

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.081



防堵塞型透水制品的制备与性能研究

唐静,赵玉婷,梁美坤,贺灏苇,余意恒,曾路

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400045)

摘要:为改善路面透水性能,聚合物透水混凝土已逐渐广泛用于海绵城市的建设中。试验采用特细砂和环氧树脂制备透水材料,通过控制变量法,分别探讨砂的粒径和聚合物掺量对透水混凝土的抗压强度以及透水系数的影响;并进行了堵塞的模拟实验,基于图像分析透水混凝土的孔径大小,通过观察混凝土的微观结构分析其性能变化规律。实验结果表明,在粒径相同的情况下,随着环氧树脂掺量的增加,环氧树脂透水混凝土的抗压强度逐渐提高,而透水系数逐渐下降;环氧树脂透水混凝土抗压强度会随着较大粒径颗粒复掺含量的增大呈现先增加后下降的趋势,而透水系数呈现不断增大的趋势。当骨料粒径为 0.15~0.3 mm,环氧树脂掺量为骨料质量的 5% 时,制品的平均孔隙率为 14%,平均等效直径为 214 μm ;当粒径为 0.15~0.3 mm 和 0.3~0.6 mm 的骨料复掺比例为 1:1 时,综合效果较好,抗压强度达 41.7 MPa,透水系数为 1.7 mm/s,制品堵塞 4 次循环后,透水衰减系数小于 20%,防堵塞性能良好。

关键词:透水制品;骨料粒径;聚合物;防堵塞;孔隙结构

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)04-0137-06

Study on preparation and performance of anti-blocking pervious products

Tang Jing, Zhao Yuting, Liang Meikun, He Binwei, Yu Yiheng, Zeng Lu

(College of Materials Science & Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to improve the permeable performance of pavement, polymer pervious concrete has been widely used in the construction of sponge city. Polymer experiment, special fine sand and epoxy resin were used to prepare materials required in tests. The influence of particle size and polymer content on the compressive strength and permeable coefficient of permeable concrete were discussed by controlling variable method. At the same time, the simulation experiment of blockage is carried out. Based on the image analysis, the pore of the permeable concrete is analyzed. Finally, the mechanism of its performance change is analyzed by observing the microscopic structure of the concrete. The experimental results show that with the increase of the amount of epoxy resin admixture, the compressive strength of epoxy resin permeable concrete increases and the permeable coefficient decreases. The compressive strength of epoxy resin permeable concrete will increase initially and then decrease with the increase of the dosage of the large

收稿日期:2019-01-09

基金项目:第九届“重庆大学大学生科研训练计划”项目(CQU-SRTP-2017178)

作者简介:唐静(1985-),女,主要从事建筑材料研究,E-mail:460862327@qq.com.

曾路(通信作者),男,副教授,E-mail:zool@foxmail.com.

Received:2019-01-09

Foundation item: Ninth “Scientific Research and Training Program for College Students of Chongqing University”(No. CQU-SRTP-2017178)

Author brief: Tang Jing(1985-), main research interest: building materials, E-mail:460862327@qq.com.

Zeng Lu(corresponding author), associate professor, E-mail:zool@foxmail.com.

particle size aggregate. The aggregate blending ratios with particle sizes of 0.15~0.3 and 0.3~0.6 were 1:1, with a compressive strength of 41.7 MPa and a permeation coefficient of 1.7 mm/s, as the best performance. After the product blocks four cycles, the permeability attenuation coefficient is less than 20%, and the anti-blockage performance is satisfactory and promising.

