

盐蚀-冻融耦合环境下流态固化土强度劣化及预测模型

戚晨彦^{1,2}, 周云东^{1,2}, 王伟^{1,2}, 耿维娟³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 3. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为系统研究盐侵蚀与冻融循环耦合作用下流态固化土的力学性能劣化规律, 本文以水泥为基材, 分别掺入矿渣和磷石膏制备流态固化土试样, 通过室内试验模拟清水、氯化钠和硫酸钠环境下的冻融循环过程, 重点分析不同固化体系在盐蚀冻融条件下的强度演化特征、质量变化规律及抗侵蚀能力差异。试验结果表明, 随冻融循环次数增加, 各组试样抗压强度均呈现“缓慢下降—快速下降—逐渐稳定”的三阶段衰减特征。矿渣的掺入可显著提高流态固化土的抗盐蚀冻融能力, 在经历10次冻融循环后, 其强度保留率为36%~54%, 质量变化率为0.25%~0.60%, 整体抗劣化性能优于磷石膏体系。在盐蚀冻融耦合作用下, 水泥-矿渣固化土在硫酸钠环境中的强度损失明显大于氯化钠环境, 影响程度高出28%~39%; 而水泥-磷石膏固化土在硫酸钠环境中表现出相对较强的抗侵蚀能力。基于试验结果, 通过回归分析建立了适用于盐蚀冻融耦合条件的强度衰减模型, 可用于预测流态固化土在长期复杂环境作用下的强度演变, 为寒冷盐蚀地区流态固化土的工程应用提供参考。

关键词: 流态固化土; 冻融循环; 盐类侵蚀; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)02-0418-09

Strength Degradation and Prediction Model of Flowable Solidified Soil Under Coupled Salt Erosion and Freeze-Thaw Conditions

QI Chenyan^{1,2}, ZHOU Yundong^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, GENG Weijuan³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu China)

Abstract: To investigate the strength degradation behavior of flowable solidified soil under the coupled effects of salt erosion and freeze-thaw cycles, flowable solidified soil specimens were prepared using cement blended with slag and phosphogypsum. Laboratory tests were conducted to simulate freeze-thaw cycles in fresh water, sodium chloride solution, and sodium sulfate solution. The strength evolution, mass variation, and deterioration characteristics of different solidification systems were analyzed. The results show that with increasing freeze-thaw cycles, the compressive strength of all specimens exhibits a three-stage degradation pattern, including slow reduction, rapid reduction, and gradual stabilization. The incorporation of slag significantly improves resistance to salt erosion and freeze-thaw damage. After ten freeze-thaw cycles, the strength retention rate of slag modified

收稿日期: 2025-11-20

修回日期: 2026-01-09

接受日期: 2026-01-20

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20240875)

作者简介: 戚晨彦(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理方面的研究

通信作者: 周云东(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事软土地基处理、道路堤坝工程等方面的研究, E-mail: ydzhou@hhu.edu.cn

引用格式: 戚晨彦, 周云东, 王伟, 等. 盐蚀-冻融耦合环境下流态固化土强度劣化及预测模型[J]. 河南科学, 2026, 44(2): 418-426.

Qi C T, Zhou Y D, Wang W, et al. Strength degradation and prediction model of flowable solidified soil under coupled salt erosion and freeze-thaw conditions[J]. Henan Science, 2026, 44(2): 418-426.

specimens ranges from 36% to 54%, while the mass change rate is between 0.25% and 0.60%, indicating the best durability performance. Under coupled salt erosion and freeze-thaw conditions, the cement slag system experiences greater strength loss in sodium sulfate solution than in sodium chloride solution, with an increase of 28% to 39%. In contrast, the cement phosphogypsum system shows better resistance in the sodium sulfate environment. Based on the experimental results, a strength degradation model suitable for coupled salt erosion and freeze-thaw conditions is established through regression analysis. The proposed model can be used to predict long term strength evolution of flowable solidified soil in harsh environments and provides reference for engineering applications in cold and saline regions.

Key words: fluid-solidified soil; freeze-thaw cycle; salt erosion; unconfined compressive strength

0 引言

流态固化土是一种通过在建筑渣土中掺入适量固化剂和水,经均匀搅拌后形成具有高流动性和自密实性的填筑材料^[1-3],能够有效克服异形构造及狭窄施工空间传统回填作业困难的问题,已广泛应用于沟槽回填、结构填方、路面基层、空隙填充及管道衬垫等工程领域^[4]。工程实践中常采用水泥作为流态固化土的固化剂,但其生产过程能耗高、环境污染大^[5-6],限制了流态固化土的广泛应用。近年来,利用矿渣^[7]、磷石膏^[8]等固废替代水泥制备复合固化剂,逐渐成为研究与应用热点。李宝建等^[9]研究发现水泥和矿渣的配合比为 50:50 时,强度比纯水泥固化提升 4 倍。屈俊童等^[10]研究发现改良土在磷石膏掺量由 0% 提高至 15% 时,强度提高明显,而由 15% 提高至 30% 的过程中,强度的增率降低。

