

DOI: 10.7672/sgjs2026040092

冻融循环作用下黄土基水泥土物理力学特性 及损伤机理研究*

田勇¹, 时广辉¹, 张波¹, 叶会凯¹, 李艳², 杨磊磊¹, 马冲¹, 程禹翰²

(1. 中建三局集团西北有限公司, 陕西 西安 710016; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710061)

[摘要] 为研究不同配合比组分对黄土基水泥土在冻融循环作用下的内部结构劣化特征及物理力学性能演化规律, 基于开挖废弃黄土制备黄土基水泥土材料, 开展了正交试验和冻融循环试验。通过扫描电镜得到了不同冻融循环次数下材料的微观结构劣化特征, 并采用精密电子天平、三轴剪切试验仪和非金属超声波检测仪分别测定其质量增长率、单轴抗压强度和相对弹性模量。基于极差分析法, 系统分析了水泥掺量、粉煤灰掺量、水灰比及复合减水剂掺量对材料物理力学性能的影响规律。结果表明: 随着冻融循环次数的增加, 黄土基水泥土微观结构逐步劣化; 不同组分对其抗冻性能影响显著。其中, 质量增长率与水泥掺量、粉煤灰掺量和复合减水剂掺量呈负相关, 而与水灰比呈正相关; 抗压强度和相对弹性模量随水泥掺量、粉煤灰掺量和复合减水剂掺量的增加而提高, 随水灰比的增大而降低。

[关键词] 黄土基水泥土; 冻融循环; 力学特性; 微观结构; 劣化机理

[中图分类号] TU41

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0092-07

Study on Physical and Mechanical Properties and Damage Mechanism of Loess Soil-cement Under Freeze-thaw Cycles

TIAN Yong¹, SHI Guanghui¹, ZHANG Bo¹, YE Huikai¹, LI Yan², YANG Leilei¹,
MA Chong¹, CHENG Yuhan²

(1. China Construction Third Engineering Bureau Group Northwest Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: To investigate the internal structural deterioration characteristics and the evolution laws of physical and mechanical properties of loess-based cement soil under freeze-thaw cycles, loess-based cement soil materials were prepared based on excavated waste loess. Orthogonal experiments and freeze-thaw cycle tests were conducted. The microstructural deterioration characteristics of the materials under different freeze-thaw cycles were obtained through scanning electron microscopy. Precision electronic scales, triaxial shear testers, and non-metallic ultrasonic detectors were used to measure the mass growth rate, uniaxial compressive strength, and relative elastic modulus, respectively. Based on the range analysis method, the influence of cement content, fly ash content, water-cement ratio, and composite water reducer content on the physical and mechanical properties of the materials was systematically analyzed. The results showed that with the increase in the number of freeze-thaw cycles, the microstructure of loess-based cement soil gradually deteriorated; different components had significant effects on its frost resistance. Among them, the mass growth rate was negatively correlated with cement content, fly ash content, and composite water reducer content, but positively correlated with water-cement ratio; compressive strength and relative elastic modulus increased with the increase in cement content, fly ash content, and composite water reducer content, but decreased with the increase in water-

* 陕西省住房城乡建设科研开发计划(2021-K40); 陕西省住建厅科技项目(20226220114)

[作者简介] 田勇, 高级工程师, E-mail: 93240238@qq.com

[通信作者] 时广辉, 高级工程师, E-mail: cjsjccn0123@163.com

[收稿日期] 2025-09-20

cement ratio.

Keywords: loess based cementitious soil; freeze-thaw cycle; mechanical properties; microstructure; deterioration mechanism

0 引言

黄土在我国中西部和西北地区广泛分布,是基建工程施工开挖常产生的固废材料。“双碳”背景下,固废综合利用成为资源型城市普遍面临并亟待解决的问题之一,而传统的水泥土在生产和使用过程中会产生大量 CO_2 气体。在此背景下,黄土基水泥土应运而生,即将黄土替代水泥土中的部分水泥,并掺入粉煤灰和复合减水剂制备养护成型。黄土基水泥土实现了城市固废资源再利用和低碳降碳的双重绿色生态目标,作为新型生态友好型水泥土,具有广阔的应用前景。

近年来,国内外学者对冻融循环作用下水泥土力学性能的变化规律进行了研究^[1-6],并建立了冻融循环次数与抗压强度的函数关系式。结果表明,25%水泥掺量的水泥土试样经历冻融循环作用后,抗压强度损失率高达 48.04%^[7],不在工程允许的冻融强度损失率的范围。因此,诸多学者通过添加粉煤灰^[8-9]、石灰^[10-11]、矿渣^[12]等外加剂的方式来改良水泥土,并探讨了不同改良水泥土在冻融循环作用下的强度特性^[13]。为探究多种外加剂对改良水泥土的不同加固方式,许多学者利用扫描电镜对冻融循环后改良水泥土的微观结构变化及劣化机理进行观察分析^[14-16],结果表明,相较于未改良水泥土,外加剂改善水泥土微观结构效果显著,孔隙明显减小。

