doi:10.11988/ckyyb.20180491 2019,36(11):152-156

黏度时变水泥稳定碎石材料抗冻性能试验研究

张 祺,裴向军,张晓超,高会会,冉 耀
(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘 要:为研究水泥稳定碎石材料在高寒山区的路用性能,选用自主研发的黏度时变(SJP)浆材作为水泥稳定碎石材料的胶结材料,采用无侧限抗压强度试验、冻融循环试验研究 SJP 水稳材料的力学性能,并结合电镜扫描(SEM)方法讨论 SJP 水稳材料的抗冻融机理。研究结果表明:SJP 水稳材料较普通水稳材料早期强度增长快、后期强度略高,SJP 助剂可以降低材料冻融后的质量损失率,提高其抗冻系数; SJP 浆液在助剂的作用下,C-S-H 增多与纤维状水化衍生物相结合,黏结力提高使得骨料结合更加紧密,从而有效地减缓水稳材料在冻融条件下损伤的积累,提高了道路基层的耐久性能。研究结果为提高高寒地区早期强度、减少在大温差条件下裂缝产生的路基材料选用提供了参考。

关键词:SJP 浆液;水泥稳定碎石;冻融试验;抗冻性;力学性能
中图分类号:U416.1 **文献标志码**:A
文章编号:1001-5485(2019)11-0152-05 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Mechanical Properties and Frost Resistance of Cement-stabilized Clastic Rock Material with Time-varying Paste Viscosity

ZHANG Qi, PEI Xiang-jun, ZHANG Xiao-chao, GAO Hui-hui, RAN Yao
(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the performance of cement-stabilized clastic rock material used for road in high and cold mountainous region. Self-developed slurry with time-varying viscosity (SJP) was selected as the cementitious material for the cement-stabilized clastic rock material. Unconfined compression test and cyclic freezing-thawing test were performed to examine the mechanical properties of the SJP-stabilized material, and SEM scanning for the frost resistance. Results demonstrate that the SJP-stabilized material has faster early strength growth and higher later strength than ordinary material. SJP reduces the mass loss rate of material after cyclic freezing and thawing, and improves the frost resistance coefficient. With the aid of SJP, the combination between C-S-H and fibrous hydration products strengthens, hence enhancing the bonding force and making the aggregates bond more closely, effectively decelerating the accumulation of damage of water-stable materials under freezing-thawing conditions and improving the durability of road base.

Key words: SJP slurry; cement-stabilized clastic rock; freeze-thaw test; frost resistance; mechanical property

1 研究背景

我国高寒地区分布十分广泛,遍布西北、东北及西南部分高纬度或高海拔地区,区内夜间气温低、冬季时间长、昼夜温差和季节性温差大[1-2]。严酷的自然地理环境不仅给公路施工造成诸多困难,亦使得公路在使用过程中出现诸多病害,造成公路远未达到设计服役寿命便被破坏。在我国高寒地区沥青路面工程中,水泥稳定碎石材料被广泛应用于道路基层中,水稳基层材料强度增长缓慢,施工周期长;同时受到车辆荷载的反复作用,在高寒山区昼夜温差大、风速高、干燥及季节性冻胀等因素影响下,公路路面极易产生干缩裂缝、温缩裂缝,导致路面受冻

收稿日期:2018-05-14;修回日期:2018-07-02
基金项目:交通运输部科技项目(2013318797110);成都市科学技术局项目(2015-HM02-00063-SF)
作者简介:张 祺(1993-),男,江西萍乡人,硕士研究生,主要从事地质灾害与防治、监测预警研究工作。E-mail:774693601@qq.com

融循环作用后其基层强度快速衰减,极易产生沉降或变形等严重病害问题。

目前,针对水泥稳定类基层材料的研究主要集中于强度的影响和抗冻性能的研究。孙兆辉[3]通过正交试验方法优选出了无侧限抗压强度较高、干缩应变小的集料级配组成方案;聚丙烯纤维可以有效改善水泥稳定碎石材料的干缩性能,同时提高其后期强度[4-6];蒋应军等[7]、李峭等[8]分别采用静压法和振动试验法成型试样,通过室内对比试验表明:采用振动压实方法成型的试样集料排列更加紧密,无侧限抗压强度更高;林敏等[9]、宋云连等[10]对超早强水泥稳定基层的力学性能及抗冻性能的研究结果表明:早强剂能有效提高水泥稳定碎石的强度和抗冻性能,但未对其抗冻机理进行分析。

