

配合比及养护制度对活性粉末混凝土强度影响的 试验研究

王秋维, 王志伟, 陶 毅, 苏宁粉

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西西安 710055)

摘要: 基于最紧密堆积原则的配合比设计及大量试配, 得到活性粉末混凝土(RPC)的理论配合比, 以胶凝材料、粗骨料、钢纤维、养护制度、龄期为主要变化参数, 设计 28 组边长为 100 mm 的立方体抗压试件, 测得其立方体抗压强度及二次抗压强度, 在此基础上分析不同因素对抗压强度的影响规律。结果表明: 各试件的抗压强度均达到 130 MPa 以上, 且二次抗压强度均可达到 110 MPa; RPC 的抗压强度随水胶比的增大而减小, 随钢纤维掺量的增大而增大; RPC 在热水养护条件下的强度较高, 龄期的影响较小, RPC 在常温养护下的强度随龄期的增长而显著增大。

关键词: 活性粉末混凝土; 配合比设计; 立方体抗压强度; 二次抗压强度; 养护制度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0382-06

Experimental research on effect of mix ratio and curing system on the strength of reactive powder concrete

WANG Qiuwei, WANG Zhiwei, TAO Yi, SU Ningfen

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The theoretical mix ratio of reactive powder concrete (RPC) was obtained by the most closely packed principle and a large number of trial. Based on the parameters of cementitious material, coarse aggregate, steel fiber, curing system and age, 28 groups of cubic specimens with 100 mm side length were designed. The compressive strength and secondary compressive strength of the specimens were measured, and the influence of different factors on the compressive strength was analyzed. The results show that the compressive strength of all specimens are more than 130 MPa, and the secondary compressive strength can reach 110 MPa. The compressive strength of RPC is decreased with the increase of water-cement ratio and increased with the increase of steel fiber content. The compressive strength of RPC is high under the conditions of hot water conservation, and the effect of age is little. The strength of RPC under normal temperature is increased obviously with the growth of the age.

Key words: reactive powder concrete; design of mix ratio; cube compressive strength; secondary compressive strength; curing system

活性粉末混凝土(RPC)自上世纪 90 年代由清华大学覃维祖教授介绍并引入国内, RPC 是一种超高强纤维增强混凝土材料^[1], 其基本配制原理为: 材料含有的微裂缝和孔隙等缺陷最少, 就可以获得由其组成材料所决定的最大承载能力, 并具有特别好的耐久性^[2]。活性粉末混凝土的主要原材料包括细石英砂、水泥、磨细石英粉、硅灰、高效减水剂等, 为了提高其韧性和延性, 还需要掺入钢纤维, 并在 RPC 的凝结、硬化中采取适当的加压、加热等成型养护工艺^[3]。除具有较高的抗压强度外, RPC 还有着优良的抗氯离子渗透、抗

碳化、抗腐蚀、抗渗、抗冻及耐磨等性能, 这使得其在建筑结构、市政工程、水工建筑、防爆结构、输送管道及核废料隔离与控制等方面都具有较高的推广和实用价值^[4-6]。在国内, RPC 在青藏铁路的桥梁人行道板、迁曹铁路上 T 形截面梁和蓟港铁路中 T 形截面梁中得到应用, 结构的承载能力、抗冻融能力、抗震性能均得到了大幅度提高^[7-9]。

目前, 国内对 RPC 的配制及力学性能已进行了一定研究, 积累了较丰富的经验, 如何峰等研究了原材料品种、性质及配合比对 RPC 强度的影响^[10]; 郑文忠等通过 56 组立方体抗压强度试验,

初步得到了 RPC 配合比计算方法^[11]；施韬等研究了掺入矿渣细粉对 RPC 强度的影响，并寻找工艺简单，造价低廉的 RPC 制备技术^[12]；刘娟红等研究了不同的养护制度对掺大量矿物细粉 RPC 性能的影响^[13]等。然而，已有研究存在的问题包括：1) 试件尺寸范围跨度较大，立方体抗压试件边长从 70.7 mm 到 150 mm 不等；2) RPC 配制标准不统一，配制方法离散性较大；3) RPC 的高强度需要通过高温养护来实现，不便于工程应用。

