



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

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙

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

LIU Leqing, ZHANG Wuyu, ZHANG Bingyin, GU Yuxi, and XIE Banglong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009064>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

新疆塔县地区片麻岩冻融劣化机理与规律试验研究

Research on mechanism of freezing-thawing deterioration of gneisses in the Taxian area of Xinjiang

吕文韬, 杨龙, 魏云杰, 张明 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 95–95

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

基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism

何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷壮 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 120–126

昆仑山地区冻融土导热系数试验测试与预测模型研究

Research on experimental tests and prediction models of thermal conductivity of freezing-thawing soil in the Kunlun Mountains

刘志云, 张伟, 王伟, 崔福庆 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 105–113

固结与荷载耦合作用下吹填土力学性质与微结构参数关联性

Correlation between mechanical properties and microstructure parameters of soft dredger fill under the coupling action of consolidation and load

杨爱武, 封安坤, 姜帅, 仲涛, 李潇雯 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 96–105



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009064](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009064)

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

刘乐青^{1,2}, 张吾渝^{1,2}, 张丙印³, 谷遇溪^{1,2}, 解邦龙^{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; 3. 清华大学土木水利学院, 北京 100084)

摘要: 青海地处多年冻土地区, 属于青藏高原大陆性气候带, 冻融循环是路基和地基基础的一种常见破坏因素, 为研究冻融循环作用对青海地区实际工程的影响, 揭示冻融循环作用对其损害的机理, 通过对青海西宁地区原状黄土和重塑黄土进行冻融循环试验、无侧限抗压强度试验和电镜扫描试验, 分析不同冻融温度和不同冻融循环次数对原状黄土、重塑黄土无侧限抗压强度和微观结构的影响。结果表明: 当黄土经历0~6次冻融循环时, 原状黄土和重塑黄土的强度逐渐降低, 而8~10次冻融循环后其强度先增大后趋于稳定; 原状黄土的强度随冻融温度降低而降低, 而重塑黄土的强度随冻融温度降低先增大后减小; 从微观角度分析, 冻融温度的降低和冻融循环次数的增加, 均导致黄土大颗粒逐渐分解为小颗粒, 颗粒的排列方式发生改变。

关键词: 冻融循环; 黄土; 冻融温度; 力学特性; 微观规律

中图分类号: P642.11⁺6; TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0109-07

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

LIU Leqing^{1,2}, ZHANG Wuyu^{1,2}, ZHANG Bingyin³, GU Yuxi^{1,2}, XIE Banglong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy-Saving Building Materials and Engineering Safety, Xining, Qinghai 810016, China;
3. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Qinghai is located in a permafrost region, which belongs to the continental climate zone of the Qinghai-Tibet Plateau. At the same time, freezing-thawing cycles are common destructive factors for roadbeds and foundations. In order to examine the effects of freezing-thawing cycles on actual projects in Qinghai and reveal the mechanisms of freezing-thawing cycles on damage of the projects, the freezing-thawing cycle test, unconfined compressive strength test and electron microscope scanning test of the undisturbed loess and remolded loess in the Xining area of Qinghai are conducted to analyze the influence of different freezing-thawing temperatures and different freezing-thawing cycles on the strength and microstructure of the undisturbed loess and remolded loess. The results show that when the loess undergoes 0-6 freezing-thawing cycles, the strength of the undisturbed loess and remolded loess gradually decreases. After 8-10 freezing-thawing cycles, the unconfined compressive strength of the loess first increases and then tends to be basically stable. The strength of the undisturbed loess decreases

收稿日期: 2020-09-28; 修订日期: 2021-01-11

基金项目: 青海省科技计划项目(2017-ZJ-792); 国家自然科学基金项目(51768060); 青海省创新服务平台建设专项基金项目; 青海大学土木工程创新基金项目(TC2020-02)

第一作者: 刘乐青(1999-), 女, 硕士研究生, 从事岩土及地下工程研究。E-mail: qhdllxq@163.com

通讯作者: 张吾渝(1969-), 女, 教授, 硕士, 从事岩土及地下工程研究。E-mail: qdzwly@163.com

with the decrease of the freezing and thawing temperature. However, the strength of the remolded loess first increases and then decreases with the decrease of temperature. From a microscopic point of view, the decrease in freezing-thawing temperature and the increase in the number of freezing-thawing cycles both lead to the decomposition of large loess particles into small particles, and the arrangement of the particles has changed. The results are of reference value for actual project construction and construction in the Xining area of Qinghai.

