



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12.5" GUIHUA JIAOCAI

高层建筑结构设计

谭文辉 李 达 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

高层建筑结构设计

谭文辉 李 达 主编

北 京

冶金工业出版社

2011

内 容 提 要

本书详细阐述了钢筋混凝土高层建筑结构设计的基本理论和方法, 主要内容包
括: 高层建筑的概念、特点, 高层建筑结构选型与布置, 高层建筑结构概念设计,
高层建筑结构荷载与地震作用, 框架结构设计 with 案例, 剪力墙结构设计 with 案
例, 框架-剪力墙结构设计 with 案例, 筒体结构设计简介, 高层建筑结构计
算机计算原理与设计软件简介等。书中列举了大量算例, 章末附有思考题与习
题, 便于读者掌握所学内容。

本书为高等学校土木工程专业的教材, 也可供从事建筑结构设计、施工的
工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构设计/谭文辉, 李达主编. —北京: 冶金工业
出版社, 2011. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5307-7

I. ①高… II. ①谭… ②李… 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(2010) 第 198313 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5307-7

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 1 月第 1 版, 2011 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 18.25 印张; 440 千字; 281 页

39.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

高层建筑是人类社会和科学技术发展的必然产物，在城市人口日益增多，建筑用地日益减少的情况下，发展高层建筑成为城市建设的必然选择。作为城市的地标，高层建筑不仅可以为城市创造出美丽的天际线，而且可以带来城市商业交流、经济发展的价值。近年来，高层建筑发展迅速，对相关专业的技术人才需求越来越大，要求也越来越高，因而，毕业后有可能参与或从事高层建筑结构与施工的土木工程专业的学生，学习和掌握高层建筑结构设计的理论和方法是非常必要的。

本书是编者根据近年来在高层建筑结构教学中的体会和讲义，根据国家的新标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)(2006 年版)、《建筑抗震设计规范》(GB 5011—2001)(2008 年版)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)等的有关规定，在吸收了高层建筑结构设计理论和实践的最新研究成果的基础上编写而成的。

本书在介绍各种结构体系的结构设计方法时，按结构分析和构造措施两个步骤进行讲解，并在理论阐述之后辅以例题或实例，以便读者深入体会和掌握高层建筑结构设计的理论和方法。

本书由谭文辉和李达主编，牟在根、暴育红、张鹏飞参与了有关章节的编写。具体分工是：第1~4、6章由谭文辉编写，第5章的5.1~5.5节及第7章由李达编写，第5章的5.6节由牟在根编写，第8章由张鹏飞编写，第9章由暴育红编写。

在编写过程中，参考了有关文献，在此向文献作者表示感谢。

限于编者水平，书中有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2010 年 6 月

目 录

1 绪论	1
1.1 高层建筑的定义与分类	1
1.1.1 高层建筑的定义	1
1.1.2 高层建筑的分类	1
1.2 高层建筑结构特点	2
1.2.1 高层建筑受力和位移特点	2
1.2.2 建筑高度与材料用量、工程造价的关系	4
1.2.3 高层建筑技术经济特点	5
1.3 高层建筑的发展历史与现状	5
1.3.1 世界高层建筑的发展历史	6
1.3.2 国内高层建筑的发展历史	11
1.4 高层建筑的发展趋势	12
1.5 本课程的主要内容、学习目的和要求	15
思考题与习题	15
2 高层建筑结构体系与结构布置	16
2.1 高层建筑结构体系	16
2.1.1 框架结构体系	16
2.1.2 剪力墙结构体系	19
2.1.3 框架-剪力墙结构体系	20
2.1.4 筒体结构	22
2.1.5 新型结构体系	25
2.1.6 结构体系的选择	31
2.2 高层建筑结构布置	33
2.2.1 结构平面布置原则	33
2.2.2 平面不规则的类型	34
2.3 高层建筑结构竖向布置	35
2.3.1 结构竖向布置原则	35
2.3.2 竖向不规则的类型	36
2.4 变形缝设置	37
2.4.1 伸缩缝	37
2.4.2 沉降缝	38

