

某填埋场垃圾堆体边坡失稳过程监测与反分析

詹良通, 管仁秋, 陈云敏, 刘 钊

(浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 某填埋场是国内首批在场底铺设复合衬垫系统的大型卫生填埋场, 该场垃圾坝前堆体边坡于 2008 年 6 月连续强降雨期间发生失稳事件。介绍该堆体边坡失稳过程的现场监测结果, 包括坡面水平位移、深层侧向位移和渗滤液水位。基于监测数据, 开展堆体边坡稳定性反分析工作, 探讨复合衬垫系统界面抗剪强度取值方法, 提出抽排竖井迫降水位、铺膜防渗等应急抢险措施。现场监测和理论分析结果表明: 堆体边坡中高渗滤液水位是导致其失稳的关键因素, 堆体边坡水平位移速率和渗滤液水位高度呈明显正相关关系; 该堆体边坡失稳模式是沿场底复合衬垫系统中软弱界面的深层滑移; 斜坡场底上复合衬垫系统在滑移过程中发生位移-软化效应, 其界面强度介于峰值强度和残余强度之间; 抽排竖井迫降水位是最直接、有效的应急抢险措施。

关键词: 边坡工程; 垃圾填埋场; 复合衬垫系统; 现场监测; 渗滤液水位; 水平位移; 反分析

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)08 - 1697 - 09

MONITORING AND BACK ANALYSES OF SLOPE FAILURE PROCESS AT A LANDFILL

ZHAN Liangtong, GUAN Renqiu, CHEN Yunmin, LIU Zhao

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: The landfill studied in this paper is one of the earliest sanitary landfills with composite liner system installed in China. A slope failure took place in the landfill as a result of successive heavy rainfalls in June 2008. A field monitoring program was carried out to record the slope failure process. The monitoring items include surface horizontal displacement, deep lateral displacement, and leachate level within the slope. On the basis of the monitoring results, back analyses were carried out to access the slope stability, as well as to determine interface shear strength of the composite liner system. This paper also report the emergency measures taken for preventing further catastrophic failure of the huge landfill. The field monitoring and theoretical analyses came to the following conclusions. The high leachate level, which was found to be closely correlated with the measured displacement rate observed in the landfill is a major factor leading to the slope instability. The measurement of deep lateral displacement indicated that the slip took place along the weak interface of the composite liner system at the bottom of landfill. The significant lateral movement of waste body resulted in a displacement-softening effect on the interface strength of composite liner system, and hence the shear strength along the liner was in between the peak and residual strength. Drawdown of leachate level by pumping from vertical wells was found to be the most effective and workable emergency measure.

Key words: slope engineering; landfill; composite liner system; field monitoring; leachate level; horizontal displacement; back analysis

收稿日期: 2010 - 01 - 30; **修回日期:** 2010 - 03 - 29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878194, 50778163); “十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAJ06B02)

作者简介: 詹良通(1972 -), 男, 1995 年毕业于河海大学水文地质及工程地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事非饱和土力学、环境岩土工程和边坡工程等方面的教学与研究工作。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn

1 引言

填埋是目前国内城市固体废弃物(MSW)的主要处置方式,随着各城市垃圾清运量的快速增长,各填埋场垃圾堆体高度不断增加。现代卫生填埋场普遍采用复合衬垫系统,包括防渗层和渗滤液导排层,复合衬垫系统中土工合成材料界面(如土工膜(GM)/土工织物(GT)界面、压实黏土(CCL)/土工织物(GT)界面等)抗剪强度比较低,是垃圾堆体稳定的薄弱环节。我国填埋场十多年运营经验表明:渗滤液导排系统运行数年后即发生淤堵失效,加之国内填埋场雨污分流措施不当,导致南方降水丰富地区的填埋场渗滤液水位普遍较高。上述情况使填埋场垃圾堆体稳定安全问题日益突出,已有不少填埋场发生堆体失稳事故。

目前国内外对垃圾堆体稳定问题的研究侧重于填埋垃圾抗剪强度特性的测试^[1~6]、复合衬垫系统软弱界面强度特性的测试^[7~9]、垃圾堆体的静动力稳定性分析方法^[10~13]等。目前,国内在垃圾堆体失稳案例的现场监测方面工作非常缺乏,尚未见有垃圾堆体沿场底复合衬垫系统发生失稳滑动的实测数据,以致目前对垃圾堆体稳定评价方法及参数取值的反分析和实践检验工作还很少,也未见有关垃圾堆体稳定安全监测指标及警戒值方面的报道。

针对国内某填埋场垃圾堆体边坡失稳案例,笔者在现场布设了多个监测项目,系统、全面记录了该填埋场堆体边坡在2008年6月失稳过程中堆体边坡表面位移、深层侧向位移、渗滤液水位及变化情况,为该堆体边坡失稳模式的鉴别及应急抢险措施决策提供了重要依据,也为垃圾堆体边坡稳定评价方法的实践检验和安全监测指标的选取提供了重要数据。本文主要介绍了该垃圾堆体边坡失稳过程现场监测与反分析结果。

2 场地条件

2.1 工程地质条件

该填埋场是我国第一批建成的大型卫生填埋场,是解决南方某城市生活垃圾出路的重要基础设施,属于典型的山谷型填埋场。填埋场占地面积 $149\times 10^4\text{ m}^2$,设计总容量 $47\times 10^6\text{ m}^3$,总服务年限大于30a,分为3期建设,一期工程于1996年建成并

投入使用至今。填埋场自1997年运行以来,累计处置生活垃圾 $98\times 10^5\text{ t}$,处置市政污泥 $8\times 10^5\text{ t}$ 。当前日填埋量3500 t/d,占该城市垃圾量的32%,垃圾体厚度达60m,填埋面积 $22.5\times 10^4\text{ m}^2$ 。

