

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.019

# 下凹式绿地中垂直土壤夹砂层的侧向防渗效果研究

王社平<sup>1,2</sup>, 王子健<sup>1</sup>, 张志强<sup>1</sup>, 邢 祎<sup>1</sup>, 丁艳萍<sup>3</sup>, 卢金锁<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 3. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 在测定某市土壤物理参数和分析降雨资料的基础上,以建筑物周围下凹式绿地为研究对象,利用 HYDRUS-2D 软件模拟分析下凹式绿地的渗水过程,探讨了厚度范围在 30~60 cm、深度与建筑物基础相同的垂直土壤夹砂层在下凹式绿地中的侧向阻渗作用。结果表明,设置土壤夹砂层一侧,湿润锋运移距离平均减少 59.1%,在夹砂层后的观测点含水量减少 45.5%,可以使建筑物基础周围的黄土规避湿陷性危害。

**关键词:** 下凹式绿地; 夹砂层; 湿润锋; 土壤含水量; HYDRUS-2D 软件

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0116-06

## Lateral Anti-seepage Effect of Vertical Soil Sand Layer in Sunken Lawn

WANG She-ping<sup>1,2</sup>, WANG Zi-jian<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>1</sup>, XING Yi<sup>1</sup>,  
DING Yan-ping<sup>3</sup>, LU Jin-suo<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Municipal Design and Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China; 3. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on determination of soil physical parameters and analysis of rainfall data in a city, HYDRUS-2D software was applied to simulate the water seepage process of sunken lawns around the building, and the lateral impermeability of the vertical soil sand layer with the thickness of 30~60 cm and the same depth as the building foundation in the sunken lawn was discussed. On the side of the soil sand layer, the wetting front migration distance was reduced by an average of 59.1%, the water content of the observation point after the sand layer was reduced by 45.5%, which could avoid the collapsible harm of the loess around the foundation of the building.

**Key words:** sunken lawn; soil sand layer; wet front; water content of soil; HYDRUS-2D software

下凹式绿地是雨水调蓄技术措施的一种,与普通绿地相比,下凹式绿地利用下凹空间充分蓄集雨水,增加了雨水下渗时间和下渗量。而我国西北地区大面积的湿陷性黄土受湿后会出现塌陷现象。当

湿陷性黄土含水量达到 28%~30% 时会发生局部剪切性形变<sup>[1]</sup>,因此,湿陷性黄土地区建设下凹式绿地产生的雨水无序下渗将会严重威胁下凹式绿地周边建筑物的安全。全面了解雨水在绿地下及建筑

物周围的渗透规律,防止雨水向重要构筑物基础下渗是西北地区建设海绵城市的关键所在<sup>[1]</sup>。

为了寻找适合的阻渗措施,国内外学者进行了大量研究<sup>[2-4]</sup>,但对下凹式绿地中的雨水下渗轨迹研究较少。基于此,笔者在下凹式绿地雨水入渗室内试验的基础上,模拟了降雨径流入渗后下凹式绿地中含水量、湿润锋的变化轨迹。基于 HYDRUS-2D 软件平台建立实际降雨情景下的下凹式绿地模型,选定最不利降雨情景,对设置不同厚度垂直土壤夹砂层的下凹式绿地的导向性渗水过程进行模拟,并根据模拟结果,提出了下凹式绿地设置垂直土壤夹砂层防渗的具体实施意见。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1(a)所示,为了便于直观地观测模拟下凹式绿地的渗水路径,试验装置采用有机玻璃材质,长×宽×高=700 mm×300 mm×700 mm,底部开有 15 个 2 mm 的通气孔,防止由于气塞的产生阻碍水下渗。图 1(b)中编号 1~6 处放置土壤水分传感器,用于测定土壤含水量的实时变化过程。

