

活性粉末混凝土预应力箱梁施工技术研究

王晓杰

(中铁城建集团有限公司,湖南 长沙 410208)

摘要:目前的高强与高性能混凝土存在抗折强度不高、脆性大、体积稳定性不良等缺点,活性粉末混凝土(RPC)是一种新型材料,具有良好的力学性能和高抗渗性,能够更大程度地降低混凝土用量和结构自重,从而达到安全可靠、节约成本的目的。该文将活性粉末混凝土应用于公路预应力箱梁中,通过创新优化配合比、改变传统运输工艺、蒸气养生棚养生技术研究,有效缩短活性粉末混凝土的浇筑时间,保证浇筑质量和强度。

关键词:活性粉末混凝土;箱梁;配合比;运输工艺;养生技术

中图分类号:U444,U445

文献标志码:A

Construction Technology of Reactive Powder Concrete Prestressed Box Girder

WANG Xiaojie

(China Railway Urban Construction Group Corporation Limited, Changsha, Hunan 410208, China)

Abstract: At present, high-strength and high-performance concrete has some disadvantages, such as low flexural strength, large brittleness, and poor volume stability. Reactive powder concrete (RPC) is a new type of material, which has good mechanical properties and high impermeability. It can reduce the amount of concrete to a greater extent and reduce the weight of the structure, achieving the purpose of safety, reliability, and cost saving. This paper applied RPC to highway prestressed box girder. Through the innovation and optimization of mix ratio, the change in traditional transportation technology, and curing technology research of steam curing shed, it effectively shortens the pouring time of RPC, ensuring the pouring quality and strength.

Keywords: reactive powder concrete; box girder; mix proportion; transportation technology; curing technology

0 引言

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)是1994年法国首先公布的一种新型的水泥基复合材料,主要由水泥、石英砂(粉)、钢纤维、硅灰和高效减水剂等材料配制而成,具有超高强、高韧性和低渗透率等优点,应用前景广阔。国外已修建30多座RPC桥梁,其中1/3为公路桥梁,其结构轻盈美观。中国在迁曹铁路滦柏干渠大桥工程中,采用RPC制作多孔预应力简支T梁进行力学性能测试和行车监测,其中1孔(2片)进行了力学性能测试,5孔

(10片)进行了行车监测,取得了良好的效果。目前中国RPC大多应用在铁路上,如预制轨道板、盖板等,公路上除运用于现浇桥面铺装施工外,其他应用实例罕见报道^[1-3]。

本文通过研究活性粉末混凝土的配合比、运输和养生等施工技术,成功应用于公路预应力箱梁工程中,有效保证了活性粉末混凝土箱梁强度和质量,也为相关工程应用提供了借鉴。

1 工程概况

某高速公路天桥,设计荷载为公路-II级,抗震

收稿日期:2022-06-07

基金项目:中铁城建集团有限公司科技研发计划项目(编号:ZTCJ1-2016-11)

作者简介:王晓杰,男,硕士,工程师.E-mail:773933246@qq.com

标准为地震动峰值加速度 $0.1g$, 桥下净空不小于 5.0 m , 全宽 8 m , 桥面净宽 7 m , 两侧设 0.5 m 防撞护栏, 斜交角度 45° 。其下部结构采用桩柱式桥墩, 桩基础采用直径为 150 cm 的混凝土桩, 桥墩采用直径为 140 cm 的双柱式桥墩; 上部结构采用 30 m 活性粉末混凝土(RPC)预应力小箱梁, 共计 12 片。

