

冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构

柴寿喜, 张琳, 魏丽, 田萌萌

Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing-thawing cycles

CHAI Shouxi, ZHANG Lin, WEI Li, and TIAN Mengmeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.20212026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action

杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 57-65

粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究

Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil

陈忠清, 朱泽威, 吕越 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 100-108

基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149

冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing-thawing

杨平, 刁鹏程, 张婷, 杨国清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 96-104

冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles

戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 张永双, 李贞孝, 孙嘉兴, 马剑飞 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 65-73



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.20212026

柴寿喜, 张琳, 魏丽, 等. 冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 96-105.
CHAI Shouxi, ZHANG Lin, WEI Li, *et al.* Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing-thawing cycles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 96-105.

冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的 抗压性能与微观结构

柴寿喜, 张琳, 魏丽, 田萌萌
(天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384)

摘要: 冬季冻结与春季融化引起北方滨海盐渍土的工程性质劣化。为研究纤维加筋对固化土的抗压性能、抗冻融性能与微观结构变化, 开展了石灰固化盐渍土和纤维与石灰加筋固化盐渍土的冻融试验、无侧限抗压试验、扫描电镜试验、核磁共振试验和压汞试验, 系统分析冻融后纤维加筋固化盐渍土的抗压强度与孔隙特征间的相关性、抗冻融性能及其变化规律。结果表明: 随冻融次数增加, 石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的抗压强度、孔隙体积、孔隙率均呈阶段性变化, 即冻融 1~3 次、冻融 4~7 次、冻融 8~10 次、冻融 11~15 次共 4 个阶段。随冻融次数增加, 破坏应变增大。相同冻融次数下, 2 种土的破坏应变均随压实度的增大而增大, 且纤维与石灰加筋固化土的抗压强度、破坏应变均大于石灰固化土, 孔隙率则反之。加筋土越密实, 筋土摩擦作用越强, 土的抗压性能越好; 纤维在土中随机分布与交织分布, 对土起到了空间约束作用, 提高了加筋土的抗冻融性能。研究成果可为北方盐渍土的工程利用提供理论和技术指导。

关键词: 冻融; 加筋盐渍土; 抗压强度; 微观结构; 核磁共振

中图分类号: TU411.6; TU411.92

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0096-10

Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing-thawing cycles

CHAI Shouxi, ZHANG Lin, WEI Li, TIAN Mengmeng
(School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Freezing in winter and thawing in spring lead to deterioration of the engineering property in the coastal saline soil in north China. In order to study the effect of the saline soil added lime (lime-soil) and saline soil added fiber and lime (fiber-lime-soil) on compressive capability, anti-freezing-thawing capability and microstructure, the freezing-thawing tests, unconfined compressive test, scanning electronic microscopy (SEM) test, nuclear magnetic resonance (NMR) test and mercury intrusion porosimetry (MIP) test are carried out, and the correlation between the compressive strength and microstructure characteristics, anti-freezing-thawing capability and its variation rules are systematically analyzed. The test results show that the compressive strength, pore volume and porosity of lime-soil and fiber-lime-soil under the freezing-thawing cycles are varied by four stages, that is, stage one (1-3 freezing-thawing cycles), stage two (4-7 freezing-thawing cycles), stage three (8-10 freezing-thawing cycles),

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-01-22

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 天津市科技计划项目(20YDTPJC00930); 天津市科技支撑重点项目(19YFZCSF00820)

第一作者: 柴寿喜(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事盐渍土改性固化研究。E-mail: chaishouxi@163.com

通讯作者: 张琳(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事盐渍土加筋固化研究。E-mail: 17839166834@163.com

stage four (11–15 freezing-thawing cycles). At the same freezing-thawing cycles, the failure strains of lime-soil and fiber-lime-soil increase with the increasing compactness, and the compressive strength and failure strain of fiber-lime-soil are greater than those of lime-soil, but the porosity is lower than that of lime-soil. The more the compactness is, the stronger the friction between fibers and particles, and the better the compressive properties. The interleaved fibers and randomly distributed fibers jointly limit the deformation of the soil and enhance the anti-freezing-thawing properties of the fiber-lime-soil. The results may provide the guidance in theory and technology for engineering utilization in saline soil areas in northern China.

Keywords: freezing-thawing cycle; reinforced saline soil; compressive strength; microstructure; NMR

受北方滨海地区的自然与地质环境影响, 盐渍土易发生冻胀与融沉、盐胀与溶陷工程危害, 产生地基塌陷、路面起伏、开裂等一系列工程问题^[1], 针对此问题已有众多学者开展了研究工作。魏丽等^[2]、姜宇波等^[3]以石灰固化盐渍土的无侧限抗压试验与三轴压缩试验, 证实增加石灰掺量可提高盐渍土的强度和水稳定性, 且石灰固化土的强度可满足高速公路和一级公路底基层的强度要求。齐吉琳等^[4]试验分析冻融土的物理性质、力学性质及变化机理, 认为冻融改变了土的结构, 其内部应力导致土骨架的膨胀与缩小。朱敏等^[5]、吕前辉等^[6]通过测试聚丙烯纤维加筋土的抗压强度、抗剪强度与变形性能, 认为在最优含水率附近, 纤维加筋土的抗压性能和抗剪性能最优。唐朝生等^[7]、徐敏普等^[8]分析纤维加筋的增强机理, 发现纤维加筋显著提高了土的峰值强度, 并提升了土的残余强度。陈诚等^[9]以扫描电镜试验观察木质素纤维改良土, 发现纤维在土中搭建了三维网架结构, 使土的孔隙减小, 增强了土颗粒间的联结力, 降低了冻融对土的损伤。袁志辉等^[10]通过核磁试验发现随干湿循环次数增加, 土颗粒分散, 颗粒间距增加, 颗粒间连接方式由面/面转变为面/边、面/角接触, 孔隙增多。安爱军等^[11]、吕擎峰等^[12]通过联合运用核磁共振与扫描电镜技术, 分析固化前后土的孔隙变化及分布规律, 固化后土呈蜂窝状、骨架状、海绵状等混合结构, 颗粒间的胶结程度增强, 孔隙连通性下降, 有效抑制了土的胀缩。丁建文等^[13]、张英等^[14]采用压汞法研究固化土的孔隙变化, 对比了固化土的孔隙结构、体积及分布特征。

