

『十三五』国家重点出版物出版规划项目

中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究系列丛书

千米级摩天大楼 结构施工关键技术研究

组织编写

中国建筑股份有限公司

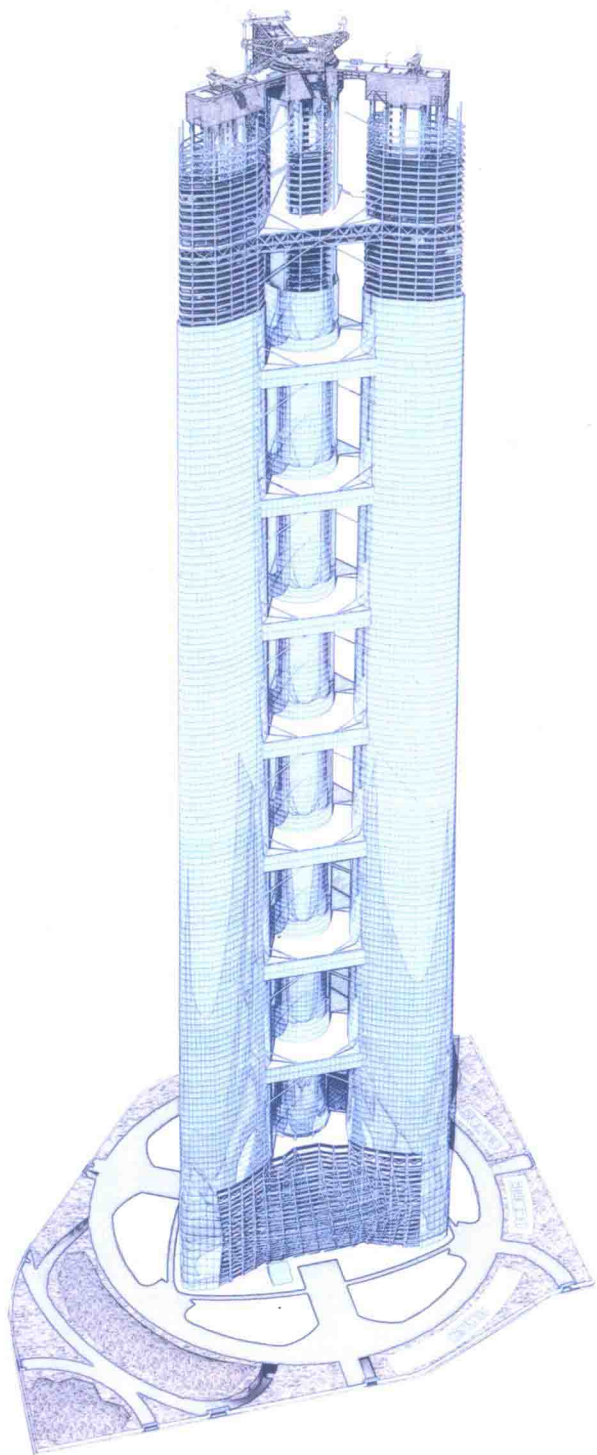
中国建筑股份有限公司技术中心

丛书主编

毛志兵

本书主编

张琨



中国建筑工业出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究系列丛书

千米级摩天大楼结构施工 关键技术研究

组织编写 中国建筑股份有限公司
中国建筑股份有限公司技术中心
丛书主编 毛志兵
本书主编 张 琨

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

千米级摩天大楼结构施工关键技术研究/张琨主
编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 6
(中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究系列丛书)
ISBN 978-7-112-20764-0

I. ①千… II. ①张… III. ①超高层建筑-建筑
结构-工程施工 IV. ①TU974

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 111051 号

本书对高度达千米级别的超高层建筑的施工关键技术进行了研究和总结, 内容共分 7 章, 分别是: 概述、千米级摩天大楼基础工程施工关键技术研究、千米级摩天大楼钢结构施工关键技术研究、千米级摩天大楼混凝土施工关键技术研究、千米级摩天大楼模架与施工平台关键技术研究、千米级摩天大楼垂直运输关键技术研究、千米级摩天大楼施工期消防与逃生技术研究。本书的研究成果比较前沿, 对于我国建设更高高度的超高层建筑具有参考意义。

