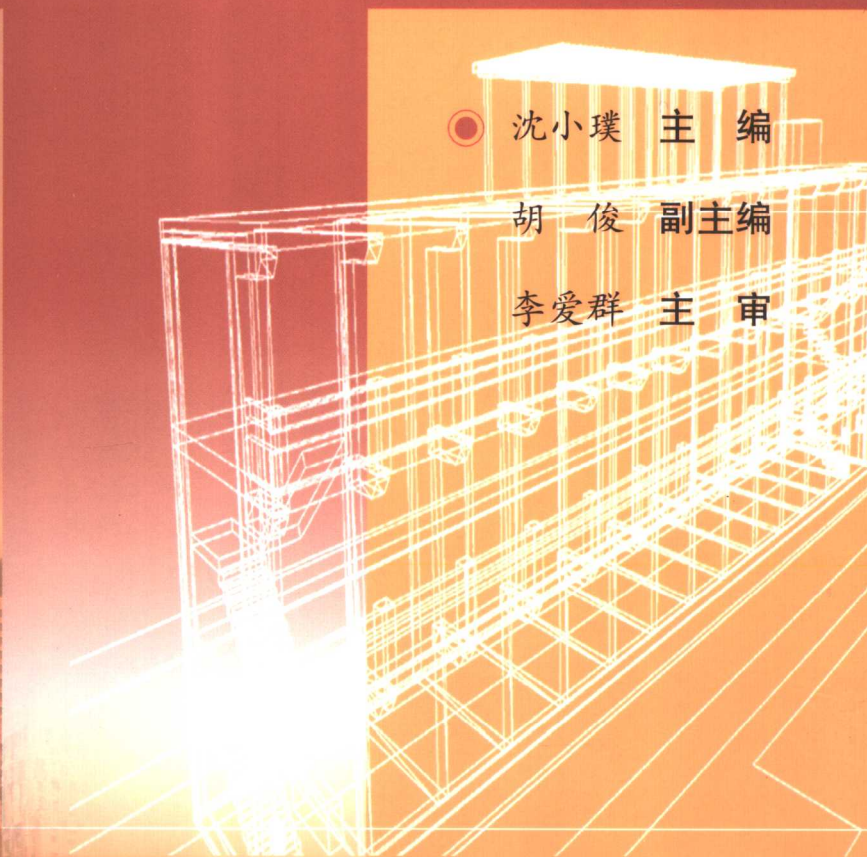


GAOCENG JIANZHU JIEGOU SHEJI

高等学校省级规划教材
——土木工程专业系列教材

高层建筑结构设计

GAOCENG JIANZHU JIEGOU SHEJI



● 沈小璞 主 编

胡 俊 副主编

李爱群 主 审

合肥工业大学出版社

高等学校省级规划教材

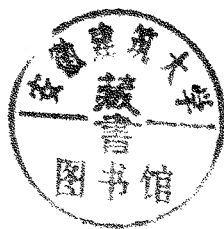
——土木工程专业系列教材

高层建筑结构设计

沈小璞 主 编

胡 俊 副主编

李爱群 主 审



合肥工业大学出版社

付印

2011-11

设计室并建出社事·部何

内 容 提 要

《高层建筑结构设计》是高等学校土木工程专业的一门主要专业课。全书共分 10 章,其主要内容有:高层建筑结构的发展、结构类型与分类,高层建筑结构体系与结构布置设计原则,高层建筑结构荷载和地震作用,高层建筑结构计算分析,框架结构设计,剪力墙结构设计,框架—剪力墙结构设计,筒体结构设计,高层建筑结构基础设计,高层建筑结构计算程序介绍与计算实例。全书深入浅出,在强调基本概念和基本理论的基础上,力求理论联系实际。为帮助读者学习,采用了很多图表和例题,并附有思考题与练习题。

本书可以作为土木工程专业全日制本科生或土建类成人教育的教材,也可供土木工程专业工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构设计 / 沈小璞主编. —合肥:合肥工业大学出版社, 2006. 12

ISBN 7-81093-526-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 154634 号

高层建筑结构设计

主 编: 沈小璞 责任编辑: 陈淮民 特约编辑: 张镭

出 版 合肥工业大学出版社

地 址 合肥市屯溪路 193 号

邮 编 230009

电 话 总编室: 0551-2903038

发行部: 0551-2903198

网 址 www.hfutpress.com.cn

E-mail Press@hfutpress.com.cn

版 次 2006 年 12 月第 1 版

印 次 2006 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787×1092 1/16

印 张 18

字 数 442 千字

发 行 全国新华书店

印 刷 安徽江淮印务有限责任公司

ISBN 7-81093-526-7/TU·25

定价: 28.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题, 请与出版社发行部联系调换

安徽省高校土木工程系列规划教材

编 委 会

主 任：千 洪

副主任：王建国 汪仁和 沈小璞

委 员：（按姓氏笔画排列）

丁克伟	马芹永	戈海玉	卢 平
刘安中	孙 强	吴 约	完海鹰
邵 艳	柳炳康	夏 勇	殷和平
高荣誉	黄 伟		

前 言

随着我国经济的快速发展,高层建筑不断涌现。高层建筑在城市建设进程中充分体现了现代建筑的特征和科技的力量。高层建筑结构的分析计算已基本告别了传统的手工计算而采用计算机程序计算,大都采用三维空间结构分析计算程序。尽管如此,作为工程技术人员,深入掌握和理解高层建筑结构设计的基本概念和基本理论,对于高层建筑结构的设计仍然是至关重要的。为适应宽口径、厚基础、多方向、重应用的土木工程专业人才培养模式要求的需要,我们组织编写了这本教材。