目前, 固化土的力学性能与微观结构研究成果较多, 但针对冻融后纤维加筋固化盐渍土的抗压强度与孔隙特征之间的相关性、抗冻融性能及其变化规律还需要系统探索。据此, 开展了冻融作用下的石灰固化盐渍土、纤维与石灰加筋固化盐渍土的无侧限抗压试

验, 以研究不同压实度条件下土的抗压性能和抗冻融性能; 借助扫描电镜、核磁共振、压汞试验, 研究冻融前后 2 种土的孔隙特征及变化规律; 建立宏观力学指标与微观结构指标间的相关关系, 以探寻纤维加筋对提高固化土的抗压性能和抗冻融性能的积极作用。研究成果可为北方盐渍土地区的工程建设提供技术指导。

1 试验材料及试样制备

1.1 试验材料

实验用土取自天津滨海新区独流减河东风大桥处。盐渍土的物理性质指标为: 风干含水率 2.8%, 含盐量 2.9%, 液限 29.6%, 塑限 17.6%, 塑性指数 12, 最优含水率 16.8%, 最大干密度 1.73 g/cm³。

熟石灰的主要成分为 Ca(OH)₂, 质量分数为 90%。选择石灰掺量为干土质量的 6%、8% 和 10%。

聚丙烯纤维的物理力学指标为: 密度 0.91 g/cm³, 直径 20 μm, 导热性极低, 弹性模量 3 500 MPa, 抗拉强度 500 MPa, 断裂延伸率 15%。

1.2 制样与养护

纤维加筋长度为试样直径的 1/3^[15]。将盐渍土风干、碾碎, 过 1 mm 筛。将土与聚丙烯纤维拌和均匀, 额外掺加石灰质量分数为 20% 的水^[16], 加水后再次均匀拌和, 装入密闭塑料袋, 浸润 24 h。制样前, 掺入石灰, 再次将混合料拌和均匀。

制样筒内壁涂抹黏稠油脂, 避免在脱模过程中破坏试样。采用双向静压法, 分 3 层装入混合料。每次压实后用刮土刀将其表面菱形刮毛, 以免出现薄弱面。在制样筒内静置试样 10 min, 缓慢推出。将试样放入恒温恒湿养护箱养护 28 d。

试样直径 61.8 mm、高度 125 mm; 聚丙烯纤维长度 19 mm、质量加筋率 0.2%; 以最优含水率和 90%、93% 和 96% 压实度制样。制备未冻融试样各 1 组、冻融试样各 15 组, 每组 6 个试样。

冻融试验前,将试样包裹 2 层保鲜膜,以免冻融过程中水分流失。

1.3 试验条件与试验设备

天津市近 50 年气象资料显示,天津冬季最低气温 -18℃,春季平均气温 20℃。为此设定冻融试验的冻结温度 -20℃、融化温度 20℃;冻结 12 h 并融化 12 h 为 1 次冻融;冻融次数为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15。

使用冻融试验箱(型号 DR-2A)进行冻融试验、无侧限抗压试验仪(型号 CBR-2)进行抗压试验,量力环系数 31.424 N/0.01 mm,试验速率 1 mm/min;使用 Leica QWin5000 图像处理软件分析土的微观结构图像;由核磁共振成像分析仪(型号 MesoMR23-060H-I)完成核磁共振试验;使用全自动压汞仪(型号 Auto Pore lv9500),获得土的孔径与孔隙数值。

2 2 种土的冻融试验结果

2.1 优选石灰掺量

课题组的前期试验结果证实^[17],6% 是石灰掺量下限值,因此分别以石灰掺量 6%、8% 和 10% 固化盐渍土。图 1 为石灰掺量 6%、8% 和 10% 固化土的应力-应变曲线。

固化土的轴向应力均随石灰掺量增加而升高。应力达到峰值后,石灰掺量 6% 和 8% 的固化土抗压强度逐渐下降,且具有一定的残余强度;石灰掺量

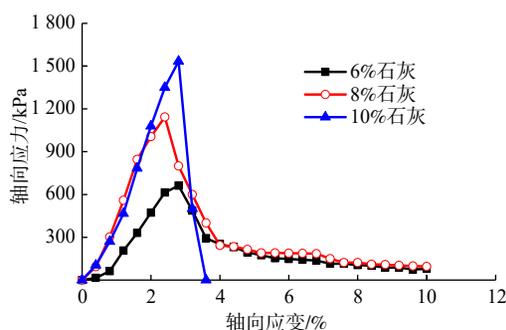


图 1 3 个石灰掺量固化盐渍土的应力-应变

Fig. 1 Stress-strain curves of lime-soil with three lime content

10% 固化土的轴向应力达到峰值后急剧下降为零。石灰与土颗粒、水、CO₂ 发生化学反应,在土中形成胶凝材料和较大团聚体,使得土的抗压强度与抗变形性能增强。适宜石灰掺量为 8%。

