

DOI: 10.11779/CJGE202106009

红黏土土质覆盖层水力参数随服役时间演变规律分析

焦卫国^{1,3}, 季永新², 张 玥^{1,3}, 贺明卫^{1,3}, 刘振男^{1,3}

(1. 贵州理工学院土木工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 中国建筑第四工程局有限公司工程技术研究院(技术中心), 广东 广州 510665,

3. 贵州理工学院乡村建设工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550003)

摘 要: 红黏土具有高液(塑)限、低渗透、中—低压缩性和较高的力学强度, 在西南喀斯特地区广泛用于路基、土石坝、各类尾矿和垃圾填埋封顶覆盖等防渗工程。对红黏土开展了实验室和现场水力参数对比测试; 在填埋场建设了红黏土覆盖层试验区并开展了自然气候条件下的长期服役水力参数监测; 分析对比了有、无植被红黏土水力参数的不同变化。结果表明: ①红黏土饱和渗透系数在 10^{-7} cm/s 量级, 渗透性低, 防渗性能好; 有效储水率约 18.8%, 与粉土—粉质黏土相当, 储水能力好。②现场大体量大范围施工而实验室精细制样导致两者土样结构有显著差异。干密度相近时, 现场土饱和入渗系数比室内重塑土大 36.62%, 防渗设计中应充分考虑实验室到现场间压实土防渗性能的“打折”现象。③在 2.0 年的长期服役中, 无植被红黏土覆盖层在日照、降雨循环作用下因土层开裂导致渗透系数较建设之初最大增加 2.9×10^4 倍; 有植被时渗透系数较建设之初或减小或增加, 最大增加 10 倍, 且与植被生长状态有关。有、无植被红黏土入渗系数和开裂情况对比表明: 植被对土质覆盖层细粒土因日照—降雨气候作用导致防渗性能的劣化有明显的抑制作用。

关键词: 填埋场; 覆盖层; 黏土; 长期服役; 水力参数; 演变规律; 植被根系

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)06-1059-10

作者简介: 焦卫国(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事非饱和土力学方面的教学和科研。E-mail: 805810460@qq.com。

Evolution of hydraulic parameters of red clay cover with service time

JIAO Wei-guo^{1,3}, JI Yong-xin², ZHANG Yue^{1,3}, HE Ming-wei^{1,3}, LIU Zhen-nan^{1,3}

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

(Technology Center) of China Construction Fourth Engineering Division Corp., Ltd., Guangzhou 510665, China; 3. Rural Construction

Engineering Technology Research Center of Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China)

Abstract: Red clay is characterized by high liquid (plastic) limit, low permeability, medium-low compressibility and high mechanical strength. It is widely used in anti-seepage projects such as roadbed, earth dam, tailings and landfill cover in karst areas of southwest China. The hydraulic parameters of the red clay are tested in laboratory and field. The test area of red clay cover is built in landfill site, and the long-term service hydraulic characteristic parameters are monitored in natural climate. The hydraulic parameters of the red clay cover with and without vegetation are analyzed. The results show that: (1) The saturated permeability coefficient of the red clay is 10^{-7} cm/s with low permeability and good anti-seepage performance. The effective water storage rate is about 18.8%, which is equivalent to that of silt and silty clay, and the water storage capacity is acceptable. (2) The large-scale construction in the field and the fine sample preparation in the laboratory lead to significant differences in the structure of the two soil samples. With similar dry density, the saturated permeability coefficient of field red clay is 36.62% higher than that of laboratory remold red clay. The "discount" phenomenon of anti-permeability of compacted soil from laboratory to site should be fully considered. (3) In long-term service of 2.0 years, the permeability of the red clay cover without vegetation increases by the maximum increase of 5×10^3 times that at the beginning of construction due to soil cracking under the sun-rainfall cycle. With vegetation, the permeability increases or decreases compared with that at the beginning of construction (the maximum increase of 10 times) and is related to the vegetation growth state. It is shown that the vegetation has an obvious inhibitory effect on the permeability deterioration of fine-grained soil due to sun-rainfall cycles.

Key words: landfill; cover; clay; long-term service; hydraulic parameter; evolution law; vegetation root system

0 引 言

从全国省级行政地图来看, 红黏土在中国西南的

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069005); 黔科合基础[2019]1143;
中建四局科技(CSCEC4B-2020-KT-6); 六盘水科技(52020-2018-01-04)
收稿日期: 2020-07-07

四川、云南、重庆、贵州和广西地区较多呈集中分布；其次在江西、湖南和湖北南部以及山东省的局部地区呈零星分布。红黏土是一种典型的高液限、塑限黏土，低渗透、大孔隙比、高含水率和高饱和度同时具有中—低压缩性和较高的力学强度，在西南喀斯特地区广泛用于公路路基^[1]、土石坝、各类尾矿以及垃圾填埋场封顶覆盖等防渗工程^[2-4]。

水力特征参数反映水份在土体中的运移和存储特性，是各类防渗工程设计的关键^[4-8]。红黏土作为一种分布广、质优价廉的防渗材料已被大量填埋场的封顶覆盖工程广泛运用^[2-4]。有许多学者对土质覆盖层进行了研究^[5-15]，但目前针对红黏土实验室和现场间水力特性的差异以及长期服役中其防渗性能或水力参数随自然季候衰减劣化方面的研究却较少。实验室往往因测试样本或模型体量、小尺度等原因，土样筛选、制作和压实等精细，样本结构均匀水力特性近乎完美。而在填埋场现场施工时，因工程条件、工程的规模和尺度等大体量、大范围施工，土样压实方法、机具、结构均匀性和室内有较大差异。Khire 等^[9]对北美某填埋场覆盖层水力参数进行了测试，发现实验室和现场覆盖层水土特征参数有一定差异。当含水率近乎一致时（10%），现场覆盖层基质吸力较实验室低一个数量级（现场为 $10^2 \sim 10^1$ kPa，实验室为 $10^3 \sim 10^2$ kPa）。此外，长期防渗服役过程中由于植被根系的生长，日照—降雨等自然气候循环对土体结构反复影响，其水力特征参数势必会发生变化。Benson 等^[10]对北美十多个填埋场土质覆盖层从实验室到现场、从现场施工到施工结束服役 1~4 a 期的水力特征参数进行了比较。结果表明：现场覆盖层饱和渗透系数 k_s 与饱和体积含水率 θ_s 较建设之初呈量级或倍数增加，土水特征曲线（Soil Water Characteristic Curve--SWCC）Van-Genuchten 模型^[17]参数 α 可增加 10^2 倍，参数 n 可减小 1.4 倍等。随着服役时间的延长，一直沿用室内参数会产生较大误差甚至会高估覆盖层的防渗能力。

