

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.059>



粗粒层增压条件下非饱和阻隔层控制降雨入渗边坡规律

杨 野¹, 吴庆华^{1,2*}, 王 珂³

1. 长江水利委员会长江科学院, 湖北武汉 430010
2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北武汉 430010
3. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川成都 610041

摘 要: 传统土质边坡表面硬化防渗措施易因降雨入渗产生干缩开裂问题, 威胁工程安全, 采用非饱和阻隔层(capillary barrier layer, CBL)阻隔保护可提升工程的长期稳定性, 但存在导水能力随长期降雨入渗而下降的现象。针对传统非饱和阻隔层中毛细阻滞能力随降雨入渗衰减的问题, 本文从水-气耦合角度, 提出了通过粗粒层增压以增强非饱和阻隔层阻隔降雨入渗的方法。采用系列物理模型试验, 在气密封闭条件下, 探讨不同降雨强度、CBL 初始含水量和粗粒层增压值等条件对其阻隔降雨入渗的影响, 主要取得以下认知: (1) 当粗粒层注气增压(1~3 kPa)时, 降雨全部从细粒层、过渡层与粗粒层界面排出, 完全抑制降雨突破过渡层/粗粒层界面而进入粗粒层, 显著提升非饱和阻隔层的阻隔效率。(2) 二元结构最大导排能力随粗粒层增压值增加而增大, 而随细粒层含水量增加而下降。(3) 提出综合阻隔性能指数以量化注气条件下非饱和阻隔层对降雨入渗的阻隔效果。该研究成果开创性地利用土体气相作为阻隔层排水驱动力, 可为边坡防护工程等领域提供科学依据。

关键词: 水气耦合; 降雨入渗; 阻滞效应; 边坡; 工程地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2026)06-2394-13

收稿日期: 2025-10-13

Controlling Rainfall Infiltration in Slopes Using an Unsaturated Barrier Layer under Coarse-Grained Layer Pressurization

Yang Ye¹, Wu Qinghua^{1,2*}, Wang Ke³

1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China
2. Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environmental Science, Wuhan 430010, China
3. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610041, China

Abstract: Traditional surface hardening and impermeabilization measures for earthen slopes are prone to desiccation cracking due to rainfall infiltration, threatening engineering safety. The application of an capillary barrier layer (CBL) for protection can enhance the safety and stability of the project. However, its hydraulic conductivity decays with the long-term process of rainfall infiltration. To address the attenuation of capillary barrier strength in conventional unsaturated CBL during rainfall infiltration, this study proposes a method to enhance the infiltration resistance of the unsaturated barrier by pressurizing the coarse-grained layer from a coupled water-gas perspective. A series of physical model tests were conducted to investigate the effects of different rainfall intensities, initial CBL moisture contents, and coarse-grained layer pressurization levels on infiltration resistance. The main findings are as follows. (1) When the coarse-grained layer is pressurized (1–3 kPa), rainfall is entirely discharged along the

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.42072282)。

作者简介: 杨野(1999—), 男, 硕士, 主要从事饱和-非饱和和地下水渗流研究工作。ORCID:0009-0002-6654-6631. E-mail:1986033346@qq.com

* **通讯作者:** 吴庆华, ORCID:0000-0001-6565-9357. E-mail: wqh0505@126.com

引用格式: 杨野, 吴庆华, 王珂, 2026. 粗粒层增压条件下非饱和阻隔层控制降雨入渗边坡规律. 地球科学, 51(6): 2394–2406.

Citation: Yang Ye, Wu Qinghua, Wang Ke, 2026. Controlling Rainfall Infiltration in Slopes Using an Unsaturated Barrier Layer under Coarse-Grained Layer Pressurization. *Earth Science*, 51(6): 2394–2406.

interface between the fine-grained layer, the transition layer, and the coarse-grained layer, completely preventing rainfall breakthrough into the coarse-grained layer and significantly improving the barrier efficiency of the unsaturated CBL. (2) The steady-state lateral drainage rate of the binary structure increases with higher pressurization in the coarse-grained layer but decreases with increasing moisture content in the fine-grained layer. (3) A Comprehensive Barrier Efficacy Index (CBEI) is proposed to quantify the effectiveness of the unsaturated barrier under air injection conditions. This result innovatively establishes the soil gas phase as the drainage driving force in barrier layers, providing a scientific basis for slope protection engineering.

Key words: coupled water-gas; rainfall infiltration; barrier effect; slope; engineering geology.

0 引言

防治降雨对土质边坡的影响,一直是边坡工程防护的研究重点,如生活垃圾填埋场的终场覆盖层,是一种为防止雨水与污水下渗、污染地下水及周边环境的边坡防护措施。目前工程上常采用防护膜、粘土覆盖层等措施防治降雨入渗危害,但在长期降雨影响下,易产生开裂等问题,影响工程长期安全有效性与环保需求(Shaikh *et al.*, 2019; 王锦楠等, 2021)。细/粗二元结构组成的非饱和边坡阻隔层(capillary barrier layer, CBL),采用上层铺设细粒土、下层铺设粗粒土的倾斜层状覆盖方式,置于需要防护的土质边坡层之上,是一种近年来工程上在如垃圾填埋场覆盖层等边坡防护工程中从源头控制降雨、污水入渗的方法(焦卫国等, 2019; Zhan *et al.*, 2020)。

已有国内外学者对影响CBL二元结构边坡阻隔层导排水能力的因素开展了大量研究,并提出相关改进优化设计方案。Aubertin *et al.* (2009)和Tami *et al.* (2004)试验证明在垃圾填埋场中,CBL二元结构覆盖层的导水能力主要取决于结构层厚、上覆细粒层最大储水能力、结构倾斜角度和土体岩性。Parent and Cabral (2006)对比不同材料设计的毛细阻滞型覆盖层的优缺点,表明细粒层粉砂加砂砾的级配组合阻隔性能较好。Harnas *et al.* (2014)为增强毛细阻滞层的储水功能,提出双毛细阻滞层的理念,并通过不同降雨条件下的一维入渗试验,发现细粒层与粗粒层之间渗透系数的差异,使入渗水分优先在交界面处侧向导排。Mancarella and Simeone (2012)在火山碎屑分层沉积条件下,证明非饱和土体内毛细阻滞效应是导致非饱和阻隔层侧向导排的关键因素,试验发现毛细阻滞效应的防渗机制易受长期降雨影响,饱和度上升导致基质吸力大幅降低,导致阻隔层导水能力下降。李光耀(2020)、刘刚等(2015)和詹良通等(2017)针对毛细阻滞层的水气运动特性进行了研究,在微观条件下验证了细/粗

颗粒土层交界处的毛细阻滞效应,结果表明当水分从细粒土渗入粗粒土时,粗粒土的毛细驱动力较小,粗粒层内封闭气泡的阻滞,水分更倾向于在细/粗粒土界面向具有较大毛细驱动力的细粒土中移动,是影响CBL二元结构侧向导水能力的关键因素。

Morris and Stormont (1998, 1999)则在不同坡角对比试验中,发现毛细阻滞层的导流排出长度与斜率有直接关系,并提出在毛细阻滞覆盖层的细—粗交界面处加入非饱和排水层(unsaturated drainage layer, UDL)可显著改善和加强覆盖层的横向排水性能这一改良方向,实践证明毛细阻滞型覆盖层的成本比其他边坡防护带的成本显著降低,具有更好的经济效益。李晓康(2022)、陈冠一等(2022)证明不同降雨条件下,CBL结构中加入非饱和排水层UDL能显著增加毛细阻滞层击穿时间,提升CBL侧向导水效率。焦卫国等(2020)在毛细阻滞层中加入UDL混合层,以室内降雨模拟试验与数值模拟的方法,分析了UDL厚度对结构导排性能的影响,并确定在CBL结构中加入UDL导排层,组成细—UDL—粗的二元边坡阻滞层结构,可以有效地提升其侧向导水效果,满足更高的工程安全需求。吴庆华等(2017, 2025)针对降雨入渗对边坡稳定性的影响,选取亚砂土/砾砂作为细粒土层,建立了非饱和土上细下粗的边坡阻滞层结构,并根据不同结构坡角(10°、20°、30°和40°)、岩性组合(亚砂土/粗砂、亚砂土/砂石等组合)、降雨强度条件下进行大量试验分析与研究,并提出当CBL二元结构采取亚砂土/细砂组合且坡角25°~27°时,可以达到最优的侧向导水效果。

