

DOI: 10.11779/CJGE2022S1034

含非饱和导排层毛细阻滞覆盖层服役性能试验研究

李晓康¹, 李旭^{*1}, 吴羊^{2,1}, 王菲^{3,1}

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 中建美国公司, 泽西城 美国; 3. 中国水利水电出版传媒集团
高等教育出版事业部, 北京 100038)

摘要: 传统毛细阻滞覆盖层在湿润地区的服役性能尚不成熟, 含非饱和导排层(unsaturated drainage layer, UDL)的毛细阻滞层代表了毛细阻滞覆盖层在湿润地区应用的新方向。通过室内降雨入渗模型试验, 分析了含UDL毛细阻滞层的防渗机理, 研究了UDL宽度及渗透系数对其导排性能的影响。试验结果表明: ①新增的非饱和导排层具有抽吸作用, 通过设置导排层, 毛细阻滞层击穿时间由730 min延长到990 min, 增长了35.6%; ②当导排层与细粒层采用相同性质的土料时, 导排层与细粒层宽度之比由1:8增加到1:4对抽吸性能的提高不大; ③增大导排层与细粒层渗透系数之比有助于增强其抽吸效果, 达到入渗水分全部由导排层排出的理想工作状态。最后, 提出了UDL理想导排状态的初步准则, 准则分析结果与试验结果吻合。本研究可为湿润地区毛细阻滞层结构优化与设计提供新参考。

关键词: 非饱和土; 毛细阻滞覆盖层; 非饱和导排层; 室内试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0189-06

作者简介: 李晓康(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和渗流、冻土多场耦合数值模拟等方面的研究。E-mail: xli2020@bjtu.edu.cn。

Experimental study on service performance of capillary barrier cover with unsaturated drainage layer

LI Xiao-kang¹, LI Xu¹, WU Yang^{2,1}, WANG Fei^{3,1}

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Construction America Inc., Jersey City, America; 3. Department of Higher Education Publication, China Water and Power Press,
Beijing 100038, China)

Abstract: The anti-seepage capability of the traditional capillary barrier cover in humid regions is immature. The capillary barrier cover with unsaturated drainage layer (UDL) represents a new direction of applying the capillary barrier cover in humid regions. Through the laboratory rainfall infiltration model tests, the anti-seepage mechanism of the capillary barrier cover with UDL is analyzed, and the effects of width and permeability coefficient of UDL on its drainage performance are studied. The test results show that: (1) The newly added unsaturated drainage layer has the suction function. By setting the drainage layer, the breakthrough time is extended from 730 min to 990 min, an increase of 35.6%. (2) When the drainage layer and the fine-grained layer are constructed by using the same materials, there are few effects on the suction performance by increasing the width ratio of the drainage layer to the fine-grained layer from 1:8 to 1:4. (3) Increasing the ratio of permeability coefficient between the drainage layer and the fine-grained layer can enhance its suction effects and achieve the ideal working state in which all the infiltration water is discharged by the drainage layer. Finally, a preliminary criterion for the ideal drainage state of UDL is proposed, and its analysis results are in good agreement with the test ones. This study may provide a new reference for the structural optimization and design of the capillary barrier cover in humid areas.

Key words: unsaturated soil; capillary barrier cover; unsaturated drainage layer; laboratory test

0 引言

毛细阻滞覆盖层(capillary barrier cover, CBC)被广泛应用于垃圾填埋场封顶工程, 以阻止降雨渗入其下部垃圾填埋物、形成污染液^[1-3]。CBC利用非饱和条件下土层交界面处的毛细张力阻滞水分流动^[4-5]。传

统CBC在湿润地区的服役性能尚不成熟^[6-7], 提升

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979002); 河南省交通运输厅科技项目(2020J-2-1)

收稿日期: 2022-09-29

*通信作者(E-mail: xuli@bjtu.edu.cn)

