

● “十三五”国家重点图书出版规划项目

● 现代土木工程精品系列图书

高层建筑钢结构

张文元 丁玉坤 于海丰 郑朝荣 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十三五”国家重点图书出版规划项目
现代土木工程精品系列图书

高层建筑钢结构

张文元 丁玉坤 于海丰 郑朝荣 编著

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书结合我国高层建筑钢结构发展与应用的现状和经验、我国新颁布的行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)以及其他相关标准,从高层钢结构计算、分析与设计角度出发,系统地讲述了高层钢结构体系布置和受力特点、高层建筑对钢材的要求、主要的荷载和作用效应、高层钢结构的计算与分析方法、主要抗侧力构件的设计要求、关键节点的设计要求等方面的内容。

本书内容丰富、系统,理论联系实际,可作为土木工程专业本科生和研究生的教学用书或参考书,也可作为有关科研人员和工程设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑钢结构/张文元等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017. 10

ISBN 978-7-5603-6997-6

I. ①高… II. ①张… III. ①高层建筑-钢结构
IV. ①TU393.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 247445 号

策划编辑 王桂芝 张 荣

责任编辑 张 瑞 刘 瑶

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 28.75 字数 730 千字

版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6997-6

定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

近年来我国高层建筑钢结构得到了快速发展和广泛应用,新技术和新方法不断出现,国内在高层建筑钢结构的设计、制作和安装方面积累了大量经验。我国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)经过近 10 年的修订与完善,新版本也于 2016 年 5 月出版。因此,有必要将最新的设计理念、成熟的工程技术、先进的设计方法和前沿的科学问题传递给读者。

本书在编写过程中,兼顾高层建筑钢结构设计的基本原理和基本方法的同时,注重工程应用和相关规范的解释,也指出了当前本领域内的前沿科学问题。本书可以作为土木工程专业本科生和研究生的教学用书或参考用书,也可作为有关科研人员和工程设计人员的参考书。

本书共分 7 章,涵盖了高层建筑钢结构发展与应用的概论、高层建筑钢结构材性要求、高层钢结构体系与特点、荷载和作用效应、计算模型与分析方法、钢构件的设计、钢结构的节点设计、钢结构的制作和安装等内容。本书具体编写分工为:哈尔滨工业大学张文元撰写第 1、2、3 章、附录 1 及附录 2,哈尔滨工业大学丁玉坤撰写第 6、7、8 章,哈尔滨工业大学郑朝荣撰写第 4 章,河北科技大学于海丰撰写第 5 章及附录 3。全书由张文元统稿,由哈尔滨工业大学张耀春教授审阅。

在本书成稿和出版过程中得到了 2016 年哈尔滨工业大学研究生教育教学改革研究项目和 2017 年河北省研究生示范课程建设项目(KCJSX2017083)的大力支持和帮助,对此表示衷心感谢。另外,哈尔滨工业大学研究生王珂、曾立静、刘辰辰、魏祺琳、赵增阳等也参与了部分文稿整理和资料收集工作,在此深表谢意。

限于作者的实践经验和技术水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 5 月

目 录

第1章 概论	1
1.1 高层建筑钢结构在国内外的发展和应用	1
1.2 高层建筑钢结构的特点及结构体系	8
1.3 高层建筑钢结构的技术经济分析	12
1.4 高层建筑钢结构建设中应该注意的若干问题	14
第2章 高层建筑钢结构材性要求	20
2.1 建筑钢材的种类与性能	20
2.2 高层建筑对钢材的相关要求	35
2.3 连接材料	40
2.4 高层建筑钢结构中常用的型材和板材	46
第3章 高层建筑钢结构体系与特点	51
3.1 高层建筑钢结构体系的基本规定	51
3.2 钢框架结构	61
3.3 框架-支撑结构	73
3.4 框架-核心筒结构及伸臂桁架结构	88
3.5 筒体结构	90
3.6 交错桁架钢结构	95
3.7 巨型钢结构	98
第4章 荷载和作用效应	114
4.1 竖向活荷载和温度作用	114
4.2 风荷载	121
4.3 地震作用	157
第5章 计算模型与分析方法	191
5.1 一般原则和基本假定	191
5.2 结构的简化计算方法	193
5.3 结构的精确计算方法	224
5.4 结构地震反应分析	240
5.5 结构整体稳定性与 $P-\Delta$ 效应	257
第6章 钢构件的设计	260
6.1 构件设计概述	260
6.2 钢构件设计的内容	261
6.3 钢梁的设计	263
6.4 钢柱的设计	272
6.5 中心支撑框架的设计	292

6.6	偏心支撑框架的设计	298
6.7	其他抗侧力构件	306
第7章	钢结构的节点设计	341
7.1	节点设计概述	341
7.2	节点连接方法	341
7.3	连接设计的一般规定	344
7.4	梁与柱刚性连接的计算	352
7.5	梁与柱连接的形式和构造要求	357
7.6	柱与柱的连接	365
7.7	梁与梁的连接和梁腹板开孔的补强	371
7.8	钢柱的柱脚设计	377
7.9	中心支撑与钢框架连接	387
7.10	偏心支撑框架的构造要求	389
7.11	钢梁与混凝土结构的连接	391
第8章	钢结构的制作和安装	393
8.1	制作	393
8.2	安装	400
附录1	高强螺栓、焊钉和锚栓	406
附录2	常用型材的规格及截面特性	416
附录3	反弯点高度计算表	442
	参考文献	448

