

DOI: 10.11779/CJGE20231251

半湿润区毛细阻滞覆盖层实际储水能力与防渗设计参数研究

莫加成¹, 焦卫国^{*1,2}, 赵青¹, 庐斌³, 罗宇⁴, 张松³

(1. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州理工学院, 贵州 贵阳 550003; 3. 贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006;
4. 黔西南州城市建设投资(集团)有限公司, 贵州 兴义 562400)

摘要: 为掌握西北半湿润气候条件下毛细阻滞覆盖层长期服役性状和实际储水能力, 在西安填埋场开展了现场足尺试验, 通过极端降雨试验和长期监测自然气候条件下覆盖层的水力变化, 定量对比了植被对覆盖层水分释放的影响, 揭示了区域气候条件下毛细阻滞覆盖层实际渗漏模式及其储水能力发挥程度。结果表明: ①西北半湿润区夏季植被生长茂盛的条件下, 有植被时水分释放速度显著大于无植被裸土, 前者累计释放量(45.80 mm)是后者(26.55 mm)的1.73倍。②中国西北半湿润气候区长时弱降雨气候条件, 如小到中雨, 毛细阻滞覆盖层渗漏时实测储水量约为理论储水量的93%。土层裂缝等优先流通道对其防渗性能影响小, 渗漏诱发原因是土层实际储水量超过理论值。短时强降雨气候条件, 如夏季午后的强降雨, 渗漏时实测储水量约为理论储水量的73%~84%。坡面径流(或积水)通过土层裂缝优先下渗是覆盖层多发的、常见的渗漏诱发机制。防渗设计中, 建议在储水理论值基础上考虑1.1~1.3的防渗富余系数。

关键词: 半湿润气候; 毛细阻滞覆盖层; 防渗; 储水能力; 诱发机制; 裂缝

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)05-0968-09

作者简介: 莫加成(1999—), 男, 硕士, 主要从事非饱和渗流、环境岩土等方面研究。E-mail: 1943907806@qq.com。

Water-storage capacity of capillary barrier cover in semi-humid areas and design parameters of anti-seepage

MO Jiacheng¹, JIAO Weiguo^{1,2}, ZHAO Qing¹, TUO Bin³, LUO Yu⁴, ZHANG Song³

(1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;
3. Guizhou Zhongjian Architectural Research and Design Institute Co., Ltd., Guiyang 550006, China; 4. Qianxinan Prefecture Urban
Construction Investment (Group) Co., Ltd., Xingyi 562400, China)

Abstract: To investigate the service behavior and water-storage capacity of capillary barrier cover systems in semi-humid areas of northwest region of China, a full-scale cover system is constructed in Xi'an, and the rainfall and long-term serviceability monitoring tests are conducted. The results show that: (1) Under lush vegetation growth in summer, the water release rate with vegetation is significantly higher than that without vegetation, with the former (45.80 mm) being 1.73 times greater than the latter (26.55 mm). (2) Under light to moderate rainfall conditions in the northwest region, the measured water-storage capacity is approximately 93% of the theoretical one. The soil cracks and other preferential flow pathways have the minimal impact on the impermeability performance, with leakage primarily occurring when the actual water-storage capacity exceeds the theoretical value. During short bursts of heavy rainfall, the measured water-storage capacity is approximately 73% to 84% of the theoretical one. The soil cracks preferentially infiltrating are a common and frequent induction mechanism for leakage in the soil cover layer. This may result in the inadequate utilization of water-storage capacity of soil. It is suggested that a safety margin coefficient of 1.1 to 1.3 should be considered to enhance impermeability.

Key words: semi-humid climate; capillary barrier cover; anti-seepage; water storage capacity; induced mechanism; crack

0 引言

当前, 中国现存上千座既有存量的垃圾填埋场面临库容饱和亟需封顶治理。封顶治理的目的是防止降

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069005, 52268053); 中建四局CSCEC4B-2020-KT-49; 贵州理工高层次人才8XJGC2019091

收稿日期: 2023-12-21

*通信作者(E-mail: 805810460@qq.com)

雨入渗、形成滤液^[1]。传统压实黏土覆盖层封顶后, 因黏土干湿循环开裂、不均匀沉降等问题导致服役效果不佳, 而加入土工膜后会引起滑膜穿刺等问题降低覆盖层的稳定性^[2]。毛细阻滞覆盖层作为一种新型土质覆盖层, 由两层水力参数差异大的细-粗粒土组成, 其利用非饱和土导水特性在细-粗粒土界

面形成毛细阻滞效应, 阻滞水分下渗而增大了上覆细粒土的储水能力^[3]; 同时通过土体蒸发、植被蒸腾等方式释放存储水分, 如此循环实现防渗^[4-5]。该类型覆盖层的耐久性、防渗效果及造价等均优于传统覆盖封顶, 目前其已被证实在北美干旱-半干旱地区服役效果良好^[6]。中国广大西北地区气候干旱。冬干夏湿, 雨热同期, 为土质覆盖的实施提供了可行的气候环境^[5]。研究西北半湿润区毛细阻滞覆盖层防渗服役性能有迫切的现实、生态和经济效益。

毛细阻滞覆盖层防渗性能与气候、植被、细-粗粒的土水力特性、土层结构等密切相关, 防渗设计需结合当地气象条件分析。Benson^[7]、Tami 等^[8]以细-粗粒土界面毛细阻滞效应失效为发生渗漏的临界状态, 假定细粒土均值且水力特性不变, 由土水特征曲线 (soil-water characteristic curve, SWCC) 计算获得该状态的最大理论储水量。当某地自然降雨入渗量超过上述理论储水量则会发生渗漏。许多学者采用数值模拟的方法开展了防渗服役研究, 如 Lee 等^[9]、Ng 等^[10]、张文杰等^[4]、王菲^[11]和王艳茹^[12]等。分析中, 常常假定上述理论储水量 100% 充分发挥, 没有考虑自然气候下土体反复吸湿-脱湿、开裂和优先流等实际防渗服役性状, 没有揭示地区气候下覆盖层实际渗漏模式及其水力触发机制, 不清楚土层实际储水能力发挥程度, 导致防渗设计偏于危险。

