

连云港徐圩港区海相软土固化特性及 强度劣化机理研究*

杨黎¹, 张辉¹, 陈永辉², 史江伟², 陈龙²

(1. 中交第三航务工程局有限公司江苏分公司, 江苏连云港 200042;

2. 河海大学, 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210024)

摘要: 依托连云港徐圩港区二港池多用途泊位转运区软基处理工程, 开展海相软土固化、干湿和冻融循环试验, 研究水泥混掺石灰、粉煤灰和石膏固化土的固化特性和强度劣化机理。结果表明: 水泥和石灰混掺的固化效果、干湿循环耐久性最优, 水泥和粉煤灰次之, 水泥和石膏最差; 水泥+石灰固化土 28 d 龄期强度分别为水泥+粉煤灰、水泥+石膏固化土强度的 2.3~2.9 倍、4.7~7.8 倍; 经历 1 次和 5 次干湿循环后, 固化土无侧限抗压强度分别降低了 10.0%~51.7% 和 28.8%~69.9%, 表明第 1 次干湿循环对固化土强度影响最为显著; 5 次冻融循环后, 固化土动弹性模量降幅为 56.3%~60.3%, 质量损失率为 10.9%~14.0%; 干湿、冻融循环后, 固化土微观结构遭到破坏、土体孔隙增加是其强度降低甚至破坏的主要原因。

关键词: 海相软土; 固化; 强度; 干湿循环; 冻融循环

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0157-08

Solidification characteristics and strength deterioration mechanism of marine soft soil in Xuwei Port, Lianyungang

YANG Li¹, ZHANG Hui¹, CHEN Yonghui², SHI Jiangwei², CHEN Long²

(1. Jiangsu Branch, CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Lianyungang 200042, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the soft soil foundation treatment project of the multi-purpose transfer area in the second harbor basin of Xuwei Port in Lianyungang, we carry out the solidification, dry-wet and freeze-thaw cycle tests of marine soft soil, and study solidification characteristics and strength deterioration mechanism of the marine soft soil solidified by cement together with lime, fly ash and gypsum. The results show that the cement mixed lime has the best solidification effect and durability, followed by cement mixed fly ash, cement mixed gypsum. The unconfined compression strengths of marine soil solidified by cement and lime are about 2.3 to 2.9 times and 4.7 to 7.8 times respectively of soil solidified by cement together with fly ash and gypsum. When the solidified soil subjected to one and five dry-wet cycles, reductions in the strength of solidified soils are 25.0% to 51.7% and 37% to 59.5% respectively. It means that the first dry-wet cycle has the most significant effects on the strength of solidified soil. After five freeze-thaw cycles, reductions in the dynamic elastic modulus and mass of the solidified soil decrease are 56.3% to 60.3% and 10.9% to 14.0% respectively. Dry-wet and freeze-thaw cycles induced strength reduction or even failure of solidified soil is mainly due to damage of microstructure and increase of soil voids.

Keywords: marine soft soil; solidification; strength; dry-wet cycle; freeze-thaw cycle

收稿日期: 2022-06-27

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52178327)

作者简介: 杨黎(1988—), 男, 高级工程师, 研究方向为软土地基处理。

连云港港区软土沉积环境独特,具有高含水率、低强度和高压缩性等特点^[1-3]。工程中,固化剂诸如水泥、粉煤灰、石膏、磷石膏等常用于提升港区疏浚淤泥物理力学特性^[4-6]。李雪刚等^[7]利用水泥和矿物填充剂改良杭州海相软土,促使土壤的双电层厚度变薄,提升了固化土 pH 值和初期强度。刘雄^[8]采用水泥和复合材料提升了宁波海相软土无侧限抗压强度,发现干拌法是处理高含水量淤泥的有效拌和方式。基于温州吹填软土固化改良试验,李海龙等^[9]发现固化土的最优含水量与固化剂用量具有正相关性,主固化剂水泥和辅助固化剂生石灰的掺量比对固化土强度和加州承载比 CBR 值影响显著。通过制定合理的固化剂配比和施工工艺,高庆辉^[10]、魏雁冰等^[11]发现生石灰、水泥、粉煤灰等固化剂能显著提升海相软土的固化强度。