CBC 在湿润地区的防渗能力是本领域的研究热点。

增设非饱和导排层 (unsaturated drainage layer, UDL) 是提升湿润地区 CBC 防渗能力较为可行的办法。Stormont 等^[8]最先提出了 UDL CBC 的构想，并通过试验证实其在小雨强下 (<10 mm/d) 具有良好的排水及防渗效果。邓林恒等^[9]开展了 UDL CBC 在强降雨条件下的导排性能试验，使其在湿润地区的应用成为可能。焦卫国等^[10]对 UDL CBC 进行了长达 2 年的野外监测，发现增设的 UDL 层可有效控制湿润气候下的渗漏量。Zhan 等^[11]进一步分析了 UDL CBC 在强降雨作用下的服役性能，发现其有效性主要取决于最上层细粒土的饱和渗透系数。Ng 等^[12]提出了在传统 CBC 下增设压实黏土层的新结构，使粗粒层由单一的毛细突破层转变为 CBC 击穿后的排水层。可以说，UDL CBC 代表了毛细阻滞层在湿润地区应用的新方向。然而，以往研究大多集中于传统 CBC 的服役性能，UDL CBC 在连续极端降雨作用下的试验数据报道较少，导致其缺乏设计理论和选材标准。

本文通过室内降雨入渗模型试验研究了含非饱和导排层毛细阻滞层的防渗机理及服役特性，对比分析了有、无 UDL 下毛细阻滞覆盖层的服役性能，研究了导排层宽度和渗透系数对其导排性能的影响。同时，提出了 UDL 理想导排状态准则，并基于试验结果对该准则进行了验证。

1 材料与方法

1.1 土料特性

试验所用细粒土料为取自深圳的全风化花岗岩，粗粒土料为主要粒径在 2~5 mm 的碎石土。根据《土工试验方法标准》进行土性试验，土料颗粒级配曲线见图 1，基本特性汇总见表 1。由表 1 可得，细粒土的分类为粉质黏土，粗粒土的分类为级配不良的角砾。

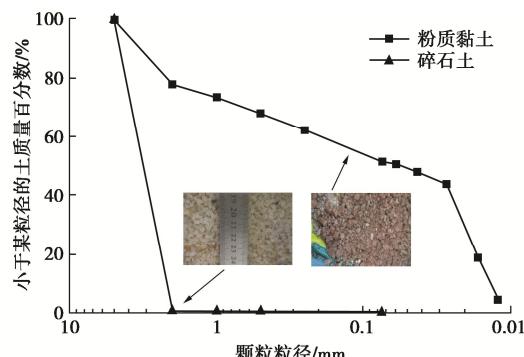


图 1 试验土料颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of test soils

试验土料吸力采用滤纸法测量，滤纸型号为 Whatman No.42。采用 van Genuchten 模型^[13]（简称

VG 模型）进行土水特征曲线的拟合和渗透系数函数的估算。试验土料的饱和渗透系数 k_s 采用变水头法测量。不同压实度 (degree of compaction, DC) 土料土水特征曲线汇总于图 2，水力参数汇总于表 2。

表 1 土料基本特性

Table 1 Basic properties of test soils

土料	G_s	C_u	C_c	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$\rho_{dmax}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_{op}/\%$
粉质 黏土	2.63	13.4	0.14	26.5	43.3	1.66	19.00
碎石土	2.61	1.29	1.02	—	—	—	—

表 2 土料水力参数

Table 2 Hydraulic parameters of test soils

土料	压实度 $\theta_s/\%$	$k_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	VG 模型拟合参数
粉质 黏土	0.76	51.9×10^{-6}	$a=0.08 \text{ kPa}^{-1}, m=0.21, n=1.6^{[14]}$
粉质 黏土	0.80	49.5×10^{-7}	$a=0.05 \text{ kPa}^{-1}, m=0.21, n=1.6$
粉质 黏土	0.90	43.4×10^{-8}	$a=0.005 \text{ kPa}^{-1}, m=0.20, n=3.0$
粉质 黏土	0.92	41.9×10^{-8}	$a=0.0035 \text{ kPa}^{-1}, m=0.18, n=3.5$
碎石土	—	38.7×10^{-2}	$a=2 \text{ kPa}^{-1}, m=0.75, n=2$

