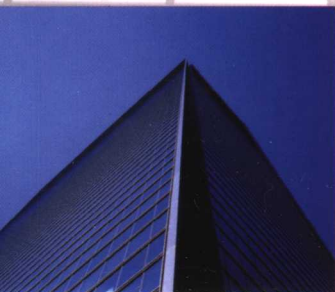


Tall Steel Structure Design

高层钢结构设计

◆ 郑廷银 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高层钢结构设计

郑廷银 编著



机械工业出版社

本书密切结合我国新修订的《钢结构设计规范》(GB50017—2003)、《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)、《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)和《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99—1998)等有关现行规范、规程的要求,对高层建筑钢结构设计进行了系统的分析与介绍。本书既注重理论的系统性和应用的可操作性,又注重学科前沿知识和方法的介绍。全书共分十一章,包括绪论;结构类型和体系;概念设计;材料选择;荷载与作用计算;作用效应计算及其组合;结构验算;构件设计;组合楼盖设计;节点设计;钢结构防火与防腐设计。

本书可作为高等院校土木工程专业高年级学生钢结构设计原理课程的后续课程教材,也可作为结构工程专业研究生的教学用书,并可供土建类工程设计、科研、钢结构制作和安装以及其他相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高层钢结构设计/郑廷银编著. —北京:机械工业出版社, 2005.8

ISBN 7-111-17205-1

I. 高… II. 郑… III. 高层建筑—钢结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 093602 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 马 宏 版式设计: 张世琴 责任校对: 张莉娟

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2005 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·19.25 印张·476 千字

0 001—4 000 册

定价: 34.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

钢结构具有自重轻、抗震性能好、绿色环保、工业化程度高、综合经济效益显著等诸多优点,深受国内外建筑师和结构工程师的青睐。因此,它不仅是世界早期高层建筑中最先使用的一种结构类型,而且也将成为今后高层建筑中具有广阔发展前景的结构类型,更将成为世界各国拟建的大型、复杂的综合性多功能超高层建筑首选的结构类型。

近年来,由于我国政策、钢材生产、设计研发等诸多方面的有利因素,建筑钢结构在我国得到了高速发展及广泛应用,但我国目前钢结构技术人材储备奇缺,特别是在最能反映国家建筑技术水平的工程硕大的高层或超高层钢结构方面的技术人才更是如此。为适应形势发展需要,加速这方面的人才培养是关键。而在我国,目前这方面的合适教材或参考书奇缺,对此,作者结合多年的教学、科研和工程实践经验,根据我国新修订的《钢结构设计规范》(GB50017—2003)、《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)、《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)和《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99—1998)等有关现行规范、规程的要求,编著了本书。

本书力求突出下列特色:①既注重基本理论和基本概念的阐述,又注重学科前沿知识的介绍,尽量反映现代建筑理念和建筑科学技术水平;②紧密结合我国新修订的《建筑结构荷载规范》、《建筑抗震设计规范》和《钢结构设计规范》以及《高层民用建筑钢结构技术规程》等国家标准,以便与实际工程应用相结合;③尽量避免与先导教材内容重复;④尽量突出便于工程应用的教学特色;⑤注重理论的系统性和应用的可操作性,尽量避免烦琐的理论公式推导;⑥每章末编写一定数量的复习思考题,以便读者复习巩固。

本书对高层建筑钢结构设计进行了系统的分析与介绍。全书共分十一章,其内容包括高层钢结构的发展展望及其设计特点;结构类型和体系;概念设计;材料选择;荷载与作用计算;作用效应计算及其组合;结构验算;构件设计;组合楼盖设计;节点设计;钢结构防火与防腐设计。

在本书编著过程中,曾引用了同行专家论著中的成果,曾得到作者所在单位的支持,张玉、杨波、马梦寒、陈志军等研究生曾对本书稿的部分图文录制付出过辛勤劳动,在此一并致谢。

由于时间所限,书中难免有引用同行专家论著或资料中的某些内容而未能详细说明出处的地方,敬请谅解!虽然本书初稿已在南京工业大学试用几届,但由于水平所限,不当之处在所难免,敬请读者批评指正,并提出宝贵意见。

郑廷银

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 高层建筑钢结构的发展概况	1
1.2 高层建筑钢结构的设计特点	4
1.3 高层建筑钢结构的发展趋势	9
复习思考题	11
第2章 高层建筑钢结构类型与体系	12
2.1 高层建筑结构类型与特征	12
2.2 高层建筑钢结构体系与特性	12
复习思考题	38
第3章 结构概念设计	39
3.1 选择有利的建筑场地	39
3.2 确定合适的建筑体形	39
3.3 变形缝的设置	43
3.4 选择有效的抗侧力结构体系	44
3.5 抗侧力构件的布置原则	48
3.6 竖向承重构件的布置	52
3.7 削减结构地震反应的措施	54
3.8 楼盖结构的选型与布置	55
3.9 地下结构的设计原则	60
复习思考题	65

第4章 材料选择	66
4.1 结构材料	66
4.2 连接材料	74
复习思考题	79
第5章 荷载与作用计算	80
5.1 竖向作用	80
5.2 风荷载	81
5.3 地震作用	95
复习思考题	105
第6章 作用效应计算及其组合	106
6.1 结构分析方法的分类及其基本步骤	106
6.2 作用效应计算的一般规定	106
6.3 简化计算方法	107
6.4 精确计算方法	119
6.5 地震作用效应计算	129
6.6 作用效应组合	137
复习思考题	138
第7章 结构验算	139
7.1 构件承载力验算	139
7.2 结构侧移检验	140
7.3 风振舒适度验算	143
7.4 结构二阶分析与稳定验算	145
复习思考题	151
第8章 构件设计	152