本书适用于建筑施工技术、管理人员参考使用, 也可作为相关专业大中专院校师生学习参考书。

总 策 划: 尚春明

责任编辑: 万 李 张 磊

责任设计: 李志立

责任校对: 李美娜 党 蕾

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究系列丛书

千米级摩天大楼结构施工关键技术研究

组织编写 中国保险股份有限公司
中国保险股份有限公司技术中心

丛书主编 毛志兵

本书主编 张 琨

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/16 印张: 22 字数: 632 千字

2017 年 12 月第一版 2017 年 12 月第一次印刷

定价: 52.00 元

ISBN 978-7-112-20764-0

(30435)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

《中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究系列丛书》 编写委员会

丛书主编：毛志兵

丛书副主编：蒋立红 李景芳

丛书编委：张 琨 王洪礼 吴一红 薛 刚 令狐延

戴立先 王 军 满孝新 邓明胜 王冬雁

《千米级摩天大楼结构施工关键技术研究》

编写人员

本书主编：张 琨

本书副主编：薛 刚 王 军 戴立先 王 辉

本书编委：

中国建筑第三工程局有限公司：

孙金桥 王开强 陈 凯 许立山 洪 健 陈 波
李 迪 周环宇 刘志茂 明 磊 孙 庆 刘晓升
欧阳明勇 李 霞 巴 鑫 周 勇 叶 贞 刘 威
崔 健 刘 彬 刘卫军 吴全龙 杨 辉 夏劲松
蒋 凯 罗汾毅

中国建筑一局（集团）有限公司：

周予启 史 媛 王红媛 黄 勇 贺茂军

中建钢构有限公司：

欧阳超 刘 曙 叶国新 吕黄兵 梁明雨

中建西部建设股份有限公司：

赵日照 林家超 彭 园 刘 离 吴 雄

中国建筑股份有限公司技术中心：

张 涛 霍 亮 李国友

序

超高层建筑是现代化城市重要的天际线，也是一个国家和地区经济、科技、综合国力的象征。从 1930 年竣工的 319m 高克莱斯勒大厦，到 2010 年竣工的 828m 高哈利法塔，以及正在建设中的 1007m 高国王塔，都代表了世界超高层建筑发展的时代坐标。

20 世纪 90 年代以来，伴随着国民经济不断增长和综合国力的提升，中国超高层建筑发展迅速，超高层建筑数量已跃居世界第一位。据有关统计显示，我国仅在 2017 年完工的超高层建筑就近 120 栋，累计将达到 600 栋以上。深圳平安国际金融中心、上海中心大厦等高度都在 600m 以上，建造中的武汉绿地中心高度将达 636m。

中国建筑股份有限公司（简称：中国建筑）是中国专业化发展最久、市场化经营最早、一体化程度最高、全球排名第一的投资建设集团，2017 年世界 500 强排名第 24 位。中国建筑秉承“品质保障、价值创造”的核心价值观，在超高层建筑建造领域，承建了国内 90% 以上高度超过 300m 的超高层建筑，经过一批 400m、500m、600m 级超高层建筑的施工实践，形成了完整的建造技术。公司建造的北京“中国尊”、上海环球金融中心、广州东塔和西塔、深圳平安国际金融中心等一批地标性建筑，打造了一张张靓丽的城市名片。

2011 年起，我们整合集团内外优势资源，历时 4 年，投入研发经费 1750 万元，组织完成了“中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究”课题。在超高层建筑设计、结构设计、机电设计以及施工技术等方面取得了一系列研究成果，部分成果已成功应用于工程中。由多位中国工程院院士和中国勘察设计大师组成的课题验收组认为，课题研究的整体成果达到了国际领先水平。

为交流超高层建筑建造经验，提高我国建筑业整体技术水平，课题组在前期研究基础上，结合公司超高层施工实践经验，编写了这套《中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究系列丛书》。丛书包括《千米级摩天大楼建筑设计关键技术研究》、《千米级摩天大楼结构设计关键技术研究》、《千米级摩天大楼机电设计关键技术研究》、《千米级摩天大楼结构施工关键技术研究》及《中国 500 米以上超高层建筑施工组织设计案例集》5 册，系统地总结了超高层建筑、千米级摩天大楼在建造过程中设计与施工关键技术的研究、实践和方案。丛书凝结了中国建筑工程技术人员智慧和汗水，是集团在超高层建筑领域持续创新的成果。

丛书的出版是我们探索研究千米级摩天大楼建造技术的开始，但仅凭一家之力是不够的，期望业界广大同仁和我们一起探索与实践，分享成果，共同推动世界摩天大楼的“中国建造”。

