

DOI: 10.11779/CJGE201509022

# 西北地区某填埋场堆体滑移过程监测与分析

何海杰<sup>1,2</sup>, 兰吉武<sup>\*1,2</sup>, 陈云敏<sup>1,2</sup>, 郑龙华<sup>1,2</sup>, 史 炜<sup>3</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058;

3. 西安市固体废弃物管理处, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 在西北某大型填埋场边坡区域布设渗滤液水位、堆体表面位移和深层侧向位移监测点并开展现场监测。在 2014 年 4 月~8 月间, 受垃圾堆载、填埋作业机械动荷载和强降雨的影响, 堆体边坡区域发生 3 次大范围滑移, 最大滑移报警面积达 30029 m<sup>2</sup>, 最大日均表面位移 253 mm, 滑移深度达 17 m。反分析该填埋场垃圾堆填边坡滑移全过程, 掌握了除堆体水位和强降雨因素外, 垃圾堆载、动荷载等因素作用下的堆体滑移规律。进一步分析降低水位、分层压实、土工织物加固等措施的抗滑效果, 结果表明, 采取降水压实及土工织物加固措施可满足堆体后续堆填的稳定要求。

**关键词:** 填埋场; 堆体滑移; 现场监测; 稳定控制

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)09-1721-06

**作者简介:** 何海杰(1987-), 男, 浙江椒江人, 博士研究生, 主要从事环境土工方面的研究。E-mail: he\_haijie@zju.edu.cn。

## Monitoring and analysis of slope slip process at a landfill in Northwest China

HE Hai-jie<sup>1,2</sup>, LAN Ji-wu<sup>1,2</sup>, CHEN Yun-min<sup>1,2</sup>, ZHENG Long-hua<sup>1,2</sup>, SHI Wei<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and

Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Xi'an Solid Waste Administration, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The field monitoring results from a large landfill in Northwest China are introduced. The monitoring items include leachate level, surface horizontal displacement and deep lateral displacement at the landfill. The monitoring results show that there were 3 large slips in the landfill from April to August in 2014, caused by garbage load, dynamic load and heavy rainfall. The maximum sliding area is 30029 m<sup>2</sup> and the sliding depth is 17 m. By monitoring and back-analyzing the overall process of the slope sliding of a landfill in the Northwest region of China, the slip principles of the slope are got, that is, the factors include garbage load, dynamic load, leachate level and heavy rainfall. The antislip effects of the measures of drawdown of leachate level by pumping, stratified compaction and geotextile reinforcement are analyzed. It is shown that the requirements of stability can be satisfied when using the measures of drawdown of leachate level by pumping, compaction and geotextile reinforcement.

**Key words:** landfill; slope slip; field monitoring; stability control

## 0 引 言

城市生活垃圾的处理主要有卫生填埋、焚烧、堆肥等方式<sup>[1-3]</sup>。在中国, 约80%的垃圾以填埋方式处理。由于大型卫生填埋场具有填埋容量大、单位处理成本低、土地利用率高、便于集中化管理等优点, 被普遍建设使用。但这些填埋场随着填埋高度逐渐增高, 堆体稳定问题日渐突出。

填埋场失稳破坏不但会泄露填埋气及渗滤液, 严重污染生活环境, 甚至会造成大规模的人员和财产损失。从20世纪80年代开始, 世界各地发生多次垃圾堆体的失稳破坏。例如, 2000年7月, 菲律宾马尼拉填埋场发生滑坡, 导致200多人死亡、600多人失踪。可见, 对于填埋堆体的稳定性<sup>[4-6]</sup>研究具有重要的理论和实践意义。Korner等<sup>[7]</sup>对世界各地10个填埋场堆体滑坡

进行统计, 发现70%的滑坡诱因为填埋体内渗滤液水位过高, 其中3个滑坡是强降雨导致。詹良通等<sup>[8-9]</sup>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。目前填埋堆体的稳定性研究主要焦点在堆体高水位上; 而垃圾堆载、车辆作业动荷载对堆体稳定的影响, 国内外并没有现场监测和理论研究文献。

