

城市雨水管理

雨水花园侧向防渗措施效果的试验与模拟研究

袁志明¹, 卢金锁¹, 苏拥军², 张荣国², 孟庆军², 罗文敏²

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 建立具有侧向防渗结构的雨水花园模拟试验装置, 基于 HYDRUS-2D 软件平台建立雨水入渗模型, 验证了侧向防渗效果以及模型参数设置的合理性, 然后对某采取侧向防渗措施的雨水花园进行模拟。结果表明, HYDRUS-2D 软件可以模拟雨水花园土壤水分二维入渗过程, 且模拟可靠性较高; 增设防水材料后雨水花园取得了较好的侧向防渗效果; 雨水花园在靠近建筑物一侧增设防水材料可以有效减少侧向入渗, 与不增设防水材料时相比湿润锋运移距离平均减小了 60.6%; 与《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的规定相比, 当雨水花园的有效保护距离为 1.5 m 时, 可将增设防水材料的雨水花园设置在距离建筑物 2.35 m 处。

关键词: 雨水花园; HYDRUS-2D; 侧向防渗; 湿润锋

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)13-0130-05

Experiment and Simulation on Anti-seepage Effect of Lateral Impervious Protective Measures in Rain Garden

YUAN Zhi-ming¹, LU Jin-suo¹, SU Yong-jun², ZHANG Rong-guo², MENG Qing-jun², LUO Wen-min²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Nanning Rail Transit Co. Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: A rain garden simulation test equipment with lateral impervious structure was set up, and HYDRUS-2D software platform was employed to establish a rainwater infiltration model of the equipment. The effect of lateral impervious structure and the rationality of model parameters setting were verified. Then, a real rain garden with lateral impervious structure was simulated. The results indicated that two-dimensional infiltration process of the rain garden could be simulated by the HYDRUS-2D software, and the simulation reliability was high. Good lateral impervious effect was achieved by the rain garden built with lateral impervious protective measures. The rain garden built with waterproof material near the side of the building could inhibit the lateral infiltration effectively, and the transport distance of wetting front could be decreased by an average of 60.6% compared with that of the rain garden without waterproof material. Compared with 1.5 m effective protection distance of a rainwater garden proposed in *Sponge City Development Technical Guide: Low Impact Development*, a rain garden with waterproof materi-

al could be set at 2.35 m away from the building.

Key words: rain garden; HYDRUS-2D; lateral anti-seepage; wetting front

雨水花园是实现海绵城市的一种重要工程措施,因建造费用低、运行管理简单等优点而被广泛应用^[1]。雨水花园入渗过程包括垂直下渗和沿水平方向的侧向入渗,垂直下渗可补给地下水,侧向入渗则会对周边建筑物的地下结构产生破坏性影响。《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(以下简称“指南”)规定:雨水花园距离建筑物基础小于3 m(水平距离)的区域,应对雨水花园采取防渗处理。雨水花园侧向防渗的目的是使侧向浸润范围减小,具体可通过土壤中含水量的变化以及湿润锋运移距离这两个指标来体现^[2,3]。笔者在具有侧向防渗结构的雨水花园模拟装置中进行雨水入渗试验,并基于HYDRUS-2D软件平台建立入渗模型,将实测的土壤含水量及湿润锋运移距离与模拟结果进行比较,验证雨水花园下渗模型。而后选取某市的雨水花园为实际案例,以该市降雨量最大的一场雨为模拟情景,模拟雨水花园在有无增设防水材料下的雨水侧向入渗湿润锋运移距离,并与指南中的规定进行比较,提出该市雨水花园的设置及侧向防渗实施建议。

1 试验设计

1.1 试验装置

室内试验装置为有机玻璃土箱,如图1所示,长为700 mm、宽为300 mm、高为700 mm。土箱底部设置15个直径为3 mm的排气孔,以尽量减少空气阻力对土壤水分入渗的影响。土箱内开挖深度为15 cm、底部宽度为10 cm、边坡系数为1的梯形槽,土壤水分传感器位于试验装置的轴对称位置1、2处。

