

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0063

DONG Chaofan, ZHANG Wuyu, ZHANG Ruixing, et al. Experimental study of the mechanical and thermal properties of lignin fiber-stabilized loess under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):612-622. [董超凡, 张吾渝, 张瑞星, 等. 冻融作用下木质素纤维改良黄土力学与热学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):612-622.]

冻融作用下木质素纤维改良黄土力学与热学特性试验研究

董超凡^{1,2}, 张吾渝^{1,2}, 张瑞星^{1,2}, 黄雨灵^{1,2}, 高英³

(1. 青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 西安交通大学城市学院, 陕西 西安 710018)

摘要: 冻融循环作用是造成寒区工程病害的主要因素之一。为探究冻融循环对木质素纤维改良黄土力学和热学的影响, 通过轻型击实试验、冻融循环试验、不固结不排水三轴剪切试验、热常数分析试验和X射线衍射试验, 以木质素纤维掺量、冻融循环次数和围压为变量展开研究。结果表明: 随着掺量的增加, 改良黄土的最大干密度降低, 最优含水率升高; 随着冻融循环次数的增加, 试样的应力-应变曲线由应变硬化型向应变软化型转变; 试样的质量损失率、破坏强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角和导热系数均随着冻融循环次数的增加呈下降趋势, 在经历第1次冻融循环后衰减率最高, 并且总是在掺量为5%时达到最大值; 试样的破坏强度和黏聚力在经历6~9次冻融循环后趋于稳定; 黄土及掺量为5%的改良黄土在X射线衍射分析中成分相似, 未发现新的物质生成, 因此, 木质素纤维是一种绿色的物理固化材料。该研究成果可为寒区土体加固提供新思路。

关键词: 木质素纤维; 改良黄土; 冻融循环; 力学特性; 导热系数

中图分类号: P642.14; TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0612-11

0 引言

青海省东部季节冻土区黄土分布广泛, 其孔隙大、土质疏松的特性在工程建设过程中易发生工程病害^[1-2]。因此, 通常对其进行改良加固后开展施工作业。随着“西部大开发”和“一带一路”倡议的实施, 青海省发展迎来了新的契机, 城镇化及基础设施的建设空前繁荣。因此, 对于基础工程领域的研究也变得尤为重要。此外, 随着“双碳”目标的提出, 有必要开展具有应用潜力和绿色、低碳、环保等特性的建筑材料的相关研究。

木质素作为一种造纸产生的高分子化合物, 全球范围内每年几乎产生超过600亿吨^[3], 而通常情况下, 这些产物被燃烧销毁, 造成大量资源浪费和环境污染^[4]。针对这一现象, 有学者尝试开展木质

素改良土的相关研究。刘松玉等^[5]、张涛等^[6]对木质素改良粉土开展一系列研究, 研究结果表明木质素能有效提高粉土强度, 微观层面表明木质素具有胶结土颗粒及填充孔隙的作用; 刘钊钊等^[7]的研究结果表明木质素的掺入可有效提高黄土强度, 并有效改善黄土的持水性和水稳性; 侯鑫等^[8]通过对木质素改良黄土开展多维度研究, 指出木质素磺酸钙是一种能够增强颗粒胶结并密实结构的新型固化材料; 高中南等^[9]、钟秀梅等^[4]开展了制样方法对木质素纤维改良黄土的研究, 结果表明制样方法对改良黄土强度有明显影响; 陈学军等^[10]通过对木质素改良红黏土力学性质展开研究, 指出改良土强度随木质素掺量的增加而提升, 并且破坏形态也由脆性破坏向塑性破坏转变; 董超凡等^[11]的研究结果表明, 木质素纤维改良黄土具有可行性, 在掺量

收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168054); 青海省科技计划项目(2020-ZJ-738); 陕西省科技厅一般项目(2021-JQ-892)资助

作者简介: 董超凡, 硕士研究生, 主要从事环境岩土及地下工程研究. E-mail: dongcf1996@163.com

通信作者: 张吾渝, 教授, 主要从事黄土地基处理及土力学研究. E-mail: qdzwy@163.com

为5%时强度达到最高,并且导热系数随着掺量的增加呈下降的趋势。这些研究表明,木质素对于土体改良具有可行性,并且在一定程度上提高了土体强度。

除此之外,由于本地区特有的地理环境造成的季节以及昼夜温度变化特点,引起土体内部水分迁移,发生水分重分布,在冻融过程中造成土体结构的劣化,致使这些地下岩土工程设施一方面易发生难以治理的冻胀、冻融沉陷和开裂等现象^[12],另一方面会对其使用的长期性及稳定性造成影响。针对冻融循环对土体破坏响应机制的研究已有开展,也取得了一系列的研究成果。陈诚等^[13]、樊科伟等^[3]的研究结果表明,土体中添加木质素纤维减弱了冻融对土体的损伤,减缓了土样内部裂隙发展,阻止了颗粒的重新排列,增强了抗冻性;胡再强等^[14]的研究结果表明,石灰改性黄土的黏聚力随冻融循环次数的增加呈降低趋势而内摩擦角基本不变;张勇敢等^[15]、崔宏环等^[16]认为在冻融1次后,土体的劣化程度最大;而刘宽等^[17]认为试样在前10次冻融循环时劣化程度显著;王中攀等^[18]研究发现试样黏聚力和内摩擦角均随着冻融循环次数的增加而减小。可见,冻融作用对不同土类的劣化程度有不同的影响。

综上所述,关于木质素改良土的研究已有开展,但是鲜有关于冻融循环作用下木质素纤维改良黄土的相关研究。除此之外,受土体结构性参数的影响,冻融循环作用对土体工程性质的影响不同。伴随着青海省“一优两高”战略的提出,为顺应生态保护和高质量发展的迫切需求,本文为探究冻融循环作用对木质素纤维改良黄土劣化影响的响应机制,以木质素纤维掺量、冻融循环次数为主要变量,通过冻融循环试验、三轴剪切试验、热常数分析试

验并结合水分损失率、弹性模量和抗剪强度指标明确冻融循环作用下试样力学和热学的变化规律,以期为寒区土体改良及工程建设提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验用土

为防止地表腐化植物等扰动土对试验结果造成影响,本试验所用黄土取自青海省东部季节冻土区某场地地下3~4 m深度处,颜色为浅黄色且无植物根系,采用Mastersizer 2000激光粒度测试仪对试验用土进行粒度分析,结果如图1所示,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19]测得土体基本物理性质指标如表1所示,并将其定名为低液限黏土。通过对试验用土进行XRD定量分析得到其主要矿物成分,如表2所示,试验用黄土的主要成分为石英和方解石等。

