

活性粉末混凝土配合比优化试验研究

徐锦超,薛文,周文建,卢凯

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

摘要: 活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)作为一种具有高强度、良好耐久性的新型水泥基复合材料,具有广泛的应用前景。为了研究原材料选取、养护制度及养护龄期等因素对 RPC 立方体力学性能的影响,进行了这3个影响因素的交叉对照试验。试验结果表明:选用粒径为2 mm左右的石英砂更有利于提高 RPC 的密实度;选用低 C_3A (铝酸三钙)含量的水泥有利于提升混凝土的抗压强度及抗折强度;直径为 $12\ \mu\text{m}$,长为4 mm 的 PVA 纤维(即白色絮状聚乙烯醇纤维, white flocculant polyvinyl alcohol fiber)体积掺量为1%时,能有效提高 RPC 的基本力学性能; $80\ ^\circ\text{C}$ 的热水养护能增强混凝土中粉煤灰活性,提高早期水化程度,使 RPC 抗压及抗折强度在3 d龄期内快速提升;RPC 强度与养护龄期呈正相关。该研究结果为后续 RPC 的相关研究和 RPC 的优化提供了一定的参考。

关键词: 活性粉末混凝土;制备工艺;力学性能;养护龄期

中图分类号: TU502.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2020)06-0578-05

Experimental study on RPC mix ratio optimization

XU Jinchao, XUE Wen, ZHOU Wenjian, LU Kai

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: RPC(reactive powder concrete) as a new type of cement matrix composite material with ultra-high strength and high durability, boasts a widespread application prospect. In order to study the effects of raw material selection, curing system and curing age on the mechanical properties of RPC cube, cross-control tests were conducted for these three influencing factors. The experimental results show that the quartz sand with particle size of about 2 mm is more conducive to RPC compaction; the cement with low C_3A (tricalcium aluminate) content is beneficial to improve the compressive and bending strength of concrete; when the fiber volume content of PVA(i. e. white flocculant polyvinyl alcohol fiber) with $12\ \mu\text{m}$ in diameter and 4 mm

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608484)

通信作者: 薛文(1983—),女,浙江省杭州人,副教授,博士,主要从事结构耐久性性能研究。E-mail: xuewen@zust.edu.cn。

in length being 1%, the basic mechanical properties of RPC could be effectively improved; the hot-water curing of 80 °C can enhance the activity of fly ash in concrete, improve the hydration degree at the early stage, and facilitate the rapid growth of RPC compressive and bending strength within 3 d age; RPC strength is positively correlated with curing age. The results of this study provide a certain reference value for the follow-up research and RPC optimization.

Keywords: RPC; preparation process; mechanical properties; curing age

早在 20 世纪 80 年代初, Bache 以最大密实度作为理论基础, 研发出超细密集填充混凝土^[1]。20 世纪 90 年代初, Larrard 等首次提出了“活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)”的概念^[2]。相较于传统混凝土, 这种新型的水泥基材料因具有高强度、较强的可塑性、良好的耐久性和优良的抗爆性等特点, 并能有效地减少结构自重, 因此在桥梁、建筑等实际工程中逐步得到应用。1997 年, 在加拿大舍布鲁克市建成了第一座 RPC 人行桥^[3], 标志着 RPC 从理论研究走向实际应用。2002 年澳大利亚建成一座预应力活性粉末混凝土公路桥^[4], 标志着 RPC 真正在工程结构中应用, 这是 RPC 在土木工程应用中的一次飞跃。中国对 RPC 的研究始于 20 世纪 90 年代^[5], 覃维祖等^[6]结合中国 HPC (high performance concrete, 高性能混凝土) 技术与经验, 选择了水泥-粉煤灰-硅灰三组分胶凝材料体系。史才军等^[7]通过正交试验研究了材料组成对 RPC 的影响, 得出硅灰和高效减水剂可有效提升 RPC 流动性能及掺加石英粉可小幅提高混凝土的强度。冯乃谦等^[8]在 RPC 和自充填混凝土(self-compacting concrete, SCC) 的基础上配制出超高性能自密实混凝土(ultra-high performance self-compacting concrete, UHP-SCC), 掺加的天然沸石粉可有效抑制混凝土收缩开裂, 并成功地在广州东塔施工过程中进行了泵送试验。张爽等^[9]通过试验研究发现蒸汽养护温度会对 RPC 长期力学性能产生影响, 得出最佳蒸汽养护温度为 90 °C。笔者所在课题组^[10]通过试验研究了外加剂、模具种类及搅拌机对 RPC 的影响, 发现消泡剂可有效改善 RPC 内部气孔率, 同时采用木模浇筑、分层振捣可进一步降低 RPC 内部气孔率。