Keywords: freezing-thawing cycle; loess; temperature; mechanical properties; micromechanism

黄土是一种由风化作用和沉积作用形成多孔且柱状节理的特殊堆积物,广泛分布于青海、宁夏、新疆和甘肃等地,其中青海地区的黄土面积约占我国黄土总面积的4%^[1]。同时,青海属于多年冻土地区,冬季气温较低,这种气候造成的冻融循环会对黄土的物理力学性能产生显著影响,给实际工程建设带来危害,因而在青海西宁地区建设工程时应考虑冻融循环作用的影响。

近年来,国内外学者关于冻融循环作用对黄土结构和力学特性影响进行的研究发现,冻融循环作用是改变黄土强度和内部结构的重要原因之一。李宝平等^[2]分析了冻融循环周期对黄土物理力学性质的影响,得出冻融循环周期越多,黄土的损害越严重,且黏聚力以指数型趋势减小;张遂等^[3]对冻粉质黏土进行三轴剪切试验,发现含水率和温度均会影响土体的抗剪强度;周有禄等^[4]对青海省黄土进行剪切试验,分析了冻融循环次数对黄土黏聚力和内摩擦角的影响;Li等^[5]通过室内试验研究发现,在冻融循环作用下原状黄土和重塑黄土的无侧限抗压强度和抗剪强度均随着冻融循环周期的增大而减小;柯睿等^[6]对固化淤泥质土进行冻融循环试验,得出当土样经过冻融循环后其无侧限抗压强度减小;崔宏环等^[7]通过非饱和直剪试验,得出冻融循环次数和冻融温度对土样力学特性的影响较为显著,冻融温度越低,土样的黏聚力呈现出先降低后稳定的趋势;杨更社等^[8]、魏尧等^[9]、叶万军等^[10]利用三轴剪切试验对冻融循环后的黄土进行研究,发现冻融温度和冻融循环次数均会改变黄土的力学特性,但冻融温度影响较小。由此可见,冻融温度和冻融循环次数均可以损害黄土的结构,降低黄土的强度。

许多学者还从微观角度分析了黄土经过冻融循环后内部颗粒的变化规律,叶万军等^[11]、张泽等^[12]对黄土进行电镜扫描试验,分析不同冻融循环次数黄土的微观图像,发现冻融循环次数的增加使黄土内部颗粒逐渐圆滑,且经历10次冻融循环时土样内部的颗

粒和孔隙结构逐渐趋于稳定;赵鲁庆等^[13]通过对陕西原状黄土进行冻融循环试验和电镜扫描试验,发现不同冻融循环次数下原状黄土的颗粒逐渐剥落,颗粒的微观形态和排列方式重新形成新的结构体系;肖东辉等^[14-15]、倪万魁等^[16]通过对冻融循环后的原状和重塑黄土进行压汞试验,得到原状黄土孔隙率达到稳定状态的冻融循环次数高于重塑黄土。由此发现,从微观角度也能揭示冻融循环作用对黄土的影响。

综上所述,冻融温度和冻融循环次数对原状黄土、重塑黄土抗剪强度影响的研究成果较多,而影响黄土无侧限抗压强度的研究成果较少。针对冻融循环对黄土无侧限抗压强度的影响,本文将青海西宁地区的原状黄土和重塑黄土作为研究对象,基于冻融循环条件,对土体进行无侧限抗压强度试验和电镜扫描试验,研究冻融温度、冻融循环次数对黄土强度及微观结构的影响,旨在为青海西宁地区的实际工程建设提供参考。

1 材料及试验方案

1.1 试验材料

试验用黄土取自青海省西宁市城北区某场地,取土深度为3 m,试验结果如表1所示。

表1 基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties

天然含水率/%	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/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
13.1	1.5	1.7	14.2	25.0	13.8	11.1

1.1.1 制备原状黄土

将试验所用的原状黄土土块利用削土器削成标准的圆柱试样(直径39.1 mm,高80 mm),用保鲜膜将其密封保存,保证试样的水分一致。制备方法均符合《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中规定的操作步骤。