2.2 抗压强度

以石灰掺量 8%、聚丙烯纤维长度 19 mm、质量加筋率 0.2% 为条件,制备石灰固化盐渍土和纤维与石灰加筋固化盐渍土。图 2 为压实度 90%、93% 和 96% 的石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的抗压强度随冻融次数变化曲线。纤维与石灰加筋固化土的抗压强度均大于石灰固化土,掺加纤维提高了土的抗压强度。冻融 1~3 次,石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的抗压强度降幅最大;冻融 4~7 次,降幅减小;冻融 8~10 次,降幅趋缓;冻融 11~15 次,抗压强度逐渐稳定。

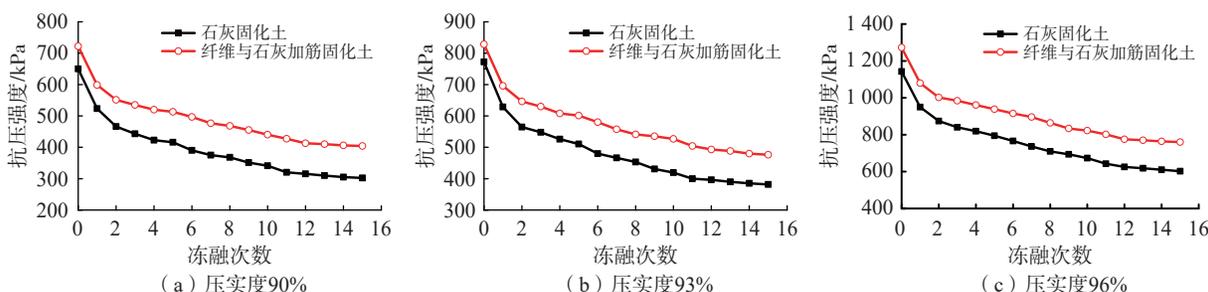


图 2 2 种土在 3 个压实度下抗压强度随冻融次数的变化

Fig. 2 Unconfined compressive strength of lime-soil and fiber-lime-soil in three compactness vs freezing-thawing cycle

3 个压实度石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的抗压强度下降率(与未冻融土的抗压强度相比)如图 3 所示。

随冻融次数增加,抗压强度的下降率增大,下降率的变化规律与抗压强度变化规律一致。纤维与石灰加筋固化土的下降率低于石灰固化土,其抗冻融性能优于石灰固化土。

在冻融作用下,孔隙水经历了水-冰-水的循环过

程,土颗粒之间的粘结作用降低,试样内部孔隙增多并出现微裂隙,导致试样结构破坏,强度大幅下降^[18]。纤维在土中随机分布与交织分布,纤维与土的摩擦作用和纤维对土的空间约束作用限制了土的冻胀变形破坏程度。

2.3 轴向应力-轴向应变

冻融 0, 1, 2, 5, 7, 10, 12, 15 次,压实度 90%、93% 和 96% 的石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土

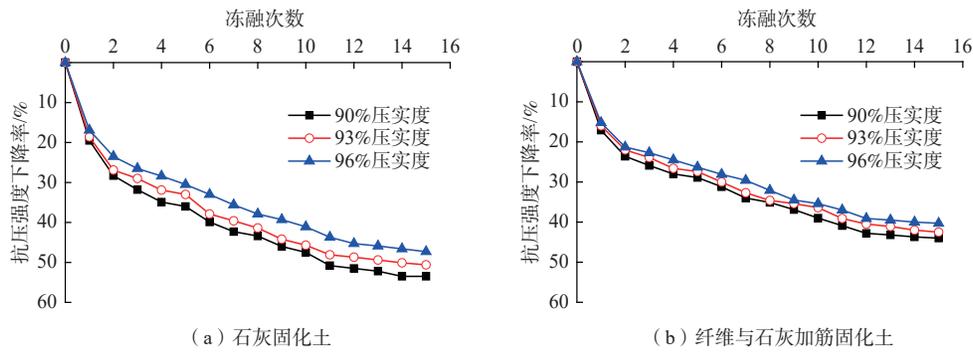


图 3 2 种固化土的抗压强度随冻融次数的下降率

Fig. 3 Decrease rate of the compressive strength of lime-soil and fiber-lime-soil with freezing-thawing cycle

