



21st CENTURY
实用规划教材

21世纪全国应用型本科**土木建筑系列**实用规划教材



高层建筑结构设计

主 编	张仲先	王海波
副主编	黄太华	闫 磊
主 审	苏 原	



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

TU973

40

21 世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材

高层建筑结构设计

主 编	张仲先	王海波
副主编	黄太华	闫 磊
参 编	刘立平	黎 丹
	程志勇	夏冬桃
	胡军安	张 杰
	周春圣	
主 审	苏 原	



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是按照我国现行有关规范与规程,参考同类优秀教材,并结合我国高层建筑发展状况而编写的。主要内容包括绪论,高层建筑结构体系与布置原则,高层建筑结构荷载及其效应组合,框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构的近似计算方法,高层建筑扭转的近似计算方法,钢筋混凝土框架结构设计,钢筋混凝土剪力墙结构设计,复杂高层建筑结构简介,高层建筑钢结构与混合结构设计简介等。

本书可作为普通高等院校土木工程专业的大学生学习高层建筑结构设计的教材,同时可作为建筑结构专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构设计/张仲先,王海波主编. —北京:北京大学出版社, 2006.7

(21世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材)

ISBN 7-301-10753-6

I. 高… II. ①张… ②王… 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 057946 号

书 名: 高层建筑结构设计

著作责任者: 张仲先 王海波 主编

策 划 编 辑: 吴 迪 李昱涛

责 任 编 辑: 吴 迪

标 准 书 号: ISBN 7-301-10753-6/TU · 0039

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 信 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 363 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 23.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

《21 世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材》

专家编审委员会

主 任 彭少民

副主任 (按拼音顺序排名)

陈伯望 金康宁 李 忱 李 杰

罗迎社 彭 刚 许成祥 杨 勤

俞 晓 袁海庆 周先雁 张俊彦

委 员 (按拼音顺序排名)

邓寿昌 付晓灵 何放龙 何培玲

李晓目 李学罡 刘 杰 刘建军

刘文生 罗 章 石建军 许 明

严 兵 张泽平 张仲先

丛书总序

我国高等教育发展迅速,全日制高等学校每年招生人数至2004年已达到420万人,毛入学率19%,步入国际公认的高等教育“大众化”阶段。面临这种大规模的扩招,教育事业的发展与改革坚持以人为本的两个主体:一是学生,一是教师。教学质量的提高是在这两个主体上的反映,教材则是两个主体的媒介,属于教学的载体。

教育部曾在第三次新建本科院校教学工作研讨会上指出:“一些高校办学定位不明,盲目追求上层次、上规格,导致人才培养规格盲目拔高,培养模式趋同。高校学生中‘升本热’、‘考硕热’、‘考博热’持续升温,应试学习倾向仍然比较普遍,导致各层次人才培养目标难于全面实现,大学生知识结构不够合理,动手能力弱,实际工作能力不强。”而作为知识传承载体的教材,在高等教育的发展过程中起着至关重要的作用,但目前教材建设却远远滞后于应用型人才培养的步伐,许多应用型本科院校一直沿用偏重于研究型的教材,缺乏针对性强的实用教材。

近年来,我国房地产行业已经成为国民经济的支柱产业之一,随着本世纪我国城市化的大趋势,土木建筑行业对实用型人才的需求还将持续增加。为了满足相关应用型本科院校培养应用型人才的教學需求,从2004年10月北京大学出版社第六事业部就开始策划本套丛书,并派出10多位编辑分赴全国近30个省份调研了两百多所院校的课程改革与教材建设的情况。在此基础上,规划出了涵盖“大土建”六个专业——土木工程、工程管理、建筑学、城市规划、给排水、建筑环境与设备工程的基础课程及专业主干课程的系列教材。通过2005年1月份在湖南大学的组稿会和2005年4月份在三峡大学的审纲会,在来自全国各地几十所高校的知名专家、教授的共同努力下,不但成立了本丛书的编审委员会,还规划出了首批包括土木工程、工程管理及建筑环境与设备工程等专业方向的40多个选题,再经过各位主编老师和参编老师的艰苦努力,并在北京大学出版社各级领导的关心和第六事业部的各位编辑辛勤劳动下,首批教材终于2006年春季学期前夕陆续出版发行了。

在首批教材的编写出版过程中,得到了越来越多的来自全国各地相关兄弟院校的领导和专家的大力支持。于是,在顺利运作第一批土建教材的鼓舞下,北京大学出版社联合全国七十多家开设有土木建筑相关专业的高校,于2005年11月26日在长沙中南林学院召开了《21世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材》(第二批)组稿会,规划了①建筑学专业;②城市规划专业;③建筑环境与设备工程专业;④给排水工程专业;⑤土木工程专业中的道路、桥梁、地下、岩土、矿山课群组近60个选题。至此,北京大学出版社规划的“大土木建筑系列教材”已经涵盖了“大土建”的6个专业,是近年来全国高等教育出版界唯一一套完全覆盖“大土建”六个专业方向的系列教材,并将于2007年全部出版发行。

