

# 浓缩液回灌对垃圾填埋体水位及稳定性的影响

詹良通<sup>1</sup>, 兰吉武<sup>1</sup>, 邓林恒<sup>1</sup>, 吕国庆<sup>2</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027;

2. 中国市政工程华北设计研究总院, 天津 300074)

**摘要:** 成都长安填埋场渗滤液反渗透处理工艺日产 260 t 浓缩液, 拟在填埋场进行回灌处理, 回灌工程实施前需评估回灌工程对垃圾填埋体稳定性的影响。在该填埋场工程地质与水文地质勘查结果的基础上, 利用 GMS 软件开展了垃圾填埋体非饱和-饱和三维渗流分析, 模拟和预测了浓缩液回灌前后填埋体内渗滤液水位变化。基于渗流分析结果, 利用 Slope/W 软件分析了浓缩液回灌对垃圾填埋体稳定性的影响, 并提出回灌工程安全稳定控制措施。分析表明, 现状水位条件下垃圾填埋体恰能满足稳定安全控制要求, 现状水位线即为安全控制水位; 若直接实施浓缩液回灌, 全场渗滤液水位明显上升, 垃圾填埋体稳定安全系数明显降低, 不能满足稳定安全控制要求; 如果预先将全场水位降低 3 m 后再实施回灌, 回灌后水位低于现状水位, 满足稳定安全控制要求。在该填埋场布设 45 口抽排竖井, 预计实施渗滤液抽排 3 个月后可将全场水位降低 3 m, 满足浓缩液回灌工程安全稳定安全控制要求。

**关键词:** 浓缩液; 回灌; 填埋体; 水位; 稳定

**中图分类号:** TU411      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2012)02-0126-06

## Effect of Concentrated Leachate Recirculation on Leachate Level and Slope Stability of Municipal Solid Waste Landfill

ZHAN Liang-tong<sup>1</sup>, LAN Ji-wu<sup>1</sup>, DENG Lin-heng<sup>1</sup>, LV Guo-qing<sup>2</sup>, CHEN Yun-min<sup>1</sup>

(1. MOE Key of Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;

2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300074, P. R. China)

**Abstract:** 260 tons concentrated leachate per day is produced at the leachate treatment plant at Chang'an landfill, which is considered to be recirculated into the landfill of municipal solid wastes. The effect of leachate recirculation on the slope stability of the landfill should be evaluated. The results from engineering geology and hydrogeology survey were firstly presented. Three-dimensional unsaturated-saturated seepage analyses were carried out by using GMS software to predict the change of leachate level as a result of the leachate recirculation. Based on the leachate levels and pore-water pressures obtained from the seepage analyses, slope stability analyses were carried out to evaluate the safety of the landfill. Some control measures were proposed to eliminate the adverse effect of leachate recirculation on the landfill safety. The analyses indicate that the factor of safety (FS) for the landfill with the current leachate level is slightly greater than the safety requirement ( $FS=1.3$ ), and the current leachate level happens to be the critical level. Direct leachate recirculation will result in a significant rise in leachate level, which will cause a significant decrease in the landfill safety. The landfill is likely to fail after a direct leachate recirculation. If the leachate recirculation is executed after the current leachate level is lowered down by 3 m and the resultant leachate level will be lower than the current leachate level, the landfill can remain safe. Vertical

**收稿日期:** 2011-08-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(51010008); 国家“973”计划课题(2012CB719802)

**作者简介:** 詹良通(1972-), 男, 教授, 主要从事环境岩土工程研究, (E-mail) zhanlt@zju.edu.cn。

pumping wells are proposed to implement the drawdown work, and if 45 wells are used and pumping is conducted for 3 mouths, the leachate level will decrease by 3 m, which meets the safety requirement.

