



稳定化垃圾焚烧飞灰的水力-力学特性 测试及其堆体稳定性分析

钱剑文¹, 徐 辉^{1,2}, 缪建冬¹, 陈 萍¹

(1.浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2.浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘 要: 对稳定化垃圾焚烧飞灰(稳定化飞灰)填埋场进行稳定性评估是保障填埋场长期安全运营的关键,而稳定化飞灰的水力-力学特性是进行稳定性评估的重要参数。为掌握稳定化飞灰在水力-力学特性方面的特征,以南京某稳定化飞灰填埋场为工程对象,测试了 0~11 个月龄期范围内稳定化飞灰的水力-力学特性,并与生活垃圾进行了对比。研究发现:稳定化飞灰的重度为 11.0~12.3 kN/m³,内摩擦角为 32.9°~34.2°,两者的龄期效应均不明显;黏聚力在 14.0~19.5 kPa 之间,随龄期的增长呈下降趋势;随着埋深的增大,残余体积含水量呈增大趋势,进气值呈减小趋势,而土水特征曲线变陡;当初始孔隙比为 1.60~2.15 时,饱和渗透系数为 $9.20 \times 10^{-6} \sim 3.82 \times 10^{-5}$ m/s。在此基础上,采用 Geo-Studio 软件分析了降雨、坡高、坡比、渗滤液水位等对稳定化飞灰堆体稳定性的影响。结果发现:平均型、前峰型和中峰型降雨模式在降雨前期对稳定性影响较大,后峰型降雨模式在降雨后期对稳定性影响较大。随着填埋高度或坡比的增大,稳定安全系数逐渐减小。随着相对渗滤液水位的提高,稳定安全系数显著下降且下降速度越来越快。稳定化飞灰在水力-力学特性及其龄期效应方面均与生活垃圾存在差异,对稳定化飞灰填埋堆体进行稳定性评估时,不可盲目采用生活垃圾填埋场相关规范及推荐参数。

关键词: 稳定化垃圾焚烧飞灰;水力-力学特性;堆体稳定性;降雨;坡高;坡比;渗滤液水位

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2021) 01-0126-10

Hydraulic-mechanical characteristic test of stabilized MSWI fly ash and stability analysis of its pile

QIAN Jianwen¹, XU Hui^{1,2}, MIAO Jiandong¹, CHEN Ping¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The stability assessment of stabilized MSWI (municipal solid waste incineration) fly ash landfills plays a crucial role in keeping the long-term safe operation of landfills, and the hydraulic-mechanical characteristics of stabilized fly ash are the key parameters in the stability assessment. To grasp the hydraulic-mechanical characteristics of stabilized fly ash, a stabilized fly ash landfill in Nanjing was chosen as a research object to test the hydraulic-mechanical characteristics at filling ages of 0~11 months, and the comparison with household waste was conducted. The test results showed that, the weight of stabilized fly ash was in the range of 11.0~12.3 kN/m³, and the internal friction angle was ranged from 32.9° to 34.2°. The filling age effect of both was not obvious. The cohesion of stabilized fly ash was in the range of 14.0~19.5 kPa, and decreased with the increase of filling age. As the burial depth of stabilized

收稿日期: 2020-08-06 网络出版日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578508); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2015R3002)

作者简介: 钱剑文(1995—), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究。

通信作者: 徐 辉, E-mail: xuhui@zstu.edu.cn

fly ash increased, the residual volume water content increased, and the air entry value decreased, while the soil water characteristic curve became steeper. When the initial void ratio was 1.60~2.15, the saturated permeability coefficient was $9.20 \times 10^{-6} \sim 3.82 \times 10^{-5}$ m/s. On this basis, the effects of rainfall, slope height, slope rate and leachate level on the pile stability of stabilized fly ash were analyzed by using the Geo-Studio software. It was found that, in the earlier stage of rainfall, three rainfall types (average, front peak and middle peak) had a significant impact on the pile stability, while in the later stage of rainfall, the back-peak rainfall type affected the pile stability most. The safety factor decreased gradually as the slope height or the slope rate increased. As the relative leachate level increased, the safety factor declined significantly and the speed of falling became faster and faster. Stabilized fly ash differed from household waste in terms of hydraulic-mechanical characteristics and aging effect. During assessing the stability of stabilized fly ash landfill system, relevant specification and the recommended parameters of MSW landfills cannot be arbitrarily adopted.

Key words: stabilized MSWI (municipal solid waste incineration) fly ash; hydraulic-mechanical characteristics; pile stability; rainfall; slope height; slope rate; leachate level

0 引言

随着城市化进程逐步推进,城市人口迅速增加,我国城市生活垃圾产量以每年 8%~10% 的速度不断增长^[1]。目前,我国处理生活垃圾以填埋、焚烧和堆肥的方式为主^[2]。自“十三五”规划以来,随着各地大力建设生活垃圾焚烧厂,垃圾焚烧处理的规模逐年提高。据统计,我国 2017 年生活垃圾焚烧量达到 8463 万吨,飞灰产量按焚烧垃圾量的 3% 保守计算,约为 250 万吨^[3]。垃圾焚烧产生的飞灰因重金属含量高而被列为危险废弃物,主要处置途径有填埋处理和资源化利用。现阶段,飞灰经过固化/稳定化后进行填埋是较为安全稳妥的处置方式,在我国应用较为广泛^[4]。稳定化垃圾焚烧飞灰(稳定化飞灰)在填埋场堆填过程中,容易发生失稳情况,这会导致人员伤亡、设施毁坏、渗滤液污染等,因此需要对填埋场进行稳定性评估。

掌握稳定化飞灰的水力-力学特性是进行填埋场稳定性分析的重要前提。目前国内外对稳定化飞灰的研究主要集中在重金属浸出毒性方面^[5-9],如 Zhang 等^[5]采用不同种类的药剂对生活垃圾焚烧飞灰进行固化稳定化处理,经浸出毒性试验后发现,稳定化处理过后飞灰中的重金属含量达到了卫生填埋的标准。然而,关于稳定化飞灰水力-力学特性的研究较少,主要研究是:徐辉等^[10]通过开展系列室内试验,对稳定化飞灰的工程特性进行了研究,得出了土工特性参数随龄期和埋深的变化规律。此外,由于我国稳定化飞灰填埋场的建设刚刚起步,存在设计标准和规范缺失等问题^[11]。目前填埋场稳定性