该填埋场底部山谷地形自北向南逐步降低,在山谷的狭窄出口处设置垃圾坝以阻挡垃圾堆体(见图1)。在垃圾坝前方(即WN方向),垃圾堆体以1:3.5~1:4的坡度放坡填筑,形成一个斜坡(120~160m高程),坡高约40m,平均坡度为15°,局部坡度较陡,特别在155m平台道路下游侧的坡度达35°。该堆体边坡区域(120~160m高程)占地面积约 $3\times 10^4\text{ m}^2$ 。该堆体边坡下卧的场底地形起伏较大,在该堆体边坡区域的西侧(即1-1剖面附近),垃圾堆体下面有一个鼓出的山脊,使得场底地形较陡,沿垃圾堆体边坡倾向的场底地形坡度达24°(见图2),大于场底衬垫系统中薄弱界面的内摩擦角,可能导致该部分垃圾体沿着场底衬垫系统界面发生滑动。该场场底基岩主要为砂岩(粉砂岩、石英砂岩),没有软弱夹层或结构面,场地地基稳定程度较高。

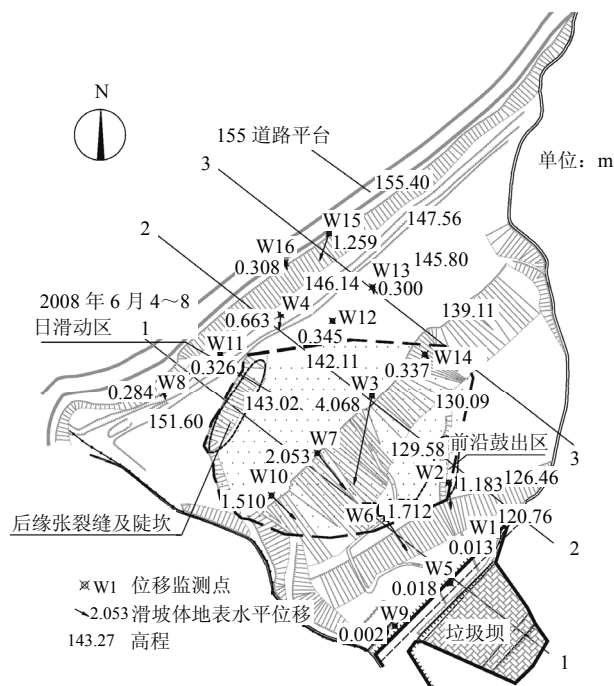


图1 坝前堆体边坡平面图

Fig.1 Site plan of the landfill slope

该填埋场是我国第一批采用水平衬垫系统的填埋场(见图3^[14])。根据国内外现有研究成果和实践经验,在上述场底衬垫系统结构中HDPE膜/土工织物界面及压实黏土/土工织物界面的抗剪强度较低,

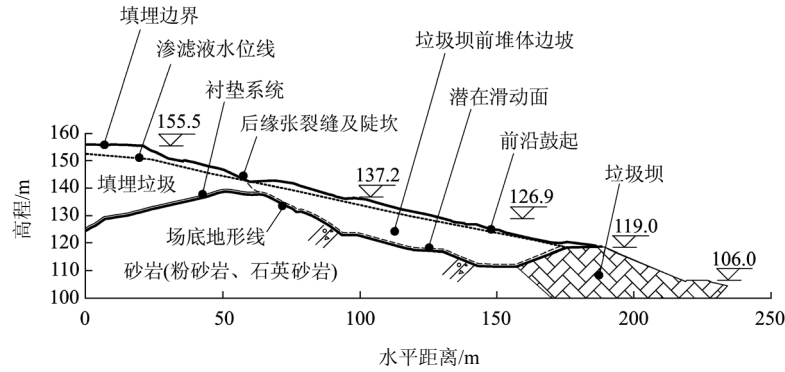


图 2 坝前堆体边坡剖面图(1-1 剖面)

Fig.2 Sectional drawing of the landfill slope(profile 1 - 1)

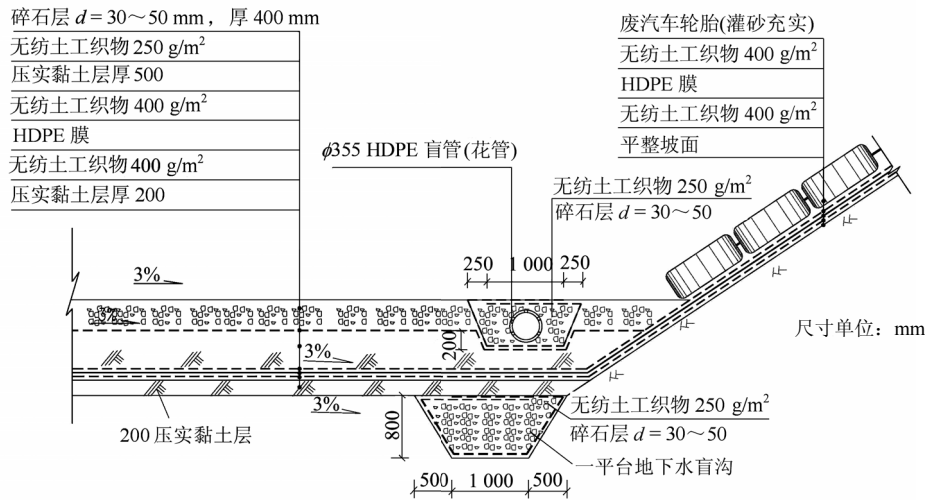


图 3 水平及斜坡场底上衬垫系统结构图^[14]

Fig.3 Structural drawing of composite liner system^[14]

是垃圾堆体稳定的薄弱环节。

垃圾坝前堆体从 2000 年开始填筑, 主要填埋物为城市生活垃圾, 含少量建筑垃圾, 堆体边坡表面的临时覆盖层为含碎石黏性土, 厚度 0.5~1.0 m。堆体边坡中垃圾的填埋龄期 3~10 a, 随埋置深度的增加而增大。