Keywords: pervious concrete; aggregate size; polymers; anti blocking; porosity structure

现代化城市建设导致城市热量增加,城市的立体化降低了散热作用,大量水泥混凝土、沥青混凝土等不透水硬化路面减弱了水的渗透与蒸发,从而造成一系列城市生态问题,例如热岛效应、城市内涝等。为改善城市生态环境,杨阳等^[1]、连亚明等^[2]提出了海绵城市建设理念。透水性地面是解决生态问题的关键,目前应用最广泛、研究较深入的是大孔隙水泥透水混凝土与沥青透水混凝土,但其大孔隙透水通道易被外界灰尘之类的微小颗粒堵塞,维护成本较高^[3]。聚合物透水混凝土因其较好的装饰效果以及较强的透水性,越来越多地被用于景观、公园、休闲小道等路面铺装领域^[4-5]。

对于聚合物透水混凝土,学者们进行了相关研究。宗晓军等^[6]发现,不掺加聚合物的透水砖在较大的水灰比条件下,试样孔隙容易被水泥浆体堵塞,很难形成较为理想的连通孔隙,无法保证透水效果;Giustozzi^[7]、李子成等^[8]的研究表明,以环氧树脂为胶黏剂的聚合物透水混凝土抗压强度更高;Jimenez等^[9]分析研究了透水路面的渗透性随时间的演化规律;Deo等^[10]研发了一种渗透装置,通过多次加入等量砂粒来模拟堵塞循环实验,直至渗透系数基本不变时,结束试验,研究表明,孔隙尺寸是颗粒尺寸的7倍左右时,透水混凝土的堵塞最严重,而孔隙尺寸随孔隙率增大而增大。

目前,学者们对聚合物透水混凝土的研究并不深入,尚无一个统一评判标准。本文旨在研究骨料粒径及聚合物掺量对透水混凝土力学性能、透水性能及防堵塞性能的影响。

1 试验原材料及试件制备

1.1 原材料

1.1.1 骨料 试验用的骨料为重庆特细砂,选取0.15~0.3 mm和0.3~0.6 mm两种粒径。

1.1.2 聚合物 环氧树脂 E-44(6101)型,环氧当量为210~240 g,产自湖南省岳阳市云溪区。

1.1.3 固化剂 丹宝牌低分子650固化剂,聚酰

胺树脂,浅棕色黏稠液体,密度(40℃)0.97~0.99 g/cm³,胺值200~240 mgKOH/g。

1.1.4 堵塞剂 粒径小于0.075 mm的尘土。

1.2 试件制备

按照表1和表2的配合比进行搅拌,环氧树脂和固化剂比例为2:1,所有试件由JJ-5行星式水泥胶砂搅拌机搅拌而成。先将环氧树脂与固化剂搅拌均匀,再加入特细砂搅拌一定时间,骨料与聚合物混合均匀后,采用人工插捣成型。抗压强度试验试件规格为40 mm×40 mm×40 mm,透水试验试件规格为100 mm×100 mm×20 mm,试件带模经烘箱60℃养护至开始固化后拆模,并继续将试件放入60℃烘箱中热养3 d,然后进行试件性能测试。

表1 单粒级配合比设计

Table 1 Single-grading mix design

实验组编号	环氧树脂掺量/%	骨料级配/mm
A1	3	0.15~0.3
A2	5	0.15~0.3
A3	8	0.15~0.3
B1	3	0.3~0.6
B2	5	0.3~0.6
B3	8	0.3~0.6

表2 双粒级配合比

Table 2 Double-grading mix design

编号	环氧树脂掺量/%	环氧树脂/kg	固化剂/kg	骨料/kg	骨料级配/mm
D1	5	75	37.5	1 500	90%0.15~0.3,10%0.3~0.6
D2	5	75	37.5	1 500	80%0.15~0.3,20%0.3~0.6
D3	5	75	37.5	1 500	70%0.15~0.3,30%0.3~0.6
D4	5	75	37.5	1 500	60%0.15~0.3,40%0.3~0.6
D5	5	75	37.5	1 500	50%0.15~0.3,50%0.3~0.6
D6	5	75	37.5	1 500	40%0.15~0.3,60%0.3~0.6
D7	5	75	37.5	1 500	30%0.15~0.3,70%0.3~0.6
D8	5	75	37.5	1 500	20%0.15~0.3,80%0.3~0.6
D9	5	75	37.5	1 500	10%0.15~0.3,90%0.3~0.6