1.1 主要工艺流程

预应力箱梁施工工艺流程如图 1 所示。

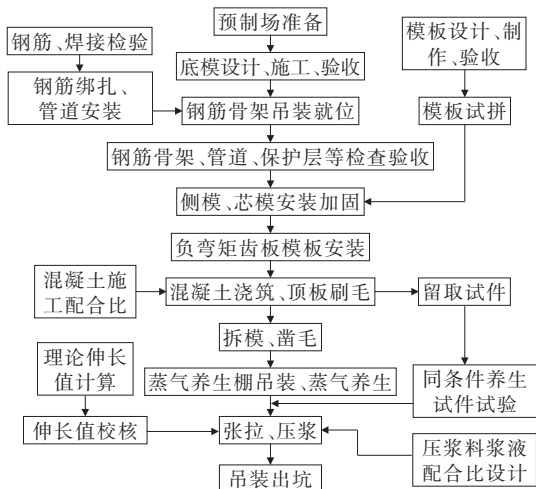


图 1 预应力箱梁施工工艺流程图

Figure 1 Construction process flow of prestressed box girder

由图 1 可以看出:RPC 箱梁预制施工的主要施工要点在于混凝土配合比、混凝土运输浇筑及蒸汽养生 3 个方面,其余工序均较为常规,基本与普通预制箱梁施工无异。

1.2 原设计 RPC130 混凝土配合比

(1) 水泥:采用强度等级为 52.5 的硅酸盐水泥。

(2) 细骨料:采用河砂,河砂可分粗粒径砂($2.36\sim 0.63\text{ mm}$)、中粒径砂($0.63\sim 0.315\text{ mm}$)和细粒径砂($0.315\sim 0.16\text{ mm}$)3 个粒径级别。各粒径级河砂的超粒径颗粒含量限值均 $\leq 15\%$ 。

(3) 硅灰: SiO_2 含量不小于 90% ,粒径为 $0.1\sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

(4) 减水剂:采用减水率不低于 25% 的聚羧酸高效减水剂^[4-6]。

(5) 钢纤维:采用高强度圆截面直纤维。

(6) 配合比:活性粉末混凝土立方体($100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$)抗压强度标准值不小于 130 MPa ,棱柱体($100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$)弹性模

量不低于 40 GPa ,坍落度宜为 $140\sim 180\text{ mm}$,扩展度宜为 $170\sim 220\text{ mm}$,含气量宜为 $2\%\sim 4\%$ 。活性粉末混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 活性粉末混凝土配合比

Table 1 Mix ratio of reactive powder concrete kg/m^3

水泥	硅灰	细砂	减水剂	钢纤维	水
851	255	996	21	157	199

1.3 工程重难点

活性粉末混凝土预制箱梁施工主要存在以下技术难题:

(1) 配合比问题。根据原设计配合比配制混凝土,发现水胶比较小,强度及工作性能均无法达到设计要求且无法满足施工所需要的工作性能,所以各组材料用量对强度及工作性能的影响非常大,现场调整优化合适的配合比尤为重要。

(2) 混凝土运输问题。RPC 混凝土特性黏稠,尤其是添加有钢纤维^[7],其黏附力更强,如采用混凝土运输罐车进行运送,会因罐车自转导致其罐体内壁上黏附大量拌和物,造成材料浪费,而且清洗的难度增大,故不宜采用。同理,如采用泵送方式进行混凝土浇筑,会因黏聚力强,对管壁的摩擦力增大,同时也会造成大量空气的滞留,泵送压力增大,极易造成堵管、爆管。

(3) 成品养生问题。RPC 预应力箱梁养生是保证强度的最关键工序,现场养生温度和湿度的界定、自然养生与高温养生的顺序、全养护周期的确定以及养护设备的选择均亟须解决。

2 活性粉末混凝土配合比优化

(1) 水胶比对 RPC 的流动性影响很大,随着水胶比增大,拌和物的流动度也随之增大,但其抗压强度及抗折强度随着水胶比的增加而减小^[8]。经现场试验,水胶比在 $0.14\sim 0.16$ 区间变化时,拌和物流动性仍然很好(表 2),经过振捣能够很快地充满模具,并能排出气泡,具有很好的密实度。

(2) 石英砂具有很高的硬度和优良的界面性能,在活性粉末混凝土中充当主要集料的功能,通过试配研究,在水胶比 0.22 的情况下,试件抗压强度可以达到 150 MPa 以上,但流动度极差,且拌和时间超过 10 min ,无法实现量产^[9]。为提高其工作性能,对其

配合比进行修改,改用粗砂 1.18~4.78 mm、中砂 0.6~2.36 mm、细砂 0.3~1.18 mm 进行试验,通过调整该项配比,不仅可达到预期强度效果,并使得 RPC 具备良好的工作性能,并缩短了近 3 min 的拌和时间(表 3)。