《高层建筑结构设计》是高等学校土木工程专业的主要专业课之一。编写本书时,一是依照《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)等有关国家规范或规程进行编写;二是符合土木工程专业本科培养方案中《高层建筑结构设计》的基本要求;三是结合作者多年的教学、科研和工程实践经验,并吸收了国内外的一些研究成果。

本书是高等学校省级规划教材——土木工程专业系列教材之一。其主要内容有:高层建筑结构的发展、结构类型与分类,高层建筑结构体系与结构布置设计原则,高层建筑结构荷载和地震作用,高层建筑结构计算分析,框架结构设计,剪力墙结构设计,框架—剪力墙结构设计,筒体结构设计,高层建筑结构基础设计,高层建筑结构计算程序介绍与计算实例。全书内容深入浅出,在强调基本概念和基本理论的基础上,力求理论联系实际。为帮助读者学习,采用了很多图表和例题作业,并且各章后都附有思考题。

本书由安徽建筑工业学院沈小璞担任主编,安徽建筑工业学院胡俊担任副主编。全书共分10章,其中:第1章由沈小璞编写,第2章由合肥学院张大庆编写,第3、5、6章由胡俊编写,第4、8章由安徽建筑工业学院方高倪编写,第7章由安徽农业大学杨智良编写,第9、10章由安徽建筑工业学院刘艳编写。全书由沈小璞教授统稿,由东南大学李爱群教授主审。

本书可以作为土木工程专业全日制本科生或土建类成人教育的教材,也可供土木工程专业其他工程技术人员作为参考用书。

本书在编写过程中得到安徽建筑工业学院领导和建筑工程系领导、同事的大力支持,也得到其他参编学校的帮助和支持,在此深表谢意。

由于编者水平有限及编写时间仓促,书中不妥和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2006年9月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 高层建筑的发展概况	1
1.2 高层建筑设计特点	6
1.3 高层建筑结构发展趋势	9
第 2 章 高层建筑结构体系与结构设计布置原则	14
2.1 结构体系	14
2.2 结构总体布置原则	27
2.3 结构设计的基本要求	35
第 3 章 高层建筑结构荷载和地震作用	42
3.1 竖向荷载计算	42
3.2 风荷载计算	45
3.3 地震作用	53
3.4 荷载效应和地震作用效应组合	65
第 4 章 高层建筑结构计算分析	70
4.1 计算分析方法和模型	70
4.2 计算参数的选取	71
4.3 结构简化计算原则与计算简图处理	72
4.4 结构整体稳定与倾覆	75
4.5 薄弱层弹塑性变形计算	77
4.6 扭转效应的简化计算	80
第 5 章 框架结构设计	86
5.1 概述	86
5.2 框架结构计算简图的确定	87
5.3 框架结构的内力与位移计算	90
5.4 框架结构的最不利内力及内力组合	108
5.5 框架抗震设计的延性要求	110
5.6 框架梁的设计	113
5.7 框架柱的设计	117
5.8 框架节点的设计	124
5.9 高层建筑框架结构设计实例	131

第 6 章 剪力墙结构设计	146
6.1 剪力墙结构的工作特点	146
6.2 整体墙结构的内力与位移计算	149
6.3 剪力墙结构的分类	162
6.4 剪力墙的截面设计及构造要求	164
6.5 高层建筑剪力墙结构设计实例	172
第 7 章 框架—剪力墙结构设计	176
7.1 框架—剪力墙结构协同工作的基本原理	176
7.2 框架—剪力墙结构的抗侧刚度	179
7.3 框架—剪力墙结构的内力与位移计算	183
7.4 刚度特征值 λ 对框剪结构受力、位移特性的影响	195
7.5 框架—剪力墙结构的截面设计及构造要求	196
7.6 高层框架—剪力墙结构设计实例	198
第 8 章 筒体结构设计	209
8.1 概述	209
8.2 筒体结构的近似计算方法	211
8.3 筒体结构的截面设计及构造要求	215
8.4 筒体结构在工程中的应用	217
第 9 章 高层建筑结构基础设计	222
9.1 概述	222
9.2 高层建筑的基础选型和埋置深度	222
9.3 地基承载力	225
9.4 筏形基础设计	227
9.5 箱形基础设计	230
9.6 桩基础设计	236
第 10 章 高层建筑结构计算程序介绍与计算实例	243
10.1 概述	243
10.2 高层建筑结构计算程序编制基本原理及方法	243
10.3 结构分析通用程序	246
10.4 高层建筑结构专用程序	248
10.5 典型高层建筑结构计算实例	251
附录	261
参考文献	279

第 1 章 概 论

1.1 高层建筑的发展概况

高层建筑是随着国家经济发展、城市人口的增多、建设可用地的减少、地价的不断高涨、科学技术的进步、钢铁和水泥的应用、电梯的发明、机械化和电气化在建筑中的应用等诸多因素而得到发展的。高层建筑是近代经济发展和科学技术进步的产物,至今已有 100 余年的历史。今天,高层建筑作为城市经济繁荣、科学发展和社会进步的重要标志,建造业主实力雄厚的象征,受到广泛关注。高层建筑不仅要考虑结构受力,还要考虑建筑功能、文化、社会、经济、设备等因素,使其发挥出最好的经济与社会效益。