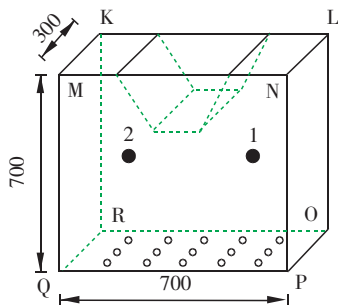


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

1.2 土壤物理性质

供试土壤是该市典型的黄土,土壤的机械组成由LS230/SVM+型激光粒度分布测定仪测定,容重采用环刀法测定,饱和含水量采用烘干法测定,土壤质地分类遵循国际制分类标准。土样的基本物理性质如下:质地为粉土,砂粒、粉粒、粘粒占比分别为8.21%、81.92%、9.87%,干容重为1.38 g/cm³,饱和含水量为0.44 cm³/cm³。

1.3 试验方法

土壤自然风干后碾压过2 mm筛,放置24 h使其水分分布均匀,按5 cm分层装入土箱,土槽的左侧斜坡上铺有防水材料,在梯形槽的底部铺一层砾石以防止加水过程中对土壤的冲刷。试验开始时,短时间内向梯形槽加入7 L水,试验过程中在装置的KLOR面上用马克笔绘制相应时刻的湿润锋曲线。试验结束后,将装置的MNPQ面拆除,用环刀在土壤水分传感器的周围取土样,用烘干法测定含水量,比较土壤水分传感器测量的含水量与烘干法测量的含水量以校核土壤水分传感器。

2 模型建立与验证

2.1 入渗基本方程

降雨条件下的雨水花园剖面土壤水分运动属于二维饱和-非饱和达西流运动,假定土壤是均质各向同性的多孔介质,忽略温度势的影响,同时不考虑土壤入渗过程中空气阻力对入渗水流的阻碍作用。雨水花园土壤水入渗的总水势由基质势和重力势组成,水分在总水势梯度下进行二维入渗,控制方程为二维Richards方程,方程表达式如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤非饱和体积含水量,cm³/cm³; t 为入渗时间,min; $K(\theta)$ 为非饱和导水率,cm/min; x 为水平坐标距离,cm; z 为垂直坐标距离,cm。

2.2 定解条件

2.2.1 初始条件

模拟降雨开始时由于土壤剖面含水量变化很小,故认为土壤初始含水量均匀分布,即:

$$\theta(x, y) = \theta_0 \quad (-X \leq x \leq X, 0 \leq z \leq Z) \quad (2)$$

2.2.2 边界条件

图2为雨水花园模型简图,由于边界IJ、BCDEF直接与大气相通,故设定为大气边界条件。边界JB处设有防水材料,边界IH、FG为装置的侧边壁,故确定边界JB、IH和FG为零通量边界。模拟雨水花园二维入渗过程中不涉及地下水位问题,因此边界GH为自由排水边界。综上,边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 & (0 \leq t \leq T, \text{沿 JB、IH、FG}) \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 & (0 \leq t \leq T, \text{沿 GH}) \\ -K(h) \frac{\partial (\theta - \theta_0)}{\partial z} = \varepsilon & (0 \leq t \leq T^0, \text{沿 IJ、DEF}) \\ -K(h) \frac{\partial (\theta - \theta_0)}{\partial z} = R & (0 \leq t \leq T, \text{沿 BCD}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 为试验结束时间; T^0 为模拟降雨结束时间; ε 为土壤蒸发强度, mm/min; R 为模拟降雨强度, mm/min。

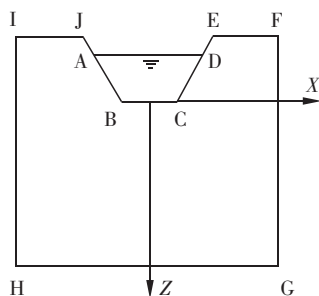


图2 雨水花园模型示意

Fig. 2 Model diagram of rain garden

2.3 模型参数

运行 HYDRUS-2D 软件需要输入大气边界条件、初始条件和土壤水分特性参数。大气边界条件用降雨强度代替,但总降雨量要与试验时的加水量相同。将试验土壤的初始含水量作为软件的初始条件,其值为 0.10。土壤水分特性参数如饱和含水量 (Q_s)、剩余含水量 (Q_r)、经验参数 α 和 n 、常数 l (一般取 0.5) 和饱和导水率 (K_s) 的获取利用土壤转换函数软件 ROSETTA 进行推求,在 ROSETTA 软件中输入土壤的机械组成和体积密度得到所需的参数,饱和体积含水量采用实测值,具体如下: Q_s 为 $0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, Q_r 为 $0.0606 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, α 为 0.0055, n 为 1.6723, l 为 0.5, K_s 为 36.08 cm/d 。