现有学者开展了大量的固化土强度特性的研究,而干湿、冻融循环下固化土强度劣化机理研究较少。通过开展固化土的干湿循环试验,何俊等^[12]发现首次干湿循环后固化污泥土的抗压强度降低了 50%,其后的干湿循环对固化土强度影响有限;增加固化剂用量能改善水泥固化土承受的干湿循环次数。通过开展固化土的劣化试验,杨俊杰等^[13]发现海水环境下水泥固化的海相软土强度劣化较快,且固化土劣化深度与养护时间正相关。徐杨等^[14]发现水泥掺量较小时,淤泥固化土的抗压强度随干湿循环次数增加逐渐下降,且第 1 次循环下降的幅度最大。

本文依托连云港徐圩港区二港池多用途泊位转运区软基处理工程,场地加固后用于堆放钢材

和集装箱,要求场地地基承载力特征值大于 70 kPa。场地主要由海相沉积层、海陆交互相沉积层、冲积和湖积混合层组成,其中海相沉积层的平均厚度为 12 m。受潮汐和季节变化的影响,港区软土承受着干湿、冻融循环荷载的影响。通过开展固化、干湿和冻融循环试验,研究海相软土的固化特性和强度劣化机理,为深厚软土地基处理提供指导。

1 海相软土固化及强度劣化试验方案

1.1 试验材料

连云港徐圩港区海相软土的含水率 w 、初始孔隙比 e_0 、液限 w_L 和压缩系数 a_v 分别介于 58.7%~78.7%、1.6~1.9、49%~56% 和 1.2~1.6 MPa⁻¹。此港区的海相软土为流塑-软塑状态,属高压缩性土。试验所用的海相软土取自于连云港徐圩港区软基处理工程,烘干粉碎、过筛后进行试验,重塑土与原状土具有相同的含水率。化学固化是利用设备将软土强制搅拌,固化剂水泥和软土发生物理-化学反应,形成具有高强度和低压缩性的水泥土。化学固化时设备搅拌破坏了原状土结构,因此,重塑土化学固化试验结果对工程应用具有很大参考价值。化学固化对原状土产生了很大的扰动,破坏了原状土的结构。因此,重塑土的试验结果对工程应用依然具有很大的参考价值。试验采用的固化材料为 P·O 42.5 水泥、石灰、粉煤灰和石膏,其中水泥、粉煤灰基本参数见表 1、2,其中粉煤灰参数与《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》^[15]要求的Ⅱ级粉煤灰基本接近。

表 1 水泥基本参数

数据类型	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	初凝时间/ min	终凝时间/ min	SO ₃ 质量 百分数/%	MgO 质量 百分数/%	3 d 强度/MPa	
						抗折	抗压
《通用硅酸盐水泥》 ^[16] 规定	≥300	≥45	≤600	≤3.5	≤5.0	≥3.5	≥17.0
实测	358	175	235	2.2	3.0	5.5	27.2

表 2 粉煤灰基本参数

数据类型	细度/%	烧失量/%	Al ₂ O ₃ 、SiO ₂ 和 Fe ₂ O ₃ 质量百分数/%	含水率/%	CaO 质量百分数/%	密度/(t·m ⁻³)
Ⅱ级粉煤灰标准	≤30	≤8.0	≥70	≤1.00	≤4.0	≤2.60
实测	16	2.8	69.3	0.85	5.6	2.55

1.2 试验方案

选取2个典型的初始含水率(60%和80%)开展海相软土的固化试验。水泥为主固化剂,石灰、粉煤灰和石膏为辅助固化剂,主固化剂和辅助固化剂配比见表3。固化土试样养护7、14、28 d后,测量其无侧限抗压强度。选取无侧限强度高的固化土试样开展干湿、冻融循环试验,研究固化土的强度劣化特性。固化土经受干湿、冻融循环后,利用扫描电镜和压汞试验分析固化土内部孔隙变化规律。

表3 海相软土固化试验方案

含水率/ %	配比/%				试验项目
	水泥	石灰	粉煤灰	石膏	
60、80	4	2	-	-	7、14、28 d 无侧限抗压强度
	5	3	-	-	
	4	-	2	-	
	5	-	3	-	
	4	-	-	2	
	5	-	-	3	

1.3 试验步骤

海相软土固化、干湿和冻融循环试验的主要步骤为:

1) 配制含水率为60%和80%的海相软土,均匀拌入水泥、石灰、粉煤灰、石膏等固化剂,将配制的固化土倒入直径和高度均为50 mm的模具,见图1a)。

2) 制备的固化土放入恒温(20±2)℃、恒湿(95±2)%的标准箱中,养护至7、14、28 d后开展无侧限抗压强度试验测量固化土强度,见图1b)。

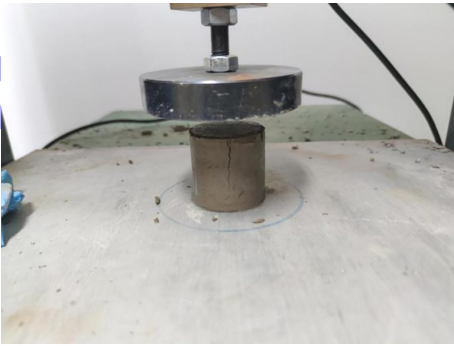
3) 为模拟连云港港区的海水环境,采用海盐配置31‰~32‰盐度的海水。固化土试样养护28 d后,先放入室温为(20±3)℃环境中干燥24 h,然后在(20±0.5)℃水浴箱中浸泡24 h,即为1个完整的干湿循环。干湿循环后,测量固化土的强度和质量变化。

4) 基于《水运工程混凝土试验检测技术规范》^[17]开展冻融循环试验。固化土长方体试件尺

寸为100 mm×100 mm×400 mm,养护至28 d后测量初始动弹性模量和质量。首先,将固化土装入桶底和桶壁均衬有橡皮衬垫的试样桶内;然后,往试样桶中注入冻融介质,确保冻融介质液面高出试样2 cm。固化土经受冻融循环后,测量其动弹性模量和质量。



a) 制备的固化土



b) 无侧限抗压试验

图1 固化土及无侧限抗压强度试验

2 海相软土的固化特性

2.1 固化土的应力-应变曲线

不同养护龄期下初始含水率为60%的固化土应力-应变关系见图2。养护龄期为7 d时,水泥+石膏固化土的应力最小,且应力-应变曲线为硬化型。固化剂采用水泥+石灰或者水泥+粉煤灰时,固化土的应力显著增加,且应力-应变关系从硬化型转为软化型,即固化土的脆性逐渐增强。养护龄期增至28 d后,掺入水泥+粉煤灰、水泥+石膏后固化土的应力-应变关系均为硬化型,而水泥+石灰混掺的固化土应力曲线呈软化型,强度达到峰值后快速降低。28 d龄期

下,混掺水泥+石灰的固化效果明显好于混掺水泥+粉煤灰和水泥+石膏。

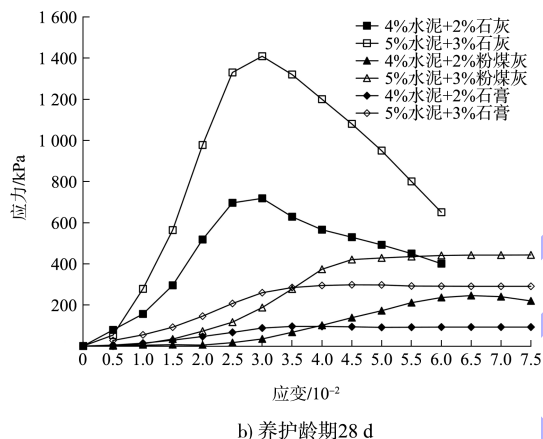
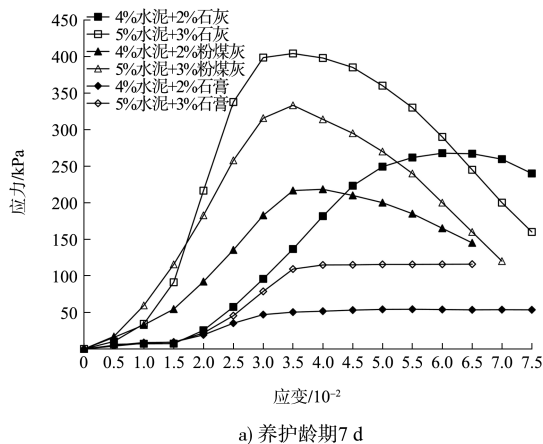


