

DOI: 10.11779/CJGE201906020

# 黄土-碎石毛细阻滞覆盖层储水能力实测与分析

焦卫国<sup>1</sup>, 詹良通<sup>2</sup>, 季永新<sup>3</sup>, 贺明卫<sup>1</sup>, 刘振男<sup>1</sup>

(1. 贵州理工学院土木工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;

3. 贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006)

**摘要:** 中国西北地区气候较干旱, 黄土分布广泛。就地取材采用当地的黄土作垃圾填埋场封场土质覆盖层具有技术可行性和良好的经济性。在西安江村沟垃圾填埋场建造了国内首个 20 m×30 m 大尺寸黄土-碎石毛细阻滞覆盖层现场试验基地, 在基地开展了极端降雨试验。水量分配测试结果表明: 总降雨量 214.8 mm; 坡面径流 1.7 mm, 占总降雨量的 0.8%; 土层存储(含蒸发) 199.57 mm, 占总降雨量的 92.9%; 渗漏 13.53 mm, 占降雨量的 6.3%。基质吸力与水份运移规律分析结果表明: 持续降雨条件下毛细阻滞覆盖层(900 mm)细粒土中表层土(15 cm 深度以上)和底层土(85 cm 深度以下)的孔压(或体积含水率)均较高; 底层土孔压(或体积含水率)较高是由于碎石-黄土界面间毛细阻滞效应对水份下渗的阻滞作用, 这是有别于单一土层降雨入渗水份运移的显著特征。储水能力评估结果表明: 极端降雨试验实测黄土-碎石毛细阻滞覆盖层有效储水量为 251.95 mm。采用室内吸湿土水特征曲线评估覆盖层有效储水能力, 有效储水量理论值  $S_{fac}$  为 218.75 mm, 实测值较理论值大 15.18%, 结果偏于安全。采用现场吸湿土水特征曲线评估覆盖层有效储水能力, 有效储水量理论值  $S_{fac}$  为 278.32 mm, 实测值比理论值小 9.47%, 偏于危险。防渗设计中建议采用室内吸湿土水特征曲线。

**关键词:** 垃圾填埋场; 覆盖层; 毛细阻滞效应; 有效储水能力; 现场测试; 极端降雨试验

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)06-1149-09

**作者简介:** 焦卫国(1983—), 男, 博士, 副教授, 从事非饱和土力学、环境土工方面的教学和研究工作。E-mail: 805810460@qq.com。

## Field tests on water storage capacity of loess-gravel capillary barrier covers

JIAO Wei-guo<sup>1</sup>, ZHANG Liang-tong<sup>2</sup>, JI Yong-xin<sup>3</sup>, HE Ming-wei<sup>1</sup>, LIU Zhen-nan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 2. Geotechnical Research Institute, Zhejiang University,

Hangzhou 310058, China 3. Guizhou Construction Science Research and Design Institute of CSCEC Co., Ltd., Guiyang 550006, China)

**Abstract:** The climate in northwest China is arid and the loess which is technically feasible and economical used for soil cover in landfills is widely distributed. At Jiangchungou Landfill, Xi'an, the first large size loess-grass capillary barrier cover 20 m×30 m is built, and the extreme rainfall experiments are carried out. The results of water distribution tests show that: with 214.8 mm rainfall, the slope runoff is 1.7 mm, accounting for 0.8% of the total rainfall, and the storage of soil (containing evaporation) is 199.57 mm, accounting for 92.9% of the total rainfall, and the leakage is 11.53 mm, accounting for 6.3% of the rainfall. The analysis of matrix suction and water migration shows that: with continuous rainfall, the pore pressure (or volume water content) of the surface soil (above depth of 15 cm) and the bottom soil (below depth of 85 cm) in the capillary-barrier cover are all high. The high pore pressure (or volumetric water content) of the underlying soil is due to the capillary-barrier effects at the gravel-loess interface, which is the distinct feature of rainfall infiltration water movement different from that of single soil layer. The evaluation of water storage capacity shows that: the effective water storage capacity of the loess-grass cover is 251.95 mm, measured by the rainfall experiments. The theoretical value of the effective water storage  $S_{fac}$  is 218.75 mm, evaluated by the indoor hygroscopic soil-water characteristic curve. The measured value is 15.18% larger than the theoretical one, and the results are safe. The theoretical value of the effective water storage  $S_{fac}$  is 278.32 mm, evaluated by the field hygroscopic soil-water characteristic curve. The measured value is 9.47%, smaller than the theoretical one, and the results are dangerous. It is suggested that the indoor hygroscopic soil-water characteristic curve should be adopted in anti-seepage design.

**Key words:** landfill; cover; capillary-barrier effect; effective water storage capacity; field test; extreme rainfall experiment

基金项目: 黔科合基础[2017]1079、[2017]1513-4, 国家自然科学基金杰青基金项目(51625805); 黔科合 SY 字[2015]3055, LH 字[2016]7096; 中建四局科技研发(CSCEC4B-2015-KT-03)

收稿日期: 2018-08-13

\*通讯作者(E-mail: 805810460@qq.com)

## 0 引言

当前,中国有近千座生活垃圾填埋场因库容饱和而面临终场封顶覆盖的问题。封顶覆盖层的主要功能是防渗。土质覆盖层(soil cover)利用非饱和土的储水特性降雨时存储入渗水份,晴朗时腾发释放水份;通过水份的存储-释放循环而实现防渗功能<sup>[1]</sup>。土质覆盖层主要有单一型(monolithic soil cover)和毛细阻滞型(capillary barrier cover)两种。其中毛细阻滞覆盖层由细粒土下衬粗粒土而成。细粒土作核心储水层发挥储水作用,粗粒土作基础层并与细粒土构成毛细阻滞屏障,通过粗、细粒土间水力特性差异形成毛细阻滞作用而增大细粒土的储水能力<sup>[1-2]</sup>。

