

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.018

雨水径流条件对陶瓷透水砖快速堵塞的影响

成智文¹, 耿康^{2,3}, 陈晓薇^{2,3}, 孙昕^{2,3}, 刘婷¹

(1. 咸阳陶瓷研究设计院有限公司, 陕西 咸阳 712000; 2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 利用自行研制的透水砖雨水径流快速堵塞模拟装置, 分别研究了雨水径流中颗粒浓度、颗粒粒径和径流速度对陶瓷透水砖渗透系数的影响。试验结果表明: 在雨水径流颗粒粒径为 10 ~ 150 μm 的条件下, 堵塞过程主要经历快速堵塞、局部波动和渐进堵塞三个阶段。雨水径流中的颗粒浓度和粒径分布是影响陶瓷透水砖快速堵塞的主要因素。在颗粒浓度为 200 ~ 1 000 mg/L 的条件下, 随着颗粒浓度的增大, 透水砖堵塞过程延缓、程度变轻; 随着颗粒粒径的增大, 堵塞特性相反。雨水径流流速是影响陶瓷透水砖快速堵塞的次要因素。当径流流速从 1.5 cm/s 增加到 6.5 cm/s 时, 堵塞过程变慢, 但不显著影响最终堵塞的程度。应结合当地雨水径流颗粒粒径范围, 选用合适规格的陶瓷透水砖。

关键词: 陶瓷透水砖; 堵塞; 雨水径流

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2021)05 - 0116 - 05

Effect of Stormwater Runoff Conditions on Rapid Clogging of Ceramic Permeable Brick

CHENG Zhi-wen¹, GENG Kang^{2,3}, CHEN Xiao-wei^{2,3}, SUN Xin^{2,3}, LIU Ting¹

(1. Xianyang Research & Design Institute of Ceramics, Xianyang 712000, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environment Ecology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Effects of sediment concentration, sediment diameter and runoff velocity on rapid clogging of ceramic permeable brick were explored by using a self-developed experimental device for simulating the rapid clogging of ceramic permeable brick by stormwater runoff. When sediment diameter in stormwater was between 10 μm and 150 μm , the clogging process mainly included three stages: rapid clogging, local fluctuation and gradual clogging. The sediment concentration and particle size distribution in stormwater runoff were the main factors affecting the rapid clogging of ceramic permeable brick. When sediment concentration was between 200 mg/L and 1 000 mg/L, the clogging process was slowed down and the clogging was less severe with the increase of sediment concentration. However, opposite clogging characteristics were obtained with the increase of sediment diameter. Stormwater runoff velocity was the

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701001 - 02)

通信作者: 孙昕 E-mail: xinsunn@163.com

minor factor influencing the rapid clogging of ceramic permeable brick. When the runoff velocity was increased from 1.5 cm/s to 6.5 cm/s, the clogging process became slow, but the final clogging degree was not significantly influenced. Ceramic permeable brick with proper specifications should be selected and applied according to the sediment diameters in the local stormwater runoff.

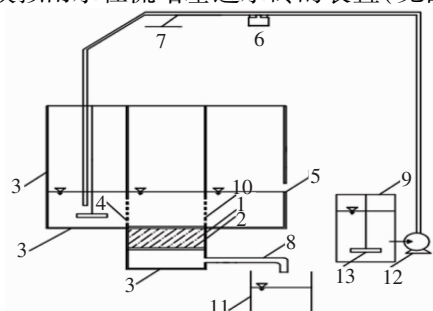
Key words: ceramic permeable brick; clogging; stormwater runoff

近年来,随着我国海绵城市进程的加快,透水铺装因其收效明显、易于实施而广泛采用,尤其是陶瓷透水砖^[1-3]。然而,囿于雨水径流水质的多样性,雨水径流携带的小颗粒不断进入透水砖和透水混凝土的孔隙,导致路面渗透性能不断降低,甚至演变成非透水路面。宋亚霖等^[4]研究发现陶瓷透水砖的透水系数在2 h之内下降73%。Terry等^[5]研究发现透水混凝土的堵塞过程与程度受雨水中颗粒物粒径和降雨强度共同影响。李莉^[6]的试验结果表明快速堵塞过程集中在初期2~10 s,孔隙率、水平径流速度、渗流速度、砂级配等因素对堵塞发展过程产生不同程度的影响。骆辉等^[7]采用控制变量法研究了雨强等5大因素对透水路面堵塞规律的影响,发现堵塞行为主要经历急剧堵塞、局部恢复、渐进堵塞和稳定出流等4个阶段。Kayhanian等^[8]根据CT扫描产生的孔隙度剖面,认为粒径<38 μm的细颗粒泥砂对堵塞具有重要影响。

