

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.018

近市政道路生物滞留带雨水入渗优化分析

梁行行¹, 李小乐², 张勋², 马越¹, 姬国强¹, 胡志平², 卢依娜²

(1. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设<集团>有限公司 海绵城市技术中心, 陕西 咸阳 712000; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对海绵型市政道路中生物滞留带的防渗膜铺设方式、防渗效果评价及雨水入渗影响范围的研究还存在较多不足, 运用 GeoStudio 软件中的渗流分析模块 SEEP/W 和应力应变分析模块 SIGMA/W 进行流固耦合分析, 对于雨水入渗作用下的两种不同类型生物滞留带, 分析滞留带底部防渗膜外伸不同长度条件下地基土中含水量及沉降的变化规律, 在确保雨水入渗不对路面产生致灾影响的前提下, 对防渗膜外伸长度进行优化。数值分析结果表明: 对于传输型生物滞留带, 防渗膜可仅在侧面铺设; 对于入渗型生物滞留带, 防渗膜在设施底部两侧各外伸 0.5 m 时可满足滞留带雨水入渗的需要。入渗型滞留设施的放坡比越小, 雨水入渗对地基土的影响就越小。

关键词: 海绵城市; 市政道路; 生物滞留带; 防渗膜; 流固耦合

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0107-06

Optimization Analysis of Rainwater Infiltration in Bioretention Zone near Municipal Roads

LIANG Hang-hang¹, LI Xiao-le², ZHANG Xun², MA Yue¹, JI Guo-qiang¹, HU Zhi-ping², LU Yi-na²

(1. Technology Research Center for Sponge City, Shaanxi Xixian New Area Fengxi New City Development and Construction Group Co. Ltd., Xianyang 712000, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: There are still many shortcomings in the study of anti-seepage membrane laying method, anti-seepage effect evaluation and influence range of rainwater infiltration in the bioretention zone of the sponge type municipal road. The percolation analysis module SEEP/W and stress strain analysis module SIGMA/W in GeoStudio software were used for fluid-solid coupling analysis. For two different types of bioretention zones under the action of rainwater infiltration, variation of water content and subsidence of foundation soil were analyzed when different extension lengths of anti-seepage membrane at the bottom of the retention zone were used. On the premise of ensuring that rainwater infiltration did not have a disastrous effect on the road surface, the extension length of anti-seepage membrane was optimized. Numerical analysis showed that the anti-seepage membrane could be laid only on the side in the transport-type bioretention zone. For the infiltration-type bioretention zone, when the anti-seepage membrane extends 0.5 m on both sides of the bottom of the facility, it could meet the need

of rainwater infiltration in the detention zone. The smaller the grading ratio of the infiltration-type retention facilities was, the less the impact of rainwater infiltration on the foundation soil under the same conditions had.

Key words: sponge city; municipal road; bioretention zone; anti-seepage membrane; fluid-soild coupling

海绵城市建设开发技术中,在地势较低的区域,通过植物、土壤和微生物系统滞蓄、净化径流雨水的设施称为生物滞留设施,由于其高效的雨水自然净化与处理特性,已成为应用最广泛的低影响开发(LID)技术之一^[1]。当设置在近市政道路上时,通常称之为生物滞留带。为了防止雨水入渗过多,一般在滞留设施底部及侧面全铺设防渗膜或对“渗”的适用条件进行限制^[2-3];同时有研究表明,在城市绿化带内设置生物滞留设施可采取铺设“两布一膜”、设置防水挡墙等防水措施^[4]。珠海市双湖路在市政道路的生物滞留带建设过程中指出,在碎石滤层与道路路基间应加铺“两布一膜”^[5]。重庆市悦来新城海绵城市道路的生物滞留带与车行道路路基之间的防渗膜按下列原则铺设:小于6 m的填方段道路半包;大于6 m的高填方道路全包^[6];当雨水入渗后对建筑基础或道路结构造成损害时,应该设置防渗层^[7]。咸阳国际机场在建设海绵城市过程中指出,应将LID设施布置在浅层,并在设施周围做防渗措施,同时应对湿陷性黄土进行强夯等处理措施^[8]。可见现有市政道路的生物滞留设施防渗做法一般为参考既有工程经验在设施底部全铺设防渗膜,少数工程在一定情况下采用防渗膜半包或不铺的方式,但均缺乏具体依据,忽视了雨水下渗后对其下部地基土及道路的影响。鉴于此,笔者选取西咸新区某道路典型滞留带工程案例,利用有限元软件GeoStudio模拟不同防渗膜铺设长度下,雨水入渗生物滞留带后对其下部土体含水量和沉降的影响,以期对现有生物滞留带的防渗措施优化提供参考。

