

活性粉末混凝土 及其柱类构件的 抗震性能

鞠彦忠 王德弘 著



科学出版社

活性粉末混凝土 及其柱类构件的抗震性能

鞠彦忠 王德弘 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了作者多年来从事活性粉末混凝土技术研究的成果,并结合国内外相关文献资料对活性粉末混凝土进行了系统、全面的论述。全书共5章,内容包括绪论,活性粉末混凝土的配制原理,活性粉末混凝土的基本力学性能,活性粉末混凝土的耐久性,活性粉末混凝土柱的抗震性能等。

本书可供土木工程、港口水运、水利工程、桥梁市政、建筑材料、工程管理等技术领域的科技人员以及高等学校相关专业的教师、研究生及高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

活性粉末混凝土及其柱类构件的抗震性能/鞠彦忠,王德弘著.—北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-043956-7

I. ①活… II. ①鞠…②王… III. ①高强混凝土-抗震性能-研究 IV. TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 057676 号

责任编辑:童安齐/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2015年4月第一次印刷 印张:7 3/4

字数:150 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8002

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

活性粉末混凝土 (Reactive Powder Contrete, RPC) 是继高强度、高性能混凝土之后, 于 20 世纪末由法国布伊格 (BOUYGUES) 公司研制成功的一种超高强、低脆性、耐久性优异的新型超高强混凝土。它是由级配良好的石英细砂 (不含粗骨料)、水泥、石英粉、硅粉、高效减水剂等组成。为了提高 RPC 的韧性和延性可加入钢纤维, 同时在 RPC 的凝结、硬化过程中可采取适当的加压、加热等成型养护工艺。由于其成分中粉末的含量和活性的增加而被称为活性粉末混凝土。

作者从 2004 年开始从事活性粉末混凝土 (RPC) 的研究工作, 得到吉林市科技局, 吉林省教育厅、科技厅和国家自然科学基金的资助, 所有的试验都完成于东北电力大学土木工程实验研究中心, 先后有十余届研究生从事该领域的研究工作, 取得了一些阶段性的成果。在本书即将出版之际, 对各方面给予的支持和帮助表示衷心的感谢。本书主要介绍活性粉末混凝土的配制原理、力学性能、耐久性和抗震性能; 有些研究内容参考了国内外同行的一些研究成果, 在此表示感谢。希望本书的出版能够对活性粉末混凝土的研究提供参考, 书中不当之处也请同行不吝赐教。

作 者

2015 年 3 月

于吉林市

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 混凝土的发展历程	1
1.2 活性粉末混凝土的发展	2
1.3 活性粉末混凝土研究中存在的主要问题及今后的发展趋势	9
参考文献	11
第2章 活性粉末混凝土的配制原理	17
2.1 活性粉末混凝土的配制原理	17
2.2 活性粉末混凝土的材料组成	23
2.3 活性粉末混凝土的配合比设计	29
2.4 活性粉末混凝土的制备工艺	33
参考文献	34
第3章 活性粉末混凝土的基本力学性能	37
3.1 活性粉末混凝土的抗压性能	37
3.2 活性粉末混凝土抗拉强度	50
3.3 力学指标之间的换算关系	55
3.4 弹性模量	58
参考文献	60
第4章 活性粉末混凝土的耐久性	63
4.1 活性粉末混凝土的抗冻性能	63
4.2 活性粉末混凝土抗氯离子渗透性	68
4.3 活性粉末混凝土的抗腐蚀性能	78
4.4 活性粉末混凝土的抗碳化性能	79
参考文献	82
第5章 活性粉末混凝土柱的抗震性能	83
5.1 试验方案设计	83
5.2 试验结果与分析	94
5.3 活性粉末混凝土柱的恢复力模型	106
5.4 结语	114
参考文献	115

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土的发展历程

自 1824 年波特兰水泥问世以来,以硅酸盐水泥为基本胶凝材料的混凝土已成为世界上各类土木工程中必不可少的基本建筑材料。为了建设高层建筑、大跨轻型结构及严酷环境中工作的结构物,发展高强度、高耐久性、高韧性和良好体积稳定性的混凝土材料一直是国际工程材料领域的研究热点之一。

一些优质活性矿物细粉及超细粉如硅灰、沸石粉等被掺入了混凝土,可以改善混凝土的性能。直到 20 世纪 70 年代高效减水剂的开发应用,在较低水灰比的条件下混凝土就可成型密实,从而获得较高的抗压强度 ($>60\text{MPa}$) 的水泥基复合材料,即高强混凝土 (High Strength Concrete, HSC) [1-3]。

混凝土抗压强度逐渐提高,但混凝土的抗拉强度低 (仅为抗压强度的 $1/10$)、韧性较差等固有弱点却没有得到相应幅度的改善。例如 1995 年美国公路合作研究计划项目调查发现,美国的混凝土桥面板普遍出现了开裂现象,为了桥梁的继续使用,对其进行了翻修,尽管使用的混凝土材料为高强混凝土,但大约 10 万座桥梁的桥面板浇注高强混凝土一月后,就出现了很多贯穿性的裂缝,严重影响桥梁的使用安全。据分析,对于高强混凝土来说,其早期弹性模量随强度升高而增大,而徐变却减小,因此比中低强度的混凝土更容易出现开裂现象。尤其对于掺入硅粉的高性能混凝土,其掺量越多,水胶比越低,混凝土早期强度发展越快,也更容易发生强度倒缩 (特别是对微裂缝敏感的劈裂抗拉强度) 和开裂现象。为了避免产生混凝土强度倒缩和开裂问题,一般有两种方法:一种是严格控制硅粉掺量,在 10% 以内,这一种方法在很多国家采用,但是混凝土水胶比不能降低太多。另一种方法是在混凝土中掺入抗拉强度高,极限延伸率大,抗碱性好的各种纤维 (金属纤维、无机纤维或有机纤维) 作为增强材料,从而形成了水泥基复合材料,即纤维混凝土 (Fiber Reinforced Concrete, FRC) [2,4],其中纤维材料可以约束混凝土裂缝的发展,使混凝土抗拉和抗弯强度显著提高,韧性及延性增强,进一步提高了混凝土的性能。

