

DOI: 10.11779/CJGE2020S2024

冻融循环条件下木质素纤维改良土性质研究及微观分析

陈 诚^{1, 2}, 郭 伟^{1, 2}, 任宇晓^{1, 2}

(1. 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学土木工程系, 天津 300072)

摘 要: 在季节性冻土区域对路基土进行改良是一种较常用的工程措施, 木质素纤维是一种经济环保, 且具有良好耐久性的添加材料。以木质素纤维改良土为研究对象, 对经历冻融循环后不同木质素纤维掺入量的改良土样进行 UU 三轴试验和 SEM 电镜扫描试验, 着重分析了冻融次数和纤维掺量对改良土力学性质的影响规律。结果显示: 应力应变曲线特性与围压、冻融次数、木质素纤维掺量均有较大关系。改良土的弹性模量、强度、黏聚力等都随着冻融循环次数的增加而降低; 0.75% 掺量的木质素纤维改良土弹性模量、强度、黏聚力均最大, 且冻融次数越多, 其表现出的强度优势越大。纤维在土样内部形成了三维网架结构或是起到了“桥梁”搭接作用, 减小了冻融对土体微观孔隙损伤的影响, 从而增强了土体的强度。试验研究表明, 木质素纤维改良土在抵抗反复冻融问题上具有明显的优势。

关键词: 冻融循环; 木质素纤维改良土; 力学性质; 电镜扫描

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0135-06

作者简介: 陈 诚(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程冻融循环方面的研究工作。E-mail: 577328704@qq.com。

Properties and microscopic analysis of lignin fiber-reinforced soils under freeze-thaw cycles

CHEN Cheng^{1, 2}, GUO Wei^{1, 2}, REN Yu-xiao^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin 300072, China; 2. Department of Architectural Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: It is a common engineering method to improve the subgrade soils in seasonal frozen soil areas. Lignin fiber is an economical and environmentally friendly additive with good durability. Taking the soils improved by the lignin fiber as the research object, the UU triaxial tests and SEM scanning tests are carried out on the soil samples with different contents of lignin fiber after freeze-thaw cycles. The influences of the times of freeze-thaw cycles and the content of fiber on the mechanical properties of the soils are analyzed emphatically. The results show that the characteristics of stress-strain curve are related to confining pressure, freeze-thaw times and lignin fiber content. The elastic modulus, strength and cohesion of the reinforced soils decrease with the increase of freeze-thaw cycles. Under the lignin fiber content of 0.75%, the elastic modulus, strength and cohesion of the reinforced soils reach the maximum. The fiber forms a three-dimensional grid structure in the soil samples or plays a role of "bridge" overlapping, which reduces the impact of freeze-thaw on the pore damage, thus enhancing the strength of the soils. The test results show that the reinforced soils with lignin fiber have obvious advantages in resisting repeated freeze-thaw cycles.

Key words: freeze-thaw cycle; lignin fiber-reinforced soil; mechanical property; scanning electron microscopy

0 引 言

随着环境温度周期性变化, 季节性冻土在反复冻融循环过程中, 内部孔隙水随之发生上下迁移、相变, 土中孔隙数量和大小将随着孔隙水的冻结与融化而发生变化, 从而引起土体内部微观结构发生改变, 导致土体出现冻胀融沉。冻融循环是一种连续不断的强风化过程, 不断破坏着土的结构性, 是引起土体强度参数降低, 产生劣化的重要原因^[1]。为克服冻融循环对土体性质的劣化影响, 工程中通常采用不同的方法对

公路地基土进行改良。改良方式主要可以分为物理、化学和综合改良 3 种^[2]。物理改良法主要是在土体中加入土工织物^[3]以及聚合物纤维等^[4]; 或是通过掺加炉渣、砂、碎石等粗颗粒来改变其颗粒级配以增强土体的物理、强度特性^[5]。化学改良方法目前采用较多,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878446); 天津市自然科学基金项目 (18JCYBJC40500)