本文在填埋场建设了红黏土覆盖层现场试验区，对自然气候长期防渗服役水力参数展开了测试，对比了填埋场现场与实验室单元体层面红黏土水力特征参数的差异，分析比较了长期服役中有、无植被红黏土水力参数的不同变化；为红黏土作防渗材料或土质覆盖层细粒土提供参考和依据。

1 方法与材料

1.1 现场试验

试验填埋场位于贵州省北部贵阳市，是贵阳市最大的生活垃圾填埋处理设施，当前填埋库容已趋于饱和并进行封场（图 1）。结合封场工程于 2015 年 12 月

在第 4, 5, 6 级平台分别建设了#1, #2, #3 红黏土土质覆盖层现场试验区。3 个试验区尺寸、面积和土层结构均一致，尺寸 $l \times b$ 为 $3.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ ，土层厚 60 cm。其中，1#试验区（位于 4 级平台）为无植被裸土覆盖层，在土层以下 15, 45 cm 分别埋设了 2 支张力计和 2 支 TDR。#2 试验区（位于 5 级平台）为有植被土质覆盖层，植被为狗牙根+高羊茅+苜蓿，在同样深度埋设了 2 支张力计和 2 支 TDR。#3 试验区（位于 6 级平台）为现场原状土探坑取样地，从现场取回原状样以便进行室内测试。



图 1 试验填埋场现场情况

Fig. 1 Site situation of experimental landfill

3 个试验区现场施工均采用小型标准压实板尺寸为 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 的冲击夯振动夯实，控制压实度 85% 对应干密度 ρ_d 为 1.37 g/cm^3 。冲击夯为上海星通建筑厂生产的 HCD100 型，夯实跳起高度为 $40 \sim 65 \text{ mm}$ ，前进速度 $\geq 8 \text{ m/min}$ ，冲击次数为 $420 \sim 700 \text{ 次/min}$ ，冲击能量为 85 N/m 。该型冲击夯体积小重量轻，适用于小范围补夯或场地狭窄等大型机械无法完成的施工任务。土样夯实后现场安装雨量计并埋设张力计和 TDR；张力计为 Soil Moisture 公司所产 jet-filled 2725 型，TDR 为自制三针式探头，雨量计为翻斗式。通过张力计和 TDR 对覆盖层体积含水率和基质吸力开展长期跟踪监测，测试频率为每周 2~3 次，典型降雨加密监测。植被参数如叶面积指数和根系深度每月测 1~2 次。另，于 2016 年 12 月在#1 试验区（无植被）和#2 试验区（有植被）红黏土层中埋插了一直径为 25 cm 的薄壁钢管以用于观测沿土层深度裂缝发育情况；管头配置了略大于管径的遮雨帽以防止雨水沿管壁优先下渗。观测时拔出管道，观测后插回管道复原。观测方法为现场肉眼和相机拍摄。

分别于 2016 年 4 月、2016 年 12 月、2017 年 12 月在#1 试验区（无植被）、#2 试验区（有植被）进行了双套环原位入渗实验，获得了现场红黏土的稳定入渗系数 k_f 。试验装置内环半径 22.6 cm，外环半径 45.2 cm，内、外环高均为 30 cm。分别采用 30 L 水桶和 2

L 水瓶供水并维持 5 cm 常水头 (图 2)。利用下式计算入渗系数 k_f :

$$q=Q/(t \times s)=k_f \cdot i \cdot A \quad (1)$$

式中, Q 为 t 时间内供水小桶内流出的水量, s 为小套环包围的面积; k_f 为入渗系数, i 为水力梯度。



图 2 现场双套环入渗试验

Fig. 2 Field infiltration tests of double rings

1.2 室内试验

实验室内对重塑红黏土开展了基本物理性质测试: 含水率为 31.5%, 天然密度为 1.67 g/cm³, 相对质量密度为 2.71, 液塑为 70.65%, 塑限为 40.32%, 孔隙比为 1.13, 最大干密度为 1.61 g/cm³, 最优含水率为 23.8%。级配曲线见图 3。土样天然含水率为 31.5%, 液限 w_L 为 70.7%, 塑限 w_P 为 40.3%, 塑性指数 I_P 为 30.4。由土样液限、塑限并结合粒径级配曲线可知该土属黏土。

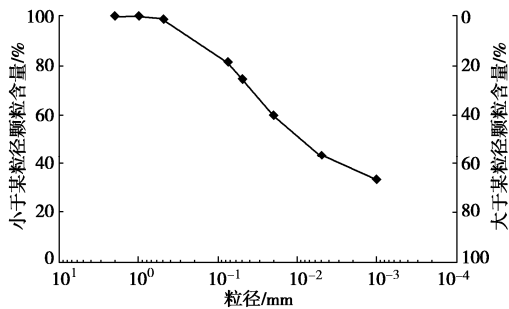


图 3 红黏土粒径级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of red clay

采用体积压力板仪对压实度分别为 85% (对应干密度 1.37 g/cm³) 和 95% (对应干密度 1.53 g/cm³) 的重塑红黏土进行了 0~1500 kPa 土水特征曲线测试。实验室采用变水头法对重塑红黏土的饱和渗透系数 k_s 进行了测试。室内重塑土与现场建设用土均取自填埋场现场取土场, 两者属同一地点, 同一边坡, 同一地层。以土水特征曲线测试为例, 室内重塑土样制作过程为: 现场扰动红黏土取样—带回实验室—四分法选取土料—烘干—选取土样并橡胶棒研磨—过筛 (2

mm) — 取筛下定质量干土样并加水 — 自制压实器分 3 层静力压实 — 成品环刀样。制样过程中干密度控制准确压实均匀。分别于 2016 年 4 月、2016 年 12 月、2017 年 12 月在 6 级测试区开挖探坑取出覆盖层原状土样 (图 4) 带回室内并采用同一体积压力板仪进行了 0~1500 kPa 土水特征曲线测试。从现场试验区取回的覆盖层红黏土原状样因大体量施工未进行土样筛分, 土样制作过程为: 现场开挖探坑 — 取覆盖层原状红黏土 — 土样保湿和密闭防护 — 运入实验室 — 室内环刀取原状样 — 土样切削修整 — 成品环刀样。



