

DOI: 10.11779/CJGE202201007

气压和温度变化共同作用下垃圾填埋场边坡稳定性研究

舒实^{1, 2}, 施建勇^{*1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 城市生活垃圾填埋场在高渗沥液水位情况下发生边坡失稳滑坡的工程事故已多次发生, 初步分析认为滑坡由渗沥液水位、垃圾降解产气和温度升高等因素共同引起。目前尚未见考虑渗沥液水位、气压和温度共同影响填埋场边坡稳定性研究的报道。通过简化垃圾填埋场气压和温度分布的计算, 利用瑞典条分法进行考虑渗沥液水位、气压和温度共同影响的填埋场边坡稳定性分析。计算结果表明: 考虑气压和温度的影响使得填埋场边坡稳定安全系数降低24.7%~43.0%; 建议在同时考虑渗沥液水位、气压和温度的影响进行填埋场边坡稳定分析时, 控制最小安全系数大于1.0可保证填埋场安全运行。本研究可为垃圾填埋场的设计、施工和运行管理提供理论支撑。

关键词: 垃圾填埋场; 气压; 温度; 边坡稳定; 安全系数

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)01-0082-08

作者简介: 舒实(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程相关问题的科研工作。E-mail: shushi@hhu.edu.cn。

Slope stability of municipal solid waste landfills under combined effects of gas pressure and temperature changes

SHU Shi^{1, 2}, SHI Jian-yong^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Engineering accidents of slope failure in municipal solid waste (MSW) landfills under the high leachate level have occurred many times. The preliminary analysis indicates that the slope failure is caused by various factors such as leachate level, gas production and temperature increase caused by the waste degradation. However, very limited researches have been conducted to analyze slope stability of landfills considering the combined effects of leachate level, gas pressure and temperature. In this study, by simplifying the calculation of gas pressure and temperature distribution of landfills, the Sweden slice method is used to analyze the slope stability of landfills under the combined effects of leachate level, gas pressure and temperature. The calculated results show that considering the influences of gas pressure and temperature, the safety factor of slope stability of landfills is reduced by 24.7%~43.0%. When analyzing the slope stability considering the combined effects of leachate level, gas pressure and temperature, it is recommended to control the minimum safety factor to be greater than 1.0 to ensure the safe operation of landfills. This study can provide theoretical support for the design, construction and operation management of MSW landfills.

Key words: MSW landfill; gas pressure; temperature; slope stability; safety factor

0 引言

边坡稳定是城市生活垃圾填埋场运行管理中最需要关注的问题之一, 一旦发生滑坡将引起严重的社会经济以及生态负面影响^[1-6]。已有文献分析认为, 渗沥液水位是影响填埋场边坡稳定性的主要因素^[6-12], 因此, 降低渗沥液水位成为预防填埋场边坡失稳的推荐措施。Merry等^[3]研究发现, 填埋场中的垃圾降解产气也是影响边坡稳定的重要因素, 并进行了考虑渗沥液水位作用的垃圾气压力计算研究。另外, 有机物降解会导致填埋场内部温度会升高^[13-14]; 温度升高引起

填埋场边坡失稳的研究已经开展^[15-16]。此外, 渗沥液水位又是影响填埋场气压力和温度分布的重要因素^[17-18]。在进行填埋场边坡稳定分析时, 除考虑渗沥液水位的主因, 还应考虑由此引起的气压力和温度升高的作用, 相关的研究工作尚处于起步阶段^[11, 15]。

本文根据填埋场气压和温度的变化, 采用瑞典条分法对填埋场边坡稳定性进行计算, 分析气压和温度

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877222, 42007253)

收稿日期: 2021-03-29

*通信作者(E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn)

对填埋场边坡稳定的影响规律, 为填埋场边坡稳定控制提供建议, 本研究可为垃圾填埋场的设计、施工和运行管理提供理论支撑。

1 同时考虑气压和温度的垃圾填埋场边坡稳定计算方法

关于垃圾填埋场中气压力的计算, 从 Townsend 等提出一维条件下气压力解析解后, 目前已经取得较好的进展^[19-23]。Shu 等^[24]给出了垃圾气压力 u_a (kPa) 的简化计算公式:

$$u_a = \frac{Qg}{2k_a}(2HZ - Z^2) \quad (1)$$

式中, k_a 为气体渗透系数 (m/s), Q 为单位体积垃圾的产气速率 ($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$), g 为重力加速度 (m/s^2), Z 为气压力计算点在渗沥液以下的深度 (m), H 为在渗沥液以下垃圾总填埋高度 (m), 如图 1 所示。

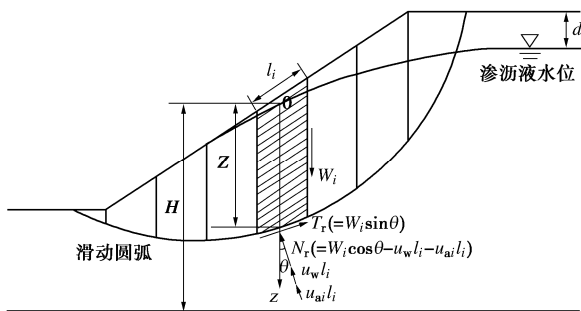


图1 滑动土条上作用力示意图^[24]

