



新世纪土木工程系列规划教材

高层建筑 结构设计



王 萱 主编

Education



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新世纪土木工程系列规划教材

高层建筑结构设计

主 编 王 萱
副主编 谢 群 孙修礼 周翠玲
参 编 杨涛春 王新元 徐宗美
主 审 翟爱良

机械工业出版社

《高层建筑结构设计》主要是根据《高等学校土木工程本科专业指导性专业规范》规定的知识点,并结合我国高层建筑结构设计涉及的现行规范和标准编写的。本书主要介绍了高层混凝土结构设计的理论和方法,内容主要包括高层建筑结构体系与结构布置、高层建筑结构的荷载与地震作用、高层建筑结构的计算分析与设计要求、钢筋混凝土框架结构设计、钢筋混凝土剪力墙结构设计、钢筋混凝土框架—剪力墙结构设计、钢筋混凝土筒体结构设计、复杂高层建筑结构设计及高层混合结构设计。为方便读者学习,编写了适量的典型例题,章后附有思考题或习题。

《高层建筑结构设计》可作为高等院校土木工程专业相关课程的教学用书,也可作为土建工程技术人员参考书以及职业资格考试的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构设计/王萱主编. —北京:机械工业出版社, 2018. 1
新世纪土木工程系列规划教材
ISBN 978-7-111-58450-6

I. ①高… II. ①王… III. ①高层建筑-结构设计-高等学校-教材
IV. ①TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 276669 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 责任校对:杜雨霏
封面设计:张 静 责任印制:张 博
河北鑫兆源印刷有限公司印刷
2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·17 印张·413 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-58450-6
定价:43.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前言

我国可耕地面积只占世界可耕地面积的 7% 左右,却要养活世界上约 20% 的人口。为解决节约土地、保证吃饭和基本建设等问题,发展高层建筑是理所当然的事情。高层建筑体量较大,造价较高,发展高层建筑需要有雄厚的经济实力做后盾。进入 21 世纪以来,随着经济的迅速发展,高层建筑如雨后春笋般在全国各地迅猛发展,我国已是全球在建高层建筑最多的国家,其中,钢筋混凝土结构是高层建筑结构的主体,混合结构应用也越来越广泛,复杂高层建筑结构层出不穷。为适应我国高层建筑的发展,满足土木工程专业高层建筑结构设计的教学需要,我们编写了这本书。

本书根据土木工程专业本科教学大纲的要求,覆盖《高等学校土木工程本科专业指导性专业规范》相应核心知识点和技能点,在编写过程中参考了大量同类优秀教材,并结合国内外高层建筑的发展和应用现状及相关职业资格考试,对高层建筑结构的基本知识、结构选型与结构布置、荷载与地震作用、设计计算的基本规定、高层钢筋混凝土框架结构设计、钢筋混凝土剪力墙结构设计、钢筋混凝土框架—剪力墙结构设计、钢筋混凝土筒体结构设计、复杂高层结构设计和高层混合结构设计等问题进行讨论。本书主要依据我国现行的《高层混凝土结构技术规程》《混凝土结构设计规范》《建筑抗震设计规范》《建筑结构荷载设计规范》等有关规范规程编写,注重理论上的系统性,同时强调叙述简明扼要,力求适用和实用。

学习高层建筑结构设计重要的是概念清楚,掌握基本的设计计算方法。为此,本书主要阐述了高层建筑结构常用的设计计算方法,并配有一定量的例题和习题,辅助说明方法的应用,实用性强。通过本书的学习,可以帮助读者深刻理解高层建筑结构的受力性能、变形特点和设计原则,掌握高层建筑结构各种结构体系的布置特点、应用范围等,获得高层建筑结构设计方面的知识,加深对相关规范和标准的理解,为学生毕业后从事高层建筑结构的设计、施工和技术管理打下基础。

本书由王萱任主编。全书共 10 章,第 1 章、第 6 章 6.5~6.7 节及第 7 章由王萱编写;第 2 章、第 3 章、第 4 章 4.1~4.5 节、第 6 章 6.1~6.4 节由谢群编写;第 5 章、第 8 章和第 10 章由孙修礼编写;第 4 章 4.6~4.7 由杨涛春编写;第 6 章 6.8~6.9 节由周翠玲编写;第 9 章由王新元、徐宗美编写。本书由翟爱良教授主审。在此表示衷心感谢。

在本书编写过程中,编者参考和借鉴了相关书籍和图片资料,得到了有关老师和朋友的大力支持,在此一并致谢!