收稿日期: 2020-08-07

***通信作者** (E-mail: guow@tju.edu.cn)

在土体中外加水泥^[6]、石灰^[7]或是化学浆液^[8]等,通过改良材料与土颗粒间发生化学反应,从而生成强度较高的新物质,以提高土体的强度和稳定性。综合法则

是物理改良与化学改良的结合^[9]。可以发现,上述国内外学者关于冻融循环对改良土的研究虽多,但以往改良材料的选取大多数局限于水泥、石灰、聚丙烯高分子纤维等,并不全面,有待进一步去探索新型改良材料。众所周知,石灰、水泥通常表现出以拉伸开裂为主的脆性破坏模式;此外这种碱性化学材料的掺入,会对周围土壤环境造成严重的污染。随着国家的迅速发展,环境污染日益严重,环保问题已成为阻碍国家发展的重要因素之一,绿色、经济改良土的物理力学性质研究将成为国内外岩土工程领域的一个崭新课题。而木质素纤维作为造纸工业副产品之一,来源广泛、价格低廉,具有经济、环保以及良好耐久性的优点,因此岩土工程领域中木质素纤维改良土具有很好的应用前景。

此外研究表明,土的宏观力学性质从根本上受其微观结构的控制,通过对土微观结构的研究,可以从微观的角度上解释土的力学性质^[10]。刘春等^[11]基于 PACS 软件进行裂纹模式分析。PACS 软件具有自动分割识别颗粒和孔隙的功能,可以有效地减少人为因素对处理结果的影响,因此本文选用 PACS 软件对 SEM 图片进行处理。

本文设计完成了多种掺量的木质素纤维改良土在不同冻融次数后的 UU 三轴试验,着重分析了不同冻融次数下改良土的应力应变特性、弹性模量、强度指标等力学性质的变化规律。探讨了改良土的抵抗冻融效果并得出最佳掺量。并对不同冻融次数后的改良土进行 SEM 电镜扫描试验,从微观孔隙、概率熵变化的角度解释冻融对土体宏观力学性质影响的机理。

1 试验材料及试验方案

1.1 试验材料

试验所用土样为天津滨海新区软黏土,在 105℃干燥箱中烘干 24 h 后,碾散并筛分,按《土工试验方法标准》(GB /T 50123—2019)测得土样基本物理指标见表 1。

表 1 土样物理特性指标

Table 1 Physical properties of soil samples

$w_{op}/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	G_s	$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p
19.2	18.7	2.67	42.4	22.5	20.4

试验用木质素纤维来自河北石家庄石粉厂。纤维呈絮状,长度 1~3 mm,在水中具有良好的分散性。

1.2 土样制备

首先将土样晒干,然后粉碎并过筛,以除去大颗

粒杂质。进行三轴试验的关键是确保制备的试样具有良好的一致性,为使纤维与土样充分均匀混合,本文试验的制样方法是:先称取一定质量干土,将不同配比(分别为干土质量的 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%)的纤维加入一定量的水中(干土质量的 20%)混合,再喷洒入干土中,充分搅拌 30 min 后,套上保鲜膜密封静置 12 h 待水分均匀分布后,再将土样分 3 层填入制样器,压实后削平土样表面。试样最终尺寸: $\phi 39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 。

1.3 试验方案

冻融试验箱可控温度范围为-25℃~150℃,如图 1(a)。将上述制得的土样用保鲜膜密封,形成封闭的冻融环境,防止冻融循环试验中水分的散失和外界补给。根据文献[1, 3, 4]可知,5 次冻融后,冻融对土体的物理力学性质影响基本稳定。故本文的冻融次数分别选取 0, 1, 3, 5, 7, 9 次,试样冻结、融化温度分别设为-20℃、20℃,冻结、融化时间均为 12 h,以保证土样内部完全冻结、融化。

由于软黏土透水性较差,故本文对其进行不固结不排水三轴试验(UU),试验采用双联三轴应变控制式系统,如图 1(b)所示,试验机轴向加载量程选择 0~1 kN,三轴围压、反压压力范围 0~1 MPa。对经过不同冻融次数后的土样进行 UU 三轴试验,围压分别选取 100, 200, 300 kPa,剪切速率选取 0.5 mm/min,剪切应变达到 20%时停止试验。

微观试验采用型号为 Quanta250 的电镜扫描仪,如图 1(c)。电子发射电压为 5 kV,接口连接到计算机,可以将扫描图像直接传送到计算机。分别对不同冻融次数后木质素纤维掺量为 0%, 0.25%, 0.75%的改良土进行电镜扫描,扫描倍数设为 100, 500, 1000。