随着社会发展,许多特殊工程对混凝土的抗渗、抗化学腐蚀性等耐久性的能力提出了更高的要求,于是,高性能混凝土 (High Performance Concrete, HPC) 的概念被提出 [1-3]。高性能混凝土通常是在普通混凝土和高强混凝土的基础上,通过加入活性混合材料和高效减水剂等掺和料和外加剂,可以大幅度降低混凝土材料的水

胶比,同时,活性混合材料的二次水化作用使水泥水化产物中氢氧化钙减少,水化硅酸钙凝胶增多,改善了混凝土的孔结构并降低了孔隙率,尤其是改善了混凝土最薄弱环节——粗骨料界面,致使混凝土力学强度和耐久性都得到增强,即获得了高性能混凝土。这种混凝土材料能够使混凝土构件断面尺寸减小,减轻结构自重,耐久性得到了显著提高,使用寿命可以大大延长,因此在工程中得到了广泛应用。

高强、高性能混凝土的实践证明:细化骨料粒径,可以使复合材料内部结构均匀化,从而提高强度;纤维混凝土的工程应用经验证明,粗骨料颗粒较大,很大程度限制了纤维的“架桥”作用,而且较长的纤维会对混凝土拌和物的工作性产生很大影响,不利于工程应用。

1993年,法国BOUYGUES公司的Richard Pierre和Marcel Cheyrezy根据细粒致密水泥基均匀体系(Densified with Small Particles, DSP)、无宏观缺陷模型(Macro defect free, MDF)及纤维增强技术,剔除粗骨料,用石英砂作为骨料,掺入活性矿物掺和料和短纤维,配以加压成型、高温蒸汽养护制度等方法,得到强度和耐久性好的活性粉末混凝土,其抗压强度可达170~800MPa,抗弯强度可达15~60MPa,断裂能达到 40kJ/m^2 ^[5, 6]。钢纤维的使用,显著提高了其抗拉强度和韧性,其韧性可达普通混凝土韧性的250倍以上。由于采用大量硅灰、粒化高炉矿渣等活性混合材料及高效减水剂,大大增加了水组分细度,提高了水化反应活性,该水泥基复合材料被称为活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)。

1.2 活性粉末混凝土的发展

1.2.1 国外活性粉末混凝土发展

1995年,Marcel Cheyrezy^[7]通过热重分析和XRD分析证明了相对较高的养护温度(如60℃热水养护、200℃高压蒸汽养护等)会激发活性掺和料的火山灰反应,通过压汞分析发现RPC中直径为3.75nm~100μm的孔不超过总体积的9%,说明热养护对RPC的性能有很大的改善作用。

1996年,Roux等^[8]对RPC200的耐久性进行了系统的研究,通过试验研究了RPC200的抗碳化性能、抗氯离子渗透性能和耐磨性,并与C30和C80混凝土进行了对比分析。研究表明,活性粉末混凝土试件在CO₂浓度为100%的环境中存放90d后而未发生丝毫碳化;活性粉末混凝土的氯离子扩散系数为0.02,明显低于C80混凝土的0.6和C30混凝土的1.1;活性粉末混凝土的耐磨系数为1.3,也低于C30混凝土的4.0和C80混凝土的2.4;活性粉末混凝土各项耐久性指标均明显优于C30和C80混凝土。O'Neil和Edward^[9]研究了用活性粉末混凝土制作高性能的管类产品,并介绍了其生产过程。

1997年,Bonneau等^[10]通过试验研究了RPC的抗压强度、抗折强度、弹性模

量和断裂能等力学性能指标。他们经试验研究得出 RPC 不仅具有较高的抗压强度,而且掺加微细钢纤维后能显著提高 RPC 的抗折强度和吸收能量的能力,PRC200 的抗折强度(30~60MPa)及断裂能($40\,000\text{J/m}^2$)远高于 HPC。

1998 年,Matte 等^[11]对活性粉末混凝土材料制作的放射性核废料储藏容器的性能进行了研究。研究表明,活性粉末混凝土核废料储藏容器能够防止放射性物质从内部泄漏,并且能够抵御外部侵蚀性介质的腐蚀,具有良好的使用性能。

2000 年,Philippot^[12]用核磁共振对活性粉末混凝土的孔隙率进行了研究。Cappola 和 Jennifer^[13]介绍了活性粉末混凝土在土木工程结构中的应用情况。

2001 年,Arnaud Poitou^[14]研究了纤维具有方向性的活性粉末混凝土及其力学性能。Voo 等^[15]对活性粉末混凝土在桥梁工程的应用进行了尝试,对纤维增强的活性粉末混凝土厚板的性能进行了研究。

2002 年,Ple 等^[16, 17]进行了活性粉末混凝土的拉伸性能试验,并对活性粉末混凝土的受拉性能及断裂力学特性进行了研究,得到了材料在双轴拉伸时的力学性能,建立了 RPC 材料模型并进行了试验验证。