2 试件性能测试

2.1 抗压强度

截至目前,中国尚未制定出针对环氧树脂胶砂力学强度的相关标准,试验参考《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999),用抗压强度试验机进行测试,试件的受压面积为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 。

2.2 透水系数

目前,中国对透水性混凝土透水系数的测试主要有两种方法:一种是日本混凝土工学协会推荐的大孔混凝土透水性试验方法,即常水头。另一种方法是采用变化水头的方法,即从一定的水头高度开始,以渗流速度 V 表示透水性混凝土的透水系数^[11]。试验采用变水头方法,也即固定水位高度法^[12]。定制的透水仪尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 350\text{ mm}$ 的透明套筒,其两端开口,上下刻度间距离为 250 mm 。首先,用橡皮泥对试件和透水仪一端开口进行密封;然后,向透水仪中加水至超过上刻度,对水面从上刻度下降到下刻度所经过的时间进行计时;最后,由公式 $V=H/\Delta t$ 计算得出,式中, H 为上下刻度间距离, Δt 为水面流经上下刻度的时间。

2.3 堵塞模拟

将 10 g 堵塞剂均匀洒在透水混凝土试件表面,测透水系数。测完后将滞留在试件表面的堵塞剂刮下来,用毛刷将表面清洗干净,并重新测定其透水系数,上述步骤为一个循环。重复加入等量堵塞剂,直至4个循环,停止实验,分别测试每个循环的透水系数。

2.4 孔隙图像分析

采用切片法获取透水混凝土不同截面处的二维平面图像,并结合普通光学数码相机进行剖面图像拍摄^[13]。用Photoshop图像处理软件沿试件边界线裁剪出试件截面区域图像,去除背景图像,进行图片的二值化处理,以达到分析目的。

3 试验结论

3.1 聚合物掺量对聚合物透水混凝土性能的影响

根据表1的配比,由图1和图2可知,在粒径相同的情况下,随着环氧树脂掺量的增加,环氧树脂透水混凝土的抗压强度逐渐提高,而透水系数逐渐下降。其中,B组实验的环氧掺量为5%和8%时,指标达到要求,考虑到试验在强度和透水中相对重视提高透水混凝土面层的强度性能,因此,以抗压强度的增长作为评判较优配比的依据。在粒径为 $0.3\sim$

0.6 mm ,环氧掺量为8%时,即B3组,表现出较佳的综合性能,其抗压强度为 33.5 MPa ,透水系数达 1.2 mm/s 。相同粒径下,相比较5%掺量时的B2组,其透水系数虽然下降了63.6%,但其抗压强度却增长了47.6%。

