

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.139



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



膨润土防水毯搭接对复合垂直防渗墙防渗性能的影响

杨仕钊¹, 肖成志¹, 臧年永¹, 谢世平², 何顺辉²

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津中联格林科技发展有限公司, 天津 300387)

摘要: 膨润土防水毯(GCL)复合垂直防渗墙是由水泥-膨润土泥浆墙和膨润土防水毯组成的新型竖向防渗阻污墙, 施工中 GCL 的搭接宽度和搭接区处理效果是影响复合垂直防渗墙防渗阻污性能的重要因素。通过建立含 GCL 搭接区的复合垂直防渗墙二维污染物运移模型, 基于数值计算方法, 综合考虑 GCL 搭接宽度 B_2 、搭接区渗透系数 k_p 、水泥-膨润土墙厚度 L_w 和渗透系数 k_w 对搭接区内污染物分布规律及临界搭接宽度的影响。结果表明: GCL 搭接区绕渗对复合垂直防渗墙防渗阻污效果影响明显; 在相同条件下, 当搭接区渗透系数 k_p 由 1.0×10^{-6} 降至 1.0×10^{-10} m/s 时, GCL 临界搭接宽度 B_2 由 68.9 cm 减至 21.1 cm; 增加水泥-膨润土墙厚度 L_w , 搭接区出口污染物浓度和临界搭接宽度相应减小, 当 L_w 由 0.4 m 增加至 0.8 m 时, 防渗墙被击穿时间延长约 2.5 倍, 临界搭接宽度减少 38.5%; 当水泥-膨润土墙渗透系数 k_w 由 1.0×10^{-8} m/s 降至 5.0×10^{-10} m/s 时, 搭接区出口污染物质量浓度减少 73.1%, GCL 临界搭接宽度减少 33.3%。

关键词: 膨润土防水毯; 复合垂直防渗墙; 搭接宽度; 污染物运移; 数值方法

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)01-0100-10

Effect of geosynthetic clay liners overlap on impervious performance of geosynthetic clay liners composite vertical barrier wall

YANG Shizhao¹, XIAO Chengzhi¹, ZANG Nianyong¹, XIE Shiping², HE Shunhui²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Tianjin Zhonglian Gelin Science and Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300387, P. R. China)

Abstract: Geosynthetic clay liners (GCL) composite vertical anti-seepage wall, which consists of a cement-bentonite slurry wall and geosynthetic clay liners, is a new type of vertical anti-seepage wall. GCL overlap width and the treatment effect of the overlap area are the important factors that influence the impervious performance of a GCL composite vertical barrier wall. A two-dimensional model for pollutant migration was presented in this study. The study conducted a comprehensive analysis of the impact of various factors,

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1805004)

作者简介: 杨仕钊(1998-), 男, 博士生, 主要从事污染物运移机理研究, E-mail: 202131603010@stu.hebut.edu.cn。

肖成志(通信作者), 教授, 博士生导师, E-mail: chengzhixiao@hotmail.com。

Received: 2023-08-22

Foundation item: National Key Research and Development Program (No. 2019YFC1805004)

Author brief: YANG Shizhao (1998-), PhD candidate, main research interest: mechanism of pollutant transport, E-mail: 202131603010@stu.hebut.edu.cn.

XIAO Chengzhi (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: chengzhixiao@hotmail.com.

including the width of GCL overlap (B_2), the permeability coefficient of the GCL overlap area (k_p), the thickness of the cement-bentonite wall (L_w) and the permeability coefficient of the cement-bentonite wall (k_w), on the transversal distribution of pollutants and the critical GCL overlap width. This analysis was based on a numerical simulation method. The calculation results showed that the bypass effect induced by the GCL overlap area has a significant influence on the anti-seepage performance. Keeping the other parameters identical, when the k_p of the GCL overlap area is reduced from 1.0×10^{-6} m/s to 1.0×10^{-10} m/s, the critical GCL overlap width decreases considerably from 68.9 cm to 21.1 cm. Increasing L_w leads to a decrease in pollutant concentration at the exit of the overlap area and a reduction in the critical overlap width of the GCL. For example, when L_w is increased from 0.4 to 0.8 m, the breakthrough time is extended by approximately 2.5 times and the critical GCL overlap width is reduced by about 38.5%. Furthermore, when the k_w of the cement-bentonite wall is reduced from 1.0×10^{-8} m/s to 5.0×10^{-10} m/s, the concentration of pollutant at the exit of the overlap area is decreased by 73.1% and the critical width of the GCL overlap is reduced by about 33.3%.

Keywords: geosynthetic clay liners; composite vertical barrier wall; overlap width; pollutant migration; numerical methods

作为生活垃圾和工业固体垃圾的堆放场地,城市生活垃圾填埋场和一般工业固体垃圾填埋场内部废弃物经长时间发酵、浸泡,产生含有剧毒有机污染物的渗滤液;在非正规填埋场或防渗系统老化的填埋场中,这类渗滤液极易渗入周围土体^[1]。渗滤液中有有机污染物种类繁多,包括苯系物、酚类和多环芳烃类等,此类污染物渗漏会威胁人类健康和生态环境^[2]。作为治理污染物渗漏的有效手段之一,复合垂直防渗墙通过将膨润土防水毯(geosynthetic clay liners, GCL)、土工膜或共聚土工膜等土工防渗材料与传统的地下防渗墙相结合,相比传统防渗墙,具有更高的耐久性和阻污性能。该类防渗墙将 GCL 事先铺设于预挖沟槽外侧,再将一定配比的水泥-膨润土泥浆浇筑于沟槽内,两种材料在凝固养护过程中紧密结合,形成一体化的低渗透性复合防渗墙体,从而起到隔离污染物的作用^[3]。

实践表明, GCL 具有防渗性能优异、施工简便和工期短的特点,但受幅宽限制,施工时须多幅 GCL 搭接使用,且 GCL 搭接处通常为复合垂直防渗墙易发生渗漏的薄弱部位。Weerasinghe 等^[4]采用涂抹膨润土膏(0.5 kg/m^2)的方式处理 GCL 搭接处,并基于流箱试验研究了搭接宽度对其防渗效果的影响,结果表明,适当增加搭接宽度可有效减少搭接处渗透通量。杨旭等^[5]基于搭接宽度和侧向压力开展了 GCL 搭接处渗流特性试验研究,指出在低水头压力下搭接宽度应不小于 30 cm。詹良通等^[6]设置 50 cm 的搭接宽度,研究不同侧压下搭接区涂抹与不涂抹搭接剂时的等效渗透系数,结果表明,后者等效渗透系数最大可达到前者的 15 倍。上述研究结果表明, GCL 搭接区渗透系数受搭接宽度和搭接剂涂抹效果的影响较大,搭接区失效会导致污

