

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220616001

冻融循环作用对 F1 加固黄土强度与微观结构的影响研究*

谢嘉豪¹, 李建东¹, 王旭^{1,2}, 张延杰¹, 蒋代军¹, 王兴为¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 冻融循环作用显著影响固化剂加固效果和固化土物理力学特性。为研究冻融循环作用对 F1 加固黄土强度与微观结构特性的影响, 对不同掺量、不同冻融次数的 F1 固化黄土试样开展三轴不固结不排水试验及电镜扫描试验, 探讨冻融前后 F1 加固黄土抗剪强度参数及微观孔隙结构变化规律。研究发现, F1 可显著改善黄土持水特性和压实特性。当 F1 掺量为 0.3 L/m³ 最佳掺量时, 与黄土相比, F1 固化黄土塑限和最优含水率分别减少 2.65% 和 7.22%, 液限和最大干密度分别增大 7.92% 和 9.83%; F1 显著增大黄土黏聚力与内摩擦角。0 次和 15 次冻融循环时, 与未冻融黄土相比, 0.3 L/m³ 掺量 F1 固化黄土的黏聚力分别增大 36.82% 和 16.64%, 内摩擦角分别增大 16.92% 和 4.63%; 与黄土相比, 冻融循环 15 次时 F1 固化黄土中微孔隙增大 6.28%、小孔隙减少 17.84%, 孔隙面积比和平均分形分维数分别减小了 20.4% 和 0.67%, 表明经 F1 固化后黄土形成更加稳定的层状堆叠结构, 显著改善冻融循环作用下微、小孔隙的演化和发育, 提高密实度、增强力学性能和抗剪强度。

关键词: 冻融循环; 黄土; F1 离子固化剂; 抗剪强度; 微观结构

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1445-09

Effects of Freeze-thaw Cycles on the Strength and Microstructure of F1-solidified Loess

XIE Jiahao¹, LI Jiandong¹, WANG Xu^{1,2}, ZHANG Yanjie¹, JIANG Daijun¹, WANG Xingwei¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Freeze-thaw cycles significantly affects the consolidation effect and the physical and mechanical properties of solidified soil. In order to study impact of freeze-thaw cycles on the strength and microstructural properties of F1-solidified loess, triaxial unconsolidated-undrained loess tests and electron microscopy scanning tests were carried out on F1-solidified loess samples with varying FI dosages and freeze-thaw durations. These tests aimed to explore the shear strength parameters and changes in the microscopic pore structure of F1-solidified loess before and after freeze-thaw cycles. The study revealed that F1 can significantly improve the water-holding and compaction properties of loess. At

* 收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868038)、甘肃省基础研究创新群体项目(21JR7RA347)资助

作者简介: 谢嘉豪(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事黄土地区地基处理与基础工程方向的研究。

E-mail: 11200279@stu.lzjtu.edu.cn

the optimum dosage of $0.3\text{L}/\text{m}^3$, the plastic limit and optimum moisture content of F1-solidified loess are reduced by 2.65% and 7.22% respectively, while the liquid limit and maximum dry density are increased by 7.92% and 9.83% respectively. F1 significantly increases the cohesion and internal friction angle of loess. At 0 and 15 freeze-thaw cycles, compared with unfrozen thawed loess, the cohesion of F1-solidified loess with $0.3\text{L}/\text{m}^3$ content increased by 36.82% and 16.64% respectively, the internal friction angle increased by 16.92% and 4.63% respectively. compared with the loess, the microporosity in F1-solidified loess increased by 6.28% and small porosity decreased by 17.84% at 15 freeze-thaw cycles. Additionally, the pore area ratio and average fractal dimension decreased by 20.4% and 0.67% respectively. These changes indicate that the loess forms a more stable laminated stacking structure after F1 curing, which significantly improves the evolution and development of micro and small pores under freeze-thaw cycles, increases the compactness, enhances the mechanical properties and shear strength.

Keywords: freeze-thaw cycle; loess; F1 ionic soil stabilizer; shear strength; microstructure

0 引言

在西北干旱与半干旱的形成和赋存环境影响下,黄土具有独特的矿物成分和结构特征,多表现出质地疏松、孔隙结构发育、湿陷性强等特殊物理性质^[1-2],经常出现路基开裂、地基沉陷、边坡失稳等一系列工程病害,使黄土的加固与改良研究引起了工程与科研人员的关注^[3-4]。研究表明,水泥、石灰和粉煤灰等传统胶凝材料固化黄土具有早期强度低、易收缩开裂等缺点^[5-7],且生产过程中存在高污染、高耗能现象,双碳战略的发展将制约传统胶凝材料加固黄土的大面积应用。

