目　录

前言 …… I

第 1 章　建筑结构概念设计概述 …… 1
1.1　建筑结构的作用 …… 1
1.2　结构概念设计的概念 …… 1
1.3　概念设计在建设过程中的地位 …… 2
1.4　建筑结构的基本构件类型 …… 5
1.4.1　基本构件的类型 …… 5
1.4.2　各种构件之间的区别与联系 …… 10
1.5　建筑结构的几个基本概念 …… 14
1.5.1　荷载和作用 …… 14
1.5.2　结构失效和材料，结构受力和荷载 …… 16
1.5.3　结构的可靠度和设计方法 …… 17
1.5.4　结构的三个基本分体系 …… 19
1.5.5　关于地基的基本概念 …… 20
1.5.6　梁、板设计中的几个基本概念 …… 22
1.5.7　梁、拱和索 …… 25
1.5.8　梁柱框架 …… 28
1.5.9　平面桁架（含空腹桁架）和空间网架 …… 29
1.5.10　从对比中认识壳体结构 …… 32
1.5.11　折板结构和幕结构 …… 35
1.5.12　帐篷、网索和充气结构 …… 37
1.5.13　结构受力、变形的相对性 …… 39
1.5.14　结构构件的弯曲变形示意图 …… 40
1.5.15　预应力和预应力结构 …… 42
1.5.16　结构抗震设计的基本概念 …… 44
1.5.17　从总体概念上考虑结构设计 …… 46
1.5.18　对标准、规范、规程应有的知识 …… 49
1.6　结构概念设计的原则 …… 50

第 2 章　托罗哈结构概念设计作品案例 …… 54
2.1　关于 E. 托罗哈的评价 …… 54

2.2 运动场旁有轨电车站 …… 56
2.3 圆形手术教室 …… 58
2.4 阿尔捷希拉集贸市场 …… 60
2.5 阿罗丝渡槽 …… 64
2.6 半英里长的渡槽方案 …… 68
2.7 考特温多斯飞机棚 …… 70
2.8 马德里赛马场观众台 …… 72
2.9 拉斯考茨足球运动场观众台 …… 79
2.10 雷索莱多斯回力球场 …… 83
2.11 托雷琼和巴拉加飞机棚 …… 88
2.12 埃斯拉拱桥 …… 92
2.13 建筑结构小品 …… 98
2.13.1 考蒂拉莱斯房屋工程 …… 98
2.13.2 马德里某蓄水池 …… 103

第3章 高层建筑结构概念和结构设计案例 …… 105
3.1 高层建筑的定义和高层建筑的结构体系 …… 105
3.1.1 高层建筑的定义 …… 105
3.1.2 高层建筑的结构体系 …… 105
3.2 高层建筑结构受力概念 …… 109
3.2.1 高层建筑结构受力特征 …… 109
3.2.2 从对比中认识高层建筑结构 …… 110
3.2.3 高层建筑的风荷载 …… 112
3.2.4 高层建筑承受的地震作用 …… 113
3.2.5 高层建筑结构中的传力路线 …… 114
3.2.6 弯曲刚度指数和剪切刚度指数的概念 …… 116
3.3 知名高层建筑结构设计案例 …… 120
3.3.1 香港中国银行 …… 120
3.3.2 香港汇丰银行 …… 124
3.3.3 世界贸易中心和西尔斯大厦 …… 127
3.3.4 帝国大厦和约翰·汉考克中心 …… 133
3.3.5 塔拉纳特提出的高效能高层建筑结构概念 …… 136
3.3.6 拟建超高层建筑——米格林-拜尔特大厦的结构概念设计 …… 139
3.3.7 地王商业大厦和金茂大厦 …… 141
3.3.8 核心筒外伸桁架结构体系概念及其概念设计案例 …… 145
3.3.9 错列桁架结构体系的概念及其概念设计案例 …… 148
3.3.10 有转换层的结构概念设计案例 …… 151

第 4 章　其他建筑结构概念设计案例 …… 154
4.1　一般肋形楼盖结构 …… 154
4.1.1　楼盖结构在建筑结构中的地位 …… 154
4.1.2　肋形楼盖构件的主要参数估计 …… 155
4.1.3　一般钢筋混凝土肋形楼盖案例 …… 158
4.1.4　扁梁楼盖案例 …… 160
4.2　盒子结构 …… 164
4.2.1　盒子结构概述 …… 164
4.2.2　盒子结构案例 …… 165
4.3　穹顶结构 …… 170
4.3.1　穹顶结构概述 …… 170
4.3.2　古近代穹顶结构案例 …… 171
4.3.3　现代穹顶结构案例 …… 176
4.4　拱结构 …… 181
4.4.1　拱结构特点 …… 181
4.4.2　拱结构案例 …… 182
4.5　悬索结构 …… 190
4.5.1　悬索结构特点 …… 190
4.5.2　悬索结构案例 …… 191
4.6　网架结构 …… 203
4.6.1　网架结构特点 …… 203
4.6.2　网架结构案例 …… 205
4.7　T. 亨特结构概念设计案例（草图） …… 215
4.7.1　东英格兰大学塞恩斯伯里中心 …… 215
4.7.2　布里斯托尔演奏中心 …… 220
4.7.3　结构小品两例 …… 224

第 5 章　课程作业案例 …… 227
5.1　本案例工程概况和结构特点 …… 227
5.2　本案例概念设计的任务 …… 230
5.3　教学组织及要求 …… 231
5.4　方案比较及方案的确定 …… 231

参考文献 …… 239

第 1 章　建筑结构概念设计概述

1.1　建筑结构的作用

从分子到宇宙，结构无所不在。建筑物自然也有结构，它将建筑物的各部分有序地组成一个完整的整体，称之为建筑结构。

建筑结构的作用，首先表现为形成人类活动所需要的、功能良好和舒适美观的空间。它既有物质方面的需要（如它的空间尺度、功能需求和通道联系），又有精神方面的需要（如它的文化内涵、新颖形式和高雅表现），这是建筑结构的根本目的和出发点。

建筑结构的作用，其次表现为能够抵御自然的和人为的作用力（前者如地球引力、风力、气温变化和地震作用等，后者如振动、爆炸等），能使建筑物耐久使用，并在突发偶然事件时，保持整体稳定，这是建筑结构之所以存在的根本原因。

建筑结构的作用，第三表现为充分发挥所采用材料的效能。建筑结构都是应用石、砖、混凝土、钢材、木材乃至合金材料、化学合成材料等在土层或岩层上建造的。材料所需的资金占建筑工程投资的大部分。材料是建造结构的根本物质条件。“有效地利用材料、尽可能地节约材料”往往是建筑结构设计的重要指标。

此外，建筑结构必须适应当时当地的环境，并与施工方法有机结合，因为任何建筑工程都受到当时当地政治、经济、社会、文化、科技、法规等因素的制约，任何建筑结构都是靠合理的施工技术来实现的。因此，优秀的建筑结构应具有以下特点：

(1) 在应用上，要满足空间和功能的需求；

(2) 在安全上，要符合承载和耐久的需要；

(3) 在技术上，要体现科技和工程的新发展；

(4) 在造型上，要与建筑艺术融为一体；

(5) 在建造上，要合理用材并与施工实际相结合。

1.2　结构概念设计的概念

建筑工程的概念设计在我国应成为一个先于建筑工程的初步设计，以功能优越、造型美观、技术先进的总体方案为目标的设计阶段。建筑工程的概念设计一般有建筑方面的概念设计和结构方面的概念设计两大部分，它们之间相互影响、相互协调、相互结合。

在建筑工程的概念设计里，要求在环境的布局和治理、建筑的空间和形式、结构的体系和材料、构筑的方法和效益之间协调一致，做到“功能、结构、美观、建造”的统一。

结构概念设计的前提，是对地区规划和自然环境、建筑意图和使用功能需要的理解，以及对资金状况、材料来源和建造条件的了解。

结构概念设计的成果，是确定结构的总体方案（指主要承重体系）、相应的分结构体系（指屋楼盖、基础等）以及它们间的关系（含主要连接方法）。

结构概念设计的主要手段，是对力学概念、材料性能、结构体系和建造技术的娴熟运用，同时还要有审美的眼光、工程的意识和丰富的实践经验。在结构概念设计过程中，要进行整体的考虑，全面的比较，快速的估算，综合的评价和果断的选择。

结构概念设计所需的时间，既可能在短期内完成，也可能要经历一个反复比较的进程，甚至要进行一些模拟试验；它们都要摆脱设计作品的一般化。

结构概念设计的目的，是在初步设计前为所设计的工程项目设想一个概念性的总体方案，使今后的设计、施工和使用都能够做到“又好、又快、又省”。

做好**结构概念设计的思维方式**和传统相比，要有以下转变：

(1) 从习惯于纵向思维（从结构的方案、体系、布置、计算、构造到施工图）转变为兼注意横向思维（规划、建筑、结构、设备、施工的结合）；

(2) 从习惯于重视设计规范，转变为更重视实践（工程经验积累和多观察工程实际现象）；

(3) 从习惯于重视理论分析，转变为兼重视综合考虑（人、财、物、时间、空间……）；

(4) 从习惯于追求“绝对地确定”，转变为注意“相对地比较”（在比较中求相对地好、快、省）；

(5) 从习惯于标准、定型、传统，转变为改革、更新、创造。

总之，要做到构思有新意，做法有创新，尽可能采用新技术，为新的实践提供新思路。

做好**结构概念设计要处理好各种参与者的关系**，重视和尊重业主代表、建筑和设备主持人、施工人员的要求、思路、观点和意见，因为他们的根本出发点与结构是一致的，他们与结构间的矛盾可以在互相了解、相互协商、相互探讨中得到统一。

如果说在结构设计中选择好设计程序称为用好“软件（software)”，运用计算机进行计算和绘图称为使用“硬件（hardware)”；那么，做好结构概念设计应称为有了“慧件（wiseware)”。在一项工程设计中，有一个好的慧件似乎比正确地用好软件、硬件更为重要。做好概念设计是设计者应该具备的能力，也是他们具有高素质和高修养的表现；而对于学习者来说，则是高境界的学习阶段，是培养创新思维和创造能力的组成部分。

1.3　概念设计在建设过程中的地位

我国现行建筑工程建设的程序如图 1－1 所示。初步设计以前的“设计构思”，以及在综合地合理处理规划、建筑、结构、设备、施工诸方面关系后所形成的“总体设计方案”，是概念设计的成果。它为完成初步设计文件提供了正确的概念和思路。因而可以认为，概念设计既是设计的灵魂，也是整个建设过程中的灵魂。

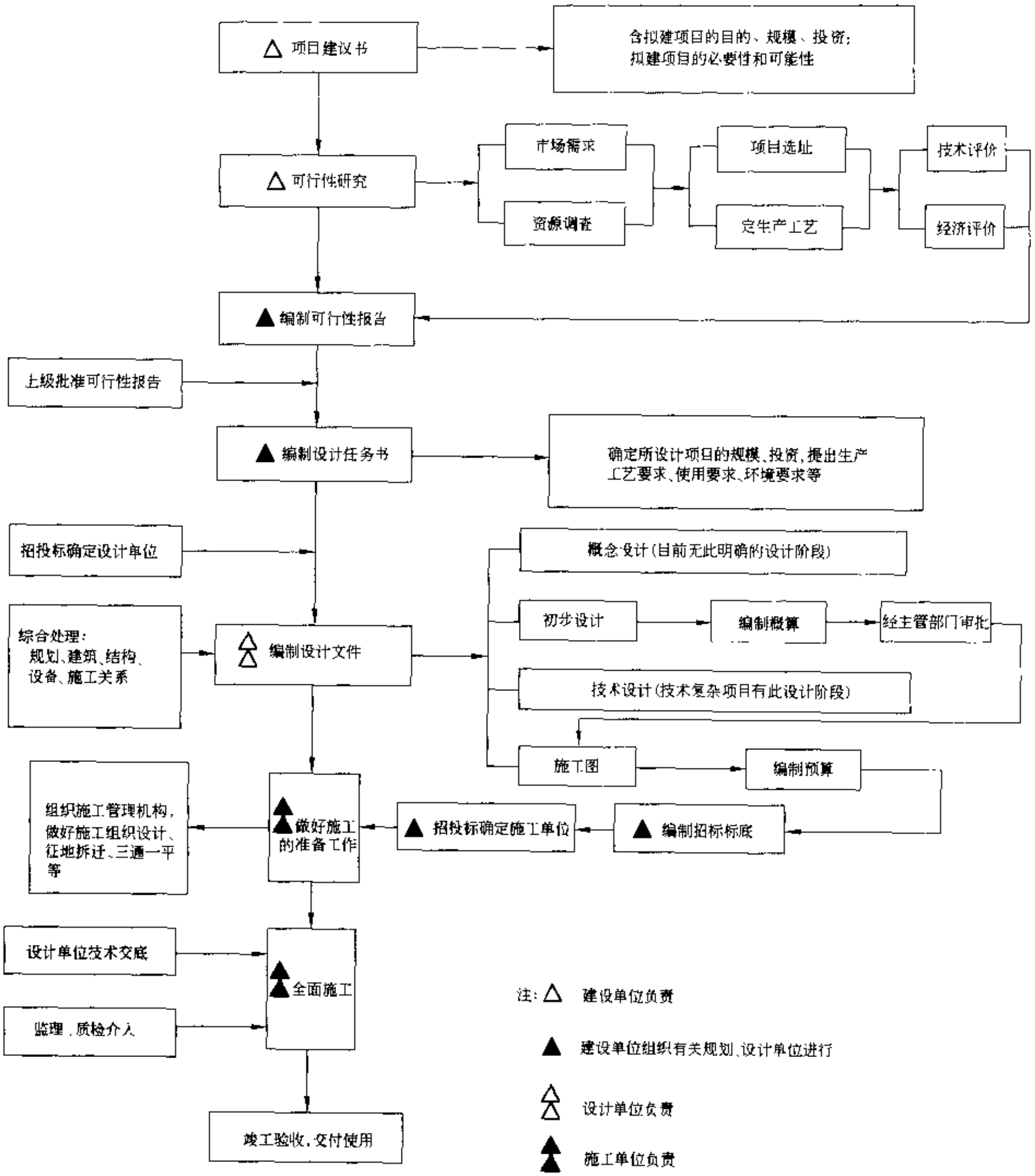


图 1-1　我国现行建筑工程建设程序示意

1. 概念设计与初步设计的关系

初步设计文件应包括以下三方面：

(1) 设计说明——含设计依据、设计规模、设计范围、设计指导思想和特点（对总体布局、选用标准和结构选型的综合叙述）、总指标（占地面积、建筑面积、能源和主要建筑材料消耗量、概算等）。

(2) 设计图纸——含区域位置图、总平面图、建筑半立剖示意图、竖向布置图。

(3) 结构设计——含结构设计总说明（自然条件、安全等级、使用荷载、抗震烈度和其他特殊要求）和结构设计主要内容的说明（结构选型、地基处理、基础型式、材料选用、构造处理等）。

由此可见，概念设计的深度以能够进行上述初步设计的需要为前提。对于结构的概念设计来说，则要按照长期安全使用的要求，建筑设计的需要，技术经济的可能，以及结构受力的分析，巧妙地做到以下几点：

——确定主体结构的体系（和其相应的楼盖、屋盖、承重结构和基础结构系统）；

——选择主要的结构用材料；

——考虑关键部位的构造措施；

——合理地建议先进的施工技术。

2. 建设过程中各类工程师的职责

建筑物的建设过程是建筑师、结构工程师、设备工程师、施工工程师共同合作的多边复杂过程。各类工程师要解决的主要问题如表 1-1 所示。

表 1-1　建设过程中各类工程师的职责

建筑师的职责	结构工程师的职责
(1) 与规划的协调，房屋体型和周围环境的设计； (2) 合理布置和组织房屋室内空间； (3) 解决好采光通风、照明、隔音、隔热等建筑技术问题； (4) 艺术处理和室内外装饰。	(1) 确定房屋结构承受的荷载，并合理选用结构材料； (2) 正确选用结构体系和结构型式； (3) 解决好结构承载力、变形、稳定、抗倾覆等技术问题； (4) 解决好结构的连接构造和施工方法问题。
设备工程师的职责	**施工工程师的职责**
(1) 确定水源，给排水标准、系统、装置； (2) 确定热源，供热、制冷和空调的标准、系统、装置； (3) 确定电源，照明、弱电、动力用电的标准、系统、装置； (4) 使水、暖、电系统和建筑、结构布置协调一致。	(1) 施工组织设计和施工现场装置； (2) 确定施工技术方案和选用施工设备； (3) 建筑材料的购置、检验和使用； (4) 熟练技工和劳动力的组织； (5) 确保工程质量和工期进度。

其中，建筑师和结构工程师的密切配合与合作，是最基本的要求。结构工程师和建筑师的关系有 4 个层次：

(1) **合作**——即“你做你的设计，我做我的设计，遇到矛盾，合作协商解决”，这是最低层次的要求。

(2) **结合**——即“虽然各做各的，但都能懂得对方，主动结合，互相补充”。结构工程师要懂得建筑设计原理，理解建筑艺术需要，熟悉建筑技术问题，清楚本工程的建筑设计思路；同样，建筑师要懂得结构设计原理和结构技术、构造问题，清楚本工程的结构设计思路，这是较高层次的要求。

(3) **融合**——即“你中有我，我中有你，融为一体”。结构工程师要自觉地考虑建筑问题，建筑师也要自觉地考虑结构问题。实际上，建筑平面和体型是所采用结构体系的反映，而结构选型又受到建筑设计思路和效果的影响。它们之间客观上存在着更高层次的融合关系。

(4) **统一**——即“结构工程师就是建筑师，建筑师也是结构工程师”，两类人才的素质都统一在一个人的身上。如意大利的奈尔维（P. L. Nervi）和西班牙的托罗哈（E. Torroja）就是这种人物。罗

马小体育馆（见节 4.3.3）和马德里赛马场观众台（见节 2.8）是他们各自的代表作。这是最高层次的关系，应该作为结构工程师和建筑师的方向。

概念设计时，结构工程师和建筑师之间至少是“结合”关系，应该是“融合”关系。做到“功能、结构、美观、建造的统一”，是概念设计的高标准要求。

如果把建筑物比作一个人，建筑相应于人的气质、精神、体型、容貌，结构相应于人的骨骼、肌肉、耐力、寿命。如果把建筑物比作一棵树，建筑相应于树种、树叶、树形，它的根是文化；结构相应于树干、树茎、树枝，它的根是材料。要融文化的内涵于建筑之中，依靠材料和结构的发展，才能促使建筑的繁荣。要充分掌握材料的性能，充分发挥材料的作用，靠社会和建筑的需求，才能促使和充实结构的发展。

西班牙著名结构工程师托罗哈的座右铭，应该成为进行结构概念设计时的指导思想：

“My final aim always been for the functional, structural and aesthetic aspects of a project to present an integrated whole, both in essence and appearance.”（我的最终目的，是永远将一个设计对象的功能方面、结构方面、美观方面表现为一个在本质上和形式上结合的整体。）

1.4　建筑结构的基本构件类型

建筑结构是在一个空间中用各种基本的结构构件集合成的有着某种特征的有机体；有了各种基本的结构构件，才能够将它们组织成一个具有使用功能的空间，才能够使这个有机体作为一个整体结构将作用在它上面的荷载传递给地基。建筑结构概念设计的一个重要成果，就是确定一个由这些基本的结构构件集合成的合理的主体结构体系，并将它们有效地联系起来，形成需要的某种特征。可以认为，对任何事物的基本认识都是从对该事物的类型群进行系统的、有序的认识开始的；对建筑结构和结构概念设计的基本认识，也将从对组成结构的基本构件类型群开始。

1.4.1　基本构件的类型

常用可供选择的基本结构构件大体有以下 12 种类型。

1. 板

（1）板的特点

板是覆盖一个具有较大平面尺寸，但却具有相对较小厚度的平面形结构构件。它通常水平设置（有时也可能斜向设置），承受垂直于板面方向的荷载，受力以弯矩、剪力、扭矩为主，但在结构计算中剪力和扭矩往往可以忽略。

（2）板的分类

1）按平面形状分，有方形、矩形、圆形、扇形、三角形、梯形和各种异形板等。

2）按截面形状分，有实心板、空心（如圆孔、矩形孔）板、槽形板、单（双）T 形板、单（双）向密肋板、压型钢板、叠合板（如压型钢板与混凝土板叠合、预制预应力薄板与现浇混凝土板叠合）等。

3）按受力特点分，有单向板、双向板；按支承条件又可分为四边支承、三边支承、两边支承、一

边支承和4角点支承板；按支承边的约束条件还可分为简支边（沿支承边无弯矩，板端可发生转角）、固定边（沿支承边有反力、弯矩，无转角）、连续边（沿支承边有反力、弯矩、转角）、自由边（沿支承边无反力、无弯矩）板；按设置方向分，有平板、斜板（如楼梯板）、竖板（如墙板）。板可以仅支承在梁上、墙上、柱上或地平面上，也可以一部分支承在梁上，一部分支承在墙上或柱上。

4）按所用材料分，有钢筋混凝土板、预应力（含无粘结预应力）混凝土板、钢板、压型钢板、实木板、胶合木板等。

5）除以上分类外，板还可以组合成空间结构，如V形折板结构、幕结构或其他空间折板结构。它们的受力情况就不仅是承受垂直于板面的荷载，更要作为该空间结构的一些组合构件，承受空间作用时相应的内力。详见节1.5.11。

2. 梁

(1) 梁的特点

梁一般指承受垂直于其纵轴方向荷载的线型构件，它的截面尺寸小于其跨度。如果荷载重心作用在梁的纵轴平面内，该梁只承受弯矩和剪力，否则还受有扭矩。如果荷载所在平面与梁的纵对称轴面斜交或正交，该梁便处于双向受弯、受剪状态，甚至还可能同时受扭矩作用。

(2) 梁的分类

1）按几何形状分，有水平直梁、斜直梁、曲梁、空间曲梁（螺旋形梁属此）等。

2）按截面形状分，有矩形、T形、倒T形、L形，倒L形、乙形、工字形、槽形、箱形、空腹、薄腹、扁腹（指截面宽度大于截面高度）等。还有等截面（指全梁的截面等高）、变截面（如鱼腹式、折线式，即全梁的截面不等高）、叠合（指两次浇筑成型）梁等。

3）按受力特点分，有简支梁、伸臂梁、悬臂梁、两端固定梁、一端简支另端固定梁、连续梁等。梁的受力特点还与它在结构中所处位置以及所受荷载情况有关，如在平面楼盖中有次梁、主梁、密肋梁、交叉梁（即井字梁）、挑梁，在楼梯中有斜梁，在工业厂房中有承受动力荷载的吊车梁，在桥梁中有桥面梁等；至于圈梁，则是砌体结构中埋置在墙砌体内的一种构件，不直接承受荷载，主要作用是承受因墙体不均匀沉降引起的内力，增加楼（屋）盖的水平刚度。梁的高跨比一般为1/16～1/8，悬臂梁要高达1/6～1/5，预应力混凝土梁可小至1/25～1/20。高跨比大于1/4的梁称为深梁。

4）按所用材料分，有钢筋混凝土梁、预应力混凝土梁、型钢梁、钢板梁、组合梁（如型钢与混凝土组合）、实木梁、胶合木梁等。

3. 柱

(1) 柱的特点

柱是承受平行于其纵轴方向荷载的线形构件，它的截面尺寸小于它的高度，一般以受压和受弯为主，故柱也称压弯构件。

(2) 柱的分类

1）按截面形状分，有方(矩)形、圆(环)形、工(L、十)字形截面柱，双肢柱、格构柱，单(双)阶柱(用于有吊车的单层厂房结构)等。

2）按受力特点分，有轴心受压柱和偏心受压柱两种；至于构造柱，则是墙砌体中的一种构件，不直接承受荷载，其作用主要是增加墙体的延性。

3）按所用材料分，有石柱、砖柱、砌块柱、钢筋混凝土柱、钢柱、组合柱（如型钢与混凝土组合，砌块与钢筋混凝土组合）、木柱等。

4. 框架

（1）框架的特点

框架是由横梁和立柱联合组成能同时承受竖向荷载和水平荷载的结构构件。在一般建筑物中，框架的横梁和立柱都是刚性连接，它们间的夹角在受力前后是不变的；连接处的刚性给予框架在承受竖向和水平荷载时衡量承载能力和稳定性的尺度，使框架的梁和柱既受轴力（框架梁在设计时轴力可忽略）又受弯曲和剪切（框架柱在设计时剪切可忽略）。在单层厂房中，由横梁和立柱刚性连接的框架也称刚接排架；横梁和立柱间用铰支承连接的框架则称铰接排架，简称排架。

（2）框架的分类

1）按跨数、层数和立面构成分，有单跨、多跨框架，单层、多层框架，以及对称、不对称框架。单跨对称框架又称门式框架。

2）按受力特点分，若框架的各构件轴线处于一平面内的称平面框架，若不在同一平面内的称空间框架，空间框架也可由平面框架组成。

3）按所用材料分，有钢筋混凝土框架、预应力混凝土框架、钢框架、胶合木框架和组合框架（如钢筋混凝土柱和型钢梁，组合砖柱和钢筋混凝土梁）等。

5. 桁架

（1）桁架的特点

桁架是由若干直杆组成的一般具有三角形区格的平面或空间承重结构构件。它在竖向和水平荷载作用下各杆件主要承受轴向拉力或轴向压力（当有侧向荷载作用在桁架的个别杆件上时，它们也会像梁一样受弯曲），从面能充分利用材料的强度；故适用于较大跨度或高度的结构物，如屋盖结构中的屋架、高层建筑中的支撑系统或格构墙体、桥梁工程中的跨越结构、高耸结构（如桅杆塔、输电塔）以及闸门等。

（2）桁架的分类

1）按立面形状分，有三角形、梯形、平行弦、折线形、拱形以及空腹桁架等；其中空腹桁架的腹杆间没有斜杆，参见图 1－17。

2）按受力特点分，有静定桁架和超静定桁架，平面桁架和空间桁架（其中网架就是空间桁架中的一种）。

3）按所用材料分，有钢筋混凝土、预应力混凝土、钢结构、预应力钢结构、木结构、组合结构（如钢和木组合，钢筋混凝土和型钢组合）等。

6. 网架

（1）网架的特点

网架是由多根杆件按照一定的网格形式，通过节点连接而成的空间结构。各杆件主要承受拉力或压力。网架具有重量轻、刚度大、抗震性能好等优点，主要用于大跨度屋盖结构。

（2）网架的分类（参见图 1－19）

1）按外形分，有双层平板网架、立体交叉桁架、单（双）层曲面壳型网架等。

2）按板型网格组成分，有交叉桁架网架（含两向或三向正〈斜〉放、两向或三向斜交斜放）、四角锥网架（含正〈斜〉放四角锥、正放抽空四角锥、棋盘〈星〉形四角锥）、三角锥网架（含抽空三角锥、蜂窝形三角锥）、六角锥网架等。

3）按形成曲面的形式分，有圆柱面壳网架、球面壳网架、双曲抛物面壳网架等。

4）按所用材料分，有钢筋混凝土网架、钢网架、木网架、组合网架等。

7. 拱

（1）拱的特点

拱是由曲线形或折线形平面杆件组成的平面结构构件，含拱圈和支座两部分。拱圈在荷载作用下主要承受轴向压力（有时也承受弯矩和剪力），支座可作成能承受竖向和水平反力以及弯矩的支墩，也可用拉杆来承受水平推力。由于拱圈主要承受轴向压力，与同跨度同荷载的梁相比，能节省材料，提高刚度，跨越较大空间，可采用砖、石、混凝土等廉价材料，因而它的应用范围很广泛，既可用于大跨度结构，也可用于一般跨度的承重构件。

（2）拱的分类

1）按拱轴线的外形分，有圆弧拱、抛物线拱、悬链线拱、折线拱等。

2）按拱圈截面分，有实体拱、箱形拱、管状截面拱、桁架拱等。

3）按受力特点分，有三铰拱、两铰拱、无铰拱等。

4）按所用材料分，有钢筋混凝土拱、混凝土砌块拱、砖拱、石拱、钢拱（含钢桁架拱）、木拱（含木桁架拱）等。

8. 壳体

（1）壳体的特点

壳体是一种曲面形的构件，它与边缘构件（可由梁、拱或桁架等构成）组成的空间结构称壳体结构。壳体结构具有很好的空间传力性能，能以较小的构件厚度覆盖大跨度空间。它可以做成各种形状，适应多种工程造型的需要；不论做成什么形状，一般都能做到刚度大、承载力高、造型新颖，且可兼有承重和围护双重作用，能较大幅度地节省结构用材，因而广泛应用于结构工程中。壳体的曲面一般可由直线或曲线旋转或平移面成；它们在壳面荷载作用下主要的受力状态为双向受压，因而可以做得很薄，但在与边缘构件连接处的附近除受压力还受弯、受剪，因而需局部加厚。

（2）壳体的分类

1）按曲面几何特征分，有正高斯曲率① 壳（如圆球面壳、椭圆球面壳、抛物面壳、双曲扁壳）、负高斯曲率壳（如双曲面壳、双曲抛物面扭壳、双曲抛物面鞍形壳）、零高斯曲率壳（如圆柱面壳即筒壳、椭圆柱面壳、锥面壳）等，参见图 1－24。

2）按所用材料分，以钢筋混凝土壳为主，也可用钢网架壳、砖壳、胶合木壳等。

---

① 两个方向主曲率（k_1 和 k_2）的乘积称高斯曲率 K，$K=k_1k_2$：
正高斯曲率为 k_1、k_2 同号，即 $K>0$；
负高斯曲率为 k_1、k_2 异号，即 $K<0$；
零高斯曲率为 k_1 或 k_2 为零，即 $K=0$。

9. 墙

(1) 墙的特点

墙主要是承受平行于墙面方向荷载的竖向构件。它在重力和竖向荷载作用下主要承受压力，有时也承受弯矩和剪力；但在风、地震等水平荷载作用下或土压力、水压力等水平力作用下则主要承受剪力和弯矩。

(2) 墙的分类

1) 按形状分，有平面形墙（含空心墙、空斗墙）、筒体墙、曲面形墙、折线形墙。

2) 按受力分，有以承受重力为主的承重墙、以承受风力或地震产生的水平力为主的剪力墙，以及作为隔断等非受力用的非承重墙。承重墙多用于单、多层建筑，剪力墙多用于多、高层建筑。

3) 按材料分，有砖墙、砌块墙（混凝土或硅酸盐材料制成）、钢筋混凝土墙、钢格构墙、组合墙（两种以上材料组合）、玻璃幕墙、竹墙、木墙、石墙、土坯墙、夯土墙等。

4) 按施工方式分，有现场制作墙、大型砌块墙、预制板式墙、预制筒体墙。

5) 按位置或功能分，有内墙、外墙、纵墙、横墙、山墙、女儿墙、挡土墙，以及隔断墙、耐火墙、屏蔽墙、隔音墙等。

10. 索

(1) 索的特点

索是以柔性受拉钢索组成的构件，用于悬索结构（由柔性拉索及其边缘构件组成的结构）或悬挂结构（指楼〈屋〉面荷载通过吊索或吊杆悬挂在主体结构上的结构）。悬索结构一般能充分利用抗拉性能很好的材料，做到跨度大、自重小、材料省且便于施工（如大跨屋盖结构或大跨桥梁结构）。悬挂结构则多用于高层建筑，其中吊索或吊杆承受重力荷载，水平荷载则由筒体、塔架或框架柱承受。

(2) 索的分类

1) 按所用材料分，有钢丝束、钢丝绳、钢绞线、链条、圆钢、钢管以及其他受拉性能好的线材等；个别的也可用预应力混凝土板带或钢板带代替。

2) 按受力特点分，有单曲面索（单层、双层）、双曲面索和双曲交叉索（都是空间索），形式有单层、双层、伞形、圆形、椭圆形、矩形、菱形等。悬挂结构还有悬挂索、双曲面悬挂索、斜拉索等。

3) 按悬挂的支承结构分，有筒体支承、柱或塔架支承的悬索结构、悬挂结构等。

11. 薄膜构件

(1) 薄膜构件的特点

薄膜构件是指用薄膜材料制成的构件；它或者由空心封闭式薄膜充入空气后形成，或者将薄膜张拉后形成，可参见节 1.5.12。它具有重量轻、跨度大、构造简单、造型灵活、施工简便等优越性；但隔热、防火性能差，且充气薄膜尚有漏气缺陷，需持续供气，故仅适用于轻便流动的临时性和半永久性建筑。

(2) 薄膜构件的分类

1) 按所用面材材料分，有玻璃纤维布、塑料薄膜、金属编织物等薄膜用材。

2) 按结构型式分，有气承式（直接用单层薄膜作屋面、外墙，充气后形成圆筒状或圆球状表面）、气囊式（将空气充入薄膜，形成板、梁、柱、壳等构件，再将它们连接成结构）、张拉式（将薄膜直接张拉在边缘构件〈杆件或绳索〉上形成结构平面）等。

12. **基础**

(1) 基础的特点

基础是地面以下部分的结构构件，用来将上部结构（即地面以上结构）所承受的荷载传给地基。

(2) 基础的分类

1) 按埋置深度分，有浅基础（如墙基础、柱基础、片筏基础）、深基础（如桩基础、沉箱）、明置基础（直接搁置在地面上的基础）等。

2) 按结构型式分，有单独基础、墙下条形基础、柱下交叉基础、柱下联合基础、片筏基础、箱形基础、壳形基础、桩基础（支承桩、摩擦桩、直桩、斜桩）、沉箱基础等。

3) 按受力特点分，有柔性基础（承受弯矩、剪力为主）、刚性基础（承受压力为主）。

4) 按所用材料分，有砖基础、条石基础、毛石基础、三合土基础、混凝土基础、钢筋混凝土基础等。

1.4.2　各种构件之间的区别与联系

从以上结构构件的类别看，虽然有着十多类数百种结构构件，琳琅满目。但是其基本性质都是由直杆或曲杆组成的线形构件、平面或单曲面或双曲面组成的面形构件，其基本受力状态无非是受拉（$+N$）、受压（$-N$）、受弯（M）、受剪（V）和受扭（M_T）5种。例如，厚度为 t 的平板，可视作由两组正交平行的截面高度为 t 的梁相互粘结而成的水平或斜向平面构件；厚度为 h 的墙，可视作由多根截面高度为 h 的柱相互粘结而成的竖向平面构件；拱可视作曲杆；拱板可视作由多个拱粘结而成的曲面；壳体结构无非是有边缘构件支承的各种空间曲面；基础无非是搁置在地基上承受土反力的厚板、厚梁、厚墙……各种建筑结构型式的概貌如表 1－2 所示。同时，基本构件、基本结构单元及其集合形式如表 1－3 所示；基本构件又可以用刚性构件和非刚性（柔性）构件来划分。刚性构件指在荷载作用下没有显著形状改变的构件，梁、柱是刚性构件的典型。非刚性（柔性）构件指在一种荷载条件下只有一种形状，当荷载性质改变后形状也会急剧变化的构件，钢缆、薄膜是非刚性构件的典型。在表 1－3中给出刚性和非刚性基本构件和基本结构单元。

刚性的基本构件可分为：

(1) 线形构件——直线形的梁、柱、框架、桁架；
　　曲线形的曲梁、拱；

(2) 面形构件——平面形的板、墙，以及由框架构成的平面结构构件；由桁架构成的平面屋（楼）盖的构件和平板网架结构构件；
　　单曲面形的拱板，以及由拱或桁架拱构成的单曲面屋盖结构构件；
　　双曲面形的各种壳体，以及由网架构成的壳面结构构件。

非刚性（柔性）的基本构件可分为：

(1) 线形构件——直线形的拉索；
　　曲线形的悬索；

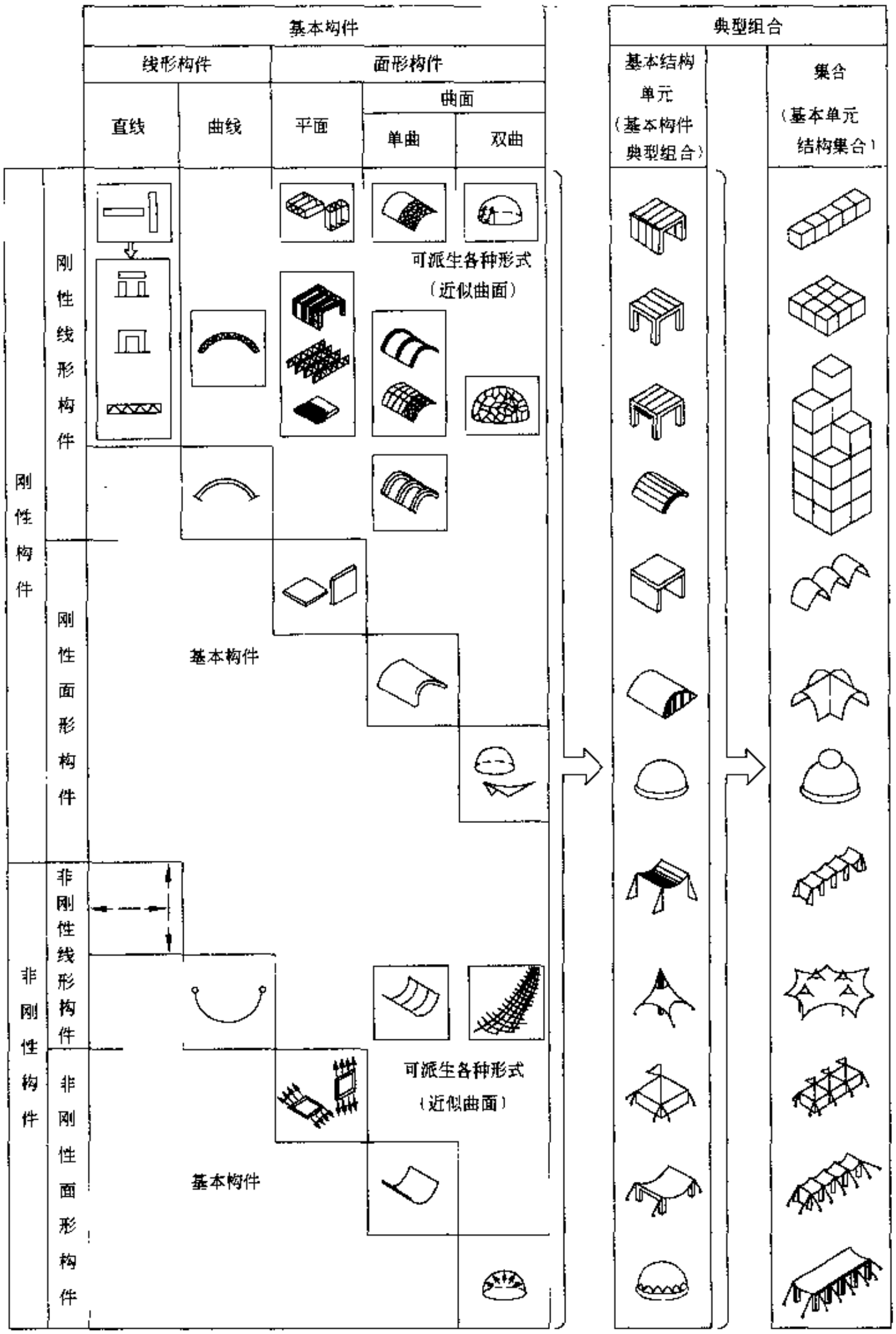
(2) 面形构件——平面形的拉膜；
　　单曲面形和薄膜，以及由索条构成的单曲面索构件；
　　双曲面形的充气构件，以及由金属编织物构成的双曲面拉索构件。

表 1-2　建筑结构型式概貌

结构性质	线性构件	平面(单曲面)基本构件，结构单元	空间基本构件	空间结构类型
直杆	梁 $(\underline{M}、V、N)$ 柱 $(\underline{-N}、M、V)$ 杆 $(\underline{N})$ 索 $(\underline{+N})$	平板 次主梁 交叉梁 各种肋形楼盖结构：板梁、次主梁、交叉梁、密肋、无梁、曲梁 框架 排架 板柱结构 平面墙体 格构墙体 板墙结构 桁架 板架结构	深梁桁梁结构（错列） 折板 幕结构 褶结构 组装空间盒子 空间框架 双向框架 剪力墙结构 单筒 筒中筒 成束筒 框-剪结构（平面） 框筒结构 撑系结构（平面） 立体交叉桁架 平板网架 单面网架 双面网架	深梁(桁架)结构 折板结构 盒子结构 格架式结构 高层建筑结构 网架结构
曲杆	梁 $(\underline{M}、V、M_T)$ 拱 $(\underline{-N}、M、V)$ 索 $(\underline{+N})$	曲梁（平面） 拱 拱板 拱结构 单曲面悬索 悬挂索 索结构 斜拉索 斜拉结构 薄带：钢板带、预应力混凝土带 薄膜 平面结构类型	筒壳 球壳 双曲扁壳 锥壳 双面抛物线壳 双曲面悬索 双曲面悬挂索 充气结构 悬挂网架 悬挂薄壳 拱或壳撑杆	壳体结构 悬索结构 薄膜结构 组合结构

说明：M 为弯矩，V 为剪力，$+N$ 为轴向拉力，$-N$ 为轴向压力，M_T 为扭矩，加下划线“ ”表示该构件的主要受力状态。

表 1-3 刚性的和非刚性的基本构件和基本结构单元①



① 表 1-3 选自 *Structure*（4th Edition），Daniel L. Schodek，2001。其中文版《建筑结构》将由清华大学出版社出版。本图未经清华大学出版社书面认可不允许在其他图书中使用。

基本结构单元有楼（屋）盖结构、墙体结构、筒体结构、拱面结构、壳面结构、穹顶结构、四角支承结构、帐篷结构、悬索结构、充气结构、基础结构等。

基本结构单元的集合形式有基本结构单元的线型集合、平面集合、立体集合、交叉集合、上下叠合等。

若以楼（屋）盖基本结构单元的受载和支承情况分类，还可归纳如表 1－4 所示。

表 1－4　基本结构单元以受载情况分类

受载和支承情况			典型受弯结构单元		典型索状结构单元			
			单向结构	双向结构	单向结构		双向结构	
					刚性	柔性	刚性	柔性
集中荷载	两边平行支承							
	周边连续支承							
均布荷载	两边平行支承							
	周边连续支承							

① 表 1－4 选自 *Structure*（4th Edition），Daniel L. Schodek，2001。本图未经清华大学出版社书面认可，不允许在其他图书中使用。

表 1-4 中分**集中荷载**（1 个、3 个和 4 个）和**均布荷载**，以及**两边平行支承**和**四周连续支承**两大类情况，简示了典型的受弯基本结构单元（如梁、交叉梁、单双向板、圆形板）和典型的索状基本结构单元（如索、拱、折线梁、锥形结构、穹顶结构、壳体结构、薄膜结构）在两种荷载作用下、两种支承条件下的一般结构布置情况。

1.5　建筑结构的几个基本概念

建筑结构的基本概念，反映建筑结构中基本事物本质属性[①] 的思维形式，它们是建筑结构知识中基本的成分；人们对它们的获得和掌握，是对建筑结构最基本的认识，也是人们在认识建筑结构过程中的重要环节。这些基本概念是随着实践的发展、科技的进步、新事物的发现以及人们对自然和建筑工程认识的不断深入而变化的。它们的内涵不断在充实，外延不断在扩大，总的趋势是从具体到抽象、从模糊到清晰、从个别到综合、从概念的形成到概念的同化。人们对它们的获得和掌握也因此而不断深入、不断同化、不断用已掌握的概念去学习新概念或修正原有概念。影响概念获得和掌握的因素是知识、智力和经验，是比较和评价，是肯定例证与否定例证实践的积累。

下面列出在结构设计中常用到的一些基本概念，也可以认为它们是在结构设计中许多相关基本概念之间形成相互联系又相互区别的概念系统，反映着结构设计中的内在联系的关系。正确地应用这些基本结构概念，再加上力学、建筑、施工方面的基本概念，是做好结构概念设计的根本。

1.5.1　荷载和作用

结构是建筑物的骨架，支承着自然的和人为的作用力，是建筑物能够存在的根本原因。这种作用力有两类（图 1-2）：

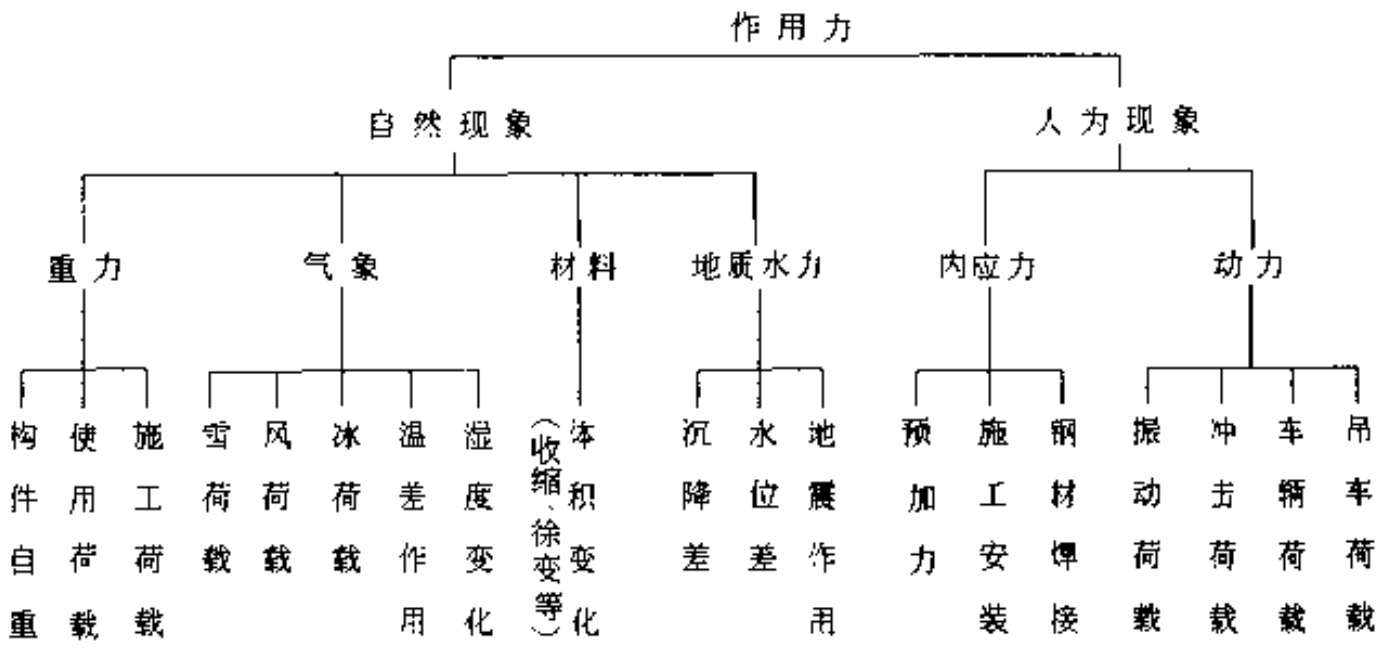


图 1-2　结构作用力的分类

① 事物的本质属性指事物的特征以及它与其他事物的联系。

(1) 直接施加于结构上的集中力或分布力，使它产生内力效应的称**荷载**（也称直接作用）。如结构构件自重；构件上构造层（如地面等）的重力荷载；楼（屋）面上人群、设备等的使用荷载，雪荷载和施工荷载；施加在外墙面上的风荷载；建筑物中机器转动产生的振动荷载；突加给建筑物的冲击荷载（如爆炸力）等。

(2) 由某种原因使结构产生约束变形或外加变形，从而产生内力效应，这种原因称**作用**（也称间接作用）。如地基不均匀沉降的外加变形引起的沉降作用（图 1-3(a)）；温差或材料体积变化，但结构的变形却受到约束而引起的温差（或收缩）作用（图 1-3(b)）；地震时地面运动和质点加速度反应引起的惯性作用；因钢材焊接引起的热效应作用等。

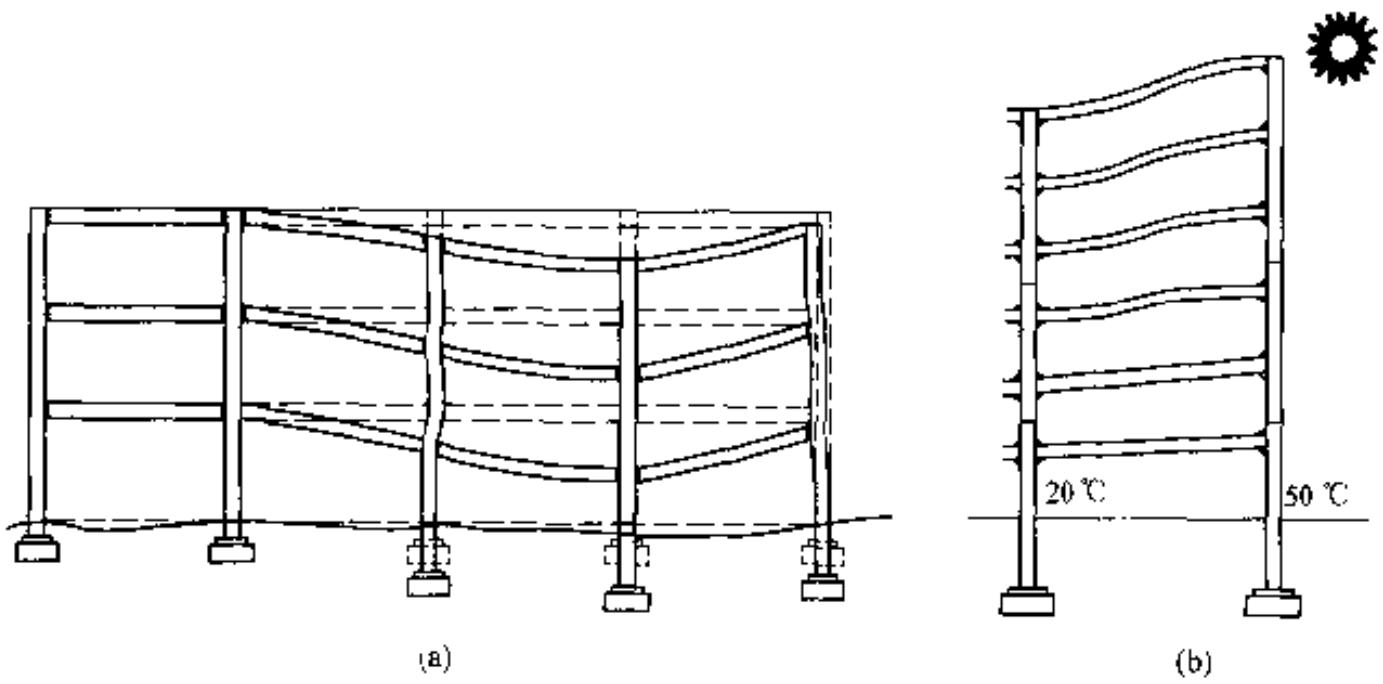


图 1-3　结构上的作用举例

(a) 地基不均匀沉降的作用　(b) 温差的作用

进行结构概念设计时，应对该结构可能承受上述荷载和作用中的主要部分加以考虑，不要有所遗漏，这是最根本的一点。还要注意其中哪些是动载（也称动态作用，估算时要考虑动力系数），哪些是静载（也称静态作用，无需考虑动力系数），根据荷载和作用的性质而异。应该说荷载和作用中的大多数是动载，因为它们的值大多数随时间在变化。但是从它们对结构的影响看，则可分为两种情况：一是这种变化很慢，它们产生的影响与静载差不多；一是这种变化很快，所产生的影响与静载相差较大。前者可属于**静载**，这是荷载和作用中的大多数；后者属于**动载**，如冲击荷载、吊车荷载、地震作用等。这里所谓快慢是相对于结构的自振周期而言。如果荷载在 1 s 之内从 0 增加到其最大值，对于自振周期为 0.1 s 的结构来说，这种加载速度是缓慢的，可视作静载，而对于自振周期为 10 s 的结构来说，这种加载速度是较快的，它就是动载。例如，风荷载对于一般低层建筑来说是静载，而对高层建筑来说则是动载，因为后者自振周期较长。

荷载还可按它施加在结构上时间的变异来区分：

(1) **恒载**（也称永久荷载或永久作用）——是指建筑物中每一构配件的质量所引起的地心吸力，包括结构构件、楼地面、墙面、固定设备等。它们在设计基准期（一般为 50 年）内的量值不随时间变化，或其变化与平均值相比可以忽略不计，它们都是随机变量。

(2) **活载**（也称可变荷载或可变作用）——是指建筑物使用过程中所施加的可移动荷载，它们在设计基准期内的量值随时间变化，且其变化与平均值相比不可以忽略不计；它们都是随机过程。例如楼面

活载实际是人体和家具加于楼面很小面积上的可移动荷载，在设计时利用等效原理将它们化算成全楼面的等效均布荷载。

(3) **偶然荷载**（也称偶然作用）——是指在设计基准期内不一定出现，一旦出现它的量值很大、持续时间很短的荷载，例如地震荷载、爆炸荷载等。

在结构设计中有时要考虑结构在承受恒载外还要承受两种或两种以上活载的情况。由于它们不可能同时到达各自的最大值，因此为了使结构在承受恒载和两种或两种以上活载时的可靠度和该结构在恒载和单一活载作用下的可靠度一致起见，要考虑荷载的最不利组合问题。也就是说，在计算结构的内力效应（轴力、弯矩、剪力等）或变形、裂缝等时，要考虑各种活载的组合值系数（或频数值系数、准永久值系数，视结构设计的不同极限状态而异）。若只考虑该结构承受恒载和单一活载，则没有此荷载组合问题。

1.5.2　结构失效和材料，结构受力和荷载

结构的根本功能有：(1) 承受正常使用和施工时可能出现的作用力；(2) 正常工作时有良好工作性能；(3) 正常维护下有足够耐久性；(4) 偶然事件发生时保持必需的整体稳定性。结构的失效意味着上述任一预定功能的丧失。防止结构失效则是结构概念设计要确保的任务。

结构失效包括下列 5 个方面：

(1) **破坏**——指结构或其构件因所用材料的强度被超越，或应变大于其极限值而丧失承载力（图 1-4(a)）；

(2) **失稳**——指结构或其构件因截面过小而被压屈或因连接处失效而形成可变体系（图 1-4(b)，在不大的作用力下突然发生大变形的现象（图1-4(a)），它同样也丧失承载力；

(3) **变形过大**（含**裂缝过宽**）——指结构或其构件在施加作用力后发生影响使用的过大变形（图 1-4(c)，含过宽裂缝）；

(4) **耐久性丧失**——指结构所用材料在长期环境中受破坏因素的影响，丧失使用功能；

(5) **倾覆或滑移**——指结构作为刚体失去平衡的现象（图 1-4(d)，(e)）。

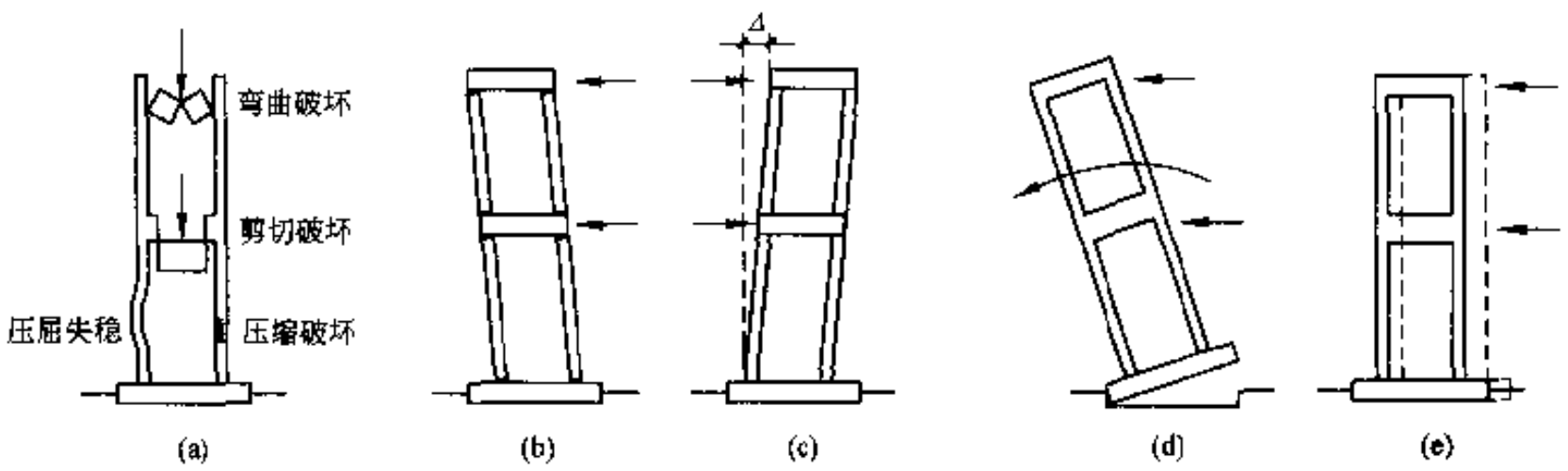


图 1-4　结构的失效

(a) 构件破坏　(b) 结构形成可变体系　(c) 变形 Δ 过大　(d) 倾覆　(e) 滑移

与这些失效现象直接相关的是结构所用材料的性能。其主要方面是：

(1) 极限应力（钢材指屈服应力）和极限应变，与结构承载力有关；

(2) 应力应变关系中的弹性模量、弹性阶段、塑性阶段和延性性能，它们都与结构的变形（含裂

缝）有关；

(3) 线膨胀系数，与结构的温度效应有关；

(4) 其他重要性能，如耐久性、耐火性、冷弯性、冲击韧性等。

建筑结构采用的材料主要有钢材、混凝土、砌体（砌块、砖、石等）、木材等。它们应力应变关系、极限应力、极限应变的比较，以及弹性、塑性和延性的表现，如图 1－5(a) 所示。