染物在薄弱处流动加快,因此,有必要开展复合垂直防渗墙中 GCL 搭接区污染物运移分析及其服役时间预测研究。

目前,污染物在竖向低渗透反应墙中运移的理论研究成果较多。Zhan 等^[7]以土工膜-膨润土复合屏障为研究对象,假设污染物从防渗墙流出时的浓度为零,推导得到了适用于出口边界外侧地下水流速较大工况的一维瞬态解析解。Xie 等^[8]推导了重金属污染物在防渗墙-外部含水层模型中运移的一维解析解,对墙体出口边界处污染物进行处理,使其与实际工程更相符。相较于二维模型,一维污染物运移模型因忽略墙体深度方向上的对流与扩散作用,使得浓度预测结果偏大,预测墙体服役时间的精度不足。现场及室内试验表明,防渗墙入口处浓度在深度上通常呈正态分布^[9-10]。鉴于此, Ding 等^[11]考虑到防渗墙-外部土层模型入口处浓度沿边界垂直方向呈不均匀分布,推导出二维瞬态对流-扩散模型的半解析解,预测了不同运移及墙体参数下防渗结构的服役寿命。上述分析所选截面均为沿墙体垂直方向上的运移典型截面,即膨润土泥浆墙体、GCL 或土工膜组成的纵向截面。彭春辉等^[12]建立了污染物在土工膜复合隔离墙横截面上的二维运移模型,重点分析了外侧含水层横向地下水流速对防渗墙出口处污染物浓度的影响。

笔者建立含 GCL 搭接区的 GCL 复合垂直防渗墙横截面二维污染物运移模型,基于数值模拟方法,研究特定污染物在搭接区运移时的浓度变化,并依据 GCL 复合垂直防渗墙的击穿时间,对不同因素影响下的 GCL 临界搭接宽度进行参数分析,为 GCL 复合垂直防渗墙的设计提供理论依据。

1 数学模型与控制方程的建立

1.1 污染物运移模型及基本假设

如图 1(a) 所示, GCL 垂直防渗墙施工时 GCL 搭接处容易出现渗漏薄弱区域。选取特定深度处的横截面, 开展二维污染物运移规律及其搭接参数对污染物运移的影响分析。现有原位试验研究中, 通过钻取实际填埋场中沿竖向各深度处的样品, 测得垂直防渗墙及其附近范围内污染物浓度值沿墙体深度方向(见图 1(a)中 z 方向)呈正态分布趋势, 即在防渗墙沿深度方向的中间位置处浓度最大, 通常为防渗墙最先被击穿的位置^[9-10]。因此, 假设 GCL 复合垂直防渗墙污染物运移模型的深度为 10 m, 取沿深度方向 $1/2(z=5\text{ m})$ 处横截面开展研究。考虑 GCL 搭接区影响的复合垂直防渗墙污染物运移模型如图 1(b) 所示, 模型由水泥-膨润土墙、GCL、GCL 搭接区及外部含水层组成, 其中搭接区为双层 GCL 的重叠部位, 各部分对应的厚度分别为 L_w 、 L_{GCL} 、 L_p 和 L_a 。研究水平横截面复合垂直防渗墙中污染物运移的基本假设: 1) GCL、水泥-膨润土墙和外部含水层均为均匀、饱和且各向同性, 将 GCL 视为一层致密的膨润土层; 2) 污染物的扩散作用遵循 Fick 第二定律; 3) 研究区域对污染物的等温吸附为线性瞬时吸附, 遵循 Henry 定律; 4) 污染物为单一的有机污染物, 且污染物浓度随时间的降解速率仅与温度有关, 模型中温度保持不变; 5) 研究区域两侧为对称边界, 外部含水层外侧为半无限边界; 6) 墙体内侧水位高于外侧, 且水位差恒定为 5 m。

1.2 控制方程

为表述方便, 分别采用下标 w 、 g 、 p 和 a 表示水泥-膨润土墙、GCL、GCL 搭接区和外部含水层。根

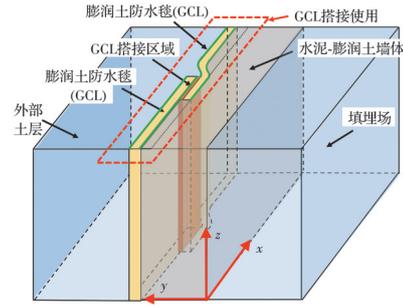
$$R_{d,i} \frac{\partial C_i(x,y,t)}{\partial t} = D_{x,i} \frac{\partial^2 C_i(x,y,t)}{\partial x^2} + D_{y,i} \frac{\partial^2 C_i(x,y,t)}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C_i(x,y,t)}{\partial x} - v_y \frac{\partial C_i(x,y,t)}{\partial y} - \lambda_i C_i(x,y,t) \quad (1)$$

式中: $R_{d,i}$ 为第 i ($i=w, g, p, a$) 层的吸附阻滞因子; x 和 y 分别为二维坐标系中的位置坐标; t 为时间; $C_i(x,y,t)$ 为污染物在第 i 层位置坐标 (x,y) 处的瞬时浓度; $D_{x,i}$ 和 $D_{y,i}$ 分别为污染物在 i 层 x 方向和 y 方向上的水动力弥散系数; v_x 和 v_y 分别为污染物在对应位置上的渗流速度; λ_i 为第 i ($i=w, a$) 层区域内的一级生物降解常数。其中

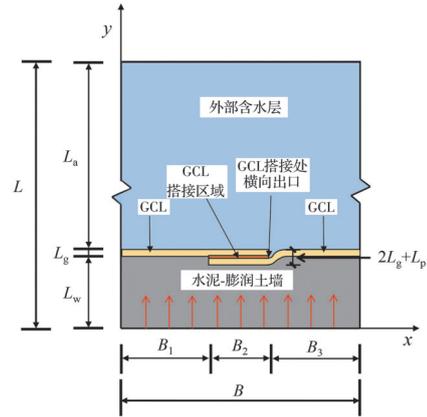
$$R_{d,i} = 1 + \frac{\rho_{d,i} K_{d,i}}{n_i}, D_{x,i} = D_i^* + D_{mx,i},$$

$$D_{y,i} = D_i^* + D_{my,i}, \lambda_i = \frac{\ln 2}{t_{1/2,i}}$$

式中: $\rho_{d,i}$ 、 $K_{d,i}$ 、 n_i 分别为第 i 层材料的干密度、吸附



(a) GCL 复合垂直防渗墙整体示意图



(b) 横截面上二维污染物运移模型

($z=5\text{ m}$)

图 1 污染物运移模型图

Fig. 1 Diagram of the pollutant transport model

据上述假设和数学模型, 污染物沿图 1 所示截面的 x 和 y 方向运移。在水泥-膨润土墙和含水层区域, 考虑对流、扩散、线性吸附作用和降解作用对污染物运移的影响; 由于 GCL 和 GCL 搭接区的厚度较薄, 生物降解作用在此区域不明显, 故不考虑降解作用的影响^[13]。基于质量守恒定律, 建立各区域内的污染物运移控制方程