(a) 冻融试验箱 (b) 双联三轴试验系统 (c) 微观扫描仪

图 1 试验仪器

Fig. 1 Test instrument

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线

图 2 为 0.75%掺量木质素纤维改良土的应力应变曲线。可以看出,在 100 kPa 围压下,改良土的应力

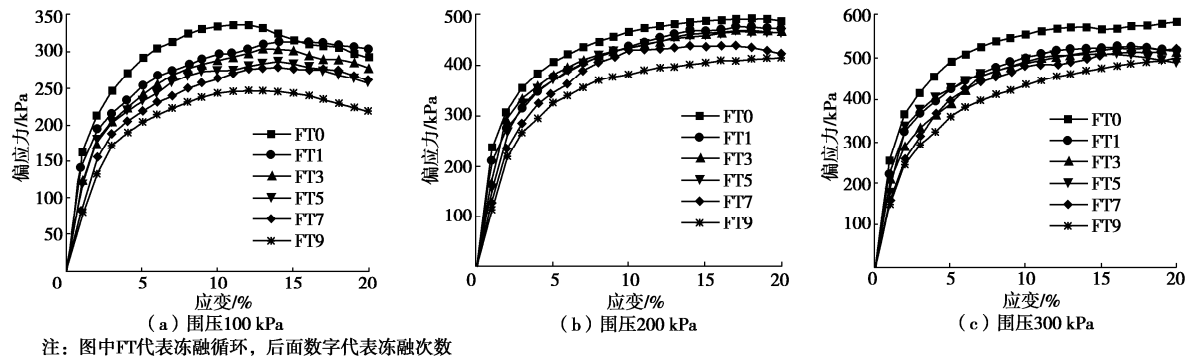


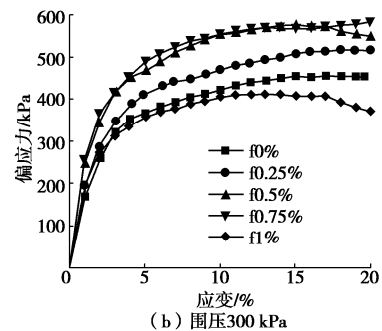
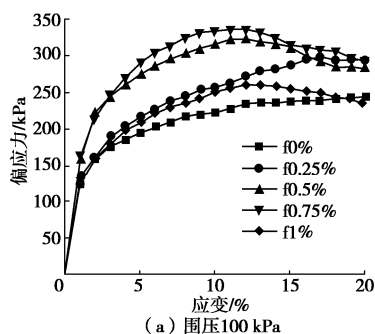
图2 冻融次数对 0.75%纤维改良土应力应变曲线影响

Fig. 2 Effects of freeze-thaw cycles on stress-strain curves of 0.75% lignin fiber-reinforced soils

应变曲线均表现为应变软化型，而在 200, 300 kPa 的围压下，表现为应变硬化型。这体现了围压大小对冻融循环后土体应力应变曲线具有重要的影响。在较高围压下，由于侧限的存在，随机分布在土体中的纤维构成了三维网架结构，加强了土中潜在的薄弱面，减小土中裂隙的延伸和发展，提高土样塑性。同时高围压还会增强了土颗粒间的联锁力，增加了相对滑移面（即剪切面）上的正应力，从而减小了冻融过程中产生的裂缝和裂隙，围压的压实作用增强了土体的变形抗力。

此外未经过冻融的土体体现出更强的应变软化特性，随着冻融次数的增加逐渐由应变软化型向硬化型转变，应力应变曲线的平面位置随冻融循环次数的增加而不断下降。这主要是冻融对土体有一个结构重塑效应，土体在冻结时，内部水结冰形成的冰晶体在土体内部产生冻胀力，当冻胀力超过土颗粒间的黏结力时，增大土颗粒间的微孔隙，导致土颗粒结构发生破坏，重新排列，从而在宏观上应力幅值随冻融循环次数的增加表现出逐渐劣化衰减的趋势。