8.1 梁	152	10.2 梁与柱的连接	233
8.2 轴心受压柱	157	10.3 梁与梁的连接	253
8.3 框架柱	161	10.4 柱与柱的连接	260
8.4 中心支撑	168	10.5 钢柱柱脚	267
8.5 偏心支撑	172	10.6 支撑的连接	278
8.6 钢板剪力墙	177	10.7 抗震剪力墙板与钢框架 的连接	286
8.7 内藏钢板支撑剪力墙	179	10.8 钢梁与钢筋混凝土构件 的连接	287
8.8 带竖缝的混凝土剪力墙	183	复习思考题	289
复习思考题	187		
第9章 组合楼盖设计	188	第11章 钢结构防火与防腐设计	290
9.1 分类与组成	188	11.1 钢结构防火设计	290
9.2 组合楼板设计	188	11.2 钢结构防腐设计	298
9.3 组合梁设计	204	复习思考题	300
复习思考题	229		
第10章 节点设计	230	参考文献	301
10.1 概述	230		

第 1 章 绪 论

1.1 高层建筑钢结构的发展概况

高层钢结构是近代经济发展和科学技术进步的产物，至今已有 100 多年的发展史。自 1885 年美国兴建第一幢高层钢结构建筑——芝加哥家庭保险公司大楼（Home Insurance Company, 10 层，55m）以来，高层钢结构建筑不断发展。特别是进入 20 世纪以后，随着钢结构设计技术的发展，高层建筑在结构与构造技术上逐渐成熟，大量高层钢结构在美国建成，如 1913 年在纽约建造的沃尔沃斯（Wool Worth）大楼，采用钢框架体系，主体结构为 31 层，高 122m，塔楼再升高 29 层，总计达 60 层，总高 244m；1931 年在纽约兴建了帝国大厦（Empire State Building），102 层，高 381m，它保持世界最高建筑的记录达 41 年之久。在第二次世界大战前，超过 200m 的高层建筑已有 10 幢。第二次世界大战爆发，使高层建筑的发展受到严重影响。第二次世界大战结束后，在美国重新兴起建造高层建筑，并向超高层发展，继而在世界各国相继建造了许多高层建筑，形成了高层建筑的繁荣时期。至 1979 年，全世界建成 200m 以上的高层建筑有 50 幢以上，其中大部分在美国。其中著名的建筑有：1945 年在纽约建造的标准石油公司大楼，82 层，高 346m。1968 年建造在芝加哥的约翰·汉考克大厦（Hancock Centre），100 层，高 344m，上有 106m 高的电视天线，是一幢综合性高层办公建筑。其平面为长方形，外形上窄下宽，结构为钢结构内筒加 X 形支撑-钢桁架外筒（图 1-1）。1972 年建造的纽约世界贸易中心大厦（World Trade Centre），110 层，北塔楼高 417m，南塔楼高 415m，打破了帝国大厦保持 41 年世界最高建筑的记录。塔楼平面为正方形，尺寸为 63m × 63m，结构采用筒中筒体系。内筒由电梯井及辅助用房组成，外筒由钢框架组成。该大楼共装有 2 万余个减振器。每层 100 个，顶部设计位移 900mm，实测位移仅 280mm（该大楼已毁于 2001 年 9·11 事件）。1974 年，美国又在芝加哥建成了西尔斯大厦（Sears Tower），110 层，高 443m，目前为世界第三高楼。结构为由 9 个标准方筒组成束筒体系，外形特点是逐级上收（图 1-2）。西尔斯大厦的出现标志着现代建筑技术的新发展，它保持世界最高建筑的记录达 23 年之久。到 20 世纪 80 年代和 90 年代初期，高层建筑虽然在高度上未有新的突破，但其风格有了新的变化，并酝酿着更高的建筑。例如，在这一时期内，美国曾规划、设计纽约“电视城”（Television City Tower, 150 层，509m）和费尼克斯市的 Phoenix Tower（高 515m），高度都突破 500m。在全世界已建成的前十大高楼（至 2004 年）中美国占四幢，亚洲占六幢（表 1-1）。

在我国，高层钢结构建筑虽然起步较晚，但发展较快。自 20 世纪 80 年代中期始建高层钢结构至今，在这短短的十余年中，至 2004 年，我国已建和在建的高层钢结构建筑（含钢-混凝土混合结构和组合结构）已近 80 幢，总建筑面积约 600 万 m²。它们主要分布于上海、北京和深圳，其中上海最多。1998 年竣工的上海金茂大厦（图 1-3），地上 88 层，高 421m，目前高度为中国大陆之最，亚洲第三，世界第四（表 1-1）；上海环球金融中心，地面以上 95 层，高 492m，已于 1997 年动工，由于多种原因停工后，现已开始复建；据有关资料介绍，

上海还将拟建 1000m 高楼；在深圳，继深圳发展中心（地上 48 层，高 165m）、地王大厦（地上 68 层，高 325m）、赛格广场（地上 70 层，高 278.6m）等一批高层钢结构建筑相继建成后，拟建造两幢外形相同，每幢 128 层，高 488m 的中华大厦；北京于 20 世纪 80 年代建成京广中心（57 层，高 208m）、京城大厦（52 层，高 182m）等高层钢结构建筑之后，亦将动工兴建 88 层的大楼；重庆市计划兴建的重庆综合大厦，114 层，高 457m；在香港，继中国银行大厦（地面以上 72 层，高 368m）和香港汇丰银行大厦（地面以上 48 层，高 178.8m），建成之后，于 1992 年又建成了中心广场（地面以上 78 层，高 374m）。中国银行大厦和香港汇丰银行大厦两栋建筑最具特色，他们是建筑适应性和高效结构性能有机结合的典范。中国银行大厦目前位于世界十大高楼之列（表 1-1）；在台湾，85 层的 T&C 大厦，高 348m；台北 101 大厦，地面以上 101 层，高 508m，目前为世界第一高楼（表 1-1 和图 1-5）。该两栋建筑为台湾的高层钢结构代表性建筑。