1 模型构建

1.1 地质条件及生物滞留带简介

该市政道路是西咸新区沣西新城连接咸阳与西安的主干道路之一,设计长度为4.29 km,采用四幅路形式,中央分隔带宽12.0 m,机动车道各宽16.0 m,两侧分隔带各宽3.0 m,辅道各宽8.0 m。地勘资料显示,沿线地基土分为4个工程地质层,地质剖面见图1。两侧分隔带中的生物滞留带剖面见图2,

滞留带深为1.23 m,底部宽度均为1.3 m。滞留带侧面铺设防渗膜。传输型生物滞留带土质为种植土,做表面下凹;入渗型生物滞留带下部铺设0.3 m厚的砾石层,并在砾石层中铺设DN100穿孔排水管,上部为雨水下渗能力较强的换填土。

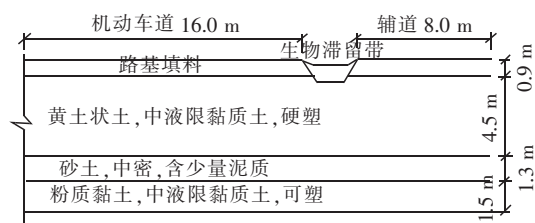
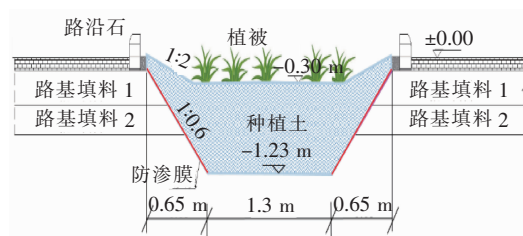
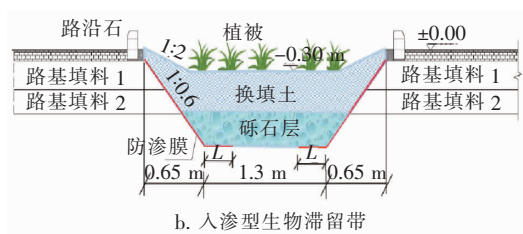


图1 地层剖面

Fig. 1 Stratigraphic profile



a. 传输型生物滞留带



b. 入渗型生物滞留带

图2 生物滞留带剖面

Fig. 2 Schematic diagram of bioretention zone

1.2 有限元模型

考虑道路工程特点,可以选取某一断面按平面应变问题进行分析^[8]。如图3建立的有限元模型,计算深度从路面向下取8.2 m,两侧分别取机动车道宽16.0 m和非机动车道宽8.0 m,机动车道及辅道横坡均为1.5%。模型网格划分都采用非结构化的四边形和三角形网格。其中含水量变化影响范围见图3,均从滞留设施底部正下方起算,路面沉降变

化观测位置选取距离滞留设施最近的 A 点。

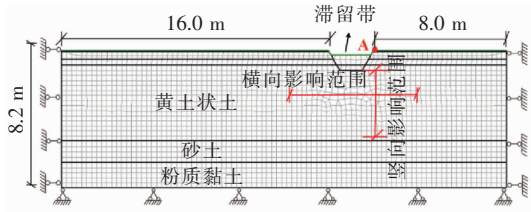


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

表1 土层的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

项 目	土层厚度/m	含水量/%	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa
黄土状土	4.5	20.0	19.5	6×10^{-4}	24	31	10.3
砂土	1.3	22.0	19.8	5×10^{-1}	36	4	20.0
粉质黏土	1.5	26.9	19.6	1×10^{-3}	21	25	9.8

