目　　录

1. **概述**…… (1)
1.1 深基坑支护工程特点与现状 …… (1)
1.2 措施与对策 …… (6)
1.3 发展与展望 …… (7)
2. **侧向土压力**…… (9)
2.1 库伦土压力理论…… (10)
2.2 朗肯土压力理论…… (14)
2.3 静止土压力计算…… (20)
2.4 分层土土压力计算…… (20)
2.5 算例…… (21)
3. **悬臂式支护结构** …… (24)
3.1 均质土支护结构…… (24)
3.2 非均质土支护结构…… (30)
3.3 基坑上下不同土层支护结构内力计算分析…… (32)
3.4 基坑上下不同土层支护结构内力计算表…… (42)
4. **土层锚杆** …… (76)
4.1 土层锚杆构造和应用…… (76)
4.2 土层锚杆的试验研究…… (76)
4.3 土层锚杆设计…… (80)
5. **混合支护结构** …… (82)
5.1 混合支护结构的有限元分析…… (83)
5.2 单层支点混合支护结构…… (84)
5.3 多层支点混合支护结构…… (85)
5.4 多层支点混合支护结构计算实例…… (87)
5.5 均质土中多层支点混合支护结构内力计算表…… (91)
6. **双排桩支护结构**…… (147)
6.1 计算模型 …… (147)
6.2 侧向土压力 …… (148)
6.3 内力计算 …… (158)
7. **重力式挡墙结构**…… (160)
7.1 滑动稳定性验算 …… (160)
7.2 倾复稳定性验算 …… (160)
7.3 地基土容许承载力验算 …… (161)
8. **基坑底稳定性分析**…… (162)
8.1 基坑底土体抗隆起计算 …… (162)

8.2 基坑底水压力稳定计算 …… (165)
9. 降水设计 …… (168)
9.1 降水基本理论 …… (168)
9.2 降水方法 …… (177)
9.3 降水设计与计算 …… (182)
10. 深基坑支护工程实例介绍 …… (192)
10.1 北京京城大厦(H型钢加锚杆) …… (192)
10.2 北京华侨公寓(桩墙合一施工方法) …… (193)
10.3 上海锦江分馆 …… (194)
10.4 上海陆家宅沪办大楼 …… (198)
10.5 成都人民商场营业楼 …… (204)
10.6 上海展览中心北馆 …… (206)
10.7 深圳国商大厦地下车库 …… (208)
10.8 宁波镇海广播电视大楼 …… (212)
10.9 上海启华大厦 …… (214)
10.10 宁波北仑港火力发电厂 …… (217)
10.11 天津塘沽盐场气象台电算楼 …… (219)
10.12 抚顺饮食公司站前宾馆 …… (224)
10.13 上海特种基础工程研究所办公楼 …… (226)
10.14 上海电讯大楼 …… (229)
10.15 上海市人民广场地下变电站 …… (234)
10.16 福建省烟草综合业务大楼 …… (237)
参考文献 …… (240)

1. 概　述

深基坑支护设计、施工、监测技术是近十多年来在我国逐步涉及的技术难题。深基坑的护壁，不仅要保证基坑内能正常作业安全，而且要防止基底及坑外土体移动，保证基坑附近建筑物、道路管线的正常运行。这些难题在具体工程实践中表现方法有所不同。近年来我国大量兴建的高层建筑深基坑成功施工实例，各地区通过工程实践与科研，都有了一些行之有效的技术方法，使深基坑支护工程技术水平得到了迅速提高，取得了可喜的成绩。

1.1　深基坑支护工程特点与现状

80年代以来，随着我国改革开放的进展，高层建筑不断增加。随着建筑高度的增加，根据构造及使用要求，基础埋深也随之不断增加。尤其是进入90年代后，我国经济的迅速发展，大中城市地价不断上涨，空间利用率随之提高，出现了众多的超高层建筑，使地下室埋深达20多米，各种深基坑支护的先进设计计算方法，施工工艺不断产生。

基坑开挖是基础和地下工程施工中的一个古老的传统课题。同时又是一个综合性的岩土工程难题，既涉及土力学中典型的强度与稳定问题，又包含了变形问题，同时还涉及到土与支护结构的共同作用。对这些问题的认识及其对策的研究，是随着土力学理论、分析技术、测试仪器以及施工机械、施工技术的进步而逐步完善的。我们简单的回顾一下便不难看出，无论是从理论还是从实践的角度看，基坑开挖技术都有了很大的进步。

最早提出分析方法的是Terzaghi和Peck等人，他们早在40年代就提出了预估挖方稳定程度和支撑荷载大小的总应力法。这一理论原理一直沿用至今，只不过有了许多改进与修正。50年代，Bjerrum和Eide给出了分析深基坑底板隆起的方法。60年代开始在奥斯陆和墨西哥城软粘土深基坑中使用了仪器进行监测，此后的大量实测资料提高了预测的准确性，并从70年代起，产生了相应的指导开挖的法规。从80年代初开始我国逐渐涉入深基坑设计与施工领域，在深圳地区的第一个深基坑支护工程率先应用了信息施工法，大大节省了工程造价。进入90年代后为了总结我国深基坑支护设计与施工经验，开始着手编制深基坑支护设计与施工的有关法规。

随着旧城改造工程的推进，对基坑开挖技术提出了更高、更严的要求，即不仅要确保边坡的稳定，而且要满足变形控制的要求，以确保基坑周围的建筑物、地下管线、道路等的安全。为了准确估计由于开挖引起的土体和支护系统的变形，一方面依赖于成功应用有限元等现代分析工具，一方面依赖于土的计算参数的正确性。常规的室内试验方法已不足以确定预估位移的关键参数—土的刚度，只有把室内试验与原位测试技术结合起来才能解决这个问题。

与分析、计算方法的进步相对应的是基坑开挖技术，特别是支护技术的日臻完善，并出现了许多新的支护结构形式与稳定边坡的方法。维护边坡稳定，传统的做法是板桩支撑系统或板桩锚拉系统。这些方法的优点是支撑材料可以回收，但却存在许多致命弱点，诸如支撑往往是在开挖之后施加的，以致变形难以避免；拔出板桩时仍旧会引起边坡土体的进一步变形等。因此，在建筑物密集的城区或周围有建(构)筑物及地下设施的场地，选用传统方法受到许多限制，处之不当还常会酿成事故。这些例子是很多的。这些事故的发生固然是痛心的，但从反面教育了岩土工程师去重视、去研究、去改进。从这个意义上讲，这些事故也是岩土工程技术进步

的一种促进剂。

表 1-1 给出了上海部分主要高层、超高层建筑物层总高度及地下部分深度概况表。

主要高层、超高层建筑情况表　　表 1-1

工程名称	层数	高度 (m)	地下部分深度 (m)
上海展览中心北馆	48	164.80	−4.08～−9.20
上海锦江分馆	46	153.09	−9.10～−11.05
静安希尔顿酒店	43	143.62	−7.25～−9.30
上海国际贸易中心	37	140	−10.30
金陵综合大楼	37	139.70	−8.50
上海电讯大楼	24	130.60	−12.75
联谊大厦	30	108.50	−5.20
上海锦伦文华酒店	30	106.50	−8.075
亚洲宾馆	32	104.30	−5.40～−7.20
上海花园饭店	35	122.56	−6.20
陆家宅沪办大楼	37	127.60	−7.00
物资贸易中心大楼	37	115.25	−6.00～−6.80
上海贸海宾馆	25	94.56	−7.40～−8.40
启华大厦	24	74.50	−5.15～−6.65
华东电管局调度大楼	24	124.60	−3.90
长征医院	17	72.00	
华亭宾馆	29	90.00	−6.65～−10.70
虹桥宾馆	34	104.26	−7.50～−8.70

对于上海这种饱和软粘土地基，地基土的强度很低；渗透系数很小，一般为 6×10^{-7}～2×10^{-6}cm/s，透水性较低，地下原水位较高，常见水位在地下 1m 左右，给深基坑支护设计、施工带来了诸多不利影响，除地质条件外，以上海地区为例深基坑支护工程施工还受如下因素影响：

(1)主要高层、超高层建筑都集中在市区，市区的建筑密度很大，人口密集，交通拥挤，施工场地狭小，为此，高层建筑施工，尤其是深基础施工的条件很差。

(2)为了节约土地，在工程建设中要充分利用基地面积，地下建筑物约占基地面积 90%，紧靠邻近建筑，还要求充分利用地下空间，设置人防、车库、机房、仓库等各种设施。基础深度越来越大，地下基坑的开挖深度由一层发展到二层，甚至三层，越来越深。

(3)深基坑的施工，对周围环境势必有所影响，要减小这一影响，也是软土地基深基坑施工中的一个很大的难题。不单要考虑对邻近建筑物的影响，还要考虑对周围地下的煤气、上水、下水、电讯、电缆等管线的影响。

随着竞争机制的增加，业主对造价、工程进度、工程质量的要求也越来越高，相应增大了施工单位的难度。

近年来，我国建造了不少高层建筑，北京、天津、上海、广州、深圳等地高层建筑密度最大，各种地质条件及地下水条件也不尽相同，尽管在深基坑支护设计、施工中遇到不少问题，甚至个别工程出现事故，但最终都得以解决，基本上满足了设计、施工要求。我国深基坑支护工程质量总体上的好的。表 1-2 汇集了北京地区有代表性的高层建筑深基坑成功经验共 34 个，最深

的基坑为地下 23.5m。

北京地区高层建筑深基坑支护情况表　　表 1-2

序号	工程名称	面积 (m^2)	高度 (m)	层数		地面下深度(m)	基础做法	支护施工做法
				地上	地下			
1	中国国际信托公司大厦	50193	101.6	28	3	−13.5	箱型基础，三元乙丙橡胶防水层	φ500 钢筋混凝土钻孔灌注桩及部分 H 型钢桩作挡土桩，间距 1m，在−6.95m 处作 1 道锚杆
2	京城大厦	110270	183	50	4	−23.5	箱型基础，持力层深 23.5m 卵石	H 型钢(488)桩长 24～27m，作支挡桩，中距 1.1m，3 道锚杆拉结，锚杆垂直距离为 −5m，−12m，−18m
3	王府井宾馆	约 60000	48	15	3	−16	筏式基础，底板 1.5m 厚，由底板向上在连续墙侧构筑内墙衬，与连续墙连成一体	地下连续墙厚 600，深墙 20m，深入挖坑 4m，4 道锚杆分别为 −1.8，−6.7，−11.2，−13.7m（施工时改为 3 道锚杆）
4	京广中心大厦	121712	204～209	51	4	−18.5	桩基，挖深 18.5m 后浇筑 φ1.5～2.5m 灌注桩，桩长 22.5m，持力层为地面下 41m 的砂卵石层	地下连续墙厚 600，挖坑深 18.5m，墙深 23.5m，设计 5 道锚杆
5	发展大厦	51495	80	22	2	−11	箱型基础，局部预制桩基	H 型钢(488)桩，间距 1.1m，1 道锚杆，在地面下 4m 处，间距 1.65m 及 2.2m
6	新华社主楼	28234	127	26	5	−19.6	箱型基础	φ800 灌注桩，间距 1.6m，1 道锚杆，上部采取放坡
7	农贸中心大厦	128765	90	27	4	−15.1	箱型基础	φ400 双排灌注桩，桩顶做双排宽连梁，1 道锚杆，局部 2 道锚杆
8	王府井穆斯林贸易大楼		30	7	2	−9	箱型基础	基坑深 9m，地下连续墙，1 层锚杆，墙深 15.5m，厚 600
9	中国人民银行金融大楼	38982	40	10	3	−13.8	箱型基础	φ1300 灌注桩，间距 1.8m，在 −7m 处 1 道锚杆
10	友谊医院病房医技楼	33400	49.5	14	2	−10	箱型基础	φ500 灌注桩，间距 1m，1 道锚杆（在 −4.5m 处）
11	京西宾馆	56139	96.6	29	3	−11	箱型基础	56C 钢板桩，间距 0.93～1.2m，桩顶下 2.4m 处 1 道锚杆
12	科技活动中心	27100	96.7	25	3	−10.5	箱型基础	φ400 灌注桩，双排桩顶下 4m 处 1 道锚杆，桩长 11.7m，挡土高度 8.7m
13	金朗大酒店	31000	48	15	3	−13.5	箱型基础	φ800 灌注桩及 H 型钢桩（局部），1 道锚杆，锚杆从 φ800 灌注桩中直接穿过，在 H 型钢桩间从腰梁间穿过

续表

序号	工程名称	面积 (m^2)	高度 (m)	层数 地上	层数 地下	地面下深度(m)	基础做法	支护施工做法
14	东四隆福大厦	17315	36	8	3	−12 −8.7	箱型基础	ϕ500 灌注桩，间距 700，最深坑为−11.2～−12m，1 道锚杆
15	华府大厦				2	−10.2 −13.4	箱型基础	ϕ1000 灌注桩，间距 1.6m，用锚杆 1 道，局部 2 道
16	左家庄综合办公大楼	51392	109	32	3	−12.2	桩箱复合基础	H 型钢桩锚杆 1 道
17	长城饭店	55408	83	22	2	−12.1	主楼筏基，低跨独立基础连系梁	一部分挡土钢桩拉锚
18	国际饭店	72660	104.4	31	3	−14.3	箱型基础	63 号工字钢桩，间距 0.7m，桩长 17m，桩顶拉锚
19	北京图书馆主楼	50382	64	19	3	−11.9	箱型基础，支护大直径桩又是承重桩	ϕ1000 大直径扩底桩兼作挡土桩，并与其后的大直径扩底桩（承重）拉结，在工程承重桩之间每 1.5m 加 ϕ800 挡土桩
20	北京饭店贵宾楼	42500	39	11	3	−10.5	主楼箱基，过街楼部分用大直径扩底桩 ϕ1100，经扩大到 ϕ1800	过街楼大直径桩作为主楼东西挡土桩，其它三面用 SM50B 钢板桩，间距 1m，桩顶下 1m 拉锚，钢板桩最后拔起
21	北京医院	61490	50.6	13	3	−9.5	箱型基础	ϕ500 灌注桩间距 1.2m，桩顶拉锚，部分用 ϕ800 灌注桩悬臂
22	科技情报中心	70326	27.6	6	2	−7	箱型基础	ϕ500/ϕ800 灌注桩间距 1.25/2m，桩顶向下 3.8m 处拉锚
23	中国专利局	34816	76.3	25	4	−15	箱型基础	H 型钢(488)桩，锚拉，桩长 18m
24	长富宫大厦	33772	90	25	2	−14.33	筏基	ϕ800 灌注桩，间距 1.5m，悬臂 9m，桩长 13.6m，桩顶放坡
25	全国总工会工人之家	27000		19	3	−11.5	箱型基础	ϕ1000 灌注桩，间距 1.5m，悬臂 10m，柱顶放坡
26	岭南饭店	21690	84.6	21	2	10.9	箱型基础	ϕ1000 灌注桩，间距 1.5m，悬臂 9m，桩长 14m
27	军委通讯兵大楼	31820	91.5	19	2		箱型基础	ϕ1200 灌注桩，悬臂 7m，桩顶至槽口放坡
28	华侨公寓地下车库	7804		3	3	−11.3	ϕ800 大直径桩，一柱一桩，边桩既挡土又承重	桩墙合一，半逆作法施工，承重桩与挡土桩合一
29	新世纪饭店	总 101250	109	35	2	−14 10.8	筏基（低层桩墙合一）	ϕ800 挡土桩，其后 4～6m 处拉桩，桩径 800
30	西苑饭店	62500	93	29	2～3	−12	主楼箱基，裙房交叉梁基	坑深 9～12m，小坡度大开挖，放坡 1∶0.75，钢丝网水泥护坡，局部离
31	兆龙饭店	25239	71.8	22	2	−11.12	箱型基础	−6.2m 以上放坡，以下采用 ϕ500 悬臂灌注桩
32	大都饭店	37800	66.7	15	2	−13.3	箱型基础	梅花型双排灌注桩，大部 1 层锚杆，局部 2 层锚杆
33	故宫地下构筑物				3	−13.5		ϕ800 灌注桩，间距 1.5m，上作承台连梁，锚杆 1 道，承台梁作腰梁
34	渔阳饭店	41000	96.6	28	2	−11.6	桩基上筏基	H 型钢桩挡土，间距 1m，后有锚桩，拉杆在−2m 处

目前基坑支护型式主要分为两大类，即支挡型和加固型，其主要型式如下：

1、支挡型

(1)桩排支挡结构

1)稀疏桩排

当边坡土质尚好地下水位较低时，可利用土拱作用，以稀疏桩排支挡边坡。

2)连续桩排

对于不能形成土拱作用的软土边坡，支挡桩必须连续密排。密排的钻孔桩可以互相搭连，或在桩身混凝土强度尚未形成时在相邻桩之间做一根素混凝土树根桩把钻孔桩排连接起来，从而形成一种既挡土又防渗的简易连续墙。

3)双排桩

当土软弱或开挖深度大时，单排桩的横向刚度往往不能满足控制变形的要求。这时，可采用双排桩通过桩顶盖梁联成门式刚架式的整体，这种框架式桩排具有较大的侧向刚度，可以有效地限制边坡的侧向变形。

4)组合式桩排

a. 主桩与挡板组合：这实际上也是一种稀疏桩排支挡，只是桩距较大，利用挡板把桩间土的侧压力传递给主桩，同时起到一定的防渗作用。

b. 主桩与水泥土拱组合：以水泥搅拌桩相互搭接组成平面拱代替挡板，把侧压力传递给主桩。这种支挡具有良好的防渗效果，施工更方便，适用于更深的基坑。

c. 桩排与水泥土防渗墙组合：在地下水位高的软土地区，防渗是保证基坑支护成功的重要一环。采用稀疏桩排(单排或双排)挡土，水泥搅拌桩排防渗的组合结构被实践证明是经济有效的一种支护型式。

(2)地下连续墙

地下连续墙优点是对周围环境影响小、对地层条件适应性强、墙体长度可任意调节。它适用于各种深度的基坑开挖。还可将地下连续墙作为支护结构与主体结构，从而大大降低工程造价。又可采用逆作法施工减少对环境和地面交通等影响。地下连续墙作为支护结构还具有抗弯刚度、防渗性能和整体性好等优点。开挖深度可达 30m。目前用于支护的地下连续墙，已从单一的一字型发展出折板型和 π 型等多种形式，以获得更大的侧向刚度。

以上所述支挡型支护结构均可加上内支撑或锚杆作用使其具有更大的适应性。

2、加固型

(1)水泥搅拌桩加固法

水泥搅拌法是软土加固的一种有效方法，国内用于开挖工程首先是在上海四平路地下车库的基坑支护工程，获得成功后很快在上海地区推广开来，之后又推广到江、浙、闽等软土地区。其优点突出表现为：施工无环境污染(无噪声、无振动、无排污)、造价低廉及防渗性能好。

加固原理是：利用具有一定强度的水泥搅拌桩相互搭接组成格构体系，从而使边坡滑动棱体范围内的土体得加固，保持边坡稳定。加固体按重力式挡土墙验算，当稳定性不足时，增加加固体的厚度和深度，直到满足稳定性。

粉喷水泥搅拌桩也开始用于基坑支护，上海医药工业研究院新楼基坑深约 6m，采用粉喷桩获得成功。证明粉喷桩同样可以用于边坡加固支护。

(2)高压旋喷桩加固法

高压旋喷桩也是加固软弱地基的方法，由于其水泥含量高，强度比水泥搅拌桩高得多，因

此加固边坡厚度可以较薄。当基坑为圆形时，可利用拱效应进一步减小加固厚度。

(3)注浆加固法

其基本原理是：用气压、液压或电化学方法，把水泥浆或其它化学溶液注入土体孔隙中，改善地基土的物理力学性质，达到加固土体和防渗的目的。

(4)网状树根桩加固法

其原理是：使边坡破坏棱体范围内的土体与树根桩网构成一个桩土复合体，它具有良好的整体稳定性，足以抗御土压力、水压力和地面超载。

(5)插筋补强法

插筋补强护坡技术是通过在边坡土体中插入一定数量抗拉强度较大、并具有一定刚度的插筋锚体，使之与土体形成复合土体共同工作。这种方法可提高边坡土体的结构强度和抗变形刚度，减小土体侧向变形，增强边坡整体稳定性。在工作机理及施工工艺上，它明显不同于在填土中敷设板带的加筋土技术，也不同于护坡支撑中的锚杆技术。插筋补强护坡技术是吸取了上述某些工艺技术的特点而发展起来的一种以主动制约机制为基础的新型边坡稳定技术。它以发挥插筋锚体与土体相互作用形成复合土体的补强效应为基本特征，以插筋作为补强的基本手段。与其它护坡技术相比，虽然它的护坡深度不可能太大(一般≯10m)，但它不需大型施工机械，不需单独占用场地，而且具有施工简便、适用性广泛，费用低，可以竖直开挖等优点，因而有广泛的应用前景。

1.2 措施与对策

深基坑支护工程是基础施工所必须的临时结构，深大基坑支护的施工造价与设计的合理紧密相关，合理的设计是影响整个工程施工进度与造价的关键所在。由于地基土的不定性，周围环境条件不同等，尤其是各个设计者的经验往往是影响基坑支护设计合理性的因素，不同的设计方案可能会使同一支护工程花较少的费用而获得更安全的结果。如何选择经济与安全、进度之间的合理平衡是每个设计者首先必须意识到的问题。

为了保证基坑设计的合理性与经济性，基坑支护设计施工技术的发展建议采用如下措施与对策：

(1)建立可靠的设计质量管理办法。由于基坑支护设计与地质及水文条件密切相关，地基土参数的试验方法、取值、地下水的影响等往往是确定支护结构设计的主要因素。同时如打桩、降水施工过程中也可能改变地基土的性质；更应引起重视的是大型建筑物场地基坑周边地质条件与环境条件不尽相同。这些复杂因素都要求设计者依靠自己的岩土工程经验来决定不同的设计方案。因此，要求设计人员除具备结构设计知识还应具有一定的岩土工程经验。以深圳为例，根据这些年来高层建筑基坑设计经验总结，市政府有关部门明文规定，深基坑支护设计单位必须经过专门审查合格后才具备设计资质，完善了设计管理，使深圳的基坑支护结构设计水平有了明显的提高。

(2)采用动态设计信息施工技术法，保证基坑安全施工。岩土工程的设计大多数情况下通常是与实际工程实践紧密不可分的，尤其是基坑支护这种临时结构其受力的不确定因素很多，为了保证较为经济地实现安全，有些设计意图将贯彻于具体工程实际条件的应用与处理中。在基坑开挖与支护的施工过程中，预知可能引起局部或整体破坏的先兆，并及时相应修改设计，采用措施往往可以弥补原设计的不足，以经济的设计，附加局部的"亡羊补牢"达到节省工程造价的目的。

从我国目前深基坑施工成功实例所见，凡是事前重视，采用预防措施，在施工过程中严格进行施工监控者，即采用前述的所谓“信息施工技术”，工程效果大都是成功的，对于开挖自身和对于邻近对象，都会取得良好反应。因而对于环境效应问题（岩土工程施工对周围或邻近的影响问题）需要强调的仍然是：对于岩土工程师的要求是需要设法与结构工程师、施工工程师直至建设单位在这一问题上取得共识与重视。有了统一的认识就有可能未雨绸缪防患于未然。实践表明：对于环境效应，事前有共识和采取工程措施，其所产生的危害是可以避免的。

工程监测的必要性，它的作用和在岩土工程中的地位应从两方面来认识。它既是防止产生环境影响的必不可少的环节和手段。更重要的是要从改革和发展设计方法的高度来认识。动态设计方法与信息施工技术要求人们随时注意和掌握岩土工程施工过程中的信息反馈和资料积累，而工程监测是其不可缺少的手段，由这样的高度来认识施工监控，它的重要性和作用便将使工程监测作为岩土工程实施的一个阶段（勘察—设计—施工—监控与反馈）常规化和固定下来，而不至于成为可有可无的措施。

（3）加强深基坑支护技术的科研工作，促进技术进步。深基坑支护工程投入的建设基金尤为可观，但在这方面所进行的系统科学研究工作却甚少。为了在这方面获得较大的技术进步，在认真总结经验、教训的同时，除具有信息施工中所得到的一些常规数据外，还必须对支护结构工程的变形与内力包括作用于不同支护结构上的荷载（主动土压力和被动土压力）进行系统的实测，众所周知，岩土工程的科研成果优劣很大程度上依赖于试验数据的数量与精确度，只有积累了一定的实测结果后才能使深基坑支护设计、施工的技术水平得以提高。同时，各地应认真总结当地经验作法，并形成自己的一套设计施工技术，只有这样，我们才能将目前已有的一些定性经验逐步形成定量的计算分析方法，使深基坑支护设计、施工水平获得真正的提高。

目前，我国的深基坑设计、施工还处于边干、边学、边提高、边总结、边积累资料的过程。今后，对于所有工程都应注意进行认真总结，以尽早提高我们的设计、施工水平。

1.3 发展与展望

十多年来，随着改革开放的进展，国家经济建设取得了长足进步，从而带动了岩土工程包括开挖和支护工程技术的发展和进步，至少在面的方面已是广泛地铺展。目前，各地基本建设中的各类建筑朝着高、大、深、重等方面的发展势头仍方兴未艾。可以预料，基坑开挖与支护技术的各个方面均将继续得到全面而深入的应用和推广，各种支护型式和设计计算方法将会在“点”上更深入而形成“点深面广”的发展势态。今后深基坑设计施工技术将可能会有如下发展：

（1）根据基坑施工发展需要及我国综合经济水平的提高，将继续充实深基坑开挖、支护的施工队伍素质及装备，引进国外新技术，增加技术手段；

（2）大力促进与推广动态设计和信息施工技术，使之在开挖支护工程设计中，成为设计指导思想的基调，用在变更改革岩土工程的总体设计构思；

（3）深基坑开挖与支护问题对经典土力学理论提出了新的挑战。此前，大量的浅挖工程和无需支护的实践，使人们已经习惯于一般常规的“加载”的土力学方法（特别是一次性的单调加载过程）。土中应力与变形均无需作符合开挖边界的调整，但是现在不同了，基坑（特别是深基坑）开挖与支护的应力、变形分析将把不可忽视的卸载问题（还有应力路径的内容）及其引发的土体应力、强度、变形性质以及其变化提上岩土工程师的议事日程、提出需要深入研究的课题。于是也可以说，不断发展中的工程实践对岩土工程和岩土力学得出了新的研究和发展方向与要求。

基坑开挖与支护技术的发展水平是从一个侧面反映和衡量一个国家工业水平和建筑技术高低的重要标志。从国外的发展趋势看来，为适应我国工程建设的需要，还必须继续深入研究和开发这方面的技术。当然，在基坑开挖与支护领域中，人们已应用各种手段和技术措施集中解决了一个又一个工程问题和难题。相信今后在不断完善和不断认识、提高深化的过程中，必定会将这一工程领域的技术水平推向更新的高度，为岩土工程总体增添更加丰富的内容。

2. 侧向土压力

侧向土压力在深基坑支护工程问题中是一个重要的设计参数。挡墙和板桩墙，支撑的和不支撑的开挖，筒仓壁和储箱上的谷物压力，隧道墙以及其它地下结构物上的土或岩石压力都需要对构件的侧向压力有定量的估算来作设计或稳定性分析。

从广义来说，土压力是土作用在工程结构上的或作用在被土体所包围的结构物表面上的压力或那些压力的合力。这些压力是由土的自重、土所承载的恒载和活荷载所产生，其大小由土的物理、力学性质、土和结构之间的物理作用、绝对位移、相对位移以及变形值与特性所决定。

图 2-1 示出有关各类土木工程结构土压力的几个例子，其基本不同点在于位移的类型和数值。图 2-1a 挡土墙绕其基底转动；图 2-1b 板桩是柔性结构，因而在土压力作用下变形；图 2-1c 用支撑围护的坑壁水平移动。

土压力的大小和分布是超静定问题，首先是因为位移和变形的作用，而且也由于各单个颗粒产生的压力以及颗粒间作用力的绝对值仍然不清楚。颗粒间的孔隙通常是由空气或水所填充。

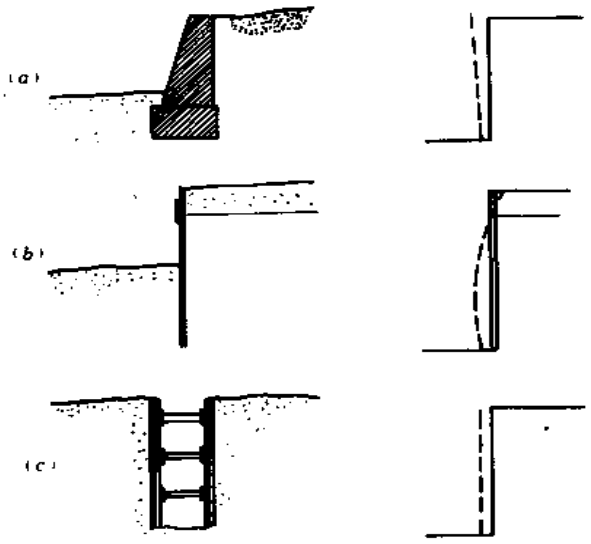


图 2-1 与土压力有关的工程问题
(a) 重力式挡墙；(b) 板桩；(c) 挖方的支撑

根据墙的移动情况，作用在挡土墙墙背上的土压力可以分为静止土压力、主动土压力（往往简称土压力）和被动土压力（往往简称土抗力）三种，其中主动土压力值最小，被动土压力值最大，而静止土压力值则介乎两者之间，它们与墙的位移关系如图 2-2 所示。

如果墙体的刚度很大，墙身不产生任何移动或转动，这时墙后填土对墙背所产生的土压力称为静止土压力，其值可以根据直线变形体无侧向变形理论或近似方法求得，土体内相应的应力状态称为弹性平衡状态。

试验表明：如刚性墙身受墙后填土的作用绕墙背底部（即墙踵）向外转动（图 2-3*a*）或平行移动，作用在墙背上的土压力从静止土压力值逐渐减小，直到填土内出现滑动面。在滑动面以上的土体（滑动楔体）将沿着这一滑动面向下向前滑动。在这个滑动楔体即将发生滑动的一瞬间，作用在墙背上的土压力减少到最小值，称为主动土压力，而土体内相应的应力状态称为主动极限平衡状态。相反，如墙身受外力作用（如图 2-3*b* 所示拱桥传给桥台上的推力）而挤压墙后的填土，则土压力从静止压力值逐渐增大，直到填土内出现滑动面，滑动楔体将沿着某一滑动面向上向后推出，发生破坏。在这一瞬间作用在墙背上的土压力增加到最大值，称为被动土压力，而土体内相应的应力状态称为被动极限平衡状态。所以，主动土压力和被动土压力是墙

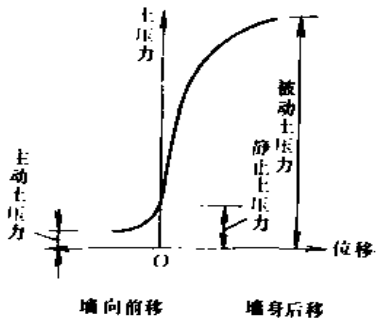


图 2-2　墙身位移与土压力关系

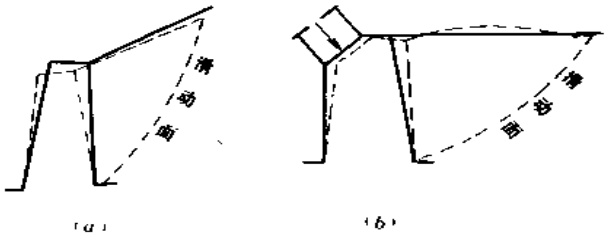


图 2-3　产生主动或被动土压力的情况
(a) 主动土压力；(b) 被动土压力

后填土处于两种不同极限平衡状态时作用在墙背上并且可以计算的两个土压力；至于介于这两个极限平衡状态间的情况，除静止土压力这一特殊情况以外，由于填土处于弹性平衡状态，是一个超静定问题，目前还无法计算其相应的土压力。

设计时应根据挡土结构的实际工作条件，主要是墙身的位移情况，决定采用哪一种土压力作为计算依据。一般基坑支抗护结构上部分由于它受到墙后土的作用和地基变形，总要转动向前移动，这些微小的转动或移动将足以使作用在墙背上的土压力接近于主动土压力，所以设计时多按主动土压力计算。在这同时，基坑支护结构的下部分，由于结构向坑内的可能位移，使土体处于被动受压状态，产生了被动土压力以维持结构的平衡作用。

计算土压力的理论主要有 G. A. 库伦(Couiomb)理论(1773)和 W. J. M. 朗肯(Rankine)理论(1857)。

2.1　库伦土压力理论

库伦土压力理论假定：(1)挡土墙是刚性的，墙后填土是无粘性砂土；(2)当墙身向前或向后移动以产生主动土压力或被动土压力时的滑动楔体是沿着墙背和一个通过墙踵的平面发生滑动；(3)滑动土楔体可视为刚体，如图 2-4 所示。库伦土压力理论是从滑动楔体处于极限平衡状态时力的静力平衡条件出发而求解主动或被动土压力的。分析时和分析土坡稳定性一样，也当作平面问题来考虑。

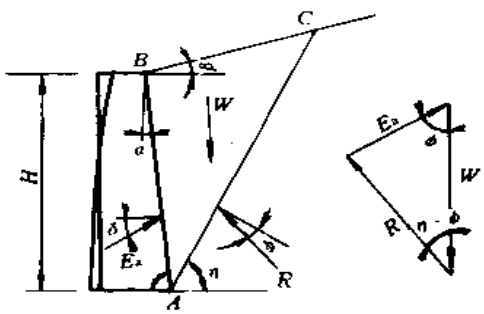


图 2-4　主动土压力的计算

1、一般分式

(1)主动土压力的计算

当墙身向前转动或平移使得墙后无粘性填土土楔 ABC(图 2-4)沿墙背 AB 和通过墙踵 A 点的滑动面 AC 向下向前滑动时，在这破坏的瞬间，滑动楔体 ABC 处于主动极限平衡状态。取 ABC 为隔离体，其自重为 W，则墙背对滑动楔体的反力为 E，其作用向与墙背的法线成 δ 角(δ 为墙背与土体间的摩擦角，称为墙摩擦角或外摩擦角)，滑动面 AC 与水平面的夹角为 η，AC 面上的反力为 R，其作用方向与 AC 面上的法线成 φ 角(φ 角为土的内摩擦角)，并位在

704028

法线的下方，如图 2-4 所示。所以，作用在滑动楔体 ABC 上的力一共有 W、E 和 R 三个力，其中 W 的大小及方向、E 和 R 的方向都为已知，由此可绘出封闭力三角形。根据静力平衡条件，由力的正弦定律，可得：

$$\frac{E}{W}=\frac{\sin(\eta-\varphi)}{\sin[180°-(\eta-\varphi+\psi)]}=\frac{\sin(\eta-\varphi)}{\sin(\eta-\varphi+\psi)}$$

即

$$E=W\frac{\sin(\eta-\varphi)}{\sin(\eta-\varphi+\psi)}$$

式中 $\psi=\lambda-\delta$。

其他符号如图 2-4 所示。

由于滑动面 AC 是任意选择的，所以，它不一定是真正的滑动面，因而由上式计算得出的土压力 E 也只是相应于滑动面 AC 时的土压力，而不一定是所求的主动土压力。选用不同的滑动面，土压力 E 值也将随之不同。但是，挡墙破坏时，土体内只能有一个真正的滑动面（即最危险的滑动面），与这个滑动面相应的土压力才是所求的主动土压力 E_a。那么，怎样来确定这个滑动面呢？可以把 E 看作是滑动楔体自重作用下克服了滑动面 AC 上的摩擦力以后而向前滑动的力，可见 E 值越大，楔体向下滑动的可能性也越大，所以产生最大 E 值的滑动面就是实际发生的真正的滑动面，相应最大的 E 值就是主动土压力 E_a。所以求真正滑动面的条件是：$\frac{dE}{d\eta}=0$，由此确定 η 值，也就是真正滑动面的的位置。求得 η 值后，再代入上式，就可得出主动土压力 E_a。如下式所示：

$$E_a=\frac{1}{2}\gamma H^2\frac{\cos^2(\varphi-\alpha)}{\cos^2\alpha\cos(\delta+\alpha)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta+\varphi)\sin(\varphi-\beta)}{\cos(\delta+\alpha)\cos(\alpha-\beta)}}\right]^2} \tag{2.1.1}$$

令

$$K_a=\frac{\cos^2(\varphi-\alpha)}{\cos^2\alpha\cos(\delta+\alpha)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta+\varphi)\sin(\varphi-\beta)}{\cos(\delta+\alpha)\cos(\alpha-\beta)}}\right]^2} \tag{2.1.2}$$

则式(2.1.1)可改写成

$$E_a=\frac{1}{2}\gamma H^2K_a \tag{2.1.3}$$

式中 γ、φ—分别是填土的容重(kN/m³)的内摩擦角；

H—挡土墙度，m；

α—墙背的倾斜角，即墙背与垂线的夹角。以垂线为准，反时针为正（叫俯斜）；顺时针为负（叫仰斜）；

β—墙后填土表面的倾斜角；

δ—墙背与填土间的摩擦角，它与填土性质、墙背粗糙程度、排水条件、填土表面轮廓和它上面有无超载等有关，应由试验确定。一般情况下可取下列数值：

墙背粗糙和排水良好，取 $\delta=(1/3\sim1/2)\varphi$；墙背很粗糙且排水良好，取 $\delta=(1/2\sim2/3)\varphi$；墙背光滑而排水不良，取 $\delta=0\sim1/3\varphi$；

K_a—主动土压力系数。

所以，主动土压力 E_a 与 γ、H 和 K_a 有关，而 K_a 又与一系列因素 φ、δ、α、β 等有关。φ 角越大，则 K_a（或 E_a）值越小；δ 角越大，则 K_a（或 E_a）值越小；α 角为负（即仰斜墙），且其值越大，则 K_a（或 E_a）值越小，而 α 角为正（即俯斜墙），且其值越大，则 K_a（或 E_a）值越大；β 角越大，则 K_a（或 E_a）越大，而当 $\beta>\varphi$。时，则 K_a 将得出虚根，表明式(2.1.1)已不适用，因此，必须控制使 β

≥φ。了解上述这些关系，将有助于在支护结构设计中如何减小主动土压力。

当墙高为 z 时，$E_a=\frac{1}{2}\gamma z^2K_a$，则沿墙高 z 的主动土压力强度 a_z 等于

$$e_{az}=\frac{dE_a}{dz}=\gamma zK_a \tag{2.1.4}$$

可见当 $z=0$ 时，$a_0=0$；$z=H$ 时，$a_H=\gamma HK_a$，沿墙高主动土压力强度是按直线分布的，其强度分布图形为三角形，如图 2-5 所示，而主动土压力 E_a 的作用点明显地就在距墙底为 $H/3$ 处。

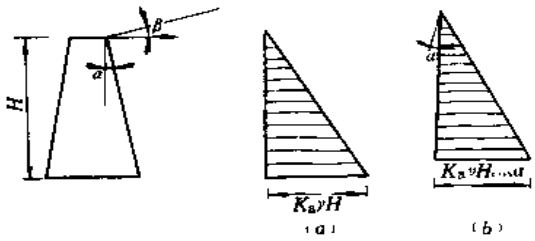


图 2-5　主动土压力强度分布图
(a)沿墙高的分布；(b)沿墙背的分布

对于最常见的情况，即墙背垂直($\alpha=0$)，墙表面光滑($\delta=0$)，填土表面水平($\beta=0$)且与墙齐高时，式(2.1.1)可简化成：

$$E_a=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2}) \tag{2.1.5}$$

(2)被动土压力的计算

当墙在外力作用下向后推压填土，最终使滑动楔体沿墙背 AB 和滑动面 AC 向上滑动时(图 2-6)，在破坏的瞬间，滑动楔体 ABC 处于被动极限平衡状态。取 ABC 为隔离体，可见除自重 W 外，作用在楔体上的反力 E 和 R 的方向与求主动土压力时相反，都应位在法线的另一侧，按上述求主动土压力时同样的道理和方法，可求得被动土压力 E_p 的一般表达式，如式 (2.1.6)所示。但要注意到与求主动土压力不同的地方，就是相应于 E 为最小值时的滑动面才是真正的滑动面，因为楔体在这时所受的阻力最小，最容易被向上推出。

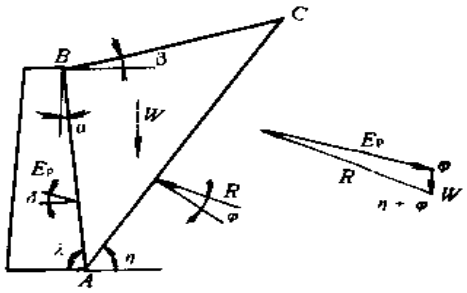


图 2-6　被动土压力的计算

被动土压力 E_p 的分式如下：

$$E_p=\frac{1}{2}\gamma H^2\frac{\cos^2(\varphi+\alpha)}{\cos^2\alpha\cos(\alpha-\delta)\left[1-\sqrt{\frac{\sin(\delta+\varphi)\sin(\varphi+\beta)}{\cos(\alpha-\delta)\cos(\alpha-\beta)}}\right]^2}$$

$$=\frac{1}{2}\gamma H^2K_p \tag{2.1.6}$$

式中　K_p—被动土压力系数；

其他符号意义同前。

被动土压力 E_p 的作用点在距墙底等于 $H/3$ 处。

当墙背垂直($\alpha=0$)、光滑($\delta=0$)，填上表面水平($\beta=0$)且与墙齐高时，式(2.1.6)可简化成

$$E_p=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{2.1.7}$$

2. 粘性填土、超载和地下水对土压力的影响

(1)粘性土式(2.1.1)和式(2.1.6)都是按无粘性填土推导而得出的。但有时填土可能是粘

性土，这时可以用三种不同的方法计算土压力：

1)第一种方法：认为粘性土的内聚力是其抗剪强度的一部分，并在楔体滑动时起了抵抗滑动的作用，而且沿着滑动面上均匀分布。因此，在考虑滑动楔体的静力平衡时，除了前述 W、E 及 R 三个力以外，又增加了一个沿着滑动面并与滑动方向相反而作用着的总内聚力 c，它的大小(等于单位内聚力与滑动面长度的乘积)和方向都是已知的。根据前述同样的求解方法，就可求得主动或被动土压力。对于墙背垂直、光滑而填土表面水平与墙齐高的情况，作用在墙背上的主动和被动土压力如下式所示：

$$E_A=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2cH\tan(45°-\frac{\varphi}{2})+\frac{2c^2}{\gamma} \tag{2.1.8}$$

和

$$E_p=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})+2cH\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{2.1.9}$$

式中 c—土的内聚力，kN/m^2；

其他符号意义同前。

2)第二种方法：把填土的内聚力折算成为所谓等值内摩擦角 φ_D，也就是说，适当加大土的内摩擦角，把内聚力概括进去，而后按式(2.1.1)或式(2.1.6)计算土压力，这样，计算简单。关键在于怎样确定等值内摩擦角。实用上，对一般粘性土，地下水位以上常设 35°或 30°，地下水位以下用 30°～25°。但是，等值内摩擦角并非是一个定值，随墙高而变化，墙高越小，等值内摩擦角越大。如墙高为定值，则等值内摩擦角将随内聚力的增加而迅速递增。计算表明：对于高墙而填土土质较差时，用 $\varphi_D=35°$计算，偏于不安全；对于低墙而填土土质较好时，用 $\varphi_D=35°$计算，却又偏于安全。可见用一个等值内摩擦角来代替填土的实际抗剪强度，不能很好地符合实际情况，也并不都偏于安全。最妥当的办法还是根据土的 c、φ 值来计算相应的 φ_D 值而后加以选用。每一种挡土墙的边界条件都可以求出一个等值内摩擦角 φ_D 值。如设挡土墙的边界条件是墙背垂直光滑，填土表面水平并与墙齐高，则

按内聚力计算时，

$$E_{a1}=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2cH\tan(45°-\frac{\varphi}{2})+\frac{2c^2}{\gamma}$$

按等值内摩擦角计算时

$$E_{a2}=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°-\frac{\varphi_D}{2})$$

令 $E_{a1}=E_{a2}$，就可求得等值内摩擦角 φ_D 如下式所示：

$$\tan(45°-\frac{\varphi_D}{2})=\sqrt{\frac{\gamma H^2\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-4cH\tan(45°-\frac{\varphi}{2})+\frac{4c^2}{\gamma}}{\gamma H^2}} \tag{2.1.10}$$

3)第三种方法：不考虑土的内聚力，仍按无粘性填土计算。这样计算的主动土压力值偏大，偏于安全。

(2)连续均布超载的作用

当表面上作用连续均布超载 q_0(kN/m^2)时，可把 q_0 的作用换算成一个高度为 h(m)、重度为 γ(kN/m^3)的等代土层来考虑，即

$$h=\frac{q_0}{\gamma} \tag{2.1.11}$$

然后按墙高为$(H+h)$(m)来计算土压力，如图 2-7 所示。但实际上，在填土表面上并无高度为 h 的土层，而是连续均布的超载 q_0，这超载只给墙顶以下的实际墙高以压力，所以，在确定作用在墙背上的土压力时，不应考虑 h 高度上的土压力。

当墙背垂直光滑、填土面水平与墙齐高并作用有连续均布超载 q_0 时，主动土压力 E_a 可按下式计算：

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{1}{2}\gamma(H+h)^2\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) - \frac{1}{2}\gamma h^2\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) \\ &= \frac{1}{2}\gamma(H+\frac{q_0}{\gamma})^2\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) - \frac{1}{2}\gamma(\frac{q_0}{\gamma})\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) \\ &= \frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) + q_0 H\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) \end{aligned} \qquad (2.1.12)$$

同理，可得被动土压力 E_p 等于

$$E_p=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45^\circ+\frac{\varphi}{2})+q_0 H\tan^2(45^\circ+\frac{\varphi}{2}) \qquad (2.1.13)$$

可见，连续均布超载对土压力的增量是一个定值，等于 $q_0 H\tan^2(45^\circ\pm\frac{\varphi}{2})$，它的土压力强度分布图形是一个矩形。

(3)地下水的作用

如墙后填土因排水不良而积有地下水，则在计算土压力时，应在考虑水对土的减重作用的同时，再计算作用在墙背上的静水压力(一般情况下不考虑动水力的作用)。所以，作用在墙背上的总压力将是土压力和静水压力之和。同时由于水的存在，土的抗剪强度将有所降低(但粗粒土的内摩擦角受浸水的影响很小，一般可认为不变)。所以，为了保证挡土墙的安全，应做好填土内的排水工作，如隔一定距离在墙身上留泄水孔等。

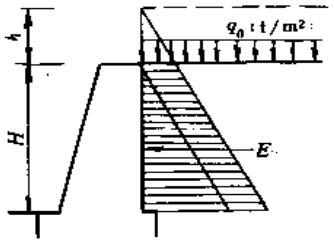


图 2-7 在填土自重和连续均布荷载作用下主动土压力的计算

2.2 朗肯土压力理论

朗肯土压力理论假定墙背和填土间没有摩擦力(即 $\delta=0$)。然后按墙身的移动情况，根据墙后土体内任一点处于主动或被动极限平衡状态时最大和最小主应力间的关系求得主动或被动土压力强度以及主动和被动土压力(它等于土压力强度分布图形的面积)。由于没有考虑摩擦力，这样求得的主动土压力值偏大，而被动土压力值则偏小。因此，用朗肯土压力理论来设计挡土墙总是偏于安全的；而且公式简单，便于记忆，所以也被广泛应用。

1、基本理论

朗肯研究了半无限均质土体中任意点的应力状态，导出了土压力理论。

在图 2-8a 中，AB 为无粘性半无限土体的水平表面，由于其中任何垂直截面都是对称的，作用在垂直截面的剪应力等于零，而法向应力就成为主应力。设 G 是横截面积等于 1、高度为 z 的一个砂柱，其重度为 γ，则作用在它的垂直和水平截面上的剪应力也都等于零，相应截面上的法向应力则成为主应力。因此，在它水平底面上的竖向应力 σ_z 为主应力，并等于其自重应力，即

$$\sigma_z=\gamma z$$

而水平应力 $\sigma_h=\zeta z$ 则是另一个主应力。这时土的应力状态如图 2-8c 中的应力圆弧$\overset{\frown}{12}$所示。当侧向水平应力 σ_h 由于土的侧胀而减小时，点 2 就逐渐左移，最后达到点 3 的位置，这时，应力圆正好与抗剪强度线相切，这就叫做主动极限平衡状状态。反之，当水平应力 σ_h 由于土受到侧向挤压而挤紧时，应力圆$\overset{\frown}{12}$上的点 2 就要向右方移动，一直移到图中的点 4 的位置而与抗剪强度线相切，这时叫做被动限机平衡状态。当土体处于极限平衡状态时，土中任一点的最大主应力 σ_1 与最小主应力 σ_3 间存在着如下关系：

无粘性土：

$$\sigma_1=\sigma_3\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{2.2.1}$$

或

$$\sigma_3=\sigma_1\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2}) \tag{2.2.2}$$

粘性土：

$$\sigma_1=\sigma_3\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})+2c\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{3.2.3}$$

或

$$\sigma_3=\sigma_1\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2c\tan(45°-\frac{\varphi}{2}) \tag{3.2.4}$$

而滑动面(即破裂面)与最大主应力平面之间的夹角等于 $45°+\frac{\varphi}{2}$。

当整个土体在水平方向有机会侧向膨胀伸展(图 2-8a 中的 ab 平面移动至 a_1b_1 处)而达到主动极限平衡状态(或主动朗肯状态)时，在深度 z 处任一点所受的竖向应力 γz 是最大主应力，而水平应力是最小主应力，也就是该点的主动土压力强度 e_a，由式(2.2.2)和式(2.2.4)，可得

无粘性土：

$$e_a=\gamma z\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2}) \tag{2.2.5}$$

粘性土：

$$e_a=\gamma z\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2c\tan(45°-\frac{\varphi}{2}) \tag{2.2.6}$$

因为最大主应力是竖向的，也即最大主应力作用面是水平的，所以滑动面和水平面成夹角 $45°+\frac{\varphi}{2}$。

当整个土体在水平方向有机会受挤压缩(图 2-8b 中 ab 平面移动至 a_2b_2 处)而达到被动极限平衡状态(或被动朗肯状态)时，在深度 z 处任一点所受的竖向应力 γz 是最小主应力，水平应力是最大主应力，也就是该点的被动土压力强度 e_p，由式(2.2.1)和式(2.2.3)，可得

无粘性土：

$$e_p=\gamma z\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{2.2.7}$$

粘性土：

$$e_r=\gamma z\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})+2c\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{2.2.8}$$

因为最大主应力是水平的，亦即最大主应力作用面是竖向的，所以滑动面和水平面成夹角 $45°-\frac{\varphi}{2}$。

2. 一般公式

上述分析相应于整个半无限土体全部受拉或受压的情况，它属于连续性平衡状态。

朗肯认为可以用挡土墙来代替半无限土体的一部分，而替换的结果并不影响土体其他部分的应力状态，即作用在墙背上的土压力强度等于达到主动朗肯状态或被动朗肯状态时半无限土体中某个与墙背方向一致而高度相等的截面上的应力。这样，朗肯土压力理论的极限平衡问题只有半无限土体界面情况这一个边界条件，而没有考虑墙背和填土之间的摩擦力。

考虑最简单的情况：墙背垂直、光滑，填土面水平与墙齐高。这样，就可直接应用式(2.2.5)～式(2.2.8)来确定作用在挡土墙墙背上的土压力。

(1)主动土压力的计算

如图 2-9 所示，当挡土墙向外移动或转动时，墙后的填土就逐渐变松，土压力从静止土压力逐渐减小。如果墙身继续外移，待墙后填土处于主动朗肯状态，并出现与水平面成$(45°+\frac{\varphi}{2})$夹角的滑动面时，这时在填土表面以下深度 z 处任一点的竖向应力是最大主应力，并等于该点的土自重压力 γz，而水平应力是最小主应力，也就是主动土压力强度 e_a。

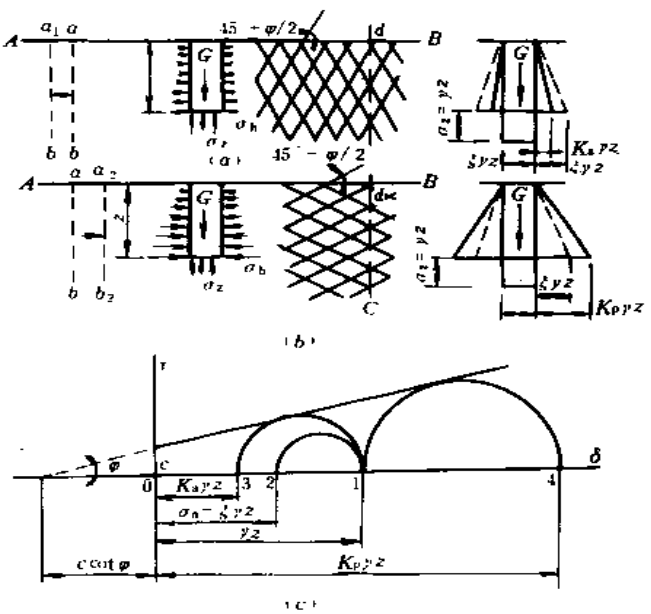


图 2-8　朗肯极限平衡状态

(a)半无限土体的主动朗肯极限平衡状态；(b)半无限土体的被动朗肯极限平衡状态；(c)用应力圆表示主动和被动朗肯极限平衡状态

当填土为无粘性土时，由式(2.2.5)得

$$e_a=\gamma z\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})$$

可见 e_a 与 z 成正比。$z=0$ 时，$e_a=0$；$z=H$ 时，$e_a=\gamma H\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})$，它的主动土压力强度分布图形是一个三角形，如图 2-9b 所示。这个三角形压力强度分布图形的面积就等于作用在墙背上的主动土压力 E_a，即

$$E_a=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2}) \qquad (2.2.9)$$

它的作用点位于土压力强度分布图形的形心，即距墙底以上 $H/3$ 处。

当填土为粘性土时，由式(2.2.6)，得

$$e_a=\gamma z\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2c\tan(45°-\frac{\varphi}{2})$$

可见，当 $z=0$ 时，$e_a=-2c\tan(45°-\frac{\varphi}{2})$。

负值表示拉应力。当深度 z 增加时，e_a 逐渐由负值变小而等于零，这个主动土压力强度 e_a 等于零时的相应深度 z_0 如下式所示：

$$z_0=\frac{2c}{\gamma}\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \qquad (2.2.10)$$

当 $z=H$ 时，则

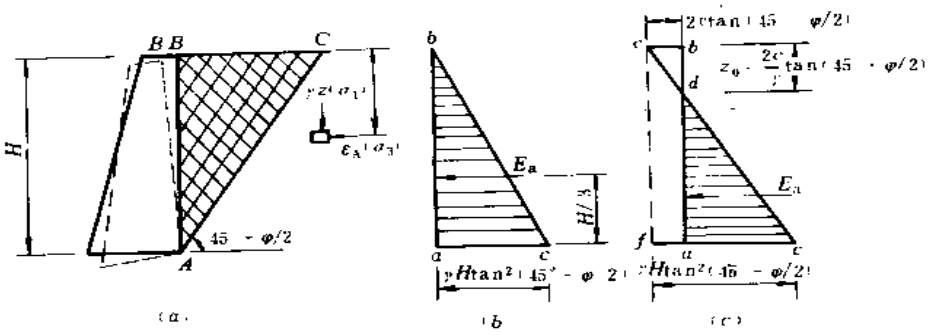


图 2-9　主动土压力的计算

(a)主动土压力计算；(b)无粘性填土的主动土压力强度分布图形；

(c)粘性土填土的主动土压力强度分布图形

$$e_a=\gamma H\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2c\tan(45°-\frac{\varphi}{2})$$

主动土压力强度分布如图 2-9 所示。

实用上，通常不考虑填土与墙背之间的拉应力，也就是略去不计 z_0 高度内的负值部分，所以作用在墙背上的主动土压力等于图 2-9c 所示主动土压力强度分布图形的三角形 *ade* 面积所代表的压力，即

$$E_a=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2Hc\tan(45°-\frac{\varphi}{2})+\frac{2c^2}{\gamma} \qquad (2.2.11)$$

它的作用点在墙底以上$\frac{1}{3}(H-z_0)$处。

(2)被动土压力的计算

当墙后填土因墙背向后移动或转动而逐渐受到挤压时，土压力从静止土压力逐渐增大。如果墙身继续后移，待墙后填土达到被动朗肯状态并出现与水平面成$(45°-\frac{\varphi}{2})$夹角的滑动面时，这时在填土表面以下深度 z 处任一点的竖向应力是最小主应力，并等于该点的土自重压力 γz，而水平应力是最大主应力，也就是被动土压力强度 e_p。

当填土为无粘性土时，由式(2.2.7)得

$$e_p=\gamma z\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})$$

和

$$E_p=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2}) \qquad (2.2.12)$$

当填土为无粘性土时，由式(2.2.8)，得

$$e_p=\gamma z\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})+2c\tan(45°+\frac{\varphi}{2})$$

和

$$E_p=\frac{1}{2}\gamma H^2\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})+2cH\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \qquad (2.2.13)$$

它们的压力分布图形如图 2-10 所示，作用点也就是它们的形心。

与库伦土压力理论公式比较，可以看出，当墙背垂直、光滑，填土表面水平与墙齐高时，用朗肯土压力理论求得的土压力值和用库伦土压力理论求得的土压力值是完全一致的，所以，也可以这样说，上述朗肯土压力公式是库伦土压力理论的一个特例。

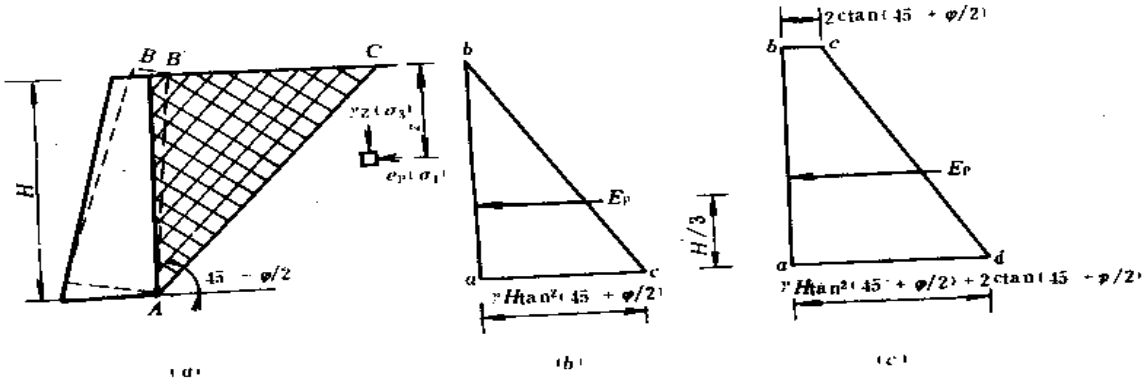


图 2-10　被动土压力的计算

(a)被动土压力计算；(b)无粘性填土的被动土压力强度分布图形；

(c)粘性土填土的被动土压力强度分布图形

(3)超载对土压力的影响

当填上表面作用均布超载 q_0(t/m²)时，则深度 z 处的竖向应力将为 $\gamma z+q_0$，因而，由式(2.2.6)和式(2.2.8)，可分别得出主动和被动土压力强度 e_a 和 e_p 将如下式所示：

$$e_a=(\gamma z+q)\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})-2c\tan(45°-\frac{\varphi}{2}) \qquad (2.2.14)$$

和

$$e_b=(\gamma z+q)\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})+2c\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \qquad (2.2.15)$$

可见超载所产生的被动和主动土压力强度沿墙背是一个常数，即 $q_0\tan^2(45°\pm\frac{\varphi}{2})$它们的分布图形都是一个矩形。

3、朗肯土压力理论计算土压力的一些特殊情况

(1)水平填土表面上有局部均布超载作用

两种荷载分布情况，第一种情况是距墙顶 l 处开始作用连续均布超载 q_0(kN/m²)，如图 2-11a、b 所示，第二种情况是距墙顶 l 处作用 l_1 宽的均布超载，如图 2-11c、d 所示。

图 2-11a 表示距墙顶 l 处开始作用连续均布超载 q(kN/m²)，主动土压力可按下式方法确定。从超载起点 O 引 OC 直线与水平线成 $45°+\frac{\varphi}{2}$角，交墙背于 C 点。设 C 点以上不考虑均布超载的作用，其主动土压力只是由于填土的自重所引起，土压力强度分布图形如图 2-11a 中 ABa 所示。C 点以下考虑均布超载的作用，由此所引起的主动土压力强度分布图形如 acde 所示。最后，作用在墙背上主动土压力强度分布图形如 ABcde 所示。

另一种方法如图 2-11b 所示。从 O 点引 OC 及 OD 分别与水平线成 $45°+\frac{\varphi}{2}$角，交墙背于 C 及 D 点。C 点以上不考虑均布超载 q 的作用，D 点以下全部考虑 q 的作用，而 C、D 点间的土压力强度为直线变化。最后的主动土压力强度分布图形如图 2-11b 中 ABcde 所示。

图 2-11c 表示距墙顶 l 处作用 l_1 宽的均布超载 q_0(kN/m²)，其主动土压力可在上述方法(图 2-11)的基础上加以适当修改后确定。先设超载是连续分布，按上述方法求出主动土压力强度分布图形如 ABcdg。从局部均布荷载另一端 O' 点引直线与水平线成 $45°+\frac{\varphi}{2}$角，并交墙背于 C 点。设只有 O' 点右侧才作用有连续均布超载，则墙背 DA 段因此所产生附加的主动土压力强度分布图形如 adfg。实际上，O' 点右侧并不存在均布荷载，所以，土压力强度分布图形应在

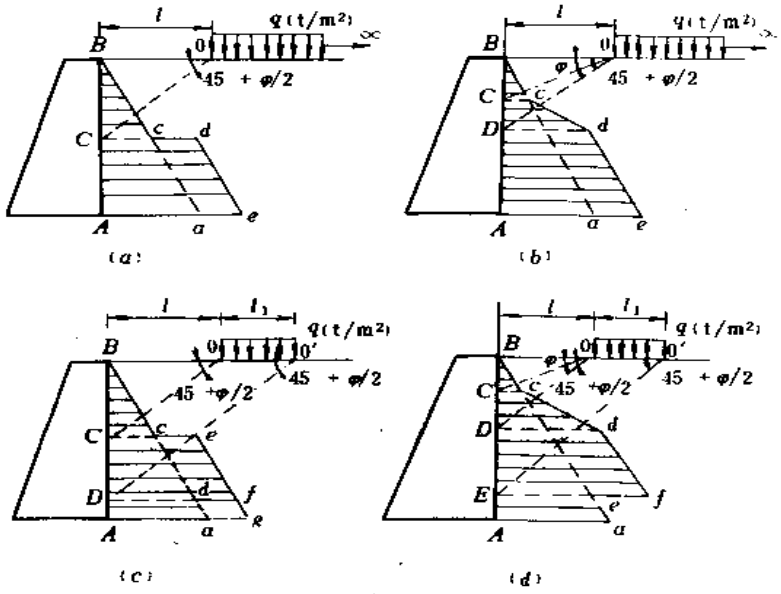


图 2-11　局部均布超载作用下主动土压力的计算

(a)、(b)距墙顶 l 处开始作用均布超载；

(c)、(d)距墙顶 l 处作用 l_1 宽的均布超载

ABceg 中减去 adfg 而如图 2-11c 中 ABcefda 所示。另一种求解方法如图 2-11d 所示，不多赘述。

(2)集中荷载

图 2-12 表示在水平填土表面上沿纵向作用着连续集中荷载 p(kN/m)。从荷载作用点 O 引两直线 OC 及 OD 分别与水平线成 φ 及 $45°+\varphi/2$ 角，并交墙背于 C 及 D 点。设集中荷载仅作用在 CD 段范围内，由此所引起的主动土压力增量为 ΔE_a，可按下式近似计算：并认为它的压力分布图形系按等腰三角形分布，如图 2-12 所示。

(3)不规则的填土表面

实际上，挡土墙后面的填土表面往往不是由单一的水平面或倾斜面所组成，而可能如图 2-13 所示的几种情况。这时，就不能按前述简单的填土表面情况直接套用公式来计算土压力，而要分别按填土表面为水平或倾斜的情况近似计算，而后再进行组合。

也有其他近似计算法。例如，假设一个滑动面(它与水平面成 $45°+\frac{\varphi}{2}$ 的夹角)，而后根据滑动楔体的静力平衡求出主动土压力 E_a。

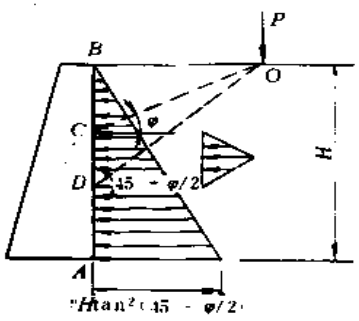


图 2-12　集中荷载作用下主动土压力的近似计算

图 2-13a 是一种情形，在墙背后先有一段水平的填土表面，然后与斜面相连。计算时，可延长倾斜面交墙背于 C 点，分别计算墙背为 AB 而填土表面水平时主动土压力强度的分布图形 BAd 以及当墙背为 AC 而填土表面倾斜时主动土压力强度的分布图形 CAe，这两个图形交于 f 点，则实际主动土压力强度分布图形可近似认为如 BAefB 所示，它的面积就是主动土压力 E_a 的近似值。

当填土表面如图 2-13b 所示时，可分别计算墙背 AB 在填土表面为倾斜时的主动土压力强度分布图形 BAe 以及虚设墙背 AC 在填土表面为水平时的主动土压力强度分布图形 CAd，这两个图形相交于 f 点，则 BAdfB 就是实际主动土压力强度的近似分布图形。

根据上述两种不规则填土表面情况下主动土压力的计算方法，不难得到如图 2-13c 中所示填土表面情况的主动土压力强度分布图形 BAehiB。

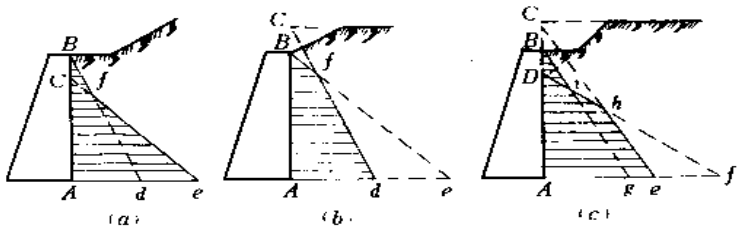


图 2-13　填土表面不规则时主动土压力的近似计算

2.3　静止土压力计算

当挡土墙绝对不动时，墙后填土因墙的侧限作用而处于弹性平衡状态，这时，填土作用在墙背上的土压力叫做静止压力 E_0，已见前述。

设 K_0 为土的静止土压力系数 e_0 为作用在墙背上填土表面下任意深度 z 处的静止土压力强度，E_0 为作用在墙高为 H 的墙背上的静止土压力：

$$e_0=\sigma_x=\xi\gamma z=K_0\gamma z$$

$$E_0=\frac{1}{2}K_0\gamma H^2 \qquad (2.3.1)$$

静止土压力系数应通过对填土的试验测定，在无可靠的试验资料时，实用上，还有按下述方法来近似计算的：

(1)近似方法：如丹麦《基础工程实用规范(DS415—1965)》建议：对正常压密土：

$$K_0=1-\sin\bar{\varphi} \qquad (2.3.2)$$

式中　$\bar{\varphi}$—用有效应力表示的土内摩擦角。

而日本《建筑基础结构设计规范(1972)建议》：$K_0=0.5$。

(2)经验方法：我国习惯上按主动土压力计算，即令 $K_0=K_a$。这样求出的 E_0 值偏小，比其他方法求得的 E_0 值要小 30%左右。

2.4　分层土土压力计算

在实际工程中，基坑周边土层一般为成层土结构，分层土的土压力计算一般以分层土的重力密度 γ_i，内摩擦角 φ_i，内聚力 c_i 应用下式计算：

第 n 层土底面对墙的主动土压力为：

$$E_{an}=(q_n+\sum_{i=1}^{n}\gamma_i h_i)\mathrm{tg}^2(45°-\frac{\varphi_n}{2})-2c_n\mathrm{tg}(45°-\frac{\varphi_n}{2}) \qquad (2.4.1)$$

式中　q_n——地面附加荷载传递到 n 层土底面的垂直荷载；

γ_i——i 层土的天然重力密度(kN/m³)；

h_i——i 层土的厚度(m)；

φ_n——第 n 层土的内摩擦角(°)；

c_n——第 n 层土的内聚力(kN/m²)。

第 n 层土底面对墙的被动土压力为：

$$E_{pn}=\left(\sum_{j=1}^{n=m+1}\gamma_j h_j\right)\cdot\tan^2\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)+2c_n\tan\left(45°+\frac{\varphi_n}{2}\right) \qquad (2.4.2)$$

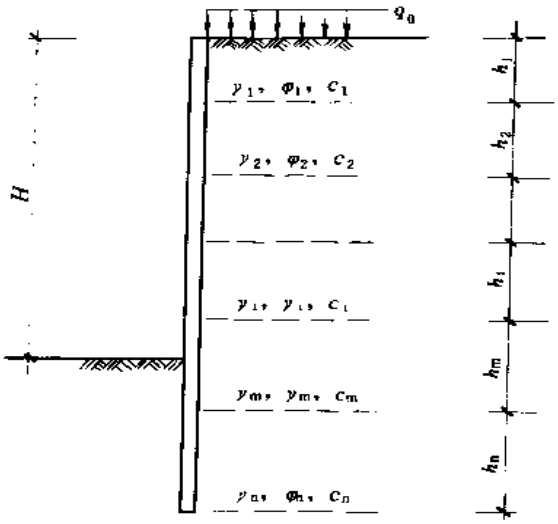


图 2-14　分层土土压力计算示意图

2.5　算　　例

【例 1】某基坑开挖深度 6m，从地面到 6m 深度为三种土层，各土层厚度和主要物理性质指标如图 2-15 所示。试求主动土压力，

【解】当由不同土层组成时，可分层计算土压力。对任一层的上覆土层的自重压力可近似地看作为作用在该层表面上的连续均布荷载。

在表面处的主动土压力强度 e_{a0} 为

$$e_{a0}=\gamma z\tan^2\left(45°-\frac{\varphi_1}{2}\right)$$

在距地表面 1m 处的主动压力强度 e_{a1} 和 e'_{a1} 各等于

$$e'_{a1}=\gamma_1 z_1\tan^2\left(45°-\frac{\varphi_1}{2}\right)=16.5\times1\times\tan^2\left(45°-\frac{30°}{2}\right)=16.5\times\frac{1}{3}=5.5\text{kN/m}^2$$

$$e'_{a1}=\gamma_1 z_1\tan^2\left(45°-\frac{\varphi_2}{2}\right)-2c_2\tan\left(45°-\frac{\varphi_2}{2}\right)$$

$$=16.5\times1\times\tan^2(45°-0)-2\times20\times\tan(45°-0)$$

$$=16.5\times1\times1-40\times1=16.5-40.0=-23.5(\text{kN/m}^2)$$

在距地表面 3m 处的主动土压力强度 e_{a3} 和 e'_{a3} 各等于

$$e_{a3}=(\gamma_1 z_1+\gamma_2 z_2)\tan^2\left(45°-\frac{\varphi_2}{2}\right)-2c_2\tan\left(45°-\frac{\varphi_2}{2}\right)$$

$$= (16.5 \times 1 + 18 \times 2)\tan^2(45° - \frac{0}{2}) - 2 \times 20 \times \tan 45°$$

$$= (16.5 + 36) - 40 = 12.5(\text{kN/m}^2)$$

$$e'_{a3} = (\gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2)\tan^2(45° - \frac{\varphi_3}{2}) - 2 \times c_3 \times \tan(45° - \frac{\varphi_3}{2})$$

$$= (16.5 \times 1 + 18 \times 2) \times \tan^2(45° - \frac{20°}{2}) - 2 \times 10 \times \tan(45° - \frac{20°}{2})$$

$$= 52.5 \times 0.49 - 20 \times 0.7 = 11.7(\text{kN/m}^2)$$

在距地表面 6m 处的主动土压力强度 e_{a6} 等于

$$e_{a6} = (\gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3)\tan^2(45° - \frac{\varphi_3}{2}) - 2c_3\tan(45° - \frac{\varphi_3}{2})$$

$$= (16.5 \times 1 + 18 \times 2 + 19 \times 3)\tan^2(45° - \frac{20°}{2}) - 2 \times 10 \times \tan(45° - \frac{20°}{2})$$

$$= 109.5 \times 0.49 - 20 \times 0.7 = 39.7(\text{kN/m}^2)$$

它的主动土压力强度分布图形如图 2-15 所示。

略去不计填土和墙背之间的拉应力，则得主动土压力 E_a 等于

$$E_a = \frac{1}{2} \times 1 \times 5.5 + \frac{1}{2} \times 0.7 \times 12.5 + \frac{1}{2}(11.7 + 39.7) \times 3$$

$$= 84.2\text{kN/m}$$

它的作用点在墙底以上 1.46m 处（计算从略）。

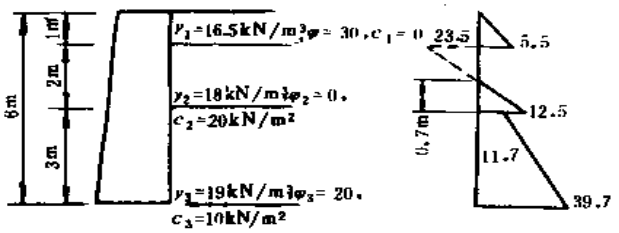


图 2-15

【例 2】求图 2-16 示挡土墙的主动土压力：(1)墙后填土无地下水；(2)因排水不良，墙后地下水位在距墙底 2m 处。设填土为砂土，γ=1.8t/m³，饱和重度=20kN/m³，内摩角 φ=30°（在水位以下假定其值不变）。

【解】1. 无地下水情况

$$E_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 \tan^2(45° - \frac{\varphi}{2}) = \frac{1}{2} \times 18 \times 6^2 \times \tan^2(45° - \frac{30°}{2})$$

$$= \frac{1}{2} \times 18 \times 36 \times \frac{1}{3} = 108\text{kN/m}$$

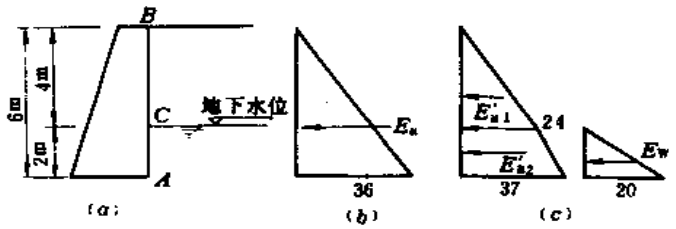


图 2-16

2. 墙后填土有地下水的情况：在地下水位以上部分，主动土压力强度不变。在地下水位标高即距填土表面下 4m 处的主动土压力强度 e_{a4} 等于

$$e_{a4}=\gamma_z\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2})=18\times4\times\tan^2(45^\circ-\frac{30^\circ}{2})$$

$$=24(\mathrm{kN/m^2})$$

在墙底，因土浸在水下，应考虑水对土有减重作用，故主动土压力强度 e_{a5} 等于：

$$e_{a5}=[18\times4+(20-10)\times2]\tan^2(45^\circ-\frac{30^\circ}{2})=30.7\mathrm{kN/m^2}$$

主动土压力强度分布图形如图 2-16 所示，主动土压力 E'_{a1+2} 等于三角形与梯形面积之和，即

$$E'_{a1+2}=\frac{1}{2}\times4\times24+\frac{1}{2}\times2\times(24+30.7)=48+54.7=102.7(\mathrm{kN/m^2})$$

作用在墙背上的水压力 E_w 等于水压力分布图形的面积，即

$$E_w=\frac{1}{2}\times20\times2=20(\mathrm{kN/m^2})$$

总压力 E'_a 等于主动土压力和水压力之和，即

$$E'_a=E'_{a1+2}+E_w=102.7+20=122.7\mathrm{kN/m}$$

可见，当墙后填土有水时，土压力部分将减小（$E'_{a1+2}<E_a$），但计入水压力后，总压力将增大（$E'_a>E_a$），而且水位越高，总压力越大。所以，为保证挡土墙的安全，必须做好墙后土内的排水工作。

3. 悬臂式支护结构

挡土结构的使用是在现场条件不允许基坑维持其天然坡度的情况下用于保持基坑开挖面稳定的结构物。悬臂式挡土结构可能是地下连续墙、木桩、钢筋混凝土桩、钢板桩等，它利用悬臂作用来挡住墙后土体。悬臂式挡土结构的设计过程首先是选定初步尺寸，然后按稳定性和结构要求进行分析并根据需要修改。

悬臂式结构安全系数概念应引起注意，因为它的真正含义不明确。如果将计算的埋置深度增加50%，对该问题来说并不是加了一个1.5的安全系数。既不是说该结构增加了50%的安全度，也不意味着侧压力可增加50%——侧压力甚至可能增加100%。必须按新的条件分析，正确地评价其安全度。试考虑一个例子，其中，计算的埋置深度为1m。假定将埋深增加到1.5m（有很多人就认为是"安全系数$K=1.5$"）。现再假定开挖又下降了0.5m，墙很有可能破坏，因为主动侧压力是和从开挖起算的高度成平方增大的。此时所应做的工作是分析变化了0.5m后细察这种新的几何尺寸条件下应有多大的入土深度。任意规定一个数值来增大入土深度（或将被动压力系数除以此值）的做法并不可取。入土深度必须比现用荷载和几何尺寸下按稳定性所需要的数值稍为增大（这是"安全系数"的实际应用）。建议入土深度的增加应由下列分析确定：

（1）要以总的工程判断为根据考虑由于土重度增加、施加超载或填土参数降低的原因而使侧压力的某些增大。

（2）开挖面的标高可能下降。

悬臂式挡土结构的安全系数一般分为稳定性安全系数和结构安全系数，稳定性分析时一般计算入土深度乘以安全系数1.2～1.5，结构强度计算时一般按现行规范取值。

3.1 均质土支护结构

结构设计主要取决于进入到开挖面以下的土中有足够的深度及刚度，以使成行作为宽悬臂梁来支承开挖面以上的侧向土压力（墙的每单位宽度被看作是一个单独的悬臂梁）。这样仅在墙高不大时才是经济的，因为随着墙高的增加需要的截面模量便急剧增大；弯矩随墙的悬臂长度成三次方增加，这类墙因悬臂作用其侧向挠度相当大。

在径典的悬臂板桩设计中，作了如图3-1c所示的简化假定。

1. 无粘性均质土

解这个问题时假定在填土侧开挖面以上受主动土压力。在主动土压力影响下，墙趋于旋转，从而在墙的前面发生被动压力及墙后为主动压力。在图3-1a的支点b处，墙后土从主动转到被动压力，而在剩下的到桩底的距离墙前是主动压力。在计算主动及被动压力时，可方便地把该点以上的土体视作超载来考虑。

因为设计这类墙时需要解入土深度的四次方程式，以彻底推导出此方程为便。当假定开挖面以下的土与开挖面以上的填土具有同样的φ角时，在图3-1c和图3-2所给条件下推导方程并不困难。图3-2标出了所需的各项。

无粘性土悬臂式支护结构设计的各项主要参数已示于图3-2，以下分别进行分析并导得悬臂式支护结构的通解。

(1)土压力系数 K_a、K_p 及土压力 p、p'、p''

由式(2.4.5)及式(2.4.10)可知，对于无粘性土，主动及被动土压力系数 K_a 及 K_p 分别为

$$K_a=\mathrm{tg}^2(45°-\frac{\varphi}{2}) \tag{3.1.1}$$

$$K_p=\mathrm{tg}^2(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{3.1.2}$$

为以下分析方便设被动土压力系数与主动土压力系数之比为，即

$$\xi=K_p/K_a \tag{3.1.3}$$

由图 3-4 可知，计算所需各点土压力值 p、p'、p''为：

$$p=\gamma(K_p-K_a)Y \tag{3.1.4}$$

$$p'=\gamma(H+a)K_p-\gamma\cdot a\cdot K_a \tag{3.1.5}$$

$$p''=\gamma(H+D)K_p-\gamma\cdot D\cdot K_a \tag{3.1.6}$$

(2)开挖面以下结构所受压力为零点距离 a

结构所受土压力为零点，即为主动土压力与被动土压力相等的位置，

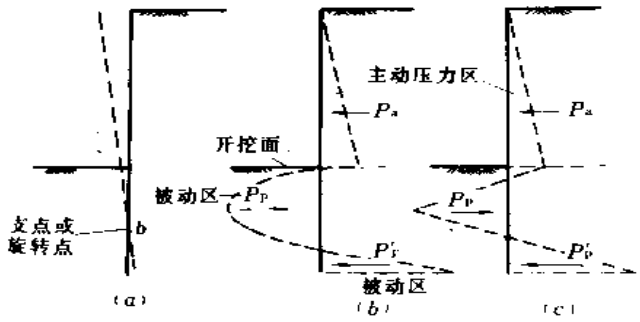


图 3-1

(a)假设弹性线；(b)可能具有的和有限元解获得的土压力定量分布；(c)计算用的简化压力图（所示为粒状土并无水）

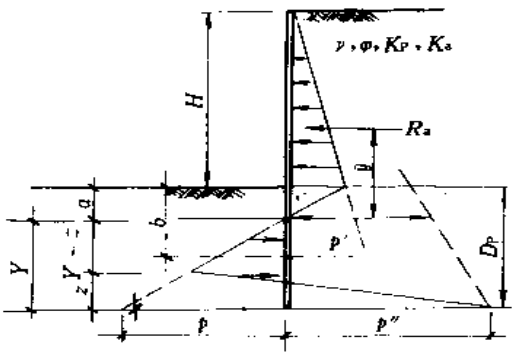


图 3-2　粒状土中的悬臂板桩压力图

$$p'=0 \tag{3.1.7}$$

将式(3.1.5)及(3.1.3)代入上式可得：

$$a=n_1H \tag{3.1.8}$$

式中

$$n_1=\frac{1}{\xi-1} \tag{3.1.9}$$

(3)开挖面下最大弯矩作用点 b

结构最大弯矩作用点，亦即结构断面剪应力为零点，依此条件可由图 3-2 得：

$$\frac{b}{2}\gamma bK_p-\frac{(H+b)}{2}\cdot\gamma(H+b)K_a=0$$

整理得：

$$(\frac{H}{b}+1)^2=\frac{K_p}{K_a}$$

将式(3.1.3)代入上式并解得：

$$b=n_2H \tag{3.1.10}$$

式中

$$n_2=\frac{1}{\sqrt{\xi}-1} \tag{3.1.11}$$

(4)最大弯矩值 M_{max}

由图 3-2 对 b 点取矩，可得最大弯矩值 M_{max} 为：

$$M_{max}=\frac{H+b}{3}\cdot\frac{(H+b)^2}{2}\cdot\gamma K_a-\frac{b}{3}\cdot\frac{\gamma b^2}{2}K_p$$

$$=\frac{\gamma}{6}[(H+b)^3K_a-b^3K_p] \qquad (3.1.12)$$

将式(3.1.10)及(3.1.3)代入上式整理得

$$M_{max}=\frac{\gamma H^3K_a}{6}\frac{\xi}{(\sqrt{\xi}-1)^2}$$

$$=\frac{\gamma H^3K_a}{6}n_2^2\xi$$

令

$$\alpha=n_2^2\xi \qquad (3.1.13)$$

代入式(3.1.12)得

$$M_{max}=\alpha\cdot\frac{K_a\gamma H^3}{6} \qquad (3.1.14)$$

(5)埋置深度 D

埋置深度 D 必须满足静力平衡条件，即作用于结构上的全部水平向作用力平衡条件和绕结构根部自由端弯矩总和为零的条件由图 3-2 作用在结构上水平力平衡条件可得。

$$R_a+(p+p'')\cdot\frac{z}{2}-p\frac{Y}{2}=0 \qquad (3.1.15)$$

对 z 求解得

$$z=\frac{pY-2R_a}{p+p''} \qquad (3.1.16)$$

根部自由端弯矩为零条件可得：

$$R_a(Y+\bar{y})+\frac{z}{2}(p+p'')\cdot\frac{z}{3}-p\frac{Y}{2}\cdot\frac{Y}{3}=0$$

化简得：

$$6R_a(Y+\bar{y})+z^2(p+p'')-pY^2=0 \qquad (3.1.17)$$

并将式(3.1.4)及(3.1.6)代入上式，整理成 Y 的四次方程式：

$$Y^4+(\frac{p'}{\beta})Y^3-(\frac{8R_a}{\beta})Y^2-\left[\frac{6R_a}{\beta^2}(2\beta\bar{y}+p')\right]Y-\frac{6R_a\bar{y}p'+4R_a^2}{\beta^2}=0 \qquad (3.1.18)$$

令：

$$a_3=p'/\beta \qquad (3.1.19)$$

$$a_2=-8R_a/\beta \qquad (3.1.20)$$

$$a_1=-\frac{6R_a}{\beta^2}(2\beta\bar{y}+p') \qquad (3.1.21)$$

$$a_0=-(6R_a\bar{y}p'+4R_a^2)/\beta^2 \qquad (3.1.22)$$

$$\beta=\gamma(K_p-K_a) \qquad (3.1.23)$$

计算并便于给出粗略的定量结果及定性概念，假定墙绕根部转动，此时土压力分布如图 3-3 所示：

为保证墙体不绕 0 点转动，其最小埋深 D 应满足：

$$\frac{1}{6}\gamma(H+D)^3K_a-\frac{1}{6}\gamma D^3K_p\geqslant 0$$

即
$$(H+D)^3\geqslant\frac{K_p}{K_a}D^3=\xi D^3$$

整理得：
$$D=n_1H \qquad (3.1.24)$$

式中：
$$n_1=\frac{1}{\sqrt[3]{\xi}-1} \qquad (3.1.25)$$

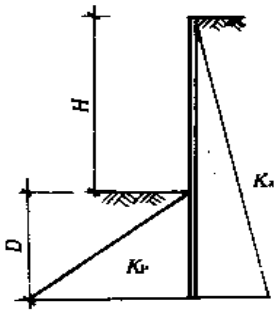


图 3-3

式(3.1.24)可作为初步设计时预估最小埋置深度，实际计算值应按式(3.1.18)确定。将式(3.1.18)求出的 Y 值加上土压力零点深度 a，即为图 3-2 所示最小埋置深度 D_p，令 $\lambda=D_p/D$，对于不同 φ 值计算结果如表 3-1 最下一行所示，从表中可见，随 φ 值增加，λ 值趋于 1。即 φ 值越大，两种方法误差越小，其最大值为 1.121，因此为简化计算方便，可应用式(3.1.24)计算后再乘一个大于 1 的系数。

表 3-1

$\varphi(°)$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K_p	1.191	1.420	1.698	2.040	2.464	3.000	3.690	4.600	5.828	7.549
$\xi=K_p/K_a$	1.418	2.017	2.884	4.160	6.071	9.000	13.62	21.16	3.97	56.99
$n_1=\frac{1}{\xi-1}$	2.392	0.983	0.531	0.316	0.197	0.125	0.079	0.050	0.030	0.018
$n_2=\frac{1}{\sqrt{\xi}-1}$	5.241	2.380	1.432	0.962	0.683	0.500	0.372	0.278	0.207	0.153
$\alpha=n_2^2\xi$	38.30	11.42	5.916	3.850	2.833	2.250	1.882	1.633	1.457	1.329
$n_t=\frac{1}{\sqrt[3]{\xi}-1}$	8.100	3.795	2.362	1.644	1.213	0.926	0.720	0.566	0.447	0.351
$\lambda=D_p/D$	1.121	1.119	1.116	1.112	1.106	1.101	1.093	1.085	1.078	1.068

综合上述，对于无粘性土中的土压力为零点埋置深度系数 n_1，最大弯矩作用点深度系数 n_2，最大弯矩系数 α 及简化计算最小埋置深度系数 n_t，可分别由式(3.1.9)，(3.1.11)，(3.1.13)及(3.1.25)求得，根据不同 φ 值，其结果如表 3-1 所示。

将表 3-1 分别以 φ 及 ξ 为横座标绘制成图 3-4 及图 3-5。

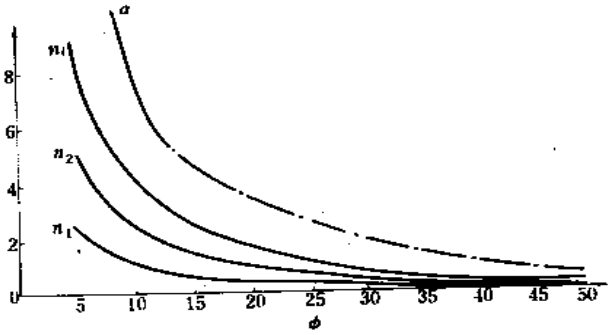


图 3-4

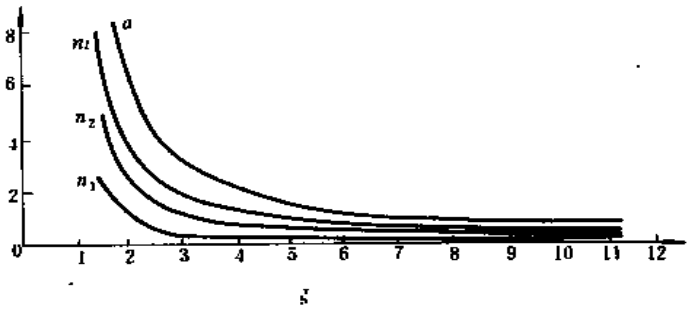


图 3-5

从图 3-4 可见，当均质土中 φ 值较小时，弯矩及嵌固深度较大，φ 值的微小提高，弯矩，嵌固深度均有较大下降，从表 3.1.1 可见，当 φ 值较小时，显然悬臂式结构设计是不合理的。

从图 3-5 可见，ξ 值较小时，嵌固深度及弯矩值较大，ξ 值的提高有利于降低弯矩及嵌固深度，这就提示我们当 φ 值一定时，则可提高 ξ 值的，亦即提高改善被动土压力区土质条件，提高被动土压力系数而达到较好的受力效果。

均质无粘性土中悬臂支护结构的计算步骤可归结如下：

(*a*)拟订已知条件；

(*b*)计算主动与被动土压力系数；

(*c*)计算压力 p，p' p''，距离 a 以及合力 R_a 和它的位置。当压力图的底为 $H+a$ 和高为 p_a 的三角形时，合力位置可以下式求得：

$$\bar{y}=(H+2a)/3 \qquad (3.1.26)$$

(*d*)将上述计算值可入式(3.1.19)并由式(3.1.20)求解 Y。

2. 粘性均质土

与无粘性均质土不同的是粘性土的粘结力作用，在挡墙后可能产生拉应力区，开挖临空面的主动土压力作用零点从地面下移，其受力分布如图 3-6 所示。

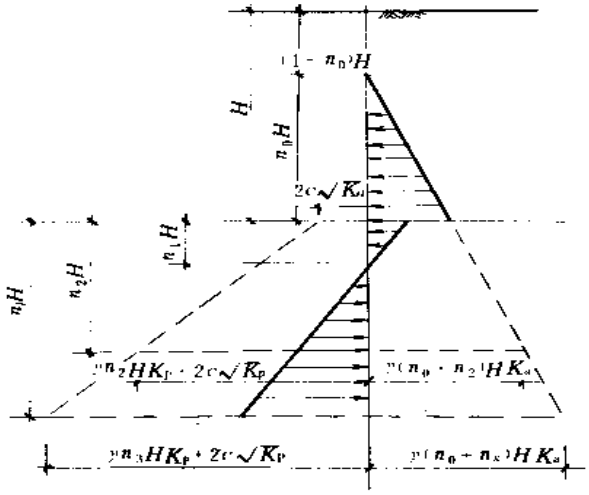


图 3-6　墙背裂缝深度$(1-n_0)H$ 与粘聚力 C 的关系

令粘性土的主动土压力 $p=0$，则

$$p=\gamma(1-n_0)HK_a-2c\sqrt{K_a}=0$$

由上式得

$$n_0=1-\frac{2c}{\gamma H\sqrt{K_a}} \qquad (3.1.27)$$

(1)土压力为零点的距离 n_1H

从上述无粘性土的分析可知，开挖面以下土压力为零点可由主动土压力与被动土压力相等而得：

$$\gamma n_1HK_p+2c\sqrt{K_p}=\gamma(n_0+n_1)HK_a \qquad (3.1.28)$$

将式(3.1.27)代入上式得：

$$n_1=\frac{n_0K_a-(1-n_0)\sqrt{K_pK_a}}{K_p-K_a}$$

将 $\xi=K_p/K_a$ 代入上式得：

$$n_1=\frac{n_0-(1-n_0)\sqrt{\xi}}{\xi-1} \tag{3.1.29}$$

显然，上式当 $c=0$ 亦即 $n_0=1$ 时得到无粘性土的情况。

(2)剪力为零点深度 n_2H

剪力为零点深度按结构断面剪力的零条件得：

$$\frac{1}{2}(n_0+n_2)H\gamma(n_0+n_2)HK_a=\frac{1}{2}(n_2H)^2\gamma K_p+2c\sqrt{K_p}\cdot n_2H$$

将式(3.1.27)代入上式并两边同除以 K_a 得：

$$(n_0+n_2)^2=\xi n_2^2+2(1-n_0)\sqrt{\xi}n_2$$

即

$$n_2^2+2n_0n_2+n_0^2-\xi n_2^2-2(1-n_0)n_2\sqrt{\xi}=0$$

$$(1-\xi)n_2^2+2[n_0-(1-n_0)\sqrt{\xi}]n_2+n_0^2=0$$

$$b=n_0-(1-n_0)\sqrt{\xi}=n_1(\xi-1) \tag{3.1.30}$$

则

$$n_2=\frac{b+\sqrt{b^2-(1-\xi)n_0}}{\xi-1} \tag{3.1.31}$$

如 $c=0$，即 $n_0=1$，则上式中 $b=1$ 得

$$n_2=\frac{1}{\sqrt{\xi}-1}$$

上式与无粘性土中 n_2 表达式(3.1.11)一致。

(3)最大弯矩值 M_{max}

从图 3-6 对剪力为零断面计算弯矩得：

$$\begin{aligned}M_{max}&=\frac{1}{6}(n_o+n_2)^3H^3\gamma K_a-\frac{1}{6}n_2^3H^3\gamma K_p-\frac{1}{2}n_2^2H^2\cdot 2c\sqrt{K_p}\\&=\frac{1}{6}K_a\gamma H^3[(n_o+n_2)^3-n_2^3\xi-3n_2^2(1-n_0)\sqrt{\xi}]\\&=\frac{1}{6}\gamma H^3K_a\xi[(n_0+n_2)^3-\xi n_2^3-3n_2^2(1-n_0)\sqrt{\xi}]\\&=\alpha\cdot\frac{1}{6}\gamma H^3K_a\end{aligned} \tag{3.1.32}$$

式中

$$\alpha=\xi[(n_0+n_2)^3-\xi n_2^3-3n_2^2(1-n_0)\sqrt{\xi}] \tag{3.1.33}$$

如 $c=0$，即 $n_0=1$，上式可表达为

$$\alpha=\frac{\xi}{(\sqrt{\xi}-1)^2}=n_2^2\xi$$

此式与无粘性土的式(2.1.13)相同

(5)近似计算埋置深度 n_iH

为保证墙体不绕根部转动，应满足

$$\frac{1}{6}(n_0+n_i)^3H^3\gamma K_a-\frac{1}{6}n_i^3H^3\gamma K_a-\frac{1}{2}n_i^2H^2\cdot 2c\sqrt{K_p}=0 \tag{3.1.34}$$

$$(n_0+n_l)^3-\xi n^3-3n_l^2(1-n_0)\sqrt{\xi}=0$$

即

$$n_0^3+3n_0^2n_l+3n_0n_l^2+n_l^3-\xi n_l^3-3(1-n_0)\sqrt{\xi}\,n_l^2=0$$

$$(1-\xi)n_l^3+3[(n_0-(1-n_0)\sqrt{\xi}\,]n_l^2+3n_0^2n_l+n_0^3=0$$

令

$$b_1=3[n_0-(1-n_0)\sqrt{\xi}\,]/(1-\xi)=-3n_1$$

$$b_2=3n_0^2/(1-\xi)$$

$$b_3=n_0^3/(1-\xi)$$

$$p=b_2-b_1^2/3$$

$$q=\frac{2}{27}b_1^3-\frac{1}{3}b_1b_2+b_3$$

$$s=(\frac{q}{2})^2+(\frac{p}{3})^3$$

则

$$n_l=\sqrt[3]{\sqrt{s}-\frac{q}{2}}-\sqrt[3]{\sqrt{s}+\frac{q}{2}} \qquad (3.1.35)$$

当 $c=0$，即 $n_0=1$ 时，式(3.1.34)为

$$n_l=\frac{1}{\sqrt[3]{\xi}-1}$$

上式与无粘性式(3.1.25)一致。

3.2 非均质土支护设计

前一节给出了均质土且无超载条件下的悬臂式支护结构设计的基本方法及相应的定量分析计算公式，目的在于给出对这种支护结构设计基本概念及便于计算的基本设计参数值，而为实际工程的设计计算提供定性的结果。

在实际工程中，大部分工程为非均质土的复杂情况，为此，需要考虑各种分层土质、地面超载等复杂条件的设计方法。对于非均质土，图 3-7 以分层土状态表示，结构受力如图 3-7 所示。

转动点 b 以下的合力以 P 表示，在实际计算绕 b 点的抵抗弯矩时为方便计算可不计 P 的影响。

悬臂式支护结构设计应计算嵌固深度、结构强度及结构顶端的位移。

(1)嵌固深度 Y

通常在计算非均质土中的嵌固深度 Y 采用简化方法，即考虑 b 点的力矩平衡条件，以嵌固深度 Y 为未知变量，根据各力对 b 点取矩通过试算决定，如图 3-7 所示假定力矩平衡点 b 位于开挖面下第 m 层土中，则根据力矩平衡条件可得

$$\sum_{i=1}^{n}E_{ai}b_{ai}=\sum_{j=1}^{m}E_{pj}b_{pj} \qquad (3.21)$$

其中 E_{ai}、E_{pj}—分别为作用在支护结构上的各层土的主动土压力和被动土压力；

b_{ai}、b_{pj}—分别为主动土压力合力与被动土压力合力作用点至桩端 b 点的距离，与 Y 值有关。

式(3.2.1)计算所得嵌固深度 Y 应乘以 1.2 的经验系数以满足嵌固段抵抗嵌固力矩的要求，如图 3-7 所示墙的计算长度 L 为：

$$L=H+a+1.2Y \qquad (3.2.2)$$

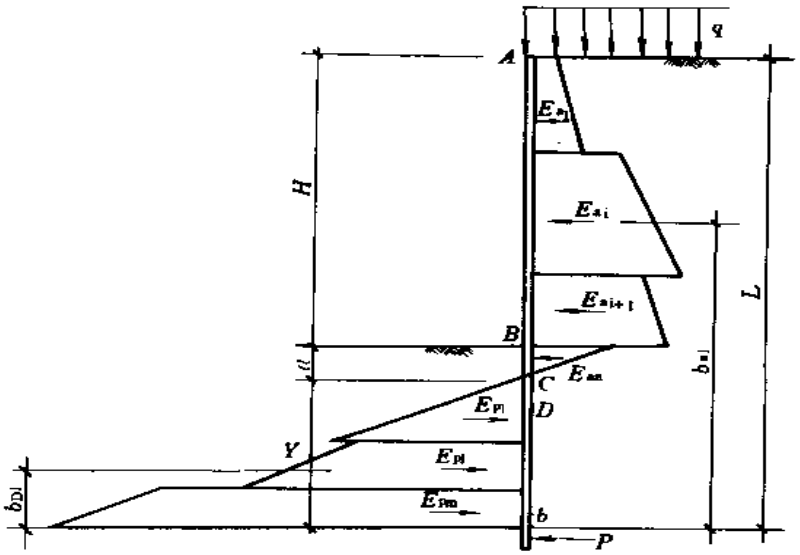


图 3-7　非均质土悬臂式支护结构的受力状态

(2)最大弯矩 M_{max}

为了求得结构的最大变矩 M_{max}，首先必须确定结构剪力为零点所在土层，剪力为零条件可得：

$$\sum_{i=1}^{n} E_{ai} - \sum_{j=1}^{k} E_{pj} = 0 \qquad (3.2.3)$$

通过上式计算，试算时分解取 $j=1,2,\cdots m$，当由式(3.2.3)左边计算值小于零时，所得 k 值即为剪力为零的结构断面所在土层，剪力为零点的断面只需在 j 层中寻找满足式(3.2.3)条件者即可求得。

求得剪力为零的土层 j 层位置后，结构的最大变矩值 M_{max} 可由下式确定：

$$M_{max} = \sum_{i=1}^{n} E_{ai} \cdot y_i - \sum_{j=1}^{k} E_{pj} \cdot y_j \qquad (3.2.4)$$

式中 k 表示第 k 层土中满足式(3.2.3)的上部分土层；

y_i—剪力 $Q=0$ 以上各层土主动土压力 E_{ai} 对剪力为零处的距离；

y_j—被动土压力合力 E_{pj} 作用点对剪力为零处的距离。

(3)悬臂端变形 s

悬臂结构顶端的变形值计算是个比较复杂的问题，大部分文献中没有涉及到这方面的内容，从实用角度出发，假定开挖面以上的结构按悬臂梁的柔性变形计算，悬臂梁的固定端在开挖面处。这样，开挖面以下部分则类似于受水平力的桩，开挖面上的结构受上部主动土压力的合力 H' 及力矩 M' 作用而使开挖面处的桩头产生水平位移 Δ 及相应转角 θ，计算假定如图 3-8a 及 3-8b 所示。水平位移 Δ 及相应转角可按《建筑桩基技术规范》中推荐的 m 法进行计算，结构顶点处的总变形 s 为

$$s = \delta + \Delta + \theta H$$

式中　H—上段结构长度；

δ—悬臂梁上段(开挖面以下)结构柔性变形值；

Δ—开挖面处结构水平位移值；

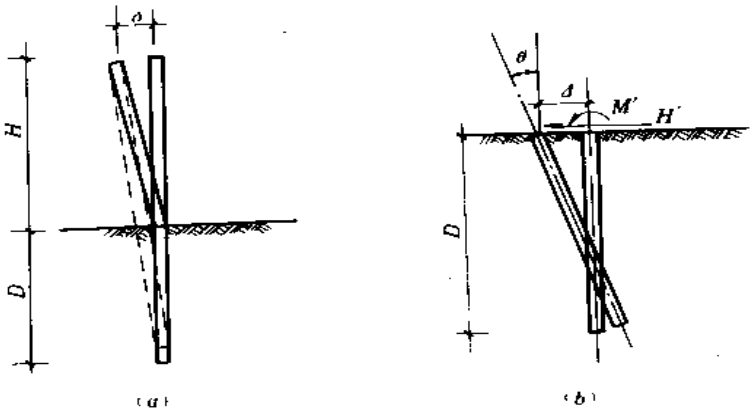


图 3-8

(a)支护顶端的变形；(b)支护下段的受力

θ—开挖面处结构转角值(弧度)。

3.3 基坑上下不同土层支护结构内力计算分析

图 3-9 所示为一开挖深度为 H，在地表作用有附加荷载 q_0 的基坑。作用于结构上的土压力采用朗肯土压力理论，其土压力分布及悬臂支护结构内力计算所需几何参数如图 3-10 所示。

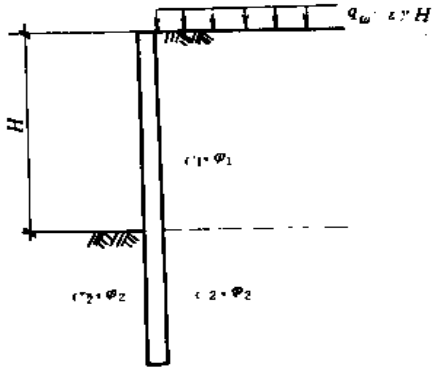


图 3-9

基坑上下不同 c，φ 值示意图

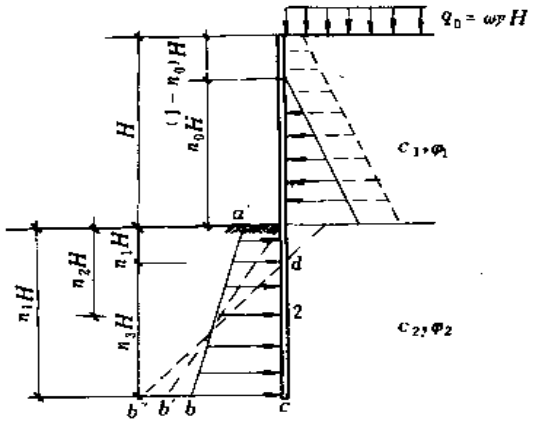


图 3-10

土压力分布及内力计算几何参数图

图 3-10 中各几何参数意义如下：

$(1-n_0)H$—由于 c 的影响，土压力零点下移深度；

n_1H—基坑开挖面以下土压力零点深度；

n_2H—基坑开挖面以下最大弯矩作用点深度；

n_iH—基坑开挖面以下支护结构最小入土深度；

n_3H—土压力零点以下支护结构最小嵌固深度。

由于受 c_1、c_2、φ_1、φ_2 的影响，从图 3-10 可见，开挖面以下的土压力分布可能会产生如下情况：

当 c_2 值很大时，基坑下土压力分布如图 3-10 中矩形面积 abco 所示，即基坑开挖面下均为被动土压力，土压力零点位于基坑开挖面。

当 c_2 值在基坑开挖面产生的被动土压力恰与主动土压值相等时，基坑面以下土压力分布为三角形 ob′c 分布，土压力零点要位于基坑开挖面。

当 c_2 较小时，土压力分布如图 3-10 中 oo′db″c 两个三角形分布，上部分 oo′d 为主动土压力，下部分 db″c 为被动土压力。

以上三种情形，如考虑基坑下方点土压力值 e_{a0} 为代数值，则可知当 $e_{a0}>0$ 时为第 1 种情况；$e_{a0}=0$ 时为第 2 种情况；当 $e_{a0}<0$ 时即为第 3 种情况。

1. 结构内力及几何参数计算公式

如图 3-10 所示，各计算控制点的土压力值根据朗肯土压力公式可表示为

$$e_g = q_0 K_{a1} + \gamma(1-n_0)HK_{a1} - 2c_1\sqrt{K_{a1}} \tag{3.3.1}$$

$$e_{of} = e_g + \gamma n_0 HK_{a1} \tag{3.3.2}$$

$$e_{a0} = 2c_2(\sqrt{K_{p2}} + \sqrt{K_{a2}}) - q_0 K_{a2} - \gamma HK_{a2} \tag{3.3.3}$$

$$e_d = 2c_2(K_{p2} + K_{a2}) - q_0 K_{a2} - \gamma(1+n_1)HK_{a2} + \gamma n_1 HK_{p2} \tag{3.3.4}$$

$$e_2 = 2c_2(\sqrt{K_{p2}} + \sqrt{K_{a2}}) - q_0 K_{a2} - \gamma(1+n_1)HK_{a2} + \gamma n_2 HK_{p2} \tag{3.3.5}$$

$$e_c = 2c_2\sqrt{K_{p2}} + \sqrt{K_{a2}} - q_0 K_{a2} - \gamma(1+n_l)HK_{a2} + \gamma n_l HK_{p2} \tag{3.3.6}$$

式中

$$K_{a1} = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) \tag{3.3.7}$$

$$K_{a2} = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_2}{2}) \tag{3.3.8}$$

$$K_{p2} = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi_2}{2}) \tag{3.3.9}$$

为计算方便，将 c_1、c_2 及 q_0 转换成无量纲系数，即令：

$$c_1 = \delta_1 \gamma H \tag{3.3.10}$$

$$c_2 = \delta_2 \gamma H \tag{3.3.11}$$

$$q_0 = \omega \gamma H \tag{3.3.12}$$

(1)土压力零点高度系数 n_0 及深度系数 n_1

1)土压力零点高度系数 n_0

如图 3-10 所示，在超载 q_0 较小时，由于上层土 c_1 的作用，离基坑开挖底面的某一高度 n_0H 的 g 点土压力值可能为零，令该点的土压力值 e_g(式 3.3.1)为零，则

$$q_0 K_{a1} + \gamma(1-n_0)HK_{a1} - 2c_1\sqrt{K_{a1}} = 0$$

即

$$\omega + (1-n_0) - 2\delta_1/\sqrt{K_{a1}} = 0$$

解得：

$$n_0 = 1 + \omega - 2\delta_1/\sqrt{K_{a1}} \tag{3.3.13}$$

从图 3-10 可见，当 $n_0<1$ 时，基坑开挖深度范围内存在着土压力为零的点，而当 $n_0\geqslant 1$ 时，

上层土土压分布如图 3-10 中的虚线所示，此时，土压力零点位于地表面处；若当 $n_0>1$ 时取 $n_0=1$，则由式 3.3.13 可得计算上层土压力值时，相应的地面超载系数应取：

$$\omega'=\omega-2\delta_1/\sqrt{K_{a1}} \tag{3.3.13-1}$$

$$q_0'=\omega'\gamma H \tag{3.3.13-2}$$

当 $n_0\leqslant 1$ 时，取 $q'_0=0(\omega'=0)$ (3.3.13—3)

2)土压力零点深度系数 n_1

由图 3-10 可知，基坑面下的土压力零点深度系数 n_1 可由式(3.3.4)中令 $e_d=0$ 求得，注意基坑面以下的土压力计算与 c_1(或 n_0)无关，仅与实际地面荷载 q_0、开挖深度 H 有关。

$$e_d=2c_2(\sqrt{K_{p2}}+\sqrt{K_{a2}})-q_0K_{a2}-\gamma(1+n_1)HK_{a2}+\gamma n_1HK_{p2}=0$$

将式(3.3.10)～(3.3.12)代入上式，并将式两边同除以 γHK_{a2}，则

$$2\delta_2(\sqrt{\xi_2}+1)/\sqrt{K_{a2}}-\omega-(1+n_1)+n_1\xi_2=0$$

解得：

$$n_1=\frac{1+\omega-2\delta_2(\sqrt{\xi_2}+1)/\sqrt{K_{a2}}}{\xi_2-1} \tag{3.3.14}$$

式中

$$\xi_2=K_{p2}/K_{a2} \tag{3.3.15}$$

当由式(3.3.14)计算得 $n_1<0$ 时，说明土压力零点位于基坑开挖面上。

(2)最大弯矩作用点深度系数 n_2

由材料力学知识可知，最大弯矩作用点应满足剪力为零。由图 3-10 可知，结构剪应力为零点的表达式为：

$$q'_0K_{a1}H+n_0\gamma HK_{a1}\cdot\frac{1}{2}n_0H-\frac{1}{2}(e_{a0}+e_2)\cdot n_2H=0 \tag{3.3.16}$$

令

$$\lambda_{21}=K_{a2}/K_{a1} \tag{3.3.17}$$

将式(3.3.3)、(3.3.5)、(3.3.10)～(3.3.12)、(3.3.14)、(3.3.17)代入式(3.3.16)，并两边同除以 $\frac{1}{2}\gamma H^2K_{a1}$ 可得

$$2\omega'+n_0^2-2\lambda_{21}n_1n_2(\xi_2-1)-\lambda_{21}(\xi_2-1)n_2^2=0 \tag{3.3.18}$$

上式两边同除以 $-\lambda_{21}(\xi_2-1)$ 可得

$$n_2^2+2n_1n_2-\frac{2\omega'+n_0^2}{\lambda_{21}(\xi_2-1)}=0 \tag{3.3.19}$$

式(3.3.19)为典型的一元二次方程，由于 $n_2>n_1$，故解得

$$n_2=n_1+\sqrt{n_1^2+\frac{2\omega'+n_0^2}{\lambda_{21}(\xi_2-1)}} \tag{3.3.20}$$

(3)最大弯矩值 M_{max}

如图 3-10 所示，于基坑开挖面以下 n_2H 处对上部力取矩，可得最大弯矩值 M_{max}

$$\begin{aligned}M_{max}&=q'_0K_{a1}H\cdot(\frac{1}{2}H+n_2H)+\frac{1}{2}\gamma(n_0H)^2K_{a1}\cdot(\frac{1}{3}n_0H+n_2H)\\&\quad-e_{a1}n_2H\cdot\frac{1}{2}n_2H-\frac{1}{6}(e_2-e_{a0})(n_2H)^2\\&=\frac{1}{6}\omega'\gamma H^3K_{a1}(3+6n_2)+\frac{1}{6}n_0^2\gamma H^3K_{a1}(n_0+3n_2)\end{aligned}$$

$$-\frac{3}{6}n_1n_2^2\gamma H^3K_{a2}(\xi_2-1)-\frac{1}{6}n_2^3\gamma H^3(K_{p2}-K_{p2})$$

$$=\frac{1}{6}\gamma H^3K_{a1}[3\omega'(1+2n_2)+n_0^2(n_0+3n_2)$$

$$-\lambda_{21}(\xi_2-1)n_2^2(n_2-3n_1)] \tag{3.3.21}$$

令
$$\alpha_u=3\omega'(1+2n_2)+n_0^2(n_1+3n_2)-\lambda_{21}(\xi_2-1)n_2^2(n_2-3n_1) \tag{3.3.22}$$

则
$$M_{max}=\alpha_u\cdot\frac{1}{6}\gamma H^3K_{a1} \tag{3.3.23}$$

(4)最小埋置深度系数 n_t

前已述及，悬臂式支护结构近似计算埋置深度可由结构绕端点力矩平衡条件确定。设在深度 n_tH 处的弯矩为零，则由图 3-10 可得出类似于式(3.3.22)的计算推导过程。令 n_2 以 n_t 代替，则力矩平衡条件为

$$3\omega'(1+2n_t)+n_0^2(n_0+3n_t)-\lambda_{21}(\xi_2-1)n_t^2(n_t-3n_1)=0 \tag{3.3.24}$$

式(3.3.24)为 n_t 的一元三次方程，其解可由一般的一元三次方程求得符合工程实际的实根，亦可采用数值解法。由于 $n_t>n_2$，则可在 n_2 值的基础上逐步赋值求出式(3.3.24)的解。

(5)嵌固长度系数 n_3

由图 3-10 可知，嵌固段长度系数 n_3 为

$$n_3=n_t-n_1 \qquad n_1\geqslant 0 \tag{3.3.25}$$

当 $n_1<0$ 时，$n_3=n_0$ (3.3.26)

(6)最大剪力 Q_{max}

结构断面的最大剪力位于土压力零点处，其值根据 n_1H 处以上的土压力合力确定，规定剪力以使脱离体顺时针方向旋转为正，即

$$-Q_{max}=q'_0K_{a1}H+\frac{1}{2}\gamma(n_0H)^2K_{a1}-e_{a0}n_1H-\frac{1}{2}(e_d-e_{a0})n_1H$$

$$=\omega'\gamma H^2K_{a1}+\frac{1}{2}n_0^2\gamma H^2K_{a1}+n_1^2(\xi_2-1)\gamma H^2K_{a2}-\frac{1}{2}n_1^2\gamma H^2K_{a2}(\xi_2-1)$$

$$=\frac{1}{2}\gamma H^2K_{a1}[2\omega'+n_0^2+n_1^2(\xi_2-1)\lambda_{21}] \tag{3.3.27}$$

令
$$\varepsilon_u=\begin{cases}-(2\omega'+n_0^2) & n_1\leqslant 0\\ -[2\omega'+n_0^2+n_1^2(\xi_2-1)\lambda_{21}] & n_1>0\end{cases} \tag{3.3.28}$$

则
$$Q_{max}=\frac{1}{2}\gamma H^2K_{a1}\cdot\varepsilon_u \tag{3.3.29}$$

从以上分析可知，悬臂式支护结构的内力计算可简化为以上所述几何参数系数及剪力与弯矩的系数计算。

2、结构内力计算特性

上下土层为不同条件时，支护结构的内力主要与 c_1、c_2、φ_1、φ_2 及 q_0 五个变量有关，从以上推导所得公式结果可得出如下性质：

(1)土压力零点特性

1)以式(3.3.14)可见，土压力零点深度系数 n_1 仅与下层土的 c_2、φ_2 及附加荷载 q_0 有关而上层土的 c_1、φ_1 值不影响土压力零点位置。

2)临界内聚力 $c_{2c}(\delta_{2c})$

从图 3-10 可知，在基底面的土压力分布可能出现三种情况，即可能是主动土压力、土压力

为零及被动土压力状态，其中间阶段，亦即基底上压力恰为零点状态，称其为土压力分布临界状态。当 q_0、φ_2 为定值时，存在一内聚力 c_{2c} 使 $n_1=0$，称此内聚力 c_{2c} 为临界内聚力。对于不同的 ω 及 φ_2 值可由式(3.3.14)令 $n_1=0$ 求解出相应的 δ_{2c}，称此为临界内聚力系数 δ_{2c}。表 3-2 给出了临界内聚力系数 δ_{2c}。

