



RPC研究现状及其在桥梁工程中的应用

余庭嘉 罗富元

(广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院 广西南宁 530012)

摘要:活性粉末混凝土(RPC)作为一种新型混凝土材料,凭借自身优异的材料性能,在桥梁工程中具有较好的应用前景。本文介绍了RPC材料的基本性能和研究现状,列举了国内外桥梁工程应用实例。

关键词:桥梁 RPC 工程应用 超高性能混凝土

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.03.002

引言

改革开放以来,我国经济跨入高速发展的时期,与此同时,我国公路桥梁建设也相应进入黄金时期。截至2012年,我国公路里程已达423.8万公里、桥梁70余万座。已建成的公路桥梁中,以混凝土板桥、T梁桥和箱梁桥为主,占比达到90%以上;这些混凝土桥梁在使用一定年限以后,常发生下挠、开裂、钢筋锈蚀等问题,对公路桥梁的安全营运造成影响,严重者甚至发生桥梁垮塌的事故^[1]。在未来的桥梁设计、建设中,这些问题是广大桥梁工程师们无法绕开的难题,解决现有的配筋混凝土桥梁结构普遍存在因混凝土老化导致的结构耐久性问题,对提高混凝土桥梁的安全性和减少桥梁寿命周期内的维修成本具有重要意义。

活性粉末混凝土RPC(Reactive Powder Concrete)作为一种超高性能混凝土,具有较高的韧性、抗压强度及优异的耐久性能,是极具应用前景的新型混凝土材料,其本身的优越性能有望从根本上解决现有混凝土桥梁的耐久性问题。

1 活性粉末混凝土RPC

活性粉末混凝土RPC作为超高性能混凝土的一种,由法国Bouygues实验室在1993年研制成功^[2]。通过去除高强混凝土中的粗骨料,仅以石英砂作为骨料并掺加微细掺合料(通常为硅灰),基于最大密实度理论以确定各材料的级配,降低了混凝土内部的空隙和微裂缝等缺陷,使得RPC具有优异的力学性能(特别是抗拉强度)和耐久性,同时钢纤维的掺入使材料表现出良好的韧性和延性。

RPC优异的力学及物理性能是普通混凝土和

高性能混凝土无法比拟的,其按抗压强度和制备条件的不同分为RPC200, RPC800两个等级。虽然RPC200的抗压强度远低于RPC800,但其韧性较RPC800更好且不需要250℃~400℃的超高温养护,因此具有更广阔的应用前景。

1.1 RPC的主要性能

由法国Bouygues实验室所研制的RPC由级配细石英砂(粒径小于1mm)、水泥、石英粉、硅灰、高效减水剂和钢纤维组成,并在混凝土硬化成型的养护过程中加热、加压而得。其与高性能混凝土HPC和普通混凝土NC的主要力学性能和耐久性对比如表1所示^[2]。

表1 RPC和HPC, NC的主要力学性能和耐久性比较

混凝土类型	RPC200	RPC800	HPC	NC
抗压强度/MPa	170~230	500~800	60~100	20~50
抗折强度/MPa	30~60	45~140	6~10	2~5
弹性模量/GPa	40~60	65~75	30~40	30~40
材料断裂能/(kJ·m ⁻²)	20~40	1.2~2	0.14	0.12
氯离子扩散系数/ (×10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)	0.02	-	0.6	1.1
冻融剥落/(g·cm ⁻²)	7	-	900	>1000
吸水特性/(kg·m ⁻³)	0.2	-	0.4	2.7
磨损系数	1.3	-	2.8	4.0

从表1可知, RPC除了具有较高的抗压强度外,其综合性能相对于HPC和NC有着全面的提升,凭借自身较低的孔隙率, RPC的抗氯离子渗透、抗腐蚀、抗冻、抗渗能力表现优异且耐磨能力好。特别是抗氯离子渗透系数和冻融剥落相较于HPC提高了一个数量级以上,表明RPC的耐久性较普通混凝土提升明显。同时,凭借钢纤维的加入,显著提高了RPC的抗折强度和吸收能