笔者以陶瓷透水砖为研究对象,系统研究雨水径流条件对透水砖孔隙快速堵塞的影响过程。

1 透水砖快速堵塞过程模拟装置

采用《透水路面砖与透水路面板》(GB/T 25993—2010)中的透水砖透水系数测试装置,不能实时测定雨水径流下透水砖的透水系数,为此研制了可模拟雨水径流堵塞透水砖的装置(见图1)。



1.小型陶瓷透水砖路面 2.玻璃胶和橡胶圈 3.有机玻璃容器 4.水平径流模拟装置 5.溢流堰 6.流量计 7.阀门 8.出水口 9.雨水制备桶 10.超声波流速仪 11.渗透水收集桶 12.水泵 13.搅拌器

图1 模拟雨水径流堵塞透水砖装置

Fig.1 Device for simulating clogging of permeable brick by stormwater runoff

1.1 地表径流的实验室模拟

为了模拟室内降雨,目前主要通过加压喷头喷洒或在试件上方转动叶片来驱使水流圆周运动而实现,均与实际的雨水径流条件存在较大差异。本装置包括有机玻璃制作的前端雨水调节槽、中间雨水渗流槽和末端出水槽,中间水槽内部安放透水砖,水槽之间设有配水孔;调节前端进水槽内进水阀门开启度实现不同的雨水径流量,以便模拟真实的雨水径流。

1.2 透水试验过程中透水系数的实时测定

在试验装置内透水砖上表面安装水位标尺,读取试验过程中的水位差(H);当透水砖上的水深达到既定高度而且流量稳定后,开始计时并测定透过透水砖的水量(Q),根据达西定律计算透水砖的透水系数(视透水系数稳定为透水砖快速堵塞过程的终点):

$$k_T = QL/AHt \quad (1)$$

式中: k_T 为水温为 T ℃时的透水系数,cm/s; Q 为 t 时间内渗出的水量,mL; L 为试样的厚度,cm; A 为试样上表面的面积,cm²; H 为水位差,cm; t 为时间,s。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验所用的陶瓷透水砖如图2所示,长20 cm、宽10 cm、高5.5 cm。该透水砖工作表面为上面层,厚度约1.1 cm,孔隙小而紧凑;下面层厚度约4.4 cm,孔隙较大且不规则。根据压汞仪测定结果,透水砖表面和内部的平均孔径分别为346.0 nm和815.8 nm。

利用图3所示装置测定透水砖孔隙率。首先将透水砖放入100℃烘箱内烘干至恒质量 m_1 ,并精确到1 g;再将透水砖放入水箱,充分浸泡后采用悬吊法测量其浸水后的质量 m_2 ;有效孔隙率 $P = [1 - (m_2 - m_1)/V] \times 100\%$ 。

选用筛分后的高岭土和河砂作为3种基础堵塞材料,粉砂粒径为10~150 μm,细砂粒径为20~500

μm ,粗砂粒径为 $50 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$;为使试验条件更接近实际的雨水径流,采用全级配堵塞材料,粒径为 $10 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ (见表1)。

