



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202103004 中图分类号 X705 文献标识码 A

黄志亮, 郭晓静, 蔡小平, 等. 含污泥坑生活垃圾填埋场竖向扩容工程稳定沉降分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 638-644. [HUANG Zhiliang, GUO Xiaojing, CAI Xiaoping, et al. Analysis of the stabilization and settlement of vertical expansion project for municipal solid waste landfill with sludge pit[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 638-644.]

# 含污泥坑生活垃圾填埋场竖向扩容工程稳定沉降分析

黄志亮<sup>1,✉</sup>, 郭晓静<sup>1</sup>, 蔡小平<sup>1</sup>, 刘靖<sup>1</sup>, 蒲诃夫<sup>2</sup>, 陈训龙<sup>2</sup>

1. 北京涇渭环境科技有限公司, 北京 100041; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074

**摘要** 为减少生活垃圾填埋场内污泥坑的存在给填埋场后期竖向扩容工程带来的难度, 以辽宁省某含污泥坑生活垃圾填埋场为例, 对其竖向扩容工程进行了工艺设计和验证分析。根据工程目标和相关规范, 合理确定了扩容后填埋场整体平面布置和填埋堆高等参数, 选用原位固化技术对污泥进行了加固处理, 并确定了处理后污泥的力学参数设计值。使用 Geo-Slope 软件, 建立了扩容后填埋场堆体边坡的计算模型, 并分析和评价了 3 种不同工况边坡抗滑稳定性的影响。基于理正岩土软件, 对填埋场垃圾堆体进行了沉降计算, 并根据沉降分析结果进一步确定了防渗系统设计方案。结果表明: 污泥坑加固处理后, 各工况下的垃圾堆体边坡抗滑稳定安全系数均满足规范要求; 固化处理后污泥的相关强度等指标均满足垃圾堆体竖向扩容设计要求; 防渗系统最大伸长率为 0.4%, 满足规范要求; 防渗结构中设置了抗沉降加筋层, 可抵抗垃圾堆体的不均匀沉降。本研究成果可为国内同类型生活垃圾填埋场的竖向扩容工程工艺设计提供参考和借鉴。

**关键词** 生活垃圾填埋场; 污泥原位固化; 竖向扩容; 沉降; 边坡稳定性

近年来, 随着“无废城市”理念及相关政策的推出, 我国城市生活垃圾的处置正从以填埋为主向以焚烧为主转变<sup>[1]</sup>。城市生活垃圾填埋处置正在逐步减少, 但是, 由于当前绝大多数城市的生活垃圾焚烧设施的建设未能及时跟上城市生活垃圾处置的需要, 大量生活垃圾不得不继续采用填埋方式进行处置<sup>[2]</sup>。生活垃圾的填埋会浪费大量土地资源, 而当前我国城市的用地本就越发紧张, 这使得多数城市生活垃圾填埋场的新场选址变得越来越困难。相比而言, 国内目前更倾向于利用现有生活垃圾填埋场进行竖向或横向扩容<sup>[3-4]</sup>。因此, 如何在现有垃圾填埋场的基础上进行安全有效且经济环保的扩容是当前面临的一个重要工程问题。

目前, 已有一些工程师和学者对垃圾填埋场扩容工程进行了工艺设计和相关工程技术的研 究, 并取得了一定的成果。何耀忠<sup>[5]</sup>以广东省某县级市生活垃圾填埋场为例, 针对该填埋区积水水位过高且存在溃坝隐患的问题, 进行了扩容工程的工程设计和分析。王刚<sup>[6]</sup>以广州兴丰生活垃圾卫生填埋场为例, 根据扩容工程目标, 对该扩容工程的工艺进行了设计和验证。王艳明等<sup>[7]</sup>针对老填埋场竖向扩容时垃圾堆体沉降机理的特殊性, 结合工程实例, 对沉降计算公式中有关参数取值进行了探讨, 并对扩容垃圾荷载作用下原垃圾堆体的沉降发展趋势进行了分析。冯兵强等<sup>[8]</sup>

收稿日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-07-07

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1806000)

