

DOI: 10.7672/sgjs2024100024

桥梁转体球铰支座用活性粉末混凝土试验研究*

樊立龙^{1,2}, 张京京³, 李志辉¹, 石庆波³, 王海良⁴

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 2. 天津市装配式桥梁智能建造技术与装备重点实验室, 天津 300300; 3. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222; 4. 天津城建大学, 天津 300384)

[摘要] 为提高活性粉末混凝土(RPC)的流动性,开展桥梁转体球铰支座用RPC材料试验。通过控制变量法,研究RPC性能的基础配合比,探讨矿物掺合料、钢纤维及减水剂掺量对RPC性能的影响。结果表明:矿粉、硅灰适量替代水泥掺加到RPC体系,能充分发挥微集料填充效应及火山灰活性,提高体系抗压强度,矿粉与硅灰最佳掺量分别为45,20kg/m³;钢纤维的掺加能大幅度提高RPC抗压强度,钢纤维最佳掺量为75kg/m³;减水剂在RPC中作用机理主要表现为静电斥力与空间位阻,减水剂最佳掺量为1.8kg/m³;通过最优试验配合比测试,RPC材料综合性能满足桥梁转体球铰支座应用要求。

[关键词] 桥梁;混凝土;球铰支座;矿物掺合料;钢纤维;减水剂;流动性;力学性能

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)10-0024-05

Experimental Study on Reactive Powder Concrete for Bridge Swivel Ball Joint Bearings

FAN Lilong^{1,2}, ZHANG Jingjing³, LI Zhihui¹, SHI Qingbo³, WANG Hailiang⁴

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Construction Technology and Equipment for Prefabricated Bridges, Tianjin 300300, China; 3. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 4. Tianjin Urban Construction University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to improve the flowability of reactive powder concrete (RPC), experiments were conducted on RPC materials used for bridge swivel ball joint bearings. By using the method of controlling variables, the basic mix proportion of the RPC system is studied, and the effects of mineral admixtures, steel fibers, and water reducer on the RPC performance are explored. The results show that adding appropriate amounts of mineral powder and silica fume instead of cement to the RPC system can fully exert the filling effect of micro aggregates and the activity of volcanic ash, improve the compressive strength of the system, and the optimal dosage of mineral powder and silica fume is 45kg/m³ and 20kg/m³ respectively. The addition of steel fibers can significantly improve the compressive strength of RPC, and the optimal amount of steel fibers is 75kg/m³. The mechanism of action of water reducer in RPC mainly manifests as electrostatic repulsion and steric hindrance, and the optimal dosage of water reducer is 1.8kg/m³. Through the optimal experimental mix ratio test, the comprehensive performance of RPC material meets the application requirements of bridge swivel ball joint bearings.

Keywords: bridges; concrete; ball joint bearings; mineral admixtures; steel fiber; water reducer; flowability; mechanical property

* 国家“十四五”重点研发计划:大温差强辐射大风干燥环境下桥梁墩台塔柱现浇混凝土性能演变规律及劣化机理研究(2021YFB3701-03);天津市轨道交通重大专项:轨道交通装配式连续梁产业化关键技术研究(18ZXGDGX00050);中国铁建大桥工程局集团有限公司:2200t起重船吊装大节段钢梁关键技术研究(DQJ-2022-B04)
[作者简介] 樊立龙,正高级工程师,E-mail:30102472@qq.com
[收稿日期] 2023-11-16

0 引言

活性粉末混凝土(reactive powder concrete,简称RPC)是新兴的一种水泥基复合材料,近年来广泛应用于重要的混凝土结构中,如大型钢构件、高跨梁构件、重要预制节点构件及重要装配式墙板柱。

表 1 水泥参数指标

Table 1 Cement parameter indicators

| 比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) | 凝结时间/min | | 烧失量/% | 氯离子/% | 天然石膏/% | 碱含量/% | SO_3 /% | MgO/% |
|--|----------|-----|-------|-------|--------|-------|------------------|-------|
| | 初凝 | 终凝 | | | | | | |
| 387.65 | 156 | 195 | 0.650 | 0.041 | 3.100 | 0.850 | 2.050 | 2.180 |