Stormont等<sup>[3-5]</sup>, Khire等<sup>[6]</sup>发现粗-细粒土形成毛细阻滞作用后细粒土储水能力比单层土有较大程度提高,并最早将毛细阻滞作用引入到土质覆盖层设计中。Aubertin<sup>[7]</sup>、Yang等<sup>[8]</sup>开展室内模型试验,通过在土层中埋设张力计和含水率探头对比测试了不同结构毛细阻滞作用对细粒土储水能力提升的效果<sup>[7]</sup>。美国能源局(DOE)和环保署(EPA)在全美24个填埋场开展了土质覆盖层防渗性能评估项目(ACAP-Alternative Covers Assessment Program)<sup>[9-11]</sup>。结果表明:在北美中西部干旱与半干旱气候区毛细阻滞覆盖层具有普适性,防渗效果较好<sup>[10-13]</sup>。

中国西北地区气候普遍较干旱,黄土分布广泛。就地取材采用黄土作土质覆盖层具有技术可行性和良好的经济性<sup>[14-15]</sup>。当前,国内有许多学者对毛细阻滞覆盖层进行了研究。赵慧等<sup>[16]</sup>、陆海军等<sup>[17]</sup>、Ng等<sup>[18]</sup>、邓林恒等<sup>[19]</sup>通过室内模型与数值分析相结合的方法在中国的中、东部湿润气候区对毛细阻滞覆盖层服役性状进行了研究。张文杰等<sup>[20-22]</sup>在杭州(湿润气候)开展了毛细阻滞覆盖层一维土柱长期监测试验并分析了其长期服役性能。以上这些研究均针对中国湿润气候区,而针对中国西北较干旱地区的研究还较少。仅有的报道是焦卫国等<sup>[14]</sup>、詹良通等<sup>[15]</sup>初步分析了西北黄土作覆盖层的适宜性并估算了单一型和毛细阻滞型黄土覆盖层的初步设计厚度,但缺乏对黄土水份分布特性和实际储水能力的验证。本文在西安江村沟垃圾填埋场建造了国内首个20 m×30 m大尺寸黄土-碎石毛细阻滞覆盖层现场试验基地并在基地开展了极端降雨试验。测试了黄土覆盖层基质吸力、水份运移特性和各水量分配;分析了室内单元体和现场尺度黄土覆盖层的储水特性;验证并评估了黄土-碎石毛细阻滞覆盖层的理论和实际储水能力,为黄土覆盖层在中国西北地区的应用提供数据支撑。

## 1 覆盖层尺寸、结构、仪器与土性参数

### 1.1 覆盖层地理位置、平面尺寸、结构和仪器埋设

中国降雨量呈现出从东南沿海向西北内陆递减的趋势,西北地区气候普遍以干旱,半干旱和半湿润为主。西北地区陕西省西安市年均降水量 $P$ 约500 mm,潜在蒸发量PET约600~700 mm,干湿指数(降水量/蒸发量)为0.5~1.0;属于半湿润气候,是西北地区中年降雨量最多,气候相对最湿润的地区之一。覆盖层试验基地位于西安市江村沟垃圾填埋场。江村沟垃圾填埋场是西安最大的垃圾处理设施,位于灞桥区狄寨乡,距西安市中心16 km,占地1100亩。覆盖层现场试验基地在第三期工程的7~8级平台间,边坡坡度 $14.8^\circ$ ,垃圾填埋龄期3~5 a(图1)。

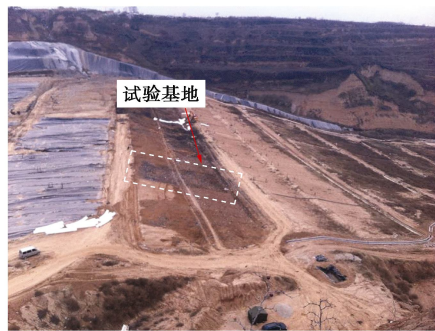


图1 西安江村沟垃圾填埋场黄土覆盖层试验基地

Fig. 1 Loess cover at Jiangcungou Landfill, Xi'an

试验覆盖层总尺寸30 m×20 m(长×宽),核心测试区尺寸24 m×10 m(长×宽)。宽度方向左右各预留5 m为核心测试区与场地周边的过渡区(图2, 3)。过渡区结构、土性参数同核心测试区。覆盖层黄土层厚0.90 m,剖面结构从上到下依次为30 cm厚植被土层(黄土和堆肥料混合,干密度 $1.35\text{ g/cm}^3$ );60 cm厚黄土核心储水功能层(干密度 $1.45\text{ g/cm}^3$ );15 cm厚碎石层(粒径0.5~2 cm,用于通气试验扩散层并作毛细阻滞效应粗粒土层)。核心测试区碎石层底部及四周设置了HDPE土工膜,隔断其与周边过渡区的水气联系并形成一个独立水文测试单元。核心测试区按坡顶、坡中和坡脚3个剖面 and 4个不同深度分别埋设了TDR、张力计、气压表和温度传感器等(图4)。同一剖面TDR和张力计成排间隔布置,埋设深度依次为15, 35, 60, 85 cm(图5)。张力计采用Soil moisture公司生产的jet-filled 2725型;TDR探头为自制三针式,信号测试仪为北美Campbell公司所产TDR100。气压和温度等用于覆盖层气相传导特性研究(其它文献详述)。试验基地旁设有小型气象站监测气象信息,建成后俯视见图3。

