

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.128



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



淋滤作用下固化石油污染土的力学性能及 污染物迁移演变历程

李敏^{a,b}, 于禾苗^a, 李辉^a, 赵末炎^a

(河北工业大学 a. 土木与交通学院; b. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要:厘清环境效应下固化石油污染土的力学性能及污染物迁移扩散演变历程是推进污染土工程再利用的关键前提。选择石灰和粉煤灰为固化材料, 结合淋滤试验和 COMSOL Multiphysics 软件模拟, 通过滤后界面含油量分布评价淋滤环境下固化作用对石油迁移的控制性, 以土体界面强度和变形演变为指标, 评价淋滤环境下固化污染土的力学稳定性。结果表明: 石灰、粉煤灰固化能解决污染土在淋滤作用下存在的污染物迁移扩散甚至大量迁出问题, 实现对土中石油污染物迁移的良好控制。淋滤作用下, 固化污染土各界面含油量始终接近初始设定状态, 迁移率仅为 1.35%~2.76%; 固化污染土的力学参数变化幅度与围压及污染物浓度正相关, 但都仅在初始受力的 10 s 内存在波动, 随后强度值稳定在 $5.77 \times 10^4 \sim 6.07 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, 位移最大波动值为 $1.73 \times 10^{-3} \sim 6.46 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 。固化污染土的力学稳定性良好, 安全系数 F_s 达 10 以上。石灰、粉煤灰固化石油污染土能同时兼顾环境和工程需求, 具有工程再利用潜力。

关键词:石油污染土; 淋滤; 固化再利用; 迁移控制; 力学性能

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0202-08

The mechanical properties and contaminant migration evolution of solidified oil-contaminated soil under leaching

LI Min^{a,b}, YU Hemiao^a, LI Hui^a, ZHAO Moyan^a

(a. School of Civil and Transportation Engineering; b. Hebei Research Center of Civil Engineering Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: Understanding the mechanical properties of solidified oil-contaminated soil and the evolution of contaminant migration and diffusion under environmental effects is a key prerequisite for promoting the reuse of contaminated soil projects. Lime and fly ash with a low-carbon concept were selected as solidification materials. Combined with a leaching test and COMSOL Multiphysics software, the control of the solidification effect on oil migration under leaching environment was evaluated macroscopically by the oil content after leaching, and the mechanical stability under leaching was evaluated by soil strength and deformation. The results indicate that the solidification of lime-fly ash has the potential to address the issue of contaminant migration and diffusion,

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(52278341, 51978235); 河北省自然科学基金(E2018202274)

作者简介: 李敏(1985-), 女, 教授, 博士, 主要从事污染土处置研究, E-mail: limin0409@hebut.edu.cn.

Received: 2023-06-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52278341, 51978235); Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018202274)

Author brief: LI Min (1985-), professor, PhD, main research interest: disposal of the contaminated soil, E-mail: limin0409@hebut.edu.cn.

particularly in cases where a significant number of contaminants are migrating under the leaching effect of contaminated soil, and to achieve effective control of the migration of oil contaminants in soil. The oil content at each interface of solidified contaminated soil under the action of leaching is always close to the initial oil content setting state, and the migration rate is only 1.35%-2.76%. The variation range of the mechanical parameters of the solidified contaminated soil under leaching is positively correlated with confining pressure and contaminant concentration, but only fluctuates within 10 s of the initial stress and then the strength value is stable at 5.77×10^4 - 6.07×10^4 N/m², and the maximum fluctuation value of displacement is 1.73×10^{-3} - 6.46×10^{-2} mm. The mechanical stability of solidified contaminated soil is good, and the safety factor F_s is more than 10. Lime-fly ash solidified oil-contaminated soil can take into account both environmental and engineering requirements, and exhibits the potential for engineering reuse.

Keywords: oil-contaminated soil; leaching; solidification and reuse; migration control; mechanical property

石油作为现今世界经济发展的主要动力来源之一,在其开采、冶炼及运输使用过程中常造成土壤污染问题^[1]。石油污染物具有毒性、黏滞性、不稳定性等特点,会改变土体的力学性能并随外界环境的变化在土中发生吸附解吸和迁移扩散等行为,对人类健康和生态环境造成威胁^[2-3]。将石油污染土固化处理并进行工程再利用是一种经济环保的处置方式^[4]。厘清环境效应下固化油污染土的力学性能及污染物迁移扩散演变历程是推进污染土工程再利用需解决的关键科学问题。

石油类污染物主要以吸附态(吸附土颗粒)、溶水态和溶气态的形式存在土壤中,并极易在降雨淋滤的作用下向四周迁移,引发二次污染^[5]。石油污染物在土中的迁移深度与污染强度和降雨量成正比^[6]。相同淋滤条件下,柴油在砂土中的迁移深度大于壤土^[7-8]。干密度的增加能提升土体对石油污染物的截留能力^[9]。同时,淋滤作用也会影响土体的抗剪强度,造成边坡破坏、地面隆起、堤坝失稳等现象^[10-11]。