中国各地极端降水等气候条件如今频繁出现。现场足尺试验是研究某地自然气候下覆盖层实际防渗性能最有效的手段^[6, 13-15]。与单元体测试^[11-12, 16]相比, 其更能直接反应地区气候作用下覆盖层的实际服役性能。如 Melchior 等^[14]对德国某填埋场开展了自然气候下的长期监测, 获得了细粒土水力特性的变化规律, 揭示了长期服役土层结构的劣化及其对防渗性能的影响。北美 ACAP 项目开展了现场 24 个站点垃圾填埋场土质覆盖防渗监测研究, 评估了不同类型覆盖层在北美各气候区实际防渗性能^[6]。自然气候长期服役过程中, 覆盖层经历的实际气候条件复杂多变, 如夏季高温、太阳辐射、不同雨型等气候因素相互作用, 导致实际储水能力下降。目前, 针对中国西北半湿润自然气候条件下开展长期监测的研究还不多, 对该地覆盖层实际服役性状和储水能力缺乏认识。这阻碍了土

质覆盖技术的应用。

本文在西北某填埋场建设了土质覆盖层足尺试验基地, 开展了极端降雨试验, 对自然气候下覆盖层的水力响应变化进行了长期监测。揭示了区域气候条件下覆盖层的实际服役性状, 给出了防渗设计参数, 为西北土质覆盖层的工程应用提供理论和数据支撑。

1 试验设计

1.1 覆盖层结构、仪器埋设和植被条件

在西安某填埋场建设了毛细阻滞覆盖层足尺试验基地。根据试验目的, 先后设置了无植被和有植被两种状态 (图 1 (a), (b))。覆盖层由核心测试区和过渡区组成, 核心测试区长×宽为 24 m×10 m。土层剖面从上到下依次为植被层 (厚 30 cm)、储水黄土层 (厚 60 cm)、碎石层 (厚 30 cm)。文献[17]表明, 土质覆盖层建设时, 各土层干密度选取需综合考虑植被生长与防渗储水性能。故, 本文植被层黄土干密度为 1.35 g/cm³, 核心储水层黄土干密度 1.45 g/cm³。核心测试区坡顶 (R_1)、坡中 (R_2) 和坡脚 (R_3) 3 个剖面不同深度分别埋设了 12 只张力计和 12 只 TDR, 以测试基质吸力和含水率。埋设深度从坡面起算, 坚直向下依次为 15, 35, 60, 85 cm (图 1 (d))。两种探头的埋设水平横向间距均为 1 m、纵向均为 8 m (图 1 (e))。张力计为 Soil moisture 公司生产的 jet-filled 2725 型; TDR 探头为自制三针式, 信号测试仪为 Campbell 公司 TDR100 型。核心测试区碎石层底部设置了 HDPE 膜, 其隔绝测试区与周边土体水力联系, 通过膜上 PVC 管将坡脚出水口处渗漏量接引至收集池, 人工定期 (每 2 h) 称量读取。场地旁设置了小型自动气象站, 用以记录场区实时降雨量、太阳辐射等气候参数。覆盖层蒸渗仪系统结构, 仪器埋设等详见图 1 (c), (d), (e)。

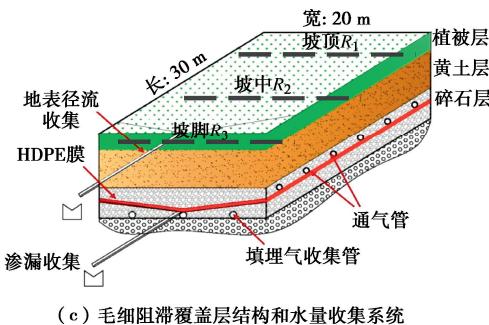
覆盖层建设完成后, 坡面无植被裸土条件下开展了极端降雨试验和自然气候下实际服役性状的长时监测。为对比有植被工况腾发作用的影响, 一个完整水文年中, 植被需保持较长绿化时间和较优生长存活率。故, 无植被工况试验结束后, 根据西北气候条件选择冷暖型植被混种 (图 1 (b))。种植方案如下: 核心测试区“四季青+黑麦草+早熟禾”3 种草混种, 质量比例为 4:3:3; 过渡区“紫花苜蓿+四季青”两种草混种, 质量比例为 7:3。过渡区紫花苜蓿为直根, 核心测试区四季青+黑麦草+早熟禾为须根。定期对植叶生长速度和不同条件下的叶面积指数、湿质量等进行了测定。