由于编者水平有限,书中难免有欠妥之处,敬请有关专家、同行和广大读者提出宝贵意见。

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 高层建筑的概念	1
1.2 高层建筑的发展概况	1
1.3 高层建筑结构设计特点	6
1.4 高层建筑结构的类型	9
1.5 高层建筑结构的发展趋势	10
思考题	12
第 2 章 高层建筑的结构体系与结构布置	13
2.1 高层建筑的结构体系	13
2.2 结构总体布置	28
2.3 高层建筑的基础与地下室	37
思考题	40
第 3 章 高层建筑结构的荷载和地震作用	41
3.1 竖向荷载	41
3.2 风荷载	44
3.3 地震作用	54
思考题	66
习题	66
第 4 章 高层建筑结构的计算分析与设计要求	68
4.1 高层建筑结构计算分析方法	68
4.2 荷载效应组合	71
4.3 高层建筑结构设计要求	73
4.4 高层建筑结构的抗震性能设计	81
4.5 高层建筑结构的抗震概念设计	83
4.6 高层建筑结构抗连续倒塌设计	86
4.7 高层建筑结构分析和设计程序简介	88
思考题	92
第 5 章 钢筋混凝土框架结构设计	93
5.1 框架结构的布置	93
5.2 框架结构的计算简图	95
5.3 竖向荷载作用下框架结构内力的简化计算	99
5.4 水平荷载作用下框架结构内力和侧移的简化计算	101
5.5 框架结构内力组合	108
5.6 框架延性设计的概念	110
5.7 框架梁设计	111
5.8 框架柱设计	114
5.9 框架节点设计	120
思考题	124
第 6 章 钢筋混凝土剪力墙结构设计	126
6.1 剪力墙的结构布置	126
6.2 剪力墙结构平面协同工作分析	129
6.3 整体墙在水平荷载作用下的内力和位移计算	133
6.4 整体小开口墙在水平荷载作用下的内力和位移计算	136
6.5 双肢墙在水平荷载作用下的内力和位移计算	139
6.6 多肢墙在水平荷载作用下的内力和位移计算	149
6.7 壁式框架在水平荷载作用下的内力和位移计算	153
6.8 剪力墙分类的判别	157
6.9 剪力墙截面设计	160
思考题	182
习题	182

第 7 章 钢筋混凝土框架—剪力墙结构设计	184
7.1 概述	184
7.2 框架—剪力墙结构在水平荷载作用下的简化分析	188
7.3 框架—剪力墙铰接体系在水平荷载作用下的内力和侧移计算	190
7.4 框架—剪力墙刚接体系在水平荷载作用下的内力和侧移计算	196
7.5 框架—剪力墙结构的受力和侧移特征	200
7.6 框架、剪力墙及框架—剪力墙结构考虑扭转效应的近似计算	202
7.7 框架—剪力墙结构的截面设计和构造	210
7.8 框架—剪力墙结构的内力侧移计算综合例题	213
思考题	221
习题	222
第 8 章 钢筋混凝土筒体结构设计	223

8.1 筒体结构的布置及受力特点	223
8.2 筒体结构计算方法	228
8.3 筒体结构的截面设计及构造要求	231
思考题	233
第 9 章 复杂高层建筑设计	234
9.1 带转换层的高层建筑结构	234
9.2 带加强层的高层建筑结构	239
9.3 错层结构	241
9.4 连体结构	242
9.5 多塔楼结构、竖向收进及悬挑结构	243
思考题	246
第 10 章 高层混合结构设计	247
10.1 概述	247
10.2 高层建筑混合结构布置	248
10.3 混合结构的计算分析	251
10.4 型钢混凝土结构设计	252
10.5 钢管混凝土柱设计	263
思考题	263
参考文献	264

绪论 第1章

本章提要

- (1) 高层建筑的概念及其结构设计特点
- (2) 高层建筑的发展历史及趋势
- (3) 高层建筑结构的类型

1.1 高层建筑的概念

高层建筑是相对于多层建筑而言的，通常是以建筑高度和层数作为两个主要指标来划分的。1972年召开的国际建筑会议建议，将9层及9层以上的建筑定义为高层建筑，并按建筑的高度和层数划分为四类：第一类，9~16层，高度不超过50m；第二类，17~25层，高度不超过75m；第三类，26~40层，高度不超过100m；第四类，40层以上，高度为100m以上，又称为超高层建筑。

不同的国家或地区根据其具体情况，综合考虑经济条件、建筑技术、电梯设备、消防装置、建筑类别等因素又有各自的规定。如美国规定高度为22~25m以上或7层以上的建筑为高层建筑；英国规定高度为24.3m以上的建筑为高层建筑；日本规定11层以上或高度超过31m的建筑为高层建筑。

JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》（以下简称为《高规》）规定，10层及10层以上或房屋高度大于28m的住宅建筑和房屋高度大于24m的其他高层民用建筑为高层建筑。

高层建筑房屋高度是指自建筑物室外地面至房屋主要屋面的高度，不包括突出屋面的电梯机房、水箱、构架等高度。

GB 50016—2014《建筑设计防火规范》规定，建筑高度大于27m的住宅建筑和建筑高度大于24m的非单层厂房、仓库和其他民用建筑为高层建筑。

世界上许多国家将高度超过100m或层数在30层以上的高层建筑称为超高层建筑。

1.2 高层建筑的发展概况

高层建筑的发展可分为古代高层建筑和现代高层建筑两部分。古代高层建筑主要是寺庙或纪念性建筑，结构形式大多是木结构和砖石结构。如公元前280年建成的埃及亚历山大港口的灯塔，高150m，采用石材砌筑，耸立至今。公元338年建成的巴比伦城巴贝尔塔，90m

高。欧洲古代的罗马城在公元 80 年已有砖墙承重的 10 层建筑。我国古代高层建筑主要表现在各种宝塔,现存最早的嵩岳寺塔,位于河南省登封市的嵩山南麓,建于公元 523 年,总高 41m 左右,砖砌单层筒体,平面呈正十二边形,外形为 15 层密檐(图 1.1)。现存最高的砖塔为建于公元 1055 年河北定县城内的开元寺塔(又称料敌塔),塔高 84m,砖砌双层筒体,共 11 层,平面为正八角形。现存最早的玻璃饰面砖塔是建于公元 1049 年开封佑国寺塔,高 55m,八角 13 层,是仿木构的楼阁式砖塔。初建于公元 7 世纪的西藏拉萨布达拉宫(外 13 层,内 9 层,占地 10 万多 m^2)是海拔最高、规模宏大的宫堡式建筑群,花岗岩砌筑,最高点为达赖灵塔的金顶,高度 110m,海拔 3756.5m(图 1.2)。



