


吕西林 著

复杂高层建筑结构 抗震理论与应用



(第二版)

 科学出版社

复杂高层建筑结构抗震理论与应用

(第二版)

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;复杂高层建筑的结构体系;复杂高层建筑结构抗震分析方法,包括模态推覆分析方法、弹塑性时程分析方法和增量动力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;复杂高层建筑结构的消能减震新体系,包括组合消能减震支撑体系、组合基础隔震体系、阻尼器连接的耦联结构消能减震体系和颗粒阻尼器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;复杂高层建筑工程抗震研究应用实例。

本书可供土木建筑工程设计和研究人员参考,也可作为土建类专业的研究生教材。

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. —2版. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-042279-8

I. ①复… II. ①吕… III. ①高层建筑-建筑结构-防震设计 IV. ①TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 248204 号

责任编辑:吴凡洁 乔丽维 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年1月第二版 印张:47 3/4

2015年1月第一次印刷 字数:1 107 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第2版前言

自从本书第1版2007年9月出版以来,已经过了7年时间。在这7年中,高层建筑的建设一直蓬勃发展,新的项目不断出现,新的分析和设计方法也不断得到工程应用,同时,大量工程的建设也向科学研究提出了新的要求和挑战。国家自然科学基金委员会工程与材料学部在2008年启动了重大研究计划:重大工程的动力灾变研究,其中重大高层建筑工程抗震抗风研究是非常重要的研究内容之一。本书作者有幸参加了这一重大研究计划的工作,并承担了有关高层建筑结构新体系及其抗震研究的重点项目和国际合作项目,在与国内外同行的交流与合作中,学到了许多创新理念和应用技术。通过与工程界同行的交流与合作,部分研究成果得到了应用和推广,也增加了实践经验,为进一步的研究开拓了思路。

在这7年中,本书作者与团队成员共主持或参与完成了下列高层建筑抗震相关的重点项目:①国家自然科学基金委员会优秀研究群体项目——土木工程防灾研究(第2期);②科学技术部“十一五”科技支撑计划子课题——大型复杂结构振动台模型试验技术;③上海市工程建设标准化办公室——《超限高层建筑工程抗震设计指南》修订;④国家自然科学基金委员会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;⑤北京市“十一五”重大科技攻关项目——大型复杂高层建筑抗震关键技术与示范;⑥国家自然科学基金重大国际合作项目——城市重大超高层建筑工程地震灾害效应评价与减灾研究,并将上述部分研究成果应用于十多个重大高层建筑工程的抗震分析和设计。在上述工作的基础上,本书第2版在绪论中增加了“高层建筑的地震破坏”,在结构分析方面增加了“增量动力非线性分析方法”,在构件的恢复力模型方面增加了“高含钢率型钢混凝土柱的恢复力模型”,在消能减震方面增加了“颗粒阻尼器的研究与工程实例”等内容;并对第1版中的各章内容和所有实例进行了精炼和简化,全面更新了“复杂高层建筑抗震设计指南”的内容,在简化抗震研究实例的基础上,增加了三个大型复杂工程的抗震研究实例。

本书第2版的修改是作者与团队成员及研究生共同完成的,他们是蒋欢军、卢文胜、李培振、周颖、鲁正及十多名博士生和硕士生,正是他们的辛勤努力才使本团队的研究工作能逐步深入。本书的工程实例来源于国内的几个大型设计研究院,是他们的大力支持才使本团队的成果能在重大工程中应用并得到检验,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,书中难免有疏漏之处,对于本书中可能存在的问题,衷心希望读者不吝指正。

作者

2014年9月

第 1 版前言

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,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。但随之而来一个日益突显的问题是,我国目前在建的高度在 300m 以上的复杂高层建筑工程,大部分是外方做的设计方案,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,主要原因是我国现行的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撑,就显得尤其重要,并成为一项迫切的任务。

在过去的 15 年中,作者及其研究团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,该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团队发展的分析方法、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 and 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团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和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”专项基金项目——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项目——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团队成员及研究生共同完成的,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,是他们的大力支持才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工程实例依据。在此,对他们表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏之处,衷心希望读者不吝指正。