基坑上下不同土层临界内聚力系数 δ_{2c} 表 3-2

δ_{2c} \ ω / φ_2	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	0.60	0.70
6	0.203	0.213	0.224	0.232	0.243	0.252	0.263	0.273	0.284	0.304	0.324	0.345
7	0.195	0.205	0.215	0.224	0.234	0.243	0.254	0.263	0.273	0.292	0.311	0.332
8	0.187	0.197	0.207	0.215	0.226	0.234	0.245	0.254	0.263	0.282	0.301	0.319
9	0.181	0.189	0.199	0.209	0.217	0.226	0.234	0.245	0.254	0.270	0.289	0.306
10	0.174	0.183	0.191	0.201	0.209	0.217	0.226	0.234	0.243	0.261	0.280	0.296
11	0.168	0.176	0.185	0.193	0.201	0.209	0.217	0.226	0.234	0.252	0.268	0.284
12	0.161	0.170	0.178	0.185	0.193	0.201	0.209	0.217	0.226	0.241	0.259	0.273
13	0.156	0.163	0.170	0.178	0.185	0.193	0.201	0.209	0.217	0.232	0.248	0.263
14	0.149	0.156	0.163	0.172	0.180	0.185	0.193	0.201	0.209	0.224	0.239	0.252
15	0.144	0.151	0.158	0.165	0.172	0.180	0.185	0.193	0.201	0.215	0.228	0.243
16	0.137	0.144	0.151	0.158	0.165	0.172	0.178	0.185	0.191	0.205	0.219	0.232
17	0.132	0.139	0.145	0.152	0.158	0.165	0.170	0.178	0.183	0.197	0.211	0.224
18	0.126	0.132	0.139	0.145	0.152	0.158	0.165	0.170	0.176	0.189	0.201	0.215
19	0.121	0.127	0.134	0.139	0.145	0.151	0.158	0.163	0.170	0.181	0.193	0.205
20	0.116	0.122	0.127	0.134	0.139	0.145	0.151	0.156	0.163	0.174	0.185	0.197
21	0.110	0.116	0.122	0.127	0.134	0.139	0.144	0.151	0.156	0.167	0.178	0.189
22	0.106	0.112	0.116	0.122	0.127	0.132	0.139	0.144	0.149	0.159	0.170	0.180
23	0.102	0.107	0.112	0.116	0.122	0.127	0.132	0.137	0.142	0.152	0.163	0.172
24	0.097	0.102	0.107	0.112	0.116	0.121	0.126	0.130	0.135	0.145	0.156	0.165
25	0.093	0.097	0.102	0.106	0.112	0.116	0.121	0.126	0.129	0.139	0.149	0.158
26	0.088	0.093	0.097	0.102	0.106	0.110	0.115	0.119	0.124	0.132	0.142	0.151
27	0.084	0.089	0.093	0.097	0.102	0.106	0.109	0.113	0.118	0.126	0.135	0.144
28	0.080	0.084	0.088	0.092	0.096	0.100	0.104	0.109	0.112	0.121	0.129	0.137
29	0.076	0.080	0.084	0.088	0.092	0.096	0.099	0.103	0.107	0.115	0.122	0.130
30	0.073	0.076	0.080	0.084	0.088	0.090	0.095	0.099	0.102	0.109	0.116	0.124
31	0.069	0.073	0.076	0.080	0.083	0.086	0.090	0.093	0.097	0.103	0.110	0.118
32	0.066	0.069	0.073	0.075	0.079	0.083	0.085	0.089	0.092	0.099	0.104	0.112
33	0.062	0.066	0.069	0.071	0.075	0.078	0.081	0.084	0.088	0.093	0.100	0.106
34	0.059	0.062	0.066	0.068	0.071	0.074	0.076	0.080	0.083	0.089	0.095	0.100
35	0.056	0.059	0.061	0.064	0.067	0.070	0.073	0.075	0.079	0.084	0.089	0.095
36	0.053	0.056	0.058	0.061	0.063	0.067	0.069	0.071	0.074	0.080	0.085	0.090
37	0.050	0.053	0.055	0.058	0.060	0.062	0.066	0.068	0.070	0.075	0.080	0.085
38	0.048	0.049	0.053	0.055	0.057	0.059	0.061	0.063	0.067	0.071	0.075	0.080
39	0.045	0.047	0.049	0.052	0.054	0.056	0.058	0.060	0.062	0.067	0.071	0.076
40	0.042	0.045	0.047	0.049	0.050	0.053	0.055	0.057	0.059	0.063	0.067	0.071
41	0.040	0.042	0.044	0.046	0.048	0.049	0.052	0.054	0.056	0.059	0.063	0.067
42	0.037	0.039	0.041	0.043	0.045	0.047	0.049	0.050	0.053	0.056	0.060	0.063
43	0.035	0.037	0.038	0.040	0.042	0.044	0.046	0.048	0.049	0.053	0.056	0.059
44	0.033	0.034	0.036	0.037	0.039	0.041	0.043	0.045	0.046	0.049	0.053	0.056
45	0.031	0.032	0.034	0.036	0.037	0.038	0.040	0.041	0.043	0.046	0.049	0.053
46	0.029	0.030	0.032	0.033	0.034	0.036	0.037	0.038	0.040	0.043	0.046	0.049
47	0.027	0.029	0.029	0.031	0.032	0.033	0.035	0.037	0.037	0.040	0.043	0.046
48	0.025	0.026	0.028	0.029	0.030	0.032	0.032	0.034	0.035	0.037	0.040	0.043
49	0.023	0.024	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.032	0.032	0.035	0.037	0.039
50	0.021	0.023	0.023	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.032	0.035	0.037

(2)c_1，φ_1 转换 φ'_1($c'_1=0$)特性

由于土上层由聚力 c_1 的存在，使计算公式较为复杂，一般工程计算时均习惯于采用等效内摩擦角 φ'_1 进行计算，传统方法一般采用土压力强度相等的原则进行等代计算，实际上这种等代方法是片面的，特别是当地面超载较大时等代结果可能使土压力分布与等代前计算结构内力各系数造成较大的误差，由此而造成结构内力的计算误差比土压力分布的误差更为严重。从上节分析可知，结构计算的最大剪力及弯矩作用位置均在基坑开挖面以下。因此，只要保证基坑开挖面处以上的土压力在基坑面处的静力等效力矩与合力与实际值相等，且基坑面上的附加垂直荷载相等，即可保证将 c_1，φ_1，转换成等效内摩擦角 φ'_1 后，其内力计算结果与原状态相同。

如图 3-11(a)所示为图 3-10 基坑开挖面以上考虑原土参数 c_1，φ_1 的土压力分布图，图 3-11(b)所示为等效内解擦角为 φ_1'，内聚力 $c'_1=0$ 的土压力分布图，等效后的基坑计算深度由 H 变为 $H'=n_cH$，引入 H' 则可保证土压力合力与力矩满足原状态下的静力平衡条件。

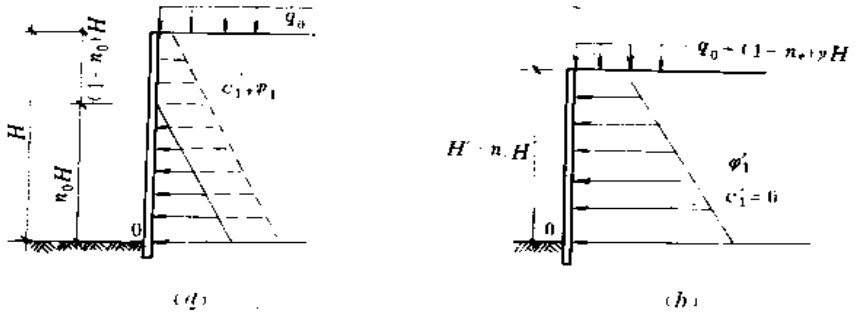


图 3-11　c_1、φ_1 转换 φ'_1 示意图

(a)c_1，φ_1 状态土压力分布；(b)等效 φ'_1 状态土压力分布

如图 3-11，将原状 c_1、φ_1 值转换为 φ'_1 后，相应的计算深度为 H'，作用于图 3-11(b)上的附加荷载由原来的 q_0 增加($H-H'$)所产生的土自重超载$(1-n_c)\gamma H$。

令
$$q_0=\omega\gamma H \tag{3.3.30}$$
$$c_1=\delta_1\gamma H \tag{3.3.31}$$

根据图 3-11(a)与图 3-11(b)的土压力作用力合力相等条件得

$$q_0'K_{a1}\cdot H+\frac{1}{2}\gamma(n_0H)^2K_{a1}=[q_0+(1-n_c)\gamma H]\cdot K'_{a1}\cdot n_cH+\frac{1}{2}(n_cH)^2\gamma K'_{a1} \tag{3.3.32}$$

式中 q'_0 及 n_0 由式(3.3.3.－2)或(3.3.3－3)及(3.3.13)确定。

$$K_{a1}=\tan^2(45°-\frac{\varphi_1}{2})$$

$$K'_{a1}=\tan^2(45°-\frac{\varphi_1}{2})$$

将式(3.3.30)、(3.3.31)代入式(3.3.32)整理得：

$$(2\omega'+n_0^2)K_{a1}=[2(\omega+1)-n_c]n_cK'_{a1} \tag{3.3.33}$$

根据两种土压力分布状态下土压力合力对基坑底的合力力矩相等条件可得：

$$\frac{1}{2}q'_0K_{a1}H^2+\frac{1}{6}\gamma(n_0H)^3K_{a1}=\frac{1}{2}[q_0+(1-n_c)\gamma H]K'_{a1}(n_cH)^2+\frac{1}{6}(n_cH)^3K'_{a1}$$

即
$$(3\omega'+n_0^3)K_{a1}=[3(\omega+1)-2n_c]n_c^2K'_{a1} \tag{3.3.34}$$

令 $$A=\frac{2\omega'+n_0^2}{3\omega'+n_0^3} \tag{3.3.35}$$

将式(3.4.33)两边同除以式(3.4.34)得：

$$A=\frac{2(\omega+1)-n_c}{[3(\omega+1)-2n_c]n_c}$$

整理得 $$2An_c^2-[3(\omega+1)A+1]n_c+2(\omega+1)=0$$

解得 $$n_c=(B-\sqrt{B^2-(\omega+1)/A} \tag{3.3.36}$$

式中 $$B=[3(\omega+1)A+1]/(4A) \tag{3.3.37}$$

从式(3.3.36)可知，n_c 仅与 n_0 与 c_0 有关。

将式(3.4.36)代入式(3.4.33)求得等效主动土压力系数：

$$K'_{a1}=\frac{2\omega'+n_0^2}{[2(\omega+1)-n_c]\cdot n_c}\cdot K_{a1} \tag{3.3.38}$$

其相应的等效内摩擦角 φ'_1 可由下式求得：

$$\varphi'_1=2\times(45°-\arctan K'_{a1}) \tag{3.3.39}$$

表 3-3 给出了按式(3.3.38)、式(3.3.33)及式(3.3.39)所求出的在 $c_1(n_0)$、ω、φ_1 不同条件下的 n_c 及 φ'_1 值，可供实际设计时选用。

式(3.3.35)中的 n_0 可根据 δ_1、K_{a1}值由式(3.3.13)求得

实际应用时，当上层土 c_1、φ_1 值已定条件下，根据式(3.3.13)求得 n_0、地面超载系数 ω，则可从表 3-3 中查出相应的 n_c 及 φ'_1，计算时只需取计算开挖深度为 n_cH，并意以 $q_0+(1-n_c)\gamma H$ 或 $[\omega+(1-n_c)]\frac{H}{H_c}\cdot\gamma H_c$ 为新的计算深度的地面超载。按等效内摩擦角 φ'_1 计算所得结果将与 c_1、φ_1 值计算结构内力结果完全一致。

c_1、φ_1 等效内摩擦角 φ'_1 表

$\omega=0.00$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{a1}}$　　**表 3-3(1)**

D		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
n_c		1.00	0.83	0.75	0.69	0.63	0.58	0.53	0.49	0.44	0.40	0.36
φ_1	K_{a1}	φ'_1										
6	0.811	6.0	8.1	10.1	12.3	14.4	16.6	19.0	21.4	23.9	26.5	29.2
8	0.756	8.0	10.1	12.1	14.2	16.4	18.6	20.9	23.2	25.7	28.3	31.0
10	0.704	10.0	12.0	14.1	16.2	18.3	20.5	22.7	25.1	27.5	30.0	32.7
12	0.656	12.0	14.0	16.1	18.1	20.2	22.4	24.6	26.9	29.3	31.8	34.4
14	0.610	14.0	16.0	18.0	20.1	22.1	24.3	26.5	28.7	31.1	33.5	36.1
16	0.568	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.1	28.3	30.5	32.8	35.2	37.7
18	0.528	18.0	20.0	21.9	23.9	25.9	28.0	30.1	32.3	34.6	36.9	39.4
20	0.490	20.0	21.9	23.9	25.8	27.8	29.8	31.9	34.1	36.3	38.6	41.0
22	0.455	22.0	23.9	25.8	27.7	29.7	31.7	33.7	35.8	38.0	40.2	42.6
24	0.422	24.0	25.9	27.8	29.7	31.6	33.5	35.5	37.6	39.7	41.9	44.2
26	0.390	26.0	27.9	29.7	31.6	33.4	35.3	37.3	39.3	41.4	43.5	45.7
28	0.361	28.0	29.8	31.6	33.4	35.3	37.1	39.1	41.0	43.0	45.1	47.3
30	0.333	30.0	31.8	33.6	35.3	37.1	39.0	40.8	42.7	44.7	46.7	48.8
32	0.307	32.0	33.8	35.5	37.2	39.0	40.7	42.6	44.4	46.3	48.3	50.3
34	0.283	34.0	35.7	37.4	39.1	40.8	42.5	44.3	46.1	47.9	49.8	51.8
36	0.260	36.0	37.7	39.3	41.0	42.6	44.3	46.0	47.8	49.5	51.4	53.3
38	0.238	38.0	39.6	41.2	42.8	44.4	46.1	47.7	49.4	51.1	52.9	54.8
40	0.217	40.0	41.6	43.1	44.7	46.2	47.8	49.4	51.1	52.7	54.4	56.2
42	0.198	42.0	43.5	45.0	46.5	48.0	49.6	51.1	52.7	54.3	56.0	57.7
44	0.180	44.0	45.5	46.9	48.4	49.8	51.3	52.8	54.3	55.9	57.5	59.1
46	0.163	46.0	47.4	48.8	50.2	51.6	53.0	54.5	55.9	57.4	59.0	60.5
48	0.147	48.0	49.4	50.7	52.1	53.4	54.8	56.1	57.5	59.0	60.4	61.9

$\omega=0.05$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{s1}}$　　表 3-3(2)

D		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
n_c		0.87	0.79	0.73	0.67	0.62	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.36
φ_1	K_{s1}						φ'_1					
6	0.811	8.0	9.9	12.0	14.0	16.1	18.3	20.5	22.9	25.3	27.9	30.6
8	0.756	10.0	11.9	13.9	15.9	18.0	20.2	22.4	24.7	27.1	29.7	32.3
10	0.704	12.0	13.9	15.9	17.9	20.0	22.1	24.3	26.6	28.9	31.4	34.0
12	0.656	13.9	15.9	17.8	19.8	21.9	24.0	26.1	28.4	30.7	33.1	35.7
14	0.610	15.9	17.8	19.8	21.7	23.7	25.8	28.0	30.2	32.5	34.8	37.4
16	0.568	17.9	19.8	21.7	23.6	25.6	27.7	29.8	31.9	34.2	36.5	39.0
18	0.528	19.9	21.7	23.6	25.5	27.5	29.5	31.6	33.7	35.9	38.2	40.6
20	0.490	21.9	23.7	25.6	27.4	29.4	31.3	33.3	35.4	37.6	39.8	42.2
22	0.455	23.8	25.6	27.5	29.3	31.2	33.1	35.1	37.2	39.3	41.5	43.7
24	0.422	25.8	27.6	29.4	31.2	33.1	34.9	36.9	38.9	40.9	43.1	45.3
26	0.390	27.8	29.5	31.3	33.1	34.9	36.7	38.6	40.6	42.6	44.7	46.8
28	0.361	29.7	31.5	33.2	34.9	36.7	38.5	40.4	42.3	44.2	46.2	48.3
30	0.333	31.7	33.4	35.1	36.8	38.5	40.3	42.1	43.9	45.8	47.8	49.8
32	0.307	33.7	35.3	37.0	38.6	40.3	42.0	43.8	45.6	47.4	49.3	51.3
34	0.283	35.6	37.2	38.8	40.5	42.1	43.8	45.5	47.2	49.0	50.9	52.8
36	0.260	37.6	39.2	40.7	42.3	43.9	45.5	47.2	48.9	50.6	52.4	54.2
38	0.238	39.6	41.1	42.6	44.1	45.7	47.2	48.8	50.5	52.2	53.9	55.7
40	0.217	41.5	43.0	44.5	45.9	47.4	49.0	50.5	52.1	53.7	55.4	57.1
42	0.198	43.5	44.9	46.3	47.8	49.2	50.7	52.2	53.7	55.2	56.9	58.5
44	0.180	45.4	46.8	48.2	49.6	51.0	52.4	53.8	55.3	56.8	58.3	59.9
46	0.163	47.4	48.7	50.0	51.4	52.7	54.1	55.4	56.9	58.3	59.8	61.3
48	0.147	49.3	50.6	51.9	53.2	54.4	55.8	57.1	58.4	59.8	61.2	62.7

$\omega=0.10$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{s1}}$　　表 3-3(3)

D		0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
n_c		0.84	0.77	0.71	0.66	0.61	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.36
φ_1	K_{s1}						φ'_1					
6	0.811	9.8	11.7	13.6	15.6	17.7	19.8	22.0	24.3	26.7	29.2	31.9
8	0.756	11.7	13.6	15.6	17.6	19.6	21.7	23.9	26.1	28.5	31.0	33.6
10	0.704	13.7	15.6	17.5	19.5	21.5	23.6	25.7	28.0	30.3	32.7	35.3
12	0.656	15.7	17.6	19.4	21.4	23.4	25.4	27.5	29.7	32.0	34.4	36.9
14	0.610	17.7	19.5	21.4	23.3	25.2	27.3	29.3	31.5	33.7	36.1	38.5
16	0.568	19.6	21.4	23.3	25.2	27.1	29.1	31.1	33.3	35.4	37.7	40.1
18	0.528	21.6	23.4	25.2	27.1	29.0	30.9	32.9	35.0	37.1	39.4	41.7
20	0.490	23.5	25.3	27.1	28.9	30.8	32.7	34.7	36.7	38.8	41.0	43.3
22	0.455	25.5	27.2	29.0	30.8	32.6	34.5	36.4	38.4	40.5	42.6	44.8
24	0.422	27.4	29.1	30.9	32.6	34.4	36.3	38.1	40.1	42.1	44.2	46.3
26	0.390	29.4	31.0	32.7	34.5	36.2	38.0	39.9	41.7	43.7	45.7	47.8
28	0.361	31.3	32.9	34.6	36.3	38.0	39.8	41.6	43.4	45.3	47.3	49.3
30	0.333	33.2	34.8	36.5	38.1	39.8	41.5	43.2	45.0	46.9	48.8	50.8
32	0.307	35.2	36.7	38.3	39.9	41.6	43.2	44.9	46.7	48.5	50.3	52.2
34	0.283	37.1	38.6	40.2	41.7	43.3	44.9	46.6	48.3	50.0	51.8	53.7
36	0.260	39.0	40.5	42.0	43.5	45.1	46.6	48.2	49.9	51.6	53.3	55.1
38	0.238	40.9	42.4	43.8	45.3	46.8	48.3	49.9	51.5	53.1	54.8	56.5
40	0.217	42.9	44.3	45.7	47.1	48.5	50.0	51.5	53.0	54.6	56.2	57.9
42	0.198	44.8	46.1	47.5	48.9	50.3	51.7	53.1	54.6	56.1	57.7	59.3
44	0.180	46.7	48.0	49.3	50.6	52.0	53.3	54.7	56.2	57.6	59.1	60.7
46	0.163	48.6	49.8	51.1	52.4	53.7	55.0	56.3	57.7	59.1	60.5	62.0
48	0.147	50.5	51.7	52.9	54.2	55.4	56.7	57.9	59.2	60.6	61.9	63.4

$\omega=0.15$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{s1}}$　　表 3-3(4)

D		0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
n_c		0.82	0.76	0.70	0.65	0.61	0.56	0.52	0.47	0.43	0.39	0.35
φ_1	K_{s1}	φ'_1										
6	0.811	11.4	13.3	15.2	17.1	19.2	21.2	23.4	25.7	28.0	30.5	33.1
8	0.756	13.4	15.2	17.1	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5	29.8	32.2	34.8
10	0.704	15.4	17.2	19.0	21.0	22.9	25.0	27.1	29.3	31.5	33.9	36.4
12	0.656	17.3	19.1	21.0	22.9	24.8	26.8	28.9	31.0	33.3	35.6	38.0
14	0.610	19.3	21.0	22.9	24.7	26.6	28.6	30.7	32.8	35.0	37.2	39.6
16	0.568	21.2	23.0	24.8	26.6	28.5	30.4	32.4	34.5	36.6	38.9	41.2
18	0.528	23.1	24.9	26.6	28.5	30.3	32.2	34.2	36.2	38.3	40.5	42.8
20	0.490	25.1	26.8	28.5	30.3	32.1	34.0	35.9	37.9	39.9	42.1	44.3
22	0.455	27.0	28.7	30.4	32.1	33.9	35.7	37.6	39.5	41.6	43.6	45.8
24	0.422	28.9	30.6	32.2	33.9	35.7	37.5	39.3	41.2	43.2	45.2	47.3
26	0.390	30.8	32.4	34.1	35.8	37.5	39.2	41.0	42.8	44.7	46.7	48.8
28	0.361	32.7	34.3	35.9	37.6	39.2	40.9	42.7	44.5	46.3	48.2	50.2
30	0.333	34.6	36.2	37.8	39.4	41.0	42.6	44.3	46.1	47.9	49.7	51.7
32	0.307	36.5	38.0	39.6	41.1	42.7	44.3	46.0	47.7	49.4	51.2	53.1
34	0.283	38.4	39.9	41.4	42.9	44.4	46.0	47.6	49.3	50.9	52.7	54.5
36	0.260	40.3	41.8	43.2	44.7	46.2	47.7	49.2	50.8	52.5	54.2	55.9
38	0.238	42.2	43.6	45.0	46.4	47.9	49.3	50.8	52.4	54.0	55.6	57.3
40	0.217	44.1	45.4	46.8	48.2	49.6	51.0	52.4	53.9	55.4	57.0	58.7
42	0.198	45.9	47.3	48.6	49.9	51.3	52.6	54.0	55.5	56.9	58.4	60.0
44	0.180	47.8	49.1	50.4	51.6	52.9	54.3	55.6	57.0	58.4	59.8	61.3
46	0.163	49.7	50.9	52.1	53.4	54.6	55.9	57.2	58.5	59.8	61.2	62.7
48	0.147	51.5	52.7	53.9	55.1	56.3	57.5	58.7	60.0	61.3	62.6	64.0

$\omega=0.20$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{s1}}$　　表 3-3(5)

D		0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
n_c		0.80	0.75	0.69	0.65	0.60	0.56	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35
φ_1	K_{s1}	φ'_1										
6	0.811	13.0	14.8	16.6	18.6	20.5	22.6	24.7	26.9	29.2	31.7	34.2
8	0.756	14.9	16.7	18.6	20.5	22.4	24.4	26.5	28.7	31.0	33.4	35.9
10	0.704	16.9	18.7	20.5	22.4	24.3	26.3	28.3	30.5	32.7	35.0	37.5
12	0.656	18.8	20.6	22.4	24.2	26.1	28.1	30.1	32.2	34.4	36.7	39.1
14	0.610	20.7	22.5	24.3	26.1	28.0	29.9	31.9	33.9	36.1	38.3	40.7
16	0.568	22.7	24.4	26.1	27.9	29.8	31.7	33.6	35.6	37.7	39.9	42.2
18	0.528	24.6	26.3	28.0	29.8	31.6	33.4	35.3	37.3	39.4	41.5	43.8
20	0.490	26.5	28.2	29.8	31.6	33.3	35.2	37.0	39.0	41.0	43.1	45.3
22	0.455	28.4	30.0	31.7	33.4	35.1	36.9	38.7	40.6	42.6	44.6	46.8
24	0.422	30.3	31.9	33.5	35.2	36.9	38.6	40.4	42.3	44.2	46.2	48.2
26	0.390	32.2	33.7	35.3	37.0	38.6	40.3	42.1	43.9	45.7	47.7	49.7
28	0.361	34.1	35.6	37.1	38.7	40.4	42.0	43.7	45.5	47.3	49.1	51.1
30	0.333	35.9	37.4	39.0	40.5	42.1	43.7	45.3	47.0	48.8	50.6	52.5
32	0.307	37.8	39.3	40.7	42.2	43.8	45.4	47.0	48.6	50.3	52.1	53.9
34	0.283	39.7	41.1	42.5	44.0	45.5	47.0	48.6	50.2	51.8	53.5	55.3
36	0.260	41.5	42.9	44.3	45.7	47.2	48.6	50.2	51.7	53.3	54.9	56.7
38	0.238	43.4	44.7	46.1	47.4	48.8	50.3	51.7	53.2	54.8	56.4	58.0
40	0.217	45.2	46.5	47.8	49.2	50.5	51.9	53.3	54.7	56.2	57.8	59.3
42	0.198	47.0	48.3	49.6	50.9	52.2	53.5	54.9	56.2	57.7	59.1	60.7
44	0.180	48.9	50.1	51.3	52.6	53.8	55.1	56.4	57.7	59.1	60.5	62.0
46	0.163	50.7	51.9	53.0	54.2	55.4	56.7	57.9	59.2	60.5	61.9	63.3
48	0.147	52.5	53.6	54.8	55.9	57.1	58.3	59.5	60.7	61.9	63.2	64.6

$\omega=0.25$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{s1}}$　　表 3-3(6)

D		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
n_c		0.79	0.74	0.69	0.64	0.60	0.55	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35
φ_1	K_{s1}	ψ_1										
6	0.811	14.4	16.2	18.0	19.9	21.8	23.9	25.9	28.1	30.4	32.8	35.3
8	0.756	16.4	18.1	19.9	21.8	23.7	25.7	27.7	29.9	32.1	34.5	36.9
10	0.704	18.3	20.0	21.8	23.7	25.5	27.5	29.5	31.6	33.8	36.1	38.5
12	0.656	20.2	21.9	23.7	25.5	27.4	29.3	31.3	33.3	35.5	37.7	40.1
14	0.610	22.1	23.8	25.6	27.3	29.2	31.1	33.0	35.0	37.1	39.3	41.6
16	0.568	24.0	25.7	27.4	29.2	31.0	32.8	34.7	36.7	38.8	40.9	43.2
18	0.528	25.9	27.6	29.3	31.0	32.7	34.6	36.4	38.4	40.4	42.5	44.7
20	0.490	27.8	29.4	31.1	32.8	34.5	36.3	38.1	40.0	42.0	44.0	46.2
22	0.455	29.7	31.3	32.9	34.6	36.3	38.0	39.8	41.6	43.6	45.5	47.6
24	0.422	31.6	33.1	34.7	36.3	38.0	39.7	41.4	43.2	45.1	47.0	49.1
26	0.390	33.4	35.0	36.5	38.1	39.7	41.4	43.1	44.8	46.6	48.5	50.5
28	0.361	35.3	36.8	38.3	39.8	41.4	43.0	44.7	46.4	48.2	50.0	51.9
30	0.333	37.1	38.6	40.1	41.6	43.1	44.7	46.3	48.0	49.7	51.4	53.3
32	0.307	39.0	40.4	41.8	43.3	44.8	46.3	47.9	49.5	51.2	52.9	54.7
34	0.283	40.8	42.2	43.6	45.0	46.5	47.9	49.5	51.0	52.6	54.3	56.0
36	0.260	42.6	44.0	45.3	46.7	48.1	49.5	51.0	52.5	54.1	55.7	57.4
38	0.238	44.4	45.7	47.1	48.4	49.8	51.1	52.6	54.0	55.5	57.1	58.7
40	0.217	46.2	47.5	48.8	50.1	51.4	52.7	54.1	55.5	57.0	58.5	60.0
42	0.198	48.0	49.3	50.5	51.7	53.0	54.3	55.6	57.0	58.4	59.8	61.3
44	0.180	49.8	51.0	52.2	53.4	54.6	55.9	57.1	58.4	59.8	61.2	62.6
46	0.163	51.6	52.8	53.9	55.1	56.2	57.4	58.6	59.9	61.2	62.5	63.9
48	0.147	53.4	54.5	55.6	56.7	57.8	59.0	60.1	61.3	62.6	63.8	65.1

$\omega=0.30$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{s1}}$　　表 3-3(7)

D		0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
n_c		0.78	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35
φ_1	K_{s1}	ψ_1										
6	0.811	15.8	17.5	19.3	21.2	23.1	25.1	27.1	29.2	31.5	33.8	36.3
8	0.756	17.7	19.4	21.2	23.0	24.9	26.9	28.9	31.0	33.2	35.5	37.9
10	0.704	19.6	21.3	23.1	24.9	26.7	28.7	30.6	32.7	34.9	37.1	39.5
12	0.656	21.5	23.2	24.9	26.7	28.5	30.4	32.4	34.4	36.5	38.7	41.0
14	0.610	23.4	25.1	26.8	28.5	30.3	32.2	34.1	36.1	38.1	40.3	42.6
16	0.568	25.3	27.0	28.6	30.3	32.1	33.9	35.8	37.7	39.8	41.9	44.1
18	0.528	27.2	28.8	30.4	32.1	33.9	35.6	37.5	39.4	41.3	43.4	45.6
20	0.490	29.1	30.6	32.3	33.9	35.6	37.3	39.1	41.0	42.9	44.9	47.0
22	0.455	30.9	32.5	34.0	35.7	37.3	39.0	40.8	42.6	44.5	46.4	48.5
24	0.422	32.8	34.3	35.8	37.4	39.0	40.7	42.4	44.2	46.0	47.9	49.9
26	0.390	34.6	36.1	37.6	39.1	40.7	42.3	44.0	45.7	47.5	49.4	51.3
28	0.361	36.4	37.9	39.4	40.9	42.4	44.0	45.6	47.3	49.0	50.8	52.7
30	0.333	38.2	39.7	41.1	42.6	44.1	45.6	47.2	48.8	50.5	52.2	54.0
32	0.307	40.1	41.4	42.8	44.3	45.7	47.2	48.7	50.3	51.9	53.6	55.4
34	0.283	41.9	43.2	44.6	45.9	47.4	48.8	50.3	51.8	53.4	55.0	56.7
36	0.260	43.6	45.0	46.3	47.6	49.0	50.4	51.8	53.3	54.8	56.4	58.0
38	0.238	45.4	46.7	48.0	49.3	50.6	52.0	53.3	54.8	56.2	57.8	59.3
40	0.217	47.2	48.4	49.7	50.9	52.2	53.5	54.9	56.2	57.6	59.1	60.6
42	0.198	49.0	50.2	51.4	52.6	53.8	55.1	56.4	57.7	59.0	60.4	61.9
44	0.180	50.7	51.9	53.0	54.2	55.4	56.6	57.8	59.1	60.4	61.8	63.2
46	0.163	52.5	53.6	54.7	55.8	57.0	58.1	59.3	60.5	61.8	63.1	64.4
48	0.147	54.2	55.3	56.4	57.4	58.5	59.6	60.8	61.9	63.1	64.4	65.6

$\omega=0.35$　　$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{a1}}$　　表 3-3(8)

D		0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
n_c		0.77	0.72	0.68	0.63	0.59	0.55	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35
φ_1	K_{a1}	φ'_1										
6	0.811	17.1	18.8	20.5	22.4	24.2	26.2	28.2	30.3	32.5	34.8	37.2
8	0.756	19.0	20.7	22.4	24.2	26.1	28.0	30.0	32.0	34.2	36.5	38.8
10	0.704	20.9	22.6	24.3	26.0	27.9	29.8	31.7	33.7	35.8	38.1	40.4
12	0.656	22.8	24.4	26.1	27.9	29.7	31.5	33.4	35.4	37.5	39.7	41.9
14	0.610	24.7	26.3	28.0	29.7	31.4	33.2	35.1	37.1	39.1	41.2	43.4
16	0.568	26.5	28.1	29.8	31.4	33.2	35.0	36.8	38.7	40.7	42.8	44.9
18	0.528	28.4	30.0	31.6	33.2	34.9	36.6	38.5	40.3	42.3	44.3	46.4
20	0.490	30.2	31.8	33.3	35.0	36.6	38.3	40.1	41.9	43.8	45.8	47.8
22	0.455	32.1	33.6	35.1	36.7	38.3	40.0	41.7	43.5	45.3	47.2	49.2
24	0.422	33.9	35.4	36.9	38.4	40.0	41.6	43.3	45.0	46.8	48.7	50.6
26	0.390	35.7	37.1	38.6	40.1	41.7	43.3	44.9	46.6	48.3	50.1	52.0
28	0.361	37.5	38.9	40.4	41.8	43.3	44.9	46.5	48.1	49.8	51.5	53.4
30	0.333	39.3	40.7	42.1	43.5	45.0	46.5	48.0	49.6	51.2	52.9	54.7
32	0.307	41.1	42.4	43.8	45.2	46.6	48.1	49.6	51.1	52.7	54.3	56.0
34	0.283	42.8	44.2	45.5	46.8	48.2	49.6	51.1	52.6	54.1	55.7	57.4
36	0.260	44.6	45.9	47.2	48.5	49.8	51.2	52.6	54.0	55.5	57.0	58.6
38	0.238	46.4	47.6	48.8	50.1	51.4	52.7	54.1	55.5	56.9	58.4	59.9
40	0.217	48.1	49.3	50.5	51.7	53.0	54.3	55.6	56.9	58.3	59.7	61.2
42	0.198	49.9	51.0	52.2	53.3	54.5	55.8	57.0	58.3	59.6	61.0	62.4
44	0.180	51.6	52.7	53.8	54.9	56.1	57.3	58.5	59.7	61.0	62.3	63.7
46	0.163	53.3	54.4	55.4	56.5	57.6	58.8	59.9	61.1	62.3	63.6	64.9
48	0.147	55.0	56.0	57.1	58.1	59.2	60.3	61.4	62.5	63.7	64.9	66.1

3.4　基坑上下不同土层支护结构内力计算表

根据上节分析，基坑上下不同土层支护结构内力计算可以式(3.3.14)、(3.3.20)(3.3.22)、(3.3.24)、(3.3.25)及3.3.28)的无量纲系数表示，将这些表达式根据不同的 ω、φ_1、φ_2($\delta_1=0$、$\delta_2=0$)及 $\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$制成如表 3-8(1)～3-8(30)的无量纲系数表，使上下不同土层支护结构内力计算变得十分简便。

表 3-8(1)～3-8(30)适用于如图 3-12 所示地质(包含 $\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$)及地面附加荷载情况下的内力计算。

为方便计算，令

$$\text{剪力常数：}A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_e K'_{a1} \tag{3.4.1}$$

$$\text{弯矩常数：}A_m=\frac{1}{6}\gamma H_e^3 K'_{a1} \tag{3.4.2}$$

$$\text{竖向应力：}A_0=\gamma H_e \tag{3.4.3}$$

$$\text{等效深度：}H_e=n_c H \tag{3.4.4}$$

$$\text{等效超载系数：}\omega'=[\omega+(1-n_c)]/n_c \tag{3.4.5}$$

式中 n_c 可根据 c_1(或 δ_1)及 K_{a1}由表 3-3(1)～3-3(8)确定。

当 $c_1\neq0$ 且 $D=2\delta_1\Big/\sqrt{K_{a1}}>\omega$ 时，应将图 3-12(a)转化成图 3—12(b)的计算横式后查表；当 $D\leqslant\omega$ 时，由于 c_1 的影响消除了附加荷载系数 ω 的影响，因此在计算时取图 3-12(a)的 $c_1=0$ 及 $q_0=(\omega-D)\gamma H$ 查表计算即可。

【例 1】某工程开挖深度为 8m，采用悬臂式支护结构，其土层参数及地面超载如图 3-13

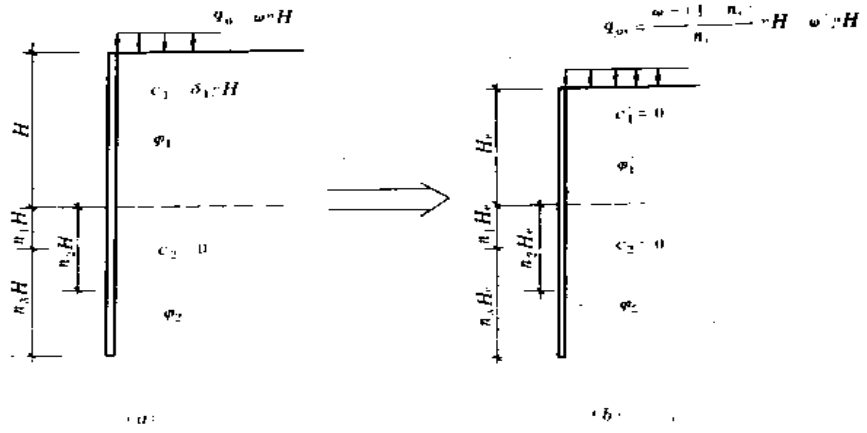


图 3-12

(a)实际计算条件图；(b)c_1～φ_1 等效 φ'_1 后计算图

所示。

【解】1. 计算各查表参数

$\omega=q_0/\gamma H=28/(17.5\times8)=0.2$

$$A_Q=\frac{1}{2}\gamma H^2K_{a1}$$

$$=\frac{1}{2}\times17.5\times8^2\times0.49=274\text{kN/m}$$

$$A_M=\frac{H}{3}\cdot A_Q=\frac{8}{3}\times274=732(\text{kN}\cdot\text{m/m})$$

2. **结构内力计算**

应用表 3-4 进行内力计算，表中系数一栏根据 $\omega=0.2$、$\varphi_1=20°$、$\varphi_2=32°$由表 3-8(5)查得。

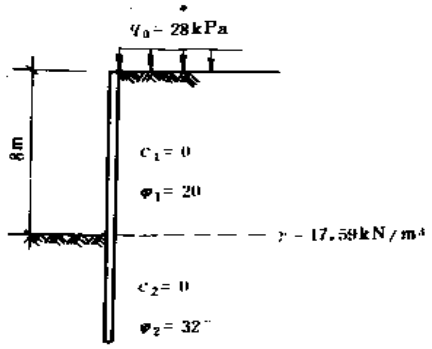


图 3-13

表 3-4

序　号	计算项目	系　数		计算公式	结　果	单　位
1	土压力零点深度	n_1	0.125	n_1H	1.0	m
2	最大剪力	ε_a	−1.494	ε_aA_Q	−409	kN/m
3	最大弯矩深度	n_2	0.624	n_2H	5.0	m
4	最大弯矩	α_a	3.639	α_aA_m	2664	kN·m/m
5	嵌固长度	n_3	1.044	n_3H	8.35	m
6	结构总长度			$(1+n_1+1.2n_3)H$	19.0	m

【例 2】某基坑开挖深度及超载条件与上例相同，但在开挖面以上 8m 范围内，土体内聚力 $c_1=14\text{kPa}$，计算结构内力。

【解】由于上层土内聚力存在，因此需将内聚力 c_1 及 φ_1 化为等效内摩擦角 φ'_1 及计算深度 n_c 后计算。表 3-5 中，$D=0.286>\omega=0.20$，可知，c_1、φ_1 等效后应按图 3-12(b)形式进行计算。计算简图如图 3-14 所示。

1. 查表参数计算(表 3-5)

表 3-5

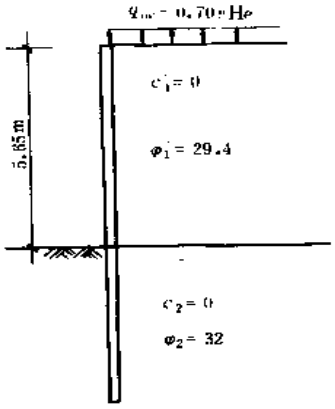


图 3-14

序号	计算项目	符号	计算公式	结果
1	土层平均重度	γ	$(\gamma_1+\gamma_2)/2$	17.5
2	地面超载系数	ω	$q_0/\gamma H$	0.20
3	上层土内摩擦角	φ_1		20°
4	上层土内聚力系数	δ_1	$c_1/\gamma H$	0.10
5	下层土内摩擦角	φ_2		32°
6	下层土内聚力系数	δ_2	$c_2/\gamma H$	0
7	基坑面上土压力零点高度系数	D	$2\delta_1/\sqrt{K_{a1}}$	0.286
8	上层土等代内摩擦角	φ_1'	根据 ω,φ_1 及 D	29.40
9	等代计算开挖深度系数	n_c	查表 3-3(5)确定	0.707
10	等代开挖深度	H_e	n_cH	5.65
11	等代超载系数	ω'	$(\omega+1-n_c)/n_c$	0.70
12	竖向应力	A_0	γH_e	98.9
13	剪力常数	A_Q	$(\gamma H_e^2K'_{a1})/2$	95.3
14	弯矩常数	A_M	$(\gamma H_e^3K'_{a1})/6$	179.4

2. 结构内力计算表(表 3-6)

表 3-6

序　号	计算项目	系　数		计算公式	结　果	单　位
1	土压力零点深度	n_1	0.177	n_1H_e	1.00	m
2	最大剪力	ε_a	−2.678	ε_aA_Q	−255	kN/m
3	最大弯矩深度	n_2	0.728	n_2H_e	4.11	m
4	最大弯矩	α_a	7.42	α_aA_M	1331	kN·m/m
5	嵌固长度	n_3	1.16	n_3H_e	6.55	m
6	结构总长度			$H+(n_1+1.2n_3)H_e$	16.85	m

【例 3】 基坑开挖深度与地面超载条件与图 3-13 相同,但在开挖面以上 8m 范围内土体内聚力 $c_1=5$kPa,计算结构内力。

【解】

$$\delta_1=c_1/\gamma H=5/(17.5\times8)=0.036$$

$$D=2\times\delta_1/\sqrt{K_{a1}}=2\times0.036/\sqrt{0.49}=0.103$$

由于 $\delta=0.103<\omega=0.2$,故查表计算时可取

$$\omega'=\omega-\delta=0.20-0.103\approx0.1$$

$$n_c=1$$

计算简图如图 3-15 所示,查表 3-8(3),应用表 3-7(1)进行计算:

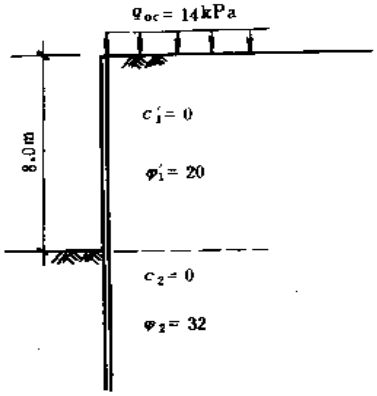


图 3-15

表 3-7(1)

序号	计算项目	系数		计算公式	结果	单位
1	土压力零点深度	n_1	0.115	n_1H	0.92	m
2	最大剪力	ε_u	−1.279	$\varepsilon_u A_Q$	−350	kN/m
3	最大弯距深度	n_2	0.576	n_2H	4.61	m
4	最大弯距	α_u	2.911	$\alpha_u A_M$	2131	kN·m/m
5	嵌固长度	n_3	0.971	n_3H	7.77	m
6	结构总长度	$(1+n_1+1.2n_3)H$			18.2	m

【例 4】基坑开挖深度与地面超载条件与图 3-13 相同，但基坑上下土层的土体内聚力 $c_1=c_2=11$kPa，试计算结构内力。

【解】1. 查表参数计算

$\delta_1=\delta_2=c_2/\gamma H=11/(17.5\times8)=0.079$

当 $\omega=0.2$、$\varphi_2=30°$时，查表 3-2 得 $\delta_{2c}=0.079$，故本例所给出的 c_2 恰好为临界内聚力。

2. 结构的内力计算

根据 $\omega=0.2$、$\varphi_1=20°$、$\varphi_2=32°$及 $\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$查表 3-8(20)，得各系数计算内力如表 3-7(2)所示。

表 3-7(2)

序　号	计算项目	系　数		计算公式	结　果	单　位
1	土压力零点深度	n_1	0.000	n_1H	0.000	m
2	最大剪力	ε_u	−0.954	$\varepsilon_u A_Q$	−261	kN/m
3	最大弯矩深度	n_2	0.398	n_2H	3.18	m
4	最大弯矩	α_u	1.692	$\alpha_u A_M$	1239	kN·m/m
5	嵌固长度	n_3	0.818	n_3H	6.54	m
6	结构总长度	$(1+n_1+1.2n_3)H$			15.85	m

$\omega=0.00$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(1)

K_{a1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.331	0.983	0.754	0.594	0.476	0.386	0.316	0.197	0.125	0.079	0.050
$-\varepsilon_u$	2.331	1.983	1.754	1.594	1.476	1.386	1.316	1.197	1.125	1.079	1.050
n_2	3.093	2.379	1.905	1.567	1.314	1.118	0.962	0.683	0.500	0.372	0.278
α_u	16.75	11.42	8.44	6.59	5.35	4.49	3.85	2.83	2.25	1.88	1.63
n_3	3.542	2.816	2.325	1.973	1.708	1.502	1.330	1.021	0.805	0.642	0.518
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.983	0.754	0.594	0.476	0.386	0.316	0.261	0.164	0.104	0.066	0.041
$-\varepsilon_u$	1.916	1.703	1.553	1.443	1.359	1.294	1.242	1.152	1.096	1.060	1.037
n_2	2.405	1.929	1.589	1.335	1.138	0.980	0.852	0.616	0.456	0.342	0.257
α_u	11.20	8.32	6.53	5.33	4.48	3.85	3.38	2.58	2.10	1.79	1.57
n_3	2.862	2.374	2.015	1.749	1.536	1.364	1.221	0.952	0.757	0.611	0.496
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.754	0.594	0.476	0.386	0.316	0.261	0.216	0.137	0.087	0.055	0.034
$-\varepsilon_u$	1.655	1.515	1.412	1.334	1.273	1.225	1.186	1.117	1.074	1.046	1.028
n_2	1.954	1.613	1.357	1.158	1.000	0.870	0.762	0.560	0.418	0.315	0.238
α_u	8.220	6.479	5.308	4.476	3.862	3.393	3.025	2.387	1.986	1.714	1.522
n_3	2.419	2.064	1.791	1.577	1.403	1.254	1.131	0.893	0.717	0.581	0.474
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.594	0.476	0.386	0.316	0.261	0.216	0.180	0.114	0.072	0.045	0.027
$-\varepsilon_u$	1.480	1.384	1.311	1.254	1.209	1.173	1.143	1.090	1.056	1.035	1.021
n_2	1.637	1.380	1.179	1.019	0.889	0.780	0.688	0.511	0.385	0.292	0.220
α_u	6.438	5.294	4.479	3.873	3.410	3.046	2.753	2.229	1.886	1.649	1.477
n_3	2.108	1.834	1.613	1.438	1.293	1.169	1.058	0.842	0.683	0.552	0.448
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.476	0.386	0.316	0.261	0.216	0.180	0.150	0.095	0.060	0.037	0.025
$-\varepsilon_u$	1.358	1.290	1.237	1.195	1.161	1.133	1.110	1.069	1.043	1.026	1.018
n_2	1.403	1.201	1.040	0.908	0.798	0.705	0.625	0.469	0.356	0.271	0.212
α_u	5.286	4.485	3.888	3.430	3.068	2.777	2.538	2.099	1.803	1.592	1.457
n_3	1.877	1.655	1.478	1.327	1.201	1.090	0.995	0.799	0.646	0.528	0.438
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.386	0.316	0.261	0.216	0.180	0.150	0.125	0.079	0.050	0.030	0.022
$-\varepsilon_u$	1.270	1.220	1.181	1.149	1.124	1.103	1.085	1.053	1.032	1.019	1.015
n_2	1.224	1.061	0.928	0.816	0.722	0.641	0.572	0.433	0.330	0.251	0.205
α_u	4.495	3.906	3.452	3.093	2.803	2.564	2.365	1.991	1.731	1.543	1.437
n_3	1.698	1.515	1.362	1.235	1.122	1.022	0.937	0.759	0.615	0.501	0.427
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.316	0.261	0.216	0.180	0.150	0.125	0.104	0.066	0.041	0.025	0.020
$-\varepsilon_u$	1.205	1.169	1.139	1.115	1.095	1.079	1.065	1.040	1.024	1.014	1.013
n_2	1.083	0.948	0.835	0.740	0.658	0.587	0.525	0.400	0.306	0.234	0.197
α_u	3.928	3.477	3.119	2.830	2.591	2.392	2.223	1.899	1.668	1.499	1.419
n_3	1.557	1.402	1.269	1.155	1.053	0.967	0.886	0.719	0.590	0.479	0.417
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.261	0.216	0.180	0.150	0.125	0.104	0.087	0.055	0.034	0.020	0.018
$-\varepsilon_u$	1.157	1.130	1.107	1.089	1.073	1.061	1.050	1.031	1.018	1.010	1.011
n_2	0.969	0.855	0.758	0.675	0.603	0.540	0.485	0.371	0.285	0.217	0.190
α_u	3.504	3.148	2.859	2.620	2.420	2.250	2.105	1.820	1.614	1.459	1.402
n_3	1.438	1.304	1.188	1.085	0.993	0.916	0.843	0.687	0.561	0.458	0.407

$\omega=0.05$　　$\delta_1=\delta_2=0$

表 3-8(2)

K_{z1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.398	1.032	0.792	0.624	0.500	0.406	0.332	0.207	0.131	0.083	0.052
$-\varepsilon_u$	2.568	2.184	1.932	1.755	1.625	1.526	1.449	1.317	1.238	1.187	1.155
n_2	3.246	2.498	1.999	1.644	1.379	1.173	1.009	0.717	0.525	0.390	0.291
α_u	19.36	13.19	9.75	7.61	6.18	5.18	4.44	3.27	2.59	2.17	1.88
n_3	3.714	2.955	2.442	2.071	1.794	1.573	1.397	1.070	0.843	0.677	0.544
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.032	0.792	0.624	0.500	0.406	0.332	0.274	0.172	0.109	0.069	0.043
$-\varepsilon_u$	2.110	1.875	1.709	1.588	1.496	1.424	1.367	1.267	1.206	1.167	1.141
n_2	2.524	2.024	1.668	1.401	1.194	1.029	0.894	0.647	0.479	0.359	0.269
α_u	12.94	9.61	7.54	6.15	5.17	4.45	3.90	2.98	2.43	2.06	1.81
n_3	3.007	2.487	2.114	1.836	1.613	1.432	1.280	0.999	0.794	0.639	0.516
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.792	0.624	0.500	0.406	0.332	0.274	0.227	0.144	0.091	0.057	0.035
$-\varepsilon_u$	1.822	1.668	1.554	1.468	1.401	1.348	1.305	1.229	1.181	1.151	1.131
n_2	2.051	1.692	1.424	1.215	1.049	0.913	0.800	0.587	0.439	0.331	0.249
α_u	9.493	7.480	6.126	5.165	4.455	3.913	3.488	2.752	2.288	1.974	1.752
n_3	2.538	2.164	1.879	1.655	1.472	1.319	1.188	0.939	0.753	0.609	0.494
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.624	0.500	0.406	0.332	0.274	0.227	0.189	0.120	0.076	0.047	0.029
$-\varepsilon_u$	1.629	1.523	1.443	1.380	1.331	1.291	1.258	1.199	1.162	1.138	1.123
n_2	1.718	1.448	1.238	1.070	0.932	0.818	0.722	0.537	0.404	0.306	0.231
α_u	7.432	6.110	5.168	4.468	3.933	3.512	3.174	2.569	2.173	1.899	1.700
n_3	2.209	1.923	1.692	1.507	1.353	1.221	1.108	0.887	0.713	0.579	0.472
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.500	0.406	0.332	0.274	0.227	0.189	0.157	0.100	0.063	0.039	0.026
$-\varepsilon_u$	1.494	1.419	1.361	1.314	1.277	1.247	1.222	1.176	1.147	1.129	1.119
n_2	1.472	1.261	1.091	0.953	0.837	0.739	0.656	0.493	0.373	0.284	0.223
α_u	6.100	5.175	4.485	3.956	3.538	3.202	2.926	2.419	2.076	1.833	1.677
n_3	1.968	1.735	1.549	1.393	1.260	1.141	1.044	0.838	0.681	0.555	0.462
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.406	0.332	0.274	0.227	0.189	0.157	0.131	0.083	0.052	0.032	0.023
$-\varepsilon_u$	1.397	1.343	1.300	1.265	1.236	1.213	1.194	1.158	1.136	1.121	1.117
n_2	1.285	1.113	0.973	0.856	0.758	0.673	0.600	0.454	0.346	0.264	0.215
α_u	5.187	4.506	3.981	3.566	3.231	2.956	2.726	2.293	1.993	1.776	1.655
n_3	1.784	1.591	1.429	1.294	1.174	1.076	0.983	0.796	0.649	0.527	0.451
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.332	0.274	0.227	0.189	0.157	0.131	0.109	0.069	0.043	0.026	0.021
$-\varepsilon_u$	1.326	1.286	1.253	1.227	1.205	1.187	1.172	1.144	1.127	1.116	1.114
n_2	1.137	0.995	0.876	0.776	0.690	0.616	0.551	0.420	0.321	0.245	0.207
α_u	4.531	4.010	3.597	3.262	2.987	2.757	2.562	2.187	1.921	1.725	1.634
n_3	1.634	1.471	1.329	1.212	1.103	1.015	0.932	0.756	0.618	0.504	0.441
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.274	0.227	0.189	0.157	0.131	0.109	0.091	0.057	0.035	0.021	0.019
$-\varepsilon_u$	1.273	1.243	1.218	1.198	1.181	1.167	1.155	1.134	1.120	1.111	1.112
n_2	1.017	0.897	0.795	0.708	0.633	0.567	0.508	0.390	0.299	0.228	0.199
α_u	4.041	3.630	3.296	3.020	2.789	2.593	2.425	2.096	1.858	1.680	1.614
n_3	1.508	1.370	1.247	1.136	1.041	0.957	0.882	0.717	0.589	0.477	0.431

$\omega=0.10$　　$\delta_1=\delta_2=0$

表 3-8(3)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.464	1.081	0.830	0.653	0.523	0.425	0.348	0.217	0.137	0.087	0.055
$-\varepsilon_u$	2.811	2.390	2.113	1.919	1.776	1.667	1.583	1.439	1.351	1.296	1.260
n_2	3.398	2.614	2.092	1.721	1.443	1.227	1.056	0.750	0.548	0.408	0.305
α_u	22.16	15.09	11.14	8.69	7.05	5.90	5.06	3.72	2.95	2.46	2.13
n_3	3.889	3.088	2.553	2.167	1.874	1.643	1.458	1.118	0.881	0.705	0.570
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.081	0.830	0.653	0.523	0.425	0.348	0.287	0.181	0.115	0.072	0.045
$-\varepsilon_u$	2.308	2.050	1.869	1.736	1.634	1.556	1.493	1.384	1.316	1.273	1.245
n_2	2.642	2.119	1.745	1.466	1.249	1.076	0.935	0.676	0.501	0.375	0.281
α_u	14.80	10.98	8.61	7.02	5.89	5.07	4.44	3.39	2.76	2.34	2.05
n_3	3.141	2.604	2.212	1.917	1.684	1.498	1.338	1.041	0.831	0.667	0.541
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.830	0.653	0.523	0.425	0.348	0.287	0.238	0.151	0.096	0.060	0.037
$-\varepsilon_u$	1.992	1.823	1.699	1.604	1.531	1.472	1.425	1.342	1.289	1.255	1.234
n_2	2.146	1.771	1.490	1.271	1.097	0.955	0.837	0.614	0.459	0.346	0.260
α_u	10.85	8.54	6.99	5.89	5.08	4.46	3.97	3.13	2.60	2.24	1.99
n_3	2.656	2.262	1.961	1.726	1.534	1.378	1.244	0.978	0.783	0.636	0.514
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.653	0.523	0.425	0.348	0.287	0.238	0.198	0.126	0.079	0.050	0.030
$-\varepsilon_u$	1.780	1.664	1.576	1.508	1.453	1.409	1.373	1.309	1.268	1.242	1.225
n_2	1.797	1.515	1.295	1.119	0.975	0.856	0.755	0.561	0.423	0.320	0.241
α_u	8.484	6.970	5.891	5.091	4.478	3.997	3.611	2.919	2.467	2.154	1.928
n_3	2.309	2.011	1.770	1.576	1.413	1.278	1.157	0.925	0.748	0.605	0.491
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.523	0.425	0.348	0.287	0.238	0.198	0.165	0.105	0.066	0.041	0.027
$-\varepsilon_u$	1.633	1.550	1.486	1.435	1.394	1.361	1.334	1.284	1.252	1.231	1.221
n_2	1.540	1.319	1.141	0.996	0.875	0.773	0.686	0.515	0.390	0.297	0.233
α_u	6.958	5.899	5.110	4.504	4.027	3.642	3.327	2.747	2.356	2.079	1.901
n_3	2.057	1.814	1.618	1.454	1.312	1.195	1.086	0.875	0.709	0.576	0.480
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.425	0.348	0.287	0.238	0.198	0.165	0.137	0.087	0.055	0.033	0.024
$-\varepsilon_u$	1.526	1.467	1.419	1.381	1.350	1.324	1.303	1.264	1.239	1.223	1.218
n_2	1.344	1.165	1.018	0.896	0.792	0.704	0.627	0.475	0.362	0.275	0.224
α_u	5.912	5.134	4.533	4.059	3.676	3.361	3.099	2.604	2.262	2.014	1.875
n_3	1.864	1.661	1.496	1.353	1.229	1.119	1.024	0.827	0.677	0.552	0.470
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.348	0.287	0.238	0.198	0.165	0.137	0.115	0.072	0.045	0.027	0.022
$-\varepsilon_u$	1.448	1.404	1.368	1.339	1.315	1.296	1.279	1.249	1.229	1.217	1.216
n_2	1.189	1.040	0.916	0.812	0.722	0.644	0.576	0.439	0.336	0.256	0.216
α_u	5.161	4.566	4.093	3.711	3.396	3.133	2.911	2.483	2.180	1.956	1.852
n_3	1.706	1.533	1.388	1.264	1.152	1.056	0.971	0.786	0.646	0.524	0.459
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.287	0.238	0.198	0.165	0.137	0.115	0.096	0.060	0.037	0.022	0.020
$-\varepsilon_u$	1.390	1.357	1.330	1.307	1.289	1.273	1.261	1.237	1.222	1.212	1.213
n_2	1.063	0.938	0.832	0.740	0.661	0.592	0.531	0.407	0.312	0.238	0.208
α_u	4.601	4.131	3.749	3.434	3.170	2.946	2.754	2.379	2.108	1.904	1.829
n_3	1.576	1.430	1.299	1.191	1.089	0.998	0.921	0.752	0.615	0.501	0.449

$\omega=0.15$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(4)

$\bar{K}_{s1}$	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.531	1.131	0.868	0.683	0.547	0.444	0.364	0.227	0.144	0.091	0.057
$-\varepsilon_u$	3.060	2.600	2.298	2.085	1.929	1.811	1.719	1.561	1.465	1.405	1.366
n_2	3.549	2.729	2.184	1.796	1.505	1.281	1.101	0.782	0.572	0.425	0.317
α_u	25.16	17.11	12.61	9.83	7.97	6.67	5.71	4.18	3.31	2.76	2.39
n_3	4.053	3.219	2.662	2.258	1.953	1.711	1.517	1.160	0.913	0.734	0.590
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.131	0.868	0.683	0.547	0.444	0.364	0.300	0.189	0.120	0.076	0.047
$-\varepsilon_u$	2.511	2.229	2.031	1.885	1.775	1.689	1.620	1.501	1.427	1.380	1.349
n_2	2.758	2.211	1.821	1.529	1.303	1.122	0.975	0.705	0.522	0.391	0.293
α_u	16.77	12.44	9.74	7.93	6.65	5.71	5.00	3.81	3.09	2.63	2.30
n_3	3.278	2.714	2.303	1.997	1.754	1.559	1.395	1.086	0.862	0.695	0.561
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.868	0.683	0.547	0.444	0.364	0.300	0.249	0.157	0.100	0.063	0.039
$-\varepsilon_u$	2.166	1.981	1.845	1.742	1.661	1.598	1.546	1.455	1.397	1.361	1.337
n_2	2.240	1.848	1.554	1.326	1.144	0.996	0.872	0.640	0.478	0.360	0.271
α_u	12.28	9.66	7.90	6.65	5.73	5.02	4.47	3.52	2.92	2.51	2.23
n_3	2.767	2.355	2.042	1.797	1.600	1.431	1.294	1.018	0.818	0.662	0.538
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.683	0.547	0.444	0.364	0.300	0.249	0.207	0.131	0.083	0.052	0.031
$-\varepsilon_u$	1.934	1.808	1.711	1.636	1.577	1.529	1.489	1.419	1.374	1.346	1.327
n_2	1.875	1.580	1.350	1.167	1.017	0.892	0.787	0.584	0.440	0.333	0.251
α_u	9.594	7.874	6.649	5.741	5.046	4.501	4.063	3.280	2.768	2.414	2.158
n_3	2.408	2.093	1.841	1.643	1.472	1.328	1.205	0.958	0.777	0.631	0.510
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.547	0.444	0.364	0.300	0.249	0.207	0.172	0.109	0.069	0.043	0.028
$-\varepsilon_u$	1.773	1.683	1.613	1.557	1.512	1.476	1.446	1.391	1.357	1.334	1.323
n_2	1.607	1.375	1.190	1.039	0.913	0.806	0.715	0.536	0.407	0.309	0.242
α_u	7.859	6.657	5.762	5.075	4.534	4.098	3.741	3.085	2.643	2.330	2.128
n_3	2.145	1.891	1.686	1.513	1.369	1.239	1.133	0.907	0.738	0.601	0.499
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.444	0.364	0.300	0.249	0.207	0.172	0.144	0.091	0.057	0.035	0.026
$-\varepsilon_u$	1.657	1.591	1.539	1.498	1.464	1.436	1.412	1.370	1.343	1.325	1.320
n_2	1.401	1.214	1.061	0.934	0.826	0.733	0.653	0.494	0.377	0.287	0.233
α_u	6.671	5.788	5.108	4.570	4.136	3.779	3.482	2.923	2.536	2.256	2.099
n_3	1.937	1.730	1.556	1.405	1.279	1.166	1.065	0.863	0.700	0.572	0.488
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.364	0.300	0.249	0.207	0.172	0.144	0.120	0.076	0.047	0.028	0.023
$-\varepsilon_u$	1.572	1.523	1.484	1.452	1.426	1.404	1.386	1.353	1.332	1.319	1.317
n_2	1.239	1.085	0.955	0.846	0.752	0.671	0.600	0.457	0.350	0.267	0.225
α_u	5.819	5.144	4.609	4.176	3.819	3.522	3.270	2.786	2.443	2.190	2.072
n_3	1.775	1.599	1.447	1.314	1.200	1.097	1.010	0.821	0.668	0.543	0.477
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.300	0.249	0.207	0.172	0.144	0.120	0.100	0.063	0.039	0.023	0.021
$-\varepsilon_u$	1.508	1.471	1.442	1.417	1.397	1.380	1.366	1.340	1.324	1.314	1.314
n_2	1.109	0.978	0.867	0.772	0.689	0.617	0.554	0.424	0.325	0.248	0.217
α_u	5.184	4.651	4.218	3.861	3.562	3.309	3.093	2.668	2.361	2.132	2.047
n_3	1.644	1.489	1.355	1.234	1.130	1.042	0.959	0.781	0.637	0.520	0.466

$\omega=0.20$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(5)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.597	1.180	0.905	0.713	0.571	0.464	0.380	0.237	0.150	0.095	0.060
$-\varepsilon_u$	3.317	2.816	2.486	2.255	2.085	1.956	1.856	1.684	1.580	1.514	1.471
n_2	3.699	2.843	2.275	1.870	1.567	1.333	1.146	0.813	0.594	0.442	0.330
α_u	28.37	19.26	14.18	11.03	8.94	7.46	6.39	4.67	3.69	3.07	2.65
n_3	4.221	3.349	2.765	2.347	2.026	1.779	1.576	1.206	0.949	0.756	0.610
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.180	0.905	0.713	0.571	0.464	0.380	0.313	0.197	0.125	0.079	0.049
$-\varepsilon_u$	2.719	2.412	2.196	2.038	1.917	1.823	1.749	1.619	1.538	1.487	1.454
n_2	2.874	2.303	1.896	1.592	1.356	1.168	1.015	0.733	0.542	0.406	0.304
α_u	18.88	13.98	10.93	8.89	7.45	6.39	5.59	4.25	3.44	2.92	2.55
n_3	3.409	2.823	2.399	2.076	1.823	1.618	1.446	1.126	0.892	0.722	0.580
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.905	0.713	0.571	0.464	0.380	0.313	0.260	0.164	0.104	0.066	0.040
$-\varepsilon_u$	2.343	2.141	1.993	1.881	1.793	1.724	1.668	1.568	1.506	1.466	1.440
n_2	2.332	1.924	1.618	1.380	1.190	1.036	0.907	0.665	0.497	0.374	0.282
α_u	13.80	10.84	8.85	7.44	6.40	5.61	4.99	3.92	3.24	2.79	2.47
n_3	2.877	2.446	2.122	1.867	1.661	1.488	1.343	1.056	0.848	0.684	0.556
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.713	0.571	0.464	0.380	0.313	0.260	0.216	0.137	0.087	0.054	0.033
$-\varepsilon_u$	2.091	1.953	1.848	1.766	1.701	1.649	1.606	1.530	1.481	1.450	1.430
n_2	1.952	1.644	1.405	1.214	1.058	0.928	0.818	0.608	0.457	0.346	0.261
α_u	10.76	8.82	7.44	6.42	5.64	5.02	4.53	3.65	3.08	2.68	2.39
n_3	2.505	2.173	1.917	1.704	1.529	1.378	1.252	0.996	0.806	0.652	0.528
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.571	0.464	0.380	0.313	0.260	0.216	0.180	0.114	0.072	0.044	0.030
$-\varepsilon_u$	1.915	1.817	1.741	1.680	1.631	1.592	1.559	1.500	1.462	1.437	1.425
n_2	1.672	1.431	1.238	1.080	0.949	0.838	0.743	0.557	0.422	0.321	0.252
α_u	8.804	7.450	6.442	5.669	5.060	4.570	4.169	3.432	2.936	2.584	2.359
n_3	2.226	1.963	1.748	1.572	1.419	1.287	1.173	0.943	0.766	0.621	0.517
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.464	0.380	0.313	0.260	0.216	0.180	0.150	0.095	0.060	0.036	0.027
$-\varepsilon_u$	1.789	1.717	1.661	1.615	1.578	1.548	1.522	1.476	1.447	1.428	1.422
n_2	1.458	1.263	1.104	0.971	0.858	0.762	0.679	0.514	0.391	0.298	0.242
α_u	7.464	6.470	5.704	5.099	4.611	4.211	3.878	3.250	2.815	2.502	2.327
n_3	2.014	1.793	1.615	1.456	1.328	1.207	1.104	0.894	0.727	0.592	0.506
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.380	0.313	0.260	0.216	0.180	0.150	0.125	0.079	0.049	0.030	0.024
$-\varepsilon_u$	1.696	1.643	1.600	1.566	1.537	1.514	1.494	1.458	1.435	1.420	1.418
n_2	1.289	1.128	0.993	0.879	0.782	0.697	0.624	0.475	0.363	0.277	0.234
α_u	6.504	5.744	5.143	4.656	4.256	3.921	3.639	3.096	2.711	2.428	2.296
n_3	1.844	1.660	1.499	1.364	1.247	1.137	1.044	0.851	0.694	0.562	0.490
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.313	0.260	0.216	0.180	0.150	0.125	0.104	0.066	0.040	0.024	0.021
$-\varepsilon_u$	1.626	1.587	1.554	1.528	1.506	1.487	1.472	1.444	1.426	1.415	1.416
n_2	1.153	1.017	0.901	0.802	0.716	0.641	0.575	0.440	0.338	0.258	0.225
α_u	5.788	5.189	4.703	4.302	3.967	3.683	3.439	2.964	2.620	2.363	2.268
n_3	1.705	1.542	1.405	1.282	1.176	1.076	0.991	0.810	0.663	0.539	0.479

$\omega=0.25$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(6)

K_{a1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.664	1.229	0.943	0.742	0.595	0.483	0.396	0.247	0.156	0.099	0.062
$-\varepsilon_a$	3.580	3.036	2.679	2.428	2.244	2.104	1.994	1.808	1.695	1.624	1.578
n_2	3.847	2.957	2.365	1.943	1.628	1.384	1.190	0.844	0.617	0.458	0.342
α_a	31.79	21.55	15.83	12.30	9.95	8.30	7.09	5.17	4.07	3.39	2.92
n_3	4.383	3.478	2.872	2.431	2.103	1.841	1.629	1.247	0.980	0.784	0.630
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.229	0.943	0.742	0.595	0.483	0.396	0.326	0.205	0.130	0.082	0.051
$-\varepsilon_a$	2.931	2.598	2.364	2.192	2.061	1.959	1.878	1.737	1.650	1.594	1.558
n_2	2.988	2.394	1.970	1.654	1.408	1.213	1.053	0.760	0.562	0.421	0.316
α_a	21.11	15.60	12.18	9.89	8.28	7.09	6.20	4.70	3.80	3.21	2.81
n_3	3.539	2.926	2.483	2.149	1.885	1.677	1.497	1.165	0.927	0.743	0.599
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.943	0.742	0.595	0.483	0.396	0.326	0.270	0.171	0.109	0.068	0.042
$-\varepsilon_a$	2.523	2.304	2.144	2.022	1.927	1.852	1.791	1.683	1.615	1.572	1.543
n_2	2.424	1.999	1.680	1.433	1.236	1.075	0.942	0.690	0.515	0.388	0.292
α_a	15.40	12.08	9.85	8.27	7.11	6.22	5.53	4.33	3.58	3.07	2.71
n_3	2.986	2.536	2.200	1.935	1.720	1.539	1.386	1.094	0.877	0.710	0.575*
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.742	0.595	0.483	0.396	0.326	0.270	0.225	0.143	0.090	0.056	0.034
$-\varepsilon_a$	2.250	2.100	1.986	1.897	1.827	1.770	1.724	1.641	1.588	1.554	1.532
n_2	2.028	1.708	1.459	1.260	1.098	0.963	0.849	0.630	0.474	0.359	0.271
α_a	11.99	9.81	8.27	7.12	6.25	5.56	5.01	4.03	3.39	2.95	2.63
n_3	2.596	2.253	1.981	1.765	1.581	1.427	1.294	1.027	0.829	0.672	0.546
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.595	0.483	0.396	0.326	0.270	0.225	0.187	0.119	0.075	0.046	0.031
$-\varepsilon_a$	2.059	1.952	1.870	1.804	1.751	1.708	1.672	1.608	1.567	1.540	1.528
n_2	1.737	1.486	1.285	1.121	0.985	0.869	0.771	0.578	0.438	0.332	0.261
α_a	9.793	8.276	7.149	6.284	5.604	5.057	4.609	3.787	3.235	2.844	2.593
n_3	2.307	2.033	1.810	1.625	1.469	1.334	1.213	0.974	0.788	0.641	0.535
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.483	0.396	0.326	0.270	0.225	0.187	0.156	0.099	0.062	0.038	0.028
$-\varepsilon_a$	1.922	1.844	1.783	1.734	1.693	1.660	1.633	1.583	1.551	1.530	1.523
n_2	1.514	1.311	1.145	1.007	0.890	0.791	0.704	0.533	0.405	0.309	0.251
α_a	8.292	7.179	6.323	5.648	5.103	4.656	4.284	3.584	3.101	2.751	2.557
n_3	2.086	1.861	1.669	1.512	1.371	1.248	1.143	0.923	0.753	0.611	0.518
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.396	0.326	0.270	0.225	0.187	0.156	0.130	0.082	0.051	0.031	0.025
$-\varepsilon_a$	1.821	1.764	1.717	1.680	1.649	1.623	1.602	1.563	1.538	1.522	1.520
n_2	1.338	1.170	1.030	0.912	0.811	0.723	0.647	0.492	0.376	0.287	0.242
α_a	7.216	6.367	5.695	5.152	4.705	4.332	4.017	3.412	2.984	2.670	2.523
n_3	1.907	1.714	1.550	1.412	1.288	1.177	1.081	0.880	0.715	0.581	0.507
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.326	0.270	0.225	0.187	0.156	0.130	0.109	0.068	0.042	0.025	0.022
$-\varepsilon_a$	1.746	1.702	1.667	1.639	1.615	1.595	1.578	1.548	1.528	1.516	1.517
n_2	1.196	1.055	0.935	0.832	0.743	0.665	0.596	0.456	0.350	0.267	0.233
α_a	6.415	5.746	5.204	4.757	4.382	4.066	3.795	3.265	2.883	2.597	2.491
n_3	1.765	1.599	1.455	1.324	1.216	1.114	1.023	0.833	0.683	0.557	0.496

$\omega=0.30$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(7)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.730	1.278	0.981	0.772	0.619	0.502	0.411	0.256	0.162	0.103	0.065
$-\varepsilon_u$	3.850	3.261	2.875	2.604	2.404	2.253	2.135	1.933	1.811	1.734	1.684
n_2	3.994	3.069	2.453	2.016	1.688	1.435	1.233	0.874	0.638	0.474	0.354
α_u	35.42	23.96	17.58	13.63	11.01	9.17	7.82	5.69	4.47	3.71	3.19
n_3	4.544	3.606	2.973	2.518	2.175	1.903	1.687	1.287	1.011	0.811	0.649
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.278	0.981	0.772	0.619	0.502	0.411	0.339	0.213	0.136	0.086	0.053
$-\varepsilon_u$	3.148	2.787	2.534	2.348	2.207	2.097	2.009	1.857	1.762	1.702	1.663
n_2	3.101	2.483	2.044	1.715	1.460	1.257	1.091	0.787	0.582	0.435	0.326
α_u	23.47	17.31	13.49	10.94	9.15	7.83	6.83	5.17	4.17	3.52	3.07
n_3	3.668	3.028	2.572	2.226	1.953	1.730	1.547	1.199	0.956	0.770	0.618
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.981	0.772	0.619	0.502	0.411	0.339	0.281	0.178	0.113	0.071	0.044
$-\varepsilon_u$	2.706	2.470	2.296	2.165	2.062	1.980	1.914	1.798	1.725	1.677	1.647
n_2	2.515	2.073	1.742	1.485	1.281	1.114	0.975	0.714	0.533	0.401	0.302
α_u	17.08	13.38	10.89	9.13	7.84	6.85	6.08	4.75	3.92	3.36	2.96
n_3	3.089	2.626	2.278	1.998	1.774	1.589	1.434	1.126	0.905	0.730	0.588
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.772	0.619	0.502	0.411	0.339	0.281	0.234	0.148	0.094	0.059	0.036
$-\varepsilon_u$	2.411	2.249	2.125	2.030	1.953	1.892	1.842	1.752	1.695	1.658	1.635
n_2	2.103	1.771	1.512	1.306	1.137	0.997	0.879	0.652	0.491	0.371	0.280
α_u	13.28	10.85	9.13	7.86	6.89	6.12	5.51	4.42	3.71	3.22	2.87
n_3	2.686	2.332	2.050	1.824	1.633	1.476	1.335	1.064	0.857	0.692	0.564
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.619	0.502	0.411	0.339	0.281	0.234	0.195	0.124	0.078	0.048	0.032
$-\varepsilon_u$	2.204	2.089	2.000	1.929	1.872	1.825	1.787	1.717	1.672	1.644	1.630
n_2	1.800	1.540	1.331	1.161	1.020	0.900	0.798	0.598	0.453	0.344	0.269
α_u	10.83	9.14	7.88	6.92	6.17	5.56	5.06	4.15	3.54	3.11	2.83
n_3	2.387	2.103	1.870	1.677	1.518	1.376	1.253	1.004	0.815	0.661	0.547
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.502	0.411	0.339	0.281	0.234	0.195	0.162	0.103	0.065	0.039	0.029
$-\varepsilon_u$	2.056	1.972	1.906	1.853	1.809	1.773	1.744	1.689	1.655	1.632	1.625
n_2	1.568	1.358	1.186	1.043	0.922	0.818	0.729	0.551	0.419	0.319	0.260
α_u	9.153	7.916	6.965	6.214	5.609	5.114	4.701	3.926	3.391	3.005	2.790
n_3	2.156	1.922	1.727	1.557	1.418	1.288	1.181	0.953	0.775	0.630	0.536
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.411	0.339	0.281	0.234	0.195	0.162	0.136	0.086	0.053	0.032	0.026
$-\varepsilon_u$	1.947	1.885	1.835	1.794	1.761	1.733	1.710	1.668	1.641	1.624	1.622
n_2	1.386	1.212	1.067	0.944	0.839	0.748	0.669	0.509	0.389	0.297	0.250
α_u	7.955	7.012	6.266	5.663	5.167	4.754	4.405	3.736	3.262	2.915	2.753
n_3	1.974	1.773	1.606	1.455	1.329	1.216	1.113	0.904	0.736	0.600	0.524
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.339	0.281	0.234	0.195	0.162	0.136	0.113	0.071	0.044	0.026	0.023
$-\varepsilon_u$	1.866	1.819	1.781	1.750	1.724	1.703	1.685	1.652	1.631	1.617	1.618
n_2	1.239	1.092	0.967	0.861	0.768	0.688	0.617	0.472	0.362	0.276	0.241
α_u	7.065	6.322	5.720	5.224	4.809	4.459	4.159	3.573	3.150	2.834	2.717
n_3	1.824	1.651	1.499	1.371	1.251	1.152	1.059	0.861	0.703	0.570	0.513

$\omega=0.35$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(8)

K_{a1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.797	1.327	1.018	0.802	0.642	0.521	0.427	0.266	0.169	0.107	0.067
$-\varepsilon_u$	4.126	3.492	3.075	2.782	2.567	2.404	2.277	2.059	1.928	1.844	1.790
n_2	4.141	3.180	2.542	2.087	1.748	1.485	1.276	0.904	0.660	0.489	0.365
α_u	39.27	26.51	19.41	15.03	12.12	10.08	8.59	6.22	4.88	4.04	3.47
n_3	4.704	3.728	3.073	2.600	2.245	1.969	1.739	1.327	1.041	0.832	0.668
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.327	1.018	0.802	0.642	0.521	0.427	0.352	0.222	0.141	0.089	0.055
$-\varepsilon_u$	3.369	2.981	2.707	2.507	2.354	2.236	2.141	1.977	1.875	1.810	1.768
n_2	3.213	2.572	2.116	1.775	1.511	1.300	1.128	0.814	0.601	0.449	0.337
α_u	25.96	19.11	14.87	12.04	10.05	8.59	7.48	5.64	4.54	3.83	3.33
n_3	3.790	3.134	2.659	2.297	2.014	1.788	1.596	1.237	0.981	0.791	0.637
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.018	0.802	0.642	0.521	0.427	0.352	0.292	0.185	0.117	0.074	0.045
$-\varepsilon_u$	2.893	2.638	2.451	2.309	2.198	2.110	2.039	1.913	1.834	1.784	1.751
n_2	2.604	2.146	1.803	1.537	1.325	1.152	1.008	0.738	0.551	0.414	0.312
α_u	18.85	14.74	11.98	10.03	8.60	7.51	6.66	5.19	4.27	3.65	3.22
n_3	3.191	2.714	2.351	2.066	1.833	1.639	1.476	1.163	0.928	0.751	0.606
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.802	0.642	0.521	0.427	0.352	0.292	0.243	0.154	0.098	0.061	0.037
$-\varepsilon_u$	2.574	2.399	2.267	2.163	2.081	2.015	1.961	1.864	1.803	1.763	1.737
n_2	2.177	1.832	1.564	1.350	1.176	1.031	0.908	0.674	0.507	0.383	0.289
α_u	14.62	11.94	10.03	8.62	7.54	6.70	6.03	4.82	4.04	3.50	3.12
n_3	2.776	2.405	2.118	1.878	1.683	1.519	1.376	1.094	0.884	0.712	0.577
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.642	0.521	0.427	0.352	0.292	0.243	0.202	0.128	0.081	0.050	0.033
$-\varepsilon_u$	2.352	2.228	2.131	2.055	1.993	1.943	1.901	1.826	1.778	1.747	1.732
n_2	1.863	1.593	1.377	1.201	1.054	0.930	0.824	0.618	0.468	0.355	0.278
α_u	11.90	10.03	8.65	7.58	6.75	6.08	5.53	4.52	3.85	3.37	3.07
n_3	2.465	2.171	1.930	1.733	1.562	1.417	1.292	1.034	0.837	0.680	0.565
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.521	0.427	0.352	0.292	0.243	0.202	0.169	0.107	0.067	0.041	0.030
$-\varepsilon_u$	2.192	2.102	2.030	1.972	1.925	1.887	1.855	1.796	1.759	1.735	1.727
n_2	1.622	1.404	1.226	1.078	0.953	0.845	0.753	0.569	0.433	0.329	0.268
α_u	10.05	8.68	7.63	6.80	6.13	5.58	5.13	4.28	3.69	3.26	3.03
n_3	2.226	1.982	1.779	1.606	1.460	1.328	1.214	0.982	0.796	0.648	0.553
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.427	0.352	0.292	0.243	0.202	0.169	0.141	0.089	0.055	0.033	0.027
$-\varepsilon_u$	2.074	2.007	1.954	1.910	1.874	1.844	1.819	1.774	1.744	1.726	1.723
n_2	1.433	1.253	1.103	0.976	0.867	0.773	0.691	0.526	0.402	0.306	0.258
α_u	8.721	7.679	6.855	6.189	5.643	5.187	4.803	4.066	3.545	3.163	2.985
n_3	2.036	1.825	1.651	1.503	1.370	1.254	1.150	0.932	0.761	0.618	0.536
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.352	0.292	0.243	0.202	0.169	0.141	0.117	0.074	0.045	0.027	0.024
$-\varepsilon_u$	1.986	1.936	1.895	1.862	1.834	1.811	1.791	1.756	1.733	1.719	1.720
n_2	1.280	1.128	1.000	0.889	0.794	0.710	0.637	0.487	0.373	0.285	0.249
α_u	7.736	6.916	6.251	5.704	5.247	4.861	4.531	3.886	3.421	3.074	2.946
n_3	1.878	1.701	1.547	1.412	1.290	1.184	1.089	0.888	0.723	0.588	0.525

$\omega=0.40$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(9)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.864	1.376	1.056	0.831	0.666	0.541	0.443	0.276	0.175	0.111	0.069
$-\varepsilon_u$	4.409	3.727	3.279	2.964	2.733	2.557	2.420	2.187	2.045	1.955	1.897
n_2	4.286	3.290	2.629	2.158	1.807	1.535	1.318	0.933	0.681	0.505	0.376
α_u	43.35	29.20	21.34	16.49	13.27	11.02	9.38	6.78	5.30	4.37	3.75
n_3	4.863	3.849	3.173	2.682	2.315	2.029	1.795	1.367	1.071	0.854	0.687
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.376	1.056	0.831	0.666	0.541	0.443	0.365	0.230	0.146	0.092	0.057
$-\varepsilon_u$	3.595	3.177	2.883	2.668	2.504	2.376	2.275	2.098	1.988	1.918	1.873
n_2	3.324	2.660	2.188	1.834	1.561	1.343	1.165	0.840	0.620	0.463	0.347
α_u	28.58	21.01	16.31	13.19	10.99	9.38	8.16	6.14	4.93	4.14	3.60
n_3	3.918	3.234	2.741	2.368	2.075	1.840	1.645	1.275	1.009	0.811	0.655
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.056	0.831	0.666	0.541	0.443	0.365	0.303	0.192	0.122	0.076	0.047
$-\varepsilon_u$	3.083	2.809	2.608	2.455	2.336	2.241	2.165	2.029	1.944	1.890	1.854
n_2	2.693	2.219	1.863	1.588	1.368	1.189	1.041	0.762	0.568	0.427	0.321
α_u	20.71	16.16	13.12	10.97	9.39	8.19	7.25	5.64	4.63	3.95	3.48
n_3	3.297	2.797	2.422	2.127	1.885	1.689	1.523	1.195	0.956	0.771	0.624
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.831	0.666	0.541	0.443	0.365	0.303	0.252	0.160	0.101	0.063	0.038
$-\varepsilon_u$	2.740	2.552	2.409	2.298	2.210	2.139	2.081	1.976	1.910	1.868	1.840
n_2	2.251	1.893	1.616	1.395	1.214	1.064	0.937	0.695	0.522	0.395	0.297
α_u	16.03	13.06	10.96	9.41	8.22	7.30	6.55	5.23	4.38	3.79	3.36
n_3	2.859	2.482	2.180	1.937	1.733	1.566	1.416	1.125	0.906	0.731	0.594
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.666	0.541	0.443	0.365	0.303	0.252	0.210	0.133	0.084	0.052	0.035
$-\varepsilon_u$	2.501	2.368	2.264	2.181	2.115	2.061	2.016	1.936	1.884	1.851	1.835
n_2	1.925	1.645	1.422	1.239	1.088	0.960	0.850	0.637	0.482	0.365	0.286
α_u	13.03	10.96	9.44	8.26	7.35	6.61	6.01	4.91	4.17	3.65	3.31
n_3	2.539	2.234	1.989	1.784	1.610	1.458	1.326	1.064	0.863	0.699	0.582
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.541	0.443	0.365	0.303	0.252	0.210	0.175	0.111	0.069	0.042	0.031
$-\varepsilon_u$	2.329	2.232	2.155	2.093	2.042	2.001	1.967	1.904	1.863	1.838	1.829
n_2	1.676	1.450	1.266	1.112	0.983	0.872	0.776	0.586	0.446	0.339	0.276
α_u	10.98	9.47	8.31	7.40	6.67	6.07	5.57	4.63	3.99	3.52	3.27
n_3	2.290	2.042	1.830	1.655	1.501	1.367	1.251	1.010	0.817	0.667	0.565
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.443	0.365	0.303	0.252	0.210	0.175	0.146	0.092	0.057	0.035	0.028
$-\varepsilon_u$	2.202	2.131	2.073	2.026	1.987	1.955	1.928	1.879	1.848	1.828	1.825
n_2	1.479	1.293	1.138	1.007	0.894	0.797	0.712	0.542	0.414	0.315	0.266
α_u	9.514	8.368	7.462	6.731	6.131	5.631	5.209	4.402	3.832	3.414	3.220
n_3	2.096	1.883	1.700	1.545	1.409	1.287	1.181	0.960	0.781	0.636	0.553
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.365	0.303	0.252	0.210	0.175	0.146	0.122	0.076	0.047	0.028	0.025
$-\varepsilon_u$	2.108	2.054	2.010	1.974	1.944	1.919	1.898	1.860	1.836	1.820	1.821
n_2	1.321	1.164	1.031	0.917	0.818	0.732	0.656	0.502	0.385	0.293	0.256
α_u	8.429	7.527	6.798	6.198	5.696	5.273	4.911	4.205	3.696	3.317	3.178
n_3	1.936	1.751	1.589	1.452	1.328	1.216	1.120	0.911	0.743	0.605	0.541

$\omega=0.45$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(10)

K_{z1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.930	1.425	1.094	0.861	0.690	0.560	0.459	0.286	0.181	0.115	0.072
$-\varepsilon_u$	4.699	3.967	3.486	3.149	2.901	2.712	2.565	2.315	2.163	2.067	2.004
n_2	4.431	3.400	2.716	2.229	1.865	1.584	1.360	0.962	0.701	0.520	0.387
α_u	47.66	32.04	23.36	18.02	14.48	12.00	10.20	7.34	5.73	4.72	4.04
n_3	5.021	3.970	3.272	2.767	2.385	2.084	1.846	1.406	1.100	0.880	0.705
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.425	1.094	0.861	0.690	0.560	0.459	0.378	0.238	0.151	0.096	0.059
$-\varepsilon_u$	3.826	3.377	3.062	2.831	2.655	2.518	2.409	2.219	2.102	2.027	1.978
n_2	3.435	2.748	2.259	1.893	1.610	1.385	1.202	0.866	0.639	0.477	0.357
α_u	31.34	22.99	17.82	14.38	11.97	10.20	8.86	6.64	5.32	4.47	3.88
n_3	4.039	3.334	2.823	2.438	2.135	1.891	1.688	1.308	1.038	0.831	0.673
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.094	0.861	0.690	0.560	0.459	0.378	0.314	0.198	0.126	0.079	0.049
$-\varepsilon_u$	3.276	2.982	2.766	2.602	2.474	2.373	2.291	2.146	2.055	1.996	1.958
n_2	2.782	2.290	1.923	1.638	1.411	1.226	1.073	0.785	0.585	0.439	0.330
α_u	22.66	17.65	14.30	11.94	10.21	8.89	7.86	6.09	4.99	4.25	3.74
n_3	3.398	2.884	2.493	2.188	1.942	1.738	1.564	1.226	0.979	0.790	0.642
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.861	0.690	0.560	0.459	0.378	0.314	0.261	0.166	0.105	0.065	0.040
$-\varepsilon_u$	2.909	2.707	2.554	2.434	2.340	2.263	2.201	2.089	2.018	1.973	1.943
n_2	2.323	1.954	1.667	1.438	1.252	1.097	0.966	0.715	0.538	0.406	0.306
α_u	17.50	14.24	11.93	10.22	8.93	7.91	7.10	5.65	4.72	4.08	3.61
n_3	2.947	2.554	2.242	1.994	1.783	1.608	1.455	1.155	0.928	0.751	0.611
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.690	0.560	0.459	0.378	0.314	0.261	0.217	0.138	0.087	0.054	0.036
$-\varepsilon_u$	2.652	2.509	2.397	2.309	2.238	2.180	2.132	2.045	1.990	1.954	1.937
n_2	1.986	1.697	1.466	1.278	1.121	0.989	0.876	0.656	0.496	0.376	0.295
α_u	14.19	11.93	10.25	8.97	7.96	7.16	6.50	5.29	4.49	3.92	3.56
n_3	2.611	2.297	2.042	1.834	1.652	1.498	1.364	1.093	0.884	0.717	0.594
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.560	0.459	0.378	0.314	0.261	0.217	0.181	0.115	0.072	0.044	0.032
$-\varepsilon_u$	2.467	2.363	2.281	2.214	2.160	2.116	2.079	2.011	1.968	1.940	1.932
n_2	1.728	1.495	1.305	1.146	1.013	0.898	0.799	0.604	0.459	0.349	0.284
α_u	11.94	10.29	9.02	8.02	7.22	6.56	6.02	5.00	4.29	3.79	3.51
n_3	2.358	2.096	1.881	1.698	1.542	1.406	1.283	1.034	0.842	0.685	0.582
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.459	0.378	0.314	0.261	0.217	0.181	0.151	0.096	0.059	0.036	0.029
$-\varepsilon_u$	2.332	2.255	2.193	2.142	2.100	2.066	2.037	1.985	1.951	1.930	1.927
n_2	1.525	1.333	1.172	1.037	0.921	0.821	0.733	0.557	0.426	0.324	0.273
α_u	10.33	9.08	8.09	7.29	6.63	6.09	5.63	4.74	4.12	3.67	3.46
n_3	2.151	1.934	1.749	1.586	1.449	1.324	1.212	0.982	0.801	0.648	0.564
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.378	0.314	0.261	0.217	0.181	0.151	0.126	0.079	0.049	0.029	0.026
$-\varepsilon_u$	2.230	2.172	2.125	2.086	2.054	2.028	2.005	1.964	1.938	1.922	1.923
n_2	1.362	1.199	1.062	0.944	0.843	0.754	0.676	0.516	0.396	0.301	0.263
α_u	9.144	8.158	7.360	6.704	6.156	5.694	5.299	4.530	3.976	3.563	3.412
n_3	1.988	1.796	1.631	1.487	1.361	1.248	1.150	0.932	0.762	0.617	0.552

$\omega=0.50$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(11)

$K_{\omega 1}$	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	1.997	1.475	1.132	0.891	0.714	0.579	0.475	0.296	0.187	0.119	0.074
$-\varepsilon_u$	4.995	4.212	3.697	3.336	3.071	2.869	2.712	2.444	2.281	2.178	2.112
n_2	4.575	3.510	2.802	2.298	1.923	1.632	1.401	0.990	0.721	0.534	0.398
α_u	52.20	35.01	25.48	19.62	15.74	13.02	11.05	7.93	6.17	5.07	4.33
n_3	5.174	4.090	3.365	2.843	2.454	2.143	1.896	1.439	1.129	0.901	0.724
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.475	1.132	0.891	0.714	0.579	0.475	0.392	0.246	0.156	0.099	0.061
$-\varepsilon_u$	4.061	3.581	3.244	2.996	2.808	2.661	2.545	2.342	2.216	2.136	2.084
n_2	3.545	2.835	2.329	1.952	1.660	1.427	1.238	0.891	0.657	0.490	0.367
α_u	34.24	25.06	19.39	15.62	12.98	11.04	9.58	7.16	5.72	4.79	4.15
n_3	4.160	3.428	2.904	2.508	2.195	1.942	1.736	1.345	1.066	0.852	0.686
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.132	0.891	0.714	0.579	0.475	0.392	0.324	0.205	0.130	0.082	0.050
$-\varepsilon_u$	3.473	3.158	2.927	2.752	2.615	2.506	2.419	2.263	2.166	2.103	2.063
n_2	2.869	2.362	1.982	1.688	1.454	1.263	1.104	0.807	0.601	0.452	0.339
α_u	24.69	19.20	15.53	12.95	11.05	9.61	8.49	6.56	5.37	4.56	4.00
n_3	3.498	2.966	2.563	2.249	1.994	1.781	1.605	1.257	1.006	0.810	0.654
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.891	0.714	0.579	0.475	0.392	0.324	0.270	0.171	0.108	0.068	0.041
$-\varepsilon_u$	3.079	2.864	2.700	2.572	2.471	2.389	2.322	2.203	2.127	2.078	2.046
n_2	2.395	2.014	1.718	1.481	1.289	1.129	0.994	0.736	0.553	0.417	0.314
α_u	19.03	15.46	12.93	11.07	9.65	8.54	7.66	6.08	5.07	4.37	3.87
n_3	3.030	2.625	2.303	2.047	1.832	1.649	1.494	1.185	0.954	0.770	0.623
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.714	0.579	0.475	0.392	0.324	0.270	0.225	0.143	0.090	0.056	0.037
$-\varepsilon_u$	2.805	2.652	2.532	2.438	2.361	2.299	2.248	2.156	2.096	2.058	2.040
n_2	2.047	1.748	1.510	1.315	1.154	1.018	0.901	0.674	0.510	0.386	0.303
α_u	15.41	12.93	11.10	9.70	8.60	7.72	7.00	5.69	4.82	4.20	3.81
n_3	2.688	2.364	2.100	1.879	1.694	1.538	1.396	1.121	0.905	0.736	0.611
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.579	0.475	0.392	0.324	0.270	0.225	0.187	0.119	0.074	0.045	0.033
$-\varepsilon_u$	2.607	2.496	2.407	2.336	2.278	2.231	2.191	2.119	2.073	2.043	2.034
n_2	1.780	1.540	1.343	1.180	1.042	0.924	0.822	0.620	0.472	0.358	0.291
α_u	12.94	11.13	9.75	8.66	7.79	7.07	6.48	5.37	4.60	4.06	3.75
n_3	2.421	2.155	1.932	1.745	1.582	1.439	1.315	1.062	0.862	0.698	0.593
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.475	0.392	0.324	0.270	0.225	0.187	0.156	0.099	0.061	0.037	0.030
$-\varepsilon_u$	2.462	2.379	2.313	2.259	2.214	2.178	2.147	2.091	2.055	2.032	2.029
n_2	1.570	1.372	1.207	1.067	0.947	0.844	0.754	0.573	0.437	0.333	0.281
α_u	11.18	9.81	8.73	7.86	7.15	6.55	6.05	5.09	4.42	3.93	3.70
n_3	2.211	1.985	1.792	1.627	1.483	1.357	1.243	1.004	0.821	0.666	0.581
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.392	0.324	0.270	0.225	0.187	0.156	0.130	0.082	0.050	0.030	0.027
$-\varepsilon_u$	2.354	2.292	2.241	2.199	2.165	2.137	2.113	2.069	2.041	2.023	2.024
n_2	1.402	1.234	1.093	0.971	0.866	0.775	0.694	0.531	0.406	0.309	0.270
α_u	9.881	8.806	7.937	7.223	6.627	6.124	5.695	4.860	4.259	3.812	3.649
n_3	2.040	1.845	1.678	1.527	1.399	1.284	1.179	0.959	0.781	0.635	0.564

$\omega=0.55$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(12)

K_{w1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	2.063	1.524	1.169	0.920	0.738	0.599	0.491	0.306	0.194	0.123	0.077
$-\varepsilon_u$	5.298	4.462	3.912	3.527	3.243	3.028	2.860	2.574	2.400	2.290	2.219
n_2	4.719	3.618	2.887	2.368	1.980	1.680	1.442	1.018	0.742	0.549	0.409
α_u	56.98	38.14	27.70	21.28	17.04	14.08	11.93	8.53	6.62	5.42	4.63
n_3	5.331	4.209	3.463	2.922	2.517	2.201	1.946	1.477	1.158	0.921	0.737
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.524	1.169	0.920	0.738	0.599	0.491	0.405	0.254	0.162	0.102	0.063
$-\varepsilon_u$	4.301	3.788	3.428	3.164	2.963	2.806	2.682	2.465	2.331	2.245	2.190
n_2	3.654	2.921	2.399	2.010	1.708	1.468	1.273	0.916	0.675	0.504	0.377
α_u	37.28	27.24	21.03	16.92	14.03	11.92	10.33	7.70	6.14	5.13	4.43
n_3	4.280	3.527	2.984	2.577	2.255	1.993	1.779	1.376	1.088	0.871	0.703
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.169	0.920	0.738	0.599	0.491	0.405	0.335	0.212	0.135	0.085	0.052
$-\varepsilon_u$	3.673	3.337	3.090	2.903	2.756	2.640	2.547	2.381	2.277	2.210	2.167
n_2	2.956	2.432	2.041	1.737	1.496	1.299	1.136	0.830	0.618	0.464	0.348
α_u	26.82	20.82	16.81	13.99	11.93	10.36	9.14	7.05	5.75	4.88	4.27
n_3	3.592	3.047	2.633	2.309	2.045	1.829	1.645	1.287	1.028	0.829	0.671
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.920	0.738	0.599	0.491	0.405	0.335	0.279	0.177	0.112	0.070	0.042
$-\varepsilon_u$	3.253	3.022	2.847	2.711	2.602	2.515	2.444	2.316	2.235	2.183	2.149
n_2	2.467	2.073	1.768	1.524	1.325	1.161	1.022	0.756	0.567	0.428	0.322
α_u	20.63	16.73	13.97	11.94	10.40	9.19	8.23	6.52	5.42	4.67	4.13
n_3	3.111	2.695	2.364	2.098	1.876	1.690	1.533	1.214	0.975	0.788	0.635
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.738	0.599	0.491	0.405	0.335	0.279	0.232	0.148	0.093	0.057	0.038
$-\varepsilon_u$	2.959	2.796	2.668	2.567	2.486	2.420	2.365	2.266	2.203	2.162	2.142
n_2	2.107	1.799	1.553	1.353	1.186	1.046	0.926	0.692	0.523	0.396	0.310
α_u	16.67	13.97	11.97	10.45	9.25	8.30	7.52	6.10	5.15	4.48	4.06
n_3	2.759	2.425	2.153	1.928	1.741	1.577	1.434	1.145	0.925	0.749	0.622
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.599	0.491	0.405	0.335	0.279	0.232	0.194	0.123	0.077	0.047	0.034
$-\varepsilon_u$	2.748	2.629	2.535	2.459	2.397	2.346	2.304	2.227	2.178	2.146	2.136
n_2	1.831	1.584	1.381	1.213	1.071	0.949	0.845	0.637	0.484	0.368	0.299
α_u	13.97	12.01	10.50	9.32	8.37	7.59	6.95	5.75	4.92	4.33	4.00
n_3	2.483	2.208	1.982	1.787	1.622	1.477	1.346	1.084	0.882	0.716	0.605
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.491	0.405	0.335	0.279	0.232	0.194	0.162	0.102	0.063	0.038	0.031
$-\varepsilon_u$	2.593	2.505	2.434	2.376	2.329	2.290	2.257	2.197	2.158	2.134	2.131
n_2	1.615	1.411	1.240	1.096	0.973	0.867	0.774	0.588	0.449	0.341	0.288
α_u	12.06	10.57	9.39	8.45	7.67	7.03	6.48	5.45	4.72	4.19	3.94
n_3	2.270	2.036	1.840	1.667	1.521	1.388	1.273	1.031	0.835	0.678	0.592
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.405	0.335	0.279	0.232	0.194	0.162	0.135	0.085	0.052	0.031	0.028
$-\varepsilon_u$	2.478	2.411	2.357	2.313	2.276	2.246	2.220	2.174	2.144	2.125	2.126
n_2	1.441	1.269	1.123	0.998	0.890	0.796	0.713	0.545	0.417	0.317	0.277
α_u	10.64	9.47	8.53	7.75	7.11	6.56	6.10	5.20	4.55	4.06	3.89
n_3	2.091	1.888	1.719	1.566	1.431	1.314	1.203	0.980	0.800	0.647	0.580

$\omega=0.60$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(13)

K_{zi}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	2.130	1.573	1.207	0.950	0.761	0.618	0.506	0.316	0.200	0.127	0.079
$-\varepsilon_u$	5.608	4.717	4.131	3.720	3.418	3.189	3.010	2.705	2.520	2.403	2.327
n_2	4.862	3.726	2.972	2.437	2.037	1.728	1.482	1.046	0.761	0.563	0.419
α_u	62.01	41.41	30.02	23.02	18.40	15.18	12.84	9.15	7.08	5.79	4.93
n_3	5.482	4.328	3.555	3.001	2.585	2.255	1.996	1.510	1.181	0.941	0.755
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.573	1.207	0.950	0.761	0.618	0.506	0.418	0.263	0.167	0.105	0.065
$-\varepsilon_u$	4.545	3.999	3.615	3.333	3.119	2.952	2.820	2.589	2.446	2.355	2.295
n_2	3.763	3.007	2.469	2.067	1.757	1.509	1.308	0.940	0.693	0.517	0.386
α_u	40.46	29.50	22.74	18.26	15.12	12.83	11.10	8.25	6.56	5.46	4.72
n_3	4.400	3.620	3.064	2.641	2.313	2.043	1.826	1.408	1.116	0.891	0.716
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.207	0.950	0.761	0.618	0.506	0.418	0.346	0.219	0.139	0.087	0.054
$-\varepsilon_u$	3.876	3.518	3.255	3.055	2.899	2.776	2.676	2.500	2.389	2.317	2.271
n_2	3.043	2.503	2.099	1.786	1.537	1.335	1.167	0.852	0.634	0.475	0.357
α_u	29.04	22.50	18.14	15.07	12.83	11.13	9.81	7.54	6.13	5.20	4.54
n_3	3.691	3.127	2.702	2.368	2.096	1.872	1.685	1.318	1.055	0.848	0.683
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.950	0.761	0.618	0.506	0.418	0.346	0.288	0.183	0.116	0.072	0.044
$-\varepsilon_u$	3.428	3.183	2.996	2.851	2.735	2.642	2.567	2.430	2.344	2.288	2.253
n_2	2.538	2.132	1.817	1.566	1.362	1.192	1.049	0.776	0.582	0.439	0.330
α_u	22.29	18.04	15.05	12.84	11.17	9.86	8.82	6.97	5.78	4.97	4.38
n_3	3.193	2.765	2.424	2.150	1.924	1.731	1.566	1.243	0.996	0.807	0.652
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.761	0.618	0.506	0.418	0.346	0.288	0.240	0.152	0.096	0.059	0.039
$-\varepsilon_u$	3.115	2.941	2.806	2.698	2.611	2.541	2.483	2.377	2.310	2.266	2.245
n_2	2.166	1.849	1.596	1.390	1.218	1.074	0.951	0.710	0.537	0.406	0.318
α_u	17.97	15.04	12.87	11.22	9.92	8.89	8.05	6.51	5.49	4.77	4.32
n_3	2.830	2.486	2.205	1.977	1.782	1.611	1.466	1.173	0.946	0.767	0.634
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.618	0.506	0.418	0.346	0.288	0.240	0.200	0.127	0.079	0.049	0.036
$-\varepsilon_u$	2.891	2.764	2.664	2.583	2.517	2.462	2.418	2.335	2.283	2.249	2.239
n_2	1.882	1.627	1.419	1.245	1.099	0.974	0.867	0.653	0.496	0.377	0.306
α_u	15.04	12.91	11.28	9.99	8.97	8.13	7.43	6.13	5.24	4.60	4.25
n_3	2.549	2.266	2.031	1.829	1.661	1.510	1.382	1.112	0.897	0.728	0.621
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.506	0.418	0.346	0.288	0.240	0.200	0.167	0.105	0.065	0.039	0.032
$-\varepsilon_u$	2.726	2.632	2.556	2.495	2.444	2.402	2.367	2.303	2.262	2.236	2.233
n_2	1.659	1.449	1.273	1.125	0.999	0.890	0.794	0.603	0.460	0.350	0.295
α_u	12.96	11.34	10.07	9.05	8.21	7.51	6.93	5.81	5.02	4.45	4.19
n_3	2.323	2.086	1.882	1.708	1.554	1.420	1.303	1.053	0.854	0.695	0.603
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.418	0.346	0.288	0.240	0.200	0.167	0.139	0.087	0.054	0.032	0.029
$-\varepsilon_u$	2.602	2.532	2.474	2.427	2.388	2.355	2.328	2.278	2.246	2.226	2.228
n_2	1.480	1.302	1.152	1.024	0.913	0.816	0.731	0.558	0.427	0.325	0.284
α_u	11.42	10.16	9.14	8.30	7.60	7.01	6.51	5.54	4.84	4.32	4.13
n_3	2.142	1.936	1.760	1.599	1.463	1.339	1.232	1.001	0.813	0.663	0.591

$\omega=0.65$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(14)

K_{w1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	2.196	1.622	1.245	0.980	0.785	0.637	0.522	0.325	0.206	0.131	0.082
$-\varepsilon_u$	5.924	4.976	4.354	3.917	3.596	3.352	3.162	2.837	2.640	2.516	2.435
n_2	5.004	3.834	3.057	2.505	2.093	1.775	1.522	1.073	0.781	0.577	0.430
α_u	67.29	44.84	32.43	24.83	19.81	16.32	13.78	9.79	7.55	6.16	5.23
n_3	5.633	4.442	3.647	3.080	2.648	2.313	2.040	1.548	1.209	0.962	0.773
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.622	1.245	0.980	0.785	0.637	0.522	0.431	0.271	0.172	0.109	0.067
$-\varepsilon_u$	4.794	4.213	3.805	3.505	3.278	3.100	2.959	2.714	2.562	2.464	2.402
n_2	3.871	3.092	2.538	2.124	1.804	1.550	1.343	0.965	0.710	0.529	0.396
α_u	43.80	31.87	24.52	19.65	16.24	13.76	11.89	8.81	6.98	5.81	5.01
n_3	4.514	3.717	3.143	2.709	2.367	2.093	1.867	1.439	1.138	0.911	0.733
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.245	0.980	0.785	0.637	0.522	0.431	0.357	0.226	0.143	0.090	0.055
$-\varepsilon_u$	4.082	3.702	3.422	3.209	3.044	2.912	2.807	2.619	2.501	2.425	2.376
n_2	3.129	2.572	2.157	1.835	1.578	1.370	1.197	0.873	0.649	0.487	0.366
α_u	31.36	24.25	19.52	16.19	13.76	11.92	10.49	8.04	6.53	5.52	4.81
n_3	3.784	3.207	2.771	2.427	2.146	1.919	1.725	1.347	1.076	0.867	0.695
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.980	0.785	0.637	0.522	0.431	0.357	0.297	0.188	0.119	0.074	0.045
$-\varepsilon_u$	3.606	3.345	3.147	2.992	2.869	2.771	2.690	2.545	2.453	2.394	2.356
n_2	2.608	2.190	1.866	1.608	1.398	1.223	1.076	0.795	0.596	0.450	0.338
α_u	24.01	19.41	16.16	13.77	11.96	10.55	9.42	7.43	6.15	5.27	4.65
n_3	3.273	2.830	2.484	2.201	1.967	1.771	1.604	1.267	1.017	0.820	0.663
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.785	0.637	0.522	0.431	0.357	0.297	0.247	0.157	0.099	0.061	0.041
$-\varepsilon_u$	3.274	3.088	2.944	2.830	2.737	2.662	2.600	2.488	2.417	2.370	2.348
n_2	2.225	1.899	1.638	1.426	1.250	1.101	0.975	0.728	0.550	0.416	0.326
α_u	19.32	16.14	13.80	12.01	10.61	9.50	8.59	6.93	5.83	5.06	4.57
n_3	2.900	2.546	2.261	2.020	1.823	1.650	1.498	1.196	0.966	0.780	0.650
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.637	0.522	0.431	0.357	0.297	0.247	0.206	0.131	0.082	0.050	0.037
$-\varepsilon_u$	3.035	2.900	2.793	2.707	2.637	2.579	2.531	2.444	2.388	2.352	2.341
n_2	1.933	1.670	1.456	1.278	1.127	0.999	0.888	0.669	0.508	0.386	0.314
α_u	16.15	13.84	12.07	10.69	9.58	8.67	7.92	6.52	5.57	4.88	4.50
n_3	2.610	2.318	2.075	1.871	1.696	1.542	1.407	1.134	0.916	0.746	0.632
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.522	0.431	0.357	0.297	0.247	0.206	0.172	0.109	0.067	0.041	0.033
$-\varepsilon_u$	2.859	2.759	2.679	2.613	2.559	2.515	2.478	2.410	2.366	2.338	2.335
n_2	1.703	1.486	1.306	1.154	1.024	0.912	0.814	0.618	0.471	0.358	0.302
α_u	13.89	12.14	10.77	9.66	8.76	8.01	7.38	6.18	5.33	4.72	4.44
n_3	2.381	2.136	1.924	1.747	1.592	1.451	1.332	1.074	0.873	0.707	0.619
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.431	0.357	0.297	0.247	0.206	0.172	0.143	0.090	0.055	0.033	0.029
$-\varepsilon_u$	2.728	2.653	2.592	2.541	2.500	2.465	2.436	2.383	2.349	2.328	2.330
n_2	1.518	1.336	1.182	1.050	0.936	0.836	0.749	0.572	0.437	0.333	0.291
α_u	12.22	10.86	9.76	8.85	8.10	7.47	6.93	5.88	5.13	4.58	4.37
n_3	2.192	1.979	1.795	1.637	1.495	1.369	1.261	1.022	0.832	0.675	0.601

$\omega=0.70$　　$\delta_1=\delta_2=0$　　表 3-8(15)

K_{a1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	2.263	1.671	1.282	1.010	0.809	0.657	0.538	0.335	0.212	0.135	0.084
$-\varepsilon_u$	6.247	5.241	4.580	4.116	3.775	3.516	3.315	2.970	2.761	2.629	2.543
n_2	5.147	3.941	3.141	2.573	2.149	1.822	1.562	1.101	0.800	0.591	0.440
α_u	72.83	48.42	34.95	26.71	21.27	17.49	14.75	10.44	8.03	6.53	5.54
n_3	5.784	4.560	3.744	3.154	2.715	2.365	2.089	1.580	1.237	0.981	0.785
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	1.671	1.282	1.010	0.809	0.657	0.538	0.444	0.279	0.177	0.112	0.070
$-\varepsilon_u$	5.047	4.431	3.998	3.679	3.438	3.249	3.100	2.839	2.678	2.575	2.508
n_2	3.979	3.177	2.607	2.181	1.852	1.590	1.378	0.989	0.728	0.542	0.405
α_u	47.28	34.33	26.36	21.09	17.41	14.73	12.71	9.38	7.42	6.16	5.30
n_3	4.633	3.809	3.217	2.772	2.425	2.142	1.909	1.470	1.160	0.930	0.745
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	1.282	1.010	0.809	0.657	0.538	0.444	0.368	0.233	0.148	0.093	0.057
$-\varepsilon_u$	4.292	3.888	3.591	3.365	3.190	3.050	2.938	2.738	2.613	2.532	2.480
n_2	3.214	2.642	2.214	1.883	1.619	1.405	1.227	0.895	0.665	0.499	0.374
α_u	33.77	26.06	20.94	17.35	14.72	12.73	11.19	8.56	6.93	5.85	5.09
n_3	3.882	3.287	2.835	2.481	2.196	1.961	1.760	1.377	1.097	0.881	0.712
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	1.010	0.809	0.657	0.538	0.444	0.368	0.306	0.194	0.123	0.077	0.047
$-\varepsilon_u$	3.786	3.509	3.299	3.135	3.004	2.899	2.814	2.660	2.563	2.500	2.459
n_2	2.678	2.248	1.915	1.649	1.433	1.254	1.103	0.815	0.611	0.460	0.346
α_u	25.80	20.82	17.31	14.73	12.78	11.25	10.04	7.90	6.52	5.58	4.91
n_3	3.353	2.899	2.543	2.251	2.014	1.811	1.637	1.296	1.038	0.838	0.679
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.809	0.657	0.538	0.444	0.368	0.306	0.255	0.162	0.102	0.063	0.042
$-\varepsilon_u$	3.434	3.237	3.084	2.962	2.864	2.785	2.719	2.600	2.524	2.475	2.451
n_2	2.284	1.948	1.680	1.462	1.281	1.129	0.999	0.745	0.563	0.426	0.333
α_u	20.72	17.29	14.76	12.83	11.32	10.12	9.14	7.36	6.18	5.36	4.83
n_3	2.965	2.606	2.312	2.069	1.863	1.683	1.534	1.224	0.986	0.798	0.661
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.657	0.538	0.444	0.368	0.306	0.255	0.212	0.135	0.084	0.052	0.038
$-\varepsilon_u$	3.180	3.037	2.923	2.832	2.757	2.696	2.646	2.553	2.494	2.455	2.443
n_2	1.983	1.713	1.492	1.309	1.155	1.023	0.910	0.685	0.520	0.395	0.321
α_u	17.28	14.79	12.89	11.40	10.20	9.23	8.42	6.92	5.90	5.16	4.76
n_3	2.671	2.370	2.124	1.912	1.734	1.579	1.437	1.155	0.936	0.758	0.643
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.538	0.444	0.368	0.306	0.255	0.212	0.177	0.112	0.070	0.042	0.034
$-\varepsilon_u$	2.993	2.887	2.802	2.733	2.675	2.628	2.589	2.517	2.470	2.441	2.437
n_2	1.746	1.524	1.339	1.182	1.049	0.934	0.833	0.632	0.482	0.366	0.309
α_u	14.85	12.96	11.48	10.30	9.32	8.52	7.84	6.55	5.65	4.99	4.69
n_3	2.433	2.180	1.966	1.787	1.624	1.481	1.356	1.095	0.892	0.724	0.630
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.444	0.368	0.306	0.255	0.212	0.177	0.148	0.093	0.057	0.034	0.030
$-\varepsilon_u$	2.854	2.774	2.710	2.656	2.612	2.575	2.545	2.488	2.452	2.430	2.431
n_2	1.556	1.369	1.211	1.075	0.958	0.856	0.767	0.585	0.447	0.340	0.297
α_u	13.05	11.58	10.39	9.42	8.62	7.94	7.36	6.23	5.43	4.83	4.62
n_3	2.242	2.021	1.835	1.670	1.526	1.399	1.284	1.042	0.850	0.686	0.612

$\omega=0.00$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$（查表 3-2）　　**表 3-8(16)**

K_{z1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.324	0.344	0.365	0.386	0.407	0.428	0.450	0.506	0.563	0.619	0.675
n_2	0.657	0.582	0.525	0.479	0.440	0.407	0.377	0.316	0.265	0.221	0.183
α_u	0.611	0.603	0.603	0.608	0.617	0.629	0.642	0.680	0.720	0.761	0.801
n_3	1.227	1.097	1.000	0.919	0.855	0.797	0.747	0.641	0.555	0.481	0.413
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.361	0.382	0.402	0.423	0.445	0.466	0.488	0.544	0.600	0.655	0.709
n_2	0.618	0.556	0.507	0.465	0.430	0.399	0.371	0.311	0.260	0.217	0.178
α_u	0.664	0.650	0.663	0.670	0.679	0.690	0.703	0.739	0.777	0.814	0.850
n_3	1.163	1.056	0.972	0.900	0.840	0.789	0.741	0.636	0.550	0.472	0.403
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.398	0.419	0.440	0.461	0.482	0.504	0.525	0.580	0.635	0.689	0.741
n_2	0.588	0.536	0.491	0.454	0.420	0.391	0.364	0.305	0.255	0.212	0.173
α_u	0.720	0.719	0.723	0.731	0.740	0.751	0.763	0.796	0.830	0.864	0.895
n_3	1.113	1.026	0.946	0.884	0.825	0.776	0.729	0.630	0.540	0.467	0.398
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.435	0.455	0.476	0.497	0.519	0.540	0.562	0.616	0.669	0.722	0.772
n_2	0.565	0.518	0.478	0.443	0.411	0.382	0.356	0.299	0.249	0.206	0.168
α_u	0.778	0.779	0.784	0.791	0.800	0.810	0.821	0.851	0.881	0.910	0.937
n_3	1.075	0.998	0.928	0.868	0.811	0.762	0.721	0.619	0.534	0.456	0.388
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.471	0.491	0.512	0.533	0.554	0.575	0.597	0.650	0.702	0.752	0.786
n_2	0.546	0.503	0.466	0.432	0.402	0.374	0.348	0.292	0.243	0.200	0.165
α_u	0.837	0.838	0.843	0.850	0.858	0.867	0.877	0.903	0.929	0.953	0.956
n_3	1.046	0.973	0.911	0.852	0.802	0.754	0.708	0.612	0.523	0.445	0.385
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.506	0.526	0.547	0.568	0.589	0.609	0.630	0.682	0.732	0.781	0.800
n_2	0.529	0.489	0.454	0.422	0.392	0.365	0.340	0.285	0.236	0.193	0.162
α_u	0.895	0.897	0.901	0.906	0.913	0.921	0.929	0.951	0.972	0.991	0.974
n_3	1.019	0.949	0.889	0.837	0.787	0.740	0.695	0.600	0.511	0.438	0.377
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.540	0.560	0.581	0.601	0.622	0.642	0.662	0.713	0.761	0.807	0.813
n_2	0.513	0.476	0.442	0.411	0.383	0.357	0.332	0.277	0.229	0.186	0.159
α_u	0.952	0.953	0.956	0.961	0.966	0.972	0.979	0.996	1.012	1.026	0.991
n_3	0.993	0.931	0.872	0.821	0.773	0.727	0.682	0.587	0.499	0.426	0.374
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.574	0.594	0.614	0.634	0.654	0.674	0.693	0.742	0.788	0.832	0.826
n_2	0.499	0.463	0.431	0.401	0.373	0.347	0.323	0.269	0.221	0.179	0.156
α_u	1.007	1.007	1.009	1.012	1.016	1.021	1.025	1.037	1.048	1.056	1.007
n_3	0.974	0.913	0.856	0.806	0.753	0.712	0.668	0.574	0.486	0.414	0.366

$\omega=0.05$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(17)

K_{x1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.358	0.380	0.402	0.425	0.449	0.472	0.496	0.558	0.620	0.682	0.744
n_2	0.690	0.611	0.551	0.502	0.462	0.427	0.396	0.332	0.278	0.233	0.192
α_u	0.708	0.698	0.698	0.704	0.715	0.728	0.743	0.787	0.834	0.881	0.927
n_3	1.285	1.151	1.051	0.967	0.897	0.837	0.786	0.677	0.583	0.503	0.432
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.398	0.421	0.444	0.467	0.490	0.514	0.538	0.599	0.661	0.722	0.782
n_2	0.648	0.584	0.532	0.489	0.451	0.419	0.389	0.326	0.273	0.228	0.187
α_u	0.768	0.764	0.767	0.775	0.786	0.799	0.814	0.855	0.899	0.943	0.984
n_3	1.218	1.109	1.022	0.944	0.881	0.824	0.774	0.666	0.578	0.498	0.427
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.439	0.462	0.485	0.508	0.531	0.555	0.579	0.640	0.700	0.760	0.817
n_2	0.618	0.562	0.516	0.476	0.441	0.410	0.382	0.320	0.268	0.222	0.182
α_u	0.833	0.833	0.837	0.846	0.857	0.869	0.883	0.921	0.961	1.000	1.036
n_3	1.168	1.072	0.996	0.926	0.866	0.815	0.767	0.660	0.568	0.487	0.417
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.479	0.502	0.525	0.548	0.572	0.595	0.619	0.679	0.738	0.796	0.851
n_2	0.594	0.544	0.502	0.465	0.432	0.402	0.374	0.313	0.262	0.216	0.176
α_u	0.901	0.902	0.907	0.915	0.926	0.937	0.950	0.985	1.020	1.054	1.084
n_3	1.129	1.044	0.972	0.910	0.852	0.802	0.754	0.648	0.562	0.481	0.406
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.519	0.542	0.564	0.588	0.611	0.634	0.658	0.716	0.774	0.829	0.866
n_2	0.573	0.528	0.489	0.454	0.422	0.393	0.366	0.306	0.255	0.210	0.173
α_u	0.969	0.971	0.976	0.983	0.993	1.003	1.015	1.045	1.075	1.103	1.107
n_3	1.098	1.023	0.954	0.894	0.837	0.788	0.741	0.641	0.550	0.470	0.403
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.558	0.580	0.603	0.626	0.649	0.672	0.695	0.752	0.807	0.861	0.882
n_2	0.555	0.514	0.476	0.443	0.412	0.384	0.357	0.299	0.248	0.203	0.170
α_u	1.036	1.038	1.043	1.049	1.057	1.066	1.076	1.101	1.126	1.148	1.128
n_3	1.070	0.999	0.936	0.878	0.822	0.774	0.732	0.629	0.538	0.458	0.395
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.596	0.618	0.640	0.663	0.685	0.708	0.730	0.786	0.839	0.890	0.896
n_2	0.539	0.500	0.464	0.432	0.402	0.374	0.349	0.291	0.240	0.196	0.167
α_u	1.102	1.103	1.107	1.112	1.119	1.126	1.133	1.153	1.172	1.188	1.147
n_3	1.044	0.980	0.914	0.862	0.807	0.759	0.719	0.616	0.525	0.446	0.392
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.632	0.654	0.676	0.699	0.721	0.743	0.764	0.818	0.869	0.917	0.910
n_2	0.524	0.486	0.452	0.421	0.392	0.365	0.339	0.282	0.232	0.188	0.163
α_u	1.165	1.166	1.168	1.172	1.176	1.181	1.187	1.201	1.214	1.223	1.166
n_3	1.019	0.956	0.897	0.846	0.792	0.745	0.704	0.602	0.512	0.433	

