

文章编号:1673-2049(2014)03-0001-24

超高性能混凝土研究综述

陈宝春^{1,2}, 季 韬^{1,2}, 黄卿维^{1,2}, 吴怀中³, 丁庆军⁴, 詹颖雯⁵

(1. 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; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 3. 韦恩州立大学 工程学院, 密歇根 底特律 MI48202; 4. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 5. 台湾营建研究院, 台湾 新北 23146)

摘要:介绍了超高性能混凝土(UHPC)的提出与世界各国的研究概况、UHPC的基本制备原理与技术指标;对UHPC材料制备技术、超高性能机理、材料性能、工程应用研究进展进行了综述,提出了基体材料组成、凝结硬化过程与微观结构,纤维增强增韧机理微观力学分析,组成设计与制备技术,材性测试方法与指标体系,基于工程应用的研究与创新性应用研究,经济性和标准与规范等方面的研究方向。结果表明:UHPC在理论研究与工程应用方面都取得了可喜的进展,随着环保、可持续发展日益受到重视,UHPC具有极好的发展前景。

关键词:超高性能混凝土;制备技术;材性;工程应用;微观力学分析

中图分类号:TU528.2 **文献标志码:**A

Review of Research on Ultra-high Performance Concrete

CHEN Bao-chun^{1,2}, JI Tao^{1,2}, HUANG Qing-wei^{1,2}, WU Huai-zhong³,
DING Qing-jun⁴, CHAN Ying-wen⁵

(1. Sustainable and Innovative Bridge Engineering Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 3. Department of Civil & Environmental Engineering, Wayne State University, Detroit MI48202, Michigan, USA; 4. School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 5. Taiwan Construction Research Institute, New Taipei 23146, Taiwan, China)

Abstract: Authors gave a brief introduction to state-of-the-art developments and research progresses of ultra-high performance concrete (UHPC) in the world, to the fundamentals of material preparations and performance indexes. Attention was placed on critical review of the material preparation technologies, mechanisms of the super high performance, and superior material properties of UHPC and its engineering applications. Finally, critical future research directions were highlighted, including the optimal compositions of UHPC matrix, the setting and hardening progress, as well as the resulting micro-structure, the micro-mechanics analysis of fiber reinforcement and toughness improvement principle, mix design and preparation technology, testing methodology of material characteristics and its standardization. Engineering applications should be based on practical and innovative application research findings, economic benefits, and the establishment of suitable standards and specifications. The results show that it is clear that great advances have been achieved on both the fundamental research and the

收稿日期:2014-07-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(U1305245)

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.

engineering application of UHPC. With environmental protection, sustainable development being more attention, UHPC has excellent prospects for development.

Key words: ultra-high performance concrete; preparation technology; material property; engineering application; micro-mechanics analysis

0 引言

混凝土是一种水泥基复合材料,它是以水泥为胶结剂,结合各种集料、外加剂等而形成的水硬性胶凝材料。混凝土是当今用量最大的建筑材料,与其他建筑材料相比,混凝土生产能耗低、原料来源广、工艺简便、成本低廉且具有耐久、防火、适应性强、应用方便等特点。从社会发展和技术进步的角度来看,在今后相当长的时间内,混凝土仍是应用最广、用量最大的建筑材料。然而,由于混凝土自重大、脆性大和强度(尤其是抗拉强度)低,影响和限制了它的使用范围;同时,对于低强度的混凝土,在满足相同功能时用量较大,这加剧了对自然资源和能源的消耗,另外也增加了废气和粉尘的排放,增大了对能源的需求和环境的污染。

20世纪以来,随着社会经济的发展,工程结构朝更高、更长、更深方向发展,这对混凝土的强度提出了新的要求。为满足这种要求,随着科技的进步,混凝土的强度得到了不断的提高。在20世纪20年代、50年代和70年代,混凝土的平均抗压强度可分别达到20,30,40 MPa。20世纪70年代末,由于减水剂和高活性掺合料的开发和应用,强度超过60 MPa的高强混凝土(High Strength Concrete, HSC)应运而生,此后在土木工程中得到越来越广泛的应用^[1-5]。

然而,单纯提高混凝土抗压强度,并不能改变其脆性大、抗拉强度低的不足。采用纤维增强的方法,产生了纤维增强混凝土(Fiber Reinforced Concrete, FRC)^[4,6],其所用纤维按材料性质可划分为金属纤维、无机纤维和有机纤维等,最常用的是金属纤维中的钢纤维。随着社会的发展,许多特殊工程,如近海和海岸工程、海上石油钻井平台、海底隧道、地下空间、核废料容器、核反应堆防护罩等,对混凝土的耐腐蚀性、耐久性和抵抗各种恶劣环境的能力等也提出了更高的要求。因此,人们又提出了将HSC包含在内的高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)的概念。

在HPC应用发展的同时,人们并没有停止对混凝土向更高强度、更高性能发展的追求。1972~

1973年, Brunauer等在《Cement and Concrete Research》杂志上发表了有关 Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity的系列论文,报道了抗压强度达到240 MPa的低孔隙率的水泥基材料,但是研究中并未采用萘系和聚合物高效减水剂,该技术没有在工程中得到推广应用^[3]。Bache采用细料致密法(Densified with Small Particles, DSP),通过发挥硅灰与高效减水剂的组合作用,以达到减小孔隙率的目的,制备出强度为150~200 MPa的混凝土,其产品在市场上以DENSIT商标的混凝土制品出现^[3,7]。Birchall等^[8]开发出无宏观缺陷(Macro Defect Free, MDF)水泥基材料,抗压强度可达到200 MPa。MDF水泥基材料问世后,引起了有关学者的广泛关注,并开展了许多有关这类材料优异性能和高强机理的研究。此外, Roy在1972年获得了抗压强度达到650 MPa的水泥基材料。美国的CEMCOM公司采用不锈钢粉也制备出超高强材料DASH47^[3]。20世纪90年代,法国Bouygues公司在DSP, MDF及钢纤维混凝土等研究的基础上,研发出了活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)^[9-10]。RPC分为2个等级,强度在200 MPa以内的称为RPC200,强度在200 MPa以上、800 MPa以下的称为RPC800^[9-10]。1994年, Larard等^[11]首次提出了超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)的概念。

直至今日,有关水泥基向更高强度发展的研究报道仍不断地出现,然而具有工程应用前景的并不多:有些因为价格太高,有些因为制备技术太复杂,而有些则在强度提高的同时某些性能指标下降。因此,以RPC制备原理为基础的UHPC材料的研究与应用,是当今水泥基材料发展的主要方向之一。美国国家科学基金会于1989年投资建立了一个“高级水泥基材料科技中心”,并为该中心提供了1 000万美元的科研经费^[5]。美国联邦公路局以RPC为研究对象,对UHPC开展了系统的研究,进行了1 000多个试件的测试,研究内容包括配制技术、强度、耐久性和长期性能等力学性能^[12]。在此基础上,美国密歇根州交通技术研究院开展了进一步的研究^[13]。法国土木工程学会在大量研究的基础上,

于2002年制订了超高性能纤维混凝土的指南(初稿)^[14]。日本土木工程协会也于2004年制订了相应的设计施工指南(初稿),并于2006年出版了英文版本^[15]。韩国提出了一个超级桥梁(Super Bridge 200)的计划,希望通过应用UHPC建造桥梁,减少20%的工程造价,在10年内节省20亿美元的投资,减少44%二氧化碳的排放量和减少20%的养护费用^[16]。中国从20世纪90年代开始了UHPC的研究,取得了一系列的成果,国家标准《活性粉末混凝土》已在征求意见^[17]。

2004年9月在德国的卡塞尔举行的UHPC国际会议上,与会专家认为UHPC虽然被命名为混凝土材料,但是却可以认为是一种新型材料,是新一代水泥基建筑材料^[18]。2009年在法国马赛举行的超高性能纤维增强混凝土(Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)国际会议上,与会专家认为因UHPFRC低碳环保且性能优异,可以用来建造低碳混凝土结构,在未来必将得到大力发展^[19]。尽管UHPC自出现以来,不断被应用于桥梁、建筑、核电、市政、海洋等工程之中,然而应用发展远低于预期。以应用最多的桥梁为例,自1997年第一座UHPC桥——加拿大魁北克省Sherbrooke的RPC桥建成以来,十几年间全世界也仅建成30余座,且以中小跨径与人行桥为主^[20]。在中国,UHPC实际工程应用也极少,以桥梁为例,仅在铁路上有1座梁桥的应用,目前1座公路梁桥正在建设之中。在中国处于大规模工程建设的背景下,UHPC在中国的应用显得更为滞后。这种应用不理想的状况,究其原因:一方面,有关UHPC的研究主要集中在发达国家,而这些国家已完成大规模的基础设施建设,推动其研究与应用的市场动力不足;另一方面,发展中国家虽然有较大的基础设施建设的需求,但是基础研究不足和UHPC价格较高,影响了其在工程中的应用。

在今后相当长一段时间内,中国仍处于大建设时期,随着对节能减排、可持续发展要求的不断提高,对混凝土性能的要求也将越来越高,因此UHPC具有广阔的应用前景。2014年3月4日,住房和城乡建设部、工业和信息化部召开了高性能混凝土推广应用指导组成立暨第一次工作会。会议认为,高性能混凝土推广应用是强化节能减排、防治大气污染的有效途径,能提高建筑质量,延长建筑物寿命,提升防灾减灾能力,有利于推动水泥工业结构调

整。在节能减排方面,据专家估算,以目前中国每年混凝土的使用量 $4 \times 10^9 \text{ m}^3$ 测算,通过推广高性能混凝土,合理使用掺合料,每立方米混凝土可节约水泥25 kg,实现年节约水泥 $1 \times 10^8 \text{ t}$,进而减少消耗石灰石 $1.1 \times 10^8 \text{ t}$ 、粘土 $6 \times 10^7 \text{ t}$,节约标准煤 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$,减少排放二氧化碳 $7.5 \times 10^7 \text{ t}$ ^[21]。若能推广应用UHPC,成效显然更大,同时也能为中国UHPC技术、混凝土材料与工程结构领先于世界做出积极的贡献。因此,开展UHPC的制备技术与工程应用基础研究,具有重要的意义。为此,国家自然科学基金委员会与福建省人民政府设立的“促进海峡两岸科技合作联合基金”2013年资助了“超高性能混凝土制备与工程应用基础研究”项目。在该项目的指南建议、项目申请、项目获批后的研究计划制订中,笔者查阅了大量的研究资料,结合前期研究成果,对UHPC的研究现状有了较为全面的了解。为促进该项目的顺利进行,并推动中国UHPC研究与应用的不断发展,整理撰写了本文。

1 UHPC制备基本原理与技术指标

1.1 UHPC制备基本原理

对普通混凝土的研究,人们认识到混凝土作为一种多孔的不均匀材料,孔结构是影响其强度的主要因素,而固体混合物的颗粒体系所具有的高堆积密实度是混凝土获得高强度的关键。因此,减小孔隙率、优化孔结构、提高密实度、掺入纤维是UHPC制备的基本原理和主要方法,以RPC为例,其获得超高性能的主要途径有以下几种^[9]:

(1)剔除粗骨料,限制细骨料的粒径不大于 $300 \mu\text{m}$,提高了骨料的均匀性。

(2)通过优化细骨料的级配,使其密布整个颗粒空间,增大了骨料的密实度。

(3)掺入硅粉、粉煤灰等超细活性矿物掺合料,使其具有很好的微粉填充效应,并通过化学反应降低孔隙率,减小孔径,优化了内部孔结构。

(4)在硬化过程中,通过加压和热养护,减少化学收缩,并将C-S-H转化成托贝莫来石,继而成为硬硅钙石,改善材料的微观结构。

(5)通过添加短而细的钢纤维,改善材料延性。

中国正在制订的国家标准《活性粉末混凝土》(征求意见稿)^[17]中对RPC的定义为:以水泥、矿物掺合料、细骨料、高强度微细钢纤维或有机合成纤维等原料生产的超高性能纤维增强细骨料混凝土。从

上述定义可见,它对养护制度、配合比中的一些组分并没有严格的限制,如有些结构需要现场浇注,蒸压养护较为困难而采用常规养护时,如果骨料强度高且表面粗糙,也可得到强度为 200 MPa 的 RPC^[22]。

UHPC 基于 RPC 的制备原理,如采用小粒径骨料,掺入钢纤维和采用蒸压养护等,但是对骨料的粒径、养护制度、配合比中的组分等则没有严格的限制,如采用常规养护工艺也可配制出强度超过 150 MPa 的 UHPC。文献[23]中采用常规材料,不采用热养护、预压等特殊工艺,也制备出强度超过 200 MPa,可泵送浇注的 UHPC,其技术包括选择低需水量的水泥和硅灰、合理的砂浆水泥比、硅灰水泥比和水灰比等。文献[24]中采用普通材料和常温养护,制备出坍落度为 268 mm,90 d 强度为 175.8 MPa 的混凝土。文献[25]中采用常规材料和养护,制备出抗压强度超过 200 MPa 的混凝土,掺入质量分数为 1% 的钢纤维的抗拉强度可达到 15.9 MPa。

1.2 UHPC 技术指标

在 UHPC 的研究中,有些继续采用 RPC 的名称,有些直接称之为 UHPC,还有一些则称之为 UHPFRC,如法国与日本的相关指南^[14-15],有的则认为 UHPFRC 就是 RPC,是 UHPC 与 FRC 相结合的产物^[26],目前对这些名词还没有统一公认的定义。从内涵来看,RPC,UHPC 与 UHPFRC 有许多相同之处;相对来说,UHPC 的范围大些,RPC 和 UHPFRC 的范围小些,这也可以直接从字面上看出来。本文中在引用参考文献时,保持原文献的材料名称,在进行综述分析时,则统称为 UHPC。