作者

2007年1月

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

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 高层建筑的地震破坏	4
1.4 高层建筑结构的发展趋势	11
1.5 复杂高层建筑的出现及对结构设计的影响	14
参考文献	14
第 2 章 复杂高层建筑的结构体系	15
2.1 常用结构体系	15
2.2 筒体结构体系	28
2.3 混合结构体系	33
2.4 巨型组合结构体系	48
2.5 未来的结构体系	55
参考文献	57
第 3 章 复杂高层建筑结构抗震分析方法	58
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 增量动力非线性分析方法	80
3.5 非线性分析中的单元模型	89
3.6 材料和构件的恢复力模型	106
3.7 非线性分析方法的工程应用	153
3.8 抗震结构体系的优化理论与应用实例	180
参考文献	199
第 3 章附录 考虑材料非线性的单元切线刚度矩阵	200
第 4 章 复杂高层建筑抗震模型试验理论与方法	204
4.1 结构抗震模型试验的相似理论	204
4.2 高层建筑抗震试验的相似模型	210
4.3 不同材料结构体系模型的相似要求	216
4.4 高层建筑抗震试验模型相似关系的试验验证	220

4.5	高层建筑抗震模型试验结果的分析与应用	253
4.6	高层建筑抗震模型试验研究进展与存在的问题	269
	参考文献	271
第5章	复杂高层建筑抗震设计指南	273
5.1	概述	273
5.2	超限高层建筑工程的认定和抗震概念设计	274
5.3	结构抗震体系的基本要求	281
5.4	结构抗震性能设计的基本要求	285
5.5	结构抗震计算分析的基本要求	288
5.6	结构抗震构造措施要点	300
5.7	地基基础抗震设计要求	302
5.8	结构抗震模型试验的基本要求	303
第6章	复杂高层建筑的消能减震新体系	304
6.1	高层建筑常用的振动控制技术	304
6.2	组合消能减震支撑的开发研究及工程应用	306
6.3	组合基础隔震系统的开发与工程应用	338
6.4	用阻尼器连接的耦联结构体系减震研究与工程应用	365
6.5	阻尼墙的开发研究与理论分析	398
6.6	位移型阻尼装置的研发与工程应用	431
6.7	颗粒阻尼器的研发与工程应用	447
	参考文献	459
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	460
7.1	高层建筑地基基础的震害	460
7.2	动力相互作用体系的特点	474
7.3	动力相互作用体系的分析和试验方法	477
7.4	动力相互作用体系的模型试验	487
7.5	动力相互作用体系的计算机模拟分析	512
7.6	考虑动力相互作用的简化抗震设计	540
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	549
	参考文献	564
第8章	复杂高层建筑工程抗震研究实例	567
8.1	复杂体型框架结构	567
8.2	复杂体型剪力墙结构	572
8.3	复杂体型框架-剪力墙结构	580
8.4	复杂体型框架-筒体结构	593
8.5	复杂体型多塔楼弱连接结构	619
8.6	复杂体型钢管混凝土结构	638

8.7 复杂体型混合结构	648
8.8 复杂体型多筒体结构	677
8.9 立面开大洞门式结构	709
8.10 巨型组合结构	719
参考文献	746

Contents

Preface 2

Preface 1

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Characteristics of High-rise Buildings	1
1.2 Development History of High-rise Building Structures	2
1.3 Seismic Damage of High-rise Building Structures	4
1.4 Development Tendencies of High-rise Building Structural Systems	11
1.5 Emerging of Complex High-rise Buildings and its Influence on Seismic Analysis and Design	14
References	14
Chapter 2 Structural Systems for Complex High-rise Buildings	15
2.1 Conventional Structural Systems for High-rise Buildings	15
2.2 Tubular Structural Systems	28
2.3 Hybrid Structural Systems	33
2.4 Composite Mega Structural Systems	48
2.5 New Structural Systems for the Future	55
References	57
Chapter 3 Seismic Analysis Methods for Complex High-rise Structures	58
3.1 Conventional Methods for Seismic Analysis	58
3.2 Elastic and Elasto-plastic Time History Analysis	62
3.3 Push-over Analysis Method for Static Nonlinear analysis	71
3.4 Increment Dynamic Analysis Methods	80
3.5 Element Models in Nonlinear Analysis	89
3.6 Restoring Force Models for Structural Materials and Members	106
3.7 Engineering Applications of Nonlinear Methods in Seismic Analysis	153
3.8 Optimization of Earthquake Resistant Structural Systems and Application	180
References	199
Appendix	200
Chapter 4 Theory and Method of Seismic Model Testing for Complex High-rise Structures	204
4.1 Similitude Theory for Structural Seismic Model Testing	204

