

城市雨水管理

透水路面与生物滞留组合系统的径流体积控制效能

李俊奇^{1,2}, 关鹏祥¹, 杨正³, 王文海^{1,2}, 杨擎柱¹, 李芃抒¹

(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. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 3. 中国地质大学<北京> 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 透水路面与生物滞留组合系统为典型的低影响开发雨水控制设施,通过实验室人工模拟降雨,对道路1%横、纵坡条件下透水路面与生物滞留组合系统的径流雨水体积控制效能进行了研究。结果表明,变径流系数法-等流时线法更适合试验条件下透水路面的产汇流理论计算;随着降雨重现期由1年增加至20年,透水路面的径流雨水体积控制率由30.69%降低到10.21%;高降雨重现期下组合系统增加蓄水层深度对雨水体积控制率的改善效果不如低降雨重现期下显著;随着降雨重现期由3年增加至20年,组合系统中生物滞留设施对雨水体积控制率的贡献比例从71.56%增加至86.31%;当组合系统中滞留带蓄水层深度为15 cm时,10年和20年重现期下的雨水体积控制率为75.73%和74.59%,径流雨水控制效果较好;影响组合系统雨水体积控制率的主要因素相关性排序为蓄水层深度>降雨量>峰值雨强。

关键词: 透水路面; 生物滞留设施; 路面径流; 城市雨水管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0125-05

Runoff Volume Control Efficiency of Combined System of Pervious Pavement and Bioretention

LI Jun-qi^{1,2}, GUAN Peng-xiang¹, YANG Zheng³, WANG Wen-hai^{1,2},
YANG Qing-zhu¹, LI Peng-shu¹

(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 Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China; 3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences <Beijing>, Beijing 100083, China)

Abstract: The combined system of pervious pavement and bioretention is a typical low impact development facility. The runoff volume control efficiency of a road with 1% horizontal and longitudinal slope by the combined system was explored through the simulated rainfall experiments. The results showed that variable runoff coefficient method - isochrone method was more suitable for theoretically calculating the runoff yield and confluence of the pervious pavement under the experimental condition. As the rainfall return period increased from one year to twenty years, the runoff volume control rate of pervious pavement decreased from 30.69% to 10.21%. The improvement effect on the runoff volume

control rate by increasing the depth of the water ponding area in high rainfall return period was not as significant as that in low rainfall return period. With the increase of rainfall return period from three years to twenty years, the percentage of bioretention in the combined system contributed to the runoff volume control rate increased from 71.56% to 86.31%. When the depth of the water ponding area was 15 cm, good runoff control efficiency was achieved with the volume control rates of 75.73% and 74.59% under 10-year and 20-year return periods. The correlation sequence of the main factors affecting the runoff volume control rate by the combined system was the depth of water ponding area > rainfall > peak rainfall intensity.

Key words: pervious pavement; bioretention facility; road runoff; urban stormwater management

透水路面与生物滞留设施广泛应用于海绵城市建设中,对削减径流雨水峰值流量和外排总量、延迟滞峰时间等均有较好的效果。目前国内外已有部分学者对单项的透水路面与生物滞留设施开展了水量与水质控制效能的研究^[1-4],对组合系统的产汇流过程及径流控制效果也开展了理论分析计算^[4],但仍缺乏透水路面与生物滞留组合系统的试验数据支撑。为此,笔者对透水路面与生物滞留组合系统的产汇流过程进行了试验研究,分析透水路面的产汇流计算方法以及组合系统的径流雨水体积控制效能,并对主要影响因素进行了相关性排序,以期透水路面与生物滞留组合系统的设计应用提供参考。

1 试验部分

1.1 试验装置

试验装置位于实验室内,设置一条机动车道和一个生物滞留设施,机动车道铺设透水沥青路面,构建透水路面与生物滞留组合系统,见图1。降雨采用人工降雨装置模拟,降雨高度为15 m,雨强连续变化范围为10~250 mm/h,降雨均匀度系数>0.90,雨滴大小范围为1.50~5.00 mm。通过控制降雨装置喷头开度,实现不同重现期的模拟降雨过程。

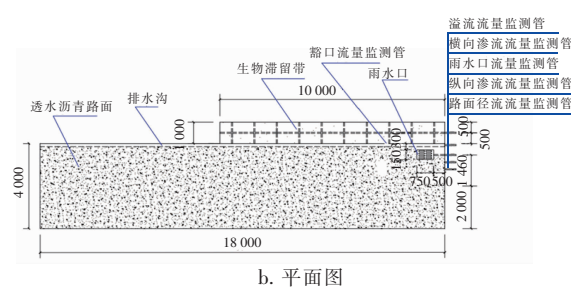
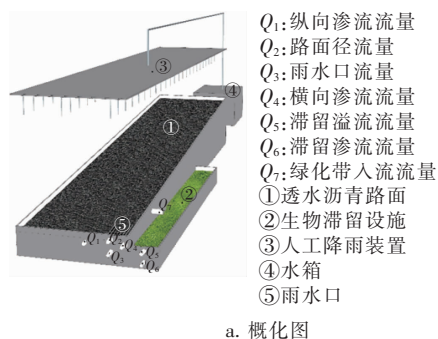


