

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221211003

冻融作用下复合相变材料改良黄土力学特性研究及机理分析*

朱怀太¹, 欧尔峰¹, 姜琪^{2,3}, 赵永春^{2,3}, 赵建沅^{2,3}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为降低冻融作用对黄土力学性能的劣化影响, 基于相变材料的温度调控功能, 提出了一种采用膨胀石墨-正十四烷复合相变材料(EG-C₁₄)改良黄土的方法。以兰州黄土为研究对象, 开展典型冻融循环后不同EG-C₁₄掺入比黄土试样的体积变形试验、力学性能试验和微观结构试验, 探究冻融作用下不同EG-C₁₄掺量对黄土力学性能的影响规律及改良机理。试验结果表明: EG-C₁₄减缓了冻融循环过程中土体内部温度变化, 进而有效抑制了土体的胀缩变形; 同时, EG-C₁₄降低了冻融循环对土体微观结构的损伤, 与素黄土相比, 多次冻融循环后改良土体内部的支架孔隙明显减少, 颗粒骨架也更为密实, 进而增强了土体的力学性能; 此外, EG-C₁₄改良黄土的力学性能随EG-C₁₄掺量的增加先增大然后逐渐趋于稳定, 且掺量为4%时改良效果最佳。

关键词: 冻融作用; 黄土; 复合相变材料; 力学特性; 机理分析

中图分类号: TU444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0715-10

Study on the Mechanical Properties and Mechanism Analysis of Loess Improved by Composite Phase Change Materials under Freeze-thaw Conditions

ZHU Huaitai¹, OU Erfeng¹, JIANG Qi^{2,3}, ZHAO Yongchun^{2,3}, ZHAO Jianyuan^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To mitigate the detrimental impact of freeze-thaw cycles on loess mechanical properties, a method using expanded graphite-n-tetradecane composite phase change material (EG-C₁₄) was proposed, leveraging the temperature modulation capability of phase change materials. Focusing on the Lanzhou loess, a series of tests were conducted after typical freeze-thaw cycles, including volumetric deformation tests, mechanical property tests, and microstructure tests on loess samples with varying EG-C₁₄ dosage levels. The study aimed to explore the influence of different EG-C₁₄ dosages on loess mechanical properties under freeze-thaw conditions and its enhancement mechanism. Results indicate

* 收稿日期: 2022-12-11; 修回日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(52168058)、第八批甘肃省科技计划(21ZD8JA003)资助

作者简介: 朱怀太(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事寒区土体性能提升技术方面的研究。E-mail: zhu_at@163.com

通信作者: 欧尔峰(1979—), 男, 副教授, 博士。主要从事隧道抗震方面的研究。E-mail: ouerf@163.com

that EG-C₁₄ effectively mitigated the temperature variations within the soil during freeze-thaw cycles, thereby suppressing soil expansion and contraction deformation. Additionally, EG-C₁₄ minimized soil microstructure damage during freeze-thaw cycles. Enhanced soil exhibited reduced scaffold porosity and denser particle skeleton compared to untreated loess after multiple cycles, thus improving its mechanical properties. Furthermore, EG-C₁₄ dosage positively correlated with enhanced mechanical properties, stabilizing notably at a 4% dosage. These findings offer valuable insights for deploying EG-C₁₄ enhanced loess in practical applications.

Keywords: freeze-thaw; loess; composite phase change material; mechanical properties; mechanism analysis

0 引言

黄土在我国分布极为广泛,总面积约为63万 km²,其中超过70%位于西北黄土高原地区^[1-2]。由于特殊的地理位置与气候环境,西北地区黄土会面临周期性的冻融作用,黄土的力学性能会随冻融循环而下降^[3-4],导致黄土直接作为工程填料时会严重影响工程建筑物的服役状态和运营安全^[5-7]。为克服冻融作用对土体力学性能的损伤,实际工程中通常对土体进行加固与改良处理^[8]。常规处理方法主要包括强夯法^[9-10],铺设土工格栅^[11],添加纤维素^[12-13]、纳米材料^[14-15]、水泥或粉煤灰^[16-18]等,但上述方法都是较为被动地改变土体内部结构进而达到提升土体抗冻融性能的目的,无法主动降低冻融作用对土体力学性能的劣化影响^[19]。因此,探究更主动、更有效地提升冻融作用下黄土力学性能的方法对西北地区的工程建设及灾害防治具有重要的现实意义^[20-21]。

相变储能材料是近年来兴起的一种新型控温材料,其作用原理是通过固液相之间转换时释放和吸收大量热量来主动调控基体内部温度变化,从而减缓冻融循环对基体的劣化影响^[22]。因相变材料胀缩性小、环保及成本低等优点,已广泛应用于建筑隔热保温^[23-24]、提升沥青与混凝土抗冻融性能等方面^[25],是一种很好的提升基体抗冻融能力的材料。但相变材料不溶于水且无法浸入土体孔隙,故直接将相变材料掺入土体会由于重力和水分迁移的作用发生渗流甚至析出土体,严重影响调温效果^[26]。而通过多孔介质吸附相变材料的方法,能对基体内部的相变材料起到保护和固定作用,进而保障相变材料的工作效率和经济效益最大化^[27]。其中以正十四烷(C₁₄H₃₀, C₁₄)为主体相变材料,膨胀石墨(Expanded graphite, EG)为载体制备的膨胀石

墨-正十四烷复合相变材料(EG-C₁₄),由于膨胀石墨的强吸附性、耐腐蚀、耐辐射和抗冲击等特点与正十四烷的低温相变储能特性,使EG-C₁₄在提升混凝土抗冻融性能方面具有优越表现^[28]。