目前众多学者对流态固化土的物理力学性质进行了研究^[1-3],体现出固化土具有显著的工程适用性与环保效益。随着流态固化土的广泛应用,其服役环境也日趋复杂多元。一方面,在盐渍土地区环境中,流态固化土遭受盐类侵蚀,严重影响其长期耐久性。韩鹏举等^[11]研究了硫酸钠对水泥固化土的影响,发现当水泥土中硫酸钠质量分数为 9 g/kg 时,固化土强度最大,过量则导致强度下降。王超等^[12]研究发现固化土的抗压强度在氯盐含量为 0.3%~9.0% 时,随着氯盐含量的增加先增大后减小,在 3.0% 时抗压强度达到峰值。张丹等^[13]通过对比不同盐溶液环境下水泥土的强度演变,发现出硫酸钠的侵蚀性强于氯化钠。陈刚等^[14]对氯盐侵蚀下的水泥固化土进行研究,随氯盐侵蚀时间增加,其内部结构破坏,承载力下降。吴燕开等^[15]和何俊等^[16]发现工业固废的加入能够提高固化土抗氯盐和抗硫酸盐的侵蚀

能力。另一方面,受到周期性气候变化的影响,我国绝大部分地区在地表以下存在一定厚度的季节性冬冻夏融活动层^[17],回填后的流态固化土常遭受冻融作用而引起的性能劣化,严重影响工程的安全性。Yang 等^[18]研究了固化土在冻融循环作用下的应力应变曲线、强度和压缩模量等宏观力学性能。张凌凯和贾威^[19]研究了干湿冻融作用下固化土抗剪强度、压缩特性和渗透性与微观孔隙之间的关系。综上所述,盐类侵蚀和冻融循环均对固化土性能产生重要影响,但现有研究多集中于单一作用条件下水泥固化土的性能变化,对于固废协同水泥制备的流态固化土在盐蚀与冻融耦合作用下的耐久性研究仍较为缺乏。

基于此,本文以矿渣和磷石膏协同水泥制备的流态固化土为研究对象,系统研究氯化钠和硫酸钠环境与冻融循环耦合作用下其表现形貌、无侧限抗压强度及质量变化规律,为流态固化土在季节性气候区的工程应用提供参考。

1 试验材料、方案与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土料

试验所用土料取自山西省太原市某工程现场,该地区属季节性冻土区,且盐渍化现象较为普遍。原状土呈黄色,采集后清除碎石及植物根茎等杂质,破碎过筛后置于 105 °C 恒温烘箱中干燥至恒重,冷却至室温后采用粉碎机粉碎,并通过 2 mm 圆孔筛作为试验用土料,如图 1 所示。其主要物理性质指标见表 1。根据土的工程分类标准,试验土料属于低液限黏土。

1.1.2 固化剂

试验采用普通硅酸盐水泥作为基准固化材料,工业固废选用矿渣和磷石膏。三种固化材料的化学

成分采用 XRF 方法进行测试,结果见表2。矿渣富含 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 ,具有潜在水化活性;磷石膏以 CaSO_4 为主,硫酸根含量较高,二者均具备作为水泥部分替代材料的工程潜力。



图1 试验用土料

Fig.1 Soil material for test

表1 试验用土料主要物理性质指标

Tab.1 Main physical properties of soil material for test

指标	G_s	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$
数值	2.71	27	18	9

表2 水泥和工业废渣组分

Tab.2 Components of cement and industrial residues 单位: %

组分	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	SO_3
水泥	25.00	51.41	8.27	3.7	3.7	
矿渣	33.22	39.51	16.04	8.96		1.80
磷石膏	2.31	36.56	0.13	0.08	0.66	59.03

1.1.3 溶液配制

参考山西地下水盐分含量^[20],以 30 g/L 氯化钠和 30 g/L 硫酸钠作为侵蚀环境。采用国药集团产的分析纯无水硫酸钠(净含量 99.5%)和分析纯无水氯化钠(净含量 99.5%)配制溶液,试验用水为去离子水。

1.2 试验方案

当水泥掺量为干土质量的 10%、水固比为 0.52 时,试样流动度为 178 mm,28 d 无侧限抗压强度为 531 kPa,兼具良好的流动性、自密实性能和力学性能,满足泵送施工流动度(160~200 mm)及基坑回填 28 d 强度(≥ 300 kPa)的要求^[21]。据此确定基准配合比为水泥掺量 10%、水固比 0.52。在基准配合比基础上,为研究工业固废协同水泥固化的影响,根据已有研究^[8-9],设置矿渣和磷石膏替代水泥比例为 10%~50%。结合流动度与力学性能综合评价,最终选取矿渣替代 50% 水泥(C5G5)和磷石膏替代 20% 水泥(C8P2)作为对比组,与纯水泥固化土(C10)共

同构成三种固化体系。各试验工况在清水、氯化钠溶液和硫酸钠溶液环境下,分别经历 0、3、6、10 次冻融循环,具体方案见表 3。

表3 试验方案

Tab.3 Test program

试样编号	固化剂组成	养护时间/d	侵蚀溶液	冻融循环次数/次
C10	10% 水泥	28	清水	0,3,6,10
			30 g/L 氯化钠	
			30 g/L 硫酸钠	
C5G5	5% 水泥+5% 矿渣	28	清水	0,3,6,10
			30 g/L 氯化钠	
			30 g/L 硫酸钠	
C8P2	8% 水泥+2% 磷石膏	28	清水	0,3,6,10
			30 g/L 氯化钠	
			30 g/L 硫酸钠	