图 3 绘制了不同木质素纤维掺量改良土在 100, 300 kPa 两种围压下的应力应变曲线。在 100 kPa 下，随着木质素纤维掺量的增加，应力应变曲线逐渐呈现出应变软化特性。这是由于絮状的木质素纤维在加入水中时，生成的浆体有一定的胶结固化特性，改良土产生了一定的脆性，表现出应变软化的特点。而在 300 kPa 围压下，由于高围压对土体的塑性提升大于胶结固化产生的脆性，所以表现出更强的应变硬化特性。



注：图中f代表木质素纤维，后面数字代表掺量

图3 不同木质素纤维掺量对改良土应力应变曲线的影响

Fig. 3 Effects of fiber content on stress-strain curves of reinforced soils

2.2 弹性模量

土体弹性模量的确定通常是取 1%轴向应变时偏应力增量与轴向应变增量之比^[12]：

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{1.0\%} - \sigma_0}{\varepsilon_{1.0\%} - \varepsilon_0} \quad (1)$$

式中 E 为弹性模量； $\Delta\sigma$ 为应力增量； $\Delta\varepsilon$ 为应变增量， σ_0 和 ε_0 分别对应初始应力和初始应变。

根据式 (1)，计算得到不同木质素纤维掺量在不同冻融次数后弹性模量的变化曲线，由于篇幅有限，仅列出 100 kPa 围压下的结果，如图 4。冻融循环会使弹性模量大幅度减小，第 1 次冻融循环后的弹性模量降低幅度较大。而木质素纤维的掺入使弹性模量产生了不同程度的提高，其中，木质素纤维掺量为 0.75% 时改良土的弹性模量最大。

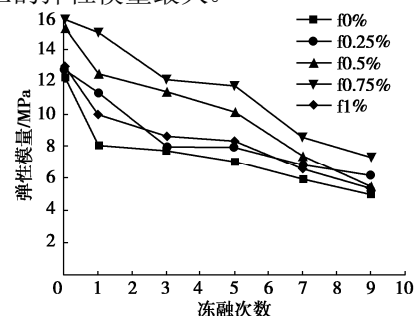


图4 弹性模量的变化规律

Fig. 4 Effects of freeze-thaw cycles on elastic modulus

为探究在同一冻融次数下不同木质素纤维掺量抵抗冻融劣化的效果,定义弹性模量的衰减幅度 D_E 为

$$D_E = \frac{E_N - E_0}{E_0} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

式中, E_N 为 N 次冻融后的弹性模量, E_0 为未冻融的弹性模量。

经过上式计算,冻融 9 次后,不同木质素纤维掺量改良土弹性模量的衰减幅度见表 2。在 200, 300 kPa 围压下, 0.75% 掺量的改良土弹性模量衰减幅度分别为 53.55%, 47.33%, 均为同一围压下的最低值。在 100 kPa 围压时, 衰减幅度为 58.74%, 仅比 0.25% 掺量的改良土大, 因此综合来看, 可以说明 0.75% 木质素纤维改良土抵抗冻融对弹模劣化影响的效果最好。

表 2 改良土 9 次冻融后的弹性模量衰减幅度

Table 2 Attenuation amplitudes of elastic modulus of reinforced soils after 9 freeze-thaw cycles (%)

纤维掺量/%	围压		
	100 kPa	200 kPa	300 kPa
0	-58.96	-54.38	-62.47
0.25	-52.13	-56.02	-58.48
0.50	-64.86	-60.64	-68.72
0.75	-58.74	-53.55	-47.33
1.00	-59.59	-56.73	-47.69

2.3 破坏强度

对于应变硬化型, 取 15% 轴向应变对应的偏应力作为其破坏强度, 对于应变软化型, 取其峰值应力作为破坏强度。据此可以得到围压 100 kPa 下木质素纤维改良土的破坏强度, 如图 5 所示, 将改良土经 9 次冻融循环后的破坏强度衰减值列于表 3。

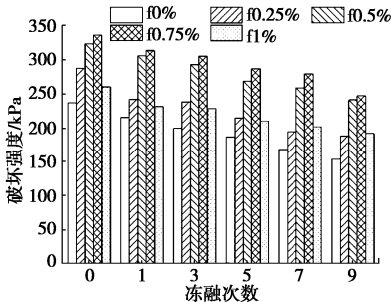


图 5 冻融次数对不同纤维掺量改良土破坏强度的影响

Fig. 5 Effects of freeze-thaw cycles on failure strength of soils reinforced by lignin fiber