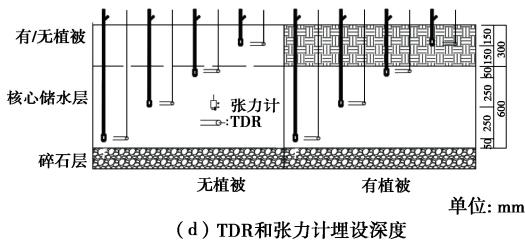
(a) 无植被条件毛细阻滞覆盖层



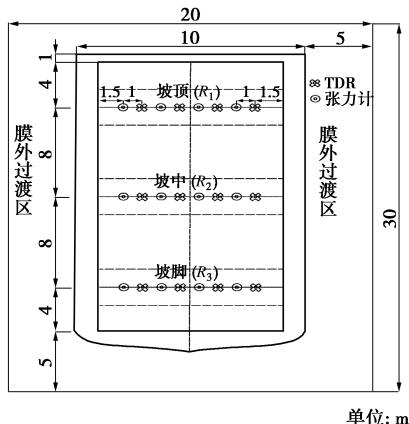
(b) 有植被条件毛细阻滞覆盖层



(c) 毛细阻滞覆盖层结构和水量收集系统



(d) TDR和张力计埋设深度



(e) TDR和张力计埋设平面图

图1 现场试验毛细阻滞覆盖层

Fig. 1 Capillary barrier cover in field tests

1.2 土性参数及其测试方法

表1和图2给出了覆盖层细粒土(黄土)室内重

塑土样的基本参数和颗粒曲线。该黄土取自该填埋场北侧边坡Q₃地层,由液、塑限和粒径分布可知属粉质粘土。采用体积压力板仪测试了黄土吸湿和脱湿过程土水特征曲线,吸力范围0~1500 kPa(图3)。图3中33 kPa吸力处对应含水率为田间持水率,1500 kPa吸力处对应含水率为残余含水率^[7, 18]。重塑黄土试样干密度为1.35, 1.45 g/cm³。

表1 黄土基本参数

Table 1 Parameters of loess

土样 名称	颗粒组成/%			最大干 密度/ (g·cm ⁻³)	最优含 水率/% (塑限)/ %	液塑 (塑限)/ %
	>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm			
Q ₃	2.2%	67.8%	30.0%	1.71	19.5	36.7
黄土						22.0

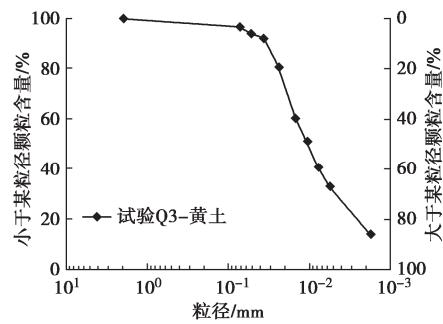


图2 黄土颗粒曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of loess

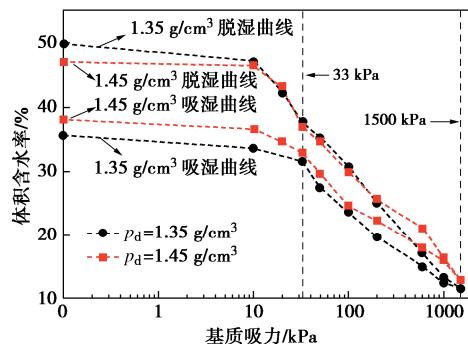


图3 土水特征曲线

Fig. 3 Soil-water characteristic curves

监测过程中,测试了总降雨量、坡面径流量和渗漏量等覆盖层各水量分配。水量分配与平衡见下式:

$$P = R + S + P_r + E_T \quad (1)$$

式中: P为降水量; R为坡面径流量; S为土层存储水量; P_r为渗漏量; E_T为实验期腾发量,各变量单位均为mm。降水量P包括各月的自然降雨量、人工降雨量和植被灌溉水量。自然降雨量由翻斗雨量计测试,人工降雨量和植被灌溉量由水表(流量计)测试。土层存储水量S通过TDR探头测试土层不同深度体积含水率后,由含水率与土层厚度积分算出。坡面径流量R、渗漏量P_r由HDPE膜收集,PVC管引出并定期

称量实测。腾发量 E_T 由式(1)通过水量平衡计算得出。

1.3 覆盖层理论储水量

Benson^[7]、Tami 等^[8]研究表明: 随着降雨入渗毛细阻滞覆盖层细粒土含水率逐渐增加, 水分击穿细-粗粒土交界面毛细阻滞效应失效进而发生渗漏。渗漏时刻, 细-粗粒土交界面的基质吸力为粗粒土的进水值 ϕ_b , 此时交界面上底层细粒土对应含水率为 θ_b 。其它深度黄土层含水率从细-粗粒土界面向黄土表层递减。细粒土整个吸力水头剖面近似看作单位梯度剖面。根据上述, 本文理论储水量可进行如下计算: 细-粗粒土交界面基质吸力为 ϕ_b , 以此界面为起点, 细粒土基质吸力沿土层厚度方向线性增加, 厚度 Z 处基质吸力为 $Z+\phi_b$ 。通过 SWCC 曲线计算出细粒土基质吸力剖面所对应的体积含水率剖面。最终由体积含水率剖面与土层厚度积分获得理论总储水量。计算式为

$$S_c = \int_0^b \theta(z + h_w^*) dz = \theta_r b + (\theta_s - \theta_r) \int_0^b \{[1 + (\alpha(z + h_w^*)^n]^{-m}\} dz \quad (2)$$

式中: S_c 为毛细阻滞覆盖层渗漏发生时刻的总储水量, 其包括有效储水量和无效(凋萎点)储水量两部分; $\theta(z)$ 为吸力水头与体积含水率的对应关系, 由 SWCC 获得; b 为细粒土层厚度; z 为细粒土中某一土层距细-粗粒土界面的高度; h_w^* 为粗粒土的进水值 ϕ_b (0.5 kPa) 所对应的水头; θ_r 为细粒土在 1500 kPa 时的残余体积含水率; θ_s 为细粒土饱和体积含水率; α , n , m 等为 Van Genuchten 模型拟合参数。

本文将细粒土厚度均分 45 层, 逐层计算每一层(2 cm)含水量。累计可得毛细阻滞覆盖层总储水量理论值 S_c 为 400.40 mm。其中无效(凋萎点)储水量为 122.08 mm, 由残余体积含水率剖面与土层厚度积分获得。有效储水量为 278.32 mm, 由理论总储水量减无效(凋萎点)储水量获得。

