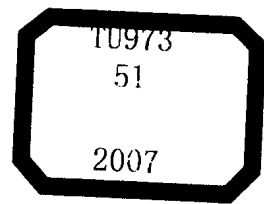


超高层建筑 结构设计 与施工

徐至钧 赵锡宏 主 编
陈祥福 唐兴荣 等编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





超高层建筑结构 设计与施工

徐至钧 赵锡宏主编
陈祥福 唐兴荣等编著

机械工业出版社

国际上把高度超过 30 层或 100m 以上的高楼称之为超高层建筑。本书介绍了世界最高的 100 栋超高层建筑和我国已建 200 多栋超高层建筑。

全书共九章，主要内容包括：超高层建筑结构体系、超高层建筑的结构构造、筒体结构设计、超高层建筑钢结构工程、转换层结构设计等，结合国内外一批工程实例对超高层建筑的沉降、建筑与地基基础共同作用以及结构施工等方面作了深入介绍，并提出空间变刚度等沉降群桩设计的新理论。本书对超高层建筑结构设计及施工，有很强的实用价值和参考价值。

本书可供工程设计人员、科研人员以及土建专业师生、研究生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

超高层建筑结构设计及施工/徐至钧, 赵锡宏主编; 陈祥福等编著.
—北京:机械工业出版社, 2007. 5
ISBN 978-7-111-21395-6

I. 超... II. ①徐... ②赵... ③陈... III. ①高层建筑-结构设计②
高层建筑-工程施工 IV. TU97

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 059925 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 何文军 责任编辑: 孙亚军 版式设计: 霍永明
责任校对: 李秋荣 封面设计: 姚毅 责任印制: 杨曦
北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)
2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 25 印张 · 621 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-21395-6
定价: 48.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 68327259
封面无防伪标均为盗版

前 言

超高层建筑 (Super Tall Building) 顾名思义是超过高层建筑,但目前还没有明确的定名。在国际上把高度超过 30 层或 100m 以上的高楼,称之为超高层建筑。

当前世界高层建筑发展除了建筑功能、外观造型和结构体系不断创新和改进外,还有一个重要特点,就是建筑高度不断增高,这是因为高层建筑的高度,实际在一定程度上反映了一个国家的整体国力和科学技术的总体水平,同时,每幢著名高层建筑也是历史的写照和时代的纪念碑。根据目前美国高层建筑的建设,近期可突破 500m 大关。而阿联酋正在建设的百吉迪拜大楼 (Buri Dubai Tower) 高度已突破 700m, 预计约在 2009 年建成。根据世界高层建筑专家预测,到本世纪末高层建筑有可能超过 1000m,是超高层建筑中世界最高的摩天大厦。

我国高层建筑的整体水平与国际水平相比差距正在缩小,有的已接近或已达到了世界先进水平。今后我国超高层建筑必定会大量兴建和不断发展,但一定要结合中国的国情和适应我国经济、科技发展的水平,克服盲目性,注意统筹规划、与环境协调、合理布局 and 因地制宜,并综合考虑城市规划、经济、技术、市容、防灾、设备和管理等各方面的问题。对超高层建筑,应该给予特别注意的有如下问题:

1. 不断改进和发展新的结构体系。目前,我国高层建筑大部分都采用框架—剪力墙、剪力墙、框架—筒体结构和筒中筒结构,对超高层建筑来说这远远不能满足建筑功能、复杂体形和迅速发展的需要。根据超高层建筑结构发展的经验还应该注意发展巨型结构、成束筒结构,具有转换楼层和刚体水平构件的结构、减振阻尼结构和隔震防震结构等。从中要开发出适合中国国情、具有中国特色的新型结构体系。

2. 在大量发展钢筋混凝土超高层建筑的同时,要积极研究超高层钢结构、型钢混凝土和钢—混凝土组合结构,尽快制定国家超高层结构设计及施工规范。积极研究超高层钢结构和钢—混凝土结构体系,发展钢结构在超高层建筑中的应用。

3. 加强超高层建筑结构分析中的非线性、非确定性问题研究,进行动力分析,保证结构的安全度和可靠性。加强超高层建筑结构优化设计的理论研究和应用开发工作。在结构断面尺寸优化的基础上,要逐步研究给定结构拓扑的几何优化和对结构拓扑优化。重点要开发适用的软件,使之发挥经济效益。

4. 大力加强超高层建筑深基础的研究和实测工作,这类基础不确定因素很多,地质条件复杂,有许多问题还没有完全弄清楚,研究潜力很大。如岩土本构关系和物理力学性能、深基础和超深地下室逆作法、地基—基础—上部结构共同作用、地震动力分析、非确定性分析、数值计算、地下空间利用、基础工程模拟、CAD 和专家系统等。应该投入更多的人力、物力和财力进行深基础研究,其必将得到很大的经济效益。