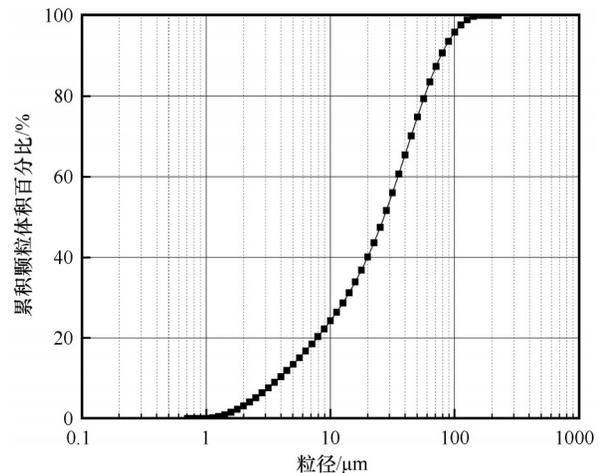


图1 试验用黄土粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of the loess samples used in this study

表1 黄土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of loess

比重	粒径分布/%			最大干密度/(g·cm ⁻³)	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	最优含水率 ω_{op} /%	土的分类
	0.075~2 mm	0.002~0.075 mm	<0.002 mm					
2.71	12.66	84.2	3.14	1.73	25.1	13.5	14.74	低液限黏土

1.1.2 木质素纤维

试验所用木质素纤维采购于山东某化工厂,呈白色絮状固体,是天然木材经过化学处理得到的有机纤维,具有芳香气味、良好的韧性、分散性、化学稳定性、抗裂性和耐酸碱腐蚀性(图2)。

1.2 试样制备

将试验用黄土放入105℃的干燥箱内烘24 h以上,直至黄土质量恒定,即认为其达到干燥状态,冷却至室温后碾碎过2 mm筛。木质素纤维过1 mm筛剔除絮状团聚物^[4]后与黄土混合搅拌5 min,使土

表2 黄土的矿物成分

Table 2 Mineral components of loess

矿物成分	含量/%
石英	57.0
方解石	13.0
钠长石	9.0
斜绿泥石	8.5
伊利石	1.5
白云母	11.0



图2 试验用木质素纤维

Fig. 2 Lignin fibers used in this study

样与木质素纤维混合均匀,并按黄土的最优含水量配制试验用土,密封24 h后采用静压加载装置分层加载制成。在前期预试验过程中,发现当掺量超过5%时,混合料中的木质素纤维会产生团聚现象,影响试样的均一性。为了保证试验的完整性,本次试验选择木质素纤维掺量为干土质量的0%、1%、3%、5%和7%。为模拟封闭系统,防止试样的水分散失,试样制备完成后用塑料薄膜包裹密封并静置24 h,待试样内部水分迁移平衡后开始进行冻融试验及三轴剪切试验和热常数分析试验。

1.3 试验方案

1.3.1 击实试验

将土样烘干、碾碎、过5 mm筛后,分别与0%、1%、3%、5%和7%的木质素纤维混合均匀,之后加入蒸馏水配制成5种不同含水量的土料,密封静置闷料12 h后,进行轻型击实试验,得到不同掺量下木质素纤维改良黄土的最大干密度和最优含水量。

1.3.2 冻融循环试验

为明确冻融循环对木质素纤维改良黄土的影响,选择冻融循环次数和木质素纤维掺量为试验变量,利用TMS9018—500型冻胀循环试验箱,进行封闭系统下三维冻结和融化的冻融循环试验^[20]。既

有文献的试验结果表明^[15-16,21],第1次冻融循环会对土体结构产生较大影响,在10次冻融循环后结构趋于稳定,因此本次试验的冻融循环次数设计为0、1、3、6、9、15和20次,共7种。调研西宁地区冬季气象资料,设置冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,Liu等^[22]的研究结果表明融化温度不会对试样结构产生影响,因此融化温度设置为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为模拟自然条件下的真实冻融过程^[23],同时结合前期的研究^[24],试样的冻结和融化过程均在12 h内完成。因此,本次试验以冻结12 h和融化12 h为1次冻融循环。达到设定冻融循环次数后,取出试样称重并进行三轴剪切试验和热常数分析试验,其余试样继续进行冻融循环试验直至达到试验条件后取出并开展相关试验。其中三轴试样尺寸为直径39.1 mm、高度80 mm;导热系数测试试样为直径61.8 mm、高度20 mm的环刀试样,试样的初始含水率均为14.74%。

1.3.3 三轴剪切试验

由于冻融循环多发生在地基及路基的表层,并且车辆荷载多为瞬时荷载,土体内部水分通常不能及时发生排水固结^[20],因此本次试验为不固结不排水试验。试验仪器为SLB-1型应力-应变三轴剪切仪,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19]设置轴向加载速率为 $0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,控制应变为15%。Liu等^[25]开展了现场监测,发现路基固化土侧向压力一般为20~60 kPa,因此,为模拟地层压力,本次试验围压采用30、60和90 kPa。为便于制样,控制干密度为 $1.56\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.3.4 导热系数试验

导热系数是土体灾害防治的重要指标,本次试验利用双面测试法,采用Hot Disk TPS1500S型热常数分析仪对试样进行测试,测试时需将测试探头夹在两个均匀质试样中并静置15 min,保证探头与试样温度一致,减少试验误差,之后开展测试试验。

2 试验结果与分析

2.1 击实特性

木质素纤维改良黄土的击实试验结果,如图3所示。可以看出与素土相比,随着木质素纤维的增加,改良黄土的最大干密度逐渐减小,而最优含水量呈现上升的趋势。木质素纤维掺量从0增加到7%,改良黄土的最大干密度由 $1.73\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 减小至 $1.41\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最优含水量从14.74%增加到26.21%。