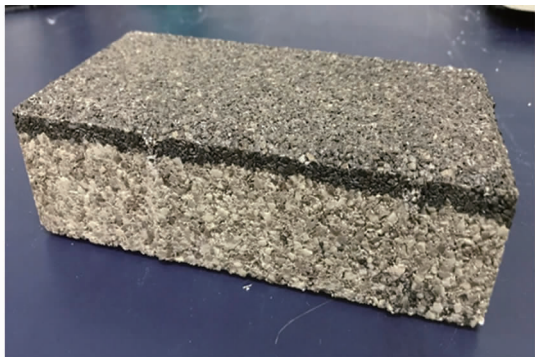


图2 陶瓷透水砖试样

Fig. 2 Sample of ceramic permeable brick



图3 测定透水砖孔隙率的装置

Fig. 3 Device for measuring the porosity of permeable brick

表1 堵塞材料级配

Tab. 1 Diameter distributions of clogging materials

粒径范围/ μm	粉砂/%	细砂/%	粗砂/%	全级配砂/%
10 ~ 20	50	0	0	5
20 ~ 50	45	5	0	10
50 ~ 150	5	85	5	25
150 ~ 500	0	10	90	35
500 ~ 1 000	0	0	5	25

2.2 试验过程与方案

陶瓷透水砖的堵塞试验步骤如下:

① 试验前,取同一批次的10块陶瓷透水砖,清洁其表面,在 $105\ ^\circ\text{C}$ 烘箱内干燥2 h;用防水胶密封透水砖与装置之间的缝隙。

② 待防水胶干化后,启动雨水径流模拟系统,调节进水管阀门,使中间水槽透水砖表面的水深稳定达到 $8.5\ \text{cm}$ 。

③ 采用多普勒流速仪测量透水砖表面的垂向水流速度,计算平均流速和流量;调节水泵电机转速和进水管阀门,直至砖表面水流速度达到要求值,然后连续记录每透过水量 $500\ \text{mL}$ 的时间。

具体试验条件如表2所示。

表2 陶瓷透水砖堵塞试验条件

Tab. 2 Experimental conditions for clogging of permeable brick

方案	地表径流流速/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	颗粒级配	人工配制雨水颗粒物浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1	1.5	全级配	1 000
2	1.5	全级配	800
3	1.5	全级配	600
4	1.5	全级配	400
5	1.5	粉砂	200
6	1.5	细砂	200
7	1.5	粗砂	200
8	1.5	全级配	200
9	4.5	全级配	200
10	6.5	全级配	200

3 试验结果和分析

3.1 雨水中颗粒浓度对陶瓷透水砖堵塞的影响

改变人工配制雨水的颗粒浓度(表2中的方案1、方案2、方案3、方案4和方案8),探究雨水中的颗粒浓度对陶瓷透水砖堵塞过程的影响。根据西安市雨水径流中的颗粒浓度范围,选取 200 、 400 、 600 、 800 和 $1\,000\ \text{mg/L}$ 等5个浓度梯度展开试验,结果如图4所示。

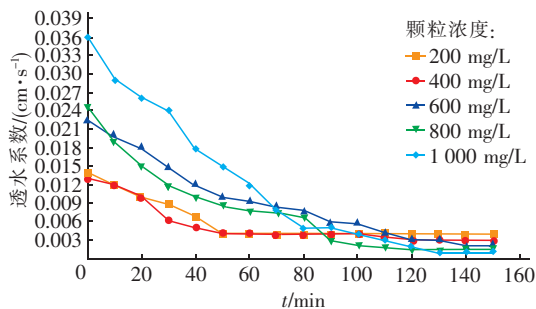


图4 不同雨水径流颗粒物浓度条件下透水系数变化曲线

Fig. 4 Variation curves of permeability coefficient under different sediment concentrations in stormwater

由图4可见,在5组颗粒浓度条件下,随着透水试验的进行,陶瓷透水砖的透水系数均逐渐减小,最后趋于稳定。在 $150\ \text{min}$ 时,雨水颗粒浓度为 200 、 400 、 600 、 800 和 $1\,000\ \text{mg/L}$ 的最终透水系数分别下降为初始系数的 28.6% 、 23.1% 、 18.0% 、 5.9% 和 2.8% ,其中颗粒浓度为 $1\,000\ \text{mg/L}$ 条件下的透水

系数下降最快。此试验结果说明,在雨水颗粒级配确定的工况下,颗粒浓度越大,陶瓷透水砖的堵塞程度就越轻。究其原因,雨水中颗粒物质浓度越大,颗粒之间的碰撞和向前推拥作用就越强,颗粒越不容易停留在透水砖表面,进入透水砖内部的颗粒相应减少,透水砖孔隙内截留的颗粒就越少,即堵塞的程度就越轻。

