

透水砖铺装渗透性能衰减与维护恢复效果试验

张 伟^{1,2,3}, 刘亚姣¹, 孙慧超¹, 李俊奇^{1,2,3}

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044;
3. 北京建筑大学北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要:为评估透水砖铺装渗透速率衰减恢复过程与颗粒物粒径特征及维护方式间的定量关系, 设计了 14 个透水砖铺装小试试验装置, 对 ≤ 10 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 45$ 、 $45\sim 75$ 、 $>75\ \mu\text{m}$ 和全级配颗粒物 6 种粒径范围颗粒物, 在 200、400、600、800 mg/L 等 4 种颗粒物质量浓度下进行模拟径流试验, 并采用不维护、清扫、压力水冲洗、真空抽吸、清扫+压力水冲洗、真空抽吸+压力水冲洗 6 种维护方式, 通过 12 次进水-维护模拟试验, 探究透水砖铺装周期性进水和维护条件下渗透性能演变特征及其影响因素。结果表明: 在 200 mg/L 全级配颗粒物入流条件下, 透水砖铺装不进行维护时的使用寿命仅为 3 a 左右, 清扫+压力水冲洗可能是最有效的维护方式; 在 200 mg/L 颗粒物质量浓度并进行压力水冲洗条件下, 相较全级配颗粒物和不大于 $45\ \mu\text{m}$ 的颗粒物, 粒径大于 $45\ \mu\text{m}$ 的颗粒物更容易使透水砖铺装出现渗透性能衰减现象, 经历 3 a 累积降水后, ≤ 10 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 45\ \mu\text{m}$ 颗粒物粒径条件下透水砖铺装的渗透速率可保持在初始渗透速率的 $(42.3\pm 2.8)\%$ 、 $(54.3\pm 5.9)\%$ 和 $(48.4\pm 4.9)\%$; 在采用全级配颗粒物并进行压力水冲洗条件下, 长期运行过程中, 透水砖铺装的渗透性能衰减程度与颗粒物质量浓度间未发现明显相关关系。

关键词:透水砖铺装; 渗透速率; 维护方式; 颗粒物粒径; 颗粒物质量浓度

中图分类号:TV121⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0198-11

Experiment on permeability performance attenuation and maintenance restoration effect of permeable brick pavement//ZHANG Wei^{1,2,3}, LIU Yajiao¹, SUN Huichao¹, LI Junqi^{1,2,3} (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction National Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: To evaluate the quantitative relationship between the recovery process of permeability performance attenuation of permeable brick pavement and the particle size characteristics as well as the maintenance methods, 14 pilot-scale devices were established, six particle size ranges (≤ 10 , $10\sim 20$, $20\sim 45$, $45\sim 75$, $>75\ \mu\text{m}$, and full-gradation) and 4 particle mass concentrations (200, 400, 600, 800 mg/L) were designed. Meanwhile, six maintenance methods (no maintenance, sweeping, pressure washing, vacuum suction, sweeping combined pressure washing, and vacuum suction combined pressure washing) were employed to explore the characteristics of permeability evolution and associated influencing factors under 12 periodic inflow-maintenance conditions. The results show that under the flow condition of 200 mg/L particle mass concentration and full-gradation particles, the service life of permeable brick pavement without maintenance is about 3 a, and sweeping combined pressure washing is the most effective maintenance method. Under the condition of 200 mg/L particle mass concentration and pressure washing, $>45\ \mu\text{m}$ particles are more likely to cause clogging of permeable brick pavement than full-gradation particles and $\leq 45\ \mu\text{m}$ particles. After 3 a of cumulative precipitation, the permeability rate of permeable brick pavement under particle size conditions of ≤ 10 , $10\sim 20$, $20\sim 45\ \mu\text{m}$ can be maintained at $(42.3\pm 2.8)\%$, $(54.3\pm 5.9)\%$, and $(48.4\pm 4.9)\%$ of the initial permeability rate. Under the condition of full-gradation particles and pressure washing, there is no significant correlation between the degree of permeability attenuation of

基金项目:北京市社会科学基金项目(24GLB016);广安市系统化全域推进海绵城市建设课题项目(CG-2024-150 XXH032);北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220108);北京建筑大学培育项目(X23047)

作者简介:张伟(1984—),男,副教授,博士,主要从事海绵城市与内涝治理研究。E-mail:zhangwei@bucea.edu.cn

透水铺装是城市雨水管理和海绵城市建设的关键技术之一^[1]。按照我国现行国家标准 GB/T 38906—2020《低影响开发雨水控制利用 设施分类》中规定,透水铺装又可细分为透水砖、透水沥青、透水混凝土、构造透水铺装等多种形式,在我国海绵城市试点/示范城市建设和全国系统化全域推进海绵城市工作中,透水砖铺装是应用最广的透水铺装技术。然而,大量工程实践和研究表明,由于大气沉降、雨水冲刷、径流污染和铺装材料老化脱落等因素影响,透水砖铺装在运行阶段其渗透性能通常会呈现明显衰减,甚至堵塞的情况^[2-4]。

颗粒物在透水铺装面层和孔隙结构内堆积造成的物理堵塞是引起其渗透下降的主要机制^[5],因此国内外开展了大量有关透水铺装渗透性能衰减和堵塞过程影响因素的研究。García-Haba 等^[6]采用不同粒径范围的地表颗粒物对透水沥青进行了试验研究,发现粒径小于 125 μm 的颗粒物比粒径在 250~500 μm 或 0~1 000 μm 范围的颗粒物对透水沥青造成的渗透速率损失更小。Nichols 等^[7]对水泥透水砖铺装进行堵塞试验发现,粗颗粒物比细颗粒物会更加显著降低透水砖面层的渗透性能。但成智文等^[8]发现粒径在 20~50 μm 范围的颗粒物引起的表面堵塞是陶瓷透水砖堵塞的主要原因。研究结果差异可能与透水铺装的类型、堵塞材料粒径特征等因素有关。此外,颗粒物浓度是影响透水铺装渗透性能衰减过程的另一重要因素。高浓度颗粒物加速颗粒物累积速率,进而渗透速率衰减越快,降低了透水铺装的有效运行年限^[9]。

适时维护是保障透水铺装运行效能并延长其使用寿命的关键措施。目前透水铺装维护方式包括清扫、真空抽吸、压力水冲洗等。Sandoval 等^[10]评估了维护方式对透水混凝土渗透性能的恢复效果,发现由细颗粒物造成的堵塞,高压水冲洗可有效恢复其性能,而砂砾造成的堵塞,真空抽吸则是更为有效的维护方式。此外,维护方式对渗透性能恢复效果也因透水铺装类型差异呈现不同的结果^[11]。已有研究表明透水铺装维护工作可以一定程度恢复其渗透性能,但也有研究表明一些维护方式并未发挥有效作用,甚至还会加重透水铺装的堵塞程度^[12]。Yuan 等^[13]研究发现由大粒径颗粒物造成的透水混凝土堵塞,高压水冲洗使内部颗粒物更加紧实,进而并不能恢复其渗透性能,甚至加剧其堵塞程度。

目前研究报道探索了颗粒物特性、维护方式等

因素对透水铺装渗透性能的影响,但鲜有全面评估透水砖铺装渗透速率衰减恢复过程与颗粒物粒径特征及维护方式间的关系。因此,本文通过透水砖铺装小试试验,以进水-维护周期性模拟试验探究入流颗粒物粒径、颗粒物质量浓度和维护方式对透水砖铺装渗透性能的影响,以期在不同情境下透水砖铺装维护方式的选择提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

