

文章编号:1673-2049(2019)02-0010-11

超高性能混凝土应用进展

陈宝春^{1,2}, 韦建刚^{1,2,3}, 苏家战^{1,2}, 黄伟^{1,2}, 陈逸聪^{1,2}, 黄卿维^{1,2}, 陈昭晖^{1,2}

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 可持续与创新桥梁福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108; 3. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要:针对超高性能混凝土(UHPC)近年来成为土木工程领域研究热点的情况,首先统计分析了中国国家自然科学基金资助超高性能混凝土研究项目的数量,介绍了国际上主要的UHPC学术会议,然后综述了各国UHPC实际工程应用进展和标准制定进展,最后对UHPC最低抗压强度、定义、工程应用和标准制定进行了讨论。结果表明:中国UHPC研究的广度、深度与系统性不断增强,已成为国际UHPC研究的重要力量,当前和未来一段时间内,UHPC实际工程应用将主要集中在亚洲国家;作为实际工程应用重要基础的UHPC标准(含规程、规范和指南)在不断的制订与更新之中,中国有关UHPC地方、协会与团体标准的制定呈井喷式现象,其中中国依托亚洲混凝土联合会,正在编制的亚洲UHPC材料和结构设计指南将成为第1个有关UHPC的国际团体标准;目前仍无法设计一个全球均可接受的UHPC强度最低要求和UHPC定义;为取得更好的经济效益和推广应用,建议中国的UHPC抗压强度最低要求定在120~130 MPa之间;中国在UHPC研究与应用方面具有广阔前景。

关键词:超高性能混凝土;工程应用;标准制定;强度;纤维增强

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

State-of-the-art Progress on Application of Ultra-high Performance Concrete

CHEN Bao-chun^{1,2}, WEI Jian-gang^{1,2,3}, SU Jia-zhan^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}, CHEN Yi-cong^{1,2},
HUANG Qing-wei^{1,2}, CHEN Zhao-hui^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Sustainable and Innovative Bridge Engineering Research Center of Fujian Province University, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 3. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China)

Abstract: In view of the fact that ultra-high performance concrete (UHPC) became a research hotspot in the field of civil engineering in recent years, the number of UHPC research projects funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) was analyzed. The main UHPC academic conferences in the world were introduced, and the progress of UHPC practical engineering application and standard formulation in various countries were summarized. Finally, the minimum compressive strength, definition, engineering application and standard formulation of UHPC were discussed. The results show that the breadth, depth and systematicness of UHPC research in China are increasing, and it has become an important force in international UHPC research. At present and in the future, UHPC practical engineering applications will mainly focus

收稿日期:2018-12-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0705400)

作者简介:陈宝春(1958-),男,福建罗源人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:baochunchen@fzu.edu.cn。

on Asian countries. As an important basis for practical engineering applications, the UHPC standards (including regulations, specifications and guidelines) are constantly being formulated and updated. The formulation of UHPC local, association and group standards in China is blowout. Among them, China, relying on the Asian Concrete Federation, is compiling the Asian UHPC material and structure design guidelines, which will become the first international group standard on UHPC. It is still impossible to design a globally acceptable UHPC minimum strength requirement and UHPC definition. In order to obtain better economic benefit and popularize application, it is suggested that the minimum compressive strength of UHPC in China should be set between 120-130 MPa. UHPC has broad prospects in research and application in China.

Key words: ultra-high performance concrete; engineering application; standard formulation; strength; fiber reinforced

0 引言

1994年Larrard等^[1]提出超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)概念后, UHPC的应用与研究得到持续发展,近年来已成为土木工程领域的研究热点。在中国工程院战略咨询中心等单位发布的《全球工程前沿报告2018》^[2]中,超高性能与智能水泥基复合材料列在土木、水利与建筑工程中工程前沿发展态势的第2位。在结构自身和社会可持续发展对高性能材料要求的双重压力下, UHPC研究在中国的升温尤其明显。2014年陈宝春等^[3]发表了1篇相关文献综述,截至目前是《建筑科学与工程学报》全文下载次数最高的论文之一。自2007年以来,国家自然科学基金共资助相关课题88项,其中,青年基金31项、面上基金51项和重点基金4项,重点基金项目具体为:《超高性能混凝土制备和应用基础研究》、《超高性能混凝土制备与工程应用基础研究》、《生态纳米超高性能混凝土的制备与应用基础》和《复杂作用下钢管超高性能混凝土力学性能及设计计算理论研究》。从图1可以看出,资助项目呈急速上升趋势。

2018年,科技部与相关部门在2018年“绿色建筑及建筑工业化”重点专项中设立了“水泥基高性能结构材料关键技术研究与应用”项目,江苏苏博特新材料股份有限公司牵头,湖南大学、福州大学、东南大学、同济大学、清华大学等共15所高校、科研院所和行业龙头企业组成的项目组获批该项目。这是中国有关UHPC的第1个国家级重大项目,它的开展有望改善中国过去在UHPC研究方面以小项目、分散研究为主的现象,提高研究的广度、深度和系统性,推动工程应用的发展。