中国建筑工程总公司 董事长、党组书记
中国建筑股份有限公司 董事长



前 言

中国建筑作为全球最大的投资建设集团，为了适应超高层建筑的发展，推动相关技术的提升，2011 年启动了《中国建筑千米级摩天大楼建造技术研究》课题立项工作，并于 2015 年结题验收。本书在课题研究成果的基础上，提炼总结中国建筑多年的研究与实践成果，形成千米级摩天大楼结构施工关键技术。

本书共分 7 章，第 1 章阐述了国内外超高层建筑及其技术的发展概况。第 2 章介绍了适用于千米级摩天大楼基础工程施工的主要关键技术，内容包括超大长径比桩、超大直径桩、超深超大基坑等施工技术研究。第 3 章介绍了千米级摩天大楼钢结构施工关键技术，内容包含多腔体巨型钢柱、超长超厚单层钢板剪力墙的制作与安装、自动焊接机器人、变形控制、远程监测等。第 4 章介绍了千米级摩天大楼混凝土施工关键技术，内容涉及混凝土的研制、施工、千米泵送等方面。第 5 章介绍了千米级摩天大楼模架与施工平台技术，内容包括低位顶模、集成平台、液压爬模三种模架体系。第 6 章围绕千米级摩天大楼垂直运输设备，介绍了回转平台、单塔多笼循环电梯、跃层电梯、竖向通道塔等关键技术研究。第 7 章以千米级摩天大楼施工期消防与逃生为重点，介绍了“临时/永久”相结合消防系统应用研究及磁力缓降安全逃生装置研究。全书比较系统地总结了当今超高层建筑结构施工的关键技术与工程实践成果。书中多项技术达到国际领先或先进水平，部分技术全球首创。

本书诸多技术的研发和应用，是中国建筑工程技术人员及业界人士的共同心血。在他们研究成果的基础上，本书编写人员力求将这些成果展现在读者面前。本书涉及的专业门类广、研究成果多，因编者水平有限，难免有不当之处，希望广大读者批评指正！

本书编委会
2017 年 6 月

目 录

1 概述	1
1.1 国内外超高层建筑发展概况	1
1.2 超高层建筑施工技术的发展情况	4
1.2.1 国外超高层建筑技术的发展	4
1.2.2 国内超高层建筑技术的发展	5
2 千米级摩天大楼基础工程施工关键技术研究	11
2.1 研究背景	11
2.2 软土地区超大长径比灌注桩施工技术	11
2.2.1 超长灌注桩护壁泥浆研制与施工技术	12
2.2.2 超长超重钢筋笼关键施工技术	15
2.2.3 超大长径比灌注桩垂直度控制技术	19
2.2.4 超长灌注桩水下高强高性能混凝土施工技术	20
2.2.5 竖向高密度点位环形注浆设计与施工技术	23
2.3 浅埋岩地区超大直径灌注桩施工技术	26
2.3.1 超大直径承压桩钢筋笼关键施工技术	26
2.3.2 水下自密实混凝土特性研究与应用	31
2.3.3 超大直径承压桩双导管水下混凝土浇筑施工技术	32
2.4 超深超大基坑施工技术	35
2.4.1 超高层建筑上下同步逆作法施工技术	36
2.4.2 大面积密集混凝土内支撑条件下超大超深基坑施工技术	48
2.5 小结	57
3 千米级摩天大楼钢结构施工关键技术研究	59
3.1 研究背景	59
3.2 多腔体巨型钢柱施工关键技术	60
3.2.1 多腔体巨型钢柱深化设计与制造技术	61
3.2.2 多腔体巨型钢柱现场焊接技术	66
3.2.3 工程应用	71
3.3 超长、超厚单层钢板剪力墙制造与安装技术	71
3.3.1 钢板剪力墙深化设计技术	72
3.3.2 钢板剪力墙制造技术	74
3.3.3 钢板剪力墙现场连接技术	77
3.3.4 工程应用	81
3.4 现场自动焊接机器人施工技术	81

