

高层建筑结构的连续化分析

金问鲁 著

中国铁道出版社

1994年·北京

高层建筑结构的连续化分析

金问鲁 著

中国铁道出版社

1994年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

高层建筑结构是结构学中最活跃且富生命力的学科。其中,垂直荷载和水平荷载的共同作用,塑性分析,特别是在地震和风振随机荷载下结构的性能都是有待探讨的问题。本书主要提供作者本人的研究成果,例如墙、柱沿高度变化刚度的计算;“开口及闭口薄壁结构的统一分析理论”,地震、风振荷载下随机振动分析的有限元法等。同时,本书对悬臂梁比拟法,一个或三个自由度的水平荷载分析及垂直荷载的简易分析法提供了简单有效的计算方法。

本书可供土建设计、施工、研究人员,大专院校师生应用与参考。

高层建筑结构的连续化分析

金问鲁 著

*

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 刘启山 封面设计 翟 达

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:7.375 字数:194 千

1994 年 9 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—2500 册

ISBN7-113-01766-5/TU·386 定价:9.00 元

前 言

在工业发达的国家中,城市人口大量集中,为了节约用地,兴建了多幢高层或超高层的建筑。当前在纽约、东京等城市高层建筑林立,如 1972 年建成的美国纽约世界贸易中心是 110 层的塔楼,1974 年在美国芝加哥建成希尔斯大厦 109 层,建有 3 层地下室,总高度达 442m。

我国从 70 年代后期,开始兴建高层建筑,1976 年广州建成 33 层的白云宾馆,总高为 106.60m;以后建成了如上海电讯大楼,高 118m;上海锦江饭店分馆,高 154m;南京金陵饭店,高 110.76m;北京国际饭店,高 112m;深圳国际贸易中心大厦,高 158.65m。在北京新建了许多高层住宅。

在本书作者的主持下,在杭州设计了多项高层建筑。其中有:在 70 年代末建造的江城饭店,高 50m,是杭州市所建的第一座高层建筑。江城饭店在底层需要宽敞的空间,属于框支剪力墙式高层建筑,特点是框支底梁受有很大的拉应力,用一般的计算程序不能求得相应的内力。为此,作者创建了框支结构的递推矩阵法,并出席了 1984 年在广州召开的第三届国际高层建筑会议。还有平面为矩形,两端各有两个半圆的筒状高层建筑:杭州百货大楼,高 102m;月牙形平面的联谊大厦,以及邮政枢纽大楼,中国银行,贸易大厦,西湖博览会等。在以上各项工程设计中,采用了全国各地的计算程序,发现这些程序存在着某些缺陷,例如一般未能考虑包括扭转的整体空间作用,以及水平荷载和垂直荷载的共同作用等。

为此,作者发展了一种连续化分析方法,在本书中将着重介绍连续化分析方法。

在第一章中,作者简单叙述了高层建筑结构的平面、立面、结构布置和荷载情况。谈到高层建筑结构便会联想到矗立的山峰,在

结构力学中最简单的比拟便是竖立着的悬臂梁,承受着自身的垂直荷重和外部的水平荷载。这个比拟虽然简单,但是相应的计算可以推断高层建筑的高度限制,平面、立面处理以及材料性质对结构的内力影响,为结构的选型作出有益的指导和参考。