材料的应力应变关系也反映了由材料组成结构构件的受力 P 和变形 f 的关系，如图 1－5(b) 所示。从中可见在一般情况下结构受力和荷载的关系为：

(1) 在结构自重和各种构造做法等恒载作用时，结构的变形（竖向和侧向）都相对较小，结构处于**弹性阶段**（图 1－5(b) Ⅰ处）；

(2) 结构承受使用活载时，变形有不大增值（图 1－5(b) Ⅱ处，由于在一般情况下使用荷载只相当于恒载的一小部分）；

(3) 结构受一般地震作用（或风荷载）时所发生的变形可能比仅有使用荷载时大得多，但二者同时发生其最大值的概率很低，这时结构已快进入**塑性阶段**（图 1－5(b) Ⅲ处）；

(4) 除承受规定的恒载、活载与风荷载、地震荷载的组合内力外，结构还应具备足够的储备承载力，而更重要的则是在正常荷载组合下结构要保持在容许应力、容许变形的极限范围内，这些限值通常是由材料的弹性性能界限所决定的；

(5) 在遭到大地震时，结构受力和变形可能比一般情况大 2～4 倍，这时允许结构进入塑性阶段；正如材料要有延性，结构也应该有足够的延性（图 1－5(b) 中Ⅲ以后至Ⅳ），它可以吸收地震能量，减小地震作用，保证结构不致倒塌，待震后再行修复。

图 1－5(b) 所示 $P-f$ 关系，应作为结构概念设计时的重要概念。

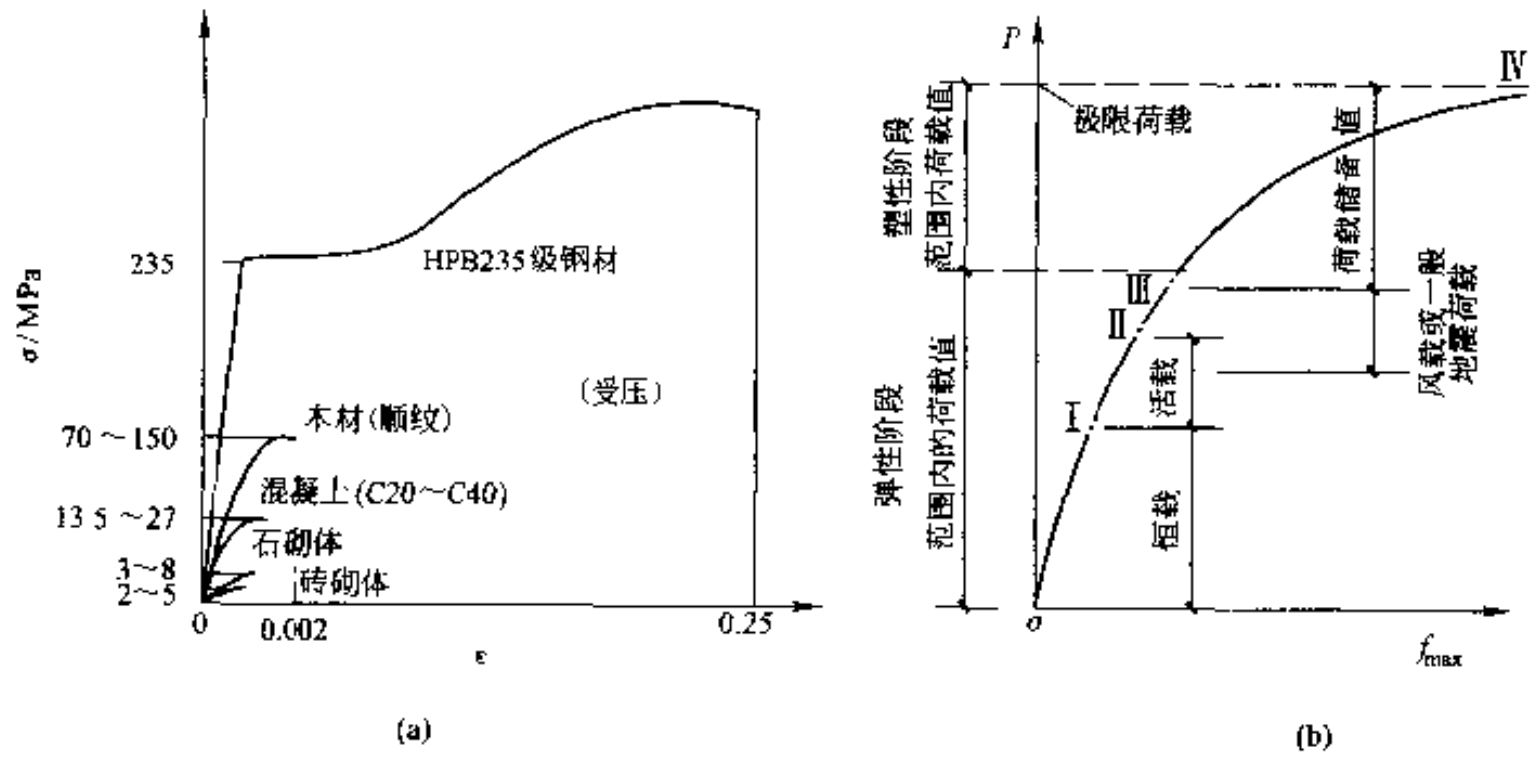


图 1－5　结构的失效

(a) 不同材料的应力应变关系对比　(b) 不同荷载作用下的结构受力 P 与结构变形 f 的关系

1.5.3　结构的可靠度和设计方法

建筑结构最主要的功能是确保使用者的生命、财产安全。以往曾经按安全系数来定量描述结构确保

安全的程度，当前则应用国际上先进的可靠性理论结合我国工程实践所确定的可靠度设计方法来保证。

结构**可靠度**的基本概念是：结构在规定的时间内（指设计基准期）、在规定的条件下（指正常设计、施工、使用和维修），完成预定功能（见节 1.5.2）的安全程度（以概率表示），它取决于荷载（作用）在结构中引起的效应（S）和结构自身抗力（R）的关系，

$R>S$ 时，结构“安全”；

$R<S$ 时，结构“失效”；

$R=S$ 时，结构处于“极限状态”。

由于 R、S 都是随机变量，结构的安全程度取决于“失效”的概率值 P_f 的大小（即 P_f 是控制结构安全程度的定量表述）。安全度大的结构 P_f 小，P_f 大时结构的安全程度降低。P_f 的数值极小，表达起来不方便，故利用统计运算表达为**可靠指标** β。β 为标准正态概率分布中距离平均值为 β 倍标准差 σ（即 $\beta\sigma$）时相应的失效概率。实际建筑结构中的 β 值在 2.7～4.2 之间，相应于 P_f 为 3.5×10^{-3}～1.3×10^{-5}。我国绝大多数建筑结构的 $\beta=3.2$～3.7，相应的失效概率大约为 1.0×10^{-4}～7.0×10^{-4}。

建筑结构设计时采用极限状态设计方法，是以可靠指标 β 度量其可靠度并采用分项系数的设计表达式进行设计的。这里结构的极限状态，指整个结构或其一部分能满足预定功能（见节 1.5.2）的特定状态；当超过此特定状态时结构即不能满足这些功能要求。极限状态分为两种：

（1）承载能力极限状态——相应于结构或构件达到最大承载力的情形。所有结构构件都要进行承载力（含失稳）计算；处于地震区的尚应进行抗震承载力验算；有些结构必要时还应进行倾覆、滑移的验算；此外还要保证结构的整体稳定性、使局部破坏不至于导致大范围或连续的倒塌。

（2）正常使用极限状态——相应于结构或构件的变形、裂缝或耐久性能达到某项规定取值，使其无法正常使用的情形。对使用上需要控制变形值的结构构件，应进行变形验算；对使用上要求不出现裂缝或限制裂缝宽度的构件，应进行混凝土拉应力或裂缝宽度的验算。

结构在极限状态设计中荷载的取值如下：

（1）承载力计算及稳定验算时应采用荷载的设计值，它等于荷载的标准值乘以荷载分项系数；当有两种或两种以上活荷载时，还要考虑荷载的组合问题。

（2）变形、裂缝控制验算时应采用相应的荷载代表值，包括荷载的标准值、组合值、频遇值和准永久值。

（3）进行结构的抗震设计时，地震作用及其他荷载值均应按《建筑抗震设计规范》的规定确定。

（4）预制构件应按制作、运输、安装时相应的荷载值作施工阶段验算；吊装时应考虑自重的动力系数。

在极限状态设计中计算结构抗力 R 时，要采用材料强度的设计值，它等于材料强度的标准值除以材料分项系数。

上述极限状态设计方法中主要参数的概念如下（具体值可查相应规范）：

（1）**荷载标准值**——指结构在使用期间的正常情况下可能出现的最大荷载概率分布的某个分位值；现行《建筑结构荷载规范》（GB 50009）原则上取众值，即出现频率最高的值作为荷载标准值。由于荷载作用性质不同，对各种荷载的标准值又根据实践经验分别作了具体的规定。

（2）**荷载分项系数**——考虑荷载可能超载，在计算极限状态效应时一般应乘以大于 1.0 的系数；其中永久荷载分项系数 $\gamma_G=1.0$～1.35（一般取 1.2），可变荷载分项系数 $\gamma_Q=1.3$～1.4（一般取 1.4）。

（3）**荷载组合值**——当可变荷载有两种或两种以上时所采用的荷载值，它等于将下述组合值系数 ψ_C 与某一荷载设计值相乘，其目的是组合后的荷载效应在设计基准期内的超越概率能与该荷载单独出

现时的相应概率趋于一致；荷载组合值系数 $\psi_C=0.7$、0.9。

（4）**荷载频遇值**　一在设计基准期内，其超越的总时间为规定的较小比率（或超越频率为规定频率）时的可变荷载值。

（5）**荷载准永久值**——在设计基准期内，其超越的总时间约为设计基准期一半时的可变荷载值。

（6）**材料强度标准值**——材料强度具有 95%保证率的分位值。

（7）**材料强度分项系数**——考虑材料的实际强度有低于标准值的可能，出现不安全因素，从而在分析相应结构构件的可靠度以后引入的一个不小于 1.0 的系数；钢材的材料分项系数 $\gamma_S=1.1\sim1.2$，混凝土的材料分项系数 $\gamma_C=1.40$。

（8）**设计基准期**——为确定可变荷载以及与时间有关的材料性能取值而选用的时间参数；我国的国家标准定为 50 年。

上述结构可靠度和设计方法的基本概念，主要在结构计算时应用，在结构概念设计中不一定会直接遇到，但却是结构概念设计中考虑结构安全程度时的重要概念。

1.5.4　结构的三个基本分体系

建筑结构是由许多结构构件组成的一个系统，其中主要的受力系统称为结构总体系。结构总体系固然千姿百态，形形色色，但是仔细分析总是由基本水平分体系、基本竖向分体系以及基础体系三部分组成。

基本水平分体系　一般由板、梁、桁（网）架组成，如板-梁体系和桁（网）架体系。基本水平分体系也称楼（屋）盖体系，其作用为：（1）在竖向，承受楼面或屋面的竖向荷载，并把它传给竖向分体系；（2）在水平方向，起隔板和支承竖向构件的作用，并保持竖向构件的稳定。

基本竖向分体系一般由柱、墙、筒体组成，如框架体系、墙体系和并筒体系等。其作用为：（1）在竖向，承受由水平体系传来的全部荷载，并把它传给基础体系；（2）在水平方向，抵抗水平作用力如风荷载、水平地震作用等，也把它们传给基础体系。

基础体系一般由独立基础、条形基础、交叉基础、片筏基础、箱形基础（一般为浅埋）以及桩、沉井（一般为深埋）组成。其作用为：（1）把上述两类分体系传来的重力荷载全部传给地基；（2）承受地面以上的上部结构传来的水平作用力，并把它们传给地基；（3）限制整个结构的沉降，避免不允许的不均匀沉降和结构的滑移。

结构水平分体系和竖向分体系之间的基本矛盾是，竖向结构构件之间的距离愈大，水平结构构件所需要的材料用量愈多。好的结构概念设计应该寻求到一个最开阔、最灵活的可利用空间，满足人们使用的功能和美观的需求，而为此所付出的材料和施工消耗最少，而且能适合本地区的自然条件（气候、地质、水文、地形等）。

基础的形式和体系要按照建筑物所在场地的土质和地下水的实际情况进行选择和设计。为此，在结构概念设计前至少要拥有该建筑物所在场地的初步勘察报告。这是结构概念设计的必备条件。

显然，了解并掌握当地有关环境的基本情况和基本数据，如地形图、地震设防烈度、风雪荷载、气温变化、雨季和最高雨量等，对确定结构的三个基本分体系有着重要影响。

建筑物、建筑结构总体系、三个基本分体系、基本结构构件和构件受力状态之间的隶属关系，见图 1-6。

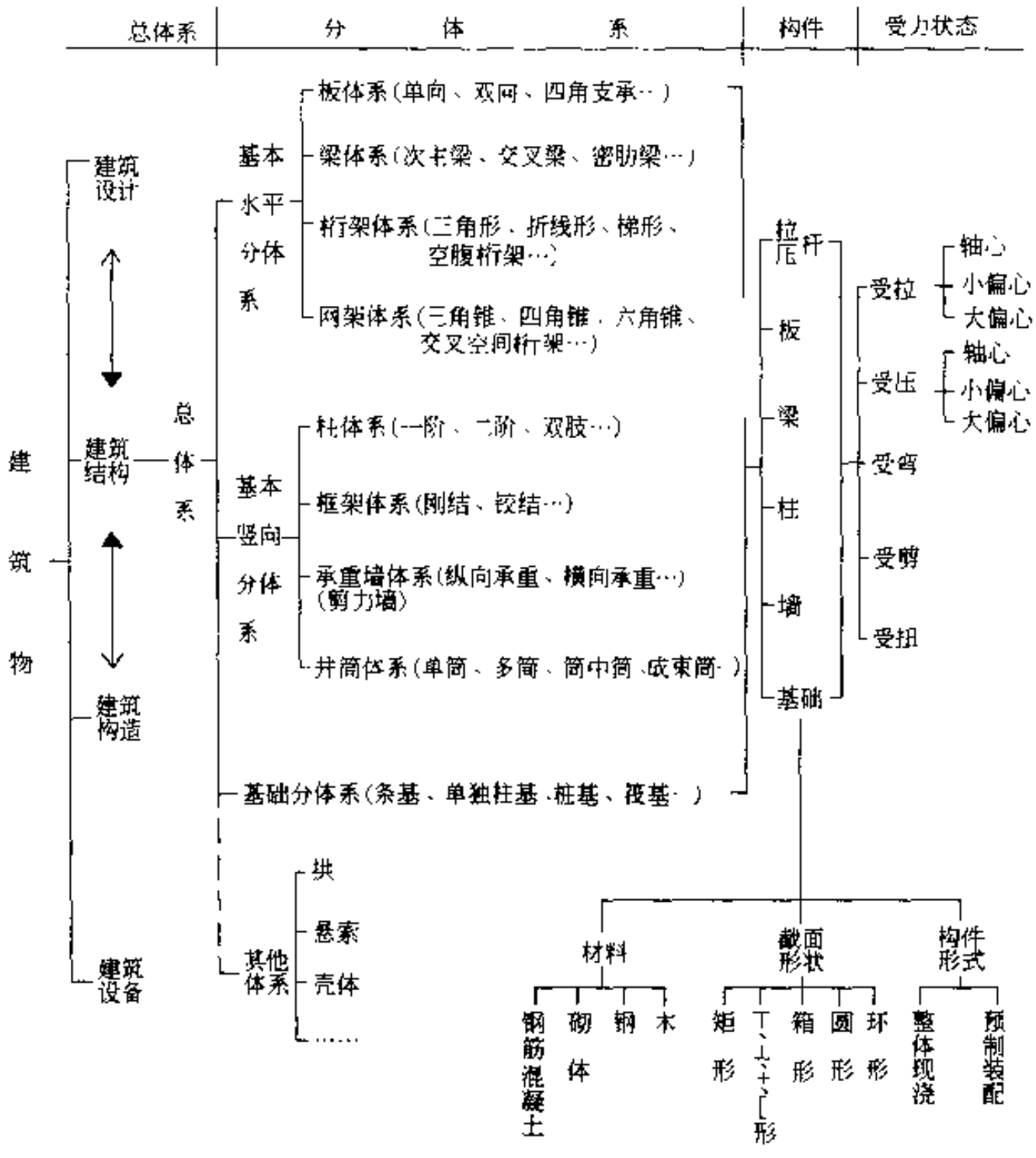


图 1-6 结构总体系与基本分体系的隶属关系

（本图中粗箭头方向表示主要作用，开口箭头方面表示反作用）

1.5.5 关于地基的基本概念

在结构设计和施工中最难驾驭的是建筑物的地基和基础；其中地基持力层的选择、地基承载力的确定、基础型式和体系的落实以及施工时软弱地基的处理……哪一件都不是容易的事。这是因为人们只能在设计前通过几个钻孔的土样试验，得知其少量信息，不可能完整地掌握它的更全面的情况。在实际工程中往往凭经验处理所遇到的问题，这样就会产生误差乃至错误。在进行结构概念设计时，掌握以下关于地基的基本概念十分重要：

（1）地基土一般有 3 个特性：一是压缩性大（C20 混凝土的弹性模量约为饱和细砂的 1 600 倍）；二是强度低（土的强度指抗剪强度）；三是透水性大。土的基本物理性指标有：

1）天然容重（重度）$\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3} \sim 20\ \mathrm{kN/m^3}$；

2）含水量 ω = 水重/固体颗粒重 = 0% ~ 60%（砂土 0% ~ 40%，粘性土 20% ~ 60%）；

3）孔隙比 e = 孔隙体积/固体体积 = 0.5 ~ 1.2（砂土 < 0.6，粘性土 < 1 时为良好地基）；

4）无粘性土分为密实（如中砂 $e<0.6$）、中密、稍密、松散（如中砂 $e>0.85$）4 类；

5）粘性土的物理特性以图 1－7 表示。其中 w_L（%）称液限，为液态与塑态间分界的含水量；w_P（%）称塑限，为塑态与半固态间分界的含水量；$I_L=(w-w_P)/(w_L-w_P)$ 称液性指数，是确定粘性土相对稠度与承载力的重要指标。

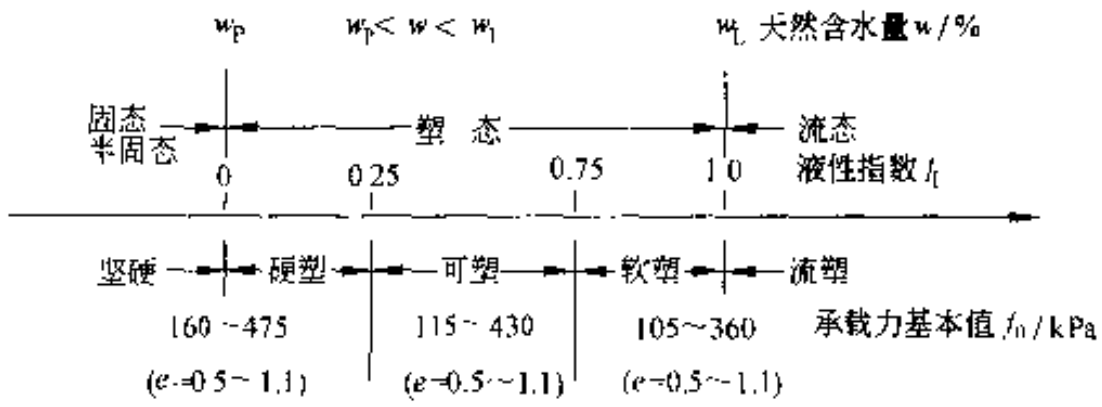


图 1－7　粘性土的稠度和承载力

（2）常见的不良地基有以下几种：

1）软土，指抗剪强度低、压缩性高、渗透性小的淤泥、淤泥质土，尚未压实固结的吹、冲填土，松散砂土等。它们的参考性能指标是：（1）天然含水量 $w=30\%\sim80\%$，甚至 200%；孔隙比 $e=1\sim2$，甚至 6；压缩系数 $a_{1-2}=0.5\sim1.5$，甚至 4.5；液性指数 $I_L=0.75\sim1.0$，甚至 >1.0；剪切强度 <20 kPa，甚至 5 kPa。

2）杂填土，指人类活动所形成的无规则堆填物。

3）河岸河沟附近场地；山坡或山脚下场地。

4）断层或岩层节理发育场地。

不良地基需要处理，处理类别有换土垫层、夯实、振动挤密、排水固结、化学加固（注入或拌合固化材料）等，它们各自的处理方法、原理和适用范围见表 1－5。

（3）掌握场地地面以下土层和地下水信息的主要来源是本地区工程地质勘察。就结构概念设计来说，至少应有初步勘察报告。在初步勘察报告中，要求做到在相关的场地中每 50 m～150 m 布置一个钻孔，孔深达 10 m 左右，目的是为了查明建筑场地下土层、岩层和水文情况，了解不良地质现象的成因、分布和发展趋势，以便确定建筑物总平面布置、选择地基持力层和基础的设计方案，对不良地基的治理方法提供依据。

（4）地基承载力指地基承受建筑结构传来荷载的能力，若大于此能力，一是地基发生的不均匀变形将超越建筑物所能容许的限度，建筑物会开裂或倾斜；二是土体会因剪切破坏而丧失稳定，使建筑物倒塌。所以地基承载力是指能满足上述变形和强度两方面要求，并考虑足够安全储备后确定的地基土单位面积负载能力。它根据勘察报告给出的土的物理力学指标查《建筑地基基础规范》得到的地基承载力特征值①，在设计时根据所确定的基础宽度和埋置深度予以修正后得到。

（5）地基的变形特征有沉降量、沉降差、倾斜和局部倾斜，它们都应限制在规范规定的“地基变形允许值”以内。一般多层建筑物在施工期间完成的沉降量，对砂土可认为完成 80% 以上，对低、中和高压缩性土可分别认为完成 50%～80%、20%～50% 和 5%～20%。饱和粘土地基的沉降往往需要几年甚至几十年。

（6）地下水对建筑结构的影响有以下 6 方面：1）基础埋深；2）地基沉降；3）地下室渗水；4）使地下空心结构物浮起；5）对混凝土和钢筋的腐蚀；6）施工时排水和出现流砂、管涌等不利现象。

---

① 《建筑地基基础规范》（GB 50007－2002）中规定，由地基土的载荷试验测定的地基土压力变形曲线变形段内规定的变形所对应的压力值称为地基承载力特征值。

表 1-5　地基处理方法类别及适用范围

分类	处理方法	原理及作用	适用范围及要求
换土垫层	砂垫层 碎石垫层 素土垫层 灰土垫层	挖除地下水位以上软弱、松散土层，换填砂、碎石并分层夯实至所要求干重力密度，从而提高垫层承载能力，减少地基变形	适用于处理地下水位不高，但软弱土层埋藏较浅且建筑物荷重不大的情况
夯实	重锤夯实 强夯	重锤夯实是通过夯锤自由下落能量压实地基土表层；强夯则是通过较大的、自由下落的夯实能量，迫使较深范围内软弱、松散土动力压密，使地基土密度增加	适用于杂填土、砂及含水量不高的粘性土，强夯时应注意对邻近建筑物的影响
振动及挤密	振冲桩 挤密碎石桩 挤密砂桩 挤密土桩 挤密灰土桩	通过挤密或振动成孔，使深层土密实，并在振动挤密过程中，或成孔后，向孔中回填砂、碎石等材料，形成砂桩、碎石桩，与土层一起组成复合地基，从而提高地基承载力、减少地基变形	适用于处理砂土、粉土或粘粒含量不高的粘性土层，有时也可用来处理软弱粘土层
排水固结	砂井排水预压 纸板排水预压 真空排水预压	通过在软弱土地基上堆载（或在覆盖在地基上的薄膜下抽真空），以及采取改善地基排水固结条件（如设砂井或排水纸板），加速地基在堆载下固结，地基强度增长、压缩性减小、稳定性提高	适用于处理大面积软弱粘土层，但需有预压条件（如预压堆土荷载，预压时间），预压前应做出周密细致的预压工程设计
化学加固（注入或拌合固化材料）	电硅化 旋喷桩 水泥石灰搅拌桩	通过向土孔隙中注入化学溶液（如硅酸钠）、或向土中喷射或拌合固化材料（如水泥浆或水泥、石灰粉）将土颗粒胶结，增强土体强度	适用于处理松散、软弱土层，特别适用于加固已建建筑物地基

1.5.6　梁、板设计中的几个基本概念

在结构的水平分体系中应用得最广的是承受竖向荷载的梁和板。对于梁来说，如果竖向荷载的重心作用在梁的纵轴平面内，梁只承受弯矩 M 和剪力 V，否则还要承受扭矩 M_T。关于梁在设计中的基本概念如下。

(1) 梁的常用截面为矩形和 T 形，更合理的截面为工形和箱形（它们都可将截面分成翼缘和腹板两部分）。对后者而言，可以认为，截面的弯曲承载力 M 主要由翼缘承担；截面的剪切承载力 V 主要由腹板承担。

(2) 单跨梁中合理的形式为两端（或一端）伸臂梁，两端伸臂梁中更合理的为每端外伸 0.211 至 0.2251 的情况，因为它们最大正负弯矩值 $\pm M$ 和最大挠度值 f 都比单跨简支梁小得多（见图 1-8(a)）。

(3) 等跨连续梁要在考虑荷载组合后用结构计算手册提供的内力系数值（也可用下述不等跨连续梁近似的内力图），来估算设计该梁所需的各截面的 M 和 V。对于用塑性材料做成的不等跨连续梁（包括配筋率不太高的钢筋混凝土梁），当最短跨不小于最长跨的 2/3 时，可用下述近似法画出弯矩图（图 1-8(b)）：

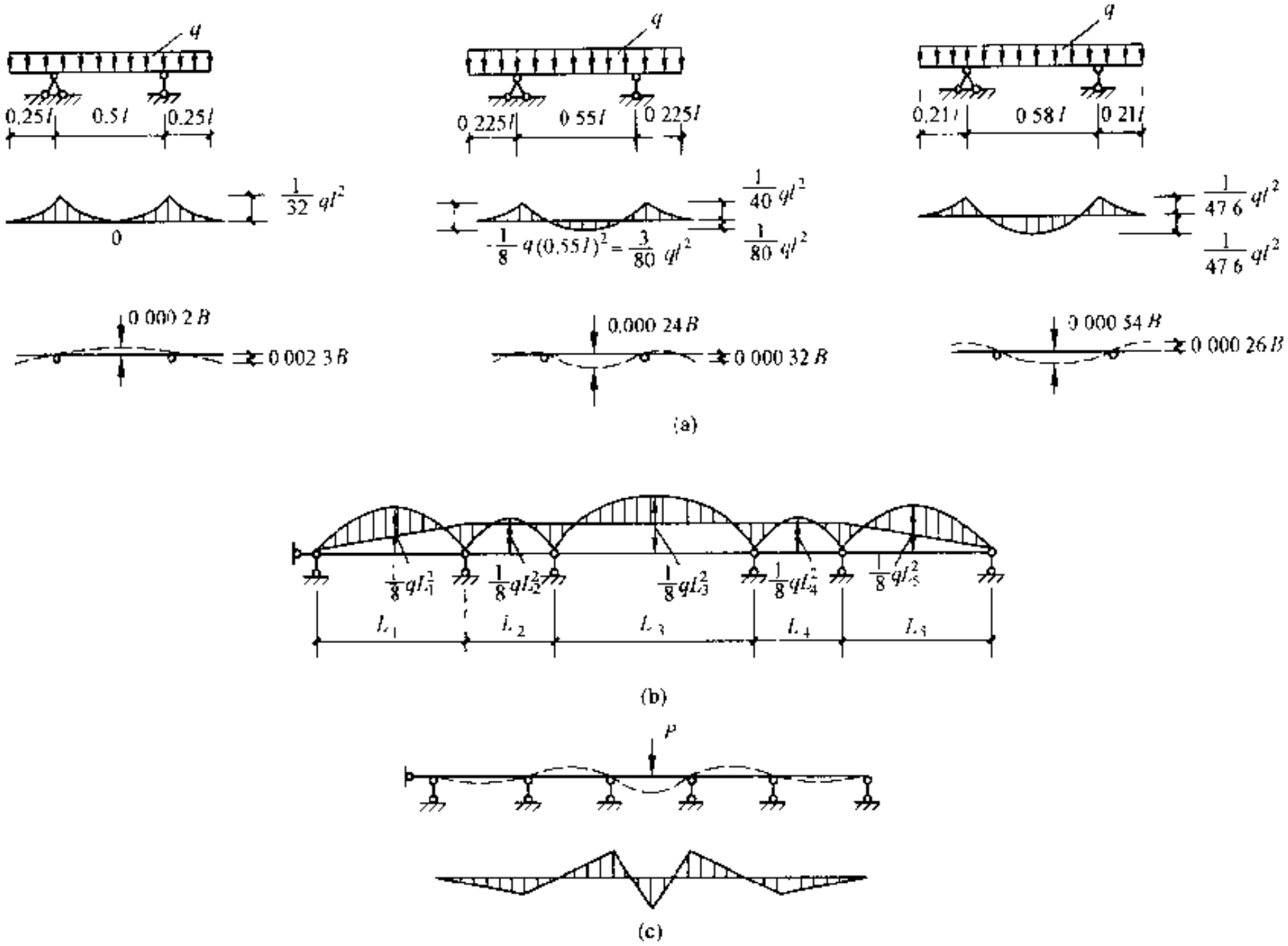


图 1－8　几种不同类型梁的弯矩和变形比较

(a) 两端伸臂梁伸臂长度变化对弯矩图和变形图的影响（$B=ql^4/EI$）

(b) 不等跨连续梁弯矩图近似画法　(c) 连续梁只一跨承受集中荷载时

1）在各跨上端画出相应单跨简支梁的弯矩图（$M_{max}=\frac{1}{8}ql^2$）；

2）假定各支承处截面负弯矩值，下列公式可作参考：

每端第二支座　$M=0.11\,q\,[(l_1+l_2)/2]^2$，；

每端第三支座　$M=0.08\,q\,[(l_1+l_2)/2]^2$

3）将各支座处负弯矩值连成直线，直线与各跨相应单跨简支梁弯矩图之间的图形，即为此不等跨连续梁的弯矩图。

在连续梁上只有一跨受荷载时，其余各跨都将参与受载，但内力图的衰减较快，如图1－8(c)所示。

(4) 实际工程中还常用双向或三向等截面交叉梁（也称格栅），它一般有正放正交、斜放正交和三向斜交等几种（见图 1－9(a)）。正放正交适用于方形或矩形楼（屋）面。图1－9(b)为两种楼面，均设置间距为 a 的交叉梁系。对 $2a\times2a$ 情况，两个方向梁所承受的楼面荷载是相等的，各 50%；对 $2a\times3a$ 情况，短、长方向梁承受的楼面荷载分别为 83.3%和 16.7%。其差异是后种情况中短向梁的线刚度（EI/l）比长向梁大的缘故。故在等截面交叉梁系中，短向是主要受力方向。其他多格各种交叉梁系的内力系数均可查结构手册。

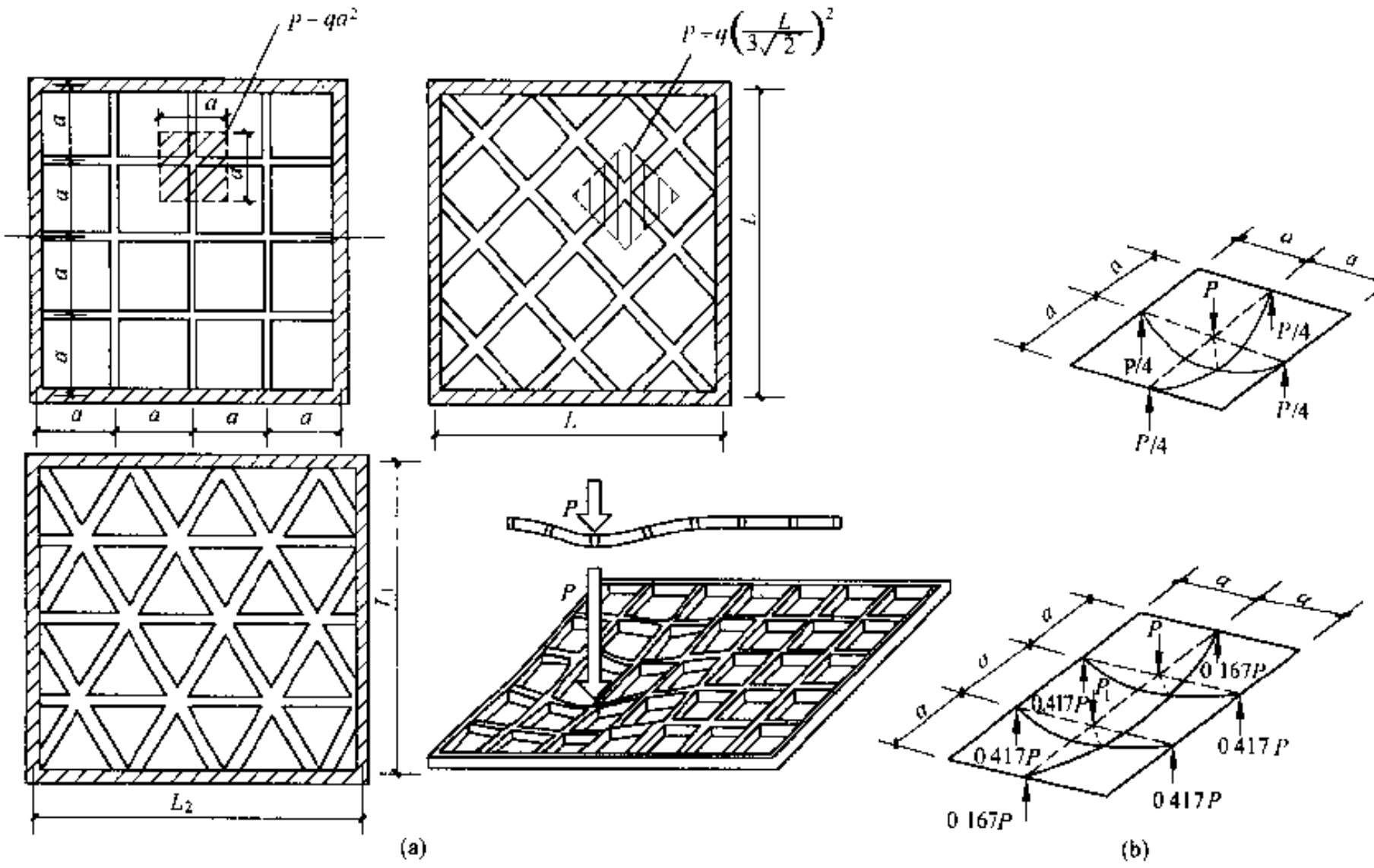


图 1-9 几种交叉梁系及其受力特征

(a) 三种交叉梁系 (b) 两种正交正放交叉梁楼面而受力比较

(5) 从图 1-9 (a) 可见若在格栅的某一根梁上施加一集中荷载 P，周围的梁都会协同受荷，因而双向格栅梁比单向梁的强度和刚度都大得多。将双向格栅梁做成零间距，就成为双向板。

关于板在设计中的基本概念有：

(1) 单向板只在单方向受力，它和单跨梁、连续梁的受力概念相同，不另赘述；单向板是双向板的特殊情况，指板的四边只有两相对的边是支承边时以及板的边长比（长边长度/短边长度）≥2 时才是单向板。

(2) 双向板指四边支承板、三边支承板或两相邻边支承的板，且当板的边长比<2 时，才称为双向板或按双向板计算。双向板的强度和刚度也肯定会比单向板大得多。下面列出 5 种双向板进行比较（见表 1-6 和图 1-10）。

表 1-6 几种双向板受力情况比较

支承条件	M_1	M_2	M_1^0	M_2^0	M_{01}	M_{02}	R_1	R_2	R_{12}	f_{max}
两边简支	0.125 0		0					0.750		0.013 0
两边固端	0.041 7		−0.083 3					0.750		0.002 6
四边简支	0.072 8	0.028 1	0	0			0.266	0.484		0.007 7
四边固端	0.033 8	0.010 2	−0.075 0	−0.056 6			0.247	0.503		0.002 2
四角支承	0.082 8	0.268 9			0.207 5	0.310 0			0.375	0.037 1

说明：$l_2/l_1=1.5$；

M 指单位长度截面上的弯矩；M_1、M_2 分别为平行于 l_1、l_2 方向板中点弯矩；M_1^0、M_2^0 分别为 l_1、l_2 固端边中点弯矩；

M_{01}、M_{02} 分别为平行于 l_1、l_2 方向自由边的中点矩；M 值为表中数据乘以 ql_1^2；

R_1、R_2 和 R_{12} 分别为 l_1、l_2 边支座总反力和板角支座处的反力；

B 为截面抗弯刚度，$B=Eh^3/12\ (1-\mu^2)$，E 为弹性模量，h 为板厚，μ 为泊松比；

f_{max} 等于表中数据乘以 ql_1^4/B。

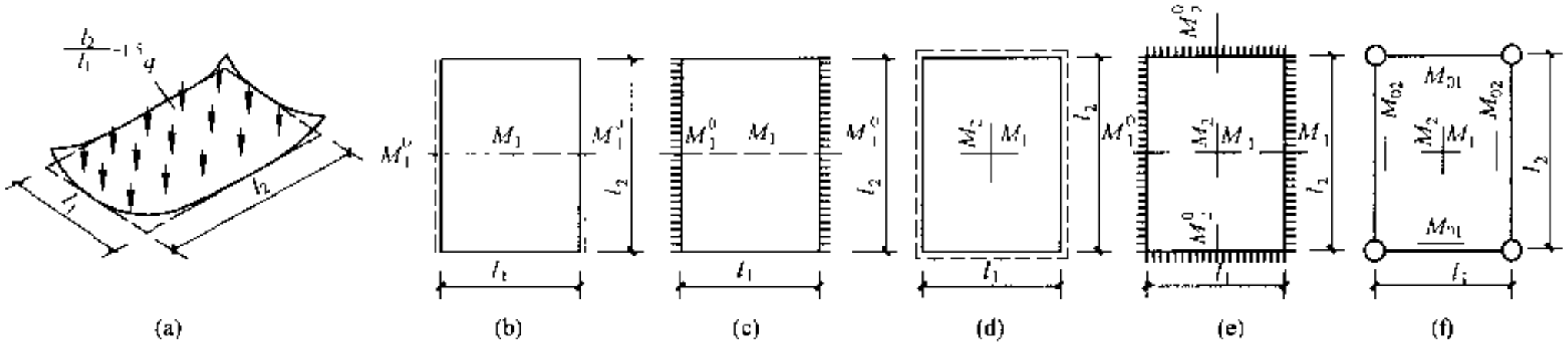


图 1-10　不同支承条件板的受力情况

(a) 双向板尺寸及四边支承时板面受力后四角上翘现象　(b) 两边简支板

(c) 两边固端板　(d) 四边简支板　(e) 四边固端板　(f) 四角支承板

表 1-6 说明板有以下规律性现象：

(1) 两相对边支承板不论简支还是固端均为单向板；四边支承板当 $l_2/l_1 \geqslant 2$ 时，也可近似按单向板设计（这时 $M_1 \approx 0.1ql^2$，$M_2 \approx 0.015\ ql^2$）。

(2) 四边支承板都有 $M_1 > M_2$，$R_2 > R_1$，且 f 都很小的情况，说明其主要受力方向为短向，其刚度比单向简支板和四角支承板大得多。

(3) 四角支承板的受力和刚度情况都比四边支承板更为不利（$M_{1角} > M_{1边}$，$M_{2角} \gg M_{2边}$，$f_{角} \gg f_{边}$），这在概念设计时应予以特别注意。而且：1）其主要受力方向是长向；2）支承点附近板带承受的弯矩大于跨中板带承受的弯矩（$M_{01} > M_1$，$M_{02} > M_2$），这两点正好与四边支承板相反。

(4) 四边支承板受竖向作用力后四角有上翘现象（图 1-10(a)），在实际工程中必然在四角会引起约束负弯矩产生的内力。这在概念设计时也应予以注意。

1.5.7　梁、拱和索

梁受力后其截面部分受拉、部分受压，应力分布很不均匀，不能充分利用材料的强度（图 1-11(a)）。若在梁端加一对水平压力 H，就能改变各截面受力状态；如果 H 的大小、作用点选得合适，可使梁各截面处于受压或压弯状态，能提高梁的承载力，这就形成了拱（图 1-11 (b)）。相反，若在梁端加一对水平拉力 T，也能使梁各截面处于受拉或拉弯状态，这就形成了拉杆，其极端就是索（图 1-11 (c)）。显然，拱结构宜于用抗压性能好的材料（如砌体、混凝土）做成；索结构宜于用抗拉性能好的材料（如钢索、钢缆）做成。

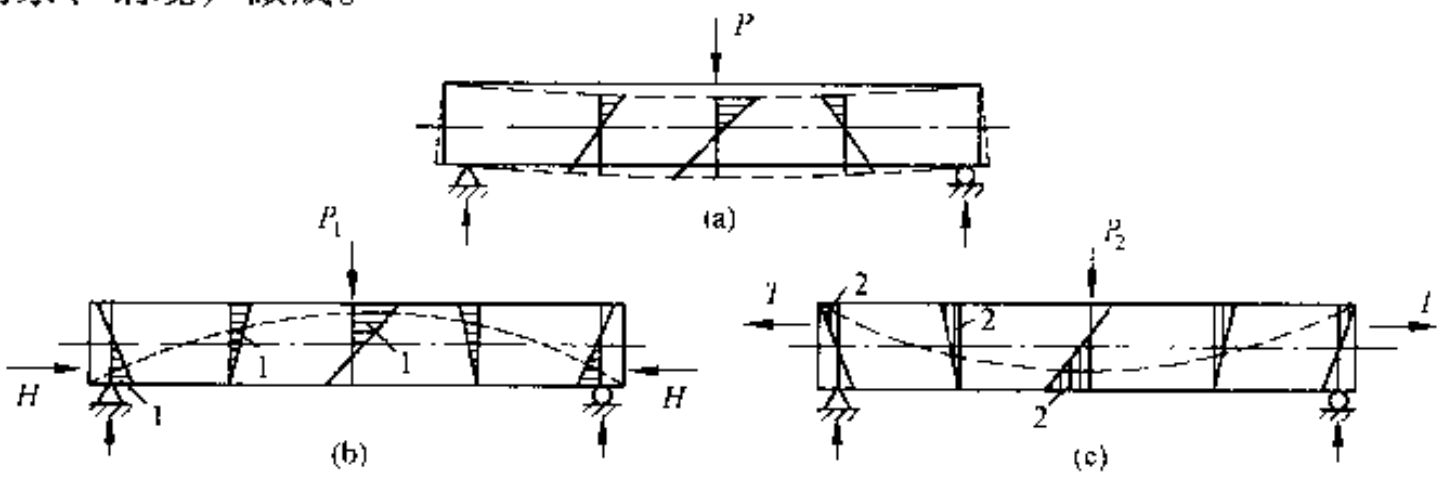


图 1-11　梁、拱、拉杆（索）的对比

1—压应力区　2—拉应力区

拱结构是有推力的结构。拱的外形一般是抛物线、圆弧线或折线，目的是使拱体各截面在外荷载、支承反力和推力作用下基本上处于受压或较小偏心受压状态，从而大大提高拱结构的承载力（图 1－12（a））。在结构概念设计时，如果采用拱结构，除依据作用力情况合理选择拱的外形外，关键是确定承受推力的结构措施，它一般有 4 种措施可供选择（图 1－13）：（1）由拉杆承受——优点是结构自身平衡，使基础受力简单；又可用作上部结构构件，可替代大跨度屋架；（2）由基础承受——这时要注意能承受水平推力的基础做法；（3）由侧面结构物承受——这时此结构物必须有足够的抗侧力刚度；（4）由侧面水平构件承受——它一般是设置在拱脚处的水平屋盖构件；水平推力先由此构件作为刚性水平方向的梁承受，再传递给两端的拉杆或竖向抗侧力结构。此外，还有一个关键问题是当拱承受过大内压力时的失稳现象；防止失稳的办法是在拱身两侧加足够的侧向支撑点（图 1－13(e)）。

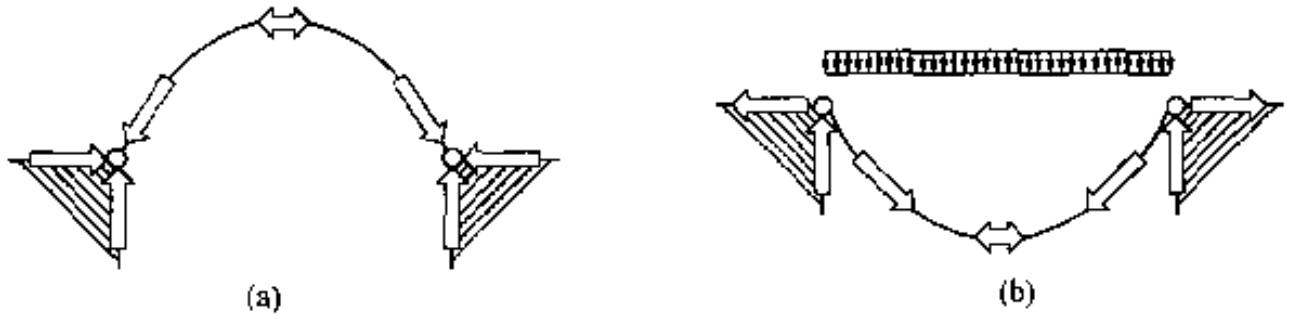


图 1－12　拱和索

(a) 仅受压力的理想拱　(b) 仅受拉力的理想索（最大内力均在支承处）

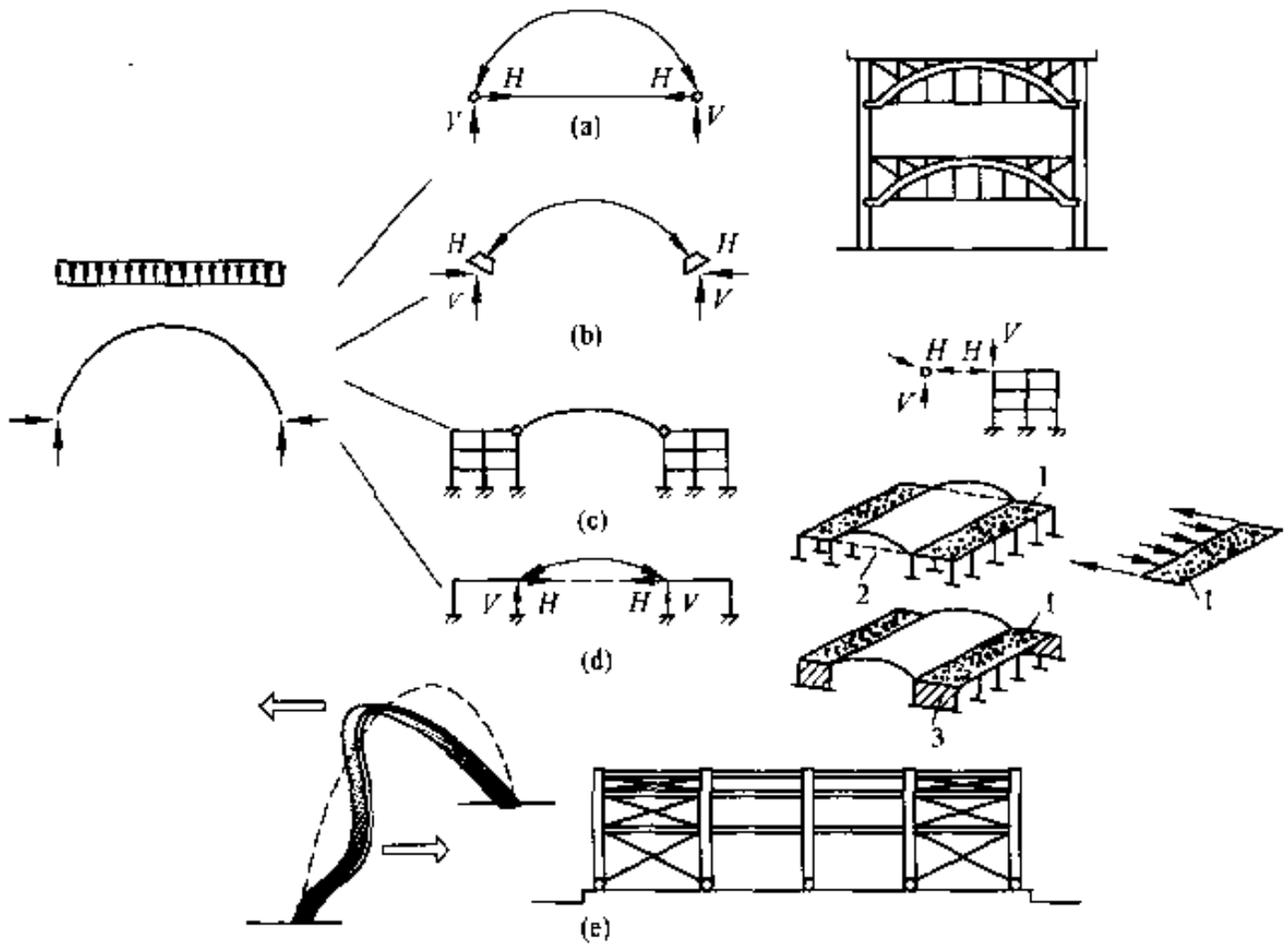


图 1－13　拱结构的支承方式

(a) 拉杆拱　(b) 落地拱　(c) 由框架结构支承的拱；

(d) 由水平屋盖支承的拱（1—水平屋盖　2—两侧拉杆　3—抗侧力结构）

(e) 拱的失稳和拱侧支撑措施

索结构是仅承受拉力的结构（图 1－12(b)）。作为屋面的索结构，一般由索网、边缘构件和支承构件三部分组成。索网（见图 1－14）有单曲面（呈圆筒形微凹面，用单层或双层拉索）、双曲面（呈凹形或凸形旋转面，也可用单层或双层拉索）和交叉双曲面（由两组曲率相反的拉索交叉形成，主拉索下凹为承重索，副拉索上凸为稳定索）三种类型。在结构概念设计时，如果采用索结构做屋面除选用合理的索网外，另一关键是它的支承处理。它通常用 3 种措施：(1) 用斜向牵索（图 1－14(a)、(b)）——虽简易有效但影响外观和使用效果；(2) 用封闭的圆形或马鞍形环梁和相应支柱（图 1－14(c)、(d)、(f)）——环梁内力可以自平衡；(3) 用对称的斜撑体系（图 1－14(e)）——要处理好对称斜撑底部基础的连接。

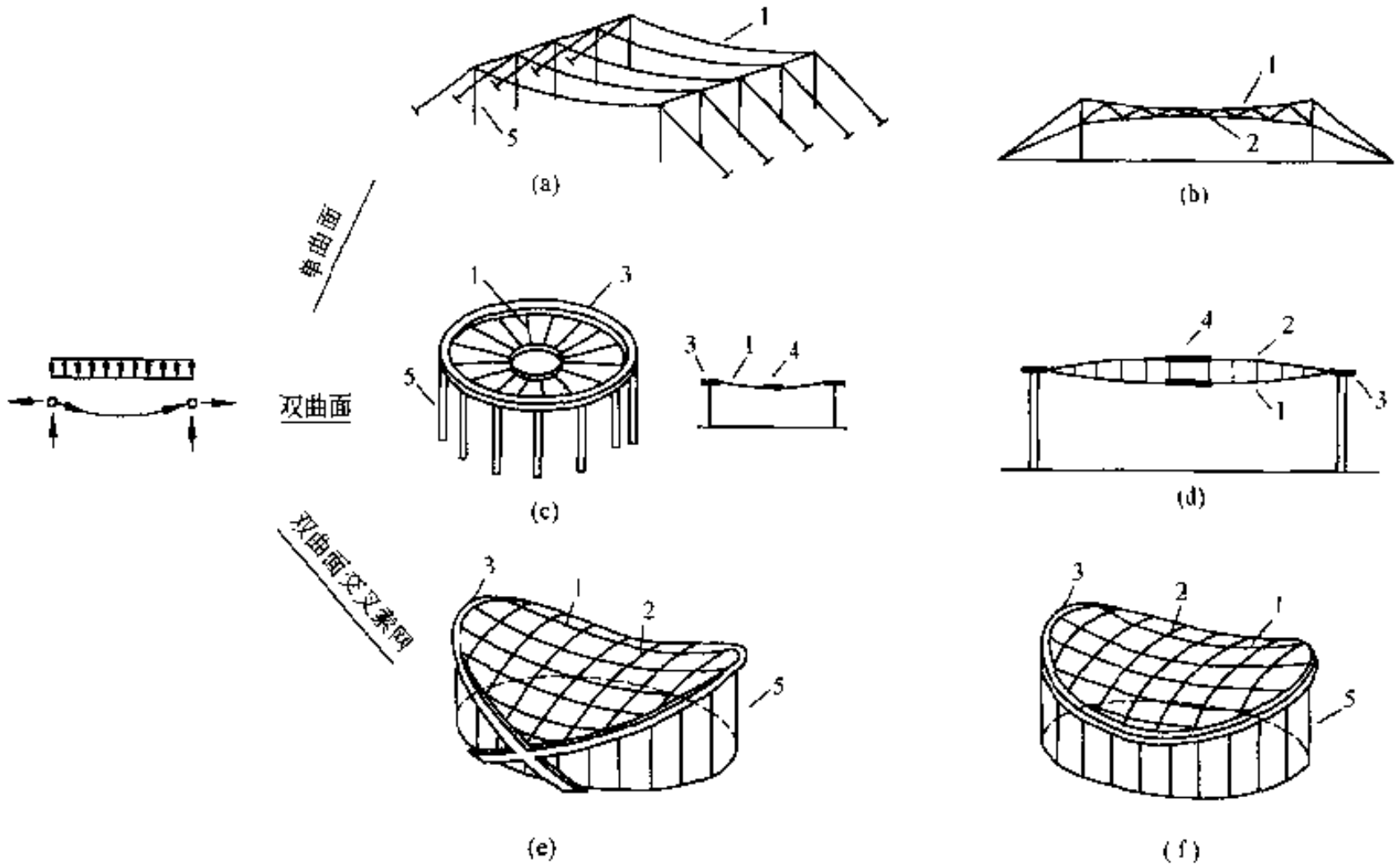


图 1－14　索结构类型

(a) 单曲面（无稳定索）(b) 单曲面（有稳定索）(c) 双曲面（无稳定索）(d) 双曲面（有稳定索）(e)、(f) 交叉双曲面

1—承重索　2—稳定索　3—边缘构件　4—中心拉环　5—支承立柱

索结构能跨越大跨度（40 m～150 m），可形成大空间，充分利用材料固有性能，施工简捷，造型新颖。钢索是柔性材料。索结构的刚度和稳定性较差，在水平风力作用下索屋面将产生风吸力，使屋盖出现被掀起或失稳和产生颤动的现象（图 1－15），因而往往需用稳定索。

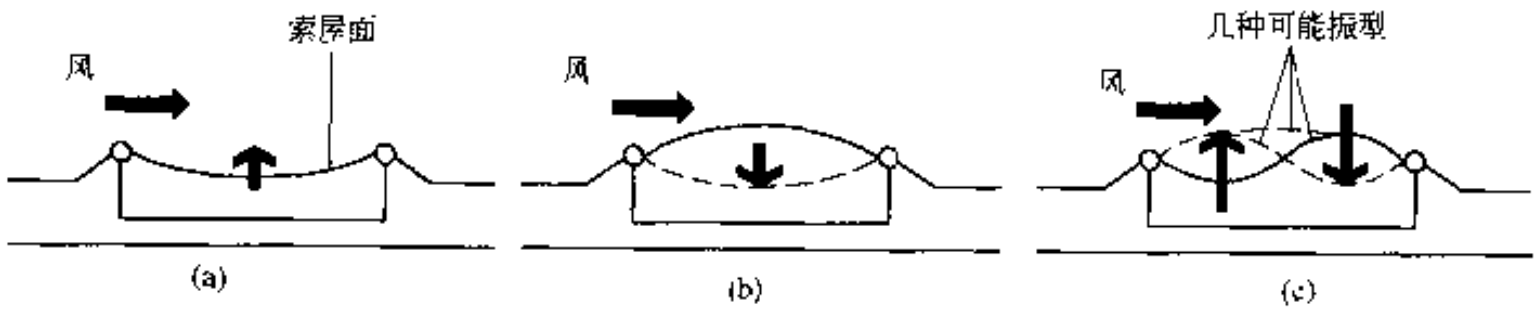


图 1－15　索屋面在水平风力下的影响

(a) 在水平风力下产生吸力　(b) 风力使屋盖上下颤动　(c) 风力使屋盖失稳

1.5.8　梁柱框架

框架是由梁、柱连接成能同时承受竖向和水平荷载的平面结构系统。它有以下特点：(1) 梁和柱间的连接为刚节点（有时也可做成铰节点，称铰接框架或排架）；(2) 梁端一般有负弯矩，每跨梁的弯矩符合规律（$|M_{跨中}| + 1/2\ [|M_{左端}| + |M_{右端}|] = M_{跨中,简支梁}$）。在荷载作用下梁受弯曲、剪切和压缩，但压缩忽略不计；(3) 柱在荷载作用下也受弯曲、剪切和压缩，但剪切可不计；(4) 设计框架时要注意它能否构成“几何不变体”、以及是静定结构还是超静定结构的问题；不允许采用“几何可变体”的框架，提倡选用超静定框架结构，因为它的承载力和刚度都比较大。