1.1.1 国外高层建筑的发展

1.1.1.1 国外高层建筑发展的三个阶段

1. 第一阶段

在 19 世纪中期以前,欧美一般只能建 6 层左右的建筑,其主要原因是当时缺少材料和可靠的垂直运输系统。

2. 第二阶段

从 19 世纪中叶开始到 20 世纪 50 年代初,近 100 年里,在 1855 年发明了电梯系统,1924 年发明了硅酸盐水泥,以及钢铁工业的不断发展,使人们建造更高的建筑成为可能。在美国一些城市出现了 20~30 层的高层建筑。如家庭保险公司大楼(Home Insurance Building),11 层,高 55m,建于 1884~1886 年,采用铸铁框架承重结构,标志着一种区别于传统砌筑结构的新结构体系的诞生。19 世纪末,高层建筑已经发展到了采用钢结构,建筑物的高度越过了 100m 大关。1898 年建成的纽约 Park Row 大厦(30 层,118m)是 19 世纪世界上最高的建筑。世界上最早的钢筋混凝土框架结构高层建筑,是 1903 年在美国辛辛那提建造的因格尔斯大楼,16 层,高 64m。1931 年美国纽约曼哈顿建造了 102 层、高 381m 的著名的帝国大厦(Empire State Building),它保持世界最高建筑的记录达 41 年之久(图 1-1),直到 1972 年才被美国的“世界贸易中心”大楼(World Trade Center Towers)(图 1-2)打破。后者建造在美国纽约,110 层,高 417m,钢结构。

这一时期,虽然高层建筑有了比较大的发展,但受到设计理论和建筑材料的限制,结构材料用量较多、自重较大,且仅限于框架结构,建于非抗震区。

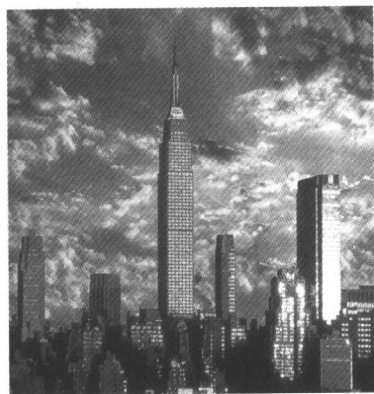


图 1-1 纽约帝国大厦

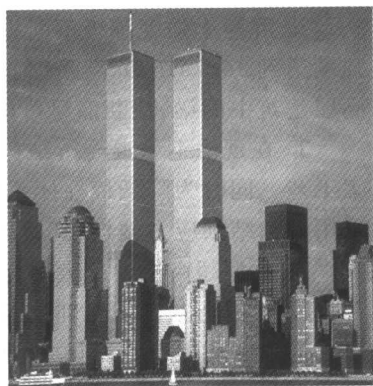


图 1-2 世界贸易中心

3. 第三阶段

由于在轻质高强材料、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,以及计算机在设计中的应用,使得高层建筑飞速发展。从 20 世纪 50 年代开始,特别是 60 年代以后到现在,高层建筑已发展为若干结构体系(如剪力墙结构体系、框—剪结构体系、筒体结构体系等等)。如 1974 年美国在芝加哥又建成了当时世界最高的西尔斯大厦(Sears Tower),110 层,高 443m,钢结构筒体结构体系(图 1-3)。

一般高度的高层建筑(80~150m)更是大量兴建。朝鲜平壤市的柳京饭店,地面以上 101 层,高 305.4m,钢筋混凝土结构;1998 年建成的位于马来西亚首都吉隆坡的佩重纳斯大厦(或称“国营石油双塔”),88 层,高 452m,框架—筒体结构(图 1-4);预期 21 世纪,亚洲将成为新的高层建筑中心。

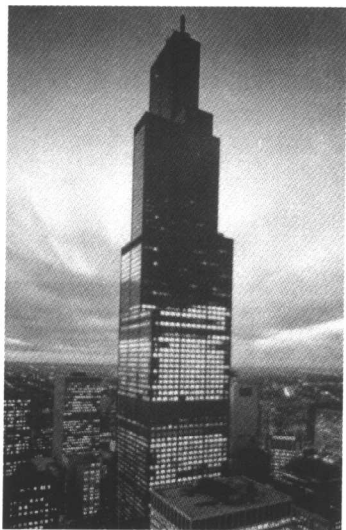


图 1-3 芝加哥西尔斯大厦



图 1-4 吉隆坡佩重纳斯大厦

1.1.1.2 国外高层建筑发展的主要特点

1. 40 层以上的超高层建筑,采用钢结构居多,40 层以下一般都采用现浇钢筋混凝土结构。对 100 幢高层建筑分析表明,钢结构占 66%,型钢混凝土结构(劲性混凝土结构)占 18%,钢筋混凝土结构仅占 16%。

2. 混凝土强度等级不断提高。如美国旧金山于 1983 年建成的一幢高层建筑,柱的混凝土强度达到 45.7MPa。高强钢筋也在建筑工程中广泛应用,尤其是预应力混凝土构件中。这就使高层建筑中的梁、柱断面尽可能的减小,而建筑空间和有效使用面积尽可能增加。