我国高等学校土木建筑专业的教育,在国家教育部和建设部的指导下,经土木建筑专业指导委员会六年来的研讨,已经形成了宽口径“大土建”的专业发展模式,明确了土木建筑专业教育的培养目标、培养方案和毕业生基本规格,从宽口径的视角,要求毕业生能

从事土木工程的设计、施工与管理工作。业务范围涉及房屋建筑、隧道与地下建筑、公路与城市道路、铁道工程与桥梁、矿山建筑等，并且制定一整套课程教学大纲。本系列教材就是根据最新的培养方案和课程教学大纲，由一批长期在教学第一线从事教学并有多年工程经验和丰富教学经验的教师担任主编，以定位“应用型人才培养”为目标而编撰，具有以下特点：

(1) 按照宽口径土木工程专业培养方案，注重提高学生综合素质和创新能力，注重加强学生专业基础知识和优化基本理论知识结构，不刻意追求理论研究型教材深度，内容取舍少而精，向培养土木工程师从事设计、施工与管理的应用方向拓展。

(2) 在理解土木工程相关学科的基础上，深入研究各课程之间的相互关系，各课程教材既要反映本学科发展水平，保证教材自身体系的完整性，又要尽量避免内容的重复。

(3) 培养学生，单靠专门的设计技巧训练和运用现成的方法，要取得专门实践的成功是不够的，因为这些方法随科学技术的发展经常在改变。为了了解并和这些迅速发展的方法同步，教材的编撰侧重培养学生透彻理解教材中的基本理论、基本特性和性能，又同时熟悉现行设计方法的理论依据和工程背景，以不变应万变，这是本系列教材力图涵盖的两个方面。

(4) 我国颁发的现行有关土木工程类的规范及规程，系 1999~2002 年完成的修订，内容较大的取舍和更新，反映了我国土木工程设计与施工技术的发展。作为应用型教材，为培养学生毕业后获得注册执业资格，在内容上涉及不少相关规范条文和算例。但并不是规范条文的释义。

(5) 当代土木工程设计，越来越多地使用计算机程序或采用通用性的商业软件，有些结构特殊要求，则由工程师自行编写程序。本系列的相关工程结构课程的教材中，在阐述真实结构、简化计算模型、数学表达式之间的关系的基础上，给出了设计方法的详细步骤，这些步骤均可容易地转换成工程结构的流程图，有助于培养学生编写计算机程序。

(6) 按照科学发展观，从可持续发展的观念，根据课程特点，反映学科现代新理论、新技术、新材料、新工艺，以社会发展和科技进步的新近成果充实、更新教材内容，尽最大可能在教材中增加了这方面的信息量。同时考虑开发音像、电子、网络等多媒体教学形式，以提高教学效果和效率。

衷心感谢本套系列教材的各位编著者，没有他们在教学第一线的教改和工程第一线的辛勤实践，要出版如此规模的系列实用教材是不可能的。同时感谢北京大学出版社为我们广大编著者提供了广阔的平台，为我们进一步提高本专业领域的教学质量和教学水平提供了很好的条件。

我们真诚希望使用本系列教材的教师和学生，不吝指正，随时给我们提出宝贵的意见，以期进一步对本系列教材进行修订、完善。

本系列教材配套的 PPT 电子教案以及习题答案在出版社相关网站上提供下载。

《21 世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材》

专家编审委员会

2006 年 1 月

前 言

近 20 年来,我国的高层建筑发展犹如雨后春笋,十分迅猛。无论是在高层建筑建造的地域与数量方面,还是在结构的高度与层数、新的结构体系与新材料的应用方面都不断地取得突破,表明我国高层建筑的设计水平和施工技术发展迅速。为了适应我国高层建筑发展的需要,为解决和丰富广大土木工程专业的大学生学习高层建筑结构设计的学习用书和众多建筑结构专业的工程技术人员的学习与参考用书,编写这本教材十分必要。

本书的编写不仅参考了同类的优秀教材,还紧密结合国内外,尤其是我国高层建筑的发展与应用现状,严格按照 1998—2002 版的国家现行有关规范与规程进行。这些规范和规程主要包括《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)、《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)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—1998)、《钢管混凝土结构设计规程》(YB 9082—1997)、《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)、《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28:90)等。学习本书时,读者应具备混凝土结构和钢结构以及结构力学和材料力学方面的基础知识。通过本书的学习不仅可以帮助读者获得高层建筑结构设计方面的知识,还可帮助读者加深对相关规范与规程的认识与理解,增加对钢管混凝土及钢管混凝土结构构件设计方面的知识。