2003 年,Corinaldesi 等^[18]对活性粉末混凝土的力学性能和传热性能进行了试验研究。Voo 等^[19]对纤维增强的活性粉末混凝土厚板的性能进行了研究。

2004 年,Washer^[20, 21]进行了活性粉末混凝土无损检测方面的研究工作,对活性粉末混凝土进行了超声波检测试验。

2005 年, Lee^[22]研究了活性粉末混凝土的黏结力和黏结耐久性。

2006 年,Voo 等^[23]对纤维增强预应力活性粉末混凝土梁剪切强度进行了研究。Shaheen、Kuznetsov、Valerian^[24, 25]对冲击荷载下钢纤维活性粉末混凝土的强度和韧性进行了研究。Fujikake^[26-28]对活性粉末混凝土在拉伸时的应变速率进行了研究,对高速弯曲荷载作用下的活性粉末混凝土梁进行了非线性分析,对活性粉末混凝土梁的冲击响应进行了研究并建立了理论模型。Shaheen 和 Ehab^[29]用活性粉末混凝土对后张法碳纤维增强的聚合物腱的锚固进行了研究。

2007 年,Graybeal 和 Tanesic^[30]依据 ASTM C944-99 标准,采用旋转砂轮以 200r/min 的速度对 RPC 持续磨损 2min,测得其质量损失为 10%左右。

2008 年,Cwirzen^[31]对活性粉末混凝土的力学性能、耐久性及其与普通混凝土的粘结性能进行了研究。

2010 年,Yazici Halit 等^[32, 33]对掺矿物掺和料活性粉末混凝土的配比及养护方法对其力学性能的影响进行了研究,采用粒化高炉矿渣和粉煤灰部分替代水泥和硅灰配制出了抗压强度超过 200MPa 的活性粉末混凝土,并对 3 中养护制备条件下(常温养护条件、高温蒸汽养护和高温高压养护)的 RPC 的性能进行了比较分析。Kang 和 Lee 等^[34]对不同钢纤维掺量的超高强混凝土进行三点弯曲试验,测得其折拉强度随纤维掺量的增加线性增长。依据试验结果,提出了简单实用的三折线模型,可用于不同纤维掺量的超高强混凝土的结构设计和有限元分析。

2011 年, Taia 等^[35]对 200~800℃ 高温后 RPC 的应力-应变行为进行研究。试件采用 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱体, 钢纤维体积掺量为 1%、2% 和 3%。试验结果表明: 200~300℃ 作用后, RPC 抗压强度有所增加, 经历温度高于 300℃ 时, 抗压强度明显下降; 峰值应变 500℃ 前不断增大, 500℃ 后逐渐减小, 200℃ 后, 钢纤维掺量大的 RPC 峰值应变也相应较大; 弹性模量随温度的增加不断降低, 且钢纤维掺量大的 RPC 具有较高的弹性模量。基于回归分析结果, 建立了 RPC 力学性能随温度变化的计算公式, 为 RPC 的工业应用和设计提供了有价值的参考。

2012 年, Ipek 等^[36]开展了养护时的压力对 RPC 的性能影响的研究, 试验结果表明, 在凝结过程施加 5~25MPa 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。Hüseyin Yiğiter 等^[37]采用粉煤灰替代部分水泥进行了低水泥用量 RPC 的制备研究, 取代了 60% 的水泥, 并在凝结硬化过程中通过施加压力减少孔隙和自由水, 制备得到了 338MPa 的 RPC。Aydin 等^[38, 39]对碱激发活性粉末混凝土进行了研究, 研究表明, 在相同抗压强度条件下, 碱激发 RPC 具有更高的抗弯性能、断裂能以及与钢筋的粘结性能; 由于碱激发 RPC 中的 CaO/SiO₂ 含量较低, 其纳米的孔结构有利于水分的逸出, 内部孔压力较低, 具有更好的防火性能。

2013 年, Graybeal^[40]、Willek 等^[41]对纤维与 RPC 基体的相互作用进行了研究, 通过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 RPC 基体的材料配制比例, 镀铜直纤维与 RPC 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/mm², 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。表明 RPC 基体与纤维的相互作用, RPC 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。

1.2.2 国内活性粉末混凝土的研究进展

国内有关活性粉末混凝土的第一篇公开发表的文献是俞瑞堂在《国外桥梁》1998 年第一期上发表的“活性粉末混凝土的理论与实践”, 介绍了加拿大舍布鲁克市活性粉末混凝土人行天桥的设计与制造情况^[42]。覃维祖^[43]在 1999 年《工业建筑》第四期介绍了活性粉末混凝土的配制原理及应用展望。

此后, 国内学者对活性粉末混凝土开展了大量的研究工作, 取得了一些成果。这些成果主要集中在以下几个方面: 活性粉末混凝土的配制原理、力学性能、耐久性、微观结构、构件设计及应用等。清华大学覃维祖等对活性粉末混凝土的配制原理进行了研究, 对活性粉末混凝土在石油工业中的应用进行了尝试^[43, 45]。湖南大学黄政宇和方志等, 对活性粉末混凝土的配比、强度、耐久性、流变性能、粘结、受压的动力性能、与碳纤维之间的锚固等开展了广泛的研究^[46-49]。同济大学施惠生等对矿渣活性粉末混凝土的配制技术、应力-应变关系及抗渗性进行了研