日本的高层建筑始于钢结构，日本的高层钢结构建筑始于 20 世纪 60 年代。在日本，超过 100m 的建筑几乎全部采用钢结构，近年新建 200m 以上的建筑全为钢结构。位于日本东京的 NEC 办公大楼（地面以上 43 层，地面以下 4 层，屋顶间 1 层，高 180m）和日本神户 TC 办公大楼（地面以下 3 层，地面以上 25 层，高 103m）以及日本东京第一市政厅办公大楼（地面以上 48 层，高 243m）等一批高层钢结构建筑，采用了能满足特殊功能和综合功能要求的具有良好的建筑适应性和潜在的高效结构性能的高层建筑结构新体系——巨型钢框架结构体系。日本横滨标志大厦（Landmark Tower），地面以上 73 层，高 296m，是当前日本最高的建筑。在亚洲国家中，高层钢结构建筑发展较快、数量较多的是日本。

马来西亚于 1997 年在吉隆坡建成双塔大厦（Petronas Tower），88 层，高 452m，目前为世界第二高楼（表 1-1 和图 1-6），于 1998 年建成 77 层，高 382m 的瑞凯特广场（Plaza Rakyat）大楼，该三座塔楼均位于世界十大高楼之列（表 1-1）。此外，在新加坡、汉城等地也于 20 世纪 80 年代中期就已建成高度超 200m 的钢结构建筑。

自 20 世纪 70 年代以来，亚洲陆续建造了一些高度超过 200m、300m，甚至 400m 的超高层建筑，并正在向更高的高度发展。如日本拟建的“动力智能大厦-200”，地上 200 层，高 800m（图 1-4）；空中城市大厦-1000，地面直径 400m，高 1000m（图 1-13），地基深达 60 m，可供 10 万人居住，提供 3.5 万个工作职位。日本拟建的部分超高层建筑见表 1-2。

表 1-1 目前（到 2004 年）世界 10 幢最高的高层建筑

序号	建 筑 物	城市	建成年份	层数	高度/m	材料	用途
1	101 大厦	台北	2004	101	508	钢/混凝土	多功能
2	双塔大厦	吉隆坡	1997	88	452	钢/混凝土	多功能
3	西尔斯大厦	芝加哥	1974	110	443	钢	办公楼
4	金茂大厦	上海	1998	88	421	钢/混凝土	多功能
5	世界贸易中心北楼	纽约	1972	110	417	钢	办公楼
6	世界贸易中心南楼	纽约	1973	110	415	钢	办公楼
7	瑞凯特广场	吉隆坡	1998	77	382	钢/混凝土	多功能
8	帝国大厦	纽约	1931	102	381	钢	办公楼
9	中心广场	香港	1992	78	374	钢/混凝土	办公楼
10	中国银行大厦	香港	1988	72	368	钢/混凝土	办公楼