随着UHPC应用与研究不断推进,相关国际学

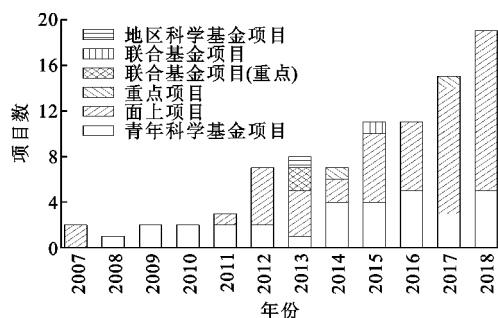


图1 2007~2018年国家自然科学基金资助的有关UHPC研究项目数

Fig. 1 Number of UHPC Research Projects Funded by NSFC from 2007 to 2018

术交流也日益活跃。2004年,德国在卡塞尔举办了第1届UHPC和高性能建筑材料国际学术会议(International Symposium on UHPC and High Performance Materials in Construction),此后,每隔4年固定在卡塞尔举办1次,最近一届为2016年举办的第4届,下一届将于2020年举办。2009年法国在马赛举办了第1届超高性能纤维增强混凝土国际会议(International Symposium on Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete, UHP-FRC),此后,也是每隔4年固定在法国境内举办1次,最近一届为2017年在蒙彼利埃举办的第3届,下一届将于2021年举办。2016年,美国举办了第1届UHPC国际学术研讨会(International Interactive Symposium on UHPC),以后也计划每4年1届,为了与其他相关会议错开,第2届将于2019年举办。2016年,中国在长沙举办了第1届UHPC材料与结构国际学术会议(International Conference on UHPC materials and Structures),每2年举办1次,2018年的第2届已在福州举办,下一届将于2020年在南京举办。至此,国际上形成了在德

国、法国、美国和中国分别举办的 4 个主要 UHPC 国际学术会议,除中国为 2 年 1 届外,其他均为 4 年 1 届。此外,还有一些以 UHPC 为主题的会议,如 2015 年在印度举办的亚洲混凝土协会(ACF)的第 1 届学术研讨会,2016 年在中国举办的第 3 届井冈山论坛之“高性能与超高性能混凝土技术进展”技术论坛。

笔者参加了最近一轮的 4 个相关会议,参与了“水泥基高性能结构材料关键技术研究与应用”项目的申报和数个相关规程的编写。笔者根据在此过程中整理的资料,尤其是参与筹办第 2 届 UHPC 材料与结构国际学术会议(福州)期间获得的信息,对 UHPC 的应用进展进行综述。本文的综述着重于应用方面,有关具体研究的进展见文献[3]。虽然文献[3]发表 4 年来,相关研究有了新的进展,但总体情况变化不大,该文献仍有参考意义。

1 实际应用进展

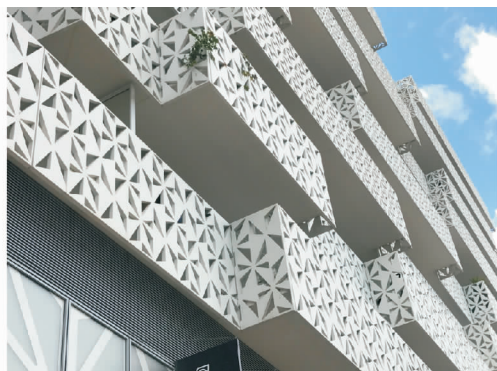
1.1 欧洲

法国是较早开展 UHPC 研究的国家。20 世纪 90 年代,法国 Bouygues 公司研发的活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)[4-5]被认为是 UHPC 的一种,现有许多研究仍采用这一名称。1998 年,法国在卡特农核能发电厂中采用了预制预应力 UHPC 梁。此后, UHPC 在建筑结构、幕墙、外墙挂板、屋盖和桥梁等应用不断增多[6]。图 2 为 UHPC 在法国的几个应用实例照片。法国社会对 UHPC 普及率与认可度较高,它被认为是建筑行业潜在的新“革命性”材料,尤其得到建筑师的青睐, UHPC 在几个大型建筑的幕墙中的应用影响极大,是其应用范围较广、规模较大的主要原因。

UHPC 的发展历史更早可追溯到 20 世纪 70 年代丹麦 Densit 提出的密实增强复合材料(CRC)。它提出后被用于一些预制阳台、表面硬化处理和注浆等[7],但近年来丹麦在 UHPC 应用方面的进展并不突出。

2005~2013 年,德国卡塞尔大学在德国国家研究基金会(DFG)资助下,联合 20 余个单位,对 UHPC 进行全面研究。在此基础上,修建了第 1 批跨度分别为 7, 9, 12 m 的预制预应力 UHPC 桥梁。2007 年建成了加特纳普拉兹(Gartnerplatzbrücke)人行桥[8]。

2004 年以来,瑞士开展了 UHPC 可行性和工程应用研究,其中,在桥梁工程中,新桥[图 3(a)]和



(a) 建筑外墙挂板



(b) 火车站屋盖



(c) 斜腿刚构桥

图 2 法国蒙彼利埃 UHPC 应用实例

Fig. 2 Application Cases of UHPC in Montpellier, France
旧桥均有应用。最大的旧桥加固项目是 Chillon 高架桥[图 3(b)]。该桥采用 $2\,400\text{ m}^3$ 的 UHPC 对桥面板进行重新铺装,并对结构进行了加固修复[9]。

此外,西班牙、奥地利、捷克和意大利等国也都有 UHPC 应用的工程实例,如西班牙于 2003 年引进了 UHPC,用于马德里雷纳索非亚博物馆(Reina Sofia Museum in Madrid)的复合结构构件[10]。在桥梁方面,奥地利建成了跨径 70 m 的公路拱桥[11],捷克建成了跨径 156 m 的人行斜拉桥[12]。此外, UHPC 在欧洲建筑、核电、市政和海洋等工程方面均有所应用。