连续化分析是力学中的一个古老方法。物质由离散电子、中子、质子构成。在宏观上看来,将孤立的粒子群看成连续体,由此发展出来的弹性力学、塑性力学可以求解大量的工程问题,这是前代科学家的智慧结晶。但是将离散体进行连续化,决非随意进行的过程,连续化后的连续体必须和原来的离散体有非常近似的力学性质,这样求得的解才能和真实的结构充分逼近,求出足够精确程度的近似解。举例来说,在大跨结构中的索网结构,如果索网的网距很小,由为数众多单索组成的索网很容易联想为薄膜结构。又如在斜张桥中,有一组平行索系或辐射形索系将桥面和桥墩连接,也很容易看成一片薄膜。按照这个观点,作者对索系采用了薄膜比拟法,见《悬挂结构的计算理论》,浙江科技出版社,1980。值得注意的是作者提出的索网薄膜比拟法和弹性力学中一般的薄膜理论具有本质的不同。作者的薄膜比拟,既考虑到结构的双向刚度的差别,也考虑到结构的几何非线性,即是结构的内力和变位不成正比,这样的薄膜和真实的索网蕴含着相同的力学性质,由此所得的解具有足够的精确度。离散结构有数目众多的构件,从而它的总体结构方程中的未知数为数众多,求解困难。连续化分析的优点即是离散结构化为连续体,导出连续体的控制方程,使未知变量的数目减为极少,从而使计算简化。在第二章中首先申述连续化分析的基本原理,变形和内力的基本假定,以及如何将板、梁、墙等离散构件折算成具有相同性质的连续体。其次陈述一个由作者提出的薄壁构件统一计算理论。在高层建筑结构中剪力墙是常用的一种构件,可用薄壁构件理论进行计算。在当前的薄壁结构理论中,有符拉索夫理论,适用于开口薄壁构件;还有沃伦斯基理论,适用于闭口薄壁构件。在高层建筑结构中可能同时含有开、闭口两种薄壁构件,如果采用两种不同的理论进行计算,可能会带来很大不便。作

者的统一计算理论使两种开口、闭口薄壁构件具有统一的计算方法。统一计算理论的基础是铁木辛柯梁理论,这种梁理论的优点是不仅考虑到梁的弯曲应变、轴向应变,而且考虑到梁的剪切应变。以铁木辛柯梁理论为基础,可以求出总体高层结构在垂直、水平的动、静力作用下内力和变位,但是这种处理方法较伯努利的普通梁理论具有较多的未知量。普通梁理论是铁木辛柯梁理论的特殊情况,在第二章中也推导了从铁木辛柯梁到普通梁的简化理论。

第三、四、五章都是采用普通梁理论为基础的高层建筑结构理论。在连续化假设中一般假定楼板在本身平面内是绝对刚性的,这样楼板的平面只有三个刚体变位:沿 x 、 y 轴的线性变位 u 、 v 及绕 Oz 轴的旋转变位 ω 。一般在高层建筑结构的平面中都有一个对称轴,水平荷载对这个轴也是对称的,在计算水平荷载所产生的内力及变位时仅有一个水平荷载方向的线性变位作为未知量,这个未知量将写为 v 。第三章考虑水平荷载,仅有一个水平变位 v ,这是高层建筑结构中最简单的问题,在某些高层建筑结构教程中已列出求解的公式。但是已有的求解公式仅适用于沿整个建筑高度上结构刚度不变的情形,这不符合实际情况。实际上,上层结构的刚度要较下层为小,而且高层和低层的建筑平面常常不同。为此,作者推导了刚度改变情况的计算公式列入第三章中。为了功能和美观,高层建筑的平面有时不具备对称轴,或虽有对称轴,但是作用着不对称的水平荷载。在这种情况下将有三个未知变位: u 、 v 和 ω 。同样假设沿建筑的整个高度上刚度改变,推导了计算公式,列入第四章中。这里指出,第三、四章中的计算都是采用解析法求解,从连续化的意义上说来,所求得的是准确解。为了考虑刚度变化,作者提供了递推算法。虽然在高层建筑结构中水平荷载是主要的,但是垂直荷载的影响也不容忽视,值得注意的是垂直荷载产生的内力和水平荷载产生的内力不是独立的,而是相互干扰,存在着相互作用。举例来说,如果某个墙或柱受到垂直荷载产生垂直压缩变形,这个变形造成连系梁的梁端弯矩,从而改变了由水平荷载所产生的内力和变形。在第五章中,对垂直荷载和水平荷载的内力、变位分别

计算,看作是相互独立,然后考虑它们的相互作用,由此求得的次应力和初始算得的应力相加作为近似解。第三、四、五章构成整体结构的一种求解方法,虽然是近似的,但仍有一定的准确程度,和当前各种计算方法或计算程序相比较,显然在计算假定上看来,计算合理而且充分协调。