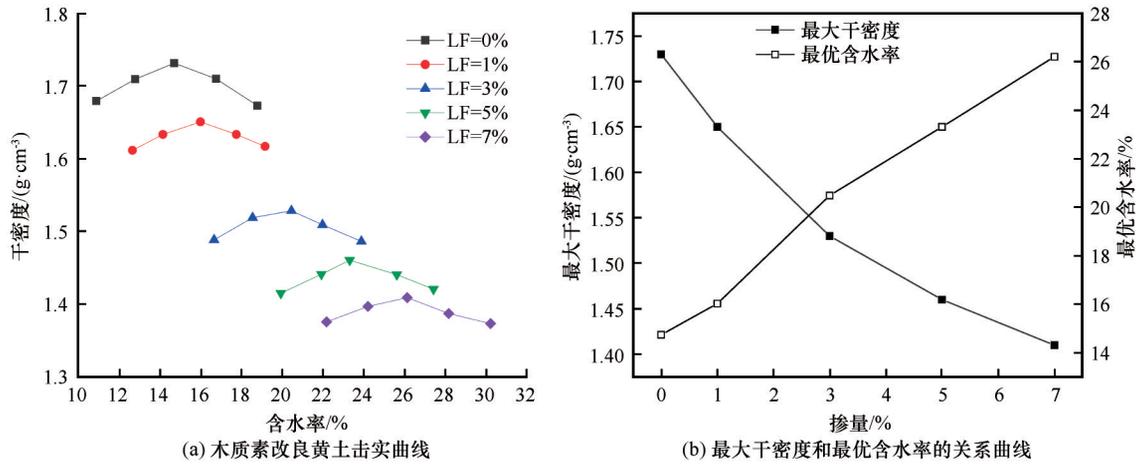


图3 木质素纤维改良黄土击实特性关系曲线

Fig. 3 Lignin fiber stabilized loess compaction properties relationship curve: lignin stabilized loess compaction curves (a); relationship curve between maximum dry density and optimum moisture content (b)

2.2 应力-应变曲线

为明确冻融循环作用下改良黄土的变形和强

度特性,绘制不同掺量、冻融循环次数和围压的应力-应变关系曲线,见图4(a)~4(c)。图4(a)为控制

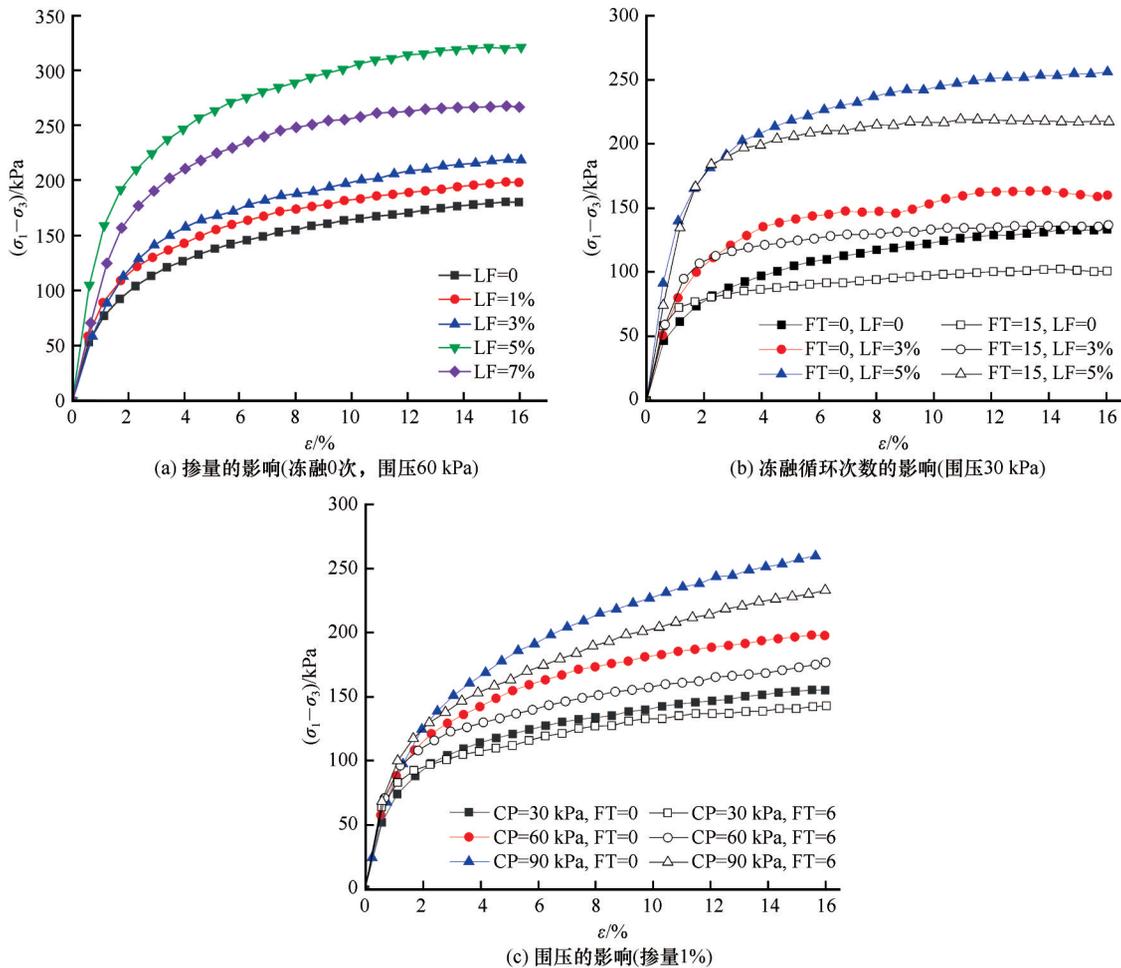


图4 试样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of the lignin fiber stabilized loess samples: effect of admixture (F-T=0, envelope pressure 60 kPa) (a); effect of number of freeze-thaw cycles (envelope pressure 30 kPa) (b); effect of envelope pressure (1% admixture) (c)

围压为 60 kPa, 在 0 次冻融条件下不同掺量试样的应力-应变曲线的变化规律, 可以看出不同掺量下试样的应力-应变曲线均呈应变硬化型。图 4(b) 为围压 30 kPa 下, 不同冻融循环次数对应的应力-应变曲线, 从图中可以看出经过冻融的试样, 应力-应变曲线向应变软化型转变。在相同掺量下, 冻融后的试样强度均小于未冻融的试样, 这是由于冻融过程中水分迁移形成的冰晶体使得土样孔隙变大, 弱化了颗粒间的胶结作用, 使得试样在一定程度上发生结构损伤, 强度降低。图 4(c) 为木质素纤维掺量为 1% 时, 不同围压下试样的应力-应变关系曲线, 在不同围压下, 试样的应力-应变曲线均呈现应变硬化型; 在不同冻融循环次数下, 试样的抗剪强度降低, 但应力-应变曲线依然呈现应变硬化型。

2.3 水分损失

将冻融循环前后的试样进行称重, 并定义水分损失率为试样质量损失与初始含水量的比值, 计算公式如下:

$$\nabla = \frac{m_0}{m_i} = \frac{m_i - m_a}{m_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为试样水分减少量; m_i 为试样初始水分含量; m_a 为冻融循环后试样水分含量。

