



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202206145 中图分类号 X705 文献标识码 A

戴世金, 钱剑文, 兰吉武, 等. 典型生活垃圾填埋场堆体安全监测及堆高稳定性分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3685-3695. [DAI Shijin, QIAN Jianwen, LAN Jiwu, et al. Monitoring and stability analysis of a typical domestic waste sanitary landfill site[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(11): 3685-3695.]

典型生活垃圾填埋场堆体安全监测及堆高稳定性分析

戴世金^{1,3}, 钱剑文², 兰吉武^{2,✉}, 刘晨旭², 王凤侠¹, 赵由才³

1. 深圳市宝安区市容环境综合管理服务中心, 深圳 518101; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092

摘要 为了解生活垃圾填埋场堆体堆高稳定性变化, 以南方某典型生活垃圾卫生填埋场为研究对象, 开展为期 1 年的堆体安全监测。通过布设渗沥液水位、堆体表面位移和深层侧向位移等在线监测设备, 获取连续稳定的堆体安全特征数据。并使用 GeoStudio 软件分析填埋高度和渗沥液水位对边坡稳定性的影响。结果表明, 填埋场滞水水位埋深摆动幅度为 0~4 m, 主水位降低幅度为 1~2 m, 渗沥液水位高度、表面位移速率受降雨量和填埋作业影响较为明显; 填埋初期, 堆体持续向外滑移, 日均滑移速率在 1~8 mm·d⁻¹; 堆体作业区域由于堆体厚度大、堆填速率快, 其深层侧向位移速率大于两侧边坡区域, 雨季滑移速率大于旱季, 1 年内表层累计水平位移可达到 950 mm。渗沥液水位对填埋堆体稳定性有较大影响, 随着渗沥液水位的下降, 堆体安全系数逐渐增大, 填埋场警戒水位埋深可设为 5.0 m。本研究结果可为垃圾填埋场的堆体安全稳定控制提供参考。

关键词 垃圾填埋场; 堆体监测; 渗滤液水位; 填埋高度; 警戒值

生活垃圾填埋场作为我国普遍适用的生活垃圾处置场所, 在很长一段时间内, 是大部分地区生活垃圾的主要处置场所。2020 年生活垃圾填埋场超过 640 座, 生活垃圾填埋量超过 7.77×10^7 t, 仍占清运总量的 35% 以上, 垃圾填埋设施处于相对饱和阶段^[1-2]。随着经济社会的快速发展和“无废城市”建设的大力推行, 我国生活垃圾清运量逐年攀升。为了及时清理和处置生活垃圾, 不少生活垃圾填埋场存在一定程度上的“超填”现象, 填埋场的填埋高度不断增高, 堆体稳定问题日渐突出^[3-4]。近年来, 对填埋场设计、施工、填埋、封闭后的监测及维护, 主要集中在保护周边地下水和大气不产生严重污染, 对填埋场稳定性的关注度不高。然而, 自 20 世纪 80 年代以来, 国内外发生多起填埋场的失稳破坏现象, 严重污染生活环境, 甚至造成大规模的人员和财产损失。例如, 2017 年 4 月斯里兰卡 Meethotamulla 垃圾填埋场在连续几天的降雨后发生失稳, 造成 100 多座房屋被毁、30 多人死亡的重大事故^[3,5-6]。我国的深圳、重庆、上海等地也发生过多起填埋场失稳灾害, 共造成 500 多人的死亡; 同时, 填埋垃圾和渗沥液的扩散也严重污染了周边的水土环境^[7]。可见, 对于填埋堆体的稳定性研究具有重要的理论和实践意义。

我国对于填埋场稳定性的研究起步于 20 世纪 90 年代, 赵由才等^[8-9]率先在上海进行了填埋场稳定性的实验研究。此后, 陈云敏等^[10]对填埋场稳定性进行了系统性的研究, 结合卫生填埋场工

收稿日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-11-08

第一作者: 戴世金 (1993—), 男, 博士, daishijin1993@126.com; ✉通信作者: 兰吉武 (1980—), 男, 博士, 副研究员, lanjiwu@zju.edu.cn

程, 构建了堆体力学参数, 并讨论了填埋场中渗滤液饱和度、边坡角度和浸润线埋深对填埋场边坡稳定性的影响, 发现填埋堆体稳定性与垃圾组成、压实程度、渗滤液水位、填埋方式和年限等密切相关。在填埋场运行过程中, 渗滤液水位对堆体稳定性有关键影响。管仁秋等^[1]发现, 我国城市固体废物组分含水率较高, 渗滤液赋存形式复杂, 渗滤液水位高是正在运行填埋场普遍存在的问题。由于填埋垃圾的非均质性和中间覆盖层的存在, 垃圾堆体中渗滤液分布非常复杂, 往往存在一个主渗滤液水位和多个滞水位^[2]。KORNER等^[4]对全球10个大型垃圾填埋场进行统计分析, 发现失稳触发机制均与填埋体内渗滤液水位过高有关。朱文明等^[3]对老港综合填埋场生活垃圾填埋堆体稳定性进行了评估, 发现主水位上升显著降低堆体沿地基的稳定及内部稳定, 滞水位埋深上升会引起垃圾堆体浅层和后续填高堆体滑动。因此, 填埋过程中垃圾堆体现场的水位和位移监测, 是研判垃圾填埋堆体稳定性的重要手段。

然而, 由于技术手段和资金限制, 目前填埋堆体的监测仍以间歇性钻孔监测为主, 部分研究集中在堆体滑移事故的灾害分析。何海杰等^[2]对西北地区某填埋场堆体边坡滑移的过程进行了监测, 追踪分析堆体滑移位置和过程。詹良通等^[7]通过对深圳填埋场滑坡事故调查, 发现强降雨导致堆体水位急剧升高是事故发生的关键因素。国内关于填埋作业过程中的连续性水位、位移监测方面的研究工作较少, 监测数据积累量低, 也少见有关垃圾堆体稳定安全监测指标及水位警戒值方面的报道。本研究以南方某典型山谷型填埋场为研究对象, 开展为期1年的堆体监测, 记录该填埋场堆体边坡在监测期间的表面位移、深层侧向位移、渗滤液水位变化情况。采用数值模拟分析来揭示填埋堆体的稳定状况和渗滤液警戒值, 为类似卫生填埋场的现场稳定监测、分析和控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 监测对象