综上所述,目前关于非饱和阻隔层抑制降雨入渗的研究主要集中于不同降雨强度、结构倾斜角度、不同岩性、不同级配组合、不同CBL结构地形组合对其阻隔效果的影响,但对降雨入渗过程中土壤空气如何影响其阻隔效果的研究少有关,且对于

采取主动扩大多孔介质内毛细阻滞效应,增强阻隔层排水能力的方法较为欠缺.为此,本文基于水—气耦合作用,建立通过控制气相压力来直接增强界面毛细阻滞力驱动侧向排水的物理机制,采用系列物理模型试验,开展粗粒层增压条件下非饱和阻隔层控制降雨入渗边坡的规律研究,为进一步优化垃圾填埋场的终场覆盖层导排效果以及边坡稳定性防护提供科学参考.

1 试验方法与材料

1.1 试验土样

根据设计要求,采用模拟试验土层分别采用粉砂、圆砾以及黏土,试验土体的岩性、颗粒级配、干密度与渗透系数由室内试验测得,结果如表 1 所示.

1.2 试验系统

试验装置组成包括四部分:降雨模拟系统、土柱腔体模拟系统、注气与测压系统和排水收集系统四大部分,用于室内试验气密封闭条件下模拟工程实际情况.

1.2.1 降雨模拟系统 降雨模拟系统由针头式降雨模拟空腔、降雨支架和运输水管 3 部分组成,尺寸为长 21 cm、宽 16 cm、高 12 cm 的玻璃腔体,降雨模拟腔体水位高度为 4.5 cm 和 8 cm 时,其对应的降雨强度分别为 3.64×10^{-4} cm/s 和 5.34×10^{-4} cm/s.降雨模拟试验过程中,水体采用亮蓝染色示踪.

1.2.2 土柱腔体模拟系统 试验装置采用长 21 cm、宽 16 cm、高 21 cm 的空心玻璃腔体,具体模型试验设计见图 1.

模型外侧上下放置倾角为 22° 的玻璃三角楔体

模拟土坡坡角,在模型内部由下至上填筑边坡层、粗粒层、UDL 混合层(粗粒土与细粒土按体积 1:1 混合)与细粒层.模型从下至上分别填充边坡层、粗粒层、混合层(UDL)和细粒层,其总厚度分别为 4 cm、4 cm、2 cm 与 9 cm.填筑完成以后在细粒层表面平铺一层粒径为 5~2 mm 的碎石土,避免降雨模拟时,长时间雨滴击打土坡表面,对试验结果造成影响.模型底部、右侧边均为透水、透气边界,用多孔玻璃板模拟,模型顶部为降雨—大气边界,其余侧边均为不透水、不透气边界.

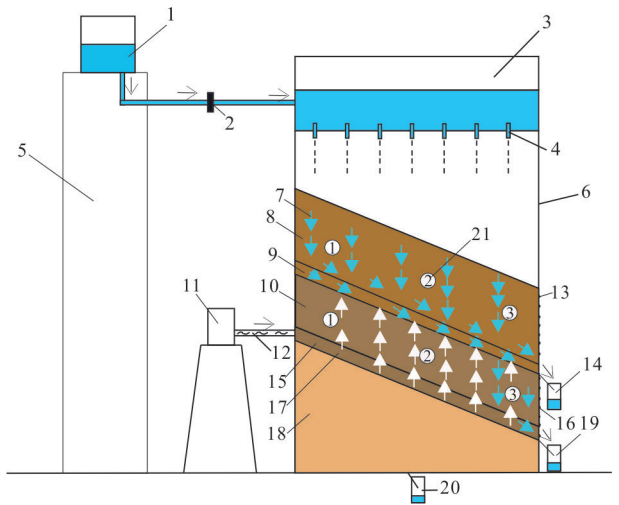


图 1 物理模型结构示意图

Fig.1 Physical model of the CBL

1. 供水系统; 2. 输水阀门; 3. 降雨模拟器; 4. 医用针头; 5. 供水支架; 6. 降雨支架; 7. 降雨运移路径; 8. 细粒层; 9. 混合层; 10. 粗粒层; 11. 双源稳压注气系统; 12. 注气通路; 13. 细粒层多孔排水板; 14. 细粒层/混合层排水搜集; 15. 粗粒层注气铜管网; 16. 粗粒层多孔排水板; 17. 增压气体运移路径; 18. 边坡层; 19. 粗粒层排水收集; 20. 边坡层排水收集; 21. 测压点

表 1 二元结构地层颗粒级配与主要物理参数

Table 1 Particle size distribution and physical parameters of the dual structure layer

土样	土壤类型	粒径分布(%)						干密度 (g/cm ³)	饱和 渗透系数 (cm/s)	混合 比例
		中砾		细砾	中砂	细砂	粉粒/黏粒			
		20~10 mm	10~5 mm	5~2 mm	0.50~0.25 mm	0.250~0.075 mm	<0.075 mm			
细粒层	粉砂	—	—	—	20	75	5	1.45	1.19×10^{-2}	
粗粒层	圆砾	30	20	50	—	—	—	1.7	1.05	
UDL	圆砾	16.55	11.03	27.58	8.97	33.63	2.24	1.62	5.28×10^{-2}	1:1
边坡层	黏土		—	—	1.6	2.8	95.6	1.6	5.3×10^{-6}	

1.2.3 注气与测压系统 降雨模拟开始前 30 min 与试验降雨持续过程中,以易安空压机(E100L)每 2 min 周期性地注压至双通路气源稳压系统(HYH-QY-2)内,转化为设计所需压力范围后,注压至粗粒层底所埋设注气通路以达到试验设计增压强度,并以智能压力变送器(GT/T 13384-2008)实时监测土体内集气单元处压力变化,分别记录不同时刻细粒层中测压点 MF-1、MF-2 与测压点 MF-3 与粗粒层测压点 MC-1、MC-2 和 MC-3 内压力变化数值.注气通路与各土层内测压点分布情况见图 2,注气通路、测压单元和输气管线的安装与土体的填筑同时进行,试验仪器安装时封闭加固,以减少测压误差,提升试验结果准确性,管线接口均采用气密封闭双通、三通金属接口,注气和测压系统与土柱腔体模拟系统边壁连接处均采用玻璃胶进行密封,以保证气密性.填筑土样时,同步埋设自主设计的多孔铜管网、玻璃空腔至土柱内作为注气通路和测压点测压单元见图 3,利用 6 mm 塑胶软管与双源稳压注气系统、智能压力变送器相连,以无纸记录仪每 2 min 自动记录试验期间细粒层、粗粒层内部气压变化过程.

1.2.4 排水收集系统 排水侧细粒层、粗粒层多孔板排水口分别与量筒、带刻度的封闭玻璃瓶连接,利用电子天平实时测量试验过程中细粒层、UDL 混合层、粗粒层与边坡层的降雨入渗排水量.

为保证数据收集的精度,在开始排水以后 0~20 min,每 2 min 记录一次数据并拍摄侧向渗流跟踪照片;20~60 min,每 5 min 一次;60~120 min,每 10 min 一次;以后每 20 min 一次的方式记录,当连续 3 次排水强度波动范围在 5% 以内时,认为饱和和导排层的排水已达到稳定,即降雨停止后 0~10 min,每 2 min 记录一次;10~30 min,每 5 min 一次进行排水量记录,当排水完全停止后,结束试验.

