

DOI: 10.11779/CJGE2024S10035

# 水、气边界可控/测的大尺寸模型槽试验系统

路紫辰<sup>1,2</sup>, 陈锐<sup>\*1,2</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>, 陈子彬<sup>1,2</sup>, 郭浩文<sup>3</sup>, 黄俊文<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东 深圳 518055;

3. 香港科技大学土木与环境工程学系, 香港 999077)

**摘 要:** 准确评价垃圾填埋场土质覆盖层的水气调控性能对于污染治理尤为重要。现有模型试验设备的密封效果大多不理想, 无法准确地控制气压, 不能较好地模拟垃圾填埋场实际工况的水、气边界条件。为解决此类问题, 设计了水、气边界可控/测的大尺寸模型槽试验系统。该系统可监测覆盖层不同深度孔隙水压力、孔隙气压力和体积含水量的变化, 并收集覆盖层的表面径流量、侧向导排量及底部渗漏量。模型槽侧壁通过内外套板及卡套挤压 O 型圈进行密封, 经检验, 该密封装置可确保模型槽具备良好的闭气性和闭水性, 有助于进一步研究土质覆盖层防渗闭气规律及机理。通过应用该试验系统, 评估了强降雨条件下植草(狗牙根草)倾斜双层毛细阻滞覆盖层水气耦合运移的短期响应。初步试验结果表明, 植草倾斜覆盖层在强降雨结束时渗漏量占降雨量的 2.4%, 降雨时坡顶处砂土层的吸力大于击穿吸力, 毛细阻滞作用未失效, 若忽略气压的影响会低估覆盖层的导排性能。

**关键词:** 模型槽; 边界条件; 密封; 水气耦合; 土质覆盖层

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0037-06

**作者简介:** 路紫辰(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态岩土方面的研究工作。E-mail: celuzichen@163.com。

## A large-scale flume model test system with controllable/measurable hydraulic and gas boundary conditions

LU Zichen<sup>1,2</sup>, CHEN Rui<sup>\*1,2</sup>, WANG Hao<sup>1,2</sup>, CHEN Zibin<sup>1,2</sup>, GUO Haowen<sup>3</sup>, HUANG Junwen<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Provincial

Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Shenzhen 518055, China; 3. Department of Civil and

Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** The accurate evaluation of water-gas transport is important for pollution control in landfill earthen covers. With poor sealing effects, most of the existing model test instruments cannot accurately control the air pressure and simulate the boundary conditions of landfills. To solve this problem, a large-scale flume system with controllable/measurable boundary conditions is developed. The pore water pressure, pore air pressure and water content in the inclined cover layer are monitored to calculate the percolation, surface runoff and lateral drainage. Each side of the flume is sealed by squeezing the O-ring through the sleeve and inner/outer sleeve plates. After checking, the sealing devices ensure the effectiveness of the test system in evaluating the cover performances to minimize infiltration and gas emissions. The flume system is used to investigate the short-term performance of an inclined capillary barrier cover with Bermuda grass in coupled water-gas migrations under heavy rainfall. It is found that the final cumulative percolation through the cover accounts for 2.4% of the total rainfall depth. The suction in the top sand layer is higher than the breakthrough value during rainfall, indicating the effectiveness of capillary barrier. Also, the lateral drainage capacity is greatly underestimated, without considering the pore air pressure.

**Key words:** flume model; boundary condition; sealing; coupled water-gas; earthen cover

## 0 引 言

目前, 填埋法是中国处理城市固体废弃物的主要方式, 固废垃圾在降解过程中会产生大量污染性的填埋气和渗滤液, 且强降雨条件下渗滤液产量升高, 环境污染尤为严重。因此, 对复杂环境下土质覆盖层水气运移规律的研究具有显著的实际工程意义。

当前已有大量研究者通过物理模型试验研究典型

**基金项目:** 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目 NSFC-RGC (内地-香港)(52261160382); 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室项目(2023B1212010004); 深圳市科技计划项目(KQTD20210811090112003)