评估主要参考生活垃圾填埋场的相关标准与规范,考虑到稳定化飞灰与生活垃圾在水力-力学特性方面可能存在较大差异,因此上述做法可能存在欠妥之处。综上所述,为更好地指导稳定化飞灰填埋场的设计、运营和管理,需要全面掌握稳定化飞灰和生活垃圾在水力-力学特性方面的异同点,深入研究稳定化飞灰堆体的稳定性及其关键控制因素。

本文通过现场钻孔取样获得了不同龄期的稳定化飞灰试样,测试了稳定化飞灰的重度、抗剪强度、饱和渗透系数和土水特征曲线,揭示了其与生活垃圾的异同点,分析了降雨入渗、坡高、坡比、渗滤液水位等因素对稳定化飞灰堆体稳定性的影响,最后对稳定化飞灰填埋场的建设提出了工程建议。

1 工程概况

本文以南京某稳定化飞灰填埋场为工程对象。该填埋场分两期建设,其平面图和剖面图分别如图 1 和图 2 所示。底部衬垫系统主要由导排层、防渗层和地下水检测层组成,总厚度为 1.2 m 左右,其上填埋库区通过临时隔堤划分为 3 个填埋单元。一期工程主要填埋区域为单元 I 和单元 II,设计填埋高度为 15.0 m,分层填埋厚度为 3.0 m,边坡坡比为 1:2.5,设计填埋库容为 30 万 m³,服役年限为 5 年;二期工程在一期工程的基础上扩大填埋面积,填埋区域主要为单元 I 和单元 II 上部以及单元 III,整个填埋库区依靠周围山体联合堆高,设计封场高度为 30.0 m,设计填埋库容为 270 万 m³,服役年限为 25 年。为了便于后续对比分析,生活垃圾填埋场的填埋进程与该稳定化飞灰填埋场保持一致。

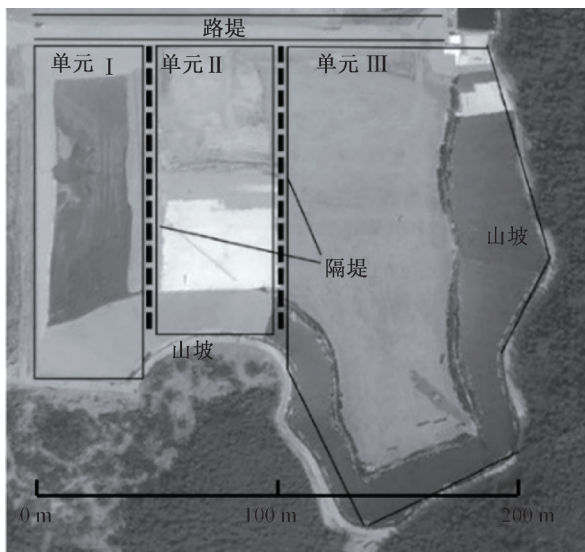


图1 稳定化飞灰填埋场平面图

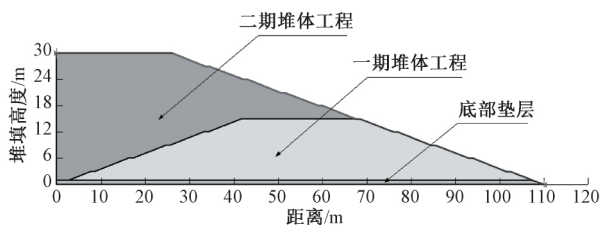


图2 稳定化飞灰填埋场剖面图

2 稳定化飞灰的水力-力学特性测试及分析

2.1 力学特性

通过钻孔获取了该填埋场不同龄期的稳定化飞灰试样,对试样的重度、抗剪强度等物理力学性质进行了测试。采用钻孔取样体积-质量法测试稳定化飞灰的重度,对于龄期为0,1,3,6,11个月的稳定化飞灰,其相应重度分别为11.1,12.3,11.2,11.0 kN/m³和11.8 kN/m³。由此可见,稳定化飞灰的重度随龄期无明显变化规律。采用国产STSZ-2型三轴仪测试了稳定化飞灰的抗剪强度参数,对于龄期为0,1,3,6,11个月的稳定化飞灰,其内摩擦角 φ 分别为34.1°,33.7°,34.2°,33.3°和32.9°,黏聚力 c 分别为19.5,19.0,18.1,15.2 kPa和14.0 kPa。经数据拟合后得出黏聚力随龄期的变化规律,即 $c=19.4-0.53t$,其中 t 表示稳定化飞灰的填埋龄期(月)。由此可见,稳定化飞灰的内摩擦角的龄期效应不明显,而黏聚力随龄期的增长呈减小的趋势,这是因为稳定化飞灰的黏聚力主要来源于颗粒胶结作用,这种胶结作用在填埋场环境下逐渐遭到破坏,从而造成黏聚力下降^[12-13]。综合上述分析得到不同龄期稳定化飞灰的抗剪强度参数,如表1所示。

表1 稳定化飞灰和生活垃圾的物理力学参数

材料类型	填埋龄期/年	重度 γ / (kN · m ⁻³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
稳定化飞灰	1	11.5	16.2	33.6
	2		9.9	
	3		3.5	
	>4		0.0	
生活垃圾	0~5	11.0	23.7	11.7
	5~10	12.5	15.7	24.4
	10~13	13.5	0.0	26.0
	>13	14.0	0.0	26.0

Zhan等^[14]和陈云敏等^[15]在苏州七子山生活垃圾填埋场进行了钻孔取样,共5个钻孔,覆盖龄期范围为0~13年。其中31个试样进行了重度测试,26个试样进行了三轴剪切强度试验,试验结果如表1所示。从表1可见,随着填埋龄期的增长,生活垃圾的重度呈现明显的增大趋势,这主要是因为生活垃圾中的轻质有机物组分不断被降解,渣土等重质组分含量逐渐提高,从而重度 γ 增大。此外,随着填埋龄期的增长,生活垃圾的内摩擦角 φ 逐渐增大,而黏聚力 c 呈下降趋势。这是因为生活垃圾的黏聚力主要由纤维状组分所贡献,随着生化降解作用的进行,部分纤维状物质逐渐变为颗粒状物质,从而导致其黏聚力减小,内摩擦角增大^[16]。