1.4 边界处理

地基两侧施加水平约束,底部施加水平约束和竖向约束,上部构筑物取自由边界。由于设计中滞留带上部允许积水最长时间为 72 h,积水超过 72 h 时则采取人工措施处理多余雨水。而且滞留带中溢流井高出滞留带顶面 20 cm,超过 20 cm 的积水会通过溢流井排走,即滞留带中最大积水高度为 20 cm,因此本研究中降雨边界均按最不利条件即滞留带上部 20 cm 积水持续 72 h 计算。防渗膜用不透水的界面材料模拟,设置其渗透系数为 0。为了获得对渗流域和初始应力场更符合实际的设定,首先通过运行渗流稳态分析和原位分析来作为耦合分析的初始条件。

2 计算结果与分析

生物滞留带中雨水入渗引起的地基场含水量变化范围及导致的路面沉降是工程设计关心的重要问题,因此本研究将通过观察不同防渗膜铺设长度下地基土中含水量的变化和路面沉降情况来评价雨水入渗对不同生物滞留带的影响。考虑雨水入渗的对称性,选取滞留带一侧的辅道观测路面沉降。

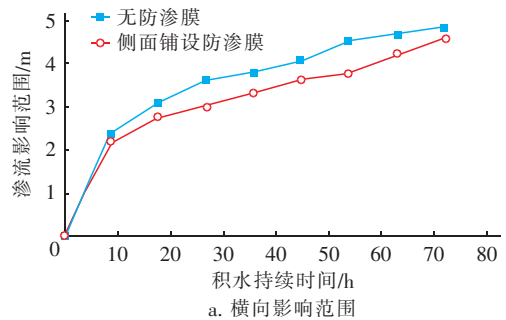
2.1 防渗膜铺设长度对渗流的影响及其优化

2.1.1 传输型生物滞留带

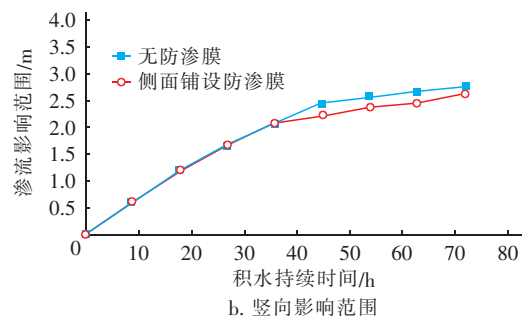
在传输型生物滞留带上部加 20 cm 水头并持续 72 h,地基土的初始体积含水量为 17%,观测不同防渗膜铺设工况下地基土中含水量的变化以及导致的路面沉降情况。图 4 为雨水入渗在地基土中的影响范围。

1.3 参数选取

耦合计算时土性模型采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型^[9]。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对现场土样进行测定获得其物理力学参数,结果见表 1。传输型生物滞留带的种植土为黏土状土,渗透系数为 $2.55 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$;入渗型生物滞留带中的换填土由砂、原土、椰糠按一定的体积比拌和而成,因而其渗透性能较好,渗透系数为 $7.95 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。



a. 横向影响范围



b. 竖向影响范围

图4 入渗影响范围时程曲线

Fig.4 Time history curve of infiltration influence range

由图 4 可以看出,随着积水持续时间的增加,渗流的影响范围不断增大,而且增大趋势逐渐趋于平缓,说明渗流速率有所减缓;当入渗时间较短时,无防渗膜和侧面铺设防渗膜的渗透影响范围基本一致,这可能是因为入渗初期水分从设施底部开始下渗,此时防渗膜铺设对入渗范围影响较小。积水持续 24 h 且无防渗膜铺设时,渗流的横向影响范围约为 3.65 m;侧面铺设防渗膜时,渗流的横向影响范

围约为2.96 m,渗流的竖向影响范围也有所减小。积水持续72 h且侧面不铺设防渗膜时,渗流的横向影响范围最大为4.8 m,竖向影响范围最大为2.76 m;滞留设施侧面铺设防渗膜时,渗流影响的最大横向范围为4.62 m,最大竖向影响范围为2.62 m,可见防渗膜的铺设有减小了渗流的影响范围。对比相同条件下渗流的横向和竖向影响范围可知,横向影响范围的减小更多,说明防渗膜铺设长度的增加主要抑制的是雨水的横向渗流。