关于 UHPC 或 RPC 的技术指标,目前也没有统一公认的定义。法国 UHPFRC 指南^[14]中,定义它为具有 150 MPa 以上抗压强度,有纤维加强以确保非脆性行为,采用特殊骨料的高粘性材料。日本 UHPFRC 指南^[15]中,定义它是一种纤维加劲的水泥基复合材料,抗压强度超过 150 MPa,抗拉强度超过 5 MPa,开裂强度超过 4 MPa,并给出了基本组成:最大粒径小于 2.5 mm 的骨料、水泥和火山灰,水灰比小于 0.24;掺入不低于 2% 体积掺量、长度为 10~20 mm、直径为 0.1~0.25 mm、抗拉强度不小于 2 GPa 的加劲纤维。

中国的国家标准《活性粉末混凝土》(征求意见稿)^[17]中对 RPC 按力学性能的等级划分见表 1。从表 1 可知,它对抗压强度要求最低为 100 MPa,比法国、日本的抗压强度 150 MPa 要低。

表 1 活性粉末混凝土力学性能的等级划分

Tab. 1 Grade Classification of Mechanic Properties of RPC

等级	抗压强度标准值/MPa	抗折强度/MPa	弹性模量/GPa
R100	100	≥12	≥40
R120	120	≥14	≥40
R140	140	≥18	≥40
R160	160	≥22	≥40
R180	180	≥24	≥40

2 制备技术

2.1 材料组分与配合比

如同其他混凝土材料的研究一样,UHPC 的研究也是从材料制备开始的。各国研究者结合当地的材料开展了大量的配合比设计,中国也开展了许多的研究,如文献[27]~[32]。

UHPC 作为一种高技术的新材料,成本较高是影响其工程应用的一个重要因素。文献[33]中对一些 RPC 试验的原材料进行分析,发现其成本均在 4 000 元·m⁻³ 以上,最高达到 8 000 元·m⁻³,远高于普通混凝土的价格。为此,提出了 RPC 性价比计算方法,并以钢纤维掺量为主要参数进行研究。

由于 RPC 中的钢纤维为细钢纤维,且为了防锈而镀铜,其较高的价格是 RPC 材料成本较高的主要原因,因此,许多研究围绕钢纤维及其替代品展开。文献[34]中采用碳纤维替代部分钢纤维进行 RPC 的配制,发现 RPC 的抗折强度下降而抗压强度有所提高。文献[35]中采用碳纤维替代钢纤维配制 RPC,结果表明,最终破坏形态表现出很大的脆性破坏。此外,还有学者对聚丙烯纤维 RPC 和混杂纤维 RPC 开展了研究,将低模量的聚丙烯纤维、中模量的耐碱玻璃纤维和高模量的钢纤维混杂掺入 RPC,可使 RPC 的一些力学性能得到一定程度的改善而提高^[36-42]。美国规范在 AASHTO Type II 梁中采用 80 级焊接钢筋网以取代 UHPC 中的钢纤维,其抗剪强度超过采用钢纤维的 UHPC 梁,且施工方便,成本大大降低^[43]。

为降低成本,研究人员还开展了采用替代材料减少 UHPC 中水泥、硅灰用量的研究,如钢渣粉、超细粉煤灰、石粉、偏高岭土、火电厂微珠、超细矿渣、稻壳灰等,不仅能降低造价,而且利于环保^[44-50]。

文献[51]中开展低水泥用量的 RPC 研究,用粉煤灰取代了 60% 的水泥,在凝结硬化过程中施加压力,得到 338 MPa 的 RPC。在 RPC 中采用粉煤灰和矿渣替代水泥和硅灰,可减少高效减水剂的用量,

并减少 RPC 的水化热和收缩^[40]。文献[52]中采用棕榈油灰取代 50% 的胶凝材料,配制的 UHPC 具有 158.28 MPa 的抗压强度、46.69 MPa 的弯拉强度和 13.78 MPa 的直拉强度。文献[53]中采用稻壳灰取代硅灰,在标准养护制度下,可制备出强度超过 150 MPa 的 UHPC,当采用水泥+10% 硅灰+10% 稻壳灰时,得到的 UHPC 性能最好。在 RPC 的凝结硬化过程,加入部分水化水泥基材料(PH-CM),能促进水泥水化,增加 C-S-H 生成量,使 RPC 具有较高的早期强度^[54]。

由于胶凝材料(水泥和硅灰)表面特性不同,可选择多种减水剂进行耦合使用,其效果更好^[55]。在 UHPC 配合比设计中采用修正的安德烈亚森颗粒密实模型,可以降低胶凝材料的用量,如养护 28 d 后,仍有很多水泥没有水化,则可采用一些便宜的材料来替代,如石粉^[56]。文献[57]中提高 RPC 的硅灰含量,使配制的 RPC 强度得到提高的同时,其表观密度降低到 $1\,900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

另外,为减少对天然骨料的开采,研究人员还探索利用其他材料来替代 UHPC 中的石英砂等,如采用烧结铝矾土^[40]、机制砂^[58]和丘砂^[59-60]等。文献[61]中采用铁矿石尾矿替代 UHPC 中的天然骨料,由于较差的界面,工作性和强度下降。文献[62]中将废弃混凝土块放入 UHPC 中,可减少早期收缩,制成自约束收缩 UHPC。文献[63]中采用超细水泥制备了新型超高性能混凝土 SC-RPC,避免了硅灰的使用,且便于现场养护与施工。

2.2 拌制与养护技术

与普通混凝土不同的是,RPC 由于采用基体材料+细粒径组分材料+钢纤维进行配制,在拌制过程中容易聚团,影响 RPC 成型的均质性和材料性质,是备受工程界关心的一个主要问题。各国学者对需要采用的搅拌设备、混合料的拌制时间与顺序等也开展了相应的研究,如 Colleparidi 等^[64]的研究表明,搅拌 1 min 后添加减水剂的 RPC,其工作性能要优于即时掺入减水剂的 RPC^[64]。文献[65]中介绍了常规搅拌工艺配制的 RPC 的特性,制定了加料顺序。文献[66]中研究了 3 种不同的投料搅拌方法,试验结果表明,不同的投料次序对 RPC 的抗折强度和抗压强度有一定影响,尤其对 RPC 流动性的影响较大。此外,RPC 浇注时钢纤维方向分布对 RPC 的抗拉强度等性能有较大影响。为寻找有效控制钢纤维方向的方法,文献[67]中通过数值分析和试验研究,探讨了通过挤压改变钢纤维排列方向

的方法;文献[68]中采用管壁效应和混凝土流动方向等方法,改变钢纤维在试件内的排列方向,试件成型后的 X 射线图像表明,该措施取得了良好效果。

高温、加压养护制度是 UHPC 获得高性能的重要手段,温度越高、时间越长,参加反应的硅灰越多,内部结构也就越密实。文献[69]中指出,与 90 °C 热养护相比,在 20 °C 标准养护条件下的 UHPFRC 试块,抗压强度降低 20%,抗弯强度降低 10%,断裂能降低 15%。高温、加压养护制度是 RPC 获得高性能的重要手段,如 RPC 中含有火山灰活性物质,在不同养护制度下,RPC 的力学性能有较大差异^[14-15]。以 ²⁹Si 磁共振方法(²⁹Si NMR)量测水泥、硅灰、石英粉等胶结粉体在不同养护条件下的水化程度,可确立有效且经济的养护方式^[70]。Richard 等^[10]的研究表明,90 °C 热养护能加速火山灰反应,并改变已形成水化物的微观结构,高温养护(250 °C~400 °C)能促使结晶水化物的形成与硬化浆体的脱水。Dallaire 等^[71]的研究表明,RPC 试件在加压 50 MPa 和 400 °C 的条件下养护 48 h 后,其抗压强度可达到 500 MPa。Cheyrezy 等^[72]通过热重分析和 X 射线衍射对热养护下传统 RPC 的微观结构进行分析,认为传统 RPC 在养护温度介于 150 °C~200 °C 之间时,孔隙率最小。对采用蒸汽养护、滞后蒸养与降温蒸养以及常规养护这 4 种养护方式进行了对比试验,结果表明,蒸养对材性的影响最大,而采用蒸养但滞后蒸养与降温蒸养对材性的影响较小^[72]。蒸养能提高材料的抗压强度、抗拉强度和弹性模量,减小徐变,加快收缩速度,提高抗渗能力^[12]。然而,蒸汽或蒸压养护给施工带来困难,也提高了制备成本。因此,不采用蒸汽或蒸压养护时,如何获得 RPC 材料的高性能,也成为研究的一个热点。吴炎海等^[73-77]也都开展了不同养护制度和龄期对 RPC 材料性能影响的研究,结果表明,蒸养对提高材料性能具有极其有利的作用,并提出了相应的最佳养护条件。

养护时的压力对 UHPC 的性能也有影响。研究结果表明,在凝结过程施加 5~25 MPa 的预压力时,RPC 的抗弯强度可提高 34%~66%,韧性可提高 3.39~4.81 倍,这是由于预压力可消除孔隙和自由水,使颗粒更加紧密^[78]。蒸压时间、温度和压力均会影响 RPC 的性能;对于每一个压力和温度,存在一个临界蒸压时间;蒸压时间过长,反而会使其力学性能有所下降^[79]。蒸压养护对提高 RPC 抗压强度作用明显,但是其抗折强度和韧性反而低于 28 d

标准养护的RPC,这可能与蒸压养护对提高钢纤维和水泥石的粘结作用不大有关^[22,79],而在RPC中增加粉煤灰和矿渣用量可减少蒸压情况下其抗折强度和韧性的降低^[79]。

3 超高性能机理

3.1 微观结构

文献[80]中从测量的纳米尺度力学性能出发,采用多层次多尺度微观结构模型,精确计算UHPC的刚度,且证实了纤维-基体界面是无缺陷的。此后,许多学者采用SEM,EDS微区元素点分析与X射线衍射等试验,对RPC的微观结构开展了研究,进一步揭示了RPC形成高性能的基本原理。

RPC密实度与强度之间存在着高度的相关性^[80-81],但是最大密实度并不代表最高强度,强度取决于其微观结构和水化阶段的性能^[82-83]。蒸压养护能降低C-S-H凝胶中的CaO/SiO₂,使RPC中形成针状和片状的托勃莫来石^[40,84]。电导率与水化度存在一种函数关系,当水化度达到26%时,孔隙不连续,采用超声波技术可以监测凝结硬化过程RPC的孔隙半径的变化^[81,85]。UHPC孔结构可用表面分维来表示,且建立了混凝土的纹理、硅酸盐链长(表面分维)和C-S-H量的关系^[85]。

高温可促进水泥、硅灰和石英粉的化学反应,当温度达到250℃时,RPC中出现硬硅钙石。随着养护温度的增加,C-S-H平均链长增加^[86-87]。碱激发水泥RPC(ARPC)在抗压强度相同情况下,具有更高的抗弯性能、断裂能以及与钢筋的粘结性能;由于ARPC的CaO/SiO₂较低,其纳米的孔结构有利于水分的逸出,内部孔压力较低,因此具有更好的防火性能^[88-89]。

3.2 纤维增强增韧机理

研究表明,未掺入钢纤维的UHPC,在进行受压试验时由于内部积聚的能量太大而呈现爆炸性破坏,表现出较普通混凝土和高强混凝土更大的脆性。因此,UHPC一般掺有纤维,故它也可视为基体与纤维的复合材料。纤维主要以细钢纤维为主,直径较小,为0.20~0.22mm,长细比较大,为55~70,而UHPC基体的胶凝粒径小,因而它与基材间的粘结滑移、纤维的拉拔、纤维桥接和裂缝的偏转作用以及对混凝土材性的增强机理都有其自身的特性。为此,对纤维的增强增韧机理开展了大量的研究。

文献[90]中研究了钢纤维分布角度分别为0°、

30°,45°,60°,90°时对RPC断裂性能的影响。结果表明:当分布角度为0°时,构件的平均应变最大,其变化规律为0°~60°降低,60°~90°增加;轴拉构件在0°~40°之间为延性破坏,60°~90°之间为脆性破坏,40°~60°则处于中间状态,RPC的伪应变强化效应与钢纤维的分布特征有较大的关系,但是纤维分布方向对抗压强度的影响较小。

大量的研究表明,钢纤维对UHPC的抗拉强度和韧性有明显的提高作用,这种提高作用,在不影响钢纤维分布均匀性的前提下(一般在3.5%~4%之间),与钢纤维的掺量成正比^[91-93]。受拉破坏时,在开裂口处由于钢纤维的桥搭作用,与普通混凝土相比,它的抗拉强度和韧性有很大的提高,其破坏形式是钢纤维被拔出破坏,而不是拉断破坏^[94-96]。

对抗压强度,钢纤维也有一定的增强作用,但是一般认为存在一个界限掺量,当超过这个掺量时,抗压强度不升反降。对于这个界限掺量,各国学者有不同的看法,从2%到4%都有^[97-100]。