**Key words:** concentrated liquid; leachate recirculation; landfill; leachate level; stability

中国 2008 年修订的《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)<sup>[1]</sup>提高了生活垃圾填埋场污水排放标准,填埋场渗滤液处理后须满足二级污水排放要求,《生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范(试行)》<sup>[2]</sup>推荐采用纳滤和反渗透作为渗滤液的深度处理工艺。这 2 种工艺产生的浓缩液具有污染物浓度高、难处理的特点,现有处理方法包括蒸馏、固化、焚烧、回灌等。其中浓缩液回灌处理是在渗滤液回灌的基础上发展起来的,能有效降低浓缩液中污染物浓度,同时加速填埋体生物降解的稳定化过程<sup>[3-4]</sup>,是一种较为先进的处理方法。欧美发达国家从 20 世纪 90 年代开始了浓缩液回灌工艺研究及工程应用,例如,德国从 1986 年开始尝试浓缩液回灌填埋场,目前约有 15 座填埋场采用浓缩液回灌工艺。1997 年哥伦比亚 Dona Juana 填埋场实施渗滤液回灌时填埋体发生了失稳事故<sup>[5-6]</sup>,实施回灌工程时垃圾填埋体的稳定性开始得到重视<sup>[6-8]</sup>,中国许多垃圾填埋场渗滤液水位较高,填埋体存在安全隐患<sup>[9]</sup>。因此在实施浓缩液回灌之前,必须评估回灌对垃圾填埋体稳定的影响。

成都长安垃圾填埋场渗滤液反渗透处理工艺日产 260 t 浓缩液,拟在填埋场回灌处理。由于垃圾填埋体内现状渗滤液水位较高,浓缩液回灌可能会导致水位进一步上升,威胁垃圾填埋体稳定安全,故开展该填埋场回灌工程的安全性及可行性评估工作。首先进行该填埋场工程地质与水文地质勘查,然后利用 GMS 软件进行垃圾填埋体非饱和一饱和三维渗流分析,模拟和预测了浓缩液回灌前后填埋体内渗滤液水位变化;基于渗流分析结果,利用 Slope/W 软件分析了浓缩液回灌对垃圾填埋体稳定性的影响,并提出回灌工程安全稳定控制措施。

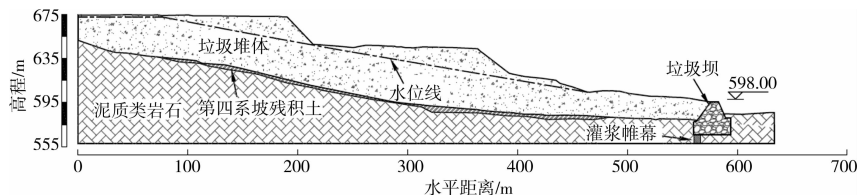


图 2 典型地质剖面图

2 现场渗滤液回灌试验

为了研究回灌可行性,笔者在 680 m 高程平台上开展回灌试验。由于当时渗滤液处理厂还未建

1 场地工程地质与水文地质条件

如图 1 所示,成都长安填埋场为山谷型填埋场,场地地形为 U 形山谷,谷底峡口设置高约 30 m 的浆砌石垃圾坝,坝顶高程为 598 m,坝底设置有垂直防渗帷幕,深度 18 m。该填埋场典型填埋剖面及场底地质剖面如图 2 所示,垃圾填埋体自下游垃圾坝起始直到上游 680 m 高程,形成了一个约 80 m 高的垃圾填埋体边坡,其中 630~650 m 和 650~680 m 两个高程间陡坡坡度分别为 1:0.9、1:1.6。现场勘察时 680 m 高程平台仍在填埋作业。现场钻探表明填埋体物质组成主要为城市生活垃圾,地表下约 0~4 m 内垃圾较为干燥,降解程度低;4 m 以下垃圾降解程度较高。场底主要分布第四系坡积土,谷坡处厚度为 0.3~2.5 m,谷底处厚度为 1.5~5.2 m。坡积土下覆土层为侏罗系蓬莱镇组泥质类岩石,渗透系数介于  $1.0\times10^{-8}\sim1.0\times10^{-7}$  m/s,形成相对隔水层。

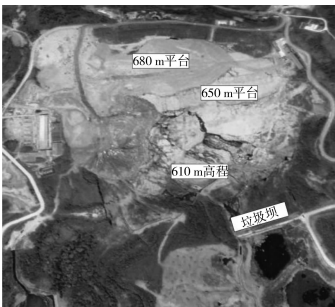


图 1 现状地形示意图

根据现场水位监测结果,该填埋场内渗滤液水位较高,现状渗滤液水位线如图 2 所示,上游 680 m 高程平台局部水位埋深只有 1~3 m,陡坡处水位埋深大,在 650 m 高程处及 610 m 高程下游坡体发现有渗滤液溢出。

