

生活垃圾填埋场的稳定性数值模拟及分析

胡丹莉, 张振营*

浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年5月29日; 录用日期: 2023年7月14日; 发布日期: 2023年7月21日

摘要

生活垃圾填埋场是一个不稳定的灾害体, 很容易发生滑坡现象。一旦填埋场发生失稳滑移, 会导致填埋堆体内大量的渗滤液和填埋气体溢出, 对下游造成灾难性的环境污染。本文以浙江的一个生活垃圾填埋场为例, 利用Geo-Studio数值模拟软件的Slope和Seep模块, 建立了相应的填埋场几何模型, 利用室内试验测出的土工参数对模型参数进行取值, 对填埋场边坡稳定性进行分析。统一采用Bishop法计算该填埋场在不同影响因素下的最小安全系数 F_s 和可能的滑移坡面。结果表明, 填埋场的安全系数随着水位线的下降、抗剪强度参数的增大而增大, 随着降雨时间的增加而逐渐减小, 随着沉降的增大先增大后减小。本文的研究结果可为城市生活垃圾填埋场的污染治理提供基础数据, 为稳定性分析提供有价值的信息。

关键词

生活垃圾, 填埋场, 数值模拟, 稳定性分析, 安全系数

Numerical Simulation and Analysis of the Stability of a Municipal Solid Waste Landfill

Danli Hu, Zhenying Zhang*

School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: May 29th, 2023; accepted: Jul. 14th, 2023; published: Jul. 21st, 2023

Abstract

The solid waste landfill is an unstable disaster body, which is prone to landslides. Once the landfill site experiences instability and sliding, it can lead to a large amount of leachate and landfill gas overflowing from the landfill site, causing catastrophic pollution to the downstream environment. Taking a solid waste landfill in Zhejiang Province as an example, this paper established the corresponding geometric modeling of the landfill through the Slope and Seep modules of the numeri-

*通讯作者。

cal simulation software Geo-Studio, and analyzed the slope stability of the landfill using the geotechnical parameters measured in laboratory tests to determine the values of model parameters. The Bishop method was used to calculate the minimum safety factor F_s and possible sliding surface of the landfill site under different influencing factors. The results indicate that the safety factor of the landfill gradually increases with the decrease of the water level, the increase of waste shear strength parameters, decreases with the increase of rainfall time, and increases initially and decreases with increasing settlement. The research results of this paper can provide basic data for the prevention of environmental pollution of solid waste landfills, and provide valuable references for stability analysis.

Keywords

Solid Waste, Landfill, Numerical Simulation, Stability Analysis, Safety Factor

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加快, 生活垃圾的数量正在迅速增加, 旧的垃圾填埋场正面临着退役或提前关闭的问题[1]。因此, 需要对既有老垃圾填埋场进行场地调查, 弄清楚垃圾填埋场的污染现状, 重要的是建立一个治理依据来管理生活垃圾填埋场并确保其安全运行[2] [3]。在生活垃圾填埋场的运行过程中, 诸如高渗滤液水位、不完全压实、填埋场超负荷、陡峭的地基和极端天气条件等问题都会在一定程度上影响填埋场的稳定性[4] [5]。填埋场的不稳定性会导致大量的渗滤液和填埋气体溢出, 从而导致灾难性的环境污染[6]。

从上世纪开始至今, 国内外学者在垃圾填埋场边坡稳定性方面的研究取得了一定成果, 并进行了大量的科研工作。陈云敏等人[7]详细研究了如何确定降水时渗滤液影响下的浸润线, 并基于有限元计算分析了边坡的稳定性。冯世进等人[8]在室内试验的基础上, 用极限平衡法研究了边坡在发生破坏时沿底衬系统的稳定性, 计算了边坡的最大和最小安全系数, 以及生活垃圾的强度参数、地形和材料参数对边坡底衬系统稳定性的影响。Babu 等人[9]分析了分层边坡的稳定性, 考虑到了由于垃圾填埋场内不同龄期的垃圾造成的强度参数差异。Gao 等人[10]提出了一种基于填埋过程的空间和时间离散化的实用方法来计算填埋场的沉降和库容, 他们将填埋场内的生活垃圾分为独立的柱状单元, 通过桶状填埋过程确定每个单元的完整填埋过程, 并基于分层总和法进行填埋场库容的计算。舒实等人[11]采用瑞典条分法简化了填埋场内大气压力和温度分布的计算, 考虑到渗滤液水位、大气压力和温度的综合影响, 分析了坡度的稳定性。

综上所述, 进行生活垃圾填埋场稳定性的数值模拟, 有助于填埋场垃圾扩容以及对稳定性分析进行更深层次的研究。本文基于数值模拟软件 Geo-Studio, 考虑渗滤液水位、连续降雨、抗剪强度参数和沉降等因素, 对填埋场进行数值模拟从而对填埋场稳定性进行研究。

2. 工程概况与模型建立

2.1. 工程概况

浙江某生活垃圾填埋场位于浙江中部, 以山地为主, 用地面积约 563 亩左右, 库容 980 万立方米, 日平均处理垃圾规模为 800 吨。工程基础数据来自于对该填埋场的工程研究、取样和室内试验: 填埋场