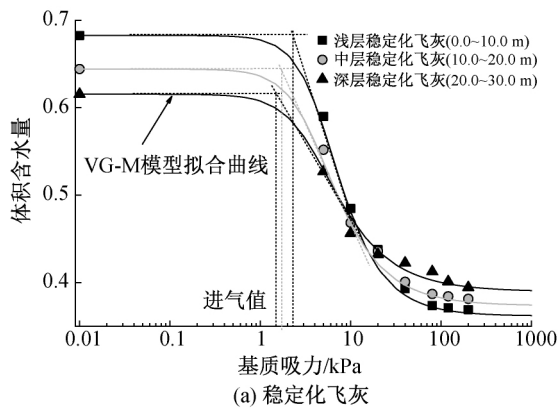
2.2 水力特性

2.2.1 土水特征曲线

本试验采用Cat. No. 1600压力板仪测试了该填埋场稳定化飞灰试样在干燥过程中的土水特征曲线。试样直径为71 mm,高度为19 mm,共设置3组,初始孔隙比分别为2.15,1.81和1.60,模拟浅层(0.0~10.0 m)、中层(10.0~20.0 m)和深层(20.0~30.0 m)稳定化飞灰试样的密实状态,气压施加顺序依次为5.0,10.0,20.0,50.0,80.0,120.0 kPa和160.0 kPa。试验原理采用轴平移技术:试样底部的陶土板只排水不排气,同时陶土板下端的排水管与大气相通,保证试样中的孔隙水压力为零,当试样达到平衡状态时,该级气压就等于基质吸力。试验时首先向压力室施加气压,使试样中的孔隙水排出,直至达到平衡状态,即在24 h内试样的质量含水率变化小于0.2%,然后利用称重法测量试样的体积含水量,接着施加下一级气压,重复上述步骤。最后一级气压作用下的试验结束后,将试样取出并用烘干法测试其体积含水量,用于反推前面各级气压作用下试样的体积含水量。根据试验得到的稳定化飞灰试样的基质吸力-体积含水量数据点,如图3(a)所示。利用VG-M模型^[16]对试验数据点进行拟合,拟

合参数见如表 2。VG-M 模型可用式(1)表示:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |bs|^n)^m} \quad (1)$$



其中: θ 为体积含水量; θ_s 为饱和体积含水量; θ_r 为残余体积含水量; s 为基质吸力, kPa; b , n , m 为模型参数; $n = 1/(1-m)$ 。

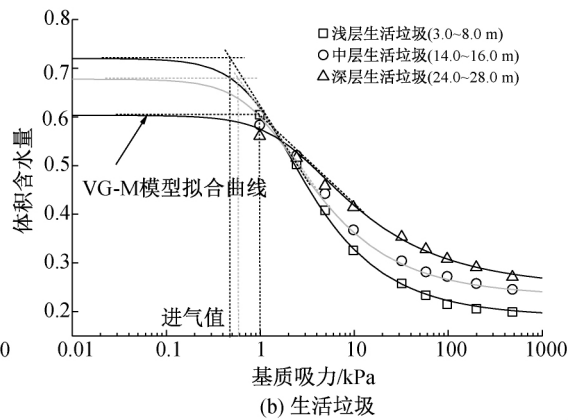


图 3 稳定化飞灰和生活垃圾的土水特征曲线

张文杰等^[17]利用 Cat. No. 1600 压力板仪对苏州七子山填埋场深度分别为 3.0~8.0 m(浅层)、14.0~16.0 m(中层)和 24.0~28.0 m(深层)的垃圾土进行了土水特征曲线测试,初始孔隙比分别为 2.57、2.10 和 1.52。根据试验结果得到的垃圾土的基质吸力-体积含水量数据点,如图 3(b)所示。利用 VG-M 模型对试验数据点进行拟合,拟合参数如表 2 所示。

表 2 VG-M 模型参数

材料类型	埋深/m	θ_s	θ_r	a	m
稳定化飞灰	浅层 0.0~10.0	0.6825	0.3618	0.2057	0.5523
	中层 10.0~20.0	0.6441	0.3735	0.2553	0.5126
	深层 20.0~30.0	0.6154	0.3896	0.2637	0.4837
生活垃圾	浅层 3.0~8.0	0.7199	0.1900	0.8373	0.3864
	中层 14.0~16.0	0.6774	0.2385	0.7412	0.3729
	深层 24.0~28.0	0.6032	0.2584	0.5383	0.3244

从表 2 可见,稳定化飞灰的残余体积含水量 θ_r 介于 0.362~0.390 之间,高于生活垃圾的 0.190~0.258。这主要是因为稳定化飞灰的粒径要远小于生活垃圾,粒径越小,则吸持水分的能力越强。此外,随着埋深的增大,稳定化飞灰和生活垃圾的 θ_r 均呈现增大趋势。这主要是因为试样的埋深越大,则孔隙比越小,从而残余持水量越大。从图 3 可见,稳定化飞灰的进气值介于 1.8~2.1 kPa 之间,略高于生活垃圾的 0.5~0.8 kPa。这一现象也与稳定化飞灰的粒径小于生活垃圾有关。此外,随着埋深的增加,稳定化飞灰和生活垃圾的土水特征曲线更缓。这主要是因为浅层试样存在密实度较低、粒径较大等性质,从而大孔隙特征更加明显。

2.2.2 非饱和和渗透系数曲线

利用常水头试验测试了该填埋场稳定化飞灰试

样的饱和渗透系数。试样的直径为 10 cm,高度约 11 cm。当试样的初始孔隙比分别为 2.15、1.81 和 1.60 时,相应的饱和渗透系数依次为 3.82×10^{-5} 、 1.70×10^{-5} m/s 和 9.20×10^{-6} m/s。基于土水特征曲线,采用 VG-M 模型对稳定化飞灰的非饱和渗透系数进行了计算,计算公式为:

$$k_w = k_{rw} k_s \quad (2)$$

$$k_{rw} = \theta_e^{\gamma_v} [1 - (1 - \theta_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

