



普通高等教育“十二五”住建部规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

高层建筑结构

(第3版)

G C J Z J G

吕西林 主编



WUTP

武汉理工大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等学校土木工程专业新编系列教材

中国土木工程学会教育工作委员会 审订

高层建筑结构

(第3版)

吕西林 主编

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

【内容提要】

本教材主要是根据高等学校土木工程本科专业“高层建筑结构”课程的教学大纲编写的。内容包括高层建筑结构体系与结构布置,高层建筑结构荷载作用与结构计算原则,高层建筑结构扭转效应的简化计算,框架结构的受力分析与设计,剪力墙结构的受力分析与设计,框架-剪力墙结构的受力分析与设计,筒体结构及钢与混凝土组合结构的分析与设计方法,高层建筑结构构件的截面设计与构造要求,以及高层建筑基础的设计要点等。

本教材的目的是,使学生通过本课程的学习,能够深刻理解高层建筑结构的受力性能、变形特点和设计原则,了解高层建筑结构的组成及各种结构体系的布置特点、应用范围等,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。

本书也可以作为高等专科学校、高等职业技术学院的教学用书,以及土建工程技术人员参考用书。

【主编简介】

吕西林 男,1955年1月生,博士,同济大学教授、博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,国家杰出青年基金获得者,现任同济大学土木工程学院结构工程与防灾研究所所长、土木工程防灾国家重点实验室副主任。主要研究方向为工程结构抗震防灾、钢筋混凝土结构理论与应用。研究领域涉及高层和超高层建筑结构的抗震性能和设计方法,大型复杂体系建筑结构的抗震分析与设计理论,高层建筑结构的振动控制理论与工程应用,结构与地基的动力相互作用理论与应用,采用新材料新技术加固现有的建筑结构等。出版学术著作及教材7本,在国内外重要学术期刊上发表论文200多篇,其中SCI收录论文40多篇,EI收录论文120多篇。获得国家科技进步二等奖2项,省部级科技进步一等奖4项、二等奖8项,获国家专利20多项。

主要学术兼职有:中国建筑学会建筑结构分会副理事长、中国建筑学会抗震防灾分会副理事长、中国建筑学会抗震试验技术专业委员会主任委员、中国建筑学会高层建筑抗震专业委员会副主任委员、全国建筑物鉴定与加固技术委员会副主任委员、中国地震学会地震工程专业委员会副主任委员、中国振动工程学会结构动力学委员会副主任委员、国际实验结构工程协会副主席、国际桥梁与结构工程协会技术委员会委员。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构/吕西林主编. —3版. —武汉:武汉理工大学出版社,2011.12 重印
ISBN 978-7-5629-3613-8

I. 高… II. 吕… III. 高层建筑-建筑结构-高等学校-教材 IV. TU973

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第171991号

项目负责人:蔡德民 刘永坚 田道全 责任编辑:戴皓华
责任校对:高英 装帧设计:吴极
出版发行:武汉理工大学出版社
社址:武汉市洪山区珞狮路122号
邮编:430070
网址:<http://www.techbook.com.cn>
经销:各地新华书店
印刷:武汉理工大印刷厂
开本:880×1230 1/16
印张:13.5
插页:1
字数:438千字
版次:2011年8月第3版
印次:2011年12月第2次印刷 总第15次印刷
印数:102001—112000册
定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87394412 87383695 87384729 87397097(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

普通高等学校土木工程专业新编系列教材编审委员会

(第4届)

学术顾问:

吕西林 李杰 罗福午 李少甫 甘绍熺 包世华 毛鹤琴
辛克贵 刘立新 李必瑜 彭少民 何铭新 吴培明 胡敏良

主任委员:

李国强 朱宏亮 田高

副主任委员:

刘伟庆 邹超英 白国良 徐礼华 雷宏刚 贾连光 朱彦鹏
张永兴 张俊平 刘殿忠 缪昇 王岚 周学军 赵明华

委员:(以姓氏笔画为序)

王林 王燕 王月明 王天稳 王社良 王泽云 袁海庆
邓铁军 王新武 王毅红 吴炎海 卢文胜 白晓红 蒋沧如
叶献国 孙俊 孙强 刘长滨 李书进 李启令 曾志兴
李怀建 刘剑飞 孙家齐 过静珺 李碧雄 张立人 窦立军
陈水生 邵旭东 陈伯望 宋固全 张国强 张科强 戴国欣
吴雪茹 吴辉琴 何培玲 周云 俞晓 饶云刚 魏瑞演
姜玉松 段兵廷 柳炳康 赵瑞斌 徐伟 秦建平 袁广林

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘书长:蔡德民

第 3 版前言

本教材主要是根据土木工程本科专业“高层建筑结构”课程的教学大纲编写的,内容包括高层建筑结构体系与结构布置,高层建筑结构荷载作用与结构计算原则,高层建筑结构扭转效应的简化计算,框架结构的受力分析与设计,剪力墙结构的受力分析与设计,框架-剪力墙结构受力分析与设计,筒体结构及钢与混凝土组合结构的分析与设计方法,高层建筑结构构件的截面设计与构造要求,以及高层建筑基础的设计要点。