第一作者: 黄志亮(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, gshatty2005@163.com; ✉通信作者

在高陡边坡山谷地形的垃圾填埋场扩容工程中,采取工程设计、施工以及旧场在施工期继续使用等措施,解决了扩容与填埋场稳定性问题。张婷<sup>[9]</sup>对某垃圾填埋场扩容过程中垃圾坝的现状进行了稳定性分析和评价,分析了坝后垃圾堆体起坡点距坝体的距离和渗沥液水位对坝体稳定性的影响,并根据分析结果制定了相应的工程措施。周小文等<sup>[10]</sup>采用离心机实验和数值仿真模拟方法对垂直扩容垃圾填埋场的挡土土坝稳定性进行了研究。芦业磊等<sup>[11]</sup>以定远县炉桥镇垃圾填埋场为例,对其中GCL复合垂直柔性防渗墙工程的施工工艺进行了分析。然而,在扩容工程设计中,垃圾堆体的沉降、堆体边坡稳定性以及防渗系统的设计等仍然存在着诸多问题,尤其是垃圾堆体内混填了市政污泥的填埋场问题更多;同时,含污泥坑生活垃圾填埋场的竖向扩容工程的工艺设计尚少有可借鉴的成熟案例<sup>[12]</sup>。

基于上述原因,本研究以辽宁省某含污泥坑生活垃圾填埋场为例,对其竖向扩容工程进行了工艺设计和验证分析;拟选用原位固化技术对污泥进行处理,并给出处理后污泥的力学参数设计值;使用Geo-Slope软件,建立扩容后填埋场堆体边坡的计算模型,并对3种不同工况下的边坡抗滑稳定性进行了分析和评价;基于理正岩土软件,对填埋场垃圾堆体进行了沉降计算,并根据沉降分析结果进一步给出了防渗系统设计方案。

## 1 工程概况与设计

### 1.1 工程概况

辽宁省某生活垃圾填埋场一期已填垃圾约 $5\times 10^6$  t,垃圾堆体顶部标高10~16 m,高出地面5~10 m,整体西高东低。一期垃圾堆体占地面积约为 $1.66\times 10^5$  m<sup>2</sup>。在一期垃圾堆体的顶部各有一处污泥坑和一处沼渣坑,平面布置如图1所示。通过工程勘察、取样和室内外试验测试等手段,得出工程的基本数据:泥坑占地面积约为19 059.46 m<sup>2</sup>,平均深度约为6.73 m,最大深度约为10.5 m,污泥总量约为128 270.17 m<sup>3</sup>,含水率为75%~85%;沼渣坑占地面积约为7 138.87 m<sup>2</sup>,平均深度约为3.71 m,最大深度约为4.8 m,污泥总量约为26 485.21 m<sup>3</sup>,含水率为80%~85%。可见,污泥坑和沼渣坑(以下统称为污泥坑)的最深位置剖面为本工程的最不利情况,其截面位置如图1中A-A和B-B断面所示。为解决辽宁省某市生活垃圾焚烧厂建设期生活垃圾处理的需要,急需对该填埋场进行竖向扩容。设计库容为 $1.23\times 10^6$  m<sup>3</sup>。

### 1.2 工程设计与参数取值

1) 竖向扩容工程设计。由实际勘察结果可知,该填埋场污泥坑分层较为明显,主要分为表面垃圾层和底部流塑、软塑污泥层,其中表层垃圾可直接清除掉。根据工程分析结果,本项目拟选用原位固化技术对底层污泥坑进行加固处理。根据工程目标和填埋场设计技术规范<sup>[13]</sup>,设计计算出新堆载的垃圾层高度约为25 m,扩建后填埋场整个垃圾堆体的最大高度可达42 m,根据图1中截面A-A和B-B,分别给出2处最不利情况下扩容后的填埋场设计剖面图(图2和图3)。

通过工程现场勘察和测试结果,并结合相关规范推荐值及相关研究<sup>[14-18]</sup>,得出的固化处理后污泥的物理力学参数设计值及填埋场其他材料物理力学参数见表1。