RPC 在工程中的应用已逐渐取得良好的社会效益和经济效益, 但其制备工艺、养护工艺要求均较高, 在中国的推广应用还需要进一步研究。RPC 配合比设计的基本原则应满足最大密实度理论, 即材料内部的孔隙率低和微裂缝少, 在保证混凝土有足够和易性的前提下, 颗粒粒径分布达到最优状态, 即毫米级颗粒的间隙由微米级颗粒填充, 微米级颗粒的间隙由纳米级颗粒填充。因此, 制备 RPC 的原材料平均粒径为 0.1~1 mm, 以尽可能地减少拌合物颗粒间的空隙, 使拌合物更密实。本研究通过试配试验, 研究原材料选取、养护机制、养护龄期等因素对 RPC 抗压强度及抗折强度的影响, 并分析了 RPC 配制原理及养护成型工艺, 从而为同类研究及 RPC 在实际工程中的浇筑工艺提供了参考。

1 制备原则与工艺

1.1 原材料选用

本研究根据 RPC 选材原则及文献^[11-12]选用制备材料。425 水泥, 购于湖州南方水泥有限公司, 比表面积为 300~400 m²/kg, C₃A (铝酸三钙) 质量分数为 6.09%, 以下简称 425; 525 水泥, 购于杭州三狮水泥有限公司, 比表面积为 400~450 m²/kg, C₃A 质量分数为 7.03%, 以下简称 525; 超细水泥, 购于山东蟠龙山水泥有限公司, 比表面积为 1 250~1 340 m²/kg; 硅灰, 购于四川朗天有限公司, 比表面积大于 18 000 m²/kg; 石英砂, 采用 3 种石英砂, 分别为 3# 褐色石英砂(2~3 mm)、3# 白色石英砂(3~4 mm)、5# 石英砂(0.5~1.5 mm), 以下简称 5#; 石英粉, 采用 8# 石英砂, 粒径为 0.08 mm; 减水剂, 购于江苏西卡有限公司, 为瑞士“西卡牌”聚羧酸高效减水剂, 白色固体粉末; 纤维, 白色絮状聚乙烯醇纤维(white flocculant polyvinyl alcohol fiber, 以下简称 PVA 纤维), 长为 4 mm, 纤维直径为 12 μm, 拉伸强度为 1 600 MPa; 拌合水为普通自来水; 模具为木模。

1.2 试件制作、养护及强度测试

本研究采用文献^[8]的制备工艺, 浇筑 100 mm×100 mm×100 mm 的抗压试件 48 个, 40 mm×40 mm×

160 mm的抗折试件 12 个。拌合物振捣完毕后入模,置于标准养护室养护 24 h 后脱模,随后将试块放入各养护环境中。养护方式见表 1 所示。参考文献[10,13],在养护温度超过 50 °C 的热水养护作用下,拌合物中的硅灰等矿物质会迅速与水泥水化产物进行二次水化,C-S-H(C、S、H 分别表示 CaO、SiO₂、H₂O)胶凝体积增加,使混凝土内部孔隙率降低,孔结构得到改善,RPC内部更加密实,使RPC强度快速提升。因此,本研究选择试块成型后进行热水养护,使其强度快速提升,并测试在热水养护不同龄期(2 d 或 3 d)后 RPC 的抗压强度和抗折强度,以及在 3 d 热水养护后再标准养护 3、7、14 d 下 RPC 的抗压强度和抗折强度。各组别配合比见表 2~4。