本文针对冻融循环作用下不同因素水平配合比的黄土基水泥土,利用极差分析研究水泥掺量、水灰比大小、粉煤灰掺量和复合减水剂掺量对冻融循环作用下物理力学特性的影响规律,并结合电镜扫描揭示黄土基水泥土的冻融损伤机制。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计

试验设计参照 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》,考虑水泥掺量 (a_w)、粉煤灰掺量 (α_f)、复合减水剂掺量 (α_a) 及水灰比 (u) 4 种影响因素,每个因素设计 3 个水平,如表 1 所示。利用 SPSS 软件中的数据子菜单正交设计功能完成正交试验设计方案,如表 2 所示。

1.2 试样制备

本文试验所用黄土取自陕西省西安市幸福林带某施工段经烘干筛分后使用。粉煤灰、水泥分别

表 1 正交试验设计水平因素

Table 1 Horizontal factors of orthogonal experimental design

水平	影响因素			
	$a_w/\%$	u	$\alpha_f/\%$	$\alpha_a/\%$
1	19	1.3	50	3
2	22	1.5	80	4
3	25	1.7	110	5

注:水泥掺量为土的质量分数(混合物中某因素质量占另一因素质量的百分比),粉煤灰、复合减水剂掺量为水泥的质量分数

表 2 正交试验配合比方案

Table 2 Orthogonal test proportioning scheme

试验组号	$a_w/\%$	u	$\alpha_f/\%$	$\alpha_a/\%$
A1	19.00	1.30	50.00	3.00
A2	19.00	1.50	80.00	4.00
A3	19.00	1.70	110.00	5.00
A4	22.00	1.30	110.00	4.00
A5	22.00	1.50	50.00	5.00
A6	22.00	1.70	80.00	3.00
A7	25.00	1.30	80.00	5.00
A8	25.00	1.50	110.00	3.00
A9	25.00	1.70	50.00	4.00

按照 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》和 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》选取合适比例使用。复合减水剂则由木质素磺酸盐、氨基磺酸盐、多环芳香族磺酸盐按照 2:3:5 的比例混合制成。

黄土基水泥土试样的制备流程如图 1 所示。首先,将黄土原土平铺于试验托盘,放入电热恒温鼓风干燥箱中,设定烘干温度 105℃ 烘干 24h,达到预定时间后打开箱门,自然冷却至室温将土样取出,碾碎并过 2mm 标准筛。然后分别按照正交试验设计配合比称取土、水泥、粉煤灰、复合减水剂放入搅拌机中搅拌,搅拌过程中均匀注水,10min 后停止搅拌,将均匀拌合物分 3 次放入 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的立方体试模中,并沿试模边缘向中心插捣数次。随后,将立方体试模放在振动台上,振捣 2min 后将试模取下,用刮刀沿试模上口抹平,静置 24h 后脱模。最后,用塑料袋包裹恒温恒湿养护至 28d 龄期。养护完成后使用精密电子天平测定其质量。

1.3 单轴压缩试验

依照正交设计共设置 9 组工况、7 个冻融等级,共 63 个试样($\phi 39.1\text{mm} \times 80\text{mm}$)。试验在 TFB-1 型三轴剪切试验仪上进行,如图 2 所示。试验开始前

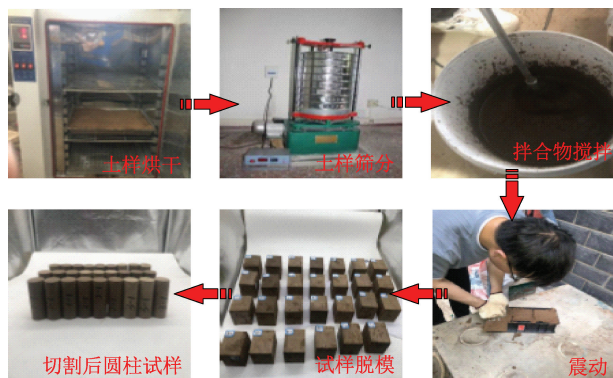


图 1 试样制备流程

Fig. 1 Sample preparation process

擦干养护至规定龄期试样的表面水分,套入橡皮套,底座依次放置透水石、试件、试件帽,保证三者中心共线,以 1mm/min 的速度连续均匀的施加荷载,采集系统自动记录应力和应变直至试样破坏,立即停止试验。

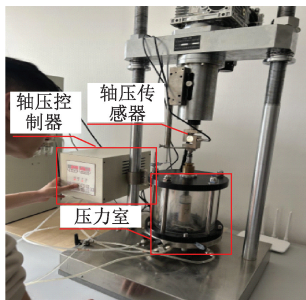


图 2 压缩试验

Fig. 2 Compression test

1.4 相对弹性模量测定试验

相对弹性模量通过测定弹性波在黄土基水泥土内部的传播速度,来判别其内部的结构状态,能反应黄土基水泥土受冻融作用后的内部损伤水平。

利用非金属超声波检测仪对不同冻融循环次数下的黄土基水泥土相对动弹性模量进行测定。试验开始前,将试件平放于试验台,给检测仪探头涂上凡士林并作为耦合介质直接堆积,超声波在耦合介质中传播时间 t_c ,然后将探头两侧分别与试件两端断面对齐,记录超声波传播时间,将采集后数据代入式(1),(2)进行计算即可得到不同冻融循环次数下黄土基水泥土的相对弹性模量。