1.3 试验方案

为模拟不同增压条件下,CBL 二元结构对降雨入渗的影响规律,根据自然边坡条件和已有文献,确定各层土样所需制备的初始质量含水量分别为细粒层 7%、混合层(细粒层与粗粒层土 1:1 制备) 4.75%、粗粒层 2.5%、边坡层 17.3%,模型最佳倾斜角度为 22°,并共设计 5 组试验,具体方案设置见表 2.

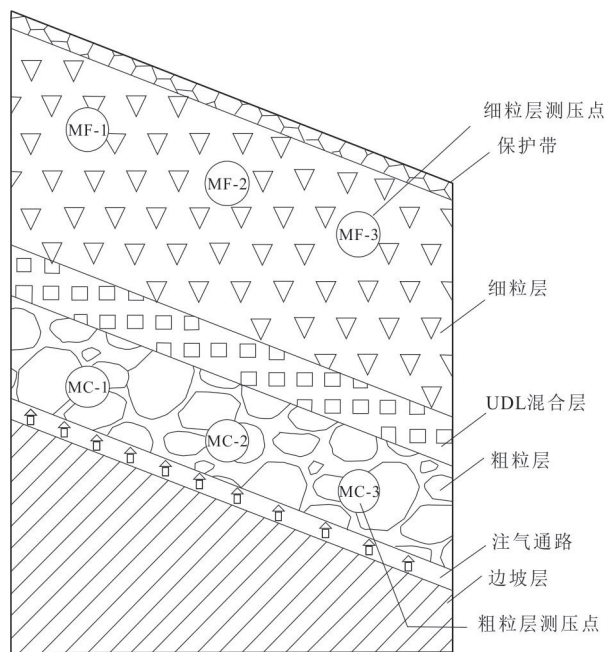


图 2 测压点分布示意

Fig.2 Layout of pressure measuring point

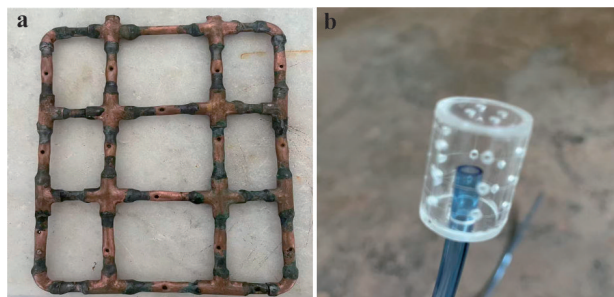


图 3 注压与测压单元

Fig. 3 Pressure injection and pressure measuring unit

a. 粗粒层注气铜管网; b. 细/粗粒层测压玻璃腔

2 粗粒层未增压条件下降雨入渗规律

试验 F0 降雨强度为 3.64×10^{-4} cm/s,粗粒层无增压条件下,降雨入渗示踪情况可见图 4.从图 4 可知,F0 试验中,降雨入渗浸润线运动基本与模型倾斜角度相符, $t=40$ min 时,在针头式降雨模拟影响下,浸润区为独立的入渗区域.当 $t=100$ min 时,在水平重力梯度影响下,浸润区域逐步连为整体,此时可观测到模型右侧多孔排水口上部开始渗水. $t=100 \sim 120$ min 时,右侧浸润锋线对比中部与左侧下移速度显著地增加,坡体中部与坡角垂向迁移距离分别约为 5.5 cm 与 7.5 cm,右侧水体优先突破混合层,到达粗粒层.这是由于随着模拟降雨过程的推进,内部右侧土壤水局部质量含水量的上升,优先

表 2 试验方案
Table 2 Schemes of rainfall tests

方案名称	降雨强度 (10^{-4} cm/s)	粗粒层增压值 (kPa)	CBL 初始含水量 (细粒层/混合层/粗粒层)	降雨时间 (h)
F0	3.64	0	低(7%/4.75%/2.5%)	10
F1	3.64	2~3	低(7%/4.75%/2.5%)	10
F2	3.64	2~3	高(F1完成后连续降雨试验)	10
F3	5.34	2~3	高(F2完成后连续降雨试验)	10
F4	3.64	1~2	高(F3完成后连续降雨试验)	10

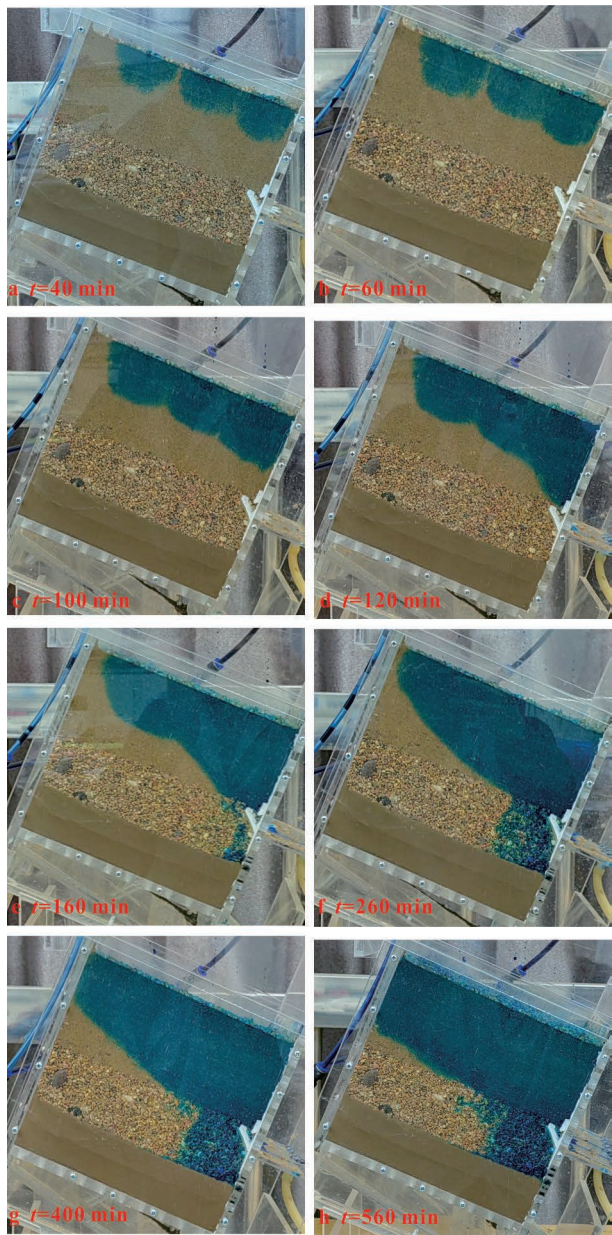


图 4 F0 无粗粒层增压条件下二元结构降雨入渗示踪
Fig.4 Tracking of rainfall infiltration in capillary barrier layer under F0 no pressurization condition in coarse-grained layer

形成局部的饱和区域,并在细粒层右侧形成稳定的排水通路. $t=120\sim160$ min 时,大量入渗水体突破混合层与粗粒层,此阶段细粒层约 65% 区域被亮蓝所染色,同时细粒层浸润线也整体逐步下移,饱和区域逐步扩大,此过程表明非饱和土内渗流驱动力完成动态转变,随着细粒层含水量因持续模拟降雨进程而增加,其基质势不断降低,控制水分运移的主导驱动力从初期的基质吸力梯度,逐步过渡为后期的重力势梯度. $t=150\sim260$ min 时在粗粒层坡脚处逐步形成区域饱和带,此阶段排水孔处可显著观测细粒层与粗粒层形成稳定的侧向排水流动. $t=260\sim500$ min 时,细粒层浸润线逐步下移,饱和区域缓慢地扩展,细粒层与粗粒层饱和染色区域最终占据总体面积约 95% 与 35%. 试验结束时黏土层未有染色情况,说明全部降雨入渗水体均无击穿黏土层,表明对于在 CBL 二元结构中加入 1:1 混合层时,在中降雨强度(3.64×10^{-4} cm/s)下,二元结构非饱和阻隔层具有完全阻隔能力,该地层对抑制降雨入渗效果明显,但在该方案试验过程中,仍可观测粗粒层产生大量侧向排水与亮蓝染色区域,说明该方案下 CBL 二元结构阻滞能力存在继续提升的空间.