本书共分九章，主要结合超高层建筑介绍结构体系，简述世界最高的 100 栋超高层建筑和中国超高层建筑情况、超高层建筑的结构构造，超限高层建筑的抗震审查规定、筒体结构设计、超高层建筑钢结构工程、转换层结构设计、超高层建筑沉降计算与实例分析，提出空间变刚度等沉降群桩设计的新理论，并介绍超高层建筑结构施工。

本书由教授级高级工程师徐至钧和同济大学教授、博士生导师赵锡宏主编，陈祥福、唐兴荣、龚剑、张保良等编著。具体编写分工：第一、八章 赵锡宏、龚剑、张保良，第二、三、五、九章 徐至钧，第四、六章 唐兴荣，第七章 陈祥福。

另外，在编写本书的过程中，还有傅细泉、张勇、吕会云、宋宏伟、李景、易亚东、林婷等参加了部分编写和校对工作。

在编写中引用了许多科研、教学和工程单位的一些研究成果和工程总结等，在书中参考文献中都尽量注明出处，但难免有遗漏，在此谨向所有作者表示衷心的感谢。由于水平有限，书中不妥之处，尚祈各界读者朋友不吝指正。

作者于深圳
2006 年 11 月

目 录

前言

第一章 超高层建筑的结构体系	1
第一节 引言	1
第二节 世界超高层建筑的发展	1
第三节 结构体系	7
一、超高层建筑设计控制因素	7
二、超高层建筑的结构体系	8
第四节 超高层建筑的工程实例	10
[实例 1] 美国独特贝壳广场 (One Shell Plaza)	10
[实例 2] 美国西尔斯大楼 (Sears Tower)	11
[实例 3] 香港中国银行大楼 (Bank of China Tower)	12
[实例 4] 马来西亚石油大厦 (Petronas Tower)	13
[实例 5] 德国商业银行大楼 (Commerzbank Tower)	14
[实例 6] 金茂大厦 (Jinmao Building)	15
[实例 7] 高雄东帝士 85 超高大楼 (T & C Tower)	17
[实例 8] 恒隆广场 (Henglong Plaza)	17
[实例 9] 台北-101 大楼 (Taipei International Financial Center)	19
[实例 10] 百联世茂国际广场 (Brilliance Shimao International Plaza)	20
[实例 11] 上海环球金融中心 (Shanghai World Financial Center)	21
[实例 12] 百吉迪拜大楼 (Burj Dubai Tower)	23
第五节 超高层建筑的结构体系选择	24
第六节 结论与建议	25
参考文献	25
第二章 国内外超高层建筑	27
第一节 绪论	27
第二节 世界上最高的 100 栋建筑	28
第三节 中国超高层建筑概览	31

第三章 超高层建筑结构构造	37
第一节 高层建筑一般规定	37
一、高层建筑结构的高宽比	37
二、结构平面布置	38
三、伸缩缝、沉降缝和防震缝	39
四、增大伸缩缝间距的措施	41
五、结构竖向布置	41
六、超高层建筑的抗震	43
第二节 框架结构	46
一、结构布置	46
二、框架梁	47
三、框架柱	50
第三节 剪力墙结构	54
一、结构布置	54
二、剪力墙的厚度要求	55
三、剪力墙的配筋构造	57
四、剪力墙轴压比	59
五、钢筋的连接和锚固	59
六、连梁截面和配筋构造	60
七、剪力墙墙面和连梁开洞时的构造要求	61
第四节 框架—剪力墙结构	62
一、框架—剪力墙结构的形式	62
二、框架—剪力墙的抗震设计	62
三、框架—剪力墙的结构布置	62
四、截面设计及构造	64
第五节 筒体结构	66
一、结构布置	66
二、截面设计和构造措施	67
三、框架—核心筒	68
四、筒中筒结构	69
附录一 超限高层建筑工程抗震设防管理规定	71
附录二 全国超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会抗震设防专项审查办法	73
附录三 超限高层建筑工程抗震设防专项	