究^[50,51]。福州大学周瑞忠等对活性粉末混凝土的断裂与疲劳性能进行了深入研究,提出了提高活性粉末混凝土疲劳强度的方法,并对碳纤维活性粉末混凝土进行了研究^[52-54]。吴炎海等对 RPC200 的制作和力学性能进行了试验研究,对 22 根钢管活性粉末混凝土短柱进行了轴压试验,分析了荷载-变形曲线、破坏特征和影响极限承载力的主要因素^[55-57]。中南大学龙广成等对活性粉末混凝土的配制、干燥与收缩、力学性能、微观结构及应用进行了大量的研究工作^[58,59]。解放军理工大学郭志昆等对活性粉末混凝土的力学性能、微观结构、强度预测等进行了研究^[60,61]。北京交通大学阎贵平等对活性粉末混凝土的配制原理、力学性能和全曲线本构关系、微观结构、疲劳性能、弯曲强度耐久性等方面进行了系统深入的研究,对活性粉末混凝土柱的抗震性能进行了 3 个小比例尺试件的试验研究,在活性粉末混凝土的工程应用方面也做了大量的工作,在桥梁人行道板和支架、交通护栏方面取得了工程应用实例^[62-65]。哈尔滨工业大学郑文忠等研究了水胶比和石英砂、硅灰、矿渣粉、钢纤维品种与掺量及养护制度对活性粉末混凝土的强度和流动度的影响,初步提出了活性粉末混凝土配合比计算方法,并对活性粉末混凝土梁式构件的受力性能及设计方法进行了试验研究^[66-68]。东南大学孙伟等对超高性能绿色活性粉末混凝土的制备进行了探索,成功制备出了力学性能较高的生态型绿色活性粉末混凝土,并应用自行研制的穿甲弹对其抗侵彻性能进行了研究,试验结果表明超高性能绿色混凝土具有优异的抗侵彻、抗爆炸性能^[69,70]。东北电力大学鞠彦忠等对活性粉末混凝土的配制技术、力学性能以及活性粉末混凝土构件的设计进行了系统研究^[71-76]。

RPC 优异的耐久性是其在工程应用的一个重要原因,国内学者对活性粉末混凝土材料的耐久性也进行了深入、广泛的研究。鞠彦忠等^[77-79]对活性粉末混凝土的抗冻、抗碳化及抗氯离子渗透性能进行了广泛的研究,研究表明,活性粉末混凝土具有很好的抗冻融性能,在活性粉末混凝土抗冻融耐久性的诸多影响因素中,水胶比是最主要的影响因素,其次是硅灰水泥比,最后是钢纤维掺量;RPC 的 56d 抗碳化深度几乎为 0;标准养护条件下,粉煤灰水泥比为 0.3 的 RPC 试件在直流电压下通电 18h 的电通量和电流为 0。刘斯凤等^[80]将活性粉末混凝土试件浸入我国新疆盐湖卤水,三个月后测得试件的质量无损失,动弹性模量损失在 90d 时仅为 0.5%左右,证明了活性粉末混凝土材料良好的抗化学溶液侵蚀的性能。安明喆等^[81]进行了高性能混凝土(HPC)和活性粉末混凝土材料的抗冻融、抗碳化及抗氯离子渗透性能的对比试验,得到了 HPC 和 RPC 两种材料经过 50 次、100 次、150 次、200 次、250 次和 300 次冻融循环后的质量损失和动弹模量损失,3d、7d、14d、28d 的碳化深度及氯离子扩散系数,试验结果显示,RPC 在经过 300 次冻融循环后的耐久性系数仍大于 99,28d 的抗碳化深度为 0,氯离子渗透系数为 0.222。杨吴生等^[82]测定了 RPC 棱柱体试件抗冻融和抗化学溶液侵蚀性能,试验结果显示,经 300 次冻融循环后 RPC 材料的耐久性系数仍然大于 100,而且在海水中浸泡过

的 RPC 试件的抗压强度和抗折强度都比浸泡前高。未翠霞、宋少民^[83]将边长为 100mm 的 RPC 立方体试件浸泡在硫酸钠饱和溶液中 24h, 再于 80℃ 的烤箱中烘干, 试验结果显示, 10 次循环后 RPC 立方体试件的质量损失仅为 1%, 20 次循环后试件的质量损失不变化, 但 RPC 试件的强度却在逐渐增大。叶青等^[84]对 RPC 抗液氮冻融能力进行了试验研究, 试验表明, RPC 经过 50 次常规冻融和一次液氮冻融循环之后, 其质量损失为 0.4%, 强度损失为 1.8%, 因此, RPC 具有抗液氮冻融的能力。

以上研究从不同方面对 RPC 材料的耐久性进行了研究, 也与常规混凝土和高性能混凝土的耐久性进行了比较分析, 这些研究均表明, RPC 材料具有良好耐久性。

一些单位的研究人员对 RPC 材料的高温性能、抗冲击性能、耐磨性、与钢筋的粘结性能等进行了研究。

鞠杨等^[85, 86]对不同钢纤维含量 RPC 的热工性能 (体积密度 ρ 、热传导系数 λ 、热扩散系数 α 、比热容 C_v 和线膨胀系数 α_l) 进行了试验研究, 并建立了 ρ 、 λ 、 α 、 C_v 和 α_l 随温度 T 、钢纤维体积率 ρ_v 变化的计算公式。与普通高强高性能混凝土相比, RPC 的热扩散系数偏高, 质量损失率、热传导系数和比热容偏低, 线膨胀系数则基本持平, 说明 RPC 热扩散性能较好, 但传导和贮存热量的能力不高。