3. 在现浇钢筋混凝土结构高层建筑中,普遍采用了板柱体系,从而简化了大梁和楼板的施工工艺。同时为降低板柱体系的建筑用钢量,提高板、柱的刚度和抗裂性能,加大结构的跨度,常采用无粘结预应力楼板,其效果也非常好。

4. 大型超高层建筑大多是采用筒中筒结构或多筒结构体系。其刚度大、侧移小。

5. 地基与基础的处理技术比较复杂,按补偿式基础设计要求和建筑整体稳定性,一般高层建筑均设多层地下室。如“世界贸易中心”大楼设地下室 7 层,其中 4 层是汽车库,可停放 2000 辆小汽车,其余为商场和地下车站。

1.1.2 国内高层建筑的发展

1.1.2.1 国内高层建筑的发展史

1. 我国古代高层建筑的发展

我国是高层建筑的真正“故乡”和“发源地”，有着悠久的历史。

公元 524 年在河南建造了嵩岳寺塔(15 层,高 50m,砖砌单筒结构);公元 704 年在西安建造了大雁塔(7 层,总高 64m,砖木结构);公元 1055 年在河北定县建造了料敌塔(11 层,高 82m,砖砌双筒结构);公元 1056 年在山西应县建造了木塔(9 层,高 67m,木结构),堪称世界木结构的奇迹。

这些古代高塔建筑不仅在建筑艺术上具有很高水平,而且结构体系、施工技术和施工方法也具有很高水平,并经受了若干次大地震的考验。

2. 我国近代高层建筑的发展

我国近代高层建筑起步较晚,在解放前为数极少。仅在上海、天津、广州等少数城市有高层建筑,其中最高的是上海国际饭店,地下 2 层,地上 22 层,高度为 82.51m,而且是外国人设计的。

解放后,20 世纪 50 年代在北京建造了一些高层建筑,例如和平宾馆地下 1 层,地上 8 层,高度为 27.2m;电报大楼,地上 12 层,高度为 68.35m 等等。

到了 20 世纪 60 年代,高层建筑又有所发展,如 1966 年在广州建成了 18 层的人民大厦,高度为 63m;1968 年建成广州宾馆,总高度为 88m,地下 1 层,地上 27 层,是 60 年代我国最高的一幢高层建筑。

到 20 世纪 70 年代,我国高层建筑发展较快,北京、上海、广州等大城市兴建了一批高层旅馆、公寓、办公建筑。层数最多的是 1977 年建成的广州白云宾馆,地下 1 层,主楼 33 层,高度为 114.05m,是 70 年代我国最高的高层建筑。

进入 20 世纪 80 年代以后,高层建筑发展迅速,已从沿海大城市发展到遍及全国各省市、自治区。其特点是数量大,层数多,造型复杂,分布地区广泛,不断应用新的结构体系。仅 1980~1983 年所建的高层建筑就相当于 1949 年以来 30 多年中所建高层建筑的总和。

20 世纪 90 年代以来,超高层建筑和高层建筑的发展更加迅猛,建筑物层数和高度不断增长,我国已建成了多座 200 米以上的高层建筑。如上海金茂大厦,88 层,结构高度 383m,建筑高度 420.5m,正方形筒体一框架结构(图 1-5);深圳帝王商业大厦,81 层,结构高度 325m,桅杆高度 384m(图 1-6);广州中天广场,80 层,结构高度 320m。

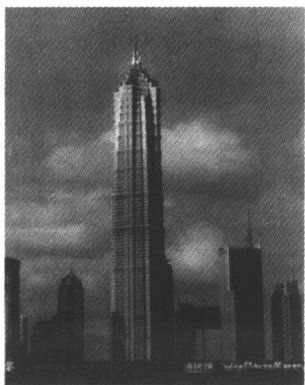


图 1-5 上海金茂大厦



图 1-6 深圳帝王商业大厦

21 世纪是高层建筑进入一个飞速发展的阶段,目前正处于改革开放以来高层建筑发展的第二个高潮,除北京、上海、深圳、广州等沿海城市外,内地(包括西部)其他大、中城市高层建筑也在迅速发展。2004 年在中国台北建成的 101 大厦(101 层,建筑高度 508m),目前为世界第一高楼(图 1-7)。中国内地已建成的最高的建筑为上海金茂大厦,88 层,结构高度为 383m(塔尖 420.5m)。具代表性的是正在兴建的上海环球金融中心,地上 101 层,地下 3 层,高 492m。建成后可能成为中国内地最高的高层建筑(图 1-8)。

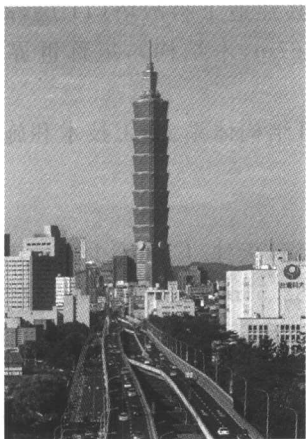


图 1-7 台北 101 大厦



图 1-8 上海环球金融中心

1.1.2.2 国内高层建筑发展的特点

1. 层数增多,高度增高,积极参与国际高层建筑竞争。结构高度不断增加,通过高度(体量)可显示地区或国家的实力,建筑高度成为追求目标。为了争取第一(地区、国内甚至世界),各地高层建筑高度不断增加。

