



土木学科发展现状及 前沿发展方向研究

The Development Status and Frontiers of
Civil Engineering



中国工程院土木、水利与建筑工程学部 〇 编



人民交通出版社
China Communications Press

土木学科发展现状及 前沿发展方向研究

The Development Status and Frontiers of
Civil Engineering

中国工程院土木、水利与建筑工程学部 ◎ 编



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书是中国工程院土木、水利与建筑工程学部咨询项目——土木学科发展现状及前沿发展方向研究的成果,以专题报告的形式汇总了结构工程、桥梁工程、道路工程、铁道工程、隧道与地下工程、土木工程防灾与防护工程、岩土工程、土木工程信息技术等二级学科的发展现状和发展趋势。

本书可供相关学科从事教学和科研的工程技术人员使用,也可供高校相关专业本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木学科发展现状及前沿发展方向研究/中国工程院土木、水利与建筑工程学部编. --北京:人民交通出版社, 2012. 5

ISBN 978-7-114-09772-0

I. ①土… II. ①中… III. ①土木工程—技术发展—研究—中国 IV. ①TU-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 080859 号

书 名: 土木学科发展现状及前沿发展方向研究

著 作 者: 中国工程院土木、水利与建筑工程学部

责任编辑: 王 霞 (wxccpress@126.com)

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 23.5

字 数: 405 千

版 次: 2012 年 5 月 第 1 版

印 次: 2012 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09772-0

定 价: 100.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

土木工程学科是直接面向经济和社会发展的科学和技术，它直接影响着人居环境、交通设施、工业和国防工程的建设和运行，影响着城镇化进程、社会可持续发展和构建和谐社会。

在可预见的 20 至 30 年内，中国土木工程仍将处于高速发展期，除了将兴建大量现代化的民用建筑、海港、铁路、公路、桥梁、水利水电工程、地下及国防工程外，正在运行的建筑物将逐步进入大修和重建期，这无疑对我国的土木工程科学和技术提出了新的需求。此外，伴随材料科学和技术、信息科学和技术、数学、力学和工程管理学的发展，从学科交叉、融合方面，也将使土木工程科学和技术进入一个快速发展的新时代。作为土木工程高速发展的大国，中国理应站到世界土木工程科学和技术创新发展的前列。中国的土木工程学科进入了快速发展的机遇期。

土木工程学科的发展战略和前沿发展是我国未来的土木工程教育、科学和技术进步的重要导向；影响到土木工程教育的专业设置、人才培养，特别是高层次土木工程人才的成长。

为了准确把握我国土木工程学科的发展方向和发展战略，中国工程院土木、水利与建筑工程学部于 2009 年 7 月设立了学部咨询项目——“土木学科发展现状及前沿发展方向研究”。鉴于学部同时设立了“水利水电学科发展现状及前沿发展方向研究”，并计划逐步设立有关建筑、测绘学科的研究项目，故本项目的研究被限定在如下范畴：结构工程，包括空间结构、钢结

构、混凝土结构、高层建筑、施工技术等；桥梁工程；道路工程；铁道工程；隧道与地下工程；土木工程防灾与防护工程；岩土工程；土木工程信息技术。

鉴于近年来科学技术部、中国科学院、教育部和国家自然科学基金委员会等部委已经组织多批专家、教授，开展过相关的研究，故本项目没有组织大批专家、教授，从最基础的调研开始，而是分专题指定一、两位最熟悉的院士负责，由他们邀请相关专家，组成专题调研和报告编写小组，开展相应的调研和报告编写工作。

各专题报告的初稿已经于2010年7月底之前完成，经学部主任同意，于2010年8月27日—30日在南昌召开了“土木学科发展现状及前沿发展方向研究”结题评审会。与会专家建议：本项目的研究报告应该突出相关二级学科的发展战略，以区别于工程院和基金委联合咨询项目——“中国工程科技中长期发展战略研究”的“土木、水利、建筑工程科技中长期发展战略研究”报告，重点关注学科发展的前沿方向与新兴工程科学和技术；注重新兴、前沿性、前瞻性，以及对整个土木工程学科发展将产生重要影响的发展方向；鉴于多数专题报告已经具有较高水平，对于相关学科的教学和科研人员具有参考价值，建议对研究报告进行修订，报送学部常委会，经同意后正式出版。2010年9月18日，中国工程院土木、水利与建筑工程学部五届二次学部常委会已经同意，本项目研究报告修订后正式出版。