由图 5 可以看出, 在同一冻融次数下, 当木质素纤维掺量小于 0.75% 时, 强度随掺量的增加而增大, 超过 0.75% 时, 强度随掺量的增加反而大幅度减小, 呈现出这种现象的原因主要是木质素纤维掺量较多, 分布比较集中, 在土样内部形成了薄弱面, 从而降低了土样强度。0.5% 和 0.75% 掺量的木质素纤维改良土性能最优, 二者强度接近, 而超过 5 次冻融后, 0.75% 掺量的改良土在强度方面的优势开始扩大。

另外, 由表 3 可知, 随着冻融次数的增加, 土样强度均出现不同幅度的降低。9 次冻融后, 素土的强度衰减幅度在 100 kPa 围压下达到最大值 34.9%, 而 0.75% 木质素纤维改良土的衰减幅度在 200, 300 kPa 围压下分别为 16.92%, 17.16%, 均为同围压下的最小值, 故综合来看, 可以确定木质素纤维最佳掺量在 0.75% 附近。

表 3 改良土 9 次冻融后的强度衰减幅度

Table 3 Attenuation amplitudes of strength of reinforced soils after 9 freeze-thaw cycles (%)

纤维掺量/%	围压		
	100 kPa	200 kPa	300 kPa
0	-34.90	-26.32	-33.02
0.25	-34.35	-21.67	-32.26
0.50	-25.50	-22.83	-22.96
0.75	-26.51	-16.92	-17.16
1.00	-26.33	-17.64	-19.82

2.4 抗剪强度指标

根据 UU 试验得到的应力应变曲线, 对 3 种围压所形成的破坏包络线进行直线拟合, 得到抗剪强度指标随冻融循环的变化规律, 如图 6 所示。整体来看, 改良土表现出更高的黏聚力和内摩擦角。素土的黏聚力随着冻融次数的增加, 呈现出先增加后降低的趋势, 内摩擦角随冻融次数的增加而减小 7° , 变化幅度较大。0.75% 木质素纤维改良土的黏聚力和内摩擦角均为最大; 且 0.75% 掺量的改良土随冻融次数的增加, 抗剪强度指标变化幅度较小、相对更加稳定。因此也可以说明木质素纤维最佳掺量在 0.75% 附近。

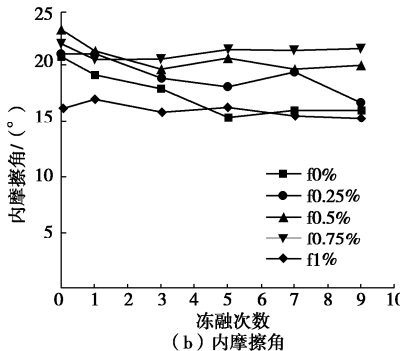
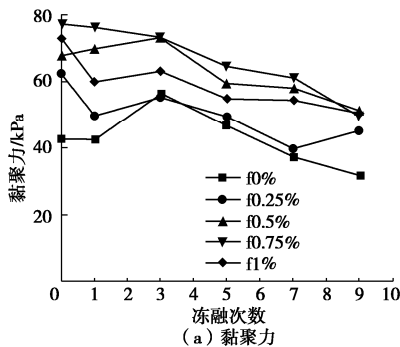


图 6 冻融对抗剪强度指标的影响

Fig. 6 Effects of freeze-thaw cycles on shear strength index

3 微观结构分析

100 倍 SEM 图像如图 7 所示, 其中黑色代表孔隙, 白色代表土体。可以看出 9 次冻融后的孔隙明显大于 1 次冻融后的孔隙, 且 9 次冻融后颗粒有明显的抱团聚拢现象。0.75% 木质素纤维改良土的裂隙明显比素土更少。对改良土样局部放大 1000 倍后得到图 8, 可以发现纤维在土样内部主要起到了三维网架结构或是“桥梁”搭接作用, 加强了土体之间的联结力, 从而在宏观上增加了力学性能指标。