量的能力, RPC200的抗折强度达到HPC的6倍, 断裂能平均达到 30kJ/m^2 , 而HPC的断裂能只有 0.14kJ/m^2 , 使得RPC的抗震耗能能力与普通混凝土有了质的提高。

1.2 RPC的研究现状

RPC自问世以来, 国内外专家学者对其制备、机理、材料性能及工程应用展开了大量研究, 并取得了丰硕的研究成果。

国外对RPC配置技术的研究已相当成熟, 以美国联邦公路局为例, 其对RPC开展了系统研究, 基于1000多个试件的测试, 研究包括了制备技术、强度、耐久性和长期性能等力学性能^[3]。通过选用低需水量的水泥和硅灰, 调整砂浆水泥比、硅灰水泥比和水灰比等, 研制出了不需要热养护、预压等特殊工艺也可以制备出的强度超过 200MPa 的RPC^[4]。2001年美国联邦公路局制作了一个跨径 24m 的预应力RPC梁^[5], 并进行了结构试验, 试验中此梁表现出优良的力学与变形性能, 当梁的挠度达到 300mm 时, 试验人员借助放大镜也没有找到裂缝, 其极限强度达到了 207MPa , 极限挠度为 480mm 。该试验梁所表现出的高强度和良好韧性, 表明RPC在桥梁结构中具有良好的应用前景。

在整理大量研究数据的基础上, 法国土木工程学会于2002年制订了超高性能纤维混凝土的指南(初稿)^[6]; 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出版了英文版本^[7]。

我国对RPC的研究开展时间较国外晚, 但近十几年来对RPC的配比、受力性能等做了较多研究。如北京交通大学的闫光杰等^[8]采用本土原材料对RPC中石英砂级配、钢纤维含量和养护条件进行了较多尝试, 得出了最佳配比和养护条件方案; 试验得到最佳配比RPC的抗压强度 168.6MPa 、抗折强度 21.6MPa 、弹性模量 46.8GPa , 表明我国本土化RPC材料的性能已经接近国外RPC200。在构件的实验研究方面, 对配筋RPC梁和预应力RPC梁的正截面和斜截面抗裂性能与承载能力进行了较多研究, 研究结果表明, 在RPC梁的设计计算中应充分考虑RPC材料优良的抗拉能力^[9-16]。

同时, 我国已于2016年底出台了活性粉末混凝土的国家标准^[17]—《活性粉末混凝土》GB/T31387-2015, 标准中对RPC按力学性能进行了等级划分(见表2)。相关标准的出台, 标志我国在RPC的研究应用方面开始走向成熟。

表2 活性粉末混凝土力学性能的等级划分

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 RPC在桥梁工程中的应用现状

2.1 RPC在国外桥梁中的应用实例

RPC出现以来的20多年里, 在桥梁工程中的应用实例并不算多, 国外建成的RPC桥梁大约30余座, 且以中小跨径的人行桥为主^[18]。1997年, 加拿大魁北克Sherbrooke市建成了世界上第一座RPC人行桥—Sherbrooke桥(图1), 跨径 60m , 采用预应力桁架简支梁结构体系, 全桥除预应力筋外无传统腹筋; 上弦杆包括桥面板、横向加劲肋和纵向加劲肋均由RPC制成, 桁架腹杆为管内填充素RPC的不锈钢管^[19]。2002年, 韩国首尔建成的Sunyudo人行桥^[18](图2), 是已建成的最大跨径RPC拱桥, 主拱跨径达到 120m , 采用 π 形截面, 高 130cm , 宽 430cm , 顶板厚 3cm ; 该桥的建设规模和技术难度均高于Sherbrooke桥, 标志着RPC的实际应用达到了新的高度。2006年美国修建跨径的Mars Hill公路桥, 跨径 33m , 采用I形梁; 2008年日本修建的GSE单跨简支梁公路桥, 跨径 46m , 采用箱形梁; 2010年奥地利修建的Wild公路拱桥, 跨径 70m , 箱形拱圈; 这3座公路桥的建成标志着RPC材料在公路桥梁应用上的突破。