本文在西北某填埋场堆体边坡滑移现场布设渗滤液水位、堆体表面位移、堆体深层侧向位移监测点开展了近1年的监测, 特别是2014年4月起, 获得了该

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2012CB719800)

收稿日期: 2014-11-15

\*通讯作者

堆体边坡受多种因素影响的滑移过程。通过监测与分析,第一次系统掌握了除堆体水位和强降雨因素外,垃圾堆载、动荷载等因素作用下的堆体滑移规律;并进一步进行理论分析,揭示了后续填埋堆体的稳定状况和稳定控制方案建议,可为大型卫生填埋场的现场稳定监测、分析和控制提供参考。

## 1 场地条件

该填埋场是某市唯一的生活垃圾处理设施,占地 1100 多亩,总容积 4900 多万  $\text{m}^3$  (见图 1)。填埋场建设于黄土台塬区的狭长沟谷内,沟谷谷底上下游长度超过 1000 m,谷底标高 498~546 m;谷底平坦段横向宽度 50~100 m;经长期垃圾填埋,下游堆体现有坡高 70~80 m (见图 2);堆体最终设计填埋高度 120 m,为国内最高垃圾堆体边坡之一。该地区年降水量为 582.5~652.8 mm,蒸发量为 1372 mm。前期勘察结果表明,由于采用了多层黄土中间覆盖层,堆体内存在多层滞水;而最上面一层填埋堆体内,滞水位高度与南方填埋场相近,约为地面以下 3 m。

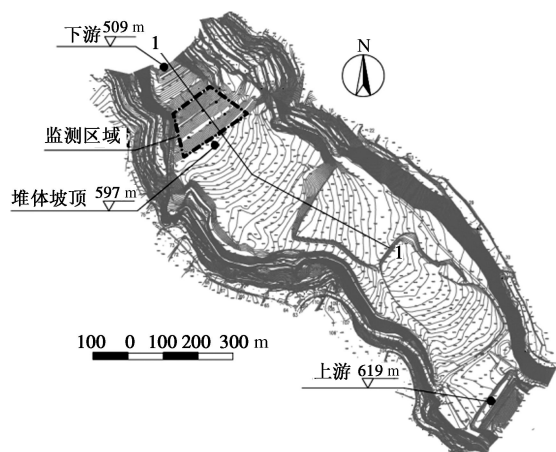


图 1 堆体平面布置图

Fig. 1 Layout of landfill

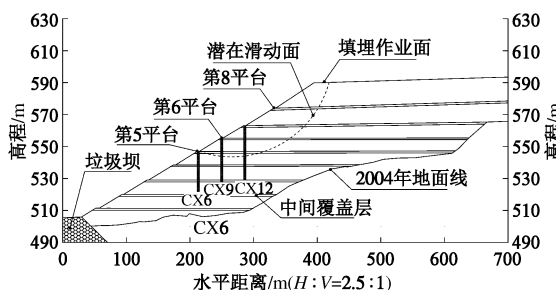


图 2 堆体 1-1 剖面图

Fig. 2 1-1 Cross-section of landfill

## 2 现场监测

### 2.1 监测点布置

2014年4月,填埋场在第8平台顶部进行第9层垃圾

倾倒作业,临近倾倒作业面的第7层、第8层堆体表面观测到了局部滑移迹象,因此在第7层、第8层堆体边坡区域增设了表面位移监测点(W1-W53);同时利用现场第5~第7平台已建的深层位移兼水位监测点(CX5-CX12)开展了深层测斜和水位监测。如图3,表面位移监测点共53个,深层位移兼水位监测点共8个。