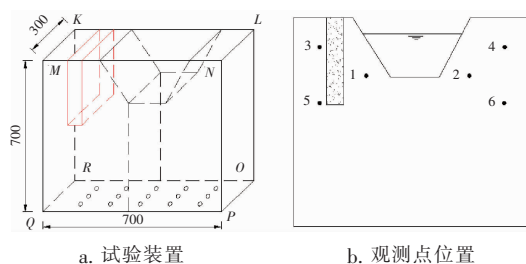


图 1 试验装置及观测点设置示意

Fig. 1 Schematics of test device and setting of observation points

### 1.2 试验用土壤

试验用原状土壤及砂土的组成采用激光粒度分布测定仪测定,测定结果显示,土壤的容重为 1.38 g/cm<sup>3</sup>,砂粒(>0.05 mm)、粉粒(0.005~0.05 mm)、黏粒(<0.005 mm)占比分别为 8.21%、81.92%、9.87%;砂土的容重为 1.63 g/cm<sup>3</sup>,砂粒(>0.05 mm)、粉粒(0.005~0.05 mm)、黏粒(<0.005 mm)占比分别为 86.00%、7.10%、6.90%。容重采用烘干法测定。

### 1.3 试验方法

将风干后的土样洒入适量清水后混合均匀,避免阳光照射和风吹,静置 1 d,使土样初始含水量尽

可能接近一致。同时,设置长×宽×高=300 mm×300 mm×50 mm 的含砂层置于图 1 的红色区域。将处理后的土壤以及砂土按照设定位置,以 5 cm 厚度分层装入试验装置中,并层层压实,同时将土壤水分传感器放入编号 1~6 处。1 号位于土层表面下 160 mm 处,3 号位于土层表面下 60 mm 处,5 号位于土层表面下 260 mm 处,3、5 号位于土壤夹砂层左侧;同时,2、4、6 号观测点与 1、3、5 号观测点关于下凹空间对称设置。为了防止挡板缝隙入渗和土箱边壁效应对测量结果造成影响,将边壁处土壤夯实,尽可能地降低边壁渗水对其造成的影响。

采用向土壤表层均匀洒水的方法模拟降雨过程。在洒水过程中,保持土壤上水层深度不超过 2 cm,从侧壁观察土壤下渗的湿润锋,并在 KLOR 面上用马克笔绘制相应时刻的湿润锋曲面形状,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,采用烘干法测定含水量,并比较土壤水分传感器测定的含水量与烘干法测定的含水量,以校核土壤水分传感器。

## 2 模型的建立

### 2.1 基本方程

HYDRUS 模型对饱和-非饱和土壤的水分运动过程是基于 Richards 方程描述的,由 Galerkin 线状有限元法对该方程数值求解。依据土壤水分特征参数,设定定解条件(初始条件和边界条件),可对土壤水分的实时情况进行模拟。

假定降雨径流渗入下凹式绿地后土壤为各向同性的均质。以含水量为变量的土壤水分运动方程即 Richards 方程<sup>[5]</sup>如下:

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

式中: $\theta$  为土壤体积含水量,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>;  $D(\theta)$  为土壤水扩散率,cm<sup>2</sup>/min;  $K(\theta)$  为非饱和土壤导水率,cm/min;  $t$  为时间,min;  $x$ 、 $z$  分别为水平、垂直方向坐标,cm。其中,Richards 方程中非饱和土壤水分特征参数选择 van Genuchten(VG)模型拟合。

### 2.2 定解条件

按照试验箱体的尺寸建立模型进行模拟,按照图 2 设置模型的边界条件和初始条件。以下凹式绿地表面为  $x$  轴,模型竖直方向为  $z$  轴,其中红色方框区域为夹砂层结构,其余部分为模型土壤。

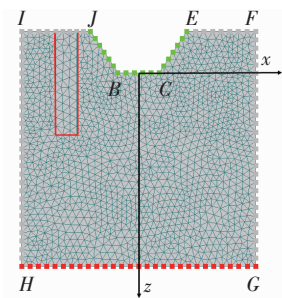


图2 下凹式绿地模型示意

Fig. 2 Schematics of sunken lawn model

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

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

如图2所示,由于试验中设定边界JBCE直接与大气相通,故设定为大气边界条件。边界IH、FG为有机玻璃土箱的侧边壁,故确定边界EFG和JIH为零通量边界。模拟下凹式绿地二维入渗过程中不涉及地下水水位问题,因此边界GH为自由排水边界。综上,边界条件可总结为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 & (0 \leq t \leq T \text{ 沿 } HIJ) \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 & (0 \leq t \leq T \text{ 沿 } EFG) \\ -K(h) \frac{\partial(\theta - \theta_0)}{\partial z} = \varepsilon & (0 \leq t \leq T^0 \text{ 沿 } JBCE) \\ -K(h) \frac{\partial(\theta - \theta_0)}{\partial z} = R & (0 \leq t \leq T \text{ 沿 } GH) \end{cases} \quad (3)$$