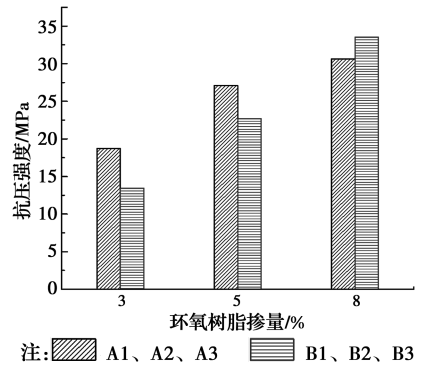


图1 聚合物掺量与抗压强度的关系

Fig. 1 The relationship between polymer dosage and compressive strength

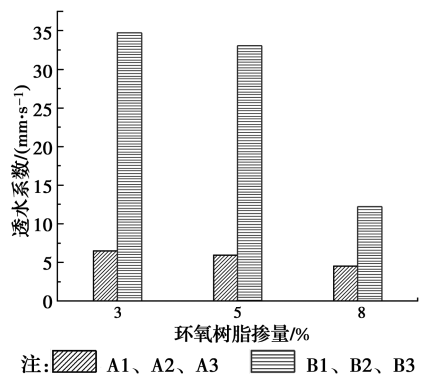


图2 聚合物掺量与透水系数的关系

Fig. 2 The relationship between polymer dosage and permeation coefficient

环氧树脂透水混凝土是在由砂紧密堆积形成的多孔空间骨架中填入环氧树脂而胶结在一起的体系。当聚合物掺量较少时,骨料间渗入的胶黏剂较少,聚合物不足以充分包裹骨料,仅在细砂表面形成一层较薄的胶结层,导致骨料间胶粘性变差,因而抗压强度较低;随着聚合物掺量的增加,骨料间粘接面积增大,并不断填充骨架间的部分空隙,使骨料表面的粘结力增强,混凝土更密实,则抗压强度随之增大。

透水混凝土内部空隙的大小、数量和连通孔隙的数量对透水性能有较大影响。细砂本身的堆积空隙率较大,当环氧掺量较小时,用于填充孔隙的环氧树脂较少,对整体空隙影响较小,混凝土仍保留有较多的空隙,对液体的阻力小,因此透水系数较大;环

氧树脂用量增大后,环氧树脂不仅可以包裹细砂,也开始填充空隙,使得细砂的堆积更加紧密,从而降低总的孔隙率;同时,环氧树脂还会阻断连通孔隙,增大水流通过的阻力,使透水系数测定值下降;另外,环氧树脂过量时,会在重力的作用下沉降到混凝土底部,不仅较大程度地降低了透水性,还增加了生产成本。

3.2 骨料级配对聚合物透水混凝土性能的影响

根据表2的配比,从图3可知,环氧树脂透水混凝土抗压强度随着颗粒较大粒径复掺含量的增大而呈现先增加后下降的趋势,而透水系数呈现不断增大的趋势;同时,在复掺条件下,两种粒径复掺的比例为1:1时,综合效果最佳,其抗压强度为41.72 MPa,透水系数为1.7 mm/s,透水系数相对于D9组的最高透水系数3.2 mm/s,下降了46.9%,而抗压强度相对于D8组的最低抗压强度23.1 MPa,提高了89.2%。

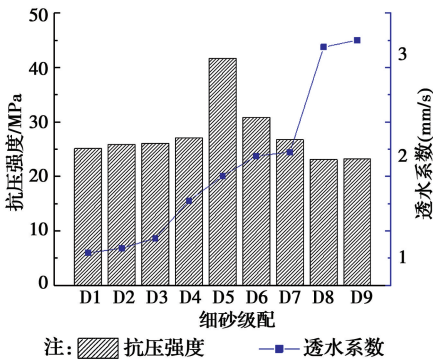


图3 骨料级配对聚合物透水混凝土性能的影响

Fig. 3 Effect of gradation on the performance of polymers pervious concrete

当0.15~0.3 mm粒径的细砂所占比例最高时,骨料总体的比表面积过大,而环氧树脂的掺量固定在5%,不足以完全均匀地包裹在细砂表面,造成细砂间没有良好的粘结。随着细砂占比降低,细砂的比表面积随之减小,在一定的环氧树脂用量下,聚合物对细砂的包裹更完全,提高了环氧树脂与细砂之间的胶结强度,抗压强度由此呈上升趋势。但当比例增大后,其比表面积持续降低,细砂表面的胶黏剂过多,使得整个体系的粘聚性不断下降,压强随之降低。对于透水性能,随着0.3~0.6 mm粒径细砂用量的增大,骨料越不容易紧密堆积,聚合物透水混凝土的多孔空间骨架的空隙率也就越大,透水系数因此越大。