3.4.1	适用性设计关键技术	83
3.4.2	自动化设计关键技术	83
3.4.3	焊接工艺参数关键技术	84
3.4.4	轻量化设计关键技术	89
3.4.5	工程应用	89
3.5	结构变形控制关键技术	92
3.5.1	施工模拟技术	93
3.5.2	施工控制技术	99
3.6	远程无线实时监测技术	101
3.6.1	监测技术原理	101
3.6.2	工程应用	105
3.7	小结	108
4	千米级摩天大楼混凝土施工关键技术研究	110
4.1	研究背景	110
4.2	千米级建筑高性能混凝土配制技术	111
4.2.1	低水化热低收缩大体积混凝土配制技术	111
4.2.2	超高强高性能混凝土配制技术	115
4.2.3	高强轻集料混凝土配制技术	118
4.3	巨型钢管混凝土柱施工关键技术	121
4.3.1	巨型钢管混凝土性能影响因素	122
4.3.2	自应力自养护自密实钢管混凝土配制技术	123
4.3.3	钢管混凝土施工技术	133
4.3.4	钢管混凝土脱空检测技术	136
4.4	千米级超高层泵送关键技术	140
4.4.1	混凝土泵送性能评价体系	140
4.4.2	混凝土水平泵送模拟验证	146
4.4.3	千米级混凝土泵送技术	155
4.5	钢板剪力墙混凝土裂缝控制关键技术	161
4.5.1	钢板剪力墙混凝土开裂机理分析	161
4.5.2	预热钢板试验与结果分析	166
4.5.3	预热钢板减少裂缝产生的作用效果	171
4.6	小结	173
5	千米级摩天大楼模架与施工平台关键技术研究	175
5.1	研究背景	175
5.2	低位少支点整体顶升平台模架体系	176
5.2.1	低位顶模施工原理	177
5.2.2	周转性设计与施工技术	183
5.2.3	适应性设计与施工技术	190
5.2.4	安全性设计与施工技术	194
5.3	超高层施工装备集成平台	198

5.3.1	集成平台施工原理	199
5.3.2	高承载力设计与施工技术	200
5.3.3	高适应性设计与施工技术	208
5.3.4	装备集成设计与施工技术	211
5.3.5	智能综合监控设计与施工技术	217
5.4	液压自爬升模板体系	224
5.4.1	智能型多点液压自爬升模板系统	224
5.4.2	外框巨型钢柱液压自爬升操作平台	239
5.5	小结	244
6	千米级摩天大楼施工垂直运输关键技术研究	246
6.1	研究背景	246
6.2	回转式多吊机集成运行平台	247
6.2.1	集成平台整体运行设计	248
6.2.2	吊机基座平台系统设计	250
6.2.3	回转驱动系统设计	251
6.2.4	支承顶升系统设计	256
6.2.5	廻转平台加工与试验	257
6.2.6	工程应用	266
6.3	单塔多笼循环运行施工电梯	268
6.3.1	单塔多笼循环运行施工电梯整体设计	269
6.3.2	旋转换轨机构的设计	271
6.3.3	智能群控调度及安全监控系统的设计	275
6.3.4	无电缆分段供电技术的设计	280
6.3.5	样梯现场试验	283
6.3.6	工程应用	290
6.4	超高层跃层电梯	290
6.4.1	跃层电梯安装与跃升流程	291
6.4.2	跃层电梯临时支撑形式的研究	292
6.4.3	跃层电梯全过程多专业深化设计及协同施工	293
6.4.4	跃层电梯临时机房与正式机房的切换	295
6.5	竖向通道塔	296
6.5.1	通道塔结构设计	296
6.5.2	通道塔安拆技术	299
6.5.3	通道塔监测技术	302
6.5.4	工程应用效果	305
6.6	大型设备性能提升及改进技术	306
6.6.1	动臂式塔式起重机施工技术研究	306
6.6.2	高速电梯施工技术	312
6.7	小结	320

7 千米级摩天大楼施工期消防与逃生技术研究	322
7.1 研究背景	322
7.2 “临时/永久”相结合消防系统应用研究	323
7.2.1 正式消防系统在施工阶段应用的可行性分析	323
7.2.2 临时消防系统与正式消防系统无缝转接技术	324
7.2.3 基于 BIM 技术平台的机电管线综合深化及专业协同	327
7.3 磁力缓降安全逃生装置	328
7.3.1 高楼逃生装置国内外技术现状及方向	328
7.3.2 磁力缓降逃生系统载重效率研究	330
7.3.3 磁力缓降逃生系统附属装置的研究与试制	332
7.3.4 磁力缓降逃生系统足尺模型试验及工程应用储备研究	335
7.4 小结	337
参考文献	338