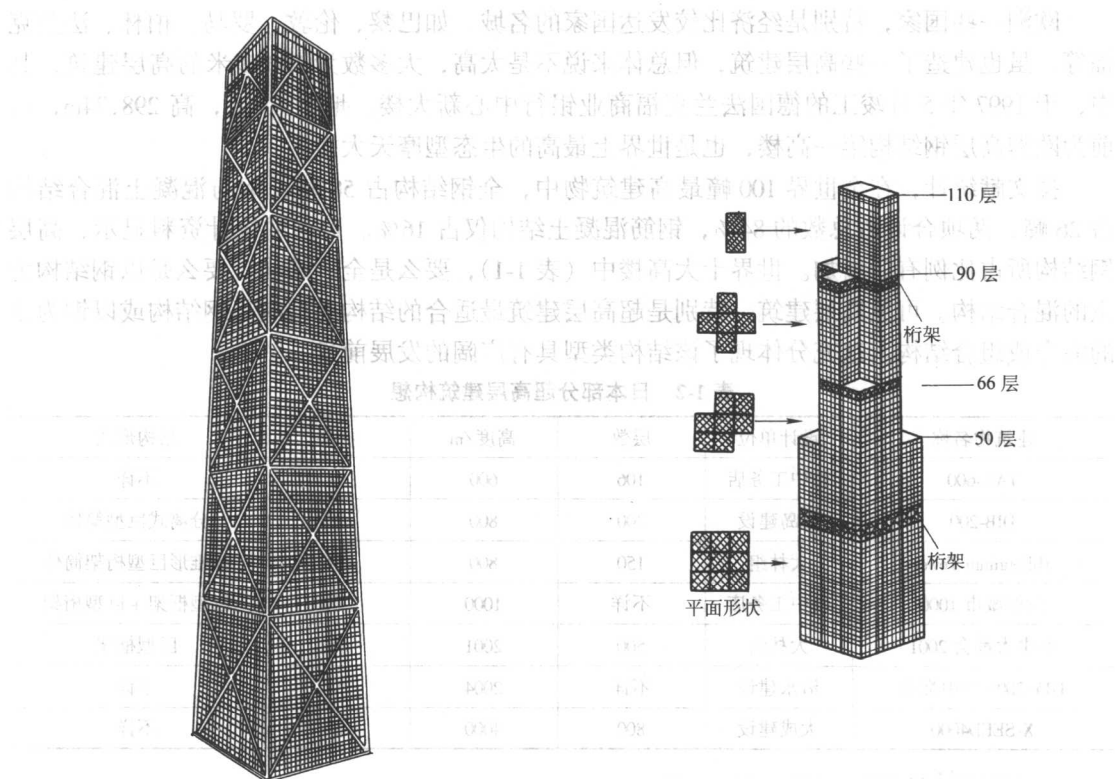


图 1-1 美国汉考克大厦

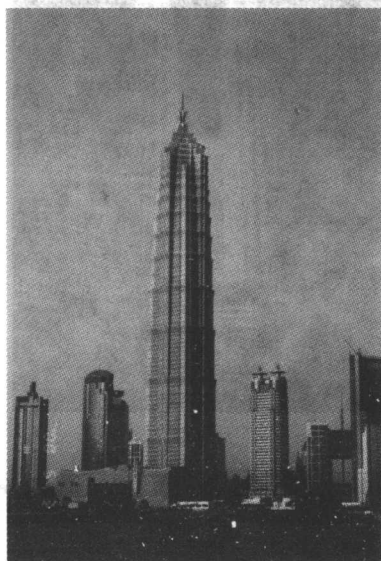


图 1-2 美国西尔斯大厦

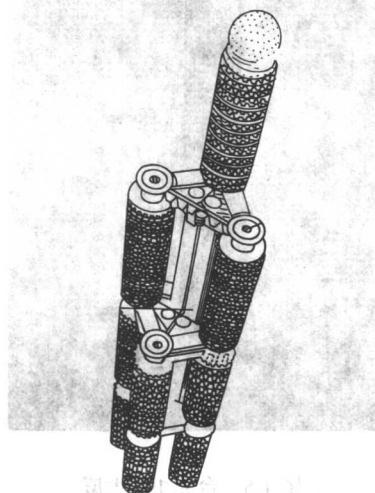


图 1-3 中国上海金茂大厦

点群长新馆群能网能能能 1.1

图 1-4 日本“动力智能大厦-200”

素因宝天代能能高平本 1

欧洲一些国家，特别是经济比较发达国家的名城，如巴黎、伦敦、罗马、柏林、法兰克福等，虽也建造了一些高层建筑，但总体来说不是太高，大多数为 100 多米的高层建筑，其中，于 1997 年 5 月竣工的德国法兰克福商业银行中心新大楼，地上 63 层，高 298.74m，目前为欧洲高层钢结构第一高楼，也是世界上最高的生态型摩天大楼。

据文献统计，在全世界 100 幢最高建筑物中，全钢结构占 58 幢，钢与混凝土混合结构占 26 幢，两项合计占总数的 84%，钢筋混凝土结构仅占 16%。目前的统计资料显示，高层钢结构所占比例有所增加。世界十大高楼中（表 1-1），要么是全钢结构，要么是以钢结构为主的混合结构。可见高层建筑，特别是超高层建筑最适合的结构类型应是钢结构或以钢为主的混合或组合结构。这充分体现了该结构类型具有广阔的发展前景。

表 1-2 日本部分超高层建筑构想

建筑物名称	设计单位	层数	高度/m	材料	结构形式
TAK-600	竹中工务店	106	600	钢	不详
DIB-200	鹿岛建设	200	800	钢	分离式巨型筒体
Millennium Tower	大林组	150	800	钢	圆锥形巨型桁架筒体
空中城市 1000	竹中工务店	不详	1000	钢	巨型框架 + 巨型桁架
空中大都会 2001	大林组	500	2001	钢	巨型框架
TRY-2004 空中都市	清水建设	不详	2004	钢	不详
X-SEED4000	大成建设	800	4000	钢	不详

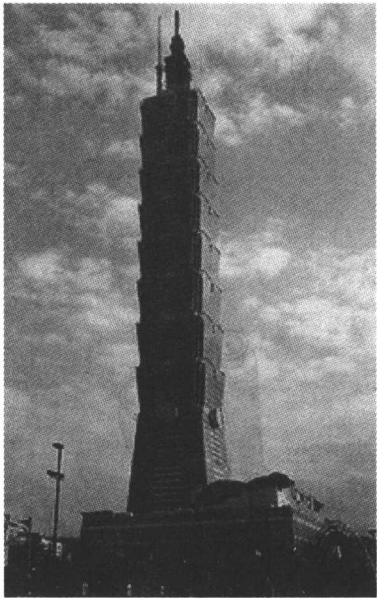


图 1-5 台北 101 大厦

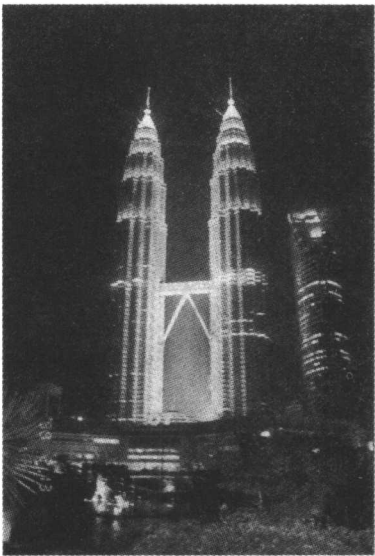


图 1-6 吉隆坡双塔大厦（Petronas Tower）

1.2 高层建筑钢结构的设计特点

1. 水平荷载成为决定因素

在高度较小的建筑中，往往是竖向荷载（楼面、屋面活载、结构自重等）控制着结构设

计,而在高层建筑中,尽管竖向荷载仍对结构设计产生着重要影响,但水平荷载却起着决定性的因素,往往成为高层建筑结构设计的控制因素。这是因为:一方面结构自重和楼面使用荷载在竖向构件中所引起的轴力和弯矩的数值,仅与楼房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轴力,是与楼房高度的二次方成正比;另一方面,对某一高度的楼房来说,竖向荷载大体上是定值,而作为水平荷载的风荷载和地震作用,其数值随结构动力特性的不同而有较大幅度的变化,从而使合理确定水平荷载比确定竖向荷载困难。

如图 1-7 所示某一高层建筑结构的计算简图。在各种荷载作用下的内力与房屋高度的关系为:

竖向荷载作用下的最大轴力:

$$N = wH \quad (1-1)$$

水平均布荷载作用下的最大弯矩:

$$M = \frac{1}{2} qH^2 \quad (1-2)$$

水平倒三角形分布荷载作用下的最大弯矩:

$$M = \frac{1}{3} qH^2 \quad (1-3)$$

式中 q 、 w 为作用于楼房每 m 高度上的水平荷载与竖向荷载。

图 1-8 为风荷载作用下的 5 跨钢框架各分项用钢量随房屋层数而变化的示意图,从中可见水平荷载的影响远远大于竖向荷载的影响,而且随着房屋层数的增加而急剧增加。

2. 结构侧移可能成为控制指标

由图 1-7 所示的计算简图确定的结构顶点侧移为:

$$\text{水平均布荷载作用时} \quad \Delta = \frac{qH^4}{8EI} \quad (1-4)$$

$$\text{水平倒三角形分布荷载作用时} \quad \Delta = \frac{11qH^4}{120EI} \quad (1-5)$$

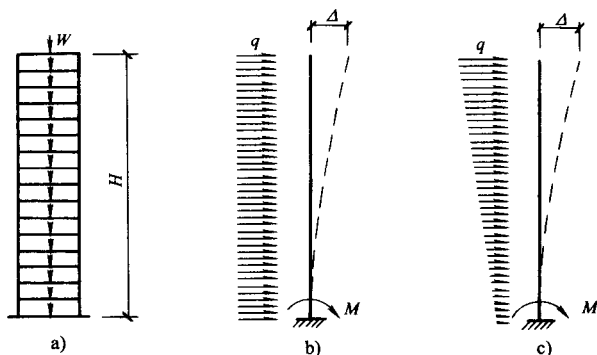


图 1-7 荷载内力与侧移

a) 重力荷载 b) 水平均布荷载 c) 水平倒三角形荷载

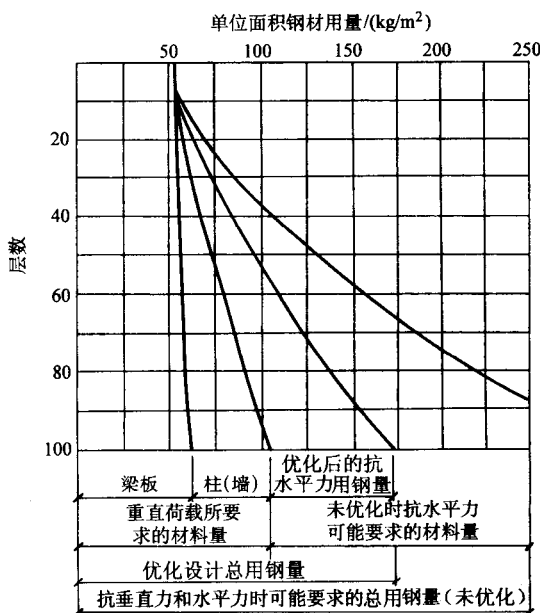


图 1-8 高层建筑结构用钢量随层数的变化

从上式可以看出, 结构顶点侧移 Δ 与结构总高度 H 的四次方成正比。这说明, 随着房屋高度的增加, 水平荷载下结构的侧向变形速率增大。因此, 与较低房屋相比, 结构侧移已上升为高层建筑结构设计的关键因素, 可能成为结构设计的控制指标。

通过上述分析可知, 设计高层建筑结构时, 不仅要求结构具有足够的强度, 还要求有足够的刚度, 使结构在水平荷载作用下产生的侧移被控制在某一限值之内。这是因为高层建筑的使用功能和安全, 与结构侧移的大小密切相关, 即

(1) 过大侧移难以保证舒适度要求, 会影响楼房内使用人员的正常工作与生活。

(2) 过大的侧向变形会使隔墙、围护墙以及高级饰面材料出现裂缝或损坏, 此外, 也会使电梯因轨道变形而不能正常运行等, 无法保证房屋的正常使用。

(3) 过大的侧向变形会使结构产生过大的二阶效应——引起过大的附加内力, 以致有时使总内力超过结构的承载能力, 或者使结构的变形成为不稳定, 甚至引起倒塌, 结构的安全受到威胁。因此, 结构的侧移控制成为一个保证结构合理性的综合性指标。

3. 轴向变形不容忽视

在高层钢结构中, 由于柱中轴力大 (特别是底层柱), 因而轴向变形大, 同时各柱轴向变形差异随房屋高度的增加而加大。框架中柱的轴压应力往往大于边柱的轴压应力, 中柱的轴向压缩变形大于边柱的轴向压缩变形。当房屋很高时, 这种轴向压缩差异将会达到较大的数值, 其后果相当于连续梁的中间支座产生沉陷, 从而使连续梁中间支座处的负弯矩值减小, 跨中正弯矩值和端支座负弯矩值增大 (图 1-9)。因此, 若忽略柱中轴向变形, 将会使结构内力和位移的分析结果产生一定的误差。在图 1-9 中, 图 a 表示未考虑各柱压缩差异时梁的弯矩分布, 图 b 表示各柱压缩差异后梁的实际弯矩分布。在较低的房屋中, 因为柱的总高度较小, 此种效应不显著, 所以可不考虑。