图1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of test device

依据实验室内场地条件、道路横纵坡设计规范以及人工铺设透水路面可控误差等因素,设置透水路面长为18 m、宽为4 m,道路横坡与纵坡均为1%。装置采用透水沥青路面I型,路表水进入表面层后排入邻近排水设施,整体结构根据《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190—2012)铺装而成,面层材料选用OGFC-13排水性沥青路面混合料,厚度为5 cm。面层下铺设不透水土工布作为封层,封层下铺设厚度为15 cm的二灰粒料作为垫层,并在垫层与基层间增加防渗措施,道路基层厚度为55 cm。道路外侧面层下方埋设长为18 m、宽为16 cm、高为6 cm的排水暗沟。在道路外侧末端设置尺寸为75 cm×45 cm的雨水口,深度为30 cm。道路外侧距道路末端2.5 m处设有宽为20 cm的透水路面与生物滞留设施连接豁口。绿化带入流量为排水暗沟导入,横向渗流总流量为流量 Q_4 和 Q_7 之和。

设置生物滞留设施位于道路一侧,考虑到透水沥青路面与生物滞留设施的面积占比及实验室内条件等因素,设计生物滞留设施的长为10 m、宽为1 m,结构为复杂型,由下至上依次为5 cm厚的砖石基层、防渗膜、30 cm厚的砾石层、20 cm厚的种植土

层。在其砾石层底部预设“丰”字型穿孔集水管,集水干管坡度为1%,支管间距为1 m,开孔直径为1 cm,总开孔率为8%。装置中生物滞留设施的蓄水层高度能够灵活调节。

1.2 试验方案

为分析北京地区不同降雨重现期、不同滞留带蓄水层深度条件下,单独透水路面以及组合系统对径流雨水体积的控制效能,并根据试验监测值与理论计算值寻找适合该透水路面的产汇流计算方法,进行以下试验方案设计:当测试单独透水路面时,降雨重现期设为1、3、5、10、20年;当测试组合系统时,降雨重现期设为3、5、10年,滞留带蓄水层深度设为5、10、15 cm。降雨条件采用北京市Ⅱ区暴雨强度公式,并利用芝加哥雨型进行暴雨时程分配,雨峰位置系数 $r=0.4$ 。根据实验室内的水箱容积,降雨历时采用1 h。

1.3 雨水体积控制效果的计算方法

① 雨水体积控制率

对试验装置的外排雨水流量进行积分,得出外排雨水总体积 V_1 ,则雨水体积控制率 η 为:

$$\eta = \left(1 - \frac{V_1}{V_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_0 为试验装置内的降雨体积, m^3 。

② 单位面积雨水控制体积

单位面积透水路面控制的雨水体积,为降雨体积扣除外排雨水体积后除以透水路面面积,即:

$$\alpha = (V_0 - V_1) / A \quad (2)$$

式中: α 为单位面积雨水控制体积, m^3/m^2 ; A 为透水路面面积, m^2 。

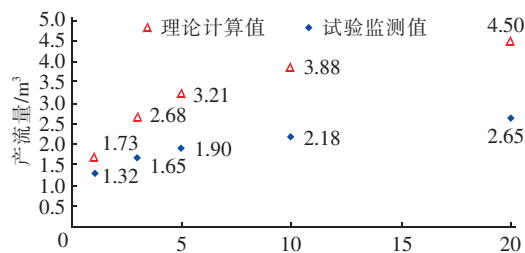
2 试验结果与分析

2.1 透水路面径流雨水的控制效果

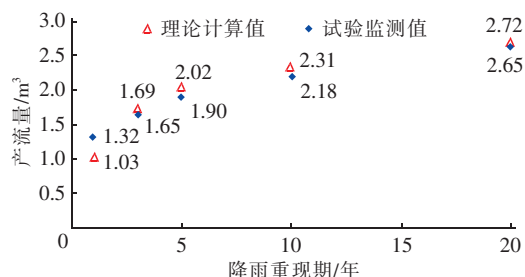
对单独透水路面情况下的外排雨水流量进行积分得出外排雨水总体积,利用式(1)计算得到,在1、3、5、10、20年一遇的重现期条件下,单独透水路面的径流雨水体积控制率分别为30.69%、27.94%、21.29%、11.92%、10.21%;并通过拟合得出两者呈指数函数关系: $\eta = 29.875e^{-0.061P}$ (P 为重现期), $R^2 = 0.8598$,相关性较好。可以看出,在不同重现期下该透水路面对雨水体积的控制率较为有限,这是由于试验采用Ⅰ型透水路面,雨水下渗至道路面层后不能再进行入渗,导致透水路面控制的雨水体积较少,控制率较为有限。