1 概 述

1.1 国内外超高层建筑发展概况

超高层建筑因巨大的社会效益和经济效益受到人们的青睐,许多国家和企业纷纷投资或建设超高层建筑来展示其财富和地位。自超高层建筑诞生以来,这股热潮就一直没有停止过。1894年美国纽约高106m的曼哈顿人寿保险大厦落成,成为世界第一栋超高层建筑。此后,有13栋超高层建筑成为当时世界第一高峰,超高层建筑的高度纪录不断被刷新,大部分世界第一的超高层建筑都只是昙花一现,只有1931年建成的381m的美国纽约大厦保持世界第一高楼称号达42年。

从世界范围来看,超高层建筑的发展可大致分为3个阶段:

第1阶段(1894—1935年):高层建筑进入超高层建筑的起步阶段,世界超高层建筑的发展雏形时期,其代表为1894年美国纽约高106m的曼哈顿人寿保险大厦(见图1-1)。之后的美国经济危机和第一次、第二次世界大战使得全球超高层建筑几乎全部停止。这一时期的超高层建筑受到设计理论和建筑材料的限制,结构材料用量较多、自重较大,结构形式单一,主要为框架结构,均建于非抗震区。

第2阶段(1950—1975年):随着建筑技术的进步,建筑结构理论日趋成熟,特别是钢筋混凝土结构技术的应用取得突破性进展。超高层建筑进入新发展阶段。简洁实用、不受传统建筑形式约束的现代主义超高层建筑成为发展主流。1950年建成的纽约联合国秘书处大厦(39层,高166m)是现代主义超高层建筑的早期代表作。1976年建成的波士顿汉考克大厦(60层,高240.7m)建筑体形为简洁的长方体,是现代主义超高层建筑的晚期代表作(见图1-2)。此后世界超高层建筑设计思潮开始转变。

第3阶段(1980年至今):超高层建筑发展呈现新特点,简单的几何形式使建筑设计走向了极端。超高层建筑在追求造型及功能多样化的同时,新技术、新材料被大量地应用到超高层建筑中来。不少具有民族和地方特色的超高层建筑在世界各地兴建,超高层建筑的建设呈爆发式增长。2010年建成的高828m的哈利法塔以惊人的高度实现了超高层建筑发展的飞跃,成为世界第一高楼(见图1-3)。高度超过1000m的王国塔也在建设中。相当一批有效高度超过600m甚至超过1000m的超高层建筑也在规划设计中,全球各地正在掀起超高层建筑的建设热潮。

目前,中国已成为世界上建筑业最活跃与最繁荣的国家,超高层建筑数量已经稳居世界第一。在2016年全球十大高楼中,中国已经占据6席(见表1-1)。中国的超高层建筑数量占据了全球超高层建筑的半数以上,截至2015年底全球300m以上超高层建筑186座,中国占115座,全球500m以上超高层建筑16座,中国占10座,中国已成为建造摩天大楼的“头号主力”。2010年以后是全球超高层建筑全面爆发阶段,2010年以前全球300m以上超高层建筑总量为45座,2010年至2015年的短短5年间全球新增300m以上超高层建筑(在建及建成)数量达到惊人的141座,相当于2010年以前全部数量的3.1倍,建设重心明显由欧美转向东亚,其中中国在这5年间300m以上超高层建筑(在建及建成)多达86座,相当于全球其他国家同一时期总和的1.6倍。



图 1-1 曼哈顿人寿保险大厦



图 1-2 波士顿汉考克大厦



图 1-3 哈利法塔（一）

全球前 10 名高楼

表 1-1

序号	名称	高度	所在城市	施工单位	状态
1	王国大厦	1007m	吉达(沙特阿拉伯)	美国 Adrian Smith+Gordon Gill Architecture 公司	在建 (见图 1-4)
2	哈利法塔	828m	迪拜(阿联酋)	韩国三星公司	建成 (见图 1-5)
3	苏州中南中心	729m	苏州(中国)	中国建筑	在建
4	武汉绿地中心	636m	武汉(中国)	中国建筑	在建
5	上海中心大厦	632m	上海(中国)	上海建工	建成
6	皇家钟塔酒店	601m	麦加(沙特阿拉伯)	沙特 Binladen 集团	建成
7	深圳平安金融中心	600m	深圳(中国)	中国建筑	封顶
8	天津 117 大厦	597m	天津(中国)	中国建筑	封顶
9	沈阳宝能国际金融中心	568m	沈阳(中国)	中国建筑	在建
10	乐天超级大厦	555m	首尔(韩国)	韩国乐天建筑	在建