成,没有浓缩液,因此利用该场高浓度的渗滤液进行回灌试验。试验采用回灌塘方式,回灌塘平面尺寸为 6.0 m×6.0 m,深度约为 1.8 m。试验过程中回灌塘内渗滤液水位高度维持在 1.0~1.8 m,当渗滤

液入渗导致塘内水位下降至 1.0 m 即补充渗滤液至 1.8 m 高度。每日补充到回灌塘内的渗滤液总量即为日回灌量,同时在回灌塘周边布设水位监测并监测周边水位上升情况。其中 2 个回灌塘的日回灌量时程曲线见图 3,可见初期日回灌量大,4 d 后日回灌量趋于稳定值,介于 28~30 m<sup>3</sup>/d。日回灌量稳定值反映了浅部垃圾的渗透性,由 Green-Ampt 公式估算垃圾体饱和渗透系数  $K_s$  约为  $7.5 \times 10^{-6}$  m/s。

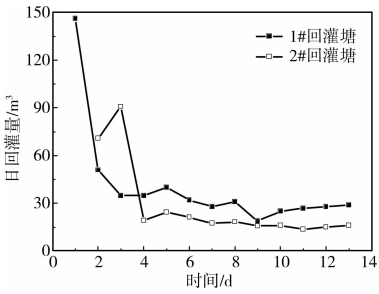


图 3 日回灌量变化曲线

3 回灌前后填埋体中水位模拟与预测

填埋体中渗滤液水位模拟与预测采用 GMS (Groundwater Modeling System) 软件中 Femwater 模块, Femwater 是三维饱和-非饱和多孔介质中渗流分析有限元软件,它拥有强大的前后处理功能,能方便的利用地形及地层信息生成三维数值模型。渗流分析中暂不考虑垃圾体及渗滤液自身压缩性与渗滤液中化学溶质对渗流的影响,并假定垃圾填埋体为各向同性介质。Femwater 模块中非饱和-饱和渗流控制方程:

$$k_w \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial k_w}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial k_w}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial k_w}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} + q = F \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $h$  为总水头,是位置水头和压力水头之和;  $k_w$  为非饱和渗透系数;  $q$  为汇源项,如降雨补给量、回灌量等;  $F$  为储水系数,可从介质的土水特征曲线获得。

垃圾水力参数见图 4,暂不考虑浓缩液对水力参数的影响,土水特征曲线参照中国类似组分垃圾的测试结果<sup>[9]</sup>,并采用 van Genuchten 公式拟合得特征参数值:  $\theta_s = 0.59$ ,  $\theta_r = 0.25$ ,  $\alpha = 4.62$ ,  $n = 1.456$ ;由土水特征曲线与现场回灌试验得到的垃圾饱和渗透系数计算垃圾非饱和渗透性曲线<sup>[10]</sup>,如图 4(b)所示。三维渗流分析模型见图 5,填埋体顶面为现状填埋面,面积约 20.6 万 m<sup>2</sup>,填埋体底面为泥质类岩石,填埋体最大厚度约 60 m,全场共划分 3 594 个三棱柱单元。