研究设计了 14 个结构相同的透水砖铺装小试试验装置(图 1(a)),图 1(b)中铺装编号说明详见表 1。各装置配备相对独立的蠕动泵、水箱和搅拌器等进水组件,从上到下依次为面层、找平层和基层(图 1(c))。面层由两块规格为 200 mm×100 mm×60 mm 的透水砖组成,砖体接缝处、砖与塑料槽接缝处采用透明玻璃胶密封,避免出现“短流”现象。找平层是粒径为 1.3 mm 的砂层,基层是粒径为 6~9 mm 的砾石层,层间铺设规格为 200 g/m² 土工布。装置顶部设有 10 cm 的蓄水区,底部采用直径 30 mm 的 PVC 排水管,符合《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》和 CJJ/T 188—2012《透水砖路面技术规程》的规定和要求。试验过程确保模拟径流中颗粒物完全混合。试验于 2024 年 7—9 月进行,搭建防雨棚进行遮挡,试验期间未受天然降雨影响。

1.2 试验设计

1.2.1 雨水径流配置

以当地年均降水量 571.9 mm 为参考,确定每次试验进水量为 5.75 L,相当于 0.25 a 降水量,进水历时为 1 h。研究采集道路地表颗粒物,经标准筛筛分后,配置模拟径流,根据 Zhang 等^[14-15]的研究,设置 ≤ 10 、10~20、20~45、45~75、 >75 μm 和全级配颗粒物(F)6 种粒径范围颗粒物,全级配颗粒物粒径分布和粒径分段分布分别见图 2 和图 3。

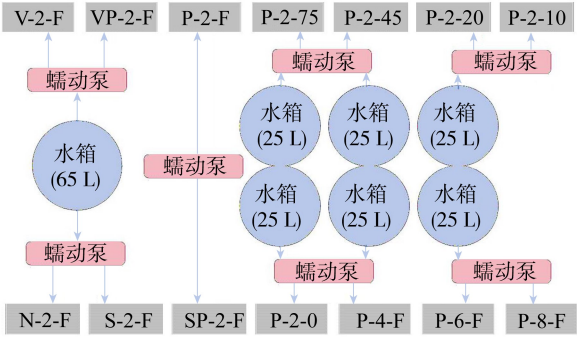
考虑到不同地区道路径流污染水平差异性,参考 Zhang 等^[16-17]研究,确定了 200、400、600、800 mg/L 4 种颗粒物质量浓度。

1.2.2 维护方式确定

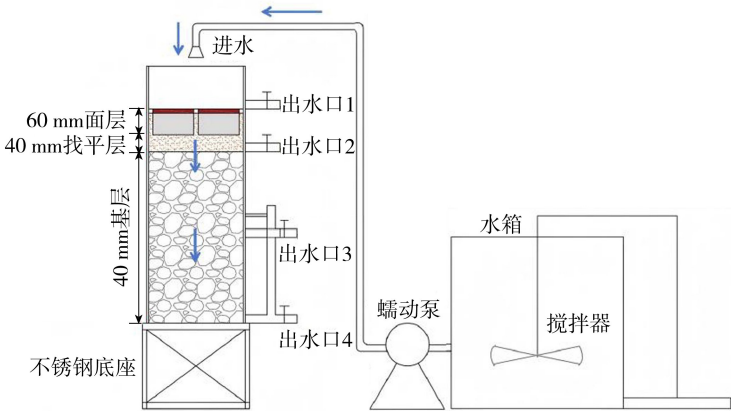
采用 3 种单一维护方式(清扫(S)、压力水冲洗(P)、真空抽吸(V))和 2 种组合维护方式(清扫+压力水冲洗(SP)和真空抽吸+压力水冲洗(VP))^[18-19],并设置不维护(N)作为对照。每次维



(a) 透水砖铺装小试试验装置



(b) 模拟径流试验设计



(c) 进水流程

图 1 试验设计与透水砖铺装结构

Fig. 1 Experimental design and structure of permeable brick pavement

表 1 透水砖铺装试验设计方案

Table 1 Experimental scheme of permeable brick pavement

序号	装置编号	维护方式	颗粒物质量 浓度/(mg/L)	颗粒物粒径 范围/ μm
1	P-2-0	压力水冲洗	200	≤ 10
2	P-2-10	压力水冲洗	200	10-20
3	P-2-20	压力水冲洗	200	20-45
4	P-2-45	压力水冲洗	200	45-75
5	P-2-75	压力水冲洗	200	> 75
6	P-2-F	压力水冲洗	200	全级配
7	P-4-F	压力水冲洗	400	全级配
8	P-6-F	压力水冲洗	600	全级配
9	P-8-F	压力水冲洗	800	全级配
10	V-2-F	真空抽吸	200	全级配
11	VP-2-F	真空抽吸+压力水冲洗	200	全级配
12	S-2-F	清扫	200	全级配
13	SP-2-F	清扫+压力水冲洗	200	全级配
14	N-2-F	不维护	200	全级配

护开始前,透水砖铺装表面均处于干燥状态。手动清扫使用毛刷,真空抽吸使用负压为 20 kPa 的吸尘器,采用这两种方式维护直到铺装表面无明显颗粒累积时停止。压力水冲洗使用压力为 10 MPa 的水枪,冲洗时间为 30 s,维护时使水柱与面层形成 45° 角^[20],水从面层上方出水口 1 排出,由 1 000 mL 取样瓶承接出水。组合维护方式按照两个单一方式先后交替完成,即首先进行清扫或真空抽吸,随后立即进行压力水冲洗。

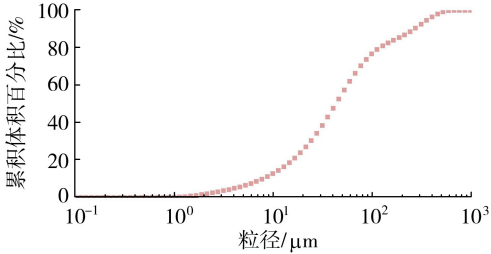


图 2 全级配颗粒物粒径分布

Fig. 2 Cumulative particle size distribution of full-gradation particles

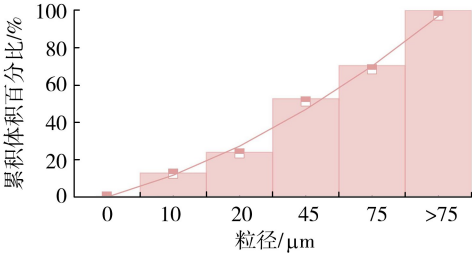


图 3 全级配颗粒物粒径分段分布

Fig. 3 Cumulative particle size fraction distribution of full-gradation particles

进水-维护循环试验采用先进水后维护的方式,即为 1 次循环,共进行 12 次循环试验。试验期间,出水口 2 和出水口 3 始终处于关闭状态,出水口 4 始终处于开启状态,当进行进水试验时,出水口 1 关闭,当进行维护试验时,采用压力水冲洗的装置开启

出水口 1,其他装置出水口 1 关闭(图 1(c))。使用恒水头法(5 cm)测定每次进水和维护后各装置的渗透速率,并对维护清理的颗粒物进行烘干后称重。14 个透水砖铺装装置编号形式为“维护方式-颗粒物质量浓度-颗粒物粒径”,具体试验设计见图 1(b)和表 1。