第六章以铁木辛柯梁理论为基础,既考虑了构件的弯曲和轴向变形,又考虑到构件的剪切变形。严格说来,只有用铁木辛柯梁才能导出薄壁构件的统一理论。本章的理论推导对于水平荷载和垂直荷载的共同作用在连续化意义上属于严格性的,由此导出全部控制方程,但是由于未知变位数目较多,在求解时需要某些数值方法,例如有限元法。用本章方法可以求出梁、柱以及每个直线段墙中的内力和变形,对每个构件可以进行精确设计。用这种方法虽然未知变位的数目较多,但是采用迭推算法可以大量减少未知量的数目,由此编制电算程序,计算可在一般微机上进行。

按照高层建筑结构和抗震规范对于一般高层结构可将地震力折化为相当的静力进行计算,但是对于高度较大,特别是超高层结构则必须按动力学进行计算。动力学计算有两种方法,一种是写出结构的动力学方程,时间坐标 t 和空间坐标作为共同的独立变量,将时间 t 离散化,在时程上进行分析;另一种是对动力学方程进行傅里叶变换,将时间 t 转换为频率 ω ,在频率域 ω 上进行分析。从傅里叶变换的理论知道,原函数对 t 的微分在变换后化成对 ω 的乘法代数运算,充分简化了计算程序。在第三、四、五、六各章中都列出结构的动力方程,并叙述了在频率域 ω 中的求解方法。

在第七章,阐述了作者所提出的高层建筑结构在地震下随机振动的有限元方法。当地震谱为已知时,根据用有限元法求得的动力刚度矩阵来分析计算结构位移和内力的功率谱非常方便。当求得响应:结构位移和内力的功率谱后即可分析结构的安全度。当前国内外规范都以概率论为基础,但是地震荷载是完全随机性的,却缺少适当的概率分析方法,本章的目的即是希望在这方面得到重视。第八章是总结与展望,其中申述了作者本人的一些观点,供各

目 录

第一章 高层建筑结构的平面、立面、荷载及悬臂梁	
比拟法	1
第一节 高层建筑的平面、立面	1
第二节 高层建筑结构的材料和建筑体系	6
第三节 高层建筑结构的荷载	13
第四节 高层建筑结构的悬臂梁比拟法	17
第二章 连续化分析的基本原理、薄壁构件的统一计算	
理论	34
第一节 结构动力学的变分原理	34
第二节 高层建筑结构连续化分析的基本原理	46
第三节 统一薄壁构件理论(由作者提出)	52
第三章 在水平荷载下有对称轴情况的结构分析	95
第一节 基本原理	95
第二节 静力问题分析	100
第三节 动力问题分析	113
第四章 任意水平荷载下的结构分析	127
第一节 墙、柱的变位、弯曲和扭转	127
第二节 梁系的变位和弯曲	137
第三节 方程的综合	139
第四节 静力问题的有限元法	141
第五节 计算例题	155
第五章 垂直荷载下高层建筑结构的近似分析	166
第一节 双肢柱计算	166
第二节 整体柱近似法计算	174

第三节	垂直应力扩散分布原理及扩散分布高度·····	181
第六章	在水平荷载、垂直荷载任意组合下普遍情况 的结构分析·····	186
第一节	结点和构件编号,构件的几何尺寸和外载·····	187
第二节	构件的应变能·····	188
第三节	结点的折算荷载和方程的综合·····	194
第四节	雷斯纳变分原理及迭代解法·····	197
第七章	高层建筑结构在地震下的随机振动·····	208
第一节	偏历性原理及有关公式·····	210
第二节	功率谱密度函数和相关函数之间的相互关系·····	212
第三节	正交过程的统计规律·····	214
第四节	单自由度随机振动·····	215
第五节	弹性结构随机振动的有限元分析法·····	218
第八章	总结与展望·····	221
	参考文献·····	225