第1章 概 论

1.1 高层建筑钢结构在国内外的发展和应用

1.1.1 高层建筑钢结构的发展背景

随着世界城市化进程的加速,造成了城市中人口相对集中、土地价格昂贵等问题,节约用地成为关键,这为高层建筑的发展与应用提供了强烈的客观需求。同时,为改善城市面貌,体现城市现代化气息,或体现大型集团公司的经济实力和技术水平,为建设地标性高层建筑提供了主观需求。

然而,传统的砖、石、木等建筑材料受到承载力和塑性变形能力的制约,无法建造更高的建筑物。直到20世纪初,随着性能更加优异的钢筋混凝土和钢材在建筑领域的应用,并开发出了垂直交通工具——电梯,为建造高层建筑提供了物质基础,才出现了真正意义上的高层建筑。高层建筑与单层和多层建筑的区别在于层数多、高度大、防火要求高、结构设计和建造技术复杂、辅助设备多等,因此单位建筑面积的造价也偏高。

1972年联合国教科文组织所属的世界高层建筑委员会召开的国际高层建筑会议,将9层及以上的建筑定义为高层建筑,并按层数和高度将高层建筑分为4类:

第一类:9~16层(最高到50 m),也称小高层;

第二类:17~25层(最高到75 m),也称中高层;

第三类:26~40层(最高到100 m),也称高层;

第四类:40层以上(高度在100 m以上),也称超高层。

另外,世界各国也根据建筑类别、材料品种,特别是防火要求等因素,规定了高层建筑的层数和高度。我国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)规定,10层及10层以上或房屋高度大于28 m的住宅建筑以及房屋高度大于24 m的其他民用建筑属于高层范畴,使用钢结构时需按规程的相关规定进行设计。

作为现代建筑材料的钢材,虽然密度是混凝土的3倍左右,但其强度是混凝土的10倍左右,弹性模量也接近混凝土的10倍,因此在高层建设中使用钢材可以有效降低承重构件的几何尺寸。另外,从19世纪中叶以来,钢铁冶炼技术取得了显著突破,开始能够批量生成型钢和铸钢,工厂化的制作和加工又使高层钢结构的建设速度大为加快,省去了混凝土结构中的养护时间,主体结构施工可以达到一天数层,显著提高了高层建筑的效率。可见,钢结构是高层建筑的首选形式。2004年统计的世界最高的90幢高层建筑中,钢结构(S)有36幢,占40.0%;钢-混凝土混合结构(M)有31幢,占34.4%;钢筋混凝土结构(RC)有23幢,占25.6%。2009年统计国内200 m以上的55幢高层建筑中,钢结构及钢-混凝土混合结构有35幢,钢筋混凝土结构20幢,以钢-混凝土混合结构为主。

值得注意的是,近年来随着超高层的高度越来越大,承重构件所需承载力和刚度越来越高,对于钢材的防火、防腐要求越来越严格,钢-混凝土混合结构体系发展迅速,包括国内应用较为典型的钢框架-混凝土核心筒(剪力墙)结构体系,也包括钢管混凝土、型钢混凝土、组合梁、组合楼板等组合构件的应用。特别是我国近年所建的高层与超高层中,钢-混凝土混合结构体系多达80%以上。

另外,除了钢结构强度高、刚度大、施工速度快之外,还有多种因素决定了在高层建筑中首选钢结构体系,如:钢材具有较好的延性和塑性耗能能力,抗震性能好;钢构件外形美观,甚至不用过分装修就能符合建筑要求;考虑施工费用在内的综合造价更加合理;钢材可回收,可重复利用,属于绿色环保建筑材料等。

1.1.2 高层建筑钢结构的发展与应用

从钢结构建筑的发展趋势上看,与世界工业化进程密不可分,取决于钢铁产业的成熟度,遵循着一条从欧洲到北美、再到亚洲的发展途径。世界上将钢材作为承重构件的方法起源于西方工业革命时期,比较公认的代表性建筑为1872年法国巴黎建成的Menier巧克力厂和1885年美国芝加哥建成的10层家庭保险大楼,均采用了钢框架结构。美国在第二次世界大战之后取代欧洲成为世界钢铁工业中心,1975年钢产量达到顶峰,约为5000万t,此时的钢结构建筑达到顶峰,随后进入稳定期。期间相继建成了纽约帝国大厦(1931年,高381m,102层)、纽约世界贸易中心双塔(1972年,高417m,100层)、芝加哥西尔斯大厦(1974年,高443m,110层)等一大批标志性高层建筑物。日本在20世纪六七十年代之后经济高速发展,钢铁产量于20世纪90年代左右达到顶峰,钢结构建筑也进入了成熟稳定期,建成了东京新市府大厦(1991年,241.9m,48层)、横滨里程碑大厦(1993年,高296m,73层)、大阪世界贸易中心(1995年,高256m,55层)等地标式高层建筑。同期的韩国、马来西亚、阿联酋、中国台湾地区、中国香港特别行政区等亚洲其他国家和地区,也相继建成了很多高层及超高层建筑,如香港中国银行大厦(1990年,高315m,70层)、吉隆坡石油双塔(1998年,高452m,88层)、台北101大厦(2003年,高508m,101层)。

