



华建集团 科创成果系列丛书
ARCPLUS

超高层建筑设计 与工程实践

STRUCTURAL DESIGN AND PRACTICE
OF SUPER HIGH-RISE BUILDINGS

周建龙 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

超高层建筑设计 与工程实践

STRUCTURAL DESIGN AND PRACTICE
OF SUPER HIGH-RISE BUILDINGS

周建龙 著



图书在版编目 (CIP) 数据

超高层建筑结构设计与实践/周建龙著. —上海: 同济大学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5608-7496-8

I. ①超… II. ①周… III. ①超高层建筑-结构设计 ②超高层建筑-建筑工程 IV. ①TU97

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 289205 号

本书入选 2017 年上海市重点图书

华建集团科创成果系列丛书

超高层建筑结构设计与实践

周建龙 著

出品人: 华春荣

策划编辑: 胡毅 吕炜

责任编辑: 胡晗欣

责任校对: 徐逢乔

装帧设计: 完颖

出版发行: 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(上海市四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021-65985622)

经 销: 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店

排版制作: 南京新翰博图文制作有限公司

印 刷: 上海盛通时代印刷有限公司

开 本: 889mm×1194mm 1/16

印 张: 27.5

字 数: 880000

版 次: 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5608-7496-8

定 价: 228.00 元

版权所有 侵权必究 印装问题 负责调换

内容提要

目前我国是全球超高层建筑发展的中心，不仅在建或已建超高层建筑的数量和高度均名列前茅，而且其建设规模和设计复杂程度也属世界罕见。许多超高层建筑突破了我国现行相关技术标准与规范的规定。如何保证这些超高层建筑抗震和抗风的安全性、经济性和施工可建性，引起了我国政府以及工程技术人员的关注。

本书基于大量的超高层建筑工程实践，针对当前建筑高度大于 300 m 的超高层建筑结构设计面临的主要关键技术问题，从结构抗侧力体系选型、抗风技术、抗震技术、消能减震（振）技术、非荷载效应、巨型构件及节点构造、地基基础技术等方面进行了全面阐述和系统总结。同时，本书以华东建筑集团股份有限公司华东建筑设计研究总院完成的 9 个超高层建筑项目为工程实例，对超高层建筑结构设计关键技术及应用进行了剖析和介绍。

本书可供土木建筑工程设计人员和研究人员参考，也可供土木建筑类专业的学生学习使用。

作者简介

周建龙 华东建筑集团股份有限公司华东建筑设计研究总院首席总工程师，国家一级注册结构工程师，教授级高级工程师，中国勘察设计协会结构设计分会副理事长，中国建筑学会资深会员，全国超限高层建筑抗震设防专项审查专家委员会委员，同济大学兼职教授，上海市领军人才。

长期致力于超高层建筑及大跨结构的设计与研究工作。主持完成了上海环球金融中心、南京绿地紫峰大厦、上海铁路南站等工程的设计，负责审定武汉绿地中心、天津高银金融 117 大厦、武汉中心、苏州国际金融中心、上海世博中心、江苏大剧院、国家会展中心（上海）等重大工程项目。

主编和参编国家及行业规范十多项，获得各类设计奖二十余项，其中国家设计金奖 1 项、银奖 1 项，上海市优秀设计一等奖 8 项，全国优秀建筑结构一等奖 5 项，发表论文五十余篇。

编委会

学术顾问

孙 钧 郑时龄 江欢成 魏敦山

主 任

沈 迪

副主任

高承勇 沈立东 汪孝安 王卫东

编 委 (以姓氏笔画排列)