1.3 数据处理

采用恒水头法测定渗透速率,计算公式为

$$P = 10Q_n/t_nS \tag{1}$$

式中: P 为渗透速率,mm/min; Q_n 为间隔时间内渗透的水量,mL; t_n 为渗透的间隔时间,min; S 为有效渗透面积,cm²。

采用渗透比和渗透比变量表示透水砖铺装渗透性能变化,计算公式为

$$R = P_n/P_0 \times 100\% \tag{2}$$

$$\Delta R = R_a - R_b \tag{3}$$

式中: R 为渗透比,%; ΔR 为渗透比变化量,%; P_n 为某次测定的渗透速率,mm/min; P_0 为初始渗透率,mm/min; R_a 为维护后渗透比,%; R_b 为维护前渗透比,%。

使用 IBM SPSS Statistics 27.0.1 对装置间 ΔR 和维护清理颗粒物质量进行单因素方差分析, $p < 0.05$ 表示具有统计学意义,对颗粒物质量浓度和渗透比进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 维护方式的影响

12 次进水-维护循环试验中,不同维护方式下透水砖铺装的渗透比和渗透比变量见图 4。由图 4 可见,装置 N-2-F 的渗透比在试验过程中呈现逐渐下降趋势,12 次试验后其渗透比仅为 9.6%,在经历约 3 a 累积降水后,透水砖铺装渗透性能已下降一个数量级,说明透水砖铺装在不进行维护的情况下,其运行 3 a 后基本失去渗透能力。

装置 S-2-F、P-2-F、V-2-F、VP-2-F 和 SP-2-F 的渗透比均呈现出进水后下降并维护后变化的周期性特征。其中,装置 S-2-F 的渗透比在 6 次循环试验后接近下降一个数量级,在 7~12 次循环试验后稳定在(6.1±2.6)%。装置 P-2-F、V-2-F、VP-2-F 和 SP-2-F 的渗透比于第 9~12 次循环试验基本趋于稳定,分别为(13.3±4.3)%、(28.6±4.7)%、(37.3±3.2)%和(45.0±2.8)%。从试验数据来看,5 种维护方式对透水砖铺装渗透性能的影响呈现显著不同的结果。采用传统的人工清扫方式对透水砖铺装进行维护,并不能有效地恢复透水砖铺装的渗透性能,反而加剧了渗透性能衰减。但是采用压力水冲洗、

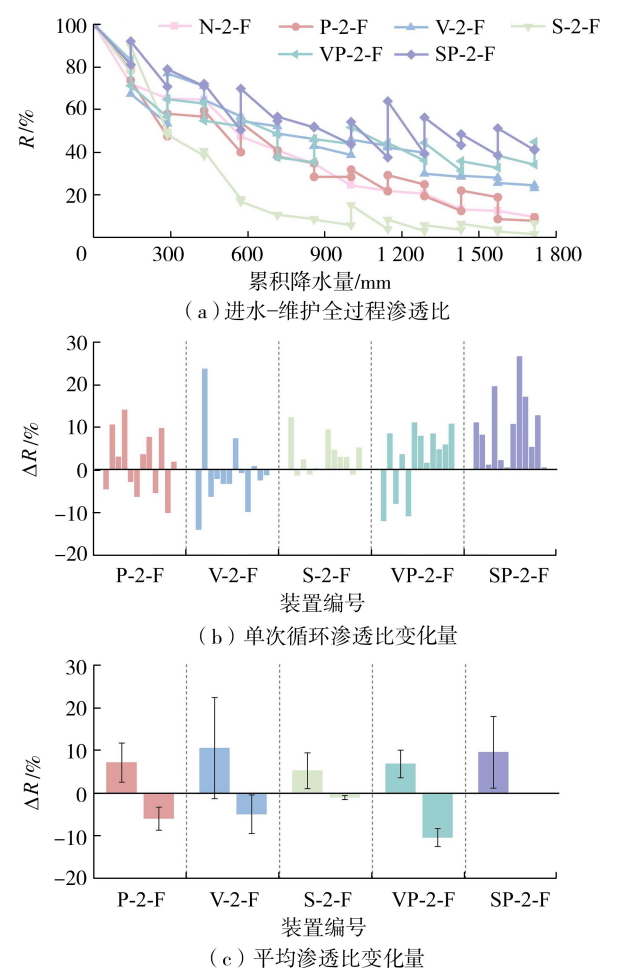


图 4 不同维护方式下透水砖铺装的渗透比和渗透比变化量

Fig. 4 Changes of R and ΔR of permeable brick pavement under different maintenance methods

真空抽吸和两种组合维护方式时,透水砖铺装的渗透性能却呈现不同程度的恢复。可以清楚地看到,仅对比两种单一维护方式,真空抽吸对透水砖铺装渗透性能的恢复效果明显优于压力水冲洗方式;对比两种组合维护方式对透水砖铺装渗透性能的恢复效果,也呈现显著差异($p < 0.05$)。值得注意的是,无论哪种组合维护方式,均优于单一维护方式的效果,这与谢西等^[21]的研究结果相似。

图 4(a)主要展示了 3 a 累积降水下 5 种维护方式对透水砖铺装渗透性能影响的差异,并不能很好地体现各次循环试验中透水砖铺装渗透性能的差异。图 4(b)给出每次循环试验后,其渗透性能呈现恢复或加剧衰减的结果。在 12 次循环试验中,装置 SP-2-F 的 ΔR 未出现负值,即清扫+压力水冲洗方式对透水砖铺装渗透性能的恢复具有较好效果,尽管每次恢复效果有所差异,但是最终呈现的渗透比稳定在较高水平。其他 4 个装置在 12 次循环试验中既有恢复渗透性能的情况,也出现了加剧渗透性能衰减的现象,值得注意的是,在整个循环试验过程

中,其 ΔR 并未呈现明确规律性变化,但在渗透性能恢复或加剧衰减上存在差异。

装置 S-2-F、P-2-F、V-2-F 和 VP-2-F, 单次循环试验中渗透性能恢复比例最高值出现在 V-2-F 装置, 主要是因为真空抽吸维护方式作用深度大^[22], 对颗粒物的去除更为有效, 但装置 V-2-F 各次循环试验的 ΔR 呈现明显的差异, 主要是由于实际维护过程中很难保证对透水砖每个位置达到同样的抽吸清理效果。另外, 装置 V-2-F 虽然在单次循环试验中出现了峰值, 但在 12 次循环试验中, 仅有 25.0% 的循环试验呈现渗透性能恢复的效果, 也从另一侧面证实真空抽吸维护作业要求对维护效果影响显著。

在 12 次循环试验中, 装置 P-2-F 有 58.3% 的循环试验起到了恢复透水砖铺装渗透性能的效果, 主要是由于压力水冲洗在高压水流冲刷作用下, 可轻易破坏颗粒物间的紧密结构, 使颗粒物冲刷出来或随水流向下移动^[23-24], 从而恢复渗透性能; 而出现渗透性能衰减加剧的现象是由于大粒径颗粒物物理堵塞, 在压力水冲洗作用下, 颗粒物在透水砖内部更加牢固, 从而影响了其渗透性能恢复^[13]。装置 P-2-F 单次循环试验渗透性能最高恢复比例为 13.9%, 在数值上略大于单次循环试验加剧渗透性能衰减最高程度 (ΔR 为 -10.2%), 并且压力水冲洗实现渗透性能恢复的试验场次比例较高, 意味着在本试验中压力水冲洗对透水砖铺装渗透性能具有一定的恢复效果, 12 次循环试验后期稳定渗透比为 $(13.3 \pm 4.3)\%$ 也说明了这一点。