1.2 北美

1994 年,北美开始 UHPC 的研究。1997 年,加



(a) UHPC人行桥



(b) Chillon高架桥UHPC加固(Eugen Brühwiler提供)

图3 瑞士 UHPC 应用实例

Fig. 3 Application Cases of UHPC in Switzerland

拿大建成了世界第1座 UHPC 桥梁,即魁北克的舍布鲁克(Sherbrooke)人行桥。此后,加拿大在 UHPC 桥梁结构方面的应用进展不大,主要集中在桥梁湿接缝中。2001年,美国联邦公路署(FHWA)启动了一项研究项目,旨在评估 UHPC 并将其引入美国公路项目中。自2006年以来,FHWA 发布了几份关于 UHPC 的研究报告与文件,包括预制桥梁构件现场浇筑连接的设计指南,均可在其网站上直接下载。

目前,北美已建成200多座使用 UHPC 材料的桥梁,大多数是用于接缝中,其中规模最大的项目是普拉斯基高架桥(Pulaski Skyway),该桥为4车道,总长超过5 km。此外,在 FHWA 资助下,爱荷华州立大学发布了 UHPC 华夫桥面板桥梁的设计指南。此外,UHPC 还用于其他预制建筑和结构,如围护体系、安全产品、废水处理槽、市政设施、地下公用事业产品、檐篷、支柱和立柱(用于轻轨的中转站)等^[7,13]。

1.3 澳洲与亚洲

1999年,澳大利亚 VSL 发起 UHPC 开发项目。早期的重要项目之一是新南威尔士牧羊人高速公路桥(Shepherds Highway Bridge,建于2004年),大桥采用现浇桥面预应力 UHPC 的 I 形梁。

20世纪末,UHPC 传入亚洲,多国开始了研究。日本的应用较早开展,包括人行天桥、公路桥、沟渠盖、桥面板修复、隧道衬砌和预制构件,其中建成的

桥梁有14座,比如 UHPC 预制梁用于东京湾中的羽田机场(Haneda Airport)跑道桥。然而,近些年日本 UHPC 的应用进展不大。

21世纪初,韩国开始 UHPC 研究,并于2002年首次采用 UHPC 在首尔建成了仙游(Seonyu)人行桥,该桥由法国设计。自2004年以来,韩国建设技术研究院(KICT)对该桥进行了全面的结构分析、材料测试、试验实施和设计准则的编写^[14-16]。韩国在“超级桥梁200”(SUPER Bridge 200)计划资助下,2012年自主建成第1座 UHPC 公路桥(宽5 m,长11 m),同时以斜拉桥为应用对象,开展了跨径分别为200,800,1 000 m 斜拉桥试设计研究,并修建了全世界第1座 UHPC 斜拉桥(Super Bridge I)和第1座公路斜拉桥(LEGO 桥,跨径为100 m)。

2006年,马来西亚新成立的 Dura 科技有限公司致力于 UHPC 工程应用,其中以预制预应力桥梁为主。经过2007~2010年的研发期后,第1座桥于2010年建成,目前已建成107座^[17],在世界各国桥梁结构中应用最多。部分桥梁见图4,其中最大跨径的是 Batu6 桥[图4(c)],单跨跨径100 m。目前的主流产品是工厂节段预制梁段,现场穿预应力索张拉形成 U 形梁,现浇钢筋混凝土桥面板,桥台采用整体式桥台。在综合造价上 UHPC 梁低于普通预应力混凝土梁,这是其最突出的优势。

越南在最近10年才开始 UHPC 的研究,近3年已建了15座人行桥,以双 T 形梁为主,跨径8~18 m^[18]。主梁内不配普通钢筋,采用先张法预应力筋,且梁采用预制吊装,避免了搭设支架,从而简化施工,降低造价,进而促进应用。此外,越南还将 UHPC 用于建筑物的外挂墙板、楼梯、房屋结构、沟渠等。图5为越南 UHPC 人行桥。

中国在 UHPC 提出不久,就开始了相关的研究。2003年开始,UHPC 被应用于沟槽盖、桥梁、声屏障、人行天桥、高速公路桥面和维修等领域。在高速铁路电缆槽盖板中的应用曾是世界上 UHPC 用量最大的工程之一,截至2015年3月,应用的 UHPC 盖板约 $21.4 \times 10^6 \text{ m}^2$,UHPC 材料约 $535 \times 10^3 \text{ m}^3$,原铁道部还专门颁发了相应的暂行技术条件规范。然而,由于技术门槛低,近年来质量下降,已基本停止使用^[19]。在中国,较早应用于桥梁主体结构的是2座铁路低高度梁桥,在公路、市政桥梁和人行天桥的应用也不断增多,目前已知的共有8座,包括第1座4跨($4 \times 30 \text{ m}$)的预制预应力梯形箱梁公路桥^[20]。当前应用最为活跃的是在钢桥的桥面板中,



(a) KT-KB桥



(b) Sekolah Taayah人行桥



(c) Batu6桥

图 4 马来西亚 UHPC 应用实例

Fig. 4 Application Cases of UHPC in Malaysia

自 2011 年在广东马房桥应用以来,共有 20 座桥梁采用了此项技术^[21]。此外,在建筑物外墙挂板、桥梁声屏、轨枕等领域也有应用,如深圳深业上城中心采用了 UHPC 外墙挂板,总面积达 $2\times 10^4\text{ m}^2$,每片挂板宽 1.5 m、高 2.8 m,采用 Ductal 的有机纤维,不用热养护,配有钢筋^[22]。

