

高层建筑 结构设计

中国建筑科学研究院
建筑结构研究所主编

高层建筑结构设计

中国建筑科学研究院建筑结构研究所 主编

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书根据我国高层建筑工程中的实践经验及科研成果,比较系统地阐述了高层建筑设计方法,并详细地介绍了我国《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规定》(JZ102-79)的有关内容。书中既阐述了必要的理论,又着重注意实际应用。全书共九章,主要包括结构设计基本概念和原则、结构方案选择和布置、结构内力计算的常用方法和一些较新的方法、钢筋混凝土框架及剪力墙的截面设计和结构构造、计算实例和震害经验分析。

本书可供从事建筑结构工程工作的技术人员和科学研究工作者以及高等院校中工业与民用建筑专业的师生参考。

高 层 建 筑 结 构 设 计

中国建筑科学研究院建筑结构研究所 主编

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1985年11月第三次印刷 印张:33 3/4

印数:37,001—59,000 字数:788,000

统一书号:15031·452

本社书号:2847·15—1

定价:7.85 元

前 言

我国解放以来,在北京、广州,上海等几十个城市陆续兴建了一大批高层建筑。这些高层建筑的兴建,既节约了城市建设用地,又改变了城市面貌,满足了社会主义建设事业发展的需要。

通过工程实践和科学研究,我国的高层建筑结构设计方法得到了不断的发展和提高,《钢筋混凝土高层建筑设计施工规定》(JZ 102-79)也颁布了。为适应高层建筑的进一步发展,有必要对现有的结构设计方法和有关的研究成果作比较系统的总结,对(JZ 102-79)规定的有关内容和科学依据加以详细介绍。因此,特编写本书供有关科技人员参考。为了使读者能比较深入地了解高层建筑结构设计的方法,本书不仅阐述了有关理论,而且着重介绍了实际应用。在内容编排方面,从介绍高层建筑结构设计的基本概念和原则开始,随后分别介绍结构方案选择和结构布置,结构内力和位移计算的常用方法和一些较新的方法,以及钢筋混凝土框架及剪力墙结构的截面设计和构造。第九章还列举了最常用的框架-剪力墙结构和剪力墙结构的设计计算实例。第八章对国内外一些高层建筑的震害作了分析。根据我国的具体情况,本书主要讨论四十层以下的钢筋混凝土高层建筑结构,着重点是结构的抗震设计;至于抗风设计,只作了一般介绍。

参加本书编写工作的有:徐培福、赵西安、郝锐坤(中国建筑科学研究院建筑结构研究所),陈克标(北京市建筑设计院),方鄂华(清华大学),曾华(北京工业大学)、王绍豪(北京市第一建筑工程公司),曾哲(北京市第二建筑工程公司)。中国建筑科学研究院建筑结构研究所的张维嶽和夏靖华两同志对全书进行了审阅。在编写过程中还引用了有关兄弟单位的资料,这将在有关章节予以说明。由于本书涉及的内容较广,而编者水平又有限,故难免有不当之处,希望读者批评指正。

目 录

前言

第一章 高层建筑结构设计的基本概念和原则	1
第一节 高层建筑发展简况.....	1
第二节 近代高层建筑结构体系及设计方法简述.....	4
第三节 抗风设计的基本概念和原则.....	12
第四节 抗震设计的基本概念和原则.....	15
第二章 高层建筑结构体系与结构布置	22
第一节 结构选型.....	22
第二节 结构体系.....	23
第三节 结构布置.....	34
第四节 地基与基础.....	54
第三章 高层建筑结构内力与位移计算的一般原则	57
第一节 高层建筑结构的荷载.....	57
第二节 内力与位移计算的一般原则.....	78
第四章 高层建筑结构内力与位移计算的一般方法	97
第一节 高层建筑结构考虑空间协同工作的矩阵分析方法.....	97
第二节 高层框架结构的近似计算.....	112
第三节 高层剪力墙结构内力与位移的计算.....	145
第四节 框架剪力墙结构的内力与位移计算.....	209
第五章 高层建筑结构内力与位移分析的其他方法	233
第一节 框筒和筒中筒结构的近似计算.....	233
第二节 用有限单元法分析剪力墙结构.....	238
第三节 高层建筑结构在地震荷载作用下的弹塑性动力分析.....	255
第六章 框架剪力墙结构的性能与截面设计	294
第一节 一般性能和要求.....	294
第二节 截面设计和配筋构造.....	301
第三节 装配式框架节点设计.....	315
第四节 连结构造.....	339
第七章 剪力墙结构的性能与截面设计	352
第一节 剪力墙结构的特点.....	352
第二节 单肢剪力墙的性能与截面设计.....	352
第三节 开孔剪力墙的受力性能与截面设计.....	376
第四节 剪力墙结构的构造.....	398
第八章 震害分析	410

第一节	概述.....	410
第二节	场地、地基和震害的关系.....	413
第三节	结构刚度和震害的关系.....	426
第四节	平面布置、体型和震害的关系.....	432
第五节	防震缝处理不当产生的震害.....	443
第六节	框架中柱的强度及延性对震害的影响.....	445
第七节	剪力墙中连梁强度及延性对震害的影响.....	453
第八节	结论和建议.....	460
第九章	高层建筑结构计算实例.....	462
第一节	剪力墙结构计算.....	462
第二节	框架-剪力墙结构计算	495
参考文献		530

第一章 高层建筑结构设计的基本概念和原则

第一节 高层建筑发展简况

高层建筑的发展有一个长期的过程。根据对现存的部分早期高层建筑的考察，早在一千几百年以前世界上就出现了高层建筑。如我国河南登封县的嵩岳寺塔，十层，高 40 米，就建于公元 523 年；西安的大雁塔，七层，高 60 余米，改建于公元 704 年。古罗马帝国在三世纪末到四世纪初就修建了一些十层左右的房屋。公元十一世纪前后，又有更高的建筑出现，如我国河北定县的料敌塔（十一层）高 82 米（见图 1.1.1），山西应县木塔（九层）高 67 米。意大利于公元 1100 年至 1109 年在 Bologna 建造了四十余座塔楼，其中 L'asineli 塔竟高达 98 米（见图 1.1.2）。表 1.1.1 列出了我国现存的部分早期高层建筑的有关资料。