试样的水分损失率和冻融循环次数之间的关系如图 5 所示。从图中可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 各掺量下改良黄土的水分含量均有所下降。在冻融循环作用下, 水分发生损失可归因为: 在封闭系统的三维冻融过程中, 试样内部温度梯度的变化, 造成了水分迁移现象的产生。在冻结过程中, 水分向试样表面迁移形成冰晶体; 而在融化过

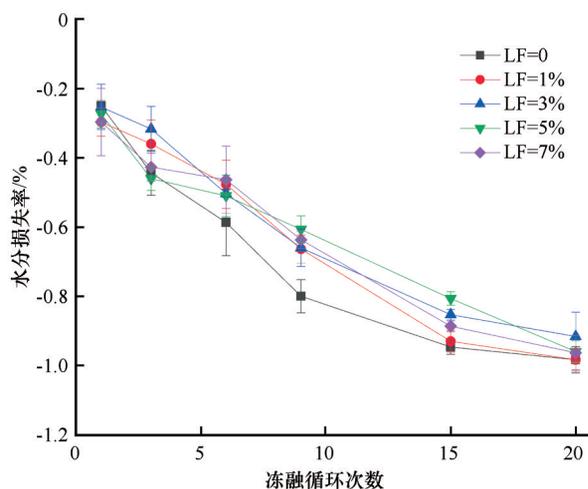


图5 水分损失率与冻融循环次数的关系曲线

Fig. 5 Moisture loss rate versus number of freeze-thaw cycles of the lignin fiber stabilized loess samples

程中, 这些冰晶体中的水分一部分迁移回到试样内部, 而剩余一部分残留在试样表面, 并随着试验时试样表面保鲜膜的剥除而损失, 因此试样的水分含量随着冻融循环次数的增加而降低。

相对于重塑黄土, 木质素纤维改良黄土的水分损失略小, 这可能是因为木质素纤维中的水分迁移量较小, 进而导致试样水分的损失率小于重塑黄土试样。

2.4 破坏强度

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19], 当应力-应变曲线的破坏形式为软化型时, 取偏应力峰值为破坏强度; 当应力-应变曲线的破坏形式为硬化型时, 则取轴向应变 15% 对应的偏应力值作为破坏强度, 不同条件下试样的破坏强度如图 6 所示。

围压对改良黄土破坏强度的影响, 如图 6(a) 所示。从图中可以看出随着围压的增加冻融前后试样的破坏强度并未出现较大改变, 如掺量为 5% 的改良黄土试样破坏强度在围压由 30 kPa 增加至 90 kPa 时, 冻融 20 次的试样破坏强度较未冻融试样降低了 39 kPa、32.4 kPa 和 31 kPa, 降低幅度为 17.96%、11.23% 和 8.39%, 分析认为围压可以使得试样孔隙减小, 在一定程度上减弱冻融作用造成结构破坏的影响, 恢复试样强度, 这一点和胡田飞等^[20]的研究结果一致。

掺量对试样破坏强度的影响, 如图 6(b) 所示。随着掺量的增加, 试样的破坏强度先升高后降低, 在掺量为 5% 时破坏强度达到最大值, 并且在各冻融循环次数下均有相似的规律。这是由于在制样过程中木质素纤维与水混合形成了一部分起到胶结固化作用的浆体^[13], 增强了土颗粒间的联系; 除此之外, 木质素纤维起到了桥梁搭接的作用并形成网状结构, 使得颗粒间的联系紧密, 在受到外力时, 土颗粒将外力分散到纤维及更多土颗粒上, 在宏观上表现为强度提高^[3]。但掺量的进一步增加, 造成木质素纤维发生团聚现象, 使得颗粒间的孔隙变大, 并形成裂隙, 土颗粒间形成薄弱面^[11], 并最终表现为强度降低。

破坏强度随冻融循环次数的变化规律, 如图 6(c) 所示。从图中可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 试样的破坏强度呈先下降后稳定的趋势。在冻融初期, 试样的强度显著下降, 这是由于在冻结过程中, 水分迁移及冰晶体的形成造成了试样结构的