图2 初始含水率为60%不同养护龄期的固化土应力-应变关系

2.2 固化土强度分析

初始含水率为60%和80%的固化土无侧限抗压强度见图3。两种含水率下强度变化规律基本相同,养护龄期越长,固化土的无侧限抗压强度增幅越大。《软土地基深层搅拌加固法技术规程》^[18]规定固化土的90 d龄期无侧限抗压强度须达到500 kPa。可以看出,在含水率为60%和80%的工况下,4%水泥+2%石灰、5%水泥+3%石灰及5%水泥+3%粉煤灰时掺混固化土28 d养护龄期强度均达到规范要求。

含水率为60%时,海相软土掺入5%水泥+3%石灰后,7、14和28 d龄期的固化土无侧限抗压强度分别为410、863和1480 kPa;养护龄期从7 d增加到14、28 d后,强度分别增长了110%和260%。水泥和石灰的掺量分别为4%和2%时,养

护龄期从7 d增加到14和28 d后,强度分别增长了57%和184%。固化土养护龄期增长后,固化剂掺量越大,固化土强度增幅越明显。

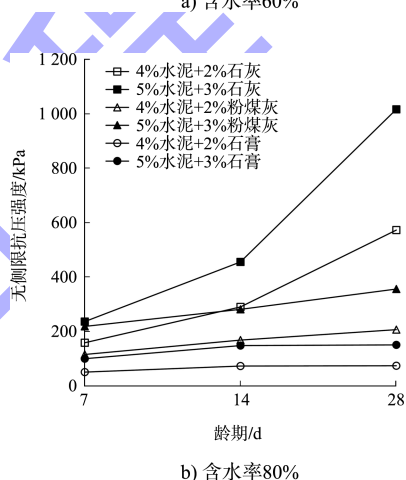
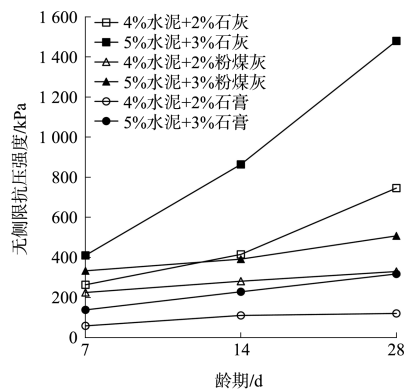


图3 不同含水率试样无侧限抗压强度

海相软土掺入5%水泥+3%粉煤灰后,含水率60%的固化土养护7、14和28 d后无侧限抗压强度分别为333、392和508 kPa;养护龄期从7 d增加到14、28 d后,强度分别增长了17.7%和52.5%。掺入4%水泥+2%粉煤灰后,养护7、14和28 d后固化土的无侧限抗压强度分别为225、281和329 kPa。水泥+石膏的总掺量分别为6%和8%时,28 d龄期固化土的无侧限抗压强度分别为120和318 kPa。增加2%的固化剂用量后,28 d龄期的水泥+石灰、水泥+粉煤灰和水泥+石膏固化土的强度增幅分别为98.4%、54.1%和163.9%。

海相软土初始含水率为80%时,固化剂总掺量由6%增加到8%后,28 d龄期的水泥+石灰、水泥+粉煤灰和水泥+石膏固化土强度增幅分别为77.5%、72.2%和104.0%。海相软土的含水率从

60%增至 80%后, 固化土强度的降幅为 23.2%~42.4%。含水率为 60%时, 相同固化剂掺量下 28 d 龄期的水泥+石灰固化土的强度分别是水泥+粉煤灰、水泥+石膏固化土强度的 2.3~2.9 倍和 4.7~6.2 倍。含水率增至 80%后, 28 d 龄期的水泥+石灰固化土强度分别是水泥+粉煤灰、水泥+石膏固化土强度的 2.8~2.9 倍和 6.7~7.8 倍。因此, 水泥+石灰混掺的固化效果最优, 水泥+粉煤灰次之, 水泥+石膏最差。

3 干湿、冻融循环下固化土强度劣化特性

3.1 干湿循环对固化土无侧限抗压强度的影响

水泥+石膏的固化效果不明显, 选用水泥+石灰和水泥+粉煤灰固化的海相软土开展干湿循环试验。通过检查试验后的试样可看出, 经历 1 次干湿循环后, 各固化剂配合比下的固化表面较为完整。第 3 次干湿循环后, 固化土试样从顶部四周开始出现破碎散落, 表面出现裂隙; 第 5 次干湿循环后, 掺入水泥+石灰的固化土试样表面出现了严重的破碎, 见图 4a); 掺入水泥+粉煤灰的固化土破碎严重, 试样表面大面积破碎散落, 见图 4b)。很明显, 固化土试样的破碎程度与干湿循环次数正相关。