2010年9月22日将本项目研究报告的“修改事项”分发给各专题负责人，各专题均进行了认真修改，修改稿已经于2011年9月底收齐。在编辑出版过程中，我们对各专题报告进行了必要的局部修订。

正如著名物理学家Max Planck所指出的，“科学是内在的整体，它被分解为单独的个体不是取决于事物本身，而是人类认识能力的局限性。”土木工程科学本身是一个整体，把它分解成若干学科，除了人类认识能力的局限性，还包括技术内涵和工程实现的特殊性。所以，我们在一个个专题报告之

外，从多学科交叉融合角度，探讨土木工程科学和技术的前沿研究方向是必要的。因此，在原定专题报告之外，又增加了一份后记——“土木工程学科的综合交叉研究”。但是，“后记”并不是综述各专题报告的内容，而是讨论各专题报告没有涉及或没有深入讨论的土木工程科学的前沿研究方向。

本研究报告文集的出版，采纳了各专题报告单独署名的办法，这一方面是尊重各位专家的劳动成果和学术责任，另一方面也为读者与作者直接联系提供方便。

尽管我们在努力追求无误，但错误和不完善之处在所难免，特别是在前沿研究方向和发展战略方面，定会有遗漏之处，敬请读者谅解。

是为序。

崔俊芝

目录

结构工程学科的发展现状及前沿发展方向——综合报告

..... 欧进萍 崔俊芝 等 (1)

钢结构学科的发展现状及前沿发展方向研究 沈祖炎 李元齐 (31)

混凝土和预应力混凝土结构学科现状及发展方向研究

..... 吕志涛 吴 京 王景全 朱 虹 (57)

高层建筑结构发展现状及前沿发展方向 ... 徐培福 肖从真 王翠坤 (76)

空间结构发展现状及前沿发展方向研究 董石麟 (104)

建筑施工技术的发展现状及前沿发展方向研究

..... 叶可明 胡玉银 孔德志 (119)

道路工程学科的发展现状及前沿发展方向 黄 卫 孙立军 (134)

桥梁工程学科的现状 & 前沿发展方向研究 项海帆 范立础 (153)

隧道及地下工程学科发展现状及前沿发展方向研究

..... 王梦恕 郭 璇 张德华 (184)

铁路和城市轨道交通工程学科的现状 & 前沿发展方向研究

..... 何华武 (228)

土木工程防灾学科发展现状及前沿发展方向研究

..... 周福霖 崔 杰 (250)

岩土工程学科的现状 & 前沿发展方向研究

..... 郑颖人 龚晓南 朱合华 刘汉龙 杨 强 (271)

土木工程信息技术学科的现状 & 前沿发展方向研究

..... 王 静 梁 博 崔俊芝 (324)

土木工程科学的综合交叉研究——后记 崔俊芝 杨秀敏 (355)

结构工程学科的发展现状及前沿 发展方向——综合报告

欧进萍 崔俊芝 等

1 国家需求

结构工程是通过试验、计算和理论分析,研究土木工程材料、构件、结构体系及其短期和长期力学行为、分析与试验方法、设计理论和建造技术的一门工程技术学科,具有显著的理论与实践结合、并相互牵动的特征。

结构工程具有悠久的历史,但直到第一次工业革命时期钢铁工业的兴起和波特兰水泥的发明,以及基于牛顿力学的结构分析与设计理论的建立,才诞生了真正科学意义上的结构工程学科。

现代工程结构分为混凝土与预应力混凝土结构、钢结构、大跨空间结构和高层建筑结构等,设计理论和施工技术是结构工程学科的重要内容,结构分析方法与试验技术是结构工程学科研究的重要手段,也是设计理论和施工技术的基础。

