

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0740

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

李 敏^{1,2}, 孟德骄³, 姚昕好¹

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 天津辰创环境工程科技有限责任公司, 天津 300400)

摘 要: 温度是影响石油污染土性能的重要因素。依托滨海地区特有气候环境特点, 借助抗压强度指标及应力-应变分布, 从抗温敏性角度, 优化石油污染滨海盐渍土对二灰的固化需求。研究表明: (1) 在-20~40 °C 温度变化范围内, 石油污染土抗压强度波动幅度高达 1 倍, 采用二灰进行固化处理后, 抗压强度波动缩小至 10%~20%。二灰固化作用可将热敏性物质(石油、水、盐)吸附、包裹于胶体内外, 增强对环境温度变化的抵抗性。(2) 石油污染土及固化石油污染土的无侧限抗压强度均随温度变化呈先减小后增大趋势, 10 °C 为强度转折点, 也即最低点, 实际工程中应加以重视。(3) 温度作用下, 固化石油污染土呈应变软化型破坏, 且随温度及污染水平的增大, 塑性变形阶段延长, 轴向应变增大, 出现四周型层状破坏。(4) 土体自身的污染程度影响固化效果, 高污染条件下抗压强度波动幅度约为 40%, 实际工程中应依据土体自身的污染程度调整固化配比。低污染土的固化配比选取只需略高于未污染土, 过高固化配比并不利于增强稳定性, 同比率石灰掺量的改变较粉煤灰的更有助于增强稳定性。污染水平≤6%的石油污染盐渍土, 可选固化配比为石灰 10%+粉煤灰 20%。

关 键 词: 温敏性; 固化石油污染土; 无侧限抗压强度; 应力-应变曲线

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 04-1203-08

Optimization of requirement for two kinds of ash solidified materials used in oil contaminated saline soil considering temperature sensitivity

LI Min^{1,2}, MENG De-jiao³, YAO Xin-yu¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Hebei Research Center of Civil Engineering Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. Tianjin Chenchuang Environment Engineering Science & Technology Co., Ltd., Tianjin 300400, China)

Abstract: Temperature is an important factor that affects properties of oil contaminated soil. This study considered the special characteristics of the climate environment in the coastal area and used unconfined compressive strength and stress-strain distribution to optimize the requirement for two kinds of ash solidified materials, and the temperature sensitivity was used as an evaluation criterion. Results indicate that the compressive strength of the oil contaminated soil significantly fluctuates, and it is up to two times in the temperature range of -20~40 °C. However, the fluctuation reduces to 10%~20% after soil solidification with two kinds of ash. Solidified materials can adsorb and enclose the temperature sensitive substances (oil, water and salt) in the gel body and even outside, and then it can enhance the resistance to the variation of environmental temperature. The unconfined compressive strengths of oil contaminated soil and solidified soil decrease first and then increase with the increasing of temperature, and 10 °C is the turning point, which is the lowest point. The results suggest that this temperature should be of particular concern in practical engineering. Under the action of temperature, the failure mode of solidified oil contaminated soil is strain-softening. With the increase of temperature and the contaminated level, the plastic deformation stage is prolonged, and the axial strain gradually increases. Finally, the surrounding layered damage occurs. The contaminated level of soil itself affects the solidified effect, and the fluctuation of compressive strength under a high level of contamination is about 40%. Therefore, in actual engineering, the solidified requirement should be adjusted according to the contaminated level. As to the soil with low contamination, the solidified requirement is only slightly higher than that

收稿日期: 2019-04-24

修回日期: 2019-06-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51978235); 河北省自然科学基金 (No. E2018202274); 天津市自然科学基金 (No. 17JCZDJC39200)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51978235), the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2018202274) and the Natural Science Foundation of Tianjin (17JCZDJC39200).

第一作者简介: 李敏, 女, 1985 年生, 博士, 副教授, 主要从事污染土方面的处置研究。E-mail: limin-0409@163.com

of the uncontaminated soil, and too much solidification for the soil with low contamination is often counterproductive. Lime has more contribution than fly ash to soil stability under the same additive to soil ratio. As to the oil-contaminated saline soil with 6% contamination, the optional solidified condition is 10% lime +20% fly ash.