3 粗粒层增压条件下降雨入渗规律

3.1 粗粒层增压条件下浸润线变化特征

3.1.1 低含水率初始条件下浸润线变化规律 图 5 为粗粒层增压条件下,开始降雨强度为 3.64×10^{-4} cm/s 的模拟试验 F1 降雨入渗锋线变化过程. 当 $t=0\sim72$ min 时,水分逐渐渗入细粒层内部,土体气体的逸散与阻滞导致中部染色水体渗入速度最快,而右侧最慢, $t=40$ min 时可看到,染色水体分别下渗至左侧 5.2 cm、中部 6.9 cm 和右侧 4.8 cm,左右两侧下降速率显著地慢于中部,这是由于土体内部增压气体优先由右侧多孔排水板处逸散,在细粒层

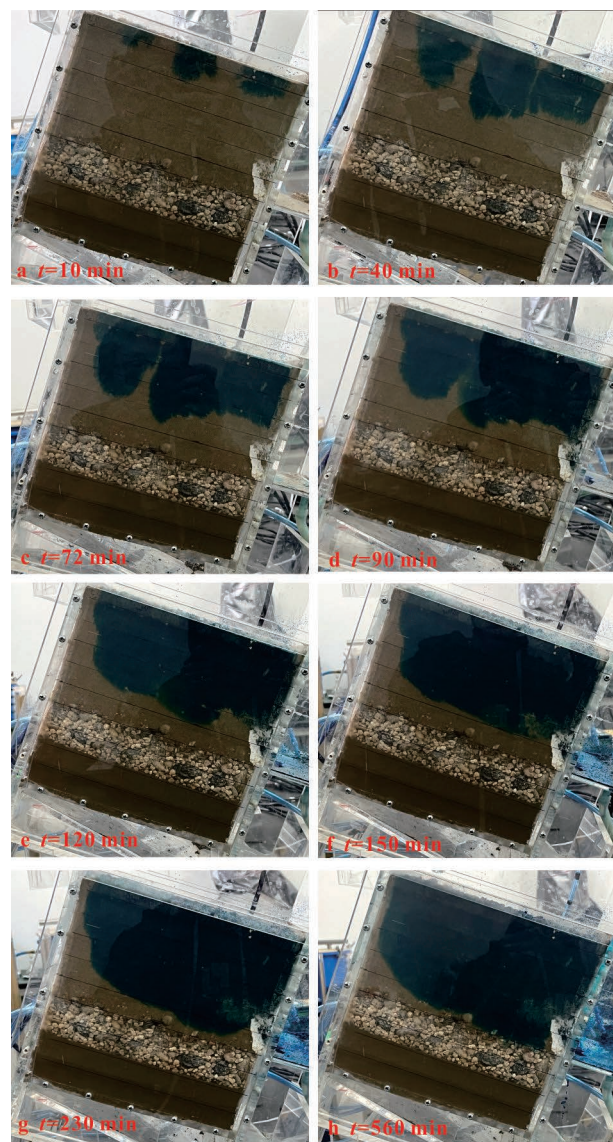


图5 F1粗粒层增压条件下二元结构降雨入渗示踪

Fig.5 Tracking of rainfall infiltration in capillary barrier layer under F1 pressurization condition in coarse-grained layer

底部的右侧坡脚排气、排水边界,已经形成了增压气体排出的优势流,从而改变右侧水体的渗入路径。当 $t=72\text{ min}$ 时,增压气体阻滞右侧水体运移的现象更加显著,染色水体分别渗入左侧 6.9 cm 、中部 8.4 cm 和 5.3 cm 处,这说明粗粒层增压后,压力梯度驱动增压气体排水边界优先运移,形成气体优势流通道,该通道在细粒层底部形成局部高气压区,提升了该区域的基质吸力,进而延缓了水分的垂向下渗,导致中部与右侧垂向渗流速度降低。在 $t=72\text{ min}$ 时观测到细粒层右侧多孔排水口排水,在此阶段土体气相主导着降雨入渗锋线的运动。

随着降雨入渗的进行,基质吸力提供的驱动力随土壤湿润而减少,入渗方向逐步由重力势梯度主导。 $t=90\text{ min}$ 时,饱和区域随着降雨入渗的进程逐步扩展,右侧入渗锋线下降速度显著增加,水体下渗到达细粒层左侧 7.2 cm 、中部 8.3 cm 和右侧 6.8 cm 处。 $t=120\text{ min}$ 时,中部入渗接近混合层顶部,随着浸润锋的向下移动,水重力势梯度完全主导渗流方向,但由于细粒层坡脚增压气体逸散通路的存在,导致右侧浸润线下降依旧缓慢,到达细粒层右侧 7.2 cm 处,此时细粒层入渗浸润锋线已完全连成片状。 $t=150\text{ min}$ 时,随着细粒层含水量逐渐趋近饱和导水率,此时,水分运移逐渐由重力水势主导,气体压力对渗流路径的影响减弱。

$t=230\text{ min}$ 时,随着水分入渗接近混合层顶部、细粒层底部,细粒层与混合层(UDL)分别约 80% 与 15% 面积被入渗水体所浸润。 $t=330\sim 430\text{ min}$ 时,已经有部分水体完全击穿混合层,并达到粗粒层顶部,由于坡脚在水平分量的增加,重力水势积累较大,导致浸润锋线下降速度较左侧显著变快,主要表现为细粒层下方右侧优先形成高排水饱和区域,为侧向排水提供了快速通路。 $t=430\text{ min}$ 时,降雨锋线趋于稳定,水分垂向浸润运动趋向停止,水体优先由右侧饱和通路排出,从整体来看,持续降雨进程并未明显导致降雨锋线的下降,而仅提升整体细粒层的饱和度,说明降雨入渗水体完全由细粒层坡脚饱和区内排出,气压驱动下细粒层排水速率显著增快,导致系统总水势并未持续大量积累,推动浸润线持续下移。 $t=540\text{ min}$ 时,停止降雨,开始持续 30 min 的排水过程,此时细粒层与混合层土体约 97% 与 65% 区域被亮蓝所染色。模拟降雨期间,在粗粒层增压条件下,增压气体改变了土体内的水势与压力势分布。气体压力梯度推动气体向低气压边界运移,形成局部高气压区,从而提升该区域基质吸力,影响浸润线运移过程。随着入渗进行,细粒层含水量上升,导水率逐渐增加,渗流逐渐由重力势主导,气体压力对浸润线运动影响减弱,但仍驱动细粒层快速侧向排水。降雨停止后粗粒层、黏土层并无观测到被亮蓝水体染色,说明该方案入渗水体并未击穿粗粒层、黏土层,说明粗粒层增压条件下CBL二元结构对降雨阻滞效果显著地优于试验方案F0。

3.1.2 高含水率初始条件下浸润线变化规律 F2、F3、F4均为F1模型土体完成后连续进行降雨试验,细粒层与混合层处于高初始质量含水量条件.对于试验方案F2,在无降雨情况下,土体内部残余部分渗水,在放置10~12 h以后,向下入渗至粗粒层顶部1 cm处. $t=100$ min时,浸润线并无明显变化,由于在气阻条件下,水分都优先向右侧导排,侧向渗流速度远大于垂向渗流速度,细粒层仅在左侧形成高4 cm、长6 cm的三角非饱和区域, $t=300$ min时右侧浸润线缓慢下降至粗粒层0.8 cm处, $t=600$ min时,细粒层与混合层约100%与95%面积被水体所染色.

试验方案F3浸润线对比F2并无明显变化,当 $t=100$ min时,部分水分向下入渗粗粒层1.5 cm处, $t=300$ min时,浸润线接近粗粒层中部2 cm处. $t=600$ min,浸润线对比粗粒层整体下降0.5 cm,变化幅度小,下降速率慢,试验结束时粗粒层约15%位置被亮蓝所染色,且未观测粗粒层排水情况.