本研究以南方典型山谷型卫生填埋场为研究对象。该填埋场于2014年投入使用, 由西、中2个区域组成, 整体呈西高东低的地势, 总设计库容约 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图1)。所填埋的生活垃圾主要为原生生活垃圾, 含水率为44%~50%。有机物含量为40%~45%, 无机物含量约为12.44%, 与国内大多数填埋场一样, 该填埋场采用分区分层填埋、层层压实的方式, 每层垃圾厚度为2.5~3 m, 每层垃圾压实后必须覆土20~30 cm。由于填埋时间和工程扰动情况不同, 不同分区堆体稳定性指标有所差异。监测期间(2016年5月至2017年5月)填埋场实际入场填埋规模约为 $800 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, 堆体由50 m标高填埋至115 m标高。在调查期间, 存在堆填速度快、填埋强度大、高度高、坡度大的状况; 而且存在填埋垃圾成份及粒度复杂、渗滤液导排系统结垢严重、堆体水位高等典型问题, 安全隐患较为突出。在生活垃圾继续填埋的静荷载、动荷载以及强降雨等不利条件下, 本场地存在大面积快速滑移的可能性, 从而会发生安全事故。

填埋场所属区域全年气温高、湿度大, 雨量充沛, 但年际变化较大, 如图2所示。主要表现为4月至9月为雨季, 10月至3月为旱季, 年平均降雨天数为144.7 d, 年平均降雨量为1667 mm。其中, 雨季、台风等恶劣天气较为频繁, 如2016年8月初登陆的台风“妮姐”; 9月13日来袭的台风“莫兰蒂”; 10月20日台风“海马”等强台风天气。



图1 监测填埋场堆体现场图

Fig. 1 Site diagram of the monitored landfill site

1.2 监测布点与数据采集

按《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ176-2012)^[7]中的相关要求开展垃圾堆体连续性稳定监测，监测内容包括：1) 堆体渗沥液水位监测，包括滞水位和主水位，为后续堆体的稳定性评估工作提供了依据；2) 表面水平位移监测，为及时掌握堆体表面的滑移状态和范围；3) 深层水平位移监测，以为填埋堆体的滑移模式以及范围鉴别提供依据。各监测点位的平面位置分布如图 3 (a) 所示，填埋场监测

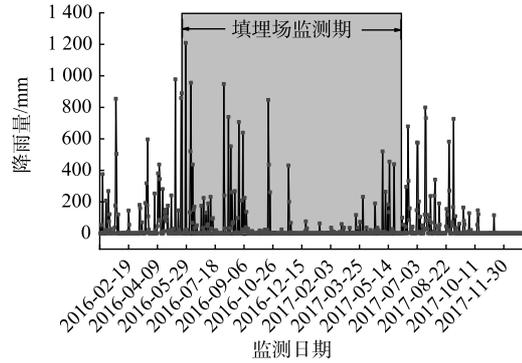
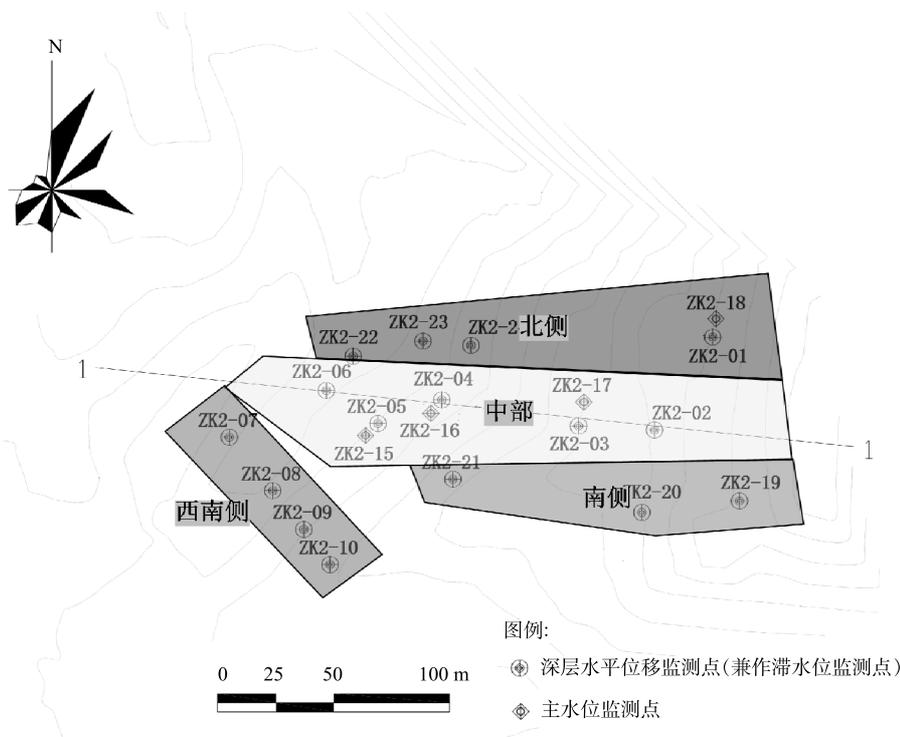
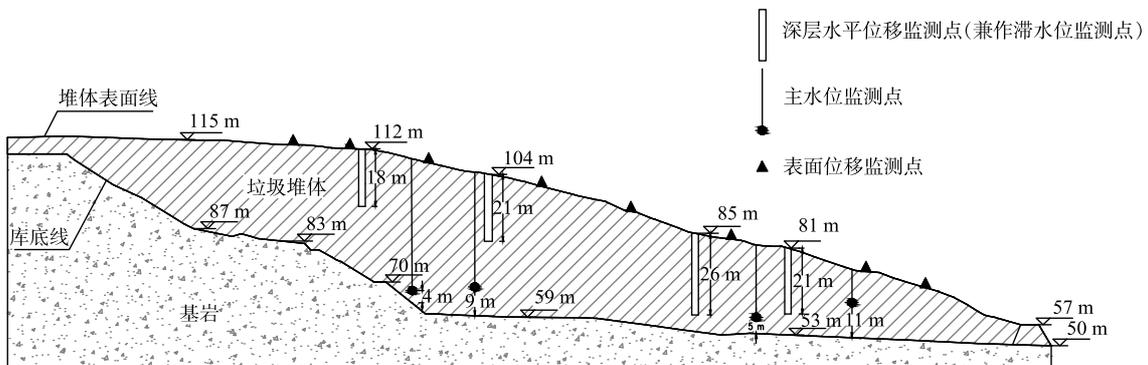