1.3 试验方法

1.3.1 试样的制备和养护

按设计配合比将烘干土料、水、水泥及固废充分搅拌均匀后,装入直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱模具中。装样前在模具内壁均匀喷涂脱模剂。成型后试样置于温度(20±2)℃、相对湿度 95% 的养护箱中养护 1 d 脱模,完整试样继续进行 28 d 标准养护。

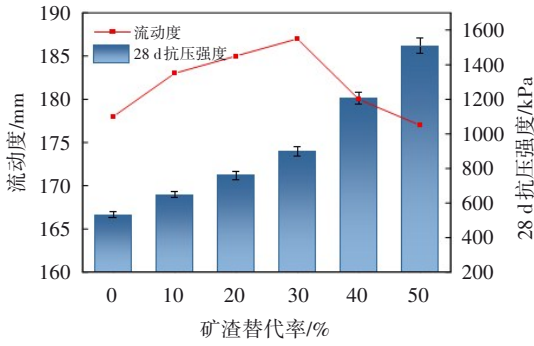
1.3.2 盐冻试验

养护完成后的试样分组浸入预制盐溶液中,溶液液面高出试样 2 cm,浸泡 4 d 后取出,擦干表面水分并用保鲜膜包裹,置于低温试验箱中进行冻融试验。依据山西地区极端低温条件,冻结温度设定为 -20℃,融化温度为 20℃。每个冻融循环周期为 24 h,包括 -20℃ 冻结 12 h 和 20℃ 盐溶液中融化侵蚀 12 h。

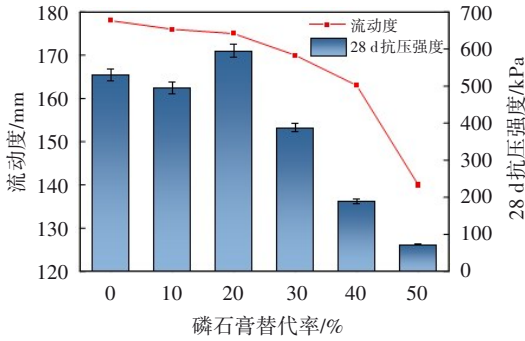
参考相关研究^[18-19],冻融循环次数设置为 0、3、6、10 次。冻融试验结束后,对试样进行外观观察、质量测定及无侧限抗压强度试验。每组试样设置 3 个平行件,取算术平均值作为试验结果;当单个测值与平均值偏差超过 15% 时,予以剔除。

1.4 固化剂配比的确定

为确定盐蚀冻融耦合试验中采用的合理固化剂配比,对矿渣和磷石膏在不同替代率条件下流态固化土的流动度及 28 d 无侧限抗压强度进行了对比分析,如图 2 所示。结果表明,随着矿渣替代率的增加,试样 28 d 强度显著提高,在替代率为 50% 时较纯水泥固化土提高约 184%;同时其流动度在替代率不超过 30% 时有所提升,进一步增大后虽略有下降,



(a)矿渣不同替代率下流动度和28 d无侧限抗压强度变化



(b)磷石膏不同替代率下流动度和28 d无侧限抗压强度变化

图2 矿渣/磷石膏不同替代率下流动度和28 d无侧限抗压强度变化

Fig.2 Changes in flowability and 28 d unconfined compressive strength at different replacement rates of slag/phosphogypsum

但仍保持在160 mm以上,满足泵送施工要求。综合流动性与力学性能,确定50%矿渣替代率为较优配比。相比之下,磷石膏替代率的增加会明显降低流动度,当替代率超过40%时已难以满足工程要求,其28 d强度则呈现先增后减的变化规律,在替代率为20%时达到最大值,较纯水泥组提高约10%。因此,选取20%磷石膏替代率作为推荐配比。基于上述分析,本文最终选取纯水泥体系(C10)、50%矿渣替代水泥体系(C5G5)和20%磷石膏替代水泥体系(C8P2)作为后续盐蚀冻融耦合试验的对比研究对象。

2 结果与分析

2.1 盐蚀冻融耦合作用下质量与表观形貌变化

2.1.1 质量变化率

盐冻循环后流态固化土的损伤情况可由试样质量变化率反映,每次盐冻循环后,各试块的质量变化率可按式(1)计算。

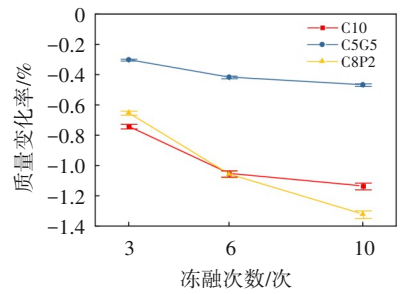
$$\Delta M_n = \frac{M_n - M_0}{M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: ΔM_n 为 n 次盐冻循环后流态固化土试样的质量