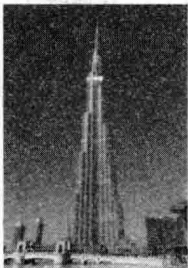
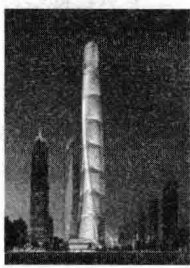
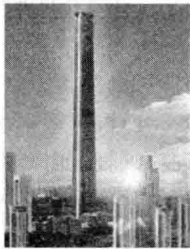
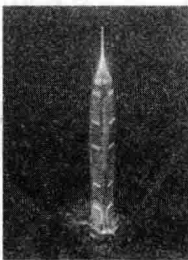
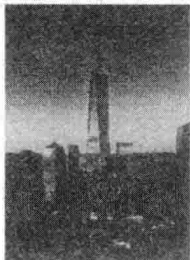
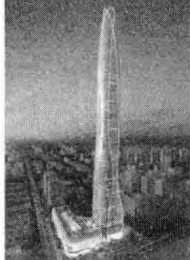
中国的钢铁产量在1996年超越美国和日本,钢铁工业进入了繁荣期,特别是近年来的钢铁年总产量超过了7亿t,约为世界其他国家总和的2.5倍。伴随着中国钢铁工业和国民经济的崛起,中国钢结构产业也具备了高速发展的物质条件,世界高层建筑中心已经转移到中国。近年来已经相继建成了一大批具有代表性的超高层建筑物,如上海中心大厦(2015年,高632m,128层)、天津117大厦(2014年,高597m,117层)、广州东塔(2014年,高530m,112层)、深圳地王大厦(1996年,高384m,69层)等。

表1.1给出了全球已建成或即将完工的高层建筑,并给出了所使用的结构体系、建筑功能和整体照片。其中美国纽约帝国大厦(高381m)自1931年建成之后一直雄踞世界第一长达40年之久,直到1974年才被芝加哥的西尔斯大厦(高443m)超越。而进入20世纪90年代以后,建筑物的世界第一高度则被频繁刷新,逐渐突破了500m、600m和800m关口。目前世界第一高楼为阿联酋迪拜的哈利法塔(也称迪拜塔),高度为828m,建筑物的中下部采用组合结构,而中上部采用钢结构,属于混合结构体系。此外,各种超高层建筑的设想方案不胜枚举,高度甚至超过了1km,呈现出向空中城市发展的趋势。随着各种新技术、新材料和新体系在高层与超高层建筑中的应用,我国也在积极准备,一些单位正在进行千米级超

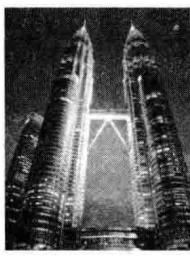
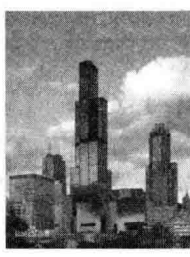
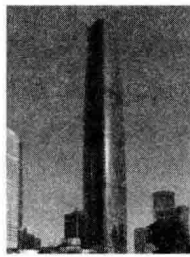
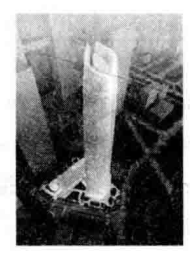
高层建筑的预研。

从表 1.1 中所示的全球最高的 54 幢高层建筑中可以看出,其中绝大部分(48 幢)是近 20 年内建设的,占了近 90%,可见人们追求高度的欲望越来越强烈。其中,位于亚洲的超高层建筑 44 幢,占 81%;位于我国的超高层建筑有 30 幢,占 56%。可见高层建筑的建设热潮已经由欧美转移到了亚洲,并以我国最具代表性,呈现出空前繁荣趋势。在这 54 幢超高层建筑中,建筑材料以钢结构和混合结构为主(39 幢),占 72%,可见在地震设防区及非地震区的超高层建筑中普遍首选钢结构体系及混合结构体系,已被认可为普遍的设计原则。