2. 结构体型复杂,平面、立面多样化。为了体现个性、追求新颖,使高层建筑的平面、立面体型均极其特殊,结构的复杂程度和不规则程度为国内外前所未有,为结构设计带来极大挑战。平面形状有:矩形、方形、八角形、多边形、扇形、圆形、菱形、弧形、Y 形、L 形等。立面出现各种类型转换,外挑、内收、大底盘多塔楼、连体建筑、立面开大洞等复杂体型的建筑。

3. 筒体或筒束结构在各类高层建筑中已得到广泛应用。高层建筑结构体系:框架、框架—剪力墙、剪力墙、底层大空间剪力墙、框筒和筒体(包括筒中筒与成束筒)、巨型结构及悬挑结构;超高层建筑结构体系:框架—筒体结构、筒中筒结构、框架—支撑体系。

4. 高层以钢筋混凝土结构为主,但钢—混凝土混合(组合)结构应用较多(尤其是超高层)。

5. 钢结构高层建筑正在崛起。

1.1.3 世界十大高楼名次

按 2004 年统计,世界十大高楼如下:

- (1) 台北 101 大厦,101 层,建筑高度 508m,2004 年,台北(101 TOWER)
- (2) 佩重纳斯大厦,88 层,452m,1998 年,吉隆坡(PERTRONAS TOWER)
- (3) 西尔斯大厦,110 层,443m,1974 年,芝加哥(SEARS TOWER)
- (4) 金茂大厦,88 层,420.5m,1998 年,上海(JIN MAO TOWER)

(5)世界贸易中心,110层,417m & 415m,1972年,纽约(TWO WORLD TRADE CENTER,2001.9.11被毁)

(6)帝国大厦,102层,381m,1931年,纽约(EMPIRE STATE BUILDING)

(7)中环广场,78层,374m,1992年,香港(CENTRAL PLAZA)

(8)中国银行大厦,70层,369m,1989年,香港(BANK OF CHINA TOWER)

(9)T&C大厦,85层,347.5m,1997年,高雄(T&C TOWER)

(10)阿摩柯大楼,80层,346m,1973年,芝加哥(MOCO BUILDING)

以上名次很快会发生变化,正在筹建或建设中的高层建筑有:Chicago World Trade Center(芝加哥)待建 701m、Miglin—Beitler Skyneedle(芝加哥)待建 610m、上海环球金融中心(上海)在建 492m。

1.1.4 高层建筑的结构类型、技术特点及分类

1.1.4.1 高层建筑的结构类型

1. 钢筋混凝土结构

缺点:构件断面大,占用面积大,自重重大。

优点:造价较低,材料来源丰富,可浇注成各种复杂断面形状,可以组成多种结构体系。可节省钢材,承载能力较高,经过合理设计,可获得较好的抗震性能。

2. 钢结构

优点:强度高、韧性大、抗震性能好、易于加工,能缩短现场施工工期,施工方便。

缺点:用钢量大,造价很高,而且耐火性能差。

3. 组合结构

优点: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以及混凝土结构的抗压性能,进一步减轻结构重量,提高结构延性。

常见的组合类型:

(1)用钢材加强钢筋混凝土构件。

(2)钢骨钢筋混凝土构件。

(3)钢管钢筋混凝土构件。

(4)部分抗侧力结构用钢结构,另一部分采用钢筋混凝土结构(或部分采用钢骨钢筋混凝土结构)。

1.1.4.2 高层建筑结构主要技术特点

1. 结构加强层

某一层进行加强以减少核心筒弯矩及侧移。

2. 转换层

梁式、预应力大梁、桁架式和箱式用于上层为剪力墙,下层为框架大空间——高度可达2~3层楼高。

3. 钢管钢骨混凝土结构

利用钢和混凝土的各自优点,减小柱面积,缩短工期。

1.1.4.3 高层建筑的结构分类

在不同的国家和不同的时期,对高层建筑有不同的定义。在欧洲的一些国家把10层以上的

建筑称为高层建筑,前苏联则把 9 层以上的建筑视为高层建筑,如此等等,不一而论。

根据联合国教科文组织所属的世界高层建筑委员会的建议,一般将高层建筑划分为 4 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(高度超过 100m)。

根据我国目前高层建筑的现状,我国制定的《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)中明确规定 10 层或 10 层以上,高度在 28m 或 28m 以上的民用建筑为高层建筑范围。我国《高层民用建筑设计防火规范》(GB50045-1995)和《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-1998)中规定 10 层及 10 层以上的民用建筑和总高度超过 24m 的公共建筑及综合性建筑为高层建筑。而把 9 层以下或高度不超过 24m 的建筑称为中高层建筑(7~9 层)、多层建筑(4~6 层)和低层建筑(≤ 3 层)。

目前国际上把高度在 100m 以上的高层建筑称为超高层建筑,并且层数在 30 层以上。

1.2 高层建筑设计特点

1.2.1 水平荷载是设计的主要因素

高层结构总是要同时承受竖向荷载和水平荷载作用。荷载对结构产生的内力是随着建筑物的高度增加而变化的。当建筑物高度较矮时,整个结构是以竖向荷载为设计的主要依据,而水平荷载的影响相对是比较小的,同时整个结构的水平位移也较小。