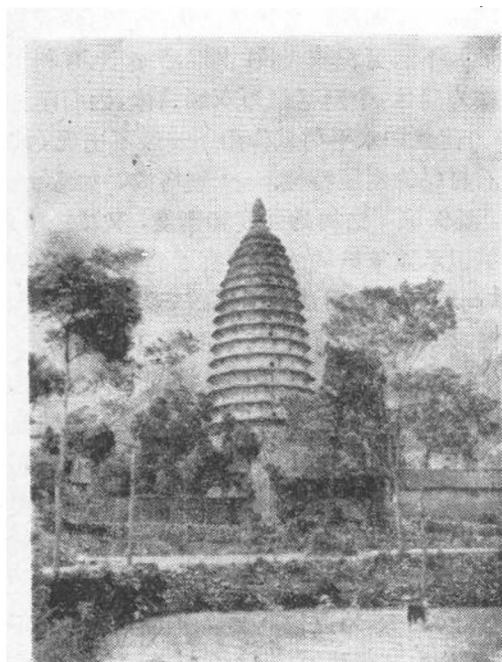


图 1.1.1 河北定县料敌塔

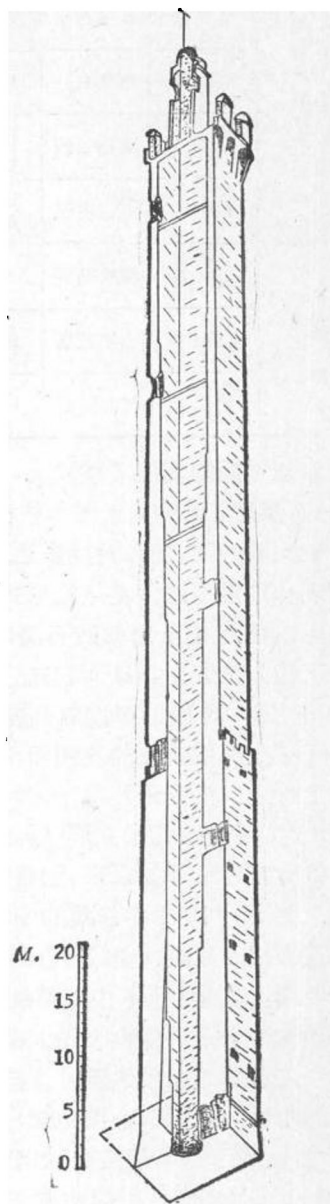


图 1.1.2 L'asineli 塔剖面

表 1.1.1 我国现存的部分早期高层建筑

结 构	建筑物名称	地 点	建造年代 (公元)	高 度 (米)	层 数	平面形状	结构体系	构 造
砖 木 混 合 结 构	嵩岳寺塔	河南登封	523 年	40米	外观五层 内部十层	正十二边形, 内部正八边形	砖砌单层 筒体	木楼板
	大雁塔	陕西西安	704 年 (改建)	60余米	七 层	正方形	砖砌单层 筒体	木楼板
	千寻塔	云南大理	9 世纪	60米	外观十七层 内部十一层	正八边形	砖砌单层 筒体	木楼板
	虎丘塔	江苏苏州	959 年	50余米	七层	正八边形	砖砌双层 筒体	砖楼面
	料敌塔	河北定县	1055年	82米	十一层	正八边形	砖砌双层 筒体	砖楼面
	开元寺 双塔	福建泉州	1237年 1256年	44米 48米	五层	正八边形	石砌双层 筒体	木楼板
	六和塔	浙江杭州	1156年 重 建	59.9米	七层	正八边形	砖砌双层 筒体	砖楼面
木 结 构	独乐寺 观音阁	河北蓟县	984年	22.5米	外观二层 内部三层	长方形	木框架	木楼板
	应县木塔	山西应县	1056年	67.3米	外观五层 内部九层	正八边形	木筒体	木楼板
	普宁寺 大乘阁	河北承德	1755年	约 40 米	五层	长方形	木框架	木楼板

五
由

这些早期的高层塔楼建筑,由于受到当时经济技术条件的限制,都是用砖、石和木料建造的,墙壁相当厚,支撑木柱都很粗大,因而使用面积相当狭窄。但是这些建筑物的外形一般比较合理,多为封闭多边形(如八边形),下部面积较大,往上逐渐缩小,有利于抗御风荷载和地震荷载。在结构形式上不少塔楼为筒体,个别甚至为双层筒体,因而刚度和强度性能较好。由于厚壁砖石筒体结构在重力荷载和水平荷载作用下一般不出现(或者只有很小的)拉应力,从而就充分利用了砖石材料的耐压特性。个别塔楼,如意大利的 L'asineli 塔,其墙的厚度随高度逐渐减少,既保证了结构的强度和刚度,又减轻了自重,并扩大了上部建筑物的使用面积。这样一些以承重墙结构为主的高层建筑一直持续了好长一个时期。直到十九世纪末,仍有极少数高层建筑采用这种承重砖墙结构,如美国芝加哥于 1891 年建造的十六层 Monadnock 大楼,其下部几层砖墙的厚度竟达 1.8 米。

自十九世纪开始以来,随着经济和技术的发展,出现了一些用铁框架结构修建的高层房屋。英国于 1801 年修建的曼彻斯特棉纺厂,七层,就是最早以铸铁框架作为建筑物内部承重骨架的建筑。美国于 1843 年用熟铁框架修建了长岛 Black Marbor 灯塔。到十九世纪中期,就涌现了不少内部铁框架与外承重砖墙相结合的高层房屋。1883 年,美国建造的芝加哥十一层保险公司大楼则是世界上最先用铁框架(部分钢梁)承受全部荷载、外墙仅为自承重的高层建筑。这样一些建筑可以说就是近代高层建筑的萌芽。