3.2 雨水中颗粒级配对陶瓷透水砖堵塞的影响

不同颗粒级配条件下(表2中方案5、6、7和8)陶瓷透水砖的透水系数变化曲线如图5所示。当雨水中含有粉砂和细砂时,透水系数表现为先快速下降、再略有回升、后逐渐平稳三个阶段;在其他颗粒级配条件下,透水系数表现为先快速下降、后逐渐平稳两个阶段。150 min时,粉砂、细砂、粗砂和全级配砂砾对应的透水系数分别下降为初始系数的49.7%、45.4%、8.0%和28%,表明雨水中含有粗颗粒物质时的透水系数下降最快,快速堵塞终点的透水系数最小。

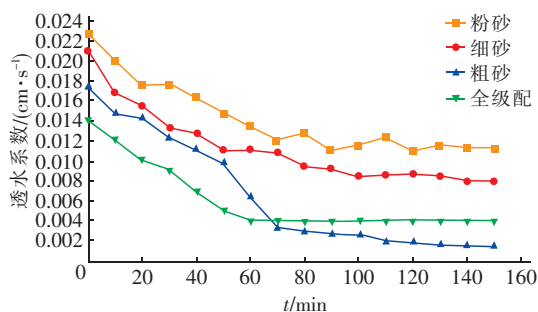


图5 不同雨水径流颗粒级配条件下透水系数变化曲线

Fig.5 Variation curves of permeability coefficient under different sediment diameter distributions in stormwater

由图5可见,雨水颗粒粒径不同,引起的陶瓷透水砖的堵塞过程存在较大差异。在较低的径流速度(1.5 cm/s)条件下,当雨水中含有粉砂和细砂时,颗粒粒径均小于150 μm ,较小粒径的颗粒沉速较小,不易截留在透水砖表面,大多数容易随水流沿透水砖表面水平向右运动至出水槽;在透水砖表面稳定水头的作用下,也会有少量颗粒随垂向下渗水流进入透水砖表面之下或内部,进入透水砖表面之下浅层的部分颗粒又会因水平径流的冲刷作用而被再次冲出透水砖,从而透水性能下降相对较小。当雨水中含有全级配和粗砂时,颗粒粒径介于150~1000 μm ,且多数为500 μm 左右,沉速较大,不易沿透水砖表面水平向右运动至出水槽;在水压力的

作用下,容易被截留在陶瓷透水砖表面,少量颗粒甚至会进入透水砖内部,从而使透水系数快速降低,并较早趋于稳定。

3.3 雨水径流流速对陶瓷透水砖堵塞的影响

试验中通过调节进水水量,实现透水砖表面径流流速为1.5、4.5和6.5 cm/s三种条件(表2中方案8、9和10)。图6为不同雨水径流流速下透水系数的变化曲线。

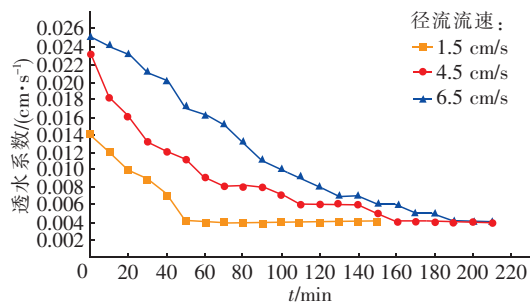


图6 不同雨水径流流速条件下透水系数变化曲线

Fig.6 Variation curves of permeability coefficient under different stormwater flow velocities

由图6可见,透水砖堵塞过程均表现为先快速下降、后逐渐平稳两个阶段,快速堵塞终点时的透水系数相同;但径流流速越大,透水砖堵塞越缓慢。可见,水平径流流速的增大,只能延缓堵塞的发展历程,但不能显著影响最终堵塞的程度。在颗粒级配确定的情况下,颗粒的沉速和启动流速也随之确定,透水砖表面的水平流速越大,越容易使水体中颗粒物质悬浮于水中,或是削弱颗粒物质向下的入渗运动,使颗粒物质易于随雨水径流水平向右流向出水槽,即使暂时被截留于透水砖表面的较小颗粒也会再度悬浮,而不易进入透水砖的内部,从而减少了颗粒物质在透水砖表面和内部的截留量,延缓了透水砖的堵塞过程。