图 2 填埋场所在区域降雨量变化
Fig. 2 Rainfall change in landfill area



(a) 堆体监测点位平面图



(b) 堆体监测点位剖面示意图

图 3 填埋场堆体监测布点图

Fig. 3 Monitoring points of in-service landfill for bulk stability

范围划分为北侧、中部、南侧和西南侧4个区域。其中,北侧区域为靠近边坡区域,填埋量少,但坡度较大。中部区域为主要填埋作业区,填埋厚度较大,填埋量多。南侧区域和西南侧区域填埋厚度较中部区域小。

本次在填埋场堆体和分区坝区域共设置150个表面水平位移监测点,利用TC1700全站仪监测各点位坐标变化,掌握堆体和坝体的位移和沉降情况。在堆体内设置16只深层水平位移监测管(兼作滞水位监测点),平均埋设深度为25 m,其布设剖面图如图3(b)所示,利用测斜仪测量预埋设在堆体内测斜管的倾斜度,掌握堆体深处的位移情况。同时,利用钢尺水位计测量管内渗沥液水位高度,掌握堆体渗沥液滞水位情况。在堆体边坡内设置4个主水位监测点,利用孔隙水压力计监测并掌握堆体主水位。孔隙水压力埋设点尽量埋设至堆体底部,同时严格控制深度,避免对库底防渗膜造成影响。

1.3 数据分析与堆高稳定性计算

本研究采用Excel 2016软件对数据进行统计分析。垃圾堆体边坡稳定分析采用GeoStudio软件包中Slope/W模块,该软件具有滑动面自动搜索功能,不仅能搜索圆弧型滑动面,而且能搜索非圆弧型滑动面。采用Morgenstern & Price法对主要稳定控制剖面进行稳定分析。该方法能够同时满足整体力和力矩的平衡条件,适用于任意形状的滑动面,并能考虑多层水位影响,被广泛地应用到边坡稳定性分析工作中^[14]。

考虑到垃圾填埋场这一基础设施的重要性,安全等级设定为一级。因此,堆体边坡稳定安全系数控制选定标准为:正常气象条件对应的渗沥液水位时,边坡稳定安全系数大于1.35。基于文献数据^[15-17]和本研究实际情况,对不同龄期生活垃圾的重度和抗剪强度参数进行取值,如表1所示。

表1 填埋场垃圾土工参数设置
Table 1 Geotechnical parameters of landfill municipal solid waste

| 土层 | c/kPa | $\phi/(\circ)$ | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ |
|------|-------|----------------|--|
| 表层垃圾 | 23.3 | 12 | 11 |
| 中层垃圾 | 15 | 24 | 12.5 |
| 底层垃圾 | 0 | 26 | 14 |
| 衬垫系统 | 0 | 12 | 18 |
| 地基 | 100 | 28 | 19 |
| 垃圾坝 | 10 | 30 | 18 |

2 结果与讨论

2.1 渗沥液水位变化

在生活垃圾填埋时,为减小填埋期间的降雨入渗,往往会采用渗透系数较小的土料进行中间覆盖。当上部再填埋垃圾后,位于填埋场内的中间覆盖层上可能出现局部滞水,形成滞水位^[12]。垃圾堆体中渗滤液分布非常复杂,局部区域往往存在一个主水位和多个滞水位。本次监测中,各区域滞水位埋深监测结果如图4所示。其中,北侧区域各监测点位(ZK2-01, ZK2-22, ZK2-23, ZK2-24)滞水位都呈现下降趋势。2016年5月至2017年6月期间,各监测点位滞水位埋深平均下降约4 m,如图4(a)所示。在2016年5月至6月台风暴雨期间,埋深上升小于1 m,摆动幅度很小,其后滞水位稳定性在4~6 m之间。滞水位的埋深变化与降雨量、垃圾渗透系数、垃圾初始含水量等相关,当降雨量较大、垃圾渗透系数较小时,将在垃圾体内形成一定规模的滞水位。沈磊等^[12]研究了不同降雨强度下滞水位水头高度,发现降雨强度越大,滞水位越高。对于卫生填埋场来说,某一固定降雨强度下,滞水位水头都先增大后趋于稳定下降。北部区域由于已完成填埋并覆膜,降雨入渗量少,且该填埋场属于山谷型填埋场,北侧区域处于谷底两侧山体边坡处,垃圾自身所产渗沥液会向中部区域汇集。因此,滞水位总体呈下降趋势,这与陈云敏等^[18]的研究相符。

如图4(b)和图4(c)所示,中部区域顶部以及西南侧区域(ZK2-02~ZK2-10)在监测初期仍处于填埋作业状态,且填埋作业面积较大。因此,该区域的滞水位埋深摆动趋势明显,摆动幅度在2~7 m,