的轴向应力-轴向应变曲线见图 4。

石灰固化土、纤维与石灰加筋固化土的轴向应力-轴向应变的变化规律基本一致。

对比图 4, 冻融作用下, 压实度 90%、93% 和 96%

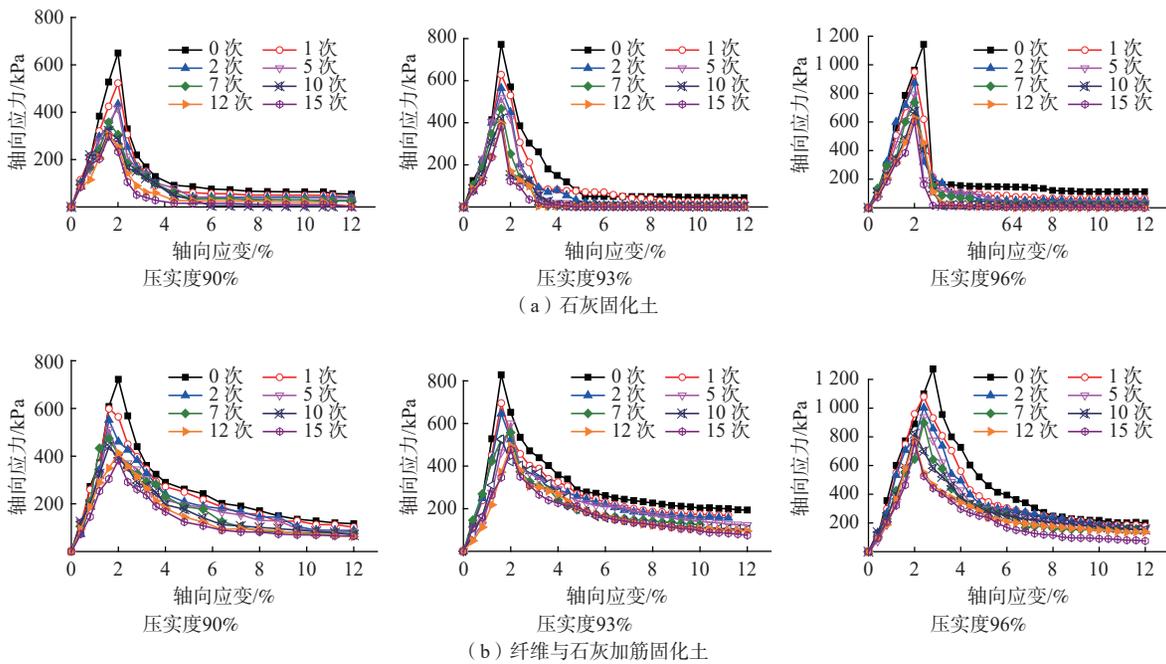


图 4 不同冻融次数时 2 种土在 3 种压实度下的轴向应力-轴向应变

Fig. 4 Axial stress-axial strain curves of lime-soil and fiber-lime-soil in three compactness of different freezing-thawing cycles

随应变增加, 2 种土的应力增大, 应力达峰值后, 试样发生不同程度的破坏; 应变继续增加, 峰值应力下降, 最后逐渐平缓。纤维与石灰加筋固化土的应力均大于石灰固化土, 残余强度降幅较小。这表明, 掺加纤维提高了冻融土的韧性。压实度 96% 纤维与石灰加筋固化土的抗变形性能最好, 压实度 90% 石灰固化土的最差。

相同冻融次数, 随压实度增大, 2 种土的峰值强度增加, 轴向应力-轴向应变曲线的斜率增大, 纤维与石灰加筋固化土的峰值应力大于石灰固化土。压实度越大, 土颗粒与纤维的摩擦力和联结力越大。纤维加

筋有效约束了土颗粒位移, 限制了土的变形, 减弱了冻融对土的劣化作用。

相同压实度, 随冻融次数增加, 石灰固化土的峰值应力减小, 冻融降低了土强度, 使得土逐渐趋于塑性破坏, 水分不断迁移, 土颗粒的排列方式被破坏, 降低了土的抗变形性能。冻融前期, 强度下降明显; 冻融后期, 土颗粒间的联结达到新的平衡状态, 此时土的变形破坏程度减弱。

2.4 试样的破坏形态

冻融 0, 1, 2, 5, 7, 10, 12, 15 次 2 种土试样的抗压破坏形态如图 5 所示。随冻融次数增加, 土强度减弱,



图 5 不同冻融次数石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土试样的抗压破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of the lime-soil and fiber-lime-soil under different freezing-thawing cycles

破坏程度增加。未冻融石灰固化土出现贯通裂隙，破坏程度较为严重；冻融 1~3 次，试样裂隙增多，边角掉落碎渣，强度大幅下降；冻融 4~7 次，裂隙变宽，试样有部分碎渣掉落，强度降幅减小；冻融 8~10 次，试样掉落碎渣明显增多，强度缓慢下降；冻融 11~15 次，试样多贯通裂隙，裂隙处片状剥落增多，完整性较差。

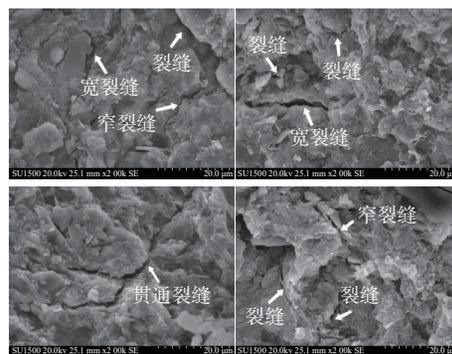
纤维与石灰加筋固化土裂隙较窄且数量较少，破裂面呈现“裂而不断”及表面“起皮”现象，边角完整性较好。这表明掺加纤维减少了裂隙数量，减小了裂隙宽度，改变了裂隙发展方向，降低了裂隙贯通率，弱化了土的冻融破坏作用，提升了土的强度与抗变形性能。

3 土的孔隙分布特征

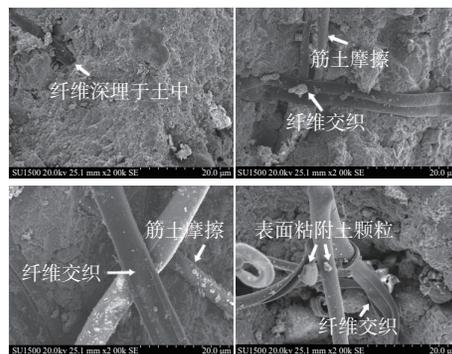
3.1 扫描电镜试验

对比石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土试验结果，掺入纤维后，土的冻融损伤减弱，抗变形性能提高。石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的扫描电镜微观形貌如图 6 所示。

未冻融的土颗粒间的胶结与整体性较好，冻融 1~3 次，孔隙开始发育，整体性变差；冻融 4~7 次后，孔隙明显增大，贯通孔隙增加；冻融 8~10 次，碎渣增多，破坏程度较大；冻融 11~15 次，裂隙明显增多且增宽。说明随冻融次数增加，试样微观上破坏增强；宏观上表现为冻融对力学性质的劣化影响，即冻融次