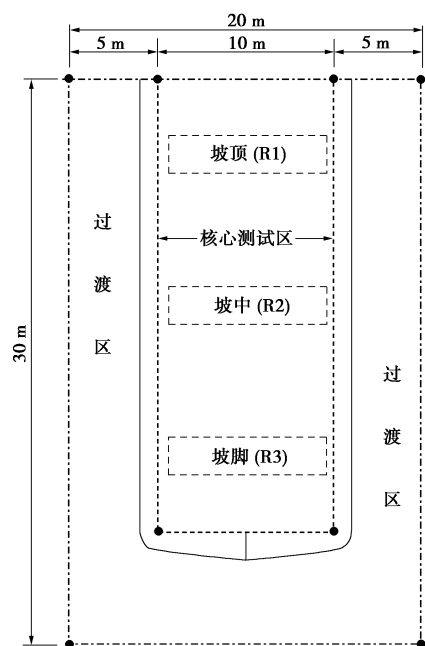


图 2 覆盖层试验基地平面布置图  
Fig. 2 Plan of field cover



图 3 覆盖层试验基地俯视图  
Fig. 3 Overview of final cover

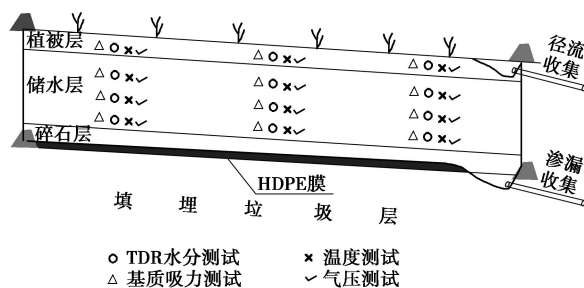


图 4 覆盖层结构和仪器埋设剖面

Fig. 4 Structure of final cover of loess and instrumentation

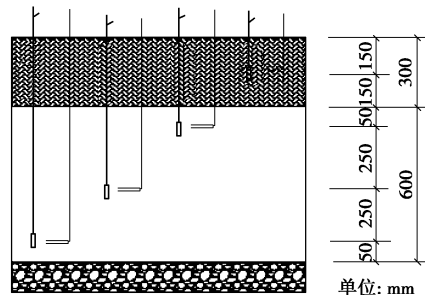


图 5 TDR 和张力计埋设深度细节图  
Fig. 5 Depths of TDR and tension meters

1.2 降雨模拟装置

根据西安地区气象特征和黄土水力特性确定了试

验总降雨量 (214.8 mm) 和雨强 (2.98~3.00 mm/h) 并设计了降雨模拟装置。装置由喷头群、供水管、流量计、压力表、阀门和潜水泵组成。从坡顶到坡脚, 喷头群分 7 排间隔梅花形布置。在主管上分别布设过滤器、压力控制阀门、流量计、离心潜水压力泵和疏水阀, 每排支路上分别设置流量计和流量调节阀。过滤器过滤水中杂物防止堵塞喷头; 压力控制阀和疏水阀通过调节阀门的开启度以控制总管水头压力; 压力表用于显示喷射压力; 流量计测试流量、离心潜水泵为喷灌系统提供水源和动力。水源为场区自来水。试验中根据供水管中的流量计读取总降雨量; 底部 HDPE 膜、预埋的 PPR 管和集水池等收集覆盖层渗漏量; 坡面土梁围堰、HDPE 管等收集坡面径流量。

1.3 水力特性参数

试验黄土取自江村沟垃圾填埋场北侧 Q<sub>3</sub> 边坡地层。根据颗分和液塑限指标可知该黄土属于粉质黏土 (表 1)。室内, 采用体积压力板仪分别测试了干密度为 1.35, 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 基质吸力范围为 0~1500 kPa 压实黄土的吸湿和脱湿过程土水特征曲线 (图 6)。

表 1 黄土基本参数

Table 1 Parameters of loess

土样 名称	界限粒径/mm			含量/%		
	>0.075	0.075~0.005	<0.005	w <sub>L</sub> /%	w <sub>p</sub> /%	I <sub>p</sub>
Q <sub>3</sub> 黄土	2.2%	71.8%	26%	36.7	22	15

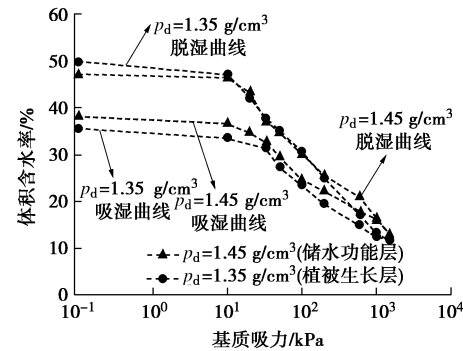


图 6 室内黄土吸湿和脱湿土水特征曲线

Fig. 6 Wetting and drying curves of soil-water characteristics for loess by laboratory testing

2 直接测试结果

2.1 测试方法、频率和水量平衡

在核心测试区和过渡区均进行了等强度极端降雨试验, 雨强为 2.98~3.00 mm/h。试验中通过 TDR 和张力计实时读取黄土层的基质吸力和体积含水率, 频率为 1 次/120 min。实时监测覆盖层坡面径流、渗漏产生的时间和流量。试验中水量平衡有下式:

$$P = R + S + P_t + E \quad (1)$$

式中,  $P$  为降雨量,  $R$  为坡面径流量,  $S$  为土层存储量,

$P_r$ 为渗漏量,  $E$ 为试验期蒸发量。其中, 降雨量  $P$ 通过流量计读取; 坡面径流量  $R$ 、渗漏量  $P_r$ 为现场称量实测; 土层存储量  $S$ 通过 TDR 实测含水率后经土层厚度积分算出。蒸发量  $E$ 经上式水量平衡计算得出, 同时由气象监测数据并结合试验地附近蒸发量校核分析。