目前对石油污染土的固化处理研究多集中在力学性能和工程应用上^[12]。李敏等^[13-14]已证实石灰-粉煤灰固化处理后的土体力学性能满足工程回用的路基规范要求。在此基础上,结合淋滤试验和 COMSOL Multiphysics 软件模拟,通过滤后界面含油量分布分析污染物迁移演变历程,评价淋滤环境下固化作用对石油迁移的控制性;以土体强度、变形为指标,评价淋滤作用下土体的力学稳定性。

1 室内试验研究

1.1 试验材料与装置

由于石油污染物主要集中于距地表 10 cm 以内的土壤中^[15],为保证研究内容充足有效,试样尺寸为 7 cm(直径)×14 cm(高度),如图 1 所示。石油污染会导致土体结构松散,降低土体的持水性和渗透

性^[16],考虑淋滤液压力对土体结构的影响及淋滤的充足性,在试验过程中,试样顶部放置透水石并设一定的缓冲区域,试验运行时间及压力如表 1 所示。试验过程中,淋滤液经泵增压后通过进水口均匀作用于试样上方,渗出液经下方出水口统一收集。试验完成后,以 2 cm 间隔取样,并采用超声-紫外法测定滤后各界面处的石油含量^[17]。

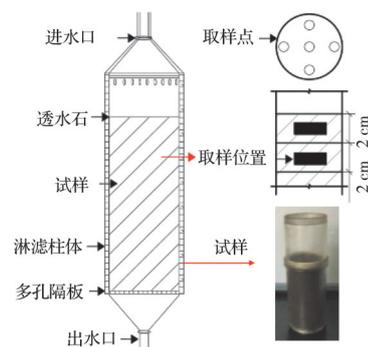


图 1 试验装置及取样示意图

Fig. 1 Test device and sampling diagram

综合已有文献中的石油含量分布及固化材料掺量^[18-20],人工配置固化/未固化石油污染土。其中,试验用土取自天津市滨海新区,为粉质黏土,其物理化学指标见表 2;试验用油取自天津市大港区油田,为深棕色半流体状轻质原油;固化材料选择石灰和粉煤灰。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[21],使用手动轻型击实仪在装置内直接制样(图 1),试验设计参数见表 1。固化污染土置于恒温恒湿养护箱中养护 28 d。以未固化石油污染土为对照组。

1.2 结果分析

1.2.1 固化/未固化污染土中滤后含油量的分布规律
不同污染浓度(30~180 mg/g)的未固化污染土滤后含油量显著降低且数值接近(26.91~36.45 mg/g)(图 2)。说明土体对石油污染物的稳定吸附量在此范围内,超出该范围的污染物易受外界条件

表 1 试验设计参数

Table 1 Test design parameters

| 土体含油量/(mg/g) | 取样深度/cm | 固化材料掺量/% | | 运行时间/h | 运行压力/kPa | 流量/cm ³ | 流速/(cm/s) |
|----------------------|------------------|----------|-----|--------|----------|----------------------|-----------|
| | | 石灰 | 粉煤灰 | | | | |
| 30、60、90、120、150、180 | 2、4、6、8、10、12、14 | 10 | 20 | 5 | 30~35 | 1.44×10 ⁵ | 0.52 |

表 2 土的物理化学指标

Table 2 Physicochemical indexes of soil

| 风干含 水率/% | 最优含 水率/% | 最大干密 度/(g/cm ³) | 相对 体积 质量 | 稠度指标 | | | 粒径分布/% | | | | |
|-------------|-------------|--------------------------------|----------------|------|------|------|---------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------|
| | | | | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 | < 0.005 mm | 0.01~ 0.005 mm | 0.05~ 0.01 mm | 0.075~ 0.05 mm | > 0.075 mm |
| 2.4 | 17.7 | 1.71 | 2.7 | 30.6 | 18.8 | 11.8 | 46.4 | 12.7 | 37.2 | 1.5 | 2.2 |

的影响,发生解吸、迁移和扩散等行为。

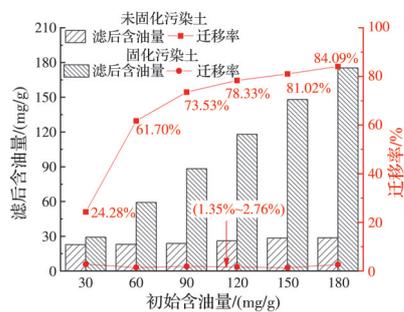


图 2 固化及未固化污染土滤后含油量分布图

Fig. 2 Distribution of leached oil content of contaminated soils with and without solidification

