

吕西林 著

复杂高层建筑结构 抗震理论与应用



科学出版社
www.sciencep.com

复杂高层建筑结构抗震理论与应用

吕西林 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较系统地阐述了复杂高层建筑结构抗震设计的基本理论、分析方法和创新技术,以及重大工程应用的主要成果。内容包括复杂高层建筑出现的背景和特点;复杂高层结构的新体系;复杂高层建筑结构抗震分析方法,包括模态推覆分析方法和弹塑性时程分析方法及实际工程应用;复杂高层建筑结构抗震模型试验理论与方法;复杂高层建筑结构抗震设计指南;复杂高层建筑结构消能减震新体系,包括组合消能减震支撑体系、组合基础隔震体系和阻尼器连接的耦联结构消能减震体系及其各种工程应用;高层建筑结构-桩-土动力相互作用体系的理论与应用;各类复杂高层建筑工程的抗震研究实例等。

本书可供土木建筑工程设计人员和研究人员参考,也可作为土木建筑类专业专业的研究生教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂高层建筑结构抗震理论与应用 / 吕西林著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-020135-5

I. 复… II. 吕… III. 高层建筑—抗震设计—研究 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 149513 号

责任编辑:王志欣 吴凡洁 牛宇锋 王向珍 / 责任校对:包志虹
责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 9 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2007 年 9 月第一次印刷 印张:47 1/4

印数:1—2 500 字数:932 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

建设“节能省地”型的公共建筑和住宅建筑是我国城市建设中的一项基本战略,而建造高层建筑则是实现“节能省地”战略的重要内容。随着我国经济的发展和建筑技术的进步,功能多样、形体独特的复杂高层建筑大量涌现,这一方面增加了城市的景观,另一方面也对结构设计特别是抗震设计提出了新的挑战,同时也吸引了国内外的建筑师和工程师参与其中,为我国的高层建筑建设市场带来了活力。但随之而来的一个日益突显的问题是,我国目前在建高度 200m 以上的复杂高层建筑工程,大部分是外方做设计方案,在结构体系确定后由中方进行施工图设计,设计的主动权掌握在外方设计师手中。从结构设计的角度看,这主要是因为我国现行复杂高层建筑的设计理论和技术标准还不成熟。而目前,国内大型复杂超高层建筑工程还在不断出现,这些复杂高层建筑工程的建设必然需要新的设计理论和技术标准来指导,因此,进行大型复杂高层建筑工程的抗震基础理论研究,为我国独立设计和建造大型复杂高层建筑工程提供理论和技术支持,就显得尤其重要并成为一项迫切的任务。

在过去的 15 年中,作者及其研究梯队在复杂高层建筑结构抗震防灾新理论新技术研究和应用方面进行了较多的研究工作,取得了相应的成果,研究成果在很多重大工程中得以应用。为了向广大的研究人员和设计人员介绍复杂高层建筑抗震的最新研究成果,特撰写了本书。本书共 8 章,主要论述了复杂高层建筑结构抗震理论及工程应用问题。主要内容有:①高层建筑结构体系的发展过程、复杂高层建筑结构的出现及对设计的影响、高层建筑结构体系的发展趋势;②常用的结构体系和新出现的结构体系;③复杂高层建筑结构抗震分析新方法,包括模态推覆分析方法和弹塑性时程分析方法,重点介绍了作者及其研究梯队发展的分析方法、计算程序和工程应用成果;④高层建筑抗震模型试验的相似理论和实现方法,论述了高层建筑结构抗震模型试验的特点及控制因素,阐述了高层建筑结构抗震模型试验结果的分析和评价方法,分析了结构抗震模型试验中存在的问题和发展趋势;⑤复杂高层建筑结构抗震设计指南的编制原则和详细内容,主要包括抗震概念设计、结构抗震分析和抗震构造措施、结构模型试验的基本要求以及地基基础抗震设计要点;⑥复杂高层建筑结构的消能减震新体系,重点介绍了作者及其研究梯队开发的组合消能减震支撑体系、组合基础隔震体系和阻尼器连接的耦联结构消能减震体系的技术特点和分析方法,以及工程应用示范;⑦高层建筑结构-桩-土动力相互作用体系的理论与应用,主要包括高层建筑桩基础的震害、高层建筑结构-桩-土动力相

互作用体系的特点、振动台模型试验方法以及计算机模拟分析技术；⑧按结构类型介绍了各类复杂高层建筑结构抗震研究成果的工程应用实例，包括结构特点、模型试验、计算分析和现场实测等内容。