马伟骏 王平山 王传顺 王前程 李亚明 陈众励 陈国亮 季永兴 夏 冰
徐 扬 奚耕读 高文艳 疏正宏

审稿专家

吕西林

总序

文/秦云

伴随着中国的城市化进程，勘察设计行业经历了高速发展时期，行业技术水平在长期的大量工程实践中得到了长足发展。高难度、大体量、技术复杂的建筑设计和建造能力显著提高；以建筑业 10 项新技术为代表的先进技术得以推广运用，装配式混凝土结构技术、建筑防灾减灾、建筑信息化等相关技术持续更新和发展，建筑品质和建造效率不断提高；建筑节能法律法规体系初步形成，节能标准进一步完善，绿色建筑在政府投资公益性建筑、大型公共建筑等项目建设中得到积极推进。如今，尽管我国经济发展进入新常态，但建筑业发展总体上仍处于重要战略机遇期，也面临着市场风险增多、发展速度受限的挑战。准确把握市场供需结构的变化，增强改革意识、创新意识，加强科技创新和新技术推广，才能适应市场需求，才能促进整个建筑业的转型发展。

华东建筑集团股份有限公司（以下简称华建集团）作为一家以先瞻科技为依托的高新技术上市企业，引领着行业的发展，集团定位为以工程设计咨询为核心，为城镇建设提供高品质综合解决方案的集成服务供应商。旗下拥有华东建筑设计研究总院、上海建筑设计研究院、华东都市建筑设计研究总院等 10 余家分子（子）公司和专业机构。集团业务领域覆盖工程建设项目全过程，作品遍及全国各省市及 60 多个国家和地区，累计完成 3 万余项工程设计及咨询工作，建成大量地标性项目，工程专业技术始终引领并推动着行业发展和不断攀升新高度。

华建集团完成的项目中有近 2 000 项工程设计、科研项目和标准设计获得过包括国家科技进步一等奖，国家级优秀工程勘察设计金、银奖，土木工程詹天佑奖在内的国家、省（部）级优秀设计和科技进步奖，体现了集团卓越的行业技术创新能力。累累硕果来自数十年如一日的坚持和积累，来自企业在科技创新和人才培养方面的不懈努力。集团以“4 + e”科技创新体系为依托，以市场化、产业

化为导向，创新科技研发机制，构建多层级、多元化的技术研发平台，逐渐形成了以创新、创意为核心的企业文化。在专项业务领域，开展了超高层、交通、医疗、养老、体育、演艺、工业化住宅、教育、水利等专项产品研发，建立了有效的专项业务产品系列核心技术和专项技术数据库，解决了工程设计中共性和关键性的技术难点，提升了设计品质；在专业技术方面，拥有以超高层结构分析与设计技术、软土地区建筑深基础设计关键技术、大跨空间结构分析与设计技术、建筑声学技术、BIM 数字化技术、建筑机电技术、绿色建筑技术、围填海工程技术等为代表的核心专业技术，在提升和保持集团在行业中的领先地位方面，起到了强有力的技术支撑作用。同时，集团聚焦中高端领军人才培养，实施“213”人才队伍建设工程，不断提升和强化集团在行业内的人才比较优势和核心竞争力，集团人才队伍不断成长壮大，一批批优秀设计师成为企业和行业内的领军人才。

为了更好地实现专业知识与经验的集成和共享，推动行业发展，承担国有企业社会责任，我们将华建集团各专业、各领域领军人才多年的研究成果编撰成系列丛书，以记录、总结他们及团队在长期实践与研究过程中积累的大量宝贵经验和所取得的成就。

丛书聚焦工程建设中的重点和难点问题，所涉及项目难度高、规模大、技术精，具有普通小型工程无法比拟的复杂性，希望能为广大设计工作者提供参考，为提升我国建筑工程设计水平尽一点微薄之力。

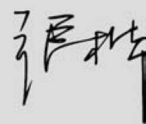
A stylized handwritten signature in black ink, consisting of the characters '陈' (Chen) and '立' (Li) written in a cursive, expressive style.

