

# 海绵城市建设中三种类型透水路面削减内涝效果研究

王宏宇<sup>1</sup>, 吴昊<sup>2</sup>, 马宏伟<sup>3</sup>, 王鹏<sup>3</sup>, 凌莉<sup>3</sup>

(1. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160; 2. 瓦地工程设计咨询<北京>有限公司, 北京 100022; 3. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 在海绵城市建设过程中,透水路面的削减内涝效果对区域海绵化改造具有重要意义。对透水沥青路面、透水混凝土路面和陶瓷透水砖路面三种不同类型透水路面的削减内涝效果进行了研究。结果表明,透水路面总地表径流减少1%~40%,峰值流量减少7%~42%。透水路面的效果受透水率和初始含水量的影响。初始含水量为0%和50%时,三种路面地表总径流减少效果和峰值流量减少效果分别下降8%~24%和8%~17%。初始含水量高的透水路面减少总径流和减少峰值流量的效果下降。在三种透水路面中,最不利状态下透水沥青路面透水效果最好,陶瓷透水砖路面次之,透水混凝土路面较差。最佳状态下透水混凝土路面透水效果最好,透水沥青路面效果次之,陶瓷透水砖路面效果最差。

**关键词:** 海绵城市; 透水路面; 洪涝灾害

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)12-0044-05

## Study on Waterlogging Reduction Effect of Three Types of Permeable Pavements in Sponge City Construction

WANG Hong-yu<sup>1</sup>, WU Hao<sup>2</sup>, MA Hong-wei<sup>3</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>, LING Li<sup>3</sup>

(1. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100160, China; 2. Wadi Engineering Design Consulting <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100022, China; 3. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The performance of permeable pavements on reducing waterlogging is important to the regional sponge transformation in the process of sponge city construction in China. This study evaluated the performance of three types of permeable pavements (permeable asphalts, permeable concretes, and permeable ceramic brick pavers) on reducing waterlogging. The results indicated that the permeable pavements reduced total surface runoff by 1% - 40% and peak flow by 7% - 42%, respectively. The effect of permeable pavement was affected by permeability and initial water content. When the initial water content at the beginning of was 0% and 50%, the total runoff reduction and peak flow reduction decreased by 8% - 24% and 8% - 17%, respectively. The effect of reducing total runoff and peak flow of permeable pavement with high initial water content was reduced. Among the three types of permeable pavements, in the most disadvantageous state, permeable asphalts had the best performance, followed by permeable ceramic brick pavers, and permeable concretes was the worst; and in the most advantageous state, permeable concretes had the best performance, followed by permeable asphalts, and permeable ceramic brick pavers was the worst.

**Key words:** sponge city; permeable pavement; flood disaster

在过去的几十年里,城市内涝灾害在中国造成了较大的破坏,已经成为一个亟待解决的问题<sup>[1-2]</sup>。2008年—2010年,我国351个城市中,有213个城市发生了市区内涝。有39.0%的城市一年中发生了3次以上内涝,22.0%的城市一年中发生了1~2次内涝。74.6%的城市内涝最大积水深度超过了50 mm,90.0%的城市内涝最大积水深度超过了15 mm。78.9%的城市积水时间超过0.5 h,16.0%的城市积水时间超过12.0 h。北京市在1950年—2017年间发生内涝30次,内涝发生期集中于6月—8月。我国多数城市出现的内涝次数均高于设计值,城市的排水防涝能力亟待提高<sup>[3]</sup>。在海绵城市的建设和改造过程中,路面透水铺装占据重要地位<sup>[4]</sup>,研究发现,国内目前广泛应用的硬质化路面会阻碍雨水渗透,导致市政排水超载,从而增大市区内涝的发生概率,透水性铺装可以解决硬质化路面产生的问题,降低市区内涝灾害发生的风险,降低城市噪音污染,增大使用舒适性<sup>[5]</sup>。随着海绵城市建设的不断发展,陶瓷透水砖、透水混凝土、透水沥青等材料、工艺逐步提出,应用透水路面代替传统的硬质铺装作为广场和小区内铺装已得到广泛应用<sup>[3]</sup>。