2) 污泥原位固化药剂及施工工艺。污泥的固化,其机理是向污泥中加入固化剂,通过一系列复杂的物理化学反应,使其转化成类似土壤或胶结强度很大的固体。原位固化快速搅拌系统的强力螺旋搅拌头可以借助挖掘机长臂和转角在污泥内的上、下,左、右和前、后三维空间内任意运动,均匀搅拌并混合从其中心端输出的固化粉体药剂和周围污泥,形成污泥固化区域。污泥固化药剂成分及添加量见表2。

3) 设计参数校核。考虑污泥原位固化后将作为竖向扩容填埋场的基础土层,固化后的污泥必须满足《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》(GB/T 23485-2009)<sup>[19]</sup>中要求的污泥填埋基本指标及《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB 16889-2008)<sup>[20]</sup>的相关规定。同时,结合本工程项目特

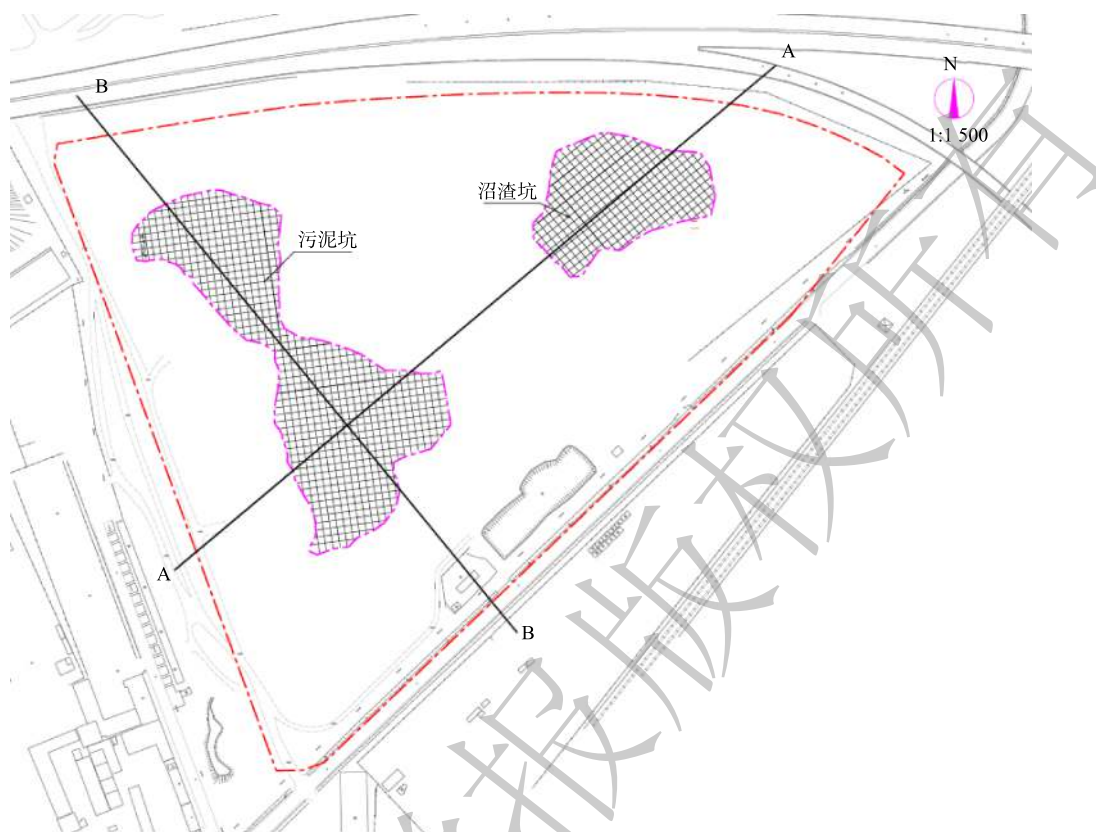


图1 垃圾填埋场污泥坑的平面布置图

Fig. 1 Layout plan of sludge pit in the landfill site

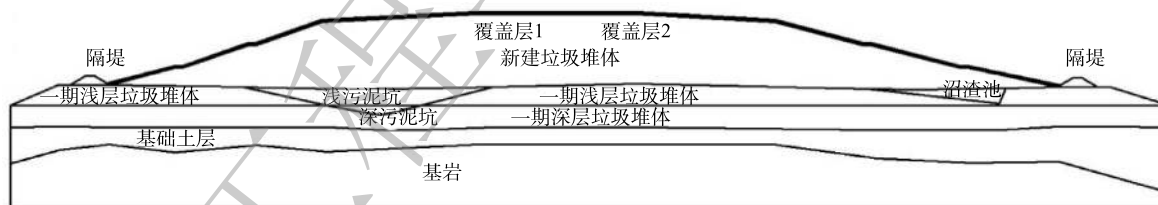


图2 A-A 截面处扩容后填埋场设计剖面图

Fig. 2 Design profile of section A-A of the landfill after expansion

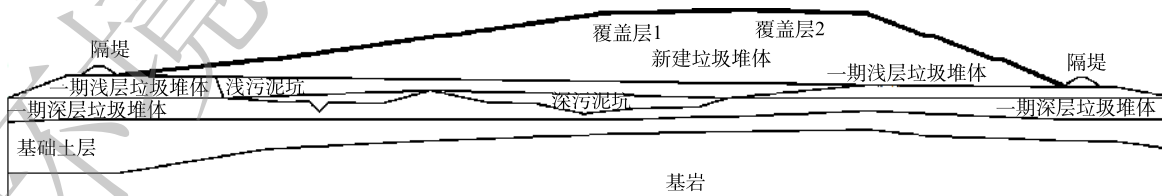


图3 B-B 截面处扩容后填埋场设计剖面图

Fig. 3 Design profile of section B-B of the landfill after expansion

点和技术要求，原位固化处理后污泥在经过28 d 固化龄期后，需达到表3 中的指标参数。

根据图2、图3 和表1，采用摩尔库仑抗剪强度计算公式对该项目设计参数进行校核，具体计算方法见式(1)。计算结果见表4。由表3 和表4 可知，固化后污泥的设计参数值满足指标要求。



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

