

土-复合有机改性膨润土垂直屏障防渗性能的现场和室内试验研究

于晨阳¹, 倪 浩¹, 王 敏¹, 庄 恒¹, 姜哲元¹, 李颖臻¹, 徐杨¹, 李静文², 吴朝峰³, 杜延军^{*1}

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2. 北京高能时代环境技术股份有限公司, 北京 100095

3. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对某有机化工污染场地, 选取四甲基氯化铵 (TMA) 和羧甲基纤维素钠 (CMC) 复合改性膨润土, 采用开挖-回填施工工艺建造了长 10 m×宽 0.6 m×深 5 m 的土-复合有机改性膨润土 (STCMB) 垂直阻隔屏障, 同时也建造了同等规模的传统 (未改性) 土-膨润土 (SCB) 垂直阻隔屏障作为对照。通过现场微水试验和室内柔性壁渗透试验, 对比分析了两类垂直阻隔屏障材料在现场和室内条件下获取的渗透系数。现场微水试验结果表明, STCMB 屏障的渗透系数相较于 SCB 屏障降低了约 38%, 两者的渗透系数分别为 8.1×10^{-11} m/s 和 1.3×10^{-10} m/s。根据已有研究, 这可能是由于 TMA 和 CMC 两者通过协同作用在膨润土颗粒间形成了三维凝胶网状结构, 增加了渗透路径的曲折度, 从而降低了渗透系数。室内柔性壁渗透试验结果表明, STCMB 屏障在自来水和 1000 mg/L 苯酚溶液作用下的渗透系数分别为 8.0×10^{-11} m/s 和 6.9×10^{-11} m/s, SCB 屏障分别为 1.4×10^{-10} m/s 和 1.6×10^{-10} m/s。两类屏障在自来水和 1000 mg/L 苯酚溶液作用下的渗透系数比值分别为 1.159 和 0.875, 表明两类屏障的渗透系数受苯酚溶液的影响较小, 且屏障材料对苯酚溶液具有良好的化学相容性。此外, 微水试验测试获取的渗透系数与室内柔性壁渗透试验结果相近, 二者在测试尺度和测试参数可控方面具有互补性, 有助于更全面地评估土-膨润土系垂直阻隔屏障的防渗性能。

关键词: 复合有机改性膨润土; 垂直阻隔屏障; 开挖-回填法; 微水试验; 渗透系数

中图分类号: 文献标识码: 文章编号:

作者简介: 于晨阳(2001—), 女, 硕士生, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: yuchenyang0918@163.com。

*杜延军 (通讯作者, 1972—), 男, 教授, 主要从事环境岩土工程研究。Email: duyanjun@seu.edu.cn。

Field Trial and Laboratory Study of Soil-Composite Organics-Amended Bentonite Vertical Barriers: Hydraulic Conductivity Evaluation

YU Chen-Yang¹, Ni Hao¹, Wang Min¹, Zhuang Heng¹, Jiang Zhe-Yuan¹, Li Ying-Zhen¹, Xu Yang¹, Li Jing-Wen², Wu Chao-Feng³, Du Yan-Jun^{*1}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China; 2. Beijing Geoenviron Engineering & Technology, Inc, Beijing 100095, China; 3. China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: This study employed a composite organics-amended bentonite in creating soil-bentonite backfills for the construction of a vertical barrier. The backfill consisted of in-situ clayey soil and bentonite amended with tetramethylammonium chloride (TMA) and sodium carboxymethyl cellulose (CMC), hereinafter referred to as STCMB. The vertical barrier was constructed using the excavation-backfill method, with dimensions of 10 m in length, 0.6 m in width, and 5 m in depth. For comparison, a conventional (unamended) soil-bentonite (SCB) vertical barrier with the same dimensions was also constructed. Field slug tests and laboratory flexible-wall hydraulic conductivity tests were conducted to evaluate and compare the hydraulic conductivity of the two types of vertical barrier materials under field and laboratory conditions. The results of field slug tests revealed that the hydraulic conductivity of STCMB was approximately 38% lower than that of SCB, with measured values of 8.1×10^{-11} m/s and 1.3×10^{-10} m/s, respectively. Based on previous study, this could be attributed to the synergistic interactions between TMA and CMC, which facilitated the formation of a three-dimensional hydrogel network structure among bentonite particles. This structural configuration enhanced the tortuosity of fluid transport pathway, thereby reducing the hydraulic conductivity. Flexible wall hydraulic conductivity test results showed that the hydraulic conductivities of STCMB were 8.0×10^{-11} m/s in tap water and 6.9×10^{-11} m/s in 1000 mg/L phenol solution. In contrast, the SCB exhibited higher hydraulic conductivities of 1.4×10^{-10} m/s in tap water and 1.6×10^{-10} m/s in 1000 mg/L phenol solution. The ratios of hydraulic conductivity in tap water to that in the phenol

solution for STCMB and SCB were 1.159 and 0.875, respectively, indicating minimal impact of the phenol solution on hydraulic performance and demonstrating favorable chemical compatibility. Furthermore, the hydraulic conductivities obtained from the field slug tests closely aligned with those obtained from the flexible wall hydraulic conductivity tests. **With respective advantages in test scale and parameter control, these two methods collectively facilitate a comprehensive evaluation of the hydraulic conductivity of soil-bentonite vertical barriers.**

Key words: Composite organics-amended bentonite; vertical barrier; excavation-backfill method; slug test; hydraulic conductivity

0 引 言

垂直阻隔技术是阻滞场地内污染物通过地下水以及土体向周围环境扩散的有效手段^[1]。土-膨润土材料由于其渗透性低、成本低，被广泛用作控制地下水巾污染物迁移的垂直阻隔屏障^[1-2]。长江三角洲地区，是全球最大的农药生产基地。通过对 20 个农药生产场地的土壤和地下水进行样本分析，共检测到 194 种有机化学物质，80% 的污染物浓度超过区域筛查水平的 5 倍。其中，苯酚为主要污染物之一^[3]。已有研究表明，传统的土-膨润土材料在高浓度水溶性有机污染物（如丙酮、乙酸等）和非水相液体 NAPL（如柴油）作用下，渗透系数增大了 2-5 个数量级^[4,5]，无法满足防渗要求 ($k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$)。因此，为了达到预期的防渗效果，需要对土-膨润土材料进行改性。