2.2 覆盖层各水量分配测试结果

图 7 是直接测得的降雨量和覆盖层各水量分配情况。由图可见, 降雨试验从 6 月 24 日持续到 6 月 30 日, 总降雨量 214.8 mm。6 月 23 日—24 日降雨初期无坡面径流, 这是由于降雨雨强较小且表层土含水量低, 降雨量全部转化为入渗量。27 日降雨试验持续第 80h 覆盖层开始出现渗漏。29 日极端降雨停止, 坡面径流随即结束但渗漏一直持续到 7 月 2 日。降雨停止后继续监测覆盖层基质吸力、水份运移和渗漏量, 表 2 列出了降雨试验期间和结束后覆盖层各水量分配情况。由表可见, 约 92.9%的降雨量全部转化为土层存储, 仅 0.8%转化为坡面径流; 渗漏量累计 13.53 mm, 占本次降雨量的 6.3%。

表 2 极端降雨试验各水量分配

Table 2 Water distribution in extreme rainfall experiments (mm)

时间	各水量平衡与分配			
	坡面径流	土层存储 (包含蒸发量)	渗漏	累计降雨
6月23日	0	0	0	0
6月24日	0	36.63	0	36.63
6月25日	0.29	41.73	0	41.73
6月26日	0.57	108.33	0	108.33
6月27日	0.92	118.9	1.79	121.65
26月28日	1.47	181.7	5.08	188.25
6月29日*	1.7	204.8	8.3	214.8
6月30日	1.7	201.8	11.3	214.8
7月1日	1.7	199.97	13.13	214.8
7月2日	1.7	199.57	13.53	214.8
总计	1.7	199.57	13.53	214.8
百分比/%	0.8	92.9	6.30	100

注: \*极端降雨停止。

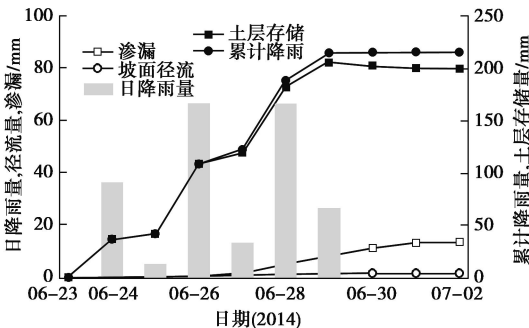


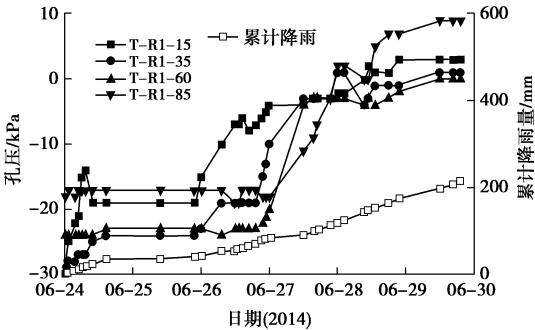
图 7 极端降雨试验水量分配和变化规律

Fig. 7 Water distribution in extreme rainfall experiments

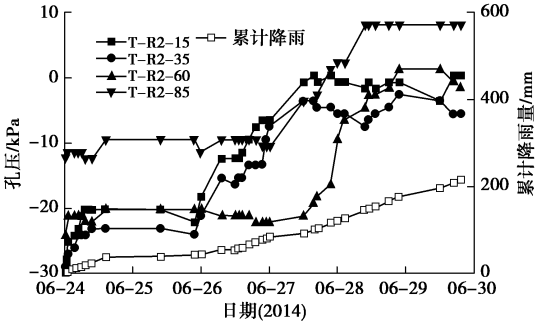
2.3 覆盖层基质吸力测试结果

图 8 是降雨试验覆盖层坡面不同位置、不同深度土层孔隙水压力(基质吸力)随时间变化曲线。图例 R1, R2 和 R3 分别表示坡顶、坡中和坡脚; 15, 35,

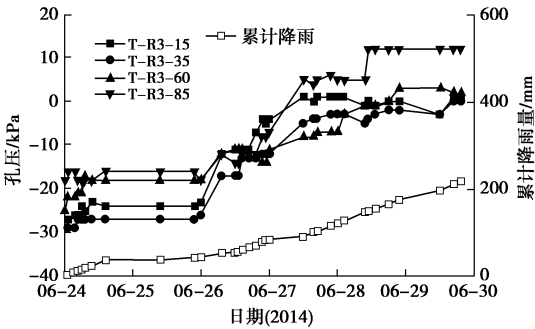
60, 85 表示仪器埋设深度分别为坡面下 15, 35, 60, 85 cm。其中深度 15 cm 的仪器位于表层植被土中(植被土厚 30 cm); 85 cm 的仪器位于黄土-碎石交界面之上 5 cm 的黄土层中。以坡中剖面(R2)为例: 降雨初期(7 月 24 日), 埋深 15 cm 土层孔压从 -30 kPa 上升至 -15~-20 kPa, 而埋深 35 cm 以下土层孔压基本不变。此外, 25 日降雨短暂停止后坡顶、坡中和坡脚 3 个剖面表层黄土孔压均有不同程度的下降。推测一方面是由于西安地区夏季气温高日照强烈土层蒸发失水; 另一方面由于表层土中的水份向深层土运移有关。在降雨后期(7 月 28 日后), 无论是坡顶, 坡中还是坡脚各深度土层孔压均有显著的升高(0~-5 kPa)。其中底部深 85 cm 土层的孔压均要明显高于其它深度的土层, 达到 10 kPa。