高寒地区水泥稳定碎石基层存在早期强度增长慢,低温(冻融)条件下路面收缩开裂、变形、沉降严重等问题。为缩短道路在高寒地区的施工周期,并提高其服役周期,需要求水泥稳定碎石基层具有较高的早期强度,使得基层材料在较短的养护周期内达到设计强度;同时要求结构具有良好的抗冻性能,减少在大温差气候下裂缝的产生,以便保证道路的使用寿命。故本文通过采用课题组自主研发的黏度时变(SJP)浆液,对比 SJP 水泥稳定碎石材料和普通水泥稳定碎石材料的力学性能和抗冻性能,结合水泥结石体冻融试验后的微观结构特征,对 SJP 水稳材料的冻融损伤机理进行探讨。

2　试验概况

2.1　试验原材料

(1)骨料取自成都市新都镇顺和砂石加工厂,部分细沙、集料各级配用量如表 1 所示。

表 1　颗粒级配取值

Table 1　Particle distributions

级配/mm	[0.075, 0.6]	(0.6, 2.36]	(2.36, 4.75]	(4.75, 9.5]	(9.5, 19]	(19, 26.5]	(26.5, 31.5]
含量/%	11	11	5	21	29	17	6

(2)本次试验选用峨眉山西南水泥有限公司生产的“西南”牌复合硅酸盐水泥(P. C32. 5R),其各项指标如表 2 所示。

表 2　P. C32. 5R 水泥的主要技术指标

Table 2　Main technical indexes of cement P. C32. 5R

项目	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
技术要求	≥45	≤600	≥16	≥32.5	≥3.5	≥5.5
试验结果	158	215	17.3	37.4	5.6	7.6

(3)选用课题组自主研发的 SJP 浆液[11]作为水泥稳定碎石材料(简称水稳材料)的胶结材料,与集料搅拌混合后形成 SJP 水稳材料。

SJP 浆液以水泥浆为基浆,掺加助剂 1#(纤维素类溶剂)、助剂 2#(钙硅质早强剂)、助剂 3#(酰胺类稳定剂),各类材料配合比(质量比)为 $m_{水泥}:m_{水}:m_{助剂1\#}:m_{助剂2\#}:m_{助剂3\#}=100:60:0.33:2:1.5$。按一定顺序加入助剂配合形成不同的浆液。

2.2　试样制备

本次试验把质量比为 3.5%的水泥掺入水泥稳定碎石混合料中,预定含水量分别为 4.5%,4.8%,5.1%,5.4%,按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)[12]中振动压实试验方法进行击实试验,通过试验结果确定最佳含水量和最大干密度分别为 5.1%和 2.29 g/cm^3(忽略助剂掺量的影响)。试样为 Φ150 mm×150 mm 的圆柱体,振动压实,0.5 h 后脱模装入塑料袋内,并在恒温(20±2)℃、相对湿度 95%的保湿条件下养护至 1,3,7,14,28 d 龄期进行无侧限抗压强度试验,且在相应龄期的最后 1 天将试样饱水。冻融循环试验前,将试样放入 20 ℃的水中养护 1 d;分别将普通水稳材料和 SJP 水稳材料试样的一半放入冻融试验装置中,剩余部分试样用于做对比试验。

2.3　试验方法

2.3.1　无侧限抗压强度试验

将试样养护至规定龄期后对其进行单轴无侧限抗压强度试验,每个龄期 6 个试样,结果采用 3 倍均方差方法剔除异常值后取平均值。试验在 CSS-44300 电子万能试验机上进行,单轴无侧限抗压强度试验以 1 mm/min 的剪切速率进行。

2.3.2　冻融循环试验

冻融循环试验依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)[12]进行,选用养护 28 d 后的标准试样,养护龄期的最后 1 天将待测试样从养护箱中取出,饱水 24 h,然后置于低温箱中开始冻结。试样冻结温度从 20 ℃降低到-18 ℃,融化温度为 20 ℃,冻结时间为 16 h,融化时间为 8 h。如此反复,每个冻融循环周期为 24 h。测定冻融 5,10,15,20 次后试样的无侧限抗压强度,并对试样质量的变化及外观拍照进行记录。