对土-膨润土材料进行改性的目的不仅是降低其在有机污染物作用下的渗透系数，而且还旨在提高其吸附和稳定污染物的能力，从而延长阻隔屏障的服役寿命^[6,7]。四甲基氯化铵 (TMA) 因其可增强对有机物的吸附能力而广泛应用于有机黏土的制备中^[8]。TMA 能有效嵌入蒙脱土层间，通过静电作用力和微孔填充机制提高吸附性能，从而大大增强蒙脱土对挥发性有机化合物 (VOCs) 如甲苯的吸附能力^[9]，可有效提升膨润土的化学相容性。范日东^[10]研究了羧甲基纤维素钠 (CMC) 改性膨润土在典型重金属作用下的防渗性能。结果表明，在相同孔隙比条件下，CMC 改性膨润土在硝酸铅-硝酸锌混合溶液、铬酸钾溶液以及氯化钙溶液作用下的渗透系数与未被污染状态下的渗透系数的比值为 1.3~1.5。进一步地，Ni 等人^[11]采用 TMA 和 CMC 对钠基膨润土进行改性并与砂土混合得到垂直阻隔屏障回填料 (STCMB)，室内柔性壁渗透实验结果表明，渗透液由自来水变为苯酚溶液后，STCMB 回填料的渗透系数降低了约 9%。然而，目前尚缺乏将复合有机改性膨润土材料作为垂直阻隔屏障应用于有机污染场地的现场试验研究。因此，本研究基于室内试验的结果，开展进一步的现场试验研究，验证其在复杂环境条件下的防渗性能。

在国内外研究领域，童星^[12]采用孔压静力触探

(CPTU) 方法测试并计算了土-膨润土材料的原位渗透系数。Malusis^[13]通过室内柔性壁渗透试验、刚性壁渗透试验以及现场微水试验，对土-膨润土垂直阻隔屏障的渗透系数 (k) 进行了测量和比较。结果表明，现场微水试验测得的 k 值略大于室内柔性壁渗透试验。因此，在进行室内柔性壁渗透试验的同时，应对比现场试验，以更真实地反映复杂因素影响下的垂直阻隔屏障的原位渗透系数。然而，在我国采用微水试验测试土-膨润土材料渗透系数的研究报道比较少。相较于传统的钻孔压水试验和抽水试验，微水试验具有测试精度高且不会产生二次污染的优点^[14]，可满足污染场地垂直阻隔屏障原位渗透系数测定的需要。

微水试验结果分析通常采用半解析解模型，运用较广泛的模型有 Hvorslev 模型^[15]，Bouwer-Rice 模型^[16]、Cooper 模型^[17]和 KGS 模型^[18]。Hvorslev 模型适用于承压含水层，忽略含水层弹性储水效应并假定水位恢复过程中地下水渗流稳定。Cooper 模型在 Hvorslev 模型基础上考虑了含水介质的弹性储水效应，且假定地下水渗流为瞬态流。这两种模型仅适用于过阻尼衰减的微水试验。Bouwer-Rice 模型适用于潜水含水层，假设介质为均质各向异性多孔介质，忽略含水层弹性储水效应和井孔薄壁效应，通过筛管长度与过滤管半径的比值拟合标准曲线，得到有效影响半径，根据水头差与时间半对数关系曲线的斜率计算渗透系数^[19]。KGS 模型适用于承压与潜水含水层，考虑了含水层弹性储水效应。然而，以上模型均未考虑屏障本身的边界条件^[20]，因此不适用于屏障内微水试验的数据演算。Britton 等人^[21,22]采用有限差分法 (MODFLOW 计算软件) 建立了在固定水头边界条件下的垂直阻隔屏障模型，获取了形状因子 F ，并基于微水试验数据反演出垂直阻隔屏障的原位渗透系数。此外，Britton 等人^[21,22]还研究了井与屏障相对位置和膨润土滤饼等因素对形状因子取值的影响。

基金项目：国家自然科学基金 (42177133, 42477178)；国家重点研发计划 (2018YFC1803100)；中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项 (DG3-G02-2023)；安徽省重点研发计划 (2023t07020018)

基于此, 本研究针对某有机化工污染场地, 采用开挖-回填法建造了以土-四甲基氯化铵 (TMA) 和羧甲基纤维素钠 (CMC) 复合有机改性膨润土 (STCMB) 垂直阻隔屏障, 同时也建造了同等规模的传统 (未改性) 土-膨润土 (SCB) 垂直阻隔屏障作为对照。通过开展现场微水试验和室内柔性壁渗透试验, 系统评价 STCMB 和 SCB 垂直阻隔屏障的防渗性能。

1 工程概况

1.1 场地概况

现场试验区位于江苏省无锡市某有机化工污染场地内, 该场地东临锡澄运河, 与长江直线距离约为 30 公里; 北临农田; 南近工业区。依据试验区周边地质勘察孔的钻探资料, 可得试验区 10 m 范围内, 从上至下可分为三层: (1) 填土, 层厚 1.1~2.6 m; (2) 粉质黏土, 层厚 4.1~5.7 m; (3) 粉砂, 层厚 3.2~3.7 m。根据场地工程地质勘察报告, 各土层基本特性见表 1。

表 1 场地土层基本物理特性指标

Table 1 Physical properties of in-situ soil layer

地层	含水率 $w/\%$	液限 $WL/\%$	干密度 $\rho_d/g\cdot cm^{-3}$	孔隙比 e	水平渗透系数 $k_h/m\cdot s^{-1}$
填土	34.2	36.8	1.41	0.92	2.1×10^{-6}
粉质黏土	38.4	38.3	1.56	0.74	5.5×10^{-8}
粉砂	30.1	-	1.89	0.79	2.2×10^{-6}

试验场地地下水类型为第四系松散岩类孔隙水, 水量丰富。试验区填土层和粉质黏土层顶部赋存潜水, 粉砂层赋存微承压水。潜水主要通过大气降水和地表径流补给, 并通过地下水侧向流动排泄, 其水位受季节性气候变化的影响, 平均埋深约 1.0 m, 正常年变幅为 0.5~1.0 m。夏季地下水流向主要表现为由北向南, 温度约为 17.5~20.5 °C。污染调查显示, 场地地下水无重金属污染, 但在地下水样品中检出多种有机物, 包括氯苯、1,2-二氯苯、1,3-二氯苯、氯仿、苯和苯酚等。

1.2 垂直阻隔屏障材料与设计

该污染场地先前已进行了风险管控和修复治理工作。如图 1 所示, G2 区块污染边界四周已实施了复合高密度聚乙烯土工膜 (HDPE) 垂直阻隔, 管控场内地污染地下水向场地外迁移。同时, G2 区块地表实施了水平覆盖阻隔, 阻隔材料包括无纺土工布、HDPE 膜、复合土工排水网和覆土。由于场地内已建有垂直阻隔屏障和水平覆盖阻隔系统, 因此在场地内进行试验会破坏现有水平覆盖阻隔结构。此外, 地方管理部门要求明确禁止在污染场地内施工。因此, 参照《工业污染现场垂直向阻隔技术规范》(HG/T 20715-2020)^[23],

现场试验选址在厂区南部, 距离污染边界外 5 米处。



图 1 现场试验功能区俯视图

Fig.1 Plan view of the field test site

本次现场试验设计了两段垂直阻隔屏障: (1) 土-复合有机改性膨润土垂直阻隔屏障 (STCMB), 尺寸为长 10 m×宽 0.6 m×深 5 m; (2) 土-膨润土 (SCB) 垂直阻隔屏障, 尺寸与 STCMB 相同, 作为对照, 如图 1 所示。由于该屏障阻隔目标为潜水含水层中污染物, 潜水含水层的厚度大约为 3 m, 且粉质黏土层具有低渗透性的特点, 依据规范^[23]要求, 垂直阻隔屏障深度选取为 5 m, 确保其嵌入粉质黏土层而不穿透。