图 1.1 嵩岳寺塔

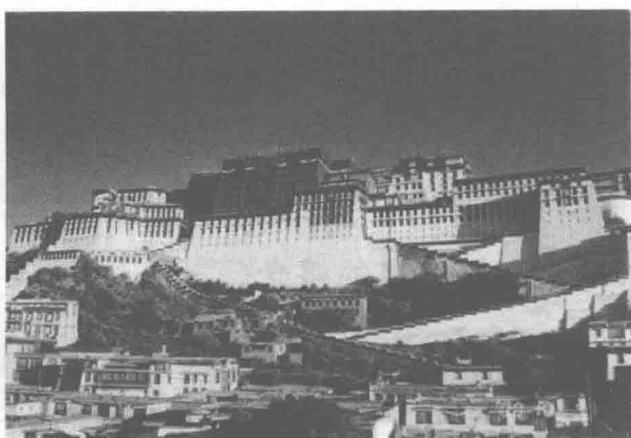


图 1.2 西藏布达拉宫

古代高层建筑结构平面大多设计成圆形或正多边形,可减少水平荷载作用效应,增大结构刚度,受力性能好,为许多近代和现代高层建筑所效仿。

近现代高层建筑是城市化、工业化和科学技术发展的产物。科学技术进步、新材料新工艺涌现、结构设计理论的发展、机械化电气化在建筑的应用、计算机在设计中的应用、施工机械和施工技术的发展等,使人们在高空居住和工作成为可能。世界近现代高层建筑的发展一般分为三个阶段。

第一阶段从 19 世纪中期至 19 世纪末,为高层建筑的形成期。随着工业的发展和经济的繁荣,人口向城市集中,造成用地紧张,迫使建筑物向高层发展。1851 年电梯系统的发明和 1857 年第一台自控客用电梯的出现,解决了高层建筑的竖向运输问题,为建造更高的建筑创造了条件。1801 年在英国曼彻斯特建成的一座 7 层棉纺厂房,采用铸铁框架承重;作为近代高层建筑起点的标志是建于 1884—1886 年的芝加哥家庭保险公司大楼(Home Insurance Building, 11 层,高 55m),采用铸铁框架,部分钢梁和砖石自承重外墙。1891—1895 年在芝加哥建造的共济会神殿大楼(Masonis Temple, 20 层,高 92m),是首次全部用钢做框架的高层建筑。1898 年在纽约建造的 Park Row 大厦(30 层,高 118m),为 19 世纪世界上最高的建筑。

第二阶段从 19 世纪末至 20 世纪 50 年代初,为高层建筑的发展期。钢铁工业的发展和钢结构设计技术的进步,使高层建筑逐步向上发展。在结构理论方面突破了纯框架抗侧力体系,提出在框架结构中设置竖向支撑或剪力墙来增加高层建筑的侧向刚度。1903 年在辛辛那提建造的英格尔大楼(Ingall, 16 层,高 64m)是最早的钢筋混凝土框架高层建筑。1931

年在纽约建成的帝国大厦（Empire State Building，102层，381m，图1.3）保持世界最高建筑长达41年之久。第二次世界大战之前，超过200m的高层建筑已有10栋。这一时期主要采用平面结构设计理论，建筑材料的强度较低，材料用量较多，结构自重较大。20世纪30年代开始的世界经济大萧条和第二次世界大战的爆发，高层建筑的发展一度趋于停顿。



图 1.3 帝国大厦

第三阶段从20世纪50年代开始，高层建筑进入繁荣发展时期。20世纪60年代美国著名的结构专家弗茨勒·汉（Fazlur Khan，1929—1982）提出了框筒结构设计概念，为建造高层建筑提供了理想的结构形式。这种体系又衍生出筒中筒、多束筒和斜撑筒等结构体系，将高层建筑的发展推向了新阶段。焊接和高强螺栓在钢结构制造中的推广和进一步应用，建成了一批有代表性高层建筑物，如建成于1968年的芝加哥约翰汉考克中心（John Hancock Center，100层，高344m），采用对角支撑桁架型筒体结构体系；建成于1973年的纽约世界贸易中心（World Trade Center）双塔楼（北楼高417m，南楼高415m，均110层），采用钢结构框筒结构（外筒内框），该工程首次进行了模型风洞试验，首次采用了压型钢板组合楼板，首次在楼梯井道采用了轻质防火隔板，首次采用黏弹性阻尼器进行风振效应控制等，对后来的高层建筑结构的设计和建造都具有重要的参考价值（注：2001年9月11日遭恐怖分子毁灭性袭击，造成两座大楼先后竖向逐层坍塌）。建成于1974年的芝加哥西尔斯大厦（Sears Tower，110层，高443m），采用钢结构成束框架筒体结构，作为新的世界最高建筑享誉22年之久。西尔斯大厦的用钢量仅为 $161\text{kg}/\text{m}^2$ ，而采用平面结构框架体系的帝国大厦用钢量为 $206\text{kg}/\text{m}^2$ （图1.4）。

美国是近代高层建筑发源地和中心，高层建筑经历了百余年的发展，如今已经遍及世界各地。

东欧在20世纪50年代建造了两座摩天大楼，1953年苏联建造的莫斯科国立大学主楼

(36层, 高 240m) 和 1955 年波兰建造的华沙文化宫大厦 (42 层, 高 231m), 直到 80 年代还保持着欧洲最高建筑的纪录。1975 年在波兰华沙建成的 Palace Kulturgi Nauki 大楼 (47 层, 高 241m), 迄今仍为欧洲最高的建筑。1973 年在巴黎建造了 Maine Montparnasse 办公大楼 (64 层, 高 229m), 1975 年在多伦多建造了第一银行塔楼 (72 层, 高 285m)。

