

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.017

排水沥青路面孔隙堵塞及其对侧向排水能力的影响

王元¹, 刘后虎¹, 单景松², 周宇翔¹, 李华¹, 王翔¹

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048; 2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 对于表层排水沥青路面,其排水能力主要通过内部侧向排水实现,但使用过程中的孔隙堵塞会对该类路面的排水能力产生影响,为此通过堵塞试验进行了研究。堵塞试验中分级添加单一级配或混合级配的颗粒物,依次测定堵塞后的渗水系数,以残余渗水系数反映孔隙堵塞对排水能力的影响。结果表明,堵塞试验开始阶段排水沥青混合料的渗水系数衰减速度最快,随着堵塞试验次数的增加,渗水系数衰减速度逐渐变缓。各试件渗水系数的变化规律与堵塞颗粒物的粒径有关,空隙率较小的 PAC13-I 试件容易受到较大粒径(0.3~2.36 mm)颗粒物的堵塞,而空隙率较大的 PAC13-II 试件容易被粒径为 0~0.6 mm 的小颗粒物堵塞。由最终的残余渗水系数可知, PAC13-II 试件的抗堵塞能力显著优于 PAC13-I 试件。

关键词: 排水沥青路面; 侧向排水能力; 抗堵塞能力; 空隙率; 渗水系数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0097-06

Porosity Clogging of Drainage Asphalt Pavement and Its Effect on Lateral Drainage Capacity

WANG Yuan¹, LIU Hou-hu¹, SHAN Jing-song², ZHOU Yu-xiang¹, LI Hua¹,
WANG Xiang¹

(1. PowerChina Road Bridge Group Co. Ltd., Beijing 100048, China; 2. Shandong Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: For surface drainage asphalt pavement, its drainage capacity is mainly achieved through internal lateral drainage. However, porosity clogging has an adverse impact on the drainage capacity of this pavement. For this reason, the effect of porosity clogging on the lateral drainage capacity of drainage surface was explored through clogging test. In the clogging test, single or mixed particles were added in different grades, the seepage coefficient after clogging was measured successively, and the residual seepage coefficient was used to reflect the effect of porosity clogging on the drainage capacity. The seepage coefficient of drainage asphalt mixture had the fastest attenuation velocity at the beginning of the clogging test, and the attenuation velocity of seepage coefficient gradually slowed down with the increase of the clogging test times. The variation of seepage coefficient of each specimen was related to the particle

size of the blockage. PAC13- I specimen with low porosity content was easily blocked by large particles with particle size of 0.3 – 2.36 mm, while PAC13- II specimen with high porosity content was easily blocked by small particles with particle size of 0 – 0.6 mm. According to the final residual seepage coefficient, the anti-clogging ability of the PAC13- II specimen was significantly superior to that of the PAC13- I specimen.

Key words: drainage asphalt pavement; lateral drainage capacity; anti-clogging ability; porosity content; seepage coefficient

排水型沥青路面具有较大的空隙率,一般在15%~25%之间,能有效防止雨天路面水膜的形成,提高路面粗糙度,降低车辆滑移风险,减少水花和水雾,提高行车安全。但多孔隙沥青混合料(PA)在使用过程中不可避免地会被路面灰尘、碎石及轮胎磨损物等堵塞孔隙,严重时会导致其排水性能和降噪效果丧失^[1-2]。