复合有机改性膨润土垂直阻隔屏障材料已通过室内水浴搅拌烘干法成功研发^[11], 本研究将其应用于现场以验证其防渗性能。室内预实验表明, 采用干拌法制备的复合有机改性膨润土在自来水渗透下的渗透系数 (k) 可满足防渗要求 ($k \leq 10^{-9} m/s$)。因此, 考虑到干拌法施工便捷且具成本效益, 现场施工亦采用干拌法制备复合有机改性膨润土。制备材料包括钠化钙基膨润土 (江苏镇江牧丰有限公司)、四甲基氯化铵 (工业级, 纯度≥99%, 江苏豪隆化工有限公司) 和羧甲基纤维素钠 (工业级, 粘度为 800~1200 Pa·s, 河北恒金泰环保科技有限公司), 其掺量分别为钠化钙基膨润土质量的 7% 和 10% (干重比)。将钠化钙基膨润土、四甲基氯化铵 (TMA) 和羧甲基纤维素钠 (CMC) 按设计比例置于混凝土滚筒搅拌机 (JZM350.500.750) 搅拌 50 分钟, 充分混匀后制得复合有机改性膨润土。复合有机改性膨润土和钠化钙基膨润土分别在 STCMB 和 SCB 回填料中的含量为 10% (干重比)。其中, 钠化钙基膨润土基本物理参数如表 2 所示。

表 2 钠化钙基膨润土基本物理特性指标

Table 2 Properties of sodium-activated calcium bentonite

物理特性指标	数值
比重 G_s	2.72
黏粒含量/%	69
细粒含量/%	100
液限 $WL/\%$	201.6
塑限 $WP/\%$	57.8
塑性指数 I_p	143.8

1.3 施工工艺

采用开挖-回填法进行施工，施工工艺流程参考《工业污染场地竖向阻隔技术规范》(HG/T 20715-2020)^[23]，主要包括开挖成槽、膨润土泥浆护壁、回填材料均匀拌合和回填成形四个步骤，施工工艺流程见图 2。具体过程如下：①试验场地平整：使用小型履带式挖掘机(TCE30，厦门泰德尔实业有限公司)推压，确保试验场地平整。②平面定点：根据平面设计点位放置施工控制线。③膨润土泥浆制备：先将膨润土以土水比 9:1 的掺量少量多次的加入内径 1 m，高度 0.8 m 的高速泥浆搅拌桶(SYJ-10，无锡市建鼎建工仪器有限公司)进行第一次搅拌，搅拌桶的输入转速为 1400 rpm，输出转速为 32 rpm，最大扭矩 3000 N·m，持续 30 min，至无团聚。泥浆制备用水为自来水，pH 为 7.24，电导率为 201 μS/cm。随后，将泥浆泵入预先建造的泥浆水化池(尺寸为长 5 m×宽 3 m×深 1.5 m)进行低速地第二次搅拌，所用搅拌设备与第一次搅拌相同，持续搅拌 24 小时。对泥浆的施工和易性参数进行了现场测试，结果为：膨润土泥浆的滤失量介于 19.2~20.7 mL/30min，马氏黏度介于 49~55 s，比重介于 1.067~1.095，pH 介于 9.1~9.9，均满足规范^[23]施工和易性要求。④开挖成槽：使用长臂挖掘机

(LG6085，龙工(上海)挖掘机制造有限公司)开挖槽沟，同时注入膨润土泥浆，液面高于地表 15 cm，使槽壁形成一层薄而光滑的膨润土滤饼^[24]，以阻隔成槽期间地下水渗入并保持槽体稳定。⑤清底：参考《建筑工程地基基础工程施工规范》(GB 51004-2015)^[25]，使用长臂挖掘机清除槽底砾石等不良沉积物，控制槽体宽度、深度和垂直度达到设计值，防止两侧土层及被开挖土散落或滑落于槽体底部，导致屏障底部出现渗透系数远大于回填材料的砂砾等沉积物。⑥土-膨润土回填料制备：筛选原位土，去除砾砂、碎石和建筑残渣。使用全液压挖掘机(神钢 SK200-10)的挖斗将膨润土及复合有机改性膨润土干粉与原位土按设计比例

(1:9 干重比)充分拌合，回填料含水率采用沟槽中制备的膨润土泥浆调节，使得回填料坍落度为 125 mm。⑦钢筋笼布设与回填：将事先装配的带有土压力和孔压传感器的钢筋笼由挖掘机缓慢下放至槽底。通过直径 20 cm 的导管和 1.5 m×1.5 m 的漏斗，采用导管法将土-膨润土回填料在重力作用下沉降至膨润土泥浆液面以上，逐步移动导管和漏斗以完成回填。⑧顶部保护：在屏障顶部铺设 60 cm 厚的原位土和膨润土混合层。同时，在试验区域四周设置围挡，防止外部干扰。

2 试验方案

2.1 取样方案

根据《工业污染场地竖向阻隔技术规范》(HG/T 20715-2020)^[23]中现场取样时间的相关规定，施工完成后 30 天后，在距屏障中心 10 cm 位置处，通过薄壁取土法(GXY-1 型岩芯钻机)获取低扰动样品。STCMB 和 SCB 屏障各选取 1 个点位进行取样，样品直径为 76 mm，取样深度为 0.5~5.0 m，取样位置如图 3 所示。大气压传感器安装于 CC 段土-其他聚合物改性膨润土垂直阻隔屏障内，本文对此部分不予重点讨论。



图 2 现场试验方案示意图

Fig. 2 Field testing program

2.2 微水试验原理

微水试验(slug test)是通过瞬间改变试验孔段中地下水水位，记录水位恢复过程，进而根据理论模型推算水文地质参数的钻孔水文地质试验方法^[14]。本文选用 Britton 模型^[21]来求解试验屏障的渗透系数，计算公式如下：

$$P_w = P_t - P_a \quad (1)$$

$$k_{\text{slug}} = \frac{r_c^2 \ln(R_e / r_w)}{2L} \frac{\Delta \ln(H_{s0} / H_s)}{\Delta t} \quad (2)$$

$$k_{\text{slug}} = -\frac{A_f}{F} m = -\frac{\pi r_c^2}{F} \frac{\Delta \ln(H_s / H_{s0})}{\Delta t} \quad (3)$$

$$F = \frac{2\pi L}{\ln(R_e / r_w)} \quad (4)$$

式中： P_t 为绝对压强； P_a 为大气压强； P_w 为实际水头； A_f 过滤管横截面积，($A_f = \pi r_c^2 = 0.0028 \text{ m}^2$)； F 为形状因子，取决于过滤管开筛长度($L=2.0 \text{ m}$)、井孔直径($D_w=2r_w=76 \text{ mm}$)和水头消散的有效影响半径 R_e 的影响； k_{slug} 为基于微水试验得到的渗透系数， m/s ； H_s 和 H_{s0} 分别为 t 时刻和初始时刻钻孔中水头和静止水头的差值， m 。

