

# 2019年度中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告

中国混凝土与水泥制品协会UHPC分会

中国混凝土与水泥制品协会在2018年12月成立了超高性能水泥基材料与工程技术分会(简称CCPA-UHPC分会),旨在促进中国UHPC技术进步、知识普及、应用推广和产业发展。在2019年6月30日南昌召开的首届CCPA-UHPC论坛开幕式上,CCPA执行会长徐永模指出:UHPC突破了水泥基材料性能和应用领域的很多极限。无论是结构材料组分的复合,水泥基材料本身的性能、与纤维增强材料的复合,还是与其他结构材料的“组合”,应该说都打开了许多发展空间,为我们创新者提供了许多想象空间。目前UHPC在各种工程上的应用还只是开始,一旦UHPC的性能和优势被认识,将很快形成UHPC的开发和应用高潮。希望UHPC的发展起始于国外,成长在中国,成就在中国!

从2019年开始,CCPA-UHPC分会将每年撰写“中国UHPC技术与应用发展报告”,回顾、记录和总结UHPC在中国的发展进步。本报告是这一系列年度报告的开篇,包含了过去和当年开展的工作。

## 一、UHPC的发展回顾

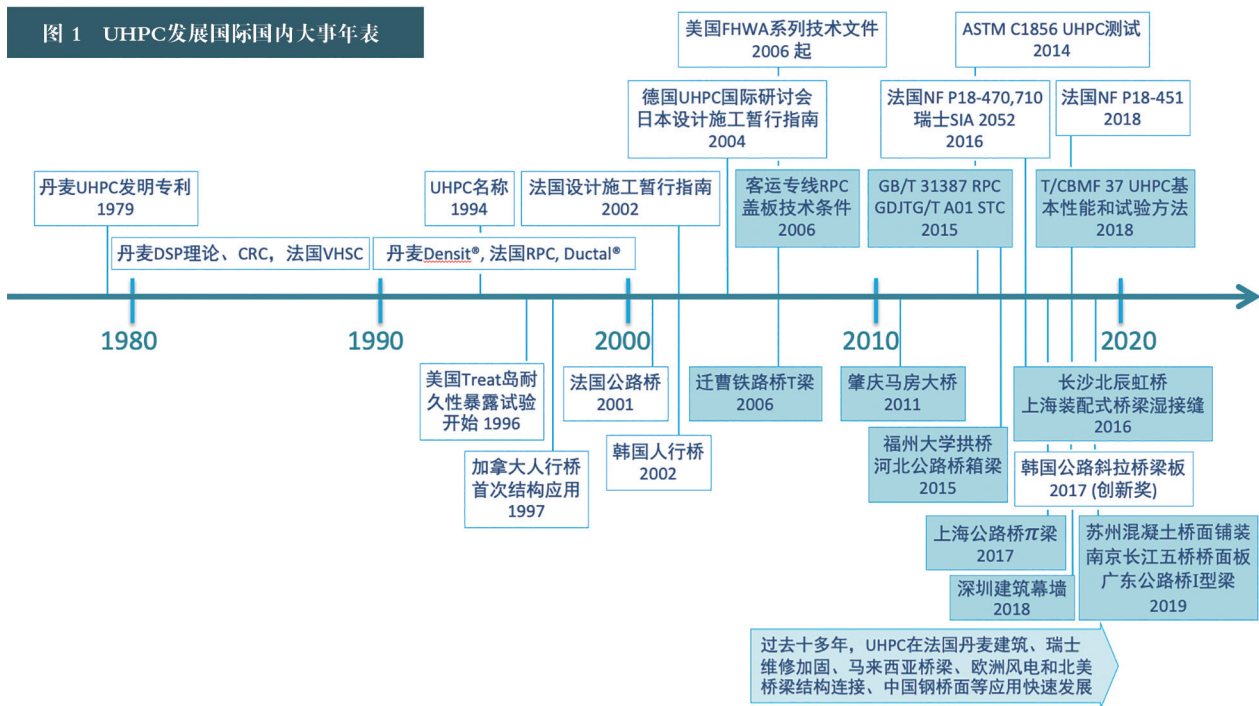
国际上和中国UHPC技术与应用发展,至今的大事年表如图1所示。UHPC发明的标志是丹麦Hans Henrik Bache先生1979年申请第一个专利以及他建立DSP理论,至今年正好是40年。在上世纪八十年代,丹麦开展了UHPC材料的应用研究。当时UHPC被称作Ny Beton(新

型混凝土)、CRC(Compact Reinforced Composite密实增强复合材料,即R-UHPC或纤维和钢筋增强水泥基复合材料),以及Densit®商标的商业化UHPC预混料产品。上世纪九十年代,法国是UHPC研究发展最活跃的国家。其中,法国多个企业参加的“活性粉末混凝土”(Reactive Powder Concrete,简称RPC)研究项目,发表了系列研究论文使RPC或UHPC在世界范围获得重视和研究发展。法国最早开展UHPC的标准化工作,到2018年颁布了完整系列的UHPC材料、设计和施工标准。

UHPC(超高性能混凝土)名称是1994年法国学者建议的,因能更好表达这种超高性能水泥基纤维增强材料的优越性能,逐步被广泛接受和采用。法国、瑞士和德国自己语言的名称是“超高性能纤维增强混凝土”(法语简称为BFUP、德语为UHFB,等同英语简称UHPFRC—Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete)。瑞士定义UHPFRC中的“C”代表“水泥基复合材料”(Cement-based Composite),认为UHPFRC克服了混凝土(Concrete)的诸多缺点,已经不是混凝土了。尽管如此,国际上交流,UHPC是通用的名称。

在“知网”上查询中国关于UHPC技术方面的中文文章,最早为1998年俞瑞堂编译文章“活性粉末混凝土的理论与实践”(发表在《国外桥梁》杂志1998年第1期),以及覃维祖、曹峰的文章“一种超高性能混凝土——活性粉末混凝土”(发表在《工业建筑》1999年第4期)。这

图1 UHPC发展国际国内大事年表



两篇文章都介绍了法国研究的“活性粉末混凝土”，是中国UHPC技术的启蒙，早期中国的相关研究应用也多采用RPC名称，至今RPC名称在中国还有使用。法国如今已经不再使用RPC名称，使用BFUP或直接使用各企业商标名称如Ductal®、BSI®等，与UHPC含义相同。

中国UHPC的研究探索始于上世纪末，最早的规模化应用是客运专线的电缆沟盖板（RPC盖板），开端性的桥梁应用包括：2006年建造迁曹铁路滦柏干渠大桥低高度RPC预应力T型梁铁路桥，2011年肇庆马房大桥的一跨钢桥面铺装试验段（当时使用的名称为超高韧性混凝土，简称STC），2015年建造福州大学校园内UHPC拱桥（10米跨径）和京港澳高速石安段UHPC箱梁公路桥，2016年建造的长沙北辰虹桥（预制节段拼装预应力UHPC箱梁桥）和上海装配式高架桥UHPC湿接缝；之后桥梁和建筑创新应用呈明显增长势头。UHPC如今是中国水泥基材料研究、应用、创新、发展最具活力的领域，伴随工程应用的增长，UHPC业已成为可工业化生产和商业化供应的工程材料，产品类型和应用领域在不断扩展。UHPC的标准化工作正在中国全面展开，进入标准体