20世纪以来,胶体化学、高分子化学及岩土工程化学等学科的快速发展,为新型土壤固化剂的研制注入了新活力,国内外技术人员研发出众多性能优良、经济高效、绿色环保、施工简便的新型土壤固化剂^[8-9]。张丽萍等^[10]采用EN-1固化剂加固黄土,发现EN-1可显著提高黄土抗剪强度及抗渗性能。刘月梅等^[11]从持水和导水性等方面论证了EN-1固化黄土在边坡生态防护应用中的可行性。王银梅等^[12]基于现代化测试手段,对SH加固黄土机理和物理力学特性进行了研究,发现SH可显著增大黄土强度,减小压缩性,消除湿陷性。徐鹏飞等^[13]发现15次冻融循环后SH加固黄土的黏聚力和内摩擦角仍分别提高58.03%及103.67%,表明SH固化剂可极大改善黄土的抗冻性。田见效等^[14]对S型固化剂加固黄土的强度、抗冻性和抗渗性进行了研究,

发现反复冻融条件下S型固化剂可有效减小黄土强度损失,提高土体稳定性。李建东等^[15-16]对F1离子固化剂加固机理、加固黄土物理力学特性和微观结构展开试验研究,发现F1可有效改善黄土水敏性,减小孔隙率,提高土体密实度和力学强度^[17]。

离子型固化剂虽可显著改善黄土的物理力学特性,但因西北黄土多分布于季冻区,冬冻夏融作用显著影响加固效果和固化黄土的物理力学特性^[18-19],针对离子型固化剂加固黄土抗冻耐久性研究鲜有报道。鉴于此,本文以兰州黄土为试验对象,对冻融循环作用下F1加固黄土的强度特性和微观结构特征展开研究,以期对离子型固化剂在季冻区的应用提供技术参考。

1 试验材料与试样制备

1.1 试验材料

1.1.1 黄土

试验黄土为埋深0.5~2.0 m的第四纪兰州重塑黄土,基本物理参数见表1。土体中粉粒、黏粒含量分别为75.6%、16.8%,属粉质黏土。

1.1.2 F1离子固化剂

F1离子固化剂(简称F1)是一种丙烯酸磺化有机聚合物(密度 $1.35\text{g}/\text{cm}^3$),常温下呈淡黄色,稀溶液无毒、无公害。F1遇水时可释放大量的强阳离子化合物,在黄土中黏土矿物表面发生一系列物化反应,改善黄土物理力学特性。F1加固土体过程如图1所示,其加固机理主要包括:(1)破坏双电层结构,

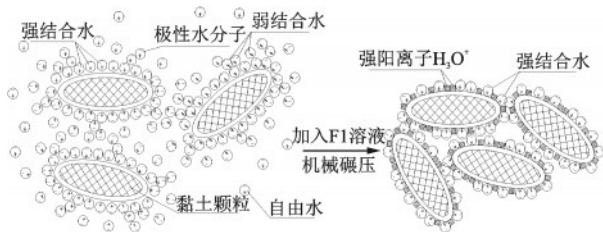


图1 F1加固土体示意

Fig.1 Schematic diagram of F1-solidified soil

减弱土壤吸水能力;(2)通过离子交换反应,减小土

颗粒间距,促进颗粒絮凝团聚;(3)F1中的有机磺化物包裹土颗粒形成隔水膜,降低土体水敏性^[17]。

1.2 试样制备

选取四种F1掺量分别为0.2、0.3、0.5、0.7 L/m³,根据土体质量和掺量比计算F1用量,并将F1按照体积比1:200进行稀释,后将稀释液与黄土充分拌合,制备F1固化黄土试样。按照《公路土工试验规程》^[20]开展击实试验及界限含水率试验,试验结果见表1。

表1 F1固化黄土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of F1-solidified loess

F1掺量/(L·m ⁻³)	塑限/%	液限/%	塑性指数I _p	最优含水率ω _{opt} /%	最大干密度ρ _{dmax} /(g·cm ⁻³)
黄土	18.9	26.5	7.6	14.26	1.73
0.2	18.60	27.4	8.8	13.50	1.87
0.3	18.40	28.6	10.2	13.23	1.9
0.5	18.41	28.6	10.2	14.28	1.866
0.7	18.41	28.6	10.2	14.69	1.84