(a) 坡顶 R1 孔压随降雨时间变化规律



(b) 坡中 R2 孔压随降雨时间变化规律



(c) 坡脚 R3 孔压随降雨时间变化规律

图 8 坡顶、坡中和坡脚孔压随降雨时间变化规律

Fig. 8 Variation of pore water pressure with rainfall time

2.4 覆盖层体积含水率测试结果

图 9 是降雨试验中坡顶、坡中和坡脚 3 个剖面不同深度土层含水率随降雨时间的变化规律, 图例同前。以坡中剖面(R2)为例: 6 月 24 日降雨初期, 埋深

15 cm 深度土层水份由 25% 上升至 28%, 而埋深 35 cm 以下土层含水率上升则较小。这与水份在土体中逐渐由表层土下渗运移到深层土有关。6 月 25 日由于降雨量较少, 覆盖层土体含水率变化较小。26 日—27 日由于降雨量增多土体含水率显著增加, 到 28 日土体含水率增加至 40% 左右; 29 日含水率不再明显增加, 稳定在 42%~43% 间。

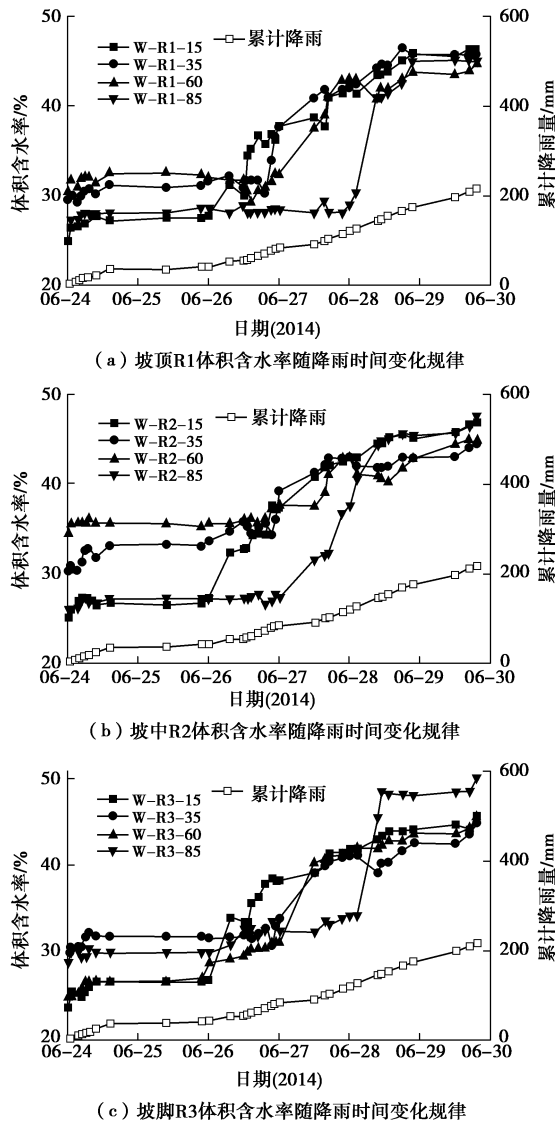


图9 坡顶、坡中和坡脚体积含水率随降雨时间变化规律

Fig. 9 Variation of volumetric water content with rainfall time

### 3 数据讨论与分析

#### 3.1 覆盖层基质吸力响应与水份运移规律

图 10 是以天为时间单位, 坡中剖面 (R2) 黄土层不同深度孔隙水压力 (基质吸力) 随降雨时间的变化情况。由图可见: 降雨前期 (6 月 23 日—26 日), 埋深 60 cm 以上土层孔压均有不同程度的升高, 而埋深 60~85 cm 土层孔压则变化较小。降雨中期 (6 月 27 日—28 日), 浅表层黄土 (埋深 15~35 cm) 孔压

达到 0 kPa 并保持不变, 而中下层黄土 (埋深 35~85 cm) 孔压则有较大程度升高。29 日降雨停止, 表层 (埋深 15 cm) 和底层 (埋深 85 cm) 黄土孔压明显比中部土层 (埋深 15~60 cm) 高。表层黄土孔压高可能是由于人工降雨水份入渗在黄土表层形成一近饱和层。图 11 是以天为时间单位, 坡中剖面 (R2) 黄土层不同深度体积含水率随降雨时间的变化规律。结合图 10 中不同深度土层孔压变化情况, 发现 24 日、25 日埋深 65 cm 以下土层孔压比 65 cm 以上土层高, 但其体积含水率则较 65 cm 以上土层低。这一方面由于张力计是在覆盖层建成后埋设, 官腔口径粗直, 降雨初期水份可能会沿着个别张力计管腔优先下渗到陶瓷头; 而 TDR 则在覆盖层施工期埋设, 水份难以沿着弯曲细小的导线优先下渗。

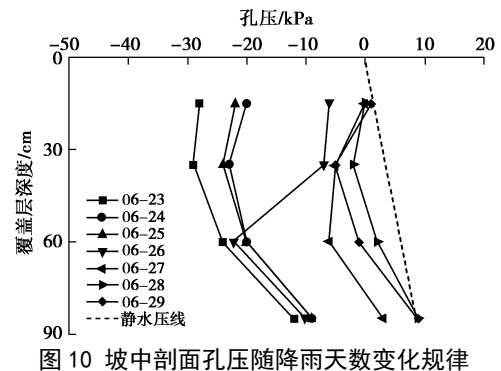


图 10 坡中剖面孔压随降雨天数变化规律

Fig. 10 Variation of pore water pressure with days

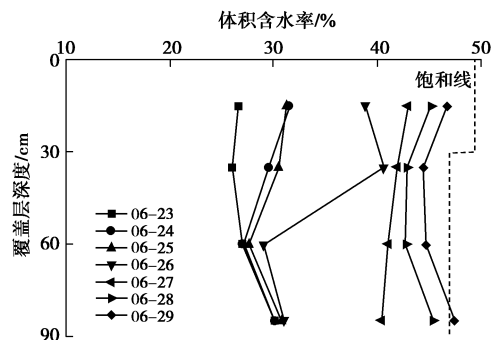


图 11 坡中剖面体积含水率随降雨天数变化规律

Fig. 11 Variation of volumetric water content with days

#### 3.2 黄土-碎石毛细阻滞作用分析

图 12 是水份在单一土层中入渗运移所形成的湿润锋分区简图。由图可见: 在水份下渗过程中表层含水率 (孔压) 最高, 形成“近饱和层”。近饱和层与水份入渗强度、入渗持续时间与土体渗透性有关。紧接着为“过渡层”, 过渡层含水率 (孔压) 稍低。过渡层之下为“非饱和传导层”, 传导层前方为“湿润层”。湿润层最前方为水份运移的湿润锋, 该锋线是水份运移的最前端, 含水率最低。由此可见水份在单一土层中入渗运移规律, 随着深度的增加含水率 (孔压) 逐渐降低。



