

文章编号:1674-599X(2022)03-0019-07

地聚物再生混凝土粗骨料的优化设计

熊志青¹,蔡春声²,彭晖^{1,3}

(1.长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙410114;2.路易斯安那州立大学建筑土木与环境工程系,美国巴吞鲁日70803;
3.长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室,湖南长沙410114)

摘要:为研究粗骨料不同参数对地聚物再生混凝土性能的影响,采用三因素三水平的正交试验设计方法对粗骨料进行优化设计,分析不同因素对粗骨料配比的作用以及不同水平间的差异。探讨粗骨料最大粒径、分形维数及天然骨料对再生骨料的取代粒径这三因素对再生混凝土性能的影响规律和机理。试验结果表明:对于混凝土的流动性与抗压强度,粗骨料粒径的大小始终是影响地聚物再生混凝土性能的关键因素;骨料优化后的混凝土强度基本可达到C50级别,与基准混凝土相比,优化后混凝土的性能得到明显改善;混凝土的抗压强度与粗骨料各因素之间存在着良好的线性关系。

关键词:地聚物再生混凝土;骨料优化;分形维数;取代粒径;抗压强度

中图分类号:O319.56

文献标志码:A

Optimal design of coarse aggregate for geopolymer recycled concrete based on orthogonal test

XIONG Zhiqing¹, CAI Chunsheng², PENG Hui^{1,3}

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge 70803, USA;

3.National-Local Joint Engineering Laboratory of Technology for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract:It is essential for advancing practical engineering applications to investigate the influence of different parameters of coarse aggregates on the performance of geopolymer recycled concrete. A three-factor, three-level orthogonal experimental design method was mainly used to optimize the coarse aggregates' design, the different factors' role in the coarse aggregate ratios and the differences between the different levels were analyzed. The effect of the maximum size of coarse aggregate, the gradation, and the substitution of natural aggregate for recycled aggregate on the performance of recycled concrete was investigated. The results showed that the size of the coarse aggregate is always the critical factor affecting the performance of recycled concrete. The strength of the concrete after aggregate optimization can almost always reach the C50 level, and the performance of the optimized concrete is significantly improved compared with that of the base concrete. There is an excellent linear relationship between the compressive strength of concrete and the factors of coarse aggregate.

Key words: geopolymer recycled concrete; aggregate optimization; fractal dimension; particle size substitution; compressive strength

地聚物再生混凝土是一种以富含硅、铝元素的工业固体废弃物为胶凝材料,将氢氧化钠和水玻璃

混合作为碱激发剂^[1],与再生骨料拌和而成的新型绿色建材。它具有与普通混凝土相似的性能^[2-3],也

收稿日期:2021-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878068)

作者简介:熊志青(1997—),男,长沙理工大学硕士生。

具有地聚物的早期强度高、热稳定性好、耐腐蚀等特点^[4-8]。复合材料的性能取决于其主要成分。在普通混凝土中,骨料占材料总体积的60%~80%,因此,骨料在混凝土体系中发挥着至关重要的作用^[9]。但再生粗骨料是由废弃混凝土破碎而来的,在其生产过程中,由于原生混凝土强度等级不高、含有较多杂质及无固定级配等缺陷,目前生产的再生骨料普遍存在品质不佳、性能不稳定等问题,严重制约了再生混凝土质量提升及工程应用。再生混凝土的性能随再生粗骨料取代率的增大而变差^[10-11]。学者们通过物理强化^[12]和化学强化^[13-15]的方法改善再生粗骨料的品质。这两种方法虽在一定程度上改善了再生粗骨料的性能,但需要投入大量的人力与物力,增加了再生骨料的生产成本。因此,探究一种操作简便、成本低廉的骨料强化方法显得尤为重要。本研究采用三因素三水平的正交试验对粗骨料进行优化设计,分析不同因素对粗骨料配比的影响及同一因素不同水平间的差异,探讨粗骨料最大粒径、分形维数及天然骨料对再生骨料的取代粒