国内外学者针对排水沥青混合料(PAC)的空隙率、排水及抗堵塞性能进行了相关研究,德国Stuttgart大学用电子扫描显微技术对经过人工污染的大孔隙沥青混凝土路面的薄层断面的堵塞现象进行了分析,发现排水沥青路面中的孔隙堵塞共包含4种类型,分别为外部堵塞、脏污黏附堵塞、混合料自污染以及结块^[3];Masad等人对排水沥青路面在自然降雨条件下的孔隙堵塞进行研究,发现在雨水和车轮荷载共同作用下,排水沥青路面下层的空隙率下降更为明显^[4];王宏畅等人对多孔隙沥青混合料的排水及抗堵塞能力的研究发现,空隙率越大其排水能力越强,抗堵塞能力也越强^[5]。由此可见,多孔沥青路面的渗水能力除了与堵塞物性质有关外,与本身的材料级配、孔隙大小及孔隙空间分布特征等都有一定关系^[6-8]。孔隙堵塞是表面孔隙和内部孔隙堵塞共同作用的结果,表面孔隙堵塞是排水路面最容易发生的一类堵塞,也是导致渗透速率快速降低的一种堵塞模式^[9];而内部孔隙堵塞的主要特征为大量的砂颗粒滞留在孔隙内部,主要原因包括过滤作用、沉淀作用和惯性作用^[10]。已有研究大多集中于多孔隙沥青混合料的竖向透水研究,实际降雨过程中,多孔路面在达到孔隙饱和状态后向两侧排水是其最主要的排水方式,因此,笔者对排水型沥青路面的侧向排水能力及抗堵塞性能进行了研究,通过排水型沥青混合料室内堵塞试验,研究了不同孔隙排水型沥青混合料对不同级配颗粒物的抗堵塞能力。

1 研究方案设计

为研究排水路面的孔隙堵塞对其排水性能的影响,堵塞试验准备过程主要包括3部分:其一为道路孔隙堵塞物特性分析,该部分需要从道路表面收集颗粒物,并对其级配进行分析,确定试验用堵塞物颗粒级配;其二为制作室内车辙板试件,调整沥青混合料级配制作两种空隙率水平的车辙板试件,并对其底面进行封闭处理,仅允许水从侧面流出;其三为渗水仪研发测试,为模拟自然降雨条件下路面的排水能力,研究适用于排水路面的无压力渗水仪。准备工作完成后,堵塞试验采用分级施加颗粒物的方法,具体的试验流程如图1所示。