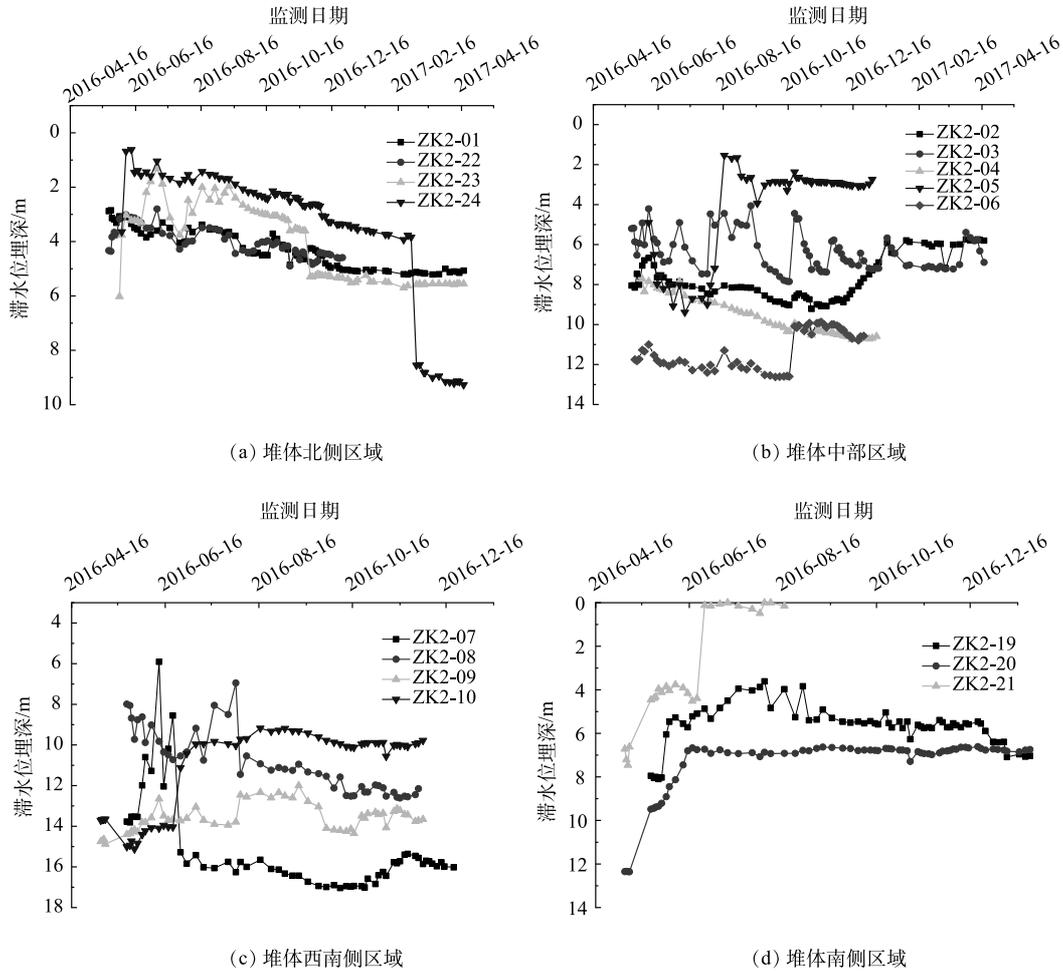


图 4 垃圾填埋场滞水位监测结果

Fig. 4 Monitoring results of stagnant water level in landfill pile

滞水位最大上升到 1.7 m。一方面，滞水位埋深在雨季期间有大幅度升高 (2016 年 6 月、8 月)，最大上升幅度超过 6 m；另一方面，可能是受到填埋工程扰动的影响，表现出有多个震荡上升的时段。当填埋作业时，工程扰动可能导致堆体内压力上升，从而导致渗透系数下降，形成局部滞水^[13]。随着降雨量的减少，渗沥液通过填埋场导排系统排出，滞水位埋深逐渐下降，最终中部区域滞水位埋深稳定在 4~10 m，西南侧区域滞水位埋深稳定在 10~14 m。

南侧区域的滞水位表现为先上升后基本保持不变，如图 4 (d) 所示。2016 年 5 月至 6 月由于台风降雨天气而有大幅度升高。这主要是因为，在雨季期间，顶部填埋作业区域有部分雨水入渗，造成南侧下游区域水位急剧上升；监测后期降雨入渗量减少后，顶部新填埋垃圾产生的渗沥液也不断流向下游南侧区域。因此，该区域的渗沥液水位始终保持一个较为稳定的状态，南部区域如 ZK2-19、ZK2-20 点位的滞水水位埋深后期稳定在 6~7 m (表 2)。与国内其他填埋场相比，该填埋场下游区域的滞水埋深较深，这说明渗滤液导排情况良好。

总体来看，滞水位埋深主要受降雨量影响较大，故呈现出雨季抬升旱季降低的趋势，摆动幅度在 0~4 m。对于填埋场不同区域，滞水位埋深变化情况不同，如表 2 所示。由于地形地势和导排情况的差异，填埋场边坡区域的垃圾填埋量较少，卫生填埋场覆盖良好的情况下，受降雨量影响小，滞水位变化幅度较低。南部区域处于下游，滞水位埋深较浅，应持续关注其水位变化情况。填埋作业区域的水位变化较为频繁，除了受填埋场地形、日常降雨影响之外，填埋作业过程中的

表2 填埋场不同区域滞水位变化情况
Table 2 Variation trend of stagnant water level in different areas of landfill site

| 填埋区域 | 特征 | 变化趋势 | 滞水位变化 | 稳定后滞水位埋深/m |
|---------|---------------------|----------------|-------------------------|------------|
| 北侧区域 | 边坡区域, 垃圾堆填时间长, 覆盖好 | 下降 | 平均下降约4 m | 4~6 |
| 中部、西南区域 | 作业区域, 垃圾暴露面较大 | 先升高后稳定, 随后逐步下降 | 摆动幅度在2~7 m, 最大上升幅度超过6 m | 6~14 |
| 南侧区域 | 垃圾堆填时间短, 覆盖较好, 汇水区域 | 先升高后稳定 | 最大上升7 m | 4~7 |

机械碾压、覆盖膜破损、当日填埋垃圾含水量的不同都会导致水位的异常变化。因此, 在垃圾填埋过程中应密切关注和控制水位, 防止垃圾堆体局部处于饱和状态, 使得垃圾堆体甚至“浮在”水中, 最终诱发安全事故。KOEMER等^[19]研究了10个大型固体垃圾填埋场, 发现垃圾堆体失稳均与水力诱发灾变为主。在此研究中发现, 由降雨量导致的滞水位上升, 其恢复周期在15~30 d, 水位雍高的时间较长。詹良通等^[7]认为, 通过打设竖井, 抽排加速降低水位, 可以提高填埋场的稳定性, 保证填埋作业和部分水位雍高时段的堆体安全。