2.4.3 防震缝	38
2.5 高层建筑水平承重结构选型	39
2.5.1 楼盖结构的类型和特点	39
2.5.2 楼盖结构的选型与构造要求	40
2.6 高层建筑基础选型	41
2.6.1 基础形式	42
2.6.2 基础埋深	43
思考题与习题	44
3 高层建筑结构概念设计	45
3.1 高层建筑结构受力特征	45
3.1.1 高层建筑结构基本构件的受力特征	45
3.1.2 建筑结构的三个基本分体系	46
3.1.3 高层建筑结构的传力路线	47
3.1.4 弯曲刚度指数 (<i>BRI</i>) 和剪切刚度指数 (<i>SRI</i>) 的概念	48
3.2 高层建筑结构设计要求	50
3.2.1 荷载效应组合	50
3.2.2 承载能力的验算	52
3.2.3 侧向位移限制和舒适度要求	53
3.2.4 重力二阶效应与结构的抗倾覆验算	55
3.2.5 高层建筑结构的延性要求和抗震等级	58
3.3 高层建筑结构分析	63
3.3.1 结构分析原则	63
3.3.2 结构分析方法	64
3.3.3 结构分析步骤	65
3.4 高层建筑结构计算的基本假定、计算简图和计算要求	66
3.4.1 高层建筑结构计算基本原则与假定	66
3.4.2 高层建筑分析模型	67
3.4.3 计算简图	68
3.4.4 计算参数处理原则	69
思考题与习题	69
4 高层建筑结构荷载与地震作用	71
4.1 引言	71
4.2 竖向荷载	71
4.3 风荷载作用	72
4.3.1 风对高层建筑结构作用的特点	72
4.3.2 单位面积上的风荷载标准值及基本风压	73
4.3.3 总风荷载与局部风荷载	76

4.3.4 多层钢筋混凝土框架房屋风荷载计算例题	77
4.4 地震作用	78
4.4.1 地震作用的特点	78
4.4.2 一般计算原则	79
4.4.3 计算方法	79
4.4.4 突出屋面上塔楼的地震力	89
4.4.5 竖向地震作用计算	90
思考题与习题	91
5 钢筋混凝土框架结构与案例	92
5.1 框架结构的设计步骤	92
5.2 结构布置与计算简图	93
5.2.1 结构布置	93
5.2.2 计算简图	95
5.3 框架结构内力计算	97
5.3.1 竖向荷载作用下结构的内力计算	97
5.3.2 水平荷载作用下结构的内力计算	102
5.3.3 内力组合及最不利内力	110
5.4 框架结构位移计算	110
5.5 框架结构截面设计与构造要求	112
5.5.1 框架结构抗震设计的一般原则	112
5.5.2 框架梁设计	113
5.5.3 框架柱设计	117
5.5.4 框架节点设计和配筋构造	122
5.6 设计案例	126
5.6.1 设计资料	126
5.6.2 横向框架的计算简图	128
5.6.3 重力荷载计算	129
5.6.4 框架横向侧移刚度计算	131
5.6.5 水平地震作用下横向框架的位移和内力计算	133
5.6.6 风荷载作用下横向框架结构的位移和内力计算	136
5.6.7 竖向荷载作用下横向框架结构的内力计算	138
5.6.8 横向框架内力组合	149
5.6.9 框架梁、柱截面配筋计算	153
思考题与习题	156
6 钢筋混凝土剪力墙结构与案例	157
6.1 剪力墙结构体系与布置	157
6.1.1 剪力墙结构体系	157

6.1.2 剪力墙的布置	159
6.1.3 剪力墙结构方案初估	162
6.1.4 剪力墙设计计算流程图	164
6.2 剪力墙的内力及位移计算	164
6.2.1 剪力墙计算方法	164
6.2.2 剪力墙类型的判别	166
6.2.3 整体剪力墙在水平荷载作用下内力及位移的计算	169
6.2.4 整体小开口墙在水平荷载作用下内力及位移的计算	171
6.2.5 联肢剪力墙在水平荷载作用下内力及位移的计算	175
6.2.6 壁式框架在水平荷载作用下内力及位移的计算	196
6.3 剪力墙结构设计构造要求	199
6.3.1 剪力墙的配筋形式	199
6.3.2 墙肢正截面承载力及轴压比限值	200
6.3.3 墙肢斜截面抗剪承载力计算	205
6.3.4 剪力墙构造要求	207
6.3.5 连梁设计计算与构造要求	211
6.3.6 剪力墙截面设计案例	214
思考题与习题	220
7 钢筋混凝土框架-剪力墙结构与案例	222
7.1 框架-剪力墙结构的形式与布置	222
7.1.1 结构体系和形式	222
7.1.2 框架-剪力墙结构的变形及受力特点	222
7.1.3 结构布置	223
7.2 框架-剪力墙结构内力和位移计算	228
7.2.1 微分方程法协同分析的基本原理	228
7.2.2 铰接体系协同工作计算	230
7.2.3 刚接体系协同工作计算	237
7.2.4 总框架总剪力的调整	241
7.2.5 各框架、剪力墙和连梁的内力计算	242
7.3 框架地震倾覆力矩和自振周期	244
7.3.1 框架地震倾覆力矩的计算	244
7.3.2 自振周期	245
7.4 刚度特征值 λ 对结构受力、位移特性的影响	245
7.5 框架-剪力墙结构截面设计与构造要求	246
7.6 设计案例	247
7.6.1 基本计算参数	248
7.6.2 水平地震作用	251
7.6.3 水平位移验算	254