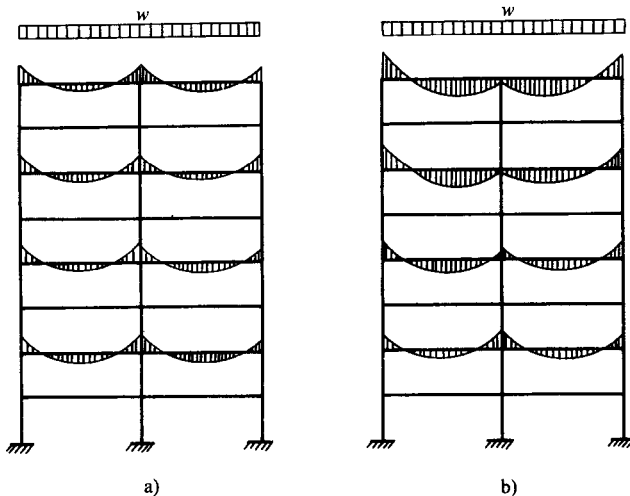


图 1-9 框架中连续梁的弯矩分布

a) 未考虑柱的差异压缩 b) 各柱差异压缩后的实际情况

另一方面, 在高层建筑中, 特别是在超高层建筑中, 柱的负载很大, 其总高度又很大, 整根

柱在重力荷载下的轴向变形有时可能达到数百毫米, 对建筑物的楼面标高产生不可忽视的影响。因此, 在构件下料时, 应根据轴向变形计算值, 对下料长度进行调整。

美国休斯顿的 75 层得克萨斯商业大厦, 采用型钢混凝土墙和钢柱组成的混合结构体系。据计算, 中心钢柱由于负荷面积大, 截面尺寸小, 重力荷载下的轴向压缩变形, 要比型钢混凝土剪力墙多 260mm, 这就要求该钢柱在下料时总共要加长 260mm, 并需逐层加以调整。

4. 梁柱节点域的剪切变形影响不能忽视

在结构设计中, 钢框架的梁、柱大都采用工字形或箱形截面, 若假设梁、柱端弯矩完

全由梁、柱翼缘板承担,并忽略轴力对节点域变形的影响,则节点域可视为处于纯剪切状态工作,加之节点域板件一般较薄,剪切变形较大,因此,对结构内力和侧移的影响不能忽视。

文献[43]对同一钢框架结构,采用有限元法分析后得出:考虑梁、柱节点域剪切变形后,其梁、柱弯矩均有所增加,侧向水平位移增加显著。与不考虑其剪切变形的情况相比,顶层绝对侧移量增大8.8%,若以层间侧移而论,第一层增大1.2%,第二层增大9.7%,顶层则可增大达25.7%左右。可见,在进行高层钢框架的内力和侧移计算时,不能忽视其梁、柱节点域的剪切变形影响。

5. 结构延性是重要设计指标

相对于较低楼房而言,高层建筑更柔一些,在地震作用下的变形更大一些。为了使结构在进入塑性变形阶段后仍具有较强的变形能力,避免倒塌,除选用延性较好的材料外,特别需要在构造上采取恰当的措施,来保证结构具有足够的延性。

6. 尽量选用空间构件

为使高层建筑适应各种使用情况的不同要求,在实际工作中,尽管出现多种结构体系,然而,组成这些结构体系的构件可归纳为线形构件、平面构件和空间构件三类基本形式,如图1-10。

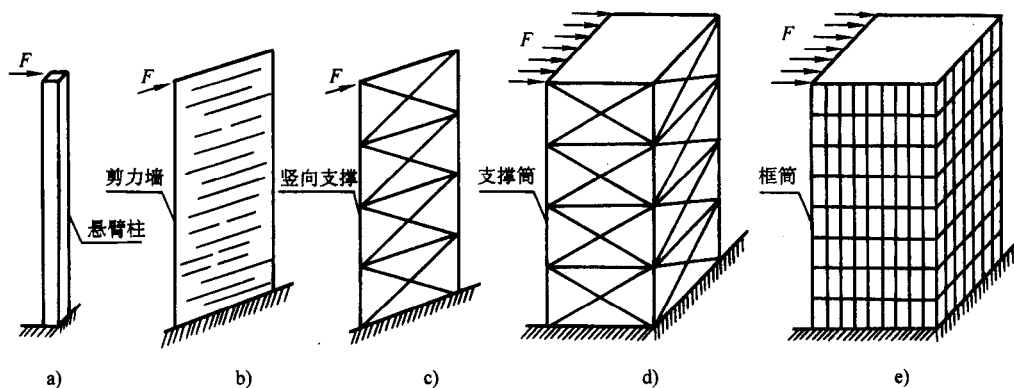


图 1-10 抗侧力构件的基本形式

a) 线形构件 b) 实体平面构件 c) 杆系平面构件 d) 空间构件(一) e) 空间构件(二)

(1) 线形构件 具有较大长细比的细长构件,称为线形构件或线构件。当它不是作为一个独立构件承受荷载,而是作为某种构件(如框架、桁架或支撑)中的一个组成部分时,则称为杆件。当它作为框架中的柱或梁使用时,主要承受弯矩、剪力和压力,其变形中的最主要成分是垂直于杆轴方向的弯曲变形。当它作为桁架或支撑中的弦杆和腹杆使用时,主要是承受轴向压力或拉力,轴向压缩或轴向拉伸是其变形的成分。

线构件是组成框架-支撑体系、框架-剪力墙体系的基本构件。

(2) 平面构件 具有较大横截面宽厚比的片状构件,称为平面构件或面构件。它作为楼板使用时,承受平面外弯矩,垂直于其平面的挠度是其变形的特点。它作为墙体使用时,承受着沿其平面作用的水平剪力和弯矩,也承担一定的竖向压力;弯曲变形和剪切变形是墙体侧移的主要成分。面构件出平面方向的刚度和承载力很小,结构分析中常略去不计。

面构件是组成框架-剪力墙体系、框架-核心筒体系的基本构件。

(3) 空间构件 由线构件和(或)面构件组成的具有较大横截面尺寸和较小壁厚的组合构件,称为空间构件或立体构件。框筒就是由梁和柱等线构件组成的空间构件;框架-核心筒体系中的核心筒常由面构件组成空间构件;巨型结构体系中的巨型柱常由线构件或线构件与面构件组合成空间构件,其巨型梁通常由线构件组成。在高层建筑结构中,空间构件作为竖向筒体或巨型柱使用时,主要承受倾覆力矩、水平剪力和扭转力矩。与线构件和面构件相比,它具有较大的抗扭刚度和极大的抗推刚度,在水平荷载下的侧移较小,因而在高层或超高层建筑中,宜尽量选用空间构件。