2 覆盖层实际服役性状

2.1 监测期含水率和基质吸力特征

图 4 分别是覆盖层坡顶、坡中和坡脚不同深度基质吸力随气候变化规律。图例 “ R_1 , R_2 和 R_3 ” 分别表示坡顶、坡中和坡脚, “15, 35, 60, 85” 表示仪器埋设深度 15, 35, 60, 85 cm, “ T , W ” 分别表示基质吸力、体积含水率。深度 15 cm 仪器位于植被层土中, 85 cm 仪器位于细-粗粒土交界面之上 5 cm 的核心储水黄土层中。由图 4 可见, 5 月份张力计埋设初期土层基质吸力范围在 $-12 \sim -60$ kPa, 之后因自然降雨, 含水率升高基质吸力降低, 5 月底达到 $-16 \sim -20$

kPa。6 月 23 日—29 日进行了无植被人工降雨试验, 覆盖层含水率增高, 土层近饱和状态, 基质吸力降低到 $-6 \sim 0$ kPa。7 月—8 月夏季气温高, 表层土基质吸力较深层土变化剧烈。浅层土(35 cm 以上)基质吸力在 $-30 \sim 0$ kPa, 深层土(35 cm 以下)基质吸力在 $-10 \sim 0$ kPa 且较浅层土稳定。9 月中旬因连续自然降雨, 土层含水率增高基质吸力降低。10 月因干旱少雨, 土层全剖面基质吸力均有升高。这是由于该时间段植被仍较茂盛, 蒸腾强烈土体含水率大幅降低所致。11 月自然降雨量少, 膜内测试区植被受一定的施肥养护下生长茂盛, 土体耦合植被腾发作用强烈, 浅层土体基质吸力变化明显。

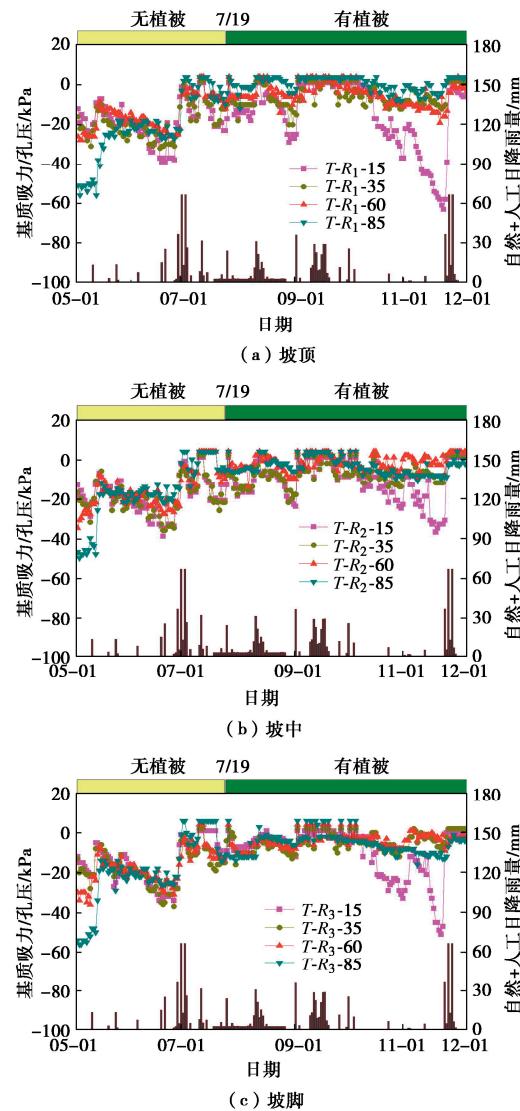


图 4 坡顶、坡中和坡脚不同深度孔压变化

Fig. 4 Variation of pore water pressure at different depths of slope top, middle and toe with climate

图 5 分别是覆盖层坡顶、坡中和坡脚不同深度含水率随气候变化规律。可见 6 月下旬, 9 月中旬和 11 月底 3 个时间段土层含水率高达 40% 以上。这是由于该时段分别有两次人工降雨和自然降雨。从图 5 中不

同深度土层含水率的变化可见,浅层土(35 cm以上)含水率随气候变化剧烈,深层土(35 cm以下)含水率相对稳定。这是由于浅层土水分蒸发耗散速度快,土体经历失水-吸水干湿循环剧烈。

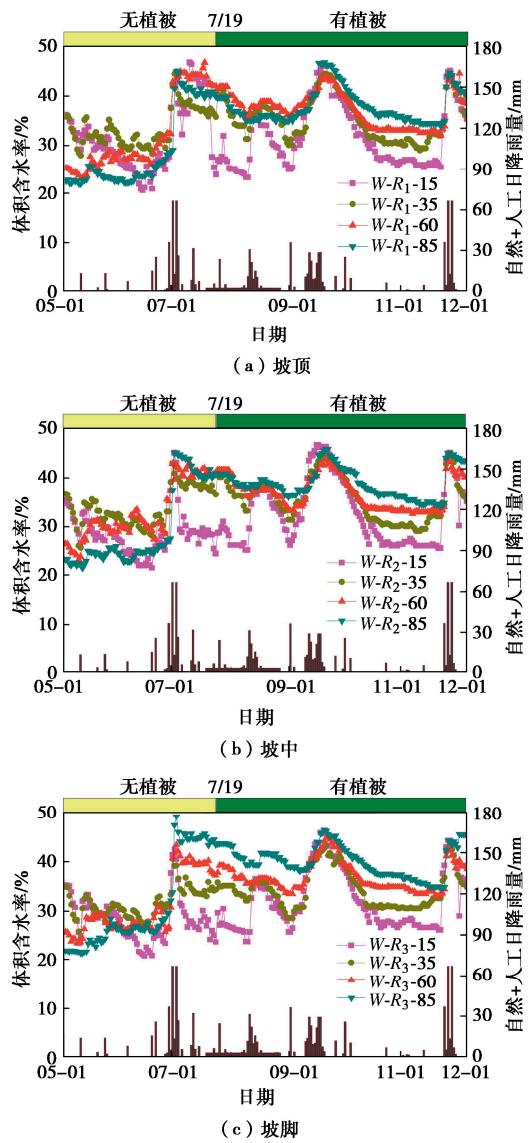


图 5 坡顶、坡中和坡脚不同深度含水率变化

Fig. 5 Variation of water content at different depths of slope top, middle and toe with climate