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

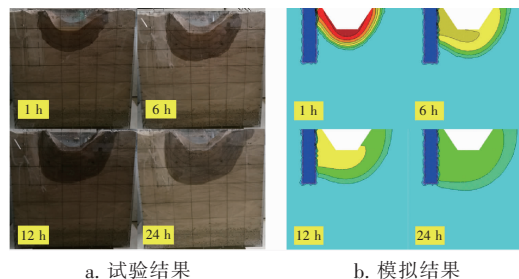
### 2.3 模型参数

运行HYDRUS-2D软件需要土壤水分运动参数:饱和含水量 $\theta_s$ 、剩余含水量 $\theta_r$ 、经验参数 $\alpha$ 和 $n$ 、经验常数 $l$ 、饱和导水率 $K_s$ ,以及土壤的初始条件和大气边界条件。土壤初始条件选取测得的土壤初始含水量 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,大气边界条件选取降雨强度,总降雨量与试验加水量相同。本试验中土壤水分运动参数的获取利用H1850R型离心机实测供试土壤不同负压条件下的含水量分布。基于土壤水分特性曲线拟合软件RETIC对试验数据进行线性拟合, $R^2$ 为0.998,拟合度较好。推求出最优的土壤水分运

动参数如下:黄土的饱和含水量 $\theta_s$ 和剩余含水量 $\theta_r$ 分别为 $0.15$ 、 $0.65 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,经验参数 $\alpha$ 和 $n$ 分别为 $0.02$ 、 $1.6832$ ,经验常数 $l$ 为 $0.5$ ,饱和导水率 $K_s$ 为 $1.503 \text{ cm}^3/\text{min}$ ;砂土的 $\theta_s$ 和 $\theta_r$ 分别为 $0.045$ 、 $0.43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , $\alpha$ 和 $n$ 分别为 $0.145$ 、 $2.68$ , $l$ 为 $0.5$ , $K_s$ 为 $2.500 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。

### 2.4 模型验证

试验实测和模拟得到的下凹式绿地土壤水分二维运动随时间的变化见图3,分别选取入渗时间1、6、12、24 h进行比较。可以看出,在夹砂层一侧湿润锋形状与不设置夹砂层一侧的差别较大,在1 h时湿润锋以下凹式绿地为中心呈椭圆形运移,1 h后夹砂层一侧的湿润锋横向运移距离明显小于不设夹砂层一侧的,并且在12 h后靠近夹砂层一侧的竖向运移距离大于不设夹砂层一侧的,夹砂层一侧的湿润锋横向运移距离比不设夹砂层一侧的平均减小了59.1%。另外,湿润锋实测值与模拟值的变化趋势一致,且模拟湿润锋运移结果略大于试验结果。



a. 试验结果

b. 模拟结果

图3 试验结果与模拟结果

Fig. 3 Experimental results and simulation results

试验实测和模拟得到的下凹式绿地湿润锋运移距离对比如图4所示。以下凹式绿地底部中心竖直方向为轴将湿润锋运移距离图拆分为如图4(a)和(b)所示的设置夹砂层一侧和未设置夹砂层一侧两部分。图4(b)中湿润锋以下凹式绿地为中心呈扇形扩散,湿润锋运移距离模拟值始终大于实测值,且模拟的湿润锋锋面更加平滑;图4(a)中湿润锋在达到夹砂层后横向运移中断且不再连续,并且模拟值与实测值都出现了这一现象。图4(a)、(b)为竖向湿润锋运移距离的模拟值与实测值,如图4(c)所示,两者的相关系数 $R^2 = 0.80$ ;图4(b)中横向湿润锋运移距离的实测值与模拟值的相关系数 $R^2 = 0.72$ ;图4(a)中横向湿润锋运移距离集中在35 cm左右不再扩散。图4(d)为入渗速率的模拟值与实