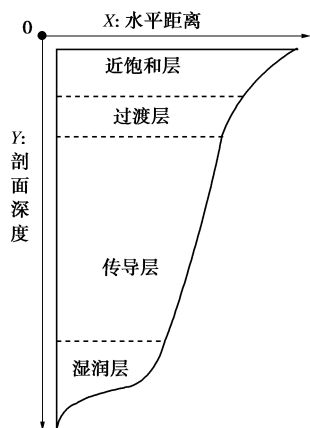


图 12 单一土层水份入渗迁移规律<sup>[23]</sup>

Fig. 12 Water migration in single soil layer

图 13, 14 是试验中不同日期, 覆盖层孔压和体积含水率随深度的变化规律。由图可见, 降雨前期 (23 日—26 日) 覆盖中上层土 (60 cm 深度以上) 孔压和体积含水率有较大幅度的升高。降雨中期 (26 日—27 日) 深层土 (35 cm 深度以下) 孔压上升明显较浅表层 (35 cm 深度以上) 黄土高, 结合图 14 可见深层土含水率升高明显较浅表层幅度大。降雨末期 (27 日—29 日), 深层土 (35 cm 深度以下) 孔压升高明显较浅表层 (35 cm 深度以上) 快。29 日降雨停止, 表层土 (15 cm 深度以上) 和底层土 (85 cm 深度以下) 的孔压接近静水压线且体积含水率均已接近饱和。底层土孔压 (含水率) 高, 是因为随着降雨的进行水份下渗到达黄土层底部, 由于碎石-黄土界面间毛细阻滞效应对水份下渗的阻滞作用, 导致土层底部水份滞留聚集而接近

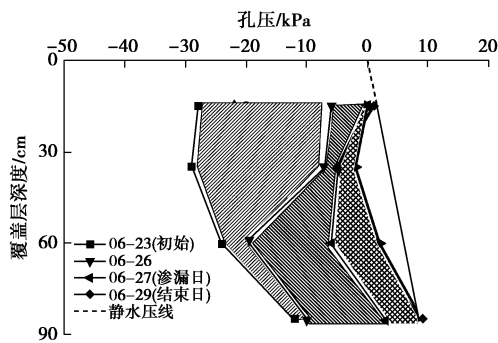


图 13 典型日期坡中剖面孔压变化规律

Fig. 13 Pore water pressures on typical date

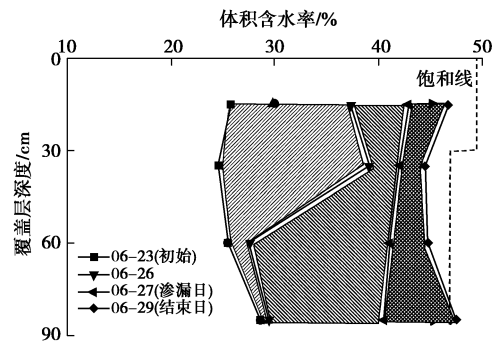


图 14 典型日期坡中剖面体积含水率变化规律

Fig. 14 Volumetric water contents on typical date

饱和。该现象表明碎石-黄土间的毛细阻滞效应发挥了作用, 同时也是有别于单一土层水份入渗的显著特征。

3.3 土层实际储水量分析

覆盖层土层实际储水量有两种计算方法: ①基于式 (1) 的水量平衡; 由总降雨量扣除坡面径流量、渗漏量和降雨试验期蒸发量可得土层实际储水量。②通过 TDR 探头测试不同深度土层体积含水率, 再由含水率与覆盖层土层厚度积分而算出土层实际储水量。方法一中, 试验期蒸发量包括降雨期喷头喷出的雨滴 (水雾和水珠) 与覆盖层表层饱和和裸土蒸发量两部分。纵有独立设置的气象站对覆盖层所处局部环境进行气象监测, 也难以准确计算。因此, 试验期蒸发量参考了国家气象台泾河气象站 6 月 23 日—7 月 2 日间的自由水面蒸发量 (数据来源于中国国家气象信息共享网-核心会员)。方法二中纵使在覆盖层坡顶、坡中和坡脚 3 个剖面不同深度累计埋设了 12 只 TDR, 但因覆盖层体量和尺度较大, 仍可能会有误差。表 3 是以上两种算法土层储水量的差异对比, 可见两种算法在 6 月 27、29 日仅仅相差 5~7 mm。随着计算时间的延长, 7 月 2 日 (渗漏停止日) 土层存储量相差 12.77 mm (累计降雨量 214.8 mm, 误差率为 5.94%)。考虑到方法一中蒸发量的不确定性后文统一采用 TDR 实测法。

表 3 土层实际存储量分析

Table 3 Analysis of actual storage of soil layers (mm)