图5为路面沉降时程曲线。

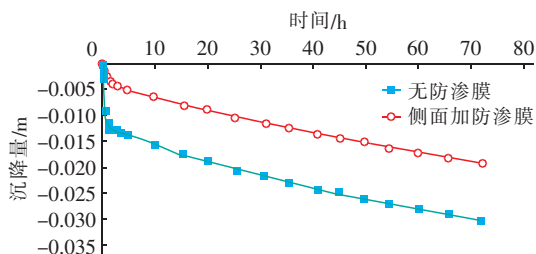


图5 路面沉降时程曲线

Fig. 5 Time history curve of pavement subsidence

由图5可知,无防渗膜铺设时,20 cm水头持续72 h时,路面最大沉降30 mm;防渗膜在滞留设施侧面铺设时,路面最大位移即A点的沉降为19 mm。根据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012),道路横坡 i 宜采用1.0%~2.0%,辅道长为8 m,因此水平面垂直高度差为120 mm,当路肩产生沉降时,即使道路横坡增大,当道路横坡为2.0%时,路面水平垂直高差为160 mm,而雨水入渗生物滞留设施导致的路面沉降总是从路肩开始,即当路肩沉降超过40 mm时,横坡过大超过2.0%将会影响行车舒适感及安全,因此本研究中控制路肩沉降按40 mm考虑。

传输型生物滞留带的主要功能为上部传输雨水,其下渗性能较差,无防渗膜铺设时,对地基土的影响也很小,考虑到一定的安全储备,可考虑只在其侧面铺设防渗膜。

2.1.2 入渗型生物滞留带

在入渗型生物滞留带上部加20 cm水头并持续24 h,地基土的初始体积含水量为27%,改变防渗膜的外伸长度,入渗影响范围时程曲线如图6所示(渗流影响范围及沉降变化观测位置同传输型生物滞留带)。随着积水持续时间的增加,渗流的影响范围不断增大,且增大的趋势减缓,说明渗流速率有

所减缓;对比相同条件下渗流的横向和竖向影响范围可知,防渗膜增加相同长度时,渗流的横向及竖向影响范围都随之减小。滞留设施侧面铺设防渗膜、积水持续72 h时,渗流影响的最大横向范围为7.4 m、最大竖向范围为6.1 m。滞留设施底部两侧防渗膜各外伸0.5 m时,渗流影响的最大横向范围为5.3 m、最大竖向范围为4.3 m。

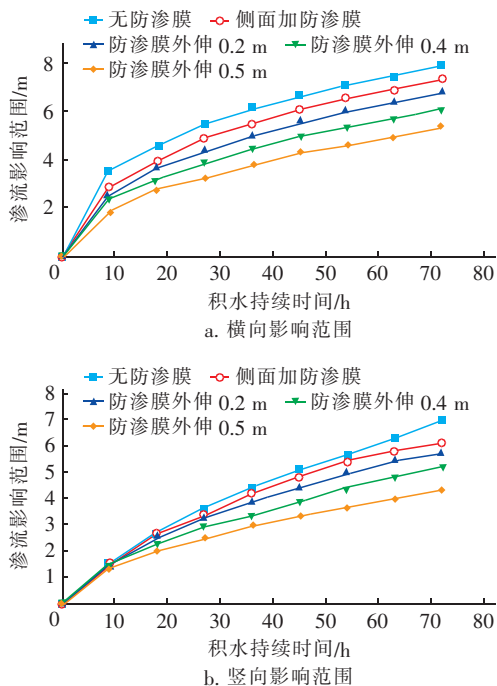


图6 入渗影响范围时程曲线

Fig. 6 Time history curve of infiltration influence range

此外,在不同防渗膜铺设条件下,水分入渗的横向影响范围随着时间的增大而均匀变化,但竖向影响范围中存在明显的突变点,产生这种现象的原因可能是,水分竖向入渗过程较水平方向更易受到地层条件的影响。

由图7的路面沉降时程曲线可知,20 cm水头持续72 h时,仅侧面铺设防渗膜工况下,路面最大沉降为48 mm,随着防渗膜铺设长度的增加,路面沉降有所减小,外伸至0.5 m时,滞留带底部剩余30 cm未铺设防渗膜,此时路面沉降为29 mm,小于规范允许值(40 mm),因此入渗型生物滞留带可考虑防渗膜外伸0.5 m。