根据钻孔勘探及现场水位监测结果, 该场垃圾堆体中渗滤液水位很高(见图 2), 在斜坡部分渗滤液水位埋深只有 0~2 m, 显著降雨后水位升高 0.5~1.0 m, 在斜坡下部有大量渗滤液溢出。主场区渗滤液水位达到 150 m 高程以上, 强降雨之后水位可达 155 m 高程。如此高的渗滤液水位对垃圾堆体稳定性构成极大的威胁。场区内地下水导排系统目前工作正常, 场底衬垫下面不会有显著的承压水。

2.2 气象条件

深圳属亚热带海洋性季风气候, 年平均降雨量为 1 948.6 mm, 主要集中在 4~9 月。2008 年 6 月

降水异常偏多, 月降雨量 1 395.3 mm, 比历年同期平均值(296.5 mm)多 370%。该月有 4 次强降水过程: 6~7 日累计降雨量达 333.0 mm; 13~14 日降雨量分别为 175.0 和 150.1 mm; 17~18 日降雨量分别为 42.6 和 86.2 mm; 25~28 日普降暴雨到大暴雨, 25 日降雨量达到 203.9 mm。

3 堆体边坡失稳过程及抢险措施

根据现场踏勘, 自 2008 年 3 月初垃圾坝前边坡西侧后部发现张裂缝以来, 该局部堆体一直处于不稳定状态。业主组织开展堆体表面水平位移、沉降及渗滤液水位监测, 共布置了 11 个地表位移监测点(W1~W11)和 3 个水位监测孔(Q1~Q3)。4 月 17~18 日暴雨期间堆体边坡发生了 1~2 m 顺坡向滑移和沉陷, 能鉴别滑移区域为西侧 1/3 坡体。5 月底, 业主在笔者单位建议下开始组织实施一些抢险措

施,即在堆体边坡上打设测斜管和抽排降水竖井,并在堆体边坡及非填埋作业区铺膜,减少雨水入渗。6月6~7日暴雨期间,坡体中部(137 m 平台)和下部发生 1~4 m 顺坡向滑移,坡体后缘张裂缝处下沉产生 3 m 多高陡坎(见图 2),坡体下部多处鼓出或隆起,此时能鉴别滑移范围从西侧 1/3 扩大到 1/2~2/3 坡体。6月10日,垃圾坝前堆体边坡上 15 口抽排竖井全部安装完毕,开始迫降水位。除此之外,暴雨之后业主还组织实施了以下抢险措施:(1)加大场区铺膜防渗的面积。(2)分流导排:疏通所有地表水导排通道,分流和导排 155 m 高程以上主场区中凹地积水;并对垃圾坝前边坡渗滤液溢出点接导排管或修建碎石盲沟,把渗滤液排出场外。(3)坡脚反压,在临时反压平台鼓出区域外侧用砂袋加宽临时反压平台。从 6月10日 15 口抽排竖井陆续工作后,西侧滑坡体的位移速率有明显减缓的趋势,在随后的 3 次强降雨期间,西侧滑坡体没有再发生明显的滑移。

4 坝前堆体边坡失稳过程现场监测

4.1 监测项目及方法

4.1.1 监测项目

为了对上述堆体边坡失稳的过程有较为全面的掌控,笔者单位参与了该填埋场垃圾坝前堆体边坡现场监测,监测项目包括:(1)表面位移监测,以及及时掌握堆体边坡的滑移范围和状态。(2)深层侧向位移监测,为该堆体边坡失稳模式及滑移面深度鉴别提供了依据。(3)堆体边坡内的渗滤液水位监测,为填埋场的稳定性评估工作提供了重要的数据。表面位移监测点布置如图 1 所示,深层位移和渗滤液水位监测点布置如图 4 所示,该图也显示了边坡上 15 口降水竖井的位置。

4.1.2 各项目监测方法及设备

表面位移监测点共有 16 个(W1~W16),其中 W12~W16 是在 6月6~7日暴雨之后设置的,以监测扩大后的滑移区域。表面位移监测是利用 TC1700 全站仪测量标志点坐标变化来实现的。

深层侧向位移监测点共有 7 个(CX1~CX7)。深层侧向位移监测是利用测斜仪测量预先埋设测斜管倾斜度来实现的。需要指出的是,为防止打穿填埋场底部衬垫系统,所有的测斜管均未深入到场底地基,因此测斜管底部不是固定端,需要结合测斜管

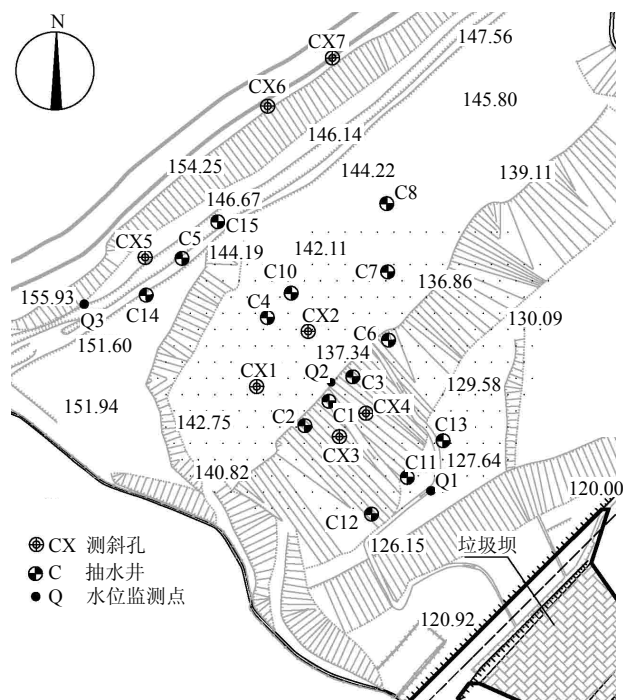


图 4 监测点和抽排竖井平面布置图

Fig.4 Site plan of monitoring points and vertical wells

顶部水平位移监测结果根据绝对位移和相对位移的关系,计算出测斜管不同深度处的实际(绝对)位移。

渗滤液水位的监测是利用钢尺水位计在预先埋设的水位管和测斜管中进行。水位监测点共有 10 个,其中 3 个(Q1~Q3)为水位管,另外 7 个是可透水的测斜管。需要指出的是 Q1 监测点在 6 月份已经损坏,故没有数据。