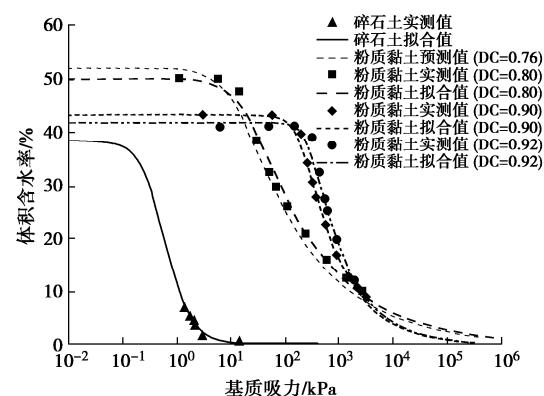


图 2 试验土料土水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curves of test soils

由图 2 可得，粗粒土进水值约为 2 kPa，这即毛细阻滞层的击穿吸力^[10]，对应的击穿含水率在 3% 左右。由表 2 可知，粗、细粒土的饱和渗透系数相差 4~5 个量级，符合毛细阻滞覆盖层的一般要求。

1.2 试验装置

试验装置由土柱装置、降雨装置、量测装置 3 部分组成，试验装置示意图如图 3 所示。

土柱细粒层厚度为 15 cm，粗粒层及导排层厚度均为 28 cm。导排层宽度可通过卡槽在 5, 10 cm 之间调节。降雨设备由降雨器与马氏瓶组成，降雨器长宽尺寸与土柱相同，底面均匀打有直径 2 mm 的针孔以模拟降水，通过调节马氏瓶水头控制降雨强度。量测系统包括设置在土柱中的水分传感器、设置在土柱下方的电子天平及数据采集仪。水分传感器为产自澳大利亚 ICT 公司的 MP406 土壤水分传感器，精度为 $\pm 1\%$ 。

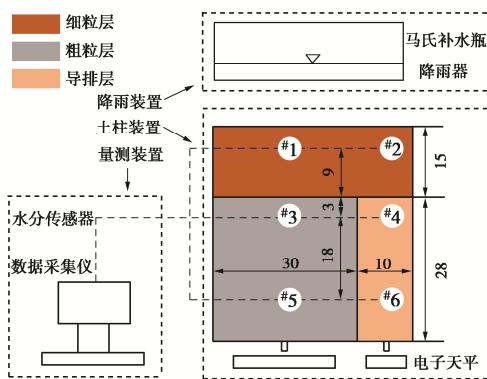


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test devices

1.3 试验方案

本研究设置 3 个试验组、开展 6 次模型试验, 试验方案汇总于表 3。其中, 试验组一用于验证 UDL 的导排效果, T1 试验设置 10 cm 宽导排层, T2 试验作为对照组, 不设置导排层, 其余条件完全相同。试验组二用于研究导排层宽度对其服役性能的影响, 包含 T1、T3 两次试验, 导排层宽度分别为 10, 5 cm, 与细粒层宽度比分别为 1:8 与 1:4。试验组三用于研究导排层渗透系数对导排性能的影响, 通过控制细粒土的压实度调节细粒层和导排层的渗透系数。

参考《土工试验方法标准》^[15], 试验土柱采用分层压实法制备。为便于观察水分入渗情况, 土柱的初始状态为干燥。粗粒土干密度控制为 1.60 g/cm³, 细粒土干密度由目标压实度控制。降雨强度控制为 80 mm/d 左右, 以粗-细交界面下部#3 水分传感器测量到水分增长时刻作为击穿时间。