测值,两者的相关系数  $R^2 = 0.98$ ,结果一致性较好。

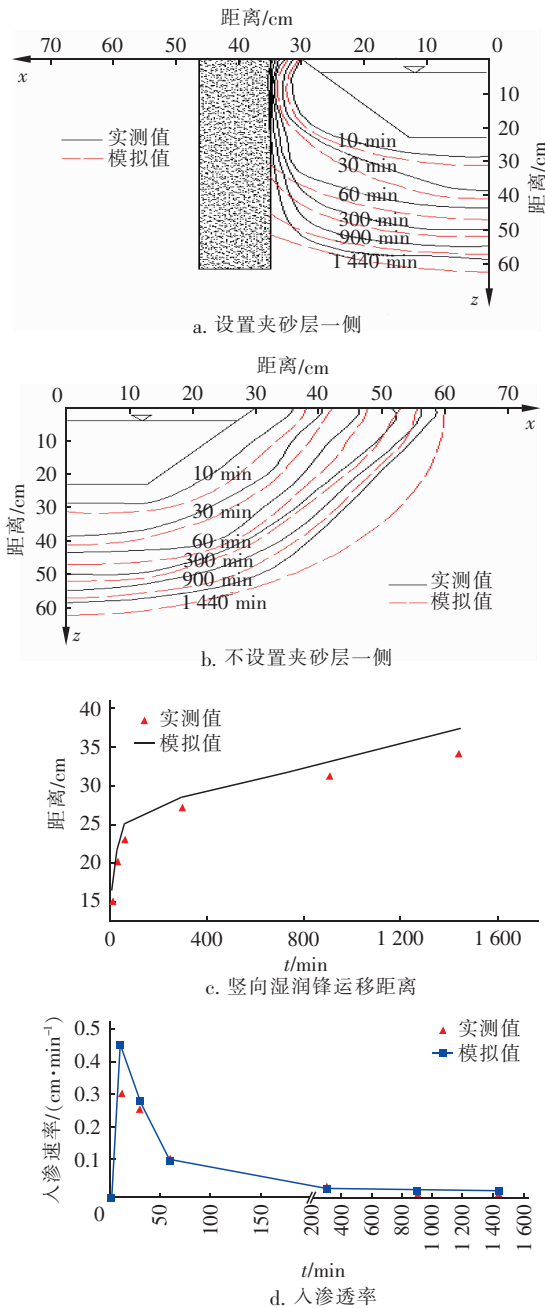


图4 湿润锋横向迁移距离及竖向入渗速率

Fig.4 Wet front lateral migration distance and vertical infiltration rate

观测点1、2、3、4处含水量的实测值与模拟值随入渗时间的变化见图5,计算得到实测值与模拟值的相关系数  $R^2$  分别为0.93、0.95、0.85、0.82。由图5可知,含水量模拟值在大部分时间内大于实测值,并且波动小,实测值与模拟值随入渗时间的变化趋势一致。对比图5(a)、(b)可知,对称观测点1、2

到达含水量最大值的时间接近,最大含水量分别为0.2886、0.2800  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。对比图5(c)、(d)可知,对称观测点3、4的初始含水量相同,观测点4的含水量在20 h后上升,但位于含砂层后侧的观测点3的含水量没有上升,说明夹砂层的阻渗效果较好,湿润锋没有到达夹砂层后的观测点3处,并且将渗入水更多沿夹砂层边界导入了深层土壤。