表 1 RPC 养护方式

Table 1 RPC curing mode

养护方式	初始温度/°C	升温速度/(°C·h ⁻¹)	最终温度/°C
标准养护	20±2	0	20±2
热水养护	20	20±2	80

表 2 立方体抗压试验试块配合比设计

Table 2 Mix ratio design of cube compression test block

编号	水泥/(kg·m ⁻³)		石英砂/(kg·m ⁻³)			相同组成材料/(kg·m ⁻³)					PVA 体积 占比/%	R2d	R3d	R3d+ C7d	R3d+ C14d
	425	525	3#白	3#褐	5#	超细 水泥	硅灰	石英粉	减水剂	拌合水					
A	733.3	×	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	×	√	×	×	×
B	733.3	×	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	1	√	×	×	×
C	733.3	×	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	2.5	√	×	×	×
D	733.3	×	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	4.5	√	×	×	×
E	733.3	×	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	×	×
F	733.3	×	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	√	×
G	733.3	×	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	×	√
H	733.3	×	1 016.7	70	33.3	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	×	×
I	×	733.3	1 016.7	70	33.3	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	×	×
J	×	733.3	1 016.7	70	33.3	183.3	93.3	110	3.3	80	1	√	×	×	×
K	×	733.3	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	×	×
L	×	733.3	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	√	×
M	×	733.3	×	1 141.7	50	183.3	93.3	110	3.3	80	1	×	√	×	√

注:R2d 表示热水养护 2 d;R3d 表示热水养护 3 d;R3d+C7d 表示热水养护 2 d 再常温养护 7 d;R3d+C14d 表示热水养护 2 d 再常温养护 14 d;√表示有;×表示无。表 3 表 4 同。

表 3 抗折试验试块配合比设计

Table 3 Mix ratio design of bending test block

编号	水泥/(kg·m ⁻³)		石英砂/(kg·m ⁻³)		相同组成材料/(kg·m ⁻³)					PVA 体 积占 比/%	R3d	R3d+ C7d	R3d+ C14d
	425	525	3#褐	5#	超细 水泥	硅灰	石英粉	减水剂	拌合水				
P	716.0	×	1 106.5	52.0	179	91.0	104.3	3.9	78.1	1	√	√	×
Q	716.0	×	1 106.5	52.0	179	91.0	104.3	3.9	78.1	1	√	×	√
R	×	716.0	1 106.5	52.0	179	91.0	104.3	3.9	78.1	1	√	√	×
S	×	716.0	1 106.5	52.0	179	91.0	104.3	3.9	78.1	1	√	×	√

表 4 采用不同细骨料的 RPC 配合比设计

Table 4 RPC mix ratio design with different fine aggregate

编号	水泥/(kg·m ⁻³)		骨料/(kg·m ⁻³)					相同组成材料/ (kg·m ⁻³)				PVA 体 积占 比/%	R2d	R3d
	425	超细水泥	3#褐	5#	河砂	3#白	硅灰	石英粉	减水剂	拌合水				
N	916.6	×	×	×	1.54	×	93.3	110	3.3	80	×	√	×	
H	733.3	183.3	×	70	33.3	1 016.7	93.3	110	3.3	80	1	×	√	
A	733.3	183.3	1 141.7	50	×	×	93.3	110	3.3	80	×	√	×	
P	916.6	×	1 141.7	50	×	×	93.3	110	3.3	80	×	√	×	
B	733.3	183.3	1 141.7	50	×	×	93.3	110	3.3	80	1	×	√	

2 试验结果及分析

2.1 抗压强度测试

2.1.1 PVA 纤维掺量对 RPC 抗压强度的影响

本研究采用最大荷载 1 000 t 的液态式压力试验机进行加载,加载速度为 1 MPa/s。未掺纤维的 RPC 试块在达到极限荷载时完全被压碎,而掺纤维的 RPC 试块在整个受压破坏过程中能保持较好的整体性。各组试件的抗压强度试验结果见表 5。试验结果显示,PVA 体积掺量为 2.5% 试块(C 组)和 4.5% 试块(D 组)强度与未掺入 PVA 纤维的试块(A 组)抗压强度基本上一致;C 组、D 组试验结果与 PVA 纤维体积掺量为 1% 的试块(B 组)相比,抗压强度下降明显,抗压强度下降幅度甚至达到 10%。可见,PVA 纤维使用存在最优掺量。最优掺量纤维的掺入可以保证在搅拌过程中纤维的均匀分散及在 RPC 中的连续分布,从而改善 RPC 内部结构,提高 RPC 结构的连续性。当 PVA 纤维过量掺入时,由于搅拌工艺的局限性,使得 PVA 纤维无法很好地分散开,容易出现成团现象。成团的 PVA 纤维易包裹水泥浆体和空气,使 RPC 内部微裂缝数量增加,以致降低了 RPC 的密实度和强度^[14]。根据本研究的试验结果,该 PVA 纤维的最优掺量建议为所需制得 RPC 体积量的 1%。