Keywords: temperature sensitivity; solidified oil contaminated soil; unconfined compressive strength; stress-strain curve

1 引言

近些年来,石油抛洒或泄露于环境中的现象日益严重,对污染土进行固化改性,并作为土工材料用于路堤或者路基中,是一种经济环保的处置方式^[1]。石油污染土具有不稳定性^[2]。混有石油的路面,在低温环境下,会变脆变硬,甚至丧失应力松弛能力,引发缩裂病害^[3];在高温环境下,石油黏度降低,易引起地面沉降、变形^[4]。增强固化石油污染土对环境变化的抵抗性,建立适应于环境变化的固化需求,是实现污染土处置的关键问题之一。

环境温度是影响石油污染土物理力学性质的关键因素^[5]。石油黏度对温度十分敏感,其改变直接影响着土中介质的吸附解吸过程、水相的分布及状态^[6]。在固定吸力下,温度升高,水的黏滞性降低,孔隙比减小,密度增大^[7]。温度越低,石油黏度越大,流动性越低,油膜厚度随之增大^[8-9]。

环境温度也是影响土体力学性质的因素之一。冻土单轴抗压强度是温度的幂指数关系^[10]。随温度升高,土体吸力增加,排水剪切和不排水剪切强度增大^[11],动力特性提高,回弹模量增大^[12]。冻融作用后,黏土孔隙比降低,而平均孔径提高^[13]。低含水率非饱和土易发生热固结现象,土中水分重新迁移,粒间水胶连接力增强,抗压强度增大^[14]。

环境温度对石油污染土的影响不可忽视,目前的研究多集中于冻融、大温差条件下未污染的土体,对大跨度温度作用下污染土性质的分布研究较少。本文以天津大港地区的石油污染盐渍土为研究对象,结合天津地区近 10 年的气温变化情况,开展 -20~40 °C 阶梯环境温度下固化石油污染土的无侧限抗压强度试验,以分析环境温度对固化石油污染土强度及应力-应变曲线特征的影响,探索环境温度及石油污染水平共同作用下,对石灰及粉煤灰的固化需求。该研究成果可为石油污染土的科学处置提供技术支持。

2 试验的材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 石油

石油取自天津市大港油田,为混合石油(轻质油),元素组成见表 1。

表 1 石油的主要元素组成百分比

Table 1 Element compositions of oil

元素	C	H	S	N
组成百分比/%	85.76	13.40	0.12	0.23

2.1.2 盐渍土

盐渍土取自天津滨海新区,其基本物理性质指标见表 2 和图 1。

表 2 滨海盐渍土的基本性质

Table 2 Physical properties of inshore saline soil

含盐量 /%	烘干后含水率 /%	稠度指标		
		塑限/%	液限/%	塑性指数
2.64	2	18.5	31.6	13.1

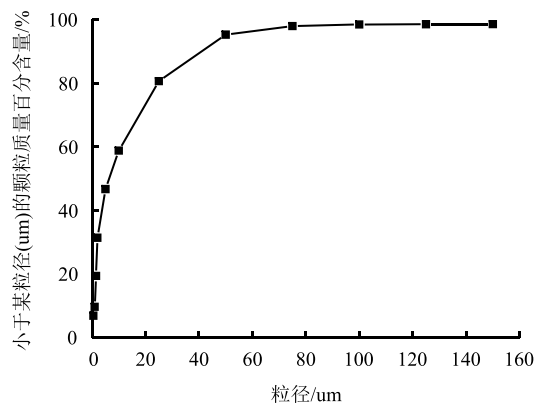


图 1 盐渍土粒径分布图

Fig.1 Particle size distribution of the saline soil

2.1.3 石灰

石灰主要成分为 CaO (见表 3)。石灰对石油污染物具有不可逆性的化学吸附作用^[15],石灰水解反应可增大溶液的碱性,激发土体活性^[16]。参考已有关于石灰固化土文献^[17],确定石灰掺量为 8%、10%。

表 3 石灰的主要化学成分

Table 3 Chemical compositions of lime

成分	SiO ₂	CaO	MgO	SO ₃
百分比/%	1.08	95.32	0.68	0.01

2.1.4 粉煤灰

粉煤灰取自天津杨柳青电厂,主要由煤灰和炉渣组成(质量比是 7:3),平均比表面积为 0.812 m²/g,详细参数见表 4。

粉煤灰含有大量的以活性氧化物 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主的玻璃微珠，对石油污染物具有较强的物理吸附性，已被广泛的应用于含油废水的处置^[18]。

粉煤灰的活性效应及微集料效应，有助于降低土体热膨胀系数^[19]。参考已有文献，确定粉煤灰掺量为 15%、20%、25%。

表 4 粉煤灰的物理化学性质
Table 4 Physico-chemical properties of fly ash

比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)		平均孔径/nm		总孔容积/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)		化学成分含量(质量分数)/%						
炉渣	煤灰	炉渣	煤灰	炉渣	煤灰	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5
1.35×10^{-1}	1.10	13.38	8.15	4.50×10^{-4}	2.25×10^{-5}	52.58	30.32	8.73	2.33	0.73	1.52	0.84

2.2 试验方案

综合考虑石油污染事故报道中的污染性及盐渍土自身的饱和度^[20]，控制土体含水率为 14%，石油掺量为 3%、6%、9%。

依据《公路土工试验规程》(JET E40—2007)^[21]，盐渍土风干过 2 mm 筛，将石油和水依次均匀拌入盐渍土，分别密封静置 24 h，以模拟石油污染土；然后，加入石灰、粉煤灰，拌和均匀后再次密封静置 24 h，缓解后期因石灰吸水膨胀造成土体开裂的影响。采用双向静压法制样，试样直径为 39.1 mm，高为 80 mm，干密度为 1.7 g/cm^3 。借助恒温恒湿养护箱对土样进行养护，整个养护期间的温度控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，湿度为 90%^[21]，养护龄期为 28 d。