郑文忠等^[87, 88]通过 136 个 RPC 试件的高温爆裂试验和 1200 个 RPC 试件的高温试验及高温后力学性能进行了系统的试验研究, 结果表明, RPC 爆裂几率随含水率的增加逐渐增大, 临界含水率为 20%~24%, 升温速度越快、试件尺寸越大, RPC 爆裂发生越剧烈。相对于升温速度和试件尺寸而言, 含水率对 RPC 高温爆裂的影响最大。钢纤维通过提高 RPC 的抗拉强度和减小温度应力抑制 RPC 爆裂的发生, 体积掺量为 2% 时可有效防止 RPC 发生爆裂; 聚丙烯纤维熔点为 165℃, 高温下熔化并在 RPC 内留下互相连通的孔洞, 为蒸汽和热量逸出提供通道, 从而缓解 RPC 内部蒸汽压力, 抑制爆裂发生, 聚丙烯纤维体积掺量为 0.3% 时可以防止 RPC 发生爆裂; RPC 中混掺钢纤维与聚丙烯纤维时, 一方面钢纤维提高了 RPC 的抗拉强度和热传导能力, 另一方面聚丙烯纤维缓解了蒸汽压力, 二者共同作用抑制爆裂效果显著。基于蒸汽压机理和热应力机理, 提出了 RPC 爆裂的综合作用机理, 即 RPC 高温爆裂归因于蒸汽压、热应力和随机性裂纹三方面的综合作用; 从 RPC 爆裂影响因素和爆裂机理出发, 制定了 RPC 爆裂抑制措施。

徐飞等^[89]对不同温度及钢纤维掺量 RPC 的应力-应变行为进行了研究, 结果表明: 高温下钢纤维 RPC 的自由膨胀变形 (ε_{th}) 随温度 (T) 的升高不断增大, 表

达式为 $\varepsilon_{th} = \left[26 \left(\frac{T}{1000} \right) + 10 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 \right] \times 10^{-3}$; 随温度升高, 钢纤维 RPC 棱柱体抗

压强度和弹性模量迅速下降, 峰值应变逐渐升高, 200℃、400℃、600℃和 800℃高温下钢纤维 RPC 的抗压强度分别降为常温时的 76%~82%、53%~62%、33%~42%

和 14%~19%；钢纤维掺量变化对高温下 RPC 力学性能的影响不明显；将高温下钢纤维 RPC 应力-应变曲线进行归一化分析，提出了单轴受压本构模型。

葛涛等^[90]利用 125 榴弹炮改装的发射装置对 RPC 和 C30 钢筋混凝土制成的靶板做高速侵彻试验，并通过对比两种不同材料的试验结果分析 RPC 的抗冲击力学性能。Tai^[91]利用霍普金森压杆研究了活性粉末混凝土的抗冲击性能，试验表明活性粉末混凝土具有较好的抗冲击性能。赖建中等^[92]采用分离式 SHPB 对不同纤维掺量的 RPC 材料进行了层裂性能试验。结果表明，RPC 材料层裂强度和破坏形态具有明显的应变率效应，层裂强度和破坏程度随着应变率的提高而增加。王耀华等^[93]采用步枪子弹和半穿甲弹进行了新型钢丝网 RPC 抗侵彻性能试验，通过比较靶体的破坏形态和侵彻深度以确定钢丝网 RPC 的抗侵彻性能，同时利用 ANSYS/LS-DYNA 动力有限元分析软件对两种靶体的抗侵彻性能进行数值计算分析，创建了新型钢丝网 RPC 的计算模型。试验和计算结果均表明：钢丝网 RPC 具有较好的抗局部破坏和抗裂的性能，且具有较高的效费比。余自若等^[94, 95]对 RPC 的疲劳特性进行了系统的研究，研究表明：循环荷载作用下，RPC 的疲劳破坏表现为形成单一临界疲劳主裂纹的破坏形态；RPC 的宏观疲劳损伤过程按宏观疲劳裂纹演变模式分为裂纹潜伏、裂纹稳定扩展和失稳破坏 3 个阶段。深圳市政工程设计院李忠、黄利东^[96]依据我国《无机地面材料耐磨性试验方法》(GB/T 12988-91)进行 RPC 耐磨性试验，测得 RPC 平均磨坑长度为 25.1mm，小于 28mm，参照《混凝土路面砖》(JC/T 466-2000)的规定，RPC 耐磨性达到优等品的要求，具有良好的耐磨性。中国台湾朝阳科技大学 Lee 等^[97]按照 ASTM C131 粗骨料抗磨试验标准，测得 1000 次耐磨循环后普通混凝土、高强砂浆和 RPC 的质量损失分别为 67%、33%和 8%，可见 RPC 抗磨性能是普通混凝土的 8 倍、高强砂浆的 4 倍，具有较高的耐磨性能。

对于 RPC 构件设计的研究也已经逐渐开展，卢姗姗^[98]在对 5 根不掺钢纤维 RPC 梁的受弯性能试验的基础上，通过理论推导分析，得到不掺钢纤维 RPC 梁正截面承载力计算公式。余自若等^[99]通过对 RPC 无配筋梁和有配筋梁的试验，分析了 RPC 梁的弯曲强度和变形特性。假设梁可承受拉应力且拉应力按矩形分布，给出了 RPC 受弯构件正截面承载力的计算公式，通过该公式计算出的理论值与试验值符合良好。李莉^[67, 68, 100]对 5 根钢筋活性粉末混凝土两跨连续梁进行了每跨跨中单点集中加载试验，并根据试验结果建立了承载力极限状态下支座两侧等效塑性较长度的计算公式以及弯矩调幅的计算公式。万见明^[101]对 RPC 试验梁进行了试验研究，并根据试验数据和有限元分析结果建立了 RPC 梁抗裂计算模型和 RPC 梁的正截面抗裂计算公式。林震宇等^[102]进行 22 根圆钢管 RPC 轴压短柱试验，分析其荷载-变形曲线、破坏特征，根据普通钢管混凝土极限承载力计算规范，结合试验结果，通过修正套箍系数，给出了圆钢管 RPC 轴压短柱极限承载力统一计算公式。周铁峰等^[103]参照高架桥设计规范对 RPC 桥墩进行了初步设计，通过有限