空间构件是框筒体系、筒中筒体系、束筒体系、支撑框筒体系、大型支撑筒体系及巨型结构体系中的基本构件。

7. 防火设计必不可少

钢材虽为非燃烧材料,但它耐热不耐火,在火灾高温下,结构钢的强度和刚度都将迅速降低,而火灾升温又十分迅速,故无防火保护措施钢构件在火灾中很容易破坏。高层建筑钢结构既有一般高层建筑的消防特点,又有钢结构在高温条件下的特有规律(主要是强度降低和蠕变),因此,高层建筑钢结构必须进行恰当的防火设计,以减少或避免财产损失和人员伤亡。

8. 防锈处理必须到位

由于钢材耐腐蚀性差,钢结构构件易生锈腐蚀,影响结构使用寿命,所以高层建筑钢结构中的所有钢结构构件均应进行合理的防锈处理,以保证结构的长期使用。

9. 避雷系统完整可靠

高层建筑上遭受雷击的机会比一般建筑要多,一年中的雷击次数与建筑物的高度有关,建筑物越高,受到的雷击次数越多。在雷击放电时便有可能引起火灾或产生其他电击、机械性的事故。因此,为了保证高层建筑的防雷安全,高层建筑要设置可靠的避雷系统。

10. 结构动力响应成为关键因素

低层房屋一般采用简单方法计及结构动力响应对荷载的影响后,设计主要按静力问题处理,而高层建筑风振、地震动响应成为设计考虑的关键因素。

由于风和地震作用的随机性和复杂性,高层建筑风振和地震响应分析至今仍处于深入研究之中。高层建筑动力响应是由结构特征、环境作用等诸因素综合影响决定的,是结构整体性能的体现,同时也表明,要获得满意的结构动力响应特征,必须综合考虑结构系统,这是高层结构动力响应分析设计难度较大的另一方面。

11. 减轻结构自重具有重要意义

高层建筑结构设计要求尽可能采用轻质、高强且性能良好的材料,一方面减小重力荷载,进一步减小基础压力和造价;另一方面因结构所受动力荷载大小直接与质量有关,减小质量有助于减小结构动力荷载。

12. 结构体系合理与否取决于能否有效提供抗侧能力

在满足建筑造型和空间设计的前提下,结构体系和结构方案主要由如何有效形成抗侧力体系确定。结构体系的经济性也主要取决于抗侧力体系的有效性。正因为此,高层建筑随高度不同而结构体系有较大变化。图 1-11 为常用结构体系适用最多层数示意图。合理确定抗侧力结构成为高层建筑结构设计成败的关键。

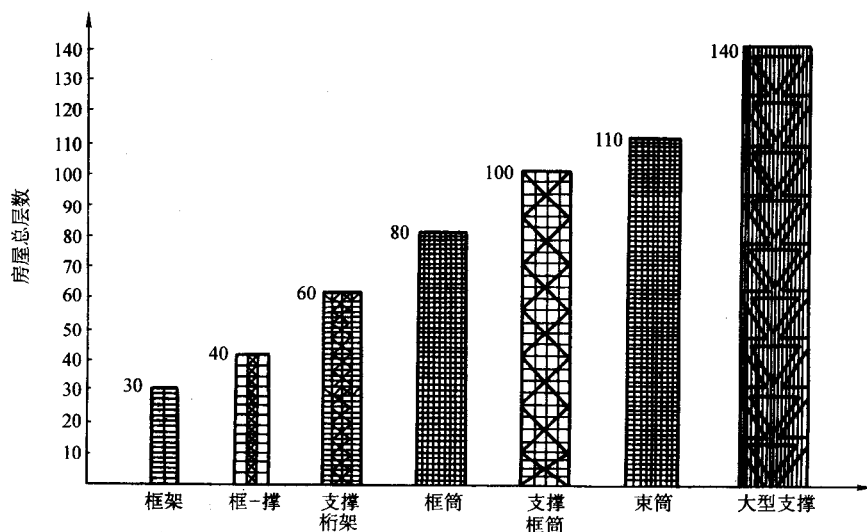


图 1-11 钢结构高层建筑结构体系

1.3 高层建筑钢结构的发展趋势

随着城市建设和社会发展，高层建筑必将会高速发展。在确保高层建筑具有足够可靠度的前提下，为了进一步节约材料和降低造价，结构构件和材料正在不断更新，设计概念也在不断发展。高层建筑钢结构的发展趋势主要表现在下列方面。

1. 构件立体化

高层建筑在水平荷载作用下，主要靠竖向构件提供抗推刚度和强度来维持稳定。在各类竖向构件中，竖向线性构件（如柱）的抗推刚度较小；竖向平面构件（剪力墙或平面框架）虽然在其平面内具有较大的刚度，然而其平面外的刚度依然小到可略去不计；由墙或密柱深梁组成的筒体或巨型柱，尽管其基本元件依旧是线形构件或平面构件，但它已转变成具有不同力学特性的立体构件，在任何方向均具有较大的抗推刚度及抗扭刚度，能抗御任何方向较大的倾覆力矩及扭转力矩，从而可充分发挥材料作用。

2. 巨柱周边化

巨型柱属立体构件，本身具有较大的抗推刚度和抗扭刚度。若将巨柱沿建筑平面的周边布置，则该结构具有特大的抗推刚度和抗扭刚度，能抗御特大的水平荷载与扭转荷载。因此，采用该种结构布置方案形成的结构主体是改善结构体系抗侧性能的有效途径，如日本拟建的“动力智能大厦-200”（图 1-4）等建筑。