利用式(2)计算得到,当重现期为3、5、10、20年时,该透水路面在试验条件下的单位面积雨水控制体积分别为13.62、11.91、7.82、7.55 L/m^2 。

王庆通过理论结合案例计算对比研究了透水路面产流计算方法,得出适合透水路面的产流计算方法为Linsley-Horton下渗法,适合透水路面的产汇流计算方法为Linsley-Horton下渗法-等流时线法^[5]。杨擎柱通过透水路面产汇流试验研究结合理论计算,得出适合透水路面的产汇流计算方法为变径流系数法-等流时线法^[6]。本研究根据王庆和杨擎柱的研究结果,对试验透水路面产汇流过程进行理论计算,并与试验监测值进行对比,以期找到适合本试验的透水路面产汇流计算方法,结果如图2所示。



a. Linsley-Horton下渗法-等流时线法



b. 变径流系数法-等流时线法

图2 透水路面的产汇流计算方法

Fig. 2 Runoff yield and confluence calculation method of the pervious pavement

由图2可知,Linsley-Horton下渗法-等流时线法的理论计算值与试验监测值的误差平均为37.6%,且误差随重现期的增加而增大。变径流系数法-等流时线法的理论计算值与试验监测值较接近,除了重现期为1年时理论值与监测值的误差较大外,其他重现期下理论值与监测值的误差平均为8.9%。由此表明,变径流系数法-等流时线法是较适合本试验条件的透水路面产汇流理论计算方法。

2.2 组合系统的雨水控制效果

当滞留带蓄水层深度分别为5、10、15 cm时,5

年一遇重现期条件下组合系统的雨水体积控制率分别为65.05%、76.25%、93.56%,10年一遇重现期条件下分别为70.22%、74.43%、75.73%。可知,当蓄水层深度由5 cm增至15 cm时,5年一遇重现期下组合系统的雨水体积控制率增加了28.51%,而10年一遇重现期下仅增加了5.51%。10年一遇重现期下的降雨量较大,使得路面产流量及滞留带入流量较大,导致降雨雨峰来临时滞留带内已经存储了较多雨水,因此使得增加蓄水层深度对雨水体积控制率的改善效果不如5年一遇重现期。

经分析,在5年一遇重现期下,随着组合系统滞留带蓄水层深度由5 cm增加至15 cm,组合系统中透水路面对雨水体积控制率的贡献比逐渐减小,由32.73%降至22.76%,生物滞留设施的贡献比逐渐增大,由67.27%增至77.24%;在10年一遇重现期下呈现同样的规律,透水路面对雨水体积控制率的贡献比由16.98%降至15.74%,生物滞留设施的贡献比由83.02%增至84.26%。

当组合系统蓄水层深度为15 cm时,3、5、10和20年一遇重现期下组合系统的雨水体积控制率分别为98.25%、93.56%、75.73%、74.59%。可知,相比3年一遇重现期,5、10和20年一遇重现期时组合系统的雨水体积控制率分别下降了4.69%、22.52%与23.66%。当降雨重现期由3年增至5年时,组合系统的雨水体积控制率衰减较慢,当重现期由5年增至10年时,组合系统的雨水体积控制率衰减较快。经分析,这是由于10年一遇相比5年一遇的降雨总量和强度均增加较多,导致路面径流量和市政管道外排量增加,因此使得10年一遇降雨条件下组合系统的雨水控制率下降较快。

对比发现,当重现期由3年增加至20年时,单独透水路面和组合系统的雨水体积控制率分别为10.21%~27.94%和74.59%~98.25%,可见增加生物滞留设施后,组合系统比单独透水路面对雨水体积控制效能的改善效果较明显。经分析,随着重现期由3年增至20年,组合系统中生物滞留设施对雨水体积控制率的贡献比从71.56%增至86.31%,透水路面的贡献比从28.44%减小至13.69%。

2.3 雨水体积控制率的主要影响因素分析

组合系统中影响雨水体积控制率的主要因子有:峰值雨强、降雨量以及滞留带蓄水层深度。本研究选用SPSS中的Spearman法进行参数的双变量相

关性分析,以找到影响组合系统雨水体积控制率的主要因子相关性排列次序。结果表明,峰值雨强与控制率呈负相关,相关系数为-0.167,相关性不显著;降雨量与控制率呈负相关,相关系数为-0.571,相关性不显著;蓄水层深度与控制率呈正相关,相关系数为0.772,相关性显著。由此得到影响组合系统雨水体积控制率的主要因子相关性排序为:蓄水层深度>降雨量>峰值雨强。