图 4 现场试验区覆盖层红黏土原状样

Fig. 4 Undisturbed sample of red clay in field test cover

现场和室内开展的红黏土水力特性测试项目详见表 1。

表 1 现场和室内开展的试验测试项目

Table 1 Items of field and laboratory tests

室内试验	现场试验
重塑红黏土的基本物理性质和参数	现场覆盖层红黏土体积含水率和基质吸力长期监测
室内重塑土变水头饱和和渗透系数	现场覆盖层双套环原位入渗试验
室内重塑土的土水特征曲线	现场降雨量等气候条件和植被参数
从现场取回的覆盖层原状土土水特征曲线	现场覆盖层红黏土裂缝观测

1.3 理论分析方法

利用 Van-Genuchten (V-G) 模型对红黏土的土水特征曲线进行了数据拟合:

$$\theta_s = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right)^m} \quad (2)$$

用 V-G 模型并根据红黏土的饱和渗透系数 k_s 与土水特征曲线对其非饱和渗透系数进行了分析预测:

$$k_w = \frac{k_s [1 - (\alpha \psi^{n-1}) \cdot (1 + (\alpha \psi)^n)]^l}{(1 + (\alpha \psi)^n)^{m/2}} \quad (3)$$

式中, θ_s 为饱和含水率, θ_r 为残余含水率, α 为与土

壤进气值有关的倒数, n 为脱水速率较快的斜线段斜率, m 和 l 为系数。

2 红黏土土水特性随服役时间演变特性

2.1 室内重塑红黏土储水能力分析

图 5 为采用体积压力板仪对压实度分别为 85% (干密度 1.37 g/cm^3) 和 95% (干密度 1.53 g/cm^3) 重塑红黏土进行的 0~1500 kPa 脱湿、1500~0 kPa 吸湿土水特征曲线测试结果。由图 5 可见, 压实度 (干密度) 对重塑红黏土土水特性有影响。脱湿过程, 土体饱和时其干密度越小含水量越高; 吸湿过程, 干密度越大基质吸力 1500 kPa 所对应的残余含水率 θ_m 越高。

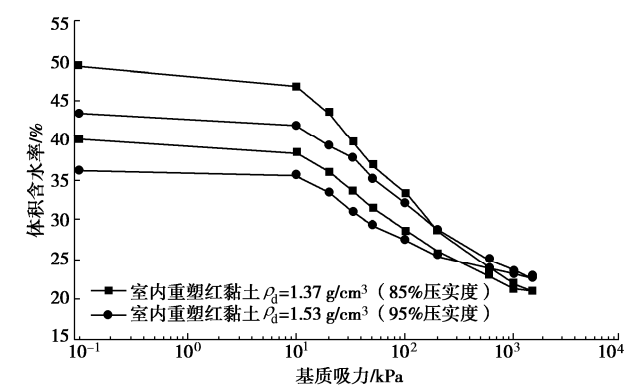


图 5 不同压实度 (干密度) 重塑红黏土土水特征曲线

Fig. 5 Soil water characteristic curves of remolded red clay soil with different degrees of compaction (dry densities)

图 6 和表 2 列出了国内外在土质覆盖层类似研究中采用的细粒土土水特征曲线和土水特征参数。图 6 分别给出了本文干密度 1.37 g/cm^3 的红黏土、文献[5]中干密度 1.45 g/cm^3 的黏性黄土、邓林恒^[20]和 Ng C W W 等^[21]在中国东南沿海类似研究中所采用的土质覆盖层细粒土土水特征曲线。表 2 中文献[22~24]研究采用的细粒土土水特征参数, 英文名是笔者在文中采用的名称, 汉语为利用文中土样颗分曲线根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011) 分类标准进行的分类。由表 2 可见: 本文红黏土与文献[5]中黏性黄土饱和含水率 θ_s 分别为 49.41% 和 47.1%, 两者接近; 基质吸力 33 kPa 所对应的田间持水率 θ_c , 红黏土为 39.85%, 黏性黄土为 34.6%, 前者稍高; 残余含水率 θ_m 红黏土为 21.09%, 黏性黄土为 12.1%, 前者较后者高 8.99%。同时由表 2 可见: 红黏土的残余含水率 θ_m 在 20% 以上, 较其它土类明显高出约 10%; 饱和含水率 θ_s 和田间持水率 θ_c 较其它土类稍高; 而田间持水率与残余含水率之间的差值定义为有效储水率 θ_a , 红黏土为 18.8%, 与粉土—粉质黏土相当, 储水能力较好。

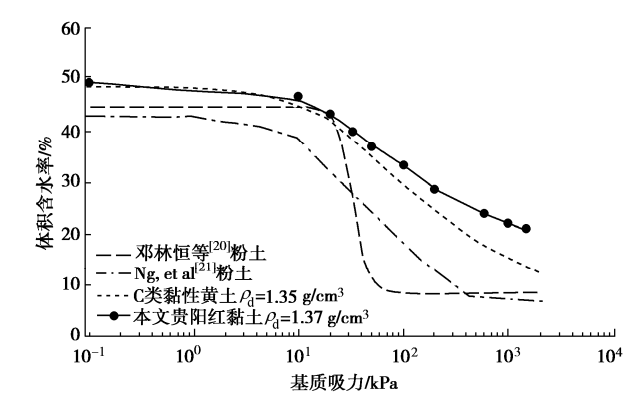


图 6 类似研究的覆盖层细粒土 SWCC

Fig. 6 SWCCs of fine-grained soil in cover

表 2 国内外类似研究覆盖层细粒土土水特征值

Table 2 Characteristic values of fine soil of cover in similar studies

文献中土类名称	土类划分	饱和含水率 θ_s /%	田间持水率 θ_c /%	残余含水率 θ_m /%	有效储水率 θ_a /%
silty sand (Khire ^[22])	粉质黏土	42.0	28.3	10.4	17.9
Fine soil (Morris ^[23])	粉质黏土	40.0	30.2	8.0	22.0
Silt loam (Scanlon ^[24])	粉质黏土	47.0	27.4	8.0	19.5
钱塘江粉土 (邓林恒 ^[20])	粉土	44.8	32.0	8.0	24.0
细粒土 (Ng C W W ^[20])	粉土	43.1	30.0	8.0	22.0
C 类黏性黄土 (焦卫国等 ^[5])	粉质黏土	47.1	34.6	12.1	22.5
本文红黏土	黏土	49.41	39.85	21.09	18.8