式中:  $\tau$ 为抗剪强度, kPa;  $\sigma$ 为正应力, kPa;  $c$ 为黏聚力, kPa;  $\varphi$ 为内摩擦角。

## 2 堆体边坡抗滑稳定性分析与评价

### 2.1 堆体边坡工况条件

根据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ 176-2012)<sup>[13]</sup>的规定,垃圾堆体边坡的稳定性分析应考虑以下3种条件。

1) 正常运用条件。填埋场工程投入运行后,经常发生或长时间持续的情况包括:①填埋场垃圾填埋过程;②填埋场封场后的情况;③填埋场渗沥液水位处于正常水位。

2) 非正常运用条件 I。遭遇强降雨等引起的渗沥液水位显著上升。

3) 非正常运用条件 II。正常运用条件下遭遇地震。

结合本工程特点,本项目拟分析的3种对应条件包括静力条件、静力+最高渗沥液水位条件、地震力+最高渗沥液水位条件。根据要求,该堆体边坡抗滑稳定性分析中考虑的最高渗沥液水位应控制在堆体高度的0.5倍。同时,根据本工程条件及《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)<sup>[21]</sup>,该填埋场的抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.1g(g为重力加速度),抗震验算采用拟静力法进行计算。

### 2.2 堆体边坡抗滑稳定性分析

由图2和图3可以看出,垃圾填埋场一期现存垃圾堆体存在堆体坡面,而新垃圾堆体的堆填和隔堤的建设会对现有坡体产生稳定性影响。因此,应针对一期现有堆体和二期扩容后堆体的坡面分别进行稳定性计算和分析。根据图2和图3以及表1的计算参数,采用Geo-Slope软件进行了建模计算和分析。该软件不仅具有非圆弧滑动面自动搜索功能,而且能够解决穿过软弱夹层或界面的滑动面搜索问题。采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度破坏准则,分析中选用广泛采用的极限平衡法(Morgenstern-Price)计算堆体边坡的稳定安全系数。由此,计算得到上述3种工况条件下堆体边坡的抗滑稳定安全系数,结果见表5。