的最大深度为 28 m, 垃圾以织物、石头、塑料和灰土为主, 其中塑料含量最多, 平均占 27.8%; 含水率主要分布在 30%~60%之间, 天然密度范围在 0.313~1.248 g/cm³之间, 比重范围在 1.69~2.254 之间; 垃圾粘聚力的分布范围为 4.79~14.91 kPa, 内摩擦角的分布范围为 8.63°~19.8°; 现状压缩的压缩指数范围为 1.103~1.882, 完全降解压缩的压缩指数范围为 1.118~1.184; 渗透系数的分布范围为 1.251×10^{-8} ~ 7.746×10^{-6} m/s, 田间持水量(干重)大多分布在 30%~60%之间; 有机质含量大多分布在 12-18%之间, 纤维素和木质素的比值分布范围为 0.1~1.9。

2.2. 模型建立

所建立的模型以浙江某生活垃圾填埋场为例, 同时利用 Geo-Studio 数值模拟软件的 Slope 和 Seep 模块, 建立相应的填埋场几何模型, 利用室内试验测出的土工参数对填埋场边坡稳定性进行分析。统一采用 Bishop 法计算该填埋场不同影响因素下的最小安全系数 F_s 和可能的滑移坡面。设置该填埋场长为 300 m, 垃圾分为浅层、中层和深层垃圾, 每层高 10 m, 埋藏垃圾的总高度为 30 m, 地基的厚度为 10 m。各材料参数取值列于表 1。

Table 1. Parameter values for various materials

表 1. 各材料参数取值

材料名称	重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)
基岩	22	35	50
浅层垃圾	7	8	13
中层垃圾	8	12	15
深层垃圾	9	10	16
土工膜	9	5	13

根据表 1, 设计参数使用摩尔库仑的抗剪强度公式进行校准, 具体计算方法如下:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ 为抗剪强度, kPa; σ 为正应力, kPa; c 为黏聚力, kPa; φ 为内摩擦角, °。

3. 模拟结果与分析

3.1. 渗滤液水位对填埋场稳定性的影响

为了分析填埋场内渗滤液水位对填埋场稳定性的影响, 将水位设置在距离垃圾表面 5 m、10 m、15 m、20 m 和 25 m 处, 并确定了不同水位下的填埋场安全系数, 如图 1。根据 GB 50869-2013 《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》[12]中给出的安全系数的参考值, 可以得出以下结论: 当边坡的安全系数 $F_s < 1.3$ 时, 表示稳定性较差; 安全系数 F_s 在 1.3~1.5 之间, 表示边坡较为稳定; 当安全系数 $F_s > 1.5$ 时, 则表示稳定性很好。

图 1 可以看出, 在水位距表面 5 m、10 m、15 m、20 m 和 25 m 时, 安全系数分别为 1.009、1.484、1.985、2.027 和 2.098, 说明随着水位线的下降, 边坡的安全系数逐渐增大。当水位距离垃圾表面 5 m 时, 填埋场的安全系数为 1.009, 远小于 1.3, 说明此时存在较大失稳的风险; 当水位距离垃圾表面 10 m 时, 填埋场安全系数几乎接近 1.5, 说明填埋场稳定性较好; 当水位距离填埋场表面 > 10 m 时, 填埋场安全系数均大于 1.5, 说明填埋场稳定性很好。因此, 填埋场的水位由渗滤液监测系统监测, 迅速控制当水位距表面只有 10 m 时的情况, 此时需要预防填埋场可能发生失稳的风险。