据近 20 年滨海地区的气候环境变化，考虑四季温差、极值温度及平均温度的分布，确定模拟环境温度为 -20 、 -10 、 0 、 10 、 20 、 30 、 40°C 。养护后试样在各温度下放置 48 h 后取出，置于 TSZ-2.0 型应变控制式三轴仪测定无侧限抗压强度及变形参数，量力环系数为 10.52 N/0.01 mm ，剪切速率为 2 mm/min ，以变形量 0.5 mm 为间隔读取应力值。

测试过程中，为维持统一的环境温度条件，解决温差突变的影响，对强度测试仪进行改装，在强度测试仪外围搭建恒温槽，并包裹保温材料。恒温槽内部设置 S 型水流盘管，利用恒温水浴实现测试过程中的温度控制，改装后的试验装置见图 2。

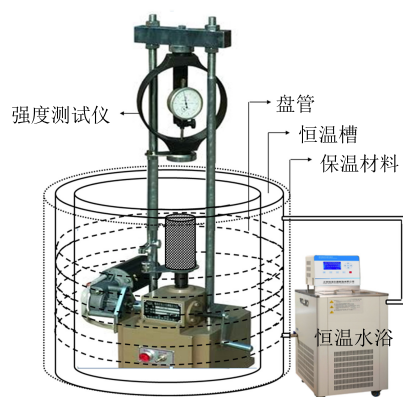


图 2 温控条件下的强度测试仪

Fig.2 Strength tester under temperature control condition

3 试验及结果讨论

3.1 环境温度作用下污染土及固化污染土强度分布

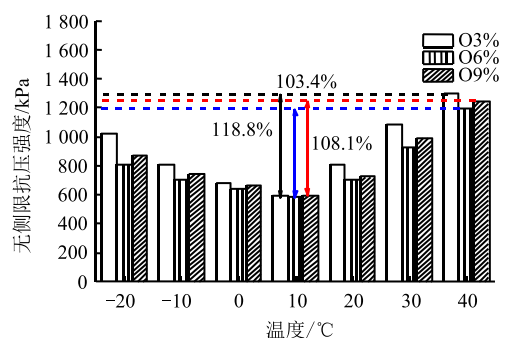
石灰粉煤灰固化可大幅度提高石油污染土的强度，强度指标满足规范要求。污染土和固化污染土的抗压强度随环境温度改变的变化趋势一致，随温度从 -20°C 升高，污染土和固化污染土无侧限抗压强度呈先减小后增大趋势， 10°C 为转折点也为强度的最低点，在实际工程中应予以重视（见图 3）。

分析其原因，环境温度 10°C 以下，热敏性物质体积收缩，分子间距离减小，相互之间的作用力增大，一部分中间相态的碳氢化合物在低温下转变为液体，密度增大，黏滞性增强，促进了油土与土体颗粒之间的胶结作用，固化污染土的无侧限抗压强度增大^[6]；当环境温度降低位于 0°C 以下，土中的水发生相变，形成冰晶并逐渐形成冰体，且温度越低，冰的强度越高，冰与土颗粒之间的黏聚力持续增强，固化土的抗压强度随温度的降低而不断增大^[22]；当环境温度高于 10°C ，土体水分的蒸发加快，同时因为土中存在着较多的封闭气体，使得孔隙水蒸发的表面积增大，土颗粒间的水化膜变薄，黏结力增加，土体强度增大。另一方面，对于盐渍土而言，随环境温度的升高，土中含水率降低，液相中的可溶盐浓度增大，引起盐析出，使颗粒发生胶结，进而包裹成黏土团块并阻塞孔隙，形成一种连锁结构，导致土的胶结作用加强，强度增大^[23-24]。

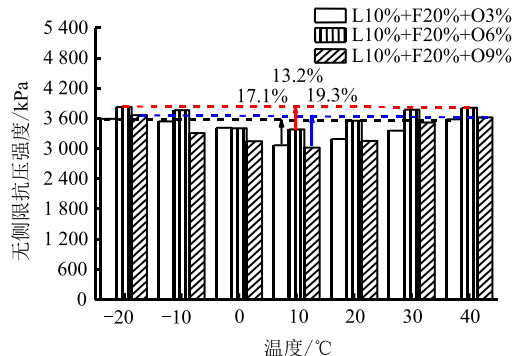
从整体波动看（图 3 中虚线部分），石油污染盐渍土的无侧限抗压强度随环境温度的波动范围高达 100% 以上，石油污染土对环境具有敏感性，这一点和谢首斌等^[2]研究结果一致。二灰固化处理可有效改善污染土对环境变化的抵抗性，经二灰固化后，污染土无侧限抗压强度随环境温度的波动显著减小，波动幅值维持在 10%~20%。