系的建立阶段。

UHPC的专题技术交流始于德国Kassel大学在2004年举办的第一届UHPC国际研讨会（每四年一届，英语交流）。2004年后的15年间，国际上包括中国的UHPC技术发展速度明显加快，大量企业、大学和研究机构的科研人员加入UHPC研究与应用开发的行列，UHPC交流的平台也不断增加，如法国土木工程协会从2009年开始举办国际研讨会（英语和法语交流），也是四年一届；美国2016年举办UHPC互动国际研讨会（英语交流），今年刚举办了第二届；RILEM（国际材料和结构实验研究联合会）的中国系列UHPC国际研讨会（英语交流），2016年和2018年分别在长沙和福州举办了两届，2020年将在南京举办第三届。

2019年CCPA-UHPC分会也搭建起UHPC中文交流的本土化平台——CCPA-UHPC论坛。首届CCPA-UHPC论坛为期1天，于2019年6月30日在南昌举办（与预拌混凝土行业第六届“井冈山论坛”同期举办，2019年29~30日），论坛主旨为：分享UHPC知识与经验，启发创意与创新，讨论技术空白点与努力方向。2019年湖南省硅酸盐学会、湖南大学等单位也在长沙组织召开了“全国首届超高

性能混凝土材料与结构研讨会”(2019年10月17~20日)。第二届CCPA-UHPC论坛在CCPA的南京年会期间召开(2019年12月6~8日),同期还举办由CCPA和中国硅酸盐学会发起、以UHPC为专题的“第二届混凝土大讲堂”,邀请国际国内对UHPC技术发展有重大贡献的专家学者讲课。除UHPC专题会议外,在近年来召开的水泥基材料和UHPC应用相关行业会议、论坛上,UHPC主题的报告数量明显增多,从一个侧面体现了中国UHPC研究应用的勃勃生机。

## 二、中国UHPC 研究与应用技术发展

经过二十年的发展,在中国一些高校、企业已经造就出一批专注于UHPC的研发团队,成为中国UHPC技术进步和推广应用的主要驱动力。鉴于中国之大、开展的研发活动之多,难以收集完整全面的信息资料,本报告从首届CCPA-UHPC论坛、发表论文及新闻报道等获得的信息,介绍部分团队开展的部分UHPC研究应用工作,从中一窥中国的UHPC技术进展。

### 湖南大学

湖南大学黄政宇、邵旭东和方志教授等的团队,在中国最早开展UHPC材料和结构性能研究、桥梁设计与应用研究以及工程实践。邵旭东教授团队发展的钢-UHPC复合桥面结构很好地解决了困扰钢桥的两大难题——桥面铺装寿命短和钢结构易疲劳损伤;设计和试验研究了多种UHPC结构、钢-UHPC复合结构桥梁。其中,钢-UHPC复合桥面在中国已进入规模化应用,其他桥型正在走入工程应用。

方志教授团队开展了UHPC结构设计基本理论研究,编制湖南省工程建设地方标准DBJ 43/T 325—2017《活性粉末混凝土结构技术规程》,以及一些开创性UHPC结构设计和工程实践,如主持设计了长沙北辰三角洲跨街天桥(可通行消防车辆)——中国首座节段预制拼装预应力UHPC连续箱梁桥;设计将UHPC(RPC)用于混合梁斜拉桥钢-混结合段,并分别在云南六库怒江二桥(2014)、湖北石首长江大桥(2018)和湖北嘉鱼长

江大桥(2018)上成功应用;设计和实施用UHPC加固预应力混凝土箱梁桥主梁(混凝土强度不足的新建桥梁);为法国设计的24米、27米跨大跨预应力UHPC(RPC)屋面梁进行审核优化等。

### 同济大学

同济大学王俊颜研究员团队着重于研究和提升UHPC“应变强化”(应变硬化)性能,使UHPC材料“又刚又韧”,具备更好的裂缝控制能力,与钢筋一起受拉更好的协同性。该团队采用轴拉试验、气体渗透性、显微镜观察等方法研究UHPC裂缝自愈合,所获得的结果更进一步明晰了UHPC裂缝自愈合的特性特征。采用声发射分析研究UHPC轴拉加载损伤发生与发展以及损伤对渗透性影响,采用圆环约束试验分析UHPC收缩特征;与结构团队合作开展UHPC梁结构性能、装配式混凝土框架UHPC连接节点抗震性试验研究等,取得了丰硕研究成果。与UHPC生产、结构设计与工程施工企业合作,该团队的UHPC工程应用案例已达40余项,包括桥梁结构维修加固、结构连接、新型桥梁结构等。依托先进土木工程材料教育部重点实验室,2019年4月王俊颜倡导成立了同济大学UHPC创新团队,成员来自同济大学材料科学与工程学院、土木工程学院和上海市政工程设计院,后续还将引入更多成员扩大团队规模和范围,形成“材料-结构-应用”一体化团队协同创新,更好地发展UHPC技术体系、拓展工程应用。

### 长安大学

针对我国大量公路桥梁需要维修加固的重大需求,长安大学王春生教授团队对钢-混凝土组合加固技术进行了较为系统的试验、理论与应用研究,开展了从模型梁、足尺梁到实桥的系列跨尺度试验研究,形成完整的组合加固技术体系,并成功实施了多座混凝土桥梁的组合加固工程,取得良好技术、经济效果。在现有加固技术基础上,学习借鉴瑞士加固技术,王春生团队研究使用UHPFRC材料进一步改进提升组合加固的技术、经济效果。经过系统性试验研究,包括足尺混凝土板、T梁加固的承载力试验,不同组合加固方法对比,数值与理论

分析,以及工程实践,表明UHPC组合加固技术在混凝土结构裂缝控制、全截面(原结构与加固结构)共同工作与承载、减小加固结构自重(减幅达50%)等方面具有显著优势,采用预应力技术还能再提升加固效果。该技术体系的应用,可参考长安大学编制的陕西省地方标准SDBXM 39—2019《超高性能纤维混凝土组合加固桥梁设计与施工技术规程》。