加拿大的高层建筑数量仅次于美国, 如 1974 年在多伦多市建成的贸易理事会大楼 (57 层, 高 239m)。

1986 年在澳大利亚首都墨尔本建造了瑞阿托中心大厦 (70 层, 高 243m) 为南半球最高的建筑。在非洲的约翰内斯堡建造的卡尔顿中心 (Calton Center) (50 层, 高 220m) 为非洲大陆最高的建筑。

20 世纪 90 年代以后, 由于亚洲经济的崛起, 西太平洋沿岸的日本、朝鲜、韩国、中国大陆、中国香港、中国台湾、新加坡和马来西亚等国家和地区, 陆续成为继美国之后新的高层建筑中心, 如 1998 年在马来西亚吉隆坡建成的彼得罗纳斯大厦 (Petronas Tower, 88 层, 高 452m) 为当时世界最高的建筑。

日本 1964 年废除了建筑高度不得超过 31m 的限制, 于 1968 年建成了霞关大厦 (36 层, 高 147m), 1978 年在东京建造了阳光大厦 (60 层, 高 226m), 后又建造了多幢高度超过 100m 的高层建筑。

我国大陆地区的高层建筑发展, 经过一段从低到高, 从单一到复杂的发展阶段。

20 世纪 50 年代北京的十大建筑工程推动了我国高层建筑的发展, 如 1959 年建成的北京民族饭店 (12 层, 高 47.4m), 1968 年建成的广州宾馆 (27 层, 高 88m) 为 60 年代我国最高的建筑。

20 世纪 70 年代, 我国高层建筑有了较大的发展, 1974 年建成的北京饭店东楼 (19 层, 高 87.15m) 为当时北京最高的建筑; 1977 年广州白云宾馆 (33 层, 高 114.05m) 的建造, 使我国高层建筑的高度突破了 100m。

20 世纪 80 年代是我国高层建筑发展的繁荣期, 建筑层数和高度不断地突破, 功能和造型越来越复杂, 分布地区越来越广泛, 结构体系日趋多样化。北京、广州、深圳、上海等 30 多个大中城市建造了一大批高层建筑, 如 1987 年建造的北京彩色电视中心 (27 层, 高 112.7m), 采用钢筋混凝土结构, 为当时我国 8 度地震区中最高的建筑; 1988 年建成的上海锦江饭店分馆 (43 层, 高 153.52m) 采用框架芯墙全钢结构体系, 同年建造的上海静安希尔顿饭店 (43 层, 高 143.62m) 采用钢—混凝土混合结构, 1988 年建造的深圳发展中心大厦 (43 层, 高 165.3m) 为我国第一幢大型高层钢结构建筑。

20 世纪 90 年代以后, 高层建筑在国内得到了前所未有的发展, 2015 年建成上海中心大厦 (125 层, 高 632m) 是目前我国最高建筑 (图 1.5), 世界第二高建筑。

2003 年在中国台北建成的国际金融中心 101 大楼 (101 层, 高 508m), 曾拿下了“世界高楼”四项指标中的三项世界之最, 即“最高建筑物” (高 508m)、“最高使用楼层” (高 438m) 和“最高屋顶高度” (高 448m), 如图 1.6 所示。

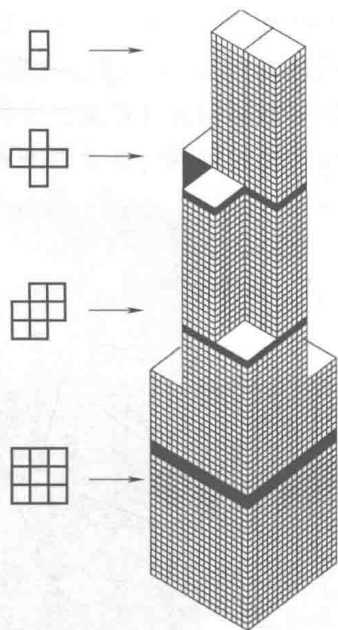


图 1.4 西尔斯大厦图

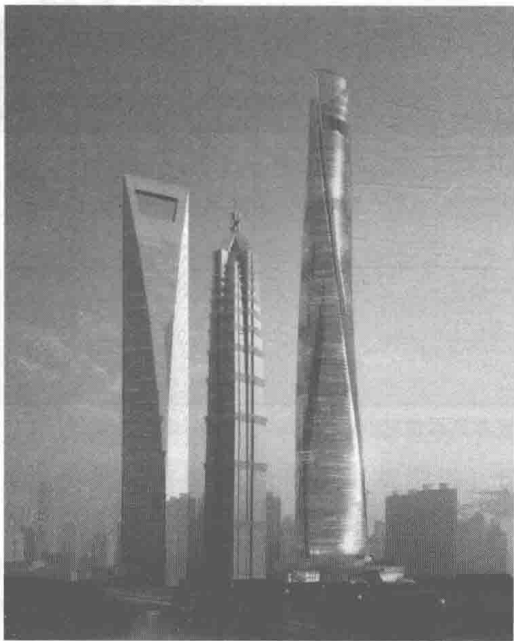


图 1.5 上海中心大厦



图 1.6 国际金融中心 101 大楼

根据世界高层建筑与城市住宅委员会（Council on Tall Buildings & Urban Habitat）公布的结果，表 1.1 给出了前 10 幢世界上最高建筑。