**收稿日期:** 2024-04-29

**\*通信作者** (E-mail: cecchenrui@hit.edu.cn)

结构型式的腾发式土质覆盖层水分和气体运移特性。Ng 等<sup>[1]</sup>通过一维土柱试验得出非饱和压实黏土的气体穿透值随着饱和度和土层厚度的增加而增加。Miyazaki<sup>[2]</sup>通过入渗试验证明了倾斜条件下双层毛细阻滞覆盖层细颗粒和粗颗粒界面处存在明显的水分侧向流动现象。Kampf 等<sup>[3]</sup>通过模型试验证明双层毛细阻滞覆盖层具有良好的侧向导排性能,能减小水分入渗量。Bussiere 等<sup>[4]</sup>通过模型试验研究了倾斜角度对双层毛细阻滞覆盖层性能的影响。Ng 等<sup>[5]</sup>通过模型槽试验证明 3 层毛细阻滞覆盖层在倾斜情况下具有良好的防渗性能。

以往研究大多只注重土质覆盖层水分运移或气体运移特性,忽略了真实环境条件下水气运移的相互耦合作用。研究土质覆盖层水气耦合运移的难点是确保试验装置的闭气性和闭水性良好。为了对植被土质覆盖层试验体施加模拟垃圾填埋场实际工况的水、气边界条件,需要制作出水、气边界条件均可控的模型槽试验系统。目前常见的模型槽装置可以实现水边界控制,但由于实现气体密封比水密封更加困难,可实现气边界可控的大型模型槽试验系统相对较少。

综上,为了更好地通过模型试验研究土质覆盖层水气耦合运移规律及机理,本文设计了水、气边界可控/测的大尺寸模型槽试验系统。使用了自主研发的密封装置,确保模型槽具备良好的闭气性和闭水性。以种植有狗牙根草的倾斜双层毛细阻滞覆盖层为试验对象进行大尺寸模型槽试验,研究了其在强降雨条件下的水气耦合运移规律及机理。

## 1 模型槽试验系统设计

### 1.1 模型槽设计

如图 1 所示为水、气边界可控/测的大尺寸模型槽示意图,该装置由顶盖和槽体两部分组成,顶盖材质为透明有机玻璃,长 3000 mm,宽 1000 mm,厚度 10 mm。槽体的材质为钢材,长 3000 mm,宽 1000 mm,高 2000 mm,壁厚 10 mm<sup>[6]</sup>。槽体顶部边缘设计为法兰盘,法兰盘与顶盖间设置橡胶垫,通过螺丝和螺母栓紧进行密闭。侧面设置有传感器安装孔、表面径流收集口、侧向导排收集口、供气口、出气口和出水口。

设置于模型槽底部的供气口用于模拟土质覆盖层服役过程中固废垃圾降解生成的填埋气。依据填埋气气压现场监测结果<sup>[1]</sup>,模型槽底部施加气压为 5 kPa。供气孔的气源为空压机,输出气压通过两级调压阀进行控制。压缩空气改变了土体的吸力状态,增大了模型槽底部土体的孔隙气压力,引起土体内部气体自下而上流动。模型槽试验系统各开口用密封装置进行密

闭,如图 2 所示。密封装置为陈锐等<sup>[7]</sup>设计,通过内外套板及卡套挤压 O 型圈来实现传感器电缆线处的密闭,可任意拆卸及安装,便于更换传感器。

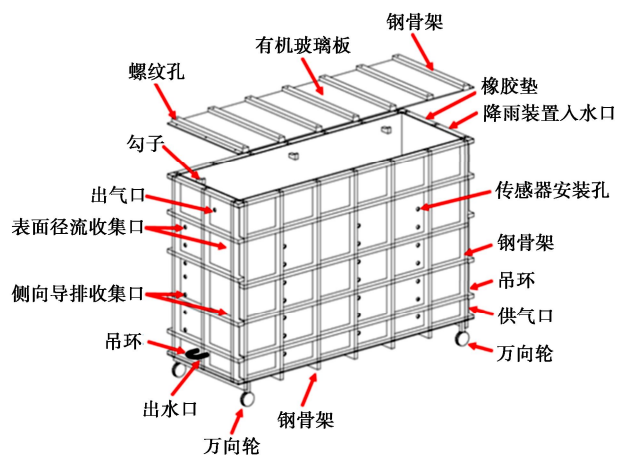


图 1 水、气边界可控/测的大尺寸模型槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large-scale flume model devices