表 3 试验方案

Table 3 Test plans

试验组	试验编号	细粒层		导排层		研究内容
		压实度/%	压实度/%	宽度/cm		
一	T1	80	80	10		验证导排层
	T2	80	—	0		抽吸作用
二	T1	80	80	10		厚度对抽吸效
	T3	80	80	5		果的影响
三	T4	80	76	5		k_s 对抽吸效果
	T5	90	80	5		的影响
	T6	92	80	5		

2 试验结果

2.1 导排层抽吸效果验证

(1) 入渗及击穿特征

将试验组一中 T1、T2 试验的水分入渗情况绘制于图 4。由图 4 可得, 在 T1 试验中, 湿润锋到达导排层后, 入渗速度明显增长。结合该时刻入渗剖面可得, 当降雨入渗至粗-细界面处, 水分在粗粒土上方聚集,

而由导排层继续下渗。这说明, 在粗-细界面处, 毛细阻滞作用生效, 但此时导排层的渗流通道畅通, 因此导排层内湿润锋面低于粗-细界面。在降雨强度(即总入渗量)不变的情况下, 过水面积由土柱全断面减小至导排层, 导致导排层内的流速增大, 出现图 4 中的湿润锋前进速度增长现象。

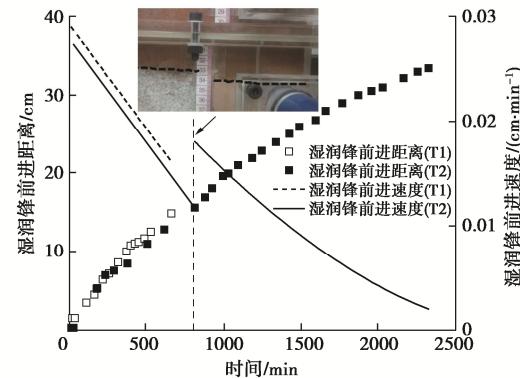


图 4 水分入渗情况 (试验组一)

Fig. 4 Water infiltration process (Test group I)

图 5 为试验组一中#3、#4 号传感器含水率随时间的变化情况, 该传感器距离粗-细界面 3 cm。由图可得, 由于增加了导排层, 毛细阻滞界面的击穿时间由 730 min 增长到 990 min, 增长了 35.6%。

结合上述分析, 可得到导排层的防渗机理为: 在粗-细界面毛细阻滞作用生效的同时, 导排层具有抽吸效果, 排出了大量聚集在粗-细界面处的水分, 降低了界面处水分聚集速度, 延长了毛细阻滞层的击穿时间。

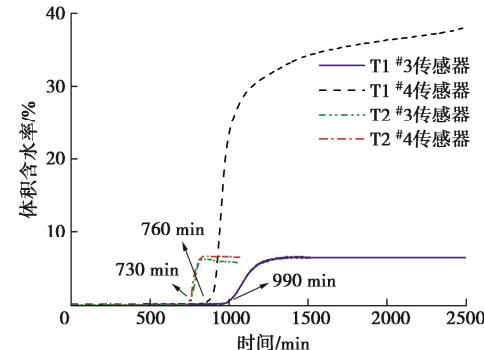


图 5 #3 和#4 传感器含水率随时间变化 (试验组一)

Fig. 5 Change of water content of sensors No. 3 and No. 4
(Test group I)

(2) 理想导排效果

试验组一证明了导排层具有抽吸效果, 可增强毛细阻滞层的防渗效果、延长其击穿时间。然而, 湿润锋到达土柱底部后, 土柱渗漏水分全部来自粗粒层, 这在毛细阻滞层的设计中应避免, 因为粗粒土层渗漏会导致其下覆固体垃圾产生污染液。

