

中国土木工程科技 2035 发展趋势与路径研究

陶慕轩¹, 聂建国², 樊健生³, 潘文豪¹, 汪家继¹, 刘诚¹

(1. 清华大学土木工程系土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学北京市钢与混凝土组合结构工程技术研究中心, 北京 100084; 3. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 中国城镇化亟须从“高速推进”转向“品质提升”的新阶段, 土木结构工程作为城镇化的重要载体和标志, 创造人居环境, 将成为中国城镇化品质提升的核心突破口之一。从现在到 2035 年将是我国土木结构工程领域的关键转型期和重要机遇期。本文综述了世界上土木结构工程领域科技的先进水平, 总结了面向 2035 年土木结构工程科技的发展方向和趋势, 识别了土木结构工程领域我国需要解决的重大问题及其对工程科技的需求, 提出了土木结构工程领域的关键技术与发展路径, 指出了面向 2035 年土木结构工程领域需要国家层面部署的重大工程。

关键词: 2035 年; 土木工程; 结构工程; 发展趋势; 关键技术; 发展路径; 重大工程

中图分类号: TU3 **文献标识码:** A

Development Trends and Path for China's Civil and Structural Engineering Science and Technology to 2035

Tao Muxuan¹, Nie Jianguo², Fan Jiansheng³, Pan Wenhao¹, Wang Jiayi¹, Liu Cheng¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education of the PRC, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Steel and Concrete Composite Structures, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: China's urbanization development needs to shift from rapid growth to quality improvement. As a major carrier and symbol of urbanization, civil and structural engineering will become one of the key development methods for China to improve the quality of its urbanization by creating higher quality living environments. China's civil and structural engineering will undergo crucial transformations and will embrace important opportunities in the period between now and the year 2035. This paper provides an overall review of world-leading technologies in civil and structural engineering fields; summarizes the development direction and trends of civil and structural engineering technologies to 2035; and identifies pending major issues in China's civil and structural engineering, along with their demands for engineering science and technology. This paper then proposes key technologies and a development path for civil and structural engineering, and suggests major projects that need to be implemented on a national level for China's civil and structural engineering to 2035.

Keywords: 2035; civil engineering; structural engineering; development trends; key technology; development path; major projects

收稿日期: 2016-12-09; 修回日期: 2016-12-21

通讯作者: 陶慕轩, 清华大学土木工程系土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 特别研究员, 主要研究方向为钢-混凝土组合结构等;
E-mail: taomuxuan@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国工程科技 2035 发展战略研究”(2015-ZD-14)、“高性能可持续结构工程发展战略研究”(2015-ZCQ-09); 国家自然科学基金项目(L1522025)

本刊网址: www.engingsci.cn

一、前言

土木工程是直接面向经济社会发展的科学技术，深刻影响着人居环境、城镇化进程，以及社会的可持续发展。中央城镇化工作会议将新型城镇化建设作为中国未来发展的重要战略，城镇与基础设施建设已成为中国未来经济社会发展的重要引擎。中国城镇化亟须从“高速推进”转向“品质提升”的新阶段，土木工程作为城镇化的重要载体和标志，创造人居环境，必将成为中国城镇化品质提升的核心突破口之一。从现在到 2035 年，我国土木工程领域研究将处于关键转型期和重要机遇期。为全面应对未来 20 年土木工程领域的空前挑战，从 2015 年开始，在中国工程院与国家自然科学基金委员会共同资助开展的“中国工程科技 2035 发展战略研究”项目的总体框架下，依托中国工程院土木、水利与建筑工程学部，设立了土木工程领域专题研究组，对面向 2035 年我国土木工程科技的发展战略开展了系列研究，本文综述了其中的部分研究成果。

二、土木工程领域世界科技先进水平

土木工程技术的发展与本国的基本国情和发展阶段密切相关，因此世界各国土木工程技术的发展各具特色，理念也各有差异。例如日本，由于长期遭受地震灾害的威胁，因此在抗震技术方面发展迅猛，处于世界领先地位，但其总体技术风格和发展路径又与美国颇有差异，在世界上独树一帜。从 2015 年英国教育组织 Quacquarelli Symonds (QS) 颁布的世界学科排名可以看到，土木工程学科排名前十位的高校中，欧美高校各占 3 席，中国及中国香港高校占 2 席，日本和新加坡高校各占 1 席。除了欧美发达国家和日本这些传统工程科技强国外，中国近年来在土木工程领域所取得的科技成就同样也从一定程度上反映出本领域的国际先进水平。