由表1可知,F1加固后黄土塑限减小、液限及塑性指数增大。随着F1掺量增大,土体最优含水率先减小后增大,最大干密度先增大后减小,当F1掺量为0.3 L/m³时,较黄土相比,F1固化黄土塑限减少2.65%,液限和塑性指数分别增大7.92%、34.21%,最优含水率减少7.22%,最大干密度增大9.83%,表明F1可大幅影响土体持水特性和击实特性。其原因是黄土的持水特性主要受影响土体吸附作用的孔隙状况和比表面积等因素影响,F1通过离子交换作用破坏双电层结构,减小土颗粒表面水膜厚度和颗粒间距,进而减小土体孔隙率和比表面积,增大土体密实度,削弱了对水的吸附能力,从而使得土体塑限及最优含水率降低,液限增大,进而达到改善黄土基本物理特性的目的^[17,21]。

1.3 试验方案

1.3.1 F1加固黄土冻融循环试验

试验地点为兰州交通大学道桥工程灾害防治实验室,冻融循环试验控制试样压实度为95%,利用液压制样器,分三层将不同F1掺量的固化黄土试样制备成尺寸为Φ39.1 mm×H80 mm的三轴试样,试样成型后利用保鲜膜包裹,并对其编号记录。利用波纹铝翅片串铜管结构的DW-40型低温试验箱模拟低温环境,如图2所示,其具有换热效率高、制冷速度快等优点,冻融循环过程如图3所示,其中设

定黄土试样冻结温度为-20℃,融化温度为20℃,冻融循环次数为15次,单次冻融循环周期为24 h(冻结12 h和融化12 h)。



图2 DW-40型低温试验箱

Fig.2 DW-40 low temperature test chamber

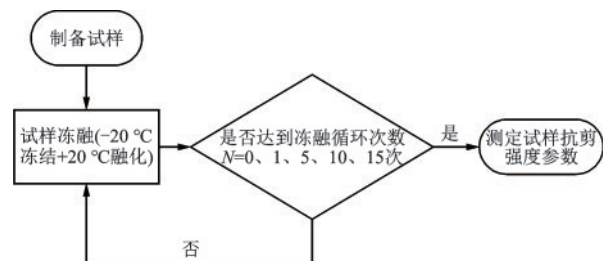


图3 冻融循环过程示意

Fig.3 Schematic diagram of freeze-thaw cycle process

1.3.2 三轴不固结不排水试验

冻融循环次数 N 为 0、1、5、10、15 时,对每种试样分别施加 4 种围压(50、100、200、400 kPa),控制剪切速率为 0.8 mm/min,依据试验规程^[20],使用围压由单片机自动控制的 TSZ-6A 型应变控制式三轴仪(图 4),对不同 F1 掺量固化黄土试样开展三轴不固结不排水试验,测定试样在不同围压和冻融循环次数下的抗剪强度,研究 F1 固化剂对黄土抗剪强度参数的影响。

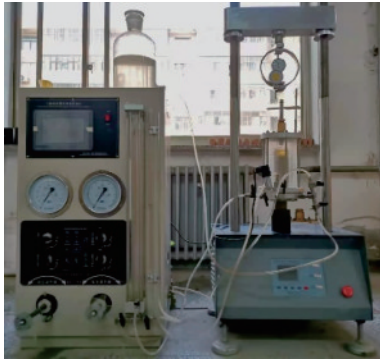


图 4 TSZ-6A 型应变控制式三轴仪
Fig.4 TSZ-6A strain-controlled triaxial apparatus

1.3.3 电镜扫描(SEM)试验

选取冻融 0、5、10、15 次黄土和 F1 固化黄土试样,切片打磨。在 20 kV 电压下,利用 GeminiSEM500 型电镜扫描仪发射、接受试样表面电子束反射信号(图 5),获取不同试样 1 500 倍微观结构图像,采用 Image-Pro Plus6.0 细观图像分析软件,提取 SEM 图像中土体微观孔隙结构参数,借助分形理论对 F1 固化黄土微观孔隙结构特征展开研究,以期从微观角度分析 F1 固化剂对黄土抗冻融特性的影响机理。

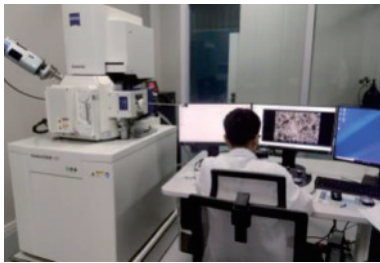


图 5 GeminiSEM500 型电镜扫描仪
Fig.5 GeminiSEM500 electron microscope scanner

2 试验结果及其分析

2.1 冻融循环作用对抗剪强度的影响

冻融循环作用显著影响固化土物理力学特性,

易导致固化土工程性质劣化。为研究冻融循环作用对 F1 固化黄土强度特性的影响,对不同冻融次数下不同 F1 掺量固化黄土的抗剪强度参数展开分析,研究冻融循环作用对 F1 固化黄土强度特性的影响。