全书共分 9 章,主要介绍了高层建筑的发展概况与应用现状、主要特点以及结构分析方法的发展;各种常用结构体系的特点与布置原则、荷载计算与效应组合;对框架结构、剪力墙结构及框架-剪力墙结构的内力分析方法与设计要求作为重点进行了介绍;对复杂高层建筑结构的设计也作了适当的介绍。本书以钢筋混凝土结构为主,同时也介绍了高层钢结构和混合结构。第 1 章及 2.3 节由华中科技大学张仲先教授编写,第 2 章 2.1、2.2 节及第 5 章由黄石理工学院的程志勇副教授编写,第 3 章由武汉工业学院黎丹老师编写,第 4 章由湖南城市学院的王海波副教授编写,第 6 章由中南林业科技大学的黄太华副教授编写,第 7 章由湖北工业大学的夏冬桃、胡军安老师编写,第 8 章由南京工程学院的闫磊老师编写,第 9 章由重庆大学的刘立平副教授编写。全书由华中科技大学张仲先教授和湖南城市学院王海波副教授主编,由华中科技大学苏原副教授主审。华中科技大学土木工程与力学学院张杰博士和周春圣硕士在本书的编写过程中花了大量的时间,在资料收集、插图绘制、全书的校对以及部分章节的编写方面做了大量的工作。

由于编者水平有限,时间仓促,不妥之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

编 者
2006 年 2 月

目 录

第1章 绪论	1	2.3.3 结构的抗震等级	37
1.1 高层建筑结构的特点	1	2.3.4 结构的平面布置	39
1.1.1 高层建筑的范畴	1	2.3.5 结构的竖向布置	39
1.1.2 高层建筑结构的主要特点	1	2.3.6 不规则结构	40
1.1.3 高层建筑的设计要求	3	2.3.7 变形缝	42
1.1.4 高层建筑结构的概念设计	6	2.3.8 高层建筑基础	46
1.2 高层建筑的发展概况	7	2.4 本章小结	48
1.2.1 高层建筑的发展	7	2.5 思考题	48
1.2.2 高层建筑的发展特点	17		
1.3 高层建筑结构分析方法简介	18	第3章 高层建筑结构荷载及其效应组合	50
1.3.1 以手算为基础的近似计算方法	18	3.1 水平荷载作用下结构简化计算原则	50
1.3.2 以杆件为单元的矩阵位移法	20	3.1.1 荷载作用方向	50
1.3.3 结构分析通用程序	22	3.1.2 平面化假定	51
1.3.4 高层建筑结构专用程序	22	3.2 竖向荷载	52
1.3.5 结构的动力特性及动力时程分析	23	3.3 风荷载	52
1.3.6 高层建筑力学分析近期进一步研究的课题	24	3.3.1 风荷载标准值	53
1.4 本课程的主要内容	25	3.3.2 总风荷载与局部风荷载	58
		3.3.3 风洞试验简介	60
第2章 高层建筑结构体系与布置原则	27	3.4 地震作用	61
2.1 高层建筑的承重单体与抗侧力结构单元	27	3.4.1 地震作用的特点	61
2.2 高层建筑的结构体系	28	3.4.2 抗震设防准则及基本方法	62
2.2.1 框架结构	28	3.4.3 抗震计算理论	63
2.2.2 剪力墙结构	30	3.4.4 设计反应谱	65
2.2.3 框架-剪力墙结构	31	3.4.5 水平地震作用计算	67
2.2.4 筒体结构	33	3.4.6 结构自振周期计算	74
2.2.5 巨型结构	33	3.4.7 竖向地震作用计算	75
2.3 高层建筑结构布置原则	34	3.5 荷载效应组合	76
2.3.1 最大适用高度	35	3.5.1 承载力验算	76
2.3.2 高宽比限值	36	3.5.2 侧移变形验算	77
		3.5.3 荷载效应组合	78
		3.5.4 抗震措施	80
		3.6 本章小结	82
		3.7 思考题	83

第4章 高层建筑结构的近似

计算方法 85

- 4.1 框架结构的近似计算方法 85
 - 4.1.1 竖向荷载下的内力计算方法 85
 - 4.1.2 水平荷载作用下的内力计算 88
 - 4.1.3 变形及稳定验算 97
- 4.2 剪力墙结构的近似计算方法 98
 - 4.2.1 剪力墙的分类、受力特点
及分类界限 98
 - 4.2.2 剪力墙有效翼缘宽度 b_f 102
 - 4.2.3 剪力墙结构在竖向荷载
作用下的内力计算方法 102
 - 4.2.4 剪力墙结构在水平荷载
作用下的内力与位移
计算方法 105
- 4.3 框架-剪力墙结构的近似计算方法 116
 - 4.3.1 框-剪结构在竖向荷载
作用下的内力计算方法 116
 - 4.3.2 框-剪结构在水平荷载
作用下的内力计算方法 116
 - 4.3.3 框-剪结构中剪力墙
的合理数量 124
- 4.4 本章小结 126
- 4.5 思考题 126

第5章 扭转近似计算 127

- 5.1 概述 127
- 5.2 质量中心 128
 - 5.2.1 刚心的一般计算方法 129
 - 5.2.2 框架结构的刚心计算 130
 - 5.2.3 剪力墙结构的刚心计算 130
 - 5.2.4 框架-剪力墙结构
的刚心计算 130
 - 5.2.5 扭转偏心距 131
- 5.3 考虑扭转作用的剪力修正 131
 - 5.3.1 抗侧力结构单元侧移组成 131
 - 5.3.2 抗侧力结构单元
的剪力计算 132
- 5.4 减小结构扭转效应的方法 133