(一) 中国大规模基础设施建设，促进结构体系的不断创新和大型复杂结构建造技术的不断进步

中国经历了史无前例的大规模基础设施建设，为我国土木工程科技创新提供了前所未有的

机遇。我国自主研发了以钢-混凝土组合结构、大跨空间结构、预应力结构等为代表的系列结构新技术，其综合指标居于世界先进水平；在节约资源、提高安全、改善居住品质、减少劳动用工等方面优势显著。我国在大型复杂结构和超高层建筑结构设计、分析和施工关键技术方面取得了一系列具有自主知识产权、国际先进的核心技术成果，在材料、设计、施工、运维等方面解决了一系列关键的技术难题 [1]，实现了技术极限与传统认知的不断突破，有力地保障了中国重大标志性工程的建设水平。

(二) 工程结构可靠性、耐久性及全寿命设计理念得到初步实现，并获得广泛认同

土木工程结构的可靠度理论和方法取得了重要进展 [2]，在可靠性数学 [3] 的基础上，逐步发展了适用于土木工程结构的可靠度设计理论体系，为全面提升土木工程结构的安全和可靠性起到了至关重要的作用。随着社会经济的快速发展，可持续发展已成为全球性的重大挑战。在这一背景下，倡导注重结构耐久性并进而发展为全寿命周期设计理论，来综合考虑工程结构设计、施工、运营和管理的各个环节。该方向目前已成为国内外最活跃、最前沿的研究领域之一，是国内外学者普遍关注的焦点和研究热点。

(三) 基于性能的抗震设计得到应用，抗震试验技术不断革新，大规模结构地震灾变模拟得到推广

土木工程结构抗震是近年来本领域进展最快的方向之一。在美国联邦应急管理署 (FEMA) 和美国国家科学基金会 (NSF) 的联合资助下，美国科学家和工程师提出了基于性能的抗震设计思想 [4,5]，标志着结构抗震设计方法迈向了新的高度。美国发起的地震工程模拟网络 (NEES) 计划以及日本建造的世界最大规模振动台 E-Defense 强有力地推动了结构抗震试验技术的进步。振动台试验和拟动力试验作为当今世界最重要的结构抗震试验方法，已被国内外学者广泛接受。在此基础上发展起来的在线混合试验 [6] 等新型试验技术，在揭示复杂结构体系地震灾变机理方面也取得了满意的效果。此外，高性能计算手段的逐步成熟，有力地推动了工程结构抗震分析和设计不断向精细化的方向发展。

三、面向 2035 年土木结构工程领域科技的发展方向 and 趋势

(一) 高性能可持续土木结构工程将成为未来发展的主旋律

近年来,随着我国土木工程建设规模空前扩大,资源能源消耗大、环境污染严重、使用寿命短、安全可靠低、抗灾能力弱等问题已成为我国土木结构工程领域面临的重大挑战,严重制约着我国经济社会的可持续发展。面向 2035 年土木结构工程所暴露的问题,将从结构的安全性转移到工程结构的耐久性、使用寿命、抗灾能力以及危及地球生态的资源能源与环境等。因此,土木结构工程技术未来将以全寿命设计理论及方法为主要突破口,重点发展高性能结构工程,实现土木结构工程领域的可持续发展 [7]。高性能结构工程针对不同工程结构在不同环境或使用要求下对其性能的不同要求,应具有不同的性能特点和表现形式,例如,面向 2035 年我国亟须在大型立体城市集群构建、深海工程建设、新型能源开发利用、战略物资储备、军事防护设施革新等领域取得颠覆性突破,这些领域中的土木结构工程具有巨型化、复杂化、超高化、系统化的突出特征,因此对高性能可持续结构工程提出了更综合且更复杂的性能需求。

