

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0162

HUANG Yuling, ZHANG Wuyu, JI Gang'ao, et al. Experimental study on mechanical properties of calcium lignosulfonate modified loess under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1863-1874. [黄雨灵, 张吾渝, 季港澳, 等. 冻融循环作用下木质素磺酸钙改良黄土的力学特性研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1863-1874.]

冻融循环作用下木质素磺酸钙改良黄土的力学特性研究

黄雨灵^{1,2}, 张吾渝^{1,2}, 季港澳^{1,2}, 解邦龙^{1,2}, 董超凡^{1,2}

(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)

摘 要: 木质素磺酸钙作为一种绿色环保的改良材料, 近年来被应用于土体加固领域。为探究木质素磺酸钙对黄土的固化效果, 通过开展侧限浸水压缩试验、冻融循环试验、不固结不排水三轴剪切试验、扫描电镜试验和X射线衍射试验, 分析冻融循环次数、掺量和围压对木质素磺酸钙改良黄土力学性质和微观机理的影响规律。研究结果表明: 掺入木质素磺酸钙, 可有效消除黄土的湿陷性。此外, 改良黄土的应力-应变曲线随木质素磺酸钙掺量的增加向一般硬化型转变, 而随着冻融循环次数的增加, 应力-应变曲线向弱硬化型转变。改良黄土的破坏强度随木质素磺酸钙掺量的增加呈先增大后减小的趋势, 木质素磺酸钙掺量为1%时破坏强度最高, 各掺量改良黄土随冻融循环次数的增加先减小后趋于稳定, 同时抗剪强度指标呈现下降的趋势。通过扫描电镜试验和X射线衍射试验, 发现改良黄土内部有胶结物生成并填充了土颗粒间的孔隙, 使土体密实度提高, 进而提高土体强度; 而冻融作用导致土颗粒的接触方式由面-面接触向点-点、点-面接触过渡。此外, 木质素磺酸钙改良黄土中未发现新的矿物成分生成, 且冻融作用未造成土体矿物成分的消解。

关键词: 黄土; 木质素磺酸钙; 冻融循环; 抗剪强度; 微观机理

中图分类号: P642.14; TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1863-12

0 引言

木质素磺酸钙作为造纸工业副产品之一, 在工业中通常被直接排放至江河或浓缩后燃烧, 造成资源浪费和环境污染。生态文明社会的发展离不开环保理念, 绿色建材逐渐推广并运用到土木工程行业中。研究表明木质素磺酸钙具有良好的螯合性、有效胶结颗粒和提高散体材料强度的优点^[1], 其主要元素为C、H、O、Ca和Na等元素^[1], 是一种环保的高分子材料。因此, 合理利用木质素, 既可以保证资源利用最大化又可以达到环境保护的要求。

青海省东北部地区黄土分布较广, 黄土具有孔隙大、遇水易湿陷等性质, 因此黄土内部结构易发生破坏^[2], 致使建筑结构存在较多安全隐患。此

外, 该地区黄土位于季节冻土区内, 冻融循环作用也是导致建筑物产生工程病害的重要因素之一。冻融作用主要以改变土颗粒之间的结构连接和排列方式导致土体劣化, 对土体造成不可逆的损伤, 进而影响土体的力学性质。季节冻土区工程施工中经常采用水泥、生石灰和粉煤灰等传统改良剂对黄土地基或路基进行换土垫层, 以提高土体的承载力。同时, 有研究发现, 固化剂的种类及掺量的不同会造成改良土加固效果的差异, 与重塑黄土相比, 改良黄土的强度仍明显提高^[3-6]。伴随着青海省“生态优先、绿色发展”战略的提出, 为顺应生态保护和高质量发展的要求, 选取一种稳定且环境友好型的改良材料对土体进行加固, 显得尤为重要。

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168054); 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室开放基金计划项目(KLKF-2021-007)资助

作者简介: 黄雨灵, 硕士研究生, 主要从事环境岩土方面的研究工作. E-mail: hyuling805@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方面的研究工作. E-mail: qdzw@163.com

木质素具有环境友好、可再生性强、化学性质相对稳定的等优点^[1]。利用木质素改良土体的相关研究已有开展,Santoni等^[7]、Tingle等^[8]分别对木质素磺酸盐改良粉砂和粉质黏土进行试验,发现干湿条件下木质素可以有效改善土体的无侧限抗压强度;Indraratna等^[9]对木质素改良粉砂进行抗侵蚀试验,发现木质素能够提高粉砂抗侵蚀能力,且木质素改良粉砂的抗侵蚀性优于水泥改良土;Ceylan等^[10]研究了木质素在黏土路基稳定方面的应用,结果表明:木质素的掺入能有效提高地基承载力;侯鑫等^[11]、贺智强等^[12]分别对木质素磺酸钙改良黄土进行了加卸载试验和不固结排水剪切试验,发现改良黄土的回弹模量和抗剪强度明显高于素土;刘松玉等^[13]开展木质素磺酸钙改良粉土路基填料现场试验,研究结果表明木质素磺酸钙可有效提高粉土的抗压强度和耐久性。

木质素掺量对改良土体的力学性能也有影响,张建伟等^[14]对木质素改良土进行了无侧限抗压强度试验,试验结果表明:木质素改良粉土的无侧限抗压强度随掺量先增加后减小,在5%时效果最优,并且其强度随养护龄期的增加而升高,随着冻融循环次数的增加而降低;刘钊钊等^[15]、姬胜戈等^[16]基于土水特征曲线、崩解试验和模拟降雨冲刷试验,发现木质素磺酸盐的掺入,可以有效改善土体的水理性质,最优掺量分别为1%~2%和0.5%~3%。

此外,在探究木质素加固土体机理方面,已有学者结合多维度的微观试验(SEM、XRD、ESP)进行研究,姬胜戈等^[16]认为木质素磺酸钙主要是通过胶结颗粒和填充黄土孔隙达到提高土体力学性能的效果;贺智强等^[12]提出木质素中的疏水基可包裹黄土颗粒,进而提高改良黄土的水稳性;侯鑫等^[11]、张涛等^[17]木质素能够通过水解反应和质子化反应减薄双电层厚度,达到密实结构的效果。

综上所述,在季节性冻土区利用木质素对土体改良具有可行性,且能够为寒区工程建设提供一定的参考依据。本文主要以木质素磺酸钙和黄土为试验材料,首先进行侧限浸水压缩试验,之后以冻融循环次数、木质素磺酸钙掺量和围压为试验变量,对木质素磺酸钙改良黄土进行冻融试验、不固结不排水三轴剪切试验、扫描电镜试验和X射线衍射试验,研究木质素磺酸钙对黄土的改良效果及冻融作用对木质素磺酸钙改良黄土力学特性的影响,试验结果可为木质素磺酸钙在黄土地基及路基的处理设计中提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验所用黄土取自青海省西宁市城北区某场地,取土深度为3 m,颜色为淡黄色,无明显根系及虫洞。黄土的基本物理性质如表1所示,并定名该地黄土为低液限黏土。

表1 黄土基本物性指标

Table 1 Basic physical properties of loess

| 天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 最优含水率/% | 塑限/% | 液限/% | 塑性指数 | 液性指数 |
|--|---|---------|-------|-------|-------|-------|
| 1.484 | 1.73 | 14.74 | 13.50 | 25.10 | 11.60 | 0.106 |