ω=0.10　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(18)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.393	0.417	0.441	0.467	0.492	0.518	0.545	0.612	0.681	0.749	0.816
n_2	0.723	0.640	0.577	0.526	0.484	0.447	0.415	0.347	0.292	0.244	0.201
α_u	0.813	0.802	0.803	0.810	0.822	0.837	0.855	0.904	0.959	1.013	1.066
n_3	1.348	1.205	1.097	1.011	0.939	0.877	0.820	0.707	0.612	0.529	0.451
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.437	0.462	0.487	0.512	0.538	0.564	0.591	0.658	0.726	0.793	0.858
n_2	0.679	0.612	0.557	0.512	0.473	0.438	0.408	0.342	0.286	0.239	0.196
α_u	0.883	0.879	0.882	0.891	0.904	0.919	0.936	0.983	1.034	1.084	1.131
n_3	1.274	1.162	1.067	0.992	0.923	0.863	0.813	0.702	0.606	0.519	0.446
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.482	0.507	0.532	0.557	0.583	0.609	0.636	0.702	0.769	0.834	0.897
n_2	0.647	0.589	0.541	0.499	0.462	0.430	0.400	0.335	0.281	0.233	0.191
α_u	0.958	0.958	0.963	0.972	0.985	0.999	1.015	1.059	1.105	1.150	1.192
n_3	1.227	1.124	1.041	0.969	0.907	0.855	0.800	0.690	0.596	0.513	0.436
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.526	0.551	0.576	0.602	0.627	0.653	0.680	0.745	0.810	0.873	0.934
n_2	0.622	0.570	0.526	0.487	0.452	0.421	0.392	0.328	0.274	0.227	0.185
α_u	1.036	1.037	1.043	1.053	1.064	1.078	1.093	1.132	1.173	1.212	1.247
n_3	1.187	1.095	1.021	0.952	0.892	0.841	0.792	0.683	0.589	0.502	0.425
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.569	0.594	0.619	0.645	0.670	0.696	0.722	0.786	0.849	0.910	0.951
n_2	0.601	0.553	0.512	0.475	0.442	0.411	0.383	0.321	0.267	0.220	0.181
α_u	1.114	1.116	1.122	1.131	1.142	1.154	1.167	1.201	1.236	1.268	1.272
n_3	1.151	1.068	0.997	0.935	0.877	0.826	0.778	0.671	0.577	0.490	0.421
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.612	0.637	0.662	0.687	0.712	0.737	0.763	0.825	0.886	0.944	0.968
n_2	0.582	0.538	0.499	0.464	0.432	0.402	0.374	0.313	0.260	0.213	0.178
α_u	1.191	1.193	1.199	1.206	1.216	1.226	1.237	1.266	1.294	1.320	1.296
n_3	1.122	1.048	0.979	0.919	0.862	0.812	0.764	0.658	0.565	0.478	0.413
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.654	0.678	0.703	0.728	0.752	0.777	0.802	0.862	0.921	0.977	0.984
n_2	0.565	0.523	0.486	0.452	0.421	0.392	0.365	0.305	0.252	0.205	0.175
α_u	1.267	1.268	1.273	1.279	1.286	1.294	1.303	1.326	1.347	1.366	1.319
n_3	1.095	1.023	0.961	0.902	0.846	0.797	0.750	0.645	0.552	0.465	0.410
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.694	0.718	0.742	0.767	0.791	0.815	0.839	0.897	0.954	1.006	0.999
n_2	0.549	0.509	0.474	0.441	0.410	0.382	0.355	0.296	0.243	0.197	0.171
α_u	1.340	1.340	1.343	1.347	1.352	1.358	1.365	1.381	1.395	1.406	1.341
n_3	1.069	0.999	0.939	0.886	0.830	0.782	0.735	0.631	0.538	0.452	0.401

$\omega=0.15$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$（查表 3-2）　　**表 3-8(19)**

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.429	0.455	0.482	0.510	0.538	0.567	0.595	0.669	0.744	0.819	0.892
n_2	0.756	0.669	0.603	0.550	0.506	0.468	0.434	0.363	0.305	0.255	0.210
α_u	0.930	0.917	0.917	0.925	0.939	0.956	0.976	1.033	1.095	1.158	1.218
n_3	1.411	1.259	1.148	1.055	0.981	0.918	0.859	0.738	0.640	0.550	0.475
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.478	0.505	0.532	0.560	0.588	0.617	0.646	0.719	0.793	0.866	0.938
n_2	0.710	0.639	0.583	0.535	0.494	0.458	0.426	0.357	0.299	0.249	0.205
α_u	1.009	1.004	1.008	1.018	1.033	1.050	1.069	1.124	1.181	1.238	1.293
n_3	1.335	1.214	1.118	1.035	0.964	0.903	0.851	0.732	0.629	0.544	0.465
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.527	0.554	0.581	0.609	0.638	0.666	0.695	0.768	0.840	0.911	0.980
n_2	0.677	0.616	0.565	0.522	0.483	0.449	0.418	0.351	0.293	0.243	0.199
α_u	1.095	1.094	1.100	1.111	1.125	1.142	1.160	1.211	1.263	1.314	1.362
n_3	1.282	1.176	1.090	1.017	0.948	0.889	0.838	0.721	0.623	0.533	0.454
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.575	0.602	0.630	0.658	0.686	0.714	0.743	0.814	0.885	0.954	1.020
n_2	0.650	0.596	0.550	0.509	0.473	0.440	0.410	0.343	0.287	0.237	0.193
α_u	1.183	1.185	1.192	1.203	1.216	1.232	1.248	1.294	1.340	1.384	1.424
n_3	1.240	1.146	1.065	0.999	0.933	0.880	0.825	0.713	0.612	0.527	0.448
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.622	0.650	0.677	0.705	0.733	0.761	0.789	0.859	0.928	0.995	1.039
n_2	0.628	0.579	0.535	0.497	0.462	0.430	0.401	0.336	0.279	0.230	0.190
α_u	1.273	1.275	1.282	1.292	1.304	1.318	1.333	1.373	1.412	1.449	1.452
n_3	1.203	1.119	1.045	0.977	0.917	0.865	0.816	0.701	0.604	0.515	0.440
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.669	0.696	0.723	0.751	0.778	0.806	0.833	0.902	0.968	1.032	1.057
n_2	0.608	0.562	0.522	0.485	0.451	0.420	0.391	0.327	0.271	0.222	0.186
α_u	1.361	1.364	1.370	1.378	1.389	1.401	1.413	1.447	1.479	1.507	1.479
n_3	1.173	1.092	1.022	0.960	0.901	0.850	0.801	0.687	0.591	0.502	0.436
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.714	0.741	0.768	0.795	0.822	0.849	0.876	0.942	1.007	1.066	1.074
n_2	0.590	0.547	0.508	0.473	0.440	0.410	0.382	0.318	0.263	0.214	0.182
α_u	1.447	1.449	1.454	1.461	1.470	1.479	1.489	1.515	1.540	1.556	1.503
n_3	1.145	1.072	1.003	0.943	0.885	0.835	0.787	0.673	0.578	0.489	0.427
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.759	0.785	0.811	0.838	0.864	0.891	0.917	0.981	1.042	1.097	1.090
n_2	0.573	0.532	0.495	0.461	0.429	0.399	0.372	0.309	0.254	0.206	0.179
α_u	1.531	1.531	1.534	1.539	1.545	1.552	1.559	1.578	1.593	1.598	1.525
n_3	1.118	1.047	0.985	0.926	0.869	0.819	0.767	0.659	0.559	0.471	0.419

$\omega=0.20$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$（查表 3-2）　　**表 3-8(20)**

K_{x1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.467	0.496	0.525	0.555	0.586	0.617	0.648	0.729	0.810	0.891	0.972
n_2	0.789	0.698	0.629	0.574	0.528	0.488	0.453	0.379	0.318	0.266	0.220
α_u	1.056	1.042	1.042	1.051	1.067	1.087	1.109	1.174	1.244	1.315	1.384
n_3	1.469	1.313	1.199	1.104	1.023	0.958	0.898	0.769	0.668	0.576	0.495
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.520	0.550	0.579	0.610	0.640	0.672	0.703	0.783	0.863	0.943	1.021
n_2	0.741	0.667	0.608	0.558	0.516	0.478	0.445	0.373	0.312	0.260	0.214
α_u	1.147	1.141	1.145	1.157	1.173	1.193	1.215	1.277	1.342	1.407	1.468
n_3	1.391	1.267	1.163	1.078	1.006	0.943	0.885	0.763	0.657	0.570	0.484
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.573	0.603	0.633	0.663	0.694	0.725	0.757	0.836	0.915	0.992	1.066
n_2	0.706	0.643	0.590	0.544	0.504	0.469	0.436	0.366	0.306	0.254	0.208
α_u	1.244	1.243	1.250	1.262	1.279	1.298	1.318	1.375	1.435	1.493	1.543
n_3	1.336	1.228	1.135	1.059	0.989	0.929	0.876	0.756	0.651	0.559	0.478
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.626	0.656	0.686	0.716	0.747	0.778	0.809	0.887	0.964	1.039	1.108
n_2	0.678	0.622	0.574	0.531	0.493	0.459	0.427	0.358	0.299	0.247	0.201
α_u	1.345	1.346	1.354	1.366	1.382	1.399	1.419	1.470	1.523	1.571	1.608
n_3	1.293	1.197	1.114	1.041	0.973	0.914	0.862	0.743	0.639	0.547	0.466
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.678	0.707	0.737	0.767	0.798	0.828	0.859	0.935	1.010	1.081	1.128
n_2	0.655	0.604	0.559	0.518	0.482	0.449	0.418	0.350	0.291	0.240	0.197
α_u	1.446	1.449	1.457	1.468	1.482	1.498	1.515	1.560	1.604	1.640	1.637
n_3	1.255	1.169	1.089	1.023	0.957	0.904	0.848	0.730	0.626	0.535	0.457
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.728	0.758	0.788	0.817	0.847	0.877	0.908	0.982	1.054	1.120	1.146
n_2	0.635	0.587	0.544	0.506	0.471	0.439	0.408	0.341	0.283	0.232	0.194
α_u	1.546	1.549	1.556	1.566	1.578	1.592	1.606	1.644	1.677	1.700	1.664
n_3	1.225	1.142	1.069	1.001	0.941	0.889	0.833	0.716	0.613	0.522	0.454
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.778	0.807	0.836	0.866	0.895	0.925	0.954	1.026	1.094	1.156	1.164
n_2	0.616	0.571	0.530	0.493	0.459	0.428	0.398	0.332	0.274	0.223	0.190
α_u	1.644	1.647	1.652	1.660	1.670	1.680	1.692	1.721	1.741	1.750	1.688
n_3	1.196	1.116	1.045	0.983	0.924	0.868	0.818	0.702	0.599	0.508	0.445
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.826	0.855	0.884	0.912	0.941	0.970	0.998	1.067	1.131	1.189	1.181
n_2	0.598	0.556	0.517	0.481	0.448	0.417	0.388	0.322	0.265	0.214	0.186
α_u	1.739	1.740	1.743	1.749	1.756	1.764	1.772	1.788	1.795	1.792	1.711
n_3	1.168	1.091	1.027	0.966	0.908	0.852	0.803	0.687	0.585	0.489	0.436

$\omega=0.25$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(21)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.507	0.538	0.570	0.602	0.636	0.669	0.704	0.791	0.879	0.967	1.053
n_2	0.821	0.727	0.656	0.598	0.550	0.508	0.472	0.395	0.331	0.277	0.229
α_u	1.194	1.177	1.178	1.188	1.206	1.228	1.254	1.327	1.407	1.487	1.562
n_3	1.531	1.372	1.246	1.148	1.065	0.998	0.932	0.805	0.696	0.602	0.514
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.565	0.596	0.629	0.662	0.695	0.729	0.763	0.850	0.937	1.023	1.105
n_2	0.772	0.695	0.633	0.582	0.537	0.498	0.463	0.388	0.326	0.271	0.223
α_u	1.296	1.289	1.295	1.308	1.326	1.348	1.373	1.443	1.517	1.590	1.650
n_3	1.452	1.320	1.213	1.127	1.047	0.983	0.923	0.793	0.686	0.591	0.503
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.622	0.654	0.687	0.720	0.753	0.787	0.821	0.907	0.993	1.075	1.153
n_2	0.735	0.669	0.614	0.567	0.525	0.488	0.454	0.381	0.319	0.264	0.216
α_u	1.406	1.405	1.413	1.427	1.445	1.467	1.490	1.555	1.622	1.682	1.727
n_3	1.390	1.279	1.184	1.102	1.030	0.968	0.909	0.786	0.679	0.579	0.496
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.679	0.711	0.744	0.777	0.810	0.844	0.878	0.962	1.045	1.124	1.196
n_2	0.707	0.648	0.597	0.553	0.514	0.478	0.445	0.373	0.311	0.257	0.209
α_u	1.520	1.522	1.531	1.545	1.562	1.582	1.603	1.662	1.719	1.763	1.794
n_3	1.347	1.243	1.157	1.083	1.014	0.953	0.900	0.773	0.666	0.567	0.484
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.735	0.767	0.800	0.833	0.866	0.899	0.932	1.015	1.094	1.168	1.216
n_2	0.682	0.629	0.582	0.540	0.502	0.468	0.436	0.365	0.303	0.249	0.205
α_u	1.634	1.638	1.646	1.659	1.675	1.693	1.712	1.763	1.805	1.834	1.823
n_3	1.307	1.214	1.137	1.065	0.997	0.938	0.886	0.760	0.653	0.554	0.475
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.790	0.822	0.855	0.887	0.920	0.952	0.985	1.064	1.139	1.209	1.236
n_2	0.661	0.611	0.567	0.527	0.490	0.457	0.425	0.355	0.294	0.241	0.201
α_u	1.748	1.751	1.759	1.770	1.784	1.799	1.815	1.853	1.880	1.895	1.851
n_3	1.276	1.186	1.112	1.042	0.980	0.922	0.870	0.745	0.639	0.541	0.466
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.844	0.876	0.908	0.939	0.971	1.003	1.035	1.110	1.181	1.246	1.254
n_2	0.642	0.595	0.553	0.514	0.479	0.446	0.415	0.346	0.285	0.232	0.197
α_u	1.859	1.861	1.867	1.876	1.887	1.899	1.911	1.933	1.945	1.946	1.876
n_3	1.242	1.165	1.093	1.024	0.964	0.906	0.855	0.731	0.625	0.527	0.462
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.896	0.927	0.959	0.990	1.021	1.052	1.082	1.153	1.219	1.280	1.272
n_2	0.623	0.579	0.538	0.501	0.466	0.434	0.404	0.335	0.275	0.222	0.193
α_u	1.966	1.967	1.971	1.977	1.984	1.990	1.996	2.002	2.000	1.989	1.899
n_3	1.213	1.139	1.068	1.006	0.941	0.889	0.834	0.715	0.605	0.507	0.453

$\omega=0.30$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{zc}$(查表 3-2)　　表 3-8(22)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.548	0.582	0.616	0.652	0.688	0.724	0.761	0.855	0.951	1.046	1.136
n_2	0.854	0.756	0.682	0.622	0.572	0.529	0.491	0.411	0.345	0.288	0.237
α_u	1.343	1.324	1.325	1.337	1.357	1.382	1.411	1.493	1.582	1.671	1.743
n_3	1.594	1.426	1.297	1.197	1.112	1.039	0.971	0.836	0.720	0.623	0.532
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.611	0.645	0.680	0.716	0.752	0.788	0.825	0.919	1.013	1.104	1.189
n_2	0.803	0.723	0.659	0.605	0.559	0.518	0.482	0.404	0.339	0.282	0.231
α_u	1.458	1.451	1.456	1.471	1.492	1.517	1.545	1.623	1.706	1.778	1.833
n_3	1.508	1.373	1.264	1.170	1.094	1.023	0.962	0.829	0.714	0.612	0.521
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.673	0.708	0.743	0.779	0.815	0.851	0.888	0.981	1.072	1.158	1.239
n_2	0.765	0.696	0.639	0.590	0.546	0.508	0.473	0.396	0.331	0.274	0.224
α_u	1.582	1.581	1.589	1.605	1.626	1.650	1.676	1.749	1.819	1.874	1.913
n_3	1.445	1.331	1.234	1.150	1.071	1.008	0.948	0.816	0.701	0.604	0.509
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.735	0.769	0.805	0.840	0.876	0.913	0.949	1.040	1.127	1.209	1.284
n_2	0.735	0.674	0.621	0.575	0.534	0.497	0.463	0.388	0.323	0.267	0.216
α_u	1.710	1.712	1.722	1.737	1.757	1.779	1.804	1.867	1.920	1.957	1.981
n_3	1.400	1.294	1.206	1.125	1.054	0.992	0.933	0.803	0.693	0.592	0.496
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.795	0.830	0.865	0.901	0.936	0.972	1.008	1.095	1.178	1.255	1.305
n_2	0.710	0.654	0.605	0.562	0.522	0.486	0.453	0.379	0.315	0.258	0.212
α_u	1.838	1.842	1.852	1.867	1.884	1.904	1.926	1.973	2.008	2.030	2.012
n_3	1.360	1.264	1.180	1.107	1.037	0.976	0.918	0.789	0.675	0.573	0.492
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.855	0.889	0.924	0.959	0.995	1.030	1.064	1.147	1.225	1.297	1.325
n_2	0.688	0.636	0.590	0.548	0.510	0.475	0.442	0.369	0.305	0.249	0.208
α_u	1.966	1.970	1.979	1.991	2.007	2.023	2.037	2.067	2.085	2.092	2.040
n_3	1.323	1.236	1.155	1.083	1.020	0.960	0.902	0.774	0.660	0.559	0.483
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.913	0.947	0.982	1.016	1.050	1.083	1.116	1.195	1.268	1.336	1.344
n_2	0.667	0.619	0.575	0.535	0.498	0.463	0.431	0.358	0.295	0.240	0.204
α_u	2.091	2.094	2.101	2.110	2.120	2.129	2.136	2.149	2.152	2.144	2.065
n_3	1.292	1.209	1.135	1.065	1.003	0.943	0.886	0.758	0.645	0.545	0.474
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.969	1.003	1.037	1.070	1.102	1.134	1.165	1.239	1.308	1.371	1.363
n_2	0.648	0.602	0.560	0.521	0.484	0.451	0.419	0.347	0.285	0.230	0.200
α_u	2.211	2.212	2.215	2.218	2.221	2.222	2.223	2.220	2.208	2.188	2.089
n_3	1.263	1.182	1.110	1.041	0.979	0.921	0.864	0.737	0.625	0.525	0.470

$\omega=0.35$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(23)

K_{x1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.591	0.628	0.665	0.703	0.741	0.781	0.821	0.922	1.025	1.124	1.218
n_2	0.887	0.785	0.708	0.646	0.594	0.549	0.510	0.426	0.358	0.299	0.246
α_u	1.504	1.483	1.484	1.497	1.519	1.547	1.580	1.672	1.771	1.858	1.925
n_3	1.652	1.480	1.348	1.241	1.154	1.074	1.010	0.866	0.748	0.644	0.551
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.659	0.696	0.733	0.772	0.811	0.850	0.890	0.991	1.091	1.185	1.274
n_2	0.834	0.751	0.684	0.628	0.580	0.538	0.500	0.419	0.351	0.292	0.239
α_u	1.633	1.624	1.631	1.647	1.671	1.699	1.730	1.818	1.902	1.969	2.019
n_3	1.569	1.426	1.309	1.213	1.135	1.063	0.995	0.859	0.741	0.637	0.539
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.726	0.763	0.801	0.840	0.879	0.918	0.958	1.057	1.152	1.241	1.325
n_2	0.794	0.723	0.663	0.612	0.567	0.527	0.491	0.411	0.343	0.284	0.232
α_u	1.771	1.770	1.780	1.797	1.821	1.847	1.877	1.955	2.019	2.068	2.101
n_3	1.504	1.383	1.278	1.192	1.112	1.047	0.986	0.846	0.728	0.624	0.527
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.792	0.830	0.868	0.906	0.945	0.984	1.023	1.119	1.209	1.294	1.372
n_2	0.763	0.700	0.645	0.598	0.555	0.516	0.481	0.402	0.335	0.276	0.224
α_u	1.915	1.917	1.928	1.946	1.967	1.993	2.019	2.078	2.123	2.154	2.171
n_3	1.453	1.345	1.250	1.168	1.095	1.031	0.971	0.832	0.715	0.611	0.514
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.858	0.895	0.933	0.971	1.010	1.048	1.085	1.176	1.262	1.341	1.394
n_2	0.737	0.679	0.628	0.583	0.542	0.505	0.470	0.393	0.326	0.267	0.219
α_u	2.059	2.063	2.074	2.090	2.110	2.130	2.148	2.187	2.214	2.228	2.202
n_3	1.412	1.314	1.223	1.148	1.077	1.015	0.955	0.818	0.701	0.592	0.504
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.922	0.959	0.997	1.034	1.071	1.108	1.143	1.230	1.311	1.385	1.415
n_2	0.714	0.660	0.612	0.569	0.529	0.493	0.459	0.382	0.316	0.258	0.215
α_u	2.202	2.206	2.216	2.229	2.241	2.253	2.264	2.284	2.293	2.292	2.231
n_3	1.374	1.285	1.202	1.129	1.059	0.993	0.934	0.802	0.681	0.578	0.500
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.985	1.021	1.058	1.094	1.129	1.164	1.198	1.279	1.356	1.426	1.434
n_2	0.693	0.642	0.596	0.555	0.516	0.480	0.446	0.371	0.305	0.248	0.211
α_u	2.341	2.344	2.348	2.353	2.358	2.362	2.366	2.368	2.361	2.345	2.257
n_3	1.343	1.257	1.176	1.105	1.036	0.975	0.916	0.781	0.665	0.558	0.491
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.045	1.080	1.115	1.149	1.183	1.216	1.248	1.325	1.397	1.462	1.453
n_2	0.673	0.625	0.580	0.540	0.502	0.467	0.434	0.359	0.294	0.238	0.206
α_u	2.474	2.470	2.467	2.464	2.462	2.458	2.455	2.440	2.418	2.388	2.280
n_3	1.313	1.230	1.150	1.080	1.012	0.952	0.894	0.764	0.644	0.543	0.481

$\omega=0.40$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(24)

K_{a1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.636	0.675	0.715	0.756	0.797	0.840	0.882	0.992	1.100	1.203	1.300
n_2	0.920	0.815	0.734	0.670	0.616	0.569	0.528	0.442	0.371	0.309	0.254
α_u	1.677	1.654	1.655	1.670	1.694	1.726	1.762	1.865	1.966	2.047	2.110
n_3	1.715	1.535	1.399	1.285	1.196	1.114	1.048	0.897	0.776	0.669	0.569
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.708	0.748	0.789	0.830	0.872	0.914	0.957	1.065	1.168	1.266	1.358
n_2	0.865	0.778	0.709	0.652	0.602	0.558	0.519	0.435	0.363	0.302	0.247
α_u	1.821	1.812	1.819	1.837	1.863	1.894	1.929	2.023	2.101	2.163	2.207
n_3	1.625	1.478	1.359	1.262	1.177	1.098	1.034	0.890	0.763	0.657	0.557
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.781	0.821	0.861	0.903	0.945	0.987	1.030	1.133	1.232	1.325	1.411
n_2	0.824	0.750	0.688	0.635	0.588	0.547	0.509	0.426	0.355	0.293	0.239
α_u	1.976	1.974	1.985	2.005	2.030	2.060	2.093	2.165	2.222	2.264	2.291
n_3	1.559	1.430	1.328	1.235	1.158	1.087	1.019	0.876	0.750	0.643	0.544
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.852	0.892	0.933	0.975	1.016	1.058	1.098	1.197	1.291	1.378	1.460
n_2	0.791	0.726	0.669	0.620	0.575	0.535	0.498	0.416	0.346	0.285	0.231
α_u	2.135	2.138	2.151	2.170	2.194	2.218	2.242	2.292	2.329	2.353	2.363
n_3	1.506	1.396	1.299	1.215	1.135	1.070	1.003	0.861	0.736	0.630	0.537
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.922	0.963	1.003	1.044	1.084	1.124	1.163	1.257	1.345	1.428	1.482
n_2	0.764	0.704	0.652	0.605	0.562	0.523	0.486	0.406	0.336	0.275	0.226
α_u	2.296	2.301	2.313	2.329	2.345	2.361	2.375	2.405	2.423	2.429	2.395
n_3	1.464	1.359	1.272	1.190	1.117	1.048	0.986	0.846	0.721	0.610	0.521
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.991	1.031	1.071	1.110	1.148	1.186	1.223	1.312	1.396	1.474	1.504
n_2	0.740	0.685	0.635	0.589	0.548	0.510	0.474	0.395	0.326	0.266	0.222
α_u	2.456	2.459	2.465	2.473	2.480	2.487	2.494	2.504	2.504	2.494	2.424
n_3	1.425	1.330	1.245	1.164	1.093	1.030	0.964	0.825	0.706	0.596	0.512
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.058	1.096	1.134	1.171	1.208	1.244	1.279	1.364	1.443	1.515	1.525
n_2	0.718	0.665	0.618	0.574	0.534	0.496	0.461	0.383	0.315	0.256	0.217
α_u	2.607	2.603	2.602	2.601	2.601	2.600	2.598	2.590	2.573	2.548	2.450
n_3	1.393	1.300	1.218	1.144	1.074	1.006	0.946	0.808	0.685	0.576	0.502
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.121	1.157	1.193	1.229	1.264	1.298	1.331	1.411	1.486	1.553	1.544
n_2	0.697	0.646	0.600	0.558	0.519	0.482	0.448	0.371	0.304	0.245	0.213
α_u	2.743	2.732	2.723	2.715	2.707	2.698	2.690	2.664	2.631	2.591	2.474
n_3	1.357	1.271	1.190	1.118	1.049	0.982	0.923	0.786	0.664	0.555	0.498

$\omega=0.45$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(25)

K_{n1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.682	0.724	0.767	0.811	0.855	0.901	0.947	1.063	1.175	1.282	1.382
n_2	0.953	0.844	0.761	0.694	0.638	0.590	0.547	0.458	0.383	0.319	0.262
α_u	1.863	1.838	1.838	1.855	1.882	1.917	1.957	2.067	2.163	2.240	2.297
n_3	1.778	1.589	1.446	1.334	1.238	1.155	1.082	0.933	0.803	0.689	0.587
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.760	0.802	0.846	0.890	0.935	0.981	1.026	1.138	1.246	1.347	1.442
n_2	0.895	0.806	0.735	0.675	0.623	0.578	0.537	0.449	0.375	0.311	0.254
α_u	2.023	2.013	2.021	2.041	2.070	2.105	2.143	2.231	2.303	2.358	2.396
n_3	1.680	1.531	1.405	1.305	1.218	1.138	1.072	0.919	0.790	0.676	0.574
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.837	0.880	0.924	0.969	1.013	1.058	1.102	1.209	1.311	1.408	1.497
n_2	0.853	0.777	0.713	0.658	0.609	0.566	0.526	0.440	0.366	0.303	0.246
α_u	2.195	2.193	2.205	2.227	2.256	2.285	2.314	2.378	2.428	2.463	2.483
n_3	1.613	1.482	1.373	1.278	1.199	1.121	1.056	0.905	0.776	0.663	0.556
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.914	0.957	1.001	1.045	1.088	1.131	1.173	1.276	1.373	1.463	1.547
n_2	0.820	0.752	0.693	0.642	0.595	0.553	0.515	0.430	0.357	0.293	0.238
α_u	2.372	2.375	2.389	2.408	2.428	2.449	2.468	2.509	2.538	2.554	2.556
n_3	1.560	1.442	1.343	1.257	1.175	1.103	1.035	0.890	0.762	0.643	0.543
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.990	1.032	1.075	1.117	1.159	1.200	1.240	1.337	1.429	1.515	1.571
n_2	0.792	0.729	0.675	0.625	0.581	0.540	0.502	0.419	0.347	0.284	0.233
α_u	2.551	2.555	2.563	2.573	2.584	2.595	2.606	2.625	2.635	2.632	2.589
n_3	1.517	1.409	1.315	1.230	1.156	1.085	1.017	0.869	0.742	0.629	0.533
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.063	1.104	1.145	1.185	1.225	1.264	1.302	1.395	1.482	1.562	1.593
n_2	0.767	0.708	0.656	0.609	0.566	0.526	0.489	0.407	0.336	0.274	0.228
α_u	2.723	2.719	2.719	2.721	2.724	2.726	2.728	2.727	2.717	2.698	2.618
n_3	1.477	1.378	1.286	1.204	1.131	1.061	0.994	0.852	0.726	0.609	0.528
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.132	1.171	1.210	1.249	1.287	1.324	1.360	1.448	1.530	1.605	1.615
n_2	0.743	0.688	0.638	0.593	0.551	0.512	0.476	0.395	0.324	0.263	0.224
α_u	2.878	2.867	2.859	2.853	2.847	2.841	2.835	2.815	2.788	2.752	2.645
n_3	1.438	1.343	1.258	1.178	1.106	1.037	0.976	0.830	0.704	0.593	0.519
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.196	1.234	1.272	1.308	1.345	1.380	1.415	1.498	1.574	1.645	1.635
n_2	0.720	0.668	0.620	0.576	0.535	0.497	0.462	0.382	0.313	0.252	0.219
α_u	3.018	2.999	2.984	2.969	2.956	2.942	2.928	2.890	2.846	2.796	2.669
n_3	1.400	1.313	1.225	1.151	1.080	1.012	0.952	0.807	0.683	0.572	0.509

$\omega=0.50$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(26)

K_{A1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.730	0.775	0.821	0.868	0.915	0.964	1.013	1.134	1.250	1.360	1.464
n_2	0.986	0.873	0.787	0.718	0.660	0.610	0.566	0.473	0.395	0.328	0.270
α_u	2.063	2.034	2.035	2.054	2.084	2.123	2.167	2.273	2.363	2.434	2.486
n_3	1.836	1.643	1.497	1.378	1.280	1.195	1.121	0.963	0.825	0.708	0.600
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.813	0.859	0.905	0.953	1.001	1.049	1.096	1.212	1.323	1.428	1.526
n_2	0.926	0.834	0.760	0.698	0.645	0.598	0.555	0.464	0.387	0.320	0.262
α_u	2.240	2.228	2.237	2.260	2.292	2.327	2.362	2.443	2.508	2.556	2.588
n_3	1.741	1.584	1.455	1.348	1.260	1.178	1.105	0.949	0.812	0.695	0.587
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.896	0.942	0.989	1.036	1.083	1.129	1.175	1.285	1.391	1.491	1.583
n_2	0.883	0.803	0.737	0.680	0.630	0.585	0.544	0.454	0.377	0.311	0.253
α_u	2.430	2.428	2.442	2.464	2.489	2.514	2.539	2.595	2.637	2.664	2.676
n_3	1.668	1.533	1.422	1.325	1.235	1.160	1.089	0.934	0.797	0.681	0.573
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.978	1.024	1.070	1.115	1.160	1.205	1.248	1.354	1.454	1.548	1.635
n_2	0.848	0.777	0.717	0.663	0.615	0.571	0.531	0.443	0.367	0.302	0.244
α_u	2.626	2.629	2.639	2.652	2.667	2.683	2.698	2.730	2.750	2.757	2.751
n_3	1.613	1.492	1.392	1.298	1.215	1.136	1.071	0.913	0.782	0.662	0.559
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.058	1.103	1.147	1.190	1.233	1.275	1.317	1.418	1.513	1.602	1.660
n_2	0.819	0.754	0.697	0.646	0.599	0.557	0.518	0.431	0.357	0.292	0.240
α_u	2.820	2.816	2.817	2.822	2.828	2.834	2.840	2.849	2.849	2.837	2.784
n_3	1.569	1.454	1.357	1.271	1.189	1.117	1.048	0.896	0.762	0.647	0.550
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.134	1.176	1.219	1.260	1.301	1.342	1.382	1.477	1.567	1.650	1.683
n_2	0.792	0.731	0.677	0.628	0.583	0.542	0.504	0.419	0.345	0.281	0.235
α_u	2.996	2.985	2.978	2.974	2.971	2.968	2.965	2.953	2.933	2.904	2.814
n_3	1.527	1.421	1.327	1.243	1.163	1.092	1.024	0.874	0.740	0.626	0.540
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.205	1.246	1.286	1.326	1.365	1.404	1.442	1.533	1.617	1.695	1.705
n_2	0.767	0.709	0.658	0.611	0.567	0.527	0.490	0.406	0.334	0.270	0.230
α_u	3.155	3.137	3.122	3.109	3.098	3.086	3.075	3.043	3.005	2.959	2.841
n_3	1.482	1.384	1.293	1.211	1.137	1.067	1.000	0.851	0.724	0.605	0.530
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.272	1.311	1.350	1.388	1.425	1.462	1.498	1.584	1.663	1.736	1.726
n_2	0.743	0.688	0.639	0.593	0.551	0.512	0.475	0.393	0.321	0.259	0.225
α_u	3.298	3.272	3.249	3.228	3.209	3.189	3.170	3.119	3.064	3.003	2.866
n_3	1.443	1.348	1.264	1.183	1.111	1.042	0.975	0.828	0.701	0.584	0.520

$\omega=0.55$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$（查表 3-2）　　表 3-8(27)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.779	0.827	0.876	0.926	0.977	1.029	1.080	1.205	1.325	1.439	1.546
n_2	1.019	0.902	0.813	0.742	0.682	0.630	0.585	0.487	0.407	0.338	0.277
α_u	2.276	2.245	2.245	2.266	2.299	2.341	2.383	2.482	2.566	2.631	2.676
n_3	1.899	1.697	1.548	1.427	1.322	1.235	1.155	0.987	0.847	0.728	0.617
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.868	0.917	0.967	1.017	1.067	1.117	1.166	1.286	1.400	1.509	1.610
n_2	0.957	0.862	0.785	0.721	0.666	0.617	0.573	0.478	0.398	0.329	0.269
α_u	2.471	2.459	2.468	2.493	2.523	2.554	2.585	2.657	2.715	2.757	2.781
n_3	1.797	1.637	1.505	1.396	1.301	1.217	1.138	0.973	0.833	0.714	0.604
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.957	1.006	1.055	1.104	1.152	1.200	1.247	1.362	1.471	1.574	1.669
n_2	0.912	0.830	0.762	0.702	0.650	0.603	0.560	0.467	0.388	0.320	0.260
α_u	2.681	2.679	2.690	2.707	2.726	2.747	2.768	2.814	2.848	2.867	2.872
n_3	1.727	1.585	1.467	1.367	1.275	1.193	1.120	0.957	0.818	0.695	0.585
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.044	1.092	1.139	1.186	1.232	1.278	1.323	1.432	1.536	1.633	1.723
n_2	0.876	0.803	0.739	0.684	0.634	0.588	0.547	0.455	0.378	0.310	0.251
α_u	2.895	2.890	2.893	2.900	2.910	2.921	2.931	2.953	2.964	2.962	2.948
n_3	1.666	1.543	1.434	1.339	1.249	1.173	1.097	0.940	0.803	0.680	0.571
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.127	1.173	1.218	1.263	1.308	1.351	1.394	1.498	1.597	1.688	1.748
n_2	0.845	0.777	0.718	0.665	0.617	0.573	0.533	0.443	0.366	0.300	0.246
α_u	3.094	3.082	3.077	3.075	3.075	3.076	3.077	3.076	3.065	3.044	2.982
n_3	1.620	1.502	1.398	1.305	1.222	1.148	1.078	0.918	0.781	0.660	0.561
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.205	1.249	1.293	1.336	1.378	1.420	1.461	1.560	1.653	1.739	1.772
n_2	0.816	0.753	0.697	0.647	0.600	0.558	0.518	0.430	0.355	0.289	0.241
α_u	3.274	3.255	3.242	3.231	3.222	3.214	3.206	3.182	3.151	3.112	3.012
n_3	1.571	1.463	1.367	1.277	1.195	1.123	1.053	0.895	0.760	0.644	0.551
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.279	1.321	1.363	1.404	1.444	1.484	1.523	1.617	1.705	1.785	1.795
n_2	0.790	0.730	0.677	0.628	0.584	0.542	0.503	0.417	0.342	0.277	0.236
α_u	3.437	3.411	3.389	3.370	3.352	3.335	3.318	3.274	3.224	3.167	3.040
n_3	1.525	1.425	1.332	1.248	1.169	1.097	1.028	0.872	0.737	0.622	0.546
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.348	1.388	1.428	1.468	1.506	1.544	1.581	1.670	1.752	1.827	1.817
n_2	0.764	0.708	0.657	0.610	0.566	0.526	0.488	0.403	0.330	0.266	0.231
α_u	3.582	3.549	3.519	3.491	3.465	3.440	3.415	3.351	3.284	3.211	3.064
n_3	1.484	1.388	1.297	1.215	1.141	1.066	1.003	0.848	0.720	0.601	0.536

$\omega=0.60$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2r}$（查表 3-2）　　**表 3-8(28)**

K_{z1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.831	0.882	0.934	0.987	1.041	1.094	1.147	1.276	1.400	1.518	1.628
n_2	1.051	0.931	0.839	0.766	0.704	0.650	0.603	0.502	0.418	0.347	0.284
α_u	2.503	2.469	2.470	2.492	2.527	2.565	2.603	2.695	2.771	2.829	2.869
n_3	1.961	1.751	1.594	1.471	1.364	1.275	1.193	1.017	0.873	0.747	0.629
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.925	0.977	1.030	1.082	1.134	1.185	1.236	1.360	1.478	1.590	1.695
n_2	0.988	0.890	0.811	0.744	0.686	0.636	0.590	0.491	0.409	0.338	0.276
α_u	2.718	2.704	2.714	2.734	2.758	2.785	2.812	2.875	2.925	2.959	2.976
n_3	1.858	1.690	1.551	1.439	1.341	1.251	1.175	1.001	0.854	0.728	0.616
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.019	1.071	1.121	1.172	1.222	1.271	1.320	1.438	1.550	1.657	1.755
n_2	0.941	0.856	0.785	0.723	0.669	0.620	0.576	0.480	0.399	0.328	0.267
α_u	2.948	2.940	2.943	2.954	2.968	2.984	3.000	3.036	3.061	3.072	3.069
n_3	1.781	1.636	1.510	1.408	1.314	1.230	1.151	0.985	0.839	0.713	0.602
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.110	1.159	1.208	1.256	1.304	1.352	1.398	1.511	1.618	1.718	1.811
n_2	0.903	0.827	0.761	0.704	0.652	0.605	0.562	0.468	0.387	0.318	0.257
α_u	3.170	3.156	3.152	3.153	3.157	3.163	3.168	3.179	3.181	3.170	3.147
n_3	1.718	1.587	1.476	1.374	1.287	1.205	1.127	0.963	0.822	0.693	0.582
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.195	1.243	1.290	1.336	1.382	1.427	1.472	1.579	1.681	1.775	1.837
n_2	0.870	0.800	0.739	0.684	0.634	0.589	0.547	0.455	0.376	0.307	0.252
α_u	3.373	3.353	3.340	3.332	3.327	3.322	3.318	3.305	3.284	3.253	3.181
n_3	1.665	1.545	1.439	1.344	1.254	1.179	1.102	0.940	0.801	0.677	0.572
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.276	1.321	1.367	1.411	1.455	1.498	1.540	1.642	1.738	1.827	1.862
n_2	0.840	0.775	0.717	0.665	0.617	0.573	0.532	0.442	0.364	0.296	0.247
α_u	3.558	3.530	3.509	3.492	3.477	3.464	3.450	3.414	3.372	3.322	3.212
n_3	1.615	1.505	1.402	1.310	1.227	1.153	1.077	0.917	0.779	0.656	0.567
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.352	1.396	1.439	1.481	1.523	1.564	1.605	1.701	1.792	1.875	1.885
n_2	0.812	0.751	0.696	0.645	0.599	0.556	0.517	0.428	0.351	0.284	0.242
α_u	3.724	3.689	3.660	3.634	3.610	3.587	3.565	3.508	3.446	3.378	3.240
n_3	1.567	1.461	1.366	1.280	1.199	1.121	1.052	0.893	0.756	0.634	0.557
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.424	1.465	1.507	1.547	1.587	1.626	1.664	1.756	1.841	1.918	1.908
n_2	0.786	0.727	0.675	0.626	0.581	0.540	0.501	0.414	0.338	0.272	0.237
α_u	3.872	3.830	3.793	3.758	3.726	3.694	3.664	3.586	3.506	3.422	3.264
n_3	1.526	1.422	1.330	1.246	1.166	1.095	1.026	0.869	0.733	0.612	0.547

$\omega=0.60$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(29)

K_{s1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.883	0.938	0.993	1.049	1.105	1.160	1.214	1.347	1.475	1.596	1.711
n_2	1.084	0.960	0.866	0.789	0.725	0.669	0.620	0.515	0.429	0.356	0.291
α_u	2.746	2.708	2.709	2.730	2.759	2.793	2.827	2.910	2.979	3.030	3.063
n_3	2.019	1.810	1.646	1.514	1.405	1.309	1.225	1.045	0.894	0.761	0.646
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	0.984	1.039	1.093	1.147	1.201	1.254	1.306	1.433	1.555	1.671	1.779
n_2	1.019	0.917	0.835	0.766	0.706	0.654	0.606	0.504	0.419	0.346	0.282
α_u	2.981	2.964	2.966	2.979	2.997	3.019	3.042	3.096	3.138	3.163	3.173
n_3	1.914	1.737	1.600	1.481	1.376	1.289	1.206	1.024	0.879	0.746	0.632
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.083	1.135	1.188	1.240	1.291	1.342	1.392	1.514	1.630	1.740	1.841
n_2	0.970	0.882	0.808	0.744	0.688	0.638	0.592	0.492	0.409	0.336	0.273
α_u	3.224	3.206	3.201	3.205	3.213	3.224	3.236	3.262	3.277	3.279	3.268
n_3	1.835	1.682	1.558	1.444	1.348	1.263	1.182	1.007	0.859	0.731	0.613
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.176	1.227	1.277	1.327	1.376	1.425	1.473	1.589	1.700	1.803	1.899
n_2	0.930	0.851	0.783	0.723	0.670	0.621	0.577	0.480	0.397	0.326	0.263
α_u	3.450	3.427	3.415	3.410	3.408	3.408	3.409	3.409	3.400	3.379	3.347
n_3	1.770	1.631	1.513	1.413	1.320	1.236	1.157	0.985	0.837	0.711	0.598
Ⅱ φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.264	1.313	1.361	1.409	1.456	1.503	1.549	1.660	1.764	1.862	1.926
n_2	0.895	0.822	0.759	0.702	0.651	0.605	0.561	0.466	0.385	0.315	0.258
α_u	3.657	3.629	3.608	3.593	3.582	3.572	3.562	3.537	3.505	3.464	3.382
n_3	1.710	1.587	1.474	1.377	1.286	1.205	1.131	0.961	0.820	0.690	0.588
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.347	1.394	1.440	1.486	1.532	1.576	1.620	1.725	1.824	1.915	1.951
n_2	0.863	0.796	0.736	0.682	0.633	0.588	0.546	0.453	0.373	0.303	0.253
α_u	3.846	3.810	3.782	3.758	3.736	3.717	3.697	3.649	3.595	3.534	3.413
n_3	1.658	1.541	1.436	1.342	1.258	1.178	1.106	0.938	0.798	0.668	0.578
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.426	1.471	1.515	1.559	1.602	1.644	1.686	1.786	1.879	1.965	1.975
n_2	0.834	0.771	0.714	0.662	0.615	0.571	0.530	0.438	0.359	0.291	0.247
α_u	4.015	3.972	3.935	3.902	3.872	3.843	3.815	3.744	3.669	3.590	3.441
n_3	1.609	1.501	1.399	1.312	1.225	1.151	1.080	0.913	0.774	0.646	0.567
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_u$	1.499	1.542	1.585	1.627	1.668	1.708	1.748	1.842	1.930	2.009	1.999
n_2	0.806	0.746	0.692	0.642	0.596	0.553	0.513	0.424	0.346	0.279	0.242
α_u	4.167	4.116	4.071	4.029	3.990	3.952	3.915	3.823	3.730	3.634	3.466
n_3	1.561	1.456	1.362	1.277	1.196	1.118	1.048	0.889	0.751	0.624	0.557

$\omega=0.70$　　$\delta_1=\delta_2=\delta_{2c}$(查表 3-2)　　表 3-8(30)

K_{a1}	0.756	0.704	0.656	0.610	0.568	0.528	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217
φ_1	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
φ_2	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	0.938	0.995	1.053	1.111	1.169	1.225	1.281	1.418	1.550	1.675	1.793
n_2	1.117	0.989	0.891	0.812	0.746	0.688	0.637	0.529	0.440	0.364	0.298
α_a	3.003	2.962	2.958	2.972	2.996	3.024	3.054	3.128	3.190	3.233	3.259
n_3	2.082	1.864	1.696	1.557	1.446	1.348	1.257	1.069	0.915	0.779	0.658
φ_2	10	12	14	16	18	20	22	27	32	37	42
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	1.044	1.100	1.157	1.212	1.267	1.322	1.376	1.507	1.633	1.752	1.863
n_2	1.050	0.944	0.859	0.788	0.726	0.671	0.622	0.517	0.430	0.355	0.289
α_a	3.257	3.229	3.222	3.228	3.241	3.257	3.276	3.319	3.352	3.370	3.372
n_3	1.970	1.789	1.644	1.523	1.416	1.321	1.232	1.052	0.895	0.765	0.644
φ_2	12	14	16	18	20	22	24	29	34	39	44
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	1.146	1.200	1.254	1.308	1.361	1.413	1.465	1.590	1.710	1.823	1.927
n_2	0.998	0.907	0.830	0.764	0.706	0.654	0.607	0.505	0.418	0.344	0.279
α_a	3.505	3.476	3.463	3.460	3.463	3.468	3.475	3.490	3.496	3.489	3.468
n_3	1.888	1.732	1.595	1.484	1.381	1.294	1.212	1.030	0.878	0.744	0.624
φ_2	14	16	18	20	22	24	26	31	36	41	46
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	1.242	1.294	1.346	1.398	1.448	1.499	1.548	1.668	1.782	1.888	1.987
n_2	0.955	0.874	0.804	0.742	0.687	0.637	0.591	0.491	0.407	0.333	0.269
α_a	3.735	3.703	3.683	3.670	3.662	3.657	3.653	3.641	3.621	3.591	3.549
n_3	1.815	1.674	1.554	1.447	1.352	1.262	1.186	1.006	0.857	0.723	0.609
φ_2	16	18	20	22	24	26	28	33	38	43	47
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	1.333	1.383	1.433	1.482	1.531	1.579	1.626	1.740	1.848	1.948	2.014
n_2	0.919	0.844	0.779	0.720	0.668	0.620	0.575	0.478	0.394	0.322	0.264
α_a	3.947	3.909	3.881	3.859	3.841	3.825	3.810	3.772	3.729	3.677	3.584
n_3	1.754	1.624	1.514	1.410	1.318	1.235	1.155	0.988	0.834	0.707	0.599
φ_2	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	48
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	1.418	1.467	1.514	1.562	1.608	1.654	1.699	1.808	1.910	2.004	2.041
n_2	0.886	0.816	0.755	0.699	0.649	0.602	0.559	0.463	0.381	0.310	0.259
α_a	4.139	4.094	4.058	4.027	3.999	3.973	3.948	3.886	3.820	3.747	3.616
n_3	1.701	1.581	1.475	1.374	1.289	1.207	1.129	0.958	0.811	0.685	0.589
φ_2	20	22	24	26	28	30	32	37	42	47	49
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	1.499	1.545	1.591	1.636	1.681	1.725	1.767	1.870	1.966	2.054	2.066
n_2	0.855	0.790	0.732	0.678	0.629	0.584	0.542	0.448	0.368	0.298	0.253
α_a	4.312	4.260	4.215	4.175	4.137	4.102	4.068	3.983	3.896	3.804	3.644
n_3	1.650	1.535	1.432	1.338	1.254	1.174	1.102	0.933	0.788	0.663	0.578
φ_2	22	24	26	28	30	32	34	39	44	49	50
n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$-\varepsilon_a$	1.575	1.619	1.663	1.706	1.749	1.790	1.831	1.928	2.018	2.101	2.090
n_2	0.826	0.765	0.709	0.658	0.610	0.566	0.525	0.433	0.354	0.285	0.248
α_a	4.466	4.406	4.353	4.304	4.257	4.213	4.170	4.063	3.956	3.848	3.669
n_3	1.601	1.495	1.394	1.308	1.220	1.146	1.070	0.908	0.764	0.640	0.568

4. 土层锚杆

土层锚杆是由岩石锚杆发展起来的。1958年联邦德国的宝尔(Bauer)公司在深基础施工时，为了固定挡土墙，采用钻孔注浆技术制成土层锚杆获得成功，引起了各国工程技术界的重视。随后各国学者和公司相继投入土层锚杆技术的开发研究工作，并使这项技术得到迅速发展。现在土层锚杆技术已能施工长达50m以上的锚杆，在粘性土中抗拔力可达1000kN，在非粘性土中达2500kN。被锚固的挡土墙可达40m以上。由于它发展迅速，并已成为一项新的施工技术。许多国家先后制定了土层锚杆规范，西欧已开始制订统一的欧洲标准规范。在第七、八届土力学会议上曾列专题讨论土层锚杆技术理论和实践问题。但是，土层锚杆技术和其他地基加固技术一样，它的发展主要不是依靠理论上的突破，而是大量采用实践的施工经验，故理论研究往往落后于施工实践。

在我国，土层锚杆技术于80年代初在北京、天津等地已开始研究和应用。如天津某污水处理厂的沉淀池，曾用1338根，长度12～13m的垂直土层锚杆作为抗浮措施，大大的减少池底板的厚度，节约了工程投资。其后，又在地铁、深基坑挡土墙支护和其他市政工程上应用。

4.1 土层锚杆构造和应用

土层锚杆是一种受拉构件见图4-1。整根土层锚杆长度分为锚固段和自由段、锚固段是土层锚杆在土中以摩擦力形式传递荷载的部分，它是由水泥、砂浆等胶结物以压浆形式，注入钻孔中凝固而成的。其中有受拉的锚杆(钢筋或钢丝束等)，它的上部连接自由段。自由段不与钻孔土壁接触，仅把锚固力传到锚头处。锚头是进行张拉和把锚固力锚碇在结构上的装置。它使结构产生锚固力。

应用土层锚杆支护，悬臂式结构厚度可减小到最经济的厚度，曾计算在地下连续墙跨度大于12m时，采用墙内支撑是不经济的。上海某工程的大面积深基坑工程，由于没有采用斜运动场支锚杆支护，只好采用格式半重力式地下连续墙，工程量成倍增加。又加上海某高层建筑地下室工程，深基坑周围是拉森钢板桩挡土墙，开挖深度为6.5m，曾设置纵横二道 $\phi609\times12$mm 钢管支撑，既增加了工程造价，又给机械化挖土和地下室施工造成困难。隧道支护和地下车站挡土墙、钢板桩墙以及桩排式地下连续墙都可用土层锚杆支护。土层锚杆使原来的悬臂式支护结构无法实现的基坑支护技术变成可能实施。

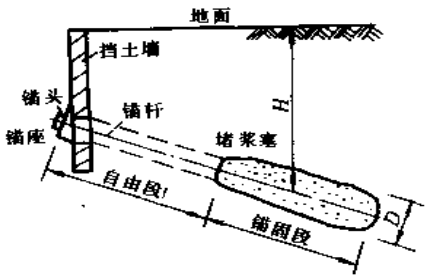


图4-1 土层锚杆构造示意图

4.2 土层锚杆的试验研究

80年代以来，我国在北京、上海等地进行了大批的土层锚杆试验研究工作，选用地质钻机作为成锚的代用设备，以通用的建筑机械和地质设备作为成锚的辅助设备，为我国迅速推广应用锚杆创造了有利条件。

1. **成孔工艺**

采用探矿钻机用为成孔机具，合金钻头冲水钻进法，当达到锚固段时，换上扩孔冲水钻头，钻到设计标高。这种成孔工艺较为有效。在保证孔口的水位前提下，没有出现坍孔的现象。应注意的是在钻进流砂层时(即粉砂层)，钻进速度应适当放慢。以使钻头和孔中的自成泥浆把流砂层段的孔壁，糊上一层泥皮，以保持孔壁的完整性、增加护孔性。同时仍要坚持孔口水位不能低于地面。

采用合金钻头和护孔合金钻头的冲水钻进法，通过成孔工艺试验成功，因此一般的工程地质钻机和探矿钻机，均可作为土层锚杆的成孔设备。

2. **锚杆、注浆管制作**

锚杆的强度必须能承受锚拉的全部荷载，而且变形不大，有一定的控制要求，构造上要求使其和锚固体不脱开，有较高的握裹力。国外施工的土层锚杆，把锚固段的锚杆做成各种型式，最常用的有两种：一种是不带尾板；另一种是有尾板的。如图 4.2.1 所示。从理论上我们知道，土锚的承载力与土体的抗剪强度 τ 值有很大关系，公式如下：

$$\tau=\sigma_r\tan\varphi+c \qquad (4.2.1)$$

式中 σ_r—锚固体外土体径向压力；

φ—土体的内摩擦角；

c—土体的内聚力。

$$\sigma_r=K_0\cdot\gamma\cdot H$$

K_0—土体的静止侧压系数；

γ—土体的重力密度；

H—土体的埋置深度。

对于无尾板锚杆的土层锚杆，受拉时，整个锚固体受拉，故锚固体直径变细，这样 σ_r 值就变小，同时锚固体与土体孔隙增加，土体孔隙比增大，水填充其间，这样 φ 值减小，对于公式(4.2.1)，由于 σ_r 和 φ 值的减小，剪切强度 τ 值也就减小。

但是对于有尾板锚杆的土层锚杆，土层锚杆受力时，由于锚杆尾板作用于锚固全上，锚固体受压，它的直径变粗，同时对土体产生径向压力，这样 σ_r 值增大，锚固体周围土体的孔隙比减小。φ 值增大，提高了 τ 值，对提高土层锚杆的抗拔力是有益的。

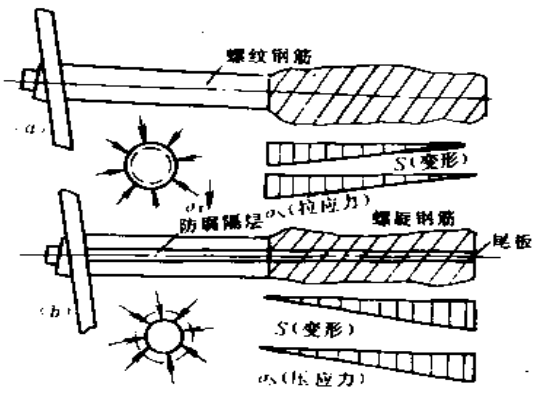


图 4-2 两种锚杆构造及其应力与应变关系
(a)不带尾板螺纹钢筋锚杆；(b)有尾板的锚杆

土层锚杆均是无尾板型式，因为按有尾板的型式，在受拉时，τ 值可以增大，这种理论对岩石甸杆其效果是显著的。但是对在软土地层中，土体的变形模量远比锚固体砂浆的变形模量小得多，故 τ 值不会有所增加，如果采用尾板锚杆会给制作锚杆和沉放锚杆带来困难。注浆管采用 ϕ3/4″黑铁管，一次注浆只是在管底口进行临时封住；二次注浆管是将在锚固段中的那段管，制作成花管形式，用聚氯乙烯薄膜把花管眼和底口临时封住。

3. 注浆成锚

当钻孔达到标高后，清水洗孔，待基本出清水后，应立即放入锚杆和 2 根注浆管（2φ3/4″墨铁管）。随后进行第一次注浆。采用普通单缸柱塞式压浆机，压力 0.3 至 0.5MPa，注量 100L/min，浆量通常根据钻孔直径和深度而定，待浆液达到初凝强度，进行第二次注浆，采用 BW200—40/60 型泥浆泵，控制压力 2MPa，目的使第一次注浆体的锚固段膨胀，达到扩大锚固段直径，增大抗拔力和承载力的作用。

对注浆的材料在试验中曾采用过聚胺脂浆液，因为这种浆液遇水后发泡并硬化，同时在发泡硬化时把还未硬化的浆液挤入土中，即所谓二次注浆的作用。但是由于配制的浆液遇水硬化时间较短，浆液还未流到远处就硬化，所以未能获得较理想的效果。以后则采用水泥为胶结材料。

第一次注浆是水泥砂浆，浆液从注浆管底部溢出，直到注浆量达到要求为止，拔出注浆管。第二次是注入水泥浆，浆液从第二根注浆的花管段及底部溢出的。一般情况，第二次注浆压力约在 2MPa，冲破塑料薄膜及初凝砂浆后，浆液注到砂浆体和土体之间，当浆量达到一定值后，再稳压 2min，便完成注浆工序。

4. 抗拔受力机理

土层锚杆的承载力主要是锚固体与土体之间的摩阻力，这摩阻力的大小直接影响土层锚杆的抗拔力。

第五根土锚加荷 200kN，进行松弛观测，又进行了在荷载 200kN 时的流变观察（极限荷载的 65%），观察了 70 天，位移量除气温有些波动外，趋势是稳定不变的。

分析上述的五根土锚徐变情况：除一根土锚荷载是极限荷载较短时间破坏之外，其余四根土锚加荷均小于其极限荷载，因此加荷载后土体的流变量小而且很快趋向稳定。这结果说明了饱和软土中的土锚受设计荷载时，不会产生无休止的变形。

由于饱和软土的流变性能，必然会对土锚锚碇荷载造成松弛现象，饱和软土中的二根松弛试验结果如下：

第一根土锚加荷载 150kN 锚碇住，（是极限荷载的 43%），其安全系数为 2.32，观察 15 天后，锚杆内拉力达到稳定，此时拉力为 130kN，即稳定后拉力为原施加拉力的 87%；

第二根土锚加荷载 200kN 锚碇住，前三天拉力下降到 80%，但第 4、5 天拉力又回升，第 8、9 天达到原拉力 90%，以后随之又下降。最后因压力环损坏而停止观测。

从试验观测，引起土锚拉力松弛的原因：

(1)锚固体周围土体的受力后，土体产生流变；

(2)锚固体与土体的分界面，在受力后产生相对的移动。

土层锚杆受拉时，锚固体的侧摩阻力，开始时是由上部的土体首先达一极限状态，而下层摩阻力发挥较小，随着土锚受力的增大，土体极限抗剪强度逐渐下移，当土锚达到极限拉力时，最下层锚固体的土体才达到极限抗剪强度。例如，某分段装有内力量测原件的 21m 长垂直土层锚杆，在受拉力 40kN 时，侧阻力在 0～1.66mm（贴应变片位置）范围达到极大值，$\tau_{max}=41.2$kPa；当拉力 80kN 时，侧阻力在 1.66～4.73m 范围达到极大值，$\tau_{max}=47.7$kPa；当拉力 240kN 时，侧阻力在 4.73～8.93 范围达到极大值，$\tau_{max}=66$kPa；当拉力 400kN 时，侧阻力在 19m 以下取得极大值，$\tau_{max}=97$kPa。由此，可以断定，各层土体是由上而下逐渐发挥作用的。荷载小时，仅上层土发挥作用，下层土不发挥作用；当荷载逐渐增加，达到极限承载力时，下部各层土达到极限荷载，上层锚杆的承载能力才达到破坏。

5. 土层锚杆的徐变和松弛

在粘性土中，土体受到侧向力的作用，必然会产生土体的流变。某饱和软土工程中五根徐变试验锚杆介绍如下：

第一根土锚加荷 100kN（达到极限荷载），在稳定一天后，突然破坏；

第二根土锚加荷 150kN（极限荷载的 50%），位移有变化，但很快趋向稳定，后因地基支座倾斜而拆除试验装置；

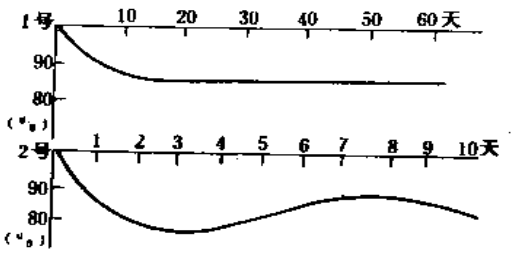


图 4-3　1 号、2 号土层锚杆应力松弛曲线

第三根土锚加荷 100kN（极限荷载的 1/3），加荷后 1h 即稳定，后又加荷到 150kN，位移量增加 10mm，但很快稳定了，观察了 7 天；

第四根土锚加荷 100kN（极限荷载的 59%），稳定后又加荷载到 150kN（极限荷载的 80%），观察 60 天以上，位移量稳定；

上述两个原因是主要的，不排斥地下水位的变化也会使土锚产生松驰的现场，见图 4-3。

室内试验取土样做剪切流变试验，分别取 0.4，0.5，0.63，0.7，0.8 和 0.95 倍的固结快剪强度，试验结果绘制半对数曲线图，如图 4-4 所示。从图中可以看出当 $\tau=0.63\tau_f$（τ_f 为极限抗剪强度）时，S-log$t$ 为直线，说明 $\tau=0.63\tau_f$ 作为分界，当 $\tau\geqslant 0.63\tau_f$ 时，变形随时间发散，而不收敛；在 $\tau<0.6\tau_f$ 时，变形也随时间有发展，但有收敛为定值。长期使用的土层锚杆，要使土的抗剪强度小于 $0.63\tau_f$，即是安全的，其安全系数 $N\geqslant\frac{1}{0.63}=1.59$，否则发生流变破坏。

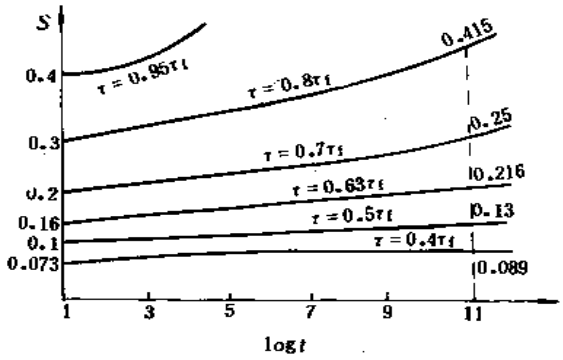


图 4-4　粘土的 $\tau-S-\log t$ 关系曲线

锚杆的施工工艺流程如下（图 4-5）：

实践表明，施工技术的关键是二次注浆，土锚的关键是锚固段与土体的摩擦力，其值与锚固段和周围土体的挤密、粘结度有关。多次试验表明，用通常的一次注浆工艺，其承拉力较低；如果在水泥砂浆呈初凝状态时再在其底部注入水泥浆，使水泥浆挤入土体，即能增加土体对锚固段的法向应力，从而较大地提高土锚的承拉力，二次注浆其承拉力一般为一次注浆法的二倍，且徐变大大减少。因而，土锚杆在饱和软粘土中得到应用。

为保证锚固段工作可靠，锚固段应埋置至一定深度，即应在土壁稳定坡线以下。

通过试验测得，土层锚杆在找期荷载作用下的变形。当试验荷载为极限荷载的 70%时，10 小时内位移趋向稳定，其最大位移值为 1mm；当试验荷载为极限荷载的 70～86%时，在 20 小时内位移趋向稳定，其最大位移值为 3mm。

4.3 土层锚杆设计

土层锚杆设计应考虑以下因素：

(1)土锚的使用时间，一般使用时间在2年以内为临时土层锚杆，超过2年时间为永久性土层锚杆。

(2)土层锚杆的锚固体截面积和长度直接影响土层锚杆的承载力，通过试验表明：在饱和软土中土层锚杆承载力与锚固段长度和直径成正比关系。

(3)锚杆钢筋(或钢丝束)和水泥砂浆强度的确定，在设计荷载作用下，应考虑锚固砂浆产生的裂缝宽度和裂缝间距的控制。

(4)设计土层锚杆拉力由锚固体与土体间摩阻力确定，在实际工程应用时应进行现场抗拔试验，确定其极限承载力。

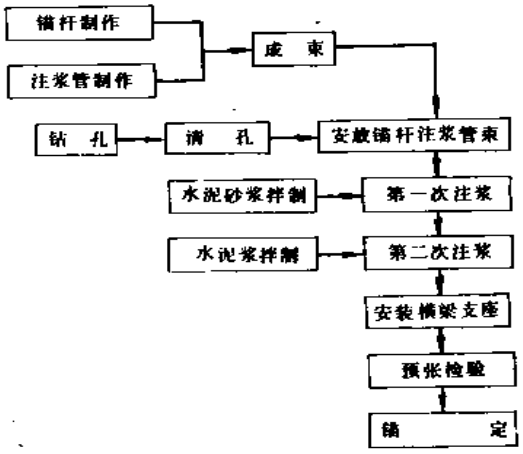


图 4-5

斜土锚的设计计算简图如图4-6所示。

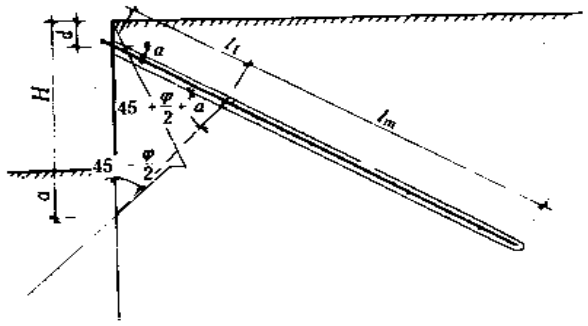


图 4-6 斜锚杆计算简图

第一层斜土锚的高度 d 宜在填土层以下，以防钻孔时发生坍孔。

斜土锚的自由度长度 l_f，应是位于土体滑裂面内的锚杆长度，当斜锚与地面成夹角 α 时，根据图4-6中所示锚杆与破裂面及支护结构所构成的三角形关系可得：

$$\frac{l_f}{\sin(45°-\frac{\varphi}{2})}=\frac{H+a-d}{\sin(45°+\frac{\varphi}{2}+\alpha)}$$

整理得：

$$l_f=\frac{\sin(45°-\frac{\varphi}{2})}{\sin(45°+\frac{\varphi}{2}+\alpha)}\cdot(H+a-d)$$

斜锚的锚固段长度应进入到较硬的持力层中，锚固段和长度不应小于4m，锚固段的长度1m由锚杆设计拉力值及锚固段土体摩阻力强度决定：

$$F_s=\frac{1}{K}\pi D\sum_{i=1}^{n}l_i\cdot f_i \qquad (4.3.2)$$

$$l_m=\sum_{i=1}^{n}l_i \qquad (4.3.3)$$

式中 F_a—单锚容许抗拔力(kN)；

K—安全系数，根据锚杆破坏后的危害程度决定，对于永久性锚杆 $K=1.8\sim2.2$，对于临时性锚杆 $K=1.4\sim1.8$；

l_i——穿越第 i 层土的厚度；

f_i——第 i 层土的极限摩阻力(kPa)，无当地经验时，可按表 4.3.1 取；

n——锚杆穿越的土层数；

D——锚固段直径，当钻孔直径为 d_0 时，采用一次灌注 $D=1.2d_0$；采用一次灌注，然后第二次压力注浆 $D=1.5d_0$。

锚杆直径 d_g 应符合下式要求：

$$d_g\geqslant 2\sqrt{\frac{R_a}{\pi[\sigma]}}+\delta\cdot T \qquad (4.3.4)$$

式中 d_g—锚杆直径(mm)；

R_a—设计锚杆拉力(kN)；

$[\sigma]$—锚杆材料容许拉应力(kN/mm²)

δ—锚杆钢材年锈蚀量，取 0.04～0.05mm/年；

T—锚杆使用年限。

为了避免群锚作用降低单锚承载力，锚杆水平间距一般为 1.5～4.0m，上下层锚杆间距不宜大于 2.5m，锚杆的倾斜角一般取 15°～25°以保证充分利用锚杆的水平力。

极限抗拔摩阻力 f_i　　表 4-1

土层种类	土的状态	f_i 值(kPa)
淤泥质土	—	20～25
粘性土	坚　硬	60～70
	硬　塑	50～60
	可　塑	40～50
	软　塑	30～40
粉　土	中　密	100～150
砂　土	松　散	90～140
	稍　密	160～200
	中　密	220～250
	密　实	270～400

注：1. 表中数据仅用作初步设计时估算。

2. 表中 f_i 系采用一次常压灌浆测定的数据。

5. 混合支护结构

混合支护结构是由挡墙和固定挡墙就位的组合挡土结构体系。挡墙可用下列之一的方法：

(1)板桩(钢、混凝土或木)

(2)有挡板或无挡板的立柱(或桩)

(3)钢筋混凝土灌注桩(或墩)

(4)地下连续墙

固定挡墙就位(支点)主要有：

(1)撑梁和支撑或斜撑

(2)锚杆

在仅须挡土而水不为问题的地方，立柱间距或就地钻孔灌注桩间距可以选择不要挡板或其他墙件。因为桩上的侧向压力产生的"土拱"或跨越作用将挡住空处的土。该区的宽度可如图 5-1 所示的 45°线相交来粗略估计。当然桩必须适当支撑以提供必要的侧向土阻力。

在必须同时挡土和水的地方，这种体系在水位以下必须相当地不漏水并具有抵抗土和静水压力的能力。降低水位是很不现实的，因为这也将引起周围的土和结构物的沉降。板桩的接缝可能让相当多的水漏入基坑而使水位明显降低。在这些情况下，解决办法可能仅限于用就地灌注混凝土墙或围绕板桩周围灌浆或用粘土截水墙以减低土的渗透性。混凝土和粘土墙可利用地下连续墙法施工。

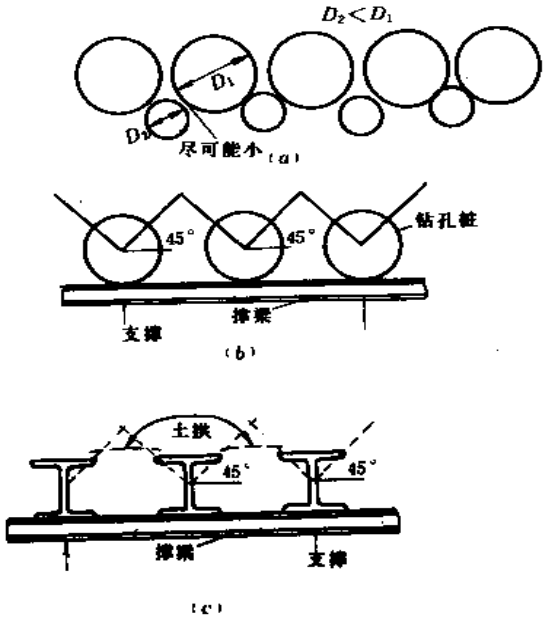


图 5-1 基坑支撑体系

(a)用两排钻孔桩形成防水墙；(b)单排钻孔桩并靠土拱作用挡土；(c)用宽翼缘型钢代替钻孔桩

施工程序是设置桩(板桩、立柱或就地灌注桩)并借助灌浆做一些初步的防水工作。在此期间内应拍取足够数量的周围结构物的照片以确定其所处状态并选择若干地标高且设置控制点以便测定和监测地面的下陷(沉陷及朝向基坑的侧向移动)。

然后进行开挖，并根据地面沉陷的监测和预测，在选定的深度处设置撑梁和支撑。支撑或斜撑体系在开挖区域内造成不希望有的障碍。替代的方法是用锚杆，但是这将涉及到调进钻机钻设锚杆获得伸入相邻业主的地基中的许可以及遇到公用设施的问题。尽管如此，锚杆一般仍是可取的解决办法，只要能伸入相邻地界的范围足以设置锚碇。施工完成以后锚碇就留在原位。

基坑周围的地面下陷在已建成地区是一个非常严重的问题。它至今还没有可靠地得到解

决。在地面下陷完全可以忽略的情况下，它仅是保守设计和运气的组合而不是理性分析的结果。

混合结构的侧向土压力分布经我国许多工程设计经验与实测结果证明在简化计算条件下，应用简单的悬臂式结构侧向土压力分布结果是可行的。

5.1 混合支护结构的有限元分析

有限元法是混合支护结构分析现有的最有效和最合理的方法。其计算结果可得出设计弯矩和估算的侧向变形以及位于开挖面以下由被动抗力产生的土压力。

有限元法对采用多个锚碇装置(锚杆、土锚、锚碇等)的混合结构分析是特别有利。而用古典法对多层锚杆系要获得锚杆力、墙的变形和弯矩是特别困难的。

图 5-2 示有板桩墙和 $P-X$ 编码和单元力。该课题实际上是一个旋转了 90°的弹性地基上梁的问题，其中仅将开挖面以上的土弹簧予以去除。

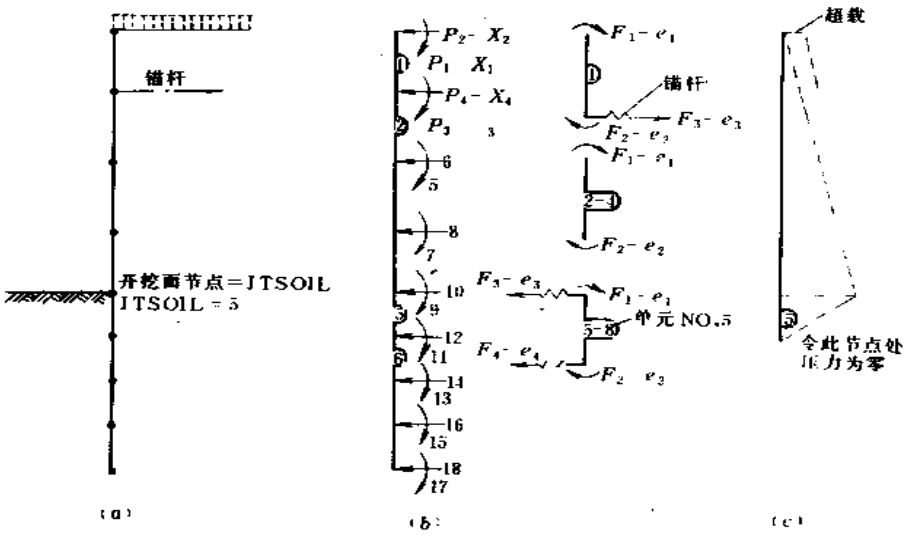


图 5-2 悬臂式或锚碇式(包括多层锚杆的板桩墙的有限元分析)
(a)墙系与所选的节点；(b)总的 $P-X$ 编码；(c)典型的有限单元力，包括任何土或锚杆"弹簧"；(d)库伦压力图

有限元求解该课题的步骤如下：

(1)画出土—墙系统并决定节点位置。在每个锚杆位置处，基坑面处以及在每个土层变化处布置一个节点。力求保持相邻构件的长度比 $R=(L_m/L_{m+1})\leqslant 5$，最好接近于 1。

(2)用库伦公式(或朗金公式)计算从地面到开挖面的侧向土压力。在土层变化处节点值用平均土压力。除非相邻单元长度相同否则会导致一个小的计算误差，但一般都是可忽略不计的。

(3)计算基坑以下土的基床反力模量 k_s。

(4)在要读入土弹簧的地方，包括锚碇式墙的锚杆节点处对土节点都予以定位，在调整土弹簧时需要读入与节点相邻的两个单元的数值。

(5)如果需要，可输入计算锚杆力。注意锚杆输入力必须符号正确，并可能产生墙向填土方向运动。由于最终的模型是一种数学的力系，如果可能它将迫使这种力系平衡。如力系不能静

力平衡，程序通常是不会进行计算的。

根据上述分析，可在弹性地基梁计算程序上稍作修改而得到混合支护结构的有限元分析程序。这种分析方法的精度还取决于基坑面以下土弹簧系数 ks 的取值问题。一般工程设计均采用较为实用的等值梁法计算。

5.2 单层支点混合支护结构

单层支点混合支护结构采用等值梁法进行计算，取基坑面以下土压力零点为反弯点，非均质土中单层支点混合结构分析计算简图如图 5-3 所示，支点水平力可按下列步聚计算：

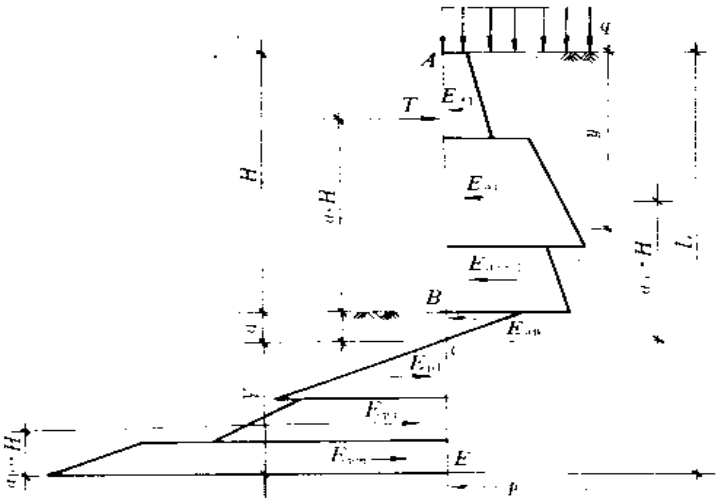


图 5-3 单层支点支护结构的受力状态

1. 计算反弯点 c 离基坑面的距离 a

由 c 点的主动土压力与被动土压力相等条件，可有：

$$\gamma_n \cdot a \cdot K_{pn} = (\bar{\gamma} \cdot H + \gamma_n \cdot a) \cdot K_{an} \tag{5.2.1}$$

式中 $\bar{\gamma}$——基坑面以上土重度加权平均值；

γ_n——基坑面以下土压力为零点土层的重度（当多于一层土时取基坑下的平均重度）；

K_{pn}、K_{an}——土压力为零点土层的被动与主动土压力系数。将式(5.2.1)整理得：

$$a = \frac{\bar{\gamma}}{\gamma_n} \cdot \frac{H}{(\xi_n - 1)} = n_1 \cdot H \tag{5.2.2}$$

式中

$$n_1 = \frac{\bar{\gamma}}{\gamma_n} \cdot \frac{1}{(\xi_n - 1)} \tag{5.2.3}$$

2. 计算支点力 T

支点力 T 根据绕反弯点 C 的力矩平衡条件计算：

$$(\alpha_t \cdot H + a) \cdot T = \sum_{i=1}^{n} E_{ai} \cdot \alpha_{ai} \cdot H \tag{5.2.4}$$

将式(5.2.2)代入上式得：

$$T=\sum_{i=i}^{n}E_{ai}\cdot a_{ai}/(a_i+n_1) \qquad (5.2.5)$$

3. 最大弯矩作用点及最大弯矩值

设最大弯矩作用点于被动土压力区的第 m 层，则由此层某一位置以上的全部主动与被动土压力及支点力 T 的平衡条件可以求得最大弯矩作用点。

位于土体中结构的最大弯矩值以最大弯矩断面对全部上部力取矩可得。

4. 最小嵌固深度 Y

结构的最小嵌固深度 Y，由图 5-3 可知对上部全部力的平衡零条件可得：

$$\sum_{j=1}^{m}E_{pj}=\sum_{i=1}^{n}E_{ai} \qquad (5.2.6)$$

单支点混合结构的支护计算长度可取为：

$$L=H+a+1.2Y \qquad (5.2.7)$$

5.3 多层支点混合支护结构

当基坑较深，土质较差，单支点混合支护结构不能满足基坑支挡的强度与稳定性要求时，可采用多层支点混合支护结构。多层支点混合支护结构受力简图如图 5-4 所示。

多层支点混合支护结构按等值梁法计算时，应根据分层挖土深度与每层支点设置的实际施工情况分层计算，并假定下层挖土不影响上层支点的计算水平力。其计算步骤如下：

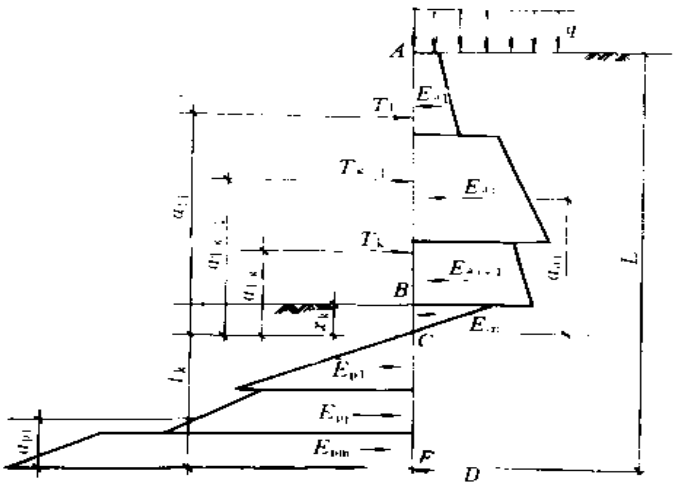


图 5－4 多层支点混合支护结构的受力状态

(1)第一层支点可按单层支点混合结构方法计算，计算的开挖深度 H 取为第二层支点设置位置的开挖深度，以此求出第一层支点水平 T_1。

(2)第二层支点设置，其挖土深度需满足第三层支点安装需要，计算墙后主动土压力，墙前被动土压力，寻找土压力为零的点 d，其位置在挖土面下 d 处(图 5-5)。

图 5-5 中

H——计算相应阶段时基坑开挖总深度；

d——相应阶段土压力为零时开挖面下的深度；

t——相应阶段板桩嵌入土压力为零点以下需要深度；

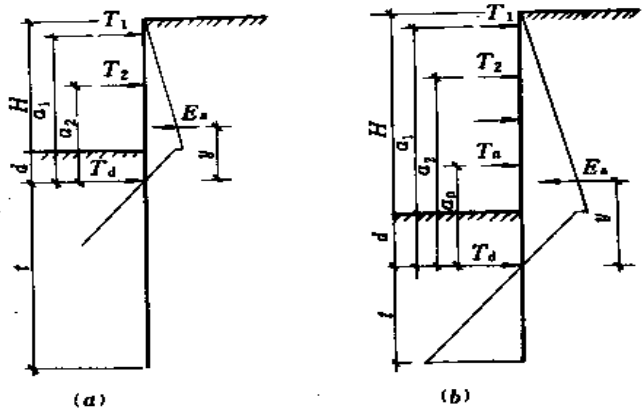


图 5－5　多层支点混合支护结构桩计算简图

(a)二层支撑；(b)多层支撑

T_1、T_2、T_n——自上而下各层支撑的反力；

a_1、a_2…a_n——自上而下各层支撑到土压力为零点的距离。

(3)计算 d 点以上板桩后土压力对 d 点的力矩 M_a，和土压力合力 E_a；

(4)计算第一层支撑反力 T_1 对 d 的力矩 M_1

$$M_1=T_1\cdot a_1$$

(5)计算第二层支撑到 d 点的距离 a_2；

(6)计算第二层支撑反力 T_2，

$$T_2=\frac{M_a-M_1}{a_2}$$

(7)计算本阶段 d 点假想反力 T_d

$$T_d=E_a-T_1-T_2$$

(8)计算本阶段板桩在 d 点下需嵌入深度 t，按该段板桩端部水平力平衡条件确定。

(9)按(3)(4)、(5)、(6)、(7)、(8)步骤逐层往下计算各层支撑反力，如第 i 层支撑的反力为：

$$T_i=\frac{M_a-M_1-M_2\cdots\cdots-M_{i-1}}{a_i}\qquad(5.3.2)$$

挖至基坑设计底面时，第 n 层支撑的反力为

$$T_n=\frac{M_a-M_1-M_2\cdots\cdots-M_{n-1}}{a_n}\qquad(5.3.3)$$

假设支点 d 的反力为：

$$T_d=E_a-T_1-T_2-\cdots\cdots-T_n\qquad(5.3.4)$$

(10)计算板桩总长度 L

$$L=h+d+1.2t\qquad(5.3.5)$$

(11)逐段验算板桩的最大弯矩，验算强度；

(12)验算各层支点的强度和稳定性；

(13)验算各层支点横梁的强度。

5.4 多层支点混合支护结构计算实例

某地下室基坑工程，挖土深度 9m，土质情况如图 5-6 所示，挡土结构体系采用板桩墙加 3 道支撑体系。钢板桩每延长米截面模量 $W=3.82\times10^5\text{mm}^3$，惯性矩 $I=9.55\times10^8\text{mm}^3$，弹性模量 $E=2.06\times10^5\text{N/mm}^2$。

挖土和支撑的程序为：第一阶段挖土→第一层支撑→第二阶段挖土→第二层支撑→第三阶段挖土→第三层支撑→第四阶段挖土→加层垫层→拆除第三层支撑。现分别对各阶段的板桩受力情况进行分析：

(1)第一阶段挖土深 3.0m，挖土完成后板桩墙呈悬臂状态。第一阶段挖土板桩计算简图如图 5-6 所示。第一阶段计算目的在于确定以上假定挖土深度 3m 时悬臂式板桩墙结构是否满足强度与稳定性的要求。

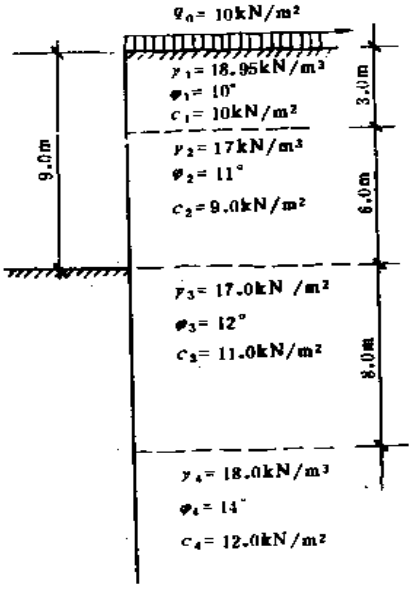


图 5-6 多层支点板桩墙地质及开挖情况

如分析方便，首先计算如下变量：

$$\sqrt{K_{p1}}=\text{tg}(45^\circ+\frac{\varphi_1}{2})=1.192\quad K_{p1}=1.420$$

$$\sqrt{K_{p2}}=\text{tg}(45^\circ+\frac{\varphi_2}{2})=1.213\quad K_{p2}=1.472$$

$$\sqrt{K_{p3}}=\text{tg}(45^\circ+\frac{\varphi_3}{2})=1.234\quad K_{p3}=1.1.525$$

$$\sqrt{K_{p4}}=\text{tg}(45^\circ+\frac{\varphi_4}{2})=1.280\quad K_{p4}=1.638$$

$$\sqrt{K_{a1}}=\text{tg}(45^\circ-\frac{\varphi_1}{2})=0.839\quad K_{a1}=0.704$$

$$\sqrt{K_{a2}}=\text{tg}(45^\circ-\frac{\varphi_2}{2})=0.824\quad K_{a2}=0.680$$

$$\sqrt{K_{a3}}=\text{tg}(45^\circ-\frac{\varphi_3}{2})=0.810\quad K_{a3}=0.656$$

$$\sqrt{K_{a4}}=\text{tg}(45^\circ-\frac{\varphi_4}{2})=0.781\quad K_{a4}==0.610$$

根据式(2.2.1)，地面及以下 3m 处的主动土压力 e_0 及 e_1 分别为：

$$e_0=q_0\cdot K_{a1}-2\cdot c_1\sqrt{K_{a1}}=-9.74 \tag{5.4.1}$$

$$e_1=(q_0+\gamma_1 H)\cdot K_{a1}-2c_1K_{a1}=28.78 \tag{5.4.2}$$

土压力零点位置 X 为：

$$x=3/(1+\frac{28.78}{9.74})=0.76(\text{m})$$

主动土压力合力 E_{a1}

$$E_{a1}=\frac{1}{2}(3-0.76)\times28.78=32.25$$

第 2 层土在 3m 处的主动土压力强度 e'_2 为：

$$e'_2=(q_0+\gamma_1 H)K_{a2}-2c_2\sqrt{K_{a2}}=28.69 \tag{5.4.3}$$

设在开挖面以下距离 d 处，土压力为零即

$$\gamma_2 dK_{p2}+2c_2\sqrt{K_{p2}}=e'_2+\gamma_2 dK_{a2} \tag{5.4.4}$$

得：

$$\begin{aligned} d&=\frac{e'_2-2c_2\sqrt{K_{p2}}}{\gamma_2(K_{p2}-K_{a2})}\\ &=\frac{28.69-2\times 9\times 1.213}{17\times(1.472-0.680)}\\ &=0.51(\text{m}) \end{aligned} \tag{5.4.5}$$

最大弯矩作用点位置 t 可由断面剪力为零条件求得：

从图 5-7 几何关系可得：

$$\frac{t}{e_t}=\frac{d}{e'_2} \tag{5.4.6}$$

$$e_t=\frac{e'_2}{d}t \tag{5.4.7}$$

故 $$E_{a1}+\frac{1}{2}de'_2=\frac{1}{2}t\cdot e_t \tag{5.4.8}$$

将式(5.4.7)代入上式得：

$$t^2=(2\times 32.25+0.51\times 28.29)\times\frac{0.51}{28.69}=1.407$$

即 $$t=1.19(\text{m})$$

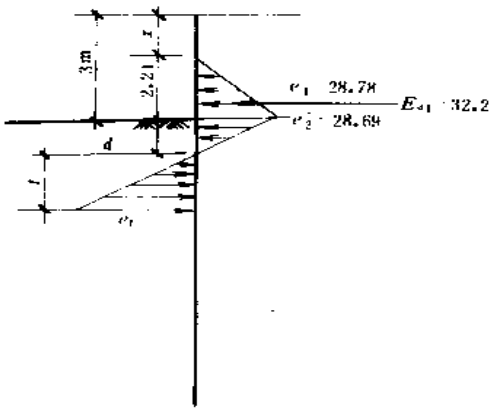


图 5-7

$$e_t=\frac{28.69}{0.51}\times 1.19=66.94 \tag{5.4.9}$$

第一开挖阶段最大弯矩值 M_{max1} 为：

$$\begin{aligned} M_{max1}&=E_{a1}\times\left(\frac{3-x}{3}+d+t\right)+\frac{1}{2}\cdot d\cdot e'_2\cdot\frac{2}{3}d-\frac{1}{2}t\cdot e_t\cdot\frac{1}{3}t\\ &=32.25\times 2.45+\frac{1}{3}\times 0.51^2\times 28.69-\frac{1}{6}\times 66.94\times 1.19^2\\ &=68.22(\text{kN}\cdot\text{m})\\ &=68.22\times 10^6(\text{N}\cdot\text{mm}) \end{aligned} \tag{5.4.10}$$

板桩应力：

$$\sigma=\frac{M_{max1}}{W}=\frac{68.22\times 10^6}{3.82\times 10^6}=18\text{N/mm}^2<[\sigma]=240\text{N/mm}^2 \tag{5.4.11}$$

满足要求。

由于本工程开挖深度为 9m，因此，对于第一阶段开挖 3m 深度时，嵌固深度必然满足要求可以不验算。

(2)第二阶段挖土深度为 6.0m，并在开挖的第一阶段深度 3.0m 处设立锚杆，计算简图如图 5-8 所示。

1)开挖 6m 深度处土压力强度 e_6 由图 5-8 可得：

$$e_6=28.69+3\times 17\times 0.68=63.37 \tag{5.4.12}$$

2)开挖面以下距离为 d_2 处土压力为零，则

$$d_2=\frac{e_6-2c_2\sqrt{K_{p2}}}{\gamma_2(K_{p2}-K_{a2})}$$

$$=\frac{63.37-2\times9\times1.213}{17\times(1.472-0.680}=3.09(\text{m})$$

(5.4.13)

3)在土压力零点 c 位置以上第二阶段挖土时的全部土压力合力 E_{a2} 为(见图 5-8)：

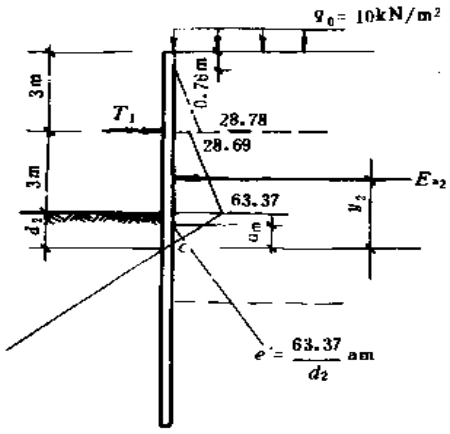


图 5-8

$$E_{a2}=\frac{1}{2}\times28.78\times(3-0.76)+\frac{1}{2}(28.69+$$

$$+63.37)\times3+\frac{1}{2}\times3.09\times63.37$$

$$=32.23+138.09+97.91$$

$$=268.23(\text{kN/m})\qquad(5.4.14)$$

4)主动土压力合力作用点高 c 点距离为 y_2，则

$$E_{a2}\cdot y_2=\frac{1}{2}\times28.78\times(3-0.76)\times(\frac{1}{3}\times2.24+3+d)+$$

$$+28.69\times3\times(\frac{1}{2}\times3+d)+\frac{1}{2}\times63.37\times3\times(\frac{1}{3}\times3+d)+$$

$$+\frac{1}{2}\times63.37\times d\times\frac{2}{3}d$$

$$=32.23\times6.84+86.07\times4.59+95.06\times4.09+97.91\times2.06$$

$$=220.45+395.06+388.80+201.70$$

$$=1206.00$$

故

$$y_2=\frac{1206}{E_{a2}}=\frac{1206}{268.23}=4.50(\text{m})\qquad(5.4.15)$$

5)主动土压力对 c 点的矩 M_{a2} 为

$$M_{a2}=E_{a2}\cdot y_2=1206(\text{kN}\cdot\text{m/m}\qquad(5.4.15)$$

6)第一层支点力 T_1 为

$$T_1=\frac{M_{a2}}{a_1}=\frac{1206}{(3+3.09)}=\frac{1206}{6.09}=198.03(\text{kN/m})\qquad(5.4.17)$$

7)最大弯矩作用点位置 a_m

根据式(5.4.17)所得 T_1 及与式(5.4.14)比较可知，剪力为零点应位于基坑开挖面以下，即

$$T_1-E_{a2}+\frac{1}{2}\times a_m\cdot(\frac{63.37}{3.09}\times a_m)=0$$

得

$$a_m^2=\frac{2\times(268.23-198.03)\times3.09}{63.37}=6.846$$

$$a_m=2.62(\text{m})\qquad(5.4.18)$$

$$d_2-a_m=3.09-2.62=0.47(\text{m})$$

$$e'=\frac{63.37}{3.09}\times a_m=53.73\qquad(5.4.19)$$

8)最大弯矩值 M_2

$$M_2=32.23\times(\frac{1}{3}\times2.24+3+0.47)+86.07(\frac{1}{2}\times3+0.47)+$$

$$+95.06\times\left(\frac{1}{3}\times3+0.47\right)+\frac{1}{2}\times53.73\times0.47^2+\frac{1}{2}\times$$

$$\times0.47\times(63.37-53.73)\times\frac{2}{3}\times0.47-198.03\times(3+0.47)$$

$$=135.09+169.56+139.74+5.93+0.71-687.16$$

$$=-236.13(\text{kN}\cdot\text{m/m})$$

9)板桩应力 σ

$$\sigma=\frac{|M_2|}{W}=\frac{236.13\times10^6}{3.82\times10^6}=61.81(\text{N/mm}^2)\text{满足要求}$$

(3)第三阶段挖土深度为 9m，并在开挖的第二阶段深度 6m 处设置第二层锚杆，计算简图如图 5-9 所示。

1)计算开挖深度 9m 处的主动土压力强度 e_9 及 e'_9

$$e_9=28.69+6\times17\times0.68$$

$$=98.05$$

$$e'_9=(q_0+\gamma_1h_1+\gamma_2h_2)K_{a3}-2c_3\sqrt{K_{a3}}$$

$$=(10+18\times3+17\times6)\times0.656-2\times11\times0.81$$

$$=91.08$$

2)开挖面以下土压力为零点深度 d_3

$$d_3=\frac{e'_9-2c_3\sqrt{K_{p3}}}{\gamma_3(K_{p3}-K_{a3})}$$

$$=\frac{91.08-2\times11\times1.234}{17\times(1.525-0.656)}$$

$$=4.33(\text{m})\qquad(5.4.20)$$

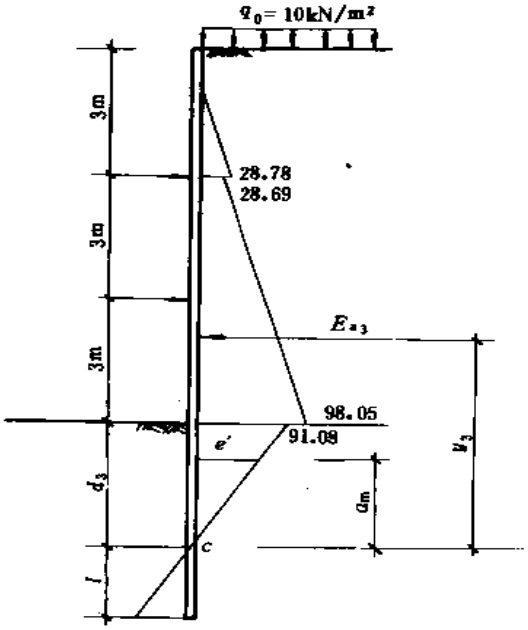


图 5-9

3)土压为零点位置 c 以上的全部土压力合力 E_{a3}

$$E_{a3}=32.23+28.69\times6+\frac{1}{2}\times6\times(98.05-28.69)+\frac{1}{2}\times4.33\times91.08$$

$$=32.23+172.14+208.08+197.19=609.64\qquad(5.4.21)$$

4)主动土压力合力作用点离 c 点的距离 y_3

$$E_{a3}\cdot y_3=32.23\times\left(\frac{1}{3}\times2.24+6+4.33\right)+172.14\times(3+4.33)+208.08\times\left(\frac{1}{3}\times6+4.33\right)+197.19\times\frac{2}{3}\times4.33$$

$$=357.00+1261.79+1317.15+1138.44$$

$$=4074.38\qquad(5.4.22)$$

故 $$y_3=4074.38/609.64=6.68(\text{m})$$

5)第二层支点力 T_2

$$T_2=\frac{E_{a3}\cdot y_3-T_1\cdot(6+d_3)}{(3+d_3)}$$

$$= \frac{4074.38 - 198.03 \times (6 + 4.33)}{(3 + 4.33)}$$

$$= 276.77 \qquad (5.4.23)$$

6)最大弯矩作用点位置 a_m

由于(T_1+T_2)大于如式(5.4.21)中的前三项，因此，剪力为零点(弯矩最大值点)位于基坑开挖面以下。根据水平力平衡条件可得

$$T_1+T_2-E_{a3}+\frac{1}{2}\cdot a_m\cdot(\frac{91.08}{4.33}\times a_m)=0$$

$$=a_m^2=\frac{2\times(609.64-1980-276.77)\times 4.33}{91.08}=12.82$$

得

$$a_m=3.58(\mathrm{m})$$

$$e'=\frac{91.08}{4.33}\times a_m=91.08\times 3.58/4.33=75.30$$

$$d_3-a_m=4.33-3.58=0.75(\mathrm{m})$$

7)最大弯矩 M_3

$$M_3=32.23\times(\frac{1}{3}\times 2.44+6+0.75)+172.14\times(3+0.75)+208.08\times(\frac{1}{3}\times 6+0.75)+$$
$$0.75\times 75.30\times\frac{1}{2}\times 0.75+\frac{1}{2}\times 0.75\times(91.08-75.30)\times\frac{2}{3}\times 0.75-198.03\times(6$$
$$+0.75)-276.77(3+0.75)$$
$$=243.77+645.53+572.22+21.18+2.96-1336.70-1037.89$$
$$=-888.93$$

8)板桩应力 σ

$$\sigma=\frac{|M_3|}{W}=\frac{888.93\times 10^6}{3.82\times 10^6}=232.70<240(\mathrm{N/mm^2})$$

9)嵌固深度 l_3

嵌固深度 l 以水平力平衡条件确定，由图 5-8 得

$$E_{a3}-T_1-T_2-\frac{1}{2}\cdot l_3\cdot\gamma\cdot l_3\cdot(K_{p3}-K_{a3})=0$$

$$l_3^2=\frac{2\times(60964-198.03-276.77)}{17\times(1.525-0.656)}=18.26$$

$$l_3=4.27(\mathrm{m})$$

10)结构总长度 L

$$L=9+d_3+1.2l_3$$
$$=9+4.33+1.2\times 4.27=18.45\ (\mathrm{m})$$

5.5 均质土中多层支点混合支护结构内力计算表

均质土层中多层支点混合支护结构内力用等值梁法分析时，可采用查表方式进行计算。图 5-10 为多层支点计算简图。任一开挖阶段的支点力及结构内力可通过等值梁法(土压力计算采用朗肯土压力理论)分析得出的无量纲系数求得。无量纲系数如表 5-9(1)5－10(50)所示。

假设每层支点位置即为此层支点施工前的开挖深度，当第一层支点施工前的开挖深度为 h，第二层支点施工前的开挖深度为 $2h$，以此类推，当全部支点施工完之后的开挖深度即为实

际基坑最终开挖深度。

以 n_{ij} 表示长度系数，其中第一下脚标 $i=1,2,3$ 分别表示每次开挖后的土压力零点、剪力零点(最大弯矩点)及嵌固长度系数；第二下脚标 $j=0,1,2,3,4,5$ 分别表示悬臂、第一支点至第五支点施工后的挖土深度状态。

应用表 5-9(1)～5－9(50)求混合支护结构内力时，查表参数计算如下：

$$h=H_m/(m+1) \quad (5.5.1)$$

式中 m——等距离分布的支点层数。

$$\delta=c/(\gamma h) \quad (5.5.2)$$

$$\omega=q_0/(\gamma h) \quad (5.5.3)$$

内力及几何参数计算公式如下：

$$H_j=(j+1)\cdot h \quad (5.5.4)$$

式中 j——第 j 层支点，$j=0$ 为悬臂状态。

$$A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_j^2 K_a \quad (5.5.5)$$

$$A_M=\frac{H_j}{3}\cdot A_Q \quad (5.5.6)$$

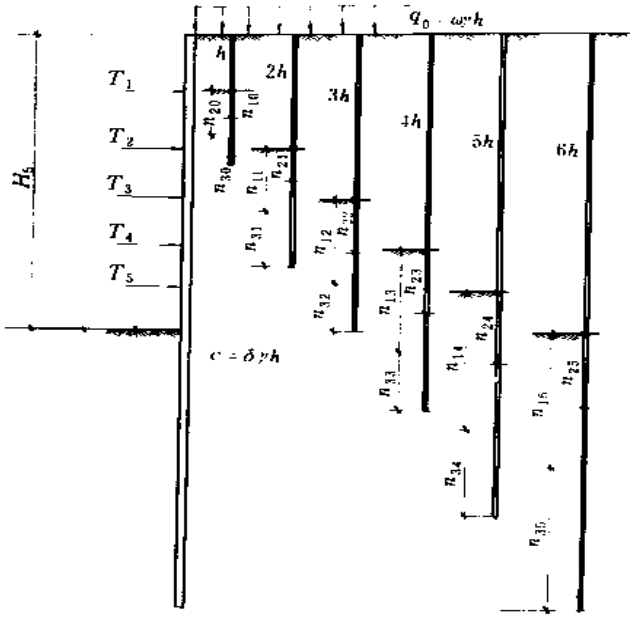


图 5-10 多层支点计算简图

注：图中 n_{ij} 为长度系数，实际长度为 $n_{ij}(j+1)h$

各种开挖条件下的结构内力与几何数值可在每种状态下查表 5.9(1)～5.9(50)相应系数，然后按下述方法计算：

(1)支点水平力：$T_j=\beta\cdot A_Q$ (5.5.7)

(2)支点上方剪力：$Q'_t=(\varepsilon_t-\beta)\cdot A_Q$ (5.5.8)

(3)支点下方剪力：$Q_t=\varepsilon_t\cdot A_Q$ (5.5.9)

(4)支点处弯矩：$M_t=\alpha_t\cdot A_M$ (5.5.10)

(5)土压力零点深度：$l_1=n_1 H_j$ (5.5.11)

(6)土压力零点处剪力：$Q_u=\varepsilon_u A_Q$ (5.5.12)

(7)剪力零点深度：$l_2=n_2 H_j$ (5.5.13)

(8)剪力零点处弯矩：$M_u=\alpha_u A_M$ (5.5.14)

(9)嵌固长度：$l_3=n_3 H_j$ (5.5.15)

(10)结构长度：$l=H_j+l_1+1.2l_3$ (5.5.16)

全部计算可应用表格形式进行。

【例 1】某工程开挖深度为 18m，土层参数为 $c=10.5$kPa，$\varphi=20°$，土的重度 $\gamma=20$kN/m³。试计算锚杆力及结构内力。

【解】如图 5-11 所示，本工程拟设置五层锚杆，各层锚杆位置为均匀分布。

1. 计算各查表所用参数

$$h=\frac{H_j}{j+1}=\frac{18}{5+1}=3(\text{m})$$

$$\delta=c/\gamma h=10.5/(20\times 3)=0.175$$

$$\omega=q_0/\gamma h=12/(20\times 3)=0.20$$

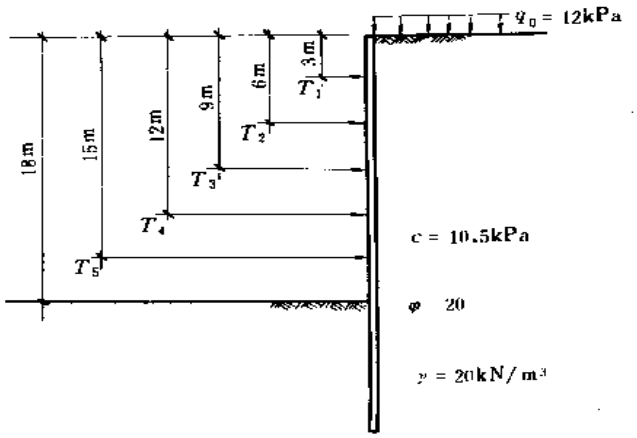


图 5-11

根据上述参数查表 5-9(14)计算各层锚杆力及结构内力，计算过程如表 5-1～5-5。

第 1 层支点力及结构内力计算表 **表 5-1**

$H_1=6\text{m}$ $A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_1^2 K_a=176.4$ $A_M=\frac{A_Q}{3}\cdot H_1=352.8$

序 号	计算项目	系 数		计算公式	结 果	单 位
1	支点水平力	β	0.475	βAQ	84.1	kN/m
2	支点上方剪力	$\varepsilon_t-\beta$	−0.123	$(\varepsilon_t-\beta)A_Q$	−22.0	kN/m
3	支点下方剪力	ε_t	0.352	$\varepsilon_t A_Q$	62.1	kN/m
4	支点处弯矩	α_t	0.043	$\alpha_t A_M$	15.3	kN·m/m
5	土压力零点深度	n_1	0.109	$n_1 H_1$	0.65	m
6	土压力零点处剪力	ε_u	−0.330	$\varepsilon_u A_Q$	58.4	kN/m
7	剪力零点深度	n_2	−0.162	$n_2 H_1$	−0.97	m
8	剪力零点处弯矩	α_u	−0.155	$\alpha_u A_M$	−54.7	kN·m/m
9	嵌固长度	n_3	0.301	$n_3 H_1$	1.81	m
10	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)H_1$			8.82	m

第 2 层支点力及结构内力计算表 **表 5-2**

$H_2=9\text{m}$ $A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_2^2 K_a=396.9$ $A_M=\frac{A_Q}{3}\cdot H_2=1190.7$

序 号	计算项目	系 数		计算公式	结 果	单 位
1	支点水平力	β	0.441	βA_Q	175.4	kN/m
2	支点上方剪力	$\varepsilon_t-\beta$	−0.11	$(\varepsilon_t-\beta)A_Q$	−44.0	kN/m
3	支点下方剪力	ε_t	0.331	$\varepsilon_t A_Q$	131.4	kN/m
4	支点处弯矩	α_t	−0.029	$\alpha_t A_M$	−34.2	kN·m/m
5	土压力零点深度	n_1	0.178	$n_1 H_2$	1.60	m
6	土压力零点处剪力	ε_u	−0.307	$\varepsilon_u A_Q$	−122.1	kN/m
7	剪力零点深度	n_2	−0.093	$n_2 H_2$	−0.84	m
8	剪力零点处弯矩	α_u	−0.155	$\alpha_u A_M$	−184.8	kN·m/m
9	嵌固长度	n_3	0.286	$n_3 H_2$	2.58	m
10	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)H_2$			13.70	m

第 3 层支点力及结构内力计算表 表 5-3

$H_3=12\text{m}$ $A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_3^2 K_a=705.6$ $A_M=\frac{A_Q}{3}\cdot H_3=2822.4$

序 号	计算项目	系 数		计算公式	结 果	单 位
1	支点水平力	β	0.389	βA_Q	274.7	kN/m
2	支点上方剪力	$\varepsilon_t-\beta$	−0.089	$(\varepsilon_t-\beta)A_Q$	−63.0	kN/m
3	支点下方剪力	ε_t	0.300	$\varepsilon_t A_Q$	211.7	kN/m
4	支点处弯矩	α_t	−0.056	$\alpha_t A_M$	−159.0	kN·m/m
5	土压力零点深度	n_1	0.213	$n_1 H_3$	2.55	m
6	土压力零点处剪力	ε_u	−0.287	$\varepsilon_u A_Q$	−202.6	kN/m
7	剪力零点深度	n_2	−0.056	$n_2 H_3$	−0.67	m
8	剪力零点处弯矩	α_u	−0.147	$\alpha_u Am$	−414.8	kN·m/m
9	嵌固长度	n_3	0.278	$n_3 H_3$	3.33	m
10	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)H_3$			18.55	m

第 4 层支点力及结构内力计算表 表 5-4

$H_4=15\text{m}$ $A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_4^2 K_a=1102.5$ $A_M=\frac{A_Q}{3}\cdot H_4=5512.5$

序 号	计算项目	系 数		计算公式	结 果	单 位
1	支点水平力	β	0.337	βA_Q	372.2	kN/m
2	支点上方剪力	$\varepsilon_t-\beta$	−0.064	$(\varepsilon_t-\beta)A_Q$	−71.0	kN/m
3	支点下方剪力	ε_t	0.273	$\varepsilon_t A_Q$	301.2	kN/m
4	支点处弯矩	α_t	−0.071	$\alpha_t A_M$	−392.2	kN·m/m
5	土压力零点深度	n_1	0.233	$n_1 H_4$	3.50	m
6	土压力零点处剪力	ε_u	−0.273	$\varepsilon_u A_Q$	−301.6	kN/m
7	剪力零点深度	n_2	−0.034	$n_7 H_4$	−0.051	m
8	剪力零点处弯矩	α_u	−0.141	$\alpha_u A_M$	−777.3	kN·m/m
9	嵌固长度	n_3	0.273	$n_3 H_4$	4.10	m
10	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)H_4$			23.42	m

第 5 层支点力及结构内力计算表 表 5-5

$H_5=18\text{m}$ $A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_5^2 K_a=1587.6$ $A_M=\frac{A_Q}{3}\cdot H_5=9525.6$

序 号	计算项目	系 数		计算公式	结 果	单 位
1	支点水平力	β	0.296	βA_Q	469.6	kN/m
2	支点上方剪力	$\varepsilon_t-\beta$	−0.044	$(\varepsilon_t-\beta)A_Q$	−69.8	kN/m
3	支点下方剪力	ε_t	0.252	$\varepsilon_t A_Q$	399.8	kN/m
4	支点处弯矩	α_t	−0.080	$\alpha_t A_M$	−761.6	kN·m/m
5	土压力零点深度	n_1	0.247	$n_1 H_5$	4.45	m
6	土压力零点处剪力	ε_u	−0.264	$\varepsilon_u A_Q$	−419.9	kN/m
7	剪力零点深度	n_2	−0.020	$n_7 H_5$	−0.036	m
8	剪力零点处弯矩	α_u	−0.137	$\alpha_u A_M$	−1305.0	kN·m/m
9	嵌固长度	n_3	0.270	$n_3 H_5$	4.86	m
10	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)H_5$			28.28	m

【例 2】某工程开挖深度为 9m，土层参数为 $c=10\text{kPa}$，$\varphi=12°$，土的重度 $\gamma=17\text{kN/m}^3$，设计采用二层锚杆(图 5-12)。试计算锚杆力及结构内力。

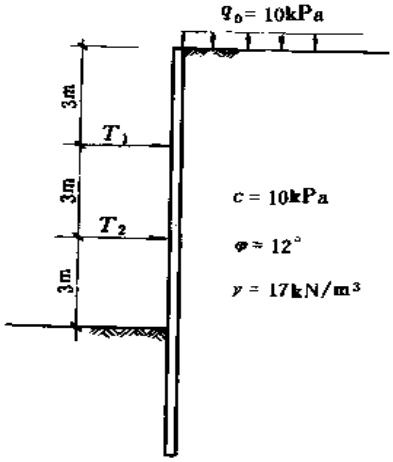


图 5-12

【解】1. 计算查表所需各参数

$$h=\frac{H_j}{j+1}=\frac{9}{2+1}=3(\text{m})$$

$$\delta=c/(\gamma h)=10/(17\times3)\approx0.20$$

$$\omega=q_0/(\gamma h)=10(17\times3)\approx0.20$$

根据上述参数，当 $\omega=0.20$、$\varphi=12°$时，对应表 5-9(13)与 5—9(14)的 $\delta=0.161$ 及 $\delta=0.242$，查表系数可取两表此查得的平均值。

2. 悬臂阶段开挖计算表(表 5-6)

表 5-6

$H_0=3\text{m}$　　$A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_0^2K_a=50.11$　　$A_M=\frac{H_0}{3}\cdot A_Q=50.11$

序号	计算项目	系数			计算公式	结果	单位
1	土压力零点深度	n_1	0.147 1.000	0.074	n_1H_0	0.22	m
2	剪力零点深度	n_2	0.859 0.341	0.60	n_2H_0	1.80	m
3	最大弯矩	α_u	1.76 0.43	1.10	α_uA_M	55.12	kN·m/m
4	嵌固长度	n_3	1.402 0.736	1.07	n_3H_0	3.21	m
5	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)H_0$				7.07	m

注：上表所指深度为本阶段开挖面以下深度。

3. 第 1 层支点力及结构内力计算表(表 5-7)

表 5-7

$H_1=6\text{m}$　　$A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_1^2K_a=200.43$　　$A_M=\frac{A_Q}{3}H_1=400.86$

序　号	计算项目	系　数			计算公式	结　果	单　位
1	支点水平力	β	0.759 0.480	0.62	βA_Q	124.17	kN/m
2	支点上方剪力	$\varepsilon_t-\beta$		−0.126	$(\varepsilon_t-\beta)A_Q$	−25.25	kN/m
3	支点下主剪力	ε_t	0.598 0.389	0.494	ε_tA_Q	98.91	kN/m
4	支点处弯矩	α_t	0.064 0.027	0.046	α_tA_M	18.24	kN·m/m
5	土压力零点深度	n_1	0.451 0.261	0.351	n_1H_1	2.14	m
6	土压力零点处剪力	ε_u	−0.46 0.332	0.40	ε_uA_Q	−79.37	kN/m
7	剪力零点深度	n_2	−0.03 −0.008	−0.019	n_2H_1	−0.114	m
8	剪力零点处弯矩	α_u	−0.41 −0.231	0.32	α_uA_M	−128.48	kN·m/m
9	嵌固长度	n_3	0.493 0.437	0.465	n_3H_1	2.79	m
10	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)\cdot H_1$				11.48	m

4. 第 2 层支点力及结构内力计算表(表 5-8)

表 5-8

$H_2=9$m	$A_Q=\frac{1}{2}\gamma H_2^2 K_a=451$	$A_M=\frac{A_Q}{3}\cdot H_2=1353$

序 号	计算项目	系 数			计算公式	结 果	单 位
1	支点水平力	β	0.589 0.516	0.553	βA_Q	249	kN/m
2	支点上方剪力	$\varepsilon_t-\beta$		−0.048	$(\varepsilon_t-\beta)A_Q$	−22	kN/m
3	支点下方剪力	ε_t	0.566 0.444	0.505	$\varepsilon_t A_Q$	228	kN/m
4	支点处弯矩	α_t	−0.121 −0.061	−0.182	$\alpha_t A_M$	−246	kN·m/m
5	土压力零点深度	n_1	0.552 0.426	0.489	$n_1 H_1$	4.401	m
6	土压力零点处剪力	ε_n	−0.462 −0.350	−0.406	$\varepsilon_n A_Q$	−183	kN/m
7	剪力零点深度	n_2	0.038 −0.014	0.012	$n_2 H_2$	0.108	m
8	剪力零点处弯矩	α_n	−0.452 −0.290	−0.371	$\alpha_n A_M$	−502	kN·m/m
9	嵌固长度	n_3	0.514 0.446	0.48	$n_3 H_2$	4.32	m
10	结构最小长度	$(1+n_1+1.2n_3)\cdot H_2$				18.59	m