为探讨纤维对UHPC强度(尤其是抗拉强度)影响的细观作用机理,一些研究对纤维与UHPC基体的相互作用开展了研究。文献[101]中提出了一种新型的抗拉试验方法(在夹具和试件间采用转换板,使拉应力均匀)用于测试纤维的拔出试验。通过优化UHPC基体的材料配制比例,镀铜直纤维与UHPC的最大等效粘结应力可达到22MPa,纤维的最大拉应力可达到1840MPa,拉出所需要的能耗为71J·mm⁻²,其粘结强度、纤维最大应力和拉出耗能分别为HSC的7倍、4倍和20倍;此外,UHPC的拉拔荷载-位移曲线达到最大荷载后没有出现像HSC曲线的突然下降现象,表明UHPC与纤维的摩擦因数更大,其密实性较HSC更好^[102]。文献[103]中研究镀铜直纤维、变形纤维(弯勾纤维和扭转纤维)物理化学界面的粘结性能,变形纤维的粘结强度47MPa是直纤维的5倍。通过优化UHP-FRC的配合比,直纤维的粘结强度可以从10MPa提高到20MPa。硅灰对粘结性能有利,最优的硅灰水泥比为20%~30%,当硅灰水泥比为30%时,其粘结强度可提高14%^[104]。文献[105]中认为,掺入质量分数为3%的钢纤维,其抗压强度、弹性模量、收缩性能和界面性能最好,并给出了粘结应力-滑移模型。

4 材料性能研究

4.1 拉、压强度等基本力学性能

在强度等力学性能方面,主要研究内容有抗压

强度、抗拉强度、韧性、弹性模量和应力-应变曲线、极限应变、泊松比、平均断裂能、延性、热膨胀系数等,其中,抗压强度、抗拉强度是UHPC最基本的力学性能,已开展了大量的研究。

在材料性能的测试方面,与普通混凝土和高强混凝土一样,UHPC也存在着尺寸效应问题,因此如何根据其特点,制定统一的测试标准,已成为研究的主要内容。由于UHPC基体组成材料的最大粒径不超过1 mm,因此除了一般混凝土测试方法外,研究人员还采用了砂浆或胶砂的测试方法。中国学者常采用边长为150 mm(混凝土标准试件)、100 mm(混凝土非标准试件)、70.7 mm(建筑砂浆试件)和40 mm(胶砂试件)等立方体试件和尺寸为150 mm×150 mm×300 mm和100 mm×100 mm×300 mm等棱柱体试件^[106-112];国外研究人员常采用 $\Phi 76 \times 153$, $\Phi 100 \times 200$, $\Phi 90 \times 180$ 等圆柱体试件^[12,109-111]。文献[110]中的研究表明,如果不掺入纤维,RPC的尺寸效应与普通混凝土或高性能混凝土大致相同,但是如果掺入纤维,RPC的尺寸效应变得明显。文献[112]中认为,与掺入纤维的UHPCFRCC相比,不掺入纤维的UHPC抗压强度的变异系数较大。总的来说,小尺寸试件所测的强度要大于大尺寸试件,但是各尺寸试件所测强度之间的比值,目前还没有统一的结论。

文献[108]中认为,边长分别为70.7 mm和40 mm的试件对应的是建筑砂浆和水泥胶砂试件规格和测试方法,与现有普通混凝土或高强混凝土的测试方法之间存在一定的差异,不应作为RPC抗压强度的测试试件。鉴于一般检测机构或实验室的压力机能力,文献[17],[106],[108]中均建议采用边长为100 mm的RPC立方体试块为标准测试试件。根据不同形状试件的测试结果可知,立方体试件的抗压强度大于棱柱体的抗压强度,文献[108]中汇总了65个试验样本,得出二者之间的比值为0.87,略高于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[113]中规定的高强混凝土C80的二者比值0.82。

目前混凝土抗拉强度主要的测试方法有轴拉试验、劈裂试验和抗折试验3种。由于混凝土材料的抗压强度高,抗拉强度低,且抗拉强度测试难度较大,在结构中发挥的作用较小,因此抗拉强度的测试并没有得到重视,各种测试结果之间的关系以及工程中的应用标准还不统一。虽然UHPC的拉压比与普通混凝土的拉压比相差不大,但是其抗拉强度绝对值已达到10 MPa或更高,在结构受力中能发

挥一定的作用,因此,UHPC的抗拉强度研究受到了重视。UHPC的抗拉强度测试方法,基本沿用了普通混凝土的3种测试方法,研究表明,同普通混凝土一样,UHPC测得的抗拉强度从高到低依次为轴拉强度、劈拉强度以及弯拉强度,但是对于各种测试结果之间的比值量化关系,目前为止还没有公认的定论^[12,91,100,108]。

除抗压强度、抗拉强度外,许多研究者对UHPC的其他材性进行了综合性的研究。美国联邦公路局^[12]和美国密歇根州交通技术研究院^[13]对UHPC的强度、耐久性、长期性能等力学性能进行了较为系统的研究,为其在美国桥梁工程中的应用奠定了理论基础。文献[114]中研究了RPC200的棱柱体抗压强度、立方体抗压强度、劈拉强度、弹性模量、峰值应变、泊松比等参数,并建立了弹性模量和峰值应变的拟合公式。文献[115]中采用超声波技术来测定UHPC的弹性模量和泊松比。文献[110]中认为,ACI公式可以预测UHPC的弹性模量。

Fehling等^[116]研究了不同钢纤维掺量UHPC的受压应力-应变曲线,认为不掺入钢纤维UHPC受压破坏时呈现爆炸性,无曲线下降段;掺入钢纤维UHPC的应力-应变曲线则存在明显的下降段,但是随着钢纤维掺量和分布的不同,曲线下降段的斜率不同。对于应力-应变曲线的上升段,不同养护方式所对应的系数也是不一样的^[110]。Prabha等^[109]通过MTS测得不同钢纤维种类和掺量RPC的单轴受压应力-应变全曲线,认为RPC的应力-应变曲线上上升段近似呈直线,下降段的形状则取决于钢纤维含量和种类。纤维的形状(光滑、弯钩、扭转)对抗拉强度、峰值应变和耗能能力的影响较小,而纤维的体积掺量起决定性的作用;光滑纤维与UHPC基体的粘结强度高,所以未必需要弯钩和扭转的纤维^[117]。Fujikake等^[118]采用伺服控制试验机,研究了不同应变率对RPC受拉应力-应变全曲线的影响。结果表明,初裂抗拉强度和极限抗拉强度都随着加载速率的提高而增加。

文献[119]中对抗拉和抗压本构关系测试方法进行了改进,研究发现,钢纤维对抗拉强度提高明显,但是对抗压强度和弹性模量提高不明显。文献[120],[121]中由弯曲试验采用反向分析方法来量化UHPCFRCC的受拉应力-应变关系,并将计算结果与直拉试验结果(DTTs)进行了比较,发现峰值应力和对应的应变略微偏大。

Liang等^[31,33,108]研究了不同砂胶比、水胶比、钢

纤维掺量对RPC强度的影响。结果表明:随砂胶比的增大,RPC的抗折强度、抗压强度均减小;随水胶比的增大,RPC的抗折强度增大,但是抗压强度在水胶比为0.18时达到最大值;随钢纤维掺量的增大,RPC的轴拉强度、劈拉强度和抗折强度均增大,但是抗压强度在钢纤维掺量2%时达到最大值。

4.2 体积稳定性

收缩、徐变等体积稳定性是RPC长期性能研究的主要内容^[12-13,122-124]。研究结果表明:由于孔隙致密,采用蒸汽养护的RPC收缩和徐变均减小,收缩的速度较普通混凝土快,在24h内可完成总收缩量的1/2,这有利于预应力RPC构件工厂化生产时生产效率的提高;随着水灰比和高效减水剂掺量的增加,RPC收缩增大^[125]。对于温度20℃、相对湿度50%下养护的RPC,标准试件(75mm×75mm×280mm)1d的总收缩为 377×10^{-6} ,7d的总收缩为 488×10^{-6} ,其早期收缩占总收缩的77%;与标准试件相比,小试件(25mm×25mm×280mm)的总收缩较大^[126]。

在RPC中掺入SAP(Super-absorbent Polymer)和SRA(Shrinkage-reducing Admixture)可使RPC的自收缩降低^[127]。在阻止水蒸发方面,采用石蜡效果比较好。在凝结时间试验中,当抗穿透压力为1.5MPa时,UHPC的应力开始发展,这个时间比初凝时间早0.6h,该时间被定义为零应力点;自收缩应变比总应变大,15d时为 6.13×10^{-4} 。超声波技术可用于测量其早期抗拉强度和弹性模量^[128]。文献[129]中认为:零应力点是浇注后6h;从6~15h,自收缩应变为 5.77×10^{-4} ;由于自干燥,30d时,自收缩应变为 7.53×10^{-4} ;因为玻璃纤维增强复合材料(GFRP)的刚度最低,只有普通钢筋的1/4,采用GFRP的自收缩应力只有采用普通钢筋变形的66.5%~70.1%;钢筋表面特性对自收缩影响不大。文献[130]中认为,掺入纤维可以减少SRA从UHPC中的渗出,减少早期收缩,从而提高UHPC的抗裂性。高温养护加速了水化和自干燥过程,所以UHPC自收缩增加^[131]。

对于预测长期性能来说,采用拉伸徐变比抗拉强度更合适,因为拉伸徐变更敏感且重要。热处理和钢纤维对拉伸徐变性能的影响较大,由于纤维-基体界面在热处理下变得致密,短直钢纤维能降低UHPC的拉伸徐变^[132]。对于徐变,虽然徐变系数较小,但是由于材料的强度提高,早龄期加载产生的徐变变形还是相当可观的,因此,工程应用中应尽可能

地采用晚龄期加载。

4.3 耐久性

对于RPC的耐久性研究,其主要集中在抗除冰盐腐蚀、抗氯离子渗透能力以及抗冻融循环能力等方面^[12-13,133-136]。

大量的研究均表明:RPC具有非常致密的微观结构和很强的抗渗透能力以及很好的抗冻融循环能力^[137];UHPC的耐水性比普通混凝土好(以渗出的钙为指标)^[138],UHPC具有很好的水密性和愈合裂缝的能力^[139],UHPC耐硫酸盐、氯盐,但是不耐高浓度硫酸^[140]。文献[141]中指出:UHPC的抗弯强度是抗压强度的16%~18%;将冻融循环1098次构件与放置于20℃的水中养护1年的构件相比,其抗压强度和弹性模量反而增加。文献[142]中指出,气体渗透法比孔结构能更准确评价UHPC的耐久性;UHPC的耐久性较普通混凝土和砂浆好。

4.4 其他性能

研究人员对UHPC的其他性能也开展了研究,如高温、抗爆抗冲击、粘结性能等。

UHPC立方体抗压强度在温度达到100℃时开始下降,在200℃~500℃之间时增加,温度超过600℃后又开始下降。当温度低于300℃时,UHPC立方体抗压强度随着纤维掺量的增加而增加,但是当温度高于300℃时,UHPC立方体抗压强度随着纤维掺量的增加而降低。UHPC立方体抗拉强度在200℃时开始下降,在200℃~300℃之间时增加,温度超过300℃后又开始下降。当温度低于600℃时,UHPC立方体抗拉强度随着纤维掺量的增加而增加,但是当温度高于600℃时,UHPC立方体抗拉强度随着纤维掺量的增加而降低。在火灾环境下,UHPC抗拉强度降低速度比其抗压强度高,UHPC强度降低速度和质量损失率低于普通混凝土和高性能混凝土^[143-145]。在UHPC中复掺碳纤维和聚丙烯纤维,聚丙烯纤维在高温下融化后,为蒸汽提供逸出通道,提高了UHPC的抗火性能,但是其效果不如高强混凝土和高性能混凝土^[146]。

UHPC抗爆性优于普通混凝土^[147],穿透深度小于C30混凝土的1/2^[148],钢纤维可避免它在动荷载下产生粉碎性破坏^[149-150]。Lai等^[151]建立了受冲击后RPC的本构关系,并模拟了其冲击破坏过程。Tai^[152]建立了动能耗散能力与高应变率、钢纤维含量之间的关系。文献[153]中研究了弯曲荷载和剪切荷载下的UHPC动力特性,给出了动力增长系数的变化规律。文献[154]中的研究发现,UHPC

在动载下的抗压强度、劈拉强度对应变率和应力率很敏感。文献[155]中采用离散元编制并验证了模拟弹体侵彻的程序 CORTUF。

UHPC 的粘结性能包括它与钢筋的粘结性能和它与其他混凝土的粘结性能。文献[156],[157]中研究了光圆钢筋与 RPC 的粘结性能。文献[158]中研究了高强钢筋与 RPC 的粘结性能,结果表明,与普通混凝土相比,高强钢筋与 RPC 的荷载-滑移曲线上升段较陡,下降段平缓或有回升。文献[159]中研究了碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)筋与 UHPFRC 的粘结,发现光圆 CFRP 筋的粘结强度与磨砂 CFRP 筋的相差不多;随着 CFRP 筋直径和锚固长度的增大,粘结强度降低,破坏发生在 CFRP 筋外层。此外,有些学者还研究了 RPC 的断裂性能^[96]、抗裂评价方法^[160]、疲劳损伤^[161]等。

5 工程应用研究

5.1 基本构件的受力性能

配筋 RPC 梁和预应力 RPC 梁受力性能的研究,主要集中在 RPC 较高的抗拉能力对结构正截面和斜截面抗裂性能与极限承载力影响的分析上,研究表明,在设计计算中应以充分考虑 RPC 材料优良的抗拉能力^[162-172]。与普通梁相比,UHPFRC 梁具有更好的极限荷载、刚度和抗裂性能^[171]。浇注 UHPC 方法不同,即从梁的中间部位开始浇注和从梁的端部开始浇注,钢纤维的方向不同,UHPC 梁的抗弯性能也不同^[172]。文献[173]中研究了 UHPC 梁的扭转性能,发现随着配箍率的增加,极限扭转强度和扭转刚度增加,且极限扭转强度随着纵筋配筋率的增加而增加。