表 2 水胶比对强度及流动度影响

Table 2 Influence of water-binder ratio on strength and fluidity

水胶比 (W/C)	减水剂 用量/%	养护 条件	抗压强度/MPa		胶砂流动 度/mm
			2 d	3 d	
0.20	2.6	90℃水养	84.1	97.2	230
0.18	2.6	90℃水养	111.6	112.6	220
0.16	2.6	90℃水养	126.8	136.8	200
0.14	3.7	90℃水养	136.6	152.0	160

表 3 同等水胶比砂掺配比例对流动度影响

Table 3 Influence of sand mixing ratio with the same water-binder ratio on fluidity

砂掺配比例			水胶比 (W/C)	抗压强度/MPa		胶砂流动 度/mm
粗砂	中砂	细砂		2 d	3 d	
0.1	0.6	0.3	0.14	136.6	152.0	160
0.2	0.6	0.2	0.14	134.5	149.8	170
0.3	0.5	0.2	0.14	140.2	156.3	180
0.3	0.4	0.3	0.14	138.9	155.1	180

(3) 目前对于 RPC 混凝土用砂并无成熟的经验,经过查阅文献得出一般砂的粒径范围为 0.15~0.6 mm,但试配发现选用该级配范围的砂拌和出来的 RPC 混凝土工作性能较差(表 4)^[10-11]。由表 4 可知:初次选用的砂砾粒径在 0.15~0.6 mm 之间占总量的 80%,无法形成连续的级配曲线。

表 4 砂砾筛分结果

Table 4 Results of gravel screening

筛孔/ mm	通过率/%		桥规Ⅰ区 范围	桥规Ⅱ区 范围
	初次选用砂	掺配合成砂		
4.75	0	0	0~10	0~10
2.36	0	6.4	5~35	0~25
1.18	0	49.2	35~65	10~50
0.6	20.7	74.0	71~85	41~70
0.3	96.6	90.6	80~95	70~92
0.15	99.7	98.2	90~100	90~100

参考《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)中粗砂的级配及区间范围,并按照最大密实理论,选用不同规格的砂进行掺配^[12-13],结果见表 5。

表 5 细集料堆积密度测试结果

Table 5 Test results of fine aggregate packing density

组号	不同规格砂的含量			堆积密度/ (kg·m ⁻³)
	3 [#] 砂	2 [#] 砂	1 [#] 砂	
1	0.10	0.6	0.30	1 505
2	0.20	0.6	0.20	1 517
3	0.20	0.5	0.30	1 525
4	0.10	0.5	0.40	1 494
5	0.30	0.4	0.30	1 482
6	0.00	0.5	0.50	1 462
7	0.15	0.6	0.25	1 520

从上述堆积密度对比试验中发现,当掺配比例为 3[#]砂:2[#]砂:1[#]砂=2:5:3 时,堆积密度最大,掺配后的砂筛分结果亦列于表 4。

从筛分结果可见:掺配合成后的砂细度模数 3.18,级配完全符合《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)中的Ⅰ区要求,基本符合Ⅱ区砂要求,确定为较为合理的级配,进行试配试验发现其混凝土扩展度有明显的改善,其扩展度处于 250~390 mm 之间,确定采用该掺配合成砂。

(4) 对多种不同配方和用量的聚羧酸减水剂进行试拌并检测各项性能指标(表 6),试验发现采用醚类的配方 2,掺量 4% 拌和的混凝土工作性最佳,强度满足设计要求,因此决定采用醚类的配方 2,掺量 4% 作为最终配合比方案候选。

表 6 不同配方和用量的聚羧酸减水剂各项性能指标

Table 6 Performance indexes of polycarboxylic acid superplasticizers with different formula and dosages

减水剂 种类	配方	2% 掺量		3% 掺量		4% 掺量	
		扩展 度/mm	强度/ MPa	扩展 度/mm	强度/ MPa	扩展度/ mm	强度/ MPa
酯类	1	250	145.1	360	152.4	510	146.5
	2	265	150.3	400	143.3	515	150.4
	3	255	145.3	375	148.2	500	151.8
醚类	1	265	147.4	360	146.3	490	145.5
	2	275	145.4	435	152.8	580	152.7
	3	310	152.8	405	149.3	520	152.8

(5) 结合项目所处条件,本研究在保证水泥、硅灰用量比例不变且强度满足要求的前提下,对其他组成成分进行了多项试验,从而确定出各种材料对强度、工作性能的影响,使其工作性能达到最佳状态。经过多组试验比对,最终确定 RPC130 混凝土配合比如表 7 所示。