在 12 次循环试验中, 装置 S-2-F 有 33.3% 的循环试验加剧了透水砖铺装渗透性能的衰减, 且单次循环试验的衰减程度均较低, ΔR 均在 -1.0% 左右。然而该装置的渗透比却比不进行维护的装置 N-2-F 更早地下降一个数量级, 原因是人工清扫可对透水砖表面大颗粒物实现清理, 但会使部分较小的颗粒物进入透水砖内部^[25], 且每次循环试验中进水后其渗透性能下降程度较大, 因此人工清扫方式可能并不是透水砖铺装适用的维护方式, 文韬等^[26] 的研究也印证了这一点。

在 12 次循环试验中, 装置 VP-2-F 有 3 次循环试验加剧了透水砖铺装渗透性能的衰减, 且单次循环试验的衰减程度均较高, ΔR 均在 -10.0% 左右, 然而这几次加剧衰减的循环试验均发生在前 5 次循环试验中, 之后 6~12 次循环试验中装置 VP-2-F 渗透性能均能保持一定的恢复效果, 且最后的稳定渗透比保持较高的水平, 说明在长期试验中, 真空抽吸+压力水冲洗方式对透水砖铺装可起到较好的渗

透性能恢复效果。

图 4(b) 中所示每次循环试验结果, 在实际工程中会受到多种因素的影响, 因此还需结合这 12 次循环试验中渗透性能恢复或加剧衰减效果的平均水平对这 5 种维护方式效果进行评价 (图 4(c))。从渗透性能恢复角度来看, 装置 SP-2-F 的平均 ΔR 为 $(9.5 \pm 8.3)\%$, 再次表明了清扫+压力水冲洗方式对透水砖铺装渗透性能恢复具有较好效果; 其他 4 个装置中, 装置 V-2-F 的平均 ΔR 为 $(10.5 \pm 11.8)\%$, 说明真空抽吸维护方式的恢复效果很好, 但标准差大说明其效果并不稳定, 另外 3 个装置恢复效果则无显著性差异 ($p > 0.05$)。从渗透性能加剧衰减角度来看, 装置 S-2-F 的平均 ΔR 为 $(-1.0 \pm 0.5)\%$, 也就是说清扫方式对渗透性能加剧衰减程度较小, 且变化较为稳定, 相比而言, 装置 VP-2-F 的加剧衰减程度最大, 平均 ΔR 为 $(-10.3 \pm 2.1)\%$, 尽管该装置是组合维护方式, 但并没有呈现出较好的维护效果。装置 P-2-F 和 V-2-F 的结果无显著性差异 ($p > 0.05$)。

从图 4 还可知, 组合维护方式和单一维护方式对透水砖铺装渗透性能的影响并不是简单的叠加关系。12 次循环试验中, 5 种维护方式清理的颗粒物平均质量见图 5。由图 5 可见不同维护方式对颗粒物的清理效果存在明显差异。其中, 真空抽吸清理的颗粒物质量明显小于其他 4 种维护方式 ($p < 0.05$), 这主要与维护作业原理有关。从清理的颗粒物质量上看, 单一维护方式和组合维护方式之间也并未体现明确的联系, 不同维护方式的相互作用机制以及对透水砖铺装的影响尚需进一步的研究探索。

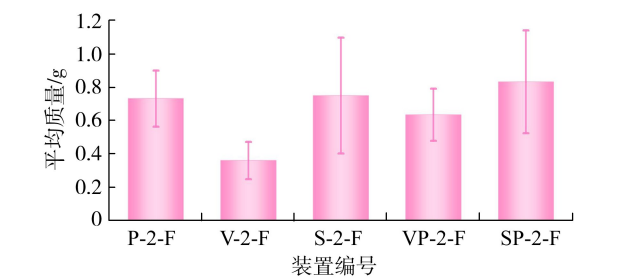


图 5 不同维护方式下清理的颗粒物平均质量

Fig. 5 Mean mass of particles cleaned under different maintenance methods

为进一步评估维护方式对透水砖铺装渗透性能恢复的长期效果, 选取指数模型, 以累积降水量为自变量, 渗透比为因变量, 得到了不同维护方式下渗透比变化公式 (表 2)。可见在 5 种维护方式下, 透水砖铺装的渗透比均呈显著的指数衰减趋势 ($r^2 > 0.95$)。依据公式, 绘制了 5 种维护方式下透水砖铺装渗透比随累积降水量变化的过程曲线 (图 6), 进一步明晰了

不同维护方式对透水砖铺装渗透性能的长期影响。

表 2 渗透比变化公式

Table 2 Formula for change of R

装置编号	对应公式	r^2
P-2-F	$y = 89.32e^{-x/711.91} + 5.28$	0.96
V-2-F	$y = 78.50e^{-x/906.43} + 14.56$	0.95
S-2-F	$y = 105.04e^{-x/382.21} + 0.70$	0.97
VP-2-F	$y = 60.66e^{-x/358.39} + 37.87$	0.95
SP-2-F	$y = 59.19e^{-x/547.44} + 40.93$	0.98

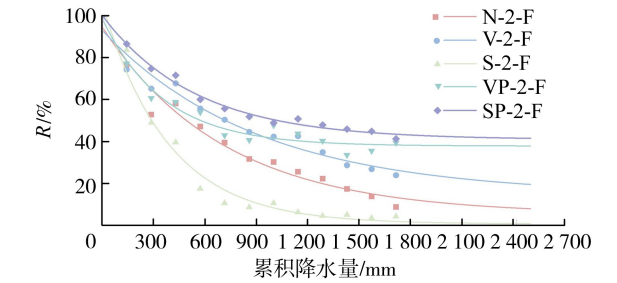


图 6 渗透比随累积降水量变化过程曲线

Fig. 6 Process curve of R with cumulative precipitation

由图 6 可知,在长期降水条件下,装置 VP-2-F 和 SP-2-F 的渗透比保持在较高的水平,分别稳定在 38% 和 41% 左右,这说明 2 种组合维护方式对透水砖铺装渗透性能具有长期稳定的恢复效果。装置 P-2-F 和 V-2-F 的渗透比均呈现缓慢下降的趋势,但采用真空抽吸方式对透水砖铺装渗透性能的长期恢复效果明显优于采用压力水冲洗方式。装置 S-2-F 的渗透性能则在累积降水量为 1 000 mm 时就下降一个数量级,之后随累积降水量的不断增加,渗透性能始终处于较低水平。

综上所述,无论是从最终稳定的渗透比,还是从循环试验过程的恢复效果或加剧程度,亦或是从平均水平来看,清扫+压力水冲洗对透水砖铺装来说都是最优且最稳定的维护方式,虽然其平均恢复效果与只采用真空抽吸方式的相差不大,但在 12 次循环试验全过程中确实体现出明显优势。尽管从单次循环试验来看,真空抽吸+压力水冲洗维护方式恢复效果与压力水冲洗相差不大,也出现几次较严重的衰减加剧,但由于真空抽吸的先行使用能够对导致透水砖铺装表面堵塞的部分颗粒物实现有效去除,使其在整个试验过程中仍能够达到与清扫+压力水冲洗方式同等的稳定水平。

关于 3 种单一维护方式,清扫是最常见的维护方式。从整个循环试验过程来看,尽管其起到渗透性能恢复效果的试验次数较多,但每次循环试验中进水后其渗透性能衰减程度较高,也就是并未通过维护作业有效清理出导致透水砖渗透性能衰减的颗粒物,因此并不是一种有效的维护方式。从实际工