注: *上述土储水能力指标因干密度不同而略有差异, “土类划分”为根据中国 GB50007—2011 标准进行的分类。

2.2 现场与室内红黏土储水能力差异

图 7 是采用体积压力板仪分别对现场覆盖层取回的原状红黏土与室内重塑红黏土的土水特征曲线测试结果。由图 7 可见: 现场土和室内重塑土的土水特征曲线有一定区别。饱和含水率现场土为 49.41%, 重塑土为 49.05%, 两者几乎一致。田间持水率现场土为 36.08%, 重塑土为 39.85%, 前者较后者小 3.77%。残余含水率现场土为 18.08%, 重塑土为 21.09%, 前者较后者小 3.01%。现场土和室内重塑土干密度相近, 测试仪器和方法相同但土水特性有一定差异可能与土样过筛、干密度控制和制样压实均匀性不同有关。图 8 给出了现场土和室内重塑土土样的对比。可见: 现场大体量大范围施工而实验室精细制样使土样结构不同, 由此导致两者水力特性有一定差异。

图 9 是现场覆盖层红黏土在自然气候条件下利用张力计和 TDR 联合测试所得土水特征点与覆盖层原状土在室内利用体积压力板仪所测土水特征点的对

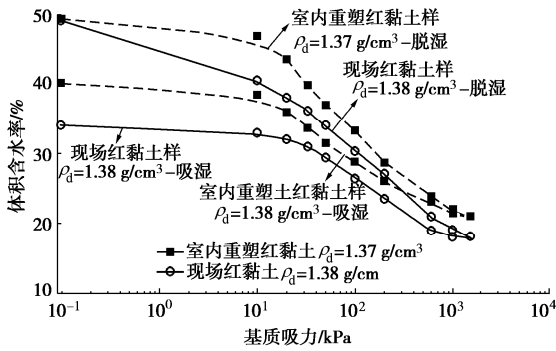


图7 近似干密度室内重塑和现场红黏土土水特征曲线对比

Fig. 7 Comparison of soil-water characteristic curves in laboratory remoulding and field red clay with approximate dry density

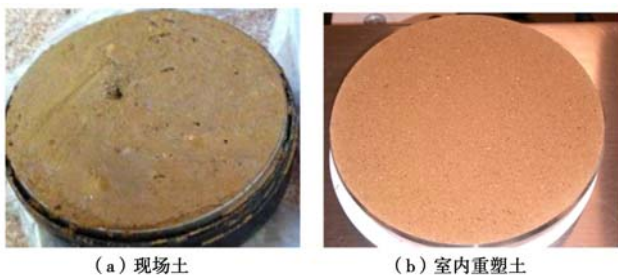


图8 现场土和室内重塑土对比

Fig. 8 Comparison between field soil and laboratory remolded soil

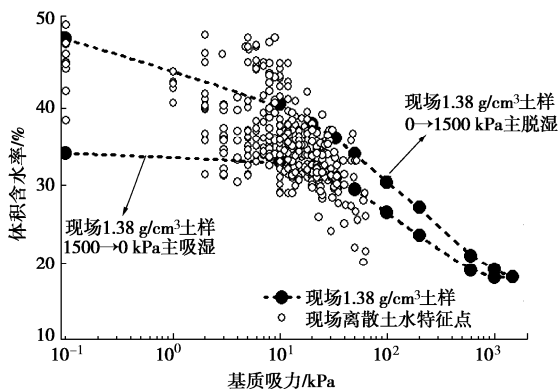


图9 不同测试方法和环境红黏土土水特征点对比

Fig. 9 Comparison of soil-water characteristic points of red clay under different environments by different test methods

比。两者土样均为现场土, 土样压实设备和方法均为现场冲击夯振动夯实, 所不同的是测试方法和测试环境。图例中蓝色空心圆点是现场覆盖层红黏土在自然气候条件下, 埋设于其中的张力计(测试基质吸力)和 TDR (测试体积含水率)联合测试而来。蓝色实心大圆点是从现场覆盖层取回的原状土样(图4)在实验室内由体积压力板仪测试而来。由图可见: 现场测试点基质吸力分布于 0~50 kPa, 体积含水率多分布于 30%~45%。当基质吸力为某一定值时, 对应有多个体积含水率相同的点; 而当体积含水率为某一定值时, 也对应有多个体积含水率相同的点。这与现场覆盖层红

黏土在自然气候作用下经历多个吸湿—脱湿滞回作用, 这些点位于滞回环上有关。此外, 现场小部分点较离散, 甚至高于室内脱湿点或低于室内吸湿点, 这与现场仪器和设备的工作稳定性或现场红黏土的结构、压实度等均匀性较差有关。

图10是#2试验区覆盖层红黏土在2016年7月的一场自然降雨条件下, 埋设于土中的张力计和 TDR 共同测试而来的土水特征点。图例中, 红色空心圆点为降雨时红黏土吸水过程的吸湿点, 红色实心圆点为降雨后天气晴朗红黏土失水过程的脱湿点。灰色实心方形点是从现场覆盖层取回的原状红黏土在实验室内由体积压力板仪测试而来的 0~1500 kPa 土水特征点。由图10可见: 本次降雨后部分现场测试点基质吸力达到或接近 0 kPa, 对应饱和体积含水率 41%~46%, 与室内测试点 49.8% 的饱和体积含水率相比, 低 3.8%~8.8%。这可能与现场红黏土有气泡, 降雨入渗水分难以将气泡完全置换而呈假饱和状态有关。此外本次降雨前初始条件: 红黏土吸湿起点初始基质吸力约 25 kPa, 而室内压力板仪测试吸湿起点初始基质吸力为 1500 kPa, 现场吸湿起点远远高于室内。由土水特征曲线的吸湿滞回特性可知: 吸湿起点不同吸湿过程土水特征曲线也不同, 进而会影响储水能力。现场吸湿起点高于室内, 故现场大部分吸湿点位于室内吸湿曲线上方。这表明自然气候条件下, 土质覆盖层的最大储水能力与降雨前土层的初始初始基质吸力或含水率有关, 其随着气候变化而变化。