随着建筑物高度的增加,水平荷载(风荷载或地震作用)产生的内力和位移迅速增大。通过把建筑物看成一个竖向悬臂构件这样简单例子(图 1-9)来看,可得出以下结果。

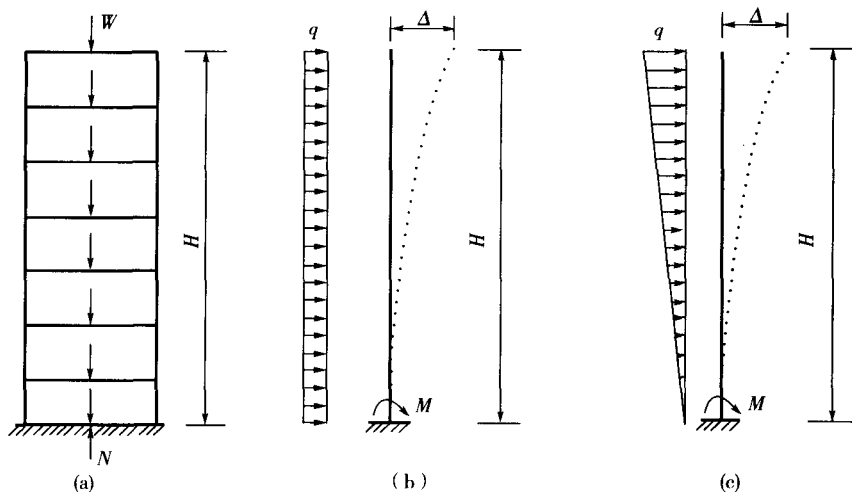


图 1-9 建筑物受力示意图

荷载效应的最大值(轴力 N 、弯矩 M 和位移 Δ)可用式(1-1)到式(1-5)表达:

轴力与高度成正比,竖向荷载作用下:

$$N=WH=f(H) \quad (1-1)$$

弯矩与高度二次方成正比,水平荷载作用下:

$$M=qH^2/2=f(H^2) \quad (\text{均布}) \quad (1-2)$$

$$M=qH^2/3=f(H^2) \quad (\text{倒三角形}) \quad (1-3)$$

侧向位移与高度的四次方成正比,水平荷载作用下:

$$\Delta=qH^4/8EI=f(H^4) \quad (\text{均布}) \quad (1-4)$$

$$\Delta=11qH^4/120EI=f(H^4) \quad (\text{倒三角形}) \quad (1-5)$$

式中, q 、 W 分别为高楼每米高度的水平荷载和竖向荷载(kN/m)。

因此,从这个简单的例子中可以看出,高层建筑中水平荷载成了结构设计的主要因素。而且当建筑物高度增加时,水平荷载(风、地震)对结构起的作用将越来越大。除了结构内力将明显加大外,结构的侧向位移增加更快。它们可以表示为高度 H 的函数(图 1-10)。在高层建筑中,水平荷载和地震作用对结构设计起着决定性的作用。

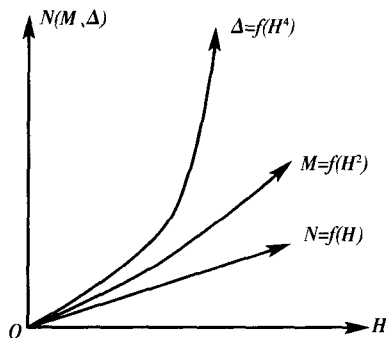


图 1-10 建筑物高度 H 对内力、位移的影响

1.2.2 侧向位移是结构设计控制因素

从上述例子中可以看出,与较低楼房不同,结构侧向位移已成为高层建筑设计中的关键因素。随着楼房高度的增加,水平荷载作用下结构的侧向变形迅速增大,结构顶点侧移 Δ 与建筑高度 H 的四次方成正比。设计高层建筑设计时要求结构不仅要具有足够的强度,还要具有足够的抗推刚度,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:

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

2. 层间相对侧移量(层间位移)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 Δ 过大,也会使电梯因轨道变形而不能正常运行,以及机电管道受到破坏。

3. 高层建筑的重心位置较高,过大的侧向变形使结构因 $P-\Delta$ 效应而产生较大的附加应力,甚至因侧移与应力的恶性循环导致建筑物倒塌。

因此,要限制侧向位移。

1.2.3 结构延性是重要的设计指标

地震区的高层建筑设计中,除要考虑正常使用时的竖向荷载、风荷载以外,还必须使结构具有良好的抗震性能,做到“小震不坏”。在遭遇相当于设计烈度的地震时,经一般修理仍能继续使用。在强震下有损坏,而不致使人民生命财产和重要生产设备遭受危害,能裂而不倒。为此,要求结构具有较好的延性,也就是说,结构在强烈地震作用下,当结构构件进入屈服阶段后具有较强的变形能力,能吸收地震作用下产生的能量,结构能维持一定的承载力。

结构的延性采用延性系数来表达,有两种表达方式:

$$(1) \text{以位移表示:} \quad \mu = \Delta_{\mu} / \Delta_y \quad (\text{整体结构}) \quad (1-6)$$