试验用木质素磺酸钙如图1所示,呈棕色粉末状固体,有芳香性气味,且易溶于水。通过扫描电镜(SEM)发现其具有多孔隙和层状结构,如图2所示。

1.2 试样制备

将黄土放入105℃烘箱烘干12 h后过2 mm筛。已有研究表明^[16],木质素磺酸钙改良黄土的击实曲线较素土波动小,因此本试验基于黄土的最优含水率进行试样制备^[11,18]:按照黄土质量比的0%、1%、2%和3%对改良土进行配制,之后将土料搅拌3~5分钟,保证木质素磺酸钙掺和均匀,最后将配制好的土料静置12 h保证水分迁移均衡。按照黄土



图1 木质素磺酸钙

Fig. 1 Calcium lignosulfonate

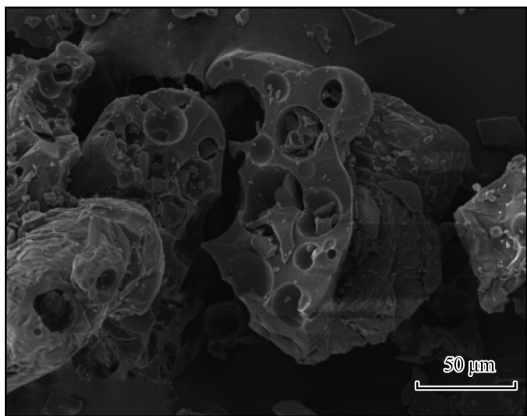


图2 木质素磺酸钙的SEM图像

Fig. 2 SEM image of calcium lignosulfonate

95% 压实度分别制作室内侧限浸水压缩试验环刀试样和不固结不排水三轴剪切试验圆柱试样, 尺寸 $H \times R$ 分别为 20 mm×61.8 mm 和 80 mm×39.1 mm, 最后将成型试样用保鲜膜包裹, 防止水分挥发。

1.3 试验方案

1.3.1 室内侧限浸水压缩试验

试验首先采用三联固结仪分别对木质素磺酸钙掺量为 0%、1%、2% 和 3% 的改良黄土进行侧限浸水压缩试验, 各级加载压力分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa。

1.3.2 冻融循环试验

冻融循环试验在冻胀循环试验箱 (TMS9018-500) 中进行, 冻融过程为封闭系统下的三维冻融过程。为准确模拟实际工程, 对青海省西宁地区近三年冬季月平均最低气温进行统计 (图 3), 得到平均

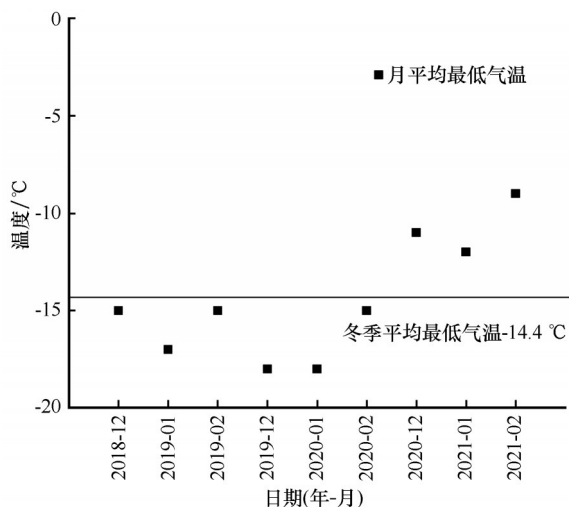


图3 西宁近3年冬季平均最低气温曲线

Fig. 3 The average lowest temperature curve of Xining in recent 3 years

最低气温为 $-14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 故将冻结温度设定为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结合已有试验, 融化温度对土体结构的影响不大^[19], 因此将融化温度设定为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最终采用如图 4 所示的正弦波形温控模式进行冻融循环试验, 起始相位为 π , 幅值为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为保证试验过程中试样能够完全冻结和融化, 在冻融循环试验开始前, 在试样中心嵌入热电偶, 测试结果表明试样在 12 h 内可完全冻结和融化^[4, 19-21]。因此, 本次试验以冻结 12 h 和融化 12 h 为 1 次冻融循环。

既有的试验结果表明, 土体强度的最低值出现于 10 次冻融循环内, 而在冻融 10 次之后, 强度逐渐趋于稳定。鉴于此, 8~12 次冻融循环可满足研究冻融循环作用对强度等力学性质影响的要求^[22], 因此, 本研究中冻融循环次数设定为 0、3、6、9 和 12 次共 5 种。

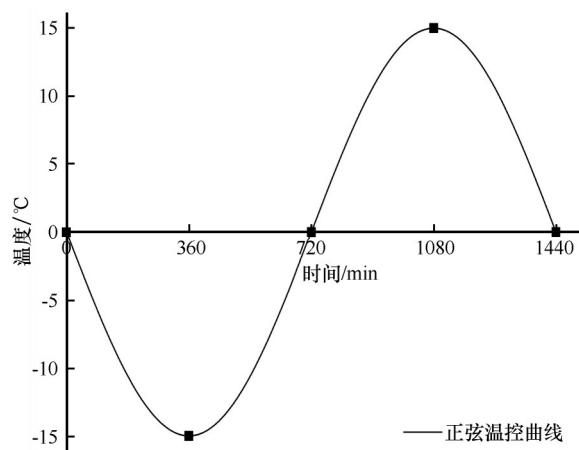


图4 正弦温控模式

Fig. 4 Sinusoidal temperature control curve

1.3.3 不固结不排水三轴剪切试验

由于地基处理的压实过程中存在超固结应力历史以及路面基层行车荷载的瞬时性, 低渗透性的粉质黏土在融化状态下无法完成固结排水过程^[22], 同时为模拟快速施工的工况, 本试验进行不固结不排水三轴剪切试验。试验采用 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪, 试验操作按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) 执行。研究表明, 路基现场实际测得的围压较小, 通常为 20~60 kPa^[23], 同时, 青海省冬季地表冻结深度为 1.5 m 左右, 因此为了模拟地层压力, 围压分别设置为 15 kPa、45 kPa 和 75 kPa, 剪切应变速率设置为 $0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 在轴向应变达到 20% 时中止试验。

1.3.4 扫描电镜试验

选择经过冻融循环试验后,具有代表性的试样,用真空冷冻干燥仪冻结干燥,保证试样干燥并保持原有形态结构^[23]。将干燥完成的土样掰开并取得新鲜断面后进行喷金处理,之后开展扫描电镜试验(SEM),扫描倍数为500倍,从微观角度分析土样内部结构变化。

1.3.5 X射线衍射试验

取经过冻融循环试验后自然风干土样50 g,利用研钵对较大颗粒土样研磨碾碎,再制样进行X射线衍射试验(XRD),分析土样内部矿物成分的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 湿陷性评价

各掺量下改良黄土的湿陷系数如图5所示。在100 kPa、150 kPa、200 kPa压力下,黄土的湿陷系数均介于0.015~0.03之间,说明该黄土为弱湿陷性黄土。而各掺量改良黄土在各级压力下的湿陷系数均小于0.015,说明木质素磺酸钙的加入,可以有效消除黄土的湿陷性。

2.2 应力-应变曲线

不同冻融循环次数、掺量和围压下试样的应力-应变曲线如图6所示。随着围压和掺量的增加,改良黄土的应力-应变曲线由弱硬化型向一般硬化型发展,而随着冻融循环次数的增加,应力-应变曲线仍为弱硬化型。由图6(a)可知,木质素磺酸钙掺量为0%、1%和3%时,应力-应变曲线上未出现拐点,偏差应力均随着轴向应变的增大而增大,前期增长速度较快,后期增长速度变缓并逐渐趋于稳