框架结构既可整体建造，也可用装配式成套构件组成，后者如图 1－16(a) 所示。不论整体建造还是预制装配，框架中的梁柱节点做法都是关键所在（图 1－16(b)、(c)）。

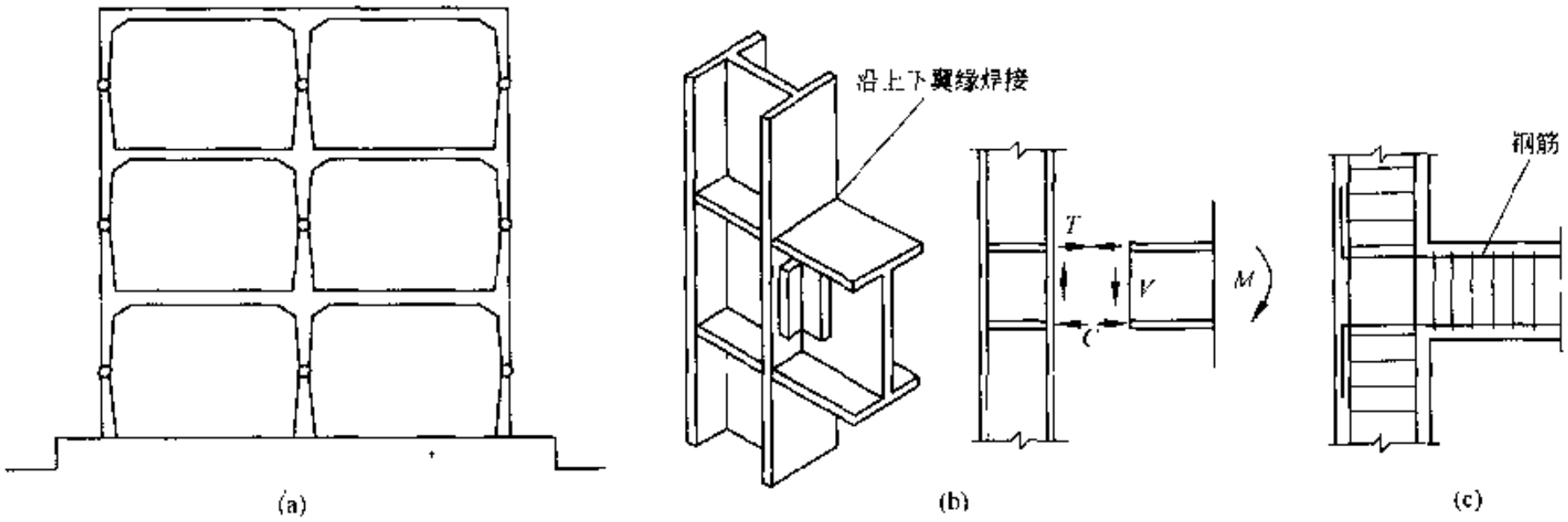


图 1－16　框架结构的节点

(a) 多层框架的成套构件连接　(b) 钢材节点　(c) 钢筋混凝土节点

在建筑结构中用框架作为主体结构的称为框架体系，它是结构概念设计中常用的一种结构体系。其优点是可使建筑平面布置灵活，形成大开间；缺点是侧向刚度小，侧移大，难以用它建造很高的建筑物。设计框架结构时应注意以下要点：

(1) 从建筑布置看，与框架柱高对应的是层高，与框架梁跨对应的是开间；从结构受力看，框架柱是压弯构件，框架梁是弯剪构件；所以在多层跨度较大的建筑物中，梁的截面往往大于柱的截面，顶层柱因承受的压力小有时处于受力不利状态；而在高层建筑物中，由于柱是主要的抗侧力构件，柱的截面往往大于梁的截面，底层柱因承受的弯矩大而处于受力不利状态。

(2) 设计框架结构时必须考虑竖向荷载和水平荷载（风荷载或水平地震作用，二者不同时发生）的组合，这时值得注意的是，由于水平荷载在向左、向右两个方向都可能发生，组合后柱、梁端内力都可能有较大增长，梁端还可能出现正弯矩；另外，因框架结构一般为多层多跨，有时还要考虑各层间竖向活荷载的最不利组合。

(3) 在考虑框架结构的承载力时，要注意做到“柱的强度大于梁”，“节点的强度大于构件”。前者为了避免柱的破坏先于梁的破坏，导致框架结构形成可变体系丧失整体稳定；后者为了避免梁柱节点的破坏先于其连接的构件，保证结构的整体性。对于钢筋混凝土框架结构来说，还要做到“抗剪强度大于抗弯强度”，以避免构件脆性失效。

(4) 设计框架结构时除确保承载力外，还要考虑在竖向荷载和水平荷载共同作用下由于梁、柱弯曲变形引起的侧向位移；在高层建筑结构中这种侧移往往是设计的控制因素。

1.5.9　平面桁架（含空腹桁架）和空间网架

在结构的水平分体系中有时采用以轴心受力杆组成的结构，它们一般有两类：平面桁架和空间网架。

水平方向设置的平面桁架可看成由工形截面梁演变来的：若将该梁截面中正应力较小的腹板挖去，组成由上下弦杆和斜腹杆连接的格构式结构，就是平面桁架。上下弦杆承受因弯曲引起的内压力和内拉力，相应于梁的翼缘；斜腹杆承受因剪切引起的斜拉力或斜压力，相应于梁的腹板。由于桁架的杆件都是全截面受力，材料强度得到充分利用，故桁架可比梁的跨度大得多（当跨度大于 15 m～18 m 时，常采用桁架）。理想桁架的特点是：(1) 所有结点都是铰结点；(2) 所有外力都施加在结点上；(3) 各杆的轴线都是直线且通过铰中心。理想桁架只受轴向力，称为主内力。但是工程实际与理想状态有所不同，如实际桁架中的结点为刚结点，杆件是连续的等，由此产生的附加内力称为次内力。一般桁架的次内力可忽略，大跨和特殊受力的桁架则不能忽略，这在结构概念设计应予以注意。

常用的平面桁架型式有平行弦、拱形、三角形等。它们在单位荷载作用下的杆件主内力图见图 1－17(a)、(b)、(c)。由图可见桁架的杆件布置对内力影响是很大的。其中以拱形桁架较为合理，但杆

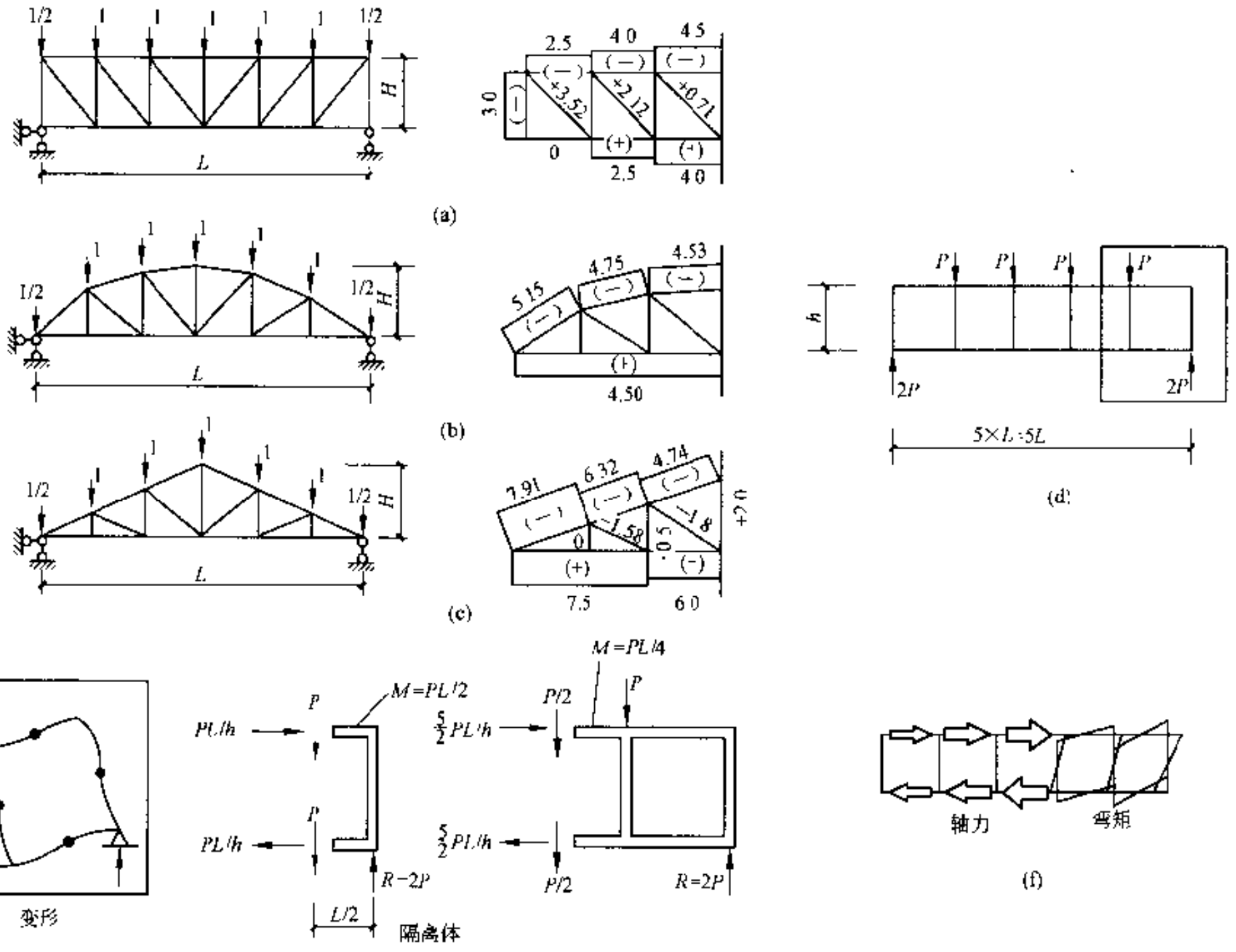


图 1－17　各种型式的平面桁架（$H/L=1/6$）

(a) 平行弦桁架　(b) 拱形桁架　(c) 三角形桁架　(d) 空腹桁架

(e) 空腹桁架变形和隔离体图　(f) 空腹桁架内力示意

件布置除合理承受荷载外还要考虑其他使用要求，如屋面防水、屋面板的布置等，要综合多种因素后方能确定。

平面桁架优点是跨度大、用料省、制作安装方便；缺点有：（1）节间有斜杆，不利于通过管道和设置门窗洞口；（2）侧向刚度小，平面外稳定性差；（3）高度较小，体型笨重。因而人们进一步发展了空腹桁架和空间网架。空腹桁架是平面桁架的特例。它仅由平行的上下弦和直腹杆组成，没有斜腹杆，因而在其空腹处可通过管道或设置门窗。图 1－17(d) 所示空腹桁架可按水平框架作近似解（取反弯点在各杆中点处）；它受力后的变形图和隔离体图如图 1－17(e)，求得各杆的轴力和弯矩示意于图 1－17(f) 中。可见空腹桁架各杆件除承受有轴向力外还承受弯矩。

空间网架是平面桁架向空间的演变。它要求平面上两个方向的桁架等高，在很大程度上改善平面桁架平面外稳定性差的弱点。空间网架既可做成将平面桁架在两个方向上正交或斜交的网架；也可做成上下弦各自联系成网格的，腹杆在两个方向上都起斜杆作用的网架；既可做成平板型平面网架也可做成折板形或壳形网架。

平板型网架在概念上像一块平板搁在四周柱列上或几个支承立柱上。前者如四边支承双向板，后者如四角支承双向板（图 1－9(d)、(e)、(f)）。图 1－18 表示四角支承网架的近似受力简图。图示网架任一方向沿总截面的弯矩分布是不均匀的。每个网格节间弦杆承受的弯矩 $M = S$（节间尺寸）$\times m_{平均}$（节间平均单位长度的弯矩值），并可按此弯矩近似地求得相应的上下弦内力 C（压）和 T（拉）。由于平板型网架的类型众多（如有交叉平面桁架体体系、角锥体系等），每个节点连接的杆件众多，以及支承柱的间距较大等原因，空间网架在概念设计时要注意的问题有：（1）选择合适的网格类型（参见图1－19）和杆件组成（以钢管为宜，也可用型钢）；（2）选择网架的节点做法（图1－20）；（3）注意网架与支承立柱的连接；对于跨度较大的网架，由于挠度较大和温度应力的影响，宜采用弧形支座或摇摆支座（图 1－20 (d)）。

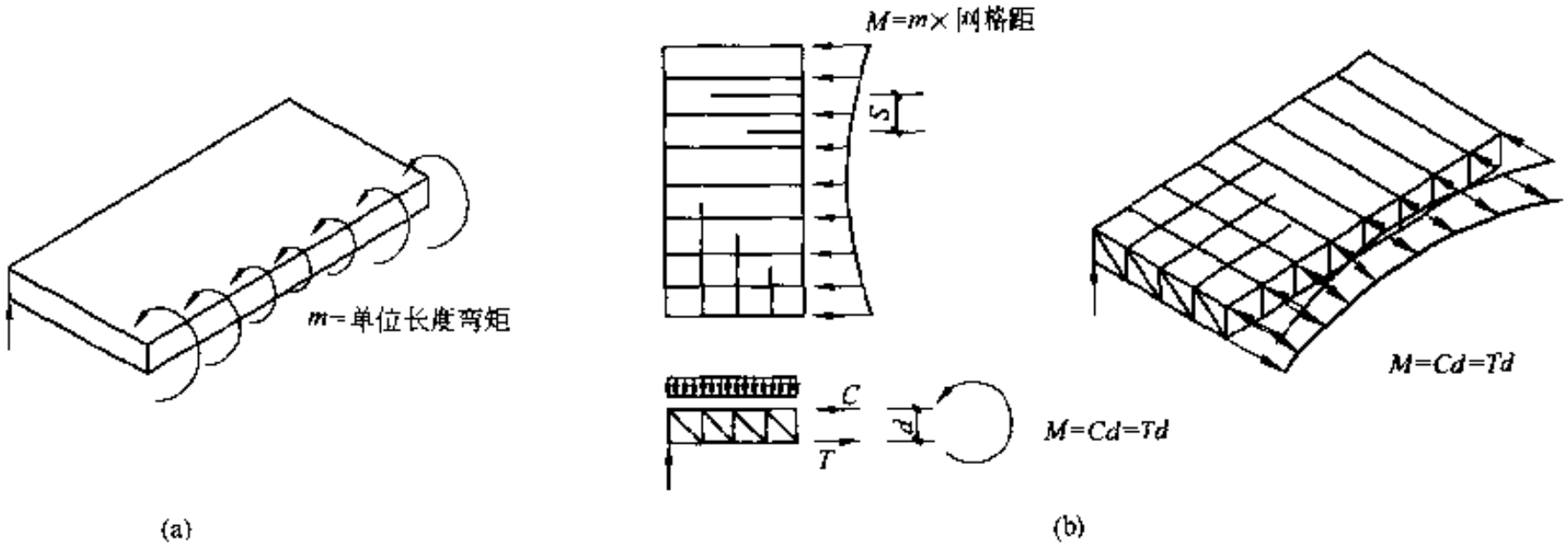


图 1－18　四角支承平板型网架近似受力分析

(a) 四角支承双向板的截面弯矩

(b) 四角支承网架的截面弯矩和截面内力 C、T

平板型网架的跨度 L 一般较大，其高跨比可取 1/13～1/10（$L<30$ m），1/16～1/12（$L=30\sim60$ m），1/20～1/14（$L>60$ m）。网架的挠度宜控制在 1/250 跨度内。

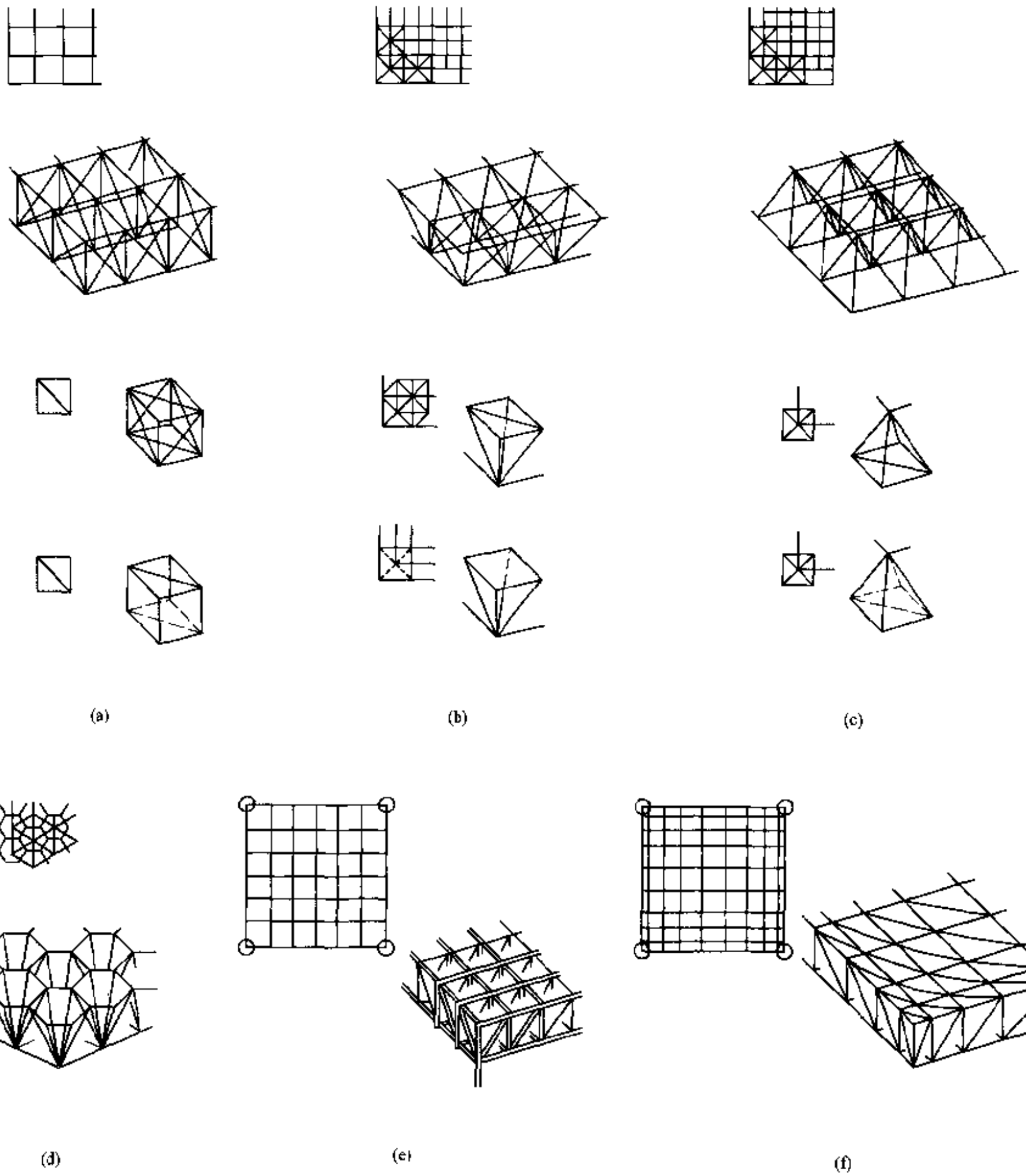


图 1-19　不同类型的网架

(a) 交叉平面桁架　(b) 四角锥网架　(c) 三角锥网架　(d)六角锥网架
(e) 等间距网格，变截面杆件做法　(f) 变间距网格，等截面杆件做法

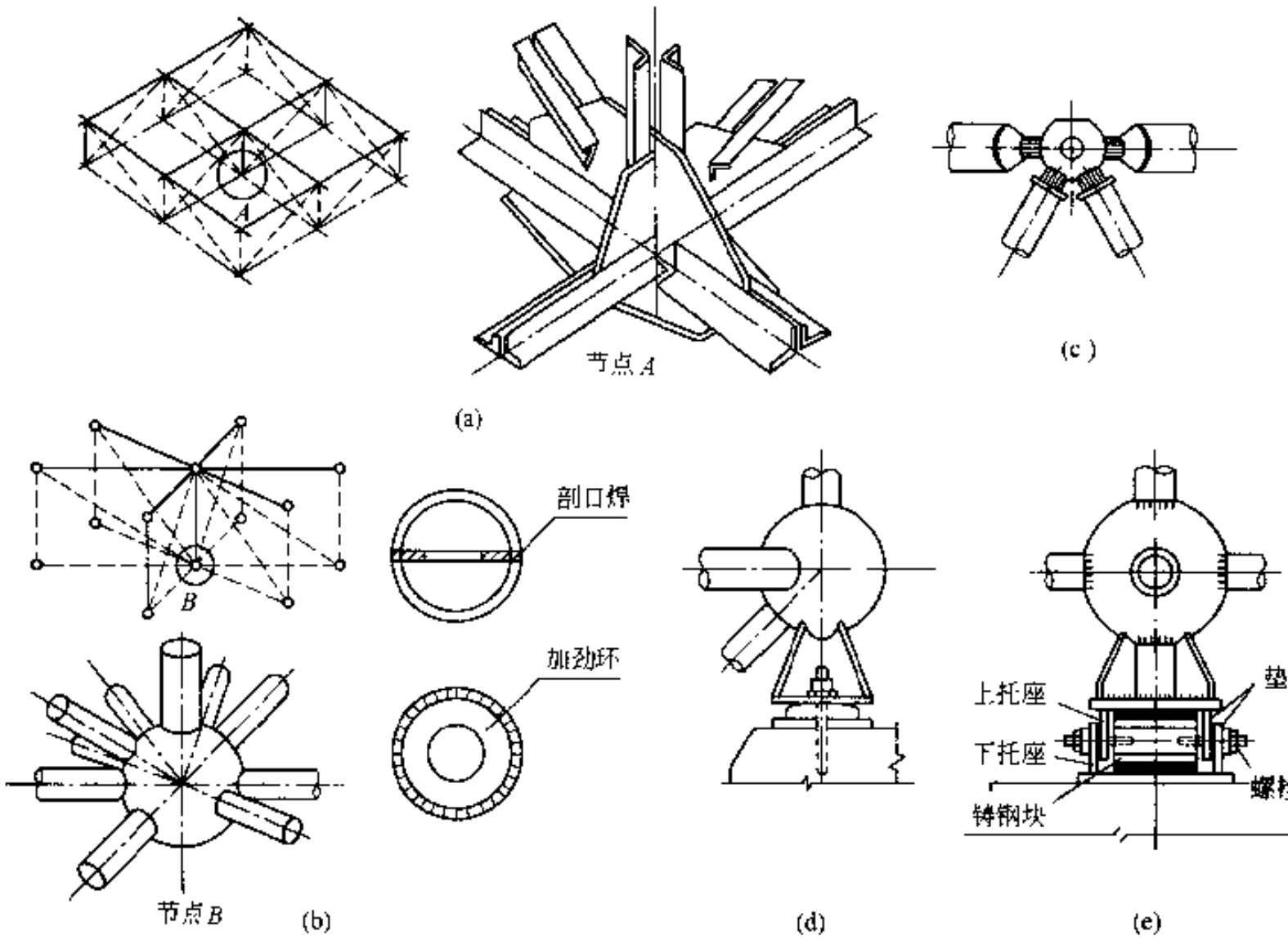


图 1-20 网架节点

(a) 焊接钢板节点 (b) 焊接球节点 (c) 螺栓节点

(d)、(e) 网架与支承立柱的连接做法

1.5.10 从对比中认识壳体结构

自然界存在着大量的壳体，如蛋壳、龟壳、贝壳、脑壳以及各种动植物的器官等等。它们的强度很高，但壳壁却既极薄又具有丰富的几何形状。这意味着神奇的自然，用最少的材料，为生物界做成大量可以自我保护的器官。人们正是从这里受到启示，发展了建筑工程中的壳体结构。下面从建筑结构件之间的比较来认识壳体结构的特点：

1. 有矩和无矩构件比较

图 1-21 所示为一方形框架和一圆环，均承受均匀水压 q，它们的边长、直径以及截面尺寸均相同。经计算，框架的最大弯矩为 $ql^2/12$，轴力为 $ql/2$，最大截面应力为 $55\,q/b$；而圆环的弯矩为 0，轴力为 $ql/2$，截面应力为 $5\,q/b$，与方形相比应力相差 10 倍。可见，无矩构件比有矩构件优越得多。

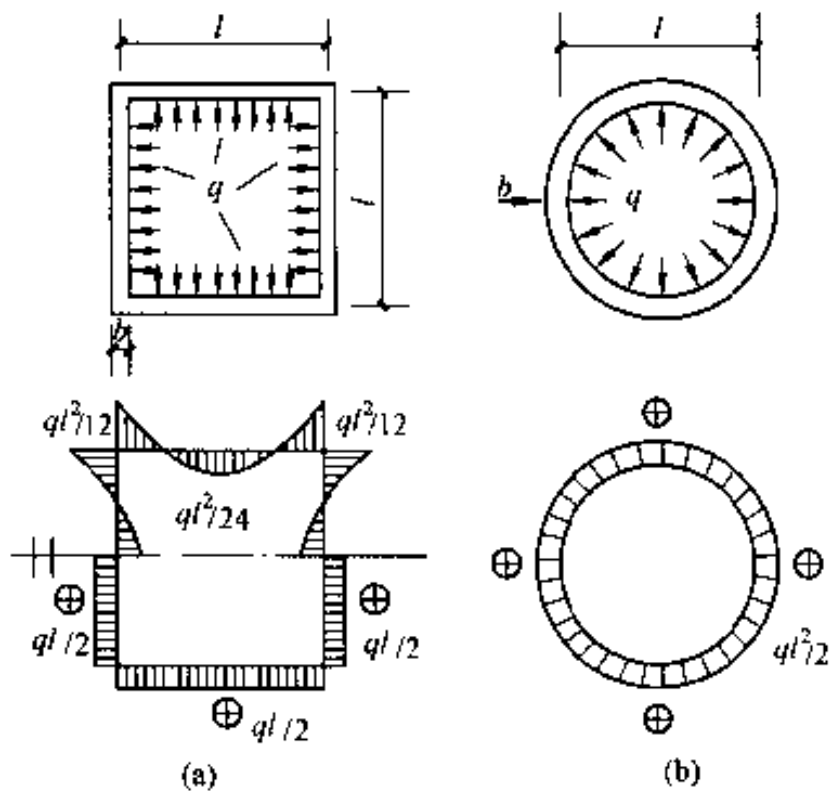


图 1-21 方形构件与圆形构件受力对比

(a) 方形框架 (b) 圆环 ($l = 10\,b$)

2. 平板与球壳比较

图 1－22 示一四边简支圆平板和一底部简支半圆球壳，均承受均布荷载 q，它们的半径 r 和厚度 h 均相同。经计算，圆平板中心承受弯矩 M 为 $0.188\,gr^2$，相应单位宽度应力为 $1.125\,gr^2/h^2$；而半圆球壳顶部沿壳面单位宽度上的法向力 N 为 $gr/2$，相应的应力为 $0.5gr/h$。如取 $r=30h$，则两者相差 $1.125gr^2/h^2 : 0.5gr/h = 2.25r/h = 67.50$ 倍。可见，壳体比平板要优越得多。

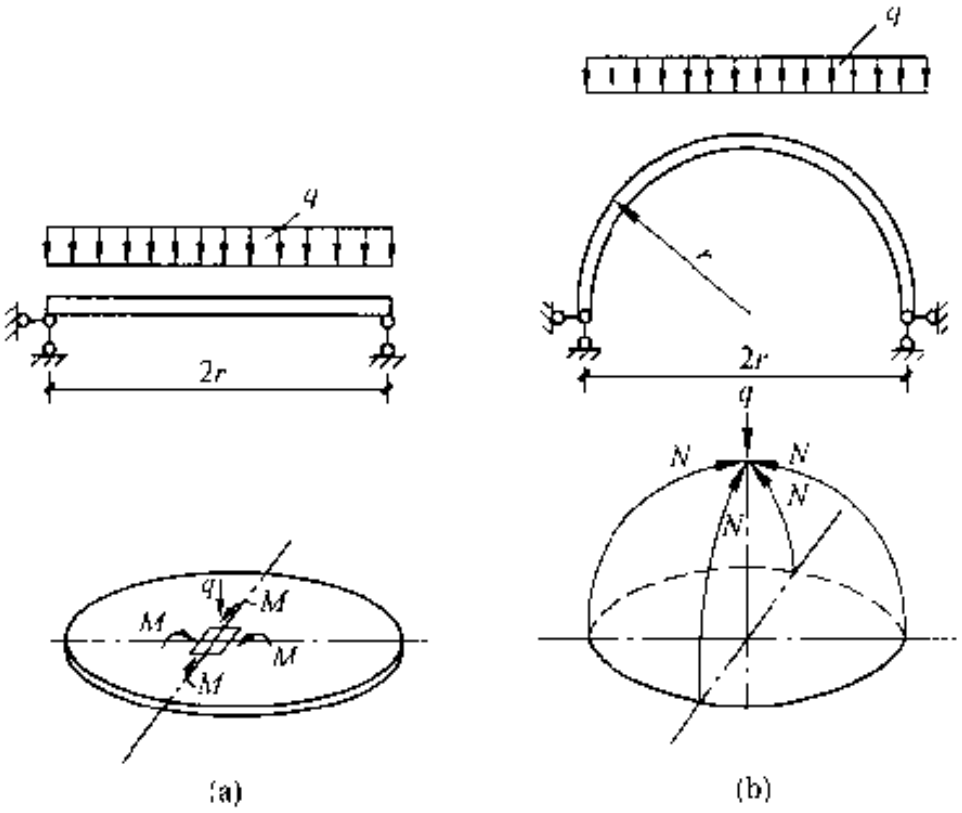


图 1－22　平板与球壳受力对比

(a) 四边简支圆平板　(b) 底部简支半圆球壳

3. 拱与壳比较

拱是平面结构，壳是空间结构。可以把球面壳看作由一组竖拱和一组水平圆环组成（图 1－23(a)）。如果在无矩状态中拱只有一种内力即轴向压力，那么壳则有两个方向的轴力（竖拱的和水平圆环的）。壳不仅在某个特定荷载下，而且在各种荷载下基本上处于无矩状态。此外，拱与壳的区别还可以从边界力的影响来说明：如在拱底加一对水平力 H（图 1－23(b)），其传力路线只有一种，即由一端经拱顶传至另端，全拱受弯曲，拱顶弯矩值最大；如在球面壳底部加一圈水平力 H（图 1－23(c)），其传力路线有二，既可沿竖拱传也可经水平圆环传，在沿竖拱传递引起弯曲时水平圆环能起阻止作用。其结果是只在近壳体边缘附近局部范围内竖拱受弯曲，很快衰减。可见，空间的壳和平面的拱相比，有很大优越性。

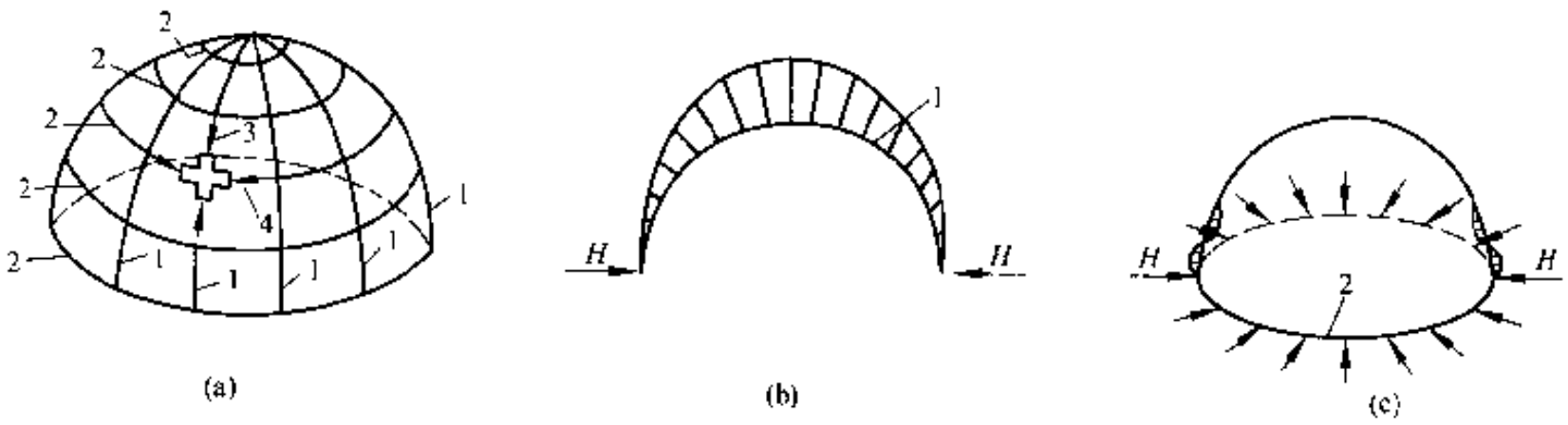


图 1－23　拱与壳受力对比

(a) 半圆球壳　(b) 底部有 H 时拱的弯矩图　(c) 底部有 H 时球壳的弯矩图

1—竖拱　2—水平圆环　3—经向内力　4—纬（环）向内力

因此，壳体结构是一种薄壁空间曲面结构，在一般荷载下可设计成使壳面主要处于无矩（也称薄膜）状态，因而受力性能好，刚度大，自重轻，材料省，可以覆盖大跨度空间，形成新颖美观的建筑造型。但其缺点是：(1) 一般用钢筋混凝土成型，模板制作较困难，施工费用较高（近来发展有用钢丝网模具成型、柔模喷涂成型、柔模气压成型、地面现浇整体吊装等方法）；(2) 有些壳体结构（如球壳、扁壳）占用建筑空间太多，对保温不利，且有回声现象；(3) 由于薄壳是以受压力为主的构件，当跨度很大厚跨比减小时（有的壳体结构厚跨比可有 1/1500，甚至更小），稳定问题十分突出。

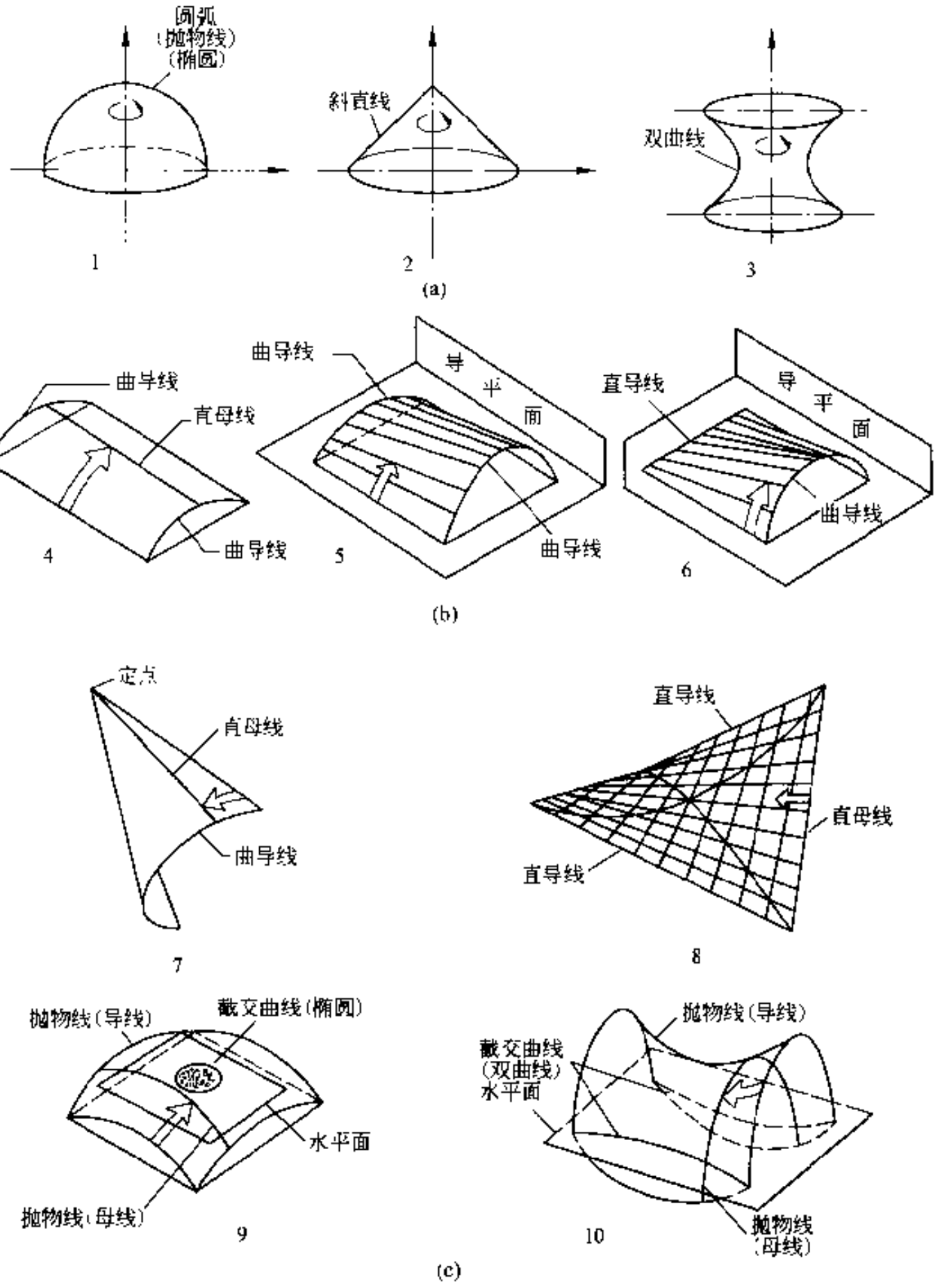


图 1-24 壳体结构的曲面形式

(a) 旋转曲面 (b) 直纹曲面 (c) 平移曲面

1—球壳 2—圆锥壳 3—双曲面壳 4—柱面(筒)壳 5 柱面壳

6—劈锥壳 7—锥形壳 8—扭壳 9—双曲扁壳 10—双曲抛物面壳

壳体结构的曲面形式多种多样，基本上有旋转曲面、直纹曲面和平移曲面三类，见图 1-24。

壳体结构的经典计算理论在 19 世纪末 20 世纪初开始形成，至今已很成熟，但由于涉及高阶偏微分方程求解，能够用经典方法解决计算问题的仅限于一些几何形状、边界条件及荷载都较为简单的特殊情况。一般情况下求解须借助于用有限元等数值方法，或针对不同的具体情况引人近似简化的工程分析(见第 4 章实例)，或甚至可采用模拟试验的方法（见第 2 章实例)。

壳体结构今后的发展，在造型上从单一曲面到多种曲面的组合（图 1-25)；在材料上从钢筋混凝

土结构到用钢管及型钢组成的钢网壳结构；在结构体系上将壳体与悬索等其他结构组合（见本章表 1－2)等，已在建筑工程中实现，它们还将不断发展。关于壳体结构的一些理论问题，如地震作用和风振问题，自由壳面形状的制定和计算问题，薄壁混凝土构件的稳定问题、徐变问题等都是有待解决的复杂问题。

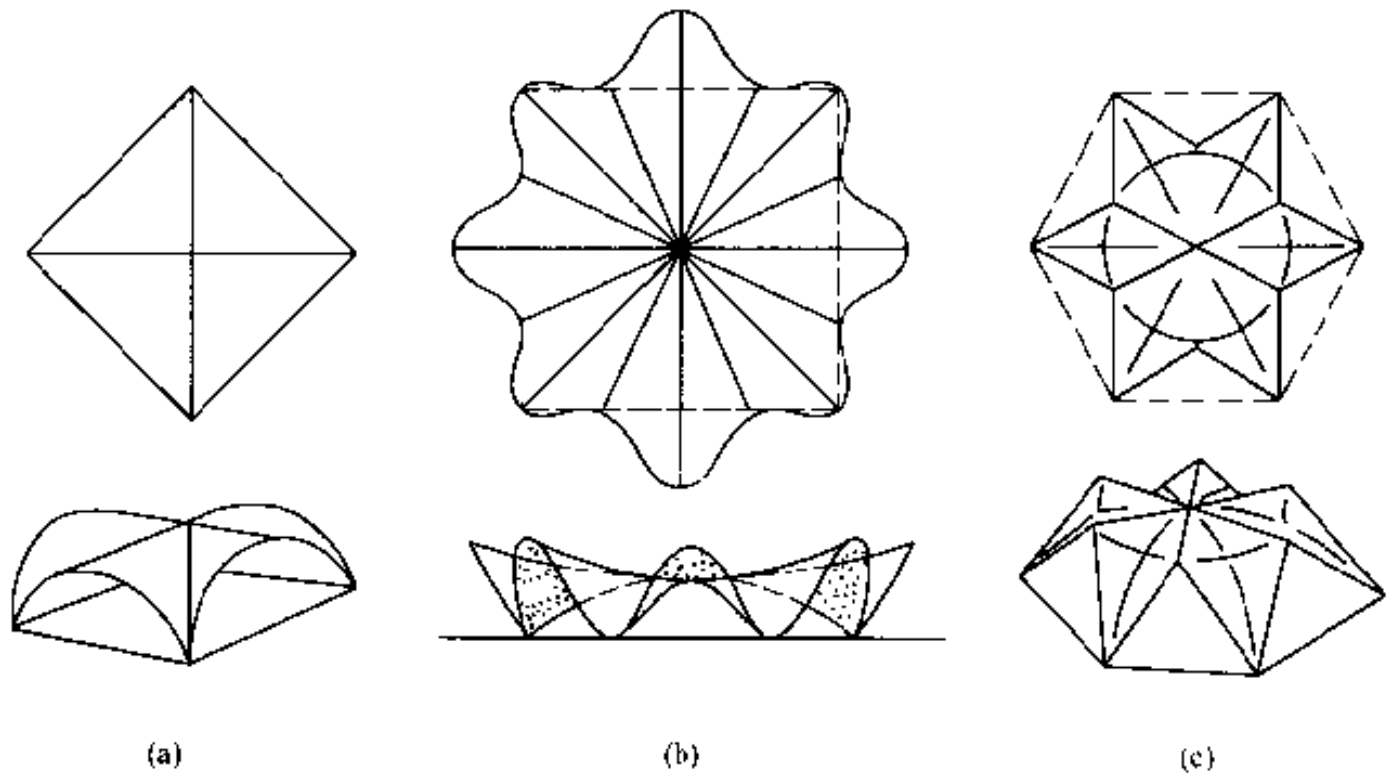


图 1－25　壳体的曲面组合示意

1.5.11　折板结构和幕结构

折板结构和幕结构与壳体结构同属薄壁空间结构，后者由曲面组成，前者由平板组成。壳体结构以其曲面的空间刚度保证结构刚性，折板和幕结构则以折板组成的空间刚度保证结构刚性。

1. 折板结构

V 形折板结构（图 1－26(a)）多用于屋盖，其跨度 L 与波长 B 之比 一般在 5 以上，矢跨比 1/18～1/10，跨度在 24 m 以内。在屋盖荷载作用下，折板的纵向可按 V 形截面梁估算，折板的横向则按简支板（当折板预制拼装时）或多跨连续板（当折板整体制成时）作内力分析。折板的跨间或跨端要设置横隔构件以保持外形，折板结构的两个端部要设置拉杆以保证整个结构成为几何不变体系。

多边折板由板、边梁、横隔构件组成（图 1～26(b)），它可以是单波或多波的，单跨或多跨的。多边折板中顶板宽度宜为（0.25～0.4）倍波长，波长 l_2 不应大于 12m，跨度 l_1 可达 27m 或更大，折板倾角不宜大于 30°。多边折板的内力分析类似 V 形折板。

2. 幕结构

幕结构是折板结构中应用较广的一种，既可用作屋盖也可用作楼盖。它由整体联系的三角形、梯形、矩形薄板组成（图 1－27(a)），顶板宽（0.4～0.5）l，矢高（1/12～1/8）l，跨度 8 m～10 m，幕顶支承在柱上，有无柱帽视幕顶荷载而定。幕结构的内力分析：矩形平板按双向板，梯形板按单向板，三角形板按三角形简支或连续板估算；此外还要作折板的整体作用估算，估算时考虑每个幕结构是一个四角支承双向板，板跨取柱间距减柱帽宽（l_1—b_1）或（l_2—b_2），幕结构的高度取上下水平板的中距 f_0（见图 1－27(b)、(c)）。

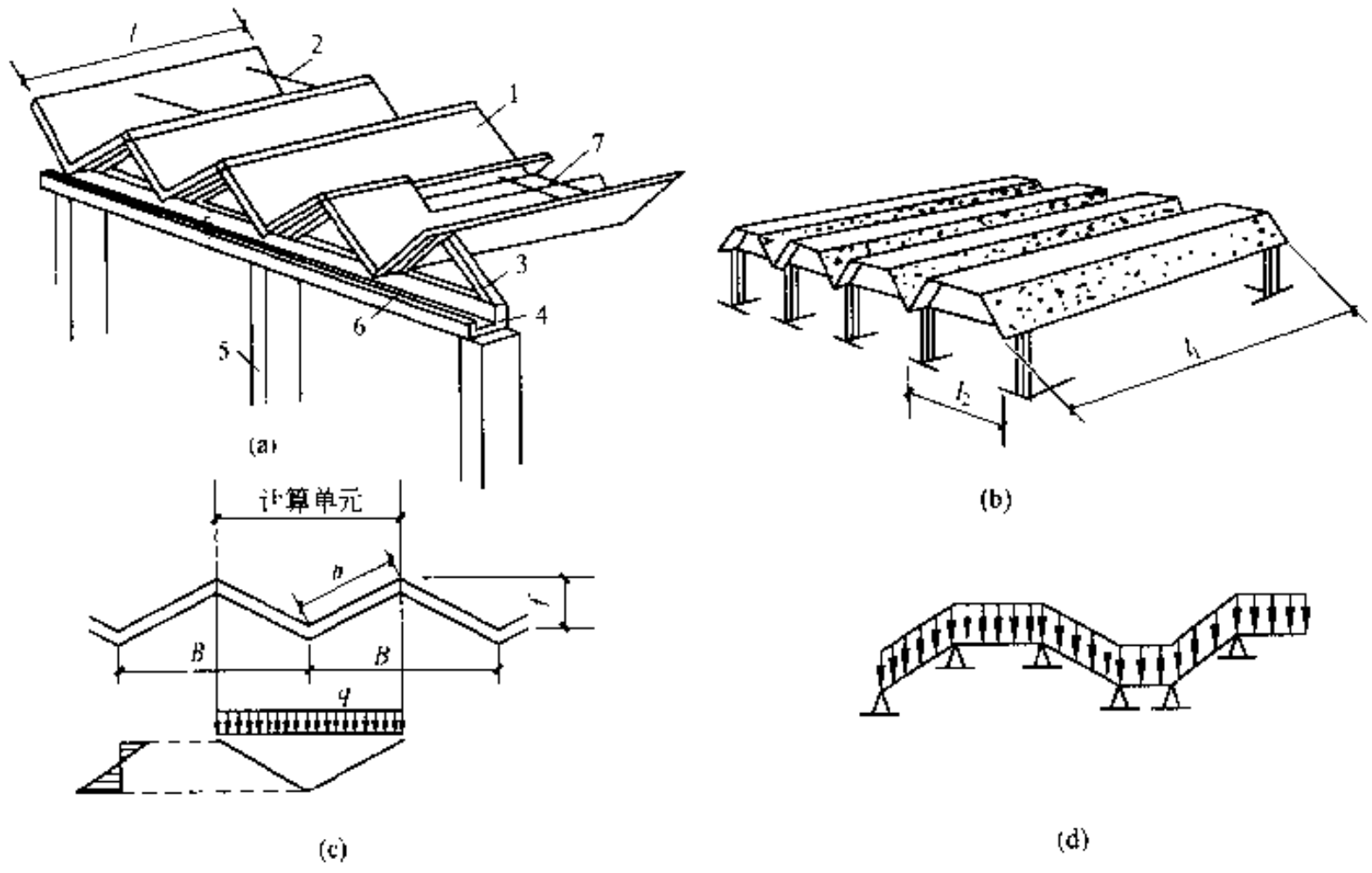


图 1-26 V 形折板和多边折板

(a) V 形折板屋盖 (b) 多边折板屋盖 (c) V 形折板计算单元 (d) 多边折板横向计算简图

1—折板 2—拉杆 3—三角架 4—托梁 5—支承柱 6—天沟 7—天窗

图 1-27

(a) 单跨幕结构（1—幕板 2—边梁） (b) 多跨有柱帽幕结构 (c) 幕结构整体作用时的计算简图

1.5.12　帐篷、网索和充气结构

帐篷、网索和充气结构都是由薄膜、钢或其他金属网索、或其复合物组成的柔性面结构。其共同特点是只能承受拉力，都对空气动力效应很敏感。历史上最早的帐篷是游牧民族用兽皮做成的。日常生活中可以见到许多网索和充气结构的实例，如蜘蛛网、肥皂泡、足球、轮胎就是典型。在近现代建筑中采用帐篷、网索和充气结构却是 17 世纪以后的事。18 世纪中国发明的雨伞传入英国成为普遍的防雨用具后，就发展了将帐篷绷紧在钢拱架外面的帐篷结构。在欧洲，用它做成的教室、运动场所、野地医院……成为当时广泛采用的建筑体系，称“Perma System”。第二次世界大战时需要大量临时建筑，帐篷、网索和充气结构才得到较大发展。其中 1970 年大阪国际博览会上的美国馆，是平面尺寸为 140 m × 83.5 m 的充气结构，1972 年建成的慕尼黑奥林匹克体育中心是现代网索结构的代表作。

1. 帐篷结构

帐篷结构的基本概念可从拉紧手帕实例（图 1－28(a)）中看出：若用手绷紧手帕的两对角，它的另两对角必然耷下；这时若在另两对角施加力，必然是一对向下的力，这就使手帕完全绷紧并呈马鞍形曲面，此曲面上所有纤维都受拉伸（图 1－28(d)）。实际帐篷结构的单元如图 1－28(b) 所示的 $ADCE$。其中 A、C 是一对支承桅杆，A、C 两点是篷面的最高点。它们的中点 B 是 AC 曲线上的最低点，又是 DE 曲线上的最高点。如果 A 和 C 处所受的力是由桅杆两侧传来的向上的拉力 T_1（图 1－28(d)）的话，那么篷面上 D 和 E 处所受的力必须是向下的拉力 T_2（图 1－28(d)），才能使篷面各点都处于双向受拉状态，这时该帐篷才能承受作用在篷面上的荷载 P[①]。帐篷结构的其他型式如图 1－28(e)、(f)、(g) 所示。不论什么型式，篷面的双向曲率都不能过小，曲面不能过于平缓，因为这意味着帐篷能承受的荷载 P 很小。另外还要注意的是篷膜与桅杆的联系以及篷膜边缘的处理：若篷膜直接支承在桅杆顶部，就要加设加强的曲顶盖以防篷膜发生冲剪破坏（图 1－28(h)）；若篷膜是从桅杆顶端吊下来的，则应在篷膜周围设置钢缆环，以便将桅杆承受的力分配给篷膜或网索（图 1－28(i)）；同理，在篷膜的边缘处也应设法予以加强（图 1－28(j)）。

2. 网索结构

网索结构的基本概念同帐篷结构，因为网索是篷膜的特例，不过是用双向正交的钢缆来代替篷膜。

3. 充气结构

充气结构的基本概念有所不同，它是在封闭的薄膜内充塞压缩空气后形成。它有两大类：气承式和气囊式。气承式结构是用单层薄膜作为屋面和外墙，将其周边锚固在圈梁或地梁上如图 1－29(a) 所示，薄膜在充气后承受着内拉力；当这种结构要跨越大跨度屋面时，为了减小薄膜内拉力，在薄膜上面可设置钢索网。气承式结构的室内气压要略大于室外气压，大的程度是既要保证在任何室外荷载（荷载的内涵同上述帐篷结构）作用下都不会使薄膜受压，又不会使在室内活动的人们感到不适。所以气承式结构是一个低压包而不是一个高压球。气囊式结构是将空气充入由薄膜制成的气囊，形成柱、梁、拱、壳等构件，再将这些构件连接组合而成的结构，如图 1－29（b）所示；气囊中的气压为室外气压的 2～7 倍，所以它是一种高压体系。

---

① 作用在篷面上的荷载有篷面及其构造层自重、风压力和风吸力，雪荷载和施工荷载等。向下的竖向荷载使一个方向的纤维所受的力增加，另一方向纤维所受的力减小。

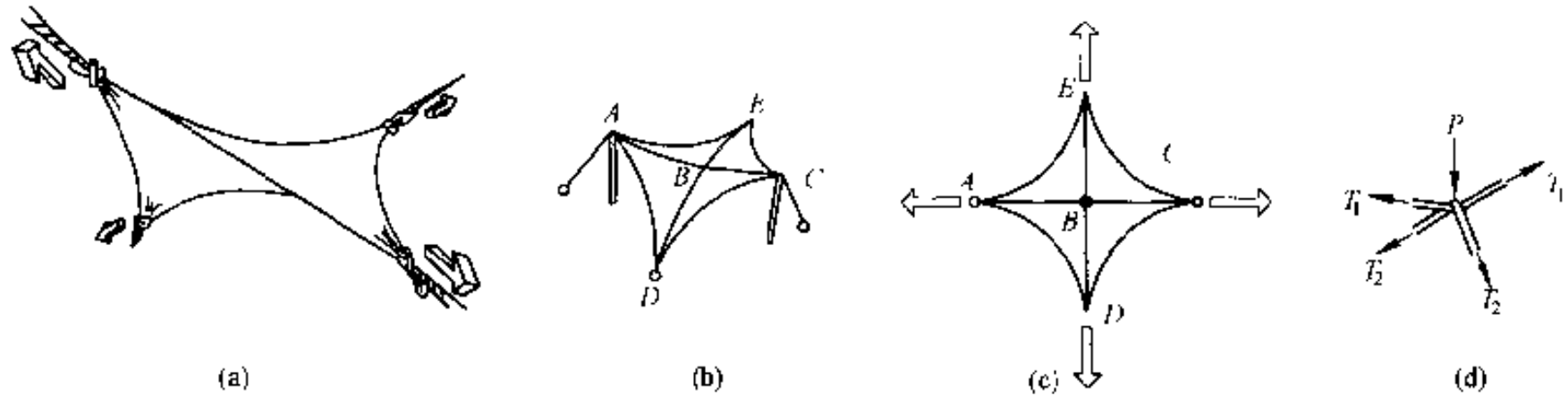


图 1-28 帐篷结构受力概念

(a) 手帕受力示意 (b) 帐篷结构单元 (c) 帐篷单元平面 (d) 帐篷纤维受力示意

(e)、(f)、(g) 不同型式的帐篷结构 (h)、(i)、(j) 帐篷结构构造上应注意的地方

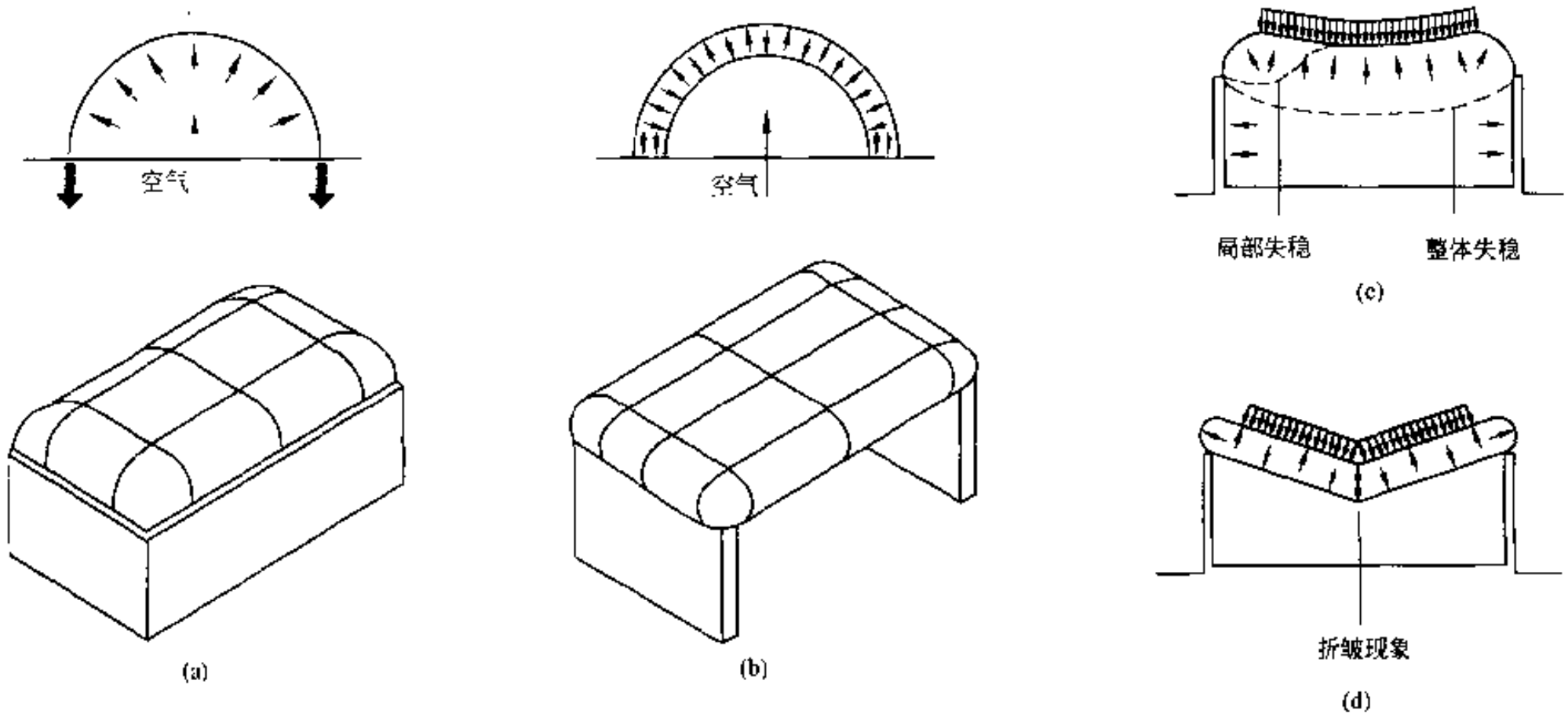


图 1-29 充气结构受力概念

(a) 气承式结构 (b) 气囊式结构 (c) 气承式结构的失稳现象 (d) 气囊式结构的失稳现象

气承式结构在外荷载作用下既可能发生局部失稳，也可能发生整体的突然下陷，如图 1－29(c)。气囊式结构在外荷载作用下可能发生折皱式破坏，如图 1－29(d) 所示；防止这种破坏的措施是加大充气的内压。