注：数据来源于高楼迷论坛，截至 2016 年 6 月。



图 1-4 王国大厦



图 1-5 哈利法塔（二）

摩天大楼在中国如雨后春笋般展现，建筑高度不断被刷新（见表 1-2）。除数量增多外，超高层建筑的高度近年不断刷新，我国超高层建筑的高度正在从 400m 级向 600m 级、700m 级挺进。492m 高的上海环球金融中心已正式投入使用；2015 年 4 月，600m 高的深圳平安金融中心结构封顶；2015 年 9 月，597m 高的天津 117 大厦结构封顶，成为中国结构第一高楼；2016 年 3 月，632m 高的上海中心大厦完工，成为建成高楼中中国第一、世界第二高楼。此外全国各地尚有一批正在兴建的高层建筑，如 729m 高的苏州中南中心（见图 1-6）、636m 高的武汉绿地中心（见图 1-7）、568m 的沈阳宝能国际金融中心等。

中国前十名高楼 表 1-2

序号	名称	高度	所在城市	施工单位	状态
1	苏州中南中心	729m	苏州	中国建筑	在建
2	武汉绿地中心	636m	武汉	中国建筑	在建
3	上海中心大厦	632m	上海	上海建工	建成
4	深圳平安金融中心	600m	深圳	中国建筑	封顶
5	天津 117 大厦	597m	天津	中国建筑	封顶
6	沈阳宝能国际金融中心	568m	沈阳	中国建筑	在建
7	广州东塔	530m	广州	中国建筑	建成
8	天津周大福	530m	天津	中国建筑	在建
9	北京中国尊	528m	北京	中国建筑	在建
10	台北 101 大厦	509m	台北	KTRT 团队	建成

注：数据来源于高楼迷论坛，截至 2016 年 6 月。



图 1-6 苏州中南中心



图 1-7 武汉绿地中心

超高层建筑高度的不断攀升，不仅仅是高度的突破，而且还带动了整个建筑业的发展，包括施工技术、材料技术、设备制造技术等多行业的共同发展，是促进国民经济发展的一个重要纽带，超高层建筑发展是经济发展的大势所趋。

1.2 超高层建筑施工技术的发展情况

1.2.1 国外超高层建筑技术的发展

建筑活动往往是在一定技术基础上进行的,因而建筑业的历史发展以建筑技术的不断进步为前提。建筑业对技术的大胆尝试和利用大都表现在材料技术、结构技术、设备技术等

1. 现代科学技术促进超高层建筑材料的发展

超高层建筑对建筑钢材和混凝土的要求更高。对钢材性能的要求:高强度,低屈强比,窄屈服幅等的耐震性能;加工工艺上的可焊性,形状尺寸加工精度;耐久性,如高张力钢、低屈服点钢、热处理钢等。1988—1992年间,日本开发研制了屈服点为 590N/mm^2 的高张力钢,广泛用于超高层建筑中。近些年来,又开发研制了屈服点为 780N/mm^2 的高张力钢,已开始应用于超高层建筑中。另一方面,低屈服点钢(如屈服点为 100N/mm^2 的钢材,为普通钢材屈服点的一半左右)被研发用于结构梁柱等特殊部位作为吸收地震能的材料。钢筋混凝土结构中的钢筋和混凝土强度也在迅速提高。1988年以来,进行了强度为 $58.8\sim 117.6\text{MPa}$ 的混凝土及强度为 $686\sim 1176.7\text{MPa}$ 钢筋的开发及应用。

2. 现代科学技术促进超高层建筑结构体系的发展

传统建筑主要采用砖石作为承重材料,但因其强度较低难以形成整体性,限制了建筑进一步向高空发展。19世纪后半叶钢铁制造技术取得突破,美国威廉·詹尼发明了一种全新的建筑结构体系——钢框架(骨架)结构体系。该结构体系创新性地采用钢铁作为承重材料,承重结构与围护(分隔)结构分离,1894—1935年的超高层建筑主要采用钢结构体系。1929—1933年期间纽约的帝国大厦采用了钢框架支撑结构,具有建筑之王的美称。1950—1975年的钢结构涌现出多个新结构体系,剪力墙结构、框架-剪力墙结构、框架-筒体结构、筒中筒结构、带转换层结构等体系陆续涌现,混凝土和钢材强度等级不断提高,既满足了建筑形式和功能的需求,更满足了高度不断增长的需求。1980年以后的超高层建筑结构中,钢结构的数量和高度发展速度明显减缓,钢筋混凝土结构和混合结构的发展速度超过钢结构。在超高层混合结构中采用了巨型型钢混凝土柱、钢管混凝土柱、巨型伸臂桁架、带钢支撑的巨型外筒、型钢或带斜撑混凝土内筒、钢板混凝土剪力墙等的有效组合。