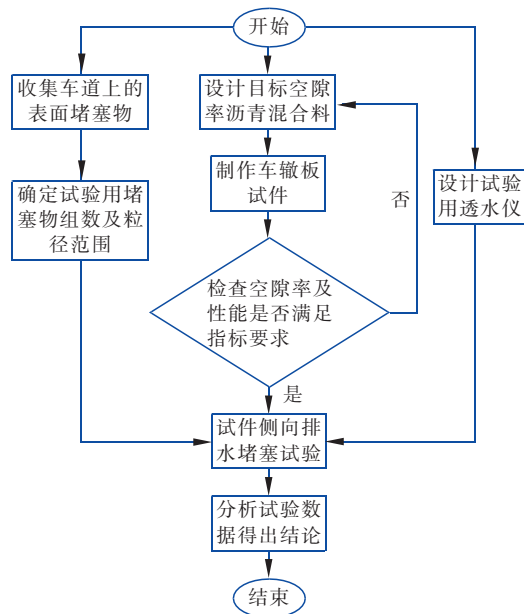


图1 试验流程

Fig. 1 Flow chart of clogging test

2 试验材料及试件制作

2.1 试验用原材料

试验用原材料主要包括基质沥青、高黏度添加剂、纤维和矿料。基质沥青为A级70#道路石油沥

青。采用HVA高黏度添加剂对基质沥青进行改性,高黏度添加剂采用颗粒状添加剂,其性能指标要求如下:外观呈颗粒状、均匀、饱满,单个颗粒质量 $\leq 0.03\text{ g}$,相对密度为 $0.9 \sim 1.0$,熔融指数 $\geq 2.0\text{ g}/10\text{ min}$,灰分 $\leq 2\%$ 。纤维采用聚酯纤维,纤维掺量为沥青混合料质量的 0.1% ,其性能指标要求如下:耐热性即在 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下加热 2 h 后体积、颜色无明显变化,断裂强度 $\geq 500\text{ MPa}$,断裂伸长率 $\geq 15\%$,长度为 $(9 \pm 1)\text{ mm}$,直径为 $(15 \pm 5)\text{ }\mu\text{m}$ 。矿料中粗集料选用山东昌乐产玄武岩,细集料为山东莱阳石灰岩,填料为石灰岩矿粉。室内拌合顺序:集料+HVA+纤维,先干拌,然后加入沥青拌合,最后加入矿粉拌合。为控制试件的空隙率,试验采用两种级配,分别以PAC13-I和PAC13-II表示,级配曲线如图2所示。级配设计过程中, 2.36 mm 和 4.75 mm 的筛孔通过率对排水沥青混合料的空隙率起到重要作用,必须严格控制。

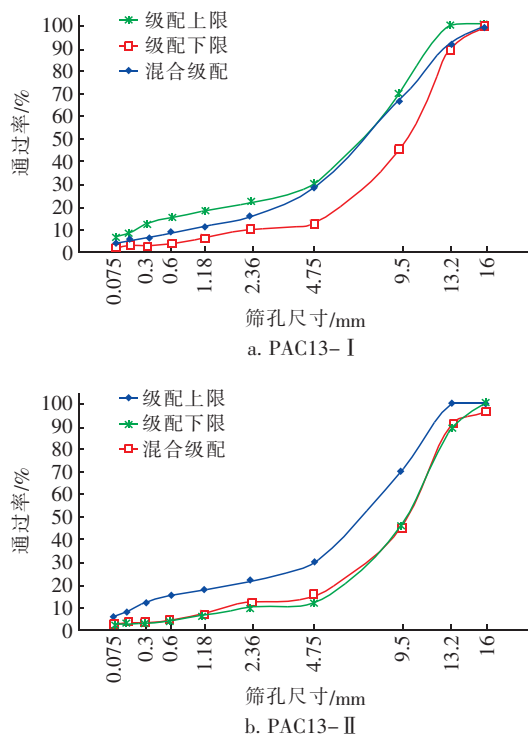


图2 PAC13-I和PAC13-II的级配曲线

Fig.2 Distribution curves of PAC13-I and PAC13-II

2.2 车辙板试件制备

两种级配的排水型沥青混合料各制作7块车辙板试件。为测试沥青混合料空隙率,制作车辙板试件的同时,同步击实成型马歇尔试件。加入高黏剂的改性沥青混合料无法直接通过试验准确测定其理

论最大密度,因此通过计算法确定。对于马歇尔试件,使用饱水法测试其连通孔隙,以此作为同批次成型车辙板试件的空隙率参数。两种级配排水沥青混合料各试件的孔隙参数如下:PAC13-I级配,7块车辙板试件的空隙率分别为 19.46% 、 18.72% 、 19.61% 、 19.37% 、 19.37% 、 18.62% 、 19.19% ,连通空隙率分别为 14.10% 、 13.55% 、 14.20% 、 12.95% 、 13.79% 、 12.61% 、 12.23% ;PAC13-II级配,7块车辙板试件的空隙率分别为 23.44% 、 23.66% 、 23.29% 、 23.44% 、 23.74% 、 23.47% 、 23.42% ,连通空隙率分别为 17.71% 、 18.55% 、 17.57% 、 18.20% 、 18.63% 、 18.00% 、 17.91% 。PAC13-I级配和PAC13-II级配的平均空隙率分别为 19.2% 和 23.5% 。