7.6.4 水平地震作用下总剪力墙、总框架和总连梁的内力计算	254
7.6.5 连梁刚接时构件内力计算	256
思考题与习题	257
8 钢筋混凝土筒体结构设计简介	258
8.1 筒体结构选型	258
8.2 筒体结构的受力性能与计算方法	260
8.2.1 筒体结构的受力性能	260
8.2.2 筒体结构的计算方法	262
8.3 筒体结构的截面设计及构造要求	265
思考题与习题	268
9 高层建筑结构计算机计算原理与设计软件简介	269
9.1 高层建筑结构计算机计算原理	269
9.1.1 以杆件为单元的矩阵位移法	269
9.1.2 空间组合结构算法	270
9.2 高层建筑结构设计和分析软件简介	270
9.2.1 结构分析通用程序	271
9.2.2 高层建筑结构分析与设计专用程序	273
9.3 高层建筑结构程序计算结果的分析	275
9.3.1 计算结果产生错误的原因	275
9.3.2 计算结果的分析、判断和调整	276
思考题与习题	279
参考文献	280

1 绪 论

1.1 高层建筑的定义与分类

1.1.1 高层建筑的定义

随着社会经济建设和科学技术的进步，高层建筑在世界各国大量兴建。高层建筑可节约城市用地，缩短公用设施和市政管网的开发周期，从而减少市政投资，加快城市建设。但是，随着高度的增加，高层建筑的技术问题、建筑艺术问题、投资经济问题以及社会效益问题、环境问题等逐渐变得复杂、严峻，因此，高层建筑成为衡量一个国家建筑科学技术水平的重要标志，更是检验一个国家建筑结构技术成熟程度的标尺。

什么是高层建筑？高层建筑是具有一定层数或高度的建筑。高层建筑的起点高度或层数，各国规定不一，目前尚无统一的严格定义。如：美国规定 24.6m 或 7 层以上的建筑物为高层建筑；日本规定 31m 或 8 层及以上的建筑物为高层建筑；英国规定高度等于或大于 24.3m 的建筑物为高层建筑；德国规定 22m 以上的建筑物为高层建筑。

1972 年，国际高层建筑会议将高层建筑分为 4 类：

第一类高层建筑为 9 ~ 16 层（最高 50m）；

第二类高层建筑为 17 ~ 25 层（最高 75m）；

第三类高层建筑为 26 ~ 40 层（最高 100m）；

第四类高层建筑为 40 层以上（高于 100m）。

在我国，旧规范规定：8 层以上的建筑称为高层建筑，新《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3—2002）（以下简称《高规》）规定：10 层及 10 层以上或房屋高度大于 28m 的建筑物为高层建筑（tall building）。《高层民用建筑设计防火规范》（GB 50045—1995）中指出：10 层及 10 层以上的居住建筑（包括首层设置商业服务网点的住宅）和建筑高度超过 24m 的公共建筑应属于高层建筑。国际上，通常将高度超过 100m 或层数在 30 层以上的高层建筑称为超高层建筑（super-tall building）。

1.1.2 高层建筑的分类

（1）根据高层建筑的使用性质、火灾危险性、疏散和扑救难度等，《高层民用建筑防火设计规范》（GB 50045—1995）（2001 年版）将高层建筑分为两类：

一类建筑为 19 层及 19 层以上的普通住宅和达到高层标准的高级住宅（装饰标准高、有集中空调的住宅）或建筑高度超过 50m，每层建筑面积超过 1500m² 的商住楼和比较重要的公共建筑；

二类建筑为 10 层至 18 层的普通住宅或建筑高度不超过 50m，每层建筑面积较小的其

他公共建筑。

(2) 根据高层建筑的使用功能,高层建筑可分为:

- 1) 高层住宅。包括塔式住宅和板式住宅以及底部为商业用房、上部为住宅的商住楼。
- 2) 高层旅馆。包括星级酒店、大型饭店等。
- 3) 公共性建筑。包括办公、商业、科研、教学等用楼。

(3) 按照建筑结构使用的材料不同,高层建筑结构又可分为钢筋混凝土结构、钢结构和钢-混凝土混合结构三种类型。

1) 钢筋混凝土结构具有取材容易、耐久性和耐火性良好、承载能力大、刚度好、节约钢材、造价低、可模性好以及能浇制成各种复杂的截面和形状等优点,现浇整体式混凝土结构还具有整体性好的优点,设计合理时,可获得较好的抗震性能。钢筋混凝土结构布置灵活方便,可组成各种结构受力体系,在高层建筑中得到了广泛的应用。但是,钢筋混凝土结构施工工序复杂,建造周期较长,受季节的影响大,对高层建筑的建造不利。由于高性能混凝土材料的发展和施工技术的不断进步,钢筋混凝土结构仍将是今后高层建筑的主要结构类型。目前最高的混凝土建筑是1996年在广州建成的高391m的中信广场大厦。