与 5.4 节算例相比,应用内力计算表使复杂的多层支点内力计算变得较为简便了。

均质土中多层支点混合支护结构内力计算表

$\omega=0.00$　　表 5-9(1)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	1.332	0.984	0.755	0.594	0.476	0.387	0.317	0.197	0.125	0.079	0.050
	n_2	3.094	2.381	1.906	1.568	1.315	1.119	0.963	0.684	0.500	0.372	0.278
	α_u	16.76	11.43	8.45	6.59	5.36	4.49	3.85	2.83	2.25	1.88	1.63
	n_3	3.542	2.817	2.326	1.973	1.709	1.502	1.331	1.021	0.805	0.643	0.518
第一层支点	β	1.555	1.323	1.170	1.063	0.984	0.924	0.878	0.798	0.750	0.720	0.700
	ε_t	1.305	1.073	0.920	0.813	0.734	0.674	0.628	0.548	0.500	0.470	0.450
	α_t	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
	n_1	1.332	0.984	0.755	0.594	0.476	0.387	0.317	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.777	0.661	0.585	0.531	0.492	0.462	0.439	0.399	0.375	0.360	0.350
	n_2	0.314	0.177	0.090	0.032	-0.008	-0.039	-0.063	-0.107	-0.134	-0.152	-0.163
	$-\alpha_u$	1.582	1.067	0.778	0.597	0.476	0.391	0.328	0.229	0.174	0.141	0.121
	n_3	1.018	0.807	0.665	0.562	0.484	0.423	0.373	0.281	0.217	0.169	0.132
第二层支点	β	0.881	0.753	0.670	0.612	0.569	0.537	0.513	0.471	0.447	0.432	0.423
	ε_t	1.128	0.897	0.745	0.640	0.562	0.504	0.458	0.382	0.336	0.307	0.289
	α_t	-0.395	-0.291	-0.224	-0.176	-0.141	-0.115	-0.094	-0.058	-0.037	-0.024	-0.015
	n_1	1.332	0.984	0.755	0.594	0.476	0.387	0.317	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.760	0.643	0.565	0.510	0.470	0.438	0.414	0.371	0.345	0.328	0.316
	n_2	0.326	0.189	0.102	0.044	0.003	-0.026	-0.050	-0.091	-0.117	-0.133	-0.143
	$-\alpha_u$	1.529	1.022	0.738	0.562	0.444	0.361	0.300	0.204	0.151	0.120	0.101
	n_3	1.006	0.795	0.653	0.551	0.473	0.412	0.362	0.271	0.208	0.161	0.125
第三层支点	β	0.715	0.616	0.552	0.509	0.477	0.454	0.436	0.408	0.393	0.385	0.381
	ε_t	1.037	0.808	0.659	0.556	0.481	0.425	0.382	0.311	0.270	0.246	0.231
	α_t	-0.533	-0.392	-0.299	-0.235	-0.187	-0.151	-0.124	-0.076	-0.048	-0.030	-0.019
	n_1	1.332	0.984	0.755	0.594	0.476	0.387	0.317	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.733	0.613	0.533	0.476	0.433	0.399	0.373	0.324	0.293	0.271	0.256
	n_2	0.344	0.207	0.121	0.062	0.022	-0.006	-0.028	-0.066	-0.088	-0.101	-0.109
	$-\alpha_u$	1.448	0.952	0.677	0.506	0.393	0.314	0.256	0.165	0.116	0.087	0.069
	n_3	0.988	0.777	0.634	0.532	0.454	0.393	0.344	0.253	0.191	0.147	0.113
第四层支点	β	0.596	0.515	0.463	0.427	0.402	0.383	0.369	0.347	0.335	0.329	0.325
	ε_t	0.979	0.752	0.605	0.503	0.430	0.375	0.333	0.266	0.228	0.206	0.193
	α_t	-0.591	-0.431	-0.326	-0.254	-0.201	-0.161	-0.130	-0.078	-0.048	-0.030	-0.018
	n_1	1.332	0.984	0.755	0.594	0.476	0.387	0.317	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.713	0.592	0.510	0.451	0.407	0.372	0.343	0.292	0.257	0.234	0.217
	n_2	0.358	0.221	0.134	0.076	0.036	0.008	-0.013	-0.048	-0.068	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.389	0.903	0.633	0.468	0.358	0.282	0.226	0.141	0.094	0.068	0.052
	n_3	0.974	0.763	0.621	0.518	0.440	0.379	0.330	0.240	0.179	0.136	0.104
第五层支点	β	0.509	0.441	0.397	0.367	0.345	0.330	0.318	0.299	0.290	0.284	0.281
	ε_t	0.939	0.713	0.567	0.466	0.394	0.340	0.300	0.234	0.198	0.177	0.165
	α_t	-0.622	-0.450	-0.339	-0.261	-0.205	-0.163	-0.131	-0.077	-0.047	-0.029	-0.017
	n_1	1.332	0.984	0.755	0.594	0.476	0.387	0.317	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.699	0.576	0.494	0.434	0.388	0.352	0.323	0.269	0.233	0.208	0.190
	n_2	0.367	0.231	0.144	0.087	0.046	0.018	-0.003	-0.036	-0.055	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.348	0.868	0.603	0.441	0.334	0.260	0.206	0.124	0.081	0.056	0.041
	n_3	0.965	0.753	0.611	0.508	0.430	0.369	0.320	0.230	0.171	0.128	0.097

$\omega=0.00$ 表 5-9(2)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.665	0.490	0.376	0.296	0.237	0.193	0.157	0.097	0.062	0.040	0.025
	n_2	1.789	1.416	1.166	0.986	0.850	0.742	0.652	0.489	0.378	0.294	0.229
臂	α_u	4.28	3.28	2.69	2.31	2.04	1.86	1.70	1.45	1.32	1.22	1.16
	n_3	2.253	1.861	1.591	1.395	1.242	1.119	1.015	0.817	0.675	0.560	0.464
第一层支点	β	1.021	0.892	0.808	0.751	0.711	0.681	0.657	0.622	0.608	0.604	0.605
	ε_t	0.867	0.735	0.648	0.587	0.543	0.510	0.483	0.440	0.417	0.404	0.398
	α_t	0.060	0.062	0.064	0.066	0.068	0.071	0.072	0.078	0.084	0.089	0.094
	n_1	0.999	0.737	0.565	0.445	0.357	0.290	0.237	0.147	0.094	0.059	0.037
	$-\varepsilon_u$	0.524	0.463	0.426	0.400	0.383	0.371	0.361	0.347	0.340	0.337	0.335
	n_2	0.163	0.062	-0.001	-0.038	-0.066	-0.088	-0.106	-0.138	-0.157	-0.170	-0.177
	$-\alpha_u$	0.875	0.626	0.483	0.390	0.326	0.279	0.243	0.185	0.151	0.129	0.115
	n_3	0.835	0.675	0.567	0.488	0.427	0.379	0.338	0.262	0.206	0.164	0.129
第二层支点	β	0.763	0.661	0.596	0.550	0.518	0.493	0.474	0.443	0.426	0.416	0.410
	ε_t	0.863	0.701	0.595	0.520	0.466	0.425	0.392	0.338	0.306	0.286	0.274
	α_t	-0.243	-0.183	-0.143	-0.114	-0.093	-0.077	-0.064	-0.041	-0.026	-0.017	-0.011
	n_1	1.110	0.819	0.628	0.495	0.397	0.322	0.263	0.164	0.104	0.066	0.041
	$-\varepsilon_u$	0.570	0.491	0.440	0.405	0.379	0.360	0.345	0.321	0.308	0.301	0.296
	n_2	0.239	0.124	0.052	0.004	-0.026	-0.050	-0.069	-0.103	-0.124	-0.137	-0.146
	$-\alpha_u$	0.992	0.682	0.507	0.397	0.322	0.269	0.228	0.164	0.127	0.105	0.091
	n_3	0.871	0.695	0.576	0.490	0.425	0.373	0.331	0.252	0.196	0.154	0.121
第三层支点	β	0.646	0.562	0.508	0.471	0.445	0.426	0.411	0.389	0.378	0.372	0.370
	ε_t	0.846	0.670	0.555	0.475	0.417	0.374	0.340	0.285	0.253	0.234	0.223
	α_t	-0.367	-0.273	-0.211	-0.167	-0.135	-0.110	-0.091	-0.057	-0.037	-0.024	-0.015
	n_1	1.165	0.860	0.660	0.520	0.417	0.338	0.277	0.172	0.109	0.069	0.043
	$-\varepsilon_u$	0.584	0.494	0.435	0.393	0.362	0.338	0.318	0.285	0.264	0.251	0.242
	n_2	0.283	0.163	0.087	0.036	0.001	-0.022	-0.041	-0.072	-0.091	-0.103	-0.110
	$-\alpha_u$	1.031	0.690	0.498	0.380	0.300	0.244	0.202	0.136	0.099	0.077	0.063
	n_3	0.882	0.697	0.573	0.483	0.415	0.361	0.318	0.237	0.182	0.141	0.110
第四层支点	β	0.551	0.479	0.434	0.403	0.380	0.364	0.352	0.334	0.324	0.320	0.318
	ε_t	0.829	0.645	0.525	0.442	0.382	0.337	0.303	0.248	0.216	0.198	0.187
	α_t	-0.438	-0.322	-0.246	-0.193	-0.154	-0.124	-0.101	-0.062	-0.039	-0.025	-0.015
	n_1	1.199	0.885	0.679	0.535	0.428	0.348	0.285	0.177	0.113	0.071	0.045
	$-\varepsilon_u$	0.592	0.495	0.430	0.384	0.349	0.322	0.300	0.260	0.235	0.218	0.206
	n_2	0.310	0.187	0.109	0.057	0.021	-0.005	-0.023	-0.053	-0.071	-0.082	-0.088
	$-\alpha_u$	1.052	0.691	0.490	0.367	0.284	0.227	0.184	0.118	0.082	0.061	0.047
	n_3	0.888	0.698	0.570	0.478	0.408	0.353	0.308	0.227	0.171	0.131	0.101
第五层支点	β	0.478	0.416	0.376	0.349	0.330	0.316	0.306	0.290	0.282	0.278	0.276
	ε_t	0.815	0.625	0.502	0.417	0.356	0.310	0.276	0.220	0.189	0.172	0.161
	α_t	-0.484	-0.353	-0.267	-0.207	-0.164	-0.131	-0.106	-0.064	-0.039	-0.024	-0.015
	n_1	1.221	0.902	0.692	0.545	0.436	0.354	0.290	0.181	0.115	0.073	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.597	0.495	0.427	0.377	0.340	0.310	0.286	0.243	0.214	0.195	0.181
	n_2	0.329	0.204	0.124	0.071	0.034	0.008	-0.011	-0.040	-0.057	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.065	0.691	0.484	0.357	0.273	0.215	0.172	0.106	0.071	0.050	0.038
	n_3	0.892	0.698	0.567	0.473	0.402	0.346	0.301	0.219	0.164	0.124	0.095

$\omega=0.00$ 表 5-9(3)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.655	0.577	0.519	0.474	0.437	0.406	0.373	0.312	0.264	0.221	0.183
臂	a_u	0.61	0.59	0.59	0.60	0.61	0.63	0.63	0.66	0.71	0.76	0.80
	n_3	1.225	1.087	0.989	0.914	0.852	0.796	0.743	0.637	0.554	0.481	0.413
第	β	0.616	0.559	0.524	0.502	0.488	0.480	0.473	0.471	0.483	0.499	0.518
	ε_t	0.535	0.473	0.434	0.406	0.387	0.374	0.361	0.346	0.343	0.345	0.350
一	a_t	0.023	0.025	0.027	0.030	0.032	0.035	0.037	0.044	0.052	0.061	0.069
	n_1	0.665	0.490	0.376	0.296	0.237	0.193	0.157	0.097	0.062	0.040	0.025
层	$-\varepsilon_u$	0.332	0.313	0.304	0.300	0.299	0.300	0.300	0.306	0.312	0.318	0.322
	n_2	0.000	-0.045	-0.077	-0.101	-0.119	-0.134	-0.146	-0.167	-0.179	-0.186	-0.190
支	$-a_u$	0.441	0.345	0.286	0.245	0.216	0.195	0.176	0.147	0.129	0.117	0.109
	n_3	0.665	0.555	0.479	0.422	0.377	0.341	0.308	0.246	0.198	0.159	0.127
点	β	0.643	0.568	0.520	0.488	0.464	0.448	0.434	0.414	0.404	0.399	0.397
	ε_t	0.643	0.537	0.468	0.419	0.384	0.357	0.335	0.299	0.279	0.267	0.259
第	a_t	-0.131	-0.101	-0.081	-0.066	-0.055	-0.046	-0.038	-0.025	-0.017	-0.011	-0.007
	n_1	0.887	0.655	0.502	0.395	0.317	0.258	0.210	0.131	0.083	0.053	0.033
二	$-\varepsilon_u$	0.408	0.362	0.333	0.314	0.302	0.293	0.286	0.278	0.276	0.277	0.278
	n_2	0.150	0.058	0.001	-0.030	-0.053	-0.072	-0.087	-0.113	-0.130	-0.141	-0.148
层	$-a_u$	0.602	0.431	0.334	0.271	0.227	0.195	0.170	0.129	0.106	0.092	0.082
	n_3	0.737	0.596	0.501	0.432	0.379	0.337	0.301	0.234	0.186	0.148	0.118
支	β	0.576	0.507	0.463	0.433	0.412	0.397	0.385	0.368	0.361	0.359	0.359
	ε_t	0.679	0.548	0.463	0.404	0.361	0.328	0.303	0.261	0.237	0.223	0.215
点	a_t	-0.237	-0.179	-0.141	-0.113	-0.093	-0.077	-0.064	-0.041	-0.027	-0.018	-0.011
	n_1	0.999	0.737	0.565	0.445	0.357	0.290	0.237	0.147	0.094	0.059	0.037
第	$-\varepsilon_u$	0.453	0.389	0.348	0.319	0.298	0.283	0.270	0.250	0.239	0.232	0.228
	n_2	0.222	0.118	0.053	0.009	-0.017	-0.037	-0.052	-0.079	-0.095	-0.105	-0.111
三	$-a_u$	0.704	0.482	0.356	0.278	0.225	0.187	0.157	0.111	0.084	0.068	0.057
	n_3	0.777	0.619	0.512	0.436	0.377	0.331	0.293	0.222	0.173	0.136	0.107
层	β	0.506	0.444	0.404	0.377	0.359	0.345	0.335	0.320	0.313	0.311	0.310
	ε_t	0.695	0.548	0.452	0.386	0.339	0.303	0.275	0.230	0.205	0.191	0.182
支	a_t	-0.312	-0.232	-0.179	-0.142	-0.115	-0.094	-0.077	-0.048	-0.031	-0.020	-0.013
	n_1	1.065	0.786	0.603	0.475	0.381	0.309	0.253	0.157	0.100	0.063	0.040
点	$-\varepsilon_u$	0.483	0.407	0.358	0.322	0.296	0.276	0.260	0.232	0.214	0.203	0.195
	n_2	0.263	0.153	0.084	0.037	0.005	-0.016	-0.032	-0.058	-0.074	-0.083	-0.089
第	$-a_u$	0.774	0.516	0.372	0.282	0.223	0.181	0.149	0.099	0.071	0.054	0.044
	n_3	0.802	0.633	0.520	0.438	0.376	0.327	0.287	0.214	0.164	0.127	0.099
四	β	0.446	0.391	0.356	0.332	0.315	0.303	0.294	0.281	0.275	0.272	0.271
	ε_t	0.702	0.544	0.442	0.371	0.321	0.283	0.254	0.207	0.181	0.166	0.158
层	a_t	-0.368	-0.270	-0.206	-0.162	-0.129	-0.104	-0.085	-0.052	-0.033	-0.020	-0.013
	n_1	1.110	0.819	0.628	0.495	0.397	0.322	0.263	0.164	0.104	0.066	0.041
支	$-\varepsilon_u$	0.504	0.420	0.365	0.325	0.295	0.272	0.253	0.219	0.197	0.182	0.172
	n_2	0.291	0.176	0.104	0.055	0.022	-0.002	-0.018	-0.044	-0.059	-0.068	-0.074
点	$-a_u$	0.825	0.541	0.383	0.286	0.221	0.176	0.143	0.091	0.062	0.045	0.035
第五层支点	n_3	0.819	0.643	0.525	0.439	0.375	0.324	0.283	0.208	0.157	0.120	0.093

ω=0.00　　表 5-9(4)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.115	0.125	0.136	0.146	0.154	0.162	0.163	0.167	0.166	0.155	0.140
臂	α_u	0.07	0.08	0.10	0.12	0.15	0.17	0.19	0.27	0.36	0.44	0.53
	n_3	0.305	0.325	0.346	0.366	0.379	0.392	0.393	0.397	0.391	0.370	0.340
第一层支点	β	0.329	0.315	0.309	0.309	0.312	0.318	0.321	0.343	0.374	0.406	0.439
	ε_t	0.298	0.279	0.269	0.263	0.260	0.260	0.258	0.264	0.277	0.291	0.306
	α_t	0.006	0.007	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.022	0.030	0.039	0.049
	n_1	0.332	0.243	0.186	0.146	0.118	0.096	0.077	0.047	0.031	0.020	0.012
	$-\varepsilon_u$	0.212	0.220	0.228	0.237	0.246	0.254	0.261	0.278	0.292	0.303	0.312
	n_2	-0.103	-0.128	-0.145	-0.159	-0.169	-0.176	-0.184	-0.195	-0.200	-0.202	-0.202
	$-\alpha_u$	0.203	0.175	0.157	0.145	0.136	0.129	0.122	0.113	0.108	0.104	0.101
	n_3	0.531	0.465	0.415	0.376	0.342	0.314	0.288	0.234	0.191	0.155	0.125
第二层支点	β	0.524	0.476	0.445	0.425	0.411	0.402	0.393	0.383	0.380	0.381	0.383
	ε_t	0.466	0.405	0.364	0.336	0.315	0.299	0.286	0.265	0.254	0.248	0.245
	α_t	-0.054	-0.043	-0.035	-0.029	-0.025	-0.021	-0.017	-0.012	-0.008	-0.005	-0.003
	n_1	0.665	0.490	0.376	0.296	0.237	0.193	0.157	0.097	0.062	0.040	0.025
	$-\varepsilon_u$	0.278	0.257	0.245	0.240	0.238	0.237	0.237	0.241	0.249	0.256	0.263
	n_2	0.057	-0.008	-0.038	-0.060	-0.077	-0.090	-0.102	-0.122	-0.135	-0.144	-0.150
	$-\alpha_u$	0.338	0.258	0.210	0.177	0.154	0.137	0.123	0.100	0.087	0.079	0.074
	n_3	0.608	0.502	0.431	0.378	0.336	0.303	0.274	0.218	0.176	0.143	0.114
第三层支点	β	0.505	0.451	0.417	0.394	0.378	0.367	0.359	0.348	0.345	0.345	0.348
	ε_t	0.536	0.444	0.384	0.342	0.311	0.288	0.269	0.239	0.222	0.212	0.207
	α_t	-0.141	-0.109	-0.087	-0.071	-0.059	-0.050	-0.042	-0.028	-0.019	-0.012	-0.008
	n_1	0.832	0.613	0.470	0.370	0.297	0.241	0.197	0.122	0.078	0.050	0.031
	$-\varepsilon_u$	0.340	0.298	0.272	0.255	0.244	0.235	0.228	0.220	0.217	0.216	0.216
	n_2	0.159	0.072	0.017	-0.014	-0.034	-0.050	-0.063	-0.085	-0.098	-0.107	-0.112
	$-\alpha_u$	0.458	0.323	0.247	0.199	0.165	0.140	0.121	0.089	0.071	0.060	0.052
	n_3	0.673	0.542	0.453	0.389	0.341	0.302	0.269	0.208	0.165	0.131	0.104
第四层支点	β	0.460	0.408	0.374	0.352	0.337	0.326	0.318	0.306	0.303	0.302	0.303
	ε_t	0.575	0.461	0.388	0.336	0.299	0.272	0.250	0.215	0.195	0.183	0.177
	α_t	-0.213	-0.161	-0.126	-0.101	-0.083	-0.069	-0.057	-0.037	-0.024	-0.016	-0.010
	n_1	0.932	0.688	0.527	0.415	0.333	0.270	0.221	0.137	0.087	0.056	0.035
	$-\varepsilon_u$	0.385	0.329	0.293	0.268	0.249	0.236	0.224	0.206	0.196	0.190	0.186
	n_2	0.215	0.118	0.057	0.016	-0.010	-0.026	-0.040	-0.063	-0.076	-0.084	-0.090
	$-\alpha_u$	0.552	0.375	0.275	0.214	0.172	0.142	0.119	0.082	0.061	0.048	0.040
	n_3	0.716	0.569	0.470	0.399	0.345	0.302	0.267	0.202	0.157	0.123	0.096
第五层支点	β	0.414	0.366	0.335	0.314	0.300	0.290	0.282	0.271	0.267	0.266	0.266
	ε_t	0.600	0.471	0.387	0.330	0.288	0.257	0.233	0.194	0.173	0.161	0.154
	α_t	-0.272	-0.202	-0.156	-0.123	-0.099	-0.081	-0.066	-0.042	-0.027	-0.017	-0.011
	n_1	0.999	0.737	0.565	0.445	0.357	0.290	0.237	0.147	0.094	0.059	0.037
	$-\varepsilon_u$	0.419	0.352	0.308	0.277	0.254	0.237	0.222	0.197	0.181	0.171	0.165
	n_2	0.252	0.148	0.083	0.039	0.009	-0.011	-0.025	-0.048	-0.061	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	0.625	0.415	0.297	0.225	0.177	0.143	0.117	0.077	0.055	0.041	0.032
	n_3	0.747	0.589	0.482	0.406	0.348	0.303	0.265	0.197	0.151	0.117	0.090

$\omega=0.00$ 表 5-9(5)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.009	0.014	0.020	0.027	0.036	0.045	0.051	0.071	0.090	0.100	0.101
臂	α_u	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.05	0.09	0.16	0.24	0.34
	n_3	0.044	0.059	0.080	0.097	0.121	0.145	0.161	0.211	0.250	0.270	0.266
	β	0.123	0.134	0.145	0.158	0.172	0.186	0.198	0.236	0.279	0.324	0.368
第	ε_t	0.118	0.126	0.135	0.144	0.153	0.163	0.170	0.193	0.218	0.242	0.265
	α_t	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.009	0.015	0.023	0.033
一	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
层	$-\varepsilon_u$	0.201	0.209	0.217	0.225	0.233	0.241	0.247	0.264	0.281	0.294	0.305
支	n_2	-0.219	-0.220	-0.221	-0.221	-0.222	-0.222	-0.222	-0.222	-0.220	-0.217	-0.214
点	$-\alpha_u$	0.061	0.064	0.066	0.069	0.072	0.075	0.077	0.082	0.087	0.091	0.093
	n_3	0.516	0.450	0.401	0.363	0.331	0.305	0.277	0.226	0.187	0.153	0.123
	β	0.423	0.396	0.379	0.369	0.362	0.359	0.353	0.351	0.356	0.361	0.367
第	ε_t	0.334	0.303	0.283	0.269	0.259	0.251	0.243	0.234	0.231	0.230	0.232
	α_t	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
二	n_1	0.443	0.325	0.249	0.196	0.157	0.129	0.103	0.064	0.041	0.026	0.016
层	$-\varepsilon_u$	0.177	0.175	0.178	0.182	0.187	0.193	0.198	0.213	0.226	0.239	0.250
支	n_2	-0.021	-0.049	-0.068	-0.083	-0.095	-0.105	-0.114	-0.130	-0.140	-0.147	-0.152
点	$-\alpha_u$	0.171	0.141	0.122	0.109	0.099	0.092	0.085	0.076	0.071	0.068	0.066
	n_3	0.486	0.415	0.366	0.329	0.299	0.273	0.251	0.205	0.168	0.138	0.111
	β	0.434	0.394	0.370	0.354	0.344	0.337	0.331	0.327	0.328	0.331	0.336
第	ε_t	0.417	0.356	0.316	0.288	0.267	0.252	0.239	0.219	0.208	0.202	0.199
	α_t	-0.072	-0.057	-0.047	-0.040	-0.034	-0.029	-0.024	-0.017	-0.012	-0.008	-0.005
三	n_1	0.665	0.490	0.376	0.296	0.237	0.193	0.157	0.097	0.062	0.040	0.025
层	$-\varepsilon_u$	0.245	0.222	0.209	0.201	0.197	0.195	0.193	0.194	0.197	0.202	0.206
支	n_2	0.094	0.023	-0.014	-0.034	-0.050	-0.062	-0.072	-0.090	-0.101	-0.108	-0.113
点	$-\alpha_u$	0.280	0.208	0.166	0.138	0.118	0.104	0.091	0.071	0.060	0.052	0.047
	n_3	0.572	0.467	0.397	0.346	0.306	0.275	0.247	0.196	0.157	0.127	0.101
	β	0.414	0.371	0.344	0.327	0.315	0.307	0.300	0.293	0.292	0.293	0.296
第	ε_t	0.470	0.385	0.330	0.292	0.264	0.243	0.226	0.200	0.185	0.176	0.172
	α_t	-0.137	-0.106	-0.085	-0.069	-0.058	-0.048	-0.040	-0.027	-0.018	-0.012	-0.008
四	n_1	0.798	0.589	0.451	0.355	0.285	0.232	0.189	0.117	0.075	0.048	0.030
层	$-\varepsilon_u$	0.300	0.261	0.236	0.220	0.208	0.200	0.193	0.183	0.179	0.178	0.177
支	n_2	0.167	0.082	0.029	-0.004	-0.022	-0.036	-0.048	-0.067	-0.078	-0.086	-0.090
点	$-\alpha_u$	0.379	0.264	0.199	0.159	0.131	0.110	0.094	0.068	0.053	0.043	0.037
	n_3	0.632	0.506	0.422	0.361	0.315	0.278	0.247	0.190	0.150	0.119	0.094
	β	0.383	0.341	0.314	0.297	0.285	0.276	0.270	0.262	0.259	0.260	0.261
第	ε_t	0.507	0.404	0.338	0.292	0.258	0.234	0.214	0.183	0.166	0.156	0.150
	α_t	-0.194	-0.146	-0.114	-0.092	-0.075	-0.062	-0.051	-0.033	-0.021	-0.014	-0.009
五	n_1	0.887	0.655	0.502	0.395	0.317	0.258	0.210	0.131	0.083	0.053	0.033
层	$-\varepsilon_u$	0.342	0.291	0.258	0.234	0.218	0.205	0.194	0.177	0.167	0.161	0.157
支	n_2	0.212	0.120	0.061	0.022	-0.004	-0.019	-0.031	-0.052	-0.063	-0.070	-0.075
点	$-\alpha_u$	0.462	0.311	0.227	0.175	0.140	0.115	0.096	0.065	0.048	0.037	0.030
	n_3	0.675	0.535	0.441	0.373	0.322	0.282	0.248	0.187	0.145	0.113	0.088

ω=0.10　　表 5-9(6)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.465	1.082	0.830	0.654	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	n_2	3.400	2.616	2.094	1.722	1.444	1.228	1.057	0.750	0.549	0.408	0.305
臂	α_u	22.18	15.10	11.15	8.69	7.06	5.91	5.06	3.72	2.95	2.46	2.13
	n_3	3.890	3.089	2.553	2.168	1.875	1.643	1.458	1.118	0.881	0.706	0.570
第一层支点	β	1.733	1.479	1.311	1.194	1.108	1.043	0.993	0.907	0.855	0.823	0.802
	ε_t	1.433	1.179	1.011	0.894	0.808	0.743	0.693	0.607	0.555	0.523	0.502
	α_t	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162
	n_1	1.399	1.033	0.793	0.624	0.500	0.406	0.333	0.207	0.131	0.083	0.052
	$-\varepsilon_u$	0.835	0.706	0.621	0.561	0.517	0.483	0.456	0.411	0.383	0.365	0.353
	n_2	0.344	0.200	0.108	0.047	0.004	-0.027	-0.052	-0.096	-0.124	-0.142	-0.153
	$-\alpha_u$	1.762	1.177	0.850	0.648	0.513	0.417	0.348	0.238	0.177	0.141	0.119
	n_3	1.055	0.833	0.685	0.577	0.496	0.432	0.380	0.285	0.219	0.170	0.133
第二层支点	β	0.916	0.783	0.696	0.635	0.591	0.557	0.531	0.488	0.462	0.446	0.435
	ε_t	1.197	0.951	0.790	0.677	0.594	0.532	0.484	0.402	0.353	0.322	0.303
	α_t	-0.430	-0.316	-0.242	-0.190	-0.152	-0.123	-0.101	-0.062	-0.039	-0.025	-0.016
	n_1	1.376	1.017	0.780	0.614	0.492	0.400	0.327	0.204	0.129	0.082	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.803	0.677	0.594	0.535	0.492	0.459	0.432	0.387	0.359	0.340	0.328
	n_2	0.342	0.200	0.110	0.050	0.008	-0.022	-0.047	-0.089	-0.115	-0.132	-0.143
	$-\alpha_u$	1.660	1.105	0.796	0.604	0.476	0.386	0.320	0.217	0.160	0.126	0.105
	n_3	1.034	0.816	0.670	0.564	0.484	0.421	0.370	0.276	0.212	0.164	0.128
第三层支点	β	0.735	0.634	0.568	0.523	0.491	0.467	0.449	0.421	0.405	0.397	0.393
	ε_t	1.084	0.844	0.688	0.579	0.500	0.441	0.396	0.322	0.279	0.253	0.238
	α_t	-0.572	-0.421	-0.321	-0.252	-0.201	-0.162	-0.132	-0.082	-0.051	-0.032	-0.020
	n_1	1.365	1.008	0.774	0.609	0.488	0.396	0.325	0.202	0.128	0.081	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.765	0.640	0.556	0.495	0.450	0.415	0.387	0.336	0.303	0.280	0.264
	n_2	0.356	0.215	0.126	0.067	0.025	-0.004	-0.027	-0.065	-0.087	-0.101	-0.109
	$-\alpha_u$	1.546	1.015	0.720	0.538	0.417	0.332	0.271	0.174	0.122	0.091	0.072
	n_3	1.010	0.793	0.648	0.543	0.463	0.401	0.350	0.258	0.195	0.149	0.115
第四层支点	β	0.609	0.527	0.473	0.437	0.411	0.392	0.378	0.355	0.343	0.337	0.333
	ε_t	1.015	0.779	0.625	0.520	0.443	0.386	0.343	0.273	0.234	0.211	0.197
	α_t	-0.627	-0.457	-0.346	-0.269	-0.213	-0.170	-0.138	-0.083	-0.051	-0.032	-0.019
	n_1	1.359	1.003	0.770	0.606	0.486	0.394	0.323	0.201	0.128	0.081	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.739	0.613	0.528	0.467	0.420	0.384	0.354	0.301	0.265	0.240	0.223
	n_2	0.366	0.227	0.139	0.079	0.038	0.009	-0.012	-0.048	-0.068	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.466	0.952	0.667	0.492	0.376	0.296	0.237	0.147	0.098	0.070	0.053
	n_3	0.992	0.776	0.631	0.527	0.447	0.385	0.335	0.244	0.182	0.138	0.105
第五层支点	β	0.518	0.449	0.404	0.374	0.352	0.336	0.324	0.305	0.295	0.290	0.287
	ε_t	0.968	0.734	0.583	0.479	0.404	0.349	0.307	0.239	0.202	0.181	0.168
	α_t	-0.654	-0.473	-0.356	-0.274	-0.215	-0.171	-0.137	-0.081	-0.049	-0.030	-0.018
	n_1	1.354	1.000	0.768	0.604	0.484	0.393	0.322	0.201	0.127	0.081	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.720	0.594	0.508	0.447	0.399	0.362	0.332	0.276	0.238	0.212	0.194
	n_2	0.375	0.236	0.148	0.089	0.048	0.019	-0.002	-0.036	-0.055	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.411	0.908	0.630	0.460	0.348	0.271	0.215	0.129	0.084	0.058	0.042
	n_3	0.980	0.764	0.620	0.515	0.436	0.374	0.324	0.233	0.173	0.130	0.098

$\omega=0.10$ 表 5-9(7)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.798	0.588	0.451	0.355	0.285	0.232	0.188	0.117	0.075	0.048	0.030
	n_2	2.094	1.651	1.354	1.141	0.980	0.853	0.747	0.557	0.427	0.331	0.257
臂	α_u	6.60	4.97	4.03	3.42	3.00	2.70	2.45	2.06	1.84	1.70	1.59
	n_3	2.601	2.138	1.823	1.591	1.410	1.266	1.148	0.920	0.753	0.624	0.517
第一层支点	β	1.217	1.057	0.954	0.884	0.834	0.797	0.768	0.726	0.708	0.702	0.704
	ε_t	1.021	0.858	0.751	0.677	0.623	0.582	0.550	0.498	0.471	0.456	0.448
	α_t	0.086	0.089	0.091	0.094	0.097	0.100	0.102	0.108	0.116	0.122	0.129
	n_1	1.065	0.786	0.603	0.475	0.381	0.309	0.253	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_u$	0.664	0.578	0.523	0.485	0.457	0.437	0.420	0.393	0.376	0.365	0.355
	n_2	0.231	0.109	0.033	-0.015	-0.046	-0.071	-0.091	-0.125	-0.146	-0.158	-0.166
	$-\alpha_u$	1.087	0.761	0.575	0.456	0.374	0.315	0.270	0.198	0.157	0.131	0.114
	n_3	0.835	0.678	0.570	0.492	0.431	0.382	0.342	0.264	0.208	0.165	0.130
第二层支点	β	0.811	0.701	0.629	0.580	0.544	0.517	0.496	0.462	0.442	0.431	0.424
	ε_t	0.957	0.773	0.652	0.567	0.505	0.459	0.422	0.360	0.324	0.302	0.287
	α_t	-0.293	-0.219	-0.170	-0.135	-0.109	-0.089	-0.073	-0.046	-0.030	-0.019	-0.012
	n_1	1.154	0.852	0.654	0.515	0.412	0.335	0.274	0.171	0.108	0.069	0.043
	$-\varepsilon_u$	0.674	0.577	0.514	0.470	0.438	0.413	0.393	0.361	0.341	0.329	0.320
	n_2	0.281	0.153	0.072	0.019	-0.017	-0.042	-0.063	-0.099	-0.121	-0.136	-0.145
	$-\alpha_u$	1.165	0.794	0.585	0.454	0.365	0.302	0.254	0.179	0.137	0.112	0.096
	n_3	0.873	0.699	0.581	0.496	0.431	0.379	0.336	0.256	0.200	0.157	0.124
第三层支点	β	0.675	0.586	0.528	0.489	0.461	0.441	0.426	0.402	0.390	0.385	0.382
	ε_t	0.915	0.721	0.595	0.507	0.443	0.396	0.359	0.298	0.263	0.243	0.230
	α_t	-0.424	-0.314	-0.242	-0.191	-0.154	-0.125	-0.103	-0.064	-0.041	-0.026	-0.016
	n_1	1.199	0.885	0.679	0.535	0.428	0.348	0.285	0.177	0.113	0.071	0.045
	$-\varepsilon_u$	0.666	0.562	0.493	0.444	0.407	0.379	0.356	0.315	0.289	0.271	0.258
	n_2	0.315	0.184	0.102	0.047	0.009	-0.017	-0.037	-0.070	-0.090	-0.102	-0.110
	$-\alpha_u$	1.170	0.779	0.560	0.425	0.334	0.270	0.222	0.147	0.106	0.081	0.066
	n_3	0.884	0.701	0.577	0.487	0.419	0.366	0.322	0.241	0.185	0.143	0.111
第四层支点	β	0.569	0.495	0.447	0.414	0.391	0.375	0.362	0.342	0.333	0.328	0.326
	ε_t	0.884	0.685	0.556	0.466	0.402	0.354	0.317	0.257	0.223	0.204	0.192
	α_t	-0.491	-0.360	-0.275	-0.215	-0.171	-0.138	-0.112	-0.068	-0.043	-0.027	-0.016
	n_1	1.225	0.905	0.694	0.546	0.438	0.356	0.291	0.181	0.115	0.073	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.658	0.550	0.477	0.425	0.385	0.355	0.329	0.284	0.254	0.234	0.218
	n_2	0.336	0.204	0.121	0.066	0.027	0.000	-0.019	-0.052	-0.070	-0.081	-0.088
	$-\alpha_u$	1.166	0.764	0.541	0.403	0.312	0.248	0.200	0.127	0.087	0.064	0.049
	n_3	0.889	0.700	0.573	0.481	0.411	0.356	0.311	0.229	0.174	0.133	0.102
第五层支点	β	0.491	0.427	0.386	0.358	0.338	0.324	0.313	0.296	0.288	0.284	0.282
	ε_t	0.861	0.658	0.527	0.436	0.371	0.323	0.286	0.227	0.194	0.176	0.165
	α_t	-0.533	-0.388	-0.293	-0.227	-0.179	-0.143	-0.115	-0.069	-0.042	-0.026	-0.016
	n_1	1.243	0.918	0.704	0.554	0.444	0.361	0.295	0.184	0.117	0.074	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.653	0.541	0.466	0.412	0.370	0.338	0.311	0.263	0.230	0.208	0.191
	n_2	0.350	0.218	0.134	0.078	0.039	0.012	-0.008	-0.039	-0.057	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.162	0.753	0.527	0.388	0.296	0.232	0.186	0.114	0.075	0.053	0.039
	n_3	0.893	0.700	0.570	0.476	0.405	0.349	0.304	0.221	0.165	0.126	0.096

$\omega=0.10$ 表 5-9(8)

状态												
	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.131	0.095	0.072	0.056	0.046	0.038	0.029	0.017	0.012	0.008	0.005
	n_2	0.915	0.781	0.686	0.613	0.556	0.509	0.462	0.376	0.312	0.257	0.210
	α_u	1.20	1.11	1.07	1.04	1.03	1.03	1.02	1.03	1.07	1.11	1.14
	n_3	1.508	1.326	1.194	1.092	1.005	0.935	0.868	0.734	0.630	0.545	0.465
第一层支点	β	0.759	0.682	0.635	0.605	0.586	0.574	0.563	0.559	0.570	0.587	0.608
	ε_t	0.647	0.565	0.512	0.476	0.450	0.432	0.416	0.396	0.390	0.391	0.396
	α_t	0.037	0.040	0.043	0.046	0.050	0.054	0.057	0.066	0.076	0.087	0.097
	n_1	0.732	0.539	0.413	0.325	0.261	0.212	0.173	0.107	0.068	0.044	0.027
	$-\varepsilon_u$	0.436	0.400	0.378	0.365	0.357	0.352	0.347	0.343	0.342	0.342	0.341
	n_2	0.059	-0.017	-0.054	-0.082	-0.103	-0.119	-0.133	-0.156	-0.169	-0.177	-0.180
	$-\alpha_u$	0.562	0.426	0.344	0.289	0.250	0.221	0.197	0.158	0.135	0.120	0.109
	n_3	0.672	0.564	0.488	0.431	0.385	0.347	0.314	0.250	0.201	0.161	0.128
第二层支点	β	0.693	0.609	0.555	0.518	0.492	0.473	0.457	0.434	0.422	0.415	0.412
	ε_t	0.720	0.597	0.515	0.459	0.417	0.386	0.360	0.319	0.295	0.281	0.272
	α_t	-0.165	-0.126	-0.100	-0.081	-0.066	-0.055	-0.046	-0.030	-0.019	-0.013	-0.008
	n_1	0.932	0.687	0.527	0.415	0.333	0.270	0.221	0.137	0.087	0.055	0.035
	$-\varepsilon_u$	0.496	0.434	0.395	0.369	0.351	0.338	0.327	0.312	0.305	0.302	0.300
	n_2	0.190	0.085	0.019	-0.019	-0.045	-0.065	-0.081	-0.110	-0.128	-0.140	-0.148
	$-\alpha_u$	0.724	0.511	0.390	0.312	0.259	0.220	0.190	0.142	0.115	0.098	0.087
	n_3	0.742	0.603	0.508	0.439	0.386	0.343	0.307	0.239	0.190	0.151	0.120
第三层支点	β	0.605	0.531	0.483	0.451	0.429	0.413	0.400	0.382	0.374	0.371	0.371
	ε_t	0.739	0.593	0.498	0.432	0.384	0.348	0.319	0.273	0.247	0.231	0.222
	α_t	-0.280	-0.210	-0.164	-0.131	-0.107	-0.088	-0.073	-0.047	-0.031	-0.020	-0.013
	n_1	1.032	0.762	0.584	0.460	0.369	0.300	0.245	0.152	0.097	0.061	0.038
	$-\varepsilon_u$	0.525	0.448	0.399	0.364	0.338	0.319	0.303	0.277	0.261	0.251	0.244
	n_2	0.252	0.139	0.067	0.020	-0.011	-0.032	-0.049	-0.077	-0.094	-0.104	-0.111
	$-\alpha_u$	0.811	0.551	0.405	0.313	0.251	0.207	0.173	0.120	0.090	0.072	0.060
	n_3	0.780	0.623	0.517	0.440	0.382	0.335	0.297	0.226	0.176	0.138	0.108
第四层支点	β	0.524	0.459	0.418	0.390	0.370	0.356	0.345	0.329	0.322	0.319	0.318
	ε_t	0.744	0.584	0.480	0.408	0.357	0.318	0.288	0.239	0.212	0.196	0.187
	α_t	-0.355	-0.263	-0.202	-0.160	-0.129	-0.105	-0.086	-0.053	-0.034	-0.022	-0.014
	n_1	1.092	0.806	0.618	0.487	0.390	0.317	0.259	0.161	0.102	0.065	0.041
	$-\varepsilon_u$	0.543	0.457	0.400	0.360	0.329	0.306	0.287	0.253	0.232	0.218	0.208
	n_2	0.288	0.170	0.095	0.045	0.011	-0.012	-0.029	-0.057	-0.073	-0.083	-0.089
	$-\alpha_u$	0.867	0.576	0.413	0.312	0.245	0.198	0.162	0.106	0.076	0.057	0.045
	n_3	0.804	0.636	0.523	0.441	0.379	0.330	0.290	0.216	0.166	0.129	0.100
第五层支点	β	0.459	0.402	0.365	0.340	0.323	0.310	0.301	0.287	0.280	0.278	0.277
	ε_t	0.744	0.575	0.465	0.389	0.335	0.295	0.264	0.214	0.186	0.170	0.161
	α_t	-0.408	-0.299	-0.228	-0.178	-0.142	-0.114	-0.092	-0.056	-0.035	-0.022	-0.014
	n_1	1.132	0.836	0.641	0.505	0.405	0.329	0.269	0.167	0.106	0.067	0.042
	$-\varepsilon_u$	0.555	0.463	0.401	0.357	0.323	0.297	0.275	0.237	0.212	0.195	0.182
	n_2	0.312	0.191	0.114	0.062	0.027	0.002	-0.015	-0.043	-0.059	-0.068	-0.074
	$-\alpha_u$	0.907	0.593	0.419	0.311	0.241	0.191	0.154	0.097	0.066	0.048	0.036
	n_3	0.820	0.645	0.527	0.442	0.378	0.327	0.285	0.210	0.159	0.122	0.094

$\omega=0.10$

表 5-9(9)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.213	0.220	0.227	0.232	0.235	0.238	0.232	0.222	0.209	0.190	0.166
	α_u	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29	0.33	0.36	0.46	0.58	0.69	0.79
臂	n_3	0.508	0.515	0.527	0.532	0.535	0.538	0.522	0.502	0.474	0.440	0.391
第一层支点	β	0.423	0.400	0.389	0.385	0.386	0.391	0.393	0.415	0.449	0.484	0.521
	ε_t	0.372	0.343	0.326	0.315	0.309	0.307	0.303	0.306	0.318	0.332	0.348
	α_t	0.012	0.014	0.016	0.018	0.021	0.025	0.027	0.036	0.047	0.059	0.072
	n_1	0.398	0.292	0.224	0.176	0.141	0.116	0.093	0.057	0.037	0.024	0.015
	$-\varepsilon_u$	0.276	0.274	0.276	0.280	0.285	0.290	0.294	0.305	0.315	0.323	0.328
	n_2	-0.076	-0.106	-0.128	-0.144	-0.156	-0.165	-0.174	-0.186	-0.192	-0.194	-0.194
	$-\alpha_u$	0.263	0.219	0.192	0.172	0.159	0.148	0.138	0.124	0.115	0.108	0.103
	n_3	0.546	0.478	0.427	0.386	0.352	0.322	0.295	0.240	0.195	0.158	0.126
第二层支点	β	0.574	0.517	0.481	0.457	0.440	0.428	0.418	0.404	0.399	0.398	0.399
	ε_t	0.528	0.452	0.403	0.368	0.343	0.324	0.308	0.282	0.269	0.262	0.258
	α_t	-0.074	-0.058	-0.047	-0.039	-0.032	-0.028	-0.023	-0.015	-0.010	-0.007	-0.004
	n_1	0.709	0.523	0.401	0.315	0.253	0.206	0.167	0.104	0.066	0.042	0.026
	$-\varepsilon_u$	0.347	0.315	0.296	0.284	0.278	0.274	0.271	0.270	0.273	0.278	0.282
	n_2	0.094	0.012	-0.026	-0.051	-0.070	-0.085	-0.097	-0.120	-0.134	-0.143	-0.150
	$-\alpha_u$	0.415	0.310	0.247	0.206	0.177	0.156	0.138	0.110	0.095	0.085	0.078
	n_3	0.615	0.511	0.439	0.385	0.344	0.310	0.280	0.223	0.180	0.146	0.117
第三层支点	β	0.535	0.475	0.438	0.413	0.395	0.383	0.374	0.361	0.358	0.358	0.360
	ε_t	0.587	0.482	0.414	0.366	0.331	0.305	0.284	0.250	0.231	0.220	0.214
	α_t	-0.170	-0.130	-0.104	-0.084	-0.070	-0.059	-0.049	-0.032	-0.021	-0.014	-0.009
	n_1	0.865	0.638	0.489	0.385	0.309	0.251	0.205	0.127	0.081	0.052	0.032
	$-\varepsilon_u$	0.401	0.349	0.316	0.294	0.278	0.267	0.257	0.243	0.236	0.233	0.231
	n_2	0.189	0.092	0.031	-0.007	-0.029	-0.046	-0.059	-0.083	-0.097	-0.106	-0.112
	$-\alpha_u$	0.536	0.374	0.283	0.225	0.185	0.156	0.133	0.097	0.076	0.063	0.055
	n_3	0.677	0.547	0.459	0.395	0.346	0.306	0.273	0.212	0.167	0.133	0.105
第四层支点	β	0.479	0.423	0.388	0.364	0.348	0.336	0.327	0.315	0.311	0.310	0.311
	ε_t	0.619	0.494	0.413	0.356	0.316	0.285	0.261	0.223	0.201	0.189	0.182
	α_t	-0.246	-0.185	-0.144	-0.115	-0.094	-0.077	-0.064	-0.041	-0.026	-0.017	-0.011
	n_1	0.958	0.707	0.542	0.427	0.342	0.278	0.227	0.141	0.090	0.057	0.036
	$-\varepsilon_u$	0.438	0.373	0.330	0.301	0.279	0.262	0.248	0.225	0.212	0.203	0.197
	n_2	0.240	0.135	0.069	0.024	-0.005	-0.023	-0.037	-0.061	-0.075	-0.084	-0.090
	$-\alpha_u$	0.625	0.422	0.308	0.237	0.190	0.156	0.130	0.088	0.065	0.051	0.042
	n_3	0.718	0.572	0.474	0.403	0.348	0.305	0.270	0.204	0.159	0.124	0.097
第五层支点	β	0.428	0.377	0.344	0.323	0.308	0.297	0.289	0.277	0.273	0.271	0.272
	ε_t	0.637	0.498	0.408	0.346	0.302	0.268	0.242	0.201	0.178	0.165	0.157
	α_t	-0.304	-0.225	-0.173	-0.137	-0.110	-0.089	-0.073	-0.045	-0.029	-0.018	-0.011
	n_1	1.021	0.753	0.578	0.455	0.365	0.296	0.242	0.151	0.096	0.061	0.038
	$-\varepsilon_u$	0.465	0.391	0.341	0.306	0.280	0.260	0.243	0.213	0.195	0.182	0.174
	n_2	0.273	0.162	0.093	0.046	0.014	-0.008	-0.022	-0.047	-0.061	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	0.692	0.458	0.327	0.247	0.193	0.155	0.127	0.082	0.058	0.043	0.034
	n_3	0.748	0.591	0.485	0.409	0.351	0.305	0.268	0.199	0.152	0.118	0.091

$\omega=0.10$ 表 5-9(10)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.031	0.039	0.049	0.059	0.071	0.082	0.089	0.110	0.126	0.131	0.126
臂	α_u	0.02	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.18	0.29	0.41	0.53
	n_3	0.111	0.134	0.159	0.184	0.211	0.237	0.254	0.295	0.326	0.331	0.321
	β	0.185	0.191	0.200	0.212	0.226	0.242	0.253	0.294	0.342	0.392	0.441
第	ε_t	0.170	0.172	0.177	0.184	0.192	0.201	0.206	0.227	0.253	0.279	0.304
	α_t	0.002	0.002	0.004	0.005	0.006	0.008	0.010	0.017	0.027	0.038	0.051
一	n_1	0.065	0.045	0.034	0.027	0.022	0.019	0.013	0.007	0.005	0.004	0.002
层	$-\varepsilon_u$	0.210	0.221	0.231	0.241	0.250	0.258	0.265	0.282	0.297	0.309	0.318
支	n_2	-0.189	-0.199	-0.205	-0.208	-0.211	-0.212	-0.215	-0.215	-0.213	-0.210	-0.206
点	$-\alpha_u$	0.093	0.089	0.088	0.088	0.089	0.090	0.089	0.092	0.094	0.096	0.096
	n_3	0.518	0.460	0.413	0.375	0.342	0.314	0.288	0.235	0.192	0.156	0.125
	β	0.467	0.434	0.413	0.400	0.391	0.385	0.379	0.375	0.376	0.380	0.385
第	ε_t	0.379	0.339	0.313	0.295	0.282	0.272	0.263	0.250	0.245	0.244	0.244
	α_t	-0.012	-0.009	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001
二	n_1	0.487	0.358	0.274	0.216	0.173	0.141	0.114	0.071	0.045	0.029	0.018
层	$-\varepsilon_u$	0.229	0.218	0.215	0.215	0.218	0.222	0.224	0.234	0.246	0.257	0.266
支	n_2	-0.005	-0.037	-0.059	-0.077	-0.090	-0.101	-0.111	-0.128	-0.139	-0.146	-0.152
点	$-\alpha_u$	0.216	0.173	0.146	0.128	0.115	0.105	0.096	0.083	0.077	0.073	0.070
	n_3	0.497	0.426	0.376	0.338	0.307	0.281	0.257	0.210	0.172	0.141	0.114
	β	0.463	0.419	0.391	0.373	0.361	0.353	0.347	0.340	0.341	0.344	0.349
第	ε_t	0.459	0.388	0.342	0.309	0.285	0.268	0.253	0.229	0.217	0.210	0.206
	α_t	-0.091	-0.072	-0.058	-0.048	-0.041	-0.035	-0.029	-0.020	-0.014	-0.009	-0.006
三	n_1	0.698	0.515	0.394	0.310	0.249	0.203	0.165	0.102	0.065	0.042	0.026
层	$-\varepsilon_u$	0.295	0.264	0.245	0.233	0.226	0.221	0.217	0.213	0.214	0.216	0.219
支	n_2	0.122	0.042	-0.005	-0.028	-0.045	-0.058	-0.069	-0.088	-0.100	-0.108	-0.113
点	$-\alpha_u$	0.334	0.243	0.191	0.157	0.133	0.115	0.101	0.077	0.064	0.055	0.050
	n_3	0.576	0.473	0.403	0.351	0.312	0.280	0.252	0.199	0.160	0.129	0.103
	β	0.433	0.387	0.358	0.339	0.326	0.317	0.310	0.302	0.300	0.301	0.304
第	ε_t	0.508	0.414	0.352	0.310	0.279	0.256	0.237	0.207	0.191	0.182	0.176
	α_t	-0.161	-0.123	-0.098	-0.079	-0.066	-0.055	-0.046	-0.030	-0.020	-0.013	-0.008
四	n_1	0.825	0.608	0.467	0.367	0.295	0.240	0.195	0.121	0.077	0.049	0.031
层	$-\varepsilon_u$	0.346	0.299	0.269	0.248	0.234	0.223	0.214	0.200	0.194	0.190	0.188
支	n_2	0.191	0.099	0.041	0.002	-0.018	-0.033	-0.045	-0.065	-0.078	-0.085	-0.090
点	$-\alpha_u$	0.435	0.300	0.224	0.177	0.145	0.121	0.102	0.073	0.056	0.045	0.038
	n_3	0.634	0.510	0.426	0.365	0.319	0.282	0.251	0.193	0.152	0.120	0.095
	β	0.396	0.351	0.324	0.305	0.292	0.283	0.277	0.268	0.265	0.265	0.267
第	ε_t	0.541	0.429	0.357	0.307	0.271	0.244	0.222	0.189	0.170	0.160	0.154
	α_t	-0.220	-0.165	-0.128	-0.102	-0.083	-0.069	-0.056	-0.036	-0.023	-0.015	-0.010
五	n_1	0.910	0.671	0.515	0.405	0.325	0.264	0.215	0.134	0.085	0.054	0.034
层	$-\varepsilon_u$	0.384	0.325	0.287	0.260	0.241	0.226	0.213	0.192	0.180	0.171	0.166
支	n_2	0.233	0.134	0.071	0.029	0.000	-0.016	-0.029	-0.050	-0.063	-0.070	-0.075
点	$-\alpha_u$	0.516	0.346	0.251	0.193	0.153	0.125	0.103	0.069	0.050	0.039	0.031
	n_3	0.676	0.537	0.444	0.376	0.325	0.284	0.251	0.189	0.146	0.114	0.089

$\omega=0.20$

表 5-9(11)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.598	1.181	0.906	0.713	0.572	0.464	0.380	0.237	0.150	0.095	0.060
	n_2	3.701	2.845	2.276	1.871	1.568	1.334	1.147	0.814	0.595	0.442	0.330
臂	α_u	28.40	19.28	14.19	11.04	8.94	7.47	6.39	4.67	3.69	3.07	2.66
	n_3	4.222	3.355	2.765	2.348	2.027	1.780	1.577	1.207	0.950	0.762	0.611
第一层支点	β	1.916	1.637	1.455	1.327	1.234	1.163	1.109	1.016	0.960	0.926	0.903
	ε_t	1.566	1.287	1.105	0.977	0.884	0.813	0.759	0.666	0.610	0.576	0.553
	α_t	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
	n_1	1.465	1.082	0.830	0.654	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	$-\varepsilon_u$	0.895	0.753	0.659	0.592	0.543	0.505	0.475	0.423	0.391	0.370	0.357
	n_2	0.373	0.222	0.125	0.061	0.016	-0.017	-0.042	-0.087	-0.115	-0.133	-0.144
	$-\alpha_u$	1.956	1.296	0.929	0.702	0.552	0.446	0.369	0.248	0.181	0.142	0.118
	n_3	1.092	0.861	0.705	0.593	0.508	0.442	0.388	0.289	0.221	0.171	0.133
第二层支点	β	0.951	0.813	0.722	0.659	0.612	0.577	0.550	0.504	0.476	0.459	0.448
	ε_t	1.269	1.007	0.835	0.715	0.627	0.561	0.509	0.422	0.370	0.337	0.316
	α_t	-0.467	-0.343	-0.261	-0.205	-0.163	-0.132	-0.107	-0.066	-0.042	-0.026	-0.016
	n_1	1.421	1.049	0.805	0.634	0.508	0.412	0.338	0.211	0.134	0.085	0.053
	$-\varepsilon_u$	0.846	0.712	0.624	0.561	0.515	0.479	0.451	0.402	0.372	0.353	0.340
	n_2	0.359	0.212	0.119	0.057	0.013	-0.018	-0.043	-0.087	-0.114	-0.131	-0.143
	$-\alpha_u$	1.797	1.193	0.856	0.648	0.510	0.412	0.341	0.230	0.169	0.133	0.110
	n_3	1.062	0.837	0.686	0.577	0.495	0.430	0.378	0.282	0.216	0.167	0.130
第三层支点	β	0.756	0.652	0.584	0.538	0.505	0.480	0.462	0.433	0.417	0.409	0.405
	ε_t	1.132	0.881	0.716	0.603	0.520	0.458	0.411	0.333	0.288	0.261	0.245
	α_t	-0.613	-0.451	-0.344	-0.269	-0.215	-0.173	-0.141	-0.087	-0.055	-0.035	-0.022
	n_1	1.399	1.033	0.793	0.624	0.500	0.406	0.333	0.207	0.131	0.083	0.052
	$-\varepsilon_u$	0.799	0.667	0.578	0.515	0.468	0.431	0.401	0.348	0.313	0.289	0.272
	n_2	0.367	0.223	0.132	0.071	0.028	-0.002	-0.025	-0.064	-0.087	-0.101	-0.109
	$-\alpha_u$	1.648	1.080	0.764	0.570	0.441	0.351	0.286	0.183	0.128	0.095	0.075
	n_3	1.031	0.810	0.661	0.553	0.472	0.408	0.356	0.262	0.198	0.151	0.116
第四层支点	β	0.622	0.538	0.484	0.447	0.420	0.401	0.386	0.363	0.351	0.345	0.341
	ε_t	1.051	0.806	0.646	0.536	0.457	0.398	0.353	0.280	0.239	0.216	0.202
	α_t	-0.664	-0.484	-0.366	-0.284	-0.225	-0.180	-0.145	-0.088	-0.054	-0.033	-0.020
	n_1	1.385	1.023	0.785	0.618	0.495	0.402	0.329	0.205	0.130	0.083	0.052
	$-\varepsilon_u$	0.766	0.634	0.546	0.483	0.434	0.396	0.366	0.310	0.272	0.246	0.228
	n_2	0.375	0.233	0.143	0.083	0.041	0.011	-0.011	-0.047	-0.068	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.546	1.002	0.702	0.517	0.395	0.310	0.249	0.154	0.102	0.073	0.055
	n_3	1.010	0.790	0.642	0.536	0.455	0.391	0.340	0.247	0.185	0.140	0.106
第五层支点	β	0.528	0.457	0.412	0.380	0.358	0.342	0.330	0.311	0.301	0.296	0.293
	ε_t	0.997	0.755	0.599	0.492	0.415	0.357	0.314	0.244	0.206	0.184	0.172
	α_t	-0.686	-0.497	-0.374	-0.288	-0.226	-0.179	-0.144	-0.085	-0.051	-0.031	-0.019
	n_1	1.376	1.017	0.780	0.614	0.492	0.400	0.327	0.204	0.129	0.082	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.742	0.612	0.524	0.460	0.411	0.372	0.341	0.283	0.244	0.217	0.198
	n_2	0.382	0.241	0.151	0.092	0.050	0.020	-0.001	-0.036	-0.055	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.476	0.949	0.658	0.480	0.363	0.282	0.224	0.134	0.087	0.059	0.043
	n_3	0.994	0.776	0.629	0.523	0.442	0.379	0.329	0.236	0.175	0.131	0.099

$\omega=0.20$

表 5-9(12)

状态												
	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.931	0.687	0.527	0.414	0.332	0.270	0.220	0.137	0.087	0.055	0.035
	n_2	2.401	1.887	1.543	1.296	1.110	0.964	0.842	0.624	0.476	0.367	0.283
	α_u	9.64	7.18	5.76	4.84	4.21	3.76	3.39	2.81	2.47	2.24	2.08
	n_3	2.949	2.415	2.052	1.787	1.582	1.418	1.277	1.017	0.829	0.682	0.564
第一层支点	β	1.431	1.238	1.113	1.026	0.965	0.921	0.886	0.835	0.813	0.805	0.805
	ε_t	1.189	0.991	0.863	0.772	0.706	0.657	0.619	0.558	0.526	0.509	0.500
	α_t	0.119	0.122	0.125	0.129	0.132	0.135	0.138	0.145	0.153	0.160	0.166
	n_1	1.132	0.835	0.641	0.504	0.404	0.329	0.268	0.167	0.106	0.067	0.042
	$-\varepsilon_u$	0.815	0.701	0.626	0.569	0.526	0.493	0.466	0.420	0.391	0.371	0.358
	n_2	0.303	0.160	0.070	0.010	-0.027	-0.054	-0.076	-0.113	-0.135	-0.148	-0.156
	$-\alpha_u$	1.326	0.913	0.678	0.526	0.423	0.349	0.295	0.208	0.160	0.131	0.112
	n_3	0.828	0.676	0.571	0.494	0.434	0.386	0.345	0.267	0.210	0.165	0.130
第二层支点	β	0.859	0.740	0.662	0.608	0.568	0.539	0.516	0.478	0.457	0.444	0.436
	ε_t	1.058	0.849	0.712	0.615	0.545	0.492	0.450	0.381	0.341	0.316	0.301
	α_t	-0.347	-0.257	-0.198	-0.156	-0.125	-0.101	-0.082	-0.051	-0.032	-0.020	-0.013
	n_1	1.199	0.885	0.679	0.534	0.428	0.348	0.285	0.177	0.113	0.071	0.045
	$-\varepsilon_u$	0.784	0.668	0.592	0.534	0.492	0.459	0.433	0.388	0.361	0.343	0.332
	n_2	0.325	0.183	0.093	0.033	-0.007	-0.035	-0.058	-0.096	-0.120	-0.135	-0.145
	$-\alpha_u$	1.353	0.916	0.669	0.513	0.408	0.334	0.279	0.193	0.146	0.118	0.101
	n_3	0.873	0.702	0.586	0.501	0.437	0.385	0.342	0.261	0.204	0.160	0.126
第三层支点	β	0.703	0.609	0.548	0.507	0.477	0.456	0.439	0.415	0.402	0.397	0.394
	ε_t	0.987	0.775	0.636	0.539	0.469	0.416	0.376	0.310	0.272	0.250	0.237
	α_t	-0.484	-0.358	-0.274	-0.215	-0.172	-0.139	-0.114	-0.070	-0.045	-0.028	-0.018
	n_1	1.232	0.910	0.698	0.549	0.440	0.358	0.293	0.182	0.116	0.073	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.750	0.632	0.552	0.493	0.448	0.414	0.386	0.336	0.303	0.281	0.266
	n_2	0.347	0.206	0.117	0.057	0.016	-0.012	-0.033	-0.069	-0.090	-0.102	-0.110
	$-\alpha_u$	1.317	0.874	0.626	0.471	0.367	0.295	0.241	0.158	0.112	0.085	0.069
	n_3	0.885	0.703	0.581	0.492	0.424	0.371	0.326	0.245	0.188	0.146	0.113
第四层支点	β	0.588	0.510	0.460	0.426	0.402	0.384	0.371	0.351	0.341	0.336	0.334
	ε_t	0.941	0.727	0.587	0.490	0.420	0.369	0.329	0.265	0.229	0.209	0.197
	α_t	-0.547	-0.401	-0.305	-0.237	-0.188	-0.151	-0.122	-0.074	-0.046	-0.028	-0.017
	n_1	1.252	0.924	0.709	0.558	0.448	0.363	0.297	0.185	0.118	0.075	0.047
	$-\varepsilon_u$	0.727	0.606	0.525	0.465	0.419	0.383	0.353	0.300	0.265	0.241	0.224
	n_2	0.362	0.222	0.134	0.074	0.033	0.003	-0.017	-0.051	-0.070	-0.081	-0.088
	$-\alpha_u$	1.286	0.841	0.594	0.440	0.338	0.267	0.215	0.135	0.091	0.066	0.051
	n_3	0.890	0.702	0.576	0.485	0.415	0.360	0.315	0.232	0.176	0.135	0.104
第五层支点	β	0.504	0.437	0.395	0.366	0.345	0.330	0.319	0.302	0.294	0.290	0.288
	ε_t	0.908	0.692	0.553	0.456	0.386	0.335	0.296	0.233	0.199	0.179	0.168
	α_t	-0.583	-0.424	-0.320	-0.247	-0.194	-0.155	-0.124	-0.074	-0.045	-0.027	-0.017
	n_1	1.265	0.934	0.717	0.564	0.452	0.367	0.301	0.187	0.119	0.075	0.047
	$-\varepsilon_u$	0.710	0.588	0.506	0.445	0.398	0.361	0.331	0.276	0.239	0.213	0.195
	n_2	0.372	0.233	0.145	0.085	0.044	0.015	-0.006	-0.038	-0.056	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.263	0.818	0.571	0.418	0.318	0.248	0.197	0.120	0.078	0.055	0.041
	n_3	0.893	0.701	0.572	0.479	0.408	0.352	0.307	0.224	0.167	0.127	0.097

ω=0.20

表 5-9(13)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.265	0.193	0.147	0.116	0.093	0.077	0.060	0.037	0.024	0.016	0.010
	n_2	1.191	0.995	0.859	0.758	0.678	0.613	0.552	0.442	0.361	0.294	0.237
臂	α_n	2.14	1.91	1.76	1.68	1.62	1.59	1.54	1.51	1.53	1.55	1.57
	n_3	1.811	1.572	1.402	1.272	1.165	1.077	0.992	0.835	0.711	0.608	0.513
第一层支点	β	0.920	0.821	0.759	0.720	0.694	0.678	0.664	0.655	0.666	0.685	0.707
	ε_t	0.772	0.666	0.598	0.552	0.519	0.496	0.476	0.450	0.442	0.442	0.447
	α_t	0.057	0.061	0.064	0.069	0.073	0.078	0.082	0.093	0.107	0.120	0.133
	n_1	0.798	0.588	0.451	0.355	0.285	0.232	0.188	0.117	0.075	0.048	0.030
	$-\varepsilon_n$	0.552	0.495	0.460	0.436	0.420	0.408	0.397	0.381	0.372	0.365	0.356
	n_2	0.124	0.020	-0.030	-0.061	-0.085	-0.103	-0.119	-0.144	-0.158	-0.165	-0.169
	$-\alpha_n$	0.706	0.520	0.410	0.337	0.286	0.248	0.218	0.169	0.140	0.121	0.107
	n_3	0.674	0.568	0.493	0.436	0.390	0.352	0.318	0.253	0.202	0.162	0.128
第二层支点	β	0.742	0.649	0.589	0.548	0.519	0.497	0.480	0.452	0.438	0.430	0.425
	ε_t	0.803	0.660	0.566	0.500	0.452	0.416	0.387	0.339	0.312	0.296	0.286
	α_t	-0.204	-0.154	-0.121	-0.097	-0.079	-0.065	-0.054	-0.034	-0.022	-0.014	-0.009
	n_1	0.976	0.720	0.552	0.435	0.349	0.283	0.231	0.144	0.092	0.058	0.036
	$-\varepsilon_n$	0.589	0.512	0.462	0.428	0.404	0.386	0.371	0.348	0.335	0.328	0.321
	n_2	0.231	0.113	0.038	-0.008	-0.036	-0.058	-0.076	-0.107	-0.126	-0.139	-0.147
	$-\alpha_n$	0.858	0.600	0.452	0.358	0.294	0.248	0.212	0.155	0.124	0.104	0.092
	n_3	0.745	0.608	0.514	0.445	0.392	0.349	0.312	0.244	0.193	0.154	0.122
第三层支点	β	0.634	0.555	0.504	0.470	0.446	0.428	0.415	0.395	0.387	0.384	0.384
	ε_t	0.802	0.640	0.535	0.461	0.408	0.368	0.337	0.285	0.257	0.239	0.229
	α_t	-0.326	-0.244	-0.190	-0.151	-0.123	-0.101	-0.083	-0.053	-0.034	-0.022	-0.014
	n_1	1.065	0.786	0.603	0.475	0.381	0.309	0.253	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_n$	0.599	0.510	0.452	0.410	0.380	0.357	0.337	0.304	0.284	0.270	0.259
	n_2	0.284	0.160	0.082	0.030	-0.005	-0.027	-0.045	-0.075	-0.093	-0.104	-0.111
	$-\alpha_n$	0.925	0.625	0.457	0.351	0.280	0.229	0.191	0.130	0.097	0.076	0.063
	n_3	0.781	0.626	0.521	0.445	0.386	0.340	0.301	0.229	0.178	0.140	0.110
第四层支点	β	0.543	0.475	0.431	0.402	0.381	0.366	0.354	0.338	0.330	0.327	0.326
	ε_t	0.795	0.622	0.509	0.431	0.375	0.333	0.300	0.248	0.219	0.202	0.192
	α_t	-0.401	-0.296	-0.227	-0.179	-0.143	-0.116	-0.095	-0.059	-0.037	-0.024	-0.015
	n_1	1.119	0.826	0.633	0.499	0.400	0.325	0.265	0.165	0.105	0.067	0.042
	$-\varepsilon_n$	0.604	0.508	0.444	0.398	0.364	0.337	0.315	0.276	0.250	0.233	0.219
	n_2	0.314	0.187	0.107	0.054	0.017	-0.008	-0.025	-0.055	-0.072	-0.082	-0.089
	$-\alpha_n$	0.965	0.639	0.457	0.344	0.269	0.216	0.176	0.114	0.080	0.060	0.047
	n_3	0.805	0.638	0.526	0.445	0.383	0.334	0.293	0.219	0.168	0.130	0.101
第五层支点	β	0.472	0.413	0.374	0.349	0.330	0.317	0.308	0.293	0.286	0.283	0.283
	ε_t	0.787	0.606	0.489	0.408	0.350	0.307	0.274	0.220	0.191	0.174	0.164
	α_t	-0.451	-0.330	-0.251	-0.196	-0.155	-0.125	-0.101	-0.061	-0.038	-0.024	-0.015
	n_1	1.154	0.852	0.654	0.515	0.412	0.335	0.274	0.171	0.108	0.069	0.043
	$-\varepsilon_n$	0.608	0.506	0.438	0.389	0.352	0.323	0.299	0.256	0.227	0.207	0.191
	n_2	0.333	0.205	0.124	0.070	0.032	0.005	-0.013	-0.042	-0.058	-0.068	-0.074
	$-\alpha_n$	0.992	0.648	0.456	0.339	0.261	0.206	0.166	0.104	0.070	0.050	0.038
	n_3	0.821	0.647	0.530	0.445	0.380	0.330	0.288	0.212	0.160	0.123	0.094

$\omega=0.20$

表 5-9(14)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.353	0.346	0.341	0.335	0.329	0.323	0.307	0.281	0.255	0.225	0.193
	α_u	0.35	0.39	0.43	0.48	0.53	0.58	0.62	0.74	0.88	1.01	1.13
	n_3	0.773	0.751	0.736	0.720	0.704	0.693	0.662	0.611	0.565	0.505	0.448
第一层支点	β	0.534	0.499	0.480	0.472	0.470	0.474	0.475	0.497	0.532	0.571	0.611
	ϵ_t	0.458	0.415	0.389	0.373	0.363	0.358	0.352	0.352	0.363	0.378	0.395
	α_t	0.021	0.024	0.027	0.031	0.035	0.039	0.043	0.055	0.070	0.085	0.101
	n_1	0.465	0.341	0.261	0.206	0.165	0.135	0.109	0.067	0.043	0.028	0.017
	$-\epsilon_u$	0.354	0.339	0.332	0.330	0.329	0.331	0.330	0.334	0.339	0.342	0.342
	n_2	-0.046	-0.083	-0.108	-0.127	-0.141	-0.152	-0.162	-0.176	-0.182	-0.184	-0.184
	$-\alpha_u$	0.338	0.272	0.231	0.203	0.183	0.168	0.155	0.133	0.120	0.110	0.102
	n_3	0.555	0.488	0.437	0.395	0.359	0.329	0.301	0.244	0.198	0.160	0.127
第二层支点	β	0.624	0.558	0.516	0.487	0.468	0.453	0.441	0.425	0.417	0.414	0.413
	ϵ_t	0.594	0.503	0.444	0.403	0.372	0.350	0.331	0.301	0.285	0.276	0.271
	α_t	-0.099	-0.076	-0.061	-0.050	-0.041	-0.035	-0.029	-0.019	-0.012	-0.008	-0.005
	n_1	0.754	0.556	0.426	0.335	0.269	0.219	0.178	0.111	0.071	0.045	0.028
	$-\epsilon_u$	0.422	0.377	0.350	0.333	0.321	0.314	0.307	0.300	0.299	0.301	0.302
	n_2	0.133	0.038	-0.014	-0.041	-0.062	-0.079	-0.093	-0.117	-0.132	-0.142	-0.149
	$-\alpha_u$	0.505	0.369	0.290	0.239	0.203	0.177	0.155	0.121	0.102	0.090	0.083
	n_3	0.621	0.518	0.446	0.393	0.351	0.316	0.286	0.228	0.184	0.149	0.119
第三层支点	β	0.564	0.499	0.459	0.431	0.412	0.399	0.389	0.375	0.371	0.371	0.373
	ϵ_t	0.641	0.523	0.446	0.392	0.353	0.323	0.300	0.262	0.241	0.228	0.221
	α_t	-0.204	-0.155	-0.122	-0.099	-0.081	-0.068	-0.056	-0.037	-0.024	-0.016	-0.010
	n_1	0.898	0.663	0.508	0.400	0.321	0.261	0.213	0.132	0.084	0.054	0.033
	$-\epsilon_u$	0.465	0.402	0.362	0.334	0.314	0.299	0.287	0.267	0.257	0.250	0.246
	n_2	0.219	0.112	0.045	0.001	-0.023	-0.041	-0.056	-0.081	-0.096	-0.106	-0.112
	$-\alpha_u$	0.621	0.430	0.322	0.254	0.207	0.174	0.147	0.105	0.082	0.067	0.057
	n_3	0.679	0.551	0.463	0.399	0.350	0.311	0.278	0.215	0.170	0.135	0.107
第四层支点	β	0.498	0.439	0.401	0.376	0.359	0.347	0.337	0.324	0.319	0.318	0.319
	ϵ_t	0.664	0.527	0.438	0.377	0.332	0.299	0.273	0.231	0.208	0.194	0.186
	α_t	-0.281	-0.210	-0.163	-0.130	-0.105	-0.087	-0.071	-0.045	-0.029	-0.019	-0.012
	n_1	0.985	0.727	0.558	0.439	0.352	0.286	0.233	0.145	0.092	0.059	0.037
	$-\epsilon_u$	0.493	0.419	0.370	0.335	0.310	0.290	0.273	0.246	0.229	0.217	0.209
	n_2	0.265	0.152	0.080	0.033	0.000	-0.019	-0.034	-0.060	-0.074	-0.084	-0.089
	$-\alpha_u$	0.703	0.473	0.343	0.263	0.209	0.171	0.141	0.095	0.069	0.053	0.043
	n_3	0.720	0.575	0.477	0.406	0.352	0.309	0.273	0.207	0.161	0.126	0.099
第五层支点	β	0.441	0.387	0.354	0.331	0.315	0.304	0.296	0.284	0.279	0.277	0.277
	ϵ_t	0.676	0.527	0.430	0.363	0.315	0.280	0.252	0.207	0.183	0.169	0.161
	α_t	-0.339	-0.250	-0.192	-0.151	-0.121	-0.098	-0.080	-0.049	-0.031	-0.020	-0.012
	n_1	1.043	0.770	0.590	0.465	0.373	0.303	0.247	0.154	0.098	0.062	0.039
	$-\epsilon_u$	0.513	0.430	0.375	0.336	0.306	0.284	0.264	0.231	0.209	0.194	0.183
	n_2	0.294	0.177	0.103	0.053	0.019	-0.004	-0.020	-0.045	-0.060	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	0.763	0.503	0.359	0.269	0.210	0.168	0.137	0.088	0.061	0.045	0.035
	n_3	0.749	0.593	0.488	0.412	0.354	0.308	0.270	0.201	0.154	0.119	0.092

$\omega=0.20$

表 5-9(15)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.069	0.081	0.093	0.106	0.120	0.132	0.138	0.155	0.165	0.163	0.151
臂	α_u	0.05	0.07	0.09	0.12	0.15	0.19	0.22	0.33	0.48	0.63	0.79
	n_3	0.209	0.236	0.268	0.296	0.325	0.352	0.363	0.390	0.405	0.398	0.376
第一层支点	β	0.257	0.258	0.265	0.276	0.290	0.307	0.318	0.361	0.414	0.469	0.523
	ϵ_t	0.228	0.224	0.224	0.228	0.234	0.242	0.246	0.266	0.293	0.320	0.346
	α_t	0.005	0.006	0.008	0.010	0.013	0.016	0.019	0.029	0.042	0.058	0.074
	n_1	0.131	0.095	0.072	0.056	0.046	0.038	0.029	0.017	0.012	0.008	0.005
	$-\epsilon_u$	0.239	0.247	0.256	0.264	0.272	0.280	0.286	0.301	0.314	0.323	0.329
	n_2	-0.162	-0.177	-0.187	-0.193	-0.198	-0.200	-0.204	-0.207	-0.205	-0.201	-0.197
	$-\alpha_u$	0.130	0.119	0.113	0.109	0.107	0.106	0.103	0.101	0.100	0.099	0.097
	n_3	0.521	0.466	0.420	0.382	0.349	0.321	0.295	0.240	0.196	0.159	0.127
第二层支点	β	0.513	0.472	0.447	0.430	0.418	0.410	0.403	0.396	0.395	0.397	0.401
	ϵ_t	0.429	0.378	0.346	0.323	0.306	0.294	0.283	0.267	0.260	0.257	0.256
	α_t	-0.025	-0.019	-0.015	-0.013	-0.011	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	-0.002	-0.001
	n_1	0.532	0.391	0.299	0.236	0.189	0.154	0.125	0.077	0.050	0.032	0.020
	$-\epsilon_u$	0.286	0.267	0.257	0.253	0.252	0.253	0.253	0.259	0.268	0.276	0.284
	n_2	0.026	-0.024	-0.050	-0.069	-0.085	-0.097	-0.107	-0.126	-0.138	-0.146	-0.151
	$-\alpha_u$	0.269	0.210	0.174	0.150	0.133	0.120	0.109	0.092	0.083	0.078	0.074
	n_3	0.506	0.435	0.385	0.346	0.314	0.288	0.263	0.215	0.176	0.144	0.116
第三层支点	β	0.493	0.443	0.412	0.392	0.378	0.369	0.362	0.354	0.354	0.357	0.362
	ϵ_t	0.504	0.422	0.369	0.331	0.304	0.284	0.267	0.240	0.226	0.218	0.213
	α_t	-0.113	-0.088	-0.071	-0.058	-0.049	-0.042	-0.035	-0.023	-0.016	-0.011	-0.007
	n_1	0.732	0.539	0.413	0.325	0.261	0.212	0.173	0.107	0.068	0.044	0.027
	$-\epsilon_u$	0.349	0.309	0.284	0.267	0.256	0.249	0.242	0.234	0.232	0.231	0.232
	n_2	0.152	0.061	0.005	-0.021	-0.040	-0.054	-0.066	-0.087	-0.099	-0.108	-0.113
	$-\alpha_u$	0.394	0.283	0.219	0.178	0.150	0.129	0.111	0.084	0.068	0.058	0.052
	n_3	0.580	0.478	0.408	0.357	0.317	0.284	0.256	0.202	0.163	0.131	0.104
第四层支点	β	0.452	0.403	0.372	0.351	0.337	0.327	0.320	0.311	0.309	0.309	0.312
	ϵ_t	0.548	0.443	0.375	0.328	0.294	0.268	0.248	0.215	0.197	0.187	0.181
	α_t	-0.187	-0.142	-0.112	-0.091	-0.075	-0.062	-0.051	-0.033	-0.022	-0.014	-0.009
	n_1	0.852	0.628	0.482	0.379	0.304	0.247	0.201	0.125	0.080	0.051	0.032
	$-\epsilon_u$	0.394	0.339	0.303	0.279	0.261	0.248	0.236	0.218	0.209	0.202	0.198
	n_2	0.215	0.115	0.052	0.010	-0.014	-0.029	-0.042	-0.064	-0.077	-0.085	-0.090
	$-\alpha_u$	0.495	0.339	0.252	0.197	0.160	0.133	0.112	0.078	0.059	0.047	0.040
	n_3	0.636	0.513	0.430	0.369	0.322	0.285	0.254	0.196	0.154	0.122	0.096
第五层支点	β	0.409	0.362	0.333	0.313	0.300	0.291	0.283	0.274	0.271	0.271	0.272
	ϵ_t	0.576	0.455	0.377	0.322	0.283	0.254	0.231	0.195	0.175	0.163	0.157
	α_t	-0.248	-0.185	-0.143	-0.114	-0.092	-0.076	-0.062	-0.039	-0.025	-0.016	-0.010
	n_1	0.932	0.687	0.527	0.415	0.333	0.270	0.221	0.137	0.087	0.055	0.035
	$-\epsilon_u$	0.427	0.361	0.318	0.287	0.264	0.247	0.232	0.207	0.192	0.182	0.175
	n_2	0.254	0.148	0.081	0.036	0.005	-0.013	-0.027	-0.049	-0.062	-0.070	-0.075
	$-\alpha_u$	0.573	0.383	0.277	0.211	0.167	0.136	0.112	0.074	0.053	0.040	0.032
	n_3	0.678	0.539	0.446	0.379	0.328	0.287	0.253	0.191	0.148	0.116	0.090

$\omega=0.30$ 表 5-9(16)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_*	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.732	1.279	0.981	0.773	0.619	0.503	0.412	0.257	0.163	0.103	0.065
	n_2	3.996	3.071	2.455	2.017	1.689	1.436	1.234	0.875	0.639	0.474	0.354
臂	α_u	35.45	23.98	17.59	13.64	11.02	9.18	7.83	5.69	4.48	3.71	3.20
	n_3	4.550	3.607	2.974	2.519	2.175	1.908	1.687	1.288	1.011	0.811	0.64
	β	2.103	1.799	1.601	1.462	1.360	1.284	1.225	1.125	1.066	1.029	1.005
第	ε_t	1.703	1.399	1.201	1.062	0.960	0.884	0.825	0.725	0.666	0.629	0.605
	α_t	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238	0.238
一	n_1	1.532	1.131	0.868	0.684	0.548	0.445	0.364	0.227	0.144	0.091	0.057
	$-\varepsilon_u$	0.958	0.802	0.698	0.624	0.569	0.527	0.494	0.436	0.400	0.376	0.360
层	n_2	0.402	0.243	0.142	0.074	0.027	-0.007	-0.033	-0.079	-0.107	-0.125	-0.136
	$-\alpha_u$	2.165	1.424	1.013	0.760	0.593	0.476	0.391	0.258	0.186	0.143	0.117
支	n_3	1.130	0.888	0.726	0.609	0.521	0.452	0.396	0.293	0.224	0.173	0.134
	β	0.986	0.842	0.748	0.682	0.634	0.597	0.569	0.521	0.491	0.473	0.461
第	ε_t	1.343	1.064	0.882	0.754	0.661	0.590	0.536	0.443	0.387	0.352	0.330
	α_t	-0.505	-0.370	-0.282	-0.220	-0.175	-0.141	-0.115	-0.070	-0.044	-0.028	-0.017
二	n_1	1.465	1.082	0.830	0.654	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	$-\varepsilon_u$	0.891	0.748	0.654	0.587	0.538	0.500	0.470	0.418	0.386	0.366	0.352
层	n_2	0.376	0.224	0.128	0.063	0.018	-0.015	-0.040	-0.085	-0.113	-0.130	-0.142
	$-\alpha_u$	1.942	1.285	0.919	0.694	0.544	0.439	0.363	0.243	0.178	0.139	0.115
支	n_3	1.089	0.858	0.703	0.591	0.506	0.440	0.386	0.287	0.220	0.170	0.132
	β	0.776	0.669	0.600	0.552	0.518	0.493	0.474	0.445	0.429	0.421	0.417
第	ε_t	1.182	0.918	0.746	0.627	0.540	0.475	0.426	0.344	0.297	0.269	0.252
	α_t	-0.656	-0.482	-0.367	-0.288	-0.229	-0.185	-0.151	-0.093	-0.059	-0.037	-0.023
三	n_1	1.432	1.058	0.812	0.639	0.512	0.416	0.341	0.212	0.135	0.085	0.053
	$-\varepsilon_u$	0.833	0.694	0.602	0.535	0.485	0.447	0.415	0.360	0.323	0.298	0.280
层	n_2	0.379	0.231	0.138	0.075	0.031	0.000	-0.023	-0.063	-0.086	-0.100	-0.109
	$-\alpha_u$	1.753	1.147	0.811	0.604	0.467	0.371	0.302	0.193	0.134	0.099	0.078
支	n_3	1.053	0.826	0.674	0.564	0.481	0.416	0.363	0.266	0.201	0.154	0.118
	β	0.636	0.550	0.494	0.456	0.429	0.409	0.395	0.371	0.359	0.353	0.349
第	ε_t	1.088	0.833	0.668	0.553	0.471	0.410	0.363	0.287	0.245	0.221	0.206
	α_t	-0.703	-0.512	-0.387	-0.301	-0.237	-0.190	-0.153	-0.092	-0.057	-0.035	-0.021
四	n_1	1.412	1.043	0.800	0.630	0.505	0.410	0.336	0.209	0.133	0.084	0.053
	$-\varepsilon_u$	0.793	0.656	0.565	0.498	0.448	0.409	0.377	0.319	0.280	0.252	0.234
层	n_2	0.384	0.239	0.147	0.086	0.043	0.012	-0.010	-0.047	-0.068	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.629	1.055	0.737	0.543	0.414	0.325	0.260	0.160	0.107	0.076	0.057
支	n_3	1.028	0.804	0.653	0.544	0.462	0.398	0.346	0.251	0.187	0.142	0.108
	β	0.537	0.465	0.419	0.387	0.365	0.348	0.336	0.317	0.307	0.301	0.298
第	ε_t	1.026	0.777	0.616	0.505	0.425	0.366	0.321	0.250	0.210	0.188	0.175
	α_t	-0.720	-0.521	-0.392	-0.302	-0.237	-0.188	-0.151	-0.089	-0.054	-0.033	-0.020
五	n_1	1.399	1.033	0.793	0.624	0.500	0.406	0.333	0.207	0.131	0.083	0.052
	$-\varepsilon_u$	0.765	0.630	0.539	0.473	0.422	0.382	0.350	0.290	0.250	0.222	0.202
层	n_2	0.389	0.246	0.155	0.094	0.052	0.021	0.000	-0.035	-0.055	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.544	0.992	0.687	0.501	0.379	0.294	0.233	0.139	0.090	0.061	0.045
支	n_3	1.009	0.787	0.638	0.530	0.448	0.385	0.333	0.239	0.177	0.133	0.100

$\omega=0.30$

表 5-9(17)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.065	0.785	0.602	0.474	0.380	0.309	0.252	0.157	0.100	0.063	0.040
	n_2	2.705	2.120	1.729	1.448	1.236	1.071	0.934	0.688	0.523	0.401	0.308
臂	α_u	13.43	9.89	7.84	6.53	5.63	4.98	4.46	3.64	3.15	2.82	2.58
	n_3	3.290	2.685	2.272	1.974	1.741	1.557	1.402	1.112	0.903	0.738	0.609
第一层支点	β	1.614	1.394	1.253	1.157	1.089	1.039	1.000	0.944	0.918	0.908	0.907
	ε_t	1.322	1.098	0.952	0.852	0.780	0.726	0.684	0.617	0.581	0.562	0.552
	α_t	0.157	0.160	0.163	0.166	0.169	0.173	0.175	0.183	0.190	0.197	0.204
	n_1	1.198	0.884	0.679	0.534	0.428	0.348	0.284	0.177	0.112	0.071	0.045
	$-\varepsilon_u$	0.890	0.754	0.664	0.600	0.552	0.515	0.485	0.433	0.399	0.377	0.362
	n_2	0.344	0.188	0.091	0.027	-0.014	-0.042	-0.064	-0.102	-0.125	-0.139	-0.147
	$-\alpha_u$	1.502	1.018	0.744	0.572	0.456	0.374	0.313	0.217	0.163	0.131	0.111
	n_3	0.855	0.697	0.588	0.507	0.444	0.394	0.351	0.270	0.211	0.166	0.131
第二层支点	β	0.896	0.770	0.688	0.631	0.589	0.558	0.534	0.494	0.471	0.457	0.449
	ε_t	1.131	0.904	0.755	0.652	0.576	0.519	0.475	0.401	0.358	0.331	0.314
	α_t	-0.384	-0.282	-0.216	-0.169	-0.135	-0.109	-0.089	-0.055	-0.034	-0.022	-0.013
	n_1	1.243	0.918	0.704	0.554	0.444	0.361	0.295	0.184	0.117	0.074	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.839	0.708	0.622	0.560	0.515	0.480	0.452	0.404	0.375	0.356	0.344
	n_2	0.347	0.197	0.102	0.040	-0.003	-0.031	-0.054	-0.094	-0.118	-0.134	-0.144
	$-\alpha_u$	1.486	0.998	0.724	0.553	0.439	0.358	0.299	0.205	0.155	0.124	0.106
	n_3	0.896	0.721	0.602	0.514	0.447	0.394	0.349	0.267	0.208	0.163	0.128
第三层支点	β	0.725	0.627	0.564	0.521	0.491	0.469	0.452	0.427	0.414	0.409	0.406
	ε_t	1.038	0.811	0.664	0.562	0.488	0.433	0.390	0.320	0.281	0.258	0.244
	α_t	-0.526	-0.387	-0.295	-0.232	-0.185	-0.150	-0.122	-0.076	-0.048	-0.030	-0.019
	n_1	1.265	0.934	0.717	0.564	0.452	0.367	0.301	0.187	0.119	0.075	0.047
	$-\varepsilon_u$	0.792	0.662	0.575	0.513	0.466	0.430	0.400	0.348	0.313	0.290	0.274
	n_2	0.362	0.216	0.123	0.062	0.019	-0.010	-0.032	-0.068	-0.089	-0.102	-0.110
	$-\alpha_u$	1.419	0.936	0.667	0.501	0.390	0.312	0.255	0.166	0.118	0.089	0.072
	n_3	0.903	0.718	0.594	0.503	0.433	0.378	0.333	0.249	0.191	0.148	0.115
第四层支点	β	0.602	0.522	0.471	0.436	0.411	0.393	0.380	0.359	0.349	0.344	0.342
	ε_t	0.980	0.754	0.608	0.507	0.434	0.380	0.339	0.272	0.235	0.214	0.201
	α_t	-0.586	-0.427	-0.324	-0.252	-0.199	-0.160	-0.129	-0.078	-0.048	-0.030	-0.018
	n_1	1.279	0.944	0.724	0.570	0.457	0.371	0.304	0.189	0.120	0.076	0.048
	$-\varepsilon_u$	0.760	0.631	0.543	0.480	0.433	0.395	0.365	0.309	0.272	0.247	0.229
	n_2	0.374	0.229	0.138	0.077	0.035	0.005	-0.016	-0.050	-0.070	-0.081	-0.088
	$-\alpha_u$	1.368	0.891	0.626	0.464	0.356	0.281	0.226	0.141	0.095	0.069	0.053
	n_3	0.905	0.715	0.586	0.493	0.422	0.366	0.320	0.236	0.178	0.137	0.105
第五层支点	β	0.513	0.446	0.402	0.373	0.352	0.337	0.325	0.308	0.299	0.295	0.293
	ε_t	0.939	0.714	0.569	0.468	0.397	0.343	0.303	0.238	0.203	0.183	0.171
	α_t	-0.618	-0.448	-0.337	-0.260	-0.204	-0.162	-0.130	-0.077	-0.047	-0.029	-0.017
	n_1	1.287	0.951	0.729	0.574	0.460	0.374	0.306	0.191	0.121	0.077	0.048
	$-\varepsilon_u$	0.738	0.609	0.521	0.458	0.409	0.371	0.340	0.283	0.244	0.218	0.199
	n_2	0.382	0.239	0.148	0.088	0.046	0.016	-0.005	-0.038	-0.056	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.330	0.858	0.597	0.437	0.332	0.259	0.206	0.124	0.081	0.057	0.042
	n_3	0.906	0.712	0.581	0.486	0.414	0.357	0.311	0.227	0.169	0.128	0.098

$\omega=0.30$ 表 5-9(18)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.398	0.291	0.223	0.175	0.141	0.115	0.092	0.057	0.037	0.024	0.015
	n_2	1.477	1.216	1.037	0.905	0.802	0.720	0.644	0.508	0.409	0.330	0.263
臂	α_u	3.54	3.04	2.74	2.55	2.42	2.33	2.23	2.13	2.09	2.06	2.04
	n_3	2.129	1.830	1.615	1.455	1.321	1.219	1.117	0.931	0.787	0.666	0.559
	β	1.099	0.974	0.896	0.846	0.814	0.793	0.775	0.762	0.771	0.788	0.809
第	ε_t	0.910	0.778	0.693	0.635	0.595	0.566	0.541	0.508	0.496	0.495	0.499
	α_t	0.082	0.087	0.092	0.097	0.103	0.109	0.113	0.128	0.143	0.157	0.170
一	n_1	0.865	0.638	0.489	0.385	0.309	0.251	0.204	0.127	0.081	0.051	0.032
	$-\varepsilon_u$	0.679	0.599	0.548	0.512	0.486	0.467	0.450	0.419	0.391	0.372	0.359
层	n_2	0.196	0.070	-0.004	-0.039	-0.066	-0.086	-0.103	-0.131	-0.146	-0.154	-0.159
	$-\alpha_u$	0.873	0.629	0.485	0.391	0.325	0.278	0.240	0.179	0.143	0.120	0.105
支	n_3	0.669	0.568	0.495	0.438	0.393	0.354	0.321	0.254	0.203	0.162	0.129
	β	0.791	0.689	0.623	0.577	0.544	0.520	0.501	0.470	0.452	0.443	0.437
第	ε_t	0.891	0.727	0.619	0.544	0.490	0.448	0.415	0.361	0.329	0.310	0.299
	α_t	-0.247	-0.185	-0.144	-0.114	-0.093	-0.076	-0.062	-0.039	-0.025	-0.016	-0.010
二	n_1	1.021	0.753	0.578	0.455	0.365	0.296	0.242	0.150	0.096	0.061	0.038
	$-\varepsilon_u$	0.687	0.593	0.532	0.490	0.459	0.436	0.416	0.384	0.359	0.343	0.334
层	n_2	0.275	0.142	0.059	0.004	-0.027	-0.050	-0.070	-0.103	-0.124	-0.138	-0.147
	$-\alpha_u$	1.006	0.697	0.520	0.409	0.332	0.278	0.236	0.170	0.132	0.110	0.097
支	n_3	0.746	0.611	0.519	0.450	0.397	0.354	0.317	0.248	0.197	0.157	0.125
	β	0.663	0.578	0.524	0.488	0.462	0.444	0.429	0.409	0.399	0.396	0.396
第	ε_t	0.868	0.689	0.573	0.492	0.433	0.389	0.354	0.298	0.266	0.247	0.236
	α_t	-0.377	-0.281	-0.217	-0.172	-0.139	-0.114	-0.094	-0.059	-0.038	-0.024	-0.015
三	n_1	1.098	0.811	0.622	0.490	0.392	0.319	0.261	0.162	0.103	0.065	0.041
	$-\varepsilon_u$	0.677	0.575	0.507	0.459	0.424	0.396	0.373	0.332	0.301	0.281	0.267
层	n_2	0.316	0.182	0.097	0.041	0.002	-0.022	-0.041	-0.073	-0.092	-0.104	-0.111
	$-\alpha_u$	1.048	0.705	0.512	0.392	0.311	0.253	0.209	0.141	0.103	0.080	0.066
支	n_3	0.782	0.629	0.525	0.449	0.390	0.344	0.305	0.232	0.181	0.142	0.112
	β	0.562	0.490	0.444	0.413	0.392	0.376	0.364	0.347	0.339	0.335	0.334
第	ε_t	0.847	0.660	0.539	0.455	0.394	0.349	0.314	0.257	0.225	0.207	0.196
	α_t	-0.449	-0.331	-0.253	-0.199	-0.159	-0.129	-0.105	-0.064	-0.040	-0.025	-0.016
四	n_1	1.145	0.845	0.648	0.511	0.409	0.332	0.272	0.169	0.107	0.068	0.043
	$-\varepsilon_u$	0.668	0.561	0.489	0.438	0.399	0.369	0.344	0.298	0.264	0.240	0.224
层	n_2	0.340	0.205	0.120	0.063	0.023	-0.004	-0.022	-0.053	-0.071	-0.082	-0.089
	$-\alpha_u$	1.068	0.706	0.503	0.378	0.294	0.235	0.191	0.122	0.085	0.062	0.049
支	n_3	0.805	0.640	0.529	0.448	0.386	0.337	0.296	0.222	0.170	0.132	0.102
	β	0.485	0.423	0.384	0.357	0.338	0.325	0.314	0.299	0.292	0.289	0.288
第	ε_t	0.831	0.638	0.513	0.427	0.365	0.319	0.284	0.227	0.196	0.178	0.168
	α_t	-0.496	-0.362	-0.275	-0.214	-0.170	-0.136	-0.110	-0.066	-0.040	-0.025	-0.015
五	n_1	1.176	0.868	0.666	0.524	0.420	0.341	0.279	0.174	0.110	0.070	0.044
	$-\varepsilon_u$	0.662	0.551	0.476	0.423	0.382	0.350	0.323	0.274	0.238	0.213	0.195
层	n_2	0.355	0.220	0.134	0.077	0.037	0.009	-0.010	-0.040	-0.058	-0.068	-0.074
	$-\alpha_u$	1.081	0.705	0.496	0.367	0.282	0.223	0.178	0.110	0.073	0.052	0.039
支	n_3	0.821	0.649	0.532	0.447	0.383	0.332	0.290	0.214	0.162	0.124	0.095

$\omega=0.30$

表 5-9(19)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.532	0.500	0.474	0.451	0.432	0.414	0.388	0.342	0.301	0.260	0.220
臂	α_u	0.68	0.72	0.77	0.82	0.88	0.95	0.98	1.12	1.28	1.42	1.55
	n_3	1.087	1.020	0.969	0.926	0.887	0.854	0.808	0.722	0.651	0.575	0.505
	β	0.662	0.611	0.584	0.570	0.565	0.567	0.566	0.587	0.625	0.667	0.711
第	ε_t	0.555	0.497	0.460	0.437	0.423	0.414	0.405	0.402	0.412	0.428	0.445
	α_t	0.035	0.039	0.043	0.048	0.054	0.060	0.064	0.080	0.098	0.117	0.136
一	n_1	0.531	0.391	0.299	0.235	0.189	0.154	0.124	0.077	0.049	0.032	0.020
	$-\varepsilon_u$	0.445	0.414	0.396	0.386	0.379	0.375	0.370	0.365	0.363	0.359	0.352
层	n_2	-0.013	-0.057	-0.087	-0.109	-0.125	-0.138	-0.149	-0.164	-0.171	-0.173	-0.172
	$-\alpha_u$	0.428	0.335	0.277	0.238	0.210	0.189	0.171	0.142	0.124	0.110	0.100
支	n_3	0.558	0.493	0.443	0.401	0.365	0.334	0.305	0.247	0.200	0.160	0.128
	β	0.674	0.599	0.551	0.518	0.495	0.478	0.464	0.444	0.434	0.428	0.426
第	ε_t	0.665	0.558	0.488	0.439	0.404	0.377	0.355	0.320	0.301	0.290	0.284
	α_t	-0.127	-0.097	-0.077	-0.062	-0.051	-0.043	-0.035	-0.022	-0.015	-0.009	-0.006
二	n_1	0.798	0.588	0.451	0.355	0.285	0.232	0.188	0.117	0.075	0.048	0.030
	$-\varepsilon_u$	0.503	0.445	0.409	0.384	0.368	0.356	0.346	0.332	0.327	0.325	0.321
层	n_2	0.174	0.065	-0.001	-0.031	-0.055	-0.073	-0.088	-0.114	-0.131	-0.142	-0.149
	$-\alpha_u$	0.605	0.436	0.338	0.275	0.231	0.199	0.173	0.133	0.110	0.096	0.088
支	n_3	0.624	0.523	0.452	0.399	0.357	0.322	0.292	0.233	0.188	0.152	0.121
	β	0.593	0.524	0.479	0.450	0.429	0.415	0.404	0.389	0.384	0.383	0.385
第	ε_t	0.698	0.565	0.479	0.418	0.375	0.342	0.316	0.274	0.250	0.236	0.228
	α_t	-0.241	-0.182	-0.143	-0.115	-0.094	-0.078	-0.064	-0.042	-0.027	-0.018	-0.011
三	n_1	0.932	0.687	0.527	0.415	0.333	0.270	0.221	0.137	0.087	0.055	0.035
	$-\varepsilon_u$	0.533	0.459	0.410	0.377	0.352	0.334	0.318	0.293	0.278	0.268	0.259
层	n_2	0.251	0.133	0.059	0.011	-0.017	-0.037	-0.052	-0.079	-0.095	-0.105	-0.112
	$-\alpha_u$	0.714	0.491	0.365	0.285	0.231	0.192	0.162	0.114	0.087	0.071	0.060
支	n_3	0.681	0.554	0.468	0.404	0.355	0.315	0.282	0.219	0.173	0.137	0.109
	β	0.516	0.454	0.415	0.388	0.370	0.357	0.347	0.333	0.328	0.327	0.327
第	ε_t	0.711	0.562	0.465	0.398	0.350	0.314	0.285	0.239	0.214	0.200	0.191
	α_t	-0.320	-0.238	-0.184	-0.146	-0.118	-0.097	-0.079	-0.050	-0.032	-0.020	-0.013
四	n_1	1.012	0.747	0.573	0.451	0.361	0.294	0.240	0.149	0.095	0.060	0.038
	$-\varepsilon_u$	0.551	0.466	0.410	0.371	0.341	0.319	0.299	0.266	0.246	0.231	0.219
层	n_2	0.291	0.169	0.092	0.041	0.006	-0.015	-0.031	-0.058	-0.074	-0.083	-0.089
	$-\alpha_u$	0.786	0.527	0.381	0.290	0.230	0.187	0.153	0.102	0.074	0.056	0.045
支	n_3	0.721	0.577	0.480	0.409	0.355	0.312	0.276	0.210	0.163	0.127	0.100
	β	0.454	0.398	0.363	0.339	0.323	0.311	0.302	0.290	0.285	0.283	0.283
第	ε_t	0.716	0.556	0.453	0.381	0.329	0.291	0.261	0.214	0.188	0.173	0.164
	α_t	-0.376	-0.277	-0.212	-0.166	-0.133	-0.108	-0.087	-0.054	-0.034	-0.021	-0.013
五	n_1	1.065	0.786	0.603	0.475	0.381	0.309	0.253	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_u$	0.563	0.471	0.410	0.366	0.334	0.308	0.286	0.248	0.223	0.206	0.191
层	n_2	0.316	0.191	0.113	0.060	0.024	-0.001	-0.017	-0.044	-0.059	-0.068	-0.074
	$-\alpha_u$	0.837	0.551	0.392	0.294	0.228	0.182	0.147	0.094	0.065	0.047	0.036
支	n_3	0.749	0.595	0.490	0.414	0.356	0.311	0.273	0.203	0.156	0.120	0.093

$\omega=0.30$ 表 5-9(20)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.128	0.142	0.156	0.169	0.182	0.194	0.196	0.205	0.206	0.196	0.177
	α_t	0.12	0.15	0.19	0.23	0.28	0.34	0.39	0.54	0.74	0.93	1.12
臂	n_3	0.348	0.377	0.406	0.434	0.457	0.479	0.481	0.490	0.491	0.466	0.432
	β	0.341	0.336	0.340	0.350	0.363	0.380	0.391	0.437	0.495	0.555	0.614
第	ε_t	0.293	0.281	0.277	0.277	0.281	0.287	0.290	0.309	0.336	0.364	0.393
一	α_t	0.010	0.013	0.016	0.019	0.023	0.028	0.032	0.046	0.063	0.083	0.104
层	n_1	0.198	0.144	0.109	0.086	0.070	0.058	0.044	0.027	0.018	0.012	0.007
支	$-\varepsilon_u$	0.284	0.286	0.291	0.296	0.302	0.308	0.311	0.322	0.331	0.336	0.339
	n_2	-0.135	-0.155	-0.169	-0.178	-0.184	-0.188	-0.193	-0.196	-0.195	-0.191	-0.187
点	$-\alpha_u$	0.174	0.153	0.140	0.131	0.126	0.122	0.116	0.109	0.105	0.100	0.096
	n_3	0.523	0.471	0.426	0.389	0.356	0.326	0.300	0.244	0.198	0.160	0.128
	β	0.561	0.512	0.481	0.460	0.445	0.436	0.427	0.416	0.413	0.413	0.415
第	ε_t	0.483	0.421	0.381	0.352	0.332	0.317	0.303	0.284	0.275	0.270	0.269
二	α_t	-0.041	-0.032	-0.025	-0.021	-0.017	-0.015	-0.012	-0.007	-0.005	-0.003	-0.002
层	n_1	0.576	0.424	0.325	0.255	0.205	0.167	0.135	0.084	0.054	0.034	0.021
支	$-\varepsilon_u$	0.349	0.320	0.303	0.294	0.289	0.287	0.284	0.285	0.291	0.297	0.302
	n_2	0.064	-0.010	-0.040	-0.062	-0.079	-0.092	-0.104	-0.124	-0.136	-0.145	-0.151
点	$-\alpha_u$	0.331	0.253	0.206	0.174	0.152	0.137	0.122	0.101	0.090	0.083	0.079
	n_3	0.512	0.443	0.393	0.354	0.321	0.294	0.269	0.220	0.180	0.147	0.119
	β	0.522	0.468	0.433	0.411	0.396	0.386	0.377	0.368	0.367	0.370	0.374
第	ε_t	0.552	0.458	0.397	0.354	0.323	0.300	0.281	0.251	0.235	0.225	0.220
三	α_t	-0.138	-0.107	-0.085	-0.070	-0.058	-0.049	-0.041	-0.027	-0.018	-0.012	-0.008
层	n_1	0.765	0.564	0.432	0.340	0.273	0.222	0.181	0.112	0.072	0.046	0.028
支	$-\varepsilon_u$	0.406	0.356	0.325	0.304	0.289	0.279	0.269	0.256	0.251	0.247	0.246
	n_2	0.183	0.082	0.019	-0.014	-0.035	-0.050	-0.063	-0.085	-0.099	-0.107	-0.113
点	$-\alpha_u$	0.461	0.327	0.250	0.201	0.168	0.143	0.123	0.091	0.073	0.062	0.054
	n_3	0.582	0.482	0.413	0.362	0.321	0.289	0.260	0.206	0.165	0.133	0.106
	β	0.471	0.418	0.385	0.363	0.348	0.338	0.330	0.320	0.317	0.318	0.320
第	ε_t	0.589	0.474	0.399	0.347	0.309	0.281	0.259	0.223	0.203	0.192	0.186
四	α_t	-0.216	-0.163	-0.128	-0.103	-0.084	-0.070	-0.057	-0.037	-0.024	-0.016	-0.010
层	n_1	0.878	0.648	0.497	0.391	0.314	0.255	0.208	0.129	0.082	0.052	0.033
支	$-\varepsilon_u$	0.445	0.381	0.339	0.310	0.289	0.273	0.259	0.237	0.224	0.215	0.209
	n_2	0.241	0.132	0.064	0.019	-0.009	-0.026	-0.040	-0.063	-0.076	-0.085	-0.090
点	$-\alpha_u$	0.559	0.382	0.281	0.219	0.176	0.146	0.122	0.084	0.063	0.050	0.041
	n_3	0.638	0.516	0.433	0.372	0.326	0.289	0.257	0.198	0.156	0.123	0.097
	β	0.422	0.373	0.342	0.322	0.308	0.298	0.290	0.280	0.277	0.277	0.278
第	ε_t	0.612	0.482	0.397	0.338	0.296	0.265	0.240	0.201	0.180	0.167	0.160
五	α_t	-0.277	-0.206	-0.159	-0.126	-0.102	-0.083	-0.068	-0.043	-0.027	-0.017	-0.011
层	n_1	0.954	0.704	0.540	0.425	0.341	0.277	0.226	0.141	0.089	0.057	0.036
支	$-\varepsilon_u$	0.472	0.398	0.349	0.315	0.289	0.270	0.252	0.224	0.205	0.193	0.184
	n_2	0.276	0.162	0.091	0.043	0.010	-0.010	-0.024	-0.048	-0.061	-0.070	-0.075
点	$-\alpha_u$	0.634	0.423	0.304	0.231	0.182	0.148	0.121	0.079	0.056	0.042	0.033
	n_3	0.678	0.541	0.449	0.382	0.330	0.290	0.256	0.193	0.150	0.117	0.091

$\omega=0.40$

表 5-9(21)

状态												
	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	1.865	1.377	1.057	0.832	0.667	0.541	0.443	0.276	0.175	0.111	0.070
	n_2	4.289	3.292	2.631	2.160	1.808	1.536	1.319	0.934	0.681	0.505	0.377
	α_t	43.39	29.23	21.36	16.50	13.28	11.03	9.39	6.78	5.30	4.38	3.76
	n_3	4.864	3.850	3.174	2.687	2.316	2.029	1.796	1.367	1.071	0.854	0.687
第一层支点	β	2.295	1.964	1.748	1.598	1.488	1.406	1.342	1.235	1.171	1.132	1.107
	ε_t	1.845	1.514	1.298	1.148	1.038	0.956	0.892	0.785	0.721	0.682	0.657
	α_t	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275
	n_1	1.598	1.181	0.906	0.713	0.572	0.464	0.380	0.237	0.150	0.095	0.060
	$-\varepsilon_u$	1.023	0.852	0.739	0.658	0.598	0.551	0.514	0.450	0.409	0.382	0.364
	n_2	0.431	0.265	0.159	0.088	0.038	0.002	-0.024	-0.071	-0.099	-0.117	-0.129
	$-\alpha_u$	2.390	1.561	1.103	0.823	0.638	0.509	0.415	0.270	0.191	0.145	0.116
	n_3	1.168	0.916	0.747	0.625	0.533	0.462	0.404	0.298	0.226	0.174	0.135
第二层支点	β	1.021	0.872	0.774	0.706	0.656	0.618	0.588	0.537	0.506	0.487	0.474
	ε_t	1.418	1.123	0.929	0.794	0.695	0.620	0.562	0.464	0.405	0.368	0.344
	α_t	-0.546	-0.399	-0.303	-0.236	-0.187	-0.151	-0.122	-0.075	-0.047	-0.029	-0.018
	n_1	1.510	1.115	0.856	0.674	0.540	0.438	0.359	0.224	0.142	0.090	0.056
	$-\varepsilon_u$	0.937	0.785	0.685	0.614	0.561	0.521	0.489	0.434	0.400	0.379	0.365
	n_2	0.392	0.236	0.137	0.070	0.023	-0.011	-0.037	-0.083	-0.111	-0.130	-0.142
	$-\alpha_u$	2.093	1.381	0.985	0.742	0.580	0.468	0.385	0.257	0.187	0.146	0.120
	n_3	1.117	0.879	0.719	0.604	0.517	0.449	0.394	0.293	0.224	0.173	0.135
第三层支点	β	0.797	0.687	0.616	0.567	0.532	0.506	0.487	0.456	0.441	0.433	0.429
	ε_t	1.232	0.956	0.776	0.651	0.560	0.493	0.441	0.355	0.306	0.277	0.259
	α_t	-0.700	-0.514	-0.392	-0.306	-0.244	-0.197	-0.161	-0.099	-0.062	-0.039	-0.024
	n_1	1.465	1.082	0.830	0.654	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	$-\varepsilon_u$	0.867	0.722	0.625	0.556	0.503	0.463	0.430	0.372	0.333	0.307	0.288
	n_2	0.391	0.239	0.144	0.079	0.034	0.002	-0.022	-0.062	-0.086	-0.100	-0.109
	$-\alpha_u$	1.864	1.217	0.859	0.639	0.493	0.392	0.318	0.202	0.140	0.103	0.081
	n_3	1.075	0.843	0.687	0.575	0.490	0.423	0.369	0.271	0.204	0.156	0.120
第四层支点	β	0.649	0.561	0.505	0.466	0.438	0.418	0.403	0.379	0.367	0.360	0.357
	ε_t	1.126	0.861	0.689	0.571	0.485	0.421	0.373	0.295	0.251	0.226	0.211
	α_t	-0.742	-0.541	-0.409	-0.317	-0.251	-0.200	-0.162	-0.097	-0.060	-0.037	-0.023
	n_1	1.439	1.063	0.815	0.642	0.514	0.418	0.342	0.213	0.135	0.086	0.054
	$-\varepsilon_u$	0.820	0.679	0.583	0.515	0.463	0.422	0.388	0.328	0.287	0.259	0.239
	n_2	0.393	0.245	0.152	0.089	0.045	0.014	-0.009	-0.046	-0.067	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.714	1.109	0.774	0.569	0.434	0.340	0.272	0.167	0.111	0.078	0.059
	n_3	1.045	0.817	0.664	0.553	0.469	0.404	0.351	0.254	0.190	0.143	0.109
第五层支点	β	0.546	0.473	0.426	0.394	0.371	0.355	0.342	0.323	0.312	0.307	0.304
	ε_t	1.056	0.799	0.633	0.518	0.436	0.375	0.329	0.255	0.214	0.191	0.178
	α_t	-0.755	-0.546	-0.410	-0.316	-0.248	-0.197	-0.157	-0.093	-0.056	-0.034	-0.020
	n_1	1.421	1.049	0.805	0.634	0.508	0.412	0.338	0.211	0.134	0.085	0.053
	$-\varepsilon_u$	0.787	0.648	0.554	0.486	0.434	0.393	0.359	0.298	0.256	0.227	0.206
	n_2	0.397	0.251	0.159	0.097	0.053	0.023	0.001	-0.035	-0.055	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.613	1.035	0.717	0.522	0.394	0.306	0.242	0.144	0.093	0.063	0.046
	n_3	1.024	0.799	0.647	0.537	0.455	0.390	0.337	0.242	0.179	0.134	0.101

ω=0.40

表 5-9(22)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.198	0.884	0.678	0.533	0.428	0.348	0.284	0.176	0.112	0.071	0.045
	n_2	3.003	2.348	1.909	1.595	1.359	1.174	1.022	0.750	0.567	0.433	0.332
臂	α_t	17.89	13.03	10.23	8.44	7.22	6.34	5.64	4.52	3.87	3.42	3.11
	n_3	3.625	2.944	2.482	2.147	1.891	1.686	1.513	1.193	0.964	0.787	0.647
第	β	1.793	1.551	1.395	1.288	1.213	1.159	1.116	1.052	1.024	1.012	1.009
	ε_t	1.451	1.204	1.044	0.934	0.854	0.795	0.749	0.675	0.636	0.615	0.604
	α_t	0.194	0.197	0.200	0.204	0.207	0.210	0.213	0.220	0.228	0.235	0.241
一	n_1	1.265	0.934	0.716	0.564	0.452	0.367	0.300	0.187	0.119	0.075	0.047
	$-\varepsilon_u$	0.953	0.803	0.703	0.632	0.579	0.537	0.504	0.446	0.408	0.383	0.365
层	n_2	0.377	0.213	0.111	0.043	-0.002	-0.031	-0.054	-0.093	-0.116	-0.130	-0.139
	$-\alpha_u$	1.676	1.126	0.816	0.623	0.493	0.401	0.332	0.226	0.167	0.132	0.110
支	n_3	0.888	0.721	0.606	0.521	0.455	0.402	0.357	0.273	0.213	0.167	0.131
点	β	0.931	0.799	0.713	0.654	0.611	0.578	0.553	0.510	0.486	0.471	0.461
	ε_t	1.201	0.958	0.800	0.689	0.608	0.548	0.500	0.421	0.374	0.346	0.328
第	α_t	-0.419	-0.307	-0.234	-0.183	-0.146	-0.118	-0.096	-0.059	-0.037	-0.023	-0.014
	n_1	1.287	0.950	0.729	0.574	0.460	0.374	0.306	0.190	0.121	0.077	0.048
二	$-\varepsilon_u$	0.884	0.745	0.652	0.587	0.538	0.501	0.471	0.420	0.389	0.369	0.356
	n_2	0.364	0.209	0.112	0.047	0.002	-0.027	-0.051	-0.092	-0.117	-0.133	-0.144
层	$-\alpha_u$	1.615	1.080	0.781	0.595	0.471	0.383	0.319	0.218	0.163	0.131	0.111
	n_3	0.923	0.741	0.617	0.527	0.458	0.403	0.357	0.272	0.212	0.166	0.131
支	β	0.745	0.645	0.580	0.536	0.505	0.482	0.465	0.439	0.426	0.420	0.418
	ε_t	1.085	0.847	0.692	0.585	0.507	0.449	0.404	0.331	0.290	0.266	0.251
点	α_t	-0.565	-0.415	-0.317	-0.249	-0.199	-0.161	-0.131	-0.081	-0.051	-0.032	-0.020
第	n_1	1.298	0.959	0.736	0.579	0.464	0.377	0.308	0.192	0.122	0.077	0.048
	$-\varepsilon_u$	0.826	0.690	0.599	0.533	0.484	0.446	0.415	0.360	0.324	0.299	0.282
三	n_2	0.374	0.224	0.129	0.066	0.022	-0.008	-0.030	-0.067	-0.089	-0.102	-0.110
	$-\alpha_u$	1.516	0.998	0.710	0.532	0.414	0.331	0.270	0.175	0.124	0.093	0.074
层	n_3	0.924	0.735	0.606	0.513	0.442	0.385	0.339	0.253	0.194	0.150	0.116
支	β	0.615	0.534	0.481	0.446	0.420	0.402	0.388	0.367	0.357	0.352	0.350
	ε_t	1.015	0.780	0.628	0.523	0.447	0.391	0.348	0.279	0.241	0.219	0.206
点	α_t	-0.622	-0.453	-0.343	-0.267	-0.211	-0.169	-0.137	-0.083	-0.051	-0.032	-0.019
第	n_1	1.305	0.964	0.739	0.582	0.467	0.379	0.310	0.193	0.123	0.078	0.049
	$-\varepsilon_u$	0.787	0.653	0.562	0.497	0.447	0.408	0.376	0.318	0.280	0.253	0.235
四	n_2	0.383	0.235	0.142	0.080	0.037	0.007	-0.015	-0.049	-0.069	-0.081	-0.088
	$-\alpha_u$	1.444	0.940	0.660	0.488	0.374	0.295	0.237	0.147	0.099	0.072	0.055
层	n_3	0.922	0.728	0.597	0.502	0.429	0.372	0.325	0.239	0.181	0.138	0.106
支	β	0.523	0.454	0.410	0.380	0.358	0.343	0.331	0.314	0.305	0.301	0.299
	ε_t	0.968	0.735	0.585	0.481	0.407	0.352	0.310	0.243	0.207	0.186	0.174
点	α_t	-0.650	-0.470	-0.354	-0.273	-0.214	-0.171	-0.137	-0.081	-0.049	-0.030	-0.018
第	n_1	1.310	0.967	0.742	0.584	0.468	0.380	0.311	0.194	0.123	0.078	0.049
	$-\varepsilon_u$	0.760	0.627	0.536	0.471	0.421	0.381	0.349	0.290	0.250	0.223	0.203
五	n_2	0.389	0.244	0.152	0.090	0.048	0.018	-0.004	-0.037	-0.056	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.394	0.898	0.625	0.457	0.347	0.270	0.215	0.129	0.084	0.058	0.043
层	n_3	0.920	0.723	0.590	0.494	0.420	0.363	0.315	0.230	0.171	0.130	0.099
支												
点												