2.2 监测期覆盖层水量分配

图 6(a) 是监测期覆盖层经历的自然降雨、人工降雨、植被灌溉等累计降水量统计。其中,6月(23日—30日,无植被)和11月(18日—23日,有植被)先后进行了两次人工降雨试验,降雨量累计 409.65 mm。7月,8月因植被种植人工浇水 184.24 mm。以上,监测期“自然降雨+人工降雨+植被灌溉”三者累计降水量达 1173.53 mm,比西安近 50 年最湿润年(1983 年,年降雨量 903.2 mm)高 270.33 mm。表 2 和图 6(b) 是监测期各月的降水量 P 、坡面径流量 R 、

渗漏量 P_r 、土层储水量 S 和腾发量 E_T 统计。6月份,无植被人工降雨试验覆盖层渗漏 8.3 mm,土层储水量 S 为 354.3 mm。7月,8月份气温高,新种植被灌溉加之夏季短时强降雨出现少量渗漏(0.6~1.1 mm),土层储水量 S 不到理论值的 78%。9月份,自然总降雨量 262.88 mm,其中 9月 10 日—9月 20 日 10 d 累计降雨量近 200 mm,该场连续降雨覆盖层累计渗漏 41.8 mm。

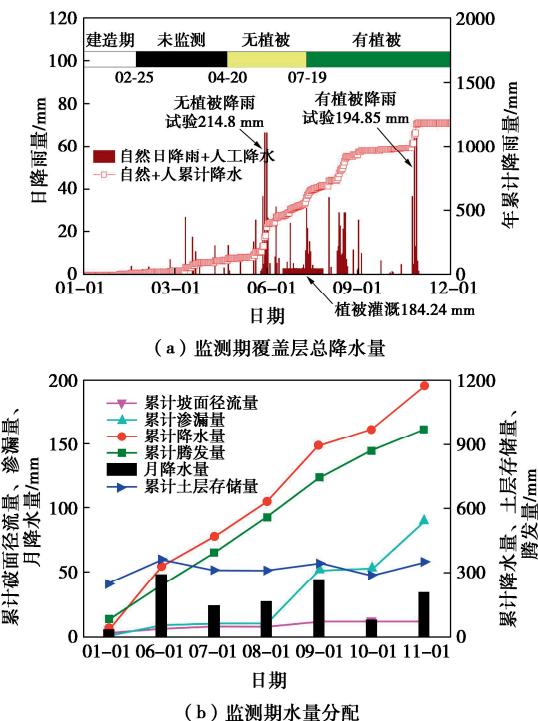


图 6 监测期覆盖层总降水量与各水量分配

Fig. 6 Total precipitation and water distribution of cover during monitoring period

表 2 监测期覆盖层水量分配

Table 2 Water distribution during monitoring period

单位: mm

时间	降水量 P	坡面径流量 R	腾发量 E_T	土层储水量 S	渗漏量 P_r
5月	35.80	2.43	77.40	241.56	0
6月	290.30	3.66	153.60	354.3	8.30
7月	140.70	1.48	160.10	309.22	1.10
8月	162.80	0	165.10	307.43	0.60
9月	262.88	3.71	184.00	340.80	41.80
10月	75.65	0	128.30	288.15	0
11月	205.40	0.15	100.70	345.83	37.04
总计	1173.50	11.43	969.20	345.83	88.84

这一方面是由于本场降雨持续时间长、雨量大、雨强小、雨水全部入渗。另一方面是由于本场降雨之前因植被护理浇水,土层初始含水率高,剩余储水容量小。10月降水量 P 少、土体腾发量 E_T 高,为覆盖层迎接下一轮降雨提供充足的储水空间。11月份,开展有植被人工降雨试验,覆盖层储水充足并伴有渗漏

发生, 土层储水量 S 与渗漏量 P_r 分别为 345.83, 37.04 mm。

文献[5]对西安地区近 50 a 气象特征进行了统计, 指出该地每年降水量 P 峰值在 7 月和 9 月, 并通过数值分析得出每年 7 月—11 月是该地土质覆盖层的高危易渗气象段。上述 9 月份发生的自然降雨和渗漏事件, 也印证了该地高危易渗气象段分析的合理性。

3 分析与讨论

3.1 覆盖层水分释放特性

对覆盖层分别在“有/无植被条件”下水分的释放速度进行了对比分析, 选取了如下两个时间段进行比较:

(1) 覆盖层无植被: 6 月 21 日—31 日 (11 d), 上边界: 无植被, 裸土, 叶面积指数≈0。

(2) 覆盖层有植被: 8 月 18 日—28 日 (11 d), 上边界: 植被+土层, 叶面积指数 0.8~1.4。

两个气象时段, 气温、日照、风速和太阳辐射角等气候因素和水分释放量详见表 3, 4。

表 3 无植被条件 6 月 21 日—31 日气候和水分释放

Table 3 Climate and water release from Jun. 21 to 31 without

日期	单位: mm			
	日降雨量/ mm	累计降雨 量/mm	日释放量/ mm	累计释放 量/mm
06-21	0.1	0.1	1.08	1.08
06-22	0	0.1	2.72	3.80
06-23	0	0.1	2.20	6.00
06-24	0.5	0.6	0.28	6.28
06-25	0.2	0.8	0.88	7.15
06-26	0	0.8	3.93	11.09
06-27	0.5	1.3	0.93	12.02
06-28	0	1.3	4.72	16.74
06-29	0	1.3	4.37	21.11
06-30	0	1.3	3.42	24.53
06-31	0	1.3	2.02	26.55

注: 6 月 21 日—31 日 (11 d), 气温 28~34.7°C; 相对湿度 72%~90%; 日辐射 7.5~0.5 W/m²; 平均风速 1.2~3.1 m/s。