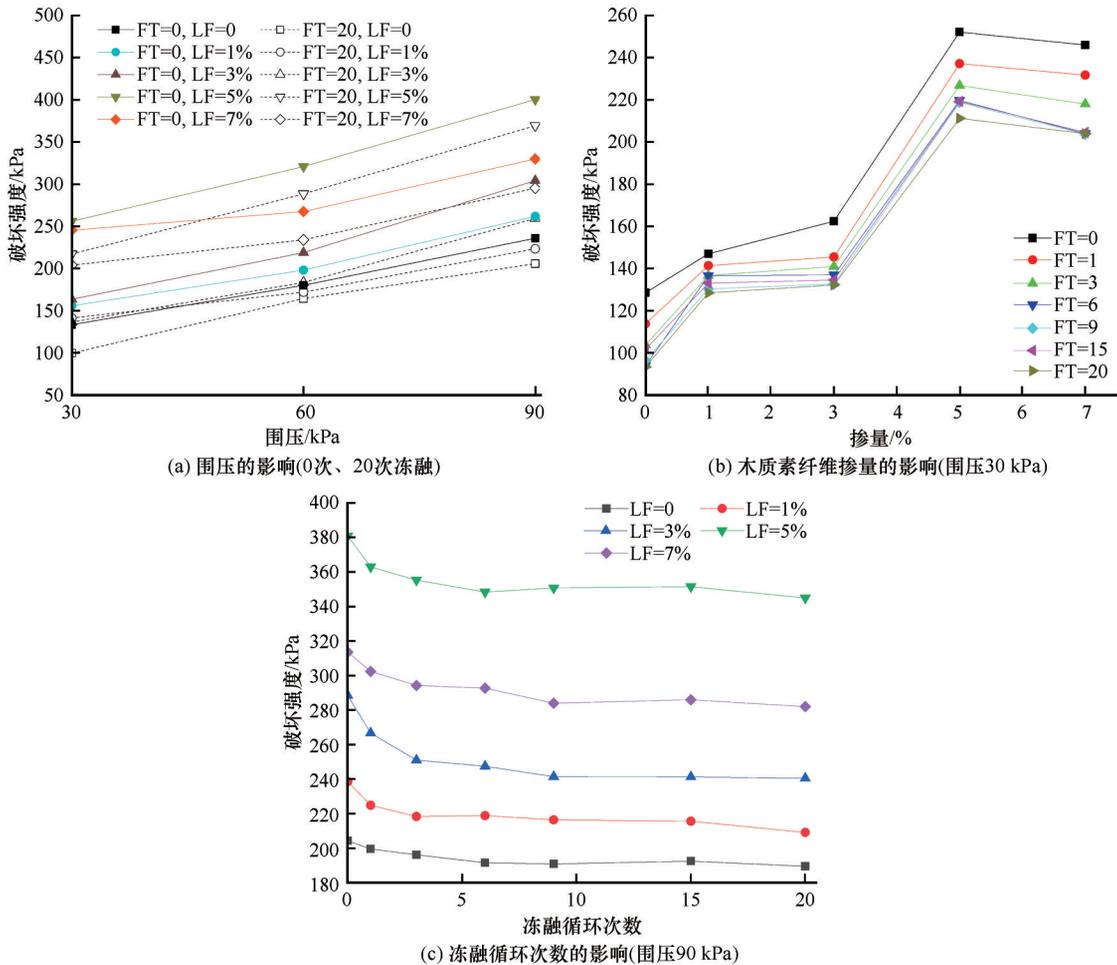


图6 试样的破坏强度

Fig. 6 Destructive strength of the lignin fiber stabilized loess samples: effect of envelope pressure (F-T=0 and 20) (a); effect of lignin fiber admixture (envelope pressure 30 kPa) (b); effect of number of freeze-thaw cycles (envelope pressure 90 kPa) (c)

破坏,改变了颗粒间的连接方式,因此破坏强度出现显著下降的趋势;经过多次冻融循环后,试样的土体结构和水分迁移会逐渐达到新的稳定状态,土体颗粒间的排列方式和连接方式不再发生变化,因此,试样的破坏强度在第6次时基本趋于稳定。此外,木质素纤维的加入会使得土颗粒的排列更加有序^[13],并且能够重排并抑制土颗粒的错动,减缓试样裂隙在冻融过程中的进一步发展^[3],这能有效提升土体强度并增强土体抗冻性。

2.5 弹性模量

弹性模量是土体抵抗弹性变形能力大小的尺度,是体现土体刚度和变形特性的参数。根据三轴试验结果,取其中应力-应变曲线轴向应变1.5%和0.5%所对应的偏应力与轴向应变增量的比值作为弹性模量^[26],计算公式如下:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{1.5\%} - \sigma_{0.5\%}}{\varepsilon_{1.5\%} - \varepsilon_{0.5\%}} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; $\Delta\sigma$ 为应力增量; $\Delta\varepsilon$ 为应变增量; $\sigma_{1.5\%}$ 和 $\sigma_{0.5\%}$ 为1.5%和0.5%所对应的偏应力增量; $\varepsilon_{1.5\%}$ 和 $\varepsilon_{0.5\%}$ 为1.5%和0.5%所对应的轴向应变增量。

通过式(4)计算得到不同因素影响的弹性模量变化规律,如图7所示。由图7(a)可见改良黄土的弹性模量随着冻融循环次数的增加发生了不同程度的下降,但木质素纤维的增加有效地提高了改良黄土的弹性模量,在掺量为5%时达到最大。由图7(b)可见改良黄土的弹性模量随着围压的增加而增大,且在各围压下冻融循环均会使弹性模量下降。

2.6 抗剪强度指标

土的抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的极限能力,是岩土领域中重要的力学指标,受多种因素的影响,并由黏聚力和内摩擦角来表征。黏聚力反映的是颗粒间的胶结作用和物理-化学键力作用,内摩擦角反映的是颗粒间的滑动摩擦和咬合作用。

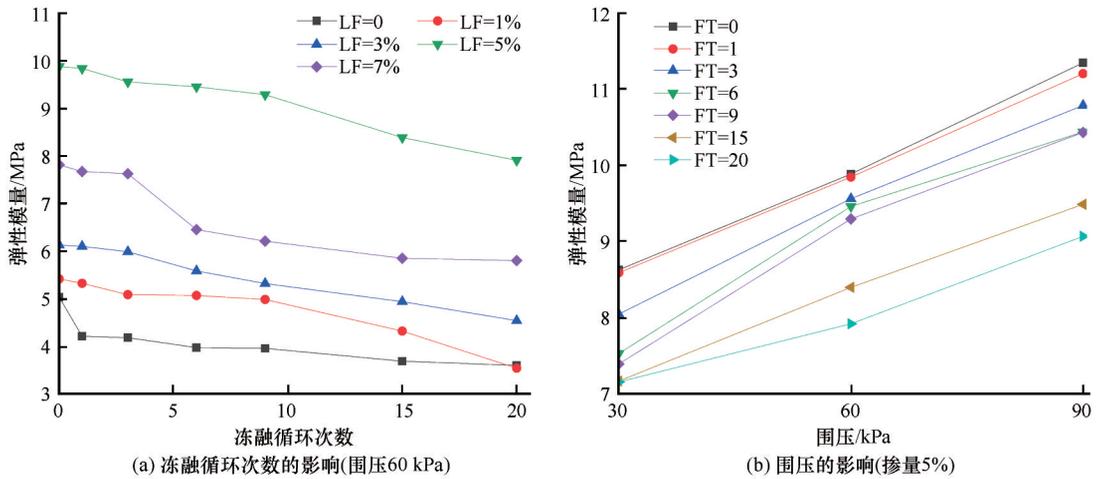


图7 弹性模量的变化规律

Fig. 7 The law of change of modulus of elasticity of the lignin fiber stabilized loess samples: effect of number of freeze-thaw cycles (envelope pressure 60 kPa) (a); effect of envelope pressure (5% admixture) (b)

为明确冻融循环及木质素纤维掺量对抗剪强度指标的影响,以 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为圆心原点、 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为圆半径,绘制莫尔应力圆,并做通过各圆顶点的直线,如图8所示。

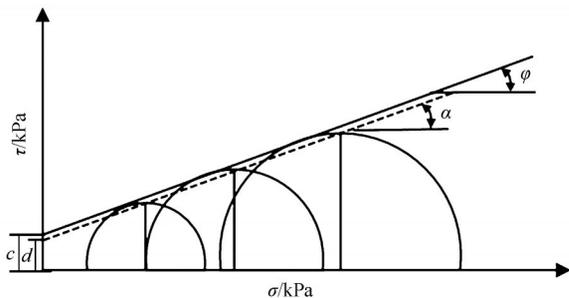


图8 莫尔圆与抗剪强度指标的关系

Fig. 8 Relationship of moorish circle and shear strength index

根据其倾角及其与纵坐标轴的截距计算内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c ^[27],即

$$\phi = \arcsin(\tan \alpha) \quad (3)$$

$$c = d/\cos \phi \quad (4)$$

式中: α 为直线倾角; d 为直线与纵坐标轴的截距。

图9为冻融循环作用下各掺量改良黄土黏聚力和内摩擦角随冻融循环次数变化的关系曲线。从图9(a)中可以看出,试样的黏聚力随着冻融循环次数的增加呈先降低后平稳的趋势,并且在6次以后趋于平稳。分析原因认为:试样在冻融过程中冰晶体冻结时的膨胀和融化时的水分重分布,引起试样结构发生变化,造成土体结构中颗粒间距增大、胶结作用减弱,因此黏聚力降低。而这种冻融造成的