### 福州大学

福州大学陈宝春团队的UHPC(RPC)研究始于2001年,已对UHPC材料和结构性能开展了大量试验研究,如利用福建地方低成本、循环使用材料制备UHPC,研究粗骨料、纤维(掺量、形状、尺寸及混杂)对UHPC材料性能的影响,研究分析抗压强度的试件尺寸效应和优化获得狗骨抗拉试件形状与尺寸,成为多个团体和地方标准的试验方法依据;开展钢筋UHPC、预应力UHPC受弯、受剪、受压等构件的研究,提出相应的计算公式,为UHPC结构应用打下理论基础。提出将UHPC用于海洋环境钢筋混凝土桥墩外层设想,相应试设计和分析表明具备高可行性;开展了系列UHPC结构创新研究,如钢筋UHPC拱、素UHPC拱的试验研究和跨径160~600米UHPC拱桥的试设计,UHPC应用于整体桥、无缝桥的基础研究,钢管UHPC柱和高强钢管UHPC柱以及新型复合柱的研究等。设计了2015年建造的福州大学校园UHPC拱桥,该桥跨径10米、UHPC拱圈宽2米、厚10厘米;设计了2015年建造的国内第一座公路UHPC桥,该桥位于京港澳高速公路石安段改扩建工程K34+690处,跨径布置为4米×30米连续小箱梁,全长120米,桥宽为8米,斜交角为45度,并进行了一片30米箱梁的足尺破坏试验。

### 武汉理工大学

武汉理工大学水中和教授、余睿研究员团队开展了高水平的UHPC基础理论研究与工程应用实践。基础性研究包括UHPC材料低环境负荷制备、功能设计与调控,提出了生态型UHPC材料的设计理念,并建立起科学智能的配制方法,其中多项研究,如利用工业尾矿降低水泥用量、利用纤维运动模式改善纤维分布和提高纤维

效率、利用天然多孔材料作为UHPC内养护材料减少收缩等,均取得很好效果。该团队参与建造了我国第一个UHPC-混凝土复合结构的海洋漂浮平台。利用UHPC材料的抗腐蚀性、抗冲击性能,良好的解决了漂浮平台的服役寿命与安全性。正在开展的研究项目包括UHPC建造国防工程的防护掩体及工事,深远海建筑材料耐久性暴露试验等。

### 东南大学

在已故孙伟院士带领下,东南大学很早开始开展RPC的研究,发展生态型RPC,并在军事工程领域应用。王景全、刘加平教授等团队开展UHPC材料与结构性能研究,致力于构建UHPC材料性能-设计理论-结构体系,研究粗骨料尺寸、含量对UHPC抗弯、抗拉性能影响等。

### 哈尔滨工业大学

哈尔滨工业大学长江学者郑文忠教授团队较早开展了RPC制备与应用技术研究,研发出立方体抗压强度达250MPa的RPC,提出RPC力学指标取值方法和建立高温下/后RPC单轴受压本构关系计算模型。吴香国教授团队构建了基于纤维参数的UHPC单轴受力应力应变关系表达,研究提出了钢筋UHPC构件、预应力(先张/后张)UHPC构件、预制预应力UHPC叠合板组合梁弯剪设计方法,开展UHPC免拆模壳复合构件设计方法研究。相关成果在国内外人行桥、公路桥梁、油田管线跨越桥等多项工程以及材料性能改性设计中得到应用。研究提出UHPC复合外墙挂板,实现了轻质、高强、耐久、装饰、保温一体化设计目标,并在既有建筑墙体节能改造等工程中得到了应用。研究提出的叠合板用UHPC-RC复合底板显著提高了结构耐久性,在某大型体育场馆叠合板工程中得到了应用。研究提出的仿石材UHPC制备技术,目前已经进入工程小试阶段,为装饰石材UHPC替代技术奠定了基础。2017年,由哈尔滨工业大学主持编制中国建材联合会和CCPA标准《超高性能混凝土结构设计技术规程》,目前已进入征求意见阶段。

### 北京交通大学

北京交通大学朋改非教授团队自2007年开始UHPC

的研究工作,深入研究了含粗骨料UHPC、普通UHPC和RPC的高温损伤特征、抗火性特征及其抗火性改善方法与机理,研制了新型UHPC,提出了高温爆裂的主要机理及其改善方法与机理等,为制备高抗火、耐高温UHPC建立理论和技术基础。创新研究成果之一为组合养护技术,提出了一种热水养护与干热养护相结合的新方法,无需采用蒸压釜进行蒸压养护而可以达到蒸压养护的效果,为优化UHPC性能、简化制备设备与工艺奠定了基础。针对UHPC的组合养护,开展了深入的微观试验研究,与宏观性能研究相印证,建立了组合养护优化UHPC性能的机理理论,相关研究论文发表在国际顶级期刊《Cement & Concrete Research》,研究成果获发明专利授权一项。在常规采用纤维的方法之外,提出了解决UHPC高温爆裂问题的组合养护新方法。目前,正在开展组合养护与内养护剂优化UHPC性能以及组合养护技术实用化等研究。

#### 南京理工大学

南京理工大学赖建中教授团队专注于抗爆、抗侵彻超高性能水泥基复合材料(UHPCC)的研究与开发。通过试验观测、理论分析和数值模拟,提出了新型超高性能水泥基复合材料抗多次冲击优化设计及制备的关键技术,成功制备具有抗多次冲击能力的UHPCC。采用不同尺度、不同品种的纤维和高强骨料混杂增强技术,制备出了抗侵彻UHPCC,并在实验基础上提出了UHPCC多次侵彻深度计算方程,模型计算结果与实测数据非常接近。采用有限元模拟技术研究了侵彻冲击下弹靶作用全过程,结果表明靶体强度、骨料间距、弹头形状和侵彻速度对靶体侵彻破坏形态、应力波传播、损伤分布有显著影响。通过选择合适的骨料间距和混凝土本构参数,计算模拟的侵彻深度和弹坑直径与采用搅拌-灌注复合工艺制备的双层和三层UHPCC靶体的实测结果十分吻合。研究成果在国防和人防工程、核电站防护、核废料固封、反恐抗爆工程等领域有广泛的应用前景。

#### 清华大学

清华大学覃维祖教授在1999年撰文介绍RPC并指导

学生开展相关材料研发,此后清华建材团队一直活跃在UHPC研究应用和标准化工作领域。闫培渝教授主持编制了首个标准GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》;路新瀛教授主持编制了中国建材联合会和CCPA团体标准T/CBMF 37—2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》,组织了中国第一次UHPC材料性能的多实验室平行试验,以此为基础确定了科学简洁先进的UHPC基本性能要求与分级,并建立起先进的适合于UHPC抗渗与抗拉性能测试的试验方法。

### 三、中国UHPC的标准化工作

#### 1. 中国UHPC(或RPC)标准化概况

中国UHPC的标准化工作起始于2006年,即铁道部技术文件《客运专线活性粉末混凝土(RPC)材料人行道挡板、盖板暂行技术条件》。2015年编制颁布了国标GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》,以及广东省交通运输行业地方标准GDJTG/T A01—2015《超高性能轻型组合桥面结构技术规程》。

从2016年开始,中国UHPC相关团体标准的编制工作密集展开,中国进入UHPC团体标准体系建立快速发展阶段,阻碍UHPC工程应用的标准规范“瓶颈”不久将会消失,促进UHPC应用和行业发展。已编制完成、颁布的团体标准有(不完全统计):