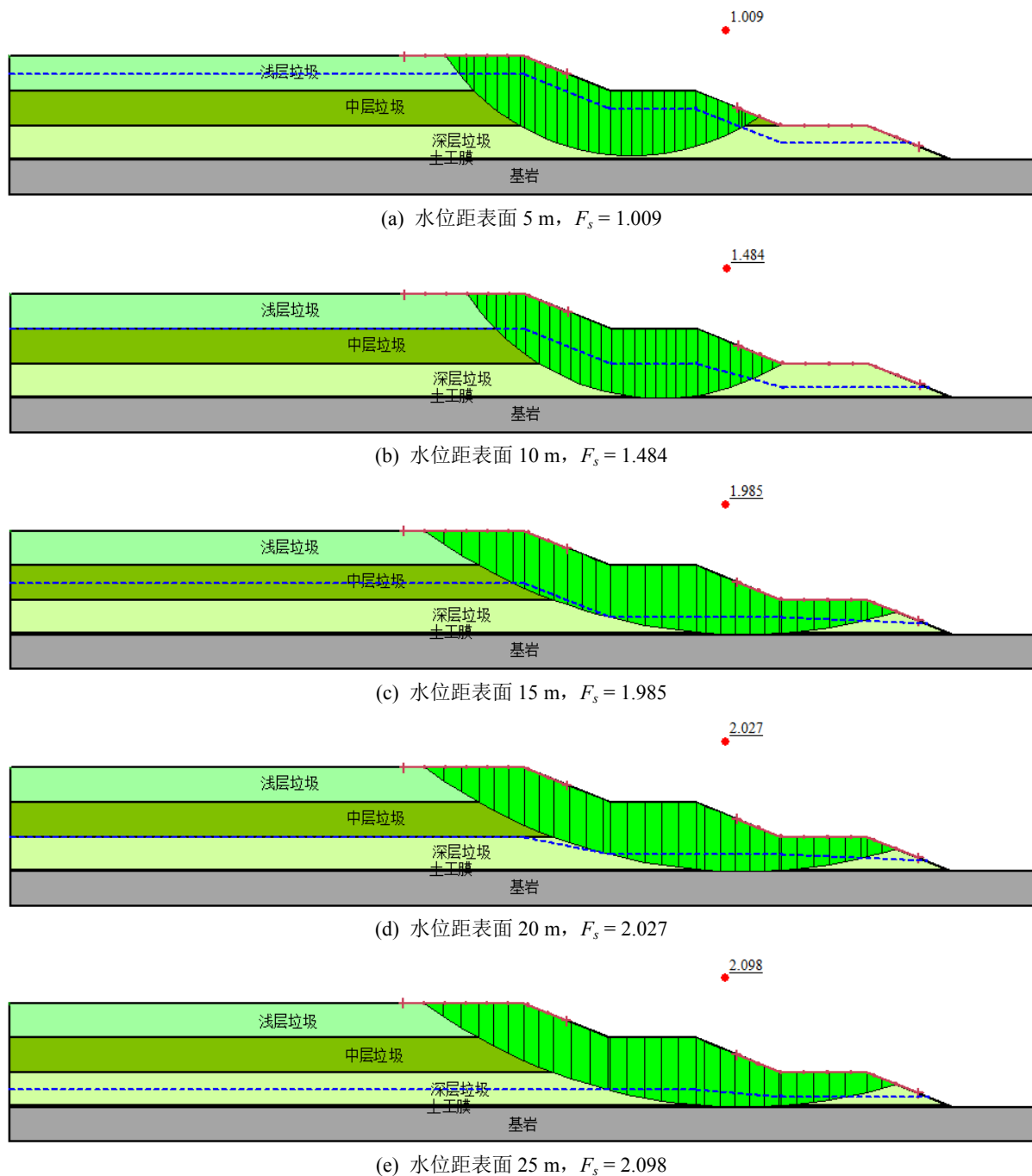


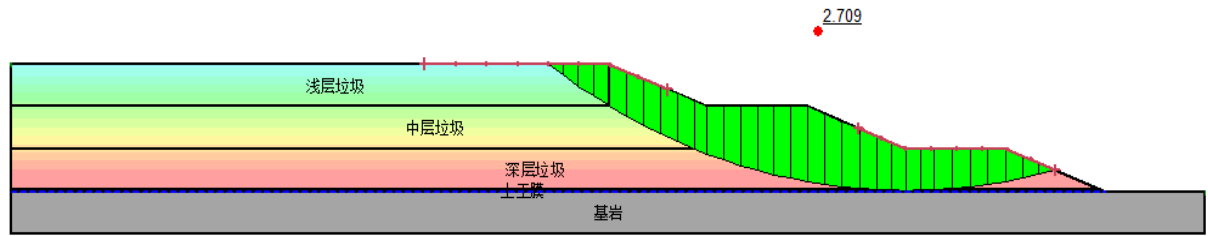
Figure 1. Safety factors of the landfill site under different water levels

图 1. 不同水位下的填埋场安全系数

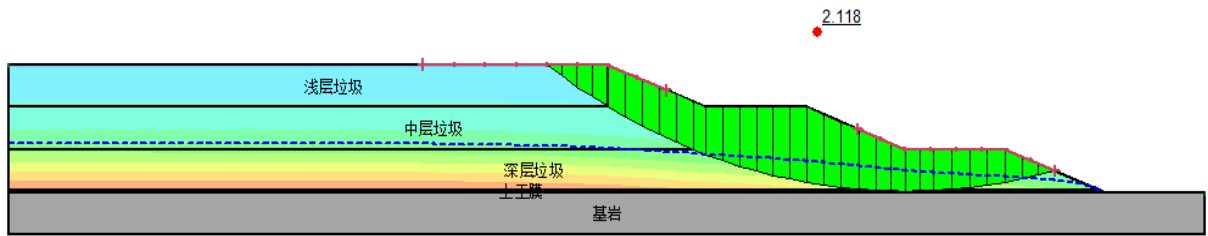
3.2. 连续降雨对填埋场稳定性的影响

为了研究连续降雨对填埋场稳定性的影响, 边坡的边界条件被设定为顶部和表面的雨水自由渗入的边界, 降雨量为每天 50 mm, 连续 7 天的强降雨, 得到不同降雨时间下的填埋场安全系数, 如图 2。