1.1 城镇与城市化发展是我国迈向发达国家的重要战略, 结构工程学科为城镇与城市化发展提供核心关键科学技术, 形成了国民经济的支柱产业——建筑行业

结构工程向人类提供赖以生存的生活、生产以及社会活动的场所, 在人类社会文明发展中发挥着基础性作用, 是构建现代城市的核心技术学科, 对当今社会经济发展起着重要支撑作用。

自从改革开放以来, 为满足社会经济发展以及城乡居民生活和社会文化活动的需要, 我国开展了大规模基础设施的建设, 一大批标志性重大建筑工程在我国建成。例如, 20 世纪 90 年代的深圳地王大厦 (325m)、上海金茂大厦 (420.5m)、上海东方明珠电视塔 (468m), 为举办 2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会及 2010 年广州亚运会而建成的鸟巢、水立方、北京 T3 航站楼、上海环球金融中心 (492m)、上海中心 (580m)、广州新电视塔 (610m) 等, 结构的跨度、高度和复杂程度不断刷新, 新型结构体系不断涌现。结构工程学科从材料、结构体系、结构设计与施工技术等诸多方面为这些重大工程的建设提供了重要的科技支撑。

我国不仅在重大工程的建设方面成绩斐然, 基础设施的建设规模也是空前的。目前我国每年新建建筑面积达到 20 亿平方米, 我国基础设施建设的规模超过了世界上其他国家地区建设规模的总和。大规模基础设施建设推动了我国建筑业的发展与繁荣, 建筑业已经成为我国国民经济的支柱产业, 在国民经济五大物质生产部门中, 建筑业年产值仅低于工业、农业, 而高于运输业和商业, 位居第三。此外, 建筑业就业容量大, 产业关联度高, 全社会 50% 以上的固定资产投资要通过建筑业而形成新的生产能力或使用价值, 建筑业增加值约占国内生产总值的 7%。建筑业的繁荣带动了钢铁和水泥等建筑材料产业的发展, 我国目前是世界上钢用量最大的国家, 近 10 年来, 建筑业的发展使钢材年产量一直保持较高的增长势头, 2000 年~2004 年钢材产量平均年增长率在 20% 以上, 2005 年中国钢产量已超过 3 亿吨, 2006 年达到 4.227 亿吨, 2007 年达到 4.8 亿吨, 2008 年达到 5 亿吨以上; 我国是当今世界上水泥用量最多的国家, 2008 年水泥产量 14 亿吨, 占全世界的 50%, 仅江苏省的产量就超过了整个美国。

人类社会的发展历史表明, 社会经济的发展与社会城市化的程度具有相互牵动的关系。为实现迈向发达国家行列的重大战略, 我国政府制定了加快

推动我国城镇化与城市发展的重大决策。据《中国城市发展报告(2009)》:1949年,我国只有132个城市,城镇化水平仅为10.6%;而到2009年底,全国31个省、自治区、直辖市共有城市655个,城镇化水平46.59%,城镇人口达62186万。我国已进入城镇化加速时期,预计到2020年,将有60%以上的人口居住在城镇,2050年则有75%的人口居住在城市,城镇人口将达到10亿以上。当前,我国不仅城市化程度较低,与发达国家相比,我国城镇居民的住房条件也有较大的差距,据统计,目前我国城市人均住宅建筑面积为 26m^2 ,欧洲国家的人均住房面积为 35m^2 左右,美国人均住房面积大约为 60m^2 。今后30年,随着我国的城镇化进程加快,以及西部大开发、中部崛起、东北老工业基地振兴等计划的实施,我国对高层建筑、大跨度空间结构、钢结构和钢筋混凝土及预应力混凝土结构等各类建筑的需求量仍将快速增长,城市地下空间开发与利用的需求将越来越迫切。我国建筑行业的巨大市场需求和人类对大型复杂结构的追求为结构工程学科的发展提供了机遇和挑战。