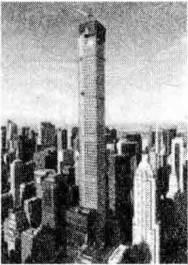
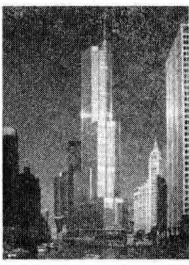
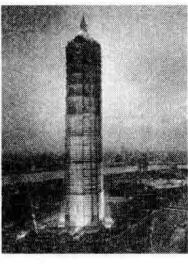
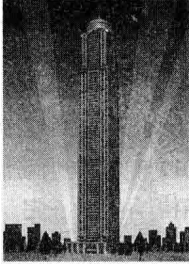
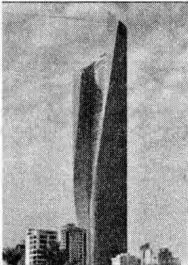
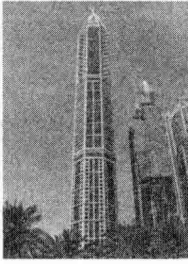
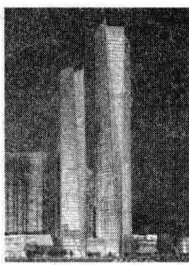
表 1.1 全球已建成或在建的超高层建筑

1	哈利法塔		2	上海中心大厦	
828 m, 163 层, 迪拜, 2010 年建成, 下部组合结构+上部钢结构构成的混合结构, 用途为办公/住宅/酒店			632 m, 128 层, 上海, 2015 年建成, 巨型框架+混凝土核心筒+伸臂桁架构成的混合结构, 用途为酒店/办公		
3	麦加皇家钟楼酒店		4	天津 117 大厦	
601 m, 120 层, 麦加, 2012 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为酒店/其他			597 m, 117 层, 天津, 2014 年建成, 巨型框架+混凝土核心筒构成的混合结构, 用途为办公/酒店		
5	深圳平安金融中心		6	世贸中心一号大楼	
592.5 m, 118 层, 深圳, 2016 年建成, 巨柱+伸臂桁架+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为办公/酒店/商业			541.3 m, 94 层, 纽约, 2013 年建成, 延性框架+混凝土核心筒构成的混合结构, 用途为办公		
7	广州东塔		8	天津周大福中心大厦	
530 m, 112 层, 广州, 2014 年建成, 巨型框架+混凝土核心筒构成的混合结构, 用途为办公/酒店			530 m, 101 层, 天津, 2017 年封顶, 巨型框架+混凝土核心筒构成的混合结构, 用途为办公/酒店/公寓等		

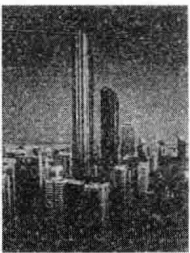
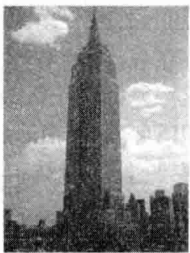
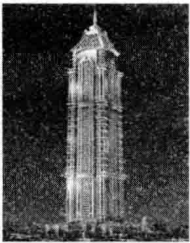
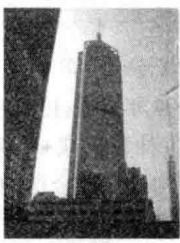
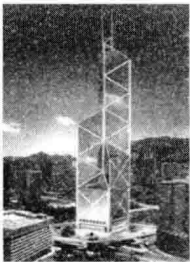
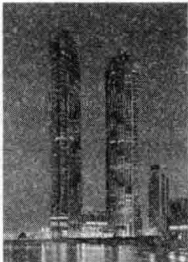
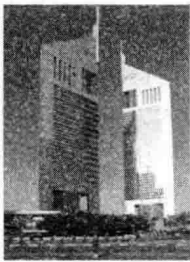
续表 1.1

9	中国尊		10	台北 101 大厦	
524 m, 108 层, 北京, 预计 2018 年建成, 巨型框撑外筒+混凝土内筒构成的混合结构, 用钢量为 14 万吨, 用途为办公			508 m, 101 层, 台北, 2004 年建成, 巨型框架混合结构体系, 用途为办公		
11	上海环球金融中心		12	环球贸易广场	
492 m, 101 层, 上海, 2008 年建成, 巨型桁架外筒+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为酒店/办公			484 m, 108 层, 香港, 2010 年建成, 巨型构件构成的混合结构体系, 用途为酒店/办公		
13	吉隆坡石油双塔		14	紫峰大厦	
451.9 m, 88 层, 吉隆坡, 1998 年建成, 型钢混凝土外筒+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为办公			450 m, 89 层, 南京, 2010 年建成, 造价 40 亿元人民币, 带加强层的钢框架+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为酒店/办公		
15	西尔斯大厦		16	京基 100	
443 m, 110 层, 芝加哥, 1974 年建成, 成束筒钢结构体系, 用途为办公			441.8 m, 100 层, 深圳, 2011 年建成, 支撑钢框架外筒+伸臂桁架+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为酒店/办公		
17	广州西塔		18	武汉中心	
438.6 m, 103 层, 广州, 2010 年建成, 钢管混凝土斜交柱网外筒+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为酒店/办公			438 m, 88 层, 武汉, 2016 年建成, 巨型框架+伸臂桁架+混凝土核心筒构成的混合结构, 用途为办公/酒店/商业		