本教材的目的是使学生通过本课程的学习,能够深刻理解高层建筑结构的受力性能、变形特点和设计原则,了解高层建筑结构的组成及各种结构体系的布置特点、应用范围;掌握高层建筑结构计算简图的确定方法;掌握风荷载及地震作用的计算方法;掌握框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构受力分析与设计的实用方法;掌握高层建筑结构的抗震设计概念,掌握框架和剪力墙的截面设计原理;了解筒体结构的内力计算方法、内力分布特点及构造要点;了解钢与混凝土组合结构以及高层建筑基础的设计要点。

本教材是在作者多年教学、科研和工程实践经验的基础上,结合了国家自然科学基金重大研究计划重点项目“强地震作用下超高层建筑损伤机理及破坏全过程研究”(资助号:90815029)、北京市科技计划重点项目“大型复杂高层抗震关键技术研究示范”(资助号:D09050600370000)等研究项目的成果。并依据最新颁布的《高层建筑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》、《建筑结构荷载规范》等有关规范或规程编写的。内容取舍上在符合大专院校土木工程专业教学要求的前提下,力求基本、实用,既注重理论上的系统性,也注意叙述时简明扼要。本次修订还补充了相关例题,并附有思考题和习题。

本课程的课内总学时为 36 个,学时分配建议如下:

学时分配参考表

章 节	学 时	章 节	学 时
1	4	6	6
2		7	2
3	6	8	2
4	8	9	2
5	6		

很明显,上述学时分配是很紧的,主要是要求学生要课前自学预习,课后再进一步复习加深,通过自学和课堂教学逐步掌握高层建筑结构的设计原理。当然,学校可根据各自教学安排适当地增减学时和教学内容。

本教材的第 1 版由吕西林担任主编并编写第 1 章,桂国庆任副主编并编写第 3、5、6、9 章,张建荣编写第 4、7、8 章,卢文胜编写第 2 章。本教材的第 2、3 版由吕西林担任主编并修编第 1 章,卢文胜修编第 2、3 章,张建荣修编第 4、7、8 章,蒋欢军修编第 5、6、9 章。全书由吕西林修改定稿。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2011 年 5 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 高层建筑的特点	(1)
1.2 高层建筑结构的发展概况	(2)
1.3 本课程的教学内容与要求	(4)
2 高层建筑结构体系与结构布置	(7)
2.1 概述	(7)
2.1.1 框架结构体系	(7)
2.1.2 剪力墙结构体系	(8)
2.1.3 框架-剪力墙结构体系	(9)
2.1.4 筒体结构体系	(9)
2.1.5 巨型结构体系	(9)
2.2 结构布置原则	(10)
2.2.1 抗震设防结构布置原则	(10)
2.2.2 房屋适用高度和高宽比	(11)
2.2.3 结构平面布置原则	(12)
2.2.4 结构竖向布置原则	(14)
2.2.5 设伸缩缝、沉降缝和防震缝的原则	(15)
2.2.6 结构截面尺寸初估	(17)
2.3 楼盖结构布置	(18)
2.3.1 现浇楼盖和装配整体式楼盖	(18)
2.3.2 梁板式楼盖	(19)
2.3.3 密肋楼盖	(19)
2.3.4 无梁楼盖	(19)
2.3.5 非预应力平板	(19)
2.3.6 预应力平板	(19)
2.4 基础结构布置	(20)
2.4.1 基础类型	(20)
2.4.2 基础选型原则	(20)
2.4.3 基础埋深	(21)
2.4.4 基础底板厚度	(21)
2.5 水平位移限值和舒适度要求	(22)
2.6 结构布置实例	(23)
2.6.1 住宅建筑	(22)
2.6.2 旅馆建筑	(23)
2.6.3 公共性建筑	(23)
思考题	(24)
3 高层建筑结构荷载作用与结构设计原则	(25)
3.1 恒荷载及楼面活荷载的计算	(25)
3.1.1 恒荷载	(25)
3.1.2 活荷载	(25)