固化作用能提高土体对石油污染物的吸附稳定性,固化污染土的滤后含油量始终与初始含油量接近,石油污染物迁移率为 1.35%~2.76%,远小于未固化污染土(24.28%~84.09%)。这是因为固化材料中的粉煤灰具有较强的表面活性,存在的强电负性羰基官能团(如醇羟基、醛基、羧基等)可对石油污染物产生强吸附^[22];同时,石灰与土中的硅酸盐反应后生成的水化胶凝产物可显著提高污染土的结构稳定性^[23];两者的联合作用实现了石油污染物在土中迁移的有效控制。

1.2.2 淋滤作用下固化/未固化污染土中石油污染物演变历程

将不同取样点测得的石油含量以等高线形式绘制成图,如图 3、图 4 所示。未固化污染土中的石油污染物不稳定,极易在淋滤作用下迁移扩散,且存在迁出现象,如图 5(a)、(c)所示。对于初始含油量为 30、60、90 mg/g 的污染土,在重力及水压力作用下,各界面处的石油污染物分布较均匀,沿 2、6、10 和 14 cm 深度处的界面石油含量平均值分别为 26.44、26.06、26.86、26.27 mg/g,整体数值接近(26.06~26.91 mg/g),超出部分均迁出土体,如图 3(a)~(c)所示。

初始含油量在 120~180 mg/g 的污染土,淋滤

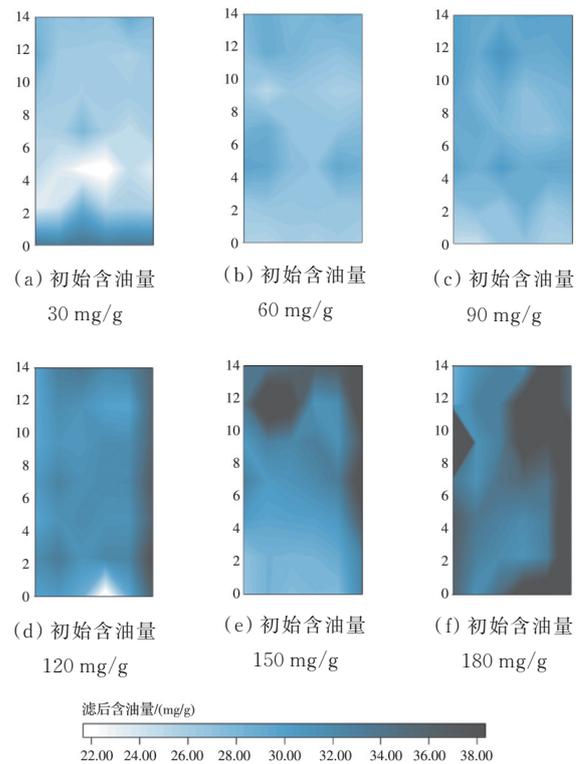


图 3 未固化污染土中石油污染物演变历程

Fig. 3 Evolution process of oil contaminants in unconsolidated contaminated soil

作用下各界面处的石油污染物浓度存在差别,伴随着土中含油量的增加,油水作用增强,在油水斥力和浮力作用的影响下,沿 2、6、10、14 cm 深度处的石油含量范围分别为 32.74~36.12 mg/g、31.73~35.97 mg/g、31.77~35.35 mg/g、29.00~33.86 mg/g,整体上呈现周边浓度高于内部点位的趋势,如图 3(d)~(f)所示。对于石油污染土,污染浓度越高,迁移扩散现象越明显,二次迁移风险也越大。

固化污染土中石油污染物稳定性良好,淋滤作用下仅在土中发生微量迁移。以初始含油量较高(120、150、180 mg/g)的固化污染土为例,淋滤作用下沿 2、6、10、14 cm 深度界面处的石油含量分别为(123.25、119.87、118.27、120.97 mg/g)、(146.23、