第一章 高层建筑结构的平面、立面、荷载及悬臂梁比拟法

第一节 高层建筑的平面、立面

在中国的古代建筑中,最常见的是塔式建筑,平面常为正六角形或正八边形,从立面上看来逐层缩小,如图 1—1。

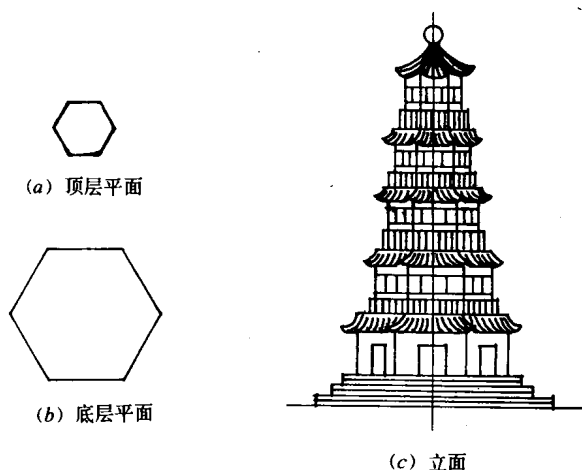
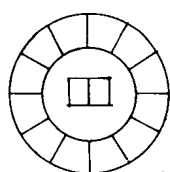
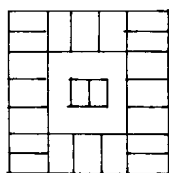


图 1—1 古塔平、立面图

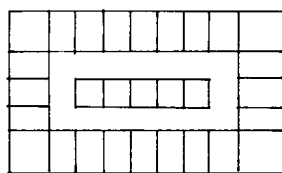
在当前高层建筑结构中一般具有简单图形的平面,例如有圆形、正方形、矩形、三角形、六角形、月牙形或端部带有三角形或半圆形的矩形等,如图 1—2。常用的还有以矩形为基本单元组成各种建筑平面,如 U 字形, I 形和翼形等,如图 1—3。在大量高层建筑的兴建后,建筑师们发现单一的矩形平面过于单调,不能满足使用



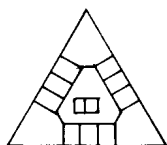
(a) 圆形



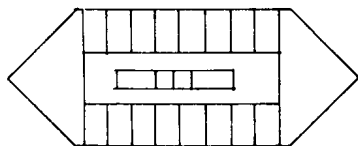
(b) 方形



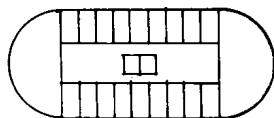
(c) 矩形



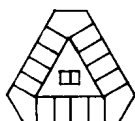
(d) 三角形



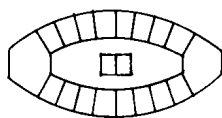
(e) 带有两端三角形的矩形



(f) 带有两端半圆形的矩形

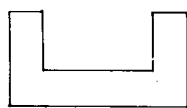


(g) 六角形



(h) 月牙形

图 1--2 各种平面示意图



(a) U形平面



(b) 工形平面



(c) 翼形平面

图 1--3 组合矩形平面

者的功能和美观需要。建筑师们开始追求建筑布置形式的变化或高层建筑的不同外貌。首先表现在区域规划里，区里有几幢高层建筑表征着区域的文化或商业中心。在高层建筑的平面和立面上力求变化，在外形中有时模仿自然，采用波浪形或花瓣形的平面，如

图 1—4, 这种形式结合高低透迤的立面, 配合天然的风景区。

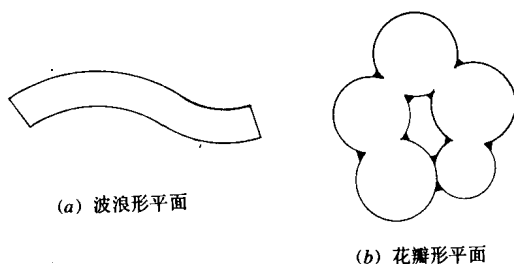


图 1—4 模仿自然的高层建筑结构平面

对于高层建筑结构, 从力学分析简单明晰, 容易处理防震措施的构造等观点看来结构工程师欢迎简单形状, 如圆形、矩形的平面布置。但是由于人类的生活需要和审美要求, 高层建筑结构有进一步复杂化的趋势, 结构师的责任不是一律排斥这些形式, 而是应该和建筑师共同合作寻求新的形式来丰富广大群众的生活。当前电子计算机的迅猛发展, 促进计算结构力学的进一步完善, 已使许多复杂结构包括应力集中区域的内力分析成为可能。力学家和结构工程师还应该对不断涌现出新问题的分析方法进行深化。