3.4 陶瓷透水砖快速堵塞前后孔隙率变化

为了探究透水砖堵塞与孔隙率的关系,测定了透水砖堵塞前后孔隙率的变化。在过水试验结束后,将透水砖表面沉积的颗粒用毛刷清理掉,然后测定其孔隙率。结果见表3。可见,透水砖在堵塞前后孔隙率变化不大,透水砖孔隙率在堵塞后均略有降低,理论上透水系数略微变小,但实际上透水系数明显降低,这说明在本试验条件下,引起透水砖堵塞的颗粒主要集中在透水砖表面,而进入内部的颗粒较少。

表3 陶瓷透水砖快速堵塞前后孔隙率变化

Tab.3 Variations of porosity of permeable brick before and after rapid clogging

%

方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
堵塞前孔隙率	26.1	25.5	26.3	27.9	25.3	26.9	24.7	25.3	27.4	25.9
堵塞后孔隙率	25.2	24.3	25.3	26.5	23.7	26.3	23.3	24.0	26.5	25.1

4 结论

① 在雨水径流中颗粒粒径为 $10 \sim 150 \mu\text{m}$ 的条件下,陶瓷透水砖的堵塞过程主要经历快速堵塞、局部波动和渐进堵塞三个阶段。

② 雨水径流中的颗粒浓度和粒径分布是影响陶瓷透水砖快速堵塞的主要因素;颗粒浓度越大,透水砖堵塞程度越轻;颗粒粒径越大,透水砖透水系数下降越快速,堵塞过程越快速、程度越重。

③ 雨水径流流速是影响陶瓷透水砖快速堵塞的次要因素,随着径流流速的增大,颗粒被截留至透水砖表面和内部的几率降低,堵塞过程被延缓,但不能显著影响最终堵塞的程度。

④ 应结合当地雨水径流颗粒粒径范围,选用合适规格的陶瓷透水砖。

参考文献:

- [1] 韦甦,吴力平,李军. 透水砖应用于海绵城市建设的若干问题探讨[J]. 中国给水排水,2017,33(12):1-5.
WEI Su, WU Liping, LI Jun. Discussion on the application of water permeable brick in the construction of sponge city[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12):1-5(in Chinese).
- [2] 韩暖. 基于海绵城市理念下的透水砖及铺装设计[D]. 成都:西南交通大学,2017.
HAN Nuan. Design of Permeable Brick and Pavement Based on Concept of Sponge City[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [3] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering[J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10:121-142.
- [4] 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).

- [5] Terry Lucke, Carsten Dierkes, 崔玉忠. 实验室进行混凝土路面砖透水路面的堵塞试验研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2017(4):29-32.
TERRY Lucke, CARSTEN Dierkes, CUI Yuzhong. Laboratory tests on blocking of permeable concrete pavement brick[J]. Building Blocks and Block Building, 2017(4):29-32(in Chinese).
- [6] 李莉. 透水路面孔隙堵塞机理试验模拟研究[D]. 济南:山东大学,2018.
LI Li. Experimental and Simulation Study on the Pore Clogging Mechanism of Permeable Pavement[D]. Jinan: Shandong University, 2018(in Chinese).
- [7] 骆辉,赵晓晴,蔡小宁,等. 海绵城市建设下Ⅲ型全透式透水沥青路面堵塞行为试验研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2018, 27(3):63-69.
LUO Hui, ZHAO Xiaoping, CAI Xiaoning, et al. Experimental research of clogging behavior of the Ⅲ type permeable asphalt pavement under the construction of sponge city[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology(Natural Science Edition), 2018, 27(3):63-69(in Chinese).
- [8] 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.

作者简介:成智文(1969-),男,陕西武功人,硕士,教授级高级工程师,从事建筑卫生陶瓷行业研究。

E-mail: xyczw@sina.com

收稿日期:2019-07-02

修回日期:2019-09-30

(编辑:孔红春)