与普通钢筋相比,采用高强钢筋的 UHPC 梁具有较好的延性和较高的富余承载力^[174]。在梁中采用 UHPC 作为受拉钢筋,可承担 30 MPa 的弯曲拉伸强度,且没有任何滑移现象,梁具有较好的延性^[175]。与没有钢骨的 UHPC 梁相比,预应力钢骨 UHPC 梁具有较高的富余抗剪承载力、裂后刚度以及较好的剪切延性^[176]。

对 UHPC 梁板的抗冲击能力也进行了研究,在没有箍筋情况下,冲击荷载作用下的 RPC 梁产生很多细小的裂缝,发生延性的弯曲破坏^[177]。在 RPC 梁中,加载速度的增加将使其极限荷载、荷载-位移曲线下下降段的斜率和极限挠度得到提高^[178]。文献[179]中研究了 UHPFRC 在冲击荷载和静力荷载

下的反应;在冲击荷载下,板的强度和断裂能远大于静力荷载时的。文献[180]中对 UHPFRC 板在冲击荷载下的性能进行了数值模拟,在该模型中考虑了 UHPFRC 的应变软化,并进行了参数分析。文献[181]中比较了普通混凝土柱和 UHPC 柱在冲击荷载下的性能,并进行了仿真分析。

RPC 抗压强度极高,应用于柱结构具有巨大优势,研究表明,与普通钢筋混凝土柱相比,配筋 RPC 柱具有更为优越的静力和动力性能^[182-183]。然而,当 RPC 不掺入钢纤维时,在高应力或复杂受力状态下爆裂性破坏现象明显,虽然掺入钢纤维有助于改善 RPC 的脆性,但是随着 RPC 抗压强度的增大,其脆性仍呈现增大的趋势。因此,研究人员开展了将 RPC 置于钢管中的试验研究,结果表明,与普通钢管混凝土相同,钢管对管内 RPC 也可以发挥套箍效应,其强度与延性均得到了提高^[184-189]。

另一种防止 RPC 脆性破坏的方法是采用 CFRP 布包裹 RPC 柱,研究发现,对于轴压构件,其可提高承载力 19%,但是对偏压柱的承载力提高不大^[190-191]。对于纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)管 UHPC 柱的滞回性能,内部没有配筋的构件和有配筋的构件具有相同的强度和延性;与钢筋混凝土相比,由于 FRP 的弹性特性,FRP 管+纤维混凝土(UHPC Filled FRP Tubes, UHPCFFT)具有很高的抗弯强度和初始刚度,但是延性和位移会小一些,耗能能力相似^[192]。

文献[193]中提出一种 UHPFRC 预制构件节点,其优点是搭接长度短,避免横向和纵向钢筋的交错,能提高现场施工效率与安全性。文献[194]中研究 RPC 用于 CFRP 筋锚固的局部抗压性能。文献[195],[196]中对配有钢纤维 RPC 永久柱模的钢筋混凝土(RC)框架进行了静力性能与抗震性能的试验研究。

5.2 工程研究

UHPC 被提出来后,已在许多工程中得到应用,其中以在桥梁中的应用最多。文献[20]中收集到的应用 UHPC 作为主结构修建的桥梁有 33 座,结合工程应用已开展了大量相应的研究。

美国联邦公路局自 2001 年开始研究 RPC 在公路基础设施中的应用,开展了 π 形梁、井式桥面板、桥面板连接件、钢筋和钢纤维在 RPC 内部的协同效应以及开裂 RPC 梁的抗拉性能与耐久性基础试验研究,目前已成功将 RPC 应用于多座桥梁^[124]。

日本为将 UHPC 应用于其国内的桥梁工程建

设,进行了UHPC力学性能、耐久性能、湿接缝、干接缝以及UHPC与普通混凝土的PBL连接等试验研究^[197]。德国为建造Gärtnerplatz桥进行了一系列的验证性试验,如UHPC性能和质量控制试验、UHPC桥面板受弯和受剪极限承载力试验、钢板与UHPC梁接合处的耐摩擦性试验等^[198]。奥地利进行了UHPC柱试验研究,其成果为威尔德UHPC拱桥提供了理论基础^[199]。中国为修建迁曹铁路溧柏干渠大桥,也开展了UHPC梁的模型试验研究^[168]。此外,文献[200]中开展了主跨为400m的预应力RPC连续箱梁桥的试设计研究,可克服钢梁造价与养护费用高的缺点,又可解决预应力普通混凝土梁结构笨重、施工工期长等问题。

拱是以受压为主的结构,能够充分发挥UHPC的超高抗压强度,然而在现有的应用中,拱桥只有2座。为推动其应用,文献[201]中进行了2个RPC拱在集中荷载作用下的受力全过程试验,结果表明,RPC拱的受力性能优于RC拱,在同级荷载下RPC拱裂缝的宽度约为RC拱的25%~50%,且开裂荷载、钢筋屈服荷载和极限承载力均较RC拱有明显的提高。为促进应用,克罗地亚提出了主跨分别为432,500,750,1000m的混凝土拱桥设计构思^[202-203]。在中国,福州大学开展了跨径为160,420,600m的RPC拱桥系列试设计研究,结果表明,与普通混凝土拱桥相比,RPC拱桥主拱圈的混凝土用量与自重可减少约40%,具有很好的工程应用前景^[204-206]。

UHPC材料强度高但价格相对也高,因此,在结构中如何充分发挥其材料特性,研究人员也进行了一些结构与施工方面的创新研究。除传统的箱梁截面外, π 形截面、桁架等也都得到应用^[20,207-209]。UHPC与普通混凝土或高强混凝土的组合梁结构、将UHPC使用在保护层等研究,也都得到了开展和应用^[210]。此外,Sparowitz等^[211]还提出了RPC与玻璃形成的全封闭人行桥组合结构并开展了试验。

除主体结构外,UHPC还被用于预制板的铰缝、桥面板等桥梁局部结构或构造之中^[207,212]。邵旭东等^[213]将UHPC用于钢桥面铺装层中,进行了足尺节段模型静载试验并已应用于广东马房桥。文献[214]中将胶合板梁和UHPC板组合成新型桥面体系,探讨其耐久性(测试老化前后的粘结力)和力的传递能力,并研究粘结性能对不同破坏模式下力的传递、极限承载能力和局部变形的影响。UHPC还被用于既有桥梁的加固与改造之中,自

2004年以来仅在瑞士UHPC就有20次被用于桥面板、防撞护栏、墩柱等加固中^[215]。

除了桥梁工程外,UHPC在建筑、石油、核电、市政、军事、道路、海洋等工程中也都有着广阔的应用前景,为实际的应用或潜在的应用,研究人员已开展了大量的针对性研究。文献[216],[217]中开展了UHPC悬臂挡墙的足尺试验和设计计算方法研究。文献[218]中开展了UHPC打入桩施工过程与打入后的受力性能试验。文献[219]中将UHPC用于高压电线杆交叉双臂,以取代易腐蚀的木材或钢杆,试验证明,其承载能力满足要求,并研究了不同的浇注方式下普通钢筋周围钢纤维方向对UHPC交叉双臂抗弯强度的影响以及剪跨比对弯曲和剪切能力的影响。日本为修建细川河灌溉渠道进行了RPC抗磨蚀性的试验,结果表明,普通混凝土的抗磨蚀性仅为RPC的40%左右^[220]。中国针对金属井盖被盗严重,开展了RPC井盖的试验研究,与普通钢筋混凝土井盖和铸铁井盖相比,RPC井盖具有轻质、高强、高韧性以及使用安全方便和造价低廉等特点^[94,221-223]。文献[224],[225]中开展了采用离心法生产UHPC空心柱在电线杆中应用的研究。文献[226]中研究了UHPC用于新建路面磨耗层和既有路面罩面修复的研究。文献[181],[227]中开展了UHPCFR在防护工程中的抗冲击试验。UHPC在中国目前应用最多的是高速铁路的电缆槽盖板,在盖板综合性能指标满足设计要求的前提下,开展了有效降低生产成本及控制产品质量的研究,原中国铁道部还专门颁发了《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》。

6 未来研究方向

6.1 基体材料组成、凝结硬化过程与微观结构研究

混凝土是一种多组分的不均匀多相体,材料来源的复杂与多样性,加剧了其变异性,微观结构复杂多变。对UHPC基体凝结硬化过程、微观结构已开展了较多的研究,表明其宏观性能的提高得益于其微观结构的改善。然而RPC水胶比低,大量未水化相会在后期继续水化,与普通混凝土差异较大,目前对UHPC形成机理、微观结构与宏观性能关系、低水胶比材料结构稳定性和耐久性的研究还不够系统与深入。因此,应采用现代测试技术,研究侵蚀环境下RPC胶凝体系水化-侵蚀反应交互作用的水化动力学,揭示侵蚀环境下RPC微观结构形成与演变规律,探讨侵蚀环境下RPC性能退化与失效机理,

建立基于力学性能和传输性能的侵蚀环境下 RPC 多尺度损伤模型,以推动 UHPC 材料设计理论的发展,为工程应用奠定理论基础。

6.2 纤维增强增韧机理细观力学研究

纤维是影响 UHPC 材性和成本的主要因素。一般纤维混凝土的纤维增加机理与细观力学的研究已较为成熟,能够根据基体与纤维参数预测纤维的增强作用。UHPC 掺入的钢纤维直径小、长细比较大及胶凝粒径小,因而它与基体间的粘结滑移、纤维的拉拔、纤维桥接和裂缝的偏转作用以及对混凝土材性的增强机理都有其自身的特性。目前纤维对 UHPC 作用的研究仍以试验及定性分析为主。由于纤维的材性、形状、长细比、掺量等参数较多,导致实测结果各异,难以形成直接指导纤维设计的理论。因此,在纤维增强增韧机理方面,应用细观力学分析和数值仿真分析方面还有待突破。

6.3 组成设计与制备技术

UHPC 的组成设计与制备是其研究与应用的基础,正如第 2.1 节中指出的世界各国结合当地的材料开展了大量的配合比设计,实验室制备已无困难,各国都在致力于将复杂的实验室制备技术转化为低成本的工程实用制备技术,这需要理论与技术 2 个方面的突破。

尽管 UHPC 剔除了粗骨料,减少了骨料与水泥石之间的界面缺陷,材料均匀性得到了提高。然而由于第 3.1,3.2 节中所介绍的理论尚未有根本性的突破,加上 UHPC 养护制度、拌制技术均影响到材性,因此,其配合比设计目前还是以经验、试验方法为主。如何根据 UHPC 的特点,实现 UHPC 配合比设计科学化的突破,是今后的主要发展方向。

另一方面,从技术层面来说,工程应用制备时,如何保证各组成材料混合均匀、纤维不结团等,需要从设备与技术 2 个方面来解决。国外一些企业通过专利和注册商标,如丹麦的 Densit、法国的 Ductal、德国的 Ducon、马来西亚的 Dura,具有较强的研发和市场推广动力,也促进了将现有的实验室制备技术向工程实用制备技术转化。相比较而言,中国目前尚无相似的市场机制,尽管已有大量实验室制备成果,但是实际应用还较少,实用制备技术还不够成熟,这将成为影响 UHPC 与普通混凝土和高强混凝土竞争的重要因素。

6.4 材性测试方法与指标体系

材性是 UHPC 工程应用的重要技术指标。虽然已开展了大量的研究,但是本文第 4 节中指出,它

与普通混凝土、高强混凝土均有不同之处,UHPC 各种试验结果具有相当的离散性,目前对于 UHPC 材性测试方法与指标体系还没有统一的标准,如抗压强度各类尺寸试件之间的换算关系仍没有较统一的计算公式可供使用;抗拉强度不同试验方法测试结果之间的差异缺乏有效的分析,缺少 3 种抗拉强度之间的简单换算关系;弹性模量与强度之间的关系尚未有公认统一的模型等。在工程应用中,混凝土的应力-应变关系等材料的本构关系,是结构分析尤其是结构非线性与破坏模式分析的重要基础。目前这方面虽然已开展了一些研究,但是并未形成共识,不同研究者给出的应力-应变关系曲线有时相差甚大,而且以一维为主。因此,今后应形成有共识的一维应力-应变关系,并开展多维应力-应变关系、破坏准则以及动力与疲劳荷载下的本构关系研究。

已有研究表明,采用蒸汽养护的 UHPC 收缩和徐变较小,但是对于常温养护时如何减小收缩和徐变,还有待进一步研究。UHPC 材料的致密性较高,抗渗性、抗碳化、抗氯离子渗透、抗冻融与耐磨性均较好,但是钢纤维锈蚀问题、基体中未水化水泥可能遇水继续水化等耐久性问题,还需要深入的研究。

今后应对 UHPC 材料力学指标、耐久性能和体积稳定性等分项指标和指标体系进行研究,提出基本指标与重要指标,分析其与普通混凝土和高性能混凝土测试技术的异同,进行必要的改进与创新。

6.5 基于工程应用的研究

对于实际工程结构中常用的 UHPC 梁、板、柱、拱、节点等已进行了相当多的试验研究,其中以梁的试件数量最多,柱的试件数量偏少。与普通混凝土基本构件的试件相比,UHPC 的试件总量偏少,尚不足以建立起成熟可靠的设计计算方法。

预制的 UHPC 构件可在工厂实现高温加压养护,并获得较好的材性。预制构件如何连接成为 UHPC 结构设计的关键,虽然对模式化构件和节点已开展了一些研究,但是仍不够成熟。在强度提高后,结构的设计在参照钢结构构件的轻型化、装配化施工技术方面创新不够。由于中国的混凝土工程工厂化、产品化程度低,这方面的研究更显得滞后。