十九世纪末到二十世纪初,由于工业技术的进步,为近代高层建筑的发展创造了有利的条件,出现了钢框架结构和钢筋混凝土框架结构高层建筑。1889 年美国芝加哥修建的 Second Rand McNally 大楼(九层)就是世界上第一幢采用钢框架结构的高层建筑;而最早的钢筋混凝土框架结构高层建筑则是 1903 年修建的法国巴黎 Franklin 公寓和美国辛辛纳提

城 Ingall 大楼(十六层)。那个时期钢框架结构是相当广泛的,而钢筋混凝土框架结构则只有少数几例。有些钢框架结构工程,由于增设了钢支撑、垂直桁架或剪力墙,因而其刚度和强度得到了加强和提高,进而又使建筑物的高度有所增加,推动了高层建筑的发展。例如,1905 年美国纽约的 Metropolitan 高楼,修了五十层之多;1931 年,美国又在纽约建造了有名的 102 层帝国大厦。这一时期,高层建筑虽然有比较大的发展,但毕竟受到设计理论和建筑材料的限制,结构自重较大,材料用量较多,且仅限于框架结构,建于非地震区。

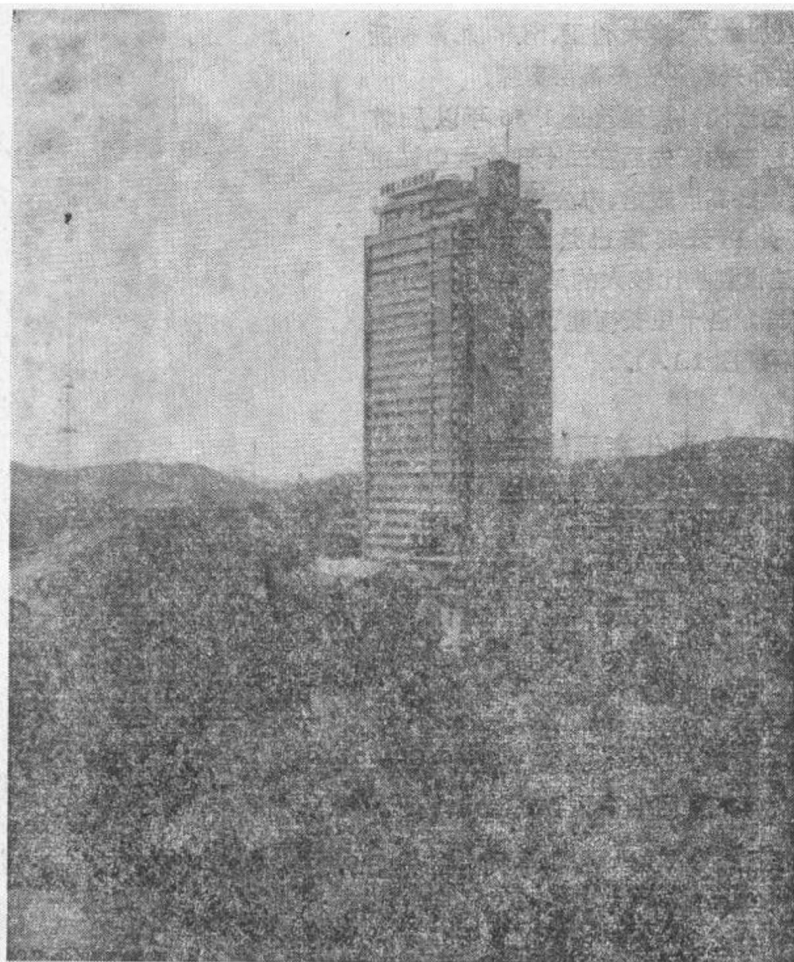


图 1.1.3 广州白云宾馆

直到二十世纪五十年代,由于轻质高强材料研究成功,抗风抗震结构体系得到了发展,新的设计理论取得成果,电子计算机在设计中得到应用,以及新的施工技术和施工机械不断涌现,均为大规模地、较经济地修建高层建筑提供先决条件,高层建筑才得到了迅速发展。不少国家由于城市人口大量集聚,密度猛增(如美国纽约每公顷为 1000 人,香港为 3700 人),造成城市生产和生活用房紧张,地价昂贵,因此就迫使建筑物向空间发展。截至目前为止,不少国家的高层建筑几乎占了整个城市建筑面积的 30~40%。美国的高层建筑数量最多,高度在 160~200 米的建筑就有 100 多幢;目前世界上最高的芝加哥 Sears 大楼,有 110 层,高达 443 米。日本的高层建筑楼房近十多年来发展很快,在地震区建造

了三十余幢 100 米以上的高层建筑。有些国家还出现了高层建筑群,如法国巴黎的 Defecce 区就修建几十幢 30~50 层的楼房;罗马尼亚首都布加勒斯特,在几个住宅区盖了几百幢十一层左右的住宅。近十年来,南斯拉夫、比利时、荷兰、苏联等国已把高层建筑的比重提高了 1~3 倍。有些国家和地区,如墨西哥、委内瑞拉、加拿大、澳大利亚、南非、香港和新加坡等,也都兴建了许多高层房屋。

我国的近代高层建筑是 1955 年以后才逐渐发展起来的,先后在二十几个大中城市修建了一大批高层旅馆、办公楼、公寓、住宅;最高的广州白云宾馆已达三十三层(图 1.1.3)。建设规模比较大的是北京“前三门”高层建筑群,沿十里长街建了四十余幢 9~15 层的高楼(图 1.1.4)。

第二节 近代高层建筑结构体系及设计方法简述

二十世纪五十年代至今,国内外高层建筑结构设计积累了丰富的经验,出现了多种结构体系,抗风抗震设计理论得到了不断发展。下面分别对非地震区和地震区的高层建筑结构情况加以介绍。