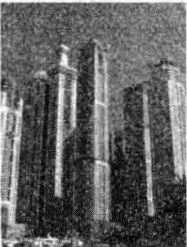
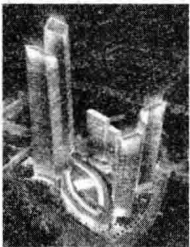
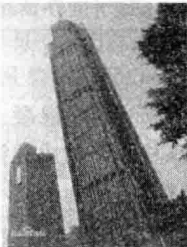
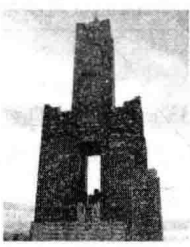
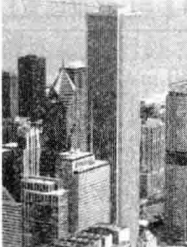
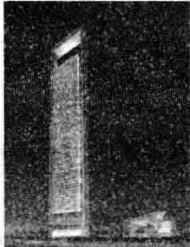
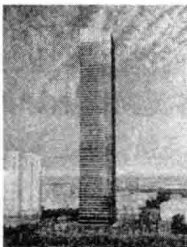
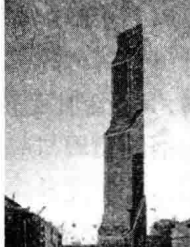
续表 1.1

19	432 公园大道		20	特朗普国际酒店大厦	
425.5 m, 85 层, 纽约, 2015 年建成, 钢筋混凝土框架+核心筒结构, 用途为住宅			423.2 m, 98 层, 芝加哥, 2009 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为住宅/酒店		
21	金茂大厦		22	公主塔	
420.5 m, 88 层, 上海, 1999 年建成, 巨型柱外框架+伸臂桁架+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为酒店/办公			413.4 m, 101 层, 迪拜, 2012 年建成, 混合结构, 用途为住宅		
23	阿尔哈姆拉塔		24	国际金融中心二期	
412.6 m, 80 层, 科威特城, 2011 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为办公			412 m, 88 层, 香港, 2003 年建成, 混合结构体系, 用途为办公		
25	玛丽娜 23 大厦		26	中信广场	
392.4 m, 88 层, 迪拜, 2012 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为住宅			390.2 m, 80 层, 广州, 1996 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为办公		
27	地王大厦(信兴广场)		28	大连裕景中心	
384 m, 69 层, 深圳, 1996 年建成, 钢管混凝土框架+型钢混凝土内筒构成的混合结构, 用途为办公			383.1 m, 80 层, 大连, 2015 年建成, 巨型支撑框架+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为酒店/办公		

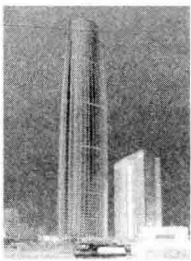
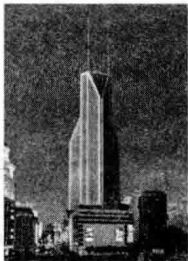
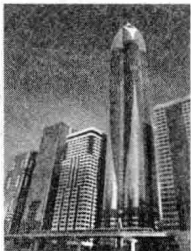
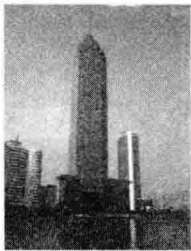
续表 1.1

29	穆罕默德·本·拉希德塔		30	帝国大厦	
381.2 m, 88 层, 迪拜, 2014 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为住宅			381 m, 102 层, 纽约, 1931 年建成, 钢框架结构, 用途为办公		
31	精英公寓塔楼		32	香港中环广场	
380.5 m, 87 层, 迪拜, 2012 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为住宅			373.9 m, 78 层, 香港, 1992 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为办公		
33	中国银行大厦		34	美国银行大厦	
367.4 m, 72 层, 香港, 1990 年建成, 八片平面支撑+五根型钢混凝土柱构成的大型支撑混合结构, 用途为办公			365.8 m, 55 层, 纽约, 2009 年建成, 混合结构, 用途为办公		
35	阿勒玛斯大楼		36	马奎斯 JW 万豪酒店塔 1、2	
360 m, 68 层, 迪拜, 2008 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为办公			355.4 m, 82 层, 迪拜, 2012 年建成, 双塔, 钢筋混凝土结构, 用途为酒店		
37	阿联酋大厦		38	沃克大厦	
354.6 m, 54 层, 迪拜, 2000 年建成, 钢和混凝土混合结构, 用途为办公			353.6 m, 90 层, 莫斯科, 2015 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为住宅/公寓/办公		

续表 1.1

39	火炬大厦		40	恒隆广场	
352 m, 86 层, 迪拜, 2011 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为住宅			350.6 m, 68 层, 沈阳, 2015 年建成, 混合结构, 用途为酒店/办公		
41	广晟国际大厦		42	高雄大楼	
350.3 m, 60 层, 广州, 2012 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为办公			347.5 m, 85 层, 高雄, 1997 年建成, 巨型框架钢结构, 用途为酒店/办公/零售		
43	怡安中心		44	中环中心	
346.3 m, 83 层, 芝加哥, 1973 年建成, 钢结构, 用途为办公			346 m, 73 层, 香港, 1998 年建成, 钢结构, 用途为办公		
45	约翰汉考克大厦		46	阿布扎比国家石油公司总部大楼	
343.7 m, 100 层, 芝加哥, 1969 年建成, 钢结构大型支撑框筒, 用途为住宅/办公			342 m, 65 层, 阿布扎比, 2015 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为办公		
47	无锡九龙仓国际金融中心		48	水星之城	
339 m, 68 层, 无锡, 2014 年建成, 混合结构, 用途为酒店/办公			338.8 m, 75 层, 莫斯科, 2013 年建成, 钢筋混凝土结构, 用途为住宅/办公		