目前,针对复合相变材料提升土体抗冻融性能的研究较少,尤其是低温复合相变材料的掺量对冻融作用下黄土力学性能的影响规律尚有待深入研究。因此,本文选取兰州重塑黄土为研究对象,通过物理吸附法制备EG-C₁₄,开展不同掺量下EG-C₁₄改良黄土的冻融循环试验、三轴剪切试验、X射线衍射试验(XRD)、体积监测试验、差式扫描量热试验(DSC)和电镜扫描试验(SEM)。研究冻融作用下不同EG-C₁₄掺量对黄土力学性能的影响规律及改良机理,以期EG-C₁₄改良黄土在实际工程中的应用提供技术支持,进而为西北地区工程建设及灾害防治提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验所用黄土取自兰州新区某地基场地,呈黄褐色,取样深度为0.5~1.0 m;取样地点多年平均降水量260~350 mm;暖季平均气温约为20℃,冷季平均最低气温约为-10℃,极端低温可达-19.7℃;且冻结时间主要集中在11月至第二年3月份^[29]。

测得试验土料的基本物理性质见表1。图1为土料的粒径分布曲线,其中砂粒(0.075 mm<d≤2 mm)含量占7.95%;粉粒(0.005 mm<d≤0.075 mm)含量占81.73%;黏粒(d≤0.005 mm)含量占10.32%。计算得到该土样的不均匀系数C_u=7.04,曲率系数C_c=1.65,试验土样属于连续级配且颗粒不均匀的粉质黏土。

表1 重塑黄土基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of reshaping loess

天然 含水率/%	最优 含水率/%	最大干密 度/(g·cm ⁻³)	液限/ %	塑限/ %
8.98	14.36	1.80	29.43	18.50

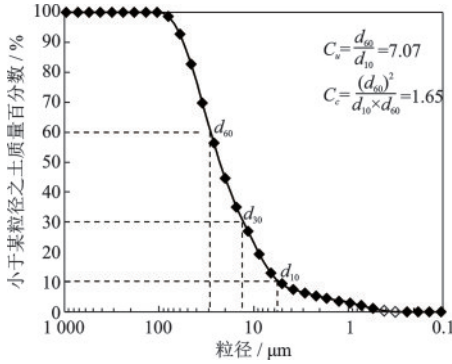


图1 土样粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of soil samples

复合相变材料EG-C₁₄的具体制备步骤如下^[19]: 首先将干燥后的石墨置于微波炉且在700 W功率下煅烧40 s, 制得膨胀250倍的EG; 将EG与C₁₄按1:9的质量比混合后放入烧杯, 采用集热式恒温加热磁力搅拌器以160 r/min的转速恒速搅拌; 搅拌一段时间后称量混合物的质量, 直至质量恒定不变时, 认为达到吸附完全, 即制得EG-C₁₄复合相变材料。按上述方法制备的EG-C₁₄具有良好的共熔性, 其相变属性见表2。

表2 EG-C₁₄的相变参数

Table 2 Phase change parameters of EG-C₁₄

材料	起始 冻结温 度/°C	冻结 结束温 度/°C	冻结 潜热/ (J·g ⁻¹)	起始 融化温 度/°C	融化 结束温 度/°C	融化 潜热/ (J·g ⁻¹)
C ₁₄	5.03	-3.79	196.3	-0.62	13.86	203.1
EG-C ₁₄	5.03	-1.03	120.7	-1.38	10.26	114.4

1.2 试样制备

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[30]进行三轴试样的制备。采用外掺法, 按不同比例(干土质量的2%、4%、6%)将EG-C₁₄与土料混合均匀, 按照最优含水率(干土质量的14.36%)向混合均匀的土料喷洒蒸馏水, 充分搅拌后密封闷料24 h, 使水分分布更为均匀。试样采用CSS-1120C标准制样机(图2(a))均制备成标准圆柱体, 保证所有土样的压实度均为95%, 制备三轴试样。

1.3 试验方案

研究表明经历5至7次冻融循环后, 土体的物理力学性质基本趋于稳定^[11], 因此本文分别开展0、1、3、6、9次冻融循环后不同EG-C₁₄掺量(0%、2%、4%、6%)黄土试样的物理力学性能变化规律研究, 具体试验方案安排如下:

(1) EG-C₁₄提升冻融作用下黄土力学性能的可行性分析试验: 首先, 取不同掺量下已经闷好的土料风干、碾碎, 并过0.075 mm筛后进行XRD测试(图2(d)), 研究改良前后土样的矿物成分变化; 然后, 称取10 mg不同掺量下已经闷好的土料, 进行DSC热循环试验(图2(e)), 测试温度设定为±20 °C, 降温 and 加热速率皆设定为3 °C/min, 分析试验土样的热特性。综合考察EG-C₁₄的作用形式与调温效果, 可为后续试验提供参考。

(2) EG-C₁₄改良黄土的变形特征与力学性能试验: 首先, 使用HC-HDK9/F型冻融试验机进行0、1、3、6、9次冻融循环试验(图2(b)), 冻融温度为±20 °C, 冻融周期为24 h, 以保证所有试样完全冻结、融化; 在冻融循环期间, 进行试样的体积监测试验, 且为保证试样体积变形差异对试验造成的误差, 每组试验同时设置5个平行样, 并对每个试样沿高度方向每间隔16 mm测量一次直径, 沿两端面垂直方向测量3次高度, 计算所有平行试样的体积均值, 进而分析土样的胀缩变形规律^{[26][31]}; 最后, 对经历不同冻融次数后不同EG-C₁₄掺入比的改良土样在GDS三轴试验系统中(图2(c))分别进行围压为50、100、200、400 kPa的不固结不排水三轴试验(UU)。