表1 各材料物理力学参数

Table 1 Values of physical and mechanical parameters of various materials

土层	厚度/m	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	抗剪强度参数	
			黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
新填埋垃圾	25	10	29	13
浅层垃圾体	5~8	12	16	25
深层垃圾体	5~8	13	5	30
浅层固化污泥	5~7	14	23	20
深层固化污泥	3~5	13	21	18
固化沼渣	3~7	14	23	20
覆盖层1	0.3	20	20	10
覆盖层2	0.6	1	0	12
隔堤	—	20	200	50
基础土层	6~14	16	25	18

注:黏聚力和内摩擦角数据采用不固结不排水测试获得。

表2 污泥原位固化药剂成分

Table 2 Ingredients for in-situ curing of sludge

序号	药剂成分	添加量 <sup>1)</sup> /(kg·m <sup>-3</sup> )
1	水泥	90~135
2	石灰	60~90
3	粉煤灰	45~65
4	硫酸亚铁	80~120
5	硫酸铝	24~36

注:1)污泥固化药剂质量与污泥体积比例。

表3 处理后污泥的目标参数及实际参数

Table 3 Required and real values of target parameters of treated sludge

类型	含水率/%	pH	抗剪强度/kPa	地基承载力/kPa
目标值	<60	5~10	≥60	≥90
实际值	42~58	7.8~9.5	60.64~72.37	95~116

表4 抗剪强度验证与计算结果

Table 4 Verification and calculation results of shear strength

污泥层	有效附加应力/kPa	抗剪强度/kPa
浅层固化污泥	122	67.40
深层固化污泥	122	60.64

注:有效附加应力 $\sigma$ 的计算是基于垃圾堆体渗沥液浸润线为0.5倍垃圾堆体高度这一条件<sup>[13]</sup>。

### 2.3 堆体边坡稳定性评价

针对堆体边坡的抗滑稳定性评价问题,可参考《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ 176-2012)<sup>[13]</sup>的相关规定。根据垃圾堆体边坡工程的坡高及失稳后可能造成后果的严重性等因素,按照表5中的安全系数,确定出该堆体边坡抗滑稳定的最小安全系数要求值(表6),通过对比分析,进行堆体边坡的抗滑稳定性评价。

考虑到本工程扩容后垃圾堆体总高度为35~42 m,可以判定该堆体边坡的安全等级属于二级。然后,结合表5中对应的最小安全系数要求值,得到对比结果(表7),其中堆体边坡计算安全系数为各坡面计算安全系数的统计最小值。由此可见,各工况下堆体边坡抗滑稳定安全系数均满足规范要求,说明本设计方案合理。

## 3 垃圾堆体沉降计算与防渗系统设计

### 3.1 垃圾堆体沉降计算

填埋场的沉降包括地基沉降和垃圾堆体沉降2部分,其中地基沉降对于填埋场底部防渗衬垫系统和管道的设计及后期运营具有重要影响,而垃圾堆体沉降对于填埋场封顶覆盖系统设计运营以及场地最终填埋容量的估算影响较大。本项目中,填埋场沉降计算采用传统土力学理论,其中污泥可视作软土,按软土地基沉降进行计算分析<sup>[7,22]</sup>。

根据填埋计划,该填埋场将在1 a内完成生活垃圾填埋,采用1:3向上填筑,并每5.0 m设置1座平台,综合坡度1:3.4,顶部平台宽约47 m,填埋高度约25 m。污泥坑平均深度约为6.73 m,最大深度约为10.5 m。沼渣坑平均深度约为3.71 m,最大深度约为4.8 m。根据污泥固结实验,固化污泥的压缩模量为1.85~4.1 MPa,此处取固化污泥的压缩模量为3.0 MPa。杂填土压缩模量为4.0 MPa。选用理正软件建立填埋场沉降模型并进行计算,具体计算过程如下。

1) 各级填埋加荷的沉降计算。第1级加荷,0~6个月。加载开始时,计算高度为0 m,沉降高度为0 m。加载结束时,计算高度为12.611 m,附加应力为163.943 kPa,沉降高度为0.112 m。第2级加荷,6~10个月。加载开始时,计算高度为12.611 m,附加应力为163.943 kPa,沉降高度为0.112 m。加载结束时,计算高度为25.319 m,附加应力为329.147 kPa,沉降高度为0.319 m。

2) 填埋竣工时及后期沉降计算。基准期开始时刻:填埋至设计标高时刻。考虑沉降影响后,实际计算高度为25.319 m。竣工时,地基沉降高度为0.319 m。竣工后,基准期内的残余沉降0.386 m。基准期结束时,地基沉降0.705 m。最终地基总沉降高度为 $1.100 \times 1.362 \text{ m} = 1.499 \text{ m}$ 。

表5 各条件下堆体边坡的抗滑稳定安全系数计算结果  
Table 5 Calculation results of safety factor for landfill slope stability under various conditions

工况条件	坡面类别	A-A剖面模型		B-B剖面模型	
		左侧	右侧	左侧	右侧
静力	一期	3.018	3.847	3.222	6.408
	二期	2.732	3.432	5.028	2.618
静力+最高渗沥液水位	一期	3.018	3.847	3.222	6.408
	二期	1.887	2.321	4.291	2.406
地震力+最高渗沥液水位	一期	2.319	2.740	2.419	3.822
	二期	1.220	1.333	2.230	1.550

表6 堆体边坡抗滑稳定最小安全系数  
Table 6 Minimum safety factor for anti-seepage and stability of landfill slope

运用条件	安全等级		
	一级	二级	三级
正常运用条件	1.35	1.30	1.25
非常运用条件I	1.30	1.25	1.20
非常运用条件II	1.15	1.10	1.05

注:安全等级包括一级(堆体边坡坡高 $\geq 60 \text{ m}$ )、二级( $30 \text{ m} \leq$ 堆体边坡坡高 $< 60 \text{ m}$ )和三级(堆体边坡坡高 $< 30 \text{ m}$ )。

表7 堆体边坡抗滑稳定性评价结果  
Table 7 Evaluation results of landfill slope stability

工况条件	堆体的计算安全系数	最小安全系数要求值	评价结果
静力	2.618	1.30	稳定且满足要求
静力+最高渗沥液水位	1.887	1.25	稳定且满足要求
最高渗沥液水位+地震力	1.220	1.10	稳定且满足要求

### 3.2 防渗衬垫系统设计

防渗衬垫系统应能有效地阻止渗沥液透过，以保护地下水不受污染；同时，应具有相应的物理力学性能、抗化学腐蚀能力和抗老化能力。防渗层应覆盖垃圾填埋场场地和四周边坡，形成完整有效的防渗屏障。根据最不利设计原则，将土工膜布置图和沉降断面图进行叠加，土工膜上段沉降 0.20 m，中段沉降 1.362 m，尾端沉降 0.20 m，断面长度约 300 m，原始坡度 1%。设计标高：上端 14.2 m，中端 12.45 m，尾端 10.7 m。最终沉降后标高：上端 14.00 m，中端 11.088 m，尾端 10.5 m。拉伸长度约为 0.2 m，考虑不均衡性，安全系数为 3，最大伸长率为  $0.2 \times 3 / 150 = 0.4\%$ 。

为抵抗将来的不均匀沉降，防渗系统设置双向拉伸聚丙烯土工格栅(产品规格为 TGSG5050)，格栅的纵/横向拉伸强度  $\geq 50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ，纵/横 2% 伸长率时的拉伸强度  $\geq 17.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ，纵/横 5% 伸长率时的拉伸强度  $\geq 35 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。具体防渗结构设计如图 4 所示。

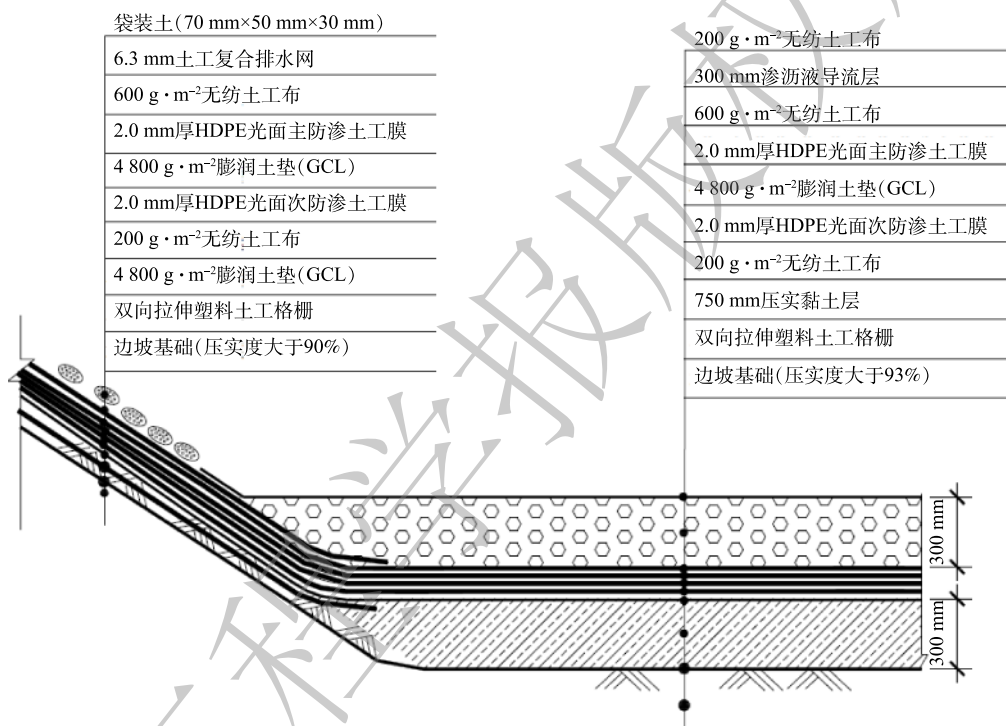


图 4 防渗衬垫系统设计

Fig. 4 Structural design of seepage control system

## 4 结论

1) 本项目通过分层堆填来完成近 25 m 高的垃圾填埋场竖向扩容工程，并选用原位固化技术处理填埋场内的污泥和沼渣；结合现场勘察、实验测试以及参考规范和相关研究，确定的浅层固化污泥和深层固化污泥在有效应力作用下抗剪强度  $\geq 60 \text{ kPa}$ ，地基承载力  $\geq 90 \text{ kPa}$ 。上述参数均满足垃圾堆体竖向扩容要求。

2) 扩容后垃圾填埋场堆体边坡的抗滑稳定性分析模型计算结果表明，垃圾堆体在正常运用条件、非正常运用条件 I 和非正常运用条件 II 不同情况下，垃圾堆体边坡抗滑稳定安全系数均满足相关工程技术规范的要求。

3) 通过沉降计算得出，库容竣工后，加载 25 m 高的垃圾堆体产生的沉降值为 0.319 m，而堆体最终总沉降为 1.499 m，由此得到的防渗系统最大伸长率为 0.4%，可满足规范相关工程技术要求。通过设置抗沉降加筋层，可抵抗垃圾堆体下方地基产生的不均匀沉降。