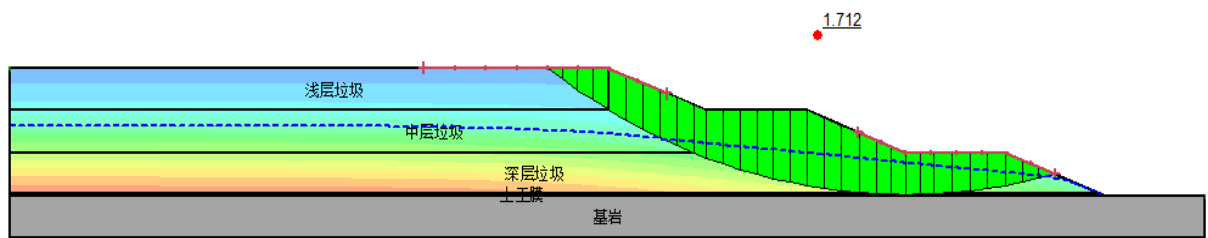
图 2 可以看出, 垃圾填埋场的初始状态稳定性安全系数为 2.709, 填埋场稳定性极好; 降雨 1 天后, 垃圾填埋场的稳定性安全系数大幅下降, 降到了 2.118, 但仍处于稳定状态; 降雨 2 天后, 垃圾填埋场的