3 堵塞物调查分析

以青岛市某城市主干道为调查对象,在靠近路缘石约 1 m 范围内,使用强力吸尘器采集两段机动车道和两段非机动车道的路面颗粒物。机动车道的初始收集颗粒物样品主要由粉尘、砂粒以及有机杂质组成。在实验室内对采集到的颗粒物进行处理,剔除有机杂质,然后进行烘干并筛分,得到路表颗粒物级配组成。机动车道表面颗粒物的粒径范围主要集中在 $0.075 \sim 0.15$ 、 $0.15 \sim 0.3$ 、 $0.3 \sim 0.6$ 、 $0.6 \sim 1.18\text{ mm}$,质量占比分别为 13.9% 、 22% 、 27.8% 和 15.8% 。非机动车道表面颗粒物的粒径范围主要分布在 <0.075 、 $0.075 \sim 0.15$ 、 $0.15 \sim 0.3$ 、 $0.3 \sim 0.6$ 、 $0.6 \sim 1.18\text{ mm}$,质量占比分别为 30.1% 、 15.2% 、 14.3% 、 17.9% 、 15.0% 。

根据路面颗粒物调查分析结果,为比较颗粒物粒径对排水路面孔隙堵塞的影响,最终确定6种粒径的单一级配颗粒物作为排水沥青混合料堵塞试验的堵塞物。另外将实际调查得到的机动车道路面颗粒物级配作为混合级配进行堵塞试验,用来跟单一级配颗粒物堵塞试验的结果进行对比。单一级配堵塞物编号为I~VI,粒径分别为 $1.18 \sim 2.36$ 、 $0.6 \sim 1.18$ 、 $0.3 \sim 0.6$ 、 $0.15 \sim 0.3$ 、 $0.075 \sim 0.15$ 、 $<0.075\text{ mm}$,混合级配堵塞物编号为VII。

4 渗水系数测试

为模拟自然降雨状态下路面内部的排水能力,对传统密实路面渗水仪进行了改进,研发了无压式排水路面渗水仪,如图3所示。无压式渗水仪主要包括上部的储水桶、中部的出水管及控制阀门、下部

的封闭桶3个部分。测试时封闭桶底面与路面表面进行紧贴封闭,防止雨水沿底部边缘外流。封闭桶底面以上5 mm处设有穿透孔,一方面保持与大气连通,另一方面控制水面高度,实现自然降雨条件下的路面渗排水能力测试。



图3 路面无压渗水仪

Fig. 3 Pressureless water permeability meter

路面渗水能力的计算方法如下:

$$C_w = \frac{V_1 - V_2}{(t_2 - t_1) \times A} \quad (1)$$

式中: C_w 为路面或试件的渗水系数, cm/s ; V_1 为开始计时的进水量筒液面高度, mL ; V_2 为结束计时进水量筒液面高度, mL ; t_1 为开始计时的时间, s ; t_2 为结束计时的时间, s ; A 为封闭桶内径范围的面积, cm^2 , 本装置底面半径为 8 cm 。

5 堵塞试验

对于表面层采用多孔隙沥青混合料的沥青路面, 沥青层内部排水主要靠沥青表面层的内部侧向排水实现, 本研究主要考察排水沥青混合料的侧向排水性能, 因而需要对车辙板试件底部进行密封处理, 即先在试件底部均匀涂抹防水涂料, 然后在涂料层外部粘贴防渗聚酯布。经过试验测试, 该方法能有效防止雨水从底面渗出。

堵塞试验采用分级添加颗粒物的方法, 将堵塞颗粒物进行分批添加。具体方法如下: ①利用透水仪测定车辙板试件的初始侧向渗水系数, 记为 C_{w0} ; ②将 4 g 堵塞物均匀撒布在渗水测试面积范围内, 应用渗水仪持续测定, 待渗水速度稳定后读数计算渗水系数, 记为 C_{w1} ; ③再将 4 g 堵塞物加入到试件

