

高温后活性粉末混凝土横向变形性能

李海艳^{1,2}, 王 英¹, 郑文忠¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 石家庄铁道大学 工程力学系, 050043 石家庄)

摘要: 为获得高温后活性粉末混凝土(RPC)横向变形性能变化规律,对180个70.7 mm×70.7 mm×228 mm的RPC试件进行高温后单轴受压试验,实测了20~900℃后纤维种类和掺量不同的RPC横向变形系数随应力比的变化曲线,进而得到高温后RPC体积应变随温度的变化规律.研究表明:常温下RPC泊松比为0.201~0.212,相同温度作用后,泊松比随纤维掺量的增加相应减小;20~400℃,RPC泊松比随经历温度的升高逐渐降低,经历温度高于400℃时,泊松比有所回升.拟合给出了RPC泊松比随温度变化的计算公式,与试验结果吻合较好.

关键词: 活性粉末混凝土;高温;横向变形系数;体积应变;泊松比

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)04-0001-05

Transverse deformation properties of reactive powder concrete after exposure to high temperature

LI Haiyan^{1,2}, WANG Ying¹, ZHENG Wenzhong¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Railway University, 050043 Shijiazhuang, China)

Abstract: To obtain the transverse deformation properties of reactive powder concrete (RPC) after high temperature, the uniaxial compression experiments were conducted on 180 prismatic specimens with the size of 70.7 mm×70.7 mm×228 mm for reactive powder concrete (RPC) after exposure to 20~900℃. The curves of transverse deformation coefficient with the stress ratio were measured for RPC with various fiber types and contents. Then the relationships between volumetric strain and heating temperature were received. The results indicate that the Poisson's ratio of RPC under room temperature is 0.201~0.212. For the same heat treatment, the Poisson's ratio reduces gradually with the increasing of fiber content. After exposure to 20~400℃ the Poisson's ratio decreases gradually with the temperature increases, but it restores when the temperature is higher than 400℃. The equation to express the relationship between Poisson's ratio and exposure temperature is proposed, and the fitting curve is in good agreement with the test results.

Key words: reactive powder concrete; high temperature; transverse deformation coefficient; volumetric strain; Poisson's ratio

混凝土横向变形系数和体积应变反应了构件受力时的横向变形能力和内部裂缝的发展过程.在材料弹性范围内,横向变形系数为一定值,定义

为泊松比,泊松比是进行材料弹塑性分析的重要指标^[1].我国现行GB50010—2010《混凝土结构设计规范》中规定混凝土泊松比取0.2.ACI高强混凝土委员会报道的强度55~80 MPa混凝土的泊松比试验结果为0.20~0.28.对高温后普通混凝土(NSC)和高强混凝土(HSC)横向变形性能进行研究^[2-4],发现当应力不超过0.5倍峰值应力时,泊松比随经历温度的升高逐渐降低,温度达到500~600℃后,泊松比有所回升,高应力水平点

收稿日期: 2012-05-18.

基金项目: 教育部长江学者奖励计划资助项目(2009-37);

教育部博士点基金资助项目(20092302110046).

作者简介: 李海艳(1984—),女,博士研究生;

郑文忠(1965—),男,博士生导师,长江学者特聘教授.

通信作者: 李海艳, haiyan126@163.com.

对应的泊松比与温度的关系不确定.

活性粉末混凝土(RPC)是近年来新兴的一种超高强混凝土,目前,对RPC常温力学性能的研究较多^[5-6],但对其高温后力学性能的研究较少^[7-8].RPC中掺入钢纤维可以有效提高其力学性能^[9],而聚丙烯纤维(PPF)的掺入则对RPC高温性能有较大影响,因为PPF熔点较低为165℃,当温度高于其熔点时,PPF熔化并在RPC内留下相互连通的孔道,为蒸汽和热量逸出提供通道,降低RPC爆裂发生的可能性并改善其力学性能^[10].为了明确不同高温后RPC的横向变形性能和裂缝发展过程,本文完成了180个活性粉末混凝土(RPC)棱柱体试件的高温后单轴受压试验,得到了不同高温后纤维种类和掺量不同的RPC横向变形系数随应力比的变化曲线,进而推得高温后RPC体积应变随温度的变化规律,建立了RPC泊松比随温度变化的计算公式,并将常温下RPC泊松比与普通混凝土和高强混凝土进行了对比分析.