——湖南省工程建设地方标准DBJ 43/T 325—2017《活性粉末混凝土结构技术规程》

——中国建材联合会和CCPA标准T/CBMF 37—2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》

——陕西省地方标准SDBXM 39—2019《超高性能纤维混凝土组合加固桥梁设计与施工技术规程》

——河北省地方标准DB 13/T 2946—2019《超高性能混凝土制备与工程应用技术规程》

在编的或尚未发布的团体、行业标准有(不完全统计):

——中国建材联合会标准《超高性能混凝土现场浇筑施工技术规程》、《预制超高性能混凝土构件生产技

术规程》和《超高性能混凝土结构设计技术规程》

——福建省工程建设地方标准《超高性能混凝土制备与工程应用技术规程》和《超高性能混凝土桥梁设计与施工技术规程》

——中国公路学会《超高性能混凝土加固桥梁技术指南》

——中国工程建设标准化协会标准《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》、《超高性能混凝土结构规程》、《建筑及道路工程超高性能混凝土应用技术规程》和《公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程》

——交通部行业标准《公路桥涵超高性能混凝土应用规范》

——广东省公路学会标准《预应力(无腹筋)超高性能混凝土梁技术规程》，等。

## 2. 中国建材联合会CBMF/CCPA的UHPC团体标准

CCPA正在组织编制和建立通用性的UHPC标准规范体系，2018年完成并发布了T/CBMF 37、T/CCPA 7—2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》，设计、预制和现浇施工规范完成了征求意见稿，待编制UHPC预混料产品标准完成，就建立起了基本的UHPC团体标准体系。

T/CBMF 37—2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》定义了UHPC，即：“超高性能混凝土是指兼具超高抗渗性能和力学性能的纤维增强水泥基复合材料”。该定义虽然是描述性的，但对UHPC材料的性能要求是量化的，体现在标准中各等级UHPC需要满足的技术要求。该标准编制，贯彻的原则是“简洁实用、国际先

进和不限创新”，基于对UHPC性能分析、国外标准调研、开展多实验室平行试验与结果分析，以及广泛征求意见，最终完成。为配合该标准颁布实施，CCPA-UHPC分会与中国建材工业出版社合作出版了新书《超高性能混凝土基本性能与试验方法》，该书汇集了编制同名标准(T/CBMF 37—2018)的基础性和支撑性材料，可作为该标准的应用导读。

## 四、中国UHPC产业发展现状

CCPA-UHPC分会成立至今，共有会员单位58个，其中科研单位5个、高校5个、企业46个、行业组织1家。企业会员主要是UHPC材料、制品、构件研发与生产企业，工程施工企业，原材料(纤维、外加剂、白水泥)生产供应企业，是中国UHPC技术进步、推广应用和产业发展的生力军。以下简要介绍部分CCPA-UHPC会员企业的工作。

### 中交二航局

中交二航局技术中心和武汉港湾研究院，在UHPC材料和新结构开发、施工技术与装备方面开展了大量研究和工程应用实践，填补了一些施工技术中的空白，如依托南京五桥预制UHPC桥面板项目研究发展了含粗骨料UHPC搅拌制备、布料、振捣密实、养护等关键技术，探索优化主要工序的技术参数、确定质量控制要点和方法，建立起完整可行的UHPC构件工厂化预制工艺、生产线装备以及质量保证体系；依托马尔代夫中马友谊大桥(如图2所示)，建立起钢桥面UHPC铺装施工、养护的技术体系，完成总面积近2500平方米的铺装工程；良好完

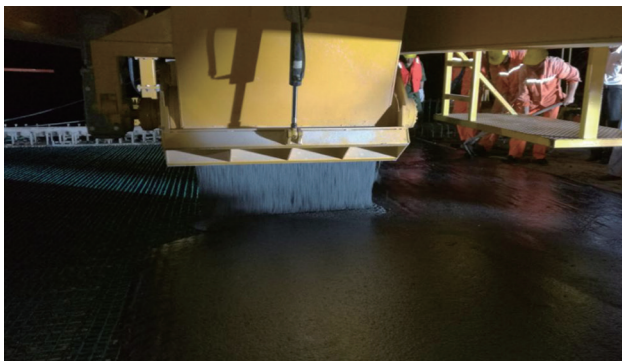


图2 援马尔代夫——中马友谊大桥钢桥面UHPC铺装与建成后(中交二航提供照片)

成了庞公大桥索塔钢-混结合段UHPC浇筑施工和重庆白居寺长江大桥基础-塔柱过渡区“夹心”UHPC浇筑施工。在新型桥梁的研究开发中,将UHPC应用于中小跨径装配式梁桥中,包括钢混组合连续梁负弯矩区桥面板、UHPC主梁、预制混凝土桥面板纵横向接缝;此外,开发了UHPC护筒、UHPC栈桥面板等临时结构产品,并成功应用于工程项目中。目前正研发UHPC大直径管桩、UHPC墩柱外壳(兼做永久模板)、UHPC套筒等多种薄壁薄壳构件,用于提升结构在海洋腐蚀环境中的使用寿命和承载能力。

#### 南京信立达新材料系统工程股份有限公司

研究开发生产UHPC材料和制品构件,发展构件成型技术,在复杂形状和曲面构件的数字化模型制造、UHPC构件成型生产、构件安装以及BIM工程管理等技术达到国际先进水平,高水平高质量完成了深圳悦彩城展示中心、余杭文化艺术中心、上海音乐学院歌剧院等UHPC建筑幕墙项目。

#### 上海复培新材料科技有限公司

研究开发生产UHPC材料和构件、发展施工技术,先后为多个工程供应UHPC材料和完成施工,如南通拱架桥预制和现浇UHPC桥面板、苏州混凝土箱梁桥面UHPC铺装、上海高架桥桥墩和盖梁UHPC加固、宁波机场路南延线预制箱梁之间和梁柱之间的UHPC湿接缝连接(部分标段)、乌鲁木齐高架路装配式桥梁各种预制构件之间的UHPC湿接缝连接等。

#### 广州市玖塘材料科技有限公司

研究开发生产UHPC材料和制品、构件,发展构件成型与安装技术,积极在建筑领域推广装饰与结构一体化、轻质装饰构件等UHPC应用。

#### 广东盖特奇新材料科技有限公司

研究开发生产UHPC材料和制品、构件,为电力电信开发了多种预制UHPC构件产品;研发了易施工、长寿命的高抗冲磨UHPC材料,试验证实UHPC抗冲磨性能远优于传统使用的钢纤维混凝土和高强混凝土,并在两个水工工程中应用。

#### 江苏苏博特新材料股份有限公司

研究开发UHPC材料、外加剂和纤维,发展施工技术,通过UHPC流变调控研究,开发出适合UHPC的外加剂;为南京五桥UHPC桥面板项目研发高弯拉、高弹模、低收缩的含粗骨料UHPC;为上海松浦大桥钢桥面UHPC铺装和宁波机场路南延线预制箱梁的湿接缝连接(部分标段)供应UHPC材料和完成施工。