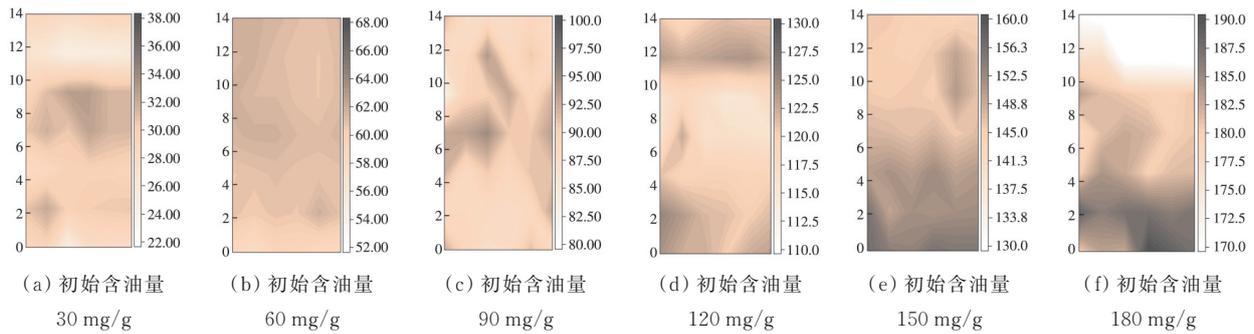


图 4 固化污染土中石油污染物的演变历程

Fig. 4 Evolution process of oil contaminants in solidified contaminated soil

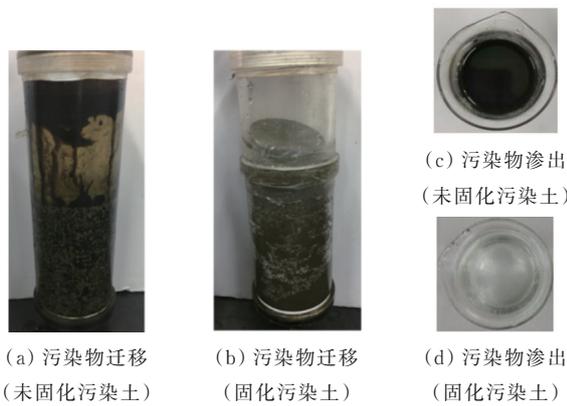


图 5 固化/未固化石油污染土中污染物迁移现象图

Fig. 5 Contaminant migration phenomenon in solidified/unsolidified oil-contaminated soil

150.91、148.58、152.81 mg/g)、(171.41、180.83、180.86、187.10 mg/g)。各界面处石油浓度值均接近初始设定值,且渗出液清澈,呈水状,无任何迁出迹象(图 5),固化作用对于土中石油污染物迁移控制具有有效性。

2 淋滤作用下土体力学稳定性分析

2.1 模型构建

为进一步探求淋滤作用下土体力学性能的演变过程,用 COMSOL Multiphysics 软件中的固体力学模块和理查兹方程对室内模型试验进行模拟分析。如图 6 所示,模型尺寸与实际试验装置一致,顶部设置压力边界,底部设置固定约束和流体流出边界,两侧设置棍支撑(模拟试验条件)和 0~200 kPa 压力边界(模拟不同工况条件)。模拟中固化/未固化污染土的力学及水力学参数由淋滤试验和课题组前期研究成果^[24-25]确定,见表 3。

表 3 模型的力学及水力学参数

Table3 Mechanical and hydraulic parameters of the model

| 污染土类别 | 泊松比 | 弹性模量/(MN/m ²) | 土体密度/(g/cm ³) | 液体密度/(g/cm ³) | 水力传导率/(cm/s) |
|--------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|
| 未固化污染土 | 0.30 | 18~5 | 1.6 | 1 | 0.55×10 ⁻⁶ ~8.26×10 ⁻⁶ |
| 固化污染土 | 0.25 | 50~80 | 1.6 | 1 | 1.92×10 ⁻⁴ ~3.30×10 ⁻⁴ |

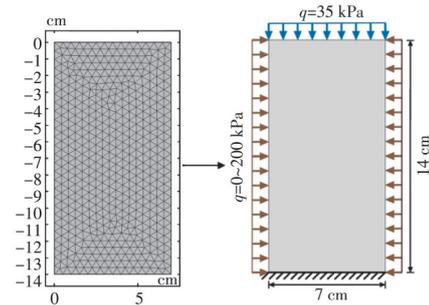


图 6 模型图的构建

Fig. 6 Construction of model diagram

2.2 数值模拟可行性分析

随着液体逐渐入渗,固化/未固化污染土内孔隙压力逐渐增加,当液体渗出时,土体达到饱和状态。由于固化污染土中的粉煤灰具有较强的吸附特性,能在吸附石油分子的同时与石灰协同将石油分子包裹在土体内部,弱化石油污染土的斥水性,提高污染土的渗透性。在模拟结果中,固化污染土的饱和时间为 4.3 s,远小于未固化污染土的 34.7 s,该结果与淋滤试验过程中的饱和时间(4、35 s)一致(图 7)。

在相同淋滤条件下,固化/未固化污染土的位移最大值分别为 5.30×10^{-3} 、1.80 mm,也与试验现象(固化污染土无明显位移,未固化污染土有明显位移)一致(图 8)。淋滤作用下土体饱和度及位移变化规律的数值模拟结果能较好地反映试验结果,所构建模型合理。

2.3 淋滤作用下固化石油污染土的力学性能演变过程

2.3.1 初始应力平衡下的力学性能演变

初始应力平衡下,当土中污染浓度在 0~150 mg/g 时,固化/未固化污染土的应力变化趋势相同,

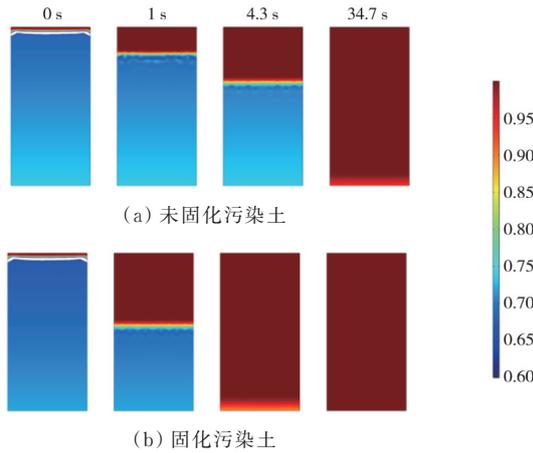


图 7 淋滤作用下固化/未固化污染土饱和度变化情况
Fig. 7 Saturation change of solidified/unsolidified contaminated soil under leaching function