国内外学者对 RPC 材料进行了大量研究。李基恒等^[1]进行活性粉末混凝土配合比优化设计,通过优化骨料级配结构,调整水胶比与浆集比,在不改变流动度的情况下,提高活性粉末混凝土的力学性能。张君瑞等^[2]研究了大掺量石粉活性粉末混凝土配合比优化,结合宏观力学性能和微观结构分析了 RPC 强度形成机理、受压破坏机理及影响强度的因素。彭学理等^[3]研究了活性粉末混凝土在大跨度铁路桥梁钢桥面铺装中的应用,拓宽了应用范围并对材料力学性能进行了系统性阐述。

到目前为止,针对 RPC 在桥梁转体球铰支座中的研究与应用较少。因此本文结合桥梁转体球铰支座应用的要求,开展 RPC 材料试验研究,进一步提升 RPC 综合特性,提高其在桥梁转体球铰支座中应用的可靠性。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料主要有:P·I 52.5 级水泥,无水石膏,S95 级矿粉,活性 SiO_2 硅灰,5~8mm 细石,聚羧酸减水剂,消泡剂粉体,膨胀剂粉体,0.125~0.214,0.214~0.630mm 石英砂,使用时两种石英砂按质量 1:1 复配应用;均匀级配人工砂,镀铜短切纤维。水泥参数指标如表 1 所示,矿粉、硅灰化学成分如表 2 所示,聚羧酸减水剂物理指标如表 3 所示。

表 2 矿粉、硅灰化学成分

Table 2 Chemical composition of mineral powder and silica fume

| 成分 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | SiO_2 | MgO | K_2O | Na_2O |
|----|-------------------------|-------------------------|-------|----------------|------|----------------------|-----------------------|
| 矿粉 | 10.15 | 3.42 | 38.59 | 30.31 | 8.55 | — | — |
| 硅灰 | 1.24 | 0.47 | 0.24 | 94.23 | 0.65 | 1.24 | 0.46 |

表 3 聚羧酸减水剂物理指标

Table 3 Physical indicators of polycarboxylate superplasticizer

| 外观 | 堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | pH 值 | 减水率/% | 灰分/% | 含水率/% |
|-------|--|------|-----------|---------|---------|
| 淡黄色粉体 | 450~550 | 7~9 | ≥ 41 | < 4.4 | < 2.8 |

1.2 试验设备

试验设备有:JJ-5 型水泥胶砂搅拌机,TYE-300B 型压力试验机,YDW-10 型电子抗折试验机,精细电子型百分表,MTB/MTQ 电子天平,标准恒温

恒湿养护箱,单卧轴强制式混凝土搅拌机,50Hz 振动台。

1.3 参考标准

本文 RPC 试验研究及性能测试参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》、GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》。

2 结果分析

2.1 基础配合比试验

本文桥梁转体球铰支座用 RPC 抗压强度设计等级为 C120,材料初始扩展度应超过 580mm,拌合物具备大流动度、自密实特性。RPC 基础配合比为(kg/m^3):水泥:石膏:细石:石英砂:人工砂:钢纤维:消泡剂:膨胀剂:减水剂:水=385:10:60:185:255:80:0.15:0.05:1.70:90,该配合比下 RPC 的性能指标如表 4 所示。由表 4 可知,基础配合比下 RPC 材料初始扩展度较小、黏度较大、工作性能较差,因此需做进一步优化。