本书的主要内容源自以下复杂高层建筑结构抗震研究项目的部分成果：①国家教育委员会“跨世纪优秀人才”专项基金——高层建筑抗震控制理论与应用研究(1994~1997)；②国家自然科学基金重大项目三级专题——超高层建筑结构体系及其需要解决的力学问题(59895410)；③国家自然科学基金杰出青年基金——高层建筑结构抗震研究(50025821)；④国家自然科学基金重点项目——结构与地基相互作用体系的振动台试验和计算分析(59823002)；⑤上海市优秀学科带头人资助计划——超限高层建筑抗震研究与应用(1998XD14013)；⑥上海市科学技术委员会项目——钢管混凝土结构抗震关键技术研究；⑦上海市重点学科建设研究项目——复杂体系高层混凝土结构抗震研究；⑧国家自然科学基金委员会创新研究群体项目——土木工程防灾研究(50321803)；⑨国家自然科学基金重点项目——结构振动台模型试验技术及其远程协同试验方法研究(50338040)。

本书的成果是作者与梯队成员和研究生共同完成的，他们是周德源、钱江、施卫星、卢文胜、朱杰江、李培振、周颖、翁大根、吴晓涵、蒋欢军、赵斌以及十多名博士生和硕士生，正是他们的辛勤工作才使研究能逐步深入。本书中的工程实例来源于国内的几个大型设计研究院，他们的大力支持使研究成果能在重大工程中得以检验和应用，并最终为提炼设计标准或设计指南提供了工程实例依据。在此，作者对他们表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中难免有疏漏和不足之处，衷心希望读者不吝赐教。

作 者

2007年1月

目 录

前言

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 第 1 章 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 高层建筑结构的发展趋势 | 4 |
| 1.4 复杂高层建筑的出现及对结构设计的影响 | 8 |
| 参考文献..... | 8 |
| 第 2 章 复杂高层建筑的结构体系 | 9 |
| 2.1 常用结构体系 | 9 |
| 2.2 筒体结构体系..... | 25 |
| 2.3 混合结构体系..... | 30 |
| 2.4 巨型组合结构体系..... | 45 |
| 2.5 未来的结构体系..... | 53 |
| 参考文献 | 56 |
| 第 3 章 复杂高层建筑结构抗震分析方法 | 57 |
| 3.1 常用的抗震分析方法..... | 58 |
| 3.2 弹性及弹塑性时程分析方法..... | 62 |
| 3.3 静力非线性分析(推覆分析)方法..... | 71 |
| 3.4 非线性分析中的单元模型..... | 82 |
| 3.5 材料和构件的恢复力模型 | 100 |
| 3.6 非线性分析方法的工程应用 | 146 |
| 3.7 抗震结构体系的优化理论与应用实例 | 169 |
| 参考文献..... | 199 |
| 第 4 章 复杂高层建筑抗震模型试验理论与方法 | 201 |
| 4.1 结构抗震模型试验的相似理论 | 201 |
| 4.2 高层建筑抗震试验的相似模型 | 208 |
| 4.3 不同材料结构体系模型的相似要求 | 215 |
| 4.4 高层建筑抗震试验模型相似关系的试验验证 | 219 |
| 4.5 高层建筑抗震模型试验结果的分析与应用 | 257 |
| 4.6 高层建筑抗震模型试验研究进展与存在的问题 | 284 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 参考文献 | 286 |
| 第 5 章 复杂高层建筑抗震设计指南 | 288 |
| 5.1 概述 | 288 |
| 5.2 超限高层建筑工程的认定和抗震概念设计 | 289 |
| 5.3 结构抗震计算分析的基本要求 | 296 |
| 5.4 结构抗震构造措施要点 | 306 |
| 5.5 地基基础抗震设计要求 | 308 |
| 5.6 结构抗震模型试验的基本要求 | 309 |
| 参考文献 | 310 |
| 第 6 章 复杂高层建筑结构的消能减震新体系 | 311 |
| 6.1 高层建筑常用的振动控制技术 | 311 |
| 6.2 组合消能减震支撑的开发研究及工程应用 | 314 |
| 6.3 组合基础隔震系统的开发研究及工程应用 | 351 |
| 6.4 用阻尼器连接的耦联结构体系减震研究与工程应用 | 380 |
| 6.5 阻尼墙的开发研究与理论分析 | 419 |
| 6.6 位移型阻尼装置的研发与工程应用 | 456 |
| 参考文献 | 464 |
| 第 7 章 高层建筑结构-桩-土动力相互作用体系的理论与应用 | 465 |
| 7.1 高层建筑地基基础的震害 | 465 |
| 7.2 动力相互作用体系的特点 | 478 |
| 7.3 动力相互作用体系的分析和试验方法 | 482 |
| 7.4 动力相互作用体系的模型试验 | 493 |
| 7.5 动力相互作用体系的计算机模拟分析 | 521 |
| 7.6 考虑动力相互作用的简化抗震设计 | 552 |
| 7.7 考虑地基土液化影响的桩基-高层建筑体系地震反应分析 | 561 |
| 参考文献 | 577 |
| 第 8 章 复杂高层建筑工程抗震研究实例 | 580 |
| 8.1 复杂体形框架结构 | 580 |
| 8.2 复杂体形剪力墙结构 | 585 |
| 8.3 复杂体形框架-剪力墙结构 | 595 |
| 8.4 复杂体形框架-筒体结构 | 610 |
| 8.5 复杂体形多塔楼弱连接结构 | 629 |
| 8.6 复杂体形钢管混凝土结构 | 653 |
| 8.7 复杂体形混合结构 | 664 |
| 8.8 复杂体形多筒体结构 | 695 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 8.9 立面开大洞门式结构 | 707 |
| 8.10 巨型组合结构 | 719 |
| 参考文献 | 733 |
| 附录 考虑材料非线性的单元切线刚度矩阵 | 735 |