2015 年国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387-2015)颁布^[14]，其对标准试件的尺寸、配制、试验方法等进行了明确规定。本文在此背景下，基于最紧密堆积原则进行 RPC 配合比设计，制作标准 RPC 立方体试件，对其抗压力学性能及影响因素进行深入研究。

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥：选用 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥；硅粉：颜色为灰白色，SiO₂ 含量大于 97%，平均粒径在 0.1~0.15 μm，比表面积为 15~27 m²/g，松散容重为 150~200 kg/m³，活性指标≥85%；石英粉：粒径 325 目，SiO₂ 含量大于 98%；石英砂：粗砂为 20~40 目，中砂为 40~70 目，细砂为 70~120 目，SiO₂ 质量分数大于 99%；减水剂：国内某混凝土外加剂厂生产的新型非萘系高性能减水剂，黄褐色粘稠液体，减水率≥30%，含固量 30%，1 个小时无坍落度损失，轻微缓凝，不引气；钢纤维：镀铜钢纤维，形状为线性，直径 0.2±0.03 mm，长度 13mm，抗拉强度≥2 850 N/mm²，长径比(L/d)为 65±7.5%。

1.2 配合比及试件设计

RPC 的基本配制原理为材料含有的微裂缝和孔隙等缺陷最少，因此基于最紧密堆积原则，通过试验确定颗粒之间的最小空隙，从而确定密实度。颗粒间的空隙则由胶凝材料形成的浆体来填充，同时结合试验试配结果，最终来确定配合比^[15]，初步得到基础配合比 JC：

$$W_{\text{水泥}} = 674.21 \text{ kg/m}^3; W_{\text{硅粉}} = 168.55 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{\text{石英粉}} = 215.75 \text{ kg/m}^3; W_{\text{粗砂}} = 673.05 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{\text{中砂}} = 312.97 \text{ kg/m}^3; W_{\text{细砂}} = 218.74 \text{ kg/m}^3$$

已有文献表明，钢纤维掺量一般按体积掺量的 1%~3% 计算，当钢纤维体积掺量低于 1% 时，不能完全发挥 RPC 的强度；而当钢纤维体积掺量大于 3% 时，强度提升效果有限，并且造价升高。

因此本文取钢纤维掺量为 2.5% (体积掺量)^[16-17]，由钢材密度得到钢纤维掺量为 200 kg/m³。

减水剂：由于各类减水剂减水效果不同，所以掺量也不尽相同，查阅相关资料并由试配试验，减水剂按胶凝材料的 2% (质量比) 考虑，则减水剂掺量为 21.17 kg/m³。

引气剂：RPC 粘度大，流动性差，内部气泡通常无法通过物理震动方式大量排出^[18]，试配结果表明，加入引气剂会大大减少 RPC 内部缺陷，提高 RPC 密实度，提升 RPC 强度。引气剂掺量一般为拌合物总质量的 0.8%，则引气剂掺量为 21.13 kg/m³。

由上述结果可知，水泥、硅灰和石英粉三者的质量比为 1 : 0.25 : 0.32，砂胶比为 1.14，钢纤维掺量为体积掺量的 2.5%，减水剂为胶凝材料总质量的 2%，水胶比设定为 0.16。以此为基准配合比，设计 16 组 RPC 立方体抗压试件，变化因素包括水胶比、钢纤维掺量、硅灰掺量、石英粉掺量、砂胶比。

依据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387-2015)要求^[14]，每组试验设计 3 个试件，试件尺寸均为 100 mm×100 mm×100 mm，采用三联试模一次性浇筑完成。试件参数设计如表 1 所示。

表 1 不同配合比下各组试验参数

Tab. 1 Specimen parameters with different mix ratio

组别	配合比设计						
	水泥	硅灰	石英粉	砂胶比	钢纤维/%	减水剂/%	水胶比
A1	1	0.25	0.32	1.14	2.5	2	0.18
A2	1	0.25	0.32	1.14	2.5	2	0.20
A3	1	0.25	0.32	1.14	2.5	2	0.22
B1	1	0.25	0.32	1.14	1	2	0.16
B2	1	0.25	0.32	1.14	1.5	2	0.16
B3	1	0.25	0.32	1.14	2.0	2	0.16
C1	1	0.15	0.32	1.14	2.5	2	0.16
C2	1	0.20	0.32	1.14	2.5	2	0.16
C3	1	0.30	0.32	1.14	2.5	2	0.16
D1	1	0.25	0.12	1.14	2.5	2	0.16
D2	1	0.25	0.22	1.14	2.5	2	0.16
D3	1	0.25	0.42	1.14	2.5	2	0.16
E1	1	0.25	0.32	0.9	2.5	2	0.16
E2	1	0.25	0.32	1.0	2.5	2	0.16
E3	1	0.25	0.32	1.2	2.5	2	0.16