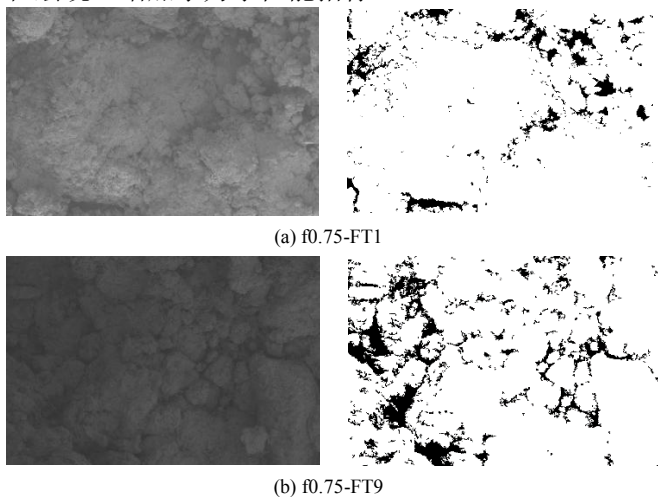
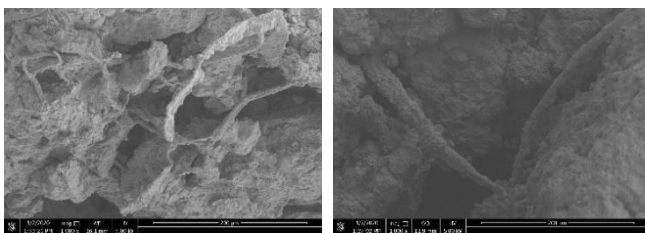


图 7 冻融 1, 9 次后, 100 倍下改良土 SEM 照片(左边为原图, 右边为二值化处理后图像)

Fig. 7 SEM photos of reinforced soils under 100 times after 1 and 9 freeze-thaw cycles

通过 PACS 图像处理软件对电镜扫描后的图像进行定量分析, 可以得到孔隙度、概率熵等参数。

对 100 倍下的图像进行二值化处理, 并降噪分割, 可以得到不同冻融次数后的孔隙大小。如图 9 所示, 随着冻融次数的增加, 土样内部孔隙率明显增大, 在宏观上体现出冻融对力学性质的劣化影响。另外, 0.75% 木质素纤维改良土相比于其他土样有更小的孔隙度, 从而提高了土体的破坏强度, 说明了改良效果最佳, 这也与前文分析得到的数据结果一致。



(a) 扫描图片 1

(b) 扫描图片 2

图 8 冻融 9 次, 0.75% 纤维改良土 1000 倍的 SEM 照片

Fig. 8 SEM photos of 0.75% lignin fiber-reinforced soils 1000 times after 9 freeze-thaw cycles

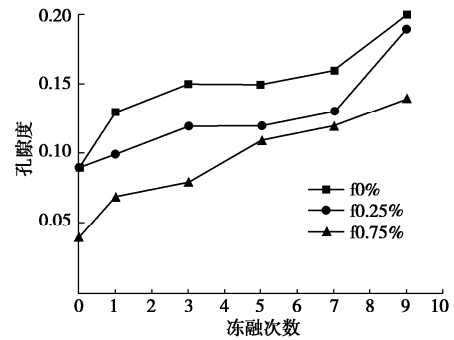


图 9 孔隙度随冻融次数的变化规律

Fig. 9 Variation of porosity with freeze-thaw cycles

概率熵是一个描述颗粒排列的结构参数, 可用来分析冻融循环作用后的土颗粒排列情况。从图 10 中可以看出, 随着冻融次数的增加, 三种土样的概率熵都逐渐减小。这说明冻融作用对土颗粒排列的定向性有一定的影响, 根据概率熵的定义可知, 在冻融作用下, 颗粒排列由较混乱状态向有序状态发展, 也就是说颗粒排列的定向性越来越好。

这是因为, 在冻融循环过程中, 外界温度条件的改变使得孔隙水发生相变, 形成一定体积的冰晶结构, 相邻土颗粒在冰晶体的楔形力挤压作用下, 颗粒发生相对位移。此外在低温冻结过程中, 由于冻结锋面的存在, 土体内部水分有向冻结锋面定向迁移的趋势, 为土颗粒的位移提供条件, 故而在冻融循环作用下, 土颗粒间的相对位移改变了土颗粒的排列方式, 使土颗粒排列的定向性越来越好。