径三因素对再生混凝土性能的影响规律和机理。

1 试验设计

1.1 试验材料

本研究选用的细度模数为2.5的天然河砂作为细骨料。粗骨料是由湖南云中再生科技股份有限公司生产的再生骨料和长沙产的玄武岩碎石,按照不同粒径区间组合而成的,不同粒径区间的再生骨料和天然骨料的表观密度和吸水率见表1。矿渣为湖南华菱钢铁冶炼厂生产的高炉矿渣。偏高岭土为内蒙古超牌公司生产的K-1300型偏高岭土。矿渣和偏高岭土的化学成分分别见表2和表3。碱激发剂溶液由硅酸钠(Na_2SiO_3)溶液与纯度为98%的针片状氢氧化钠(NaOH)配制而成。硅酸钠溶液采用模数为3.25的弱碱性液体硅酸钠,其二氧化硅的质量分数为26.41%,氧化钠的质量分数为8.38%,在20℃下密度为1.38 g/cm³。碱激发剂溶液均在试验前配制并陈化24 h。

表1 骨料表观密度及吸水率

Table 1 Apparent density and water absorption of aggregates

骨料参数	天然骨料		再生骨料	
	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%
4.75~9.5	2 732	5.80	2 624	11.37
9.5~16	2 759	5.70	2 599	10.31
16~19	2 718	5.40	2 651	8.31
19~26.5	—	—	2 612	8.57
26.5~31.5	—	—	2 614	8.97

表2 矿渣化学成分的质量分数

Table 2 Mass fraction of chemical composition of slag

原料种类	质量分数/%						
	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(MgO)	w(SO ₃)	w(TiO ₂)	其他
矿渣	44.1	30.2	13.7	5.6	3.2	1.8	1.4

表3 偏高岭土化学成分的质量分数

Table 2 Mass fraction of chemical composition of metakaolin

原料种类	质量分数/%						
	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(Na ₂ O)	w(K ₂ O)	其他
偏高岭土	54.5	43.0	1.0	0.8	0.1	0.4	0.2

1.2 试验设计方案

本研究采用正交试验方法,探究各试验因素对地聚物再生混凝土流动性及抗压强度的影响。正交设计的优势是在同一试验中可以测试多个试验因素的影响程度,也可以通过较少的试验次数经统计分析后,获得最佳方案。正交试验采用 $L_9(3^4)$ 正交设计表,以粗骨料的最大粒径、分形维数及天然骨料对再生骨料的取代粒径为3个因素,各因素水平数也设计为3,试验因素及水平见表4。

表4 因素及水平表

Table 4 Table of factor and level

水平	因素		
	最大粒径/mm	分形维数	取代粒径/mm
1	19.0	2.3	4.75~9.5
2	26.5	2.5	9.5~16.0
3	31.5	2.7	16.0~19.0

1.3 试件制备

本研究共设计了12组地聚物混凝土配合比试验,粗骨料优化配比设计见表5。胶凝材料中矿渣与偏高岭土的比例为1:1,碱激发剂中硅酸钠、外加水与氢氧化钠的质量比为5.4:1.2:1.0^[16]。每组试验分别制作6个150 mm×150 mm×150 mm的试件。制备试件时,先将胶凝材料搅拌2 min使其混合均匀,再加入一半的碱激发剂并搅拌2 min,然后加入细骨料与剩余的激发剂继续搅拌2 min,最后加入粗骨料并搅拌3 min直至均匀。搅拌结束后,在模具中浇筑成型,并辅以振动使其更加密实,试件浇筑完成后盖上薄膜,静置24 h后脱模,然后将其置于标准养护箱内养护至龄期。