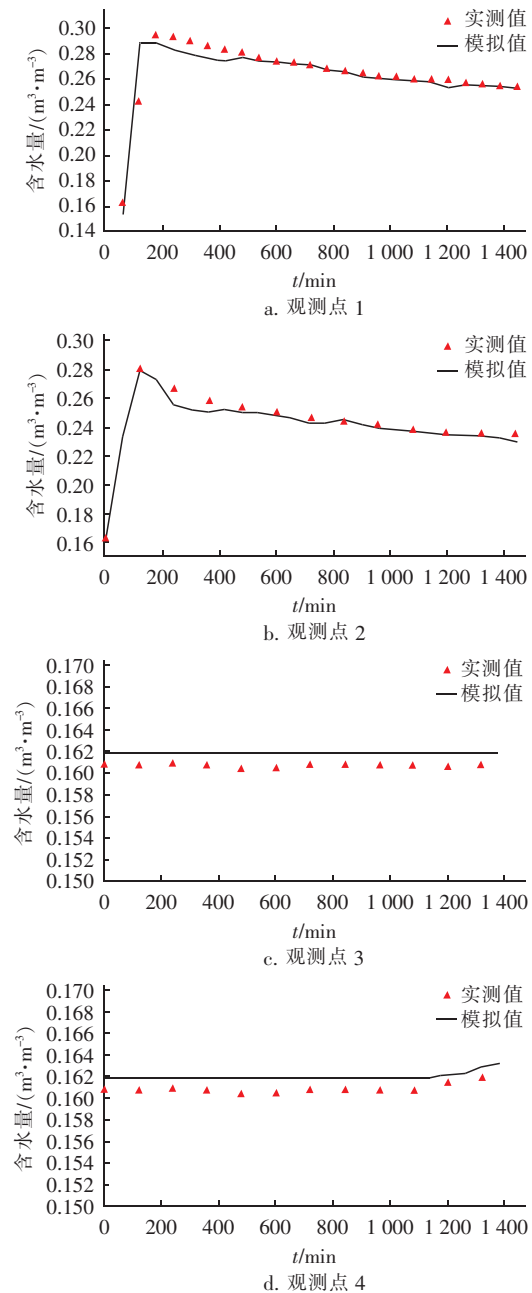


图5 含水量实测值与模拟值对比

Fig.5 Comparison of measured and simulated water content

湿润锋、含水量实测值与模拟值存在偏差的原因主要有以下两点:一是试验中下部气孔不能完全



导出土壤中的空气,空气阻力对土壤水分入渗的阻碍作用影响湿润锋运移;二是 HYDRUS 求解过程是基于土壤均质各向同性的假定,而试验中达不到理想条件。基于实测与模拟结果的数据分析,说明 HYDRUS-2D 软件可以模拟下凹式绿地中土壤水分的二维入渗过程,且可靠性较高。

### 3 下凹式绿地入渗案例模拟与分析

#### 3.1 场景设定

设定一个面积为  $20\text{ m}^2$ 、有效蓄水深度为  $1.0\text{ m}$  的下凹式绿地,其汇水面积为  $400\text{ m}^2$ ,其中不透水硬化路面占  $70\%$ ,绿地率为  $30\%$ ,绿地、硬化路面径流系数分别为  $0.15$ 、 $0.85$ ,综合径流系数为  $0.64$ 。

#### 3.2 模拟场景及降雨选择

模拟场景概化模型以及模拟降雨选择如图 6 所示。模拟下凹式绿地设置在建筑物周围或道路两侧。降雨过程中当水位达到下凹式绿地最大水位时,雨水溢流排出。模拟中设置土壤为均质各项同性,对下凹式绿地靠近建筑物基础一侧设置土壤夹砂层,同时与不设置夹砂层的下凹式绿地进行对比。降雨资料选自该市某气象站 2005 年—2014 年共计 10 年降雨较集中月份(4 月—10 月)通过数据审核的自记暴雨雨量资料。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年为 2011 年,最大场降雨出现在 2011 年 9 月 16 日,总降雨量为  $98.8\text{ mm}$ ,历时  $45\text{ h } 51\text{ min}$ ,为了验证土壤夹砂层阻渗效果,选取 2011 年 4 月—10 月期间的降雨为最不利降雨情景。