上述仪器在堆体边坡出现滑移迹象后陆续布置,6月期间,基本上实现了日测日报,完整的记录了堆体边坡失稳过程中渗滤液水位、表面位移和深层侧向位移的变化。

4.2 监测结果及分析

4.2.1 渗滤液水位

渗滤液水位监测结果如图 5 所示,图中所示为 2008 年 6 月各监测点的渗滤液水位埋深随时间的变化,图中水位埋深是以监测点位置处坡面为零点。

由图 4 可知,CX2~CX5 和 Q2 位于堆体边坡主要滑移区域,也是抽排竖井布设区域;CX6, CX7 和 Q3 位于滑移区域的外围,与抽排竖井距离也较远;CX1 位置对应于场底地形鼓出地方。结合各监测点在堆体边坡的位置,由图 5 可知,2008 年 6 月 1 日,堆体边坡中渗滤液水位很高,埋深大多在 2 m 以内。现场可以看到,边坡下部有渗滤液从坡面溢出。从 6 月 10 日开始,堆体边坡中打设的 15 口应急抽排竖井开始抽排渗滤液,6 月 13 日由于暴雨及

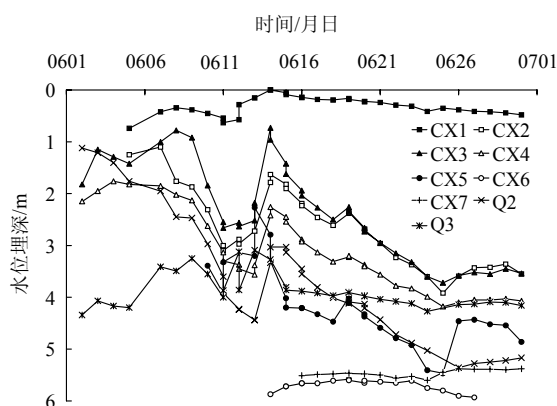


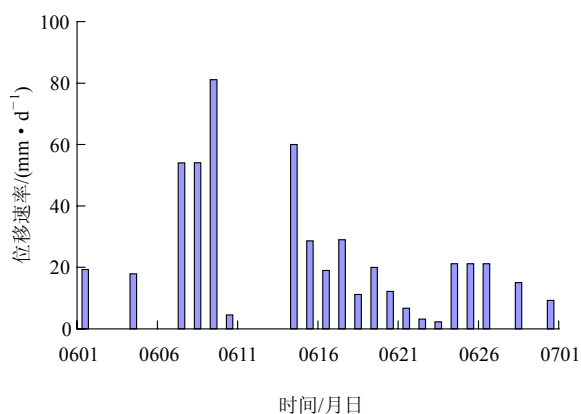
图 5 监测点的渗滤液水位埋深及随时间变化(2008 年)

Fig.5 Curves between leachate level depth and monitoring time (in 2008)

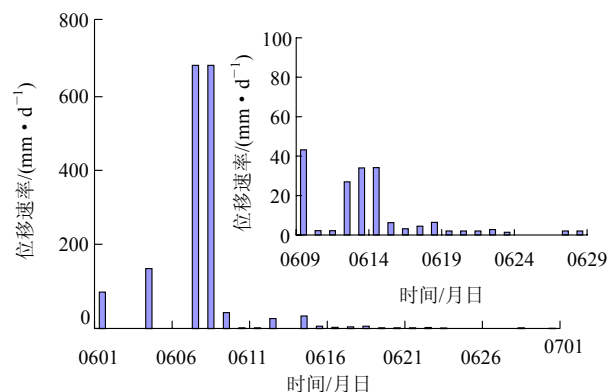
竖井抽排设备故障停机导致渗滤液水位快速回升,抽水重新开始后,抽水井影响区域范围内的水位监测孔(CX2~CX5 和 Q2)中水位持续下降,到 6 月底为止,这些监测孔中水位埋深均降到 3.5 m 以下,部分孔水位埋深达 5.0 m 以下。抽水井影响区域范围以外的监测孔(CX6, CX7 和 Q3)中水位降低不明显。另外, CX1 监测点位于场底地形隆起位置,垃圾体厚度较薄,由于受上游场主场区渗滤液的补给,水位降低不太明显。

4.2.2 坡面水平位移

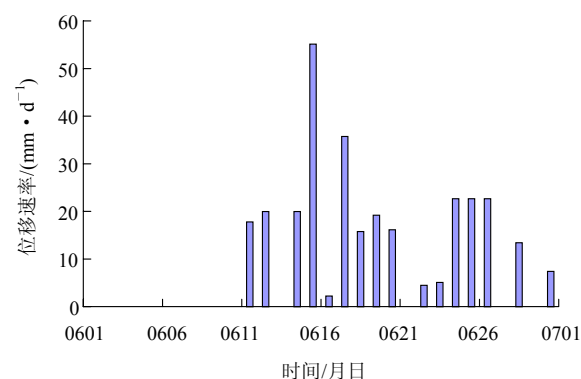
各水平位移监测点在 2008 年 6 月发生的水平位移量如图 1 所示,各位移矢量旁边的数字代表各监测点水平位移值的大小,方向代表水平位移发生的方向。需要指出的是图 1 中的箭头长度是实际位移放大 10 倍后的示意图。图 6 中显示了其中有代表性的 3 个监测点(W4, W7, W15)的水平位移速率与时间关系。



(a) 堆体边坡后缘监测点 W4



(b) 堆体边坡中部监测点 W7



(c) 155 m 平台道路边缘监测点 W15

图 6 水平位移速率与时间关系(2008 年)

Fig.6 Relationships between horizontal displacement rate and time(in 2008)