程角度来看,真空抽吸维护应用相较压力水冲洗更少,但从本试验的数据来看,真空抽吸在单次循环试验中取得较好的渗透性能恢复效果,然而从 12 次循环试验来看,其能够实现渗透性能恢复循环试验的数量和比例远不如压力水冲洗。压力水冲洗在实际工程实践中应用较多,但不少研究表明这种方式可能存在加剧渗透性能衰减的风险。然而从本试验结果来看,经历 3 a 累积降水后,真空抽吸方式下透水砖铺装稳定的渗透性能水平明显高于压力水冲洗,但压力水冲洗实现渗透性能恢复的试验场次比例明显高于真空抽吸方式。

2.2 颗粒物粒径的影响

12 次循环试验中,6 种颗粒物粒径入流条件下透水砖铺装的渗透比和渗透比变量变化如图 7 所示。从图 7(a) 可见,装置 P-2-0、P-2-10 和 P-2-20 的渗透比降低均较为缓慢,经历了 2 a 累积降水后,第 3 年也就是 9~12 次循环试验中渗透比分别稳定在 $(42.3 \pm 2.8)\%$ 、 $(54.3 \pm 5.9)\%$ 和 $(48.4 \pm 4.9)\%$,即当入流颗粒物粒径不大于 $45\text{ }\mu\text{m}$ 时,在压力水冲洗维护方式下,透水砖铺装的渗透性能可保持较高的水平。装置 P-2-45 和 P-2-75 的渗透比在 9~12 次循环试验中分别稳定在 $(7.1 \pm 3.5)\%$ 和 $(10.9 \pm 2.5)\%$,说明粒径大于 $45\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物更容易被透水砖孔隙截留。另外,装置 P-2-F 的渗透比在 9~12 次循环试验中稳定在 $(13.3 \pm 4.3)\%$,其渗透比较装置 P-2-0、P-2-10 和 P-2-20 的低,同时比装置 P-2-45 和 P-2-75 的高,主要是由于装置 P-2-F 的入流颗粒物为全级配颗粒物,其中不大于 $45\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒物和大于 $45\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒物的体积占比分别为 52.6% 和 47.4% (图 3),这是其稳定值呈现中等水平的主要原因。

为进一步探讨入流颗粒物粒径对透水砖铺装渗透性能衰减过程影响及原因,图 8 给出了透水砖铺装渗透性能衰减过程示意图。一般而言,透水砖铺装渗透性能衰减过程可以分为 4 个阶段。首先,透水砖铺装不受雨水径流冲刷携带的颗粒物的影响,保持良好的渗透性能 (图 8(a)); 随着雨水径流携带颗粒物进入透水砖铺装,使得透水砖铺装内部开始孔隙堵塞,孔隙量开始减少、孔隙结构开始变化^[27] (图 8(b)); 在持续降雨或多次降雨条件下,颗粒物持续进入透水砖铺装中,连通孔隙被颗粒物堵塞^[28],从而在透水砖内部形成堵塞面 (图 8(c)); 随着颗粒物不断累积,在透水砖内部形成主要的堵塞区域^[29],使得透水砖铺装几乎失去渗透性能,通常渗透速率衰减一个数量级认为其失去渗透性能^[30] (图 8(d))。

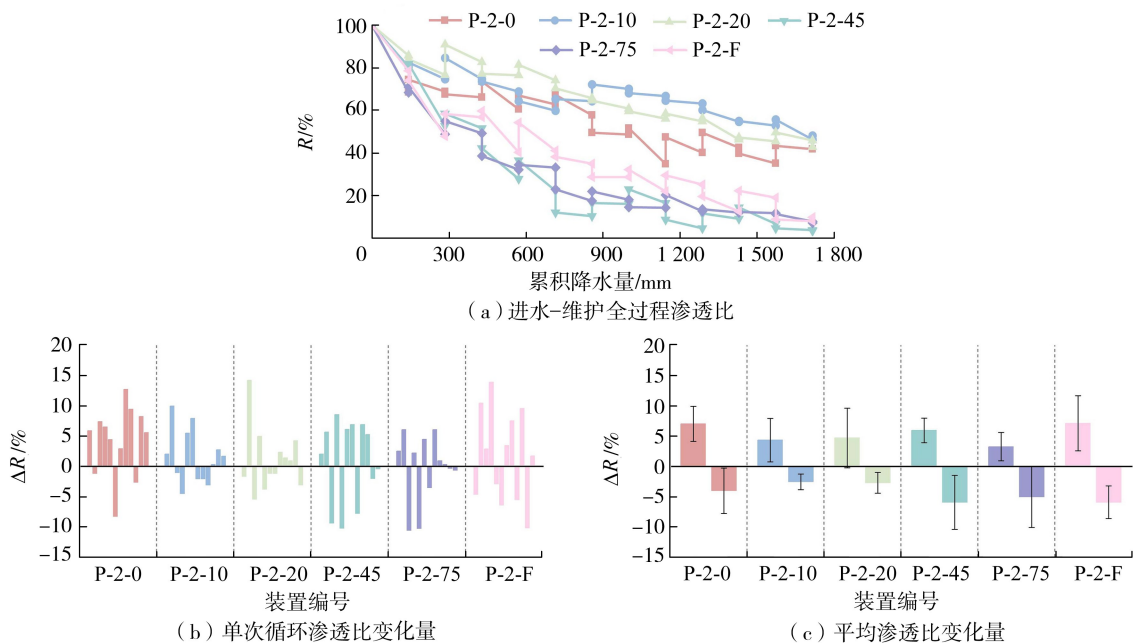


图 7 不同颗粒物粒径下透水砖铺装的渗透比和渗透比变化量

Fig. 7 Changes of R and ΔR of permeable brick pavement under different particle size ranges

