

# 采用机制砂、破碎卵石制备UHPC及工程应用

余泽文 彭健秋 袁飞飞 杜兵 余露

(四川公路桥梁建设集团有限公司 成都 610041)

**摘要:** 彭山岷江大桥主桥钢拱塔的钢混结合段原设计采用环氧树脂混凝土进行预应力张拉端密封,但试拌后环氧树脂混凝土流动性较差,强度较低,且方量较少,考虑到料仓周转、施工便捷性及经济效益,利用既有常规原材料,拟采用自然养护类机制砂破碎卵石UHPC取代环氧树脂混凝土进行浇筑。为满足混凝土高流动性、高抗裂、低成本等要求,研究了细集料类型、5~10mm破碎卵石取代细集料的掺量对UHPC工作性、力学性、体积稳定性及早期抗裂性的影响。结果表明:采用0~4.75mm天然砂、机制砂取代0~1.25mm石英砂后,UHPC工作性、体积稳定性及早期抗裂性改善显著,但不利于力学性,其28d强度分别降低约18.3%、12.4%;随着粗集料取代量由0%增加至30%,UHPC工作性、体积稳定性及抗裂性改善显著,在掺量30%时可提高UHPC极限强度;掺入粗集料可有效降低UHPC粘度,但粗集料取代量超过30%后不利于抗裂纤维分散性。通过以上研究,制备的UHPC坍落度/扩展度为270/700mm、倒置坍落度筒排空时间/t500时间为3s、7d/28d抗压强度103.2MPa/129.1MPa、28d干燥收缩率为 $258 \times 10^{-6}$ ,经济效益优良,成功应用于彭山岷江大桥。

**关键词:** 天然砂UHPC; 机制砂UHPC; 破碎卵石UHPC; 粗集料取代量; 细集料类型; 经济效益。

**中图分类号:** TU528.58

**文献标识码:** A

Preparation and engineering application of UHPC with machine-made sand and basalt

Yu zewen, Peng Jianqiu, Yuan Feifei, Du Bing, Yu Lu

(Sichuan highway and Bridge Construction Group Co., Ltd, Chengdu, 610041, P. R. China)

**Abstract:** The steel-concrete joint section of the Steel Arch Tower of the main bridge of Pengshan Minjiang River Bridge was designed to use epoxy resin concrete for prestressed tension end sealing, but after trial mixing, the epoxy resin concrete has poor fluidity, low strength and small volume. Considering the turnover of the silo, the convenience of construction and economic benefits, the existing conventional raw materials are used, and it is proposed to use natural curing machine-made sand crushed pebble UHPC to replace epoxy resin concrete for pouring. In order to meet the requirements of high fluidity, high crack resistance and low cost of concrete, the effects of the type of fine aggregate and the content of 5-10mm crushed pebble instead of fine aggregate on the workability, mechanical properties, volume stability and early crack resistance of UHPC were studied. The results show that the workability, volume stability and early crack resistance of UHPC are significantly improved by using 0-4.75mm natural sand and manufactured sand instead of 0-1.25mm quartz sand, but it is not conducive to mechanical properties, and its 28 day strength is reduced by about 18.3% and 12.4% respectively; With the substitution of coarse aggregate increasing from 0% to 30%, the workability, volume stability and crack resistance of UHPC are significantly improved, and the ultimate strength of UHPC can be increased when the content is 30%; Adding coarse aggregate can effectively reduce the viscosity of UHPC, but the substitution of coarse aggregate is more than 30%, which is not conducive to the dispersion of anti cracking fiber. Through the above research, the prepared UHPC has a slump / expansion of 270 / 700mm, an inverted slump cylinder emptying time / t500 time of 3S, a 7d / 28d compressive strength of 103.2mpa/129.1mpa, and a 28d drying shrinkage of  $258 \times 10^{-6}$ , with excellent economic benefits, has been successfully applied to Pengshan Minjiang River Bridge.

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, 简称UHPC)一般是由常规混凝土剔除粗集料,通过掺入0.6mm微细石英砂、抗裂纤维、超微粉体矿物材料及高效减水的超塑化剂等拌合而成<sup>[1-4]</sup>。UHPC内部孔隙率小,结构密度高,是一种具有优异力学性能、超高耐久性的混凝土材料,在桥梁工程、高层建筑、核电以及国防工程中应用前景广泛<sup>[5]</sup>。但UHPC水胶比低、集料体系为0.6mm微细石英砂、胶凝材料用量高、钢纤维掺入量大等特性,导致其粘度较重、早期水化热高、体积收缩大、养护要求高、经济效益差,只能用于对成本不敏感的特殊用途的建筑材料<sup>[6-8]</sup>,与绿色低碳可持续发展道路相悖,制约了UHPC的发展与工程应用。

为寻求UHPC更合理、工程适应性更强、经济效益更高的骨架体系,学者们进行了许多研究。李伯勋<sup>[9]</sup>等分别采用最大粒径为3mm、2.5mm的天然河砂配制UHPC,研究发现天然河砂颗粒圆滑,有利于混凝土流动性,但强度较低。Sahmaran<sup>[10]</sup>等认为正确的使用较粗的细集料(最大粒径2.38mm)制备UHPC可以获得优良的力学性能。此外黄政宇<sup>[11]</sup>等通过掺入最大粒径8mm的粗集料制备UHPC,表明粗集料掺量在小于400kg/m<sup>3</sup>对UHPC抗压强度有增强作用,集料对UHPC的弹性模量有明显的正向影响。Wille K<sup>[12]</sup>等报道报告显示UHPC材料成本(不计钢纤维)分别介于每立方米

约470美元至650美元之间,掺入粗骨料后UHPC每立方米在465美元至500美元之间,使用粗骨料可以获得良好的成本效益。Cwirzen A<sup>[13]</sup>等研究表明在UHPC中掺入碎石后,其收缩率得到了显著的改善。

以上试验研究表明,采用常规粒径(0~4.75mm)机制砂或天然砂取代0.6mm限制粒径石英砂、掺入粗集料等技术措施制备UHPC具有可行性,可大幅降低料源获得难度及生产成本。但常规粒径机制砂或天然砂与粗集料相结合后对UHPC工作性、力学性和体积稳定性的影响机理较复杂,相关研究较少。因此,本文依托彭山岷江大桥,以细集料种类、粗集料掺量为主要参数,设计试验研究了细集料种类、粗集料掺量对UHPC工作性、力学性和体积稳定性的影响,为工程应用提供技术支撑。

## 1 工程概况

彭山区岷江大桥主桥为(37.5+39+55+120+120+55+39+35)m的三塔斜拉桥(见图1)。本桥P4墩为主桥钢拱塔主墩,钢拱塔从下往上分为8个节段(D0~D7),D0为钢混结合段,原设计采用28d抗压强度 $\geq 100\text{MPa}$ 的环氧树脂混凝土进行预应力张拉端密封(见图2)。但试拌后环氧树脂混凝土流动性较差,28d强度小于设计强度,且方量较少仅25m<sup>3</sup>,考虑到材料储存、施工便捷性及经济效益,利用现场既有常规原材料,通过计算确定,拟采用

自然养护类 UHPC 取代环氧树脂混凝土进行浇筑, UHPC 性能设计 要求见表 1。

表 1 UHPC 性能设计要求

Table 1 UHPC performance design requirements

坍落度/mm	扩展度/mm	倒置坍落度筒排空时间/s	T <sub>500</sub> /s	抗压强度/MPa		28d 干燥收缩率	早期抗裂性能等级
				7d	28d		
≥250	≥650	3 ~ 10s	3 ~ 10s	≥80	≥100	≤300 × 10 <sup>-6</sup>	≥L-III

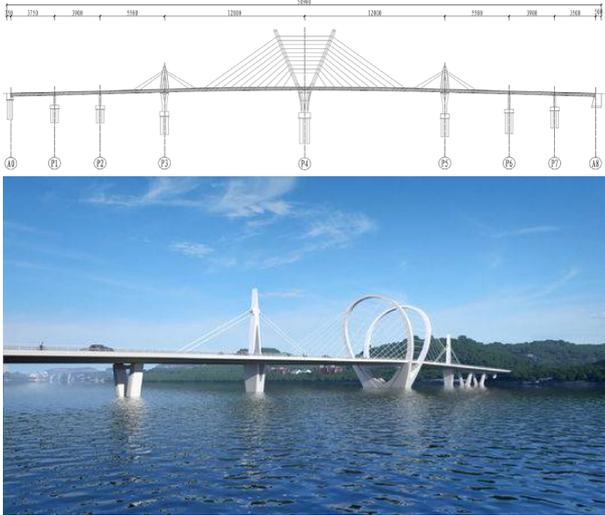


图 1 彭山岷江大桥总体布置图

Fig. 1 General layout of Pengshan Minjiang River Bridge

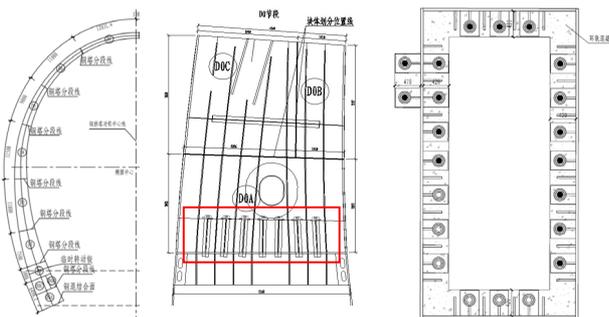


图 2 彭山岷江大桥拱钢塔混钢结合段

Fig. 2 Steel concrete joint section of Steel Arch Tower of Pengshan Minjiang Bridge

## 2 原材料与试验方法

表 2 UHPC 配合比及性能指标

Tab. 2 UHPC mix proportion and performance index

组别	坍落度/mm	扩展度/mm	倒置坍落度筒排空时间/s	T <sub>500</sub> /s	抗压强度/MPa		28d 体积收缩率
					7d	28d	
A0	250	570	8s	7s	121.3	145.7	491 × 10 <sup>-6</sup>

结合基准配合比及表 2 可见, A0 组 UHPC 倒置坍落度筒排空时间、T500 时间较高, 坍落度、扩展度较小, 未达到设计要求, UHPC 粘度较重、流动性较差; A0 组 UHPC 抗压强度达到设计要求, 富余系数较大; 混凝土 28d 体积收缩率未达到设计要求, 且早期强度发展过快, 早期收缩大, 开裂风险高。

表 3 UHPC 细集料类型及性能指标

Tab. 3 Type and performance index of UHPC fine aggregate

组别	细集料类型	细集料粒径	坍落度/mm	扩展度/mm	倒置坍落度筒排空时间/s	T500/s	28d 干燥收缩率 / × 10 <sup>-6</sup>	开裂面积 c/mm <sup>2</sup> · m <sup>-2</sup>	早期抗裂性能等级
A0	石英砂	0 ~ 1.25mm	250	570	8	7	491	616	L-III
A1	天然砂	0 ~ 4.75mm	270	710	6	6	388	438	L-IV
A2	机制砂	0 ~ 4.75mm	260	680	5	5	359	323	L-IV

### 2.1 原材料参数

- 1) 水泥: 采用 P · II 52.5 水泥, 比表面积 390m<sup>2</sup>/kg, 3d/28d 抗折强度 6.2MPa/8.3MPa, 3d/28d 抗压强度 34.1MPa/58.7MPa;
- 2) 粉煤灰微珠: 比表面积 1300m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup>, 需水量比 95%;
- 3) 硅灰: SiO<sub>2</sub> 含量 86.3%, 需水量比 109%, 7d/28d 活性指数 100%/112%;
- 4) 膨胀剂: 钙镁复合型膨胀剂, 水中 7d/空气中 28d 限制膨胀率 0.026/0.012。
- 5) 镀铜钢纤维: 直径 0.20mm, 长度 12mm, 抗拉强度 2700MPa;
- 6) 有机纤维: 直径 0.15mm, 长度 12mm, 拉伸强度 1000MPa;
- 7) 细集料: 石英砂, 粒径 0 ~ 1.25mm; II 区机制砂, 细度模数 3.05; 天然砂, 细度模数 3.12;
- 8) 粗集料: 采用 5 ~ 10mm 连续级配破碎卵石, 母岩强度 204.1MPa, 压碎值 6.7%;
- 9) 外加剂: 苏博特新材料有限公司提供聚羧酸系超塑化剂及减水剂助剂;
- 10) 水: 生活用水;

### 2.2 试验方法

- 1) 混凝土工作性能试验方法: 按 GB/T 50080《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行。
- 2) 混凝土力学性能试验方法: 按 GB/T 50081《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。
- 3) 体积稳定性试验方法: 按《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T 50082) 中的接触法进行。

### 3 试验与结果分析

#### 3.1 基准配合比设计

基于混凝土密实骨架堆积理论<sup>[10]</sup>进行 UHPC 基准配合比设计, 使粉体材料与集料形成致密堆积状态, 得到 UHPC 基准配合比为: 水泥: 微珠: 硅灰: 膨胀剂: 钢纤维: 有机纤维: 石英砂: 水: 外加剂=660: 190: 50: 150: 2: 1070: 190: 35。混凝土基本性能见表 2。

#### 3.2 细集料类型研究

保持 UHPC 配合比参数不变, 以细集料类型为影响因素, 以设计要求的工作性、力学性、体积稳定性及抗裂性为考核指标, 研究细集料类型对 UHPC 各项性能的影响。UHPC 细集料类型及性能指标见表 3。

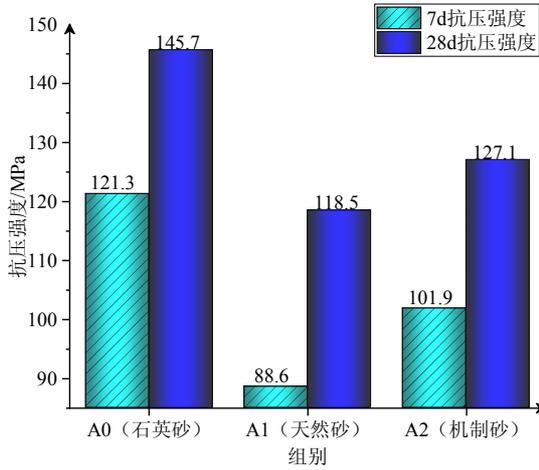


图3 细集料类型对 UHPC 抗压强度影响

Fig. 3 Effect of fine aggregate type on compressive strength of UHPC

①工作性能

分析表3中A0~A2组,采用常规粒径0~4.75mm的天然砂、机制砂取代限制粒径0~1.25mm的石英砂后,UHPC的工作性能改善显著,均能满足设计要求。可能是因为0~1.25mm的石英砂比表面积较大,达到高流动性需要更多的浆体量,导致石英砂UHPC流动性较差、粘度较重。此外UHPC采用机制砂取代天然砂后,

坍落度、扩展度分别从270mm、710mm降低至260mm、680mm,倒置坍落度筒排空时间、T500时间均从6s降低至5s,流动性劣化较小,粘度有一定改善。这是因为天然砂粒形较机制砂圆润光滑,对混凝土流动性有一定改善,但天然砂粗颗粒较机制砂少,比表面积稍大,不利于混凝土粘度。

②力学性能

分析图3可知,A1组天然砂UHPC的7d、28d强度分别较A0组石英砂UHPC降低了27.0%、18.7%,A2组机制砂UHPC的7d、28d强度分别较A1组天然砂UHPC增长了15.0%、7.3%。母岩强度较高的石英砂能够抵抗更高的轴向荷载,使混凝土不易受压破坏。机制砂较天然砂的粒形较粗糙,具备一定棱角,与浆体粘结较好,有利于UHPC强度增长。

③耐久性能

分析表3中A0~A2组,0~4.75mm的天然砂、机制砂UHPC的28d干燥收缩率、早期抗裂性能均较0~1.25mm石英砂有较大改善。这是因为细集料粒径较大,集料体积稳定性优异,形成的致密堆积骨架结构一定程度上抑制了UHPC收缩,改善了UHPC耐久性能。

3.3 粗集料取代量研究

保持UHPC配合比参数不变,以5~10mm破碎卵石取代机制砂的掺量为影响因素,以设计要求的工作性、力学性、体积稳定性及抗裂性为考核指标,研究粗集料掺量对UHPC各项性能的影响。UHPC粗集料取代量及性能见表4。

表4 UHPC粗集料取代量及性能指标

Tab. 4 Substitution amount and performance index of UHPC coarse aggregate

组别	粗集料取代量	坍落度/mm	扩展度/mm	倒置坍落度筒排空时间/s	T500/s	28d干燥收缩率/ $\times 10^{-6}$	开裂面积 $c/mm^2 \cdot m^{-2}$	早期抗裂性能等级
A2	0%	260	680	5	5	359	323	L-IV
B1	10%	265	680	4	5	375	292	L-IV
B2	20%	265	680	4	4	291	220	L-IV
B3	30%	270	700	3	3	258	108	L-V
B4	40%	260	670	4	5	398	282	L-IV

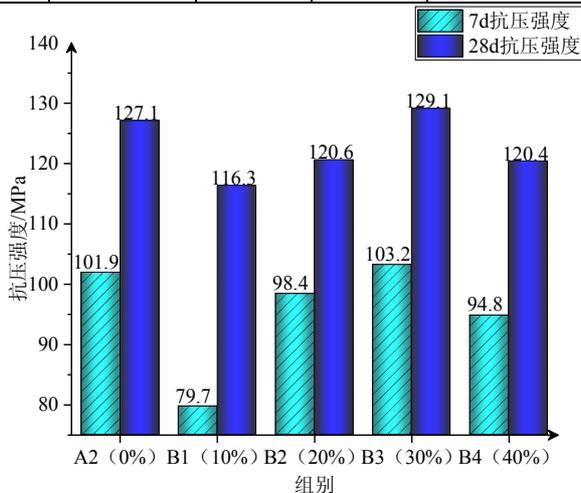


图4 粗集料掺量对 UHPC 抗压强度影响

Fig. 4 Effect of coarse aggregate content on compressive strength of UHPC

①工作性能

分析表4中A2、B1~B3组,UHPC中5~10mm破碎卵石取代机制砂的掺量由0%增加至30%,其坍落度、扩展度分别从

260mm、655mm提高至270mm、700mm,其倒置坍落度筒排空时间、T500时间均从5s降低至3s,混凝土流速、粘度、包裹性、流动性均得到改善。说明UHPC掺入粗集料后,集料比表面积减少,UHPC流速、流动性及粘度改善。



图5 A2组扩展度测试 图6 B3组扩展度测试 图7 B4组纤维分散效果差

Fig. 5 Group A2 expansion test Fig. 6 Group B3 expansion test

Fig. 7 The fiber dispersion effect of B4 group was poor

分析表4中B3、B4组,当粗集料取代量进一步从30%增加至40%,UHPC包裹性、流动性及纤维分散性较差,如图6。说明粗集料取代量过多时,较低的粘度较难分散抗裂纤维,且增加了钢筋纤维间距,影响UHPC的包裹性及流动性。整体趋势上看,掺入粗集料对UHPC工作性能有较大改善,可认为粗集料取代量对混凝土工作性能改善存在峰值,本次试验该峰值为30%。

②力学性能

分析图4中A2、B1组,粗集料取用量从0%增加至10%,UHPC的7d、28d强度分别降低了21.8%、8.5%。粗集料掺量较少,粗集料在水泥浆体中处于悬浮状态,影响钢纤维取向系数及桥接增韧系数,降低UHPC的极限强度。

分析图4中B1~B3组,粗集料取用量从10%增加至30%,UHPC的7d、28d强度逐渐增加,粗集料取用量为30%时UHPC强度达到最高,7d、28d强度分别为103.2Mpa、129.1Mpa,7d、28d强度分别增长了35.8%、15.3%。粗集料掺量增加,使UHPC的集料骨架结构更合理,集料堆积状态更紧密,粗集料之间的机械咬合作用增强,从而增加了UHPC的极限强度。

分析图4中B3、B4组,粗集料取用量从30%增加至40%,UHPC的7d、28d强度显著降低。粗集料掺量过多,大幅降低了UHPC粘度,使抗裂纤维出现团聚现象,不利于抗裂纤维的增强增韧效果,导致UHPC强度降低。

### ③耐久性能

分析表4中A2、B1~B3组,粗集料取用量从0%增加至30%,混凝土28d干燥收缩率、早期抗裂性能逐渐改善,紧密堆积状态的粗细集料骨架结构提供了一定的机械咬合力,同时粗集料具有优异的耐久性能,显著改善了UHPC的体积稳定性,提高了其抗裂性能。

## 4 工程应用

彭山区岷江大桥于2022年3月采用B3组配合比,顺利完成钢拱塔D0节段预应力张拉端浇筑,混凝土工作性能优异,拆模后箱体结构外观优质、表面无裂缝,现场取样混凝土试件强度及超声回弹综合检测法检测强度均满足设计要求。



图8 钢混结合段预应力张拉端密封部位 Fig. 8 Sealing part of prestressed tensioning end of steel-concrete joint section Fig. 9 UHPC pouring



图10 UHPC浇筑温度测试 Fig. 10 UHPC pouring temperature test Fig. 11 UHPC formwork removal appearance

## 5 结论

(1)就本文而言,UHPC采用常规粒径0~4.75mm天然砂、机制砂取代限制粒径0~1.25mm石英砂后,工作性、体积稳定性及早期抗裂性均有显著改善,但不利于力学性,其28d强度分别降低约18.3%、12.4%;

(2)就本文而言,UHPC随着5~10mm破碎卵石取代机制砂的掺量由0%增加至30%,工作性、体积稳定性及抗裂性均有显著

改善,但粗集料取用量在掺量低时对力学性有不利影响,在掺量适宜时可形成更合理的密实骨架结构,提高UHPC极限强度。试验结果表明,粗集料取用量在30%时力学性最优;

(3)掺入粗集料可有效降低UHPC粘度,但不利于抗裂纤维分散性,就本文而言,粗集料取用量在40%时,UHPC抗裂纤维出现明显团聚现象,显著降低抗裂纤维的增强、增韧及抗裂效果。试验数据表明,粗集料取用量不宜超过30%;

(4)采用常规粒径0~4.75mm机制砂、5~10mm破碎卵石取代机制砂的掺量为30%时,可制备出坍落度/扩展度为270mm/700mm、倒置坍落度筒排空时间/T500时间均为3s、7d/28d强度为103.2Mpa/129.1Mpa,28d干燥收缩率为 $258 \times 10^{-6}$ 、早期抗裂等级为L-V的UHPC,其料源易获取且经济效益优异。

### 参考文献:

[1]Pierre Richard and Marcel Cheyrezy. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7) : 1501-1511.

[2]BIRCHALL J D, HOWARD AJ, KENDALL K. Flexural strength and porosity of cements[J]. Nature, 1981, 289 : 388-390.

[3]陈宝春,季韬,黄卿维,吴怀申,丁庆军,詹颖雯.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(03): 1-24.

[4]Dehui Wang et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96 : 368-377.

[5]G. Habert et al. Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 38 : 1-11.

[6]Jun Kil Park and Seung Hun Park and Dong Joo Kim. Effect of matrix shrinkage on rate sensitivity of the pullout response of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94 : 226-237.

[7]陈宝春,李聪,黄伟,安明喆,韩松,丁庆军.超高性能混凝土收缩综述[J].交通运输工程学报,2018,18(01): 13-28.

[8]张云升,张国荣,李司晨.超高性能水泥基复合材料早期自收缩特性研究[J].建筑材料学报,2014,17(01): 19-23.

[9]李伯勋.低成本环保型超高性能混凝土的配制研究.湖南大学,2009.

[10]Sahmaran M, Lachemi M, Hossain K M A, et al. Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites[J]. ACI Materials Journal. 2009, 106(3): 308-316.

[11]黄政宇,李仕根.含粗集料超高性能混凝土力学性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018(3): 47-54.

[12]Wille K, Christopher B. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete[J]. Construction & Building Materials, 2015, 86: 33-43.

[13]Cwirzen A, Penttala V, Vornanen C. Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC[J]. Cement & Concrete Research, 2008, 38(10): 1217-1226.

作者简介:余泽文(1980~),女,硕士,高级工程师,主要从事高性能混凝土技术开发与特大型桥梁工程材料的应用与研究。