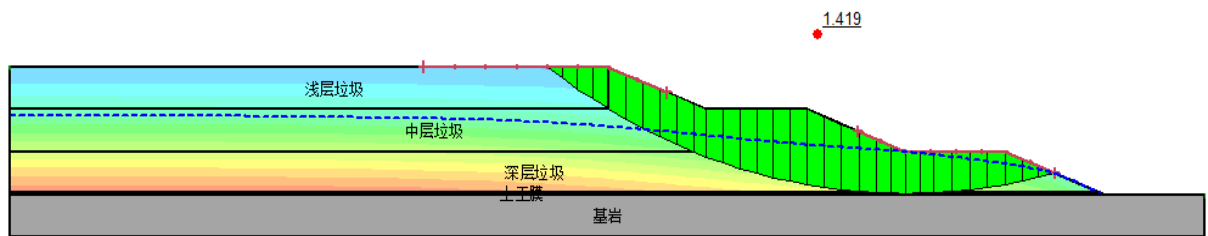
(a) 初始状态, $F_s = 2.709$



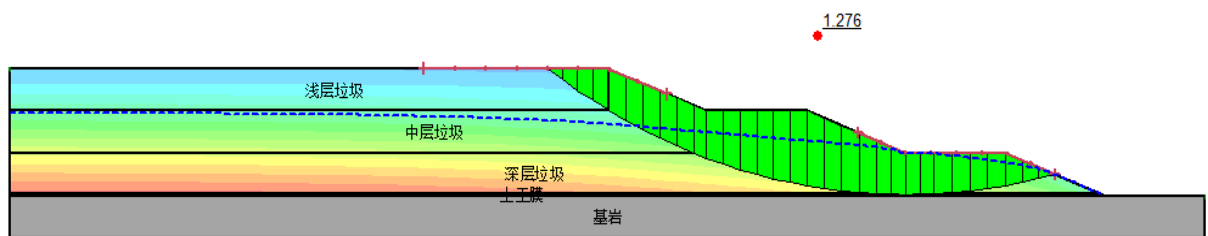
(b) 降雨 1 天, $F_s = 2.118$



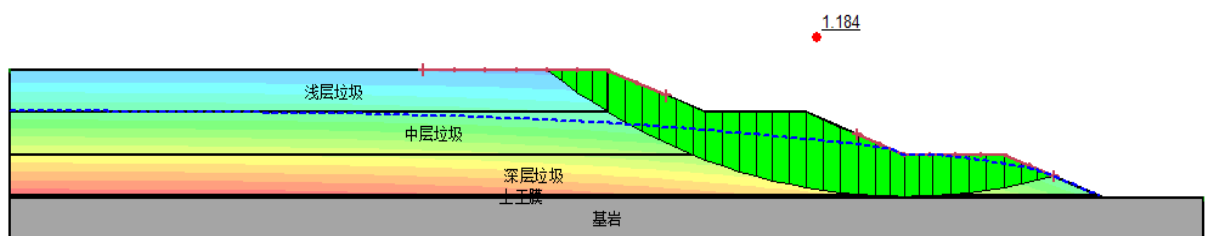
(c) 降雨 2 天, $F_s = 1.712$



(d) 降雨 3 天, $F_s = 1.419$



(e) 降雨 4 天, $F_s = 1.276$



(f) 降雨 5 天, $F_s = 1.184$

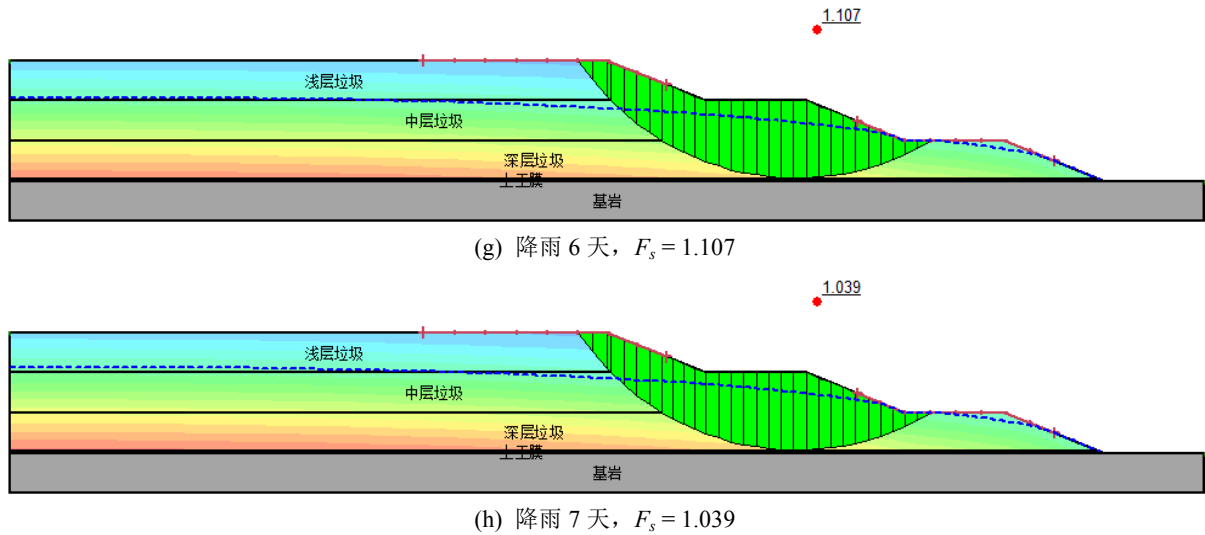


Figure 2. Safety factors of the landfill site under different rainfall times

图 2. 不同降雨时间下的填埋场安全系数

稳定性安全系数继续下降, 降到了 1.712, 也处于稳定状态; 降雨 3 天后, 垃圾填埋场的稳定性安全系数降为 1.419, 小于 1.5, 此时填埋场稳定性较好; 从降雨 4 天开始, 填埋场的安全系数开始小于 1.3, 此时填埋场的稳定性较差, 应注意失稳问题。随着降雨时间的增加, 填埋场的安全系数呈先大幅下降后逐渐下降的趋势, 变化见图 3。因此, 一旦填埋场填埋完成, 通过对填埋场表面进行防渗处理和铺覆盖层, 将减少连续降雨天气对填埋场稳定性的影响。

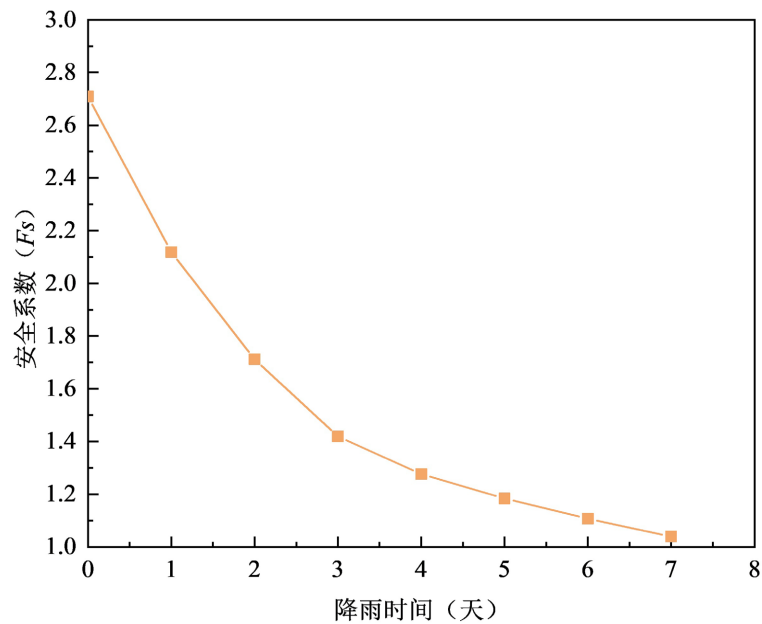


Figure 3. The safety factor varies with rainfall time

图 3. 安全系数随降雨时间变化

3.3. 抗剪强度参数对填埋场稳定性的影响

为分析填埋场垃圾的抗剪强度参数对填埋场稳定性的影响, 假设填埋垃圾的各层垃圾物理特性相同,

重度为 10 kN/m^3 , 分别设置黏聚力 $c = 5、10、15、20 \text{ kPa}$ 和内摩擦角 $\varphi = 5^\circ、10^\circ、15^\circ、20^\circ$, 计算获得不同抗剪强度参数的安全系数, 如图 4。