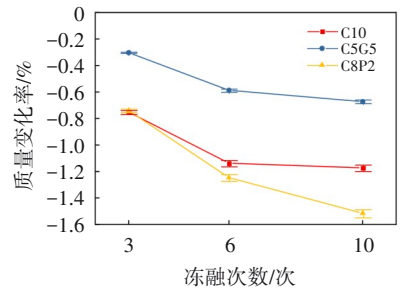
变化率; M_n 为 n 次盐冻循环后流态固化土试块的质量; M_0 为未经盐冻循环的试块的初始质量。

图3展示了不同侵蚀环境与冻融循环耦合作用下流态固化土的质量变化率,该值为正表示试样质量增加,为负则表示质量减少。质量变化主要由两方面机制共同作用:一方面,侵蚀-冻融耦合作用导致试样表面材料剥落,造成质量损失;另一方面,随着表面裂隙发育与内部结构损伤加剧,外部溶液渗入孔隙内部,引起质量增加。

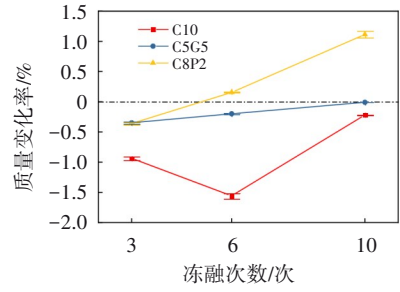
从图中可以看出,在清水与氯化钠环境中,所有试样的质量变化率始终为负值且持续下降,表明质量损失随冻融次数增加不断增大,但在冻融6次后降幅趋缓,这主要是由于此后裂隙显著扩展,溶液侵入在一定程度上抵消了表面剥落导致的质量损失;三种试样质量损失程度依次为C8P2>C10>C5G5。而在硫酸钠环境中,质量变化率整体呈上升趋势,



(a)清水环境



(b)氯化钠环境



(c)硫酸钠环境

图3 盐蚀冻融耦合作用下流态固化土的质量变化率

Fig.3 Quality change rate of flowable solidified soil under the coupled effect of salt corrosion and freeze-thaw cycle

C8P2试样在冻融6次后甚至转为正值,说明溶液渗入超过剥落损失,C10和C5G5质量变化率虽有上升但仍保持负值,表明仍以表面剥落为主;该环境下三者质量损失顺序为C10>C5G5>C8P2。

2.1.2 表观形貌

表4给出了盐蚀与冻融循环耦合作用下三种固化体系试样的表观形貌演化过程。冻融3次后,试样主要出现局部轻微剥落,整体结构保持完整;冻融6次后,表面剥落范围扩大,并出现可辨识的裂纹和微裂隙;当冻融次数增至10次时,试样损伤显著加重,普遍表现为大面积剥落、密集微裂隙及局部粗大裂缝,部分试样几何形态发生明显畸变。

在固化剂组成和冻融循环次数相同的条件下,侵蚀环境对试样表观劣化程度具有显著影响。以经历10次冻融循环的试样为例,清水环境中仅观察到轻微表面剥落和少量细裂缝;氯化钠环境下剥落面积明显扩大,并伴随裂缝数量增加;而在硫酸钠环境中,试样普遍出现大面积剥落和贯通裂缝,劣化程度最为突出。

在冻融循环次数和侵蚀环境一致的情况下,不同固化体系试样的抗损伤能力差异明显。C5G5试样整体表现出最优的抗劣化性能,其表面剥落较轻,未出现明显粗大裂缝,几何形态保持较为完整。

C10与C8P2试样的表观损伤程度对侵蚀环境较为敏感。

2.2 流态固化土强度演化规律

2.2.1 冻融次数对无侧限抗压强度的影响

图4展现了盐蚀冻融耦合作用下试样强度随冻融次数的强度变化规律(误差棒为标准偏差,强度标准偏差为5~31 kPa)。在固化剂组成和侵蚀环境相同的条件下,各试样强度均随冻融次数增加而逐步降低,并呈现出明显的阶段性特征。具体而言,在冻融初期(0~3次),试样强度缓慢下降,降幅约为14%~23%;进入中期(3~6次),强度衰减显著加快,降幅约为初期的2~3倍;在后期(6~10次),强度损失趋于平缓,逐渐进入相对稳定阶段。

上述规律主要源于冻融损伤机制的阶段性演化。冻融初期,试样内部尚未形成贯通裂隙,侵蚀介质难以深入,强度损失主要由孔隙水结冰产生的冻胀应力引起。随着冻融循环的进行,表面及内部微裂隙逐渐发育,为水分和侵蚀离子提供了迁移通道,物理冻胀与化学侵蚀共同作用,加速了结构破坏过程。至后期阶段,试样内部易破坏的孔隙和反应活性组分已大量消耗,后续冻融对整体强度的影响趋于减弱。

表4 盐蚀冻融耦合作用下试样的表观形貌

Tab.4 Appearance of samples under the coupled effect of salt corrosion and freeze-thaw cycle

冻融次数/次	试样C10在不同环境下表观形貌			试样C5G5在不同环境下表观形貌			试样C8P2在不同环境下表观形貌		
	清水	氯化钠	硫酸钠	清水	氯化钠	硫酸钠	清水	氯化钠	硫酸钠
3									
									