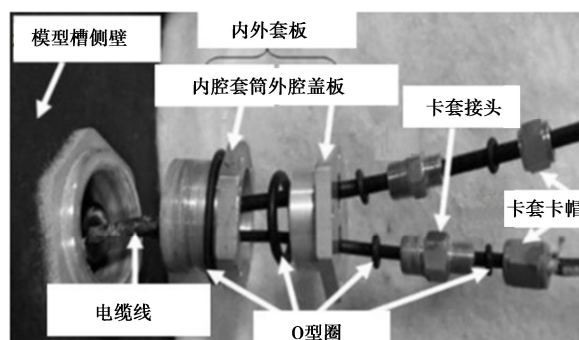


图 2 模型槽密封装置实物图<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Physical drawing of sealing devices for flume model

模型槽的降雨模拟装置由 30 个内径为 8 mm 的软管及雾化喷头组成,可通过稳压阀实现降雨强度的控制。降雨装置距离覆盖层表面 500 mm,降雨重力势较小,雨滴降落对土面产生的冲蚀作用可忽略不计,故无法模拟雨滴速度及雨水对土面的冲击效果。该装置主要应用于不同强度降雨的模拟,以研究降雨入渗对土质覆盖层水气耦合运移的影响,与本研究的关注点相契合。

### 1.2 模型槽闭气性能检验

为了对模型槽试验装置施加模拟垃圾填埋场实际工况的气压边界条件,需对其进行闭气性能检验。检验步骤如下:先向模型槽施加恒定的气压值 7 kPa,然后关闭入气口,持续监测模型槽内气压。在监测过程中,昼夜温差会引起气体体积的变化,使监测的气压读数呈现有规律波动,整个监测过程中气压的变化范围为  $6.5 \pm 0.6$  kPa,如图 3 所示。气压整体变化趋势不变,因此认为模型槽的闭气性满足要求。为保证模型

槽内气压相对恒定, 试验过程中应控制温度变化范围, 减小温度对本试验气压测量的影响。

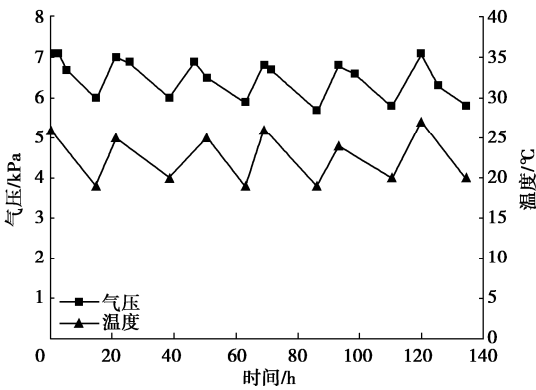


图 3 模型槽内气压和温度随时间变化图

Fig. 3 Variation of air pressure and temperature with time

1.3 模型槽测量系统

如图 4 所示为模型槽试验装置及测量系统示意图。3 种传感器安装在覆盖层中, 包括测量体积含水量的土壤水分传感器、测量孔隙气压力的气压传感器和测量孔隙水压力的张力计。水量收集装置由表面径流装置、侧向导排装置和渗漏量收集装置组成。降雨装置由稳压阀、玻璃转子流量计及喷头组成。供气装置均由空气压缩机、调压阀、气压计和增湿瓶组成。照明装置由全光谱植物灯组成, 可为植物生长提供其所需的全光谱光照环境, 并在试验全程保持持续的光照条件, 通过控制顶部光照边界条件不变, 减小光照强度变化对植被生长状态的影响。