#### 江西贝融超高性能混凝土技术有限公司

江西贝融循环材料股份有限公司与江西省建筑材料工业科学研究设计院合作设立的江西省UHPC工程技术中心,研究开发生产UHPC材料和制品、构件,发展施工技术,产品应用于市政桥梁和道路维修、现浇建筑构件、透水道路铺装等,为钢桥面铺装供应材料和完成施工。

#### 华新新型建材(武汉)有限公司 / 拉法基豪瑞建材(中国)有限公司

华新新型建材(武汉)有限公司是华新水泥与拉法基豪瑞建材集团合资公司,在工业和基础设施建设领域推广应用Ductal®或超可隆®品牌UHPC产品,在工业建筑预制大跨度预应力UHPC梁、水泥厂钢烟囱防腐改造、耐磨防腐抗冲击地坪成功应用。拉法基豪瑞建材(中国)有限公司则致力于在建筑领域推广Ductal®产品,已在中国用于多个建筑幕墙或外立面项目。

#### 阿尔博波特兰(安庆)有限公司

在中国供应两款白色UHPC预混料产品:AALBORG EXTREME™ Light120和AALBORG EXCEL™。

#### 上海史瑞坦环保科技有限公司

较早开始UHPC在桥梁方面应用推广和工程施工,完成的工程包括上海昌平路跨苏州河新桥、浦东机场停车库连接匝道、兰州东岗立交桥、上海北虹立交桥等的UHPC铺装,上海北横通道防撞墙、宁波机场路县江大桥的UHPC湿接缝连接,上海百曲港大桥铰缝维修以及立交桥边梁UHPC加固等。

#### 砼创(上海)新材料科技股份有限公司

研究开发生产UHPC材料和构件成型技术,为建筑

项目生产和安装UHPC构件,完成了宁波市奉化区未来城科普中心项目的UHPC建筑外立面(如图3所示)。

## 五、中国UHPC的工程应用与市场规模

### 1. 中国UHPC工程应用

以下介绍收集到的中国UHPC工程应用部分案例,也是一些有较大发展潜力的应用。



图3 宁波市奉化区未来城科普中心(上海砼创提供照片)

表1 钢-UHPC(STC)复合桥面工程应用案例(2011~2017)

序号	桥名	位置	跨径/m	桥型	应用年份
1	马房大桥第11跨	广东肇庆	64	简支钢箱梁桥	2011
2	佛陈大桥	广东肇庆	58.51+112.8+58.51	三跨连续钢箱梁桥	2014
3	河西交通枢纽市政配套工程	湖南长沙	54	简支钢箱梁桥	2015
4	通惠河大桥	北京通州	11.5+60+18.5	上承式拱梁组合桥	2015
5	海河大桥	天津	310	独塔斜拉桥	2015
6	北运河大桥	北京通州	30+40+70+40+30	上承式拱桥	2016
7	枫溪大桥	湖南株洲	300	自锚式悬索桥	2016
8	碧石大桥	广东汕头	518	双塔双索面斜拉桥	2016
9	梨川大桥	广东东莞	138	无背索竖琴式斜拉桥	2016
10	焦山门桥	浙江嘉兴	36.5	梁桥挂孔	2016
11	散民路桥	贵州贵阳	32+56+32	钢结构V构	2016
12	广中江高速龙溪互通A匝道桥	广东江门	28+50+28	钢箱梁桥	2016
13	沈荡大桥	浙江嘉兴	72	钢桁架梁	2016
14	五一大桥	浙江湖州	60+128+60	连续钢-混凝土混合梁桥	2017
15	洞庭湖二桥	湖南岳阳	1480	钢桁梁悬索桥	2017
16	桐关大桥	湖南长沙	50+50	连续钢箱梁桥	2017
17	昭华大桥	湖南湘潭	168+228	自锚式悬索桥	2017

摘自邵旭东、曹君辉《面向未来的高性能桥梁结构研发与应用》,建筑科学与工程学报,2017年9月。

### 钢-UHPC复合桥面

钢-UHPC复合桥面2011年首次在广东肇庆马房大桥应用,截至2018年11月已在中国用于60余座钢桥,桥面面积超过百万平方米。表1是2011~2017年17个工程应用案例。湖南大学邵旭东教授团队发展的钢-UHPC复合桥面结构,很好地解决了困扰钢桥的技术难题,增强了钢桥的市场竞争力。钢-UHPC复合桥面已进入规模化、可持



续应用阶段,也是中国继铁路电缆沟盖板(RPC盖板,现在已停用)之后,目前UHPC用量最大的工程应用。

### 装配式桥梁预制构件的结构连接

在美国和加拿大,UHPC现在最主要的应用为快速桥梁施工(ABC),即用于装配式桥梁预制构件的湿接缝连接。采用UHPC湿接缝进行构件之间“结构连接”,大幅度减小接缝宽度、简化接缝配筋、不需要钢筋焊接,显著减少了现场施工量和难度,能够提高装配化率、施工效率和经济性,更重要的是:大幅提升了装配结构的性能,包括抗疲劳、抗震、抗裂性能以及耐久性,克服了传统方式连接构件“连接节点弱”的难题。

上海市政、上海城建设计院已经在一些高架桥工程中率先设计采用预制装配方式快速施工,并使用UHPC湿接缝连接构件,如上海2016年建设的S3公路先期实施段高架桥部分小箱梁的纵向接缝连接(长3.1公里,用预制装配方法施工仅用了100天建成),上海嘉闵高架预制装配式结构的梁-梁之间、盖梁-墩柱之间以及墩柱-承台之间的接缝连结,宁波机场路南延市政道路和轻轨一体化高架箱梁纵向接缝连接,均为UHPC湿接缝连接(如图4所示)。预制装配式桥梁与UHPC湿接缝组合的

技术体系,因建设速度快、桥梁性能和质量好,预计未来会在中国获得越来越多的应用,同时成为UHPC应用的重要领域。

### 钢-UHPC组合梁的UHPC桥面板

近几年,钢-UHPC组合梁在中国桥梁结构创新与应用方面取得了重大进展。2018年建造的南通中央森林公园钢管拱桥(宽6米、跨径32米),采用了预制和现浇80毫米厚UHPC桥面板;2019年正在施工建设的两座大型桥梁工程——南京长江五桥和湖南益阳青龙洲大桥,均采用了预制UHPC桥面板,然后与钢箱梁组成钢-UHPC组合梁。

南京长江五桥跨越长江段长4130米,主桥为三塔双跨组合梁斜拉桥,跨径布置为80米+218米+2×600米+218米+80米。其钢-UHPC组合梁标准节段尺寸为长14.6米、宽35.6米、高3.6米(组合梁中心线处),制造方法为:预制生产钢筋UHPC(含粗骨料)板,标准板尺寸为宽6.92米、长11.3米、厚0.17米;每个组合梁节段有4块UHPC预制板,在工厂采用UHPC湿接缝相互连接、与钢箱梁叠合连接。组合梁架设安装后,梁段UHPC板横向在现场用UHPC湿接缝连接。该工程UHPC用量为预制板(494块)