2.4 模型验证

根据前人的研究成果,均质土壤的二维入渗湿润锋形状是中心对称的椭圆或圆形^[4]。试验测得的和 HYDRUS-2D 软件模拟的雨水花园土壤水分二维运动随时间的变化见图3,选取入渗时间分别为 30、90、180 min 和 19 h 进行比较。由图3可以看出:增设防水材料促使该侧的侧向入渗湿润锋形状发生改变,增设防水材料一侧的侧向湿润锋运移距离明显小于不增设防水材料一侧,模拟结果与试验结果一致性较好。

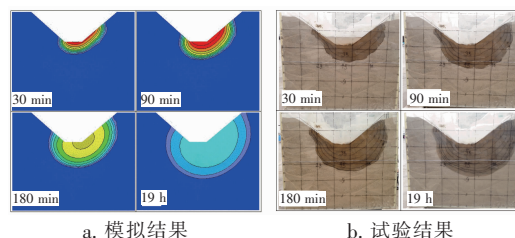


图3 模拟结果和试验结果

Fig. 3 Results of simulation and experiment

图4为 $X=0$ 处沿 Z 轴方向和 $Z=0$ 处沿 X 轴方向的湿润锋运移距离的实测值与模拟值随入渗时间的变化,其 R^2 分别为 0.89 和 0.84。对比图4(a)、(b)可以看出:湿润锋实测值与模拟值的变化趋势一致,且模拟值始终大于实测值。

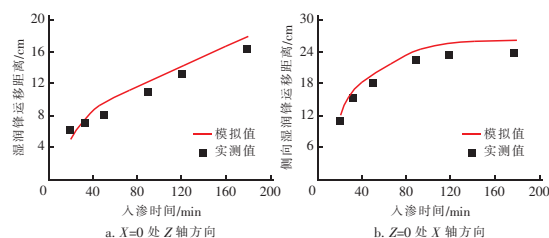


图4 湿润锋运移距离的实测值与模拟值对比

Fig. 4 Comparison between simulated and measured wetting front distance

观测点1、2处含水量的实测值与模拟值随入渗时间的变化见图5。可知:入渗1 h后观测点1处的含水量开始发生变化,而观测点2处的含水量在入渗4 h后才发生变化,这说明增设防水材料可以阻止水分向侧向运动;入渗过程中观测点1处的最大含水量为 $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,观测点2处的最大含水量为 $0.17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,说明增设防水材料后雨水花园的侧向防渗效果较好。含水量实测值与模拟值随入渗时间的变化趋势一致,且含水量模拟值总体上大于

实测值;对观测点1和2处的实测值与模拟值进行统计分析,计算得到 R^2 分别为0.87和0.80。

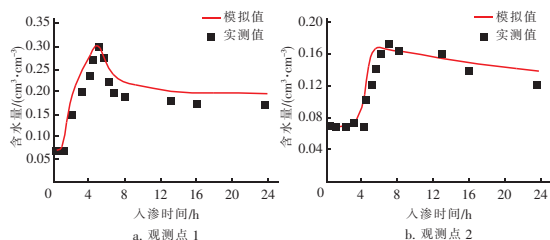


图5 含水量实测值与模拟值对比

Fig. 5 Comparison between simulated and measured water content

湿润锋、含水量实测值与模拟值存在偏差的原因主要是:①试验过程中空气阻力对土壤水分入渗的阻碍作用依然存在;②模型求解过程是基于土壤均质各向同性的假定,而实际试验中很难达到该条件。综上可知,HYDRUS-2D软件可以模拟雨水花园土壤水分二维入渗过程,且可靠性较高。