序

文/张桦

近些年随着各地区经济的快速增长，超高层建筑在全球范围得到了空前的发展。根据世界高层都市建筑学会（Council on Tall Buildings and Urban Habitat, CTBUH）统计，在 2017 年全球共有 144 座 200 m 及以上建筑竣工，创造了年度高层建筑竣工数量的新纪录。中国连续第 10 年拥有最多的 200 m 及以上竣工建筑，2017 年以 76 座的数量大幅领先于其他国家。

华东建筑集团股份有限公司华东建筑设计研究总院在超高层建筑设计领域深耕细作了二十多年，从最初与境外设计公司合作设计，到现在与境外设计公司同台竞技、全过程原创设计及技术创新。华东建筑设计研究总院在超高层建筑发展的浪潮中，抓住机遇，迎头赶上，设计水平有了明显的提升，专业设计能力得到业内高度认可。笔者长期从事超高层建筑结构的设计与研究工作，积累了丰富的超高层结构设计经验。本书系统梳理和总结了我国超高层建筑设计结构的若干关键技术，特别是在新型高效结构体系的应用、结构抗震抗风形体优化、超高层建筑消能减震（振）对策、弹塑性动力时程分析及超高层建筑基础设计等方面颇具特色，书中集超高层建筑设计精华的众多工程实例可为读者进行超高层建筑设计提供更为详细的参考或借鉴。期望本书的出版，能为提升我国超高层建筑设计水平尽一点微薄之力，也期望我国早日从超高层建筑的“大国”走向超高层建筑的“强国”。



前言

文/周建龙

这是一本写给工程师看的书，它没有复杂的公式推导，也没有规范条文的机械解读，有的只是我们对超高层建筑设计设计的深刻理解和长期工程实践经验的总结和提炼，让结构设计回归到以受力和材料为基础的本质，这是我们一直在努力的方向。

我国超高层建筑数量伴随着国民经济的发展而快速增加。根据 CTBUH 统计，截至 2017 年年底，全球已竣工的 300 m 以上的超高层建筑已达到 128 座，其中中国 59 座，阿联酋 25 座，美国 18 座。建筑高度 632 m 的上海中心大厦及 599 m 的深圳平安金融中心已建成使用，597 m 的天津高银金融 117 大厦和 530 m 的天津周大福金融中心已经结构封顶，636 m 的武汉绿地中心目前结构施工高度已超过 400 m，预计 2018 年完工……与此同时，塔冠高度 729 m 的苏州中南中心正在设计之中。我国已成为世界超高层建筑发展的中心。

与我国在建及建成的超高层建筑数量在全球遥遥领先相比，我国的超高层建筑设计水平的提升则稍显缓慢，工程实践似乎已经走在理论研究的前面。我们在工程实践中也发现了不少值得研究的问题，如对超高层建筑抗风设计的不够重视、对高性能材料的使用限制以及对巨震下结构性能的担忧等，使得结构工程师对抗震和抗风设计提出相对严格的要求，从而造成结构材料的增加和施工的复杂化。我们需要怎样的超高层建筑，如何设计出高效、合理和经济的超高层建筑结构，一直都是追求的结构工程师需要思考的问题，促使我们不断追求最佳解决方案。

华东建筑集团股份有限公司华东建筑设计研究总院（以下简称华东总院）的发展与壮大，与我国高层和超高层建筑的发展是同步的，特别是在超高层建筑的设计领域。以 20 世纪 90 年代初上海浦东改革开放为契机，近 30 年来华东总院在超高层建筑设计领域积累了丰富的业绩和工程经验，掌握了核心技术，创作及设计完成了以东方明珠广播电视塔、上海环球金融中心、上海世茂国际广场、武汉绿地中心、武汉中心、南京绿地紫峰大厦、天津高银金融 117 大厦、天津周大福金融中心及中央电视台 CCTV 新台址主楼为代表的一大批超高层建筑项目。众多工程业绩和项目经验的沉淀和积累，给我们提供了很好的机会和信心，使得我们可以对我国超高层建筑设计的关键技术进行系统的梳理和总结，明晰和提炼，我们将与同行一起，为提升我国超高层建筑设计的水平而努力。

本书共分为两大部分，第一部分为本书的第1—7章，主要介绍超高层建筑结构设计方面的关键技术，第二部分为本书的第8章，为超高层建筑工程实例分析。第1—7章内容主要包括概述、超高层建筑结构体系与选型、超高层建筑结构抗风设计、超高层建筑结构抗震设计、考虑非荷载效应的施工过程模拟分析、超高层建筑结构构件与节点设计、超高层建筑结构基础设计。第8章选取了华东总院近年来完成的9个不同建筑高度、抗震设防烈度、结构体系和各具设计特点的超高层建筑工程实例，从结构选型、计算分析、结构设计特点和难点等方面进行详尽的介绍和分析。