注：1) 表中钢纤维掺量均为体积掺量，减水剂为胶凝材料（水泥，硅粉，石英粉）总质量的百分比，其它均为质量比。

2) 为保证材料的强度，所有试验配合比中均掺入 0.5% (体积掺量) 6 mm 长的聚丙烯纤维，直径 0.031 mm，抗拉强度大于 400 N/mm²。

3) 为保证 RPC 的工作性能，所有试件制作过程中均掺入微量引气剂、早强剂，具体掺量依据产品要求确定。

1.3 试件制备及养护制度

(1) 制备设备

采用 HJW60 型强制式单卧轴混凝土搅拌机, 主轴转速 45 转/分, 最大搅拌容量 60 L. 混凝土试验振动台, 振幅为 2 mm, 振动频率为 50 Hz. 恒温水箱, 温度量程 0~100 °C.

(2) 搅拌工艺

将各类原材料按配合比依次称重, 首先将水泥、硅粉、石英粉倒入搅拌机内, 干拌 2 min, 待胶凝材料混合均匀后, 将水、减水剂、引气剂等外加剂倒入搅拌机内搅拌 6 min, 等胶凝材料完全变为浆体后, 倒入级配石英砂和钢纤维, 搅拌 10 min, 等其混合均匀后出料.

(3) 成型

装模时, 分层振捣分层浇筑, 首先装入模具一半量的 RPC, 并不断振捣, 放在振动台振动 1 分钟, 然后取下, 把剩下模具一半量的 RPC 装入模具, 使拌合物略高出模具上口, 并置于振动台振动 3 分钟, 待其表面出浆, 并且无气泡冒出时, 用刮刀抹面收平, 然后对试件进行编号, 置于养护室养护, 如图 1(a)所示.

(4) 拆模

为保证前期强度, 节省试验时间, 试验加入了少量早强剂, 本文所采用的拆模时间为 24h, 并能满足后期试验要求.

(5) 养护制度

对以上 16 组立方体试件均采用下面第三种养护制度, 龄期均为 7 d. 设定三种养护制度, 取基础配合比 JC 设计立方体抗压试件 12 组, 以测试龄期(7 d、14 d、28 d、56 d)以及养护制度对 RPC 抗压强度的影响规律^[19].

1) 自然养护: 置于常温(10~30 °C)的空气静置状态下, 至试验龄期测试;

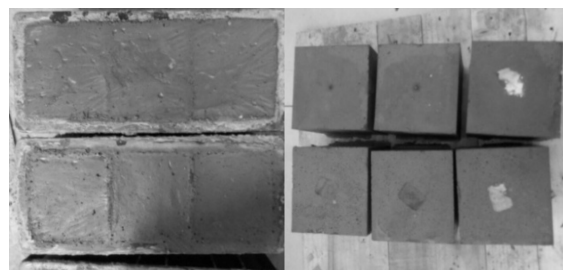
2) 常温水养护: 即拆模之后, 置于室温水, 水温(10~30 °C), 至试验龄期进行强度试验;

3) 热水养护: 拆模后, 置于恒温(90 °C)水箱中, 养护 3 d, 之后取出试件置于常温自然状态下养护至试验龄期.

1.4 试件加载制度

采用 TYA-2000 型电液式压力试验机, 试验加载尽量不采用试件浇筑时的上下两个面, 以保证材料强度得以发挥, 依据规范 GB/T 31387-2015, 加载速率取 1.2~1.4 MPa/s. 保持加载速率不变, 直至试件破坏, 依据试验测试结果记录峰值荷载. 二次抗压强度试验即原试块在加载到达

峰值卸载后再次进行加载. 如图 1(b)所示.