3　试验结果分析与讨论

3.1　无侧限抗压强度

通过对不同龄期试样的无侧限抗压强度数据进

行统计分析后,得到各龄期无侧限抗压强度的结果如表 3 所示,抗压强度随龄期的变化曲线见图 1。

表 3 SJP 与普通水稳材料强度对比

Table 3 Comparison of strength between SJP and ordinary cement stabilizing material

龄期/d	水稳层抗压强度/MPa	
	普通水稳材料	SJP 水稳材料
1	3.96	4.36
3	5.78	6.18
7	6.89	7.31
14	7.32	8.15
28	7.82	8.86

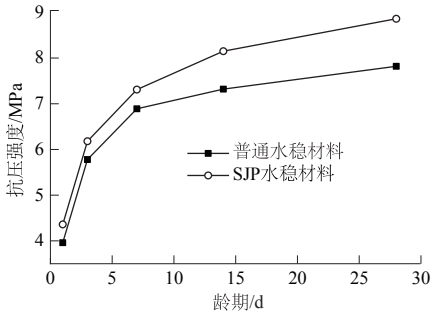


图 1 SJP 与普通水稳材料各龄期抗压强度对比曲线

Fig. 1 Curves of compressive strength of SJP and ordinary cement stabilizing material at different ages

通过表 3 和图 1 可以看出,水稳材料的无侧限抗压强度随龄期的增加呈现早期(7 d 前)强度增长快、后期(7 d 后)强度增长缓的趋势,2 种水稳材料养护龄期 3 d 的无侧限抗压强度均可以达到设计的施工的强度(5~6 MPa)要求。

SJP 水稳材料 3 d 的抗压强度比普通水稳材料强度高 7%左右,28 d 的强度高 13%左右。与普通水稳材料相比,SJP 水稳材料具有前期强度增长较快、后期强度较普通水稳材料高的特点。这主要是因为 SJP 浆液在纤维素类助剂的作用下产生大量的纤维针状水泥水化衍生物,水化产物间相互穿插,充填于水泥颗粒之间,形成的"联带"将水泥颗粒连接更紧密[13-14],有效提高了 SJP 浆液的黏聚力,与级配骨料混合时,将其中的细小颗粒黏结得更加紧密,从而提高了 SJP 水稳材料的早期强度;同时硅钙类助剂的加入使得 C-S-H(Ca-SiO_2-H_2O)凝胶产量增多,C-S-H 与纤维状水泥衍生物相结合使得水泥水化的晶胚加速形成,从而后期强度更高。

3.2 质量损失率

水稳材料经过 n 次冻融循环后试样质量的变化率 W_n(%)可按式(1)计算[9]。

$$W_n = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \times 100\% \quad 。 \tag{1}$$

式中:M_0 为冻融循环前试样的质量;M_n 为 n 次冻融循环后试样的质量。

冻融循环作用使水稳材料的质量发生变化,主要由 2 部分构成:一是试样在水槽中融化时表面或边缘的细骨料会不断剥落使其质量减小;二是试样在反复冻融循环作用下会出现细小的裂缝,融化的过程中水分迁移使得质量增加。实际试验过程中,边缘骨料剥落的质量要远大于水分迁移至裂缝的质量,所以整个冻融试验后,总体质量不断减小。冻融循环试验过程中观测到普通水稳材料试样掉块非常明显,SJP 水稳材料试样表面剥落量相对较少。分别对 1,2,3,4,5,10,15,20 次冻融循环后的质量损失率进行测量并计算,其结果如表 4 所示。

表 4 平均质量损失率

Table 4 Average mass loss rate

材料类型	不同冻融循环次数下试样平均质量损失率/%							
	1	2	3	4	5	10	15	20
普通水稳材料	0.68	1.26	1.51	1.96	2.25	3.45	4.62	5.56
SJP 水稳材料	0.59	1.01	1.16	1.45	1.81	2.85	3.68	4.55