上表面, 采用步骤②的方法测定渗水系数, 记为 C_{w2} , 以此重复多次, 第 n 次记为 C_{wn} 。

为比较颗粒级配对排水路面孔隙堵塞的影响, 对 PAC13-I 和 PAC13-II 两种空隙率车辙板试件, 按照试件编号 1~7 对应使用编号 I~VII 颗粒物进行堵塞试验。其中, 1~6 号试件采用单一粒径颗粒物进行堵塞试验, 以比较不同粒径颗粒物对孔隙堵塞的影响; 7 号试件使用混合级配颗粒物进行堵塞试验, 混合级配为机动车道实际调查所得的颗粒级配, 目的在于对比单一级配和混合级配对试件孔隙堵塞的影响差异。

6 结果与分析

6.1 PAC13-I 试件的孔隙堵塞情况

PAC13-I 各试件的堵塞试验结果见图 4。

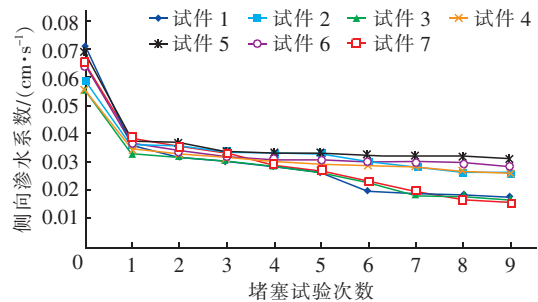


图4 PAC13-I 试件的侧向渗水系数随堵塞试验次数的变化

Fig. 4 Change of lateral permeable coefficient of PAC13-I with clogging test times

在单一级配和混合级配多次堵塞试验条件下, 各试件的侧向渗水系数呈现以下特点: ①第 1 次堵塞试验后试件的渗水系数衰减最快, 之后随着堵塞试验次数的增加, 各试块渗水系数的衰减速度明显变缓, 这说明对于 PAC13-I 型沥青混合料, 试件的初期堵塞对其排水能力影响较大, 这一过程主要是颗粒物堵塞表面连通孔隙, 导致雨水无法顺利进入路面内部, 致使路面的排水能力降低; ②堵塞物为 I ($1.18 \sim 2.36 \text{ mm}$)、III ($0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$)、VIII (混合级配) 时, 多次堵塞试验过程中, 车辙板试件的侧向渗水系数持续降低, 而其他级配的堵塞物, 在第 1 次堵塞试验后试件的渗水系数变化较小。

为进一步分析堵塞试验的渗水系数变化, 将第 n 次堵塞后测得的渗水系数 C_{wn} 与初始渗水系数 C_{w0} 的比值 (C_{wn}/C_{w0}) 定义为残留渗水系数 γ_n , 以此反映渗水系数的降低速率。第 1 次各试件的残留渗水

系数 γ_1 分别为0.50、0.61、0.75、0.71、0.68、0.70、0.59,第9次各试件的残留渗水系数 γ_9 分别为0.24、0.54、0.30、0.47、0.45、0.45、0.35。据此可以发现:① γ_1 代表初期残留渗水能力。初期残留渗水系数由小到大前3位为I(1.18~2.36 mm)、Ⅶ(混合级配)、Ⅱ(0.6~1.18 mm),说明1.18~2.36 mm、0.6~1.18 mm和混合级配这3种颗粒物的堵塞作用对PAC13-I沥青混合料的初期排水能力影响最大。② γ_9 代表多次堵塞试验后试件的残留渗水能力。1号试块的残余渗水系数最小,仅为0.24,说明颗粒物I(1.18~2.36 mm)对试件的长期堵塞影响最严重,其次为颗粒物Ⅲ(0.3~0.6 mm)和混合级配,其残余渗水系数分别为0.30和0.35。

6.2 PAC13-II试件的孔隙堵塞情况

PAC-II各试件的堵塞试验结果如图5所示。第1次各试件的残留渗水系数 γ_1 分别为0.8425、0.7886、0.9167、0.7930、0.7869、0.6318、0.7241;第9次各试件的残留渗水系数 γ_9 分别为0.6719、0.6430、0.3643、0.5504、0.4553、0.3866、0.5527。