图4 箱梁纵向UHPC湿接缝施工(上海复培提供照片)

6569立方米、工厂和现场湿接缝分别为4736立方米和365立方米,总用量达11670立方米,是迄今世界上UHPC用量最大的桥梁工程。该项目UHPC预制板在中交二航局第四工程公司芜湖裕溪口预制场生产,为此二航局新建了适合UHPC拌制、输送、布料、振捣和整平的设备与生产线,使UHPC构件生产的自动化水平、生产效率和质量控制能力都提高到了新水平(如图5所示)。

湖南益阳市青龙洲大桥是跨越资江自锚式悬索桥,跨径布置为60米+110米+260米+110米+60米,主梁为钢-UHPC轻型组合梁,梁宽36.5米。其桥面板为钢板条与UHPC矮肋板的组合结构,顶板厚100毫米,纵肋高120毫米(含8毫米厚钢板条)。

#### 混凝土桥面铺装

2019年完工的苏州东环快速路跨运河桥,主桥为70米+120米+70米预应力混凝土箱梁桥。为了提高桥梁负弯矩区抗裂能力和耐久性,在桥墩墩顶两侧约16米范围,原设计70毫米厚C40普通混凝土铺装用UHPC铺装替代,施工如图6所示。

在混凝土桥梁上采用UHPC铺装,具有广泛应用价值。瑞士洛桑理工Brühwiler教授倡导,并在世界范围获得认可和应用的桥梁维修加固方法,是在混凝土桥面铺

设钢筋UHPC层——这是一个多重功能层:提高桥梁强度、刚度,抗裂、防水和保护普通混凝土,从而提高桥梁服役寿命。新桥使用UHPC铺装,UHPC层的多重功能从新桥就发挥作用,有助于提升了桥梁性能、质量和使用寿命。

#### UHPC梁桥

马来西亚发展了多种全截面UHPC梁为主梁的桥梁,有效发挥UHPC力学性能使UHPC桥造价低于传统钢筋混凝土桥。因造价很有竞争力,马来西亚现在是UHPC梁桥数量最多的国家。在其他国家如法国、美国、韩国和中国(中国的工程应用案例见表1),也都发展和建造了UHPC梁桥,但都没有进入实质性推广应用,原因之一是初始造价高于传统材料和结构的梁桥。开展UHPC桥梁结构创新,或许能改变这种状况。

2018年中路杜拉公司建造中国首座无筋预应力体系UHPC梁桥——广州北环高速扩建F匝道桥。该桥有6片I型后张预应力预制梁,梁高62厘米,顶、底缘宽40厘米,腹板厚10厘米,跨径16米。预制I梁体内未配置纵向钢筋及箍筋(只有后张预应力筋);梁顶之间设置UHPC搭板(作为永久模板),上面浇筑15厘米厚C50钢纤维混凝土桥面板,再铺设2厘米厚沥青超薄磨耗层。据介绍,该



图5 南京长江五桥钢-UHPC组合梁示意图、UHPC桥面板预制生产线(中交二航提供照片)

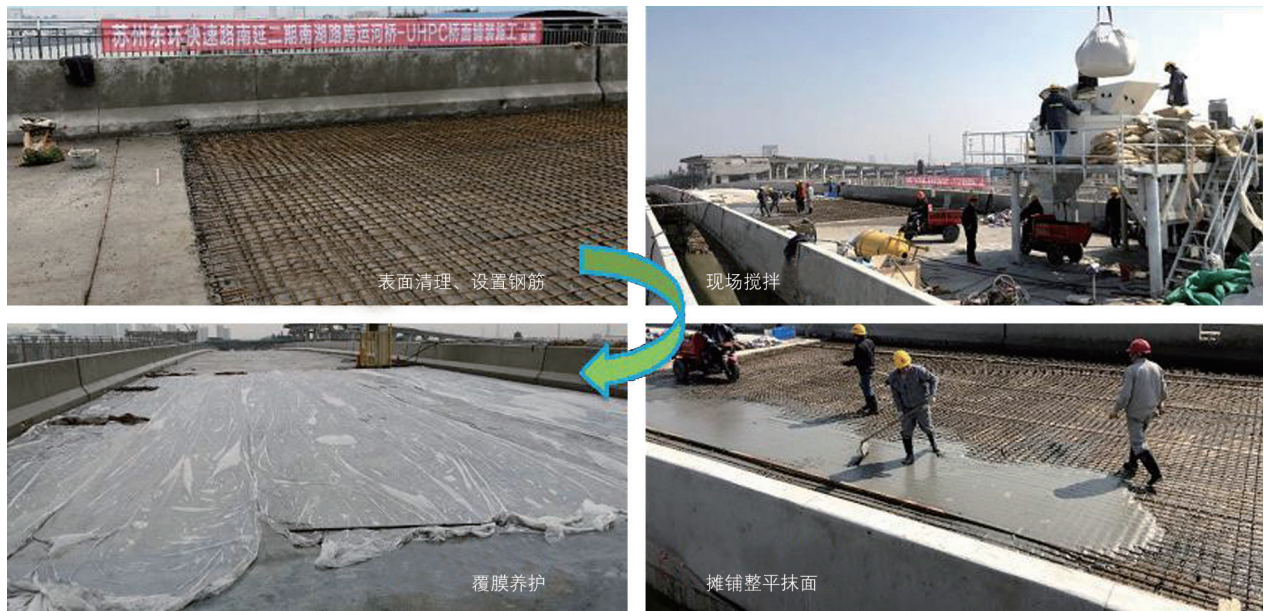


图6 混凝土桥面UHPC铺装施工(上海复培提供照片)

桥预制梁采用UHPC结构替代现在广泛采用的预制小箱梁、空心板或T梁,具有预制装配化、轻型快速化、减轻结构自重(40%~60%)、有效减小建筑高度或提高跨越能力的优势,并能简化施工工艺、提高结构质量,具备经济优势。

#### 水工结构UHPC抗冲磨层

广东盖特奇公司制备的低收缩抗冲磨UHPC,2018年1月和2019年5月分别在两个水工工程用于铺设抗冲磨功能层(厚度分别为10厘米和20厘米)。抗冲磨UHPC层与普通混凝土粘接良好,形成一体化结构,都没有出现开裂、脱空等现象。至今,两个工程的UHPC抗冲磨层状态良好,将成为工程应用UHPC抗冲磨长期性能观察的很好样板。

如果采用全寿命周期成本进行评估,UHPC作为水利水电工程抗冲磨材料具有一定的经济优势。随着材料技术的发展,UHPC的制备成本会进一步降低,性能进一步提升,有望发展成为最优异的水工抗冲磨材料之一。