4. 常用的薄膜材料

帐篷、网索、充气结构中的薄膜常用涂有聚氯乙烯的聚脂纤维、涂有聚四氟乙烯的玻璃纤维或涂有硅树脂的玻璃纤维做成。聚脂纤维强度高但易老化。聚氯乙烯的价格不贵，耐火、易粘合但面层易退色、易沾油污，寿命约为 10 年左右。近年发展的硅树脂玻璃纤维有较好的耐久性，易于粘合，但价格较高。

1.5.13　结构受力、变形的相对性

结构概念设计中常遇到“刚度相对大小”、“变形相对主次”、“结构体系是基本的还是附属的”等问题。下面先以最简单的交叉梁楼盖为例说明“结构受力相对性”的基本概念，再加以延伸。

1. 结构受力的相对性

设一 $2a \times 2b$（$b=1.2a$）的四格交叉梁系，梁截面 $b_1 \times h_1$，如图 1－30(a)，用结构力学的力法算得

$M_A = 0.185qab^2 = 0.266qa^3$，相当于 A 梁跨度中部作用有集中力

$$P = 0.44qa^2;$$

$M_B = 0.315qa^2 b = 0.378qa^3$，相当于 B 梁跨度中部作用有集中力

$$P = 0.76qa^2;$$

两根梁承受的荷载差别并不甚大。

另假设上述四格交叉梁系的 B 梁线刚度 $E_B I_B/2a$ 为 A 梁线刚度 $E_A I_A/2b$ 的 8 倍，如图 1－30(b)

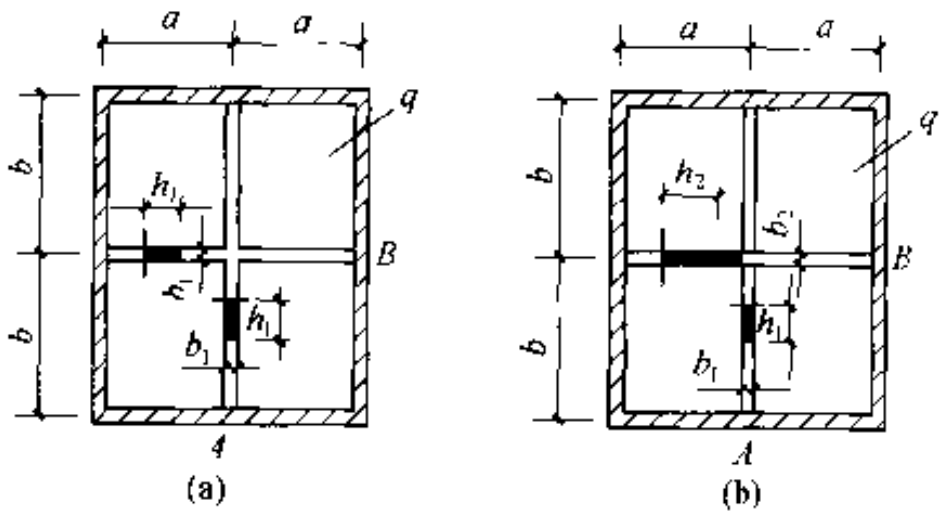


图 1－30　不同梁系示意

(a) 交叉梁系　(b) 次主梁系

(q 为单位面积上的荷载)

即

$$(E_b I_B/2a) = 8(E_A I_A/2b), \text{或 } i_B : i_A = 8$$

则 $E_A I_A = 0.15 E_B I_B$，即 A 梁的截面抗弯刚度为 B 梁的 0.15 倍（B 梁截面 $b_2 \times h_2$）。同理可用力法求得 $M_A = 0.0576qa^3$，$M_B = 0.552qa^3$，相当于 A 梁跨度中部作用有集中力 $P = 0.096qa^2$，B 梁跨度中部作用有集中力 $P = 1.104qa^2$，即 92% 的楼面荷载由 B 梁承受。可见，当两个方向交叉梁的线刚度之比为 8 左右时，线刚度大的梁几乎承受了楼面的全部荷载，而线刚度小的梁刚则几乎不承受荷载。这里，引进了反映线形构件（梁或柱）抗弯刚度的参数——**线刚度** EI/l。它由截面抗弯刚度 EI 和构件长度 l 两个参数组成。显然，EI 只能反映截面抗弯刚度不能代表构件抗弯刚度；而 EI/l 却能较好地反映构件的抗弯刚度，因为同截面构件长度愈大的梁，它的抗弯刚度愈小，构件的抗弯刚度与 l 成反比。这里，又引进了线刚度比（$i_B : i_A$）的概念，指的是构件之间线刚度的比值。这是在结构分析中常遇到的概念。假

若结构中某一构件的线刚度比其他构件的线刚度大得多（例如，$i_B : i_A \geqslant n$，若 $n=8$），则往往可假设该构件的线刚度为无限大；反之，如果某一构件的线刚度比其他构件小很多，则可把它假设为零。在正交交叉梁系中，若两个方向梁的线刚度相近，楼面荷载为双向传递；若线刚度相差悬殊，则楼面荷载沿线刚度大的方向单向传递。常用楼盖设计中的次主梁系是交叉梁系的特例，这里的次梁若按一个方向的交叉梁设计，它的线刚度应该比和它正交的主梁的线刚度要小得多。

2. 结构变形相对性

（1）上述概念可借用来叙述结构中主要变形和次要变形的关系。如：

计算梁的挠度和框架的侧移时，经常略去剪力和轴力产生的变形，只考虑弯矩引起的变形；忽略前者，实质上就是假设它们由剪力和轴力引起的位移比由弯矩引起的位移小得多；

在局部平衡力系作用下，忽略远处的微小变形，只取荷载附近的局部结构进行计算；

在框架的侧移计算中，在水平荷载下往往忽略框架结点转角引起的侧移，因为结点侧移是主要位移，结点转角是次要位移。

（2）上述概念还可借用来叙述结构体系主体部分和从属部分的关系。当荷载只施加在主体部分时，可单独取出主体部分计算内力，认为从属部分内力为零。当荷载只施加在从属部分时，可将主体部分视作从属部分的支承，先取从属部分计算支座反力和内力，然后将有关的支座反力反其方向视作主体部分的荷载，来计算主体部分的内力。

由此可见，在考虑结构中各部分受力和变形的相对状况后，可以使结构概念设计中的估算工作大大简化。

1.5.14 结构构件的弯曲变形示意图

在结构概念设计阶段，设计人员往往要判断结构构件哪一面受拉、哪一面受压，以便估计钢筋放在构件的哪一侧，有时更要定性地估计结构受力后的挠度和侧移情况，以及反弯点的位置。为此，懂得一些绘制结构构件受力后的弯曲变形示意图的规律是很有用的。

1. 弯曲变形图的规律

一般说来，结构构件受力后的弯曲变形示意图有以下几点规律：

（1）由于 $\frac{M}{EI}=\frac{1}{\rho}=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2}$，因此可以根据弯矩图直接画出构件的弯曲变形示意图。在弯矩图无突变的情况下，弯曲变形图为一连续曲线，不存在转折。其中：

M 值大的区段，曲率半径 ρ 小，变形曲线的曲率大；

M 值小的区段，曲率半径 ρ 大，变形曲线的曲率小；

$M=0$ 的区段，曲率半径 ρ 等于∞，变形曲线为直线；

$+M$ 值的区段，变形曲线为凹形；$-M$ 值的区段，变形曲线为凸形。显然，外鼓的一侧受拉，内凹的一侧受压（见图 1-31(a)）。

（2）对于一端为固定端的悬臂梁或下端为固定端的悬臂柱，无论在与构件长度方向相垂直的集中荷载作用下还是在均布荷载作用下，变形曲线均凸向荷载作用方向，固定端处的曲线与原构件轴线相切，

如图 1－31(a) 所示。推而广之，凡固定端支承点处，变形曲线的切线必定与固定端面相垂直。

(3) 凡连续不动铰支承点处，两侧变形曲线的切线斜率不变，如图 1－31(b) 所示。

(4) 凡不动铰支承点和固定端支承点处，在水平和竖向方向上均不得有任何位移；而滚动支承点处在沿滚动方向可以有微小位移，如图 1－31(c) 所示。

(5) 凡刚结点处，与该结点连接的杆件可以任意转动，但它们之间的夹角不变（图 1－31(d)）；刚结点在荷载或其他作用力作用下，可能有位移，也可能没有。

(6) 凡铰结点处，与该结点连接的杆件的夹角可以作任意变化，但由铰结点引出的变形曲线段为直线（图 1－31(e)）；铰结点在荷载或其他作用力作用下，可能有位移，也可能没有。

(7) 凡反弯点处（$M=0$），在变形曲线上为一拐点，连接拐点的变形曲线为一连续曲线；反弯点在荷载或其他作用力作用下有位移，如图 1－31(f)。

(8) 绘制弯曲变形示意图时，一般不考虑轴向变形，因而杆件的长度可以认为是不变的。

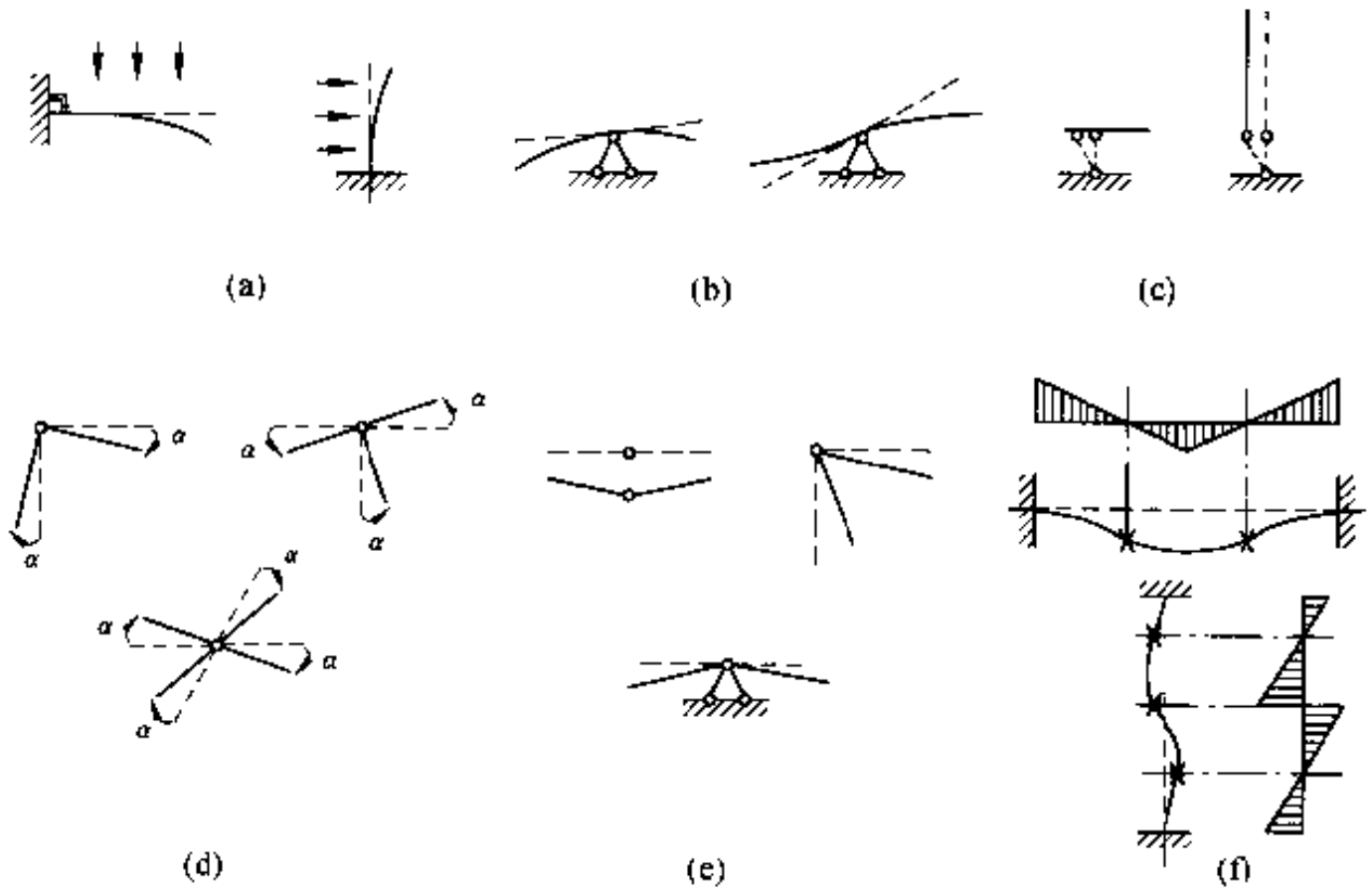


图 1－31　弯曲变形图的一般规律

(a) 固定端支承　(b) 连续不动铰支承　(c) 滚动铰支承　(d) 刚结点　(e) 铰结点　(f) 反弯点

——杆件变形曲线　----切线或原杆件位置　×反弯点

2. 绘制弯曲变形示意图的步骤

绘制弯曲变形示意图步骤如下：

(1) 画出构件在荷载或其他作用力作用下的弯矩示意图；

(2) 根据弯矩示意图和上述规律作变形示意图；作图时，一般从直接受载的构件画起，按顺序对它连接的构件作图，最后画到支承处；

(3) 按照弯曲变形图的规律，对照弯矩示意图进行全面检查。

图 1－32 举例表示悬臂梁、连续梁、单跨框架、两跨排架、两层三跨框架在荷载作用下的弯曲变形示意图。

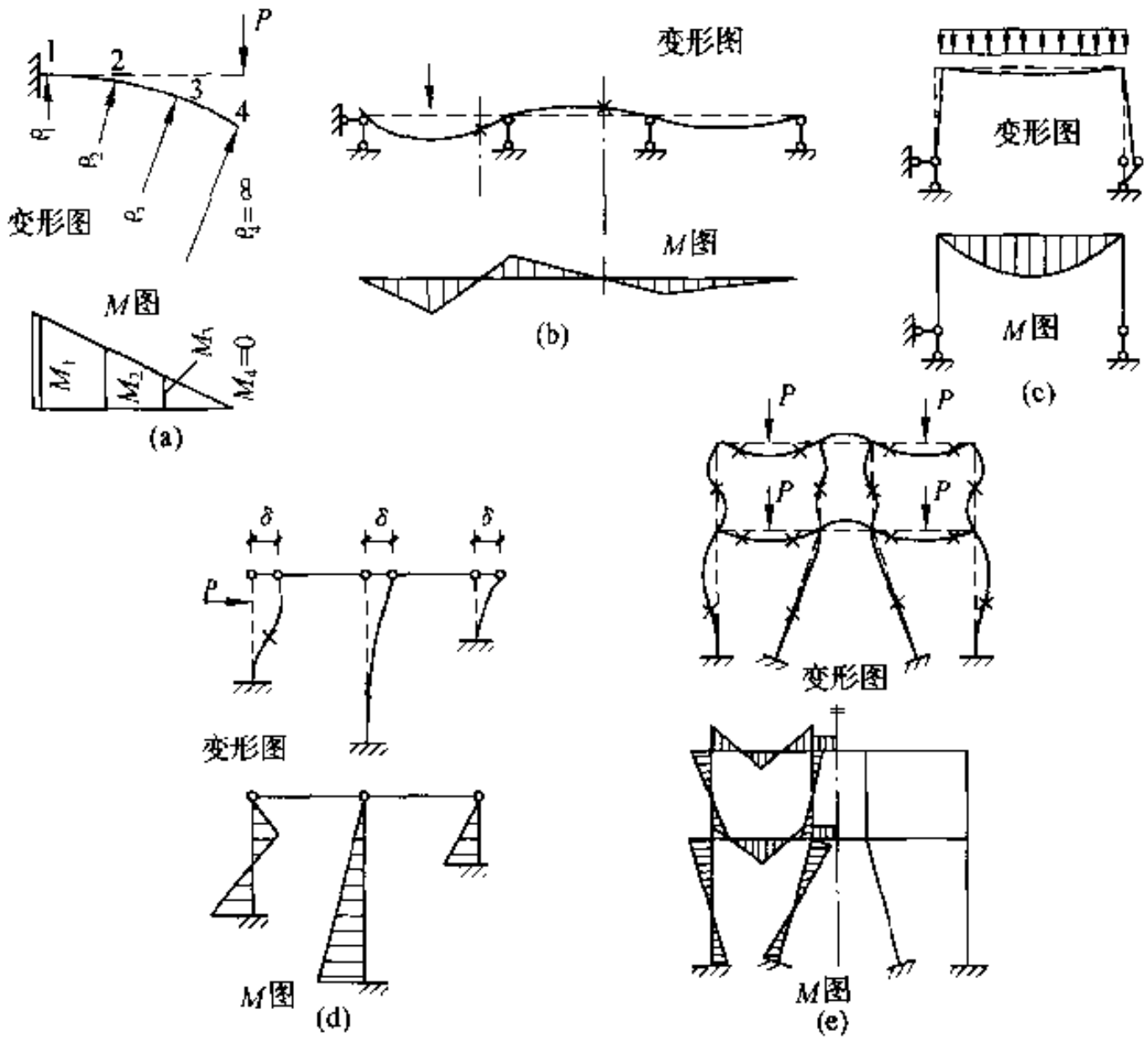


图 1-32 弯曲变形示意图

(a) 悬臂梁 (b) 连续梁 (c) 单跨框架 (d) 两跨排梁 (e) 两层三跨框架

1.5.15 预应力和预应力结构

1. 预应力的概念

预应力（pre-stress）的概念由 1886 年美国工程师杰克逊首先提出，用以制造预应力钢筋混凝土结构，但因人们对混凝土的预应力换失缺乏了解而导致失败。直到 1928 年法国工程师弗雷西涅提出必须用高强钢筋和高强度混凝土以减少因混凝土徐变造成的预应力损失，预应力混凝土结构才开始进入应用阶段。70 多年来，预应力结构有很大发展，至今它已成为现代结构工程的重要组成部分。

预应力，是在结构使用前人们主动对结构施加某种作用力后，在结构构件截面上得到的应力。其目的是改变结构在使用期间的受力性能，达到人们期望的受力状态（图 1-11(b)、(c) 就是这种期望的体现）。由于这种预先施加的作用力在时间、空间、数量上都是人们在设计、施工或使用时可以控制和调整的，因而有人认为“预应力”改为“预加力（given force 或 pre-force)”。预加力的功绩在于它能使建筑结构由仅是一种被动承受各种作用力的**被动结构**，转变为一种可以用它主动调节受力、变形的**主动结构**，因而这个概念是正确的；但目前一般还称作预应力。

2. 预应力结构的概念

施加了预加力的结构称为预应力结构。预应力混凝土结构的好处有：(1) 从材料看，可以改善混凝

土的塑性，使它成为弹性材料，而且一般无裂缝，因而整体性更好、更耐久。(2) 从结构看，可以控制开裂、提高刚度、减小截面、减少变形；由于材料具有弹性，活载产生的变形在卸载后可立即恢复、超载产生的裂缝在卸载后可立即消失；由于预应力筋的应力变化幅度小，结构的疲劳强度可以提高；由于预加力可由设计人控制，故预应力结构的设计是一种能人为控制的设计。(3) 从施工看，施加预应力时结构所用材料的性能均经过自检，因而有自我保护能力；而且施加预加力还是形成现代化施工的良好手段。(4) 从经济看，可以加大跨度（约可比非预应力混凝土构件的跨度大 30%～40%以上）、降低层高、加大建筑开间、降低混凝土用量和结构总重量，减少或不用变形缝……取得明显的经济效果。

预应力结构的理念有：(1) 弹性理论——施加预加力后能使结构在制作和使用期间都处于弹性受力阶段；设计时只要使构件上下边缘应力不超过允许应力值，结构的变形不超过允许限制即可。(2) 荷载平衡——用预加力来平衡外荷载，可将外荷载对结构的影响抵消，大大减少外荷载下结构的受力和变形，甚至可使构件的全截面均匀受压和使结构的挠度为零。(3) “全预应力”和“部分预应力”——结构设计时可将构件设计成全预应力构件或部分预应力构件；以钢筋混凝土预应力结构为例，前者在使用荷载下不允许出现拉应力，后者在使用荷载下允许受拉边缘产生限值下的拉应力，或者允许出现裂缝，但应受到限制（有人认为允许出现限值拉应力的应称为“限值预应力”）。(4) 索梁分载① ——将施加预应力的索视为索构件，与梁（板或其他）构件共同承担荷载；也即将索可承担的荷载由索承担，其余的由梁承担。索的设置可在体内（如无粘结预应力板），也可在体外，如图 1－33。

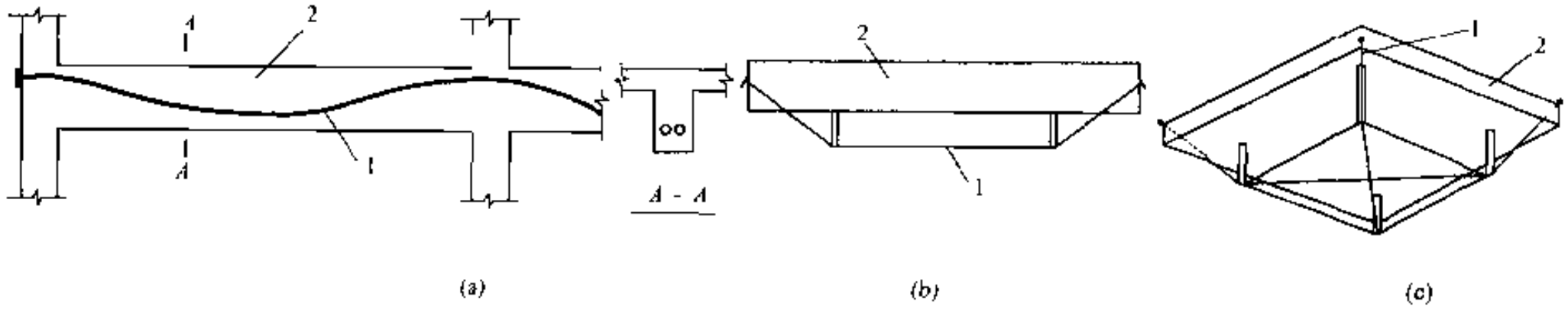


图 1－33　预应力索的布置

(a) 梁（或板）的体内索　(b) 梁的体外索　(c) 索的空间布置

1—预加力索　2—梁或板

现代施加预应力的方法可分为两大类：先张法和后张法。后者是用高强度钢铰线、钢丝和钢筋来作为预应力筋来完成的。钢铰线既能与混凝土粘结，也可不加粘结。在有粘结的结构中，张拉钢筋后要用水泥砂浆将预应力筋的孔道填满；在无粘结的结构中，预应力筋的孔道中没有砂浆。在高层建筑结构中更愿意采用无粘结预应力混凝土结构。

预应力混凝土结构中预加应力钢筋的初始预拉应力要超过 1 400 MPa，混凝土的抗压强度要在 C35～C45范围内。这种对材料的高强度要求，主要是考虑混凝土的收缩徐变会产生不小的预加应力损失（约 20%）的缘故。

预应力混凝土结构工程的设计包括以下步骤：(1) 确定混凝土构件的尺寸（可参考表 1－7）；(2) 确定预应力钢筋在构件纵横剖面中的位置和施加预加力大小；(3) 以关键截面的应力状态和构件的长期

① 由我国工程师谢醒悔近年提出，见《现代预力混凝土结构设计新方法》，现代结构研究会编，1999。

挠度来复核构件在使用阶段的性能；(4) 按极限抗弯和抗剪承载力来复核构件截面。

表 1-7 后张预应力混凝土楼盖构件的近似跨高比

结构构件	简支跨	连续跨	悬臂跨
单向实心板	40～48	42～50	14～16
双向无梁板	36～45	40～48	13～15
宽扁梁	26～30	30～35	10～12
单向密肋梁	20～28	24～30	8～10
一般梁	18～22	20～25	7～8
主要梁	14～20	16～24	5～8

1.5.16 结构抗震设计的基本概念

在进行结构抗震设计时，要注意如下几方面的概念：

(1) 工程师们在设计建筑结构时不可能准确预计在何时、何地会发生地震，也不可能估计发生地震时本地区的地震烈度和地震运动特性。他们凭借的是国家地震管理部门制定的《地震烈度区划图》所确定的该地区地震烈度，以及《建筑抗震规范》关于抗震设计的要求。区划图是依据地震历史和当地的地质资料得出的。当设计中要落实设防烈度和确定抗震措施时，还要对具体场地做出地震评价，它必须考虑地震历史、建筑物场地附近的活动断裂带，以及地震波通过处地基材料的物理力学性能等。以下几点对预估所在场地在未来地震时的地面运动是明显的：

1) 一次地震所释放能量的大小和建筑物到震中的距离（称震中距）有关；随震中距增大，地面运动的强烈程度减小；

2) 软土沉积层厚度大时，会引起长周期特性占优势的地面运动；坚硬土沉积层薄时，会引起短周期特性占优势的地面运动；

3) 土地对地面运动的放大作用随基岩运动强度和频率的变化面改变。

(2) 建筑物所受的地震力来自支承结构的地面运动和地面运动引起结构的竖向和水平惯性力；但通常都忽略竖向惯性力，因为大部分构件竖向受力的安全储备足以抵抗它们。水平惯性力等于质量乘以最大加速度反应，它们代表建筑物各质点在地震反应中所发生最大振动循环中最大位移和零速度这一临界时刻的惯性力。虽然在大地震的振动作用下，结构已超过其弹性极限，但实践中的结构仍然是按经过抗震的可靠度处理后的弹性方法分析的。地震时结构上的水平地震力和下列因素有关：

1) 建筑物的质量；

2) 建筑物的动力特性，如周期、振型和阻尼；

3) 地面运动的速度、持时和频率，以及土地和结构的相互作用。

(3) 建筑物抗震设计中的不确定因素很多，其中最主要的是难以估计未来可能发生地震的强度和性质。所以抗震设计的最基本原则是“**小震不坏，中震可修，大震不倒**”。也即在遇到众值烈度地震时(或称多遇烈度，50 年超越概率为 63.2%，见图 1-34)，结构一般不应受损坏或不需修理；在遇到中等烈度地震时（本地区设防烈度或称基本烈度，50 年超越概率为 13%，见图 1-34)，结构允许某些部位进入塑性状态，吸收并耗散地震能量，经一般修理仍可继续使用；遇到罕遇烈度地震时（50 年超越

概率2～3%，见图 1－34)，结构不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。按照这个基本原则进行建筑物的抗震设计，可使结构能提供一定的储备能力，使建造时只增加不多的造价，使建筑外形只有很少的牺牲，至于发生地震时的后果，则要看地震烈度而异，至少可以不出现人员伤亡。

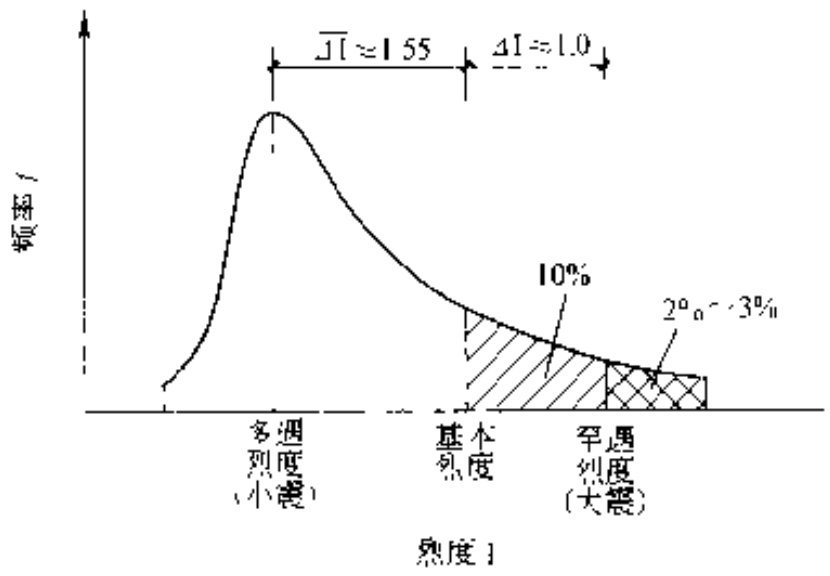


图 1－34　三种地震烈度的关系

(4) 抗震设计中的不确定因素，还由于人们尚不充分掌握地震过程中地质条件对结构表现的影响，和建筑材料在振动过程中性质的变化。因而当采用静力分析和按照弹性方法进行抗震设计时，有必要使结构具有超过弹性约定以外表现满意的能力，以便适应真正记录到的地震。这个能力来自选择一个良好的抗震结构体系和使结构具有良好的变形和耗能能力。它们表现在符合下列一些原则性要求上：

1) 在结构体系上，所选结构体系应具有明确的计算简图和合理的传递地震力的途径；并且宜有多道抗震防线；结构在两个主轴方向的动力特征相近。

2) 在结构布局上，要使整个结构布置合理，有均匀的刚度和强度分布，避免有局部削弱、突变或产生过大应力集中的部位；

3) 在结构构件上，要使结构既有必要的抗震承载力，又有很好的承受非弹性变形的能力，即延性。

4) 在结构构造上，要做好结构构件的连接构造，使它具有延性和保持能量耗散的能力，尤其在保

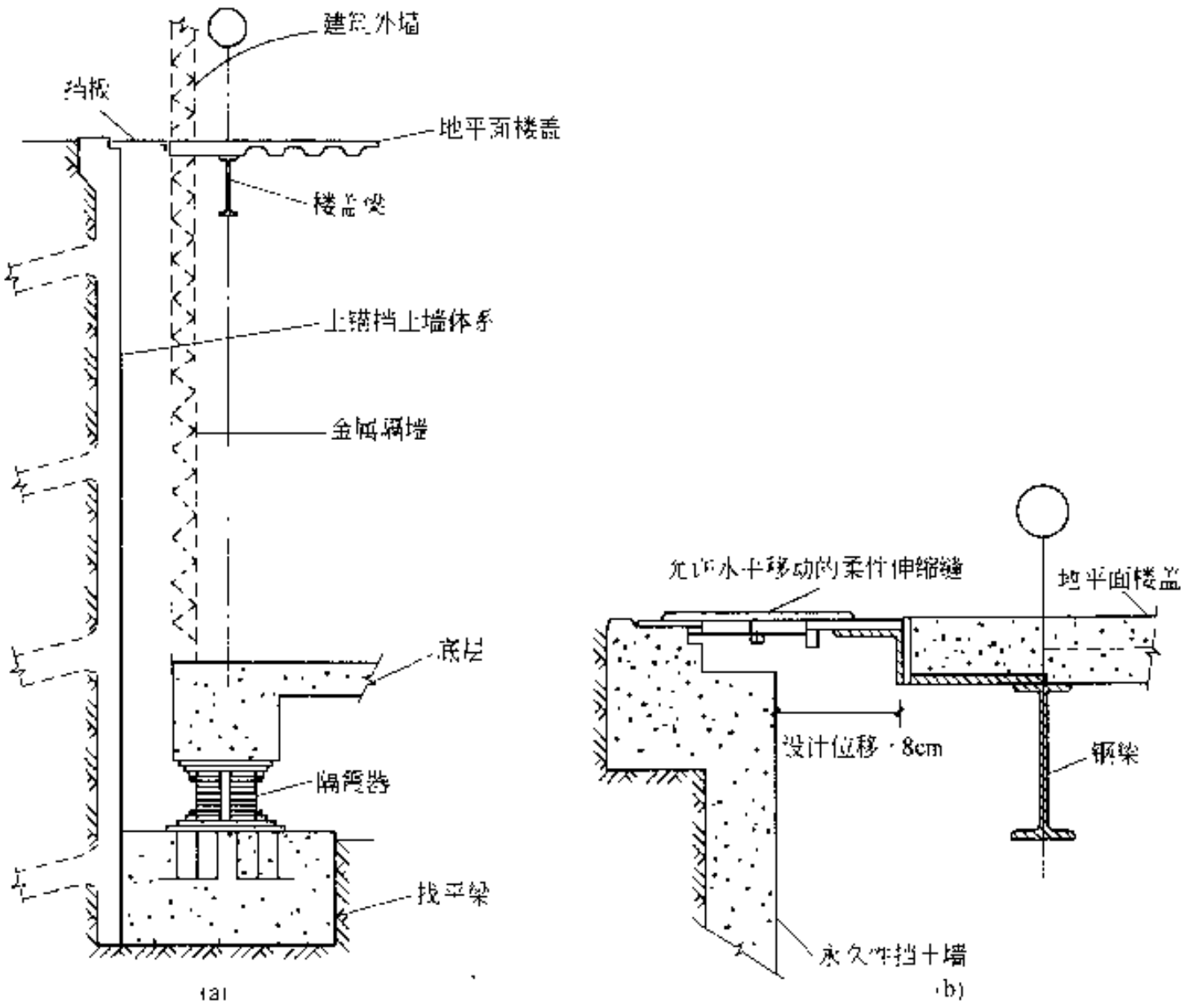


图 1－35　隔震措施举例

(a) 隔震建筑物中的沟槽和隔震器　(b) 沟槽的地平面处做法

持整体稳定性时更为重要。

（5）注意地震的减灾技术——隔震、耗能、增加延性、设置阻尼系统等。**隔震**，是在建筑物底座处设置合成橡胶支承、滚轴、套筒桩、滑板等装置（图 1－35(a)、(b)），获得柔性效果，改变该建筑物振动时的基本周期，使其和地震引发地面运动的卓越周期不同，达到减振效果；但在安装隔震装置的同时要设置一些阻尼器，用以降低因地震产生的振幅。**耗能**，则是将地震时地面运动的卓越周期进行一次结构的周期转变，即允许地震能量进入建筑物，被该建筑物抗震结构体系中某些构件所设的耗能装置的吸收；这些耗能系统有金属系统、摩擦系统、粘弹性系统、粘滞和半粘滞系统等，它们都能使地震能量转化为结构中的热量而部分消失。**延性**，是材料、结构构件或结构体系利用非弹性变形阶段的变形吸收能量的能力，它能使结构在可接受变形的范围内吸收能量而不破坏，这是抗震减灾所希望具备的性能；抗震结构的延性常以其在反复水平力作用下的水平变形关系曲线——滞回曲线来表示（图 1－36），该曲线的斜率代表结构刚度，滞回曲线包围的面积表示结构的耗能。若包围面积愈大，说明该结构延性愈好，地震时耗能愈大，被认为是好的抗震结构体系。

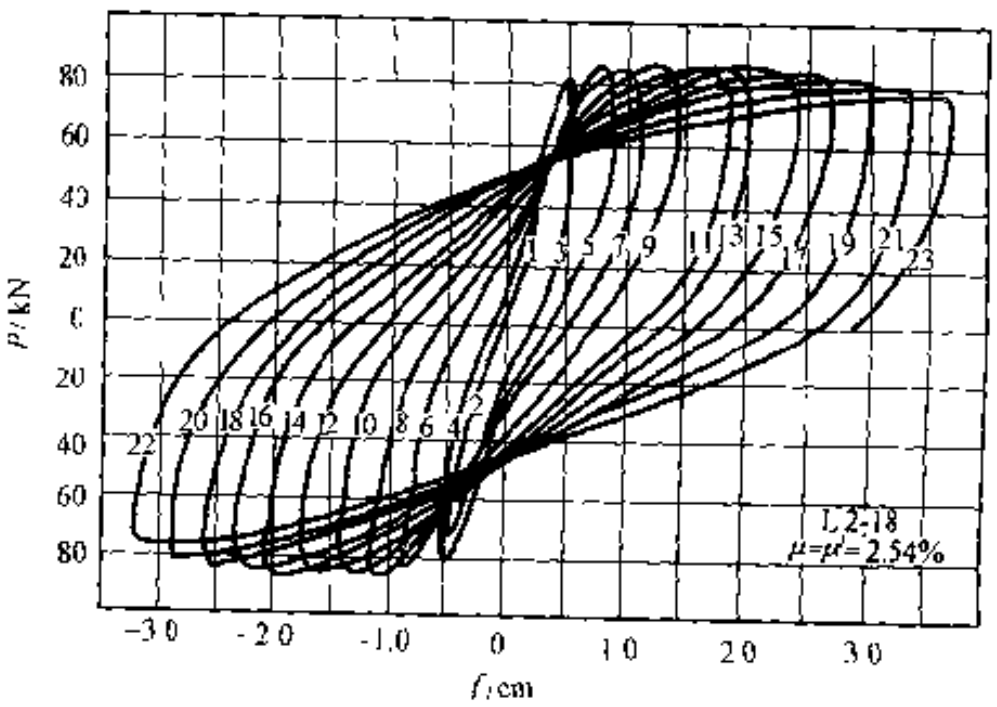


图 1－36 某钢筋混凝土柱的荷载-变形（$P-f$）滞回曲线

1.5.17 从总体概念上考虑结构设计

建筑物本质上是一个使用与结构相结合，并与所处环境相协调的空间整体；只是为设计方便在结构分析中才往往将它分解简化为各种平面结构和结构构件的组合。而结构概念设计，却是一个要从总体角度来考虑结构整体怎样满足各种需要和可能的阶段；这时，要求设计人将一个结构方案加以概念化，使主要的空间界限、联结方式以及各个使用部件如楼盖、墙、使用空间、交通系统等的相互关系，都能得到最佳的解决。因而结构工程师在这时既要掌握将结构分解的分析方法，更要从总体上考虑结构所面临的综合性问题。例如：

（1）楼（屋）盖结构主要是承受楼（屋）面竖向重力荷载的，但在风荷载和水平地震作用下却可看成是一个水平方向的深梁，它支承在墙体上（考虑横向受侧力时支承墙体是横墙，纵向受侧力时支承墙体则是纵墙，图1－37）。如果在砌体结构中将圈梁设置在楼（屋）盖四侧，可以大大提高建筑物楼（屋）盖结构的水平刚度，也就提高了整个建筑自身的水平刚度，对它的整体抗震性能起很大作用。

（2）砌筑在条形基础上的墙体是竖向承重构件，但同时也能视作在地基上的弹性地基梁；若在墙体内的各层楼面标高处设置水平纵向钢筋，就能在一定程度上起抵抗不均匀沉降的作用。如清华大学某宿舍楼曾经这样做了，经沉降观测和对墙体内纵向钢筋的应变测量，证明当整个房屋有中凹形沉降时，纵向钢筋沿墙横截面的应变分布大体符合“梁截面受弯曲后仍保持平截面”的假定（图 1－38），这就证实了条形基础上的墙体可整体地看成弹性地基上的梁，墙体中设置的水平纵向钢筋（也可看成圈梁）可以抵抗建筑物的不均匀沉降。

（3）结构方案的传统，是将建筑空间分隔成一个个平面，在每个平面内设置相同的结构体系。这样

做往往形成“虽建筑要求灵活，但结构布置呆板”、“横向结构刚强，纵向结构柔弱”的矛盾。这种传统有时可打破，代以从实际出发，面向功能和受力双重需要，总体综合地确定结构体系的思想。如美国麻省理工学院土木系提出的错列桁架体系就克服了上述不足（图 1－39）。该体系用同层高的桁架作为横梁与柱形成框架，相邻两片框架不在同一层内；因而可加大建筑布置灵活性，而且用平面内刚度极大的楼板来传递相邻两片框架间的剪力，大大加强了建筑物的总体刚性。又如中国建筑科学研究院设计所提出的“纵框横剪”结构方案，即在建筑物刚度软弱的横向布置适当数量的横向剪力墙（不设框架），而在刚度较强的纵向布置纵向框架（不设剪力墙）。它不但使建筑布置灵活，而且使结构纵横两个方向的侧向刚度大体相当。

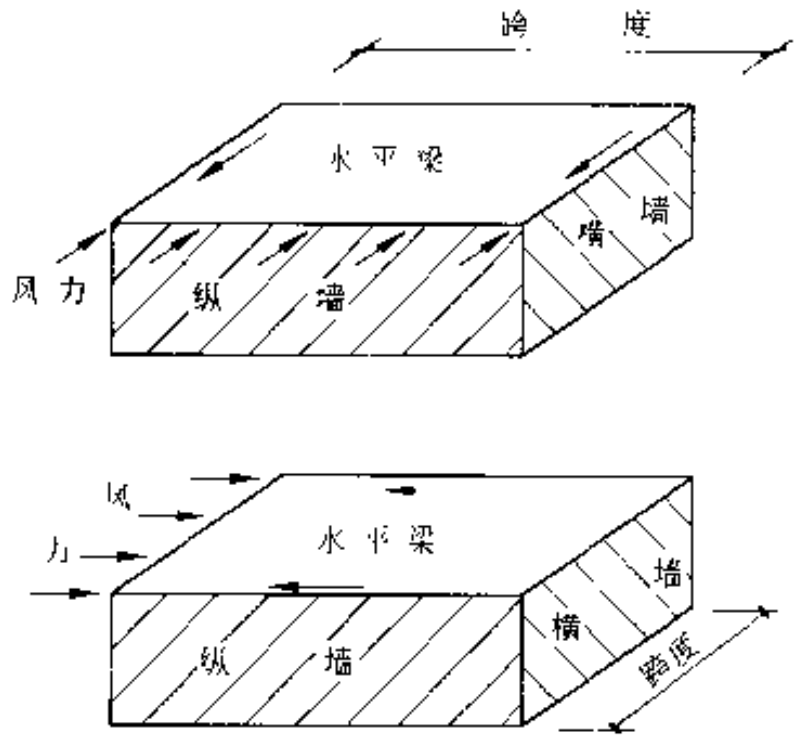


图 1－37　将楼（屋）盖视作水平深梁

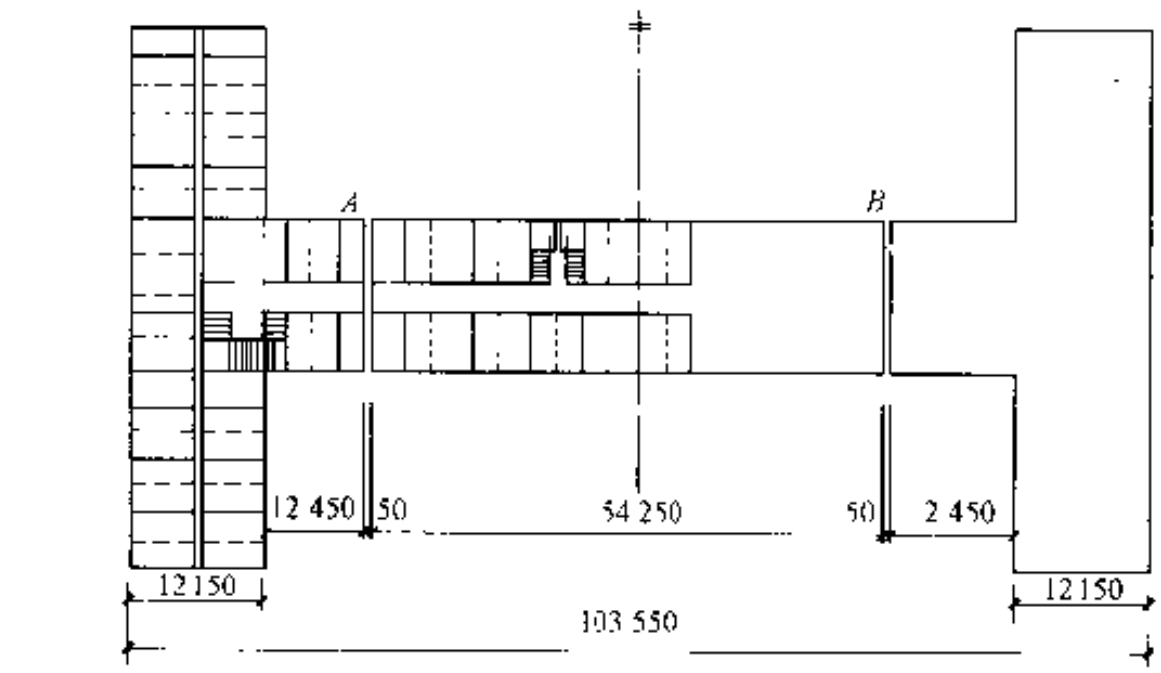
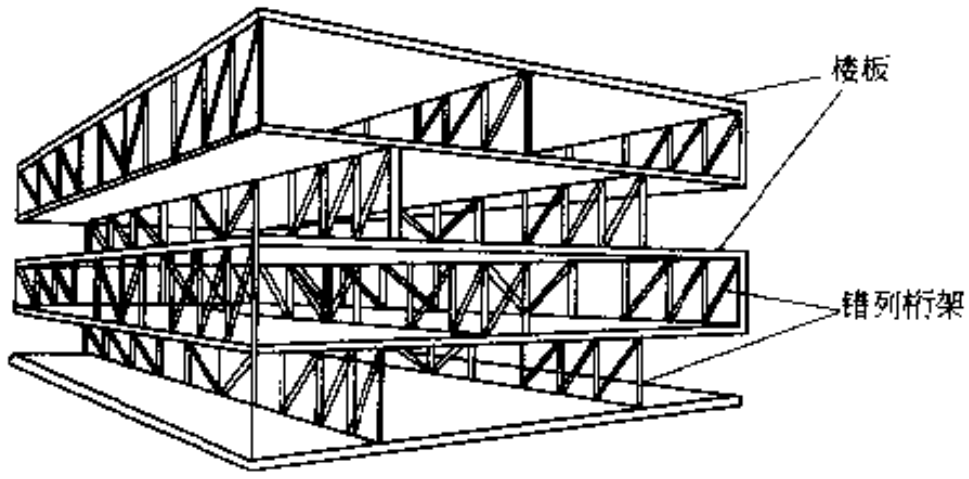
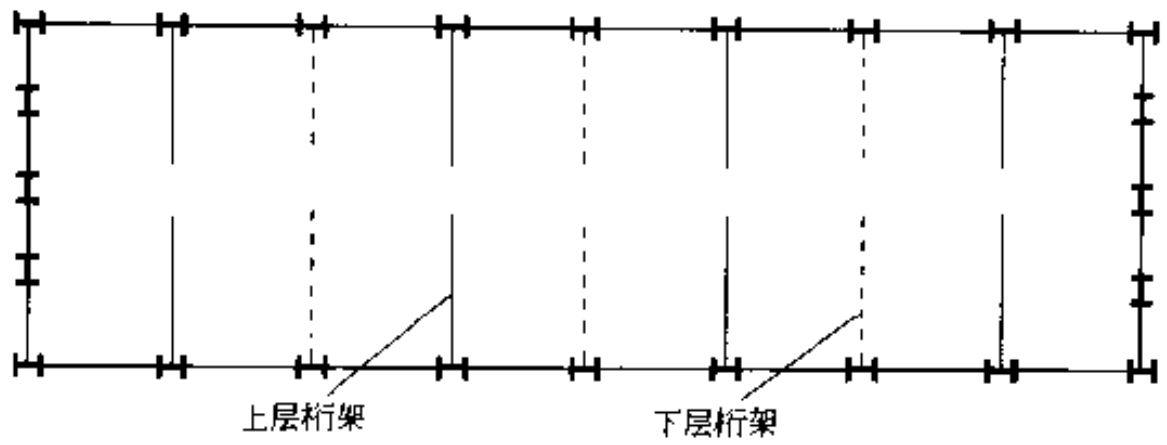


图 1－38　将条形基础上的墙体视作弹性地基上的梁

（4）充分利用建筑空间范围内的结构构件（墙、板、柱等）形成空间结构，并合理解决空间结构方案中的结构问题。例如林同炎等所著《结构概念和体系》第 4 章所述空间组合单元（图 1－40）就是一个典范的概念构思。在这个概念构思里：从环境角度看，四周环境到中央庭园 E 都可以设置敞开的入口，中央庭园 E 到 4 个独立的空间单元也有敞开入口；从建筑角度看，是一个既开敞又有



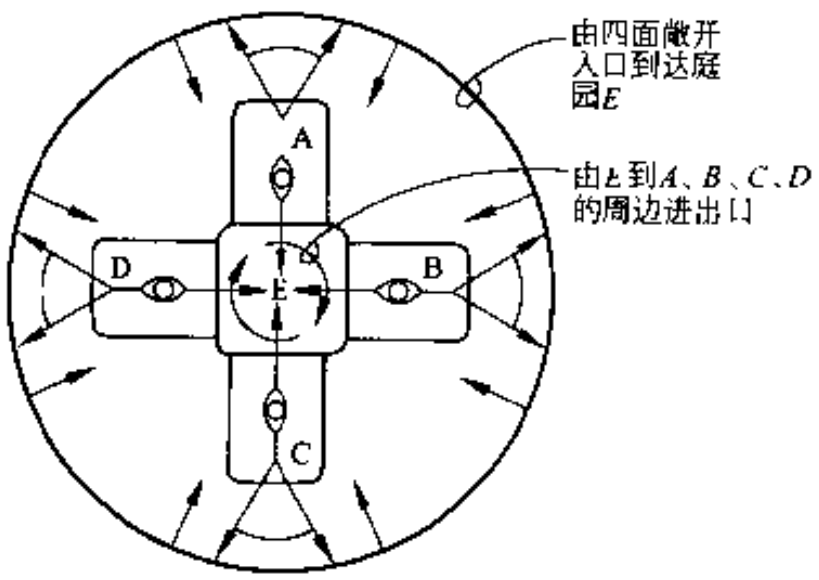
(a)



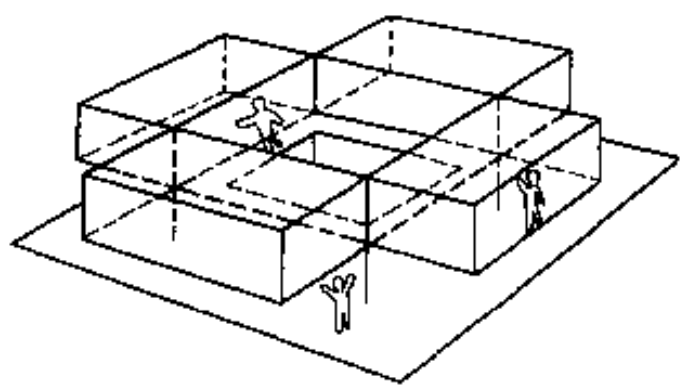
(b)

图 1-39 错列桁架结构体系

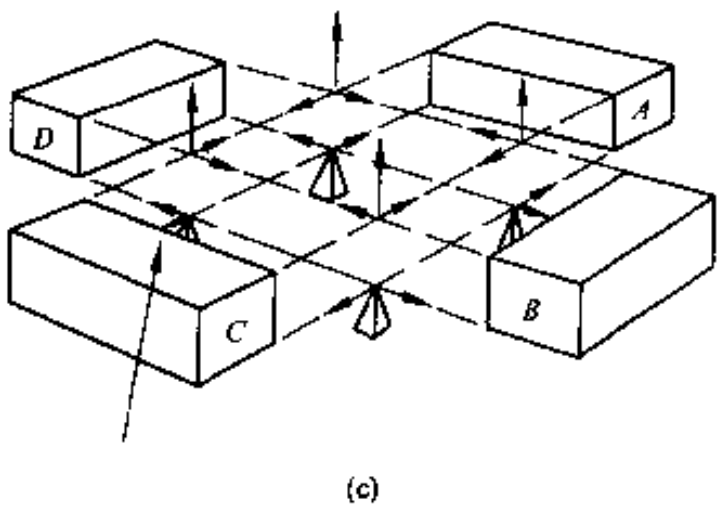
(a) 错列桁架布置 (b) 结构平面



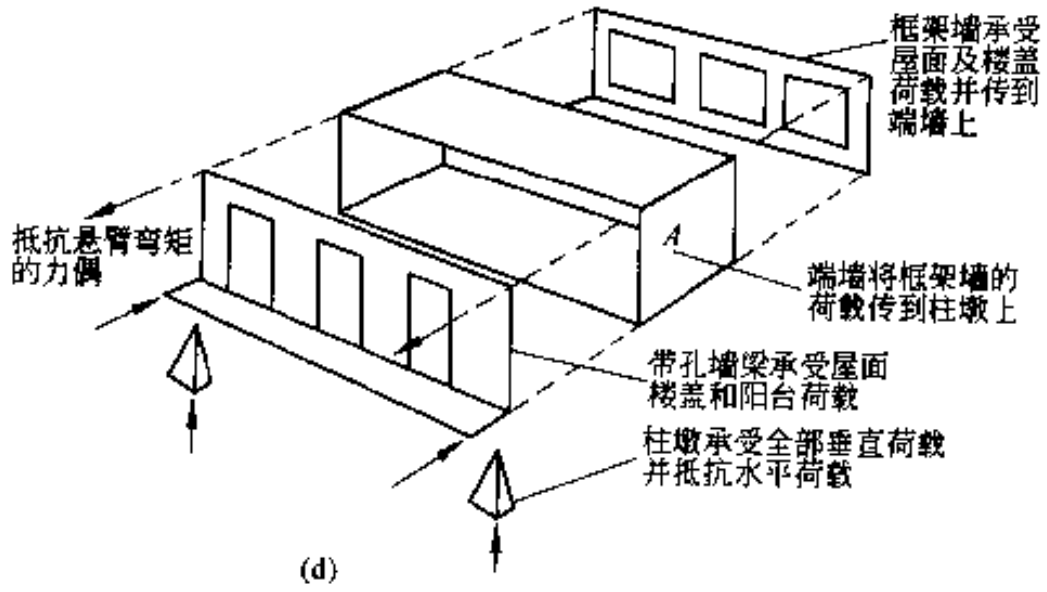
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-40 某空间组合示意

(a) 总平面 (b) 整体空间形式的方案 (c) 总体结构体系 (d) 箱形结构单元相互关系略图

联系的完整空间，4 个独立单元间有走廊沟通，形式新颖，使用方便，视野开阔，户外有大片可供利用的空地；从结构角度看，由内外墙、端墙、楼（屋）面板、柱墩和内走廊等 7 种构件组成。总结构体系是 4 个既独立又联系的箱形结构，悬臂支承在 4 个柱墩上，端墙和内墙相连，既是承重墙又是两端伸臂梁，外墙既是承重墙又是空腹桁架，内墙既是带孔墙梁又承受楼屋面和走廊荷载，楼屋面既是承重板又是悬臂箱形结构的上下翼缘，柱墩既承受全部结构的重力荷载，也抵抗水平侧向力。

1.5.18　对标准、规范、规程应有的认识

在建筑结构设计时，除必须考虑使用功能需求、建筑设计意图和资金、材料、施工等必要条件外，另一重要依据是它要受建筑结构设计标准、规范、规程有关条文的制约。因而怎样正确认识“标准”、“规范”、“规程”，以及理解它们在结构概念设计阶段的作用，是至关重要的。

“标准”定义为由国务院或各部委授权主管机构制定或批准的对重复性事物和概念所作的统一规定，它是以科学、技术和实践经验的综合成果为基础，经有关方面协商一致的产物，在以特定形式发布后作为共同遵守的准则和依据。其中“技术标准”是对技术原则、指标或界限给出的规定，是一种衡量准则，属国家标准范畴。如《土的分类标准》、《建筑结构可靠度设计统一标准》等。

“规范”为由各部委授权主管机构制定的对技术要求和技术方法所做的系列规定，它涉及的范围较广泛、较系统、通用性强，它是标准的一种形式，也属于国家标准范畴。如《钢结构设计规范》、《建筑抗震设计规范》等。

“规程”为由各部委授权主管机构制定的对具体技术要求、实施程序和方法所做的系列规定，它涉及的范围较单一、较具体、专用性强，它也是标准的一种形式，但不作为国家标准。如《钢筋混凝土深梁设计规程》等。

由此可见，标准、规范、规程虽然都是统一的或系列的规定，都需要共同遵守，但是它们却是以科学技术和实践经验的综合成果为基础的；随着科技的进步以及实践经验的积累，它们都是会不断更新和修订的。事实上在我国以往实践中，技术规范大体上每 10 年左右修订一次（现行《混凝土结构设计规范（GB 50010－2002）》就是在 13 年前的《混凝土结构设计规范（GBJ 10－89）》基础上修订的）；同时，20 世纪 90 年代以来，各国技术规范修订的周期也明显缩短。所以，作为一个建筑结构的设计人，不应该把标准、规范、规程视作死板的、一成不变的规定。他们一方面在一般情况下应该遵循它们，另一方面在具有充分实践经验的基础上，经过研究、验证和协商，对其中不恰当的条文，也可以予以修正、发展和更新。