由表 4 可知,随着冻融次数的增加,平均质量损失率呈增大趋势。5 次冻融循环前,普通水稳材料在 2,3,4,5 次冻融循环后的质量损失率比冻融 1 次时分别增长 85.3%,122.1%,188.2%,230.9%;而 SJP 水稳材料分别增长 71.2%,96.6%,145.8%,206.8%。结果表明:普通水稳材料在初期冻融循环时质量损失率累积更快;5 次冻融循环后,其质量损失率均呈线性增长,15 次冻融循环时试样边缘掉块较明显,传统水泥水稳材料质量损失率为 4.62%,SJP 水稳材料质量损失率为 3.68%。从质量损失率来看,SJP 水稳材料冻融后的耐久性能更好。

3.3 冻融后抗压强度与抗冻系数

水稳材料冻融循环后试样的抗冻系数 BDR 可用式(2)计算。

$$\mathrm{BDR} = \frac{\mathrm{RDC}}{\mathrm{RC}} \times 100\% \quad 。 \tag{2}$$

式中:RDC 为冻融后试样的无侧限抗压强度;RC 为未冻试样浸水 24 h 后的无侧限抗压强度。

利用冻融前后试样无侧限抗压强度试验数据,采用 3 倍均方差方法剔除异常值后取平均值,继而采用式(2)计算不同冻融循环次数后试样的抗冻系数,冻融后的抗压强度和冻融系数计算结果如表 5 所示。

强度衰减曲线如图 2(a)所示。从图 2(a)可以看出,随着冻融循环次数的增加,2 种水稳材料抗压强度的变化趋势基本一致。

表 5　冻融后的抗压强度及抗冻系数

Table 5　Compressive strength and frost resistance coefficient after different cycles of freezing and thawing

冻融循环次数	无侧限抗压强度/MPa		抗冻系数 BRD/%	
	普通水稳材料	SJP 水稳材料	普通水稳材料	SJP 水稳材料
0	7.82	8.86	100	100
5	6.80	8.24	87	93
10	5.81	6.71	74	76
15	4.10	5.68	52	64
20	2.89	3.99	37	45

冻融循环次数较少时，其抗压强度缓慢减小，随着冻融循环次数的增加，抗压强度衰减速率增大，这是因为试样在多次冻融循环的作用下，裂纹逐渐扩展并贯通，加速破坏。由于 SJP 水稳材料的后期强度较高，在相同冻融循环次数后，SJP 水稳材料的强度更高。根据不同冻融循环次数后的抗压强度，得到了 SJP 水稳材料强度衰减曲线，曲线拟合度均较高。抗冻系数随冻融次数的变化趋势与其强度衰减趋势基本一致（图 2(b)）。

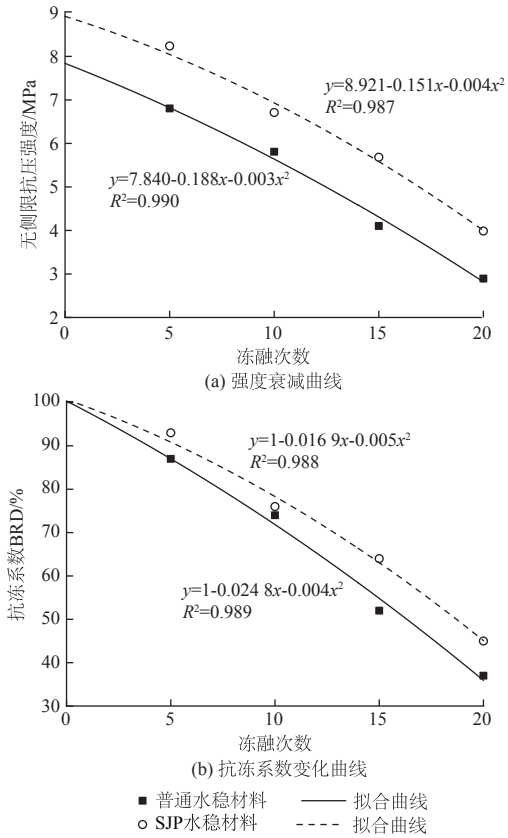


图 2　2 种水稳定材料的强度衰减曲线和抗冻系数变化曲线

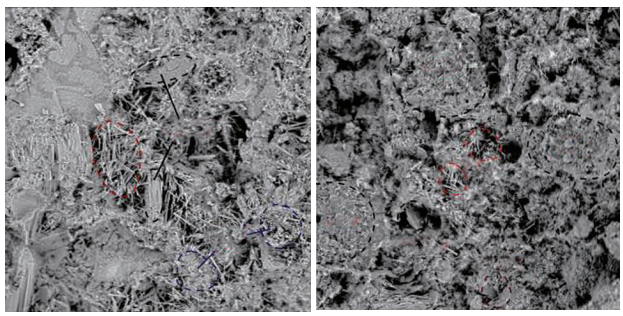
Fig. 2　Curves of strength attenuation and frost resistance coefficient