2 标准制订进展

本文所说的标准包括指南、标准和规范等。标准是实际工程应用的重要基础。

2.1 欧洲

2.1.1 法国

法国在 UHPC 标准制订方面开展得最早。20



(a) 足尺试验模型(非破坏性)



(b) 某实桥

图 5 越南 UHPC 人行桥

Fig. 5 UHPC Pedestrian Bridges in Vietnam

世纪 90 年代末,法国土木工程协会(AFGC)就开始编写 UHPC 的指南,2001 年公布了初版,2013 年修订重发。随后法国标准协会(AFNOR)分别在 2016 年和 2017 年公布了 2 份 UHPC 的标准,内容如下:

(1)NF P 18-710,对欧洲规范 2 的补充—混凝土结构设计:超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)的具体规则(2016 年 4 月 16 日)。

(2)NF P 18-470,超高性能纤维增强混凝土:规格、性能、生产和一致性。

需要指出的是,法国标准以具有纤维增强的 UHPC 为主,即 UHPFRC。NF P18-710 规定了无筋、加筋和预应力 UHPFRC 结构设计规则,提供 UHPFRC 压缩、拉伸、剪切性能分析和设计规则及模型,提供可靠性管理、极限状态设计和耐久性设计等具体规定^[23-24]。

NF P18-470 为 UHPFRC 材料标准,包括新拌和硬化后 UHPFRC 材料性能、原材料选择、测试方法和质量控制要求的原则。还根据 UHPC 耐久性和强度(抗压强度和直拉强度)性能,对不同 UHPC 类别进行分类,规定从 130 MPa 到 250 MPa 的 5 种抗压强度和 3 种直拉强度。此外,还包括生产(配料、运输、浇筑、固结和养护)和确认现场硬化性能等方法^[25]。

2.1.2 瑞士

2014 年 12 月,瑞士工程师与建筑师协会(SIA)

发行了 SIA 2052 标准,即《UHPFRC:建筑材料、设计与应用》。该文件为无筋、加筋和预应力 UHPFRC 结构设计提供了原则。它适用于抗压强度不小于 120 MPa 且直拉强度不小于 7.0 MPa 的 UHPFRC,允许从应变软化到应变硬化的 3 种拉伸强度。它还提供 UHPC 压缩、拉伸和剪切性能的设计模型与规则,以及纤维定向作用的可靠性系数。在火灾和疲劳方面提供简短的注释^[26]。该标准是欧洲出版的第 2 个正式 UHPC 标准,如同法国标准一样,主要对象也是具有纤维增强的 UHPFRC。

2.1.3 德国

德国目前还没有正式出版 UHPC 相关指南或标准。由德国结构混凝土委员会(DAFStb)主编的 UHPFRC 指南还在编制之中。虽然是指南,但一经批准,将成为德国 UHPC 结构应用的标准性文件。该指南基于欧洲规范(EN)和德国的研究成果,共包含两部分:第 1 部分为结构设计,包含具有纤维增强的 UHPC、钢筋或预应力 UHPC 预制和现浇结构;第 2 部分为混凝土技术和质量控制,对原材料、配合比、质量控制、新拌和硬化性能的研究方法,以及生产和结构设计等提出要求,以便生产出能适应不同应用要求的、经济的 UHPC 材料。指南规定了 3 种抗压强度(C130, C150 和 C175)的 UHPC 指标,并给出符合 EN 对耐久性的要求^[27-28]。

2.1.4 西班牙

西班牙 UHPC 指南还在编制之中。2015 年,西班牙混凝土科学-技术协会(ACHE)第一委员会成立了工作组,负责编制 UHPFRC 指南。该指南中的 UHPC 材料包括 6 类抗压强度(120, 135, 150, 175, 200, 225 MPa)、2 类抗拉强度(应变硬化和应变软化,类似于法国准则),并符合 EN 耐久性要求。该指南还将包含原材料要求(包括最大骨料粒径和纤维尺寸)、可加工性、环境暴露条件、浇筑方法和地理因素等^[10]。

2.2 北美

北美中,美国有关 UHPC 的标准有几个版本。

2.2.1 美国材料与测试协会

2017 年 7 月,美国材料与试验协会(ASTM)发布首份专门用于 UHPC 的文件,即《超高性能混凝土试件的制造和试验的标准实施规程》(ASTM C 1856/1856M-17),提供在实验室和现场中具有代表性的 UHPC 样品制造和测试的方法,以确定材料的性能,还提供测试抗压强度、抗弯强度、静态弹性模量、泊松比、收缩徐变、长度变化、耐磨性、抗冻融性

能和氯离子渗透的方法^[29]。

2.2.2 美国混凝土协会

2012 年,美国混凝土协会(ACI)成立“ACI 239-UHPC”分委员会,其下设立了几个小组,编写了 2 份新兴技术报告,其中一份是关于 UHPC 结构设计的报告^[30]。

2.2.3 美国联邦公路署

美国联邦公路署(FHWA)没有发布相关规范或标准,但从 1999 年已持续对 UHPC 开展研究,发布系列报告,如《超高性能混凝土的材料性能研究》(FHWA-HRT-06-103)、《超高性能混凝土预应力 I-梁的结构性能》(FHWA-HRT-06-115)、《预制 UHPC 华夫板桥面系统和连接的设计指南》(FHWA-HRT-13-032)、《超高性能混凝土研究综述》(FHWA-HRT-13-060)、《现浇 UHPC 的连接设计和施工》(FHWA-HRT-14-084)等,为实际应用和相关标准制订提供参考。

