

## ·地基基础·

## 深基坑悬臂支护桩嵌入深度的可靠度设计

余 玫 (华侨大学 362011)

**摘要:** 本文通过对深基坑挡土支护结构稳定性分析, 建立悬臂式支护桩稳定的可靠度模型, 在给定可靠指标  $\beta$  下, 求悬臂式支护桩的长度, 通过实例说明了本文方法的可行性。

**关键词:** 深基坑挡土支护结构, 可靠度模型, 稳定性, 可靠指标。

## Reliability Design On the Depth of Cantilever Pile for Deep Pit Retaining Structure

Yu Mei (Huaqiao University 362011)

**Abstract:** The paper makes an analysis on stability of deep pit retaining structure (DPRS) in foundation contraction, sets up the reliability mode of stability of DPRS, and solves for the depth of cantilever pile under a certain reliability index. through calculation of an example, the availability of the method is verified.

**Keywords:** deep pit retaining structure reliability mode stability reliability index

目前, 高层建筑不断掘起, 越来越来的深基础得到普遍的采用, 基础的深度还在不断地增加。例如: 上海金茂大厦基础深度达 19.6 米, 北京京城大厦达 23.7 米。因此, 对于这样深的基础, 在确定施工方案时, 首要问题就是确定深基坑的挡土支护结构, 以确保深基础施工能够经济、安全、迅速地进行。

基坑挡土支护结构类型众多, 由于受到施工现场面积和土质条件的限制, 通常采用的型式有①悬臂式支护结构; ②拉锚(撑)支护结构; ③钢筋砼连续墙支护结构。当基坑较浅, 地质条件较好和位移要求不甚严格时, 基坑支护结构型式较多采用悬臂支护桩。这种支护结构在基坑开挖时完全依靠嵌入坑底足够的深度来保持稳定, 对其最小插入坑底深度的确定有解板法, 图解法, 还可由实验经验总结的表格法查得<sup>[1]</sup>。目前国内常见的悬臂桩支护结构对桩长的解析计算大部分还是通过引入安全系数  $K$ 。由被动土压力对桩端提供的抵抗力矩与主动土压力所产生的倾覆力矩之比大于安全系数  $K$  作为稳定条件来确定悬臂支护桩的嵌入深度。由于作用在桩上的各种荷载效应具有一定的随机性, 由其产生的抵抗力矩和倾覆力矩也将是随机变量。因此, 采用安全系数法来确定支护桩的嵌入深度便显得不够科学。本文从考虑悬臂支护桩稳定性可靠度出发, 在给定稳定可靠指标的前提下确定悬臂支护桩的嵌入深度, 解决了目前在支护桩桩长的设计中对  $K$  取值的盲目性, 使得可靠度的指标在深基坑支护桩的稳定计算中得到体现。

## 1. 悬臂支护桩在分层土中的受力。

## 1.1 主动土压力和被动土压力

在实际工程中, 基坑周边土一般为多层土结构, 分层土的压力可以按朗肯理论给出, 第  $n$  层土底面对桩的主动土压力为:

$$q_{an} = [P_n + \sum_{i=1}^n r_i (h_i - h_{i-1})] \lg^2(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2}) - 2C_n \lg(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2}) \quad (1)$$

而被动土压力为:

$$q_{pn} = \sum_{j=m+1}^n r_j (h_j - h_{j-1}) \lg^2(45^\circ + \frac{\varphi_n}{2}) + 2C_n \lg(45^\circ + \frac{\varphi_n}{2}) \quad (2)$$

式中:  $P_n$ ——地面附加荷载传递到第  $n$  层土底面的垂直荷载

$r_i$ ——第  $i$  层土的天然重度  
 $h_i$ ——第  $i$  层土底面深度  
 $\varphi_n$ ——第  $n$  层土的内摩擦角  
 $C_n$ ——第  $n$  层土的粘聚力