Contents

Preface

| | |
|--|-----|
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Characteristics of High-rise Buildings | 1 |
| 1.2 Development History of High-rise Building Structures | 2 |
| 1.3 Development Tendencies of High-rise Building Structural Systems | 4 |
| 1.4 Emerging of Complex High-rise Buildings and its Influence on Seismic Analysis and Design | 8 |
| Reference | 8 |
| Chapter 2 Structural Systems for Complex High-rise Buildings | 9 |
| 2.1 Conventional Structural Systems for High-rise Buildings | 9 |
| 2.2 Tubular Structural Systems | 25 |
| 2.3 Hybrid Structural Systems | 30 |
| 2.4 Composite Mega Structural Systems | 45 |
| 2.5 New Structural Systems for the Future | 53 |
| Reference | 56 |
| Chapter 3 Seismic Analysis Methods for Complex High-rise Structures | 57 |
| 3.1 Conventional Methods for Seismic Analysis | 58 |
| 3.2 Elastic and Elasto-plastic Time History Analysis | 62 |
| 3.3 Pushover Analysis Method for Static Non-linear analysis | 71 |
| 3.4 Element Models in Non-linear Analysis | 82 |
| 3.5 Restoring Force Models for Structural Materials and Members | 100 |
| 3.6 Engineering Applications of Non-linear Methods in Seismic Analysis | 146 |
| 3.7 Optimization of Earthquake Resistant Structural Systems and Application | 169 |
| Reference | 199 |
| Chapter 4 Theory and Method of Seismic Model Testing for Complex High-rise Structures | 201 |
| 4.1 Similitude Theory for Structural Seismic Model Testing | 201 |

| | | |
|--|--|-----|
| 4.2 | Special Requirements for Seismic Model Testing of High-rise Structures | 208 |
| 4.3 | Similitude Requirements for the Structures with Different Material Systems | 215 |
| 4.4 | Experimental Verification of the Similitude Requirements for Seismic Model Testing of High-rise Structures | 219 |
| 4.5 | Evaluation and Interpretation for the Results of Seismic Model Testing of High-rise Structures | 257 |
| 4.6 | Research Developments and Existing Problems in Seismic Model Testing of High-rise Structures | 284 |
| | Reference | 286 |
| Chapter 5 Seismic Design Guidelines for the Complex High-rise Structures | | |
| | Structures | 288 |
| 5.1 | Background and Scope | 288 |
| 5.2 | Identification of Structural Regularity and Conceptual Design | 289 |
| 5.3 | Basic Requirements for Structural Analysis | 296 |
| 5.4 | Detailing and Constructional Measures | 306 |
| 5.5 | Design requirements for Foundation and Subsoil | 308 |
| 5.6 | Basic Requirements for Structural Model Testing | 309 |
| | Reference | 310 |
| Chapter 6 Seismic Energy Dissipation Systems for Complex High-rise Structures | | |
| | Structures | 311 |
| 6.1 | Overview of Structural Control Technologies in High-rise Building Application | 311 |
| 6.2 | Innovation of Combined Energy Dissipation Bracing System with Application | 314 |
| 6.3 | Innovation of Combined Base Isolation System with Application | 351 |
| 6.4 | Innovation of Damper-connected Structural System with Application | 380 |
| 6.5 | Test and Analysis of Viscous Damping Walls | 419 |
| 6.6 | Research and Development of Deformation Based Damping Devices with Application | 456 |
| | Reference | 464 |