续表 1.1

49	天津环球金融中心		50	世茂国际广场	
	336.9 m, 75 层, 天津, 2011 年建成, 钢管混凝土框架+伸臂桁架+钢板剪力墙内筒构成的混合结构, 用途为办公			333.3 m, 60 层, 上海, 2006 年建成, 巨型框架+混凝土内筒构成的混合结构, 用途为酒店/办公/零售	
51	瑞汉金玫瑰罗塔纳酒店		52	温州世界贸易中心	
	333 m, 71 层, 迪拜, 2007 年建成, 混合结构, 用途为酒店			333 m, 68 层, 温州, 2009 年建成, 钢筋混凝土外框筒+核心筒构成的筒中筒结构, 用途为商贸/办公/餐饮	
53	中国民生银行大厦		54	北京国贸三期	
	331 m, 68 层, 武汉, 2008 年建成, 钢结构(使用钢管混凝土柱), 用途为办公			330 m, 74 层, 北京, 2010 年建成, 筒中筒结构(外筒: SRC 柱+钢梁; 内筒: SRC 柱+钢梁+支撑; 伸臂桁架), 用途为酒店/办公	

1.2 高层建筑钢结构的特点及结构体系

1.2.1 高层建筑钢结构的优缺点

1. 高层建筑钢结构的优点

(1) 钢结构材料轻质高强。

虽然钢材的密度高于其他建筑材料,但钢材的抗拉、抗压、抗剪强度明显高于其他建筑材料,其强重比是混凝土的 5 倍以上,是砖石等各类砌块的 10 倍以上。特别是随着高强度合金钢的发展与应用,屈服强度 400 MPa 以上的高强钢正在被逐渐应用于高层建筑中,强重比指标更加优异。一般情况下,高层钢结构自重(包括梁、板、柱)为 $6 \sim 8 \text{ kN/m}^2$,仅为钢筋混凝土高层结构自重($12 \sim 14 \text{ kN/m}^2$)的 $1/2 \sim 3/5$ 。同时,钢材在力学性能上基本各向同性,广泛适用于各类受压、受拉和受弯构件。

(2) 减轻结构自重可降低地震作用和基础造价。

由于结构自重的降低,参与水平地震的等效重力荷载(恒荷+部分活荷)降低,当楼层水平地震加速度相同时,高层钢结构地震作用将显著降低,有利于结构抗震设计。此外,结构

自重的减轻,还可以使基础造价降低,这种优势在软土地基和人工地基时尤为明显。

(3) 高层钢结构具有良好的抗震性能。

钢材的延性好,伸长率在20%以上,强屈比在1.2以上,能够确保钢构件发生较大塑性变形时也不会断裂。在地震作用下,不仅可以发展较大塑性变形进行滞回耗能,也可以在维持承载力不下降的情况下具有良好的适应强震变形的能力,维持“大震不倒”。另外,由于钢结构建筑比混凝土结构重量更轻,更易采用与结构质量直接相关的TMD、TLD等结构振动控制措施,提高结构抗风、抗震能力。

(4) 减小结构所占面积、增加使用面积。

由于钢材的轻质高强,承受同样内力的情况下,钢构件(梁、柱等)的截面尺寸远小于钢筋混凝土构件,因而结构自身所占用的建筑面积小,相当于增加了使用面积。同时,高层钢结构中通常利用钢梁与混凝土楼板的组合作用,刚度较大,可以实现较大柱网尺寸,也可减小竖向构件的用量,从而增加使用面积。通常情况下,钢结构构件所占面积与建筑面积的比值约为3%,混合结构为3.5%~4%,钢筋混凝土结构为7%~9%。钢结构可较钢筋混凝土结构增加使用面积4%~6%,对于业主而言这种直接的经济效益最为可观。

(5) 施工速度快、周期短。

钢结构构件均可实现在工厂加工,施工现场仅需完成拼装即可,现场装配大多使用螺栓连接,施工速度快,现场劳动成本低。另外,高层钢结构中广泛使用组合楼盖,压型钢板不但能全部或部分代替楼板内钢筋,而且可以作为楼板混凝土浇筑的模板使用,省去了大量支模、钢筋绑扎的时间,也可以多层楼面同时施工。综合比较,30~50层的钢结构高层建筑可以比混凝土高层建筑减少工期20%~50%。