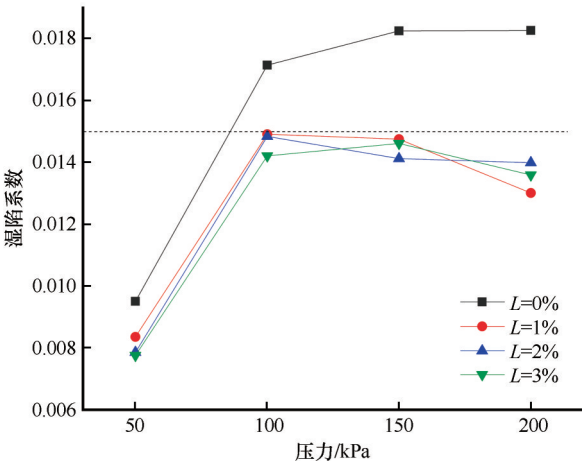


图5 各掺量下木质素磺酸钙改良黄土的湿陷系数(L 表示木质素磺酸钙掺量, σ_3 表示围压, $F-T$ 表示冻融循环次数)
Fig. 5 Collapsibility coefficient of calcium lignosulfonate improved loess with different dosage (L represents the content of calcium lignosulfonate, σ_3 represents the confining pressure, $F-T$ represents the number of freeze-thaw cycles)

定。由图6(b)可知,经过6次冻融循环后,应力-应变曲线仍为弱硬化型,但破坏强度有所下降,这说明冻融循环作用对土体强度造成了劣化。

图7为围压为45 kPa条件下,各掺量改良黄土试样的破坏形态图像,围压15 kPa和75 kPa下的试样破坏具有相似特征。图7中从左到右掺量分别为0%、1%、2%和3%,可见试样没有出现明显破坏面,但表现出明显的剪胀破坏特征,属于塑性破坏。这是因为木质素磺酸钙的加入,有效胶结黄土颗粒,土样的骨架强度得到一定提升,当试样在经受剪应力破坏时,仅发生了剪胀而未表现出显著的脆性破坏形态。

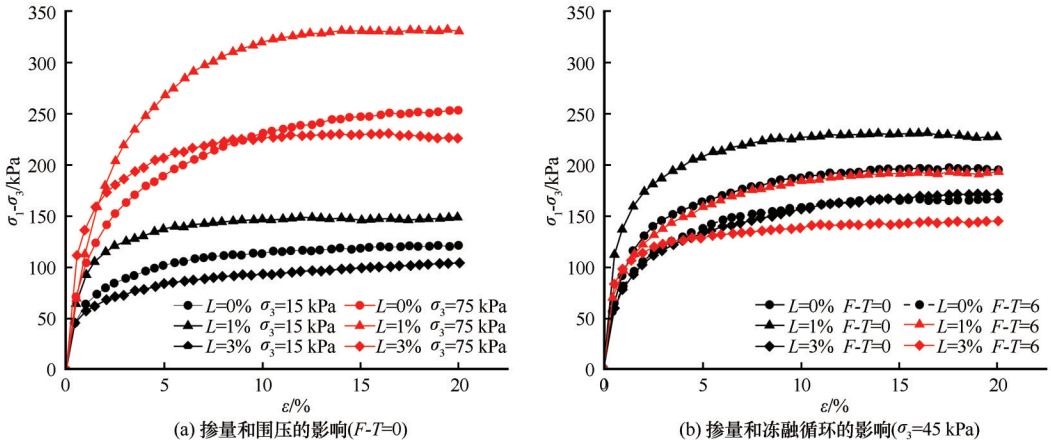


图6 试样应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of samples: the effect of content of calcium lignosulfonate and confining pressure ($F-T=0$) (a); the effect of content of calcium lignosulfonate and freeze-thaw cycles ($\sigma_3=45$ kPa) (b)

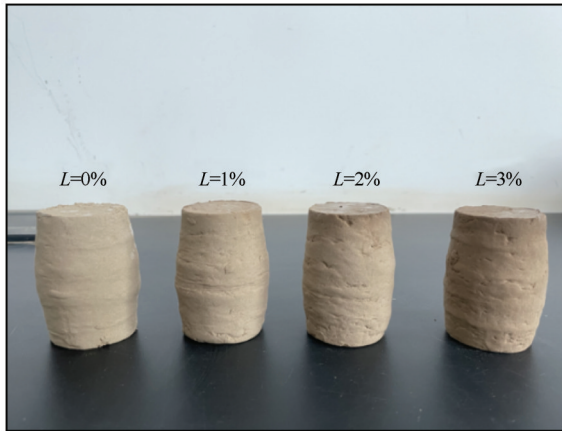


图7 木质素磺酸钙改良黄土剪切破坏图像
Fig. 7 Calcium lignosulfonate modified loess shear failure image

2.3 木质素磺酸钙改良黄土的破坏强度特性

2.3.1 木质素磺酸钙掺量的影响

不同掺量下改良黄土的破坏强度如图8所示。由图8分析可知,在相同围压下,改良黄土的破坏强度随着掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势,在掺量为1%时,试样的破坏强度最高。在相同掺量下,改良黄土的破坏强度随着围压的增大而增大。当围压分别为15 kPa、45 kPa、75 kPa时,将掺量为1%的改良黄土试样的破坏强度与素土试样进行对比,发现前者破坏强度分别增长34.7 kPa、32.3 kPa、47.2 kPa。这是由于随着围压的增大,改良黄土内部的土颗粒重新排列挤密,且围压越大,颗粒之间接触会更加紧密,则土颗粒间的滑动摩擦更大,土体的破坏强度逐渐增大,可见围压的挤密作用,可以增加土体抵抗变形的能力。当围压为75 kPa时,掺量分别为1%和2%时,改良黄土的破坏强度较素土分别提高18.6%、14.7%。而掺量增至3%时,改

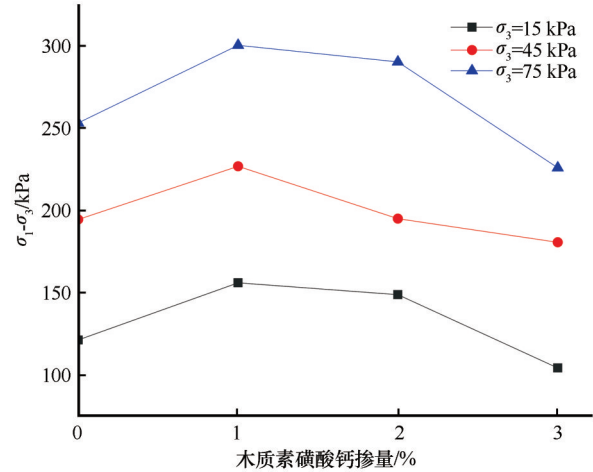


图8 不同木质素磺酸钙掺量下破坏强度曲线
Fig. 8 Relationship of failure strength under different calcium lignosulfonate content

良黄土的破坏强度较素土降低10.8%,可见适量木质素磺酸钙的掺入才可以有效提高改良黄土的破坏强度。

2.3.2 冻融循环次数的影响

不同围压下改良黄土试样的破坏强度和冻融循环次数的关系曲线如图9所示。由图9可知,随着冻融循环次数的增加,破坏强度呈现出先减小后稳定的趋势。经历多次冻融循环作用后,土体内部的水分不断冻结与融化,反复冻融使得试样内部土颗粒之间的排列方式发生较大改变,内部结构不断变化,对土体内部造成损伤,土体内部孔隙不断增大,试样内部土颗粒之间的咬合作用和胶结作用减弱,从而导致土体剪切强度下降;而当冻融循环达到9~12次后,土体内部结构受冻融作用的影响降低,土体内部结构逐渐趋于稳定,因此对应的剪切强度也逐渐趋于稳定。