主水位监测结果如图5所示。该填埋场堆体主水位在库底以上5~20 m内, 堆体堆高约50 m。这说明, 主水位控制尚可。在1年监测期间, 堆体主水位高度呈降低趋势, 降低幅度在1~3 m。主水位的控制为填埋场的安全稳定提供了保障, 渗滤液水位对填埋体的稳定安全系数的影响非常明显, 水位越高、溢出点越高, 堆体稳定安全系数越小, 且更容易发生浅层滑动^[8-9]。

2.2 表面水平位移

为了监测堆体在高水位和填埋作业时的滑动, 对填埋堆体的表面水平位移进行了监测。根据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》, 以 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 作为日均滑移速率警戒线^[10], 监测期间内填埋场表面水平位移超限情况以及降雨量情况如图6所示。从图6(a)中可以看出, 该填埋场在监测期间, 不同区域的日均表面水平位移呈现出相似的变化规律, 最大日均位移速率达到 $38 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 表面水平位移超限面积与降雨量的变化有明显的一致性。这说明, 降雨增加能快速导致堆体的水位升高, 促使表面水平位移增大, 从而使得堆体内部垃圾滑移。且降雨使填埋堆体的表面水平位移发生较快, 极易发生紧急事故。与水位变化情况不同, 北侧、西南侧和南侧的日均滑移速率变化较大。这说明, 降雨导致的水位雍高不是影响滑移的唯一因素, 而是与现场地址情况、填埋作业情况均有关。何海杰等^[2]研究了西北地区填埋堆体3次滑移, 发现堆体2次较大面积滑移是由强降雨引发, 1次是由垃圾堆载、填埋作业动荷载和强降雨等综合因素引发。造成表面位移超限的原因有2方面。首先, 填埋场地处南方某城市, 降水比较集中, 单次降雨量大。雨季到来时, 降水量激增, 部分雨水渗入堆体内部渗流至海拔较低的底部, 造成该处水位雍高严重, 堆体稳定性差, 故出现滑移现象。带动表面位移大面积超限这也是西南侧和南侧滑移量变化较大的原因^[5]。

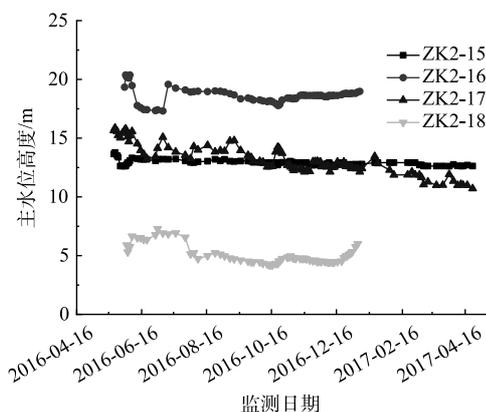


图5 填埋堆体主水位高度
Fig. 5 Main water level of landfill pile

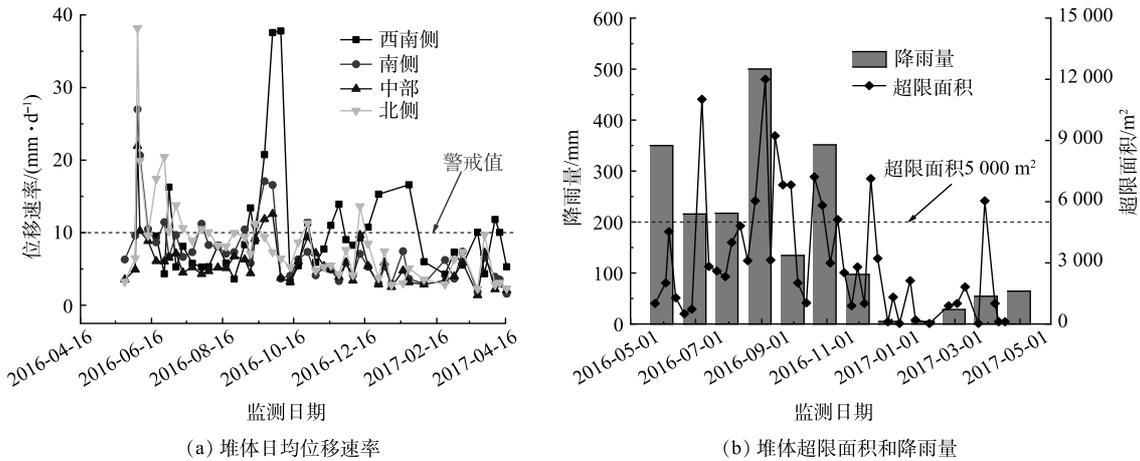


图 6 堆体表面位移超限面积统计情况

Fig. 6 Statistics of the over-limit area of the landfill pile

其次，该处填埋场为典型山谷型卫生填埋场，堆体坡度大，虽底部有垃圾坝进行支撑，受工程建设和逐层填埋影响，属于易滑动区域。在本研究的监测期间，表面水平位移超限面积超过 5 000 m² 共出现 11 次 (总测量次数 45 次)，如图 6 (b) 所示。超限主要集中在雨季、台风等恶劣天气条件下，如 2016 年 8 月初登陆的台风“妮妲”、9 月 13 日来袭的台风“莫兰蒂”、10 月 20 日台风“海马”时期，表面水平位移达到预警值；同时也受现场填埋作业影响，如 2017 年 3 月 29 日现场平台加高，车辆出入表面位移监测点布设区域，也造成了较大范围的超限现象。

2.3 深层侧向水平位移

填埋场各监测区域深层水平位移点以 ZK2-01、ZK2-05、ZK2-19、ZK2-07 为例，监测数据如图 7 所示。监测过程中，库区堆体持续向外滑移，可以发现位移变化方向集中以堆体一侧为主，不同日期堆体最大水平位移均发生在浅层，而深层位移量相对较小。其主要原因是，浅层堆体的荷载强度低，侧向变容易，而随着堆体深度的增加，上部加载使得下部堆体荷载加大，侧向变形逐渐减小，符合堆体的滑移规律^[20-21]。堆体日均滑移速率在 1~8 mm·d⁻¹，表层累计水平位移 250~950 mm。其中，中部区域监测点位 ZK2-05 表层水平位移为 950 mm，西南侧区域 ZK2-07 为 350 mm，北侧区域 ZK2-01 为 510 mm，南侧区域 ZK2-19 为 250 mm，位于堆体边坡中部和北侧区域处滑移速率大于其他位置，这与水位分析的数据基本一致 (表 2)。通过对数据的观测，可以看出，不同填埋区域的深层水平位移变化趋势不同。中部、西南侧、北侧和南侧区域分别在 0~10 m、0~12 m、0~8 m 和 0~7 m 范围内水平位移变化明显，填埋区北侧边坡区域的坡度较大。由于不同区域的埋深不同，导致深层水平位移较大^[22]，堆体边坡处共有 11 处监测点位滑移速率大于 2 mm·d⁻¹ 且深度超过 10 m。西南侧区域 ZK2-07 的浅层水平位移在后期有所变化，主要是因为填埋堆体整形工程使得位移方向发生变化，累计水平位移有所减小。