分配系数和孔隙率; D_i^* 为第 i 层的有效扩散系数; $D_{mx,i}$ 、 $D_{my,i}$ 分别为第 i 层 x 、 y 方向的机械弥散系数; $t_{1/2,i}$ 为有机污染物的半衰期。

模型中污染物渗流由进出口处压力梯度推动, 将达西定律与连续性方程相结合, 得到瞬态研究下的渗流速度场控制方程, 并用数值计算方法进行求解。控制方程为

$$\frac{\partial(\eta\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho v_d) = Q_m \quad (2)$$

$$v_d = -\frac{k}{\rho g} \nabla p \quad (3)$$

$$v_x = \frac{v_{d,x}}{n}; v_y = \frac{v_{d,y}}{n}$$

式中: v_d 为某位置处的达西流速; $v_{d,x}$, $v_{d,y}$ 分别为某位置 x 方向和 y 方向上的达西流速; ρ 为污染物浓度; g 为重力加速度; n , k 分别为相关位置处材料的孔隙率和渗透系数; p 为水头压力; Q_m 为质量源项, 模型中无其他水头影响, 即 $Q_m = 0$ 。

1.3 边界条件

1) 模型初始条件。基于假设1), 墙体在未接触污染物时为饱和状态, 此时模型中各层污染物浓度值均为零, 即 $t=0$ 时

$$C_i(x, y, t) \Big|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

2) 模型恒浓度入口处边界条件

$$C_w(x, y, t) \Big|_{y=0} = C_0 \quad (5)$$

式中: C_0 为水泥-膨润土防渗墙内侧边界入口处的污染物浓度。

3) 左、右边界条件。

$$\text{左边界}(x=0): \frac{\partial C_i(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, i=w, g, a \quad (6)$$

$$\text{右边界}(x=B): \frac{\partial C_i(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=B} = 0, i=w, g, a \quad (7)$$

4) 外部含水层出口处边界条件

$$\frac{\partial C_a(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{y=L} = 0 \quad (8)$$

5) 模型内各层交界处条件。污染物在复合垂直防渗墙-含水层中运移时, 第 i ($i=w, g, p, a$) 层的污染物通量 f 可表示为

$$f_{x,i} = n_i v_{x,i} C_i - n_i D_{x,i} \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (9)$$

$$f_{y,i} = n_i v_{y,i} C_i - n_i D_{y,i} \frac{\partial C_i}{\partial y} \quad (10)$$

假设模型中各层间交界处浓度和通量均具有连续性, 则各层交界处条件为

① 水泥-膨润土墙与 GCL 各交界处。水泥-膨润土墙与 GCL 各交界处污染物浓度连续, 通量连续形式为

$$f_{x,w} + f_{y,w} = f_{x,g} + f_{y,g}, 0 \leq x \leq B \quad (11)$$

$$f_{x,w} \Big|_{x=B_1} + f_{y,w} = f_{x,g} \Big|_{x=B_1} + f_{y,g}, L_w - L_p - L_g \leq y \leq L_w - L_p \quad (12)$$

② GCL 与外部含水层各交界处。GCL 与外部含水层各交界处污染物浓度连续, 通量连续形式为

$$f_{x,g} + f_{y,g} = f_{x,a} + f_{y,a}, 0 \leq x \leq B \quad (13)$$

$$f_{x,g} \Big|_{x=B_2} + f_{y,g} = f_{x,a} \Big|_{x=B_2} + f_{y,a}, L_w \leq y \leq L_w + L_g \quad (14)$$

③ GCL 搭接区与其他区域的各交界处。

GCL 搭接区上、下边界处

$$f_{x,p} + f_{y,p} \Big|_{y=L_w} = f_{x,g} + f_{y,g} \Big|_{y=L_w}, B_1 \leq x \leq B_2 \quad (15)$$

$$f_{x,p} + f_{y,p} \Big|_{y=L_w - L_g} = f_{x,g} + f_{y,g} \Big|_{y=L_w - L_g}, B_1 \leq x \leq B_2 \quad (16)$$

GCL 搭接区左、右边界处

$$f_{x,p} \Big|_{x=B_1} + f_{y,p} = f_{x,w} \Big|_{x=B_1} + f_{y,w}, L_w - L_p \leq y \leq L_w \quad (17)$$

$$f_{x,p} \Big|_{x=B_2} + f_{y,p} = f_{x,a} \Big|_{x=B_2} + f_{y,a}, L_w - L_p \leq y \leq L_w \quad (18)$$

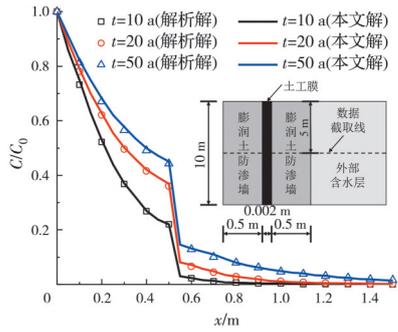
2 模型验证

针对偏微分方程初边值问题, 采用数值分析软件 COMSOL Multiphysics 中达西定律模块 (dl) 和多孔介质迁移分析模块 (tds) 进行数学模型构建, 并对渗流场及浓度场进行耦合计算。为验证 COMSOL 二维数值模型解的正确性, 考虑到以下现实情况: GCL 复合垂直防渗墙虽在实践中得到应用, 但目前该类型复合防渗墙的室内试验和现场实测数据匮乏; 而土工膜 (GMB) 复合垂直防渗墙研究成果较多, 且土工膜在复合垂直防渗墙中的作用与 GCL 类似。因此, 针对现有土工膜复合垂直防渗墙的非搭接区进行污染物运移分析, 进而将数值结果与现有二维半解析解进行对比验证。

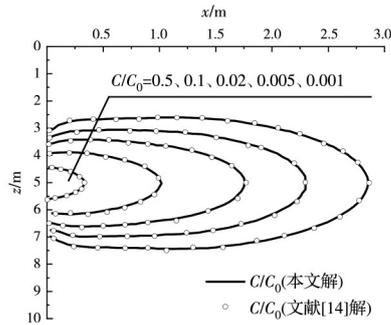
建立与文献[14]中相同的二维无搭接土工膜复合防渗墙数值模型, 数值计算中复合防渗墙尺寸、材料参数和模型参数均与文献[14]相同, 其中内外两层膨润土系墙体厚度设置为 0.5 m, GMB 层厚度设置为 0.002 m, 其余模型参数参见文献[14]。将数值计算结果与文献[14]中的半解析结果进行对比, 如图 2 所示。尽管解析验证模型与本文模型在污染物运移方向及土工防渗材料种类方面存在差异, 但二者污染物运移模型方程并无区别; GCL 与土工膜在两个模型中均被假设为均质层状防渗层, 二者防渗性能和功能类似, 仅在材料厚度等参数上存在较小差异, 而且污染物在相同水平截面内的运移机理相同。图 2(a) 中选取二维模型中深度方向 1/2 处 ($z=5$ m) 沿 x 方向的污染物浓度分布, 对比本文数值模型解与半解析解在不同时间下的结果。图 2(b) 为 $t=50$ a 时本文数值模型解与半解析解对污染物在墙体内部的二维分布趋势的对比。结果表明, 本文数值计算结果与既有二维半解析解结果吻合良好, 表明本文污染物运移的数值模型计算准确。