2) 钢结构具有材料强度高、截面小、自重轻、塑性和韧性好、制造简便、施工周期短、抗震性能好等优点,在高层建筑中也有着较广泛的应用。但由于高层建筑钢结构用钢量大、造价高,再加之因钢结构防火性能差,需要采取防火保护措施,增加了工程造价,此外,钢结构的应用还受钢铁产量和造价的限制。目前最高的钢结构建筑是1974年在芝加哥建成的高442m的西尔斯大厦。

3) 钢-混凝土组合结构或混合结构是将钢材放在混凝土构件内部(称为钢骨混凝土),或在钢管内部填充混凝土,做成外包钢构件(称为钢管混凝土)。这种结构不仅具有钢结构自重轻、截面尺寸小、施工进度快、抗震性能好等特点,同时还兼有混凝土结构刚度大、防火性能好、造价低的优点,因而被认为是一种较好的高层建筑结构形式,近年来在世界上发展迅速。目前世界最高的十大建筑中,有八个是组合结构。最高的组合结构建筑是2010年1月落成的哈利法塔(828m, 162层)。

1.2 高层建筑结构特点

与多层建筑结构相比,高层建筑结构具有其独特的一面。高层建筑结构可以假想为支承在地面上的竖向悬臂构件,其承受着竖向荷载和水平荷载的作用。下面分别从受力特点、造价、技术经济等方面阐述。

1.2.1 高层建筑受力和位移特点

(1) 高层建筑中水平荷载产生的影响远大于垂直荷载产生的影响,因此高层建筑结构必须是一个既能抗弯曲,又能抗剪切,还能使其地基和基础承受上部传来的各种作用力的结构系统。

建筑物抗弯曲要求必须达到以下三个条件(图1-1):

- 1) 不会使建筑物发生倾斜(图1-1a);
- 2) 支承体系(柱或墙)的某些部位不致被压碎、压屈或拉断(图1-1b);