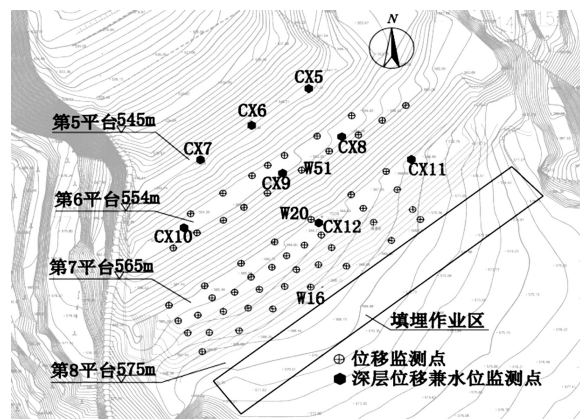


图 3 监测点平面布置图

Fig. 3 Layout of monitoring points

### 2.2 监测结果

#### (1) 表面位移

《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》规定连续两日表面位移速率超过 10 mm/d 需要报警,据此确定监测报警面积。如图 4,自 2014 年 4~8 月,堆体发生 5 次大范围报警,其中有 3 次报警面积超过 10000  $\text{m}^2$ ,分别发生在 2014 年 4 月 9~24 日、2014 年 7 月 31 日、2014 年 8 月 14 日。

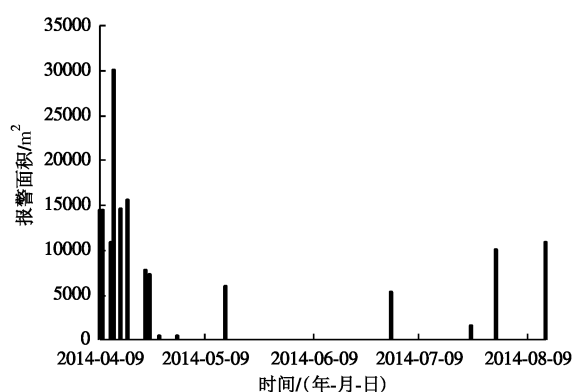


图 4 堆体边坡报警面积

Fig. 4 Alarm area of landfill

在 2014 年 4 月 9~24 日期间出现大范围长时间的报警,报警面积最大为 30029  $\text{m}^2$ ,持续时间大约 15 d。堆体边坡位移速率很大,尤其是第 8 平台堆体边坡中部 W16 点单日最大水平位移达到 253 mm,第 7 平台堆体中部 W20 点当日水平位移也达到 80 mm,第 6

平台堆体边坡中部 W51 点的位移速率约为 30 mm, 局部区域形成明显的陡坎 (图 5)。在此期间, 堆体第 9 层垃圾正在近边坡区域进行填埋作业, 垃圾车、推土机等机械活动频繁, 同时在 4 月 11 日伴有 26.9 mm 的降雨 (见图 6)。第 9 层平台近边坡区域作业完成后, 位移减缓, 报警面积逐步减小。可见, 上述位移过程与降雨、第 9 层垃圾堆载和填埋过程中的作业机械动荷载有密切联系。