图 7 是上述两个气象时段覆盖层分别在有/无植被条件下日释放水量和累计释放量的对比。可见无植被条件: 日释放量约 2.0~5.0 mm/d, 最大日释放量为 4.72 mm, 累计释放量 26.55 mm。有植被条件: 日释放量约 2.0~6.2 mm/d, 最大日释放量为 6.22 mm, 累计释放量 45.80 mm。上述气象条件相近的两个气象段, 有植被条件的累计释放水量是无植被条件的 1.73 倍。杨忠东等^[19]对西北内陆地区植草生长参数进行反演统计, 发现叶面积指数峰值在 1.6~2.0 且随时间单峰变化, 本文有植被气象时段的植草 (叶面积指数: 0.8~1.4) 可视为处于茂盛状态。综上, 在夏季植被生长茂盛的条件下, 覆盖层水分释放速度显著大于无植被裸土。限于文章篇幅, 植被对覆盖层水分运

移特性、渗透系数和储水能力的影响详见文献[20]。

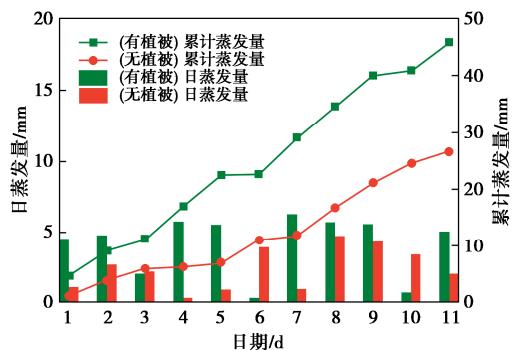


图 7 有、无植被条件覆盖层水分释放对比

Fig. 7 Comparison of water release of cover with and without vegetation

表 4 有植被条件 8 月 18 日—28 日气候和水分释放

Table 4 Climate and water release from Aug. 18 to 28 with

日期	vegetation			单位: mm
	日降雨量/ mm	累计降雨 量/mm	日释放 量/mm	
08-18	0	0	4.50	4.50
08-19	0	0	4.73	9.23
08-20	0.1	0.1	2.00	11.23
08-21	0	0.1	5.70	16.93
08-22	0	0.1	5.05	22.43
08-23	0.4	0.5	0.28	22.71
08-24	0	0.5	6.22	28.93
08-25	0	0.5	5.65	34.58
08-26	0	0.5	5.50	40.08
08-27	1.1	1.6	0.67	40.75
08-28	0.1	1.7	5.05	45.80

注: 8 月 18 日—28 日 (11 d) 气温 29~35.7°C; 相对湿度 70%~90%; 日辐射 5.5~0.5 W/m²; 平均风速 1.3~3.0 m/s。

3.2 实际储水量与防渗设计讨论

图 8 反映了监测试验期间, 覆盖层各渗漏事件 ($S_6, S_7, S_8, S_9, S_{11}$) 中的实测储水量和理论储水量。渗漏事件中, S_6 和 S_{11} 事件均为现场开展的人工长时强降雨试验, S_9 为自然气候下的长时强降雨。 S_7, S_8 为夏季午后的短时强降雨。渗漏事件中实测储水量, 由现场埋设于覆盖层土层中的 TDR 实测含水率通过土层厚度积分可计算而来。渗漏事件中理论储水量, 由 1.3 节细-粗粒土界面毛细阻滞效应失效机理及其理论储水量式 (2) 计算而来。渗漏量 P_r 为实时称量读取, 各渗漏事件 $S_6, S_7, S_8, S_9, S_{11}$ 渗漏量 P_r 分别为 8.3, 1.1, 0.6, 41.8, 37.04 mm。

现以 6 月人工极端降雨试验监测到的渗漏事件为例 (记为 S_6 事件)。 S_6 事件中, 降雨实验从 6 月 24 日持续到 6 月 30 日, 总降雨量 214.8 mm。在试验进行第 78 小时监测到覆盖层出现渗漏, 试验结束累计渗漏 8.3 mm。如前所述现场实验中, 由埋设于土层中的 TDR 实测含水率通过土层厚度积分可计算覆盖层实时储水量。渗漏时刻 TDR 含水率实测值: 0~65 cm

深度 TDR 实测含水率为 42.0%~42.3%; 85 cm 深度 TDR 实测含水率为 36.7%。根据前述毛细阻滞覆盖层理论储水量及其分布, 由理论计算值和现场实测值对比可知 (图 9): 15~35 cm 深度实测含水率比理论含水率高 0.09%~0.3%; 35~65 cm 深度实测含水率与理论含水率接近; 65~85 cm 深度实测含水率比理论含水率低 0.3%~6.38%。由上述理论与实测值对比: 覆盖层总储水量理论值 S_{fac} 为 400.40 mm, 现场实测值为 374.03 mm, 实测值约为理论值的 93%。