对经历 n 次冻融循环试样的相对弹性模量应按公式(1)进行计算。

$$E_r(n) = \tau_n^2 \times 100 \quad (1)$$

式中: $E_r(n)$ 为 n 次冻融循环作用下试样的相对弹性模量(%); τ_n 为超声波在试样中的相对传播时间(%),精确至 0.1,按式(2)进行计算。

$$\tau_n = \frac{t_0 - t_c}{t_n - t_c} \quad (2)$$

式中: t_0 为超声波在耦合介质中传播时间(μs); t_n 为 n 次冻融循环作用下超声波在试样和耦合介质中的传播时间(μs)。

2 冻融循环作用下黄土基水泥土的物理特性

2.1 质量变化规律

在每个冻融循环周期结束后,对试样进行称重,按式(3)计算其冻融后质量变化率,绘制质量变化率与冻融循环次数的关系曲线,如图 3 所示。

$$\Delta W_{ni} = \frac{W_{ni} - W_{0i}}{W_{0i}} \times 100 \quad (3)$$

式中: ΔW_{ni} 为 n 次冻融循环后第 i 个黄土基水泥土试件的质量变化率(%); W_{0i} 为冻融循环试验前第 i 个黄土基水泥土试件质量(g); W_{ni} 为 n 次冻融循环后第 i 个黄土基水泥土试件的质量(g)。

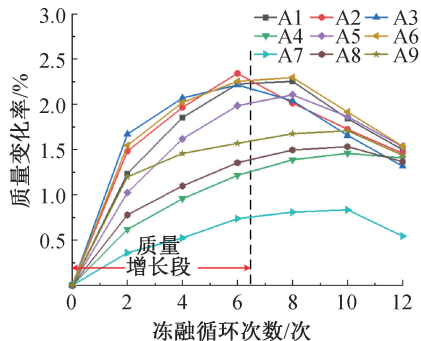


图 3 质量变化率随冻融循环次数变化关系

Fig. 3 Relationship between the rate of mass change and freeze-thaw cycles times

由图 3 可知,冻融循环作用下黄土基水泥土的质量变化过程可分为质量增长段和质量下降段。在外界温度降至 0°C 以下时,游离在试件孔隙内部的自由水会缓慢凝结成冰,与常温时相比体积增大 9%,会对孔隙四周产生膨胀应力,当膨胀应力大于黄土基水泥土内部骨架的抗拉强度时,会造成内部孔隙的不可逆扩张等结构变化^[17],在水融过程中,会从外部环境中吸收更多水,多次冻结和融化使裂隙持续发育,也致使更多的水分填补孔隙,因此,试件质量随冻融循环次数的增多而增加。

随着冻融次数的增加,试件内部孔隙逐步发育完整,试件表层的剥蚀质量逐渐增加,冻胀效应不断减弱,表层剥蚀质量大于吸水质量,试件整体随冻融次数的增加质量呈下降趋势。综上所述,冻融循环作用下黄土基水泥土的质量变化是内部结构损伤和外部颗粒脱落耦合作用的结果。

2.2 质量变化影响因素

取质量增长段(冻融循环 0~6 次)黄土基水泥

土质量的水平均值,绘制各影响因素对黄土基水泥土质量增长率的影响规律曲线,如图4所示。

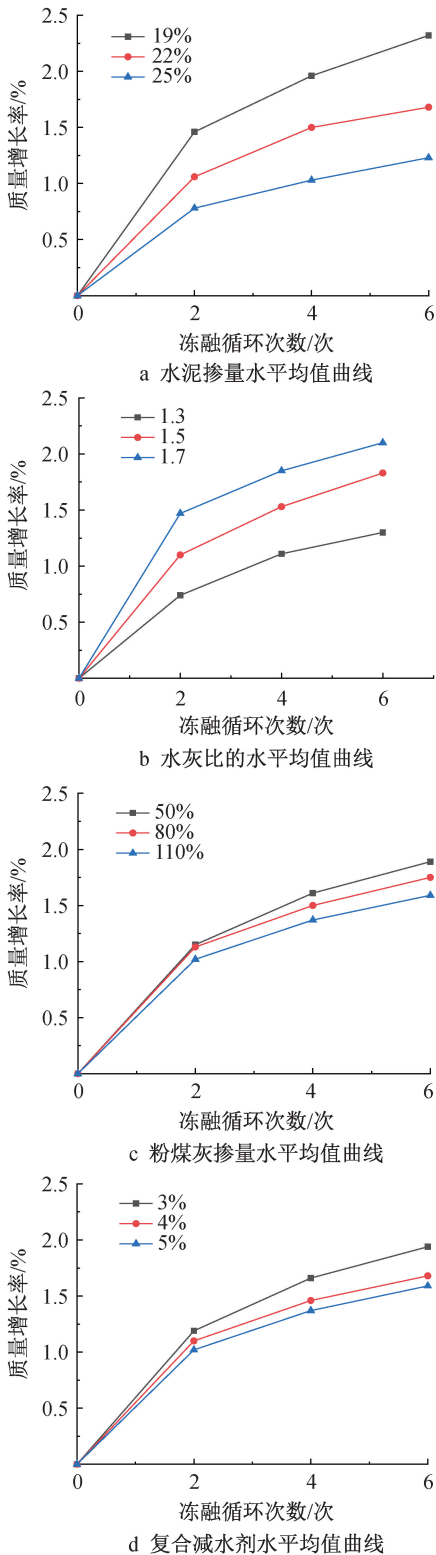


图4 冻融循环作用下质量增长率随各因素变化曲线
Fig. 4 Curve of mass growth rate under freeze-thaw cycles with various factors