表 4 基础配合比下 RPC 性能指标

Table 4 RPC performance indicators under basic mix ratio

| 试验编号 | 初始扩展度/mm | 抗压强度/MPa | | | 初始黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$) | 工作性能 |
|------|----------|----------|--------|--------|--|------|
| | | 3d | 7d | 28d | | |
| 1 | 554 | 97.79 | 107.69 | 128.45 | 2 400 | 较差 |
| 2 | 562 | 97.69 | 106.75 | 129.33 | 2 120 | 较差 |
| 3 | 547 | 98.44 | 108.21 | 127.79 | 2 745 | 较差 |

为达到 RPC 应有的超高强度、超大流动度等特性,配合比中会控制水胶比(胶凝材料掺量过高,尤其水泥掺量),一般低于 0.2。同时为达到强度应用要求,在体系中掺加大量钢纤维,易造成 RPC 成品拌合黏度大、流动性能差、自密实差等缺陷。因此考虑影响 RPC 力学性能、流动性能、黏聚性等指标,在基础配合比的前提下进行矿物掺合料优化试验、钢纤维优化试验和减水剂优化试验研究。

2.2 矿物掺合料优化试验

矿物掺合料掺量如表 5 所示,性能测试结果如图 1 所示。

由图 1a,1b 可知,随着矿粉掺量的增加,RPC 初始扩展度呈先增大后减小的趋势,当矿粉掺量为 $45\text{kg}/\text{m}^3$ 时,初始扩展度达到最大值 598mm。同时,随着矿粉掺量的增加,RPC 3d 抗压强度逐渐降低,7,28d 抗压强度先提高后降低,在矿粉掺量 $45\text{kg}/\text{m}^3$

表 5 矿物掺合料掺量

Table 5 Mineral admixture content $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

| 试验序号 | 水泥 | 石膏 | 矿粉 | 硅灰 |
|------|-----|----|----|----|
| 1 | 385 | 10 | 0 | 0 |
| 2 | 375 | 10 | 15 | 0 |
| 3 | 365 | 10 | 30 | 0 |
| 4 | 355 | 10 | 45 | 0 |
| 5 | 345 | 10 | 60 | 0 |
| 6 | 385 | 10 | 0 | 0 |
| 7 | 375 | 10 | 0 | 10 |
| 8 | 365 | 10 | 0 | 20 |
| 9 | 355 | 10 | 0 | 30 |
| 10 | 345 | 10 | 0 | 40 |

注:仅列出胶凝材料掺量,其他原材料掺量同 2.1 节

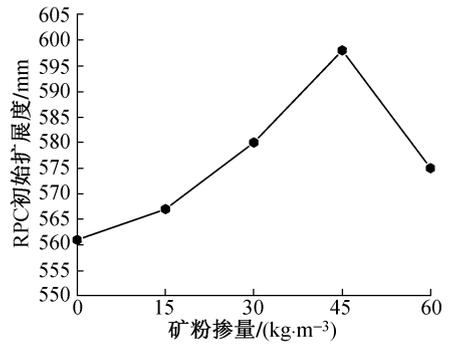
时均达到最大值,分别为 109.71, 130.22MPa。矿粉是一种高细度、高活性的矿物掺合料,比表面积大,能填补水分子消耗留下的微小孔洞结构及强度较弱的胶凝材料硬化体,同时矿粉的“滚珠效应”会提高 RPC 的和易性。由图 1c, 1d 可知,随着硅灰掺量的增加, RPC 初始扩展度先减小后增大,硅灰掺量 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 时,初始扩展度达到最小值 545mm。同时,随着硅灰掺量的增加, RPC 3, 7, 28d 抗压强度均先提高后降低,当硅灰掺量 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 28d 抗压强度达到最大值 131.14MPa。硅灰是一种高活性超细粉,其中主要矿物成分为 SiO_2 , 颗粒粒径在 $0.1\mu\text{m}$ 左右,较水泥其比表面积更大,掺加可发挥作为高活性矿物掺合料的微集料填充效应、火山灰效应,能与水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 CaSiO_3 , 促进水泥水化反应,这与文献[4-6]的研究结果类似。