(3) EG-C₁₄改良黄土的微观机理探究试验: 将经过不同冻融循环次数的试样放置在阴凉通风处

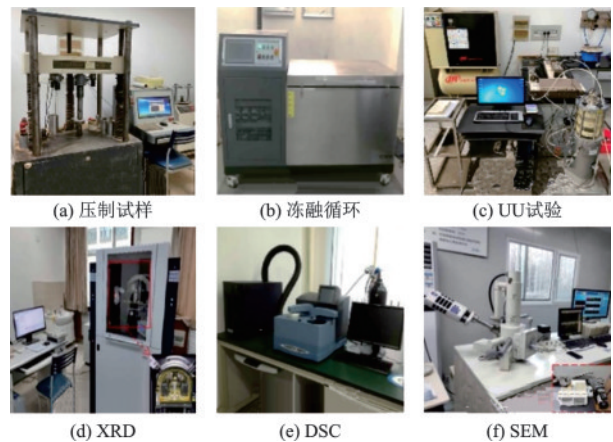


图2 试验仪器

Fig.2 Experimental instruments

进行自然阴干,然后将试样切断并选取完整新鲜的断面喷金处理后进行电镜扫描(图2(f)),观察土体微观结构的变化,并总结归纳EG-C₁₄改良黄土的作用机理。

2 试验结果与分析

2.1 EG-C₁₄改良黄土力学性能的可行性分析

2.1.1 EG-C₁₄作用形式分析

图3给出了9次冻融循环后素黄土和4% EG-C₁₄掺入比改良黄土的XRD测试结果,可看出掺入EG-C₁₄前后土样的主要矿物成分皆为石英、钠长石、方解石、白云石、伊利石和绿泥石,且衍射曲线的谱峰重叠,表明在土体中掺入EG-C₁₄后无新物质生成。因此,冻融作用下EG-C₁₄与试验黄土之间并未发生化学反应,仅是物理作用过程。

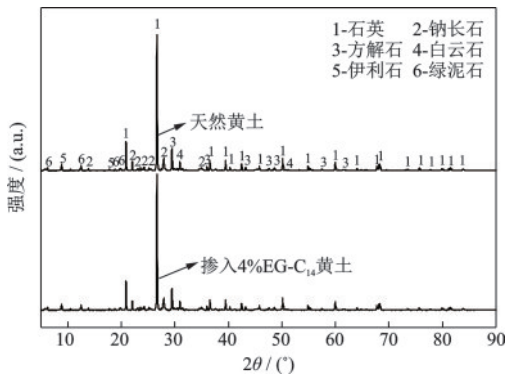


图3 XRD测试结果

Fig.3 Test results of XRD

2.1.2 EG-C₁₄的调温效果分析

为探究冻融循环过程中EG-C₁₄对土体温度波动的影响,对不同EG-C₁₄掺量下的试验土样进行DSC测试,结果如图4所示。图中向上峰表示降温放热过程,向下峰为升温吸热过程,曲线峰面积代表相变潜热,且冻融过程中水和EG-C₁₄的潜热值在表3中列出。从图4可看出素黄土在冻融循环过程中,只有一个放热峰和吸热峰,仅是土体中水发生相变;掺入EG-C₁₄后,由于C₁₄和水的相变温度不同,且二者无法同时发生相变,因此EG-C₁₄改良黄土在冻融循环过程中出现两个峰值。且EG-C₁₄改良土样在降温冻结时,EG-C₁₄先于土样发生相变并释放热量,延缓了土样内部温度的下降,使得土样中水的冻结温度有不同程度的降低。与素黄土相

比,当EG-C₁₄掺量为2%、4%和6%时,土样中水的冻结温度分别下降0.52、0.92和1.02℃。而在升温融化过程中,冻土中的冰开始融化后EG-C₁₄也逐渐相变并吸收热量,延长了冻土的融化过程并减缓了土体内部温度上升。因此,EG-C₁₄能有效减缓土体冻融过程中的温度波动,这对抑制土体的胀缩变形有积极作用。

此外,结合图4和表3可以发现土样中EG-C₁₄的相变潜热随EG-C₁₄掺量的增加而增大并逐渐趋于稳定。这是由于EG-C₁₄掺量过高时,容易在土体内部形成团聚体,因此当环境温度快速变化时,被包裹在里面的EG-C₁₄无法及时进行热量的吸收和释放,导致EG-C₁₄掺量为6%时调温效果不明显,会影响对土体的改良效果。

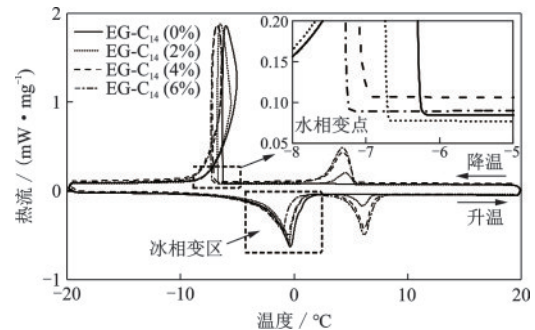


图4 DSC特征曲线

Fig.4 DSC characteristic curve

表3 试验土样中水和C₁₄在冻融循环时的相变潜热

Table 3 Latent heat of phase change for water and C₁₄ in test soil samples during freeze-thaw cycles

EG-C ₁₄ 掺量/%	降温过程		升温过程	
	C ₁₄ 冻结潜热/(J·g ⁻¹)	水冻结潜热/(J·g ⁻¹)	冰融化潜热/(J·g ⁻¹)	C ₁₄ 融化潜热/(J·g ⁻¹)
0	0.00	51.00	50.76	0.00
2	8.80	47.80	48.50	7.32
4	22.15	42.80	44.70	21.51
6	24.50	40.60	38.20	23.72