									
6									
10									

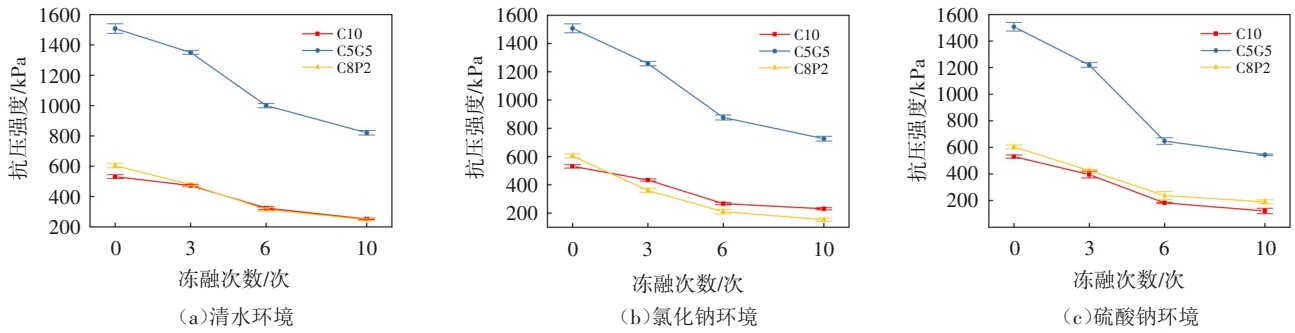


图4 盐蚀冻融耦合作用下流态固化土的强度变化

Fig.4 Strength of flowable solidified soil under the coupled effect of salt corrosion and freeze-thaw cycle

2.2.2 固化剂对无侧限抗压强度的影响

为定量比较不同固化体系的抗劣化能力,引入强度保留系数作为评价指标,其定义为冻融后强度与初始强度之比。图5展示了不同固化剂试样在各侵蚀环境下的强度保留情况。

在清水和氯化钠环境中,C5G5试样的强度保留系数始终最高,其次为C10,C8P2最低。经10次冻融后,C5G5试样的强度保留系数较C10提高约15%~32%,表明矿渣的掺入显著增强了抗冻融能力。其原因在于矿渣的火山灰反应可持续消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,生成结构致密的C-S-H凝胶,从而降低孔隙连通性,抑制水分和 Cl^- 的侵入。C8P2试样在氯化钠环境中表现出最为显著的强度劣化。这主要与磷石膏中 SO_4^{2-} 的存在有关,其与水泥铝相反应生成钙矾石,引起内部膨胀;同时, Cl^- 与水化铝酸钙反应生成无胶结能力的Friedel盐,进一步削弱结构稳定性。

但在硫酸钠环境中,强度保留情况则与前两种环境中有所不同,除冻融3次外,C5G5的系数比C10高约6.1%,C8P2高约2%。其可归因于三者对硫酸盐侵蚀的抵抗能力及微观结构稳定性的差异。C10中水泥含量最高,水泥水化产生的大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和铝相为硫酸盐侵蚀提供了充足的反应物。 SO_4^{2-} 的侵

入会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成二水石膏,此过程伴随体积增大超100%;随后,石膏与铝相迅速反应,生成二次钙矾石,产生高达250%以上的体积膨胀^[11]。石膏和钙矾石导致的双重膨胀,在冻融循环产生的物理应力协同下,造成显著膨胀开裂与结构破坏。C8P2虽因提前引入 SO_4^{2-} 消耗部分铝相并生成早期钙矾石,一定程度上缓解了后续膨胀压力,但体系中仍存在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,石膏的生成无法避免,强度损失居中。而C5G5则通过火山灰反应大量消耗易蚀组分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,形成致密且化学稳定性高的低碱度C-S-H凝胶使微观结构更加密实,极大地延缓了 SO_4^{2-} 的侵入速率。因此,C5G5表现出最优异的长期耐久性。

2.2.3 侵蚀环境对无侧限抗压强度的影响

为量化侵蚀环境对流态固化土的影响,引入环境影响系数 K ,即在第 N 次冻融循环后,不同盐溶液环境中的无侧限抗压强度与清水环境中无侧限抗压强度的比值,强度比值按式(2)计算,系数值越小表示侵蚀环境影响越大。