对比具体数值可以发现，增大固化配比虽有利于增大抗压强度值，但不一定有利于增强其在环境变化中的稳定性。如对于石油掺量为 3% 的固化污

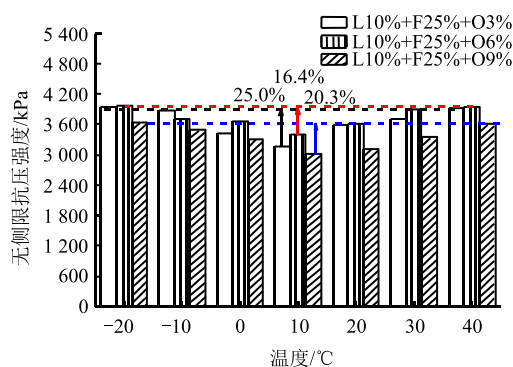
染土,在配比石灰 10%+粉煤灰 20%条件下,强度随温度的最大波动为 17.1%,当固化配比增大时,波动也随之增大至 25%,过高配比不利于提高固化污染土的力学稳定性。建议实际工程中,应统筹考虑基本强度需求和环境稳定性。



(a) 污染土的抗压强度分布



(b) 石灰 10%+粉煤灰 20%固化污染土强度分布



(c) 石灰 10%+粉煤灰 25%固化污染土强度分布

注: L—石灰; F—粉煤灰; O—石油。

图 3 污染土及固化污染土的无侧限抗压强度随环境温度的变化分布

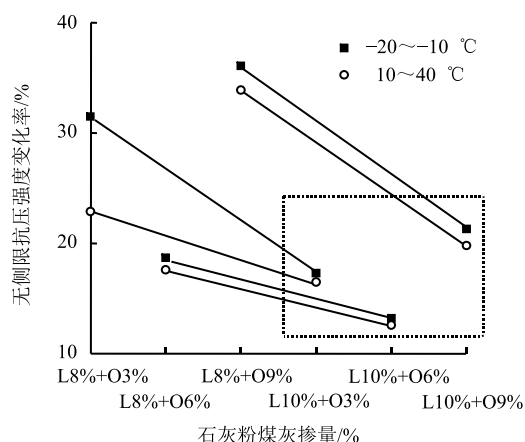
Fig.3 Unconfined compressive strength as a function of temperature for different soils

3.2 环境温度作用下的固化需求分析

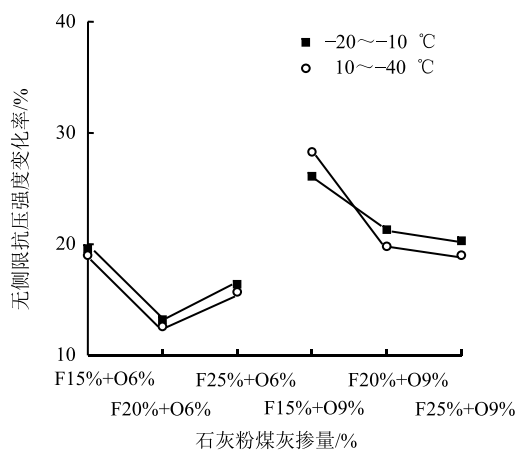
分别对比不同配比条件下固化污染土因环境温度改变而引起的强度变化率(以 10 °C 下固化土无侧限抗压强度为基础,分别计算正负温下强度最大变化百分比)(见图 4),固化土强度随环境温度

变化率见表 5。

随石灰含量的增大,固化污染土对温度的敏感性降低(见图 4(a))。对于 3%、6%及 9%石油污染土,在石灰的掺量增加 2%条件下,环境温度所引起的无侧限抗压强度变化率由 41%~20%下降并维持在 17%左右,10%石灰配比有助于增强正负温条件变化下固化污染土的抗温敏性。对比-20~-10 °C 和 10~-40 °C 两个阶段,可以发现,低温条件下所引起的强度波动要大于高温条件,且 3%石油掺量固化污染土的强度波动幅度最大,6%和 9%石油掺量固化污染土在两阶段的波动值接近。



(a) 温度影响下强度与石灰掺量的关系



(b) 温度影响下强度与粉煤灰掺量的关系

图 4 环境温度变化与固化配比间的关系曲线

Fig.4 Relationship between environmental temperature and solidified content

分析其原因,当石灰的掺量较低时,土颗粒周围的双电层较厚,水化产物中具有胶结作用的硅酸凝胶等胶体占有的比例较小,固化作用对石油污染物的吸附、包裹能力有限,粒间作用以斥力占优势,稳定性差;当石灰掺量增大,火山灰反应生成的水化产物 C-S-H 等凝胶在水环境中硬化程度增强,在土颗粒外围形成保护膜,石油类污染物被固化作用