现行的我国标准、规范和规程中，已经规定有 4 种不同的情况可以区别对待：

（1）强制性条文——具有法律属性，一经查出违反，不论是否发生事故，都要追究责任。但这种条文在规范中只是少数，如《凝凝土结构设计规范（GB 50010－2002）》中的强制性条文只有 17 条，占现行该规范条文总数的 4%左右。

（2）要严格遵守的条文——规范中的正面词用“必须”，反面词用“严禁”，表示非这样做不可，但并不具有强制性要求。

（3）应该遵守的条文——规范中的正面词用“应”，反面词用“不应”或“不得”，表示在正常情况下均应这样做。

(4) 允许稍有（或有）这样的样文——规范中的正面词用“宜（或‘可’）”，反面词用“不宜”，表示在条件允许时首先（或者在一定条件下可以）这样做。

在结构概念设计阶段，需要遵循的是结构设计标准、规范、规程中的“总则”、“一般性规定”、“基本要求”、“材料选择”等宏观问题的条文；至于结构计算、构造细节等方面和具体条文，可留待技术设计和施工图阶段去考虑。这里，除应该遵循上述 4 种不同情况加以区别对待外，有创新意义的设想可以更多一些地加以展示，并创造条件予以落实以便实现。这些有创新意义的设想应具备以下条件：

(1) 要从当时当地的实际条件出发；

(2) 要有科学的理论根据并在技术上证明是可行的；

(3) 要有实际的实验或以往的实践验证；

(4) 要进行可行的全面分析（参见节 1.6 第 1 条原则）。

1.6 结构概念设计的原则

结构概念设计的原则，是人们根据对力学、结构、材料、建筑理论以及施工技术和管理知识的认识，对建筑、结构和设备功能需求的理解，对设计、施工和使用实践的领会，在总结长期工程经验的基础上所制定的一些基本要求，对做好结构概念设计有着重要的指导作用。这些原则大体有下列 8 条，前 4 条是属于总体考虑方面的，后 4 条是属于结构技术方面的。

1. 全面考虑原则（也称三维构思原则）

结构概念设计时，首先要对其所涉及的各个方面作全面的考虑。它包括建筑、结构和施工方面的考虑，使用、功能、美观、技术和经济方面的考虑，以及整体、局部和它们间关系方面的考虑。这 3 个方面的考虑构成了结构概念设计时的三维构思。

建筑方面指空间、尺度、联系等使用要求，采光、通风、防火等功能要求，美学、形式、风格等美观要求。

结构方面指结构整体和关键部位受力、变形的合理性，主要构件间连接、构造的牢固性，所选择结构体系、型式的可靠性、经济性和新颖性，以及结构所用材料在长期使用环境下的耐久性。

施工方面指取材的现实，成型的可能，做法的合理……

做好上述考虑，也就注意了使用、功能、美观、技术和经济方面的需求。此外，还要正确对待整体、局部和它们间的关系。一般先从整体入手（如根据建筑场地条件提出主体结构体系和基础造型），进而考虑一些关键的局部（如主要构件类型和连接关系），再回到整体（如结构的适用性、可靠性、耐久性、整体稳定性）上来加以修正认定，是一个必经的过程。

在上述三维构思基础上进一步是二维构思的技术设计阶段，这时主要是分别解决好水平分体系（如楼、屋盖）和竖向分体系（如柱、墙）各自的构件选择和它们间的双边关系（如支承、连接）。在二维构思基础上再进一步则是一维构思的施工图阶段，这时主要是设计计算组成分体系的每一个构件（如板、梁、柱）。尽管三种构思（三维、二维、一维）所要解决的问题各具相对独立性，但它们都有着反馈关系：施工图阶段的构思会影响和修正技术设计阶段的构思；技术设计阶段的构思又会影响初步设计

阶段的构思；初步设计阶段的构思当然也会影响和修正概念设计的构思。

2. 功能协调原则

结构概念设计时，应该尽可能做到结构、建筑、设备和施工手段的功能协调，以便取得尽可能大的效能和尽可能多的效益。如：

在结构和建筑功能协调方面，要做到建筑体型和结构体系相协调，建筑使用和结构布置相结合，建筑分区和结构分段（如变形缝设置位置）相一致等；

在结构和设备功能协调方面，有设备系统和结构布局是相应的，设备线路和结构构件是相通的，设备部件和结构构造是相配的等；

在结构和施工手段综合协调方面，如在做现浇混凝土结构时，将模板作为结构构件的组成部分；在安装预制构件时，将施加预加力手段与构件连接方法相一致，考虑构件受力元素和受力状态与施工过程中的做法相一致等。

3. 实际出发原则

结构概念设计时必须从实际出发处理所遇到的各种问题。例如认真考虑当地固有的自然条件（如气候、地质条件等）、当地历史形成的人文条件（如文化背景、已建建筑物等）、当地当时的资源条件（如资金、原材料、设施等）。因而：

（1）概念设计前要对当地的实际情况进行全面了解和分析；

（2）概念设计时所取的各种条件要符合当地当时实际可能；

（3）所做的概念设计方案必须充分满足未来使用时的实际需要。

4. 精益求精原则

结构概念设计往往是多种方案比较选优的过程，在这过程中要注意以下几点：

（1）在思维上，既要有纵向思维（结构→构件→连接→构造），还要有横向思维，就是要从多方面去思考（见前述“全面考虑原则”）；

（2）在分析上，不仅只会“分析问题”，更要善于“提出问题”，敢于否定已有的初步设想，要多设想几种方案以及可能遇到的问题进行分析和处理；

（3）在解答上，不要“从一而终”，要设想几种解决措施，以便“择优取胜”；

（4）在方法上，有时有一个明确概念就能定案，有时要有定性的理论分析（估算），有时还要懂得何时需要和怎样采用模拟试验的方法；

（5）在评价上，不能只评价**能否**（指工程技术上能否做到），还要评价**可否**（指政策法规上可否这样做）、**值否**（指经济合理上值不值得做）、**应否**（指在可行性和持续性上应否这般做）。

5. 减轻自重原则

结构所承受的荷载无非两种：竖向荷载和水平荷载。竖向荷载的85%以上是建筑物自重（结构和装饰层自重），水平荷载中的地震荷载与建筑物自重直接相关。所以减轻自重是一条重要的结构概念设计原则。它不仅可以减轻结构承受的荷载，而且可以降低建筑造价、加快建造速度、节约建筑材料、减少材料在生产运输方面的劳动量。减轻自重的措施大体有：

（1）采用轻质高强材料，如轻集料混凝土、高性能混凝土、高强度钢材、冷弯薄壁型钢、多孔或空心砌块、塑料制品等；

（2）采取高效能的结构型式，如采用合理截面型式的预制构件或预加应力构件，根据结构受力特点采用组合构件或组合结构，以及采用薄壳、折板、箱形结构等优越的结构型式；

（3）选择优越的结构体系，如采用筒体结构、错列结构、网架结构、空间桁架、空间框架等空间结构体系；

（4）选择合理的结构布置，如尽可能减少外墙面积、加大开间尺寸和柱网间距、降低不必要的楼层高度等。

6. 空间作用原则

建筑物本来是一个空间结构，平时往往为了结构设计计算工作的简化，将它分解成各种平面受力状态进行量化分析。在结构概念设计时，考虑建筑物内各部分结构的空间作用，实际上是还原到它本来的结构面貌。当然，如果这时更能有意识地利用或构成构件间的空间关系，往往还会给所设计的建筑结构带来加大刚度、减小内力、受力效能好等方面的优点。这时，依其有效性的次序做到以下几点是有利的：

（1）加强结构构件的平面外刚度（如在砌筑墙体内设置钢筋混凝土圈梁和构造柱）；

（2）加强平面结构与平面外结构构件的联系（如平面屋架与屋架间支撑的联系）；

（3）考虑结构构件间的相互作用（如板与梁的相互作用）；

（4）考虑结构体系间的相互作用（如剪力墙体系与框架体系的相互作用）；

（5）采用空间结构体系（如空间框架、壳体结构）。

7. 合理受力原则

结构概念设计时，要经常运用力学原理来处理结构构件的一般受力分析问题。以下几个方面往往应给予注意：

（1）从受力和变形看，均匀受力比集中受力好，多跨连续比单跨简支好，空间作用比平面作用好，刚性连接比铰连接好，超静定的受力体系比静定的受力体系好；另外，传力简捷比传力曲折好，要避免不明确的受力状态。

（2）从受力和变形的分析看，要尽可能利用结构的对称性、刚度的相对性、变形的连续性和协调性；既要分析各部分构件的直接受力状态，也要分析整体结构的宏观受力状态；要抓住主要的受力状况和它所发生的变形，忽略次要的受力状况和它的相应变形。

（3）从抗力和材料看，要尽可能选用以轴向应力为主的受力状态，尽可能增加构件和结构的截面惯性矩和抗弯刚度、抗剪切能力和抗剪刚度，并合理地选用材料和组织构件的截面，做到“因材施用，材尽其用”。

（4）从结构构件自身看，砌体构件要注意设置好圈梁和构造柱、芯柱，以保证砌体结构的延性和承受不均匀沉降的能力；混凝土构件要避免剪切破坏先于弯曲破坏、混凝土压溃先于钢筋屈服、钢筋与混凝土的粘结破坏先于构件自身破坏，以避免造成脆性失效；钢构件应避免局部失稳或整个构件失稳，以确保钢结构的承载和变形能力；构件间和连接应使节点和预埋件的破坏不先于其连接件，以便充分发挥构件自身的作用。

8. **优化选型原则**

结构概念设计归根到底是确定主体结构体系及其联系。它要考虑 3 个方面，用比较方法进行优化选择：

（1）优化结构体系。前提是掌握各类基本构件的特征（如与受力相关的几何特征，与变形相关的刚性特征等），根据环境、使用、建筑和荷载实况优化选择合用的基本构件，确定它们间的联系，形成基本结构单元和它的支承做法（如框架结构，筒体结构，拱、索结构等）；再将基本结构单元通过线型、平面、叠合、交叉等集合型式构成主要结构体系（参见表 1-2～表 1-4）；

（2）优化结构布置。在满足使用要求和建筑意向前提下优化地布置楼屋盖水平系统、柱墙竖向支承系统和基础系统。这时除比较各种布置的承载能力、竖向和侧向变形、支承做法、地质条件等结构问题的合理性优越性外，重要的原则是平立面宜规则、对称，具有良好的整体性，竖向剖面除规整外侧向刚度宜均匀变化，自下而上逐渐减小，避免突变；

（3）合理构造做法。重点是结构构造做法和建筑构造要求相一致，结构的理论构造要求和施工的实际构造做法相一致。这里的“一致”，是指实现可能的一致性和受力/功能特征的一致性；

在结构概念设计的优化选型中通常遇到下列关系：

（1）需求和可能的关系，原则是“面向需求，力争可能”；

（2）传统和创新的关系，原则是“努力创新，保持特色”；

（3）质量和速度的关系，原则是“质量第一，兼顾速度”；

（4）效能和效益的关系，原则是“效能为先，也要效益”；

（5）优化和合理的关系，原则是“常规合理，优化选择”。

第 2 章　托罗哈结构概念设计作品案例

本章列出了西班牙结构工程师 E. 托罗哈的结构概念设计作品 12 例。其中，小型建筑物有地下电车站、手术教室等，大型建筑物有赛马场观众台、飞机棚等。它们都是结构概念设计的范例，值得初学者认真阅读。通过这些作品的介绍，人们可以从中得到什么启发，可以思考什么问题，在节 2.1“关于 E. 托罗哈的评价”中有所提示。

2.1　关于 E. 托罗哈的评价

这里选取能够比较准确、深刻地反映托罗哈的评语供读者参考。

1. 美国著名建筑学者马里奥·萨尔瓦多利（Mario Salvadori）对 E. 托罗哈的评价[①]：

爱德华·托罗哈（Eduardo Torroja）是国际上真正伟大的结构工程师之一。

许多认真的建筑专业和结构专业的学生都梦想在一个杰出的结构老师指导下学习，以便获得结构意识（structural consciousness），因为这种意识是设计的坚实基础。结构力学给予学生某些结构的数学和力学分析方法，而要获得结构意识则需要经过一个很长的练习阶段。

一流的结构教师并不多，以致我们中的大多数只能是自己在做设计中摸索，也许要经过一个痛苦的无计划的在职训练过程才能有所领悟。通常，每天在工程师室里工作成为我们掌握结构基本性能的代理老师。

托罗哈是一个人道主义者，一个有智慧的大企业管理人员，一个伟大的工程师，一个热心的研究工作者。他成为现在公认的这样一种人（这些头衔决不是一蹴而就的，也不是徒有虚名）的曲折成长道路，和其他达到如此高水平的大师的成长道路是相同的：

——他们必须花很长的时间全面地学习文化基本知识，托罗哈在这种学习中还加上对人文和数学的深刻理解；

——他们必须应用自己掌握的知识去解决一些新的问题，从中得到丰富的技术知识，扩大视野；

——要逐渐积累经验，变成直觉（intuition），他们的脑子才能胜任十分复杂的评价和快速的估算（后者反映他们对结构基本性能的掌握）。这一点永无止境，不断引导他们到更高的境界。

托罗哈是一位杰出的概念结构设计家。数学和非常的理性直觉使他有如此突出的成就。他所设计的结构以经济和强度作为基础，他的人道主义反映在他所具有的美的眼光。一个优雅精致的美的意识渗透在他的概念之中。

托罗哈作为一个工程师，致力于理论分析，但他懂得什么时候需要停止他的数学推导而采取试验应力分析的方法。

托罗哈的作品没有虚饰的内容，他作品中的美是很少造价的副产品——这一点增加了他作品的内在

---

① 引自 *The Structure of Eduardo Torroja*，F W Dodge Co.，1958。

价值。

2. 1995 年出版的由美国高层建筑与城市协会主编的名著《高层建筑设计》（Architecture of Tall Buildings）一书中介绍了 E. 托罗哈等三位杰出的设计人。书中写道[①]：

“西班牙三位优秀的设计者：安东尼奥·高迪（Antonio gaudi，1852—1996）、爱德华多·托罗哈（Eduardo Torroja，1899—1961）和费利克斯·坎德拉（Felix Candela，1910—）创造着大量可能出现的新的结构型式。

高迪是一位建筑师，在他多年从事的工作中寻求能与合理的结构相结构的新建筑形式……

工科教授和设计人托罗哈热衷于采用钢筋混凝土做成空间薄壳结构……

坎德拉受训成为一名建筑师但却精于数学分析，他追随高迪探索采用新的形式，并追随托罗哈应用新的建筑材料……

他们的成功多半是由于他们作为一个建设者的经验，而不是由于他们对于结构中数学理论的理解。然而，更重要的却是他们代表了建筑师、工程师和建造者之间协作的优势。由于他们对这三种行业的理解和感觉，以及他们丰富的想像力，他们自己起着所有这三种人的作用。他们都已经成为优秀的有影响的结构艺术家。”

① 引自高层建筑和城市环境协会编著，罗福午　英若聪等译，《高层建筑设计》[美]，中国建筑工业出版社，1997。

2.2 运动场旁有轨电车站

这个运动场旁有轨电车站（stadium streetcar station）曾设想建造在马德里大学城里，是某露天大型运动场周围道路的一个组成部分。如按此方案建造车站，看运动比赛的公众就可能很方便地使用运动场周围的道路。电车轨道的标高低于引向运动场的主干道，有两条交通线与电车线路正交；路旁楼梯用于行人走向运动场或从运动场走出来乘电车（图 2-1）。

电车站的主要部分位于大道下隧道处。从结构上说，隧道由钢筋混凝土单跨刚架支承建成，隧道侧边为钢筋混凝土顶板和墙板：这些板的有些部位设置在刚架内侧缘，而另一些部位设置在刚架外侧缘，视刚架受力后的弯矩图特性而定，因而可以认为，板的位置处于刚架的受压区域（图 2-2）。

具体说来，在沿刚架水平跨的跨中区段（那里弯矩为正号），板位于刚架的外侧缘，即跨中区段 T 形截面梁的上部压区，形成受压翼缘；在水平梁与竖向立柱相交区附近，板位于刚架内侧缘，即刚架节点附近 T 形截面梁的下部压区和 T 形截面柱的一侧压区，也形成受压翼缘；而在刚架底部邻近基础的部位，板又位于刚架立柱的外侧缘，因为弯矩在那里又是正号。

在钢筋混凝土顶板的墙板上的混凝土都是显露的，只是利用刚架节点附近的木模做成各种建筑师需要的装饰线条，使电车站具有新颖、美丽、轻巧的外观，同时在沿月台一侧还可建成可供坐在那里候车的凸出体，这个设计方案既美观、实用，其建筑造型又完全符合结构受力原理。

图 2-3 所示月台另一侧的部分墙体上开有洞口，作为行人坡道的出入口（图 2-1）。在洞口上设置搁刚架梁的加强过梁。电车站两端还各有一个阶梯（也见图 2-3），与加强过梁连接的几榀刚架和阶梯处的刚架都是异型的。

不幸的是，战争影响了运动场的建设。这个地区的规划发生了变化，这个设计的巧妙构思未能被人们所领会。但是，它却告诉我们一个基本的设计原则，那就是应该尽可能地使建筑设计方案和结构设计原理高度地统一起来，这是建筑师和结构工程师共同的责任。

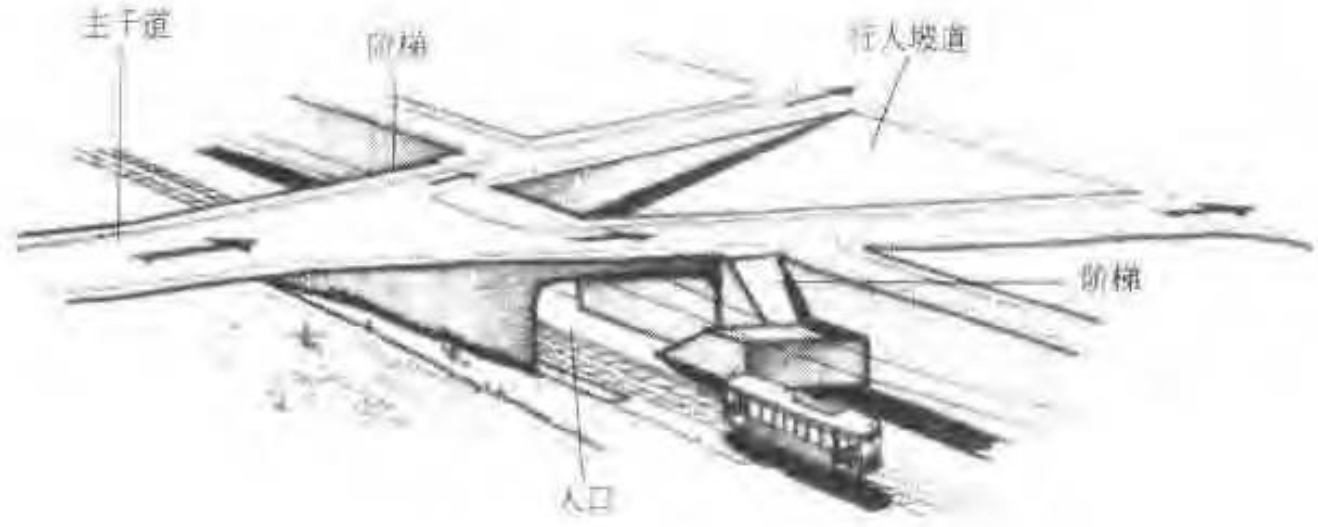


图 2-1　电车站与周围环境关系

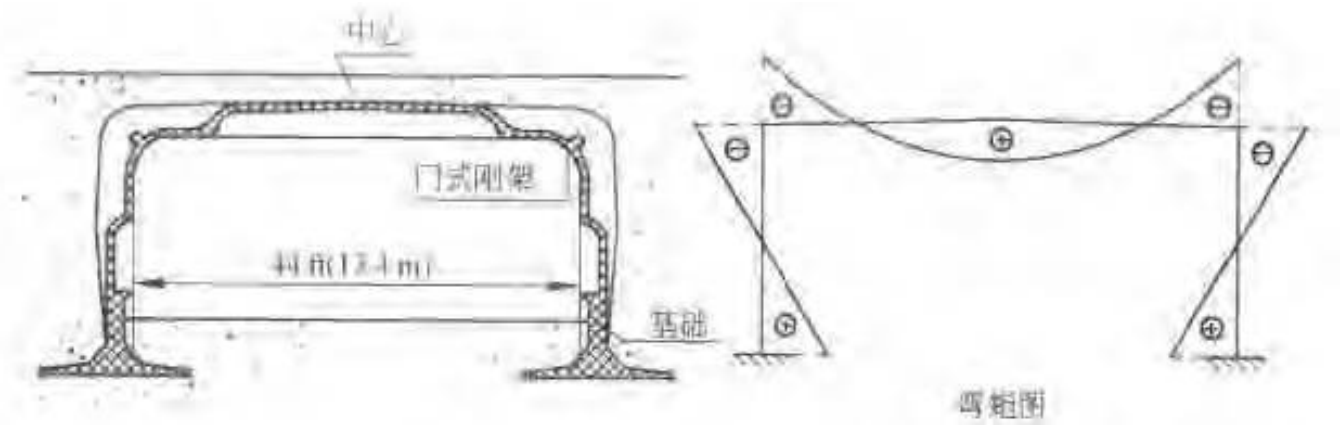


图 2-2　门式刚架剖面及其弯矩图

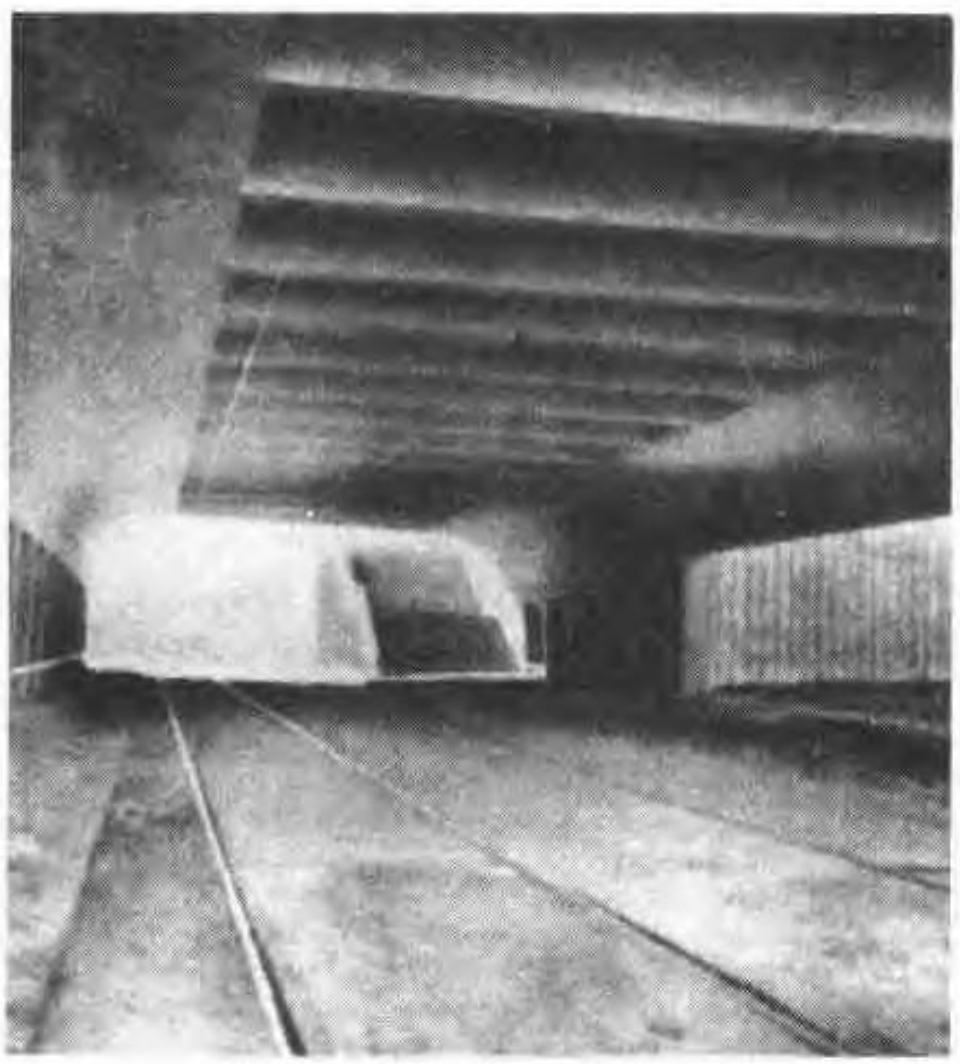


图 2-3　有轨电车站内观

（月台一侧的洞口和阶梯）

【编者提示】

这是一篇用结构弯矩图写成的文章。

结构弯矩图，有正有负，上下左右都不能画错。谁会想到可以利用它，与建筑装饰、建筑使用和谐统一起来，作为实用、美观、经济的建筑作品的科学技术基础呢？而托罗哈恰恰想到并且做到这一点。

我们应该有这样一种认识："任何技术问题都蕴藏有它的艺术内涵；任何完美的艺术都存在着技术上的合理。"所以，土木工程师应该学点建筑学和美学，并且学会把它们应用并融合到自己的工程实践中。

2.3 圆形手术教室

马德里大学城医院要建造一座圆形手术教室（operating amphitheater）。该手术教室平面直径 70 ft（21.34 m），无中间柱；屋盖上设有一个平面直径为 32 ft（10 m）的圆形或八角形竖向天窗，与封闭的底层围墙同圆心。

有两种设计方案可供选择。方案 A 是将天窗架直接设置在位于底层圆形建筑周边倒 L 形悬臂刚架的伸臂梁上，如图 2－4 (a)。方案 B（最后采用的方案）是将天窗固定在一个八角放射形的天窗结构上，而这个天窗结构又支承在位于底层圆形建筑周边的柱上，如图 2－4 (b)。

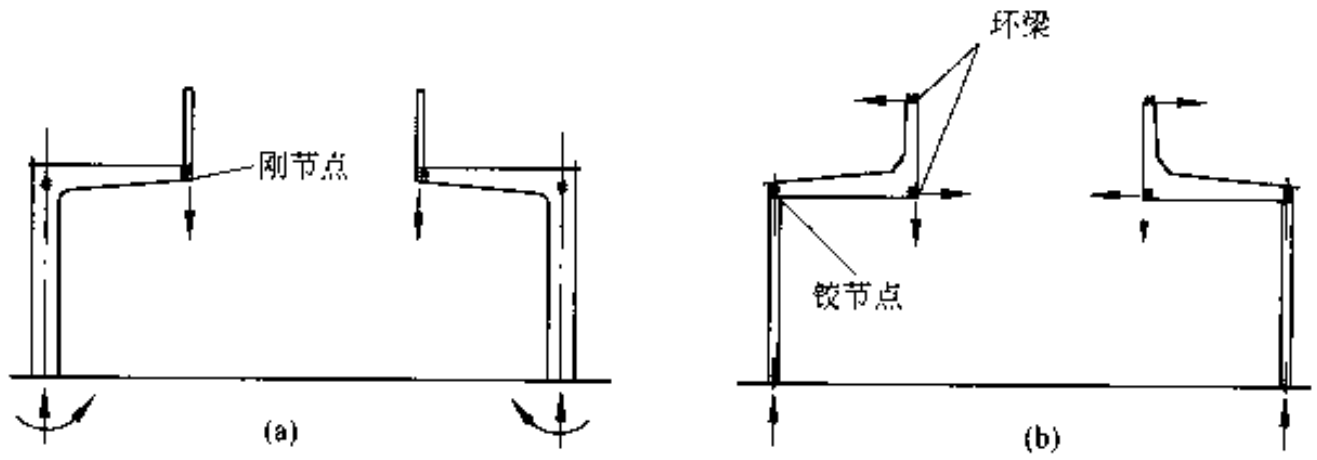


图 2－4

(a) 方案 A　　(b) 方案 B

在方案 B 中，天窗自重和屋盖荷载产生的向下重力，由 8 个放射形天窗结构的水平悬臂梁传至底层周边柱，并与周边柱产生的向上支承反力形成一个力偶。这个力偶，与由两对在天窗放射形水平径向受力杆系中产生的拉力和压力所形成的力偶相平衡。两对径向受力杆系之一为放射形天窗结构的横梁，另一为设置在天窗顶端的径向刚性肋条。屋盖天窗结构构件的圆轴对称性保证了这些水平力处于自我平衡状态。下部的 8 个水平力为拉力，因而它们是稳定的平衡；上部的 8 个水平力为压力，其杆件压屈的危险由汇交于一个中心点的 8 根微曲径向肋条所消解。

两个方案相比，方案 A 的周边柱承受着轴向压力和弯矩，其截面较大；而方案 B 的周边柱仅承受着简单的轴心压力并且不传递任何弯矩，它们的截面可以很小。因面方案 B 可以比方案 A 有更大的使用面积。方案 B 的主要构件配筋图示意于图 2－5。

上述结构设计方案含有等压结构的意义。只要结构所承受的荷载是轴对称于圆心，就可以直接由明确的结构计算得到各构件所受的内力。但是，侧向水平风压或一些不均匀、不对称的竖向荷载却会打乱这种轴对称关系。考虑到这一点，在结构设计中要将8个竖向天窗柱连同其上下联系梁组成一个八角形空腹大梁，

并以此空腹大梁的刚度来保证结构的侧向稳定。

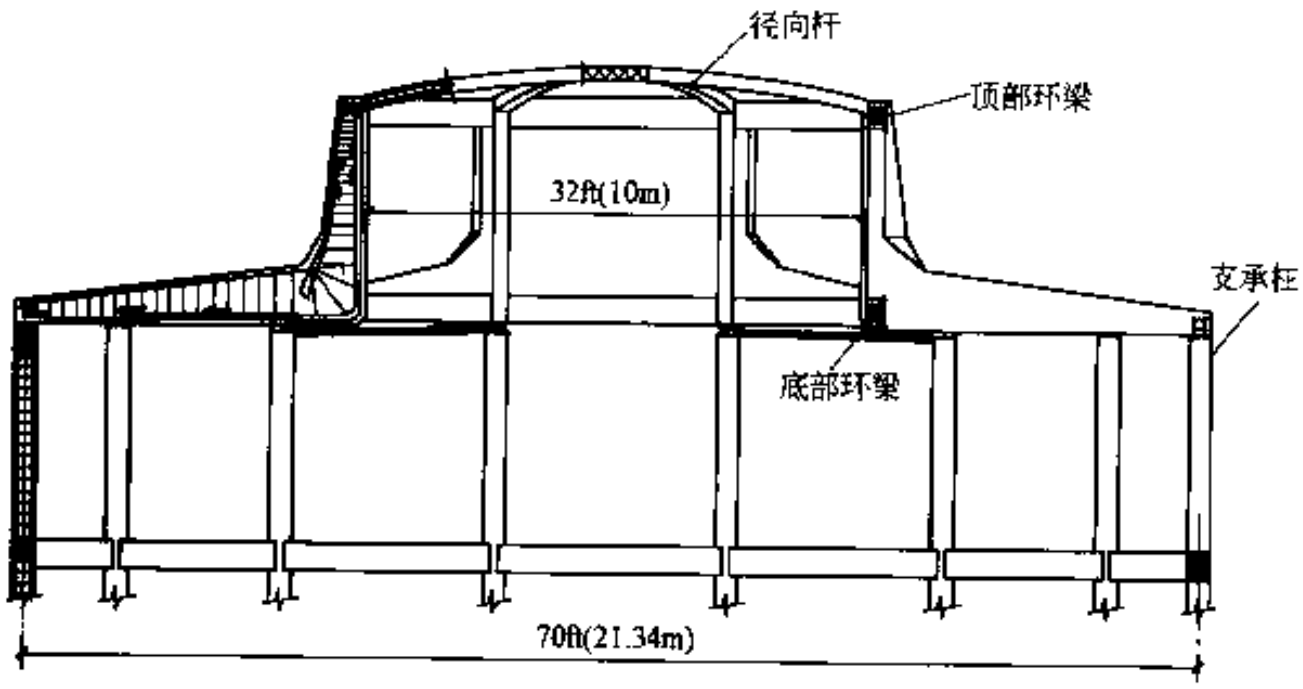


图 2-5　方案 B 主要构件配筋示意

虽然在轴对称荷载作用下，由于结构的轴对称性使得该结构的内力分析十分简单；但是，在不对称荷载作用下，该结构将是高次静不定的，其内力计算会变得冗长而乏味，而且即便计算得很精确，其结果也是近似的。为此，理论上的内力和结构承载力的估算，必须要用一个小比例牛型的直接试验结果来验证。参见图 2-6。



图 2-6　小比例尺模型试验

【编者提示】

“观其一点，不及其余”是人们观察事物时常犯的毛病。

方案 A 就是这样：它只考虑了对称轴一侧的半刚架，只看到在半刚架伸臂梁顶部作用着一个集中力，按常规只能做成能使刚架柱承受很大弯矩的“肥梁胖柱”的结构体系，占用较大的使用空间，因此这是一个不好的方案。

而托罗哈采用的方案 B，他考虑的是整个手术室的结构，看到可使天窗结构承受一对能够抵消使半刚架发生旋转的自平衡反向力偶：在左侧，此力偶与原来半刚架的顺时针弯矩相抵消；在右侧，此力偶与原来半刚架的逆时针弯矩相抵消。这样就使全部周边柱处于轴心受压状态，大大减少了柱截面尺寸，加大了使用面积，取得了实用效益。

巧妙的是，需要天窗结构承受的力偶使得：(1) 在天窗架顶部存在着轴对称于圆心的一圈压力，托罗哈为此设置径向微曲形刚性肋条来承受，肋条汇交于圆心可防止失稳，肋条间可以安装天窗玻璃；(2) 在天窗架底部存在着轴对称于圆心的一圈拉力，托罗哈为此设置了钢筋混凝土环梁来承受这些拉力在圆周方向的分力，环梁对天窗采光没有任何障碍。

另外，托罗哈并没有对这个结构体系进行在不对称荷载作用下的冗长计算，而是采用模型试验的办法来解决。在概念设计中懂得和做到这一点是重要的。

2.4 阿尔捷希拉集贸市场

阿尔捷希拉集贸市场（market at Algeciras）的结构包括一个球面圆屋顶壳和支承它的8个周边支柱。（图2-7，图2-8，图2-9(a)）。圆顶的直径为156 ft（47.6 m），曲率半径为145 ft（44.2 m）。



图2-7 阿尔捷希拉市场鸟瞰

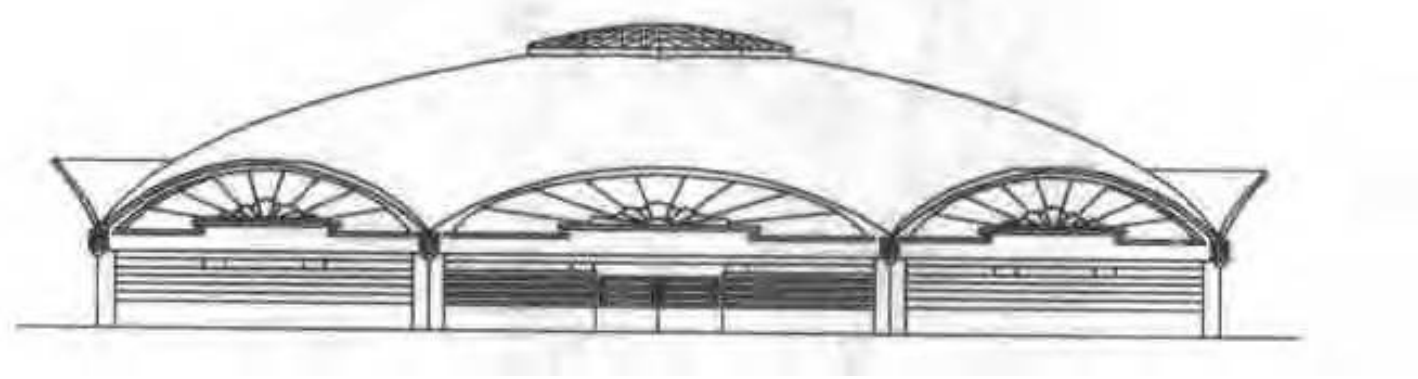
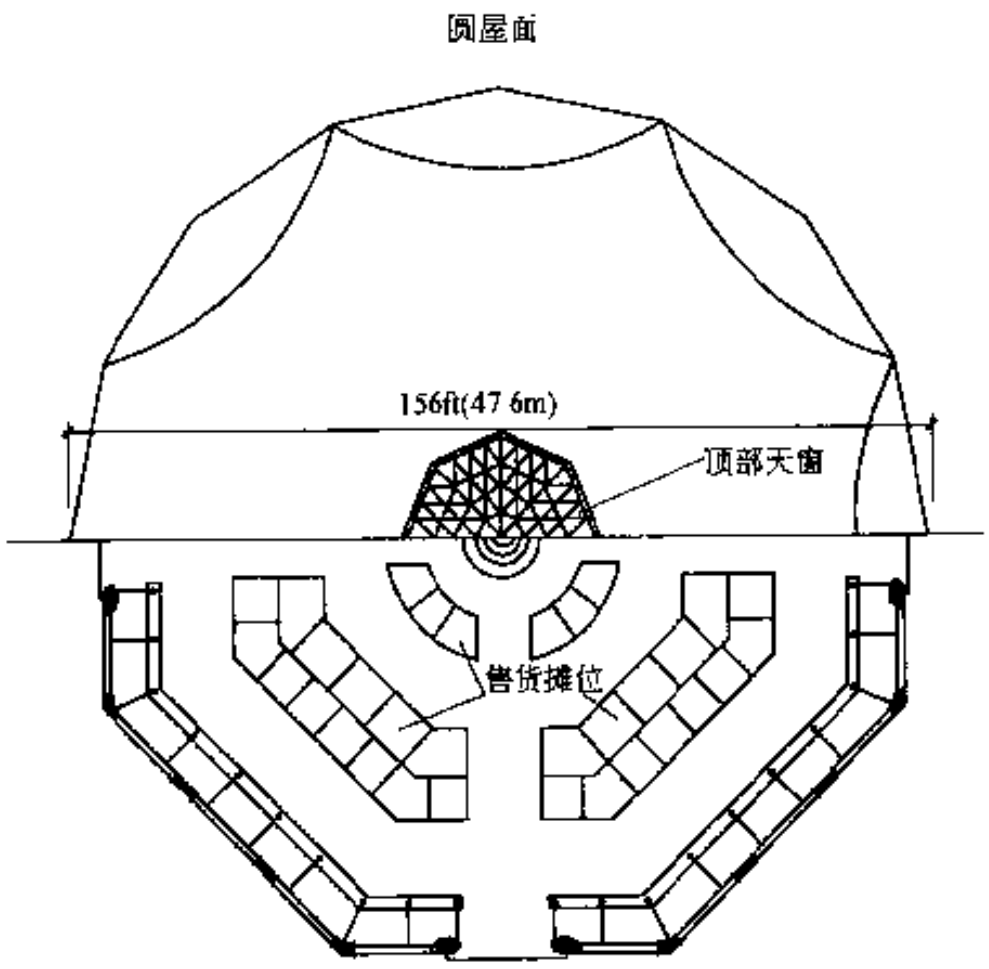


图2-8 阿尔捷希拉市场立面

球面圆顶的外檐与8个圆柱形拱顶（cylindrical vaults）汇合，拱顶跨越8个边支柱。球面圆顶和拱顶交接区形成了球面圆顶的刚性支承，并使它们在屋盖荷载作用下产生的主应力集中到边支柱上（图2-10(a)）。圆柱形拱顶的曲面自呈八边形的支承周边向室外方向悬挑，使得市场人口处可以防雨（2-9(b)）。



(a)



(b)

图 2-9

(a) 平面和屋面　(b) 入口处挑出的圆柱形拱顶

球面圆顶壳身的理论厚度为 3.5 in (8.89 cm)，实际厚度逐渐增加至支承边附近为 18 in (45.72 cm)，以便承受在那里的集中力。每个支承点处支承力的竖向分力由支承柱承担，然而其水平径向分力（即推力）则由一个八角形的以 16 根 ϕ12 in (ϕ30 mm)钢筋组成的钢环箍所平衡。圆顶的主应力轨迹线和配筋示意见图 2-10。

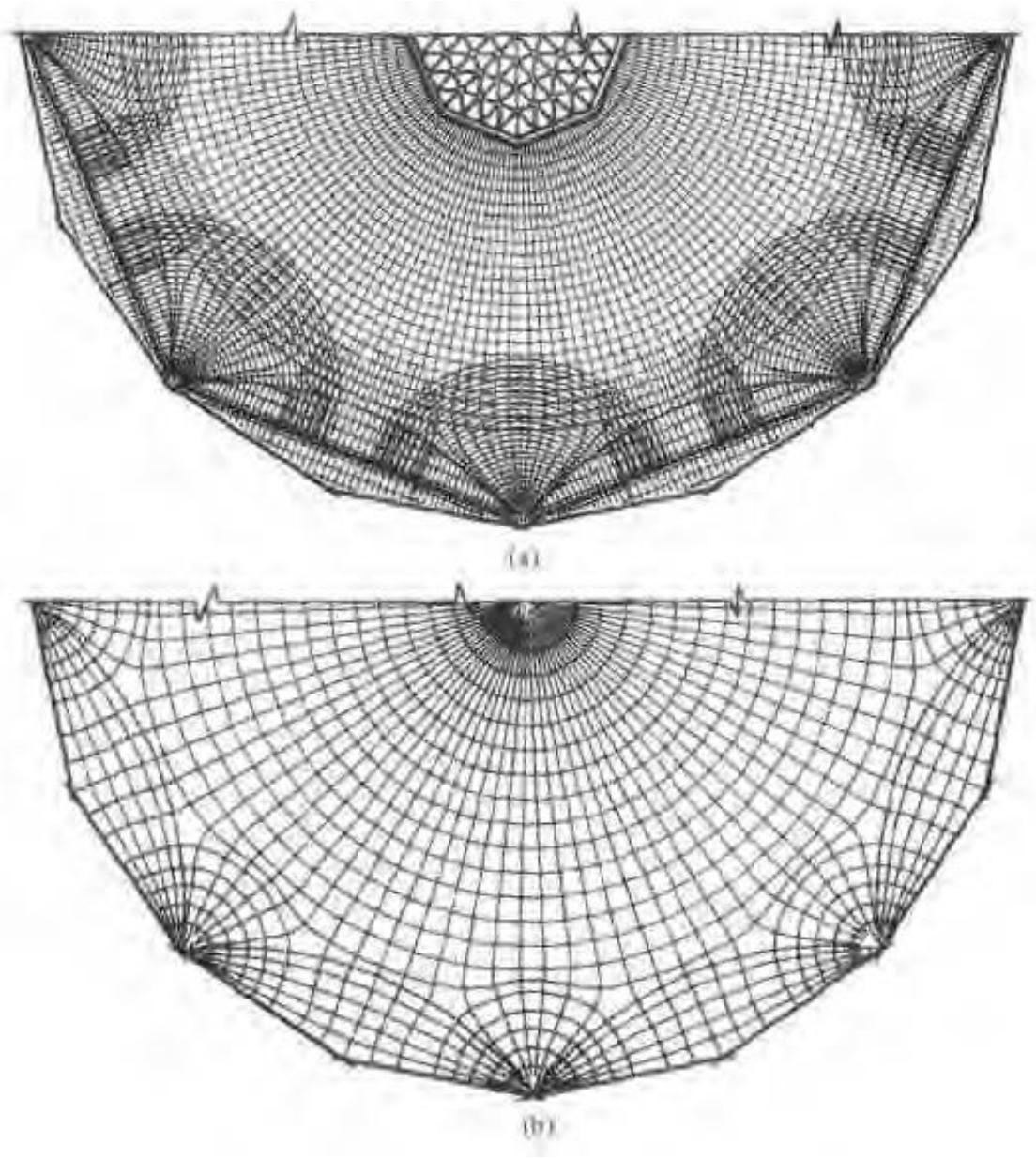


图 2-10 圆顶主应力轨迹和配筋示意图

(a) 圆顶主应力轨迹线 (b) 圆顶配筋示意

钢环箍必须施加拉力才能平衡推力，在施加拉力的同时，球面圆顶壳有压缩的趋势，而且圆顶本身在支承边缘处也受到弯曲。为了对钢环箍施加拉力，在钢环箍上设置着花兰螺丝；在拧紧花兰螺丝使钢环箍拉伸受力的同时，还使圆柱形拱顶在支承点的径向受到压力。

当钢环箍逐渐拉紧至预定需要的程度时，受压缩和弯曲的圆顶和拱顶逐渐向上提升，即壳身和拱身有从模板上皮逐渐向上移动的趋势。因拉紧钢环箍引起壳身有受压、受弯而脱离模板的这种倾向，在一定程度上抵消了圆顶外围和边支柱顶点在屋盖荷载作用下的径向向外侧移。

连接边支柱间钢环箍中点至圆柱形拱身的径向杆件（见图 2-8 图形中部的径向杆），只是为了对圆柱形拱壳壳身的稳定有利，同时也可以防止壳边的压屈。

一旦钢环箍被拉紧后，就用混凝土将它们包起来。这种保护性措施不但能够防止钢筋锈蚀，而且也可以避免钢环箍和钢筋混凝土圆顶屋盖之间因两种材料不同而产生的温度变形差。

为了使整个屋盖结构的伸缩只对边支承柱产生影响而不对四

【编者提示】

(1) 这是一个球面壳结构方案，适用于大型市场建筑。壳顶直径 $L=47.6$ m，壳面厚 $t=0.089$ m，厚跨比 1∶535，是鸡蛋壳厚跨比 0.3 mm∶45 mm=1∶150 的 1/3.5。由于 $\phi=\arcsin\left(\frac{L}{2R}\right)=32.6°$（图 1-11），说明在壳顶自重作用下，屋面结构在经纬方向均处于受压状态，无裂缝产生，因此可以做成无卷材刚性防水屋面（当球壳 $\phi<51.8°$ 时，在沿壳面法向均布荷载作用下，经圈和纬圈均受压）。若按球壳的临界压屈荷载 $q_{cr}=CE_c\left(\frac{t}{R}\right)^2\geqslant q_w$（$q_w$ = 实际壳顶屋面重力荷载 = $0.089\times25=2.23$ kPa）进行校核，$q_{cr}=0.06\times2.55\times10^4\times\left(\frac{89}{44\,200}\right)^2=0.006\,2$ MPa=6.2 kPa$>q_w$，这说明有足够的安全储备。因此此结构方案在结构受力和建筑防水两方面都是合理的。

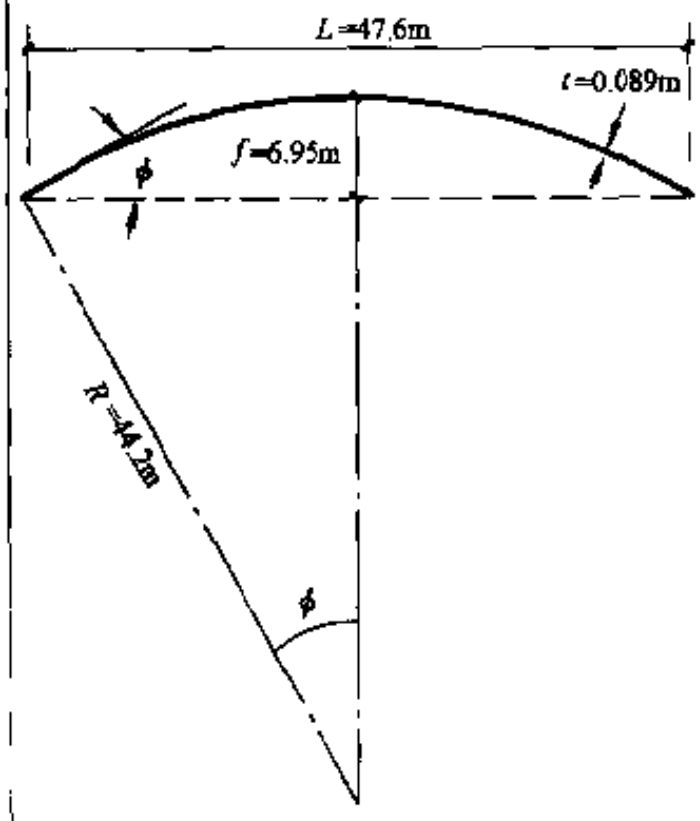


图 2-11

(2) 球壳底部由 8 个水平刚度很大的筒壳面把屋面荷载传给立柱，又用预应力钢筋环箍产生的预拉力与球壳底部的水平推力相平衡。这些筒壳和环箍不但有着加强底部边缘、传递屋面荷载、平衡结构内力的功能，而且在外形上与

周墙体产生影响，边支承柱的柱顶必须允许发生一定的径向侧移。这种支承柱要设计成既能承受轴向压力、切向剪力，还要使得它容易产生径向侧移。这种构件的截面尺寸应设计成在建筑物径向狭小而在建筑物圆周方向宽大（图 2－12）。这样，它们就能既确保整个建筑结构的稳定，又较少地承受由温差引起的弯矩。

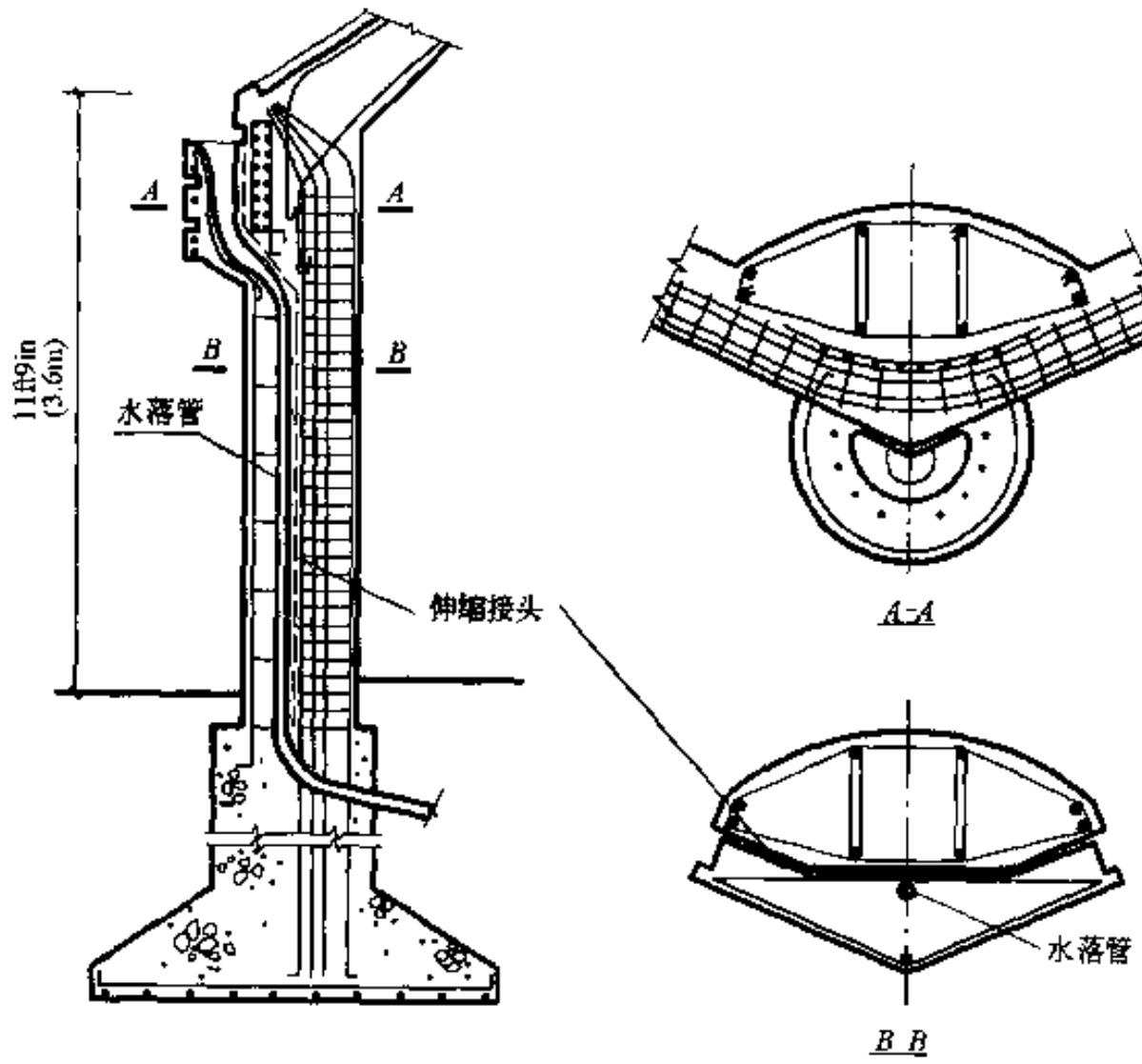


图 2－12　支承柱构造做法示意

由于屋盖结构基本上全面受压，它没有使混凝土材料开裂的危险，因而圆屋顶可以防水，不再需要做防水处理。

市场建筑物中心处有一个天窗。天窗周边设有封闭的钢筋混凝土圆环构件与壳面板相连，作为对壳面板中部开洞后的加固。天窗用预制的钢筋混凝土杆组成三角形格栅做成，内设天窗玻璃（图 2－9(a)）。

边支柱间的外围墙体与结构分离。它只起维护市场大厅的作用，不参加承受屋盖传下的荷载。

屋面球壳协调统一，又使得整个结构的构造、施工做法以及脱模方法变得简捷明了。

(3) 本结构方案采用椭圆形截面的立柱，它在建筑物径向狭小，在建筑物圆周方向宽大，既能确保整体的稳定，又可较少承受由温差引起的弯矩。

(4) 在球壳顶部开设的采光、通风天窗，以及把屋面落水管埋置在立柱外侧的做法，也具有独到之处。

这虽然是一个极平凡的市场建筑，却选用了一个建筑、结构、施工三方面统一协调的，既实用美观又经济合理的不平凡方案。

2.5 阿罗丝渡槽

设计阿罗丝渡槽（Alloz aqueduct，图 2-13）的基本思路，是采用内侧双向压力的方法，消除任何可能出现的混凝土龟裂，避免渡槽槽壁漏水。

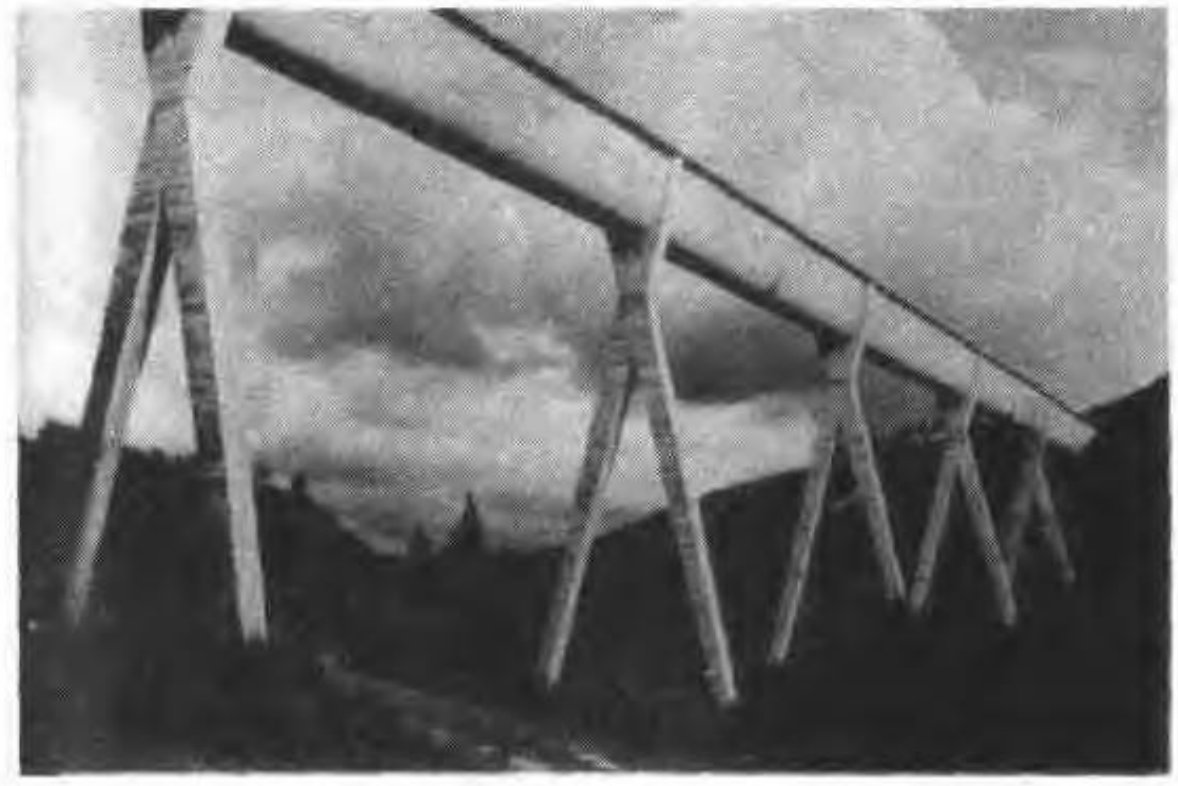


图 2-13 阿罗丝渡槽

为了达到上述效果，将渡槽设计成一个 124 ft（37.8 m）长，支承在间隔 62 ft（18.9 m）的支架上，两端伸臂各长 31 ft (9.45 m)的单元（图 2-14)。这样，由渡槽重力（包括渡槽构件自重和渡槽中流水的重力荷载）产生的弯矩，在沿整个渡槽长度方向都是负值，只有渡槽单元的中点和伸臂的自由端处弯矩为零，而在渡槽中间支承截面上的负弯矩最大。这些负弯矩使得渡槽的顶部都受有内拉力。当渡槽用后张法预应力制造后，使得在预加应力和渡槽重力的共同作用下，整个渡槽截面都受着纵向压力。这个纵向压力在渡槽底部的值最大（图 2-15 (a)），同时这里的水压力也是最大的。