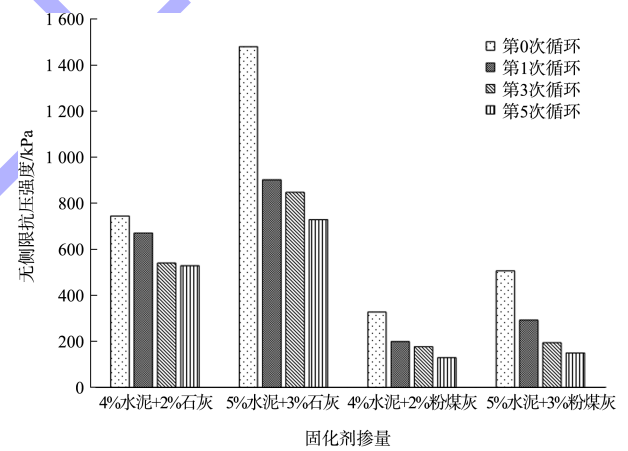
a) 固化剂为水泥+石灰



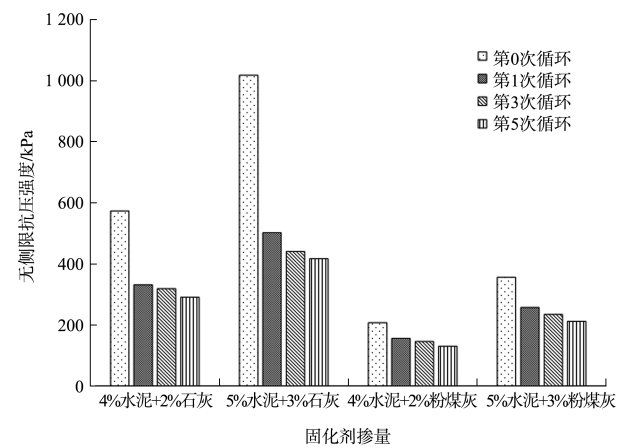
b) 固化剂为水泥+粉煤灰

图 4 第 5 次干湿循环后固化土的形态

初始含水率为 60%和 80%时固化土干湿循环后无侧限抗压强度见图 5。可以看出, 干湿循环次数增加后, 两种含水率的固化土强度降幅规律类似。4 种固化剂配比下, 第 1 次干湿循环引起的固化土无侧限抗压强度的降幅最为明显; 固化土经受的干湿循环次数增加后, 其无侧限抗压强度不断降低, 但降速逐步放缓。初始含水率为 60%的固化土经历 1 次干湿循环后, 4%水泥+2%石灰、5%水泥+3%石灰、4%水泥+2%粉煤灰、5%水泥+3%粉煤灰固化土的无侧限抗压强度降幅分别为 10.0%、39.0%、39.0%和 42.0%; 干湿循环从 1 次增至 5 次后, 4 种固化剂配比下无侧限抗压强度的降幅分别为 28.8%、50.7%、59.9%和 69.9%。初始含水率为 80%时, 4 种固化剂配比的固化土 1 次、5 次干湿循环后无侧限抗压强度的降幅分别介于 25.0%~51.7%和 37.0%~59.5%。



a) 初始含水率60%



b) 初始含水率80%

图 5 不同初始含水率的固化土干湿循环后无侧限抗压强度

海相软土的初始含水率为 60% 时, 掺入水泥+石灰的固化土 5 次干湿循环后其强度为 730 kPa, 满足《软土地基深层搅拌加固法技术规程》中固化土强度大于 500 kPa 的规定。5 次干湿循环后, 掺入 4% 水泥+2% 粉煤灰的固化土有部分试样发生断裂破坏, 其余固化剂配比试样的强度均低于 500 kPa。表明水泥+石灰混掺的固化土的干湿循环耐久性最优, 水泥+粉煤灰次之, 水泥+石膏最差。