Fig. 1 Schematic diagram of forces acting on soil slice^[24]

图 1 中, d 为渗沥液水位埋深 (m), c_i 为第 i 垃圾土条底部的黏聚力 (kPa), φ_i 为第 i 垃圾土条底部的内摩擦角 ($^\circ$), l_i 为第 i 垃圾土条底部滑弧长度 (m), W_i 为第 i 垃圾土条的重量 (kN/m), θ 为垃圾土条底部法向和垂直方向的夹角 ($^\circ$)。叠加土条底部渗沥液压力和垃圾气压力^[3], 由平衡条件可以得到考虑气压力的边坡稳定安全系数公式:

$$F_s = \frac{\sum [c_i l_i + (W_i \cos \theta_i - u_{wi} l_i - u_{ai} l_i) \tan \varphi_i]}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

式中, u_{wi} 为第 i 垃圾土条底部的渗沥液压力 (kPa), u_{ai} 为第 i 垃圾土条底部的垃圾气压力 (kPa)。

据多场耦合作用分析, 温度升高会引起流体压力的升高^[25]。但在填埋场开敞条件下且垃圾体的渗透系数较高, 温度升高引发的压力升高是有限的^[26]; 温度升高的作用主要体现在对垃圾土和衬里界面剪切强度特性的影响^[27]; 垃圾土强度对圆弧滑动破坏计算影响更加直接。根据填埋场温度变化监控试验结果^[13-18], 可以简化填埋场温度随填埋深度变化的计算方法, 如

图 2。图 2 中 T_0 , T_m 和 T_b 分别为填埋场表面温度、最高温度和底部温度。当渗沥液水位高过填埋深度一半时 ($d > H$, 相对深度大于 0.5), 渗沥液水位以上垃圾土温度从 T_0 随深度线性增加至 T_m , 渗沥液水位以下温度保持不变 (图 2 (a)); 当渗沥液水位低于填埋深度一半时 ($d < H$), 填埋深度一半以上温度随深度线性增加, 填埋深度一半以下随深度线性降低 (图 2 (b))。另外, 姜兆起^[27]开展了在不同的恒定温度下垃圾土三轴剪切试验研究, 结果认为温度变化对垃圾土内摩擦角的影响很小, 黏聚力随温度升高以 $0.5 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$ 的比例减小。因此, 在进行温度影响的填埋场边坡稳定分析时, 以 20°C 为参考基础温度, 温度每升高 1°C 黏聚力减小 0.5 kPa , 内摩擦角保持不变, 并代入式 (2) 进行修正。

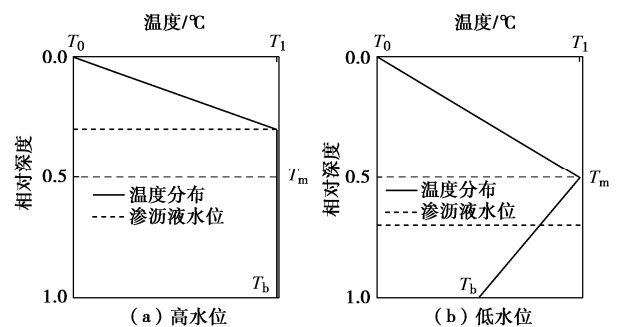


图2 温度随深度分布简化示意图^[16]

Fig. 2 Schematic diagram of temperature distribution of landfill with depth^[16]

2 产气速率对填埋场边坡稳定安全系数的影响

由式 (1) 可见, 垃圾土的气体渗透系数 k_a 和降解产气速率 Q 是影响填埋场气压的主要参数。魏海云等^[28]对苏州七子山填埋场进行垃圾土现场取样, 并在接近饱和条件下试验得到气体渗透系数为 $2.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{kPa} \cdot \text{s})$, 即 $3.17 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。施建勇等在类似的试验条件下得到气体渗透系数分别为 $4.24 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ^[29]和 $3.16 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ^[30]。Townsend 等^[31]在进行填埋场气压计算时取垃圾土气体渗透系数为 $9.25 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。由此可见, 垃圾土的气体渗透系数基本在 10^{-7} m/s 的数量级。本文取垃圾土的气体渗透系数为 $3.17 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 进行填埋场气压的计算。

产气速率随着垃圾土填埋时间呈现先增加后降低再保持稳定的规律^[32]。根据现有文献报道, 垃圾土产气速率一般在 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 的范围内变化 (如表 1)。另外, 根据无锡垃圾填埋场从 2017

年 11 月到 2019 年 4 月垃圾进场量统计和产气量的试验结果,发现产气量和垃圾进场量有一定的正相关性,计算得到平均产气速率约为 $1.21 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ^[24]。