通过分析所有深层水平位移监测点监测数据可以看出，雨季滑移速率大于旱季。这说明，降雨量仍是影响堆体稳定性的主要因素，这与水位监测分析的结果一致。位于作业区域的中部填埋高度高，水位变化大，同时深层水平位移较高，是填埋过程中需要重点监测的位置；而位于堆体区域的北侧，水位变化不明显，但深层水平位移显著，应在填埋过程中着重观测深层位移情况，避免堆体的深层位移滑动。陈云敏^[10]等指出，当监测到深层水平位移较高时，可及时采取应急降水等措施降低水位，以防止堆体出现不稳定因素，诱发安全事故。

2.4 堆体边坡稳定性分析

结合现场地形及堆体监测结果情况，本研究选取一组可能出现失稳的滑移面，利用库底地形

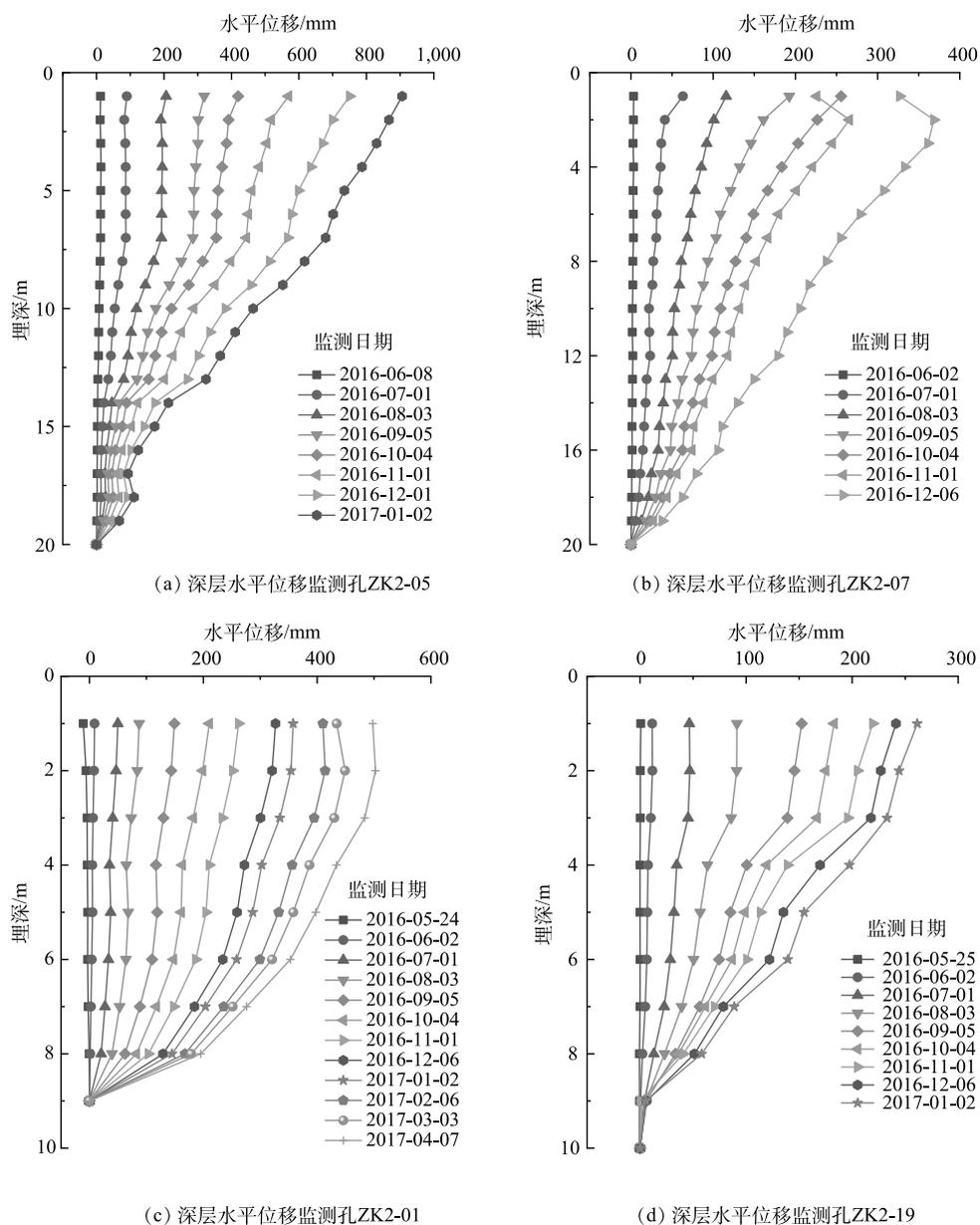


图7 堆体深层水平位移监测结果

Fig. 7 Monitoring results of deep horizontal displacement of the landfill pile

以及勘查数据画出剖面图,如图8(a)和图8(b)所示(剖面1—1)。结合前文水位测得数据,确定剖面主水位高度在堆体库底以上6~21 m范围内,滞水位埋深在堆体表面以下0~12 m范围内。现状水位条件下堆体稳定性计算结果如图8(c)所示,分析该剖面条件下的稳定安全系数为1.427,达到规范要求安全系数1.35^[19],垃圾堆体目前自身处于较为稳定的状态。当继续堆高10 m时,堆体安全系数为1.228,不能满足规范1.35的要求。因此,要降低堆填高度,及时采取相应的堆体稳定控制措施,如抽排降水、堆体反压等来保障堆体的安全^[18]。