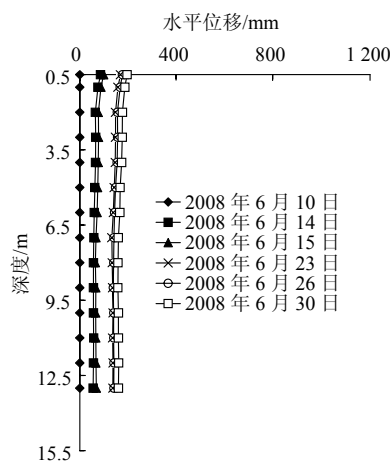
由图 1 可知,堆体边坡中部(137 m 平台)的位移量最大, W3 监测点在 2008 年 6 月的累积位移量超过 4.0 m, W7 监测点的累积位移量超过 2.0 m, 堆体边坡西边缘的 W10 监测点的累积位移超过 1.5 m。大多数监测点水平位移方向与边坡倾向一致,但 W3 和 W15 的位移方向与边坡倾向不完全一致。垃圾坝邻近的各监测点(W1, W5, W9)的累积位移量均小于 0.02 m,说明垃圾坝是稳定的。155 m 道路位置处各个监测点的累积位移量大部分小于 0.5 m (除 W15 之外)。

如图 6(a), (b)所示, 2008 年 6 月 6~7 日暴雨期间,堆体边坡中部(W7)水平位移速率很大,单日水平位移高达 720 mm,堆体边坡后部(W4)的水平位移速率也显著增大。结合其他监测点的监测结果可知,此时的滑动区主要位于堆体边坡中西部(见图 1)。如图 6 所示, 2008 年 6 月 11 日各项应急抢险措施开始奏效,西侧边坡的位移速率有明显减缓的趋势。在 6 月 13~14 日测得的水平位移速率较大

是由于暴雨及竖井抽排设备故障停机导致渗滤液水位快速回升的结果。在随后的雨季期间,抽排竖井影响范围内监测点(如 W7)的水平位移速率降低到 10 mm/d 以下,且受降雨的影响较小,表明利用抽排竖井降低渗滤液水位能有效控制堆体边坡的位移速率。然而,降水井影响范围外监测点(如 W4, W15)的水平位移仍以每日厘米级速率发展,特别是 6 月 13~14, 25~28 日暴雨期间位移速率有较明显的增大,与降雨量存在明显的相关性。

4.2.3 深层侧向位移

深层侧向位移各监测孔的平面布置如图 4 所示,选取其中有代表性的监测点(CX1, CX3, CX5)的监测结果绘制于图 7 中,这 3 个测斜孔均位于 1-1 剖面附近。CX3 位于堆体边坡中部, CX1 位置对应于场底地形鼓出区域, CX5 位于堆体边坡后缘。由图 7(a)可知,在 6 月 4~8 日期间, CX3 测斜管整个量测深度内均测得约 1.5 m 顺坡向水平位移,表明测斜管发生的是整体水平位移,滑动面位于该测斜管管底以下。由图 7(b)可知, CX1 测得的侧向位



(c) 测斜管 CX5

图 7 顺坡向水平位移及随时间变化

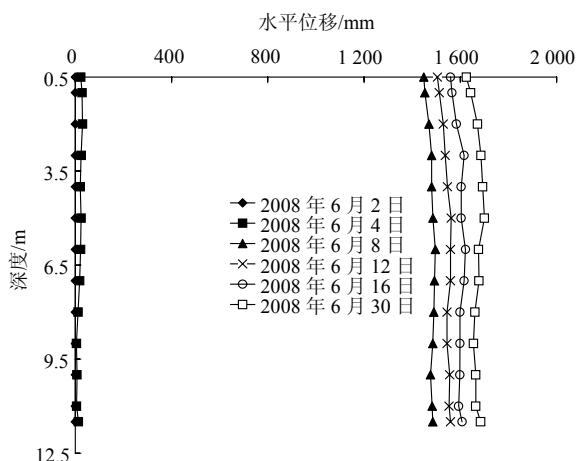
Fig.7 Relationships between slope-direction horizontal displacement and monitoring time

移沿深度逐渐减小,最大值(约 0.5 m)位于堆体表面,测斜管底端位移量约有 20 cm,表明 CX1 测斜管以倾斜变形为主。由图 7(c)可知,位于滑动体陡坎后缘的 CX5 深层侧向位移量(约 0.2 m)很小且沿深度几乎无变化。对比 CX1, CX5 的位移量可判断,滑动面穿过 CX1 测斜管的中下部,未穿过 CX5。根据以上监测结果可知,西侧堆体边坡的失稳模式是沿着底部衬垫系统的深层滑移,滑裂面后缘在 CX1, CX5 测斜管之间。

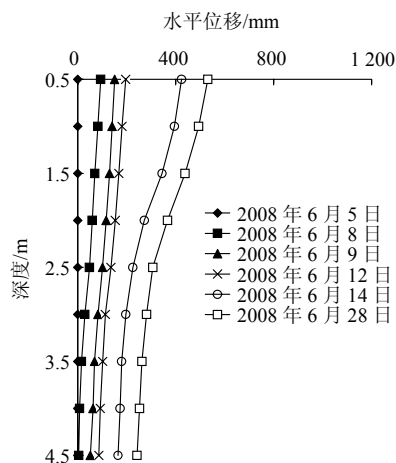
上述垃圾堆体边坡在各种稳定状态下的水平位移速率及侧向位移数据,真实反映了垃圾堆体边坡的变形发展规律,可为垃圾堆体边坡稳定安全监测指标及警戒值确定提供重要依据,笔者将另文做进一步论述。