表 1 垃圾填埋场产气速率统计

Table 1 Summary of gas generation rate of landfill	
产气速率 $Q/(\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	数据来源
1.21×10^{-6}	Shu 等 ^[24]
4.40×10^{-7}	Townsend 等 ^[31]
$1.14 \times 10^{-5} \sim 1.34 \times 10^{-4}$	Shi 等 ^[32]
$1.64 \times 10^{-9} \sim 5.33 \times 10^{-8}$	马小飞等 ^[33]
$8.20 \times 10^{-10} \sim 5.45 \times 10^{-8}$	Gao 等 ^[34]
$1.39 \times 10^{-7} \sim 3.13 \times 10^{-7}$	金涛等 ^[35]
$1.55 \times 10^{-7} \sim 1.90 \times 10^{-3}$	刘盛涛等 ^[36]

分别取垃圾土产气速率为 1.0×10^{-8} , 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-6} , $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 对一坡高 h 为 50 m, 坡比 m 为 1:3 的垃圾填埋场边坡进行稳定性分析^[8]。渗沥液埋深 d 分别考虑 5, 20, 35 m 三种情况。垃圾土的重度 γ 取 $15 \text{ kN}/\text{m}^3$, 20°C 时黏聚力 c 取 15 kPa , 内摩擦角 φ 分别考虑 15° , 20° , 25° , 30° , 40° 五种情况^[37]。根据前人文献报道,填埋场表面温度 T_0 、最高温度 T_m 和底部温度 T_b 分别取 20°C , 50°C 和 20°C ^[13-15]。计算得到产气速率对填埋场边坡稳定安全系数 F_s 的影响,如图 3 所示。在图 3 (a) 中,当渗沥液埋深为 5 m 时,在不同垃圾土内摩擦角的情况下产气速率从 $1.0 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 增加到 $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,安全系数降低 8.0%左右;而产气速率从 $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 增加到 $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,安全系数降低 96.8%。说明产气速率在 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 的范围内对填埋场边坡稳定的影响并不明显,而当产气速率大于 $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 时,产气速率会显著影响填埋场边坡稳定。对比图 3 (b), (c) 可以看出,渗沥液水位埋深越小,即渗沥液水位越高,产气速率对安全系数的影响越明显。当渗沥液埋深为 35 m 时,产气速率从 $1.0 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 增加到 $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,安全系数仅降低 0.9%左右,产气速率对填埋场边坡稳定几乎不产生影响。

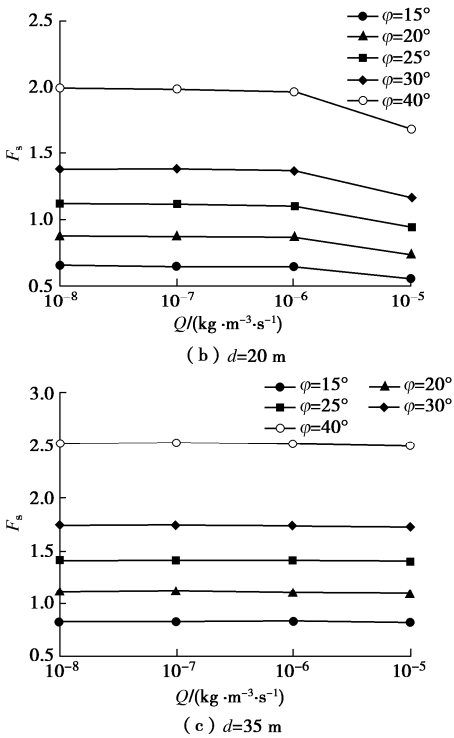
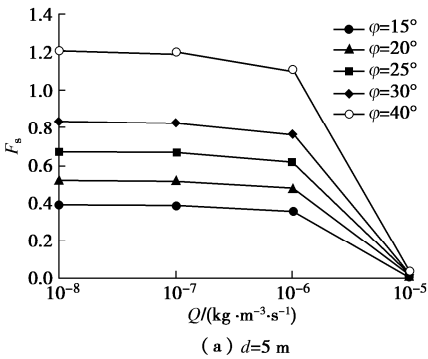


图 3 产气速率对填埋场边坡稳定安全系数的影响

Fig. 3 Influences of gas generation rate on safety factor of slope stability of landfill

3 温度对填埋场边坡稳定安全系数的影响

根据现有文献报道,填埋场内部最高温度一般在 $40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ (如表 2)。因此,分别取填埋场内部最高温度为 40°C , 50°C , 60°C 和 70°C , 仍然对坡高 h 为 50 m, 坡比 m 为 1:3 的垃圾填埋场边坡进行稳定性分析。垃圾土产气速率取 $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 20°C 时黏聚力 c 取 25 kPa 。渗沥液埋深 d 、垃圾土的重度 γ 、内摩擦角 φ 和气体渗透系数 k_a , 以及填埋场地表温度 T_0 和底部温度 T_b 与第 2 节的取值保持一致。计算得到最高温度对填埋场边坡稳定安全系数的影响,如图 4 所示。

表 2 填埋场内部最高温度统计^[18]

Tbale 2 Summary of peak temperatures in landfills ^[18]	
填埋场位置	最高温度 $T_m/^\circ\text{C}$
Montech (法国)	60.0
Seoul (韩国)	63.2
Tokyo (日本)	65.3
British Columbia (加拿大)	49.2
Melbourne (澳大利亚)	65.3
Gyal (匈牙利)	56.2
California (美国)	60.3
夷陵 (中国)	56.7
无锡 (中国)	42.0