(二) 提升抵御多重灾害的能力是未来土木结构工程科技发展的重要任务

土木工程推动了人类社会的文明进步,同时也给人类带来了灾害。土木工程是灾害的主要载体,而土木工程手段则是防灾减灾的主要手段。全球地震、台风、洪水等自然灾害频发,爆炸、火灾、武器打击等人为灾害危机潜伏,这些都对土木工程结构的综合防灾减灾提出了更深层次的需求。一方面,土木工程结构抗震技术一直是研究热点,预计未来仍将成为重点的攻关方向,从过去的安全单一原则设计法,到现在普遍接受的基于性能的设计法,未来将向可恢复功能乃至可控的目标迈进,工程结构的抗震设计理念仍有广阔的革新空间;另一方面,某一灾害引起的次生灾害以及多灾种的耦合作用,将对土木工程结构的防灾减灾技术提出全新的挑战,多灾种的物理模型以及全

球气候灾变条件下土木工程结构的灾变模拟与控制将成为该方向的主要难题。

(三) 劳动力紧缺逼迫土木结构工程产业不断转型升级

面向 2035 年世界经济社会发展的总体趋势是:老龄化问题日益突出、劳动力持续减少、人力资本显著提高,这些趋势将对土木结构工程产业形态产生极其深远的影响。传统的土木结构工程产业模式将愈发无所适从,破解难题的核心在于提升土木结构工程产业的劳动生产率。随着劳动力价格的不断攀升,劳动力缺口将逼迫土木结构工程产业持续转型升级,向工业化和智能化方向发展。预计到 2035 年,传统土木结构工程行业分散的、低水平的、低效率的手工业生产方式将完全被现代化、智能化、柔性化的制造、运输、安装和科学管理的生产方式所取代。同时,劳动生产率将大幅提升,建设速度将显著加快,工程成本将逐步降低,工程质量将更易控制。

(四) 多学科交叉与多领域协作助推土木结构工程技术创新

土木结构工程技术是一项古老的传统工程技术,其大规模、粗放式、以消耗大量人力资源为特征的运作模式将愈发与世界经济的发展模式和需求格格不入,未来土木工程产业结构必将发生翻天覆地的变化,并将以崭新的面貌展现在世人面前。面向 2035 年,土木结构工程技术将表现出显著的精细化与智能化特征,多学科的交叉融合将为古老的土木结构工程技术注入新的活力。先进材料科学与土木结构工程的有机融合,或将引发高性能土木结构工程材料的革命;先进自动化技术、信息技术、机械技术与土木结构工程的有机融合,将实现土木结构工程建造过程的自动化与智能化,土木结构工程工业化程度将显著提升;先进控制技术、机械技术、电子技术、网络技术与土木结构工程的有机融合,将推动精细化土木结构工程试验方法和健康监测技术的深度发展;先进计算技术、软件工程技术、基础力学的发展与土木结构工程的有机融合,将为土木结构工程的高性能计算注入新的活力。此外,土木结构工程技术不再局限于在传统建筑、桥梁、隧道等领域,在和清洁能源、海洋工程、国防工程

等新兴领域的广泛合作中,将催生出一系列全新的技术增长点,将成为面向 2035 年土木工程科技进步的不竭动力。

四、我国土木工程领域需要解决的重大问题及其对工程科技的需求

我国土木工程领域面临着可持续发展的严峻挑战,这一挑战背后的原因是:产业结构落后,创新机制匮乏,原创性土木工程理论和方法不足 [1],缺乏自主知识产权的土木工程计算机辅助工程(CAE)软件 [8],规范标准体系无法起到引领技术创新的作用。面对 2035 年建设全球化的中国、安全的中国、可持续发展的中国、智能化的中国的迫切需求,土木工程科技的发展必须首先着眼于解决四项需求。

需求一:大力发展高性能结构工程技术,实现土木工程行业的可持续发展。2009 年,中国工程院设立的“土木学科发展现状及前沿发展方向研究”战略咨询项目的研究报告指出:我国是世界上土木工程资源能源消耗最多的国家,土木工程行业已经成为国家单项能耗最大的行业。每年我国消费全球大约一半的钢铁和水泥用于基础设施建设,而水泥和钢铁的碳排放量占总排放量的 30% 以上,且大规模基础设施建设还产生大量垃圾,土建垃圾数量已占城市垃圾总量的 30% 以上 [1]。资源能源约束矛盾日益突出,环境生态承载能力逐步逼近极限,因此对高性能结构工程技术的需求与日俱增。所谓高性能结构工程,即指土木工程在规划、设计、建造、运营、拆除等全寿命周期的各个阶段,具有高安全性能、高施工性能、高使用性能、高环保性能、高耐久性能、高维护性能和高经济性能,是土木工程可持续发展的重要途径 [7]。

需求二:建立完善土木工程综合防灾减灾科技体系,大幅降低土木工程灾害风险。中国工程院“土木学科发展现状及前沿发展方向研究”战略咨询项目研究报告表明:尽管我国一直以来对土木工程防灾减灾给予了极大的重视,但随着人口聚居度的提高和社会物质财富的不断积累,防灾减灾的形势却日趋严峻。一方面,从近年来灾害频发的现状可以看到,灾害有愈演愈烈的趋势;另一方面,为了缓解资源、人口、环境等压力,不得不向

地下空间、海洋等自然条件更为恶劣复杂、灾害风险更大的区域发展 [1]。灾害面前,土木工程科技工作者虽然竭尽全力,但仍然难以达到预期的目标,因为太多的科学问题和技术难题没有攻克。面向 2035 年,国际化的中国要求在灾害防治这一国际重大危机事件的处理中有重要话语权,发挥关键作用并做出自身贡献,安全的中国要求构建对事故和灾难有较强防御能力的社会基础设施,为此,建立完善的土木工程综合防灾减灾科技体系刻不容缓。

需求三,构建高度现代化与智能化的土木工程建造技术体系,加速土木工程产业结构转型升级。到 2035 年,中国将是高度智能化的中国,土木工程建造技术将逐步展现出现代化、工业化、智能化的特征。随着信息化技术、3D 打印技术以及大数据、互联网等手段的不断涌入,土木工程工程将实现高水平智能化的建造过程,并由此带来节水、节能、节时、节材、节地、节人等一系列效益,绿色建筑以及可持续建造理念也将得到普及。此外,土木工程产业结构也将加速转型升级,传统意义的量大面广的混凝土结构由于能效低、劳动力成本高、资源能源消耗大、环境污染严重等问题将受到挑战,标准化和工业化建造的混凝土结构以及钢结构、组合结构等一系列更符合绿色低碳要求的结构形式,将逐步成为土木工程领域的主流。

需求四,突破原创性土木工程理论、方法与软件,构建引领先进科技潮流的土木工程规范标准体系。虽然我国在大规模基础设施建设的实践中解决了诸多土木工程技术难题,但正如欧进萍和崔俊芝等学者呼吁:我们解决这些难题的基础大多是发达国家最早建立的土木工程理论、方法与软件。例如,一方面,目前在结构工程抗震分析和设计中最常用的结构动力学、地震反应谱等理论方法都由欧美学者原创,我国土木工程分析和计算对国外 CAE 软件的依赖程度很高;另一方面,规范标准作为土木工程建设的重要技术依据和准则,对引领技术方向、保障工程质量安全、推广应用先进技术、提升核心技术竞争力具有不可替代的重要意义,但我国土木工程建设标准体系在顶层设计和编撰机制方面存在诸多不足,因此严重制约了标准的先进性及其引领作用的发挥 [7]。只有突破原创性土木工程理论、方法与软件,构建引

领先科技潮流的土木工程规范标准体系，才能逐步使我国迈向土木工程强国之列。

五、土木工程领域的关键技术与发展路径

(一) 基于技术预见的关键技术识别

为筛选面向 2035 年前后我国土木工程领域的关键技术，课题组开展了较大规模的技术预见专家调查。专家调查共进行两轮，第一轮调查前首先通过广泛征求行业内专家意见凝练形成了包括 15 项关键技术的备选技术清单；根据第一轮专家调查结果，课题组又进一步修改备选技术清单并将备选技术压缩至 14 项，再次交由专家进行第二轮调查。第一轮、第二轮调查的参与人数分别为 189 位和 196 位。