$\omega=0.40$ 表 5-9(23)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.531	0.390	0.298	0.235	0.189	0.154	0.124	0.076	0.049	0.032	0.020
	n_2	1.769	1.442	1.218	1.054	0.928	0.827	0.736	0.572	0.455	0.363	0.288
臂	α_t	5.48	4.58	4.04	3.68	3.44	3.27	3.08	2.84	2.71	2.61	2.52
	n_3	2.458	2.092	1.835	1.640	1.484	1.357	1.242	1.026	0.861	0.722	0.603
第一层支点	β	1.296	1.143	1.047	0.983	0.940	0.913	0.890	0.870	0.875	0.891	0.911
	ε_t	1.061	0.900	0.796	0.723	0.672	0.636	0.606	0.566	0.551	0.548	0.550
	α_t	0.114	0.120	0.126	0.132	0.139	0.145	0.150	0.165	0.181	0.195	0.208
	n_1	0.931	0.687	0.527	0.414	0.332	0.270	0.220	0.137	0.087	0.055	0.035
	$-\varepsilon_u$	0.818	0.712	0.642	0.584	0.541	0.507	0.480	0.431	0.400	0.378	0.363
	n_2	0.274	0.124	0.033	-0.018	-0.048	-0.071	-0.090	-0.119	-0.136	-0.145	-0.150
	$-\alpha_u$	1.057	0.751	0.569	0.447	0.363	0.303	0.257	0.185	0.145	0.120	0.103
	n_3	0.658	0.563	0.493	0.440	0.395	0.357	0.324	0.256	0.204	0.163	0.129
第二层支点	β	0.839	0.728	0.655	0.605	0.568	0.541	0.519	0.485	0.467	0.456	0.450
	ε_t	0.984	0.798	0.675	0.588	0.525	0.478	0.441	0.380	0.345	0.324	0.312
	α_t	-0.293	-0.218	-0.168	-0.132	-0.106	-0.085	-0.069	-0.043	-0.027	-0.017	-0.010
	n_1	1.065	0.786	0.603	0.474	0.380	0.309	0.252	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_u$	0.792	0.680	0.605	0.547	0.505	0.472	0.445	0.400	0.373	0.356	0.346
	n_2	0.321	0.173	0.080	0.018	-0.019	-0.045	-0.066	-0.101	-0.123	-0.137	-0.146
	$-\alpha_u$	1.165	0.802	0.594	0.460	0.369	0.304	0.256	0.181	0.140	0.116	0.101
	n_3	0.744	0.613	0.522	0.456	0.404	0.361	0.324	0.253	0.201	0.160	0.127
第三层支点	β	0.691	0.602	0.545	0.505	0.478	0.458	0.443	0.421	0.411	0.408	0.408
	ε_t	0.936	0.740	0.612	0.521	0.456	0.407	0.370	0.308	0.275	0.255	0.243
	α_t	-0.431	-0.320	-0.246	-0.194	-0.155	-0.126	-0.103	-0.064	-0.041	-0.026	-0.016
	n_1	1.132	0.835	0.641	0.504	0.404	0.329	0.268	0.167	0.106	0.067	0.042
	$-\varepsilon_u$	0.758	0.642	0.564	0.504	0.459	0.424	0.395	0.344	0.312	0.290	0.275
	n_2	0.350	0.204	0.112	0.051	0.008	-0.018	-0.038	-0.072	-0.092	-0.104	-0.111
	$-\alpha_u$	1.178	0.790	0.572	0.432	0.339	0.274	0.225	0.149	0.108	0.083	0.068
	n_3	0.782	0.631	0.528	0.454	0.396	0.349	0.310	0.237	0.184	0.145	0.113
第四层支点	β	0.580	0.505	0.458	0.425	0.402	0.385	0.373	0.355	0.347	0.343	0.342
	ε_t	0.902	0.700	0.569	0.477	0.411	0.362	0.324	0.264	0.230	0.212	0.201
	α_t	-0.501	-0.368	-0.281	-0.219	-0.174	-0.140	-0.113	-0.069	-0.043	-0.027	-0.016
	n_1	1.172	0.865	0.664	0.522	0.419	0.340	0.278	0.173	0.110	0.070	0.044
	$-\varepsilon_u$	0.735	0.616	0.535	0.474	0.427	0.391	0.361	0.307	0.271	0.247	0.230
	n_2	0.367	0.223	0.132	0.071	0.028	-0.001	-0.021	-0.053	-0.071	-0.082	-0.089
	$-\alpha_u$	1.177	0.776	0.552	0.411	0.317	0.251	0.203	0.128	0.088	0.065	0.051
	n_3	0.805	0.642	0.532	0.452	0.390	0.341	0.301	0.225	0.173	0.134	0.104
第五层支点	β	0.498	0.434	0.393	0.365	0.345	0.331	0.321	0.305	0.298	0.295	0.294
	ε_t	0.876	0.671	0.538	0.445	0.379	0.330	0.292	0.232	0.200	0.181	0.171
	α_t	-0.543	-0.396	-0.300	-0.232	-0.182	-0.146	-0.117	-0.070	-0.042	-0.026	-0.016
	n_1	1.199	0.885	0.679	0.534	0.428	0.348	0.285	0.177	0.113	0.071	0.045
	$-\varepsilon_u$	0.718	0.597	0.515	0.453	0.405	0.368	0.337	0.281	0.244	0.218	0.200
	n_2	0.377	0.235	0.145	0.084	0.042	0.012	-0.009	-0.040	-0.057	-0.068	-0.074
	$-\alpha_u$	1.174	0.765	0.537	0.395	0.301	0.236	0.188	0.115	0.076	0.054	0.040
	n_3	0.821	0.650	0.534	0.451	0.387	0.336	0.294	0.217	0.164	0.126	0.097

$\omega=0.40$ 表 5-9(24)

状态												
	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.744	0.674	0.621	0.578	0.541	0.510	0.472	0.404	0.348	0.295	0.245
	α_t	1.22	1.24	1.28	1.32	1.38	1.45	1.47	1.61	1.78	1.91	2.00
	n_3	1.444	1.314	1.221	1.143	1.076	1.020	0.957	0.839	0.738	0.645	0.555
第一层支点	β	0.807	0.739	0.700	0.680	0.671	0.670	0.667	0.688	0.727	0.770	0.812
	ε_t	0.665	0.587	0.539	0.508	0.488	0.476	0.464	0.457	0.466	0.480	0.497
	α_t	0.053	0.059	0.065	0.071	0.078	0.085	0.092	0.111	0.133	0.155	0.174
	n_1	0.598	0.440	0.337	0.265	0.213	0.174	0.140	0.087	0.056	0.036	0.022
	$-\varepsilon_u$	0.547	0.498	0.468	0.448	0.434	0.424	0.413	0.397	0.383	0.367	0.356
	n_2	0.044	-0.029	-0.064	-0.090	-0.108	-0.122	-0.134	-0.151	-0.158	-0.161	-0.162
	$-\alpha_u$	0.537	0.408	0.329	0.276	0.239	0.211	0.188	0.149	0.125	0.109	0.098
	n_3	0.554	0.494	0.445	0.404	0.368	0.336	0.308	0.248	0.200	0.161	0.128
第二层支点	β	0.724	0.639	0.584	0.547	0.521	0.501	0.486	0.461	0.448	0.441	0.438
	ε_t	0.741	0.616	0.535	0.478	0.437	0.406	0.380	0.340	0.317	0.304	0.297
	α_t	-0.159	-0.120	-0.094	-0.076	-0.062	-0.051	-0.042	-0.026	-0.017	-0.011	-0.007
	n_1	0.843	0.621	0.476	0.375	0.301	0.245	0.199	0.124	0.079	0.050	0.031
	$-\varepsilon_u$	0.591	0.518	0.471	0.440	0.417	0.401	0.387	0.366	0.353	0.340	0.334
	n_2	0.218	0.094	0.019	-0.021	-0.047	-0.066	-0.083	-0.111	-0.129	-0.141	-0.149
	$-\alpha_u$	0.717	0.512	0.392	0.315	0.262	0.223	0.193	0.145	0.118	0.102	0.092
	n_3	0.625	0.527	0.458	0.405	0.363	0.328	0.297	0.237	0.192	0.155	0.124
第三层支点	β	0.622	0.548	0.500	0.468	0.446	0.431	0.419	0.402	0.396	0.395	0.397
	ε_t	0.757	0.609	0.513	0.446	0.398	0.362	0.332	0.286	0.259	0.244	0.235
	α_t	-0.282	-0.212	-0.165	-0.132	-0.108	-0.089	-0.073	-0.047	-0.031	-0.020	-0.012
	n_1	0.965	0.712	0.546	0.430	0.345	0.280	0.228	0.142	0.090	0.057	0.036
	$-\varepsilon_u$	0.604	0.518	0.461	0.421	0.392	0.370	0.351	0.319	0.297	0.279	0.267
	n_2	0.283	0.155	0.074	0.021	-0.011	-0.032	-0.049	-0.077	-0.094	-0.105	-0.112
	$-\alpha_u$	0.813	0.557	0.411	0.320	0.257	0.213	0.178	0.124	0.093	0.074	0.063
	n_3	0.682	0.557	0.471	0.408	0.359	0.320	0.286	0.222	0.176	0.139	0.110
第四层支点	β	0.535	0.470	0.428	0.400	0.381	0.367	0.357	0.342	0.336	0.335	0.335
	ε_t	0.759	0.598	0.493	0.420	0.367	0.328	0.297	0.248	0.220	0.205	0.195
	α_t	-0.361	-0.268	-0.206	-0.163	-0.131	-0.107	-0.087	-0.055	-0.035	-0.022	-0.014
	n_1	1.038	0.766	0.588	0.463	0.371	0.301	0.246	0.153	0.097	0.062	0.039
	$-\varepsilon_u$	0.610	0.515	0.453	0.408	0.374	0.349	0.326	0.288	0.261	0.239	0.224
	n_2	0.317	0.187	0.105	0.050	0.012	-0.011	-0.028	-0.056	-0.073	-0.083	-0.089
	$-\alpha_u$	0.874	0.584	0.421	0.320	0.252	0.203	0.167	0.109	0.078	0.059	0.047
	n_3	0.721	0.580	0.483	0.413	0.359	0.315	0.279	0.212	0.165	0.129	0.101
第五层支点	β	0.467	0.409	0.373	0.348	0.331	0.318	0.309	0.296	0.290	0.289	0.289
	ε_t	0.758	0.586	0.476	0.399	0.344	0.303	0.271	0.220	0.192	0.176	0.167
	α_t	-0.416	-0.305	-0.233	-0.182	-0.145	-0.118	-0.095	-0.058	-0.036	-0.022	-0.014
	n_1	1.087	0.802	0.616	0.485	0.389	0.316	0.258	0.161	0.102	0.065	0.041
	$-\varepsilon_u$	0.614	0.513	0.446	0.398	0.362	0.333	0.309	0.266	0.236	0.212	0.195
	n_2	0.338	0.206	0.123	0.068	0.030	0.002	-0.015	-0.043	-0.059	-0.068	-0.074
	$-\alpha_u$	0.915	0.602	0.427	0.319	0.247	0.197	0.159	0.100	0.068	0.049	0.037
	n_3	0.750	0.596	0.492	0.417	0.359	0.313	0.275	0.205	0.157	0.122	0.094

ω=0.40　　表 5-9(25)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.212	0.225	0.237	0.248	0.257	0.265	0.262	0.259	0.250	0.230	0.204
臂	a_t	0.25	0.30	0.36	0.42	0.50	0.58	0.64	0.84	1.08	1.32	1.54
	n_3	0.532	0.555	0.572	0.593	0.607	0.615	0.607	0.594	0.575	0.535	0.484
	β	0.439	0.427	0.426	0.433	0.446	0.462	0.473	0.522	0.585	0.650	0.714
第	ε_t	0.367	0.345	0.335	0.332	0.333	0.337	0.338	0.356	0.384	0.413	0.444
	a_t	0.019	0.023	0.027	0.032	0.038	0.044	0.050	0.068	0.090	0.115	0.140
一	n_1	0.265	0.193	0.147	0.116	0.093	0.077	0.060	0.037	0.024	0.016	0.010
层	$-\varepsilon_u$	0.345	0.337	0.335	0.336	0.338	0.340	0.340	0.345	0.348	0.349	0.345
支	n_2	-0.106	-0.132	-0.149	-0.161	-0.169	-0.174	-0.180	-0.185	-0.184	-0.180	-0.175
点	$-a_u$	0.228	0.193	0.171	0.156	0.145	0.138	0.129	0.116	0.108	0.100	0.093
	n_3	0.522	0.473	0.430	0.393	0.360	0.330	0.304	0.247	0.200	0.161	0.128
	β	0.610	0.552	0.514	0.490	0.472	0.460	0.449	0.435	0.430	0.428	0.427
第	ε_t	0.543	0.467	0.418	0.384	0.360	0.341	0.325	0.301	0.290	0.284	0.282
	a_t	-0.060	-0.046	-0.037	-0.030	-0.025	-0.021	-0.017	-0.011	-0.007	-0.005	-0.003
二	n_1	0.620	0.457	0.350	0.275	0.221	0.180	0.146	0.090	0.058	0.037	0.023
层	$-\varepsilon_u$	0.418	0.378	0.353	0.339	0.330	0.324	0.318	0.314	0.316	0.319	0.319
支	n_2	0.105	0.008	-0.029	-0.053	-0.072	-0.087	-0.100	-0.121	-0.135	-0.144	-0.151
点	$-a_u$	0.403	0.302	0.242	0.202	0.175	0.155	0.137	0.111	0.097	0.089	0.083
	n_3	0.515	0.449	0.399	0.360	0.328	0.300	0.275	0.224	0.184	0.150	0.121
	β	0.552	0.492	0.455	0.430	0.413	0.402	0.393	0.382	0.380	0.383	0.387
第	ε_t	0.602	0.496	0.427	0.379	0.344	0.318	0.296	0.262	0.244	0.233	0.228
	a_t	-0.167	-0.127	-0.101	-0.082	-0.068	-0.057	-0.047	-0.031	-0.021	-0.014	-0.009
三	n_1	0.798	0.588	0.451	0.355	0.285	0.232	0.188	0.117	0.075	0.048	0.030
层	$-\varepsilon_u$	0.467	0.407	0.368	0.342	0.323	0.310	0.297	0.279	0.270	0.264	0.257
支	n_2	0.214	0.103	0.034	-0.007	-0.029	-0.046	-0.060	-0.083	-0.098	-0.107	-0.113
点	$-a_u$	0.533	0.376	0.285	0.227	0.187	0.159	0.135	0.099	0.078	0.065	0.057
	n_3	0.584	0.486	0.417	0.366	0.326	0.293	0.264	0.209	0.168	0.135	0.108
	β	0.490	0.434	0.399	0.375	0.359	0.348	0.340	0.329	0.325	0.326	0.328
第	ε_t	0.632	0.506	0.424	0.367	0.325	0.295	0.270	0.231	0.210	0.197	0.190
	a_t	-0.248	-0.186	-0.145	-0.116	-0.095	-0.078	-0.064	-0.041	-0.027	-0.017	-0.011
四	n_1	0.905	0.667	0.512	0.403	0.323	0.263	0.214	0.133	0.085	0.054	0.034
层	$-\varepsilon_u$	0.497	0.424	0.377	0.343	0.319	0.300	0.283	0.256	0.240	0.229	0.218
支	n_2	0.267	0.149	0.076	0.027	-0.004	-0.022	-0.037	-0.061	-0.075	-0.084	-0.090
点	$-a_u$	0.628	0.427	0.313	0.242	0.194	0.160	0.132	0.090	0.067	0.052	0.043
	n_3	0.638	0.518	0.436	0.376	0.329	0.292	0.260	0.201	0.158	0.125	0.099
	β	0.435	0.384	0.352	0.330	0.315	0.305	0.297	0.286	0.283	0.282	0.284
第	ε_t	0.650	0.509	0.418	0.355	0.310	0.276	0.249	0.207	0.184	0.171	0.164
	a_t	-0.309	-0.229	-0.176	-0.139	-0.112	-0.092	-0.074	-0.046	-0.030	-0.019	-0.012
一	n_1	0.976	0.720	0.552	0.435	0.349	0.283	0.231	0.144	0.092	0.058	0.036
层	$-\varepsilon_u$	0.518	0.436	0.382	0.343	0.315	0.293	0.273	0.240	0.219	0.204	0.191
支	n_2	0.298	0.177	0.101	0.050	0.016	-0.007	-0.022	-0.047	-0.061	-0.069	-0.074
点	$-a_u$	0.698	0.464	0.333	0.252	0.198	0.160	0.130	0.085	0.059	0.044	0.035
	n_3	0.679	0.543	0.451	0.384	0.333	0.292	0.258	0.195	0.151	0.118	0.092

$\omega=0.50$

表 5-9(26)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_A	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	1.998	1.476	1.132	0.892	0.714	0.580	0.475	0.296	0.188	0.119	0.075
	n_2	4.578	3.512	2.804	2.300	1.924	1.633	1.402	0.991	0.722	0.535	0.399
	α_u	52.25	35.05	25.50	19.63	15.75	13.03	11.06	7.94	6.17	5.07	4.33
	n_3	5.175	4.096	3.366	2.848	2.455	2.143	1.897	1.440	1.129	0.901	0.724
第一层支点	β	2.490	2.132	1.899	1.736	1.618	1.528	1.460	1.345	1.277	1.236	1.209
	ε_t	1.990	1.632	1.399	1.236	1.118	1.028	0.960	0.845	0.777	0.736	0.709
	α_t	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313
	n_1	1.665	1.230	0.944	0.743	0.595	0.483	0.396	0.247	0.156	0.099	0.062
	$-\varepsilon_u$	1.091	0.905	0.781	0.693	0.627	0.576	0.535	0.464	0.418	0.388	0.368
	n_2	0.459	0.286	0.176	0.101	0.049	0.012	-0.016	-0.064	-0.093	-0.111	-0.122
	$-\alpha_u$	2.631	1.708	1.199	0.889	0.685	0.543	0.441	0.282	0.196	0.147	0.116
	n_3	1.206	0.944	0.768	0.642	0.546	0.472	0.412	0.303	0.229	0.176	0.135
第二层支点	β	1.056	0.902	0.801	0.730	0.678	0.638	0.607	0.554	0.521	0.501	0.487
	ε_t	1.496	1.183	0.978	0.835	0.730	0.651	0.589	0.485	0.422	0.383	0.358
	α_t	-0.588	-0.429	-0.325	-0.253	-0.200	-0.161	-0.130	-0.079	-0.049	-0.031	-0.019
	n_1	1.554	1.148	0.881	0.693	0.556	0.451	0.370	0.230	0.146	0.093	0.058
	$-\varepsilon_u$	0.984	0.823	0.717	0.641	0.585	0.542	0.509	0.450	0.415	0.392	0.377
	n_2	0.409	0.248	0.145	0.076	0.028	-0.007	-0.034	-0.081	-0.110	-0.129	-0.141
	$-\alpha_u$	2.252	1.481	1.054	0.792	0.618	0.497	0.409	0.271	0.196	0.152	0.126
	n_3	1.145	0.900	0.736	0.617	0.528	0.458	0.401	0.298	0.228	0.176	0.137
第三层支点	β	0.817	0.704	0.632	0.581	0.546	0.519	0.499	0.468	0.452	0.444	0.440
	ε_t	1.284	0.995	0.807	0.676	0.581	0.510	0.456	0.366	0.315	0.285	0.267
	α_t	-0.746	-0.547	-0.417	-0.326	-0.260	-0.209	-0.171	-0.105	-0.066	-0.042	-0.026
	n_1	1.499	1.107	0.849	0.669	0.536	0.435	0.356	0.222	0.141	0.089	0.056
	$-\varepsilon_u$	0.902	0.750	0.649	0.576	0.522	0.479	0.445	0.384	0.343	0.316	0.296
	n_2	0.402	0.248	0.149	0.083	0.037	0.005	-0.020	-0.061	-0.085	-0.100	-0.109
	$-\alpha_u$	1.978	1.290	0.909	0.675	0.520	0.412	0.334	0.212	0.146	0.107	0.084
	n_3	1.096	0.859	0.700	0.585	0.499	0.430	0.375	0.275	0.207	0.158	0.121
第四层支点	β	0.662	0.573	0.515	0.476	0.448	0.427	0.412	0.388	0.375	0.368	0.365
	ε_t	1.164	0.889	0.711	0.588	0.499	0.433	0.383	0.302	0.257	0.231	0.215
	α_t	-0.783	-0.570	-0.431	-0.334	-0.264	-0.211	-0.170	-0.102	-0.063	-0.039	-0.024
	n_1	1.465	1.082	0.830	0.654	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	$-\varepsilon_u$	0.848	0.701	0.602	0.531	0.477	0.434	0.400	0.337	0.295	0.265	0.245
	n_2	0.402	0.252	0.156	0.092	0.047	0.015	-0.008	-0.046	-0.067	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.802	1.164	0.812	0.597	0.455	0.356	0.285	0.174	0.115	0.081	0.061
	n_3	1.063	0.830	0.674	0.562	0.477	0.410	0.356	0.258	0.192	0.145	0.110
第五层支点	β	0.556	0.481	0.434	0.401	0.378	0.361	0.348	0.328	0.318	0.312	0.309
	ε_t	1.086	0.821	0.650	0.532	0.447	0.384	0.337	0.260	0.218	0.195	0.181
	α_t	-0.790	-0.572	-0.429	-0.331	-0.259	-0.206	-0.165	-0.097	-0.058	-0.035	-0.021
	n_1	1.443	1.066	0.818	0.644	0.516	0.419	0.343	0.214	0.136	0.086	0.054
	$-\varepsilon_u$	0.810	0.667	0.570	0.499	0.446	0.403	0.369	0.305	0.262	0.232	0.211
	n_2	0.404	0.256	0.162	0.099	0.055	0.024	0.001	-0.034	-0.054	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.684	1.080	0.747	0.544	0.411	0.318	0.252	0.150	0.096	0.065	0.047
	n_3	1.039	0.810	0.656	0.545	0.461	0.395	0.342	0.245	0.181	0.136	0.102

$\omega=0.50$

表 5-9(27)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_*	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.331	0.982	0.753	0.593	0.475	0.386	0.315	0.196	0.125	0.079	0.050
	n_2	3.296	2.571	2.086	1.739	1.478	1.275	1.107	0.809	0.609	0.464	0.355
臂	α_u	23.05	16.62	12.92	10.57	8.97	7.82	6.92	5.47	4.62	4.05	3.65
	n_3	3.945	3.194	2.688	2.316	2.033	1.808	1.622	1.273	1.024	0.835	0.680
第一层支点	β	1.977	1.710	1.539	1.422	1.339	1.279	1.232	1.161	1.129	1.115	1.111
	ε_t	1.584	1.314	1.138	1.017	0.930	0.865	0.815	0.735	0.692	0.668	0.656
	α_t	0.232	0.235	0.238	0.241	0.244	0.248	0.250	0.258	0.265	0.272	0.279
	n_1	1.332	0.983	0.754	0.594	0.476	0.387	0.316	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	1.019	0.854	0.744	0.666	0.607	0.561	0.524	0.459	0.417	0.389	0.369
	n_2	0.409	0.238	0.130	0.059	0.011	-0.021	-0.045	-0.085	-0.108	-0.123	-0.131
	$-\alpha_u$	1.866	1.243	0.894	0.677	0.532	0.429	0.354	0.236	0.171	0.133	0.109
	n_3	0.923	0.745	0.624	0.534	0.465	0.410	0.364	0.277	0.215	0.168	0.132
第二层支点	β	0.965	0.829	0.739	0.677	0.632	0.598	0.571	0.527	0.501	0.484	0.474
	ε_t	1.273	1.014	0.845	0.727	0.641	0.577	0.526	0.441	0.392	0.361	0.341
	α_t	-0.456	-0.334	-0.254	-0.198	-0.157	-0.127	-0.103	-0.063	-0.039	-0.024	-0.015
	n_1	1.332	0.983	0.754	0.594	0.476	0.387	0.316	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.930	0.782	0.684	0.614	0.562	0.523	0.491	0.437	0.404	0.382	0.369
	n_2	0.382	0.222	0.121	0.054	0.008	-0.024	-0.048	-0.090	-0.116	-0.133	-0.143
	$-\alpha_u$	1.750	1.167	0.841	0.639	0.504	0.410	0.340	0.231	0.172	0.137	0.116
	n_3	0.950	0.761	0.633	0.540	0.468	0.412	0.365	0.277	0.216	0.169	0.133
第三层支点	β	0.766	0.662	0.596	0.551	0.518	0.495	0.477	0.451	0.438	0.432	0.430
	ε_t	1.134	0.884	0.721	0.608	0.527	0.466	0.419	0.342	0.299	0.274	0.258
	α_t	-0.607	-0.445	-0.340	-0.266	-0.213	-0.172	-0.140	-0.087	-0.055	-0.035	-0.022
	n_1	1.332	0.983	0.754	0.594	0.476	0.387	0.316	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.861	0.718	0.623	0.554	0.502	0.462	0.430	0.372	0.334	0.308	0.290
	n_2	0.386	0.232	0.135	0.070	0.025	-0.006	-0.028	-0.066	-0.088	-0.102	-0.110
	$-\alpha_u$	1.616	1.063	0.755	0.565	0.438	0.350	0.285	0.184	0.129	0.097	0.077
	n_3	0.945	0.751	0.619	0.524	0.451	0.393	0.345	0.258	0.197	0.152	0.118
第四层支点	β	0.629	0.545	0.492	0.455	0.429	0.411	0.397	0.375	0.365	0.360	0.358
	ε_t	1.051	0.807	0.649	0.540	0.461	0.403	0.358	0.286	0.246	0.224	0.210
	α_t	-0.659	-0.480	-0.364	-0.283	-0.224	-0.179	-0.145	-0.087	-0.054	-0.033	-0.021
	n_1	1.332	0.983	0.755	0.594	0.476	0.387	0.316	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.815	0.675	0.581	0.513	0.461	0.421	0.388	0.328	0.287	0.260	0.240
	n_2	0.392	0.242	0.147	0.083	0.040	0.008	-0.013	-0.049	-0.069	-0.081	-0.088
	$-\alpha_u$	1.523	0.990	0.694	0.513	0.393	0.309	0.248	0.154	0.103	0.074	0.057
	n_3	0.940	0.742	0.608	0.511	0.437	0.378	0.330	0.243	0.183	0.140	0.107
第五层支点	β	0.532	0.462	0.417	0.386	0.365	0.349	0.337	0.320	0.311	0.306	0.304
	ε_t	0.997	0.756	0.601	0.494	0.417	0.361	0.318	0.249	0.211	0.190	0.177
	α_t	-0.682	-0.494	-0.372	-0.287	-0.225	-0.179	-0.143	-0.085	-0.051	-0.031	-0.019
	n_1	1.332	0.983	0.755	0.594	0.476	0.387	0.317	0.197	0.125	0.079	0.050
	$-\varepsilon_u$	0.783	0.645	0.552	0.484	0.433	0.392	0.358	0.297	0.256	0.227	0.207
	n_2	0.397	0.249	0.155	0.093	0.050	0.019	-0.003	-0.037	-0.056	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.458	0.939	0.653	0.477	0.362	0.281	0.223	0.134	0.087	0.060	0.044
	n_3	0.935	0.735	0.599	0.501	0.426	0.368	0.320	0.232	0.173	0.131	0.100

ω=0.50　　表 5-9(28)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.664	0.488	0.374	0.294	0.236	0.193	0.155	0.096	0.062	0.039	0.025
	n_2	2.063	1.667	1.397	1.201	1.050	0.930	0.824	0.633	0.499	0.395	0.311
	α_u	8.02	6.54	5.64	5.04	4.63	4.32	4.04	3.61	3.36	3.18	3.03
臂	n_3	2.784	2.349	2.044	1.817	1.639	1.492	1.359	1.112	0.922	0.770	0.642
	β	1.480	1.298	1.185	1.112	1.063	1.031	1.004	0.978	0.980	0.994	1.012
第	ε_t	1.195	1.005	0.884	0.802	0.745	0.704	0.671	0.624	0.606	0.601	0.602
	α_t	0.151	0.157	0.163	0.170	0.176	0.183	0.188	0.203	0.218	0.232	0.245
一	n_1	0.998	0.736	0.564	0.444	0.356	0.290	0.236	0.147	0.093	0.059	0.037
层	$-\varepsilon_u$	0.907	0.771	0.681	0.616	0.568	0.530	0.499	0.444	0.408	0.384	0.366
支	n_2	0.328	0.159	0.059	-0.003	-0.035	-0.059	-0.078	-0.109	-0.126	-0.136	-0.141
点	$-\alpha_u$	1.213	0.846	0.629	0.489	0.394	0.326	0.274	0.193	0.148	0.120	0.102
	n_3	0.670	0.576	0.506	0.449	0.402	0.363	0.328	0.258	0.206	0.164	0.129
	β	0.878	0.758	0.681	0.627	0.589	0.560	0.537	0.501	0.481	0.469	0.462
第	ε_t	1.060	0.853	0.718	0.624	0.556	0.505	0.465	0.399	0.362	0.339	0.325
	α_t	-0.331	-0.243	-0.185	-0.145	-0.116	-0.093	-0.076	-0.046	-0.029	-0.018	-0.011
二	n_1	1.109	0.819	0.628	0.494	0.396	0.322	0.263	0.164	0.104	0.066	0.041
层	$-\varepsilon_u$	0.857	0.724	0.637	0.575	0.529	0.493	0.465	0.417	0.388	0.370	0.359
支	n_2	0.348	0.189	0.090	0.026	-0.014	-0.041	-0.062	-0.099	-0.122	-0.136	-0.146
点	$-\alpha_u$	1.294	0.881	0.646	0.498	0.398	0.327	0.274	0.193	0.149	0.122	0.106
	n_3	0.761	0.630	0.537	0.468	0.414	0.369	0.331	0.258	0.205	0.163	0.129
	β	0.714	0.620	0.561	0.520	0.491	0.471	0.455	0.433	0.423	0.420	0.420
第	ε_t	0.989	0.777	0.639	0.544	0.475	0.423	0.383	0.319	0.283	0.262	0.250
	α_t	-0.474	-0.349	-0.267	-0.209	-0.168	-0.136	-0.111	-0.069	-0.044	-0.028	-0.018
三	n_1	1.165	0.860	0.660	0.519	0.416	0.338	0.276	0.172	0.109	0.069	0.043
层	$-\varepsilon_u$	0.808	0.676	0.588	0.525	0.477	0.440	0.410	0.356	0.322	0.299	0.283
支	n_2	0.369	0.215	0.119	0.055	0.012	-0.016	-0.037	-0.071	-0.091	-0.103	-0.111
点	$-\alpha_u$	1.280	0.852	0.611	0.461	0.361	0.291	0.238	0.157	0.113	0.087	0.071
	n_3	0.796	0.645	0.541	0.464	0.405	0.357	0.316	0.241	0.187	0.147	0.115
	β	0.595	0.518	0.468	0.435	0.411	0.394	0.382	0.363	0.355	0.351	0.350
第	ε_t	0.943	0.728	0.589	0.493	0.424	0.373	0.334	0.271	0.236	0.216	0.205
	α_t	-0.541	-0.395	-0.299	-0.233	-0.185	-0.149	-0.120	-0.073	-0.045	-0.028	-0.017
四	n_1	1.198	0.885	0.679	0.534	0.428	0.348	0.284	0.177	0.113	0.071	0.045
层	$-\varepsilon_u$	0.775	0.643	0.554	0.490	0.442	0.403	0.372	0.316	0.279	0.253	0.236
支	n_2	0.381	0.231	0.137	0.074	0.031	0.000	-0.019	-0.052	-0.071	-0.082	-0.089
点	$-\alpha_u$	1.261	0.826	0.583	0.433	0.334	0.265	0.213	0.134	0.092	0.067	0.052
	n_3	0.817	0.654	0.542	0.460	0.398	0.347	0.306	0.229	0.175	0.135	0.105
	β	0.509	0.443	0.400	0.372	0.352	0.337	0.327	0.311	0.303	0.300	0.299
第	ε_t	0.909	0.693	0.554	0.458	0.389	0.338	0.299	0.237	0.204	0.185	0.174
	α_t	-0.579	-0.420	-0.316	-0.244	-0.192	-0.153	-0.123	-0.073	-0.045	-0.027	-0.017
五	n_1	1.221	0.901	0.691	0.544	0.436	0.354	0.290	0.181	0.115	0.073	0.046
层	$-\varepsilon_u$	0.751	0.619	0.531	0.466	0.417	0.378	0.346	0.288	0.250	0.223	0.204
支	n_2	0.389	0.241	0.148	0.086	0.043	0.013	-0.008	-0.039	-0.057	-0.067	-0.074
点	$-\alpha_u$	1.244	0.806	0.563	0.413	0.315	0.246	0.196	0.119	0.079	0.055	0.041
	n_3	0.831	0.660	0.543	0.458	0.393	0.341	0.298	0.220	0.166	0.127	0.098

ω=0.50

表 5-9(29)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.982	0.865	0.779	0.711	0.656	0.609	0.559	0.467	0.394	0.328	0.269
臂	α_u	2.05	2.00	2.00	2.02	2.06	2.12	2.12	2.23	2.35	2.43	2.48
	n_3	1.832	1.630	1.484	1.366	1.276	1.194	1.109	0.952	0.824	0.708	0.599
第一层支点	β	0.970	0.881	0.830	0.802	0.788	0.784	0.778	0.795	0.832	0.873	0.914
	ε_t	0.787	0.688	0.626	0.586	0.560	0.543	0.528	0.515	0.521	0.533	0.549
	α_t	0.078	0.085	0.092	0.100	0.109	0.118	0.126	0.148	0.171	0.192	0.211
	n_1	0.665	0.489	0.375	0.295	0.237	0.193	0.156	0.097	0.062	0.040	0.025
	$-\varepsilon_u$	0.661	0.591	0.546	0.516	0.493	0.476	0.458	0.418	0.391	0.373	0.359
	n_2	0.122	0.000	-0.040	-0.069	-0.090	-0.105	-0.118	-0.138	-0.147	-0.151	-0.152
	$-\alpha_u$	0.663	0.494	0.388	0.319	0.271	0.235	0.204	0.155	0.127	0.108	0.096
	n_3	0.542	0.490	0.444	0.404	0.368	0.337	0.308	0.249	0.200	0.161	0.128
第二层支点	β	0.772	0.678	0.618	0.576	0.546	0.524	0.506	0.477	0.462	0.454	0.450
	ε_t	0.822	0.678	0.584	0.519	0.472	0.436	0.407	0.359	0.333	0.318	0.310
	α_t	-0.195	-0.146	-0.114	-0.091	-0.074	-0.060	-0.049	-0.030	-0.019	-0.012	-0.007
	n_1	0.887	0.654	0.501	0.395	0.317	0.258	0.210	0.130	0.083	0.053	0.033
	$-\varepsilon_u$	0.683	0.595	0.537	0.498	0.470	0.449	0.430	0.390	0.368	0.354	0.346
	n_2	0.263	0.124	0.039	-0.011	-0.038	-0.060	-0.077	-0.109	-0.128	-0.140	-0.148
	$-\alpha_u$	0.839	0.595	0.451	0.359	0.295	0.250	0.214	0.157	0.126	0.108	0.097
	n_3	0.624	0.530	0.462	0.410	0.368	0.333	0.302	0.242	0.195	0.157	0.126
第三层支点	β	0.651	0.571	0.521	0.487	0.463	0.446	0.433	0.415	0.409	0.408	0.410
	ε_t	0.819	0.656	0.549	0.475	0.422	0.382	0.349	0.297	0.268	0.252	0.242
	α_t	-0.326	-0.244	-0.190	-0.151	-0.123	-0.101	-0.083	-0.052	-0.033	-0.021	-0.014
	n_1	0.998	0.736	0.565	0.445	0.357	0.290	0.236	0.147	0.094	0.059	0.037
	$-\varepsilon_u$	0.679	0.579	0.514	0.468	0.434	0.408	0.385	0.338	0.308	0.288	0.275
	n_2	0.317	0.177	0.090	0.032	-0.005	-0.027	-0.045	-0.076	-0.094	-0.105	-0.112
	$-\alpha_u$	0.920	0.628	0.461	0.356	0.285	0.234	0.195	0.132	0.098	0.078	0.065
	n_3	0.681	0.559	0.475	0.412	0.363	0.324	0.290	0.226	0.179	0.142	0.112
第四层支点	β	0.554	0.485	0.442	0.412	0.392	0.378	0.366	0.351	0.344	0.343	0.343
	ε_t	0.810	0.635	0.521	0.442	0.386	0.343	0.310	0.256	0.226	0.209	0.200
	α_t	-0.405	-0.300	-0.230	-0.182	-0.146	-0.119	-0.097	-0.059	-0.037	-0.023	-0.015
	n_1	1.065	0.786	0.603	0.475	0.380	0.309	0.252	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_u$	0.672	0.567	0.496	0.446	0.409	0.379	0.354	0.302	0.269	0.246	0.230
	n_2	0.344	0.205	0.117	0.059	0.019	-0.008	-0.025	-0.056	-0.073	-0.083	-0.089
	$-\alpha_u$	0.966	0.644	0.464	0.351	0.275	0.221	0.180	0.116	0.081	0.061	0.048
	n_3	0.721	0.581	0.486	0.416	0.362	0.319	0.282	0.215	0.167	0.131	0.102
第四层支点	β	0.480	0.420	0.382	0.356	0.338	0.326	0.316	0.302	0.296	0.294	0.294
	ε_t	0.800	0.617	0.499	0.417	0.359	0.315	0.281	0.226	0.196	0.180	0.170
	α_t	-0.457	-0.335	-0.255	-0.200	-0.159	-0.128	-0.103	-0.062	-0.038	-0.024	-0.014
	n_1	1.110	0.819	0.628	0.495	0.396	0.322	0.263	0.164	0.104	0.066	0.041
	$-\varepsilon_u$	0.666	0.557	0.483	0.431	0.391	0.359	0.332	0.278	0.242	0.217	0.200
	n_2	0.360	0.221	0.134	0.075	0.035	0.006	-0.012	-0.042	-0.059	-0.068	-0.074
	$-\alpha_u$	0.996	0.654	0.464	0.346	0.267	0.212	0.170	0.105	0.071	0.051	0.039
	n_3	0.749	0.598	0.494	0.419	0.361	0.316	0.278	0.208	0.159	0.123	0.095

ω=0.50

表 5-9(30)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.326	0.332	0.337	0.341	0.344	0.344	0.333	0.316	0.294	0.264	0.228
臂	α_u	0.47	0.54	0.62	0.71	0.81	0.92	0.99	1.24	1.53	1.79	1.98
	n_3	0.756	0.762	0.767	0.766	0.769	0.764	0.743	0.706	0.659	0.604	0.533
第一层支点	β	0.553	0.530	0.524	0.528	0.539	0.555	0.565	0.616	0.684	0.752	0.816
	ε_t	0.451	0.418	0.400	0.392	0.389	0.392	0.391	0.407	0.436	0.466	0.495
	α_t	0.032	0.038	0.044	0.050	0.058	0.066	0.073	0.096	0.124	0.152	0.178
	n_1	0.331	0.242	0.185	0.145	0.117	0.096	0.076	0.047	0.031	0.020	0.012
	$-\varepsilon_u$	0.419	0.399	0.388	0.382	0.379	0.377	0.373	0.369	0.366	0.356	0.348
	n_2	-0.075	-0.107	-0.128	-0.142	-0.152	-0.159	-0.166	-0.172	-0.171	-0.168	-0.165
	$-\alpha_u$	0.293	0.239	0.205	0.183	0.166	0.154	0.141	0.122	0.109	0.098	0.090
	n_3	0.516	0.472	0.432	0.395	0.362	0.333	0.306	0.248	0.200	0.161	0.128
第二层支点	β	0.659	0.591	0.548	0.519	0.498	0.484	0.471	0.453	0.445	0.440	0.439
	ε_t	0.607	0.517	0.458	0.418	0.389	0.367	0.348	0.320	0.306	0.298	0.295
	α_t	-0.083	-0.063	-0.050	-0.040	-0.033	-0.028	-0.022	-0.014	-0.009	-0.006	-0.004
	n_1	0.665	0.489	0.375	0.295	0.237	0.193	0.156	0.097	0.062	0.040	0.025
	$-\varepsilon_u$	0.493	0.440	0.408	0.387	0.373	0.364	0.354	0.344	0.342	0.335	0.332
	n_2	0.149	0.036	-0.018	-0.045	-0.065	-0.081	-0.095	-0.119	-0.134	-0.144	-0.150
	$-\alpha_u$	0.484	0.358	0.283	0.233	0.199	0.174	0.153	0.122	0.105	0.094	0.088
	n_3	0.516	0.453	0.405	0.366	0.334	0.306	0.280	0.229	0.187	0.153	0.123
第三层支点	β	0.581	0.516	0.476	0.449	0.430	0.418	0.408	0.396	0.393	0.395	0.399
	ε_t	0.655	0.536	0.458	0.404	0.365	0.336	0.311	0.274	0.253	0.241	0.235
	α_t	-0.199	-0.151	-0.119	-0.096	-0.079	-0.066	-0.054	-0.035	-0.024	-0.015	-0.010
	n_1	0.832	0.613	0.470	0.370	0.297	0.241	0.196	0.122	0.078	0.050	0.031
	$-\varepsilon_u$	0.531	0.460	0.414	0.382	0.360	0.343	0.327	0.304	0.291	0.275	0.265
	n_2	0.247	0.125	0.049	0.000	-0.024	-0.042	-0.057	-0.082	-0.097	-0.107	-0.113
	$-\alpha_u$	0.612	0.429	0.323	0.255	0.209	0.175	0.148	0.107	0.084	0.069	0.059
	n_3	0.584	0.488	0.421	0.371	0.330	0.297	0.268	0.213	0.171	0.137	0.109
第四层支点	β	0.508	0.449	0.412	0.387	0.370	0.358	0.349	0.337	0.334	0.334	0.336
	ε_t	0.677	0.539	0.449	0.387	0.342	0.309	0.282	0.239	0.216	0.202	0.195
	α_t	-0.282	-0.211	-0.164	-0.131	-0.106	-0.087	-0.071	-0.045	-0.029	-0.019	-0.012
	n_1	0.932	0.687	0.527	0.415	0.333	0.270	0.220	0.137	0.087	0.055	0.035
	$-\varepsilon_u$	0.553	0.470	0.416	0.377	0.349	0.328	0.308	0.277	0.257	0.237	0.224
	n_2	0.293	0.167	0.088	0.036	0.000	-0.019	-0.034	-0.060	-0.075	-0.084	-0.090
	$-\alpha_u$	0.701	0.475	0.347	0.267	0.213	0.174	0.144	0.097	0.071	0.055	0.045
	n_3	0.638	0.520	0.439	0.379	0.332	0.295	0.263	0.203	0.160	0.127	0.100
第五层支点	β	0.448	0.395	0.361	0.339	0.323	0.312	0.304	0.293	0.289	0.288	0.289
	ε_t	0.688	0.537	0.439	0.372	0.323	0.287	0.259	0.214	0.189	0.175	0.167
	α_t	-0.343	-0.253	-0.195	-0.153	-0.123	-0.100	-0.081	-0.050	-0.032	-0.020	-0.012
	n_1	0.998	0.737	0.565	0.445	0.357	0.290	0.237	0.147	0.094	0.059	0.037
	$-\varepsilon_u$	0.566	0.476	0.416	0.373	0.341	0.316	0.295	0.257	0.233	0.211	0.195
	n_2	0.320	0.192	0.111	0.058	0.021	-0.004	-0.020	-0.045	-0.060	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	0.765	0.508	0.364	0.274	0.215	0.172	0.140	0.090	0.063	0.046	0.036
	n_3	0.679	0.545	0.453	0.387	0.336	0.295	0.261	0.197	0.153	0.119	0.093

ω=0.60　　表 5-9(31)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	2.131	1.574	1.208	0.951	0.762	0.619	0.507	0.316	0.200	0.127	0.080
	n_2	4.865	3.729	2.974	2.438	2.038	1.729	1.483	1.047	0.762	0.564	0.420
臂	α_t	62.07	41.45	30.04	23.04	18.42	15.19	12.85	9.16	7.08	5.79	4.93
	n_3	5.484	4.330	3.556	3.002	2.586	2.261	1.997	1.511	1.187	0.942	0.755
第一层支点	β	2.690	2.303	2.051	1.876	1.748	1.652	1.578	1.455	1.383	1.339	1.311
	ε_t	2.140	1.753	1.501	1.326	1.198	1.102	1.028	0.905	0.833	0.789	0.761
	α_t	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
	n_1	1.732	1.279	0.981	0.773	0.619	0.503	0.412	0.257	0.163	0.103	0.065
	$-\varepsilon_u$	1.161	0.959	0.825	0.729	0.657	0.601	0.557	0.478	0.428	0.395	0.373
	n_2	0.488	0.307	0.192	0.114	0.060	0.020	-0.008	-0.057	-0.086	-0.105	-0.116
	$-\alpha_u$	2.889	1.864	1.302	0.959	0.735	0.580	0.468	0.295	0.202	0.149	0.116
	n_3	1.244	0.972	0.789	0.658	0.559	0.482	0.420	0.307	0.232	0.177	0.136
第二层支点	β	1.091	0.932	0.827	0.753	0.699	0.658	0.626	0.571	0.537	0.515	0.500
	ε_t	1.575	1.244	1.027	0.876	0.765	0.682	0.617	0.506	0.440	0.399	0.371
	α_t	-0.633	-0.461	-0.349	-0.271	-0.214	-0.171	-0.139	-0.084	-0.052	-0.032	-0.020
	n_1	1.598	1.181	0.906	0.713	0.572	0.464	0.380	0.237	0.150	0.095	0.060
	$-\varepsilon_u$	1.032	0.862	0.749	0.669	0.610	0.564	0.528	0.467	0.429	0.405	0.389
	n_2	0.426	0.260	0.154	0.083	0.033	-0.003	-0.031	-0.079	-0.108	-0.128	-0.140
	$-\alpha_u$	2.419	1.586	1.126	0.843	0.657	0.527	0.433	0.286	0.206	0.159	0.131
	n_3	1.172	0.921	0.752	0.630	0.539	0.467	0.409	0.304	0.232	0.179	0.139
第三层支点	β	0.838	0.722	0.647	0.596	0.559	0.532	0.512	0.480	0.464	0.456	0.452
	ε_t	1.336	1.034	0.838	0.701	0.602	0.528	0.471	0.378	0.324	0.293	0.274
	α_t	-0.794	-0.582	-0.443	-0.346	-0.276	-0.222	-0.181	-0.112	-0.070	-0.044	-0.028
	n_1	1.532	1.131	0.868	0.684	0.548	0.445	0.364	0.227	0.144	0.091	0.057
	$-\varepsilon_u$	0.938	0.779	0.673	0.597	0.540	0.496	0.460	0.396	0.354	0.325	0.305
	n_2	0.414	0.256	0.155	0.088	0.040	0.007	-0.018	-0.060	-0.085	-0.100	-0.109
	$-\alpha_u$	2.097	1.365	0.960	0.712	0.548	0.434	0.351	0.222	0.153	0.112	0.087
	n_3	1.118	0.876	0.713	0.596	0.507	0.438	0.382	0.280	0.210	0.161	0.123
第四层支点	β	0.676	0.584	0.525	0.485	0.457	0.436	0.420	0.396	0.383	0.376	0.373
	ε_t	1.203	0.918	0.734	0.606	0.514	0.446	0.394	0.309	0.263	0.236	0.220
	α_t	-0.825	-0.601	-0.454	-0.352	-0.278	-0.222	-0.179	-0.108	-0.066	-0.041	-0.025
	n_1	1.492	1.102	0.846	0.666	0.533	0.433	0.355	0.221	0.140	0.089	0.056
	$-\varepsilon_u$	0.876	0.724	0.622	0.548	0.492	0.447	0.412	0.346	0.302	0.272	0.250
	n_2	0.412	0.258	0.161	0.095	0.050	0.017	-0.006	-0.045	-0.067	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.893	1.222	0.851	0.625	0.476	0.372	0.297	0.182	0.120	0.084	0.063
	n_3	1.080	0.844	0.685	0.570	0.484	0.416	0.361	0.261	0.195	0.147	0.112
第五层支点	β	0.565	0.489	0.441	0.408	0.384	0.367	0.354	0.334	0.324	0.318	0.315
	ε_t	1.117	0.844	0.667	0.545	0.458	0.393	0.344	0.265	0.223	0.198	0.184
	α_t	-0.827	-0.598	-0.449	-0.346	-0.271	-0.215	-0.172	-0.101	-0.061	-0.037	-0.022
	n_1	1.465	1.082	0.830	0.654	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	$-\varepsilon_u$	0.834	0.686	0.585	0.513	0.458	0.414	0.378	0.312	0.268	0.237	0.215
	n_2	0.411	0.261	0.166	0.102	0.057	0.025	0.002	-0.034	-0.054	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.757	1.126	0.779	0.566	0.427	0.331	0.262	0.155	0.099	0.067	0.049
	n_3	1.054	0.821	0.665	0.552	0.467	0.400	0.346	0.248	0.183	0.137	0.103

$\omega=0.60$

表 5-9(32)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.464	1.080	0.829	0.652	0.523	0.425	0.347	0.216	0.137	0.087	0.055
	n_2	3.586	2.790	2.259	1.880	1.594	1.372	1.191	0.866	0.650	0.494	0.376
	α_t	28.97	20.69	15.95	12.94	10.90	9.44	8.30	6.49	5.42	4.71	4.21
臂	n_3	4.256	3.435	2.881	2.477	2.172	1.927	1.724	1.351	1.083	0.882	0.717
第一层支点	β	2.164	1.872	1.685	1.557	1.466	1.400	1.348	1.271	1.234	1.218	1.213
	ε_t	1.722	1.426	1.234	1.102	1.007	0.937	0.881	0.794	0.747	0.721	0.708
	α_t	0.269	0.272	0.275	0.279	0.282	0.285	0.288	0.295	0.303	0.310	0.316
	n_1	1.398	1.032	0.792	0.623	0.500	0.406	0.332	0.207	0.131	0.083	0.052
	$-\varepsilon_u$	1.087	0.907	0.787	0.701	0.636	0.586	0.546	0.474	0.427	0.395	0.374
	n_2	0.441	0.262	0.149	0.075	0.023	-0.011	-0.036	-0.077	-0.101	-0.116	-0.125
	$-\alpha_u$	2.070	1.369	0.977	0.735	0.573	0.460	0.376	0.247	0.176	0.134	0.109
	n_3	0.957	0.770	0.642	0.549	0.476	0.418	0.370	0.281	0.217	0.170	0.132
第二层支点	β	1.000	0.858	0.765	0.701	0.653	0.618	0.590	0.543	0.515	0.498	0.487
	ε_t	1.347	1.071	0.891	0.766	0.675	0.606	0.552	0.462	0.409	0.376	0.355
	α_t	-0.495	-0.361	-0.274	-0.214	-0.169	-0.136	-0.110	-0.067	-0.042	-0.026	-0.016
	n_1	1.376	1.016	0.779	0.614	0.492	0.399	0.327	0.204	0.129	0.082	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.978	0.820	0.716	0.642	0.587	0.544	0.511	0.453	0.418	0.396	0.381
	n_2	0.400	0.235	0.130	0.061	0.013	-0.020	-0.045	-0.088	-0.114	-0.132	-0.143
	$-\alpha_u$	1.893	1.258	0.904	0.685	0.539	0.437	0.361	0.244	0.181	0.144	0.121
	n_3	0.977	0.781	0.649	0.553	0.479	0.420	0.372	0.283	0.220	0.172	0.135
第三层支点	β	0.786	0.680	0.612	0.565	0.532	0.508	0.490	0.463	0.450	0.444	0.442
	ε_t	1.183	0.921	0.751	0.632	0.547	0.483	0.434	0.353	0.308	0.281	0.266
	α_t	-0.649	-0.477	-0.364	-0.285	-0.227	-0.184	-0.150	-0.092	-0.058	-0.037	-0.023
	n_1	1.365	1.008	0.773	0.609	0.488	0.396	0.324	0.202	0.128	0.081	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.896	0.747	0.647	0.575	0.521	0.479	0.445	0.384	0.344	0.317	0.298
	n_2	0.398	0.241	0.141	0.075	0.029	-0.004	-0.026	-0.065	-0.088	-0.102	-0.110
	$-\alpha_u$	1.721	1.130	0.801	0.598	0.464	0.370	0.301	0.194	0.135	0.101	0.080
	n_3	0.967	0.767	0.632	0.534	0.459	0.400	0.351	0.262	0.200	0.155	0.120
第四层支点	β	0.642	0.557	0.502	0.465	0.439	0.419	0.405	0.384	0.373	0.368	0.366
	ε_t	1.088	0.835	0.670	0.557	0.475	0.414	0.368	0.293	0.252	0.229	0.215
	α_t	-0.698	-0.508	-0.385	-0.299	-0.236	-0.189	-0.153	-0.092	-0.057	-0.035	-0.022
	n_1	1.358	1.003	0.770	0.606	0.486	0.394	0.323	0.201	0.128	0.081	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.843	0.698	0.600	0.529	0.476	0.434	0.399	0.337	0.295	0.266	0.246
	n_2	0.401	0.248	0.151	0.087	0.042	0.010	-0.012	-0.048	-0.069	-0.081	-0.088
	$-\alpha_u$	1.605	1.042	0.730	0.538	0.412	0.324	0.260	0.161	0.108	0.077	0.058
	n_3	0.957	0.755	0.618	0.519	0.444	0.384	0.336	0.247	0.186	0.142	0.109
第五层支点	β	0.542	0.470	0.424	0.393	0.371	0.355	0.343	0.325	0.316	0.312	0.310
	ε_t	1.026	0.778	0.618	0.507	0.428	0.369	0.325	0.254	0.215	0.193	0.181
	α_t	-0.716	-0.518	-0.390	-0.300	-0.236	-0.187	-0.150	-0.089	-0.054	-0.033	-0.020
	n_1	1.354	1.000	0.767	0.604	0.484	0.393	0.322	0.201	0.127	0.081	0.051
	$-\varepsilon_u$	0.806	0.664	0.568	0.498	0.444	0.402	0.368	0.305	0.262	0.232	0.212
	n_2	0.404	0.254	0.159	0.096	0.052	0.020	-0.002	-0.036	-0.056	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.525	0.982	0.681	0.498	0.377	0.293	0.232	0.139	0.090	0.062	0.046
	n_3	0.950	0.746	0.608	0.508	0.433	0.373	0.324	0.235	0.176	0.133	0.101

$\omega=0.60$ 表 5-9(33)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.797	0.586	0.449	0.353	0.284	0.231	0.187	0.116	0.074	0.047	0.030
	n_2	2.352	1.887	1.572	1.343	1.168	1.029	0.909	0.692	0.541	0.425	0.334
	α_t	11.11	8.85	7.49	6.59	5.96	5.50	5.08	4.44	4.06	3.77	3.56
臂	n_3	3.100	2.596	2.248	1.985	1.779	1.613	1.467	1.191	0.982	0.818	0.679
第一层支点	β	1.655	1.452	1.325	1.242	1.187	1.150	1.119	1.087	1.086	1.097	1.114
	ε_t	1.321	1.109	0.974	0.883	0.819	0.773	0.735	0.683	0.661	0.654	0.654
	α_t	0.188	0.194	0.201	0.207	0.214	0.220	0.225	0.240	0.256	0.270	0.283
	n_1	1.065	0.785	0.602	0.474	0.380	0.309	0.252	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_u$	0.972	0.822	0.722	0.650	0.596	0.554	0.519	0.458	0.418	0.390	0.370
	n_2	0.368	0.190	0.083	0.015	-0.022	-0.047	-0.067	-0.100	-0.118	-0.128	-0.134
	$-\alpha_u$	1.363	0.941	0.694	0.535	0.427	0.351	0.292	0.202	0.151	0.121	0.101
	n_3	0.697	0.595	0.519	0.459	0.410	0.369	0.332	0.261	0.207	0.164	0.130
第二层支点	β	0.912	0.787	0.706	0.650	0.610	0.579	0.556	0.517	0.495	0.482	0.475
	ε_t	1.128	0.906	0.761	0.660	0.588	0.533	0.490	0.419	0.378	0.354	0.339
	α_t	-0.364	-0.267	-0.203	-0.159	-0.126	-0.102	-0.082	-0.050	-0.031	-0.020	-0.012
	n_1	1.154	0.851	0.653	0.514	0.412	0.335	0.273	0.170	0.108	0.069	0.043
	$-\varepsilon_u$	0.903	0.762	0.669	0.602	0.553	0.515	0.485	0.434	0.403	0.383	0.371
	n_2	0.367	0.203	0.100	0.034	-0.010	-0.037	-0.059	-0.097	-0.121	-0.136	-0.145
	$-\alpha_u$	1.413	0.958	0.700	0.537	0.428	0.352	0.294	0.205	0.157	0.128	0.111
	n_3	0.787	0.649	0.553	0.480	0.424	0.378	0.338	0.264	0.209	0.166	0.131
第三层支点	β	0.735	0.638	0.576	0.535	0.505	0.484	0.468	0.445	0.435	0.432	0.432
	ε_t	1.035	0.812	0.667	0.566	0.494	0.440	0.398	0.330	0.292	0.270	0.257
	α_t	-0.512	-0.377	-0.288	-0.226	-0.181	-0.146	-0.119	-0.074	-0.047	-0.030	-0.019
	n_1	1.198	0.884	0.679	0.534	0.428	0.348	0.284	0.177	0.112	0.071	0.045
	$-\varepsilon_u$	0.843	0.705	0.612	0.545	0.495	0.457	0.425	0.369	0.332	0.308	0.291
	n_2	0.381	0.224	0.125	0.060	0.015	-0.014	-0.035	-0.070	-0.091	-0.103	-0.111
	$-\alpha_u$	1.371	0.910	0.652	0.491	0.384	0.309	0.253	0.166	0.119	0.091	0.074
	n_3	0.817	0.661	0.554	0.474	0.413	0.364	0.323	0.245	0.191	0.149	0.116
第四层支点	β	0.608	0.529	0.479	0.444	0.420	0.403	0.390	0.371	0.363	0.359	0.358
	ε_t	0.978	0.754	0.609	0.509	0.437	0.384	0.343	0.278	0.242	0.221	0.210
	α_t	-0.576	-0.420	-0.318	-0.248	-0.196	-0.158	-0.127	-0.077	-0.048	-0.030	-0.018
	n_1	1.225	0.904	0.694	0.546	0.438	0.356	0.291	0.181	0.115	0.073	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.802	0.665	0.573	0.507	0.456	0.416	0.384	0.325	0.286	0.260	0.241
	n_2	0.391	0.237	0.141	0.077	0.033	0.002	-0.018	-0.052	-0.071	-0.082	-0.088
	$-\alpha_u$	1.334	0.872	0.615	0.457	0.352	0.278	0.224	0.141	0.096	0.070	0.054
	n_3	0.834	0.667	0.553	0.469	0.405	0.353	0.311	0.232	0.178	0.137	0.106
第五层支点	β	0.518	0.451	0.408	0.379	0.358	0.344	0.333	0.316	0.309	0.306	0.305
	ε_t	0.937	0.714	0.570	0.470	0.399	0.346	0.306	0.242	0.208	0.188	0.177
	α_t	-0.610	-0.442	-0.333	-0.257	-0.202	-0.161	-0.129	-0.077	-0.047	-0.029	-0.017
	n_1	1.243	0.918	0.704	0.554	0.444	0.361	0.295	0.184	0.117	0.074	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.774	0.638	0.546	0.480	0.429	0.389	0.356	0.296	0.255	0.227	0.208
	n_2	0.397	0.247	0.152	0.089	0.045	0.015	-0.007	-0.039	-0.057	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.305	0.844	0.589	0.432	0.329	0.257	0.204	0.124	0.082	0.057	0.043
	n_3	0.846	0.671	0.552	0.465	0.399	0.346	0.303	0.223	0.168	0.128	0.098

ω=0.60

表 5-9(34)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_x	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.130	0.093	0.070	0.055	0.045	0.038	0.027	0.016	0.011	0.008	0.005
	n_2	1.239	1.067	0.944	0.849	0.773	0.709	0.645	0.527	0.437	0.359	0.292
	α_t	3.27	3.08	2.99	2.95	2.93	2.94	2.89	2.90	2.95	2.97	2.97
	n_3	2.113	1.869	1.689	1.544	1.428	1.326	1.228	1.041	0.890	0.757	0.637
第一层支点	β	1.150	1.038	0.973	0.932	0.911	0.901	0.892	0.903	0.937	0.976	1.016
	ε_t	0.923	0.799	0.721	0.668	0.633	0.611	0.591	0.573	0.576	0.586	0.600
	α_t	0.108	0.117	0.126	0.136	0.145	0.155	0.163	0.185	0.208	0.230	0.249
	n_1	0.731	0.538	0.412	0.325	0.261	0.212	0.172	0.107	0.068	0.043	0.027
	$-\varepsilon_u$	0.786	0.693	0.631	0.577	0.536	0.505	0.478	0.431	0.400	0.379	0.363
	n_2	0.208	0.058	-0.015	-0.048	-0.073	-0.090	-0.105	-0.127	-0.137	-0.142	-0.144
	$-\alpha_u$	0.800	0.591	0.456	0.363	0.300	0.254	0.218	0.161	0.129	0.108	0.094
	n_3	0.523	0.480	0.439	0.403	0.369	0.338	0.310	0.250	0.201	0.161	0.128
第二层支点	β	0.821	0.717	0.650	0.602	0.568	0.543	0.523	0.492	0.476	0.467	0.463
	ε_t	0.908	0.744	0.637	0.560	0.504	0.463	0.430	0.378	0.349	0.332	0.323
	α_t	-0.235	-0.175	-0.135	-0.106	-0.084	-0.068	-0.055	-0.034	-0.021	-0.013	-0.008
	n_1	0.931	0.687	0.527	0.414	0.332	0.270	0.220	0.137	0.087	0.055	0.035
	$-\varepsilon_u$	0.782	0.676	0.606	0.550	0.508	0.476	0.450	0.407	0.383	0.368	0.359
	n_2	0.311	0.156	0.061	-0.001	-0.032	-0.055	-0.074	-0.107	-0.127	-0.139	-0.148
	$-\alpha_u$	0.970	0.685	0.516	0.403	0.326	0.272	0.231	0.168	0.134	0.114	0.101
	n_3	0.620	0.531	0.465	0.416	0.375	0.340	0.309	0.247	0.199	0.160	0.128
第三层支点	β	0.680	0.595	0.541	0.504	0.478	0.460	0.446	0.427	0.421	0.420	0.422
	ε_t	0.884	0.704	0.586	0.503	0.443	0.398	0.363	0.307	0.277	0.259	0.249
	α_t	-0.375	-0.279	-0.216	-0.170	-0.136	-0.111	-0.090	-0.057	-0.036	-0.023	-0.015
	n_1	1.032	0.761	0.584	0.459	0.368	0.299	0.244	0.152	0.097	0.061	0.038
	$-\varepsilon_u$	0.757	0.644	0.568	0.509	0.464	0.429	0.400	0.350	0.318	0.297	0.283
	n_2	0.352	0.200	0.106	0.042	-0.001	-0.025	-0.044	-0.075	-0.094	-0.105	-0.112
	$-\alpha_u$	1.032	0.703	0.514	0.392	0.310	0.251	0.207	0.140	0.103	0.081	0.068
	n_3	0.680	0.561	0.478	0.418	0.370	0.330	0.296	0.230	0.182	0.144	0.114
第四层支点	β	0.572	0.501	0.455	0.424	0.402	0.387	0.375	0.359	0.352	0.351	0.351
	ε_t	0.862	0.673	0.550	0.463	0.401	0.355	0.319	0.262	0.232	0.214	0.204
	α_t	-0.452	-0.334	-0.256	-0.199	-0.159	-0.128	-0.103	-0.063	-0.040	-0.025	-0.015
	n_1	1.092	0.806	0.618	0.486	0.390	0.317	0.259	0.161	0.102	0.065	0.041
	$-\varepsilon_u$	0.736	0.620	0.541	0.479	0.432	0.396	0.366	0.312	0.276	0.252	0.235
	n_2	0.371	0.223	0.130	0.066	0.023	-0.006	-0.024	-0.055	-0.072	-0.083	-0.089
	$-\alpha_u$	1.063	0.708	0.508	0.380	0.295	0.235	0.190	0.122	0.085	0.063	0.050
	n_3	0.720	0.583	0.488	0.420	0.367	0.324	0.287	0.219	0.170	0.133	0.103
第五层支点	β	0.493	0.431	0.391	0.364	0.345	0.332	0.322	0.308	0.302	0.300	0.300
	ε_t	0.844	0.649	0.523	0.434	0.371	0.324	0.288	0.231	0.200	0.183	0.173
	α_t	-0.501	-0.367	-0.279	-0.216	-0.170	-0.136	-0.109	-0.065	-0.040	-0.025	-0.015
	n_1	1.132	0.835	0.641	0.504	0.404	0.329	0.268	0.167	0.106	0.067	0.042
	$-\varepsilon_u$	0.721	0.602	0.521	0.458	0.411	0.373	0.342	0.285	0.248	0.222	0.204
	n_2	0.383	0.237	0.144	0.082	0.039	0.008	-0.011	-0.042	-0.058	-0.068	-0.074
	$-\alpha_u$	1.081	0.710	0.502	0.370	0.283	0.223	0.178	0.109	0.073	0.052	0.040
	n_3	0.749	0.599	0.496	0.423	0.366	0.320	0.282	0.211	0.161	0.124	0.096

$\omega=0.60$

表 5-9(35)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.470	0.462	0.454	0.446	0.438	0.430	0.410	0.374	0.338	0.296	0.252
臂	α_t	0.82	0.92	1.02	1.13	1.25	1.38	1.46	1.76	2.05	2.28	2.44
	n_3	1.025	1.002	0.979	0.961	0.938	0.920	0.885	0.814	0.743	0.666	0.582
第一层支点	β	0.683	0.648	0.634	0.633	0.642	0.658	0.667	0.721	0.789	0.855	0.917
	ε_t	0.547	0.499	0.472	0.458	0.452	0.452	0.448	0.463	0.490	0.519	0.547
	α_t	0.050	0.057	0.065	0.073	0.083	0.094	0.102	0.131	0.161	0.190	0.215
	n_1	0.398	0.291	0.223	0.175	0.141	0.115	0.092	0.057	0.037	0.024	0.015
	$-\varepsilon_u$	0.506	0.471	0.449	0.435	0.425	0.418	0.408	0.392	0.374	0.362	0.352
	n_2	-0.042	-0.081	-0.106	-0.123	-0.135	-0.143	-0.151	-0.158	-0.159	-0.157	-0.155
	$-\alpha_u$	0.373	0.294	0.245	0.212	0.189	0.171	0.154	0.127	0.109	0.097	0.088
	n_3	0.504	0.468	0.430	0.395	0.363	0.333	0.306	0.248	0.200	0.160	0.128
第二层支点	β	0.708	0.631	0.581	0.548	0.524	0.507	0.492	0.469	0.458	0.453	0.451
	ε_t	0.676	0.570	0.502	0.454	0.420	0.394	0.372	0.339	0.321	0.312	0.307
	α_t	-0.109	-0.082	-0.064	-0.052	-0.042	-0.035	-0.028	-0.017	-0.011	-0.007	-0.004
	n_1	0.709	0.522	0.400	0.315	0.253	0.206	0.167	0.104	0.066	0.042	0.026
	$-\varepsilon_u$	0.574	0.508	0.466	0.439	0.420	0.406	0.393	0.374	0.358	0.349	0.345
	n_2	0.194	0.066	-0.006	-0.035	-0.058	-0.076	-0.091	-0.116	-0.133	-0.143	-0.150
	$-\alpha_u$	0.574	0.421	0.329	0.268	0.226	0.196	0.171	0.133	0.112	0.100	0.092
	n_3	0.515	0.456	0.410	0.372	0.339	0.311	0.285	0.233	0.191	0.155	0.125
第三层支点	β	0.610	0.540	0.496	0.467	0.447	0.433	0.422	0.409	0.406	0.407	0.411
	ε_t	0.711	0.577	0.491	0.430	0.387	0.354	0.327	0.285	0.262	0.248	0.242
	α_t	-0.234	-0.177	-0.139	-0.112	-0.091	-0.076	-0.062	-0.040	-0.026	-0.017	-0.011
	n_1	0.865	0.638	0.489	0.385	0.309	0.251	0.204	0.127	0.081	0.051	0.032
	$-\varepsilon_u$	0.599	0.516	0.462	0.425	0.398	0.378	0.359	0.328	0.302	0.285	0.273
	n_2	0.281	0.147	0.064	0.010	-0.018	-0.038	-0.053	-0.080	-0.096	-0.106	-0.113
	$-\alpha_u$	0.697	0.486	0.364	0.286	0.232	0.194	0.163	0.115	0.088	0.072	0.062
	n_3	0.584	0.491	0.425	0.374	0.334	0.301	0.272	0.216	0.173	0.139	0.111
第四层支点	β	0.527	0.465	0.426	0.399	0.381	0.369	0.359	0.346	0.342	0.342	0.344
	ε_t	0.723	0.573	0.475	0.408	0.359	0.323	0.294	0.247	0.222	0.207	0.199
	α_t	-0.319	-0.238	-0.184	-0.146	-0.118	-0.097	-0.079	-0.050	-0.032	-0.020	-0.013
	n_1	0.958	0.707	0.542	0.427	0.342	0.278	0.227	0.141	0.090	0.057	0.036
	$-\varepsilon_u$	0.610	0.517	0.456	0.413	0.381	0.356	0.334	0.296	0.265	0.244	0.229
	n_2	0.320	0.185	0.101	0.045	0.007	-0.015	-0.031	-0.058	-0.074	-0.084	-0.090
	$-\alpha_u$	0.778	0.526	0.384	0.294	0.233	0.190	0.156	0.104	0.074	0.057	0.046
	n_3	0.638	0.522	0.441	0.382	0.336	0.298	0.266	0.206	0.162	0.128	0.101
第五层支点	β	0.461	0.406	0.371	0.347	0.331	0.319	0.311	0.299	0.294	0.294	0.295
	ε_t	0.728	0.566	0.462	0.389	0.337	0.299	0.268	0.220	0.193	0.178	0.170
	α_t	-0.379	-0.279	-0.214	-0.168	-0.135	-0.109	-0.089	-0.054	-0.034	-0.021	-0.013
	n_1	1.021	0.753	0.578	0.455	0.365	0.296	0.242	0.150	0.096	0.061	0.038
	$-\varepsilon_u$	0.615	0.517	0.451	0.404	0.369	0.341	0.317	0.274	0.239	0.216	0.199
	n_2	0.342	0.207	0.122	0.065	0.026	-0.001	-0.017	-0.044	-0.060	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	0.835	0.554	0.396	0.298	0.232	0.186	0.150	0.096	0.065	0.048	0.037
	n_3	0.678	0.546	0.455	0.389	0.338	0.297	0.263	0.199	0.155	0.121	0.094

$\omega=0.70$

表 5-9(36)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	2.264	1.672	1.283	1.010	0.810	0.657	0.539	0.336	0.213	0.135	0.085
	n_2	5.150	3.944	3.143	2.575	2.151	1.823	1.563	1.101	0.801	0.592	0.440
臂	α_v	72.90	48.47	34.99	26.73	21.29	17.50	14.76	10.45	8.03	6.54	5.54
	n_3	5.785	4.561	3.745	3.159	2.716	2.371	2.090	1.581	1.238	0.982	0.786
第一层支点	β	2.894	2.477	2.206	2.017	1.880	1.777	1.698	1.566	1.489	1.443	1.413
	ε_t	2.294	1.877	1.606	1.417	1.280	1.177	1.098	0.966	0.889	0.843	0.813
	α_t	0.387	0.387	0.387	0.387	0.387	0.387	0.387	0.387	0.387	0.387	0.387
	n_1	1.798	1.328	1.019	0.802	0.643	0.522	0.428	0.267	0.169	0.107	0.067
	$-\varepsilon_u$	1.234	1.016	0.870	0.766	0.688	0.628	0.580	0.494	0.439	0.402	0.377
	n_2	0.516	0.328	0.209	0.128	0.070	0.029	-0.001	-0.051	-0.080	-0.099	-0.111
	$-\alpha_u$	3.163	2.031	1.411	1.034	0.788	0.619	0.497	0.309	0.209	0.152	0.117
	n_3	1.282	1.000	0.811	0.675	0.573	0.493	0.428	0.312	0.234	0.179	0.137
第二层支点	β	1.126	0.961	0.853	0.777	0.721	0.679	0.645	0.588	0.552	0.529	0.513
	ε_t	1.656	1.307	1.078	0.918	0.801	0.713	0.644	0.528	0.458	0.414	0.386
	α_t	-0.679	-0.494	-0.373	-0.289	-0.228	-0.182	-0.147	-0.089	-0.054	-0.034	-0.021
	n_1	1.643	1.213	0.931	0.733	0.587	0.477	0.391	0.244	0.154	0.098	0.061
	$-\varepsilon_u$	1.081	0.901	0.782	0.697	0.634	0.586	0.548	0.483	0.443	0.418	0.401
	n_2	0.443	0.272	0.163	0.089	0.038	0.001	-0.027	-0.076	-0.107	-0.127	-0.140
	$-\alpha_u$	2.594	1.696	1.201	0.897	0.697	0.558	0.457	0.301	0.216	0.166	0.136
	n_3	1.200	0.941	0.768	0.644	0.550	0.476	0.417	0.309	0.236	0.182	0.141
第三层支点	β	0.858	0.740	0.663	0.610	0.573	0.545	0.524	0.492	0.476	0.468	0.464
	ε_t	1.390	1.075	0.869	0.727	0.624	0.546	0.487	0.389	0.334	0.301	0.281
	α_t	-0.843	-0.617	-0.470	-0.367	-0.292	-0.236	-0.192	-0.118	-0.074	-0.047	-0.029
	n_1	1.565	1.156	0.887	0.698	0.560	0.454	0.372	0.232	0.147	0.093	0.058
	$-\varepsilon_u$	0.974	0.809	0.698	0.619	0.559	0.513	0.475	0.408	0.364	0.334	0.313
	n_2	0.426	0.264	0.161	0.092	0.044	0.009	-0.016	-0.059	-0.084	-0.100	-0.109
	$-\alpha_u$	2.220	1.443	1.013	0.750	0.577	0.456	0.369	0.233	0.159	0.116	0.090
	n_3	1.139	0.892	0.726	0.606	0.516	0.445	0.388	0.284	0.214	0.163	0.125
第四层支点	β	0.689	0.596	0.536	0.495	0.466	0.444	0.429	0.404	0.391	0.384	0.381
	ε_t	1.242	0.947	0.756	0.624	0.529	0.458	0.404	0.317	0.268	0.241	0.224
	α_t	-0.868	-0.632	-0.478	-0.370	-0.292	-0.234	-0.188	-0.113	-0.069	-0.043	-0.026
	n_1	1.518	1.122	0.861	0.678	0.543	0.441	0.361	0.225	0.143	0.090	0.057
	$-\varepsilon_u$	0.905	0.747	0.641	0.564	0.506	0.461	0.423	0.356	0.310	0.278	0.256
	n_2	0.421	0.264	0.165	0.098	0.052	0.019	-0.005	-0.044	-0.067	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	1.987	1.281	0.892	0.654	0.497	0.389	0.310	0.189	0.124	0.087	0.065
	n_3	1.098	0.857	0.696	0.579	0.491	0.422	0.366	0.265	0.197	0.149	0.113
第五层支点	β	0.574	0.498	0.448	0.414	0.391	0.373	0.360	0.340	0.329	0.324	0.320
	ε_t	1.148	0.867	0.684	0.559	0.469	0.402	0.352	0.271	0.227	0.202	0.187
	α_t	-0.864	-0.625	-0.469	-0.361	-0.283	-0.224	-0.179	-0.106	-0.063	-0.038	-0.023
	n_1	1.487	1.099	0.843	0.664	0.532	0.432	0.354	0.220	0.140	0.089	0.056
	$-\varepsilon_u$	0.857	0.705	0.601	0.527	0.470	0.424	0.388	0.320	0.274	0.242	0.219
	n_2	0.419	0.266	0.169	0.104	0.059	0.027	0.003	-0.033	-0.054	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.832	1.173	0.811	0.589	0.444	0.344	0.272	0.161	0.102	0.069	0.050
	n_3	1.069	0.833	0.674	0.559	0.473	0.405	0.350	0.251	0.185	0.138	0.104

$\omega=0.70$

表 5-9(37)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.597	1.179	0.904	0.712	0.571	0.464	0.379	0.236	0.150	0.095	0.060
	n_2	3.872	3.007	2.430	2.018	1.709	1.468	1.272	0.922	0.690	0.522	0.397
臂	α_n	35.69	25.25	19.30	15.55	13.01	11.20	9.80	7.56	6.25	5.39	4.78
	n_3	4.560	3.673	3.071	2.636	2.303	2.040	1.823	1.422	1.135	0.922	0.748
	β	2.356	2.038	1.833	1.693	1.594	1.522	1.466	1.381	1.340	1.321	1.315
第	ε_t	1.864	1.541	1.333	1.189	1.085	1.009	0.949	0.854	0.803	0.775	0.760
一	α_t	0.307	0.310	0.313	0.316	0.319	0.323	0.325	0.333	0.340	0.347	0.354
	n_1	1.465	1.081	0.829	0.653	0.523	0.425	0.348	0.217	0.137	0.087	0.055
层	$-\varepsilon_u$	1.157	0.962	0.831	0.737	0.667	0.612	0.567	0.488	0.437	0.402	0.378
	n_2	0.472	0.286	0.168	0.090	0.036	-0.002	-0.027	-0.070	-0.094	-0.109	-0.119
支	$-\alpha_n$	2.290	1.504	1.066	0.796	0.618	0.493	0.401	0.258	0.182	0.136	0.109
	n_3	0.992	0.795	0.661	0.563	0.488	0.427	0.377	0.285	0.220	0.171	0.133
点	β	1.035	0.888	0.791	0.724	0.675	0.638	0.609	0.560	0.530	0.512	0.500
第	ε_t	1.422	1.130	0.939	0.806	0.709	0.636	0.579	0.483	0.426	0.391	0.369
二	α_t	-0.535	-0.390	-0.296	-0.230	-0.182	-0.146	-0.118	-0.071	-0.044	-0.027	-0.017
	n_1	1.421	1.049	0.805	0.633	0.508	0.412	0.337	0.210	0.133	0.085	0.053
层	$-\varepsilon_u$	1.026	0.859	0.748	0.670	0.611	0.567	0.531	0.470	0.432	0.409	0.394
	n_2	0.417	0.247	0.140	0.068	0.018	-0.016	-0.041	-0.086	-0.113	-0.131	-0.142
支	$-\alpha_u$	2.043	1.353	0.969	0.732	0.575	0.465	0.384	0.258	0.190	0.150	0.126
	n_3	1.003	0.802	0.665	0.565	0.490	0.429	0.380	0.288	0.223	0.175	0.137
点	β	0.806	0.697	0.627	0.580	0.546	0.521	0.503	0.475	0.462	0.456	0.454
第	ε_t	1.233	0.959	0.781	0.657	0.567	0.500	0.449	0.365	0.317	0.289	0.273
三	α_t	-0.694	-0.509	-0.388	-0.304	-0.242	-0.196	-0.159	-0.098	-0.062	-0.039	-0.025
	n_1	1.398	1.033	0.792	0.624	0.500	0.406	0.332	0.207	0.131	0.083	0.052
层	$-\varepsilon_u$	0.932	0.776	0.671	0.596	0.540	0.496	0.460	0.396	0.355	0.326	0.307
	n_2	0.410	0.249	0.147	0.079	0.032	-0.001	-0.025	-0.064	-0.087	-0.101	-0.110
支	$-\alpha_u$	1.830	1.199	0.849	0.633	0.490	0.390	0.317	0.203	0.142	0.106	0.083
	n_3	0.988	0.783	0.645	0.544	0.468	0.407	0.358	0.266	0.203	0.157	0.121
点	β	0.655	0.568	0.512	0.474	0.448	0.428	0.414	0.392	0.381	0.376	0.374
第	ε_t	1.126	0.863	0.692	0.574	0.489	0.426	0.378	0.301	0.258	0.234	0.219
四	α_t	-0.737	-0.537	-0.406	-0.315	-0.249	-0.200	-0.161	-0.097	-0.060	-0.037	-0.023
	n_1	1.385	1.023	0.785	0.618	0.495	0.402	0.329	0.205	0.130	0.083	0.052
层	$-\varepsilon_u$	0.871	0.721	0.619	0.546	0.490	0.447	0.411	0.346	0.303	0.273	0.252
	n_2	0.410	0.254	0.156	0.090	0.044	0.012	-0.011	-0.048	-0.068	-0.081	-0.088
支	$-\alpha_u$	1.690	1.096	0.767	0.565	0.432	0.339	0.272	0.168	0.112	0.080	0.060
	n_3	0.975	0.768	0.629	0.528	0.451	0.390	0.341	0.250	0.188	0.144	0.110
点	β	0.551	0.478	0.432	0.400	0.378	0.362	0.349	0.331	0.322	0.318	0.315
第	ε_t	1.056	0.800	0.634	0.520	0.439	0.378	0.332	0.259	0.219	0.197	0.184
五	α_t	-0.751	-0.543	-0.408	-0.315	-0.247	-0.196	-0.157	-0.093	-0.056	-0.034	-0.021
	n_1	1.376	1.016	0.780	0.614	0.492	0.399	0.327	0.204	0.129	0.082	0.051
层	$-\varepsilon_u$	0.829	0.683	0.583	0.511	0.456	0.413	0.377	0.312	0.268	0.237	0.216
	n_2	0.412	0.259	0.163	0.098	0.053	0.022	-0.001	-0.036	-0.055	-0.067	-0.073
支	$-\alpha_u$	1.594	1.025	0.711	0.519	0.393	0.305	0.242	0.145	0.093	0.064	0.047
点	n_3	0.965	0.757	0.617	0.516	0.439	0.378	0.328	0.238	0.178	0.134	0.102

$\omega=0.70$ 表 5-9(38)

状态												
	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
参	K_n	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.931	0.685	0.525	0.413	0.331	0.270	0.219	0.136	0.087	0.055	0.035
	n_2	2.638	2.104	1.744	1.482	1.284	1.127	0.992	0.749	0.582	0.455	0.355
	α_u	14.78	11.55	9.61	8.34	7.45	6.80	6.22	5.33	4.79	4.40	4.10
	n_3	3.407	2.839	2.439	2.150	1.917	1.731	1.573	1.264	1.040	0.860	0.710
第一层支点	β	1.835	1.609	1.467	1.374	1.312	1.269	1.235	1.196	1.191	1.200	1.216
	ε_t	1.450	1.216	1.067	0.965	0.894	0.842	0.801	0.742	0.717	0.707	0.706
	α_t	0.226	0.232	0.238	0.245	0.251	0.258	0.263	0.278	0.293	0.307	0.320
	n_1	1.131	0.834	0.640	0.504	0.404	0.328	0.268	0.167	0.106	0.067	0.042
	$-\varepsilon_u$	1.040	0.875	0.765	0.686	0.626	0.579	0.540	0.472	0.427	0.396	0.375
	n_2	0.406	0.220	0.107	0.034	-0.011	-0.037	-0.058	-0.091	-0.110	-0.121	-0.127
	$-\alpha_u$	1.527	1.044	0.764	0.585	0.464	0.377	0.312	0.211	0.156	0.122	0.101
	n_3	0.725	0.615	0.533	0.470	0.418	0.375	0.337	0.264	0.209	0.165	0.130
第二层支点	β	0.946	0.816	0.732	0.673	0.631	0.599	0.574	0.533	0.510	0.496	0.487
	ε_t	1.198	0.960	0.805	0.698	0.620	0.561	0.515	0.439	0.395	0.369	0.352
	α_t	-0.400	-0.292	-0.222	-0.173	-0.137	-0.110	-0.089	-0.054	-0.034	-0.021	-0.013
	n_1	1.198	0.884	0.678	0.534	0.428	0.348	0.284	0.177	0.112	0.071	0.045
	$-\varepsilon_u$	0.951	0.801	0.701	0.630	0.578	0.538	0.505	0.450	0.417	0.397	0.384
	n_2	0.386	0.216	0.111	0.041	-0.005	-0.033	-0.056	-0.095	-0.119	-0.135	-0.145
	$-\alpha_u$	1.539	1.039	0.756	0.579	0.460	0.377	0.314	0.218	0.166	0.135	0.116
	n_3	0.812	0.668	0.568	0.493	0.434	0.386	0.346	0.269	0.213	0.169	0.134
第三层支点	β	0.755	0.656	0.592	0.549	0.519	0.497	0.481	0.457	0.447	0.444	0.444
	ε_t	1.083	0.847	0.695	0.589	0.513	0.456	0.412	0.341	0.301	0.278	0.265
	α_t	-0.552	-0.405	-0.310	-0.243	-0.194	-0.157	-0.128	-0.079	-0.051	-0.032	-0.020
	n_1	1.232	0.909	0.697	0.549	0.440	0.358	0.292	0.182	0.116	0.073	0.046
	$-\varepsilon_u$	0.879	0.733	0.636	0.567	0.514	0.473	0.440	0.381	0.343	0.317	0.299
	n_2	0.393	0.232	0.131	0.064	0.018	-0.012	-0.033	-0.069	-0.090	-0.103	-0.111
	$-\alpha_u$	1.467	0.972	0.694	0.522	0.408	0.327	0.267	0.175	0.125	0.095	0.077
	n_3	0.838	0.677	0.566	0.485	0.422	0.371	0.329	0.250	0.194	0.151	0.118
第四层支点	β	0.622	0.541	0.489	0.454	0.430	0.412	0.399	0.379	0.371	0.367	0.366
	ε_t	1.013	0.780	0.630	0.526	0.451	0.396	0.353	0.285	0.248	0.226	0.214
	α_t	-0.612	-0.446	-0.338	-0.263	-0.208	-0.167	-0.135	-0.082	-0.051	-0.032	-0.019
	n_1	1.252	0.924	0.709	0.558	0.447	0.363	0.297	0.185	0.118	0.075	0.047
	$-\varepsilon_u$	0.830	0.688	0.592	0.523	0.471	0.429	0.396	0.335	0.294	0.266	0.247
	n_2	0.400	0.244	0.146	0.080	0.036	0.004	-0.017	-0.051	-0.070	-0.082	-0.088
	$-\alpha_u$	1.409	0.921	0.649	0.481	0.370	0.292	0.235	0.147	0.100	0.073	0.056
	n_3	0.852	0.680	0.563	0.478	0.412	0.359	0.316	0.236	0.180	0.139	0.107
第五层支点	β	0.527	0.459	0.415	0.386	0.365	0.350	0.339	0.322	0.315	0.311	0.310
	ε_t	0.966	0.735	0.586	0.483	0.409	0.355	0.314	0.247	0.212	0.192	0.180
	α_t	-0.642	-0.465	-0.350	-0.270	-0.212	-0.169	-0.135	-0.080	-0.049	-0.030	-0.018
	n_1	1.265	0.934	0.717	0.564	0.452	0.367	0.300	0.187	0.119	0.075	0.047
	$-\varepsilon_u$	0.797	0.657	0.562	0.493	0.441	0.399	0.365	0.303	0.261	0.232	0.212
	n_2	0.404	0.252	0.156	0.092	0.047	0.016	-0.006	-0.039	-0.057	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.367	0.884	0.616	0.452	0.343	0.268	0.213	0.129	0.084	0.059	0.044
	n_3	0.861	0.682	0.561	0.473	0.405	0.351	0.307	0.226	0.170	0.130	0.099

$\omega=0.70$ 表 5-9(39)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.264	0.191	0.145	0.114	0.092	0.077	0.059	0.036	0.024	0.016	0.010
	n_2	1.506	1.274	1.110	0.986	0.887	0.806	0.728	0.585	0.478	0.389	0.314
	α_u	4.94	4.49	4.22	4.05	3.94	3.87	3.74	3.63	3.58	3.54	3.48
臂	n_3	2.408	2.103	1.880	1.712	1.570	1.450	1.339	1.119	0.949	0.804	0.674
	β	1.331	1.191	1.109	1.060	1.032	1.018	1.005	1.011	1.042	1.079	1.118
第	ε_t	1.054	0.902	0.808	0.746	0.705	0.678	0.655	0.631	0.630	0.639	0.652
	α_t	0.145	0.154	0.164	0.173	0.183	0.193	0.201	0.223	0.246	0.267	0.286
一	n_1	0.798	0.587	0.450	0.354	0.284	0.232	0.188	0.116	0.075	0.047	0.030
层	$-\varepsilon_u$	0.883	0.757	0.672	0.611	0.565	0.529	0.498	0.444	0.410	0.385	0.367
支	n_2	0.281	0.104	0.005	-0.032	-0.058	-0.077	-0.093	-0.116	-0.128	-0.134	-0.136
点	$-\alpha_u$	0.923	0.673	0.510	0.401	0.328	0.275	0.233	0.168	0.132	0.109	0.093
	n_3	0.517	0.483	0.445	0.407	0.373	0.341	0.312	0.251	0.202	0.162	0.128
	β	0.861	0.748	0.675	0.625	0.589	0.562	0.541	0.508	0.490	0.480	0.475
第	ε_t	0.984	0.798	0.678	0.594	0.534	0.490	0.454	0.397	0.365	0.347	0.336
	α_t	-0.271	-0.198	-0.151	-0.118	-0.094	-0.076	-0.061	-0.037	-0.023	-0.015	-0.009
二	n_1	0.976	0.720	0.552	0.434	0.348	0.283	0.231	0.143	0.091	0.058	0.036
层	$-\varepsilon_u$	0.855	0.725	0.639	0.578	0.533	0.499	0.471	0.425	0.398	0.381	0.372
支	n_2	0.346	0.175	0.073	0.007	-0.027	-0.051	-0.071	-0.105	-0.125	-0.139	-0.147
点	$-\alpha_u$	1.089	0.758	0.564	0.439	0.354	0.295	0.249	0.179	0.142	0.120	0.106
	n_3	0.630	0.544	0.479	0.427	0.384	0.348	0.316	0.252	0.203	0.163	0.130
	β	0.704	0.614	0.557	0.519	0.492	0.473	0.459	0.439	0.433	0.432	0.434
第	ε_t	0.938	0.741	0.613	0.524	0.461	0.414	0.377	0.317	0.285	0.267	0.256
	α_t	-0.418	-0.307	-0.235	-0.185	-0.148	-0.121	-0.098	-0.061	-0.039	-0.025	-0.016
三	n_1	1.065	0.786	0.603	0.474	0.380	0.309	0.252	0.157	0.100	0.063	0.040
层	$-\varepsilon_u$	0.813	0.681	0.593	0.530	0.482	0.446	0.415	0.362	0.329	0.306	0.291
支	n_2	0.375	0.212	0.112	0.047	0.003	-0.022	-0.042	-0.074	-0.093	-0.105	-0.112
点	$-\alpha_u$	1.131	0.762	0.552	0.420	0.331	0.268	0.220	0.148	0.109	0.085	0.071
	n_3	0.690	0.573	0.490	0.428	0.378	0.337	0.302	0.234	0.185	0.146	0.115
	β	0.588	0.513	0.466	0.434	0.411	0.396	0.384	0.367	0.361	0.359	0.359
第	ε_t	0.904	0.701	0.570	0.479	0.414	0.366	0.329	0.269	0.237	0.219	0.209
	α_t	-0.493	-0.360	-0.273	-0.213	-0.169	-0.136	-0.110	-0.067	-0.042	-0.026	-0.016
四	n_1	1.118	0.825	0.633	0.498	0.400	0.325	0.265	0.165	0.105	0.067	0.042
层	$-\varepsilon_u$	0.782	0.649	0.560	0.496	0.447	0.409	0.377	0.321	0.284	0.259	0.241
支	n_2	0.389	0.232	0.134	0.070	0.026	-0.004	-0.023	-0.054	-0.072	-0.083	-0.089
点	$-\alpha_u$	1.146	0.756	0.538	0.402	0.311	0.248	0.200	0.127	0.089	0.066	0.052
	n_3	0.729	0.593	0.499	0.429	0.374	0.330	0.292	0.222	0.172	0.134	0.105
	β	0.504	0.439	0.399	0.371	0.352	0.338	0.328	0.313	0.307	0.305	0.305
第	ε_t	0.879	0.672	0.538	0.447	0.381	0.332	0.295	0.236	0.204	0.187	0.177
	α_t	-0.538	-0.390	-0.294	-0.228	-0.179	-0.143	-0.115	-0.069	-0.042	-0.026	-0.016
五	n_1	1.154	0.852	0.653	0.514	0.412	0.335	0.274	0.170	0.108	0.069	0.043
层	$-\varepsilon_u$	0.759	0.626	0.537	0.472	0.422	0.383	0.351	0.293	0.254	0.227	0.208
支	n_2	0.398	0.244	0.148	0.084	0.040	0.010	-0.011	-0.041	-0.058	-0.068	-0.074
点	$-\alpha_u$	1.152	0.750	0.526	0.388	0.297	0.233	0.186	0.114	0.076	0.054	0.041
	n_3	0.756	0.608	0.505	0.430	0.372	0.325	0.286	0.214	0.163	0.126	0.097

$\omega=0.70$ 表 5-9(40)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.645	0.612	0.585	0.562	0.540	0.521	0.490	0.432	0.380	0.327	0.274
	α_u	1.37	1.47	1.59	1.71	1.85	2.00	2.08	2.35	2.60	2.79	2.92
	n_3	1.335	1.267	1.210	1.162	1.120	1.081	1.025	0.917	0.820	0.722	0.624
第一层支点	β	0.830	0.779	0.756	0.751	0.757	0.771	0.778	0.828	0.893	0.958	1.019
	ε_t	0.655	0.590	0.552	0.531	0.520	0.517	0.511	0.520	0.545	0.572	0.599
	α_t	0.074	0.082	0.092	0.103	0.115	0.128	0.138	0.168	0.199	0.227	0.253
	n_1	0.464	0.341	0.260	0.205	0.165	0.135	0.108	0.066	0.043	0.028	0.017
	$-\varepsilon_u$	0.606	0.552	0.517	0.493	0.476	0.461	0.440	0.405	0.383	0.368	0.356
	n_2	-0.008	-0.053	-0.082	-0.102	-0.116	-0.126	-0.135	-0.146	-0.148	-0.148	-0.147
	$-\alpha_u$	0.470	0.358	0.290	0.245	0.213	0.188	0.165	0.131	0.111	0.097	0.087
	n_3	0.484	0.458	0.425	0.392	0.361	0.331	0.305	0.247	0.200	0.160	0.128
第二层支点	β	0.756	0.670	0.614	0.576	0.549	0.528	0.510	0.484	0.471	0.465	0.463
	ε_t	0.750	0.627	0.547	0.492	0.453	0.423	0.396	0.357	0.336	0.326	0.320
	α_t	-0.139	-0.104	-0.081	-0.064	-0.052	-0.043	-0.034	-0.021	-0.013	-0.008	-0.005
	n_1	0.754	0.555	0.425	0.335	0.269	0.219	0.177	0.110	0.070	0.045	0.028
	$-\varepsilon_u$	0.661	0.580	0.529	0.494	0.469	0.450	0.427	0.392	0.373	0.363	0.358
	n_2	0.243	0.098	0.012	-0.026	-0.050	-0.070	-0.086	-0.114	-0.131	-0.142	-0.150
	$-\alpha_u$	0.672	0.491	0.380	0.306	0.256	0.219	0.188	0.143	0.119	0.105	0.096
	n_3	0.511	0.457	0.413	0.376	0.344	0.316	0.291	0.238	0.195	0.158	0.127
第三层支点	β	0.639	0.564	0.517	0.486	0.464	0.449	0.437	0.421	0.418	0.419	0.423
	ε_t	0.769	0.621	0.525	0.458	0.409	0.373	0.343	0.295	0.270	0.256	0.249
	α_t	-0.273	-0.205	-0.160	-0.128	-0.105	-0.087	-0.070	-0.044	-0.029	-0.019	-0.012
	n_1	0.898	0.662	0.508	0.400	0.321	0.261	0.212	0.132	0.084	0.053	0.033
	$-\varepsilon_u$	0.670	0.575	0.513	0.470	0.438	0.412	0.385	0.340	0.312	0.294	0.282
	n_2	0.316	0.170	0.080	0.021	-0.012	-0.033	-0.051	-0.079	-0.096	-0.106	-0.113
	$-\alpha_u$	0.787	0.547	0.408	0.319	0.257	0.213	0.177	0.122	0.093	0.076	0.064
	n_3	0.582	0.492	0.428	0.378	0.338	0.305	0.277	0.220	0.176	0.141	0.112
第四层变点	β	0.546	0.481	0.439	0.411	0.392	0.379	0.368	0.355	0.350	0.350	0.352
	ε_t	0.771	0.608	0.503	0.429	0.377	0.337	0.305	0.254	0.227	0.212	0.204
	α_t	-0.359	-0.267	-0.206	-0.163	-0.132	-0.107	-0.087	-0.053	-0.034	-0.021	-0.013
	n_1	0.985	0.726	0.557	0.439	0.352	0.286	0.233	0.145	0.092	0.059	0.037
	$-\varepsilon_u$	0.669	0.567	0.499	0.450	0.414	0.385	0.356	0.305	0.272	0.250	0.235
	n_2	0.348	0.204	0.113	0.054	0.013	-0.012	-0.029	-0.058	-0.074	-0.084	-0.090
	$-\alpha_u$	0.860	0.581	0.422	0.322	0.254	0.206	0.167	0.109	0.078	0.059	0.048
	n_3	0.637	0.523	0.444	0.385	0.339	0.301	0.270	0.209	0.165	0.130	0.102
第五层支点	β	0.474	0.416	0.380	0.355	0.339	0.327	0.317	0.305	0.300	0.299	0.300
	ε_t	0.768	0.596	0.484	0.407	0.352	0.310	0.277	0.225	0.197	0.182	0.173
	α_t	-0.418	-0.307	-0.235	-0.184	-0.147	-0.119	-0.095	-0.057	-0.036	-0.022	-0.014
	n_1	1.043	0.769	0.590	0.465	0.372	0.303	0.247	0.154	0.098	0.062	0.039
	$-\varepsilon_u$	0.666	0.559	0.487	0.435	0.397	0.365	0.335	0.281	0.245	0.220	0.203
	n_2	0.365	0.223	0.133	0.073	0.032	0.003	-0.015	-0.044	-0.060	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	0.908	0.602	0.430	0.323	0.251	0.200	0.160	0.100	0.068	0.049	0.038
	n_3	0.677	0.547	0.457	0.392	0.341	0.300	0.266	0.202	0.157	0.122	0.095

ω=0.80

表 5-9(41)

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	2.398	1.771	1.359	1.070	0.857	0.696	0.570	0.355	0.225	0.143	0.090
	n_2	5.433	4.157	3.311	2.710	2.262	1.916	1.642	1.155	0.839	0.619	0.460
	α_u	84.78	56.12	40.35	30.71	24.37	19.98	16.79	11.81	9.03	7.31	6.17
	n_3	6.085	4.791	3.927	3.305	2.840	2.475	2.182	1.650	1.288	1.021	0.816
第一层支点	β	3.102	2.654	2.363	2.160	2.013	1.903	1.818	1.677	1.596	1.546	1.515
	ε_t	2.452	2.004	1.713	1.510	1.363	1.253	1.168	1.027	0.946	0.896	0.865
	α_t	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425
	n_1	1.865	1.377	1.057	0.832	0.667	0.541	0.443	0.276	0.175	0.111	0.070
	$-\varepsilon_u$	1.309	1.074	0.917	0.805	0.721	0.655	0.603	0.510	0.450	0.409	0.382
	n_2	0.544	0.349	0.225	0.140	0.081	0.038	0.006	-0.045	-0.075	-0.094	-0.106
	$-\alpha_u$	3.456	2.208	1.526	1.114	0.845	0.660	0.527	0.324	0.216	0.155	0.118
	n_3	1.320	1.028	0.832	0.692	0.586	0.503	0.437	0.317	0.237	0.180	0.138
第二层支点	β	1.161	0.991	0.880	0.801	0.743	0.699	0.665	0.605	0.567	0.543	0.526
	ε_t	1.740	1.371	1.130	0.961	0.838	0.745	0.673	0.550	0.477	0.430	0.400
	α_t	-0.727	-0.528	-0.398	-0.308	-0.243	-0.194	-0.156	-0.094	-0.057	-0.035	-0.022
	n_1	1.687	1.246	0.956	0.753	0.603	0.490	0.401	0.250	0.159	0.101	0.063
	$-\varepsilon_u$	1.131	0.941	0.815	0.726	0.660	0.609	0.569	0.500	0.458	0.431	0.413
	n_2	0.460	0.284	0.172	0.096	0.043	0.005	-0.024	-0.074	-0.106	-0.126	-0.139
	$-\alpha_u$	2.776	1.811	1.279	0.953	0.739	0.591	0.483	0.316	0.226	0.173	0.142
	n_3	1.227	0.962	0.784	0.657	0.560	0.485	0.424	0.314	0.239	0.185	0.143
第三层支点	β	0.878	0.757	0.679	0.625	0.586	0.558	0.537	0.504	0.487	0.479	0.476
	ε_t	1.444	1.116	0.902	0.753	0.645	0.565	0.503	0.401	0.343	0.309	0.288
	α_t	-0.894	-0.654	-0.498	-0.389	-0.309	-0.249	-0.203	-0.125	-0.078	-0.049	-0.031
	n_1	1.598	1.181	0.906	0.713	0.572	0.464	0.380	0.237	0.150	0.095	0.060
	$-\varepsilon_u$	1.011	0.838	0.723	0.640	0.578	0.530	0.491	0.421	0.375	0.343	0.321
	n_2	0.438	0.272	0.167	0.096	0.047	0.011	-0.015	-0.058	-0.084	-0.099	-0.109
	$-\alpha_u$	2.347	1.523	1.068	0.790	0.607	0.479	0.387	0.244	0.166	0.121	0.093
	n_3	1.161	0.908	0.739	0.617	0.525	0.453	0.394	0.288	0.217	0.165	0.126
第四层支点	β	0.702	0.607	0.546	0.504	0.475	0.453	0.437	0.412	0.399	0.392	0.389
	ε_t	1.283	0.977	0.779	0.642	0.544	0.470	0.415	0.324	0.274	0.246	0.229
	α_t	-0.913	-0.664	-0.502	-0.389	-0.307	-0.245	-0.198	-0.119	-0.073	-0.045	-0.027
	n_1	1.545	1.141	0.876	0.689	0.553	0.448	0.367	0.229	0.145	0.092	0.058
	$-\varepsilon_u$	0.934	0.771	0.661	0.581	0.521	0.474	0.435	0.365	0.318	0.285	0.262
	n_2	0.430	0.271	0.170	0.102	0.054	0.020	-0.004	-0.044	-0.066	-0.080	-0.087
	$-\alpha_u$	2.083	1.342	0.933	0.684	0.519	0.406	0.323	0.197	0.129	0.090	0.067
	n_3	1.115	0.871	0.706	0.588	0.498	0.428	0.371	0.269	0.200	0.150	0.114
第四层支点	β	0.584	0.506	0.455	0.421	0.397	0.379	0.366	0.345	0.335	0.329	0.326
	ε_t	1.180	0.890	0.702	0.573	0.480	0.411	0.360	0.276	0.231	0.205	0.191
	α_t	-0.902	-0.652	-0.490	-0.377	-0.295	-0.234	-0.187	-0.110	-0.066	-0.040	-0.024
	n_1	1.510	1.115	0.856	0.674	0.540	0.438	0.359	0.224	0.142	0.090	0.056
	$-\varepsilon_u$	0.881	0.724	0.618	0.541	0.482	0.435	0.397	0.327	0.280	0.247	0.223
	n_2	0.426	0.271	0.173	0.107	0.061	0.028	0.004	-0.033	-0.054	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.909	1.222	0.843	0.613	0.462	0.357	0.282	0.167	0.106	0.071	0.051
	n_3	1.083	0.844	0.683	0.567	0.479	0.410	0.355	0.254	0.187	0.140	0.105

$\omega=0.80$

表 5-9(42)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	I4	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.731	1.277	0.980	0.771	0.618	0.502	0.410	0.255	0.162	0.103	0.065
	n_2	4.156	3.221	2.599	2.154	1.821	1.562	1.352	0.977	0.728	0.550	0.417
臂	α_u	43.23	30.33	23.01	18.41	15.31	13.10	11.40	8.70	7.13	6.10	5.38
	n_3	4.861	3.904	3.259	2.788	2.433	2.150	1.917	1.492	1.191	0.962	0.778
第	β	2.552	2.206	1.984	1.832	1.724	1.645	1.584	1.491	1.446	1.425	1.417
	ε_t	2.010	1.660	1.433	1.277	1.165	1.082	1.017	0.914	0.859	0.828	0.812
	α_t	0.344	0.347	0.350	0.354	0.357	0.360	0.363	0.370	0.378	0.385	0.391
一	n_1	1.531	1.130	0.867	0.683	0.547	0.445	0.363	0.226	0.144	0.091	0.057
	$-\varepsilon_u$	1.230	1.018	0.877	0.775	0.698	0.639	0.590	0.504	0.448	0.409	0.383
层	n_2	0.503	0.309	0.187	0.105	0.048	0.008	-0.019	-0.063	-0.088	-0.104	-0.113
	$-\alpha_u$	2.525	1.648	1.161	0.862	0.665	0.527	0.426	0.271	0.187	0.139	0.109
支	n_3	1.028	0.821	0.680	0.578	0.499	0.437	0.385	0.289	0.222	0.172	0.134
	β	1.070	0.917	0.817	0.748	0.697	0.658	0.628	0.576	0.545	0.526	0.513
点	ε_t	1.500	1.190	0.988	0.847	0.744	0.666	0.606	0.504	0.444	0.406	0.382
	α_t	-0.578	-0.421	-0.318	-0.247	-0.195	-0.156	-0.126	-0.076	-0.047	-0.029	-0.018
第	n_1	1.465	1.082	0.830	0.653	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	$-\varepsilon_u$	1.075	0.899	0.782	0.698	0.637	0.589	0.552	0.487	0.447	0.422	0.406
二	n_2	0.435	0.260	0.149	0.075	0.024	-0.012	-0.038	-0.084	-0.112	-0.130	-0.142
	$-\alpha_u$	2.200	1.453	1.038	0.782	0.612	0.494	0.407	0.272	0.200	0.157	0.131
层	n_3	1.030	0.822	0.681	0.578	0.500	0.438	0.387	0.293	0.227	0.178	0.139
	β	0.827	0.715	0.643	0.594	0.559	0.534	0.515	0.487	0.473	0.468	0.466
支	ε_t	1.285	0.998	0.811	0.682	0.588	0.518	0.464	0.376	0.326	0.297	0.280
	α_t	-0.740	-0.542	-0.413	-0.323	-0.258	-0.208	-0.169	-0.105	-0.066	-0.042	-0.026
点	n_1	1.432	1.057	0.811	0.639	0.512	0.416	0.340	0.212	0.134	0.085	0.053
	$-\varepsilon_u$	0.969	0.805	0.696	0.618	0.559	0.513	0.476	0.409	0.365	0.336	0.315
第	n_2	0.422	0.258	0.153	0.084	0.035	0.001	-0.023	-0.063	-0.087	-0.101	-0.110
	$-\alpha_u$	1.944	1.271	0.898	0.669	0.517	0.411	0.333	0.213	0.148	0.110	0.086
三	n_3	1.009	0.800	0.658	0.555	0.477	0.415	0.364	0.271	0.206	0.159	0.123
	β	0.669	0.580	0.523	0.484	0.457	0.437	0.422	0.400	0.389	0.384	0.382
层	ε_t	1.164	0.891	0.714	0.592	0.504	0.438	0.388	0.308	0.264	0.239	0.224
	α_t	-0.778	-0.567	-0.429	-0.333	-0.263	-0.210	-0.170	-0.102	-0.063	-0.039	-0.024
支	n_1	1.412	1.042	0.800	0.630	0.505	0.410	0.335	0.209	0.133	0.084	0.053
	$-\varepsilon_u$	0.900	0.744	0.639	0.563	0.505	0.460	0.423	0.356	0.311	0.279	0.257
点	n_2	0.420	0.261	0.160	0.093	0.047	0.013	-0.010	-0.047	-0.068	-0.081	-0.088
第	$-\alpha_u$	1.777	1.151	0.805	0.592	0.452	0.355	0.284	0.175	0.116	0.082	0.062
四	n_3	0.992	0.782	0.640	0.537	0.458	0.396	0.346	0.254	0.191	0.145	0.111
	β	0.560	0.486	0.439	0.407	0.384	0.368	0.355	0.337	0.328	0.323	0.321
层	ε_t	1.086	0.822	0.651	0.534	0.450	0.387	0.340	0.264	0.223	0.200	0.187
	α_t	-0.786	-0.569	-0.427	-0.329	-0.258	-0.205	-0.164	-0.097	-0.058	-0.035	-0.021
支	n_1	1.398	1.033	0.792	0.624	0.500	0.406	0.332	0.207	0.131	0.083	0.052
	$-\varepsilon_u$	0.853	0.702	0.599	0.525	0.469	0.424	0.387	0.320	0.274	0.242	0.220
点	n_2	0.419	0.264	0.166	0.101	0.055	0.023	0.000	-0.036	-0.055	-0.066	-0.073
第	$-\alpha_u$	1.665	1.070	0.741	0.541	0.409	0.317	0.251	0.150	0.096	0.066	0.048
五	n_3	0.979	0.769	0.626	0.523	0.445	0.383	0.333	0.241	0.180	0.136	0.103

$\omega=0.80$

表 5-9(43)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.064	0.783	0.600	0.472	0.379	0.309	0.250	0.155	0.099	0.063	0.040
	n_2	2.920	2.318	1.912	1.619	1.397	1.222	1.072	0.805	0.621	0.483	0.376
	α_u	19.07	14.64	12.01	10.29	9.09	8.22	7.46	6.27	5.56	5.04	4.66
臂	n_3	3.711	3.070	2.627	2.302	2.048	1.848	1.667	1.340	1.097	0.900	0.741
	β	2.019	1.769	1.612	1.508	1.438	1.390	1.351	1.305	1.296	1.303	1.318
第	ε_t	1.584	1.326	1.161	1.049	0.970	0.913	0.867	0.801	0.772	0.760	0.758
	α_t	0.263	0.269	0.276	0.282	0.289	0.295	0.300	0.315	0.331	0.345	0.358
一	n_1	1.198	0.884	0.678	0.533	0.428	0.348	0.284	0.176	0.112	0.071	0.045
层	$-\varepsilon_u$	1.111	0.930	0.809	0.722	0.656	0.605	0.563	0.487	0.438	0.403	0.379
支	n_2	0.443	0.248	0.129	0.052	0.001	-0.027	-0.048	-0.084	-0.103	-0.114	-0.121
点	$-\alpha_u$	1.705	1.156	0.839	0.638	0.502	0.406	0.333	0.221	0.160	0.124	0.100
	n_3	0.755	0.635	0.548	0.481	0.427	0.382	0.343	0.267	0.210	0.166	0.130
	β	0.981	0.845	0.757	0.696	0.652	0.619	0.592	0.549	0.524	0.509	0.500
第	ε_t	1.269	1.016	0.851	0.736	0.652	0.590	0.540	0.459	0.412	0.384	0.366
	α_t	-0.437	-0.319	-0.241	-0.188	-0.149	-0.120	-0.096	-0.058	-0.036	-0.022	-0.014
二	n_1	1.243	0.917	0.703	0.554	0.444	0.361	0.295	0.183	0.117	0.074	0.046
层	$-\varepsilon_u$	1.000	0.840	0.734	0.659	0.603	0.560	0.526	0.468	0.432	0.410	0.396
支	n_2	0.405	0.230	0.121	0.049	0.000	-0.029	-0.053	-0.093	-0.118	-0.134	-0.144
点	$-\alpha_u$	1.671	1.124	0.815	0.623	0.494	0.403	0.335	0.231	0.174	0.141	0.121
	n_3	0.838	0.687	0.583	0.505	0.444	0.395	0.353	0.274	0.216	0.172	0.136
	β	0.775	0.673	0.608	0.564	0.533	0.510	0.493	0.469	0.459	0.456	0.456
第	ε_t	1.131	0.884	0.724	0.613	0.533	0.473	0.427	0.352	0.310	0.286	0.272
	α_t	-0.593	-0.435	-0.332	-0.261	-0.208	-0.169	-0.137	-0.085	-0.054	-0.034	-0.022
三	n_1	1.265	0.934	0.716	0.564	0.452	0.367	0.300	0.187	0.119	0.075	0.047
层	$-\varepsilon_u$	0.915	0.763	0.661	0.588	0.533	0.490	0.456	0.394	0.354	0.326	0.308
支	n_2	0.406	0.241	0.138	0.069	0.022	-0.010	-0.032	-0.068	-0.090	-0.103	-0.111
点	$-\alpha_u$	1.566	1.035	0.738	0.554	0.432	0.346	0.282	0.184	0.131	0.099	0.080
	n_3	0.859	0.693	0.579	0.495	0.430	0.378	0.335	0.254	0.197	0.153	0.120
	β	0.635	0.552	0.500	0.464	0.439	0.421	0.407	0.388	0.379	0.375	0.374
第	ε_t	1.049	0.807	0.650	0.542	0.465	0.407	0.363	0.292	0.253	0.231	0.219
	α_t	-0.649	-0.473	-0.358	-0.279	-0.221	-0.177	-0.143	-0.086	-0.054	-0.033	-0.021
四	n_1	1.278	0.944	0.724	0.570	0.457	0.371	0.303	0.189	0.120	0.076	0.048
层	$-\varepsilon_u$	0.859	0.711	0.612	0.540	0.485	0.443	0.408	0.344	0.302	0.273	0.252
支	n_2	0.409	0.250	0.150	0.084	0.038	0.006	-0.016	-0.050	-0.070	-0.082	-0.088
点	$-\alpha_u$	1.488	0.970	0.683	0.506	0.388	0.307	0.246	0.154	0.104	0.075	0.058
	n_3	0.869	0.693	0.574	0.486	0.419	0.365	0.321	0.239	0.182	0.141	0.108
	β	0.537	0.467	0.423	0.392	0.371	0.356	0.345	0.328	0.320	0.317	0.316
第	ε_t	0.995	0.756	0.602	0.496	0.420	0.364	0.321	0.253	0.216	0.195	0.183
	α_t	-0.675	-0.489	-0.368	-0.284	-0.223	-0.177	-0.142	-0.084	-0.051	-0.031	-0.019
五	n_1	1.287	0.950	0.729	0.574	0.460	0.374	0.306	0.190	0.121	0.077	0.048
层	$-\varepsilon_u$	0.820	0.675	0.578	0.507	0.453	0.410	0.375	0.311	0.267	0.237	0.216
支	n_2	0.412	0.257	0.159	0.094	0.049	0.017	-0.005	-0.038	-0.057	-0.067	-0.073
点	$-\alpha_u$	1.431	0.925	0.644	0.472	0.358	0.280	0.222	0.134	0.087	0.061	0.045
	n_3	0.875	0.693	0.570	0.480	0.411	0.356	0.311	0.229	0.172	0.131	0.100

$\omega=0.80$

表 5-9(44)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.397	0.289	0.221	0.174	0.140	0.115	0.090	0.055	0.036	0.023	0.015
	n_2	1.775	1.480	1.274	1.120	0.999	0.901	0.809	0.641	0.518	0.418	0.335
臂	α_u	7.04	6.19	5.66	5.31	5.07	4.90	4.68	4.41	4.26	4.13	4.01
	n_3	2.693	2.331	2.068	1.867	1.704	1.566	1.438	1.196	1.007	0.845	0.705
	β	1.503	1.343	1.247	1.190	1.155	1.137	1.120	1.120	1.147	1.182	1.219
第	ε_t	1.176	1.004	0.896	0.826	0.778	0.746	0.719	0.689	0.685	0.692	0.704
一	α_t	0.183	0.192	0.201	0.211	0.220	0.230	0.238	0.260	0.283	0.305	0.324
	n_1	0.864	0.637	0.488	0.384	0.308	0.251	0.204	0.126	0.081	0.051	0.032
层	$-\varepsilon_u$	0.951	0.810	0.715	0.646	0.594	0.554	0.519	0.459	0.419	0.392	0.372
支	n_2	0.333	0.143	0.036	-0.017	-0.045	-0.065	-0.082	-0.107	-0.120	-0.126	-0.130
点	$-\alpha_u$	1.042	0.754	0.568	0.443	0.358	0.297	0.249	0.176	0.135	0.109	0.093
	n_3	0.531	0.493	0.452	0.413	0.377	0.345	0.315	0.252	0.203	0.162	0.128
	β	0.895	0.776	0.700	0.647	0.609	0.581	0.559	0.523	0.504	0.493	0.488
第	ε_t	1.050	0.849	0.720	0.630	0.565	0.517	0.478	0.416	0.382	0.361	0.349
二	α_t	-0.303	-0.221	-0.168	-0.131	-0.104	-0.084	-0.067	-0.041	-0.026	-0.016	-0.010
	n_1	1.020	0.752	0.577	0.454	0.364	0.296	0.241	0.150	0.096	0.061	0.038
层	$-\varepsilon_u$	0.903	0.764	0.672	0.607	0.559	0.522	0.492	0.442	0.413	0.395	0.385
支	n_2	0.366	0.190	0.084	0.016	-0.022	-0.047	-0.068	-0.103	-0.124	-0.138	-0.147
点	$-\alpha_u$	1.196	0.829	0.614	0.476	0.383	0.318	0.267	0.191	0.150	0.126	0.111
	n_3	0.654	0.562	0.493	0.438	0.394	0.356	0.323	0.257	0.207	0.166	0.133
	β	0.724	0.632	0.573	0.533	0.506	0.486	0.472	0.452	0.445	0.444	0.446
第	ε_t	0.983	0.775	0.640	0.547	0.479	0.430	0.390	0.328	0.294	0.275	0.264
三	α_t	-0.454	-0.334	-0.256	-0.201	-0.161	-0.131	-0.107	-0.066	-0.043	-0.027	-0.017
	n_1	1.098	0.810	0.621	0.489	0.392	0.319	0.260	0.162	0.103	0.065	0.041
层	$-\varepsilon_u$	0.849	0.710	0.617	0.551	0.501	0.463	0.431	0.375	0.339	0.315	0.299
支	n_2	0.388	0.222	0.119	0.052	0.006	-0.020	-0.040	-0.073	-0.093	-0.104	-0.112
点	$-\alpha_u$	1.216	0.817	0.590	0.448	0.352	0.285	0.234	0.156	0.114	0.089	0.073
	n_3	0.711	0.589	0.503	0.438	0.386	0.344	0.307	0.238	0.188	0.148	0.117
	β	0.602	0.525	0.476	0.443	0.421	0.404	0.392	0.375	0.369	0.367	0.367
第	Qt	0.938	0.726	0.589	0.495	0.427	0.377	0.338	0.276	0.243	0.224	0.213
四	α_t	-0.526	-0.384	-0.292	-0.227	-0.180	-0.145	-0.117	-0.071	-0.045	-0.028	-0.017
	n_1	1.145	0.845	0.648	0.510	0.409	0.332	0.271	0.169	0.107	0.068	0.043
层	$-\varepsilon_u$	0.810	0.672	0.579	0.512	0.462	0.422	0.389	0.330	0.292	0.265	0.247
支	n_2	0.399	0.239	0.139	0.073	0.028	-0.003	-0.022	-0.054	-0.072	-0.083	-0.089
点	$-\alpha_u$	1.215	0.801	0.568	0.424	0.328	0.261	0.210	0.133	0.092	0.068	0.054
	n_3	0.746	0.606	0.509	0.437	0.381	0.336	0.297	0.225	0.174	0.136	0.106
	β	0.513	0.448	0.406	0.378	0.358	0.345	0.334	0.319	0.313	0.311	0.311
第	ε_t	0.906	0.692	0.554	0.459	0.391	0.341	0.302	0.241	0.208	0.190	0.180
五	α_t	-0.568	-0.412	-0.310	-0.240	-0.189	-0.151	-0.121	-0.072	-0.044	-0.027	-0.017
	n_1	1.176	0.868	0.666	0.524	0.420	0.341	0.279	0.174	0.110	0.070	0.044
层	$-\varepsilon_u$	0.782	0.645	0.552	0.485	0.434	0.394	0.361	0.300	0.260	0.232	0.212
支	n_2	0.405	0.249	0.152	0.087	0.042	0.011	-0.010	-0.041	-0.058	-0.068	-0.074
点	$-\alpha_u$	1.210	0.787	0.552	0.406	0.310	0.243	0.194	0.119	0.079	0.056	0.042
	n_3	0.771	0.619	0.514	0.437	0.378	0.330	0.290	0.217	0.165	0.127	0.098