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

选用P.O42.5级普通硅酸盐水泥;SiO₂质量分数94.5%,比表面积20 780 m²/kg的微硅粉;比表面积475 m²/kg的S95型矿渣粉;SiO₂质量分数在99.6%以上,40~70目和70~140目的石英砂;黄褐色粉末状FDN浓缩型高效减水剂;长度13 mm,直径0.22 mm的高强平直钢纤维;长度18~20 mm,熔点165℃的聚丙烯纤维(PPF).试验包括6种配合比,分别对应单掺钢纤维体积率为1%、2%和3%的SRPC1、SRPC2和SRPC3;钢纤维和PPF体积掺量为2%、0.1%、2%、0.2%和1%、0.2%的HRPC1、HRPC2和HRPC3.具体配合比见表1.

表 1 试验用RPC配合比

编号	水胶比	胶凝材料			石英砂	减水剂	钢纤维/PPF/	
		水泥	硅灰	矿渣			%	%
SRPC1	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	1	0
SRPC2	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	2	0
SRPC3	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	3	0
HRPC1	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	2	0.1
HRPC2	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	2	0.2
HRPC3	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	1	0.2

注:1. 钢纤维和PPF为体积掺量;2. 水胶比为水与胶凝材料的质量比.

1.2 试件设计与制作

试验采用70.7 mm×70.7 mm×228 mm的棱柱体试件,每种配比成型10组试件,分别对应

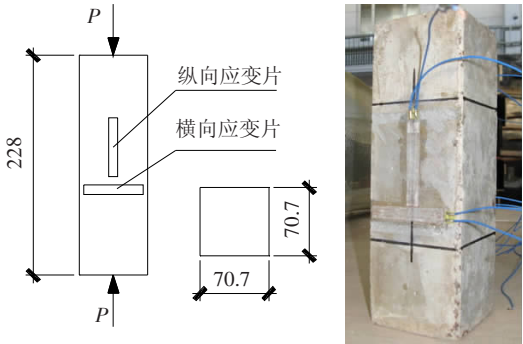
10个目标温度(20、120、200、300、400、500、600、700、800、900℃),每3个试件为一组,总计180个试件,试验数据取3个试件的平均值.

活性粉末混凝土的制备程序为:①将称量好的石英砂、水泥、硅灰、矿渣和减水剂依次倒入混凝土搅拌机,干拌3 min;②在搅拌过程中缓慢加入称量好的水,湿拌5 min;③均匀撒入钢纤维和聚丙烯纤维,搅拌5 min出料.将拌合物注入钢模,在混凝土振动台上经高频振动成型,标准环境下静置24 h后拆模,而后将试件放入HJ84型混凝土加速养护箱中养护3 d,养护箱工作电压380 V,功率3×3 kW,控温范围为常温~100℃,具体养护温度可自行设定,本试验养护箱温度设定为90℃.为了更贴近工程实际,将养护时间适当延长,即经高温养护后的试件需移入标准养护室养护60 d拿出晾干,2个月后进行高温试验.

1.3 试验步骤

将养护至规定龄期的试件先进行高温试验,目标温度为:120、200、300、400、500、600、700、800、900℃.高温试验采用电炉升温,升温速度为4℃/min,达到目标温度后恒温2 h.冷却方式为炉内自然冷却至200℃后打开炉门冷却至100℃,然后取出试件置于室内令其自然冷却至室温.

经高温试验后的试件,室内放置3 d后进行棱柱体受压试验,受压试验在5 000 kN电液伺服液压试验机上进行.横向变形系数 $\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$,体积应变 $\theta = (1 - 2\nu)\varepsilon$. ε 和 ε' 分别为纵向和横向应变,由粘贴于试件上的电阻应变片测量.本试验中应变片粘贴布置方式见图1,试件的两个对称侧面各粘贴一个标距4 cm的纵向和横向应变片,横向应变片用于测量试件的横向应变,纵向应变片除了测量轴向应变外,还起着检查试件力学对中的作用.试验过程中,应变通过DH3818静态应变测试系统每隔10 kN采集一次,直到试件受压破坏.