对于试验方案F4,在 $t=0$ min,无降雨条件下,细粒层中部分水气,由玻璃腔体边缘直接下渗至底部,并未击穿黏土层,这是由于黏土层填筑完成后,产生固结体积缩小,导致实际上黏土层与玻璃腔体内部边缘处存在缝隙,少量水气沿边缘孔隙垂直下流,而黏土层内部无渗水.当 $t=100\sim 560$ min时,降雨入渗基本不影响浸润线变化,整体浸润线变化基本停止,说明增压后处于连续降雨高压环境,依旧能维持良好排水效率,试验结束时未观测粗粒层排水现象.

试验模拟降雨过程中,试验方案F1、F2、F3、F4不同CBL初始质量含水量条件下,粗粒层、黏土层均未发现亮蓝染色水体排出现象,这说明试验增压后,在细—粗界面处增加气压力差,产生向上指向细粒层的附加压力梯度,该压力梯度由增压气阻与细、粗粒层含水量差异产生基质吸力梯度耦合,共同构成总驱动力,抵抗水分从细粒层入渗至粗粒层.对比无注气增压条件下试验方案F0,表明注气增压方案CBL二元结构对抑制降雨入渗效果显著.

3.2 粗粒层增压条件下细/粗粒层压力变化特征

3.2.1 低含水率初始条件下气压变化规律 试验F1在低含水率的初始试验条件下开始,土体气相压力测压随着降雨入渗的过程而周期性地波动,这与空压机周期性注压相符.初始注压范围为2~3 kPa,

土体内部气压的变化可大致分为3个阶段,F1方案具体细粒层、粗粒层测压点压力变化见图6.

$t=0\sim 70$ min的第一阶段,在注气初期,土体孔隙未被入渗水体堵塞,增压气体在压力梯度影响下于孔隙中积蓄,此阶段气压快速上升,细粒层测点靠近透气边界,部分气体持续逸散,因此压力累积程度远低于粗粒层.此阶段粗粒层测压点MC-1、MC-2与MC-3测压均值分别为0.29 kPa、0.21 kPa和0.30 kPa,细粒层由于接近排水、排气边界,土体测压点测压变化不同于粗粒层呈现下降趋势,此阶段细粒层测压点MF-1、MF-2与MF-3测压均值分别为0.14 kPa、0.11 kPa和0.01 kPa.

当 $t=70\sim 540$ min期间的第二阶段,随着降雨入渗,水—气两相流进入竞争阶段.细粒层右侧在气压驱动下形成稳定的气体优势逸散通道,气压消散.而粗粒层上部因细粒层含水量增加,孔隙被水部分占据,气体逸散路径受阻,加大毛细阻滞效应.此时,周期性注气与受限的逸散使粗粒层内气体压力维持动态波动平衡.细粒层靠近排水右侧排水排

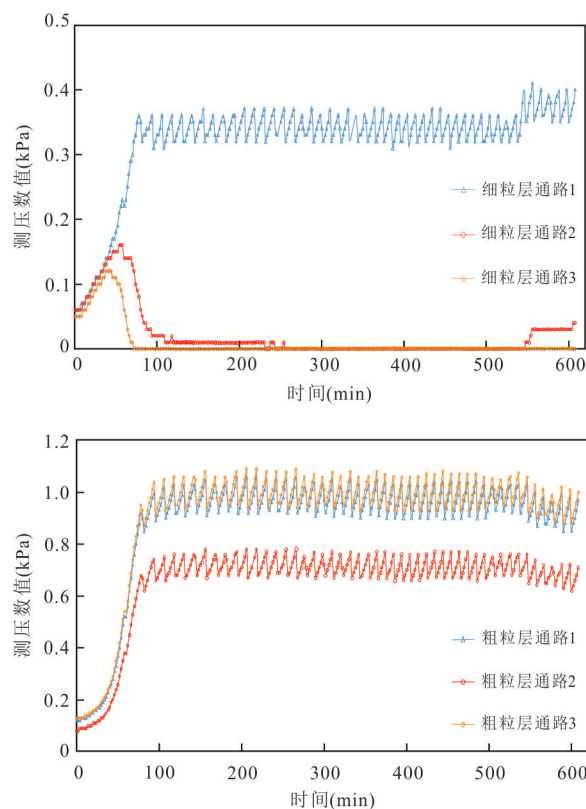


图6 F1二元结构测压变化趋势

Fig.6 Trend chart of pressure variation in capillary barrier layer for scheme F1

气边界的测压点 MF-2、MF-3 测压压力要显著小于左侧,且缓慢衰减为零,此阶段细粒层测压点 MF-1 测压均值为 0.34 kPa,这是由于右侧是排水排气边界, $t=70$ min 时,增压气体在右侧排水、排气边界形成优势通路,导致气相压力与水体快速排出,无法测出实际压力,这与试验 F1 浸润线下移运动现象相符。而粗粒层中气体由于上部细粒层饱和带的阻滞,气体不易逸出,随着注气进程表现出一种周期性的运动,此阶段粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测压均值分别为 0.96 kPa、0.71 kPa 和 0.99 kPa。 $t=540\sim 608$ min 的则为第三阶段,在此阶段模拟降雨完全停止,进入土体排水阶段,细粒层基质势降低,导致气体逸散,细粒层测压短暂上升,而粗粒层测压则缓慢下降,直到试验结束,粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测压均值分别为 0.92 kPa、0.68 kPa 和 0.95 kPa。

3.2.2 高含水率初始条件下气压变化规律 试验 F2、F3、F4 都为高含水率条件下进行的降雨模拟试验,试验方案 F2 由于 CBL 二元结构初始含水量高,土体内部测压表现出了与 F1 的不同的变化趋势。 $t=0\sim 104$ min 为第一阶段,细粒层、粗粒层测压表现为由高向低缓慢衰减,孔隙中水体阻滞气体逸散,此阶段增压气体需要突破土体孔隙水体阻滞,到达稳定状态,测压细粒层由于连续试验,开始时已形成的连续的气体逸散通路,导致细粒层测压点 MF-2、MF-3 测压数值衰减为零。随着降雨入渗过程的进一步推移, $t=104\sim 560$ min 的第二阶段时,细粒层中测压点 MF-2、MF-3 处测压基本停止,而粗粒层气体压力达到了稳定饱和阶段,在这个过程中粗粒层整体测压表现在一定范围波动,整体趋势缓慢衰减,对于水向下入渗产生阻滞作用,此阶段粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测压均值分别为 0.74 kPa、0.54 kPa 和 0.76 kPa。而当 $t=560\sim 600$ min 时,停止降雨,气压的运动也达到了第三阶段,细粒层测压缓慢上升,粗粒层测压缓慢下降,此阶段粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测压均值分别为 0.69 kPa、0.51 kPa 和 0.71 kPa。

试验 F3 细粒层、粗粒层测压点测压变化趋势与试验 F2 基本相同,具体可见图 7,在降雨强度为 5.34×10^{-4} cm/s 的高降雨强度条件下,第一阶段为 $t=0\sim 38$ min,对比 F1、F2、F4 时间显著减少,高初