位移延性系数为结构最大荷载点相应位移 Δ_{μ} 与屈服点的位移 Δ_y 的比值。

$$(2) \text{以转角来表示:} \quad \mu_{\Phi} = \Phi_{\mu} / \Phi_y \quad (\text{结构构件}) \quad (1-7)$$

式中: Φ_{μ} 为结构构件最大水平荷载时相应转角, Φ_y 为屈服点时的转角。

衡量整个结构延性的延性系数,常用顶点位移的比值来表示,它综合反映了结构各部分的塑性变形能力。对于一般钢筋混凝土结构,要求延性系数 μ 值在 3~5 之间。结构延性的好坏与许多因素有关,如结构材料,结构体系,总体布置,节点连接,构造措施等等。在高层建筑设计中,为使结构具有较好的抗震性能,在一定意义上构造设计比计算更重要。

1.2.4 轴向变形不容忽视

由结构力学可知,高层结构竖向构件的变位是由弯曲变形、轴向变形及剪切变形三项因素的影响叠加求得,其计算公式如下:

$$\delta_{ij} = \int (M_i M_j / EJ) ds + \int (N_i N_j / EA) ds + \int (\mu \theta_i \theta_j / GA) ds \quad (1-8)$$

目前,在计算多层建筑结构内力和位移时,只考虑弯曲变形,因为轴力项影响很小,剪力项一般可不考虑。但对于高层建筑结构,情况就不同了,由于层数多,高度大,轴力值很大,再加上沿高度积累的轴向变形显著,轴向变形会使高层建筑结构的内力数值与分布产生明显的变化。

图 1-11 中的框架结构,在各层相等楼面均布荷载作用下,不考虑柱轴向变形时,各横梁的弯矩大致相同,梁端有较大负弯矩。实际上,由于中柱轴力比边柱要大,因此中柱轴向压缩变形也大于边柱,相当于梁的中支座沉陷,中支座上方梁端负弯矩自下而上逐层减少,到上部楼层还可能出现正弯矩,所以,高层建筑结构不考虑墙、柱轴向变形会使计算结果产生显著的偏差。对于构件轴向变形(墙、柱轴力大)与剪切变形(截面高度大)对结构内力和位移影响不可忽略,墙肢和柱的轴向变形对内力和位移的影响,视荷载作用方向和结构型式不同而有较大的区别。

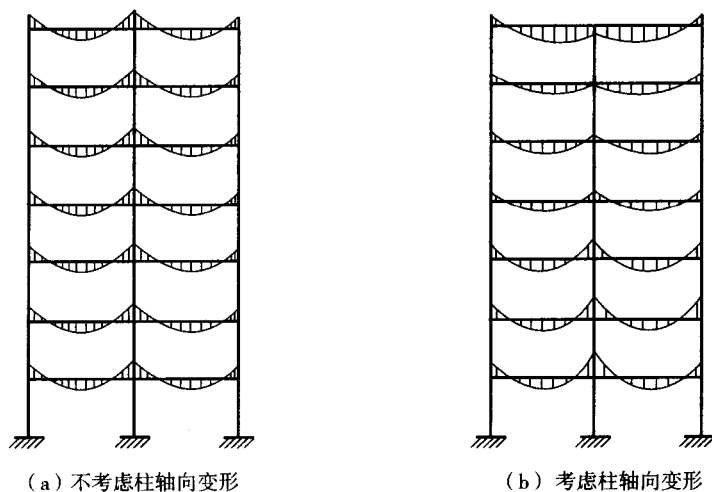


图 1-11 框架结构在均布荷载作用下弯矩图

1.2.5 减轻高层建筑自重比多层建筑更重要

减轻自重这一特点要从两个方面来考虑:

1. 地基承载力

如果在同样地基强度下,减轻自重意味着可以多建几层。假如, $q=15\text{kN/m}^2$ 可建10层,如减为 $q=10\text{kN/m}^2$ 则可建15层。例如,美国休斯敦贝壳广场大厦,采用了容重为 18.2kN/m^3 轻质混凝土双筒体结构建成高218m,52层,若采用普通钢筋混凝土(容重为 25kN/m^3),只能建成35层。

2. 地震作用

因此众所周知,地震效应是与建筑物重量成正比的。减轻自重,即减小了竖向荷载作用下构件的内力,也减小了地震作用下的构件内力,使结构构件截面变小。不但能节省材料,降低造价,还能增加使用空间。

1.3 高层建筑结构发展趋势

随着城市人口的不断增加,建设可用地的减少,高层建筑继续向着更高发展,结构所需承担的荷载和倾覆力矩将越来越大。在确保高层建筑物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,高层建筑结构构件正在不断更新,设计理念也在不断发展。

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,竖向线形构件(柱)的抗推刚度很小;竖向平面构件(墙或框架)虽然在其平面内具有很大的抗推刚度,然而其平面外的刚度依然小到略去不计。由4片墙围成的墙筒或由4片密柱深梁框架围成的框筒,尽管其基本元件依旧是线形构件或平面构件,但它已经转变成具有不同力学特性的立体构件,在任何方向水平力的作用下,均有宽大的翼缘参与抗压和抗拉,其抗力偶的力臂,即横截面受压区中心到受拉区中心的距离很大,能够抗御很大的倾覆力矩,从而适用于层数很多的高层建筑。