目前 FHWA 正在为 AASHTO T1 委员会起草一份关于使用 UHPC 进行桥梁结构设计的技术规范,它将使用直拉测试方法来测定其抗拉性能^[7]。

2.2.4 加拿大

2015 年,加拿大将钢纤维混凝土(FRC)和 UHPC 纳入下一个标准周期,并成立工作组,编写了 2 个独立的标准:CSA A23.1 附件 U《材料和施工方法》和 CSAS6 附件 A8.1《钢纤维混凝土桥梁的结构设计》,这 2 项关于 UHPC 的 CSA 标准都已得到技术委员会批准,并计划于 2019 年作为非强制性附件出版,但标准中都是使用强制性语言进行编写^[31]。

标准 CSA A23.1 附件 U《材料和施工方法》有关 UHPC 材料的主要内容有:

(1) 2 类抗压强度(分为 120~150 MPa 和大于 150 MPa 两类)。

(2) 3 类抗拉强度(分为应变硬化、应变软化和无纤维有钢筋网的 3 类)。

(3) 3 类耐久性。

该标准规定 UHPC 的预混合、部分预混合和非预混合的供应和配料规则,提供所有的试验需求,以描述材料性能和质量保证/质量控制、配料、运输、浇筑、养护和脱模的方法。

2.3 澳洲和亚洲

2.3.1 澳大利亚

澳大利亚没有相关国家标准,但有团体和企业的指南。2000 年,新南威尔士大学编制发表了《RPC 预应力混凝土梁设计指南》。指导和建议的

设计原则与 2001 年出版的法国指南非常接近。该指南还包括预应力 UHPC 梁的设计实例^[32]。

2018 年,澳大利亚标准有限公司出版《混凝土结构》(DR AS 3600)标准中第 16 节“钢纤维混凝土”含有 UHPC 的相关内容。该标准提供确定 FRC(包括 UHPC)压缩和拉伸性能的方法(测试方法和可靠性系数),并为加筋、无筋或预应力 FRC 提供设计模型。该标准还提供耐用性(包括防火)、适用性和施工前质量测试的规则。

2.3.2 日本

日本是亚洲最早制定 UHPC 指南的国家。2004 年,日本土木协会(JSCE)制定出版日语版《超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)结构设计与施工指南(草案)》,并于 2006 年出版英语版,该指南在方法上与 2001 年法国 AFGC 的指南相似^[33]。随后日本的 UHPC 标准工作停滞不前,该指南一直没有修订成正式的指南或标准。

2.3.3 韩国

2012 年,韩国混凝土协会(KSCE)制定出版韩语版《超高性能混凝土(K-UHPC)的设计指南》,它以日本指南为基础,采用韩国的研究成果^[34]对部分计算公式进行修正。目前,正在进行英语版的编制。

2.3.4 中国

2006 年,原铁道部颁布的《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》是中国最早有关 UHPC 的标准。2015 年,国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)^[35]颁布,它包括 5 种抗压强度(RPC100, RPC120, RPC140, RPC160 和 RPC180)以及相应的 5 种抗弯强度和弹性模量,此外还包括耐久性要求、原材料(包括钢纤维和有机纤维)、混合配料、运输、浇筑、养护和质量控制的规定。

随着 UHPC 应用在中国不断升温,地方与团体标准的制订正积极地展开。2015 年广东省交通运输行业地方标准《超高性能轻型组合桥面结构技术规程》(GDJTG/T A01—2015)^[36]发布,2017 年湖南省工程建设地方标准《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ 43/T 325—2017)^[37]颁布实施。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》正在征求意见,河北省地方标准《超高性能混凝土制备与工程应用技术规程》也在制订之中,正处在送审阶段。

2016 年,中国混凝土与水泥制品协会启动有关

UHPC 的中国建筑材料联合会协会标准的制订工作,率先于 2016 年 7 月立项并已正式发布了《超高性能混凝土:基本性能及试验方法》。此外,《超高性能混凝土:预制构件技术规程》、《超高性能混凝土:结构设计技术规程》和《超高性能混凝土:现场浇筑施工技术规程》等系列规程正在制订之中,中国电力企业联合会也发布了标准《超高性能混凝土电杆》(T/CEC 143—2017)。

中国工程建设标准化协会是中国较早开展工程建设团体标准的编制单位。近年来,启动立项一系列有关 UHPC 的规程制订工作,如《超高性能混凝土结构技术规程》、《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》、《建筑及道路工程超高性能混凝土应用规程》和《公路超高性能混凝土(UHPC)桥梁技术规程》等。此外,还有交通运输行业有关 UHPC 桥梁等行业标准也在制订之中。

2.3.5 亚洲混凝土联合会

亚洲混凝土联合会(ACF)在 2017 年成立 UHPC 分委员会,并启动亚洲 UHPC 材料和结构的设计指南编制工作,目前已编制出草稿,并召开 3 次讨论会。该指南有望成为第 1 个有关 UHPC 的国际团体标准。