3. 现代科学技术促进超高层建筑设备设施的发展

1871年芝加哥发生火灾,使人们认识到城市建筑防火的重要性。由于当时消防设施还比较落后,消防的合理高度在5层楼以下,因此消防设施的进步促进了高层建筑的发展。发展高层建筑需要解决的另一个技术难题是垂直运输。1890年奥蒂斯发明了现代电力电梯。由于乘客电梯的出现,建筑突破5层的高度限制(徒步可行的登高距离)成为可能。20世纪后高速电梯的陆续问世,完全解决了超高层建筑垂直运输难题。起重机行业完成了从百吨级到千吨级的跨越,大吨位塔式起重机的问世解决了超高层吊装的难题,大功率、超长臂混凝土泵解决了超高泵送的难题,高承载力模架系统的研究应用解决了超高层建筑施工的模架难题,互联网及通信技术促进了高效管理及远程控制的便捷。目前超高层建筑建造技术基本完备,超高层建筑的技术发展进入了新的阶段。

1.2.2 国内超高层建筑技术的发展

目前在超高层建筑的施工技术方面,美国和日本走在世界的前列,西方发达国家建造百米以上的高楼已各有数十至百余年历史。由于我国对超高层建筑技术的研究起步较晚,自改革开放以来我国超高层建筑的建设和技术研究才有了突破性的进展。中国超高层建筑的数量为世界之最,这些超高层建筑在给城市增添亮点的同时,也极大地推动了我国超高层建筑施工水平的提升。

1. 结构体型复杂化

业主和建筑师为实现建筑功能以及在建筑艺术、建筑造型方面体现创新,越来越重视建筑个性化的体验,设计了众多复杂体型和内部空间多变的超高层建筑,使超高层建筑的平面、立面均极其特别,使得我国超高层建筑的复杂程度也处于世界前列。

根据超高层建筑的功能要求,我国先后发展了框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、框架-筒体结构、筒中筒结构、巨型框架结构等。钢管混凝土、高强度混凝土也在超高层建筑中逐步推广。近几年,各种新的复杂体型及复杂结构体系大量出现,如体型复杂的连体结构,楼板开大洞形成的长短柱,楼板与外框结构仅通过若干节点连接,悬挑、悬挂,大跨度连体的滑动连接等。

国外高层、超高层建筑以纯钢结构为主,而我国以钢-混凝土的混合结构应用居多。据不完全统计,中国已建成的300m以上的超高层建筑,混合、组合结构约占66.7%,如上海环球金融中心(见图1-8)及金茂大厦均为钢筋混凝土核心筒,外框为型钢混凝土柱及钢柱,上海中心大厦、深圳平安金融中心、天津117大厦等全部采用混合结构。钢-混凝土混合结构之所以得到了较大发展,一方面因为其可有效地将钢、混凝土以及钢-混凝土组合构件进行组合,既具有钢结构的技术优势又具有混凝土造价相对低廉的特点;另一方面,我国现场施工的人力成本比国外低,采用混合结构比采用纯钢结构在经济方面更有优势。因此混合结构是符合我国国情的超高层建筑的结构体系,预计将来混合结构仍将得到较大的发展。

随着超高层建筑的发展,近期涌现出了一些新型结构体系。钢-混凝土框架-核心筒结构,内筒采用了型钢、钢板混凝土巨型组合柱及型钢混凝土支撑结构体系;钢管混凝土柱框架+核心钢板剪力墙体系+外伸刚臂抗侧力体系,具有较高的抗侧刚度和延性;广州西塔(见图1-9)采用了外部交叉网格结构体系,该体系具有较强的抗侧刚度及抗扭刚度,能较好地抵御风荷载和地震作用;巨型结构在超高层建筑中被广泛采用,利用外框的带状桁架和巨型柱形成巨型框架,并辅