一、非地震区的高层建筑结构

非地震区的建筑结构主要承受垂直荷载和风荷载。当建筑物较高时,风荷载往往成为结构设计的控制因素,因此结构设计的主要任务在于创造出有利于抗御风荷载的建筑物外形和结构体系,发展抗风设计理论。

几种对抗风比较有利的建筑物外形如图 1.2.1 所示。圆形和椭圆形建筑[图 1.2.1 (a, e)]与矩形建筑相比,可减少风压 20~40%。Y 形、三角形、锥形以及外柱曲线形的建筑[图 1.2.1 (b, c, d, f)]可显著增加建筑物的刚度及强度,减少侧向变形。

非地震区高层建筑结构体系的发展也很

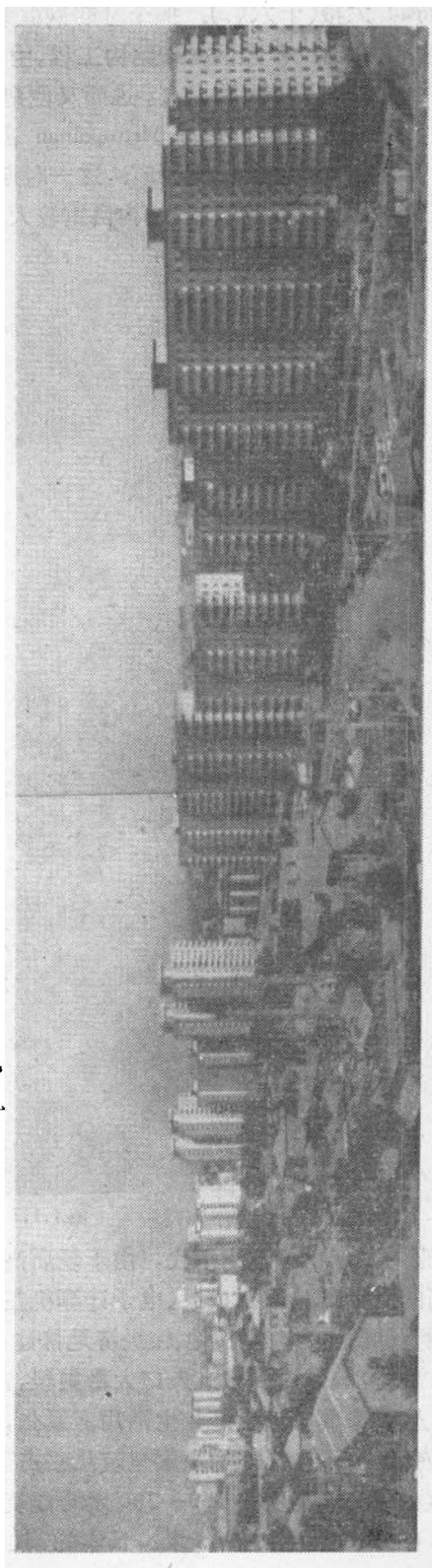
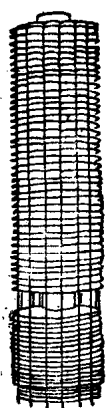
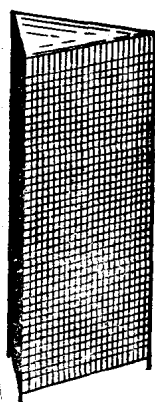


图 1.1.4 北京“前三门”大街高层建筑群之一一



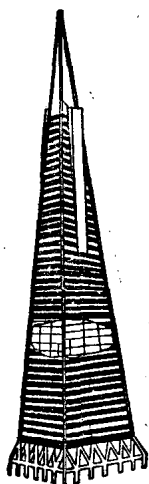
(a) 圆形



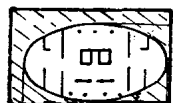
(b) 三角形



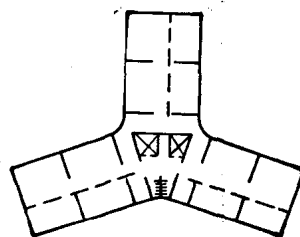
(c) 外柱曲线形



(d) 锥形



(e) 椭圆形



(f) Y形

图 1.2.1 几种对抗风比较有利的建筑物外形

迅速,图 1.2.2 列举了十四种比较有代表性的结构体系。这些体系都有一定的适用范围和优缺点(详见第二章)。图 1.2.2 (a) 为钢筋混凝土剪力墙结构体系。在已建的剪力墙结构体系的建筑物中,层数一般不超过三十五层,墙间距通常为 3.3~10 米,墙厚不超过 35 厘米;个别剪力墙结构的建筑物层数达七十层。从古代笨重的砖墙结构发展到薄壁高强的剪力墙结构,可以说是一个很大的飞跃。我国剪力墙结构体系发展较快,在风荷载为主的地区,修建的剪力墙结构体系高层建筑有广州白云宾馆(三十三层)、广州宾馆(二十七层)及上海漕溪路的高层住宅(图 1.2.3) 等。各地工程实践说明,对于建筑布置和使用上不需很大空间的建筑物,如一般性的旅馆和住宅,采用这种结构是较为适宜的。图 1.2.2 (b) 是框架-剪力墙结构体系。这种体系在二十五层以下的高层建筑中应用最为广泛。我国的高层办公楼及旅馆大部分采用这种体系。实践证明,在纯框架结构[图 1.2.2 (c)] 中局部设置剪力墙或支撑,对建筑物的使用并无多大影响,而对于增加结构刚度和强度却有比较显