其中: k_w 、 k_{rw} 和 k_s 分别为液相非饱和渗透系数、液相相对渗透系数和液相饱和渗透系数, m/s; θ_e 为有效体积含水量; γ_v 是与孔隙连通性和曲折性相关的模型参数。根据 Feng 等^[18]对参数 γ_v 的总结分析,这里对稳定化飞灰取值 $\gamma_v = 0.5$ 。根据上述方法得到的稳定化飞灰的非饱和渗透系数曲线如图 4(a)所示。

张文杰等^[17]对苏州七子山填埋场浅层、中层和深层垃圾土进行了饱和-非饱和渗透试验。根据试验结果得到的垃圾土的非饱和渗透系数曲线如图 4(b)所示。当试样的初始孔隙比分别为 2.65、2.16 和 1.78 时,相应的饱和渗透系数依次为 4.81×10^{-4} 、 3.50×10^{-5} m/s 和 3.56×10^{-6} m/s。

从图 4 可见,在相当的初始孔隙比条件下,中层稳定化飞灰和中层生活垃圾的饱和渗透系数较为接近。随着基质吸力的增大,浅层稳定化飞灰和生活垃圾的液相渗透系数均下降得比深层试样要快,即渗透系数曲线更陡,这一变化规律与土水特征曲线一致,也是由试样的持水特性差异所造成的。

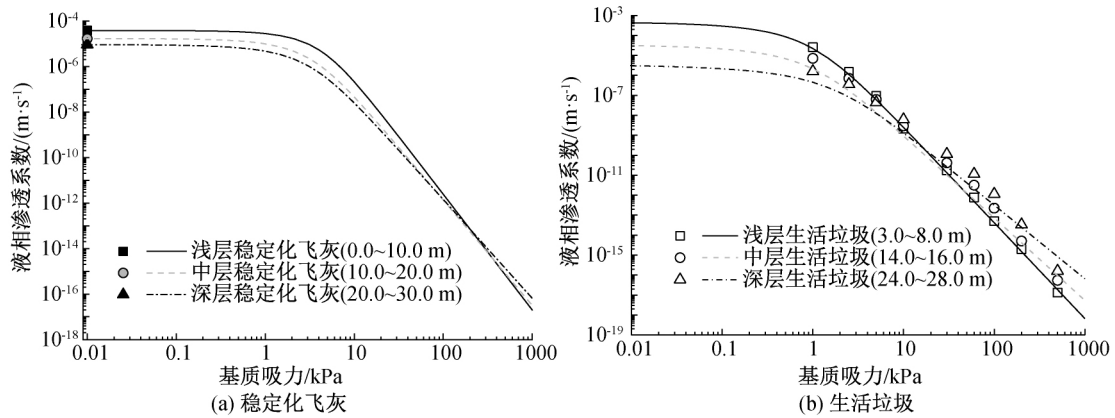


图4 稳定化飞灰和生活垃圾的非饱和渗透系数曲线

3 稳定化飞灰填埋堆体稳定性分析

3.1 稳定性分析方法

3.1.1 模型建立

利用 Geostudio 软件建立如图 5 所示的模型,图中箭头方向表示堆体的堆填次序,深色部分表示一期堆填工程,堆填顺序为 1 层至 5 层,其坡高为

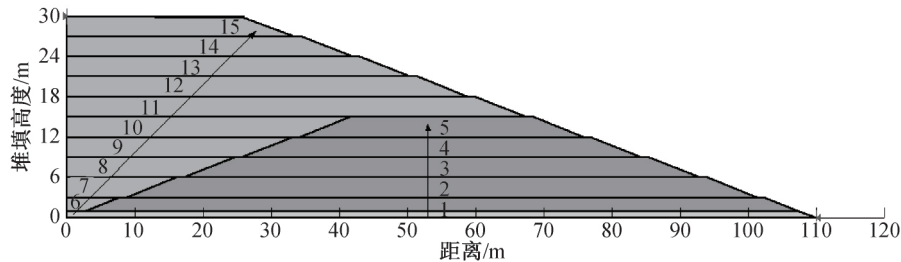


图5 填埋堆体堆填顺序示意图

3.1.2 底部垫层

该飞灰填埋场底部垫层自上而下依次为导排层、防渗层和地下水检测层,总厚度约 1.2 m。为简化计算,将整个底部衬垫系统假设为厚度为 1.2 m 的土层,该土层的抗剪强度参数取值为:内摩擦角 $\varphi=25.0^\circ$,黏聚力 $c=0.0 \text{ kPa}$ ^[19]。由于稳定化飞灰中含有大量钙离子和还原性物质,两者在适宜条件会产生化学反应生成碳酸钙沉淀,进而使底部衬垫系统中的导排层发生淤堵,这会导致其渗透系数降低。在本文计算中,正常工作时底部衬垫的渗透系数取 $3.00 \times 10^{-4} \text{ m/s}$,发生淤堵后的渗透系数取 $1.00 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ^[20]。

3.1.3 边界条件

当降雨强度小于土体入渗能力时,按照流量边界处理,流量大小等于降雨强度;当降雨强度大于土体的入渗能力时,按照定水头边界处理,水头值等于地面高程^[21-22]。按照该地区特大暴雨的雨量等级进行换算后,可得降雨强度约为 $2.30 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,取

15.0 m,坡比为 1:2.5,底部宽度为 110.0 m,平台宽度为 1.0 m。浅色部分表示二期工程,在一期工程的基础上继续堆填至 30.0 m 高度,堆填顺序为 6 层至 15 层。一期工程服役年限为 5 年,平均每年堆填一层;二期工程服役年限为 20 年,平均每 2 年堆填一层;各层的基本参数按照填埋龄期进行取值。

降雨峰值为 $2.00 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。考虑到填埋场底部防渗层的存在,将填埋场衬垫底部和堆体左侧都设定为不透水边界。具体边界条件设置如图 6 所示,其中:ed 和 ae 为不透水边界;ab 和 bc 为流量边界;cd 为自由渗出边界。

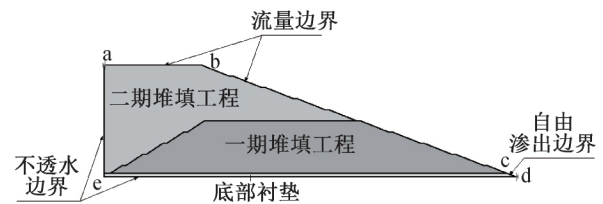


图6 堆体边界条件示意图

3.1.4 计算方法

稳定性计算方法采用典型的极限平衡法——Morgenstern-Price 法,该方法考虑了所有的条间力并满足所有的静力平衡条件,其中力矩和力平衡安全系数计算方法分别为^[23]。

$$F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - uB) R \tan \varphi')}{\sum W_x - \sum N f \pm \sum D d} \quad (5)$$

$$F_t = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \varphi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad (6)$$