3.2	风荷载的计算	(26)
3.2.1	风荷载标准值及基本风压	(26)
3.2.2	横风向风振	(29)
3.2.3	总风荷载和局部风荷载	(29)
3.3	地震作用的计算	(30)
3.3.1	一般计算原则	(30)
3.3.2	水平地震作用计算	(32)
3.3.3	突出屋面上塔楼的地震力	(35)
3.3.4	竖向地震作用的计算	(36)
3.4	荷载效应组合	(37)
3.4.1	荷载效应和地震作用效应的组合方式	(37)
3.4.2	非抗震设计时的组合	(37)
3.4.3	抗震设计时的组合	(38)
3.5	结构简化计算原则	(38)
3.5.1	弹性工作状态	(39)
3.5.2	高层建筑结构应考虑整体共同工作	(39)
3.5.3	楼板在自身平面内的刚度为无限大,平面外的刚度可以不考虑	(39)
3.5.4	在计算中应考虑墙与柱子轴向变形的影响	(39)
3.6	扭转效应的简化计算	(40)
3.6.1	质量中心、刚度中心及扭转偏心距	(40)
3.6.2	考虑扭转作用的剪力修正	(42)
3.7	抗震设计的一般原则	(44)
3.7.1	地震时地面运动的特点	(44)
3.7.2	结构的抗震性能	(45)
3.7.3	合理选择结构的刚度	(46)
3.7.4	唐山地震中高层建筑的震害	(47)
3.7.5	抗震设计的基本原则	(47)
	思考题	(48)
4	框架结构设计	(50)
4.1	框架结构的计算简图	(50)
4.1.1	计算单元的确定	(50)
4.1.2	节点的简化	(50)
4.1.3	跨度与层高的确定	(51)
4.1.4	构件截面抗弯刚度的计算	(51)
4.2	竖向荷载作用下的近似计算	(52)
4.3	水平荷载作用下的反弯点法	(52)
4.4	水平荷载作用下的 D 值法	(56)
4.4.1	修正后的柱抗侧刚度 D	(56)
4.4.2	修正后的柱反弯点高度	(58)
4.5	水平荷载作用下位移的近似计算	(60)
4.6	框架结构的内力组合	(61)
4.6.1	控制截面及最不利组合内力	(61)
4.6.2	竖向活荷载的最不利位置	(62)
4.6.3	梁端弯矩调幅	(62)
4.7	框架梁的设计	(63)

4.7.1	框架梁的受力性能	(63)
4.7.2	框架梁的承载力计算	(64)
4.7.3	框架梁构造要求	(65)
4.8	框架柱的设计	(67)
4.8.1	框架柱的受力性能	(67)
4.8.2	框架柱承载力计算	(68)
4.8.3	框架柱的计算长度	(71)
4.8.4	框架柱的构造要求	(71)
4.9	框架节点的设计	(74)
4.9.1	框架节点的受力性能	(74)
4.9.2	框架节点的受剪承载力计算	(75)
4.9.3	框架节点的构造要求	(77)
	思考题	(80)
	习题	(81)
5	剪力墙结构设计	(82)
5.1	概述	(82)
5.1.1	剪力墙结构的特点	(82)
5.1.2	剪力墙结构的布置	(82)
5.1.3	剪力墙的分类	(83)
5.1.4	剪力墙的分析方法	(84)
5.2	整体剪力墙及整体小开口剪力墙的计算	(84)
5.2.1	整体墙的计算	(84)
5.2.2	整体小开口剪力墙的计算	(86)
5.3	联肢剪力墙的计算	(88)
5.3.1	双肢墙计算	(88)
5.3.2	多肢墙计算	(95)
5.4	壁式框架的计算	(99)
5.4.1	壁式框架计算简图	(99)
5.4.2	壁式框架内力计算	(99)
5.4.3	壁式框架位移计算	(101)
5.5	剪力墙结构的分类	(101)
5.5.1	按整体参数来划分	(101)
5.5.2	按剪力墙墙肢惯性矩比值来划分	(102)
5.5.3	剪力墙类型的判别方法	(103)
5.6	剪力墙的截面设计	(104)
5.6.1	墙肢正截面抗弯承载力	(104)
5.6.2	墙肢斜截面抗剪承载力	(108)
5.6.3	施工缝的抗滑移验算	(108)
5.7	剪力墙轴压比限值及边缘构件配筋要求	(109)
5.7.1	轴压比限值	(109)
5.7.2	边缘构件的设计	(109)
5.8	短肢剪力墙的设计要求	(111)
5.8.1	应用范围	(111)
5.8.2	加强措施	(111)
5.9	剪力墙设计构造要求	(112)

5.9.1	混凝土强度等级	(112)
5.9.2	剪力墙截面尺寸	(112)
5.9.3	剪力墙的分布钢筋要求	(113)
5.9.4	钢筋锚固和连接要求	(113)
5.9.5	剪力墙开洞时的构造要求	(113)
5.10	连梁截面设计及配筋构造	(115)
5.10.1	连梁的配筋计算	(115)
5.10.2	连梁的剪力设计值计算	(116)
5.10.3	连梁配筋构造措施	(116)
	思考题	(118)
	习题	(118)
6	框架-剪力墙结构设计	(119)
6.1	概述	(119)
6.1.1	框架-剪力墙结构的特点	(119)
6.1.2	框架-剪力墙结构中的梁	(120)
6.1.3	适用高度及高宽比	(120)
6.1.4	剪力墙的合理数量	(121)
6.1.5	剪力墙的布置	(121)
6.2	框架-剪力墙结构的内力计算	(122)
6.2.1	基本假定及总剪力墙和总框架刚度计算	(122)
6.2.2	按铰接体系框剪结构的内力计算	(123)
6.2.3	按刚接体系框剪结构的内力计算	(134)
6.2.4	内力分配计算	(137)
6.3	框架-剪力墙结构协同工作性能	(138)
6.3.1	结构的侧向位移特征	(138)
6.3.2	结构的内力分布特征	(139)
6.4	框架-剪力墙结构构件的截面设计及构造要求	(140)
6.4.1	框架部分设计的调整	(140)
6.4.2	截面设计	(140)
6.4.3	剪力墙的配筋构造要求	(140)
6.4.4	带边框剪力墙的构造要求	(140)
	思考题	(141)
	习题	(141)
7	筒体结构设计	(142)
7.1	筒体结构的布置	(142)
7.1.1	核芯筒结构	(142)
7.1.2	框筒结构	(142)
7.1.3	筒中筒结构	(144)
7.1.4	框架-核芯筒结构	(144)
7.1.5	成束筒结构	(144)
7.1.6	多重筒结构	(144)
7.2	侧向力作用下的受力特点	(144)
7.3	筒体结构的计算方法	(145)
7.3.1	空间杆系-薄壁柱矩阵位移法	(145)
7.3.2	平面展开矩阵位移法	(146)