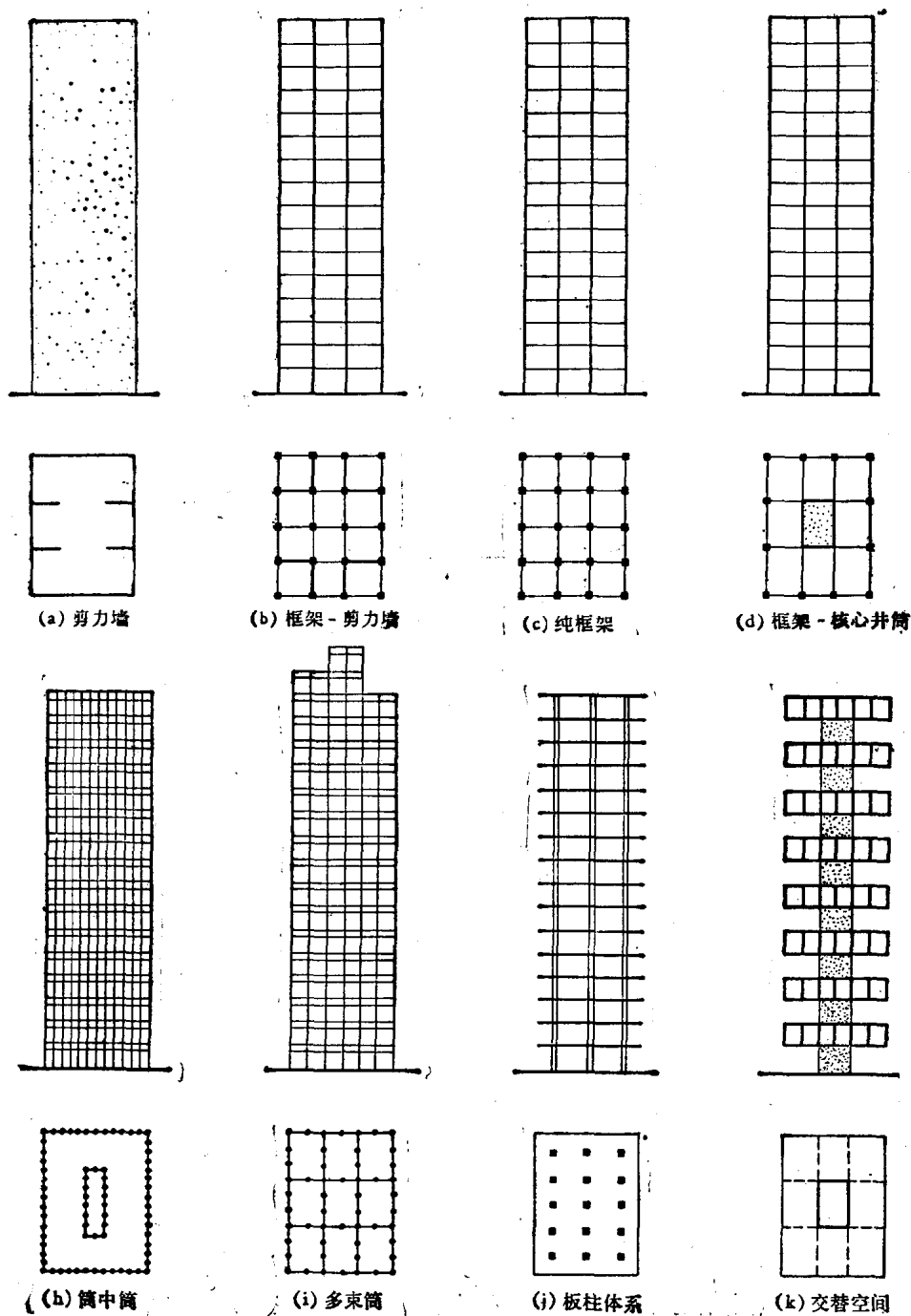
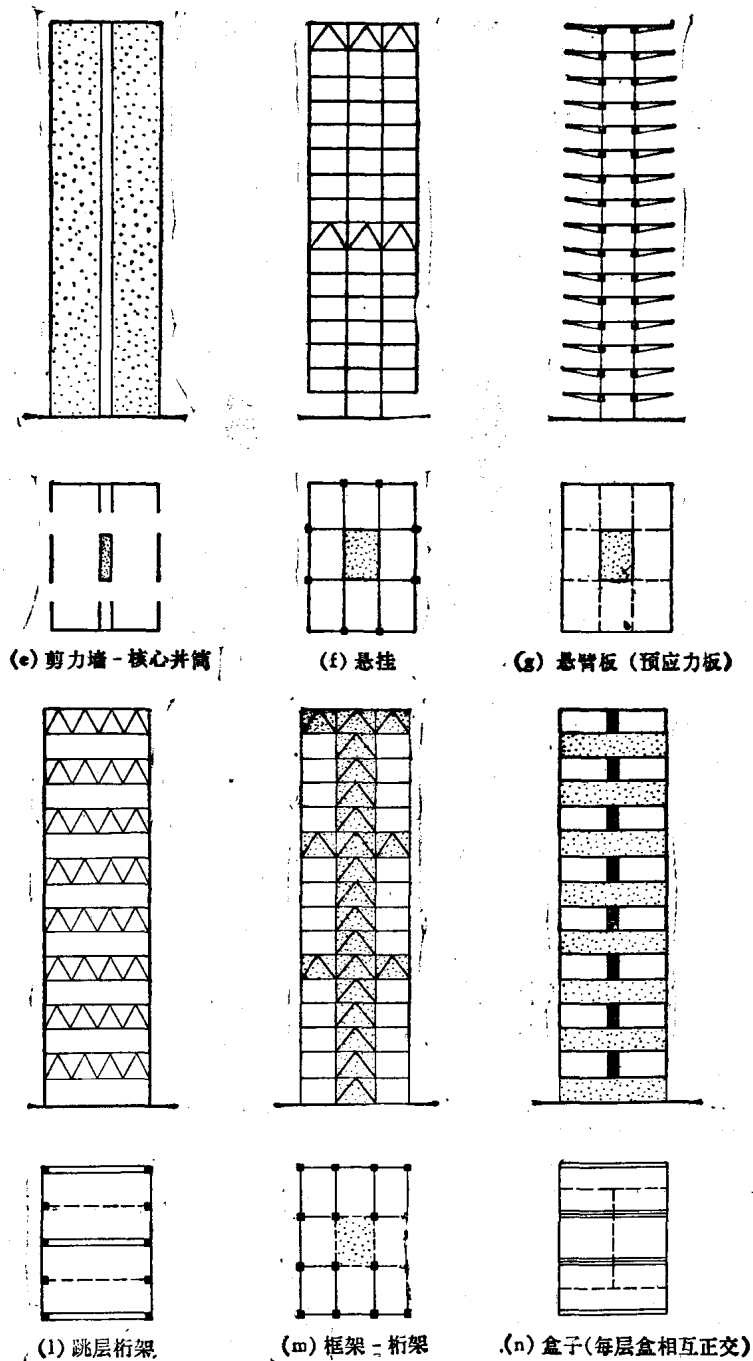