日期和 大事件	参考蒸 发量	土层实际储水量		差异 $\Delta S$ ( $\Delta S = S_1 - S_2$ )
		水量平衡 法 $S_1$	TDR 实 测法 $S_2$	
06-24 降雨开始	6.5	—	—	—
06-27 渗漏开始	12.2	106.74	113.8	-7.06
06-29 降雨结束	29.3	175.5	169.8	5.70
07-02 渗漏停止	46.5	153.07	140.3	12.77

3.4 现场覆盖层储水特征参数 (SWCC) 分析

对覆盖层黄土的土水特征响应进行了监测, 监测频率为每日一测。图 15 是采用张力计和 TDR 测得的黄土覆盖层现场土水特征点 (体积含水率-基质吸力关系数据点) 与室内单元体黄土土水特征曲线的比较 (干密度均为 1.45 g/cm<sup>3</sup>)。由图可见: 现场土水特征点的基质吸力主要分布于 0~50 kPa 间且一个吸力对应于多个含水率值, 比较离散。这与黄土层反复经历降雨-日照-降雨, 土体历经“吸湿-脱湿-吸湿”反复干湿循环, 因而多数测试点位于滞回环上有关 (室内体积压力板仪测试结果为 0~1500 kPa 主脱湿和主吸湿点)。

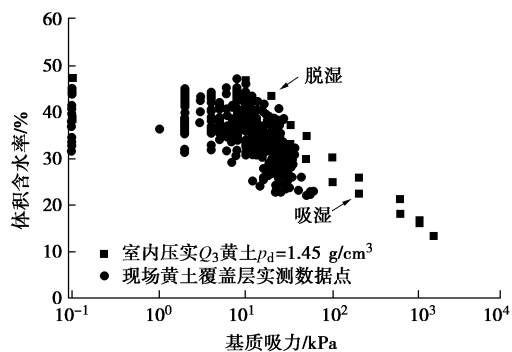


图 15 现场试验与室内测试黄土土水特征点对比

Fig. 15 Comparison between field and laboratory moisture content-suction curves

本次降雨试验中降雨入渗和降雨停止后蒸发失水是覆盖层土体典型的吸湿和脱湿过程。图 16 为两个时间段测得的现场黄土层的土水特征点, 其中脱湿点源于本次极端降雨试验后覆盖层经历西安 7 月夏季高温连续日照蒸发失水过程, 吸湿点来源于本次极端降雨试验水份入渗过程。由图可见: 降雨试验中黄土原位土水特征点基质吸力变化范围在 0~50 kPa, 体积含水率则在 45%~22%。以这些离散土水特征点为基础, 结合极端降雨试验期间现场取样测得浅表层黄土的近饱和和体积含水率  $\theta_s$ , 1500 kPa 下黄土残余含水率  $\theta_r$ , 可拟合出本次降雨试验中覆盖层现场黄土吸湿和脱湿土水特征曲线(图 16)。由图可见: 拟合得到的现场土水特征曲线与室内单元体测试得到的土水特征曲线有一定差别。现场脱湿曲线位于室内曲线的下方; 现场吸湿曲线在 0~30 kPa 范围较室内曲线高, 而 30~1500 kPa 较室内曲线低。分析两者的差别可能是由于: 一方面除前述现场部分测试点位于“吸湿—脱湿—吸湿”滞回环上因素外; 另一方面还与室内单元体制样和现场大尺度施工土料精细程度差异有关。图 17 显示了室内和现场施工所用土料对比情况。可见: 室内试验所用的土料经揉搓拌合处理后结构、质地非常均匀且筛除了粒径大于 2 mm 的颗粒(如姜石)。现场施工因体量较大, 土体压实均匀性以及土料结构中分布有大孔隙等。

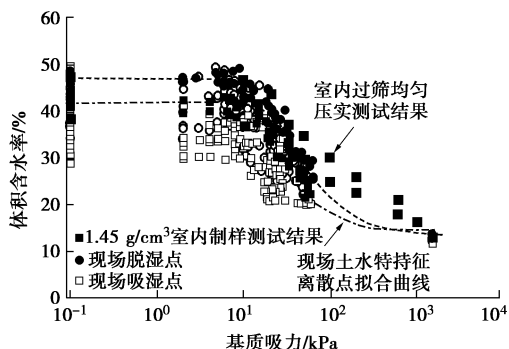


图 16 现场测试与室内试验黄土土水特征曲线

Fig. 16 Comparison between field and laboratory moisture content-suction curves



(a) 现场试验 (b) 室内试验

图 17 现场试验和室内试验土样对比

Fig. 17 Loesses in field (left) and laboratory (right)

### 3.5 覆盖层最大储水能力评估

Craig 等<sup>[24]</sup>、Stormont 等<sup>[25]</sup>、Tami 等<sup>[26]</sup>对毛细阻滞覆盖层最大储水能力进行的研究表明: 渗漏发生时细—粗粒土交界面的基质吸力为粗粒土进水值  $\phi_b$ , 此刻交界面上细粒土底层含水率为  $\theta_b$ 。可进行如下简化计算: 细—粗粒土交界面基质吸力  $\phi_b$ , 以界面为起点细粒土基质吸力沿厚度方向呈线性增加, 厚度  $Z$  处基质吸力为  $Z + \phi_b$ 。土层总储水量  $S_{t0}$  可用下式计算:

$$S_{t0} = \int_0^L \theta(z + \phi_b) dz, \quad (2)$$

式中,  $L$  为细粒土层厚度,  $\phi_b$  粗粒土进水值,  $(Z + \phi_b)$  为以界面为起点, 细粒土层厚度  $Z$  处基质吸力,  $\theta(z + \phi_b)$  为细粒土体积含水率和基质吸力之间的关系(如 V-G 模型<sup>[27]</sup>)。利用渗漏时刻土层总储水量  $S_{t0}$  扣除植被维持生存的最低储水量  $S_{fm}$ (枯萎点所对应储水量)即可获得毛细阻滞覆盖层的有效储水量  $S_{fac}$ 。本文通过室内和现场两个手段分别获得了黄土土水特征曲线, 介于两者储水特征参数(SWCC)间的差异, 分别采用上述两套参数对本次实测储水量进行评估。