3.2 干湿循环对固化土质量损失的影响

干湿循环后固化土的质量损失率见图 6。可

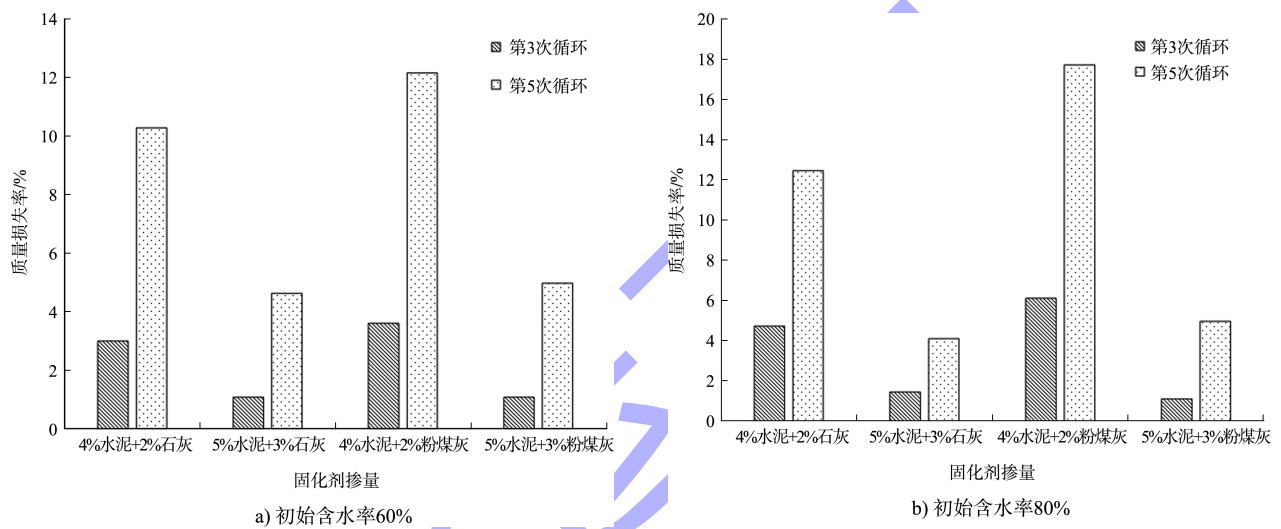


图 6 不同初始含水率和干湿循环对固化土质量损失的影响

3.3 冻融循环对固化土的影响

水泥+石灰混掺固化土干湿循环耐久性明显优于其他固化土, 因此, 开展 2 组冻融循环平行试验, 仅分析水泥+石灰混掺固化土冻融特性。不同冻融循环后固化土的动模量比和质量损失率见表 4, 其中动弹性模量采用混凝土动弹模测定仪测定, 试样 1、2 的固化剂掺量为 5% 水泥+3% 石灰, 试样 3、4 的固化剂掺量为 4% 水泥+2% 石灰。可以看出, 5 次冻融循环后固化土的相对动弹性模量在 39.7%~43.7% (降幅为 56.3%~60.3%), 质量损失率在 10.9%~14.0%。冻融循环达到 10 次后, 所有的固化土试样均损坏, 表明连云港徐圩港区固化土的抗冻融性能相对较差。本试验模拟完全干燥→饱和的干湿循环和快速冻融循环, 不同于自然环境下的干湿、冻融循环。基于室内和现场

以看出, 5 次干湿循环后掺入水泥+石灰的固化土质量损失率要明显小于掺入水泥+粉煤灰的固化土。固化剂掺量增加后, 干湿循环引起的质量损失率降幅明显。水泥+石灰的总掺量增加 2% 后, 含水率为 60% 和 80% 的固化土质量损失率分别降低了 5.7% 和 8.3%。水泥+粉煤灰的总掺量增加 2% 后, 2 个含水率下的固化土质量损失率分别降低了 7.2% 和 12.7%。因此, 海相软土含水率越高, 增加固化剂用量后固化土质量损失率的降幅越大。

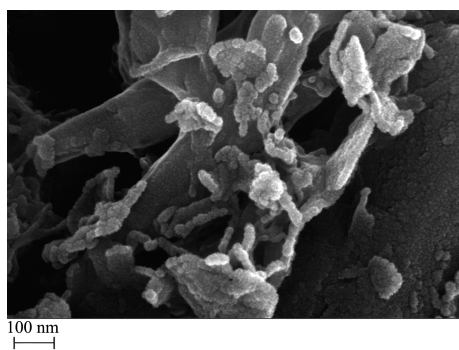
抗冻试验, 李金玉^[19]发现混凝土快速冻融循环 1 次相当于自然环境下冻融循环 10~15 次。水泥固化土的干湿、冻融循环试验对应到自然环境的循环次数有待进一步研究, 但是室内试验结果为固化土的保护提供依据。针对固化土遭遇的干湿、冻融循环破坏, 主要预防措施是提高固化剂的掺量和施工质量, 减少固化土内部的孔隙。