以透水沥青路面、透水混凝土路面和陶瓷透水砖路面为研究对象,对三种不同类型透水路面的削减内涝效果进行了对比分析。

## 1 研究背景

在小区改造过程中,小区中心广场、人行道路、停车场中可以通过透水沥青路面、透水混凝土路面和陶瓷透水砖路面进行改造,如图1所示。在实际使用过程中,由于砂土、灰尘、油污等异物在表层堆积,渗透的雨水同时过滤了空气中的灰尘、道路中的异物等,透水路面的通道孔和透水路面下的垫层中产生了一定程度的吸附和沉淀,导致了透水路面通道孔堵塞,出现了透水率衰减的现象。

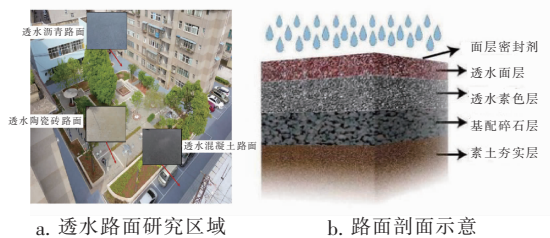


图1 三种类型透水路面

Fig. 1 Three types of permeable pavements

## 2 理论模型

### 2.1 不透水模块

SCS曲线数值法广泛应用于具有可接受的模型特性的透水路面研究中<sup>[6-7]</sup>。曲线数(CN)值是SCS方法的关键参数,其由土地利用、土壤类型和前期含水状况等一系列因素决定。以文献<sup>[6]</sup>和模型手册给出的CN参考值<sup>[8]</sup>为依据,研究中将不透水面的CN值设为94。

不透水面径流的最终计算公式为:

$$RF = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} = \frac{(P - 3.24)^2}{P + 12.97}, P > 3.24 \quad (1)$$

式中 RF——地表径流量,mm

S——土壤最大可能入渗量(潜在蓄水能力),  
等于  $\frac{25400}{CN} - 254$

$I_a$ ——雨量初损值,取值为0.2S

P——降雨量,mm

当降雨量  $P \leq 3.24$  mm时,没有地表径流。

### 2.2 透水模块

采用霍顿渗透模型<sup>[9]</sup>确定渗透率:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} = f_0e^{-kt} + f_c(1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中  $f(t)$ —— $t$ 时刻的渗透率,mm/h

$k$ ——霍顿曲线的衰变常数

$f_0$ ——最大渗透率,mm/h

$f_c$ ——最小渗透率,mm/h

毛细作用力产生的渗透是土壤水分的来源。毛细作用和重力渗透率( $f_1$ 和 $f_2$ )可以通过以下公式求解<sup>[9]</sup>:

$$f_1 = f_0e^{-kt} = f_0[1 - \frac{W(t)}{WM}] \quad (3)$$

$$f_2 = f_c(1 - e^{-kt}) = f_c \frac{W(t)}{WM} \quad (4)$$

$$W(t) = \int_0^t f_1 dt = \int_0^t f_0e^{-kt} dt \quad (5)$$

$$WM = \int_0^\infty f_1 dt = \frac{f_0}{k} \quad (6)$$

式中  $W(t)$ —— $t$ 时刻土壤的含水量,mm

WM——存水量,mm

地表径流强度( $R_s$ )及地下径流强度( $R_g$ )与降水强度( $I$ )有以下关系<sup>[9]</sup>:

$$R_s = \begin{cases} 0, I < (f_1 + f_2) \\ I - f_1 - f_2, I > (f_1 + f_2) \end{cases} \quad (7)$$

$$R_g = (I - R_s) \frac{f_2}{f_1 + f_2} \quad (8)$$

若土壤含水量在降水开始时已知,则降水过程中任一时刻( $x$ )的地表产流( $h_s$ )、地下产流( $h_g$ )、下渗水量( $F$ )可通过下式求解<sup>[9]</sup>:

$$h_s = \int_0^x R_s dx \quad (9)$$

$$h_g = \int_0^x R_g dx \quad (10)$$

$$F = P - h_s - h_g \quad (11)$$

在透水模块中,强制参数是 $f_0$ 、 $f_c$ 、 $k$ 及降水开始时的 $W$ 。存水量(WM)的计算公式<sup>[9]</sup>:

$$WM = VR \times TK \quad (12)$$

式中 VR——路面透水空隙比

TK——厚度,mm

### 3 计算及分析

为研究初始含水量及透水空隙比对内涝作用的影响,选取了三种路面性能较好和较差时的渗透性进行对比研究。当路面渗透性能较好时透水沥青路面、透水混凝土路面和陶瓷透水砖路面的渗透率分别为15 000、15 000和1 000 mm/h<sup>[5]</sup>。当渗透性较差时,渗透率分别为130、160和530 mm/h<sup>[5]</sup>。选取透水路面厚度为450 mm,透水沥青路面、透水混凝土路面和陶瓷透水砖路面三种路面透水性能较好时其透水空隙比分别为0.3、0.32及0.3,透水性能较差时其透水空隙比分别为0.1、0.12及0.14。三种路面的初始含水量分别取0%和50.0%。具体工况设计如表1所示。

表1 三种路面运行工况及其参数

Tab.1 Three types of pavements working conditions and parameters

工况	路面类型	透水空隙比	初始含水量/%
PA-0.3-0	透水沥青	0.3	0
PA-0.3-50	透水沥青	0.3	50.0
PA-0.1-0	透水沥青	0.1	0
PA-0.1-50	透水沥青	0.1	50.0
PC-0.32-0	透水混凝土	0.32	0
PC-0.32-50	透水混凝土	0.32	50.0
PC-0.12-0	透水混凝土	0.12	0
PC-0.12-50	透水混凝土	0.12	50.0
WP-0.3-0	陶瓷透水砖	0.3	0
WP-0.3-50	陶瓷透水砖	0.3	50.0
WP-0.14-0	陶瓷透水砖	0.14	0
WP-0.14-50	陶瓷透水砖	0.14	50.0

用于分析三种类型透水路面削减内涝效果的12 h降雨量如图2所示。

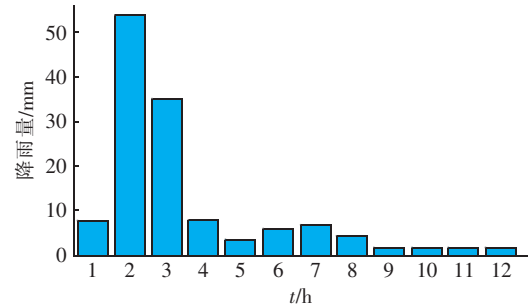


图2 12 h降雨量

Fig.2 Rainfall of 12 h

本次计算过程中,式(2)中的霍顿曲线的衰变常数取值为1.98,最大渗透率取值为199.8 mm/h,最小渗透率取值为12 mm/h。得出的不同工况路面的12 h地表径流量如表2所示。将表2中数据与图2中数据相比较,得到三种类型透水路面总表面径流量及峰值流量降低情况,结果见图3。不同工况路面对内涝削减效果如图4所示。

表2 不同工况路面的12 h地表径流量

Tab.2 Total 12 h surface runoff under all conditions

工况	地表径流量/mm	工况	地表径流量/mm
PA-0.3-0	42.7	PC-0.12-0	65.0
PA-0.3-50	59.8	PC-0.12-50	70.2
PA-0.1-0	44.5	WP-0.3-0	62.9
PA-0.1-50	58.2	WP-0.3-50	68.9
PC-0.32-0	45.8	WP-0.14-0	61.5
PC-0.32-50	60.5	WP-0.14-50	68.4