2.1.2 水泥组分对 RPC 抗压强度的影响

2.1.2.1 C_3A 质量分数对 RPC 抗压强度的影响 本研究选用的 525 水泥中 C_3A 质量分数为 7.03%,425 水泥中 C_3A 质量分数为 6.09%。各组试件立方体抗压强度试验结果见表 6。由表 6 可知,同样采用 3 d 自然养护,525 水泥试件相比较于 425 水泥试件抗压强度低 16% 左右;7 d 自然养护时,525 水泥试件相比较于 425 水泥试件抗压强度低 17% 左右;14 d 自然养护时,525 水泥试件相比较于 425 水泥试件抗压强度低 14% 左右。可见, C_3A 含量对 RPC 的抗压强度影响十分明显,采用 C_3A 含量较高的水泥制备的 RPC 试件同龄期抗压强度较低。这可能是由于 C_3A 对外加剂的吸附能力较强,导致外加剂与水泥的适应性变差,因此水泥里 C_3A 含量不宜过高。试验结果同时表明,低 C_3A 含量有利于 RPC 后期强度的进一步提高^[13,15-16]。

2.1.2.2 水泥种类对 RPC 抗压强度的影响 将 P 组中质量分数为 20% 的 425 水泥换成超细水泥,其 RPC 的抗压强度(113.3 MPa)比原来的抗压强度(106.2 MPa)提升了 6.5% 左右。可见,在骨料保持一致时,用适量的超细水泥替换 425 水泥,由于超细水泥更细密,使得成型后的 RPC 水化反应更快更完全,从而使得其抗压强度更高。

2.1.3 养护龄期对 RPC 抗压强度的影响

由表 6 可知,随着养护龄期的增加,采用不同品种水泥制得的 RPC 的抗压强度均呈增长趋势。随着常温养护时间的增加,强度在第 2 个常温养护 7 d 龄期的增幅高于前一个 7 d 龄期。笔者认为这与 RPC 中矿物掺合料使用量较大有关。前期热水养护阶段的水化产物随着养护龄期的增长不断进行二次水化反应,且在养护后期水化反应及二次水化反应更加显著,产生大量的水化产物使 RPC 抗压强度进一步提升。

2.1.4 采用不同细骨料对 RPC 抗压强度的影响

由表 7 可知,细骨料也是影响 RPC 抗压强度的一个因素。相同的制备环境下,使用石英砂制得的 RPC 抗压强度明显高于河砂制得的 RPC 抗压强度。由于石英砂硬度比河砂更高,水泥、硅灰、石英粉等不同颗粒形成了良好的级配,使得 RPC 内部更加密实,因而抗压强度更高。

表 5 不同 PVA 纤维掺量下的 RPC 抗压强度

Table 5 RPC compressive strength at different PVA fiber contents

组别	抗压强度/MPa
A	113.3
B	121.3
C	114.4
D	112.4

表 6 不同 C_3A 含量下的 RPC 抗压强度

Table 6 RPC compressive strength at different C_3A contents

水泥种类	抗压强度/MPa		
	R3d	R3d+C7d	R3d+C14d
425	126.2	130.0	137.1
525	108.7	111.0	120.1

同时,在使用石英砂的情况下,以 3# 褐色石英砂作为主要细骨料制得的 RPC 试块抗压强度明显优于 3# 白色石英砂作为主要细骨料制得的 RPC 试块,前者抗压强度比后者抗压强度约高 23%。笔者认为,这是由于 3# 褐色石英砂颗粒粒径尺寸小于 3# 白色石英砂,在振捣搅拌过程中,更细的骨料能使混凝土内部更加密实,进而提升了 RPC 的抗压强度。

2.2 抗折强度测试

本研究采用最大荷载 10 kN 的微机控制电子抗折试验机,加载速率为 0.1 kN/s,未掺入纤维的 RPC 试块呈现明显的脆性破坏且断面平整。抗折试验所得抗折强度见表 8。由表 8 可知,7 d 时 425 水泥制得的 RPC 试块(P 组)抗折强度比 525 水泥制得的 RPC 试块(R 组)高 10 MPa 左右,这一差距虽然在 14 d 时有所缩小,但仍有 7 MPa 左右。同时,随着养护龄期的增加,RPC 的抗折强度均呈增长趋势。这一现象与 RPC 的抗压强度相似。可见, C_3A 含量对 RPC 抗折强度的影响也十分显著,即水泥中 C_3A 含量高时,试件抗折强度较低; C_3A 含量低时,试件抗折强度较高。