5.4.1 关于扭转的概念设计 133

5.4.2 关于扭转的近似计算 134

5.5 本章小结 136

5.6 思考题 136

第6章 钢筋混凝土框架结构设计 137

- 6.1 延性框架的概念 137
 - 6.1.1 延性框架的要求 137
 - 6.1.2 梁的延性 139
 - 6.1.3 柱的延性 140
- 6.2 框架内力调整 142
- 6.3 框架梁的设计 143
 - 6.3.1 梁抗弯承载力计算 143
 - 6.3.2 梁的抗剪计算 143
 - 6.3.3 梁的构造措施 145
- 6.4 框架柱的设计 147
 - 6.4.1 柱压弯承载力计算 147
 - 6.4.2 柱受剪承载力计算 150
 - 6.4.3 柱的截面尺寸和材料要求 151
 - 6.4.4 框架柱的配筋构造要求 152
 - 6.4.5 轴压比的限制 155
- 6.5 梁柱节点 155
 - 6.5.1 节点剪压比的控制 156
 - 6.5.2 节点核心区剪力设计值 157
 - 6.5.3 节点核心区受剪
承载力验算 158
 - 6.5.4 节点核心区构造措施 158
- 6.6 本章小结 160
- 6.7 思考题 161

第7章 钢筋混凝土剪力墙结构设计 162

- 7.1 剪力墙结构概念设计 162
 - 7.1.1 剪力墙结构的受力
变形特点 162
 - 7.1.2 剪力墙的结构布置 162
 - 7.1.3 剪力墙最小厚度及材料
强度选定 165
 - 7.1.4 剪力墙的延性要求 166
 - 7.1.5 短肢剪力墙 167

7.2 墙肢设计	168	8.5 连体结构	203
7.2.1 墙肢内力设计值	168	8.5.1 连体结构的特点	203
7.2.2 墙肢正截面承载力计算	169	8.5.2 连体结构的抗震性能	203
7.2.3 墙肢斜截面受剪承载力计算	174	8.5.3 连体结构的结构布置和构造规定	204
7.2.4 墙肢施工缝的抗滑移验算	175	8.6 多塔楼结构	204
7.2.5 墙肢边缘构件的设计要求	176	8.6.1 多塔楼结构的特点	204
7.2.6 墙肢构造措施	178	8.6.2 多塔楼结构布置规定	205
7.3 连梁设计	179	8.6.3 多塔楼结构的加强措施	206
7.3.1 连梁的内力设计值	179	8.7 本章小结	206
7.3.2 连梁正截面承载力计算	181	8.8 思考题	207
7.3.3 连梁斜截面承载力计算	181		
7.3.4 连梁构造措施	182	第9章 高层建筑钢结构与混合结构设计	208
7.4 本章小结	182	9.1 高层建筑钢结构设计简介	208
7.5 思考题	183	9.1.1 概述	208
第8章 复杂高层建筑结构简介	184	9.1.2 结构计算方法	212
8.1 概述	184	9.1.3 构件设计	213
8.2 带转换层的高层建筑	185	9.1.4 连接设计	215
8.2.1 转换层结构的设置类别	185	9.1.5 其他	220
8.2.2 转换层的结构形式	188	9.2 高层建筑混合结构设计简介	222
8.2.3 转换层结构的设计	189	9.2.1 概述	222
8.2.4 转换层结构布置及设计的一般规定	196	9.2.2 混合结构体系的布置	222
8.3 带加强层的高层建筑	198	9.2.3 混合结构中钢筋混凝土构件设计	226
8.3.1 加强层的类型	198	9.2.4 钢管混凝土柱的设计	233
8.3.2 加强层的设计原则	200	9.3 本章小结	238
8.3.3 带加强层高层建筑结构的计算分析应遵循的原则	201	9.4 思考题	239
8.4 错层结构	202	参考文献	240
8.4.1 错层结构特点	202		
8.4.2 错层结构的设计规定	202		

第1章 绪 论

教学提示：本章介绍了高层建筑的范畴与主要特点，高层建筑结构(包括承载能力、侧移限制、舒适度及稳定与抗倾覆等方面)的总体设计要求，高层建筑的发展历史与现状以及发展过程中表现出来的主要特点，并对高层建筑结构分析与计算方法的发展作了相应的叙述。

教学要求：本章要求学生掌握高层建筑的结构特点，熟悉高层建筑的设计要求，了解高层建筑的发展概况及其结构分析方法。

1.1 高层建筑结构的特点

1.1.1 高层建筑的范畴

有关高层建筑的定义目前尚没有统一规定，从理论上讲应按照结构的受力特性来划分，即按水平作用对建筑物的影响程度来划分。联合国教科文组织下属的世界高层建筑委员会曾于1972年在美国宾夕法尼亚州的伯利恒市召开的国际高层建筑会议上专门讨论了这个问题，提出将9层及9层以上的建筑定义为高层建筑，并建议按建筑的高度将其分为4类：第一类高层建筑：9层~16层(最高到50m)；第二类高层建筑：17层~25层(最高到75m)；第三类高层建筑：26层~40层(最高到100m)；第四类高层建筑(超高层建筑)：40层以上(高度在100m以上)。