(a) 石灰固化土试样(放大2 000 倍)



(b) 纤维与石灰加筋固化土试样(放大1 000 倍)

图 6 石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的扫描电镜影像

Fig. 6 SEM images of the lime-soiland the fiber-lime-soil

数增加，试样的抗压强度降低，裂缝逐渐增大。

纤维深埋于土中，表面粘附有石灰固化土团粒，周围被土颗粒包裹、挤压，可有效阻止土颗粒位移与变形，因此提高了石灰固化土的力学性能，增强了土

的强度与稳定性。纤维在土中呈纤维交织和筋土摩擦 2 种分布形式。加筋土受外力作用时, 纤维的空间约束作用和筋土摩擦作用使土中的裂隙很难发育, 且对裂隙的扩展起到抑制作用。

3.2 核磁共振试验

冻融 0, 1, 2, 5, 7, 10, 12, 15 次、3 个压实度石灰固化土、纤维与石灰加筋固化土孔隙半径与孔隙体积占比之间的变化曲线如图 7 所示。

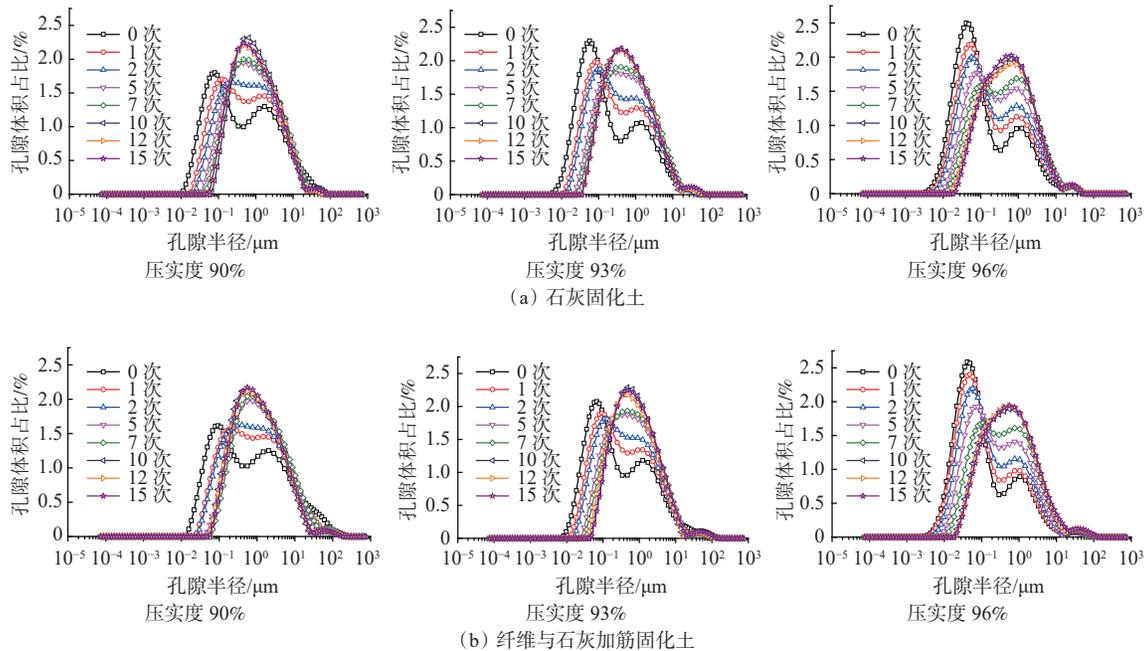


图 7 3 种压实度石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的孔隙半径与孔隙体积占比

Fig. 7 Pore radius vs pore volume of the lime-soil and the fiber-lime-soil with three compactness under some freezing-thawing cycles

2 种固化土的孔隙半径集中在 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 。可按孔隙半径划分 4 类孔隙: 微孔隙 ($0 \mu\text{m} < d \leq 1 \mu\text{m}$)、小孔隙 ($1 \mu\text{m} < d \leq 3 \mu\text{m}$)、中孔隙 ($3 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$)、大孔隙 ($10 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$)。

石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的孔隙半径与孔隙体积占比曲线呈 3 峰分布: 随冻融次数增加, 波峰持续向右移动, 主峰(波峰 1)向下移动, 次峰(波峰 2 和波峰 3)向上移动。说明微孔隙和小孔隙减少, 中孔隙和大孔隙增加, 大孔隙增加幅度小于中孔隙。孔隙体积占比(百分比)见表 1。

试样以微孔隙为主, 存在部分中孔隙和较少大孔隙。冻融 1~3 次, 微孔隙和小孔隙较快减少, 中孔隙和大孔隙较快增加; 冻融 4~7 次, 微孔隙和小孔隙缓慢减少, 中孔隙和大孔隙缓慢增加; 冻融 8~10 次, 微孔隙和小孔隙较慢增加, 中孔隙和大孔隙较快减少; 冻融 11~15 次, 孔隙变幅平缓。

压实度增大, 微孔隙体积占比增加, 大孔隙体积占比减小, 孔隙体积占比整体变幅减慢。压实度相同, 随冻融次数增加, 强度逐渐减小, 微孔隙和小孔隙

体积逐渐减小, 中孔隙和大孔隙体积均增大, 且大孔隙体积占比增幅最小。不同冻融次数, 压实度增大孔隙体积减少; 相同冻融次数, 纤维与石灰加筋固化土的孔隙体积占比均小于石灰固化土, 表明掺加纤维有助于减少孔隙体积, 孔隙变化规律与力学特征变化规律相吻合。