试验结果表明：5 次和 10 次冻融循环后，SJP 水稳材料的抗压强度均比传统水稳材料的抗压强度分别高 21%和 15%左右，15 次冻融后高 39%左右，20 次冻融后高 38%左右。在相同的冻融循环次数下，SJP 水稳材料的耐冻系数 BDR 值均大于传统水稳材料，5，10，15，20 次冻融循环后，SJP 水稳材料的抗压强度与未冻融的相比分别减小了 7%，21%，37%，55%，而传统水稳材料的抗压强度分别减小 13%，27%，46%，63%，这表明经受冻融循环作用后，SJP 水稳材料的强度衰减速率要比传统水稳层强度衰减速率慢，SJP 助剂的加入提高了水稳材料的抗冻融能力及其在低温条件下的耐久性能。

3.4　冻融损伤机理分析

上述试验结果表明：SJP 水稳材料具有前期强度增长快、后期强度更高、抗冻性较好的特性。为研究其抗冻机理，对普通水泥结石体和 SJP 浆液结石体冻融循环 25 次后的试样进行扫描电镜观测（水泥稳定碎石材料做电镜扫描试验难度大，故测试黏结材料冻融循环后的微观结构特征），如图 3 所示。下面结合冻融后结石体的微观结构特征对 SJP 水稳材料的抗冻机理进行分析与讨论。

水泥的主要矿物成分为硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙及铁铝酸四钙等。水泥的水化产物主要为 C-S-H 凝胶、氢氧化钙（$Ca(OH)_2$）、钙矾石（Aft）、单硫型水化硫铝酸钙（Afm）。其中 C-S-H 凝胶是 $Ca-SiO_2-H_2O$ 系统中存在的三元化合物总称，是硅酸盐水泥的最主要水化产物和水泥基材料强度的主要来源。从图 3(a)可以看出，水泥结石体中 Aft 的含量较高，主要分布在水化的水泥颗粒周围，同时在微观结构中可以看到大量的 $Ca(OH)_2$ 六方晶体与钙矾石交叉排列，致使水泥浆结石体中的 C-S-H 产物之间的胶结度下降，体系中孔隙率增大。对比可知 SJP 结石体的微观结构与普通水泥结石已明显不同，见图 3(b)。



(a) 普通水泥结石体　　(b) SJP浆液结石体

图 3　普通水泥液与 SJP 浆液结石体电镜图

Fig. 3　SEM images of ordinary cement slurry and SJP stone

在 SJP 浆液结石体中水化硅酸钙凝胶 C-S-H 的含量增加，相应的 Aft 钙矾石和 $Ca(OH)_2$ 的含量显著降低，同时 C-S-H 与纤维状水泥衍生物相结

合形成“联带”,使得水化产物之间的胶结更加紧密、浆液结石体的大孔隙减小、微孔隙增多、孔隙率减少,孔隙间距减小、结构更加致密,从而使得 SJP 水稳材料的后期强度更高,并且有效地提高了过渡区界面结构的黏结力,整体上具有更高的抗压强度。在往复的冻融循环过程中,SJP 浆液结石体纤维针状水泥水化衍生物形成了“联带”,能有效地减缓结石体内部冰晶膨胀压的扩散速度。因此随冻融循环次数的增加,SJP 水稳材料的质量损失率和强度衰减速率均要低于普通水稳材料,显著提高了其在冻融条件下的耐久性。

4 结 论

(1)水稳层不同龄期的抗压强度试验表明:SJP 水稳材料 3 d 的抗压强度比普通水稳材料强度高 7%左右,28 d 的强度高 13%左右,与传统材料相比,SJP 水稳材料具有前期强度增长较快、后期强度较普通水稳材料高的特点。