但是，不同的国家或地区根据其具体情况，综合建筑类别、材料品种以及防火要求等因素也还有自己的规定。如美国把高层建筑的起始高度规定为22m~25m或7层以上；日本规定为11层、31m；德国规定为22层(从室内地面起)；法国规定为住宅50m以上、其他建筑28m以上。

在我国，关于高层建筑的界限规定也未完全统一。行业标准《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层以上和高度超过28m的钢筋混凝土民用建筑属于高层建筑。国家标准《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045—1995)规定，10层及10层以上的住宅建筑(包括底层设置商业服务网点的住宅)和建筑高度超过24m的公共建筑为高层建筑。建筑高度指建筑物室外地面到其檐口或屋面面板板顶的高度，屋顶上的瞭望塔、水箱间、电梯机房、排烟机房和出屋面的楼梯间等不计入建筑高度和层数内。

1.1.2 高层建筑结构的主要特点

在一般房屋的结构设计中，通常将整个结构划分为若干平面结构单元，单元按受荷面积或间距分配荷载，然后逐片按平面结构进行力学分析和设计，然而这种简化分析和设计

的方法对高层建筑结构却并不适用。高层建筑在水平荷载作用下,如何将各楼层的总水平力(或称为层剪力)分配到各竖向平面结构(例如竖向平面框架、竖向平面剪力墙)呢?由于各片竖向平面结构(或称抗侧力结构)的刚度、形式并不相同,变形特征也不一样,因此,不能简单地像一般房屋那样由受荷面积和间距进行分配,否则会使抗侧力刚度大的结构分配到的水平力过小。高层建筑结构具有如下主要特点。

(1) 水平荷载对结构的影响大,侧移成为结构设计的主要控制目标之一。对一般建筑物,其材料用量、造价及结构方案的确定主要由竖向荷载控制,而在高层建筑结构中,高宽比增大,水平荷载(包括风力和地震力)产生的侧移和内力所占比重增大,成为确定结构方案、材料用量和造价的决定因素。其根本原因就是侧移和内力随高度的增加而迅速增长。例如一竖向悬臂杆件在竖向荷载作用下产生的轴力仅与高度成正比,但在水平荷载作用下的弯矩和侧移却分别与高度呈二次方和四次方的曲线关系。因此,当建筑物达到一定高度或层数之后,内力和位移均急剧增加。如图 1.1 所示是结构内力(N 、 M)、位移(Δ)与高度(H)的关系,除了轴向力 N 与高度成正比外,弯矩 M 与位移 Δ 都呈指数曲线上升,因此,随着高度的增加,水平荷载将成为控制结构设计的主要因素,结构侧移成为结构设计的主要控制目标。在高层建筑结构中,除了像多层和低层房屋一样进行强度计算外,还必须控制其侧移的大小,以保证高层建筑结构有足够的刚度,避免因侧移过大而造成结构开裂、破坏、倾覆以及一些次要构件和装饰的损坏。

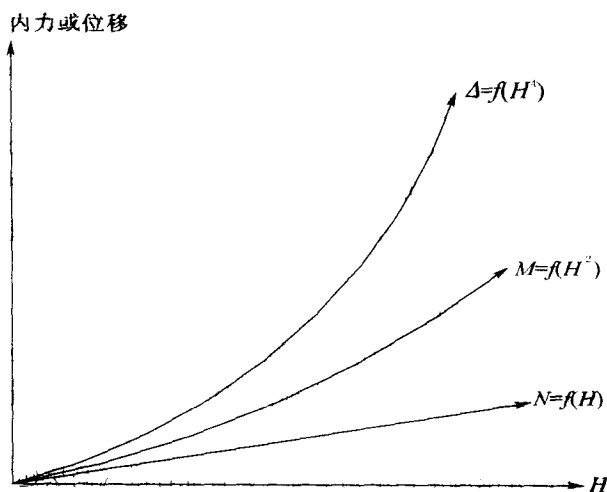


图 1.1 结构内力、位移与高度的关系

(2) 楼(屋)盖结构整体性要求高。高层建筑结构的整体共同工作特性主要是各层楼板(包括楼面梁系)作用的结果,由于楼板在自身平面内的刚度很大,变形较小,故在高层建筑中一般都假定楼板在自身平面内只有刚体位移(仅产生平动和转动),而不改变形状,并忽略楼板平面之外的刚度。因此,在高层建筑结构中的任一楼层高度处,各抗侧力结构都要受到楼板刚体移动的制约,即所谓的位移协调,这时抗侧刚度大的竖向平面结构必然要分担较多的水平力。在随后的章节中可看到,用简化方法进行内力和位移计算时应该采用其抗侧力刚度分配水平力;用计算机进行计算时应该采用整体协同工作分析或将整个结构作为三维空间体系的分析方法。