在高层建筑结构立面的处理方法一般有两种。一种是柱形处理, 建筑的外部轮廓都是垂直面, 如图 1—5。另一种高层建筑的外轮廓面呈曲面形式, 上部为柱面, 近底部处宽度增大, 这样可改善在水平荷载下的受力情况, 如图 1—6。同样, 为了丰富高层建筑的立面形式, 在立面方面可以模仿天然的山石嶙峋。举例来说, 如图 1—7, 建筑物的侧面模仿雁荡山的合掌峰。当前的建筑师们常常采用简单几何图形的建筑平面, 将平面划分成相同形状的方形或三角形单元, 对这些单元给予不同的高度, 这样建筑物中分块的不同高度, 增添了建筑物的变化和立体感。这些建筑具有天然的美, 使人联想起在风景区内, 如桂林漓江两岸矗立的山峰。这种建筑也符合结构力学原则, 建筑平面中下大上小, 有利于承受水平和垂直荷载。图 1—8 表示方形平面的建筑, 将建筑平面划分为九个方形单

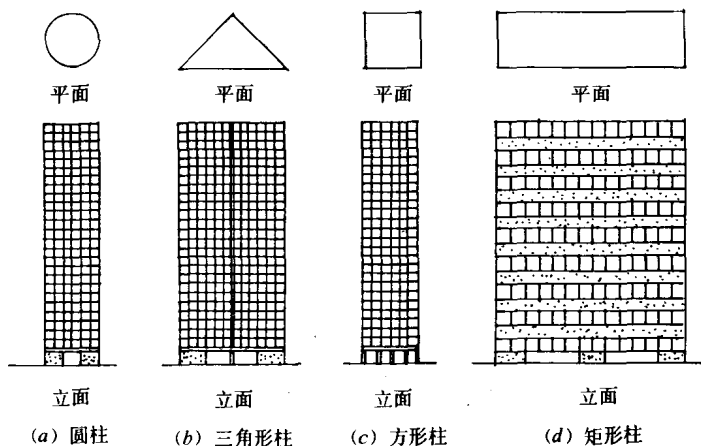


图 1—5 柱形建筑

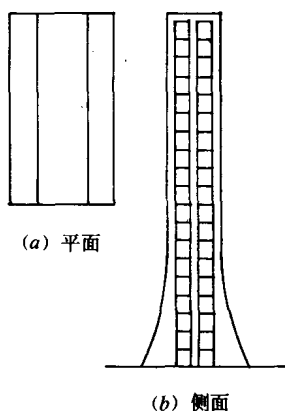


图 1—6 建筑底部的外
表面为曲面

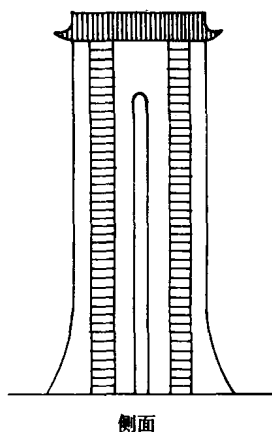


图 1—7 模仿天然山岩
的高层建筑

元,各有不同的高度。建筑物的分层平面及轴侧立体图示如图中。底面积尺寸为 $68.70\text{m} \times 68.70\text{m}$,分成九个方形单元,每个平面尺寸为 $22.90\text{m} \times 22.90\text{m}$ 。三角形底平面建筑的立体分割见图 1—9。