2.1.1 冻融循环作用对 F1 固化黄土黏聚力的影响

图 6 为冻融作用下不同 F1 掺量固化黄土试样黏聚力与冻融循环次数的关系曲线。可知不同掺量 F1 固化黄土试样黏聚力均随冻融循环次数的增大而减小,表明冻融循环作用下 F1 固化黄土出现不同程度劣化。由图 6(a)可知,与黄土相比,F1 掺量为 0.2、0.3、0.5、0.7 L/m³ 时,未冻融条件下 F1 固化黄土黏聚力分别提升 1.06 倍、1.34 倍、1.29 倍、1.11 倍。冻融 1 次时固化土黏聚力显著减小,冻融 5 次后固化土黏聚力下降幅度趋于稳定。

为量化分析冻融循环作用下 F1 对黄土黏聚力的增强效果,采用公式(1)计算冻融循环条件下不同 F1 掺量固化黄土的黏聚力变化率,如图 6(b)所示,绘制黏聚力变化率与冻融循环次数的关系曲线。

$$S_n' = \frac{C_{\text{F1HT/HT},n} - C_{\text{HT},0}}{C_{\text{HT},0}} \times 100\% \quad (1)$$

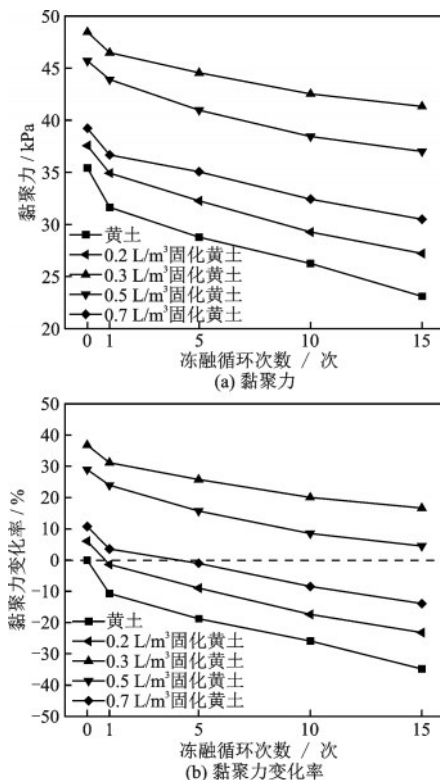


图 6 黏聚力与冻融循环次数的关系曲线
Fig.6 Relationships between cohesion force and number of freeze-thaw cycles

式中, S_n' 为 n 次循环时固化黄土黏聚力变化率(%) ; $C_{\text{F1HT/HT},n}$ 为 n 次循环时固化黄土黏聚力(kPa) ; $C_{\text{HT},0}$ 为黄土黏聚力(kPa)。

由图 6(b) 可知, 不同掺量 F1 固化黄土的黏聚力变化率随冻融循环次数的增大而减小。冻融循环 15 次时, 与未冻融黄土相比, 0.3、0.5 L/m³ 掺量固化黄土的黏聚力分别增大 16.64% 和 4.47%, 而 0.2、0.7 L/m³ 掺量的黏聚力分别减少 23.18%、13.94%, 可知冻融循环 15 次时, 0.3、0.5 L/m³ 掺量 F1 仍可提升黄土黏聚力, 且 F1 为 0.3 L/m³ 掺量时加固效果最佳。其原因是 F1 释放的大量强阳离子与黏土矿物发生离子交换反应, 破坏土颗粒表面双电层结构, 减薄水膜厚度, 削弱了冻融循环作用下粒间孔隙水体积变化对土骨架结构的挤压作用, 减弱水分融化迁移时对土骨架的冲刷作用, 增强粒间联结作用, 提高黏聚力。

2.1.2 冻融循环对 F1 固化黄土内摩擦角的影响

图 7 为冻融循环作用下不同 F1 掺量固化黄土内摩擦角与冻融循环次数的关系曲线。可知不同 F1 掺量固化黄土内摩擦角均随冻融循环次数的增大而减小。由图 7(a) 可知, 与黄土相比, 未冻融时 F1 掺量为 0.2、0.3、0.5、0.7 L/m³ 的固化黄土试样内摩擦角分别提升了 1.09 倍、1.17 倍、1.15 倍、1.11 倍。且第 1 次冻融后固化黄土内摩擦角显著降低, 后随冻融次数的增大其下降速率减小并趋于稳定。