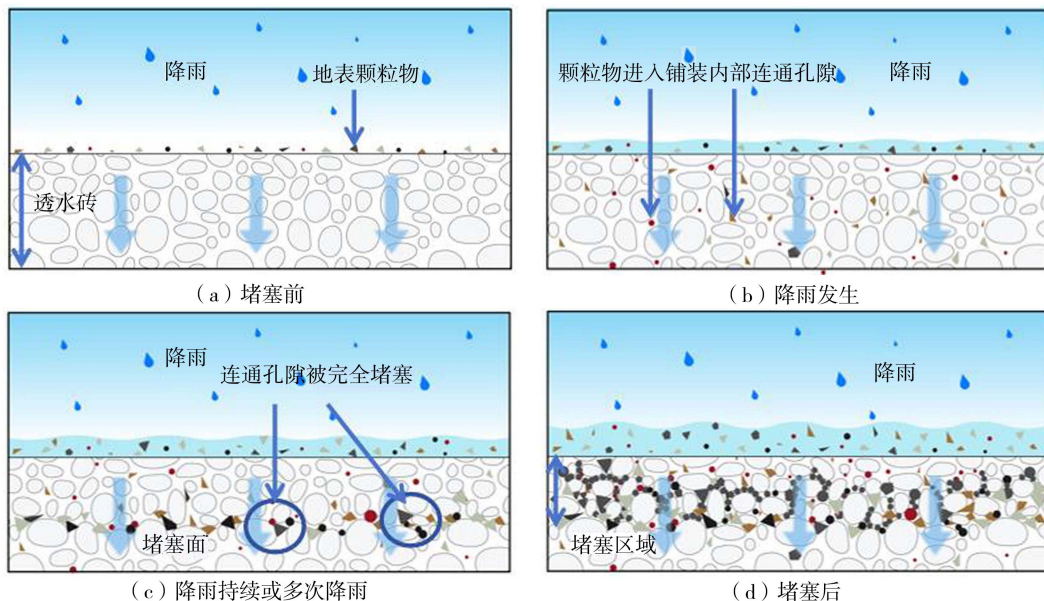


图 8 透水砖铺装渗透性能衰减过程

Fig. 8 Processes of permeability attenuation of permeable brick pavement

通过透水砖铺装渗透性能衰减过程分析,结合本试验所呈现的结果来看,装置 P-2-0、P-2-10 和 P-2-20 的入流颗粒物粒径均不大于 $45\ \mu\text{m}$,不易被孔隙截留,能随渗流下移或均匀分布在孔隙中,此外,其主要依靠黏性吸附在透水砖表面,一些较大的内部孔隙难以被堵塞,因此渗透比降低较慢(图 8(b))。装置 P-2-45 和 P-2-75 的入流颗粒物粒径大于 $45\ \mu\text{m}$,更容易被透水砖中的孔隙截留,导致孔隙通道变窄(图 8(c)),因此渗透比在前 5 次循环试验内迅速下降。当颗粒物质量相同时,装置 P-2-F 中大于 $45\ \mu\text{m}$ 颗粒物比装置 P-2-45 和 P-2-75

的少,颗粒物进入装置并完全堵塞表面和内部连通孔隙的过程较长,因此装置 P-2-F 的渗透比比装置 P-2-45 和 P-2-75 的大。

总之,粒径为 $45\sim 75\ \mu\text{m}$ 和大于 $75\ \mu\text{m}$ 的颗粒物比全级配颗粒物和小于 $45\ \mu\text{m}$ 颗粒物更容易导致透水砖铺装渗透性能的衰减。本试验研究发现与前期研究报道存在一定差异,Yang 等^[31]发现粒径大于 $75\ \mu\text{m}$ 颗粒物比小于 $75\ \mu\text{m}$ 颗粒物更容易导致透水混凝土渗透性能的衰减。成智文等^[32]对透水砖进行模拟雨水径流试验发现,粒径为 $50\sim 1000\ \mu\text{m}$ 的粗砂比 $10\sim 1000\ \mu\text{m}$ 的全级配砂和 $20\sim$

500 μm 的细砂更易造成透水砖渗透性能的衰减。尽管研究结果存在一定差异,但总体趋势呈现明显一致性,即大颗粒是导致渗透性能衰减的主要原因。出现差异主要与颗粒物粒径选取和划分标准有关,相对于前期研究报道,本试验中对粒径不大于 75 μm 颗粒物范围进行了更细致的划分,因此出现试验结果的差异性。

从图 7(b)可见,6 个装置均出现了渗透性能恢复或加剧衰减的现象,且均未呈现明显的规律性,但在恢复效果和加剧程度上有所差异。其中,装置 P-2-45、P-2-75 和 P-2-F 在 12 次循环试验中,均有 41.7% 的循环试验加剧了透水砖铺装渗透性能衰减,且单次循环试验最高衰减程度 ΔR 达到 -10.0% 左右。另外,这 3 个装置中,装置 P-2-F 的单次循环试验渗透性能恢复比例明显高于其他两个装置, ΔR 达到 14.0% 左右,这也进一步解释了 12 次循环试验中装置 P-2-F 的渗透比大于装置 P-2-45 和 P-2-75 的结果。

在 12 次循环试验中,装置 P-2-20 有 50% 的循环试验加剧了透水砖铺装渗透性能的衰减,但其单次循环试验衰减程度也相对较低, ΔR 仅为 -5.4%;另外,装置 P-2-20 在所有装置中具有单次循环试验的渗透性能恢复比例最大, ΔR 为 14.2%,所以对于装置 P-2-20 来说,尽管其实现渗透性能恢复的场次比例最低,但仍能保持较高的渗透比水平。另外,在 12 次循环试验中,装置 P-2-0 和 P-2-10 分别有 75% 和 58.3% 的循环试验恢复了透水砖铺装的渗透性能,达到单次循环试验最大恢复比例, ΔR 分别为 12.7% 和 10.0%,因此这两个装置的稳定渗透比也保持较高的水平。

由图 7(c)可知,从渗透性能衰减加剧的角度来看,装置 P-2-45、P-2-75 和 P-2-F 的平均 ΔR 并无显著性差异($p>0.05$),分别为 $(-6.1\pm4.4)\%$ 、 $(-5.1\pm5.0)\%$ 和 $(-5.9\pm2.7)\%$;装置 P-2-0、P-2-10 和 P-2-20 的平均 ΔR 并无显著性差异($p>0.05$),分别为 $(-4.0\pm3.7)\%$ 、 $(-2.5\pm1.3)\%$ 和 $(-2.7\pm1.7)\%$ 。入流含大于 45 μm 颗粒物的 3 个装置渗透性能衰减程度明显大于入流颗粒物粒径不大于 45 μm 的 3 个装置。进一步说明大于 45 μm 颗粒物是导致渗透性能衰减的主要因素。

由图 9 可知,在不考虑全级配颗粒物的情况下,随着颗粒物粒径的增大,维护清理的颗粒物质量呈现减少趋势。另外,装置 P-2-0、P-2-10 和 P-2-20 清理的平均颗粒物质量并无显著性差异($p>0.05$),但明显大于其他 3 个装置,说明压力水冲洗对不大于 45 μm 颗粒物具有较好的清理效果。装置 P-2-F 清

理的平均颗粒物质量为 $(0.733\pm0.169)\text{g}$,明显大于装置 P-2-45、P-2-75 清理的 $(0.676\pm0.116)\text{g}$ 和 $(0.526\pm0.074)\text{g}$,这也为 12 次循环试验中装置 P-2-F 的渗透比较装置 P-2-0、P-2-10 和 P-2-20 的小且比装置 P-2-45 和 P-2-75 的大这一现象提供了有力支撑。

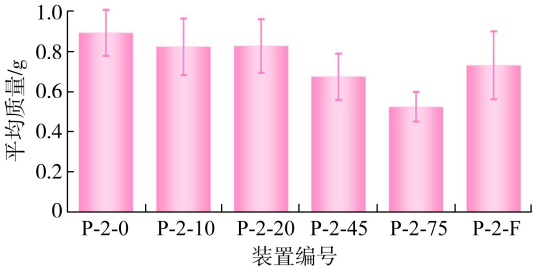


图 9 不同颗粒物粒径入流条件下压力水冲洗清理的颗粒物平均质量

Fig. 9 Mean mass of particles cleaned by pressure washing under different particle size inflow conditions

综上所述,压力水冲洗情况下, ≤ 10 、 $10\sim 20$ 和 $20\sim 45\ \mu\text{m}$ 颗粒物粒径入流条件下透水砖铺装的渗透比稳定保持着较高的水平,全级配粒径的次之, $45\sim 75$ 和 $>75\ \mu\text{m}$ 的较低。12 次循环试验中,不大于 10 μm 颗粒物粒径入流条件下透水砖铺装渗透性能实现恢复的场次数量较多,比例也相对较大,且其恢复效果更为理想; $10\sim 20$ 、 $20\sim 45\ \mu\text{m}$ 颗粒物粒径下的恢复场次数量虽然少于不大于 10 μm 的,但其单次循环试验衰减程度均较小,且这 3 个粒径范围下的平均衰减程度明显小于 $45\sim 75$ 、 $>75\ \mu\text{m}$ 和全级配颗粒物入流条件的。