7.3.3	等效弹性连续体能量法求解	(147)
7.3.4	有限条分析法	(149)
7.4	筒体结构的截面设计及构造要求	(149)
7.4.1	混凝土	(149)
7.4.2	外框筒	(150)
7.4.3	核芯筒	(150)
	思考题	(151)
8	钢与混凝土组合结构设计	(152)
8.1	概述	(152)
8.2	组合结构的基本构件和结构布置	(153)
8.2.1	组合结构的基本单元	(153)
8.2.2	高层建筑组合结构布置举例	(155)
8.2.3	结构的总体布置原则	(157)
8.3	组合结构构件设计	(158)
8.3.1	截面形式和构造要求	(158)
8.3.2	型钢混凝土梁的计算	(159)
8.3.3	型钢混凝土柱的设计	(163)
8.3.4	钢管混凝土构件设计	(166)
8.3.5	型钢混凝土的梁柱节点设计	(166)
8.4	上海金茂大厦结构概况	(168)
	思考题	(171)
	习题	(171)
9	高层建筑结构基础设计	(172)
9.1	概述	(172)
9.1.1	高层建筑基础的常用形式	(172)
9.1.2	基础的埋置深度	(172)
9.1.3	高层部分的基础与裙房基础的连接	(173)
9.1.4	基础选型实例	(174)
9.1.5	地基承载力和单桩承载力	(174)
9.2	筏形基础设计	(176)
9.2.1	筏形基础的形式	(176)
9.2.2	构造要求	(178)
9.2.3	筏板的平面尺寸	(180)
9.2.4	筏形基础的强度验算	(180)
9.3	箱形基础设计	(183)
9.3.1	概述	(183)
9.3.2	箱形基础结构布置的要求	(183)
9.3.3	构造要求	(185)
9.3.4	箱形基础基底反力计算	(187)
9.3.5	箱形基础内力计算和基础强度验算	(189)
9.4	桩基础设计	(192)
9.4.1	概述	(192)
9.4.2	预制混凝土桩	(193)
9.4.3	灌注桩	(194)
9.4.4	大直径扩底墩	(194)

9.4.5 桩基承台	(196)
思考题	(197)
附录 1 风荷载体型系数	(198)
附录 2 规则框架承受均布及倒三角形分布水平力作用时反弯点的高度比	(199)
参考文献	(204)

1 绪 论

1.1 高层建筑的特点

城市中的高层建筑是反映这个城市经济繁荣和社会进步的重要标志,当人们谈起举世闻名的摩天大楼时,往往和芝加哥、纽约这样的国际大都市联系在一起,足以说明高层建筑对城市社会形象的贡献。进入 20 世纪 90 年代以来,随着社会与经济的蓬勃发展,特别是城市建设的发展,要求建筑物所能达到的高度与规模不断地增加,例如目前世界上高度超过 300m 的高层建筑已达几十幢,国际上正在筹划的 100~300 层的巨型建筑其高度均超过 400m,我国目前已建成并投入使用的上海环球金融中心高度为 492m,已建成并投入使用的阿拉伯联合酋长国迪拜的哈利法塔高度达到了 828m,比台北 101 足足高出 320m。高层建筑在全球范围内突飞猛进的建设,从科学技术方面看,得益于力学分析方法的发展、结构设计和施工技术的进步以及现代机械和电子技术的贡献。

多少层的建筑或多高的建筑为高层建筑,不同国家有不同的规定,且多无绝对、严格的标准。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》规定:10 层及 10 层以上或房屋高度超过 28m 的住宅建筑和高度大于 24m 的其他民用建筑结构为高层建筑。建筑物高度超过 100m 时,不论住宅建筑或公共建筑,均为超高层建筑。联合国 1972 年国际高层建筑会议将 9 层及其以上的建筑定为高层建筑,并按建筑层数和高度划分为四类:

- 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,高度在 100m 以上。

美国将高度为 22~25m 以上或 7 层以上的建筑物定为高层建筑。英国将高度 24m 以上的建筑物定为高层建筑。法国规定 28m 以上,居住建筑高度在 50m 以上的建筑物为高层建筑。日本规定 8 层以上或建筑高度超过 31m 的建筑物为高层建筑,而 30 层以上的旅馆、办公楼和 20 层以上的住宅为超高层建筑。

高层建筑的特点(包括有利的和不利的)有以下几个方面:

(1)在相同的建设场地中,建造高层建筑可以获得更多的建筑面积,这样可以部分解决城市用地紧张和地价高涨的问题。设计精美的高层建筑还可以为城市增加景观,如阿拉伯联合酋长国迪拜的哈利法塔和上海的金茂大厦等。但高层建筑太多、太密集也会对城市带来热岛效应,玻璃幕墙过多的高层建筑群还可能造成光污染现象。

(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。例如在新加坡的新建居住区中,由于建造了高层建筑群,留下了更多地面空间,可以更好地建设城市绿化和人们休闲活动空间。

(3)从城市建设和管理的角度看,建筑物向高空延伸,可以缩小城市的平面规模,缩短城市道路和各种公共管线的长度,从而节省城市建设与管理的投资。由于建造高层建筑可以增加人们的聚集密度,缩短相互间的距离,水平交通与竖向交通相结合,使人们在地面上的活动走向空间化,节约了时间,增加了效率。但人口的过分密集有时也会造成交通拥挤、出行困难等问题。

(4)高层建筑中的竖向交通一般由电梯来完成,这样就会增加建筑物的造价,从建筑防火的角度看,高层建筑的防火要求要高于中低层建筑,也会增加高层建筑的工程造价和运行成本。

(5)从结构受力特性来看,横向作用(风荷载和地震作用)在高层建筑分析和设计中将起着重要的作用,特别是在超高层建筑中将起主要作用。因此高层建筑的结构分析和设计要比一般的中低层建筑复杂得多。

综合高层建筑的上述特点,可以认为,建造高层建筑一般是利大于弊,而合理的规划和设计还可以达到

美化城市环境的效果。可以预见,在相当长的一段时间内,高层建筑仍将是世界上大部分国家在城市建设中的主要建筑形式。因此,掌握高层建筑的设计知识是对建筑与土木工程领域技术人员的基本要求。作为土木工程专业的学生,更应该掌握高层建筑结构的分析理论和基本设计方法,为今后的工作打下良好的基础。

1.2 高层建筑结构的发展概况

高层建筑的结构体系是随社会生产的发展和科学技术的进步而不断发展的。早期高层建筑的发展是由于大工业的兴起促使人口向城市集中,造成城市用地紧张。为了在较小的场地范围内建造出更多的建筑面积,建筑物不得不向高空延伸,这样就由多层建筑发展为高层建筑。世界上第一幢近代高层建筑是美国芝加哥的家庭保险大楼,该楼 10 层,高 55m,建于 1885 年,采用铁柱和砖墙作为结构体系。此后 10 年中,在芝加哥和纽约相继建成了 30 幢类似的高层建筑。1895 年奥提斯(Otis)安全电梯首次在纽约某 16 层宾馆应用。19 世纪末各种型钢有很大发展,1889 年巴黎埃菲尔铁塔建成,所有这些,特别是钢结构与电梯相结合,对高层建筑的发展有很大的推动作用。20 世纪 30 年代出现了高层建筑发展的第一个高潮。1931 年建成的纽约帝国大厦,102 层,高 381m,保持了世界最高建筑纪录达 41 年之久。该建筑在结构体系上采用框架支撑体系,在电梯井纵横方向设置了支撑,连接采用铆接,在钢框中填充了墙体以共同承受横向作用。

第二次世界大战使高层建筑的发展几乎处于停顿状态,直到 20 世纪 50 年代,又开始了新的发展。战后焊接在钢结构制造中的推广和 50 年代高强螺栓的进一步应用,使 60 年代以来钢结构的加工既可以在工厂焊接制造,也可以在现场螺栓安装。美国在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初建成了 415m 和 417m 高的纽约世界贸易中心双塔楼、443m 高的芝加哥西尔斯大厦和 344m 高的芝加哥汉考克大厦等一批 100 层以上的超高层建筑,是这个时期最有代表性的建筑物,它们至今仍位于世界上少数最高的建筑物之列。这些建筑能达到如此新的高度,主要是因为采用了适应这种高度的新的结构体系,即 60 年代美国人坎恩(Fazler Khan)提出的框筒体系,为建造超高层建筑提供了理想的结构形式。从这种体系衍生出来的筒中筒、多束筒和斜撑筒等体系各有特色,将高层建筑的发展推向了新阶段。纽约世界贸易中心大楼在规模和技术上的创新,是前所未有的。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墙,首次用粘弹性阻尼器减轻风振动效应等,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。

高层建筑结构的抗震研究,导致地震活动比较频繁的日本在 1963 年取消了房屋高度不得超过 31m 的限制,使日本的高层建筑得到了发展的空间。美国早在 1957 年就取消了地震区高层建筑不得超过 13 层的限制,推动了地震区高层建筑的发展。