图1 Sherbrooke人行桥

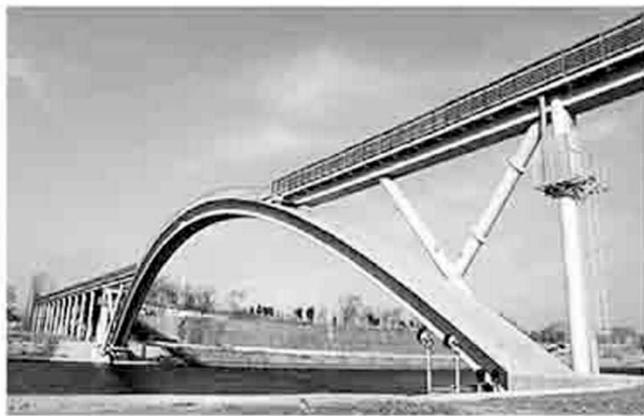


图2 Sunyudo人行桥



2.2 RPC在国内桥梁中的应用实例

RPC在国内桥梁工程应用方面,最早在铁路桥梁上得到了应用,北京交通大学研制的200MPa级RPC制作的铁路桥梁人行道构件在青藏铁路桥梁的实际工程中得到了使用^[8]。随后,为提高铁路桥梁的使用性能、延长使用寿命,针对铁路桥梁结构的服役环境条件,迁曹铁路滦柏干渠大桥工程中,首次设计采用RPC制作20m跨径的后张法预应力简支T梁;该梁的制作过程,对RPC的拌合、浇筑及养护等施工工艺提出了具体要求,制作成型的梁体质量较好^[20]。

在公路桥梁局部结构方面,湖南大学的邵旭东等针对正交异性钢桥面铺装层破损及钢桥面结构疲劳开裂2类病害问题,提出了一种新型正交异性钢板-薄层超高性能活性粉末混凝土(RPC)组合桥面结构体系,并进行了计算模拟和足尺模型静载试验;研究结果表明该新型桥面结构的钢面板及纵肋的应力较原结构下降显著(最高降幅超过70%),RPC层开裂前拉应力可达42.7MPa,基本能够消除钢桥面疲劳开裂的风险;该新型桥面结构已应用于广东马房桥和佛陈大桥(扩建)项目^[21-22]。2016年,湖南长沙建成的北辰三角洲横4路天桥(图3)^[23],是国内首座全RPC桥,桥长71m,跨径布置为27.581m+36.8m+6.423m(悬臂),桥宽6.6m,采用鱼腹式单箱3室箱梁,梁高1.3m,顶板厚0.12m,底板厚0.08m,腹板厚0.2m;该桥用于行人通过的同时,在附近楼房发生火灾时可通行消防车辆。

3 RPC工程应用研究方面的不足

虽然我国对RPC的研究做了大量的工作,但要在桥梁工程中得到广泛应用,其研究的深度和广度还需要进一步加大,在以下几个方面还有待进一步完善和提高:

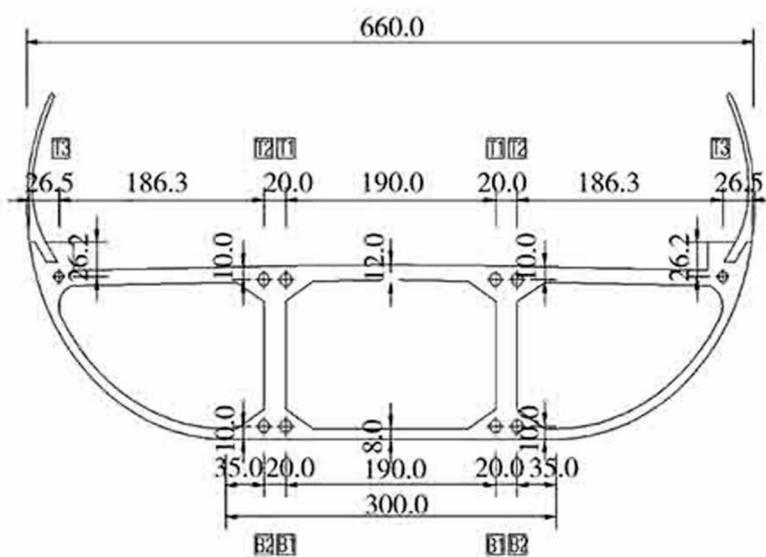


图3 北辰三角洲横四路天桥

(1) 我国水泥材料和高效减水剂的质量与国外相比存在一定的差距。而高标号的水泥和高效减水剂对RPC的强度和性能有着直接影响,其质量的优劣会直接影响RPC的性能。

(2) 目前RPC的制备在实验室中已较为成熟,但其配比的设计目前还以经验、试验为主,且养护条件、拌合技术均会影响RPC的性能;因此,在RPC的配合比设计的科学化,实验室制备技术转化为较低成本的工程制备技术方面还需进一步研究。

(3) RPC的材料性能与传统混凝土存在一定差异,现有混凝土的技术指标对其并不适用。针对RPC的材料性能试验方法和技术指标体系还有待系统性的研究,并尽早完善国家标准对RPC制备的规范化。

(4) 作为一种新型的混凝土材料,RPC构件和整体结构的设计理论、设计方法尚不成熟,还有待进一步完善。

(5) RPC材料对生产工艺的要求较高,工厂预制的RPC构件可以实现加热养护以获得较好的材性。预制构件如何连接成为RPC结构成为现场施工的关键,我国在该方面进行了一些研究,但仍不够成熟。
(下转第29页)

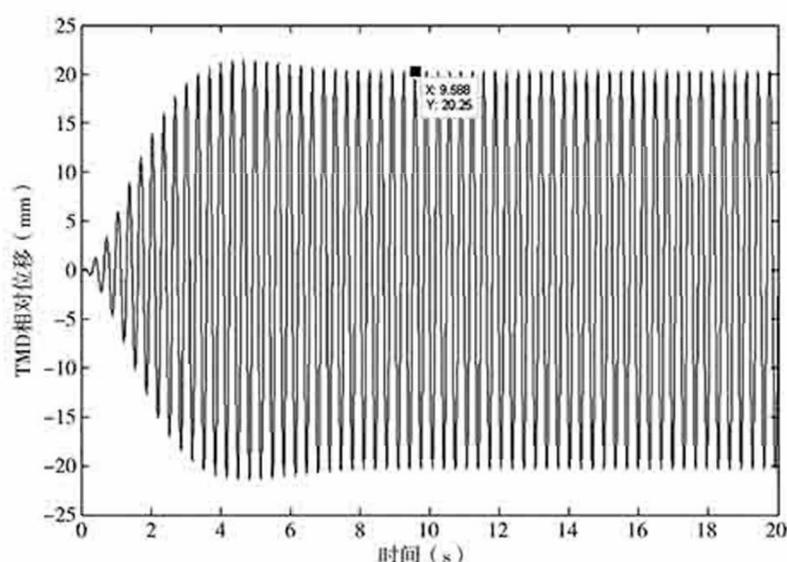


图5 景观桥ECD减振器行程

(上接第10页)

(6) RPC中的石英砂、硅灰及钢纤维成本较高,造成RPC的单位造价较普通混凝土高出许多。虽然采用RPC的桥梁结构可以通过减轻自重来降低材料的用量,耐久性的提高对全寿命周期的造价亦有降低。然而我国混凝土工业化程度较低的现实,目前依然无法提高RPC材料的经济性。若能解决RPC结构一次性投资的经济性,将会迎来其在桥梁结构中的大规模应用。