3 雨水花园入渗案例模拟与分析

3.1 场景选定

某小区建有一个面积为 20 m^2 、有效蓄水深度为 0.2 m 的雨水花园,其汇水面积为 400 m^2 ,其中建筑面积占60%、绿地率为30%、硬化路面面积率为10%,取屋顶、绿地和硬化路面的径流系数分别为0.90、0.15、0.85,则综合径流系数为0.65。

3.2 雨水花园模拟简化

图6(a)为雨水花园的典型构造示意,由蓄水区、覆盖层、种植层和溢流口四部分组成;图6(b)为雨水花园模拟概化图,模拟中不考虑土壤分层对雨水花园二维入渗的影响,即认为ABCDEFGH区域内的土壤为各向同性的均质土壤。

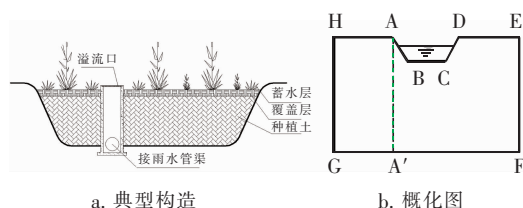


图6 雨水花园的典型构造和概化示意

Fig. 6 Typical structure and generalization of rain garden

对雨水花园AB侧增设防水材料和不增设防水材料两种情况,在选定的降雨情景下进行模拟,模拟过程中观测AA'GH区域侧向湿润锋运移距离的变化。侧向湿润锋运移距离以AA'为基准线统计,模

拟结束后统计两种情况下不同模拟时刻沿AA'方向的最大湿润锋运移距离。

3.3 降雨选择

降雨资料选自该市某气象站2005年—2014年降雨较集中月份(4月—10月)通过数据审核的自记暴雨量资料。经统计,2005年—2014年降雨较集中月份共计482场降雨,其中降雨量最大的一场降雨出现在2011年9月16日,总降雨量为98.8 mm,历时45.85 h,因此选该场降雨为最不利降雨情景。

图7为雨水花园的水位变化。雨水花园水位达到最高水位的时间是5 h,5 h后随着降雨的进行高出溢流口的水通过溢流井排走,因此直至降雨结束雨水花园维持0.2 m的恒水位。

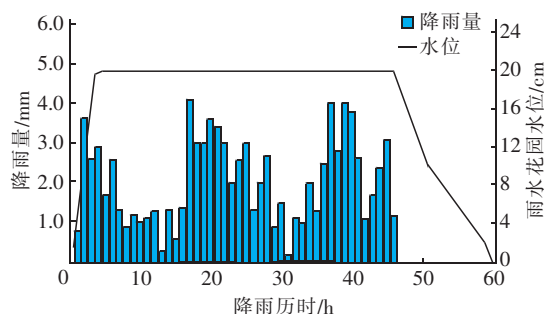


图7 雨水花园的水位变化

Fig. 7 Change of water level in rain garden

3.4 模拟结果

图8为在模拟结束时刻(第60小时)雨水花园AB侧有无增设防水材料下的二维入渗变化对比,图9为不同时刻AB侧湿润锋模拟对比。从图8可以直观地看出,增设防水材料可以使AB侧的湿润锋运移距离减小。从图9可以看出,在相同的入渗时刻,AB侧增设防水材料时的湿润锋运移距离明显小于未增设防水材料时的,且增设防水材料可以使该侧的湿润区域范围减小。