审查技术要点	75	二、钢结构体系	113
附录四 建筑结构布置属于《建筑抗震设计 规范》(GB50011—2001)《高层建 筑混凝土结构技术规程》(JGJ3— 2002)规定的特别不规则的高层 建筑	80	三、型钢混凝土构件设计	115
附录五 超限高层建筑工程抗震设防专项 审查申报表项目	80	四、型钢混凝土框架构件连接	120
参考文献	81	第三节 钢管混凝土结构	123
第四章 筒体结构设计	82	一、设计计算	124
第一节 一般规定	82	二、钢管混凝土柱的节点构造	126
一、筒体结构的分类	82	第四节 钢结构的防火保护	133
二、框筒结构的受力特点	84	一、钢结构防火的重要意义	134
三、截面设计和构造措施	86	二、关于防火保护设计	135
第二节 框架—核心筒结构	91	三、防火保护构造	136
一、核心筒设计	91	四、钢结构防火涂料	140
二、框架设计	91	五、当前应用防火涂料要点问答	141
三、墙体稳定验算	91	参考文献	144
四、框架—筒体结构的计算要点	92	第六章 转换层结构设计	145
第三节 筒中筒结构	93	第一节 概述	145
一、平面外形	93	一、结构转换层的概念	145
二、内筒设计	93	二、结构转换层的建筑功能及其分类	146
三、外框筒设计	94	第二节 转换层的主要结构形式	146
四、框筒梁和连梁的设计	94	第三节 带转换层高层建筑结构布置	148
五、筒中筒结构计算要点	96	一、底部转换层的设置高度	148
第四节 带转换层筒中筒结构	97	二、转换层上、下刚度突变的控制	149
第五节 框架—核心筒—伸臂结构	98	三、转换构件的布置	151
一、加强层的工作机理	98	四、剪力墙、筒体和框支柱的布置	152
二、水平加强构件的结构形式	99	第四节 带转换层高层建筑结构的 抗震等级	153
三、环向构件的结构形式	100	第五节 带转换梁高层建筑结构设计	153
四、带加强层高层建筑结构设计原则	100	一、一般原则	154
五、加强层的刚度选择和结构布置	101	二、底部大空间剪力墙结构的计算	155
六、带加强层高层建筑结构的抗震 等级	102	三、底部大空间剪力墙结构的设计与构造 要求	162
七、带加强层高层建筑结构构件的 设计要求	102	第六节 带桁架转换层高层建筑结构 设计	175
八、带加强层高层建筑结构的 构造要求	104	一、转换桁架结构形式	175
参考文献	105	二、结构计算的一般原则	176
第五章 超高层建筑钢结构工程	106	三、结构设计及构造要求	176
第一节 国内高层建筑钢结构的发展	106	第七节 带厚板转换层高层建筑结构 设计	181
第二节 型钢混凝土结构	112	一、厚板转换层结构的内力计算方法	182
一、概述	112	二、厚板转换层结构的设计	182
		三、厚板转换层结构的构造要求	183
		第八节 带箱形转换层高层建筑结构 设计	183
		一、箱形转换层结构的设计	184

二、箱形转换层结构的构造要求	184	一、线性弹性地基模型	279
第九节 新型转换层结构设计	185	二、非线性弹性地基模型	282
一、搭接柱转换结构	185	第二节 高层和超高层建筑与地基基础共	
二、斜柱转换结构	189	同作用的分析方法	284
三、宽扁梁转换结构	191	一、子结构分析方法的原理	284
参考文献	193	二、“共同作用”分析方法(一)——	
第七章 超高层建筑基础沉降计算		线性弹性地基模型	286
与实例分析	194	三、“共同作用”分析方法(二)——	
第一节 引言	194	非线性弹性地基模型	287
一、我国高层建筑深基础发展及对策	194	四、“共同作用”分析方法(三)——	
二、基础沉降计算是地基基础工程		桩—土体系的线性弹性模型	288
中的难题之一	195	第三节 超高层建筑与地基基础共同	
三、超高层建筑深基础沉降研究的		作用的实测与计算分析	291
进展和问题	196	一、超高层建筑的筏形基础——	
第二节 超高层建筑深基础沉降计算中实用		美国独特壳体广场	291
模型和计算参数	206	二、超高层建筑的桩箱基础——	
一、文克勒地基模型	206	世茂滨江花园	294
二、基床系数的确定	207	三、超高层建筑的桩筏基础——海德	
三、土的泊松比和变形模量的确定	210	公司骑兵大楼、德国商业银行大	
第三节 超高层建筑深基础的地		厦和金茂大厦	296
基变形分析	213	[实例1] 海德公园骑兵大楼 (Hyde	
一、土的压缩特性和力学指标	214	Park Cavalry Barracks)	297
二、基础最终沉降量的计算	221	[实例2] 德国商业银行大楼	
第四节 超高层建筑基础沉降计算与		(Commerzbank Tower)	299
实例分析	227	[实例3] 金茂大厦 (Jinmao	
一、基础沉降计算要考虑的		Building)	301
几个问题	227	第四节 超高层建筑的桩筏(箱)荷载分担	
二、未考虑深基础作用的基础		的实测与计算分析	305
沉降计算	232	一、桩筏(箱)荷载分担的现场实测	305
三、考虑深基础作用的基础沉降		二、桩筏(箱)分担荷载的计算	306
计算	235	第五节 结论与建议	308
四、青岛中银大厦沉降分析	239	参考文献	308
第五节 空间变刚度等沉降群桩设计	247	第九章 超高层建筑结构施工	310
一、实测数据的规律和应用依据	248	第一节 一般规定	310
二、空间变刚度群桩等沉降设计	256	第二节 施工测量	311
三、广东国际大厦岩石地基沉降分析	263	一、激光竖向传递测量法	311
四、上海金茂大厦实例分析	268	二、天顶法垂准测量	312
五、深圳赛格大厦实例分析	273	三、施工测量的允许偏差	312
参考文献	277	第三节 深基坑施工	314
第八章 超高层建筑与地基基础		一、深基坑工程的设计与施工	
的共同作用	279	的基本要求	314
第一节 超高层建筑的地基模型	279	二、基坑支护工程的特点	316
		三、深基坑支护结构类型	317