(a) 示意图(mm) (b) 照片

图 1 应变片粘贴布置

1.4 高温后 RPC 棱柱体抗压强度介绍

本文重点研究高温后 RPC 的横向变形性能, 为了更好地理解 RPC 横向变形性能随温度的变化情况, 本节将简要介绍高温后 RPC 棱柱体抗压强度随温度的变化规律. 对高温后 RPC 力学性能进行研究^[11-12], 发现经历温度不高于 300 ℃ 时, 钢纤维 RPC 与混杂纤维 RPC(混掺钢纤维和 PPF 的 RPC)相当于经历了“高温养护”过程, 棱柱体抗压强度较常温时略有提高; 400 ~ 700 ℃ 作用后, RPC 内部损伤逐渐加重, 抗压强度近似呈线性规律降低; 800 ~ 900 ℃ 后, 钢纤维强度丧失, 抗压强度较 700 ℃ 时有所回升. 此外, 钢纤维和 PPF 的掺入有效改善了高温后 RPC 的力学性能. 式(1)与式(2)分别给出了钢纤维 RPC 与混杂纤维 RPC 棱柱体抗压强度随温度变化的计算式.

单掺钢纤维体积率为 1% ~ 3% 的 RPC:

$$f_{ct}/f_c = 0.97 + 1.72\left(\frac{t}{1000}\right) - 8.24\left(\frac{t}{1000}\right)^2 + 6.00\left(\frac{t}{1000}\right)^3,$$
$$20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 900\text{ }^{\circ}\text{C}, R^2 = 0.990. \quad (1)$$

混掺钢纤维与 PPF 体积率为 (2%、0.1%), (2%、0.2%) 和 (1%、0.2%) 的 RPC:

$$f_{ct}/f_c = 0.96 + 2.09\left(\frac{t}{1000}\right) - 8.71\left(\frac{t}{1000}\right)^2 + 6.06\left(\frac{t}{1000}\right)^3,$$
$$20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 900\text{ }^{\circ}\text{C}, R^2 = 0.994. \quad (2)$$

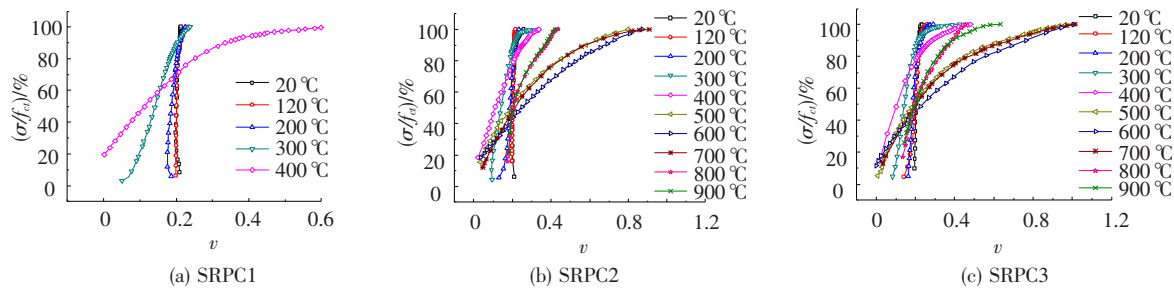


图 2 高温后单掺钢纤维 RPC 横向变形系数

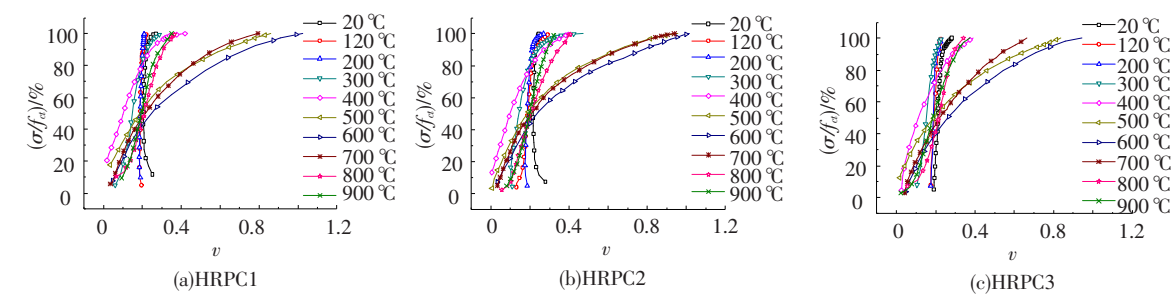


图 3 高温后混杂纤维 RPC 横向变形系数

横向变形系数较好地反映了混凝土内部裂缝的开展过程. 当 RPC 经历温度不高于 300 ℃ 时, 纤维种类和掺量不同的 RPC 横向变形系数随应力比的变化与常温时相比基本相同: 即当 $\sigma/f_{ct} \leq 0.8$ 时, 纵向、横向应变近似按比例增长, 横向变形系数基本保持不变或略有增长, 说明 RPC 的塑

式中: f_{ct} 为温度 t 作用后 RPC 棱柱体抗压强度 (MPa); f_c 为常温下 RPC 棱柱体抗压强度 (MPa); t 为经历温度 (°C); R^2 为表征拟合精度的相关系数.