(6) 钢结构是值得推广的绿色环保型建筑。

与传统建筑方式相比,钢结构建筑在全寿命周期内节能、节地、节水、节材、环保,可以少用40%左右的沙石和水泥,是名副其实的“绿色建筑”。生产钢结构主要消耗电力,焊接采用空气中制取的二氧化碳和惰性气体保护焊缝,防腐油漆在密闭车间进行,全程几乎不会增加新的二氧化碳排放,也不会产生有害气体。建造钢结构建筑的二氧化碳排放量比传统混凝土建筑降低1/3左右。另外,虽然钢筋混凝土构件的钢筋可以回收,但是必须破碎混凝土,破碎过程不仅产生大量粉尘颗粒,而且成本高,回收也无利可图。而钢结构建筑拥有高达90%的钢材回收率,且回收较方便,每一栋钢结构建筑都是一座“钢材储存仓库”。

2. 高层建筑钢结构的缺点

钢材的耐火能力差,在火灾作用下的自身耐火极限仅为15 min,之后随着钢构件温度的上升,钢材的屈服点和弹性模量急剧下降。当温度达到500~600℃时,钢材几乎丧失所有的强度和刚度,此时钢构架极易在负荷下产生较大变形,并发生倒塌。因此,在钢结构使用过程中必须对梁、柱、支撑及受力的压型钢板等采取防火保护措施,如喷涂一定厚度的防火涂料或采用难燃板材遮挡防火。另外,钢结构在潮湿环境下的耐锈蚀能力也较差,构件制作过程中要先除锈,然后再涂刷防锈漆。当然,近年来国内外耐火耐候钢的研发与应用,也为钢结构防火和防锈提供了一种有效途径。但这些防护措施都会增加钢结构的造价。

另外,与钢筋混凝土结构相比,钢结构的用钢量稍大,造价偏高。以20世纪90年代以前建成的11栋钢结构建筑(26~53层)为例,用钢量为95~160 kg/m²,平均为128 kg/m²。

而同期 9 栋钢筋混凝土建筑(18~62 层),用钢量为 $68 \sim 120 \text{ kg/m}^2$,平均为 91 kg/m^2 。显然通过采用轻质围护材料和先进结构体系,用钢量还会进一步下降,但单从用钢量指标上看,钢结构建筑仍然是偏大的。

1.2.2 高层建筑钢结构体系简介

高层建筑结构体系和房屋的高度一样,一直在不断发展和演化,从早期的框架结构体系和框架支撑结构体系,到筒体结构体系、核心筒伸臂桁架结构体系,再到近期的斜交柱网络结构体系,甚至是多种结构体系组成的复合结构体系。

其实,在 20 世纪前半叶,虽然美国建设起来高度和层数惊人的帝国大厦(1931 年)等许多高层建筑,但结构体系并没有实质性进步,都是基于框架结构或框架加风撑的结构,巨大的结构高度是依靠消耗大量建筑材料而形成的。由于缺少高级的结构计算和分析手段,高层建筑都设计得相当保守。直到第二次世界大战之后,世界恢复和平,经济高速发展,并随着计算器、计算机等硬件的出现和有限元方法、程序等软件的发展,以世界贸易中心(1973 年)和西尔斯大厦(1974 年)为代表的更高建筑物才相继建成,并在结构体系上出现了实质性创新,创造出了框筒和成束筒结构体系。之后,从 20 世纪 80 年代开始,建筑物高度呈现竞赛化的趋势,新的高效结构体系也不断涌现,如巨型框架结构体系、核心筒加伸臂桁架结构体系、使用各种人工阻尼装置的结构体系、钢和混凝土构成的混合结构体系等。由于高强建筑材料(高强钢和高强混凝土)的应用及高效结构体系的使用,虽然建筑物的高度不断被刷新,但单位建筑面积上的材料用量并未显著非线性增加,这也为高层建筑物的建设者和支持者提供了强有力的论据和高度上的广泛追逐空间。图 1.1 给出了高层建筑钢结构体系和适用高度。但随着高层建筑层数的越来越多,水平风荷载和地震荷载的影响越来越显著,所需的水平刚度越来越大,抗侧力结构体系也趋于复杂,甚至某些高层建筑使用了共同工作的多种抗侧力体系。

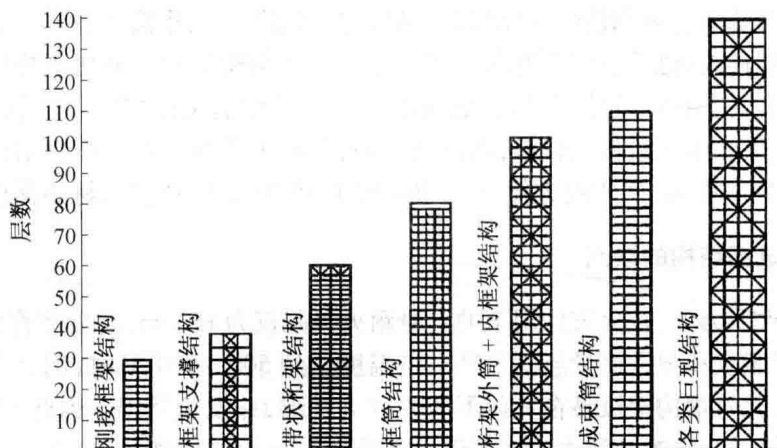


图 1.1 高层钢结构体系和适用高度

结合抗侧力体系发展现状,有些文献依据抵抗水平荷载的能力,将抗侧力体系进行了归类,统一分为内部抗侧力体系(interior structures)和外部抗侧力体系(exterior structures),如图 1.2 所示。显然,内部抗侧力体系以框架结构和框架-支撑结构(框架-剪力墙结构或框