同样为量化分析冻融循环作用下 F1 对黄土内摩擦角的增强效果, 采用公式 (2) 计算冻融循环条件下不同 F1 掺量固化黄土的内摩擦角变化率, 如图 7(b) 所示, 绘制内摩擦角变化率与冻融循环次数的关系曲线。

$$L_n' = \frac{\varphi_{\text{F1HT/HT},n} - \varphi_{\text{HT},0}}{\varphi_{\text{HT},0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, L_n' 为 n 次循环时固化黄土内摩擦角变化率(%) ; $\varphi_{\text{F1HT/HT},n}$ 为 n 次循环时固化黄土内摩擦角(°) ; $\varphi_{\text{HT},0}$ 为黄土内摩擦角(°)。

由图 7(b) 可知, 与未冻融黄土相比, 15 次冻融循环后, 0.3、0.5、0.7 L/m³ 掺量的 F1 固化黄土内摩擦角仍分别增大 4.63%、2.83%、0.34%, 而 0.2 L/m³ 掺量的 F1 固化黄土内摩擦角减少 2.82%, 表明经 15 次冻融之后 0.3、0.5、0.7 L/m³ 掺量的 F1 仍可提升黄土内摩擦角, 其原因是 F1 中的强阳离子物质与黏土颗粒表面极性水分子和水化半径较大的金属阳离子发生离子交换反应, 破坏双电层水膜结构, 减小颗粒间距, 增大粒间联结力和摩擦力。

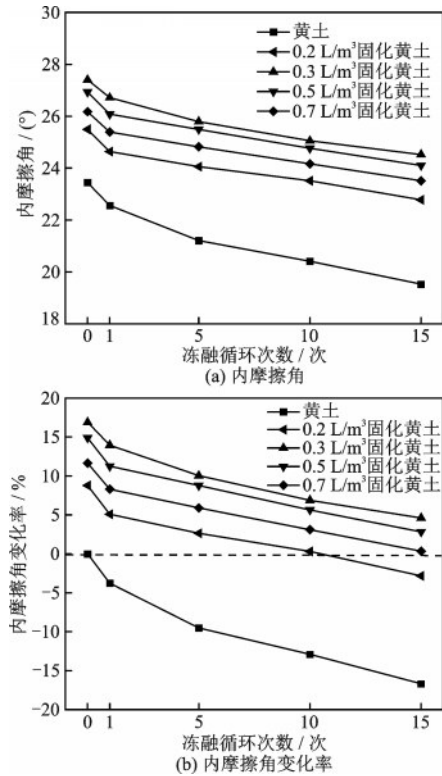


图 7 内摩擦角与冻融循环次数的关系曲线

Fig.7 Relationships between angle of internal friction and number of freeze-thaw cycles

2.2 冻融循环作用对 F1 加固黄土微观结构的影响

2.2.1 F1 固化黄土微观结构定性分析

由以上分析可知, 0.3 L/m³ 掺量是 F1 加固黄土的最佳掺量, 图 8 为不同冻融次数时黄土和 0.3 L/m³ 掺量 F1 固化黄土的微观孔隙结构 SEM 图像, 其中灰度较大的部分为土体孔隙、灰度较小的部分则为土骨架。由图 8(a) 可知, 黄土中颗粒破碎, 孔隙结构发育, 且粒间以点-点或点-面接触方式为主。对比图 8(e) 可知, 掺加 F1 后, 黄土中孔隙面积和连通孔隙显著减小, 粒间接触方式以点-面或面-面接触为主, 表明 F1 可促进土颗粒絮凝、团聚, 改变粒间接触方式, 使颗粒间形成以面-面接触为主的层状稳定堆叠结构, 进而改善黄土力学强度。

此外, 分析图 8(b)~(d) 和 (f)~(h) 可知, 随着冻融循环次数增大, 土体内部孔隙面积和孔径不断增大, 表明冻融循环作用下颗粒间的胶结强度减弱, 导致固化黄土黏聚力和内摩擦角不断劣化。当冻融循环次数大于 10 次时, 与黄土相比, F1 固化黄土内部大孔隙显著减小, 表明 F1 可有效减弱冻融作用下水分相变引起的结构破坏。