钢筋混凝土高层建筑是 20 世纪初出现的。世界上第一幢钢筋混凝土高层建筑是 1903 年建成的美国辛辛那提市的英格尔斯(Ingalls)大楼,16 层,高 64m。钢筋混凝土高层建筑的结构体系和高层钢结构类似。它的发展也经历了由低到高的过程,目前已出现了高度超过 300m 的混凝土结构高层建筑。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体系。与全钢结构和全混凝土结构相比,钢和混凝土的组合结构具有良好的抗震性能和耐腐蚀耐火等性能,在当今的超高层建筑中应用颇多。第一幢组合结构高层建筑是 1955 年在华沙建成的 I Palac Kultury Nauki 大楼,42 层,241m,它至今仍然是欧洲最高的建筑。香港的中国银行大厦,采用空间桁架和大截面的组合柱,是组合结构在高层建筑结构中的新发展。上海的金茂大厦,采用框架-筒体结构,在钢筋混凝土筒体的外围设置了 8 根截面尺寸较大的钢与混凝土组合柱,则是组合结构在高层建筑中的代表之作。日本从 20 世纪 80 年代开始,在高层建筑结构的抗风和抗震控制中,大胆地使用了结构主动控制技术和混合控制技术,代表了现代机械和电子技术在高层建筑工程中的应用方向。

我国自行建造高层建筑是从 20 世纪 50 年代开始的。50 年代中期建造了几幢 8~10 层的砖混结构住宅和旅馆。1959 年北京建成了几幢钢筋混凝土高层公共建筑,如民族饭店(12 层,47.7m)、民航大楼(15 层,60.8m)。60 年代,我国建成了广州宾馆(27 层,88m)。70 年代,北京、上海建成了一批剪力墙结构住宅(12~16 层)。1974 年建成了北京饭店(19 层,87.15m),使我国地震区高层建筑突破了 80m。1975 年,广州建成了白云宾馆(33 层,114.05m),标志着我国高层建筑开始突破 100m。80 年代是我国高层建筑发展的兴

盛时期,北京、广州、深圳、上海等 30 多个大中城市建造了一批高层建筑。进入 90 年代,随着我国经济实力的增强和城市建设的快速发展,我国的高层建筑得到了前所未有的发展,各种新型的结构体系在高层建筑工程中得到了广泛的应用,高层建筑的规模和高度不断地突破。据不完全统计,我国目前已建成的和在建的高度超过 150m 的高层建筑已超过了 100 多幢,超过 400m 的高层建筑已达到 20 多幢。

高层建筑结构体系的发展过程可以大致地归纳在表 1.1 中。

高层建筑结构体系的发展过程

表 1.1

始用年代	结构体系和特点
1885	砖墙、铸铁柱、钢梁
1889	钢框架
1903	钢筋混凝土框架
20 世纪初	钢框架+支撑
二次大战后	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,钢管钢筋混凝土结构
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	巨型结构,应力蒙皮结构,隔震结构
20 世纪 80 年代中期	被动耗能结构,主动控制结构,混合控制结构

根据高层建筑的发展过程和目前世界经济和科学技术的发展水平,可以预测今后高层建筑结构的发展趋势如下:

(1)新材料的开发和应用

随着高性能混凝土材料的研制和不断发展,混凝土的强度等级和韧性性能也不断地得到改善。混凝土的强度等级已经可以达到 C100 以上,在高层建筑中应用高强度混凝土,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钢结构的主要用钢,而耐火钢材 FR 钢的出现为钢结构的抗火设计提供了方便。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,在有些情况下可以不采用防火保护材料,从而降低钢结构的造价,使钢结构更具有竞争性。

(2)高层建筑的高度将出现突破

表 1.2 为目前世界上最高的十大建筑(截至 2010 年 1 月底)。表 1.3 为我国内地最高的十大建筑。由于高层建筑中的科技含量越来越高,已成为反映一个国家或城市科技实力和建设水平的指标之一,目前世界上不少国家都设想设计和建造更高的高层建筑。美国、日本、韩国和我国目前都正在筹划高度超过 500m,层数超过 100 层的超高层建筑,而建成于 2010 年 1 月的阿拉伯联合酋长国迪拜的哈利法塔已从技术上和经济上证明了它的可能性。

世界最高十大建筑

表 1.2

排名	建筑名称	城市	建成年份	层数	高度(m)	结构材料	用途
1	哈利法塔	迪拜	2010	162	828	组合	多用途
2	台北 101	台北	2004	101	508	组合	多用途
3	上海环球金融中心	上海	2008	101	492	组合	多用途
4	石油大厦	吉隆坡	1996	88	452	组合	多用途
5	紫峰大厦	南京	2008	89	450	组合	多用途
6	西尔斯大厦	芝加哥	1974	110	443	钢	办公
7	广州国际金融中心	广州	2009	103	440	组合	多用途
8	金茂大厦	上海	1998	88	420.5	组合	多用途
9	国际金融中心大厦二期	香港	2003	88	415	组合	多用途
10	中信广场	广州	1997	80	391	混凝土	办公

注:以上高度均指建筑高度,从室外地面至建筑最高点的高度。

我国内地最高十大建筑

表 1.3

排名	建筑名称	城市	建成年份	层数	高度(m)	结构材料	用途
1	上海环球金融中心	上海	2008	101	492	组合	多用途
2	紫峰大厦	南京	2008	89	450	组合	多用途
3	广州国际金融中心	广州	2009	103	440	组合	多用途
4	金茂大厦	上海	1998	88	420.5	组合	多用途
5	中信广场	广州	1997	80	391	混凝土	办公
6	地王大厦	深圳	1996	69	384	组合	办公
7	世贸国际广场	上海	2007	60	333	组合	多用途
8	中国国际贸易中心第三期	北京	2007	80	330	组合	多用途
9	赛格广场	深圳	2000	72	292	组合	办公
10	恒隆广场	上海	2002	66	288	组合	多用途