3 几点讨论

3.1 UHPC 最低抗压强度

UHPC 除具有超高强的抗压强度外,还具有优良的耐久性和一定的抗拉能力,但是抗压强度依然是其最主要的技术指标。

从第 2 节可知,各国标准所规定的 UHPC 最低抗压强度指标不尽相同。早期标准均定得较高,如法国(AFGC)2001 年和 2013 年的指南、日本(JSCE)2004 年的指南均定为 150 MPa,韩国 2012 年的指南更是高达 180 MPa;然而,极高的抗压强度在工程上难以充分发挥作用,为推广应用,近年来最低强度要求有降低的趋势,如法国的 NF P 18-470 定为 130 MPa,瑞士 SIA 2052 和美国 ASTM C 1856/1856M-17 定为 120 MPa。目前,120 MPa 和 130 MPa 认可度较高,同时有个别专家认为,强度只有 120~130 MPa 时,不能称之为超高性能,而只能是超高强度。因为只有耐久性好,才能称为超高性能,而且耐久性好则材料密实性必然好,强度也自然更高。在现有标准中,中国的 GB/T 31387—2015 定得最低,仅为 100 MPa,这也引起国际同行的争议。

由于各标准中所采用的强度测试试件形状、尺寸并不一致,且形状、尺寸效应存在着换算关系,由文献[38]进行的试验研究和综合分析可知,换算后各标准对 UHPC 最低强度的要求与换算前相比数值有所变化,但大小序列并没有改变。文献[38]认为,100 MPa 抗压强度的混凝土采用高性能混凝土的方法可以制备出来,因此,将其定为 UHPC 最低强度是偏低的;同时,UHPC 因为要达到优良的耐久性,采用低水胶比获得高于 100 MPa 抗压强度并无困难,而且强度定低了也不见得能取得经济效益,因此,建议中国的 UHPC 抗压强度最低要求可定在 120~130 MPa 之间。

3.2 UHPC 定义

虽然 UHPC 在学术层面的讨论还在不断进行之中,各标准对此均有所反映,但总体而言,它是一种比高性能混凝土更具优越力学性能(强度和耐久性)的水泥基复合材料。

在分析总结各国标准基础上,文献[7]提出的 UHPC 定义为“与高性能混凝土相比,具有高强度、高耐久性和拉伸延性的水泥基复合材料,并且掺入用于提高开裂后拉伸延性的纤维或纤维网,28 d 抗压强度至少 120 MPa”。文献[7]希望它是一个全球均可接受的定义,然而事实并非如此。

首先,对 UHPC 材料本质的认识,目前有两大观点:一种观点认为它仍然是混凝土的一种;另一种观点认为它是一种不同于传统混凝土的水泥基材料。具体体现在 UHPC 名词中,前者认为它的 C 是指混凝土(Concrete),后者认为它的 C 是指水泥基材料(Cement-based Material)。大部分学者和标准中 C 用的是前者,而文献[7]用的是后者,文献[39]也持后者的观点,题目就直接说“欢迎来到后混凝土时代”。实际上后者的说法在 2004 年德国卡塞尔第 1 届 UHPC 国际会议上得到许多专家的认可,虽然 UHPC 仍沿用混凝土名称,但却可以认为是一种新的材料,即新一代水泥基建筑材料^[40]。

其次,关于 UHPC 是否一定要用纤维增强,也有不同的看法。在许多研究中,UHPC 包含有纤维增强和无纤维增强的 2 种材料,以探究纤维作用;另外,在钢管 UHPC 受压构件中,管内 UHPC 也可以不用纤维增强,因为钢管约束作用能提高管内 UHPC 的韧性。另一种观点认为,UHPC 一定要有纤维增强,并应称为 UHPFRC,不能省去 FR(Fiber Reinforced,纤维增强)。法国、瑞士等规范^[24,26]均采用 UHPFRC,有时在名词中还要加上“复合”

(Composite)来强调它是由基体和纤维组成的材料。文献[7]采用的是后一种说法。

最后,文献[7]的定义认为 UHPC 应具有开裂后的拉伸延性。对此,也有不同的看法。UHPC 不仅具有一定的抗拉强度,且由于纤维的桥接作用,受拉开裂后具有一定的拉伸延性,许多学者研究认为 UHPC 受弯结构设计应考虑其抗拉强度。设计中考虑抗拉强度后,对 UHPC 的拉伸延性就必然提出要求。然而,另有观点认为 UHPC 的抗拉强度并不高,贡献不大,且它与浇注方向等施工工艺直接相关,实际工程中不易控制,为简化计算和偏安全考虑,不必考虑抗拉强度的贡献,如文献[41]。如果设计中不考虑抗拉强度的贡献,则对 UHPC 的拉伸延性没有必要提出要求。

3.3 UHPC 应用

随着标准制订的不断进展,经济性越来越成为影响 UHPC 推广应用的关键。在现有应用中,马来西亚和越南的桥梁应用具有较好的一次性投资经济性,其余大部分的造价均较高。许多学者在替代材料方面展开研究,研究结果显示,单价较高的钢纤维和硅灰的替代效果仍不理想。有学者认为,UHPC 就应该保持其超高的性能,不能为取得经济性去降低其品质,尤其是工业废料和机制砂等原材料质量不稳定,给 UHPC 质量控制带来困难。应将 UHPC 视为功能性材料,并通过结构创新来取得综合经济效益。

UHPC 比高性能混凝土具有更高的抗压强度和抗拉强度、更好的耐久性。部分应用中可以综合发挥各种性能优势,如在桥梁主体结构以及钢-UHPC 组合桥面板等。然而一些实际应用中,这 3 个优势不一定能同时发挥作用,而是偏重某些性能的发挥,如对于某些通过发挥抗拉优势、省去普通钢筋和箍筋的应用存有争议,认为这可能会导致结构脆性破坏。