1.2 可持续发展和低碳社会是当今我国面临的巨大挑战,迫切要求传统结构工程学科的变革与创新

建筑工程在满足人类生存、生活和生产需求的同时,也消耗了大量的资源和能源,并从材料生产、结构施工直至服役全寿命过程中不断地与环境相互作用。可持续建筑工程是实现社会可持续发展的重要途径之一。

我国大规模基础设施建设在取得巨大成就的同时,也使我国成为世界上建筑资源能源消耗最多的国家,极大地影响我国社会的可持续发展。据统计,我国的建筑能耗占国家全部能耗的32%,已经成为国家单项能耗最大的行业;每年我国消耗全球一半的钢铁和水泥用于建筑业,而水泥和钢铁的碳排放量占到总排量的30%以上;我国大规模的基础设施建设产生了大量的建筑垃圾,我国建筑垃圾的数量已占到城市垃圾总量的30%~40%。因此,建筑业的科技进步和节地、节能水平,在很大程度上决定着我国经济增长方式的转变以及未来国民经济整体发展的速度与质量。党的十七大报告中提出“建设资源节约型环境友好型社会”这一理念,迫切要求结构工程学科通过创新,为实现建筑业“四节一环保”(节水、节地、节材、节能和环保)的目标,发展低碳社会提供科技支撑。

发展可持续的建筑工程,需要结构工程学科在建筑材料(低能耗绿色水

泥、高强高性能钢材、新型长寿命建筑结构材料、可循环利用建筑材料、建筑垃圾材料的处理与再利用等)、结构体系(高性能抗灾结构体系、高质量高寿命结构体系、节能型结构体系、能源利用与环境友好结构体系等)、结构设计理论(全寿命设计理论与方法)和结构施工技术(绿色施工技术、工业化施工技术、设计施工一体化技术)等方面开展深入系统的研究,形成可持续建筑工程的成套理论、方法、技术、装备和相关产业,以保障建筑工程的可持续性。

2 发展现状

2.1 大规模基础设施建设推动了我国结构工程学科的发展

建国以来,我国结构工程学科经历了两次较为显著的发展阶段。解放之初,我国面临百废待兴的局面,新中国的建设推动了结构工程学科的发展,北京的十大建筑均出自我国工程师之手,这些结构无论从材料、结构体系和施工技术等方面,都对我国当时结构工程学科的发展起到了推动作用,奠定了我国结构工程学科的基础。自从改革开放以来,为满足经济与社会高速发展的需求,我国开展了大规模基础设施的建设,特别是北京申办奥运会成功以来,我国建造了大量的大跨度空间结构、超高层建筑、高耸结构和地下工程结构等,这些重大工程的建设再一次推动了我国结构工程学科的发展,我国结构工程学科在建筑材料、结构体系、结构分析与试验方法、结构设计技术、施工技术与复杂建筑装备等方面取得了长足的进步,为这些重大工程结构自主设计与施工提供了科技支撑。未来二三十年持续地大规模基础设施建设事业,为我国结构工程学科的发展提供了新的挑战和机遇,这也正是我国结构工程学科实现跻身国际前列的契机。

“十五”、“十一五”以来,全国在建筑工程建设领域取得了辉煌的成就,涌现出一大批标志性工程。国家大剧院是一座“城市中的剧院、剧院中的城市”,建筑屋面呈半椭圆形,整体漂浮于人造水面之上,造型新颖、构思独特,是传统与现代、浪漫与现实的结合;央视新址为大悬挑高层建筑,以其奇特造型被评选为2007年世界十大建筑奇迹;2008奥运工程(国家体育场—鸟巢、国家游泳中心—水立方、奥林匹克公园等)无疑是北京城市建设过程中最璀璨的明珠;首都机场3号航站楼,总建筑面积98.6万平方米,