2.2 冻融作用下EG-C₁₄改良黄土的变形及力学特性分析

2.2.1 EG-C₁₄改良黄土的变形特征分析

为分析冻融条件下不同EG-C₁₄掺量对土样体积的影响规律,定义体积变化率D_v按下式计算:

$$D_v = \frac{V_n - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, V_n 为 n 次冻融后的土样体积; V_0 为初始状态的土样体积。

图 5 给出了不同 EG-C₁₄ 掺量改良黄土在冻融循环过程中体积变化率的计算结果, 其中“F”和“T”分别表示土样处于冻结状态和融化状态。可看出素黄土的体积波动程度最大, 最大值为第 9 次冻结时, 土样体积增大 5.31%。这是因为水在冻结时体积增大 1.09 倍, 导致土体产生冻胀变形, 而融化时因重力等作用影响, 土样体积减小, 但无法恢复到最初状态, 因此在宏观上体现为“冻胀融缩”^[31]。掺入 EG-C₁₄ 后, 土样体积在冻融过程中的波动程度明显减缓。EG-C₁₄ 掺量为 2% 时, 改良土的最大体积变化率为 4.47%, 相较素黄土减小约 15.84%; 当掺入比增加到 4% 和 6% 时, 9 次冻融循环后改良土的体积变化率分别减少 30.76%、34.67%, 表明 EG-C₁₄ 能有效抑制黄土在冻融过程中的胀缩变形。

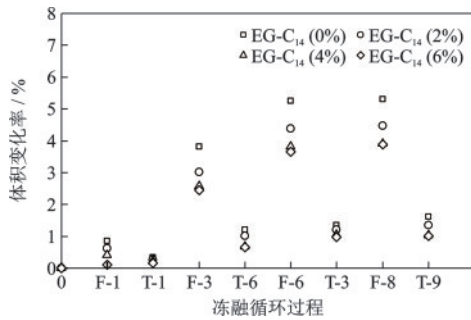


图 5 土样体积变化过程

Fig.5 Soil sample volume change process

2.2.2 EG-C₁₄ 改良黄土的应力-应变特征分析

图 6 给出了不同冻融次数、不同围压下试验土样的应力-应变曲线(限于篇幅, 仅绘制了素黄土和掺量为 4% 的两种结果)。可看出同围压下两种土样的偏应力均随冻融次数的增加而不断降低。因为冻融作用对土体起到了重塑作用, 冻融循环过程中土体发生了剧烈的胀缩变形, 土体内部冰晶的生长及冷生结构的形成严重损伤了土体内部的微观结构, 导致土体宏观力学性能大幅下降^[32]。而在 EG-C₁₄ 改良土体中, 由于 EG-C₁₄ 的相变储能特性影响了冻融过程中土体内部的温度波动, 有效抑制了土体的胀缩变形, 减小了由冻胀力和水分迁移等作用对土体微观结构造成的损伤。因此, EG-C₁₄ 改良黄土的偏应力相比素黄土有显著提升, 且在冻融循环过程中的衰减幅度也明显减小。

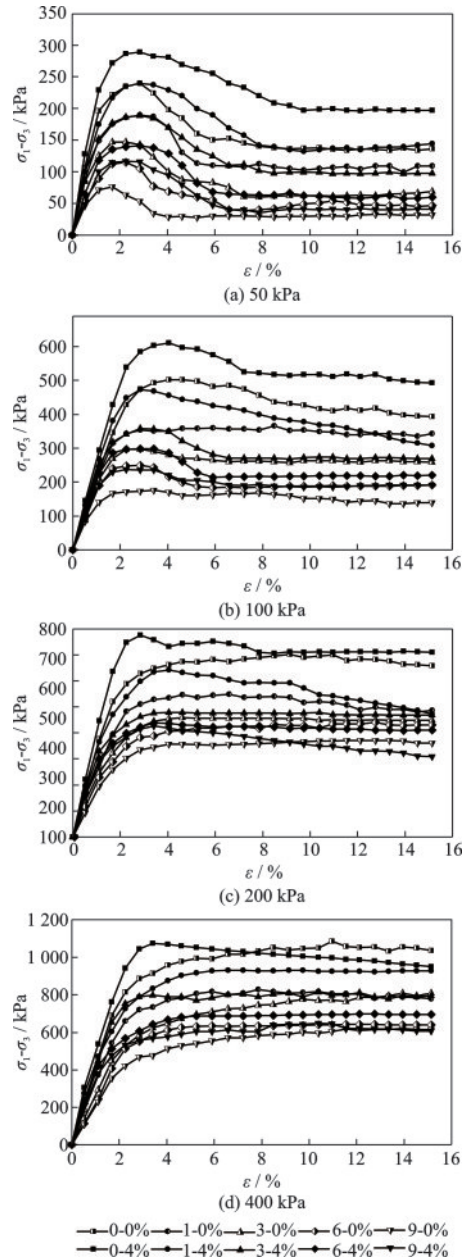


图 6 两种 EG-C₁₄ 掺入比黄土的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of loess with two EG-C₁₄ admixture ratios

图 7 给出了 9 次冻融循环后不同 EG-C₁₄ 掺量改良黄土的应力-应变曲线。可看出土体偏应力随 EG-C₁₄ 掺量的增加而增大并逐渐趋于稳定甚至降低, 这是因为 EG-C₁₄ 掺量过高时, 土体内部孔隙无法承载过量的 EG-C₁₄, 使其容易在一定区域内形成团聚体, 减弱了 EG-C₁₄ 相变时的调温效果; 同时, EG-C₁₄ 要弱于土体颗粒与结构, 一定程度上会削弱对黄土的改良效果, 最终导致 EG-C₁₄ 掺量为 6% 时改良效果不明显甚至出现低于 4% 掺量时的现象(图 7(c))。