$$K_i(N) = \frac{f_i(N)}{f_w(N)}, \quad (2)$$

式中: $f_w(N)$ 为流态固化土在清水中浸泡冻融第 N 次的无侧限抗压强度; $f_i(N)$ 为流态固化土在不同浓度

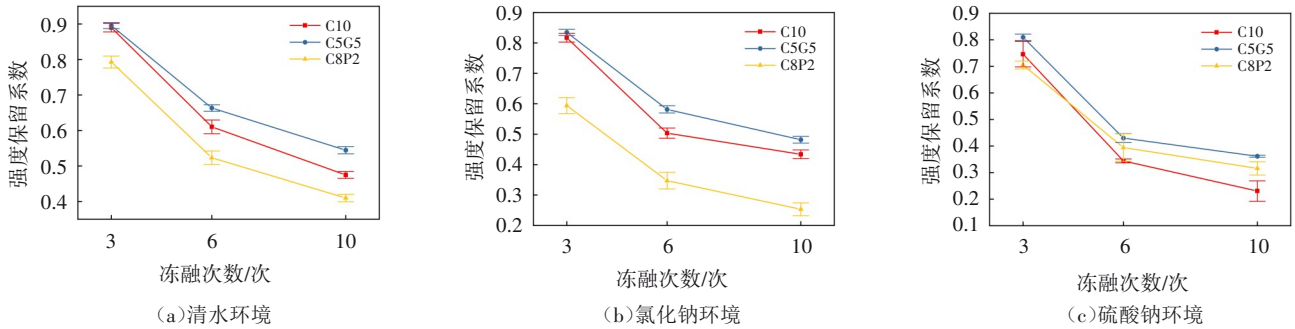


图5 盐蚀冻融耦合作用下流态固化土的强度保留系数变化

Fig.5 Strength retention coefficient of flowable solidified soil under the coupled effect of salt corrosion and freeze-thaw cycle

溶液中浸泡冻融第*N*次的无侧限抗压强度。

图6显示,两种盐环境对流态固化土的劣化作用均明显强于清水环境。在相同冻融次数下,C10和C5G5试样在硫酸钠环境中的*K*值普遍低于氯化钠环境,差异幅度为5%~39%,表明硫酸盐侵蚀更具破坏性。相比之下,C8P2试样表现出不同的响应特征,其在硫酸钠环境中的*K*值反而高于氯化钠环境。该现象与磷石膏中SO₄²⁻的“预引入效应”有关,即部分反应潜力在固化阶段已被消耗,使材料对外部硫酸盐侵蚀具有一定缓冲能力,从而在硫酸钠环境中表现出相对更好的稳定性。

2.3 流态固化土强度衰减模型

为定量描述盐冻环境对材料力学性能的损伤效应,基于试验结果建立强度衰减模型。考虑到试样在多次冻融后仍可能保留一定残余承载能力,在传统指数衰减模型基础上引入残余强度项,模型表达式如下:

$$y=A_2+(A_1-A_2)e^{-kx}, \tag{3}$$

式中:*y*为不同冻融次数下的预测强度值;*A*₁为初始强度(冻融0次);*A*₂为最终残余强度预测值;*x*为冻融循环次数;*k*为强度衰减速率,*k*越大表明衰减速率越快。

图7给出了不同侵蚀环境下各试样强度衰减模型的拟合结果,表5列出了相应模型参数。各模型的决定系数*R*²均大于0.90,表明该模型能够较好地描述流态固化土在盐蚀与冻融共同作用下的强度演化过程。对模型参数进一步分析可知,在清水环境中,试样的*k*值大小规律为C8P2>C10>C5G5,说明矿渣的掺入可有效降低强度衰减速率。在氯化钠环境中,三类试样的*k*值均明显高于清水环境,反映出氯盐对结构劣化的加速作用,但不同固化体系间的相对大小规律保持一致。在硫酸钠环境中,*k*值排序变为C10>C8P2>C5G5,且多数试样的*k*值高于氯化钠环境,表明硫酸盐侵蚀与冻融作用对传统水泥固化土的破坏性更强。该规律与前述强度保留系数及环境影响系数分析结果一致。

根据模型所预测的残余强度可知,C5G5在清水、氯化钠、硫酸钠环境中与冻融耦合分别具有23%、21%、12%的强度保留系数,C10强度保留系数分别为21%、20%、6%,C8P2强度保留系数为19%、17%、12%。模型所预测的残余强度成功量化了环境侵蚀性的相对性,硫酸钠对传统水泥基材料破坏性最强,但对固化剂改性后的材料则相对温和,从而

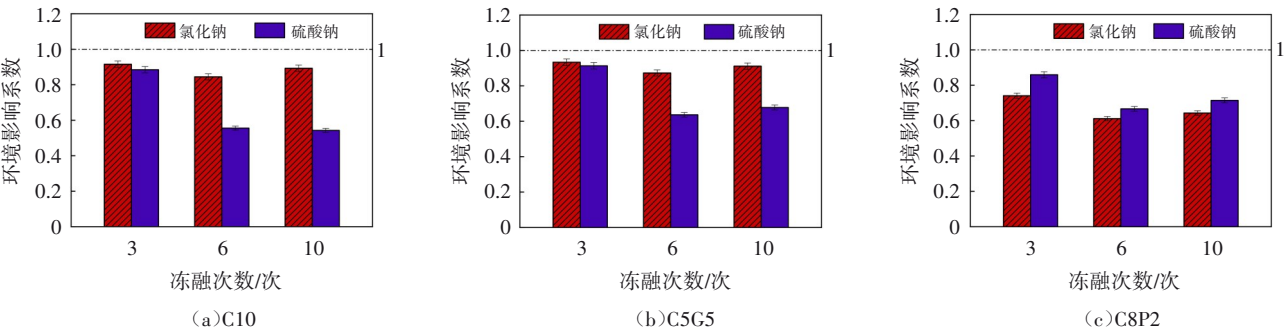


图6 盐蚀冻融耦合作用下流态固化土的环境影响系数变化

Fig.6 Environmental impact coefficient of flowable solidified soil under the coupled effect of salt corrosion and freeze-thaw cycle