是全球最大的单体航站楼，是世界上单体覆盖建筑面积最大的微弯网架，其覆盖建筑面积达到 18 万 m^2 ，连同 T3B、T3C 可达 35 万 m^2 ；2010 年的世博园工程、上海浦东国际机场二期、虹桥综合交通枢纽、上海铁路南站等诸多大跨度空间结构，上海环球金融中心、上海国金大厦、上海中心等众多超高层建筑都是我国标志性建筑，其中，上海中心建成后将成为中国第一高楼；高 308m 的广州珠江城号称“全球最节能的建筑”、高 610m 的广州塔为世界第一高塔；2010 年 1 月结构封顶的“华北第一高楼”天津环球金融中心，其高 336.9m 的津塔写字楼是钢板剪力墙结构的世界第一高楼。目前，我国还是世界上建成组合网架幢数最多的国家（共 60 幢，而世界各国的总和也不足 30 幢），在中国有跨度最大的空间结构，如 $142\text{m} \times 212\text{m}$ 的空腹双层椭圆网壳的国家大剧院， $114\text{m} \times 144\text{m}$ 的双向张弦桁架的奥运会国家体育馆，跨度 122m 弦支穹顶的全运会济南体育馆，椭圆平面 $297.3\text{m} \times 332.3\text{m}$ 网架结构的奥运会“鸟巢”体育场等。大量的大型复杂结构的建设为我国结构工程学科的发展提供了前所未有的机遇。

2.1.1 钢结构

我国建筑钢结构产业经过 20 年的发展，已经形成一个巨大的产业，其中仅主体钢结构制造业的产值就达 500 亿 ~ 600 亿。目前，建筑钢结构产业的发展已步入黄金期，形成了以钢材生产、钢结构设计、构件加工及制作、结构安装以及相关配套服务的产业链。这个产业链主要包括：①以钢铁公司为代表的建筑钢材生产产业，建筑钢结构用钢的研发、钢结构板材和型材的生产（热轧等）加工（冷弯、焊接等）等；②以科研院所为代表的建筑钢结构体系的基础理论研究、设计标准制定、技术咨询和服务等技术支撑产业；③以设计单位为代表的建筑钢结构方案及施工图设计产业；④以钢构公司为代表的建筑钢结构基本构件制作、加工产业，也包括现代商品化的针对某类建筑钢结构体系中整体或部分体系（如屋面体系、墙体体系等）产品进行研发、制作、销售、服务等产业；⑤以建筑钢结构施工企业为代表的建筑钢结构安装、施工产业。

(1) 钢材

钢材是建筑钢结构最基础的结构材料。近年来，我国钢产量持续快速增长。1996 年钢产量跃居世界第一，2007 年钢产量已达 4.9 亿吨。我国钢材质量及钢材规格基本满足建筑钢结构的要求。热轧钢材的牌号有 Q235、Q345、Q390、Q420；有各种规格的 H 型钢和钢板；有厚度为 40 ~ 150mm 的

Z向钢、耐候钢、耐火钢等。目前正在大力开展新型钢材,如高强、耐候、耐火及高延性热轧钢材,厚度在1.5mm以下牌号为Q235和Q550的超薄壁冷弯型钢,厚度大于6mm的厚壁冷弯型钢等的研究。

与美国、日本和欧洲等钢铁产业发达国家相比,我国在特种钢材的研发和产业上还相对落后,在高强钢材、低屈服点高延性结构钢材、耐火钢、耐候钢的开发和应用等方面尚有较大差距。我国目前最常用的结构钢等级为Q235和Q345,Q390和Q420仅在少量工程中应用;而国外已开始越来越多应用Q460、Q490及Q550,同时已经开始研究Q600以上结构钢的应用;日本早在20世纪90年代初就研制成功屈服强度小于100MPa、变形能力达到20%以上的钢材,目前已经用于阻尼器的研制,并成功应用于日本及我国高层建筑抗震中。