表5 混凝土粗骨料优化配比设计表

Table 5 Design table of concrete coarse aggregate mixture proportions

试件编号	混凝土配比/(kg·m ⁻³)								
	激发剂	粗骨料	粒径/mm					细骨料	胶凝材料
			4.75~9.5	9.5~16	16~19	19~26.5	26.5~31.5		
19-0-0	317	1 102	456(RA)	465(RA)	181(RA)	—	—	620	372
19-2.3-4.75	317	1 102	420(NA)	482(RA)	200(RA)	—	—	620	372
19-2.5-9.5	317	1 102	456(RA)	465(NA)	181(RA)	—	—	620	372
19-2.7-16	317	1 102	494(RA)	445(RA)	163(NA)	—	—	620	372
26.5-0-0	317	1 102	336(RA)	340(RA)	134(RA)	292(RA)	—	620	372
26.5-2.3-9.5	317	1 102	296(RA)	338(NA)	141(RA)	327(RA)	—	620	372
26.5-2.5-16	317	1 102	336(RA)	340(RA)	134(NA)	292(RA)	—	620	372
26.5-2.7-4.75	317	1 102	378(NA)	339(RA)	125(RA)	260(RA)	—	620	372
31.5-0-0	317	1 102	289(RA)	295(RA)	116(RA)	252(RA)	150(RA)	620	372
31.5-2.3-16	317	1 102	249(RA)	286(RA)	119(NA)	277(RA)	171(RA)	620	372
31.5-2.5-4.75	317	1 102	289(NA)	295(RA)	116(RA)	252(RA)	150(RA)	620	372
31.5-2.7-9.5	317	1 102	334(RA)	300(NA)	110(RA)	229(RA)	129(RA)	620	372

注:试件编号19-2.3-4.75表示该试件粗骨料最大粒径为19 mm,分形维数(即骨料级配)为2.3,天然骨料对再生骨料的取代粒径区间为4.75~9.5 mm,19-0-0表示不设置参数的空白对照组。RA表示该粒径区间采用再生骨料,NA表示该粒径区间采用天然骨料。

1.4 试验方法

混凝土搅拌完成后,按照《普通混凝土拌和物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016),先进行坍落度试验;再提起坍落度筒60 s后进行扩展度试验,使用卷尺沿任意相互垂直的两个方向测量自

然流动摊开后混凝土的长度,取两个长度的平均值为实际扩展度。

混凝土养护至一定龄期后,按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)进行立方体抗压试验,试验结果均已按照要求进行了单位换算。

2 试验结果与讨论

2.1 正交试验结果

按照本试验设计的粗骨料优化正交试验方案,将搅拌后的混凝土进行流动性能试验,并对养护至规定龄期的试件进行立方体抗压试验,结果见表6。

由表6可知,各组新拌混凝土的坍落度均已超

过220 mm,可以满足任意高度的混凝土泵送要求。其中,26.5-2.7-4.75组的坍落度最大,达到了244 mm,与坍落度最小的31.5-2.7-9.5组相比,其坍落度增大了10.4%,混凝土的流动性增长幅度较为明显。19-2.7-16组混凝土的7 d和28 d的抗压强度比19-0-0组混凝土的分别提高了30.2%和18.7%。因此,对粗骨料进行优化设计后,混凝土的流动性与抗压强度均得到明显提升。

表6 地聚物再生混凝土性能试验结果

Table 6 Test results of performance of geopolymer recycled concrete

试件编号	影响因素			流动性		抗压强度/MPa	
	最大粒径/mm	分形维数	取代粒径/mm	坍落度/mm	扩展度/cm	7 d	28 d
19-0-0	19.0	—	—	231	55	36.1	45.9
19-2.3-4.75	19.0	2.3	4.75~9.5	237	61	42.5	50.5
19-2.5-9.5	19.0	2.5	9.5~16.0	239	57	41.5	51.9
19-2.7-16	19.0	2.7	16.0~19.0	232	56	47.0	54.5
26.5-0-0	26.5	—	—	237	62	34.4	43.1
26.5-2.3-9.5	26.5	2.3	9.5~16.0	243	66	39.2	49.6
26.5-2.5-16	26.5	2.5	16.0~19.0	238	61	38.7	51.1
26.5-2.7-4.75	26.5	2.7	4.75~9.5	244	60	36.4	49.3
31.5-0-0	31.5	—	—	223	50	32.1	41.5
31.5-2.3-16	31.5	2.3	16.0~19.0	228	54	34.8	46.3
31.5-2.5-4.75	31.5	2.5	4.75~9.5	224	55	38.1	47.1
31.5-2.7-9.5	31.5	2.7	9.5~16.0	221	52	36.6	48.2