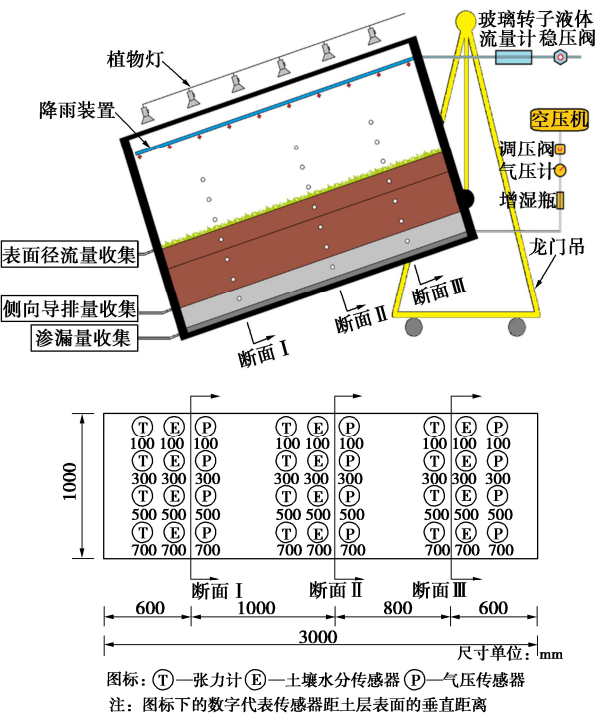


图 4 模型槽试验装置及测量系统示意图

Fig. 4 Diagram of model devices and measurement system

1.4 模型槽试验传感器

试验过程中使用多种测量传感器, 包括热传导吸力传感器、张力计、土壤水分传感器、气压传感器、数显式气体流量传感器、玻璃转子气体流量计等, 通过数据采集仪或人工读数记录数据。张力计选用陈锐等<sup>[8]</sup>设计的新型组装式张力计来测量孔隙水压力, 该张力计饱和和用时短, 性能稳定, 反应时间短, 即使在测量时发生汽化, 仍能在短时间内重新饱和并继续使用。土壤水分传感器选用 Decagon Devices 公司的 EC-5 土壤水分传感器测量体积含水量。气压传感器由孔压传感器和透气但不透水的半透膜组成, 用于测量孔隙气压力。气体流量传感器和玻璃转子气体流量计用于测量气流量。采集装置包括美控数据采集仪、稳压电源和台式电脑。

2 模型槽试验系统应用

2.1 试验用土及植被

试验用土的基本参数如表 1 所示。腾发式土质覆盖层的植被层和细粒层选用梅振<sup>[9]</sup>试验所用的储水性较强的全风化花岗岩残积土 (Completely Decomposed Granite, CDG); 粗粒层和低渗透性层土体选用 Ng 等<sup>[6]</sup>试验中所用的粗砂和高岭土。

表 1 试验用土的基本参数<sup>[6]</sup>

Table 1 Basic parameters of test soil

基本参数	土的种类	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/%	饱和透水系数/(m·s <sup>-1</sup> )
植被层和细粒层土	粉质砾砂	1.48	18.5	7.0×10 <sup>-8</sup>
粗粒层土	粗砂	1.56	—	4.0×10 <sup>-2</sup>
低渗透性层土	黏土	1.21	36.0	1.0×10 <sup>-9</sup>

本试验中植被层的植被类型选用须根系的狗牙根草, 其具有较强的耐盐碱性、抗逆性和抗旱性, 是垃圾填埋场覆盖层常用的种植对象。相关植被参数如表 2 所示。根体积密度等于湿根体积除以单元土样体积, 代表在某一土层内的根系所占土体的体积比。叶面积指数等于植物叶片总面积与土地面积的比值。

表 2 试验用土的植被参数

Table 2 Vegetation parameters of test soils

土体类型	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	根体积密度/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	叶面积指数/ (cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-2</sup> )
含狗牙根 CDG	1.47	3.98×10 <sup>-2</sup>	1.592

2.2 试验方案

本研究通过模型槽试验研究在强降雨条件下倾斜角度为 18° 时双层毛细阻滞覆盖层的水气耦合运移规律。试验用土配制完成后, 先在模型槽底部铺设厚度为 50 mm 的砾石层, 并在其内部埋设供气装置。供气装置由 4 条间距为 200 mm 的气管组成, 相邻出

气孔洞间距约为 20 mm。随后填压粗砂，并预埋张力计和土壤水分传感器，粗粒层厚度为 200 mm。随后将细粒层分 12 层压实，每层厚度为 50 mm，压实过程中预埋张力计及土壤水分传感器。最后在细粒层表面移植狗牙根草，并在模型槽下游端的内侧壁处布置表面径流收集装置。细粒层与粗粒层交界面处布置侧向导排装置。使用龙门吊将模型槽一侧抬高至倾斜角度为 18°。植被养护期间为了降低覆盖层的水分散失量，模型槽顶部用隔水板遮挡。