(2) 建筑钢结构分析与设计理论

建筑钢结构主要包括高层建筑、高耸结构、大跨度空间结构、工业厂房和轻钢多层结构等。

我国已经建立了较完整的高层钢结构分析理论,形成了高层钢结构成套技术,主要包括以下几个方面:①焊接结构的稳定性分析理论;②钢结构抗震、抗风、抗火等抗灾分析与设计理论;③钢结构振动控制技术;④钢—混凝土混合结构设计理论。目前已能够对纯钢框架、框架—抗侧力、筒体、巨型等多种高层结构体系进行自主设计,能够自主设计的结构的层数与高度也在不断刷新世界纪录。

大跨度钢结构是近30年来创新最显著的结构体系,我国大跨空间钢结构的类型、规模均居世界首位。大跨度空间钢结构可以分成刚性结构体系和柔性结构体系,主要包括薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构和膜结构以及新型组合结构体系(如张弦梁、弦支穹顶到张力结构体系),结构体系向轻型、大跨、柔性和组合形式发展。我国在“空间结构的找形理论”、“空间结构施工力学分析方法”、“空间结构抗震、抗风和抗火等抗灾分析与设计理论”等方面形成了系统的研究成果,并具有自主开发的软件用于施工阶段和服役阶段的设计。

自20世纪70年代始,塔桅钢结构在广播、通讯、输电线路及气象监测等领域得到了迅猛发展;80年代,集中建设了一批大型多功能电视塔;近年来,随着通讯事业和电力事业的发展,塔桅钢结构的高度也在不断刷新,广州塔是目前世界上最高的电视塔、江阴跨越长江的500kV输电线路塔塔高346.5m。我国在高耸结构理论分析、试验研究、结构设计、工程实践及规

范编制等方面均已成熟。

在重型钢结构厂房方面,国内的研究工作相对较早,已经建立了重型厂房钢结构非线性静、动力分析方法,承载力计算方法和相关节点的抗震设计方法。近年来轻型钢结构在我国发展较快,在薄柔构件及其构成的框架和节点的抗震性能、轻型门式刚架结构、低多层住宅钢结构成套技术等方面形成了系统的研究成果。

(3) 建筑钢结构技术标准

我国钢结构技术标准主要由国家标准、行业标准、地方标准、CECS 标准和企业标准五部分组成。总体来说,基本已满足钢结构材料、设计、加工制作、安装及施工等方面的需求;但是专项规程少,对推广应用有不利的影

响。与美国、日本和欧洲等经济发达国家相比,我国钢结构的发展起步较晚,钢结构住宅的产业化程度较低,钢结构的产业处于形成和初步发展阶段,而发达国家在 20 世纪 70 年代已经在钢结构住宅领域形成了成熟的结构体系和工业化技术标准。

2.1.2 混凝土与预应力混凝土结构

钢筋混凝土与预应力混凝土是目前我国建筑工程应用最为广泛的一类结构形式。近年来,随着高层建筑建设的需求,混凝土的强度和性能不断提高,加之高强混凝土中掺入工业矿物掺合料可以节省水泥、改善高强混凝土的早期和长期性能、满足社会可持续发展的需要。我国在实际工程中应用的混凝土的强度已经由 C40 发展至 C80、C100,其更高性能的混凝土也已经研制成功。在高强混凝土的制备工艺、高强混凝土早期性能、高强混凝土的延性、高强混凝土的抗火性能与防爆方法、高强混凝土的耐久性等方面形成了系统的研究成果。

钢筋混凝土以及钢—混凝土组合框架结构、框架—剪力墙结构、剪力墙结构、框筒结构、筒中筒结构、巨型结构、耗能减震高层建筑结构等在我国高层建筑中得到了广泛的应用。我国在钢筋混凝土构件、钢—混凝土组合构件等方面的基本力学性能、极限承载力、抗震性能、抗火性能、钢—混凝土组合构件共同工作,钢筋混凝土高层建筑结构分析与设计理论等方面开展了大量的研究,形成了我国设计与施工标准及规范体系,为我国大量的高层和超高层建筑的设计与建造提供了理论基础和技术支撑。