2.3 微水试验方法

采用全孔微水试验，包括过滤管安装、传感器布设、水头激发、水位恢复观测和数据采集和处理等步骤，具体过程如下：①过滤管安装：在 STCMB 和 SCB

屏障完成钻孔后, 立即(大约在钻孔完成后5 s)向钻孔中安装预制的PVC过滤管(外径60 mm、壁厚约2 mm、长度6 m)。PVC过滤管底部带有盖子, 并在地面以下2~4 m深度段设置筛孔(开孔直径5 mm, 开孔间距55 mm), 其余深度不开筛孔。PVC管开筛段(过滤管)的内径(60 mm)略小于钻孔内径(76 mm), 防止钻孔塌孔, 确保结构稳定及钻孔的孔径恒定, 保障试验结果可靠。在PVC管开筛段外侧包裹一层无纺土工布, 防止细粒土进入过滤管内。将孔径为5 mm×5 mm、直径为76 mm, 长度为2 m的不锈钢金属网套在PVC管开筛段处, 在无纺布与金属网之间的PVC管开筛段填充滤砂(级配不良的粗砂), 确保金属网能固定并防止滤砂脱落。上述无纺土工布包裹、金属网安装和滤砂填充均在PVC过滤管下放钻孔前完成。②传感器布设: 在每个试验点位安装水位水温传感器(LevelSCOUT, Seometrics, 美国), 该传感器储存容量为10万条数据, 温度量程为-20 °C~60 °C, 精度为±0.1 °C, 水位量程10 m, 精度±0.05% FS, 采样频率为每秒储存一次数据; 同时, 在南侧屏障安装一个大气压传感器(BaroSCOUT 2X, Seometrics, 美国), 其储存容量为10万条数据, 量程10 m, 精度±0.01% FS。③水头激发: 向钻孔中快速注入自来水以瞬时改变钻孔地下水水位, 实现水头激发。根据水电工程钻孔振荡式渗透试验规程(NB/T 35117-2018)^[26], 激发水头深度范围为0.5~2 m。为防止在土-膨润土回填料中发生水力压裂, STCMB屏障注入约2.0 L自来水, 激发水头约0.71 m; SCB屏障注入约1.5 L自来水, 激发水头约0.53 m。④水位恢复观测: 使用水位水温传感器记录试验孔段水位恢复过程, 观测周期为2~3天。⑤数据采集和处理。⑥试验结束后, 采用1.3节中制备的膨润土浆液回灌封闭钻孔。

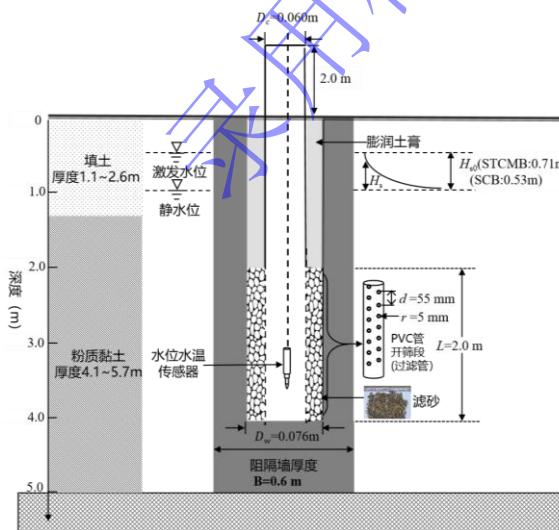


图3 微水试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of slug test

2.4 室内柔性壁渗透试验方案

本研究依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[27]对采集样品进行了基本物理性质测试, 结果如表3所示。为全面评估阻隔屏障的水力特性, 参照ASTM D5084规范^[28], 开展了常水头法室内柔性壁渗透试验。使用直径5 cm、高度5 cm的特制不锈钢环刀, 在STCMB和SCB屏障现场取样的1.5~2.0 m及3.5~4.0 m深度进行切割, 随后加工成直径5 cm、高2.5 cm的试样, 置于预装乳胶膜的PVC套筒中。试样有效应力 σ' 计算公式如下^[10]:

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma - u = \sigma - \frac{1}{3}(2P_B + P_T) \\ u = \frac{1}{3}(2P_B + P_T) \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ 为所施加的围压(kPa), u 为平均孔隙水压力(kPa); P_B 和 P_T 分别为施加到试样的下渗透压和上渗透压(kPa)由于试样顶部与大气相连, $P_T=0$ 。

由于篇幅限制, 本文未详细展示应力监测数据。根据原位应力监测结果, STCMB屏障在 $z=2.0\text{ m}$ 和 4.0 m 处的平均有效应力均为 12 kPa , SCB屏障在高度 $z=2.0\text{ m}$ 和 4.0 m 处的平均有效应力均为 13 kPa 。其中, 平均有效应力 $\sigma_m=(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)/3$, σ_x 为沿阻隔屏障走向水平有效应力、 σ_y 垂直于阻隔屏障走向水平应力、 σ_z 为阻隔屏障竖向应力。为模拟现场原位应力状态, 在柔性壁渗透试验中, 设定水力梯度恒为100, 渗透压 P_B 为 25 kPa , 围压 σ 为 36.7 kPa , 计算可得有效应力 σ' 为 20 kPa , 其略大于原位获取的有效应力($12\sim13\text{ kPa}$)。原因是当围压 σ 设定为 28.7 kPa , 即有效应力 σ' 为 12 kPa 时, 围压和渗透压十分接近, 会造成试样侧面的乳胶膜无法完全紧贴试样, 导致试样与乳胶膜之间发生渗漏。为保证渗透系数的测试准确性, 将围压设定为 36.7 kPa , 即有效应力为 20 kPa 。

在室内柔性壁渗透试验中, 苯酚由于其在水中高溶解性、低辛醇-水分配系数和低有机碳分配系数, 通常被认为是评估膨润土垂直阻隔屏障对含挥发性有机物防渗性能的保守化合物^[29]。本研究在浓度梯度设置方面借鉴了国内外已有研究^[30-31], 以确保试验结果与前人研究的可比性。在此基础上, 进一步采用更严苛的浓度条件, 以揭示材料在高浓度有机污染物渗透作用下的防渗性能演变规律。因此, 本研究选用 1000 mg/L 苯酚溶液作为渗透液, 并通过将 1.0 g 苯酚结晶颗粒溶解于 1 L 去离子水中制备该溶液。渗透试验首先使用自来水(pH 为 7.39 , 电导率为 $225\text{ }\mu\text{S/cm}$)作为渗透液, 待渗透系数稳定后, 改用 1000 mg/L 的苯酚溶液继续测试。根据ASTM D5084^[28]和ASTM