防渗膜铺设前,应确保基层平整,铺设松紧适度。防渗膜纵向连接处,应按照上坡压下坡铺设,纵向搭接宽度不能满足要求的宽度时,应采用缝合方式,搭接宽度不小于0.1 m。

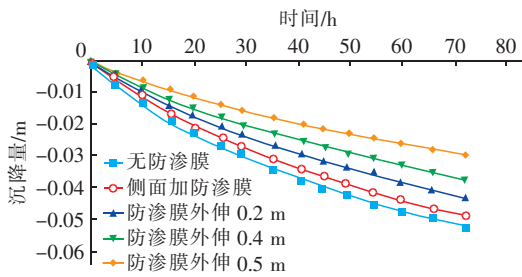


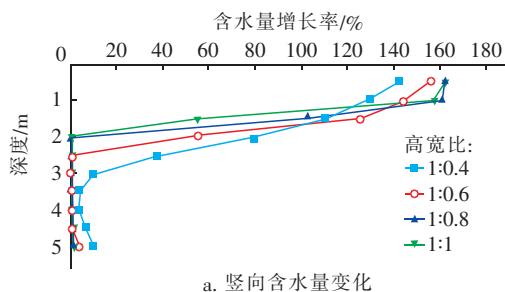
图7 路面沉降时程曲线

Fig. 7 Time history curve of pavement subsidence

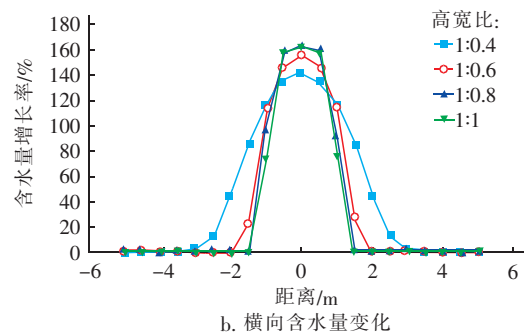
2.2 生物滞留设施结构的优化

对比2.1节中雨水入渗对传输型生物滞留设施与入渗型生物滞留设施的影响可知,相同积水条件下,雨水入渗对入渗型生物滞留设施的影响更大,为此对入渗型滞留设施的结构进行进一步优化研究。滞留设施侧面坡度在一定程度上可以改变雨水入渗的速率,因此考虑通过改变滞留设施的放坡角度来研究相同降雨条件下雨水入渗对地基土的影响。降雨边界条件按一般降雨情景,即水头边界为10 cm高水头持续24 h计算,其余边界条件同2.1节,渗流影响范围以距离滞留设施底部中间0.5 m为观察位置,沉降观测位置为整个右侧辅道路面,且计算的防渗膜长度均为2.1节中优化的结果长度。综合考虑滞留设施的结构尺寸特点及实际施工,高宽比分别设置为1:0.4、1:0.6、1:0.8、1:1。

图8为不同放坡比下地基土中含水量的变化,以含水量变化10%为界限观察入渗的影响范围。当高宽比为1:0.4时,渗流竖向影响范围为3.0 m;当高宽比为1:0.6时,渗流竖向影响范围为2.4 m;当高宽比为1:0.8时,渗流竖向影响范围为1.9 m;当高宽比为1:1时,渗流竖向影响范围为1.8 m。可见,随着高宽比的减小即滞留带斜坡变陡,渗流竖向影响范围呈现不断减小的趋势。由图8(b)可知,当高宽比为1:1时,横向含水量变化影响范围也最小,渗流影响范围为2.8 m。



a. 竖向含水量变化



b. 横向含水量变化

图8 不同放坡比下地基土含水量的变化

Fig. 8 Change of water content of foundation soil under different slope ratios

图9为滞留设施侧面不同放坡比下的路面沉降变化。可见,距离滞留设施越近的位置,路面沉降越大;斜坡高宽比减小,路面沉降也呈现出随之减小的趋势,当高宽比为1:1时路面沉降最小。当滞留设施的放坡角度减小即斜坡变缓时,雨水入渗路径也随着增加,水历经斜坡的速率减小,因此相同条件下,对地基土的影响范围也有所减小。当放坡角度减小到一定程度时,相同条件下入渗产生的影响差异较小。