原因是, 冻融破坏了土颗粒的排列形式, 使试样裂隙扩张或贯通。小孔隙不断扩展, 逐渐转化为中孔隙和大孔隙。压实度较大, 土颗粒联结紧密, 阻碍土中水的迁移, 有效抑制了冻胀^[19]。

3.3 压汞试验

冻融 0, 1, 2, 5, 7, 10, 15 次石灰固化土、纤维与石灰加筋固化土的孔隙分布特征如图 8 和图 9 所示。试样的孔隙直径为 $0.005 \sim 100 \mu\text{m}$ 。图 8(a) 和图 9(a) 中, $d \leq 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙体积累计曲线较陡, 该区间孔隙较多; $0.1 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 的孔隙体积累积曲线较平缓, 该部分孔隙较少; $10 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$ 的孔隙体积累积曲线最平缓, $>10 \mu\text{m}$ 的孔隙更少。冻融 15 次石灰固化土孔隙总体积达 0.17 mL/g , 为最大值。

表 1 不同冻融次数 3 个压实度 2 种土的孔隙体积占比

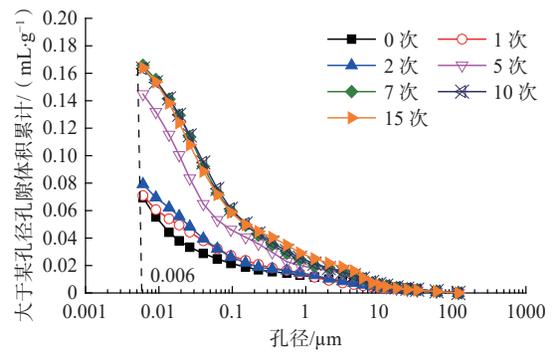
Table 1 Volume proportion of the lime-soil and fiber-lime-soil in three compactness under some freezing-thawing cycles %

孔隙类型	冻融次数	压实度90%		压实度93%		压实度96%	
		石灰土	加筋土	石灰土	加筋土	石灰土	加筋土
微孔隙	0	63.94	57.64	76.72	72.16	82.50	84.28
	1	62.01	54.52	71.70	69.89	78.93	83.61
	2	57.56	54.44	70.23	68.24	76.27	80.57
	5	53.00	48.50	65.74	63.93	72.38	76.24
	7	52.81	46.02	62.28	60.62	67.12	72.38
	10	54.89	54.28	65.70	61.18	66.35	67.56
	12	56.31	52.41	64.22	62.58	66.90	66.85
	15	55.49	51.42	64.13	59.29	66.99	65.27
小孔隙	0	16.46	15.94	13.15	14.52	10.89	9.85
	1	18.57	18.78	15.80	16.38	12.66	10.54
	2	22.13	20.07	17.08	18.03	14.46	12.44
	5	23.14	23.22	19.95	20.58	17.24	15.16
	7	25.16	24.03	21.08	21.79	19.71	18.17
	10	23.67	23.35	21.08	23.27	21.26	20.02
	12	23.28	23.75	21.10	22.00	20.64	19.86
	15	23.72	24.22	20.96	23.17	20.87	20.18
中孔隙	0	13.34	14.68	7.83	9.01	4.75	4.05
	1	14.86	17.03	10.02	10.48	6.20	4.33
	2	16.16	17.00	10.35	11.04	7.09	5.43
	5	18.30	18.68	11.94	12.44	8.40	6.86
	7	19.97	19.86	13.65	14.05	10.69	9.61
	10	17.32	17.17	11.58	13.12	10.41	10.09
	12	16.58	17.66	12.27	12.67	10.11	10.07
	15	16.53	18.13	11.83	13.97	9.88	10.69
大孔隙	0	6.26	11.74	2.29	4.31	1.86	1.82
	1	4.57	9.68	2.49	3.25	2.22	1.52
	2	4.15	8.50	2.34	2.70	2.19	1.56
	5	5.56	9.61	2.36	3.04	1.97	1.75
	7	4.06	10.10	2.99	3.54	2.49	2.65
	10	4.12	5.21	1.64	2.42	1.97	2.34
	12	3.83	6.18	2.42	2.76	2.35	3.22
	15	4.26	6.23	3.08	3.56	2.26	3.86

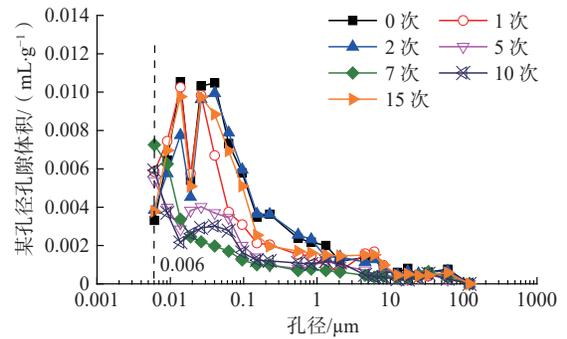
鉴于某孔径孔隙体积曲线有 4 个明显区间, 据此将孔隙划分 4 类: 微孔隙 ($0.005 \mu\text{m} < d \leq 0.04 \mu\text{m}$)、小孔隙 ($0.04 \mu\text{m} < d \leq 0.5 \mu\text{m}$)、中孔隙 ($0.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$)、大孔隙 ($10 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$)。

随冻融次数增加, 石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的孔径均增大, 峰值和峰宽总体呈下降趋势。微孔隙曲线形状和位置变化较小, 小孔隙、中孔隙和大孔隙曲线的峰值和峰宽变化较大, 表明冻融对微孔隙影响较小, 对大孔隙影响较大, 对小孔隙和中孔隙影响最大。