四、土压力的计算与分析	318	一、一般规定	360
五、基坑支护事故实例及分析	320	二、高性能混凝土	361
六、特深特大基坑工程施工	329	三、纤维混凝土	365
[实例 1] 上海金茂大厦基坑工程的 设计与施工	329	四、大体积混凝土	371
[实例 2] 国家大剧院特大深基坑 支护施工	334	第六节 脚手架工程	377
第四节 模板工程	351	一、脚手架种类	377
一、模板荷载及变形值的规定	351	二、扣件式钢管脚手架	378
二、模板的设计计算	353	第七节 吊装与垂直运输机械	384
三、模板的安装	354	一、塔式起重机	384
四、模板的拆除	357	二、施工升降机	388
第五节 混凝土工程	359	三、物料提升机	389
		四、附墙提升架和永久性电梯	390
		第八节 施工安全要求	391

第一章 超高层建筑的结构体系

第一节 引言

高层建筑 (Tall building) 在国外又称 High-rise building、Tower (塔楼) 或 Skyscraper (摩天大楼)。塔楼是一个回复到中世纪的名称, 它意味着单独性 (isolation) 和防御性 (defense)。摩天大楼却是一个激动人心的, 也是一个能激发人们想象力——能够到达天际的名称。相对来说, 高层建筑 (High-rise building) 则是一个比较实际的名称, 意味着这幢建筑物很高, 层数很多, 但还不敢称“可达到天际”。在国际上把高度超过 100m 或 30 层以上的高楼, 称之为超高层建筑 (Super Tall building)。现在, 建筑高度越来越高, 建议把高度超过 200m 或 50 层以上的高楼, 称之为超超高层建筑, 以适应时代的发展。

对于一般高层建筑, 通常采用框架、框架-剪力墙和剪力墙结构。随着建筑高度要求的增长, 这些结构已不能适应时代的需要, 新的结构的出现, 如框架-筒体结构、筒中筒结构和成束筒结构等已成为超高层的主要结构体系。

当今, 先进的结构理论, 高效的计算技术, 独特的试验设备, 新型的施工技术以及高强轻质的建筑材料, 为高度的突破创造了有利条件, 而人们对建筑高度的激烈竞争欲望, 更促使世界建筑高度榜首加快了更换的步伐。实质上, 建筑高度的竞争既显示着各个国家的经济和政治实力, 同时, 又显示着人类智慧的高度发挥。

因此, 在阐述超高层建筑的结构体系前, 有必要简单回顾一下国内外高层建筑的发展。

本章阐述超高层建筑的结构体系的特点, 是以有代表性的著名工程实例为主, 兼顾地基基础条件, 以期达到全面设计和选择超高层建筑的结构体系。

第二节 世界超高层建筑的发展

众所周知, 高层建筑最多、最有代表性的当推美国。在美国的高层建筑中, 以纽约和芝加哥的最具代表性。纽约高层建筑以高耸雄伟的气魄, 表达金融精英的社会愿望。芝加哥高层建筑则以纯洁、简明的格局, 显示现实的格调和经济发展的象征。在台北, 2003 年 10 月封顶的 101 层、高 508m (1667ft) 的台北国际金融中心 (台北-101 大楼), 一跃成为世界第一高度, 改变了高层建筑的世界高度, 仅仅保持 7 年之久世界建筑之最的马来西亚的石油大厦宣告让位 (见图 1-1 ~ 图 1-3)。表 1-1 为目前已建成的世界最高的 15 幢高层建筑, 值得指出的是: 其中有 8 幢在中国 (包括台湾和香港) 建造。

中国上海金茂大厦共 88 层, 高 421m, 于 1997 年 8 月建成, 成为中国最高建筑, 世界第四高度 (见图 1-4)。

94 层的上海环球金融中心于 1998 年已经破土动工 (见图 1-6), 桩基完工之时, 谁料亚洲金融风暴刮起, 被迫停工。5 年后, 即 2003 年 3 月复工, 改为 101 层, 建筑高度从 460 m