2 高温后 RPC 横向变形系数

图 2、3 分别为高温后单掺钢纤维与混掺两种纤维的 RPC 横向变形系数 (ν) 随应力比 (σ/f_{ct} , 应力 σ 与棱柱体抗压强度 f_{ct} 之比) 的变化曲线. 由于 SRPC1 经 500 ℃ 恒温结束后, 试件产生较宽爆裂裂纹, 已没有相对平整的表面, 无法进行后续的抗压试验, 因此, 图中只给出了 SRPC1 经 20 ~ 400 ℃ 后的横向变形系数曲线. 从图 2、3 可看出, 6 种不同配比的 RPC 所对应的 $\nu - \sigma/f_{ct}$ 曲线随经历温度的升高具有相似的变化规律: 经历温度不高于 300 ℃ 时, RPC 所受高温损伤较小, 随应力比 (σ/f_{ct}) 的增大, 横向变形系数的变化幅度较小; 400 ~ 700 ℃ 作用后, RPC 变得越来越疏松, 横向变形能力增强, 随应力比的增大, 横向变形系数变化幅度明显增大; 800 ~ 900 ℃ 作用后, 钢纤维丧失作用, 混凝土烧结, RPC 变形能力减弱, 随应力比增大, 横向变形系数变化幅度重又减小.

性变形和微裂纹发展缓慢; 当 $0.8 < \sigma/f_{ct} \leq 0.9$ 时, 横向变形系数有明显增长, 表示 RPC 内部微裂纹有较大开展, 但试件表面尚无肉眼可见裂纹; 当 $\sigma/f_{ct} > 0.9$ 时, 横向变形系数急剧增加, 试件表面出现肉眼可见裂纹, 此后, 横向应变达到极限拉伸状态, RPC 受压破坏.

3 高温后 RPC 体积应变

不同温度作用后单掺钢纤维和混掺两种纤维的 RPC 体积应变 (θ) 随应力比 (σ/f_{ct}) 的变化情况分别见图 4 和图 5。可以看出, 6 种不同配比的 RPC 体积应变随经历温度的升高具有相同的变化趋势, 体积应变临界点所对应的应力比 (σ/f_{ct}) 随温度的升高均呈先减小后增大的变化规律。当经历温度低于 300 °C 时, 体积应变临界点所对应的 σ/f_{ct} 比较接近, 其平均值处于 0.906 ~ 0.977,

说明该温度范围内, 应力比超过 90% 时 RPC 进入裂缝不稳定扩展阶段; 经 400 ~ 700 °C 高温后, 体积应变临界点所对应的 σ/f_{ct} 比较接近, 其平均值位于 0.517 ~ 0.582, 表明经 400 ~ 700 °C 作用后, 荷载达到峰值荷载的 55% 左右进入裂缝不稳定扩展阶段, 这一结论对火灾后结构构件的损伤评估具有重要意义。800 ~ 900 °C 作用后, 钢纤维基本丧失作用, RPC 烧结, 体积应变临界点所对应的应力比有所提高, 位于 0.666 ~ 0.807。