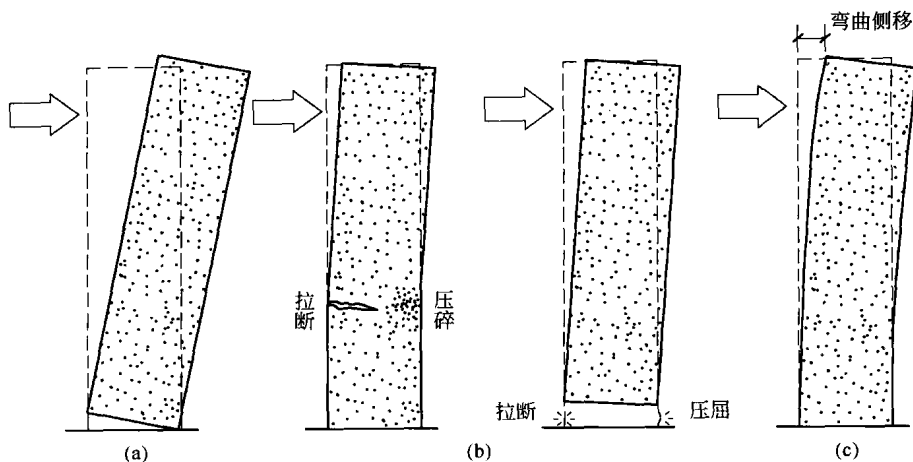


图 1-1 建筑物抗弯曲

(a) 必须不会倾覆；(b) 必须不发生拉伸破坏或压缩破坏；(c) 弯曲侧移不能过大

3) 其弯曲侧移 (和剪切侧移的总和) 不应超过弹性可恢复极限 (图 1-1c)。

建筑物抗剪切要求必须达到以下两个条件 (图 1-2)：

- 1) 不会使建筑物被剪断 (图 1-2a)；
- 2) 其剪切侧移 (和弯曲侧移的总和) 不应超过弹性可恢复极限 (图 1-2b)。

对地基和基础来说, 建筑结构系统的各支承点之间不应发生过大的不均匀变形, 而且其地基和地下结构应能承受侧向荷载引起的水平剪力, 并不致引起水平滑移。

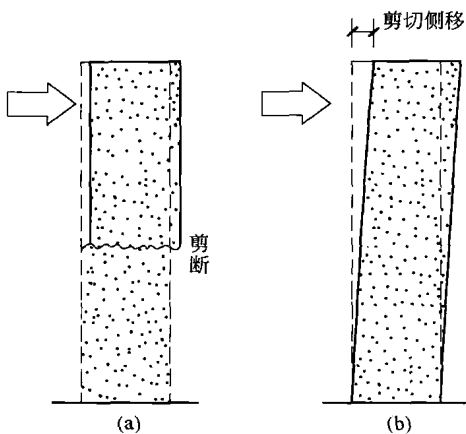


图 1-2 建筑物抗剪切

(a) 必须不发生剪坏；(b) 剪切侧移不能过大

(2) 高层建筑中, 水平荷载和地震作用对结构设计起着决定性的作用。竖向荷载在结构的竖向构件中主要产生轴向压力, 其数值仅与结构高度的一次方成正比; 而水平荷载对结构产生的倾覆力矩以及由此在竖向构件中所引起的位移, 其数值与结构高度的二次方和四次方成正比 (图1-3)。水平均布荷载作用下, 荷载效应 (轴力 N 、弯矩 M 和位移 Δ) 的值可用

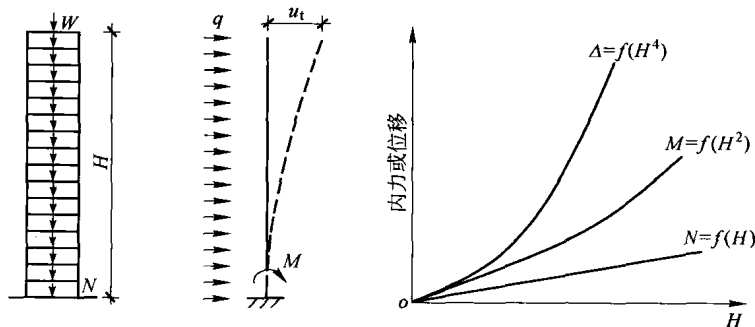


图 1-3 结构内力、位移与高度的关系

下列式子表达:

$$N = WH = f(H); M = qH^2/2 = f(H^2); \Delta = qH^4/(8EI) = f(H^4)$$

因此,设计高层建筑时,要求结构不仅具有足够的强度,还应具备足够的抗侧刚度,使结构在水平荷载下产生的侧移被控制在规定的范围内。限制侧向位移的主要原因在于:

1) 结构在强阵风作用下的振动加速度超过 $0.015g$ 时,会影响建筑内使用人员的正常工作和生活。在地震作用下,侧移过大,更会增加人们的不安全感或惊慌。

2) 层间相对位移过大会使填充墙或一些建筑装修开裂或损坏。此外,顶点总位移过大,会使电梯因轨道变形而不能正常运行,机电管道容易受到破坏。

3) 高层建筑的重心位置较高,过大的侧向变形会产生重力二阶效应,从而使结构产生较大的附加应力,甚至可能因侧移与应力的恶性循环导致建筑物倒塌。

(3) 动力反应不可低估。与竖向荷载相比,作为水平荷载的风荷载和地震作用,其数值与结构的动力特性等有关,具有较大的变异性。而且,由于作用在高层建筑上的水平荷载——风和地震作用是动态变化的,所以结构的动力反应不可低估。

(4) 高层建筑由于高度大,导致结构轴向变形、剪切变形以及温度、沉降的影响加剧。高层建筑中,竖向构件(特别是柱)的轴向压缩变形对结构和楼面标高会产生较大的影响,如美国的帝国大厦(102层、高381m),其总重量约达30万吨,导致大厦的高度比原来压缩了8~15cm;所幸迄今为止帝国大厦还找不到一处龟裂的地方。

在框架结构中,中柱承受的轴压力一般要大于边柱的轴压力,相应的,中柱的轴向压缩变形要大于边柱的轴向压缩变形。当房屋很高时,中柱和边柱就会产生较大的轴向变形差异,使框架梁产生不均匀沉降,造成框架梁的弯矩分布发生较大的变化。图1-4a所示为未考虑各柱轴向变形时框架梁的弯矩分布,图1-4b所示为考虑各柱轴向变形差异时框架梁的弯矩分布。