由图4可知,在冻融质量增长阶段,黄土基水泥土的质量增长率随着冻融循环次数的增加逐渐增

加,且这种增加趋势逐渐减弱,说明随着冻融损伤累积,试样内部孔隙的发育率随冻融次数的增加逐渐放缓。在同一冻融循环次数下,较高掺量的水泥、粉煤灰和复合减水剂及较小的水灰比试样,质量增长率相对较低。随着冻融循环次数的增加,较高掺量的水泥、粉煤灰和复合减水剂掺量及较小水灰比试样的质量增长率增速较低,冻融损伤累积速度较慢,这说明提高水泥、粉煤灰、复合减水剂掺量及降低水灰比的大小是减缓冻融循环作用下黄土基水泥土试样质量增长速率增速、缓解试样内部孔隙发育速率的有效方式。

为分析各影响因素对黄土基水泥土质量变化率的影响强弱,采用极差分析法计算极差,如表3所示。

表3 不同冻融循环次数下质量变化率极差

冻融循环次数	极差			
	水泥掺量	水灰比	粉煤灰掺量	复合减水剂掺量
2	0.68	0.73	0.13	0.17
4	0.94	0.74	0.24	0.29
6	1.09	0.80	0.31	0.33

由极差分析可知,极差越大,影响也就越显著,即某配合比因素的极差越大,说明该因素对质量增长率的影响程度也就越大。由表3可知,冻融循环2次时,各影响因素对质量变化率的影响为水灰比>水泥掺量>复合减水剂掺量>粉煤灰掺量。随冻融次数的增加,各因素极差大小逐渐增大,说明改变各因素的水平大小对质量增长率的影响逐渐增大,冻融循环4,6次,各影响因素对质量变化率的影响为水泥掺量>水灰比>复合减水剂掺量>粉煤灰掺量,此时水泥掺量取代水灰比,成为对质量增长率影响最大的因素。

3 冻融循环作用下黄土基水泥土的力学特性

3.1 抗压强度与相对动弹性模量变化规律

不同冻融循环次数下黄土基水泥土抗压强度、相对弹性模量随冻融循环次数的变化规律如图5所示。各组试样的抗压强度、相对弹性模量与冻融循环次数有良好的指数函数关系,建立两者间函数方程如式(4),(5)所示,各组试样的拟合系数如表4所示。

$$\sigma_{\max} = Ae^{-\frac{1}{b^n}} + C \quad (4)$$

$$E_r(n) = De^{-\frac{1}{E^n}} + F \quad (5)$$

式中: σ_{\max} 为单轴抗压强度; $E_r(n)$ 为相对弹性模量,%; n 为冻融循环次数; $A \sim F$ 为拟合常数项。

由图5可知,不同配合比下黄土基水泥土的抗冻性能随冻融循环次数的变化规律基本一致,随冻

表 4 力学特性参数与冻融循环次数拟合曲线系数

Table 4 Fitting curve of frost resistance performance parameters and freeze-thaw cycles times

试验组号	拟合常数			拟合度(R^2)	拟合常数			拟合度(R^2)
	A	B	C		D	E	F	
A1	4 872.076	6.666	2 113.904	0.990	44.096	7.267	55.500	0.998
A2	4 685.070	6.318	1 441.002	0.996	43.922	6.008	54.966	0.984
A3	4 237.026	5.363	4 237.026	0.985	43.946	6.532	54.773	0.979
A4	3 755.620	7.125	4 212.349	0.995	29.835	5.842	70.331	0.995
A5	3 340.279	5.339	3 196.318	0.995	35.284	5.026	64.092	0.991
A6	3 553.856	5.104	2 097.668	0.995	38.782	4.681	60.266	0.982
A7	3 864.655	10.673	4 452.809	0.998	24.835	5.728	75.448	0.993
A8	3 579.249	8.519	3 167.403	0.998	30.275	4.522	69.379	0.989
A9	3 683.194	8.523	2 516.995	0.997	31.457	3.891	67.908	0.984