混凝土材料抗压强度高而抗拉强度低的特点推动了预应力混凝土结构的

研究。预应力混凝土结构的研究和应用在我国已走过了 50 余年的历程, 经过半个多世纪的发展, 特别是随着材料科学、结构分析和试验科学的发展, 其应用范围日益扩大, 由以往的单一构件和简单结构扩大到复杂结构体系 (多高层建筑结构, 大跨空间结构, 地下结构, 桥梁结构, 高耸结构、核电站压力容器、大型市政储罐等特种结构), 预应力结构的研究已经由预应力混凝土结构拓展到预应力钢结构、预应力组合结构以及新材料预应力结构等。

20 世纪 50 ~ 70 年代, 我国主要采用中、低强度预应力钢材, 应用对象主要为屋面梁、屋架等简单构件; 从改革开放初至 90 年代末, 高强预应力钢材及相应工艺技术以及对整体结构施加预应力等现代预应力技术, 在房屋建筑、公路及桥梁工程中得到巨大发展, 总体上接近了国际先进水平; 从 2000 年至今随着我国经济的高速发展, 尤其是 2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会对大型复杂工程以及我国对大跨度桥梁、高速铁路和核电站建筑等建设的需求, 推动了我国预应力结构材料、分析理论、设计方法、施工技术和施工设备等的快速发展。我国已经研究了体外预应力技术、体内一体外混合配束技术、竖向超长预应力技术、环形预应力技术并实现了上述技术的工程应用; 发展了高层大跨预应力框架结构体系, 大面积大柱网双向预应力框架结构体系, 高层建筑预应力转换层结构体系、悬挂结构体系、多层大开间住宅结构体系、预应力巨型框架结构体系、预应力组合结构体系、预应力桥梁结构体系等; 对超静定预应力结构和部分预应力结构的分析方法、部分预应力结构的裂缝控制和配筋, 预应力结构体系的抗震性能、部分预应力混凝土结构的抗爆炸设计方法等都进行了较为深入的研究, 基本解决了它们的理论难题, 为我国预应力结构的建造提供了科学依据和技术支撑。未来我国预应力结构的重要研究课题应该是: 预应力结构的长期性能和耐久性、预应力结构应力复杂区域的分析模型、预应力装配整体结构、预应力空间结构、预应力特种结构、既有结构的预应力加固、FRP 预应力技术及 FRP 预应力结构等。

2.1.3 高层与超高层建筑 (混合结构)

由于我国人口众多, 适合居住的土地面积相对较少, 随着城市化进程的加快, 大量的人口涌入城市, 造成城市人口与土地紧张之间的矛盾, 向空中延伸的高层与超高层建筑是解决这一矛盾的重要途径, 因此将极大地推动了高层与超高层建筑在我国的发展。

高层与超高层建筑越来越多。自从改革开放以来,我国高层与超高层建筑的数量逐年增长,占新增建筑面积的比例不断提高。1971年至1980年十年共建高层149幢;1981年到1990年十年共建高层650幢,总建筑面积804万平方米,占新增面积比例9.9%;1991年到1995年共建高层750幢,总建筑面积1133万平方米,占新增面积比例23%;1996年新建高层430幢,总建筑面积725万平方米,占新增面积比例48.4%;1997年新增高层484幢,总建筑面积926万平方米,占新增面积比例57.9%。上海目前有1.4万幢24m以上的高层建筑,其中100m以上的超高层建筑有400多幢。根据中国建筑学会建筑结构分会高层建筑委员会的统计:1998年我国大陆建成的最高的100栋高层建筑中,第100名的主体结构高度为150m;2004年的统计资料中,第100名的主体结构高度为165m,超过150m的高层建筑超过150栋;截止到2008年底的统计数据中,第100名的主体结构高度为180m,超过150m的高层建筑超过250栋。我国的高层建筑,不仅在数量和高度上不断发展,地域分布也越来越广泛,改革开放之初仅集中于沿海的经济发达地区及大中城市,目前中西部的中型城市也大量出现了高层与超高层建筑。