(a) 试件浇筑



(b) 试件加载

图 1 试件浇筑及加载

Fig. 1 Pouring and loading of specimens

2 破坏形态及过程

当力的加载水平小于试件 70% 峰值荷载时, 试件表面平整未出现裂纹, 力的上升较为平稳, 当持续加载至试件极限荷载的 70%~80% 时, 试件内部出现微小响声, 即钢纤维与基体界面开始出现破坏的迹象, 试件表面未出现可见性裂纹, 继续加载至试件极限荷载的 80%~90% 时, 试件表面局部出现微裂缝, 明显看到试件本身出现压缩变形, 加载速率很快降低, 但随着裂缝的逐步稳定和钢纤维的拉结作用, 加载速率会继续反弹上升至达到极限荷载, 随加加载速率缓慢下降至试件破坏.

由于制作工艺的限制, 试件破坏部分一般发生于试件顶面, 顶部浆体较多, 平整度较差. 试件较少出现贯穿性竖向裂缝, 大部分为不规则的斜向裂缝, 并且以乱向拉裂情况为主, 这主要是由于钢纤维乱向分布的拉结作用导致. 试件最终破坏形态如图 2 所示.

3 试验结果及分析

3.1 抗压强度

试验试件的抗压强度及二次抗压强度如表 2 所示. 由表可知, 所有试件的立方体抗压强度值均在 130~170 MPa 之间, 二次抗压强度在 110~140 MPa 之间, 满足试验预期设计目标.

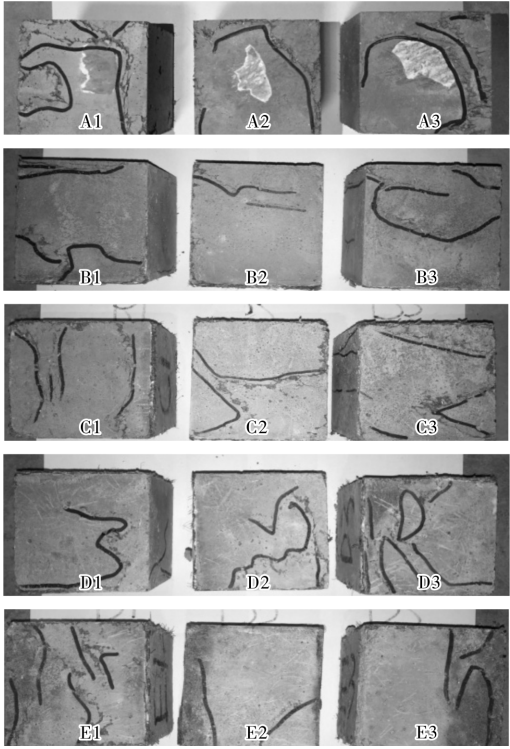


图 2 试件最终的破坏形态
Fig. 2 Failure patterns of spelimens

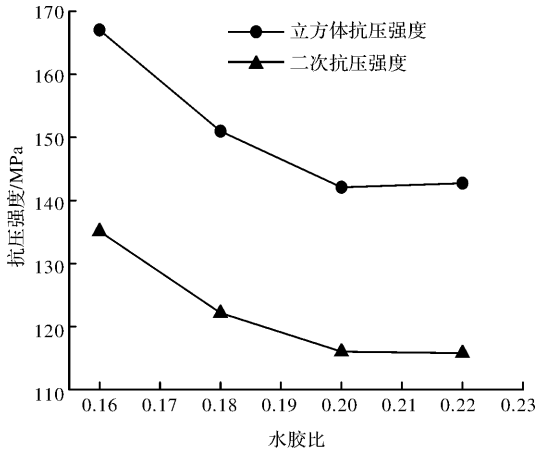
表 2 各组试件抗压强度
Tab. 2 Compressive strength of specimens

组别	立方体抗压 强度/MPa	二次抗压 强度/MPa	二次抗压强度 与首次比值
JC	167.03	135.10	0.81
A1	150.98	122.17	0.81
A2	142.08	116.05	0.82
A3	142.73	115.80	0.81
B1	138.43	111.94	0.81
B2	143.83	113.86	0.79
B3	141.78	111.48	0.79
C1	135.94	109.06	0.80
C2	145.19	110.28	0.76
C3	147.69	126.82	0.86
D1	160.61	134.55	0.84
D2	158.45	132.09	0.83
D3	162.76	138.30	0.85
E1	154.17	121.75	0.79
E2	153.42	115.39	0.75
E3	145.16	121.61	0.84