高层建筑发展速度在逐年增加，目前世界前 10 名最高建筑中中国为 6 幢，高层建筑的重心正在逐步向中国、亚洲转移，超高层建筑多采用钢—混凝土混合结构。

表 1.1 前 10 幢世界上最高建筑

序号	名称	国家	城市	建成年份	层数	高度/m			结构材料类型	用途
						结构顶	使用楼层	塔(杆)顶		
1	哈利法塔 (Burj Khalifa)	阿联酋	迪拜	2010	163+1	828	584.5	829.8	钢筋/混凝土	办公/住宅/酒店
2	上海中心大厦 (Shanghai Tower)	中国	上海	2015	128+5	632	561.3	632	复合	酒店/办公
3	麦加皇家钟塔饭店 (Makkah Royal Clock Tower)	沙特阿拉伯	麦加	2012	120+3	601	494.4	601	钢/混凝土	酒店/其他
4	平安金融中心 (Ping An Finance Center)	中国	深圳	2017	115+4	599	562.2	599	复合	办公
5	乐天世界大厦 (Lotte World Tower)	韩国	首尔	2017	123+6	554.5	497.6	557.7	复合	酒店/办公
6	世贸中心一号大楼 (One World Trade Center)	美国	纽约	2014	94+5	541.3	386.5	546.2	复合	办公
7	广州周大福金融中心 (Guangzhou CTF Finance Centre)	中国	广州	2016	111+5	530	494.5	530	复合	酒店/住宅/办公
8	台北 101 大厦 (TAIPEI 101)	中国	台北	2004	101+5	508	438	508	复合	办公

(续)

序号	名称	国家	城市	建成年份	层数	高度/m			结构材料类型	用途
						结构顶	使用楼层	塔(杆)顶		
9	上海环球金融中心 (Shanghai World Financial Center)	中国	上海	2008	101+3	492	474	494.3	复合	酒店/ 办公
10	环球贸易广场 (International Commerce Centre)	中国	香港	2010	108+4	484	468.8	484	复合	酒店/ 办公

注：根据高层建筑与城市住宅委员会（CTBUH）2017年5月发布数据整理 <http://buildingdb.ctbuh.org/>。

1.3 高层建筑设计的特点

高层建筑结构可看作支承在地面上的竖向悬臂构件，与低层、多层建筑设计相比较，结构设计在各专业中占有更重要的地位，不同结构体系的选择直接关系到建筑平面布置、立面体形、楼层高度、机电管道设置、施工技术要求、施工工期长短和投资造价高低等。高层结构设计的主要特点如下。

1. 水平荷载（作用）对结构的影响大，侧移成为结构设计的主要控制因素

高层建筑结构同时承受竖向和水平荷载的作用，有抗震设防要求的还要考虑抵抗地震作用。荷载对结构产生的内力是随着建筑物高度而变化的。在低层和多层建筑中，以重力荷载为代表的竖向荷载控制着结构设计，同时整个结构的水平位移较小；随着建筑高度的增大，水平荷载效应逐渐增大，虽然竖向荷载对结构设计仍有着重要的影响，但随着高宽比增大，水平荷载（包括风力和地震作用）产生的侧移和内力所占比重大，逐渐成为确定结构方案、材料用量和造价的决定因素。根本原因是，水平荷载产生的侧移和内力随建筑高度的增加而增长迅速，且作为水平风荷载和水平地震作用，其数值与结构的动力特性等有关，具有较大的变异性。

图 1.7 为高层建筑在竖向荷载和水平荷载作用下受力示意图，结构底部产生的轴力 N 、倾覆力矩 M 、结构顶点侧移 Δ 与结构高度 H 存在着如下关系式：

竖向结构的轴力

$$N=wH=f(H)$$

(1.1)

结构底部的倾覆力矩

$$M=\frac{1}{2}qH^2=f(H^2)$$

(水平均布荷载)
(1.2)

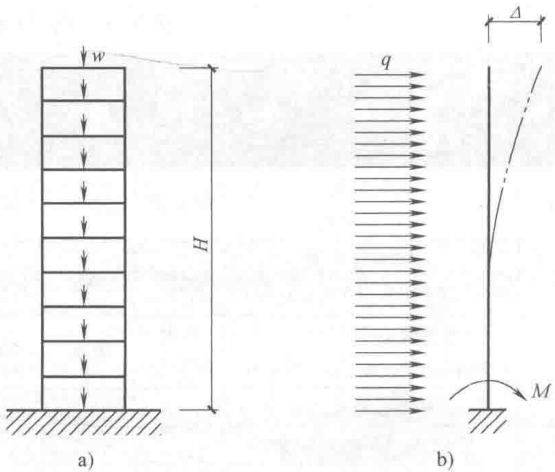


图 1.7 结构受力示意图
a) 重力荷载 b) 水平均布荷载

结构顶点侧移

$$\Delta = \frac{qH^4}{8EI} = f(H^4) \quad (1.3)$$

式中 w 、 q ——沿建筑单位高度的竖向荷载和水平荷载 (kN/m)；

H ——建筑高度 (m)；

EI ——建筑总体抗弯刚度 (E 为弹性模量, I 为惯性矩)。

结构内力 (N 、 M)、位移 (Δ) 与高度 (H) 的关系如图 1.8 所示。可见, 随着建筑物高度增大, 结构顶点的侧移增加最快, 水平荷载对结构的影响也越来越大。在高层建筑设计时, 为了有效地抵抗水平荷载或作用产生的内力和变形, 必须选择可靠的抗侧力结构体系, 使结构不仅具有足够大的承载力, 还要具有足够大的侧向刚度, 保证结构在水平荷载作用下产生的侧移被控制在一定范围内。结构侧移大小与结构的使用功能和安全的有着密切的关系。