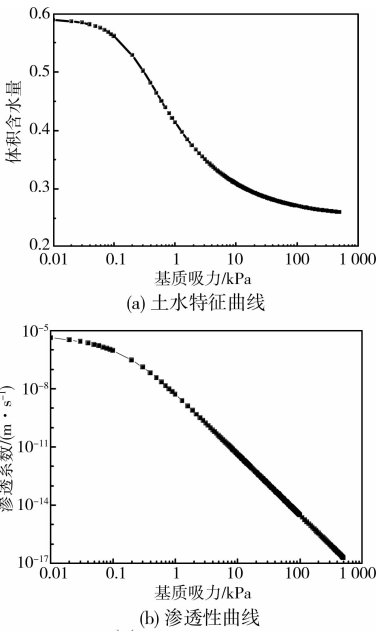


图 4 填埋垃圾的非饱和水力参数

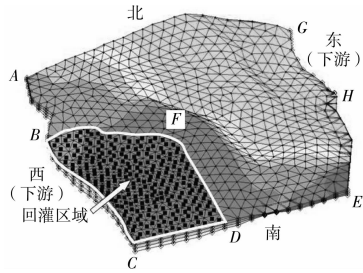


图 5 三维渗流分析模型

3.1 现状渗滤液水位模拟

根据水文地质勘查结果确定模型的边界条件:上游 680 m 平台处水位埋深约为 1~3 m,因此模型西侧边界 ABC 段和南侧 CDE 段均设为定水头边界。其中 AB 段总水头值为地表高程减去 1 m,即水位位于地表下 1 m; BCDE 段总水头边界值为 675 m。由于渗滤液在 610 m 左右高程处溢出,故东侧边界按溢出点划分为 2 段, GH 为溢出段,设为定水头边界,总水头值等于节点高程; HE 段设为不透水边界。模型北侧和模型底面为不透水边界。指定模型顶面允许最大积水深度为零,此边界条件含义为:迭代过程中当顶面处的节点的孔压为零时,软件自动将此节点的边界条件重置为定水头边界,总水头值等于节点高程。考虑到现状渗滤液水位是填埋体长期渗流的结果,采用稳态渗流分析模拟现状水位。

填埋体稳定渗流分析得到的流速矢量图(图 6),1—6 号剖面为下文垃圾填埋体稳定分析剖面。可见渗流场主要分布在 2—5 号剖面之间,这与填埋场底部为中间低两侧高的山谷地形有关,此区域垃

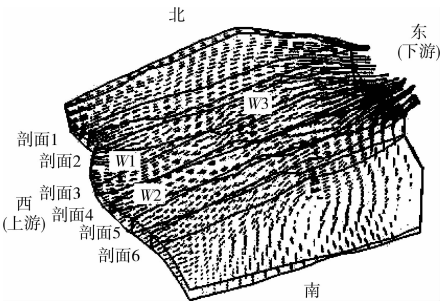


图 6 流速矢量图

圾体厚度大导致渗滤液汇集。图中 W1、W2、W3 三点实测水位埋深分别为 2.3、3.2 m 和 4 m,模拟水位埋深为 3.6、4.7、3.6 m,模拟结果与实测结果比较一致。

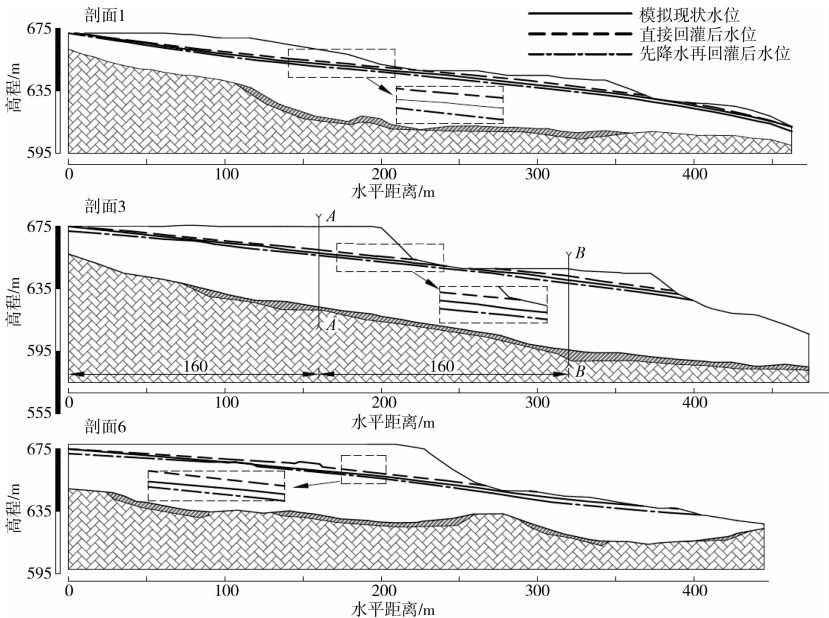


图 7 典型填埋剖面中渗滤液水位线分布

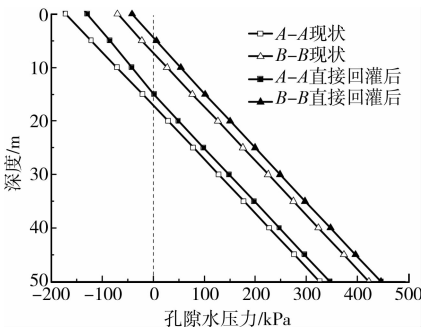


图 8 孔隙水压力随深度变化曲线

3.2 浓缩液直接回灌后水位上升预测

从稳定安全考虑,渗滤液回灌区域设置在680 m 高程平台西南侧 2/3 区域,距填埋体陡坡顶有35~ 65 m 的距离,如图 5 中 BCDF 所围成区域,面积约