为探究各试验因素对混凝土性能的影响,对粗骨料优化试验结果进行方差分析,结果见表7。由表7可知,在不同试验因素的水平变化范围内,按照*F*值的大小,影响新拌混凝土流动性的因素由大到小依次为:最大粒径、分形维数、取代粒径;影响硬化后混凝土抗压强度的因素由大到小依次为:最大粒径、取代粒径、分形维数。分析结果表明:粗骨料粒径的大小是影响混凝土流动性与抗压强度的最主要因素,尤其是混凝土的扩展度与28 d抗压强度的影响。分形维数与取代粒径对混凝土流动性与抗压强度影响的主次顺序不同。

2.2 试验结果讨论

根据粗骨料优化试验结果,绘制各试验因素对新拌混凝土流动性的影响趋势图,如图1所示。从图1可以看出,同一因素对新拌混凝土的坍落度与扩展度的影响趋势基本一致。其中,新拌混凝土的流动性随着骨料粒径的增大呈现先增大后减小的趋势,在粗骨料最大粒径为26.5 mm时达到峰值;新拌混凝土的流动性随着分形维数和取代粒径的增大而降低,但降低程度有限。从图1还可以看出,混凝土流动性

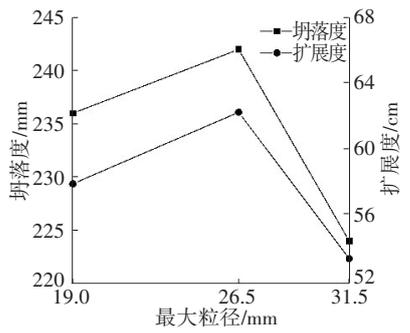
最优的组合是粗骨料粒径为4.75~26.5 mm,分形维数为2.3,天然骨料对再生骨料的取代粒径区间为4.75~9.5 mm。试验结果表明:合理选择粗骨料粒径的大小,能够在一定程度上改善混凝土的流动性,配制出满足施工要求的地聚物再生混凝土。

表7 混凝土性能指标的方差分析结果

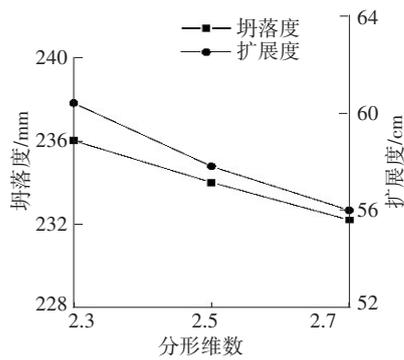
Table 7 The results of variance analysis of concrete performance indicators

性能指标	影响因素 主次顺序	按顺序对应的 <i>F</i> 值			按顺序对应的 显著性
		<i>F</i> ₁	<i>F</i> ₂	<i>F</i> ₃	
坍落度	最大粒径、分形维数、取代粒径	11.159	0.492	0.206	# — —
扩展度	最大粒径、分形维数、取代粒径	18.778	4.778	0.778	* — —
7 d抗压强度	最大粒径、取代粒径、分形维数	9.754	0.925	0.172	# — —
28 d抗压强度	最大粒径、取代粒径、分形维数	26.021	7.848	1.778	* — —

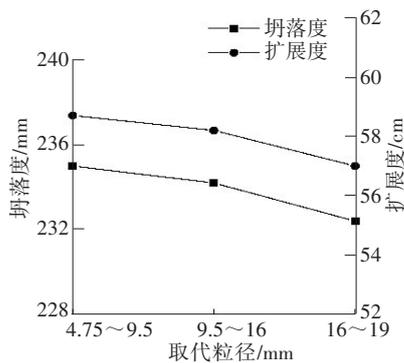
注:*F*值表示方差分析计算出的最终值,用以评估组间差异;*表示影响显著;#表示存在一定影响;—表示影响不显著。