| | |
|---|-----|
| Chapter 7 Theory of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems with Application | 465 |
| 7.1 Earthquake Damages of Subsoil and Foundation of High-rise Buildings | 465 |
| 7.2 Characteristics of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems | 478 |
| 7.3 Analysis and Testing Methods for Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems | 482 |
| 7.4 Model Testing of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems | 493 |
| 7.5 Computer Simulation of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems | 521 |
| 7.6 Simplified Seismic Design of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems | 552 |
| 7.7 Seismic Response Analysis of Soil-Pile-High-rise Structure Interaction System Considering Soil Liquefaction | 561 |
| Reference | 577 |
| Chapter 8 Case Studies of Seismic Design of Complex High-rise Buildings | 580 |
| 8.1 Complex Frame Structure | 580 |
| 8.2 Complex Shear Wall Structure | 585 |
| 8.3 Complex Frame-Shear Wall Structure | 595 |
| 8.4 Complex Frame-Tubular Structure | 610 |
| 8.5 Complex Weakly Coupled Two Towers | 629 |
| 8.6 Complex Concrete Filled Tubular Frame Structure | 653 |
| 8.7 Complex Hybrid Structure | 664 |
| 8.8 Complex Bundled Tubes Structure | 695 |
| 8.9 Triumphal Arch Type Structure | 707 |
| 8.10 Complex Composite Mega Structure | 719 |
| Reference | 733 |
| Appendix | 735 |

第 1 章 绪 论

本章主要介绍了高层建筑的特点,阐述了高层建筑结构的发展概况和发展趋势,探讨了复杂高层建筑结构出现的背景及对结构分析和设计的要求。

1.1 高层建筑的特点

高层建筑是反映城市经济繁荣和社会进步的重要标志。人们往往将摩天大楼和芝加哥、纽约这样的国际大都市联系在一起,这说明高层建筑对塑造城市社会形象作出了不可磨灭的贡献。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增加,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500m,我国目前已建成并投入使用的上海金茂大厦高度为420.5m,已建成并投入使用的位于马来西亚首都的石油大厦(或称双塔大厦)高度达452m,已经超过了美国芝加哥高443m的西尔斯大厦。我国台湾已建成了高508m(天线顶高度)的台北国际金融中心,上海正在建设结构高达492m的上海环球金融中心,阿联酋正在建设高度超过700m的伯吉迪拜塔楼。从技术层面来看,高层建筑在全球范围内突飞猛进的建设,得益于力学分析方法和计算技术的发展、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。

多少层的建筑或什么高度的建筑称为高层建筑,不同的国家有不同的规定。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)规定,10层及10层以上或房屋高度超过28m的建筑物为高层建筑。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。在实际应用中,我国建设部等有关主管部门自1984年起,将无论是住宅建筑还是公共建筑的高层建筑范围,一律定为10层及10层以上。联合国1972年国际高层建筑会议将9层直到高度100m的建筑定为高层建筑,而将30层或高度100m以上的建筑定为超高层建筑。日本将5~15层的建筑定为高层,而15层以上的建筑称为超高层建筑。

高层建筑的特点(包括有利的和不利的)有以下几个方面。

(1) 高层建筑能够节约城市用地,有效利用建筑空间。建设用地相同时,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。在建筑容积率相同的情况下,建造高层建筑可以大幅度降低建筑密度,取得更高的绿化率。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

的地面空间,增大了人们休闲的活动范围,提高了城市绿化率,从而改善了城市生活环境。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) 高层建筑可以增加城市景观,美化城市空间。建筑是凝固的音乐,是城市的雕塑,高层建筑向高空纵深发展,能够为建筑师带来更大的想像空间,富于变化的外立面可以为城市增加景观,如马来西亚首都的石油大厦和上海的金茂大厦等都以其优秀的建筑方案成为全球闻名的景观。