D7100^[32]规范, 自来水渗透需满足 $PVF \geq 2$, 且连续 4 次或以上测得的渗透系数值在平均值±25%范围内; 苯酚溶液渗透除满足上述条件外, 还需达到化学平衡^[32], 试验方可结束。

表 3 阻隔屏障基本物理特性指标

Table 3 Basic characteristics of vertical barrier

回填料	含水率 w/%	液限 WL/%	干密度 $\rho_d/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	孔隙比 e
SCB	43.5	51.1	1.37	1.00
STCMB	50.0	52.5	1.34	1.01

3 试验结果分析

3.1 微水试验

在微水试验期间, 利用大气压传感器同步监测大气压和孔内温度随时间的变化。如图 4 所示, 试验期间气温在 6~8 °C 之间小幅波动, 大气压在 14.85 psi (102.39 kPa)~15.00 psi (103.43 kPa) 之间稳定变化。微水试验开始时, STCMB 和 SCB 屏障试验孔段的地下水静止水位埋深分别为 0.67 m 和 0.26 m。图 5 展示了微水试验期间 STCMB 和 SCB 屏障的绝对压强(P_t)和温度随时间的变化。地下水温度总体稳定, 受寒流影响略降约 0.5 °C, 与大气温度变化趋势一致。绝对压强由水位传感器实测, 试验期间总体稳定呈上升趋势, 这是由于 STCMB 和 SCB 屏障地下水位恢复到静止水位过程缓慢, 地下水位降低引起的压强减小有限。而在此期间大气压强随时间略有上升, 导致绝对压强小幅度上升, 温度变化对其影响甚微。

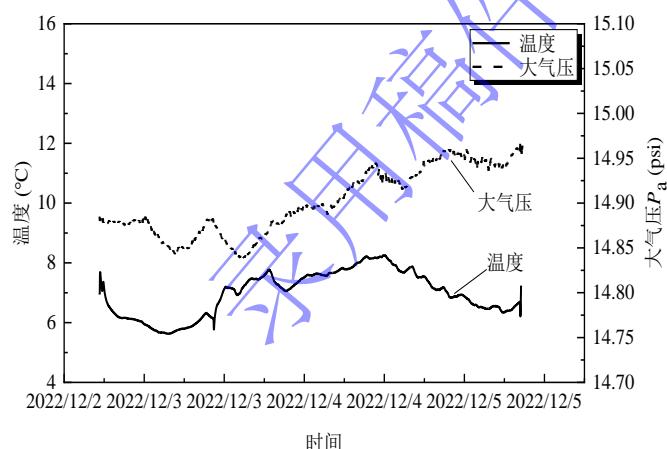


图 4 微水试验期间钻孔中大气压与温度随时间变化曲线 (1 psi=6.895 kPa)

Fig. 4 Variation of atmospheric pressure and temperature over time in the borehole during the slug test (1 psi = 6.895 kPa)

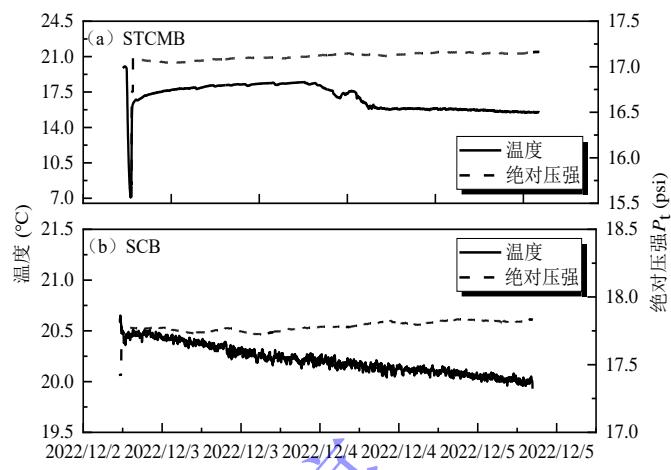


图 5 微水试验期间 STCMB 和 SCB 屏障钻孔中的绝对压强和地下水温度随时间变化曲线(1 psi = 6.895 kPa)

Fig. 5 Temporal variation of absolute pressure and groundwater temperature in the boreholes of STCMB and SCB during the slug test (1 psi = 6.895 kPa)

为消除大气压波动对水位动态观测精度的影响, 首先根据公式(1)对绝对压强进行修正, 即将微水试验测得的绝对压强减去大气压强, 获得试验孔段内的实际水头(H_s)。随后, 绘制 STCMB 和 SCB 屏障在对数条件下的归一化水头差与时间关系图(图 6)。Britton 等人^[21]提出, 可压缩性土体变水头试验 $\ln(H_s/H_{s0})-t$ 关系呈曲线, 不可压缩性土体变水头试验则为直线。本研究中 STCMB 和 SCB 屏障的 $\ln(H_s/H_{s0})-t$ 关系曲线均为直线, 说明垂直阻隔屏障在微水试验期间的激发水头作用下, 产生的固结压缩量很小可忽略不计。基于此, 对 $\ln(H_s/H_{s0})-t$ 数据进行线性拟合, 得到 STCMB 和 SCB 屏障的拟合斜率 $m(m=\Delta \ln(H_s/H_{s0})/\Delta t)$ 分别为 $-5.58 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 和 $-8.69 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 。

根据 Britton 等人^[21]的理论, 形状因子(F)与过滤管直径(D_C)、筛网开口长度(L)以及屏障宽度(B)之间的相关性如图 7 所示, 其中 $D_C=60 \text{ mm}$, $L=2.0 \text{ m}$, $B=0.6 \text{ m}$ 。计算得形状因子 $F=5.4 \text{ m}$ 。最后利用公式(3)计算基于微水试验获取的 STCMB 和 SCB 屏障在 2~4 m 深度渗透系数的平均值分别 $8.1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 和 $1.3 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 。分析 Hvorslev 模型和 Bouwer&Rice 模型发现, 两者的渗透系数控制方程均符合公式(2)。结合公式(2)和(3), 得出 Britton 模型中形状因子 F 与有效影响半径(R_e)的关系(公式 4)^[13]。

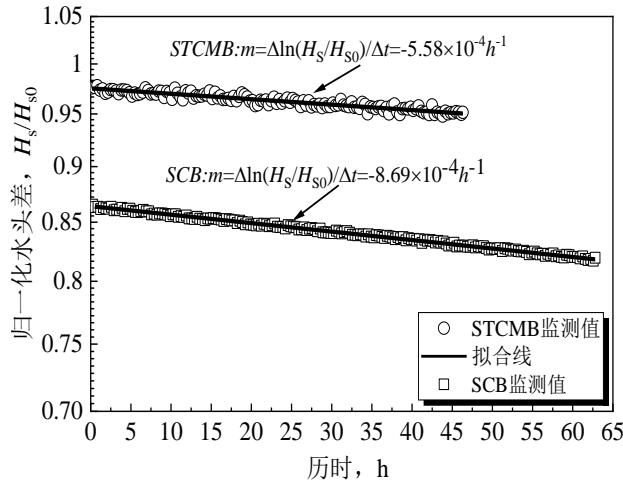


图 6 STCMB 和 SCB 屏障归一化水头随时间变化
Fig. 6 Temporal variation of normalized slug height for STCMB and SCB