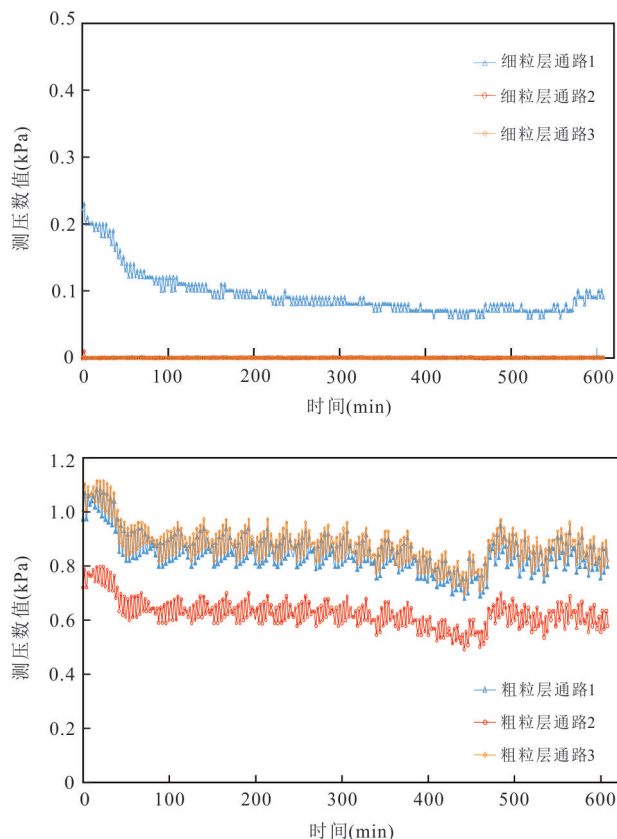


图7 F3二元结构测压变化趋势

Fig.7 Trend chart of pressure variation in capillary barrier layer for scheme F3

始含水量条件下,土体水相饱和度较高,降低气相相对渗透系数。注气初期,气体需要克服更高的毛细阻力建立排气通路,因此对比低含水率初始条件试验 F1,气压爬升较慢。开始时细粒层测压点 MF-2、MF-3 处测压停止,说明连续试验条件下,开始时土体内部右侧区域已经完全形成了气体逸散的优势通路,而测压点 MF-1 所在的土体左侧,由于存在降雨入渗饱和区域,且左侧为不透水、不透汽边界,极大减缓了气体逸散的速度。 $t=38\sim 470$ min 时,粗粒层测压同样表现出周期性的波动,此阶段粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测压均值分别为 0.76 kPa、0.56 kPa 和 0.79 kPa。第三阶段 $t=470\sim 610$ min 时,对比 F1、F2、F4 发生显著改变,高强度降雨条件下,第三阶段细、粗粒层测压值并未逐步下滑,反而略微上升,这是由于长时间高强度降雨条件下,细粒层质量含水量上升显著,对比中强度降雨条件下,更易阻滞气体逸散,使土体内部气压上升,此阶段粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测

压均值分别为 0.76 kPa、0.52 kPa 和 0.79 kPa。

对于试验方案 F4, 对比试验 F1、F2 与 F3 试验开始时下调粗粒层注气压力初始设置, 范围为粗粒层增压 1~2 kPa。当 $t=0\sim 80$ min 时, 细粒层与粗粒层测压缓慢衰减。 $t=80\sim 540$ min 时为测压稳定阶段, 此阶段粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测压均值分别达到 0.76 kPa、0.55 kPa 和 0.79 kPa。当 $t=540\sim 560$ min 时, 降雨停止, 在试验过程中, F2 与 F4 细粒层与粗粒层测压运动变化趋势基本相符, 最终降雨停止后, F4 气压衰减显著大于 F2, 这是由于 F4 初始增压较小, 相同排水时间内, 增压气体消散速度更快所导致, 此阶段粗粒层测压点 MC-1、MC-2 与 MC-3 测压均值分别为 0.61 kPa、0.43 kPa 和 0.63 kPa, 对比试验 F2 粗粒层测压均值整体下降约 19.7%。

上述分析可知, 细、粗粒层各测压点数值大小均表现出注气压力与实际测压不一致情况, 这是由于试验系统未完全密封所导致, 部分增压气体会在各设备连接处溢出, 导致实际测压会小于注气压力, 但依旧可明显观测浸润线改变与测压规律的线性趋势, 说明气密性并未影响整体趋势, 仅影响实际各土层测压大小, 实际土层内有效压力对比设计增压较低条件下, 依旧观测到较好排水效果。试验过程中注气压力表现出细粒层测压点数值 $MF-1 > MF-2 > MF-3$, 粗粒层测压点数值 $MC-3 > MC-1 > MC-2$, 这说明气体从注气通路出发后, 会优先流向阻力最小右侧边界排气边界, 气流在孔隙中不是均匀地充满整个粗粒层, 中部测压较低, 而靠近排气边界侧测压较高。该现象符合达西定律, 表明增压气体在由底部注入后, 形成了稳定的右侧向优先流通道。增压气体在坡脚形成优势逸散通路, 导致右侧测压变小的同时, 也对坡脚下渗水体产生了更强的阻滞作用, 改变了降雨入渗路径, 与浸润线运动过程所产生的右侧水体下渗速度下降现象完全相符。

3.3 注气增压对二元结构侧向排水速率的影响

二元结构非饱和和阻隔层侧向排水速率是指降雨开始后单位时间内 CBL 二元结构所排出水的体积, 用以描述此阶段内 CBL 二元结构的最大排水能力。图 8 表示试验方案 F1、F2、F3、F4 二元结构细、粗粒层侧向排水速率与总侧向排水体积随时间的变化过程。试验方案 F1、F2、F3、F4 中, 分别在降雨

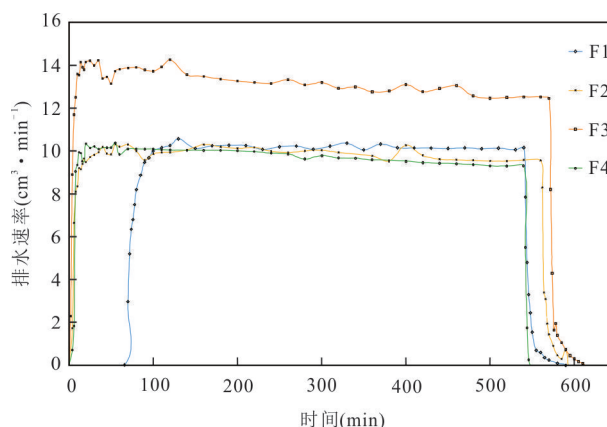


图 8 不同方案二元结构侧向排水速率趋势

Fig.8 Lateral drainage rate trend chart of capillary barrier layer with different schemes

开始后 66 min、3 min、1 min、3 min 开始排水, 在 F1 试验中降雨强度、低初始含水率条件下, 细粒层开始排水时间较慢, 而 CBL 初始含水量较高情况下, 开始降雨 1~3 min 内则开始侧向排水, 说明试验侧向排水与细粒层土层质量含水量直接联系, 质量含水量较高时, 会更易形成侧向的排水通路。

对比四组降雨试验表明, 粗粒层均无侧向排水情况, 二元结构排水速率即为细粒层侧向排水速率, 且四组试验排水速率在 $t=400\sim 600$ min 时均达到稳定情况, 即侧向排水速率无发生显著波动变化, 整体而言排水速率随着降雨模拟进程缓慢地下降直至试验结束。在降雨强度为 3.64×10^{-4} cm/s 的 F1、F2 和 F4 三组试验中, 细粒层侧向排水速率都维持于 $8\sim 12$ cm³/min, 而降雨强度为 5.34×10^{-4} cm/s 的 F3 试验方案, 细粒层的侧向排水速率则提升为 $12\sim 14$ cm³/min, 结合浸润线变化, 说明高强度降雨推动湿润锋下移, 扩大饱和区范围, 降雨强度的增大会直接导致排水速率与总排水体积的增大。

排水速率的变化显示出与细、粗粒层测压点内气压变化相同的运动规律, $t=0\sim 100$ min 期间, 土层中质量含水量迅速上升, 侧向排水速率波动较大, 说明土体内增压气体并未完全形成稳定的溢散通路, 侧向排水速率受气相压力运动影响而波动, 第二阶段为 $t=100\sim 400$ min, 侧向排水速率波动的幅度显著变缓, 第三阶段为 $t=400\sim 600$ min, 此阶段排水速率基本无变化, 说明试验排水已经达到了稳定的流动, 排水速率最终随着模拟降雨的停止而缓慢减少至停止排水, 这说明试验排水速率波动稳