元计算分析了 RPC 桥墩在正常使用状态下的力学性能,并通过稳定性、极限承载能力、抗震性能等计算分析,验证了其所使用设计理论的正确性,郝文秀等^[104]进行了 5 个 RPC 箱型桥墩试件在低周反复荷载作用下的抗震性能试验研究,分析了试件的破坏形态和延性性能。王诚^[105]通过对 3 个 RPC 箱型墩试件进行了常轴力以及水平反复荷载作用下的试验,研究了水平荷载作用方向对 RPC 箱型墩抗震性能的影响,试验结果表明:RPC 箱型墩具有较好的抗震性能,水平荷载加载的方向角是影响 RPC 箱型墩抗震性能的一个重要因素,主轴受力构件的抗震性能明显优于斜向受力构件。鞠彦忠等^[106-108]根据 RPC 力学性能试验研究结果,通过理论推导分析,提出了 RPC 电杆的承载能力计算方法和正常使用状态(抗裂度、裂缝宽度、挠度)验算方法,给出相应参数的建议取值范围,并分别对 RPC 单杆、预应力 RPC 双杆和部分预应力筋 RPC 双杆进行了设计研究,设计出了能够满足 500kV 输电线路工程应用要求的三种电杆,实现了工厂化生产,取得了较好的经济效益和社会效益。

可见,国内学者对 RPC 基本构件的设计理论和方法进行了广泛的研究,研究范围涉及梁、柱、桥墩、电杆、管涵等。但是,这些设计计算理论和方法都是基于普通钢筋混凝土结构或纤维混凝土结构计算规范和一定数量的数据,通过拟合或修正得到的,即这些设计计算公式的推导不是完全基于构件的破坏机理,而是采用的半经验半理论的方法得到的,这些结论很可能仅与文中的试验数据相符合,不一定具有普遍适应性。因此,对于 RPC 构件的设计计算理论和方法有待进行更深入的研究。

1.2.3 活性粉末混凝土的工程进展

活性粉末混凝土由于其优越的力学性能、超高的耐久性和环保性能,自问世后,短短的十几年间已在道路桥梁、核电、市政、港口海洋以及军事工程中得到了较多的应用。迄今为止已二十多个国家和地区采用 RPC 材料制作桥梁构件, RPC 材料在其他预制构件中的应用更为广泛^[109]。

(1) 加拿大于 1994 年在地处恶劣环境的魁北克省 Sherbrooke 用 RPC 预制构件,现场组装了一座跨度 60m,供行人和自行车通行的桁架桥^[110],如图 1-1 所示。

(2) 法国 BOUYGUES 公司与美国陆军工程师团合作开发生产了大跨度预应力 RPC 梁、RPC 压力管道及放射性固体废物储存容器等多种 RPC 制品,美国还将活性粉末混凝土用于下水道系统工程中^[111]。

(3) 韩国首尔的 Sun-Yu 人行拱桥的主拱圈由 RPC200 材料建造, Sun-Yu 人行拱桥的跨度为 120m,由 6 段拼装而成,每段长度均 20m,该桥的拱宽为 4.3m,薄壁箱型截面,上部面板厚度仅为 30mm^[112],如图 1-2 所示。

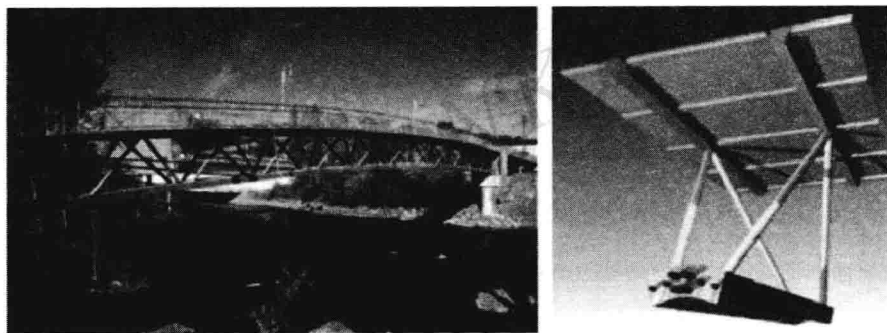


图 1-1 Sherbrooke 桥全貌及其结构形式

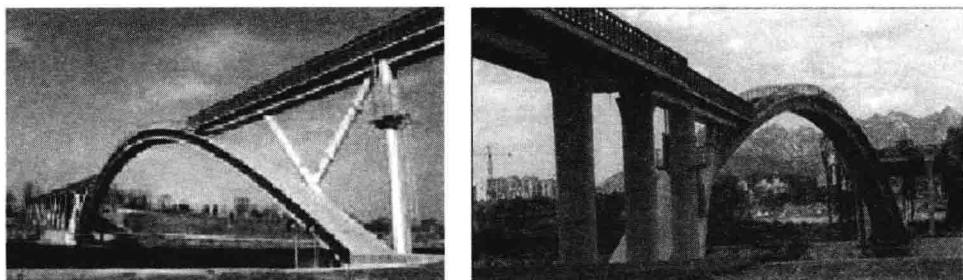


图 1-2 韩国首尔 Sun-Yu 步行桥全貌

(4) 2001 年在美国的伊利诺斯州建成的一个 18m 直径的圆形屋盖采用 RPC 材料, 该屋盖未使用任何钢筋, 由 24 块厚 12.7mm 的工厂预制的 Π 形板组成^[112]。