2. 布置周边化

高层建筑的层数多,重心高,纵然设计时应注意质量和刚度的对称布置,由于偶然偏心等原因,地震时扭转振动也是难免的。更何况地震时确实存在着转动分量,即使是对称结构,在地面运动的转动分量激发下也会发生扭转振动。所以,高层建筑的抗推构件正在从中心布置和分散布置转向沿高层建筑周边布置,以便能提供足够大的抗扭转力偶。此外,构件沿周边布置并形成空间结构后,还可为抵抗倾覆力矩提供更大的抗力偶。

3. 结构支撑化

框筒是用于高层建筑的一种高效抗侧力构件,然而,它固有的剪力滞后效应,削弱了它的抗推刚度和水平承载力。特别是当高层建筑平面尺寸较大,或者因建筑功能需要而加大柱距时,剪力滞后效应就更加严重,致使翼缘框架抵抗倾覆力矩的作用大大降低。为使框筒能充分发挥潜力并有效地用于更高的高层建筑,在框筒中增设支撑或斜向布置的抗剪墙板,已成为一种框筒的有力措施。

若把在抵抗倾覆力矩中承担压力或拉力的杆件,由原来的沿高层建筑周边分散布置,改为向房屋四角集中,在转角处形成一个巨大柱,并利用交叉斜杆连成一个立体支撑体系,是高层建筑结构中的又一发展趋势。由于巨大角柱在抵抗任何方向倾覆力矩时都具有最大的力臂,从而比

框筒更能充分发挥结构和材料的潜力。典型的例子是 1989 年落成的香港中国银行大厦(图 1-12)和正在筹划中的美国芝加哥 532m 高的摩天大楼方案,都是采用了桁架筒体结构,并将全部竖向荷载传至周边结构,它们的单位面积用钢量都仅约为 $150\text{kg}/\text{m}^2$ 。预计这种结构体系今后在 300m 以上的超高层建筑中将会得到更广泛的应用。

4. 体形多样化

为了体现个性、追求新颖,使高层建筑的平面、立面体型均极其特殊,结构的复杂程度和不规则程度为国内外前所未有的,为结构设计带来极大挑战。平面形状有:矩形、方形、八角形、多边形、扇形、圆形、菱形、弧形、Y 形、L 形等。立面出现各种类型转换、外挑、内收、大底盘多塔楼、连体建筑、立面开大洞等复杂体型的建筑。

日本东京拟建的 Millennium Tower(图 1-13),高 800m,采用圆锥状体形,底面周长 600m,可容纳 5 万居民。圆锥形高层建筑的优点是:(1)具有最小的风载体型系数;(2)上部逐渐缩小,减少了上部的风载和地震作用,从而缓解了超高层建筑的倾覆问题;(3)倾斜外柱轴力的水平分力,可以部分抵消水平荷载。此幢超高层建筑也采用支撑框筒作为结构抗侧力体系,进一步说明结构支撑化已成为超高层建筑结构的发展方向。此外,该超高层建筑每隔若干层设置一个透空层,可以减小设计风荷载。

5. 材料高强度

随着建筑高度的增加,结构面积占建筑使用面积的比例越来越大,为了改善这一不合理状况,采用高强钢和高强混凝土已势在必行。随着高性能混凝土材料的研制和不断发展,混凝土的强度等级和韧性性能也不断得到改善。C80 和 C100 强度等级的混凝土已经在超高层建筑中得到实际应用。可以减小结构构件的尺寸,减少结构自重,必将对高层建筑结构的发展产生重大影响。高强度且具有良好可焊性的厚钢板将成为今后高层建筑结构的主要用钢材材料,而耐火钢材 FR 钢的出现为钢结构的防火设计提供了方便。采用 FR 钢材制作高层钢结构时,其防火保护层的厚度可大大减小,从而降低钢结构的造价,使钢结构更具有竞争性。例如,美国芝加哥市的 74 层、高 262m 的水塔广场大厦,就是采用 C70 级高强混凝土建造的。

6. 建筑轻量化

建筑物越高,自重越大,引起的水平地震作用就越大,对竖向构件和地基造成的压力也越大,从而带来一系列的不利影响。因此,目前在高层建筑中,已开始推广应用轻质隔墙、轻质外墙板,以及采用陶粒、火山渣等为骨料的轻质混凝土材

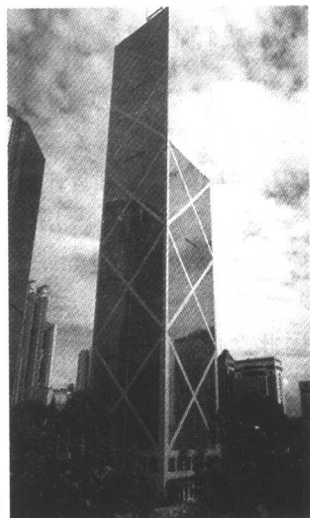


图 1-12 香港中国银行

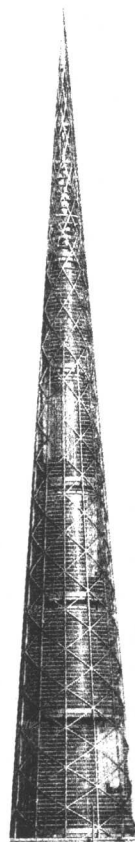


图 1-13

东京 Millennium Tower