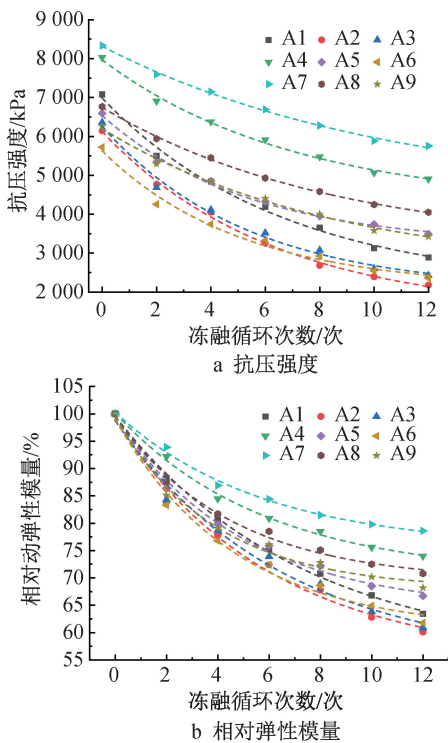


图 5 不同冻融循环次数下力学特性参数变化规律

Fig. 5 Changes in mechanical performance parameters under different freeze-thaw cycles times

融次数的增加呈指数形式递减。说明初次冻融循环对抗压强度和相对弹性模量的影响较为剧烈,内部损伤发育较快。随着冻融次数的增加,不同试验组抗压强度和相对弹性模量交替变化,拟合曲线的斜率趋于平缓,下降速率不断减缓并逐渐趋于平稳,内部损伤累积速度下降,这与部分学者的研究结论一致^[18],说明冻融的损伤效应随循环次数的增加不断减弱。

3.2 力学特性影响因素

取冻融循环作用下各因素抗压强度和相对弹性模量的平均值,绘制各影响因素对黄土基水泥土力学特性参数的影响规律曲线,如图 6 所示。

由图 6 可知,随着冻融循环次数的增加,不同因

素水平下黄土基水泥土的抗压强度和相对弹性模量均呈不同程度的衰减趋势。在同一冻融循环次数下,随水泥掺量、粉煤灰掺量及复合减水剂掺量的增加,黄土基水泥土抗压强度和相对弹性模量均出现不同幅度的提高,说明上述配合比掺量的提升,能够降低黄土基水泥土受冻后试样的内部损伤程度。

随着冻融次数的增加,较高水泥、粉煤灰和复合减水剂掺量试样的相对弹性模量的下降速率较为缓慢,说明水泥、粉煤灰和复合减水剂掺量的提高能够降低试样的受冻累积损伤速率。这是因为水泥的水化反应,粉煤灰的火山灰、微集料效应及复合减水剂的离子置换效应促进了土体间颗粒的胶结效果,使结构更加致密,提高了骨架结构的整体强度。因此,在一定程度上抵抗了冻胀效应对试样结构的破坏,抑制了冻融循环后黄土基水泥土内部损伤的扩张与发育,宏观表现为冻融循环后较高掺量的水泥、粉煤灰和复合减水剂试样表现出更高的相对弹性模量和抗压强度。

随着水灰比的增加,试样的抗冻性能不断降低,当水灰比由 1.3 增加至 1.7 时,抗压强度相对弹性模量显著降低,而低水灰比试样的下降速率更慢,这说明提升水灰比提高了冻融循环后试样的内部损伤程度且加快了试样受冻损伤的累积速率。这是因为水灰比的增加,提高了试样的初始孔隙,减弱了骨架的整体强度,内部结构相对松散,从而导致了高水灰比黄土基水泥土抗压强度和相对弹性模量的降低。

为分析各影响因素对黄土基水泥土抗压强度和相对弹性模量的影响强弱,采用极差分析法计算极差,如表 5 所示。

由表 5 可知,不同冻融循环次数下,各因素对黄土基水泥土抗压强度和相对弹性模量的影响可分为 2 个阶段。第一阶段为冻融循环 0~6 次,各因素的敏感性排序为水灰比>水泥掺量>复合减水剂掺

表 5 不同冻融循环次数下力学特性参数极差分析

Table 5 Range analysis of mechanical property parameters under different freeze-thaw times cycles

冻融循环次数	抗压强度极差				相对弹性模量极差			
	a_w	u	α_f	α_a	a_w	u	α_f	α_a
2	1 297.69	1 916.52	464.52	640.89	3.30	7.23	1.37	1.87
4	1 477.12	1 891.16	468.01	690.93	3.67	6.10	1.67	2.13
6	1 689.55	1 849.85	479.93	697.98	5.57	5.77	1.97	2.30
8	1 817.38	1 803.94	507.39	711.66	6.97	5.70	2.37	2.83
10	1 862.33	1 785.21	489.77	767.87	8.90	5.07	3.53	3.83
12	1 912.01	1 777.65	525.15	791.02	10.00	5.03	3.73	4.50