定性与气压运动直接联系,注气条件下,土体内部气压逸散的速度与强度会影响侧向排水速率的波动程度。

4 粗粒层增压对CBL二元结构侧向排水效果分析

4.1 不同增压初始条件下侧向排水效果对比

不同增压强度初始条件下,侧向排水速率对比可见图9,对比试验F0与F1浸润线运动过程可发现,增压气体改变了水体的入渗运动,降雨入渗浸润锋线的运动由重力主导的整体流,转变为水气相互作用下的非均匀流、片状流。增压气体在孔隙中形成连续通路,阻挡了水体的垂直下渗,气体逸散通路影响局部降雨入渗的速度与形态。对比试验F0、F1试验结果可知,当粗粒层注气压力达1 kPa以上时,显著地改善了CBL二元结构排水阻隔层的排水效果,达到100%细粒层排水能力,降雨入渗雨水、污水可完全在细粒层中排出,注气增压方法极大地提高了CBL二元结构对于渗水的控制能力。

由图9可以发现,当粗粒层增压2~3 kPa时,试验F1二元结构达到100%侧向排水,粗粒层均无排水情况,F1二元结构排水速率即为细粒层侧向排水速率。F1对比F0稳定排水速率与结束排水时间分别提高约88.8%与缩短约26%,整体侧向排水速率变化更稳定,这表明增压的条件下,不仅改变了降雨入渗的运动形态,更改变了土体排水的主要驱动力,F0为重力水势主导下依靠材料特性阻隔排水,F1则是依靠增压气体作为主要排水动力,土体内气相压力主动驱动了侧向排水,使导排效果得到了质的提升,因此在CBL二元结构设计时,应考虑水相与气相耦合作用影响等因素。

4.2 不同增压强度初始条件下侧向排水效果对比

增压条件下细/粗二元结构非饱和阻隔层对降雨入渗控制效果与细/粗粒层排水体积、细/粗粒层相对渗透系数与稳定增压强度有关,根据已有文献总结公式进行改良(吴庆华等,2025),见式(1)所示:

$$\eta_{cb} = \frac{Q_f + Q_c}{Q_p} \cdot \left(P_a \cdot \lg \frac{K_c}{K_f} \right), \quad (1)$$

式(1)中: η_{cb} 综合阻隔性能指数(comprehensive bar-

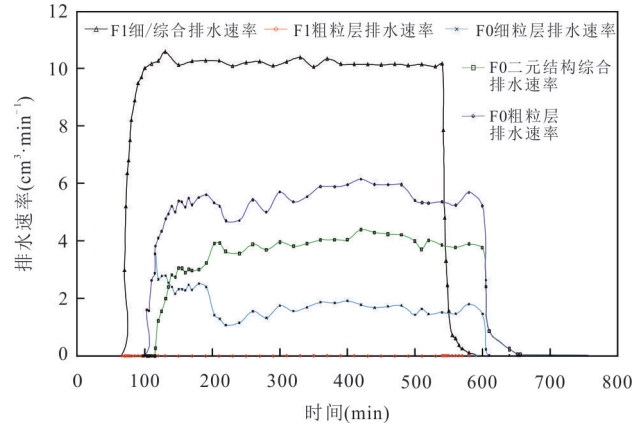


图9 不同粗粒层注压条件下二元结构侧向排水速率

Fig.9 Lateral drainage rate of capillary barrier layer under different coarse-grained layer injection pressure conditions

rier efficacy index, CBEI),该值越大,代表二元结构在气压驱动下的综合阻隔能力越强; Q_f 为细粒层总排水体积, cm^3 ; Q_c 为粗粒层总排水体积, cm^3 ; Q_p 为总降雨量, cm^3 ; K_f 为细粒层饱和渗透系数, cm/s ; K_c 为粗粒层饱和渗透系数, cm/s ; P_a 为稳定增压强度,kPa,其中 $(Q_f + Q_c)/Q_p$ 项表示细、粗粒层综合排水能力; P_a 为气压驱动项,表示增压气阻主动驱动二元结构排水能力; K_f/K_c 项表征水分由细粒层入渗粗粒层渗透特性。

表3为不同初始条件下细粒层与粗粒层降雨排水特征参数,表示CBL二元结构阻隔边坡对降雨入渗控制效果。由表可知,试验F2对比F1总排水体积与稳定排水速率分别上升15%与下降5.5%,说明初始含水量影响CBL二元结构开始排水时间,高含水量初始条件下,更易形成连通饱和区域,水分在更易受到气压驱动侧向运移,且气相通路对降雨入渗路径起到了阻断作用,低初始含水量条件下会更晚形成排水通路,部分水体储存细粒层内,更晚排水的同时,F2由于气压推动,部分F1降雨滞留水体在开始排出,导致F1总排水体积低于F2。稳定排水速率的变化则说明,CBL低含水量条件下,虽然开始排水时间较晚,但增压气体更易在相互连接的孔隙中移动,阻挡水体下渗,达到更好的排水效果,而CBL高含水量初始条件下,孔隙中存在的水分阻碍了气体的连通性,降低了气相压力对水分运动的驱动力,导致CBL二元结构稳定排水速率下降。

对比试验F2与F4结果可知总排水体积基本一致,稳定排水速率下降0.18%,这表明CBL二元结

表 3 不同方案的细/粗粒层降雨排水特征参数
Table 3 Drainage paramters of different experimental schemes

方案	稳定增压强度(kPa)	细/粗粒层总排水体积(mL)	细/粗粒层稳定排水速率(mL/min)	$\lg \frac{K_c}{K_f}$	η_{cb}
F1	0.95	4 805.4/0	10.12/0	1.946	2.01
F2	0.81	5 526.8/0	9.56/0		1.97
F3	0.90	7 456.2/0	12.50/0		2.58
F4	0.72	5 526.5/0	9.38/0		1.76

构非饱和阻隔层排水能力达到 100%，稳定排水速率会随着增压强度的变大而变大，同降雨条件下，总排水体积基本相同，这说明连续试验的高饱和区域内已经形成了连通的侧向排水通路，全部入渗水体均在气相阻滞作用下快速排出，稳定排水速率的变化表明粗粒层增压强度是改变 CBL 二元结构最大导排能力的关键物理参数，主要原因在于粗粒层增压气体显著地增强了二元结构交界面处毛细阻滞效应，土体内部气相压力的增大，增大了入渗水体垂向入渗的阻力，水分在土壤坡脚倾斜方向动力增大，导致失稳水体更易形成侧向排水，且不同增压强度下稳定排水速率的变化较小，说明最低增压强度未触及边界，有继续研究探讨的可能性。

对比方案 F2 与 F3 结果可知，在增压强度与初始含水量不变情况下，降雨强度的增加会导致总排水体积与稳定排水速率变大，当降雨强度由 3.64×10^{-4} cm/s 变为 5.34×10^{-4} cm/s 时，细粒层总排水体积与稳定排水速率分别提升 34.9% 和 30.7%，这表明高降雨强度导致水驱动力受土体内基质势与压力势主导下更快速形成连通稳定的排水通路，导致侧向稳定排水速率上升，说明在更恶劣的工况（更高含水量、更强降雨）下，增压系统依然能表现出卓越的性能。试验方案 F2、F3 总排水体积均超过标定降雨体积，说明气压驱动了土体部分原有水体（连续降雨试验土层中储存的水体）的排出，表示粗粒层增压条件下，对于中—高降雨强度 CBL 二元结构均有良好的控制入渗能力。

由公式(1)计算结果可知，二元结构非饱和阻隔层在不同初始含水量、稳定侧向排水速率与增压强度条件下，控制降雨入渗阻隔能力 η_{cb} 计算结果如下：F3(2.58) > F1(2.01) > F2(1.97) > F4(1.76)，F3 计算结果最大，说明模拟连续降雨高压环境下，阻隔能力可以维持较高水平；对比 F1 与 F2 计算结果

说明初始含水量影响气压驱动能力；对比 F2 与 F4 计算结果说明增压强度直接影响 CBL 结构排水能力，此公式计算结果与上述分析基本相符，验证了 CBEI 指数准确性。