因此, 定义导排层的理想抽吸效果为: 在降雨作用下, 渗入覆盖层的降水全部由导排层排出, 粗粒层不发生渗漏。后续研究将以达到理想抽吸效果为目标,

探究导排层宽度、渗透系数对导排效果的影响。

2.2 导排层宽度对服役性能的影响

将 T3 试验 6 个测点的含水率变化情况汇总于图 6。由图可得,粗粒层中的#3 传感器在 1560 min 水分开始增长,即击穿时间为 1560 min。由于 UDL 层的抽吸作用,在 25 cm 高度处,#3 传感器水分变化晚于#4 传感器。而在 7 cm 高度处,粗粒层中的#5 传感器变化早于导排层中的#6 传感器,这是由于随着毛细阻滞层被突破,粗粒层渗流通道被打开,相同吸力下,粗粒土渗透系数远大于细粒土,因此粗粒层中水分下渗快于导排层,在 7 cm 高度处“追上”了导排层。

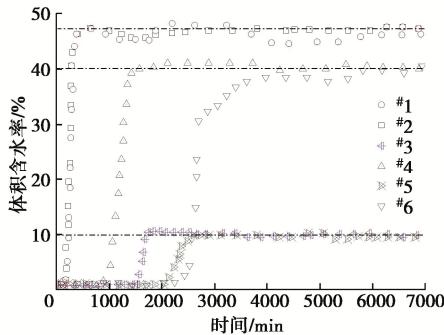


图 6 T3 试验测点含水率随时间变化(导排层宽度 5 cm)

Fig. 6 Change of water content in test T3 (UDL width of 5 cm)

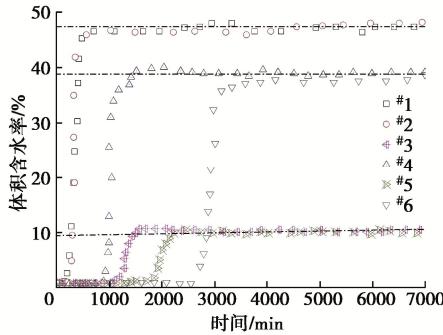


图 7 T1 试验测点含水率随时间变化(导排层宽度 10 cm)

Fig. 7 Change of water content in test T1(UDL width of 10 cm)

为了提高导排层的抽吸性能,将导排层宽度增大一倍,设为 10 cm,进行极端降雨入渗试验,即 T1 试验。T1 试验各测点含水率变化情况见图 7。由图 7 可得,T1 试验入渗规律与 T3 试验类似:由于导排层的引流效应,水分在导排层中优先入渗,毛细阻滞层击穿后,水分在粗粒土层加速下渗。在 T1、T3 试验中,粗粒土底部分别在约 3400 min 和 3500 min 开始渗漏,渗漏量等于土柱顶部入渗量,并持续到试验结束,导排层底部始终未排水。在渗漏发生时,两次试验粗粒层含水率均稳定在 10% 附近,远超其理论击穿含水率(3%)。这说明,在两次试验中,导排层的抽吸能力不足,均未达到理想工作状态。

2.3 导排层渗透系数对导排性能的影响

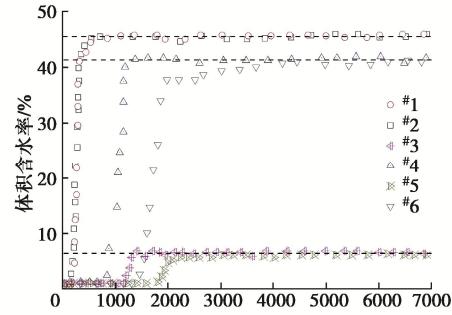
将试验组三中 T4、T5、T6 试验水分监测结果分别绘制于图 8(a), (b), (c)。由图 8 可得,与 T1、

T3 试验不同,在 T4 试验中,导排层水分传感器的变化始终先于同一高度处的粗粒层,在 T5、T6 试验中也有类似现象。说明试验组三中由于导排层压实度减小、渗透系数增大,导排层的抽吸作用得到显著增强。