(2)SJP 水稳材料的冻融试验表明:冻融循环作用后,SJP 水稳材料的质量损失率和强度衰减速率均要低于普通水稳材料,SJP 浆液能有效地提高水稳材料在冻融条件下的耐久性能。

(3)通过扫描电镜结果得到:SJP 浆液结石体在纤维素类助剂的作用下,纤维状衍生物形成的“联带”能够有效抵抗冻融作用下毛细孔中冰晶产生膨胀压力;硅钙类助剂增加了 C-S-H 产量,与纤维状水化衍生物相结合,使得骨料结合得更加紧密,能有效减缓水稳材料在冻融条件下的累积损伤。

参考文献:

[1] 洪 亮. 干旱荒漠区水泥稳定基层抗开裂性能研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
[2] 李宏亮,杨三强,洪 亮,等. 新疆干旱荒漠区大温差条件下水稳基层病害特性研究[J]. 中国公路,2013(22):120-122.
[3] 孙兆辉. 水泥稳定碎石基层材料的集料级配优化[J]. 建筑材料学报,2006,9(6):675-680.
[4] 徐建成. 掺聚丙烯纤维的水泥稳定碎石在市政道路中的应用研究[D]. 扬州:扬州大学,2012.
[5] 张金鹏,沈 捷. 聚丙烯纤维水泥稳定碎石干缩性能试验研究[J]. 铁道建筑,2009(2):80-82.
[6] 路光辉. 纤维半刚性材料用于道路基层的试验研究[J]. 路基工程,2010(1):87-88.
[7] 蒋应军,李明杰,张俊杰,等. 水泥稳定碎石强度影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版),2010,30(4):1-7.
[8] 李 峭,蒋应军,任皎龙. 基于振动法的抗疲劳断裂水泥稳定碎石强度标准[J]. 建筑材料学报,2013,16(2):276-283.
[9] 林 敏,韩会勇,董晓坡,等. 早强剂对水泥稳定碎石材料干缩特性试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(6):2000-2005.
[10] 宋云连,李龙生,刘雁军,等. 早强剂对水泥稳定材料抗冻性能的影响[J]. 公路交通科技,2016,33(3):18-23.
[11] 裴向军,黄润秋,李正兵,等. 锦屏一级水电站左岸卸荷拉裂松弛岩体灌浆加固研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(2):285-288.
[12] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2009.
[13] 裴向军,张佳兴,王文臣,等. SJP 注浆浆液水化进程与流变特性研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(2):201-209.
[14] ZHANG Jia-xing, PEI Xiang-ju, WANG Wen-chen, *et al*. Hydration Process and Rheological Properties of Cementitious Grouting Material[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 221-231.

(编辑:姜小兰)

(上接第 151 页)

[7] 汪 冲. 植物纤维混凝土砌块砌体强度理论研究及有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学,2014.
[8] 王兴肖. 植物纤维增强砌块砌体力学性能试验研究与有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学,2010.
[9] 王 沛,柴寿喜,仲晓梅. 麦棉秆加筋土的轻型击实试验与击实土的抗压性能[J]. 长江科学院院报,2012,29(5): 26-31.
[10] 冯凌云,袁 群,马 莹,等. 橡胶混凝土力学性能的试验研究[J]. 长江科学院院报,2015,32(7): 115-118.
[11] 王 伟,周爱兆,冯 丽,等. 再生粗骨料混凝土抗压强度-龄期数学模型[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 633-637.
[12] 赵圆圆. 硫酸钙晶须再生混凝土基本性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
[13] 夏冰华, 刘远才, 许纯梅. GRT 纤维-橡胶粉陶粒混凝土轴心抗压的数学分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2012, 9(9): 41-45.
[14] 陈 兵, 刘 睫. 纤维增强泡沫混凝土性能试验研究[J]. 建筑材料学报,2010, 13(3): 286-290.
[15] 殷 慧,董必钦,丁 铸,等. 混凝土的渗水、吸水特性研究[J]. 低温建筑技术,2009,128(2):4-6.
[16] 贾兴文. 粉煤灰加气混凝土吸水性能研究[J]. 房材与应用,2006,34(4):9-11.
[17] 张磊蕾, 王武祥. 改善泡沫混凝土吸水性能的研究[J]. 建筑技术与应用,2011(6):1-3.

(编辑:赵卫兵)