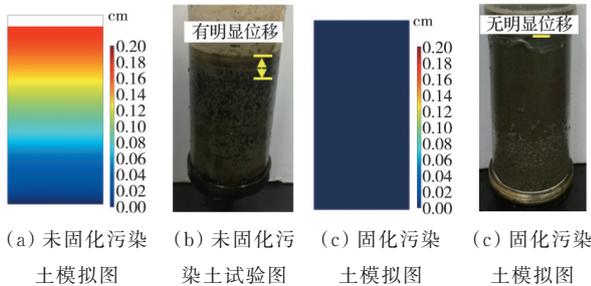


图 8 淋滤作用下固化/未固化污染土位移变化情况
Fig. 8 Displacement variation of solidified/unsolidified contaminated soil under leaching function

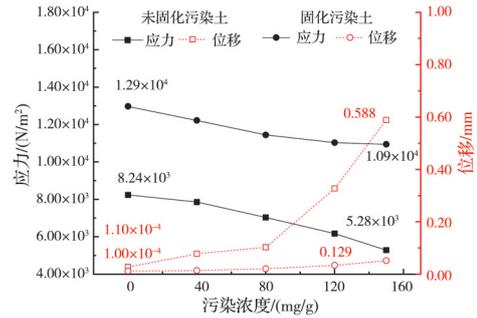
均随污染浓度的增大而减小(图 9(a)),变化范围分别为 $1.09 \times 10^4 \sim 1.29 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 和 $5.28 \times 10^3 \sim 8.24 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 。污染浓度的增加对固化污染土的位移产生微量影响。当污染浓度增加至 150 mg/g 时,固化污染土位移增加 0.12 mm ,未固化污染土位移发生明显变化,由 0.011 mm 增至 0.59 mm 。

初始应力平衡下,当围压在 $0 \sim 200 \text{ kPa}$ 变化时,固化/未固化污染土应力均随围压的增大而增大(图 9(b)),变化范围分别为 $1.10 \times 10^4 \sim 3.57 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 和 $6.17 \times 10^3 \sim 2.76 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 。围压的增加对固化污染土的位移影响较小,而未固化污染土位移增量明显,当围压增至 200 kPa 时,固化污染土位移仅增加 $1.3 \times 10^{-4} \text{ mm}$,未固化污染土位移由 0.02 mm 增至 15.60 mm 。

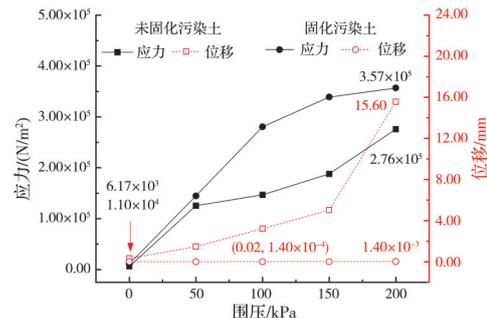
由于未固化污染土在初始应力平衡时位移已发生显著变化,此时土体已不具有稳定性。因此,仅分析固化污染土在淋滤作用下的力学性能演变过程。

2.3.2 淋滤作用下的力学性能演变

以初始含油量为 120 mg/g 的固化污染土为例,淋滤作用下固化污染土的应力随着围压的增加而



(a) 污染浓度对土体应力及位移的影响



(b) 围压对土体应力及位移的影响

图 9 初始应力平衡下固化/未固化污染土的应力及位移变化规律

Fig. 9 Variation law of stress and displacement of solidified / unsolidified contaminated soil under initial stress balance

增加(图 10)。当围压为 200 kPa 时,固化污染土内应力最大为 $3.41 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,此时模型(固化污染土)底部为主要受力点,能承受围压及土体内的渗流力,同时也证明固化污染土在不同围压及淋滤作用下仍具有很高的强度。

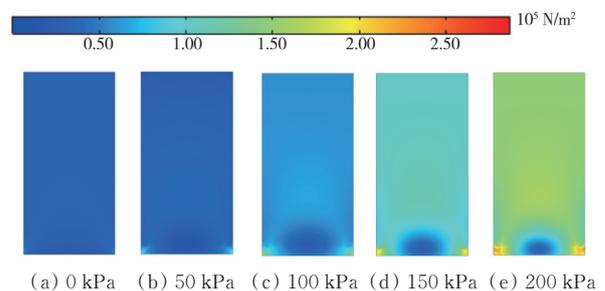


图 10 不同围压下固化污染土应力分布规律图

Fig.10 Stress distribution law of solidified contaminated soil under different confining pressures