4 展望

RPC问世以来不过20来年的时间,但其作为一种性能优异的新型混凝土材料备受工程界的瞩目。中国的科研人员紧跟国际学术前沿,针对RPC开展了大量研究,在理论研究和工程实际方面均取得一定成果,为今后RPC在桥梁工程中的应用及推广奠定了坚实基础。相信随着研究的进一步深入,RPC工程应用方面的问题都将逐一克服。伴随着我国加速建设的大环境下,RPC具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 黄建强. 公路混凝土桥梁常见病害与成因分析及处治方法[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(1): 46-49.
 [2] RICHARD P, CHEYTEZY M. ACISp. Reactive powder concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength[J]. , 1997: 507-518.
 [3] Material Property Characterization of Ultra-high Performance Concrete[R]. FHWA. Washington DC: FHWA, 2006.
 [4] WILLE K, NAAMAN A E, Parra-Montesinos G J. Ultra-high Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150MPa(22KSI): A Simpler Way[J]. ACI Materials Journal, &108(1): 34-46.
 [5] BRIAN F. FHWA Gives Superior Marks to Concrete Bridge Girder[J]. Civil Engineering Magazine, 2001,71(10): 12-13.
 [6] Association Francaise de Genie Civil. Ultra High Performance

参考文献

[1] 陈政清, 华旭刚. 人行桥的振动与动力设计[M]. 人民交通出版社, 2009.
 [2] 袁旭斌. 人行桥人致振动特性研究[D]. 同济大学, 2006.
 [3] 陈政清, 刘光栋. 人行桥的人致振动理论与动力设计[J]. 工程力学, 2009(S2):148-159.
 [4] 钱骥, 孙利民. 大跨径人行桥人致振动舒适性评估及减振措施[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5):677-681.
 [5] 可路, 王达磊, 陈艾荣. 景区大跨径人行索桥人致振动响应研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(11):101-105.
 [6] 刘建华, 王惠明, 庄表中. TMD减振在大型结构上的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5):199-199.
 [7] 李晓玮, 何斌, 施卫星. TMD减振系统在人行桥结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2013(S1):245-250.
 [8] 王立彬, 花杰, 刘康安等. 大跨度人行桥TMD减振设计[J]. 世界桥梁, 2013, 41(6):6-10.

Fiber-reinforced Concretes-interim Recommendations[M]. Paris: Association Francaise de Genie Civil, 2002.
 [7] 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.
 [8] 闫光杰, 阎贵平, 安明. 200MPa级活性粉末混凝土试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 29(2): 116-119.
 [9] 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]. 通部管理干部学院学报, 2009,19(2):41-45.
 [10] 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.
 [11] 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.
 [12] 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.
 [13] 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.
 [14] 潘春风, 魏锦辉, 孙庆珍. 铁路20m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.
 [15] 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.
 [16] 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.
 [17] 活性粉末混凝土. GB/T31387-2015[S].
 [18] 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.
 [19] 周一桥, 杜亚凡. 世界第一座预制预应力活性粉末混凝土结构—舍布鲁克人行桥[J]. 国外桥梁, 2000(3):18-23.
 [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.
 [21] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬等. 正交异性钢板-薄层RPC面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 40-45.
 [22] 郑楷柱, 何海, 梁立农等. 佛陈大桥(扩建)正交异性钢桥面板铺装耐久性设计[C]. //中国科学技术协会、广东省人民政府. 第十七届中国科协年会——分8交通基础设施安全及耐久性论坛论文集 2015.
 [23] 我校主持研发的国内首座超高性能混凝土桥梁通过验收[EB/OL]. http://news.hnu.edu.cn/zhyw/2016-09-09/12572.html, 2016-09-09/2016-09-10.