随冻融次数增加, 固化土的孔隙直径增大, 孔隙总体积增加。冻融前后纤维与石灰加筋固化土进录



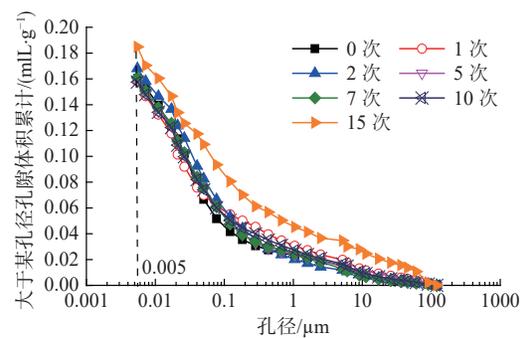
(a) 进录曲线 (大于某孔径的孔隙体积累计随孔径变化)



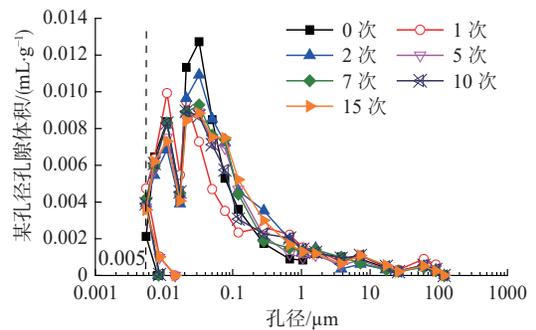
(b) 某孔径孔隙体积随孔径变化

图 8 不同冻融次数石灰固化土孔隙分布特征

Fig. 8 Pore distribution characteristics of the lime-soil under different freezing-thawing cycles



(a) 进录曲线 (大于某孔径的孔隙体积累计随孔径变化)



(b) 某孔径孔隙体积随孔径变化

图 9 不同冻融次数纤维与石灰加筋固化土孔隙分布特征

Fig. 9 Pore distribution characteristics of the fiber-lime-soil under different freezing-thawing cycles

曲线的间隔距离小于石灰固化土, 表明纤维加筋有效抑制了孔径增大和孔隙增加, 改变了土的孔隙分布特征。随冻融次数增加, 孔隙数量增多, 经过反复冻融, 小孔隙和中孔隙连通形成大孔隙, 宏观上表现为土的

强度下降, 抗变形性能降低, 这一结论与抗压试验得出的结果相吻合。

冻融 0, 1, 2, 5, 7, 10, 15 次石灰固化土、纤维与石灰加筋固化土的孔隙指标见表 2。

表 2 冻融前后石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的孔隙指标

Table 2 Pore indices of the lime-soil and fiber-lime-soil before and after freezing-thawing cycles

冻融次数	石灰固化土				纤维与石灰加筋固化土			
	孔隙面积/(m ² ·g ⁻¹)	平均直径/μm	孔隙率/%	孔隙率增长率/%	孔隙面积/(m ² ·g ⁻¹)	平均直径/μm	孔隙率/%	孔隙率增长率/%
0	22.168	0.025	26.79	0.0	20.817	0.023	25.39	0.0
1	23.162	0.026	28.20	5.3	21.257	0.024	26.58	4.7
2	23.274	0.027	28.87	7.8	21.390	0.026	27.08	6.7
5	23.495	0.029	29.98	11.9	21.500	0.027	27.75	9.3
7	23.668	0.030	30.73	14.7	21.531	0.028	28.25	11.3
10	24.762	0.032	31.77	18.6	22.152	0.029	29.05	14.4
15	25.413	0.035	34.52	28.9	22.988	0.030	30.89	21.7

随冻融次数增加, 土的孔隙率增加, 孔隙率的增长率增大。冻融作用下纤维与石灰加筋固化土的孔隙面积、平均直径、孔隙率及孔隙率的增长率均小于石灰固化土。

冻融 1~3 次, 孔隙率快速增大; 冻融 4~7 次, 孔隙率较慢增加; 冻融 8~10 次, 孔隙率缓慢增大; 冻融 11~15 次, 孔隙率快速增加。

随冻融次数增加, 孔径和孔隙体积逐渐增大, 孔隙更容易连通, 土的结构损伤越来越严重^[20]。宏观上表现为明显的变形破坏, 裂隙逐渐增大, 贯穿整个试样。冻融作用下, 小孔隙逐渐扩展为大孔隙, 且有新孔隙形成, 孔隙率增大, 土的抗变形性能降低。纤维与石灰加筋固化土孔隙率的增长率小于石灰固化土, 表明纤维约束了大孔隙和裂隙的产生, 减弱了冻融对土的结构破坏。

4 结论

(1) 随冻融次数增加, 石灰固化土和纤维与石灰加筋固化土的抗压强度、孔隙体积、孔隙率均呈 4 个阶段变化: 冻融 1~3 次, 强度降幅最大, 微孔隙和小孔隙较快减少, 中孔隙和大孔隙较快增加, 孔隙率快速增大; 冻融 4~7 次, 强度降幅减小, 微孔隙和小孔隙缓慢减少, 中孔隙和大孔隙较慢增加, 孔隙率较慢增加; 冻融 8~10 次, 强度降幅趋缓, 微孔隙和小孔隙缓慢增加, 中孔隙和大孔隙较快减少, 孔隙率缓慢增大; 冻融 11~15 次, 强度和孔隙变化逐渐稳定, 孔隙率快速增加。