流体入渗时固化污染土内的土体饱和过程和应力变化过程如图 11(a)、(b)所示。随着流体的入渗,固化污染土内的应力峰值由土体顶部逐渐转到底部,当土体达到饱和,其内部应力不再发生变化。土体位移在淋滤的瞬时达到最大,并随着流体的入渗逐渐减小,然后趋于稳定(图 11(c))。位移最大值变化范围为 $6.31 \times 10^{-3} \sim 6.76 \times 10^{-3} \text{ mm}$,说明高

围压下固化污染土稳定性仍然很高。当流体完全入渗,土体达到饱和时,位移达到稳定。

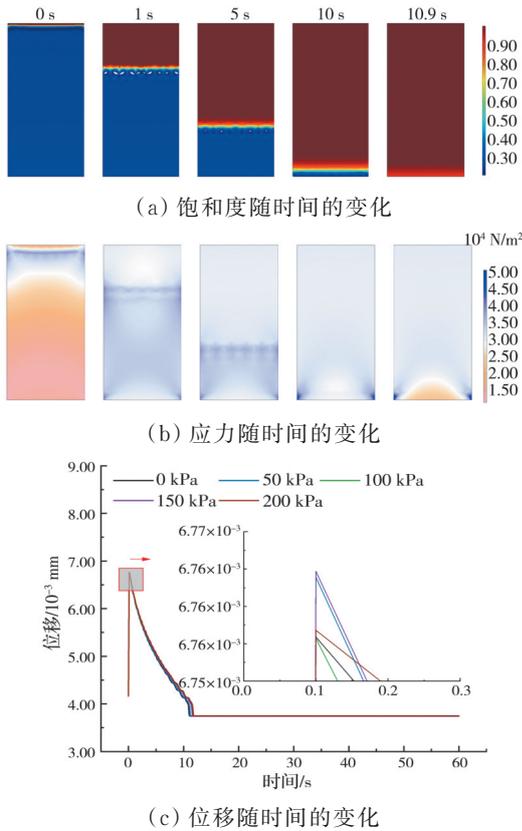


图 11 淋滤作用下固化污染土力学指标变化过程
Fig. 11 Variation process of mechanical indexes of solidified contaminated soil under leaching function

在淋滤作用下,不同浓度的固化污染土应力峰值随时间的变化规律相同,随着流体的入渗,土内应力峰值先减小、后增大,最终趋于稳定(图 12)。固化污染土内应力峰值最大在 $5.77 \times 10^4 \sim 6.07 \times 10^4 \text{ N/m}^2$,整体波动范围在 $9.17 \times 10^3 \sim 9.92 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 。淋滤作用下固化污染土的位移随着污染浓度的增加而增加。当土中污染浓度在 $0 \sim 150 \text{ mg/g}$ 时,固化污染土内位移最大波动值在 $1.73 \times 10^{-3} \sim$

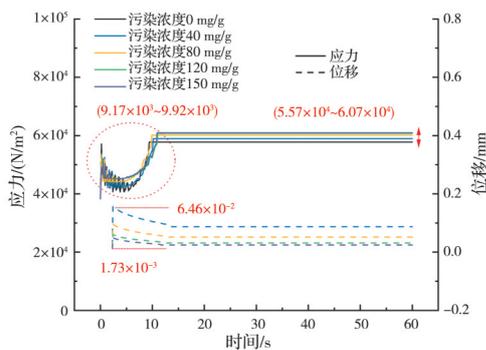
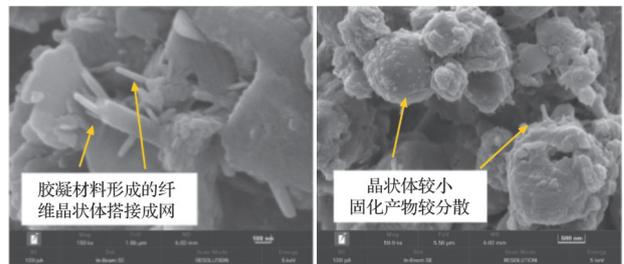


图 12 不同污染浓度下固化污染土应力和位移变化图
Fig. 12 Stress and displacement changes of solidified contaminated soil under different contamination concentrations

$6.46 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 。淋滤影响下,石灰和粉煤灰固化石油污染土的力学性能依旧满足《公路路基设计规范》(JTJ G30—2015)^[25]中二级公路上下路堤及地基土置换的强度要求和一般道路的容许工后沉降标准。

与不同围压下固化污染土位移变化规律相比(图 11(c)),污染浓度对土体位移的影响较明显。这是因为固化污染土的强度改善源于石灰、粉煤灰反应生成的凝胶材料^[26-27],低浓度固化污染土中,石灰、粉煤灰的吸附和固化反应受污染物的影响较小,生成的凝胶材料、胶凝材料较易相互搭接成网(图 13),改善整体效果。因此,在实际工程中,对于高浓度污染土,建议考虑增加固化配比及增强固化材料分布的均匀性,以保障处理效果。