图 5 堆体边坡滑移形成的陡坎  
Fig. 5 Scarp due to sliding of landfill slope

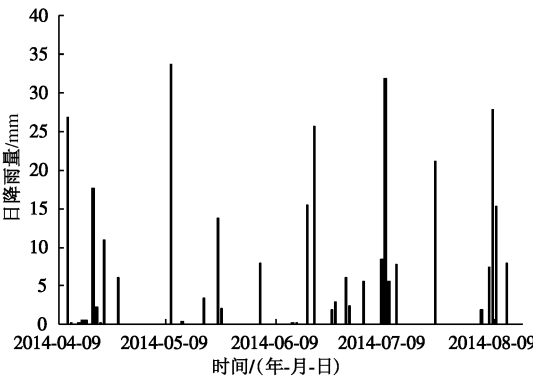


图 6 降雨量分布图  
Fig. 6 Distribution of daily rainfall

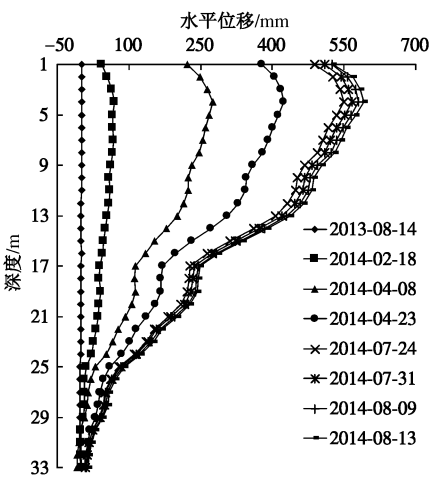
2014 年 7 月 31 日, 观测到 W16 监测点的位移量上升, 从 7 月 24 日的 7.5 mm/d 迅速升到 59.5 mm/d, 报警面积范围增大到 10076 m<sup>2</sup>。2014 年 8 月 14 日, W16 监测点的位移量急剧上升, 从 8 月 6 日的 2 mm/d 迅速升到 62 mm/d, 报警面积范围增大到 10925 m<sup>2</sup>。在此期间, 该区域无作业机械工作, 且垃圾倾倒作业面转移至上游区域, 距离此处较远。对照该地区降雨量, 2014 年 8 月 7~9 日出现明显降雨, 降雨量为 50.6 mm。降雨与报警面积增大有关。

冯世进<sup>[10]</sup>指出城市固体废弃物可看作是由“基本相”和“加筋相”组成。垃圾中含有布、树枝等纤维状成分, 该成分会在城市固废发生变形时起到加筋作用, 尤其是在发生较大变形的条件下, 产生附加的黏聚力, 其应力-应变关系为应变硬化型。Jessberger 等<sup>[11]</sup>通过大三轴试验也观测到了应变硬化现象。填埋

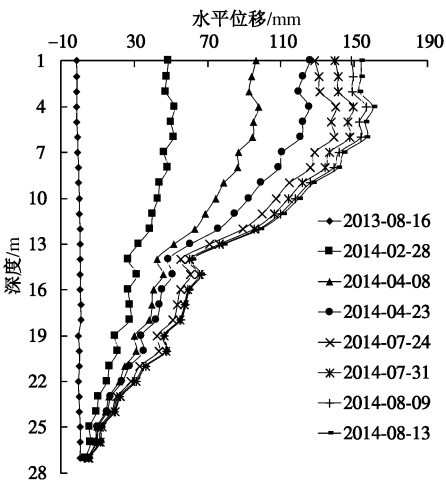
场局部区域发生较大变形, 变形后该区域垃圾的抗剪强度有所提升, 这可能是堆体发生较大滑动, 却没有发生大面积滑失的原因。

(2) 深层位移

选取位于 1-1 剖面上分别位于第 7 层、第 6 层和第 5 层平台上的 CX12、CX9、CX6 三个深层水平位移兼水位监测点, 绘制其监测结果见图 7。由图 7(a) 可知, 在 2014 年 2~8 月期间, CX12 从地面至深度 17 m 处发生显著位移, 最大累积位移量达到 590.9 mm; CX9 从地面至 14 m 深度处发生明显侧向位移, 最大累计位移量达到 160.3 mm; CX6 虽然整体发生顺坡向位移, 但总的累计位移量小于 60 mm。根据监测结果可知, 本次堆体滑移的最大深度发生在第 7 层平台 17 m 深度处, 滑移区域为堆体边坡第 6, 7, 8 层平台。根据 CX6 未见明显滑移以及 CX9 和 CX12 中的显著滑移点位置可知堆体本次滑移出口为第 6 平台和第 5 平台之间, 推测堆体潜在滑移面如图 2 所示。