3 GCL 复合垂直防渗墙影响因素分析

为研究 GCL 搭接区绕渗效应对墙体防渗及阻



(a) $z=5\text{ m}$ 截面上沿 x 方向上污染物分布



(b) $t=50\text{ a}$ 时模型内部污染物二维分布

图 2 本文数值解与二维半解析解对比

Fig. 2 Comparison between the numerical solution in this study and the two-dimensional semi-analytical solution in reference

污效果的影响,基于图 1 所示污染物运移模型,研究 GCL 复合垂直防渗墙各影响因素对污染物运移的作用。选择甲苯(TOL)为特定有机污染物,考虑到填埋场垃圾成分、使用时间和内部结构等因素的不同,渗滤液中 TOL 浓度的最大值并不相同,研究表明,其范围通常在 0.933~20.2 mg/L 之间^[15],因此,取入口浓度 C_0 为 15 mg/L,并假设此浓度值在填埋场使用寿命内保持不变。根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),生活饮用水中 TOL 的浓度限值为 0.7 mg/L,因此,复合垂直防渗墙与外部含

水层交界处的 TOL 浓度不可高于 0.7 mg/L,若超过则视为防渗墙被污染物击穿,并将该击穿时间作为复合垂直防渗墙的服役时间^[14,16]。

假设 GCL 规格为 5 kg/m^2 ,无侧向压力下水化后厚度为 1.38 cm,但在研究截面($z=5\text{ m}$)上,受侧向压力影响,GCL 厚度会减小^[17]。根据相关现场测试结果,某膨润土系阻隔墙沿地表向下 5 m 处,侧向压力约 25 kPa^[18]。文献[19]表明,侧向压力为 25 kPa 时,水化后 GCL 厚度为 0.981 cm,因此,GCL 厚度取为 1 cm。关于搭接区厚度的确定,《钠基膨润土防水毯应用技术规程》(CECS 457—2016)中规定,搭接区两层 GCL 间搭接剂单位面积膨润土含量为 $0.6\sim 2\text{ kg/m}^2$ 。假设搭接区单位面积膨润土粉含量为 1.5 kg/m^2 ,该值与 GCL 中膨润土含量值之比为 0.3,此比值对应 GCL 层厚度与 GCL 搭接区厚度间的比例关系,因此,取搭接区厚度为 GCL 层厚度的 0.3 倍,即 0.3 cm ^[20-21]。

另外,既有研究结果表明,GCL 饱和后渗透系数在 $3\times 10^{-12}\sim 3\times 10^{-11}\text{ m/s}$ 之间^[19],设定 GCL 层渗透系数为 $5\times 10^{-12}\text{ m/s}$ 。GCL 搭接区参数目前尚无具体研究,考虑到 GCL 搭接处土工织物渗透系数较低(25 kPa 下约 10^{-6} m/s),同时,膨润土膏在相同条件下的渗透系数约为 10^{-10} m/s ,取二者的中间值 10^{-8} m/s 为搭接区的渗透系数^[21]。考虑到决定 GCL 中扩散和吸附性质的主要是内部包裹的膨润土,故 GCL 层和搭接区扩散和吸附分配系数相同,根据有机污染物在 GCL 中迁移的相关研究结果,综合确定二者 $D_g=6\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ 、 $n_g=0.7$ 、 $K_{d,g}=4.4\text{ mL/g}$ ^[11,14,17,22]。由于 GCL 层及搭接区层厚度较小($\leq 1\text{ cm}$),污染物运移分析时不考虑降解影响。GCL 复合垂直防渗墙-外部含水层基准模型尺寸和材料参数见表 1。

表 1 防渗墙污染物运移数值计算参数

Table 1 Pollutant migration numerical calculation parameters for cut-off wall

墙内区域	厚度/m	宽度/m	干密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	渗透系数 $k/(\text{m/s})$	x 方向水动力弥散系数 $D/(\text{m}^2/\text{s})$	y 方向水动力弥散系数 $D/(\text{m}^2/\text{s})$	孔隙率 n	吸附分配系数 $K_d/(\text{mL/g})$	有机污染物半衰期 $t_{1/2}/\text{a}$
水泥-膨润土墙	0.8	10	1700	5×10^{-10}	9.68×10^{-10}	9.68×10^{-10}	0.8	0.54	10
GCL	0.01		790	5×10^{-12}	6×10^{-10}	6×10^{-10}	0.7	4.4	$+\infty$
GCL 搭接区	0.003	0.3	750	1.0×10^{-8}	6×10^{-10}	6×10^{-10}	0.7	4.4	$+\infty$
外部含水层	20	10	1500	3×10^{-7}	4×10^{-10}	4×10^{-10}	0.5	0	10

3.1 GCL 搭接宽度 B_2 的影响

为对比分析有无 GCL 搭接区对出口边界污染物浓度的影响,设定不同搭接宽度下 GCL 搭接区的渗透系数为 $1.0\times 10^{-8}\text{ m/s}$ ^[6]。 $B_2=0$ (无搭接、完整单层 GCL)时,复合防渗墙模型为由水泥-膨润土

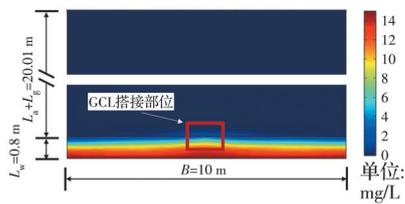
墙、单层 GCL 和外部含水层组合而成的层状结构,其厚度、宽度和材料参数均采用表 1 中的数据。选取 GCL 搭接宽度 $B_2=30\text{ cm}$ 、时间 $t=50\text{ a}$,分别计算有/无搭接区时复合垂直防渗墙横截面上的污染物浓度分布,结果如图 3 所示。其中,图 3(a)、(c)为防

渗墙整体质量浓度分布;图 3(b)、(d)分别为图 3(a)、(c)中对应部位的质量浓度分布图,该截取部分的尺寸与坐标如图 3(b)、(d)所示。

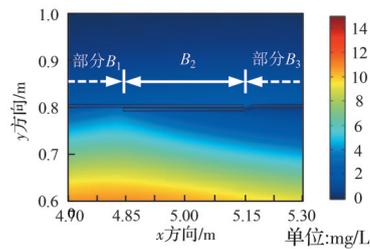
显然,当有 GCL 搭接区且搭接区渗透系数大于 GCL 自身渗透系数时,距防渗墙入口边界一定距离处沿 x 方向的污染物质量浓度不均匀;而无搭接薄弱区时,在同一距离处 GCL 复合垂直防渗墙内污染物质量浓度分布均匀,如图 3(c)、(d)所示。表明 GCL 复合垂直防渗墙模型中污染物达到水泥-膨润土墙体与 GCL 层边界时,污染物会优先选择 GCL 搭接区所在的薄弱处作为渗透路径,即搭接宽度 $B_2=30\text{ cm}$ 时,污染物最先于搭接区与外部含水层