(3) 高层建筑结构中构件的多种变形影响大。在一般房屋结构分析中,通常只考虑构件弯曲变形的影响,而忽略构件轴向变形和剪切变形的影响,因为一般来说其构件的轴力和剪力产生的影响很小。而对于高层建筑结构,由于层数多、高度高,轴力很大,从而沿高度逐渐积累的轴向变形很显著,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,因而构件中的轴向变形影响必须加以考虑;另外,在剪力墙结构体系中还应计及整片墙或墙肢的剪切变形,在筒体结构中还应计及剪变滞后的影响等。

(4) 结构受到动力荷载作用时的动力效应大。根据结构本身的特点不同,如结构的类型与形式,结构的高度与高宽比,结构的自振周期与材料的阻尼比等的不同,结构受到地震作用或风荷载作用时,产生的动力效应对结构的影响也不同,有时这种动力效应严重影响结构物的正常使用,甚至造成房屋的破坏。

(5) 扭转效应大。当结构的质量分布、刚度分布不均匀时,高层建筑结构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,从而影响各个抗侧力结构构件(柱、剪力墙或筒体)所受到的剪力,并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,在高层建筑结构设计中,结构的扭转效应是不可忽视的问题。即使在结构的质量和刚度分布均匀的高层结构中,在水平荷载作用下也仍然存在扭转效应。

(6) 必须重视结构的整体稳定和抗倾覆问题。在高层建筑结构设计中,应该重视结构的整体稳定性与结构的抗倾覆能力,防止结构发生整体失稳的破坏情况。

(7) 当建筑物高度很大时,结构内外与上下的温差过大而产生的温度内力和温度位移也是高层建筑结构的一种特点。

1.1.3 高层建筑的设计要求

在高层建筑结构的设计中应注重概念设计,重视结构的选型和平、立面布置的规则性,择优选用抗震和抗风性能好且经济合理的结构体系,加强构造措施。在抗震设计中应保证结构的整体抗震性能,使整个结构具有必要的承载能力、刚度和延性。

1. 承载力验算

高层建筑结构设计应保证结构在可能同时出现的各种外荷载作用下,各个构件及其连接均有足够的承载力。《建筑结构设计统一标准》规定构件按极限状态设计,承载力极限状态要求采用由荷载效应组合得到的构件最不利内力进行构件截面承载力验算。结构构件承载力验算的一般表达式如下。

$$\text{不考虑地震作用组合时} \quad \gamma_0 S \leq R \quad (1-1)$$

$$\text{考虑地震作用参与组合时} \quad S_E \leq R_E / \gamma_{RE} \quad (1-2)$$

式中: S ——不考虑地震作用时的荷载效应组合(简称无震组合)得到的构件内力设计值;

S_E ——考虑地震作用时的荷载效应组合(简称有震组合)得到的构件内力设计值。

S 及 S_E ——分别代表轴力、弯矩、剪力或扭矩。

R 及 R_E ——分别为无震组合或有震组合时构件承载力设计值,可分别代表轴力、弯矩、剪力或扭矩。

γ_0 和 γ_{RE} ——分别为无震组合时构件的重要性系数,有震组合时构件承载力抗震调整系数。

关于 S 及 S_E 的组合, R 及 R_E 的计算及 γ_0 和 γ_{RE} 的取值详见本书第3章。

2. 侧移限制

(1) 使用阶段层间位移限制。

结构的刚度可以用限制侧向变形的形式表达,我国现行规范主要限制层间位移。

$$(\Delta u/h)_{\max} \leq [\Delta u/h] (\Delta u/h)_{\max} \quad (1-3)$$

式中: Δu ——荷载效应组合所得结构楼层层间位移;

h ——该层层高;

$\Delta u/h$ ——层间转角,应取各楼层中最大的层间转角,即验算是否满足要求;

$[\Delta u/h]$ ——层间转角限制值。

在正常状态下,限制侧向变形的主要原因有:防止主体结构及填充墙、装修等非结构构件的开裂与损坏;同时过大的侧向变形会使人有不舒适感,影响正常使用;过大的侧移还会使结构产生较大的附加内力($P-\Delta$ 效应)。在正常使用状态下(风荷载和小震作用) $\Delta u/h$ 的限值按表 1-1 选用(高规 4.6.3 条)。

表 1-1 正常使用情况下的 $\Delta u/h$ 的限制值

材 料	结构高度	结构类型	限 制 值
钢筋混凝土结构	不大于 150m	框架	1/550
		框架-剪力墙、框架-核心筒、板柱-剪力墙	1/800
		剪力墙、筒中筒	1/1000
		框支层	1/1000
	不小于 250m	各种类型结构	1/500
钢结构		各种类型结构	1/250

注:高度在 150m~250m 之间的钢筋混凝土高层建筑,限制值按上表限制值插入计算确定。

(2) 防止倒塌层间位移限制。

在罕遇地震作用下,为防止结构倒塌,要限制结构的最大弹塑性层间位移。罕遇地震作用下 $\Delta u/h$ 的限值按表 1-2 选用(高规 4.6.5 条)。

表 1-2 罕遇地震作用下的弹塑性层间位移 $\Delta u/h$ 的限制值

材 料	结构类型	限 制 值
钢筋混凝土结构	框架	1/50
	框架-剪力墙、框架-核心筒、板柱-剪力墙	1/100
	剪力墙、筒中筒	1/120
	框支层	1/120
钢结构	各种类型结构	1/70