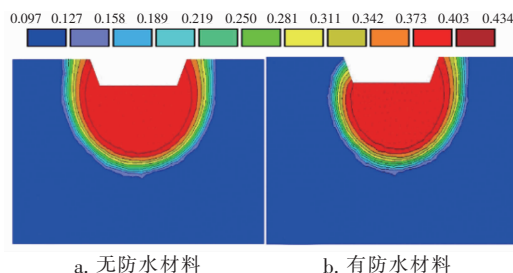


图8 有无增设防水材料下的入渗模拟结果

Fig. 8 Infiltration simulation results with and without waterproof material

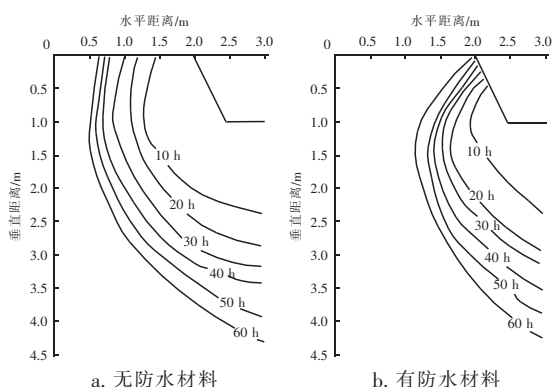


图9 不同入渗时间下的湿润锋模拟

Fig. 9 Simulation of wetting front in different infiltration times

湿润锋最大运移距离随时间变化的模拟结果显示,无论是否增设防水材料,侧向湿润锋运移距离都随入渗时间的增大而增大。在入渗时间为10、20、30、40、50、60 h时,AB侧无防水材料时的最大侧向湿润锋运移距离分别为0.7、0.9、1.2、1.3、1.45、1.5 m,而增设防水材料时分别为0.1、0.3、0.45、0.6、0.7、0.85 m,分别可减小85.7%、66.7%、62.5%、53.8%、51.7%、43.4%,平均减小60.6%。

综上可知,模拟结束时AB侧增设防水材料时的湿润锋最大运移距离为0.85 m,而未增设防水材料时的湿润锋最大运移距离为1.5 m。与指南中的规定相比,当该市不增设防水材料的雨水花园的有效保护距离为1.5 m时,增设防水材料时的有效保护距离可增大为2.15 m;当该市雨水花园的有效保护距离为1.5 m时,可将增设防水材料的雨水花园设置在距离建筑物2.35 m处。

4 结论

① 利用观测点处含水量随时间的变化和观测的湿润锋运移距离随时间的变化对模型参数进行验证,实测结果与模拟结果误差较小,HYDRUS-2D软件能够模拟雨水花园土壤水分二维入渗过程。分析试验结果与模拟结果得出,增设防水材料后的雨水花园取得了较好的侧向防渗效果。

② 对某市一雨水花园实际案例进行实际降雨情景下的模拟,雨水花园靠近建筑物一侧增设防水材料可以有效减小侧向入渗,与不增设防水材料的相比湿润锋运移距离平均减小60.6%,因此增设防水材料是一种较好的侧向防渗工程措施。

③ 与指南中的规定相比,当该市的雨水花园

不增设防水材料时,其有效保护距离为1.5 m,而增设防水材料时的有效保护距离可增大为2.15 m;当雨水花园的有效保护距离为1.5 m时,可将增设防水材料的雨水花园设置在距离建筑物2.35 m处。

参考文献:

- [1] 罗红梅,车伍,李俊奇,等. 雨水花园在雨洪控制与利用中的应用[J]. 中国给水排水,2008,24(6):48-52. Luo Hongmei, Che Wu, Li Junqi, et al. Application of rainwater garden to storm and flood control and utilization [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(6):48-52 (in Chinese).
- [2] 牛亚强,王旭,郑静,等. 侧向约束防渗路基新结构防渗效果试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(S2):252-258. Niu Yaqiang, Wang Xu, Zheng Jing, et al. Experimental research on anti-seepage effect of new embankment structure of lateral-constraint and seepage control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2):252-258 (in Chinese).
- [3] Roberts G, Rane S, Fall A M, et al. Managing lateral infiltration on wide beds in clay and sandy clay loam using Hydrus 2D[J]. Irrig Sci, 2015, 33(3):177-190.
- [4] 张勇勇. 垄沟灌溉土壤水分入渗模拟研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013. Zhang Yongyong. Simulation Research on Soil Water Infiltration under Ridge-furrow Irrigation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 (in Chinese).



作者简介:袁志明(1990-),男,山东乐陵人,硕士研究生,研究方向为雨水资源与利用。

E-mail: xjdyzm@163.com

收稿日期:2017-12-15