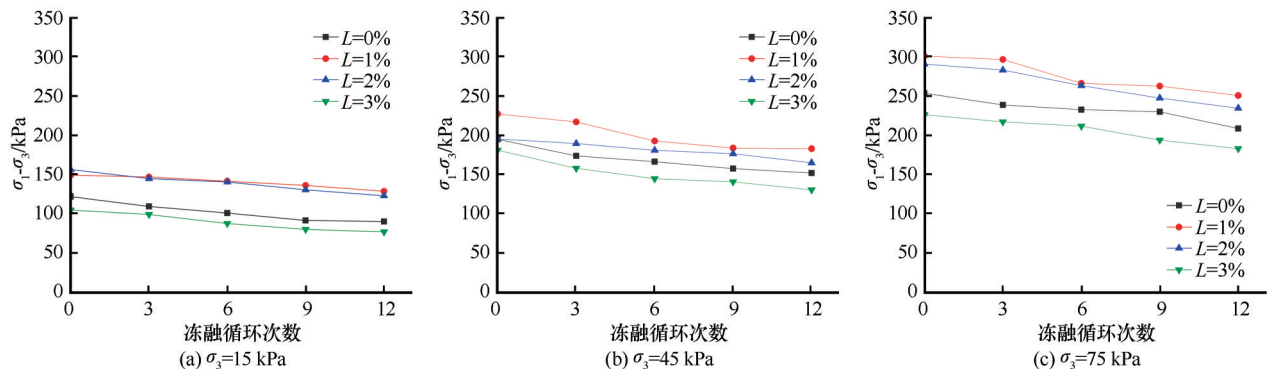


图9 不同围压下破坏强度和冻融循环次数的关系曲线

Fig. 9 Relationship between failure strength and number of freeze-thaw cycles under different confining pressures: $\sigma_3=15$ kPa (a); $\sigma_3=45$ kPa (b); $\sigma_3=75$ kPa (c)

图 10 给出了掺量为 1% 时改良黄土的 SEM 图像。可以发现,在未经冻融作用的改良土体中,木质素磺酸钙的细小颗粒填充了土颗粒之间的孔隙[图 10(a)],且由于木质素磺酸钙具有黏结性和螯合性,促使土体中细小的颗粒黏结形成团粒并附着于土体

原有颗粒的连接处,因此相较于素土,改良土的结构相对致密,并且颗粒间的接触方式以面-面接触为主。经过 12 次冻融循环后,土颗粒的棱角变得相对圆润,内部孔隙被冻融循环作用剥落的小颗粒填充,颗粒间的接触方式向点-点和点-面接触发展[图 10(b)]。

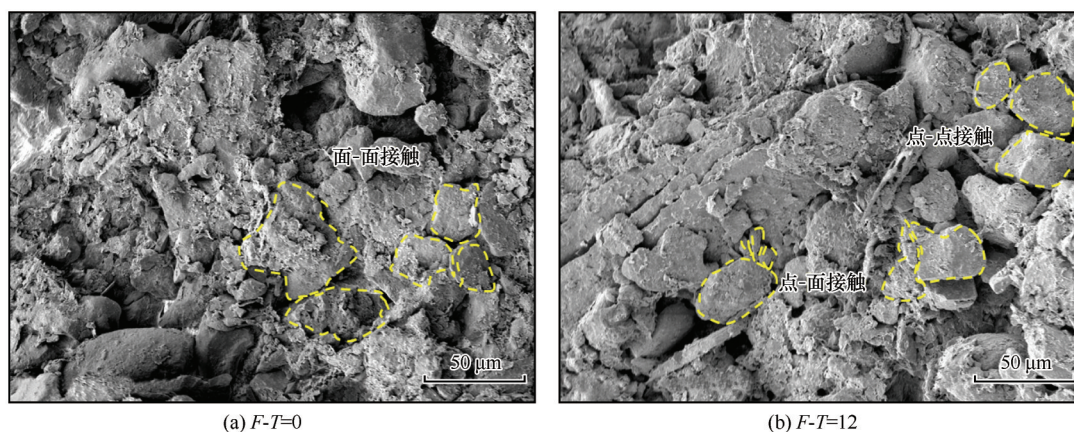


图 10 不同冻融循环次数下 1% 掺量木质素磺酸钙改良黄土 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of 1% content calcium lignosulfonate soil under different freeze-thaw cycles

2.3.3 破坏强度衰减率

$$D = \left(1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_{3(\max, i)}}{\sigma_1 - \sigma_{3(\max, 0)}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

对于应力-应变曲线呈硬化形式的试样,选取轴向应变 15% 所对应的偏应力值作为破坏强度。土体的破坏强度衰减率计算公式如下。

式中: $\sigma_1 - \sigma_{3(\max, i)}$ 为冻融循环第 i 次后试样的破坏强度; $\sigma_1 - \sigma_{3(\max, 0)}$ 为未冻融循环试样的破坏强度。

围压为 15 kPa 时,不同掺量改良黄土的破坏强度衰减率与冻融循环次数的关系曲线如图 11 所示。围压为 45 kPa、75 kPa 时也有类似规律。由图 11(a) 可知,随着冻融循环次数的增加,冻融作用对土体的劣化效应持续增加,冻融循环次数为 12 次时,衰减率有变缓趋势,由于本次试验为了更快达到理想效果,最大冻融次数仅为 12 次,其变化规律未来可增加循环次数进一步深入讨论。在冻结过程中,水分迁移及水相变过程可改变颗粒间的连接方式,能够破坏试样内部结构,因此破坏强度会出现下降的趋势;经过多次冻融循环后,土体颗粒间的排列方式和连接方式以及土体结构逐渐达到一种新的平衡状态,破坏强度衰减率也逐渐趋于稳定。随着掺量的增加,衰减率的拟合直线斜率呈现出先减小再增大的趋势,说明适量木质素磺酸钙的掺入,可以有效抵抗冻融循环作用的影响,由此推测木质素磺酸钙能有效降低冻融破坏的影响,具有一定的抗冻

性。图 11(a) 中也可以看出,当掺量为 1% 时衰减率最低。由图 11(b) 还可看出,经冻融作用后,掺量为 1% 的改良黄土相较于素土,破坏强度衰减率明显下降。

2.4 抗剪强度指标分析

土体的抗剪强度指标黏聚力(c)和内摩擦角(φ)是反映土体强度的重要参数。图 12 为黏聚力与内摩擦角随冻融循环次数变化的关系曲线。由图 12 可知,随着掺量的增加,抗剪强度指标呈现先增大后减小的趋势,而随着冻融循环次数的增加,抗剪强度指标总体为降低趋势。素土和改良黄土在冻融循环作用的影响下,黏聚力都出现不同程度的降低,对比未经冻融和经历 12 次冻融的土样,发现素土的黏聚力降低了 8.68 kPa,降低率为 52.25%;改良黄土的黏聚力随木质素磺酸钙掺量增加 1%、2% 和 3%,分别降低了 4.39 kPa、5.34 kPa 和 6.89 kPa,降低率分别为 17.33%、22.96% 和 46.59%。可见,未添加木质素的素土黏聚力降低最大,木质素磺酸钙掺量 1% 改良黄土降低最小。