参加1—7章编写的还有包联进、陈建兴、钱鹏、江晓峰、李烨、吴江斌、黄永强、童骏、刘明国、方义庆等；参与第8章工程实例编写的还有周健、黄良、陈锴、王荣、季俊、邱介尧、江彤等。

同济大学吕西林教授对本书进行了认真的审阅，提出了非常宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

本书中诸多超高层建筑项目的设计和完成得到了华东总院顾问总工程师汪大绥设计大师、全国及各省市超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会委员的悉心指导，以及华东总院其他同事的大力支持，在此一并表示感谢。

本书部分内容引用了国内外专家学者和设计同行的研究或设计成果，在此致以最诚挚的谢意，书中已尽可能详细地标明出处，如有遗漏在此由衷致歉。

由于作者水平有限，书中有不当与疏漏之处，敬请读者批评指正。



2017年10月

目 录

总序
序
前言

第 1 章 | 概述

3	1.1 超高层建筑定义
3	1.2 超高层建筑的发展概况
4	1.3 超高层建筑结构发展趋势
4	1.3.1 结构抗侧力体系多样化
4	1.3.2 风洞试验及风振控制技术
5	1.3.3 抗震性能化设计和消能减震技术
5	1.3.4 混合结构、组合构件及高性能材料的采用
6	1.3.5 超高层建筑结构施工模拟和竖向变形差异分析
6	1.3.6 超高层建筑基础设计

第 2 章 | 超高层建筑结构体系与选型

9	2.1 超高层建筑设计特点
9	2.1.1 水平荷载是决定因素
9	2.1.2 侧向变形成为控制指标
9	2.1.3 竖向变形和非荷载效应不容忽视
10	2.1.4 扭转效应不可忽视
10	2.1.5 结构顶部舒适度应重视
10	2.1.6 应考虑结构长周期效应的影响
10	2.1.7 采用消能减振阻尼装置来减小建筑的荷载响应
11	2.1.8 深基础及基坑的支护结构问题凸显
11	2.1.9 施工的可建性
12	2.1.10 与建筑师的良好配合与协调

12	2.2 超高层建筑体型
12	2.2.1 抗风设计
13	2.2.2 抗震设计
14	2.2.3 高宽比
15	2.2.4 基础埋深
15	2.3 超高层建筑结构体系
15	2.3.1 筒体结构
20	2.3.2 束筒结构
20	2.3.3 巨型结构
23	2.3.4 筒中筒结构
25	2.3.5 框架-核心筒结构
29	2.3.6 连体结构
34	2.3.7 其他结构体系
37	2.4 超高层建筑结构体系与经济性
37	2.4.1 减小结构所受的水平荷载
38	2.4.2 提高结构的抗侧效率
43	2.4.3 结构体系布置原则
44	2.4.4 影响结构经济性的其他因素
46	2.4.5 超高层结构计算分析
50	2.5 参考文献

第3章 | 超高层建筑结构抗风设计

55	3.1 风荷载特点
55	3.2 风荷载动力响应优化
55	3.2.1 建筑体型优化
58	3.2.2 结构动力特性优化
59	3.2.3 风荷载动力响应优化实例
62	3.3 风荷载确定
62	3.3.1 阻尼比
62	3.3.2 风洞试验
65	3.3.3 数值风洞模拟
65	3.4 舒适度控制
65	3.4.1 调谐质量阻尼器
69	3.4.2 调谐液体阻尼器
71	3.5 参考文献