$\omega=0.80$

表 5-9(45)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	0.846	0.780	0.728	0.684	0.646	0.612	0.569	0.488	0.421	0.356	0.296
臂	α_u	2.17	2.26	2.37	2.49	2.61	2.74	2.78	2.99	3.19	3.33	3.42
	n_3	1.681	1.555	1.458	1.374	1.306	1.242	1.164	1.018	0.891	0.776	0.661
第一层支点	β	0.995	0.925	0.892	0.877	0.877	0.887	0.891	0.935	0.998	1.061	1.121
	ε_t	0.775	0.690	0.640	0.608	0.591	0.583	0.573	0.578	0.599	0.624	0.650
	α_t	0.103	0.114	0.126	0.139	0.152	0.165	0.176	0.206	0.236	0.265	0.290
	n_1	0.531	0.390	0.298	0.235	0.189	0.154	0.124	0.076	0.049	0.032	0.020
	$-\varepsilon_u$	0.718	0.642	0.592	0.546	0.512	0.485	0.460	0.419	0.393	0.374	0.360
	n_2	0.076	-0.023	-0.058	-0.082	-0.099	-0.111	-0.121	-0.134	-0.139	-0.140	-0.139
	$-\alpha_u$	0.580	0.434	0.342	0.279	0.236	0.204	0.177	0.136	0.112	0.096	0.085
	n_3	0.455	0.443	0.416	0.388	0.359	0.331	0.304	0.247	0.200	0.160	0.128
第二层支点	β	0.804	0.708	0.646	0.601	0.569	0.546	0.527	0.499	0.485	0.478	0.475
	ε_t	0.829	0.688	0.596	0.530	0.482	0.448	0.419	0.375	0.352	0.340	0.333
	α_t	-0.173	-0.128	-0.098	-0.077	-0.061	-0.050	-0.040	-0.024	-0.015	-0.010	-0.006
	n_1	0.798	0.588	0.450	0.354	0.284	0.232	0.188	0.117	0.075	0.047	0.030
	$-\varepsilon_u$	0.754	0.657	0.594	0.541	0.502	0.473	0.448	0.410	0.389	0.377	0.371
	n_2	0.294	0.131	0.035	-0.017	-0.045	-0.066	-0.083	-0.113	-0.130	-0.142	-0.149
	$-\alpha_u$	0.775	0.567	0.435	0.344	0.282	0.239	0.204	0.154	0.127	0.111	0.101
	n_3	0.504	0.457	0.416	0.382	0.351	0.323	0.297	0.242	0.198	0.161	0.130
第三层支点	β	0.668	0.588	0.537	0.503	0.479	0.462	0.450	0.434	0.430	0.432	0.436
	ε_t	0.830	0.666	0.560	0.483	0.429	0.388	0.356	0.305	0.279	0.264	0.256
	α_t	-0.316	-0.236	-0.183	-0.145	-0.117	-0.095	-0.078	-0.049	-0.032	-0.021	-0.013
	n_1	0.931	0.687	0.527	0.414	0.332	0.270	0.220	0.137	0.087	0.086	0.035
	$-\varepsilon_u$	0.745	0.637	0.565	0.507	0.463	0.429	0.401	0.353	0.323	0.303	0.290
	n_2	0.353	0.194	0.096	0.031	-0.009	-0.031	-0.049	-0.078	-0.095	-0.106	-0.112
	$-\alpha_u$	0.881	0.613	0.455	0.350	0.279	0.228	0.189	0.130	0.098	0.079	0.067
	n_3	0.579	0.493	0.430	0.384	0.345	0.312	0.282	0.224	0.179	0.143	0.114
第四层支点	β	0.565	0.496	0.452	0.423	0.402	0.388	0.377	0.363	0.358	0.358	0.360
	ε_t	0.820	0.645	0.530	0.449	0.391	0.348	0.314	0.261	0.233	0.217	0.208
	α_t	-0.402	-0.298	-0.229	-0.179	-0.143	-0.115	-0.093	-0.057	-0.036	-0.023	-0.014
	n_1	1.012	0.746	0.572	0.450	0.361	0.294	0.239	0.149	0.095	0.060	0.038
	$-\varepsilon_u$	0.731	0.618	0.542	0.480	0.434	0.398	0.368	0.314	0.280	0.256	0.240
	n_2	0.377	0.223	0.126	0.061	0.017	-0.010	-0.028	-0.057	-0.074	-0.084	-0.090
	$-\alpha_u$	0.945	0.638	0.462	0.348	0.272	0.218	0.177	0.114	0.081	0.062	0.049
	n_3	0.635	0.524	0.446	0.390	0.344	0.307	0.275	0.212	0.167	0.132	0.104
第五层支点	β	0.487	0.427	0.389	0.363	0.345	0.333	0.323	0.310	0.306	0.305	0.306
	ε_t	0.810	0.627	0.507	0.423	0.363	0.318	0.284	0.230	0.201	0.185	0.176
	α_t	-0.458	-0.336	-0.256	-0.199	-0.157	-0.126	-0.101	-0.061	-0.037	-0.023	-0.014
	n_1	1.065	0.786	0.603	0.474	0.380	0.309	0.252	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_u$	0.719	0.602	0.523	0.461	0.413	0.376	0.344	0.288	0.251	0.225	0.207
	n_2	0.389	0.238	0.143	0.079	0.035	0.004	-0.014	-0.043	-0.059	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	0.984	0.652	0.465	0.345	0.265	0.209	0.167	0.104	0.070	0.051	0.039
	n_3	0.676	0.548	0.459	0.396	0.346	0.305	0.270	0.205	0.159	0.123	0.096

$\omega=0.90$ **表 5-9(46)**

状	δ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	2.531	1.869	1.434	1.129	0.905	0.735	0.602	0.375	0.238	0.151	0.094
	n_2	5.714	4.369	3.477	2.844	2.372	2.008	1.720	1.208	0.876	0.646	0.479
	α_u	97.74	64.43	46.14	34.99	27.68	22.61	18.95	13.24	10.06	8.11	6.82
	n_3	6.383	5.020	4.107	3.454	2.967	2.584	2.273	1.713	1.333	1.060	0.845
第一层支点	β	3.315	2.835	2.522	2.305	2.147	2.029	1.939	1.789	1.702	1.650	1.617
	ε_t	2.615	2.135	1.822	1.605	1.447	1.329	1.239	1.089	1.002	0.950	0.917
	α_t	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462
	n_1	1.931	1.427	1.095	0.862	0.691	0.561	0.459	0.286	0.181	0.115	0.072
	$-\varepsilon_u$	1.386	1.134	0.965	0.845	0.754	0.684	0.627	0.526	0.461	0.417	0.387
	n_2	0.573	0.370	0.241	0.153	0.091	0.047	0.014	-0.039	-0.070	-0.089	-0.101
	$-\alpha_u$	3.766	2.395	1.648	1.197	0.904	0.703	0.559	0.340	0.224	0.158	0.118
	n_3	1.359	1.056	0.854	0.709	0.599	0.514	0.446	0.322	0.240	0.182	0.139
第二层支点	β	1.196	1.021	0.906	0.825	0.766	0.720	0.684	0.622	0.583	0.557	0.539
	ε_t	1.825	1.436	1.182	1.005	0.875	0.777	0.702	0.573	0.495	0.446	0.414
	α_t	-0.777	-0.564	-0.425	-0.328	-0.258	-0.206	-0.165	-0.099	-0.060	-0.037	-0.023
	n_1	1.732	1.279	0.981	0.773	0.619	0.503	0.412	0.257	0.163	0.103	0.065
	$-\varepsilon_u$	1.182	0.982	0.849	0.755	0.685	0.632	0.589	0.517	0.472	0.444	0.426
	n_2	0.477	0.296	0.181	0.103	0.048	0.008	-0.021	-0.072	-0.104	-0.125	-0.139
	$-\alpha_u$	2.966	1.930	1.360	1.011	0.783	0.624	0.509	0.332	0.236	0.181	0.147
	n_3	1.255	0.983	0.801	0.670	0.571	0.494	0.432	0.319	0.243	0.188	0.146
第三层支点	β	0.899	0.775	0.694	0.639	0.600	0.571	0.549	0.516	0.499	0.491	0.488
	ε_t	1.500	1.158	0.934	0.780	0.667	0.583	0.519	0.413	0.352	0.317	0.295
	α_t	-0.946	-0.692	-0.526	-0.411	-0.327	-0.263	-0.214	-0.132	-0.083	-0.052	-0.033
	n_1	1.632	1.205	0.925	0.728	0.583	0.474	0.388	0.242	0.153	0.097	0.061
	$-\varepsilon_u$	1.049	0.869	0.748	0.662	0.597	0.547	0.506	0.433	0.385	0.352	0.329
	n_2	0.450	0.281	0.173	0.101	0.050	0.014	-0.013	-0.057	-0.084	-0.099	-0.109
	$-\alpha_u$	2.479	1.606	1.125	0.831	0.637	0.503	0.406	0.255	0.173	0.125	0.097
	n_3	1.182	0.925	0.752	0.627	0.533	0.460	0.400	0.293	0.220	0.167	0.128
第四层支点	β	0.715	0.619	0.556	0.514	0.484	0.462	0.445	0.420	0.407	0.400	0.397
	ε_t	1.323	1.008	0.803	0.661	0.559	0.483	0.425	0.332	0.280	0.251	0.234
	α_t	-0.959	-0.697	-0.527	-0.408	-0.322	-0.257	-0.207	-0.124	-0.076	-0.047	-0.028
	n_1	1.572	1.161	0.891	0.701	0.562	0.456	0.374	0.233	0.148	0.094	0.059
	$-\varepsilon_u$	0.963	0.794	0.681	0.599	0.536	0.487	0.448	0.375	0.326	0.292	0.268
	n_2	0.439	0.277	0.174	0.105	0.057	0.022	-0.003	-0.043	-0.066	-0.079	-0.087
	$-\alpha_u$	2.182	1.404	0.976	0.714	0.542	0.423	0.337	0.204	0.134	0.093	0.069
	n_3	1.133	0.884	0.717	0.596	0.505	0.434	0.377	0.272	0.202	0.152	0.115
第五层支点	β	0.593	0.514	0.463	0.428	0.403	0.385	0.372	0.351	0.340	0.335	0.332
	ε_t	1.212	0.913	0.720	0.587	0.491	0.421	0.367	0.282	0.235	0.209	0.194
	α_t	-0.942	-0.681	-0.511	-0.393	-0.308	-0.244	-0.195	-0.115	-0.069	-0.041	-0.025
	n_1	1.532	1.131	0.868	0.684	0.548	0.445	0.364	0.227	0.144	0.091	0.057
	$-\varepsilon_u$	0.905	0.743	0.634	0.555	0.494	0.446	0.407	0.335	0.286	0.252	0.227
	n_2	0.434	0.276	0.176	0.109	0.063	0.029	0.005	-0.033	-0.054	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.988	1.271	0.877	0.637	0.479	0.371	0.292	0.172	0.109	0.074	0.053
	n_3	1.098	0.855	0.692	0.574	0.485	0.415	0.359	0.257	0.189	0.141	0.106

$\omega=0.90$

表 5-9(47)

状	δ	0.094	0.087	0.081	0.074	0.068	0.063	0.058	0.047	0.036	0.028	0.021
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	1.864	1.375	1.055	0.831	0.666	0.541	0.442	0.275	0.175	0.111	0.069
	n_2	4.439	3.434	2.766	2.289	1.932	1.655	1.430	1.031	0.766	0.578	0.437
	α_u	51.65	35.95	27.08	21.52	17.79	15.14	13.11	9.91	8.05	6.83	5.99
臂	n_3	5.160	4.134	3.441	2.939	2.561	2.259	2.013	1.555	1.241	1.002	0.808
第一层支点	β	2.752	2.378	2.137	1.972	1.855	1.769	1.703	1.601	1.552	1.528	1.519
	ε_t	2.160	1.781	1.536	1.367	1.246	1.156	1.086	0.975	0.915	0.882	0.864
	α_t	0.382	0.385	0.388	0.391	0.394	0.398	0.400	0.408	0.415	0.422	0.429
	n_1	1.598	1.180	0.905	0.712	0.571	0.464	0.379	0.236	0.150	0.095	0.060
	$-\varepsilon_u$	1.305	1.077	0.924	0.814	0.731	0.666	0.614	0.520	0.459	0.417	0.387
	n_2	0.534	0.333	0.205	0.119	0.060	0.018	-0.011	-0.056	-0.083	-0.098	-0.108
	$-\alpha_u$	2.777	1.802	1.263	0.932	0.715	0.564	0.454	0.284	0.194	0.141	0.109
	n_3	1.064	0.847	0.700	0.593	0.511	0.446	0.392	0.293	0.224	0.173	0.134
第二层支点	β	1.105	0.947	0.844	0.771	0.718	0.678	0.647	0.593	0.561	0.540	0.526
	ε_t	1.579	1.251	1.037	0.888	0.779	0.697	0.633	0.526	0.462	0.422	0.396
	α_t	-0.623	-0.453	-0.342	-0.265	-0.209	-0.167	-0.134	-0.080	-0.049	-0.030	-0.019
	n_1	1.509	1.114	0.855	0.673	0.539	0.438	0.358	0.223	0.142	0.090	0.056
	$-\varepsilon_u$	1.126	0.939	0.815	0.728	0.662	0.612	0.572	0.504	0.462	0.435	0.418
	n_2	0.452	0.272	0.159	0.082	0.029	-0.008	-0.035	-0.082	-0.110	-0.129	-0.141
	$-\alpha_u$	2.364	1.557	1.109	0.834	0.651	0.524	0.431	0.287	0.209	0.164	0.136
	n_3	1.057	0.842	0.696	0.591	0.510	0.447	0.395	0.298	0.231	0.181	0.142
第三层支点	β	0.847	0.733	0.659	0.609	0.573	0.547	0.528	0.498	0.485	0.479	0.478
	ε_t	1.337	1.037	0.842	0.707	0.609	0.536	0.480	0.387	0.335	0.305	0.287
	α_t	-0.787	-0.577	-0.440	-0.344	-0.274	-0.221	-0.180	-0.111	-0.070	-0.044	-0.028
	n_1	1.465	1.082	0.830	0.653	0.524	0.425	0.348	0.217	0.138	0.087	0.055
	$-\varepsilon_u$	1.006	0.835	0.721	0.640	0.578	0.530	0.491	0.422	0.376	0.345	0.323
	n_2	0.435	0.266	0.160	0.088	0.039	0.003	-0.021	-0.062	-0.086	-0.101	-0.110
	$-\alpha_u$	2.061	1.346	0.949	0.706	0.545	0.433	0.350	0.223	0.155	0.114	0.090
	n_3	1.030	0.816	0.670	0.565	0.485	0.422	0.370	0.275	0.209	0.161	0.125
第四层支点	β	0.682	0.591	0.533	0.494	0.466	0.446	0.431	0.408	0.397	0.392	0.390
	ε_t	1.203	0.920	0.736	0.609	0.518	0.450	0.399	0.315	0.270	0.244	0.228
	α_t	-0.820	-0.597	-0.452	-0.350	-0.277	-0.222	-0.179	-0.107	-0.066	-0.041	-0.025
	n_1	1.438	1.062	0.815	0.642	0.514	0.418	0.342	0.213	0.135	0.086	0.054
	$-\varepsilon_u$	0.929	0.768	0.659	0.580	0.520	0.473	0.435	0.365	0.319	0.286	0.263
	n_2	0.429	0.267	0.165	0.096	0.049	0.015	-0.009	-0.047	-0.068	-0.080	-0.088
	$-\alpha_u$	1.867	1.208	0.844	0.620	0.473	0.371	0.297	0.182	0.121	0.085	0.064
	n_3	1.010	0.795	0.650	0.545	0.465	0.402	0.351	0.257	0.193	0.147	0.112
第五层支点	β	0.570	0.494	0.446	0.411	0.391	0.374	0.361	0.342	0.333	0.329	0.327
	ε_t	1.117	0.845	0.669	0.547	0.461	0.396	0.348	0.270	0.227	0.204	0.190
	α_t	-0.823	-0.595	-0.447	-0.344	-0.270	-0.214	-0.171	-0.101	-0.061	-0.037	-0.022
	n_1	1.421	1.049	0.805	0.634	0.508	0.412	0.338	0.210	0.133	0.085	0.053
	$-\varepsilon_u$	0.877	0.721	0.616	0.539	0.481	0.434	0.397	0.327	0.280	0.247	0.224
	n_2	0.427	0.269	0.170	0.103	0.057	0.024	0.001	-0.035	-0.055	-0.066	-0.073
	$-\alpha_u$	1.737	1.115	0.772	0.563	0.425	0.330	0.261	0.155	0.100	0.068	0.049
	n_3	0.994	0.780	0.635	0.530	0.451	0.388	0.337	0.244	0.182	0.137	0.104

$\omega=0.90$ 表 5-9(48)

状	δ	0.187	0.174	0.161	0.149	0.137	0.126	0.116	0.093	0.073	0.056	0.042
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_s	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	1.197	0.882	0.676	0.532	0.427	0.347	0.282	0.175	0.112	0.071	0.045
	n_2	3.201	2.530	2.079	1.754	1.508	1.315	1.151	0.859	0.660	0.511	0.396
	α_u	24.02	18.16	14.70	12.46	10.90	9.76	8.80	7.28	6.36	5.72	5.23
	n_3	4.004	3.298	2.813	2.452	2.176	1.957	1.764	1.409	1.148	0.940	0.776
第一层支点	β	2.206	1.931	1.758	1.644	1.565	1.511	1.468	1.414	1.402	1.406	1.420
	ε_t	1.722	1.439	1.257	1.134	1.047	0.984	0.934	0.861	0.828	0.813	0.810
	α_t	0.301	0.307	0.313	0.320	0.326	0.333	0.338	0.353	0.368	0.382	0.395
	n_1	1.264	0.933	0.715	0.563	0.452	0.367	0.299	0.186	0.119	0.075	0.047
	$-\varepsilon_u$	1.184	0.987	0.855	0.760	0.688	0.632	0.586	0.503	0.448	0.410	0.384
	n_2	0.479	0.276	0.151	0.070	0.015	-0.017	-0.040	-0.076	-0.097	-0.108	-0.115
	$-\alpha_u$	1.899	1.276	0.920	0.695	0.544	0.437	0.356	0.233	0.165	0.125	0.101
	n_3	0.785	0.656	0.564	0.493	0.436	0.389	0.348	0.270	0.212	0.167	0.131
第二层支点	β	1.015	0.875	0.783	0.719	0.673	0.638	0.611	0.566	0.539	0.523	0.513
	ε_t	1.343	1.073	0.897	0.775	0.686	0.619	0.567	0.480	0.430	0.399	0.379
	α_t	-0.476	-0.347	-0.262	-0.204	-0.161	-0.129	-0.104	-0.062	-0.039	-0.024	-0.015
	n_1	1.287	0.950	0.729	0.573	0.460	0.374	0.305	0.190	0.121	0.077	0.048
	$-\varepsilon_u$	1.050	0.880	0.768	0.688	0.629	0.583	0.547	0.485	0.447	0.424	0.409
	n_2	0.423	0.243	0.131	0.057	0.006	-0.025	-0.049	-0.091	-0.117	-0.133	-0.144
	$-\alpha_u$	1.811	1.213	0.877	0.668	0.528	0.430	0.356	0.244	0.183	0.148	0.126
	n_3	0.864	0.707	0.598	0.517	0.454	0.403	0.360	0.279	0.220	0.174	0.138
第三层支点	β	0.796	0.691	0.624	0.578	0.546	0.523	0.506	0.481	0.471	0.468	0.468
	ε_t	1.180	0.921	0.753	0.637	0.553	0.490	0.441	0.363	0.319	0.294	0.279
	α_t	-0.636	-0.467	-0.356	-0.279	-0.223	-0.180	-0.147	-0.091	-0.058	-0.037	-0.023
	n_1	1.298	0.958	0.735	0.579	0.464	0.377	0.308	0.192	0.122	0.077	0.048
	$-\varepsilon_u$	0.952	0.793	0.686	0.610	0.552	0.508	0.471	0.406	0.364	0.336	0.316
	n_2	0.418	0.250	0.144	0.074	0.025	-0.007	-0.030	-0.067	-0.089	-0.103	-0.111
	$-\alpha_u$	1.670	1.101	0.784	0.588	0.457	0.366	0.298	0.193	0.137	0.103	0.083
	n_3	0.880	0.709	0.591	0.505	0.439	0.385	0.341	0.258	0.200	0.156	0.121
第四层支点	β	0.648	0.564	0.510	0.473	0.448	0.430	0.416	0.396	0.387	0.383	0.382
	ε_t	1.086	0.835	0.672	0.559	0.479	0.419	0.373	0.299	0.259	0.236	0.223
	α_t	-0.688	-0.501	-0.379	-0.295	-0.233	-0.187	-0.151	-0.091	-0.056	-0.035	-0.022
	n_1	1.305	0.963	0.739	0.582	0.466	0.379	0.310	0.193	0.123	0.078	0.049
	$-\varepsilon_u$	0.888	0.735	0.631	0.557	0.500	0.456	0.420	0.354	0.310	0.279	0.258
	n_2	0.419	0.257	0.155	0.087	0.040	0.007	-0.015	-0.050	-0.070	-0.081	-0.088
	$-\alpha_u$	1.569	1.022	0.718	0.531	0.408	0.321	0.258	0.160	0.108	0.078	0.060
	n_3	0.886	0.707	0.584	0.495	0.426	0.371	0.326	0.243	0.185	0.142	0.110
第五层支点	β	0.546	0.475	0.430	0.399	0.378	0.362	0.351	0.334	0.326	0.323	0.322
	ε_t	1.024	0.778	0.618	0.509	0.430	0.372	0.328	0.258	0.220	0.199	0.186
	α_t	-0.708	-0.513	-0.386	-0.297	-0.234	-0.186	-0.149	-0.088	-0.053	-0.033	-0.020
	n_1	1.310	0.967	0.742	0.584	0.468	0.380	0.311	0.194	0.123	0.078	0.049
	$-\varepsilon_u$	0.844	0.695	0.594	0.521	0.465	0.421	0.384	0.318	0.273	0.242	0.220
	n_2	0.419	0.262	0.163	0.097	0.051	0.019	-0.004	-0.038	-0.056	-0.067	-0.073
	$-\alpha_u$	1.498	0.967	0.673	0.492	0.374	0.291	0.231	0.139	0.090	0.063	0.046
	n_3	0.890	0.705	0.579	0.487	0.417	0.361	0.315	0.232	0.174	0.133	0.101

$\omega=0.90$

表 5-9(49)

状	δ	0.281	0.261	0.242	0.223	0.205	0.188	0.174	0.140	0.109	0.083	0.063
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_A	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬	n_1	0.530	0.388	0.296	0.233	0.188	0.154	0.122	0.075	0.049	0.031	0.020
	n_2	2.043	1.684	1.436	1.252	1.109	0.994	0.887	0.696	0.557	0.447	0.355
	α_u	9.58	8.19	7.33	6.75	6.34	6.04	5.71	5.24	4.97	4.74	4.55
臂	n_3	2.973	2.551	2.250	2.014	1.831	1.675	1.536	1.266	1.058	0.885	0.741
	β	1.678	1.497	1.388	1.320	1.279	1.255	1.235	1.228	1.252	1.285	1.321
第	ε_t	1.302	1.108	0.986	0.906	0.852	0.815	0.784	0.748	0.741	0.745	0.756
一	α_t	0.220	0.229	0.239	0.248	0.258	0.268	0.276	0.298	0.321	0.342	0.361
	n_1	0.931	0.686	0.526	0.414	0.332	0.270	0.219	0.136	0.087	0.055	0.035
层	$-\varepsilon_u$	1.022	0.865	0.759	0.683	0.625	0.580	0.542	0.474	0.430	0.398	0.376
	n_2	0.383	0.181	0.065	-0.003	-0.032	-0.054	-0.072	-0.099	-0.112	-0.120	-0.123
支	$-\alpha_u$	1.172	0.842	0.630	0.488	0.391	0.322	0.268	0.185	0.139	0.111	0.092
	n_3	0.549	0.505	0.460	0.419	0.382	0.349	0.318	0.254	0.204	0.163	0.129
点	β	0.929	0.805	0.725	0.670	0.630	0.600	0.577	0.539	0.519	0.507	0.500
第	ε_t	1.117	0.902	0.763	0.666	0.596	0.545	0.503	0.436	0.398	0.376	0.363
	α_t	-0.337	-0.245	-0.186	-0.145	-0.115	-0.092	-0.074	-0.045	-0.028	-0.017	-0.011
二	n_1	1.065	0.785	0.602	0.474	0.380	0.309	0.252	0.157	0.100	0.063	0.040
	$-\varepsilon_u$	0.953	0.804	0.706	0.636	0.585	0.545	0.513	0.459	0.428	0.409	0.397
层	n_2	0.386	0.205	0.095	0.024	-0.017	-0.043	-0.065	-0.101	-0.123	-0.137	-0.146
	$-\alpha_u$	1.311	0.904	0.667	0.516	0.413	0.341	0.286	0.203	0.158	0.132	0.116
支	n_3	0.678	0.580	0.507	0.450	0.403	0.364	0.329	0.262	0.210	0.169	0.135
	β	0.745	0.649	0.589	0.548	0.520	0.500	0.484	0.464	0.457	0.456	0.458
点	ε_t	1.029	0.810	0.667	0.569	0.498	0.446	0.404	0.339	0.303	0.282	0.271
第	α_t	-0.492	-0.362	-0.277	-0.217	-0.174	-0.141	-0.115	-0.072	-0.046	-0.029	-0.019
	n_1	1.132	0.835	0.640	0.504	0.404	0.328	0.268	0.167	0.106	0.067	0.042
三	$-\varepsilon_u$	0.885	0.740	0.643	0.573	0.521	0.480	0.446	0.388	0.350	0.325	0.308
	n_2	0.400	0.231	0.125	0.057	0.010	-0.018	-0.038	-0.072	-0.092	-0.104	-0.111
层	$-\alpha_u$	1.305	0.875	0.631	0.478	0.375	0.303	0.248	0.165	0.120	0.093	0.076
	n_3	0.731	0.604	0.515	0.447	0.394	0.351	0.313	0.242	0.191	0.150	0.118
支	β	0.615	0.536	0.487	0.453	0.430	0.413	0.401	0.383	0.377	0.375	0.375
	ε_t	0.973	0.752	0.609	0.511	0.440	0.388	0.348	0.283	0.249	0.229	0.218
点	α_t	-0.561	-0.409	-0.311	-0.242	-0.192	-0.154	-0.125	-0.076	-0.047	-0.030	-0.018
第	n_1	1.172	0.865	0.663	0.522	0.419	0.340	0.278	0.173	0.110	0.070	0.044
	$-\varepsilon_u$	0.838	0.695	0.599	0.529	0.477	0.435	0.401	0.340	0.299	0.272	0.252
四	n_2	0.408	0.245	0.144	0.077	0.031	-0.001	-0.021	-0.053	-0.072	-0.082	-0.089
	$-\alpha_u$	1.287	0.847	0.600	0.447	0.345	0.274	0.221	0.140	0.096	0.071	0.055
层	n_3	0.763	0.619	0.519	0.445	0.388	0.341	0.302	0.229	0.177	0.138	0.107
	β	0.522	0.456	0.413	0.385	0.365	0.351	0.340	0.325	0.319	0.317	0.317
支	ε_t	0.934	0.713	0.570	0.471	0.401	0.349	0.309	0.246	0.212	0.194	0.183
	α_t	-0.599	-0.434	-0.327	-0.253	-0.199	-0.159	-0.127	-0.076	-0.046	-0.028	-0.017
点	n_1	1.198	0.884	0.679	0.534	0.428	0.348	0.284	0.177	0.112	0.071	0.045
第	$-\varepsilon_u$	0.805	0.664	0.568	0.499	0.446	0.405	0.370	0.307	0.266	0.237	0.216
	n_2	0.413	0.255	0.155	0.090	0.044	0.013	-0.009	-0.040	-0.058	-0.068	-0.074
五	$-\alpha_u$	1.270	0.825	0.578	0.425	0.324	0.254	0.202	0.123	0.082	0.058	0.043
	n_3	0.786	0.630	0.523	0.444	0.384	0.335	0.294	0.219	0.167	0.129	0.099
层												
支												
点												

ω=0.90

表 5-9(50)

状	δ	0.374	0.348	0.322	0.298	0.274	0.251	0.233	0.186	0.145	0.111	0.084
	φ	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
态	K_a	0.755	0.703	0.655	0.610	0.567	0.527	0.490	0.405	0.333	0.271	0.217
悬臂	n_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n_2	1.068	0.959	0.875	0.807	0.751	0.701	0.646	0.543	0.460	0.385	0.316
	α_u	3.29	3.30	3.34	3.40	3.48	3.56	3.55	3.68	3.82	3.90	3.93
	n_3	2.048	1.854	1.705	1.582	1.481	1.391	1.296	1.113	0.960	0.825	0.701
第一层支点	β	1.169	1.075	1.026	1.004	0.998	1.003	1.004	1.043	1.103	1.163	1.223
	ε_t	0.900	0.790	0.724	0.685	0.662	0.649	0.636	0.636	0.654	0.677	0.702
	α_t	0.139	0.151	0.164	0.177	0.190	0.203	0.213	0.243	0.274	0.302	0.328
	n_1	0.598	0.439	0.336	0.264	0.212	0.173	0.139	0.086	0.056	0.036	0.022
	$-\varepsilon_u$	0.819	0.709	0.635	0.581	0.541	0.510	0.481	0.433	0.403	0.381	0.365
	n_2	0.170	0.005	-0.038	-0.065	-0.084	-0.097	-0.109	-0.124	-0.130	-0.132	-0.132
	$-\alpha_u$	0.679	0.507	0.388	0.312	0.260	0.222	0.190	0.142	0.115	0.097	0.085
	n_3	0.427	0.434	0.414	0.387	0.358	0.331	0.304	0.247	0.200	0.161	0.128
第二层支点	β	0.846	0.739	0.670	0.623	0.589	0.564	0.544	0.514	0.499	0.491	0.488
	ε_t	0.904	0.741	0.635	0.563	0.511	0.473	0.442	0.393	0.368	0.354	0.346
	α_t	-0.206	-0.150	-0.114	-0.089	-0.071	-0.057	-0.045	-0.027	-0.017	-0.011	-0.007
	n_1	0.842	0.621	0.476	0.374	0.300	0.245	0.199	0.123	0.079	0.050	0.031
	$-\varepsilon_u$	0.833	0.709	0.628	0.570	0.528	0.497	0.470	0.427	0.404	0.391	0.384
	n_2	0.336	0.153	0.047	-0.011	-0.040	-0.062	-0.080	-0.111	-0.129	-0.141	-0.149
	$-\alpha_u$	0.876	0.633	0.480	0.378	0.308	0.260	0.221	0.165	0.135	0.117	0.106
	n_3	0.506	0.467	0.428	0.392	0.360	0.331	0.303	0.247	0.202	0.164	0.132
第三层支点	β	0.694	0.608	0.553	0.517	0.493	0.476	0.463	0.446	0.442	0.444	0.448
	ε_t	0.885	0.703	0.585	0.504	0.446	0.403	0.369	0.316	0.287	0.271	0.263
	α_t	-0.357	-0.263	-0.202	-0.159	-0.128	-0.105	-0.085	-0.053	-0.035	-0.022	-0.014
	n_1	0.965	0.711	0.545	0.429	0.344	0.280	0.228	0.142	0.090	0.057	0.036
	$-\varepsilon_u$	0.806	0.677	0.590	0.528	0.482	0.446	0.417	0.365	0.333	0.312	0.298
	n_2	0.381	0.208	0.103	0.036	-0.006	-0.029	-0.047	-0.077	-0.095	-0.106	-0.112
	$-\alpha_u$	0.971	0.668	0.490	0.376	0.299	0.244	0.202	0.138	0.103	0.083	0.070
	n_3	0.584	0.503	0.442	0.393	0.353	0.319	0.288	0.228	0.182	0.146	0.116
第四层支点	β	0.581	0.509	0.463	0.433	0.412	0.397	0.386	0.371	0.366	0.366	0.368
	ε_t	0.865	0.673	0.549	0.464	0.403	0.358	0.323	0.268	0.238	0.222	0.213
	α_t	-0.442	-0.323	-0.246	-0.192	-0.153	-0.124	-0.100	-0.061	-0.039	-0.024	-0.015
	n_1	1.038	0.766	0.587	0.462	0.371	0.301	0.246	0.153	0.097	0.062	0.039
	$-\varepsilon_u$	0.781	0.650	0.561	0.497	0.449	0.411	0.380	0.324	0.288	0.263	0.246
	n_2	0.398	0.233	0.131	0.064	0.020	-0.009	-0.027	-0.057	-0.074	-0.083	-0.090
	$-\alpha_u$	1.023	0.684	0.490	0.369	0.287	0.230	0.186	0.120	0.085	0.064	0.051
	n_3	0.640	0.533	0.456	0.398	0.351	0.313	0.279	0.216	0.169	0.133	0.105
第五层支点	β	0.499	0.436	0.397	0.370	0.352	0.339	0.329	0.316	0.311	0.311	0.311
	ε_t	0.847	0.650	0.522	0.435	0.372	0.326	0.291	0.235	0.205	0.188	0.179
	α_t	-0.495	-0.360	-0.271	-0.210	-0.166	-0.133	-0.106	-0.064	-0.039	-0.024	-0.015
	n_1	1.087	0.802	0.615	0.484	0.388	0.316	0.258	0.160	0.102	0.065	0.041
	$-\varepsilon_u$	0.761	0.629	0.539	0.474	0.425	0.386	0.354	0.296	0.257	0.230	0.212
	n_2	0.406	0.247	0.147	0.082	0.037	0.006	-0.013	-0.043	-0.059	-0.069	-0.074
	$-\alpha_u$	1.054	0.692	0.488	0.362	0.278	0.219	0.175	0.108	0.073	0.053	0.040
	ε_3	0.681	0.556	0.468	0.403	0.351	0.310	0.274	0.208	0.160	0.125	0.097

6. 双排桩支护结构

双排桩支护结构是一种新型的支护结构型式，它由两排平行的钢筋混凝土桩以及在桩顶的帽梁连接而成。这种结构虽然为悬臂式结构形式，但其结构组成却有别于单墙的悬臂式结构，对于前排桩在受力上类似于单支点混合结构，但其计算土压力却又有别于单支点混合结构。工程实践表明，在一般情况下双排桩支 护结构较其他支护结构相比，具有施工方便，不用设置横向支点、挡土结构受力条件较好等优点。

从结构上分析，双排支护桩如同嵌入土中的门式框架，与单墙悬臂结构、多支点混合支护结构，重力式挡土结构等形式受力特征有明显差异。目前在实际工程中已大量应用了双排桩支护结构，但其实际受力机理还需进一步探讨、分析。其中之一是如何选取双排支护桩结构的设计计算问题。

6.1 计算模型

图 6-1 所示为目前双排桩计算分析中大多数学者意见较为一致的分析计算模型，该模型以结构受力内力分析所采用的门式框架分析基本方法为基础，考虑了土与结构的共同作用。

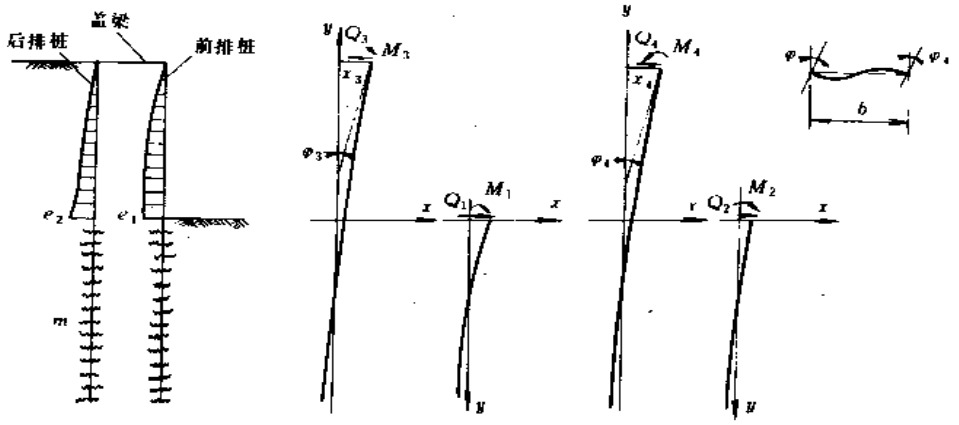


图 6-1 双排支护桩计算模型

(a)双排桩模型；(b)后排桩分解；(c)前排桩分解

图 6-1 将双排支护结构分割成前、后排桩及盖梁三部分，前排桩在开挖面以上作用荷载 q_1，盖梁作用力及开挖面以下土体弹性支撑下工作。后排桩则在后排土压力 q_2、盖梁作用力及开挖面下的弹簧支点下工作。

从图 6-1a 计算简图所示，一旦确定了 q_1、q_2 及地基土刚度系数 m 值后，按弹性地基梁及结构力学方法即可方便地求出结构受力。但从实用角度 出发，应用弹性地基梁解答在此显得较为复杂，一般工程则将图 6-1 假定为开挖面某一深度为弯矩最大值作用点为固端梁的简化计算模型(图 6-2)。

根据以上分析可知，在计算双排护坡结构时，首先必须确定的是土压力分布情况及嵌固端

位置。

6.2 侧向土压力

1. 主动土压力

双排桩的侧向土压力计算至今国内外尚未见详尽的资料报道，假定后排桩连续分布，根据经典的朗肯土压力理论，我们把所研究的桩间土作为独立的刚塑性体进行分析，前后排桩间的土体及受力状态如图 6-3 所示。

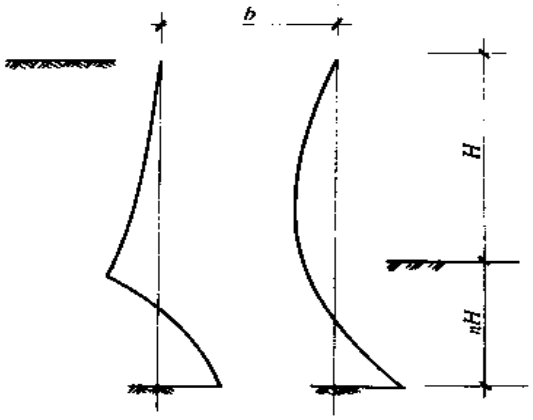


图 6-2

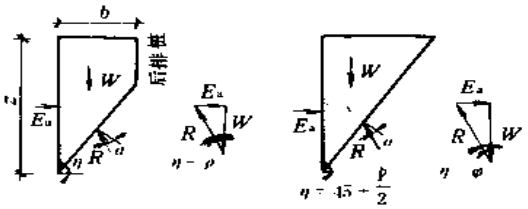


图 6-3 双排桩内土体受力分析

对有后排桩影响的土体和没有后排桩影响的土体进行分析比较可知，两者相同之处有：(1)土体均为刚塑体，并不考虑土体与墙体及桩间的摩阻力；(2)主动土压力的计算方法相同。均按极限平衡原理，两者的不同之处在于：(1)剪切破坏面不同，由于后排桩的影响将使剪切角 η 增大；(2)桩间距 b 对 η 值的影响而导致主动土压力的变化影响是显著的。

(1)基本方程

根据极限平衡原理，每延米土体的总重为(图 6-3)

$$W=\gamma b\left(z-\frac{b}{2}\tan\eta\right) \tag{6.2.1}$$

土体主动土压力合力 E_a 为：

$$E_a=\gamma_b\left(z-\frac{b}{2}\tan\eta\right)\cdot\tan(\eta-\varphi) \tag{6.2.2}$$

沿墙体的主动土压力分布 e_a，当墙高为 z 时，主动土压力分布强度为：

$$e_a=\mathrm{d}E_a/\mathrm{d}z \tag{6.2.3}$$

式中 γ——土的重度，单位为 $\mathrm{kN/m^3}$；

b——前排桩与后排桩的距离，单位为 m；

z——计算点深度，单位为 m；

η——滑动破坏面与水平面间夹角，单位为度(η 值见表 6-1)；

φ——土的内摩擦角，单位为度。

(2)破坏面

极限平衡理论解土压力问题的关键是确定破坏面，按极限平衡原理导出的破坏面是从墙足开始的，沿 $\eta=45°+\frac{\varphi}{2}$ 角开展的剪切面，土压力强度沿剪切面线性分布，其合力为 R。当墙后填土处于主动朗肯状态时，桩间土表面以下深度 z 处任一点的竖向应力是最大主应力，等于 γz，而水平应力是最小主应力，也就是水平主动土压力强度 $e_{a朗}$：

$$e_{a朗}=\gamma z\tan^2\left(45°-\frac{\varphi}{2}\right) \tag{6.2.4}$$

当考虑后排桩共同作用时，土体的边界条件已改变，亦即剪切破坏面发生了变化，η 角改

变，η 角变化从式(6.2.3)可知其直接影响着主动土压力 E_a，为了求得 η 角的解，根据极限平衡原理，将式(6.2.2)对 η 求极值：

$$\frac{dE_a}{d\eta}=0$$

即：

$$\frac{dE_a}{d\eta}=\gamma b\left(z-\frac{b}{2}\tan\eta\right)\frac{1}{\cos^2(\eta-\varphi)}-\gamma b\tan(\eta-\varphi)\frac{b}{\cos^2\eta}=0 \tag{6.2.5}$$

经整理得：

$$\frac{z}{b}=\frac{1}{2}\left[\tan\eta+\tan(\eta-\varphi)\frac{\cos^2(\eta-\varphi)}{\cos^2\eta}\right] \tag{6.2.6}$$

从式(6.2.6)给出的方程可见，剪切面与水平的夹角 η 是很难 求得的。为求 η 的解，可以应用数值解的方法，对给定的不同 z/b 通过近似解求得 η，定义式(6.2.6)左边的填土深度与其宽度之比为深宽比 ξ：

$$\xi=\frac{z}{b} \tag{6.2.7a}$$

从图 6-3 的几何关系可知，当 $\xi\leqslant\tan(45°+\frac{\varphi}{2})$时填土不受护坡桩影响，因此，前排桩主动土压力计算完全与式(6.2.4)给出的经典土压力计算公式一致；当深度比 $\xi>\tan(45°+\frac{\varphi}{2})$时，后排桩影响起作用。可见 $\xi=\tan(45°+\frac{\varphi}{2})$为考虑或不考虑后排桩影响的分界线，称此深度比为临界深宽比 ξ_c：

$$\xi_c=\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \tag{6.2.7b}$$

对于不同填土性质 $\varphi=5°\sim50°$，从临界深宽比 ξ_c 开始分别以不同的 ξ 值代入式(6.2.6)，应用近似解的方法，求得 $\xi\sim\varphi\sim\eta$ 关系如表 6-1 所示。

(2)侧向土压力分布强度

由于土体形状的改变，滑动体的破坏面夹角 η 不再是一般朗肯土压力理论所给出的定值 $\eta=45°+\frac{\varphi}{2}$，而是个变量，其变化规律如表 6-1 所示，一般表达式为：

$$\eta=f(\xi,\varphi) \tag{6.2.8}$$

η 随深度变化使得主动土压力强度 e_a 不再随深度线性分布了，从式(6.2.7a)微分可得：

$$dz=b\cdot d\xi \tag{6.2.9}$$

代入式(6.2.3)与式(6.2.2)可得：

$$e_a=\frac{dE_a}{dz}=\frac{1}{b}\frac{dE_a}{d\xi}$$

即

$$e_a=\gamma b\left[\left(1-\frac{1}{2\cos^2\eta}\frac{d\eta}{d\xi}\right)\tan(\eta-\varphi)+\left(\xi-\frac{1}{2}\tan\eta\right)\frac{1}{\cos^2(\eta-\varphi)}\frac{d\eta}{d\xi}\right] \tag{6.2.10}$$

由式(6.2.6)知，函数 $\eta=f(\xi,\varphi)$的解析式很难获得，那么式(6.2.10)中的 $d\eta/d\xi$ 也就无法求得，因此，按上述一般方法是不容易得到土压力分布强度 e_a 值的。故应用导数，将式(6.2.2)写成增量形式：

滑动破坏面与水平面的夹角 η　　表 6-1

ξ \ φ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
1.0913	47.55									
1.1918	49.85	50.05								
1.3032	52.15	52.15	52.55							
1.4281	54.45	54.30	54.50	55.00						
1.5697	56.75	56.45	56.50	56.90	57.55					
1.7321	59.05	58.60	58.55	58.80	59.30	60.00				
1.9210	61.40	60.80	60.60	60.70	61.10	61.70	62.55			
2.1445	63.75	63.00	62.65	62.65	62.90	63.40	64.15	65.05		
2.4142	66.10	65.25	64.75	64.65	64.80	65.20	65.80	66.55	67.50	
2.7475	68.45	66.90	66.90	66.70	66.70	67.00	67.50	68.15	69.00	70.00
3.0000	69.90	68.90	68.30	68.00	67.95	68.15	68.60	69.20	70.00	70.90
3.5000	72.35	71.20	70.50	70.10	70.00	70.10	70.40	70.90	71.60	72.40
4.0000	74.20	73.00	72.25	71.80	71.60	71.65	71.90	72.30	72.90	73.65
4.5000	75.70	74.45	73.65	73.15	72.90	72.90	73.10	73.45	73.95	74.65
5.0000	76.90	75.65	74.80	74.30	74.00	73.95	74.10	74.40	74.85	75.45
6.0000	78.70	77.50	76.65	76.10	75.75	75.65	75.70	75.95	76.30	76.85
7.0000	80.05	78.85	78.00	77.40	77.05	76.90	76.95	77.10	77.45	77.90
8.0000	81.05	79.90	79.05	78.45	78.10	77.95	77.90	78.05	78.35	78.75
9.00000	81.85	80.70	79.90	79.30	76.95	78.75	78.70	78.85	79.05	79.45
10.0000	82.55	81.40	80.06	80.00	79.65	79.45	79.40	79.45	79.70	80.00
12.0000	83.50	82.45	81.65	81.10	80.75	80.55	80.45	80.50	80.65	81.70
14.0000	84.25	83.20	82.45	81.95	81.55	81.35	81.25	81.30	81.45	82.25
16.0000	84.80	83.80	83.10	82.60	82.20	82.00	81.90	81.90	82.05	82.25
18.0000	85.25	84.30	83.60	83.10	82.75	82.55	82.45	82.45	82.55	82.75
20.0000	85.60	84.65	84.00	83.55	83.95	82.95	82.85	82.85	82.95	83.15

$$e_{a|z=\frac{z_1+z_2}{2}}=\frac{\Delta E_a}{\Delta Z}=\frac{E_{a|z=z_2}-E_{a|z=z_1}}{Z_2-Z_1} \qquad (6.2\cdot 11a)$$

或

$$e_{a|\xi=\frac{\xi_1+\xi_2}{2}}=\frac{1}{b}\frac{\Delta E_a}{\Delta \xi}=\frac{E_{a|\xi=\xi_1}-E_{a|\xi=\xi_1}}{b(\xi_2-\xi_1)} \qquad (6.2.11b)$$

将不同的 ξ_2、ξ_1 分别代入式(6.2.6)求出 η_2、η_1 后即可从式(6.2.2)求 $E_{a|\xi=\xi_2}$ 及 $E_{a|\xi=\xi_1}$，则主动土压力强度 e_a 可从式(6.2.11b)求得。

上述土压力分布强度计算方法在实用中极不方便，它仅为解的可行性提供了依据，为此引用没有后排桩影响的主动土压力计算公式，以便于设计人员套用一般土压力计算的基本概念与公式，引入后排桩影响系数。土压力强度后排桩影响系数为 i_e，定义为：

$$i_e=e_a/e_{a\text{朗}} \qquad (6.2.12)$$

将式(6.2.11b)及式(6.2.4)代入式(6.2.12)并整理得：

$$i_{c(\xi=\frac{\xi_1+\xi_2}{2})}=[(\xi_2-\frac{1}{2}\tan\eta_2)\tan(\eta_2-\varphi)$$
$$-(\xi_1-\frac{1}{2}\tan\eta_1)\tan(\eta_1-\varphi)]$$
$$\div[0.5\times(\xi_1+\xi_2)\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})] \qquad (6.2.13)$$

对于不同的 ξ、φ 值应用式(6.2.13)计算得 i_e 如表(6-2)所示。

从表 6-2 所列数据可知土压力强度后排桩影响系数 i_e 与深宽比 ξ 近似于双曲线形状，其双曲线函数表达式设为：

$$i_e=1-\frac{\xi-\xi_c}{a+c(\xi-\xi_c)} \qquad (6.2.14)$$

对于不同 φ 值，将表 6-2 所列 $i_e\sim\xi$ 对应数据代入上式，经过数理统计结果给出了不同 φ 值时的回归常数 a,c 及线性相关系数 r(表 6-2)，从表 6-3)所列相关系数 r 可见方程(6.2.14)很好地表达了 i_e 与 ξ 之间的关系。

综合上述分析结果，可得前后排桩间土主动土压力计算公式为：

$$e_a=\begin{cases}k\xi_c & \xi\leqslant\xi_c\\ k\cdot i_e\cdot\xi & \xi>\xi_c\end{cases} \qquad (6.2.15a)$$

式中
$$k=\gamma b\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2}) \qquad (6.2.15b)$$
$$i_e=1-\frac{\xi-\xi_c}{a+c(\xi-\xi_c)} \qquad (6.2.15c)$$
$$\xi_c=\tan(45°+\frac{\varphi}{2}) \qquad (6.2.15d)$$

a、c 值根据 φ 值由表 6-3 查得，当实际 φ 值不在表 6-3 所列时可用直线内插法求得。

(3)主动土压力及其作用点

前已述及，主动土压力 E_a 可由式(6.2.2)求得。但在实际应用中式(6.2.2)必须对不同的深宽比 ξ 求解式(6.2.2)得 η 后才能获得，这样计算十分不便。为了直接计算 E_a，我们应用主动土压力强度 e_a 的表达式(6.2.15)根据深宽比 ξ 通过求积分直接求得主动土压力 E_a：

$$E_a=\int_0^z e_a dz=\int_0^{z_c}e_a dz+\int_{z_c}^{z}e_a dz \qquad (6.2.16)$$

式中
$$z_c=b\xi_c=b\tan(45°+\frac{\varphi}{2})$$

将式(6.2.9)及式(6.2.15)代入上式并换积分上下限得：

$$E_a=b[\int_0^{\xi_c}k\cdot\xi\cdot d\xi+\int_{\xi_c}^{\xi}k\cdot i_e\cdot\xi\cdot d\xi]$$
$$=A_1+A_2 \qquad (6.2.17)$$

积分得：
$$A_1=b\int_0^{\xi_c}k\cdot\xi\cdot d\xi=\frac{b}{2}\cdot k\xi_c^2 \qquad (6.2.18)$$

令
$$\alpha_c=(a-c\cdot\xi_c)/c \qquad (6.2.19)$$

则
$$A_2=b\int_{\xi_c}^{\xi}\xi k[1-\frac{\xi-\xi_c}{c(\alpha_c+\xi)}]d\xi$$
$$=\frac{1}{2}bk\xi^2\frac{1}{c\xi^2}\{c(\xi^2-\xi_c^2)-[\xi^2$$
$$-\xi_c^2-2(\xi_c+\alpha_c)(\xi-\xi_c$$
$$-\alpha_c\ln\frac{\xi+\alpha_c}{\xi_c+\alpha_c})]\} \qquad (6.2.20)$$

土压力强度后排桩影响系数 i_e　　表 6-2

ξ \ φ / i_e	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
1.0913	1.0000									
1.1415	0.9962									
1.2475	0.9879	0.9929								
1.3657	0.9784	0.9776	0.9899							
1.4989	0.9674	0.9601	0.9684	0.9877						
1.6509	0.9547	0.9402	0.0.9431	0.9598	0.9844					
1.8265	0.9401	0.9174	0.9161	0.9287	0.9513	0.9816				
2.0327	0.9231	0.8915	0.8846	0.8935	0.9137	0.9426	0.9786			
2.2794	0.9032	0.8618	0.8490	0.8538	0.8711	0.8981	0.9332	0.9752		
2.5808	0.8797	0.8277	0.8086	0.8091	0.8232	0.8477	0.8811	0.9226	0.9712	
2.9987	0.8487	0.7841	0.7580	0.7536	0.7638	0.7851	0.8160	0.8557	0.9038	0.9602
3.5000	0.8144	0.7377	0.7051	0.6962	0.7027	0.7208	0.7487	0.7859	0.8322	0.8881
4.0000	0.7828	0.6965	0.6591	0.6470	0.6508	0.6660	0.6913	0.7259	0.7699	0.8242
4.5000	0.7536	0.6597	0.6189	0.6043	0.6057	0.6189	0.6419	0.6741	0.7158	0.7679
5.0000	0.7265	0.6268	0.5834	0.5669	0.5667	0.5780	0.5990	0.6291	0.6685	0.7183
5.8750	0.6832	0.5762	0.5301	0.5115	0.5091	0.5180	0.5361	0.5629	0.5987	0.6446
7.0000	0.6357	0.5231	0.4753	0.4553	0.4511	0.4578	0.4731	0.4965	0.5284	0.5699
8.0000	0.5988	0.4837	0.4355	0.4150	0.4098	0.4150	0.4284	0.4495	0.4786	0.5167
9.0000	0.5662	0.4501	0.4021	0.3814	0.3757	0.3798	0.3971	0.4108	0.4374	0.4726
10.0000	0.5371	0.4209	0.3735	0.3531	0.3469	0.3502	0.3609	0.3784	0.4029	0.4856
11.7500	0.4928	0.3783	0.3325	0.3125	0.3060	0.3083	0.3173	0.3325	0.3541	0.3831
14.0000	0.4466	0.3355	0.2919	0.2729	0.2663	0.2676	0.2751	0.2882	0.3069	0.3323
16.0000	0.4125	0.3050	0.2636	0.2454	0.2389	0.2397	0.2462	0.2578	0.2746	0.2974
18.0000	0.3834	0.2798	0.2404	0.2231	0.2167	0.2172	0.2230	0.2333	0.2485	0.2692
20.0000	0.3586	0.2586	0.2210	0.2046	0.1984	0.1987	0.2038	0.2132	0.2270	0.2461
22.0000	0.3367	0.2405	0.2047	0.1890	0.1830	0.1831	0.1877	0.1963	0.2091	0.2266
24.0000	0.3174	0.2248	0.1906	0.1757	0.1699	0.1689	0.1740	0.1820	0.1938	0.2101
26.0000	0.2004	0.2111	0.1785	0.1641	0.1586	0.1584	0.1622	0.1696	0.1806	0.1958
28.0000	0.2850	0.1991	0.1678	0.1541	0.1487	0.1485	0.1520	0.1588	0.1691	0.1835
30.0000	0.2715	0.1881	0.1583	0.1452	0.1400	0.1397	0.430	0.1494	0.1591	0.1726

i_e 公式中的回归系数　　表 6-3

φ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
a	11.2823	6.828	5.467	4.899	4.669	4.631	4.736	4.951	5.291	5.780
c	0.9569	0.9831	0.9896	0.9921	0.9932	0.9936	0.9934	0.9933	0.9928	0.9916
γ	0.9962	0.9991	0.9996	0.9997	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999

故式(6.2.17)为：　　$E_a = A_1 + A_2$

$$= \frac{1}{2} bk\xi^2 \{1 - \frac{1}{c\xi^2}[\xi^2 - \xi_c^2 - 2(\xi_c$$

$$+a_c)(\xi-\xi_c-a_c\ln\frac{\xi+a_c}{\xi_c+a_c})]\}$$

如图 6-4 所示，设桩间主动土压力的作用点深度为 z，则依静为平衡条件可知：

$$E_a\bar{z}=\int_0^z e_a x\mathrm{d}x \tag{6.2.22}$$

或 $$E_a\bar{z}=b^2\int_0^{\xi_c}k\xi^2\mathrm{d}\xi+b^2\int_{\xi_c}^{\xi}ki_e\xi^2\mathrm{d}\xi$$

$$=A_3+A_4 \tag{6.2.23}$$

式中(6.2.23)右边的两项积分为：

$$A_3=b_2\int_0^{\xi_c}k\xi^2\mathrm{d}\xi=\frac{1}{3}b^2k\xi_c^3 \tag{6.2.24}$$

$$A_4=b^2k\int_{\xi_c}^{\xi}=\{[1-\frac{\xi-\xi_c}{a+c(\xi-\xi_c)}]\xi^2\mathrm{d}\xi$$

$$=\frac{1}{3}bk\xi^3\frac{1}{c\xi^3}(c(\xi^3-\xi_c^3)$$

$$-\{\xi^3-\xi_c^3-(\xi_c+\alpha_c)[1.5\xi^2$$

$$-\xi_c^2)-3\alpha_c(\xi-\xi_c)$$

$$+3\alpha_c^2\ln\frac{\xi+\alpha_c}{\xi_c+\alpha_c}]\}) \tag{6.2.25}$$

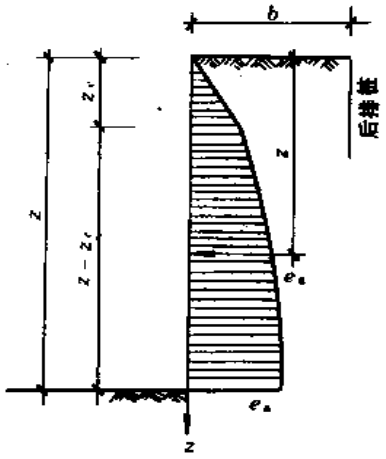


图 6-4　土压力分布图

将式(6.2.24)及式(6.2.25)代入式(6.2.23)整理得：

$$E_a\bar{z}=\frac{1}{3}b^2k\xi^3(1-\frac{1}{c\xi^3}\{\xi^2-\xi_c^2-(\xi+\alpha_c)[1.5(\xi^2-\xi_c^2)$$

$$-3\alpha_c(\xi-\xi_c)+3\alpha_c^2\ln\frac{\xi+\alpha_c}{\xi_c+\alpha_c}]\}) \tag{6.2.26}$$

(4)护坡桩影响系数

以上为了计算方便曾引入了主动土压力强度影响系数 i_e，通过对主动土压力强度的积分得到出了主动土压力表达式及重心作用点的解析式(6.2.2)及(6.2.26)。为使前排桩土压力计算完全套用无后排桩土压力计算的基本概念与公式，我们还可以定义主动土压力后排桩影响系数 i_E，重心作用点后排桩影响系数 i_z 及弯矩后排桩影响系数 i_M。

(1)主动土压力强度影响系数数 i_e

由式(6.2.12)及式(6.2.14)可得：

$$i_e=\begin{cases}1 & \xi\leqslant\xi_c\\ 1-\dfrac{\xi-\xi_c}{a+c(\xi-\xi_c)} & \xi>\xi_c\end{cases} \tag{6.2.27}$$

(2)主动土压力影响系数 i_E

将式(6.2.7a)及(6.2.15b)代入式(6.2.21)得：

$$E_a=\frac{1}{2}z^2\tan^2(45°-\frac{\varphi}{2})\{1-\frac{1}{c\xi^2}$$

$$\times[\xi^2-\xi_c^2-2(\xi_c+\alpha_c)(\xi-\xi_c-\alpha_c)$$

$$\times\ln\frac{\xi+\alpha_c}{\xi_c+\alpha_c})]\}$$

即　　$$E_a=E_{a前}\cdot i_E \tag{6.2.28}$$

从式(6.2.28)可得主动土压力影响系数 i_E：

$$i_E=\begin{cases}1 & \xi\leqslant\xi_c\\ 1-\dfrac{1}{c\xi^2}[\xi^2-\xi_c^2-2(\xi_c+\alpha_c) & \xi<\xi_c\\ \quad\times(\xi-\xi_c-\alpha_c\ln\dfrac{\xi+\alpha_c}{\xi_c+\alpha}) & \end{cases}\tag{6.2.29}$$

(3)重心作用点影响系数 i_z

土压力合力重心作用点后排桩影响系数的计算也是土压力计算的基本问题之一，将式(6.2.7*a*)、(6.2.1.5*b*)及式(6.2.28)代入式(6.2.28)整理得：

$$\begin{aligned}\bar{z}=&\frac{2}{3}z(1-\frac{1}{c\xi^3}\{\xi^2-\xi_c^2-(\xi_c+\alpha_c)\\&\times[1.5(\xi^2-\xi_c^2)-3\alpha_c(\xi-\xi_c)\\&+3\alpha_c^2\ln\frac{\xi+\alpha_c}{\xi_c+\alpha_c}]\})\end{aligned}$$

或
$$z=z_{a朗}\cdot i_z\tag{6.2.30}$$

则重心作用点影响系数 i_z：

$$i_z=\begin{cases}1 & \xi\leqslant\xi_c\\ 1-\dfrac{1}{c\xi^3}\{\xi^3-\xi_c^3-(\xi_c+\alpha_c)\\ \quad\times[1.5(\xi^2-\xi_c^2)-3\alpha_c(\xi+\xi_c)\\ \quad+3\alpha_c^2\ln\dfrac{\xi+\alpha_c}{\xi_c+\alpha_c}]\} & \xi>\xi_c\end{cases}\tag{6.2.31}$$

(4)弯矩影响系数 i_M

由图(6-3)知，沿前排深度上某一点 z 土压力对前排桩产生的弯矩 M_a 为：

$$M_a=E_a(z-\bar{z})\tag{6.2.32}$$

将式(6.2.28)及(6.2.30)代入上式得：

$$\begin{aligned}M_a&=E_{a朗}i_E\cdot(z-z_{A朗}i_z)\\&=E_{a朗}i_E\cdot z(1-\frac{2}{3}i_z)\\&=\frac{1}{3}E_{a朗}\cdot z\cdot i_M(3-2i_z)\end{aligned}$$

因为
$$M_{朗}=\frac{1}{3}E_{a朗}\cdot z$$

故
$$M_a=M_{朗}\cdot i_M\tag{6.2.33}$$

则弯矩影响系数为：

$$i_M=\begin{cases}1 & \xi\leqslant\xi_c\\ i_E(3-2i_z) & \xi>\xi_c\end{cases}\tag{6.2.34}$$

(5)双排桩土压力计算

实际工程中的双排桩结构，其后排桩往往布桩不连续，因此土压力计算与以上分析假定连续布桩有区别，考虑这个影响，如图 6-5 所示为双排桩的平面布置图，桩身直径为 d，桩间距为 a_x，显然后排桩布桩间距直接影响前后排桩的计算主动土压力。为近似考虑后排桩间距的影响，假定前、后排桩的作用土压力之和为朗肯主动土压力，即

$$e_{a朗}=e_{a前}+e_{a后}\tag{6.2.35}$$

并以 β_1、β_2 分别考虑非连续布桩的影响：

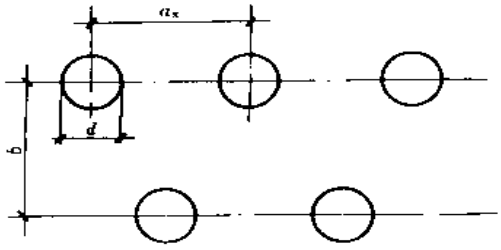


图 6-5　双排桩平面布置图

$$e_{a前}=\beta_1\cdot i_c\cdot e_{a朗} \tag{6.2.36}$$

$$e_{a后}=\beta_2\cdot(1-i_c)e_{a朗} \tag{6.2.37}$$

根据以上分析，当后排桩为连续分布时，亦即 $d/a_x=1$ 时，前排桩主压力分布与上述分析一致，即 $\beta_2=1$，当桩间距趋于无限大，即 $a_x\to\infty$ 时，土压力分布类似于无后排桩的作用，即 $\beta_2=0$，因此假定后排桩布桩间距影响系数 β_2 为：

$$\beta_2=\frac{d}{a_x} \tag{6.2.38}$$

将式(6.2.38)、(6.2.36)、(6.2.37)代入式(6.2.35)得：

$$\beta_1=\frac{1-\dfrac{d}{a_x}(1-i_c)}{i_c} \tag{6.2.39}$$

(1)前后排桩主动土压力分布

将上式代入式(6.2.36)及(6.2.37)得考虑前后排桩布桩间距时主动土压力分布：

$$e_{a前}=\begin{cases}e_{a朗} & \xi\leqslant\xi_c\\ \left[(1-\dfrac{d}{a_x})+\dfrac{d}{a_x}i_c\right]\cdot e_{a朗} & \xi>\xi_c\end{cases} \tag{6.2.40}$$

$$e_{a后}=\begin{cases}0 & \xi\leqslant\xi_c\\ (1-i_c)\dfrac{d}{a_x}\cdot e_{a朗} & \xi\leqslant\xi_c\end{cases} \tag{6.2.41}$$

其中 i_c 由式(6.2.27)计算。

(2)前后排桩主动土压力对式(6.2.40)、式(6.2.41)沿深度积分可得主动土压力 $E_{a前}$ 及 $E_{a后}$ 为：

$$E_{a前}=\begin{cases}E_{a朗} & \xi\leqslant\xi_c\\ i_{E前}\cdot E_{a朗} & \xi>\xi_c\end{cases} \tag{6.2.42}$$

$$E_{a后}=\begin{cases}0 & \xi\leqslant\xi_c\\ i_{E后}\cdot E_{a朗} & \xi>\xi_c\end{cases} \tag{6.2.43}$$

式中

$$i_{E前}=(1-\frac{d}{a_x})+\frac{d}{a_x}i_E \tag{6.2.44}$$

$$i_{E后}=(1-i_E)\cdot\frac{d}{a_x} \tag{6.2.45}$$

其中 i_E 由式(6.2.29)计算。

(3)前后排桩主动土压力合力作用点

同理对按式(6.2.40)、式(6.2.41)分布的土压力在桩身断面(深度 z 处)取矩可求出合力的重心位置。

$$\bar{z}_{前}=z_{朗}\cdot i_{z前}=\frac{2}{3}z\cdot i_{z前} \tag{6.2.46}$$

$$\bar{z}_{后}=z_{朗}\cdot i_{z后}=\frac{2}{3}z\cdot i_{z后} \tag{6.2.47}$$

$$i^2_{z前}=(1-\frac{d}{a_x})+\frac{d}{a_x}i_Ei_z \tag{6.2.48}$$

$$i_{E后}^2=\frac{d}{a_x}(1-i_E i_s) \tag{6.2.49}$$

其中 i_E 由式(6.2.31)计算。

(4)前后排桩任一断面弯矩

由图 6-4 可见任一深度由于前、后排桩主动土压力产生的弯矩 $M_{前}$ 及 $M_{后}$ 为：

$$M_{前}=i_{M前}\cdot M_{前} \tag{6.2.50}$$

$$M_{后}=i_{M后}\cdot M_{前} \tag{6.2.51}$$

式中

$$i_{M前}=i_{E前}(3-2i_{s前}) \tag{6.2.52}$$

$$i_{M后}=1-i_{M前} \tag{6.2.53}$$

以上双排桩的前后土压力计算分析方法可通过下一实例分析计算予以说明。

〔算例〕某工程基坑开挖采用双排钻孔灌注桩支护，土体内摩擦角 $\varphi=35°$，天然重度 $\varphi=19.0kN/m^3$，双排桩的平面布置如图 6-5 所示。试计算深度分别为 $z=4.8m$、$7.2m$、$9.6m$ 及 $12m$ 的侧墙土压力及弯矩。

$a_s=1.2m$，$d=0.8m$，$b=1.2m$

〔解〕：(1)确定临界深宽比 ξ_c

由式(6.2.5b)可得临界深度比 ξ_c 为：

$$\xi_c=\tan(45°+\frac{\varphi}{2})=\tan(45°+\frac{35°}{2})=1.192$$

(2)计算各影响系数

由 $\varphi=35°$查表 6-4 得曲线系数 a、c 分别为：

$a=4.7358$　　$c=0.9934$

则根据式(6.2.19)求得：

$$a_c=(a-c\xi_c)/c=(4.736-0.993\times1.192)/0.993=3.552$$

1)主动土压力强度系数 i_e

将上列 a、c 及 ξ_c 代入(6.2.27)得：

$$i_e=\begin{cases}1 & \xi\leqslant1.192\\ 1-(\xi-1.192)\div[4.7358+0.9934(\xi-1.192)] & \xi>1.192\end{cases}$$

分别以不同的 ξ 值代入上式计算得 i_e，如表 6-4 所示。

2)主动土压力影响系数 i_E

将 a、c、ξ_c 及 a_c 代入式(6.2.29)，则

$$i_E=\begin{cases}1 & \xi\leqslant\xi_c\\ 1-\dfrac{1}{0.9934\times\xi^2}[\xi^2-1.4209-9.4874[\xi-1.192-3.5517\ln\dfrac{\xi+3.552}{4.7437} & \xi>\xi_c\end{cases}$$

计算结果如表 6-5 所示。

3)主动压力作用点影响系数 i_z

由式(6.2.3)可得：

$$i_z=\begin{cases}1 & \xi\leqslant\xi_c\\ 1-\dfrac{1}{0.9934\times\xi^2}\{\xi^2-1.6937 \\ \quad -4.7437[1.5(\xi^2-1.4209) \\ \quad -10.6551(\xi-1.92) \\ \quad +27.189\dfrac{\xi+3.5517}{4.7437}]\} & \xi<\xi_c\end{cases}$$

计算结果见表 6-5。

主动土压力强度影响系数表 **表 6-4**

x	1.192	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12
ξ	0.993	1.250	1.667	2.083	2.500	3.333	4.167	5.000	6.667	8.333	10.000
i_c	1	0.988	0.909	0.841	0.783	0.688	0.613	0.553	0.462	0.396	0.047

各种影响的系数计算结果 **表 6-5**

z	4.3m	7.2m	9.6m	12.0m
ξ	4.000	6.000	8.00	10.000
i_z	0.627	0.495	0.408	0.347
i_E	0.774	0.650	0.561	0.494
i_z	0.947	0.926	0.911	0.699
i_M	0.856	0.746	0.661	0.594

(3)计算前后排桩的土压力影响系数

1)根据式(6.2.40)及式(6.2.41)计算 $i_{c前}$ 及 $i_{c后}$：

$$i_{c前}=(1-\frac{d}{a_x})+\frac{d}{a_x}\cdot i_c=(1-\frac{0.8}{1.2})+\frac{0.8}{1.2}\cdot i_c$$

将表 6-5 中 i_c 值代入上式计算结果如表 6-6 及表 6-7。

2)根据式(6·2.44)及式(6.2.45)计算不同深度 $i_{E前}$ 及 $i_{E后}$。

3)按式(6.2.48)及式(6.2.49)计算 $i_{E前}$、$i_{E后}$。

4)按式(6.2.52)及式(6.2.53)计算 $i_{M前}$ 及 $i_{M后}$。

上述不同深度计算结果如表 6-6 表 6-7。

前排桩影响系数表 **表 6-6**

z(m)	4.80	7.20	9.6	12.0
ξ	4.00	6.00	8.00	10.00
$i_{c前}$	0.751	0.663	0.605	0.565
$i_{E前}$	0.834	0.767	0.707	0.663
$i_{Z前}$	0.986	0.957	0.953	0.949
$i_{M前}$	0.857	0.833	0.773	0.731

后排桩影响系数表 **表 6-7**

z(m)	4.80	7.20	9.6	12.0
ξ	4.00	6.00	8.00	10.00
$i_{c后}$	0.249	0.337	0.395	0.435
$i_{E后}$	0.834	0.767	0.707	0.663
$i_{z后}$	1.072	1.139	1.113	1.100
$i_{M后}$	0.143	0.167	0.227	0.269

(6)被动土压力

桩间土的被动土压力分布是个比较复杂的问题，类似于主动土压力分配计算的方法，为简化计算起见，假定前后排桩的被动土压力分配系数根据主动土压力合力影响系数确定

$$e_{p前}=i_{E前}\cdot E_{P前} \tag{6.2.54}$$

$$e_{p后}=i_{E后}\cdot E_{P前} \tag{6.2.55}$$

综上所述，双排桩支护结构的前后排桩土压力分布如图 6-7 所示：

6.3 内力计算

根据上节所述图 6-6 可知，当有地面连梁时，双排桩支护结构内力可按结构力学的方法通过数值解积分求 得桩身内力，但这种解法工程上应用不便，为此，考虑采用简化分析方法，根据双排桩模型试验结果认为固定端可取在开挖面以下 1/5～1/3 开挖深度，我们即假定某一固定端位置，以此首先求得连梁弯矩及轴向力，然后再计算弯矩最大值所在断面，这样则简化了计算，但却又不乏计算精度。

计算连梁作用弯矩：

如图 6-7 所示，假定固定端位于基坑开挖面下，n_2H 深度。图 6-7 所示门式框架的桩长 $L=H(1+n_2)$，前排桩的刚度为 $(EI)_{前}$，后排桩的刚度为 $(EI)_{后}$，这种双排桩支护结构的连梁刚度一般均大于柱刚度，并由于桩间距 b 比柱子长度 L 小得多，因此可认为横梁的线刚度远大于柱子的线刚度，这样即假定横梁只有水平位移而不产生转角。

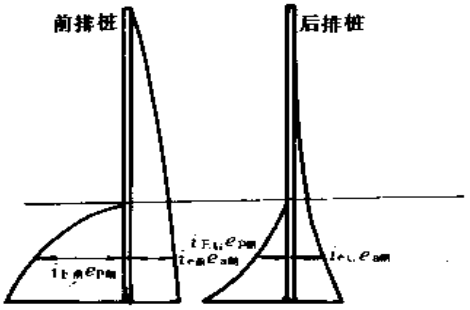


图 6-6

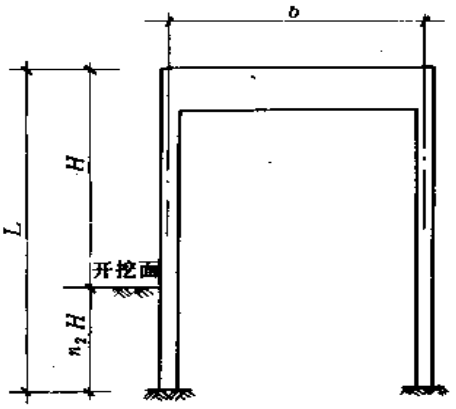


图 6-7

作用于前后排桩上的荷载可将图 6-6 所示的分布荷载简化为等效三角形荷载分布考虑。其值为：

$$q_{前}=zi_{E前}E_{a前}/L \tag{6.3.1}$$

$$q_{后}=zi_{E后}E_{a前}/L \tag{6.3.2}$$

将两柱取脱离体，前后柱受力如图 6-8 所示，根据前后柱水平位移协调条件有：

$$\frac{1}{(EI)_{后}}\left[\frac{q_{后}L^4}{30}-\frac{Q_{后}L^3}{3}-\frac{M_{后}L^2}{2}\right]=\frac{1}{(EI)_{前}}\left[\frac{q_{前}L^4}{30}-\frac{Q_{前}L^3}{3}-\frac{M_{前}L^2}{2}\right]$$

整理得

$$\frac{(EI)_{前}}{(EI)_{后}}(q_{后}L^2-10Q_{后}L-15M_{后})-(q_{前}L^2-10Q_{前}L-15M_{前})=0 \tag{6.3.3}$$

根据横梁上轴向力平条件得

$$Q_{后}=-Q_{前} \quad (6.3.4)$$

由于横梁线刚度无限大，则两柱上的转角为零，故

$$\frac{1}{(EI)_{后}}\left(\frac{q_{后}L^3}{24}-\frac{Q_{后}L^3}{2}-M_{后}L\right)=0 \quad (6.3.5)$$

$$\frac{1}{(EI)_{前}}\left(\frac{q_{前}L^3}{24}-\frac{Q_{前}L^2}{2}-M_{前}L\right)=0 \quad (6.3.6)$$

求解方程(6.3.5)及(6.3.6)得：

$$(q_{前}-q_{后})L^2-12(Q_{前}-Q_{后})L-24(M_{前}-M_{后})=0 \quad (6.3.7)$$

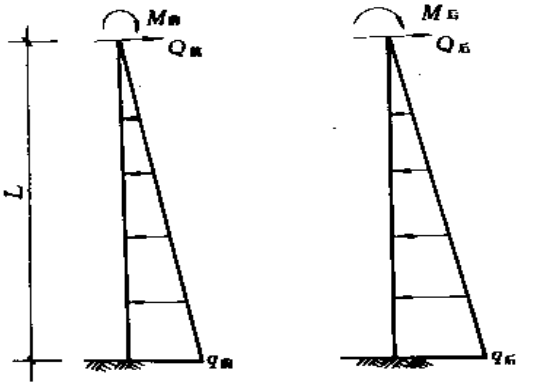


图 6-8

对于前后排桩刚度相同时，式(6.3.3)可写为：

$$(q_{前}-q_{后})L^2-10(Q_{前}-Q_{后})-15(M_{前}-M_{后})=0 \quad (6.3.8)$$

解式(6.3.7)及(6.3.8)：

$$Q_{前}-Q_{后}=\frac{(q_{前}-q_{后})(24-15)L^2}{(24\times10-12\times15)L}=\frac{3L}{20}(q_{前}-q_{后}) \quad (6.3.9)$$

$$M_{前}-M_{后}=\frac{(q_{前}-q_{后})(12-10)L^3}{60L}=\frac{L^2}{30}(q_{前}-q_{后}) \quad (6.3.10)$$

由式(6.3.4)及(6.3.9)得：

$$Q_{前}=\frac{3L}{40}(q_{前}-q_{后}) \quad (6.3.11)$$

将式(6.3.11)及式代入(6.3.6)得：

$$M_{前}=\frac{q_{前}L^2}{24}-\frac{3L^2}{80}(q_{前}-q_{后}) \quad (6.3.12)$$

$$M_{后}=\frac{q_{前}L^2}{24}-\frac{17L^2}{240}(q_{前}-q_{后}) \quad (6.3.13)$$

$$Q_{前}=\frac{3L}{20}(q_{前}-q_{后}) \quad (6.3.14)$$

$$Q_{后}=-\frac{3L}{20}(q_{前}-q_{后}) \quad (6.3.15)$$

最终内力计算可根据式(6.3.12)～(6.3.15)所示 M、Q 值与主动、被动土压力值的对应弯矩按悬臂梁方法计算双排支护结构内力，

对于成层土，以上分析主动及被动土压力强度影响系数 i_e 可以近似应用，其他则采用分段积分法计算。

7. 重力式挡墙结构

重力式挡墙顾名思义是依靠它的重量来取得稳定性。用于基坑支护的重力式挡墙主要由加固基坑周边土形成一定厚度的重力式墙。达到挡土的目的。

挡土墙是用来防止边坡坍塌的支挡构筑物，因此，必须充分保证它对滑动和倾复的稳定性以及墙本身的强度；此外，当然还应保证它的基层压力等于或小于地基土的容许承载力。

挡土墙的断面尺寸是由上述墙和地基的强度和稳定性的四个要求来控制的，而在计算作用在墙背上的土压力以及墙和地基的强度和稳定性时，又必须先要知道墙的断面尺寸。所以，挡土墙的断面尺寸不能直接求得，而要用试算法来确定。一般，可根据地区建筑经验并参考有关设计资料，初步拟定墙的断面尺寸，而后进行墙和地基的强度和稳定性验算，必要时对墙的断面尺寸作适当修改，以迄满足设计要求为止。

所以，挡土墙的计算项目包括有：滑动稳定性的验算、倾复稳定性的验算、地基土容许承载力的验算以及墙身材料应力的验算。一般情况下，倾覆稳定性较易满足，主要由基底压力（尤在墙高较大时）和滑动稳定性来控制设计。一般可不需作墙身应力的验算。

7.1 滑动稳定性验算

滑动稳定性是以抵抗滑动的力与引起滑动的力的比值 K_h 来表示（图 7-1），即

$$K_h=\frac{E_p-E_a+W\mu}{E_a} \qquad (7.1.1)$$

式中 K_h——抗滑稳定系数；

W——墙重，kN/m；

E_a——主动土压力，kN/m；

μ——基底摩擦系数，应由试验确定；当无试验资料时，可按表 7-1 选用。

挡土墙基底摩擦系数　　表 7-1

基底岩土类别		摩擦系数 μ
粘性土	可塑状态	0.25
	硬塑状态	0.25～0.30
	坚硬状态	0.30～0.40
砂　土		0.40
碎石土		0.40～0.50
软质岩石		0.40～0.60
表面粗糙的硬质岩石		0.60～0.70

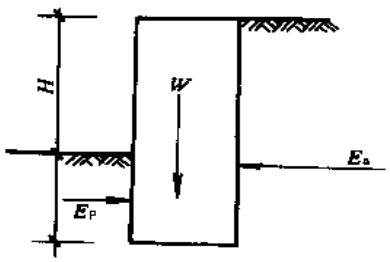


图 7-1

当基底下有软弱夹层时，应按圆弧滑动面法进行地基稳定性验算（稳定安全系数应大于或等于 1.2）。

7.2 倾覆稳定性验算

倾覆稳定性验算是以稳定力矩与倾覆力矩的比值 K_q 来表示，如图 7-2 所示。

$$K_q=\frac{\frac{1}{2}Wb+E_ph_p}{E_ah_a}\geqslant 1.5 \qquad (7.2.1)$$

当不能满足式(7.2.1)时，应改变墙宽 b 或增加埋深或在墙上增加配重，以提高稳定力。

7.3 地基土容许承载力验算

与一般挡土墙不同，基坑支护挡土墙因是加固地基土而形成的重力式挡土墙，加固后的墙重较原来土重增加不大，因此，地基承载力一般满足要求，不必验算。

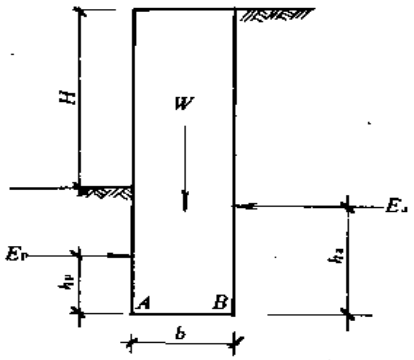


图 7-2

8. 基坑底稳定性分析

支护墙体的入土深度需要保证结构本身的强度及稳定性，还需要保证基坑底部的土体不产生隆起失稳和管涌。在灵敏软土中板桩基坑开挖时，常会发现基底土隆起和板桩向坑内倾斜，这主要是由于桩背后的土柱重量超过基底以下的地基承载力，此时地基土的塑性平衡状态受到破坏，发生桩背后土的流动，坑顶下陷，基坑底回弹隆起。无论对于何种支护体系，减少入土深度总可以达到降低造价的目的，尤其对于挡墙不能回收的墙体。但是入土深度过小又会造成基底土体的不稳定，这就需要验算，以找出合理的墙体入土深度，即保证支护及基底土体的稳定性，又达到经济合理的目的。

8.1 基坑底土体抗隆起计算

基坑底抗隆起验算目的是为了保证基坑底的稳定性，保证支护结构不发生“根部破坏”。不同的破坏假定具有不同的抗隆起验算方法，本节主要推荐采用“计及墙体极限弯矩法”及“墙底极限承载力法”，前者以抗滑动的力矩平衡条件保证基坑底的稳定性；后者则主要从地基承载力满足设计要求的条件保证基坑底的稳定性。

1 计及墙体极限弯矩的坑隆起法

此法认为开挖底面以下的墙体能起到帮助抵抗基底土体隆起的作用；并假定土体沿墙体底面滑动，认为墙体底面以下的滑动面为一圆弧，如图 8-1 所示，产生滑动的力为土体重 γH 及地表超载 q。抵抗滑动的力则为滑动面上的土体抗剪强度，对于非理想粘性土来说，其内摩擦角中不等于零。因此在计算滑动面上的抗剪强度时应采用公式：$\tau=\sigma\mathrm{tg}\phi+c$，不能只单纯考虑 $\tau=c$（c 为粘聚力）。

图 8-1 中滑动面上土体抗剪强度 τ 中的 σ 值如何选用，作如下的处理：在 AB 面上的 σ 应该是水平侧压力，实际上此面上的水平侧压力值是介于主动土压力与静止侧压力之间，因此近似地取为 $\sigma=\gamma z\mathrm{tg}^2(45°-\frac{\phi}{2})$，而不减去 $2\mathrm{ctg}(45°-\frac{\phi}{2})$，这是为了近似地反映实际土压力。况且，在开挖深度较大的情况下，后者比前者要小很多。对于 BC 滑动面上的法向应力 σ_n 则由两部分组成，即为土体自重在滑动面法向上的分力加上该水平侧压力在滑动面法向上的分力，水平侧压力的计算公式与 AB 相同。对于 CE 面亦如此，图 8-1 中的滑动面上 AB、AC、CE 各段的抗剪强度分别为：

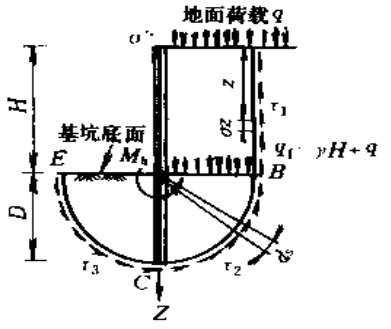


图 8-1 计及墙体极限弯矩的坑隆起示意图

$$\tau_1=(\gamma z+q)K_a\mathrm{tg}\phi+c$$

$$\tau_2=(q_f+\gamma D\sin\alpha)\sin^2\alpha\mathrm{tg}\phi+(q_f+\gamma D\sin\alpha)\sin\alpha\cdot\cos\alpha\cdot K_a\mathrm{tg}\phi+c$$

$$\tau_3=\gamma D\sin^3\alpha\mathrm{tg}\phi+\gamma D\sin^2\alpha\cdot\cos\alpha\cdot K_a\mathrm{tg}\phi+c$$

将滑动力与抗滑动力分别对圆心 O 取力矩，得

滑动力矩

$$M_s=\frac{1}{2}(\gamma H+q)D^2 \tag{8.1.1}$$

抗滑动力矩

$$M_r=\int_0^H \tau_1 dz\cdot D+\int_0^{S_2}\tau_2 dS\cdot D+\int_0^{S_3}\tau_3 dS\cdot D+M_h$$

对上式积分并经整理后得：

$$M_r=K_s tg\phi\left[\left(\frac{\gamma H^2}{2}+qH\right)D+\frac{1}{2}q_f D^2+\frac{2}{3}\gamma D^2\right]$$

$$+tg\phi\left[\frac{\pi}{4}q_f D^2+\frac{4}{3}\gamma D^3\right]+C(HD+\pi D^2)+M_h \tag{8.1.2}$$

式中 D——入土深度(m)；

H—— 基坑开挖深度(m)；

q——地表超载，(kN/m²)；

γ,c,ϕ——分别为土体空重(kN/m²)、粘聚力(kN/m²)及内摩擦角(度)，有几层不同性质的土时，可采用加权平均值；

M_h——基坑底面处墙体的极限抵抗弯矩，可采用该处的墙体设计弯矩(kN·m/m)

$$q_f=\gamma H+q(\mathrm{kN/m^2});K_a=tg^2\left(45°-\frac{\phi}{2}\right)$$

$$S_2=\overset{\frown}{BC}\qquad S_3=\overset{\frown}{EC}$$

因此抗隆起的安全系数公式为：

$$K_s=\frac{M_r}{M_g} \tag{8.1.3}$$

计算时可采用试算法选定入土深度 D。即取数个 D 值，按式(8.1.1)～(8.1.3)验算抗隆起安全系数，求得安全系数 K_s 为最小时的入土深度即为所求的入土深度，为达到稳定要求，必须满足 $K_s\geqslant 1.2\sim1.3$；如要达到严格控制地表沉降的要求，则可以把入土深度增至恰当值 $(0.9\sim1.0)H$ 或视需要再作地基加固，提高土体抗剪强度，以使 K_s 达到 1.5～2.0。

实践证明，上法较适用于中等强度和较软弱的粘性土层中的地下墙工程。

2. 墙底极限承载力法

墙底极限承载力法是将支护结构的底平面作为求极限承载力的基准面，其滑动线的形状如图 8-2 所示。

建议采用下式进行抗隆起安全系数的验算，以求得地下墙的入土深度。

$$K_s=\frac{\gamma DN_q+cN_c}{\gamma(H+D)+q} \tag{8.1.4}$$

式中 D——墙体入土深度，m；

H——基坑开挖深度，m；

γ——坑底及墙体外侧土体重度，kN/m³；

c——坑底土体的内聚力，kN/m²；

q——地面超载，kN/m²；

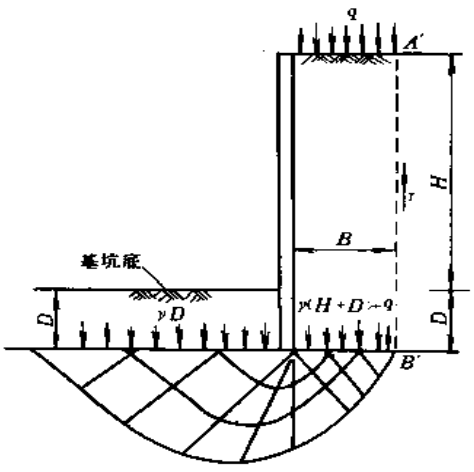


图 8-2 墙底极限承载力法示意图

承载力系数表　　表 8-1

φ	N_c	N_q	tgφ
0	5.14	1.00	0.00
1	5.38	1.09	0.02
2	5.63	1.20	0.03
3	5.90	1.31	0.05
4	5.19	1.43	0.07
5	5.49	1.57	0.09
6	6.81	1.72	0.11
7	7.16	1.88	0.12
8	7.53	2.06	0.14
9	7.92	2.25	0.16
10	8.35	2.47	0.18
11	8.80	2.71	0.19
12	9.28	2.97	0.21
13	9.81	3.26	0.23
14	10.37	3.59	0.25
15	10.98	3.94	0.27
16	11.63	4.34	0.29
17	12.34	4.77	0.31
18	13.10	5.26	0.32
19	13.93	5.80	0.34
20	14.83	6.40	0.36
21	15.82	7.07	0.38
22	16.88	7.82	0.40
23	18.05	8.66	0.42
24	19.32	9.60	0.45
25	20.72	10.66	0.47
26	22.25	11.85	0.49
27	23.94	13.20	0.51
28	25.80	14.72	0.53
29	27.86	16.44	0.55
30	30.14	18.40	0.58
31	32.67	20.63	0.60
32	35.49	23.18	0.62
33	38.64	26.09	0.65
34	42.16	29.44	0.67
35	46.12	33.30	0.70
36	50.59	37.75	0.73
37	55.63	42.92	0.75
38	61.35	48.93	0.78
39	67.87	55.96	0.81
40	75.31	64.20	0.84
41	83.86	73.90	0.87
42	93.71	85.38	0.90
43	105.11	99.02	0.93
44	108.37	115.31	0.97
45	133.88	134.88	1.00
46	152.10	158.51	1.04
47	173.64	187.21	1.07
48	199.26	222.31	1.11
49	229.93	365.51	1.15
50	266.89	319.07	1.19

N_q、N_c——地基承载力的系数，由式(8.1.5)计算

$$\left.\begin{aligned} N_q &= \mathrm{tg}^2(45^\circ+\frac{\phi}{2})e^{\pi \mathrm{tg}\varphi} \\ N_c &= (N_{q\varphi}-1)\cdot\frac{1}{\mathrm{tg}\varphi} \end{aligned}\right\} \qquad (8.1.5)$$

上式求得的 N_q、N_c 如表 8-1 所示。

用本法验算抗隆起安全系数时，由于图 8-2 中 A′B′面上的抗剪强度抵抗隆起作用没有考

虑，故安全系数可取得低一些，一般可取 $K_s=1.10\sim1.20$。

8.2 基坑底水压力稳定计算

在基坑开挖过程中，随时都要考虑水压力的存在，其危害主要表现为管涌和承压水冲溃坑底的现象。水压力的问题如能得到妥善解决，则基坑稳定就有了保障，否则将导致灾难性的破坏结果。

1. 管涌稳定条件与入土深度

当基坑面以下的土为疏松的砂 土层时，而且又作用着向上的渗透水压，如果由此产生的动水坡度大于砂土层的极限动水坡度时，砂土颗粒就会处于冒出状态，基坑底面丧失稳定，这种现象称作管涌，如图 8-3 所示。如果增加支护墙的入土深度，就能增加流线长度从而降低了动水坡度，因而增加入土深度对防止管涌现象的发生是有利的。

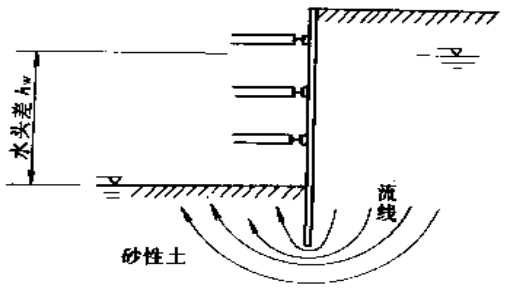


图 8-3 自由水引起的流砂

在施工中所遇到的流砂（或管涌）现象有：

（1）轻微的——板桩缝隙不密，有一部分的细砂随着地下水一起穿过缝隙而流入基坑，增加基坑的泥泞程度；

（2）中等的——在基坑底部，尤其是靠近板桩的地方，常会发现有一堆细砂缓缓冒起，仔细观察，可看到细砂堆中形成许多小小的排水槽，冒出的水夹带着一些细砂颗粒在慢慢地流动。

（3）严重的——挖基坑时如发生上述现象而仍继续往下开挖，在某些情况下，流砂的冒出速度很快，有时会象开水初沸时的翻泡，此时基坑底部成为流动状态。解放前沟渠工人曾在上海福建路七浦路排沟管时遇见流砂，但仍继续用铅桶作为工具掏泥和水，坑底液化严重，工人立足困难，半身陷在流砂之中，只好草草竣工。又如叶家宅路泵站，因挖掘较深，同时板桩的长度又不够，因此发生流砂现象，沟壕下部完全液化，使得工程无法进行。结果沟管不能达到设计的深度，不得不将其提高 60cm。中途泵站施工采用沉井法，挖掘下去时，流砂现象严重，沉井自动很快下沉，无法用人力控制，以致沉井发生倾斜，结果未能挖至设计标高，也只好勉强竣工。

管涌是土的一种渗流破坏现象。地下水在土壤内渗透，渗透水头压力沿水流方向以体积力作用于土体，其大小等于 iV_γ（i 为水力梯度），在基坑开挖过程中，周围高水位的地下水向基坑内渗透。当基坑底面以下的土体所承受的渗透水头压力（向上方向）大于土体的水中重度时，土体就会向上移动。

在砂性土地屋内，土颗粒会随着地下渗流向上流出，开始是微细颗粒被渗水携出，随着渗流通道变大，渗流作用愈益加强，最后会导致基坑被砂土淹没的事故。

在粉细砂层和软弱粘土层内，由于渗透系数较小，渗透水量少，管涌现象往往是突然产生的流塑性泥流，和砂性土内的现

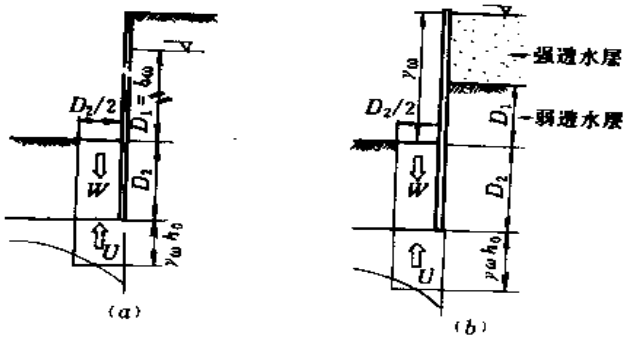


图 8-4 管涌破坏计算图式

象有所不同。

根据试验表明，流砂现象首先发生在离坑壁大约等于板桩深度一半的范围内，由于板桩是临时结构，为简化计算，可近似地取最短路径。管涌破坏计算图式如图 8-4 所示。

管涌的验算方法都是建立在下述极限平衡的公式上，即在基坑底部（严格说是渗流出口处）：

$$\gamma' = i\gamma_w \tag{8.2.1}$$

具体处理有几种方法，现选择介绍如下：

(1)太沙基法(图 8-4)

抗管涌破坏稳定性的安全系数为：

$$K_s = \frac{W}{U} \tag{8.2.2}$$

式中 W 为土的净重，$W = \frac{\gamma' D_2^2}{2}$；

U 为墙底处向上渗透压力，$U = \gamma_w h_s \frac{D_2}{2}$；

h_s 为墙底处平均渗透水头，一般取(偏于安全)；$h_s = \frac{1}{2} h_w$。

因此：

$$K_s = \frac{2\gamma' D_2}{\gamma_w h_w} \tag{8.2.3}$$

(2)极限水力梯度法

如图 8-4 计算渗流的流线长度 L 为：

$$L = D_1 + 2D_2$$

平均水力梯度 i 为：

$$i = \frac{h_w}{D_1 + 2D_2}$$

因此：

$$F_s = \frac{\gamma' (D_1 + 2D_2)}{\gamma_w h'_w} \tag{8.2.4}$$

以上两种计算方法都是以一个平均梯度的概念来衡量坑底土的渗透稳定性问题。应该注意到在渗流的流径上水力梯度并不是一致的，尤其当墙体插入深度较浅，墙底土渣没有完全清除时，就会使基坑底部边缘的渗流出口处水力梯度增大，使边缘地区发生管涌。

控制渗流最重要的因素当然是尽可能将墙底插入不透水层（渗流的水力坡降会集中于下部不透水地层内）；其次是增加墙的插入深度。这对抗管涌破坏和抗隆起破坏都是有利措施。

2. 承压水冲溃坑底的验算

图 8-5 表示基坑下有一隔水的不透水层，而基坑底处于不透水层上，下为承压水层，其水头为 $h+t$。此时应验算坑底是否会被承压水冲溃，若有可能冲溃，则须采用减压井降水以策安全。

不透水层底面受到承压水的压力为 $\gamma_w(h+t)$，而土的自重压力可看作土的重度 γ 与 t 的乘积，则两者达到平衡时：

$$\gamma t = \gamma_w (h+t)$$

$$t = \frac{\gamma_w h}{\gamma - \gamma_w} = \frac{h}{\gamma - 10} \tag{8.2.6}$$

如 $\gamma = 18 \sim 20 \text{kN/m}^3$ 时，$\gamma_w = 10 \text{kN/m}^3$，则 $t = h \sim 1.25h$，即 $\frac{t}{h+t} > 0.5 \sim 0.6$ 为安全。

如果在基底下有薄的不透水层，而且在不透水层下面是具有较大水压的滞水层，当土重不足以抵挡下部的水压时，基底就会发生隆起(图 8-6)。考虑上覆土层重量与滞水层水压的平衡，此时的安全系数取 1.2。当不满足此条件时，可考虑上覆土层重量及其与支护壁的摩擦力与滞水层水压的平衡，土与支护壁间的摩擦系数根据具体的工程条件由实验确定，土作用于支护壁目的正压力可采用主动土压力，这是偏于安全的，安全系数仍取 1.2。若还不满足稳定条件，则应采取一定的措施以防止基坑的失稳。

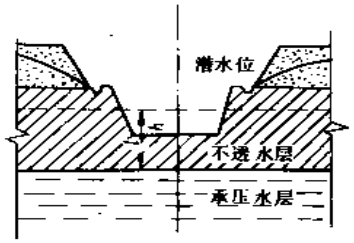


图 8-5　承压水冲溃坑底示意

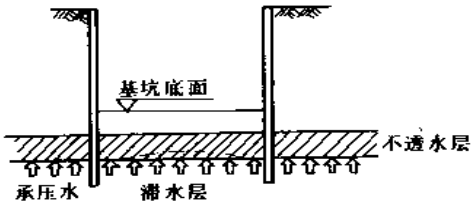


图 8-6　承压水产生的基底隆起示意

在基坑开挖中，所遇到的二个问题是土和水的关系，基坑所处地段的土是人们无法改变的，只有根据土的特性，用不同的方法去克服。由于地下水渗流而发生的流砂现象，一般有二种方法：一种是用长板桩、冻结法、或地下连续墙来防止地下渗流的进入，另一种方法是在基坑外将地下水位下降并将地下水排走，使其不致危及基坑开挖安全。

9. 降水设计

根据基坑的平面尺寸和开挖深度、地质条件和土的特性，为保证土方开挖及基础施工处于疏干和坚硬的工作条件下进行，地下水可用各种降水方法控制。

恰当的设计降水系统，将为施工带来下列各项好处：

1. 降低地下水位和截住渗流，否则将造成边坡和基坑底面破坏的危险；
2. 增加挖掘边坡的稳定性；
3. 防止坡面和基底土的流失；
4. 减少板桩和支撑的压力；
5. 防止基底的破坏和隆起。

降低水位也可用来作为地基加固的一种方法，水位的降低使土的有效应力增加，因而对水位以上和以下的土进一步固结。在砂层以上的软土层，由于砂层中产生部分真空，有利于对软土的固结，其机理是由于降低水位和在土面上增加了部分大气压力，使土的有效应力增加。成功的降水系统对于基坑支护结构的安全度具有特别重要的意义。

土中降水主要是将带有滤管的降水工具沉没到基坑四周的土中，利用各种抽水工具，在不扰动土体结构情况下，达到降低地下水位的效果。

9.1 降水基本理论

1. 完整承压井

1857 年，法国水力学家 Dupuit 首先研究出地下水涌水的理论。这些调论虽则与实际情况有些出入，但直到现在还广泛地被应用着。他研究了完整承压井和完整潜水井的涌水情况，这些井都布置在水平而均质的含水层中。这些含水层在天然状态下都有着水平的水压面或潜水面。当均匀地在井内抽水时，井中水位开始下降，而使含水层周围的地下水流向井中，经过一定的时间后，井周围的原有水位就由水平而形成向井弯曲的降落曲线。最后，这条曲线渐趋稳定，形成降落漏斗。

图 9-1 表示完整承压井在抽水时的情况。在水平含水层为均质构造以及地下水原有水位为水平状态的条件下，降落漏斗具有规则形状的旋转面，其中心轴与井轴相重合。图 9-1 的垂直剖面为抽水后的降落曲线，而在水平剖面上则为规则形状的同心圆，也即降落漏斗范围内的水压面的等压线。但在实际情况下，随着各种条件的改变，与上述的降落漏斗有所差别。

取井底不透水层水平方向为 OX 轴，而取井轴为 OY 轴，可得出流向井的水流任意圆柱剖面的水头梯度 i 和断面面积 A 的表达式：

$$i=\frac{dy}{dx}, \qquad A=2\pi \cdot x \cdot M$$

式中 x——由井轴至任一点的水平距离；

M——承压含水层厚度。

代入达西基本方程式中，则得井的流量：

$$Q=k \cdot i \cdot A=2\pi \cdot xM \cdot k \cdot \frac{dy}{dx}$$

其中 k 为含水层的渗透系数，即

$$Q=2\pi \cdot M \cdot k \cdot x \cdot \frac{dy}{dx}$$

分离变数　　$2\pi \cdot M \cdot k \cdot dy=Q \cdot \frac{dx}{x}$

积分之则得　　$2\pi \cdot M \cdot k \cdot y=Q \cdot \ln x+C$

当 $x=R$(影响半径)，当 $y=H$ 时，则上式为：

$$2\pi \cdot M \cdot k \cdot y=Q \cdot \ln x+2\pi M \cdot k \cdot H-Q \cdot \ln R$$

整理后　　$Q(\ln R-\ln x)=2\pi kM(H-y)$

即

$$Q=\frac{2\pi \cdot k \cdot M(H-y)}{\ln R-\ln x}$$

$$=\frac{2\pi \cdot k \cdot M(H-y)}{\ln \cdot \frac{R}{x}} \qquad (9.1.1)$$

将式中的自然对数以常用对数代替，则得：

$$Q=2.73kM\frac{H-y}{\lg \frac{R}{x}} \qquad (9.1.2)$$

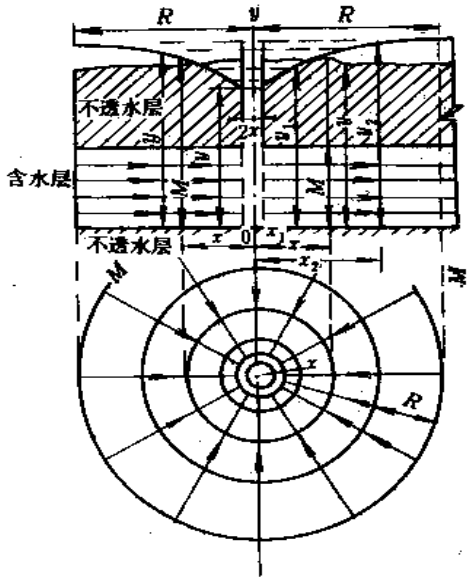


图 9-1　承压水位降落图

当 $x=r$=井半径、$y=h$ 时，并令水位降低值 $H-h=s$，则得：

$$Q=\frac{2.73kMs}{\lg \frac{R}{r}} \qquad (9.1.3)$$

2. 完整潜水井

当普通完整潜水井布置在具有潜水自由面的含水层中时，降落漏斗将同时是流向水井的实际潜流面(图 9-2)。

在这种情况下，平面图上的流线(水流的方向线)是以向中心方向的一些直线来表示的，而在剖面图上，流线将是一系列的曲线，这些曲线向上面时接近于降落曲线，而向下面时则接近平行于不透水层基线面。等水压面在该断面上是一些正交于流线的曲线。

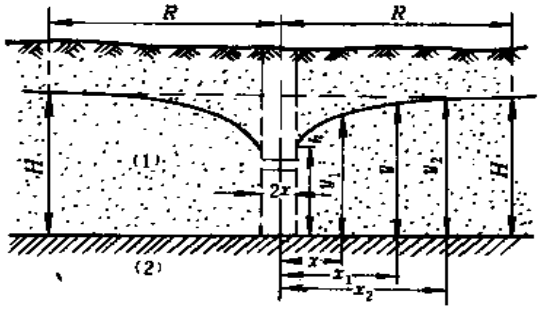


图 9-2　潜水井水位降落图

1. 潜水层；　2. 不透水层

当这种渗透水流作 Darcy 基本方程式时，根据流体力学的规则，应当把上述的等压曲面作为水流的横剖面，但 Dupuit 为使问题简化起见，将垂直的圆柱面作为水流的横剖面。

按照 Dupuit 公式，可得下列流向井的水流任意横剖面面积的表达式：

$$A=2\pi xy$$

式中　A——横断面面积，即井侧表面面积；

x——由井中心到面积边缘的距离，即为圆柱半径；

y——由不透水层到距中心距离 x 处曲线上的高。

而在该剖面上的水头梯度为：

$$i=\frac{dy}{dx}A=2\pi xy$$

由此可得水井流量的表达式：

$$Q=kiA=2\pi kxy\frac{dy}{dx}$$

式中 k 为潜水层的渗透系数。

分离变数：

$$Q\frac{dx}{x}=2\pi kydy$$

上式积分后：

$$Q\ln x=\pi ky^2+C \tag{9.1.4}$$

当 $x=R$ 时，$y=H$

其中 R——影响半径；

H——潜水含水层厚度。

$$Q\ln R=\pi kH^2+C$$

或

$$C=Q\ln R-\pi kH^2$$

将 C 值代入(9.1.4)

$$Q\ln x=\pi ky^2+Q\ln R-\pi kH^2$$

整理后

$$\pi k(H^2-y^2)=Q(\ln R-\ln x)$$

即

$$Q=\frac{\pi k(H^2-y^2)}{\ln R-\ln x}=\frac{\pi k(H^2-y^2)}{\ln\frac{R}{x}} \tag{9.1.5}$$

将自然对数以常用对数代替

$$Q=1.366k\frac{H^2-y^2}{\lg\frac{R}{x}} \tag{9.1.6}$$

当 $x=r=$井半径，$y=h$ 时，

并令水位降低值为 $H-h=s$

代入(9.1.6)，则得：

$$Q=1.366k\frac{H^2-h^2}{\lg\frac{R}{r}}=1.366k\frac{(H+h)(H-h)}{\lg\frac{R}{r}}$$

$$=1.366k\frac{(2H-s)s}{\lg\frac{R}{r}} \tag{9.1.7}$$

3. 群井的互阻作用

若有二个深井的距离小于影响半径 R 时，则需考虑到群井的互阻作用。图 9-3 表示在 A 井抽水时，水位降低为 s_1 值，相当于该井的流量 q_1，因 B 井在影响范围之内，故 A 井抽水而使 B 井的水位降低到 t_1 值；同样，若 B 井抽水而 A 井不抽水，则 A 井处的水位降低为 t_2 值。若 A、B 两井同时抽水，则两井的降落漏斗交叉在一起，在两井间形成一个总的水位降低 s_3。s_3 大于两井单独抽水时的降低值，同时占有两井间的整个面积。但是两井同时抽水时，其每井所抽到的流量比单独抽水时要小。

设有若干个井，布置在 A 点的周围，见图 9-3(b)所示，其距离可任意决定，但须在抽水井的影响范围之内。

自 A 点的第一个井抽水，则水位下降，并得出降落漏斗，其方程式为：

$$y_1^2-h_1^2=\frac{q_1}{\pi k}\ln\frac{x_1}{r_1} \qquad (9.1.8)$$

式中 y_1——第一点潜水在 A 点不透水层以上水位降低的高度；

h_1——第一点井外的水位；

q_1——第一点井的流量；

x_1——第一点井与 A 点的距离；

r_1——第一点井的半径。

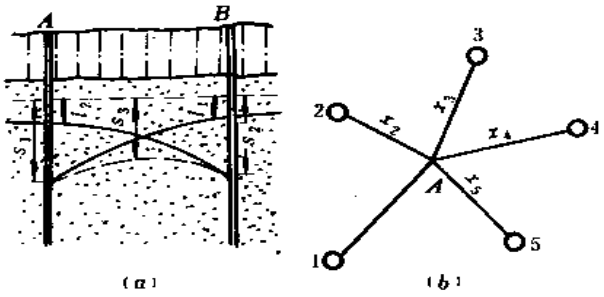


图 9-3 群井作用示意图

(a)两口互相作用的井；(b)井位布置示意图

如果全部井都同时进行抽水工作，则每个井所形成的降落漏斗都交叉在一起，而总降落曲线的方程式为：

$$y^2-h_0^2=\frac{q_1}{\pi k}\ln\frac{x_1}{r_1}+\frac{q_2}{\pi k}\ln\frac{x_2}{r_2}+\cdots\cdots+\frac{q_n}{\pi k}\ln\frac{x_n}{r_n} \qquad (9.1.9)$$

式中 $q_1,q_2\cdots\cdots q_n$——全部井同时工作时各井的流量；

h_0——每个井外的水位，令均相等。

若各井径均相等，即 $r_1=r_2\cdots\cdots=r_n$，而流量亦相等，即 $q_1=q_2\cdots\cdots q_n=\frac{Q}{n}$（$Q$ 为各井总流量，n 为井数），则式(9.1.9)应为：

$$y^2-h_0^2=\frac{Q}{\pi k_n}\left(\ln\frac{x_1}{r}+\ln\frac{x_2}{r}+\cdots\cdots\ln\frac{x_n}{r}\right)$$

或

$$y^2-h_0^2=\frac{Q}{\pi k_n}(\ln x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n-n\ln r) \qquad (9.1.10)$$

若在影响范围内任取一点，其水位高度等于静止水位的高度 H，各井距该点的距离各以 R_1、$R_2\cdots\cdots R_n$ 表示，则 $x_1=R_1$；$x_2=R_2\cdots\cdots$；$x_n=R_n$，而 $y=H$，于是(9.1.10)可写成

$$H^2-h_0^2=\frac{Q}{\pi k_n}(\ln R_1\cdot R_2\cdots\cdots R_n-n\ln r) \qquad (9.1.11)$$

同时解(9.1.9)及(9.1.10)两式，得：

$$H^2-y^2=\frac{Q}{\pi k_n}(\ln R_1\cdot R_2\cdots\cdots R_n-\ln x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n) \qquad (9.1.12)$$

若该点离各井的中点很远，故即使令 $R_1=R_2=\cdots\cdots R_n$，其误差亦不大，因此：

$$H^2-y^2=\frac{Q}{\pi k_n}(n\ln R-\ln x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n)$$

$$=\frac{Q}{\pi k_n}\left(\ln R-\frac{1}{n}\ln x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n\right)$$

亦即

$$Q=\pi k\frac{H^2-y^2}{\ln R-\frac{1}{n}(\ln x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n)}$$

以常用对数代替自然对数

$$Q=1.366k\frac{H^2-y^2}{\lg R-\frac{1}{n}(\lg x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n)} \qquad (9.1.13)$$

或

$$Q=1.366K\frac{(2H-s)s}{\lg R-\frac{1}{n}(\lg x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n)} \qquad (9.1.14)$$

9.2 降 水 方 法

1. 轻型井点

图 9-4 所示为在砂或粉土布置的线状井点，由于地下水位较高，而井点能降低地下水位的有效深度为 4.5m 左右，为防止在沉设井点时泥泞起见，特增设一道临时井点，以便于施工。

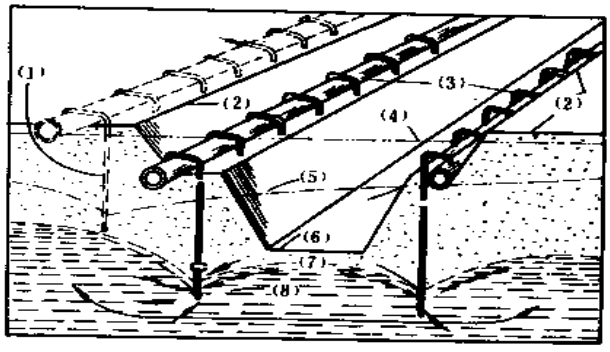


图 9-4 典型井点布置图

(1)临时井点，在设计的井点打好后可拔去；(2)原有地面；(3)长期用井点；(4)原有地下水位；(5)初始降低的水位；(6)基底；(7)最终降低的水位；(8)地下水

轻型井点的滤管直径为 50mm，长约 1m，滤网可用铜或不锈钢网制成，末端可以封闭，亦可用自射式如图 9-5 所示。自射式的优点是在井点沉设过程中，将高压水关小，然后填砂，使粗砂易于聚集在滤管周围，在运转中井点不易堵塞，但缺点是橡皮球阀和环阀常易磨损而须经常掉换，美国常用自射式，我国则用封闭式滤管，而在沉设时加用冲管钻孔。

井点排列成线状或环状，视基坑的形状而定，其间距一般为 0.8～2.4m，并与 125mm 的总管用弯联管或铠装塑料管联接，总管则与带有离心泵和真空泵的抽水设备相连，或者和水射泵相连。这一整套布置称为井点系统或轻型井点。

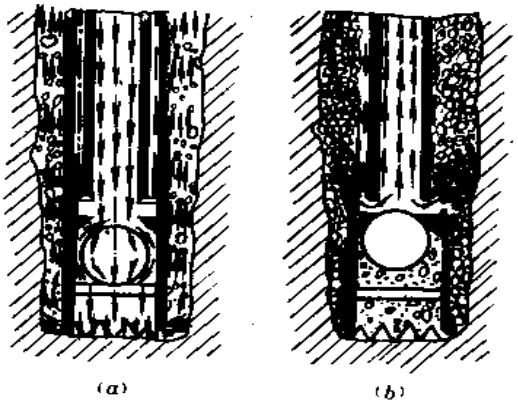


图 9-5 自射式井点

(a)沉设时喷射水流，环阀上升，球阀下沉；(b)抽水时环阀下降，球阀上升

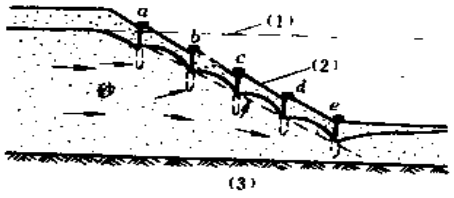


图 9-6 多级井点系统

(1)原有地下水位；(2)坡面与降落曲线间的平均厚度；(3)不透水层

井点系统是国内外应用最广泛的降水方法。特别是对小基坑、降低水位不深时尤为适宜和经济。井点系统也可设置多级(图 9-6)，但须注意：每级井点降深限于 4.5m，而坡面与降落曲线间的平均厚度也约为 4.5m，若在此厚度以下，则土仍受渗流水的渗透压力的作用。若开挖深度超过 12～15m 时，则仍须复核边坡的稳定性，并考虑到在被降水区域以下土层的渗透压力。

轻型井点分机械真空泵和水射泵井点二种。这二种轻型井点的主要差别是产生真空的原理不同。

机械真空泵井点原理如图 9-7 所示，由一台机械真空泵在集水箱内产生真空，将地下水通过虑管、井管、集水总管和过滤室等部件吸入集水箱。箱内呈低压装态，当箱内浮筒上升到一定高度时，离心泵开动将水排出箱外。

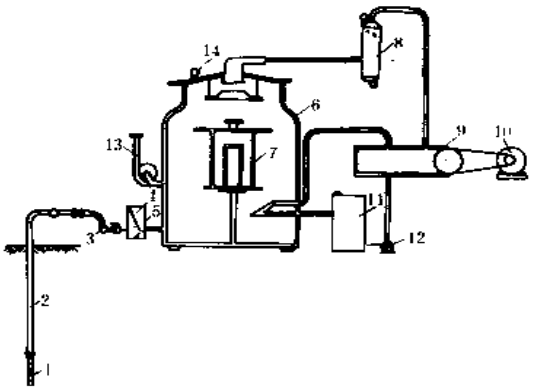


图 9-7　机械真空泵井点原理图

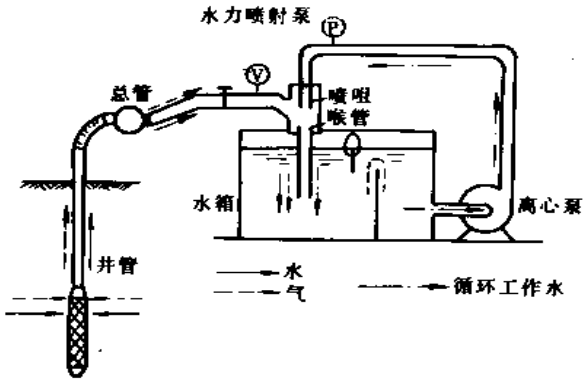


图 9-8　水射泵井点原理图

1. 滤管；2. 井管；3. 集水总管；4. 滤网；5. 过滤室；
6. 集水箱；7. 浮筒；8. 分水室；9. 真空泵；10. 电动机；
11. 冷却水箱；12. 冷却循环水泵；13. 离心泵；14. 真空计

水射泵井点的原理如图 9-8 所示。这是一个水力喷射器，采用离心泵驱动工作水运转。当水流通过喷嘴时，由于流速突然增大而在周围产生真空，把地下水吸出，水箱内的水呈 1 个大气压的天然状态。这类井点是 70 年代后发展起来的，耗电量较小，其降水深度大于机械真空泵井点，降水漏斗线比真空泵井点陡，影响范围也相应减小。

轻型井点通常采用离心泵喷水冲孔或用冲管冲孔的方法埋设井管。冲孔应竖直，直径一般为 ϕ300，深度应超出滤管底深 0.5m 以上。放入井管时应量居中，在注水清孔后回填中粗砂滤料，滤料的颗粒级配可近下式选择：

$$4D_{35}>D_{f15}>4D_{15}$$

其中 D_{35}为该土层颗分曲线上的一个粒径值，小于该颗粒的土重点总土重的 85%；D_{15}表示小于该料径的土重点总土重的 15%。D_{f15}为滤料颗分曲线上的一个粒径值，小于该粒径的砂粒占总重的 15%。

回填量应不小于计算值的 95%。D_{f15}为滤料颗分曲线上的一个粒径值，小于该粒径的砂粒占总重的 15%。

回填量不小于计算值的 95%。回填应用送砂器或其它专用工具，在井点孔口下 1m 范围内应采用粘土封口，以保持管内的真空度。

2. 喷射井点

图 9-9 表示喷射井点的主要构造和工作原理，自高压泵输入的水流，经输水导管耐达到喷嘴，在喷嘴处由于截面缩小，流速骤增到极大值，水流即以此流速冲入混合室中。由于喷嘴处流速增加，水流中的压力即相应地减低，而达到某一预定的真空度；因此，大气压力即将所欲提升的地下水经吸入管压入混合室中。此时，工作水流与被吸入的水流混合而产生直接的能量交换，同时混合室的截面积逐渐增加，流速渐减，最后以正常的速度流出井点。图 9-9(*a*)为并列