从图 4 可以看出,填埋场边坡稳定安全系数随着最高温度的增加呈线性减小。在图 4 (a) 中,当渗沥

液埋深为 5 m 时, 最高温度从 40℃增加到 70℃, 安全系数降低 17.1%~38.0%, 说明最高温度对填埋场边坡稳定的影响显著。对比图 3 (b), (c) 可以看出, 渗沥液水位埋深越小, 即渗沥液水位越高, 温度对安全系数的影响越明显。当渗沥液埋深为 35 m 时, 填埋场最高温度从 40℃增加到 70℃, 安全系数仅降低 5.3%~12.7%。

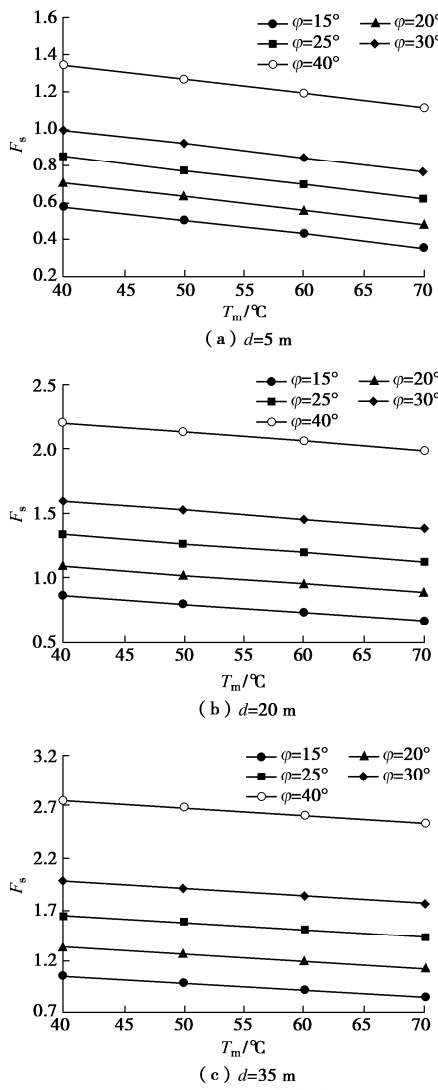


图 4 最高温度对填埋场边坡稳定安全系数的影响

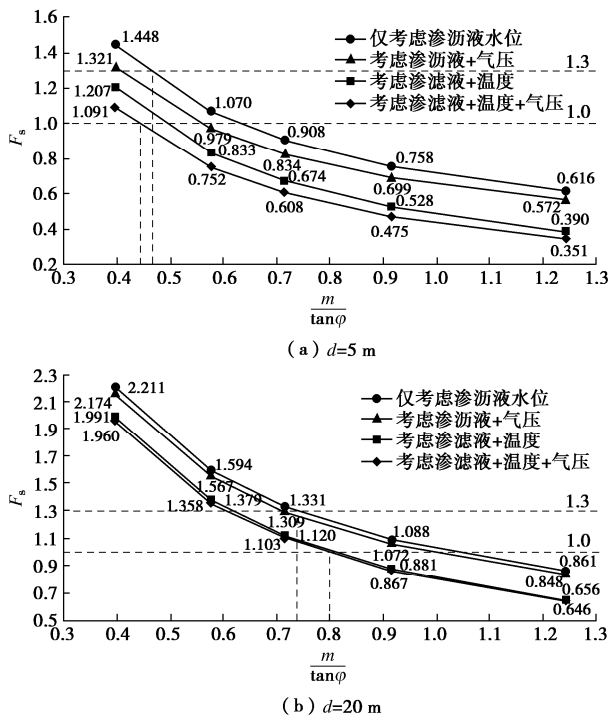
Fig. 4 Influences of peak temperature on safety factor of slope stability of landfill

4 气压和温度升高共同作用下填埋场边坡稳定计算分析

仍然对一坡高 h 为 50 m, 坡比 m 为 1:3 的垃圾填埋场边坡进行了稳定性分析。垃圾土的重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和气体渗透系数 k_a 的取值与第 2 节保持一致。地表温度 T_0 、最高温度 T_m 和底部温度 T_b 分别取 20℃, 50℃和 20℃。分别考虑平均产气速率为 $1.21 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 进行气压计算。对于填埋场边坡, 坡比与内摩擦角正切值的比值 ($m/\tan\varphi$ 值) 反