(3) 高层建筑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,从而节约城市建设与管理的投资。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,节约时间,提高效率。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) 高层建筑的建造和运营成本高于中低层建筑。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) 高层建筑的设计施工比中低层建筑复杂得多。从结构受力特性来看,侧向荷载(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到主要作用。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。

高层建筑具有上述特点,虽然建造高层建筑存在一定的弊端,但其给人类带来的巨大的社会效益现阶段还难以被其他建筑形式所替代。而合理规划和设计的高层建筑不仅能够解决城市用地紧张的问题,还可以达到美化城市环境的效果,并且,从技术层面上看,建造高层建筑的经验和理论也在不断地完善和积累中。所以,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。

1.2 高层建筑结构的发展概况

高层建筑的结构体系是随着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。为了在有限的建筑场地内获得更多的建筑面积,建筑物不得不向高空延伸,多层建筑发展成为高层建筑。世界上第一幢近代高层建筑是美国芝加哥的家庭保险(home insurance)大楼,该楼 11 层,高 55m,建成于 1885 年,采用铁柱和砖墙作为主要结构构件。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,型钢

的生产应用迅猛发展,1889年巴黎埃菲尔铁塔建成,所有这些,特别是钢结构与电梯的应用,对高层建筑的发展起到了很大的推动作用。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,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,在钢框架中填充了墙体以共同承受侧向力,该建筑保持了世界最高建筑纪录达41年之久。

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,高层建筑才开始了新一轮的发展。战后,焊接技术在钢结构制造中的推广和20世纪50年代高强螺栓的进一步应用,使20世纪60年代以来钢结构的加工既可以在工厂焊接制造,也可以在现场用螺栓安装。美国在20世纪60年代末和70年代初建成了高415m和417m的纽约世界贸易中心双塔楼、高443m的芝加哥西尔斯大厦和高344m的芝加哥汉考克大厦等一批100层以上的超高层建筑,它们是这个时期最有代表性的建筑物,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20世纪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一种较为理想的结构形式。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。例如,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,首次用黏弹性阻尼器减轻风振效应等,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。可惜的是这两栋塔楼在2001年9月11日由于恐怖分子制造的飞机撞击而烧毁倒塌。

高层建筑结构抗震研究的发展,促使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,此后,日本的高层建筑也发展迅速。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与高层钢结构类似。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结构中应用颇多。第一幢组合结构高层建筑是1955年在华沙建成的文化科学宫(Palac Kultury I 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,在钢筋混凝土筒体中设置了型钢,在外框部分设置了8根截面尺寸

较大的钢与混凝土组合柱,是组合结构在高层建筑中的最新应用。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,开创性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,我国目前建成的和在建的高度超过 150m 的高层建筑已超过 200 多幢,超过 200m 的高层建筑已达到 50 多幢。

高层建筑结构体系的发展过程可以大致归纳在表 1.1 中。

表 1.1 高层建筑结构体系的发展过程

| 使用年代 | 结构体系和特点 |
|----------------------|---------------------------------------|
| 1885 年 | 砖墙、铸铁柱、钢梁 |
| 1889 年 | 钢框架 |
| 1903 年 | 钢筋混凝土框架 |
| 20 世纪初 | 钢框架+支撑 |
| 1945 年以后 | 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,钢骨钢筋混凝土结构 |
| 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,被动耗能结构, |
| 20 世纪 80 年代后期 | 主动控制结构,混合控制结构,桁架+筒体结构 |
| 21 世纪以来 | 多重混合结构(如上海环球金融中心的巨型框架,外伸桁架,核心筒三重组合结构) |

1.3 高层建筑结构的发展趋势

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

到今后高层建筑结构的发展趋势如下:

1) 新材料将不断地应用于高层建筑

随着高性能混凝土材料的研制和不断发展,混凝土的强度等级不断提高,韧性性能也不断地得到改善,当前,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,减轻结构自重,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新的发展空间。采用FR钢建造高层钢结构时,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,使钢结构更具竞争力。

2) 高层建筑的高度将出现进一步突破

表1.2为目前世界上最高的十大建筑(截至2006年12月底)^[1]。表1.3为我国内地最高的十大建筑,它们都是20世纪90年代后期建成的。表1.4为目前世界上正在设计和建设的十大最高建筑^[1]。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,看来近期在结构高度上突破500m从技术上和经济上都是有可能实现的。