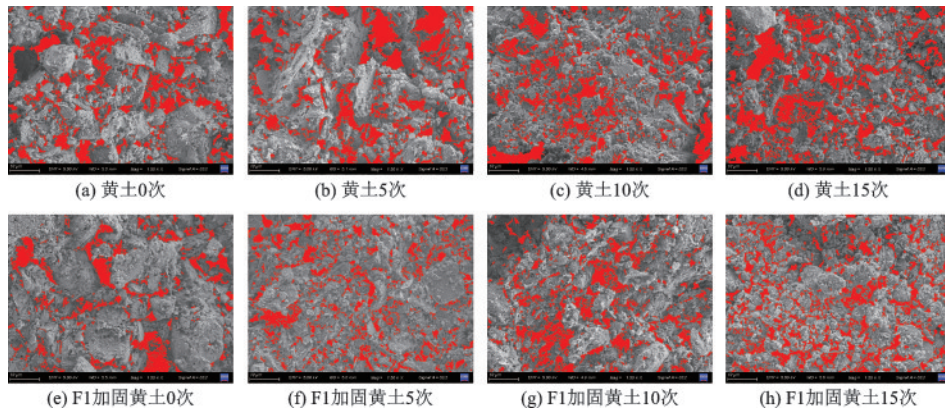


图8 不同冻融次数下土样SEM图像(1500×)

Fig.8 SEM images of soil samples under different freezing and thawing times (1500×)

2.2.2 F1固化黄土微观结构定量分析

(1) 土体孔隙等效直径

孔隙等效直径可用于判断冻融循环过程中土体孔隙孔径的变化规律。如图9所示,借鉴微观孔隙分类标准^[22],依据孔隙等效直径参数,对黄土试样中的孔隙展开分类,绘制不同冻融循环次数下F1固化黄土中4类孔隙占比关系曲线图。

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (3)$$

式中, S 为孔隙面积。

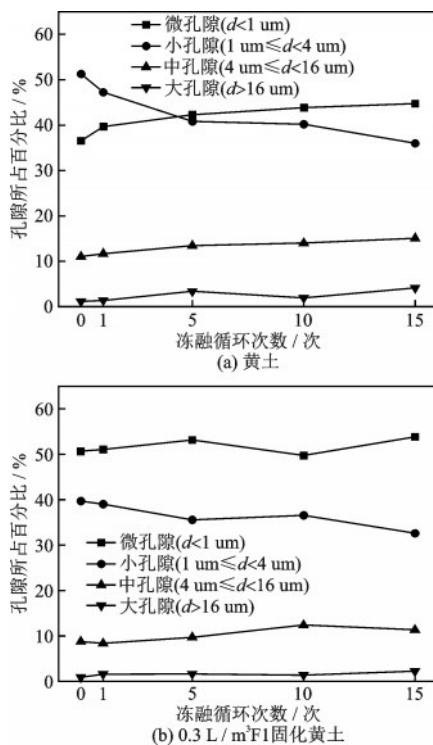


图9 各类孔隙占比与冻融循环次数的关系曲线

Fig.9 Relationships between proportion of various pores and number of freeze-thaw cycles

由图9可知,F1加固前后黄土中微观孔隙结构以微、小孔隙为主,中孔隙为辅,大孔隙占比较少。随冻融循环次数增大,黄土中微、中孔隙占比增大,小孔隙占比减少。而F1固化黄土中小孔隙占比减少,微、中孔隙变化不明显。其中与冻融0次相比,冻融15次时黄土中微孔隙占比增大22.52%、小孔隙占比减少29.76%,F1固化黄土中微孔隙占比增大6.28%、小孔隙占比减少17.84%,表明F1可显著削弱冻融循环作用中水分相变引起的孔隙结构演化。其原因是F1促进土颗粒絮凝、团聚,减小黄土微观孔径、孔隙率和孔隙水分含量。此外还可发现冻融循环作用显著影响土体中的微、小孔隙,而对大、中孔隙的影响较小。

(2) 孔隙面积比

孔隙面积比可直观反映冻融循环过程中土体内部孔隙面积变化规律。提取不同冻融循环次数下黄土与F1固化黄土试样孔隙面积,如根据公式(3)计算试样孔隙面积比,图10所示绘制冻融循环次数与试样孔隙面积比关系曲线。

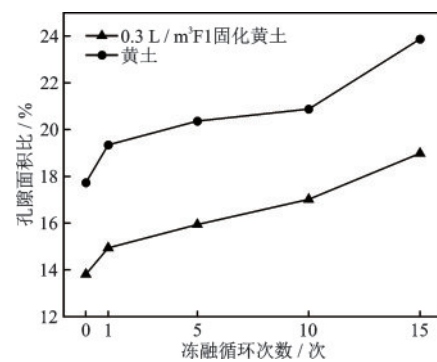


图10 试样孔隙面积比与冻融循环次数的关系

Fig.10 Relationships between sample pore area ratio and number of freeze-thaw cycles