3.3 透水制品的防堵塞性能评估

由图4和图5可知,透水系数随着循环次数的增加明显下降。通过观察A组和B组两种粒径经4次堵塞后的透水损失可发现,掺量为3%时的透水系数损失均最大,A组损失约10%,而B组损失达16%左右。这是由于在掺量较小的情况下,聚合物对骨料的包裹不足,混凝土内部形成的孔隙更多、更大,堵塞剂因而更容易进入孔隙,透水系数损失较大^[14]。另外,对比A组和B组,粒径为0.15~0.3 mm的A组透水系数整体大约损失9%,而粒径为0.3~0.6 mm的B组透水系数平均下降了15%左右,也即粒径较小的透水材料透水损失较小。这是因为堵塞剂大多停留在较小粒径试件的表面,大多没有进入到试件内部成为堵塞物质;而粒径较大时,堵塞剂进入混凝土内部,占据部分孔隙,阻断了透水通道,透水系数因而降低。

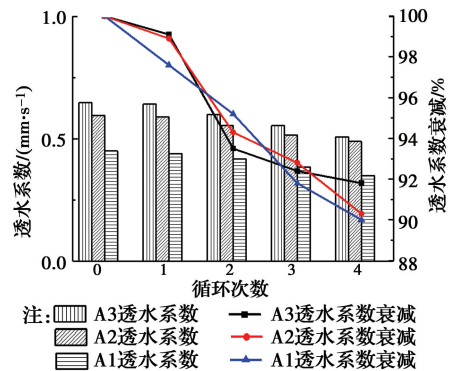


图4 A组透水系数损失

Fig. 4 loss of permeation coefficient from group A

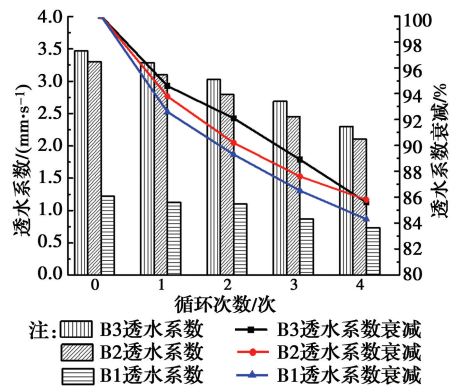


图5 B组透水系数损失

Fig. 5 loss of permeation coefficient from group B

3.4 基于图像分析孔隙尺寸

对透水混凝土的平面孔隙特征及分布特征进行分析研究,采用切片法获取透水混凝土不同截面处的二维平面图像,并结合普通光学数码相机进行剖

面图像拍摄。利用 Photoshop 图像处理软件沿试件边界线裁剪出试件截面区域图像,去除背景图像,也即图像二值化处理,使图像中数据量减少,从而能凸显出目标的轮廓,如图 6~图 8 所示,最终得到图 9,以达到分析目的。

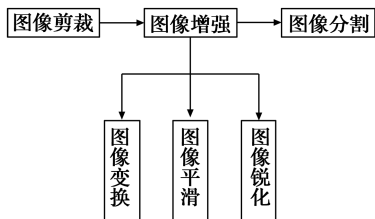


图 6 图像预处理

Fig. 6 Image preprocessing

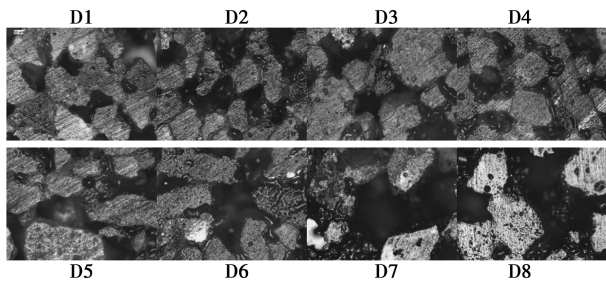


图 7 各级配混凝土试块非成型面电镜图

Fig. 7 Micrograph of non-molded surface of concrete bars from different gradation