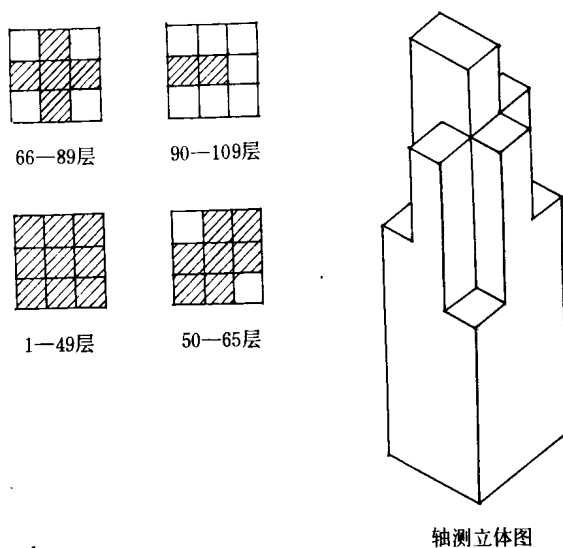


图 1—8 方形平面建筑

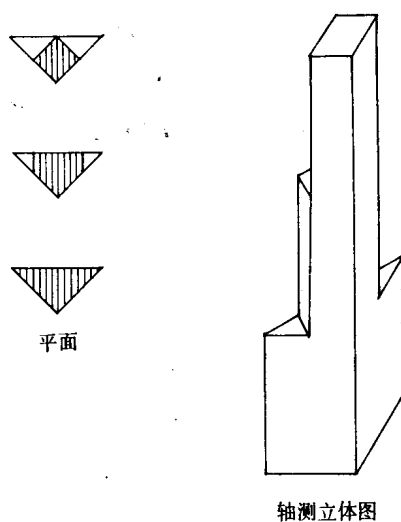


图 1—9 三角形平面建筑

第二节 高层建筑结构的材料和建筑体系

1. 材 料

高层或多层建筑中楼板都用钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土,所用材料为钢筋、水泥及砂、石料。在多层建筑结构中,一般五、六层住宅,用内、外砖墙和钢筋混凝土的梁、板共同组成砖-混凝土结构;有时用外砖墙和内钢筋混凝土柱共同承重。高层建筑结构中最常用的是钢筋混凝土结构,主要承重构件如板、梁、墙、柱均用钢筋混凝土。目前,钢筋混凝土高层建筑最高者已达76层,高262m。这个高度并非理论上的限制,如果能适当选取结构型式,改进施工方法,这个高度还可以大量突破。另一种常用的高层建筑结构是钢结构,梁、柱采用型钢。可用钢结构和钢筋混凝土相结合,在施工时先架立型钢作为骨架,外设模板将型钢包在混凝土内部,不仅可以增加结构的刚度,而且防止钢材锈蚀,并增强防火效果。采用钢结构,美国芝加哥建成的希尔斯大厦,总高度已达442m。预应力钢筋混凝土也是值得注意的结构形式,重量较轻,混凝土施加预应力后同时能承受拉应力和压应力,具有和钢结构同样的性能。

2. 结构体系

目前常用的结构体系有以下数种。

(1) 框架结构

框架结构由钢筋混凝土梁、柱刚性联结,外墙一般用实心砌体砖墙,内隔墙用轻质材料,如空心砖、加气混凝土、钢丝网水泥板等。框架结构的优点是可以满足多功能需要,不设隔墙,增大房间的使用面积。如图1—10。

(2) 剪力墙结构

多用在宾馆或办公楼建筑,一般是每隔两间设置一道横向钢筋混凝土墙,间距约为8m左右,并设纵向钢筋混凝土墙二或四条。这种结构常用在矩形平面的高层建筑,对抵抗风力或地震力的