由图 10 可知,黄土及 F1 固化黄土孔隙面积比均随冻融循环次数的增加而增大,第 1 次冻融时土体孔隙面积比增长率最大,后随冻融次数增加孔隙面积比增长率逐渐变小。与黄土相比,冻融次数分别为 0、1、5、10、15 次时,0.3 L/m³ 掺量 F1 固化黄土孔隙面积比分别减少 22.08%、22.72%、21.70%、18.47%、20.44%,表明 F1 固化剂可有效抑制冻融带来的孔隙面积增长,提高土体密实度。其原因是 F1 作用于黄土后,促进土颗粒絮凝团聚,有效减小孔隙面积占比,减弱冻融循环作用下水分相变引起的土体内部孔隙的发育程度。

(3) 孔隙平均分形维数

孔隙分形维数可表征土体内部孔隙形状的复杂程度^[23]。提取不同冻融循环次数下黄土与 0.3 L/m³ F1 固化黄土微观孔隙的等效周长与等效面积,计算孔隙平均分形维数。如图 11 所示,绘制试样孔隙平均分形维数与冻融循环次数间关系曲线。

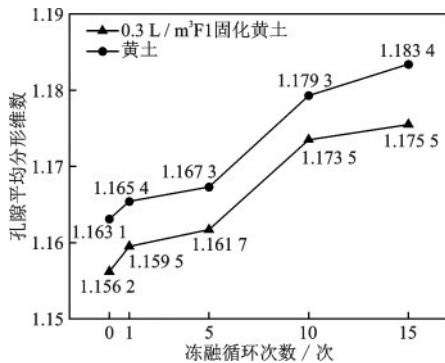


图 11 孔隙平均分形维数与冻融循环次数的关系

Fig.11 Relationships between average fractal dimension of pores and number of freeze-thaw cycles

由图 11 可知,黄土与 F1 固化黄土孔隙平均分形维数均随冻融循环次数的增大而增大,表明冻融循环作用下试样内部孔隙不断发育、不规则程度逐渐增大。其中与黄土相比,冻融次数分别为 0、1、5、10、15 次时,0.3 L/m³ 掺量 F1 固化黄土的孔隙平均分形维数分别减小了 0.59%、0.51%、0.48%、0.49%、0.67%,表明 F1 可有效改善冻融循环作用下黄土中因水分体积涨缩引起的微观孔隙和裂缝的演化和发育。

3 结 论

(1) F1 可减小黄土塑限,增大液限和最大干密

度,显著改善黄土水敏性与压实特性。当 F1 掺量为 0.3 L/m³ 时,较黄土相比塑限和最优含水率分别减少 2.65% 和 7.22%,液限和最大干密度分别增大 7.92% 和 9.83%。

(2) F1 离子固化剂可显著提升黄土黏聚力与内摩擦角,且掺量为 0.3 L/m³ 时加固效果最佳。与黄土相比,经历 0 次和 15 次冻融循环时,0.3 L/m³ F1 固化黄土的黏聚力分别增大了 36.82% 和 16.64%,内摩擦角分别增大了 16.92% 和 4.63%,表明 15 次冻融循环后,F1 依然仍可提高黄土黏聚力及内摩擦角。

(3) 冻融循环作用显著促进土体内部微、小孔隙的发育,但对大孔隙影响较小。与黄土相比,冻融循环 15 次时,微孔隙增大 6.28%、小孔隙减少 17.84%,孔隙面积比和平均分形维数分别减小了 20.44% 和 0.67%,表明黄土经 0.3 L/m³ 掺量 F1 固化后,可显著改善冻融循环作用下黄土内部微、小孔隙的演化和发育,提高密实度、增强力学性能。

参考文献:

- [1] 李国玉,马巍,穆彦虎,等. 季节冻土区压实黄土湿陷特性研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 934-943.
Li G Y, Ma W, Mu Y H, et al. Progress and prospects of the research on collapsibility of compacted loess in seasonally frozen ground regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 934-943. (in Chinese)
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
Liu Z D. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 王叶娇,王有为,靳奉雨,等. 石灰改良土的土水特征曲线及其冻结特征曲线[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 967-973.
Wang Y J, Wang Y W, Jin F Y, et al. Soil-water characteristic curve and freezing characteristic curve of lime improved soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 967-973. (in Chinese)
- [4] 王东星,高向云,杜怡莹,等. 活性 MgO 粉煤灰固化黄土剪切特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 822-829.