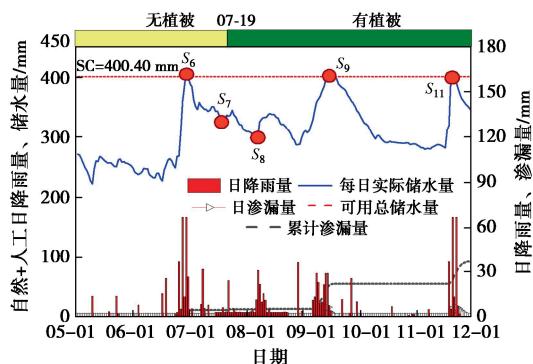


图 8 监测期覆盖层储水量和渗漏事件实测水量

Fig. 8 Water storage and percolation events during monitoring period

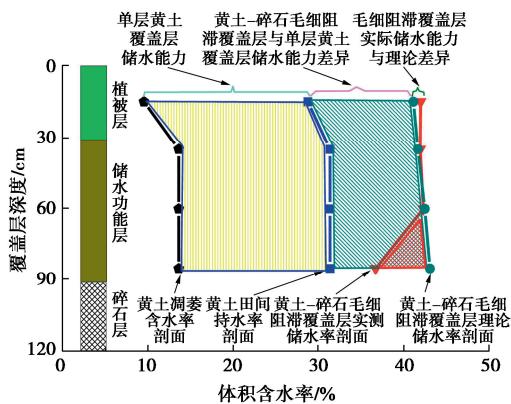


图 9 S_6 渗漏事件中覆盖层实测储水量与理论储水量对比

Fig. 9 Analysis of measured water storage by field hygroscopic SWCC in S_6

除 S_6 渗漏事件外, 图 8 中的 S_9 和 S_{11} 事件, 渗漏时实测储水量均接近可用总储水量 SC , 实际储水量均达到理论储水量的 90%以上。两次事件中, 沿土体探洞竖直向下观察, 未发现裂隙明显发育, 表层土体受植被覆盖遮挡, 开裂情况肉眼难以察觉。上述表明 S_9 , S_{11} 渗漏事件同 S_6 事件, 渗漏触发原因是, 实际服役中降雨入渗使土层储水能力几乎完全发挥, 因土层最大储水容量不足而引发渗漏。在西北半湿润自然气候条件下覆盖层长期服役中, 一些气候条件如长时弱降雨事件 (小到中雨), 一方面难以形成坡面径流, 另一方面太阳辐射弱, 表层土体开裂小或缓慢降水土体裂

缝闭合。裂缝等优先流通道对其防渗性能影响小, 土层储水能力能够充分发挥, 实际储水量达到 (或接近) 理论值是渗漏的主要原因。相应渗漏模式则可采用数值模拟法, 分析关注土层因储水能力不足而渗漏的问题。

但图 8 中的 S_7 , S_8 渗漏事件, 覆盖层实测存储水量却远远低于理论总储水量 SC 。如前所述, 本文毛细阻滞覆盖层渗漏时刻理论总储水量 SC 为 400.40 mm, S_7 事件实测值为 335.25 mm, 约为理论值的 84%; S_8 事件实测值为 293.18 mm, 约为理论值的 73%。也即这两次渗漏事件, 覆盖层尚有较多剩余储水空间, 储水能力未能充分发挥 (仅发挥了 70%~80%)。分析如下, S_7 , S_8 事件分别发生于夏季 7 月和 8 月初。该时段覆盖层几乎无植被覆盖, 太阳照射强烈, 土体表层开裂严重, 裂缝宽度约 2~6 mm。沿土体探洞竖直向下观察可知, 随着土层厚度增加, 裂隙发育受阻变缓, 发育深度约坡面以下 3~30 cm。夏季短时强降雨覆盖层坡面局部形成积水 (或坡面径流), 这些径流可能直接通过土层裂缝等通道优先下渗使覆盖层渗漏。对比各事件渗漏量 P_r 可知, S_7 (1.1 mm), S_8 (0.6 mm) 均远小于 S_6 (8.3 mm), S_9 (41.18 mm) 和 S_{11} (37.04 mm)。一方面各事件发生时降雨量、气温等外部环境因素存在差异, 覆盖层实际服役性状不同。另一方面反映了覆盖层内部裂隙发育不良, 未能形成稳定的优势流通道, 加之土体湿化愈合, 削弱了土体优先下渗能力。

文献[21]选取膜内试验区 2 个不同位置测试点, 测得了本文覆盖层的初始入渗速率和稳定入渗率 (图 10)。若不考虑土层初始基质吸力、坡度和植被等差异, 按初始入渗速率估算该气候区覆盖层临界最大降雨入渗率。试验初期 0~4 h, 黄土初始入渗率 $4 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, 估算雨强 $1.44 \sim 2.16 \text{ mm/h}$, 折算 24 h 雨强约 $34.56 \sim 51.84 \text{ mm/d}$ (属大到暴雨)。孙娴等^[22]对西北半湿润区典型城市西安的夏季降水特征进行了统计。统计表明: 近 50 a 以来, 西安夏季日降水峰值出现在下午至傍晚, 降水量和降水强度均以 15:00~20:00 时段为高值区。自 2005 年以来, 夏季大于 2.00 mm/h 的短时降雨次数明显增多, 年均达到 45 次, 其中含多起降水强度大于 20 mm/h 短时强降雨事件。

西北半湿润自然气候条件夏季 15:00~20:00 时段, 气温高, 蒸发作用强烈, 土体裸露开裂严重, 超过上述雨强的短时大到暴雨等降水事件将产生大量坡面径流, 径流 (积水) 沿土层裂缝优先下渗。这将导致覆盖层储水能力不能充分发挥而提前渗漏。其也是数值模拟对比现场试验研究中, 模拟放大饱和渗透系数 k_s 的主要原因^[4]。故在在当地毛细阻滞覆盖防渗设计中, 需考虑夏季坡面径流引发优先流, 导致覆盖层

储水能力发挥程度多在 80%~90% 的情况。建议该区域在覆盖层储水理论值基础上设置 1.1~1.3 (1/0.9~1/0.8) 的防渗富余系数。

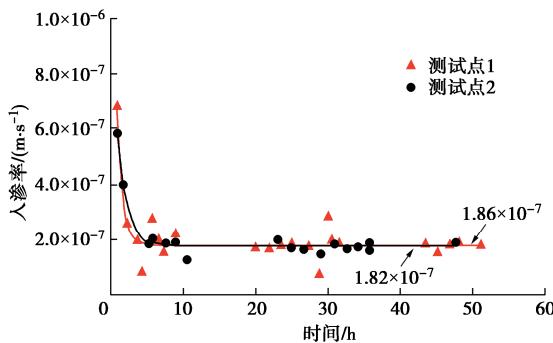


图 10 现场覆盖层黄土原位入渗曲线^[21]