(a) 深层位移兼水位监测孔 CX12



(b) 深层位移兼水位监测孔 CX9

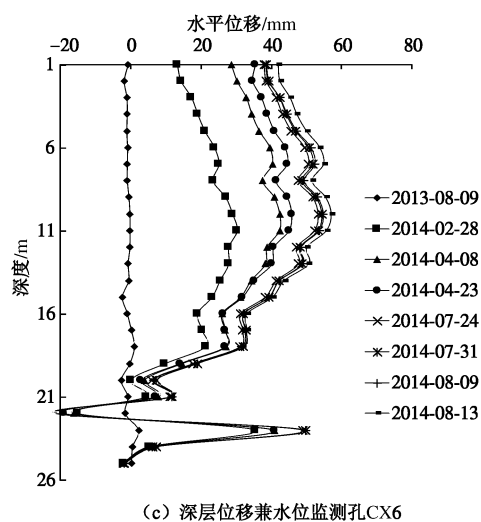


图 7 深层侧向位移监测结果

Fig. 7 Monitoring results of slope-direction horizontal displacement

(3) 渗滤液水位监测

渗滤液水位监测结果如图 8 所示，各监测点的水位基本维持不变，而 CX6、CX10 和 CX12 在 7 月下旬出现较大变化。结合图 6，7 月 8 日~12 日该地区连续降雨，降雨量达到 53.7 mm，降雨导致渗滤液水位上升。CX12 水位埋深从 7 月 13 日的 12.35 m 升至 7 月 24 日的 7.92 m，CX6 从 24.58 m 升至 19.15 m，两只孔水位分别上升 4.43 m 和 5.43 m。

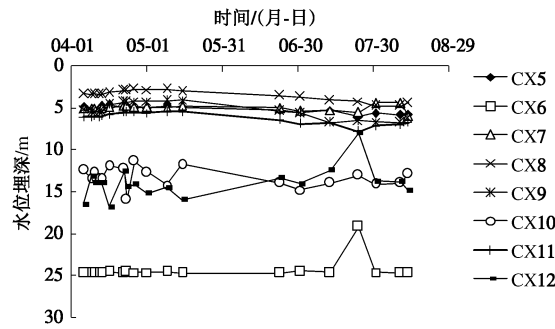


图 8 渗滤液水位埋深监测结果

Fig. 8 Monitoring results of leachate level depth

3 滑移边坡稳定性分析

3.1 堆体边坡滑移过程反分析

利用 GEO-SLOPE 软件中 SLOPE/W 模块的 Morgenstern-Price 极限平衡法对滑移边坡进行反分析，计算边坡的稳定安全系数。分析模型根据 2014 年 4 月的地形剖面图建立，如图 9 所示。各材料强度参数取值如表 1 所示：包括底部黄土层、垃圾坝、垃圾等。本文垃圾强度参数取值主要依据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》，根据不同的龄期和埋深

确定，把垃圾分成新垃圾和老垃圾。

笔者曾在现场发现，滑移较明显时，垃圾正处于第 9 平台靠近边坡位置倾倒，而且第 8 平台位置有挖掘机在施工第 9 平台底部盲沟。根据机械公司出具的施工机械参数，推土机对堆体的荷载为 105 kPa，挖掘机对堆体的荷载为 44 kPa。

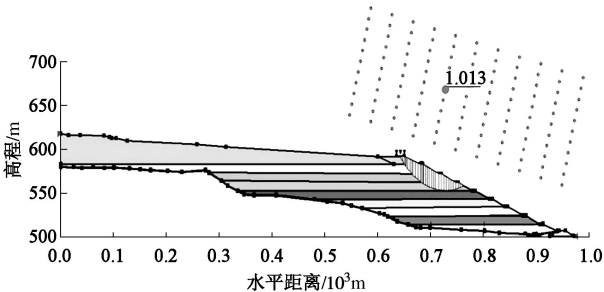


图 9 不同施工条件下下游垃圾堆体稳定安全系数

Fig. 9 Factor of safety for downstream waste slope under different construction conditions

表 1 各材料的抗剪强度参数取值

Table 1 Shear strength parameters for materials

材料	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
垃圾坝	19	28	10
黄土	19	22	30
新垃圾	12	20	8
老垃圾	15	30	0

本文根据作业机械荷载以及第 9,8 平台上不同工况对堆体的稳定性进行分析。如表 2 所示，当第 9, 8 平台处于最大荷载作用下，下游堆体的稳定系数接近 1，处于临界稳定状态。

表 2 不同施工荷载作用下下游垃圾堆体的稳定安全系数

Table 2 Factor of safety for downstream waste slope under different construction conditions

第 9 平台荷载/kPa	第 8 平台荷载/kPa	稳定安全系数
0	0	1.118
105	0	1.013
105	44	1.003

3.2 压实度对边坡稳定影响分析

《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》指出，当垃圾的压缩变形从 5% 上升至 20% 后垃圾的抗剪强指标黏聚力从 20 kPa 提高至 35 kPa，摩擦角从 8° 提高至 18°。本文分别选取了不同压实程度的垃圾来进行模拟分析，它们的强度指标根据其压实程度来选取。