结构破坏在短时间内便达到平衡,因此黏聚力下降趋势降低并逐渐趋于平稳。

从图9(b)中可以观察到相较于黏聚力而言,改良黄土的内摩擦角随冻融次数的增加有明显波动性,但总体来看内摩擦角随冻融循环次数呈减小趋势。分析原因认为:随着冻融循环次数的增加,土体内部发生水分重分布,而土颗粒上的水膜是造成颗粒产生相对滑动的一个重要因素,因此在不断的冻结与融化过程中,水分迁移以及土体劣化的共同作用,使得土颗粒间产生了相对滑动,进而呈现出内摩擦角减小的规律。

整体而言,改良黄土的黏聚力和内摩擦角均高于重塑黄土,在掺量为5%时表现为最高,综合以上对于破坏强度和弹性模量的分析,认为木质素纤维改良黄土的最优掺量在5%附近。

2.7 导热系数

基于力学性质的试验研究,对5%掺量的改良黄土及重塑黄土进行冻融循环作用下的热常数分析试验,其关系曲线如图10所示。不难看出,随着冻融循环次数的增加,试样的导热系数呈降低趋势,这是由于试样在冻结过程中,土体内的水分形成冰晶体,造成试样孔隙膨胀,而冰晶体融化后使试样内部形成架空体系,减少颗粒间的接触点和接触面^[28]。土体原生构造的改变,最终表现为导热系数的下降;此外,众所周知,含水量是影响土体导热系数的一个重要因素^[29],如前文所述,随着冻融循环次数的增加,试样中含水量降低,这导致试样的饱和度降低,同时土颗粒外层包裹的水膜变薄,颗

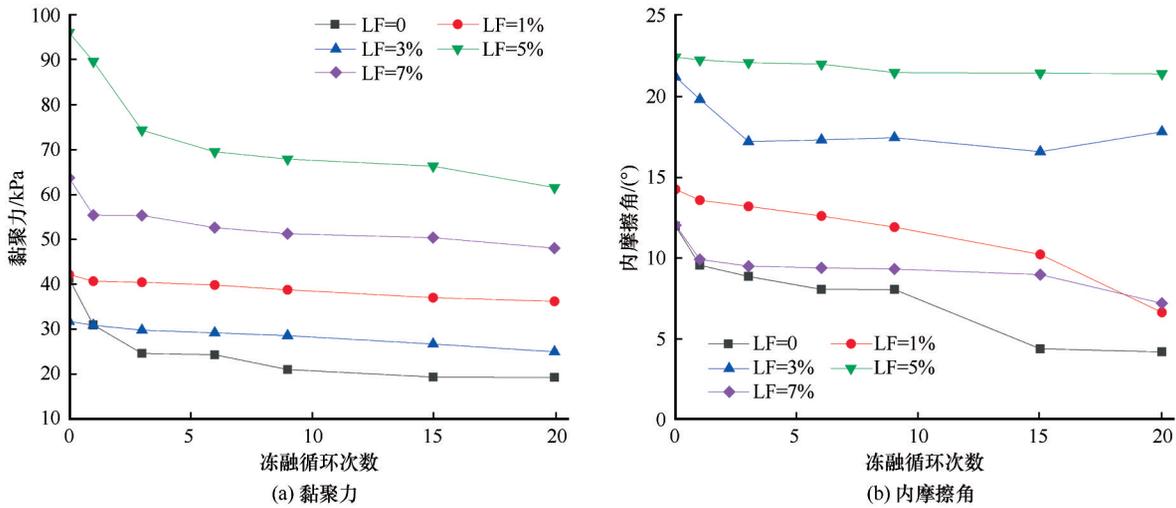


图9 黏聚力和内摩擦角与冻融循环次数的关系

Fig. 9 Relationship between: cohesion (a) and internal friction angle (b) with the number of freeze-thaw cycles

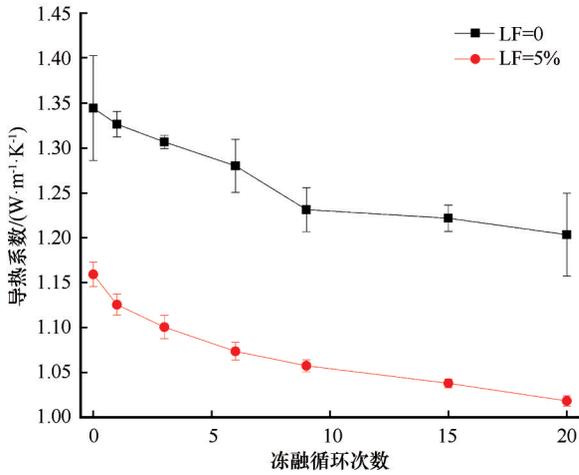


图10 导热系数与冻融循环次数的关系

Fig. 10 Relationship between thermal conductivity and the number of freeze-thaw cycles

粒间的接触热阻增大^[30],这也是造成试样导热系数随冻融循环次数呈下降趋势的一个原因。

除此之外,掺量为5%的试样导热系数小于重塑黄土的导热系数。前期研究表明^[31],一方面,木质素纤维的导热系数为 $0.0969 \sim 0.1238 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,远小于水 $0.6280 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 和土体固体颗粒 $1 \sim 5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 的导热系数;另一方面,木质素纤维的增加影响了土颗粒的接触面。因此,随着木质素纤维掺量的增加,试样的接触热阻增加,能量和热量传递减弱,导热系数下降。这也说明木质素纤维的掺入,可降低冻融破坏造成的工程病害。

2.8 XRD分析

综合以上研究,对试验用黄土及掺量为5%的改良黄土进行X射线衍射试验,分析其矿物成分,

如图11所示。由图可见改良黄土的矿物成分基本不变,主要由二氧化硅、方解石、钠长石、伊利石和斜长石构成。这说明木质素纤维在土体改良中不会发生化学反应,而是以胶结固化^[4]、填密孔隙^[10]和加筋拉结^[3,11]等方式改善土体结构,增强土体强度,并不会对环境造成污染。