3. 舒适度的要求

高层建筑物在风荷载作用下将产生振动,过大的振动加速度将使居住在高楼内的人们感觉不舒适,甚至不能忍受。国外研究人员对人的舒适程度与振动加速度之间的关系进行了研究,两者的关系见表 1-3,表中 g 为重力加速度。对照国外的研究成果和有关标准,与

我国现行行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—1998)相协调,高规要求高度超过 150m 的高层建筑混凝土结构应具有更好的使用条件,满足舒适度的要求,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 规定的 10 年一遇的风荷载取值计算,或由专门风洞试验确定的结构顶点最大加速度 $\alpha_{\max}$ 不应超过表 1-4 的限值。

表 1-3 舒适度与振动加速度的关系

不舒适的程度	建筑物的加速度	不舒适的程度	建筑物的加速度
无感觉	$<0.005g$	十分扰人	$0.05g \sim 0.15g$
有感觉	$0.005g \sim 0.015g$	不能忍受	$>0.15g$
扰人	$0.015g \sim 0.05g$		

表 1-4 结构顶点最大加速度限值 $\alpha_{\max}$

使用功能	$\alpha_{\max} (m/s^2)$	使用功能	$\alpha_{\max} (m/s^2)$
住宅、公寓	0.15	办公、旅馆	0.25

4. 稳定和抗倾覆

(1) 结构整体稳定验算。

无侧移时,一般不会发生整体失稳(高层结构刚度较大,现浇楼板作为横向隔板,整体性较强);有侧移时,水平荷载会产生重力二阶效应($P-\Delta$ 效应), $P-\Delta$ 效应太大会导致结构发生整体失稳破坏。

(2) 高层钢筋混凝土结构的稳定验算。

剪力墙、框架-剪力墙、筒体结构应符合式(1-4)要求,框架结构应符合式(1-5)要求,式中 n 为结构总层数,否则将认为结构不满足整体稳定性要求。

$$EJ_d \geq 1.4H^2 \sum_{i=1}^n G_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-4)$$

$$D_i \geq 10 \sum_{j=i}^n G_j / h_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-5)$$

当剪力墙、框架-剪力墙、筒体结构符合式(1-6)所示条件,或者框架结构符合式(1-7)所示条件时,认为结构满足稳定性要求,且可不考虑重力二阶效应的影响。

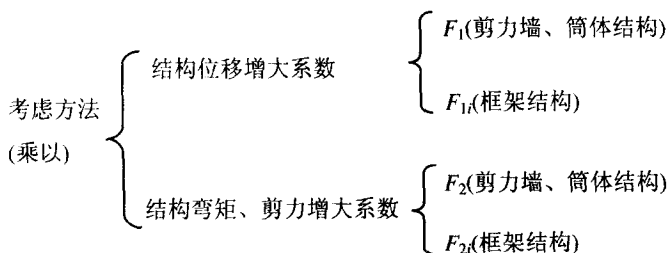
$$EJ_d \geq 2.7H^2 \sum_{i=1}^n G_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-6)$$

$$D_i \geq 20 \sum_{j=i}^n G_j / h_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-7)$$

剪力墙、框架-剪力墙、筒体结构符合式(1-8)所示条件或框架结构符合式(1-9)所示条件时,可以认为结构满足稳定性要求,但应考虑重力二阶效应对水平力作用下结构内力和位移的不利影响。高层建筑结构重力二阶效应可采用弹性方法计算,也可以采用对未考虑重力二阶效应的计算结果乘以增大系数的方法近似考虑。

$$2.7H^2 \sum_{i=1}^n G_i > EJ_d > 1.4H^2 \sum_{i=1}^n G_i \quad (1-8)$$

$$20 \sum_{j=i}^n G_j / h_i > D_i > 10 \sum_{j=i}^n G_j / h_i \quad (1-9)$$



式中: EJ_d ——结构一个主轴方向的弹性等效抗侧刚度;

D_i ——第 i 楼层的弹性等效抗侧刚度;

H ——房屋高度;

h_i ——第 i 楼层层高;

G_i, G_j ——第 i, j 层重力荷载设计值。 F_1, F_2 及 F_{1i}, F_{2i} 的计算详见高规 5.4.3 条。

(3) 高层钢结构的稳定验算。

各楼层柱子平均长细比和平均轴压比应满足一定要求, 不需进行整体稳定验算的条件是在不考虑 $P-\Delta$ 效应的弹性层间位移小于某个限值。对钢支撑、剪力墙和筒体的钢结构构件, $\Delta u/h \leq 1/1000$ 时, 可不计 $P-\Delta$ 效应。对无支撑的纯框架和 $\Delta u/h > 1/1000$ 的有支撑钢结构应考虑 $P-\Delta$ 效应来计算结构的内力 and 位移, 但一般高层钢结构需计算 $P-\Delta$ 效应。