表 3 分析了不同压实条件下的稳定安全系数，当垃圾从未压实至高度压实时，垃圾的稳定安全系数从 1.013 提高至 1.735，约提高了 70%。因此，垃圾运营过程中必须控制好垃圾的压实度，当垃圾的内摩擦角为 14°，黏聚力为 27 kPa 时，基本上满足堆体的稳定

性要求。

表 3 不同压实条件下游垃圾堆体的稳定安全系数

Table 3 Factor of safety for downstream waste slope under different compaction conditions

压实程度	内摩擦角 ( $^{\circ}$ )	黏聚力 /kPa	稳定安全系数
未压实	8	20	1.013
轻度压实	10	23	1.214
中度压实	14	27	1.496
高度压实	18	31	1.735

3.3 水位迫降对边坡稳定影响分析

表 4 分析了不同渗滤液水位下的堆体稳定性，可以看出水位对稳定性有较大影响。当堆体水位下降 20 m 时，安全系数提高至 1.145，满足短期稳定性要求，但安全储备不足，需要结合其他安全措施提高堆体稳定，达到长期稳定控制要求。

表 4 不同降水条件下游垃圾堆体的稳定安全系数

Table 4 Factor of safety for downstream waste slope under different water level conditions

降水深度/m	稳定安全系数
2	1.026
5	1.063
10	1.128
20	1.145

3.4 加筋材料对边坡稳定影响分析

如表 5 所示，当在靠近边坡 50 m 范围内的铺设不同强度的土工格栅，垃圾的安全系数有较明显的上升。当铺设 80 kN/m 的土工织物后，垃圾的安全系数上升至 1.249，较不采取措施时的 1.013 上升了约 15%~20%。因此，对靠近边坡位置的垃圾应采取加筋措施提升强度。

表 5 不同加筋材料下垃圾堆体的稳定安全系数

Table 5 Factor of safety for downstream waste slope under different reinforced materials

加筋材料强度/(kN·m <sup>-1</sup> )	稳定安全系数
30	1.138
50	1.182
80	1.249

3.5 综合整治对边坡稳定影响分析

表 6 分析了垃圾堆体采取措施与否的稳定性，当堆体继续按现有的作业方式处理，垃圾堆体的安全系数为 1.029，处于临界稳定状态。当在堆体前 50 m 范围内，每隔 0.7 m 设置一层 80 kN/m 的土工织物，并且对堆体降水 5 m，同时提升垃圾的压实度，使垃圾的抗剪强度提升至内摩擦角为 14°，黏聚力为 27 kPa，堆体的安全系数达到 1.308。

表 6 后期堆高 30 m 综合处理前后垃圾堆体的稳定安全系数

Table 6 Factor of safety for downstream waste slope before and after comprehensive treatment of 30 m in height

综合处理前后	稳定安全系数
未处理堆高 30 m	1.029
处理后堆高 30 m	1.308

4 结论与建议

本文系统监测了西北某填埋场填埋作业过程中堆体边坡区域发生的大面积滑移过程，通过现场监测数据整理和边坡稳定反分析，得出以下结论与建议：

(1) 2014 年 4 月~8 月间，在填埋场第 9 层垃圾堆体填埋作业过程中及其堆填完成后，现场观测到第 6，7，8 层堆体边坡发生 3 次报警面积超过 10000 m<sup>2</sup> 的显著滑移，其中报警面积最大达 30029 m<sup>2</sup>，单点表面日均最大位移 253 mm/d。

(2) 根据深层位移监测结果，滑移体深度可达第 7 层堆体顶部之下 17 m，滑移面出口位于第 6 平台和第 5 平台之间。

(3) 第一次大面积滑移由垃圾堆载、填埋作业动荷载和强降雨等综合因素引发，后两次较大面积滑移由强降雨引发。

(4) 提高压实度、降低水位、设置加筋材料均能有效提高堆体的稳定性，其中压实度的提高对堆体的安全系数影响最大。

(5) 若继续采取原有作业方式继续堆高，堆体很可能发生更严重的失稳滑移；采取本文提出的压实、降水及土工织物加固综合措施可以满足堆体继续堆高的稳定控制要求。

参考文献：

[1] 刘毓璜, 李琳, 贺怀建. 城市固体废弃物填埋场的岩土工程问题[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 618 - 621. (LIU Yu-chuan, LI Lin, HE Huai-jian. Investigation on geotechnical problems of municipal solid waste landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 618 - 621. (in Chinese))