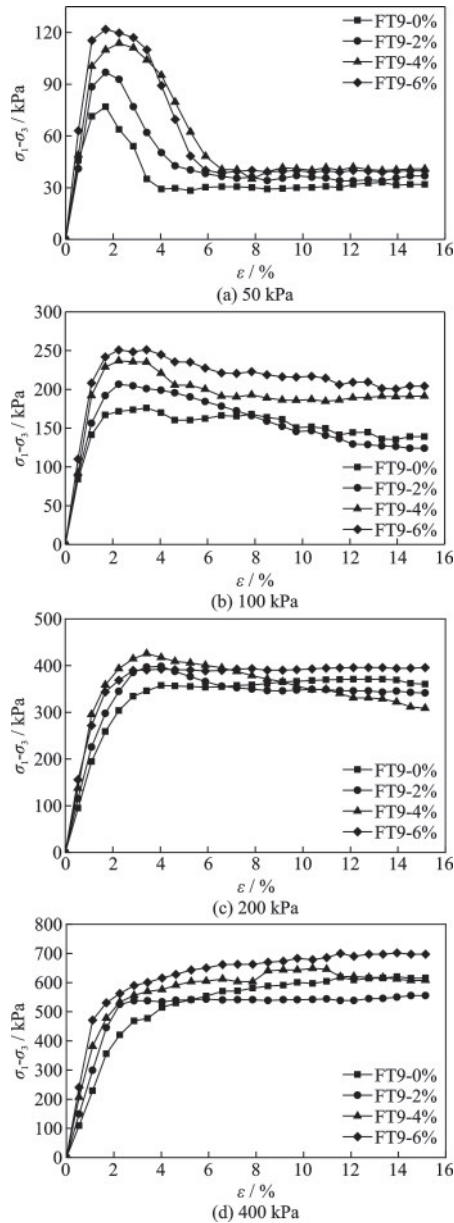


图7 9次冻融循环后不同EG-C₁₄掺量改良黄土的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of improved loess with different EG-C₁₄ dosages after 9 freeze-thaw cycles

2.2.3 EG-C₁₄改良黄土的弹性模量分析

土体弹性模量的确定方法是取土样变形过程中轴向应变为1%时的偏应力增量与轴向应变增量之比,按下式计算^[28]:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{1\%} - \sigma_0}{\varepsilon_{1\%} - \varepsilon_0} \quad (2)$$

式中, E 为弹性模量; $\Delta\sigma$ 为偏应力增量; $\Delta\varepsilon$ 为轴向应变增量。

根据式(2)计算得到不同冻融次数下不同EG-C₁₄掺量改良黄土的弹性模量结果如图8所示

(限于篇幅且更符合工程实际,仅绘制了100 kPa围压下的结果)。可看出所有土样的弹性模量均随冻融次数的增加而减小,且1次冻融循环后的衰减幅度最大,而后逐渐趋于稳定。但与素黄土相比,EG-C₁₄掺量为2%、4%、6%时,未冻融条件下改良土的弹性模量分别提升了1.05倍、1.12倍和1.16倍;而经历9次冻融循环后,提升幅度分别达到1.44倍、1.84倍和1.96倍。表明EG-C₁₄的掺入能有效提高黄土的弹性模量,且随冻融次数增加,提升效果更为显著。

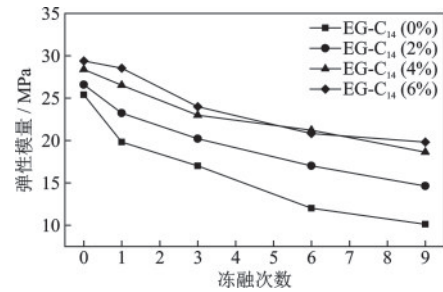


图8 100 kPa围压下弹性模量与冻融次数关系曲线

Fig.8 Modulus curve of elasticity versus freeze-thaws cycles under 100 kPa circumferential pressure

为量化分析不同EG-C₁₄掺量对土体弹性模量抗冻融能力的影响效果,定义弹性模量的衰减率 D_E 按下式计算:

$$D_E = \frac{E_n - E_0}{E_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中, E_0 和 E_n 分别为未冻融和 n 次冻融循环后土体的弹性模量。

表4给出了9次冻融循环后不同EG-C₁₄掺量下改良黄土弹性模量的衰减率计算结果。可看出素黄土弹性模量最大衰减率发生在围压为50 kPa时,衰减率高达63.83%,而同围压下2%、4%、6% EG-C₁₄改良黄土弹性模量的衰减率相比素黄土分

表4 9次冻融循环后弹性模量衰减率

Table 4 Decay rate of elastic modulus after 9 freeze-thaw cycles

EG-C ₁₄ 掺量/%	围压/kPa			
	50	100	200	400
0	63.83	63.17	56.35	53.29
2	55.92	48.85	45.01	39.20
4	37.07	35.14	33.50	30.90
6	36.27	35.00	30.65	32.62

别减小了7.91%、26.76%、27.56%。表明EG-C₁₄有效减缓了冻融作用对土体造成的损伤,且改良效果随EG-C₁₄掺量的增加先大幅提升而后逐渐趋于稳定,当EG-C₁₄掺量达到6%时改良效果并不明显甚至出现低于4%掺量时的情况(围压为200 kPa时)。因此可以说明,4%EG-C₁₄掺量对黄土提升弹性模量并抵抗冻融作用的劣化影响是最有效且最为经济的。