映了垃圾土坡的性质。因此, 在进行填埋场边坡稳定的参数分析时, 考虑 $m/\tan\varphi$ 值对安全系数的影响。以平均产气速率为 $1.21 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 进行填埋场气压计算, 得到在渗沥液水位埋深 d 分别为 5, 20, 35 m 情况下考虑垃圾气压力和温度升高作用时, $m/\tan\varphi$ 值对填埋场边坡稳定安全系数 F_s 的影响, 如图 5。从图 5 可以看出, 安全系数随 $m/\tan\varphi$ 值的增大而降低; 考虑气压和温度的影响, 安全系数呈现不同程度的降低。例如, 当 $d=5\text{ m}$ 时, 对于坡高为 50 m 的填埋场边坡, 同时考虑渗沥液水位和气压时的安全系数比仅考虑渗沥液水位时的安全系数低 7.1%~8.8%, 而同时考虑渗沥液水位和温度的安全系数则降低 16.6%~36.7%, 同时考虑渗沥液水位、气压和温度情况下的安全系数最低, 比仅考虑渗沥液水位时的安全系数低 24.7%~43.0%。从图 5 (b), (c) 可以看出, 随着渗沥液水位埋深的增大, 气压和温度对安全系数的影响减小。当 d 为 20, 35 m 时, 增加考虑气压仅使得安全系数分别降低 1.6%和 0.1%左右, 说明此时气压几乎对安全系数不产生影响; 而增加考虑温度使得安全系数分别降低 16%和 13%左右, 温度对填埋场边坡稳定的影响较明显。

另外, 在以往的研究中, 仅考虑渗沥液水位而不考虑气压和温度对填埋场边坡稳定的影响时, 提出保证填埋场安全运行的最小安全系数为 1.3^[38]。在图 5 中, 仅考虑渗沥液水位情况下安全系数 1.3 所对应的边坡 ($m/\tan\varphi$ 值), 同时考虑气压和温度时, 其安全系数接近 1.0。因此, 建议在同时考虑渗沥液水位、气压和温度的影响进行填埋场边坡稳定分析时, 控制边坡稳定的最小安全系数可取为 1.0。



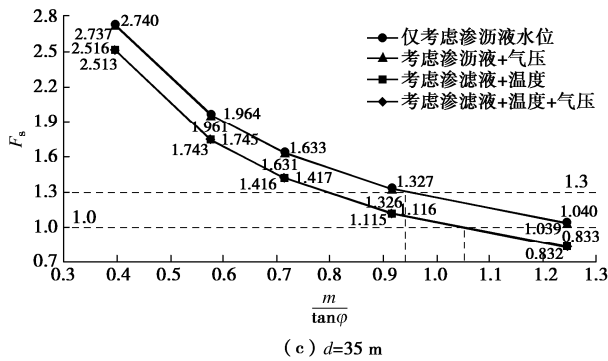


图5 考虑渗沥液水位、气压以及温度的填埋场边坡稳定计算结果

Fig. 5 Calculated results of slope stability of landfill considering leachate level, gas pressure and temperature

5 简化计算误差分析

由图1和式(1)可见,在计算土条底部的垃圾气压力时,垃圾土层的厚度、渗沥液水位高度都是按划分的土条几何参数进行取值的,可方便气压力计算和程序编写。严格分析,这样计算是存在误差的。实际垃圾气压力应寻找最短消散路径消散,对土条底部垃圾气压力沿垂直于渗沥液水位线的方向消散路径最短。另外,在计算垃圾气压力时没有考虑渗沥液水位以上部分非饱和垃圾土中产生的气压力。以滑动圆弧上点 $P(80.0, 3.57)$ 为例,如图6所示,在点 P 处的竖直方向上, $H_p=21.33$ m, $Z_p=17.76$ m。计算气压力时取渗沥液水位以下气体渗透系数 3.17×10^{-7} m/s, 渗沥液水位以上气体渗透系数 3.17×10^{-6} m/s, 产气速率 1.21×10^{-6} kg/(m³·s), 由式(1)计算得出 P 点的气压力为8.442 kPa。但是,如果考虑气压力消散最短路径, $H'_p=20.86$ m, $Z'_p=17.16$ m, 由式(1)计算得到的气压力为8.085 kPa, 小于本文简化计算的结果。因此,现有垃圾气压力和安全系数的计算结果偏保守。

根据上述计算,控制渗沥液、气压力、温度是提高填埋场边坡稳定性考虑的方向。降低渗沥液水位可提高垃圾土边坡的稳定性,因渗沥液水位降低时垃圾土中有机成分降解会加快,垃圾气压力和温度均会升

高^[18],故在降低渗沥液水位工程中应加强监测和计算分析,确保垃圾土边坡的稳定。从计算分析上看,降低垃圾气压力同样可提高垃圾土边坡的稳定性,但在饱和状态下降低垃圾气压力的效果取决于透气闭水材料的性能^[39],是在材料问题解决后还可以尝试的方法。降低垃圾土的温度,可以通过低温水注入调节的方法达成^[17, 40],实施过程中也需要加强监测。在进行垃圾土边坡增稳处置时,应综合考虑处置措施的正反向作用,并加强处置过程的监测。

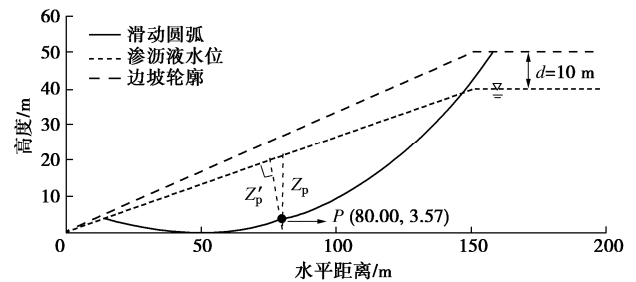


图6 气压影响稳定性分析计算误差示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calculation error of gas pressure in stability analysis