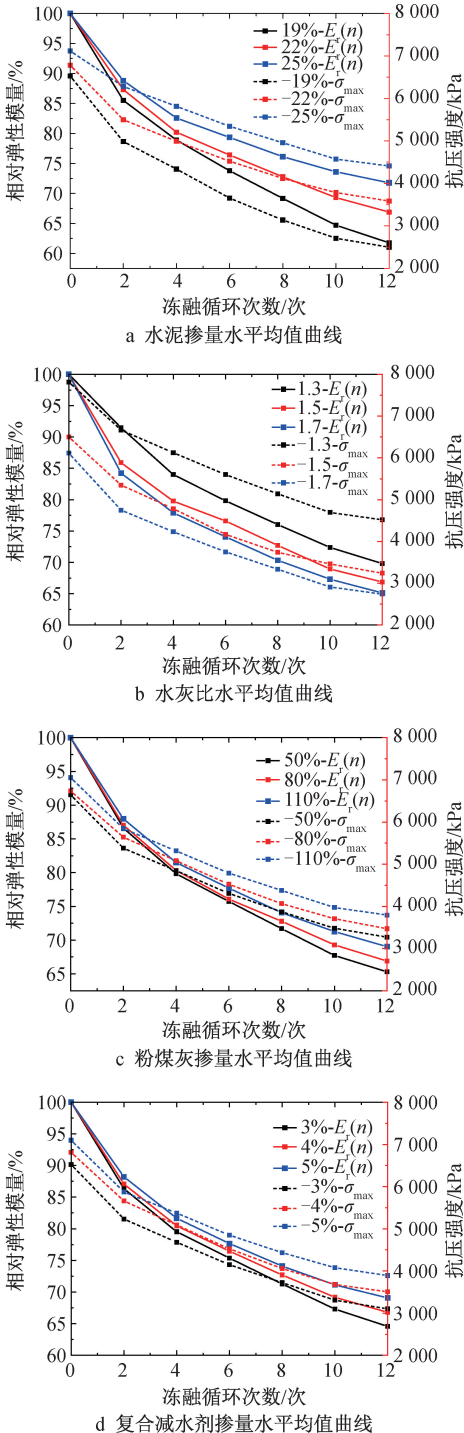


图 6 冻融循环作用下力学特性参数随各因素变化曲线
Fig. 6 Variation curves of mechanical parameters with various factors under freeze-thaw cycles

量>粉煤灰掺量,说明此阶段水灰比是影响试样冻融损伤程度的首要因素。随着冻融循环次数的增加,水灰比对相对弹性模量的影响逐渐减小,水泥掺量、粉煤灰掺量及复合减水剂掺量极差不断增大,对相对弹性模量的影响逐渐加大,并与水泥掺量的极差不断迫近。第 2 阶段为冻融循环 8~12 次,水泥掺量取代水灰比成为敏感性最强的因素,此时各因素的敏感性排序为水泥掺量>水灰比>复合减水剂掺量>粉煤灰掺量,说明在这一阶段,水泥掺量成为影响黄土基水泥土冻融损伤的首要因素,与第一阶段相同,复合减水剂掺量对冻融后黄土基水泥土内部损伤程度的影响大于粉煤灰掺量。

4 冻融化机理分析

选取试验组 A1 采用场发射环境扫描电镜对经历冻融 0,4,8,12 次冻融循环的黄土基水泥土进行分析,如图 7 所示。

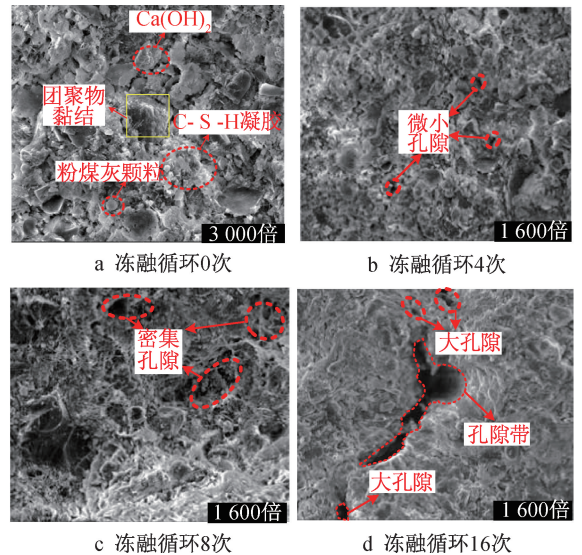


图 7 不同冻融循环次数下黄土基水泥土微观形貌
Fig. 7 Microscopic morphology of loess based cementitious soil under different freeze-thaw cycles times

由图 7 可知,冻融循环 0 次时,黄土基水泥土内部土颗粒与板片状晶体 (Ca(OH)₂)、短棒状晶体 (钙矾石)、水泥及粉煤灰水化反应生成的 C-S-H 絮状凝胶及圆形光滑粉煤灰颗粒相互联结包裹,形成

密实的团聚物,偶现微小孔隙随机分布。在冻融循环4次时,土颗粒被C-S-H凝胶包裹并相互联结,结构紧凑,在团聚物内部及联结体间不均匀分布微小孔隙,偶现较大孔隙。冻融循环8次,孔隙数目明显增多,孔隙大小显著增大,包裹在土颗粒周围或骨架间的细粒成分减小,且颗粒间边界逐渐显现,多数孔隙间有相互连通的趋势,部分孔隙内层结构胀裂,部分较大孔隙呈“沟壑”状使得骨架界面愈发清晰。冻融循环12次,孔隙数目明显减小常见大孔隙分布,部分颗粒发生位移,孔隙间相互贯通形成“孔隙带”并呈“沟壑”形态向内部延伸,骨架界面清晰可见。在反复的冻融循环作用下,黄土基水泥内部结构不断劣化,孔隙不断孔隙持续发育、扩张,直至相互贯通,宏观表现为单轴抗压强度和相对弹性模量随冻融循环次数的增加而不断减小。