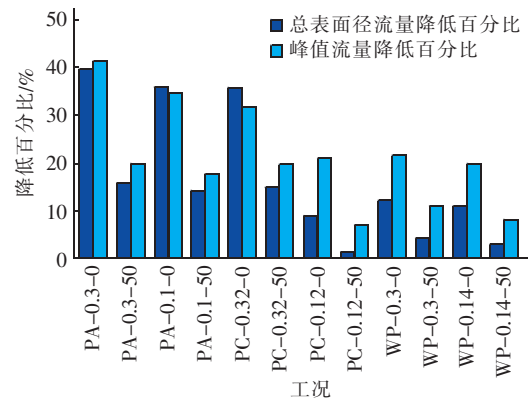


图3 三种类型透水路面总表面径流量及峰值流量降低百分比

Fig.3 Percentage of total surface runoff and peak flow reduction of three types of pavements

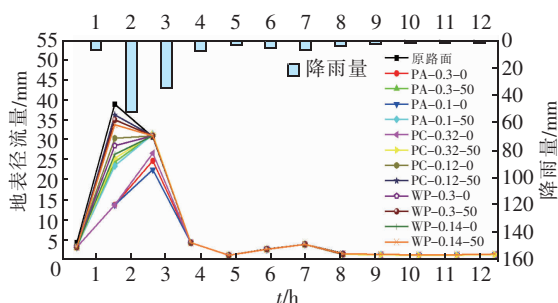


图4 不同工况路面对内涝削减效果

Fig.4 Effect of pavement in different working conditions on waterlogging reduction

由图3可知,透水沥青路面最佳状态下能够降低总表面径流量及峰值流量的百分比分别为40%和42%,透水混凝土路面最佳状态下能够降低总表面径流量及峰值流量的百分比分别为43%和32%,陶瓷透水砖路面最佳状态下能够降低总表面径流量及峰值流量的百分比分别为12%和22%。

透水沥青路面最不利状态下能够降低总表面径流量及峰值流量的百分比分别为17%和20%,透水混凝土路面最不利状态下能够降低总表面径流量及峰值流量的百分比分别为1%和7%,陶瓷透水砖路面最不利状态下能够降低总表面径流量及峰值流量的百分比分别为4%和12%。

相同透水空隙比下,初始含水量变化导致透水沥青路面降低总表面径流量的效果分别下降了24%和22%,降低峰值流量的效果分别下降了22%和17%。初始含水量变化导致透水混凝土路面降低总表面径流量的效果分别下降了21%和8%,降低峰值流量的效果分别下降了12%和14%。初始含水量变化导致陶瓷透水砖路面降低总表面径流量的效果分别下降了8%和8%,降低峰值流量的效果分别下降了11%和12%。初始含水量为0%和50%时,三种路面地表总径流减少效果和峰值流量减少效果分别下降8%~24%和8%~17%。最不利状态下透水沥青路面透水效果最好,陶瓷透水砖路面次之,透水混凝土路面较差。最佳状态下透水混凝土路面透水效果最好,透水沥青路面效果次之,陶瓷透水砖路面效果最差。

透水沥青路面在最佳状态时能够削减40%的总径流量,最不利状态下能够削减17%的总径流量,因路面初始含水量不同导致其减流效果差别可达到两倍多。通过在开始时增加初始含水量,发现

减少总径流和减少峰值流量的效果显著降低,因此路面初始含水量对削减内涝的效果影响较大。

由图4可知,三种路面透水空隙比较低时,其削减内涝作用均出现了下降的现象。由于砂土、灰尘、油污等异物在表层堆积导致的透水率降低情况,对削减内涝有着负面作用。初始含水量为0%时,透水空隙比较高的三种路面削减径流的百分比区间为15%~41%,透水空隙比较低时三种路面削减径流的百分比区间为6%~14%。由于透水路面中的微粒减少了路面的总空隙,堵塞了路面孔隙,从而导致渗透率降低,路面削减径流能力下降。