的边界处渗出,此时搭接区出口边界处质量浓度最先达到击穿界限;而无搭接区污染物运移模型中,因 GCL 层均匀且无缺陷,理论上,在 GCL 与外部含水层接触边界上的每一处污染物渗出量相同,即外部含水层任一点质量浓度达到污染标准的时间(复合垂直防渗墙击穿时间)相同,无薄弱易突破区。

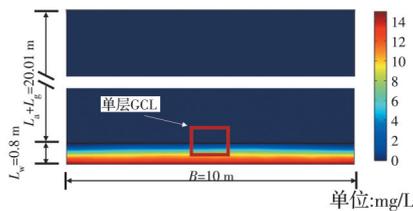
为研究不同 GCL 搭接宽度对出口边界污染物质量浓度的影响,选取 GCL 搭接宽度 $B_2=0、20、30\text{ cm}$,分别分析时间 $t=0\sim 100\text{ a}$ 内出口边界污染物质量浓度的变化,结果如图 4 所示。需要指出的是,当 GCL 存在搭接时,出口边界污染物质量浓度的监测点选择在搭接区与外部含水层的交界处;由于搭接区厚度较小,此边界上质量浓度非常接近,取边界上某一点($x=B_1+B_2, y=0.81\text{ m}$)为数据截取点。



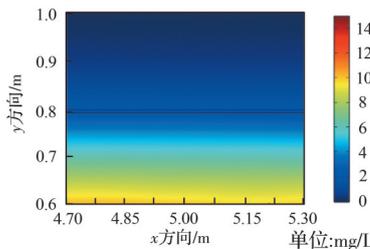
(a) 防渗墙整体质量浓度分布 (GCL 搭接宽度 $B_2=30\text{ cm}$, $t=50\text{ a}$)



(b) 搭接区附近质量浓度分布 (GCL 搭接宽度 $B_2=30\text{ cm}$, $t=50\text{ a}$)



(c) 防渗墙整体质量浓度分布 (无 GCL 搭接, $B_2=0\text{ cm}$, $t=50\text{ a}$)



(d) 搭接区附近质量浓度分布 (无 GCL 搭接, $B_2=0\text{ cm}$, $t=50\text{ a}$)

图 3 有无搭接区对 GCL 复合垂直防渗墙污染物质量浓度的影响

Fig. 3 Effect of presence or absence of overlap zones on the pollutant concentration in GCL composite cut-off wall

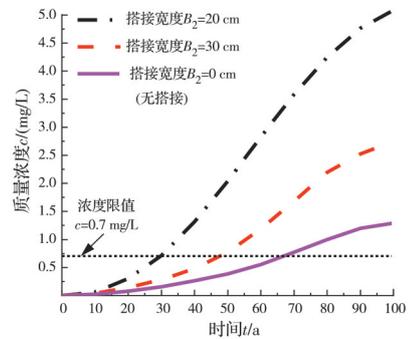


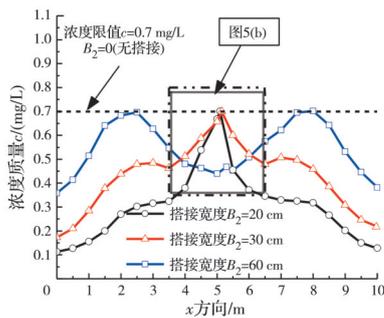
图 4 0~100 a 不同搭接宽度下出口边界处污染物质量浓度变化

Fig. 4 Pollutant concentration variation at the outlet boundary under different overlap widths during 0-100 years

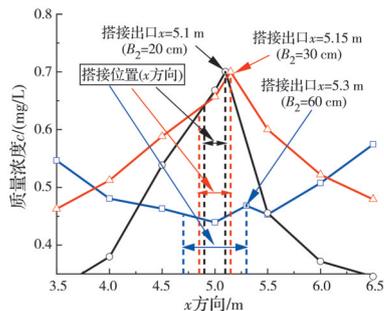
由图 4 可知,当 GCL 搭接宽度较小时(如 $B_2=20、30\text{ cm}$),同一时间对应的出口边界污染物质量浓度明显比 $B_2=0$ 时要大。另外, $B_2=0$ 时复合垂直防渗墙击穿时间为 68.7 a ,而 $B_2=20、30\text{ cm}$ 时 GCL 复合垂直防渗墙击穿时间分别为 $33.6、49.7\text{ a}$,表明 GCL 搭接绕渗对复合防渗墙整体阻污效果的影响明显。当 GCL 搭接宽度较小时,应以搭接区在外部含水层边界出口处的污染物质量浓度最先达到限值作为判断复合垂直防渗墙服役寿命的依据,实践中通过设置合理的搭接宽度,可降低或消除 GCL 搭接薄弱处导致的复合垂直防渗墙易被击穿的风险。

图 5 给出了不同 GCL 搭接宽度下复合垂直防渗墙被击穿时整个出口边界污染物质量浓度的分布。显然,无搭接时 GCL 层外部边界同时达到污染物质浓度限值,而考虑 GCL 搭接时出口边界污染物质量浓度的分布明显改变;当 $B_2=20、30\text{ cm}$ 时,搭接区出口边界污染物质量浓度最先达到限值,而非搭接区出口边界污染物质量浓度明显小于搭接

区出口边界,且搭接宽度越小,这种现象越明显。而当搭接宽度较大(如 $B_2=60\text{ cm}$)时,GCL搭接区的横向(x 方向)渗透路径过长,此时复合垂直防渗墙的污染物击穿处出现在无搭接的单层GCL出口边界。即 $B_2=60\text{ cm}$ 时,复合垂直防渗墙GCL层出口边界上优先达到击穿限值的区域并非搭接区横向出口点处($x=5.3\text{ m}, y=0.81\text{ m}$),而是非搭接区处($x=2.5\text{ m}$ 或 $7.5\text{ m}, y=0.81\text{ m}$);且此时防渗墙的击穿时间为 69.8 a ,与无搭接单层GCL的击穿时间接近。由此表明,当 B_2 较小时(如 $B_2=20, 30\text{ cm}$),由于GCL搭接区存在水平优先渗流通道,污染物会沿该路径优先渗透,导致搭接区出口处的污染物质量浓度率先达到限值;随着搭接宽度的增加(如 $B_2=60\text{ cm}$),相应搭接区水平绕渗路径距离增大,此时搭接区的击穿时间大于单层GCL区域,因此污染物质量浓度限值率先出现在无搭接的单层GCL部位,如图5所示。