图 1.2.2 高层建筑

著的效果。图 1.2.2 (d,e,f,g) 所示的四种结构体系，其共同点是都采用钢筋混凝土核心井筒。在框架井筒及剪力墙井筒结构中，核心井筒承受了部分重力荷载及大部分风荷载；在悬挂结构及悬臂板结构中，核心井筒承受了全部重力荷载及风荷载。目前采用这些体系的高层建筑已有一定数量，一般为 8 ~ 50 层。这些空间薄壁结构对增加高层建筑的刚



结构体系

度和强度有较好的效果。图 1.2.2 (h, i) 所示的筒中筒及多束筒结构, 是二十世纪七十年代开始出现的, 一般用于较高的建筑 (90~400 米) 或有特殊使用要求的建筑。我国正在设计的几幢电讯楼、旅馆、办公楼, 建筑总高度为 80~110 米, 采用了筒中筒结构。图 1.2.2 (j, k, l, m, n) 所示的几种结构体系, 虽然应用范围不很广, 但也有一定的代表性。除上述

十四种结构体系外,有些高层建筑为减少风振,采用减振装置。美国纽约的 World Trade Center 大楼采用粘弹性阻尼器减振,美国纽约的 Citicorp Center 大楼、波士顿的 John Hancock 大楼、澳大利亚悉尼的 Centerpoint 大楼等均采用调频质量阻尼器(TMD)减振,都取得较好的效果。这些特殊措施的应用范围仍较窄。

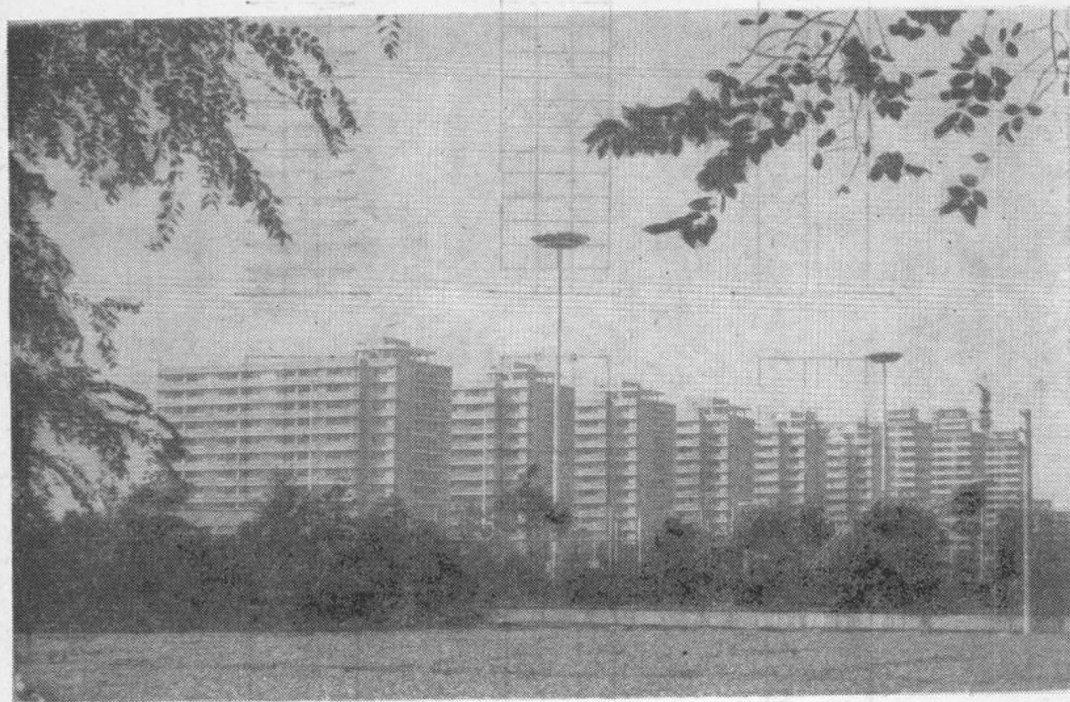


图 1.2.3 上海漕溪路高层住宅

近十多年来,轻质高强新型建筑材料在高层建筑中得到了广泛应用,为现代高层建筑取得良好的经济效果提供了物质基础。例如,美国休斯敦的 One Shell Plaza 大楼,按原设计方案用普通混凝土只能建三十五层,后改用陶粒混凝土、筒中筒体系,在造价不变的情况下,建了五十二层,经济效果十分显著。我国沈阳建造的十六层公寓,上部剪力墙结构采用陶粒混凝土,也取得了一定的经济效果。此外,还有其他轻质高强材料,如加气混凝土、石膏板、各种建筑塑料、铝合金以及高强钢材和高标号混凝土等,也都在高层建筑中得到应用。

高层建筑抗风设计理论的发展也是相当迅速的。自动化电子仪器、大型附面层流风洞等测试技术的发展以及电子计算机在计算分析中的应用,为抗风设计理论的发展创造了有利的条件。通过对近地面阵风特性的观测研究,对建筑物表面风速、风压的观测分析及建筑物对风力的反应分析,高层建筑结构抗风设计的静力算法已逐步建立。这种方法对于一般的高层建筑已可满足要求。至于高层建筑在风力作用下的动力反应分析,还有待今后进一步研究。