5 结语

1)冻融循环作用下黄土基水泥土质量变化是内部结构损伤和外部颗粒脱落耦合作用的结果。在质量增长段,黄土基水泥土的质量增长率随着冻融循环次数的增加逐渐增加,在一定冻融循环次数下,质量增长率与水泥掺量、粉煤灰掺量和复合减水剂掺量呈负相关关系,与水灰比呈正相关关系。

2)黄土基水泥土轴心抗压强度、相对弹性模量均与冻融循环次数有良好的指数函数关系。抗压强度、相对弹性模量与水泥掺量、粉煤灰掺量和复合减水剂掺量呈正相关关系,与水灰比呈负相关关系。

3)冻融循环作用下,黄土基水泥土微观结构的演化规律呈现为内部微观结构随冻融循环次数的增加不断劣化,内部孔隙总数量和大孔隙数量不断增加,骨架界面逐渐清晰,孔隙之间相互连接直至相互贯通。

参考文献:

[1] 宁宝宽,陈四利,刘斌.冻融循环对水泥土力学性质影响的研究[J].低温建筑技术,2004,26(5):10-12.
NING B K, CHEN S L, LIU B. Influence of freezing and thawing cycles on mechanical properties of cemented soil [J]. low temperature architecture technology, 2004, 26(5): 10-12.

[2] 刘欣,赵记领,杨平.冻融循环下有机质水泥土的抗压强度与微观孔隙特征[J].林业工程学报,2022,7(5):169-176.
LIU X, ZHAO J L, YANG P. Study on compressive strength and micro-pore characteristics of organic cement soil under freeze-thaw cycle [J]. Journal of forestry engineering, 2022, 7(5): 169-176.

[3] AJABI NAEINI A, SIDDIQUA S, CHERIAN C. A novel stabilized rammed earth using pulp mill fly ash as alternative low carbon cementing material [J]. Construction and building materials, 2021, 300: 124003.

[4] 张森鑫,袁方正,李治斌,等.冻融作用下木质素改良碳酸盐渍土力学性能研究[J].水利科学与寒区工程,2022,5(7):8-11.
ZHANG M X, YUAN F Z, LI Z B, et al. Study on mechanical properties of carbonated soil modified by lignin under freezing and thawing [J]. Hydro science and cold zone engineering, 2022, 5(7): 8-11.

[5] ZHANG Y, JOHNSON A E, WHITE D J. Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess [J]. Transportation geotechnics, 2019, 21: 100279.

[6] TUNCER B. Edil, BORA C. Freeze-thaw performance of chemically stabilized natural and recycled highway materials [J]. Sciences in cold and arid regions, 2015, 7(5): 482-491.

[7] 庞文台,申向东.冻融循环对水泥土力学性能的影响[J].公路,2012,57(9):30-32.
PANG W T, SHEN X D. Effect of freeze-thaw cycle on mechanical properties of cement soil [J]. Highway, 2012, 57(9): 30-32.

[8] 倪静,贺青青,李杉杉,等.水质污染和冻害作用下粉煤灰水泥土宏微观物理力学特性的相关性研究[J].长江科学院院报,2021,38(9):97-104.
NI J, HE Q Q, LI S S, et al. Correlation between macroscopic mechanical strength and microstructure of fly ash cement soil under combined effect of water pollution and freeze-thaw cycles [J]. Journal of Yangtze River scientific research institute, 2021, 38(9): 97-104.

[9] 张淑玲,倪静,马蕾,等.冻融循环作用后水泥土及粉煤灰土的力学性能试验研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):196-201.
ZHANG S L, NI J, MA L, et al. Experimental study on mechanical properties of cement soils and fly ash soils after freeze-thaw cycling [J]. Journal of water resources and water engineering, 2018, 29(4): 196-201.

[10] WANG T L, LIU J K, TIAN Y H. Dynamic properties of cement-and lime-improved soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2010, 32(11): 1733-1737.

[11] 周丽萍,申向东,白忠强.外掺剂对冻融循环水泥土强度影响的试验研究[J].人民长江,2008,39(24):73-76.
ZHOU L P, SHEN X D, BAI Z Q. Experimental study on the strength of cement soil impacted by the mixed agent under the cycling of freeze-thaw [J]. Yangtze river, 2008, 39(24): 73-76.

[12] 邵刚,李佩青,王彬杰.冻融循环对碱激发高炉矿渣微粉加固软土强度的影响[J].公路交通科技,2022,39(1):40-47.
SHAO L, LI P Q, WANG B J. Influence of freeze-thaw cycle on strength of soft soil solidified by alkali-activated ground granulated blast furnace slag [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2022, 39(1): 40-47.

[13] YARBASI N, KALKAN E, AKBULUT S. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives [J]. Cold regions science and technology, 2007, 48(1): 44-54.