通过上述试验研究可知,适量矿物掺合料替代水泥, RPC 流动性能、力学性能均未明显降低,这表明了矿粉、硅灰适量掺加均能提高 RPC 的综合性能。结合试验结果,得到最佳掺量为:矿粉 $45\text{kg}/\text{m}^3$, 硅灰 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 。

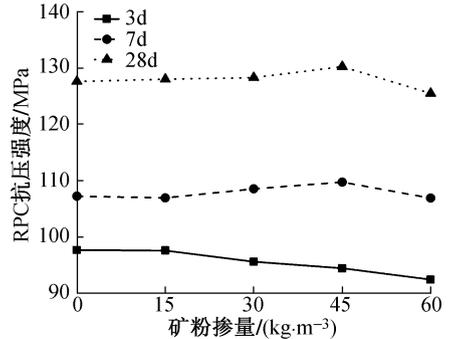
2.3 钢纤维优化试验

根据矿物掺合料最佳掺量开展钢纤维优化试验,研究钢纤维掺量对 RPC 性能的影响,以确定最佳钢纤维掺量结果如图 2 所示。

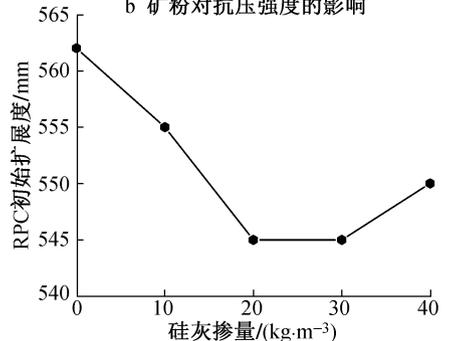
由图 2 可知,随着钢纤维掺量的增加, RPC 初始扩展度急剧减小,钢纤维掺量为 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 时,初始扩展度为 630mm,钢纤维掺量 $85\text{kg}/\text{m}^3$ 时,初始扩展度降为 525mm。钢纤维掺量与初始扩展度拟合相关系数 R^2 为 0.85,说明 RPC 初始扩展度与钢纤维掺量具有较强的相关性,充分表明了钢纤维是影响 RPC 流动性能的一项重要指标。随着钢纤维掺量的增加, RPC 3, 7, 28d 抗压强度均先提高后降低,掺量为 $75\text{kg}/\text{m}^3$ 时三者均达到最大值,掺量由 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 增加至 $75\text{kg}/\text{m}^3$, 3d 抗压强度提高



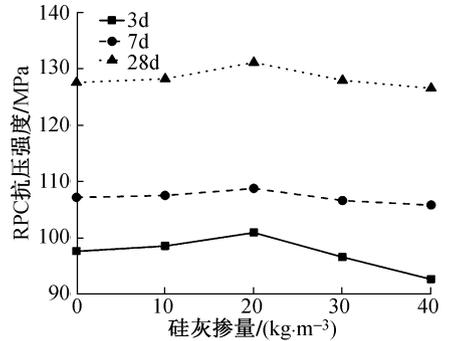
a 矿粉对初始扩展度的影响



b 矿粉对抗压强度的影响



c 硅灰对初始扩展度的影响



d 硅灰对抗压强度的影响

图 1 矿物掺合料对 RPC 性能的影响

Fig. 1 Effect of mineral admixtures on RPC performance

10.32%, 7d 抗压强度提高 6.61%, 28d 抗压强度提高 12.77%。当掺量超过 $75\text{kg}/\text{m}^3$, 3 个龄期的抗压强度均逐渐降低, 这表明随着拌合物黏度的增大, RPC 不均匀度增大, 使抗压强度有所降低。