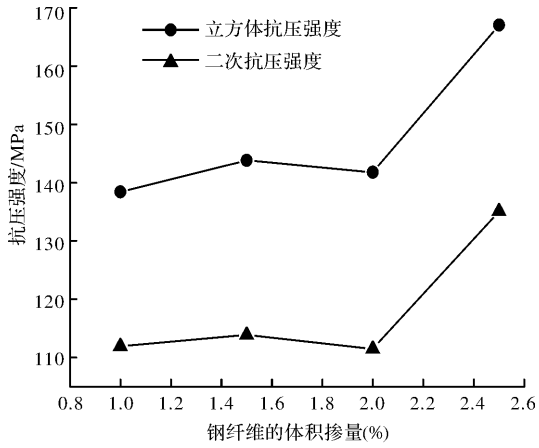
3.2 不同因素对抗压强度的影响

(1) 原材料掺量的影响

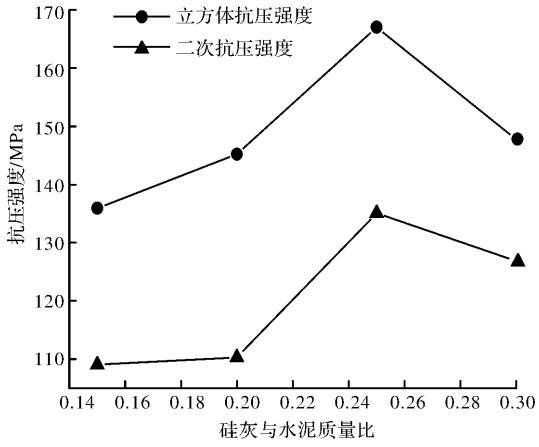
原材料掺量对 RPC 的抗压强度有较大影响，不同材料掺量对试件抗压强度(包括二次抗压强度)的影响如图 3 所示。



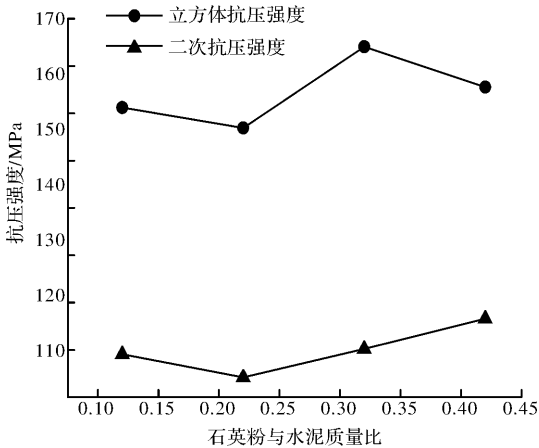
(a) 水胶比(A组)



(b) 钢纤维掺量(B组)



(c) 硅灰掺量(C组)



(d) 石英粉掺量(D组)

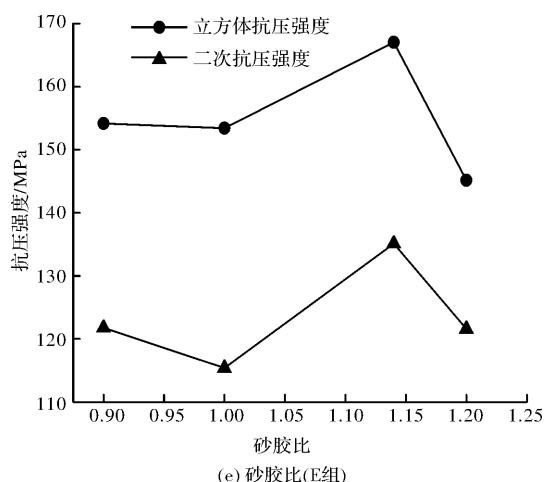


图3 配合比设计对RPC抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of different mix ratio on the compressive strength of RPC

由图3可知:

1)立方体抗压强度随水胶比的增大而减小,原因在于基体内部的水化反应需水量较小,过量水的掺入直接导致基体强度下降;但当水胶比增大到一定程度时,强度下降趋于缓和,这是由于随水胶比增大,拌合物工作性能的改善弥补了RPC部分强度损失,水胶比为0.2时基本可以实现自密实。