3. 支撑大型化

框筒是用于高层建筑的一种高效抗侧力体系，然而，它固有的剪力滞后效应（在水平荷载作用下，由于框架横梁的剪切变形，使框架柱的轴力呈非线性分布的现象），削弱了它的抗推刚度和水平承载力。特别是当房屋平面尺寸较大，或因建筑功能需要而加大柱距时，剪力滞后效应就更加严重。为使框筒能充分发挥潜力并有效地用于更高的房屋建筑之中，在框筒中增设大型支撑，已成为一种强化框筒的有力措施。如美国芝加哥的约翰·汉考克大厦（图 1-1）和香港中国银行大厦（图 1-12）等典型工程实例。

4. 体系巨型化

利用巨型柱、巨型梁、大型支撑构成巨型主体结构, 不仅可最为充分有效地提供抗侧能力, 而且可以满足越来越复杂多变的建筑要求, 获得较好的综合效益。如香港中国银行大厦(图 1-12)、日本拟建的“动力智能大厦-200”(图 1-4)和日本“空中城市大厦-1000”(图 1-13、图 1-14)等典型工程实例。

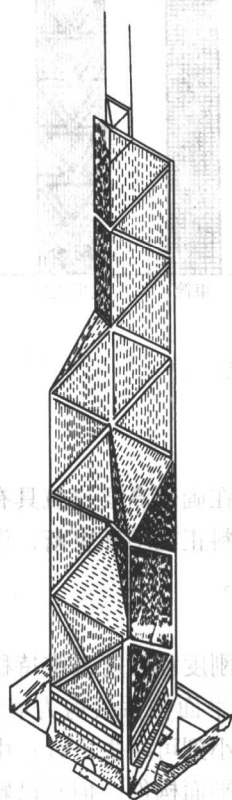


图 1-12 香港中国银行大楼

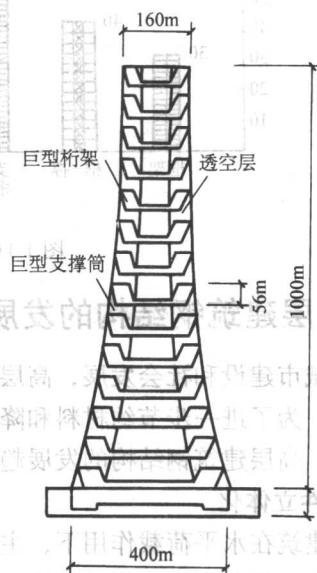


图 1-13 日本“空中城市大厦-1000”的结构剖面

5. 体形圆锥化

为了减小风载体形系数和增大抗推抗扭刚度, 现代高层特别是超高层建筑体形呈圆锥或截头圆锥化趋势。如日本东京拟建的米兰留塔楼 (Millennium Tower), 高 800m, 采用圆锥状体形; 日本“空中城市大厦-1000”为截头圆锥体(图 1-13、图 1-14)。

6. 材料高强轻型化

随着建筑高度的增加, 结构自重增大, 从而引起地震作用增大, 以致结构面积占建筑使用面积的比例和结构对地基的压力增大。因此为了尽量减小或消除上述的一系列不利影响, 研究和选用轻质高强材料(如选用压型钢板或铝板作围护外墙或隔墙等)是高层建筑钢结构的又一发展趋势。

7. 动力反应智能化

对于特高特大型或复杂体型的高层或超高层建筑, 为了减小风振或地震反应, 在结构上安装传感器、质量驱动装置、可调刚度体系和计算机等所组成的人工智能化反应控制系统,

来控制整个结构的地震反应,使它处于安全界限以内。这是高层建筑钢结构在结构减震控制方面的发展趋势。如日本拟建的动力智能大厦(DIB-200),地下7层,地上200层,高800m,建筑总面积150万 m^2 。在安装了人工智能化动力反应控制系统后,其结构在地震作用下的侧移削减40%左右^[19]。

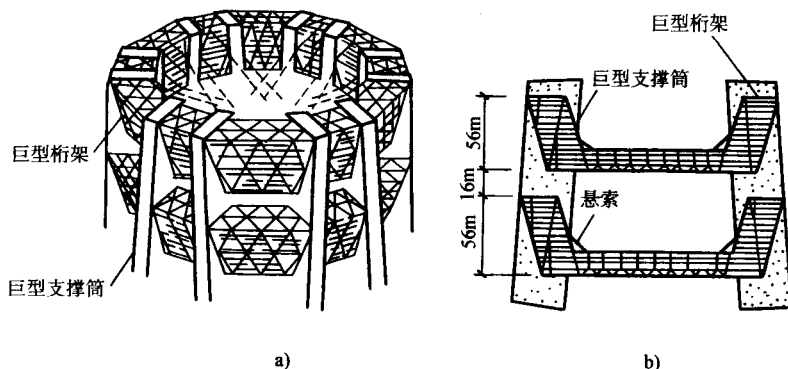


图 1-14 空中城市大厦-1000

a) 巨型框架体系单元体 b) 悬挂楼盖系统

8. 结构分析设计高度集成化

近年来,随着计算机技术的飞速发展和结构分析理论的不断深入,为研究和发展能够集稳定理论与塑性理论之大成的高等分析设计方法(Advanced Analysis Design Method),提供了现实条件和理论基础。该法主张在充分考虑影响结构性能的各种因素,特别是非线性因素情况下,能够准确分析刚性或半刚性连接结构中各构件塑性渐变的全过程,能够准确预测结构及其组件的破坏模式与极限荷载,彻底免除冗长繁琐的构件验算过程,使结构可靠度更为统一。因此,代表最新技术的高等分析将成为21世纪结构工程师的基本设计工具,基于可靠性的结构集成设计(Reliability-based Integrated Design, RID)方法将是高层钢结构设计方法发展的必然趋势。

复习思考题

- 1-1 在高层钢结构设计中,为什么说水平荷载成为决定因素,结构侧移成为控制指标?
- 1-2 在高层钢结构设计中,为什么需要考虑柱的轴向变形和梁柱节点域的剪切变形?
- 1-3 试述线性构件、平面构件和空间构件的特点与区别。