通过上述试验研究可知, 钢纤维是影响 RPC 的重要因素, 确定合适掺量能提高抗压强度, 同时不会大幅度减小初始扩展度或增加黏度。结合试验

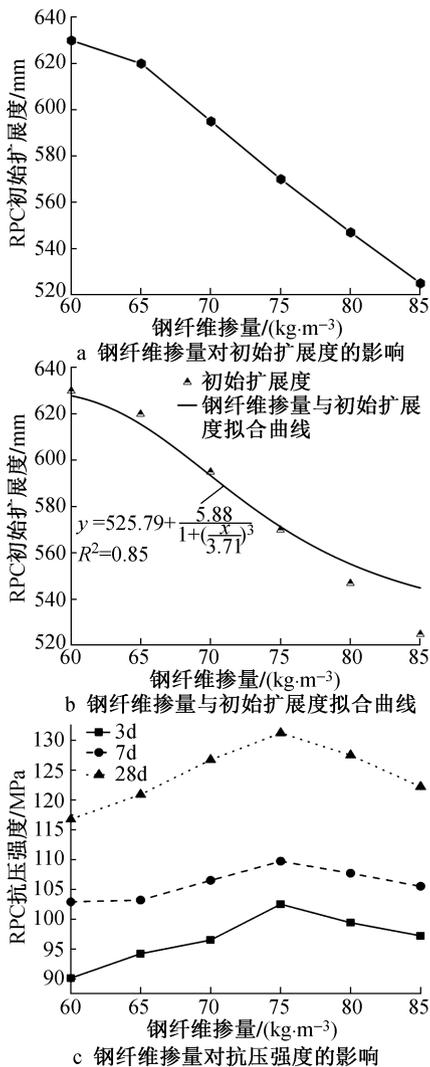


图2 钢纤维对RPC性能的影响

Fig. 2 Effect of steel fibers on RPC performance

结果,得到钢纤维最佳掺量为 $75\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2.4 减水剂掺量优化试验

减水剂作为一种重要外加剂,掺加到混凝土中对和易性改善、强度提高均有重要影响。目前在水泥基材料中应用的减水剂多为聚羧酸高效减水剂。减水剂掺量过高易造成RPC拌合物泌水、强度降低,掺量过低易造成和易性、工作性变差。

根据矿物掺合料、钢纤维最佳掺量开展减水剂(聚羧酸减水剂)掺量优化试验,减水剂掺量对RPC性能的影响如表6和图3所示。

由表6可知,随着减水剂掺量的增加,RPC拌合状态先变好后变差,掺量超过 $1.7\text{kg}/\text{m}^3$ 会出现泌水,且随着掺量的持续增加,泌水逐渐严重。同时根据28d抗压强度值可看出,随着减水剂掺量的增加,抗压强度先提高后降低,掺量为 $1.7\text{kg}/\text{m}^3$ 时达到最大值 130.44MPa 。

表6 减水剂掺量优化试验结果

Table 6 Optimization test results of water reducer content

| 试验序号 | 减水剂掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 拌合状态 | 泌水状态 | 28d 抗压强度/ MPa |
|------|---|-----------|-------|------------------|
| 1 | 1.5 | 黏度较高 | 不泌水 | 125.45 |
| 2 | 1.6 | 黏度低,和易性很好 | 不泌水 | 126.67 |
| 3 | 1.7 | 黏度低,保水性较好 | 轻微泌水 | 130.44 |
| 4 | 1.8 | 黏度低,保水性很差 | 轻微泌水 | 129.73 |
| 5 | 1.9 | 黏度低,保水性很差 | 泌水较严重 | 125.68 |