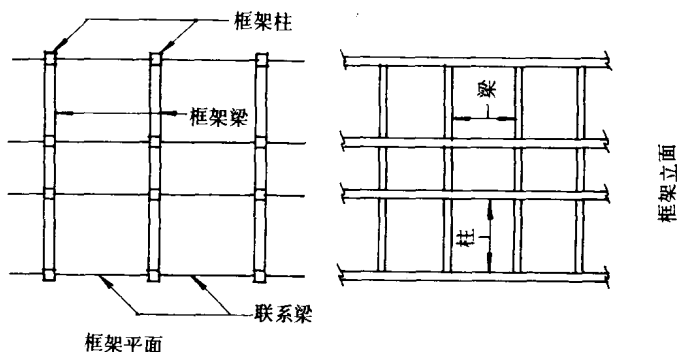


图 1—10 框架结构图

水平荷载有较大的强度和刚度。如图 1—11。

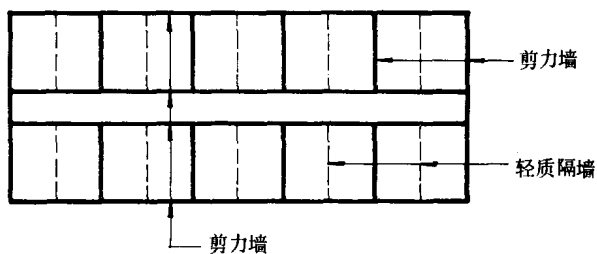


图 1—11 剪力墙结构平面布置图

(3) 筒状结构

由剪力墙组成的闭口薄壁杆件形成了筒状结构。这些筒状结构可能是单筒、多筒、筒中筒或成束的筒结构,如图 1—12。

在实际高层结构中,墙板中常常需要开设门窗,由于开孔较多,剪力墙很难形成闭合薄壁构件。为了形成闭合的筒状结构常用密排的横梁和直柱代替墙板,这样的结构称为框筒结构,如图 1—13。

如所周知,闭口薄壁结构的抗扭刚度远较开口薄壁结构的抗扭刚度为大,所以板筒结构或框筒结构在承受不规则的水平荷载

下也具有很大的承载能力。

以上三种结构：框架结构、剪力墙结构、筒状结构是高层建筑结构中常用的结构体系。在实际建筑中常用以上三种结构的组合，例如框架—剪力墙体系，框架—框筒体系等。

作者在设计工作中，根据功能需要，认为至少还应研究高层建筑结构中如下的四种体系。

(1)板、柱体系

在国内和香港的某些高层建筑中要求

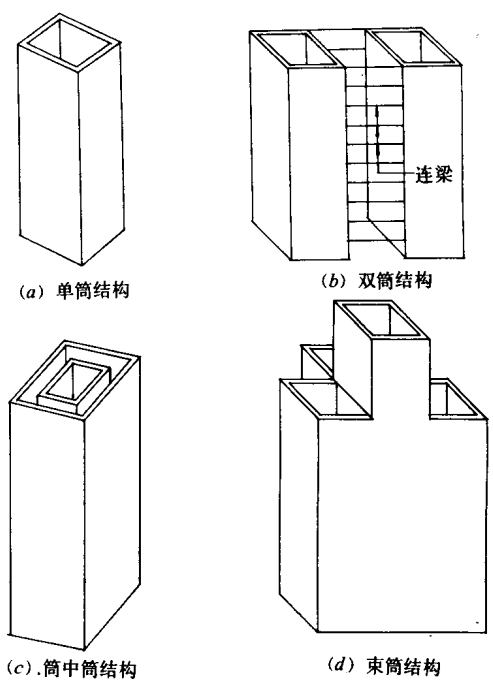


图 1—12 筒状结构

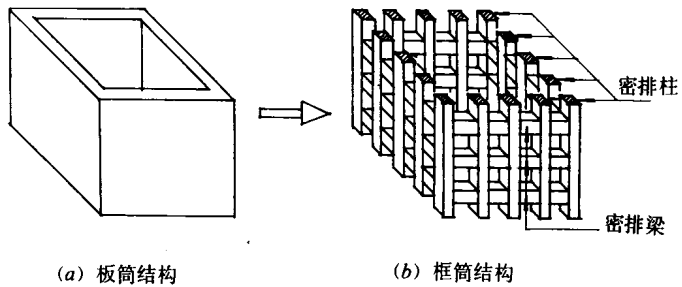


图 1—13 板筒与框筒结构

尽量压低层高，这样避免采用梁系，而将楼板直接支承在柱上，为了功能要求，有时不允许设置柱帽，板、柱体系如图 1—14 所示。