4.2	Special Requirements for Seismic Model Testing of High-rise Structures	210
4.3	Similitude Requirements for the Structures with Different Material Systems	216
4.4	Experimental Verification of the Similitude Requirements for Seismic Model Testing of High-rise Structures	220
4.5	Evaluation and Interpretation for the Results of Seismic Model Testing of High-rise Structures	253
4.6	Research Developments and Existing Problems in Seismic Model Testing of High-rise Structures	269
	References	271
Chapter 5	Seismic Design Guidelines for the Complex High-rise Structures	273
5.1	Background and Scope	273
5.2	Identification of Structural Regularity and Conceptual Design	274
5.3	Basic Requirements for Seismic System	281
5.4	Basic Requirements for Performance Based Seismic Design	285
5.5	Basic Requirements for Structural Analysis	288
5.6	Detailing and Constructional Measures	300
5.7	Design Requirements for Foundation and Subsoil	302
5.8	Basic Requirements for Structural Model Testing	303
Chapter 6	Seismic Energy Dissipation Systems for Complex High-rise Structures ...	304
6.1	Overview of Structural Control Technologies in High-rise Building Application	304
6.2	Innovation of Combined Energy Dissipation Bracing System with Application	306
6.3	Innovation of Combined Base Isolation System with Application	338
6.4	Innovation of Damper-connected Structural System with Application ...	365
6.5	Test and Analysis of Viscous Damping Walls	398
6.6	Research and Application of Deformation Based Damping Devices	431
6.7	Research and Application of Particle Dampers	447
	References	459
Chapter 7	Theory of Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction Systems with Application	460
7.1	Earthquake Damages of Subsoil and Foundation of High-rise Buildings	460
7.2	Characteristics of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems	474

7.3	Analysis and Testing Methods for Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems	477
7.4	Model Testing of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems	487
7.5	Computer Simulation of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems	512
7.6	Simplified Seismic Design of Dynamic Soil-Pile-High-rise Structure Interaction Systems	540
7.7	Seismic Response Analysis of Soil-Pile-High-rise Structure Interaction System Considering Soil Liquefaction	549
	References	564
Chapter 8	Case Studies of Seismic Design of Complex High-rise Buildings	567
8.1	Complex Frame Structure	567
8.2	Complex Shear Wall Structure	572
8.3	Complex Frame-Shear Wall Structure	580
8.4	Complex Frame-Tubular Structure	593
8.5	Complex Weakly Coupled Two Towers	619
8.6	Complex Concrete Filled Tubular Frame Structure	638
8.7	Complex Hybrid Structure	648
8.8	Complex Bundled Tubes Structure	677
8.9	Triumphal Arch Type Structure	709
8.10	Complex Composite Mega Structure	719
	References	746

第 1 章 绪 论

本章主要介绍了高层建筑的特点、高层建筑的地震破坏,阐述了高层建筑结构的发展概况和未来趋势,探讨了复杂高层建筑结构出现的背景,以及对结构分析和抗震设计的要求。

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。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 层的巨型建筑的高度均超过 500m,中国在 1998 年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 443m 高的西尔斯大厦。中国台湾已建成了高度为 508m(天线顶高度)的台北国际金融中心,上海已于 2008 年建成结构高度达 492m 的上海环球金融中心,阿联酋于 2011 年建成了高度达到 828m 的哈利法塔楼,目前人类正在向 1000m 级的高层建筑冲刺。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—2010)规定,10 层及 10 层以上或房屋高度大于 28m 的住宅建筑以及房屋高度大于 24m 的其他民用建筑为高层建筑。当建筑物高度超过 100m 时,不论住宅建筑或公共建筑,均为超高层建筑。在实际应用中,我国建设主管部门自 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 层直到高度为 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 层的建筑定为高层建筑,而将 15 层以上的建筑定为超高层建筑。

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。当建设用地相同时,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,留下了更多地面空间,增大了人们休闲活动范围,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象空间,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了全球闻名的景观。