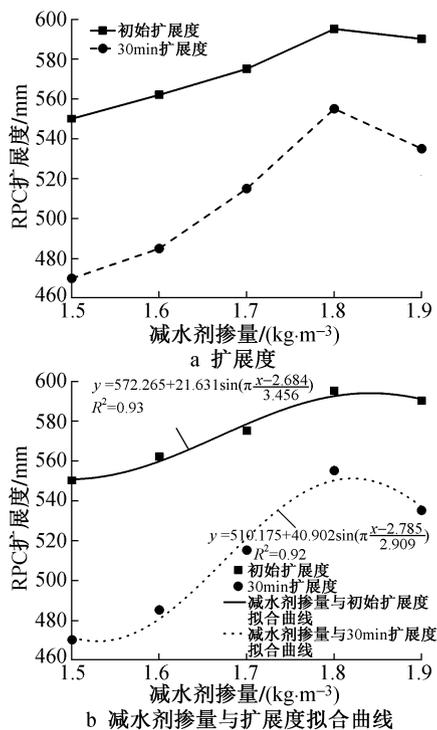


图3 减水剂对RPC性能的影响

Fig. 3 Effect of water reducer on RPC performance

由图3可知,随着减水剂掺量的增加,RPC初始扩展度、30min扩展度均先增大后减小,掺量为 $1.8\text{kg}/\text{m}^3$ 时两者均达到最大值,分别为 595 、 555mm 。减水剂掺量与初始扩展度、30min扩展度拟合曲线相关系数 R^2 分别为 0.93 、 0.92 ,说明RPC初始扩展度、30min扩展度均与减水剂掺量相关性特别强,充分表明了减水剂是影响RPC流动性能的另一项重要指标。结合试验结果,得到减水剂最佳掺量为 $1.8\text{kg}/\text{m}^3$ 。

减水剂在RPC中的作用机理如图4所示。当体系中掺入减水剂,憎水基团会定向吸附至水泥颗粒表面,亲水基团会定向吸附至水泥颗粒表面,亲水基团会定向吸附至水泥颗粒表面,形成多分子层吸附膜结构,使水泥胶粒表面带有相同符号的“-”电荷形成静电斥力,促使水泥微颗粒之间絮凝结构体相互分散,释放自由水,减少用水量,提高RPC流动度^[7]。聚羧酸减水剂分子为梳形多侧链共聚物,溶

表7 RPC最优配合比

Table 7 Optimal mix ratio of RPC

| 材料 | 水泥 | 石膏 | 矿粉 | 硅灰 | 细石 | 石英砂 | 人工砂 | 钢纤维 | 消泡剂 | 膨胀剂 | 减水剂 | 水 |
|----|-----|----|----|----|----|-----|-----|-----|------|------|------|----|
| 掺量 | 320 | 10 | 45 | 20 | 60 | 185 | 255 | 75 | 0.15 | 0.05 | 1.80 | 90 |

kg · m⁻³

于水后侧链相互交织分散于水泥微颗粒之间,形成空间位阻,降低水泥微颗粒之间聚集效应,使RPC扩展度增大,黏度降低。

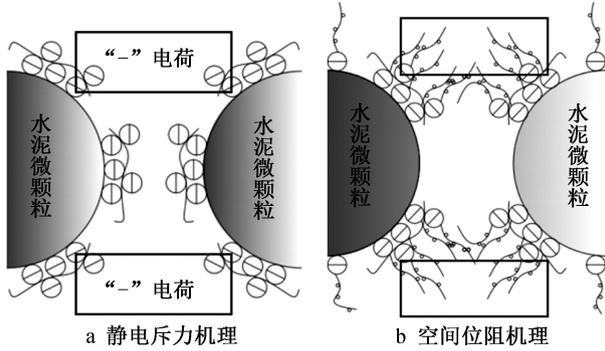


图4 减水剂在RPC中的作用机理

Fig. 4 Mechanism of action of water reducer in RPC

2.5 桥梁转体球铰支座用RPC最优试验配合比

通过上述试验研究,得出RPC最优配合比,如表7所示,其性能试验结果如表8所示。

表8 性能试验结果

Table 8 Performance test results

| 初始扩展度/mm | 抗压强度/MPa | | | RPC黏度 |
|----------|----------|--------|--------|---------|
| | 3d | 7d | 28d | |
| 595 | 96.45 | 106.72 | 127.47 | 拌合物黏度较好 |

由表8可知,RPC初始扩展度达到595mm,3d抗压强度为96.45MPa,7d抗压强度为106.72MPa,28d抗压强度为127.47MPa,拌合物黏度较好,自密实性高。