由于建筑外形、结构体系、抗风设计理论的发展以及轻质高强材料的应用,使现代高层建筑的自重大大减轻,一般在 1100 公斤/米^2 以下,有的甚至只有 $300 \sim 500 \text{ 公斤/米}^2$ 。美国于 1968~1974 年建造的三幢 100 余层的高层建筑,与 1931 年建造的纽约 102 层帝国大厦相比,自重减轻约 20%,用钢量减少约 30%。

二、地震区的高层建筑结构

地震区高层建筑的发展是比较曲折的,与非地震区高层建筑迅速、顺利的发展形成了鲜明的对照。二十世纪五十年代前,在地震区建造的高层建筑数量较少,多数在十五层以下。直到1957年,美国才取消地震区高层建筑不能超过十三层的限制。日本取消地震区高层建筑不能超过31米的限制是在1963年。几十年来,虽然随着抗震设计技术水平的提高,愈来愈多的高层建筑经受了中等强度乃至高强度地震的考验,但仍有一些高层建筑因地震而毁坏。目前地震区高层建筑最高已达50~60层,并且出现了一些抗震性能较好的结构体系,设计方法也有所发展。但是,人们至今还没有完全掌握高层建筑抗震设计的规律。

现在通常所采用的抗震结构体系有以下几种:

(1) 钢框架以及钢框架与钢筋混凝土剪力墙结合的体系。此类体系抗震性能比较好,当前地震区修建40~60层的建筑大多采用这种体系,但由于造价较高、用钢量多,仍然受到一定的限制。

(2) 钢筋混凝土剪力墙结构体系。此类体系的抗震性能也比较好,这是通过本世纪七十年代的几次大地震的实践所证实的。此类体系的震害一般较轻,结构和非结构构件的损坏都较少(详见第八章)。在地震区10~20层左右的建筑,有不少是采用这种体系的。北京近几年建成一批9~30层建筑,也采用这种体系。

(3) 钢筋混凝土框架与剪力墙(或核心井筒)结合的结构体系。这种结构也有较好的抗震性能,地震区三十层以下的高层建筑,采用这种体系较多。

(4) 悬挂结构、底层设置减震系统的结构等。在地震区也有采用这种体系的,但目前仍处于研究、试点阶段。

至于单纯钢筋混凝土框架结构及底层为柔性框架的结构,经多次震害证明,抗震性能一般较差,目前很少采用。

关于高层建筑结构抗震问题的研究,是在1906年美国旧金山地震后逐渐开展起来的。当时,只是对震害作些粗略的宏观调查,才发现钢框架抗震性能较好,钢筋混凝土结构次之。1915年日本佐野提出了衡量地震动的尺度——“震度”的概念,并规定作用于建筑物的地震力 $F = RW$ (R 为震度, W 为建筑物的重量)。关东大地震后第二年(1924年),这种“震度法”被纳入了日本城市建筑法规(R 取0.1)。这种比较老的方法是假想地震力为固定不变,与结构特性、地基好坏无关,显然是很粗糙的。然而,日本沿用这种方法一直到二十世纪五十年代。在此期间,只是考虑了震度系数随建筑物高度有简单的变化和地区的影响。1933年长滩地震时,美国取得了第一个强震记录。1940年美国在 El Centro 地震中又取得了重要的强震记录。在得到这些强震记录和建筑物自振特性资料的基础上,美国一些学者提出了地震反应谱的理论。1956年,美国旧金山采用了新的抗震设计规定;该规定以加速度反应谱特性为基础,建立了建筑物自振周期(T)与基底剪力系数的关系。以后,经不少国家的研究发展,形成了现已广泛采用的“等效静载法”。我国自解放以来,对抗震研究工作十分重视,从五十年代末开始,在十多层的高层建筑设计中采用了等效静载法进行设计。在确定作用于高层建筑上的总基底剪力及地震力沿建筑物高度分布时,考虑了地震动力作用的影响(建筑物的动态特性、结构的弹塑性性能、地区烈