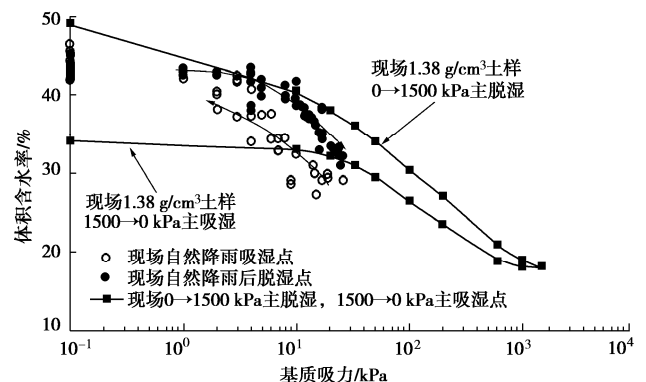


图10 现场红黏土自然降雨气候下的土水特征点

Fig. 10 Soil-water characteristic points of red clay under natural rainfall climate

2.3 现场红黏土长期服役土水特征随时间演变规律

图11是#2试验区覆盖层分别在建造结束之初 0.0 a 和服役 1.07 a, 2.03 a 从现场取回的原状红黏土在实验室内利用体积压力板仪测试而来的土水特征曲线。图12是由图11中的脱湿点基于 V-G 模型拟合而来的曲线, 表3是 V-G 模型拟合得到的饱和含水率 θ_s 、残

余含水率 θ_r 、与进气值有关的倒数 a 和脱水速率 n 四个参数值。结合图 12 和表 3 可见：覆盖层在自然气候作用下经历 0.0 a、1.07 a 和 2.03 a 的不同时间长期服役后，其土水特性会逐渐变化。饱和含水率 θ_s 由 0.0 a 的 49.05% 增加到服役 2.03 a 的 50.31%。与进气值有关的倒数 a 由 0.0 a 的 2.59 增加到服役 2.03 a 的 8.52。脱水速率 n 由 0.0 a 的 1.01 增加到服役 2.03 a 的 1.19。有效储水率 θ_a 由 0.0 a 的 16.30% 增加到服役 2.03 a 的 18.11%。图 13 是由图 11 中的吸湿点同样基于 V-G 模型拟合而来的吸湿曲线，表 4 是拟合得到的 V-G 模型参数。同样可见：从 0.0 a 到服役 1.07 a 或 2.03 a 一段时间后，4 个参数 θ_s 、 θ_r 、 a 和 n 均在发生变化。图 14 是现场覆盖层红黏土在自然气候作用下服役 2.03 a 时土体的内部结构，土层中明显可见根系活动的水平向根缝和竖向根孔。上述长期服役过程中，红黏土土水特性和参数的变化可能与植物根系生长导致的土体结构改变^[25]和根系分泌物等有机物含量增加^[26]有关。

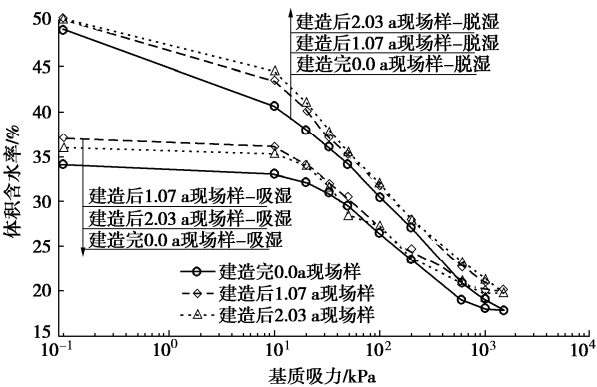


图 11 自然气候条件下红黏土不同服役时间土水特征曲线
Fig. 11 Soil-water characteristic curves of red clay in different service time under natural climate

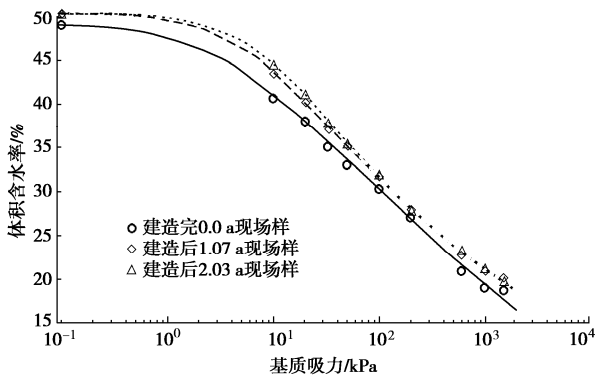


图 12 自然气候条件下不同服役时间红黏土的土水特征曲线
Fig. 12 Soil-water characteristic curves of red clay in different service time under natural climate (dehydration process)

表 3 自然气候条件下不同服役时间红黏土的土水特征曲线 V-G 模型拟合参数和有效储水率（脱湿过程）

Table 3 Fitting parameters of V-G model and effective water storage rates of SWCCs of red clay in different service time under natural climate (dehydration process)

时间	θ_s	θ_r	a	n	θ_a
现场初始	49.05	18.78	2.59	1.01	16.30
现场第一年	50.27	20.12	6.31	1.16	17.03
现场第二年	50.31	19.74	8.52	1.19	18.11

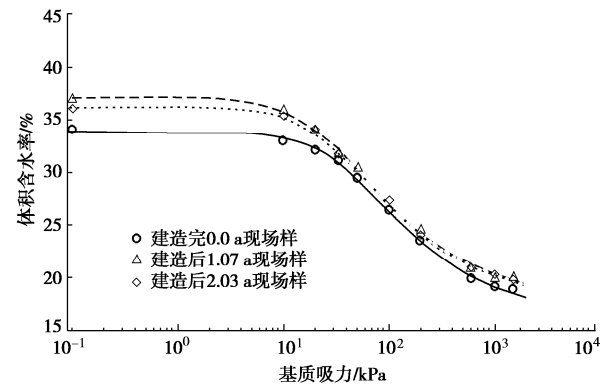


图 13 自然气候条件下不同服役时间红黏土的土水特征曲线（吸湿过程）

Fig. 13 Soil-water characteristic curves of red clay in different service time under natural climate (adding moisture process)