3 结语

1)随着矿粉掺量的增加,RPC初始扩展度先增大后减小,3d抗压强度逐渐降低,7,28d抗压强度先增大后减小;随着硅灰掺量的增加,RPC初始扩展度先减小后增大,3,7,28d抗压强度均先增大后减小;试验得出矿粉最佳掺量为45kg/m³、硅灰最佳掺量为20kg/m³。

2)随着钢纤维掺量的增加,RPC初始扩展度急剧减小,3,7,28d抗压强度均先增大后减小,掺量为75kg/m³时三者均达到最大值。表明钢纤维掺量增加,拌合物黏度增大,RPC不均匀度增大,使抗压强度降低,试验得出最佳掺量为75kg/m³。

3)随着减水剂掺量的增加,RPC初始扩展度、30min扩展度均先增大后减小;减水剂参加对RPC黏度、自密实度、抗压强度均有改善;试验得出最佳

掺量为1.8kg/m³。

4)最优试验配合比得到的桥梁转体球铰支座用RPC,初始扩展度达到595mm,3d抗压强度96.45MPa,7d抗压强度为106.72MPa,28d抗压强度为127.47MPa,同时拌合物黏度适中,自密实性高,可为实际工程应用提供试验基础和理论依据。

参考文献:

- [1] 李基恒,林长峰,汪钊龙,等. 活性粉末混凝土配合比优化设计研究[J]. 西部交通科技, 2023(9): 20-22,67.
LI J H, LIN C F, WANG Y L, et al. Research on optimization design of mix proportion of reactive powder concrete[J]. Western China communication science & technology, 2023(9): 20-22,67.
- [2] 张君瑞,黄前龙,洪伟华,等. 大掺量石粉活性粉末混凝土配合比优化研究[J]. 公路,2024,69(1): 311-316.
ZHANG J R, HUANG Q L, HONG W H, et al. Optimization of mix proportion of high dosage stone powder activated powder concrete[J]. Highway, 2024,69(1): 311-316.
- [3] 彭学理,王敏. 超高性能混凝土在大跨度铁路桥梁钢桥面铺装中的应用[J]. 世界桥梁,2020,48(2): 77-81.
PENG X L, WANG M. Application of ultra-high performance concrete in steel bridge deck paving of large-span railway bridges[J]. World bridges, 2020,48(2): 77-81.
- [4] 郝先慧,李海艳,李华,等. 活性粉末混凝土(RPC)配合比优化试验及计算[J]. 混凝土,2018(3): 156-160.
HAO X H, LI H Y, LI H, et al. Optimization test and calculation of reactive powder concrete (RPC) mix proportion[J]. Concrete, 2018(3): 156-160.
- [5] 李志坤,彭家惠,杨再富. 矿物掺合料对聚羧酸减水剂与水泥相容性的影响[J]. 材料导报,2017,31(12): 115-120.
LI Z K, PENG J H, YANG Z F. The effect of mineral admixtures on the compatibility between polycarboxylate superplasticizer and cement [J]. Materials reports, 2017, 31(12): 115-120.
- [6] 幸超群,邓怡帆,宦俊伟,等. 硅灰-粉煤灰复合矿物掺合料对混凝土性能的影响研究[J]. 新型建筑材料,2022,49(9): 52-56,85.
XING C Q, DENG Y F, DA J W, et al. Study on the influence of silica fume fly ash composite mineral admixture on the performance of concrete [J]. New building materials, 2022, 49(9): 52-56,85.
- [7] 温兆龙,蒋元海,刘洋,等. 聚羧酸减水剂与水泥及矿物掺合料适应性研究[J]. 江苏建材,2022(5): 12-13,19.
WEN Z L, JIANG Y H, LIU Y, et al. Study on the adaptability of polycarboxylic acid water reducing agent to cement and mineral admixtures [J]. Jiangsu building materials, 2022(5): 12-13,19.