由图 12(a) 中可以看出,试样的黏聚力随着冻融循环次数总体为降低趋势。分析原因认为:试样在冻结时水相变产生的冰晶均匀分布在土体中,造成的体积膨胀,胶结作用增强。但是土体融化时,原相变产生的用于支撑土颗粒骨架的冰晶融化成

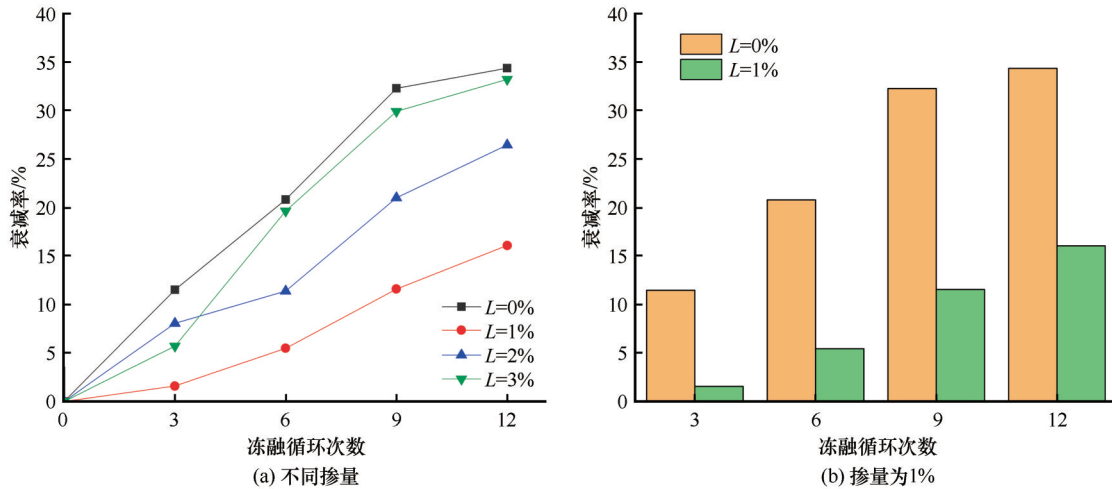
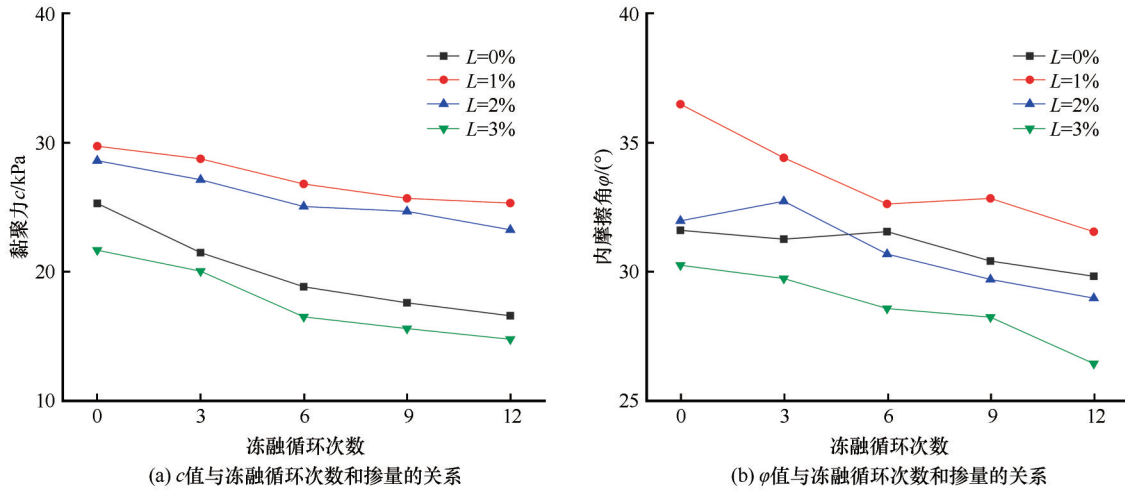


图 11 不同冻融循环次数下破坏强度衰减率

Fig. 11 Attenuation rate of failure strength under different freeze-thaw cycles: different content (a); $L=1\%$ (b)图 12 c 、 ϕ 值与冻融循环次数和掺量的关系Fig. 12 The relationship between the value of c , ϕ and the number of freeze-thaw cycles and dosage: cohesion (a); internal friction angle (b)

水,已造成的试样结构变化无法恢复,土颗粒间的接触点明显减少,因此黏聚力降低。而冻融循环被认为是动态平衡的过程,随着冻融次数的增加,土体内部一般经历破坏-弱稳定-弱破坏-稳定状态,最终土体结构和连结方式不再明显改变^[25],因此黏聚力总体为降低趋势。从图 12(b)中可以观察到,相较于黏聚力,改良黄土的内摩擦角随冻融次数的增加有波动性,但总体来看内摩擦角随冻融循环次数呈减小趋势。这是由于在冻融过程中,水分冻胀使土颗粒间距增大,导致咬合摩擦角的减小^[21],并且土体内部发生水分重分布及劣化,使得土颗粒间产生相对滑动,表现为内摩擦角减小的规律。

2.5 弹性模量

弹性模量是衡量改良土体的重要指标。Lee

等^[25]进行了无侧限压缩试验,认为土体产生 1% 的应变时对应的应力可以作为判定冻融作用下土弹性模量的变化标准。在本试验中,选取应力-应变曲线中轴向应变达到 1% 时所对应的偏应力与轴向应变的比值作为该试样的弹性模量,计算公式如 (2) 所示。

$$E = \frac{\sigma_{1\%}}{\varepsilon_{1\%}} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{1\%}$ 代表试样应变达到 1% 时的轴向应变; $\sigma_{1\%}$ 代表土体产生 1% 的应变时对应的应力。

围压为 45 kPa 时,不同冻融循环次数下,各掺量改良黄土的弹性模量如图 13 所示。由图 13 可知,随着冻融循环次数的增加,土体的弹性模量呈降低的趋势。随着木质素掺量的增加,土体的弹性

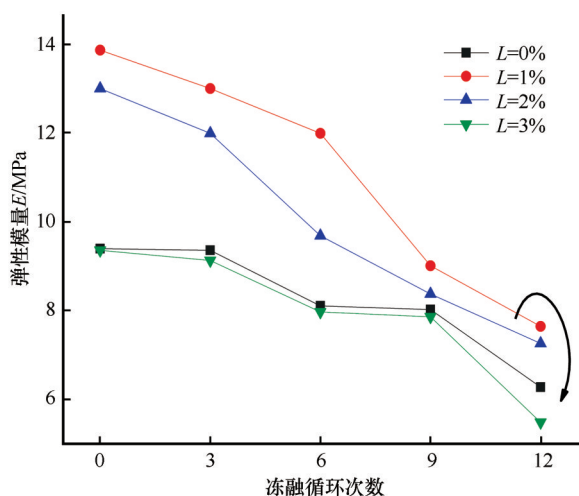


图 13 不同冻融循环次数下黄土的弹性模量与木质素磺酸钙掺量的关系

Fig. 13 The relationship between elastic module and different calcium lignosulfonate content of loess with different freeze-thaw cycles

模量呈现出先增加后减小的规律。掺量为 1% 的改良土的弹性模量明显高于素土的弹性模量,说明木质素磺酸钙的掺量为 1% 时,对黄土具有较好的改良效果,抵抗变形的能力明显强于素土,且具有一定抵抗冻融循环作用的能力。围压为 15 kPa、45 kPa 时,也具有类似的规律。