目前,UHPC 预制构件的连接方式仍以现浇 UHPC 为主,预制与现浇 UHPC 在不同养护制度下(现浇较难采用高温加压养护),如何实现材性、体积稳定性等匹配,目前研究尚少,还需要进一步研究。

6.6 创新性应用研究

正如一些专家指出的,UHPC 虽然被命名为超

高性能混凝土材料,但是却可以认为是一种新型材料,其在结构中的应用仍以沿袭传统的混凝土结构为主,虽然已有一些结构方面的创新,但是仍未定型。

UHPC弹性模量的提高与强度的提高不成正比,结构高强轻型化后,如何通过结构设计提高其刚度,需要进行结构创新研究。UHPC具有超高的抗压强度,尽管纤维提高了其韧性,但是破坏时仍具有较大的脆性,如何通过结构设计,避免其出现脆性破坏,需要结构的创新。UHPC材料单价较高,如何充分发挥材料的优势,也需要进行结构的研究。

为避免UHPC受压时出现脆性破坏,一些学者将RPC置于钢管中,开展了钢管UHPC的受力性能研究。然而,现有的钢管RPC研究中,只是简单地从改善其受压脆性来考虑,沿用传统钢管混凝土的研究思路展开,而没有考虑UHPC的填充是否会引引起质的变化,如钢管中的UHPC是否需要掺入纤维,是否需要蒸汽养护;外部钢管是否会对管内混凝土的浇注质量产生影响,进而对RPC的工作性能提出新的要求而影响到配制技术;钢管材性是否也要提高而采用超高强钢与之匹配;是否应采用约束套箍钢管混凝土结构。

UHPC除了传统的工程结构领域应用外,在其他领域也有着广阔的应用前景。UHPC已在一些市政设施中得到应用,如椅子、凳子;在机械基础中的应用;在钻孔钻头中的应用;在保险柜中的应用;在商业家具中的应用。UHPC作为一种强度高、耐久性好的材料,在替代钢材应用方面,还可以拓展到许多其他应用领域。

6.7 经济性研究

经济性是建筑材料应用的关键。UHPC应用除结构本身材料减少外,还将带来自重减轻对施工、基础要求降低的间接经济效益,耐久性提高对长期性能和全寿命造价降低的综合经济效益以及对环保、节能、低碳等社会可持续发展的社会效益。然而已有的研究中,定性分析的较多,量化的研究较少,说服力有限。

影响应用更直接的是一次性投资的经济性。现有的UHPC材料单价较高、施工费用较大,是影响其大量应用及推广的关键问题之一。在降低材料单价方面,人们对各种替代材料开展了许多研究,以河砂替代石英砂已较为成熟,但是对单价较高的钢纤维和硅灰的替代效果仍不理想。

实际应用中,对不同工程、同一工程不同部位或构件的材性指标要求存在不同,如何进行基于工程

性能要求的材料组成设计,以达到最优性价比,这是亟待解决的问题。中国混凝土工业化程度低,UHPC应用少,也是影响UHPC经济性的主要原因。

6.8 标准与规范的研究

法国、日本土木工程学会已制订了相应的UHPC的设计施工指南,其他如德国等也在编制相应的指导性文件。中国国家标准《活性粉末混凝土》已在征求意见,但是它仅为材料的标准,还缺乏工程应用的标准与规范。

在现有的基础上,随着研究的进展和工程经验的不断积累,制订、修订、完善相关的标准与规范,也是今后研究的主要方向之一。

7 结 语

UHPC从提出到现在已有20年的历史,在理论研究与应用方面都取得了可喜的进展。中国一大批研究人员紧跟国际的学术前沿,开展了大量的UHPC研究,为其今后的应用及推广奠定了坚实的基础。但是中国对UHPC的研究较为分散,以小项目研究为主,系统性和合作有待加强,目前尚未形成全国性的专门研究的学术组织与定期会议。在应用方面,UHPC在高速铁路工程中应用相对较好,在公路工程中也已开始。但是与国外相比,UHPC实际工程应用偏少,如果将其置于近30年来中国处于大规模的基础设施建设时期背景之下,就显得更少。随着中国对环保、可持续发展的日益重视,UHPC在今后相当长一段时间的基本建设中仍有着广阔的应用前景,有望在UHPC的理论研究与工程应用方面赶上并超过世界先进水平。

参考文献:

References:

- [1] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High Performance Concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [2] 冯乃谦.高性能混凝土结构[M].北京:机械工业出版社,2004.
FENG Nai-qian. High Performance Concrete Structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [3] AITCIN P C. High-performance Concrete [M]. London: E & FN Spon, 2004.
- [4] SHI C J, MO Y L. High-performance Construction Materials—Science and Applications [M]. Washington

- DC; World Scientific Publishing Company, 2008.
- [5] 胡曙光. 先进水泥基复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- HU Shu-guang. Advanced Cement-based Composite Materials[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] 赵国藩, 黄承逵. 纤维混凝土的研究与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.
- ZHAO Guo-fan, HUANG Cheng-kui. Research and Application of Fiber Concrete [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1992
- [7] BACHE H H. Densified Cement/Ultra-fine Particle-based Materials[C]//ICSC. Proceedings of the 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa; Aalborg Portland, 1981; 1-35.
- [8] BIRCHALL J D, MAJID K I, STAYNES A A, et al. Cement in the Context of New Materials for an Energy-expensive Future[J]. Philosophical Transaction of the Royal Society of London A, 1983, 310; 31-42.
- [9] 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.
- [10] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7); 1501-1511.
- [11] LARRARD D F, 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.
- [12] FHWA. Material Property Characterization of Ultra-high Performance Concrete[R]. Washington DC; FHWA, 2006.
- [13] Michigan Tech Transportation Institute. Ultra-high Performance Concrete for Michigan Bridges Material Performance—Phase I[R]. Houghton; Michigan Tech Transportation Institute, 2008.
- [14] Association Francaise de Genie Civil. Ultra High Performance Fiber-reinforced Concretes-interim Recommendations[M]. Paris: Association Francaise de Genie Civil, 2002.
- [15] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for Design and Construction of Ultra-high Performance Fiber-reinforced Concrete Structures (DRAFT) [M]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2006.
- [16] CHIN W J, KIM Y J, CHO J R, et al. Dynamic Characteristics Evaluation of Innovative UHPC Pedestrian Cable Stayed Bridge[J]. Engineering, 2012, 12(4); 869-876.
- [17] 清华大学. 国家标准《活性粉末混凝土》(征求意见稿)[Z/OL]. (2013-09-15) [2013-10-15]. <http://www.risn.org.cn/>.
Tsinghua University. National Standard Reactive Powder Concrete(Exposure Draft)[Z/OL]. (2013-09-15)[2013-10-15]. <http://www.risn.org.cn/>.
- [18] TANG M C. High Performance Concrete—Past, Present and Future[C]//ASTM. Proceedings of 1st International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel: ASTM, 2004; 3-9.
- [19] BATOZ J F, BEHLOUL M, UHPFRC Development on the Last Two Decades: An Overview[C]//TOUT-LEMONDE F, RESPLENDINO J. International Symposium on UHPFRC. Marseille: RILEM Publications, 2009; 1-13.
- [20] 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.
- [21] 武春丽. 两部委联推高性能混凝土[N]. 中国建设报, 2014-03-06(8).
WU Chun-li. Two Ministries Generalize High Performance Concrete [N]. China Construction News, 2014-03-06(8).
- [22] AYDIN S, YAZICI H, YARDIMCI M Y, et al. Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2010, 107(5); 441-449.
- [23] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Ultra-high Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa(22 KSI): A Simpler Way[J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(1); 46-34.
- [24] WANG C, YANG C, LIU F, et al. Preparation of Ultra-high Performance Concrete with Common Technology and Materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(4); 538-544.
- [25] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWLL S. Optimizing Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete[J]. Concrete International, 2011, 33(9); 35-42.
- [26] HASSAN A M T, JONES S W, MAHMUD G H. Experimental Test Methods to Determine the Uniaxial Tensile and Compressive Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37; 874-882.
- [27] 何峰, 黄政宇. 200~300 MPa 活性粉末混凝土

- (RPC)的配制技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2000(4):3-7.
- HE Feng, HUANG Zheng-yu. Study on the Preparing of 200-300 MPa Reactive Powder Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2000(4):3-7.
- [28] 吴炎海, 何雁斌. 活性粉末混凝土(RPC200)的配制试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4):44-49.
- WU Yan-hai, HE Yan-bin. Experimental Research on Proportion of Reactive Powder Concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4):44-49.
- [29] 闫光杰, 阎贵平, 安明喆, 等. 200 MPa 级活性粉末混凝土试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(2):116-119.
- YAN Guang-jie, YAN Gui-ping, AN Ming-zhe, et al. Experiment Study on 200 MPa Reactive Powder Concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(2):116-119.
- [30] 郑文忠, 李 莉. 活性粉末混凝土配制及其配合比计算方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(2):13-17.
- ZHENG Wen-zhong, LI Li. Preparation and Mix Proportion Calculation of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(2):13-17.
- [31] LIANG Yong-ning, CHEN Bao-chun, JI Tao, et al. Effects of Sand-binder Ratio, Water-binder Ratio and Volume Percentage of Steel Fiber on the Performance of RPC [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2011, 39(5):748-753.
- [32] JI T, CHEN B C, ZHUANG Y Z, et al. Effects of Packing Degree and Calcium-silicon Ratio of Cementitious Material on Strength of Reactive Powder Concrete[J]. Advances in Building Materials, 2010, 168-170:1034-1037.
- [33] DU R, HUANG Q, CHEN B. Experimental Study on RPC Mechanical Property and Cost-performance Ratio of Content of Steel Fiber[C]//Bridge Magazine Office. Proceedings of 3rd Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges. Zagreb: Bridge Magazine Office, 2011:159-166.
- [34] 张彭成, 康 青, 沈志强, 等. 钢纤维与碳纤维混合增强活性粉末混凝土力学性能实验研究[C]//赵光明. 第七届中国功能材料及其应用学术会议论文集:第5分册. 重庆:重庆功能材料期刊社有限公司, 2010:223-235.
- ZHANG Peng-cheng, KANG Qing, SHEN Zhi-qiang, et al. Experimental Research on the Mechanical Properties of Steel Fiber and Carbon Fiber Reinforce RPC [C]//ZHAO Guang-ming. Proceedings of 7th China Functional Materials and Its Application: 5th Part. Chongqing: Chongqing Functional Materials Journal Club Co., Ltd, 2010:223-235.
- [35] 柯开展, 周端忠. 掺短切碳纤维活性粉末混凝土的力学性能研究[J]. 水利发电学报, 2007, 26(1):90-96.
- KE Kai-zhan, ZHOU Rui-zhong. Researches on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1):90-96.
- [36] 郑文忠, 李海艳, 王 英. 高温后不同聚丙烯纤维掺量活性粉末混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9):119-126.
- ZHENG Wen-zhong, LI Hai-yan, WANG Ying. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete with Different Dosage of Polypropylene Fiber After High Temperature [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9):119-126.
- [37] 袁 萍, 龚礼明. 纤维材料对矿渣活性粉末混凝土力学性能影响分析[J]. 混凝土, 2009(12):58-60.
- YUAN Ping, GONG Li-ming. Analysis of Mechanics Performance Impact About Fibrous Material to Gangue Active Powder Concretes[J]. Concrete, 2009(12):58-60.
- [38] 毕巧巍, 杨兆鹏, 较 全, 等. 混杂纤维(玻璃纤维与碳纤维)活性粉末混凝土的力学性能[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(6):19-21.
- BI Qiao-wei, YANG Zhao-peng, JIAO Quan, et al. Experiment Study on Mechanical Properties of a Hybrid Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2009, 30(6):19-21.
- [39] 钟世云, 王亚妹, 高汉青. 纤维对自密实活性粉末混凝土强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5):522-527.
- ZHONG Shi-yun, WANG Ya-mei, GAO Han-qing. Effect of Fibers on Strength of Self-compacting Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5):522-527.
- [40] YAZLCL H, YIGITER H, KAEABULUT A S, et al. Utilization of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag as an Alternative Silica Source in Reactive Powder Concrete[J]. Fuel, 2008, 87(12):2401-2407.
- [41] ALLENA S, NEWTSON C M. Ultra-high Strength Concrete Mixtures Using Local Materials[J]. Journal of Civil Engineering and Architecture, 2011, 5(4):322-330.
- [42] TOUTANJI H. Properties of Polypropylene Fiber Re-