架-核心筒结构)为主,属于较为传统的结构形式。为了进一步增加这种结构的水平刚度,可以在适合的高度处配合核心支撑(核心剪力墙或核心筒)使用一道或多道伸臂桁架,使外部框架柱发挥更多的抗侧力作用。

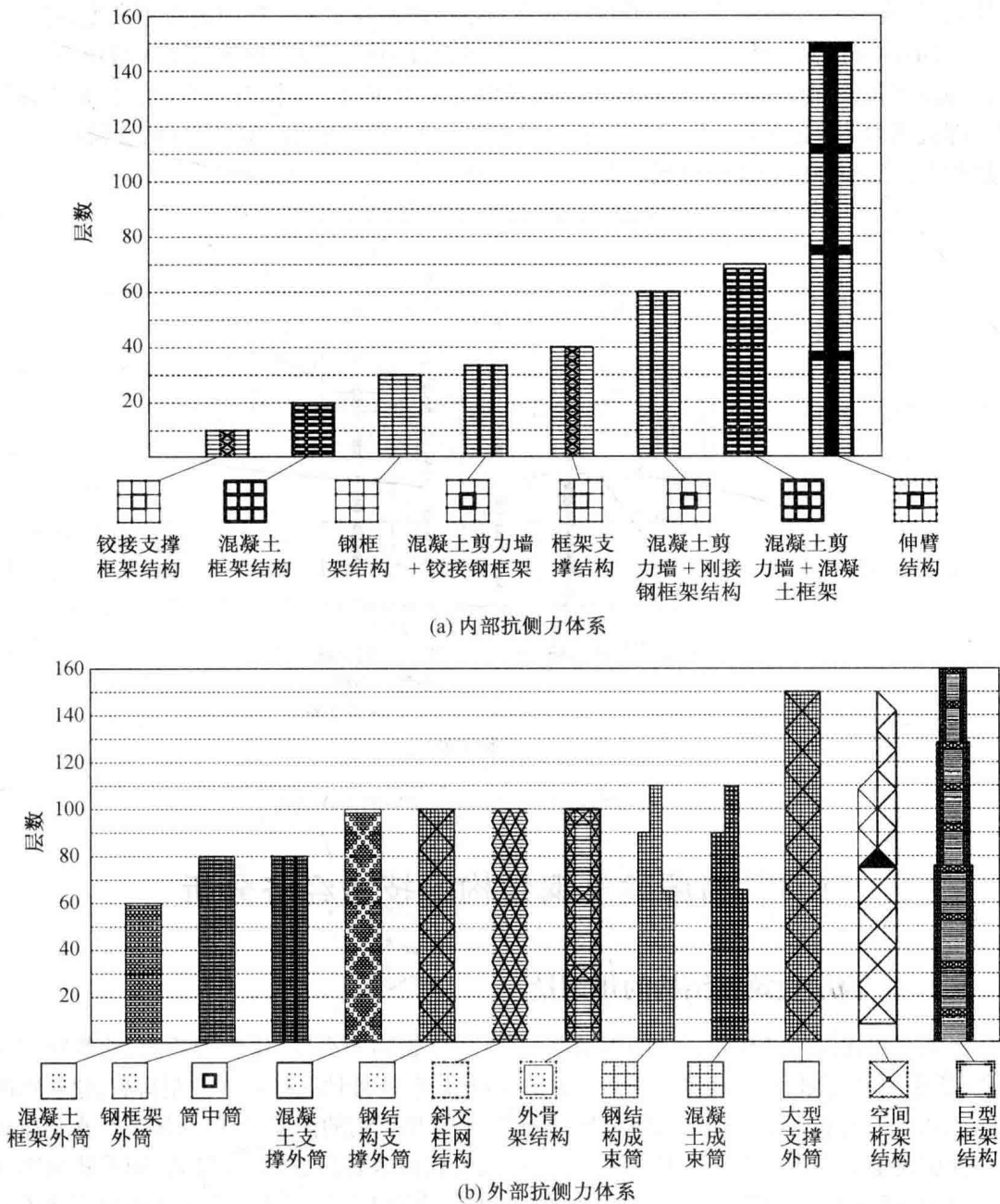


图 1.2 高层建筑结构的抗侧力体系

而外部抗侧力结构体系的特点是主要受力构件周边化分布,具有更大的整体水平刚度,其中以外筒结构、多个筒体组成的成束筒结构和巨型框架结构最具代表性。构成外筒的方式有多种,如密柱深梁的框架、设置大型斜撑的框架、斜交柱构成的网格等。巨型框架结构