表 1.2 世界最高十大建筑

| 排名 | 建筑名称 | 城市 | 建成年份 | 层数 | 高度/m | 结构材料 | 用途 |
|----|----------|-----|------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 台北国际金融中心 | 台北 | 2004 | 101 | 508 | 组合 | 多用途 |
| 2 | 石油大厦 | 吉隆坡 | 1996 | 88 | 452 | 组合 | 多用途 |
| 3 | 西尔斯大厦 | 芝加哥 | 1974 | 110 | 443 | 钢 | 办公 |
| 4 | 金茂大厦 | 上海 | 1998 | 88 | 420.5 | 组合 | 多用途 |
| 5 | 香港国际金融中心 | 香港 | 2003 | 88 | 420 | 组合 | 办公 |
| 6 | 帝国大厦 | 纽约 | 1931 | 102 | 381 | 钢 | 办公 |
| 7 | 中环大厦 | 香港 | 1992 | 78 | 374 | 混凝土 | 办公 |
| 8 | 中银大厦 | 香港 | 1989 | 70 | 367 | 组合 | 办公 |
| 9 | 酋长国塔楼 | 迪拜 | 2000 | 107 | 355 | 组合 | 多用途 |
| 10 | 东帝士大厦 | 高雄 | 1998 | 85 | 348 | 钢 | 多用途 |

表 1.3 我国内地最高十大建筑

| 排名 | 建筑名称 | 城市 | 建成年份 | 层数 | 高度/m | 结构材料 | 用途 |
|----|----------------|----|------|----|-------|------|-------|
| 1 | 金茂大厦 | 上海 | 1998 | 88 | 420.5 | 组合 | 办公、宾馆 |
| 2 | 地王大厦 | 深圳 | 1996 | 81 | 325 | 组合 | 办公 |
| 3 | 中信广场 | 广州 | 1997 | 80 | 322 | 混凝土 | 办公 |
| 4 | 赛格广场 | 深圳 | 1998 | 72 | 292 | 组合 | 办公 |
| 5 | 中银大厦 | 青岛 | 1996 | 58 | 246 | 混凝土 | 办公 |
| 6 | 明天大厦 | 上海 | 1998 | 60 | 238 | 混凝土 | 办公 |
| 7 | 上海交银 金融大厦 | 上海 | 1998 | 55 | 230 | 混凝土 | 办公 |
| 8 | 武汉世界 贸易大厦 | 武汉 | 1998 | 58 | 229 | 混凝土 | 办公 |
| 9 | 浦东国际 金融大厦 | 上海 | 1998 | 56 | 226 | 组合 | 办公 |
| 10 | 彭年广场 (余氏酒店) | 深圳 | 1998 | 58 | 222 | 混凝土 | 宾馆 |

表 1.4 世界上正在设计和建设的十大最高建筑

| 排名 | 建筑名称 | 城市 | 开工/建成日期 | 层数 | 高度/m | 结构材料 | 用途 |
|----|--|-----|-----------|------|------|------|-----|
| 1 | 伯吉迪拜塔楼 (Burj Dubai) | 迪拜 | 2004/2009 | >150 | >700 | 混凝土 | 多用途 |
| 2 | 第二乐天世界 (Lotte World I Tower) | 釜山 | /2008 | 107 | 510 | 组合 | 多用途 |
| 3 | 上海环球 金融中心 | 上海 | 2004/2007 | 101 | 492 | 组合 | 多用途 |
| 4 | 香港国际 商务中心 | 香港 | /2010 | 118 | 490 | 组合 | 多用途 |
| 5 | 联邦大厦 (Federation Tower) | 莫斯科 | /2008 | 93 | 448 | 混凝土 | 多用途 |
| 6 | 多哈-迪拜塔 (Dubai Towers-Doha) | 多哈 | /2008 | 86 | 445 | 组合 | 多用途 |
| 7 | 广州西塔 | 广州 | 2006/2008 | 103 | 432 | 组合 | 多用途 |
| 8 | 川普国际酒店 (Trump International Hotel & Tower) | 芝加哥 | /2008 | 92 | 415 | 混凝土 | 多用途 |
| 9 | Al Hamra Firdous Tower | 科威特 | /2009 | 70 | 400 | 混凝土 | 办公 |
| 10 | 玛丽娜酒店 (Marina) | 迪拜 | /2008 | 90 | 389 | 混凝土 | 住宅 |