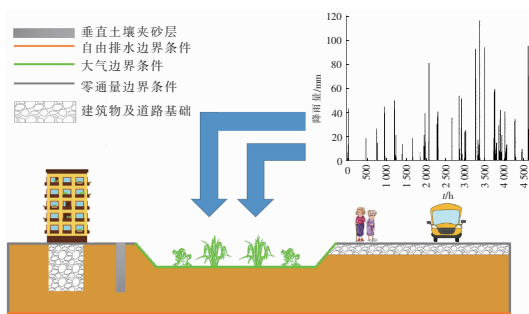


图 6 概化模型与降雨选择示意

Fig. 6 Schematic of generalized model and rainfall selection

#### 3.3 模拟结果与讨论

当夹砂层厚度为  $50\text{ cm}$ 、深度为  $6.5\text{ m}$ (与建筑物基础结构相同)时,观测点含水量的变化见图 7。可知,对称观测点 1 和 2 的含水量在  $500\text{ h}$  后开始

增长,并且观测点 1 的含水量始终大于观测点 2。观测点 4、5、6 在  $2500\text{ h}$  后出现增长,含水量随着时间的延长而增大,且观测点 6 的含水量大于观测点 4。观测点 3 始终没有出现含水量增长情况,说明设置土壤夹砂层能够有效地阻止水分侧向入渗,使夹砂层后的观测点含水量减少  $45.5\%$ 。

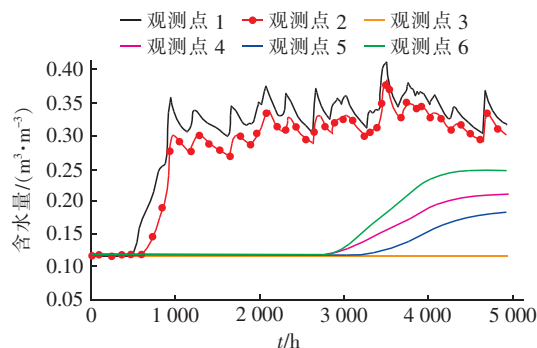


图 7 当夹砂层厚度为  $50\text{ cm}$  时观测点含水量的变化

Fig. 7 Change of water content at observation points under the condition of  $50\text{ cm}$  of sand layer

由图 7 可以看出,位于夹砂层后侧的观测点 5 的含水量比对称观测点 6 的含水量少  $26\%$ 。观测点 5 的含水量在  $3000\text{ h}$  后出现了增长,但同样位于夹砂层后的观测点 3 始终没有出现含水量上升情况,说明由于水的深处入渗在  $3000\text{ h}$  后湿润锋到达观测点 5。为此,在连续模拟中分别设置  $30$ 、 $40$ 、 $50$ 、 $60\text{ cm}$  厚度的夹砂层进行定量分析,结果见图 8。

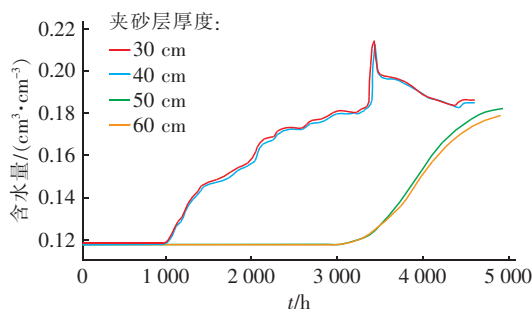


图 8 夹砂层厚度对观测点 5 含水量的影响

Fig. 8 Effect of sand layer thickness on water content at observation point 5

由图 8 可知,当夹砂层厚度为  $30$ 、 $40\text{ cm}$  时,观测点 5 的含水量在  $1000\text{ h}$  后开始上升,并且波动较大,至  $3500\text{ h}$  时达到峰值  $0.215\text{ m}^3/\text{m}^3$ ;当夹砂层厚度为  $50$ 、 $60\text{ cm}$  时,观测点 5 的含水量在  $3300\text{ h}$  后随时间上升,峰值为  $(0.018 \pm 0.005)\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。由此说明,在夹砂层厚度  $< 40\text{ cm}$  的情况下,不能在最大降雨情景下始终保持良好的阻渗效果;而在夹