表 7 最终确定的 RPC130 混凝土百分比

Table 7 Final RPC130 concrete mix								kg/m ³
水泥	硅灰	粗砂	中砂	细砂	钢纤维	水	减水剂	
851	255	318	530	212	157	155	44	

3 活性粉末混凝土成品输送技术

根据现场试验得出,每盘(1 m³)RPC 拌和时间为 6~7 min,综合考虑有效工作时间约 1 h。如采用罐装或泵送方式进行混凝土浇筑,会因黏聚力强,容易影响混凝土浇筑性能,且极易出现材料黏附罐车或泵管内,造成材料和成本浪费。综合比选,确定最佳的输送方式为将 RPC 混凝土直接采用料斗盛装,车载料斗运送至浇筑现场。

由于 RPC 中不含粗骨料,流动度为 190 mm,极易在重力作用下随出料口间隙中不间断溢出,因此对于料斗的密封有着更为严格的要求,项目创新加工定做了一款料斗,可保证滴水不漏,专门用于 RPC 的盛装运输,避免了普通料斗在运输过程中出现大量混凝土溢漏,不便于清理,同时也造成资源浪费的现象。

4 活性粉末混凝土养生技术

4.1 养生方案确定

经查中国已有活性粉末混凝土(RPC)养生试验研究,《活性粉末混凝土在石武客专铁路工程盖板生产中的应用研究》等文献^[14],主要采用专用高压高温蒸氧釜。而采用蒸养釜养生,设备需要根据梁体实际情况进行专门定制,对于小型构件相对适用,如应用于大型箱梁,成本较高,不利于推广。结合活性粉末混凝土特性,经过比选,最终选用养生棚蒸气养生,即在梁体周围,用保温材料搭设大棚,在棚内设蒸气排管,使棚内温度保持正温,保证混凝土在正温下达到设计强度。这种方式具有密封保温效果好,拆卸组装轻便,内部热量分布均匀等优点,且造价

较低。

(1) 养生棚内的保温效果,与材料的透风系数及传热系数有关,在材料的比选方面,《建筑施工计算手册》中对各种围护层的传热系数有详细说明,以“钢板间填以聚苯乙烯板”为参考,选择合适厚度的彩钢板材。选用内外层厚度为 0.5 mm 的钢板、内部为 7 cm 泡沫板的彩钢板进行养生棚设计,结构尺寸为长 34 m×宽 3.4 m×高 2.7 m(图 2、3)。

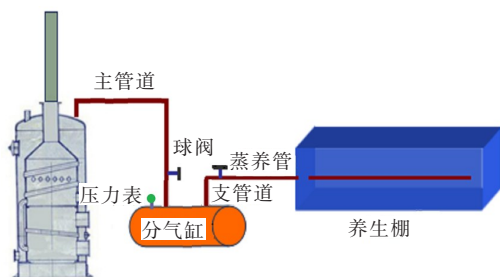


图 2 蒸气养生棚示意图

Figure 2 Schematic diagram of steam curing shed

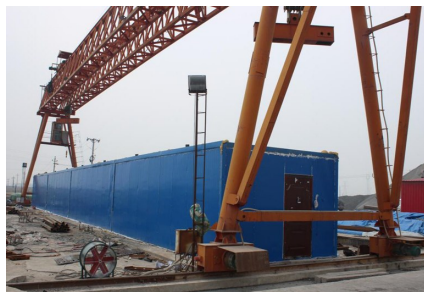


图 3 养生棚组装成型

Figure 3 Assembly and forming of curing shed

(2) 经计算在升温阶段耗能最高,需求蒸气量为 0.74 t/h。选定规格为 1 t/h 的蒸气锅炉,额定压力 0.8 MPa,蒸气温度 165 ℃,在升温阶段单位时间内所需要的蒸气量最大,蒸气用量取 740 kg/h,蒸气的比容按照压力为 0.2 MPa 时,查饱和蒸气参数表为 0.908 8 m³/kg,蒸气的流速查蒸气容许流速表为 35 m/s。参照《建筑施工计算手册》中蒸气管径计算公式进行计算,最终确定采用公称直径 48 mm(壁厚 3 mm)的对焊接钢管作为蒸气管道,管道上部按照每 50 cm 均匀布孔,孔径 5 mm,喷射角度为竖向垂直喷射。

(3) 为了保证拼接接缝的严密,在接缝处外部覆盖 0.5 mm 钢板,并在其内部喷灌工程用泡沫密封胶,底部为 3 层土工布叠放。

4.2 计算蒸气需求量和耗煤量

在此种蒸气养生环境下,暖棚在单位时间内的耗热量可建立计算模型,即截面尺寸为长34 m×宽3.4 m,高2.7 m,采用空腔式彩钢板通蒸气加热,彩钢板的重量为2 493 kg,泡沫板的重量为400 kg,环境温度 $T_a=7\text{ }^{\circ}\text{C}$,混凝土浇筑完毕时的温度 $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温时间 $T_1=6\text{ h}$,达到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持恒温 $T_2=72\text{ h}$ 。其热工计算采用蒸气热模法进行,计算蒸气需求量和耗煤量如下。

(1) 蒸气用量

$$G_z=(Q_1+Q_2+Q_3+Q_4)\cdot\beta/2\ 500 \quad (1)$$

式中: Q_1 为加热混凝土所需热量(kJ); Q_2 为加热模板和保温层所需热量(kJ); Q_3 为养生棚周围环境中散失的热量(kJ); Q_4 为蒸气充满自由空间的耗热量(kJ); G_z 为所有蒸气用量(kg); β 为损失系数,取1.5;蒸气含热量取2 500 kJ/kg。

$$G_z=(6\ 601\ 796+130\ 279+24\ 369\ 145+351\ 831)\times 1.5/2\ 500=18\ 872\text{ kg}$$

(2) 耗煤量

$$G_m=(Q_1+Q_2+Q_3+Q_4)\cdot\beta/(\eta_1\cdot\eta_2\cdot R) \quad (2)$$

式中: G_m 为耗煤量(kg); η_1 为管道效率系数,取0.8; η_2 为锅炉效率系数,取0.6; R 为煤发热量,取29 306 kJ/kg。得到:

$$G_m=(6\ 601\ 796+130\ 279+24\ 369\ 145+351\ 831)\times 1.5/0.8\times 0.6\times 29\ 306=3\ 354\text{ kg}$$

4.3 养生湿度控制

在养生过程中,湿度控制也非常重要。由于湿度是一个相对的概念,所以湿度控制较温度控制更为困难。常规养生设定的是针对 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的相对湿度要求,由此决定两个前提:① 温度恒定的状态(目前常规都是按照 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$);② 相对湿度是空气中实际所含水蒸气密度和同温度下饱和水蒸气密度的百分比值。目前能采购到的温湿度计大都是基于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下进行设定的,无法对 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下饱和水蒸气密度进行测定,为保证活性粉末混凝土的养生质量,采用目测法结合常规温湿度计共同测量控制的方法。试验量测结果发现:采用1 t高压锅炉养生,养生体积约 280 m^3 ,可保证养生期间梁体湿润,仪表显示湿度99%。

4.4 确定RPC最佳养生周期

在确定最佳养生温度、湿度后,进行最佳养生周

期的对比试验(表8)。

表8 养生周期对强度影响

Table 8 Influence of curing period on intensity

养生周期/d	抗压强度/MPa	养生周期/d	抗压强度/MPa
拆模	51.4	3	156.7
1	90.5	4	158.4
2	138.8	5	157.2

从表8可以看出:4 d养生期可达抗压强度最大值,5 d养生周期后,强度有降低的趋势。对其养生周期做更进一步的试验对比,发现基本规律是3~4 d可使RPC强度达到最大值,随后会呈现强度略降1~2 MPa,超过5 d,养生周期对强度变化无影响。

5 结论

(1) 通过试验优化RPC的水胶比、骨料粒径、外加剂等材料用量,确定符合需求的最佳RPC130混凝土配合比。调整后RPC强度1 d可达到40 MPa,3 d强度达到130~160 MPa,弹性模量达到40 GPa以上,有效保证了设计强度和施工质量,同时提高了施工效率,降低了施工成本。