- Wang D X, Gao X Y, Du Y Y, et al. Experimental investigation on shear properties of reactive MgO-fly ash stabilized loess [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(5): 822-829. (in Chinese)
- [5] 王银梅, 高立成. 黄土化学改良试验研究[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(6): 1071-1078.
Wang Y M, Gao L C. Experimental research on chemical improvement of loess[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(6): 1071-1078. (in Chinese)
- [6] 周海龙, 申向东. 土壤固化剂的应用研究现状与展望[J]. *材料导报A: 综述篇*, 2014, 28(5): 134-138.
Zhou H L, Shen X D. Application research situation and prospect of soil stabilizer[J]. *Materials Reports A: Overview*, 2014, 28(5): 134-138. (in Chinese)
- [7] Tremblay H, Duchesne J. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(3): 535-546.
- [8] 熊厚金, 林天健, 李宁. 岩土工程化学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Xiong H J, Lin T J, Li N. Chemistry of geotechnical engineering[M] Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [9] 卢雪松. 离子土壤固化剂加固武汉红色黏土的试验效果及其机理分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
Lu X S. Research on the experimental effect and mechanism of ionic soil stabilizer reinforcing Wuhan red clay [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese)
- [10] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. EN-1 固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4): 60-65.
Zhang L P, Zhang X C, Sun Q. Engineering properties and influencing factors of solidified loess by EN-1 solidifying agent [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(4): 60-65. (in Chinese)
- [11] 刘月梅, 张兴昌. EN-1 固化剂对黄土性土壤持水、供水等水分特征的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 24-31.
Liu Y M, Zhang X C. Effect of EN-1 ionic stabilizer on moisture characteristics of loess soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 24-31. (in Chinese)
- [12] 王银梅, 杨重存, 谏文武, 等. 新型高分子材料SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14): 2554-2559.
Wang Y M, Yang C C, Chen W W, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 24(14): 2554-2559. (in Chinese)
- [13] 徐鹏飞, 李泽莹, 王银梅, 等. 冻融循环对新型高分子材料SH 固化黄土力学特性的影响试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(1): 137-141.
Xu P F, Li Z Y, Wang Y M, et al. Impact of freeze-thaw cycles on mechanical properties of loess solidified with new polymer curing agent SH [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(1): 137-141. (in Chinese)
- [14] 田见效, 彭波. S 土壤稳定剂路用性能[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2002, 22(5): 20-24.
Tian J X, Peng B. Properties of S-soil-solidified-agent for road performance [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2002, 22(5): 20-24. (in Chinese)
- [15] 李建东, 王旭, 张延杰, 等. F1 离子固化剂加固试验黄土机理及强度特性研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(6): 6100-6106.
Li J D, Wang X, Zhang Y J, et al. A mechanism study of trial loess reinforced by F1 ionic soil stabilizer on curing mechanism and strength characteristics [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(6): 6100-6106. (in Chinese)
- [16] 王景龙, 王旭, 李建东, 等. F1 离子固化剂加固试验黄土的物理力学特性变化机理[J]. *材料导报*, 2021, 35(8): 8070-8075.
Wang J L, Wang X, Li J D, et al. Mechanism of experimental loess reinforced by F1 ionic soil stabilizer in physical and mechanical properties [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(8): 8070-8075. (in Chinese)
- [17] 李建东, 王旭, 张延杰, 等. F1 离子固化剂加固黄土强度及微观结构试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(4): 618-624.
Li J D, Wang X, Zhang Y J, et al. Experimental study on strength and microstructure of loess reinforced with F1 ionic soil stabilizer [J]. *Journal of southeast university (Natural Science Edition)*, 2021, 51(4): 618-624. (in Chinese)
- [18] 吕擎峰, 李晓媛, 赵彦旭, 等. 改性黄土的冻融特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(3): 819-825.

- Lyu Q F, Li X Y, Zhao Y X, et al. Properties of modified under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (3): 819-825. (in Chinese)
- [19] 王万平, 张熙胤, 王义, 等. 季节冻土区黄土抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(8):143-150 .
- Wang W P, Zhang X Y, Wang Y, et al. Variation characteristics and influencing factors of loess shear strength in seasonal frozen soil region[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54 (8) : 143-150 . (in Chinese)
- [20] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [21] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 黏粒质量分数对土壤水分蓄持能力影响的试验研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 94-99.
- Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Effects of soil clay content on soil water-holding capacity by simulated experiments [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 94-99. (in Chinese)
- [22] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学: B辑, 1987, 17(12): 1309-1316.
- Lei X Y. Type of loess in China and collapsibility [J]. Science China B, 1987, 17(12) : 1309-1316. (in Chinese)
- [23] 叶万军, 李长清, 杨更社, 等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效用[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2336-2343.
- Ye W J, Li C Q, Yang G S, et al. Scale effects of damage to loess structure under freezing and thawing conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (7) : 2336-2343. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)