砂层厚度 > 50 cm 的情况下,观测点 5 的含水量始终小于  $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (黄土湿陷含水量),夹砂层能在最大年降雨情景下保持较好的阻渗效果。

综上所述,夹砂层具有明显的阻水作用。这种阻水作用主要是因为砂土具有较小的基质吸力,当湿润锋到达交界面处时砂土基质势太小(土壤基质吸力过大),达不到砂土基质吸力的要求,因此湿润锋虽然可以因重力沿竖直方向在土壤中前进,却不能突破此交界面进入夹砂层。随着湿润锋持续运移,交界面处含水率逐渐增加,直至突破砂土基质吸力的限制,湿润锋才进入夹砂层。进入含砂层后,因为砂土渗透性较大,此时含砂层起到了一个竖向排水体的作用,使更多的水沿含砂层一侧导向土壤深处,观测点 3 的含水量一直没有变化就很好地说明了这一现象。并且粗砂阻渗这种现象前人已在垂向入渗试验中发现并进行了分析和讨论,并用进水吸力来概述此影响<sup>[6]</sup>。一系列模拟结果表明,在下凹式绿地一侧设置适当厚度的竖向夹砂层具有良好的侧向阻渗效果。

#### 4 结论

① 利用实际测得的观测点处的含水量和湿润锋运移距离随时间的变化对模拟参数进行验证,实测结果与模拟结果误差较小,表明 HYDRUS-2D 软件能够模拟设置土壤夹砂层的下凹式绿地中土壤水分的二维入渗过程。

② 在土壤夹砂层深度与建筑物基础相同的情况下,在下凹式绿地靠近建筑物一侧设置土壤夹砂层可以有效地减少侧向入渗,与不设夹砂层相比,湿润锋横向运移距离平均减少 59.1%,使夹砂层后的观测点含水量减少 45.5%。

③ 下凹式绿地案例分析表明,在最大年降雨情景下,设置土壤夹砂层保护下凹式绿地一侧建筑物基础时,应使夹砂层厚度大于 50 cm,从而保证土壤夹砂层维持良好的阻渗效果。

#### 参考文献:

- [1] 王雪浪. 大厚度湿陷性黄土湿陷变形机理、地基处理及试验研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2012.  
WANG Xuelang. Study on Characteristics of Collapse

Deformation for Collapsible Loess, Foundation Treatment Method and Tests [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012 (in Chinese).

- [2] 高原原,卢金锁,苏拥军,等. 道路下凹绿地渗水过程模拟与防护措施分析[J]. 中国给水排水,2018,34(7):118-123.  
GAO Yuanyuan, LU Jinsuo, SU Yongjun, et al. Simulation of rainwater infiltration process in roadside sunken-lawn and analysis of protective measures [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(7):118-123 (in Chinese).
- [3] 袁志明,卢金锁. 雨水花园侧向防渗措施效果的试验与模拟研究[J]. 中国给水排水,2018,34(13):130-134.  
YUAN Zhiming, LU Jinsuo. Experiment and simulation on anti-seepage effect of lateral impervious protective measures in rain garden [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13):130-134 (in Chinese).
- [4] 孙美,毛晓敏,陈剑,等. 夹砂层状土条件下渠道渗漏的室内试验和数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(8):33-38.  
SUN Mei, MAO Xiaomin, CHEN Jian, et al. Laboratory experiment and simulation on canal seepage through sand interlayer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8):33-38 (in Chinese).
- [5] KANDELOUS M M, ŠIMUNEK J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(7):1070-1076.
- [6] 汪志荣,王文焰. 砂土夹层的阻水减渗机制及合理埋深[J]. 西安理工大学学报,2000,16(2):170-174.  
WANG Zhirong, WANG Wenyan. The physical mechanism and depreciation and rational burying depth of sand layer in loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(2):170-174 (in Chinese).

作者简介:王社平(1963-),男,陕西韩城人,工学博士,正高级工程师,主要研究方向为城镇污水处理及再生利用技术。

E-mail:1592038115@qq.com

收稿日期:2019-04-22

修回日期:2019-09-18

(编辑:刘贵春)