- inforced Silica Fume Expansive Cement Concrete[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(4): 171-177.
- [43] AKHNOUKH A K, XIE H. Welded Wire Reinforcement Versus Random Steel Fibers in Precast/Pre-stressed Ultra-high Performance Concrete L-girders [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11): 2200-2207.
- [44] 胡曙光, 彭艳周, 陈凯, 等. 掺钢渣活性粉末混凝土的制备及其变形性能[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(1): 26-33.
- HU Shu-guang, PENG Yan-zhou, CHEN Kai, et al. Preparation and Deformation Performance of Reactive Powder Concrete (RPC) with Steel Slag Powder[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(1): 26-33.
- [45] 刘娟红, 王栋民, 宋少民, 等. 大掺量矿粉活性粉末混凝土性能与微结构研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(11): 54-57, 68.
- LIU Juan-hong, WANG Dong-min, SONG Shao-min, et al. Research on Durability and Micro Structure of High Volume Fine Mineral Mixture of Reactive Powder Concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(11): 54-57, 68.
- [46] 郑居焕. 掺偏高岭土活性粉末混凝土的试验研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(5): 47-49, 46.
- ZHENG Ju-huan. The Experimental Research on Metakaolin Reaction Power Concrete[J]. Building Science, 2008, 24(5): 47-49, 46.
- [47] 蔡瑞环. 高活性稻壳 SiO₂ 的制备及其在超高性能混凝土中的应用[D]. 广州: 暨南大学, 2008.
- CAI Rui-huan. Preparation of High Active Rice Husk Silica and Its Application to the Super High Performance Concrete [D]. Guangzhou: Jinan University, 2008.
- [48] ZHANG Y S, SUN W, LIU S F, et al. Preparation of C200 Green Reactive Powder Concrete and Its Static-dynamic Behaviors[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(9): 831-838.
- [49] 朱荣军. 人工砂混凝土配合比设计方法和抗裂性能的研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
- ZHU Rong-jun. Research on Mix Design Method and Crack Resistance of Manufactured Sand Concrete[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.
- [50] 蔡基伟. 石粉对机制砂混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- CAI Ji-wei. Research of Effects and Mechanism of Micro Fines on Manufactured Fine Aggregate Concretes[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [51] YIGITER H, AYDLIN S, YAZLCL H, et al. Mechanical Performance of Low Cement Reactive Powder Concrete (LCRPC)[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(8): 2907-2914.
- [52] ALDAHDOOH M A A, MUHAMAD BUNNORI N, MEGAT JOHARI M A. Development of Green Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Containing Ultrafine Palm Oil Fuel Ash[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 379-389.
- [53] VAN TUAN N, YE G, VAN BREUGEL K, et al. The Study of Using Rice Husk Ash to Produce Ultra High Performance Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 2030-2035.
- [54] SOLIMAN A M, NEHDI M L. Self-accelerated Reactive Powder Concrete Using Partially Hydrated Cementitious Materials [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(6): 596-604.
- [55] SCHROFL C, GRUBER M, PLANK J. Preferential Adsorption of Polycarboxylate Superplasticizers on Cement and Silica Fume in Ultra-high Performance Concrete (UHPC) [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(11): 1401-1408.
- [56] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix Design and Properties Assessment of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 29-39.
- [57] SADREKARIMI A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2(3): 409-417.
- [58] COLLEPARDI S, COPPOLA L, TROLI R, et al. Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete[R]. Detroit: ACI, 1997.
- [59] DUGAT J, ROUX N, BERNIE G. Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concretes[J]. Materials and Structures, 1996, 29(188): 233-240.
- [60] BONNEAU O, LACHEMI M, DALLAIRE E, et al. Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes [J]. ACI Materials Journal, 1997, 94(4): 286-290.
- [61] ZHAO S, FAN J, SUN W. Utilization of Iron Ore Tailings as Fine Aggregate in Ultra-high Performance Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 540-548.
- [62] SOLIMAN A M, NEHDI M L. Self-restraining Shrinkage Ultra-high-performance Concrete; Mechanisms and Evidence [J]. ACI Materials Journal, 2013, 110

- (4):355-363.
- [63] 肖锐,邓宗才,申臣良,等.新型超高性能混凝土的抗压性能及其砂浆体的孔结构分析[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2013,28(1):44-47.
XIAO Rui,DENG Zong-cai,SHEN Chen-liang,et al. The Compressive Property and the Mortar's Pore Structure of New Ultra-high Performance Concrete [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2013, 28(1): 44-47.
- [64] COLLEPARDI S, COPPOLA L, TROLI R, et al. Mechanisms of Actions of Different Superplasticizers for High-performance Concrete [C]//ACI. Proceedings of 2nd International Conference on High Performance Concrete: Performance and Quality of Concrete Structures. Gramado: ACI, 1999: 503-524.
- [65] 陈毅卓,阎贵平,安明喆.常规搅拌工艺条件下活性粉末混凝土抗压强度影响因素的研究[J].铁道建筑, 2003(3):44-48.
CHEN Yi-zhuo, YAN Gui-ping, AN Ming-zhe. Research of Influential Factors on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete with Normal Mixing Technology [J]. Railway Engineering, 2003 (3): 44-48.
- [66] 何雁斌,吴炎海,杨幼华,等.活性粉末混凝土(RPC200)的材料选用及制作技术[J].福建建筑, 2003(1):70-72.
HE Yan-bin, WU Yan-hai, YANG You-hua, et al. Compounding Technology and Materials Select for Reactive Powder Concrete [J]. Fujian Architecture & Construction, 2003(1): 70-72.
- [67] POITOU A, CHINESTA F, BERNIER G. Orientation Process During Extrusion of Reactive Powder Concrete Reinforced with Short Metal Fibers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(6): 593-598.
- [68] CAMACHO E, SERNA P, LOPEZ J A. UHPFRC Bolted Joints: Failure Modes of a New Simple Connection System [C]//PARRA-MONTESINOS G J, REINHARDT H W. Proceedings of HPRCC 6. New York: Springer, 2012: 421-428.
- [69] YANG S L, MILLARD S G, SOUTSOS M N, et al. Influence of Aggregate and Curing Regime on the Mechanical Properties of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2291-2298.
- [70] ZANNI H, CHEYREZY M, MARET V, et al. Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ^{29}Si NMR [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(1): 93-100.
- [71] DALLAIRE E, AITCIN P, LACHEMI M. High Performance Powder [J]. Civil Engineering, 1998(1): 48-51.
- [72] CHEYREZY M, MARET V, FROUIN L. Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete) [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1491-1500.
- [73] 吴炎海,何雁斌,杨幼华,等.养护制度对活性粉末混凝土(RPC)强度的影响[J].福州大学学报:自然科学版,2003,31(5):593-597.
WU Yan-hai, HE Yan-bin, YANG You-hua, et al. The Influence of Curing Systems on RPC Strength [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2003, 31(5): 593-597.
- [74] 陈广智,孟世强,阎培渝.养护条件和配合比对活性粉末混凝土变形率的影响[J].工业建筑,2003,33(9):63-65,84.
CHEN Guang-zhi, MENG Shi-qiang, YAN Pei-yu. Effects of Curing Condition and Proportion Ratio on Reactive Powder Concrete [J]. Industrial Construction, 2003, 33(9): 63-65, 84.
- [75] 何峰,黄政宇.养护制度对活性粉末混凝土(RPC)强度的影响研究[J].混凝土,2000(2):31-34.
HE Feng, HUANG Zheng-yu. Study on Effect of Curing Schedule on the Strength of RPC [J]. Concrete, 2000(2): 31-34.
- [76] 龙广成,谢友均,陈瑜.养护条件对活性粉末砼(RPC200)强度的影响[J].混凝土与水泥制品,2001(3):15-16.
LONG Guang-cheng, XIE You-jun, CHEN Yu. Study on the Effect of Curing Procedure on Strength of RPC200 [J]. China Concrete and Cement Products, 2001(3): 15-16.
- [77] 周锡玲,谢友均,张胜.湿热养护制度对RPC200强度影响的研究[J].施工技术,2007,36(4):49-51.
ZHOU Xi-ling, XIE You-jun, ZHANG Sheng. Study on the Effect of Wet-hot Curing System on the Strength of RPC200 [J]. Construction Technology, 2007, 36(4): 49-51.
- [78] IPEK M, YILMAZ K, UYSAL M. The Effect of Pre-setting Pressure Applied Flexural Strength and Fracture Toughness of Reactive Powder Concrete During the Setting Phase [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 459-465.
- [79] YAZLACL H, DENIZ E, BARADAN B. The Effect of Autoclave Pressure, Temperature and Duration Time on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete [J]. Construction and Building Materials,

- 2013,42;53-63.
- [80] SORELLI L, CONSTANTINIDES G, ULM F J, et al. The Nano-mechanical Signature of Ultra High Performance Concrete by Statistical Nanoindentation Techniques[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(12):1447-1456.
- [81] BONNEAU O, VERNET C, MORANVILLE M, et al. Characterization of the Granular Packing and Percolation Threshold of Reactive Powder Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(12): 1861-1867.
- [82] FENNIS S A A M, WALRAVEN J C, DEN UIJL J A. Compaction-interaction Packing Model: Regarding the Effect of Fillers in Concrete Mixture Design[J]. Materials and Structures, 2013, 46:463-478.
- [83] MORIN V, COHEN-TENOUDI F, FEYLESSOUFI A, et al. Evolution of the Capillary Network in a Reactive Powder Concrete During Hydration Process [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(12): 1907-1914.
- [84] YAZLCL H, YARDLMCL M Y, YIGITER H, et al. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing High Volumes of Ground Granulated Blast Furnace Slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8):639-648.
- [85] PORTENEUVE C, KORBJ P, PETIT D, et al. Structure-texture Correlation in Ultra-high-performance Concrete: A Nuclear Magnetic Resonance Study[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1):97-101.
- [86] ZANNI H, CHEYREZY M, MARET V, et al. Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ^{29}Si NMR[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(1):93-100.
- [87] REDA M M, SHRIVE N G, GILLOTT J E. Microstructural Investigation of Innovative UHPC[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(3):323-329.
- [88] AYDLN S, BARADAN B. Engineering Properties of Reactive Powder Concrete Without Portland Cement [J]. ACI Materials Journal, 2013, 110(6):619-627.
- [89] AYDLN S, BARADAN B. High Temperature Resistance of Alkali-activated Slag-and Portland Cement-based Reactive Powder Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2012, 109(4):463-470.
- [90] BAYARD O, PLE O. Fracture Mechanics of Reactive Powder Concrete; Material Modelling and Experimental Investigations[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70:839-851.
- [91] AN M Z, YANG Z H, YU Z R, et al. Experimental Study on the Tensile Performance of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1):54-58.
- [92] 王建雷, 郝相雨, 籍凤秋. 钢纤维对 RPC 混凝土力学性能影响研究[J]. 低温建筑技术, 2008(3):18-20. WANG Jian-lei, HAO Xiang-yu, JI Feng-qi. Influence Research on Steel Fiber to RPC[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008(3):18-20.
- [93] 梁咏宁, 陈宝春, 季 韬, 等. 砂胶比、水胶比和钢纤维掺量对 RPC 性能的影响[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5):748-753. LIANG Yong-ning, CHEN Bao-chun, JI Tao, et al. Effects of Sand-binder Ratio, Water-binder Ratio and Volume Percentage of Steel Fiber on the Performance of RPC [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2011, 39(5):748-753.
- [94] 刘斯凤, 孙 伟, 张云升, 等. 新型超高性能混凝土的力学性能研究及工程应用[J]. 工业建筑, 2002, 32(6):1-3, 11. LIU Si-feng, SUN Wei, ZHANG Yun-sheng, et al. Studies on Application and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete[J]. Industrial Construction, 2002, 32(6):1-3, 11.
- [95] 季 韬, 陈宝春, 庄一舟, 等. 活性粉末混凝土抗裂性能试验研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3):434-437, 449. JI Tao, CHEN Bao-chun, ZHUANG Yi-zhou, et al. Study for the Cracking Resistant Behavior of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2011, 39(3):434-437, 449.
- [96] 姚志雄, 周 健, 周瑞忠. 活性粉末混凝土断裂性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(6):654-659. YAO Zhi-xiong, ZHOU Jian, ZHOU Rui-zhong. Experimental Study on Fracture Properties of Reactive Powder Concrete (RPC)[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(6):654-659.
- [97] 安明喆, 宋子辉, 李 宇, 等. 不同钢纤维含量 RPC 材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5):34-38. AN Ming-zhe, SONG Zi-hui, LI Yu, et al. Study on Mechanical Performance of Reactive Powder Concrete with Different Steel Fiber Contents Under Uniaxial Compression[J]. China Railway Science, 2009, 30(5):34-38.
- [98] ZHENG W Z, LI H Y, WANG Y. Compressive Stress-strain Relationship of Steel Fiber-reinforced Reactive Powder Concrete After Exposure to Elevated Temperatures[J]. Construction and Building Materials.