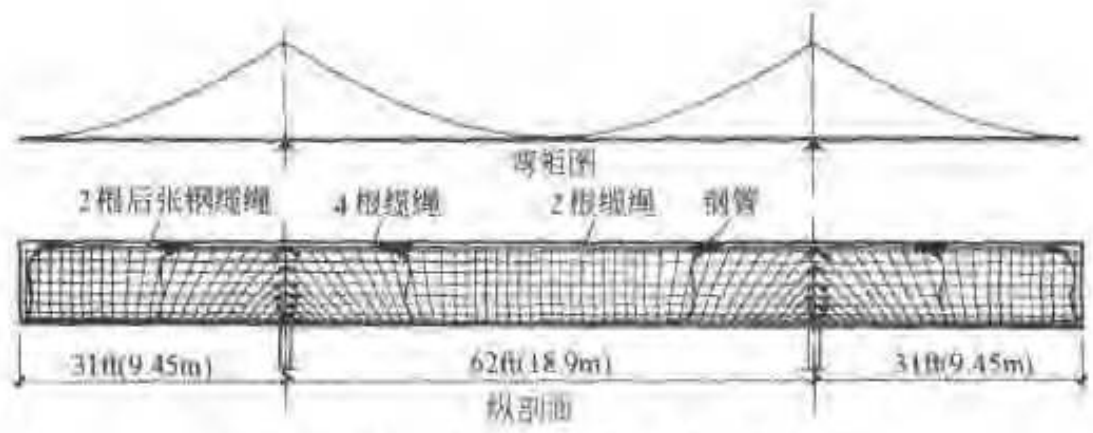


图 2-14 渡槽单元弯矩图和纵剖面

为了在横向对渡槽槽壁施加压力，在渡槽顶部设置了很多连接 U 形槽壁顶端的横杆。这种横杆每隔 15 ft（4.6 m）设置一根，用花兰螺丝使其受拉。这个拉力使槽壁互相靠拢，在槽壁内产生横向弯矩，使渡槽内侧受压，压应力愈向底部其值愈大（图 2－15（b））。

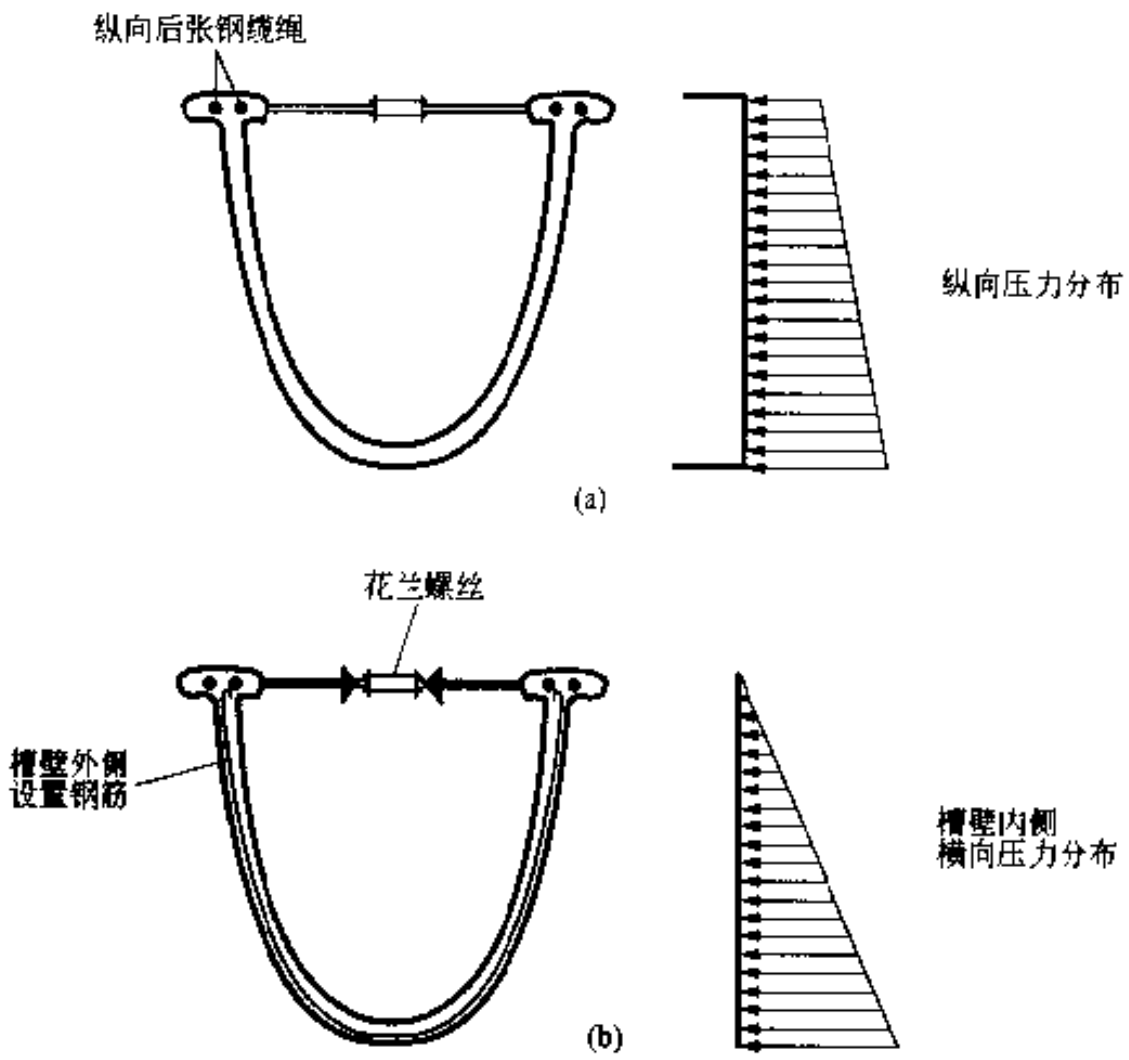


图 2－15　U 形槽壁顶横截面及槽壁受力情况

（a）沿渡槽纵向的压力分布　（b）槽壁内侧的横向压力分布

横向钢筋沿渡槽槽壁的外侧布置，它们在拉紧横杆使槽壁产生的弯矩作用下受拉。这种钢筋还能承受自渡槽伸臂端至支承架间由竖向荷载产生的沿槽壁的剪力，并能兜住渡槽底部承受槽底的拉力，好似 U 形梁底部的受拉钢筋一样。

为了对渡槽顶部施加后张预应力，要在槽顶的浅沟里预先放置一对钢铰线（在渡槽两个支架附近各再增设一对）。这些浅沟是张拉预应力筋的工作窄道；浅沟中预先放置的钢铰线也是渡槽顶部的纵向受力钢筋，它们将承受渡槽因重力荷载作用而产生的负弯矩。

上述钢铰线用钢缆绳做成，其端部可简便地将各股钢绳做成弯钩并埋设在混凝土渡槽壁内；一旦渡槽槽壁的混凝土凝固后，那些埋设在混凝土内的缆绳端部就成为预应力钢铰线的锚固端。图 2－16 中所示钢铰线锚固端附近的圆管是为了防止钢铰线和混凝土槽顶表面产生不利的粘结应力而设置的。

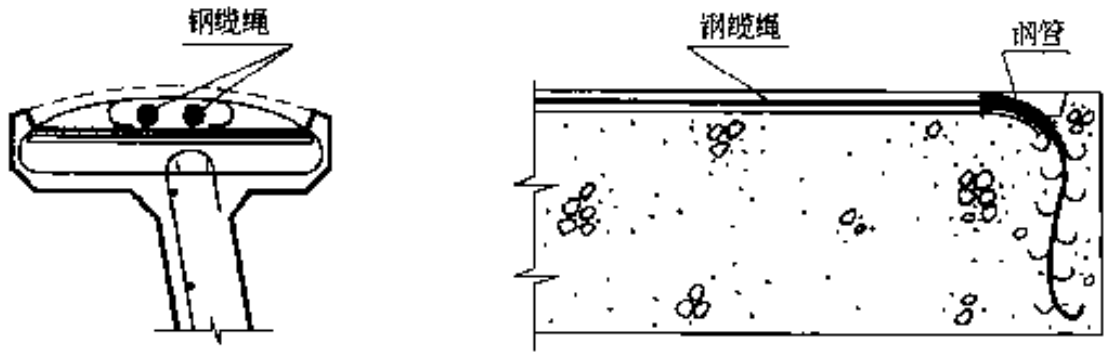


图 2-16 纵向钢缆绳锚固情况

在渡槽混凝土凝固后，钢铰线可用下列办法进行张拉：每对钢铰线都用夹具（clamp）固定在槽顶浅沟里的相应位置上，然后设法将两个夹具中部的钢铰线用一对水平推力将其分离开，这样在纵向就对钢铰线进行了张拉（图 2-17）。这种操作方法，很

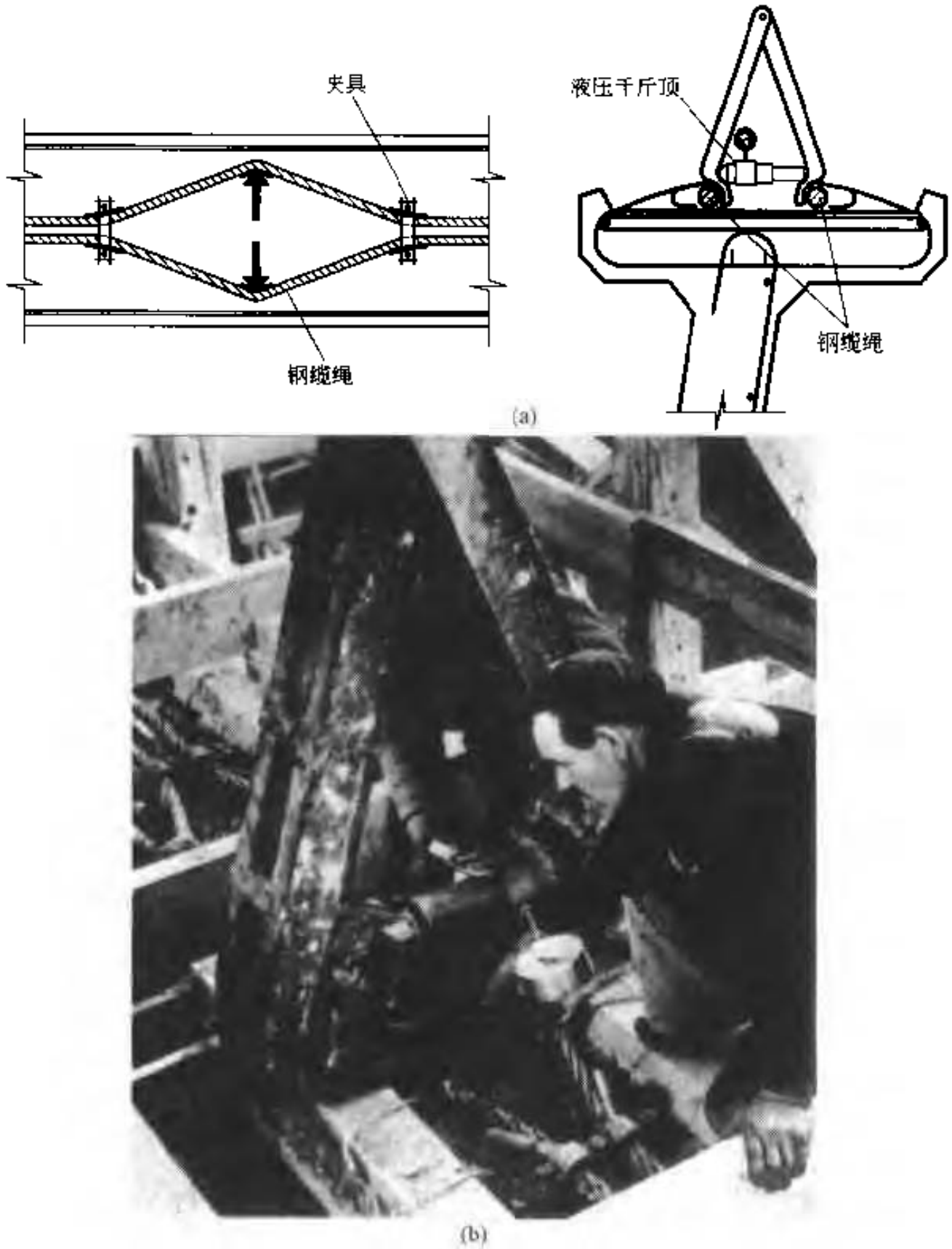


图 2-17 纵向钢缆绳张拉情况

(a) 千斤顶张拉方案 (b) 张拉钢缆绳情况

容易用一对装置在一个枢轴上的工具夹并用一个液压千斤顶来完成。当钢铰线中的预拉力达到预先的要求时，被拉开的钢铰线就用一个分离器（spreader）使它们永远分开。当这对钢铰线最大可能的分离尺寸并不能满足预拉力的要求（可从液压表上的数值算得）时，则可以再对另两个夹具间的钢铰线用同样的办法进行预张拉。

当钢铰线完成后张预拉的工序后，在它们的上面可铺设一厚层砂子加以保护，以防止大气温度的变化，特别要防止太阳的辐射。几周后，再用液压千斤顶对预拉力进行校核。这是因为混凝土的收缩、徐变以及钢铰线的松弛，都可能使得预加的拉力受到损失面需要及时对预拉力进行调整的缘故。

高架渡槽每个单元间的连接是采用埋设在槽壁混凝土中的波形铅皮封口的。在波形铅皮板的上面覆盖一层用金属丝或钢筋网加强的沥青层（图2-18）。

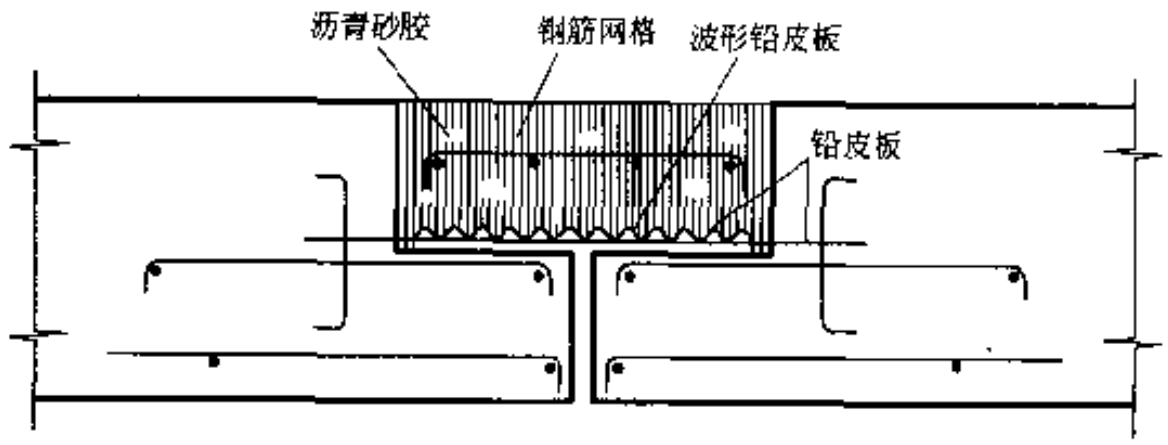


图2-18　伸缩缝处连接做法

架设渡槽的高架支承是两个倾斜交叉的杆件，形似一个巨大的双脚规。高架支承上部具有与渡槽外形相同的形状，并有专设接缝与渡槽槽壁连接，这是由于当花兰螺丝张拉时渡槽U形截面两侧槽壁有相互靠拢的倾向，设置的接缝可保证花兰螺丝张拉时支承处能与槽壁一起变形的缘故（图2-19）。高架支承架组装后的造型新颖，并能较好地保持整个渡槽结构的稳定。

渡槽槽身无论在跨度中间还是在伸臂部位均呈简状，其半个横截面形状为三次抛物线，这为水流提供了一个好的轮廓并且有较好的结构受力特性。

流槽总长度1 340 ft（408.5 m），使用后无任何裂缝和漏水现象，面全部建造细节都完成得既简单又便宜。

【编者提示】

对结构“施加预应力”，是概念设计中常用的一个手段。

它对结构预加一个用来平衡使用荷载的力，得到与未来使用时应力状态相反的预应力，既可抵消使用荷载，又可将混凝土变为弹性材料，用简单的弹性公式进行估算。其结果是可以减少结构的截面，加大结构的跨度，扩大建筑的开间，减少建筑的层高，还可以使结构不设或少设伸缩缝，抵抗过大的不均匀沉降，甚至改变结构的施工方法……本例则是用预应力手段使混凝土槽壁在各向受压，不渗漏。预加应力的手段真可谓“无所不能”。“施加预应力”被称为结构的法宝，可以解决各种当前结构设计中存在的问题。

托罗哈在本例中极巧妙地将施加预应力方法与两端伸臂做法相结合，使每个渠道单元在渡槽盛水时都处于纵横双向全截面受压状态，不言而喻地能有效地防止渡槽开裂渗水，而且施工简便，造价便宜。

这是一个创造性地利用预应力进行概念设计的范例。

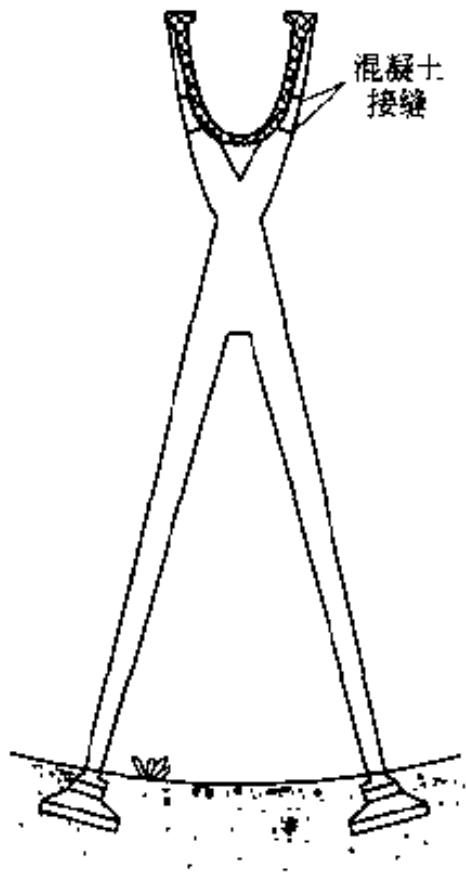


图2-19　渡槽的高架支承

2.6 半英里长的渡槽方案

半英里长的渡槽（project for a half-mile aqueduct，图 2－20，图 2－21）工程除有着较大的长度——近 3 000 ft（近 914 m）外，与前述阿罗兹渡槽工程很相似。但它在建造时被要求要降低对渡槽施加预应力进行纵向张拉时的造价；而这种纵向预加应力的方法对抵消由重力荷载所产生的在槽壁上的弯曲拉应力是必要的。此外，本工程还要求设置尽可能少的膨胀节点。按照这些限制条件，建议将本工程做成一个有众多跨度的等跨连续梁，以便得到一个降低沿梁长度方向截面最大弯矩值的有利条件。

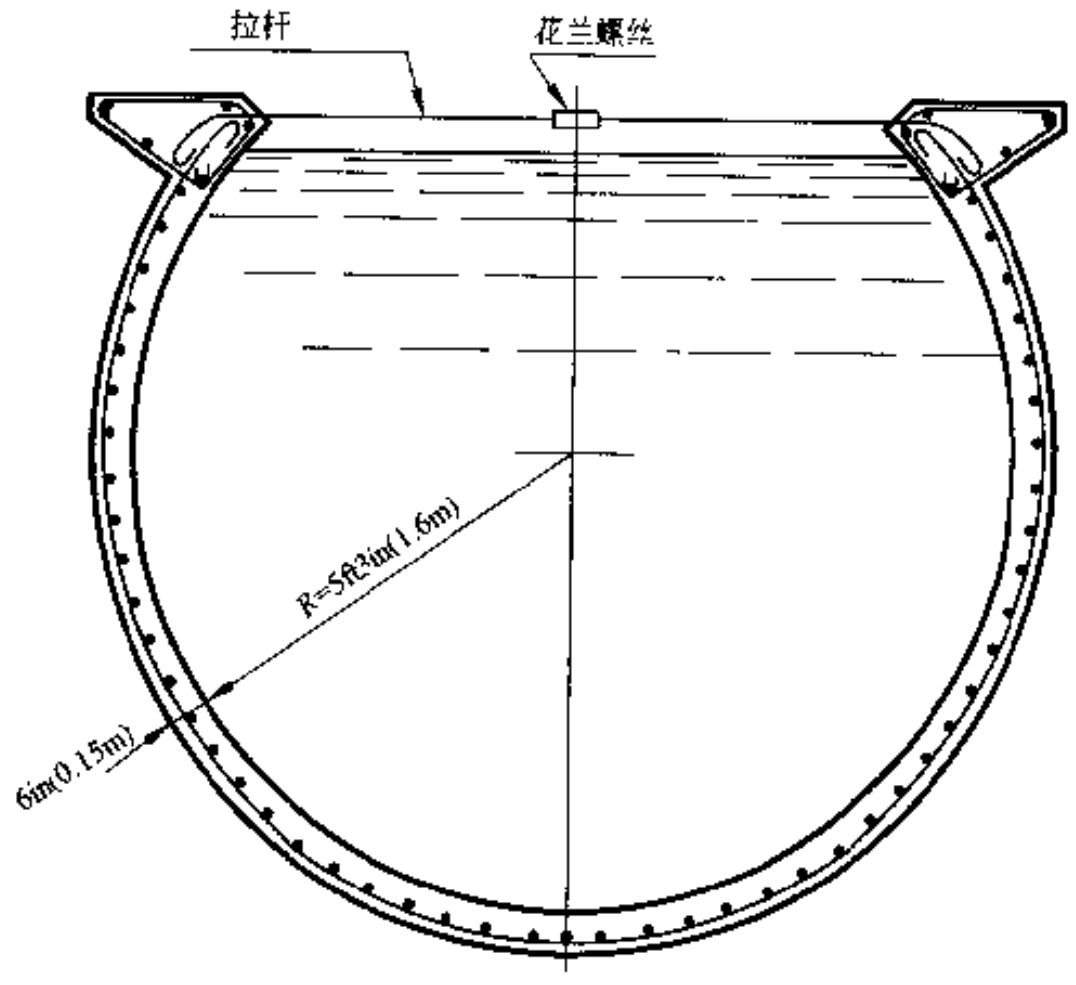


图 2－20 渡槽横剖面及其配筋和施加预应力示意

结果，本工程确定只是在沿渡槽长度的中点处设置一个连接点，其两头连接两侧长度很长的等跨连续梁。这些连续梁在高架渡槽的两端均设计成固定端支座。在这个中部节点上，设置一个位于渡槽梁上端的三铰拱（图 2－22）。由于在重力荷载作用下，这个三铰拱每一侧拱脚处都存在着一个常量为 400 t 的水平推力，这个水平推力需要由渡槽壁加以承担，这样就取得使沿渡槽全长上的槽壁受到压力的效果。这种结构方案比为了同一目的在习惯上常用的预应力钢缆体系更加便宜，而且受压结构构件的长度愈长，所能节省的造价愈多。

为了确保开口渡槽的各处槽壁都受到常量的纵向水平推力，设计者将三铰拱的拱顶铰连接处两个拱杆接触面设计成具有必要

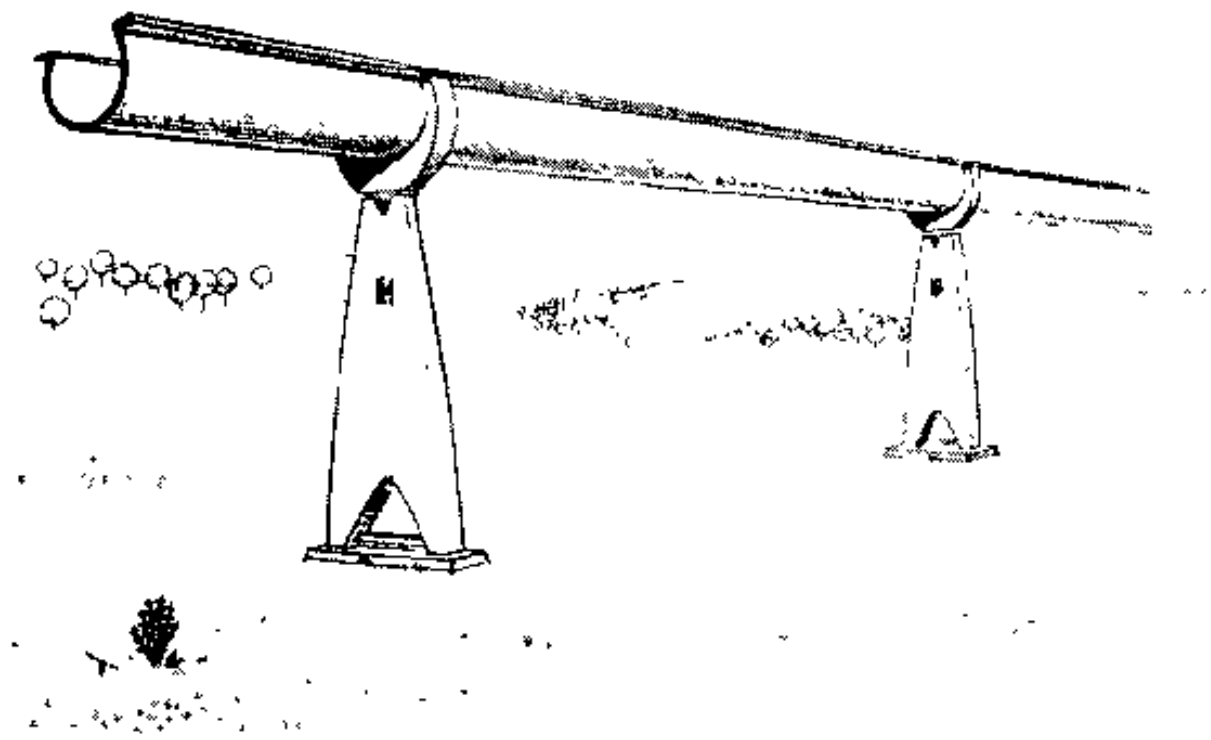


图 2-21　半英里长渡槽的标准跨间

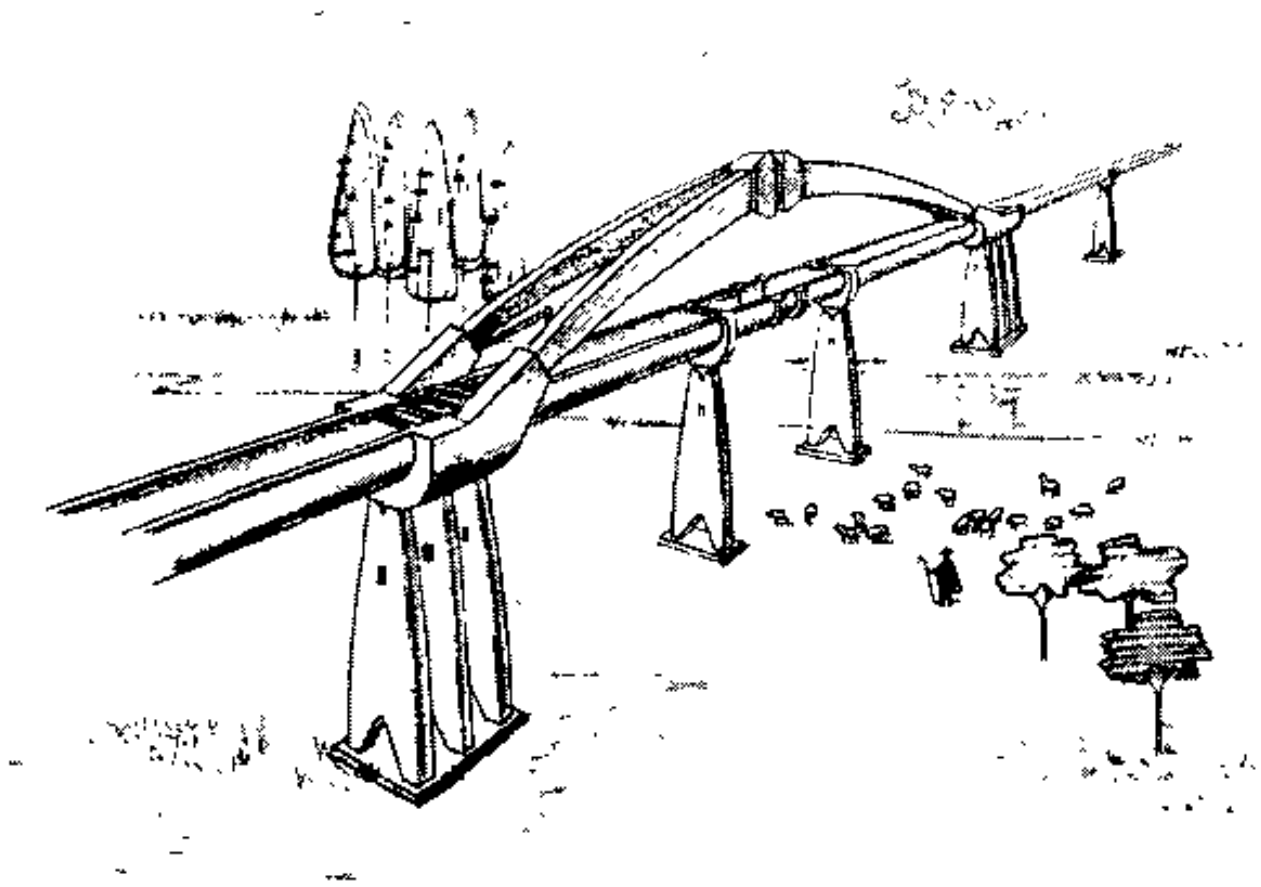


图 2-22　渡槽中部连接处做法

曲率的曲面（图 2-22），这样，不论两侧拱杆的距离在大气温度变化下是靠得更近一些还是离得更远一些，也不论沿渡槽全长上会产生什么弹性变形和塑性变形，拱杆接触面上接触点与拱脚间的拱高尺寸永远保持不变。

渡槽的支承墩要设计成具有足够的侧向刚度，以防止渡槽梁在压力作用下发生压屈；同时支承墩又要设计成是一个两铰链杆，使得渡槽梁在因大气温度变化而伸长或缩短时，不会过多地阻止由三铰拱产生的压力的传递。

渡槽节点处的防漏水做法，是在渠道内侧表面涂有一层橡皮薄膜，在渠道外侧表面装有一个金属套筒。它们都跨越节点缝隙，能达到允许渡槽沿长度方向胀缩的效果。

【编者提示】

本渡槽结构方案与前述阿罗丝渡槽结构方案异曲同工，是充分利用天然条件和结构力学原理的典范。

天然条件之一：本渡槽为直线形，可以顺利地传递由渡槽中部三铰拱产生的水平推力；

天然条件之二：三铰拱拱顶处可以随不同气温转动，使拱底在不同气温下产生几乎相同的水平推力。

力学原理之一：灵活运用三铰拱产生水平推力的原理，使渡槽在沿全长方向产生均匀压力；

力的原理之二：渡槽支座做法是典型的“可在纵向发生水平移动的链杆”，它不影响水平推力的传递。

本方案巧妙处在于三铰拱曲线形状、拱顶铰弧线和构造做法。作者并未在撰文中交代。

2.7 考特温多斯飞机棚

考特温多斯飞机棚（hangar at Cuatro Vientos）屋盖的纵向檩条搁放在115 ft（35.1 m）跨度的金属拱上。金属拱的杆件在对角线方向上相互交叉，以致安装后形成一个刚度很大的圆筒面交叉网，能够较好地承受作用在竖向投影上的风荷载和其他竖向荷载（图2-23）。

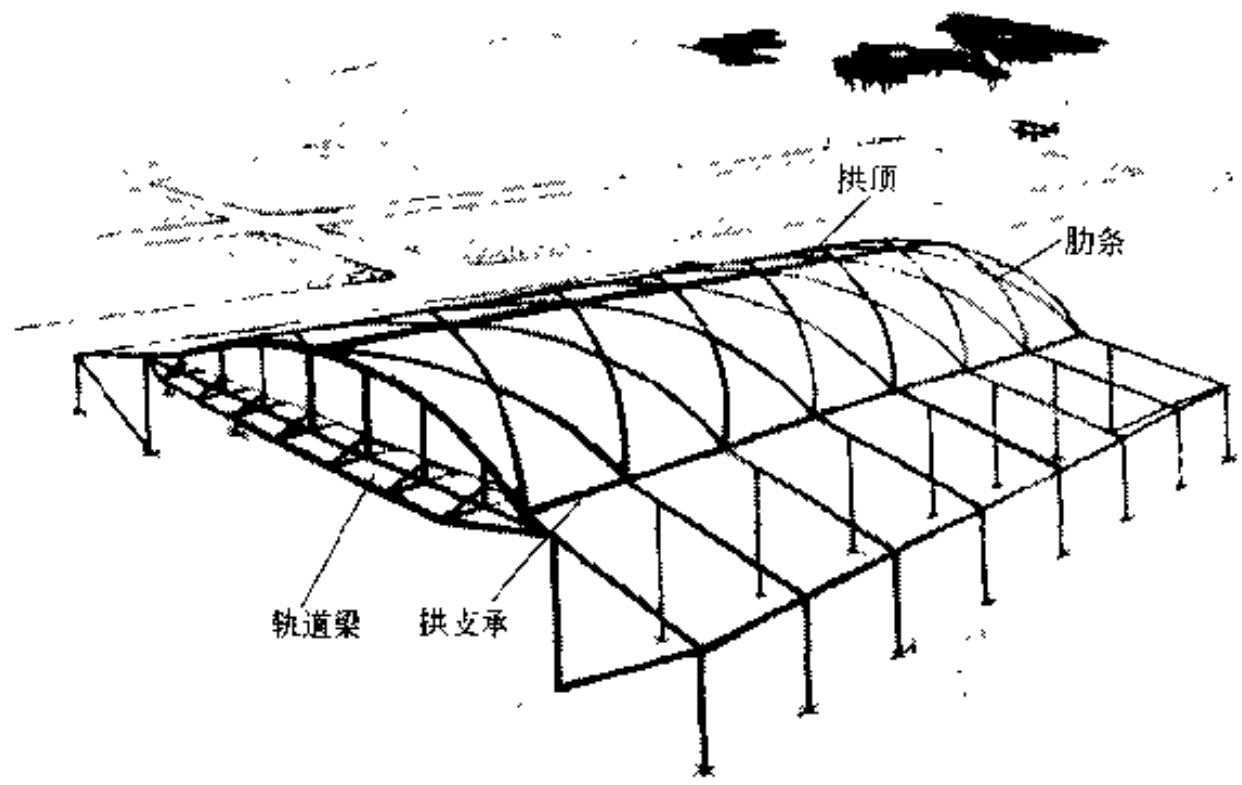


图2-23 飞机棚结构体系示意

拱脚支承在一系列突出于门式刚架一侧的伸臂梁上。这些刚架除两个端部刚架外，没有一个设计成必须用它来承受拱的侧向水平外推力的。而两侧端部刚架的对角线方向上则设置了具有足够强度和刚度的斜撑，使得端部刚架能承受整个屋盖拱传来外推力。端部刚架之所以能承受上述全部外推力，是由于两侧刚架顶部的屋盖结构就像两个略为倾斜的水平梁一样，这两个水平梁虽然自重很轻，但却在水平方向有很大的强度和刚度，足以将整个屋盖拱的全部水平外推力传递给各自的端部刚架。

屋盖拱在地面上拼装而成。拼装时在拱脚处采用一系列的临时拉杆，使拱体形成自我平衡的结构（图2-24）。当将拼装后的屋盖提升就位（即安装在两侧门式刚架的伸臂梁上），并将拱用铰连接在它的支承伸臂梁上时，临时拉杆即可予以拆除。值得注意的是，应使拱脚处的支承点做成为一个可有微量侧移的滚动铰支座，用以应付温度变化后屋盖拱在横向的伸缩。当屋盖拱完全就位后，将得到一空旷的使用空间。

两侧外层拱支承着一个轨道梁（rail girder），在轨道梁下

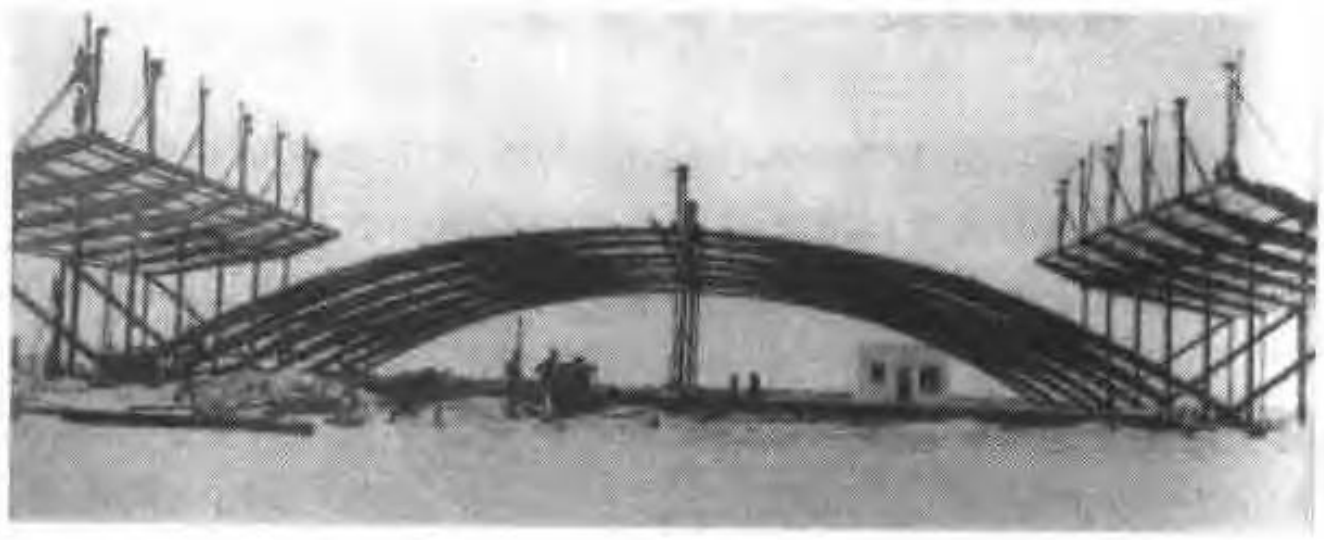


图 2－24　拱形屋盖结构就地安装后等待起吊就位

安装一扇有轨道的大门。轨道梁安装在外层拱的拱脚处，并设计成既能承受作用于大门上的水平风力，又能允许大梁在温度变化时自由胀缩的构件。轨道梁所承受的水平风力将通过屋盖拱的纵向檩条被传递给布置在飞机棚后侧的扶壁墙上。

由于屋盖拱是由一系列的三铰拱组成的。主要的弯矩发生在拱腰处。因此，每侧拱杆件所需要的截面高度在拱脚处最小，沿拱身逐渐增大，在 1/4 跨度处最大，以后又逐渐减小，到拱顶处又最小。这种做法可以将一根足够 1/4 拱身长度的工字钢沿腹部对角线剖开，调转 180°后再沿腹部将剖缝处焊牢，形成另一根具有 1/4 拱身长度的一头截面尺寸大，一头截面尺寸小的工字钢，接着将两根这样的不等截面工字钢拼成半个拱身加以弯曲后完成（图 2－25）。就位后的屋顶见图 2－26。

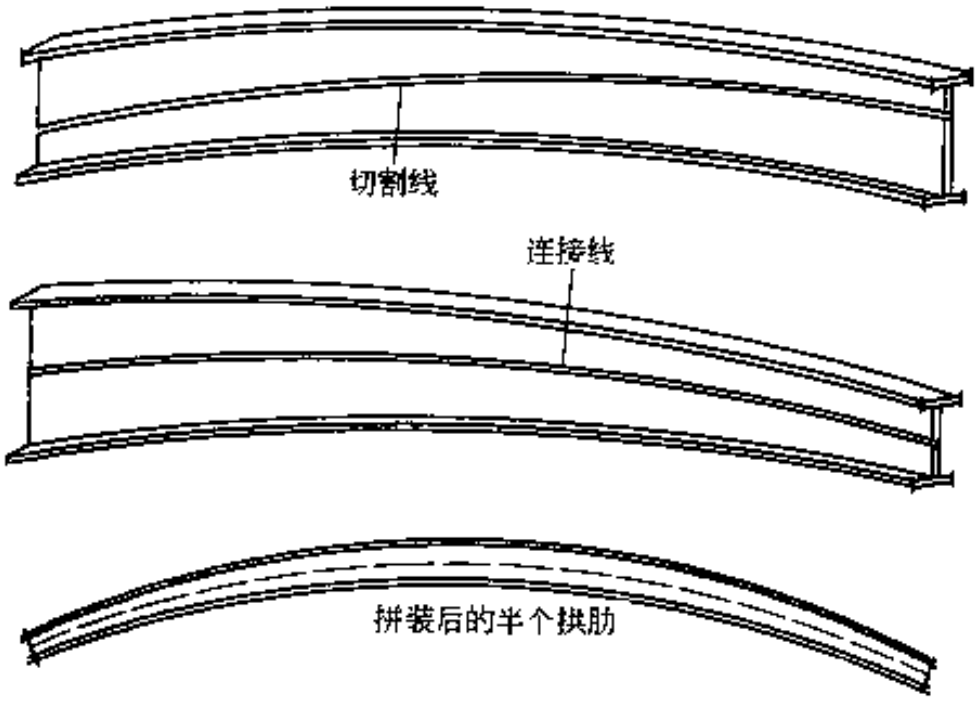


图 2－25　拱肋的拼装技术



图 2－26　就位后的屋顶

【编者提示】

本例是充分利用结构整体性和钢材可焊性的范例。它表现为：

（1）利用两侧钢构架承担拱顶的水平推力，不必在屋顶拱结构上另外再加设承受水平推力的构件（请注意正文中关于两侧刚架顶部屋盖结构的叙述）。

（2）裁剪工字钢的腹板，将它再焊成变截面构件，最合理地利用型钢原材料作为拱身构件。

在这里，可以学到一位资深的结构工程师是怎样创造性地在结构细节上，把受力分析和结构构件的连接构造融为一体的。

“结构的构造做法必须与结构的受力分析相一致”，这又是概念设计的一条不可违背的原则。

2.8 马德里赛马场观众台

马德里赛马场（Madrid racecourse）的功能要求可从图 2-27 看出：从观众看台可以清晰地看到赛场跑道；看台顶部有一个散步厅，在它上面一侧可以观看跑道，另一侧可以观看练马用的围场；有一个赌厅，面向围场；两排赌场办公用房，一面朝向赌厅，另一面朝着走向看台和跑道的走廊；在跑道平面上有第二个散步的地方，同时还有一个赌场办公室；有一个工作人员出入的通道；最后，要求屋盖覆盖着顶部散步厅和观众看台。

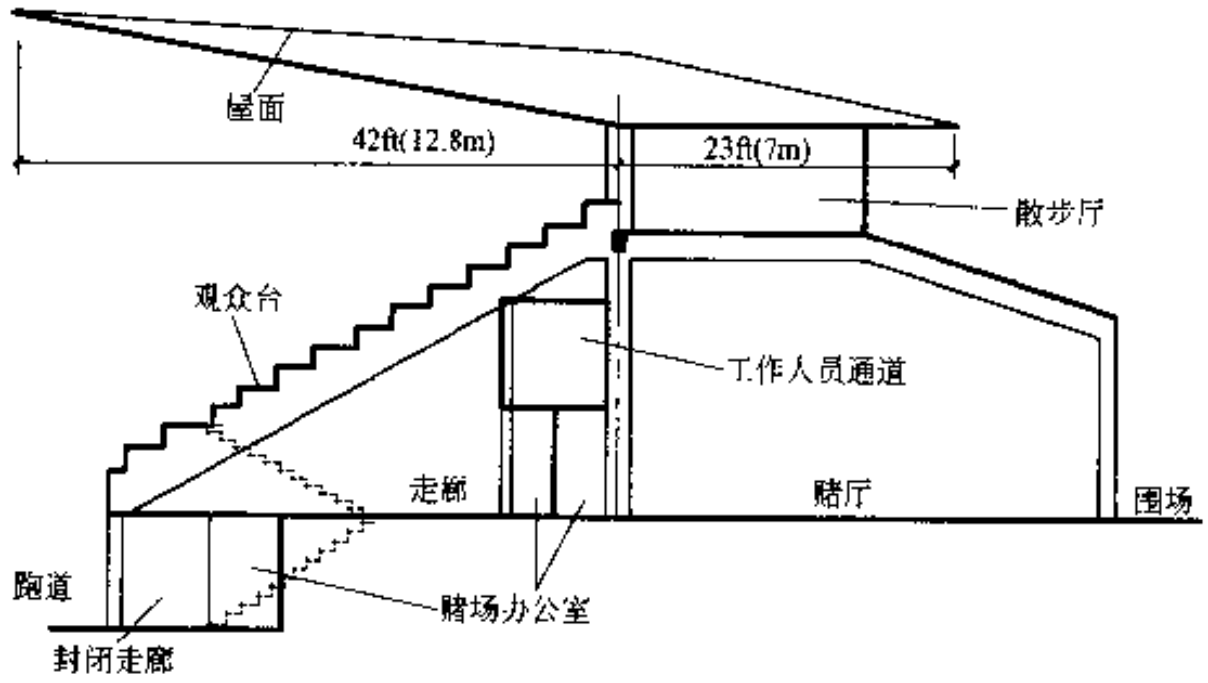


图 2-27 第一方案

显然图 2-27 所示的第一个方案是不适合的。虽然这个方案没有画细部，但明显地可以看出有以下缺点：

(1) 观众台上悬臂屋盖的重力荷载必然大于另一侧散步厅屋顶上的重力荷载，顶部散步厅后面的支承杆必然受拉，因而它必须是一个拉杆而不是受压柱子。

(2) 中间柱子必然承受全部屋盖的重力荷载，再加上拉杆的拉力；这样，中间柱就是一个主要受力构件，其截面尺寸必然很大。

(3) 赌厅上部楼盖的重力荷载大部分被拉杆所承受，围场一侧柱子所受的轴力极小，因而它似乎可以取消，使室内外环境融为一体，变成一个开敞的空间。

(4) 在紧挨着主要柱子的旁边，为了支承工作人员出入通道又设置了另一个柱子。它既难以处理好，又使得通道下面的走廊看上去很狭窄，令人感到很奇怪。如果将出入通道设置在一个从主要柱子伸出的悬臂梁上是没有困难的。

(5) 在跑道一侧，用另一根柱子支承观众台底部不是必要的，因为跑道平面和观众台底面之间足以容纳设置一个伸臂梁所需要的高度。

于是第一方案发展成图 2－28 所示的第--次修改方案。一般说来，这个方案也是不错的。

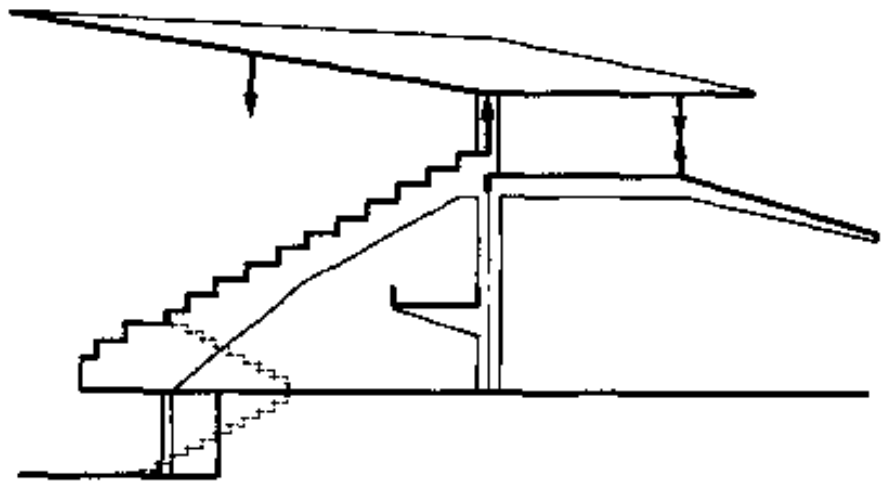


图 2－28　第一次修改方案

(1) 显然，屋盖悬臂梁的截面高度在自由端处最小，要逐渐加高至主要支承处，然后至拉杆端又可以逐渐变小。但是，在主要支承柱上端采用刚性连接并不很有用，因为屋盖结构在两侧竖向力作用下，它的稳定性很好。另一方面，在散步厅标高处的柱和梁之间有一个刚性结点却十分重要；尤其在风力作用下它会显得更为重要。

(2) 赌厅上部悬臂楼面在散步厅部分必须水平而平坦；其余部分却可以有一个向下的坡度，以便尽可能不挡住从散步厅上往下看围场的视线。

进一步说，悬臂楼面支承构件与柱连接部位的截面高度要大一些，因为那里所承受的弯矩很大。

(3) 似乎主要支承柱的下端必须固定，并以较大的截面尺寸一直延伸至基础以抵抗风力；但是从全面分析，观众台斜梁却是一个很好的支撑，它使整个结构保持很好的稳定，而且水平风力可以沿此斜梁有效而经济地传给观众台底部柱基础。

这时，就会发现设置两个刚性很强的支承柱是有缺点的（一个是主要支承柱，另一个是观众台底部的支承柱），主要是在温度变化和混凝土收缩的情况下会产生很大的内应力。所以，似乎可以减少整个结构的刚性，使得主要支承柱下端变成铰支承。

最后，根据出入通道净高的要求，观众台斜梁的截面高度应该尽量变小。

于是，又形成图 2－29 所示的第二次修改方案。

最后，为了进一步取得美观和经济合理的效果，又将整个结构设想用各种曲线形构件组成，如图 2－30 所示。如果底部结构是采用曲线构件组成的话，那么屋盖结构采用曲线构件则更为合理。倘若屋盖是一个上面隐藏着反梁的平板结构，一方面看上去

太重，另一方面又很不美观。而如果采用曲线形屋面，那么在一系列柱子之间可以用悬挑的旋转壳面加以覆盖。

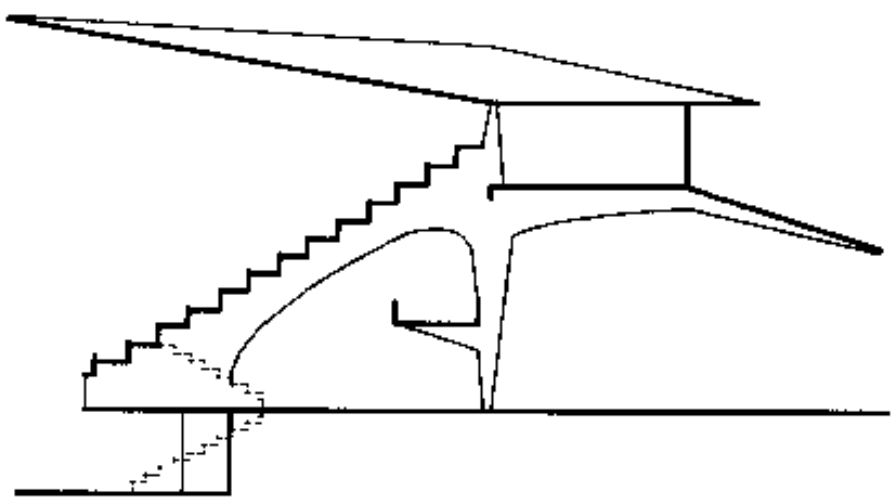


图 2-29 第二次修改方案

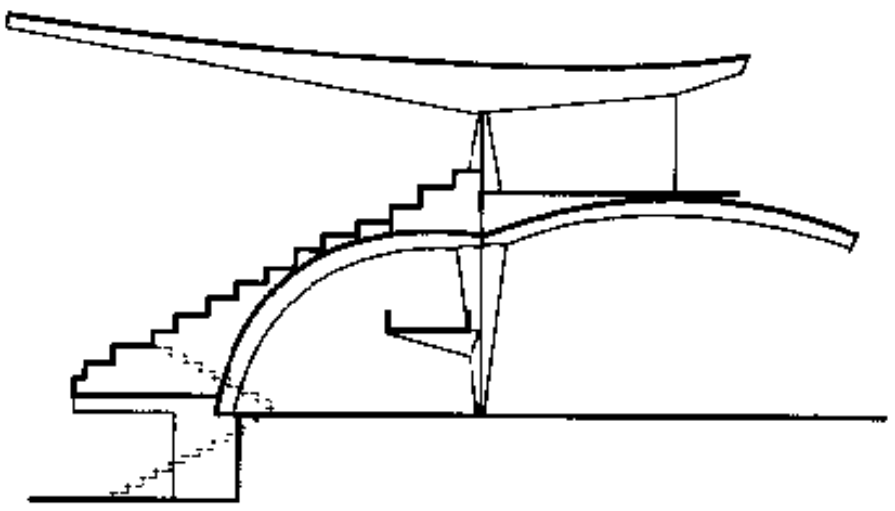


图 2-30 最后的修改方案

由于悬挑构件在柱支承处内力很大而在悬臂端内力为零，所以屋盖壳面的设计要求是：在支承柱附近，壳面的曲率要大，同时截面的刚度要大；而在自由端附近，壳面的曲率可以较小，截面的刚度也可以较小。

曾经选择了很多壳面形状，诸如连拱、劈锥壳等。经过比较，没有比双曲抛物面壳更为合适的了（图 2-31）。由于双曲抛物面各部位的曲率不一，实际的屋盖结构是双曲抛物面壳体的一个截段。该截段曲率大的那部分放在悬臂屋盖结构的中部，搁置在支承柱附近，而截段曲率小的那部分则分别在悬臂屋盖结构两端的自由边附近。

现在的问题是：这种想像出的屋盖形式是否能解决实际问题？它在工程技术上是否可行？在这两个问题上，托罗哈并没有考虑得很多。想像既不能没有常识作为设计依据，也不可能只是一个演绎推理的过程，而需要不断地进行修改和完善，直到它完全符合逻辑而且公认为不得不采用这个方案时为止。

本设计方案竞赛的限期为 3 个月，按理要花与此相应的时间才能完成。但事实上，托罗哈考虑方案的整个过程只用了几分钟。

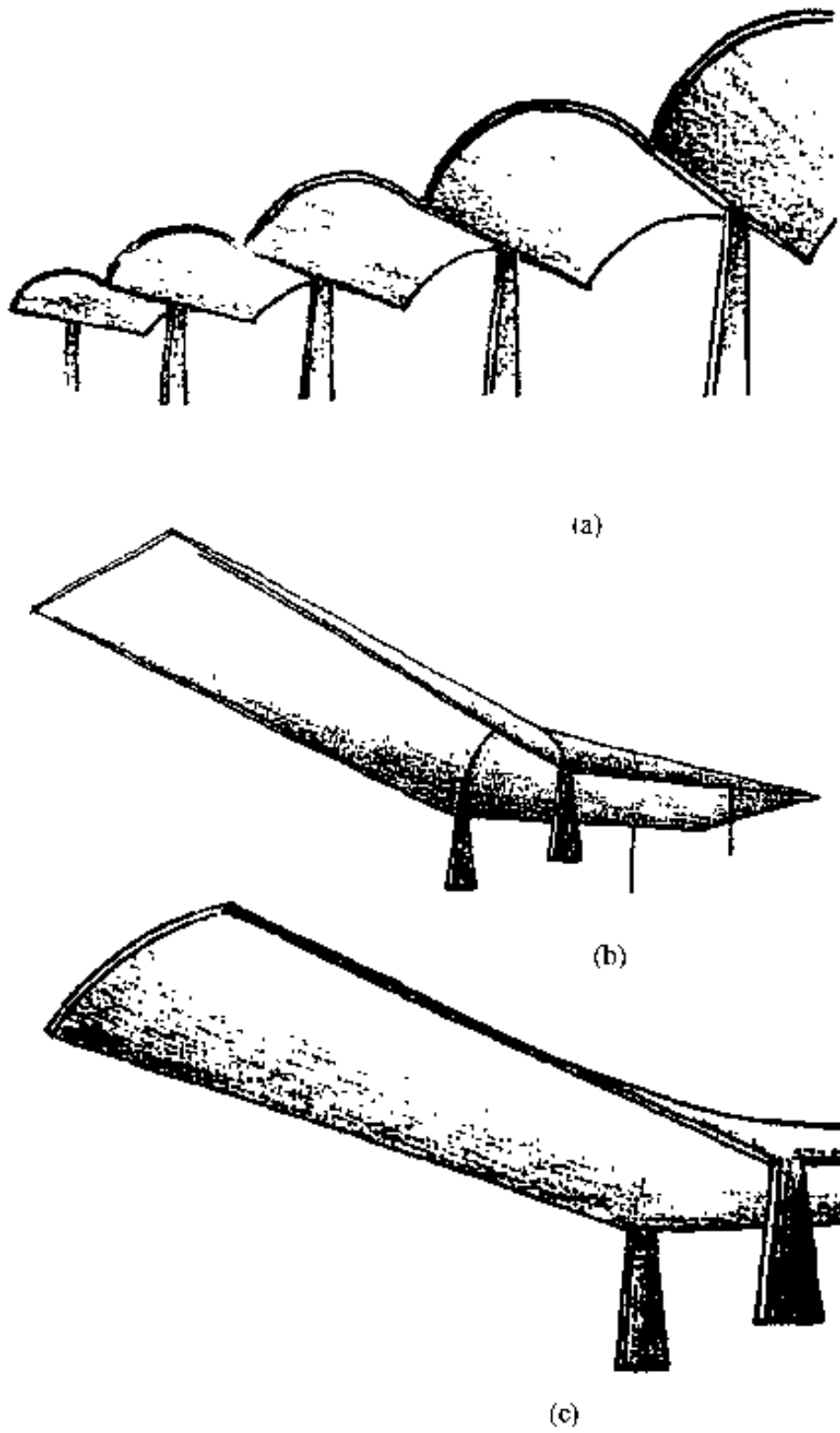


图 2－31　几种悬挑的屋盖方案

(a) 连拱方案　(b) 劈锥壳方案　(c) 双曲抛物面壳方案

这些构思和最后方案是在早晨的 1 个小时之内完成的。

屋盖最后选用悬臂式双曲抛物面壳体截段，42 ft (12.8 m) 长。在支承柱外的波段隆起 4 ft 6 in (1.4 m)，曲率半径 9 ft (2.8 m)；而在自由端处的波段隆起 1 ft 7 in (0.5 m)，曲率半径 22 ft (6.7 m)，厚 2 in (5.1 cm)。这样的尺寸比例，看起来显得轻巧。