剖面 1、3、6 现状水位线分布见图 7,可见剖面 1 渗滤液在 630 m 高程溢出,3 号剖面在 650 m 和 630 m 高程 2 处溢出,6 号剖面溢出点高程为 650 m,与实际情况相符。对比 3 号剖面与图 2 中水位分布,可见在 680 m 平台上模型西侧水平距离为 0~100 m 内的填埋体模拟水位与实测水位差别较大,但下文稳定分析表明该填埋场危险滑动体位于 620~650 m 高程,此处局部水位差异对稳定分析影响可以忽略。

在 3 号剖面上取 A、B 两点绘制孔隙水压力随深度分布图,这两点分别位于 680 m 和 650 m 高程,距垃圾体上游为 160 m 和 320 m,如图 8 所示,可见两点水位埋深分别为 17.2、7.4 m,由于分析中假定填埋体各向同性,水位线上下的孔隙水压力均随深度呈线性减少,呈静水压力分布模式。

40 800 m<sup>2</sup>。设计回灌总量为 260 t/d,回灌模拟分析时假设渗滤液均布在回灌区域,即在 BCDF 区域内施加定流量边界条件,单位面积入渗量为  $6.37 \times 10^{-3}$  m/d,模型其它边界条件同前。考虑到渗滤液回灌的长期性,采用稳态渗流分析预测直接回灌后水位上升情况。

在现状水位条件下直接实施回灌后渗滤液水位线分布见图 7,可见,填埋体内水位均有明显上升,1—6号剖面水位最大上升高度分别为:2.2、2.2、3.2、3.8、4.54、3.66 m,1—4 号剖面水位上升最大处位于为 650 m 平台附近。各剖面水位上升规律为:680 m 平台水位上升约 1.3~2.0 m,其余高程点水位上升程度随高程减小而增大,渗滤液溢出点位置明显抬升。浓缩液直接回灌后 A、B 两点孔压随深度

变化曲线见图 8, A、B 两点水位上升高度为 2.0 m 和 3.2 m。回灌前后孔压对比表明 B 点孔压上升较 A 点明显。回灌工程对 650 m 平台水位影响更明显。

3.3 先降水再回灌后水位上升预测

上述渗流分析结果表明在现状水位条件下直接实施回灌后渗滤液水位上升明显, 下文稳定分析表明该回灌方法不能满足填埋体稳定安全控制要求。通过研究, 笔者建议了采取以下措施来解决回灌工程安全问题: 预先将全场渗滤液水位降低 3 m, 然后再实施回灌, 并且回灌期间持续实施降水。笔者对此工况进行渗流分析预测全场降水 3 m 后再回灌可能导致的水位上升情况, 渗流分析模型与边界条件类似于 3.2 节, 只是改变 ACE 和 GH 段的定水头边界值来模拟全场水位降低 3 m, 即将 ACG 和 GH 段总水头值降低 3 m。同样采用稳态渗流分析。

预先降水 3 m 再回灌后水位上升情况见图 7, 可见此工况的水位低于现状水位, 渗滤液溢出点位置有所下降。6 号剖面的 680 m 平台局部水位高于现状水位, 但上升程度明显低于渗滤液直接回灌的工况。

3.4 渗滤液水位迫降措施

为了实现回灌前将渗滤液水位迫降 3 m 的要求, 根据相关工程经验, 建议采用竖井抽排渗滤液降水。根据场底地形条件及上述的渗流场模拟结果, 建议在 680、650、630 m 高程平台各布置 15 口竖井, 680 m 高程竖井间距为 40 m, 从平台边缘起呈正方形排列, 井深为 10 m; 650 m 和 630 m 高程的竖井布置在 2—6 号剖面之间, 沿等高线呈单排布置, 间距取 10~15 m, 井深为 8 m, 竖井设计抽水量取  $24 \text{ m}^3/\text{d}^{[11]}$ 。根据填埋体渗流分析结果, 采用上述设计时预计在 3 个月内可将全场水位降低 3 m。水位下降 3 m 后可实施浓缩液回灌, 回灌过程中 630 m 和 650 m 高程的 30 口竖井应持续工作以控制填埋体边坡中水位。竖井结构设计及施工必须采取防淤堵措施, 保证其长期有效性。