面层与围护结构交接处采用隔离措施。地面与墙之间踢脚部位应设置垂直减振垫。楼板基层铺设的减振垫接缝处应保持平整性和整体性,采用自粘性搭接,搭接宽度 $\geq 50\text{mm}$,搭接处可用宽 $40\sim 50\text{mm}$ 纸质或塑料胶纸闭合,以防上层水泥砂浆渗入垫板下。

4.3 室内风管(井)隔声技术

室内风管(井)敷设无法避免穿楼板、墙板,因此,对已形成的“声桥”区域进行隔声处理至关重要,具体措施如下。

1) 断开“声桥”。将管道外壁做好保温棉包扎处理,法兰接口处四周放置弹性减振垫片。

2) 缝隙封堵。对施工过程中产生的结构洞口、缝隙进行密实封堵。可采用双层防火泥(内层柔性+外层刚性)封堵,可使空气声隔声量 $D_{nT,w}+C$ 提升 $6\text{dB}(A)$ 。

3) 消声处理。对风管主管道增加阻抗复合消声器,如在主管道设置 1.2m 的消声器,插入损失量可达 $15\text{dB}(A)$ 。其次,管道连接采用柔性材质,如采用硅橡胶减振接头等。

4) 隔声处理。户内可利用木作装饰遮蔽风管(井)设备,不仅美化隐蔽设备管道,还能起到隔声效果。

现场测试数据显示,对风管管道在户内进行快速封堵处理后,管井走廊处楼板空气隔声量提升了 $4\text{dB}(A)$,邻管井次卧提升了 $2\text{dB}(A)$,表明施工阶段处理好楼板、隔墙洞口的缝隙对提升住宅隔声性能具有显著作用。

5 结语

本文基于某“五恒”住宅实践案例的现场测试

与研究发现,“恒静”目标易受管道声桥、墙体抹灰缺失、风管穿墙洞口等细节处理不当的影响。因此,严控缝隙密实封堵、优先采用重质墙体并完成抹灰、对穿楼板/墙管道进行有效的隔振消声处理,是提升此类住宅隔声性能的关键。

参考文献:

- [1] 王军强. 住宅浮筑楼板撞击声改善量试验[J]. 声学技术, 2020,39(3):329-333.
WANG J Q. Experimental study on impact sound improvement of residential floating floor[J]. Technical acoustics, 2020, 39(3): 329-333.
- [2] 薛小艳. 楼板重击撞击声噪声降低方法研究[J]. 中国环保产业, 2019(10):156-161.
XUE X Y. Study on noise reduction method of floor-slab thump and impact sounds[J]. China environmental protection industry, 2019(10):156-161.
- [3] 张毅. 加气混凝土砌块墙体空气声隔声现场实测研究[J]. 建筑科技, 2020(2):61-64.
ZHANG Y. Field test on sound insulation performance of aerated concrete block wall[J]. Building technology, 2020(2):61-64.
- [4] 孙光明. 暖通空调系统的降噪措施分析[J]. 城市建筑空间, 2022,29(S1):345-346.
SUN G M. Analysis of noise reduction measures for HVAC system[J]. City & house, 2022,29(S1):345-346.
- [5] 王军强. 绿色建筑楼板声学性能优化研究[J]. 声学技术, 2019, 38(6):665-669.
WANG J Q. Research on the acoustic performance optimization of green building floor slabs[J]. Technical acoustics, 2019, 38(6):665-669.
- [6] 吴晓春, 倪惠冰. 居住建筑浮筑楼板保温隔声技术的应用研究[J]. 新型建筑材料, 2019,46(11):91-93,98.
WU X C, NI H B. Application research on thermal and sound insulation technology of floating floor in residential buildings[J]. New building materials, 2019,46(11):91-93,98.
- [14] 张经双, 段雪雷, 马冬冬. 氯盐和冻融耦合下水泥土的强度和破坏特征[J]. 冰川冻土, 2020,42(2):515-522.
ZHANG J S, DUAN X L, MA D D. Strength and failure characteristics of soil-cement under coupling of chloride salt and freeze-thaw cycles[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2020,42(2):515-522.
- [15] 张城芋, 江双双, 陈四利, 等. 赤泥-水泥复合土的工程特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2023,41(5):475-480.
ZHANG C Y, JIANG S S, CHEN S L, et al. Experimental study on engineering properties of red mud-cement composite soil[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2023,41(5):475-480.
- [16] TAMUT Y, KALITA A, SINGH S K. A study on strength behaviour of seasonal frozen soils stabilized with cement and wood ash[C]//Sustainable construction materials. Singapore:Springer, 2022:93-105.
- [17] 陈四利, 史建军, 于涛, 等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014,22(2):343-349.
CHEN S L, SHI J J, YU T, et al. Effect of freezing-thawing cycle on the mechanical behaviors of cemented soil[J]. Journal of basic science and engineering, 2014,22(2):343-349.
- [18] 张经双, 段雪雷. 冻融循环下不同龄期水泥土损伤特性和能量耗散[J]. 硅酸盐通报, 2019,38(7):2144-2151.
ZHANG J S, DUAN X L. Effects of freeze-thaw cycles on damage characteristics and energy dissipation of soil-cement at different ages[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019,38(7):2144-2151.

(上接第98页)