2.3 颗粒物质量浓度的影响

图 10 为 12 次循环试验不同颗粒物质量浓度下透水砖铺装渗透比的变化结果。第一次循环试验进水后装置 P-2-F、P-4-F、P-6-F 和 P-8-F 的渗透性能都呈现了一定的衰减,渗透比分别为 78.5%、64.2%、53.5% 和 30.0%,且渗透性能衰减的程度与颗粒物质量浓度呈现显著的负相关关系($r=-0.986, p<0.05$)。在首次循环试验进行前,透水砖铺装装置是全新的,透水砖铺装内部孔隙处于近似没有任何颗粒物堵塞的初始状态。在这种初始状态下进行首次模拟径流试验,一次降雨进入透水砖铺装内部的颗粒物总量并未达到透水砖铺装可容纳的颗粒物总量。此时,入流颗粒物量越大,原本部分可渗流孔隙和路径会逐步减少,渗透性能衰减程度就越高。由此可知,从首次循环试验来看,透水砖铺装的渗透性能衰减程度与颗粒物质量浓度呈现高度的线性相关关系,这符合颗粒物质量浓度越高渗透速率衰减越明显的一般认知。

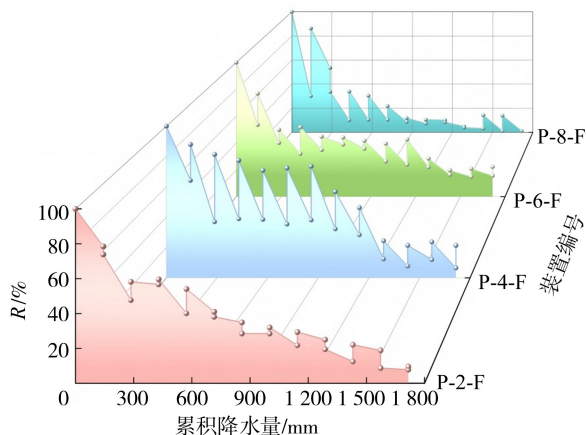


图 10 不同颗粒物质量浓度下透水砖铺装的渗透比变化
Fig. 10 Changes of R of permeable brick pavement under different particle mass concentrations

但值得注意的是,后续循环试验中,4 种颗粒物质量浓度下各透水砖铺装渗透性能的衰减程度与颗粒物质量浓度之间并未呈现像第一次循环试验所呈现的高度相关性,之所以出现这种现象,可能原因有以下几个方面:

a. 这一结果与每次循环试验中透水砖铺装渗透性能的恢复程度有关。由图 10 可见,在 12 次循环试验中,4 个装置能够实现渗透性能恢复的场次数较渗透性能衰减加剧的场次数更多,但其呈现的恢复效果存在较大差异,装置 P-2-F、P-4-F、P-6-F 和 P-8-F 的平均恢复效果 R_1 值分别为 $(7.1 \pm 4.5)\%$ 、 $(25.5 \pm 11.6)\%$ 、 $(10.7 \pm 6.6)\%$ 和 $(17.7 \pm 17.2)\%$ 。

b. 这是压力水冲洗维护方式对 4 种颗粒物质量浓度下透水砖铺装清理均匀程度差异导致的结果。当颗粒物质量浓度较低时,单次循环试验质量的颗粒物质量减少,相当比例的颗粒物可随水流进入透水砖铺装的内部,而不是停留在透水砖表面。但是随着颗粒物质量浓度的增加,更多的颗粒物会积聚在透水砖铺装表层,反而无法进入装置内部。由于采用压力水冲洗这种维护方式,在实际作业时并不能保证对透水砖表层绝对意义的均匀冲洗,维护清理不均匀可能导致颗粒物在表层积聚。

c. 这一结果还与每次循环试验维护后的恢复效果对随后一次循环试验的影响有关。为模拟天然降雨和维护作业的实际操作过程,本试验采用“分批式”试验方式,基于上述第二个方面的原因分析,每一次压力水冲洗对透水砖铺装恢复效果不均匀性都会对下一次循环试验的结果带来影响,12 次循环试验的不均匀性存在叠加的过程,这就导致 4 个装置每次循环试验渗透性能的恢复效果呈现更大的不确定性。

基于上述 3 方面原因,从长期运行效果来看,采用压力水冲洗维护方式,透水砖铺装的渗透性能衰减程度与颗粒物质量浓度并不会长期呈现理想的线性相关性。尽管本试验为诸多边界条件可控下的小试装置试验,仍会出现这一结果,在实际工程实践中,透水砖铺装的运行维护作业将面临更多影响因素和不确定因素,这也将为透水砖铺装维护操作提出更高要求。

3 结 论

a. 在 200 mg/L 全级配颗粒物入流条件下,不进行维护下透水砖铺装的使用寿命可能仅为 3 a 左右;单一清扫维护方式可能会缩短透水砖铺装的使用寿命,组合维护方式对透水砖铺装渗透性能的恢复效果总体优于单一维护方式;真空抽吸是较为理想的单一维护方式,清扫+压力水冲洗是渗透性能恢复效果较好的组合维护方式。

b. 在 200 mg/L 颗粒物质量浓度并进行压力水冲洗条件下, $45 \sim 75$ 和大于 $75 \mu\text{m}$ 的颗粒物比全级配颗粒物和不大 $45 \mu\text{m}$ 颗粒物更容易导致透水砖铺装的渗透性能衰减; ≤ 10 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 45 \mu\text{m}$ 颗粒物粒径下透水砖铺装,经历 3 a 累积降水后其渗透比仍分别保持在 $(42.3 \pm 2.8)\%$ 、 $(54.3 \pm 5.9)\%$ 和 $(48.4 \pm 4.9)\%$ 。

c. 在采用全级配颗粒物并进行压力水冲洗条件下,透水砖铺装的渗透性能衰减程度与颗粒物质量浓度在试验初始阶段呈现显著负相关关系,而长期运行效果来看,由于维护作业操作、入流颗粒物特征等多种因素影响,颗粒物质量浓度并非影响渗透性能衰减的唯一关键因素。

参考文献:

- [1] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 6-12. (LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 6-12. (in Chinese))
- [2] 宋亚霖,杜新强,刘文娜,等. 海绵城市透水砖堵塞规律试验[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 56-59. (SONG Yalin, DU Xinqiang, LIU Wenna, et al. Experimental research on clogging laws of permeable brick in sponge city[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 56-59. (in Chinese))
- [3] 亓雪颖,张守红,王玉杰,等. 颗粒物粒径和维护方式对透水砖铺装透水率衰减过程影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(8): 28-35. (QI Xueying, ZHANG Shouhong,