4 回灌对垃圾填埋体稳定性影响分析

采用 Geoslope 软件进行垃圾填埋体稳定性分析, 图 9 显示了具有代表性的 3 号剖面的分析模型。根据现场勘察结果, 模型中填埋体分为 4 m 厚的浅层垃圾, 4 m 以下为深层垃圾; 土层包括 3 m 厚坡积土和泥质类岩石。各土层的材料特性参数如表 1 所示, 城市生活垃圾抗剪强度特性复杂, 与垃圾组分、应变水平及龄期有关<sup>[9]</sup>, 强度参数变化大。目前美国推荐的垃圾强度取值为: 深度 0~4 m 内,  $c=24 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=0^\circ$ ; 4 m 以下,  $c=0 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=33^\circ$ ; 英国推荐取值为:  $c=5 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=25^\circ$ 。从该填埋场钻探取样的三

轴剪切试验结果表明: 该场填埋垃圾的  $c$  值介于 18~61 kPa,  $\varphi$  值介于  $21.9^\circ\sim29.5^\circ$ 。参考类似工程经验, 分析垃圾强度的参数取值如表 1 所示, 表中其它材料强度参数取值来自地质勘察报告。

表 1 填埋体稳定分析中所用材料参数表

土层	凝聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^\circ$ )	容重 $\gamma$ / ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	厚度
浅层垃圾	25	23	15	0~4 m
中下层垃圾	5	28	15	4 m~垃圾底部
场底坡残积土	5	25	18	场底 3 m
垃圾坝	10	28	19	

填埋体稳定分析剖面包括图 6 中 1—6 号剖面, 其中 3 号剖面如图 9 所示。模型中渗滤液水位线采用上述两种工况条件下水位模拟结果, 即现状水位和浓缩液直接回灌后水位。利用 Slope/W 软件搜索危险滑动面, 采用 Morgenstern Price 法计算安全系数<sup>[12]</sup>。填埋体稳定安全评价标准采用填埋场工程常用的稳定安全控制标准: 即整体稳定安全系数  $F_s\geq 1.3$ , 局部稳定安全系数  $F_s\geq 1.1$ 。

在现状水位下 3 号剖面的潜在滑动面及对应的稳定安全系数见图 9, 可见, 在现状渗滤液水位条件下, 填埋体整体稳定安全系数  $F_s=1.308$ , 滑动面穿过垃圾体底部, 属于深层滑动; 局部稳定安全系数  $F_s=0.867$ , 滑动面位于 650 m 高程的陡坡处, 属于浅层滑动, 可通过削坡处理解决该局部稳定问题。其它剖面的稳定分析结果见表 2, 表明现状水位条件下垃圾填埋体恰能满足稳定安全控制要求, 现状水位线即为安全控制水位。

如前所述, 渗滤液直接回灌后水位明显上升, 对应水位条件下填埋体稳定分析见表 2, 可见整体稳定安全系数明显降低, 尤其是 2、3 号剖面从 1.358、1.308 分别降到 1.028、1.059, 明显低于整体稳定安全控制要求的  $F_s\geq 1.3$ ; 局部稳定安全系数也降低, 3—5 号剖面低于局部稳定安全控制要求  $F_s\geq 1.1$ , 因此浓缩液直接回灌填埋体的安全储备不足, 在现状高水位条件下不宜实施直接回灌。如前所述, 如果预先将全场渗滤液水位降低 3 m 后再实施回灌, 回灌后水位低于现状水位, 垃圾填埋体能够满足稳定安全控制要求, 因此上述的先降水再回灌的措施具有安全性, 可以实施。

表 2 回灌前后填埋体的稳定安全系数

剖面	1	2	3	4	5	6
现状	局部稳定 1.377	1.200	0.867	1.097	1.245	2.073
	整体稳定 1.314	1.358	1.308	1.503	1.331	2.327
直接回灌	局部稳定 1.316	1.167	0.770	1.079	1.094	1.776
	整体稳定 1.251	1.028	1.059	1.126	1.171	1.593