表 4 自然气候条件下不同服役时间红黏土的土水特征曲线 V-G 模型拟合参数和有效储水率（吸湿过程）

Table 4 Fitting parameters of V-G model and effective water storage rates of SWCCs of red clay in different service time under natural climate (adding moisture process)

时间	θ_s	θ_r	a	n	θ_a
现场初始	34.1	18.78	43.30	1.55	12.22
现场第一年	37.1	20.12	27.16	1.51	11.81
现场第二年	36.08	19.74	30.63	1.54	12.01



图 14 自然气候长期服役有植被条件下覆盖层红黏土结构
Fig. 14 Structure of red clay cover with vegetation in long-term service in natural climate

3 红黏土的渗透特性随服役时间演变规律

3.1 现场与室内红黏土饱和渗透性

室内变水头渗透试验测得压实度 85%, 干密度 1.37 g/cm^3 的重塑红黏土饱和渗透系数 k_s 为 $1.42\times 10^{-7}\text{ cm/s}$; 压实度为 90%, 干密度为 1.45 g/cm^3 的重塑红黏土饱和渗透系数 k_s 为 $1.33\times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。现场覆盖层红黏土土体夯实结束后服役 0.0 a, 开展了双套环原位入渗试验, 试验曲线如图 15。经测算现场红黏土稳定入渗系数 k_f 为 $1.94\times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。由室内和现场对比可见, 干密度都为 1.37 g/cm^3 时, 现场红黏土稳定入渗系数 k_f 为 $1.94\times 10^{-7}\text{ cm/s}$, 而室内重塑红黏土 k_s 为 $1.42\times 10^{-7}\text{ cm/s}$, 前者比后者大 36.62%。这可能与如前所述实验室、现场土样的过筛与否, 土样压实均匀性和制作精细程度不同有关。值得注意的是工程实践中上述实验室精细制样和现场大体量夯实施工质量差异是普遍存在的。在公路路基、土石坝、各类尾矿以及本文的土质覆盖层防渗设计中, 应充分注意从实验室到现场间压实土防渗性能“打折”的现象。

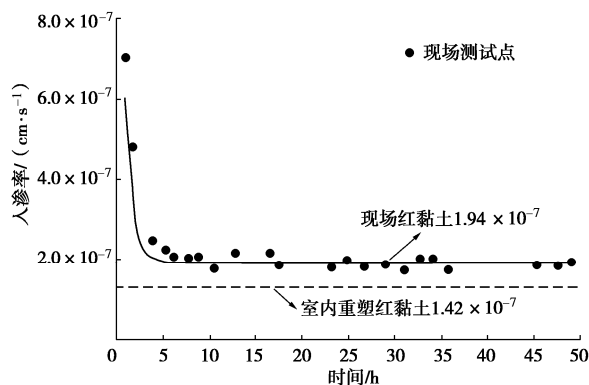


图 15 现场试验区建造之初双套环入渗系数曲线

Fig. 15 Infiltration curves of double rings at beginning of construction of field test area

3.2 无植被红黏土入渗系数随服役时间演变规律

图 16 是在#1 试验区无植被分别于建造完之初服役 0.0 a、建造结束自然气候条件下服役 0.51 a, 1.07 a 和 2.03 a 利用双套环原位试验测得的现场红黏土入渗系数曲线。表 5 列出了不同服役时间测得的稳定入渗系数。由图 16 和表 5 可见: 建造完之初服役 0.0 a, 现场稳定入渗系数为 $1.94\times 10^{-7}\text{ cm/s}$; 自然气候下服役 0.51 a 入渗系数为 $2.38\times 10^{-6}\text{ cm/s}$; 服役 1.07 a 为 $5.65\times 10^{-3}\text{ cm/s}$; 服役 2.03 a 为 $8.11\times 10^{-5}\text{ cm/s}$ 。在 2.0 a 有余的长期服役期, 红黏土稳定入渗系数从建造之初的 10^{-7} cm/s 量级增加到 1.07 a 时最大的 10^{-3} cm/s , 增大 2.9×10^4 倍; 之后到 2.03 a 又减小到 10^{-5} cm/s 量

级。图 17 给出了服役 1.07 a 时现场红黏土的开裂情况。由图 17 可见: 无植被时红黏土在干湿循环作用下易开裂, 不仅土表层分布有裂缝, 沿着土体竖直探洞往下裂缝发育到土体深部且相互交错汇集。

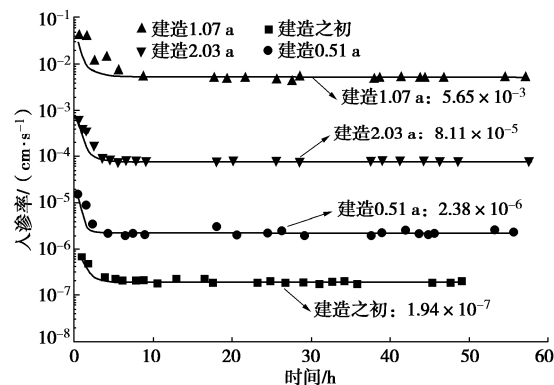


图 16 现场无植被条件不同服役时间红黏土入渗曲线

Fig. 16 Infiltration curves of double rings of red clay in different service time without vegetation on site

表 5 现场无植被红黏土不同服役时间稳定入渗系数

Table 5 Infiltration coefficients of red clay without vegetation in long-term service

时间	干密度 /(g·cm ⁻³)	稳定入渗系数 k_f /(cm·s ⁻¹)
建造之初 (0.0 a)	1.37	1.94×10^{-7}
半年 (0.51 a)	1.37	2.38×10^{-6}
1 年 (1.07 a)	1.37	5.65×10^{-3}
2 年 (2.03 a)	1.37	8.11×10^{-5}

注: 测试方法现场双套环。



图 17 长期服役过程中现场探洞观测无植被条件红黏土裂缝

Fig. 17 Observation of cracks in red clay without vegetation by on-site exploration during long-term service