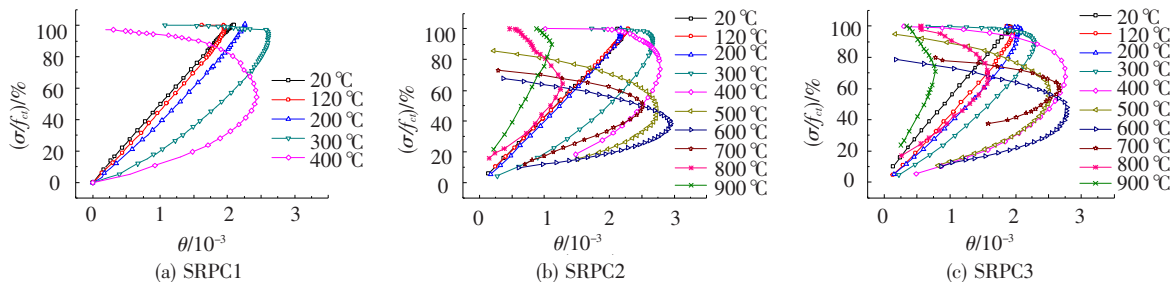


图 4 高温后单掺钢纤维 RPC 体积应变

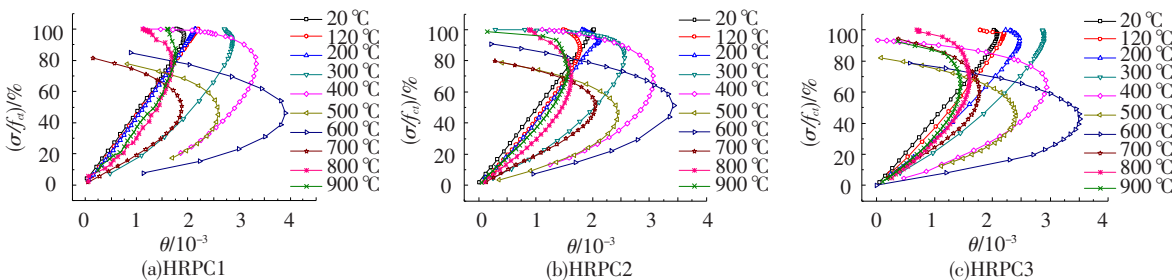


图 5 高温后混杂纤维 RPC 体积应变

4 温度对 RPC 泊松比的影响

横向变形系数在材料弹性范围内为一定值, 该值被定义为泊松比。本文认为 0.5 应力比对应的横向变形系数为 RPC 泊松比 (μ)。单掺钢纤维和混掺两种纤维的 RPC 泊松比随温度变化曲线见图 6。由图 6 可知, 单掺钢纤维和混掺纤维的 RPC 泊松比随经历温度的升高变化趋势相同: 20 ~ 400 °C, 泊松比随经历温度的升高近似呈抛物线规律降低; 400 ~ 600 °C, 随经历温度的升高泊松比线性增大; 600 ~ 900 °C, 泊松比重又减小。

由图 6 还可看出, 相同温度作用后, 单掺钢纤维的 RPC 泊松比随钢纤维体积掺量的增大逐渐减小, 600 °C 后, SRPC2 对应的泊松比较 SRPC3 提高了 5.09% 左右; 混掺钢纤维和聚丙烯纤维的 RPC 经历相同温度作用后, HRPC2 对应的泊松比最小, HRPC1 次之, HRPC3 最大, 600 °C 后, HRPC1、HRPC2 和 HRPC3 对应的泊松比分别为 0.247、0.237 和 0.260。分析原因为, 纤维约束了试件侧向膨胀, 减小了 RPC 的横向应变, 因此, 对于单掺钢纤维的

RPC 来说, 钢纤维掺量 3% 的 SRPC3 对应的泊松比最小, 对于混杂纤维 RPC 来说, 钢纤维掺量 2%、PPF 掺量 0.2% 的 HRPC2 对应的泊松比最小。

5 泊松比与温度关系拟合

鉴于单掺钢纤维与混掺钢纤维和聚丙烯纤维的 RPC 泊松比随温度的变化规律基本一致, 二者可统一采用式 (3) 表达, 拟合曲线与试验数据见图 7, 二者吻合较好。

$$\mu = \begin{cases} 0.207 - 0.661 \times 10^{-3} \left(\frac{t}{1000} \right) - 0.636 \left(\frac{t}{1000} \right)^2, & 20^\circ\text{C} \leq t \leq 400^\circ\text{C}, R^2 = 0.972; \\ -0.187 + 0.728 \left(\frac{t}{1000} \right), & 400^\circ\text{C} < t \leq 600^\circ\text{C}, R^2 = 0.997; \\ 0.801 - 1.413 \left(\frac{t}{1000} \right) + 0.826 \left(\frac{t}{1000} \right)^2, & 600^\circ\text{C} < t \leq 900^\circ\text{C}, R^2 = 0.998. \end{cases} \quad (3)$$