(a) 污染浓度 40 mg/g (b) 污染浓度 120 mg/g

图 13 不同污染浓度的固化污染土 SEM 图
Fig. 13 SEM diagram of solidified contaminated soil with different contamination concentrations

2.3.3 渗流作用下固化污染土的土体稳定性

利用 COMSOL Multiphysics 中的辅助扫描功能,通过强度折减法来计算渗流作用下固化污染土的稳定性。运算过程中 F_s 不断增加,折减后的强度指标逐渐减小,当软件分析计算不收敛时,说明此时土体发生失稳,相应条件下的 F_s 即为固化污染土的稳定安全系数。

强度折减法计算公式为

$$C_F = C/F_s \tag{1}$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}(\tan \varphi/F_s) \tag{2}$$

$$\tau_F = C_F + \sigma \tan \varphi_F \tag{3}$$

式中: C_F 为折减后的土体黏聚力; φ_F 为折减后的土体内摩擦角; τ_F 为折减后的抗剪强度; F_s 为安全系数。

固化污染土在不同折减系数下的塑性应变情况如图 14 所示。当 F_s 为 9.2 时,土体出现塑性应变,当 F_s 为 10 时,应变达到最大,由于固化污染土内棒状和纤维状的固化产物结晶体能将土体联结成整体,土体在发生破坏时的轴向应力大于横向应力,破坏面呈 $45^\circ + \varphi/2$ 的开裂角度,与抗压强度试

验结果^[24]的破坏形态一致。再次证实固化污染土在淋滤条件下仍具有良好的力学稳定性。

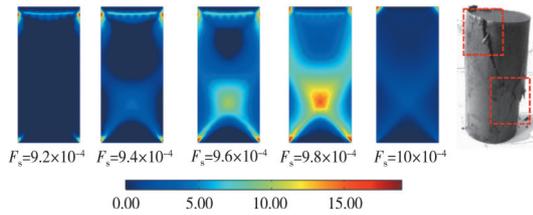


图 14 淋滤作用下固化污染土的塑性应变

Fig. 14 Plastic strain of solidified contaminated soil under leaching function

3 结论

1) 淋滤作用下未固化污染土中污染物具有不稳定性,易于迁移扩散,且存在大量迁出现象。石灰、粉煤灰固化对石油污染物的迁移控制效果良好,淋滤作用下仅存在微量污染物随水波动现象。固化污染土整体含油量波动率仅为 1.35%~2.76%,远小于未固化污染土的 24.28%~84.09%。石灰、粉煤灰固化作用可解决水环境对石油污染物赋存稳定性的影响。

2) 石油污染土力学稳定性差,初始应力条件下强度及变形分别为 $6.17 \times 10^3 \sim 2.76 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 和 $0.011 \sim 15.6 \text{ mm}$ 。淋滤作用下固化污染土的力学参数变化幅度与围压及污染物浓度呈正相关,但都仅在初始受力的 10 s 内存在波动,随后强度值稳定在 $5.77 \times 10^4 \sim 6.07 \times 10^4 \text{ N/m}^2$,位移最大波动值为 $1.73 \times 10^{-3} \sim 6.46 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 。淋滤影响下,石灰和粉煤灰固化石油污染土的力学性能依旧满足《公路路基设计规范》(JTJ G30—2015)中二级公路上下路堤及地基土置换的强度要求和一般道路的容许工后沉降标准。

3) 石灰、粉煤灰固化石油污染土在淋滤作用下力学稳定性良好, F_s 可达 10 以上。石灰、粉煤灰固化石油污染土可同时兼顾环境和工程需求,具有工程再利用潜力。

参考文献

[1] ZHOU J H, XU X Y, HUANG G M, et al. Oil degradation and variation of microbial communities in contaminated soils induced by different bacterivorous nematodes species [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 229: 113079.

[2] LI M, YU H M, ZHENG D, et al. Effects of salt and solidification treatment on the oil-contaminated soil: A case study in the coastal region of Tianjin, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312: 127619.

[3] LI Y Q, LI C L, XIN Y, et al. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 246: 114129.

[4] HOSSEINI F M M, EBADI T, ESLAMI A. Properties of fine soils contaminated with gas oil [J]. *Materials Testing*, 2017, 59(9): 803-810.

[5] MA J, LIU H, TONG L, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and *n*-alkanes in the soil-sediment profile of Jiangnan Oil Field, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(15): 13344-13351.

[6] 陈丽华, 周立辉, 张彧瑞, 等. 陇东油区包气带土壤对原油吸附行为[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(2): 56-60.

CHEN L H, ZHOU L H, ZHANG Y R, et al. Crude oil adsorption behaviors in the soil of Longdong oilfield [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2011, 47(2): 56-60. (in Chinese)

[7] 宁丽, 曾溅辉, 陈广. 柴油在土壤中迁移的试验模拟研究[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(3): 1-6.