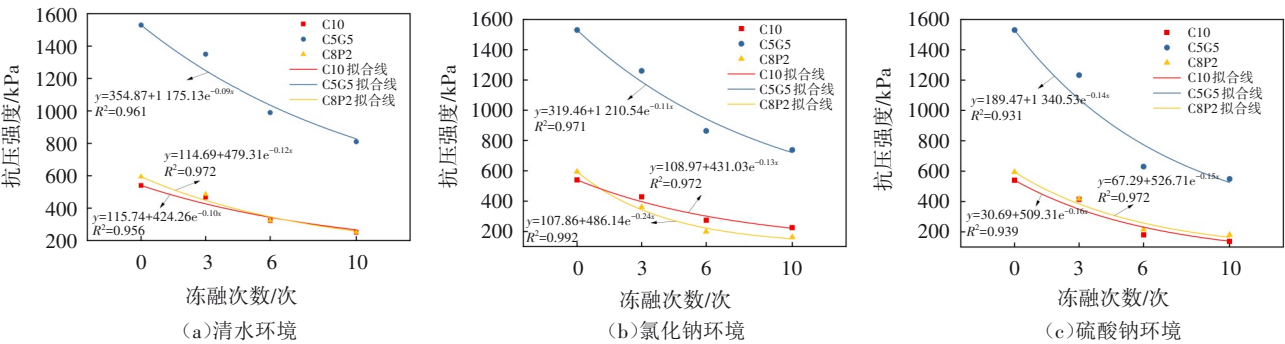


图7 盐蚀冻融耦合作用下流态固化土的强度衰减模型

Fig.7 Strength decay model of fluid-solidified soil under salt corrosion and freeze-thaw cycle

表5 流态固化土的强度衰减模型公式及相关参数

Tab.5 Models formulas and related parameters for strength decay of flowable solidified soil

侵蚀环境	试样编号	模型公式	A_1	A_2	k	R^2
清水	C10	$y=115.74+424.26e^{-0.10x}$	540	115.74	0.10	0.956
	C5G5	$y=354.87+1\ 175.13e^{-0.09x}$	1530	354.87	0.09	0.961
	C8P2	$y=114.69+479.31e^{-0.12x}$	594	114.69	0.12	0.972
氯化钠	C10	$y=108.97+431.03e^{-0.13x}$	540	108.97	0.13	0.972
	C5G5	$y=319.46+1\ 210.54e^{-0.11x}$	1530	319.46	0.11	0.971
	C8P2	$y=107.86+486.14e^{-0.24x}$	594	107.86	0.24	0.992
硫酸钠	C10	$y=30.69+509.31e^{-0.16x}$	540	30.69	0.16	0.939
	C5G5	$y=189.47+1\ 340.53e^{-0.14x}$	1530	189.47	0.14	0.931
	C8P2	$y=67.29+526.71e^{-0.15x}$	594	67.29	0.15	0.972

为面向特定长期服役环境的流态固化土固化剂设计提供了定量依据。在氯盐和硫酸盐复杂的区域,应优先选用环境适应性强的水泥-矿渣复合固化,以获取最稳健的长期性能。在硫酸盐渍土区,可考虑选用水泥-磷石膏复合固化作为经济有效的解决方案,但必须严格规避氯盐侵蚀风险。

3 结论

本研究通过系统试验与模型分析,深入探讨了盐水侵蚀与冻融循环耦合作用下不同固化剂的流态固化土性能演变规律,主要获得以下结论:

1)在盐蚀与冻融耦合作用下,流态固化土无侧限抗压强度均呈现典型的“三阶段”衰减特征,即由初期以物理冻胀作用主导的缓慢劣化阶段,过渡至物理作用与化学侵蚀协同加速的快速衰减阶段,最终因反应物逐渐消耗和结构损伤趋于稳定而进入平缓衰减阶段。

2)不同固化剂体系对侵蚀环境的响应机理存在显著差异。水泥-矿渣复合固化体系通过火山灰反应形成致密稳定的微观结构,对氯盐和硫酸盐环境均表现出较强的耐久性;水泥-磷石膏复合固化体系则因硫酸根离子的预先参与反应,对硫酸盐侵蚀表现出一定的选择性适应能力,但在氯盐环境中劣化更为明显。

3)基于试验结果建立的强度衰减预测模型能够较好描述不同侵蚀环境和冻融循环条件下流态固化土的强度演化规律,各模型拟合优度均大于 0.90。

4)在氯盐和硫酸盐侵蚀环境复杂的区域优先采用水泥-矿渣复合固化体系,以获得更稳定的长期耐久性能;在以硫酸盐侵蚀为主的盐渍土地区,可经济选用水泥-磷石膏复合固化体系,但应谨慎评估氯盐侵蚀风险,避免采用纯水泥固化方案。

参考文献:

[1] 王明,刘振忠,薛泽,等. 流态固化土基本物理力学性能试验与应用研究[J]. 防灾减灾工程学报,2025,45(4): 941-948.
Wang M, Liu Z Z, Xue Z, et al. Experiment and application study on basic physical-mechanical properties of soil-based controlled low-strength materials[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(4):941-948.