在实际工程中, 由于深基坑开挖往往都需要降水, 因而对降水后水位以上部分, 仍可按式(1)和式(2)计算主动和被动土压力。对于降水后水位以下部分, 则应根据土体渗透性不同, 考虑部分水压力的影响即当  $h_n > H_1$  ( $H_1$  为降水后水位深度) 主动土压力和被动土压力分别为

$$q_{an} = [P_n + \sum_{i=1}^i r_i (h_i - h_{i-1}) + \sum_{i=i+1}^n r'_i (h_i - h_i)] \lg^2(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2}) - 2C_n \lg(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2}) + \sum_{i=i+1}^n K_{wi} \cdot r_w (h_i - h_i) \quad (3)$$

$$q_{pn} = [\sum_{j=m+1}^i r_j (h_j - h_{j-1}) + \sum_{j=i+1}^n r'_j (h_j - h_i)] \lg^2(45^\circ + \frac{\varphi_n}{2}) + 2C_n \lg(45^\circ + \frac{\varphi_n}{2}) + \sum_{j=i+1}^n K_{wj} \cdot r_w (h_j - h_i) \quad (4)$$

式中:  $r'_i$ ——第  $i$  层土的浮容重

$r_w$ ——水的重度取  $10\text{KN/m}^3$

$K_{wi}$ ——第  $i$  层土孔隙水压力的倾压力系数

$h_n$ ——降水后水位深度

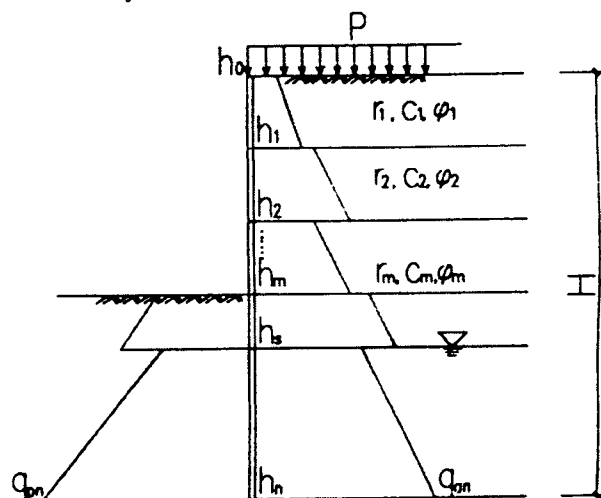


图1 分层土主动土压力和被动土压力  
1.2 悬臂支护桩的稳定平衡

悬臂式支护结构由于在基坑开挖面以上不存在支点,支护结构绕脚端的转动就成为其主要的破坏(或失稳)的模式,因此,悬臂式支护结构的稳定条件可由其绕端部转动的平衡条件得出: $M_{PB} > M_{LB}$  (5)

其中:主动土压力绕端部B点所产生的弯矩:

$$M_{LB} = \sum_{i=1}^n (h_i - h_{i-1}) \left[ q_{ai-1} \left( \frac{1}{2} H - \frac{1}{3} h_{i-1} - \frac{1}{6} h_i \right) + q_{ai} \left( \frac{1}{2} H - \frac{1}{3} h_i - \frac{1}{6} h_{i-1} \right) \right] \quad (6)$$

被动土压力绕端部B点所产生的弯矩:

$$M_{PB} = \sum_{j=m+1}^n (h_j - h_{j-1}) \left[ q_{bj-1} \left( \frac{1}{2} H - \frac{1}{3} h_{j-1} - \frac{1}{6} h_j \right) + q_{bj} \left( \frac{1}{2} H - \frac{1}{3} h_j - \frac{1}{6} h_{j-1} \right) \right] \quad (7)$$