降雨前覆盖层植被层和细粒层初始条件与梅振<sup>[9]</sup>在室外试验中土体的平均体积含水量一致，约为 45%。本研究的模拟降雨强度为 29.4 mm/h，降雨时长 12 h，为深圳市百年一遇。模型槽试验过程如表 3 所示。

表 3 模型槽试验过程

Table 3 Procedures of model tests

时间/h	试验过程
0	试验开始、通气开始、降雨开始
0~12	降雨过程
12	降雨结束、试验结束

2.3 水、气沿深度分布规律分析

覆盖层各截面处不同时刻孔隙水压力、体积含水量和孔隙气压力沿深度分布如图 5~7 所示。

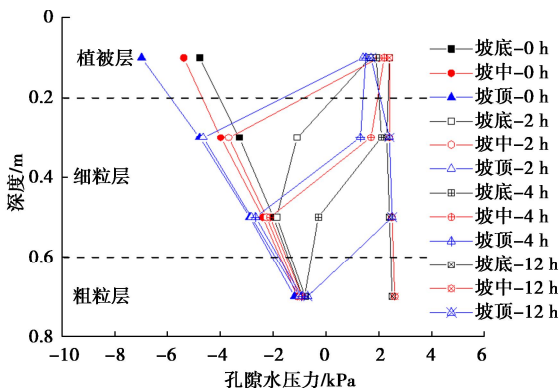


图 5 覆盖层各截面不同时刻孔隙水压力随深度变化图

Fig. 5 Variation of pore water pressure with depth

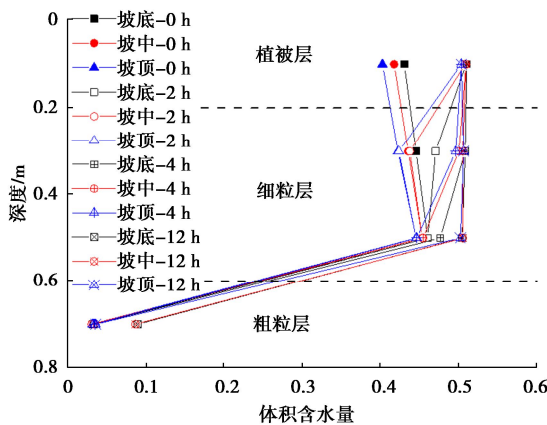


图 6 覆盖层各截面不同时刻体积含水量随深度变化图

Fig. 6 Variation of volume water content with depth

试验开始时，由于倾斜状态下水分受重力作用沿着覆盖层边坡向下运移，覆盖层在坡底不同深度处的孔隙水压力最大，在坡顶的孔隙水压力最小，这与体积含水量的变化规律一致。

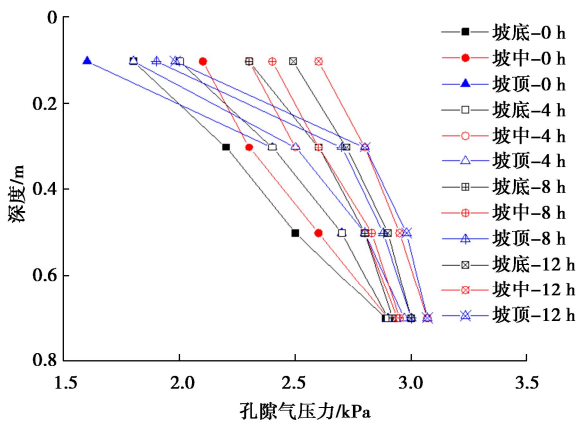


图 7 覆盖层各截面不同时刻孔隙气压力随深度变化图

Fig. 7 Variation of pore air pressure with depth

降雨过程中，覆盖层在各截面 0.1 m 深度处的基质吸力最先增大至约 0 kPa，此时植被层接近饱和，随着降雨持续进行，水分逐渐下渗，在覆盖层深度 0.3 m 处，坡底的孔隙水压力较坡中及坡顶增大较快，且坡中和坡顶的孔隙水压力变化时刻相近。其原因可能是在试验开始时，坡底的孔隙水压力最大，体积含水量较大，气体逸出速率较小，气体向上运移对水分下渗的阻碍作用较小，水分入渗速率较大。除此之外，坡底的孔隙气压力梯度最大，坡顶处的最小。其原因是坡底 CDG 的体积含水量较大，土中的水分占据土体的大部分孔隙通道，透气系数较小。相比坡中和坡底，坡顶植被层处的孔隙气压力较小，孔隙气压力梯度较大，其原因可能是倾斜条件下覆盖层坡顶处的体积含水量最小（见图 6），坡顶处植被层的透气系数较大，气体运移至该处时孔隙气压力突降。