(a) 不同 B_2 防渗墙被击穿时出口边界污染物质量浓度分布



(b) 出口边界污染物质量浓度分布详图
图 5 不同 B_2 时防渗墙被击穿时出口边界污染物质量浓度分布

Fig. 5 Distribution of pollutant concentration along the exit boundary at breakthrough time under different B_2

3.2 GCL 搭接区渗透系数 k_p 的影响

研究表明^[5],GCL搭接区搭接膏中膨润土含量、侧向压力及GCL规格等是影响其渗透系数的主要因素。基于表1中的基准模型,选取GCL搭接宽度 $B_2=30\text{ cm}$,通过改变搭接区渗透系数 k_p (1.0×10^{-6} 、 1.0×10^{-7} 、 1.0×10^{-8} 、 1.0×10^{-9} 和 $1.0\times$

10^{-10} m/s)来研究污染物在搭接区内的运移规律。取搭接区沿 x 方向上($x\in(4.85\text{ m}, 5.15\text{ m}), y=0.8\text{ m}$)污染物质量浓度的数值,绘制50 a时不同搭接区渗透系数 k_p 下搭接区内污染物质量浓度分布,如图6所示。

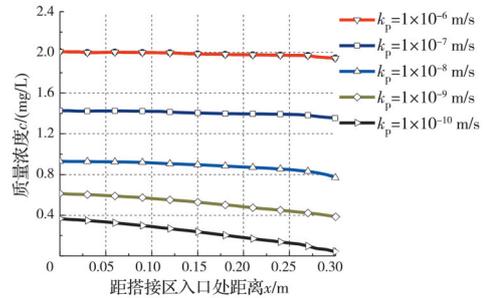


图 6 GCL 搭接区渗透系数对污染物质量浓度分布的影响
Fig. 6 Effect of permeability coefficient of the GCL overlap area on pollutant concentration distribution

由图6可知,不同 k_p 下GCL搭接区污染物质量浓度具有相同的分布规律,即距搭接区入口越远,污染物质量浓度越低,且 k_p 越小,降低程度越明显。如 $k_p=1\times 10^{-6}$ 、 1×10^{-7} 和 $1\times 10^{-8}\text{ m/s}$ 时,搭接区出口处质量浓度相较入口处分别下降 3.1% 、 6.6% 和 17.0% ,变化趋势较平缓,阻污效果较差;而当 $k_p=1\times 10^{-9}$ 和 $1\times 10^{-10}\text{ m/s}$ 时,出口处质量浓度相较入口处分别下降 40.2% 和 86.7% ,阻污效果明显更好。因此,在GCL复合垂直防渗墙的工程实践中,可通过控制GCL搭接处搭接膏的膨润土含量来降低 k_p ,从而提高GCL搭接区的防渗阻污效果。

结合图4可知,给定GCL搭接区渗透系数 k_p ,增加搭接宽度可使污染物击穿GCL复合垂直防渗墙的时间延长,但当GCL搭接宽度增至临界值时,污染物会同时击穿搭接区出口边界和无搭接单层GCL边界,此时的GCL搭接宽度即为临界搭接宽度,若继续增加搭接宽度,会造成防渗材料浪费。为确定不同 k_p 下GCL的临界搭接宽度,图7给出了搭接宽度与复合垂直防渗墙服役时间(即击穿时间)之间的关系。

由图7可知,不同搭接区渗透系数 k_p 条件下,随

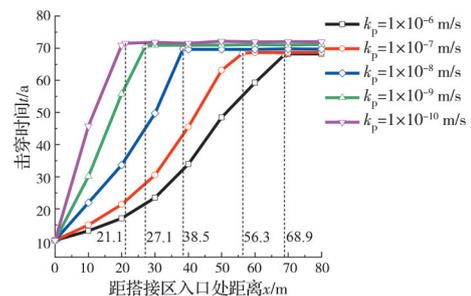


图 7 GCL 搭接宽度对击穿时间的影响
Fig. 7 Effect of GCL overlap width on breakthrough time

着搭接宽度 B_2 的增加, GCL 复合垂直防渗墙击穿时间呈先明显增加、后趋于平缓的趋势; 当 B_2 增至足够大并达到临界值时, 防渗墙被击穿的时间不再变化。其原因是当 B_2 足够大时双层 GCL 搭接区防渗能力较 B_1 、 B_3 区域(即单层 GCL 处)更强, 使污染物击穿搭接区横向区域的时间比无搭接单层 GCL 更长, 此时首先被击穿的位置转移到无搭接区域 GCL 层出口边界上, 而此处的防渗阻污能力并未随 B_2 的增加而改变(详见图 5)。若 B_2 继续增加, 对无搭接区域 GCL 层边界的污染物质量浓度变化及击穿时间将不再产生明显影响。因此, 当搭接宽度达到临界值后, GCL 层边界的击穿时间便趋于稳定。

虽然搭接区渗透性越差(即 k_p 越小)临界搭接宽度越小, 但不同 k_p 下临界搭接宽度对应的最终击穿时间趋于一致。如 k_p 由 1.0×10^{-6} 逐步减小为 1.0×10^{-7} 、 1.0×10^{-8} 、 1.0×10^{-9} 和 1.0×10^{-10} m/s 时, 临界搭接宽度 B_2 由 68.9 cm 分别减小为 56.3、38.5、27.1 和 21.1 cm, 最终击穿时间趋于与无搭接区相同。

3.3 水泥-膨润土墙参数的影响

3.3.1 水泥-膨润土墙厚度 L_w 的影响

在 GCL 复合垂直防渗墙设计中, 选取合理的水泥-膨润土墙厚度是墙体兼具足够阻污能力和经济性的重要保障^[23]。基于表 1 中的基准模型参数, 选取 GCL 搭接宽度 $B_2=30$ cm, 通过改变水泥-膨润土墙厚 L_w (0.4、0.6、0.8、1.0 m), 研究墙厚 L_w 对 GCL 复合垂直防渗墙阻污效果和临界搭接宽度的影响。图 8 为 $t=50$ a 时污染物质量浓度在 GCL 搭接区沿 x 运移方向上的变化趋势。由图 8 可知, 墙体厚度 L_w 越小, 搭接区质量浓度下降的趋势越明显; 同时, 随着墙体厚度 L_w 的减小, 搭接区入口处($x=B_1, y=L_w$)的污染物质量浓度显著升高。主要是由于 L_w 减小时污染物在复合防渗墙中的渗透路径随之缩短, 到达墙体与 GCL 层边界处时浓度明显增加。