不同堆填高度条件下堆体稳定性计算结果如图9所示。从图中可以看出,水位对稳定性有较大影响,随着渗沥液水位的下降,堆体安全系数逐渐增大。在现状水位条件下,后续堆填高度越大,对渗沥液水位控制要求越高。在现状堆体体型条件下,即类似填埋规模(800 t·d⁻¹)和坡比条件(1:3)条件下,填埋场警戒水位埋深约为5 m,该值与国内某些填埋场的警戒水位接近,如陈赞等^[15]

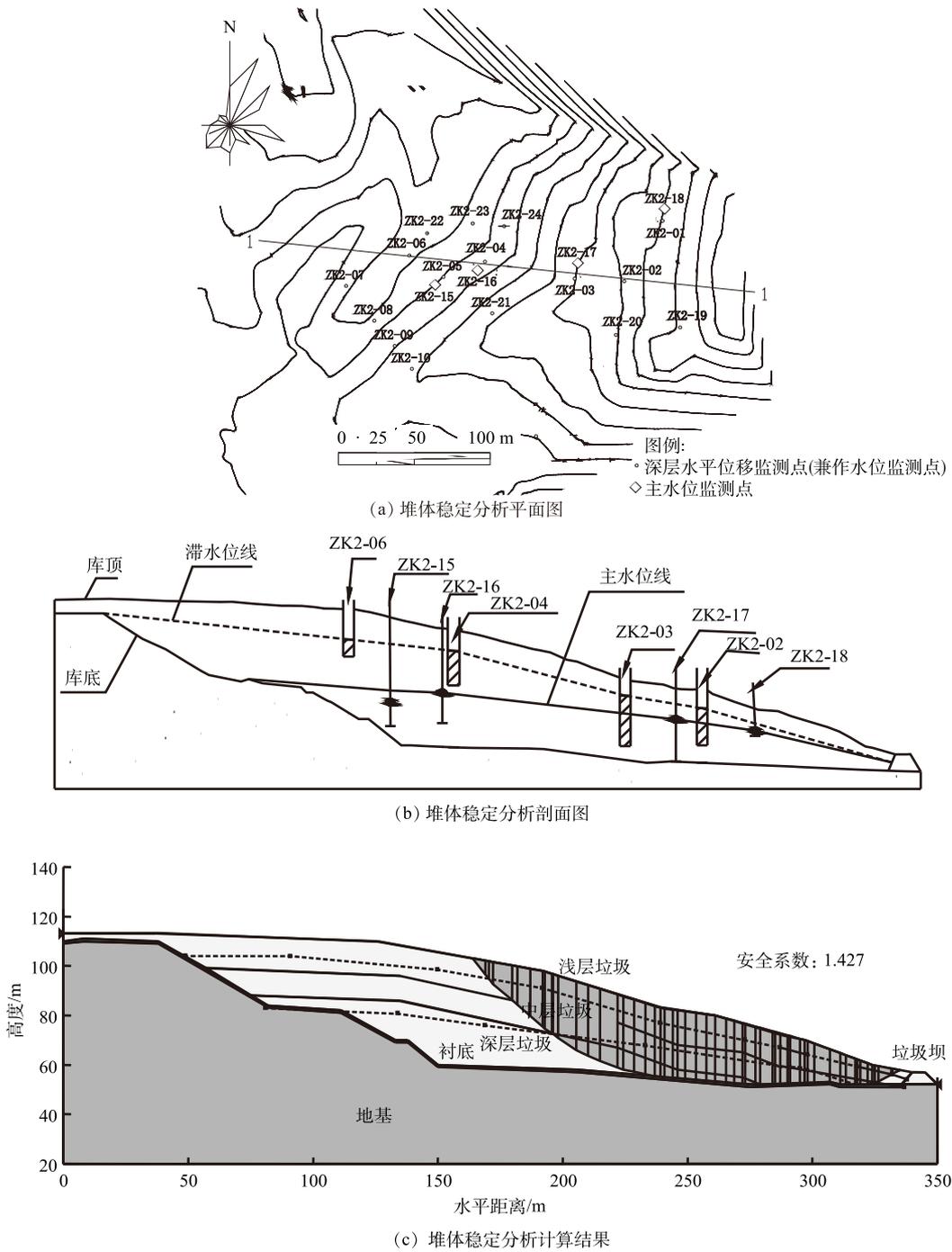


图 8 填埋场堆体稳定性分析剖面及计算结果

Fig. 8 Calculation results of local stability and overall stability of the landfill pile under present conditions

研究了江苏省某山谷型生活垃圾填埋场的警戒水位埋深为 5.5 m~7 m，朱文明等^[16]研究了上海老港综合填埋场生活垃圾填埋堆体的警戒水位埋深为 4 m~5 m，说明该警戒水位可作为同类型填埋场的参考，为堆体稳定性监测提供预警支撑。

从图中还可以看出，填埋堆体的稳定安全系数与渗滤液水位埋深变化一致，即水位埋深增大，稳定安全系数也相应增大。管仁秋等^[11]研究发现，渗滤液水位埋深每升高 10%，稳定安全系数增大约 25%，与本研究结果基本相符。堆体的水位监测和位移监测一定程度上可作为垃圾堆体

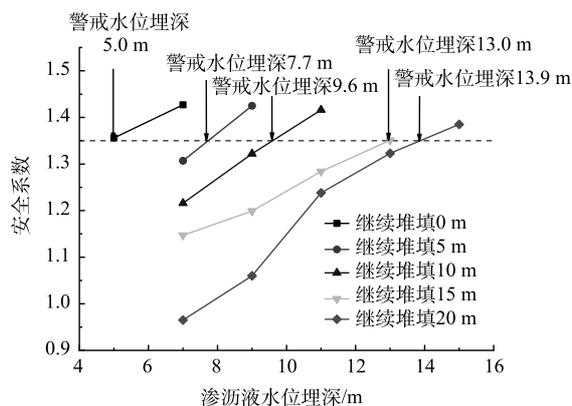


图9 填埋堆体警戒水位高度

Fig. 9 Height of warning water level of the landfill pile

稳定安全的关键性指标,在堆填厚度较大的区域,应综合进行水位观测和位移观测,在边坡区域,应重点进行位移观测。当发堆体水位升高至5 m以上时,需要采取相应的降水措施,降低堆体内渗沥液水位,以保证安全稳定。