(5) 法国用活性粉末混凝土对 1 座核电厂的冷却塔进行了改造^[112]。

RPC 材料在国内也已经出现了很多工程应用的实例, 尤其是铁路交通工程中。同时, 也出现了不少的生产 RPC 预制构件的厂家, 主要产品包括电缆槽盖板, 桥梁盖板和栏杆, 低高度梁、T 形梁, 仿古砖^[113]及人行道板等。北京交通大学联合铁道第一勘测设计院、中铁三局集团建安处桥梁厂, 采用常规生产工艺进行了铁路人行道体系构件工业化生产研究^[112]。原铁道部颁布了《客运专线 RPC 材料人行道挡板、盖板暂行技术条件》和《客运专线铁路技术管理手册: 活性粉末混凝土构件施工要点手册》, 也促进了 RPC 材料在铁路交通工程的推广应用。另外, RPC 在国内工程修复中使用也比较多, 如葛洲坝二江泄水闸和映秀湾电站拦河闸底板修补工程, 试用效果良好。

1.3 活性粉末混凝土研究中存在的主要问题及今后的发展趋势

1.3.1 存在的主要问题

RPC 的研制与应用已有成功的先例, 但是从原材料到制备工艺、试验研究、实践应用以及 RPC 的各种性能及其产生机理, 仍有很多问题需要做进一步研究。

第一是 RPC 的原材料及制备工艺。国外在制备 RPC 时对粉煤灰等工业废渣的利用率几乎为零。考虑我国实际情况,粉煤灰来源广且价格低廉,而硅灰价格昂贵,且运输不便,钢纤维价格较高,不利于 RPC 的推广应用。长期以来,对于 RPC 原材料种类选择及用量,没有统一要求和明确规定。另外,从已有的文献可知,对于 RPC 材料的搅拌、成型和养护等工艺流程多种多样,不同制备方法得到的材料性能差异较大。

第二是 RPC 试验研究尚无统一的规范来严格规范其试验方法,对试验机、加载方式及加载速度等均没有统一、详细的规范可以参考,只能通过权威文献和试验来进行研究,找出合适的试验方案。

第三是 RPC 试验室制备与实际工程中的差别。RPC 材料要获得高强度以及各种优异的力学性能,需要高温养护,有些方法还需要高湿条件或者加压方式。而在实际工程中,对 RPC 构件,并不容易保证长时间、稳定的高温养护制度,保证高湿、加压更是难以实现。所以,如何在基本保证 RPC 构件优良性能的前提下,简化其制备养护方案,节约成本也是需要继续研究的。

第四是 RPC 材料收缩的试验研究。收缩是混凝土材料的一项重要的变形特性,会对混凝土性能和结构带来不良后果,影响其耐久性。有研究指出, RPC 蒸汽养护后干缩会减小,而标准养护的干缩值和自收缩值都比较大,但由于大量试验数据缺乏,其收缩变化规律难以总结,还需要对其进行试验研究。

第五是 RPC 材料优异力学性能的产生机理。国内外学者对活性粉末混凝土存在的物理上、力学上的非均匀性和原材料颗粒级配优化等方面还较少研究,至今还没有系统明确地解释 RPC 良好的力学性能产生机理。

第六是现在对 RPC 的研究主要在制备材料方面, RPC 构件受力性能及破坏机理的研究较少,当前的工程应用仍限于参考纤维高强混凝土加上经验估算的方式进行,实际上这已经阻碍了 RPC 在工程中的推广应用,也阻碍了 RPC 材料本身的发展。

1.3.2 发展趋势

RPC 具有极其优越的性能,可应用的领域也非常广泛。在土木工程领域中,随着我国高层建筑和大跨结构迅速增加,为 RPC 的开发应用提供了巨大的空间与市场,此外,在结构及桥梁的改造、特种结构工程的施工中,它也具有广阔的应用前景。从工程应用的角度来看, RPC 在以下几个方面具有较好的发展和应用前景:

(1) 预应力结构和构件。预应力构件厂如果投入适量的资金,对部分设备进行改造,完全可以生产上述活性粉末混凝土预制构件。利用 RPC 的超高强度与高韧性,能生产薄壁、细长、大跨等新颖形式的预制构件,可大幅度缩短工期和降低工程造价。

(2) 钢-混凝土组合结构。众所周知,钢筋混凝土的最大缺点是自重,一般的建筑中结构自重为有效荷载的 8~10 倍。而用无纤维 RPC 制成的钢管混凝土,具有极高的抗压强度、弹性模量和抗冲击韧性,用它制作高层或超高层建筑的结构构件,可大幅度减小截面尺寸和结构自重,增加建筑物的使用面积与美观。因此,像 RPC 钢管混凝土这样的构件有着广阔的应用前景。