#### 工业建筑UHPC应用

在工业建筑领域,华新新材用UHPC为几项工程提供了完美解决方案,如华新长山口垃圾预处理厂、十堰环保工厂和云阳环保工厂等工程项目,使用预制工字型UHPC

预应力梁替代钢梁,很好解决了主梁在腐蚀性环境的防腐、耐久问题,同时具有承载能力大、自重轻、耐火、免维护使用寿命长、施工便捷、经济适用等优点。这些UHPC梁,在工厂采用超可隆®预混料制备UHPC,预制生产,常温养护,总计使用3000余吨预混料。在水泥工厂窑尾钢烟囱防腐改造工程中,用喷射法施工UHPC保护层替代传统防腐涂料,借助超可隆®早强、高强、耐腐蚀、耐久等性能,可施工快速,大幅度减小停窑损失,并且有效延长维护维修周期,降低维护成本。时间短、有效周期长等优势。在华新武穴环保工厂的危废联合储库,地坪使用超可隆®作为面层,既能很好抵抗铲车、行车等机械作用的刮蹭、撞击和摩擦,又实现了抗渗和耐化学侵蚀的功效,且施工简单、高效(如图7所示)。

在工业建筑领域,拥有耐高温、耐腐蚀、耐撞击、耐磨等性能的UHPC(通用或专门制备),拥有较大的应用发展空间。

#### 建筑幕墙或外立面

2019年UHPC工程应用的最大亮点在建筑项目,南京倍立达公司在2018年完成中国第一个UHPC幕墙项目——深圳悦彩城展示中心,2019年又完成多个项目(如图8所示)。

深圳悦彩城展示中心幕墙：由弧形镂空板和弧形实心板组成，弧形镂空板尺寸为3000mm×1200mm×30mm、实心板尺寸3000mm×1200mm×20mm，采用UHPC预混料喷射成型。

余杭文化艺术中心幕墙：至今中国最大的UHPC建筑应用项目，幕墙总面积达20000平方米；UHPC板采用预混料浇筑成型。构件板块尺寸不一，平均超过10平方米，最大板块长8米、高3米；预制UHPC板块生产速率最高达700平方米/天，这可能是世界上最高的UHPC板日产量。

南京中海左岸澜庭售楼处UHPC柱廊：室外造型柱，柱子没有横向分缝，UHPC构件单体高8米、宽4米，为一整件预制构件，把柱子的挺拔与顶天立地的气势完美表现出来。UHPC构件采用预混料喷射法一次成型，喷射工艺控制板块厚度，平均厚度仅为25毫米。UHPC构件为带背附钢架的大板构造，通过螺栓柔性连接，避免出现温度应力及干缩应力造成的裂纹。项目采用装配式的干挂安装方法，实现了三维可调，从而保证安装的精度。

上海音乐学院歌剧院幕墙：造型装饰幕墙采用UHPC预混料浇筑成型，常温养护16~18小时后脱模。UHPC材料搅拌完成后，具有优异的工作性能，浇筑在模具中能够完整表现模具造型，同时自流平材料也大大节省人工，操作简便。

温州瓯江路景观项目外立面：复杂构造3D镂空幕墙，采用UHPC预混料浇筑成型。

### 预制装配式建筑的构件连接

在首届CCPA-UHPC论坛清华大学樊健生教授的报告中，统计分析与美国自然科学基金项目(2013~2017)和中文期刊发表的论文(2014~2018)，发现中国UHPC应用研究热点在桥梁上。他介绍，他们团队研究用低收缩高延性水泥基复合材料(LSECC)连接装配式建筑构件，试验证明可提升节点域的抗震

性能(达到现浇结构的抗震水平)，并降低装配建筑的节点施工难度。他建议扩展UHPC应用研究的领域，发挥UHPC材料特长，例如用UHPC连接预制混凝土构件，可以形成“强节点、弱构件”，提高结构抗震性能。

上海建工二建集团装配创新研究所已经开展了相关试验研究和工程实践。针对UHPC与钢筋粘结性能，UHPC湿接缝连接梁(梁-梁节点)受弯性能、柱(柱-柱节点)抗震性能以及梁-柱节点抗震性能等进行了大量基础试验，提出和建立起基于UHPC湿接缝连接的新型预制装配式框架体系PCUS，经过1:1足尺模型荷载试验验证，结构性能达到全现浇结构水平，且节点连接的施工效率提高、成本降低(与套筒灌浆连接对比)。PCUS体系已成功应用于海甸湖庭商品房项目、上海白龙港污水处理厂改造等多个项目。

采用UHPC湿接缝连接预制装配式建筑、桥梁或其他结构的PC构件，能够提高节点连接的质量、性能和可靠性，实现“强节点、弱构件”的装配结构，并降低现场施工难度和成本，具备技术、经济两方面优势，是UHPC最具发展潜力的应用之一。

## 2. 中国如今的UHPC市场规模

从CCPA-UHPC分会会员提供的部分项目与用量信

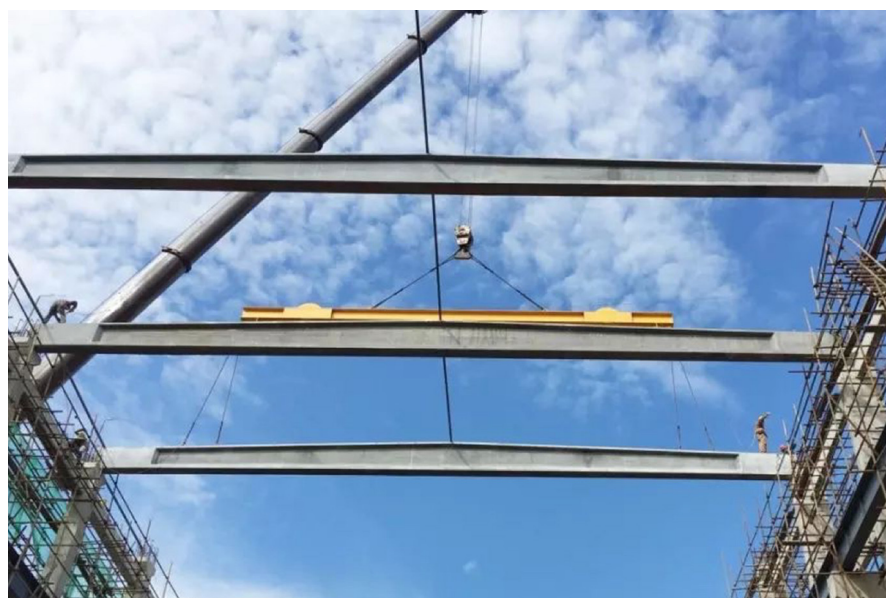
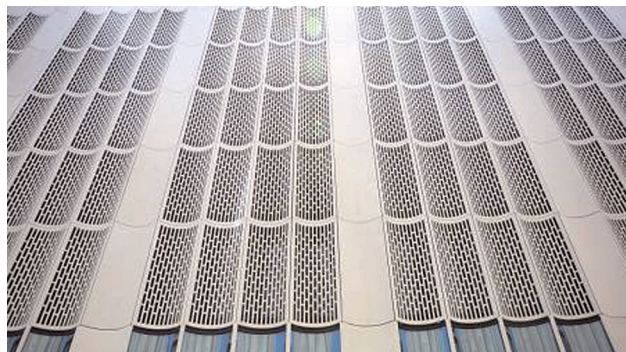