6 广州兴丰填埋场边坡稳定计算实例分析

据报道,2017年在广州兴丰填埋场南坡发生了两次滑坡,滑坡方量达到 $(4 \sim 5) \times 10^4$ m³,滑坡距离达到15 m^[12]。Ma等^[12]通过现场监测和稳定计算,分析了滑坡的位置和原因。根据中国填埋场温度监测试验^[17-18],可对该边坡进行考虑垃圾气压力和温度升高共同作用的稳定计算分析。图7为广州兴丰填埋场南坡剖面图,渗沥液水位约在坡面以下5 m,垃圾土垃圾土的重度、黏聚力和内摩擦角分别为11 kN/m³, 32 kPa 和 14°^[12]。取产气速率和气体渗透系数分别为 1.21×10^{-6} kg/(m³·s)和 3.17×10^{-7} m/s。利用本文提出的条分法对兴丰填埋场南坡进行边坡稳定分析,分别考虑3个工况:①仅考虑渗沥液水位;②同时考虑渗沥液水位和气压;③同时考虑渗沥液水位、气压和温度。3种工况下的圆弧滑动线及安全系数,如图7所示。

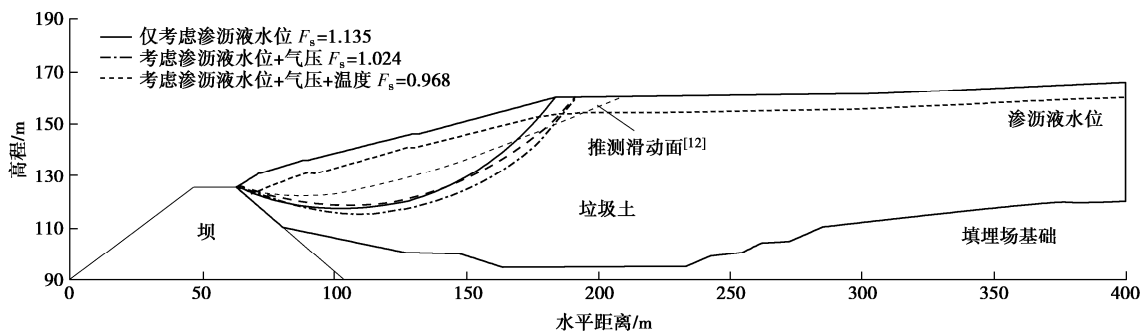


图7 广州兴丰填埋场滑坡计算结果

Fig. 7 Calculated results of slope failure in Xingfeng landfill of Guangzhou

从图7可以看出,仅考虑渗沥液水位时的边坡稳定安全系数为1.135,而另外两种工况的安全系数分别为1.024和0.968,说明考虑气压使得安全系数降低9.8%,而同时考虑气压和温度使得安全系数降低14.7%。工况3更接近填埋场的实际情况,且发生了边坡滑动。综合本文分析,建议在同时考虑渗沥液水位、气压和温度的影响进行填埋场边坡稳定分析时,控制最小安全系数大于1.0,填埋场边坡是安全的。

7 结论与建议

本文在考虑渗沥液水位影响垃圾填埋场边坡稳定计算方法的基础上,通过简化垃圾土气压力和温度分布的计算,提出了同时考虑气压和温度影响的填埋场边坡稳定计算方法,主要得到以下4点结论。

(1) 垃圾土产气速率在 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 的范围内对填埋场边坡稳定的影响并不明显,而当产气速率大于 $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 时,产气速率会显著影响填埋场边坡稳定。最高温度在 $40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内显著影响填埋场的边坡稳定,而且渗沥液水位越高影响越明显。

(2) 针对坡高为50 m,坡比为1:3,渗沥液水位为45 m的填埋场边坡,同时考虑渗沥液水位、气压和温度情况下的安全系数比仅考虑渗沥液水位的工况低24.7%~43.0%。

(3) 建议在同时考虑渗沥液水位、气压和温度的影响进行填埋场边坡稳定分析时,控制最小安全系数为1.0,可保证填埋场边坡安全。

(4) 对广州兴丰填埋场南坡进行边坡稳定实例分析,发现同时考虑气压和温度使得安全系数降低了14.7%,建议在新填垃圾体中加强气压和温度监测,同时控制渗沥液水位、填埋体气压和温度,控制填埋过程的边坡稳定性。

参考文献:

- [1] MITCHELL J K, SEED R B, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure. I: liner-system properties[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, **116**(4): 647 - 668.
- [2] KENTER R J, SCHMUCKER B O, MILLER K R. Day the earth didn't stand still: the Rumpke landslide[J]. *Waste Age*, 1997, **28** (3): 66 - 74.
- [3] MERRY S M, FRITZ W U, BUDHU M, et al. Effect of gas on pore pressures in wet landfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(5): 553 - 561.
- [4] JAYAWEERA M, GUNAWARDANA B, GUNAWARDANA M, et al. Management of municipal solid waste open dumps immediately after the collapse: an integrated approach from Meethotamulla open dump, Sri Lanka[J]. *Waste Management*, 2019, **95**: 227 - 240.
- [5] BONAPARTE R, BACHUS R C, GROSS B A. Geotechnical stability of waste fills: lessons learned and continuing challenges[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, **146**(11): 05020010.
- [6] ZHANG Z, WANG Y, FANG Y, et al. Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills[J]. *Waste Management & Research*, 2020, **38**(12): 1389 - 1404.
- [7] 詹良通, 罗小勇, 陈云敏, 等. 垃圾填埋场边坡稳定安全监测指标及警戒值[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(7): 1305 - 1312. (ZHAN Liang-tong, LUO Xiao-yong, CHEN Yun-min, et al. Field monitoring items and warning values for slope safety of MSW landfills[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(7): 1305 - 1312. (in Chinese))
- [8] XU Q Y, TOLAYMAT T, TOWNSEND T G. Impact of pressurized liquids addition on landfill slope stability[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, **138**(4): 472 - 480.
- [9] REDDY K R, KULKARNI H S, KHIRE M V. Two-phase modeling of leachate recirculation using vertical wells in bioreactor landfills[J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2013, **17**(4): 272 - 284.
- [10] 彭 赵, 兰吉武, 詹良通, 等. 塘渣反压在垃圾填埋场局部滑移治理中的应用[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, **52**(4): 710 - 718. (PENG Zhao, LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, et al. Application of loading berm in landfill partial slip control[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, **52**(4): 710 - 718. (in Chinese))
- [11] FENG S J, CHEN Z W, CHEN H X, et al. Slope stability of landfills considering leachate recirculation using vertical wells[J]. *Engineering Geology*, 2018, **241**: 76 - 85.
- [12] MA P C, KE H, LAN J W, et al. Field measurement of pore pressures and liquid-gas distribution using drilling and ERT in a high food waste content MSW landfill in Guangzhou, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, **250**: 21 - 33.
- [13] YEŞİLLER N, HANSON J L, OETTLE N K, et al. Thermal analysis of cover systems in municipal solid waste landfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(11): 1655 - 1664.
- [14] HANSON J L, YEŞİLLER N, OETTLE N K. Spatial and

- temporal temperature distributions in municipal solid waste landfills[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, **136**(8): 804-814.
- [15] JAFARI N H, STARK T D, THALHAMER T. Progression of elevated temperatures in municipal solid waste landfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, **143**(8): 05017004.
- [16] SHI J Y, SHU S, AI Y B, et al. Effect of elevated temperature on solid waste shear strength and landfill slope stability[J]. *Waste Management & Research*, 2021, **39**(2): 351 - 359.
- [17] SHI J Y, ZHANG T, ZHANG J F, et al. Prototype heat exchange and monitoring system at a municipal solid waste landfill in China[J]. *Waste Management*, 2018, **78**: 659 - 668.
- [18] ZHANG T, SHI J Y, QIAN X D, et al. Temperature and gas pressure monitoring and leachate pumping tests in a newly filled MSW layer of a landfill[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2019, **13**(1): 1 - 19.
- [19] YU L, BATLLE F, LLORET A. A coupled model for prediction of settlement and gas flow in MSW landfills[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, **34**(11): 1169 - 1190.
- [20] LIU X D, SHI J Y, QIAN X D, et al. One-dimensional model for municipal solid waste (MSW) settlement considering coupled mechanical-hydraulic-gaseous effect and concise calculation[J]. *Waste Management*, 2011, **31**(12): 2473 - 2483.
- [21] LI Y C, ZHENG J, CHEN Y M, et al. One-dimensional transient analytical solution for gas pressure in municipal solid waste landfills[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, **139**(12): 1441 - 1445.
- [22] SHI J Y, CHEN M H, QIAN X D, et al. Analytical modeling to simulate gas production for various tested landfill cells[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, **142**(3): 04015088.
- [23] FENG S J, ZHENG Q T, XIE H J. A gas flow model for layered landfills with vertical extraction wells[J]. *Waste Management*, 2017, **66**: 103 - 113.
- [24] SHU S, LI Y P, SUN Z M, et al. Effect of gas pressure on municipal solid waste landfill slope stability[J]. *Waste Management & Research: the Journal for a Sustainable Circular Economy*, 2021: 0734242X2110014.
- [25] NIU J J, WANG X K, GONG S L, et al. Exact solutions for investigating thermal response of saturated soil induced by temperature change[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, **20**(10): 04020177.
- [26] 吴 珣. 城市生活垃圾填埋场中热-气-液耦合运移理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2019. (WU Xun. Research on Heat-Gas-Liquid Coupled Behaviors of Municipal Solid Waste and Its Application[D]. Nanjing: Hohai University, 2019. (in Chinese))
- [27] 姜兆起. 温度影响下高塑料含量垃圾土强度变形特性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2018. (JIANG Zhao-qi. Experimental Study on Strength and Deformation Characteristics of Solid Waste with High Plastic Content under the Influence of Temperature[D]. Nanjing: Hohai University, 2018. (in Chinese))
- [28] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 城市生活垃圾的气体渗透性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(7): 1408 - 1415. (WEI Hai-yun, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Experimental study on gas permeability of municipal solid waste[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(7): 1408 - 1415. (in Chinese))
- [29] 施建勇, 赵 义. 气体压力和孔隙对垃圾土体气体渗透系数影响的研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(4): 586 - 593. (SHI Jian-yong, ZHAO Yi. Influence of air pressure and void on permeability coefficient of air in municipal solid waste (MSW) [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(4): 586 - 593. (in Chinese))
- [30] SHI J Y, WU X, AI Y B, et al. Laboratory test investigations on soil water characteristic curve and air permeability of municipal solid waste[J]. *Waste Management & Research*, 2018, **36**(5): 463 - 470.
- [31] TOWNSEND T G, WISE W R, JAIN P. One-dimensional gas flow model for horizontal gas collection systems at municipal solid waste landfills[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(12): 1716 - 1723.
- [32] SHI J Y, QIAN X D, WU X, et al. Organic degradation and gas generation of MSW under controlled constant temperatures[J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2018, **22**(3): 04018005.
- [33] 马小飞. 垃圾填埋场抽气试验及填埋气收集量评估方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (MA Xiao-fei. Extraction Test and Evaluation Method of Landfill Gas for Municipal Solid Waste Landfills[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [34] GAO W, CHEN Y M, ZHAN L T, et al. Engineering properties for high kitchen waste content municipal solid waste[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*