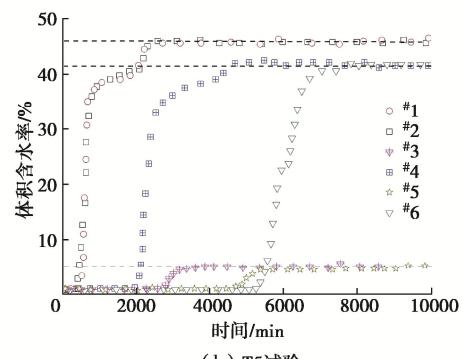
表 4 试验组三结果汇总

Table 4 Results of test group III

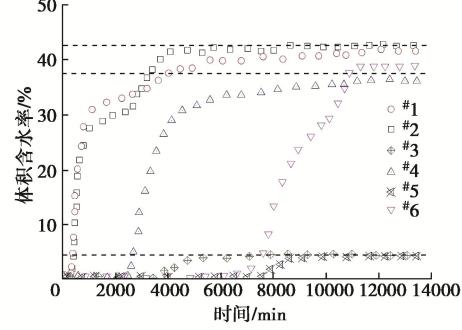
试验编号	T4	T5	T6
排水方式	全部由导排层排水		
细粒层稳定含水率/%	4	5	6
击穿时间/min	1200	2800	7000



(a) T4 试验



(b) T5 试验



(c) T6 试验

图 8 试验组三测点含水率随时间变化

Fig. 8 Change of water content in test group III

将试验组三的结果汇总于表 4,由表 4 可得:①3 次试验中,土柱底部均由导排层排水,粗粒土层无渗漏。这说明,通过设置导排层渗透系数小于细粒层,可实现理想的导排效果;②在 T4、T5、T6 试验中,随着导排层与细粒层渗透系数比值的增加,粗粒土层的稳定含水率分别为 6%, 5%, 4%, 远低于 T1、T3 试验(约 10%), 并逐渐接近其理论击穿含水率(3%), 说明细粒层与导排层渗透系数差值的增大有助于增强

导排层抽吸效果; ③随着细粒层渗透系数的降低, 结合导排效果的增强, 毛细阻滞层的击穿时间得到延长, 这与前人研究结果一致^[7]。

3 UDL 理想导排状态准则

3.1 准则提出

前述试验研究已经证明, 当导排层渗透系数小于细粒层时, 导排层可达到理想的导排效果, 如图 9 所示。此时, 毛细阻滞层的过水量可由式(1)计算。

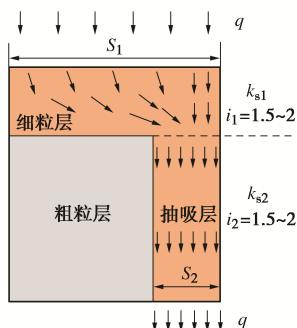


图 9 含非饱和导排层毛细阻滞覆盖层理想服役状态

Fig. 9 Ideal drainage states of capillary barrier cover with UDL

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= k_1 \cdot i_1 \cdot S_1, \\ q_2 &= k_2 \cdot i_2 \cdot S_2, \\ q_1 &= q_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, q_1 , q_2 分别为细粒层、导排层的单位时间过水量, k_1 , k_2 分别为细粒层、导排层的渗透系数, i_1 , i_2 分别为细粒层、导排层的水力梯度, S_1 , S_2 分别为细粒层、导排层的过水面积。

为了达到理想服役状态, 至少需保证导排层的过水能力不小于细粒层, 如下式:

$$q_{2\max} = k_2 \cdot i_2 \cdot S_2 \geq q_{1\max} = k_1 \cdot i_1 \cdot S_1, \quad (2)$$