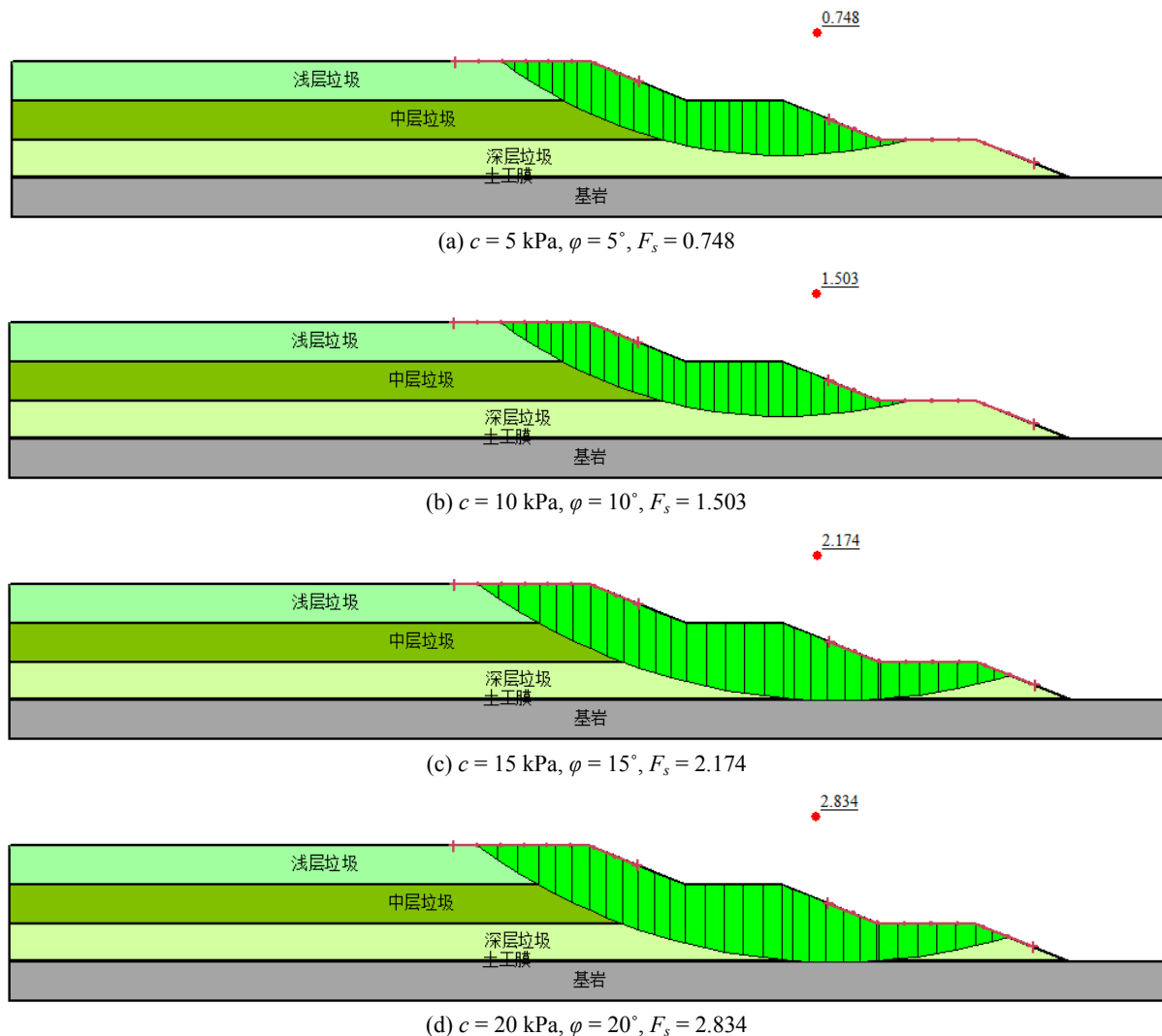


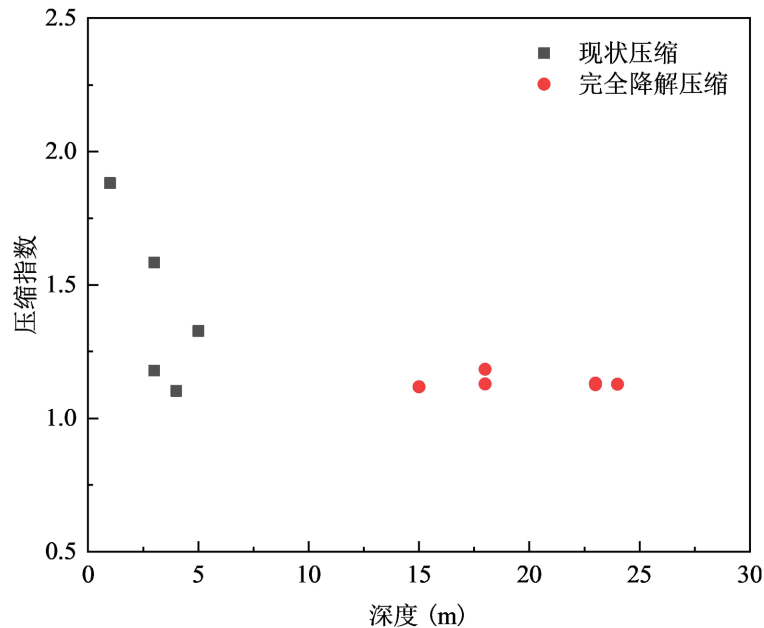
Figure 4. Safety factors of the landfill site under different shear strength parameters
图 4. 不同抗剪强度参数下的填埋场安全系数

图 4 可以看出, 垃圾填埋场的安全系数随着抗剪强度参数的增大而增大。当粘聚力小于 5 kPa , 内摩擦角小于 5° 时, 填埋场稳定性安全系数小于 0.748 , 远远小于 1.3 , 此时的填埋场处于一个失稳的状态; 当粘聚力介于 5 kPa 和 10 kPa 之间, 内摩擦角介于 5° 和 10° 之间时, 填埋场的稳定性安全系数小于 1.5 , 填埋场处于较不稳定的状态, 有可能会发生失稳; 当垃圾的粘聚力大于 10 kPa , 同时内摩擦角也大于 10° 时, 填埋场的稳定性安全系数大于 1.5 , 此时填埋场的稳定性很好。因此, 通过室内剪切试验分析垃圾不同埋深的抗剪强度参数, 可以粗略判断填埋场的稳定性状况。