3.3 有植被红黏土入渗系数随服役时间演变规律

图 18 是在#2 试验区有植被分别于建造之初服役 0.0 a、建造完自然气候条件下服役 0.51 a, 1.07 a 和 2.03 a 利用双套环原位实验测得的现场红黏土入渗系数曲线, 表 6 列出了不同服役时间测得的稳定入渗系数。由图 18 和表 6 可见: 建造完之初服役 0.0 a, 现场稳定入渗系数为 $1.94\times 10^{-7}\text{ cm/s}$; 服役 0.51 a 入渗系数为 $1.78\times 10^{-7}\text{ cm/s}$; 服役 1.07 a 为 $7.49\times 10^{-7}\text{ cm/s}$;

服役 2.03 a 为 $1.03 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。在 0.51 a 时, 稳定入渗系数较 0.0 a 的 $1.94 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 减小到 $1.78 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 这可能与植被种植初期大量生长活跃的根系在土体中生长发育增加了土体密度且植被没有经历一个完整的“茂盛—零”生长周期而无死根烂根现象有关。继续服役到 2.03 a, 稳定入渗系数从建造之初的 10^{-7} cm/s 量级增加到 10^{-6} cm/s , 增大约 10 倍。这可能与植被根系生长经历了完整生命周期, 如冬季植被枯萎部分根系坏死或红黏土历经干湿循环微裂缝进一步发育有关。图 19 给出了服役 1.07 a 时现场红黏土的开裂情况。由图可见: 表层土因有植被遮挡导致红黏土裂缝肉眼不易观察, 但沿着土体探洞竖直往下, 肉眼未见裂缝明显发育, 土体开裂情况优于同期无植被条件。

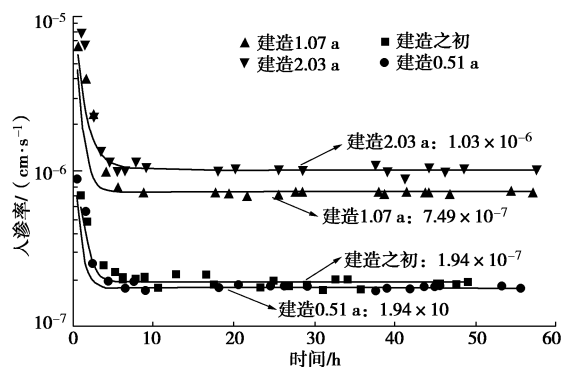


图 18 现场有植被条件不同服役时间红黏土入渗曲线

Fig. 18 Infiltration curves of double rings of red clay in different service time with vegetation on site

表 6 现场有植被红黏土稳定入渗系数随服役时间变化规律
Table 6 Infiltration coefficients of red clay with vegetation in long-term service

时间	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	稳定入渗系数 $k_f/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
建造之初 (0.0 a)	1.37	1.94×10^{-7}
半年 (0.51 a)	1.37	1.78×10^{-7}
1 年 (1.07 a)	1.37	7.49×10^{-7}
2 年 (2.03 a)	1.37	1.03×10^{-6}

注: 测试方法现场双套环。



图 19 长期服役过程中现场探洞观测有植被条件红黏土裂缝
Fig. 19 Observation of cracks in red clay with vegetation by on-site exploration during long-term service

上述红黏土覆盖层在同一填埋场, 同一自然气候条件下, 无植被裸土较有植被更易开裂。可能有如下原因: “大气-植被-土”连续系统中, 植被通过深入土中的根系将深层水向上抽吸, 这使得覆盖层水分蒸发不仅仅局限于浅表层而是整个根系深度分布区, 由此导致水分腾发作用加快。但由于植被对表层土的遮阴作用, 植草区表层土接受更低的太阳净辐射量, 温度升高和水分散失速度比无植被条件慢, 因而开裂现象得到抑制。而裸土条件因太阳的直接照射使得浅表层土体温度急剧升高、蒸发速度快水分急剧降低, 水分急剧降低的同时导致红黏土渗透系数大幅下降而使深层水分向上运移受阻, 由此导致表层土因剧烈温差和失水而开裂。上述红黏土有、无植被入渗系数和开裂情况对比表明: 植被对土质覆盖层细粒土因开裂导致的防渗性能劣化有明显的抑制作用。

3.4 红黏土非饱和和渗透特性

图 20 为红黏土的非饱和和渗透系数和文献[5]中西北黏性黄土的非饱和和渗透系数对比。本文红黏土非饱和和渗透系数是基于 V-G 模型, 根据室内重塑红黏土土水特征曲线与饱和渗透系数预测而来; 文献[5]中西北黏性黄土的非饱和和渗透系数预测方法同上。文献[5]中的黏性黄土已被证实具有良好的储水防渗性能, 可用于西北地区垃圾填埋场封场覆盖。由两者对比可见: 红黏土的饱和渗透系数在 10^{-9} m/s 或 10^{-7} cm/s 数量级, 而西安地区黏性黄土的饱和渗透系数在 10^{-7} m/s 或 10^{-5} cm/s 数量级, 前者较后者小两个数量级。从渗透性来看, 红黏土属于典型的黏土渗透性更低, 黄土属于粉质黏土渗透性稍大。但红黏土中黏粒含量高, 极易因自然气候条件下的日照-降雨循环而开裂, 使渗透系数显著增加而导致长期服役防渗性能大打“折扣”。故若采用红黏土作路基、土石坝、尾矿坝以及本文的土质覆盖层细粒土等防渗材料时, 须密切注意其开裂情况, 采取措施如种植植被并评估因开裂导致防渗性能的劣化。

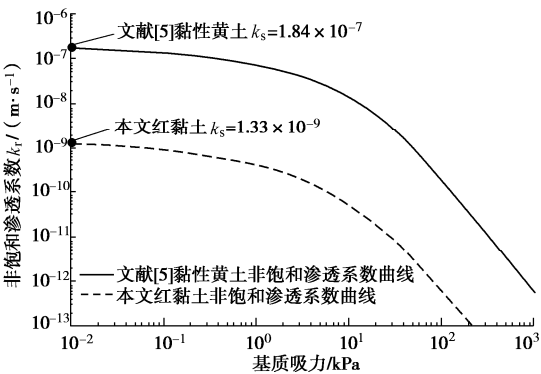


图 20 红黏土与文献[5]黏性黄土非饱和和渗透系数对比
Fig. 20 Comparison of unsaturated permeability between red clay and clay loess in paper[5]