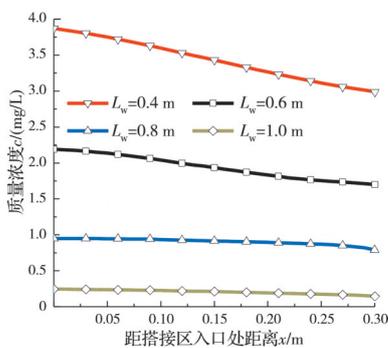


图 8 不同 L_w 下 GCL 搭接区污染物质量浓度横向分布 ($t=50$ a)

Fig. 8 Lateral distribution of pollutant concentration in GCL overlap area under different L_w ($t=50$ a)

上述分析表明, 搭接宽度相同时, 水泥-膨润土墙厚 L_w 会影响复合垂直防渗墙的阻污能力。给定水泥-膨润土墙厚 L_w , 通过适当增加搭接宽度可减弱污染物在 GCL 搭接区的绕渗作用。因此, 为进一步研究不同水泥-膨润土墙厚 L_w 下 GCL 搭接区的临界搭接宽度, 对无搭接区单层 GCL 出口处与 GCL 搭接区出口质量浓度同时达到限值时对应的搭接宽度进行计算与搜寻。考虑实际施工方便, 工程临界搭接宽度取大于计算值且与之最接近的 5 的倍数, 例如, 计算临界搭接宽度为 38.5 cm, 则实际临界搭接宽度取 40 cm。

图 9 为不同水泥-膨润土墙厚 L_w 下临界搭接宽度和击穿时间的关系。由图 9 可知, 当水泥-膨润土墙厚 L_w 越大时, 临界搭接宽度则越小, 当 $L_w=0.4$ 、0.6、0.8、1.0 m 时, 由此确定的工程实际临界 GCL 搭接宽度分别为 65、50、40、30 cm。与 k_p 对临界搭接宽度影响不同的是, 随着 L_w 的增大, 防渗墙的击穿时间显著延长。以搭接宽度 $B_2=30$ cm 为例, 当 L_w 增加一倍, 即由 0.4 m 增至 0.8 m 时, 防渗墙的击穿时间由 15.0 a 延长至 49.7 a, 击穿时间约延长 2.3 倍。当搭接宽度达到临界搭接宽度后, 复合垂直防渗墙的击穿时间趋于稳定。

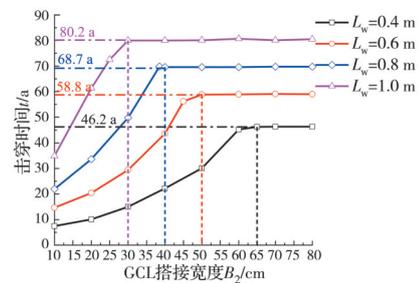


图 9 L_w 对击穿时间和临界搭接宽度的影响

Fig. 9 Effect of L_w on breakthrough time and critical GCL overlap width

3.3.2 水泥-膨润土墙渗透系数 k_w 的影响

水泥-膨润土墙的渗透系数 k_w 是影响复合垂直防渗墙防渗阻污性能的重要设计参数, 而 k_w 随混合泥浆配合比、所处环境、养护龄期及渗滤液种类的变化而变化^[24]。为研究 k_w 对阻污效果的影响, 基于表 1 中基准模型参数, 选取 GCL 搭接宽度 $B_2=30$ cm, 通过改变 k_w (1.0×10^{-8} 、 5.0×10^{-10} 和 1.0×10^{-11} m/s) 分析 50 a 时 GCL 搭接区污染物质量浓度沿横向(图 1 中 x 方向)的分布, 结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 随着 k_w 的增大, GCL 搭接区污染物质量浓度明显升高; 当 $k_w=1.0 \times 10^{-8}$ m/s 时, 搭接区出口处污染物质量浓度分别为 $k_w=5.0 \times 10^{-10}$ 、 1.0×10^{-11} m/s 时的 3.71、27.5 倍。此外, k_w 较大时, 污染物质量浓度沿搭接长度方向的下降趋

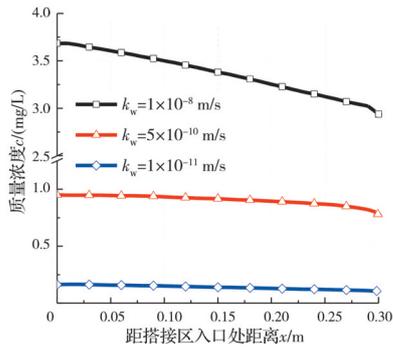


图 10 不同 k_w 下 GCL 搭接区污染物质量浓度横向分布 ($t=50$ a)

Fig. 10 Lateral distribution of pollutant concentration GCL overlap under different k_w ($t=50$ a)

势更加明显,但搭接区污染物质量浓度水平整体较高,表明增加水泥-膨润土墙的渗透系数 k_w 会明显降低 GCL 复合垂直防渗墙体的阻污效果。

为研究不同水泥-膨润土墙体渗透系数 k_w 下 GCL 搭接区出口边界处与无搭接区单层 GCL 同时被击穿时对应的临界搭接宽度,图 11 给出了不同 k_w 下 GCL 复合垂直防渗墙击穿时间随搭接宽度 B_2 的变化。由图 11 可确定最大击穿时间下可同时满足阻污效果和工程经济性的 GCL 搭接区宽度 B_2 。当 $k_w=1.0 \times 10^{-8}$ 、 5.0×10^{-10} 、 1.0×10^{-11} m/s 时,临界搭接宽度分别取 60、40、25 cm,可避免 GCL 搭接区绕渗导致的防渗墙整体阻污效果减弱。

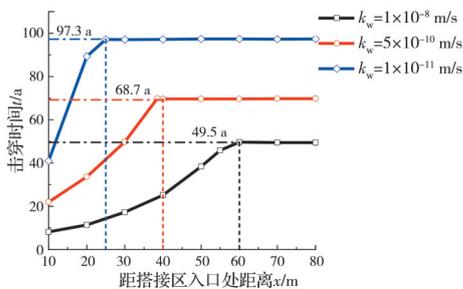


图 11 k_w 对击穿时间和临界搭接宽度的影响

Fig. 11 Effect of k_w on breakthrough time and critical GCL overlap width

4 结论

通过建立含 GCL 搭接区的 GCL 复合垂直防渗墙污染物运移模型,考虑对流、扩散、吸附及生物降解对污染物运移的影响,基于 GCL 搭接区质量浓度变化和复合防渗墙体击穿时间,研究了 GCL 搭接区污染物运移机理和临界搭接宽度,得出以下结论:

1) GCL 搭接会影响复合垂直防渗墙的污染物运移规律:搭接宽度小、搭接区渗透系数大时,搭接区出口边界处污染物质量浓度高于无搭接时单层 GCL。此时若以单层 GCL 出口边界污染物质量浓度为依据进行设计,其设计服役年限会偏高。