#### 4 结论

对透水沥青路面、透水混凝土路面和陶瓷透水砖路面三种不同类型透水路面的防洪效果进行了研究,结果表明,透水路面总地表径流减少1%~40%,峰值流量减少7%~42%。透水路面的效果受透水率和初始含水量的影响。初始含水量为0%和50%时,三种路面地表总径流减少效果和峰值流量减少效果分别下降8%~24%和8%~17%。初始含水量变化范围为0%~50%时,随着初始含水量增加,路面减少总径流和减少峰值流量的效果下降。最不利状态下透水沥青路面透水效果最好,陶瓷透水砖路面次之,透水混凝土路面较差。最佳状态下透水混凝土路面透水效果最好,透水沥青路面效果次之,陶瓷透水砖路面效果最差。

#### 参考文献:

- [1] 郝身群,马华龙,宋国军. 基于海绵城市理念的城市快速路排水设计[J]. 中国给水排水,2017,33(22):53-57.  
Hao Shenqun, Ma Hualong, Song Guojun. The drainage design of urban expressway based on sponge city[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 53-57 (in Chinese).
- [2] 车伍,杨正,赵杨,等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水,2013,29(16):13-19.  
Che Wu, Yang Zheng, Zhao Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(16): 13-19 (in Chinese).
- [3] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 雨水径流总量控制目标确定与落地的若干问题探讨[J]. 给水排水,2016,42(10):61-69.

- Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, *et al.* Discussion on some problems in the determination and realization of total rainfall runoff flow rate control[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(10): 61–69 (in Chinese).
- [4] 王建龙, 涂楠楠, 席广朋, 等. 已建小区海绵化改造途径探讨[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(18): 1–8.
- Wang Jianlong, Tu Nannan, Xi Guangpeng, *et al.* Discussion of residential district renovation combined with sponge city development [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(18): 1–8 (in Chinese).
- [5] Luo M. Application of porous road materials in sponge city construction[J]. *Chem Eng Trans*, 2017, 62: 163–168.
- [6] Zhang X, Guo X, Hu M. Hydrological effect of typical low impact development approaches in a residential district [J]. *Nat Hazards*, 2016, 80(1): 389–400.
- [7] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement [J]. *J Environ Manage*, 2013, 119: 151–161.
- [8] Mishra S K, Singh V. Soil Conservation Service Curve Number (SCS – CN) Methodology [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1941, 5: 399–417.



作者简介:王宏宇(1986–),男,重庆人,专科,助理工程师,中建二局西南分公司项目书记,从事建筑电气工程施工管理工作。

E-mail: 181954276@qq.com

收稿日期: 2018–10–22

## · 信息 ·

### 苏伊士新创建智慧水务显成效 澳门自来水漏损率降至9%

2019年4月16日,苏伊士新创建媒体见面会在上海举行。当日,苏伊士亚洲首席执行官郭仕达介绍,2018年苏伊士总收益达173亿欧元,增长11.9%。苏伊士新创建在华业绩仍然保持了稳定增长,成功突围,营收增长达到双位数。

苏伊士亚洲先进技术方案高级副总裁马海洋表示,借着中国数字化变革的东风,苏伊士新创建不断进行创新,致力为城市的水务及固废资源管理提出全新的解决方案。其中AQUADVANCED®智慧解决方案则为智慧公用事业量身定制,将应用到更广泛的领域,竞争优势明显。

AQUADVANCED®智慧解决方案是一个独特的实时软件平台,涵盖了整个水务管理周期。它能够实现水井效能实时监测、饮用水管网的实时效能优化、水系统的实时能源优化、城市排水系统实时预警和动态控制、水厂和污水厂实时虚拟监控,以及实时空气质量监测,帮助项目做到降本增效。AQUADVANCED®智慧解决方案已在澳门、重庆得到很好的应用。如澳门自来水项目,通过推行智慧水务,成功使其自来水的漏损率从1985年的18.1%降到2018年的9%;城市排水系统应用在重庆悦来新城的海绵城市建设,可以提前20h以上预警洪涝风险,最多可减少45%的溢流污水排放量,还可以减小50%的调蓄设施容积。

针对目前中国面临的水环境治理现状,AQUADVANCED®智慧解决方案将会越来越多地应用到海绵城市建设以及河道修复等领域,推动中国水环境的整体改善。

(本刊编辑部)