实际应用中,常引入安全系数K,因而悬臂式支护桩结构的稳定条件可表示为:

$$M_{PB} \geq M_{LB} \cdot K \quad (8)$$

## 2. 悬臂式支护桩稳定性的可靠度分析

所谓悬臂式支护桩稳定性的可靠度是指支护结构在整个基础施工期间,在主动压力和被动压力的共同作用下,结构保持稳定的概率。

### 2.1 支护结构稳定性可靠度模型

支护结构稳定性要求被动土压力对桩端提供的抵抗力矩大于主动土压力所产生的倾覆力矩。因此,本文建立的悬臂式支护结构稳定性可靠度模型为:

$$Z = g(M_{PB}, M_{LB}) = M_{PB} - M_{LB} \quad (9)$$

式中  $Z = g(\cdot)$  为支护结构的功能函数。 $M_{PB}$ 、 $M_{LB}$  如式(6)、式(7)所定义,由于各层土的  $r_i$ 、 $\varphi_i$ 、 $C_i$ 、 $K_{ai}$  等都是随机变量,故  $M_{PB}$ 、 $M_{LB}$  也都是随机变量,利用功能函数  $z = g(\cdot)$  值可判断悬臂支护结构所处的状态,①当  $z > 0$ , 结构处于稳定;②当  $z < 0$ , 结构处于不稳定;③当  $z = 0$ , 结构处于临界状态。

### 2.2 悬臂式支护桩稳定性可靠度设计

我国于85年1月1日开始实行的《建筑结构设计统一标准》(GBJ68-84),采用了国际上正在发展和推行的概率极限状态设计方法,即“以结构失效概率或可靠指标来度量结构可靠度,并且建立结构可靠度与结构及限状态方程之间的数学关系”的设计方法,根据上述统一标准,悬臂式支护桩稳定性可靠度极限状态方程可表示为:

$$M_{PB} - M_{LB} = 0$$

设  $M_{PB}$ 、 $M_{LB}$  均为正态分布,将其作标准正态化变换

$\hat{M}_{PB} = (M_{PB} - u_{PB})/\sigma_{PB}$ ,  $\hat{M}_{LB} = (M_{LB} - u_{LB})/\sigma_{LB}$ , 标准正态坐标系中原点到极限状态线的最短距离即为概率极限状态设计中描述系统稳定可靠度程度的指标  $\beta$  (图2)其垂足为系统最可能导致失稳的控制点,即设计验算点。

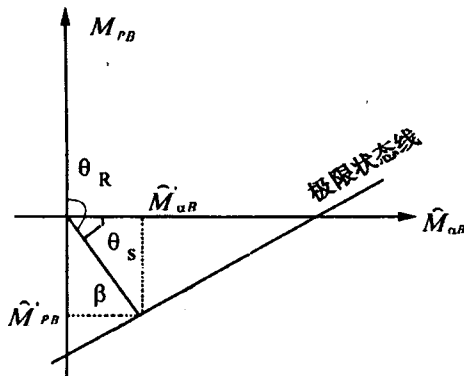


图2 可靠指标  $\beta$  与极限状态方程关系

当给定支护桩稳定性可靠指标后,基于结构可靠度设计求解悬臂式支护桩嵌入深度的步骤如下:

(1)列出极限状态方程  $g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ , 并确定所

有基本变量  $X_i$  的分布类型和统计参数;

(2)假定  $X_i^*$  的初始值和桩长  $H_0$ ;

(3)对非正态变量在  $x_i^*$  的初始值进行当量正态化转换;

(4)求方向余弦

$$\cos \theta_i = - \frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} \cdot \sigma_{x_i} / \sqrt{\sum \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} \cdot \sigma_{x_i} \right)^2}$$

(5)按公式

$$x_i^* = u_{x_i} + \cos \theta_i \beta \sigma_{x_i}$$

计算  $x_i^*$  的新值。

(6)由于  $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*, H) = 0$  是  $H$  的三次函数,按牛顿迭代法迭代计算  $H_i = H$  值;

重复上述步骤(3)到(6)直到  $H_i$  值收敛,按此方法确定的桩长  $H$  值可保证结构稳定性可靠指标达到给定的值。

### 3. 实例分析

某工程地质情况如图3,原地下水位距地表4.5米,基坑深度5.5米,采用悬臂式支护桩结构,桩外设井点降水,降水距基坑底10米,其统计特征值列于图3表中,要求设计悬臂支护桩的桩长。