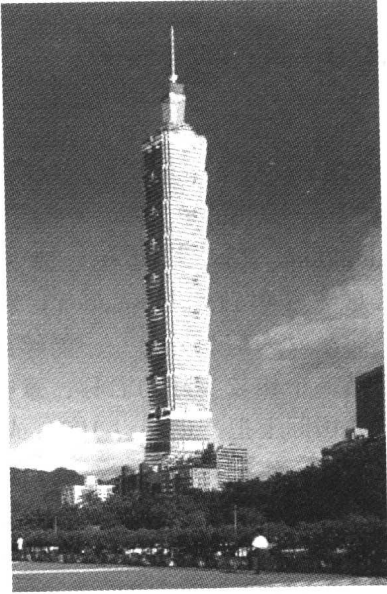


图 1-1 台北-101 508 m
世界第一高度

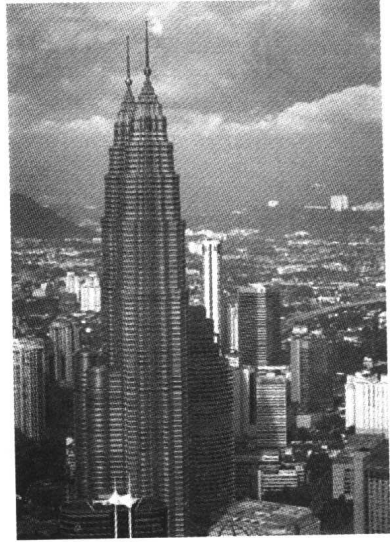


图 1-2 石油大厦 452 m
世界第二高度



图 1-3 西尔斯大厦 442m 世界第三高度

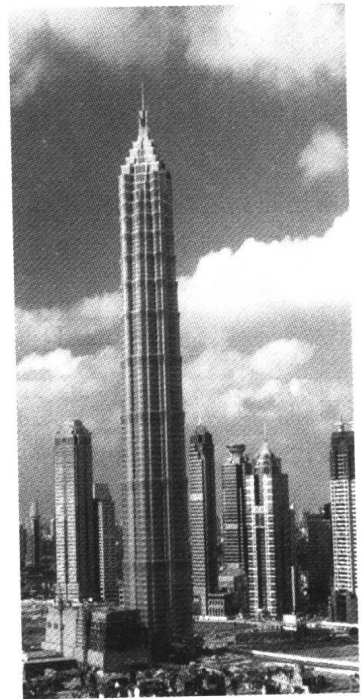


图 1-4 金茂大厦 421m

提升为 492 m，建成后有可能暂时成为世界第二高度。然而，时代在发展，2004 年 7 月 4 日的美国独立之年，在纽约世界贸易中心（钢筒中筒结构）原址（2001 年 9 月 11 日被恐怖分子飞机撞毁）举行了“自由大楼”奠基仪式。以一块 20 吨花岗石作为基石，显示 541m (1776ft) 的自由大楼正式开工，象征美国独立之年，这幢回旋式玻璃与钢筒大楼令人联想到美国的自由女神像，高达 276 ft 的尖塔犹如神像高举的火炬（见图 1-5），高 82 层的大楼预计于 2008 年竣工。而在阿联酋的迪拜的百吉迪拜大楼（Burj Dubai Tower）如今已经建造几十层，它的建成之日必将成为世界建筑之最（见图 1-7）。

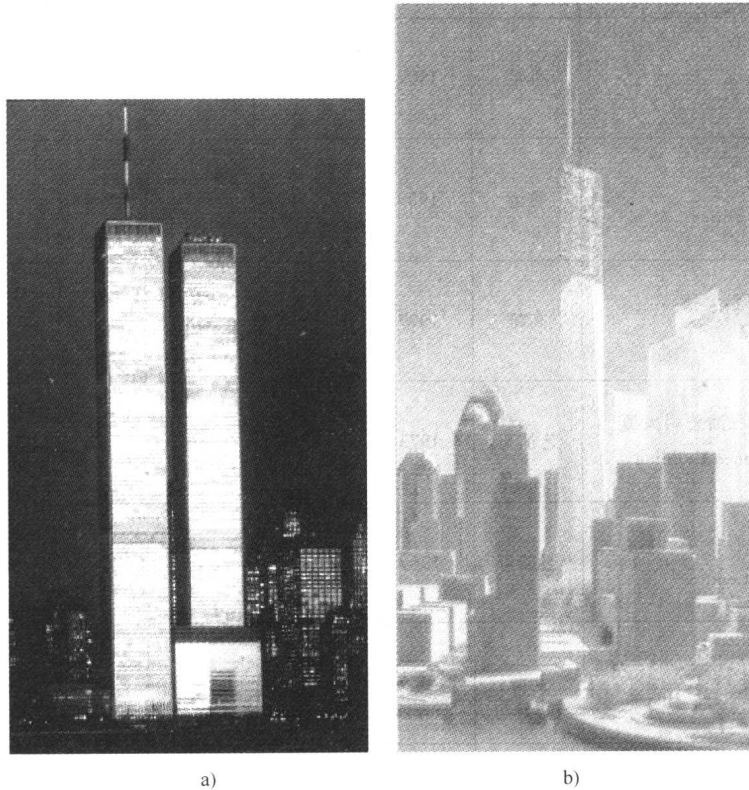


图 1-5 美国原、新世界贸易中心

a) 原世界贸易中心姐妹楼 417m, 415m (2001/9/11 被毁)

b) 新世界贸易中心 541m (建造中)

表 1-1 世界最高的 15 幢高层建筑

序号	名称	城市	建成年代	层数	高度 (m)	结构	用途	基础平面
1	台北国际金融中心 (台北-101 大楼) Taibei Int. Financial Center	台北	2003	101	508	M	多功能	矩形
2	石油大厦 Petronas Tower	吉隆坡	1996	88	452	M	多功能	圆形
3	西尔斯 Sears Tower	芝加哥	1974	110	442	S	办公	正方形