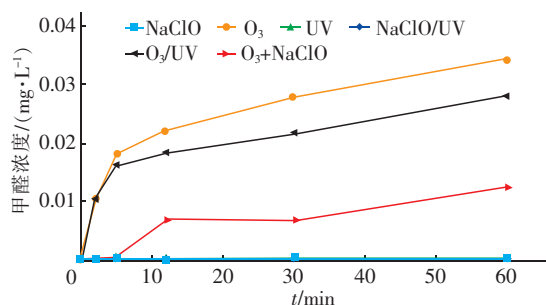


图5 PAC13-II试件的侧向渗水系数随堵塞试验次数的变化

Fig.5 Change of lateral permeable coefficient of PAC13-II with clogging test times

从试验结果可以看出:①除3号试块外,其他试块的渗水系数变化规律类似,均表现为渗水系数随堵塞试验次数的增加而逐次降低,初次堵塞试验后渗水系数降低最快,之后随着堵塞试验次数的增加,渗水系数降低的速率放缓;3号试件在试验开始阶段渗水系数降低较慢,从第3次堵塞试验后,渗水系数开始快速下降。整体来讲,PAC13-II型沥青混合料使用初期的孔隙堵塞致使路面排水能力损失较大,这一点与PAC13-I类似。②初次堵塞试验后,6号试件的残余渗水系数 γ_1 最小,且明显小于其他

试件,说明颗粒物Ⅶ(<0.075 mm)对PAC13-II型沥青混合料的初期堵塞作用最显著。③多次堵塞试验后,残余渗水系数 γ_9 最小的3个试件依次为3号、6号和5号,说明颗粒物Ⅲ(0.3~0.6 mm)、Ⅶ(<0.075 mm)、Ⅴ(0.075~0.15 mm)对PAC13-II型沥青混合料的长期排水能力影响最大。

7 结论

①对于空隙率较小的PAC13-I试件,影响其初期排水能力的主要颗粒物排序为:I(1.18~2.36 mm)>Ⅶ(混合级配)>Ⅱ(0.6~1.18 mm),影响长期排水能力的主要颗粒物排序为:I(1.18~2.36 mm)>Ⅲ(0.3~0.6 mm)>Ⅶ(混合级配),说明影响PAC13-I试件排水能力的主要颗粒物粒径较大,为0.3~2.36 mm。

②对于空隙率较大的PAC13-II试件,影响其初期排水能力的是粒径<0.075 mm的粉状颗粒物,影响其长期排水能力的主要颗粒物排序为:Ⅲ(0.3~0.6 mm)>Ⅶ(<0.075 mm)>Ⅴ(0.075~0.15 mm)。

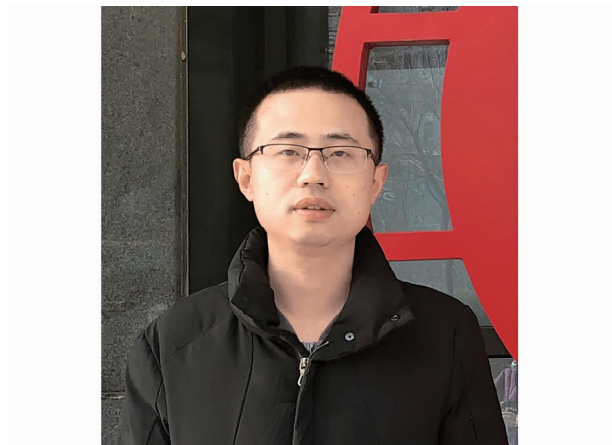
③对比PAC13-I和PAC13-II试件的堵塞试验结果可知,PAC13-I试件的空隙率相对较小,其排水能力对较大颗粒物堵塞比较敏感,受0.3~2.36 mm粒径范围颗粒物的影响较明显;PAC13-II试件的空隙率相对较大,但其排水能力对较小颗粒物堵塞比较敏感,受0~0.6 mm粒径范围颗粒物的影响比较明显。PAC13-II试件的抗堵塞能力明显优于PAC13-I试件,例如混合级配颗粒堵塞试验后,PAC13-II试件的 γ_1 和 γ_9 值分别在0.72和0.55左右,而PAC13-I试件的 γ_1 和 γ_9 值分别为0.59和0.35。