第 4 章 | 超高层建筑结构抗震设计

75	4.1 超高层建筑结构抗震设计基本原则
75	4.2 超高层建筑抗震设计策略
76	4.2.1 结构体系选型
76	4.2.2 抗侧力构件的能力设计思想
77	4.2.3 结构延性和多道防线对结构抗震设计的影响
78	4.2.4 减震技术的合理应用
78	4.3 超高层建筑结构抗震设计的整体控制指标
78	4.3.1 剪重比
81	4.3.2 层间位移角
83	4.3.3 框架剪力分担比
85	4.4 超高层建筑的抗震性能化设计
85	4.4.1 抗震设计的性能目标
86	4.4.2 超高层建筑的性能目标制定
88	4.5 罕遇地震弹塑性分析
89	4.5.1 弹塑性分析建模
91	4.5.2 静力弹塑性分析
92	4.5.3 动力弹塑性分析
93	4.5.4 弹塑性分析结果的结构整体评价
94	4.5.5 弹塑性分析结果的构件性能评价
99	4.6 超高层建筑结构减震技术
99	4.6.1 黏滞阻尼器
103	4.6.2 位移型阻尼器
106	4.6.3 混合型阻尼器
108	4.6.4 减震结构分析
109	4.7 参考文献

第 5 章 | 考虑非荷载效应的施工过程模拟分析

113	5.1 施工模拟分析的必要性
114	5.2 施工模拟与非荷载作用分析的适用范围
116	5.3 非荷载作用
117	5.3.1 温度作用
117	5.3.2 差异沉降效应
118	5.3.3 混凝土收缩和徐变
124	5.4 施工模拟分析原理及应用
124	5.4.1 施工模拟分析原理
124	5.4.2 常用分析软件

126	5.4.3	考虑徐变收缩效应的施工模拟分析目的
128	5.4.4	超高层项目一般施工顺序
128	5.4.5	考虑徐变收缩效应的实用计算方法
130	5.5	典型施工模拟分析实例
130	5.5.1	工程概述
131	5.5.2	施工模拟分析重点
131	5.5.3	分析模型及参数
132	5.5.4	施工方案及进度
137	5.5.5	塔楼控制点变形历程图
137	5.5.6	长期荷载下墙柱的压缩变形与变形预调值分析
139	5.5.7	伸臂桁架工况分析
140	5.5.8	结论
140	5.6	参考文献

第6章 | 超高层建筑结构构件与节点设计

145	6.1	楼盖
145	6.1.1	混凝土楼盖
146	6.1.2	组合楼盖
148	6.1.3	楼盖体系选型
152	6.1.4	楼盖设计注意事项
154	6.2	核心筒
155	6.2.1	核心筒的布置
156	6.2.2	核心筒剪力墙的类型及高强混凝土的应用
158	6.2.3	核心筒抗震性能设计
159	6.2.4	钢板-混凝土组合剪力墙设计
168	6.2.5	核心筒连梁设计
177	6.3	巨柱
177	6.3.1	概述
179	6.3.2	巨柱截面选型
180	6.3.3	组合截面钢骨形式
183	6.3.4	组合截面承载力计算方法
193	6.3.5	组合截面构造
197	6.4	伸臂桁架
197	6.4.1	概述
201	6.4.2	伸臂桁架的形式
208	6.4.3	伸臂桁架形式的效率分析
209	6.4.4	伸臂桁架位置的效率分析
211	6.4.5	伸臂桁架加强层的受力特点
215	6.4.6	伸臂桁架杆件的受力特点

217	6.4.7 伸臂桁架的性能化设计
219	6.4.8 加强层的楼板分析
221	6.4.9 差异沉降变形对伸臂桁架的影响
222	6.5 巨型支撑
222	6.5.1 支撑布置形式
223	6.5.2 巨型支撑与次框架结构关系
224	6.5.3 支撑与竖向变形
224	6.5.4 巨型支撑计算长度
225	6.6 环带桁架与次框架
225	6.6.1 环带桁架
226	6.6.2 环带桁架设计
227	6.6.3 次框架
227	6.7 塔冠
228	6.7.1 塔冠风荷载
228	6.7.2 带塔冠整体结构分析
228	6.7.3 塔冠鞭梢效应分析
230	6.7.4 塔冠结构设计
232	6.8 节点设计
232	6.8.1 节点类型
232	6.8.2 节点分析
233	6.8.3 柱脚节点
234	6.8.4 伸臂桁架与核心筒连接节点
237	6.8.5 伸臂桁架与框架柱连接节点
239	6.8.6 环带桁架连接节点
242	6.8.7 巨型支撑连接节点
244	6.9 参考文献