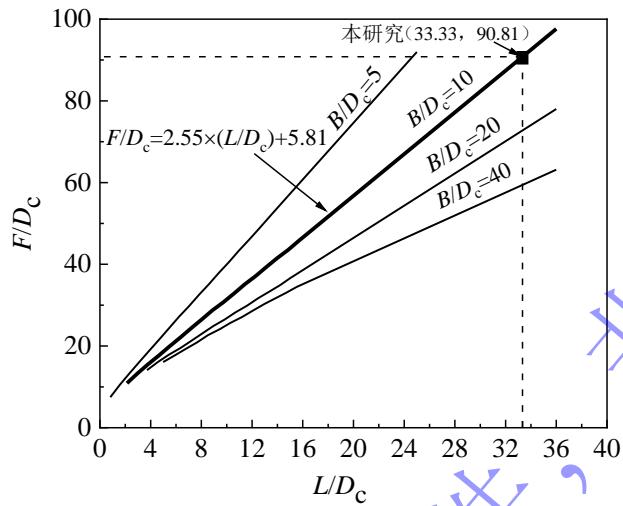


图 7 基于微水试验结果($F/D_c-L/D_c$ 关系图)确定形状因子
Fig. 7 Determining shape factor for the slug test in this study
3.2 室内柔性壁渗透试验

本研究对现场取样的 1.5~2.0m 和 3.5~4.0m 深度的 STCMB 和 SCB 试样进行了柔性壁渗透试验, 渗透系数 k 随孔隙体积 PVF 的变化如图 8-9 所示。在自来水作用下, STCMB 试样的渗透系数 ($k_{fww-STCMB}$) 介于 $7.9 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 至 $8.2 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 之间, 而 SCB 试样的渗透系数 ($k_{fww-SCB}$) 介于 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 至 $1.8 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 之间。STCMB 试样的渗透系数较 SCB 试样降低了 21%~54%。在苯酚溶液作用下, STCMB 试样的渗透系数 ($k_{fwc-STCMB}$) 为 $5.8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ~ $8.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$, 而 SCB 试样的渗透系数 ($k_{fwc-SCB}$) 为 $9.9 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ~ $2.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 。STCMB 试样在苯酚溶液中的渗透系数较 SCB 试样降低了 41%~64%。以上结果表明, STCMB 和 SCB 试样均满足防渗性能要求 ($k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$), 且 STCMB 试样的防渗性能优于 SCB 试样。

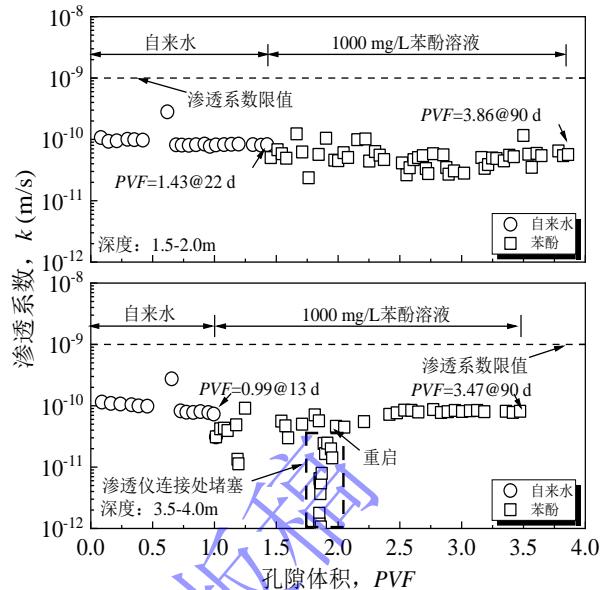


图 8 两个深度 STCMB 屏障取样的室内柔性壁渗透试验结果
Fig. 8 Results of flexible-wall hydraulic conductivity tests (k - PVF) of STCMB specimens at two depths

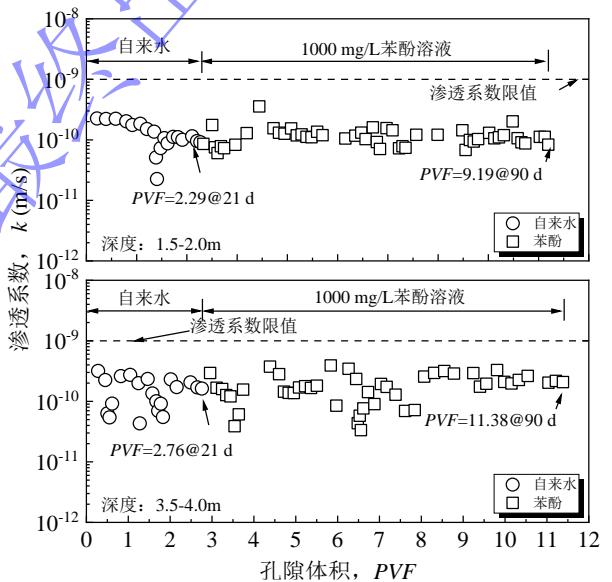


图 9 两个深度 SCB 屏障取样的室内柔性壁渗透试验结果
Fig. 9 Results of flexible wall hydraulic conductivity tests (k - PVF) of SCB specimens at two depths

表 4 汇总了同一渗透液作用下, 不同深度处阻隔屏障试样的渗透系数平均值。STCMB 屏障在自来水和 1000 mg/L 苯酚溶液作用下渗透系数平均值分别为 $8.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ($k_{fww-STCMB}$) 和 $6.9 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ($k_{fwc-STCMB}$), 二者比值为 1.159。SCB 屏障在自来水作用和 1000 mg/L 苯酚溶液作用下渗透系数平均值分别为 $1.4 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ ($k_{fww-SCB}$) 和 $1.6 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ ($k_{fwc-SCB}$), 二者比值为 0.875。结果表明, 1000 mg/L 苯酚溶液对 STCMB 和 SCB 屏障渗透系数的影响不明显, 证明两类屏障材料均对苯酚溶液具有良好的化学相容性。STCMB 和 SCB 屏障通过微水试验测试获取的渗透系数与室内柔性壁渗透试验测得的渗透系数的比值分别为 1.012

和 0.929, 两种测试方法所得的渗透系数接近。

表 4 阻隔屏障两个深度处试样渗透系数的平均值

Table 4 Average values of hydraulic conductivity for SCB and STCMB specimens at two depths