在所有调查结果中，最能反映技术方向重要性的指数为技术与应用重要性综合指数，两轮调查的相关结果如图 1 所示。从图 1 中可清楚地看到，“新型高性能结构体系关键技术”“土木工程综合防灾减灾技术”“基于全寿命期性能的建筑结构设计、施工与运维技术”在两轮调查中均得到了调查专家的普遍认可，技术与应用重要性综合指数位列前三；而“新型高性能结构体系关键技术”在两轮技术预

见调查中均排名第一。结构体系的创新作为结构工程学科进步的根本源动力，应当作为土木工程领域未来发展的最重要突破口。发展“新型高性能结构体系关键技术”是实现结构工程领域的可持续发展以及产业转型升级的根本途径，应当作为未来土木工程战略发展的方向。而“土木工程综合防灾减灾技术”和“基于全寿命期性能的建筑结构设计、施工与运维技术”是实现新型高性能结构体系的重要支撑技术，也必将成为土木工程领域持续关注的热点方向。

(二) 土木工程科技总体发展路径

面向 2035 年土木工程领域科技发展的总体架构如图 2 所示。在 2035 年国家新型城镇化建设战略、“一带一路”发展战略、可持续社会建设压力、人口红利消退等一系列国家经济社会发展情景的大背景下，发展高性能可持续土木工程技术将成为面向 2035 年我国土木工程领域科技发展的核心战略。多学科交叉融合将成为未来土木工程科技发展的突出特征。现代自动化技术、信息技术、机械技术、控制技术、电子技术、网络技术、软件技术、计算技术等将为传统土木工程工