此外, 还可以发现, 0.75% 纤维改良土的概率熵要比另外两种土样的小。说明了 0.75% 纤维改良土中的土颗粒排列在经历冻融循环后更加有序, 抵抗冻融的劣化影响更加明显。

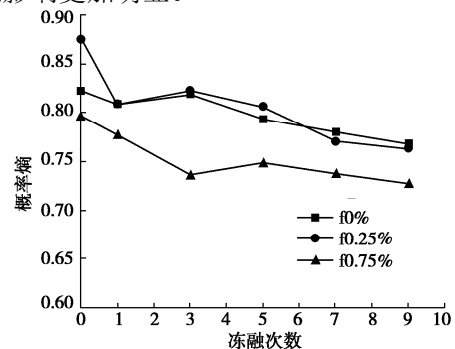


图 10 概率熵随冻融次数的变化规律

Fig. 10 Variation of probability entropy with freeze-thaw cycles

4 结 论

本文以木质素纤维改良土为研究对象, 开展了一系列冻融循环试验、UU 三轴试验和 SEM 电镜扫描试验, 分析总结了冻融次数和木质素纤维掺量对该改良土力学性质变化的影响规律, 探讨了木质素纤维改良

土的抵抗冻融效果以及微观机制。主要得到以下结论:

(1) 随着围压的增大,冻融次数的增加,应力应变曲线逐渐由应变软化型过渡到应变硬化型。随着木质素纤维掺量的增加,应力应变曲线呈现出软化特性;高围压下,此现象不明显。

(2) 首次冻融后,弹性模量降低幅度较大,之后降低幅度逐渐放缓。木质素纤维掺量为0.75%时,改良土的弹性模量、破坏强度和黏聚力均达到最大值,内摩擦角变化最为稳定,抵抗冻融劣化能力最强。在实际工程应用中,建议采用0.75%的纤维掺量来改良季节性冻土地区路基土。

(3) 从微观图像上可以看出,冻融作用使土体内部微观孔隙增大,导致宏观上力学性能的衰减,概率熵随着冻融的增加而减小。纤维在改良土样内部主要起到了三维网架结构或是“桥梁”搭接作用,减小了冻融对土体孔隙损伤的影响,从而增强了土体的强度。

参考文献:

- [1] LU Z, XIAN S, YAO H, et al. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019(157): 42 - 52.
- [2] 张艳军, 于沉香, 凌 飞, 等. 石棉纤维粉煤灰水泥改良软土试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 982 - 988. (ZHANG Yan-jun, YU Chen-xiang, LING Fei, et al. Experimental study on asbestos fiber reinforced fly ash soil-cement for soft soil enhancement[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 982 - 988. (in Chinese))
- [3] GHAZAVI M, ROUSTAEI M. Freeze - thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013(89): 22 - 29.
- [4] KRAVCHENKO E, LIU J, NIU W, et al. Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018(153): 18 - 24.
- [5] OLGUN M. The effects and optimization of additives for expansive clays under freeze-thaw conditions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013(93): 36 - 46.
- [6] ESKIŞAR T, ALTUN S, KALIPCILAR İ. Assessment of strength development and freeze-thaw performance of cement treated clays at different water contents[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015(111): 50 - 59.
- [7] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze - thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015(119): 151 - 157.
- [8] 杨晴雯, 裴向军, 黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素改良土冻融性能及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 3102 - 3113. (YANG Qing-wen, PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu. Research on the effect of freeze and thaw cycles on the property and damage mechanism of M-CMC stabilized soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3102 - 3113. (in Chinese))
- [9] LI L, SHAO W, LI Y, et al. Effects of climatic factors on mechanical properties of cement and fiber reinforced clays[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(3): 537 - 548.
- [10] 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(12): 2082 - 2086. (QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of over-consolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082 - 2086. (in Chinese))
- [11] LIU C, TANG C, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers and Geosciences, 2013(57): 77 - 80.
- [12] LEE W, BOHRA N C, ALTSCHAEFFL A G, et al. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw[J]. Can Geotech J, 1995, 32(4): 559 - 568.

(编校: 明经平)