5 堆体边坡失稳过程反分析

本文采用加拿大 GEO-SLOPE 公司开发的 GeoStudio 软件中 SLOPE/W 模块对失稳边坡进行反分析。SLOPE/W 不仅具有非圆弧滑动面自动搜索功能,且能够解决穿过软夹层或界面的滑动面搜索问题。分析中选用广为采用的 Morgenstern-Price 法^[15]计算边坡稳定安全系数,材料参数按有效应力法取值。计算模型所用的地形和水位数据分别来自于 2008 年 5 月 24 日、6 月 7 日、6 月 12 日、6 月 30 日堆体表面水平位移、沉降现场监测结果,以及上述时间的渗滤液水位现场监测结果。根据各监测点实测的水位高程,采用 SLOPE/W 中水位线法设定



(a) 测斜管 CX3



(b) 测斜管 CX1

计算模型中渗滤液水位, 各监测点之间水位线是由直线连接而成的。

计算中涉及到的材料主要有填埋垃圾和场底复合衬垫系统。笔者所在课题组前期对国内城市生活垃圾的强度参数进行了深入的测试研究, 根据已有研究成果及该填埋垃圾堆体现场测试数据^[16], 选定该填埋场填埋垃圾的计算参数为: 天然湿容重 $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 5 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 28^\circ$ 。

由此可知, 该填埋场场底的复合衬垫系统存在多层材料界面, 其中糙面 HDPE 膜/土工织物界面是最薄弱界面^[7, 9]。研究结果表明, 该界面的抗剪强度表现为显著的位移 - 软化特性, 即随着剪切位移的增加, 界面强度从峰值强度降低至残余强度。填埋场业主单位组织的前期研究工作中曾测试了该薄弱界面的峰值强度参数^[7]: 黏聚力 $c = 0 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 27.76^\circ$ (见图 8)。遗憾的是该研究没有测试该界面的残余强度, 因此只能参照类似产品的测试结果^[9], 取残余强度参数值为: 黏聚力 $c = 3.5$

kPa、内摩擦角 $\varphi = 13.5^\circ$ 。由于衬垫系统中界面的位移 - 软化特性, 在稳定性分析中, 其强度参数合理取值应与各处界面剪切位移发展程度有关, 然而填埋场底衬垫系统中界面的相对位移往往难以实测, 因此界面强度参数取值是该堆体边坡稳定性分析工作的关键技术难题之一。前人曾采用数值模拟手段对该难题开展了研究, 根据研究成果 T. D. Stark 和 A. R. Poeppel^[17]建议在填埋场水平或接近水平场底上衬垫系统界面取峰值强度参数, 而斜坡上衬垫系统取残余强度参数^[9, 17]。如图 2 所示, 该填埋场场底地形复杂, 现场监测结果表明斜坡场底之上垃圾堆体发生了显著的深层位移而软化, 由此推测斜坡场底上衬垫系统薄弱界面可能也发生了显著的位移。下文将基于现场实测数据, 通过该堆体边坡失稳过程的反分析获得衬垫系统界面的强度参数取值。考虑到界面强度参数分段取值的困难, 反分析中对衬垫系统最薄弱界面强度参数赋予单一值, 该值考虑了该衬垫系统界面强度的位移 - 软化效应。根据已有研究成果, 笔者在上述峰值和残余强度参数范围内选取了 6 组强度参数组合 (见表 1), 开展 3 个剖面 (1 - 1, 2 - 2, 3 - 3) 和 3 个时间点 (2008 年 5 月 24 日、6 月 7 日、6 月 12 日) 对应的边坡稳定性分析计算。3 个计算剖面的平面位置见图 1, 剖面图见图 9。计算中, 衬垫系统采用赋予上述抗剪强度参数的薄土层进行模拟, 通过试算发现模拟土层厚度取 1.0 m 时能利用 SLOPE/W 软件自动搜索到穿过衬垫系统的滑动面。

由监测结果可知, 2008 年 5 月 24 日、6 月 7 日、6 月 12 日分别代表了坝前堆体边坡滑移前稳

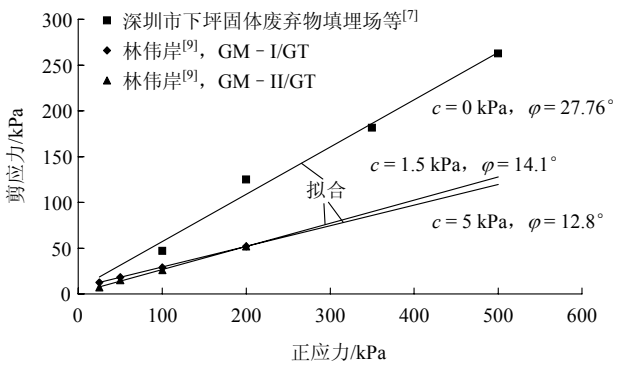


图 8 土工膜/土工织物界面的抗剪强度包线
Fig.8 GM/GT interface strength envelopes

表 1 各计算剖面及不同时间点对应的边坡稳定安全系数
Table 1 Safety factors of different sections in scheduled dates

衬垫界面强度参数		不同日期对应的稳定安全系数 FS											
c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	1 - 1 剖面				2 - 2 剖面				3 - 3 剖面			
		5 月 24 日	6 月 7 日	6 月 12 日	6 月 30 日	5 月 24 日	6 月 7 日	6 月 12 日	6 月 30 日	5 月 24 日	6 月 7 日	6 月 12 日	6 月 30 日
0.0	27.8	1.690	1.150	1.363	1.490	1.543	1.300	1.508	1.571	1.734	1.291	1.580	1.632
3.5	13.5	0.902	0.666	0.804	0.851	1.217	0.864	0.934	0.984	1.194	0.950	1.076	1.097
0.0	20.0	1.209	0.830	0.988	1.065	1.214	1.135	1.165	1.224	1.463	1.143	1.316	1.344
1.0	17.0	1.036	0.740	0.880	0.945	1.102	0.967	1.046	1.104	1.330	1.061	1.196	1.221
1.7	23.0	1.411	1.006	1.181	1.271	1.396	1.228	1.329	1.378	1.604	1.305	1.466	1.497
2.0	25.5	1.582	1.122	1.316	1.417	1.510	1.331	1.441	1.495	1.714	1.357	1.560	1.593