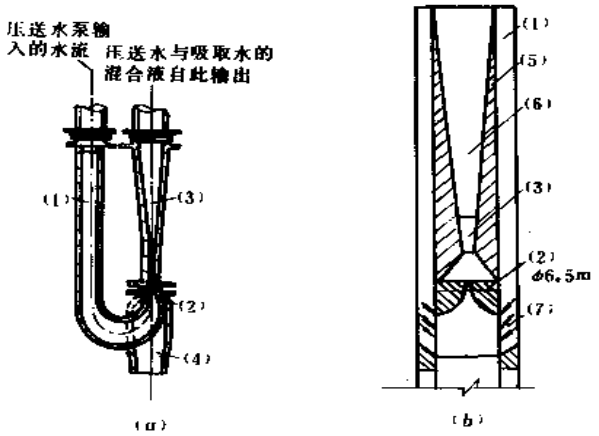


图 9-9　喷射井点构造原理图

(*a*)外接式；　(*b*)同心式(喷嘴 φ6.5mm)

(1)输水导管(亦可为同心式)；(2)喷嘴；(3)混合室(喉管)；(4)吸入管；

(5)内管；(6)扩散室；(7)工作水流

式，而我国在实际上多采用同心式(图 9.2.6*b*)，其原理相同，输入管亦即井点的外管。

喷射井点一级能提升离地面 30m 以内的地下水，并能在井点底部产生 250mm 水银柱的真空度，但因能量消耗很大，所以其工作效率一般只有 30%，同时设计十分复杂，喷嘴与混合室常须检验并掉换，特别是滤层填料不好时，常有细砂带入，使喷嘴特别易于磨损。喷射井点的降水效果在很大程度上取决于喷嘴的设计和加工质量，所使用的循环水应不含泥砂和杂物。

埋设井点时，孔径不宜小于 φ400，孔深应比滤管底深 1m 之上。滤管宜设在透水性较好的土层中，必要时可采用护扩大井点滤层等措施。

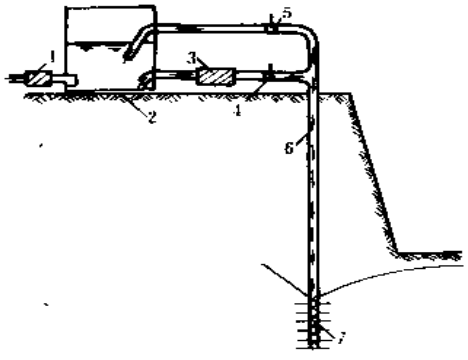


图 9-10　喷射井点施工图

1. 排水泵；2. 水箱；3. 高压离心水泵；

4. 供水总管；5. 排水总管；6. 喷射井点管；7. 滤管；

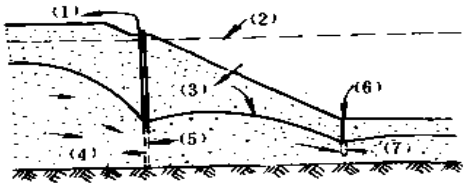


图 9-11　深井点与井点系统联合降水

(1)排水管；(2)原有地下水位；(3)降低的水位；

(4)深井点；(5)深井泵；(6)总管，接向泵；(7)井点

喷射井点间距一般为 2～3m，每套井点的总管数应控制在 30 根左右。在井点安装完成后必须及时试抽，及时发现和消除漏气和“死井”。井点孔口地面下 0.5～1.0m 深度内应采用粘土封口。喷射井点施工设计如图 9-10 所示。

3. 深井点

适用于水量大、降水深的场合，当土料较粗、渗透系数很大，而透水层厚度也大时，一般用井点系统或喷射井点不能奏效，此时采用深井点较为适宜。其优点是降水的深度大、范围也大，因此可布置在基坑施工范围以外，使其排水时的降落曲线达到基坑之下。深井点可单用，亦可和井点系统合用，如图 9-11 所示，此时井点系统通常布置在基坑周围的坡脚处，用以吸取由于深井点间距较大而流来的少量地下水。

4. 其他方法

(1)真空井点

当基坑处于渗透系数小的($k<(0.1\sim10)\times10^{-2}$m/s)、细粒粉土($D_{10}\leqslant0.05$mm)的场合时，用普通井点已不能成功地降水，这是因为土中有一部分水由于毛细管力的作用而不能用重力的方法抽出。因此必须采用真空井点降水。真空降水是在井点的顶部用粘土或膨润土封住，其厚度约为 1～1.5m，以保持滤管和其填料内的真空度，从而使井点的水力坡降增加，特别是在层状土的情况下，在井点周围的土被大气压力所稳定，阻止渗流趋向基坑并增加土的有效应力和抗剪强度。这种情况的降水要求其井点的间距要小，从而使地下水易于抽出。

就井点系统而言，其在滤管及其周围的填料的净真空度，等于在总管的真空度减去井点管的长度。因此，如果降水超过 4.5m，则在系统内所能获得的真空度就相对地小了。如果再有较大的空气损失(如总管、弯联管及其他各处接合不严，封口粘土失效等等)，那就需要另外增加一台真空泵，以保证系统内获得最大的真空度。如图 9-12 所示，除封口处的粉质粘土外，所有多层土的地下水都能受到真空的作用而流向滤管及其周围的填料。

(2)电渗降水

大多数的土都可按上述方法进行降水，但对更细颗粒的土，如一些粉土、粘质粉土和细粒粘土等，用上述方法将不能成功地降水，此时可采用电渗降水。其原理为在上述的土中插入二个电极，并施加一定强度的直流电，则发现土中的水将与土分离，由阳极流向阴极，若将井点作为阴极，则可将分离的水抽出；这样，本来土中抽不出的趋向基坑边坡并减低稳定性的地下水，由于施加直流电的影响，就渗流到井点排出，从而增加了土的强度和边坡的稳定性。

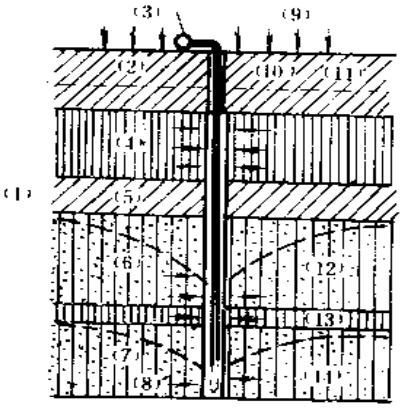


图 9-12　真空井点作用图

(1)注在部分真空作用下，邻近井点的土；(2)初始地下水位；(3)总管；(4)粉土；(5)粘土；(6)砂质粉土；(7)粉质砂土；(8)井点；(9)大气压力；(10)封口；(11)粉质粘土；(12)中到粗砂填料；(13)粉土；(14)填料中水位

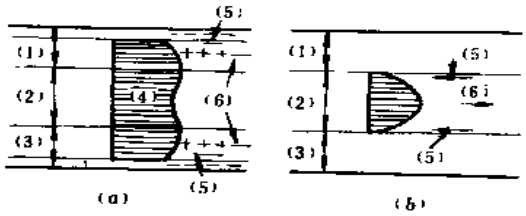


图 9-13　在一个毛细管中电渗流和水力流的比较

(a)电渗流；　　(b)水力流

(1)双电层；(2)自由水；(3)双电层；(4)速度；(5)阻力；(6)运动力

图 9-13 表示电渗的作用。由于土颗粒表面带着净的负电荷，在溶液内的负离子都被吸引到土颗粒表面上来并不断向此集中，由于水分子中正负电荷的重心并不重合，水分子被正离子所吸引。若在二电极间施加直流电时，则在土粒附近的正离子和附着在离子的水分子都为阴极所吸引，而为阳极所排斥。在孔隙中间的自由水流向阴极，图 9-13 所示为一个单毛细管内电渗流和水力流的比较，但在实际中，由于在土内的孔隙有所不同，因而在土孔隙中速度的实际分布和平均速度亦随之而异。

根据美国 Leo Cassagrande 的研究表明：电渗渗透系数 k_e 或电渗流的流动速率，在砂、粉土或粘土中大致相同，为实用起见，他假定大多数土的电渗渗透系数 k_e，当在每厘米 1 伏特的梯度情况下，为 0.5×10^{-2}m/s。

(3)减压井

当大型基坑下部伏有不透水层或弱透水层，而其下又为承压水层时，尽管在边坡有井点降水，由于开挖后上覆压力的减小，下伏的承压水压力将会使基坑底隆起或产生流砂现象。若底部不透水层的静水压力流网大于上覆有效土重，则基坑底薄弱处或薄层处发生局部隆起和涌砂，这时将拖延工期或使拟建构筑物基础不能使用。这种情况可事先考虑在基坑顶布设深井来减除承压水的压力，或者基坑开挖过程中将承压力减压到一定的高程，如图 9-14 所示。美国艾伦港船闸即采取 36 口深井来减压，在施工挖掘时并用了三级井点降水。

(4)其他情况如开挖基坑的土颗粒愈往下愈粗，若上面为粉土或粉砂而下部为更为透水的中粗砂时，则可在基坑周围弱透水性土的深度内打砂井，而将深井的滤网部分打入较粗颗粒的砂层。这样，砂井由于受深井降水的影响，上层透水性较小的土层中的水，会流向下层而由深井抽出。

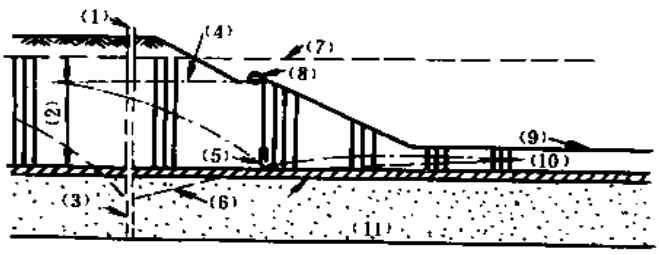


图 9-14　用深井作减压井
(1)深井；(2)粉砂；(3)深井泵；(4)粉砂中原始水位；(5)井点；(6)减低的承压水位；(7)深层砂中原始承压水头；(8)总管；(9)基坑底部；(10)粉土或粘土；(11)深层砂

又如有些情况要避免明挖，但若用深井，其滤管部分的水流不足以使深井抽汲的情况下，则可用水平排水法。其方法为在需降低水位的地段设置一竖井，竖井中相当于抽水部位凿洞，然后用一系列穿孔的管水平地向所要求的地方压出，其长度和方向可随需要而定，由水平穿孔管中流来的地下水，则由潜水泵或其他泵由竖井中抽出。但此法对成层土不宜采用。

5. 各类井点的适用条件

各种井点都有其一定的适用范围，通常根据土层的渗透性，工程开挖的深度和各种不同的降水目的来选择井点的类型。

(1)根据土层的渗透性选择降水方法

轻型井点和喷射井点适用于砂性土，粘性土中降水需采用电渗井点，如表 9-1 所示。

表 9-1

井点分类	渗透系数(cm/s)	土 层 类 别
轻型井点	$10^{-3}\sim10^{-6}$	砂质粉土，粘质粉砂，粉砂，含薄层粉砂的粉质粘土
喷射井点	$10^{-3}\sim10^{-6}$	同上
电渗井点	$<10^{-6}$	粘土，粉质粘土
深井井点	$>10^{-4}$	砂质粉土，粉砂，含薄层粉砂的粉质粘土

(2)根据开挖深度选择降水方法

当开挖深度超过 3m 时应考虑采用井点降水。当开挖深度不超过 6m 时，可采用轻型井点(机械真空泵)。采用水射泵井点可把降水深度增大到 8m。多级轻型井点的降水深度一般为 6～12m，喷射井点为 8～20m。当含水层厚度和深度均较大或深基开挖要求降低深部承压水时，可采用深井井点。深井井点可降水 15m 以上，通常采用深井泵抽水。在粘性土层开挖时，采用电渗井点可以达到良好的效果。综合挖土深度与土质条件的降水方法如表 9-2 所示。

挖土深度和降水方法的关系 表 9-2

挖土深度(m)	土名			
	粉质粘土、粉土、粉砂	细沙、中砂	粗砂、砾石	大砾石、粗卵石(含有砂粒)
<5	单层井点(真空法、电渗法)	单层普通井点	1. 井点；2. 表面排水；3. 用离心泵自竖井内抽水	
1～12	多层井点、喷射井点(真空法电渗法)	多层井点		
12～20		喷射井点		
>20	—	深井或管井		

(3)根据不同的降水目的来选择降水方法

轻型井点和喷射井点主要用于防范流砂和增加边坡和坑底的稳定性，同时使坑底无积水，利于施工。电渗井点主要用于增加渗透性很小的软粘土地基的抗剪强度以提高整体稳定的安全系数。

6. 井点降水对环境的影响及防范措施

井管埋设完成开始抽水时，井内水位下降，周围含水层的水不断流向滤管。在无承压水管特殊环境条件的情况下，经过一段时间之后，在井点周围形成漏斗状的弯曲水面。这个漏斗状水面渐趋稳定，一般总需要几天时间。降水漏斗范围内的地下水位下降之后，就必然会造成地面沉降。由于漏斗形的降水面，所产生的沉降是不均匀的，这类不均匀沉降的发展需要有一定的时间，在实际工程中，由于滤网和砂滤层结构不良，把土层中的粘粒、粉粒甚至细砂带出地面的情况是屡见不鲜的，这种现象会使周围地面很快地产生不均匀沉降，造成地面建筑和地下管线不同程度的损坏。这种现象可以通过提高降水效果来把其影响减少到最低限度。

(1)井点降水影响范围和沉降的估算

为了预估井点降水对周围环境的影响范围和造成的地面沉降，可借鉴已有的同类工程实

例，也可用一些简易的方法进行估算。

1)降水对环境影响范围的估算

降水漏斗的半径 R 通常可以用库萨金(И·π·Кусакин)的公式进行估算。

$$R=2s_k\sqrt{Kh_0} \tag{9.2.1}$$

其中 R——降水漏斗半径(m)；

s_k——漏斗降水深度(m)；

K——土层渗透系数(m/天)；

h_0——初始地下水的深度(m)。

由于地层一般成层分布，影响范围受土层的影响很显著。在上海的砂质粉土层中，实测的影响范围可达 84m。对重要工程应先采用抽水试验确定降水影响半径。

2)降水造成地面沉降的估算

在井点降水无大量细颗粒随地下水被带走的情况下，周围地面所产生的沉降量可用分层总和法进行计算：

$$s_\infty=\sum_{i=1}^{n}\frac{a_{1(1-2)}}{1+e_{01}}\Delta P_i\cdot\Delta h_1 \tag{9.2.2}$$

其中 s_∞——地面最终沉降量；

$a_{1(1-2)}$——各土层压缩系数；

e_{01}——各土层起始孔隙比；

ΔP_i——各土层因降水产生的附加应力；

Δh_1——各层土的厚度。

在降水期，降水面以下的土层通常不可能产生较明显的固结沉降量，而降水面至原始地下水面的土层因排水条件较好，会在所增加的自重应力条件下很快产生沉降，通常降水所引起的地面沉降即以这一部分沉降量为主。因此可以采用下列简易的方法估算降水所引起的沉降值

$$s=\Delta P\cdot\Delta H/E_{1-2} \tag{9.2.3}$$

其中 ΔH——降水深度，为降水面和原始地下水面的深度差；

ΔP——降水产生的自重队加应力，$\Delta P=\dfrac{\Delta\overline{H}\cdot\gamma_w}{2}$，可取 $\Delta\overline{H}=\dfrac{1}{2}\Delta H$ 进行计算；

E_{1-2}——降水深度范围内土层的压缩模量，可根据钻探试验资料，或查当地地基规范。

【算例】 上海塘桥竖井开挖井点降水(见后工程实例)，该地段为粉砂土层，$E_{1-2}=4000$kPa，

降水深度 $\Delta H=12$m，$\Delta P=\dfrac{\frac{1}{2}\cdot\Delta H\cdot\gamma_w}{2}=30$kPa

$$s=\Delta P\cdot\Delta H/E_{1-2}=9\text{cm}$$

该降水试验实例 70 天的沉降量为 84mm。

3)深井井点降水对环境影响的估算

深井井点的降水深度大于 15m，滤管布置在渗透系数大于 10^{-4}cm/s 的砂层土中。深井泵的吸口宜高于井底 1m 以上，低于惊内动水位 3m 左右。

深井井点降水的目的大都是降低深层砂性土层的承压水头，对环境的影响在很大程度上取决于土层分布情况，可按下列基本原则估算对环境的影响；

a. 当降水砂层上面有一层硬粘土层时，可作为边界封闭状态来计算沉降，即只考虑降水砂层的沉降。工程实践表明，在这种情况下，深井井点降水对环境的影响很小。

b. 降水砂层的没降可采用公式(9.2.3)进行计算。由于这层土较深，其压缩模量常在100MPa以上，取降水层厚度 $\Delta H=2\text{m}$，水头降低 20m，即 $\Delta P=200\text{kPa}$，其沉降量

$$s=\frac{200\times 2}{100\times 10^3}=4\times 10^{-3}\text{m}=4\text{mm}。$$

可见砂性土层本身的沉降量是较小的。

c. 若降水砂层上层无硬粘土封闭层，而降水持续时间又较长时，应计算上层土层在水头降 ΔP 的作用下产生的固结沉降。具体计算方法可按实际土层的分布情况，应用分层总和地面沉降的方法进行。

(2)防范井点降水对周围环境产生不良影响的措施

井点降水在市政工程建设中起着重要的作用，但必须防范其对周围环境的不良影响。

1)在降水前认真做好对周围环境的调研工作

a. 防范工程地质及水文地质情况，即对该地段应有完整的地质勘探资料，包括地层分布，透水层和透晶体情况，以及其与水体的联系和水体水位变化情况，各层土体的渗透系数，土体孔隙比和压缩系数等。

b. 查清地下贮水体，如周围的地下古河道、古水池这类的分布情况，防止出现井点和进下贮水体穿通的现象。

c. 查清上、下水管线，煤气管道、电话、电讯电缆，输电线等各种管线的分布和类型，埋设的年代和对差异沉降的随能力，考虑是否需要预先采取加固措施等等。

d. 查清周围地面和地下建筑物的情况，包括这些建筑物的基础型式，上部结构型式，在降水区中的位置和对差异沉降的随能力。降水前要查清这些建筑物的历年沉降情况和目前损伤的程度，是否需要预先采取加固措施等等。

2)合理使用井点降水，尽可能减少对周围环境的影响

降水必然会形成降水漏斗，从而造成周围地面的沉降，但只要合理使用井点，可以把这类影响控制在周围环境可以承受的范围之内。

a. 防范抽水带走土层中的细颗粒。在降水时要随时注意抽出的地下水是否有混浊现象。抽出的水中带走细颗粒不但会增加周围的沉降，而且还会使井管堵塞、井点失效。为此首先应根据周围土层的情况选用合适的滤网，同时应重视埋设井管时的成孔和回填砂滤料的质量。上海地区的粉砂层大都呈水平向分布，成孔时应昼减少搅动，把滤管设在砂性土层中。必要时可采用套管法成孔，回填砂滤料应认真按级配配制。

b. 适当放缓降水漏斗线的坡度。在同样的降水深度前提下，降水漏斗线的坡度越平缓，影响范围越大，而所产生的不均匀沉降就越小，因而降水影响区内的地下管线和建筑物受损伤的程度也愈小。根据地质勘探报告，把滤管布置在水平向连续分布的砂性土中可获得较平缓的降水漏斗曲线，从而减少对周围环境的影响。

c. 井点应连续运转，尽量避免间歇和反复抽水。

轻型井点和喷射井点在原则上应埋在砂性土层内。对砂性土层，除松砂以外，降水所引起的沉降量是很小的，然而倘若降水间歇和反复进行，现场和室内试验均表明每次降水都会产生沉降。每次降水的沉降量随着反复次数的增加而减少，逐渐趋向于零，但是总的沉降量可以累积到一个相当可观的程度。因此，应尽可能避免反复抽水。

d. 防范开挖基坑时产生承压水，造成流砂和附近地面的大量沉降。

如图 9-15 所示，在开挖基坑底面下有一粘土薄层，下面又有相当厚度的粉砂层时，若仅将

井点设在开挖深度，即开挖基坑底面，那么这层粘土会随上、下二面的渗透水压力差 $\Delta P'=(h-h_1)\gamma_w$，坑底会有产生涌砂现象的危险性。对这种情况，可打穿粘土层释放下卧粉砂层的承压水，即将井点管伸到粘土层下面含水砂层中，以降低砂层中承压水头 h，而使坑底达到稳定。

e. 防范井点和附近贮水体穿通，从而产生地下水位不下降，而出现流砂的现象。在附近有贮水体时，应考虑在井点和贮水体间设置隔水墙。

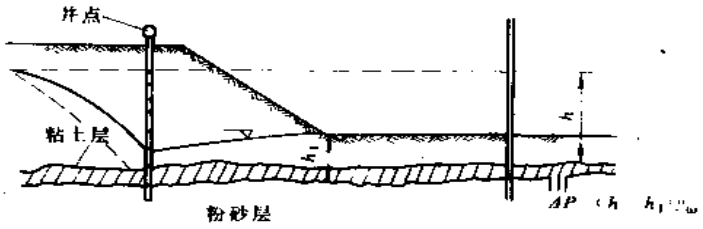


图 9-15　防范坑底涌砂现象

f. 采用内井点降水方法可以减少对周围环境的影响。在板桩地下墙支护的开挖基坑内圈设置一圈井点，通常称为内井点。在采用板桩作为侧向支护时，只要板桩按缝密封性较好又有足够的入土深度，使板桩下端较井点滤管下端深 2m 左右，则内井点降水可以大大减轻对周围环境的影响，收到良好的效果。

g. 在放坡开挖基坑降水中，如砂性土层在地面以下一定深度时，可采用以水射泵降水井点组成的封闭式井点系统。井点可安置在基坑边坡上低于在面 2～3m 的一圈平台上；或将井点位置布置在距基坑外围更远些的内圈边坡上，使井点距开挖外周有较大的距离，以减少井点对基坑外围的影响。因水射泵井点在封闭圈外侧的降水漏斗线较陡，影响距离较小，这就可能把井点降水引起的沉降范围控制在基坑周边以内或基坑外周以外 2～3m 的范围（见图 9-16）。这比在基坑外围地面上布置喷射井点降水或采用多级井点降水都较合理，既减少了降水对周围环境的影响，又节省了降水费用。

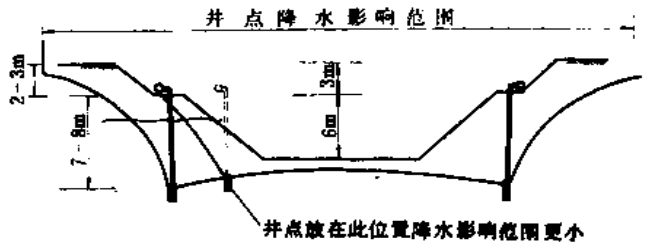


图 9-16　减少沉降影响的基坑降水井点布置图

h. 对不适宜采用井点降水的土层，不要盲目使用井点。特别是对无夹砂层的粘性土层，其渗透系数常等于或小于 10^{-7} cm/s，这种土层可以认为是不透水的，在这类土层中采用轻型井点和喷射井点往往是无效的。同时，这类土的自身抗剪强度可以维持适当开挖深度基坑的整体稳定。倘若需要增大开挖深度，可以采用放缓边坡或加深侧向支护板桩入土深度的方法解决。

(3)设置隔水帷幕

在开挖边线外设置一圈隔水帷幕，可以把降水对周围的影响缩减到很小的程度。常用的隔水帷幕有下列几种。

1)深层搅拌桩隔水墙

深层搅拌桩采用相互搭接施工的方法，水泥和土体搅拌之后，会产生化学反应，拌合体的渗透系数不大于 10^{-7}cm/s，形成连续的隔水墙，既可布置在钢板桩的后面，也可直接作为侧向隔水的支护结构。

2)砂浆防渗板桩

将一排设有注浆管的工字形钢桩打入所需隔水帷幕的位置，然后边拔桩边边注入水泥砂浆，形成一圈水泥砂浆隔水帷幕。施工可采用 20～30 号工字钢，工程质量的关键是确保工字形钢桩的垂直度和桩间接触紧密。

3)树根桩隔水帷幕

采用桩径 ϕ100～ϕ200mm 的树根桩，不用钢筋，压纯水泥浆成桩，可以形成一道隔水帷幕。施工可采用一般的工程地质钻机，采用跳打的工艺流程，以防穿孔。工程质量的关键是确保桩体有良好遥垂直度，不能有塌孔和缩颈等现象，必要时可下套管，边拔套管边注浆。

(4)保护区边缘设置回灌水系统

使用井点后，不可避免地造成周围地下水位的下降，从而使该地段的地面建筑和地下构筑物以及地下管线因不均匀沉降而受到不同程度的损伤。为尽可能消除这类影响，可采用在保护区设回灌水系统的措施。

1)回灌井点的布管和抽水井点相似，注水系统需一套泵并设置一个贮水箱。抽水井点抽出的水通到贮水箱，再从贮水箱用低压送到注水总管，多余的水另用沟管排出。

回灌井点的滤管长度应大于抽水井点的滤管，通常为 2～2.5m，井管和井壁之间回填中粗砂作为过滤层。

2)由于回灌水时会有 $Fe(OH)_2$ 的沉淀物、活动性的锈蚀及不溶解的物质积聚在注水管内，在注水期内需不断增加注水压力才能保持稳定的注入水量。对注水期较长的大型工程可以采用涂料加阴极防护的方法，并在贮水箱进出口设置滤网，以减缓注水管被堵塞的现象。注水过程中，应保持回灌水的清洁。

3)回灌保护区内应设地下水位观测井，连续记录地下水位的变化。通过调节注水系统的压力使地下水位尽可能保持原始的天然水位。

回灌井点可配合各种降水井点使用。应用回灌井点向土层中灌入是够数量的水，从而阻止回灌井点外侧建筑物及管线下的地下水流失而造成沉降，使地下水位保持不变，这时，就不会因降水而使地基的自重应力增加和地面固结沉降。

这里需要说明的是，在基坑开挖井点降水外侧使用井点回灌并不能完全保证周围地面不产生沉降。因为即使回灌设计得十分合理，使地下水位保持不变，但基坑开挖底面水位的下降造成坑底下沉，从而给基坑周围地层产生附加应力，使周围地层下降，这沉降不是固结沉降，其值是很小的。而且基坑开挖总是要产生位移，从而带动周围土体沉降。别外，回灌量不好也会影响沉降：L 顺灌量过小，则地下水位不能保持，会产生固结沉降；过大又有可能从边坡或支护墙体缝隙中流入基坑，同样会带来不利影响，因而，精心的设计与施工是保证回灌井点的作用的关键。

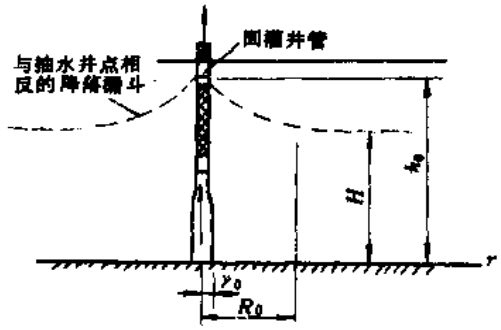


图 9-17

根据工种实践和注水试验资料，可发现回灌井点与注水井一样具有反漏斗水位曲线，如图 9-17 所示。

9.3 降水设计与计算

降水的设计和计算涉及的问题很广，设计人员应综合考虑场地的地质与地形条件、土与地下水的条件、基坑开挖尺寸、地表水迳流和施工的要求；同时要求具有井点设备和一些施工经验，以便对设计有较仔细的考虑；对于不熟悉的地区，则宜进行一些现场的测试以核对设计计算的数据。

1. 渗透系数的确定

渗透系数是降水中较复杂的因素，由于地质成因条件的不同，土层中常不是均匀的土，而多数是多种土夹杂而成的地层。一般勘察报告常提供的渗透系数多半是室内的试验数据，未能代表现场的实际情况。因此，除大型重要工程常在现场作抽水试验外，对一般的工程则可利用表 9-3 的近似值。

近似渗透系数和降水方法的关系 表 9-3

土的名称	渗透系数(m/d)	土的有效粒径(mm)	采用的降水方法	备　注
粘　土	0.001	0.003	电渗法	此类排水问题不大，一般用明排水，挖掘较深可用电渗
重粉质粘土	0.001～0.05			
粉质粘土	0.05～0.1			
粉　土	0.1～0.5	0.003～0.025	真空法、喷射井点	上海地区多半在这些土层内降水
粉　砂	0.5～1.0			
细　砂	1～5	0.1～0.25	普通井点法喷射井点	
中　砂	5～20	0.25～0.5		
粗　砂	20～50	0.5～1		
砾　石	≥50		多层井点或深井法	有时须水下挖掘

注：喷射井点应根据渗透系数确定管径。

2. 影响半径

影响半径与供水来源和渗透系数有关。值得注意的是，若地层为砂层而又邻近河床，则须考虑降水是否在沟通河水的情况下进行，若降水的抽水为河床水，则流量 Q 为无限大，曾经遇到这种事例，造成降水无效的后果。

影响半径的公式很多，现介绍砂性土中常用的 Sichardt 公式如下

$$R=3000s\sqrt{K} \qquad (9.3.1)$$

式中　s——降水深度(m)；

　　K——渗透系数(m/s)。

若按大井法计算，即将环圈井点的面积作为一个等代的大井，其半径 x_0 可用下式：

$$x_0=\sqrt{\frac{b\times l}{\pi}} \qquad (9.3.2)$$

式中　b——环圈的宽度(m)；

　　l——环圈的长度(m)。

在潜水层中 R 亦可用下式：

$$R=\sqrt{x_0^2+\frac{2K\cdot t\cdot H}{\mu}} \qquad (9.3.3)$$

式中　t——井点抽水开始算起的时间(2～5 日)；

K——渗透系数(m/d)；

H——潜水层厚度(m)；

μ——土的排水率，$\mu=n-W_{max}\cdot\frac{\gamma}{10}$

其中 n——孔隙率(%)；

W_{max}——最大分子吸湿量(%)；

γ——土的重度(kN/m³)；

上海粉砂中的 μ 值约为 10～15%。

3. 基坑降水设计所需考虑的问题

(1)气象条件　由于基坑降水大都是在土中进行，因此对基坑内的暴雨水应特别注意，须了解当地的降雨暴雨量，例如上海的暴雨量大致为 120～150mm/d，而广州的暴雨量可达 300mm/d。

(2)地质条件　须按当地的地质条件和施工经验确定其抽水量，表 9-4 可作为参考。

基坑中每 m² 面积上的出水量　　表 9—4

土　名	有裂纹的岩石	粗　砂	中　砂	细　砂	粉　砂
每 m² 面积上的出水量(m³/hr)	0.15～0.25	0.30	0.24	0.16	0.04

(3)场地条件　现场上有否堆土；来往车辆的载重量及运输的频繁程度；邻近有否民房或其他建筑物；附近道路下的基础设施(包括上下水道、电线电缆)；井点抽水的排水通道。

(4)坡面保护　井点抽水时须保持真空，除本身总管、联结管等保持密封外，还应注意随着开挖的进行而使坡面暴露而漏气，此时应使用塑料薄膜或钢丝水泥以护坡面，对小型工程亦可用纯粘土浆筑面的措施。

(5)电渗　在粘性土中开挖时应考虑采用电渗以使水位下降。

(6)电源　须保证有二路电源，以免因断电使井点停止运转而造成塌坡。特别是大型的和重要的工程尤其要采取措施，或采用发电机以作为第二电源。

(7)井点泵须有备用量，以免机械故障而停止抽水。

4. 基坑降水实例

【工程实例 1】 上海武宁路桥北堍桥墩井点系统

(1)给定资料

1)工程概况

桥墩平面尺寸为 5.7×33.0m，挖掘基坑下底面积为 8×36m，在基坑周围布设了一个 10×40m 总管的环圈井点系统；沿周边需用一套总管为 100m 计 100 根井点的轻型井点系统，如图 9-18 所示。

2)地质资料

桥墩建造在原有驳岸之上，一半处在河滩上，而另一半在河岸上；河滩上淤泥很深，而河岸部份的工程地质资料如表 9-5。

地下水位约距地面 1.5m，挖土到地下水位层面时开始沉设井点，以减少降水深度。渗透系数按该处经验试用 $K=5\times10^{-6}$m/s。

(2)计算

1)计算参数

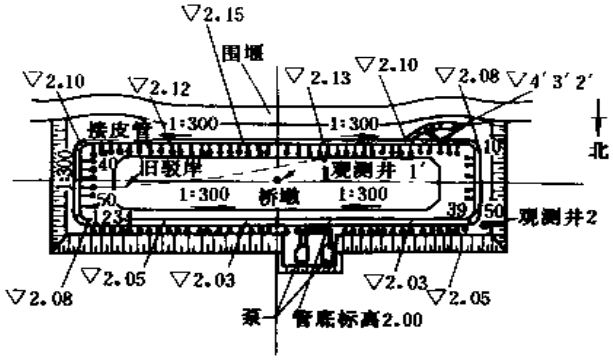


图 9-18　上海武宁路桥桥墩井点系统平面图

武宁路桥墩工程地质资料　　表 9-5

土　名	深度(m)	孔隙比	密度	液限(%)	塑限(%)	塑性指数	颗粒组成(%)		
							砂粒	粉粒	粘粒
灰色粉质粘土	0～1.07	0.88	2.73	30.1	21.3	8.8	13	76	11
	1.07～1.86		2.70	29.4	21.7	7.7	10	80	10
灰色粉砂	1.86～2.59	0.94 0.86	2.72				16	80	4
	2.59～3.14		2.69				16	78	6
	3.14～3.81		2.68				28	70	2
	3.81～4.66		2.68				38	60	2
	4.66 ～5.48		2.68				33	65	2
灰色粉质粘土	5.48～6.4		2.69	28.7	23.2	5.5	15	78	7
	6.4～7.62		2.70				96	4	0

总管直径采用 15cm，井点共长 6.5m，其中井管 5m，滤管 1.5m，井点外径为 5cm；要求降水深度 s 为 4.5m；

含水层因上下均为粉质粘土，中为粉砂，可作为承压水层计算，其厚度 M 可用钻孔资料推算到该处时应为 9.96m。

影响半径 R 用 Sichardt 公式估算为：

$$R=3000s\cdot\sqrt{K}=3000\times4.5\times\sqrt{5\times10^{-5}}=30.18\text{m}$$

$$\lg R=1.48$$

各井点对应于基坑中心的距离按图量得，如表 9-6 所示，井点编号用图 9-19(*a*)。以 K、M、s、R、$\Sigma\lg x$ 等值代入式(9.1.15))，得

$$Q=2.73KM\frac{s}{\lg R-\frac{1}{n}\lg(x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n)}$$

$$=2.73\times5\times10^{-6}\times9.96\frac{4.5}{1.48-\frac{1}{100}\times108}=1.53\times10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$$

$$=5.51\text{m}^3/\text{hr}$$

2)计算中的安全系数

由计算所得的抽水量 Q 值，一般应乘上安全系数 $K=1.2\sim1.35$，故所得的 $Q=5.51\times(1.2\sim1.35)=6.61\sim7.44m^3/hr$

井 点 计 算 表　　表 9-6

井点编号	离基坑中心距离 x(m)	$\lg x$	$\lg x$·井数
1,1′,39,39′	19.6	1.29	5.16
2,2′,38,38′	18.5	1.27	5.08
3,3′,37,37′	17.7	1.25	3.00
4,4′,36,36′	16.7	1.22	4.88
5,5′,35,35′	15.7	1.19	4.76
6,6′,34,34′	14.7	1.17	4.68
7,7′,33,33′	13.7	1.14	4.56
8,8′,32,32′	13.0	1.11	4.44
9,9′,31,31′	12.0	1.08	4.32
10,10′,30,30′	11.1	1.04	4.16
11,11′,29,29′	10.1	1.00	4.00
12,12′,28,28′	9.4	0.97	3.88
13,13′,27,27′	8.6	0.93	3.72
14,14′,26,26′	7.8	0.89	3.56
15,15′,25,25′	7.0	0.85	3.40
16,16′,24,24′	6.4	0.81	3.24
17,17′,23,23′	5.8	0.76	3.04
18,18′,22,22′	5.4	0.73	2.92
19,19′,21,21′	5.1	0.71	2.84
40,40′,50,50′	20.6	1.31	5.24
41,41′,49,49′	20.4	1.31	5.24
42,42′,48,48′	20.2	1.30	5.20
43,43′,47,47′	20.1	1.30	5.20
44,44′,46,46′	20.1	1.30	5.20
45,45′	20	1.30	2.60
20,20′	5	0.70	1.4
			$\Sigma\lg x=107.72$

注：因基坑为矩形，故有三个点和四个点到基坑中心的距离都相等

(3)讨论

1)本例在实测中开始抽水时的水量为 $16m^3/hr$，随后水量逐渐减少，以后达 到 $8m^3/hr$，而随抽水时间的延长，一个月将离基坑 84m 的土井内的潜水抽干。井点设备采用二台，以备抽水时发生机械故障而不致停止抽汲。

若按式(9.3.2)的等代半径计算，得 $\lg x_0=\lg11.3=1.05$，与用繁琐的群井公式相比，仅差3%(求得水量为 $5.12m^3/hr$)，故可用大井法的等代半径计算。

2)本例布置了 8 个观测地下水位的观测井，其实测情况见图 9-19。

3)对大型降水工程除布设观测井外，还可视工程的需要布设：土压力盒、应变计、混凝土压力计和电阻温度计、分层沉降标点、倾斜仪、孔隙水压力计等，以便观测施工和以后的长期量测。

【工程实例 2】 某钢厂采用喷射井点加电渗

某钢厂的一深基坑，平面尺寸为 2×(33.5×16.1)m，挖深 16.85m，见图 9-20 所示。先做 14×14m 的环圈喷射井点试验，认为不能满足要求，因而决定采用电渗。历时 8 个月，降水效果良好，坑内始终保持干燥，坑壁稳定，并取消了钢板桩内四道支撑的最下一道。喷射井点间距 2m，共用 96 根。泵送工作水压力按下式计算：

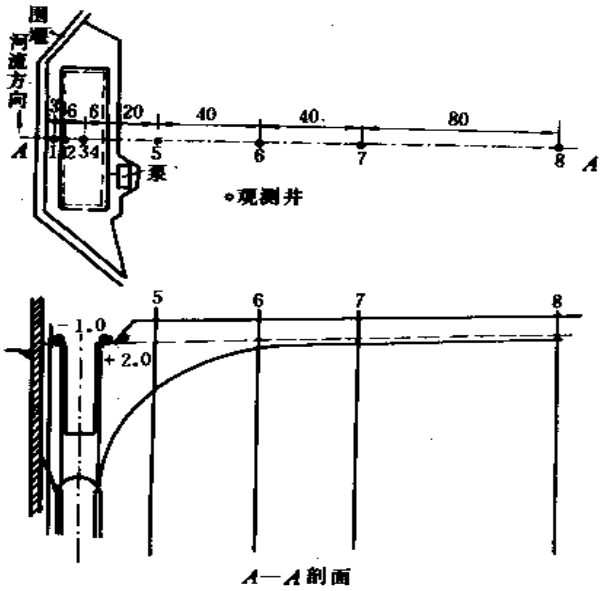


图 9-19　武宁路桥井点降低水位情况图

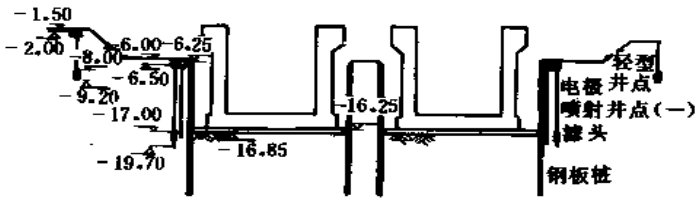


图 9-20　某深基坑电渗降水剖面图

$$P_1=\frac{P_2}{a}$$

式中　P_1——需要工作水压力，以扬程米计；

P_2——回水需要扬程＝10.5m（井管长）＋4.4m（工作水水箱标高，设在泵房顶上）＝14.9m；

a——系数，按喷射器混合室与喷嘴直径之比确定，取 0.20。故 $P_1=\frac{14.9}{0.2}=74.5$m，实际选用 150S—78 型水泵，扬程 78m，符合要求。

电渗阳极采用长 12mϕ25 钢筋，布置于紧靠坑外钢板桩旁，与井管相距 1.25m，上部 5.5m 处涂以沥青（仅在淤泥质粘土夹薄层粉砂层内用电渗）绝缘，功耗有明显降低。

电渗功率用下式计算：

$$N=\frac{UJF}{1000}(\text{千瓦})$$

式中　U——设计电压，取 45 伏；

J——设计电流密度，取 1A/m²；

F——导电面积＝H（导电深度）×L（井点布置周长）＝(12－5.5)×192＝1248m²。

故 $N=\frac{45\times1\times1248}{1000}=56.16$ 千瓦，采用 AX-500 型功率为 20 千瓦的直流电焊机 3 台。

埋设喷射井点采用套管冲枪，使成孔直径在 40cm 以上，还加用高压气以助高压水，使沉

设速度加快；当达到要求深度时，测定循环水的含泥量小于 5%时，才沉放井管，边拔套管边灌砂；选用级配适宜的中细砂作过滤层；井管过滤器下部设长 1.2m 的积泥管，实际上由于成孔质量较好，一般积泥管内含泥不超过 50cm，最多亦未超过积泥管长度。沉没好后，用 800kPa 高压水对总管和井点进行试压合格，才投入使用。电渗采用间歇通电，开始时每运转三小时停一小时，二星期后，每日夜开 3～4 次，每次 1 小时。基坑总出水量为 60m³/d，水位稳定后保持在 30m³/d 左右；电渗后土的含水量减少 4～8%，孔隙比降低 1.4～8.3%；电渗总耗电量 10180 度，电费 1000 元，按坑内挖土 17000m³ 计，每立方米平均耗电 0.059 元。

【工程实例 3】 某立交箱涵采用板桩、轻型井点、喷射井点加电渗

某立交箱涵工程全长 735.25m，穿越正在运行的铁路线下面而过，计有中间二个快车道，二侧各一慢车道，均为预制混凝土箱涵，用千斤顶分别把箱涵顶进到设计位置，箱涵二端的引道，则用明挖法施工，东西两侧用混凝土板桩辅以轻型井点降水，南端结合顶进采用 10m 长的拉森型钢板桩和 12m 长的 45# 工字钢，组合成顶进后靠，基坑前端（靠铁路）为提高边坡的抗滑能力，在距离铁路 8.5m 处压入一排长 9m 的 36# 工字钢（抗滑板桩），桩底处在－11m 处，如图 9-21 所示。箱涵制作的基坑开挖深度达 6.5m，局部挖深超过 7m。该处自 2.4m 以下为粉砂，5.2m 以下为淤泥质粘土，故基坑须穿过粉砂层进入淤泥质粘土。为保证铁路路基的安全，曾多次用电子计算机验算，认为只有把厚度为 7.9m 的淤泥质粘土加固，使强度提高 30%，才有可能使基坑开挖时的抗滑安全系数达到 1.02。否则，在列车通过时会引起铁路路基横向失稳。因而采用板桩围护、轻型井点、喷射井点加电渗的施工方法。

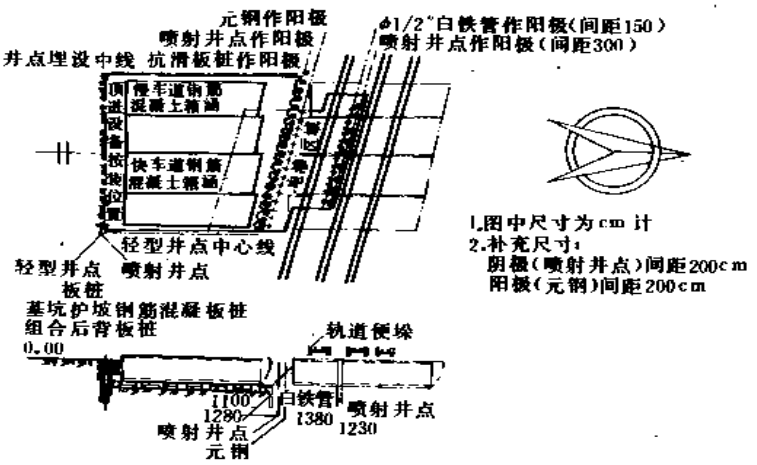


图 9-21　某立交箱涵工程电渗降水示意图

长 13m 的喷射井点作为阴极，埋深于－12.8m 处。冲孔直径 60cm，孔深 14m，下井点后即填黄砂，上部 2～3m 处用粘土封口，井点间距为 2m；阳极则用 *A*3 圆钢，上部因为粉砂，采用 φ22 并用塑料套管封闭，下部用 φ32 圆钢由电焊对接，共长 14m。全部电渗用三台直流电焊机及二台备用硅整流发电机。电压梯度约为 0.37V/cm，电流密度约为 4.5A/cm²。

根据实测，土的不排水强度比电渗前提高了 35%以上，基本符合要求。同时对拔出的圆钢进行检测，发现电蚀十分严重，特别是下部接近阴极滤管部分，几乎全被蚀光。

【工程实例 4】 浦东塘桥竖井开挖井点降水

该地段为粉砂层地基，建造一个 9×9 m 的方形沉井，井底开挖深度为 9m。在施工过程中采用了喷射井点进行降水，井点深度为 12m。自井点运转开始，实测了井边缘的地表沉降和井点降水漏斗的影响半径。半点的布置如图 9-22 所示，实测的井边缘沉降和影响半径如图 9-23

所示。

从图中可看出，在降水开始 20 余天的时间内，井边缘的沉降量 δ_A 大致以每日 2mm 直线增加，以后渐趋平缓。在降水漏斗稳定之后，降水影响半径为 50～60m，即为井点降水深度的 4～5 倍。

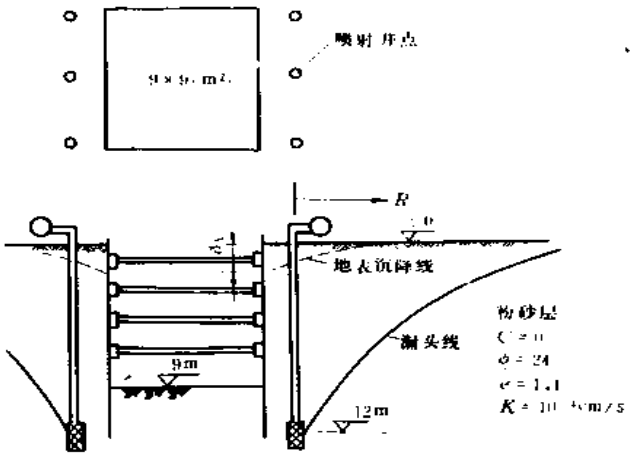


图 9-22　喷射井点布置图

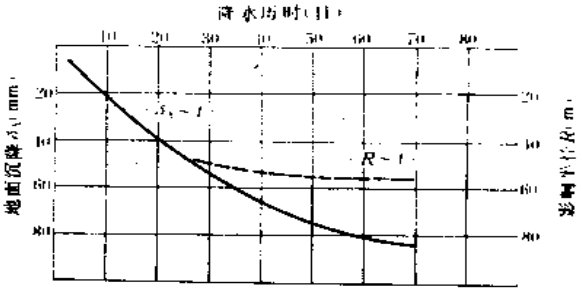


图 9-23　实测地表沉降和影响半径

【工程实例 5】 上海友谊商店主楼位于北京东路圆明园路口，地处黄浦江西 120m 左右，南距苏州河 60m，该楼长 82m、宽 34m、高 33m，是六层升板结构建筑，基础采用片筏基础，设有半地下室汽车库，见图 9-24。基础挖掘深度为离天然地面下 3.4m，东面离上海人民广播电台大楼 10m 处挖深达 4.2m。而上海人民广播电台是三十年代的建筑物、总高度 30m 的六层框架结构，其下为片筏基础，未采用桩基，但埋置深度仅为－1.50m。距离店南面 20m 及西面 16m 处均为 4～5 层三十年代的混合结构。为确保人民广播电台的安全，在基坑开挖采用井点降水的同时，在沿人民广播电台处设置回灌井点。

主　要　物　理　力　学　指　标　　表 9—7

土　名	含水量 w(%)	重度 γ (kN/m³)	孔隙比 e	压缩系数 $a_{(1-2)}$ (kPa)⁻¹	压缩模量 E (kPa)	内摩擦角 φ(°)	粘聚力 c (kPa)
褐黄色粉土	35.0	18.8	0.946	0.024	79	22°30′	0.08
灰色粉土	38.3	18.2	1.052	0.030	65	23°0′	0.08
灰色淤泥质粘土	48.0	17.4	1.399	0.100	22	10°45′	0.09

该处各土层的主要物理力学指标如表 9-7 所示。

第一层：褐黄色粉土，稍湿，含氧化铁斑点，土质均匀，一般层顶较层底粘性重，但该层较薄或缺失，厚度 0～1m，属中压缩性土。

第二层：灰色粉土，湿，易流动，层厚约 6m。土质尚均匀并夹有少量腐殖质，属中压缩性土。

第三层：灰色淤泥质粘土，湿、软塑，夹有薄层粉砂，层顶部夹砂较多，层中夹有少量蚌壳层，属高压缩性土。

降水井点及回灌井点的布置：

原始地下水位在天然地面下 1.5m，与电台大楼的基底齐平，挖掘时基坑底为天然地面下 3.4m，局部为 4.2m，如图 9-25 所示。但东面因近电台大楼而施工场地受到限制，故采用

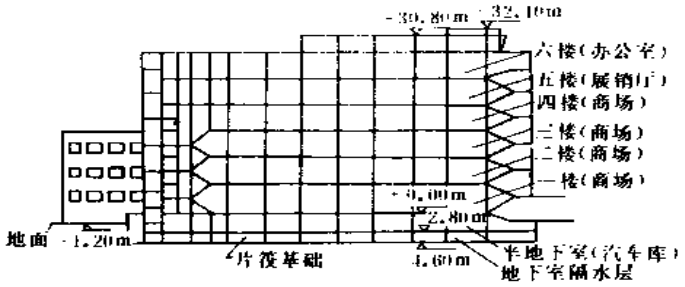


图 9-24　上海友谊商店主楼结构示意图

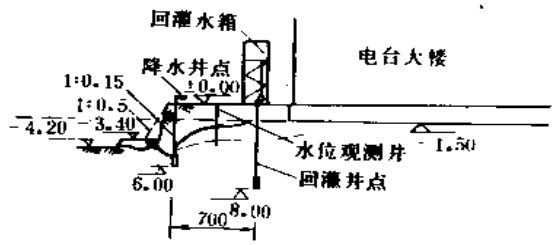


图 9-25　上海友谊商店降水、回灌井点布置

1∶0.5(垂直∶水平)的坡度，局部甚至采用 1∶0.15 的坡度，其余三面均采用 1∶0.75 的坡度。降水井点的范围为 44m×85m，井点长度为 7.1m，其中滤管长 1m，共采用三套轻型井点，总管为 10cm 直径，井管为 3.8cm，井点设备中的真空泵用 $W4$ 型，其抽气量为 113m³/min。南面和西面因恐影响原有建筑物，井点间距用 3m。

回灌井点与降水井点相距 7m，局部地段因场地限制缩小到 3m。沿电台大楼成线形布置，共长 38m，间距 3m，共计 13 根，回灌井点长为 8m，埋至灰粉土层底部，每根回灌井点都设置阀以调节灌水量。回灌水源采用自来水，接到 5m 高架空的回灌水箱，使产生压力以利回灌，在回灌水箱与回灌总管的联接管上设置流量表、阀门及压力表。

图 9-26 为本工程中降水、回灌井点的平面布置，以及测试系统如水位观测井、沉降观测点、临时基准点等。在离开降水地段 60m 及 80m 处设置水准点 C 和 P，和在南面建筑物墙上设置临时水准点临 1、临 2、临 3。水位观测井用 5cm 铁管，长 6m，下部 3m 为滤管，但回灌地段的观测井则用 3m 长的全透水的滤管。

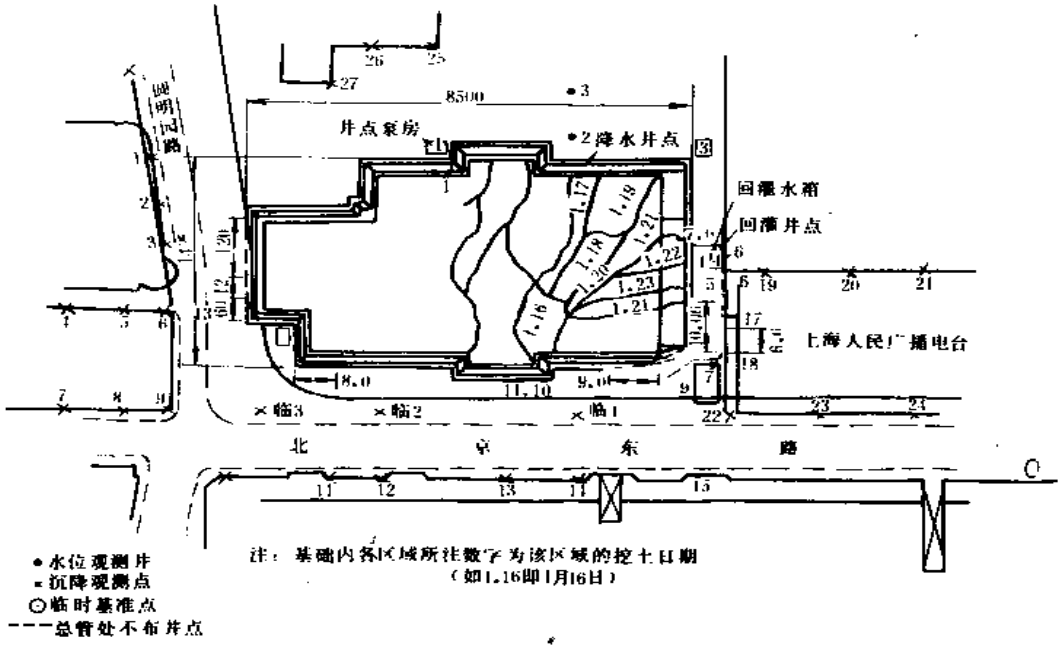


图 9-26　上海友谊商店井点平面布置

1 号降水井点于 1981 年 12 月 28 日开始降水，2 号井点于 12 月 29 日开始降水，东面回灌

地段的3号井点，在4号回灌井点灌水一天后再行降水，即在1982年1月3日开始。回灌井点须视地下水位的深浅来调节回灌量的大小。

措施及效果

东面边坡虽改小到1：0.5的坡度，但仍不能满足悬臂梁部份与基础一起挖土和同时浇捣混凝土的要求，由于井点降水及回灌效果均好，坡脚的地下水位一直维持在天然地面下4.5～5.5m左右，边坡稳定，故采用油布保护边坡，将坡度改陡到1：0.15，使基坑底部改大以满足一次浇捣的需要，未发生问题。

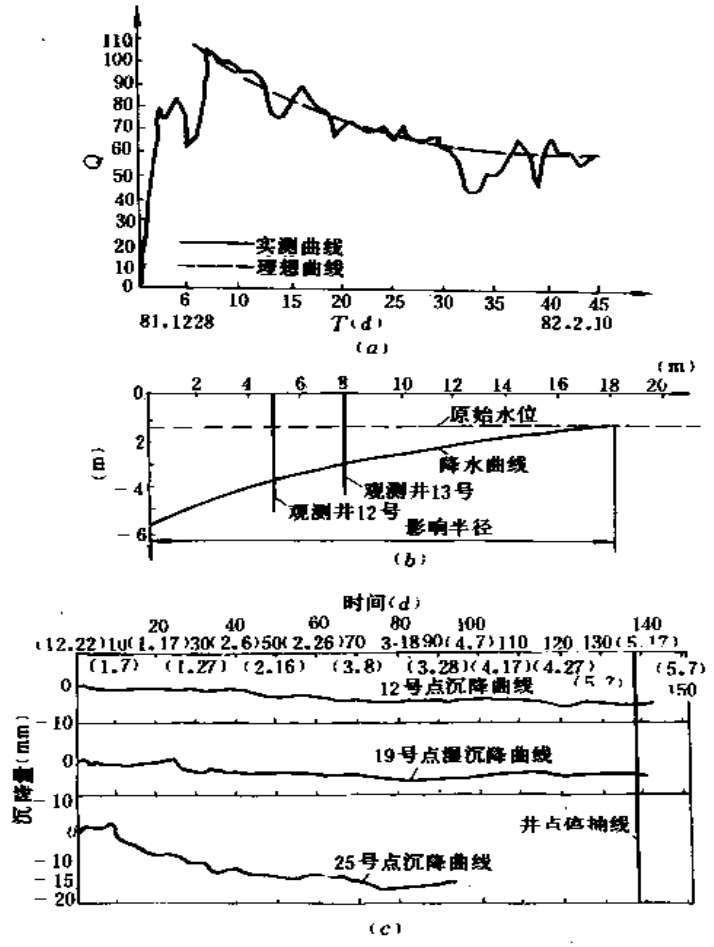


图 9-27　上海友谊商店水量与时间、地下水位、沉降量与时间的关系曲线

(a)出水量Q与时间T关系曲线(81.12.28～82.2.10)；

(b)地下水位降落曲线；(c)沉降量与时间关系曲线

回灌井点通过调节灌水量，使地下水位保持在天然地面下1.50m左右，即保持在原始地下水位处。在自来水出现断水时，则降水亦相应停止；当停电15小时使井点降水停止时，则回灌亦相应停止。

挖土结束后，基坑边坡保持稳定且干燥，为减少对电台大楼的影响，根据边坡、地下水位和天气的情况，对3号降水井点和4号灌水井点减少其抽、灌的时间。

在抽、灌水期间，必须密切注意水量、水位的观测，对观测井堵塞时须采取措施疏通。

兹将该处的水量、水位、沉降曲线示如图 9-27。

降水前后粉质粘土和粉土的含水量，分别降低了 3.17%和 2.17～5.73%。降水后的含水量系在基坑开挖时取出土样的含水量。

回灌不位一直保持在原有地下水位的水平左右，即－1.5m 左右，证明回灌是有效的

【工程实例 6】宝钢 3 号雨水泵站基坑开挖井点降水工程的回灌措施

宝钢 3 号雨水泵站基坑开挖 4.5～5.0m，距坡顶 4～5m 处有一桥台。基坑开挖采用轻型井点降水，井点深度 6m。该地段为砂质粉土和粉质粘土地基，如图 9-28 所示。

为避免井点降水使桥台基础产生沉降，在桥台基础周围采取了回灌水措施，并临测桥台二侧 A 和 B 点的实际沉降量。实测情况如图 9-29 所示。

在降水开始一个月的时间内，回灌的效果较好，实测桥台沉降量几乎为零，这段时间 内桥上未通车。以后桥上靠 B 一侧单向通车，回灌水因水沟常被出土填没而未维持正常，桥台开始沉降。到抽水历时达 180 天时，桥台的沉降量为 50～57mm。

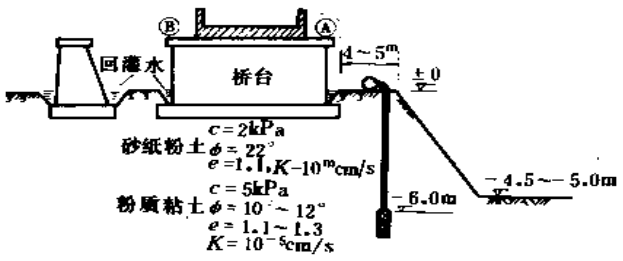


图 9-28　基坑开挖井点布置图

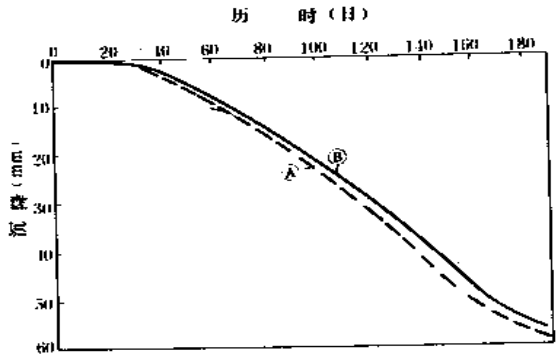


图 9-29　实测降水沉降曲线

10. 深基坑支护工程实例介绍

深基坑设计、施工技术形式多样，与一般岩土工程特性一样，深基坑支护技术的关键也是源于实践，迄今为止，我国已有众多的成功经验，个别地区也有失败教训。为了便于设计人员在计算时参考工程经验，本章挑选了部分典型深基坑支护工程实例，以便参考。

10.1 北京京城大厦(H 型钢加锚杆)

京城大厦是目前较深的基坑支护工程(深 23.5m)，用 488×300H 型钢(钢号 SM50B)，长 27m，打入桩档土，间距 1.1m，以 3 层锚杆拉结(图 10-1)。

京城大厦钢桩锚杆支护设计主动土压力呈三角形分布不变，以基坑深 23.5m 为基数，3 层锚杆不同位置为变数，求出不同支点水平力及支座弯矩、跨中弯矩，得出较优锚杆位置(如图 10-1 所示)。这个计算方法是假定支座不位移，把钢桩当连续梁来计算。但是实测支点是位移的，而且位移量不小。

(1)支座位移。在距钢桩 0.5m 处留 4 个测孔(东 2，西 2)。近似地认为测孔与钢桩变形相似。结果为、第一层锚杆处变形量为 52.2～90mm，第二层锚杆处变形量为 11.4～55.5mm，第三层锚杆处变形量为 5.1～22.1mm。

(2)由中国建研院地基所实测预应力张拉情况表明，当拉伸机加到 900kN 时锚体内应力出现明显变化，锚杆前段 3m 范围内由拉应力变为压应力，非锚固段受压，锚固段受拉，其转化点约在 3～4m 处，实际计算非锚固段 $L=3.6$m，计算符合实测情况。

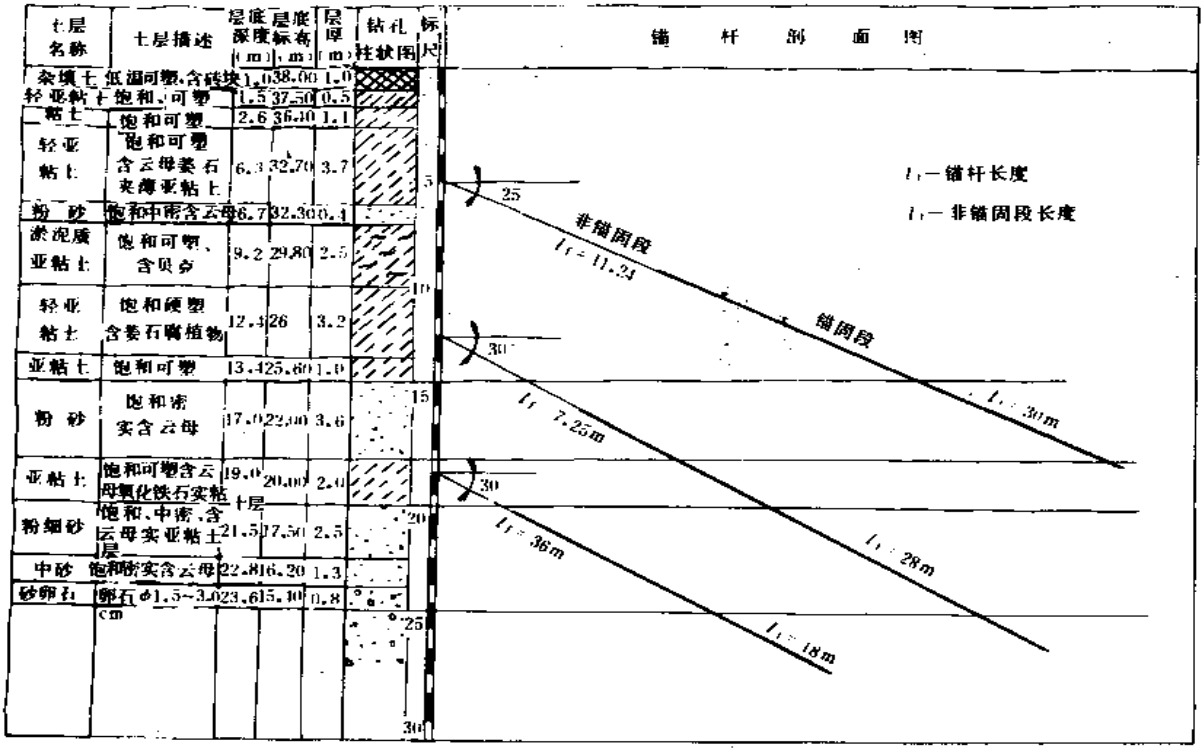


图 10-1 京城大厦锚杆及地质剖面图

10.2 北京华侨公寓(桩墙合一施工方法)

北京华侨公寓地下车库工程,将护坡桩移至结构墙体位置。轴线桩既承受垂直柱荷载又承受土压力水平荷载,轴线间增加1～3根挡土桩承受土压力。同时,在桩间砌墙作为地下室墙并采取防水措施。施工时利用地下室—7.65 m处梁板作桩的水平支撑,支妥后进行半逆作法施工。

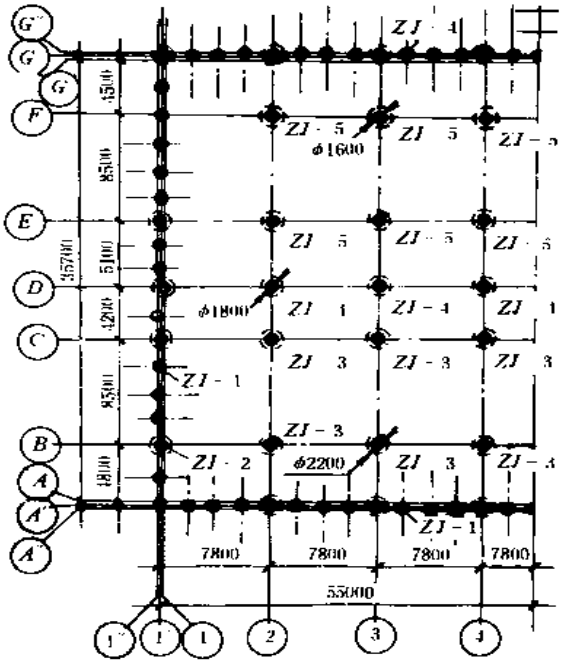


图 10-2 华侨公寓地下车库平面图

具体做法是:浇筑四周挡土桩和轴线相交的承重桩,挖土到地下室第三层底板(—7.65 m),然后挖承重扩底桩,做—7.65 m处的连梁和板以作为挡土桩的支撑,同时往—7.65m以下挖土(南面最深到11.3m,坡度1/8.6),往上则施工第三层结构,属地下半逆作法。详见图

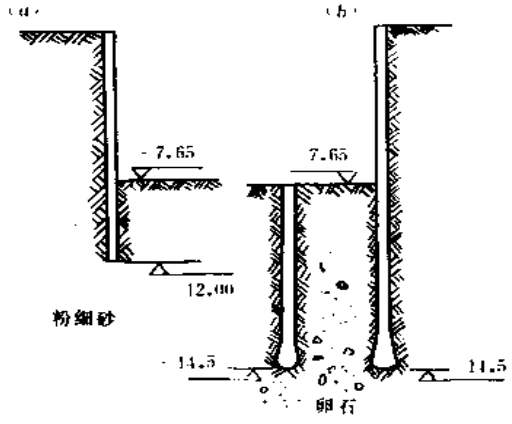


图 10-3 挡土桩承重桩剖面

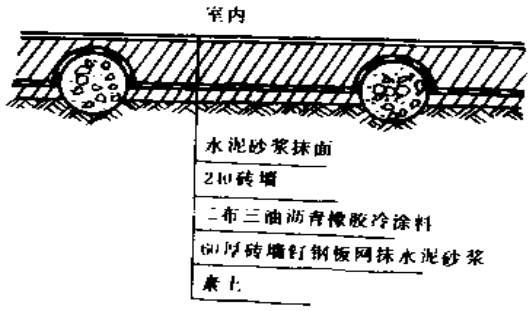


图 10-4 外墙防水构造图

10-2、图 10-3、图 10-4 及图 10-5。

采用桩墙合一的施工法，可加快进度，节约投资。华侨公寓车库工程实践表明，挡土桩用工程结构梁板作支撑是深基坑支护在北京地区的新试验，而采用半逆作法使上下结构同时施工又加快了进度。这种方法与先做基坑支护再挖土做基础和地下结构相比，可节约大量挖方及回填，节约钢筋混凝土。该工程共节约投资 19 万元，钢筋 22.3t，混凝土 718m³。

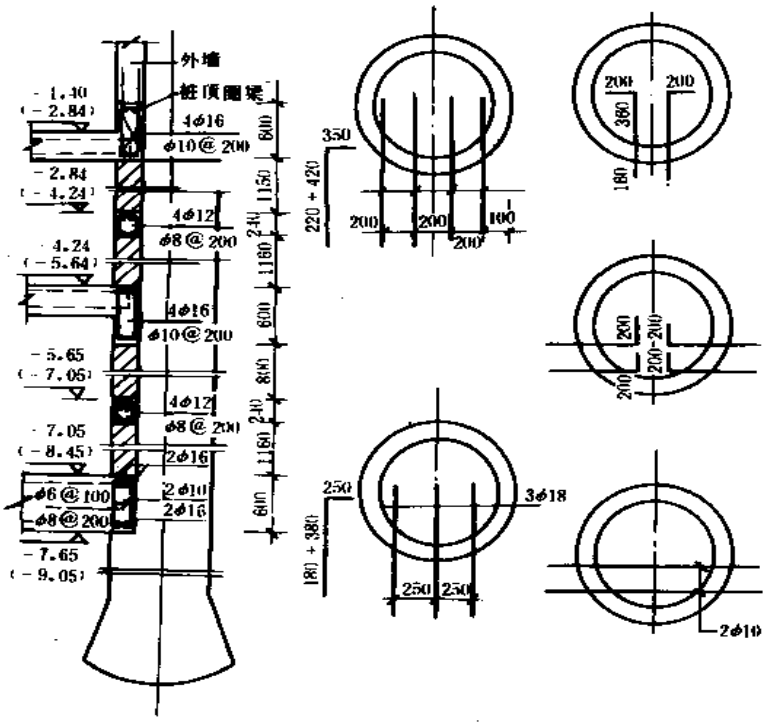


图 10—5　桩与墙连接构造图

10.3　上海锦江分馆

上海锦江分馆是一座五星级的豪华宾馆，拥用 727 套标准客房；由主楼与裙房两部分组成。分馆地处闹市，东、西两边紧靠城市主要干道，南距长乐中学教学楼 6m，西邻三层民房约 3.5～6m。基地面积为 6800m²，地下建筑物约占基地面积的 90%。分馆建筑面积为 65122m²。地质条件如表 10-6 所示。

工　程　地　质　资　料　　表 10-1

土层名称	层厚(m)	层底标高(m)	特　征	$\overline{w}$(%)	γ (g/cm³)	G (g/cm³)	e	φ (°)	c (kg/cm²)
人工填土	1.40～112.0	−1.40～−11.20	基地内有大面积工事，开挖深度在−3.20～−11.20 褐灰色，为粘性土与煤渣，碎砖，垃圾混合物，均匀性差，松散						
亚粘土	1.20～1.90	−3.00～−3.20	褐黄～褐灰色，湿，含氧化铁，铁锰质结核，属中心高压缩性[R]=11t/m²(107.8kN/m²)	38	1.81	1.73	1.08	10	0.12

土层名称	层厚(m)	层底标高(m)	特　征	$\bar{w}$(%)	γ(g/cm³)	G(g/cm³)	e	φ(°)	c(kg/cm²)
淤泥质亚粘土	4.10—5.30	−8.00～−8.50	灰色，饱和，软塑～流塑。含腐蚀质夹薄层粉砂和团状粘土，局部砂性重。土质不均匀，属高压缩性[R]=8t/m²(78.4kN/m²)	46.7	1.74	2.73	1.32	9	0.10
淤泥质粘土	7.50～8.50	−16.00～−16.50	灰色，饱和，软塑～流塑，含腐植质，夹少量薄层粉砂，薄层厚0.5～1mm，土质尚均匀，属高压缩性[R]=7.5t/m²(73.5kN/m²)	49.10	1.71	2.74	1.39	7.5	0.10
淤泥质亚粘土	11.70～12.80	−28.20～−29.30	灰～褐灰色，很湿～饱和，流塑～可塑，含云母屑，腐植质，少量灰白色泥，质结构，埋深在22.50以上土质逐渐变紧，灰粉砂薄层，薄层厚1～3mm，局部砂性重。土质尚均匀，属中～高等压缩性[R]=10.5t/m²(102.9kN/m²)	37.1	1.80	2.73	1.08	14	0.12

1. 支护方案的选择

锦江分馆主楼基础埋深9.10m，局部埋深11.50m，宜采用拉森板桩，拉森板桩有力学性能好，密封好，耐锤击。施打时对周围环境影响小等优点。但受到现场实际条件限制，无法使用拉锚，要采用内支撑。由于板桩的刚度有限，显然安装一道支撑是无法满足的。支撑的道数也不宜过多，因为道数多，不仅支撑安装难度增大而且对其后各道工序施工，如挖土、绑扎钢筋增加了难度。支撑的间距不宜过密，过密的支撑也会给挖土、绑扎钢筋、浇捣混凝土造成困难。间距也不宜过大，过大的间距将使支撑与围檩的截面增大、重量增加，增加安装的难度。

经设计本工程选用FSP—VIL钢板桩和ϕ609×11钢管支撑。

2. 节点设计

(1)支撑的长度与连接

整根支撑长度达45m，不论从经济上还是技术上都不需要做成整根。一般应做成几段组合而成。每段支撑的自重应由安装支撑设备的起重能力来确定，在安装时组合，组合接头一般可采用法兰接头。为了支撑安装的需要和缩短支撑的计算长度，在相应位置设置立柱，来支承和固定支撑。分析了锦江分馆的实际情况，认为可利用部分工程桩作立柱，其理由是：

1)锦江分馆的工程桩沉桩质量好，其位置和垂直度均小于规范允许的偏差；

2)因为用的是钢管桩，且为了工程施工的安全，均未送桩。

有条件利用工程桩作支撑的立柱。用工程桩作支撑的立柱的优点是可以减少施工措施费，减少施工工序和可以加快施工进度。

支撑与立柱连接节点，如图10-6所示。

(2)支撑与围檩的连接节点

为了安装围檩的需要，在拉森板桩上每隔一定距离焊上钢牛腿，以作为安装钢围檩搁置之用，其标高应符合支撑安装标高的要求。其节点如图10-7所示。这里要注意三点：

1)支撑尽端处要做个倒牛腿，以便支撑安装时可以搁置。

2)支撑的长度应该有一个调整间隙，一般支撑应做短200mm。

3)为了使围檩与板柱间紧密结合，使板桩整体受力，因此其间隙必须用强度等级高的混凝

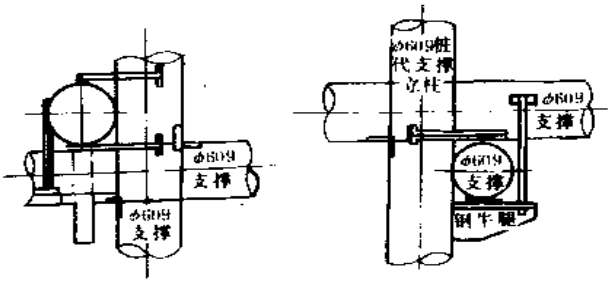


图 10-6　支撑与立柱连接节点

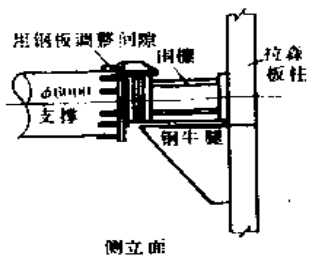


图 10-7　支撑与围檩的连接节点

土填实。

(3)立柱穿越桩承台的处理

立柱穿越桩承台的节点设计，穿越部位采用等截面角铁置换钢管。

3. 测试资料分析

(1). 工程桩与板桩的位移

板桩施工时对工程有一定的影响，因板桩施工挤压工程桩，使工程桩向内位移，其影响程度逐排减弱，三排以外影响极少。

挖土方法和顺序对板桩和工程桩都会有一定的影响，合理确定施工顺序和施工方法，可以减少其对板桩和工程桩的影响。工程中测得开挖前板桩的位置，土方开挖至第一道支撑尚未安装时板柱的位移，桩承台完成后拆除水平支撑时的位移，由于采用了分层开挖，分层支撑的方法，板桩上口的位移量在 100mm 以内。测得挖至坑底时实测板桩垂直度，板桩全部外倾，部分板桩呈弯曲状。综合分析认为，可能是在沉桩中，由于地下障碍物多，在穿越较厚的杂填土时引起变形，同时板桩本身的平直度确有一定的误差等，各种因素都会影响板桩沉桩时的垂直度。

(2)板桩的内应力

在开挖过程中，对部分板桩的应力进行测试。以 11 号板桩为例，10 月 27 日挖土至 6m 时，支撑一道已安装完毕，其应力与挠度均为理论计算值的 20%，11 月 26 日挖至坑底，此时 300 厚 C30 钢筋混凝土垫层尚未完成，板桩应力增加较大，但仍未达到[σ]，仅为[σ]的 30%，上口处应力略有下降。因此，我们建议不再设置第三道支撑。当 300 厚 C30 钢筋混凝土垫层完成的完成板桩的应力均略有下降。

从锦江分馆全部板桩实测数据看，实测数据均小于理论计算值，最大的应力也只达到[σ]的 50%。假设板桩在沉桩时有一定的初始应力，估计两者相加也不分超过[σ]。从实际位移和挠曲情况充分表明了临时性板桩与理论计算值不一致，故其计算理论，受力机量还值得深入探讨。

(3)支撑内应力

从支撑内应力实测资料可见：

1)在板桩设计时，可以允许板桩有一定量的位移值，这从经济上，技术上看都是合理的。从实际测量中证实了允许板桩有少量位移后对板桩是有利的。因为在板桩位移后，其外力将进行重分配，土压力将达到最小值，土体降水固结，基坑内密集群桩，对提高被动土压力，防止圆弧滑动，都是十分有利的，因此，从实测中得知支撑中实际应力最大值时仅为理论计算值的 75%，一般均小于 50%。

2)支撑同一部位垂直与水平方向的应力是不相同的，说明支撑实际工作状态是偏心的。这种偏差主要是安装偏差，造成的应力差异最大可达 147MPa。

3)同一根支撑两端的应力是不一致的，这证实立柱处的节点在起作用，使支撑内轴力的传递起了变化。

4)第一道支撑内的应力与第二道支撑内的应力十分接近，安装第二道支撑后第一道支撑内的应力减少甚少，这可能由于在挖土时，运土车辆和挖土机械紧靠坑边，造成坑边荷载过大，使板桩产生位移，产生板桩内应力重新分配所致。

5)挖土超深或因坑边荷载急剧增加，支撑内应力剧变，例如 11 月中旬，由于挖土超深过多，引起板桩变形，支撑内应力急剧增加。12 月中旬，由于进行浇灌混凝土，坑边荷载剧增形起支撑内应力剧变。

据上述测试资料，反过来验证了不设置第三道支撑是可能的，能满足安全要求。这一措施的实现，不仅减少了数十万元的支撑安装、使用和拆除费用，还缩短了工期二周，取得了相当好的经济效益。

4. 降水

在施工方案选择中，对锦江分馆主楼基坑开挖降水的几个方案作了比较，选用了四台喷射泵，分别带动四周共 90 根井管。电渗系统的极点其阳极利用钢管桩用导线引出，阴极用 ϕ20 钢筋打入地下，其间距和长度与井管一致，导线用 ϕ14 钢筋，用四台 $A\times8-500$ 型直流焊机整流供电。

水位观测井直径 ϕ100，深 12m，滤网长 10m。

降水井管长 12.5m，另加滤头 1.50m，间距 2～3m，(因为板桩一组为 1m)，给水回水管设在拉森板桩外侧。

在沉井管中，有部分井管无法沉至设计深度，其主要原因是处理地下障碍物时，填入土中硬块太多，其次在打桩时场地作过处理，表面铺设和碾压过一厚层道碴，清除不彻底，因此，在冲井管时，泥砂被冲出，道碴，硬块则积聚底部，使井管沉不到设计深度，实际只沉入 67 根井管。

为了保护南、西面危房，不使危险程度进一步发展，故在南、西面设回灌井点，管长 12m，静水压回灌。

降水井点管布置在拉森板桩槽口内，其井点管的砂井会随基坑土方的开挖而外露，将会明显影响真空度，影响其降水效果，故在挖土时，砂井应随挖土随用粘土封密实。

本工程的降水井管的长度，显然是不符合许多教科书上所指出的降水曲线的要求的。这是因为该工程地下 7.5m 处是一层淤泥质粘土，渗透系数极小，即使井点加电渗其效果也很不理想。因此，反过来看，水要从这层土渗出也是极为困难的。所以，我们认为在施工短期内，可将这层土看作不透水层，只要将降水井管插入这层土中，在四周形成一个挡土帷幕，就可把被开挖的土与坑外土隔开，降水只需抽出这块被围起土体中的水分，就可达到预期的效果。

用井点降水，不等于能把基坑内的水都抽出来了，土体内的水只能抽出一部分。在基坑内施工时，水还会从其他途径进入基坑。例如下雨时，雨水进入基坑，还有地下水沿钢管桩壁向上渗出，这些水都呈明水形式。因此，在基坑开挖时，应在底部挖排水沟、集水井，及时用水泵将明水排出，在垫层设置连通的盲沟系统和集水井。为此，在基础施工时，现场要准备足够的排水设备，在暴雨季节，更应特别重视。

10.4 上海陆家宅沪办大楼

沪办大楼为全国部分省、中央部分部委驻上海办事机构，联合组建的办公大楼，由办公室、餐厅、汽车库三个主要部分组成。主楼平面呈三角(六边)形，周围设置1层及4层裙房，裙房由A、B、C、D四个区组成。基地面积108700m²，总建筑面积55975m²，投资8724.8万元人民币。

大楼坐落在中山北路、武宁路交会处的东南角。中山北路靠近沪办大楼一侧，有煤气管、电缆线、上水管、下水管等共11条管线，靠得最近的一条 ϕ500 煤气管与裙房基础的最近处仅0.1m；东面为3栋5层住宅，裙房基础与住宅的净距仅5.5m，裙房与住宅间有 ϕ300 两水管距裙房基础为3.3m。南面为沪杭铁路线，裙房基础与铁轨的最近处为10.8m。总平面详见图10-8。

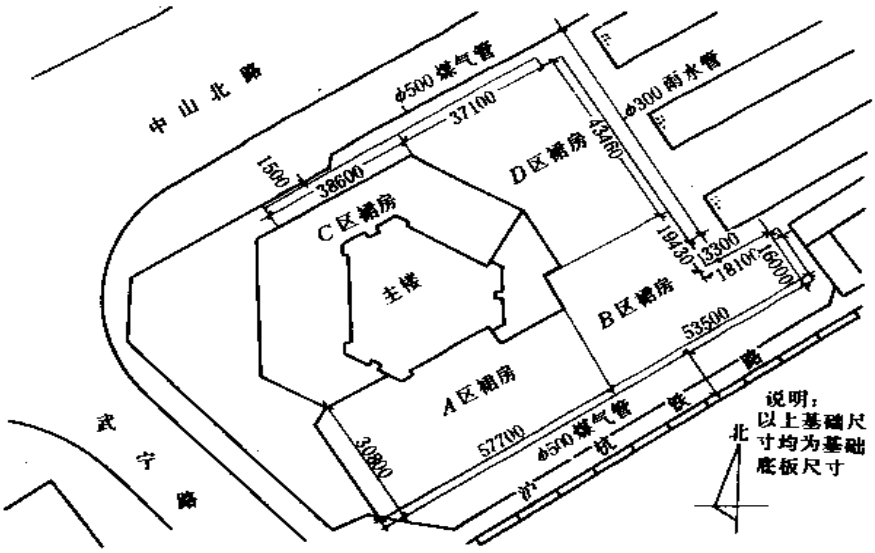


图 10-8 总平面图

本工程基础主楼埋深－8.5m，裙房埋深－4.5m，主要埋置在灰色亚砂土层中，地质资料见表10-2。

地 质 资 料 表 10-2

层 次	土 名	层面标高(m)	平均厚度(m)	物 理 力 学 性 能
1	杂填土	3.33～2.88	1.80	
2	灰黄色亚粘土	1.73～0.80	1.30	w=35.8% γ=18.6kN/m² c=0.005N/mm² φ=20° P_s=0.9N/mm² k=1.24×10⁻⁴mm/s
3A	灰色亚砂土	0.45～0.42	4.2	w=32.1% γ=18.9kN/m² C=0.005N/mm² φ=22.5° P_s=3.6N/mm² k=1.67×10⁻³mm/s
3B	灰色粉砂	－3.83～－5.17	4.25	w=26.8% γ=19.5kN/m³ c=0 φ=24° P_s=5.8N/mm² k=6.59×10⁻⁴mm/s
4A	灰色淤泥质粘土	－7.92～－8.94	4.40	w4=45.5% γ=17.6kN/mm³ c=0.11N/mm² φ=11.5° P_s=0.55N/mm² k=1.64×10⁻⁵mm/s
4B	灰色粘土	－11.72～－14.28	6.20	w=40.1% γ=18.0kN/m³ c=0.011N/mm² φ=11.5° P_s=0.7N/mm² k=1.64×10⁻⁵mm/s

降水后土体的 γ、φ、c 值均有提高。见表 10-3 及表 10-4。

降水前后含水率变化表 表 10-3

土　层	取样日期	深　度(m)	含水率 w(%)	
			降水前	降水后
Ⅲ	1985.10.12	−5～−6	46.17	37.10
Ⅳ	1985.11.18	−8～−9	49.10	38.00

降水前后 γ、φ、c 值变化表 表 10-4

土层	取样日期	深度(m)	γ(g/cm³)		φ(°)		c(kg/cm²)	
			降水前	降水后	降水前	降水后	降水前	降水后
Ⅲ	1985.10.30	−6.4	1.74	1.77	9	21.6	0.10	0.17

本工程井点回灌井不理想，降水仍然对周围有一定的影响，究其原因，认为这在回灌水进入的夹砂层与降水抽汲的夹砂层不一致所致，其次井点管与回灌井管之间距离过近形成连近现象，也就影响回灌效果。

拉森板桩的阻水效果是相对的。本工程拉森板桩沉桩十分好，由于咬口中未采用阻水材料，故在部分接缝中仍有少量水渗出。井点降水时，其影响也会通过不完全密合的接缝中向外施加影响，但其影响范围应该说远比没有拉森板桩阻挡时要小得多，根据现场实测资料看，其影响范围约为进管长度的 2.5 倍(即约为 30m)。

井点降水对周围的影响是很大的，其程度不亚于沉桩。因此，在深基础施工时，对周围环境(土体，建筑物，构筑物，道路，管线等)的监护测量是十分必要的。因为这可提供可靠的数据，能及早预计和发现周围环境的变化情况及其发展，能及时提供危害程度和范围的预计，能及时采取有效的针对性措施，可以减少或避免对周围环境的危害。

1. 挖土

(1)基坑开挖的方法与顺序

基坑开挖是在内支撑支护情况下开挖的，如此大的范围在上海尚属首次。选用挖土设备时，应尽量选用产量高的液压挖土机，但由于坑内有支撑会影响液压挖土机性能的发挥。为此制订了挖土与支撑安装交叉顺序，如图 10-9。

(2)基坑支护方案

基坑分二层开挖，下层基坑采用钢筋混凝土拉锚板桩挡土方案，此方案做法：

1)根据钢筋混凝土板桩与钢筋混凝土锚桩的拉锚距离，定出基坑第一层开挖范围是：包括主楼基础及距主楼基础边≥12m 钢筋混凝土板桩拉锚距离，挖深至裙房基底 3m。

2)施打板桩、锚桩、浇捣锚梁，安装拉锚钢筋。

3)在板桩与锚桩范围内铺 0.15m 厚道渣，浇捣 0.20m 厚，C30 混凝土地坪，为了防止锚拉区硬地坪产生位移影响裙房基础工程桩，硬地坪与裙房桩间用砂隔开，详见图 10-10

4)基坑第二交开挖是主楼基坑部分，挖至主楼基坑底，深度为 4m。

5)主楼基础施工完成后，再逐块开挖施工裙房各区基础。

此方案的特点：

a. 钢筋混凝土板桩的刚度大；钢筋混凝土板桩锚筋安装易拧紧、施加预应力后，基坑才开挖，开挖后桩顶位移很小。

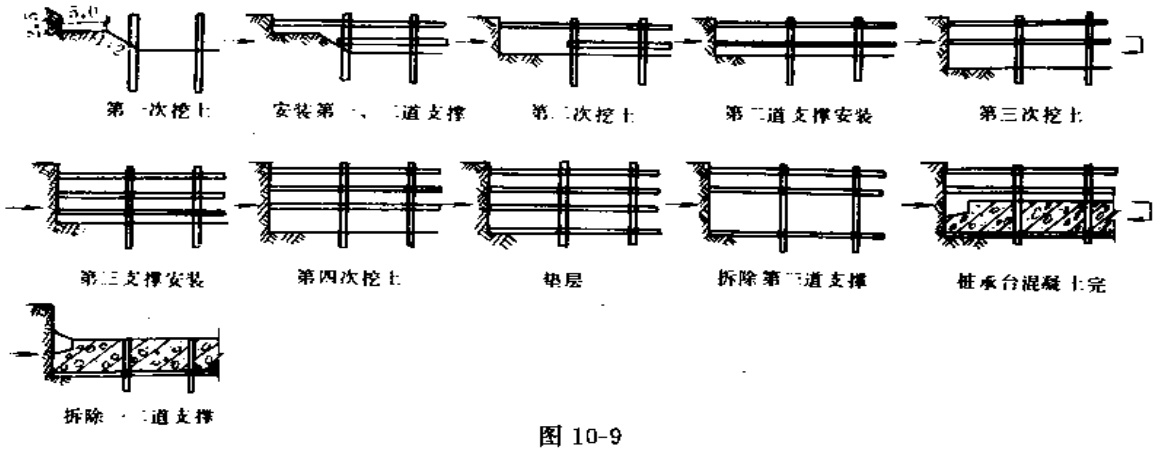


图 10-9

b. 施工场地大，基坑第一次开挖主楼基坑以外部分的钢筋混凝土板桩锚拉区可作为主楼基础施工阶段的施工场地。

此工程的做法详见图 10-11，拉锚板桩布置详见图 10-12。

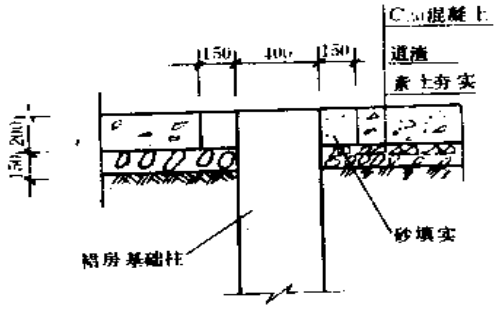


图 10-10　硬地坪与桩连接节点

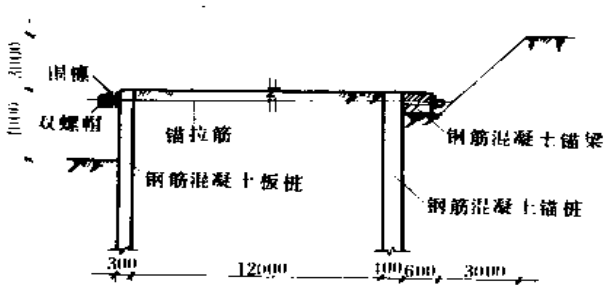


图 10-11　单拉锚钢筋混凝土板桩

(3)两层开挖深度的确定

确定基坑两层开挖深度的原则是：

1)满足下层基坑能设单锚板桩；

2)尽可能减少土方回填量。沪办工程第一层坑底开挖标高，选择于裙房基础底标高，第二层开挖到主楼基础底标高。

(4)主楼基坑开挖范围的确定

第一层基坑开挖范围主要考虑下列条件：

1)在主楼基坑钢筋混凝土板桩外要留出钢筋混凝土板桩与钢筋混凝土锚桩之间足够的拉锚距离，锚桩要设到基坑壁土体滑动面之外稳定土体区，拉锚距离由计算确定。

2)主楼基坑的钢筋混凝土板桩拉锚区，可作为基础钢筋混凝土工程的施工道路和材料堆场。

第二层基坑的开挖范围，就是板桩支护范围内的主楼基坑。

3)单锚钢筋混凝土板桩锚定结构设计：

单锚板桩锚定效果的好坏，是单锚板桩成败的关键，必须要认真设计。对场地较大的工程

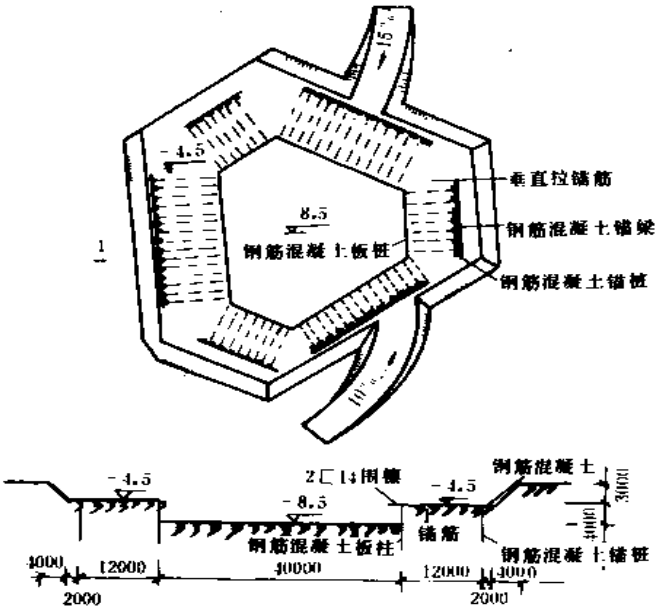


图 10-12　沪办大楼单位锚钢筋混凝土板桩布置图

有拉锚锚则可设置垂直拉锚结构(锚筋与钢筋混凝土板桩墙垂直);而对场地比较狭窄、垂直拉锚距离不够时,可灵活采用斜拉锚(锚筋与钢筋混凝土板桩墙不垂直)、对拉锚(对距离靠近的板桩墙,直接用锚筋拉结)、45°角撑(对基坑转角的相邻二边,加型钢支撑)等措施以达到对板桩的锚定作用。

2. 单锚挡土板桩计算

主楼基坑第二层开挖采用单拉锚挡土板桩。自然地坪下 3m 至 7m 为亚砂土,$\gamma_1=18.9\ kN/m^3$,$\varphi_1=24°$;7m 以下为粉砂层,$\gamma_2=19.5kN/m^3$,$\varphi_2=28°$(在地质资料中 $\varphi_1=22.5$、$\varphi_{21}=24°$,由于工程桩的挤密作用和降水固结作用,φ 值作了适当调整,地质资料说明中给出 $\varphi_1=24°$,$\varphi_1=28°$);距板桩 1.0m 以外有 $q=30kPa$ 附加荷载。

(1)计算得单位宽度板桩墙上的受土压力强度。绘出土压力分布图,见图 10-13。

(2)计算得板桩墙上土压力强度值等于零的那一点距基础底土面的距离 $y_0=0.5m$。

(3)根据简支梁计算方法计算等值梁 CS 的弯矩及 S 点处的反力 P_0。计算简图见图 10-14。采用 0.5×0.3m 钢筋混凝土板桩,混凝土强度等级 C30,钢筋用 Ⅰ 级钢,采用 4ϕ16(对称配筋)。

(4)计算得板桩的最小入土深度 $t=45mm$,则板桩长 $L=4.0+4.5=8.5m$(不包括 0.5m 桩尖),本工程板桩采用 0.5×0.3×9.0m。

(5)锚拉钢筋的选择:锚拉钢筋每 1.5m 一道,则锚拉筋的拉力 $N=63.9kN$,考虑锚筋拉力的不均匀系数 1.3,用 Ⅰ 级钢 ϕ25。

与围檩连接的螺杆用 ϕ28 钢筋加工。锚筋与钢筋混凝土板桩的锚拉节点详见图 10-15。

(6)计算得锚桩采用 0.4×0.4×7.5m,混凝土 C30 主筋选用 Ⅰ 级钢 4ϕ22。

(7)计算得锚桩与板桩的最小净距 $D=10m$,取 12m。

求 D 的计算简图见图 10-16

(8)锚桩土压力分布,见图 10-17。

(9)计算得围檩断面为 2[14。

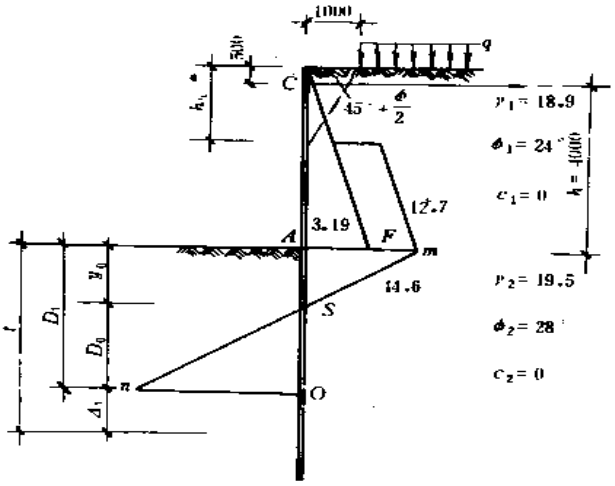


图 10-13　土压力分布图

(10)锚筋与锚桩连接：用一根现浇梁将锚筋锚入梁中，梁与锚桩浇在一起，以传递锚筋传来的拉力，见图 10-18。

(11)裙房钢筋混凝土悬臂板桩计算：开挖深度 3m，板桩埋入 0.30m，地坪活载 20MPa，土层为亚砂土，$\gamma=18.9kN/m^3$，$\varphi=24°$，计算得单位宽度板桩上所受的土压力强度，绘出压力分布图，见图 10-19。钢筋混凝土板桩选用 0.3×0.5×8m，混凝土强度等级为 C30，主筋选用Ⅰ级钢 4ϕ20。

3. 降水措施

主楼基坑开挖，采用二级轻型井点降水，基坑分两次开挖，在第一次开挖深 3m 的坑槽边，打第一级轻型井点管长 6m，抽水一周后挖土，

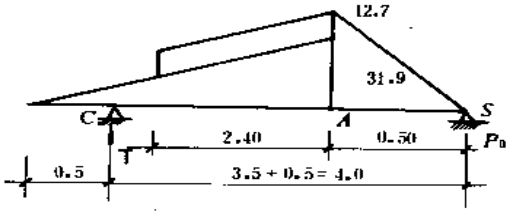


图 10-14　等值梁计算箱图

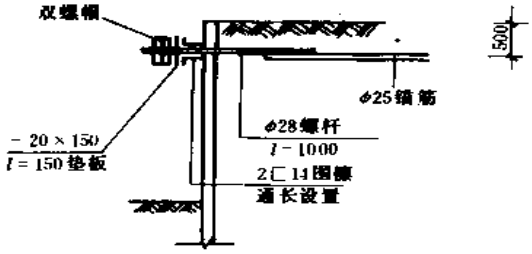


图 10-15　板桩锚拉节点

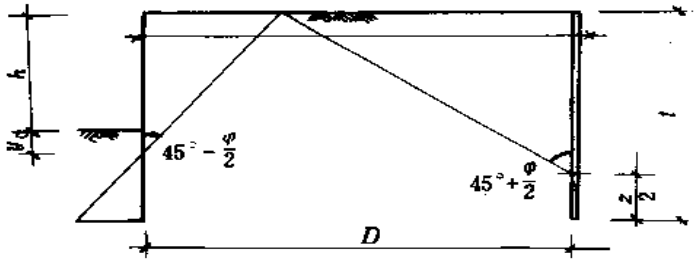


图 10-16　求 D 的计算简图

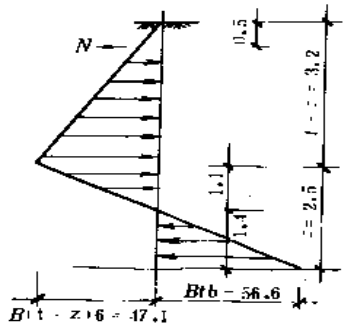


图 10-17　锚桩土压力分布图

再在第二次开挖基坑范围的周边打第二级轻型井点，管长 7m，再抽水一周后挖土。基坑开挖深度内的土体为亚砂土，渗透系数 $k=1.7\times10^{-5}mm/s$，土体有良好的渗透性，井点的降水性能很好，基坑开挖范围内的土体均较干燥。井点管布置详见图 10-20。

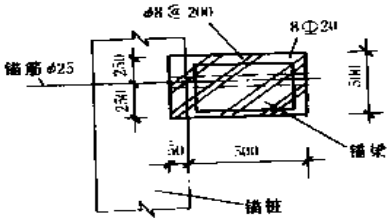


图 10-18　锚桩与锚筋连接节点

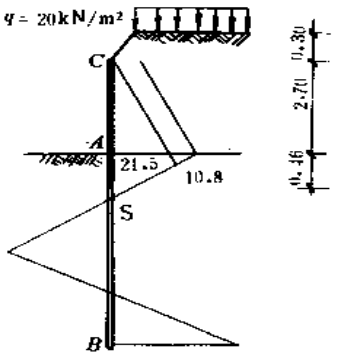


图 10-19　土压力分布图

4. 应力监测结果分析

(1)当挖土达到测试拉锚筋所在板桩墙处，拉锚筋应力陡增，一般均达到历时最大值的 65～100%。随着锚拉筋内力的不断自行调整，锚筋的内力逐渐趋于稳定。

(2)各锚筋的内力不均匀系数，在开挖阶段为 1.14～1.9，随着拉锚筋应力的自行调整，不均匀系数降为 1.43。产生锚筋应力不均匀的主要原因是：1)锚筋安装是用拧紧螺帽的方法来拉紧钢筋，锚筋的松紧不一；2)围檩 2[14 为连续梁，锚筋在梁中或梁端传给锚筋的力也不相同。使各锚筋应力不尽相同。所以，在设计中应考虑锚拉筋受力不均匀系数应不小于 1.5。

(3)从基坑开挖至基础底板混凝土浇捣将近二个月，在这一段时间内，轻型井点管的水泵几次发生故障，地下水上升，水从较大的板桩缝内流入基坑，形成流砂，使基坑个别板桩外侧坑边土体流失形成孔洞，致使个别板桩所受的土压力减小，个别锚筋的应力逐渐减小。

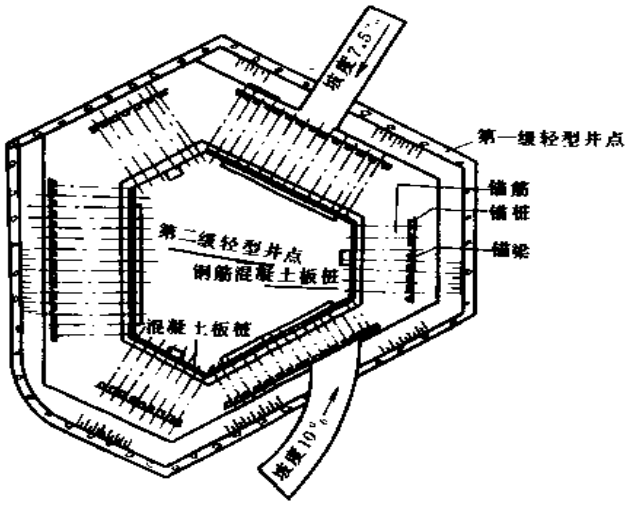


图 10-20　轻型井点管布置图

(4)基坑开挖完毕时的内力值(即无附加荷载)的统计平均值 42.0kN，计算土压力引起的锚筋的内力值为 42.5kN，几乎相等。由此可见，用等值梁法计算板桩及锚筋的内力与测得数据基本相同。

(5)坑边的 30kN/m² 附加荷载引起的锚筋计算拉力 $N_{p,y}=21.5$kN，而实测到 TD－60 Ⅰ型塔吊安装时锚筋增加的拉力 $\Delta N=5.2$kN，仅为计算内力的 24%，在浇捣基础底板混凝土时，混凝土泵引起的附加内力只为 1.7kN，仅为计算内力的 8%，与设计附加荷载作用下产生的内力相差甚大。从测试数据看来，该工程设计 30kN/m² 活荷载的假定偏大。

5. 板桩桩顶位移的测试

(1)测点布置：在六连形的三条长边设测点 27 个，测点布置详见图 10-21。

(2)仪器观测点与校正点的布置：六角形长边轴线的延长线上的两端，在测试阶段不被破坏的场地或构筑物上，设观察点和基准点，并在观测点位置施转 90°设置校正点。

(3)测试数据分析

1)桩顶位移分三个阶段测试：基坑土体开挖阶段测试三次，底板混凝土浇捣后测一次，拆

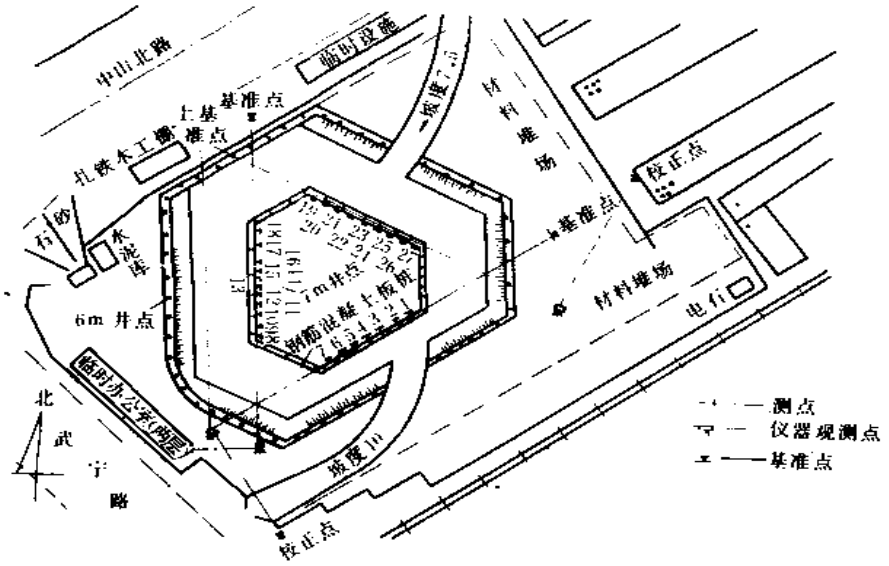


图 10-21　钢筋昆凝土板桩位移观测点布置图

除围檩后测一次，共测得 5 次数据。在这些数据中，桩顶位移最小值为 0，桩顶位移的最大值为 22.4mm，最大平均位移值 7.1mm。

2)测点 24、25、26、27 号，挖土后桩顶位移分别为 20.9mm、21.9mm、22.4mm、23.9mm。由于这部分井点管水泵发生障碍，地下水上升，一部分流砂从较大的板桩缝隙中流入基坑，板桩外侧土体有局部沉陷，板桩主动土压力减小。2 天后测得的 24、25、26、27 号测点的位移相应减小为 8mm、7mm、7mm、6mm。

3)基础底板混凝土浇捣前，桩顶位移最大值为 12mm。这样小的位移在上海已建的各工程中是少见的，挡土效果相当好。主楼基础开挖后，武宁路、中山北路、沪杭铁路及四周的煤气管线等均未出现问题。

10.5　成都人民商场营业楼

成都人民商场营业楼基坑埋深 9.35m，基坑边距临时营业楼最近距离仅为 1.0m，基坑支护设计采用灌浆锚杆作为支护。

锚杆支护区平面布置如图 10-22 所示。基坑边界西南角距离已有建筑边界线 1.5m，东北角开挖线距建筑物 1.0m。中部距离稍远，可先放坡后再垂直开挖。该区域的地质剖面如图 10-23，在 4m 深处有一淤泥夹层，原状土样快剪指标极低，残余内摩擦角 $\varphi_r=6°$，粘聚力 $c_r=1.5$ kPa。临时营业楼的砖墙直接砌在天然地基上，为老式一层砖砌房屋。

根据已有建筑物的边界情况，支护区分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个部分。Ⅰ区从原地面线(−0.85m)下挖 8.5m，Ⅰ区和Ⅲ区则下挖 6.5m。Ⅰ区设计三排锚杆，Ⅱ区和Ⅲ区设计两排锚杆。锚杆和导管的平面布置如图 10-22。导管直径 127mm，壁厚 7mm，打入砂卵石层 2m，以保证其承载力高于锚杆及面板作用在它上面的垂向荷载。管打入后在内部进行压力灌浆，胶结底部砂卵石层，最后用水泥浆填满钢管。第一排锚杆采用 ϕ25 螺纹钢筋，第二、第三排则用 ϕ60 工程地质钻杆代替。各排的锚杆分别施加 100、100、150kN 的预应力。锚杆成孔后灌水泥浆胶结孔底砂卵

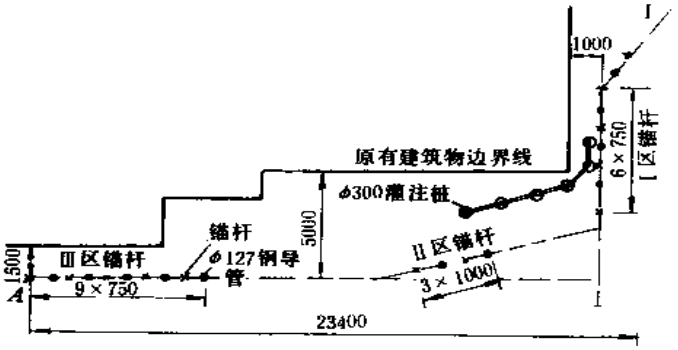


图 10-22　锚杆护壁工程平面布置

深度（m）	柱状图	性态描述
1.5		杂填土，$\phi=18$，$c=18kPa$，$\gamma=18.0kN/m$，$I_L=0.76$
4.0		亚粘土，$\gamma=19.0kN/m^3$，$\phi=18$　$c=2.0kPa$，$I_L=1.18$
5.0		淤泥，$\phi_r=6$　$c_r=1.5kPa$
6.0		细砂，$\phi=28$，$c=0$
		中砂卵石，$\phi=38$，$c=0$

图 10-23　工程地质剖面图

石，三排锚杆的胶结长度分别不小于 2m、4m、3m。三层锚杆的立面和剖面构造如图 10-24 所示。由于钻机限制，锚杆与地面的夹角都为 45°。垫座用 300 号混凝土配筋做成。

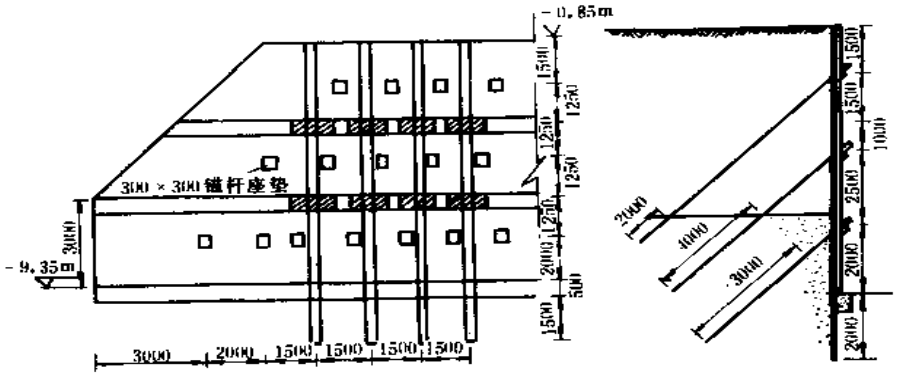


图 10-24　三层锚杆的立面和剖面构造示意图

(*a*)I 区锚杆立面布置；(*b*)设计锚固长度

第 I 区和第 II 区开挖面按设计施工顺序，依次做灌浆预应力锚杆支护，最后开挖至－7.35 m 的设计高程。由图 10-22 中 *A* 点的精密经纬仪测量表明，施工过程中 1 号柱沉降仅 1.0mm，地面无任何裂缝开展。最后进行 I 区锚杆施工时，先开挖 2.0m，进行第一层锚杆施工。按设计，第二次应挖至－5.85m 高程做支护。但施工时发生超挖，当挖至－7.35m 高程时，一层锚杆下部 1.0～2.0m 范围内靠近角部的土体崩出，上端 1 号柱一次性沉降达 20mm。原有临时建筑地板、正墙和侧墙土出现 13 条贯穿性裂缝，其大小和分布见图 10-25。发生上述事故后，立即停止开挖，并采取了以下措施：

1. 沿临时建筑边界打 6 根灌注桩，直径 30cm，嵌固于砂卵石面，桩上部由两根 20mm 直径的钢筋拉接。

2. 将 1 号柱用牛腿支撑在两根灌柱桩上。

3. 在开挖面上浇水泥浆保护，并进行临时灰砖支护。

经过以上措施处理后，位移趋势得到控制。又继续开挖至－9.35m 的设计高程。在我个后期施工过程中，观察至第 20 天时，位移已趋稳定。其中，1 号柱后期沉降 1.3mm，2 号柱沉降 1.0mm，3 号柱沉降 0.8mm，4 号柱沉降 1.2mm，5，6，7 号桩沉降都为 0.5mm。地面和墙体的裂

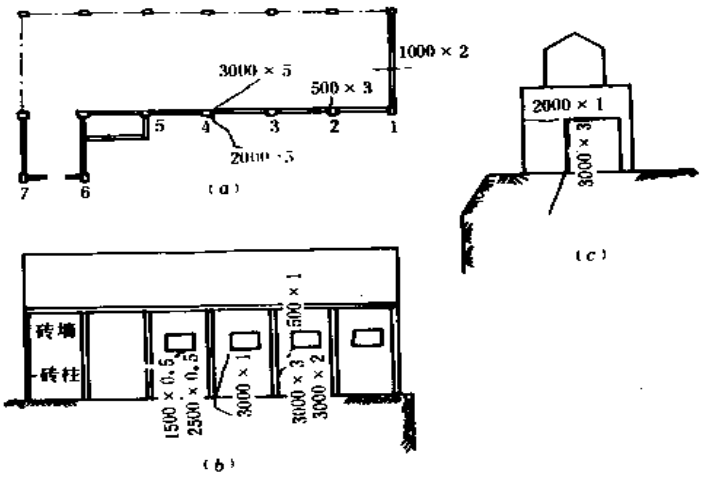


图 10-25　临时营业楼裂缝示意图

缝已不再扩展。

10.6　上海展览中心北馆

上海展览中心北馆工程建筑总面积为 185147m²。其中主楼旅馆建筑面积 64428m²；东、西长期客房公寓二幢，面积 60574m²；展览厅、剧院、办公室、陈列室、商店等建筑面积 50551m²；停车场 9594m²。

工程采用现浇钢筋混凝土框架剪力墙楼盖超高层结构。主楼旅馆建筑高度 164.8m，地下 2 层，地上 48 层。东西客房公寓二幢，建筑高度 111.5m，地下 1 层，地上 32 层。中央裙房、东北裙房、西北裙房建筑高度 34m，地下 1 层，地上 7～8 层。中央裙房、展览大厅和剧场部分屋盖采用大跨度钢结构，平面布置见图 10-26。

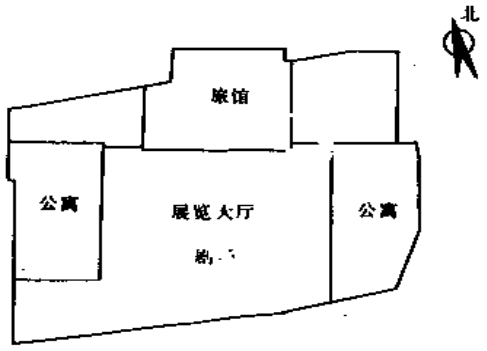


图 10-26

整个北馆工程的基础边壁紧贴建筑红线，由主楼基础、西公寓基础、东公寓基础、中央裙房基础，东北裙房基础和西北裙房基础 6 个单体基础工程组合，连成一片，每个单体基础工程之间采用沉降缝分隔处理。

整个基础处于软土地基上，其土层分布和力学性质如表 10-5。

工程地处市中心繁华地区，南临南京西路人行道，东侧紧靠西康路人行道，西靠居民住宅 5～6m，北面靠新建南阳住宅小区。在南京路、西康路二侧距挖土边线 2～3m，地下煤气、电缆、水管等设施的布置十分复杂。基坑开挖深度一般在－6.0～－8.50m，污水处理部分在－9.20m。为保证坑壁土体稳定、基坑降水、土方开挖、承台基础大体积混凝土浇捣等施工技术上的可靠性和经济上的合理性，必须谨慎选择技术方案。

土层分布和力学性质分析　　表 10-5

土层名称	土层标高(m)	土工指标
表面土	EL－1.54	
粘　土	EL－3.24	γ=18.4kN/m³ φ=0° c=25kN/m²
灰淤泥土	EL－6.09	
灰粘土	EL－16.34	γ=17.0kN/m³ φ=0° c=3.0kN/m²
粘　土	EL－29.30	γ=18.1 kN/m³ φ=0° c=4.0kN/m²
亚粘土	EL－34.24	γ=18.6kN/m³ φ=0° c=6.0kN/m²
粉质粘土	EL－39.09	
砂	EL－46.24	
粉　砂		
粘　土		

1. 基坑壁稳定

根据基坑开挖深度和坑壁外围邻近条件，对基坑壁稳定曾作过多方案比较，最后选择了 H 型钢插板挡土墙施工方案。即采用断面为 400×400×13×21、长度在 18～20m 的 H 型钢打入坑壁土体。在基坑土体开挖过程中，随挖随将木板插入护壁，见图 10-27。

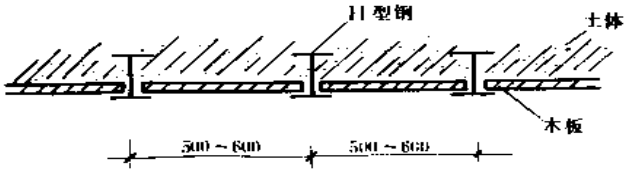


图 10-27　木板插入护壁图

采用这方案，一是可以充分发挥 H 型钢垂直向刚度大的作用，减少土壁稳定所需支撑或者拉锚道数；二是可以节约钢材；三是基坑混凝土壁直接作为模板使用，具有不留间隙等优点。

2. 基坑护壁桩支撑和锚固

基坑护壁采用 H 型钢作为挡土桩时，由于主动土压力大于坑底被动土支承力，因此，对 H 型钢挡土桩还必须加设支撑和斜锚杆锚固，以防止挡土桩位移或倾覆。在该工程基坑四周除采用锚杆和支撑外，对基坑实行分块开挖，并在分块之间采用 1∶2.5～1∶3 留坡的开挖施工方案。

(1)H 型钢支撑

在南京路侧采用 H 型钢支撑方案。即将基础承台中间部分先浇筑好，利用中间部分先浇好的基础承台将其作为 H 型钢支座，支撑挡土桩，然后边支撑边开挖土体见图 10-28。