牢牢凝聚在土体内部，流动性降低，石油及自由水的黏滞系数在不同温差下的变化率减小，并且，水化产物堵塞了一小部分孔隙，提高了整体性，缓和了其热膨胀冷收缩造成的局部应力破坏，固化污染土对温度的敏感性减弱。

随粉煤灰掺量增加时，固化石油污染土无侧限抗压强度变化率随温度改变先降低后增大，且正负温阶段的波动趋势一致（见图 4(b)）。说明存在适宜固化配比，过多的粉煤灰掺量不利于维持固化污染土在环境中的稳定性。分析其原因，粉煤灰含量由 15% 增长到 20%，土体中的活性成分增多，水化反应充足，石油、自由水被结晶包裹的效果更好，其黏滞系数在不同温度下的变化幅度降低；而且粉煤灰表面疏松多孔，比表面积大，具极强的物理吸附性，能与油脂类物质发生强结合，降低其对温度的敏感性。当粉煤灰含量进一步增大，此时石油和随龄期延长所生成的反应产物在玻璃微珠表面和内部积累，阻碍反应继续，减缓了石灰的消耗，凝胶体的结晶结构受到影响，同时土中自由水含量增大，石油污染物黏度增大，固化石油污染土对环境温度的敏感性增加。

表 5 不同环境温度下石灰粉煤灰固化污染土强度变化率
Table 5 Strength change rates of lime- and fly ash-solidified contaminated soil under different temperatures

土样类型	强度变化率/%						
	-20 ℃	-10 ℃	0 ℃	10 ℃	20 ℃	30 ℃	40 ℃
L10%+F15% +O6%	19.6	13.6	11.9	0	7.4	8.8	19
L10%+F20% +O6%	13.2	11.3	0.6	0	5	11.5	12.6
L10%+F25% +O6%	16.4	9.2	7.2	0	6.4	14.6	15.7

结合图 4 和表 5，还可发现，固化配比的确定应随土中污染物含量的增大而增大，同比率石灰掺量的改变较粉煤灰的更有助于增强稳定性。以 9% 石油含量的固化污染土为例，石灰掺量为 8%、10% 时，固化石油污染土无侧限抗压强度变化率由 35.1%、33% 降为 23.2%、22.1%。同时，6% 石油含量固化污染土，在石灰 10%+粉煤灰 20% 条件下无侧限抗压强度随温度的变化率最小，但对于 9% 石油含量固化污染土，采用 25% 粉煤灰固化污染土的力学稳定性要优于 20% 粉煤灰的。

低污染条件下，土颗粒表面覆盖的油层较薄，养护过程中水蒸气可通过表面进入土体内部，石油乳化程度增大，流动性降低，黏度上升，温度是高

黏度石油主要的影响因素，石油黏度增减的拐点与含水率、二灰、石油掺量动态变化，并不固定。伴随污染加剧，污染物在土体中所占比例增大，敏感性增强；同时，土颗粒因被大量石油包裹，油膜变厚，形状更加圆滑，棱角减少，颗粒间联结减弱，吸附性降低，外界进入土中的水蒸气降低，石油乳化程度降低，黏度减小，同时，养护箱内的水与 CO₂ 难以进入土体内部与固化材料发生反应，延缓了火山灰反应的进行和速率，产物分布较分散，分子间距离增大，需适当增加二灰的掺量以有效吸附石油促进固化反应进行。

3.3 环境温度作用下固化污染土变形破坏过程

温度作用下，固化污染土的应力-应变曲线形态接近，均为应变软化型，故以石灰 10%+粉煤灰 20%+石油 3%、6%、9% 的固化土在不同温度下的应力-应变曲线为例（见图 5）。固化污染土的应力-应变曲线可划分为 3 个阶段：抵抗性变形阶段，0%~0.8% 变形阶段，随应力的增大，土体能维持一定变形抵抗性；迅速变形阶段，1.0%~2.5% 变形阶段，应力逐渐增大并达到峰值，试样土体屈服，产生细小裂纹；破坏变形阶段，试件产生斜向贯通裂纹，试件破坏。环境温度对固化土的抗变形能力影响显著，随环境温度的升高，破坏应变表现为先减小后增大，在 10 ℃ 时，抗变形性能最弱。

对比石灰 10%+粉煤灰 20%+石油 6%、石灰 10%+粉煤灰 25%+石油 9% 的固化土在环境温度为 -20、0、10、20、40 ℃ 的破坏形态（见图 6）。石灰粉煤灰联合固化石油污染土均表现为剪切破坏，环境温度较低时（-20、0 ℃），呈脆性破坏，开始破坏时，斜向出现不贯通的细小裂纹并向纵深扩展，同时在土体下部出现少量竖向微裂隙，随后试件裂隙贯通，裂缝宽度及破坏面的面积较小。随着环境温度的增大（10、20、40 ℃），固化土在受压阶段产生明显的横向变形，呈现出塑性，轴向应变增大，裂缝宽度及斜向断面面积增大，且随着石油污染水平的增大，破坏面的形状更加不规则化，破坏角近似呈现 $45^\circ + \varphi/2$ 。