1) 侧移过大, 会使人产生不安全感, 如结构在强阵风作用下的振动加速度超过 $0.015g$ 时就会影响楼房内人的生活和工作。

2) 层间相对侧移量过大, 会使填充墙和主体结构间出现裂缝或损坏; 顶点总位移过大, 会造成电梯轨道变形, 机电管道受到破坏, 影响正常使用。

3) 高层建筑的重心位置较高, 过大的侧移还会造成结构因 $P-\Delta$ 效应而产生较大的附加内力等, 甚至可导致建筑物倒塌。

2. 应考虑构件各种变形对结构的影响

在一般房屋结构分析中, 构件的轴力和剪力产生的影响很小, 通常只考虑构件弯曲变形影响, 而忽略构件轴向变形和剪切变形的影响。高层建筑结构由于层数多、高度大, 轴力很大, 从而沿高度逐渐积累的轴向变形显著, 中部构件与边部、角部构件的轴向变形差别大, 对结构内力分配的影响大。图 1.9a 为未考虑各柱轴向变形时框架梁的弯矩分布, 图 1.9b 为

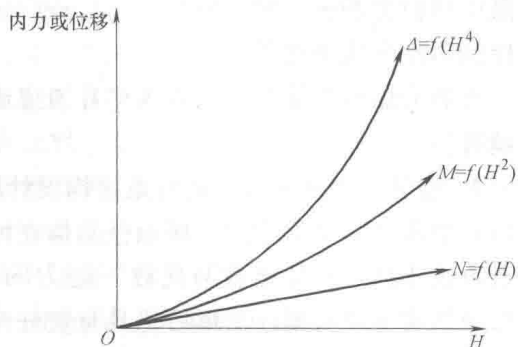


图 1.8 结构内力、位移与高度关系

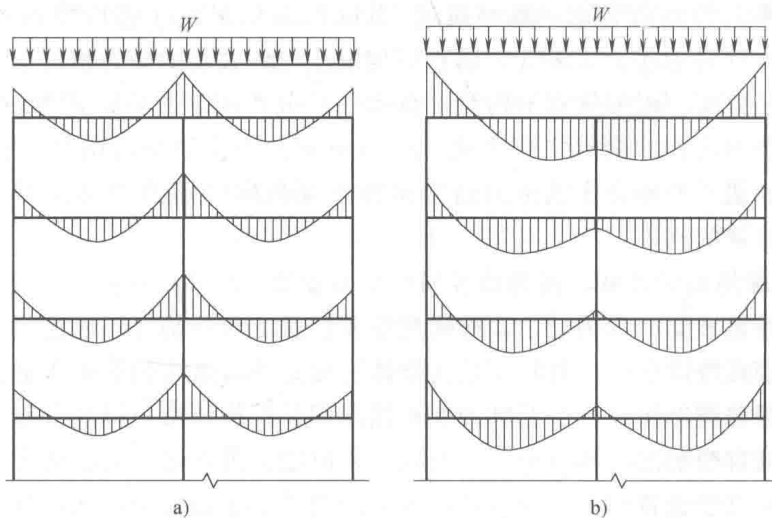


图 1.9 柱轴向变形对高层框架梁弯矩分布的影响

考虑各柱差异轴向变形时框架梁的弯矩分布。高层建筑特别是超高层建筑中,竖向构件的轴向压缩变形对预制构件的下料长度和楼面标高会产生较大的影响。如美国休斯敦 75 层的德克萨斯商业大厦,采用型钢混凝土墙和钢柱组成的混合结构体系,中心钢柱由于负荷面积大,截面尺寸小,重力荷载下底层的轴向压缩变形要比型钢混凝土墙多 260mm,为此该钢柱制作下料时需加长 260mm,并需逐层调整。

随着建筑高度的增大,结构的高宽比增大,水平荷载作用下的整体弯曲越来越大。整体弯曲使竖向结构体系产生轴向压力和拉力,其数值与建筑高度的二次方成正比。而竖向结构体系中的拉力和压力使一侧的竖向构件产生轴向压缩,另一侧的竖向构件产生轴向拉伸,从而使结构产生水平侧移。

在剪力墙结构体系中应考虑整片墙或墙肢的剪切变形,在筒体结构中应考虑剪力滞后的影响等。

3. 抗震设计要求高,延性是结构设计的重要指标

对地震区的高层建筑,应确保结构在地震作用下具有较好的抗震性能。结构的抗震性能主要取决于其“能量吸收与耗散”能力的大小,而它又取决于结构延性的大小。因此,为了保证结构在进入塑性变形后仍具有较好的抗震性能,需加强结构抗震概念设计,采取抗震构造措施,满足柱轴压比、梁和剪力墙的剪压比、构件配筋率等,确保结构具有较好的延性。

4. 减轻结构自重具有重要意义

从地基承载力或桩基承载力考虑,在同样的地基或桩基情况下,减轻房屋自重意味着可以建造更多的层数或高度,获得较高的经济效益;另外,地震效应与建筑结构的自重成正比,减轻自重是提高结构抗震能力的有效办法。高层结构的自重大了,不仅使结构上的地震剪力大,还由于重心高、地震倾覆力矩大,对竖向构件产生很大的附加轴力, $P-\Delta$ 效应会造成很大的附加弯矩。

5. 要重视结构的整体稳定、抗倾覆问题,考虑扭转效应对结构的影响

建筑物在竖向荷载作用下,由于构件的压屈,可能造成整体失稳,当高宽比 H/B 大于 5 时应验算整体稳定性;高层建筑由于高度值很大、基底面积相对较小,在水平荷载和水平地震作用下,产生很大的倾覆力矩。高度超过 150m 的高层建筑应进行整体稳定和抗倾覆验算,并应在整体计算时考虑 $P-\Delta$ 效应,防止结构发生整体失稳的破坏情况。