注:以上高度均指建筑高度,从室外地面至建筑最高点的高度。

(3)组合结构高层建筑将增多

采用组合结构可以建造比混凝土结构更高的建筑。在强震国家日本,组合结构高层建筑发展迅速,其数量已超过混凝土结构高层建筑。除外包混凝土组合柱外,钢管混凝土组合柱应用也很广泛,外包混凝土的钢管混凝土双重组柱的应用也很多。由于钢管内混凝土处于三轴受压后状态,能提高构件的竖向承载力,从而可以节省钢材。巨型组合柱首次在香港的中国银行应用,取得了很大的经济效益,上海金茂大厦结构中也成功地应用了巨型组合柱。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,组合结构在高层建筑中的应用将进一步扩大。

(4)新型结构形式的应用将增多

已建成的香港中国银行大厦和正在筹划中的芝加哥 532m 高的摩天大楼方案,都采用了桁架筒体,并将全部垂直荷载传至周边结构,它们的单位面积用钢量都仅约 $150\text{kg}/\text{m}^2$,是特别节省钢材的。预计这种结构体系今后在 300m 以上的高层建筑中将得到更多的应用。巨型框架体系由于其刚度大,便于在内部设置大空间,今后也将得到更多的应用。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,预计今后也将扩大应用。

(5)耗能减震技术的应用将得到发展

建筑结构的减震有被动耗能减震和主动减震(有时也称被动控制和主动控制)。在高层建筑中的被动耗能减震有耗能支撑,带竖缝耗能剪力墙,被动调谐质量阻尼器以及安装各种被动耗能的油阻尼器等。主动减震则是计算机控制的,由各种作动器驱动的调谐质量阻尼器对结构进行主动控制或混合控制的各种作用过程。结构主动减震的基本原理是,通过安装在结构上的各种驱动装置和传感器,与计算机系统相连接,计算机系统对地震动(或风振)和结构反应进行实时分析,向驱动装置发出信号,驱动装置对结构不断地施加各种作用,以达到在地震(或风振)作用下减小结构反应的目的。目前在日本高层建筑结构中应用各种振动控制的实例已超过 30 个,在中国内地和台湾有 3 个工程应用了这种技术。随着人类进入信息时代,计算机、通讯设备以及各类办公电子设备不受振动干扰而安全平稳地运行,具有头等重要意义,这就要求创造安全、平稳、舒适的办公室环境,并要能对各种扰动进行有效的隔离和控制,因此,高层建筑的减震控制将有很大的发展前景。

1.3 本课程的教学内容与要求

现代高层建筑结构的材料主要有:钢筋混凝土、钢-钢-钢筋混凝土的组合(主要指钢筋混凝土核芯筒,外围钢框架柱或钢管混凝土柱,国内也将这类结构称为钢-混凝土混合结构)。在国内,绝大多数高层建筑都是采用钢筋混凝土结构,极少数采用钢结构,高度超过 200m 的高层建筑有近半数采用钢-混凝土组合结构,无一采用钢结构。进入 20 世纪 90 年代,值得注意的发展趋势是:原来从高层钢结构起步的美国和日本,钢筋

混凝土高层建筑也迅速发展起来。尤其是日本,以前基本上采用钢结构,现在正在大力发展钢筋混凝土结构,主要用在 20~30 层的高层建筑中,最高达到 40 层。其主要原因是:钢筋混凝土结构整体性好,刚度大,变形小;阻尼比高,舒适性佳;且钢筋混凝土结构耐腐蚀、耐火、维护方便、造价低。

对于新一代超高层建筑,当今世界各国都已趋向采用钢-混凝土组合结构。今后,我国钢-混凝土组合结构和钢结构都会有所发展,特别是在高度超过 200m 的高层建筑中,采用钢-混凝土组合结构的可能性将会增加。但对于一般高层建筑,钢筋混凝土仍将是主要结构材料。所以,本书主要介绍钢筋混凝土高层建筑结构的设计方法,而对钢与混凝土组合结构仅做基本原理的介绍,为学生毕业后参与这些工作打下一个初步的基础。

建造一栋高层建筑,一般包括设计和施工两大环节。设计中一般包括建筑设计、结构设计和设备设计(水、电、暖通等)。建筑设计一般由建筑师完成,结构设计一般由土木结构工程师完成,包括基础设计和上部结构设计。设备设计一般由给排水、供电、空调、暖通等专业工程师完成。高层建筑结构作为承受竖向与水平荷载的体系和建筑物的骨架,在高层建筑的发展中起着非常重要的作用。高层建筑结构作为一门学科,包括钢结构、混凝土结构、钢-混凝土组合结构等各类高层建筑的性能及设计和施工方面的有关技术问题。而本门课程由于受到学时的限制,仅讨论混凝土结构和钢-混凝土组合结构设计方面的问题。其主要内容有:结构的体系和布置;结构的荷载作用及其组合;结构的设计原则和设计方法;结构的静力和动力分析方法以及实用简化分析方法;结构的抗震分析和抗震设计;框架梁、柱和剪力墙等抗侧力构件的性能和设计;结构的节点构造和设计;地基和基础的设计等等。