(2)锚固技术工艺

本工程地层锚固工艺是日本鹿岛建设株式会社的专利技术，采用的是斜锚杆施工工艺。该

工程基坑的东西北三个方向的H型钢护壁桩，采用斜锚杆锚固施工方案。具体工艺过程是，先沿H型钢桩内侧开挖出深2～2.5m、宽4～5m的工作槽一条，作为锚固机械停放操作场地；然后按设计标高位置和倾斜角度及深度，采用专用液压传动机械进行冲孔，并将每节长1.2m、直径132mm的冲管逐节压进土体内，直至达到设计深度后，穿入钢丝锚固索（每索ϕ12.7mm×6根），然后采用2.5N/cm²压力灌浆机，将水泥浆（用525号水泥，水灰比0.5）注入长约15～20m的孔内注入量每孔约40L，待水泥浆强度达到2000N/cm²后，根据设计规定数值采用千斤顶对钢丝锚固索进行张拉。

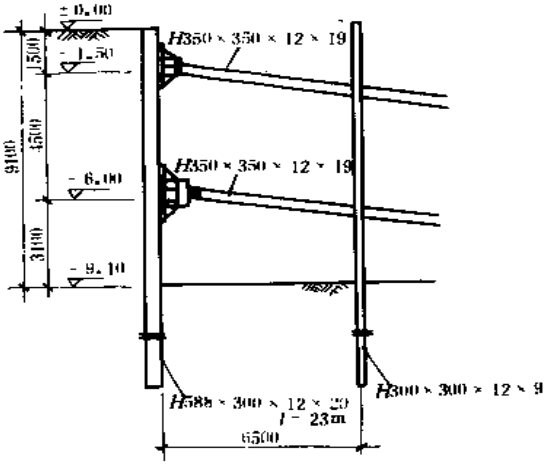


图 10-28　H型钢支撑

3. 基坑降水

整个北馆工程基坑近似四方形，土体开挖深度一般在－6.50～－8.00mm，在南京路侧部分深达－9.2m。本工程采用的是喷射井点，管长13m，间距1.80～2.00m，在基坑四周采取全封闭布置。由于基坑表面积比较大，四周井点有效降水曲线不能达到设计深度的要求，因此，在基坑中心设置了横向一排轻型井点。经井点降水后，势力影响基坑外侧地基沉陷，危及民房、地下管道等。因此，在井点外侧相应布置了回灌井点，及时补充地下水，减小外侧地基下沉。

4. 基坑土方开挖

整个北馆工程有6个单体基础工程，基坑总面积为17100m²，土方开挖量共156000m³。在一般情况下，基础土方开挖顺序应是先深后浅，而北馆工程基坑开挖是按塔楼高低为顺序，这有利于总体工程的施工进度（但在南京路侧，即由主楼向西公寓，再到东公寓，基础虽最深，仍在最后开挖）。挖土设备采用液压挖土机，1m³及0.4m³各一台。具体方法是：在－4m以上先用1m³挖土机挖土，紧接在－4m以下用0.4m³机继续深挖，挖起的土方再由1m³机抓起来装车运出。在支撑部分采用抓斗开挖。

由于6个单体工程基坑开挖逐个进行，并以基础之间沉降缝为分界，在分块开挖时，对整个基坑内部土体稳定采取了土体放坡的方法。放坡按踏步式留设，坡度1∶2～1∶2.5，坡表面覆盖钢丝网并涂抹水泥砂浆一层，以防止土体被雨水冲失、影响土体稳定和基础施工。

10.7　深圳国商大厦地下车库

工程位于深圳市商业中心、车辆及人流量很大，在地下车库附近有国际贸易大厦、深圳国际商店、海丰苑大厦等主要建筑物，处在最繁华的闹市区人民路与嘉宾路相交的交通路口上。

地下车库场地条件狭窄，在场地旁边的道路下面，埋设有重要的电缆线路及排污管道等市政设施。

1. 工程地质概况

地下车库场地原有一条北东方向的水沟斜穿而过，后填平做为临时停车场场地。

为建设地下车库，1985年3月对此地做了地质勘察。之后，于1985年9月在场地经过约两个月的降水后，又做了一次补探，以比较降水前后土层性质的改变。

根据地质勘察报告，场地内土层性质描述如下：土层共分四层。

(1)人工填土

颜色较杂，主要为黄褐色，由粘性土混风化岩块组成，局部地方夹有水泥块、砖块、生活垃圾等杂物，系近期堆填。结构松散，土质不均，层厚 1.00～6.00m。

(2)埋藏植物层

黑色，层厚 0.20～0.50m。

(3)第四系冲积层

该层由上至下又可分为四层。

1)亚粘土层

上部主要为褐黄色，含有 20～30%直径为 3～5cm 的碎石，呈硬塑状，下部为灰绿色，土质较纯，可塑状，层厚 0.30～2.00m。

2)淤泥质亚粘土及淤泥层

呈黑灰色及深灰色，有臭味，含有未完全腐蚀的植物根须及少量粉细砂，有机质含量为 3.9%左右，其天然含水量较高，在 35%左右，呈软塑、流塑状态，层厚 1.25～4.50m，层底标高－3.01～－5.88m，因本层土物理力学性质很差，层厚较大，埋藏部位正处于开挖面上，故对基坑开挖极为不利。

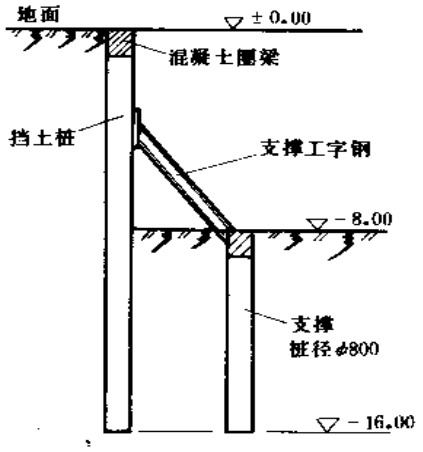


图 10-29

3)粉砂层

灰白、灰黑色、主要成份石英，混有粘性土，下部含粗砂及卵石呈饱和、稠密状态、层厚 0.30～2.8m。

4)粗砂层

灰白色，成份石英，混有粘性土，下部含较多卵石，其直径为 3～5cm，亚园菜，饱和、中密状态，层厚为 0.40～3.50m。

(4)第四系残积亚粘土

褐黄色、夹灰白色条纹，由硅化凝灰岩风化而成，可见清晰原岩结构，夹有风化岩块，呈硬塑可塑状态，层厚 3.9～10.6m，层底标高－17.61～－11.10m。

本区地下水埋深较浅。其稳定水面深度为 2.77～3.72m。

2. 支护结构设计

本工程采用的护坡桩沿基坑周边单排均匀布置，由于场地紧凑。所以护坡桩与车库主体边墙位置之间基本上没留有余地。因场地地质条件差，土锚杆的锚拉效果不好，所以选 用无拉锚结构。同时在护坡桩桩顶处，作一道钢筋混凝土圈梁，以增加护坡桩整体性。

根据场地四周建筑物的不同要求，区别对待：对于重要的场地东边及南边挡土桩间距设计较密，桩与桩中心距为 1.4m，桩径 φ800，截面配筋 20φ16；基坑西边及北面无重要建筑物，桩距相对较大，桩中心距为 1.8m，桩径 φ800，配筋 16φ16。整个基坑开挖深度 8m，但因土软弱，所以桩的嵌固长度较大，挡土桩桩长 16m，其嵌固长度 8m。

根据场地周围的环境要求，在较厚淤泥质土层上采用护坡桩，尚缺少经验。为慎重对待，由甲方、设计与施工等有关单位共同研究制定了作为施工必要措施的护坡桩支撑方案，如图 10-29。

支撑的作法是：在护坡桩内侧隔 3m 布置支撑桩，—8.00m 处，开挖后用工字钢斜撑在支撑桩桩顶与护坡桩上，由于钢支撑的作用，可改变护坡桩悬臂梁式的受力状态。

3. 基坑开挖遇到的问题及对支撑方案的调整

(1)基坑开挖土情况

护坡桩降水井施工于 1985 年 7 月中旬完成，由于受雨季影响，9 月 18 日才开始试挖土，首先在场地西面试挖，这是由于该处软土层较厚，土质条件差，桩配盘量小，属最不利条件的地段。

9 月 18 日挖土深度 4m，桩顶最大位移不到 1cm，9 月 19 日挖至 6.5m 时，已经挖进淤泥质土层，此时挖土地段桩顶位移迅速发展，最大位移很快达到 7cm。为慎重起见，当即停止挖土，停挖后位移趋于稳定。

从挖土情况可以观察到，虽然经 7 月到 9 月两个月时间的降水，但由于受到雨季的影响，土中所含水份很大，为饱和状态，部分土层呈稀软状，经日晒后，土体表面坚硬，出现干缩裂缝，但内部仍是流塑状，所以当挖土机挖进软土层以后，挖土机常常陷于泥土之中，加之西边护坡桩外侧还有一条与基坑平行的地下排污管道漏水，当开挖后，沿桩间不断有渗水流出，渗漏来重的地方，桩间土不断被冲蚀，桩间形成一个坍落的空洞。污水渗漏对桩间土的冲蚀及对护坡桩的安全是极为不利的，它增加了土的含水量，使土的强度指标进一步降低，同时引起土体的坍落，后经施工处理的处理涌水才基本上被止住。

在护坡桩产生水平位移的同时，桩顶圈梁与桩后土体之间发生脱离现象，在桩顶圈梁后面的地面上，沿圈梁混凝土表面出现裂缝，宽度 5cm 左右。估计裂缝一直发展到填土层中。可见，桩后表层填土没有直接作用在护坡桩上，桩的受力是靠较弱的下层土体对桩的挤压。

(2)护坡桩支撑方案的调查

由于在基坑挖土时出现了护坡桩水平位移过大的情况，为保证施工的安全可靠，决定采取必要的支撑措施，以防止基坑全面开挖时，护坡桩水平位移进一步增大。

经过多次讨论，决定在护坡桩桩顶以下 2m 处以一道钢筋混凝土圈梁加固护坡桩，并改工字钢斜撑为三根工字钢组成的截面为“品”字形的钢桁架。将其水平方向支撑在这道圈梁与桩顶圈梁上(图 10-30 所示)。

采用这一凌空桁架的支撑方法，支撑部位较高，对机械挖土影响小，亦不会影响底板防水橡胶的铺设。桩顶下 2m 处设置的圈梁，又增加了护坡桩的整体刚度，限制了桩的水平位移，同时作为钢桁架水平支撑节点。由于圈梁对护坡桩起到传递水平约束力的作用，也就进一步改善了桩的受力状态。

在采用这一支撑措施时，因考虑到基坑西边、东边和北边的长度较短，且两边所成的夹角较大(大于 90°)受力条件相对好一些，因此只在基坑另三个角上做了水平支撑，基坑东南角上没有采用支撑，其挡土效果也很好。采用了这些措施后，原设计的支撑(图 10-29)即不再采用。

4. 对护坡桩水平位移受力状态的分析

(1)护坡桩水平位移监测

位移观测从 1985 年 9 月试挖土时开始，至 1986 年 3 月地下车库第一层墙体完工止。

实测结果表明，护坡桩各测试点的水平位移是随挖土进行而不断增长的，随后逐渐缓慢，最后达到稳定。虽然局部地段水平位移比预料的大得多，但因逐渐稳定，所以未达到稳定极限状态。

图 10-31 为基坑挖完后护坡桩水平位移分布情况，测试结果表明，在护坡桩间距在配筋较

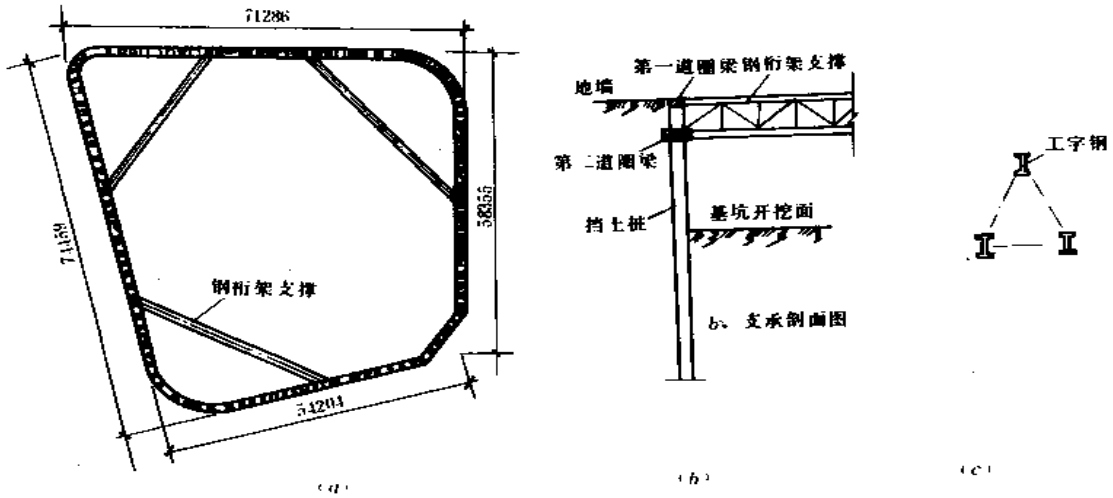


图 10-30

(a)钢桁架支撑平面图；(b)支撑立面图；(c)钢桁 2 架断面

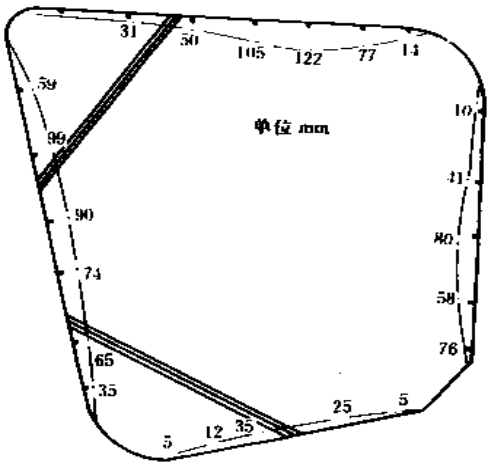


图 10-31

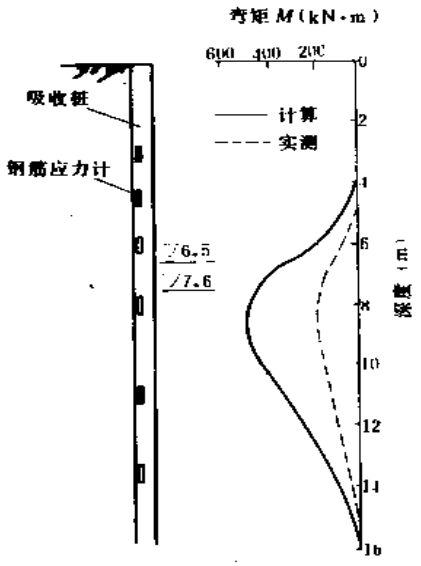


图 10-32

少的北侧及西侧，桩的水平位移较大，最大位移(北侧中间部位)达 12cm，而桩间距较小、配筋较大的南侧，最大水平位移仅为 3cm 左右。

对于同一侧护坡桩各点，其位移分布是：中间部位位移量最大，向两侧逐渐减小，在有水平钢支撑的位置上，桩的位移受到了一定的限制。这种位移分布证明了护坡桩圈梁是起到了很大作用的。

(2)护坡桩应力测试

1985 年 9 月在基坑西面挖土，这里是较土层厚，地质条件最差，护坡桩间距大，配筋又小的不利地段。挖土时进行了桩的应力测试，测试表明，挖土后桩开始受力，实测钢筋应力最大值已达 200MPa，与此相应，该处桩水平位移为 7cm。

图 10-32 是由实测应力推算的桩身弯矩值与计算的弯矩 M_z 分布的比较，可见计算的桩内力比实测内力大一倍以上。实测结果说明：虽然护坡桩产生了较大的水平位移，但钢筋应力仍未达到其强度极限，所以桩本身不会因超过强度极限而破坏。

10.8 宁波镇海广播电视大楼

宁波镇海广播电视大楼为城区的第一座高层建筑。该建筑物高约 50m，12 层 。长 22m，宽 14m，箱形基础深度在自然地坪下 3.88m。建筑面积约 4700m^2。大楼西侧约 11m 处为 837 综合大楼，六层。该楼为折板基础，已产生不均匀沉降，楼的东西两侧施工前沉降差为 39mm，南北向倾斜接近 1%，墙面已有裂缝存在。南侧面为二层民房，北侧城河路人行道下埋设有通讯电缆、水泥预应力供水管（见图 10-33）。

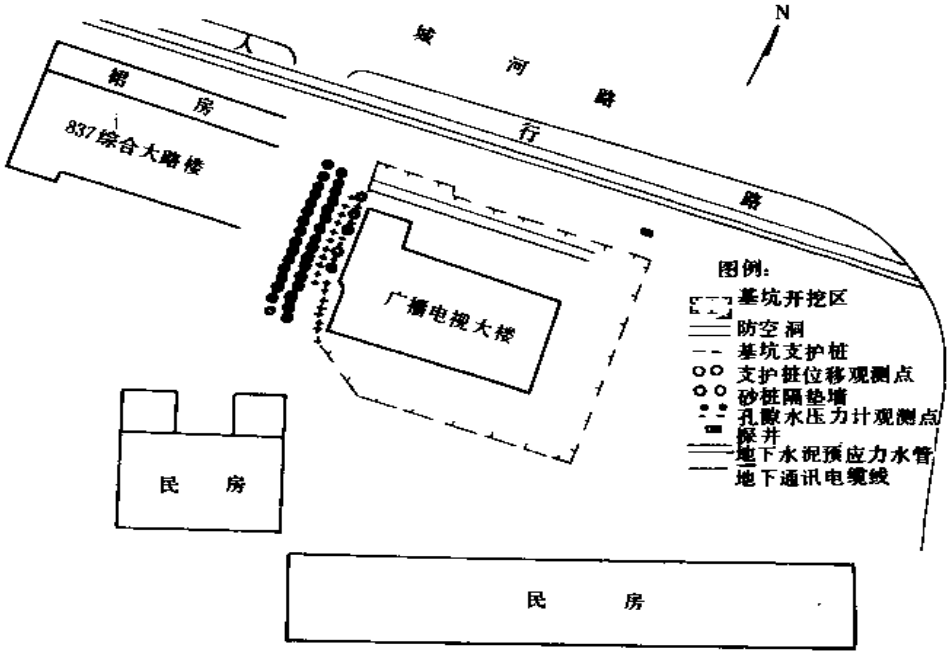


图 10-33 基坑支护平面图

1. 场地地质条件

场区地质情况及相应的物理力学性质指标　　表 10—6

层次	土质名称	层厚 (m)	物理力学指标								
			w(%)	γ(kN/m^3)	e	I_p(%)	I_L	a_{1-2} (MPa^{-1})	K (cm/sec)	φ	c
1	填土	2.00									
2a	淤质亚粘土	1.30	40.4	1.3	1.129	16.4	1.12	0.108		9.3	1.13
2b	粉土	2.50	30.0	1.91	0.845	8.4	0.86	0.033	2×10^{-7}	20.6	0.12
2c	淤质粉质亚粘土	5.40	38.8	1.82	1.074	10.5	1.73	0.090		9.6	0.12
2d	中砂	2.20	25.4	1.35				0.014		28.7	0.03
3	淤质粘土	8.70	43.5	1.73	1.289	20.9	1.07	0.072		6.5	0.14
4a	粉土	3.80	24.2	1.94	0.735	7.6	1.25	0.036		20.1	0.12
4b	中砂	2.00	25.8	1.87	0.296			0.019		30.0	0.09

2. 基坑开坑与支护

采用三面大开挖一面邻近 837 楼处用单排和双排灌注桩支护的方案。受场地的限制挖方坡度设计为 1∶1.625。挖出的土必须随时运出场地。经计算土坡度在较短施工日期(2 个月左右)内稳定性没有问题。靠近 837 楼的一侧基坑采用单排和双排沉管灌注桩支护。桩径 325mm，桩距 $2d$。受 837 建筑影响，最重要的一段(长 15m)布置双排桩。桩长 8m，通长配筋。靠民房坡脚处采用简易临时加固措施。

鉴于宁波曾数次发生预制桩沉桩结束挖土过程中桩向一侧倾斜的问题。此次规定了机械挖土的限制深度即离桩顶 1.5m 时改为人工分层挖土。

边坡开挖过程中采用明沟集水井排水。根据地勘资料地下水埋深约 1m。地层渗透系数为 2×10^{-7}cm/s。考虑到地层具有水平层理，按 $k=1\times10^{-4}$cm/s 基坑面积 1010m² 计算，当 $S=3.5$ m 时，日排水量仅为 21.5t，对于明开挖和明排水的设计，基坑排水问题将成为一个关键。为了确认这个方案的可靠性，在场地边缘挖 4m 的探井查验地层资料及观测地下水情况。实际情况说明地下水属上层滞水，水量极微。

挖深达到基底深度后坡底地层为青灰色粉砂与粘土互层。为了防止流砂现象，设计采用了用草袋填土(或砂)作临时支持，完成一段支档一段。

施工过程中的基坑降水可能造成临近建筑的附加沉降。考虑到土的渗透性低，排水量小且施工期较短，对相邻建筑的影响不大。但为安全计选用了隔振砂井中的三个进行水位观测。如水位下降使 837 大楼处地下水位产生了超过 1m 的水位降时，可利用砂井灌水以保持 837 楼一侧的水位。

3. 变形观测

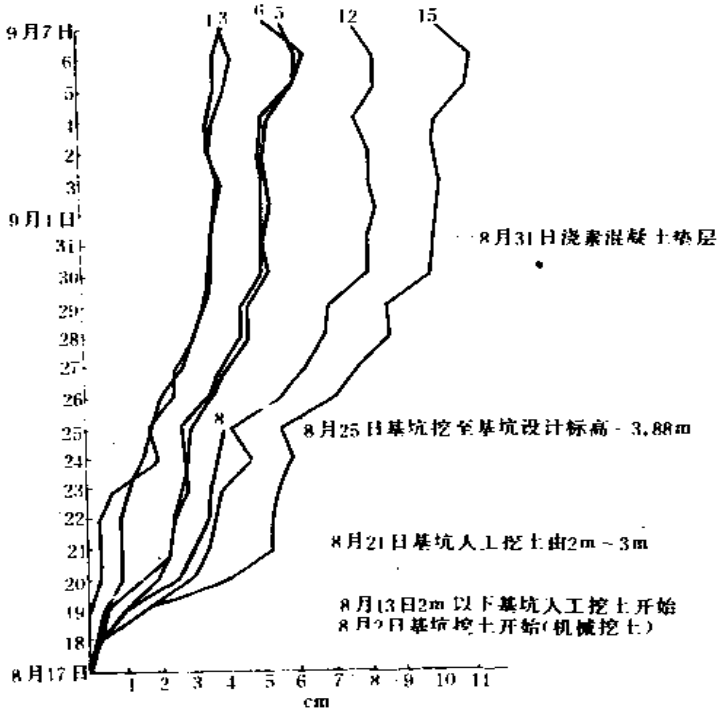


图 10-34　支护桩桩顶位移图

从8月13日开始基坑改用人工开挖，此时坑深约2m。从8月17日至9月7日的20天时间内对紧靠837楼的双排桩贴近基坑的一排桩桩顶位移进行了观测。各观测点桩顶水平位移随时间的变化见图10-34。

按施工中的几个阶段对桩顶位移进行分析可以得出以下初步认识：(1)基坑挖至设计标高后，支护桩所承受的土压力最大，桩头产生的位移速率也最大可达7mm/日左右。(2)浇灌15cm厚的素混凝土垫层以后，支护桩通过垫层与预制桩连成一体，在支护桩的中点处形成了支撑，桩顶位移速度显著降低。因此，及时地浇灌素混凝土垫层对于防止支护桩的继续位移起了重要作用。(3)桩顶最大位移达到101mm。应该指出的是，基坑内挖出的土有时未及时运走，堆积于支护桩的外侧增加了土压力，这是造成个别观测数据反常的原因。随着这部分堆土的运走，桩顶位移速度立即降低。反映在图10-34的桩顶位移随时间变化关系上有时出现异常。

837建筑的附加沉降和沉降速率：

尽管采用了双排灌注桩对基坑进行支护，在施工过程中由于土体开挖对837建筑的影响仍不可完全避免。从1991年7月30日即打桩结束时，挖土开始前至1992年2月27日的观测资料说明，在此期间内由于新建建筑物的施工造成对837楼的附加沉降约为13～18mm。沉降速率至1992年2月27日已逐渐恢复到施工前的水平。同时说明，尽管基坑回填土已于1991年12月5日结束但由于大开挖造成的对837建筑的沉降影响要滞后一段时间才能完全结束。

10.9 上海启华大厦

大厦建于淮海中路、复兴中路交汇处。邻近有淮中中学、独立式高级住宅，附近是法国、美国、日本、新加坡、澳大利亚等国家的驻沪领事馆、商务处。

大厦基地面积1277m²，总建筑面积为11325m²。主楼座落于基地中央，楼身呈三角形，两个主要立面分别朝向淮海中路与复兴中路。主楼北翼为22层，南翼为24层，建筑高度为74.5m。主楼正面中央设有观光电梯直达顶层。工程地质情况如表10-7。

工 程 地 质 情 况　　表10-7

土层名称	平均厚度(m)	层面标高(m)	主要物理力学性能
杂 填 土	1.35	3.60～3.00	
褐黄及灰黄色粘土	1.80	2.05～1.87	γ=1.86g/cm³ G=2.74g/cm³ e=1.012 φ=12° c=0.02MPa
灰色淤泥质亚粘土	3.84	0.46～−0.08	γ=1.77g/cm³ G=2.73g/cm³ e=1.213 φ=10° c=0.005MPa
灰色淤泥质粘土	8.39	−3.27～−4.23	γ=1.69g/cm³ G=2.74g/cm³ e=1.456 φ=8.7° c=0.009MPa

图10-35是启华大厦总平面图。图中阴影部分即是主楼，双点划线是规划 的建筑红线，也是地下室的边线。

本工程场地狭小，汽车库、电机房、污水处理、垃圾房、储水箱等均设置在地下室内。地下室设计面积达1182m²，边线正好压建筑红线，基坑开挖时如钢板桩挡土墙、回灌井点等均需在红线外施工。而基地建筑红线外南北侧沿靠复兴中路和淮海中路，路边有各种用途的管线，如埋地的电话电缆、煤气管、自来水上水管、下水道等，架空的3300V高压线，照明线，电车馈头线

等。图 10-36 即基坑沿淮海中路一侧的地下管线位置示意图。从图中可以看出，地下管线离基坑边线最近的只有 3.69m，而距钢板桩中心线只有 2.19m。这些管线是与本市交通、通讯、供水、供电和附近领事馆、学校、居民正常工作、学习、生活相关的，绝对不能由于施工而遭到破坏。因此，既要发全顺利地施工，又要严格保护好周围建筑物、马路和地下管线，这是施工方案编制时遇到的首要难题。

为了及早开工，许多物资准备工作是提前进行的。基坑开挖时所需的钢板桩挡土墙，早在施工方案设计前就从国外买进了 FSP—Ⅱ型 12m 钢板桩，而地质资料表明钢板桩入土部分正好是土质很差的灰色淤泥质粘土层。基坑开挖深度一般为—5.55m，局部为—7.05m，这又给基坑开挖和支护的施工技术方案制定增添了困难。

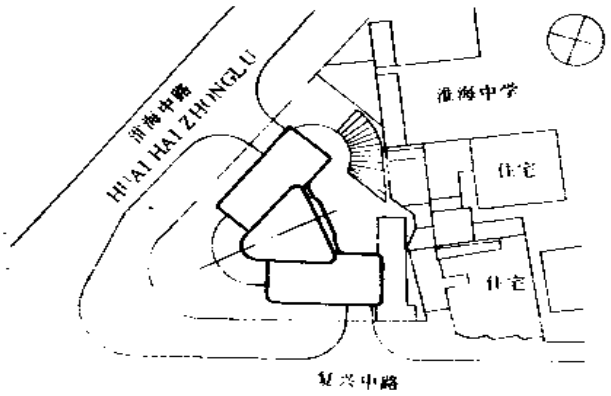


图 10-35　启华大厦总平面

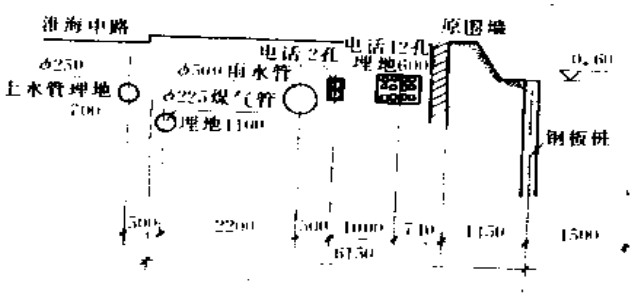


图 10-36　淮海中路边地下管线

1. 钢板桩挡土墙支撑系数的选择

在确定了利用多道水平支撑，先撑后挖的原则后，对比分析了纵横向网格式支撑方案和钢筋混凝土锁口梁结合三角形布置钢管支撑方案（以下均简称锁口梁方案）的利弊，最后选定了锁口梁方案。

锁口梁方案是由钢筋混凝土锁口梁和三角形布置的钢管支撑两部分合并而成。在控制钢板桩变形的前提下，考虑到尽量方便挖土和混凝土施工，通过计算确定在基坑开挖过程中需分三次设置支撑。

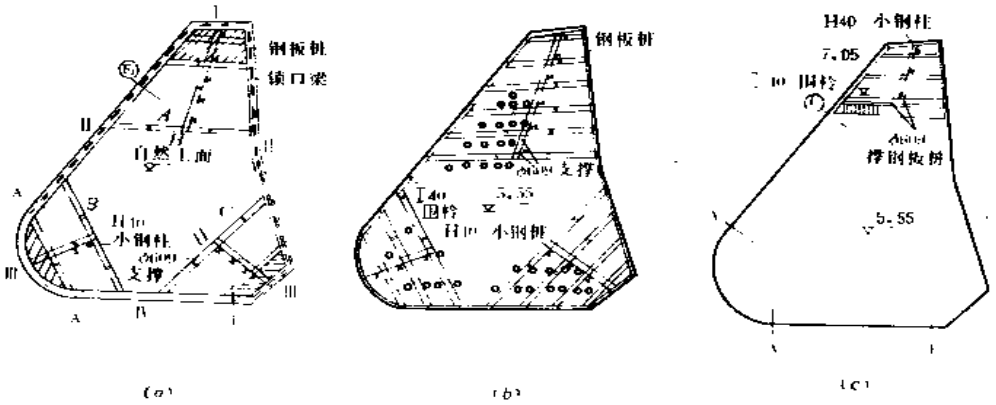
第一道支撑在挖土前进行。即在钢板桩顶端浇捣一根钢筋混凝土圈梁并开槽挖沟安装 7 根呈三角形设置的钢管支撑（图 10-37*a*）。

然后挖第一层土，到预定标高后再开沟安装第二道钢管支撑（先安装 H 型钢围檩）。同样也呈三角形分布，共 13 根。这样就可以挖第二层土（图 10-37*b*）。污水处理部分还需安装第三道支撑，再进行第三次挖土（图 10-37*c*）

为了方便底板施工，把原设计 100mm 厚素混凝土垫层修改为 400mm 厚的钢筋混凝土垫层（混凝土为 C30，配筋上下二皮双向 ϕ12@250）。在垫层达到强度要求后，此作为钢板桩的下支撑，这时即可拆除第二道钢管支撑，进行底板施工。在底板混凝土浇捣后，在钢板桩和底板混凝土之间回填砂，然后就可以拆除第一道钢管支撑，进行地下室墙板，顶板施工。而锁口梁则在基础施工完成回填结束后采用无声爆破结合风枪破碎进行拆除。

2. 尽可能减少井点降水对周围管线、建筑物和道路的影响

（1）降水井点布置在钢板桩内侧，并根据不同挖土深度打设 7.0m、8.0m 两种不同长度的



(a) (b) (c)

图 10-37

(a)第一道支撑； (b)第二道支撑； (c)第三道支撑

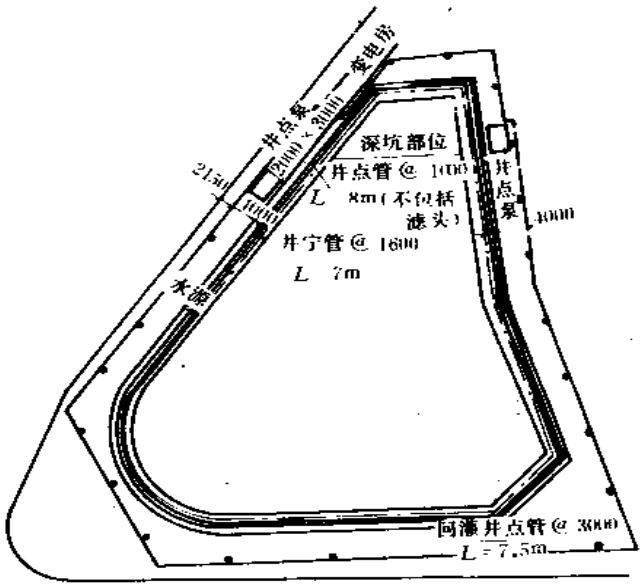


图 10-38 井点布置示意图

井管，以尽量减少钢板桩外侧的水位变化。

(2)在钢板桩外侧距降水井点 4.0m 处设置同样长度的回灌井点与降水井点同时工作，从而稳定和保持钢板桩外侧的地下水位，减少和避免因水位变化而引起的地基沉降，见图 10-38。

3. **主要施工顺序**(图 10-39)

本工程锁口梁方案的设计与施工是成功的。

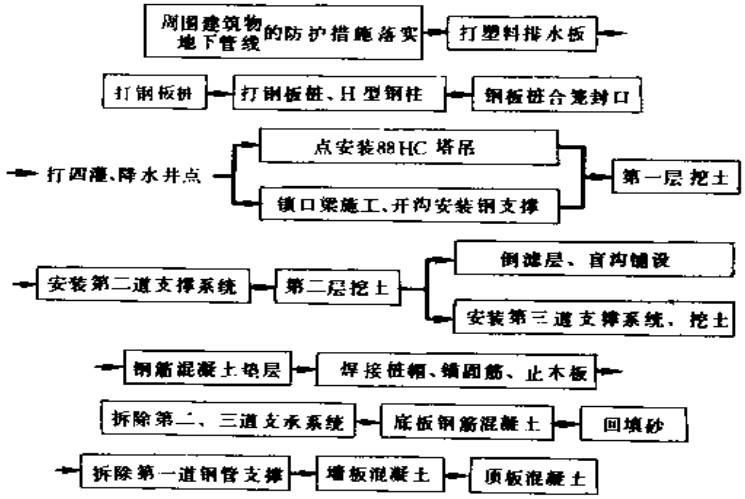


图 10-39

10.10 宁波北仑港火力发电厂

宁波北仑港火力发电厂系华东电网中一座新建的大型电厂，总装机容量为 240 万千瓦(4×60 万千瓦)，由美国依伯斯科公司与华东电力设计院合作设计。其中 1 号机组于 1989 年完成土建，1990 年进入设备安装、调试阶段。1990 年下半年，2 号机组开始兴建。两座厂房的外柱基础轴线仅相距 7.0 m，厂房柱基承台埋深 3.5m，汽机设备基础埋深 6.0m，最深的阀门坑埋深达 7.50m，与汽机主厂房毗邻的锅炉房设备基础埋深 3.8m，2 号机组，整基坑平行于 1 号机组厂房全面展开，面积达 2850m²，开挖土方量约为 1.5m³。如此大范围的开挖，又紧靠 1 号厂房，而 1 号机组正处安装、调试阶段，对地基变形十分敏感。如何防止基坑开挖对 1 号厂房及其设备基础的安全与位移的影响，便成了基坑施工的关键问题。

综合考虑土质与环境条件及工程的极端重要性，为确保 1 号机组万无一失，经过方案论证，决定在 1 号厂房与 2 号汽机基础之间设置两道挡墙，相互独立，见图 10-40。

第一道挡墙紧靠 1 号厂房柱基，净距仅 1 m 左右，系“一”字形非闭合独立挡墙，为钻孔桩框架结构体系。

1. 地质条件

厂区内第四纪覆盖层厚约 80m，其中上部 30～40m 深度范围内为全新纪海相淤泥质粘性土；以下为上更新统的湖相和浅海相粘性土，夹有透镜状冲洪积相砂砾层，自上而下为：④亚粘土、轻亚粘土和粘土互层；⑤亚粘土、轻亚粘土和粘土互层；⑥亚粘土；⑦碎砾、碎石混粘性土层；⑧晶屑熔凝灰岩。

地表下 30～40m 主要由三层土组成，自上而下为：①亚粘土：褐黄色，可塑～软塑，层厚 0.4～2.4m。无侧限抗压强度 $q_m=78kPa$，三轴快剪，$C_{uu}=30kPa$，$\varphi_{uu}=0°$。

②淤泥质粘土：黄灰～深灰色，层厚 17.8～21.5m。$q_u=78kPa$，$C_{uu}=20kPa$，$\varphi_{uu}=0°$，现场十字板抗剪强度 $C_u=40kPa$。

③淤泥质粘土：深灰色，软塑，具有细鳞片构造。层厚 0～24.8m。$q_v=78kPa$，$C_{uu}=40kPa$，$\varphi_{uu}=0°$，十字板抗剪强度 $C_u=40kPa$。

场地的静力触探曲线示于图 10-41。可以看出，在深度 21m 范围内，锥尖阻力 q_c 虽随深度稍有增大，但均小于 0.5MPa；至 23m 以下才逐渐增大到 1.0MPa，真正好的土层在 30m 以下。这就是说在不很深的范围内根本没有能够提供足够水平抗力的土层可直接作为基坑挡墙的依托。这就是本工程基坑支护设计面临的严峻现实。

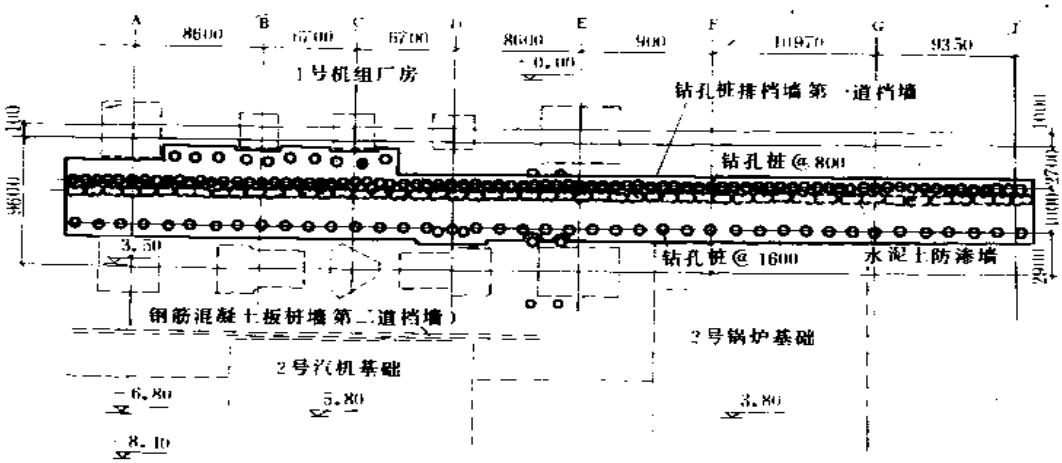


图 10-40　2 号机组工程基坑开挖支护系统平面示意图

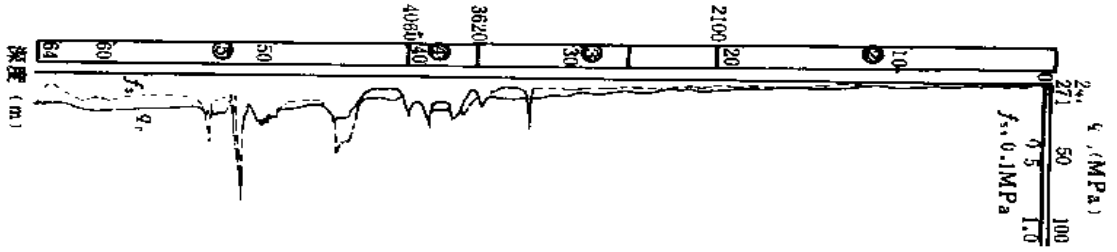


图 10-41　场地静力触探曲线

2. 支护结构与防渗设计

综合考虑土层构造和经济因素，经过初步试算，选定由双排钻孔桩与刚性盖梁(板)构成的 π 形组合结构作为支护当墙。其平面图和典型断面的剖面图分别绘于图 10-40 与图 10-42。钻孔桩直径 ϕ600mm，长 27m，穿过滑动面插入稳定土层 6.5m。前排桩间距 1.6m，后排桩间距 0.8m，两排桩相隔 4m，盖梁与桩顶为现浇混凝土刚性连结。

为了防止 2 号厂房基坑开挖排水而引起 1 号厂房地下水位下降，特在两排钻孔桩之间用水泥搅拌桩(桩径 ϕ700mm，长 12m)相互咬合做了一道连续的水泥土防渗芯墙。在基坑开挖及基础施工的半年多时间内，挡墙均无明显的渗 漏现象，证明其防渗效果很好。

基坑开挖过程中采用表面排水方式排除坑内积水，而未采用井点降水。在整个基坑开挖与基础施工过程中，均能保持坑内干燥，保证了基础施工顺利进行。

3. 位移与应力监测

为了在基坑开挖施工过程中，及时掌握支护结构与 1 号厂房基础的变形情况，正确指导施工，并确保 1 号机组设备安装、调试的顺利进行，同时亦为验证设计计算和指导今后设计，在整个开挖及基础施工过程中进行了较系统的位移与应力监测。

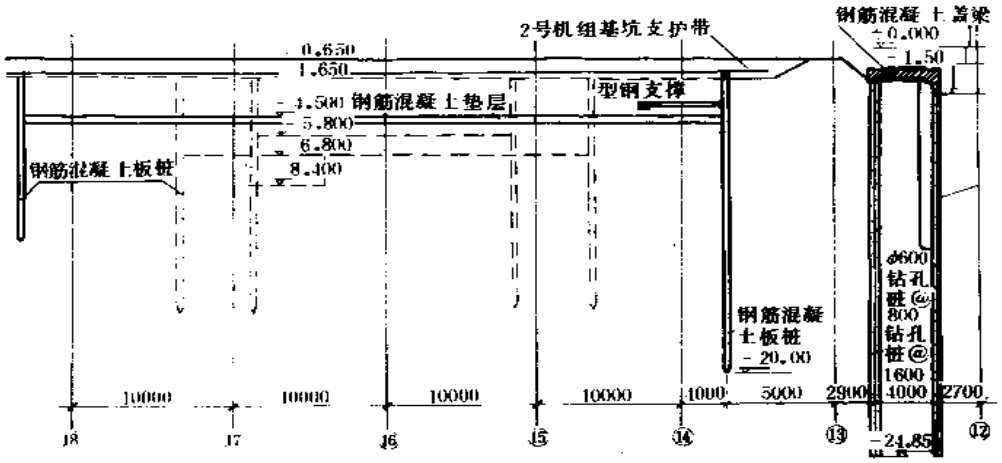


图 10-42　隔离挡墙及 2 号机组基坑开挖剖面图

监测项目包括：(1)地面位移监测，包括 1 号厂房邻柱基础和两道挡墙的沉降与水平位移；(2)隔离挡墙两侧的土压力；(3)钻孔桩桩身的变位；(4)挡墙背后土体的深层水平位移；(5)挡墙背后土中孔隙水压力。土压力由钢弦式压力盒测定，孔隙水压力由钢弦式孔压计量测，桩身和土体的深层水平位移由 SX—20 型伺服式测斜仪通过预先埋入的测斜管进行量测。

监测的主要结果可以归纳以下几点：

(1)隔离挡墙的位移很小，确保了 1 号厂房安全和设备安装的精度要求。挡墙顶部最大水平位移 22mm。

(2)钻孔桩桩身的水平位移曲线大体呈倒梯形，上大下小，在深度 3～5m 处曲线略微鼓出。桩身位移最大值约 28mm，发生在基坑全面开挖的时候。有一个值得注意的现象是，当基坑开挖较深时，桩身上部的位移增加较少，而下部位移则增加较多，这一趋势在汽机基础结构荷载施加上去后逐渐减缓，这反映了软土中大面积挖方会引起土体深层位移的特点。同时由于软土深厚，桩没能嵌入硬土层，因此即使是 27m 长桩，桩尖仍有相当的位移，最大约 15mm，大约为桩身最大位移的 50%；

(3)土压力大体保持线性分布，表明软土中的土压力分布基本符合朗肯土压力理论。只是由于挡墙位移较小，土体远未达到极限平衡状态，因此主动土压力实测值大于朗肯理论值，而被动土压力实测值则远小于朗肯理论值，这些结果与软土中的其它实测结果是一致的。

10.11　天津塘沽盐场气象台电算楼

天津塘沽盐场气象台电算楼位于塘沽区营口道与浙江路交口处，该建筑物主楼为地上 10～15 层，地下一层人防地下室，建筑物前后左右呈阶梯形，配楼二层，与主楼相接，在立面上高低错落，起伏较大。该建筑场地原有五层办公 楼，且中部还有 3.0m 深地下室，东侧为盐厂新建四层办公楼，距拟建物边线将距为 12.8m，北侧花园地下为人防工程及四层办公楼，西侧为浙江路，南侧为老年活动中心及营口道，由于场地施工条件复杂，因此应对基坑开挖和降水及其对相邻建筑物影响等问题进行重点分析和评价，建筑物位置见图 10-43。

1. 场地工程地质条件

场地地基表层为厚度不等的人工填土层(Ⅰ)，其下土层分布(Ⅰ～X)及其主要工程性质见表 10-8，勘察期间测得场地地下水位埋深 0.77～1.03m。

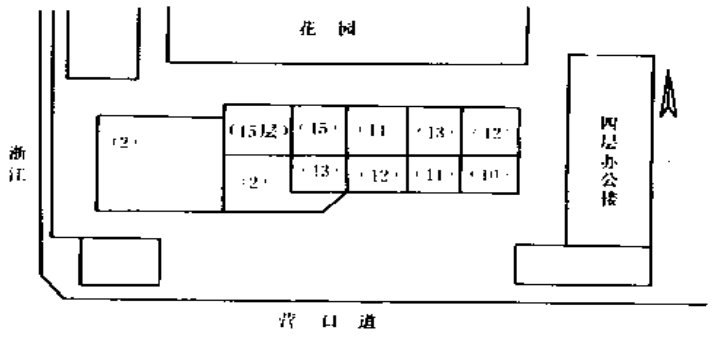


图 10-43　建筑物总平面布置图

物理力学性质及原位测试指标统计　　**表 10-8**

岩性及编号	平均厚度(m)	w(%)	γ(kN/m³)	e	I_L	E_s(MPa)	$N_{63.5}$(击)	P_s(MPa)	抗剪强度			
									φ_{cu}(度)	C_{cu}(kPa)	φ_u(度)	C_u(kPa)
粘土(Ⅰ)	1.6	39.8	18.0	1.14	0.87	3.08	2	0.76	13	20	9	12
粉质粘土($Ⅱ_1$)	1.2	31.2	18.6	0.90	1.02	4.66		1.35	18	11	8	10
淤泥质粉质粘土($Ⅱ_2$)	2.0	39.0	18.1	1.10	1.45	2.98	1.5	0.94	10	15	6	10
粉质粘土($Ⅱ_3$)	1.8	31.1	18.8	0.89	1.25	5.28	6	1.87	19	12	15	11
淤泥($Ⅱ_4$)	1.4	55.9	16.6	1.59	1.45	1.79	1	0.82	6	10	5	4
淤泥质粘土($Ⅱ_5$)	6.5	43.1	17.7	1.20	1.21	2.41	1	1.17	10	13	7	11
粉质粘土($Ⅱ_6$)	2.0	25.5	19.6	0.74	0.96	8.70	9	2.29	23	15		
粉土($Ⅱ_7$)	1.5	24.3	19.8	0.69	0.59	15.40	16	5.35	23	6		
粉质粘土(Ⅳ)	2.2	24.3	19.9	0.69	0.79	6.10	8	1.64	22	18		
粉质粘土(Ⅴ)	1.1	20.9	20.5	0.59	0.75	7.79	10	1.99	23	21		
粉土、粉砂(Ⅵ)	0.9	22.6	20.0	0.65	0.76	19.50	31	17.08	23	8		
粉质粘土(Ⅶ)	5.8	24.7	19.8	0.70	0.75	7.09	8	3.84	22	20		
粘土(Ⅷ)	3.2	34.2	18.7	0.95	0.78	5.80	7	3.32	18	29		
粉质粘土(Ⅸ)	7.6	23.2	20.0	0.67	0.67	7.91			22	20		
细砂(Ⅹ)	>15.2	19.5	19.9	0.62		24.4			35	4		

2. 基坑开挖与支护结构

(1)基坑支护方案

基坑支护设计为单锚护坡桩，护坡桩的类型采用钢筋混凝土预制桩，桩顶用连续梁相连接，锚杆设在地面下 1.0m 处，基坑南侧可采用放坡开挖。

(2)单锚护坡桩入土深度计算

1)基坑北侧、西侧护坡桩入土深度

埋深 16.0m 以上土层略去粘聚力，则相应的等效内摩擦角 φ 取为 14.0°。采用朗肯土压力理论计算护坡桩入土深度，基坑北、西侧的计算简图如图 10-44a 所示。

主动及被动土压力系数分别为：

土压力强度等于零的 O 点距基坑开挖面的距离为：

按简支梁计算等支梁作用 y 深度处的反力 P_0 和锚杆拉力 P_2，对 O 点取矩，有 $\Sigma M=0$，则可求出所需锚杆拉力 $P_a=113.1$(kN)

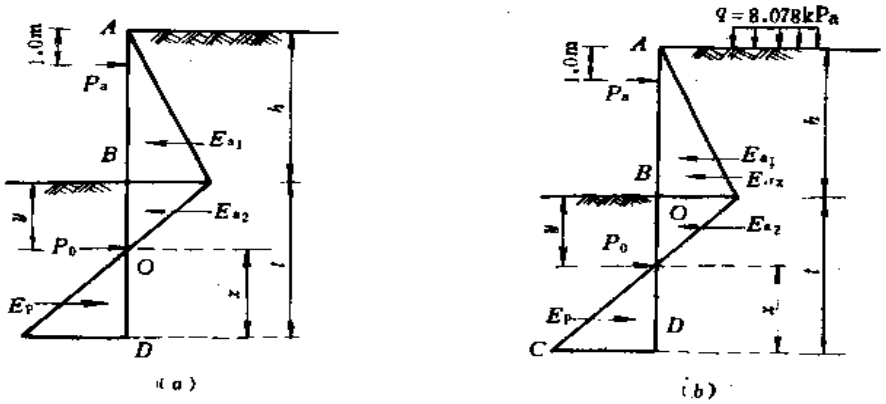


图 10-44　基坑单锚护坡桩入土深度计算简图
(a)北侧、西侧；　　(b)东侧

取安全系数为 1.35，则设计锚杆拉力 R 为：

$$R=1.35P_a=152.7(\text{kN})$$

由 $\Sigma M=0$，得 $P_0=63.6(\text{kN/m})$

根据 P_0 和墙前被动土压力对桩底端 D 点力矩相等，得 $x=4.567$，则

$$t=y+x=7.35(\text{m})$$

取系数为 1.15，则基坑开挖面距桩端的设计深度为：

$$t_0=1.15t=8.45(\text{m})$$

则基坑北、西侧单锚护坡桩设计长度为：$L=h+t_0=13.66(\text{m})$，可取 $L=14.0(\text{m})$。

2)基坑东侧护坡桩入土深度

基坑东侧距盐场新建四层办公楼很近，对护坡桩的影响必须予以考虑。如图 10-45 所示，办公楼的基底压力 q 为 80.78kPa，地基内任意点水平应力为：

$$\sigma_x=\frac{q}{\pi}(2\varepsilon-\sin 2\varepsilon\cdot\cos 2\varphi)$$

式中　　$2\varepsilon=\beta_2-\beta_1$；$2\varphi=\beta_2+\beta_1$

在护坡桩距地表深度 X 处：

$$\beta_1=\tan^{-1}(11.0/x)；\quad \beta_2=\tan^{-1}(23.5/x)$$

上述各式联立，即可求出该处的水平应力，计算结果如图 10-46 所示。

现有四层办公楼作用在护坡桩上的水平应力之和为 E_a，则考虑四层办公楼附加荷载影响，基坑东侧护坡桩入土深度计算简图如图 10-44b 所示，计算得基坑东侧单锚护坡桩入土深度 L 为 16.0m。

(3)护坡桩稳定验算

如图 10-47 所示，假定在重量 W 为 rhR 的坑壁土作用下，其下的软土地基沿圆柱面 BC 发生破坏和产生滑动，失去稳定的地基土沿圆柱面中心轴 O 转动，其转动力矩 M_d 为 $WR/2$，稳定力矩 M_r 为 $R\cdot\Sigma C\cdot L+R\Sigma W\cos\beta\text{tg}\varphi$，要保证不发生地基隆起破坏，则要求抗隆起安全系数 $K=M_r/M_d>1.50$。

对于基坑北侧、西侧，桩长 $L=14.0\text{m}$，入土深度 9.0m，取滑移面底部切点位于埋深 15.

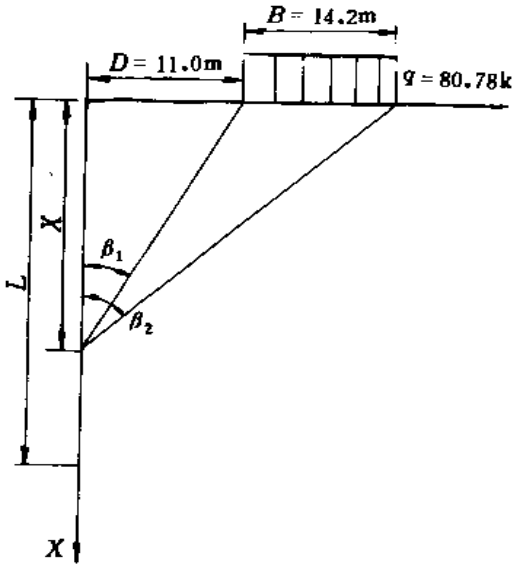


图 10-45　水平应力计算简图

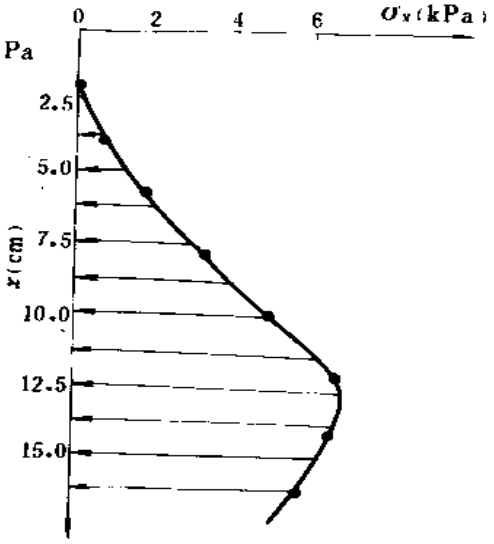


图 10-46　水平应力分布

0m 处粉质粘土的顶板，$R=10.0$m，则：

$$M_r=R\Sigma W\cos\beta\mathrm{tg}\varphi+R\Sigma CL=6782.2\mathrm{kN}\cdot\mathrm{m}$$

$$M_d=\frac{1}{2}rhR^2=4450\mathrm{kN}\cdot\mathrm{m}$$

$$K=M_r/M_d=1.52$$

类似与北、西侧计算，基坑东侧滑移面底部切点位于桩端点处，计算其抗隆起安全系数为 2.78，均大于 1.5，说明护坡桩是稳定的，不会发生基坑底部隆起破坏的危险。

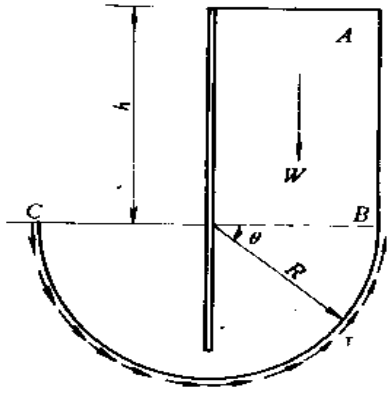


图 10-47　地基隆起计算简图

3. 基坑降水设计

基坑降水计算模式如图 10-48 所示。基坑宽 $B=17.0$m，长 $A=41.0$m，深 $H_1=5.0$m，轴线水位降低到坑底 $\Delta h=1.0$m，原地下水位平均埋深 0.9m。采用 $D=0.6$m 的大口径井抽水，滤管长度 $l=1.0$m，井点距坑壁 1.0m，K 厚度加权平均值为0.266m/天。

(1)井管理设深度 H 的计算井管距基坑轴线的水平距离为：

$$L=\frac{1}{2}B+(1+\frac{1}{2}D)=9.8(\mathrm{m})$$

井管埋设深度 H 为：

$$H\geqslant H_1+\Delta h+iL+l=8.0(\mathrm{m})$$

取地下水降落坡度 $i=1/10$。

根据场地一般埋深 10.5m 以下土层为不透水的淤泥质粘土，而 10.5m 以上多为带状结构、夹 4～5cm 厚粉土、粉砂的淤泥质土及中厚层的粉质粘土，故井点埋深可取 H 为 11.0m，抽水井按抽水完整井考虑，含水层厚度 H_0 取 10.1m

(2)抽水井数确定

井点所围成的面积 F 为 $19\times43=817\mathrm{m}^2$，则假想大口井半径为：

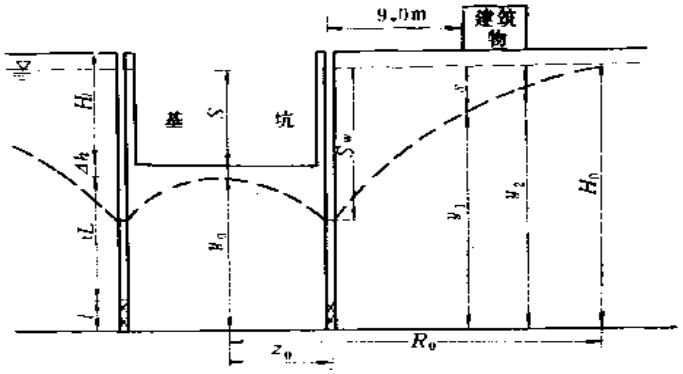


图 10-48　基坑降水计算模式

$$x_0=\sqrt{F/\pi}=16.1(\text{m})$$

抽水影响半径根据吉哈尔特公式确定为

$$R=10S\sqrt{K}=26.3(\text{m})$$

则 $R_0=X_0+R=42.4\text{m}$

所需抽水井组的总流量为

$$Q=1.366k\frac{2(H_0-s)\cdot S}{\lg(R_0/x_0)}=69.2(\text{m}^3/\text{天})$$

选取各井降深 $S_w=7.0\text{m}$，当井数 $n=12$ 时，每口井的流量为：

$$q=\frac{1.366k(2H_0-S_w)\cdot S_w}{\lg[R_0/(n\cdot rwx_0)]}=5.89(\text{m}^3/\text{天})$$

设计抽水总流量

$$Q'=nq=70.7(\text{m}^3/\text{天})$$

因此 $Q'>Q=69.2\text{m}^3/\text{天}$，$n=12$ 时已满足设计要求，施工中由于可能出现死井情况，井点数较计算值要增加 15%，实需井点数为 $n'=1.15n=14$。

(3)井点布置

为了均匀的布置井点，在东西方向取 $b=8.6\text{m}$，南北方向取 $b=9.5\text{m}$，布置方案如图 10-49 所示。

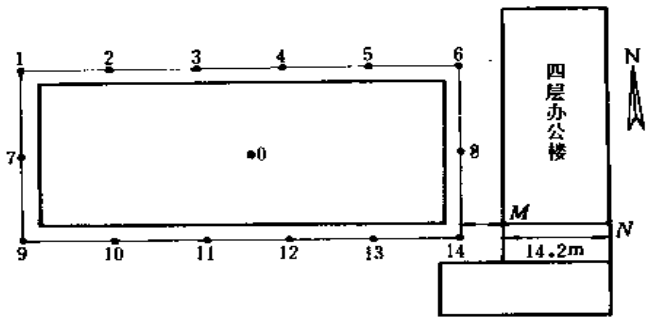


图 10-49　井点布置示意图

(4)抽水流量及降水深度检验

按上述实际矩形布置井点，计算抽水系统的实际总量为 68.3m³/天，平均每口井实际流量为 4.87m³/天；计算基坑轴线中心点 O 处水位实际降深为 5.094m，与 $S=5.1$m 相近，说明井点布置合理，满足降水要求。

(5)基坑降水对环境的影响

根据吉哈尔特公式确定的降水影响半径为 26.3m，东侧四层办公楼正处于影响范围内，水位下降将引起办公楼的附加沉降，为此选取办公楼基础内外两边缘点 M、N 进行沉降估算，如图 10-49 所示。

抽水系统对 M、N 点有影响的井点及其距离如表 10-9 所示，抽水引起的水位降深可按下式计算：

$$S=H_0-\sqrt{H_0^2-\frac{Q}{1.366K}\left[\lg R_0-\frac{1}{n}\lg(x_1\cdot x_2\cdots\cdots x_n)\right]}$$

对 M、N 有影响的井点及距离　　表 10-9

M 点	井号	5	6	8	12	13	14	Q(m³/天)	N 点	井点	8	14	Q(m³/天)
	x(m)	25.9	21.0	13.1	26.2	17.6	9.0	29.2		x(m)	25.0	23.2	9.74

由上式计算得到的 M、N 点的水位降深分别为 1.65m 和 0.33。

由于水位下降导致地基土附加应力增加，从而引起地面沉陷。东侧办公楼的基础尺寸为 42.64×14.2m²，基础埋深 1.05m，基底压力 80.78kPa，其附加压力 $P_{oz}=80.78-2\times10.5=59.8$kPa，则压缩层厚度可定为 $z_n=\omega B(cP_{oz}+1)=12.9$m，根据附加应力法得到的降水引起的 M、N 点的附加沉降分别为 7.83cm 和 1.83cm 两点沉降差为 6.0cm。

计算结果表明，降水对四层办公楼的影响较大，故应采取防护措施，在降水井与四层办公楼之间加设挡水钢板桩，其底部进入不透水层，深度达到 12.0m 为宜。

从施工实际情况看，基坑开挖与降水效果良好，邻近建筑物亦未出现因不均匀沉降造成的破坏现象，这说明方案与措施是合理和实用的。

10.12　抚顺饮食公司站前宾馆

抚顺饮食公司站前宾馆为 19 层(包括地下二层钢筋混凝土结构)，基坑开挖 9.0m。该建筑位于繁华的火车站前，占地 37.6×91.6m，东临中央路，西临电脑站和民用 7 层住宅，南靠人行道，北侧是施工工棚。其结构距中央路和人行道及工棚 5.0～6.0m，距电脑站和民用住宅只有 9.75m，见图 10-50。

该 场区地表为杂填土厚1.8m，粘土层厚约0.7m，下部为粗砂层厚为1.0m，砾石层厚 1.7m。在粗砂和砾石层之间夹有约 0.5m 厚的粘土。圆砾层为邻建的持力层(邻建采用预制桩基础，桩长 7.0m)其层厚 4.5m。最下层为基岩——风化片麻岩。地下水位埋深 5.0m。

1. 施工方案选择

鉴于以上具体情况，本工程施工方案的选择应考虑下列因素：

(1)施工时必须振动轻微、对邻建无其它损害。

(2)为防止壁坍或降水后影响邻建支护措施必须有隔水性能。

(3)支护措施必须有较大的刚度能控制边坡变形。

经分析，水泥搅拌加固法、高压旋喷桩加固法虽有隔水性能并且施工时无振动，但其强度较小且在砂砾石层中难于施工，因而不宜采用。地下连续墙、沉井支挡法具有良好的隔水性能和较大的抗弯刚度，但其成本高、施工难于进行，因而也不宜采用此两种施工方法。

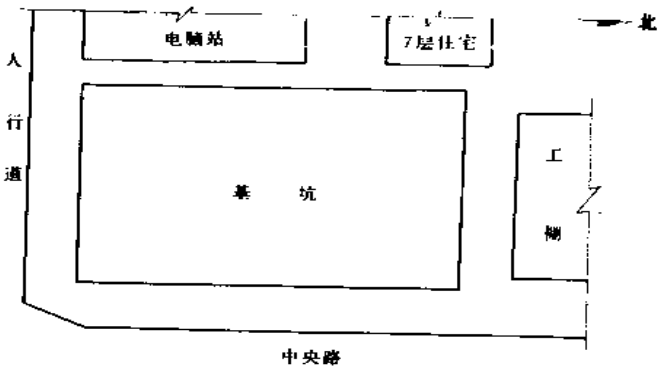


图 10-50　基坑周围建筑物平面图

“逆作法”施工克服了上述开挖方法的各种缺点，从根本上改善了基坑开挖时边坡的边界条件和受力状态，把一次性开挖的大面积、长时间暴露的边坡变成了分阶段开挖的小面积、短时间暴露的边坡；把专门用于护坡的临时排桩变成了永久的既护坡又承载的两用桩。这样就能节省大量支护材料和施工时间从而降低了成本、缩短了工期、对周围也无影响，因而选用了此施工方法。

2.“逆作法”施工工艺及过程

“逆作法”施工包括敞开式施工和封闭式施工两个过程。

(1)敞开式施工

1)基坑先开挖 1.0～2.0m，即开挖到地面零标高处。由于此层为杂填土和粘土其稳定性好，因而开挖时无需支护。

2)施工钻孔灌注桩。本工程基坑四周共布设 ϕ800 配筋 20ϕ16 的钻孔灌注桩 80 根。其中西侧 30 根间距 1.2～1.5m；东侧 24 根间距 1.56～1.78m；南、北两侧各 13 根间距 1.5～1.7m。中部共布设 ϕ1100 的钻孔灌注桩 24 根，其布置情况见图 10-51，各桩桩深进入中风化片麻岩。

在施工西侧周边桩时，由于离建筑物只有 2.75m，因而施工时采用“隔二打一”的办法以防止钻孔引起邻建地基土大面积的扰动，从而影响邻建安全。

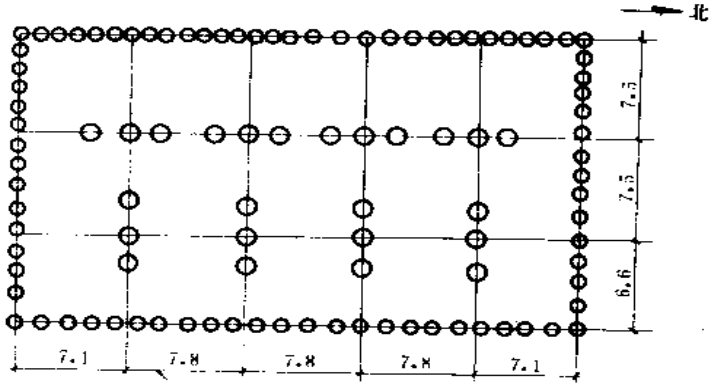


图 10-51　基础桩布置平面图

3)对基坑进行适当降水处理。由于地下水埋深 5.0m 而第一层地下室开挖深度为 4.0～5.0 m，因而本工程第一层开挖只进行了少量的降水处理。

4)修筑顶层土模、浇筑顶层板结构，预留楼梯口当施工孔洞用(降水井也包含在孔洞中)。

5)在预留施工孔洞中，开挖施工竖井安设提升设备。

(2)封闭式施工

1)由施工竖井进入顶板下面，开挖第一层两竖井之间的连通通道以便通风和安设输送带。

2)由连通通道向两边开挖，用输送带输送土石方、井口提升设备提升，见图 10-52。

3)边开挖边浇注外墙混凝土，周边桩作为永久护坡桩和支承桩。

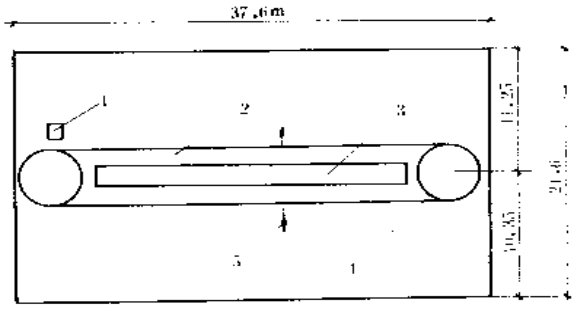


图 10-52　基坑封闭开挖平面图

1. 提升设备；2. 连通通道；
3. 输送带；4. 施工竖井；5. 开挖方向

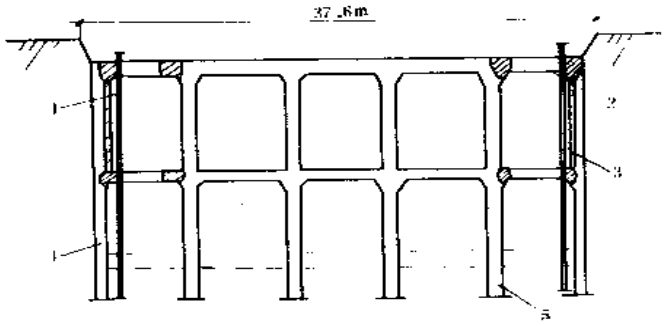


图 10-53　“逆作法”施工剖面示意图

1. 降水进；2. 施工孔洞；3. 护坡墙；
4. 周边桩(φ800)；5. 中桩(φ1100)

4)开挖支承桩周围土方并及时浇筑桩基础或桩帽。

5)修整中间楼板土模，浇筑楼板混凝土且预留下一层楼梯口当施工孔洞用，见图 10-53。

6)开挖第二层和浇筑底板时，先用开始打的降水井作降水处理其它施工可重复上述过程。

7)建筑楼梯。

3.“逆作法”施工的优越性

(1)“逆作法”施工克服了传统开挖法一次性开挖、大面积暴露的缺点，把深9.0m，长37.6m，宽 21.6m 的基坑分成三层若干区段开挖，并且边开挖边构筑护坡墙。这样减少了边坡的暴露时间，避免了边坡的风化剥蚀和护坡桩间土的塌落。

(2)周边桩既作防护桩又作基础桩这样降低了成本、缩短了工期。

(3)“逆作法”施工分层开挖、分层构筑各层楼板，从根本上改善上传统开挖法护坡桩的受力状态，传统开挖方法护坡桩如排桩其单桩受力状态呈“悬臂梁”式成“简支梁”式，而“逆作法”提当护坡桩的周边桩基本上呈框架结构，见图 10-53。

(4)“逆作法”施工分层开挖、分层降水并且边开挖边构筑护坡墙，有利于基坑隔水防止了降水对邻建的影响。

(5)“逆作法”施工构筑第一层楼板后，地面可以在楼板上施工作业；地下可以在楼板下封闭式作业，这样比传统的开挖方法在基坑中作业更偏于安全。

(6)“逆作法”只开挖有效范围内的土方量。因而比传统的大开挖法减少了大量土方量。

(7)“逆作法”施工桩基础采用钻孔灌注桩，土方开挖在封闭的状态下进行，因而其振动轻微对邻建无损害。

10.13　上海特种基础工程研究所办公楼

上海特种基础工程研究所办公楼，位于上海西南角徐家汇天钥桥路。该建筑物地下 2 层，地上 5 层，连塔楼高 21.5m，底板埋置深度为－7.30m，局部加深至－10.00m。建筑平面轴线为 39.85m×13.8m，总建筑面积约 4000m²，见图 10-54。大楼基础首次以地下连续墙作为地下主体结构边墙及基础，承受全部结构的垂直荷载，以及五级人防地下室的水平冲击波、水、土侧向

压力。中间柱的基础为 ϕ900mm×28.20m 的钻孔灌注桩，施工完成后地下连续墙底板、中间梁、柱和隔墙等组成完整的箱形结构以共同承受上部荷载。为了探索基础结构与上部结构同时施工，以期缩短施工总工期，大楼尝试采用了“逆作法”施工技术。

通过这一工程实践，对我国城市高层建筑的发展，为在密集建筑群中应用地下连续墙作为地下室外墙、压缩施工总工期，减少地下基础施工对周围相邻建筑的影响，提供了一种新的施工方法。

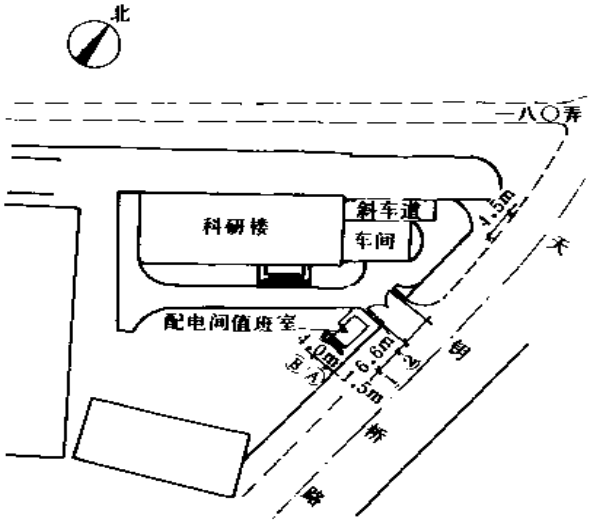


图 10-54　总平面图

1.“逆作法”施工方法

设计作为地下室边墙的地下连续墙和中排 9 根钻孔灌注桩，其同承受上部结构及基础结构平行立体作业时分配给边墙和中间柱的荷载，其施工程序如下：

(1)完成地下连续墙及中间柱下的钻孔灌注桩；

(2)开挖地面以下第一层土方，构筑顶圈梁杯口、腰圈梁、纵横水平支撑梁及吊装地下一层楼板；

(3)吊装上部第 1～3 层柱梁板结构，同时交错进行地下 2 层土方，开挖作业。第 2 层土方开挖完成后，进行构筑底板垫层及钢筋混疑土底板，分隔墙工程；

(4)在基础底板养护期间，吊装地面以上第 4～5 层柱、梁、楼板，并行进行基础内部隔墙等结构工程；

(5)地面以上及地面以下水电装修工程同时并进。

施工程序及形象进度见图 10-55。

2. 地下连续墙结构施工

以地下连续墙作为地下室的边墙是“逆作法”施工的基本条件之一，目前尚无更好的构造形式替代。大楼地下连续墙构筑深度为 13.50～15.50m，墙体厚度为 60cm，采用导板抓斗挖槽的“两钻一抓”工艺施工。考虑到墙体要承受 5 极人防要求的水平冲击波的作用，在墙体分缝部内侧开挖面预埋连接铁件，上方开挖后凿去墙体表层保护混凝土，用 8mm 铁板将预埋铁件焊接连成整体，同时将地下连续墙的分段缝都设在地下室分间的现浇混凝土隔墙处，以隔墙混凝土及其连接钢筋加强地下墙施工分缝的强度和刚度，以满足抵抗水平冲击波的要求。连锁结头

加强柱示意见图 10-56。地下连续墙施工分段的长度，等于两个开间的宽度，且线段为 7.20m，转角处的长度为 6.90m。槽段长度超过以往的常用尺寸。施工实际情况良好。

3. 中间支承基桩及其施工

中间支承基桩在施工阶段承受两种荷载，其一是承受作为支撑结构的梁板体系的自重，使其不致因跨度过大，结构上难以处理经济上不合算。其二是承受在设计中预先安排好的若干层数的上部结构传下来的结构自重及施工荷载。

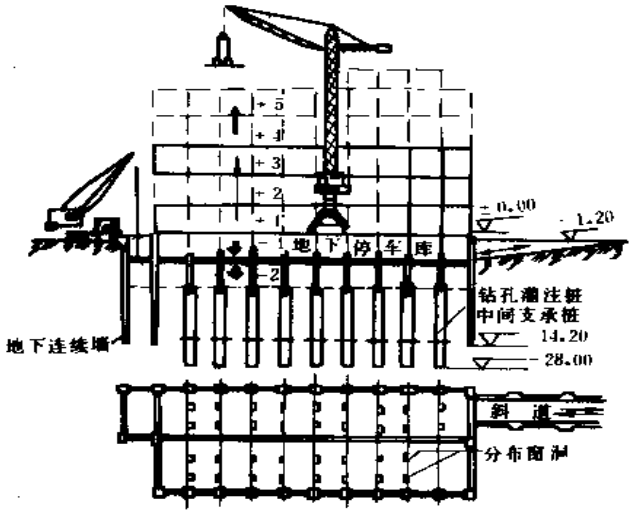


图 10-55 “逆作法”施工工艺流程及形象进度

本工程中排钻孔灌注桩以摩擦桩作为支承基桩，其受力最不利是在底板土方已完成，桩的有效摩擦长度截至最短，而上部传下的结构及施工荷载全部由基桩承担，待底板浇筑完成，至养护达到强度，此时上部荷载将由桩和底板开始共同工作，而当隔墙浇筑完成，有相当部分的荷载由隔墙传给底板承受。

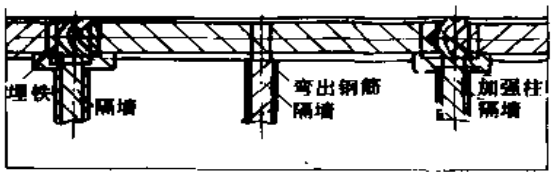


图 10-56 连锁结头加强柱示意图

对于上海软土地区以摩擦受力为主的支承基桩，设计时要考虑桩的承载能力，还要考虑施工开挖至结构完成后的沉降变形，同边墙和底板结构的变形相协调一致。基桩和结构桩的连接，一般采用在浇注桩基混凝土时插入钢管柱或 H 钢柱，埋设误差不大于柱构造覆盖物尺寸的 2/3 或 50mm。

本工程钻孔桩采用 ϕ900mm 正循环潜水电钻成孔，桩深 28m，内插 ϕ400mm 钢管桩，混凝土浇至底板以上 300～500mm，钢管插入底板底面以下 1m。由于钻孔桩内混凝土并未浇到地面，孔的上部存留钻孔泥浆，为在开挖土方时，不致因上部泥浆影响施工，开挖前预先对泥浆作水泥固化处理，参加泥浆量的 10%左右水泥，并进行搅拌，泥浆能自凝结硬。

4. 地下墙结构钢筋和内部结构钢筋连接

为保证地下连续墙，墙体与墙外结构的圈梁、中间梁、隔墙、底板等连接的整体性，结合面处的已浇混凝土表面凿毛处理。钢筋的连接有采用螺栓结合。其方法是将连接钢筋的端部加工成螺纹，按设计要求安装在钢筋上，对螺纹部分作好保护一起下入槽内，浇筑水下混凝土。当土方开挖内部结构施工时，只要清除保护物，混凝土表面凿毛，拧上螺栓和连接钢筋即可。与以往采用的将地下连续墙中连接钢筋弯起开挖后扳直与梁板钢筋相连的办法相比，其优点有：

(1)钢筋的材料和直径可按设计需要选择；(2)钢筋因没有二次整形的工作，部位正确受力状态好；(3)没有对弯起钢筋整形复原时造成混凝土表面的局部剥落。其缺点有：(1)墙加了螺纹和螺帽的金属加工量，成本较高；(2)因端部要加工成螺纹，减少了有效截面。

5. 逆作法施工区混凝土浇筑

通常混凝土的分段施工，已浇混凝土总在结合面的下部或侧面，这样新老混凝土的结合由于重力或重力产生的侧向力的作用，使二次混凝土之间的结合良好，而且混凝土浇筑过程中的气体排出亦很顺利，因而结合处一般不存在问题。而逆作法施工则相反，后浇混凝土在先浇混凝土的下部，因此，必须解决好下列几个工艺问题：(1)提供最小的操作空间；(2)混凝土空隙内的气全顺利排出；(3)混凝土水化作用生成强度过程中的收缩。

本工程逆作混凝土浇筑采取了如下措施：(1)混凝土入口处的模板随混凝土面上升至顶部逐步封装；(2)直墙模板顶部设喇叭口(单侧或双侧)，并高出结合面30cm左右；(3)结合面做成由里向外的微升，利于混凝土空隙气体排出；(4)混凝土的配合比设计，考虑使其收缩量最小。模板构造见图10-57。

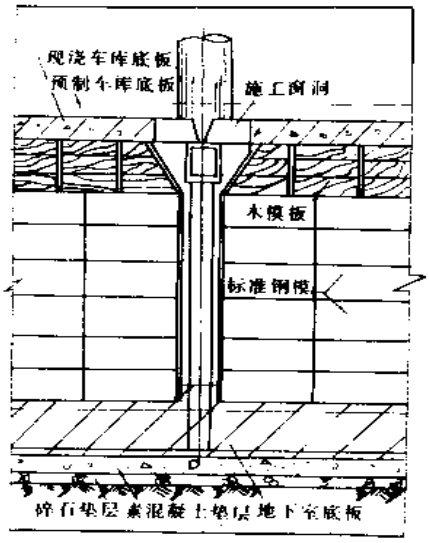


图10-57　现浇隔墙模板示意

6. 垂直运输入施工窗口

逆作法施工，由于面层的梁板主体结构已完成，地下土方、施工材料及设备的进出将集中到一处或几处，因而；垂直运输的进出口的运输能力必须根据施工需要设计，其尺寸也要满足进出材料、设备及构件的尺寸要求。

本工程以西端楼梯间作为垂直运输的施工窗洞，地下土方被运至窗洞下，再用小抓斗直接抓出外运，地下室施工的材料、设备亦从此窗口吊入，见图10-55。为了施工方便，在楼板上还分布若干小孔，以配合施工合作。

7. 沉降测量

本工程逆作法施工期间，对中间柱及边柱设置观测点，系统观测结构加载和土方开挖卸载各阶段的沉降变化，实测结果与预估值出入较大，即上部第1～3层结构吊装结束，地下二层土方开挖到底标高，底板尚未浇筑，两侧边墙沉降而中间抬升，以中跨为例其沉降抬升情况见图10-58。

10.14　上海电讯大楼

上海电讯大楼是上海与国内外通讯联系的主要枢纽，位于人民广场南面，紧靠交通干道延安东路。工程平面位置见图10-59。

本工程由上海工业建筑设计院设计，上海市基础工程公司承担多层深埋地下室施工。该工程的主楼，地面以上有24层，建筑物总高为130.60m。地下室有3层，基础埋置在地面以下11.47m。地下室的底板为1.5m厚的钢筋混凝土结构，坐落在断面0.5×0.5m、长度为33m，送入地下10m的386根预制钢筋混凝土桩及28根钢管桩上。地质以亚粘土夹粉细砂为主。见表10-10。

地下室长60m、宽40m，深度在设计室内地坪以下达12.67m。外墙采用地下连续墙结构，墙厚为60cm，墙深17.5m，周长为200延长米，划分34个槽段施工。连续墙槽段施工时采用钻抓法成槽工艺。地下墙顶面下设置二道刚度较大的圈梁，与地下室内的支撑板墙连接在一起。

施工时形成具有足够刚度的水平框架支撑，通过横向8道(7道断面宽度55cm，1道断面宽度1m)、纵向二道(断面宽度85cm)、深7m(从顶板14.7m以下至底板)的支撑板墙把整个结构分成27个区格，见图10-61。

地下室框架支撑——圈梁与内隔墙均采用敞开式逆作法施工。从面板底面开始由上向下分阶段开挖，并浇筑纵横支撑隔墙(包括圈梁)及底板，然后在底板上完成底层支撑结构及在区格内向上施工。施工顺序如图10-62。

1. 施工方案选择

本工程主楼建筑不同于一般民用高层建筑，它的层高大、跨度大、楼面使用荷载也大，特别是要在软弱土层中开挖这样深的基坑，施工难度较大。工程南侧紧临市内交通干道延安东路、不能因开挖基坑而影响车辆的正常行驶，也不能损坏路面下的各类管道而造成危害；西侧，黄陂路下亦有大量给排水管、煤气管、电缆

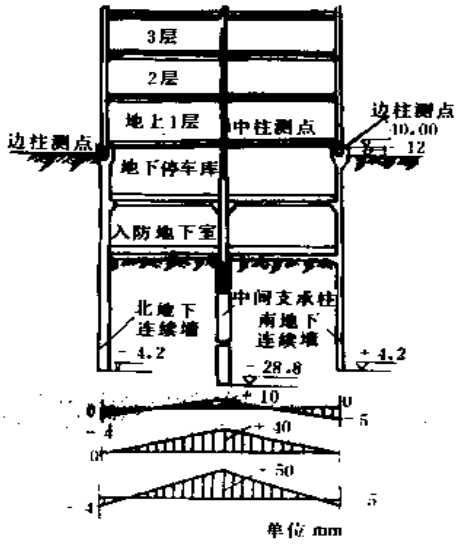


图10-58 中跨横断面墙柱沉降与抬升图

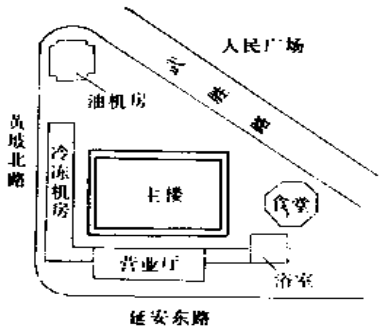


图10-59 工程平面图

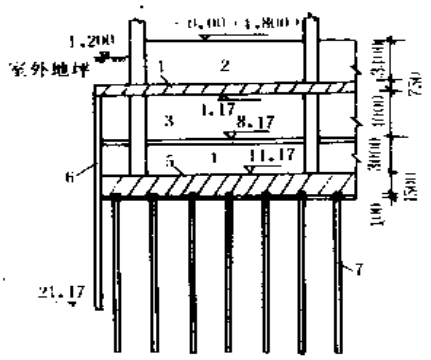


图10-60 地下室(箱形基础)剖面

1. 顶板；2. 技术层；3. 机房层；4. 结构层；5. 底板；6. 地下连续墙；7. 桩基

等，也不能因基坑的开挖引起地面沉降而变形破裂。

经设计、施工、建设等单位多次讨论，认为采用地下连续墙作为施工时的围护结构，并利用地下室内隔墙作水平支撑的基坑开挖施工方案，是比较恰当的。

采用地下连续墙的目的首先是满足主楼基础开挖的需要，随着基坑的挖深，其承受的侧向土压力将逐步增加。为了减少变形，保证墙体强度和刚度要求及施工的安全，采用逆作法施工内部结构。地下墙是主楼地下结构的外墙，起着截水和防渗的作用。人防结构建成后，还将承受由冲击波引起的特殊荷载。

土的分层及物理力学指标 表 10-10

土层	土层名称	土层厚(m)	物理力学指标												
			W(%)	γ(t/m³)	e	W_L	I_p	I_L	φ(°)	c(N/cm²)	a_{1-2}(cm²/N)	R(t/m²)	静力触探 q_c	静力触探 f_s	$N_{63.5}$
1	填　　土	标高−4.17以上													
2	亚粘土	−4.17～−10.32						0.85	12.5	1.3	0.0049	10.0			1～2
3	淤泥质亚粘土	厚5.2～6.9	44.6	1.75	1.72	36.6	15.1	>1	11.0	0.9	0.0093	7.5	5.4	0.10	1
4	淤泥质粘土	7.3～9.6	50.1	1.69	1.46	44.0	20.1	>1	7.5	1.0	0.0095	6.5	6.5	0.10	<1
5*a*	淤泥质轻亚粘土	2.7～4.8	33.9	1.83	0.99	29.1	10.1	>1	21.5	0.6	0.0040	11.0	21.2	0.51	4～7
5*b*	淤泥质亚粘土夹亚砂土	1.7～14.0	32.0	1.81	1.02	30.1	11.2	0.86	19.0	0.6	0.0045	10.0	21.2	0.51	3～4
5*c*	亚粘土	6.0～17.1	33.0	1.83	0.99	34.9	13.7	0.60	21.5	0.7	0.0036	12.0	18.1	0.29	6～10
5*d*	粘　　土	5.4～12.2	32.8	1.82	1.03	40.0	17.8	0.32	11.5	1.9	0.0036	12.0	18.1	0.29	9～10
6	亚粘土	0.65～1.5	21.9	2.00	0.65		12.0	0.77	22.5	2.2	0.0020	22.0	29.4	0.58	
7	亚砂土	2.15～4.0	21.5	1.99	0.64	21.6	5.9		27.0	0.4	0.0015	18.0	86.4	1.17	35～45
8	粉细砂	5.3～7.25	24.0	1.95	0.73			0.90			0.0010	20.0	172.8	1.39	>50
9*a*	轻亚粘土	0.55～17.00	32.7	1.86	0.90	32.7	10.0	0.87	24.0	0.5	0.0026	12.5			40～50
9*b*	亚粘土夹粉细砂	3.0～22.00	29.5	1.86	0.91	30.0	12.3		19.5	0.8	0.0038	11.5			25～35
10	含砾中粗砂	8.25～1.55	20.7									28.0			43～50
11	粉细砂	未钻穿										20.0			>50

注：1. 室内±0.000相当于绝对标高4.800m，地下室顶板面−3.40相当于绝对标高1.40m。

2. 天然地面标高相当于绝对标高+2.80～+3.00m。

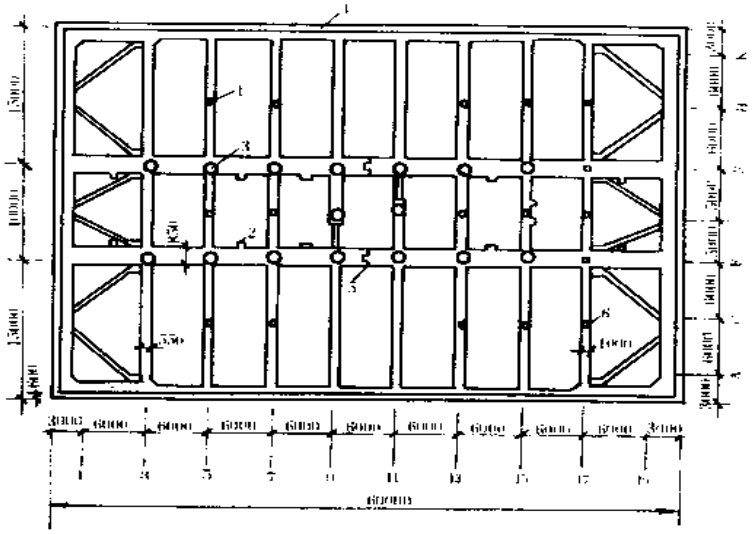


图 10-61　地下室结构平面图

1—ϕ400钢管桩；2—边桩；3—ϕ600钢管桩；4—地下连续墙；5—施工缝；6—方桩

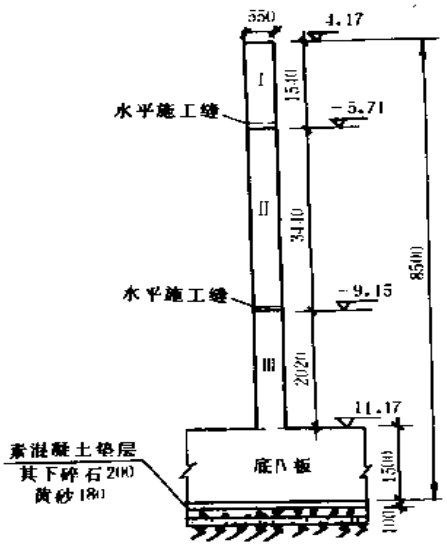


图 10-62　施工顺序图

2. 施工设计

以地下连续墙作为围护结构及利用地下室内隔墙，作水平支撑的敞开式逆作法施工方案选定后，着重设计两条栈桥的承能载力；计算土方开挖；规划钢筋、模板吊装及混凝土运送机械、车辆运输等问题。

为了缩小栈桥的支承间距及不使横向水平支撑承受垂直荷载，马道架设除了利用结构本身的 ϕ600 钢管桩外，还在⑤、⑦、(13)、(15)、轴墙的跨中设了 12 根 ϕ400 的钢管桩。见图 10-63。使栈桥满足了施工荷载的要求。

栈桥以导梁(1.5m×1.5m)作受弯桁架，以钢制路基箱作桥面，其荷载经传递由桩基承受，安全可靠。

3. 施工情况

根据设计，地下连续墙的水平支撑框架(即地下室的内墙)按逆作法进行施工，分四个层次进行。

(1)土方开挖

第一层开挖采用 1m³ 斗容量的反铲挖土机。为防止桩基横向位移，必须对称挖土，由西向东出土，包括地下墙外侧斜坡土方。开挖深度为 4.38m(即标高－1.92～－6.30m)，土方量 V_1 ＝11851m³。

第二层土方开挖深度 3.62m(标高－6.30～－9.92m)，V_2＝8122m³。

第三层土方开挖深度 3.2362m(挖到底层标高－13.15m)，V_3＝7500m³。

第二层、第三层土方采用 W－10001 吊车在二条栈桥上，分格抓土并装入卡车外运，各层土方开挖见图 10-63。

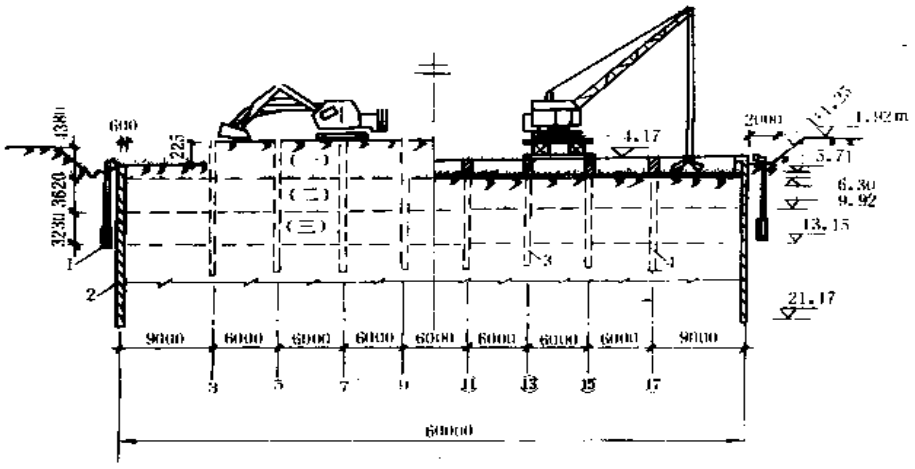


图 10-63　土方开挖示意

1. 井点(L=7m)；2. 地下连续墙；3. ϕ600(ϕ400)钢管桩；4. 500×500mm 钢筋混凝土方桩

(2)井点降水

在连续墙外侧采用轻型井点降水 4m。共打设 160 根井点管，井点间距 1.2m，井管全长

7m，设置一台真空泵与四台射流泵抽水，效果良好。在基坑内部布置二套（共 76 根）线状分布的井点。通过墙内外的井点降水沿周围 200m 地下墙起封闭作用，第一层和第二层结构制作时，地基始终保持干燥状态。

（3）道木及砂垫层铺设

为了减少钢筋混凝土板墙浇筑时，自重压力对地基产生的沉降，在每道板墙结构下各做 3.0m 宽的砂垫层。第一层板墙高 1.54m，砂垫层厚 30cm，第二层板墙高 3.44m，砂垫层厚 50cm。见图 10-64。砂垫层铺设时用平板振动器分层洒水振实，其干容重均满足 $\gamma \geqslant 1.56 t/m^3$ 的要求。

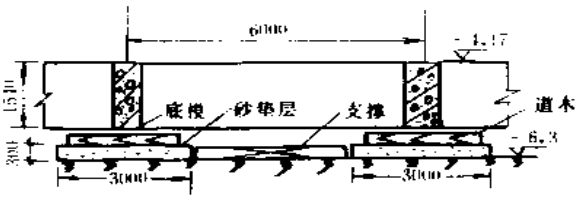


图 10-64　砂垫层、道木铺设示意图

（4）施工栈桥架设

在第一层结构制作完毕达到设计强度后，在⑤～⑦、(13)～(15)轴墙间架设了两条栈桥。每条栈桥长 56m、宽 6m，沿栈桥纵向铺设二条厚钢板带，宽 2m 厚 15mm，并隔一定距离焊防滑钢条，确保运输作业安全。见图 10-65。

（5）混凝土施工技术措施

本工程采用商品混凝土，框架板墙及底板混凝土强度等级均为 C30。底板分东、西两大块浇筑，中间留一条宽 0.85m、厚 1.5m 的后浇带。其混凝土强度等级为 C35 并需掺加膨胀剂，使两和要施工缝处，不产生收缩缝并防止渗水。混凝土入仓采取泵车布料；浇灌底板采取分层滚浆的施工方法。由于结构复杂、面积大、预埋件及门洞多，故整个结构设置了水平方向和竖直方向的施工缝

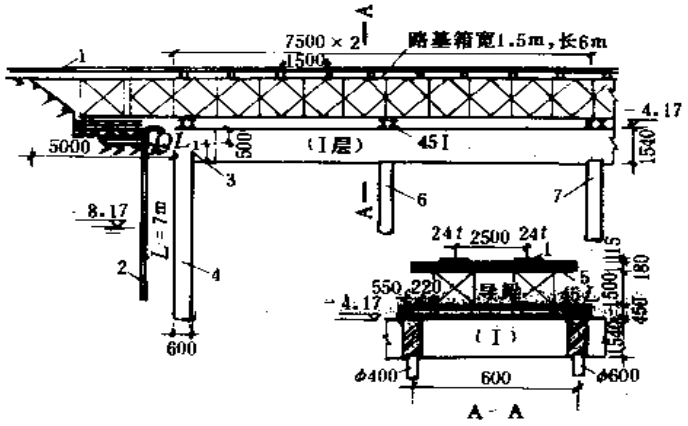


图 10-65　栈桥布置图

1. 钢板（δ=15mm）；2. 水位降低值；3. 边柱；4. 地下连续墙；
5. 路基箱；6. φ400 钢管柱（L=40、75m）；7. φ600 钢管桩

4. 逆作法施工的结构制作中采取若干保证工程质量的技术措施

（1）上、下层交接面处在其两侧的外横制作成喇叭口的斜模板，待混凝上浇筑达到设计强度后，再将斜口牛腿混凝土凿去，以保持墙面平整，接缝混凝土垂直可靠。三种喇叭口尺寸见图 10-66。

（2）第二层结构（h=3.44m）边柱混凝土浇捣与第一层交界处混凝土振捣密实，先在第一

层边柱位置上预埋 ϕ250 铁管 41 根，在 QL_2 圈梁上边柱位置旁也预埋 ϕ250 铁管 24 根，见图 10-67。

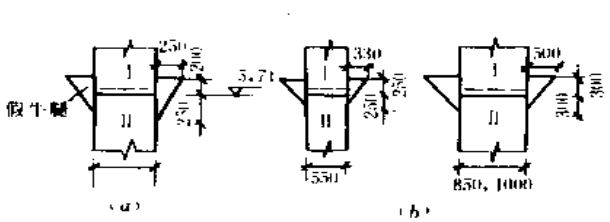


图 10-66　牛腿示意图

(a)5.17m 处西区牛腿；(b)5.17m 处东区牛腿

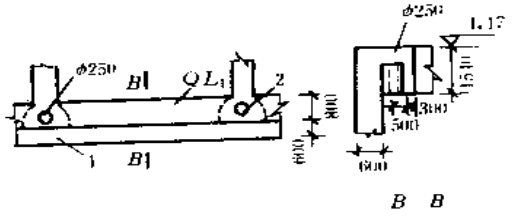


图 10-67　埋件示意图

1. 地下连续墙；2. 边桩

(3)为了提高墙的整体性和抗剪强度，水平施工缝沿缝全长做成齿槽状，并将结合面凿毛，清洗干净。

(4)上层墙身底部立筋应伸出底面，插入砂垫层中，长度为 $10d$ 及 $25d$，纵向也需相互错开，以利下层钢筋与上层钢筋焊接。在浇捣下层混凝土时，在侧模上每隔一定长度临时留孔，浇振完毕即可封闭。

(5)为了改善新旧混凝土的结合，在施工缝处采用了二次振动捣混凝土的方法。既能振捣密实、且强度略有提高(6%左右)。

(6)底板后浇带施工。根据二次振捣混凝土的经验，先进行接缝凿毛、清理及刷浆。然后分三层采取二次振捣混凝土方法浇捣并加强了养护，结果，无混凝土收缩缝隙。

经上述混凝土施工技术措施的实践，不但解决了由于分阶段逆作而可能产生的各种问题，而且，由于接缝振捣密实，节省了大量的压浆费用。

10.15　上海市人民广场地下变电站

人民广场地下变电站座落在上海市人民广场的东南部，它是国内第一座建造在城市中心的 22 万伏超高压特大型地下变电站，也是国际上可数的特大型地下变电站之一，由水利电力部上海勘测设计院设计，上海市隧道工程公司承建变电站的土建工程。

地下变电站土建工程的主体结构是一个由地下连续墙和钢筋混凝土内衬、底板、多层楼板及顶板复合构成的内径为 58m、内净高度为 19.6m 的圆形井筒。地下连续墙的平面形状是一个墙身内壁内切圆直径为 60m 的正边形，地下墙的平均深度达 38.4m，壁厚 1.2m，周长为 192.374m，周圈墙身内设有控制室通道第 6 个预留通道洞口。地下连续墙的平面布置如图 10-68 所示。

整圈地下连续墙分为 38 个施工槽段，采用钢筋笼凹凸镶嵌环向搭接方式的刚性墙体接头把 38 幅地下墙段连接成整体的封闭井圈。

1. 工程地质条件

本工程施工现场的地面标高在吴淞标高＋3.22～＋3.5m 之间，地下水水位在地表以下 0.5～1m 之间，地质状况大致如表 10-11。

2. 主要工序的施工方法与施工机具见表 10-12

3. 刚性接头

刚性接头是一种新颖优越的地下墙接头形式，它不是一道单独的工序，却同各道主要工序

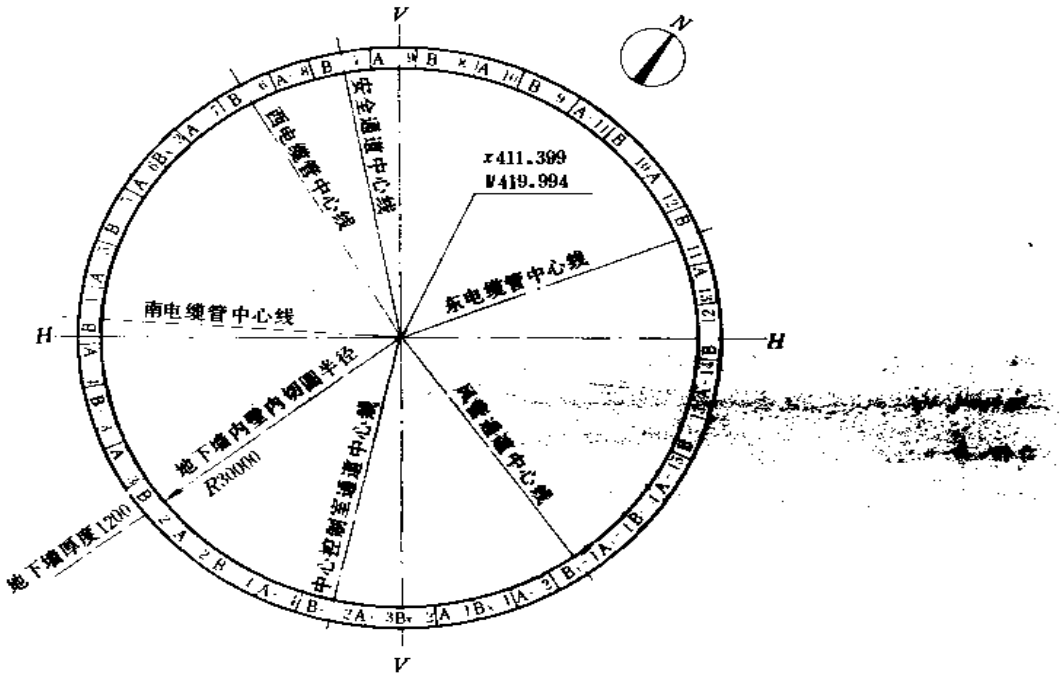


图 10-68　地下连续墙平面布置图

上海市人民广场地下变电站工程地质概况表　　**表 10-11**

工程地质层			层底标高	土层厚度	孔隙比	含水量	容重	塑性指数	压系缩数	固结快剪		土的强度
层序	土层名称	土性概述								内摩擦角	内角力	
			m	m		%	kN/m³		MPa⁻¹	度	kPa	kPa
1	杂填土	夹有砖、石、煤渣	2.30～0.13	0.70～3.40								
2	亚粘土	含少量粉砂饱和、流塑	1.04～0.29	0.20～1.80	0.96	32.9	18.5	16.7	0.53	9.2	15	100
3	淤泥质亚粘土	夹薄层粉细砂饱和、流塑	−3.12～−4.23	3.60～5.00	1.20	41.4	17.6	15.3	1.02	12.7	9	80
4	淤泥质粘　土	夹粉砂、饱和、流塑、高压缩性	−13.41～−14.49	9.40～11.10	1.42	49.7	17.1	20.9	1.22	7.4	9	65
5*a*	亚粘土	很湿、软塑，局部夹砂性土	−26.34～−27.28	12.20～13.80	1.06	36.0	18.1	15.4	0.48	10.5	10	85
5*b*	亚粘土	很湿、可塑，中等压缩性	−37.71～−43.97	11.0～17.0	1.02	33.3	18.0	15.8	0.40	12.7	12	105

质量有密切的因果关系。为了争取首次施工刚性接头地下连续墙工程获得圆满成功，不但对各道主要工序提出了高标准严要求，还把刚性接头施工列为技术攻关项目，制定出一整套保证刚性接头按设计要求结合的施工技术方案与质量保证措施，实施情况如图 10-69 所示。

从“刚性接头施工方案图”可见：如果 A 型槽段吊放钢筋笼时不垂直，倾斜量超过了 A、B 型钢筋笼的设计间隙 212mm，就会给 B 型钢筋笼下放造成障碍。在吊放 A 型槽段钢筋笼时，采用了先测出钢筋笼下放到位前的倾斜方向和倾斜量，再纠直钢筋笼的方法，使 B 型钢筋笼都能顺利下放到位，解决了这个施工技术难题。

主要工序施工方法与施工机具表　　表 10-12

序　号	工　　序	施　工　方　法	施工机具
1	泥浆系统	用双轴拌浆机拌制新鲜泥浆，用总容积约 1200 立方米的半埋砖砌泥浆池储存泥浆；用 4PL－250 型(15kW)泥浆泵回收槽内泥浆，经土碴分离筛—沉淀池—旋流器—振动筛多级分离净化后，调整其性能指标，复制成再制成再生泥浆；劣化泥浆先回收到劣化浆池内暂存再用罐车装运外弃或用 S－2 泥浆脱水机作脱水处理。	1、双轴拌浆机 2 台 2、土碴分离筛 1 台 3、旋流除碴器 4 只 4、双层振动筛 1 台 5、4PL 泥浆泵 3 台 6、3LM 泥浆泵 10 台 7、S－2 脱水机 1 台
2	开挖成槽	用 MHL－80120Ay 成槽机以"跳挖法"挖成单元槽段，并扫挖干净槽底泥积的土碴	1、MHL 液压抓斗 1 台 2、KH180 履带吊配套
3	槽段质检	用测锤与卷尺测出槽深与槽位的偏差量，用日制超声波仪器测定槽段壁面的垂直度	1、日制超声波仪 1 套 2、测锤与量具
4	清底换浆	用 Dg100pW 空气升液器伸入槽段底部以泥浆反循环法吸除槽底沉渣，并将槽内泥置换成符合清底泥浆标准的优质泥浆	1、Dg100 空气升液器 1 套 2、空气压缩机 1 台 3、50t 履带吊配合
5	预制钢筋笼	整幅钢筋笼分 2 段在整体胎模上统一布筋架立，焊成垂直搭接的骨架，并做好上、下段搭接标记。按构造要求焊装混凝土导管通道、纵横向起吊桁架、吊点、捆置点与最终悬吊环等构件	1、钢筋切断机 2 台 2、钢筋成型机 2 台 3、闪光对焊机 2 台 4、直流电焊机 6 台
6	吊装钢筋笼	用 91t 履带吊和履带吊分段抬吊钢筋笼，在空中拎直后，用单机垂直吊运入槽，再在槽口对接成整幅下放到设计标高吊装就位。	1、91t 履带吊 1 台 2、50t 履带吊 1 台 3、专用吊梁 2 套
7	吊装接头箱反力箱	用 50t 履带吊分段起吊接头箱(反力箱)入槽，在槽口逐段拼接成整根(40m)以后，下放到设计位置	1、接头箱(40m)2 套 2、反力箱(40m)2 套 3、50t 履带吊 1 台
8	浇墙体混凝土	用 50t 履带吊分段起吊混凝土导管插入钢筋笼导管通道内，并在导管内放充气球胆。混凝土由搅拌车送到现场，直接卸入导管灌斗内，在泵中浇灌成混凝土地下墙	1、混凝土导管(39m)2 套 2、50t 履带吊或汽车吊配合拆管作业
9	顶拔接头箱反力箱	用自吊 200t 液压顶升机顶动接头箱(反力箱)，由 50t 履带吊配合作业，分段拆卸拔出接头箱(反力箱)	1、200t 顶升机 1 套 2、50t 履带吊 1 台

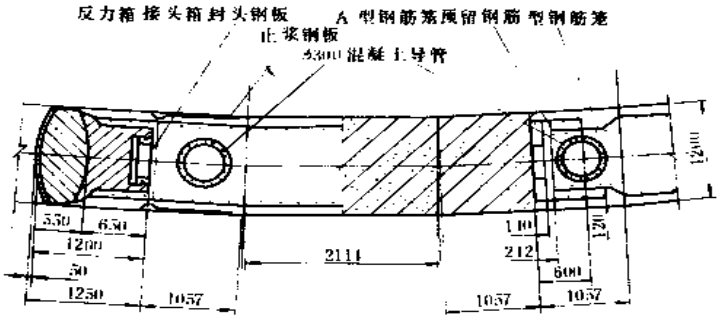


图 10-69　刚性接头施工方案图

10.16 福建省烟草综合业务大楼

该楼建于福州五四路省体育中心南面，大楼由主楼和裙楼组合，建筑面积为 15500m，基础采用 400×400mm 预制钢筋混凝土桩，桩长 12.5m，地下室外壁采用沉井，沉井搁置桩台上。

地质物理力学指标见图 10-70。

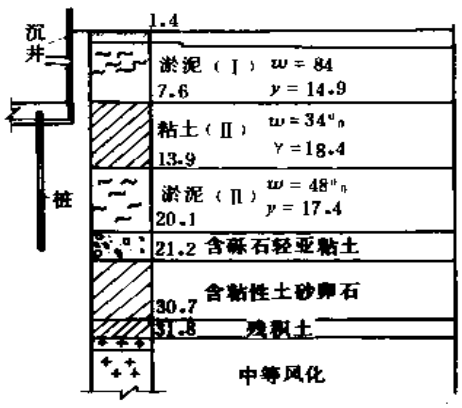


图 10-70 地质剖面

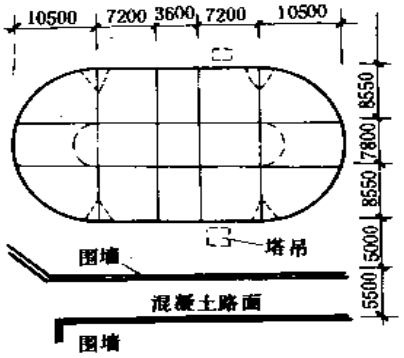


图 10-71 沉井平面

福州市地质处于盆地软土地带，属海成弱谷相沉积，淤泥埋藏较浅，厚度一般达 5～15m，水平方向变化不大，物理力学指标较差，内摩擦角一般 $\varphi=8°\sim10°$，含水量 w 为 70～80%，孔隙比 $e=1.7\sim2.4$，稀软状态，渗透系数 $=1\sim5\times10^{-7}$cm/sec。

采用沉井的外壁做支护结构墙、尤其弧形外壁和内格墙可以充分发挥混凝土承压强度高的特性，克服由于淤泥 φ 值小水平推力大的不利因素，而下沉到设计标高后，井壁就是地下室的外壁，内分格墙就是结构核心墙，同时淤泥稀软状态便于沉井下沉，又便于沉井倾斜纠偏。

本沉井东、西端为半圆形，中间为长方形，总长 40.3m，宽 21m，井高 10.5m，实际下沉深度 9m，井壁下端厚 650，上端壁厚 500，内分格墙宽 300，内格墙高 3000 混凝土采用 C30。

沉井分两节浇捣，第一节高 6500mm，下沉到距天然地面 500mm 时再接高 3000mm，该井自 1991 年 8 月 2 日开始下沉至 10 月 21 日达到设计标高，计 80 天其中包括第二节的制作和养护，开始下沉时控制下沉量 10～15cm/天，以后快些达 10～20cm/天，最大达 25cm/天。

1. 沉井四周土体破坏情况和对周围建筑物的影响

(1)在沉井南面 5m 有一道通长的围墙(见图 10-71)，从沉井下沉到结束，围墙没有发现倾斜及裂缝，两围墙之间水泥路面也没出现裂缝，实际观测在距井壁 4m 以外的建筑物在沉井施工期间是安全的，不会受到损害。

(2)沉井施工期间对周围土体的破坏影响，在开始下沉时地表上，靠近井壁的土体明显地被井壁摩擦力拖带跟随下沉，在四周 2～3m 宽出现环形沉陷滑动区及较大的水平裂缝，但下沉 4～5m 后井壁四周土体几乎是没有变形，保持稳定。

(3)因淤泥软塑状态，担心井下沉到一定深度由于井内外土的高差大，使刃脚外侧的土压力超过土的极限承载力，以致井外土体从刃脚下向内挤入坑内，或坑内产生隆起现象，实际上以上的土扰动现象没有发现，因为井坑内先打了钢筋混凝土工程桩，有利于阻止土体的扰动和挤入。

2. 井壁上不均匀的土围压和壁中钢筋应力

(1)为了解下沉期间井外侧土压力和壁中钢筋应力的变化，在井壁外侧标高－10.00、－6.20、－2.50三个不同标高处预埋20个压力盒，又在标高－9.00、－6.50、－250预埋钢筋应变片，在施工期间定期检测，随时可以了解土压力和钢筋内力情况及时指导倾斜纠偏。

本工程沉井下沉虽然顺利，但在测量记录的各点下沉时，可知沉井在淤泥中是前后左右摇晃中慢慢连续下降，由图10-72中反映出在－10.00处预埋6个压力盒，它的压力总趋势是随着井的下降而不断升高，但它的压力同样时大时小，在不同的地方，外壁有时是承受主动压力，有时承受被动压力。

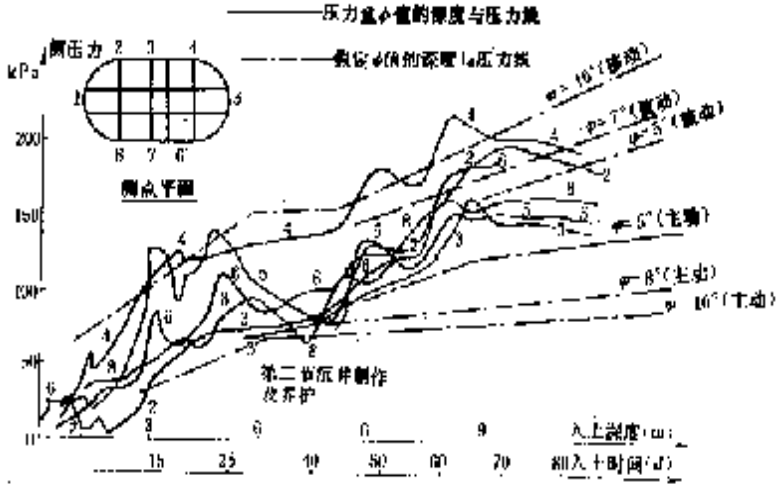


图10-72 沉度—侧压力关系曲线(压力盒埋—10.00)

(2)土的侧压力数值

设计时按地质资料提供不排水直接快剪的 $\varphi=8°28'$，为计算和表达方便，将粘土性的淤泥不计 c 值，提高 φ 值，使 $\varphi=\varphi+3=8°28'+3°=11°28'$。按砂类土考虑，用库伦公式计算 $\varphi=10°$，埋深10m时，主动土压力计算值与压力盒实测值，比较见表10-13。

由图10-72中6个压力盒曲线随着沉井下降而不断上升，但其压力值大部分都在 $\varphi=5°$ 的主动压力线和 $\varphi=7°$ 的被动土压力线之间变化，比设计中的 $\varphi=10°$ 的主动土压力线几乎高出一倍。

同时压力盒曲线压力跳动的幅度也较在说明下沉中摇摆较大，是水平倾斜造成的，所以要降低实测中的压力波动，主要加强施工管理，减少下沉时不均匀高差，有的只有2~3天时间出现不均匀高差达30cm之大，高差大必然使侧压力变化也大，沉井大下沉技术性要求不高，但必须细致小心，不可粗心大意。

表10-13

入土深度(m)	计算侧压力(kPa)	土压力含实测值(kPa)
5	31	20~70
6.5	62.0	60~140
9	94.2	140~170

(3)钢筋应力

钢筋实测结果的应力不同标高出现最大和最小应力见表10-14。由表中可知最大的钢筋压力是70MPa，最大拉应力是20MPa。

沉井内外壁钢筋应力实测结果　　表 10-14

检测钢筋位置	钢筋最大应力(MPa)	钢筋最大拉应力(MPa)	备　注
内格墙－6.50 －9.00	70	0	
东西园弧水平钢筋 －2.50 －6.50 －9.00	40	6	
南北直线外壁－6.50 －9.00	45	10	
南北直线外壁－2.5 －6.50	10	20	－6.50 点大部分受拉
竖向钢筋	40	0	由 40 降到 0

这些钢筋应力比设计强度 R_g＝310MPa 小的很多，说明在井壁中钢筋没有充分发挥作用，仅须构造配筋，原因是：

(1)淤泥摩擦角 ϕ 值小，作用壁上侧压力大，以本沉井初估南北方向约有 28000～30000kN 的水平相互作用壁上，东西方向约有 14000～15000kN 的水平力相互作用壁上，因为有很大的轴向力所以沉井壁上几乎都变成小偏心压弯构件，本沉井面积较大，但受力钢筋都接近于构造含钢率配筋。

(2)从整体来看井壁中钢筋应力都很小，而且大多受压，虽然沉井是在摇摆中慢慢下降，但从钢筋应力来看整个沉井没有产生较大的总体弯曲或扭曲，即使有不均匀压力或倾斜出现，由于沉井壁刚度大，淤泥强度低，软塑状态，压缩模量低，变形大，很快就得到平衡。

704028

参 考 文 献

[1] 顾晓鲁等．地基与基础．北京：中国建筑工业出版社，1994

[2] 陈仲颐、叶书麟．基础工程学．北京：中国建筑工业出版社，1990

[3] Hans F. Winterkorn，钱鸿缙等译．基础工程学。北京：中国建筑工业出版社，1986

[4] 黄熙龄、钱力航、黄张．高层建筑地下结构及基坑支护．北京：宇航出版社，1994

[5] 秦惠民、叶政青、深基础施工实例．北京：中国建筑工业出版社，1992

[6] 于志军．深基坑开挖施工及其支护体等的计算辅助设计．上海：同济大学地下系，1995

[7] 黄强．单层锚杆(或支撑)混合支护结构内力计算．北京：建筑结构，1994，10

[8] 黄强．基坑内外侧不同土层悬臂式支护结构内力简捷计算．北京：工业建筑，1994，12

[9] Joseph E. Bowles，唐念慈等译．基础工程分析与设计。北京：中国建筑工业出版社，1987

[10] 侯学渊等．高层建筑的岩土工程问题学术讨论会论文集．杭州：浙江大学出版社，1994

0000001796235