2.6 冻融循环作用对改良土的微观影响

2.6.1 二值化分析

采用颗粒及裂隙识别与分析系统(PCAS)对 1% 木质素磺酸钙土体扫描电镜图像进行二值化处理,二值化处理后的图像如图 14 所示。从图 14(a)可以看出,冻融循环次数为 0 次时,图像内部黑色部分较多,且土颗粒棱角分明。从图 14(b)可以看出,冻融循环次数为 12 次时的图像内部白色部分较多,并且该部分相互连接,内部孔隙较多,大多为先前孔隙周围的衍生产物。

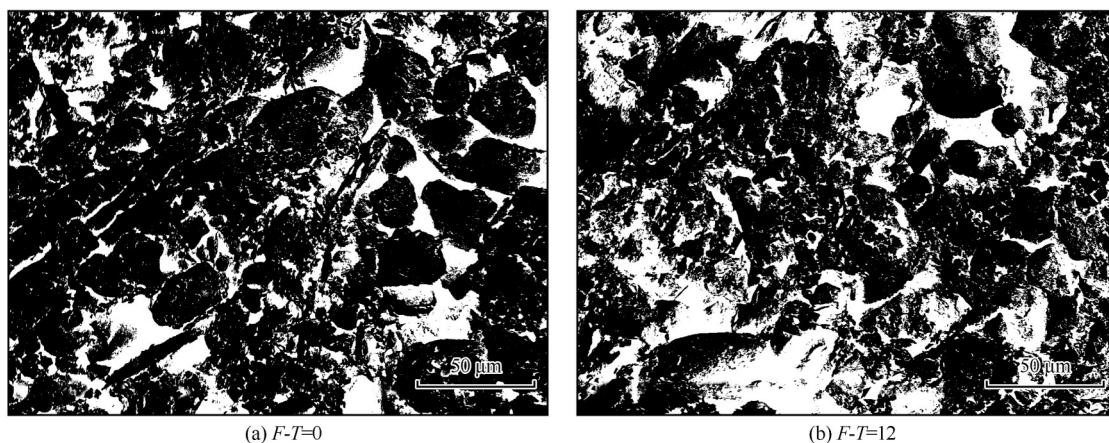


图 14 不同冻融循环次数下 1% 掺量木质素磺酸钙改良黄土 SEM 与二值化图像

Fig. 14 SEM and binary images of 1% content calcium lignosulfonate soil under different freeze-thaw cycles

图 15 给出了不同木质素磺酸钙掺量下改良土微观定量参数的变化关系曲线。概率熵用来描述土体孔隙、颗粒分布的有序性;分形维数用于描述土体内部颗粒和孔隙复杂性,其值越大,表明内部物质的分布越复杂、越密实;平均形状系数是对内部孔隙形态定量描述的参数,其值越大孔隙形态越圆滑^[26]。

由图 15 可以发现,冻融循环前 6 次时,概率熵、分形维数和平均形状系数变化幅度较大,试样内部孔隙以圆滑分布为主,内部结构排列疏松,分析其变化规律主要由于土体内部的水分不断冻结与融化,反复冻融过程中产生的冻胀力不断破坏土体结构,土颗粒结构之间的胶结作用受到破坏,对土体内部造成损伤,破坏程度增加,宏观上表现为土体

抗剪强度下降。而冻融至 12 次时,试样内部结构趋于稳定,概率熵、分形维数和平均形状系数变化幅度较小,颗粒间的孔隙增长幅度下降,达到较为平稳的状态,说明随着冻融循环次数的增加,土体内部受到冻融循环次数影响逐渐减弱,对应的破坏强度也逐渐趋于稳定。

2.6.2 XRD 试验结果

不同冻融循环次数下,素土和 1% 掺量的改良土体的 X 射线衍射谱结果如图 16 所示。由图 16 可以看出,素土和 1% 掺量改良黄土的特征衍射峰出现的位置是相同的,且改良土图像中并无新峰的出现,说明改良前后土体的内部矿物成分未发生变化,表明木质素的改良机理与水泥和石灰等传统改

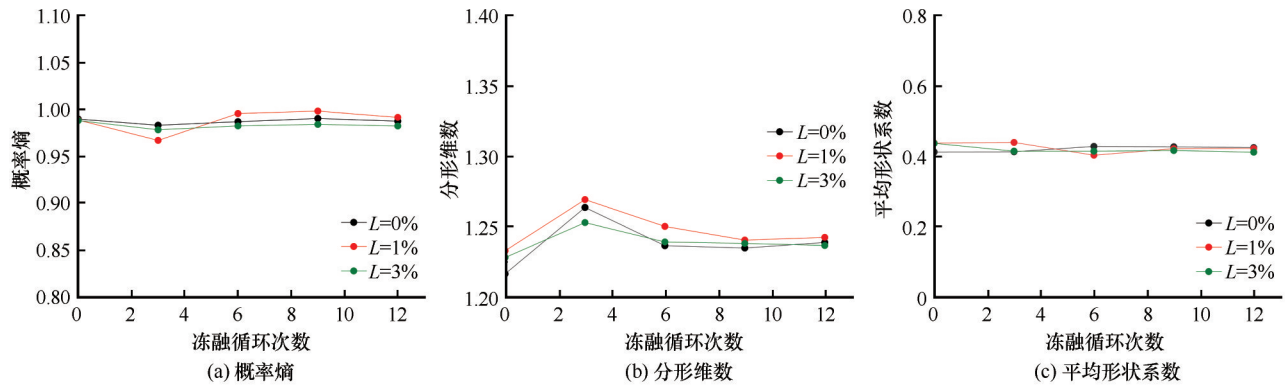


图 15 不同木质素磺酸钙掺量下改良土的微观定量参数

Fig. 15 Changes of microscopic quantitative parameters of improved loess under different calcium lignosulfonate content: probability entropy (a); fractal dimension (b); average form factor (c)

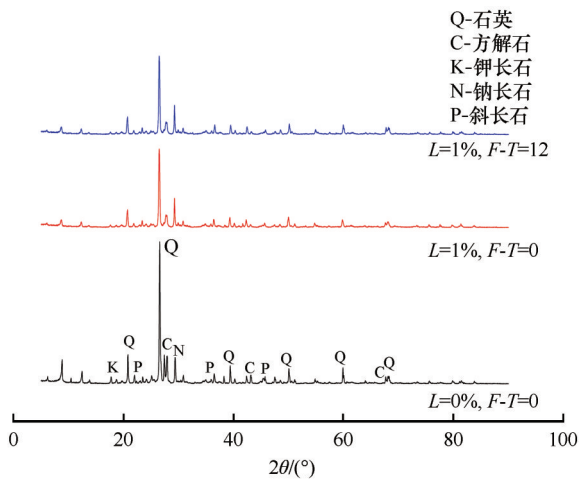


图 16 木质素磺酸钙改良黄土的 XRD 衍射图

Fig. 16 XRD diffraction pattern of calcium lignosulfonate improved loess

良材料的改良机理是不同的,这也与侯鑫等^[11]的研究结果一致。通过对 XRD 试验结果进行定性分析,发现试样所含矿物成分主要均为石英、方解石、钠长石、钾长石和斜长石,但是改良土的衍射峰值强度略有减小。Alazigha 等^[27]、刘尧伍^[28]分别利用木质素改良盐渍土、膨胀土时都观察到了相同的现象,这可能是因为木质素的无定形特性限制了矿物原子平面的衍射造成的。对经过 12 次冻融循环后掺量为 1% 的改良土进行分析,发现其衍射峰基本保持不变,内部矿物成分未有变化,可以推测冻融循环不会造成矿物成分的消解,这与刘尧伍^[28]的研究结果一致。