- 2012,35:931-940.
- [99] 安明喆,杨志慧,余自若,等. 活性粉末混凝土抗拉性能研究[J]. 铁道学报,2010,32(1):54-58.
AN Ming-zhe, YANG Zhi-hui, YU Zi-ruo, et al. Experimental Study on the Tensile Performance of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of the China Railway Society,2010,32(1):54-58.
- [100] 原海燕,安明喆,贾方方,等. 活性粉末混凝土轴拉性能试验研究[J]. 工程力学,2011,28(增1):141-144.
YUAN Hai-yan, AN Ming-zhe, JIA Fang-fang, et al. Experimental Research on Uniaxial Tensile Performance of Reactive Powder Concrete [J]. Engineering Mechanics,2011,28(S1):141-144.
- [101] GRAYBEAL B A, BABY F. Development of Direct Tension Test Method for Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2013,110(2):177-186.
- [102] WILLE K, NAAMAN A E. Effect of Ultra-high-performance Concrete on Pullout Behavior of High-strength Brass-coated Straight Steel Fibers [J]. ACI Materials Journal,2013,110(4):451-461.
- [103] WILLE K, NAAMAN A E. Pullout Behavior of High-strength Steel Fibers Embedded in Ultra-high-Performance Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2012, 109(4):479-487.
- [104] CHAN Y W, CHU S H. Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete [J]. Cement and Concrete Research,2004,34(7):1167-1172.
- [105] YOO D Y, SHIN H O, YANG J M, et al. Material and Bond Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Micro Steel Fibers [J]. Composites Part B:Engineering,2014,58:122-133.
- [106] AN M Z, ZHANG L J, YI Q X. Size Effect on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete [J]. Journal of China University of Mining and Technology,2008,18(2):279-282.
- [107] 冯磊,刘红彬,彭培火,等. 高强与活性粉末混凝土尺寸效应的分析[J]. 四川建筑科学研究,2010,36(3):191-197.
FENG Lei, LIU Hong-bin, PENG Pei-huo, et al. Analysis of Size Effect on High-strength Concrete and Reactive Powder Concrete [J]. Sichuan Building Science,2010,36(3):191-197.
- [108] 杜任远. 活性粉末混凝土梁、拱极限承载力研究[D]. 福州:福州大学,2014.
DU Ren-yuan. Research on Ultimate Load-carrying Capacities of RPC Box Girder and Arch [D]. Fuzhou; Fuzhou University,2014.
- [109] PRABHA S L, DATTATREYA J K, NEELAMEGAM M, et al. Study on Stress-strain of Reactive Powder Concrete Under Uniaxial Compression [J]. International Journal of Engineering Science and Technology,2010,2(11):6408-6416.
- [110] GRAYBEAL B A. Compressive Behavior of Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete [J]. ACI Materials Journal,2007,104(2):146-152.
- [111] KOLLMORGEN G A. Impact of Age and Size on the Mechanical Behavior of and Ultra-high Performance Concrete [R]. Houghton: Michigan Technological University,2004.
- [112] GRAYBEAL B, DAVIS M. Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 KSI) Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete [J]. ACI Materials Journal,2008,105(6):603-609.
- [113] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [114] 吴炎海,何雁斌,杨幼华. 活性粉末混凝土(RPC200)的力学性能[J]. 福州大学学报:自然科学版,2003,31(5):598-602.
WU Yan-hai, HE Yan-bin, YANG You-hua. Investigation on RPC200 Mechanical Performance [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2003, 31(5):598-602.
- [115] HASSAN A M T, JONES S W. Non-destructive Testing of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): A Feasibility Study for Using Ultrasonic and Resonant Frequency Testing Techniques [J]. Construction and Building Materials,2012, 35:361-367.
- [116] FEHLING E, BUNJE K, LEUTBECHER T. Design Relevant Properties of Hardened Ultra High Performance Concrete [C]//SCHMIDT M, FEHLING E, GEISENHANSLUKE C. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel:University of Kassel,2004:327-338.
- [117] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) Under Direct Tensile Loading [J]. Cement and Concrete Composites, 2014,48:53-66
- [118] FUJIKAKE K, SENGU T, UEDA N, et al. Effects of Strain Rate on Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete [J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2006,4(1):79-84.

- [119] HASSAN A M T, JONES S W, MAHMUD G H. Experimental Test Methods to Determine the Uniaxial Tensile and Compressive Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC) [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37: 874-882.
- [120] BABY F, GRAYBEAL B, MARCHAND P, et al. Proposed Flexural Test Method and Associated Inverse Analysis for Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2012, 109 (5): 545-555.
- [121] YOO D Y, SHIN H O, YANG J M, et al. Material and Bond Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Micro Steel Fibers [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 58: 122-133.
- [122] 国爱丽, 赵福君, 巴恒静, 等. 活性粉末混凝土配比优化及收缩性能研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31 (2): 20-24.
- GUO Ai-li, ZHAO Fu-jun, BA Heng-jing, et al. Research on the Mix Optimization and Shrinkage Properties of Reactive Powder Concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31 (2): 20-24.
- [123] 谭衡光, 刘迪祥. 活性粉末混凝土干缩性能研究 [J]. *中外公路*, 2008, 28 (4): 237-239.
- TAN Heng-guang, LIU Di-xiang. Research on Drying Shrinkage Properties of RPC [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2008, 28 (4): 237-239.
- [124] GRAYBEAL B A. UHPC in the U. S. Highway Infrastructure [C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. *Proceedings of UHPRC 2009*. Marseille: RILEM Publication, 2009: 221-234.
- [125] TAM C M, TAM V W Y, NG K M. Assessing Drying Shrinkage and Water Permeability of Reactive Powder Concrete Produced in Hong Kong [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26 (1): 79-89.
- [126] WONG A C L, CHILDS P A, BERNDT R, et al. Simultaneous Measurement of Shrinkage and Temperature of Reactive Powder Concrete at Early-age Using Fibre Bragg Grating Sensors [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29 (6): 490-497.
- [127] SOLIMAN A, NEHDI M. Early-age Shrinkage of Ultra-high-performance Concrete Under Drying/Wetting Cycles and Submerged Conditions [J]. *ACI Materials Journal*, 2012, 109 (2): 131-139.
- [128] YOO D Y, PARK J J, KIM S W, et al. Early Age Setting, Shrinkage and Tensile Characteristics of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 41: 427-438.
- [129] YOO D Y, PARK J J, KIM S W, et al. Influence of Reinforcing Bar Type on Autogenous Shrinkage Stress and Bond Behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 48: 150-161.
- [130] SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effects of Shrinkage Reducing Admixture and Wollastonite Microfiber on Early-age Behavior of Ultra-high Performance Concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 46: 81-89.
- [131] KAMEN A, DENARIE E, BRUHWILER E. Thermal Effects on Physico-mechanical Properties of Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2007, 104 (4): 415-423.
- [132] GARAS V Y, KAHN L F, KURTIS K E. Short-term Tensile Creep and Shrinkage of Ultra-high Performance Concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31 (3): 147-152.
- [133] ROUX N, ANDRADE C, SANJUAN M A. Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1996, 8 (1): 1-6.
- [134] 刘斯凤, 孙伟, 林玮, 等. 掺天然超细混合材高性能混凝土的制备及其耐久性研究 [J]. *硅酸盐学报*, 2003, 31 (11): 1080-1085.
- LIU Si-feng, SUN Wei, LIN Wei, et al. Preparation and Durability of a High Performance Concrete with Natural Ultra-fine Particles [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, 31 (11): 1080-1085.
- [135] 黄志斌. 基于人工神经网络的抗渗性、抗裂性 RPC 配合化设计 [D]. 福州: 福州大学, 2008.
- HUANG Zhi-bin. The Mix Proportion Design of Permeability Resistance and Cracking Resistance Reactive Powder Concrete Based on Artificial Neural Network [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2008.
- [136] 纪玉岩. 海洋环境下活性粉末混凝土耐久性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- JI Yu-yan. Durability Research of Reactive Powder Concrete in Marine Environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [137] SHAHEEN E, SHRIVE N. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2006, 103 (6): 444-451.
- [138] ALONSO C, CASTELLOTE M, LLORENTE I, et al. Ground Water Leaching Resistance of High and Ultra High Performance Concretes in Relation to the Tes-

- ting Convection Regime[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1583-1594.
- [139] CHARRON J P, DENARIE E, BRUHWILER E. Transport Properties of Water and Glycol in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) Under High Tensile Deformation[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(5): 689-698.
- [140] REJU R, JIJJI G. Investigations on the Chemical Durability Properties of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete[C]//IEEE. Proceeding of 2012 International Conference on Green Technologies (ICGT). New York: IEEE, 2012: 181-185.
- [141] MAGUREANU C, SOSA I, NEGRUTIU C, et al. Mechanical Properties and Durability of Ultra-high-performance Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2012, 109(2): 177-183.
- [142] WANG W, LIU J, AGOSTINI F, et al. Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) Under Progressive Aging [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 55: 1-13.
- [143] ZHENG W, LUO B, WANG Y. Compressive and Tensile Properties of Reactive Powder Concrete with Steel Fibres at Elevated Temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 844-851.
- [144] ZHENG W, LI H, WANG Y. Compressive Stress-strain Relationship of Steel Fiber-reinforced Reactive Powder Concrete After Exposure to Elevated Temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 931-940.
- [145] LIU C T, HUANG J S. Fire Performance of Highly Flowable Reactive Powder Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2072-2079.
- [146] PENG G F, KANG Y R, HUANG Y Z, et al. Experimental Research on Fire Resistance of Reactive Powder Concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2012: 1-6.
- [147] YI N H, KIM J H J, HAN T S, et al. Blast-resistant Characteristics of Ultra-high Strength Concrete and Reactive Powder Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 694-707.
- [148] PENGXIAN F, MINGYANG W, CHUNMING S. Anti-strike Capability of Steel-fiber Reactive Powder Concrete[J]. Defence Science Journal, 2013, 63(4): 363-368.
- [149] WANG Y, WANG Z, LIANG X, et al. Experimental and Numerical Studies on Dynamic Compressive Behavior of Reactive Powder Concretes [J]. Acta Mechanica Sinica, 2008, 21(5): 420-430.
- [150] YUNSHENG Z, WEI S, SIFENG L, et al. Preparation of C200 Green Reactive Powder Concrete and Its Static-dynamic Behaviors[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(9): 831-838.
- [151] LAI J, SUN W, XU S, et al. Dynamic Properties of Reactive Powder Concrete Subjected to Repeated Impacts[J]. ACI Materials Journal, 2013, 110(4): 463-472.
- [152] TAI Y S. Uniaxial Compression Tests at Various Loading Rates for Reactive Powder Concrete[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 52(1): 14-21.
- [153] MILLARD S G, MOLYNEAUX T C K, BARNETT S J, et al. Dynamic Enhancement of Blast-resistant Ultra High Performance Fibre-reinforced Concrete Under Flexural and Shear Loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(4): 405-413.
- [154] BRAGOV A M, PETROV Y V, KARIHALOO B L, et al. Dynamic Strengths and Toughness of an Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 110: 477-488.
- [155] SMITH J, CUSATIS G, PELESSONE D, et al. Discrete Modeling of Ultra-high-performance Concrete with Application to Projectile Penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 13-32.
- [156] 安明喆, 张 盟. 变形钢筋与活性粉末混凝土的粘结性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 50-54.
AN Ming-zhe, ZHANG Meng. Experimental Research of Bond Capability Between Deformed Bars and Reactive Powder Concrete [J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 50-54.
- [157] 安明喆, 张 盟, 季文玉. 光圆钢筋与活性粉末混凝土的粘结性能研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(1): 90-94.
AN Ming-zhe, ZHANG Meng, JI Wen-yu. The Research of Bond Capability Between Round Steel Bars and Reactive Powder Concrete [J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(1): 90-94.
- [158] 邓宗才, 袁常兴. 高强钢筋与活性粉末混凝土黏结性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 69-78.
DENG Zong-cai, YUAN Chang-xing. Experimental Study on Bond Capacity Between High Strength Rebar and Reactive Powder Concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 69-78.
- [159] SAYED AHMAD F, FORET G, LE ROY R. Bond Between Carbon Fibre-reinforced Polymer (CFRP) Bars and Ultra High Performance Fibre Reinforced

- Concrete (UHPFRC): Experimental Study[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 479-485.
- [160] JI T, CHEN C Y, ZHUANG Y Z. Evaluation Method for Cracking Resistant Behavior of Reactive Powder Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 45-49.
- [161] 余自若, 安明喆. 活性粉末混凝土的疲劳损伤[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 114-119.
YU Zi-ruo, AN Ming-zhe. Fatigue Damage of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(3): 114-119.
- [162] 余清河, 闫光杰. 钢筋活性粉末混凝土矩形梁抗弯性能试验研究[J]. 交通部管理干部学院学报, 2009, 19(2): 41-45.
YU Qing-he, YAN Guang-jie. Research on Flexural Property of Reinforcement RPC Rectangular Beams [J]. Journal of Transportation Management Institute of China, 2009, 19(2): 41-45.
- [163] 郑文忠, 李莉, 卢珊珊. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 125-134.
ZHENG Wen-zhong, LI Li, LU Shan-shan. Experimental Research on Mechanical Performance of Normal Section of Reinforced Reactive Powder Concrete Beam[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 125-134.
- [164] 季文玉, 丁波, 安明喆. 活性粉末混凝土 T 形梁抗剪试验研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 38-42.
JI Wen-yu, DING Bo, AN Ming-zhe. Experimental Study on the Shear Capacity of Reactive Powder Concrete T-beams[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 38-42.
- [165] 李莉, 郑文忠. 活性粉末混凝土连续梁塑性性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2): 193-199.
LI Li, ZHENG Wen-zhong. Experimental Study on Plastic Property of Reactive Powder Concrete Continuous Beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(2): 193-199.
- [166] 闫志刚, 季文玉, 安明喆. 活性粉末混凝土 T 形梁承载力试验与全过程分析[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 86-90.
YAN Zhi-gang, JI Wen-yu, AN Ming-zhe. Experimental Study and Full-range Analysis of Reactive Powder Concrete T-beams [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 86-90.
- [167] 潘春风, 魏锦辉, 孙庆珍. 铁路 20 m 预应力活性粉末混凝土 T 形梁整体性能研究[J]. 中原工学院学报, 2010, 21(1): 60-63.
- PAN Chun-feng, WEI Jin-hui, SUN Qing-zhen. Research on Overall Performance for 20 m Railway Reactive Powder Concrete Prestress T-beam[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2010, 21(1): 60-63.
- [168] 余自若, 阎贵平, 唐国栋, 等. 铁路 RPC 箱梁抗弯性能试验研究[C]//薛伟辰, 姚武. 第十届全国纤维混凝土学术会议. 上海: 同济大学出版社, 2004: 78-84.
YU Zi-ruo, YAN Gui-ping, TANG Guo-dong, et al. Experiment Study on Behaviors of Railway RPC Box Girder Bridge under flexural loading[C]//XUE Weichen, YAO Wu. Proceedings of 10th National Fiber Concrete. Shanghai: Tongji University Press, 2004: 78-84.
- [169] 卢珊珊, 郑文忠. GFRP 筋活性粉末混凝土梁正截面抗裂度计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 536-540.
LU Shan-shan, ZHENG Wen-zhong. Calculation Method for Cross-sectional Crack Resistance of Reactive Powder Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4): 536-540.
- [170] 马远荣, 胡钧策. 活性粉末混凝土预应力叠合梁抗剪强度[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 85-88.
MA Yuan-rong, HU Jun-ce. Shear Strength of the RPC Prestressed Composite Beam [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(12): 85-88.
- [171] HABEL K. Experimental Investigation of Composite Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete and Conventional Concrete Members[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(1): 93-101.
- [172] YANG I H, JOH C, KIM B S. Structural Behavior of Ultra High Performance Concrete Beams Subjected to Bending[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3478-3487.
- [173] YANG I H, JOH C, LEE J W, et al. Torsional Behavior of Ultra-high Performance Concrete Squared Beams[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 372-383.
- [174] XIA J, MACKIE K R, SALEEM M A, et al. Shear Failure Analysis on Ultra-high Performance Concrete Beams Reinforced with High Strength Steel[J]. Engineering Structures, 2011, 33(12): 3597-3609.
- [175] AZAD A K, HAKEEM I Y. Flexural Behavior of Hybrid Concrete Beams Reinforced with Ultra-high Performance Concrete Bars[J]. Construction and Building