式中: μ 为 0.5 应力比所对应的 RPC 泊松比; t 为经历温度; R^2 为相关系数。

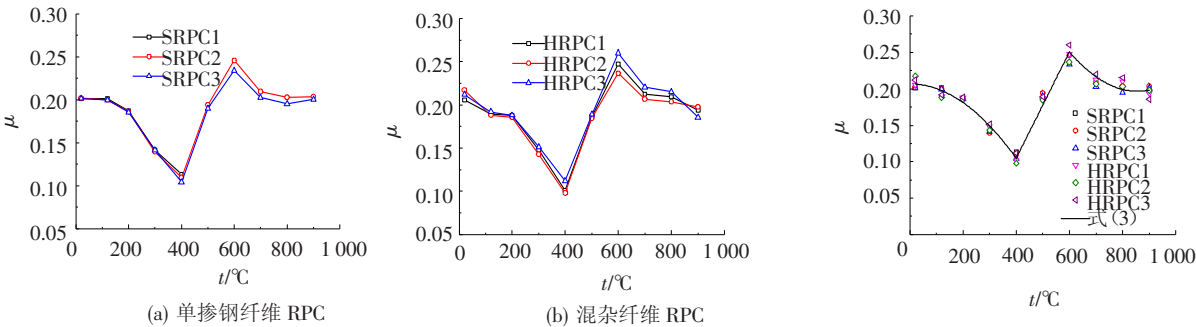


图 6 不同纤维种类和掺量的 RPC 泊松比与温度关系 图 7 不同配比 RPC 泊松比与温度关系拟合曲线

我国现行《混凝土结构设计规范》中要求混凝土泊松比取 0.2; ACI 高强混凝土委员会报道的强度 55 ~ 80 MPa 的混凝土的泊松比试验结果为 0.20 ~ 0.28; 我国铁道科学研究院测定两组强度为 63.9 MPa 和 102.0 MPa 的混凝土泊松比分别为 0.22 和 0.23. 本试验得到, 常温下单掺钢纤维的 RPC 泊松比为 0.201 左右, 混掺钢纤维和聚丙烯纤维的 RPC 泊松比为 0.212 左右, 可见, 活性粉末混凝土泊松比与普通混凝土和高强混凝土相比差别不大.

6 结 论

1) 经历温度低于 300 $^\circ\text{C}$ 时, 随应力比 (σ/f_{ct}) 的增大, RPC 横向变形系数的变化幅度较小, 体积应变临界点对应的 σ/f_{ct} 平均值位于 0.906 ~ 0.977; 400 ~ 700 $^\circ\text{C}$ 作用后, 随应力比的增大, 横向变形系数变化幅度明显增大, 体积应变临界点对应的 σ/f_{ct} 平均值位于 0.517 ~ 0.582; 800 ~ 900 $^\circ\text{C}$ 作用后, 横向变形系数变化幅度重又减小, 体积应变临界点对应的 σ/f_{ct} 平均值位于 0.666 ~ 0.807.

2) 由于纤维约束了试件侧向膨胀, 减小了试件的横向变形, 经相同温度作用后, 单掺钢纤维的 RPC 泊松比随钢纤维体积掺量的增大逐渐减小, 混掺钢纤维和聚丙烯纤维的 RPC 泊松比大小顺序为: HRPC3 > HRPC1 > HRPC2.

3) 建立了高温后 6 种不同配比的 RPC 泊松比随温度变化的计算式, 理论曲线与试验数据吻合较好. 常温下活性粉末混凝土泊松比为 0.201 ~ 0.212, 与普通混凝土和高强混凝土相比差别不大.

参考文献

[1] 过镇海. 混凝土的强度和变形——试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
[2] LAU A, ANSON M. Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1698 - 1707.

[3] 吴波, 马忠诚, 欧进萍. 高温后混凝土变形特性及本构关系的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 42 - 49.
[4] 肖建庄, 王平, 谢猛. 矿渣高性能混凝土高温后受压本构关系试验[J]. 同济大学学报, 2003, 31(2): 186 - 190.
[5] LI Li, ZHENG Wenzhong, LU Shanshan. Experimental study on mechanical properties of reactive powder concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2010, 17(6): 795 - 800.
[6] YAZICI H, YARDIMCI M Y, YIGİTER H. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag [J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32(8): 639 - 648.
[7] LIU Chin-tung, HUANG Jong-shin. Fire performance of highly flowable reactive powder concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2072 - 2079.
[8] TAI Yuh-shiou, PAN Huang-hsing, KUNG Ying-nien. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 $^\circ\text{C}$ [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(7): 2416 - 2424.
[9] 李海艳, 郑文忠, 罗百福. 高温后 RPC 立方体抗压强度退化规律研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(4): 17 - 22.
[10] 郑文忠, 李海艳, 王英. 高温后不同聚丙烯纤维掺量的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.
[11] ZHENG Wenzhong, LI Haiyan, WANG Ying. Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35(C): 931 - 940.
[12] ZHENG Wenzhong, LI Haiyan, WANG Ying. Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature[J]. Materials & Design, 2012, 41(C): 403 - 409.

(编辑 赵丽莹)