(a) 最大粒径



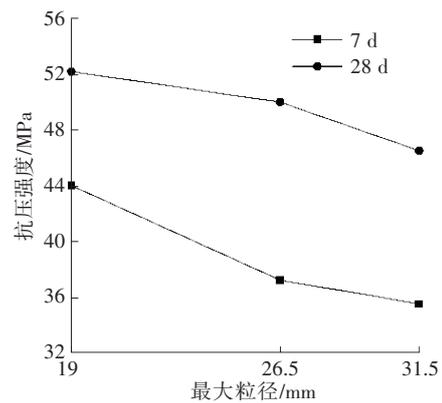
(b) 分形维数



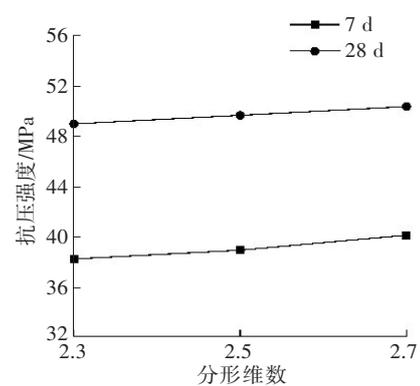
(c) 取代粒径

图1 不同试验参数对混凝土流动性的影响趋势图
Fig.1 The influence of different test parameters on the fluidity of concrete

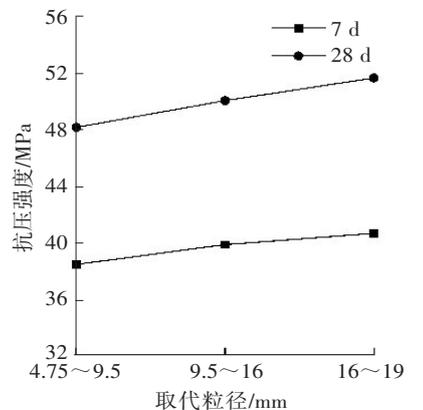
根据粗骨料优化试验结果,各试验因素与新拌混凝土抗压强度的关系,如图2所示。从图2(a)可以看出,混凝土硬化后的抗压强度随着粗骨料粒径的增大而降低,这是因为骨料粒径越大,骨料内部就越有可能存在缺陷,对于再生粗骨料影响也是这样。大粒径骨料在混凝土浇筑时,骨料粒径越大,下沉越快,且大多沉积在底部,导致混凝土内部骨料分布不均匀,混凝土硬化后的强度有所降低^[17]。从图2(b)~2(c)可以看出,混凝土的抗压强度随着粗骨料分形维数和取代粒径的增大有一定程度的提高。其中,分形维数的改变对混凝土强度的影响不大,这是因为不同分形维数所对应粗骨料级配差距较小。天然骨料取代再



(a) 最大粒径



(b) 分形维数



(c) 取代粒径

图2 不同试验参数对混凝土抗压强度的影响趋势图
Fig.2 The influence of different test parameters on the compressive strength of concrete

生骨料的粒径越大,混凝土的抗压强度就越高,这是因为再生骨料的粒径越大,骨料内部存在缺陷的概率也就越大。用天然骨料取代再生骨料,可减少骨料内部的缺陷,且大粒径骨料自身硬度较高,用大粒径的天然骨料取代再生骨料后,其发挥的作用越大。从图2还可以看出,混凝土抗压强度最优的组合是粗骨料粒径为4.75~19 mm,分形维数为2.7,天然骨料对再生骨料取代的粒径区间为16~19 mm。

2.3 分析与讨论

对于再生骨料而言,小粒径骨料破碎更充分,内部缺陷更多,小粒径骨料的性能比大粒径骨料的更差。在混凝土受压过程中,小粒径粗骨料率先被压碎,这也表明大粒径的粗骨料对混凝土强度的提升作用更明显。但当骨料粒径进一步增大时,骨料粒径之间的差异导致其在混凝土内部分布不均,尤其在混凝土受压时,粗骨料不能发挥骨架传力的作用,反而阻碍了混凝土强度的提升。因此,合理地选择骨料粒径的大小有助于提升混凝土的性能。