#### (1) 采用室内吸湿土水特征曲线评估

图 18 是采用室内吸湿土水特征曲线评估覆盖层储水能力的情况。由图可见: 0~65 cm 深度土层 TDR 实测含水率为 42.0%~42.3%; 85 cm 深度土层 TDR 实测含水率为 36.7%。而该毛细阻滞覆盖层理论储水分布为: 黄土层含水率从粗—细粒土界面(90 cm)的 38.1%向表层递减至 34.7%。由理论值和实测值对比可

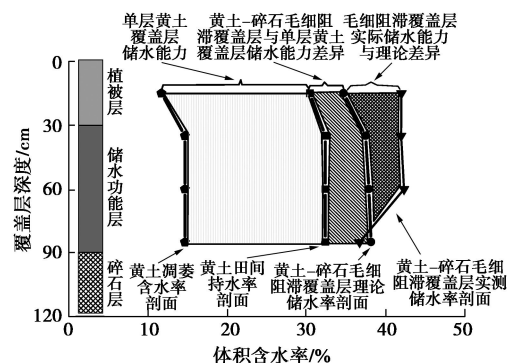


图 18 覆盖层实测储水量分析(室内吸湿 SWCC)

Fig. 18 Analysis of measured water storage by laboratory hygroscopic SWCC





- water diversion along inclined covers with capillary barrier effects[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**: 1146 – 1164.
- [8] YANG Hong, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. A study of infiltration on three sand capillary barriers[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**: 629 – 643.
- [9] BONAPARTE R, GROSS B A, DANIEL D E, et al. Draft technical guidance for rcra/cercla final covers[S]. Response, Office of Solid Waste, 2004.
- [10] BENSON C H, KHIRE M V. Earthen covers for semi-arid and arid climates[J]. Geotechnical Special Publication, 1995(53): 20 – 217.
- [11] 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.
- [12] ROSS B. The diversion capacity of capillary barriers[J]. Water Resources Research, 1990, **26**(10): 2625 – 2629.
- [13] ALBRIGHT W H, BENSON C H, GEE G W, et al. Field water balance of landfill final covers[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(6): 2317.
- [14] 焦卫国, 詹良通, 孔令刚, 等. 黄土-碎石覆盖层毛细阻滞效应及设计厚度分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, **50**(11): 2128 – 2134. (JIAO Wei-guo, ZHAN Liang-tong, LAN Ji-wu, et al. Verification of capillary barrier effect of clayey loess-gravel cover and analysis of design thickness[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2016, **50**(11): 2128 – 2134. (in Chinese))
- [15] 詹良通, 焦卫国, 孔令刚, 等. 黄土作为西北地区填埋场土质覆盖层材料可行性及设计厚度分析[J]. 岩土力学, 2014, **12**(3): 384 – 389. (ZHAN Liang-tong, JIAO Wei-guo, KONG Ling-gang, et al. Feasibility analysis of using loess as soil cover material for landfills in the northwest of China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3361 – 3369. (in Chinese))
- [16] 赵 慧, 刘川顺, 王 伟, 等. 垃圾填埋场腾发覆盖系统控制渗滤效果的研究[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(9): 86 – 89. (ZHAO Hui, LIU Chuan-shun, WANG Wei, et al. Study of leachate control effect of evapotranspiration landfill cover system[J]. China Water & Wastewater, 2008, **24**(9): 86 – 89. (in Chinese))
- [17] 陆海军, 栾茂田, 张金利. 垃圾填埋场传统封顶和 ET 封顶的比较研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 509 – 514. (LU Hai-jun, LUAN Mao-tian, ZHANG Jin-li. Research on comparison between traditional compacted clay and evapotranspiration cover systems of landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 509 – 514. (in Chinese))
- [18] NG C W W, WOONA K X, LEUNGA A K, et al. Experimental investigation of induced suction distribution in a grasscovered soil[J]. Ecological Engineering, 2013, **52**: 219 – 223.
- [19] 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))
- [20] 张文杰, 耿 潇. 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶工作机理及性能分析[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))
- [21] 张文杰, 邱战洪, 朱成仁, 等. 长三角地区填埋场 ET 封顶系统的性能评价[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 384 – 389. (ZHANG Wen-jie, QIU Zhan-hong, ZHU Cheng-ren, et al. Evaluation of evapotranspiration covers of landfills in Yangtze river delta region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 384 – 389. (in Chinese))
- [22] 张文杰, 林 午, 董林兵. 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶模型试验[J]. 岩土力学, 2014, **35**(5): 1263 – 1268. (ZHANG Wen-jie, LIN Wu, DONG Lin-bing. Model test of a capillary barrier evapotranspiration cover for landfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(5): 1263 – 1268. (in Chinese))
- [23] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 22 – 26. (KANG Shao-zhong, LIU Xiao-ming, XIONG Yun-zhang. Water transport theory and its application in soil-plant-atmosphere continuum[M]. Beijing: Water Conservancy and Electricity Press, 1994: 22 – 26. (in Chinese))
- [24] CRAIG H. BENSON. Final Covers for waste containment systems a north american perspective[C]// XVII Conference of Geotechnics of Torino “Control and Management of Subsoil Pollutants”. Torino, 1999.
- [25] STORMONT J C. The performance of two capillary barriers during constant infiltration, landfill closures, ASCE, GSP No. 53[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1995: 77 – 92.
- [26] DENNY Tami, HARIANTO Rahardjo, ENG-CHOON Leong, et al. Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, **41**: 814 – 830.
- [27] VAN Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, **44**(5): 892 – 898.