Fig. 10 Infiltration curve of loess in cover by field tests^[21]

4 结 论

在西北半湿润区开展了毛细阻滞覆盖层现场足尺试验, 得到 2 点结论。

(1) 中国西北半湿润区毛细阻滞覆盖层腾发封顶条件下, 植被耦合土体具有良好的蒸腾蒸发作用。有植被时覆盖层水分释放速度显著大于无植被裸土, 前者水分累计释放量是后者的 1.73 倍。

(2) 中国西北半湿润气候区长时弱降雨气候条件, 如小到中雨, 毛细阻滞覆盖层渗漏时, 实测储水量约理论储水量的 93%。土层裂缝等优先流通道对其防渗性能影响小, 渗漏诱发原因是土层实际储水量超过理论值。短时强降雨气候条件如夏季午后的短时大到暴雨, 渗漏时实测储水量约为理论储水量的 73%~84%。坡面径流(或积水)通过土层裂缝优先下渗是覆盖层多发的、常见的渗漏诱发机制。防渗设计中, 建议在储水理论值基础上考虑 1.1~1.3 的防渗富余系数。

参考文献:

- [1] BONAPARTE R, GROSS B A, DANIEL D E, et al. Draft Technical Guidance for RCRA/CERCLA Final Covers[S]. 2004.
- [2] STAMATOPOULOS A C, KOTZIAS P C. Earth slide on geomembrane[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 408-411.
- [3] 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 Xiaokang, 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))
- [4] 张文杰, 耿 漾. 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 Wenjie, 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))
- [5] 焦卫国, 林长松, 庢 斌, 等. 半湿润地区毛细阻滞覆盖层长期防渗性能评价与渗漏气象机制分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(10): 118-126. (JIAO Weiguo, LIN Changsong, TUO Bin, et al. Evaluation of long-term anti-seepage performance of capillary barrier cover in semi-humid area and analysis on meteorological mechanism of percolation[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 118-126. (in Chinese))
- [6] BENSON C H, ALBRIGHT W H, ROESLER A C, et al. Evaluation of final cover performance: field data from the alternative cover assessment program (ACAP)[J]. Proc Waste Management, 2002, 2: 1-15.
- [7] BENSON C H. Final covers for waste containment systems: A North American perspective[C]// XVII Conference of Geotechnics of Torino "Control and Management of Subsoil Pollutants". Torino: Associazione Geotecnica Italiana, 1999.
- [8] TAMI D, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(5): 814-830.
- [9] LEE M, KOO C H, CHONG S Y, et al. Laboratory and numerical studies of rainfall infiltration into residual soil slope improved by biomediated soil cover[J]. Water, 2022, 14(5): 744.
- [10] NG C W W, LIU J, CHEN R, et al. Numerical parametric study of an alternative three-layer capillary barrier cover system[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 4419-4429.
- [11] 王 菲. 非饱和土柱试验装置开发及毛细阻滞型防渗层参数试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (WANG Fei. Development of Unsaturated Soil Column Test Device and Experimental Study on Parameters of Capillary Blocking Impervious Layer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [12] 王艳茹. 考虑动态毛细效应的非饱和土土-水特征曲线的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (WANG Yanru. Study

- on Soil-Water Characteristic Curve of Unsaturated Soil Considering Dynamic Capillary Effect[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [13] ZHAN L T, LI G Y, JIAO W G, et al. Field measurements of water storage capacity in a loess-gravel capillary barrier cover using rainfall simulation tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(11): 1523-1536.
- [14] MELCHIOR S, SOKOLLEK V, BERGER K, et al. Results from 18 years of in situ performance testing of landfill cover systems in Germany[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, **136**(8): 815-823.
- [15] NG C W W, CHEN R, COO J L, et al. A novel vegetated three-layer landfill cover system using recycled construction wastes without geomembrane[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, **56**(12): 1863-1875.
- [16] NI J J, LEUNG A K, NG C W W, et al. Investigation of plant growth and transpiration-induced matric suction under mixed grass-tree conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(4): 561-573.
- [17] HAUSER V L, WEAND B L, GILL M D. Natural covers for landfills and buried waste[J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, **127**(9): 768-775.
- [18] 王 鑫, 肖 武, 刘慧芳, 等. 锡林浩特矿区土壤水分特征曲线和有效含水量预测[J]. 煤炭科学技术, 2020, **48**(4): 169-177. (WANG Xin, XIAO Wu, LIU Huifang, et al. Soil moisture characteristic curve and prediction of available water content of overburden in Xilinhot Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, **48**(4): 169-177. (in Chinese))
- [19] 杨忠东, 杨 虎, 谷松岩. 西北地区陆地生态系统植被状态参数业务化遥感研究[J]. 气候与环境研究, 2004, **9**(1): 54-64. (YANG Zhongdong, YANG Hu, GU Songyan. Operational retrieval of the land ecosystem vegetation status parameters from remote sensing data in Northwest China[J]. Climatic and Environmental Research, 2004, **9**(1): 54-64. (in Chinese))
- [20] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 植被对土质覆盖层水分运移和存储影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(7): 1268-1275. (JIAO Weiguo, ZHAN Liangtong, JI Yongxin, et al. Experimental study on effects of vegetation on water transport and storage in soil cover[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1268-1275. (in Chinese))
- [21] 焦卫国. 西北黄土/碎石覆盖层水分存储—释放机理及防渗设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (JIAO Weiguo. Water Storage and Release of Loess/Gravel Cover and Seepage Prevention Design Method in Northwest of China[D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [22] 孙 娜, 魏 娜, 王式功, 等. 西安夏季降水的日变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(5): 1176-1182. (SUN Xian, WEI Na, WANG Shigong, et al. Study of the Daily Variation of Summer Precipitation in Xi 'an[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(5): 1176-1182. (in Chinese))