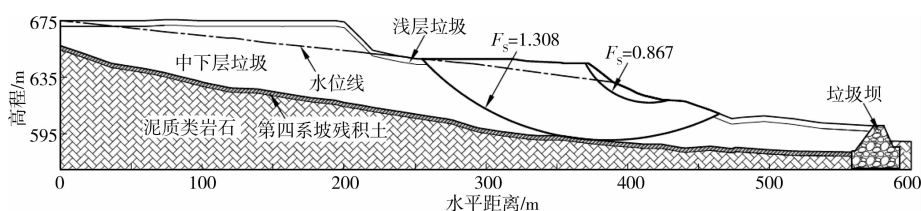


图9 3号剖面的潜在滑动面及对应的稳定安全系数

## 5 结论

根据成都长安填埋场的现场勘查、填埋体渗流分析和边坡稳定性评价结果,得到以下结论及建议:

1)该填埋场现状渗滤液水位高,多数区域埋深只有1~3 m。若直接实施浓缩液回灌,回灌后全场渗滤液水位明显上升,各剖面处上升幅度达2~5 m。若预先将全场水位降低3 m后再实施浓缩液回灌,回灌后水位低于现状水位。

2)现状水位条件下垃圾填埋体能满足稳定安全控制要求,现状水位线可作为安全控制水位。浓缩液直接回灌后,填埋体整体与局部稳定安全系数均明显降低,不能满足安全控制要求。若采取本文建议的先降水再回灌的措施,回灌后垃圾填埋体仍能满足稳定安全控制要求,该回灌工程措施具有安全性。

3)建议采用竖井抽排渗滤液降水,在680、650、630 m高程平台各布置15口竖井,预计3个月内可将全场渗滤液水位降低3 m。水位下降3 m后可在680 m高程平台实施浓缩液回灌,同时建议630 m和650 m平台的30口竖井持续实施降水。

4)文中现场试验及理论分析结果是基于现场高浓度渗滤液的流体特性获得的,必须采用渗滤液反渗透处理工艺产生的浓缩液进一步开展研究工作。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. GB 16889—2008 生活垃圾填埋场污染控制标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. HJ 564—2010 生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范(试行)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
- [3] 陈军. 矿化垃圾处理垃圾浓缩液[J]. 环境科学与管理,2007,32(12):109-112.  
CHEN JUN. Treatment of strong sewage from refuse with mineralized garbage[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(12): 109-112.
- [4] 刘研萍,李秀金,王宝贞,等. 渗滤液的反渗透浓缩液回灌研究[J]. 环境工程,2008,26(4):89-93.  
LIU YAN-PING, LI XIU-JIN, WANG BAO-ZHEN, et al. Study on infiltration of leachate concentrate from ro into landfill[J]. Environmental Engineering, 2008, 26(4): 89-93.
- [5] BLIGHT G. Slope failures in municipal solid waste

dumps and landfills; a review[J]. Waste Management & Research, 2008,26(5):448.

- [6] KOERNER R M, SOONG T Y. Leachate in landfills; the stability issues[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000,18(5):293-309.
- [7] EPA. Bioreactor Performance[R]. United States Environmental Protection Agency, 2007.
- [8] HETTIARACHCHI H, GE L. Use of geogrids to enhance stability of slope in bioreactor landfills: A conceptual method[C]//Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support (GSP 187) Proceedings of Selected Papers of the 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo., ASCE, 2009.
- [9] 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(9): 97-111.
- [10] VAN GANUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [11] 刘钊. 填埋垃圾渗透特性测试及抽排竖井渗流分析[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [12] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Geotechnique, 1965, 15(1):79-93.
- [13] 詹良通,刘钊,顾高莉. 成都长安垃圾填埋场浓缩液回灌现场试验测试报告[R]. 杭州:浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室,2008.
- [14] 詹良通,兰吉武. 成都长安垃圾填埋场浓缩液回灌工程渗流稳定分析报告[R]. 杭州:浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室,2009.
- [15] 朱伟,程南军,陈学东,等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):235-240.  
ZHU WEI, CHENG NAN-JUN, CHEN XUE-DONG, et al. Some fundamental problems of unsaturated seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 235-240.
- [16] 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.
- [17] 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 JI-RU, CHEN CHAO-MIN. Measurement and analysis of shear strength parameters of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(1):110-114.

(编辑 王秀玲)