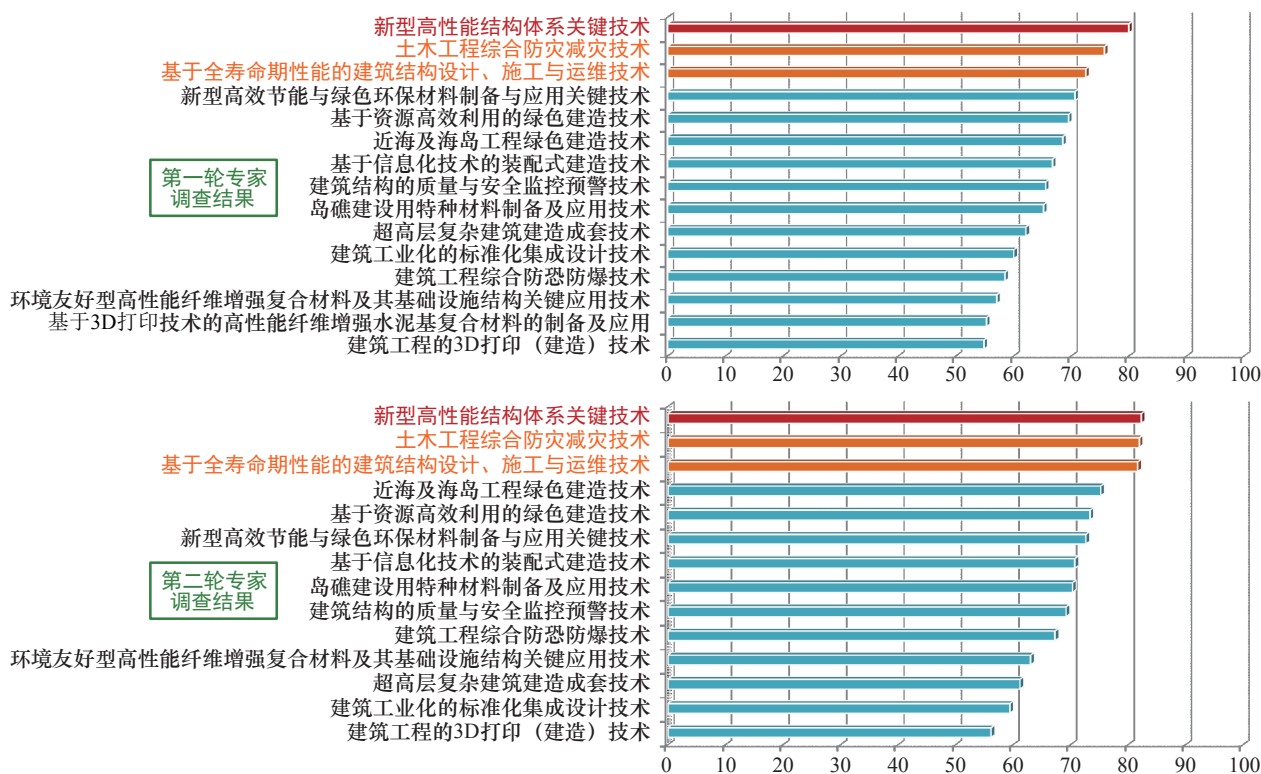


图 1 技术与应用重要性综合指数

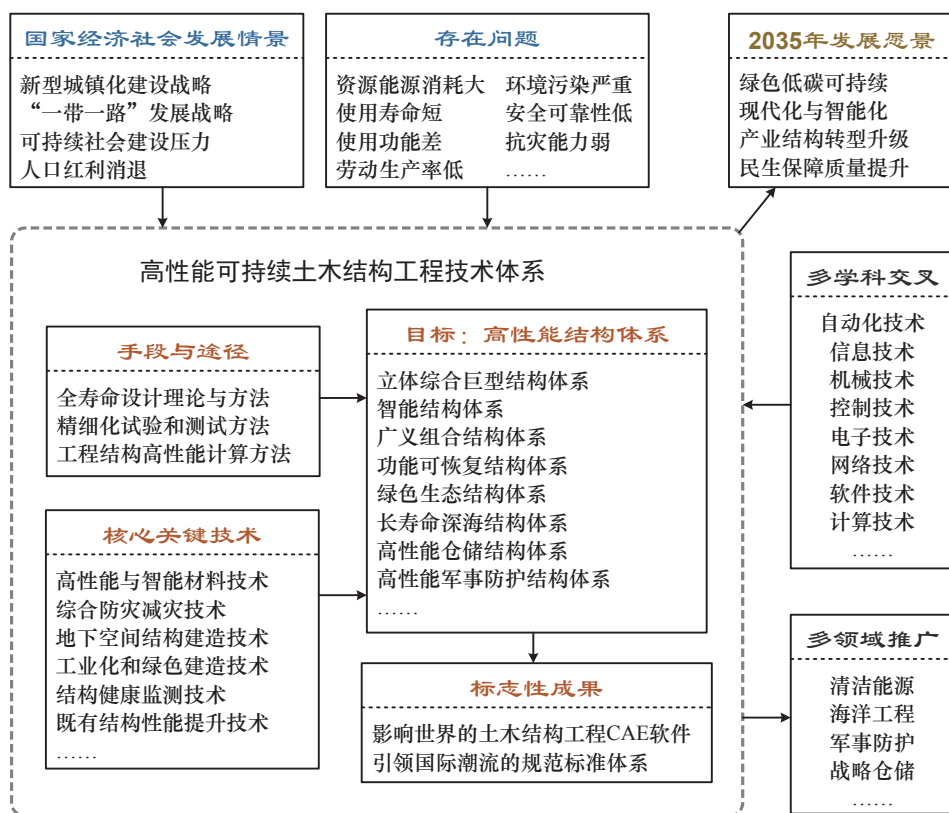


图2 面向2035年土木工程领域科技发展的总体架构

程科技发展带来全新的活力。土木工程先进技术也将向更广阔的领域拓展，在清洁能源、海洋工程、军事防护、战略仓储等领域发挥重要的支撑作用。预计到2035年，土木工程领域将全面实现绿色低碳可持续、现代化与智能化、产业结构转型升级、民生保障质量提升的发展愿景。

1. 核心目标

发展以高安全性能、高施工性能、高使用性能、高耐久性能、高维护性能和高经济性能等为特征的高性能结构体系，具体包括立体综合巨型结构体系、智能结构体系、广义组合结构体系、功能可恢复结构体系、绿色生态结构体系、长寿命深海结构体系、高性能仓储结构体系、高性能军事防护结构体系等。