深度	支护结构剖面图	岩性描述	变量统计特征值		
0	↓ ↓ ↓ ↓ P=20kN/m				
2m		素填土	$U_{r1} = 17.7kN/m^2$ $\delta_{r1} = 0.025$	$U_{c1} = 5kN/m^2$ $\delta_{c1} = 0.46$	$U_{\varphi1} = 10^\circ$ $\delta_{\varphi1} = 0.15$
5.5m	▽4.5m	粉质粘土	$U_{r2} = 19.0kN/m^2$ $\delta_{r2} = 0.024$	$U_{c2} = 30.6kN/m^2$ $\delta_{c2} = 0.46$	$U_{\varphi2} = 14^\circ 21'$ $\delta_{\varphi2} = 0.127$
7.6m		含砾粉质粘土	$U_{r3} = 19.6kN/m^2$ $\delta_{r3} = 0.025$	$U_{c3} = 22.7kN/m^2$ $\delta_{c3} = 0.4$	$U_{\varphi3} = 16^\circ 2'$ $\delta_{\varphi3} = 0.145$

图3 工程地质简图

### 3.1 可靠指标与桩长关系

根据2.2节设计步骤编制程序计算,相应于不同可靠指标的桩长计算结果见表1。

表1 可靠指标与桩长对应值

$\beta$	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
H(m)	9.86	10.11	10.34	10.56	10.77	10.97	11.16	11.33	11.48	11.62	11.76

### 3.2 安全系数与桩长关系

把各土层参数的均值代入式(8),可求得安全系数K和桩长的。计算结果见表2。

表2 安全系数与桩长的对应值

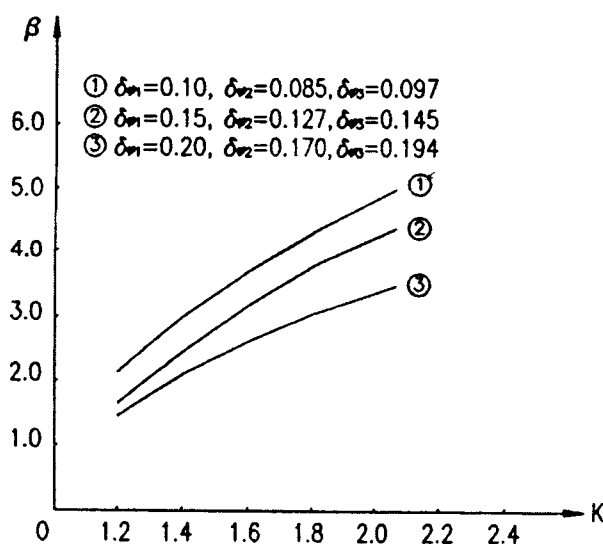
K	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
H(m)	9.40	9.86	10.45	11.27	12.56

### 3.3 可靠指标 $\beta$ 与安全系数K的关系

大量分析表明,在土层地质参数诸多变量中,内摩擦角  $\varphi$  的变异系数敏感度最大,即  $\varphi$  的变异对支护桩可靠指标影响最大。在本例中,当考虑各层  $\delta\varphi$  同时按50%变化后,相应的  $\beta$  和K的关系曲线给在图4,由图中可见,当K一定时,  $\beta$  随  $\delta\varphi$  增大而减小。这表明在土层地质参数基本变量统计特性不确定情况下,传统的K法无法真实反映结构的安全度。

### 3.4 设计结果

由上面分析可见,支护桩桩长的确定关键在于目标可靠度的选择。目前,在岩土工程中对目标可靠度  $\beta$  的取值尚无统一的规定。根据工程具体情况,参照我国《建筑结构设计统一标准》给出的结构设计用可靠指标,取  $\beta = 2.7$ 。由表1,表2可查得相应的  $H = 11.33m$ ,  $K = 1.51$ 。这样,即可保证所设计的支护桩具有较高的抗倾覆能力,也有较好的稳定可靠度。