本课程是专业课,要求先修的课程主要有结构力学、建筑材料、混凝土结构、钢结构、土力学与地基基础等。本课程的主要任务是学习高层建筑结构设计的基本方法。主要要求是:了解高层建筑结构的常用结构体系、特点以及应用范围;熟练掌握风荷载及地震作用计算方法;掌握框架结构、剪力墙结构、框剪结构 3 种基本结构内力及位移计算方法,理解这 3 种结构内力分布及侧移变形的特点及规律,学会这 3 种结构体系中所包含的框架及剪力墙构件的配筋计算方法及构造要求。通过本课程的学习,还应掌握高层钢筋混凝土结构的抗震设计原则及方法,能区别抗震设计与非抗震设计的不同要求;对筒体结构、钢与混凝土组合结构(劲性钢筋混凝土结构)的内力分布、计算特点及结构设计有初步认识;对高层建筑结构的基础设计有初步的了解。由于目前计算机应用程序的发展以及各种结构设计软件的出现,绝大部分的高层建筑设计都可以通过设计软件来完成,然而大量的工程实践告诉我们,结构的概念设计更加重要,结构体系的选用和结构布置往往对设计起着决定的作用。因此,对土木工程专业学生来说,只有掌握了扎实的高层建筑设计的基本知识,才能在今后的工作中正确地运用各种设计软件完成一个个有自己创新特点的建筑工程的设计。

在本课程的学习中,还将用到国家的有关设计标准,如《高层建筑混凝土结构技术规程》、《混凝土结构设计规范》、《钢结构设计规范》、《建筑抗震设计规范》、《建筑结构荷载规范》及《建筑地基基础设计规范》等。学习本课程中的基本原理将有助于理解这些规范中的有关规定,正确地运用规范进行工程设计。而将规范的有关内容引入到教材中也将使这门课程更加贴近工程实际,更有利于学生毕业走出校门后尽快投入到实际工程中去。

本课程各部分内容的具体要求如下:

(1) 结构体系及布置

了解横向作用对结构内力及变形影响,了解不同体系的特点、优缺点及适用范围,了解结构总体布置的原则及需要考虑的问题。了解各种结构缝的处理,地基基础选型等。

(2) 荷载作用与结构计算简化原则

熟练掌握总风荷载和局部风荷载的计算,以及用反应谱方法计算等效地震作用的方法,理解地震作用两阶段设计的内容、方法及目的以及常遇地震、罕遇地震和设防烈度的关系。掌握结构自振周期计算的实用方法,理解结构计算的平面结构假定。

了解扭转对结构内力和变形的影响,熟练掌握质量中心及刚度中心的近似计算方法,能正确应用剪力修正系数。

(3) 框架结构内力与位移计算

熟练掌握反弯点法、D 值法计算内力及位移方法,深入理解这两种方法的区别及应用范围。了解内力分

布及位移的影响因素、杆件弯曲变形及轴向变形对侧移的影响等。

(4) 剪力墙结构内力与位移计算

了解开洞对剪力墙内力及位移影响,了解不同近似方法的适用范围。深入理解连续化方法的基本假定、公式推导、公式图表应用等,熟练掌握连续化方法计算简图及带刚域框架计算简图的确定方法及带刚域杆件刚度计算方法。

(5) 框架-剪力墙协同工作计算

了解框架与剪力墙协同工作的意义。能正确建立计算简图,掌握总框架、总剪力墙、总连梁刚度计算方法,会用公式及曲线计算内力及位移。掌握几个重要概念:刚度特征值 λ 的物理意义及其对内力分配的影响,框剪结构内力分布及侧移特点。

(6) 荷载效应组合及设计要求

掌握荷载效应组合各种工况的区别应用,理解无地震组合及有地震组合时承载力验算与位移限值的区别。掌握确定结构抗震等级的方法;进一步理解两阶段抗震设计方法。

(7) 框架设计和构造

了解延性框架意义和实现延性框架的基本措施。了解梁、柱、节点区的破坏形态,会区别抗震及非抗震情况下配筋要求。掌握梁、柱、节点区的配筋设计方法。掌握几个重要概念:延性框架、强柱弱梁、强剪弱弯、轴压比及箍筋作用。

(8) 剪力墙设计和构造

了解剪力墙结构配筋特点及构造要求,掌握悬臂剪力墙及联肢剪力墙的截面配筋计算方法。掌握剪力墙约束边缘构件和构造边缘构件的概念,了解影响剪力墙延性的因素。

(9) 框筒、筒中筒及钢与混凝土组合结构

了解平面结构及空间结构计算的不同假设、区别及应用范围。对框筒及筒中筒结构布置及计算方法有初步知识,对钢与混凝土组合结构的设计有初步的了解。

(10) 高层建筑结构基础设计

对高层建筑结构的基础布置有较全面的了解,对各种基础的设计有初步的知识并掌握基础设计计算的基本原理。