3 结 论

本文通过试验研究了原材料选取、养护制度、养护龄期等因素对 RPC 力学性能的影响,得到以下结论:

- 1) 采用本研究选用的 PVA 纤维配 RPC 时,其体积掺量约为 1% 时可有效提升 RPC 的抗压、抗折性能,建议最优体积掺量为 1%。
- 2) 选用较低 C_3A 含量的水泥有利于提升混凝土早龄期(3 d)抗压强度及抗折强度。
- 3) 使用石英砂的 RPC 抗压强度比使用河砂的 RPC 抗压强度高 23%;使用较细石英砂的 RPC 抗压强度比用较粗石英砂的 RPC 抗压强度高 23%。可见,应选择较细石英砂作为 RPC 细骨料。
- 4) 将 20% 的 425 水泥替换成超细水泥制得的 RPC 抗压强度比纯 425 水泥制得的 RPC 抗压强度高 7%。
- 5) 影响 RPC 抗折强度的因素及影响规律与影响抗压强度的一致。

参考文献:

- [1] 李良,钟镇鸿,周志成,等.超高性能混凝土 UHPC 力学性能及应用介绍[J].混凝土世界,2018,20(9):57.
- [2] 陈俊豪.活性粉末混凝土的力学性能及硫酸盐侵蚀试验研究[D].西安:西安理工大学,2018:1.
- [3] 周一桥,杜亚凡.世界上第一座预制预应力活性粉混凝土结构:舍布鲁克人行桥[J].国外桥梁,2000,17(3):18.
- [4] 李彦钊,熊爱玲.活性粉末混凝土(RPC)研究应用现状及前景[J].粉煤灰,2015,27(2):42.
- [5] 邹勇.中国超高性能混凝土(UHPC)的研究与应用进展[J].重庆建筑,2019,18(7):34.
- [6] 覃维祖,曹峰.一种超高性能混凝土:活性粉末混凝土[J].工业建筑,1999,29(4):16.
- [7] 史才军,肖江帆,曹张,等.材料组成对 UHPC 性能的影响[J].硅酸盐通报,2013,32(6):1005.
- [8] 冯乃谦,叶浩文,马展祥.超高性能自密实混凝土的研发与超高泵送技术[J].施工技术,2018,47(6):117.
- [9] 张爽.养护制度对活性粉末混凝土力学性能的影响机理分析[D].秦皇岛:燕山大学,2019:36.
- [10] 薛霖,薛文,卢凯.活性粉末混凝土的制备工艺试验研究[J].新型建筑材料,2019,25(2):37.
- [11] 卢凯,薛文,毛超.不同纤维种类及掺量的 RPC 抗压强度试验研究[J].浙江科技学院学报,2019,31(6):484.
- [12] WILLE K, NAAMAN A, PARRA-MONTESINOS G. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa(22 ksi): a simpler way[J]. ProQuest,2011,108(1):46.
- [13] 阎培渝,崔强.养护制度对高强混凝土强度发展规律的影响[J].硅酸盐学报,2015,3(2):133.
- [14] 张磊,吕淑珍,罗盛鲜,等.影响活性粉末混凝土强度和干缩性能的因素研究[J].混凝土与水泥制品,2017,20(4):58.
- [15] 黄智山,赵霄龙,赵晶.中间相 C_3A 对硅酸盐水泥水化的影响[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(2):86.
- [16] 于方,熊建波,邓春林,等.养护方式对 C100 超高强混凝土抗压强度的影响规律研究[J].硅酸盐通报,2017,15(增刊 1):194.

表 7 不同细骨料组成下的 RPC 抗压强度

Table 7 RPC compressive strength under different compositions of fine aggregate

组别	抗压强度/MPa
A	113.3
B	121.3
H	102.5
N	86.4
P	109.2

表 8 抗折强度

Table 8 Bending strength

组别	抗折强度/MPa
P	22.3
Q	25.8
R	12.7
S	18.4