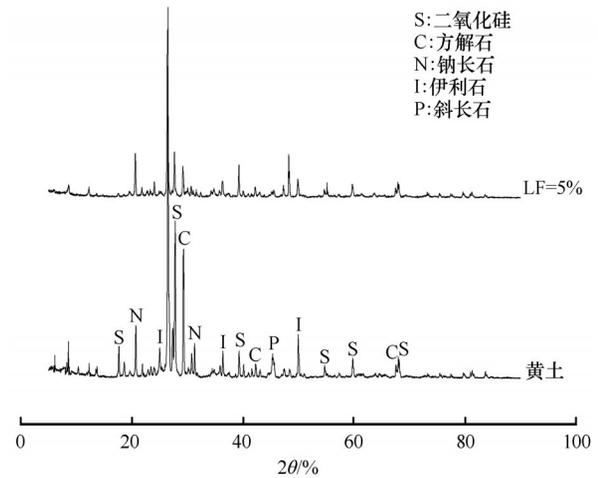


图11 重塑土与改良黄土XRD图谱

Fig. 11 XRD patterns of remodeled soils and modified loess

3 结论

本文根据寒区的冻融环境,对木质素纤维改良黄土进行多维度研究,分析了木质素纤维改良黄土的击实特性、冻融过程中的力学特性和热学特性,得到如下主要结论:

(1)随着木质素纤维掺量的增加,最优含水率呈增长趋势,最大干密度呈减小趋势。

(2)冻融循环对木质素纤维改良黄土力学特性的影响显著,试样的应力-应变曲线随冻融循环次数的增加由一般硬化型向弱硬化型转变;并且经历1次冻融循环后,试样的劣化程度最大,在6~9次时试样的破坏强度表现为稳定的趋势;随着冻融循环次数的增加,试样的水分损失率、弹性模量、黏聚力、内摩擦角和导热系数均呈下降的趋势。

(3)木质素纤维具有重排并胶结土颗粒的作用,延缓了试样裂隙的发展,提升了试样破坏强度,提高了土体的抗劣性和抗冻性。

(4)试样的破坏强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角均在掺量为5%时表现为最高值,在此掺量下导热系数低于重塑黄土,因此在季节冻土区工程中,宜采用5%的木质素纤维掺量开展施工。

参考文献(References):

- [1] Liu Leqing, Zhang Wuyu, Zhang Bingyin, et al. Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2021, 48(4): 109-115. [刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 等. 冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 109-115.]
- [2] Yang Xiaohua, Zhang Jianwei, Zhang Shasha, et al. Research progress on foundation treatment techniques of express way in Loess Area[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(1): 16-32. [杨晓华, 张建伟, 张莎莎, 等. 黄土地区高速公路地基处理技术研究进展[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(1): 16-32.]
- [3] Fan Kewei, Yan Jun, Liu Lingjie, et al. Study on strength characteristics and microstructure of expansive soil treated with lignin fibers in seasonal frozen area[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1): 326-334. [樊科伟, 严俊, 刘苓杰, 等. 木质素纤维改性季冻区膨胀土强度特性与微观结构研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 326-334.]
- [4] Zhong Xiumei, Liu Wei, Liu Zhaozhao. Effect of different sample preparation methods on mechanical properties of lignin improved loess[J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(1): 197-204. [钟秀梅, 刘伟, 刘钊钊. 不同制样方法对木质素改良黄土力学特性影响[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(1): 197-204.]
- [5] Liu Songyu, Zhang Tao, Cai Guojun. Research on technology and engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(3): 1-11. [刘松玉, 张涛, 蔡国军. 工业废弃木质素固化改良粉土路基技术与应用研究[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(3): 1-11.]
- [6] Zhang Tao, Cai Guojun, Liu Songyu, et al. Research on stabilization microcosmic mechanism of lignin based industrial by-product treated subgrade silt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1665-1672. [张涛, 蔡国军, 刘松玉, 等. 工业副产品木质素改良路基粉土的微观机制研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1665-1672.]
- [7] Liu Zhaozhao, Wang Qian, Zhong Xiumei, et al. Water holding capacity and water stability of lignin-modified loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2582-2592. [刘钊钊, 王谦, 钟秀梅, 等. 木质素改良黄土的持水性和水稳性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2582-2592.]
- [8] Hou Xin, Ma Wei, Li Guoyu, et al. Influence of lignosulfonate on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Suppl 2): 18-26. [侯鑫, 马巍, 李国玉, 等. 木质素磺酸盐对兰州黄土力学性质的影响[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增刊2): 18-26.]
- [9] Gao Zhongnan, Wang Qian, Zhao Chengcheng, et al. Effect of mixing method of sample preparation on the strength of loess improved by lignin fiber[J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 43(4): 930-934. [高中南, 王谦, 赵乘程, 等. 制样拌和方法对木质素纤维改良黄土强度的影响[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(4): 930-934.]
- [10] Chen Xuejun, Ding Xiang, Song Yu, et al. Effects of lignin on physical and mechanical properties of red clay[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(14): 5922-5928. [陈学军, 丁翔, 宋宇, 等. 木质素对红黏土物理力学特性的影响[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(14): 5922-5928.]
- [11] Dong Chaofan, Zhang Wuyu, Sun Xianglong, et al. Experimental study on the shear strength of lignin fiber improved loess[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(2): 102-110. [董超凡, 张吾渝, 孙翔龙, 等. 木质素纤维改良黄土抗剪强度的试验研究[J]. *安全与环境工程*, 2022, 29(2): 102-110.]
- [12] Zhao Futang, Chang Lijun, Zhang Wuyu. Experimental study on dynamic strength characteristics of frozen saline soil under stepped cyclic loading[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1397-1405. [赵福堂, 常立君, 张吾渝. 分级循环荷载下低温冻结盐渍土动强度特性试验研究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1397-1405.]
- [13] Chen Cheng, Guo Wei, Ren Xiaoyu. Properties and microscopic analysis of lignin fiber-reinforced soils under freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Suppl 2): 135-140. [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(增刊2): 135-140.]
- [14] Hu Zaiqiang, Liang Zhichao, Wu Chuanyi, et al. Experimental study on mechanical properties of lime modified loess under freeze-thaw cycle[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(Suppl 1): 211-217. [胡再强, 梁志超, 吴传意, 等. 冻融循环作用下石灰改性黄土的力学特性试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(增刊1): 211-217.]
- [15] Zhang Yonggan, Lu Haiyang, Liu Sihong, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and mechanical properties of clay-gravel mixtures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(Suppl 2): 3323-3333. [张勇敢, 鲁洋, 刘斯宏, 等. 冻融循环对掺砾黏土体积变化和力学特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(增刊2): 3323-3333.]
- [16] Cui Honghuan, Zhang Zhenhuan, He Yunjing, et al. Research on improved subgrade soil mechanical properties and failure strain energy density under freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(5): 1957-1963. [崔宏环, 张振寰, 何静云, 等. 冻融循环下路基改良土力学特性及破坏应变能密度研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(5): 1957-1963.]
- [17] Liu Kuan, Ye Wanjun, Jing Hongjun, et al. Microscopic damage identification and macroscopic mechanical response of loess in seasonal frozen areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical*