④较大粒径的堵塞物主要聚集于路面,主要堵塞靠近路面的较大尺寸的连通孔隙,较小粒径的堵塞物混杂着黏性颗粒,其集聚作用对孔隙的连通性产生较大影响,且影响深度相对较大。因此,对于排水型路面的养护应首先清理靠近表层的较大堵塞颗粒,然后通过压力冲洗等措施对路面内部的小颗粒聚集物进行清理。

参考文献:

- [1] 王宏畅,黄晓明,廖公云,等. 双层多孔隙沥青路面吸音降噪有限元分析[J]. 环境工程学报,2011,5(12): 2910-2914.

- Wang Hongchang, Huang Xiaoming, Liao Gongyun, *et al.* Finite element analysis for noise-reducing of double-layer porous asphalt pavement [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5 (12): 2910 - 2914 (in Chinese).
- [2] 潘薇, 王宏畅, 茅建校, 等. OGFC 沥青混合料水稳定性性能试验研究[J]. 公路工程, 2013, 38(3): 15 - 17.
Pan Wei, Wang Hongchang, Mao Jianxiao, *et al.* Study on water stability of OGFC asphalt mixes[J]. Highway Engineering, 2013, 38(3): 15 - 17 (in Chinese).
- [3] 刘羽. 大空隙透水沥青路面路用特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
Liu Yu. Research on Road Properties of Porous Drainage Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014 (in Chinese).
- [4] Masad E, Castelblanco A, Birgisson B. Effects of air void size distribution, pore pressure, and bond energy on moisture damage[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2006, 34(1): 15 - 23.
- [5] 王宏畅, 葛辉, 周明刚. 基于常水头渗透试验的 PAC 排水和抗堵塞能力[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(1): 209 - 214.
Wang Hongchang, Ge Hui, Zhou Minggang. Drain and anti-clogging ability of porous asphalt concrete based on constant head permeability experiment [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(1): 209 - 214 (in Chinese).
- [6] 李波, 孟繁宇, 李淑明, 等. 开级配抗滑磨耗层材料堵塞行为和疏通方法[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(4): 69 - 74.
Li Bo, Meng Fanyu, Li Shuming, *et al.* Exploration on blockage and dredging of OGFC material [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2013, 30(4): 69 - 74 (in Chinese).
- [7] 陈健侠, 朱晟泽, 梁彦龙, 等. 多孔沥青路面路用功能性能的衰变特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2016(4): 151 - 156.
Chen Jianxia, Zhu Shengze, Liang Yanlong, *et al.* Study on decay characteristic of road functional performance of porous asphalt pavement [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2016(4): 151 - 156 (in Chinese).
- [8] Arambula E, Masad E, Martin A E. Influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes[J]. J Mater Civil Eng, 2007, 19(8): 655 - 664.
- [9] Siriwardene N R, Deletic A, Fletcher T D. Modeling of sediment transport through stormwater gravel filters over their lifespan[J]. Environ Sci Technol, 2007, 41(23): 8099 - 8103.
- [10] May D C, Hunt J R. Hydrodynamic aspects of particle clogging in porous media [J]. Environ Sci Technol, 2005, 39(2): 577 - 584.



作者简介: 王元 (1982 -), 男, 四川成都人, 硕士, 高级工程师, 主要从事市政、房建和公路工程领域的项目管理工作。

E-mail: 199133622@qq.com

收稿日期: 2019 - 11 - 05

强化水资源监管,

落实最严格水资源管理制度