3 结论

① 通过对比分析透水路面产汇流试验监测数据与理论计算结果,发现变径流系数法-等流时线法更适合本试验的透水路面产汇流理论计算。

② 随着降雨重现期从3年一遇增加到20年一遇,组合系统中生物滞留设施对雨水体积控制率的贡献比由71.56%增加至86.31%,生物滞留设施在组合系统对径流雨水体积的控制中发挥主要作用。另外,随着降雨重现期的升高,增加生物滞留设施的滞蓄空间对组合系统径流雨水体积控制效能的改善效果呈下降趋势。

③ 在3年和5年一遇重现期下,组合系统的径流雨水体积控制率可达到90%以上;在10年和20年一遇重现期下,控制率可达到75%左右。总体来看,在3~20年降雨重现期条件下组合系统对径流雨水具有较好的控制效果,但随着重现期的增大,其控制效果有所下降。

④ 利用SPSS软件对试验监测数据进行双变量相关性分析,得到组合系统主要试验影响因子与雨水体积控制率的相关性排序为:蓄水层深度>降雨量>峰值雨强。

参考文献:

- [1] Martin W D, Kaye N B. Hydrologic characterization of undrained porous pavements[J]. J Hydrol Eng, 2014, 19(6): 1069-1079.
- [2] Chandrasena G I, Pham T, Payne E G, et al. E. coli removal in laboratory scale stormwater biofilters: Influence of vegetation and submerged zone[J]. J Hydrol, 2014, 519: 814-822.
- [3] 朱志强. 改良型生物滞留池对雨水径流中污染物去除效果的研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
Zhu Zhiqiang. Research on Modified Bio-retention Removal Effect on the Pollutant Contained in Rainfall Runoff[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017 (in

Chinese).

- [4] 黄静岩,李俊奇,宫永伟,等. 道路生物滞留带削减雨水径流的实测效果研究[J]. 中国给水排水,2017,33(11):120-127.

Huang Jingyan, Li Junqi, Gong Yongwei, *et al.* Research on stormwater runoff reduction by roadside bioretention facilities[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 120-127 (in Chinese).

- [5] 王庆. 透水路面与生物滞留组合系统对道路径流峰值流量控制效能及设计研究[D]. 北京:北京建筑大学,2016.

Wang Qing. Design and Control Efficiency of Road Peak Runoff by Combined System of Pervious Asphalt Pavement and Bioretention Facility[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016 (in Chinese).

- [6] 杨擎柱. 透水路面与生物滞留组合系统对径流峰值控制效能的实验研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018.

Yang Qingzhu. Experimental Study on Peak Runoff Control Efficiency of Combined System of Pervious Asphalt Pavement and Bioretention Facility[D]. Beijing:

Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018 (in Chinese).



作者简介:李俊奇(1967-),男,山西稷山人,博士,教授,院长,长期从事城市雨水控制利用理论与技术、水环境生态技术、环境与资源政策等研究。

E-mail: jqli6711@vip.163.com

收稿日期:2018-11-19

(上接第124页)

配方法与策略研究[J]. 环境工程学报,2009,3(1):89-92.

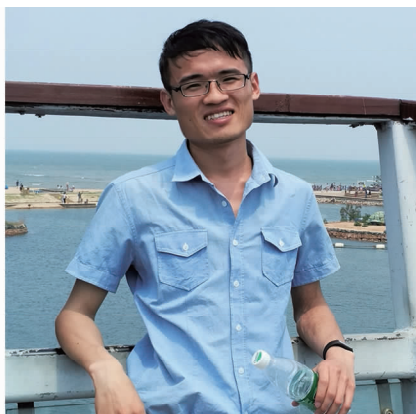
Wang Wei, Peng Yongzhen, Sun Yanan, *et al.* Study of influent flow distribution methods and strategies in step-feed A/O process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1): 89-92 (in Chinese).

- [6] Cao G H, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater[J]. Bioresour Technol, 2013, 128: 604-611.

- [7] Wang W, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Enhanced biological nutrients removal in modified step-feed anaerobic/anoxic/oxic process [J]. Chinese J Chem Eng, 2009, 17(5): 840-848.

- [8] Wang J H, Peng Y Z, Chen Y Z. Advanced nitrogen and phosphorus removal in A²O-BAF system treating low carbon-to-nitrogen ratio domestic wastewater[J]. Front

Environ Sci Eng China, 2011, 5(3): 474-480.



作者简介:孙海龙(1994-),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,研究方向为水污染控制工程。

E-mail: 849043818@qq.com

收稿日期:2018-07-13