在地聚物再生混凝土中,由于地聚物具有早期强度高、稳定性好等特点,对维持混凝土强度所发挥的作用更加重要。再生骨料因品质不佳、孔隙较多而成为影响混凝土性能的薄弱因素。在地聚物再生混凝土受压破坏过程中可以发现,混凝土的破坏是由骨料压碎与界面破坏共同引发的,小粒径的再生粗骨料几乎都被压碎^[18]。将天然碎石骨料按照不同粒径区间分别取代相应的再生骨料时,混凝土的抗压强度得到了提升,而且天然骨料取代的粒径越大,混凝土中未被压碎的骨料就越多,这也表明,用于取代再生骨料的天然骨料粒径越大,抵消骨料缺陷的效果就越明显。

粗骨料在每个粒径区间的比例(级配)同样决定着混凝土的性能,在粗骨料总质量不变时,小粒径颗粒的数目越多,骨料的总比表面积越大,大量砂浆更多的包裹、润滑骨料,降低了混凝土的流动性。对混凝土强度而言,粗骨料粒径的大小对其产生的影响却不相同,增大粗骨料的分形维数,可以使大粒径颗粒数目减少,一方面可以降低因粒径不同所带来的差异,另一方面也可以使不同大小的骨料分布更加均匀,从而提升混凝土的强度。

通过上述分析可知,在本试验条件下,从不同方面优化再生粗骨料的配比,可以达到改善新拌混凝土流动性能及硬化混凝土力学性能的目的,粗骨料优化设计对提升混凝土性能具有显著效果。

2.4 抗压强度的经验公式

参考已有的研究方法^[19],对粗骨料优化设计的正交试验结果进行回归分析。假设矿渣—偏高岭土基地聚物再生混凝土的28 d抗压强度与粗骨料最大粒径、分形维数以及取代粒径之间存在某种线性关系。故线性回归模型为:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (1)$$

式中: y 为混凝土的28 d抗压强度,MPa; $a_i(i=0,1,2,3)$ 为回归系数; x_1 为粗骨料最大粒径,mm; x_2 为粗骨料分形维数; x_3 为天然骨料对再生骨料取代的粒径区间最大值,如9.5~16 mm取为16 mm。

将表6的正交试验结果代入线性回归模型(1)中,经过多元线性回归,得到混凝土28 d抗压强度的线性回归模型为:

$$y = 46.96 - 0.4x_1 + 4.67x_2 + 0.15x_3 \quad (2)$$

实测9组28 d抗压强度正交试验,存在的变量数为4个,故自由度为5。当置信度为1%时,查F分布表,得到对应的系数为0.874,而该线性回归模型的相关系数的平方 R^2 为0.890,大于0.874,因此,该线性回归模型拟合程度较高。

3 结论

1) 粗骨料优化后,硬化混凝土28 d抗压强度基本达到C50。正交试验分析表明:粗骨料粒径的大小是影响混凝土流动性与强度的主要因素,其对坍落度与28 d抗压强度的影响最大;受制于骨料不同分形维数下级配差别不大,分形维数对混凝土性能的影响有限;天然骨料按不同粒径区间取代再生骨料,再生混凝土的强度有所改善,且取代粒径越大,性能提升效果越好。

2) 粗骨料粒径为4.75~26.5 mm,分形维数为2.3,取代粒径区间为4.75~9.5 mm时,地聚物再生混凝土具有较优的流动性;粗骨料粒径为4.75~19 mm,分形维数为2.7,取代粒径区间为16~19 mm时,地聚物再生混凝土具有较为优异的强度。因此,对粗骨料进行优化设计能够对再生混凝土的性能有所提高,使其更好地应用到工程实践中。

3) 地聚物再生混凝土的抗压强度与粗骨料最大粒径、分形维数以及取代粒径之间存在良好的线性关系,分析计算得到的线性回归模型拟合度较高。

参考文献(References):

- [1] DAVIDOVITE J. Geopolymer cement to minimize carbon-dioxide greenhouse-warming[J]. Ceramic Transactions, 1993, 37(1): 165-182.
- [2] TABSH S W, ABDELFAH A S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete[J].

- Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1163-1167.
- [3] 孙道胜,王爱国,胡普华.地质聚合物的研究与应用发展前景[J].材料导报,2009,23(7):61-65.(SUN Daosheng, WANG Aiguo, HU Puhua. Research of geopolymers and its applications and development prospects [J]. Materials Review, 2009, 23(7): 61-65. (in Chinese))
- [4] PHOO-NGERNKHAM T, MAEGAWA A, MISHIMA N, et al. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2015, 30(91): 1-8.
- [5] DAVIDOVITS J. Geopolymers [J]. Journal of Thermal Analysis, 1991, 37(8): 1633-1656.
- [6] VAN DEVENTER J S J, PROVIS J L, DUXSON P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement [J]. Minerals Engineering, 2012, 29: 89-104.
- [7] 倪文,王恩,周佳.地质聚合物:21世纪的绿色胶凝材料[J].新材料产业,2003(6):24-28.(NI Wen, WANG En, ZHOU Jia. Geopolymer-green cementitious material in 21st century [J]. Advanced Materials Industry, 2003(6): 24-28. (in Chinese))
- [8] 岳喜兵.废弃硅粉提升水泥土强度与抗硫酸盐侵蚀试验研究[J].公路与汽运,2020(4):66-69.(YUE Xibing. Experimental study on improving cement-soil strength and sulfate attack resistance by waste silica fume [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(4): 66-69. (in Chinese))
- [9] 汪振双. 架构混凝土基础理论研究[D].大连:大连理工大学,2012.(WANG Zhenshuang. Study on basic theory of frame concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [10] LIMBACHIYA M C, LEELAWAT T, DHIR R K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete [J]. Materials and Structures, 2000, 33(9): 574-580.
- [11] 肖建庄.再生混凝土单轴受压应力—应变全曲线试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1445-1449.(XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(11): 1445-1449. (in Chinese))
- [12] 李秋义,李云霞,朱崇绩,等.再生混凝土骨料强化技术研究[J].混凝土,2006(1):74-77.(LI Qiuyi, LI Yunxia, ZHU Chongji, et al. Strengthening technique of recycled concrete aggregate [J]. Concrete, 2006(1): 74-77. (in Chinese))
- [13] 杜婷,李惠强.强化再生骨料混凝土的力学性能研究[J].混凝土与水泥制品,2003(2):19-20.(DU Ting, LI Huiqiang. Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2003(2): 19-20. (in Chinese))
- [14] KOU S C, POON C S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 649-654.
- [15] PURUSHOTHAMAN R, AMIRTHAVALLI R R, KARAN L. Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 27(5): 04014168.
- [16] 李一聪,王世玉,钟卿瑜,等.偏高岭土地聚物配合比对力学性能的影响研究[J].交通科学与工程,2020,36(2):35-39.(LI Yicong, WANG Shiyu, ZHONG Qingyu, et al. Study on the effect of raw material composition on the mechanical properties of metakaolin-based geopolymer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 35-39. (in Chinese))
- [17] 王雨利,管学茂,潘启东,等.粗骨料颗粒级配对混凝土强度的影响[J].焦作工学院学报(自然科学版),2004,23(3):213-215.(WANG Yuli, GUAN Xuemao, PAN Qidong, et al. Influence of grain gradation of coarse aggregates on concrete strength [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2004, 23(3): 213-215. (in Chinese))
- [18] 张志坚.地聚物再生块体混凝土及其柱构件的力学性能试验研究[D].广州:华南理工大学,2018.(ZHANG Zhijian. Experimental study on mechanical performance of geopolymer concrete material and columns with demolished concrete lumps [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [19] 何世钦,王海超.高性能混凝土配合比设计的正交试验研究[J].工业建筑,2003,33(8):8-10,41.(HE Shiqin, WANG Haichao. Orthogonal experimental studies on mix design of high performance concrete [J]. Industrial Construction, 2003, 33(8): 8-10, 41. (in Chinese))

(责任编辑:刘平;校对:李脉;英文编辑:田湘)