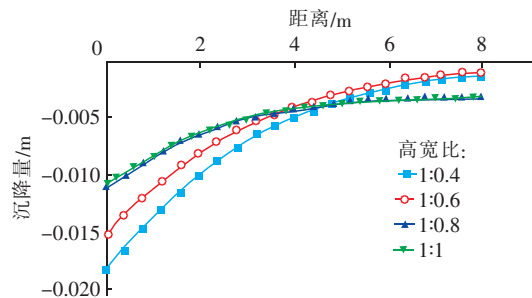


图9 路面沉降变化

Fig. 9 Change of pavement subsidence

实际工程中,在满足滞留设施雨水滞蓄容积及施工方便的条件下,可将放坡型滞留设施的坡度适当减缓,以减小雨水入渗对地基土含水量变化及路面沉降的影响。

3 结论

① 防渗膜铺设长度的增加可有效增加渗流路径,减小渗流对地基土中含水量和沉降的影响,且在滞留带底部铺设防渗膜时,主要对雨水的横向渗流起抑制作用。随着积水持续时间的增加,渗流影响速率减缓并逐渐趋于稳定。

② 对于传输型生物滞留带,雨水入渗对其下部地基土渗流场及路面沉降的影响较小,考虑到一

定的安全储备, 仅可在滞留带侧面铺设防渗膜。

③ 对于入渗型生物滞留带, 当防渗膜在侧面铺设并在底部两端各伸长 0.5 m 时, 可使雨水在下渗的同时又不影响道路正常运行。

④ 对于不同放坡角度的入渗型生物滞留设施, 当放坡比为 1:1 时, 雨水入渗作用下地基土渗流影响范围及路面沉降最小。

参考文献:

- [1] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 1-5.
Che Wu, Zhao Yang, Li Junqi, et al. Explanation of sponge city development technical guide: Basic concepts and comprehensive goals [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 1-5 (in Chinese).
- [2] 杜晓丽, 韩强, 于振亚, 等. 海绵城市建设中生物滞留设施应用的若干问题分析[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 54-58.
Du Xiaoli, Han Qiang, Yu Zhenya, et al. Some issue of the bioretention application in sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(1): 54-58 (in Chinese).
- [3] 王宏伟. 关于海绵城市建设技术措施“渗”之使用的探讨[J]. 给水排水, 2019, 45(4): 72-74.
Wang Hongwei. Discussion on penetration technology in sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4): 72-74 (in Chinese).
- [4] 梁东. 西咸新区海绵城市规划建设实施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
Liang Dong. Study on the Planning and Construction of Sponge City in Xixian [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016 (in Chinese).
- [5] 罗慧玉. 基于 LID 的市政道路建设研究——以珠海市双湖路为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
Luo Huiyu. Based on the Municipal Road Construction Research of LID—in Zhuhai Lake Road as Example [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [6] 毛绪昱, 黄丽萍. 基于海绵城市理念的山地城市道路低影响开发设计[J]. 中国给水排水, 2016, 32(10):

81-85.

Mao Xuyu, Huang Liping. Design of municipal roads in mountainous city using low impact development technology based on sponge city concept [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 81-85 (in Chinese).

- [7] 来磊. 城市雨水生物滞留池工艺技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
Lai Lei. Study on Technology of Urban Rainwater Biological Retention Pool [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [8] 张海林, 郝薛文, 薛莹, 等. 西安咸阳国际机场海绵城市建设思考[J]. 民航管理, 2018(1): 57-60.
Zhang Hailin, Hao Xuewen, Xue Ying, et al. Thoughts on sponge city construction in Xi'an Xianyang International Airport [J]. Civil Aviation Management, 2018(1): 57-60 (in Chinese).
- [9] 熊健民, 金生吉, 余天庆. 路基沉降试验研究及数值模拟[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(4): 54-56.
Xiong Jianmin, Jin Shengji, Yu Tianqing. Numerical simulation on roadbed settlement of highway [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science, 2008, 25(4): 54-56 (in Chinese).



作者简介: 梁行行 (1979 -), 男, 陕西武功人, 本科, 高级工程师, 主要从事黄土地区海绵城市建设方面的工作。

E-mail: lianghh1979@163.com

收稿日期: 2019-12-25