图4  $\beta$ -K关系曲线

## 4. 结语

(1) 本文提出的深基坑悬臂支护桩稳定性的可靠度模型、考虑了土层参数的变异性, 用概率的方法来确定悬臂支护桩的长度比起目前的K系数法更为合理。

(2) 结构可靠度设计的原则和方法可以应用到深基坑挡土支护结构的稳定性设计中, 这样深基坑挡土支护结构的稳定性就有了定量的保证。

(3) 土层参数的变异系数大小对可靠指标有较大影响, 对于参数变异性较强的, 设计时应取较大的可靠指标。

## 参考文献

1. 黄远飞: 深基坑工程实用技术 北京兵器工业出版社 1996. P77~93
2. 黄兴棣: 工程结构可靠性分析 北京人民交通出版社 1989. P217~P220
3. 赵志谱: 高层建筑施工手册 上海同济大学出版社 1996. 5

收稿日期: 1999. 12. 28

## ·地基基础·

## 人工挖孔桩工程技术中的若干问题探讨

陈江海 (厦门大学 361005)

**提要:** 本文简要地分析了人工挖孔桩的承载机理, 结合岩石的力学性状和规范的有关规定, 对当前桩基工程的勘测设计存在的几个问题进行探讨, 提出对进入中微风化的嵌岩灌注桩在设计扩大头和增加嵌岩深度上不宜过大, 否则不仅无助于提高桩基承载力, 而且给造价和工期造成一定的浪费。

**关键词:** 人工挖孔桩 嵌岩 工程造价

## Discussion of Technique Problems of Manual Excavated Pile Engineering

Chen Jianhai (Xiamen University 361005)

**Abstract:** In this paper, the bearing mechanism of manual excavated pile is simply analyzed. With the mechanical properties and the concerned criterion, several problems in reconnoitered design of pile foundation are discussed. In order to improve the bearing capacity of pile foundation and reduce the cost of project, It is suggested that the end of bored piles scooted in micro-mantle rock can not be too large and the length of socketed rock can not be too long.

**Keywords:** manual excavated pile socketed rock the cost of project

## 一、引言

随着建筑物层数的增加, 跨度的增大, 高层建筑、公共建筑由于单柱轴力较大, 在工程地质揭示基岩埋置不深的情况下, 嵌岩灌注桩尤其是人工挖孔桩, 因其单桩承载力大、施工简便、质量可靠, 得到普遍的推广和运用。但是由于人们对嵌岩灌注桩的承载机理以及对不同风化程度的基岩层的工程特性认识上存在差异, 对规范的理解和所处地区的工程经验不同, 在设计及检测手段上也不相同。尤其对人工挖孔桩的嵌岩深度、扩大头尺寸等设计参数取值、极限承载力大于20000kN的桩基检测等问题的研究尚欠深入, 各地区往往也没有出台地方性的桩基设计规程对地区性的一些参数取值进行具体的规定, 致使在工程实路中出现一些不合理的勘察设计等现象, 造成工程造价的大幅度提高和工期的成倍增长, 有鉴于此, 本文在论述多年来工程设计、施工及管理技术工作的基础上, 提出几点新的建议, 希

望起到抛砖引玉的作用。

## 二、嵌岩灌注桩荷载传递机理及承载性状

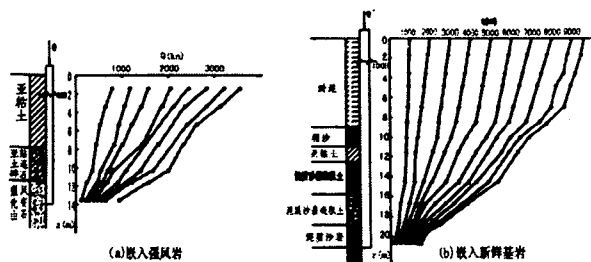


图1 嵌岩灌注桩荷载传递曲线

大量的现场试验得出嵌岩灌注桩荷载传递的典型曲线如图1, 从图1中不难看出, 不论持力基岩层的风化程度的高低, 桩身荷载(轴向力)均随深度递减, 持力层基岩以上覆盖土层的桩周摩阻力在桩身受荷变形过程中都能被调动起