表 4 冻融循环检测结果

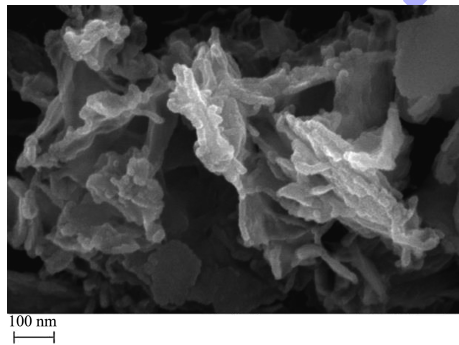
试样	最大冻融循环次数的 相对动弹性模量/%		最大冻融循环次数 的质量损失率/%	
	5 次循环	10 次循环	5 次循环	10 次循环
1	42.7	损坏	14.0	损坏
2	43.5	损坏	11.8	损坏
3	39.7	损坏	12.3	损坏
4	43.7	损坏	10.9	损坏

4 干湿和冻融循环下固化土微观结构分析

干湿循环后固化土的电镜扫描图像见图7。经历1次干湿循环后,固化土的微观结构为骨架状结构,该结构软土的粉粒含量较低,黏粒含量较高。结构微裂隙发育良好,骨架结构较紧密。经历5次干湿循环后,固化土内部骨架尺寸降低,骨架结构已不明显,骨架产生了明显的破碎。因此,干湿循环导致固化土内部孔隙增加,进而强度降低甚至破坏。



a) 1次干湿循环

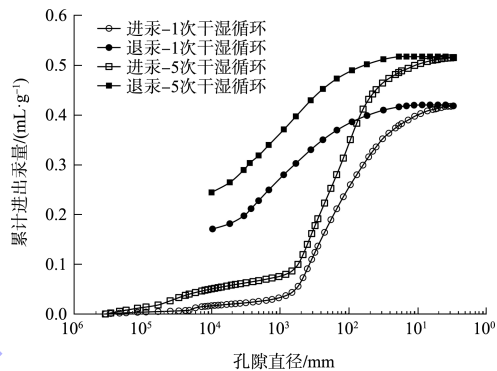


b) 5次干湿循环

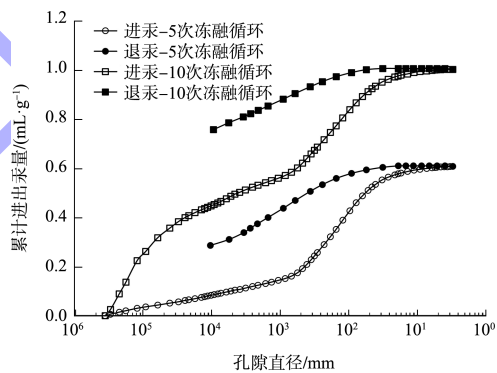
图7 干湿循环后固化土电镜扫描结果

基于 Shear 的孔隙划分方法^[20]: 孔径 $d \geq 10 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m} \leq d < 10 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m} \leq d < 2.5 \mu\text{m}$ 、 $30 \text{ nm} \leq d < 400 \text{ nm}$ 、 $d < 30 \text{ nm}$ 的颗粒孔隙分别为团粒间孔隙、团粒内孔隙、颗粒间和部分团粒内孔隙、颗粒间孔隙和颗粒内孔隙。干湿循环下固化土的压汞试验结果见图8a)。1次干湿循环后,固化土孔隙以中、小孔隙居多,即以团粒内孔隙、颗粒间孔隙为主。5次干湿循环后,固化土孔隙尺寸增多,即团粒内孔隙、颗粒间孔隙增多,