(2) 针对RPC的特性,通过改变传统运输工艺及改进料斗设计,由拌和站直接放料至料斗内,运至梁场浇筑,解决了材料黏度大、泵送困难、罐车卸料困难的难题,并有效缩短了至少20%浇筑时间,保证了施工现场RPC的初凝质量。

(3) 通过对比,选定蒸气养生棚养生技术和养生设备,创新性地制定了相应的养生方案,确定了RPC养生的蒸气需求量、耗煤量及最佳养生周期,保证了热力系统的供应,从而达到持温养生的效果,有效保证了RPC的终凝质量和强度。

参考文献:

References:

- [1] P R K R, MATHANGI D P, SUDHA C, et al. Experimental investigation of reactive powder concrete exposed to elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 119593.
- [2] WANG X H, ZHAO Q X, HE X J, et al. Mechanism analysis of the influence of delay period on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Frontiers in

- Materials, 2021, 7: 563234.
- [3] 陈宝春, 李聿胜, 韦建刚, 等. 法国一座超高性能混凝土斜腿刚构桥设计介绍[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 192-195.
- CHEN Baochun, LI Jinsheng, WEI Jiangang. A continuous rigid frame bridge with diagonal legs and ultra-high performance concrete in France[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3): 192-195.
- [4] BEKTIMIROVA U, MUKHAMMEDRAKHYM I, SHON C S, et al. Effect of aggregate packing on strength of reactive powder concrete: Modeling and experimental evaluation[J]. Materials Science Forum, 2020, 998: 299-304.
- [5] 罗俊, 陈鸣, 秦明强. 配筋活性粉末混凝土梁抗剪承载力分析[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 270-274.
- LUO Jun, CHEN Ming, QIN Mingqiang. Analysis of shear capacity of reinforced reactive powder concrete beams[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 270-274.
- [6] 黄正猛, 方志, 贾理. 体外配置CFRP预应力筋RPC梁受弯性能非线性分析. 中外公路, 2020, 40(4): 85-91.
- HUANG Zhengmeng, FANG Zhi, JIA Li. Analysis of nonlinear bending behavior of rpc beams prestressed with external CFRP tendons[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 85-91.
- [7] 中国建筑科学研究院, 大连悦泰建设工程有限公司. 纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T 221—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- China Academy of Building Research, Dalian Yuetai Construction Engineering Co., Ltd.. Technical specification for application of fiber reinforced concrete: JGJ/T 221—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] 大连理工大学. 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38—2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- Dalian University of Technology. Technical specification for fiber reinforced concrete structures: CECS 38—2004[S]. Beijing: China Planning Press, 2005.
- [9] 李军昌. RPC混凝土在简支变连续桥梁中的应用研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(8): 98-102.
- LI Junchang. Research on the application of reactive powder concrete on bridge transforming from simply-supported into continuous girders[J]. Railway Construction Technology, 2020(8): 98-102.
- [10] 耿春雷, 许零, 陈红岩, 等. 活性粉末混凝土的研究与工程应用进展[J]. 材料导报, 2012, 26(5): 70-73.
- GENG Chunlei, XU Ling, CHEN Hongyan, et al. On research progress and application of reactive powder concrete[J]. Materials Review, 2012, 26(5): 70-73.
- [11] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24.
- [12] 杜任远, 黄卿维, 陈宝春. 活性粉末混凝土桥梁应用与研究[J]. 世界桥梁, 2013, 41(1): 69-74.
- DU Renyuan, HUANG Qingwei, CHEN Baochun. Application and study of reactive powder concrete to bridge engineering[J]. World Bridges, 2013, 41(1): 69-74.
- [13] 吕平, 龙佩恒, 何国顺. 活性粉末混凝土性能试验及其在人行天桥改造工程中应用的研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 857-861.
- LYU Ping, LONG Peiheng, HE Guoshun. Research on the characteristic test of reactive powder concrete and its application in the reconstruction project of pedestrian bridge[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 857-861.
- [14] 石磊. RPC130活性粉末混凝土在石武客专铁路工程盖板生产中的应用研究[J]. 铁道建筑, 2011, 51(5): 134-135.
- SHI Lei. Study on the application of RPC130 reactive powder concrete in the production of railway engineering cover plate in Shiwu passenger dedicated line[J]. Railway Engineering, 2011, 51(5): 134-135.