4 结 论

在填埋场建设了红黏土覆盖层现场试验区, 对自然气候条件下的长期防渗服役水力参数开展了测试, 对比了现场与实验室单元体层面红黏土水力参数的差异, 分析比较了长期服役中有、无植被红黏土水力参数的不同变化, 获得3点结论。

(1) 红黏土饱和渗透系数在 10^{-9} m/s 或 10^{-7} cm/s 量级, 渗透性低, 防渗性能好; 有效储水率约 18.8%, 与粉土—粉质黏土相当, 储水能力好。长期服役中, 红黏土易开裂使渗透系数显著增加导致防渗性能大幅下降。工程实践中若用红黏土作防渗材料, 须采取措施并评估因开裂导致防渗性能的劣化。

(2) 因实验室标本精细制样和现场大体量大范围施工导致土样结构有显著差异。干密度相近时, 现场红黏土入渗系数比室内重塑红黏土饱和渗透系数大 36.62%。鉴于实验室和现场压实施工间差异的普遍性, 工程实践中应充分考虑从实验室到现场间压实黏土防渗性能的“打折”现象。

(3) 长期服役过程中, 无植被时红黏土覆盖层因开裂导致入渗系数较建设之初最大增加 2.9×10^4 倍; 有植被时较建设之初或减小或增加, 最大增加 10 倍。植被对土质覆盖层细粒土因开裂导致防渗性能劣化有明显的抑制作用。

参考文献:

- [1] 孔 雀. 废木灰处理红黏土的水力性能研究[J]. 公路工程, 2016, **41**(4): 270 - 273. (KONG Que. Research on the hydraulic performance of red clay treated with waste wood ash[J]. Highway Engineering, 2016, **41**(4): 270 - 273. (in Chinese))
- [2] 谭邦宏. 红黏土作为垃圾填埋场防渗垫层的研究进展[J]. 四川建筑, 2015, **35**(6): 107 - 108, 111. (TAN Bang-hong. Research progress of red clay as impermeable cushion in landfill[J]. Sichuan Architecture, 2015, **35**(6): 107 - 108, 111. (in Chinese))
- [3] 彭玉林, 龚爱民, 孙海燕, 等. 垃圾填埋场中改性红黏土防渗料的性能研究[J]. 人民长江, 2011, **42**(增刊 2): 163 - 165, 169. (PENG Yu-lin, GONG Ai-min, SUN Hai-yan, et al. Study on properties of modified red clay anti-seepage materials in landfill sites[J]. People's Yangtze River, 2011, **42**(S2): 163 - 165, 169.
- [4] 万 勇, 薛 强, 赵立业, 等. 干湿循环对填埋场压实黏土盖层渗透系数影响研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 679 - 686, 693. (WAN Yong, XUE Qiang, ZHAO Li-ye, et al. Study on the influence of dry-wet cycle on the permeability coefficient of compacted clay cover in landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 679 - 686, 693. (in Chinese))
- [5] 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 Wei-guo. Water Storage and Release of Loess-Gravel Cover and Seepage Prevention Design Method in Northwest of China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [6] STORMONT J C. Unsaturated drainage layers for diversion of infiltrating water[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, **123**: 364 - 366.
- [7] STORMONT J C. The effectiveness of two capillary barriers on a 10% slope[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1996, **14**(4): 243 - 267.
- [8] STORMONT J C, MORRIS C E. Method to estimate water storage capacity of capillary barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, **124**(6): 297 - 303.
- [9] KHIRE M, BENSON C, BOSSCHER P. Field-scale comparison of capillary and resistive landfill covers in an arid climate[C]// 14th Annual American Geophysical Union Hydrology Days, 1994, Colorado: 5 - 8.
- [10] BENSON C, SAWANG SURIYA A, TRZEBIATOWSKI B, et al. Pedogenic effects on the hydraulic properties of water balance cover soils[J]. Journal of Geotech and Geoenv Engr, 2007, **133**: 349 - 359.
- [11] 张文杰, 耿 潇. 垃圾填埋场毛细阻滞型蒸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))
- [12] 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))
- [13] 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**: 1146 - 1164.
- [14] 张文杰, 林 午, 董林兵. 垃圾填埋场毛细阻滞型蒸发

- 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))
- [15] 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 Wei-guo, ZHAN Liang-tong, JI Yong-xin, et al. Experimental study on the effect of vegetation on water transport and storage in soil cover[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1268 - 1275. (in Chinese))
- [16] 邱清文, 张文杰, 程泽海. 湿润地区垃圾填埋场蒸发蒸腾覆盖层参数分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(增刊 1): 283 - 289. (QIU Qing-wen, ZHANG Wen-jie, CHENG Ze-hai. Parameter analysis of evapotranspiration overburden of landfill in humid area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(S1): 283 - 289. (in Chinese))
- [17] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, **44**(5): 892 - 898.
- [18] 焦卫国, 詹良通, 季永新, 等. 黄土-碎石毛细阻滞覆盖层储水能力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1149 - 1157. (JIAO Wei-guo, ZHAN Liang-tong, JI Yong-xin, et al. Field tests on water storage capacity of loess-gravel capillary barrier covers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 1149 - 1157. (in Chinese))
- [19] 詹良通, 焦卫国, 孔令刚, 等. 黄土作为西北地区填埋场覆盖层的可行性及设计厚度分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3361 - 3369. (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))
- [20] 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))
- [21] 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**(4): 210 - 221.
- [22] KHIRE M V, BENSON C H, BOSSCHER P J. Capillary barriers: design variables and water balance[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**: 695 - 708.
- [23] MORRIS C E, STORMONT J C. Evaluation of numerical simulations of capillary barrier field tests[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1998, **16**(3): 201 - 213.
- [24] SCANLON B R, CHRISTMAN M, REEDY R C, et al. Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions[J]. Water Resour Res, 2002, **38**(12): 1323.
- [25] NG C W W, NI J J, LEUNG A K, et al. Effects of planting density on tree growth and induced soil suction[J]. Géotechnique, 2016, **66**(9): 711 - 724.
- [26] NI J J, LEUNG A K, NG C W W. Investigation of plant growth and transpiration-induced suction under mixed grass-tree conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(4): 561 - 573.