(3) 特殊用途的构件。RPC 的孔隙率极低,具有超高抗渗性及良好的耐磨性,不但能够防止放射性物质从内部泄漏,而且能够抵御外部侵蚀性介质的腐蚀,可以用于生产核废料储存容器和各种耐腐蚀的压力管和排水管道。这不仅可大大降低造价,而且可大幅度延长构件的使用寿命。另外, RPC 具有早期强度发展快、强度高的特点,可用于补强和修补工程中可替代钢材和昂贵的有机聚合物,既可保持混凝土体系的有机整体性,还可降低工程造价。

参 考 文 献

- [1] Aitcin P C. High Performance Concrete[M]. London: E & FNSpon, 2004.
- [2] Shi C J, Mo Y L. High Performance Construction Materials-Science and Applications[M]. Washington DC: World Scientific Publishing Company, 2008.
- [3] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 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.
- [5] Richard P, Cheyrezy M. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200—800 MPa Compressive Strength[C]//ACI Spring Convention: SP144-24. San Francisco, 1994: 507-518.
- [6] Richard P, Cheyrezy M. Composition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (7) : 1501-1511.
- [7] Cheyrezy M. Microstmetuml Analysis of RPC[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (7) : 1491-1500.
- [8] 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.
- [9] O'Neil, Edward F. High-Performance Pipe Products Fabricated with Reactive Powder concrete[C]//Proceedings of the Materials Engineering Conference, v 2, Materials for the New Millennium, 1996: 1320-1329.
- [10] Bonneau O, Pouhn C, et al. Reactive Powder Concretes: from Theory to Practice[J]. Concrete International, 1996, 18 (4) : 47-49.
- [11] Philippot S, Korb J P, Petit D, et al. Setting and Microporosity of Reactive Powder Concrete: Proton Nuclear Relaxation and High Resolution Solid NMR Studies[C]// 2nd International RILEM Workshop on Hydration and Setting, 1997: 227-233.
- [12] Matte V, Riehet C, Moranville M. Characterization of Reactive Powder Concrete as a Candidate for the Storage of Nuclear Wastes[C]. Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Sherbrooke, Canada, 1998, : 75-88.
- [13] Cappola, Jennifer. The Use of Reactive Powder Concrete for Civil Engineering Structures

- [C]//2000 Annual Conference Abstracts Canadian Society for Civil Engineering, 2000: 66-78.
- [14] Arnaud Poitou, et al. Fibers by Extrusion in Reinforced Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics. 2001, 127 (6) : 527-543.
- [15] Voo J, Foster, S J, Gilbert, R I, et al. Design of Disturbed Regions in Reactive Powder Concrete Bridge Girders[C]//International Conference on High performance Materials in Bridges, 2001: 17-127.
- [16] Ple O, de la Vega E A, Bernier G, et al. Biaxial Tensile Behavior of the Reactive Powder concrete[C]// Fifth ACI International Conference on Innovations in Design with Emphasis on Seismic, Wind, and Environmental Loading; Quality Control and Innovations in Materials/Hot-Weather Concreting, Cancun, Mexico, 2002: 369-387.
- [17] Bayard O, Ple O. Fracture Mechanics of Reactive Powder Concrete: Material Modelling and Experimental Investigations[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70 (7-8) : 839-851.
- [18] Corinaldesi V, Moriconi, G. Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Reactive Powder Concrete Materials[C]// International Conference on Advances in Concrete and Structures, 2003: 766-773.
- [19] Voo J, Foster S, Gilbert R I, et al. Behaviour of Fibre Reinforced Rpc Deep Panels[C]// International Conference on Advances in Structures, Sydney, Australia, 2003: 1101-1106.
- [20] Washer G, Fuchs P, Graybeal B, et al. Nondestructive Evaluation of Reactive Powder concrete[J]. AIP Conference Proceedings 2004, 700 (1) : 1035-1041.
- [21] Washer G. Ultrasonic Testing of Reactive Powder Concrete[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, February, 2004, 51 (2) : 193-201.
- [22] Lee M G, Chiu C T, and Wang Y C .The Study of Bond Strength and Bond Durability of Reactive powder concrete[J]. Journal of ASTM International, 2005, 2 (7) : 485-494.
- [23] Voo J Yen Lei. Shear strength of Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Prestressed Girders without stirrups[J]. Journal of advanced concrete technology, 2006, 4 (1) : 123-132.
- [24] Shaheen Ehab. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder concrete[J]. ACI Materials Journal, 2006, 103 (6) : 444-451.
- [25] Kuznetsov Valerian A. Strength and Toughness of Steel Fiber Reinforced Reactive Powder concrete under blast loading[J]. Transactions of Tianjin university, 2006, 12: 70-74.
- [26] Fujikake, Kazunori. Effects of Strain Rate on Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4 (1) : 79-84.
- [27] Fujikake Kazunori. Nonlinear Analysis for Reactive Powder Concrete Beams under Rapid Flexural loadings[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4 (1) : 85-97.
- [28] Fujikake Kazunori. Study on Impact Response of Reactive Powder Concrete Beam and its Analytical Model[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4 (1) : 99-108.
- [29] Shaheen, Ehab. Reactive Powder Concrete Anchorage for Post-tensioning with Carbon Fiber-reinforced Polymer Tendons[J]. ACI materials journal, 2006, 103 (6) : 436-443.
- [30] Benjamin Graybeal, Jussara Tanesi. Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete Journal of Materials in Civil Engineering[J]. 2007, 19 (10) : 848-854.
- [31] Cwirzen A, Penttala V, Vornanen C, Reactive Powder based Concretes: Mechanical Properties, Durability and Hybrid use with OPC[J]. Cement and Concrete Research. 2008, 38: 1217-1226.
- [32] Yazici Halit, Yardimci M Y, Aydin S, et al. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete