

TRD 在某垃圾填埋场垂直防渗工程中的应用研究

刘晨阳¹, 叶更强², 徐晓兵^{3*}, 胡琦^{1,4}, 丁继民⁴, 薛道寒¹

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;
3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 4. 东通岩土科技股份有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 在垃圾填埋场垂直防渗工程中, 渠式切割水泥土连续墙 (Trench Cutting Re-Mixing Deep Wall, TRD) 作为防渗墙, 其设计方法、施工控制要点和实施效果仍缺乏足够的研究。本文依托滨海平原地区某垃圾填埋场封场覆盖及生态修复工程, 根据项目工程地质特点, 比较不同防渗墙的适用性, 设计了 TRD 联合高压旋喷桩的施工方案, 在两幅 TRD 之间搭接一排高压旋喷桩, 搭接宽度为 300 mm。通过试成墙试验, 确定了 TRD 的施工参数, 并对其成墙质量进行了原位降水头注水试验、钻孔取芯试验、水泥土试块试验。原位降水头注水试验结果表明: 防渗墙渗透系数为 $1.13 \times 10^{-8} \sim 6.67 \times 10^{-7}$ cm/s; 钻孔取芯试验结果表明: 钻孔取芯芯样率较高, 墙体沿深度均一性较好, 芯样无侧限抗压强度为 0.77~1.76 MPa, 渗透系数为 $1.61 \times 10^{-8} \sim 9.96 \times 10^{-7}$ cm/s; 水泥土试块试验结果表明: 无侧限抗压强度为 4.7~23.1 MPa, 渗透系数为 $1.6 \times 10^{-8} \sim 9.0 \times 10^{-8}$ cm/s。检测结果表明, TRD 垂直防渗墙在滨海平原地区垃圾填埋场工程中施工效果较好, 满足垃圾填埋场垂直防渗墙的设计要求。

关键词: 填埋场; 垂直防渗; 渠式切割水泥土连续墙; 无侧限抗压强度; 渗透系数

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)03-0284-12

Application research of TRD as vertical barrier in a waste landfill

LIU Chen-yang¹, YE Geng-qiang², XU Xiao-bing^{3*}, HU Qi^{1,4}, DING Ji-min⁴, XUE Dao-han¹

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 4. Dongtong Geotechnical Technology Co., Ltd., Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: The effectiveness of trench cutting re-mixing deep wall (TRD) as vertical barrier in waste landfills remains research interests concerning the design methodology, construction control points. This work, based on the final cover and ecological restoration project of a landfill in a coastal plain region, evaluates the suitability of various types of vertical barriers in accordance with the geological characteristics of the site. Subsequently, the work determines the final design scheme employing TRD combined with high-pressure jet grouting piles (HJGP). The configuration includes a row of high-pressure jet grouting pile (HJGP) with a 300 mm overlapping width between adjacent sections of TRD. Construction parameters for TRD are established through trial wall-forming tests. The quality of TRD is assessed through in-situ reduced-head water injection tests and laboratory tests on soil-cement block samples. The results of in-situ reduced-head water injection tests show that the coefficient of permeability of TRD is from 1.13×10^{-8} cm/s to 6.67×10^{-7} cm/s. Borehole samples exhibit consistent sampling and uniform quality of TRD along the depth, with unconfined compression strength ranging from 0.77 MPa to 1.76 MPa and coefficient of permeability from 1.61×10^{-8} cm/s to 9.96×10^{-7} cm/s. Laboratory tests on soil-cement blocks present unconfined compression strength ranging from 4.7 MPa to 23.1 MPa and coefficient of permeability from 1.6×10^{-8} cm/s to 9.0×10^{-8} cm/s. These findings prove the satisfactory construction quality of TRD as vertical barrier in coastal plain landfills, meeting the design specifications for landfill vertical barriers.

收稿日期: 2023-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52178363); 浙江省建设科研项目 (2022K166, 2023K195)。

作者简介: 刘晨阳 (2000—), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事基坑工程等方面的研究。E-mail: 1429574913@qq.com。

*通信作者: 徐晓兵 (1982—), 男, 江苏扬州人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程等方面的研究。E-mail: xiaobingxu@gxu.edu.cn。

Key words: landfill; vertical barrier; TRD; unconfined compression strength; coefficient of permeability

0 引言

随着我国城市化进程的发展,既有生活垃圾填埋场越来越接近城市主城区。为了更好地利用生活垃圾填埋场封场后的土地资源进行后续生态开发和应用,需要对既有填埋场进行综合处置。生活垃圾在填埋后会发生降解,降解过程中会产生渗沥液和填埋气。其中,渗沥液中含有大量污染物,易造成生活垃圾填埋场周围环境中的土壤、地表水和地下水被严重污染,给城市生态系统带来破坏^[1-2]。现代生活垃圾卫生填埋场采用防、堵、排、治、用相结合的措施防治处理渗沥液,其中“堵”是防止污染扩散最直接有效的措施^[3]。“堵”通常是利用垂直防渗帷幕阻断渗沥液污染迁移和扩散的通道,将其拦截和围堵在场地内,同时也能阻止周围地下水流入场地内,为生活垃圾填埋场提供一个独立封闭的稳定化空间^[4]。

目前,生活垃圾卫生填埋场垂直防渗类型有置换法垂直开槽现浇连续墙、喷射注浆墙、水泥土搅拌桩墙、板桩防渗墙等,都是利用置换、填充、搅拌、插入板桩等达到隔离污染物的目的。置换法垂直开槽现浇连续墙包括混凝土防渗墙、土-膨润土防渗墙等,通过开槽机进行垂直开槽,待沟槽成形后在槽内浇筑塑性混凝土或铺设土工膜和填回填料,该方法适用范围广,渗透系数根据沟槽内浇筑材料不同介于 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,但其造价较高,对施工设备要求也较高^[5]。喷射注浆墙可以是高压旋喷桩防渗墙和灌浆帷幕,其中高压旋喷桩防渗墙采用钻机钻孔,在孔中喷入高压水和高压气体切割破坏土体,然后喷入高压水泥浆液与土体充分混合形成防渗帷幕,施工功效高,但施工质量较难控制,成墙过程中存在搭接^[6-7];灌浆帷幕是采用钻机在地层中开凿孔洞,用高压将浆液注入土层,利用射流作用破坏土层原有结构,使剥落的土颗粒与浆液混合形成凝结体,形成有一定强度和防渗性能的止水帷幕,渗透系数根据注浆材料的不同介于 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ^[8-9]。水泥土搅拌桩墙是通过搅拌叶片对原位土进行搅拌,并将固化剂喷入土层形成防渗墙,施工效率较高、造价较低,但通常施工深度有限,不适合复杂地质施工^[10-11]。板桩防渗墙常用钢板桩、加筋板桩等材料,通过将板桩打入土层中,再利用各个桩自带的锁扣连接形成完整的防渗墙,其强度大,但施工深度有限,防渗效果取决于锁扣

连接质量,对施工工艺要求较高,造价也相对较高。

渠式切割水泥土连续墙(Trench Cutting Re-Mixing Deep Wall, TRD)是一种新型水泥土防渗墙,其基本原理是采用链锯型刀具箱垂直插入地层中,然后作水平横向掘削,由链条带动刀具做上下回转运动,搅拌原位土体的同时掺入固化剂,形成具有一定强度和防渗性能的等厚水泥土地下连续墙。相较于传统防渗墙,TRD无需单独的开槽工序,施工深度大(目前最大成墙深度可达90 m),土层适用性强(适用于黏土、砂土、砾石等一般土层,也适用于砂卵石、风化岩层),成墙连续性和均匀性较好,渗透系数可达 10^{-7} cm/s 量级^[12-14];此外,设备施工灵活、空间要求小、施工精度高^[15]。目前,TRD已广泛应用于基坑止水帷幕和土体加固。吴超等^[16]在武汉粉质黏土和粉砂土为主的复杂地基中开展了TRD作为止水帷幕及土体加固措施的试成墙试验,结果表明:TRD钻孔取芯芯样率较高,墙体均匀性较好;芯样渗透系数为 $0.7 \times 10^{-6} \sim 0.9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,且不同深度部位差异性较小,隔水性能好;无侧限抗压强度可达1.3~1.5 MPa,且不同深度部位差异性较小。XU等^[17]介绍了深度达61.5 m的TRD在南京承压水层基坑抢险工程中的成功应用,检测结果表明墙体的渗透系数达到 10^{-6} cm/s ,无侧限抗压强度达到0.8 MPa,满足抢险工程超深止水帷幕的设计要求。王卫东等^[18-19]和黄炳德等^[20]介绍了TRD在南昌、天津、淮安等地作为基坑隔水帷幕的成功工程实践。目前,TRD在生活垃圾填埋场防渗墙中的应用研究较缺乏。日本环境省(卫生部)要求TRD在生活垃圾填埋场工程中需满足墙厚大于500 mm,渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ^[14]。王旭旭^[6]结合江苏某生活垃圾填埋场工程,对比了TRD与双轮铣深层搅拌水泥墙(Cutter Soil-Mixing Wall, CSM)的防渗墙技术方案,指出TRD从适应土层、深度、渗透系数等方面均适用于滨海地区的地质条件,但并没有工程实施及相关效果的介绍。

本文基于某垃圾填埋场封场覆盖及生态修复工程,研究TRD作为垃圾填埋场垂直防渗墙的适用性和应用效果。本工程位于滨海平原地区,填埋场堆体高度和填埋容量已超设计值,填埋场渗沥液有溢流造成填埋场周边环境风险。本文详细介绍了该垃圾填埋场TRD垂直防渗墙的设计方案、施工方案和试验检测结果,对类似垃圾填埋场防渗墙的设计和施工具有一定的指导和参考价值。

1 工程概况

1.1 工程简介

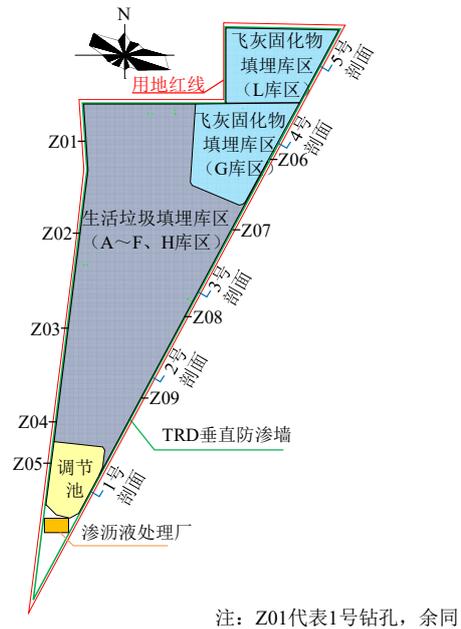
本垂直防渗墙工程隶属于某垃圾填埋场封场覆盖及生态修复工程项目。该垃圾填埋场属于滨海平原型填埋场，西侧紧邻河道，北侧距离养殖场160 m，距西北侧的温州龙湾国际机场1.3 km，距东南侧高速路约600 m，周边场地空旷平整均为农田，如图1所示。场地属海滨平原，地形平坦，总占地110亩，设计总库容330 000 m³，于2009年11月建成并投入使用。



图1 某垃圾填埋场区域位置和周边环境
Fig. 1 Location and surroundings of a landfill

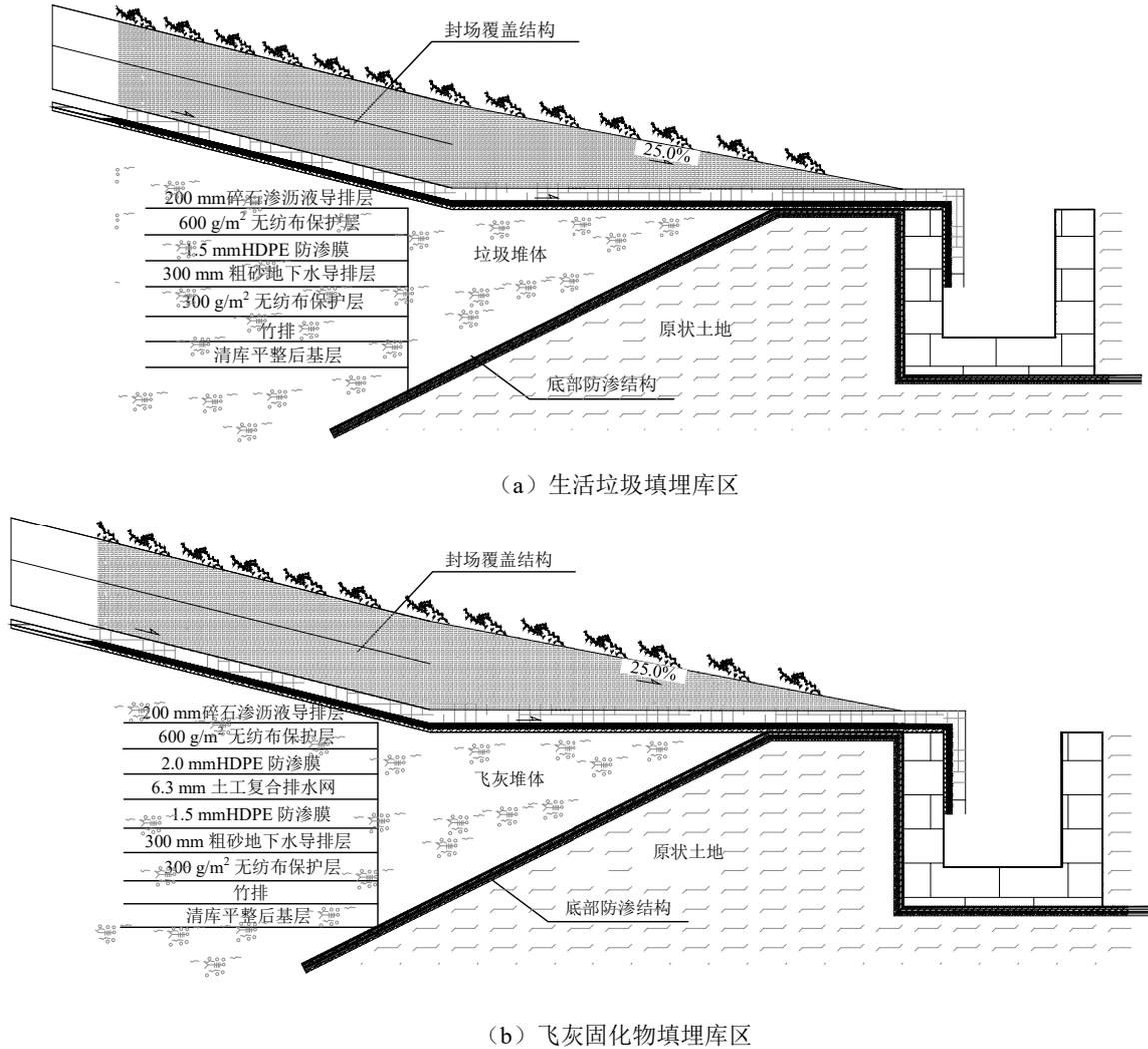
该垃圾填埋场内设有调节池、生活垃圾填埋库区、飞灰固化物填埋库区和渗沥液处理厂，填埋场平面分区及钻孔布置如图2所示。其中，生活垃圾填埋库区占地面积约41 000 m²，东西最宽处220 m，南北最宽处380 m。生活垃圾填埋库区周边建有1.0 m高的围堤，顶标高（黄海标高）为4.0 m，堤顶宽度4.5 m，堤坝两侧边坡坡率为1:1.5。填埋库底标高为1.5~2.1 m，垃圾从场底开始逐层填埋，当堆体高度达到4 m标高后，开始以1:3的坡率向上收坡至8 m标高，然后按2.5%向中心区域收坡至9 m标高。生活垃圾填埋库区自北向南分为4个填埋区，每个填埋区内再用1.0 m高的土堤分隔成若干小区，总共形成8个填埋小区（A~H库区）。G库区和L库区位于生活垃圾填埋库区东北侧，占地面积分别为8 500 m²和6 700 m²。A~F库区和H库区用以回填生活垃圾，L库区和G库区用以回填飞灰固化

物。垃圾堆体原设计垃圾最高标高为8.0~9.0 m，截至2019年3月，已填埋生活垃圾482 505 t，生活垃圾焚烧飞灰固化物159 910 t。A~F库区、H库区生活垃圾堆体标高已达10.0~13.0 m，超过设计值2.0~4.0 m，堆体厚度已达7.0~10.0 m；G库区填埋飞灰固化物，堆体顶部标高已达9.0~10.0 m，堆体厚度已达6.0~8.0 m；L库区填埋飞灰固化物，堆体顶部标高5.0~6.0 m，堆体厚度已达2.0~4.0 m。相较于原设计，各库区堆体高度、厚度均已超过设计值，处于超期服役状态。目前已停止垃圾进场，进行垃圾堆体封场覆盖和生态修复工作。



注：Z01代表1号钻孔，余同
图2 填埋场平面分区及钻孔布置图
Fig. 2 Layout plan of landfill division and boreholes

生活垃圾填埋库区采用了单层水平防渗结构，如图3(a)所示。其库底结构层自上而下分别为：200 mm 碎石渗沥液导排层、600 g/m² 无纺布保护层、1.5 mm HDPE 防渗膜、300 mm 粗砂地下水导排层、300 g/m² 无纺布保护层、竹排、清库平整后基层。其边坡结构层自上而下分别为：袋装土保护层、600 g/m² 无纺布保护层、1.5 mm HDPE 防渗膜、清库平整后基层。飞灰固化物填埋库区采用了双层水平防渗结构，如图3(b)所示。其库底结构层自上而下分别为：200 mm 碎石渗沥液导排层、600 g/m² 无纺布保护层、2.0 mm HDPE 防渗膜、6.3 mm 土工复合排水网、1.5 mm HDPE 防渗膜、300 mm 粗砂地下水导排层、300 g/m² 无纺布保护层、竹排、清库平整后基层。其边坡结构层自上而下分别为：袋装土保护层、600 g/m² 无纺布保护层、2.0 mm HDPE 防渗膜、6.3 mm 土工复合排水网、1.5 mm HDPE 防渗膜、清库平整后基层。



(a) 生活垃圾填埋库区

(b) 飞灰固化物填埋库区

图 3 防渗结构示意图

Fig. 3 Anti-seepage structure

该垃圾填埋场前期虽设有水平防渗措施,但填埋场的垃圾填埋量大大超过了原设计值且存在超高填埋,所以垃圾堆体沉降较大,极易发生水平防渗膜破损;同时,堆体中渗沥液的有机物浓度、重金属浓度较高,存在溢流造成填埋场周边地表水和地下水水质受到污染的风险。根据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ 176—2012)^[21],渗沥液渗漏对周边地下环境造成极大威胁,可采用垂直防渗帷幕对现有填埋场围封;《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》(GB 50869—2013)^[22]规定,渗沥液发生地下横向迁移时,应设置垂直防渗系统。因此,在该垃圾填埋场治理工程中设置垂直防渗帷幕,以控制填埋场垃圾堆体内部渗沥液渗漏和污染周边环境。通过方案比选,垂直防渗帷幕选用水泥土搅拌桩防渗墙形式,采用 TRD 联合高压旋喷桩成墙。本文主要针对渠式切割水泥土连续墙的设计方案、施工方案确定以及施工效果的检验检

测进行分析和介绍。

1.2 工程地质及水文地质条件

拟建场地地形平坦,在勘探深度内,地层主要由硬壳层黏土、淤积软土、深部黏土等组成,主要包括:①黏土、②₁淤泥、②₂淤泥夹粉砂、②₃细砂、②₄淤泥夹粉砂、②₅淤泥、②₆淤泥质黏土、③₁黏土、③₂黏土。土层物理力学性质指标如表 1 所示,典型地质剖面图如图 4 所示。场地地基土类型为软弱土,施工时需要注意软土塌陷及局部砂层振动液化等工程问题。

工程区域属平原区水文地质单元,地下水类型主要为孔隙潜水,含水层中除②₃细砂层具较强透水性、较强富水性外,其余各土层均具弱透水性、弱含水性。地下水位主要受邻近地表水体、大气降水、人工排水等因素影响,勘察期间测得稳定地下水位埋深为 0.15~2.60 m,高程为 2.4~4.0 m,地下水位年变化幅度一般为 1~2 m。

表1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil layers

土层	状态	层厚/ m	重度 γ / (kN/m ³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	垂直渗透系数 k_v / (cm/s)	水平渗透系数 k_h / (cm/s)	压缩模量 E_s / MPa
①黏土	软-可塑	0.9~1.0	17.4	13.5	10.1	4.0×10^{-6}	2.8×10^{-5}	2.42
② ₁ 淤泥	流塑	1.7~5.6	17.1	14.2	10.0	6.8×10^{-7}	5.3×10^{-6}	2.56
② ₂ 淤泥夹粉砂	流塑	3.5~4.1	17.1	18.4	11.0	2.3×10^{-5}	3.2×10^{-5}	2.83
② ₃ 细砂	松散-稍密	1.0~2.3	15.4	11.6	26.0	3.2×10^{-4}	4.3×10^{-4}	4.50
② ₄ 淤泥夹粉砂	流塑	2.9~5.5	17.4	15.1	11.0	6.1×10^{-7}	7.2×10^{-7}	2.70
② ₅ 淤泥	流塑	15.7~18.7	16.5	10.6	8.5	5.4×10^{-7}	6.1×10^{-7}	1.92
② ₆ 淤泥质黏土	流塑	3.1~10.9	17.6	15.3	10.9	3.0×10^{-7}	3.5×10^{-7}	2.93
③ ₁ 黏土	可塑	1.7~5.8	18.1	26.2	11.3	3.6×10^{-7}	4.3×10^{-7}	4.41
③ ₂ 黏土	软塑	2.0~10.1	18.3	27.5	11.8	2.2×10^{-6}	2.8×10^{-6}	3.84

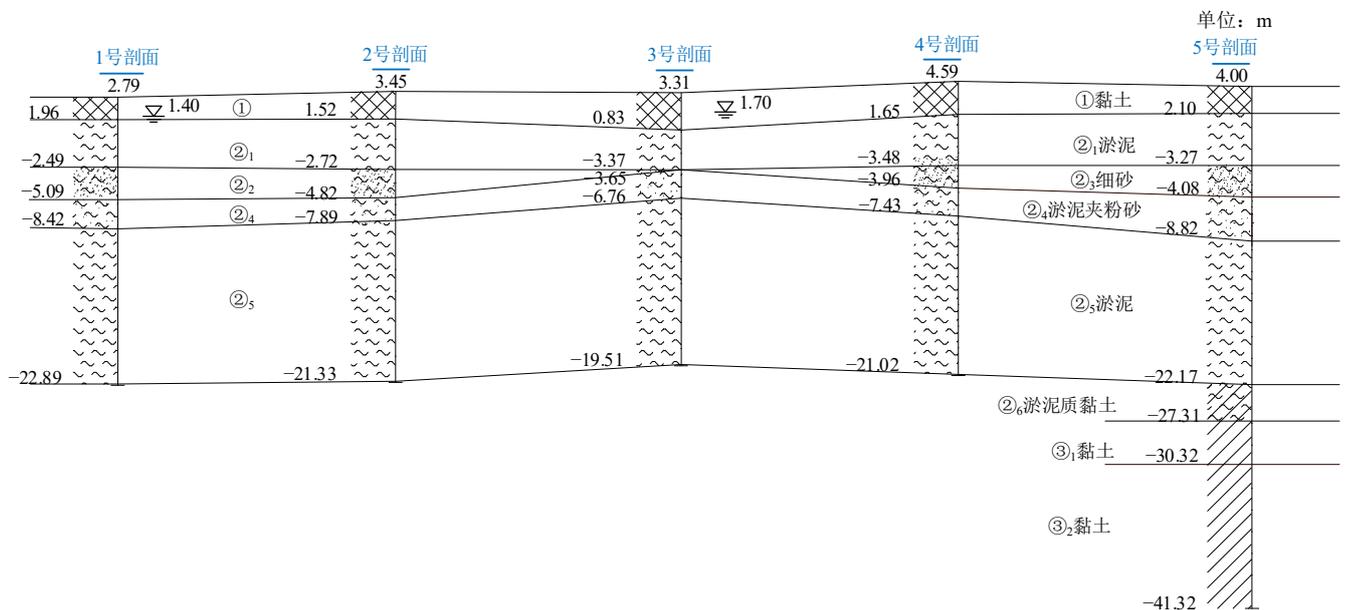


图4 典型地质剖面图

Fig. 4 Typical geological profile

2 TRD防渗墙设计方案

2.1 设计要求

为了控制库区内部渗沥液向库区外部渗漏而污染周边环境,在填埋场库区周边增设垂直防渗帷幕,穿透②₃细砂层,将其底部嵌入天然相对不透水层②₅淤泥层,以形成一个相对封闭独立的水文地质单元。通过对库区内部渗沥液的抽排,实现后续处理后的达标排放。

根据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ 176—2012)^[21],垂直防渗帷幕的渗透系数宜在 10^{-7} cm/s的数量级,宜嵌入渗透系数不大于 1×10^{-7} cm/s的隔水层中,其嵌入隔水层的深度不宜小于1 m。《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》

(GB 50869—2013)^[22]要求,当填埋场所处地质为不透水层时,可采用垂直防渗帷幕配合抽水系统进行地下水导排,垂直防渗帷幕的渗透系数不应大于 1×10^{-5} cm/s,其底部深入相对不透水层不小于2 m。根据《深层搅拌法地基处理技术规范》(DL/T 5425—2018)^[23],防渗墙墙体应进入不透水层或相对不透水层0.5~1.0 m,墙体渗透系数宜小于 1×10^{-5} cm/s。根据《渠式切割水泥土连续墙技术规程》(JGJ/T 303—2013)^[24]规定,水泥土28 d的无侧限抗压强度标准值不宜小于0.8 MPa。因此,确定本工程需满足水泥土防渗墙渗透系数在 10^{-7} cm/s量级和水泥块28 d无侧限抗压强度大于0.8 MPa的要求。本工程垂直防渗墙的质量要求如表2所示。

本工程场地不仅存在较深厚的软土层, 还存在强透水的细砂层。经过方案比选, 本工程选用 TRD 联合高压旋喷桩工艺进行防渗帷幕的成墙, 兼具优异的防渗性能和较高的经济效益。其中垂直防渗墙主体采用 TRD 施工, 并在两幅 TRD 之间搭接一排高压旋喷桩。

表 2 垂直防渗墙的质量要求

Table 2 Quality requirements of vertical barrier

帷幕质量控制参数	参数指标
墙体渗透系数/(cm/s)	10 ⁻⁷ 量级
隔水层渗透系数/(cm/s)	≤1×10 ⁻⁷
嵌入隔水层深度/m	≥1
水泥土强度 R ₂₈ /MPa	≥0.8

2.2 设计内容

本工程垂直防渗墙环绕飞灰固化物填埋库区、生活垃圾填埋库区、渗沥液调节池和处理厂设置, 用地红线内退 2 m 位置, 将库区全部围封, 设计总长度约 1 625 m (如图 2 所示)。以下针对 TRD 垂直防渗墙的设计内容进行论述。

根据《深层搅拌法地基处理技术规范》(DL/T 5425—2018) [23] 规定, 水泥土防渗墙厚度应满足:

$$S = \eta_j \Delta H / [J] \quad (1)$$

式中: ΔH 为墙体两侧水头差, m; $[J]$ 为水泥土允许比降, 可取破坏比降的 1/3~1/2; η_j 为系数, 可取 1.1~1.4。

生活垃圾填埋库区垃圾堆体整形后, 库区内堆体顶部标高为 13.50 m, 库区底部标高为 4.50 m, 库区外地下水位为 2.36~4.03 m, 考虑到库区内渗沥液最高水位与堆体顶部标高一致, 以及渗沥液最低水位与库区底部标高一致的极端工况, 取水泥土防渗墙两侧的最大水头差为 11.14 m; 本工程水泥土破坏比降大于 150, 所以水泥土允许比降取值 50; η_j 取大值, 为 1.4。因此, 有效墙厚的计算结果为 312 mm。考虑预留安全度和 TRD 机械的规格, 最终取墙厚为 600 mm。基于表 2 所示 TRD 设计参数要求, 结合本工程地勘结果, 取 TRD 平均深度为 15 m, 墙底嵌入②₅ 淤泥层中 2 m。TRD 垂直防渗墙剖面图如图 5 所示。同时, 在两幅 TRD 之间插入单排布置的高压旋喷桩。高压旋喷桩单桩直径为 800 mm, 相邻桩之间横向搭接长度为 300 mm, 桩间距为 500 mm, 与单侧 TRD 墙横向搭接宽度为 150 mm, 如图 6 所示。

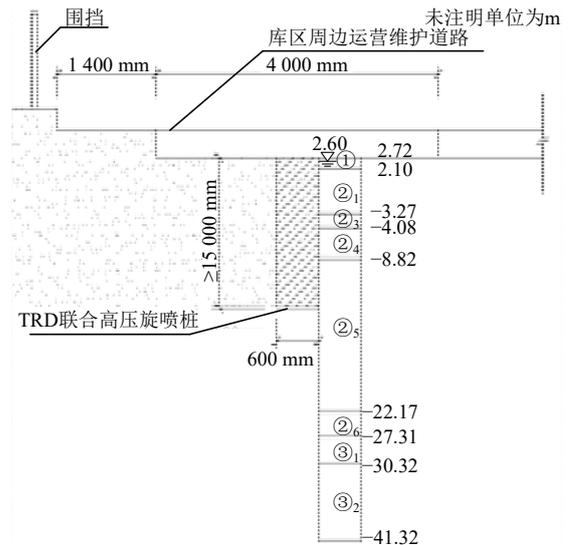


图 5 TRD 垂直防渗墙剖面图

Fig. 5 Profile of TRD vertical barrier

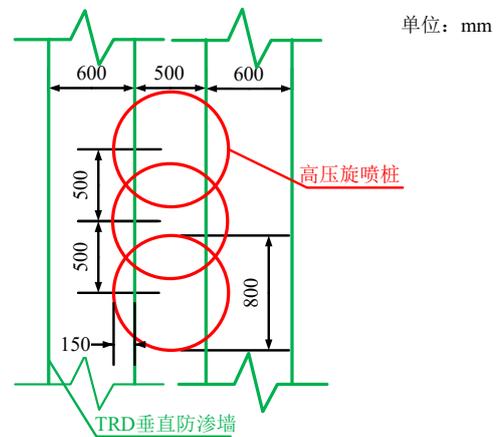


图 6 TRD 与高压旋喷桩平面布置图

Fig. 6 Layout of TRD combined with high-pressure jet grouting piles

3 TRD 防渗墙施工方案

基于试成墙试验以及成墙范围内的土层特性, 结合室内配比实验, 本工程 TRD 垂直防渗墙施工控制参数如表 3 所示。TRD 防渗墙采用履带式 CMD850 进行施工 (如图 7 所示), 每道 TRD 垂直防渗墙的间距为 500 mm。采用“三步法”的施工顺序 (即先行切割、回撤切割、注浆成墙): 首先通过切割箱端部注入切割液, 向前掘削一段距离后停止 (本工程为 8 m), 水平掘进速度为 0.8 m/h; 为保证 TRD 成槽时槽壁土体稳定、不塌方, 挖掘切割生土时注入采用钠基膨润土拌制的切割液, 每立方米被搅拌土体掺入约 100 kg 的膨润土, 切割液的水膨润土配合比为 13.3; 为使浆液不离析, 须控制泥浆流动度宜为 160~240 mm; 然后回撤挖掘至原始位置, 回切速度为 3.32 m/h; 再注入固化液, 向前推进搅拌成墙, 固

化液采用 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥, 水泥掺量为 20%, 水灰比为 1:1, 水泥:膨润土:水的质量比为 1:0.2:1, 喷浆成墙速度为 1.86 m/h, 控制泥浆流动度宜为 180~220 mm。根据《渠式切割水泥土连续墙技术规程》(JGJ/T 303—2013)^[24] 要求, TRD 垂直防渗墙定位偏差应小于 25 mm, 成墙后水平偏位不得超过 30 mm, 桩底标高偏差应小于 50 mm, 机架和墙身垂直度偏差不得超过 1/250。

表 3 TRD 垂直防渗墙施工控制参数

Table 3 Construction parameters of TRD vertical barrier

技术控制参数		参数指标
平面位置偏差/mm		±25
宽度尺寸偏差/mm		±30
桩底标高偏差/mm		±50
机架垂直度偏差		≤1/250
墙体垂直度偏差		≤1/250
切割液	膨润土掺量/(kg/m ³)	100
	水膨润土比	13.3
固化液	水泥掺量/%	20
	水灰比	1.0



图 7 TRD 垂直防渗墙现场施工图

Fig. 7 On-site construction photo of TRD vertical barrier

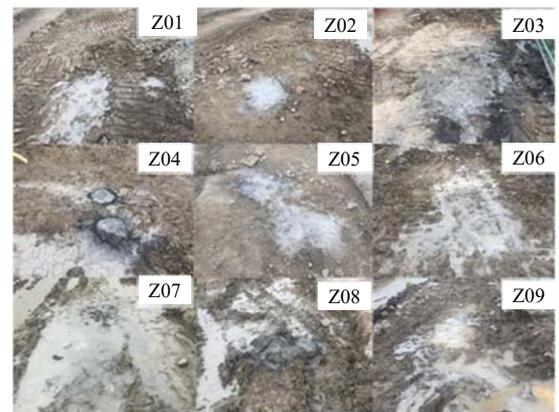
4 TRD 防渗墙质量检测与分析

《渠式切割水泥土连续墙技术规程》(JGJ/T 303—2013)^[24] 提出 TRD 质量检测内容宜包括渗透系数、抗压强度、墙体完整性、墙体深度等。《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ 176—2012)^[21] 提出了垂直防渗帷幕需达到相应的渗透系数要求, 如表 2 所示。为了全面分析 TRD 防渗墙的成墙质量, 通过钻孔取芯反映墙体沿深度方向的完整性和均匀性, 通过钻孔现场注水实验、芯样和水泥土试块的室内渗透试验确定墙体的渗透系数, 通过

芯样和水泥土试块的室内强度试验反映墙体的抗压强度。在现场注水试验结束后, 将所有钻孔进行封闭, 也采用水泥:膨润土:水的质量比为 1:0.2:1 的配合比回灌封孔, 现场钻孔与封孔如图 8 所示。



(a) 钻孔



(b) 封孔

图 8 现场钻孔与封孔

Fig. 8 On-site drilling and sealing

4.1 钻孔取芯检测

钻孔取芯检测是采用钻孔法检测垂直防渗墙的墙身长度、完整性和均匀性是否满足设计要求的常用方法。在 TRD 防渗墙中共取 9 个钻孔的芯样做直接观察以及进一步的室内无侧限抗压强度和渗透系数试验。由于钻机每回次钻进 1~2 m, 直至到达距离墙体底部 1~1.5 m 处或钻头偏出墙体以外则停止钻孔, 所以钻孔深度均为 12 m。除 Z04 与 Z05 之间钻孔间距为 50 m 外, 其他相邻钻孔之间的间距均为 100 m, 如图 2 所示。

本次采用的钻探设备为 XY-100 型钻机, 采用单管正循环合金钻进施工工艺。对垂直防渗墙从墙顶开始连续取样钻探, 开孔和终孔孔径均为 110 mm; 施工过程中确保垂直进尺取芯, 钻机平台水平, 立轴垂直顶面, 并用水平尺反复校核。取出的芯样在现场按顺序排放, 并作好回次标记及芯样描述。TRD 芯样照片如图 9 所示, 芯样整体呈灰色柱状且较为均匀、较硬、破碎较小, 钻孔取芯芯样整体连续完整。

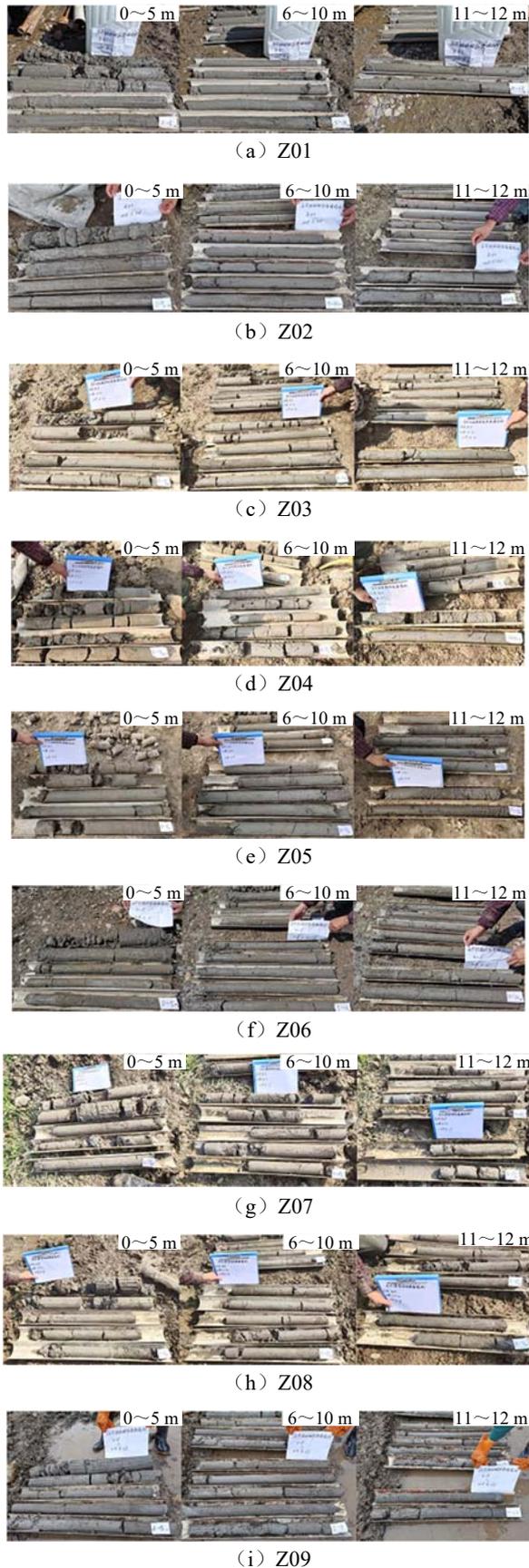


图 9 TRD 芯样照片

Fig. 9 Photos of TRD borehole samples

芯样无侧限抗压强度测试参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[25] 及

《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)^[26] 进行。现场依据室内试验要求将钻孔芯样按上、中、下进行截取, 单个芯样按每 4 m 截取 3 个样, 并用多层保鲜膜包裹送至试验室进行强度和渗透系数试验。各钻孔处 TRD 芯样室内试验结果如图 10 所示。图 10 (a) 结果表明: 钻孔芯样在不同土层中的无侧限抗压强度差异较小, 整体介于 0.77~1.76 MPa, 在浅层粉砂中的强度平均值为 1.0 MPa, 在深层软黏土中的强度平均值为 1.2 MPa, 芯样平均抗压强度基本满足表 2 规定, 即强度大于 0.8 MPa。其中, 由于钻孔取样扰动的影响, 试验时可见试样存在扰动痕迹, 且部分位于浅层土体中的试样已因扰动产生裂缝, 导致试验结果显示浅层粉砂中的芯样强度略低于深层软黏土中的芯样强度。图 10 (b) 结果表明: 芯样的渗透系数为 $1.61 \times 10^{-8} \sim 9.96 \times 10^{-7}$ cm/s, 满足规范^[21] 规定的 10^{-7} cm/s 量级的渗透系数要求。

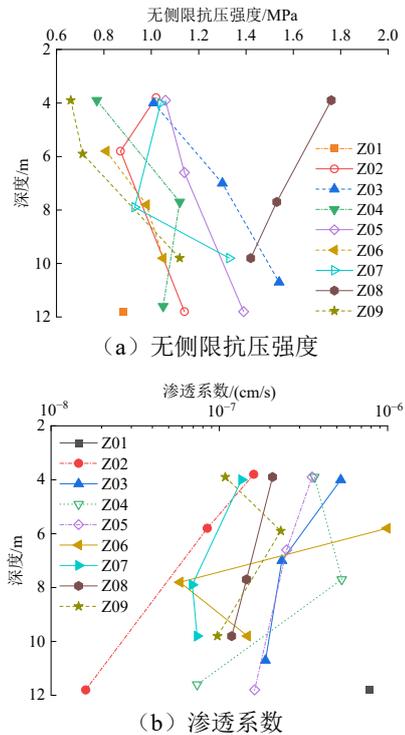


图 10 各钻孔处 TRD 芯样室内试验结果

Fig. 10 Results of laboratory tests on TRD borehole samples

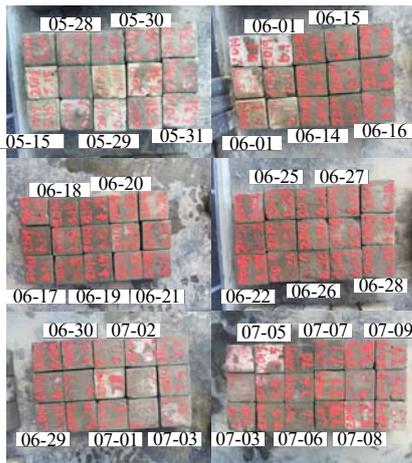
4.2 注水试验

钻孔取芯后利用 Z01~Z09 钻孔进行原位降水头注水试验 (如图 11 所示) 测定防渗墙的渗透系数, 并与芯样室内试验结果比较, 综合判断墙体的防渗性能。原位降水头注水试验结果如图 12 所示, 结果表明: TRD 垂直防渗墙的降水头注水试验渗透系数为 $1.31 \times 10^{-8} \sim 6.67 \times 10^{-7}$ cm/s, 基本为 10^{-8} cm/s 量级, 其中 Z09 孔甚至达到了 1.31×10^{-8} cm/s, 总体达到表 2 的要求。

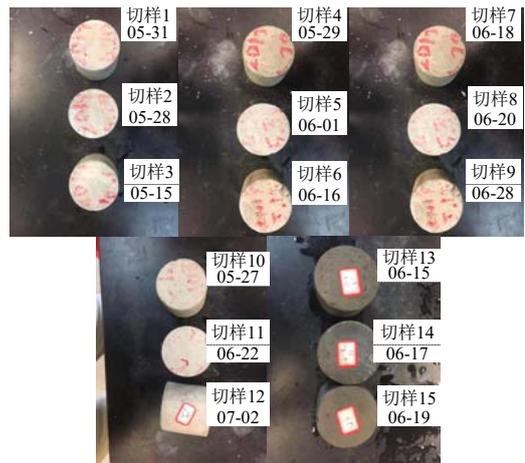
4.3 水泥土试块试验

水泥土试块的室内试验也是检测垂直防渗墙墙体强度和渗透系数的方法之一。施工现场共制作获得 93 组水泥土试块，经水下养护 28 d 后，其中 56 组水泥土试块用于无侧限抗压强度试验，15 组水泥土试块进行切样后用于渗透系数试验，水泥土试块及其切样如图 13 所示。

水泥土试块的无侧限抗压强度和试块切样渗透系数试验结果如图 14 所示。图 14 (a) 结果表明：TRD 垂直防渗墙的无侧限抗压强度为 4.7~23.1 MPa，满足规范^[24] 规定的大于 0.8 MPa 的要求。图 14 (b) 结果显示：TRD 垂直防渗墙的渗透系数为 $1.589 \times 10^{-8} \sim 9.026 \times 10^{-8}$ cm/s，满足规范^[21] 规定的 10^{-7} cm/s 量级的要求。钻孔取芯不可避免地会对芯样以及原位墙体产生扰动影响，但水泥土试块的制作条件比较理想和可控，这也是水泥土试块无侧限抗压强度和试块切样渗透系数试验结果要优于芯样和原位试验结果的主要原因。



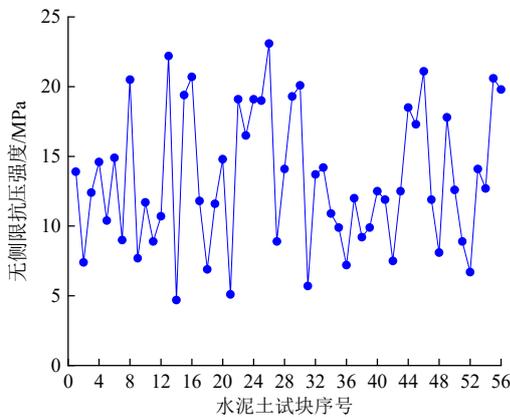
(a) 水泥土试块



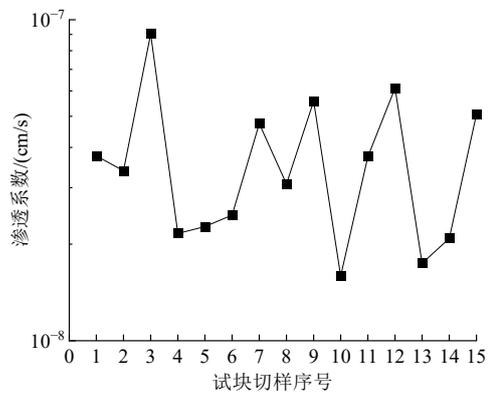
(b) 试块切样

图 13 水泥土试块及其切样

Fig. 13 Soil-cement blocks and its cutting samples



(a) 无侧限抗压强度



(b) 渗透系数

图 14 水泥土试块试验结果

Fig. 14 Results of laboratory tests on soil-cement blocks



图 11 TRD 墙体现场降水头注水试验

Fig. 11 In-situ reduced-head water injection test on TRD vertical barrier

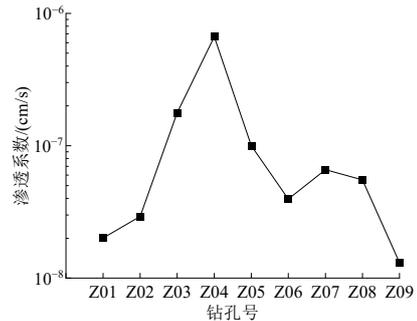


图 12 原位降水头注水试验结果

Fig. 12 Results of in-situ reduced-head water injection tests

5 结 论

本文依托滨海平原地区某垃圾填埋场封场覆盖及生态修复工程,根据项目工程地质特点,设计了 TRD 联合高压旋喷桩的垂直防渗墙方案,并对其进行了性能检测,得到以下三点结论:

(1) 在滨海平原地区首次应用了 TRD 联合高压旋喷桩作为垃圾填埋场垂直防渗墙,设计施工深度为 15 m,设计墙厚为 600 mm,墙底嵌入相对不透水层 2 m。

(2) 确定了本工程 TRD 垂直防渗墙三步法施工的主要控制参数。水平掘进速度为 0.8 m/h,切割液每立方米被搅拌土体掺入约 100 kg 的钠基膨润土,切割液的水膨润土配合比为 13.3,回切速度为 3.32 m/h,喷浆成墙速度为 1.86 m/h,固化液水泥掺量为 20%,水灰比为 1:1,最终成墙速度达到 6~10 m/d,验证了 TRD 在滨海平原地区软土地层中的施工能力。

(3) 原位降水头注水试验结果表明:渗透系数为 $1.13 \times 10^{-8} \sim 6.67 \times 10^{-7}$ cm/s; 钻孔取芯试验结果表明: TRD 垂直防渗墙芯样成形良好、胶结度较好,墙体沿深度均一性较好,达到设计深度,芯样的无侧限抗压强度为 0.77~1.76 MPa,其渗透系数为 $1.61 \times 10^{-8} \sim 9.96 \times 10^{-7}$ cm/s; 水泥土试块试验结果表明:无侧限抗压强度为 4.7~23.1 MPa,渗透系数均小于 1×10^{-7} cm/s。以上检测结果表明本工程 TRD 垂直防渗墙满足垃圾填埋场防渗帷幕的设计要求。

参考文献

- [1] 浦焯枫. 垃圾填埋场渗滤液对地下水的污染规律及防渗策略分析[J]. 工程建设与设计, 2022(14): 90-92.
PU Ye-feng. Analysis of the pollution law of landfill leachate to groundwater and the seepage prevention strategy[J]. Construction & Design for Project, 2022(14): 90-92.
- [2] 朱家明, 杨阳. 安徽省城市垃圾产生量影响因素的计量分析[J]. 长春师范大学学报, 2020, 39(4): 99-104.
ZHU Jia-ming, YANG Yang. Econometric analysis on the influencing factors of municipal solid waste in Anhui Province[J]. Journal of Changchun Normal University, 2020, 39(4): 99-104.
- [3] 谢海建. 成层介质污染物的运移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [4] XIE Hai-jian. A study on contaminant transport in layered media and the performance of landfill liner systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [4] 王志高, 谢金亮, 郝建青, 等. 隔水帷幕技术在非正规垃圾填埋场治理中的工程应用[J]. 有色冶金节能, 2019, 35(2): 40-44.
WANG Zhi-gao, XIE Jin-liang, HAO Jian-qing, et al. Engineering application of waterproof curtain technology in the treatment of informal landfill[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2019, 35(2): 40-44.
- [5] 吴小雯, 王丰, 李洵, 等. 不同类型垂直防渗帷幕在固废填埋场中的适用情况分析[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷). 北京: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2020: 2644-2648.
WU Xiao-wen, WANG Feng, LI Xun, et al. Analysis of the application of different types of vertical anti-seepage curtains in solid waste landfills[C]//Proceedings of Science and Technology Annual Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences in 2020 (Volume II). Beijing: Chinese Academic Journal (CD Edition) Electronic Magazine Co., Ltd., 2020: 2644-2648.
- [6] 王旭旭. 垂直防渗帷幕在滨海地区卫生填埋场中的应用[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(二). 2022: 368-370.
WANG Xu-xu. Application of vertical cut-off curtain to sanitary landfill site in coastal area[C]//2022 Annual Science and Technology Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences-Proceedings of Environmental Engineering Technology Innovation and Application Branch Field (II). 2022: 368-370.
- [7] 叶盛华, 但汉波, 陶如钧, 等. 垂直防渗在现代卫生填埋场中的应用[J]. 环境工程, 2013, 31(增刊 1): 510-512, 584.
YE Sheng-hua, DAN Han-bo, TAO Ru-jun, et al. Application of vertical anti-seepage in modern landfill[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 510-512, 584.
- [8] 张文杰, 陈云敏, 詹良通. 垃圾填埋场渗滤液穿过垂直防渗帷幕的渗漏分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 925-929.
ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min, ZHAN Liang-tong. Transport of leachate through vertical curtain grouting in landfills[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(5): 925-929.
- [9] 戴伟华, 俞赜赜. 灌浆帷幕防渗技术在天子岭生活垃圾

- 圾卫生填埋场中的应用[J]. 有色金属, 2003, 55(增刊): 108-112.
- DAI Wei-hua, YU Ji-yu. Application of curtain grouting anti-seepage technology to Tianziling domestic waste sanitary landfill field[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(S): 108-112.
- [10] 兰守奇, 徐永福, 王艳明. 多头水泥土搅拌桩在填埋场防渗中应用[J]. 低温建筑技术, 2005, 27(6): 95-97.
- LAN Shou-qi, XU Yong-fu, WANG Yan-ming. Application of multi-drilled cement-soil mixing pile in vertical anti-seepage of landfills[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005, 27(6): 95-97.
- [11] 刘伟. 垃圾填埋场防渗帷幕服役寿命分析及厚度计算方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- LIU Wei. Service life of vertical cutoff walls for MSW landfills and determination of its thickness[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [12] 徐晓兵, 韩小凡, 邓彪, 等. 渠式切割水泥土连续墙 (TRD)在赣江某综合整治工程中的应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(10): 144-151.
- XU Xiao-bing, HAN Xiao-fan, DENG Biao, et al. Application of trench-cutting re-mixing deep-wall (TRD) in a comprehensive renovation project of Ganjiang River[J]. Building Structure, 2023, 53(10): 144-151.
- [13] 赵广周. 三种防渗模式在赣江下游尾闾项目的应用[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(22): 130-133.
- ZHAO Guang-zhou. Application of three anti seepage modes in the project at the downstream of Ganjiang river[J]. Building Technology Development, 2022, 49(22): 130-133.
- [14] 环境省. 一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令: 昭和五十二年総理府・厚生省令第一号[EB/OL]. (2020-03-20) [2023-12-24]. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=352M50000102001>.
- Ministry of the Environment. Ministerial ordinance on technical standards for final disposal places for general waste and industrial waste: prime minister's office-ministry of health and welfare ordinance No. 1 of 1977[EB/OL]. (2020-03-20) [2023-12-24]. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=352M50000102001>.
- [15] 魏祥, 梁志荣, 李博, 等. TRD 水泥土搅拌墙在武汉地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 222-226.
- WEI Xiang, LIANG Zhi-rong, LI Bo, et al. Application of TRD cement-soil mixing wall in deep foundation pit engineering in Wuhan area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 222-226.
- [16] 吴超, 郑先君, 蒋楠, 等. TRD 工法在武汉轨道交通工程中的应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(14): 66-70.
- WU Chao, ZHENG Xian-jun, JIANG Nan, et al. Application research of TRD method in Wuhan rail transit engineering[J]. Construction Technology, 2023, 52(14): 66-70.
- [17] XU X B, HU Q, HUANG T M, et al. Seepage failure of a foundation pit with confined aquifer layers and its reconstruction[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106366.
- [18] 王卫东, 邸国恩. TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 628-633.
- WANG Wei-dong, DI Guo-en. Technology and engineering practice of cement-soil mixing wall with equal thickness by TRD method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 628-633.
- [19] 王卫东, 翁其平, 陈永才. 56 m 深 TRD 工法搅拌墙在深厚承压含水层中的成墙试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3247-3252.
- WANG Wei-dong, WENG Qi-ping, CHEN Yong-cai. Experimental investigation of construction of a 56 m deep constant thickness cement-soil wall using trench cutting re-mixing deep wall (TRD) method in deep aquifers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3247-3252.
- [20] 黄炳德, 王卫东, 邸国恩. 上海软土地层中 TRD 水泥土搅拌墙强度检测与分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 2): 108-112.
- HUANG Bing-de, WANG Wei-dong, DI Guo-en. Test and analysis of strength of cement-soil wall constructed by TRD method in soft soil of Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 108-112.
- [21] 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.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Geotechnical Engineering of Municipal Solid Waste Sanitary Landfill: CJJ 176—2012[S]. Beijing: China

- Architecture & Building Press, 2012.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 生活垃圾卫生填埋处理技术规范: GB 50869—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Municipal Solid Waste Sanitary Landfill: GB 50869 — 2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [23] 国家能源局. 深层搅拌法地基处理技术规范: DL/T 5425—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- National Energy Administration. Technical Specification for Deep Mixing Ground Treatment: DL/T 5425 — 2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 渠式切割水泥土连续墙技术规程: JGJ/T 303—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Trench Cutting Re-Mixing Deep Wall: JGJ/T 303 — 2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties: GB/T 50081 — 2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [26] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Test Code for Hydraulic Concrete: SL/T 352—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.

【简 讯】

岩土工程西湖论坛（2024）：交通岩土工程新进展（一号通知）

岩土工程西湖论坛（2024）拟定于2024年10月18—20日在杭州花家山庄召开。近年来，我国交通工程快速发展，许多岩土工程新理论、新技术和新材料在我国交通工程建设中得到应用和发展，同时也有诸多技术难题尚待解决。为了加强技术交流，促进交通岩土工程领域技术的进一步发展和提高，更好地为我国交通工程建设服务，岩土工程西湖论坛（2024）的主题定为“交通岩土工程新进展”。本次会议前，将围绕该主题组织有关专家学者编写岩土工程西湖论坛系列丛书第8册《交通岩土工程

新进展》，并由中国建筑工业出版社出版。

热忱欢迎各位同行积极参与！

会议时间：2024年10月18—20日（18日报到）

会议地点：杭州花家山庄

会议主题：交通岩土工程新进展

联系方式：宋秀英

（0571-88208775, xysong2020@163.com）

www.geo-forum.cn