NING L, ZENG J H, CHEN G. Simulated study on the migration process and effects of diesel oil on the soil properties [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(3): 1-6. (in Chinese)

[8] 潘峰, 陈丽华, 付素静, 等. 石油类污染物在陇东黄土塬区土壤中迁移的模拟试验研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 410-418.

PAN F, CHEN L H, FU S J, et al. A study on the transport performance of the petroleum contaminants in soil of the Longdong loess plateau [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 410-418. (in Chinese)

[9] 李敏, 孟德骄, 董一凡, 等. 石油污染物在滨海盐渍土中的迁移规律[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1473-1479.

LI M, MENG D J, DONG Y F, et al. Migration law of oil contamination in saline soil from inshore area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1473-1479. (in Chinese)

[10] 李梦姿, 蔡国庆, 李昊, 等. 考虑抗拉强度剪断的非饱和土无限边坡稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(4): 705-713.

LI M Z, CAI G Q, LI H, et al. Stability of infinite unsaturated soil slopes with tensile strength cut-off [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 705-713. (in Chinese)

[11] 张良以, 陈铁林, 张顶立. 降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(1): 70-77.

ZHANG L Y, CHEN T L, ZHANG D L. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(1): 70-

77. (in Chinese)
- [12] AHMAD S, BA-NAIMOON M S M, BAHRAQ A A, et al. Stabilization/solidification of petroleum oil-contaminated soil using different stabilizers to deliver a pavement subbase material [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47(10): 13687-13697.
- [13] 李敏, 王宸, 谢首斌. 石油污染水平对固化参数的需求分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊1): 3252-3261.
- LI M, WANG C, XIE S B. Analysis of requirement of oil contaminated level for solidified parameters [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup 1): 3252-3261. (in Chinese)
- [14] 李敏, 王宸, 谢首斌. 二灰固化石油污染盐渍土的力学增强演变机制[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2018, 35(2): 119-127.
- LI M, WANG C, XIE S B. Formation and development of oil contaminated saline soil solidified with lime and fly ash [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2018, 35(2): 119-127. (in Chinese)
- [15] 刘晓艳, 史鹏飞, 孙德智, 等. 大庆土壤中石油类污染物迁移模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(2): 120-124.
- LIU X Y, SHI P F, SUN D Z, et al. Transferring simulation of petroleum pollutants in soils of Daqing area [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2006, 30(2): 120-124. (in Chinese)
- [16] ABOUSNINA R M, MANALO A, SHIAU J, et al. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2015, 24(8): 833-845.
- [17] 李永霞, 郑西来. 土壤非饱和带柴油迁移的模拟实验[J]. *环境化学*, 2014, 33(11): 1841-1847.
- LI Y X, ZHENG X L. Simulated experiment on transport of diesel oil in unsaturated soil zone [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(11): 1841-1847. (in Chinese)
- [18] 李敏, 董一凡, 上官中华, 等. 石灰、粉煤灰改性对盐渍土吸附石油污染物行为的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(2): 53-59.
- LI M, DONG Y F, SHANGGUAN Z H, et al. Influence of property-modified lime and fly ash on oil absorption behaviors of saline soil [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(2): 53-59. (in Chinese)
- [19] 李敏, 孟德骄, 姚昕好. 基于温度效应下二灰固化石油污染滨海盐渍土力学特性优化固化需求[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1203-1210.
- LI M, MENG D J, YAO X Y. Optimization of requirement for two kinds of ash solidified materials used in oil contaminated saline soil considering temperature sensitivity [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1203-1210. (in Chinese)
- [20] LI M, MA C, SUN Z M, et al. Mechanical properties distribution of lime-fly ash solidified oil contaminated soil in a coastal environment [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(7): 3027-3042.
- [21] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [22] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. *岩土力学*, 1991, 12(3): 11-23.
- YANG Z Q, GUO J Y. The physio-mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1991, 12(3): 11-23. (in Chinese)
- [23] 张豫川, 姚永国, 周泓. 长龄期改良黄土抗剪强度与渗透性试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增刊2): 170-176.
- ZHANG Y C, YAO Y G, ZHOU H. Experimental study of shear strength and permeability of improved loess with long age [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Sup 2): 170-176. (in Chinese)
- [24] 谢首斌. 石灰粉煤灰固化石油污染滨海盐渍土的力学特性[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- XIE S B. Mechanical properties of petroleum-contaminated coastal saline soil solidified by lime and fly ash [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [25] 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [26] 王宸. 无机材料固化石油污染盐渍土力学性能演变及影响因素分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- WANG C. Evolution of mechanical properties of petroleum-contaminated saline soil solidified by inorganic materials and analysis of influencing factors [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] OLUWATUYI O E, OJURI O O, KHOSHGHALB A. Cement-lime stabilization of crude oil contaminated Kaolin clay [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(1): 160-167.