UHPC 在工程结构应用时,有些是简单的替代性应用,即保持结构形式基本不变,仅用 UHPC 替代普通或高性能混凝土,或替代钢材。另一些则是强调结构或造型的创新,例如图 3(a)的人行桥,将栏杆做成结构的一部分,形成 U 形梁。该形式在许多人行桥中得到应用。

中国 UHPC 研究开展并不晚,但早期的实际应用极少,若置于中国大规模工程建设的背景下,更显得滞后。中国目前仍处于大规模建设时期,在国际上被认为是 UHPC 最大的市场。同时,中国是微细

钢纤维主要生产国,且造价较低,成为中国 UHPC 推广应用一个有利条件。然而,对新材料应用的畏难和怕担责任等情绪使得工程创新应用难度增加。如何取得突破,还有待各方面的努力。

3.4 UHPC 标准

鉴于标准在中国工程建设中具有极高地位,长期以来缺乏 UHPC 相关标准,成为中国 UHPC 应用主要阻力之一。马来西亚和越南是 2 个 UHPC 应用开展较好的国家,然而两国均无相关标准,而是参考他国标准,但这在中国是行不通的。近年来,有关 UHPC 的标准制订在不断推进之中,将为中国 UHPC 应用提供重要的技术保证。然而,随着中国工程建设标准体系的改革和团体标准应用的推进,有关 UHPC 标准的制订呈井喷式现象对 UHPC 推广应用是否只是利好而无副作用,目前还难以断言。

4 结 语

UHPC 自出现以来,研究热度不断提高,应用数量、范围和地区在不断扩大,各种标准也在不断制订与更新之中。中国在 UHPC 提出不久就紧跟国际学术前沿,持续不断地开展研究和应用,已成为国际 UHPC 研究的重要力量,为更多的应用奠定了基础。随着对研究投入的加大和研究人员的不断增加,研究的广度、深度与系统性也不断增强,UHPC 标准制订与更新也在不断进行中,必将对我国土木工程节能减排、可持续发展做出积极的贡献,也有望在不久的将来成为 UHPC 研究与应用的世界强国。

参考文献:

References:

- [1] LARRARD F D, Sedran T. Optimization of Ultra-high-performance Concrete by the Use of a Packing Model[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24 (6):997-1009.
- [2] 中国工程院战略咨询中心,高等教育出版社,科睿唯安.全球工程前沿报告 2018[R].北京:中国工程院战略咨询中心,2018.
Center for Strategic Studies of Chinese Academy of Engineering, Higher Education Press, Clarivate Analytics, Engineering Fronts 2018[R]. Beijing: Center for Strategic Studies of Chinese Academy of Engineering, 2018.
- [3] 陈宝春,季 韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
CHEN Bao-chun, JI Tao, HUANG Qing-wei, et al. Review of Research on Ultra-high Performance Con-

crete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3):1-24.

- [4] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength[J]. ACI Special Publication, 1994, 144(24):507-518.
- [5] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [6] TOUTLEMONDE F, BERNARDI S, BRUGEAUD Y, et al. Twenty Years-long French Experience in UHPFRC Application and Paths Opened from the Completion of the Standards for UHPFRC[C]//SHI C J, CHEN B C. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures. Fuzhou: RILEM Publications S. A. R. L., 2018: 61-83.
- [7] PERRY V H. What Really Is Ultra-High Performance Concrete — Towards a Global Definition[C]//SHI C J, CHEN B C. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures. Fuzhou: RILEM Publications S. A. R. L., 2018: 89-105.
- [8] 马熙伦,陈宝春,黄卿维,等.德国加特纳普拉兹超高性能混凝土人行桥[J].中外公路,2017,37(2):77-81.
MA Xi-lun, CHEN Bao-chun, HUANG Qing-wei, et al. Germany Gartnerplatzbrücke UHPC Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (2):77-81.
- [9] BRUHWILER E. “Structural UHPFRC” to Enhance Bridges[C]//SHI C J, CHEN B C. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures. Fuzhou: RILEM Publications S. A. R. L., 2018:150-158.
- [10] LOPEZ J A, SERNA P, NAVARRO-GREGORI J. Advances in the Development of the First UHPFRC Recommendations in Spain: Material Classifications, Design and Characteristics [C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on UHPFRC. Montpellier: RILEM Publications S. A. R. L., 2017:565-574.
- [11] SPAROWITZ L, FREYTAG B, REICHEL M, et al. Wild Bridge — A Sustainable Arch Made of UHPFRC[C]//RADIC J, CHEN B C. Proceedings of 3rd Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges. Zagreb: University of Zagreb, 2011:45-70.