回填料	柔性壁渗透系数		$k_{\text{fwf}}/k_{\text{fwc}}$	$k_{\text{slug}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_{\text{fwf}}/k_{\text{slug}}$
	自来水 k_{fwf} $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	苯酚 k_{fwc} $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			
STCMB*	8.0×10^{-11}	6.9×10^{-11}	1.159	8.1×10^{-11}	1.012
SCB*	1.4×10^{-10}	1.6×10^{-10}	0.875	1.3×10^{-10}	0.929

注: *阻隔屏障试样在 1.5~2.0m 和 3.5~4.0m 两个深度处的室内柔性壁渗透试验测得的算术平均值。

4 讨 论

结合已有文献^[12-13,33], 对比了本研究室内柔性壁渗透试验和现场微水试验在不同深度处的渗透系数, 并与文献报道的现场试验结果进行了对比, 如图 10 所示。为了制备 STCMB 和 SCB 屏障在不同深度段的室内柔性壁渗透试样, 分别在现场取样的 1.5~2.0 m 和 3.5~4.0 m 进行切割。图中的数据基于各深度段的平均深度 1.75 m 和 3.75 m。此外, 微水试验的测试段设定在地下 2~4 m 深度, 图中相关数据采用平均深度 3 m。分析结果表明, 相较于室内柔性壁渗透试验, 微水试验测得的渗透系数普遍较高, 较为保守。这可能归因于多种复杂因素, 包括但不限于测试尺度的差异、样品在取样及制备过程中的扰动、室内试验条件(如有效应力和水力梯度的设定)的精确控制, 以及在室内试验中, 水垂直流经垂直阻隔屏障, 而在微水试验中, 水则水平流经垂直阻隔屏障, 这导致了渗透系数的各向异性^[34]。

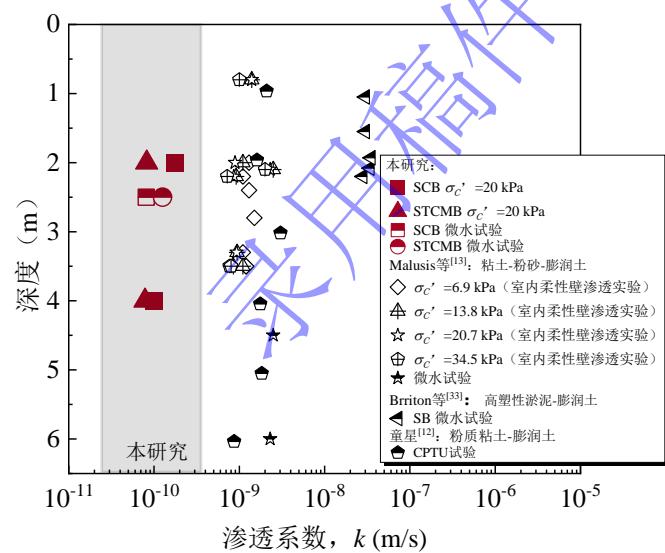


图 10 不同深度室内柔性壁渗透试验与微水试验渗透系数

Fig. 10 Hydraulic conductivity of backfill specimens obtained from flexible-wall hydraulic conductivity test and slug test based on this study and previously published studies

此外, 采用 TMA 和 CMC 作为改性剂的土-复合

有机改性膨润土 (STCMB) 相较于 Malusis 等人^[13]研究中未改性的黏土-粉砂-膨润土的渗透系数降低了一个数量级。这一结果可以归因于以下三方面的差异:首先, 本研究回填料中的膨润土掺量较高 (10%), 而 Malusis 等人^[13]及童星^[12]的研究中回填料膨润土掺量较低, 仅为 5% (如表 5 所示)。其次, 本研究测试区域的地层为粉质黏土层, 而 Malusis 等人^[13]研究测试区域为粉砂层。粉质黏土层具有较低的渗透性, 这也是本研究渗透系数较低的一个原因。此外, 由于 TMA 能有效嵌入蒙脱土层间, 通过微孔填充机制提高吸附性能^[9]。CMC 表面的亲水官能团能与膨润土相互作用, 形成水凝胶结构, 从而增强膨润土的膨胀性能, 并填充颗粒间孔隙^[35]。本研究采用 TMA 和 CMC 双改性材料, 两者协同作用在膨润土颗粒间形成三维网状结构^[11], 增加了渗透路径的曲折度, 降低了渗透系数^[36]。

表 5 阻隔屏障回填料组成及现场测试深度处土层类型

Table 5 Compositions of backfills and types of in-situ soils reported in previously published studies

母土	膨润土掺量 (干重比)	回填料 液限 wL/%	测试深度 处土层	参考文献
黏土 粉砂	5%	16%	粉砂	Malusis ^[13]
粉质 黏土	5%	-	粘质粉土	童星 ^[12]
粉质 黏土	10%	52.47%	粉质黏土	STCMB
粉质 黏土	10%	51.08%	粉质黏土	SCB

5 结 论

本研究建造了土-复合有机改性膨润土垂直屏障(长 10 m、宽 0.6 m、深 5 m)和同等规模的传统(未改性)土-膨润土垂直阻隔屏障进行对照。开展了现场微水试验和室内柔性壁渗透试验对屏障的防渗性能进行了对比评估, 验证了土-复合有机改性膨润土作为垂直阻隔屏障的可行性。主要结论如下:

(1) 根据微水试验结果, STCMB 和 SCB 屏障的

渗透系数分别为 8.1×10^{-11} m/s 和 1.3×10^{-10} m/s。在室内柔性壁渗透试验中, STCMB 和 SCB 屏障在自来水作用下不同深度处渗透系数的平均值分别为 8.0×10^{-11} m/s 和 1.4×10^{-10} m/s。微水试验和室内柔性壁渗透试验结果均验证了 STCMB 屏障防渗性能优于 SCB 屏障。

(2) 在室内柔性壁渗透试验中, STCMB 和 SCB 屏障在自来水和 1000 mg/L 苯酚溶液作用下的渗透系数比值分别为 1.159 和 0.875。表明 STCMB 和 SCB 屏障材料对苯酚溶液具有良好的化学相容性。

(3) STCMB 和 SCB 屏障通过微水试验测试获取的渗透系数与室内柔性壁渗透试验测得的渗透系数的比值分别为 1.012 和 0.929, 两种测试方法的结果较为相近, **且在测试尺度和测试参数可控方面具有互补性。**

6 致 谢

感谢课题组已毕业的硕士研究生张庆和麻统孝在现场试验过程中提供的帮助与支持。感谢北京高能时代环境技术股份有限公司对本次现场试验的支持。

参 考 文 献:

- [1] 杨光煜.活性土质膨润土竖向屏障阻隔氯代有机污染物性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.(YANG Guangyu. Research of the performance of reactive soil-bentonite vertical barrier used to contain chlorinated organics [D]. Nanjing: Southeast University, 2022)
- [2] DU Y J, FAN R D, REDDY K R, et al. Impacts of presence of lead contamination in clayey soil-calcium bentonite cutoff wall backfills [J]. Applied Clay Science, 2015, 108: 111-22.
- [3] LI M., CHEN Q, YANG L, et al. Contaminant characterization at pesticide production sites in the Yangtze River Delta: Residue, distribution, and environmental risk [J]. Science of The Total Environment, 2023, 860: 160156.
- [4] EVANS J C, CONSULTANTS W-C, FANG H-Y, et al. Organic fluid effects on the permeability of soil-bentonite slurry walls [C]. Proceedings of the National Conference on Environmental Emergencies, 1985, 267-271.
- [5] CONSOLI N C, HEINECK K S, CARRARO J A H. Portland cement stabilization of soil-bentonite for vertical cutoff walls against diesel oil contaminant [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, 28(4): 361-371.
- [6] JAVADI, S., GHAVAMI, M., ZHAO, Q., BATE, B. Advection and retardation of non-polar contaminants in compacted clay barrier material with organoclay amendment [J]. Applied Clay Science, 2024, 142: 30-39.
- [7] VOUDRIAS, E.A. The concept of a sorption chemical barrier for improving effectiveness of landfill liners [J]. Waste Management & Research, 2002, 20(3): 251-258.
- [8] CUI Q, CHEN B. Review of polymer-amended bentonite: Categories, mechanism, modification processes and application in barriers for isolating contaminants [J]. Applied Clay Science, 2023, 235: 106869.
- [9] SUN W R., LI J, LI H, et al. Mechanistic insights into ball milling enhanced montmorillonite modification with tetramethylammonium for adsorption of gaseous toluene [J]. Chemosphere, 2022, 296: 133962.
- [10] 范日东.重金属作用下土-膨润土竖向隔离屏障化学相容性和防渗截污性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.(FAN Ridong. Study on chemical compatibility and containment performance of soil-bentonite cutoff wall exposed to heavy metal contaminants [D]. Nanjing: Southeast University, 2017)
- [11] NI H, FAN R D, REDDY KRISHNA R, et al. Containment of phenol-impacted groundwater by vertical cutoff wall with backfill consisting of sand and bentonite modified with hydrophobic and hydrophilic polymers [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 461: 132627.
- [12] 童星.土-膨润土力学水力特性及其隔离墙的固结行为研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.(TONG Xing. Mechanical and hydraulic properties of soil-bentonite and consolidation behavior of cutoff wall [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017)
- [13] MALUSIS M A, BARLOW L C. Comparison of laboratory and field measurements of backfill hydraulic conductivity for a large-scale soil-bentonite cutoff wall [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(8): 04020070.
- [14] 万伟峰,李清波,曾峰,等.微水试验研究进展[J].人民黄河, 2018, 40(08): 99-104+109.(WANG Weifeng, LI Qingbo, ZENG Feng, et al. Research progress in slug test [J]. Yellow River, 2018, 40(08): 99-104+109)
- [15] HVORSLEV M J. Time lag and soil permeability in ground-water observations [M]. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US Army, 1951, 1-50.
- [16] BOUWER H, RICE R. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 423-428.
- [17] COOPER JR H H, BREDEHOEFT J D, PAPADOPULOS I S. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge

- of water [J]. Water Resources Research, 1967, 3(1): 263–269.
- [18] HYDER Z, BUTLER J J, MCELWEE C D, et al. Slug tests in partially penetrating wells [J]. Water Resources Research, 1994, 30(11): 2945–2957.
- [19] 万伟峰, 李清波, 蔡金龙, 等. 多孔均质含水层中激发强度对微水试验结果的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 1-6.(WANG Weifeng, LI Qingbo, CAI Jinlong, et al. Research on the influence of the excitation intensity on slug test results in a homogeneous porous aquifer [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 1-6.)
- [20] CHOI H, DANIEL D E. Slug test analysis in vertical cutoff walls. I: Analysis methods [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(4): 429–438.
- [21] BRITTON J P, FILZ G M, HERRING W E. Measuring the hydraulic conductivity of soil-bentonite backfill [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(12): 1250–1258.
- [22] BRITTON J P, FILZ G M, HERRING W E. Slug tests in soil-bentonite cutoff walls using a push-in piezometer tip [J]. Waste Containment and Remediation, 2012, 1-13.
- [23] 中华人民共和国工业和信息化部. HG/T 20715-2020. 工业污染场地竖向阻隔技术规范 [S]. 北京: 北京科学技术出版社, 2020.(Ministry of Industry and Information Technology. HG/T 20715-2020. Technical code for engineered vertical barriers at industrial contaminated sites [S]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 2020)
- [24] QIN S, XU T, ZHOU W H, et al. Infiltration behaviour and microstructure of filter cake from sand-modified bentonite slurry [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 40, 100963.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB51004-2015. 建筑地基基础工程施工规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. GB51004-2015. Code for construction of building foundation engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2015)
- [26] 国家能源局. NB/T 35117-2018. 水电工程钻孔振荡式渗透试验规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.(National Energy Administration. NB/T 35117-2018. Specification for slug test in borehole of hydropower projects [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018)
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. GB/T 50123-2019 Standard for geotechnical testing method [S]. Beijing: China Planning Press, 2019)
- [28] ASTM. D5084-24 Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2024.
- [29] MALUSIS M A, MANEVAL J.E., BARBEN E.J, et al. Influence of adsorption on phenol transport through soil-bentonite vertical barriers amended with activated carbon [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2010, 116 (1-4), 58-72.
- [30] 李琴,贾卓,黎建刚,等.活性炭改性土-膨润土泥浆墙阻隔苯酚污染地下水 [J].吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(01):251-260.(LI Qin, JIA Zhuo, LI Jiangang, et al. Cutoff phenol polluted groundwater with activated carbon modified soil-bentonite slurry wall [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(01):251-260)
- [31] Tang W, Ye C, Zhang Q, et al. Study on the carbon sequestration performance and barrier mechanism of biochar cement-based vertical cutoff walls for phenol pollution in groundwater [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(6): 114560.
- [32] ASTM. D7100-11 Standard test method for hydraulic conductivity compatibility testing of soils with aqueous solutions [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2020.
- [33] BRITTON J P. Soil-bentonite cutoff walls: hydraulic conductivity and contaminant transport [D]. Blacksburg Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [34] WATABE Y, YAMADA K, SAITO K. Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite [J]. Geotechnique, 2011, 61(3): 211-9.
- [35] 肖崇林,范日东,杨爱武.苯酚溶液作用下 CMC 改性膨润土化学相容性试验研究 [J].工程地质学报, 2021, 29(05):1286-1294.(XIAO Chonglin, FAN Ridong, YANG Aiwu. Experimental study on chemical compatibility of CMC treated bentonite subjected to phenol solutions [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(05): 1286-1294)
- [36] DU Y J, SHEN S Q, TIAN K, et al. Effect of polymer amendment on hydraulic conductivity of bentonite in calcium chloride solutions [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(2): 04020452.