3.4 固化石油污染土抗敏机制探讨及建议

固化石油污染土抗敏机制分析（见图 7）：固化材料掺量较低时，水化反应的进行在土颗粒表面生成了凝胶物质，针状晶体在大孔隙中交织搭接在一起，土颗粒间以面-面或面-边接触为主，结构较为松散，有较大的孔隙通道，固化土中的热敏性物质暴露在土体表面，其黏度受环境温度变化的影响较大，稳定性差。

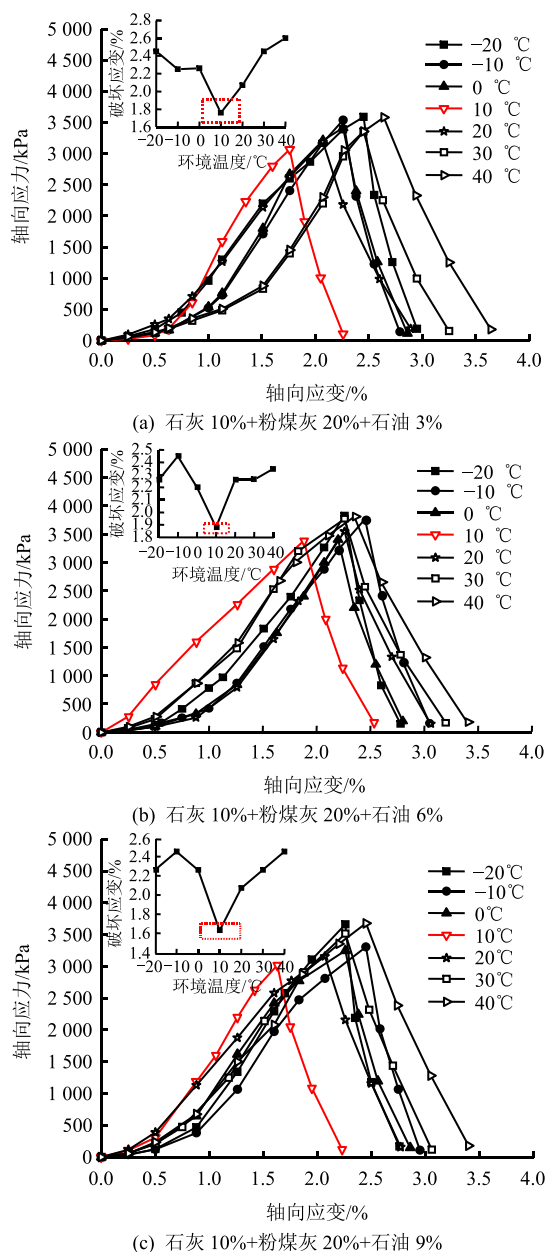


图5 环境温度作用下固化污染土应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves for solidified contaminated soil under different temperatures

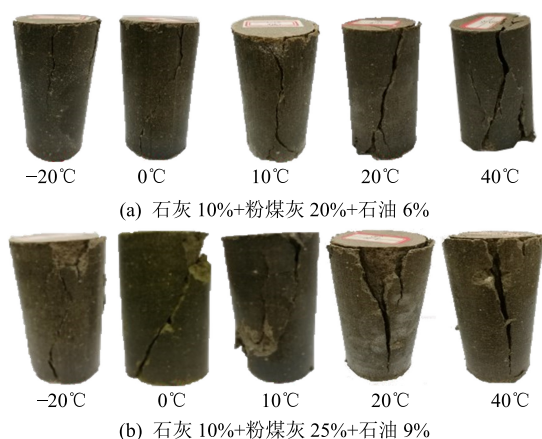


图6 温度作用下固化污染土破坏形态对比
Fig.6 Failure modes of solidified contaminated soils under different temperatures

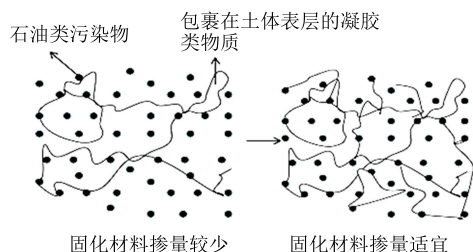
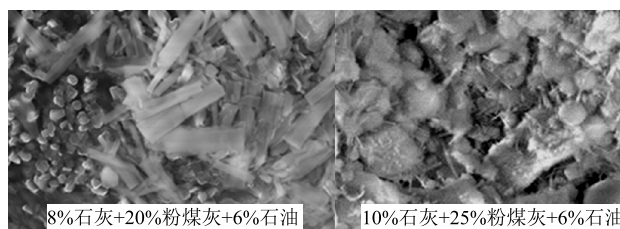