当结构的质量分布、刚度分布不均时,在水平荷载作用下,容易产生较大的扭转作用,扭转作用会使抗侧力结构的侧移发生变化,从而影响各个抗侧结构构件(柱、剪力墙或筒体)受到的剪力,进而影响各个抗侧力结构构件及其他构件的内力与变形。因此,结构的扭转效应是不可忽视的问题。

6. 相对于合理的结构计算,概念设计同样十分重要

结构概念设计是根据结构理论、实验研究结果以及工程经验等形成的基本设计原则和理念,是从结构的宏观整体出发,着眼于结构整体反应,进行结构的整体布置,确定结构细部构造等,处理高层建筑结构设计中遇到的如建筑体型、结构体系、刚度分布、结构延性等问题。概念设计有的有明确的标准或界限,有的只是原则,需要设计人员认真领会,并结合具体情况创造发挥。高层建筑结构设计涉及许多复杂问题,如地震作用和风荷载具有很强的复杂性和不确定性,准确预测其有关特性、参数及对结构的影响方法还不够完善,因此高层建

筑结构设计除了依靠数学、力学的分析计算外,还必须借助概念设计。

1.4 高层建筑结构的类型

高层建筑结构按其采用的材料,有砌体结构、混凝土结构、钢结构、钢-钢筋混凝土组合结构等类型。根据不同结构类型的特点,正确选用材料,是经济合理地建造高层建筑的一个重要方面。

砌体结构具有取材容易、施工简便、造价低廉等优点,但砌体是一种脆性材料,其抗拉、抗弯、抗剪强度均较低,抗震性能较差,现代高层建筑已很少采用无筋砌体结构。在砌体内配置钢筋可改善砌体结构受力性能,使之用于建造高层建筑成为可能。

混凝土结构具有取材容易、良好的耐久性和耐火性、承载能力大、刚度好、节约钢材、降低造价、可模性好以及能浇制成各种复杂的截面和形状的优点;现浇整体式混凝土结构的整体性好,经过合理设计,可获得较好的抗震性能的优点;混凝土结构布置灵活方便,可组成各种结构受力体系。因此混凝土结构在高层建筑中得到广泛应用。世界第一幢混凝土高层建筑是建于1903年的美国辛辛那提市的英格尔斯(Ingalls)大楼;我国的广州中天广场大厦(68层,高322m)为混凝土结构;朝鲜平壤的柳京大厦(105层,高306m)是目前混凝土结构层数最多的建筑。目前发展中国家的高层建筑主要以混凝土结构为主。

混凝土结构自重较大,使结构构件占据面积大。如广东国际大厦(65层,高200m),底层柱截面尺寸已达 $1.8\text{m}\times 2.2\text{m}$ 。此外,混凝土结构施工工序复杂、建造周期较长、受季节的影响等缺点,对高层建筑也较为不利。随着高性能混凝土材料的发展和施工技术的不断进步,混凝土结构仍将是今后高层建筑的主要结构类型。

钢结构具有材料强度高、构件断面小、自重轻、塑性和韧性好、施工周期短、抗震性能好等优点,在高层建筑中有较广泛的应用,尤其是地基条件差、抗震要求高的高层建筑。但高层建筑钢结构用钢量大、造价高,另外钢结构防火性能差,需要采取防火保护措施,也增加了工程造价。近年来,随着我国钢产量的大幅度提高以及高层建筑建造高度的增加,采用钢结构的高层建筑不断增多。

美国纽约的帝国大厦(102层,高384m)、已遭恐怖袭击倒塌的世界贸易中心(110层,高412m)、美国芝加哥的西尔斯大厦(110层,高442m)、我国深圳的地王大厦(81层,高384m)、北京的京广中心(56层,高208m),以及上海的锦江宾馆分馆(46层,高153.53m)等均采用了钢结构。

组合结构和混合结构能够在钢筋混凝土结构基础上,充分发挥钢结构优良的抗拉性能和混凝土结构的抗压性能,进一步减轻结构自重,提高结构延性。两种材料互相取长补短,可取得经济合理、技术性能优良的效果。

钢-混凝土组合结构是用钢材来加强钢筋混凝土构件的强度,钢材放在构件内部,外部是钢筋混凝土,成为钢骨(或型钢)混凝土构件。或在钢管内部填充混凝土,做成外包钢构件,成为钢管混凝土。前者可充分利用外包混凝土的刚度和耐火性能,又可利用钢骨减小构件断面和改善抗震性能,目前应用较为普遍。北京的香格里拉饭店(24层,高83m)采用钢骨混凝土柱,上海环球金融中心大厦(95层,高460m)采用钢骨混凝土框筒结构,深圳的赛格广场大厦(76层,高292m)采用圆钢管混凝土柱。

钢和混凝土的混合结构是部分抗侧力结构用钢结构，部分采用钢筋混凝土结构（或部分采用钢骨混凝土结构）。在多数情况下是用钢筋混凝土做筒（剪力墙），用钢材做框架梁、柱。刚度很大的剪力墙或筒体承受风力和地震作用，钢框架主要承受竖向荷载。如上海静安希尔顿饭店（43层，高143m）。

混合结构的另一种形式是外框筒采用钢筋混凝土或钢骨混凝土结构，内部则采用钢框架以满足使用空间的要求。如美国芝加哥的 Three First National Plaza 大厦（58层，高236m），外筒为柱距5m的钢筋混凝土筒体，内部为钢框架。