(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,节约了时间,提高了效率。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主要作用,高层建筑一旦在地震或强台风中遭到严重破坏,将会产生重大的经济损失和社会影响。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有其他建筑形式能够替代。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。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,该楼有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)安全电梯首次在新约某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,共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,高层建筑又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,也可以在现场用螺栓

安装。美国在 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。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。可惜的是这两栋塔楼在 2001 年 9 月 11 日由于恐怖袭击导致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,日本的高层建筑也得到了迅速的发展。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 年在美国辛辛那提市建成的英格尔斯(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 年在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,在北京、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,在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,在北京、广州、深圳、上海等三十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 的高层建筑已达到 1000 多幢,超过 200m 的高层建筑已达到 300 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。

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、伸臂行架、核心筒等三重组合结构)

1.3 高层建筑的地震破坏

高层建筑也可能由于设计、施工或使用不当,在强烈地震中遭到严重破坏,而高层建筑一旦发生严重破坏,修复或加固将十分困难,费用将会更高。在最近 20 年来的强烈地震中,已有许多不同类型的高层建筑发生了严重的破坏,造成了重大的经济损失和社会影响。

1. 1995 年日本阪神地震中高层建筑的主要破坏^[1]

在 1995 年 1 月 17 日发生的日本阪神地震中,不同年代建成的高层建筑发生了不同的地震破坏。图 1.1 为由于建筑物平面不规则而引起扭转破坏的实例。



图 1.1 阪神地震建筑物扭转破坏实例

图 1.2 为中间有薄弱层建筑物的典型破坏实例,其中图 1.2(a)为钢筋混凝土结构,图 1.2(b)为钢结构。图 1.3 为建筑物底层为薄弱层时的地震破坏实例,其中图 1.3(a)为底层柱子强度明显不足引起的破坏,图 1.3(b)为底层剪力墙强度不足引起的破坏。图 1.4 为高层钢结构的典型破坏实例,其中图 1.4(a)为在高层钢结构住宅中发生的破坏:梁、柱、支撑的节点附近,箱形截面柱子断裂,H 形支撑的端部则发生局部失稳。图 1.4 (b)是框架梁柱节点的两种不同的破坏模式,前者是梁与柱子相连的焊缝发生断裂,后者是柱子加劲肋板在节点处的断裂。

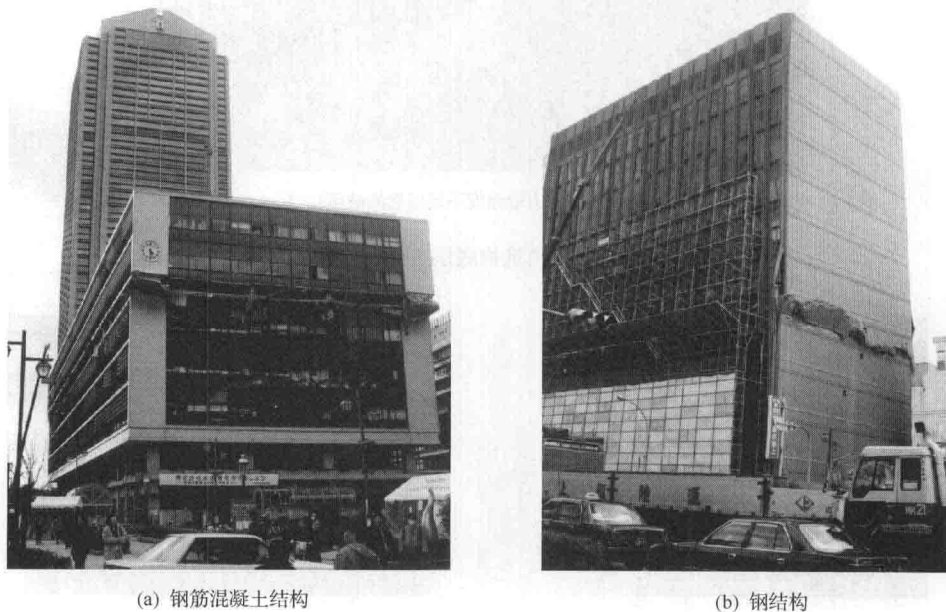


图 1.2 阪神地震建筑物中间有薄弱层破坏实例



(a) 底层柱子强度明显不足引起的破坏