图7 固化石油污染土抗敏机制示意图
Fig.7 Anti-sensitivity mechanism of solidified contaminated soil

固化材料掺量适宜, 凝胶物质在土颗粒形成黏弹性长链状、连续性的丝状薄层, 分布更加均匀, 吸附性增强, 石油类污染物被包裹的更加密实, 流动性降低, 并且减少了孔径并改善了孔结构, 固化土对热敏性物质的吸收和容纳能力降低, 环境温度变化对固化石油污染土抗压强度的影响减弱。

污染水平较大时, 石油包裹固化材料和土颗粒形成较大的团聚体, 暴露在土体表面, 其黏度系数易受环境温度变化的影响; 碎屑物质被石油黏连在土颗粒表面, 棱角较为圆润, 固化土的黏性降低, 进一步证明大量石油阻碍了水分向固化材料内部的扩散, 引起了石灰水化反应的迟滞性, 石油类污染物与固化土之间的空隙增大, 对环境温度的敏感性进一步增强。

建议: 对于石油类污染土, 在选取固化配比时, 需综合考虑当地的气候环境特点及实际土体的污染程度, 在以提高土体力学指标为目的的基础上, 应更多关注固化处置后土体的环境力学稳定性。对于污染程度较轻的土体, 固化配比的选取可参考当地未污染土的经验指标; 对于污染较重土体, 可适量提高固化配比, 但不能过多。对于具体的界值范围是课题组下一步研究重点。

4 结 论

(1) 环境温度对石油污染土力学性能影响显著, 在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内, 石油污染土的抗压强度波动幅度高达1倍。采用石灰粉煤灰进行固化处置, 可有效改善污染土随环境温度改变的波动性, 抗压强度波动缩小至10%~20%左右。二灰固化作用可将热敏性物质(石油、水、盐)吸附、包裹于

胶体内外, 增强对环境温度变化的抵抗性。

(2) 固化石油污染土也需要关注环境温度的影响。随环境温度升高, 固化污染土的抗压强度及破坏应变均先降低后增大, 10℃为转折点, 也是强度及破坏应变最低点。当环境温度<10℃, 随温度降低, 油水的黏度升高, 黏聚力增大, 抗压强度增大, 0℃以下, 土中的水冻结成冰, 成为固化污染土强度增大的主要原因。当环境温度>10℃, 随温度升高, 胶体、土颗粒、石油间胶结力增大, 形成一种连锁结构, 增强力学强度。

(3) 温度作用下, 固化污染土的破坏过程表现为剪切软化型, 由抵抗变形、迅速变形、破坏变形3个阶段组成。随温度升高, 污染水平增大, 固化土在受压阶段产生更多横向变形, 脆性破坏逐渐转变为塑性, 裂缝宽度及斜向断面面积增大, 出现四周型层状破坏。

(4) 土体自身的污染程度影响固化效果, 高污染条件下抗压强度波动幅度约为40%, 实际工程中应依据土体自身的污染程度调整固化配比, 过高固化配比并不利于增强稳定性, 同比率石灰掺量的改变较粉煤灰的更有助于增强稳定性。低污染土的固化配比选取只需略高于未污染土, 污染水平≤6%的石油污染盐渍土, 可选固化配比为石灰10%+粉煤灰20%。

参 考 文 献

- [1] 童玲. 石油污染含水介质的水理和力学特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
TONG Ling. Study on water-physical and mechanical properties of oil-contaminated soils[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [2] 谢首斌, 李敏, 杜红普, 等. 环境温度对石油污染滨海盐渍土强度及变形特性的影响[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 616-621.
XIE Shou-bin, LI Min, DU Hong-pu, et al. Influence of environment temperature on strength and deformation of saline soil in inshore contaminated by petroleum[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(4): 616-621.
- [3] 杨光. 季冻区工厂化废橡胶粉/SBS 复合改性沥青 (CR/SBSCMA)及混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
YANG Guang. Study on the performance of industrialized rubber/SBS composite modified asphalt (CR/SBSCMA) and asphalt mixture in seasonal freezing regions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [4] 刘春. 城市热岛环境中土体温度场、强度和变形的数值模拟与图像分析[D]. 南京: 南京大学, 2012.
LIU Chun. Image analysis and numerical simulation of soil temperature field, strength and deformation in urban heat island environment[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [5] 周志琴. 影响石油产品运动黏度测量准确性的因素及改进措施[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(9): 33-35.
ZHOU Zhi-qin. The factors and improvement measures that affect the accuracy of the kinematic viscosity measurement of petroleum products[J]. **Total Corrosion Control**, 2017, 31(9): 33-35.
- [6] 张鹏, 李春城, 李国玉, 等. 冻融循环对多年冻土区石油迁移影响试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1325-1331.
ZHANG Peng, LI Chun-cheng, LI Guo-yu, et al. Experimental study of the influences of freeze-thaw cycles on migration process of petroleum contaminants in permafrost regions[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2016, 38(5): 1325-1331.
- [7] 姚仰平, 牛雷, 杨一帆, 等. 考虑温度影响的非饱和土本构模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2881-2888.
YAO Yang-ping, NIU Lei, YANG Yi-fan, et al. Constitutive model for unsaturated clays considering temperature effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 2881-2888.
- [8] 刘志明, 向晶, 杨真, 等. 原油黏度变化影响因素概述[J]. 化工技术与开发, 2014, 43(11): 36-39.
LIU Zhi-ming, XIANG Jing, YANG Zhen, et al. Effect factors summarization of crude oil viscosity change[J]. **Technology & Development of Chemical Industry**, 2014, 43(11): 36-39.
- [9] 陈波, 李红军. 油品运动粘度与温度关系试验报告[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(11): 238-239.
CHEN Bo, LI Hong-jun. Test report on the relationship between viscosity and temperature of oil[J]. **China Petroleum and Chemical Standard and Quality**, 2012, 33(11): 238-239.
- [10] SAYLES F H. Creep of frozen silt and clay[R]. [S. l.]: USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1974.
- [11] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, BOUAZZA A. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft bangkok clay[J]. **Engineering Geology**, 2007, 89(1-2): 144-154.