2.2.4 EG-C₁₄改良黄土的抗剪强度指标分析

土体的抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角是反应土体强度的重要参数。因此,根据Mohr-Coulomb强度理论和试验标准^[28],通过UU试验结果计算得到不同EG-C₁₄掺量下试验土样的黏聚力和内摩擦角在冻融循环过程中的变化规律,如图9所示。可看出所有土样的黏聚力均随冻融次数的增加而减小,且EG-C₁₄对黄土黏聚力的改良效果随EG-C₁₄掺量的增加先大幅提升而后趋于稳定甚至降低(图9(a))。与素黄土相比,EG-C₁₄掺量为2%、4%和6%时,未冻融条件下土样的黏聚力分别提升了1.17倍、1.33倍和1.40倍;而9次冻融循环后的提升幅度分别达到2.50倍、3.81倍和3.63倍。表明EG-C₁₄的掺入能有效提升黄土的黏聚力并能减小冻融作用对黏聚力的劣化影响。但可以发现6%EG-C₁₄掺入比的改良效果并不明显甚至出现低于4%掺量的情况(图9(a)中3、9次冻融循环),表

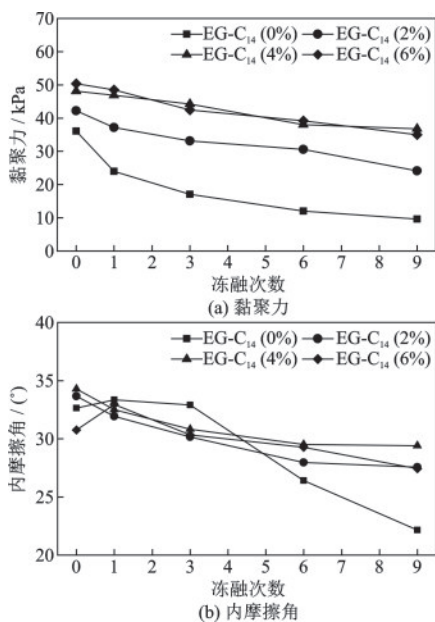


图9 抗剪强度指标随冻融循环的变化曲线

Fig.9 Variation curve of shear strength index with freeze-thaw cycles

明4%EG-C₁₄的掺入比对黄土黏聚力的改良效果更为稳定。

素黄土的内摩擦角呈现出随冻融次数增加先增大而后降低的规律,这是由于少量次数的冻融作用导致土体内部孔隙结构发生改变,大孔隙所占比例减少,土颗粒间的接触点增多,增强了土体摩擦力,进而使得内摩擦角增大^[33]。但当冻融次数持续增加时,循环往复的冻胀融缩导致土体内部结构遭受不可逆的破坏,如孔隙增大、土颗粒破碎等,导致内摩擦角减小^[34],且9次冻融循环后素黄土内摩擦角减小10.5°(图9(b));2%、4%掺入比改良黄土的内摩擦角随冻融次数的增加而不断减小,但衰减幅度相较素黄土显著降低。9次冻融循环后2种掺量的EG-C₁₄改良黄土的内摩擦角相比素黄土提升了1.24倍和1.33倍;而6%EG-C₁₄改良黄土的内摩擦角随冻融次数增加波动幅度极为不稳定。也可以说明EG-C₁₄最佳掺量应在4%附近。

2.3 微观结构变化及EG-C₁₄改良机理分析

2.3.1 冻融作用对土体微观结构的影响

图10给出了素黄土未冻融和经历9次冻融循环后局部放大500倍的土体微观结构SEM图像。可看出冻融前后土体颗粒骨架和孔隙形态发生明显变化:冻融前黄土层状堆叠结构发育,支架孔隙较少,土体颗粒之间多以镶嵌接触和面-面接触为主

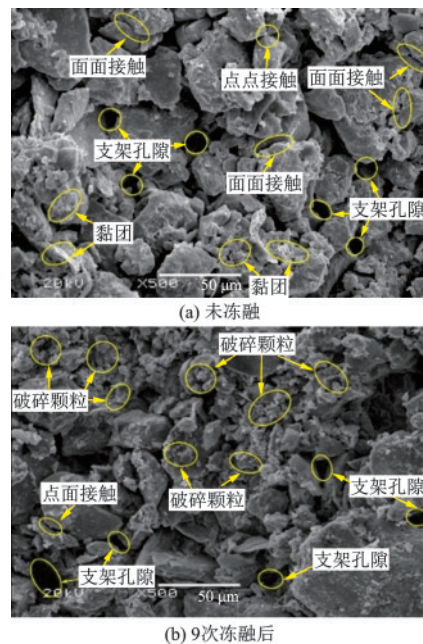


图10 不同冻融次数下黄土微观结构SEM图像

Fig.10 SEM images of loess microstructure under different freeze-thaw cycles

(图 10(a)), 而经历 9 次冻融循环后, 土样内部出现土体颗粒破碎及排列方式改变等结构变化, 支架孔隙增多, 孔隙体积增大, 使得土颗粒之间的接触方式转变为点-面接触为主(图 10(b))。

图 11 给出了 9 次冻融循环后 4% EG-C₁₄ 改良黄土的微观结构 SEM 图像。可看出 EG-C₁₄ 改良黄土的支架孔隙显著减小, 土颗粒破碎情况明显减缓, 土颗粒间由点-面接触向致密的面-面镶嵌接触形式发展(图 11(b)), 表明 EG-C₁₄ 的掺入有效抑制了冻融作用土体微观结构造成的损伤。同时, EG 的蠕虫状结构(图 11(a)) 能填充部分孔隙且对土体中微小土颗粒有一定的联结作用, 使得颗粒骨架更为密实, 胶结程度也普遍增强, 进而提升了黄土的力学性能。