## 参考文献

- [1] 裴习君. “无废城市”理念下我国城市生活垃圾处理模式探析[J]. 长沙大学学报, 2019, 33(3): 30-32.
- [2] 周卫文. 城市生活垃圾焚烧处理污染防治方法探讨[J]. 技术与市场, 2018, 25(4): 106-107.
- [3] 陈亮. 生活垃圾填埋场老场扩建方式探讨[J]. 环境工程, 2013, 31(5): 117-120.
- [4] 潘颖雅, 李昀涛. 广州市兴丰生活垃圾卫生填埋场扩容工程设计[J]. 环境卫生工程, 2015, 23(1): 69-72.
- [5] 何耀忠. 生活垃圾卫生填埋场扩容工程案例[J]. 广东化工, 2019, 46(5): 170-171.
- [6] 王刚. 广州兴丰生活垃圾卫生填埋场渗滤液扩容工程工艺设计[J]. 广东化工, 2013, 40(13): 143-144.
- [7] 王艳明, 张乾飞. 老填埋场竖向加高扩容工程的沉降计算与分析[J]. 环境工程, 2007, 25(4): 59-62.
- [8] 冯兵强, 林守忠, 兰军利. 高边坡的垃圾填埋场扩容设计与施工技术[J]. 建筑安全, 2015, 30(1): 38-40.
- [9] 张婷. 某垃圾填埋场坝体稳定性分析与工程措施[J]. 环境卫生工程, 2013, 21(2): 48-50.
- [10] 周小文, 蒋浩然, 周密, 等. 垂直扩容垃圾挡坝稳定性离心机试验与数值仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 157-166.
- [11] 芦业磊, 姚达, 王金鹏. GCL复合垂直柔性防渗墙在垃圾填埋场应用及施工工艺探讨[J]. 江苏水利, 2019(3): 52-55.
- [12] 罗小勇, 王艳明, 熊建英, 等. 垃圾填埋场污泥坑原位修复工程实践[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 285-294.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范: CJJ 176-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 张会文, 朱伟, 包建平, 等. 污泥原位固化-稳定化中试研究[J]. 环境工程, 2014, 31(8): 101-104.
- [15] 冯源, 罗小勇, 詹良通, 等. 处置库污泥工程特性测试研究[J]. 岩石力学, 2013, 34(1): 115-122.
- [16] 陈赞, 王亮, 郑智杰. 江苏某垃圾填埋场污泥库特殊性土的分析与评价[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(1): 43-49.
- [17] 李湛江, 苏兴国, 宋树祥. 兴丰生活垃圾卫生填埋场污泥原位固化工程案例[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(4): 70-75.
- [18] 张芳. 污泥原位固化处置技术的应用[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(3): 45-46.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质: GB/T 23485-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾填埋污染控制标准: GB 16889-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [22] 胡敏云, 陈云敏, 温振统. 城市垃圾填埋场垃圾土压缩变形的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 123-126.

(责任编辑: 靳炜, 郑晓梅)

## Analysis of the stabilization and settlement of vertical expansion project for municipal solid waste landfill with sludge pit

HUANG Zhiliang<sup>1,\*</sup>, GUO Xiaojing<sup>1</sup>, CAI Xiaoping<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, PU Hefu<sup>2</sup>, CHEN Xunlong<sup>2</sup>

1. BeiJing Jingwei Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 100041, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

\*Corresponding author, E-mail: gshatty2005@163.com

**Abstract** The existing sludge pit in municipal solid waste (MSW) landfill significantly increases the difficulty of the design and construction in its post vertical expansion. In this study, a MSW landfill with sludge pit in Liaoning Province was taken as a case, and the process of its vertical expansion project was designed, verified and analysed. According to the engineering objectives and relevant specifications, the overall layout of the landfill and the engineering parameters (e.g., landfill height) were reasonably determined. The in-situ solidification technology was selected to treat the sludge, and the design values of mechanical parameters of the treated sludge were determined. The Geo-slope software was used to establish the calculation model of landfill slope stability, and the effects of three different conditions on the slope stability were analysed and evaluated. The settlement of the landfill was calculated based on the Lizeheng geotechnical software, and the design scheme of the anti-seepage liner system was determined based on the settlement analysis. The results show that all the safety factors of stability of landfill slope under three conditions met the requirements of the technical code after sludge pit in-situ solidification. The strength and other indexes of the solidified sludge met the design requirements of the landfill vertical expansion. The maximum elongation of the anti-seepage liner system was 0.4%, which met the requirements of the specification. The anti-settlement reinforced layer embedded in the anti-seepage structure could resist the uneven settlement of the garbage mount. The research results can provide some references for the technological design of the vertical expansion project of similar domestic MSW landfills.

**Keywords** municipal solid waste landfill; in-situ solidification of sludge; vertical expansion; settlement; slope stability