2.7 讨论

结合扫描电子显微镜及经过颗粒及裂隙识别与分析系统(PCAS)处理的图像特征,并根据木质素磺酸钙改良黄土的试验结果,进一步探讨木质素

磺酸钙改良黄土最优掺量为 1% 的作用机制。

图 17 为不同掺量下未冻融的改良黄土扫描电镜以及经过颗粒及裂隙识别与分析系统(PCAS)二值化处理后的图像,二值化图像中白色代表孔隙,黑色代表土体。从图 17(a)中可以看出,素土的内部结构中,土颗粒与孔隙区分明显,土颗粒棱角分明,大颗粒表面附着粒状、絮状的胶结物质。当木质素磺酸钙掺量为 1% 时,如图 17(b)所示,土体中生成新的胶结物质逐渐增多,其分布于土颗粒间且填充部分颗粒间的孔隙,提供一定的胶结作用,孔隙变小且数量减少,使得土体内部变得更加密实。由图 17(c)可知,当掺量增至 3% 时,土体中大部分孔隙被填充,但从图像中也可发现过多的木质素磺酸钙附着于土颗粒上,填充于颗粒之间,反而使颗粒间的间距有所增大。换句话说,掺量过高虽然可使得木质素磺酸钙相互结合程度增大,但与土颗粒的结合度反而降低。再结合图 17(d)~17(f)二值化图像也可以看到,不同掺量,白色图像占比均比 0% 掺量小,也反映出木质素磺酸钙的掺入可减少改良黄土的孔隙;另外,也可观察到,1% 掺量白色图像占比最小。

不同掺量下未冻融的改良黄土孔隙率如图 18 所示。随着掺量的增加,改良土体的孔隙率先减小后增加。掺量分别为 1%、2%、3% 时,改良土体的孔隙率较素土分别降低了 6.1%、4.2%、3.0%。由此推测,孔隙率的减小是改良土体强度提升的重要原因。木质素磺酸钙掺入后导致改良土体孔隙结构改变,因木质素磺酸钙颗粒的填隙作用及木质素磺酸钙与素土离子交换导致的颗粒成团作用^[12],使改良土体孔隙减少,密实度提高,强度提升。除此之外,木质素磺酸钙具有大分子基团磺酸基^[1],磺酸基与相近的土颗粒搭接,形成空间结构。当木质素磺

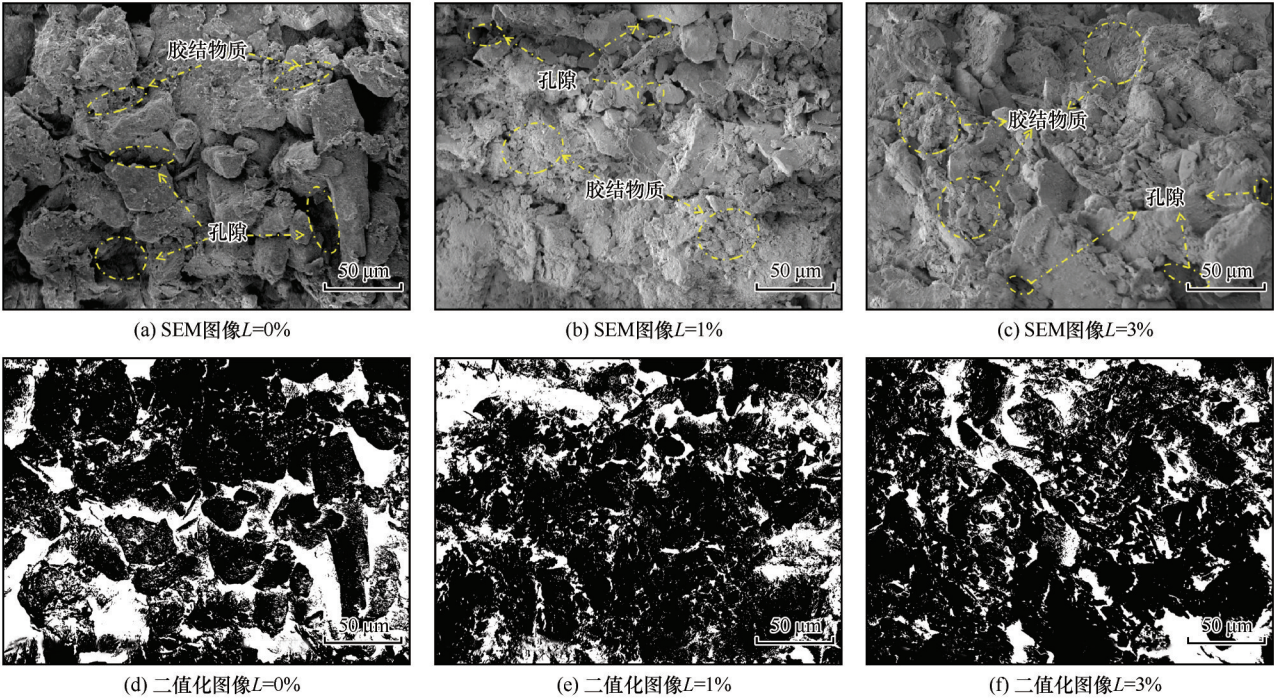


图 17 未冻融各掺量 SEM 与二值化图像

Fig. 17 SEM and binary images of each content of unfreeze-thaw: SEM image, $L=0\%$ (a); SEM image, $L=1\%$ (b); SEM image, $L=3\%$ (c); binary image, $L=0\%$ (d); binary image, $L=0\%$ (e); binary image, $L=3\%$ (f)

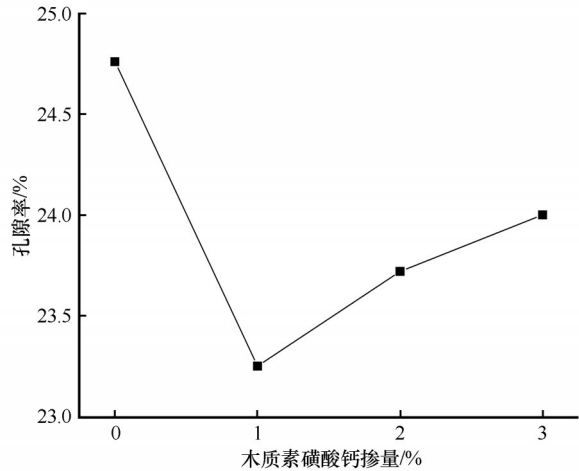


图 18 不同木质素磺酸钙掺量下改良土的孔隙率
Fig. 18 Void ratio of improved loess under different calcium lignosulfonate content

酸钙掺量最优时,搭接作用最强,促使改良土体镶嵌更加紧密,在宏观上表现为破坏强度最高。但木质素磺酸钙掺量增至 3% 时,木质素磺酸钙颗粒优先与自身结合及过多的木质素磺酸钙颗粒会导致双电层厚度增加及颗粒间的吸引力降低^[1,15],反而减弱土颗粒间的联结作用,孔隙率增加,宏观上表现为破坏强度降低。由此可见,木质素磺酸钙改良土的最优掺量为 1%。

3 结论

本文选用木质素磺酸钙对黄土进行改良,并结合青海地区的自然环境条件,对木质素磺酸钙改良黄土进行侧限浸水压缩试验、冻融循环试验、不固结不排水三轴剪切试验、扫描电镜试验和 X 射线衍射试验,分析了冻融循环次数、木质素磺酸钙掺量和围压对木质素磺酸钙改良土力学性质的影响,得到如下主要结论:

- (1)木质素磺酸钙的掺入,可以有效消除黄土的湿陷性。随着围压和木质素掺量的增加,改良黄土的应力-应变曲线由弱硬化型向一般硬化型发展;随着冻融循环次数的增加,应力-应变曲线仍为弱硬化型。试样破坏形态没有出现明显破坏面,表现出明显的剪胀破坏特征,属于塑性破坏。
- (2)在相同围压下,改良黄土的破坏强度随着木质素磺酸钙掺量的增加呈现出先增大再减小的趋势,在掺量为 1% 时,试样的破坏强度最高。各掺量改良黄土随着冻融循环次数的增加,破坏强度呈现出先减小再趋于稳定的规律。
- (3)随着木质素磺酸钙掺量的增加,抗剪强度指标呈现先增大后减小的趋势,而随着冻融循环次数的增加,抗剪强度指标呈现减小的趋势。

(4)冻融循环作用下,1% 掺量的木质素磺酸钙改良土的弹性模量高于素土的弹性模量,对黄土具有较好的改良效果,具有一定的抵抗冻融能力。

(5)根据 SEM 微观图像观察结果,木质素磺酸钙改良黄土的形成是由木质素磺酸钙胶结土颗粒与填充孔隙两部分组成的。冻融循环作用导致土体颗粒的接触方式由面-面接触向点-点、点-面接触过渡。通过 XRD 分析发现,木质素改良黄土的改良机制不同于传统改良,不会造成土体矿物成分的改变。

参考文献(References):

- [1] Jiang Tingda. Lignin[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2018: 1-3. [蒋挺大. 木质素[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 1-3.]
- [2] Zhang Wuyu. Loess engineering[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2018: 1-6. [张吾渝. 黄土工程[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018: 1-6.]
- [3] 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.]
- [4] Cui Honghuan, Pei Guolu, Yao Shijun, et al. Experimental study of mechanical properties of cement soil of different curing time subjected to freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 110-115. [崔宏环, 裴国陆, 姚世军, 等. 不同养生龄期下水泥土经冻融循环后力学性能试验探究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 110-115.]
- [5] Wang Tianliang, Liu Jiankun, Tian Yahu, et al. Static properties of cement- and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198. [王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 193-198.]
- [6] Zhang Wuyu, Guo Anbang, Lin Chen. 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.
- [7] Santoni R, Tingle J, Webster S. Stabilization of silty sand with nontraditional additives[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1787: 61-70.
- [8] Tingle J, Santoni R. Stabilization of clay soils with nontraditional additives[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1819: 72-84.
- [9] Indraratna B, Muttuvel T, Khabbaz H. Modelling the erosion rate of chemically stabilized soil incorporating tensile force-deformation characteristics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(1): 57-68.
- [10] Ceylan H, Gopalakrishnan K, Kim S. Soil stabilization with bioenergy coproduct [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2186(1): 130-137.
- [11] 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.]
- [12] He Zhiqiang, Fan henghui, Wang Junqiang, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 731-739. [贺智强, 樊恒辉, 王军强, 等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 731-739.]
- [13] 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基技术与应用研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 1-11.]
- [14] Zhang Jianwei, Kang Feixiang, Bian Hanliang, et al. Experiments on unconfined compressive strength of lignin modified silt in Yellow River flood area under freezing-thawing cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(Suppl 2): 1-6. [张建伟, 亢飞翔, 边汉亮, 等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊2): 1-6.]
- [15] 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): 2582-2892. [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.]
- [16] Ji Shengge, Wang Baozhong, Yang Xiujuan, et al. Experimental study of dispersive clay modified by calcium lignosulfonate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2405-2415. [姬胜戈, 王宝仲, 杨秀娟, 等. 木质素磺酸钙改性分散性土的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2405-2415.]
- [17] 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.]
- [18] Liu Zhaozhao. Mechanical properties and reinforcement mechanism of lignin-modified loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 16. [刘钊钊. 木质素改良黄土力学特性及加固机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 16.]
- [19] Liu J, Chang D, Yu Q. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand [J]. Engineering Geology, 2016, 210: 23-32.
- [20] Wang Tianliang. Study on dynamic and static properties of cement and lime modified fillings subjected to freezing and thawing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011: 55. [王天亮. 冻融条件下水泥及石灰路基改良土的动静力特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011: 55.]
- [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]. 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] 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.]
- [23] Liu Jiankun, Xiao Junhua. Experimental study on the stability of railroad silt subgrade with increasing train speed[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6): 833-841.
- [24] Zhao Futang, Chang Lijun, Zhang Wuyu. Analysis on the influence of cyclic stress ratio and vibration frequency on micro-structure of saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 854-864. [赵福堂, 常立君, 张吾渝. 循环应力比和振动频率对盐渍土微观结构影响分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 854-864.]
- [25] Lee W, Bohra N C, Altschaeffl A G. et al. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 559-568.
- [26] Xie Banglong, Zhang Wuyu, Sun Xianglong, et al. Study on the influence of lime-improved loess strength based on different temperature control curves[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 262-274. [解邦龙, 张吾渝, 孙翔龙, 等. 不同温控曲线对石灰改良黄土强度影响研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 262-274.]
- [27] Alazigha D, Indraratna B, Vinod J, et al. Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture [J]. Transportation Geotechnics, 2018, (14): 81-92.
- [28] Liu Yaowu. Effective assessment and stabilization mechanism of sulfur-free lignin-stabilized soda alkaline soil [D]. Changchun: Jilin University, 2020: 138. [刘尧伍. 无磺木质素加固碳酸型盐渍土工程效果与机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 138.]

Experimental study on mechanical properties of calcium lignosulfonate modified loess under freeze-thaw cycle

HUANG Yuling^{1,2}, ZHANG Wuyu^{1,2}, JI Gang'ao^{1,2}, XIE Banglong^{1,2}, DONG Chaofan^{1,2}

(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)

Abstract: Calcium lignosulfonate, as an environmentally-friendly improved material, has been applied to the field of soil reinforcement in recent years. In order to explore the solidification effect of calcium lignosulfonate on loess, indoor tests such as confined immersion compression test, freeze-thaw cycle test, unconsolidated undrained triaxial shear test, scanning electron microscope test and X-ray diffraction test were carried out to analyze the effects of freeze-thaw cycle times, content and confining pressure on the mechanical properties and microscopic mechanism of calcium lignosulfonate improved loess. The results show that: adding calcium lignosulfonate can effectively eliminate the collapsibility of loess. In addition, with the increase of calcium lignosulfonate content, the stress-strain curve of improved loess changes to general hardening type, while with the increase of freeze-thaw cycles, the stress-strain curve changes to weak hardening type. The failure strength of improved loess increases first and then decreases with the increase of calcium lignosulfonate content, and the failure strength is the highest when the calcium lignosulfonate content is 1%. With the increase of freeze-thaw cycles, the failure strength of improved loess decreases first and then tends to be stable, while the shear strength index shows a downward trend. Through scanning electron microscope test and X-ray diffraction test, it is found that cement is formed in the improved loess and fills the pores among soil particles, which improves the compactness of the soil and the strength of the soil. However, the freezing and thawing effect causes the contact mode of soil particles to change from surface-to-surface contact to point-to-point contact and point-to-surface contact. In addition, no new mineral components were found in the loess improved by calcium lignosulfonate, and the freezing and thawing did not cause the dissolution of mineral components in the soil.

Key words: loess; calcium lignosulfonate; freeze-thaw cycle; shear strength; microscopic mechanism

(责任编辑: 张明义)