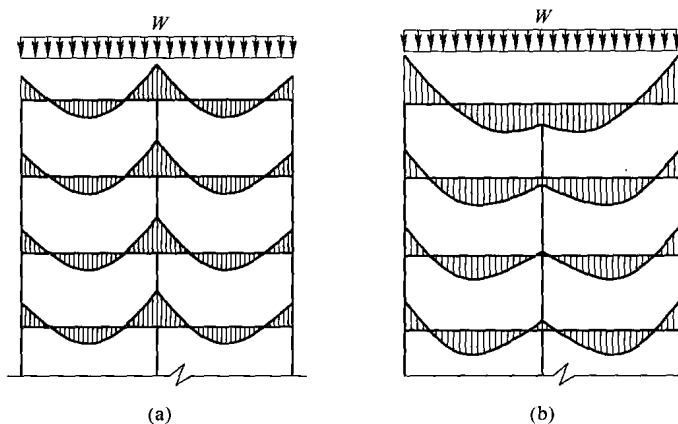


图1-4 柱轴向变形对高层框架梁弯矩分布的影响

(a) 未考虑各柱轴向变形时框架梁的弯矩分布; (b) 考虑各柱差异轴向变形时框架梁的弯矩分布

1.2.2 建筑高度与材料用量、工程造价的关系

随着建筑高度的增加,侧向荷载逐渐在建筑中占主导地位,材料用量、工程造价将呈抛物线关系增长,见图1-5。

1.2.3 高层建筑技术经济特点

高层建筑的蓬勃发展具有以下多方面的意义:

(1) 发展高层建筑,能够有效减少地面建筑的密度,建筑向高空延伸,可以增加人们的密集程度,缩短交通联系路线,节约城市用地和市政建设方面的投资;

(2) 在建筑面积与建设场地面积相同比值的情况下,建造高层建筑比多层建筑能够提供更多的空闲地面,将这些空闲地面用作绿化和休息场地,有利于美化环境,并带来更充足的日照、采光和通风效果,因此可以改善城市环境质量;

(3) 发展高层建筑其意义并不单纯在于高度的突破,而是它带动了整个建筑业的发展以及材料工艺、信息技术、设备制造工艺等其他行业的大发展,能够为人类造福,因此高层建筑的经济和社会效益都相当好;

(4) 高层建筑是科学发展和经济发展的必然产物和重要标志。高层建筑越多,高度越高,所需要解决的城市规划、建筑设计、基础工程、建筑材料、运输、消防、空调、电气、施工技术及城市公用设施所需及与之相配合的问题就愈加复杂,没有轻质高强的材料、没有强大可靠的设计分析理论、高强的施工组织技术和经济作为支撑是不可能建起高层建筑的。

但是,高层建筑的大量兴建也有其不利的一面,如:

(1) 空气流动形成的风遇到高层建筑时,往往在建筑的上下左右部位产生涡流,建筑拐角部位还会产生旋风,这些对建筑周围的行人会产生不良影响,而且随着建筑高度的增加,风荷载作用增大,这对高层建筑的强度、刚度和稳定性提出了较高要求。

(2) 由于高层建筑一般体型庞大,所以日照时间长短不一,各方位、各高度房间的温差较大,由此产生的温度应力对结构设计有影响;高反射玻璃幕墙还会导致光污染;落影区的植物因缺乏光照,生长常受到影响。

(3) 高层建筑产生的噪声也不容忽视,除了电梯、空调机组、冷却塔产生噪声,人们上下楼梯、人流的嘈杂声都会产生噪声,影响环境的安静。

因此,高层建筑的兴建应该充分考虑远期收益、环境因素、结构性能、材料费用以及所产生的社会影响,通过成本效益分析来确定最佳方案。

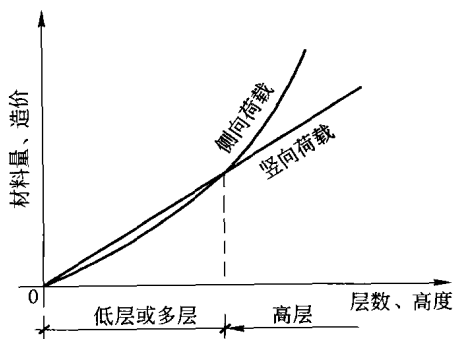


图 1-5 荷载、材料与建筑高度的关系

1.3 高层建筑的发展历史与现状

高层建筑的建造和发展已有百余年的历史,较早的高层建筑是公元前 280 年古埃及人建造的高 100 多米的亚历山大港灯塔和公元 523 年中国河南登封县建成的高 50m 的高岳寺塔。现代高层建筑兴起于美国,1885 年芝加哥建成的家庭保险大楼(Home Insurance Building)(地上 11 层,高 55m)被认为是世界上第一栋近代高层建筑。第二次世界大战以后,世界范围内出现了高层建筑的繁荣时期。

高层建筑往往是城市的点缀或标志,所以高层建筑在着重于其使用功能的同时,还要充分体现其美学功能。高层建筑的发展是经济与技术发展的产物,同时也是美学在建筑中的体现,从某种意义上说,高层建筑的发展史就是一部技术与美学的发展史。

1.3.1 世界高层建筑的发展历史

世界高层建筑的发展大致可分为四个阶段:

(1) 第一个发展阶段:18 世纪末~19 世纪末。这个时期,欧洲和美国的工业革命带来了生产力的发展与经济的繁荣。一方面,城市化发展迅速,城市人口高速增长。为了在较小的土地范围内建造更多使用面积的建筑,建筑物不得不向高空发展。另一方面,钢结构的发展和电梯的出现则促成了多层建筑的大量建造。