2)增大钢纤维掺量会提高RPC的抗压强度,当钢纤维掺量达到2.5%时,强度最高。同时钢纤维掺量越大,RPC和易性越差,在不改善其工作性能的情况下,其前期强度难以提高。

3)硅灰的掺量对于RPC的强度提升有重要作用,硅粉作为一种胶凝材料,不仅起着密实填充作用,并且在热养作用下有着活性反应,主要参与内部的二次水化反应,进一步改善了水泥石与集料界面区的性能,由试验结果,水泥与硅灰的掺量比在1:0.25时,RPC的抗压强度最高。

4)石英粉的最佳掺量(与水泥的质量比)为0.32,细微粉末的掺入有效提升了RPC的整体密实度,进一步降低了RPC内部的孔隙率,另外石英粉在高温状态下发挥自身活性,促进RPC内部的活性反应,进一步提升了RPC的抗压强度。

5)试验由计算配合比设计展开进行,结论也证实了理论计算下的砂胶比1.14为最佳砂胶比,同样,砂胶比越小,RPC的工作性能越好,砂胶比越大,和易性越差。

6)达到首次抗压强度后,RPC内部仍有大量钢纤维没有发挥强度,二次抗压强度能达到立方体抗压强度的75%~90%之间,且在影响抗压强

度的各类因素中,二次抗压强度与首次抗压强度的变化规律基本一致。

(2)龄期及养护制度的影响

龄期和养护制度对RPC的早期强度有着重要影响,不同龄期和养护制度下RPC的强度增长曲线如图4所示。

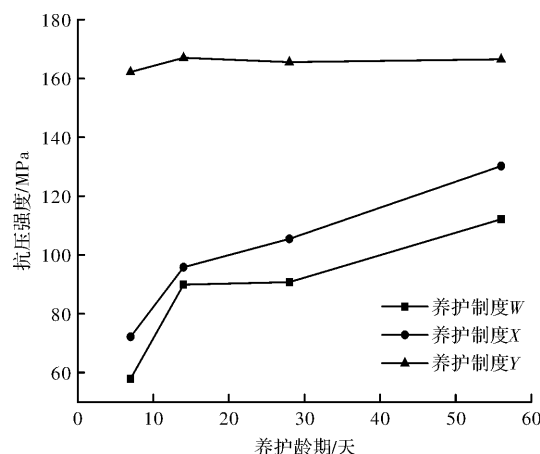


图4 龄期和养护制度对RPC抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of age and curing system on the compressive strength of RPC

由图4可知:

1)与常温养护相比,RPC在热水养护下的抗压强度更高,7d龄期时约提高80~100MPa,原因为90℃热水养护条件下,RPC的内部活性反应快速并且充分,有效增强了前期抗压强度;同时常温水养下的抗压强度比自然养护有所提高,这是由于在后续RPC强度增长的过程中,水化反应还在持续,需要水的参与才更有利于RPC强度的增长,但二者在56d龄期下的强度仍然与热养条件下抗压强度有一定差距。

2)在热养条件下,RPC的抗压强度随龄期增加变化较小,而在自然养护和常温水养护下,强度随龄期增加有明显增长,56d强度约为7d强度的两倍。

4 结论

(1)在本文所选用原材料的情况下,水泥、硅灰、石英粉的最佳掺和比例为1:0.25:0.32,基于最紧密堆积理论,粗砂、中砂、细砂的掺和比例为1:0.465:0.325。

(2)RPC立方体抗压试件的破坏形态大部分以斜向拉裂破坏为主,裂缝方向不规则,较少出现纵向的劈裂破坏。二次抗压强度能达到立方体抗压强度的75%~90%之间,二次抗压强度与首次抗

压强度的变化规律基本一致。

(3)RPC抗压强度随着水胶比的增大而减小,随着钢纤维掺量的增大而增大,水胶比、钢纤维掺量、硅灰掺量对RPC立方体抗压强度的影响要明显大于砂胶比、石英粉掺量对RPC立方体抗压强度的影响。RPC在高温热养条件下强度较高,龄期影响较小,而在常温养护条件下强度较低,随着龄期的增长,强度不断增长,56 d强度为7 d强度的接近两倍。