(4) 高层建筑抗倾覆。

正常设计的高层结构一般不会产生倾覆。控制倾覆的措施有: $H/B > 4$ 时, 在地震作用下, 基底不允许出现零应力区; $H/B \leq 4$ 时, 在地震作用下, 零应力区面积不应超过基底面积的 15%。

1.1.4 高层建筑结构的概念设计

在结构设计中包括结构作用效应分析和结构抗力分析。传统设计方法较注重这两方面的精确力学数学分析, 而忽视对一些综合的相关因素的考虑。当今世界, 科学和工商业高度发展, 高层建筑结构的功能和所处的环境、条件也在变化, 它迫使人们寻求一种新的结构设计思维方法。概念设计是保证结构具有良好抗震性能的一种方法, 就是在结构设计中某些无法进行精确计算, 而现行的规范、规程又无法具体明确规定的内容, 由设计人员将自己所掌握的知识综合运用到结构设计全过程。这些知识包括科学试验结论、震害调查结论、前人的设计经验(包括成功的经验和失败的教训)等。

结构设计的全过程包括结构方案的确定、结构布置、内力分析与配筋计算、构造措施。设计人员在对结构的地震作用、风作用、温度作用、各种其他偶然作用、结构的真实荷载效应、结构所处条件、场地土特性、结构抗力和一些基本概念深刻理解的基础上, 运用正确的思维方法去指导设计, 就是说不仅要必要的结构计算, 而且要对引起结构不安全各种因素做综合的、宏观的、定性的分析并采取相应的对策, 以求在总体上降低结构破坏概率。因此, 要做好概念设计, 需要多方面的知识, 包括理论分析、构造措施、施工技术、设计经验、事故及震害分析和处理等。尤其是结构的抗震设计, 必须运用概念设计方法, 下面简述概念设计在若干方面的体现。

在结构布置方面, 关键是受力明确, 传力途径简捷, 因此应尽量避免采用上刚下柔和

平面刚度不均匀的结构体系。保证结构协同工作的传力构件主要是楼(屋)面结构,因此要采取措施加强楼板的刚度。结构延性是度量结构抗震性能的重要指标,但不是唯一指标。过大地利用延性可能导致次生内力加剧,且延性大小的量度方法也不统一。应将结构强度、变形、破坏过程和破坏模式综合考虑。

地震动导致震害的主要原因是地基失效和结构的地震反应。地基失效指因地层断裂、错位、滑塌、液化等失去承载力。结构的地震反应包括加速度、速度和位移,并由此引起的结构损害和破坏。要分清原因,区别对待,正确设计。地震动有远震和近震之分。远离震中地区长周期波成分较多,对高柔建筑物影响大;而距震中近的地区短周期地震波较多,对低而刚的建筑物影响大。采取的对策是设法减小共振因素,提高结构耗能能力,多道设防。要特别重视塔楼的设防措施。竖向地震作用一般不作考虑,但日本阪神地震表明其作用不容忽视,尤其是其与水平地震作用组合形成的危害。在9度抗震设计及8度抗震设计的大跨结构、长悬臂结构中,应考虑竖向地震的作用。

地震作用的时间、强度、频数和震源是变化的,因此难以精确地考虑地震动的作用。解决的对策只能是定性正确,定量大致合理。追求精确的地震作用效应是不现实的,只能在必要的计算基础上加充分的构造措施实现防震目的。震害表明,结构的连接点、支承点的不可靠性,往往导致结构的坍塌,阪神地震就证明了这一点,因此应该重视连接点的设计计算和构造措施。历次震害表明,一场大灾害(如地震、风灾、水灾等)伴随的次生灾害(火灾、断电和通信、停水等),对人类生命财产的危害往往比结构的损害更为严重,因此应建立起总体抗灾的观念。

地震震害具有选择性、累积性和重复性。在坚硬场地土上,短周期结构震害比中、长周期结构的震害严重,而软弱场地土上某些中、长周期结构震害比短周期结构的震害严重。场地土的软弱夹层对中、短周期结构有时还起到减振作用。液化土如处于地基主要受力层以下,且无喷冒滑坡可能时,对剪切波作用下的中、短周期结构也能起到减振作用。地震作用总是先行损坏最薄弱结构。地震震害的累积性表现为在前震、主震和余震的同一地震序列中结构多次受损的累积效应,还表现为远场地层使地面水平运动持续时间延长,以及再次遭震的震害累积等。结构震害的重复性表现为同一场地上,特性相同的结构在多次地震下出现相似的震害。针对地震震害的上述特性,抗震设计时应明确本地区设防烈度和地震历史的条件下综合考虑上部建筑、基础和地基土的情况,合理地进行结构选型、总平面布置并采用各种具体的减震措施。

上述仅为概念设计部分内容。概念设计内容丰富,涉及面广泛,需不断总结经验,深化研究。那种只注重具体计算,孤立地看待个别问题,忽略综合地、全面地、宏观地分析问题的做法,是不可取的。

1.2 高层建筑的发展概况

1.2.1 高层建筑的发展

1. 古代高层建筑

人类自古以来就有向高空发展的愿望和要求,并在建筑上付诸实现。公元前280年建