其中： F_m 为力矩平衡安全系数； F_t 为力平衡安全系数； c' 为有效黏聚力，kPa； φ' 为有效内摩擦角； u 为孔隙水压力，kPa； N 为土条底部的法向力，kN； W 为土条自重，kN； D 为集中点荷载，kN； β ， R ， x ， f ， d ， ω 为几何参数； α 为土条底部倾角。

根据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ 176—2012)规定，本文研究的稳定化飞灰填埋场和生活垃圾填埋场堆高为 30.0 m，安全等级为二级，正常运用条件下最小安全系数应大于 1.30。

3.1.5 计算工况

为分析不同降雨类型、坡度和高度以及渗滤液

水位高度对填埋场堆体稳定性的影响，共设计四种工况，如表 3 所示。标准工况不考虑降雨入渗的影响，坡比为 1:2.5，堆填高度为 30.0 m，初始相对渗滤液水位(渗滤液水位高度与堆体厚度的比值)取值 1/2；工况 1 主要用于研究不同降雨雨型对堆体稳定性的影响，坡比为 1:2.5，填埋高度为 30.0 m，初始相对渗滤液水位为 1/2，不同的降雨模式如图 7 所示^[24-25]；工况 2 主要用于研究坡高、坡比对边坡稳定性的影响，其中坡比分别设定为 1:2，1:2.5，1:3，坡高随堆填顺序依次变化，初始相对渗滤液水位为 1/2；工况 3 主要用于研究渗滤液水位对堆体稳定性的影响，坡比为 1:2.5，填埋高度为 30.0 m，初始相对渗滤液水位分别为 0，1/6，1/3，1/2，2/3。工况 3 底部衬垫的渗透系数按照发生淤堵后进行取值，其余各工况底部衬垫的渗透系数均取值 3.00×10^{-4} m/s。

表 3 堆体稳定性计算工况

编号	降雨类型	坡比	高度/m	相对渗滤液水位
标准工况	无	1:2.5	30.0	1/2
工况 1	平均/前峰/中峰/后峰	1:2.5	30.0	1/2
工况 2	无	1:2/1:2.5/1:3	3.0~30.0	1/2
工况 3	无	1:2.5	30.0	0~2/3

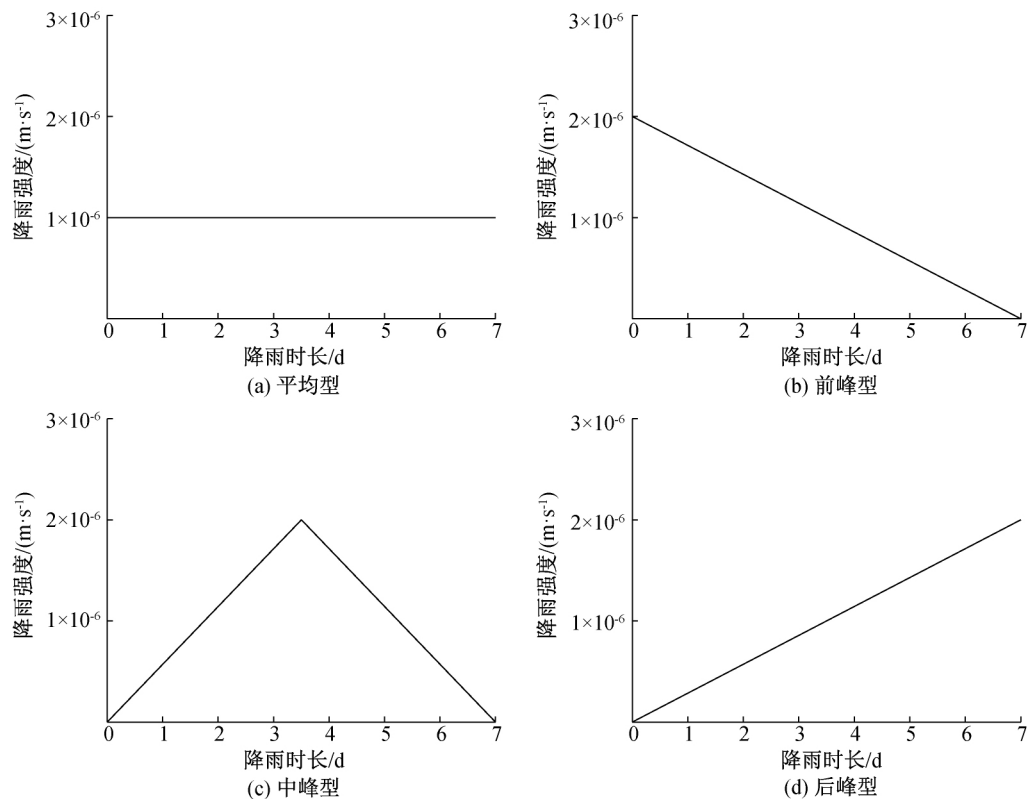


图 7 四种经典降雨模式的降雨强度曲线

3.2 稳定性计算结果分析

3.2.1 降雨条件对堆体稳定性的影响

不同降雨雨型条件下堆体的稳定性计算结果如图8所示。随着持续降雨时长的增大,稳定化飞灰堆体的稳定安全系数呈现先下降后逐渐稳定的趋势,安全系数最小值出现在后峰型降雨模式下降雨7 d后,为0.72。而生活垃圾堆体的安全系数呈现先基本不变后逐渐下降的趋势,安全系数最低值出现在中峰型降雨模式下降雨7 d后,为0.85。在降雨前期(1~4 d),不同的降雨模式对稳定化飞灰堆体安全的影响程度不同,影响程度从大到小依次为:前峰型、平均型、中峰型、后峰型。在降雨后期(4~7 d),平均型、前峰型以及中峰型降雨模式对稳定化飞灰堆体稳定性影响较小,而在后峰型降雨模式下,稳定安全系数下降速率较大。对于生活垃圾堆体而言,持续降雨时长达到4 d后,其安全系数才出现明显下降,其中下降最为显著的是中峰型和后峰型降雨模式。