超高层建筑的高度不断刷新。我国不断刷新世界范围内超高层建筑的高度纪录。1998年我国建成的上海金茂大厦高度420m,是当时最高的高层建筑;2008年,我国的超高层建筑高度又被刷新,492m的上海环球金融中心、450m的南京紫峰大厦、441m的广州西塔均已建成,10年中高层建筑的高度提高了70m;2009年,塔顶高度达632m的上海中心及648m的深圳平安金融中心破土动工,标志着我国高层建筑的高度进入了一个新的阶段;全国各地尚有一批正在设计中的超高层建筑,如高度超过600m的天津117大厦,530m的天津周大福滨海中心等。超高层建筑高度的不断攀升,其意义不仅仅在于高度的突破,它带动了新材料、结构分析与设计技术、设备制造技术、施工安装技术等建筑产业链的整体提升。

符合我国国情的高层与超高层建筑的混合结构体系得到大发展。国外高层、超高层建筑以纯钢结构为主,而我国以钢—混凝土的混合结构居多。据不完全统计,在我国已建成的高度超过200m的超高层建筑中,有50%左右为混合结构,超过300m的超高层建筑中,有66%以上是混合结构。钢—混凝土混合结构之所以在我国得到了较大发展,一方面因为它可以实现钢、混凝土以及钢—混凝土组合构件的有效组合,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,我国现场施工的劳动力成本比国外

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,预计未来混合结构仍将会得到较大发展。

我国已经形成系列的新型高层与超高层建筑结构体系。高层建筑除了要满足建筑使用功能的要求外,越来越重视建筑个性化的体现,使高层建筑的平面、立面均具特殊性。尤其近几年,各种新的复杂体型及复杂结构体系大量涌现。大底盘、多塔楼连体高层建筑在深圳大学科技楼、上海国际设计中心大厦、苏州东方之门和北京当代万国城等得到应用,该类结构受力特点及动力反应特点较为复杂,地震作用下连体部分可能会出现较大振动,并可能与主体部分发生碰撞,同时,主体结构扭转效应增强;高层与超高层建筑沿竖向功能变化丰富,为满足功能要求,往往采用钢结构桁架、宽扁梁作转换梁、型钢混凝土空腹转换桁架、斜撑转换结构、搭接柱转换、搭接墙转换等各种类型转换单元满足结构体系竖向的变化,但带转换层结构上、下层竖向构件不连续,转换层上下楼层构件内力、位移容易发生突变,对抗震不利,斜撑转换可以有效地解决竖向构件不连续的问题,避免了截面巨大的转换梁柱,但斜撑的水平分力可能对柱节点区造成剪切破坏,结构设计时,需要对这些问题采取相应措施进行加强;带大悬挑的高层建筑结构体系在我国深圳京基大梅沙酒店、CCTV 新台址、陕西法门寺等得到应用,悬挑结构体型不规则,而且结构冗余度低,结构设计时应给予足够的重视;大跨度悬挂结构是近年来发展起来的高层结构体系,广东省博物馆新馆采用了钢桁架外挑悬挂,该类结构对地震作用和风荷载作用比较敏感,地震作用下的破坏形态较为复杂。这些复杂体型的高层建筑,许多超出了现行设计规范的要求,以往的工程经验和震害资料都无法借鉴,需要进行更深入的研究。特别是许多项目采用了国外设计师的作品,但一些境外建筑师来自非地震区,缺乏抗震设计经验,有些建筑方案特别不规则。而在日本神户、我国台湾及“5·12”汶川地震中,一些特别不规则建筑受到严重破坏。我国绝大部分地区都要考虑抗震设防,因此对这些复杂体型的高层建筑抗震安全问题必须引起重视。

目前我国已建成的超高层建筑中,结构体系主要有框架—筒体结构体系、巨型柱框架—核心筒结构体系、筒中筒结构体系、外部交叉网格结构体系以及其他新型结构体系,其中框架、筒体、巨型柱等既有钢筋混凝土结构也有钢结构及组合结构。例如,北京国贸三期主塔楼高 330m,采用钢—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;在建的 337m 高的天津津塔主要抗侧力体系由钢管混凝土