- [12] COUFAL R, VITEK J L, KALNY M. The First Large Application of UHPC in the Czech Republic [C]//SRITHARAN S. Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC. Des Moines; Iowa State University, 2016:1-8.
- [13] PERRY V, SEIBERT P. Fifteen Years of UHPC Construction Experience in Precast Bridges in North America [C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. Marseille; RILEM Publications S. A. R. L. , 2013:229-238.
- [14] 杜任远,黄卿维,陈宝春. 活性粉末混凝土桥梁应用与研究[J]. 世界桥梁, 2013, 41(1):69-74.
DU Ren-yuan, HUANG Qing-wei, CHEN Bao-chun. Application and Study of Reactive Powder Concrete to Bridge Engineering [J]. World Bridges, 2013, 41(1):69-74.
- [15] KIM B S, JOH C, PARK S Y, et al. Case Studies Highlighting Innovative UHPC Bridge Applications of KICT [C]//SARASWATI S, KULKARNI V. Proceedings of the 1st International Symposium of Asian Concrete Federation on UHPC. Kolkata; Indian Concrete Institute, 2015:43-50.
- [16] 黄卿维,沈秀将,陈宝春,等. 韩国超高性能混凝土桥梁研究与应用[J]. 中外公路, 2016, 36(2):222-225.
HUANG Qing-wei, SHEN Xiu-jiang, CHEN Bao-chun, et al. Research and Application of UHPC Bridge in Korea [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(2):222-225.
- [17] VOO Y L, HAFEZOLGHORANI M, FOSTER S J. Application of Ultra-high Performance-fiber Reinforced Concrete Technology for Present and Future [C]//SHI C J, CHEN B C. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC materials and Structures. Fuzhou; RILEM Publications S. A. R. L. , 2018:6-20.
- [18] VIET T B, CHIEN B X, DUC L A. Study on UHPC and Some Application Results in Vietnam [C]//SHI C J, CHEN B C. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures. Fuzhou; RILEM Publications S. A. R. L. , 2018:21-44.
- [19] CHEN B C, AN M Z, HUANG Q W, et al. Applications of Ultra-high Performance Concrete in Bridge Engineering in China [C]//SRITHARAN S. Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC. Des Moines; Iowa State University, 2016:1-8.
- [20] 檀军锋. 活性粉末混凝土(RPC)在铁路预制梁工程中的应用[J]. 上海铁道科技, 2007(2):54-55.
TAN Jun-feng. Application of Reactive Powder Concrete (RPC) in Railway Precast Beam Engineering [J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2007(2):54-55.
- [21] CHEN B C, HUANG Q W, SHEN X J, et al. Two Pilot UHPFRC Bridges in China [J]. ACF Magazine, 2015, 1(2):42-47.
- [22] SHAO X D, CAO J H, HUANG Z Y. Research and Application of UHPC-based High Performance Bridge Structures in China [C]//SHI C J, CHEN B C. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures. Fuzhou; RILEM Publications S. A. R. L. , 2018:121-139.
- [23] VERNON P, KU M, WEILL J M, et al. Shum Yip Upperhills UHPC Facade Panels; Analysis of the Design Process [C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on UHPFRC. Montpellier; RILEM Publications S. A. R. L. , 2017:565-574.
- [24] NF P 18-470, Ultra-High Performance Fibre-reinforced Concrete (UPHFR): Specification, Performance, Production and Conformity [S].
- [25] NF P 18-710, National Addition to Eurocode 2 — Design of Concrete Structures; Specific Rules for Ultra-high Performance Fibre-reinforced Concrete (UPHFR) [S].
- [26] SIA 2052, Betons Fibres Ultra-performant; Matériaux, Dimensionnement et Execution (UHPFRC; Construction Material, Dimensioning and Application) [S].
- [27] SCHMIDT M, LEUTBECHER T, PIOTROWSKI S, et al. The German Guideline for UHPC [C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on UHPFRC. Montpellier; RILEM Publications S. A. R. L. , 2017:545-554.
- [28] SCHMIDT M. Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete [M]. Kassel; Press University of Kassel, 2014.
- [29] ASTM. 2015 Annual Book of ASTM Standards [M]. West Conshohocken; ASTM, 2015.
- [30] ASTM C1856/C1856M, Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens with UHPC [S].
- [31] CSA A23. 1/2, Annex S on Ultra-high Performance Concrete [S].

[32] GOWRIPALAN N, GILBERT R I. Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams[R]. Sydney: The University of New South Wales, 2000.

[33] JSCE. Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)[R]. Tokyo: JSCE, 2006.

[34] KCI-M-12-003, Design Recommendations for Ultra-high Performance Concrete K-UHPC[S].

[35] GB/T 31387—2015, 活性粉末混凝土[S].
GB/T 31387—2015, Reactive Powder Concrete[S].

[36] GDJTG/T A01—2015, 超高性能轻型组合桥面结构技术规程[S].
GDJTG/T A01—2015, Technical Specification for Ultra-high Performance Lightweighted Composite Deck Structure[S].

[37] DBJ 43/T 325—2017, 活性粉末混凝土结构技术规程[S].
DBJ 43/T 325—2017, Technical Specification for Reactive Powder Concrete Structures[S].

[38] YANG J, CHEN B C, WU H C. Shape and Size Effect on Compressive Strength of Ultra-high Performance Concrete[C]//CHEN B C, WEI J G. Proceedings of the 8th International Conference of Asian Concrete Federation. Fuzhou: Thailand Concrete Association, 2018: 919-924.

[39] BRUHWILER E. “Structural UHPFRC”: Welcome to the Post-concrete Era[C]//SRITHARAN S. Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC. Des Moines: Iowa State University, 2016: 1-16.

[40] TANG M C. High Performance Concrete — Past, Present and Future[C]//SCHMIDT M, FEHLING E, GEISENHANSLUKE C. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel: University of Kassel, 2004: 3-10.

[41] 方志, 郑辉, 杨剑, 等. 超高性能混凝土结构的设计方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 59-67.
FANG Zhi, ZHENG Hui, YANG Jian, et al. Design Principles for Ultra-high Performance Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 59-67.