这些双曲抛物面壳体截段的交线呈中部向下凸出的曲线状 (图 2－32 (a))，看起来非常轻巧。所有拱波的下边缘支承着整个壳身，承受由拱顶传来的整个重量。每个拱的拱腰部分可视作一根梁的腹部，拱顶相应于梁截面的受拉区而两拱相交处则相应于梁截面的受压区 (图 2－32 (b))。

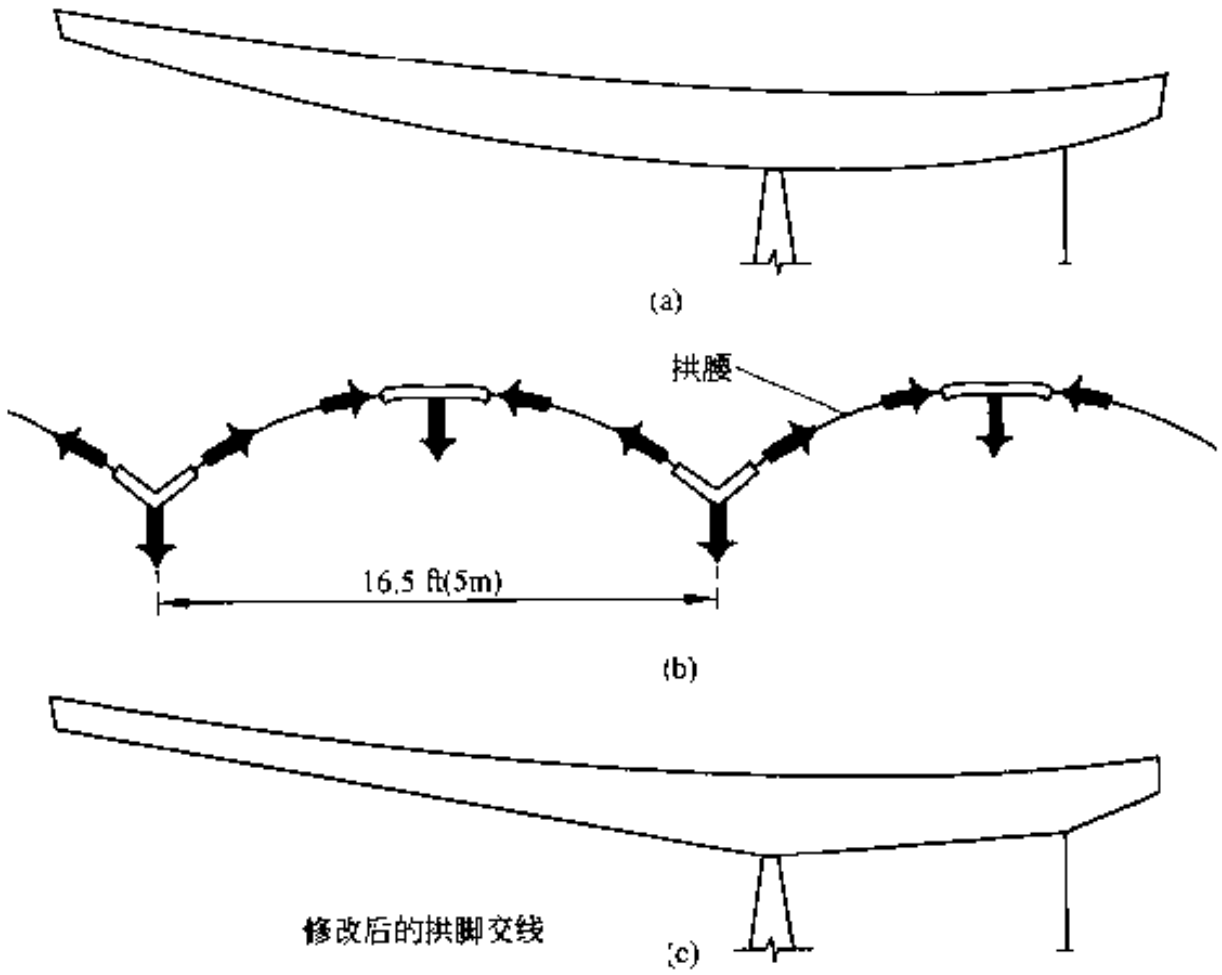


图 2-32 屋盖剖面

如若把这些双曲抛物面壳体截段仅仅看成为一个由上下弦区和中间腹部区接起来的简单梁的模型，自然过于简化了，事实上，问题既复杂也简单。最清晰的描述是提供一个等压线模型（图 2-33），由一族主压力轨迹线和与它们正交的主拉力轨迹线组成，两组轨迹线沿双曲线壳面在空间相交。壳体屋盖结构的每一个单元体的重力荷载都直接压在这两族受力线上，并通过它们将这些重力传递给支承柱。

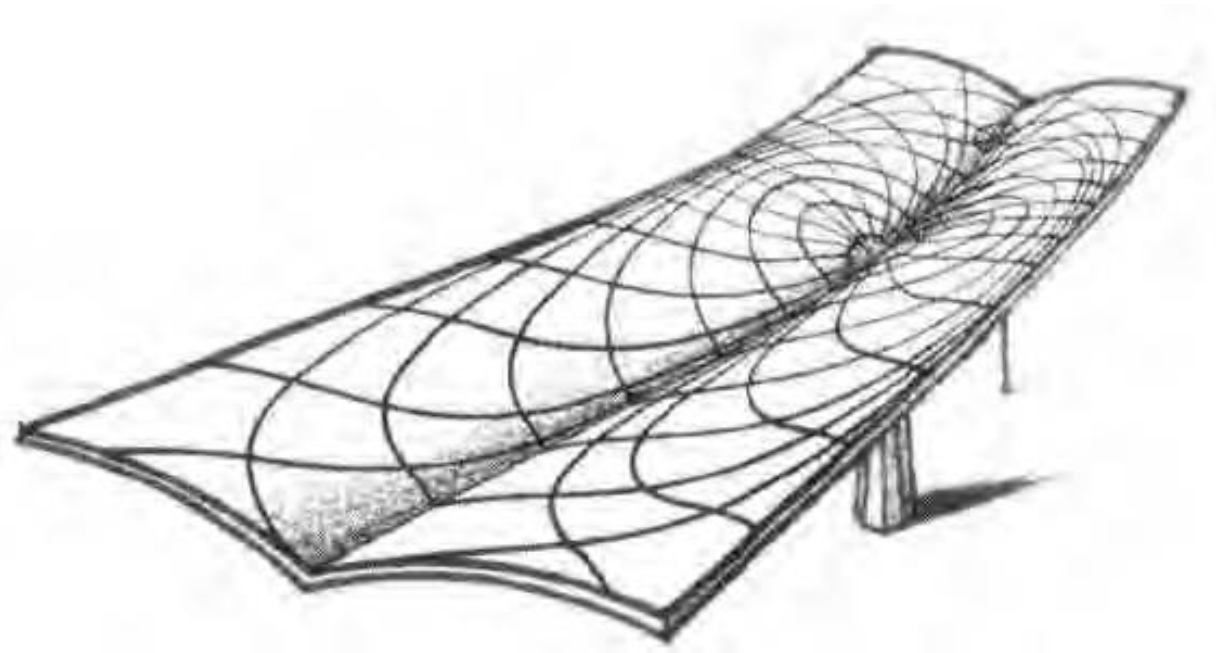


图 2-33 屋盖正应力分布示意

在设计中并不需要对这个典型双曲抛物面做精确计算，只须将它稍做修改。修改的方法是将（图 2-32(a)）所示的曲线部分都改成相近的直线部分（图 2-32(c)）。

弹性理论并没有对这种结构型式提供一种适当的应力计算技

术。然而，即使没有精确的分析，我们都清楚地知道这种结构型式具有很好的空间工作性质。对于这座现有建筑物说来，还可以着手进行试验，其目的是获得一个可能产生的等压力轨迹线分布图形。

最后决定做一个模型试验。承包商答应花费一个壳身单元的 424 ft^3（12 m^3）混凝土和全部钢筋来做一个足尺模型，进行实物试验，目的是对它的建造过程进行核实。同样的足尺模板还以用来建造 10 个另外的壳身（整个工程要采用 3 套模板）。

通过试验证实，模型可以承受 3 倍于正常使用荷载的重力（图 2－34）。



图 2－34　一个屋盖单元的加载试验

这种承载力的坚实性还可以从下面事实描述中看出：这个赛马场离西班牙内战的主战场很近，在战争中它数度遭到炮击。结果是屋盖被炮弹命中 12 次，壳面由于受到强烈振动面开裂。即使遭受这种损伤，屋盖结构仍安然矗立在大地上，至今保持着原来的形状。被炮弹命中的孔洞已经用混凝土补上，只不过由于炮弹的爆炸面使屋而有些微量下沉而已。

结构的细节并不太重要。简言之，壳身厚度从自由边缘外的 2 in（5.1 cm）逐渐加厚至支承柱处的 5.5 in（14 cm），混凝土浇筑时的施工缝留在壳身的拱顶处，因为那里渗雨水的可能性极小，面且只有很少的钢筋越过拱顶。

赌厅上部的拱顶只有 2 in（5.1 cm）厚。这些拱顶上的壳面既轻便又有曲率，这就使得它们在温度发生变化时容易伸缩。但也正是由于这个原因，它们并不能作为与支承柱相连的间距为 16 ft（4.9 m）的横向刚架的支撑。因此，为了保证横向刚架的侧向稳定，要在支承柱的中部设置 1 根纵向连系梁（图 2－35），它和支承观众台的中部横向刚架一起，形成一个刚度很大的门式刚架。在此中部刚架两侧，各设置 1 根连续的刚度很小的纵梁，将各榀横向刚架联系起来。这种低刚度的连接方式的好处在

【编者提示】

概念设计时，最宝贵的品质是“精益求精”。

结构设计，在满足建筑使用要求前提下，有自己广阔无垠的天地；它等待着结构设计者去开发。只有精益求精，才能品尝到更真实、更美满的果实。

在本实例中，托罗哈最初把注意力集中在横剖面的标准做法上：

第1步，处理横剖面中的立柱问题，把过多的立柱删减掉，使得使用空间更加开阔。

第2步，处理横剖面中的横梁和支承点做法。它包括充分利用观众台斜梁，保持结构稳定；改变柱的传统支承做法，减少温度应力等。

第3步，巧妙地利用多波双曲抛物面壳体截段代替传统的悬臂板梁方案。尤其以利用增加截面曲率代替增加截面刚度，以及利用变曲率的双曲抛物面截段代替变截面悬臂梁，更令人叫绝。

托罗哈继而细致地处理了纵剖面结构的稳定和纵向温度变形影响问题。托罗哈在每一次修改中都遇到新问题，他是在不断解决新问题的过程中向完美的结构方案迈进的。从他的实践中，人们可以领会到：建筑结构的概念设计也是一种艺术。

于，由于其自身具有足够的柔度，能适应长度方向的变化，便于将纵向温度变形最后传递给端头刚架。

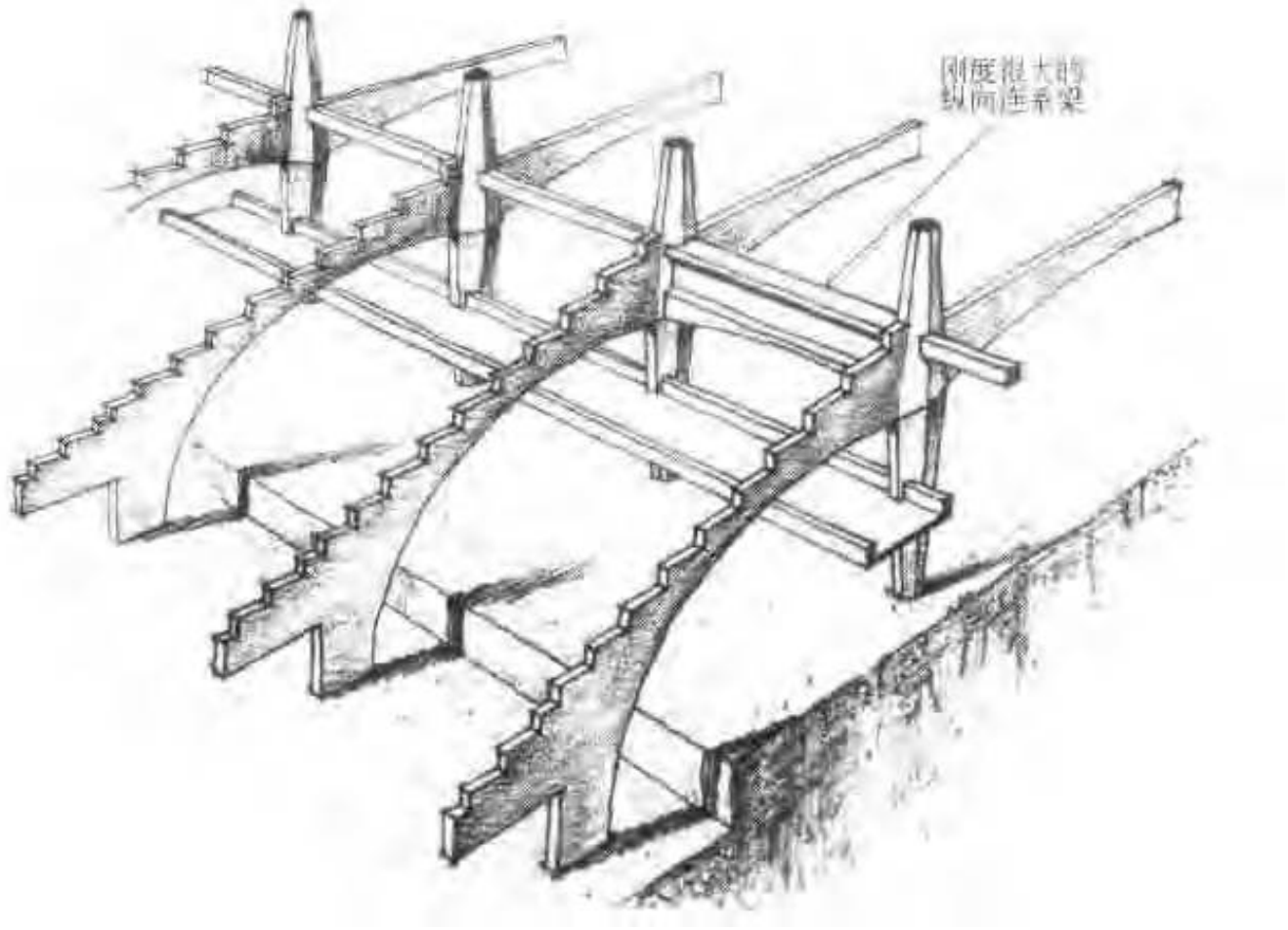


图2-35 门式刚架侧向加强

本工程寻求在底层有最大可能的空间。它关系到大赌厅和观众台下面走廊空间的大小。如果将悬挑出入通道下面和赌场办公室打通，似乎就能达到目的（它们也可能采用透明的玻璃隔断来达到这种效果）。

在赛马场跑道一侧底层走廊的屋顶是悬挑着的观众台结构。外观上看上去支承底层观众台的拱则是假的。这些假拱可以在结构工程施工完毕后再加以装饰，目的是寻求一种外观效果，而与基本的结构设计无关。

本工程竣工后的全貌示于图2-36。



图2-36 马德里赛马场看台全貌

2.9　拉斯考茨足球运动场观众台

要找到另 -些建筑材料和设计方法用于建造像拉斯考茨足球运动场（Las Corts football stadium）观众台这么大跨度的悬臂屋盖是比较困难的。本工程（图 2　37）为了在观众台上覆盖一个悬臂长度为 83 ft（25.3 m）的屋盖结构，必须采用钢结构以减少它的自重、降低它的造价。这种钢悬臂屋盖还必须刚性地锚固在一个有很强抗弯能力的竖向结构中。这个竖向结构可以用钢筋混凝土材料做成，因为混凝土自重大，既不会增加悬臂端的倾覆力矩又有利于抵抗悬臂屋盖的倾覆、而且工程造价比较低（图 2-38）。



图 2-37　拉斯考茨足球场全貌

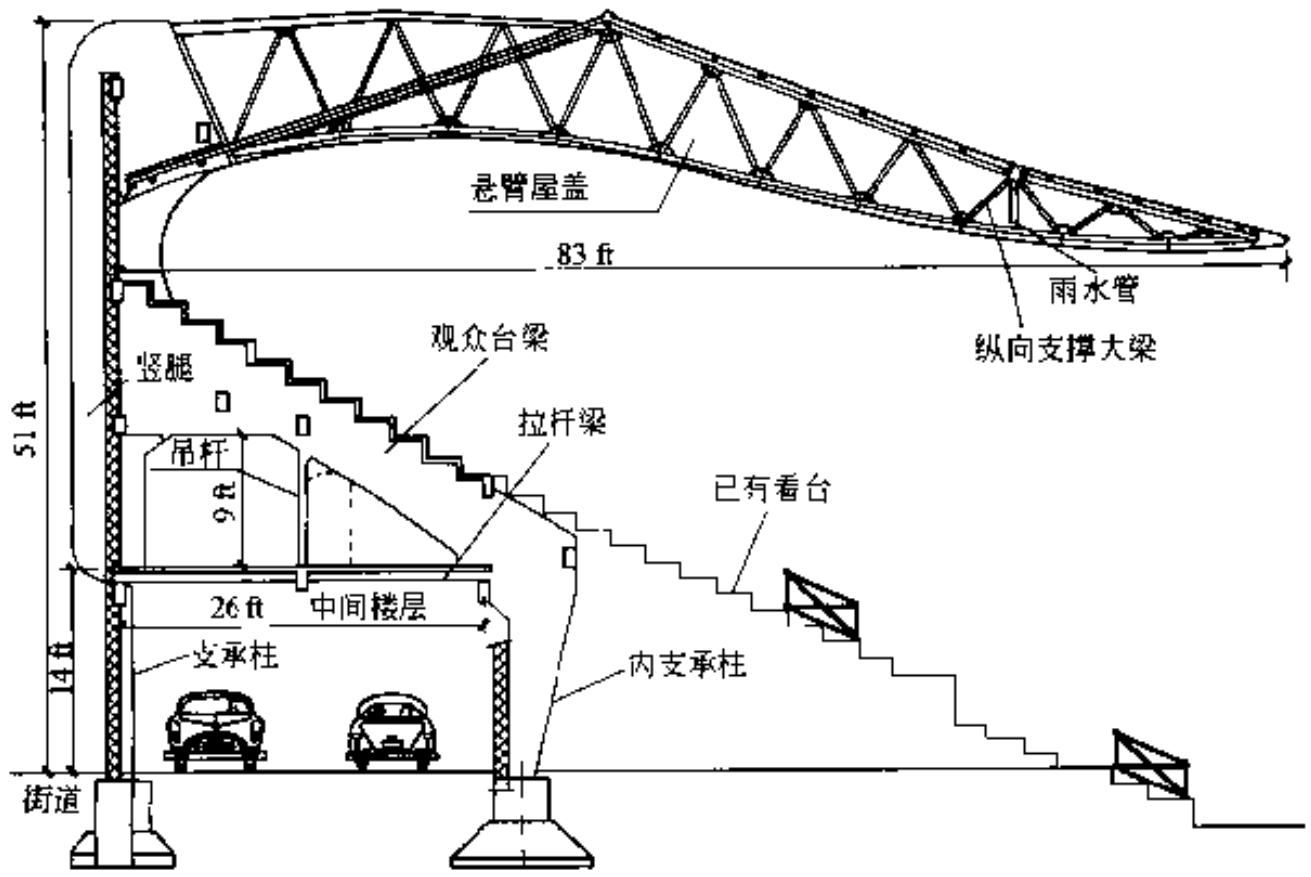


图 2-38　主体结构横剖面

竖向结构必须像梁那样有很大的截面高度，但如果将同样的截面一直延伸到地面则是不适宜的，因为这会使结构占用过多的使用空间，而这些空间应该优先留给街道或者室内通车道使用。

如果要将全部由悬臂屋盖传来的弯矩都传递给支承观众台的斜梁也是不适宜的，这也是因为一方面会使得斜梁需要较大的截面面积，同时它又会减少观众台下面走廊的可利用高度。

为了要增加观众台下面走廊的可利用高度，设计时决定设置一个尽可能薄的水平拉杆，这个拉杆也就是观众台下面走廊的平台楼板。又由于这个平台净宽 26 ft（7.9 m），作为楼板它的跨度太大，设计又决定在平台楼板的中部设置一个从观众台主斜梁吊下的吊杆。这样做以后，平面楼板的截面高度和工程造价都会有所下降；由此而会使得观众台斜梁增加一些弯矩却是相对不太重要的，因为这个斜梁已是刚性极大的门式刚架的一个组成部分。

整个结构的稳定主要依靠门式刚架的内腿。这些内腿位于观众台的半高处（实际上在已有旧看台的后面），它们所处的位置对观众台下面走廊以及有顶盖的室内通车道没有影响。

整个结构中部的平台楼板也是一根拉杆，它可以平衡门式刚架的巨型竖向梁在大跨度悬臂屋盖下的倾覆力矩。这时，设计遇到的惟一困难是这些拉杆受拉后的弹性伸长可能导致门式刚架内腿的过度变形，刚架可能因其刚性太大面产生裂缝，一种可能避免这个困难的办法是在主斜梁的中部，即在竖向吊杆处，设置一个弹性连接点：但这个设计方案是不恰当的，因为这个弹性连接点在受力时实际上是一个铰结点，它有可能降低整个结构在风荷载作用下的稳定，并迫使竖向腿要具有大得多的强度和刚度。而另一简便方法是在平台楼板这个拉杆中设置花兰螺丝；由于有了花兰螺丝，拉杆可以提前拉紧，以致在安装悬臂屋盖时拉杆的最后伸长可以较为适当，它既可不使门式刚架的构件发生过大的变形，也可防止它们发生裂缝。拉杆中需要的拉力可以用量测拉杆自然频率的方法加以控制。

主体结构的钢筋布置示意见图 2－39。

伸臂屋盖下部装饰的外轮廓可以任意选择。本工程实际选择的是一种从运动场角度看上去具有连续线条的轻型而优美的方案。它还可以按一个适当的坡度疏通全屋面的雨水，将其引导到观众台两个侧端的天沟中并流入排水墙里。

屋面材料用的是水泥石棉板。从下面往上看是一片均匀分布的间距为 6 in（15.2 cm）的半连续面橘色木板。这种装饰面强调的是拱内圈外轮廓的刚强性，同时给人以悬臂屋面既坚强有力又轻巧新颖的复合印象（图 2－40，图 2－41）。

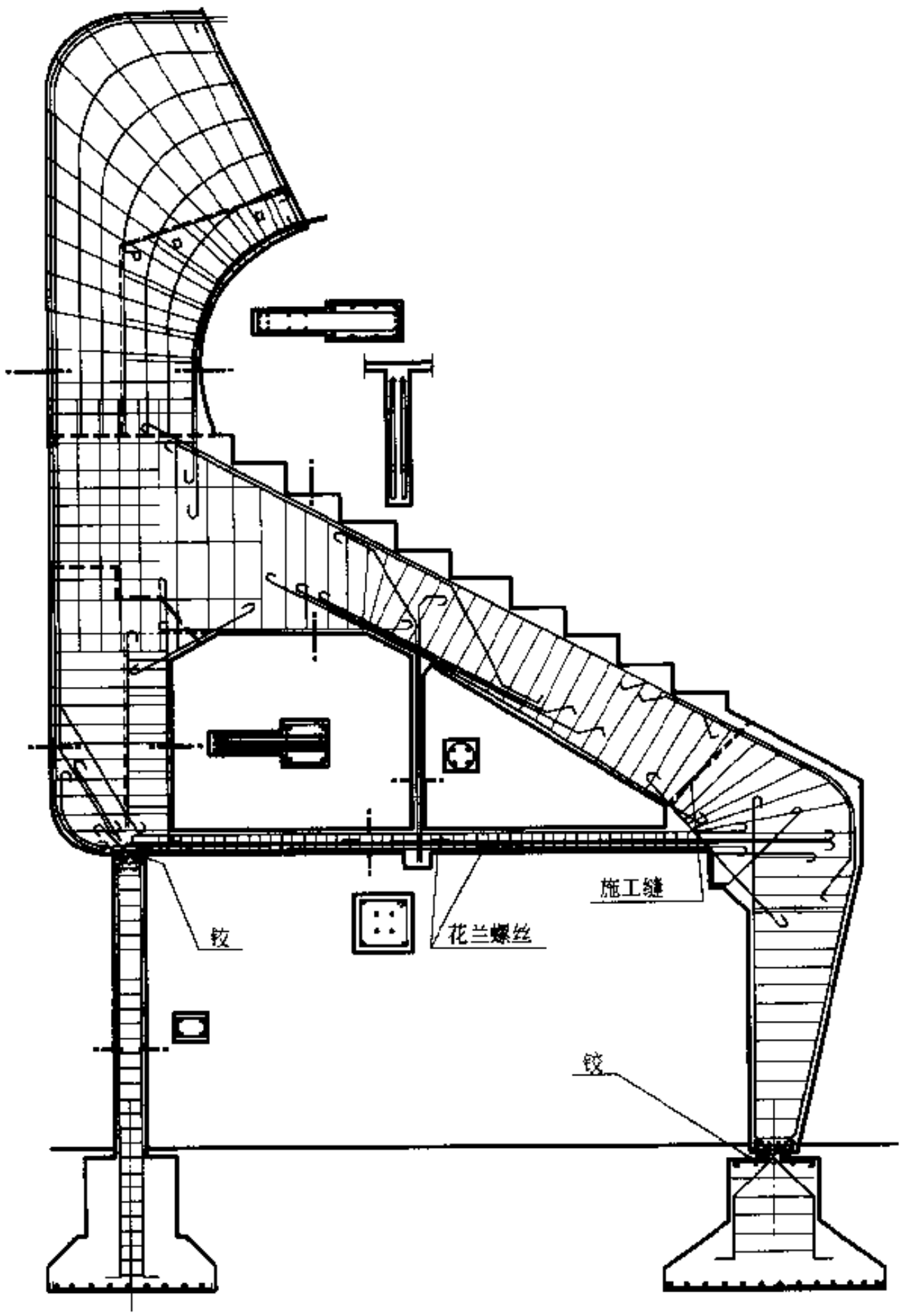


图 2－39　主体结构的钢筋布置示意

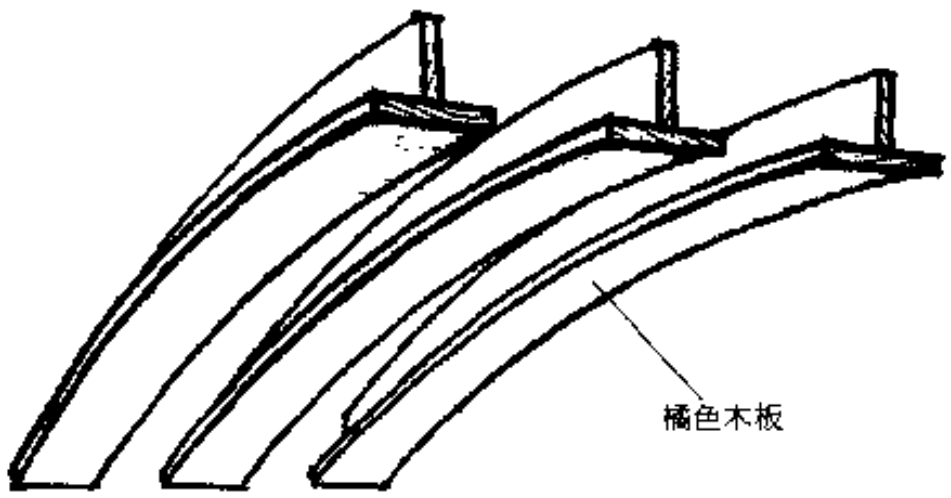


图 2－40　屋盖底部顶棚做法

[编者提示]

概念设计时，有一个重要原则必须遵循，就是“从实际出发”。

本实例与马德里赛马场看台相比，有3个实际情况要考虑：

(1) 本例是利用已有看台增建观众台，而不是新建观众台。

(2) 观众台上覆盖的悬臂屋面宽度更大．比前例的42ft增大了1倍(83ft)。

(3) 可利用空间窄小，与街道邻近，甚至要利用建筑空间作为交通通道。

托罗哈对此采用了3个“结合”的措施：

(1) 拟建结构和已有看台相结合；所增设的看台结构紧贴在已有看台的内侧。

(2) 钢结构和混凝土结构相结合：利用钢桁架重量轻、刚度大的特点形成大跨度悬挑屋面；利用混凝土刚架自重大、可模性好、价格低的特点做成合理的结构型式，可以抵御大跨悬挑屋面的倾覆。这正是利用不同材料特点做成组合结构的要点。

(3) 建筑空间和交通通道相结构；按照结构力学原理，合理地布置混凝土刚架的构件，以便尽可能增加可利用面积和可利用高度，使得建筑空间和交通通道各得其所（注意正文中关于混凝土刚架结构体系形成的描述）。

另外，托罗哈特别注意钢结构和混凝土结构的连接节点做法，并妥善解决了整个屋面结构的纵向联系、顶棚艺术处理和屋面排水问题。

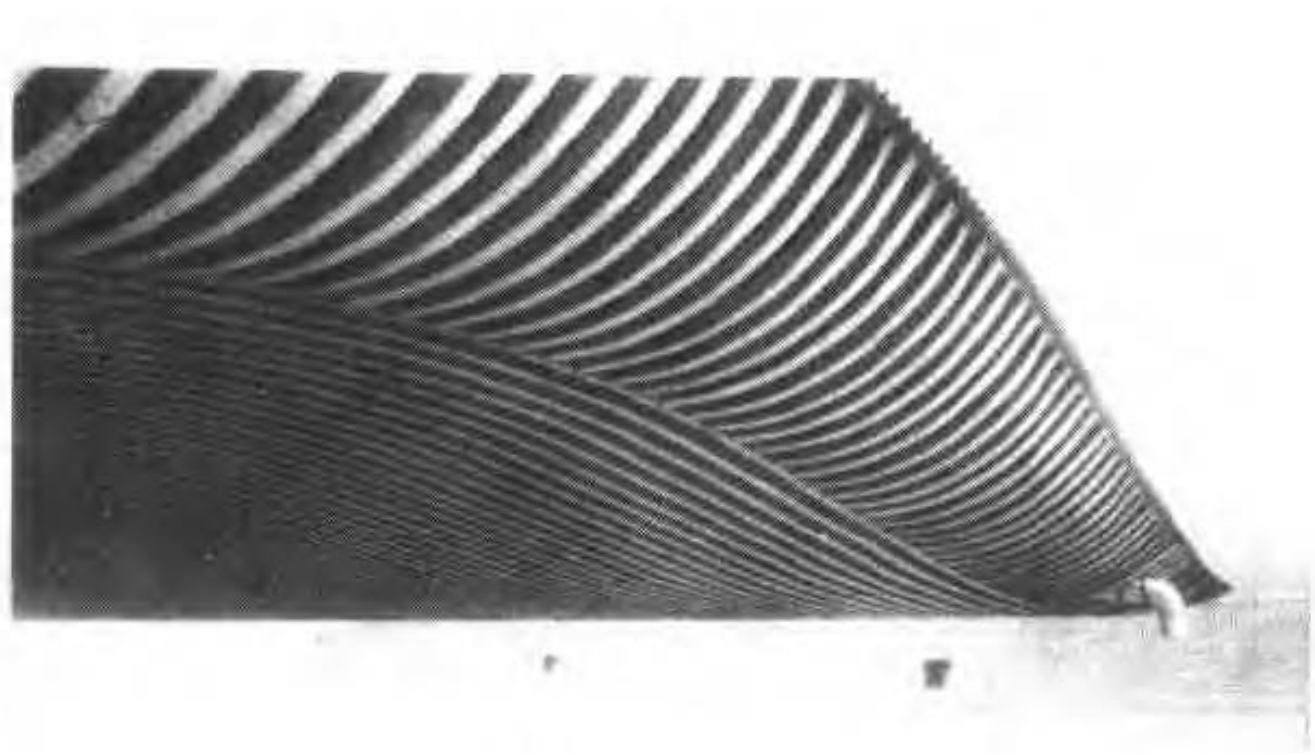


图2-41 顶棚效果

在横向，每17ft（5.2m）设置一个悬臂大梁。每个悬臂大梁都锚固在钢筋混凝土结构中，其上弦部分用螺栓直接和钢筋混凝土竖向结构中的钢筋连接（图2-42）。为了使得悬臂大梁的自由端有均匀的挠度，在离大梁边界内17ft（5.2m）的地方设置了一个轻型纵向支撑梁，将大梁连接起来。

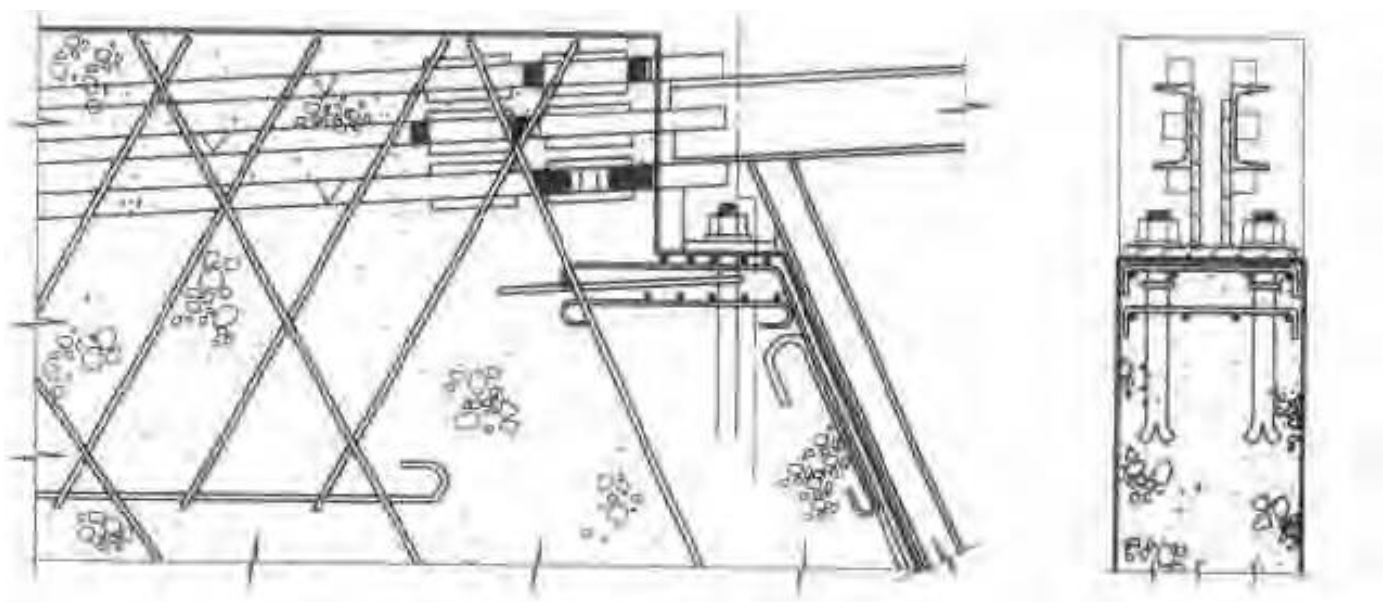


图2-42 悬臂端钢屋架和混凝土竖向支承构件的锚固接头

2.10　雷索莱多斯回力球场

回力球赛是在一个狭长形投球场地上进行的，这种狭长形球场称为回力球场。它由前墙、侧墙和回弹墙（为了球的回弹用）组成（图2-43）。观众席位于面向侧墙的敞开一侧（图2-44(b)）。

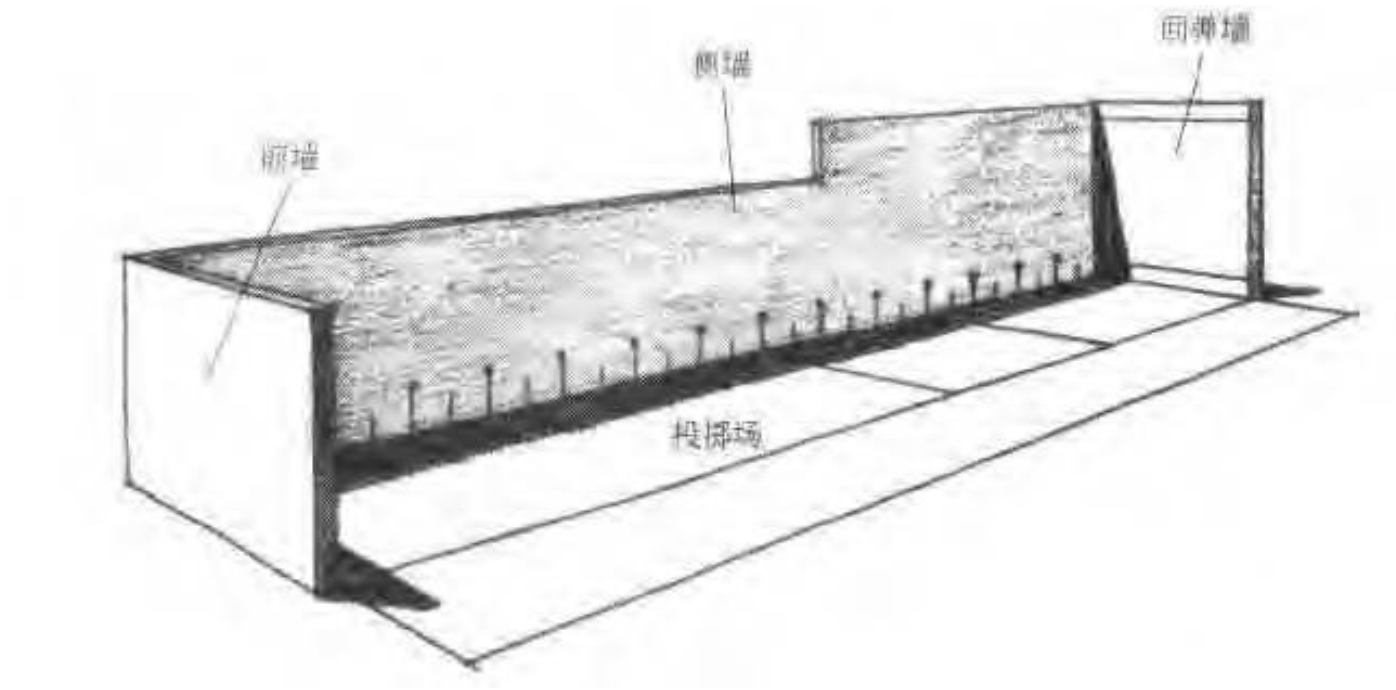
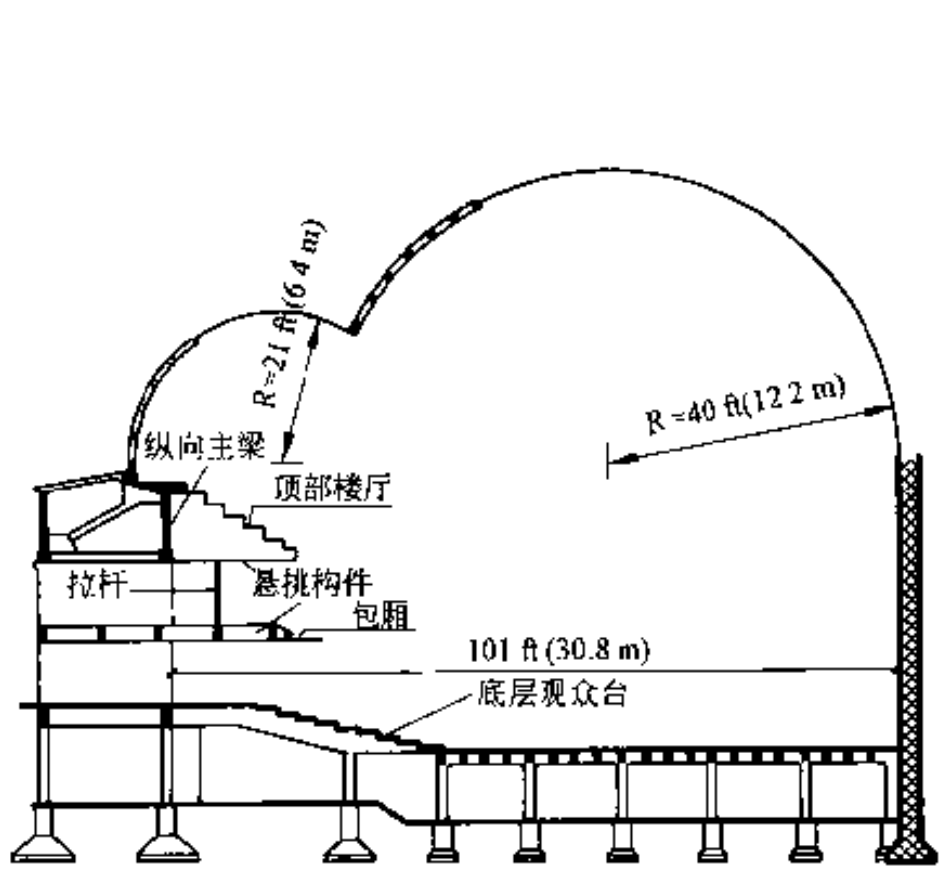


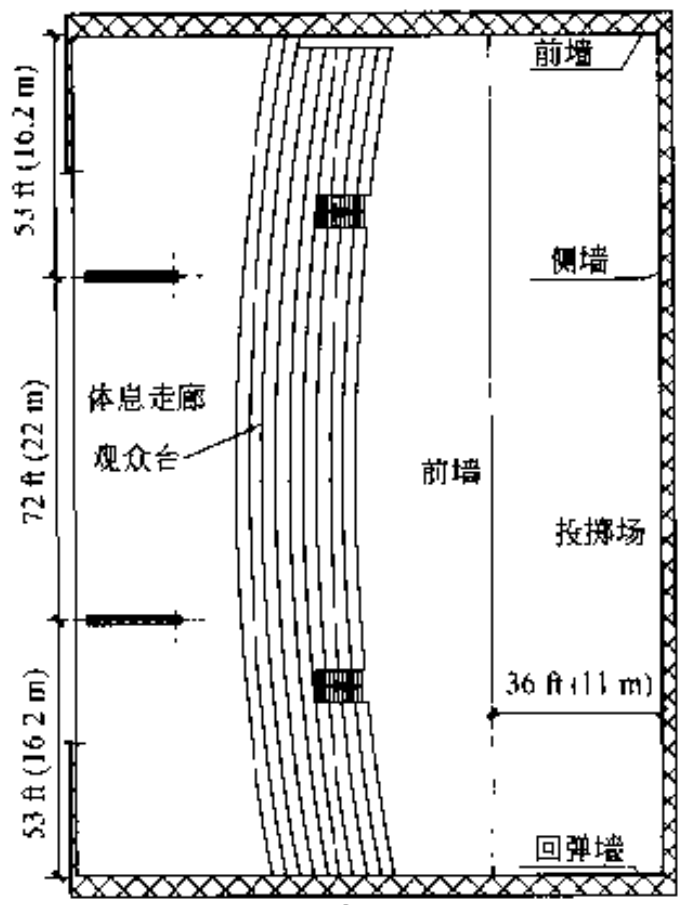
图2-43　回力球场地

雷索莱多斯回力球场（Fronton Roceletos）的下层观众台一度是世界上这类回力球场中的最大的一个，但这个“纪录”并未引起人们注意；而它的屋盖结构却十分引人注目。

球场大厅的顶盖支承在一个从纵向主梁（11.5 ft 即 3.5 m 高、72 ft 即 22 m 跨度）上伸出的横向翼缘上。从纵向主梁伸出的其他横向构件支承着下一层观众台的结构。这种布置使得人们在底层观众台的体息走廊上看投球场地时视线不受干扰（图2-44(a)）。



(a)



(b)

图2-44　回力球场平剖面

(a) 横剖面　(b) 投掷场平面和底层观众厅

考虑到大厅所处的方向和投球场地的不对称性，将屋面设计成有两个朝北的天窗是有利的。其中之一为投球场地提供光线，另一个为顶层观众台采光用（2－45）。因而屋面上这两个天窗的准确位置要预先加以确定。进一步说，天窗的倾角要按照防止太阳光线直接射向大厅的目的加以确定。

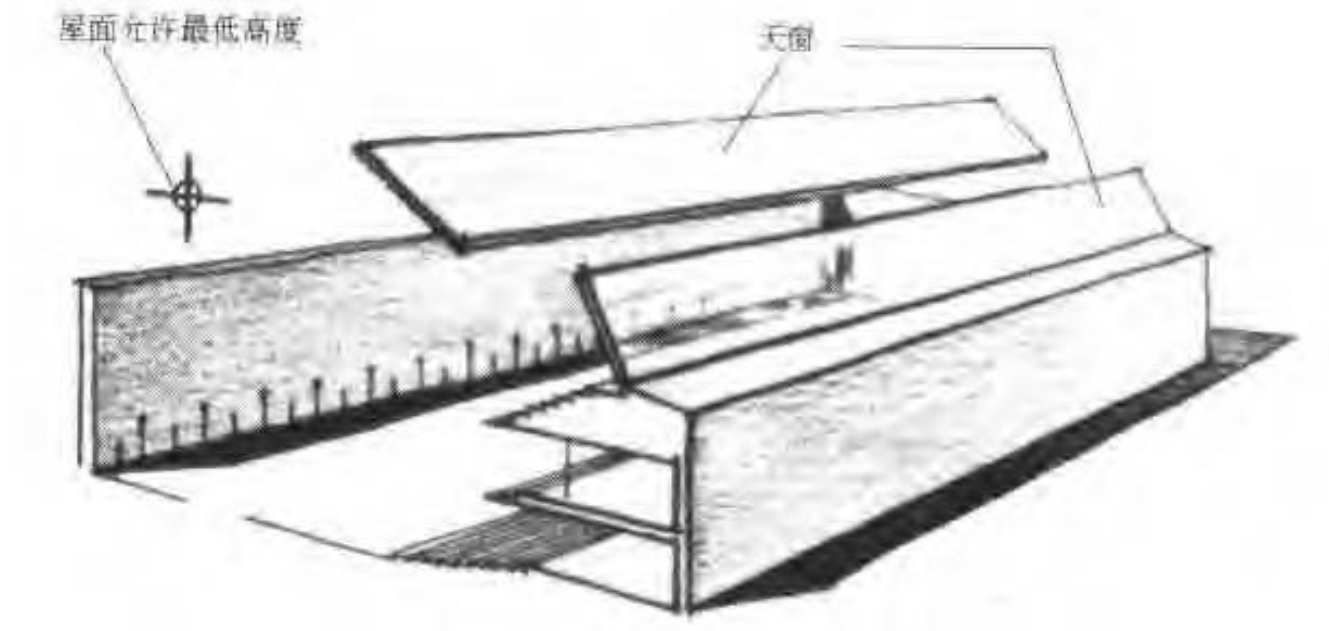


图 2－45　球场对采光和屋面允许最低高度要求

按照这些限制，一种解决的方案是布置一系列的横向桁架式大梁，它们间由纵向桁架连系起来（图 2－46 (a)）；然而，这些桁架可能产生的形状证明在结构上和美观上都是不可取的。另一种解决的方案是设置两个纵向大梁跨越天窗，它们还可以用来支承屋面（图 2－46 (b)）；这个方案将为屋盖提供一个多边折线的拱形截面，但它也被证明是不恰当的，原因是跨越天窗的纵向大梁截面扁平、跨度太大、横向联系檩条过多，既不合理又不经济。

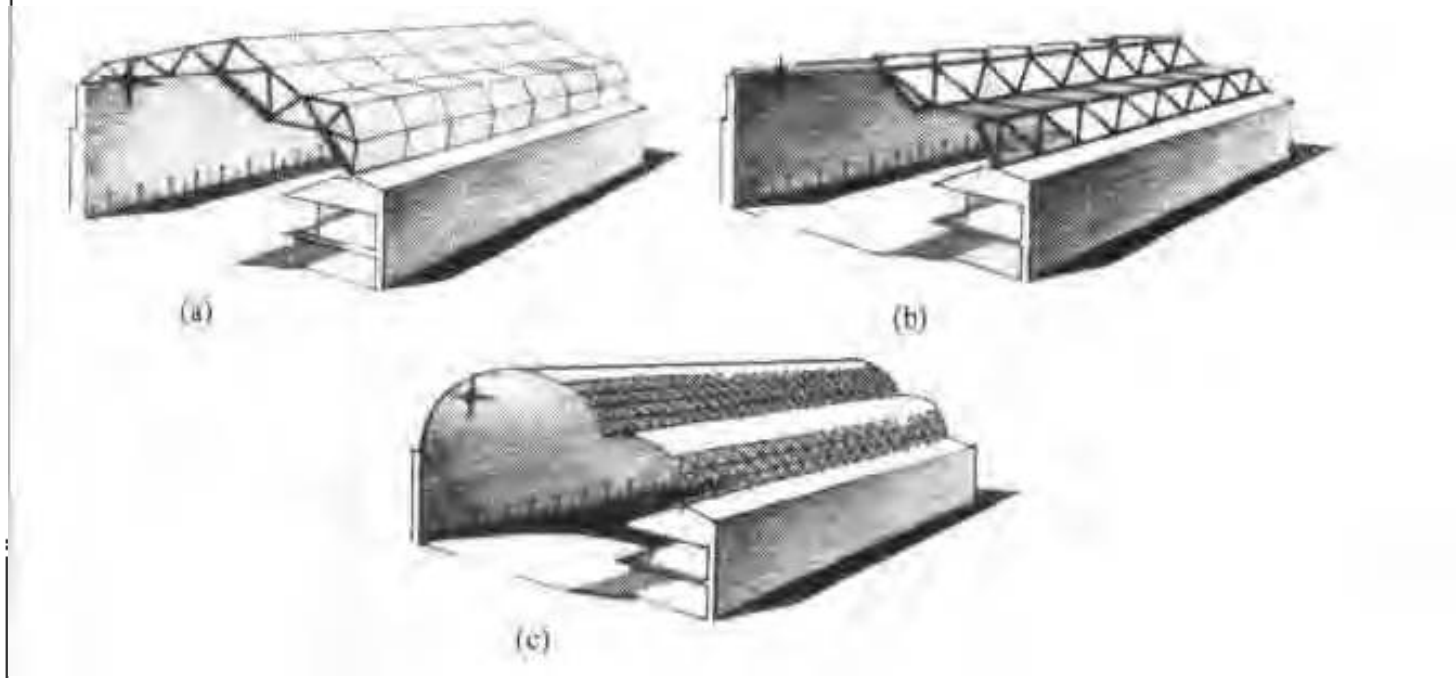


图 2－46　3 个屋盖结构方案

(a) 横向桁架梁　(b) 纵向桁架梁　(c) 圆柱形筒壳

在否定了这两个方案以后，仍要牢记天窗采光和空间高度的要求，同时还应给予球场和看台大厅一种最大可能的宽敞感。

富于想像力的手本能地画出两个拱，每个拱的尺寸都按照大

厅不对称的需要定出。屋盖的剖面可以由建造两个突起的圆柱形筒壳加以实现，并在它横截面的适当位置上布置天窗（图 2－46 (c)）。

筒壳壳面由钢筋混凝土杆件组成三角形的网格做成，其间设置玻璃天窗。

这种筒壳的造价在一般情况下显然是很昂贵的，因为它需要大量的木材做模板，整个壳身需要一次连续浇筑而成，木模在壳身还没到达足够强度时不能移走。但是本工程的这个特殊问题特殊地解决了：因为从经济上考虑，本工程急于完工，承包商并不反对用大量木材，他们可以将这些木材在另一工程中重复使用；而且由于本工作的壳身平均混凝土厚度非常薄，壳身自重非常轻，工人操作和支撑模板的脚手架和立柱无需像一般工程那般地精心制作，因而还可以省去一部分施工费用。

由于急于要求完成结构工程，建筑物的各层楼盖的混凝土浇筑，并没有等待下层楼盖的混凝土达到足够强度允许拆除其模板后才进行；还由于本工程的顶层观众台和屋盖筒壳壳身结构都采用了速凝水泥，其结果是在 90 个工作日内完成了全部结构工作，其中包括挖土、打基础、支模、绑扎钢筋、浇筑混凝土和拆除模板的时间在内。

屋盖的壳体结构由两个圆柱形筒壳段组成，它们之间沿一个与其轴平行的公共线相联。较大的圆柱形筒壳半径为40 ft (12.2 m)，较小的半径为 21 ft (6.4 m)。两个壳面相互正交。

壳身屋面的总宽度为 107 ft (32.6 m)，总长度为 180 英尺 (54.9 m)，壳身厚度为 3⅛ in (7.9 cm)，两壳正交处增厚至6¼ in (15.9 cm)。加厚的原因不仅由于壳身在此处有较大的横向弯矩，面且因为在这个部位有较粗的纵向受力钢筋，它们需要有适当厚度的混凝土保护层。

可以认为，屋盖结构相当于一个横截面为两个正交筒壳的纵向钢筋混凝土梁。两个筒壳曲线的顶部相当于梁截面的受压区，两个壳曲线连接线方向应该配置的是梁截面的纵向受拉钢筋。

天窗区由钢筋混凝土杆件组成的三角形网格组成。这些等边三角形每边 4.5 ft (1.37 m) 长，周边杆件截面尺寸为 6.5 in×12 in (16.5 cm×30.5 cm)。

筒壳壳身内力用古典方法计算得到。它比通常一般壳体结构计算要复杂得多（因为它具有不对称性以及两个筒壳相交处相应于一个弹性支承），它的计算还应包括在不同的恒载、雪荷载和风荷载作用下的组合效应等问题。

由于设计计算的复杂性以及计算误差带来的危险性，理论计算工作必须以小比例尺的试验验证和研究工作作为补充（图 2－47）。

在模型试验中，壳身在相应荷载作用下的应变和挠度被仔细地记录下来（包括拆去模板时在自重作用下的记录）。

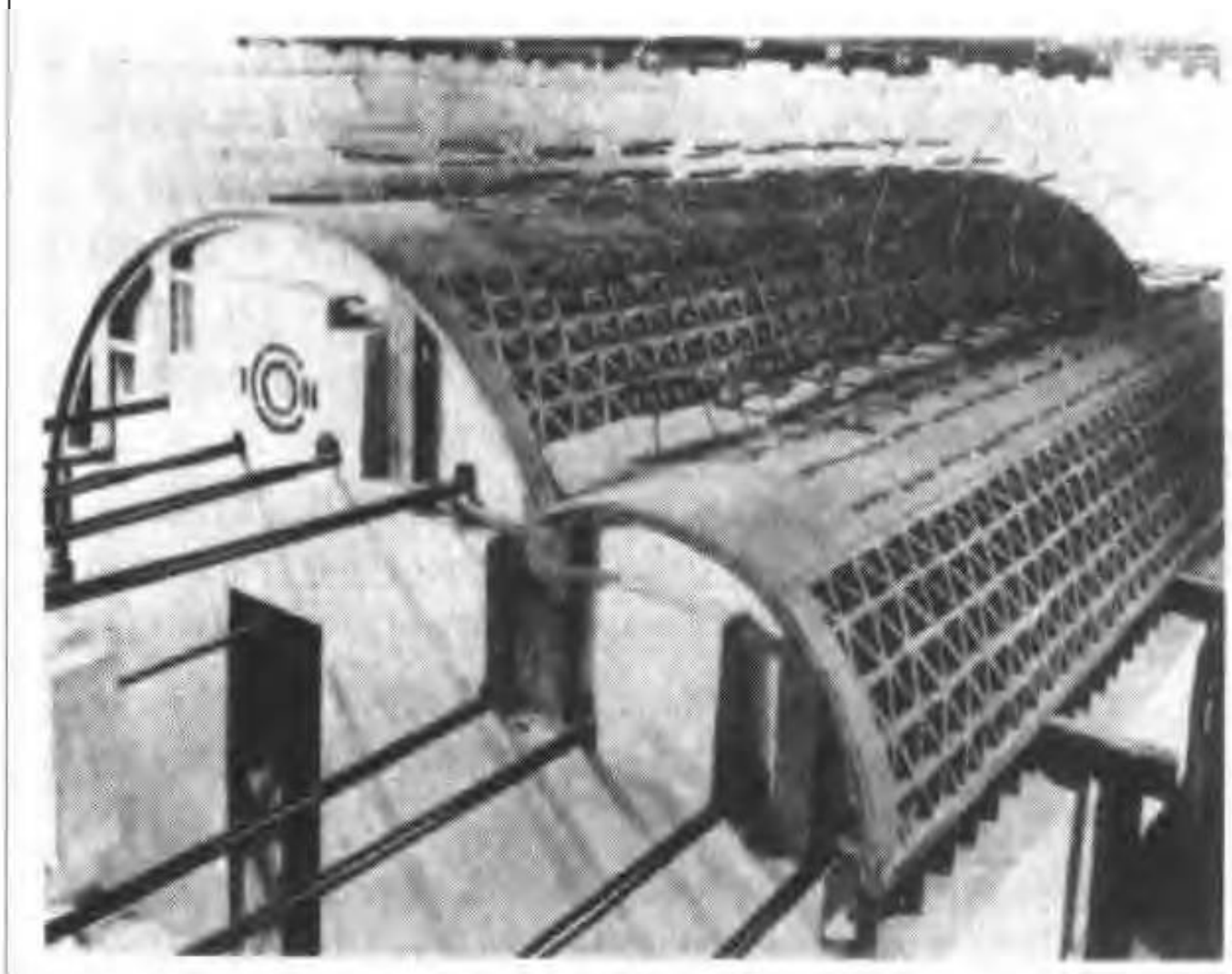


图 2－47　小比例尺模型试验

模型试验量测的结果与理论计算结果相比十分接近，只是由于模型中的天窗与模型中的壳身相比有较大的自重和刚度而产生微量的差异。这些因素不可能在理论计算中都一一考虑周到（图 2－48a）。