式中, $q_{1\max}$ 、 $q_{2\max}$ 分别为细粒层、导排层的最大单位时间过水量。

由图 8 可知, 在理想导排状态, 细粒层和导排层将形成近饱和渗流, 因此可将土层渗透系数取为饱和渗透系数; 前人研究已证实, 在强降雨作用下, 毛细阻滞层的平均水力梯度约在 1.5~2 之间^[7], 因此相比渗透系数和过水断面, 水力梯度在式(2)中的影响可以忽略; 过水断面取不同区域土层截面。则式(2)可近似地转化为下式:

$$k_{s2} \geq k_{s1} \cdot \frac{S_1}{S_2}, \quad (3)$$

式(3)即为强降雨作用下, 导排层达到理想工作状态的设计准则。

3.2 准则验证

采用提出的 UDL 理想导排状态准则分析含导排层试验, 结果汇总于表 5。由表 5 可得:

(1) 在 T1、T3 试验中, 根据 UDL 理想导排状

态准则, 由于细粒层和导排层具有相同的渗透系数, 无论如何调节导排层宽度, 均无法达到理想导排状态, 因此 T1、T3 试验中, 粗粒土层将发生渗漏, 这与 2.2 节试验现象一致。

(2) 在 T4~T6 试验中, 尽管导排层宽度均小于细粒层, 但导排层的渗透系数相比细粒层有数量级的增加, 满足 UDL 理想导排状态准则, 可实现理想导排效果, 该分析结果与 2.3 节试验现象一致。

(3) 在 T4~T6 试验中, 导排层与细粒层渗透系数比值增加, 导排层理论最大过水量随之增加, 根据准则, 导排层的导排效果将逐渐增强。这与表 5 中试验结果一致。

上述分析表明, 本文提出的 UDL 理想导排状态准则符合非饱和渗流的物理机制, 且其分析结果与试验现象吻合, 验证了该准则的可靠性。

表 5 试验结果与准则分析结果对比

Table 5 Comparison between test and theoretical results

试验次数	T1	T3	T4	T5	T6
$S_1 : S_2$	4	8	8	8	8
$k_{s1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	7.6× 10^{-7}	7.6× 10^{-7}	7.6× 10^{-7}	8.2× 10^{-8}	3.1× 10^{-8}
$k_{s2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	7.6× 10^{-7}	7.6× 10^{-7}	6.7× 10^{-6}	7.6× 10^{-7}	7.6× 10^{-7}
$k_{s2} : k_{s1}$	1	1	8.8	9.3	24.5
理论	0.25	0.125	1.10	1.16	3.06
$q_{2\max}/q_{1\max}$					
实测 q_2/q_1	0.164	0.138	1	1	1
满足理论准则	否	否	是	是	是
实现理想导排	否	否	是	是	是

3.3 讨论

式(3)指出: 提高导排层的抽吸性能有两种方式: ①提高导排层与细粒层渗透系数之比。②增大导排层与细粒层面积之比。其中, 渗透系数可通过土料选取、压实度控制等常规方式实现跨量级的变化^[16], 相比之下, 导排层宽度变化范围十分有限, 增大导排层宽度对其抽吸性能的提升不大。因此, 在实际工程中, 宜将导排层宽度设为便于施工的合理值(如 10~30 cm), 着重提高导排层与细粒层的渗透系数之比。

4 结 论

本研究通过室内降雨入渗模型试验, 分析了含非饱和导排层毛细阻滞覆盖层的防渗机理, 研究了 UDL 宽度和渗透系数对其导排性能的影响, 提出了 UDL 理想导排状态的初步准则, 并基于试验结果对该准则进行了验证, 得出以下结论:

(1) 新增的导排层具有抽吸作用, 可延长毛细阻滞层的击穿时间。

(2) 提高导排层宽度对其抽吸性能的提升不明显, 当导排层与细粒层采用相同性质的土料时, 导排

层宽度与细粒层宽度之比由 1:8 增加到 1:4 对其抽吸性能的提高不大。

(3) 增大导排层与细粒层渗透系数之比可显著增强其抽吸效果, 达到入渗水分全部由导排层排出的理想工作状态, 且二者比值越大, 抽吸效果越好。

(4) 提出的 UDL 理想导排状态准则分析结果与试验结果吻合, 在实践中应重视抽吸层与导排层渗透系数的合理选取。

参考文献:

- [1] NG C W W, NI Jun jun, LEUNG A K. Effects of plant growth and spacing on soil hydrological changes: a field study[J]. *Géotechnique*, 2020, **70**(10): 867 – 881.
- [2] ZHAN L T, LI G Y, JIAO W G, et al. Performance of a compacted loess/gravel cover as a capillary barrier and landfill gas emissions controller in Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **718**: 137195.
- [3] 焦卫国, 刘振男, 季永新, 等. 红黏土覆盖层水力参数演变规律与防渗设计讨论[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(1): 45 – 52. (JIAO Wei-guo, LIU Zhen-nan, JI Yong-xin, et al. Evolution laws of hydraulic parameters of red clay covers and design of seepage prevention[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(1): 45 – 52. (in Chinese))
- [4] APIWANTRAGOON P, BENSON C H, ALBRIGHT W H. Field hydrology of water balance covers for waste containment[J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 2015, **141**(2): 04014101.
- [5] 张文杰, 耿潇. 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶工作机制及性能分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(3): 454 – 459. (ZHANG Wen-jie, GENG Xiao. Performance and mechanism of capillary-barrier evapotranspiration cover of landfills[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(3): 454 – 459. (in Chinese))
- [6] 詹良通, 贾官伟, 邓林恒, 等. 湿润气候区固废堆场封场土质覆盖层性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(10): 1812 – 1818. (ZHAN Liang-tong, JIA Guan-wei, DENG Lin-heng, et al. Performance of earthen final covers of landfills in humid areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1812 – 1818. (in Chinese))
- [7] 李晓康, 李旭, 王菲, 等. 毛细阻滞覆盖层储水能力和击穿时间试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(7): 1501 – 1511. (LI Xiao-kang, LI Xu, WANG Fei, et al. Experimental study on water storage capacity and breakthrough time of capillary barrier cover[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, **41**(7): 1501 – 1511. (in Chinese))
- [8] STORMONT J C, MORRIS C E. Unsaturated drainage layers for diversion of infiltrating water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, **123**(5): 364 – 366.
- [9] 邓林恒, 詹良通, 陈云敏, 等. 含非饱和导排层的毛细阻滞型覆盖层性能模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 75 – 80. (DENG Lin-heng, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Model tests on capillary-barrier cover with unsaturated drainage layer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(1): 75 – 80. (in Chinese))
- [10] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 含非饱和导排层的毛细阻滞覆盖层长期性能分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, **53**(6): 1101 – 1109. (JIAO Wei-guo, ZHAN Liang-tong, JI Yong-xin, et al. Analysis on long-term performance of capillary-barrier cover with unsaturated drainage layer[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53**(6): 1101 – 1109. (in Chinese))
- [11] ZHAN T L T, LI H, JIA G W, et al. Physical and numerical study of lateral diversion by three-layer inclined capillary barrier covers under humid climatic conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **51**(12): 1438 – 1448.
- [12] 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**: 210 – 221.
- [13] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892 – 898.
- [14] 刘丽, 吴羊, 李旭, 等. 压实度对宽级配土水力特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(9): 2545 – 2555. (LIU Li, WU Yang, LI Xu, et al. Influence of compaction on hydraulic properties of widely-graded soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(9): 2545 – 2555. (in Chinese))
- [15] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (GB50132—2019 Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [16] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平, 等. 重载铁路基床表层级配碎石渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 193 – 202. (YANG Zhi-hao, YUE Zu-run, FENG Huai-ping, et al. Experimental study of permeability properties of graded macadam in heavy haul railway subgrade bed surface layer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(1): 193 – 202. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)