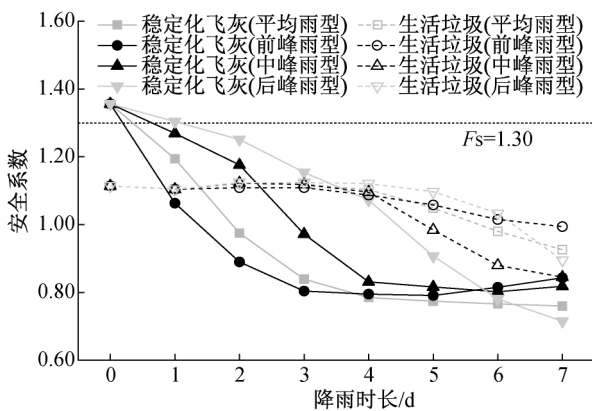


图8 堆体安全系数 F_s 变化曲线

从图3和图4可以看出,稳定化飞灰的土水特征曲线脱水斜率大于生活垃圾,且浅层稳定化飞灰的饱和和渗透系数小于浅层生活垃圾。包承纲等^[26]认为,对于给定的初始条件,降雨入渗过程中 k_s/δ (δ 为土水特征曲线的脱水斜率) 值越大,湿润锋前进得越快,而 $q\delta/k_s$ (q 为降雨量) 值越大,浅层土体中孔隙水压力上升(或吸力下降)越大,雨水入渗使得表层土首先饱和或接近饱和,由于饱和土体的液相渗透系数大于非饱和土,这可能导致坡内产生滞水层,对边坡的稳定是很不利的。因此,生活垃圾堆体内部湿润峰前进较快,而稳定化飞灰堆体内部湿润峰前进较慢,容易在湿润区形成滞水层,从而造成了稳定化飞灰堆体的安全系数在降雨初期出现明显下降。当生活垃圾堆体内部湿润峰到达渗滤液水位面时,渗滤液水位逐渐升高,安全系数逐渐下降。稳

定化飞灰浅层土体以及生活垃圾堆体初始水位线处土体的孔隙水压力随降雨时长的变化过程如图9所示。不同降雨模式对堆体内部孔隙水压力的影响差异性较大,且变化趋势与安全系数呈负相关。对于稳定化飞灰堆体,浅层土体的孔隙水压力基本呈现先上升后逐渐稳定的变化趋势,平均型、前峰型、中峰型和后峰型降雨模式的最终孔隙水压力分别为80.7, 70.8, 74.1, 86.0 kPa,最大差值为15.3 kPa。对于生活垃圾堆体而言,初始水位线处土体的孔隙水压力呈现先基本不变后逐渐下降的趋势,平均型、前峰型、中峰型和后峰型降雨模式的最终孔隙水压力分别为51.5, 41.2, 55.6, 45.2 kPa,最大差值为14.4 kPa。不同降雨模式下,不论是稳定化飞灰堆体还是生活垃圾,随着表面雨水的渗入,堆体的稳定性均受到较大的影响。因此,在填埋场堆填作业中,要加强运营管理,做好雨污分流、临时覆盖等,减少雨水入渗。

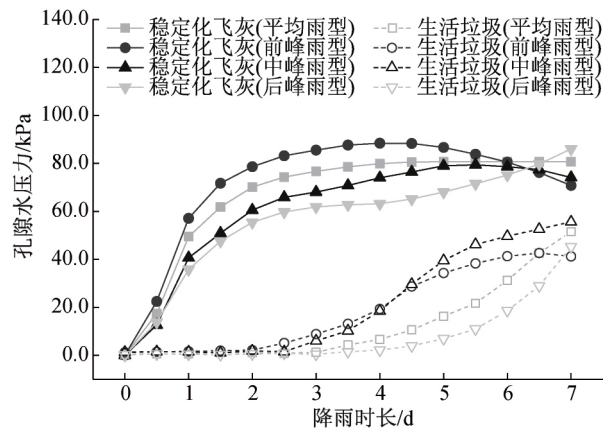


图9 不同雨型条件下堆体内孔隙水压力变化曲线

3.2.2 坡高和坡比对堆体稳定性的影响

不同坡高、坡比条件下堆体的稳定性计算结果如图10所示。一期堆体堆填过程中,生活垃圾堆体以及稳定化飞灰堆体的安全系数均随着填埋高度的增加而减小。例如,当生活垃圾堆体坡比为1:2.5时,随着填埋高度从3.0 m增加至15.0 m时,安全系数从2.64降低至1.36。此外,在整个填埋场的堆填过程中,无论是生活垃圾堆体还是稳定化飞灰堆体,其安全系数均随着坡比的增大而减小。例如,当稳定化飞灰填埋高度为30.0 m时,随着坡比从1:3提高至1:2,安全系数从1.50降低至1.09。两种堆体在堆填过程中的安全系数变化差异主要在于:

a) 当堆填次序为6~10层时,即二期堆体堆填至与一期堆体等高的过程中,生活垃圾堆体的安全系数随着填埋高度的增加而增加,而稳定化飞灰堆

体的安全系数则逐渐减小。这主要是因为二期堆体填埋过程中, 一期堆体的抗剪强度随着龄期增长发生了变化。在这一过程中, 生活垃圾的黏聚力变化不明显, 而内摩擦角则有较大提高, 因此堆体安全系数呈增大趋势; 而稳定化飞灰的黏聚力减小, 内摩擦角基本保持不变, 因此堆体安全系数呈下降趋势。

b) 当堆填次序为 10~15 层时, 即二期堆体堆填高度超过一期堆体, 生活垃圾堆体的安全系数随着填埋高度的增加而减小, 而稳定化飞灰堆体的安全系数则随着填埋高度的增加而增大。在这一过程中, 一期生活垃圾的抗剪强度参数出现了较为明显的变化, 黏聚力从 15.7 kPa 降低至 0.0 kPa, 内摩擦角从 24.4° 增加至 26.0°, 深层垃圾的抗剪强度略有增大, 而浅层垃圾的抗剪强度明显下降, 滑移面位置从深层向浅层转变, 因此生活垃圾堆体的安全系数有所下降。而一期稳定化飞灰的抗剪强度参数值较为稳定, 上层新增堆体的抗剪强度明显大于该稳定值, 黏聚力从 0.0 kPa 提高至 19.4 kPa, 内摩擦角基本保持不变, 使得土体抵抗滑移的能力得到提升, 因此稳定化飞灰堆体的安全系数有所提高。