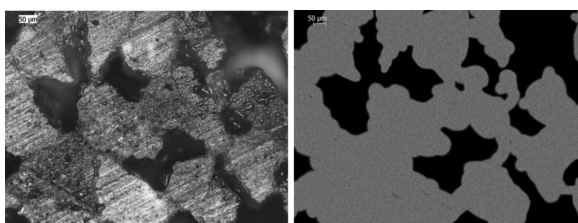


图 8 二值化前后图像对比图

Fig. 8 Image Comparison before and after binaryzation

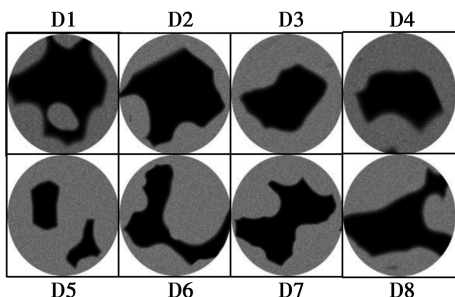


图 9 各级配混凝土孔尺寸电镜图

Fig. 9 Micrograph of concrete pore from different gradation

由图 7 可知,D1~D8 总体上孔隙率逐渐增大,透水通道增多,水流阻力减小,因此,其透水性能越来越好,透水系数呈逐渐增大的趋势^[15]。分析图 9

可知,D1~D5 的孔尺寸逐渐减小,D5~D8 的孔尺寸逐渐增大。一般情况下,抗压强度随着孔径的增大而减小,因而,D1~D8 的抗压强度应呈现先增大后减小的趋势,这也与实验结果相符合。另外,对 A 组的试块通过 Image 图像处理软件可直接提取的孔隙参数见表 3。

表 3 透水混凝土二维平面孔隙统计汇总表

Table 3 General summary of two-dimensional surface porosity statistics of pervious concrete

实验组	孔隙数量/个	平面孔隙率/%	平均等效直径/ μm
A1	62	16.6	228
A2	57	14.0	214
A3	46	10.8	209

由表 3 可知,随着环氧树脂掺量的逐渐增大,A1~A3 组孔隙数量不断减少,平面孔隙率以及平均等效直径也随之逐渐减小,这也是聚合物对孔隙逐渐填充作用的表现。孔隙的特征对混凝土的性能有较大影响,通过比较 A1 和 A3 所研究的切面处平面孔隙表征值和性能指标结果值,孔隙数量相对减少 25.8%,平面孔隙率减小 34.9%,平均等效直径减小 8.3%,其抗压强度从 18.8 MPa 提高到 30.6 MPa,提高了 62.8%,透水系数从 0.6 mm/s 降低到 0.4 mm/s,降低了 33.3%。孔隙数量越少,孔隙率越小,孔隙等效平均直径越小,混凝土的抗压强度随之提高,而透水系数逐渐降低。

4 结论

1) 单粒级 0.3~0.6 mm 特细砂条件下,环氧树脂掺量为 8% 时的综合性能较佳,抗压强度为 33.5 MPa,透水系数为 1.22 mm/s。

2) 双粒级条件下,骨料的掺配存在最佳比例,试验中,环氧树脂掺量为 5%,0.15~0.3 mm 和 0.3~0.6 mm 两种粒径的骨料掺量比例为 1:1 时,综合性能最好。抗压强度为 41.7 MPa,透水系数为 1.71 mm/s。

3) 堵塞 4 次循环后,透水衰减系数小于 20%,防堵塞性能良好。

4) 基于图像分析孔隙尺寸,制品的平均孔隙率为 10.8~16.6%,平均等效直径为 209~228 μm ,透水系数为 0.45~0.65 mm/s,满足功能要求,能实现防堵塞目的。

参考文献:

- [1] 杨阳,林广思.海绵城市概念与思想[J].南方建筑,2015(3):59-64.
YANG Y, LIN G S. A review on sponge city[J]. South Architecture, 2015(3):59-64. (in Chinese)
- [2] 连亚明,徐仁崇,王伟,等.聚合物透水混凝土应用关键技术[J].商品混凝土,2017(4):45-47.
LIAN Y M, XU R C, WANG W, et al. The application key technology of polymers pervious concrete [J]. Ready-Mixed Concret, 2017(4):45-47. (in Chinese)
- [3] 于伟蓉,覃维祖.环氧树脂微孔透水材料的制备和性能初步研究[J].新型建筑材料,2008,35(10):63-66.
YU W R, TAN W Z. Preliminary research on preparation and properties of epoxy resin micro-porous permeable material [J]. New Building Materials, 2008, 35(10):63-66. (in Chinese)
- [4] 张勇林.聚合物透水混凝土抗压强度和透水性能研究[J].福建建材,2016(7):7-9.
ZHANG Y L. Study on compressive strength and permeable properties of polymer permeable concrete [J]. Fujian Building Materials, 2016(7):7-9. (in Chinese)
- [5] 张金花,高建明,翁智财,等.聚合物对透水性混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2006(1):13-15.
ZHANG J H, GAO J M, WENG Z C, et al. Influence of polymer on properties of porous concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2006(1):13-15. (in Chinese)
- [6] 宗晓军,杨杨,项晓睿,等.聚合物对生态透水砖性能影响的研究[J].新型建筑材料,2007,34(8):57-59.
ZONG X J, YANG Y, XIANG X R, et al. Investigation of effect of polymer on properties of ecotype pervious brick [J]. New Building Materials, 2007, 34(8):57-59. (in Chinese)
- [7] GIUSTOZZI F. Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures [J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 502-512.
- [8] 李子成,张爱菊,隋修志,等.透水混凝土界面增强增韧效应研究[J].硅酸盐通报,2017,36(2):747-752.
LI Z C, ZHANG A J, SUI X Z, et al. Reinforcing and toughening performance of interface in pervious concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2):747-752. (in Chinese)
- [9] PÉREZ J F, CALZADA P M. Analysis and evaluation of the performance of porous asphalt: The spanish experience [M]//PÉREZ J F, CALZADA P M. eds. Surface Characteristics of Roadways International Research and Technologies. West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International: 512-512-16. doi: 10.1520/stp23386s.
- [10] DEO O, SUMANASOORIYA M, NEITHALATH N. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(7):741-751.
- [11] 徐仁崇,桂苗苗,龚明子,等.不同成型方法对透水混凝土性能的影响研究[J].混凝土,2011(11):129-131.
XU R C, GUI M M, GONG M Z, et al. Impact of different molding methods on pervious concrete performance [J]. Concrete, 2011(11):129-131. (in Chinese)
- [12] 徐仁崇,桂苗苗,黄洪财,等.透水混凝土抗压强度及透水系数试验方法研究[C]//特种混凝土与沥青混凝土新技术及工程应用,2012:120-121.
XU R C, GUI M M, HUANG H C, et al. Effect of polymer on permeable concrete properties [C]//New Technology And Engineering Application Of Special Concrete & Asphalt Concrete, 2012: 120-121. (in Chinese)
- [13] KAYHANIAN M, ANDERSON D, HARVEY J T, et al. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots [J] Journal of Environmental Management, 2012, 95(1):114-123.
- [14] 崔新壮,张炯,黄丹,等.暴雨作用下透水混凝土路面快速堵塞试验模拟[J].中国公路学报,2016,29(10):1-11,19.
CUI X Z, ZHANG J, HUANG D, et al. Experimental simulation of rapid clogging of pervious concrete pavement under effects of rainstorm [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10):1-11, 19. (in Chinese)
- [15] 霍亮,高建明.透水性混凝土透水系数的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2004(1):44-46.
HUO L, GAO J M. Experimental study on permeability coefficient of pervious concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2004(1):44-46. (in Chinese)