图 1-8 上海环球金融中心

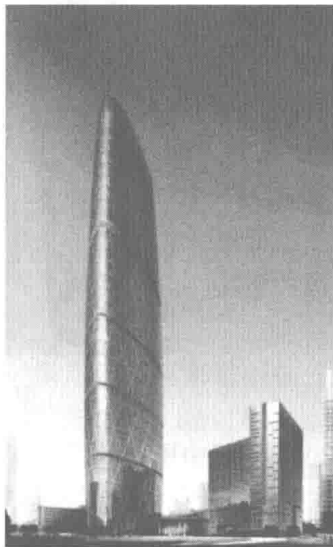


图 1-9 广州西塔

以必要的外立面的斜撑。随着超高层建筑结构的发展,会有更多新颖合理的结构体系出现。

2. 机械设备国产化

随着建筑规模的扩大,国产设备也更加大型化、专业化以及高速化,此外为了取代整机设计,机械设备也朝产品模块化、组合化和标准化发展。目前我国超高层建筑领域机械设备已实现国产化:我国塔式起重机生产技术发展迅速,建筑施工单位已能生产各种可适应超高层建筑施工需要的自升式塔式起重机,并已逐步走在世界前列;在混凝土超高设备泵送领域,我国建筑施工企业已达到世界领先水平;国产大空间、大吨位、高速施工电梯也已经实现了 500m 级超高层建筑的成功应用。



图 1-10 中联重科 D1250-80
塔式起重机

近几年国内的设备厂家都陆续推出了一批标志性产品,逐步完成了超大型塔式起重机进口品牌替代。以中联重科为例,2008 年推出 D1100 超大型塔式起重机后,陆续开发了多款超大型塔式起重机,打破了超大型塔式起重机领域被进口产品垄断的局面,尤其全球最大上回转塔式起重机 D5200 的开发及创造吉尼斯世界纪录的全球最长臂塔式起重机 D1250 的开发(该机型具有 110.68m 的有效作业半径),彻底打破了我国工程用超大吨位塔式起重机长期依赖进口的局面(见图 1-10)。中国塔式起重机行业从由国外引进技术,到不断地创新研究,经过多年的发展,除满足我国国民经济建设飞速发展的需要外,还大量出口到非洲、中东,甚至欧美国家。

国产高速施工电梯在上海环球金融中心成功应用(见图 1-11),运行速度达到 90m/min,解决了国产化施工电梯在高速运行条件下超长电缆电压降、电缆收集及自身强度等多项超常规技术指标的难题,引领了国产施工电梯在超高层建筑施工中的应用。此后一大批超高层建筑不再采用进口施工电梯,国产施工电梯速度也提高到了 96m/min 以上,最大额定载质量也逐步向 3t 以上发展。

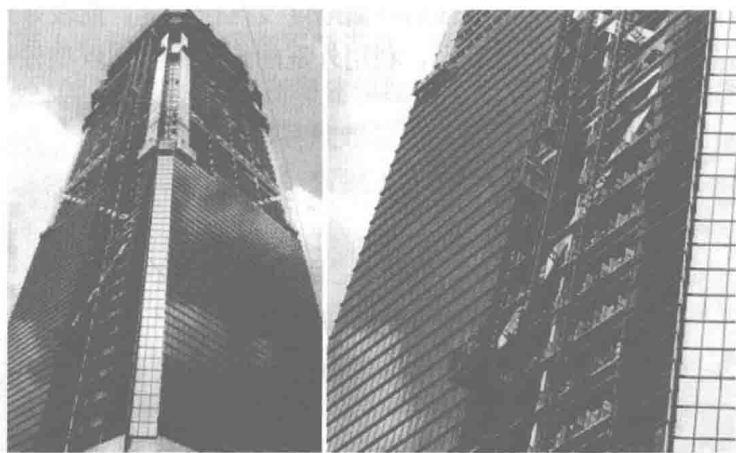


图 1-11 上海环球金融中心高速施工电梯

从 2013 年起中国建筑第三工程局有限公司开始研究单塔多笼循环运行电梯(见图 1-12),即在单根垂直导轨架两侧轨道上运行多部梯笼。在其顶部、底部及其他需要部位设置旋转节。当梯笼运行至旋转节位置时,通过旋转节进行轨道的变换,将梯笼从导轨架一侧上行的轨道变换到另一侧下行的轨道运行,形成周而复始的循环运行。梯笼通过旋转换轨机构平面旋转 180°变换轨