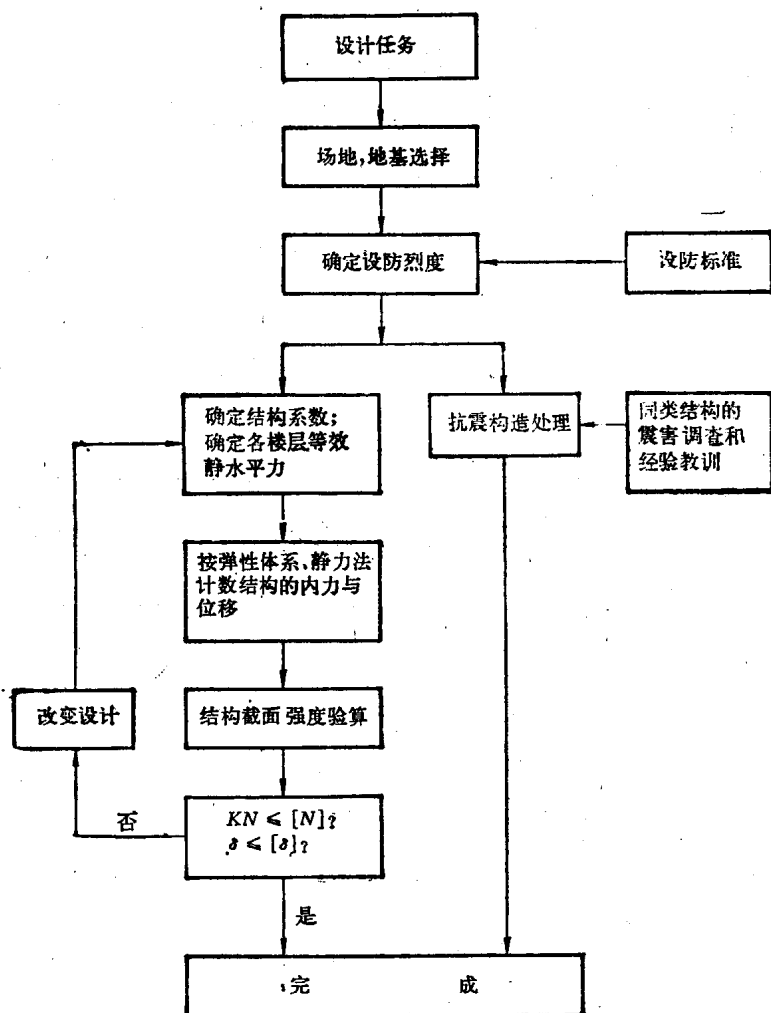


图 1.2.4 等效静载法的设计计算步骤

度和天然地基条件等)。等效静载法的设计计算步骤见图 1.2.4。

从二十世纪五十年代开始,国际上出现了高层建筑结构抗震设计的“动态分析法”。动态分析法中有一种比较简便的方法,即振型组合法。这种方法是应用地震反应谱,把建筑物简化成多自由度振动体系,通常考虑三次振型,由此求出各振型情况下的地震力,再以适当方法组合,得到建筑结构的内力。至本世纪六十年代已有一些国家采用这种方法。我国高层建筑设计中,高度超过 45 米或重量、刚度分布很不均匀的高层建筑,也采用振型组合法。动态分析的另一种方法为直接动力分析法(或称时程法)。这种方法是把建筑物简化为多自由度的振动体系(弹性的或弹塑性的),输入几种比较合适的地震波(强震记录波或人为设计的地震波),利用电子计算机求得结构的时程反应,包括结构各部分的内力、变形、裂缝、破坏等情况。如有不满足要求的地方,则修改原设计,再进行动力分析,直到求得满意的结果为止。其设计计算步骤如图 1.2.5 所示。时程法于 1956 年开始用于高层建筑抗震设计,由 L. Zeevaert 和 N. M. Newmark 对墨西哥城一幢四十四层建筑进行了分析(当然很不完善);该建筑于 1957 年 7 月遇到了强震的考验,仅内墙有轻微裂缝,而

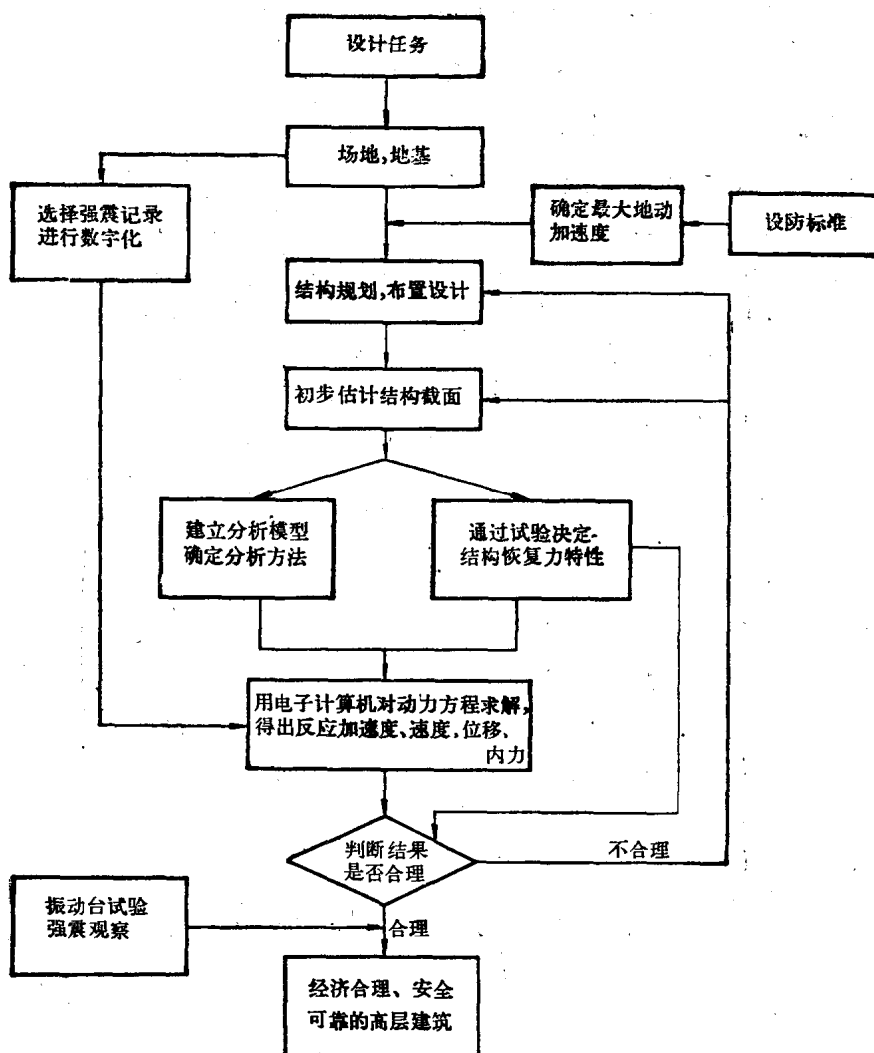


图 1.2.5 直接动力法(时程法)的设计计算步骤

周围许多 11~16 层的建筑却遭到了破坏。从而，才引起人们对结构地震反应分析的重视。日本虽然于 1959 年才在高层建筑实际工程中试用地震动力反应分析，但在六十年代就比较广泛采用了。我国也开展了这方面的研究工作。时程法是比较合理的分析方法，但至今还很不完善。从理论上讲，这种方法有不少优点，如能够发现结构的薄弱环节，对结构变形、延性的分析比较符合实际，预计的破坏状态与实际震害比较接近等。但是，这种方法的前提条件(输入地震波、结构计算模型等)与实际较难符合，又需要大型高速电子计算机，费用较大。鉴于这种情况，目前对此方法仍有不同看法。因而在研究时程法的同时，一些简化的近似方法也应加以进一步研究^[3,4]。