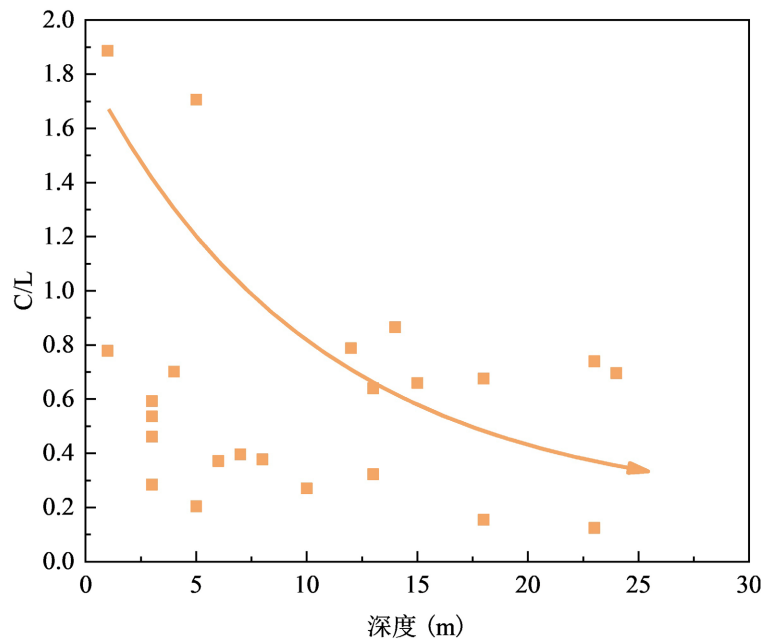
3.4. 沉降对填埋场稳定性的影响

填埋场所填的生活垃圾, 具有高压缩性及降解性的物质, 在填埋过程中会产生沉降[13]。垃圾土的沉降主要包括由于外部应力造成的力学压缩和由于生化降解造成的变形[14]。从力学压缩方面来看, 压缩指

数是反映土的压缩性的指标, 当填埋场垃圾埋深为 15 m 时, 垃圾的压缩指数变化较小(图 5(a)), 沉降趋于稳定; 从生化降解方面来看, 纤维素和木质素的比值(C/L)是反映生活垃圾降解程度的指标, 当填埋场垃圾埋深为 25 m 时, C/L 达到 0.3 (图 5(b)), 垃圾基本稳定, 不再降解产生液、气及污染物(建议取 $C/L = 0.3$ 代表基本稳定时间[15])。