Aubertin 等<sup>[10]</sup>认为毛细阻滞覆盖层的击穿压力为粗粒土的进水值。本试验在 9 h 时坡底和坡中的粗粒层处的孔隙水压力均增大至约 2.5 kPa，孔隙气压力约为 3.0 kPa，即此时砂土的基质吸力约为 0.5 kPa，即小于粗粒土的进水值（约为 2 kPa），又小于 CDG 层和粗砂层的击穿吸力（约为 3 kPa），说明此时覆盖层在坡中和坡底处的毛细阻滞作用已经失效。

降雨结束时，与坡底和坡中不同的是，覆盖层 CDG 层各截面各深度处的体积含水量在 0.50 至 0.51 范围内，但坡顶粗粒层土体的体积含水量无明显变化，维持在初始值，约为 0.04，吸力约为 3.8 kPa，大于其进水值及击穿吸力，该处的毛细阻滞作用尚未失效。原因可能是在倾斜角度 18° 条件下坡顶 CDG 层处的

初始含水率较低, 气体逸出速率较大, 水分入渗速率较小, 粗粒层和细粒层交界面处的水分沿着交界面向坡中和坡底方向运移, 与 Miyazaki<sup>[2]</sup>通过入渗试验得到的结论一致。因此, 本试验降雨结束时的侧向导排距离小于等于 0.6 m (即覆盖层顶部到坡顶截面的距离)。相比之下, 降雨结束时坡中和坡底的体积含水量均约为 0.09, 此时该处粗粒层的毛细阻滞作用已经失效, 水分已击穿粗粒层, 产生渗漏量。

如图 7 所示, 由于降雨过程中雨水下渗对填埋气逸出存在阻碍作用, 覆盖层土体内部气体被压缩, 各截面孔隙气压力随时间整体呈上升趋势, 其上升速率与土体自身的透气系数及所处的吸力状态有关。

## 2.4 水量平衡分析

如图 8 所示为降雨过程水量变化图, 包括降雨量、表面径流量、侧向导排量、储水量和渗漏量。

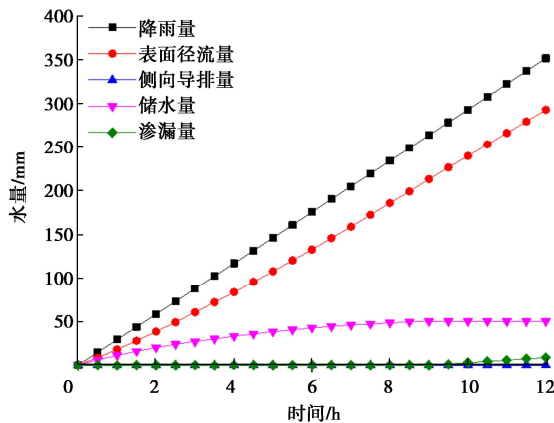


图 8 降雨过程水量随时间变化图

Fig. 8 Variation of water quantity with time

其中降雨量通过降雨装置的液体玻璃转子流量计及稳压阀控制, 表面径流量、侧向导排量和渗漏量为降雨过程中的实测值, 储水量通过计算得到。由于表层 CDG 的饱和透水系数小于降雨强度, 因此降雨开始约 5 min 时产生表面径流, 2 h 后的表面径流量增加速率约为 12.7 mm/h, 降雨结束时, 表面径流量约占降雨量的 83.3%, 较贾官伟<sup>[11]</sup>得到的表面径流量占降雨总量的 69%至 77%的结果大。原因可能是本试验的细粒层的饱和透水系数较其小, 且向上逸出的气体会阻滞水分下渗。试验过程中侧向导排量几乎为 0, 这与 Rahardjo 等<sup>[12]</sup>得到的结论一致, 即在细粒层饱和和透水系数较小时, 侧向导排量能力较弱。覆盖层储水量逐渐增加, 在 9 h 左右趋于不变, 此时覆盖层开始产生渗漏量, 毛细阻滞作用已经失效, 渗漏速率约为 2.9 mm/h, 降雨结束时, 渗漏量约占降雨量的 2.4%。