孔隙体积明显高于1次干湿循环的试样。不同冻融循环后固化土压汞试验结果见图8b)。冻融循环从5次增加到10次后,固化土内部的大孔隙增幅明显,总孔隙体积明显增加。因此,干湿、冻融循环后固化土的孔隙增多是其强度降低甚至发生破坏的主要原因。



a) 干湿循环



b) 冻融循环

图8 干湿、冻融循环后固化土压汞试验结果

5 结论

1) 基于固化土的无侧限抗压强度,水泥+石灰混掺的固化效果最优,水泥+粉煤灰次之,水泥+石膏最差。海相软土含水率在60%~80%时,6%~8%的水泥+石灰掺混固化土28d龄期强度达到500kPa。相同固化剂掺量下,掺水泥+石灰的固化土28d龄期强度分别是掺水泥+粉煤灰、水泥+石膏固化土强度的2.3~2.9倍和4.7~7.8倍。

2) 固化剂总掺量由6%增加到8%后,掺水泥+石灰、水泥+粉煤灰和水泥+石膏的28d龄期固化土强度增幅分别为77.5%~98.4%、54.1%~72.2%和104.0%~163.9%。海相软土含水率从60%

增至 80% 后, 固化土强度降低了 23.2%~42.4%。

3) 水泥+石灰混掺的固化土干湿循环耐久性明显优于水泥+粉煤灰、水泥+石膏混掺的固化土。1 次干湿循环后, 4 种固化剂配比的固化土无侧限抗压强度降幅为 10.0%~51.7%; 5 次干湿循环后, 固化土无侧限抗压强度的降幅为 28.8%~69.9%, 表明第 1 次干湿循环对固化土强度影响最为显著。

4) 5 次冻融循环后, 固化土动弹性模量降幅为 56.3%~60.3%, 质量损失率为 10.9%~14.0%; 固化土经受 10 次冻融循环后, 所有试样均损坏。固化土微观结构遭到破坏、土体孔隙增加是固化土干湿、冻融循环后强度降低甚至破坏的主要原因。

参考文献:

- [1] 田强. 连云港海相软土地基处治及其工程特性[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [2] 章定文, 刘松玉, 于新豹. 连云港海相软土特性研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003(4): 71-74.
- [3] 邓永锋, 吴燕开, 刘松玉, 等. 连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J]. 工程地质学报, 2005(1): 29-33.
- [4] 沈宇, 王瑞彩, 陶桂兰, 等. 矿渣和石灰固化疏浚淤泥效果的室内对比试验[J]. 水运工程, 2022(3): 38-43.
- [5] 张更生, 徐继涛, 尹崧宇. 疏浚吹填粉土固化室内试验[J]. 水运工程, 2018(9): 54-58.
- [6] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817-2822.
- [7] 李雪刚, 徐日庆, 王兴陈, 等. 杭州地区海、湖相软土的工程特性评价[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(8): 1346-1352, 1360.
- [8] 刘雄. 宁波海相软土固化试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [9] 李海龙, 刘科, 沈扬, 等. 水泥-生石灰固化吹填土路用特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 51-57.
- [10] 高庆辉. 生石灰、水泥、粉煤灰混合料在土地固化中的新应用: 以唐山曹妃甸国际生态城为例[J]. 科技传播, 2011(11): 168-169.
- [11] 魏雁冰, 陈对航. 新型固化法处理疏浚淤泥土的试验研究[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(4): 82-84.
- [12] 何俊, 张磊, 周莉蓉, 等. 干湿循环条件下碱渣-钢渣-电石渣固化疏浚淤泥的强度性质[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9961-9968.
- [13] 杨俊杰, 孙涛, 张玥宸, 等. 腐蚀性场地形成的水泥土的劣化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 130-138.
- [14] 徐杨, 曹磊, 阎长虹, 等. 城市河道淤泥固化土干湿耐久性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 1028-1035.
- [15] 中国建筑材料科学研究总院, 长江水利委员会长江科学院, 上海市建筑科学研究院, 等. 用于水泥和混凝土中的粉煤灰: GB/T 1596—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [16] 中国建筑材料科学研究总院. 通用硅酸盐水泥: GB 175—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [18] 冶金工业部建筑研究总院. 软土地基深层搅拌加固法技术规程: YBJ 225—1991 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [19] 李金玉. 冻融环境下混凝土结构的耐久性设计与施工[C]//中国土木工程学会. 混凝土结构耐久性设计与施工论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 43-52.
- [20] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for natural clay[R]. Washington: Transportation Research Board, 1993.

(本文编辑 王璁)