3 结论

1) 填埋堆体滞水位埋深呈现雨季抬升旱季降低趋势,摆动幅度为0~4 m。堆体主水位在库底以上12~25 m范围内,堆体稳定过程中呈降低趋势,降低幅度为1~2 m。在填埋场中部堆填区域,滞水位和位移数据摆动较大,易导致堆体稳定性问题。

2) 堆体深层水平位移速率在1~8 mm·d⁻¹之间,且深度超过10 m,堆体边坡处表面水平位移速率大于其他位置,雨季表面水平位移滑移速率大于旱季,表面累计水平位移800~1 600 mm。表面位移超限主要集中在雨季,受降水台风等恶劣天气影响较大,同时也受现场作业影响。

3) 渗沥液水位对填埋堆体稳定性有较大影响,随着渗沥液水位的下降,堆体安全系数逐渐增大。在此类堆体体型条件下,填埋场警戒水位埋深可设为5 m。

参考文献

- [1] 黄震东. 垃圾填埋场生物炭改性覆盖层甲烷减排数值模拟研究[D]. 广东: 汕头大学, 2021.
- [2] 何海杰, 兰吉武, 陈云敏, 等. 西北地区某填埋场堆体滑移过程监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1721-1726.
- [3] 米琼, 戴世金, 张瑞娜, 等. 干污泥高维填埋的堆体边坡稳定性模拟与分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1397-1402.
- [4] 刘树峰, 李鹤, 兰吉武. 某市固体废物填埋场稳定安全评价与控制措施[J]. 环境卫生工程, 2013, 21(3): 50-53.
- [5] 王凤侠, 兰天, 戴世金, 等. 山谷型生活垃圾卫生填埋场封场后堆体稳定性研究[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(3): 77-83, 89.
- [6] 戴世金, 李聪明, 王凤侠, 等. 生活垃圾处置园区安全与环境智慧平台的构建与实践[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(2): 9-15.
- [7] 詹良通, 罗小勇, 管仁秋, 等. 某垃圾填埋场污泥坑外涌及其引发下游堆体失稳机理[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1189-1196.
- [8] 赵由才, 郭兴民, 朱琳楠. 垃圾填埋场稳定化研究[J]. 重庆环境科学, 1994(05): 8-12.
- [9] 王罗春, 赵由才, 陆雍森. 垃圾填埋场稳定化评价[J]. 环境卫生工程, 2001(4): 157-159, 166.
- [10] 陈云敏, 王立忠, 胡亚元, 等. 城市固体废物填埋场边坡稳定分析[J]. 土木工程学报, 2000(3): 92-97.
- [11] 管仁秋. 城市固体废弃物填埋场边坡稳定分析及工程控制措施[D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
- [12] 沈磊. 城市固体废弃物填埋场渗沥液水位及边坡稳定分析[D]. 浙江: 浙江大学, 2011.
- [13] 朱文明, 张军. 老港综合填埋场生活垃圾填埋堆体稳定性理论评估研究[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(5): 77-81, 85.
- [14] ZHAN 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] NAVEEN B. -P., SIVAPULLAIAH P.-V., SITHARAM T.-G. Compressibility and Shear Strength of Dumped Municipal Solid Waste[J]. Journal of Solid Waste Technology and Management, 2014,

- 40(4): 327-334.
- [16] ZHANG Zhen-Ying, WU Da-Zhi. Experimental Study on the Shear Strength Characteristics of Municipal Solid Waste[J]. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 219: 660-664.
- [17] HETTIARACHCHI Hiroshan, THANI Janak. Variation of Shear Strength Properties with Organic Fraction in Unsaturated Synthetic Municipal Solid Waste[C]//American Society of Civil Engineers, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011: 1414-1423.
- [18] 陈云敏, 兰吉武, 李育超, 等. 垃圾填埋场渗沥液水位壅高及工程控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 154-163.
- [19] KOERNER Robert-M., SOONG Te-Yang. Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures[C]//American Society of Civil Engineers, Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2000: 1-38.
- [20] 孔庆宇, 袁小林, 黄作俊. 天津南港工业区防波堤工程施工监测与安全性分析[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(7): 141-143.
- [21] 康志军, 谭勇, 李想, 等. 基坑围护结构最大侧移深度对周边环境的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2909-2914, 2920.
- [22] 叶东昌. 大型基坑工程变形监测方案优化及应用研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2015.

(责任编辑: 金曙光)

Monitoring and stability analysis of a typical domestic waste sanitary landfill site

DAI Shijin^{1,3}, QIAN Jianwen², LAN Jiwu^{2*}, LIU Chenxu², WANG Fengxia¹, ZHAO Youcai³

1. Comprehensive management service center of Shenzhen Baoan District appearance of the city environment, Shenzhen 518101, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. School of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China

*Corresponding author, E-mail: lanjiwu@zju.edu.cn

Abstract In view of the stability of domestic waste landfill, a typical sanitary landfill in south China was taken as the research object, and the safety monitoring of the landfill was carried out for one year. By arranging on-line monitoring equipment such as leachate level, surface displacement and deep lateral displacement, the continuous data of safety characteristics were obtained. GeoStudio software is furthermore used to analyze the influence of landfill height and leachate level on slope stability. The results showed that the stagnant water level of the landfill fluctuated between 0-4 m, and the main water level decreased between 1-2 m. The water level height and surface displacement rate of leachate are obviously affected by rainfall and landfill operation in local area. At the initial stage of landfill, the pile body continued to slip outward, and the average daily slip rate was 1-8 mm/d. Because of the large thickness of the heap and the fast filling rate, the deep horizontal displacement rate of the operation area is higher than that of the two side slopes, and the sliding rate in rainy season is higher than that in dry season. The accumulated lateral displacement of the surface layer reached 950 mm in one year. The results showed that leachate level has great influence on the stability of landfill. With the decline of leachate level, the safety factor of landfill gradually increases, and the buried depth of the warning level of landfill can be set to 5.0 m. These results can provide important support for the safety and stability control of landfill.

Keywords landfill; field monitoring; leachate level; landfill height; warning value