(2) 在任意冻融次数下, 纤维与石灰加筋固化土

的抗压强度均大于石灰固化土。随机分布与交织分布的纤维发挥着筋土摩擦与空间约束作用, 增强了土的抗压强度和抗冻融性能, 并提高了土的残余强度。

(3) 随冻融次数增加, 各孔隙组的占比发生变化。微孔隙和小孔隙体积占比减小, 中孔隙和大孔隙体积占比增加。随压实度增大, 微孔隙和小孔隙体积占比增加, 大孔隙体积占比减小, 其中大孔隙增加幅度小于中孔隙。

(4) 纤维加筋抑制了土的孔径和孔隙体积的增加。纤维加筋使得土的孔隙面积、平均直径、孔隙率及孔隙率的增长率减小, 减弱了冻融对土结构的破坏, 并减小了土中裂隙的数量与宽度。

参考文献 (References):

- [1] 魏玉涛, 刘德玉, 张伟, 等. 荒漠-湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 183 - 190. [WEI Yutao, LIU Deyu, ZHANG Wei, et al. Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 183 - 190. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 魏丽. 纤维与石灰加筋固化滨海盐渍土的冻融损伤及力学性能退化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. [WEI Li. Fabric damage and mechanical degradation of coastal saline soil reinforced with fiber and lime under freeze-thaw cycling[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姜宇波, 柴寿喜, 魏丽, 等. 四种因素对纤维加筋盐渍

- 土抗压性能的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 233-239. [JIANG Yubo, CHAI Shouxi, WEI Li, et al. Effect of four factors on compressive property of fiber-saline soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 1): 233-239. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 齐吉琳, 程国栋, VERMEER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 887 - 894. [QI Jilin, CHENG Guodong, VERMEER P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils[J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(8): 887 - 894. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 朱敏, 倪万魁, 李向宁, 等. 黄土掺入聚丙烯纤维后的无侧限抗压强度和变形试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8337 - 8343. [ZHU Min, NI Wankui, LI Xiangning, et al. Study on unconfined compressive strength and deformation after incorporating polypropylene fiber into loess[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8337 - 8343. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吕前辉, 柴寿喜, 李敏. 多因素影响下石灰固化盐渍土抗剪性能的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 89 - 95. [LYU Qianhui, CHAI Shouxi, LI Min. An experimental study of the shear properties of the solidified saline soil with lime concerning under the influence of multiple factors[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 89 - 95. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 610 - 614. [TANG Chaosheng, SHI Bin, GU Kai. Microstructural study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 610 - 614. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 徐敏普, 孙明瑞, 常成. 冻融循环作用下秸秆纤维加筋土抗压强度试验研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2021, 34(2): 6 - 10. [XU Minpu, SUN Mingrui, CHANG Cheng. Experimental study on compressive strength of straw fiber-reinforced soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021, 34(2): 6 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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. [CHEN Cheng, GUO Wei, REN Yuxiao. Properties and microscopic analysis of lignin fiber-reinforced soils under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup 2): 135 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 袁志辉, 唐春, 杨普济, 等. 干湿循环下红土力学性质劣化的多尺度试验[J]. 水力发电学报, 2022, 41(2): 79 - 91. [YUAN Zhihui, TANG Chun, YANG Puji, et al. Multi-scale experiment of mechanical property degradation of a laterite soil under dry-wet cycling[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(2): 79 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 安爱军, 廖靖云. 基于核磁共振和扫描电镜的蒙内铁路膨胀土改良微观结构研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 152 - 156. [AN Aijun, LIAO Jingyun. Modified mesostructure of Standard Gange Railway expansive soils of Mombasa-Nairobi based on nuclear magnetic resonance and scanning electron microscope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup 2): 152 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 吕擎峰, 周刚, 王生新, 等. 固化盐渍土核磁共振微观特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 245 - 249. [LYU Qingfeng, ZHOU Gang, WANG Shengxin, et al. Microstructure characteristics of solidified saline soil based on nuclear magnetic resonance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 245 - 249. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3591 - 3596. [DING Jianwen, HONG Zhenshun, LIU Songyu. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3591 - 3596. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张英, 邴慧. 基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 169 - 174. [ZHANG Ying, BING Hui. Experimental study of the effect of freezing-thawing cycles on porosity characters of silty clay by using mercury intrusion porosimetry[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 169 - 174. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 方秋阳, 柴寿喜, 李敏, 等. 冻融循环对固化盐渍土的抗压强度与变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 1041 - 1047. [FANG Qiuyang, CHAI Shouxi, LI Min, et al. Influence of freezing-thawing cycles

- on compressive strength and deformation of solidified saline soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 1041 – 1047. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 柴寿喜. 固化滨海盐渍土的强度特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006. [CHAI Shouxi. Study on the special properties of strength of solidified saline soil in inshore[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 柴寿喜, 王晓燕, 王沛. 滨海盐渍土改性固化与加筋利用研究[M]. 天津: 天津大学出版社, 2011. [CHAI Shouxi, WANG Xiaoyan, WANG Pei. Study on modification curing and reinforcement utilization of coastal saline soil [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2011. (in Chinese)]
- [18] 程良. 盐渍土强度体变特性及冻融循环对其结构性影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. [CHENG Liang. Study on strength deformation characteristics of saline soil and the influence of freeze-thaw cycle on its structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 何攀, 许强, 刘佳良, 等. 基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 142 – 149. [HE Pan, XU Qiang, LIU Jialiang, et al. An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 142 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 秦泳, 徐彬, 郑一峰. 掺加硅藻土混凝土孔隙结构冻融破坏试验研究[J]. *路基工程*, 2020(5): 43 – 48. [QIN Yong, XU Bin, ZHENG Yifeng. Experimental study on freezing and thawing failure test of diatomite doped concrete with pore structure[J]. *Subgrade Engineering*, 2020(5): 43 – 48. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