还有一些高层建筑是由钢—钢骨混凝土（或钢管混凝土）—钢筋混凝土组成的混合结构，如上海的金茂大厦（93层，高370m），核心筒为钢筋混凝土结构，四边的大柱为钢骨混凝土柱，其余周边柱为钢柱，楼面梁为钢梁。

一般高层建筑主要采用框架结构、剪力墙结构、框架—剪力墙结构和筒体结构四大常规体系，但由于这些体系难以达到最大的高度及满足提供更自由灵活使用大空间的功能要求，在超高层建筑中，钢框架—混凝土核心筒的混合结构和组合结构已有相当的数量。表1.2为高层建筑结构体系的发展过程。

表 1.2 高层建筑结构体系的发展过程

始用年代	结构体系
1885 年	砖墙、铸铁柱、钢梁
1889 年	钢框架
1903 年	钢筋混凝土框架
20 世纪初	钢框架+支撑
第二次世界大战后	钢筋混凝土框架+剪力墙，钢筋混凝土剪力墙，预制钢筋混凝土结构
20 世纪 50 年代	钢框架+钢筋混凝土核心筒，钢骨钢筋混凝土结构
20 世纪 60 年代末和 70 年代初	框筒，筒中筒，束筒，悬挂结构，偏心支撑和带缝剪力墙板框架
20 世纪 80 年代初期	巨型结构，应力蒙皮结构，隔震结构
20 世纪 80 年中期	被动耗能结构，主动控制结构，混合控制结构

1.5 高层建筑结构的发展趋势

高层建筑的发展充分显示了科学技术的力量，结合高层建筑的发展过程，可以预测未来高层建筑结构的发展趋势将主要体现在以下方面。

1. 新材料、高强材料的开发和应用

随着高性能混凝土材料的研制和不断发展，混凝土强度等级和延性性能将得到较大的提高和改善，目前混凝土强度等级已经达到 C100 以上。高强度和良好性能的混凝土，可减小结构构件的尺寸，减轻结构自重，改善结构的抗震性能。未来轻骨料混凝土、轻混凝土、纤维混凝土、聚合物混凝土将应用于高层建筑中，高性能混凝土的开发和应用必将对高层建筑结构的发展产生重大影响。

从强度和塑性方面考虑，钢材是高层建筑结构的理想材料，高强度且具有良好焊接性能的厚钢板将成为今后高层建筑钢结构的主要用钢。特别是新型耐火耐候钢的研发，可使钢材

的防火保护层的厚度减小，或抛弃对防火材料的依赖，从而降低钢结构的造价，使钢结构更具有竞争性。

高层建筑材料发展的方向是轻质、高强、新型、复合等。

2. 高层建筑的高度出现新突破

高层建筑中的科技含量越来越高，成为一个国家或城市经济繁荣、科技实力、社会进步的重要标志，全球城市中建造最高建筑的竞争从来就没有停止过，许多国家和地区正在建造或设想建造更高的高层建筑。表 1.3 为世界高层建筑与城市住宅委员会（Council on Tall Buildings & Urban Habitat）最新公布的在建 10 栋最高建筑，还有一些超高层建筑正在酝酿中。

表 1.3 世界在建最高建筑前 10 栋

序号	名称	国家	城市	建成年份	层数	高度/m	材料	功能
1	国王塔 (Kingdom Tower)	沙特阿拉伯	吉达	2020	167	1 000	混凝土	综合
2	武汉绿地中心 (Wuhan Greenland Center)	中国	武汉	2018	125	636	混合材料	酒店/住宅/办公
3	吉隆坡 118 大厦 (Merdeka PNB118)	马来西亚	吉隆坡	2021	118	630	混合材料	酒店/办公
4	宝能环球金融中心 (Global Financial Center Tower 1)	中国	沈阳	2018	114	568	混凝土	办公
5	中国尊 (Zhongguo Zun)	中国	北京	2018	108	528	混合材料	办公
6	天誉东盟塔 (Signature Tower Jakarta1)	中国	南宁	2021	108	528	混合材料	旅馆/办公
7	恒大国际金融中心 (Evergrande IFC 1)	中国	合肥	2021	112	518	混合材料	酒店/住宅/办公
8	大连绿地中心 (Dalian Greenland Center)	中国	大连	2019	88	518	混合材料	酒店/住宅/办公
9	中央公园大厦 (Central Park Tower)	中国	重庆	2020	99	468	混凝土	住宅/酒店/零售
10	成都绿地中心 (Chengdu Greenland Tower)	中国	成都	2019	101	468	混合材料	酒店/办公

注：根据高层建筑与城市住宅委员会（CTBUH）2017 年 5 月发布数据整理 <http://buildingdb.ctbuh.org/>。

3. 采用混合结构或组合结构的高层建筑将增多

经过合理设计，采用混合结构可以取得经济合理、技术性能优良、易满足高层建筑结构侧向刚度要求的效果，可建造比混凝土结构更高的建筑。随着混凝土强度的提高以及结构构造和施工技术上的改进，今后在高层建筑结构中采用外包混凝土组合柱、钢管混凝土组合柱、外包混凝土的钢管混凝土双重组合柱等运用比例会越来越大。

4. 新的设计概念和新结构形式的应用

现代建筑向多功能综合性发展，建筑体型和结构体系趋向复杂多变，新的设计概念和结构技术将应运而生，巨型结构体系、带加强层结构、蒙皮结构今后将得到更多的应用。多束筒体系已表明在适应建筑场地、丰富建筑造型、满足多种功能和减小剪力滞后等方面具有很多优点，今后也将扩大应用。