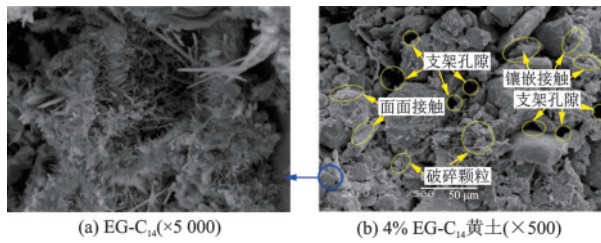


图 11 EG-C₁₄ 改良黄土微观结构 SEM 图像

Fig.11 SEM images of the microstructure of loess modified by EG-C₁₄

2.3.2 EG-C₁₄ 改良机理分析

综合上述试验分析结果, 可将冻融作用下 EG-C₁₄ 改良黄土力学性能的作用机理归纳如下: 在冻融循环过程中, EG-C₁₄ 相变释放和吸收热量能够主动减缓土体内部的温度变化, 延迟土体内部或表面水的冻结时长, 进而减缓了土颗粒间自由水的迁移和冰透镜的形成, 有效抑制了土体的胀缩变形并降低了冰晶生长和冷生构造作用对土体微观结构的损伤。因此, 经历多次冻融循环后, EG-C₁₄ 改良黄土内部的支架孔隙相比素黄土显著减少, 土颗粒破碎情况也明显减缓, 使得颗粒骨架更为密实, 胶结程度也普遍增强, 宏观上则体现为提升了冻融作用下黄土的力学性能。

此外, EG-C₁₄ 的掺量对黄土力学性能的提升也有显著影响, 随着 EG-C₁₄ 掺量增加, 黄土力学性能的提升效果呈现出先增大而后逐渐稳定的趋势。对该变化规律的影响原因可归纳如下: ①当 EG-C₁₄ 掺量增加并保持在 4% 以内时, EG-C₁₄ 会均匀地分布在土体中, 使 EG-C₁₄ 在冻融循环中充分相变, 进而起到减缓土体内部温度变化、抑制土体胀缩变形

的效果; 此外膨胀石墨的蠕虫状结构能填充部分孔隙且对微小颗粒有一定的联结作用, 使土颗粒骨架更为密实且胶结程度得到增强, 综合作用下使得黄土的抗冻融能力明显提升。②当掺量超过 4% 继续增大到达到 6% 时, 由于土体内部孔隙无法承载过量的 EG-C₁₄, 使得 EG-C₁₄ 容易形成团聚体且随机地分布在土体中, 不仅会导致团聚体内部的 EG-C₁₄ 无法及时相变, 而且 EG-C₁₄ 的强度低于土体, 在一定程度上也会削弱改良土的力学性能, 最终导致 6% 掺量下 EG-C₁₄ 的改良效果极不稳定。因此, 在实际工程应用中可使用 4% 掺量的 EG-C₁₄ 对黄土进行改良。

3 结 论

以兰州黄土为研究对象, 开展典型冻融循环后不同 EG-C₁₄ 掺量改良黄土的三轴剪切试验、体积监测试验、X 射线衍射试验、差式扫描量热试验和电镜扫描试验, 分析经历不同冻融次数后土样的体积变形特征、力学特征及内部微观结构的变化规律, 得出以下结论:

(1) EG-C₁₄ 能有效抑制改良黄土在冻融循环过程中的胀缩变形, 使得 2%、4%、6% 掺量的 EG-C₁₄ 改良黄土经历 9 次冻融循环后体积变化率相比素黄土分别减小 17.43%、30.76%、34.67%。

(2) 随着冻融次数增加, 同围压下黄土的偏应力不断减小; 而 EG-C₁₄ 的掺入明显减弱了冻融作用对土体偏应力的影响, 使得 9 次冻融循环后改良黄土的偏应力相比素黄土显著提升, 且提升效果随 EG-C₁₄ 掺量的增加先增大而后逐渐趋于稳定。

(3) EG-C₁₄ 能显著减小冻融作用对黄土的弹性模量、黏聚力与内摩擦角的劣化影响, 且掺量为 4% 时改良效果最佳。与素黄土相比, 经历 9 次冻融循环后, 4% EG-C₁₄ 改良黄土的弹性模量衰减幅度减小了 26.76%; 黏聚力提升了 3.81 倍; 内摩擦角增大了 1.33 倍。

(4) 在冻融循环过程中, EG-C₁₄ 相变释放和吸收热量减缓了土体内部的温度变化, 有效抑制了土体的胀缩变形, 降低了冻融作用对土体微观结构的损伤。9 次冻融循环后, EG-C₁₄ 改良黄土内部支架孔隙相比素黄土大幅减少, 土颗粒破碎情况也明显改善, 使得颗粒骨架更为密实, 胶结程度也普遍增强, 进而大幅提升了冻融作用下黄土的力学性能。

参考文献:

- [1] 曹伯勋. 地貌学及第四纪地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.
Cao B X. Geomorphology and quaternary geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 科学技术出版社, 1997.
Liu Z D. Loss mechanics and engineering[M]. Shanxi: Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Xu X Z, Wang J C, Zhang L X. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 穆彦虎, 马巍, 牛富俊, 等. 多年冻土区道路工程病害类型及特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 259-267.
Mu Y H, Ma W, Niu F J, et al. Study on geotechnical hazards to roadway engineering in permafrost regions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3): 259-267. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 马巍, 苏永奇. 青藏工程走廊多年冻土场地地震安全性研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 723-733.
Ma W, Su Y Q. Advances on seismic safety study of the permafrost sites along Qinghai- Tibet project corridor [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 723-733. (in Chinese)
- [7] Haeri S M, Akbari G A, Rooh P H R, et al. Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. I: experimental investigations [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(4): 04019006.
- [8] 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.
- [9] 谭罗荣. 膨胀土地基强夯处理效果的研究[J]. 岩土力学, 1990, 11(3): 39-46.
Tan L R. Effect of powerful ramming to foundation of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1990, 11(3): 3946. (in Chinese)
- [10] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 21-25.
Zhen Y R, Lu X, Li X Z, et al. Research on the theory and process of reinforcing soft clay soil foundation by strong ramming [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 21-25. (in Chinese)
- [11] Ghazavi M, Roustaei M. Freeze - thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 2013 (89) : 22-29.
- [12] 陈诚, 郭伟, 任宇晓. 冻融循环条件下木质素纤维改良土性质研究及微观分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增2): 135-140.
Chen C, Guo W, Ren Y X. Properties and microscopic analysis of lignin fiber-reinforced soils under freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup2): 135-140. (in Chinese)
- [13] Elif O M, Liu J, Niu F. Dynamic behavior of fiber-reinforced soil under freeze-thaw cycles [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 10(1): 269-284.
- [14] Wang C, Li S Y, Chen Q, et al. Statistical studies on the pore characteristic of Qinghai-Tibet Plateau silty clay modified by nano-silica[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2021, 10: 1-9.
- [15] 任晓川. 基于纳米二氧化硅改良的冻(融)土力学特性的试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
Ren X C. Experimental study on the mechanical properties of frozen (thawed) soil based on nano-silica improvement [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)
- [16] 解邦龙, 张吾渝, 张丙印, 等. 不同龄期下粉煤灰水泥土的UU抗剪强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1216-1223.
Xie B L, Zhang E Y, Zhang B Y, et al. Experimental study on unconsolidated and untrained shear strength of fly ash cement soil at different ages [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4) : 1216-1223. (in Chinese)
- [17] Hozatlolu D T, Yilmaz I. Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils [J]. Engineering Geology, 2020, 10: 1-24.
- [18] Zhou S Q, Zhou D W, Zhang Y F, et al. Study on physical-mechanical properties and microstructure of expansive soil stabilized with fly ash and lime[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 19(1): 1-15.

- [19] 于本田, 陈延飞, 李双洋, 等. 正十四烷/石墨低温相变水泥基材料的制备及冻融损伤演化[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2864-2874.
Yu B T, Chen Y F, Li S Y, et al. Preparation and freeze-thaw damage evolution of n-tetradecane/graphite low-temperature phase change cement-based materials [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(6): 2864-2874. (in Chinese)
- [20] 孟多, 刘爱华, 王东旭. 硅基载体复合相变蓄热材料的研究现状及进展[J]. 材料导报, 2015, 29(3): 55-58.
Meng D, Liu A H, Wang D X. Research and progress on silicon based composite phase change materials for thermal storage[J]. *Materials Reports*, 2015, 29(3): 55-58. (in Chinese)
- [21] 饶有致, 刘建坤, 常丹. 微胶囊相变材料改良粉质黏土的冻胀特性研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 1-15.
Rao Y Z, Liu J K, Chang D. Study on frost heave of microencapsulated phase change material incorporated silty clay [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(3): 1-15. (in Chinese)
- [22] Li W T, Ling C W, Jiang Z W. Evaluation of the potential use of form-stable phase change materials to improve the freeze-thaw resistance of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 621-632.
- [23] Aaron R S, Bentzdale P. Increasing the service life of bridge decks by incorporating phase-change materials to reduce freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24: 1034-1042.
- [24] Bentz D P, Turpin R. Potential applications of phase change materials in concrete technology [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(7): 527-532.
- [25] Romero R C, Franca D M F F, Chaves F S, et al. Fundamental investigation on the frost resistance of mortar with microencapsulated phase change materials [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103705.
- [26] 黄英豪, 陈永, 朱洵, 等. 相变材料改良膨胀土冻融性能试验研究及微观机理分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 1994-2002.
Huang Y H, Chen Y, Zhu X, et al. Experimental study and micro-mechanism analysis of freezing-thawing performance of expansive soil improved by phase change materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(11): 1994-2002. (in Chinese)
- [27] 梁书恩. 纳米胶囊化相变材料的制备及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
Liang S E. Preparation and application of nanoencapsulated phase change materials [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [28] 朱洪洲, 陈瑞璞, 苟珊, 等. 低温下水泥路面调温相变材料的制备及性能[J]. 材料导报, 2021, 35(14): 14198-14203.
Zhu H Z, Chen R P, Gou S, et al. Preparation and performance of cement pavements temperature-adjusting phase change materials under low temperatures [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(14): 14198-14203. (in Chinese)
- [29] 中国天气网. 兰州城市介绍 [EB/OL]. <http://www.weather.com.cn/>, 2011-2022.
- [30] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [31] 穆彦虎, 陈涛, 陈国良, 等. 冻融循环对黏质粗粒土抗剪强度影响的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 375-386.
Mu Y H, Chen T, Chen G L, et al. Experimental study on effect of cyclic freeze-thaw on shear behaviors of clayey coarse-grained soil [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(3): 375-386. (in Chinese)
- [32] 穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919-1925.
Mu Y H, Ma W, Li G Y, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(12): 1919-1925. (in Chinese)
- [33] 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 2082-2086.
Qi J L, Ma W. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 2082-2086. (in Chinese)
- [34] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086.
Song C X, Qi J L, Liu F Y. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)