19 世纪初,英国出现铸铁结构的多层建筑(矿井、码头建筑),但铸铁框架通常是隐藏在砖石表面之后。1840 年之后的美国,锻铁梁开始代替脆弱的铸铁梁。熟铁架、铸铁柱和砖石承重墙组成笼子结构,是迈向高层建筑结构的第一步。除此之外,19 世纪后半叶出现了具有横向稳定能力的全框架金属结构,产生了幕墙的概念,房屋支撑结构与围护墙开始分离;在建筑安全方面,防火技术与安全疏散逐步提高;19 世纪 60 年代,美国已出现给排水系统、电气照明系统、蒸汽供热系统和蒸汽机通风系统,1920 年出现了空调系统;1890 年奥提斯(Otis)发明了现代电力电梯,解决了高层建筑的竖向运输问题。以上这些都为高层建筑的发展奠定了必要的基础。

1871 年 10 月 8 日夜,芝加哥发生大火,在风力作用下,火势不断扩大、蔓延,48h 之内,烧毁房屋 18000 栋,使 10 万人无家可归,300 人被烧死。火灾后芝加哥重建,由于市区内土地昂贵,建筑向高空发展比购买更多的土地更为经济,而此时建造高层建筑的技术已具备,所以 1885 年,近代真正的第一栋高层建筑——11 层高的芝加哥家庭保险大楼诞生了。该楼没有承重墙,由金属框架承重,圆形铸铁柱子内填水泥灰,1~6 层为铸铁工字梁,其余楼层用钢梁,砖石外立面,窗间墙和窗下墙为砖石构造,像幕墙一样挂在框架之上,建筑史称它为“钢铁结构进化中决定性的一步”。

这个时期的建筑采用了一个革命性的建筑技术:放弃传统的石头承重墙,采用一种轻型的铸铁结构和石头或陶砖外墙,框架与外墙分离。

(2) 第二个发展阶段:20 世纪初期至 30 年代。第一次世界大战后,美国实力急剧膨胀,1902 年在辛辛那提市建造了 16 层、高 64m 的英格尔斯(Ingalls)大楼,为世界第一栋钢筋混凝土高层建筑。1931 年,在纽约建造了著名的 102 层、高 381m 的帝国大厦(图 1-6),它保持世界最高建筑达 41 年之久。该结构采用钢框架支撑体系,在电梯井纵横方向设置了支撑,连接采用铆接,钢框架中填充墙体以共同承受侧向力。



图 1-6 帝国大厦

这个时期,欧洲和美国的一些设计师提出了工业主义建筑设计理念,认为一栋新建筑应符合新功能、新材料、新社会制度和新技术的要求,并对高层建筑设计进行了积极探索,奠定了20世纪30~60年代现代主义高层建筑的设计原则和形式的基础。如由伯姆和鲁特设计的瑞莱斯大厦,其水平围护结构几乎全是玻璃,用轻质透明的围护结构表现出框架结构的美学特点;格罗皮乌斯的设计方案形式简洁,没有多余的装饰,充分展现框架结构的美学品位,无论是在结构上还是功能上都是杰出的,极其适合办公楼要求,成为第二次世界大战后流行的高层办公楼形式的早期萌芽。

本阶段结构发展特点:由于设计理论和建筑材料的限制,结构材料用量较多,自重较大,以框架结构为主;但是钢铁工业的发展和钢结构设计技术的进步,使高层钢结构建筑得到较大发展。

(3) 第三个发展阶段:20世纪30~80年代。这一阶段最完美地体现了工业主义建筑设计理念,这一时期的建筑所关心的问题聚焦在如何开发材料、结构的表现力,如何单纯抽象地表达使用功能、表达空间组合。密斯·凡·德·罗设计的芝加哥湖滨公寓(1952)、纽约西格拉姆大厦(1958)都充分展现了钢框架结构和围护墙体玻璃材料的表现力;芝加哥约翰·汉考克大厦(1968,100层,高344m,多功能综合建筑)(图1-7)着力挖掘了结构构件X形支撑的美学特色;贝聿铭设计的波士顿约翰·汉考克大厦(1976,60层)外墙采用全隐框反射玻璃幕墙,开创现代建筑新的表现手法(有人称为最后一栋现代主义建筑)。

工业主义建筑设计理念以适应大工业生产为目标,强化“以物为中心”,缺乏对人性的关怀,因此,许多设计也暴露出严重的缺陷。如密斯式的方盒子建筑在世界范围流行,地方特色受到严重冲击。

这一阶段代表性高层建筑还有:

1973年建造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),见图1-8。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,并对以后高层建筑结构的设计和建造具有重要的参考价值。

1974年建造的芝加哥西尔斯大厦(Willis Tower),110层,高443m,采用钢结构成束框架筒体结构,曾保持世界最高建筑达20多年之久,见图1-9。

本阶段结构发展特点:钢筋混凝土结构得到全新发展;钢结构发展新体系;钢-混组合结构迅速发展。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;20世纪60年代中期,美国著名的结构专家



图1-7 约翰·汉考克大厦

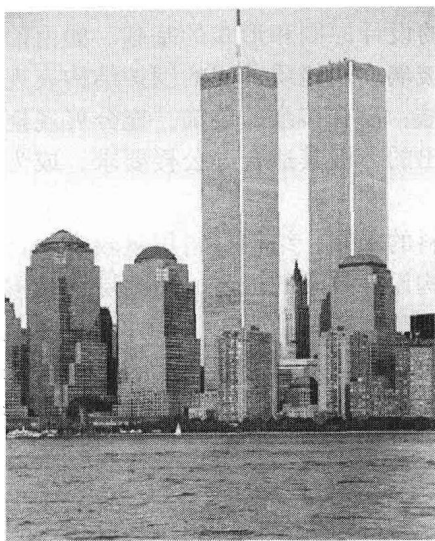


图 1-8 纽约世界贸易中心

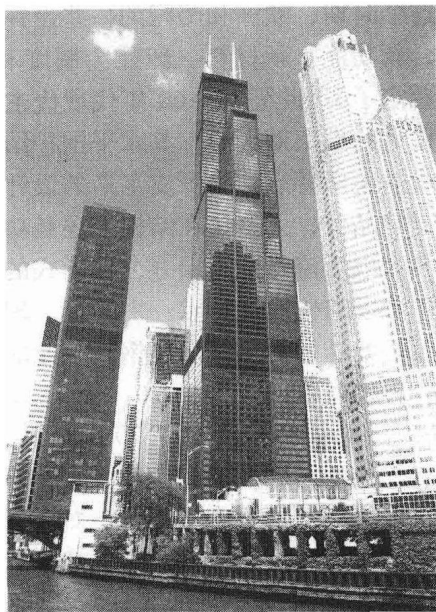


图 1-9 西尔斯大厦

法兹勒·坎恩 (Fazlur Khan) 博士, 首次提出了筒体结构设计概念, 使结构体系发展到了一个新的水平, 为高层建筑提供了理想的结构形式, 从这种体系中衍生出来的筒中筒、多束筒和斜撑筒等结构体系, 对以后高层建筑的发展产生了巨大的推动作用。

(4) 第四个发展阶段: 20 世纪 80 年代以后。20 世纪 80 年代以后, 高层建筑设计理念发生了巨大转变, 建筑形体在强调对材料和结构的率真表达的同时, 也重视建筑的语义表达; 同时注重强调建筑与周围环境的和谐和与城市文脉的整合, 工业主义建筑人文化设计理念开始深入人心。20 世纪 90 年代以后, 出现了新古典、新技派、生态观、解构主义等各种建筑流派和思潮, 这些都是工业主义建筑人文化设计理念某些观念的具体体现。如菲利普·约翰逊设计的美国电话电报公司总部大楼 (1984), 矶崎新设计的日本筑波中心 (1970~1980) 借用历史符号表达建筑的思想内涵, 贝聿铭设计的香港中国银行大厦 (1990) 通过有意识地强化结构支撑构件实现“芝麻开花节节高”的隐喻, O·M·翁格尔斯设计的德国托豪斯大厦 (20 世纪 90 年代) 隐喻的“大门”形象, 是通过建筑的虚实对比实现的, 诺曼·福斯特事务所设计的法兰克福商业银行总部大厦 (1994) 在强调象征意义和功能的同时, 引入生态的概念, 是世界上第一座“生态型”超高层建筑, 其建筑平面呈三角形, 宛如三叶花瓣夹着一枝花茎: 花瓣部分是办公空间, 花茎部分为中空大厅。中空大厅起自然通风作用, 同时还为建筑内部创造了丰富的景观。

本阶段结构发展特点是: 钢筋混凝土高层建筑得到了空前的发展; 焊接和高强螺栓在钢结构制造中得到推广和进一步应用; 同时, 轻质高强材料、抗风抗震结构体系、施工技术及施工机械等方面都取得了很大进步, 计算机在设计中的应用使得高层建筑飞速发展。高层钢筋混凝土及混合结构的发展速度超过了高层钢结构的发展, 高层建筑结构体系发展了巨型框架结构、巨型桁架结构体系等。

20 世纪 90 年代以后, 由于亚洲经济的崛起, 西太平洋沿岸的一些国家和地区, 陆续