图7 工业厂房预制UHPC预应力主梁、跨径24.54米(华新新材提供照片)



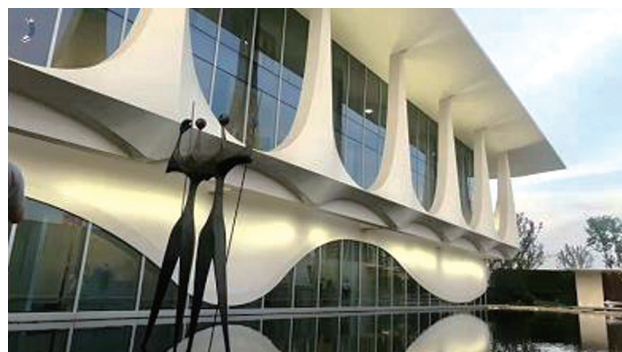
深圳悦彩城展示中心



余杭文化艺术中心



南京中海左岸澜庭售楼处



上海音乐学院歌剧院



温州瓯江路景观

图8 南京倍立达完成项目实景(南京倍立达提供照片)

息,保守估计2019年中国UHPC用量超过3万立方米,使用了逾6.5万吨UHPC预混料。在上述各种应用中,桥梁应用占据了绝大多数。

## 六、未来发展建议

UHPC在不同国家经历了四十年、三十年或二十年技术发展和推广应用后,由于国情和需求差异,UHPC应用的进展有较大差异,其中的成功应用值得我们学习借鉴。丹麦UHPC的规模化应用主要在建筑领域,包括预制

UHPC楼梯、阳台、幕墙、预制构件湿接缝连接;此外,在风电钢塔筒的灌缝连接方面,丹麦产品性能和应用技术也居于世界领先地位。法国UHPC研发与应用涉及领域较多,包括多种结构形式公路桥、建筑构件和幕墙、工业建筑、维修加固、水利工程抗冲磨等,形成的UHPC产业规模最大,如今支撑UHPC产业的主要是建筑应用,包括大型建筑项目如体育场、高铁站等一些创新结构与幕墙建筑;桥梁翻新、维修加固可能会成为另一支撑性应用。韩国在桥梁和建筑都有一些创新性应用;马来西亚、美国

和加拿大的研究应用主要在桥梁方面。

中国经历二十年的研究应用, UHPC在钢桥面铺装、钢-UHPC组合桥梁的应用规模已经走在了世界前列; UHPC在装配式桥梁和建筑构件的结构连接应用已经开始, 且桥梁结构连接在UHPC应用体量的占比较大, 期待技术体系建立完善后, 会进入可持续规模化应用。我们还拥有许多UHPC技术与应用发展空间, 建议重点在以下方面开展工作:

### 1. 装配式建筑

中国正在大力推进建筑产业化、装配化, UHPC除用于湿接缝结构连接具有技术和经济优势外, 使用UHPC生产部分构件如楼梯、阳台、轻质“三明治”保温墙板, 设计应用合理, 也可以从减小构件重量、减小建筑整体自重、降低运输吊装安装施工成本等方面获得经济性, 并提升装配式建筑质量。这类构件与装配式钢结构建筑结合应用, 可形成相互补充的装配建筑体系。在这方面, 丹麦取得非常好的应用效果, 我们也应该在装配式建筑领域发展相应设计、预制生产、结构连接、安装以及相应标准规范等构成的技术体系。

### 2. 结构维修加固

瑞士UHPC应用的主要领域为维修加固, 已经成为最具市场竞争力的桥梁维修加固技术体系, 其技术经济优势也在世界范围获得验证、认可和应用。世界许多国家包括中国都面临大量桥梁老化问题, 需要维修加固或更换, 日本如今就着力发展UHPC桥梁维修加固技术。

中国已经开展了UHPC维修加固研究和应用, 也有了相关地方标准(如陕西省地方标准SDBXM 39—2019), 公路学会标准正在编制, 但还集中在混凝土桥梁方面。还有大量老化的码头、隧道、水利水电、建筑等混凝土结构, 同样面临老化、存在结构缺陷以及不能满足现在对结构承载能力或抗震性要求等各种各样的问题。UHPC维修加固技术与方法具有技术和经济优势, 还会在更多工程领域和更大范围获得应用, 有很大市场发展空间。在该领域, 未来创新发展的内容包括: 适应不同场合、不同结构多样化的UHPC成型施工方法, 快速维修加

固材料和施工技术, 等等。

美国正在开展针对钢桥梁的UHPC维修加固研究, 取得了满意的试验研究结果。应用UHPC进行钢结构的维修加固和保护, 也值得关注和发展相应技术。

### 3. 创新建筑与结构

法国在建筑和结构创新方面走在世界前列, 重要的原因是建筑师、结构工程师较早参与到UHPC创新和应用的行列中。我国拥有数量众多的建筑师和结构设计师, 如果他们中更多人了解UHPC、参与到UHPC建筑设计和结构设计中来, 会打开一个很大创新发展空间。为此, 需要更多开展UHPC知识普及、标准规范宣传等活动。

从2019年初开始, CCPA-UHPC分会与预拌混凝土分会合作建立了微信公众号“混凝土和UHPC”。通过公众号向社会大众推广宣传UHPC基础知识、相关技术、产品和工程应用。欢迎有更多人来利用这个平台, 投稿介绍自己或所见所闻的UHPC相关技术和应用, 加入UHPC推广宣传活动, 共同推动UHPC在中国的发展进步。

UHPC为水泥制品及工程结构的性能改善和寿命提升、为创造开发新产品和新结构、为工程结构连接以及维修加固等提供了性能更好的材料, 在更高层次上满足我们对产品、对结构、对工程的需求, 如轻质高强、高耐久或长寿命、免维护、美观、防火、绿色低碳、低资源消耗等等, 对推动行业向高质量、环境生态友好方向发展, 对水泥制品和工程结构升级换代具有重要意义。

我们正走在UHPC成长的路上, 把UHPC发展好并在合适的地方用好, 我们需要扎扎实实建立起科学先进的UHPC技术体系, 包括材料制备、材料性能与试验、结构设计与优化、成型施工、质量控制与验收以及标准规范体系; 需要研究发展适合不同类型工程应用、施工特点和需求的UHPC材料; 需要让建筑师、结构设计师、水泥基材料产品企业、工程业主了解UHPC并参与开发UHPC应用; 需要在模型制造、现场生产浇筑装备、成型养护施工工艺等各方面提升技术和技艺水平等。汇集起众人的智慧、技能和努力, 推动UHPC的创新与技术进步, 使中国成为UHPC发展的新引擎, 并有所成就。🔗