[2] 张宪生, 沈吉敏, 厉伟, 等. 城市生活垃圾处理处置现状分析[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(4): 60 - 64. (ZHANG Xian-sheng, SHEN Ji-min, LI Wei, et al. Disposal and treatment of municipal solid waste: state-of-the-art[J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3(4): 60 - 64. (in Chinese))

[3] 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 等. 厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2563 - 2568. (ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, et al.

- Analysis of odor pollutants in kitchen waste composting[J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2563 - 2568. (in Chinese))
- [4] 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. (QIU Zhan-hong, HE Chun-mu, ZHU Bing-jian, et al. Investigations of water transport in valley-type MSW landfills and their stabilities subjected to various rainfall patterns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(10): 3151 - 3155. (in Chinese))
- [5] 涂帆, 崔广强, 林从谋, 等. 垃圾填埋场稳定影响因素敏感性神经网络分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1168 - 1172. (TU Fan, CUI Guang-qiang, LIN Cong-mou, et al. Sensibility analysis of factors affecting stability of waste landfill based on neural network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1168 - 1172. (in Chinese))
- [6] 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, **29**(1): 20 - 25. (FENG Shi-jin, CHEN Yun-min, GAO Guang-yun. Analysis on transitional failure of landfill along the underlying liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 20 - 25. (in Chinese))
- [7] KOERNER R M, SOONG T Y. Stability assessment of ten large landfills failures[C]// Proceedings of Sessions of Geo Denver 2000, ASCE. Colorado: Geotechnical Special Publication. 2000: 1 - 38.
- [8] 詹良通, 兰吉武, 邓林恒, 等. 浓缩液回灌对垃圾填埋体水位及稳定性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, **34**(2): 126 - 131. (ZHAN Liang-tong, LAN Ji-wu, DENG Lin-heng, et al. Effect of concentrated leachate recirculation on leachate level and slope stability of municipal solid waste landfill[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2012, **34**(2): 126 - 131. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 冯世进. 城市固体废弃物静动力强度特性及填埋场的稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (FENG Shi-jin. Static and dynamic strength properties of municipal solid waste and stability analysis of landfill[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [11] JESSBERGER H L, SYLLWASSCHY O, KOCKEL R. Investigation of waste body behavior and waste structure interaction[C]// Proceedings of 4th International Landfill Symposium. CISA, Cagliari, 1995: 731 - 743.

## 第六届日中岩土工程研讨会

2015 年 8 月 31 日~9 月 1 日在日本札幌召开

第六届日中岩土工程研讨会 (The Sixth Japan - China Geotechnical Symposium) 于 2015 年 8 月 31 日~9 月 1 日在日本札幌召开。这是继前五届北京 (2003)、上海 (2005)、长江客轮 (2007)、冲绳 (2010)、峨眉山 (2013), 由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会和日本地盘工学会共同主办的系列会议。本次研讨会由日方 Takeshi Katsumi 和中方张建民、姚仰平担任组委会主席。研讨会吸引了 100 余位参会代表, 包括中方代表 40 余人, 日方代表 50 余人。研讨会邀请北海道

大学的 Tatsuya Ishikawa 和东南大学刘松玉分别做了主题报告; 邀请名古屋大学张锋、奥地利农业大学吴伟、澳大利亚纽卡斯尔盛岱超、香港理工大学殷建华、东京科学大学 Yoshiaki Kikuchi、日本地球科学与灾害防治研究所 Kazuo Tani、早稻田大学 Hirokazu Akagi 分别做了特邀报告; 研讨会还组织了 56 个口头报告, 会前安排了火山公园的技术参观。会议安排井然有序, 学术交流充分深入, 谨此向中日双方组委会的辛勤付出表示诚挚的敬意。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 供稿)