- Materials, 2013, 49: 128-133.
- [176] YAO D, JIA J, WU F, et al. Shear Performance of Prestressed Ultra High Strength Concrete Encased Steel Beams[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 194-201.
- [177] FUJIKAKE K, SENGA T, UEDA N, et al. Study on Impact Response of Reactive Powder Concrete Beam and Its Analytical Model[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 99-108.
- [178] FUJIKAKA K, SENGA T, UEDA N, et al. Nonlinear Analysis for Reactive Powder Concrete Beams Under Rapid Flexural Loadings [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 85-97.
- [179] HABEL K, GAUVREAU P. Response of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) to Impact and Static Loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 938-946.
- [180] MAO L, BARNETT S, BEGG D, et al. Numerical Simulation of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Panel Subjected to Blast Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 64: 91-100.
- [181] ASTARLIOGLU S, KRAUTHAMMER T. Response of Normal-strength and Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete Columns to Idealized Blast Loads[J]. Engineering Structures, 2014, 61: 1-12.
- [182] 刘 畅. 活性粉末混凝土偏心受压构件破坏机理的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
LIU Chang. Experimental Study on Failure Mechanism of Reactive Powder Concrete Members Under Eccentric Compression[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [183] 黄明兰. 活性粉末混凝土配筋柱滞回性能数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
HUANG Ming-lan. Simulation on Hysteretic Behavior of Reactive Powder Concrete Reinforced Columns [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [184] 吴炎海, 林震宇. 钢管活性粉末混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 57-62.
WU Yan-hai, LIN Zhen-yu. Experimental Study of Behavior on RPC Filled Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 57-62.
- [185] 邱 捷, 陈玉泉. 钢管活性粉末混凝土的研究现状与发展[J]. 山西建筑, 2006, 32(20): 63-64.
QIU Jie, CHEN Yu-quan. Existing Condition and Development of the Research on Steel-pipe Reactive Particle Concrete[J]. Shanxi Architecture, 2006, 32(20): 63-64.
- [186] 冯 建. 钢管活性粉末混凝土柱的力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
FENG Jian. Study on Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete Filled Steel Tubular [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [187] 罗 华. 圆钢管活性粉末混凝土短柱轴压受力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
LUO Hua. Research on Behavior of Reactive Powder Concrete-filled Circular Steel Tube Stub Columns Under Axial Compression [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [188] 林震宇, 吴炎海, 沈祖炎. 圆钢管活性粉末混凝土轴压力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 52-57.
LIN Zhen-yu, WU Yan-hai, SHEN Zu-yan. Research on Behavior of RPC Filled Circular Steel Tube Column Subjected to Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 52-57.
- [189] 杨吴生. 钢管活性粉末混凝土力学性能及其极限承载力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
YANG Wu-sheng. Research on Properties and Ultimate Capacity of RPC Filled in Steel Tube Columns [D]. Changsha: Hunan University, 2003.
- [190] ZOHREVAND P, MIRMIRAN A. Effect of Column Parameters on Cyclic Behavior of Ultra-high-performance Concrete-filled Fiber-reinforced Polymer Tubes [J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(5): 823-831.
- [191] MALIK A R, FOSTER S J. Carbon Fiber-reinforced Polymer Confined Reactive Powder Concrete Columns—Experimental Investigation [J]. ACI Structural Journal, 2010, 107(3): 263-271.
- [192] ZOHREVAND P, MIRMIRAN A. Cyclic Behavior of Hybrid Columns Made of Ultra High Performance Concrete and Fiber Reinforced Polymers [J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(1): 91-99.
- [193] MAYA L F, ZANUY C, ALBAJAR L, et al. Experimental Assessment of Connections for Precast Concrete Frames Using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 173-186.
- [194] SHAHEEN E, SHRIVE N. Reactive Powder Concrete Anchorage for Post-tensioning with CFRP Tendons [J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(6): 436-443.
- [195] 王 钧, 陈 旭, 李 行, 等. 配有钢纤维 RPC 永久柱模的 RC 框架静力性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报:

- 自然科学版,2014,30(1):9-17.
WANG Jun, CHEN Xu, LI Hang, et al. Static Experimental on Reinforced Concrete Frame Structures with Steel Fiber RPC Permanent Pillar[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2014, 30(1):9-17.
- [196] 王 钧,李 行,陈 旭,等.配钢纤维 RPC 永久柱模的 RC 框架抗震性能试验[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2014,30(2):220-226.
WANG Jun, LI Hang, CHEN Xu, et al. Experimental Study on the Seismic Performance of RC Frame with the Steel Fiber RPC Permanent Pillar[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2014, 30(2):220-226.
- [197] TANAKA Y, MAEKAWA K, KAMEYAMA Y, et al. The Innovation and Application of UFC Bridges in Japan[C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of UHPFRC 2009. Marseille; RILEM Publication, 2009:149-188.
- [198] FEHLING E, BUNJE K, SCHMIDT M. Gärtnerplatz—Bridge over River Fulda in Kassel: Multispan Hybrid UHPC-steel Bridge[C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of UHPFRC 2009. Marseille; RILEM Publication, 2009:125-136.
- [199] 庄一舟,方志明.威尔德桥——可持续发展超高性能纤维混凝土拱桥[J].桥梁,2011(5):46-53.
ZHUANG Yi-zhou, FANG Zhi-ming. Wild Bridge—A Sustainable Arch Made of UHPC[J]. Bridge, 2011(5):46-53.
- [200] 邵旭东,詹 豪,雷 薇,等.超大跨径单向预应力 UHPC 连续箱梁桥概念设计与初步实验[J].土木工程学报,2013,46(8):83-89.
SHAO Xu-dong, ZHAN Hao, LEI Wei, et al. Conceptual Design and Preliminary Experiment of Super-long-span Continuous Box-girder Bridge Composed of One-way Prestressed UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8):83-89.
- [201] 杜任远,陈宝春.活性粉末混凝土拱极限承载力试验研究[J].工程力学,2013,30(5):42-48.
DU Ren-yuan, CHEN Bao-chun. Experimental Research on the Ultimate Load Capacity of Reactive Powder Concrete Arches[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5):42-48.
- [202] CANDRLIC V, BLEIZIFFER J, MANDIC A. Bakar Bridge in Reactive Power Concrete[C]//ABDUNUR C. Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge. Paris; Presses des Ponts, 2001:695-700.
- [203] CANDRLIC V, RADIC J, GUKOV I. Research of Concrete Arch Bridges Up to 1 000 m in Span[C]//PROSKE D, VAN GELDER P. Proceedings of the Fourth International Conference on Arch Bridge. Barcelona; Springer, 2004:538-547.
- [204] 杜任远.活性粉末混凝土拱桥应用基础研究[D].福州:福州大学,2010.
DU Ren-yuan. Basic Research on Application of Reactive Powder Concrete (RPC) Arch Bridge [D]. Fuzhou; Fuzhou University, 2010.
- [205] 陈宝春,李生勇,余 健,等.大跨度活性粉末混凝土拱桥试设计[J].交通科学与工程,2009,25(1):32-38.
CHEN Bao-chun, LI Sheng-yong, YU Jian, et al. Trial Design of Reactive Powder Concrete Long Span Arch Bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(1):32-38.
- [206] 许春春.超大跨径活性粉末混凝土拱桥试设计研究[D].福州:福州大学,2014.
XU Chun-chun. Trial Design Research on Super Long Span Reactive Powder Concrete (RPC) Arch Bridge [D]. Fuzhou; Fuzhou University, 2014.
- [207] GRAYBEAL B. UHPC in the US Highway Transportation System[C]//FEHLING E, SCHMIDT M, STURWALD S. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel; Kassel University Press, 2008:11-17.
- [208] FHWA. Ultra-high Performance Concrete: A State-of-the-art Report for the Bridge Community[R]. Washington DC: FHWA, 2013.
- [209] LOPEZ J A, SERNA P, CAMACHO E, et al. First Ultra-high-perofrmace Fibre-reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction [J]. Structural Engineering International, 2014, 24(1):101-104
- [210] TALAYEH N, EUGEN B. Rotation Capacity and Stress Redistribution Ability of R-UHPFRC-RC Composite Continuous Beams: An Experimental Investigation [J]. Materials and Structures, 2013, 46(12):2013-2028.
- [211] SPAROWITZ L, FREYTAG B, NGUYEN V T. Ideas for Future Uhpfrc Projects [C]//CHEN B C, ZHUANG Y Z. Proceedings of the 5th International Conference on New Dimensions in Bridges, Flyovers, Overpasses & Elevated Structures. Graz; Technology University of Graz, 2012:19-36.
- [212] HASSAN A, KAWAKAMI M. Steel-free Composite Slabs Made of Reactive Powder Materials and Fiber-

- reinforced Concrete[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5):709-718.
- [213] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等. 正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2):40-45.
SHAO Xu-dong, CAO Jun-hui, YI Du-tao, et al. Research on Basic Performance of Composite Bridge Deck System with Orthotropic Steel Deck and Thin RPC Layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2):40-45.
- [214] YOUSSEF G, LOULOU L, CHATAIGNER S, et al. Analysis of the Behaviour of a Bonded Joint Between Laminated Wood and Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Using Push-out Test[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53:381-391.
- [215] BRUHWILER E, DENARIE E. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(4):450-457.
- [216] NEMATOLLAHI B, VOO Y L, RAIZAL SAIFULNAZ M R. Structural Behavior of Precast Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPC) Cantilever Retaining Walls; Part I—Analysis and Design Procedures and Environmental Impact Calculations (EIC)[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(5):1470-1480.
- [217] NEMATOLLAHI B, VOO Y L, RAIZAL SAIFULNAZ M R. Structural Behavior of Precast Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPC) Cantilever Retaining Walls; Part II — Full Scale Experimental Testing[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(5):1481-1495.
- [218] VANDE VOORT T L, SULEIMAN M T, SRITHARAN S. Design and Performance Verification of Ultra-high Performance Concrete Plies for Deep Foundation[R]. Ames: Iowa State University, 2008.
- [219] EL-HACHA R, ABDELAZEEM H, CARIAGA I. Effect of Casting Method and Shear Span-to-depth Ratio on the Behaviour of Ultra-high Performance Concrete Cross Arms for High Voltage Transmission Lines[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8):2210-2220.
- [220] ONO T. Application of Ultra-high-strength Fiber Reinforced Concrete for Irrigation Channel Repair Works [C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of UHPFRC 2009. Marseille: RILEM Publication, 2009:541-552
- [221] 邢 锋,曹征良,方自虎,等. 活性粉末混凝土井盖:中国, 200420102375. 0[P]. 2006-02-01.
XING Feng, CAO Zheng-liang, FANG Zi-hu, et al. RPC Manhole Covers; China, 200420102375. 0[P]. 2006-02-01.
- [222] 柯开展. 纤维增强活性粉末混凝土基本力学性能及应用研究[D]. 福州:福州大学, 2006.
KE Kai-zhan. Research on the Basic Mechanical Properties of the Fiber Reactive Powder Concrete and Application[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [223] 张惠彬. 基于性能的活性粉末混凝土井盖应用研究 [D]. 福州:福州大学, 2013.
ZHANG Hui-bin. Application Researches on RPC Manhole Cover Basing on Properties [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2013.
- [224] ADAM T, MA J X. Development of an Ultra-high Performance Concrete for Precast Spun Concrete Columns[C]//SCHMIDT M, FEHLING E, GLOTZBACH C, et al. Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Kassel: Kassel University Press, 2012:841-848.
- [225] 鞠彦忠,刘红星,汪 志,等. 超高压部分预应力活性粉末混凝土电杆的设计[J]. 沈阳工程学院学报:自然科学版, 2009, 5(4):382-386.
JU Yan-zhong, LIU Hong-xing, WANG Zhi, et al. The Design and Study of EHV Partially Prestressed Reactive Powder Concrete Pole[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science, 2009, 5(4):382-386.
- [226] SCHEFFLER B, SCHMIDT M. Application of UHPC for Multifunctional Road Pavement [C]//SCHMIDT M, FEHLING E, GLOTZBACH C, et al. Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Kassel: Kassel University Press, 2012:913-920.
- [227] REBENTROST M, WIGHT G. Investigation of UHPFRC Slabs Under Blast Loads [C]//TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Proceedings of UHPFRC 2009. Marseille: RILEM Publication, 2009:363-376.