- Engineering, 2021, 43(Suppl 1): 192-197. [刘宽, 叶万军, 景宏君, 等. 季冻区黄土微观损伤识别与宏观力学响应研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊1): 192-197.]
- [18] Wang Zhongpan, Ding Qian, Chen Kezheng, et al. Effect of freeze-thaw cycles on undrained strength of remoulded saline-alkali soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 1-10. [王中攀, 丁黔, 陈克政, 等. 冻融循环对重塑碳酸盐渍土不排水强度影响研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 1-10.]
- [19] Industry Standard Writing Group of the People's Republic of China. Standard for geotechnical test methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. [中华人民共和国行业标准编写组. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.]
- [20] Hu Tianfei, Liu Jiankun, Fang Jianhong, et al. Experimental study on the effect of moisture content on mechanical properties of silty clay subjected to freeze-thaw cycling [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 123-130. [胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下含水率对粉质黏土力学性质影响试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 123-130.]
- [21] Hu Tianfei, Liu Jiankun, Fang Jianhong, et al. Experimental study on the effect of cyclic freezing-thawing on mechanical properties of silty clay with different degrees of compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1495-1503. [胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下压实度对粉质黏土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1495-1503.]
- [22] Liu J K, Chang D, Yu Q M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand[J]. Engineering Geology, 2016, 210: 23-32.
- [23] Wang Qian, Zhong Xiumei, Gao Zhongnan. Liquefaction behaviors of the saturated loess in Lanzhou City under freezing-thawing conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Suppl 1): 2986-2994. [王谦, 钟秀梅, 高中南, 等. 冻融作用下兰州饱和黄土的液化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊1): 2986-2994.]
- [24] Zhang W Y, Guo A B, Lin C. Effects of cyclic freeze and thaw on engineering properties of compacted loess and lime-stabilized loess [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9): 04019205. 1-04019205. 12.
- [25] Liu J K, Xiao J H. Experimental study on the stability of railroad silt subgrade with increasing train speed [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental, 2009, 136(6): 833-841.
- [26] Hu Tianfei, Liu Jiankun, Liu Zhenya, et al. Experimental study on strain rate effect of strength characteristics of silty clay [J]. Journal of The China Railway Society, 2018, 40(2): 132-140. [胡田飞, 刘建坤, 刘振亚, 等. 粉质黏土强度特性应变速率效应的试验研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(2): 132-140.]
- [27] Hu Tianfei, Liu Jiankun, Chang Dan, et al. Influence of freeze-thaw cycling on mechanical properties of silty clay and Duncan-Chang Constitutive Model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 298-307. [胡田飞, 刘建坤, 常丹, 等. 冻融循环对粉质黏土力学性质的影响及邓肯-张模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 298-307.]
- [28] Yang Zongwei, Xu Xiangtian, Zhao Zhimeng, et al. Laboratory investigation on thermal conductivity of tongliao silty sand under freezing-thawing condition [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(4): 837-843. [杨宗维, 徐湘田, 赵志蒙, 等. 冻融条件下通辽粉砂导热系数的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(4): 837-843.]
- [29] Ye Wanjun, Dong Xihao, Yang Gengshe, et al. Effect of moisture content and dry density on thermal parameters of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 656-662. [叶万军, 董西好, 杨更社, 等. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 656-662.]
- [30] Wang Enliang, Jiang Haiqiang, Cui Entong, et al. Study on the effect of freezing and thawing on thermal conductivity of remolded clay [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(4): 871-879. [汪恩良, 姜海强, 崔恩彤, 等. 冻融对重塑黏土导热系数影响的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(4): 871-879.]
- [31] Dong Chaofan, Lin Cheng, Zhang Wuyu, et al. Study on the thermal parameters and mechanical properties of lignin fiber improved loess in cold and arid areas [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(5): 119-126. [董超凡, 林城, 张吾渝, 等. 寒旱区木质素纤维改良黄土的热学与力学性质研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 119-126.]

Experimental study of the mechanical and thermal properties of lignin fiber-stabilized loess under freeze-thaw cycles

DONG Chaofan^{1,2}, ZHANG Wuyu^{1,2}, ZHANG Ruixing^{1,2}, HUANG Yuling^{1,2}, GAO Ying³

(1. College of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Key Laboratory of Building Energy Saving Materials and Engineering Safety, Xining 810016, China; 3. Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, China)

Abstract: Freeze-thaw cycle is one of the main factors cause engineering damage in cold regions. In order to investigate the effect of freeze-thaw cycles on the mechanical and thermal properties of lignin fiber stabilized loess, light compaction test, freeze-thaw cycles test, unconsolidated undrained triaxial shear test, thermal constant analysis test and X-ray diffraction test are used in this study. lignin fiber admixture, number of freeze-thaw cycles and envelope pressure are used as variables for this study. The results showed that the maximum dry density of the lignin fiber stabilized loess tend to decrease and the optimum moisture content tend to increase with increased admixture; As the number of freeze-thaw cycles increase, the stress-strain curve of the specimens change from strain-hardening to strain-weak softening. In addition, the rate of mass loss, break strength, modulus of elasticity, cohesion, angle of internal friction and thermal conductivity of the specimens all tended to decrease with the number of freeze-thaw cycles, with the highest decay rate after the first freeze-thaw cycle and always reach a maximum at a admixture level of 5%; the break strength and cohesion of the specimens stabilize after 6~9 freeze-thaw cycles; the loess and the composition of the lignin fiber-stabilized loess with 5% admixture was similar in the X-ray diffraction analysis and no new material was found to be produced; therefore, the lignin fiber is a green physically cure material. The results of this study can provide new ideas and methods for research related to soil stabilization and consolidation in cold regions.

Key words: lignin fiber; stabilized loess; freeze-thaw cycles; mechanical properties; thermal conductivity

(责任编辑: 罗栋梁)