本回力球场工程在西班牙内战前几个月内建筑完成，不久在战争中却遭到几次炸弹的直接命中。损伤后的屋盖结构有几平方码的壳身被毁坏，整个结构受到严重的振动。其结果是，两个筒壳的相交线有 2 ft（0.6 m）以上的位移：较大的筒壳几乎沿所有屋面都严重开裂。更糟糕的是，受压的上部天窗的纵边形成曲线下垂，并有显著的压屈迹象（图 2－48）。

那时因为不可能对这些损伤进行及时的修复，以致使得这种压屈迹象由于混凝土的徐变而逐渐发展，愈变愈坏（图 2－48b）。最后，壳身完全破坏，如果在有所损坏的同时不迟缓地加以整治，譬如给以支撑或采用钢筋混凝土加对壳身进行加固，这个建筑物可能至今还有充分的使用价值

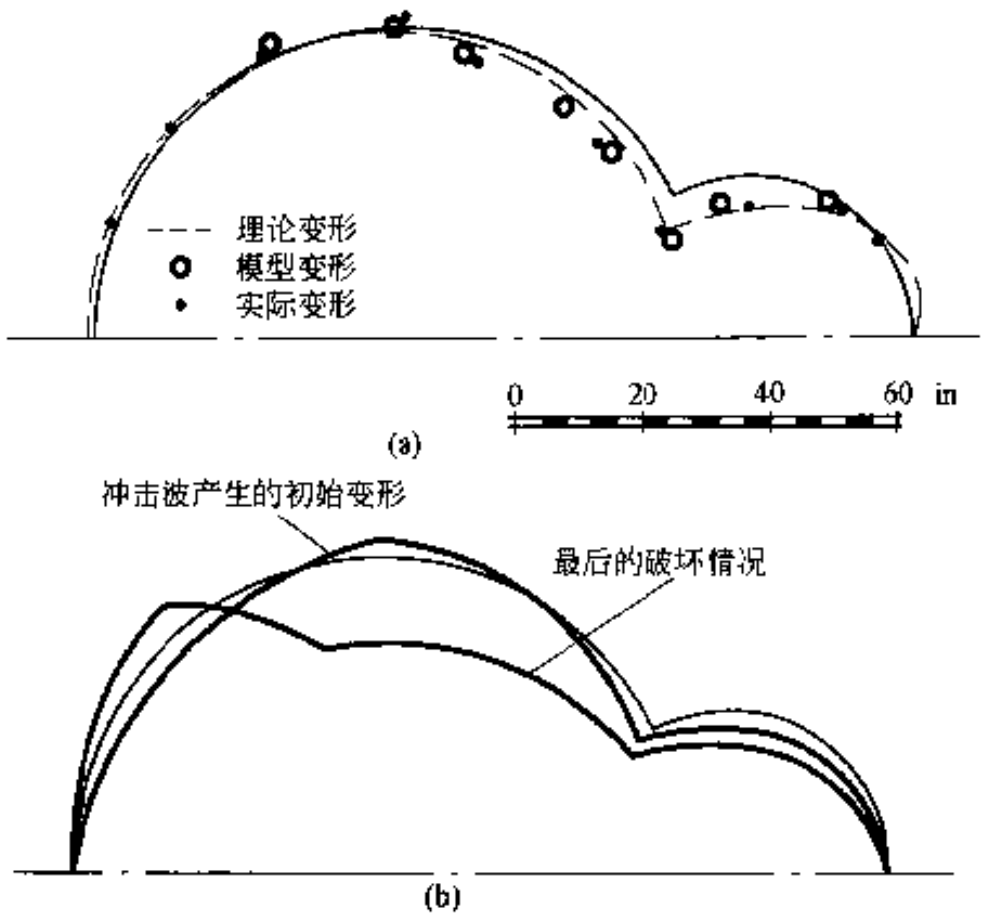


图 2－48　变形和破坏情况

(a) 理论计算模型试验和实际变形比较　(b) 受冲击后的破坏情况

无疑，如果在设计时就在筒壳身的如图 2－49 所示位置上（沿纵向约 8 m 间距）增设一些钢筋混凝土加劲肋，既不会影响美观也不会影响造价，一旦发生战争，壳身也许可以幸免被破坏。当然，除非遇到空中袭击，这种屋盖结构上的肋条在平时是一点用处也没有的。

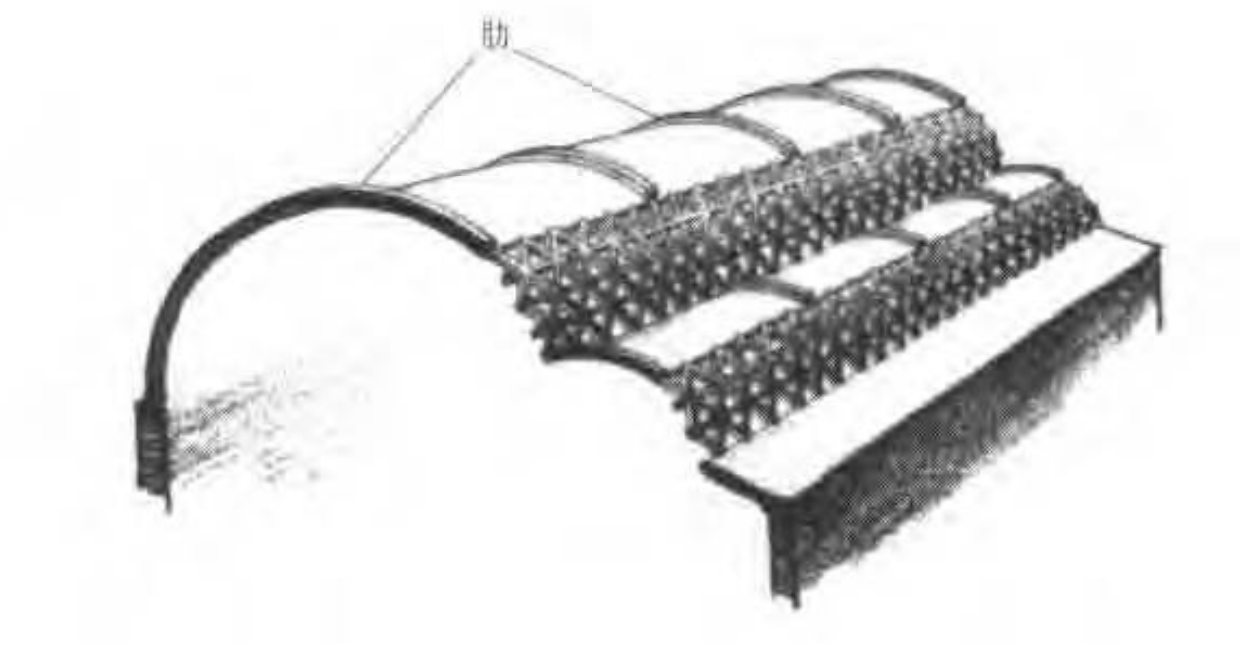


图 2－49　筒壳屋盖加肋方案

【编者提示】

“有比较才能有鉴别”，是概念设计的又一重要原则。

结构方案的“比较”，是全面的；它包括使用、技术、美观、经济 4 个方面。本例在满足使用要求前提下，从另外 3 个方面考虑了 3 种方案。经比较，能够鉴别出采用空间薄壳结构比采用平面桁架结构更为合理。但是，比较往往只凭直观和经验上的概念是不充分的，还要加上一些简略的估算。

从“鉴别”到选定方案，则必须落到实处；也就是要进行受力分析、实验验证，考虑施工技术措施等一系列实质问题。建成应用后的实践检验，还会使得对某些概念的认识深化。

此外，在一个宽 120ft（37 m）、长 182ft（57 m）的空旷球场和具有 3 层看台的大厅中，只凭两片 6 m 长的墙和一个 3.5 m 高的纵向主梁作为主体结构构件（含球场一边侧墙），不能不赞扬设计人在结构布置中运用吊挂、悬挑、外伸等技术的巧妙。

2.11 托雷琼和巴拉加飞机棚

托雷琼和巴拉加的飞机棚（Hangars at Torrejon and Barajas）都要求有 1 个 600 ft×115 ft（182.9 m×35.1 m）的空间（但后者要求净高更高），从一侧开口，并设置一个可以推移的大门。开口一侧只允许有一个中间支承点，该支承点要位于离大门不远于 33 ft (10.1 m)的地方。屋盖结构的荷载由恒载（屋盖结构自重）、13.5 lb/ft^2（66 kg/m^2）的雪荷载以及风荷载组成（图 2－50，图 2－51）。

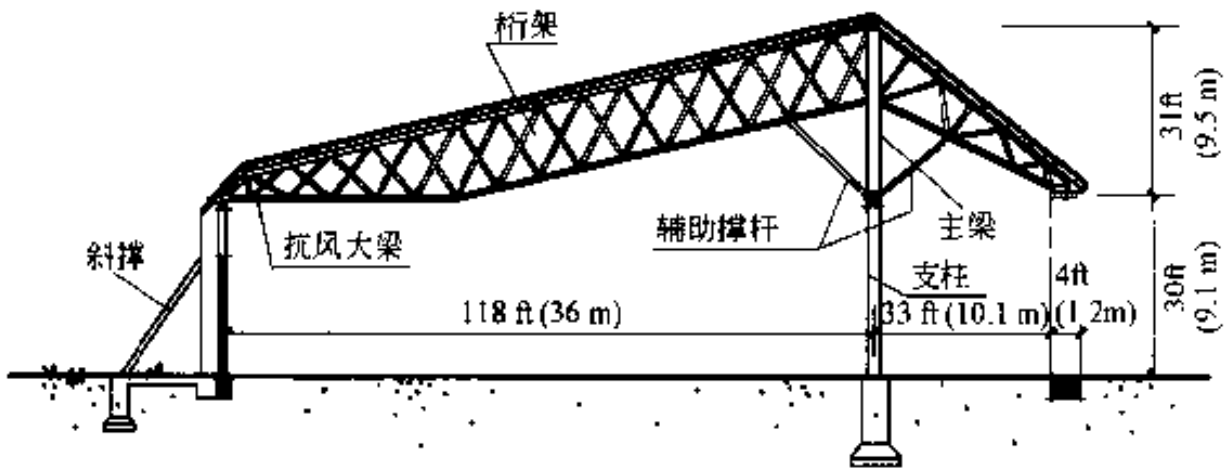
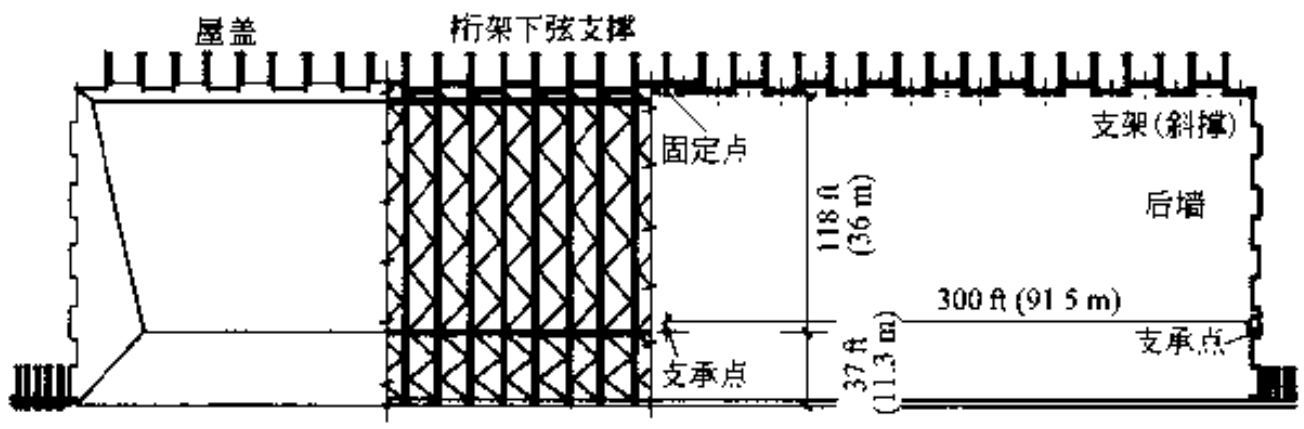


图 2－50 托雷琼飞机棚横剖面要求及做法示意



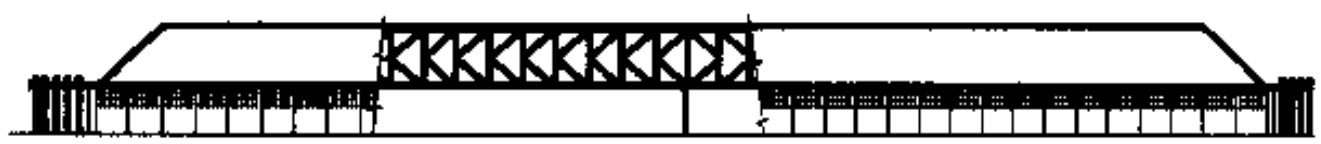


图 2－51 飞机棚平（屋盖）、立面要求及做法示意

为了尽可能地减少侧墙上的风力，屋盖做成斜坡状，其最小高度为本工程设计要求的最小净高，即沿 4 个周边均为 30 ft (9.1 m) 高。另外，屋面的坡度必须使得雨水不致从石棉水泥瓦的连接处漏入室内。

符合这些要求的最佳办法是在推拉门内 33 ft（10.1 m）处平行于飞机棚开口一侧设置一个纵向桁架。在纵向桁架上架设横向桁架梁，并由这些横向桁架梁支承整个屋面。横向桁架梁的截面高度受屋面坡度为 13°的限制。

纵向桁架是一个两跨连续桁架，每一跨为300ft(91.5m)

长。它支承在三个支承点上，其中一个在飞机棚的中点处，另两个在侧墙处。横向桁架梁支承在后墙和纵向桁架梁上，并伸臂至搁置推拉门的地方。

纵向桁架做成 31 ft（9.5 m）高，但如果将横向桁架梁也做成这个高度则是不经济的。横向桁架梁的弦杆可采用轻型杆件做成，但较长的对角线斜杆却需要用截面尺寸较大的钢材做成，以避免它们受压后发生压屈。考虑到这些因素后，可将横向桁架梁做成14 ft (4.3 m) 高，其下弦与纵向桁架 K 形斜撑的中间节点连接。

连接横向桁架梁和纵向桁架梁的斜撑是次要杆件。它的设置目的是为了防止横向桁架梁靠近中间支座处的下弦受压后可能产生压屈。

横向桁架梁腹杆为 X 形斜撑；两根斜撑在其中点处相交。选择这种杆件的布置方法是为了减少这些杆件的自由长度到一半的程度，并改善这些杆件在桁架平面内的稳定性。在垂直于交叉杆平面的方向上只要附着两面节点板就足够了；这样，交叉斜杆作为一个整体，它的惯性矩将会大大增加。

K 形三角构架用于纵向桁架梁。这样的设计方案不但可以在很大程度上减少桁架的次应力，而且为 31 ft（9.5 m）高的横向桁架梁的交叉撑杆提供了适宜的尺寸。竖腹杆的间距为 16 英尺 8 in（5.1 m），每个竖腹杆与横向桁架梁重合。这种间距尺寸也是纵向轻型钢檩条在屋面荷载作用下的合理跨度。

由飞机棚正面或后面吹过来风力的水平分力可由两个方向的结构构件加以抵抗。它们一方面由纵向桁架和横向桁架梁组成的屋盖水平结构通过剪力传递把风的水平分力传给两而侧墙；另一方面由横向桁架梁把这些力直接传给后墙。为了承受这些风力，后墙要用设置一系列倾斜的钢筋混凝土扶壁予以加强。

每个横向桁架梁将风力传递给后墙是通过有凹槽滚轴的支承进行的(图 2－52)。这种支承点的设计允许钢结构有沿飞机棚纵向的伸缩。

组装成屋盖的钢结构构件作为一个整体在后墙的中间处加以固定，其两侧是可以自由伸缩的。纵向桁架支承在三个竖向支承柱上时也必须允许屋盖结构在纵向可能自由伸缩（指从中间固定支承点至两侧方向的伸缩）。虽然这些竖向支柱都是刚性连接地埋设在基础上，但是它们应具有足够的柔性和柔性的支承条件，以便能够承受由纵向桁架在温度变化时产生的温度应力。

风力在纵向是不大的，尽管如此，它还有使屋盖结构围绕在墙中点旋转的趋势。但这个趋势很容易被横向桁架梁下弦之间的轻型斜撑和横向桁架梁与后墙之间的凹槽形支座所约束。

这个飞机棚工程一个有趣的特色是它的建造过程。两个方向的屋盖结构可以完全在地面上进行拼装，然后用液压千斤顶将它

们提到永久搁置的位置上。这种建造方法不需要临时支架，工人也不需要在高空作业。

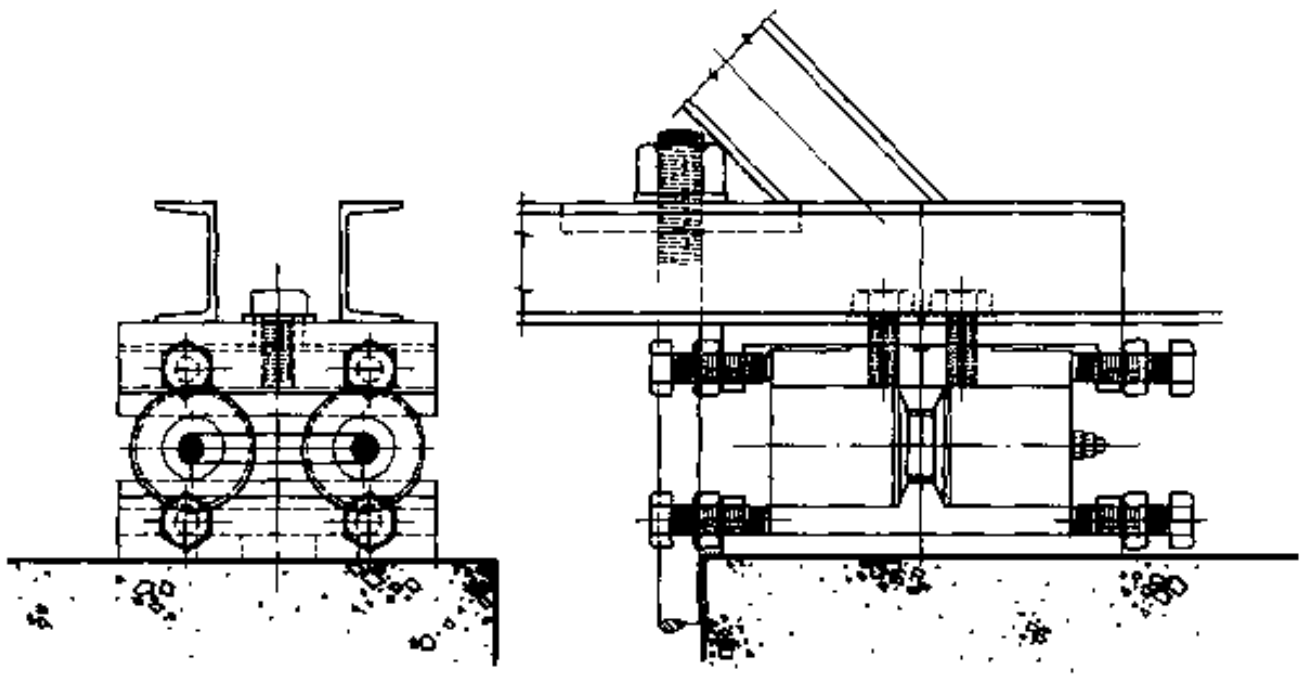


图 2－52 横向桁架梁的单向膨胀支承

由于全部屋盖结构都是焊接的，为了节约工程造价，它必须设计成容易进行焊接操作以及便于安装就位的形式。换言之，所有施焊的地方，都应该是大梁平放时或接近平放在地面上时工人可以进行焊接操作的地方，而不需要借助于在通常施工时必需用的大型转鼓加以施焊。

按照这个观点，纵向桁架梁要做成一对半桁架，它们间用节点板加以连接（图 2－53 (a)）。每一片半桁架可以平躺在地面上施焊，然后围绕下弦旋转 90°（图 2－53 (b)），使它们面对面地在一个竖面上会合，最后用节点板将它们焊成整体。

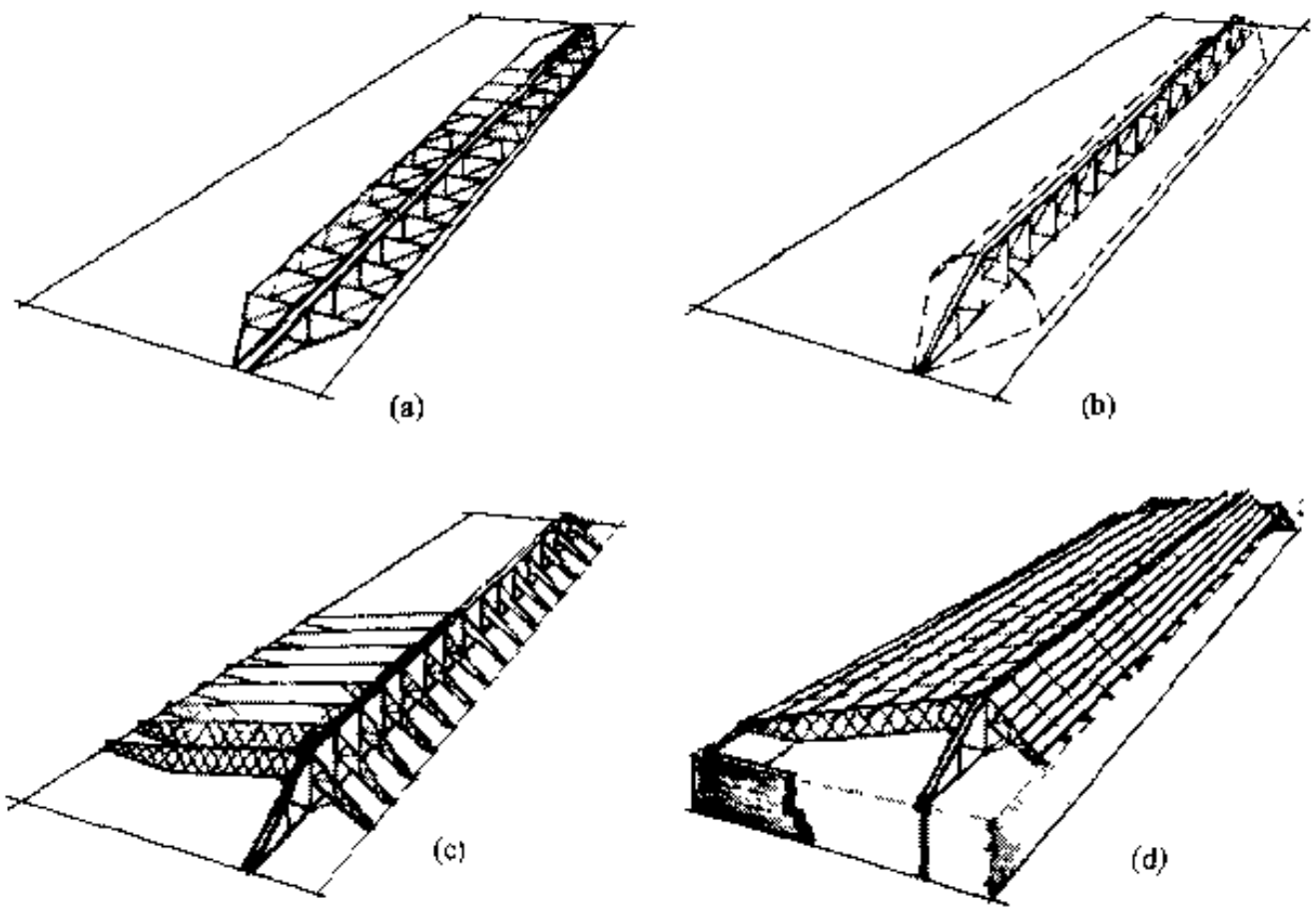


图 2－53 纵、横桁架的施焊、安装过程示意

横向桁架梁和伸臂桁架梁在工厂里拼装，然后运到工地和纵向桁架的竖杆焊接成整体。当横向桁架梁间的轻型斜撑和檩条安装好以后，整个屋盖等待提升（图2-53(c)）。

最后的操作工序是用3个液压千斤顶来完成的。它们被放在纵向桁架3个支承点的位置上，同时有许多小的机械式千斤顶挂在后墙上，当屋盖提升至预定位置的时（图2-53(d)），3个竖向支承柱就位，千斤顶移走。

位于巴拉加的飞机棚与位于托雷琼的飞机棚，惟一的区别是前者有更大的净高（41 ft，即12.5 m）以及在近后墙处加设一片水平方向放置的抗风大梁，用来传递水平风力至两个巨型的钢筋混凝土扶壁上。这种布置方案可以避免沿后墙设置许多宽厚的钢筋混凝土扶壁（图2-54、图2-55）。

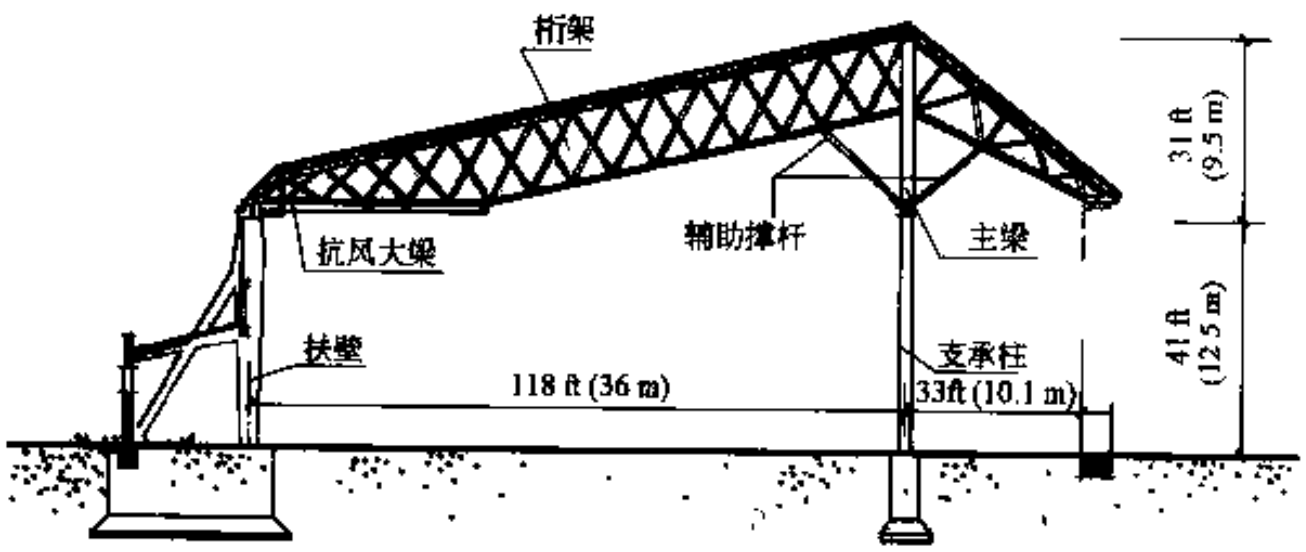


图2-54　巴拉加飞机棚横剖面示意



图2-55　巴拉加飞机棚内貌（可见加设的水平放置的抗风大梁）

【编者提示】

人对事物的认识往往是“从整体到局部，再回到整体（即整体——局部——整体）”。同样，概念设计也是如此。

在本例中，设计人首先按照使用的净空、净高要求，和大体积结构在承受风荷载和温差作用时的合理体型，确定了主次桁架、侧墙、后墙、主次桁架的斜撑和单向伸缩支承等的布置方案和基本尺寸；其次，按照桁架的受力特点，确定了主次桁架的间距、节间、杆件布置和节点处理；最后，根据选定的安装方案，确定了杆件和节点和焊接方式。

本例中的屋面坡度、次桁架形式、次桁架间距和主桁架节间关系、斜撑和伸缩支承做法及屋架安装方案等5个问题，更应引起注目。

虽然，待施二完毕设计另一类似结构时，发现总体结构方案还有可改进处，但是，总的看来，本方案从满足使用要求、结构合理布置和施工简便性三方面综合考虑，是一流的（今天看来，本方案可以改为钢网架，但这却是托罗哈在20世纪40年代时的作品）。

2.12 埃斯拉拱桥

埃斯拉拱桥（The Esla Arch，图 2－56）的跨度为 690ft (210 m)，拱顶高于水库水面 165ft（50.3 m），高出地基 330ft (100.6 m)，是一个在当时打破混凝土拱桥跨度世界纪录的设计；在设计的同时需要寻求一个既经济又合理的施工方法。此施工方法的要求是：能跨越水面施工；所架设的临时拱顶支架能安全地承受所浇筑混凝土的自重；保证施工时支架的侧向稳定（图 2－57）。



图 2－56 埃斯拉拱桥全貌



图 2－57 埃斯拉拱桥施工现场之一

此施工方法设计概念的 4 个要点是：

（1）设计一个桁架式的大跨轻型钢拱作为临时拱顶支架，跨越水面；

（2）临时支架应设计成在它完成作为临时支架用途以后，还要继续用作混凝土拱桥的永久劲性钢筋，使得总用钢量最少；

（3）精心考虑浇筑混凝土的方案，使得在浇筑过程中能够利用已凝结的混凝土拱作为支架的一个组成部分，支承再浇筑混凝土的自重；

（4）考虑防止施工过程中大跨度拱身及其支架发生整体或局部失稳的技术措施。

临时支架由两个平行的侧向钢桁架组成，其间有横向斜撑相连接。每侧桁架都是由一个个如图 2－58 所示的钢制三角架连接起来的。这些三角架用起重机从制造工厂整体运到施工现场，再用铰临时固定在已架设好的桁架构件上进行拼装，又通过这些铰节点用悬杆或撑杆支承在悬索上（见图 2－59）。一旦一段侧桁架的各个节点都用铰连接完毕后，就用花兰螺丝将它固定在悬杆吊钩上，直至此铰接桁架段按设计要求就位为止。



图 2－58　侧桁架的三角架单元

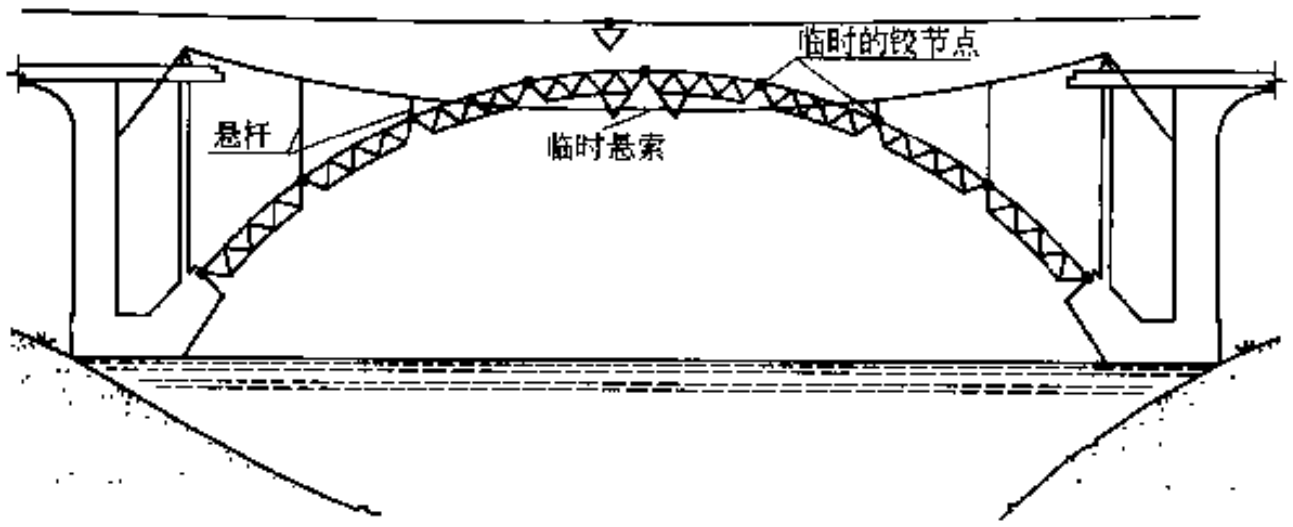


图 2－59　临时支架正面构造

在每个拱侧的所有桁架段都按设计要求就位后，就可将除拱顶和拱底外所有弦杆上的支架节点都加以焊接，使它成为一个整体的三铰拱。这个三铰拱在气温发生变化时能够自由胀缩，不致产生附加的温度应力。

形成两片平行的桁架后，用横向斜撑将它们连接起来，如图 2－60 所示。

下一个工序是浇筑临时支架上的整个一条上弦纵向拱圈，如图 2－61 中之“1”所示。在这个工序完成之后，临时支架在很大程度上得到了加固。

然后沿拱底圈浇筑图 2－61 之“2”，使临时支架的下弦杆都埋置在混凝土中。这些下弦拱圈就好像用斜腹杆悬挂在上面已凝结的拱圈上一样，如图 2－62 所示。

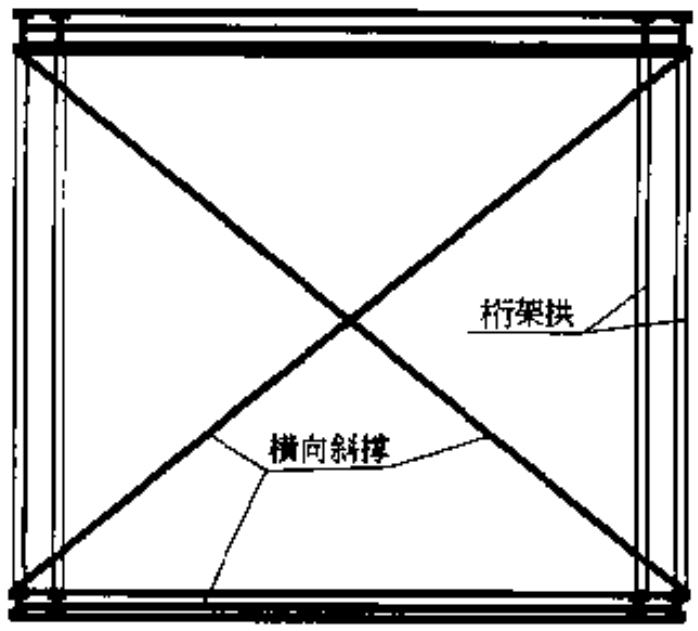


图 2－60　临时支架断面

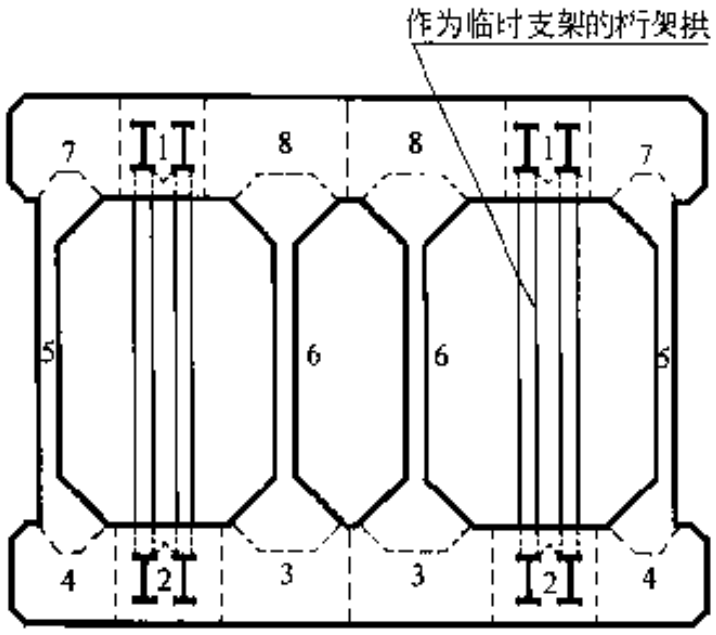


图 2-61　浇筑混凝土拱时先后次序示意
（用断面上的数字表示）

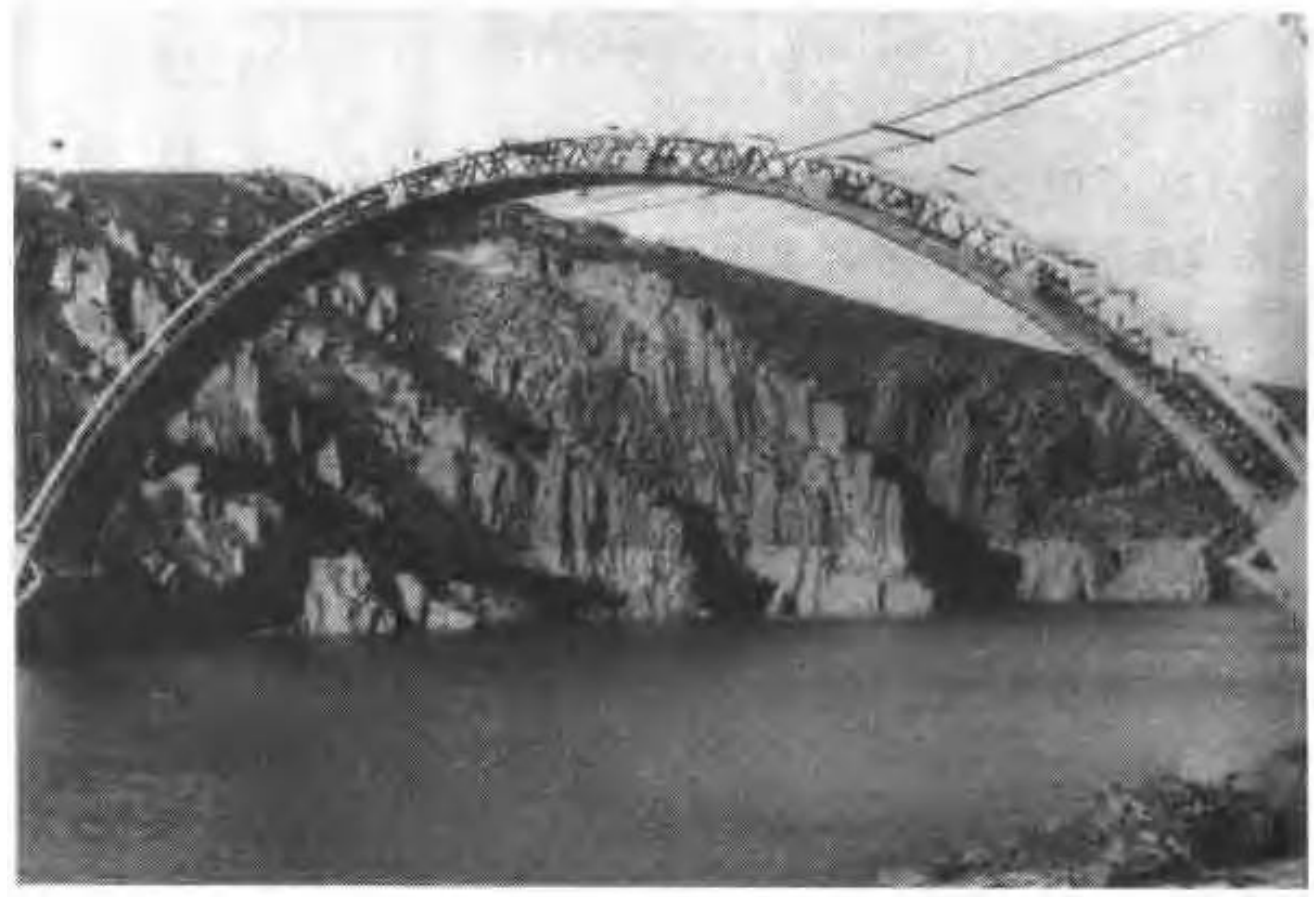


图 2-62　拱桥施工现场之二（上、下弦拱圈混凝土浇筑完毕后）

要用一组液压千斤顶同时设置在拱脚和拱顶，预压下弦杆（图 2-63），以部分减小这时上弦杆所承受的压力。这时，大拱就不是三铰拱而是一个固端支承拱。这个变化不会对原设计的拱结构产生任何损伤（指临时支架上下弦都被混凝土覆盖后该拱的受力状态），也不会使拱结构发生可能引起失稳的变形。这种引起失稳的变形在上弦混凝土已凝固，而下弦拱圈尚未凝结时是很有可能发生的。

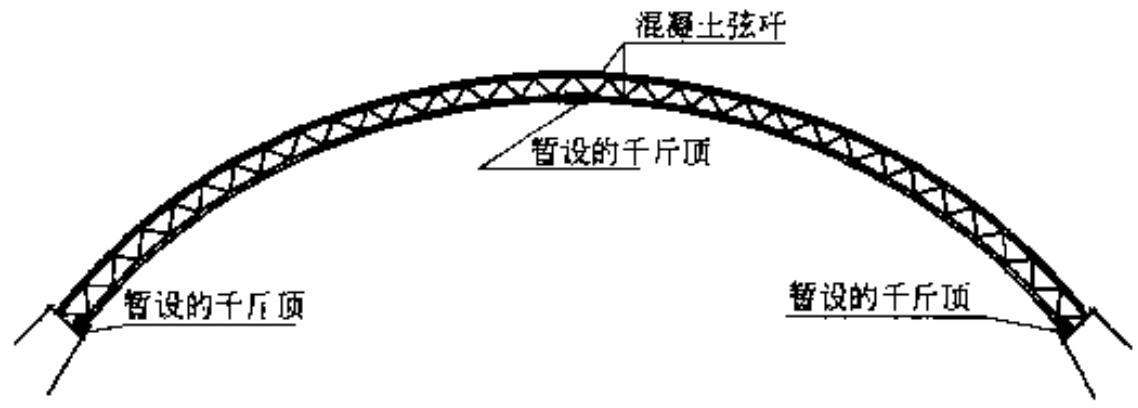


图 2-63　用千斤顶预压拱圈情况

在这个工序做完后，要依图 2-61 次序浇筑拱圈其他部位的混凝土，直至全拱浇筑完毕。这时要注意的是，临时支架的侧桁架在箱形混凝土断面内占据了两个内腔。要用竖向混凝土墙将它们完全埋置起来，形成一个能够抵抗剪力的截面。在未浇筑竖向混凝土墙以前，钢斜撑杆的抗剪能力是很低的。

由于作为临时支架的侧桁架必须设置在箱形断面的内腔内，两个临时支架的总宽度必然相对较窄，这就存在着在风荷载和先浇筑的上弦混凝土自重共同作用下临时支架发生侧向失稳的危险。

为了避免这种危险，在沿临时支架拱的腰部要设置两个锚点（anchorage points）将两片临时支架固定。这两个锚点要用牢固地连接在两旁墩座上的钢缆在空间就位（图 2－64）。钢缆上备有相应的装置以便调整它所受的作用力。锚点与临时支架上有竖向槽沟的板相连（图 2－65），因而它可以在拱平面内但不能在拱平面外移动。

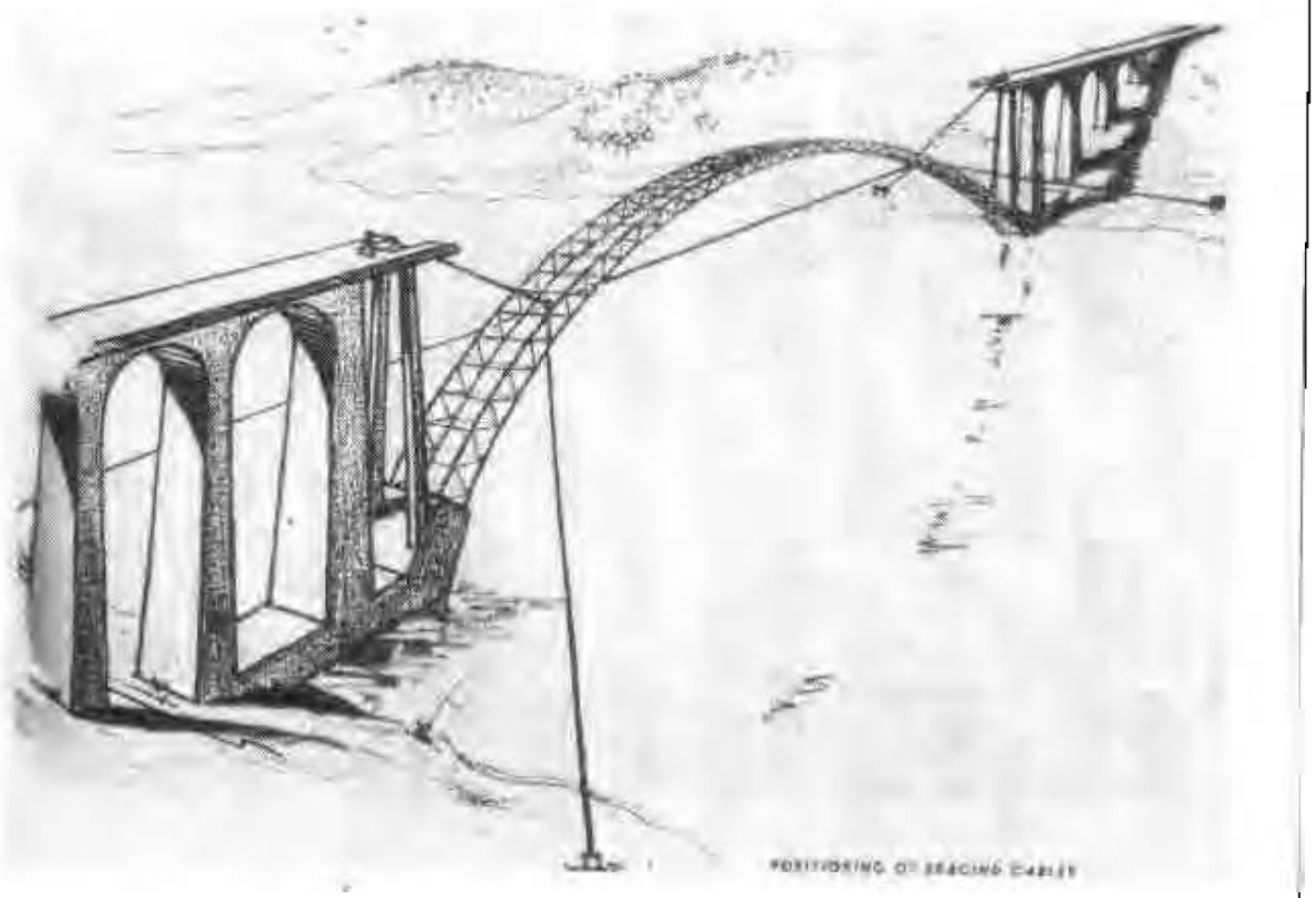


图 2－64　两旁墩座支承钢缆悬索的位置

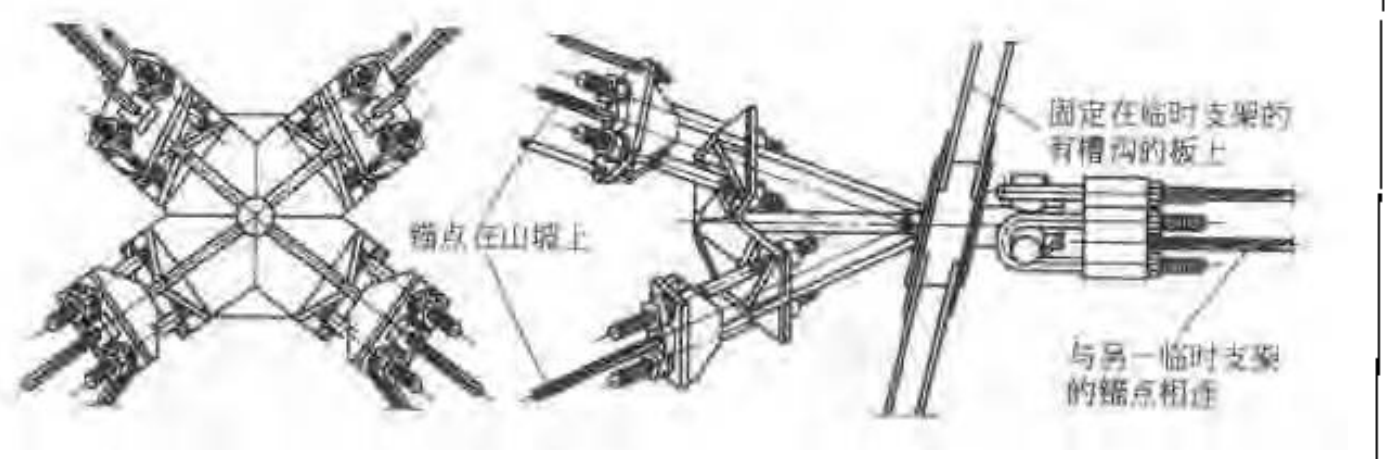


图 2－65　钢缆与锚点装置的细部做法

如前所述，拱中混凝土的浇筑是连续沿纵向进行的，但每个弦杆都必须按预定次序浇筑；这样做才能使拱顶所受的弯矩值最小。每一段浇筑长度以运输来的混凝土能一次浇筑完毕为准。两个相邻浇筑段之间留有几厘米宽的楔形空间。这个空间要等几个星期后才能浇筑填实，以便为每一段已凝固的混凝土留有足够的时间进行收缩。

再下一步工序是浇筑拱顶处留出的空隙。它的施工方法虽同每段拱体一样，但却要用 36 个液压千斤顶（图 2－66 布置情况，图 2－67 为实物）——它足以能够承受拱的 7 500 t 推力——将拱

顶推出一个空隙。此空隙大体可以补偿拱体因收缩变形和压应力而产生的徐变变形总和所造成的拱身的缩短。在拱顶混凝土浇筑完毕并达到应有强度后，就可以在拆走千斤顶后空出的空间里安置拱肩上的立柱和平台面，最后完成高架桥的全部施工。

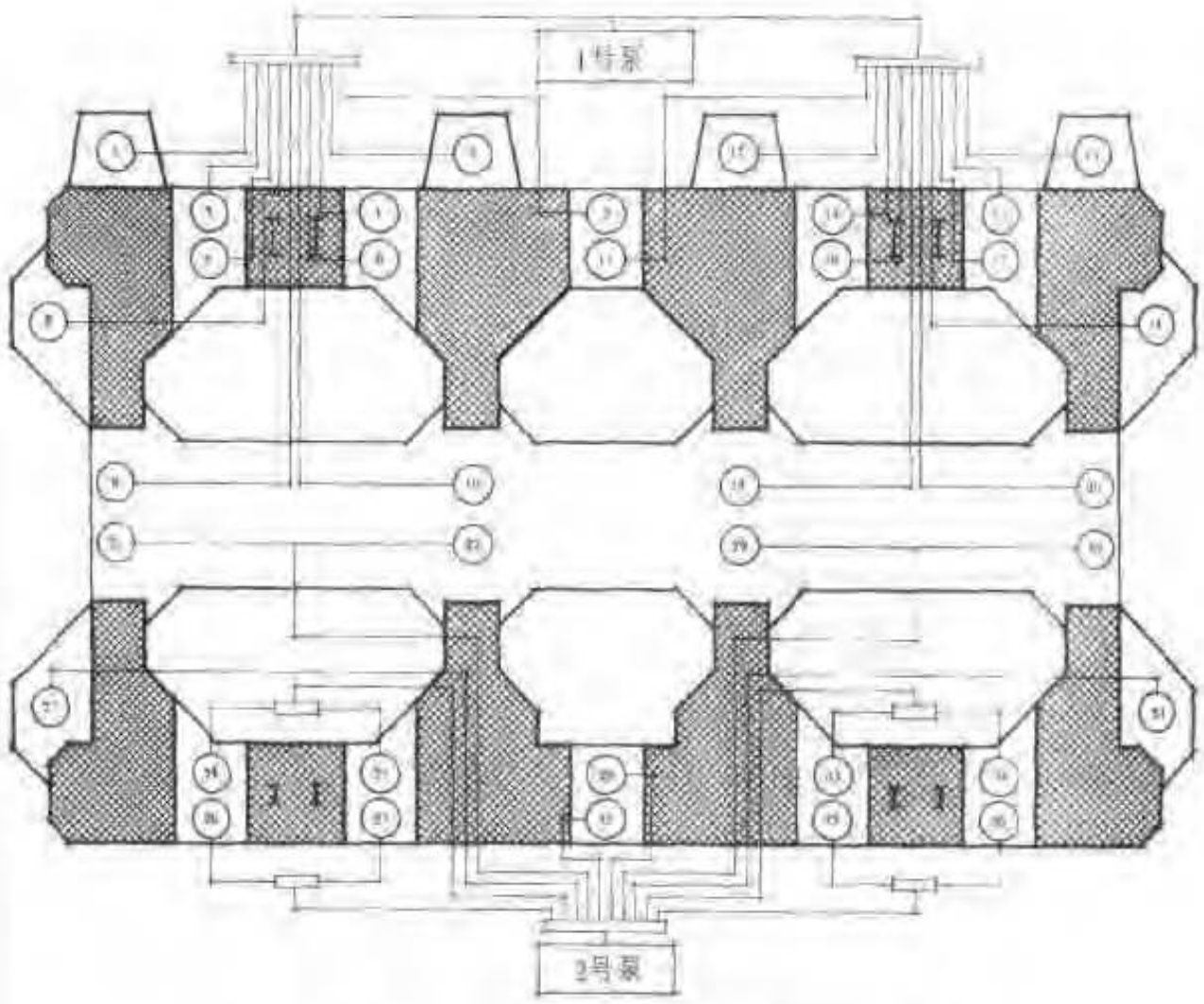


图 2-66 拱顶处安置 36 个千斤顶的分布位置



图 2-67 拱顶处千斤顶实况

上述施工全过程进行得很顺利，锚固装置在维持临时支架就位方面很有成效。即使遇到过几次大风，也没有发生什么问题。安装在拱体上一些量测仪表和一些控制性观测点都表明这个拱体一直在正常工作。然而，施工过程相对比较缓慢，因为每一段混凝土都必须有足够时间等它凝结、收缩以后才能进行下一段混凝土的浇筑，以避免它们之间有过大的应力差异。这一点是这个施工方法的重要不足。图 2-68 为大桥建成后的雄姿。



图 2-68　建成后的埃斯拉拱桥近影

【编者提示】

(1) 托罗哈把力学和结构的知识充分运用到施工过程之中，使得在埃斯拉拱桥的设计中能够做到将建设要求、结构设计、施工方法三者融为一体，既概念清晰、经济合理又切实可行。这是一个优秀的结构工程师应该做到的。相反，不懂得施工的结构工程师，算不上是一个合格的结构工程师。

(2) 托罗哈实践的本施工方法的精髓，是前述本桥拱设计概念的 4 个要点(这是编者阅读托罗哈作品选后加以归纳的)。它充分利用结构概念（如利用大跨轻型钢拱作为跨越水面的临时支架，并在完成临时支架使命后成为混凝土拱体中的劲性骨架）考虑结构问题(如考虑混凝土的收缩，徐变变形等)，做出巧妙的施工方法设计。读者可以从本施工方法的全过程中学到不少宝贵的经验。

(3) 本施工方法的另一特色是对每一个施工技术问题都细致、认真地进行处理，如混凝土浇筑的程序，千斤顶加压的程序，以及施工后的连续观察和检测等。这是一个土木工程师应有的素质。

(4) 托罗哈在实践这个施工方法后，对它并不满意。他曾表示："对今后另一些跨度稍小的拱桥，可选用每个拱身单独浇筑混凝土的方法，用在拱圈纵向接头处配置横向钢筋的办法来防止侧向失稳……"这正体现了他的精益求精、不断进取的精神，也是我们应该向他学习的地方。