2) 增加 GCL 搭接宽度可使污染物击穿复合防渗墙的时间延长,但搭接宽度大于临界搭接宽度时,无搭接处单层 GCL 会先被击穿。此时应以单层 GCL 被污染物击穿时间作为防渗墙的服役时间,并由此提出根据 GCL 搭接区出口点与无搭接区单层 GCL 出口边界最大污染物质量浓度值同时达到限值时确定临界 GCL 搭接宽度的方法。

3) GCL 搭接区渗透系数 k_p 影响搭接区内污染物质量浓度分布和临界搭接宽度,减小 GCL 搭接区渗透系数 k_p 可有效降低搭接区污染物质量浓度分布。 k_p 较高时 ($k_p=1 \times 10^{-6}$ m/s), 搭接区出口处质量浓度相较入口处质量下降 3.1%; 当 k_p 较低时 ($k_p=1 \times 10^{-9}$ m/s), 出口处浓度相较入口处下降 40.2%。当 k_p 分别为 1.0×10^{-6} 、 1.0×10^{-7} 、 1.0×10^{-8} 、 1.0×10^{-9} 、 1.0×10^{-10} m/s 时,相应临界搭接宽度分别为 68.9、56.3、38.5、27.1、21.1 cm。

4) 水泥-膨润土墙体设计参数影响 GCL 临界搭接宽度,当水泥-膨润土墙厚度 L_w 分别为 0.4、0.6、0.8、1.0 m 时,GCL 临界搭接宽度对应为 65、50、40、30 cm; 当水泥-膨润土墙体渗透系数 k_w 分别为 1.0×10^{-8} 、 5.0×10^{-10} 、 1.0×10^{-11} m/s 时,GCL 临界搭接宽度分别为 60、40、25 cm。

参考文献

- [1] LOU Z Y, ZHAO Y C, YUAN T, et al. Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(10): 3385-3391.
- [2] RENO S, GIVAUDAN J G, POULAIN S, et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(3): 468-493.
- [3] 何顺辉,尹国盛,安建杰,等.新型 GCL 复合垂直防渗技术及其在填埋场的应用[J].环境卫生工程,2020,28(3): 66-70.
HE S H, YIN G S, AN J J, et al. New GCL composite vertical anti-seepage technology and its application in landfill [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(3): 66-70. (in Chinese)
- [4] WEERASINGHE I A, GALLAGE C, DAWES L, et al. Factors affecting the hydraulic performance of a geosynthetic clay liner overlap [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 271: 110978.
- [5] 杨旭,盛金昌,郑忠巍,等.膨润土防水毯搭接方式渗流特性试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(9): 1668-1673.
YANG X, SHENG J C, ZHENG Z W, et al. Experimental study on seepage properties of GCL with different overlap methods [J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2015, 37(9): 1668-1673. (in Chinese)
- [6] 詹良通, 丁兆华, 谢世平, 等. 竖向阻隔墙中土工复合膨润土防水毯搭接区渗透系数测试与分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2387-2394, 2404.
ZHAN L T, DING Z H, XIE S P, et al. Test and analysis of hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners overlap in vertical barrier wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2387-2394, 2404. (in Chinese)
- [7] ZHAN L T, ZENG X, LI Y C, et al. Analytical solution for one-dimensional diffusion of organic pollutants in a geomembrane-Bentonite composite barrier and parametric analyses [J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, 140(1): 57-68.
- [8] XIE H J, WANG S Y, CHEN Y, et al. An analytical model for contaminant transport in cut-off wall and aquifer system [J]. Environmental Geotechnics, 2020, 7(7): 457-466.
- [9] PARKER B L, CHAPMAN S W, GUILBEAULT M A. Plume persistence caused by back diffusion from thin clay layers in a sand aquifer following TCE source-zone hydraulic isolation [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2008, 102(1/2): 86-104.
- [10] ZHAN L T, GUAN C, XIE H J, et al. Vertical migration of leachate pollutants in clayey soils beneath an uncontrolled landfill at Huainan, China: A field and theoretical investigation [J]. Science of the Total Environment, 2014, 470/471: 290-298.
- [11] DING X H, FENG S J, ZHENG Q T, et al. A two-dimensional analytical model for organic contaminants transport in a transition layer-cutoff wall-aquifer system [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 128: 103816.
- [12] 彭春辉, 冯世进, 陈宏信, 等. 地下水渗流条件下土工膜复合隔离墙中有机污染物迁移研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2055-2063.
PENG C H, FENG S J, CHEN H X, et al. Migration of organic contaminants in composite geomembrane cut-off wall considering groundwater seepage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2055-2063. (in Chinese)
- [13] 郑紫荆, 朱云海, 王巧, 等. 有机污染物在含土工膜复合隔离墙和含水层系统的运移半解析模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 453-465.
ZHENG Z J, ZHU Y H, WANG Q, et al. A semi-analytical model for analyzing the transport of organic pollutants through the geomembrane composite cut-off wall and aquifer system [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2): 453-465. (in Chinese)
- [14] PENG C H, FENG S J, ZHENG Q T, et al. A two-dimensional analytical solution for organic contaminant diffusion through a composite geomembrane cut-off wall and an aquifer [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 119: 103361.
- [15] WIJEKOON P, KOLIYABANDARA P A, COORAY A T, et al. Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 421: 126627.
- [16] 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Standards for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022. (in Chinese)
- [17] GUAN C, XIE H J, WANG Y Z, et al. An analytical model for solute transport through a GCL-based two-layered liner considering biodegradation [J]. Science of the Total Environment, 2014, 466/467: 221-231.
- [18] KE H, TONG X, LI Y C, et al. Force equilibrium-based model for predicting stresses in soil-bentonite cut-off walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(2): 04017112.
- [19] 李志斌, 徐超. 竖向应力作用下 GCL 的膨胀特性和渗透性能[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1876-1880.
LI Z B, XU C. Swelling characteristics and hydraulic properties of GCLs under vertical stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1876-1880. (in Chinese)
- [20] 钠基膨润土防水毯应用技术规程: CECS 457—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Technical specification for application of sodium bentonite geosynthetic clay liner: CECS 457—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)
- [21] GASTELO J, LI D, TIAN K, et al. Hydraulic conductivity of GCL overlap permeated with saline solutions [J]. Waste Management, 2023, 157: 348-356.
- [22] 肖成志, 陶子琪, 张金利, 等. GCL 复合垂直防渗墙中污染物运移的一维解析解[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 132-139.
XIAO C Z, TAO Z Q, ZHANG J L, et al. One-dimensional analytical solution of pollutant migration through a composite vertical barrier wall with geosynthetic clay liner [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 132-139. (in Chinese)
- [23] CHEN G N, CLEALL P J, LI Y C, et al. Decoupled advection-dispersion method for determining wall thickness of slurry trench cutoff walls [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(5): 06018007.
- [24] FLESSATI L, DELLA VECCHIA G, MUSSO G. Effects of curing on the hydro-mechanical behaviour of cement-bentonite mixtures for cut-off walls [J]. Construction and Building Materials, 2023, 383: 131392.