参考文献 References

- [1] 刘娟红,宋少民. 活性粉末混凝土[M]. 北京:化学工业出版社,2013.
LIU Juanhong, SONG Shaomin. Reactive powder concrete[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2013.
- [2] 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):16-20.
QIN Weizu, CAO Feng. A new ultra-high performance concrete——reactive powder concrete[J]. Industrial construction, 1999, 29(4):16-20.
- [3] 陈冰,李悦. 活化粉末混凝土的发展与应用[J]. 混凝土,2000(8):34-37.
CHEN Bing, LI Yue. The development and application of reactive powder concretes[J]. Concrete, 2000 (8):34-37.
- [4] 王震宇,陈松来,袁杰. 活性粉末混凝土的研究与应用进展[J]. 混凝土,2003(11):40-42.
WANG Zhenyu, CHEN Songlai, YUAN Jie. Advance of research and application on reactive powder concrete [J]. Concrete, 2003(11):40-42.
- [5] 白泓,高日. 活性粉末混凝土(RPC)在工程结构中的应用[J]. 建筑科学,2003,19(4):52-53.
BAI Hong, GAO Ri. The application of reactive powder concrete in engineering construction[J]. Building Science, 2003, 19(4):52-53.
- [6] 许贤敏. 世界上强度最高的混凝土[J]. 公路,2000(11):52-55.
XU Xianmin. The world's highest strength of concrete [J]. Highway, 2000(11):52-55.
- [7] 闫光杰,阎贵平,安明喆. 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 Guangjie, YAN Guiping, AN Mingzhe. Experimental study on 200 MPa reactive powder concrete[J]. Journal of The China Railway Society, 2004, 26(2): 116-119.
- [8] 贾方方. 钢筋与活性粉末混凝土粘结性能的试验研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
JIA Fangfang. Experimental study on properties of steel bar and reactive powder concrete [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [9] 钟铁毅,刘志东,闫志刚. 铁路32 m预应力活性粉末混凝土低高度梁力学性能研究[J]. 中国铁道科学,2012,33(6):11-16.
ZHONG Tieyi, LIU Zhidong, YAN Zhigang. Study on the mechanical properties of railway prestressed RPC lower height beam with 32 m span [J]. China Railway Science, 2012, 33(6):11-16.
- [10] 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 Zhengyu. Study on preparation technology of 200 ~ 300 MPa reactive powder concrete (RPC) [J]. China Concrete and Cement Products, 2000(4):3-7.
- [11] 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(自科版),2009,36(2):13-17.
ZHENG Wenzhong, LI Li. Preparation and mix proportion calculation of reactive powder concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(2):13-17.
- [12] 施韬,陈宝春,施惠生. 掺矿渣活性粉末混凝土配制技术的研究[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(6):867-870.
SHI Tao, CHEN Baochun, SHI Huisheng. Research on the proportion of reactive powder concrete with Blast Furnace Slag [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2005, 23 (6):867-870.
- [13] 刘娟红,王栋民. 养护对矿物细粉活性粉末混凝土性能的影响[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(7):100-103.
LIU Juanhong, WANG Dongmin. Effects of different curing systems on performance of finemineral mixture of reactive powder concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(7): 100-103.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土:GB/T 31387-2015. [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P. R. China, China National Standardization Administration. Reactive powder concrete: GB/T 31387-2015. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [15] 刘娟红,宋少民. 颗粒分布对活性粉末混凝土性能及微观结构影响[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(1):26-29.
LIU Juanhong, SONG Shaomin. The influence of particle distribution to properties and microstructure of reactive power concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1):26-29.
- [16] 单波,杨吴生,黄政宇. 钢纤维对RPC抗压强度增强作用的研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2002,24(1):109-112.
SHAN Bo, YANG Wusheng, HUANG Zhengyu. Effect of steel fiber on improving compressive strength of RPC [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2002, 24(1):109-112.
- [17] 鞠彦忠,王德弘,康孟新. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土力学性能的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(2):299-306.
JU Yanzhong, WANG Dehong, KANG Mengxin. Mechanical Properties of RPC with Different Steel Fiber Contents [J]. Journal of basic science and engineering, 2013, 21(2):299-306.
- [18] 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):45-50.
WU Yanhai, HE Yanbin. Experimental research on proportion of reactive powder concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 45-50.
- [19] 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 Yanhai, HE Yanbin, YANG Youhua, et al. The influence of curing systems on RPC strength [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2003, 31(5): 593-597.

(编辑 吴海西)