综上所述，考虑粗粒层增压值、降雨强度与 CBL 初始含水量对二元结构非饱和阻隔层侧向排水能力的影响，建议采用粗粒层增压 2~3 kPa 的增压强度的高初始含水量二元地层结构，使其在高降雨强度 (5.34×10^{-4} cm/s) 下达到最优阻隔效果。边坡防护工程中，如垃圾填埋场终场覆盖层优化设计方案，该理论增压方法优化了覆盖层阻水能力。通过气压驱动水分侧向排出，能显著减少渗滤液生成量，试验证明可满足甚至超越传统设计的防渗要求，且利用太阳能等绿色能源以维持稳定供给气压，可以显著降低成本的同时符合经济绿色工程理念，该设计为相关边坡工程防护提出了新的优化设计方案。

5 结论

本文以室内降雨模拟试验的方式，探究了细粗二元结构非饱和阻隔层在粗粒层增压条件下的降雨入渗规律，针对不同粗粒层增压强度、CBL 初始质量含水量和降雨强度等影响试验结果的主要因素进行了初步分析。

(1)粗粒层增压强度是改良 CBL 二元结构排水能力的关键因素，粗粒层增压 1~3 kPa 时细/粗二元边坡阻滞层结构侧向导排水性能上升至 100%，CBL 二元结构阻滞能力会随着增压强度的增加而增加。

(2)增压气体会影响入渗运动形态与排水速率，气相通路对降雨入渗锋线运动影响显著，导致降雨入渗由垂向均匀流变为孤立片状下渗，且主动驱动入渗水体侧向导排，显著提升排水速率。

(3)粗粒层增压1~3 kPa时,侧向排水速率随含水量变高而变低,含水量上升导致孔隙中气相通路连通性能下降,稳定增压强度变低,影响CBL结构侧向排水速率。

(4)建议进一步开展不同增压强度对CBL结构降雨入渗控制有效性方面的分析,为完善该方法应用于垃圾填埋场覆盖层以及边坡稳定性等防护工程提供更详细的科学依据。

References

- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S. A., et al., 2009. Analyses of Water Diversion along Inclined Covers with Capillary Barrier Effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(10): 1146—1164. <https://doi.org/10.1139/T09-050>
- Chen, G. Y., Xiao, J., Chen, Q., et al., 2022. Study on Seepage and Stability of Expansive Soil Slope Treated by Different Capillary Barrier Cover Layers. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 53(1): 199—213 (in Chinese with English abstract).
- Harnas, F. R., Rahardjo, H., Leong, E. C., et al., 2014. Experimental Study on Dual Capillary Barrier Using Recycled Asphalt Pavement Materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(10): 1165—1177. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0432>
- Jiao, W. G., Zhan, L. T., Ji, Y. X., et al., 2019. Analysis on Long-Term Performance of Capillary-Barrier Cover with Unsaturated Drainage Layer. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 53(6): 1101—1109 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, W. G., Zhan, L. T., Ji, Y. X., et al., 2020. Model Test and Numerical Analysis on Lateral Drainage in Capillary-Barrier Cover with Unsaturated Drainage Layer. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 37(5): 92—98 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. Y., 2020. Micro-/ Macro-Scale Water and Gas Transport Properties and Practical Performance of Capillary Barrier Covers(Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou(in Chinese with English abstract).
- Li, X. K., Li, X., Wu, Y., et al., 2022. Experimental Study on Service Performance of Capillary Barrier Cover with Unsaturated Drainage Layer. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(Suppl. 1): 189—194 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G., Tong, F. G., Xi, N. N., et al., 2015. Impact Test of Rainfall on Clay Soil Infiltration Rate, Moisture Content and Pore Pressure under Aeration and Gas Sealing Conditions. *Water Resources and Power*, 33(12): 19—21 (in Chinese with English abstract).
- Mancarella, D., Simeone, V., 2012. Capillary Barrier Effects in Unsaturated Layered Soils, with Special Reference to the Pyroclastic Veneer of the Pizzo d'Alvano, Campania, Italy. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(4): 791—801. <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0419-6>
- Morris, C. E., Stormont, J. C., 1998. Evaluation of Numerical Simulations of Capillary Barrier Field Tests. *Geotechnical & Geological Engineering*, 16(3): 201—213. <https://doi.org/10.1023/A:1008853710339>
- Morris, C. E., Stormont, J. C., 1999. Parametric Study of Unsaturated Drainage Layers in a Capillary Barrier. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(12): 1057—1065. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:12\(1057\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:12(1057))
- Parent, S. É., Cabral, A., 2006. Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(3): 689—710. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-3229-9>
- Shaikh, J., Bordoloi, S., Yamsani, S. K., et al., 2019. Long-Term Hydraulic Performance of Landfill Cover System in Extreme Humid Region: Field Monitoring and Numerical Approach. *Science of the Total Environment*, 688: 409—423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.213>
- Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E. C., et al., 2004. Design and Laboratory Verification of a Physical Model of Sloping Capillary Barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5): 814—830. <https://doi.org/10.1139/t04-036>
- Wang, J. N., Xu, H., 2021. Study on the Comprehensive Performance Evaluation of the Capillary Barrier Soil Cover System in Humid Climate Zone Built with Construction Wastes. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition)*, 45(1): 136—148 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q. H., Wang, K., 2025. Effect of Angle and Lithology on Infiltrating to Fine/Coarse Dual-Structure Slope under Rainfall Condition. *Earth Science*, 50(1): 311—321 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q. H., Zhang, J. F., Cui, H. D., et al., 2017. Experi-

mental Study of Drainage Control of Slopes with Fine-Coarse Grain Structure. *Rock and Soil Mechanics*, 38(2): 392—399 (in Chinese with English abstract).

Zhan, L. T., Li, G. Y., Jiao, W. G., et al., 2020. Performance of a Compacted Loess/Gravel Cover as a Capillary Barrier and Landfill Gas Emissions Controller in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 718: 137195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137195>

Zhan, L. T., Qiu, Q. W., Yang, Y. B., et al., 2017. Soil Column Tests and Numerical Simulations of Moisture-Gas Coupled Flow in a Loess Cover. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(6): 969—977 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈冠一, 肖杰, 陈强, 等, 2022. 不同毛细阻滞覆盖层处治膨胀土边坡的渗流及稳定性研究. 中南大学学报(自然科学版), 53(1): 199—213.

焦卫国, 詹良通, 季永新, 等, 2019. 含非饱和导排层的毛细阻滞覆盖层长期性能分析. 浙江大学学报(工学版), 53(6): 1101—1109.

焦卫国, 詹良通, 季永新, 等, 2020. 非饱和导排层水分侧向导排作用模型试验验证与影响因素分析. 长江科学院院报, 37(5): 92—98.

李光耀, 2020. 毛细阻滞型覆盖层微观—宏观水气传导特性及服役性能(硕士学位论文). 杭州: 浙江大学.

李晓康, 李旭, 吴羊, 等, 2022. 含非饱和导排层毛细阻滞覆盖层服役性能试验研究. 岩土工程学报, 44(增刊 1): 189—194.

刘刚, 童富果, 习念念, 等, 2015. 通气和封气条件下降雨对粘性土入渗速率、含水率及孔隙压力的影响试验. 水电能源科学, 33(12): 19—21.

王锦楠, 徐辉, 2021. 以建筑垃圾为填料的湿润气候区毛细阻滞型覆盖层综合性能评价. 浙江理工大学学报(自然科学版), 45(1): 136—148.

吴庆华, 王珂, 2025. 细/粗二元结构边坡角度与岩性特征对其阻隔降雨入渗的影响规律. 地球科学, 50(1): 311—321.

吴庆华, 张家发, 崔皓东, 等, 2017. 细/粗粒二元结构边坡的排水防渗效果试验研究. 岩土力学, 38(2): 392—399.

詹良通, 邱清文, 杨益彪, 等, 2017. 黄土覆盖层水—气耦合运移土柱试验及数值模拟. 岩土工程学报, 39(6): 969—977.