第 7 章 | 超高层建筑结构基础设计

249	7.1 超高层建筑基础特点与设计要求
249	7.1.1 超高层建筑地基基础特点与难点
251	7.1.2 主要技术问题
253	7.1.3 设计要求
258	7.2 天然地基筏形基础设计
258	7.2.1 天然地基筏形基础形式
258	7.2.2 天然地基筏形基础的设计关键
264	7.2.3 大连绿地中心天然地基设计实例
268	7.3 桩基础设计
268	7.3.1 主要桩型特点与发展
276	7.3.2 大直径超长灌注桩的设计

281	7.3.3 嵌岩桩的设计
284	7.3.4 群桩基础受力与沉降分析
288	7.3.5 关键施工工艺与质量控制
290	7.3.6 工程设计实例
295	7.4 超高层建筑裙房地下室抗浮设计
295	7.4.1 抗浮验算原则与内容
296	7.4.2 增加配重法
297	7.4.3 抗拔锚杆
298	7.4.4 抗拔桩
301	7.4.5 释放水浮力法
302	7.5 参考文献

第 8 章 | 超高层建筑设计工程实例

309	8.1 长沙国际金融中心 T1 塔楼
309	8.1.1 工程概况
312	8.1.2 塔楼结构体系
313	8.1.3 地基基础
313	8.1.4 结构整体计算分析
316	8.1.5 考虑非荷载效应的施工模拟分析
317	8.1.6 结构图纸及施工照片
319	8.2 武汉中心
319	8.2.1 工程概况
320	8.2.2 基础与地下室设计
321	8.2.3 上部结构体系
323	8.2.4 塔楼结构计算主要结果
324	8.2.5 结构主要特点
326	8.2.6 塔冠
326	8.2.7 结构超限判别及主要措施
327	8.2.8 关键节点设计研究
329	8.2.9 优化施工顺序调整结构内力分布
331	8.3 武汉绿地中心
331	8.3.1 工程概况
333	8.3.2 塔楼结构体系
334	8.3.3 地基基础设计
335	8.3.4 结构的整体计算分析指标
337	8.3.5 塔楼结构设计特点
338	8.3.6 平面折线、空间倾斜转换桁架受力特点研究
341	8.3.7 主要图纸及施工照片
342	8.4 上海环球金融中心

342	8.4.1 工程概况
343	8.4.2 结构体系与布置
344	8.4.3 地基基础设计
346	8.4.4 整体结构计算分析指标
348	8.4.5 结构设计特点、关键技术应用
351	8.4.6 主要图纸
357	8.5 天津周大福金融中心
357	8.5.1 工程概况
358	8.5.2 上部结构体系与布置
359	8.5.3 地基基础及地下室结构设计
359	8.5.4 整体结构计算分析
361	8.5.5 结构设计特点、关键技术应用
365	8.5.6 主要图纸
372	8.6 天津高银金融 117 大厦
372	8.6.1 工程概况
373	8.6.2 上部结构体系与布置
375	8.6.3 地基基础设计
376	8.6.4 整体结构计算分析指标
378	8.6.5 结构设计特点及关键技术应用
381	8.6.6 主要图纸
384	8.7 天津津塔
384	8.7.1 工程概况
385	8.7.2 塔楼结构体系
387	8.7.3 地基基础设计
387	8.7.4 结构的整体计算分析指标
389	8.7.5 薄钢板剪力墙设计与研究应用
397	8.7.6 主要图纸
398	8.8 南京金鹰天地广场
398	8.8.1 工程概况
399	8.8.2 上部结构体系与布置
399	8.8.3 地基基础设计
400	8.8.4 整体结构分析
401	8.8.5 结构设计特点
406	8.8.6 主要图纸
408	8.9 乌鲁木齐绿地中心
408	8.9.1 工程概况
410	8.9.2 结构体系与布置
414	8.9.3 地基基础设计
414	8.9.4 整体结构分析
417	8.9.5 黏滞阻尼器耗能效果
418	8.10 参考文献