- Engineering, 2015, 7(6): 646 - 658.
- [35] 金 涛. 长沙市城市固体废物处理场填埋气产生与迁移模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017. (JIN Tao. Study on Landfill Gas Generation and Migration Model in Municipal Solid Waste Disposal Field in Changsha City[D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese))
- [36] 刘盛涛, 郑有飞. 基于产气模型对填埋场垃圾产气速率与气压的估算[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 334 - 339. (LIU Sheng-tao, ZHENG You-fei. Estimation of biogas production rate and pressure in landfill based on biogas production model[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(26): 334 - 339. (in Chinese))
- [36] 刘盛涛, 郑有飞. 基于产气模型对填埋场垃圾产气速率与气压的估算[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 334 - 339. (LIU Sheng-tao, ZHENG You-fei. Estimation of biogas production rate and pressure in landfill based on biogas production model[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(26): 334 - 339. (in Chinese))
- [37] ZHAN T 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: 97 - 111.
- [37] ZHAN T 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.
- [38] 钱学德, 施建勇, 刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 2 版 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Xiao-dong. Design and Construction of Modern Sanitary Landfills[M]. 2nd ed. Beijing: Chinese Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [39] SAKAKI T, LIMSUWAT A, ILLANGASEKARE T H. An improved air pressure measuring method and demonstrated application to drainage in heterogeneous soils[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(2): 706 - 715.
- [40] ZHANG T, SHI J, QIAN X, et al. Temperature monitoring during a water-injection test using a vertical well in a newly filled MSW layer of a landfill[J]. Waste Management & Research, 2019, 37(5): 530 - 541.

中国土工合成材料工程协会召开第二届科技进步奖评审会

2021 年 12 月 21 日, 中国土工合成材料工程协会(CTAG)第二届科技进步奖评审会在北京顺利召开。评审委员会由中国科学院院士、浙江大学陈云敏教授任主任, 协会理事长、中国国家铁路集团有限公司周诗广正高工任副主任, 协会顾问、清华大学李广信教授、河海大学束一鸣教授等 12 位土工合成材料业内知名专家参加了会议。

协会副理事长兼秘书长、石家庄铁道大学杨广庆教授介绍了协会第二届科技进步奖的社会申报、形式审查、网络评审等前期工作情况。评审委员会明确了奖励等级、评定数量以及评审程序等细节要求, 听取了候选项目主要完成人的答辩汇报, 查阅了候选项目申报书及其支撑材料。

根据协会科技奖励管理办法, 评审委员会投票选出了协会

第二届科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 4 项。“路基绿色加固关键技术与应用”项目获一等奖, “生态护岸建设中土工合成材料研究及应用”“复杂条件下加筋路基作用机理研究及工程应用”“多机联动式喷丝法糙面土工膜生产装备”和“新型黑臭水体处理及海洋工程用高性能管袋脱水系统的研发及应用”等 4 个项目获二等奖。

两年一度的协会科技进步奖聚焦土工合成材料在铁路公路、水利水电、机场港口、节能环保等领域的应用创新和生产制造环节的工艺创新, 旨在促进土工合成材料科技成果与我国经济社会的融合发展、提升我国土工合成材料行业技术水平。宁缺毋滥和公平公正的办奖原则使得其在我国土工合成材料业内乃至土木工程领域的影响力得以显著提升。

(中国土工合成材料工程协会秘书处供稿)