(a) 压缩指数与深度的关系



(b) C/L 与深度的关系

Figure 5. The relationship between compression index, C/L , and depth

图 5. 压缩指数、 C/L 与深度的关系

为了研究填埋场垃圾的沉降对填埋场稳定性的影响, 假设填埋垃圾的各层垃圾物理特性相同, 分别

设置部分沉降(取浅层垃圾参数)、基本沉降(取中层垃圾参数)和完全沉降(取深层垃圾参数)三种情况, 计算获得不同沉降下的安全系数, 如图 6。

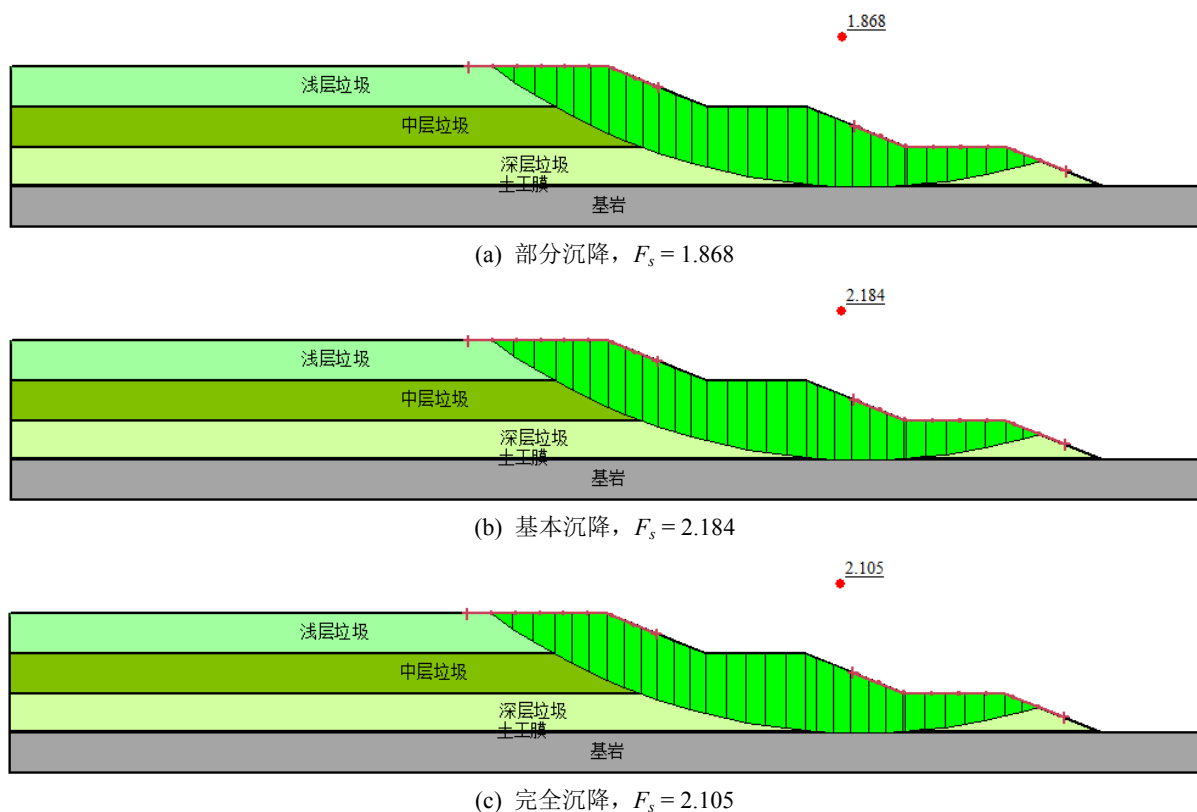


Figure 6. Safety factors of the landfill site under different settlements

图 6. 不同沉降下的填埋场安全系数

图 6 可以看出, 随着沉降的增大, 垃圾填埋场的稳定性安全系数先增大后减小。填埋场在部分沉降、基本沉降和完全沉降的三种情况下, 稳定性安全系数均大于 1.5, 说明填埋场的稳定性很好。因此, 沉降对填埋场的稳定性影响不大, 甚至部分沉降有利于垃圾之间的空隙变密实以及填埋场的扩容。

4. 结论

本文考虑渗滤液水位、连续降雨、抗剪强度参数、沉降等因素, 分析对填埋场稳定性的影响, 利用 Geo-Studio 数值模拟软件的 Slope 和 Seep 模块, 建立了相应的填埋场几何模型, 进行了填埋场边坡稳定性的分析, 得到结论如下:

- 1) 填埋场的安全系数随着水位的下降而逐渐增大, 稳定性也因此随着水位的下降而逐渐增大。当水位距表面只有 10 m 时, 需要预防填埋场可能发生失稳的风险。
- 2) 随着降雨时间的增加, 填埋场的安全系数呈先大幅下降后逐渐下降的趋势, 稳定性也呈先大幅下降后逐渐下降的趋势。从降雨 4 天开始, 填埋场的安全系数开始小于 1.3, 此时填埋场的稳定性较差。
- 3) 填埋场的稳定性安全系数随着抗剪强度参数的增大而增大。当粘聚力小于 10 kPa, 内摩擦角小于 10° 时, 垃圾填埋场处于较不稳定的状态, 有可能会发生失稳。
- 4) 随着沉降的增大, 填埋场的稳定性安全系数先增大后减小。但填埋场的稳定性安全系数均大于 1.5, 沉降对填埋场失稳影响不大。

基金项目

浙江省自然科学基金资助项目(LZ21E080003); 国家自然科学基金资助项目(51978625); 浙江省重点研发计划项目(2021C02039)。

参考文献

- [1] Liu, H., Luo, X., Jiang, X., *et al.* (2021) The Evaluation System of the Sustainable Development of Municipal Solid Waste Landfills and Its Application. *Sustainability*, **13**, 1150-1166. <https://doi.org/10.3390/su13031150>
- [2] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 389-396.
- [3] Madon, I., Drev, D. and Likar, J. (2019) Long-Term Risk Assessments Comparing Environmental Performance of Different Types of Sanitary Landfills. *Waste Management*, **96**, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.001>
- [4] 王宜轩. 城市生活垃圾填埋场失稳破坏模式研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [5] 莫凤映, 陆珏安. 分析固体废物填埋场对环境的影响及治理对策[J]. 资源节约与环保, 2020(12): 32-33.
- [6] 尹玉晶. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策思考[J]. 清洗世界, 2022, 38(9): 190-192.
- [7] 陈云敏, 柯瀚, 凌道盛. 城市垃圾填埋体的动力特性及地震响应[J]. 土木工程学报, 2002(3): 66-72.
- [8] 冯世进, 陈云敏, 高广运. 垃圾填埋场沿底部衬垫系统破坏的稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007(1): 20-25.
- [9] Babu, G.S., Reddy, K.R. and Srivastava, A. (2015) Influence of Spatially Variable Geotechnical Properties of MSW on Stability of Landfill Slopes. *Journal of Hazardous Toxic & Radioactive Waste*, **18**, 27-37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000177](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000177)
- [10] Gao, W., Xu, W., Bian, X. and Chen, Y. (2017) A Practical Approach for Calculating the Settlement and Storage Capacity of Landfills Based on the Space and Time Discretization of the Landfilling Process. *Waste Management*, **69**, 202-214. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.048>
- [11] 舒实, 施建勇. 气压和温度变化共同作用下垃圾填埋场边坡稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 82-89.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50869-2013 生活垃圾卫生填埋处理技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [13] 余松霖. 建筑渣土工程特性与矿坑填埋场沉降[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [14] 赵燕茹. 城市生活垃圾填埋体的力学特性及降解沉降研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [15] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46.