- WANG Yujie, et al. Impacts of particle size and maintenance on clogging processes of permeable pavement systems[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(8):28-35. (in Chinese))
- [4] 杜晓丽,杨明哲,尹子杰,等. 全堵塞周期内透水砖路面的下渗-产流模型研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 25-31. (DU Xiaoli, YANG Mingzhe, YIN Zijie, et al. Study on infiltration-runoff model of permeable brick pavement during full clogging cycle [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 25-31. (in Chinese))
- [5] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 221-233.
- [6] GARCÍA-HABA E, NAVES J, HERNÁNDEZ-CRESPO C, et al. Influence of sediment characteristics on long-term hydrology and water quality behaviour during the clogging process of a permeable asphalt [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103658.
- [7] NICHOLS P W B, WHITE R, LUCKE T. Do sediment type and test durations affect results of laboratory-based, accelerated testing studies of permeable pavement clogging? [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 786-791.
- [8] 成智文,耿康,陈晓薇,等. 雨水径流颗粒物对陶瓷透水砖堵塞的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 7-11. (CHENG Zhiwen, GENG Kang, CHEN Xiaowei, et al. Impacts of rainwater runoff particles on clogging of ceramic permeable brick[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 7-11. (in Chinese))
- [9] SANSALONE J, KUANG X, YING G, et al. Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage [J]. Water Research, 2012, 46(20): 6763-6774.
- [10] SANDOVAL G F B, DE MOURA A C, JUSSIANI E I, et al. Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging [J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118672.
- [11] DRAKE J, BRADFORD A. Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance [J]. Water Science & Technology, 2013, 68(9): 1950-1958.
- [12] HENDERSON V, TIGHE S L. Evaluation of pervious concrete pavement permeability renewal maintenance methods at field sites in Canada [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38(12): 1404-1413.
- [13] YUAN Jiayi, CHEN Xudong, LIU Saisai, et al. Effect of water head, gradation of clogging agent, and horizontal flow velocity on the clogging characteristics of pervious concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(9): 04018215.
- [14] ZHANG Wei, QU Peizhen, SUN Huichao, et al. Assessing the characteristics of different-sized particles in the first flush of roof runoff [J]. Water Science & Technology, 2023, 87(9): 2265-2276.
- [15] MORGAN D, JOHNSTON P, OSEI K, et al. The influence of particle size on the first flush strength of urban stormwater runoff [J]. Water Science & Technology, 2017, 76(8): 2140-2149.
- [16] ZHANG W, CHE W, LIU D K, et al. Characterization of runoff from various urban catchments at different spatial scales in Beijing, China [J]. Water Science & Technology, 2012, 66(1): 21-27.
- [17] 侯培强,任玉芬,王效科,等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 71-75. (HOU Peiqiang, REN Yufen, WANG Xiaoke, et al. Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff [J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 71-75. (in Chinese))
- [18] MERTEN F R M, DUTRA V F P, STRIEDER H L, et al. Clogging and maintenance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2022, 342: 127939.
- [19] 吴允红,李俊奇,张哲,等. 渗排型透水铺装运行维护研究进展[J]. 给水排水, 2022, 48(8): 151-159. (WU Yunhong, LI Junqi, ZHANG Zhe, et al. Operation and maintenance of permeable pavement with underdrainage: a review [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(8): 151-159. (in Chinese))
- [20] WU Yunhong, LI Junqi, ZHANG Xiaoran, et al. A systematic field effectiveness evaluation of three maintenance measures for three permeable pavements [J]. Construction and Building Materials, 2022, 352: 128821.
- [21] 谢西,姜成,林晨彤,等. 透水混凝土路面堵塞及其恢复效果研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 46-49. (XIE Xi, JIANG Cheng, LIN Chentong, et al. Research on clogging and effectiveness of restoration measures of permeable concrete pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 46-49. (in Chinese))
- [22] ZHANG Jiong, MENG Bowen, WANG Zhen, et al. Numerical simulation on cleaning of clogged pervious concrete pavement [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 341: 130878.
- [23] HU Nian, ZHANG Jiong, XIA Shuang, et al. A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121463.
- [24] MENG Anxin, XING Chao, TAN Yiqiu, et al. Investigation on the distributing behaviors of clogging particles in permeable asphalt mixtures from the microstructure perspective [J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120531.
- [25] DANZ M E, SELBIG W R, BUER N H. Assessment of restorative maintenance practices on the infiltration capacity of permeable pavement [J]. Water, 2020, 12(6): 1563.

[26] 文韬,李雅雯,刘嘉豪,等. 玉溪海绵城市透水砖堵塞恢复方法研究[J]. 中国给水排水,2019,35(12):28-32. (WEN Tao, LI Yawen, LIU Jiahao, et al. Research on recovery method of permeable bricks in Yuxi sponge city [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12):28-32. (in Chinese))

[27] LI Hengzhen, XU Huining, CHEN Fengchen, et al. Evolution of water migration in porous asphalt due to clogging[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 330: 129823.

[28] ZHANG Jiong, SHE Rui, DAI Zhaoxia, et al. Experimental simulation study on pore clogging mechanism of porous pavement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:803-818.

[29] LIU Quan, LIU Sufang, HU Gaohui, et al. Infiltration capacity and structural analysis of permeable pavements for sustainable urban: a full-scale case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125111.

[30] 杜晓丽,郑泽东,尹子杰,等. 透水砖堵塞程度对径流颗粒物冲刷规律的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 73-81. (DU Xiaoli, ZHENG Zedong, YIN Zijie, et al. Influence of blockage degree of permeable brick on scouring law of runoff particles [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):73-81. (in Chinese))

[31] YANG Jingyu, GUO Yinchuan, TAM V W Y, et al. Research on pore-clogging behavior and mechanism in pervious concrete prepared with recycled aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131420.

[32] 成智文,耿康,陈晓薇,等. 雨水径流条件对陶瓷透水砖快速堵塞的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5): 116-120. (CHENG Zhiwen, GENG Kang, CHEN Xiaowei, et al. Effect of stormwater runoff conditions on rapid clogging of ceramic permeable brick [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5):116-120. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-08 编辑:徐娟)

(上接第 197 页)

[36] ZHAI Biying, FU Qiang, LI Tianxiao, et al. Rice irrigation schedule optimization based on the AquaCrop model: study of the Longtougiao irrigation district [J]. Water, 2019, 11(9):1799.

[37] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, 17(3):430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3):430-434. (in Chinese))

[38] 李强,王俏俏,陈红丽,等. 生态流量方法应用现状研究[J]. 生态学报, 2024, 44(1):36-46. (LI Qiang, WANG Qiaoqiao, CHEN Hongli, et al. Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1):36-46. (in Chinese))

[39] 林诗隽,张红艳,莫建英,等. 基于水文学法的漓江生态流量研究[J]. 人民长江, 2023, 54(9):76-81. (LIN Shijun, ZHANG Hongyan, MO Jianying, et al. Ecological flow of Lijiang River based on hydrological method [J]. Yangtze River, 2023, 54(9):76-81. (in Chinese))

[40] LIU Wei, PARK S, BAILEY R T, et al. Quantifying the streamflow response to groundwater abstractions for irrigation or drinking water at catchment scale using SWAT and SWAT-MODFLOW [J]. Environmental Sciences Europe, 2020, 32(1):113.

[41] OCHOA C G, SIERRA A M, VIVES L, et al. Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(6):1371-1392.

[42] 李鸿雁,王凡,刘莹莹,等. 洮儿河流域平原区气候变化情景下浅层地下水水位动态响应分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(3):345-352. (LI Hongyan, WANG Fan, LIU Yingying, et al. Shallow groundwater level under climate change conditions in the Tao'er River plain [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(3):345-352. (in Chinese))

[43] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions [J]. Transaction of the ASABE, 2007, 50(4):1211-1250.

[44] 初京刚,张弛,周惠成. SWAT 与 MODFLOW 模型耦合的接口及框架结构研究及应用[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3):335-342. (CHU Jinggang, ZHANG Chi, ZHOU Huicheng, et al. Research and application of interface and frame structure of SWAT and MODFLOW models coupling [J]. Progress in Geography, 2011, 30(3):335-342. (in Chinese))

[45] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5):1903-1925.

[46] 王明君,彭勇,徐博,等. 变化环境下洮儿河下游地下水位变化趋势[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(4):806-819. (WANG Mingjun, PENG Yong, XU Bo, et al. Variation trend of the groundwater level in the lower reach of Tao'er River under changing conditions [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(4):806-819. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-22 编辑:徐娟)