## 3 结 论

本研究设计了水、气边界可控/测的大尺寸模型槽

试验系统。模型槽应用了自主研发的密封装置, 闭气性和闭水性良好, 可较好地对植被土质覆盖层试验体施加模拟实际工况的水、气边界条件, 为进一步研究土质覆盖层水气耦合运移规律及机理提供便利。

本研究应用上述模型槽装置展开物理模型试验, 研究了强降雨条件下倾斜角度为 18° 时双层毛细阻滞覆盖层的水气耦合运移规律及机理。所得结论如下:

(1) 考虑气压影响时, 倾斜角度为 18° 的双层毛细阻滞覆盖层在强降雨条件下的表面径流量约占降雨量的 83.3%, 渗漏量约占降雨量的 2.4%。

(2) 覆盖层在坡底处的孔隙水压力最大, 在坡顶处最小。降雨过程中坡底的孔隙气压力梯度最大, 坡顶的最小, 且坡顶植被层处的孔隙气压力梯度较坡中和坡底大, 倾斜条件下覆盖层坡顶处植被层和细粒层的孔隙气压力梯度较小, 气体逸出速率较大。

(3) 降雨过程中坡顶处砂土层的吸力大于击穿吸力, 毛细阻滞作用未失效, 若忽略气压的影响, 会低估双层毛细阻滞覆盖层的导排性能。

## 参考文献:

- [1] NG C W W, CHEN Z K, COO J L, et al. Gas breakthrough and emission through unsaturated compacted clay in landfill final cover[J]. Waste Management, 2015, **44**: 155-163.
- [2] MIYAZAKI T. Water flow in unsaturated soil in layered slopes[J]. Journal of Hydrology, 1988, **102**(1): 201-214.
- [3] KAMPF M, HOLFELDER T, MONTENEGRO H. Identification and parameterization of flow processes in artificial capillary barriers[J]. Water Resources Research, 2003, **39**(10): 85-94.
- [4] BUSSIÈRE B, AUBERTIN M, CHAPUIS R P. The behavior of inclined covers used as oxygen barrier[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(3): 512-535.
- [5] NG C W W, COO J L, CHEN Z K, et al. Water infiltration into a new three-layer landfill cover system[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, **142**(5): 1-12.
- [6] NG C W W, LIU J, CHEN R, et al. Physical and numerical modeling of an inclined three-layer (silt/gravelly sand/clay) capillary barrier cover system under extreme rainfall[J]. Waste Management, 2015, **38**(1): 210-221.
- [7] 陈 锐, 刘 坚, 乔 劼. 多股管线大内径的传感器密封装置及其组装方法: 中国, 201310306551.6[P]. 2013-10-23. (CHEN Rui, LIU Jian, QIAO Jie. Sealing Device for Multi-strand Pipelines with Large Diameter and Its Assembly Method: China, 201310306551.6[P]. 2013-10-23. (in

- Chinese))
- [8] 陈 锐, 刘 坚, 吴宏伟, 等. 一种装配式新型张力计的研制[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 3028-3032. (CHEN Rui, LIU Jian, NG C W W, et al. Development of a new fabricated tensometer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 3028-3032. (in Chinese))
- [9] 梅 振. 含根系非饱和土体水气渗透特性温度效应试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 28-63. (MEI Zhen. Experimental Study on the Temperature Effect of Water-Air Permeability in Unsaturated Soil with Root System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 28-63. (in Chinese))
- [10] AUBERTIN M, CIFUENTES E, APITHY S A, et al. Analyses of Water Diversion along Inclined Covers with Capillary Barrier Effects[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(10): 1146-1164.
- [11] 贾官伟. 固废堆场终场土质覆盖层中水分运移规律及调控方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (JIA Guanwei. Study on Water Migration Law and Regulation Method in Soil Cover Layer of Solid Waste Yard[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [12] RAHARDJO H, KRISDANI H, LEONG E. Application of unsaturated soil mechanics in capillary barrier system[C]// Proceeding of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, 2007: 127-137.

(编校: 孙振远)