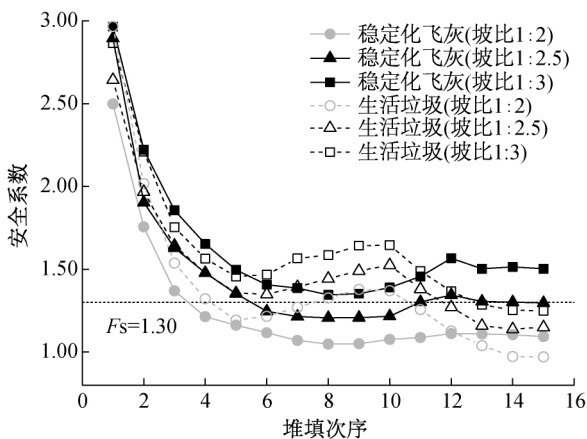


图 10 不同填埋高度、坡度下堆体安全系数 F_s 变化曲线

综上所述, 稳定化飞灰堆填过程中堆体安全系数变化与生活垃圾堆体存在一定差异, 因此在稳定化飞灰填埋场的设计过程中并不能完全按照生活垃圾填埋场相关标准。此外, 当堆体的坡比为 1:2 或 1:2.5 时, 在堆体堆填过程中, 均存在安全系数小于临界值 1.30 的情况, 因此稳定化垃圾焚烧飞灰填埋场的设计坡比建议采用 1:3。

3.2.3 渗滤液水位对堆体稳定性的影响

不同初始相对渗滤液水位条件下堆体的稳定性计算结果如图 11 所示。随着相对渗滤液水位的提高, 生活垃圾堆体和稳定化飞灰堆体的安全系数均呈显著下降, 且下降速度越来越快。对于坡比为

1:2.5 的稳定化飞灰堆体, 当相对渗滤液水位从 0 提高至 1/3 再进一步提高至 2/3 时, 安全系数从 1.78 下降至 1.56 后进一步下降至 1.02。此外, 在相同渗滤液水位作用下, 生活垃圾堆体的安全系数均要低于稳定化飞灰堆体。实际填埋场工程中, 通常采用警戒水位来表征堆体处于临界稳定安全状态下的水位线, 实际水位超过警戒水位时则表明堆体可能会发生失稳破坏^[27]。通过计算可得, 当堆体坡比为 1:2.5, 堆填高度为 30.0 m 时, 生活垃圾堆体的警戒水位为 12.0 m, 稳定化飞灰填埋体的警戒水位为 15.4 m; 当堆体坡比为 1:3, 堆填高度为 30.0 m 时, 生活垃圾堆体的警戒水位为 14.1 m, 稳定化飞灰堆体的警戒水位为 18.2 m。

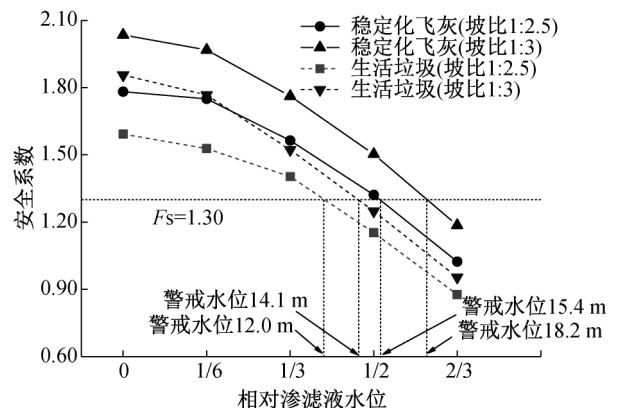


图 11 不同渗滤液水位高度下填埋堆体的安全系数

渗滤液水位对堆体稳定性的影响主要体现在:

a) 随着填埋体内渗滤液水位升高, 孔隙水压力增大, 滑动面上有效应力减小, 滑动面处的抗剪强度降低, 从而降低边坡稳定性; b) 随着渗滤液水位上升, 坡体前缘土体容易发生“软化”和集中“渗流”现象, 同时水的浮力会对坡体产生自然卸荷作用, 使得边坡抗滑力矩减小, 从而对边坡稳定性产生不利影响^[28-30]。

综上所述, 渗滤液水位对稳定化飞灰填埋场的稳定性会产生显著影响。为保证填埋场在使用年限内保持安全稳定的状态, 建议采取以下渗滤液水位控制措施: a) 减少渗滤液产生量, 如控制进场飞灰含水量、减少雨天作业、做好临时覆盖和封场覆盖等; b) 在填埋场渗滤液收集管端部采取高压水反冲洗维护措施, 以减缓导排层收集管的淤堵, 提高渗滤液导排系统的使用寿命^[31]; c) 对于导排系统已发生淤堵的填埋场, 可采取渗滤液抽排竖井、渗滤液导排水平井等工程措施以降低渗滤液水位。

4 结 论

本文通过室内试验对南京某填埋场中 0~11 个

月龄期的稳定化飞灰的水力-力学特性进行了测试,利用 Geo-Studio 软件对稳定化飞灰堆体的稳定性进行了分析,主要获得以下结论:

a) 稳定化飞灰的水力-力学特性:重度介于 $11.0 \sim 12.3 \text{ kN/m}^3$ 之间,随龄期无明显变化规律;内摩擦角 φ 在 $32.9^\circ \sim 34.2^\circ$ 之间,龄期效应不明显;黏聚力 c 在 $14.0 \sim 19.5 \text{ kPa}$ 之间,随龄期的变化规律为 $c = 19.4 - 0.53t$;残余体积含水量 θ_r 介于 $0.362 \sim 0.390$ 之间,进气值介于 $1.8 \sim 2.1 \text{ kPa}$ 之间;随着埋深的增大, θ_r 呈增大趋势,进气值呈减小趋势,土水特征曲线则变陡;初始孔隙比为 2.15, 1.81 和 1.60 时,饱和渗透系数依次为 3.82×10^{-5} , $1.70 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 和 $9.20 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