[2] 周永祥,霍孟浩,侯莉,等. 低强度流态填筑材料的研究现状及展望[J]. 材料导报,2024,38(15):130-138.
Zhou Y X, Huo M H, Hou L, et al. Current research and prospect of low strength flowable filling materials[J]. Materials Reports, 2024, 38(15): 130-138.

[3] 苏悦,闫楠,白晓宇,等. 预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用[J]. 材料导报,2024,38(9):62-68.
Su Y, Yan N, Bai X Y, et al. Research progress and application on engineering characteristics of ready-mixed fluid solidified soil[J]. Materials Reports, 2024, 38(9):62-68.

[4] Lachemi M, Hossain K M A, Shehata M, et al. Characteristics of controlled low-strength materials incorporating cement kiln dust[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(4):485-495.

[5] Shen W G, Liu Y, Yan B L, et al. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75:618-628.

[6] Wang D X, Benzerzour M, Hu X, et al. Strength, permeability, and micromechanisms of industrial residue magnesium oxychloride cement solidified slurry [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(7):04020088.

[7] Zhang W L, Zhao L Y, McCabe B A, et al. Dredged marine sediments stabilized/solidified with cement and GGBS: Factors affecting mechanical behaviour and leach-

- ability[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 138551.
- [8] 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.
- Ding J W, Zhang S, Hong Z S, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2817-2822.
- [9] 李宝建,傅赛,段冰,等. 海相软土固化强度试验及机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(增刊1): 176-180.
- Li B J, Fu S, Duan B, et al. Experimental and mechanism study on solidification strength of marine soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(S1): 176-180.
- [10] 屈俊童,栾凯钰,浦钧翔,等. 水泥-磷石膏改良泥炭质土动力特性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(12): 4427-4437.
- Qu J T, Luan K Y, Pu J X, et al. Dynamic characteristics of cement-phosphogypsum improving peaty soil[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(12): 4427-4437.
- [11] 韩鹏举,刘新,白晓红. 硫酸钠对水泥土的强度及微观孔隙影响研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2555-2561.
- Han P J, Liu X, Bai X H. Effect of sodium sulfate on strength and micropores of cemented soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2555-2561.
- [12] 王超,朱连勇,王成,等. 氯盐含量对矿粉-稻壳灰固化盐渍土强度特性的影响[J]. *中国科技论文*, 2024, 19(8): 903-911.
- Wang C, Zhu L Y, Wang C, et al. Effects of chloride content on the strength characteristics of mineral dust-rice husk ash cured saline soils[J]. *China Sciencepaper*, 2024, 19(8): 903-911.
- [13] 张丹,吴振威,宋苗苗,等. 盐分侵蚀对水泥固化土力学特性的影响研究[J]. *土木工程与管理学报*, 2022, 39(5): 94-99.
- Zhang D, Wu Z W, Song M M, et al. Effect of salt erosion on mechanical properties of cement-solidified soil[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2022, 39(5): 94-99.
- [14] 陈刚,马艳慧,郭肖阳,等. 氯盐侵蚀钢渣水泥固化淤泥土力学特性及氯离子运移规律研究[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(1): 48-58.
- Chen G, Ma Y H, Guo X Y, et al. Study on mechanical properties of steel slag cement solidified silt soil and law of chloride ion transport under different erosion times[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(1): 48-58.
- [15] 吴燕开,许美玲,杨椿茂,等. 海水侵蚀下复合固化剂改良淤泥质土的物理力学特性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(4): 1535-1545.
- Wu Y K, Xu M L, Yang C M, et al. Physical and mechanical properties of mucky soil modified by composite curing agent under seawater erosion[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(4): 1535-1545.
- [16] 何俊,龙思昊,朱元军,等. 侵蚀方式和环境对固化软土力学性质的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2024, 58(9): 1857-1865.
- He J, Long S H, Zhu Y J, et al. Effects of erosion method and environment on mechanical properties of solidified soft soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2024, 58(9): 1857-1865.
- [17] 齐吉琳,马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 133-143.
- Qi J L, Ma W. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 133-143.
- [18] Yang A W, Yang S P, Zhong X K, et al. Mechanical properties and structural evolution of sludge-cured lightweight soils subjected to freeze-thaw cycles[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(11): 4478-4488.
- [19] 张凌凯,贾威. 干湿-冻融循环下地聚物固化风积沙力学特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2025, 59(11): 2361-2369.
- Zhang L K, Jia W. Mechanical property of geopolymers solidified aeolian sand under dry-wet-freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2025, 59(11): 2361-2369.
- [20] 叶浩,王贵玲,叶思源,等. 宁夏南部月亮山西麓地下水化学特征研究[J]. *地球学报*, 2001, 22(4): 330-334.
- Ye H, Wang G L, Ye S Y, et al. Chemical characteristics of groundwater in the west piedmont of Yueliang Mountain, Ningxia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2001, 22(4): 330-334.
- [21] T/CECS 1175—2022 自密实固化土填筑技术规程[S]. T/CECS 1175—2022 Technical specification for self-compacted solidified soil filling [S].

(编辑 许军策)