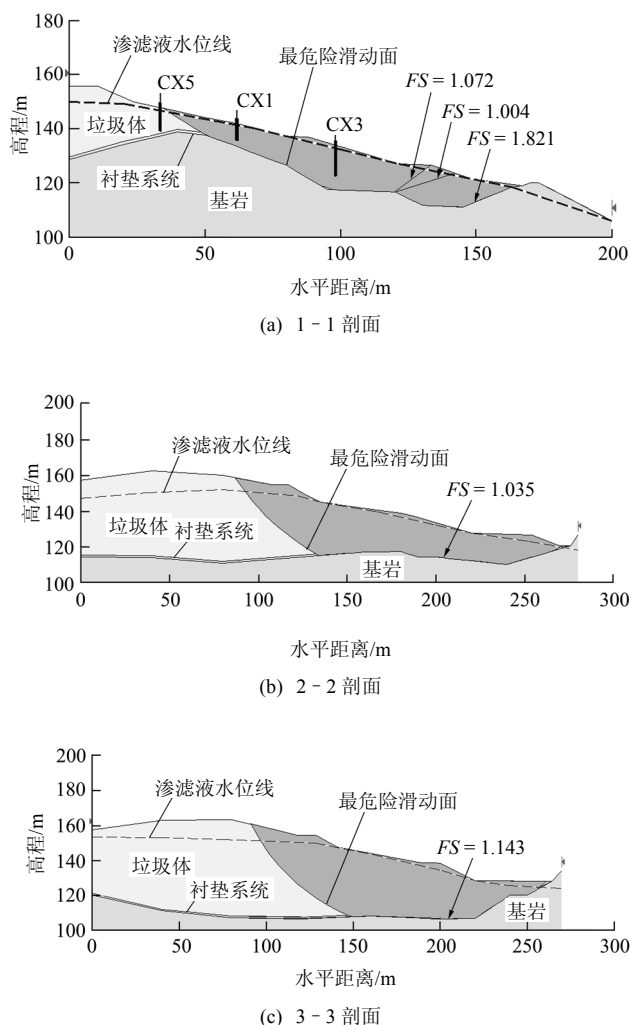


图9 不同剖面对应的最危险滑动面

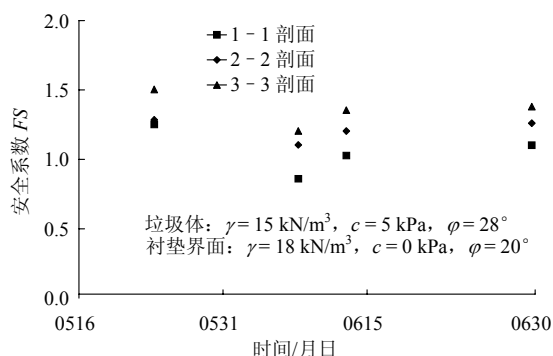
Fig.9 The most dangerous slip surfaces for different sections

定、滑移中不稳定、滑移后临界稳定 3 个阶段。2008 年 5 月 24 日时, 3 个剖面均处于稳定状态, 表 1 计算结果表明: 此种工况下, 只有当界面内摩擦角 φ 取 17° 以上时, 3 个剖面的安全系数与实际稳定状态相符合。在 6 月 7 日, 1-1 剖面对应坡体处于滑移状态, 2-2 剖面对应边坡处于临界状态, 3-3 剖面对应边坡仍处于稳定状态。表 1 计算结果表明: 此种工况下, 只有当界面内摩擦角 φ 取 25.5° 以下, 3 个剖面的安全系数与实际稳定状态相符合。6 月 12 日, 临时应急措施尤其是抽排竖井降水发挥作用后, 渗滤液水位下降, 1-1 仍处于临界稳定状态, 2-2 剖面处于基本稳定状态, 3-3 剖面仍然保持稳定状态。表 1 计算结果表明: 此种工况下, 只有当界面内摩擦角 $\varphi < 23^\circ$ 时, 3 个剖面的安全系数与实际稳定状态相符合。

由表 1 分析结果可知, 当该堆体边坡下卧衬垫层的界面抗剪强度参数取 $c = 0 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$ 时, 3

个计算剖面及 3 个时间点对应的安全系数计算结果与实际情况最相符。测量图 9(a)中穿过衬垫系统的潜在滑动面中水平段和斜坡段(反向坡也作为水平段)的长度可知, 两者的比例为 $1.05:1.0$ 。如果按 T. D. Stark 和 A. R. Poeppel^[17]建议的衬垫系统强度取值方法, 该衬垫系统界面强度分段加权平均取值结果: $c = 1.7 \text{ kPa}$, $\varphi = 20.2^\circ$, 该值与反分析结果基本一致, 说明其建议的强度取值方法适用于该堆体边坡稳定性评价。

图 9 结果表明, 堆体边坡发生的是沿底部衬垫系统的深层滑移, 最危险滑动体前缘贴着垃圾坝上游面衬垫系统穿出, 后缘滑动面从衬垫系统向上穿过垃圾体。图 10 显示了当采用反分析得到的界面强度参数时 3 个计算剖面的稳定安全系数及其随时间变化。在 2008 年 5 月 24 日, 3 个剖面的稳定安全系数(FS)均大于 1.2, 堆体边坡处于稳定状态。6 月 7 日, 1-1 剖面对应的堆体边坡进入失稳状态; 2-2, 3-3 剖面对应的堆体边坡也处于临界稳定状态。6 月 12 日, 3 个剖面稳定安全系数由于水位降低均有所提高, 1-1 剖面提高得最多。6 月 30 日, 3 个剖面的稳定性进一步加强。上述理论分析结果与堆体边坡失稳过程的实测结果基本一致, 坡体的稳定安全系数与渗滤液水位及水平位移速率存在明显的相关性。上述分析结果表明: 坡体的水平位移速率和渗滤液水位可作为垃圾堆体稳定安全监测的关键指标, 本文的实测数据为这两个关键指标警戒值的确定积累了一些经验。