- [12] LALOUI L, LEROUEIL S, CHALINDAR S. Modelling the combined effect of strain rate and temperature on one-dimensional compression of soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(12): 1765-1777.
- [13] TANG Y, YAN J. Effect of freeze-thaw on hydraulic conductivity and microstructure of soft soil in Shanghai area[J]. **Environment Earth Science**, 2015(73): 7679-7690.
- [14] 颜荣涛, 张炳晖, 杨德欢, 等. 不同温-压条件下含水合物沉积物的损伤本构关系[J]. **岩土力学**, 2018, 39(12): 4421-4428.
- YAN Rong-tao, ZHANG Bing-hui, YANG De-huan, et al. Damage constitutive model for hydrate-bearing sediment under different temperature and pore pressure conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(12): 4421-4428.
- [15] 高国瑞. 水泥固化/稳定化工业炼油废渣污染土的试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- GAO Guo-rui. Experimental study on cement solidification/stabilization process refinery waste contaminated soil[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [16] 易耀林, 李晨, 孙川, 等. 碱激发矿粉固化连云港软土试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(9): 1820-1826.
- YI Yao-lin, LI Chen, SUN Chuan, et al. Test on alkali-activated ground granulated blast-furnace slag(GGBS) for lianyungang soft soil stabilization[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1820-1826.
- [17] 王沛, 王晓燕, 柴寿喜. 滨海盐渍土的固化方法及固化土的偏应力-应变[J]. **岩土力学**, 2010, 31(12): 3939-3944.
- WANG Pei, WANG Xiao-yan, CHAI Shou-xi. Solidifying methods for inshore saline soil and its deviator stress-strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3939-3944.
- [18] 刘荣. 原材料对碱激发粉煤灰/矿渣复合体系的影响[D]. 广州: 广州大学, 2017.
- LIU Rong. The effect of raw materials on alkali-activated fly-ash/slag blended system[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [19] 丁沙. 低温度敏感性混凝土的制备技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- DING Sha. Study on preparation technology of low temperature sensitive concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [20] 李敏, 王宸, 杜红普, 等. 石灰粉煤灰联合固化石油污染滨海盐渍土的力学特性[J]. **岩石力学与工程学报**, 2017, 36(增刊 1): 3578-3586.
- LI Min, WANG Chen, DU Hong-pu, et al. Mechanical properties of oil contaminated saline soil solidified with lime and fly ash[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(Suppl. 1): 3578-3586.
- [21] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [22] 刘艳章, 郭赟林, 黄诗冰, 等. 冻融作用下裂隙类砂岩断裂特征与强度损失研究[J]. **岩土力学**, 2018, 39(增刊 2): 62-71.
- LIU Yan-zhang, GUO Yan-lin, HUANG Shi-bing. Study of fracture characteristics and strength loss of crack quasi-sandstone under freeze-thaw cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl. 2): 62-71.
- [23] 邵玉娴, 施斌, 高磊, 等. 温度对非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. **高校地质学报**, 2009, 15(2): 213-217.
- SHAO Yu-xian, SHI Bin, GAO Lei, et al. Laboratory study on influence of temperature on shear strength of unsaturated clayey soil[J]. **Geological Journal of China Universities**, 2009, 15(2): 213-217.
- [24] 牛江宇, 靳鹏伟, 李栋伟, 等. 冻结盐渍砂土单轴强度特性研究[J]. **冰川冻土**, 2015, 37(2): 428-433.
- NIU Jiang-yu, JIN Peng-wei, LI Dong-wei, et al. Study of the uniaxial compressive strength of frozen saline sandy soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2015, 37(2): 428-433.