(续)

序号	名称	城市	建成年代	层数	高度 (m)	结构	用途	基础平面
4	金茂大厦 Jinmao Building Jinmao Building	上海	1999	88	421	M	多功能	八角形
5	帝国大厦 Empire State Building	纽约	1931	102	381	S	办公	
6	中环广场 Central Plaza	香港	1992	78	374	C	办公	
7	中国银行大厦 Bank of China Tower	香港	1989	70	369	M	办公	正方形
8	东帝士金融中心大楼 T & C Tower	高雄	1997	85	348	S	多功能	矩形
9	Aon 中心标准石油公司大厦 Aon Centre Amoco Building	芝加哥	1973	80	346	S	办公	
10	约翰汉考克中心 John Hancock Center	芝加哥	1969	100	344	S	多功能	
11	百联世茂国际广场 Brilliance Shimao Int. Plaza	上海	2005	60	333	M	多功能	等腰直角 三角形
12	地王大厦 Shun Hing Square	深圳	1996	69	384	M	多功能	
13	中信广场 Citic Central Plaza	广州	1996	80	391	C	多功能	
14	芝加哥湖滨大酒店 Chicago Beach Tower Hotel	迪拜	1998	60	321	M	旅馆	
15	拜约基大厦 II Baiyoue Tower II	曼谷	1997	85	304	C	多功能	

注：1. 结构栏中 M 为钢混结构；S 为钢结构；C 为钢筋混凝土结构。

2. 时代在发展，建筑高度在竞争，表 1-1 所列的名次，仅供参考。

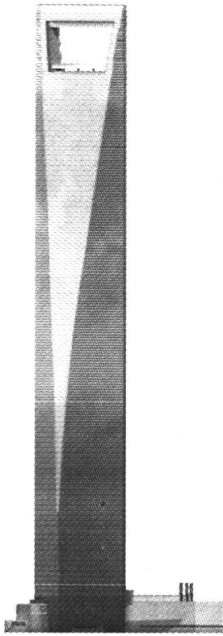


图 1-6 上海环球金融中心
492 m (建造中)

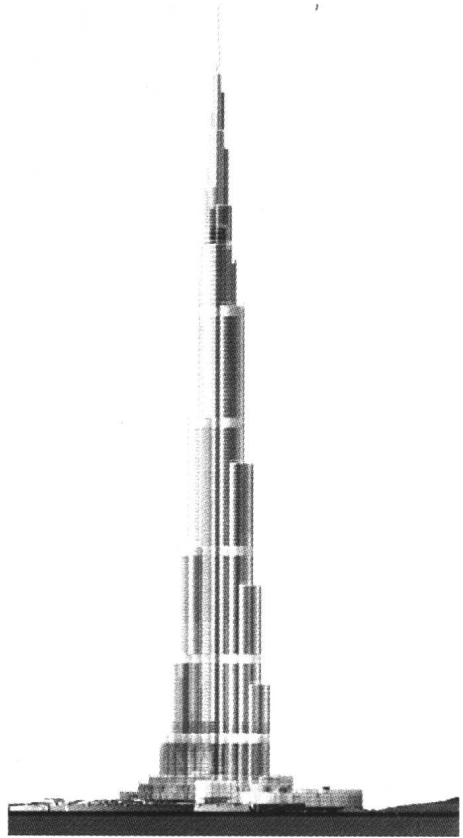


图 1-7 百吉迪拜塔楼
估计约 700m (建造中)

1967 年芝加哥湖端大厦建成，高 70 层，196m，是当时世界上最高的钢筋混凝土结构公寓楼。但是，2003 年在澳大利亚的黄金海岸开始建造的 80 层公寓（图 1-8），已取而代之成为世界最高的公寓楼。在上海，2003 年也建成中国最高的 53 层水景豪宅——世茂滨江花园（图 1-9）。

1976 年芝加哥水塔广场大厦建成，高 74 层，262m，是当时世界上最高的钢筋混凝土建筑。时隔 26 年，2002 年落成的 66 层 288 m 上海恒隆广场却成为当今世界最高的钢筋混凝土建筑（见图 1-10）。由此可见，高度在竞争，世界上没有永远第一的高楼。