2. 手段与途径

理论、试验、计算仍然是土木工程科技研发的三大支撑手段。在理论方面，通过系统集成创新，建立与我国工程结构服役环境相适应的各类结构全寿命设计理论体系；在工程结构试验方面，重点发展与现代信息及控制技术相结合的复杂恶劣服役环境条件下的土木工程精细化试验和测试方法；在工程结构计算方面，重点突破现代土木工程

结构仿真分析和优化设计的高性能计算方法。

3. 重点突破的核心关键技术

围绕高性能结构体系的发展目标，2035年土木工程领域将掌握一批国际领先的高性能土木工程核心关键技术，其中重点突破高性能与智能材料技术、综合防灾减灾技术、地下空间结构建造技术、工业化与绿色建造技术、结构健康监测技术、既有结构性能提升技术等。

4. 预计取得的标志性成果

土木工程CAE软件以及规范标准体系历来是反映各国土木工程科技水平的标志性成果，也是制约我国土木工程科技国际竞争力的两大短板。我国要迈向世界土木工程强国之列，就必须在自主知识产权的土木工程CAE软件以及高水平规范标准体系方面取得突破性进展，从而引领国际土木工程科技的发展潮流。

六、需在国家层面部署的重大工程——极端恶劣环境下巨型复杂土木工程

我国未来亟须在立体城市、深海工程、新型能

源、战略储备、军事防护等一系列关乎国计民生和国家战略的重大领域取得颠覆性突破。这些领域中的土木工程具有巨型化和复杂化的突出特征,同时还面临自然灾害、极端气候、武器打击等各类恶劣复杂环境的影响,因此实施极端恶劣环境下巨型复杂土木工程意义重大。

研发适用于大型立体城市群建设的超大规模地下空间结构和空中城市结构新体系;研发适用于跨海连岛工程的新型超大跨度桥梁、深海基础、超长海底隧道结构新体系;研发适用于深海资源开发利用的新型海洋发电结构和超大规模漂浮平台岛屿结构等新体系;研发适用于国家战略物资储备的大型粮仓、煤仓等结构新体系;研发具有优越的抗武器打击能力的军事防护和重大军事目标结构新体系。同时,还应突破各类复杂恶劣服役环境和极端灾害条件下巨型复杂土木工程试验技术、计算方法和设计理论。

到2035年,我国将在极端恶劣环境下巨型复杂土木工程的核心关键技术方面取得原创性成果,有力地促进土木工程与自然圈的和谐发展。这些原创性成果不仅将解决我国重点战略领域中土木工程重大难题,还将在世界范围内发挥显著的示范效应。

参考文献

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

- Academic Divisions of Civil Engineering, Hydraulic Engineering, and Architectural Engineering, Chinese Academy of Engineering. The development status and frontiers of civil engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [2] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
Zhao G F, Jin W L, Gong J X. Reliability theories for engineering structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.
- [3] 李继华. 可靠性数学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
Li J H. Reliability mathematics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1988.
- [4] Applied technology council. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building [R]. FEMA Publication 273, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [5] 汪梦甫, 周锡元. 基于性能的建筑结构抗震设计 [J]. 建筑结构, 2003, 33 (3): 59-61.
Wang M F, Zhou X Y. Performance-based seismic design of building structures [J]. Building Structure, 2003, 33 (3): 59-61.
- [6] Pan P, Wang T, Nakashima M. Development of online hybrid testing: Theory and applications to structural engineering [J]. International Journal of Productivity & Performance Management, 2015, 56 (7): 116-121.
- [7] 聂建国. 我国结构工程的未来——高性能结构工程 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (9): 1-8.
Nie J G. The future of structural engineering in China—high-performance structural engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (9): 1-8.
- [8] 钟万勰, 陆仲绩. CAE: 事关国家竞争力和国家安全的战略技术——关于发展我国CAE软件产业的思考 [J]. 中国科学院院刊, 2007, 22 (2): 115-119.
Zhong W X, Lu Z J. CAE: Technology for national competitive power and national security [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2007, 22 (2): 115-119.