图10 3个计算剖面在4个时间点的稳定安全系数(2008年)
Fig.10 Safety factors of 3 sections in scheduled dates(in 2008)

6 结 论

本文介绍了某填埋场垃圾堆体边坡失稳过程现场监测与理论反分析结果, 通过对结果分析与讨论

得到以下结论:

(1) 堆体边坡中高渗滤液水位是导致其失稳的关键因素,堆体边坡水平位移速率和渗滤液水位高度呈明显正相关关系,当强降雨导致渗滤液水位升高时,位移速率显著增大;当采取水位迫降措施后,位移速率得到有效控制。

(2) 深层侧向位移监测结果表明,该堆体边坡失稳模式是沿场底复合衬垫系统中薄弱界面的深层滑移,最危险滑动体前缘是贴着垃圾坝上游面穿出。

(3) 堆体边坡失稳过程的反分析结果表明,场底复合衬垫系统薄弱界面在滑移过程中发生了位移-软化效应,其界面强度可按 T. D. Stark 和 A. R. Poeppe^[17]建议的方法取值,即在场底水平或接近段取峰值强度参数,而斜坡段取残余强度参数。

(4) 本案例中所采取应急抢险措施有效避免了该填埋场在后续雨季期间发生大范围滑坡灾难,其中抽排竖井迫降水位是最直接、有效的应急抢险措施。

参考文献(References):

- [1] 钱学德,郭志平.城市固体废弃物(MSW)的工程性质[J].岩土工程学报,1998,20(5):1-6.(QIAN Xuède, GUO Zhiping. Engineering properties of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 1-6.(in Chinese))
- [2] 张振营,吴世明,陈云敏.城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):35-39.(ZHANG Zhenying, WU Shiming, CHEN Yunmin. Experimental research on the parameter of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 35-39.(in Chinese))
- [3] 张季如,陈超敏.城市生活垃圾抗剪强度参数的测试与分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):110-114.(ZHANG Jiru, CHEN Chaomin. Measurement and analysis of shear strength parameters of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 110-114.(in Chinese))
- [4] 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[博士学位论文][D].杭州:浙江大学,2005.(FENG Shijin. Static and dynamic strength properties of municipal solid waste and stability analysis of landfill[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.(in Chinese))
- [5] 刘荣,施建勇,彭功勋.垃圾土力学性质的室内试验研究[J].岩土力学,2005,26(1):108-112.(LIU Rong, SHI Jianyong, PENG Gongxun. Experimental studies of mechanical behavior of refuse samples[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 108-112.(in Chinese))
- [6] ZHAN LT, CHEN Y M, LING W A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China[J]. Engineering Geology, 2008, 97(2): 97-111.
- [7] 深圳市下坪固体废弃物填埋场,河海大学岩土工程研究所.深圳市下坪固体废弃物填埋场中的水平防渗特性研究[R].深圳:深圳市下坪固体废弃物填埋场,2001.(Shenzhen Xiaping Solid Waste Landfill, Geotechnical Research Institute of Hohai University. Study of horizontal impermeability of Shenzhen Xiaping solid waste landfill[R]. Shenzhen: Shenzhen Xiaping Solid Waste Landfill, 2001.(in Chinese))
- [8] 徐超,聊星樾,叶观宝,等.HDPE膜界面摩擦特性的斜板仪试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):989-994.(XU Chao, LIAO Xingyue, YE Guanbao, et al. Researches on frictional properties of HDPE geomembrane using tilt table device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 989-994.(in Chinese))
- [9] 林伟岸.复合衬垫系统剪力传递、强度特性及安全控制[博士学位论文][D].杭州:浙江大学,2009.(LIN Weian. Shear stress transfer, strength characteristics and safety control of composite liner systems[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.(in Chinese))
- [10] 刘君,孔宪京.卫生填埋场复合边坡地震稳定性和永久变形分析[J].岩土力学,2004,25(5):778-782.(LIU Jun, KONG Xianjing. Seismic stability and permanent displacement analysis of a solid waste landfill slope containing geomembrane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 778-782.(in Chinese))
- [11] 冯世进,陈云敏,高广运,等.垃圾坝和界面强度对填埋场沿底部衬垫系统滑动的影响[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):149-155.(FENG Shijin, CHEN Yunmin, GAO Guangyun, et al. Effects of retaining wall and interface strength on transnational failure of landfill along underlying liner system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 149-155.(in Chinese))
- [12] 高登,朱斌,陈云敏.设垃圾坝填埋场的三楔体滑动分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增2):4378-4385.(GAO Deng, ZHU Bin, CHEN Yunmin. Three-part wedge method for translational sliding analysis of landfills retained by a toe dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup.2): 4378-4385.(in Chinese))
- [13] 陈云敏,高登,朱斌,等.垃圾填埋场沿衬垫界面的地震稳定性及永久位移分析[J].中国科学(E辑),2008,(1):79-94.(CHEN Yunmin, GAO Deng, ZHU Bin, et al. Seismic stability and permanent displacement analysis of a solid waste landfill along geosynthetic interface[J]. Science in China(Ser. E), 2008, (1): 79-94.(in Chinese))
- [14] 南昌有色冶金设计研究院.深圳市下坪垃圾卫生填埋场施工图集[R].南昌:南昌有色冶金设计研究院,1994.(Nanchang Engineering and Research Institute of Nonferrous Metals. Construction scheme collection of Shenzhen Xiaping waste landfill[R]. Nanchang: Nanchang Engineering and Research Institute of Nonferrous Metals, 1994.(in Chinese))
- [15] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79-93.
- [16] 浙江大学岩土工程研究所.深圳市下坪固体废弃物填埋场堆体稳定性评价及加固措施研究[R].杭州:浙江大学岩土工程研究所,2009.(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University. Stability estimation and stabilization measures research of Shenzhen Xia-ping solid waste landfill[R]. Hangzhou: Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, 2009.(in Chinese))
- [17] STARK T D, POEPEL A R. Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(3): 597-615.