图 1-8 黄金海岸的 80 层公寓

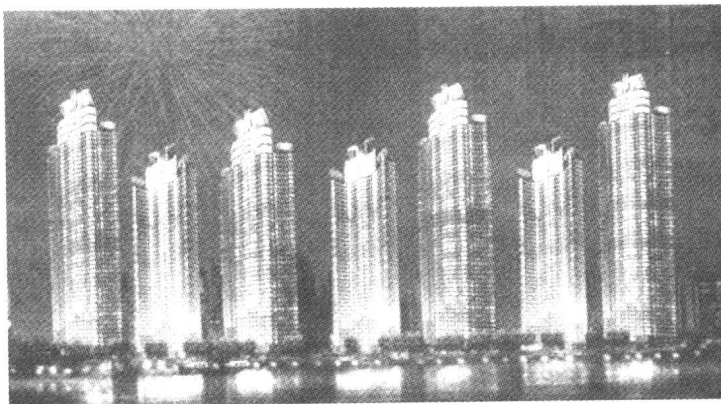


图 1-9 中国最高的 53 层水景豪宅——世茂滨江花园

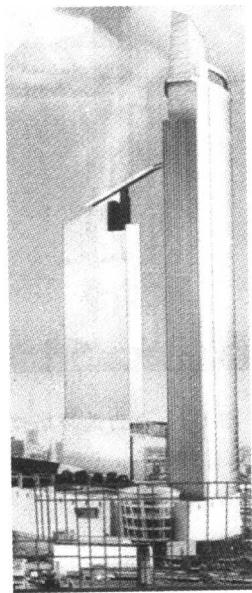


图 1-10 上海恒隆广场 288m
世界最高的钢筋混凝土大楼

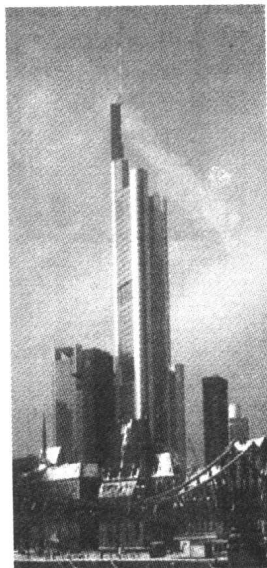


图 1-11 德国商业银行 259m
欧洲最高的大楼

特别要指出的是，对于超高层建筑，一般采用桩基。那么，天然地基上的大楼，当推 1970 年建造的美国得克萨斯 (Texas) 的独特贝壳广场 (One Shell Plaza)。其高度 218m52 层，基础尺寸为 52.46m × 70.76m，埋深 18.3m，筏基厚仅 2.52m；另一个特点：原设计为 35 层，后改用轻质高强混凝土，变为 52 层。该大楼的成功至今仍有理论和经济意义（大楼的结构体系见下节的 [实例 1] 独特贝壳广场）。

在表 1-1 中，15 幢大楼中虽然欧洲没有席位，但是，259m 高的德国商业银行大楼 (Commerzbank Tower) 是欧洲的最高大楼（见图 1-11）。设计时，考虑到高层建筑与地基基础共同作用，同时进行现场测试研究，对桩筏基础设计有重要的指导意义（该大楼的结构体系见本章第三节的 [实例 5] 德国商业银行大楼）。

第三节 结构体系

为了正确设计超高层建筑结构体系,必须对超高层结构设计的控制因素有足够的认识,因此,首先概括阐述超高层建筑结构设计的控制因素。

一、超高层建筑结构设计的控制因素

1) 风荷载

我国《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)对荷载的规定是基于低空(8~12 m)风速观测数据,多层建筑和一般高层建筑的单体模型风洞试验研究成果以及工程经验。当用于超过200 m以上的超高层建筑,可能不大合适。例如,美国SOM和LERA设计事务所对金茂大厦和上海环球金融中心的结构设计所采用的风荷载远远小于我国规范的计算结果。

又如台北-101大楼的设计,除了参考国内规范,还委托加拿大的Rowan Williams Davies & Irwin Inc. (RWDI)公司研究大楼的设计荷载,采用风洞试验确定。以1:500比例制作现场半径为600 m以内的风场环境模型,输入以10级为单位风力模拟实际的建筑物受力情况。其中各个角度的风速高度分布特性,以1:3000的地形模型中进行边界层风洞试验(Boundary layer tunnel test),然后得到大气边界层风速分布。结构体的模型采用高频率力平衡模式(高频动态天平测力技术)(High-frequency force-balance),结构的基本风压是由应变计所测到的弯矩、扭力和剪力的分布曲线统计回归获得,并且配合结构动力特性计算结构体的加速度反应。这样,将这些数据提供给设计单位作为设计风力的依据^[1]。

正在施工中的百吉迪拜塔楼,对风荷载进行大量研究和分析工作。例如,风洞试验在加拿大Ontario的边界层为RWDI's 2.4 m × 1.9 m和4.9 m × 1.4 m的风洞中展开广泛的风洞试验研究和其他研究。风洞试验项目包括刚性模型天平测力试验(Rigid-model force balance tests)、全气动弹性模型试验(full aeroelastic model study)、定域压力测试(localized pressure study)、人行道风环境研究(pedestrian wind environment studies)。试验时采用的大多是1:500的模型。然而,在人行道风环境研究中采用更大的1:250的模型,目的在于用空气动力学的方法来分析降低风速。由于在空气动力模型和天平测力试验结果中发现雷诺数的依赖性(比例效应),决定对更大的刚性模型进行高雷诺数的试验,塔楼的上部分采用1:50的比例。试验在加拿大Ottawa国家研究中心的9 m × 9 m的风道中进行。在9 m × 9 m的风道中风速可达55 m/s。风统计数据对于(塔楼的)预测的反应程度和(风)重现期之间建立联系起着重要作用。为了确定上层风况(wind regime),广泛利用地面风数据、气球(探测风)数据和区域性大气模型方法得到计算机模拟结果^[2]。