b) 随着降雨时长的增大,稳定化飞灰堆体的安全系数呈先下降后逐渐稳定的趋势:在降雨前期(1~4 d),降雨模式对稳定化飞灰堆体稳定性影响大小依次为前峰型、平均型、中峰型、后峰型;在降雨后期(4~7 d),平均型、前峰型以及中峰型降雨模式对堆体稳定性影响较小,而后峰型降雨模式下安全系数下降较大。随着填埋高度或坡比的增大,稳定化飞灰堆体的安全系数逐渐减小,稳定化飞灰填埋堆体的推荐坡比为 1:3。随着相对渗滤液水位的提高,稳定化飞灰堆体的安全系数逐渐下降且下降速度越来越快,当坡比为 1:3,堆填高度为 30.0 m 时,稳定化飞灰填埋体的警戒水位为 18.2 m 左右。

c) 稳定化飞灰在重度、抗剪强度参数、土水特征曲线、饱和渗透系数等水力-力学特性及其龄期效应方面均与生活垃圾存在差异。因此,在对稳定化飞灰填埋堆体进行稳定性评估时,不可盲目采用生活垃圾填埋场的相关规范、标准以及生活垃圾的推荐参数,应尽量采用现场取样测试数据的方式开展相关设计和评估工作。

参考文献:

- [1] 张曙光,郝永利,纪涛,等.垃圾焚烧飞灰的处置及资源化利用工艺研究[J].中国环保产业,2015(4):46-48.
- [2] 张建军.关于目前我国城乡生活垃圾处理方式的分析[J].山西建筑,2020,46(15):144-145.
- [3] 程琳.浅谈国内生活垃圾焚烧飞灰的处置技术[J].资源节约与环保,2019(3):55.
- [4] 李佳,张思奇,倪文,等.垃圾焚烧飞灰的固化及综合利用研究进展[J].金属矿山,2019(12):182-187.
- [5] Zhang B R, Zhou W X, Zhao H P, et al. Stabilization/solidification of lead in MSWI fly ash with mercapto-functionalized dendrimer Chelator [J]. Waste

Management, 2016, 50: 105-112.

- [6] Zhao Y C, Song L J, Li G J. Chemical stabilization of MSW incinerator fly ashes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 95(1/2):47-63.
- [7] Jiang J G, Wang J, Xu X, et al. Heavy metal stabilization in municipal solid waste incineration flyash using heavy metal chelating agents [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 113(1/2/3): 141-146.
- [8] 宋倩楠,王峰,唐一,等.螯合剂稳定飞灰的条件优化及螯合产物的稳定性评价[J/OL].环境工程:1-11(2020-06-16) [2020-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20200615.1539.032.html>.
- [9] 杨彦,孔昭健.螯合剂处理生活垃圾焚烧飞灰的稳定化技术研究与实践[J].有色冶金节能,2019,35(4):55-59.
- [10] 徐辉,缪建冬,陈萍,等.药剂稳定化垃圾焚烧飞灰的工程特性测试研究[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(1): 1-10.
- [11] 罗小勇,王艳明,龚习伟,等.垃圾焚烧固化稳定化飞灰填埋处置面临的问题与对策[J].环境工程学报,2018,12(10):2717-2724.
- [12] Mizutani S, Van Der Sloot H A, Sakai S. Evaluation of treatment of gas cleaning residues from MSWI with chemical agents[J]. Waste Management, 2000, 20(2/3): 233-240.
- [13] Shimaoka T, Hanashima M. Behavior of stabilized fly ashes in solid waste landfills[J]. Waste Management, 1996, 16(5/6): 545-554.
- [14] Zhan L T, Chen Y M, Ling W A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China[J]. Engineering Geology, 2008, 97(3/4): 97-111.
- [15] 陈云敏,林伟岸,詹良通,等.城市生活垃圾抗剪强度与填埋龄期关系的试验研究[J].土木工程学报,2009,42(3): 111-117.
- [16] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [17] 张文杰,陈云敏,邱战洪.垃圾土渗透性和持水性的试验研究[J].岩土力学,2009,30(11):3313-3317.
- [18] Feng S J, Zheng Q T, Chen H X. Unsaturated flow parameters of municipal solid waste [J]. Waste Management, 2017, 63: 107-121.
- [19] 冯彬.市政污泥与垃圾焚烧底灰混合固化试验及填埋稳定性分析[D].杭州:浙江大学,2015: 82.
- [20] 缪建冬.稳定化飞灰土工特性测试研究及应用[D].杭州:浙江理工大学,2019: 36-42.
- [21] 唐栋,李典庆,周创兵,等.考虑前期降雨过程的边坡稳

- 定性分析[J].岩土力学, 2013, 34(11): 3239-3248.
- [22] 李全文, 常金源, 徐文刚, 等. Geostudio 软件模拟降雨入渗过程中边界条件的探讨[J].水利规划与设计, 2019(2): 54-57.
- [23] 李婧, 李红星, 寇思飞, 等. 基于 GeoStudio 软件分析的弃渣场稳定评估[J/OL]. 西北水电 (2019-05-23) [2020-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1260.TV.20190523.1414.004.html>.
- [24] 邱战洪, 何春木, 朱兵见, 等. 不同降雨模式下山谷型垃圾填埋场水分运移及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3151-3155.
- [25] 林呀. 粘土心墙坝库水位骤降偶遇不同类型降雨上下游坝坡渗流与稳定数值模拟[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 36-41.
- [26] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 129-136.
- [27] 詹良通, 泰培, 刘小川, 等. 水平排水管控制粉土边坡警戒水位的离心模型试验研究[C]//中国水利学会. 第七届全国岩土工程物理模拟学术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2013: 296-299.
- [28] 陈鹏. 水位升高对库岸边坡稳定性影响研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017(12): 221-222.
- [29] 郭方琴. 降雨与水位升降对边坡稳定性影响分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2018: 14-15.
- [30] 窦思军, 徐兴倩, 李继国, 等. 降雨条件下水库滑坡变形特征及形成机制分析[J]. 人民珠江, 2020, 41(9): 32-38.
- [31] 何晟, 兰吉武, 詹良通. 南方山谷型填埋场渗滤液产量及水位控制措施[J]. 中国给水排水, 2010, 26(8): 1-5.

(责任编辑: 康 锋)