上述这些宝贵的资料和研究方法,对我国规范的修订很有借鉴作用。

2) 地震力

地震力的预测,目前尚难准确确定。例如,地震频繁的日本地区,对地震已进行许多深入研究,地震前也几乎无法预测何时何地会发生地震。因此,对待地震应倍加重视。

对于地震地区,除了考虑风力外,还必须考虑地震。例如,台北-101大楼地处板块交错运动频繁区域,除了风力,还必须进行地震设计,更重要的是对建筑场地地下200 m断层的深入研究^[3]。经过多方面的考察与研究,耗费了大量人力物力与时间,终于弄清该断层是

非活动断层，因此，在大楼即将完成的关键时刻，遇到台湾大地震却平安无恙，巍然不动，这是一个宝贵的经验。

但要注意：主楼不一定受地震力控制，而裙房等可能受地震力控制。例如，百吉迪拜塔楼，根据场地特定的反应谱分析表明。塔楼的结构设计主要不是受地震荷载的控制，而钢筋混凝土裙房的结构和塔楼的钢螺旋形结构设计却是地震荷载的控制因素。

3) 地基基础

由于风荷载、地震力及静荷载产生的荷载极大，而且一般柱的跨度大，荷载往往达数十万牛顿，例如，上海金茂大厦，总荷载超过 $3 \times 10^6 \text{ kN}$ ，混凝土巨型柱荷载为 101670 kN ；又如，台北-101 大楼，建筑物总垂直荷载超过 $4 \times 10^6 \text{ kN}$ ，因此，对地基基础的要求较高。在上海这样深厚的软弱地基，毫无异议，必须采用桩筏或桩箱基础。台北-101 大楼，利用深度不大的年轻岩基，采用现场浇注桩深入岩层。而高雄的 85 层东帝士大楼^[4]，岩层在地面 100m 以下，利用岩层上面的土为常见的层状冲积土，采用框格式地下连续墙（Barrette）。新加坡的 Raffle City 的 72 层、42 层、32 层的高楼群，地层条件好则采用筏板基础。

4) 业主要求

业主通常要求的就是建筑艺术和经济。有关建筑艺术将在下节工程实例中阐述。上述三个主要控制因素主要依靠结构工程师和岩土工程师，而要满足建筑艺术和经济的要求，则有赖于建筑师、结构工程师和岩土工程师三方面的密切配合。

此外，施工技术条件和建筑材料等在一定条件下也可能成为控制因素。

二、超高层建筑的结构体系

早在我国的《阿房宫赋》中记载：五步一楼，十步一阁……。人们梦想着“空中楼阁”。在 20 世纪八九十年代，日本科技人员已经构思出 1000m 高的空中楼阁的模型，向人们展示他们的雄心壮志。可是，一般的高层建筑通常采用框架、框架-剪力墙和剪力墙结构体系。随着建筑高度要求不断增长的今天，超高层建筑越来越多，高度增长很快，这些结构体系已远远不能适应时代的需要。从结构角度分析，适用于一般在 30~40 层的高层建筑的结构体系，其刚度、抗剪、抗扭、抗风和抗震能力已不能适应更高高度的要求，因此，框

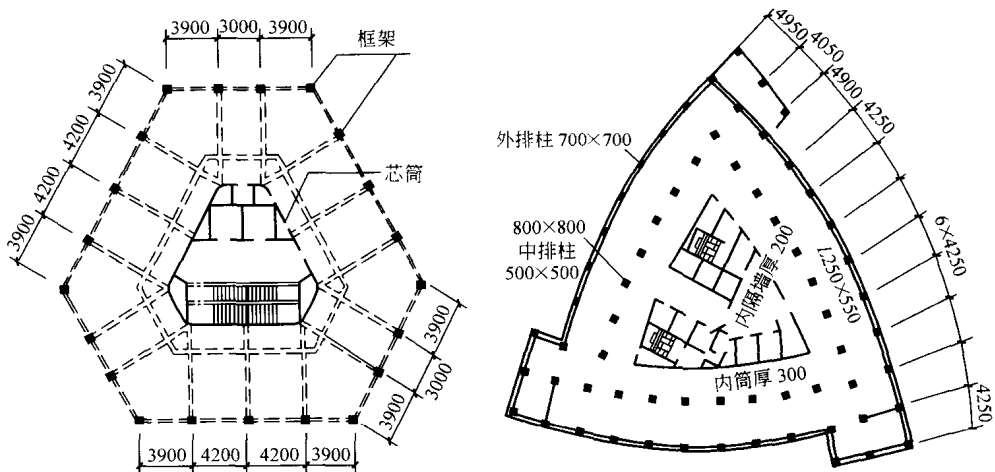


图 1-12 框架-筒体结构外形示意