1.1.2 制备重塑黄土

将碾碎黄土放进烘箱中烘8 h,烘箱温度为108 °C,

基于天然含水率配出试验所需土样并装入试样桶中密封, 静置 12 h, 保证土样与水混合均匀。试样制备按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行, 制备时将配置好的土样倒入三瓣膜内, 将土样分层击实并逐层刮毛, 保证试样不断层, 最后用保鲜膜将圆柱试样密封保存。

1.2 试验方案

1.2.1 冻融循环试验

试验采用冻胀循环试验箱(TMS9018—500)对原状黄土和重塑黄土进行冻融循环试验, 根据青海西宁地区的冬季气温变化(图 1), 本试验设定冻融温度是 $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 14.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 9.1^{\circ}\text{C}$, 冻融循环次数设定 2, 4, 6, 8, 10 次, 冻结时间为 12 h, 融化时间为 12 h。

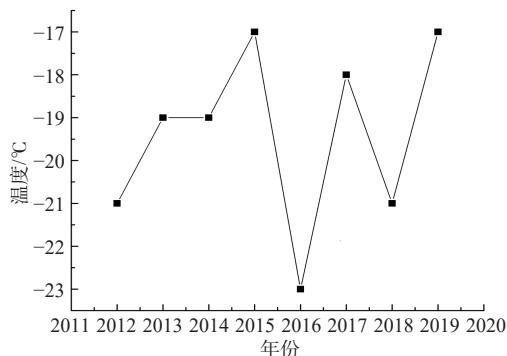


图 1 青海西宁近几年最低气温

Fig. 1 Change of the minimum temperature in Xining of Qinghai in recent years

1.2.2 无侧限抗压强度试验

试验采用 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪, 试验操作及试样制备均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) 进行。该试验的加载速率为 2.4 mm/min, 当黄土试样出现斜向剪裂时, 认为试样已被破坏, 达到试验终止条件, 如图 2 所示。

1.2.3 电镜扫描试验

将冻融循环后的土样自然风干后, 用削土刀削成长为 1 cm、宽为 1 cm、高为 2 cm 的长方体土样, 通过电镜扫描仪得到土样经过不同温度和不同冻融循环次数后的 SEM 图像, 本试验采用 500 倍微观图像分析土样内部结构变化。

2 试验结果分析

2.1 原状黄土的试验结果

冻融循环后原状黄土的无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系如图 3 所示。由图 3(a)(b) 可知, 相同的冻融温度下, 原状黄土的应力-应变曲线关系呈现

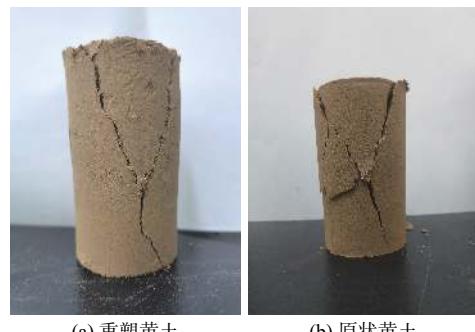


图 2 黄土的斜向剪裂破坏

Fig. 2 Oblique shear failure of loess

应变软化型, 且原状黄土的无侧限抗压强度随冻融循环次数的增加而减小, 而在冻融循环 8 次时原状黄土无侧限抗压强度缓慢增加至 35 kPa, 冻融循环 10 次时土样强度又逐渐下降。原状黄土未经过冻融循环时无侧限抗压强度达到 65 kPa, 经过冻融循环后的原状黄土峰值强度下降约 31%, 这表明冻融循环后黄土的原生结构遭受破坏。

图 3(c) 表现出原状黄土的无侧限抗压强度随冻融循环次数的增加而减小的特点。

从图 3(d) 中可知, 冻融温度改变会使原状黄土强度产生相应的宏观变化。原状黄土的强度随冻融温度降低而降低, 在冻融循环 2 次时 $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$ 下原状黄土的峰值强度比 $\pm 9.1^{\circ}\text{C}$ 下的峰值强度下降约 42%, 但在 8 次冻融循环时 $\pm 14.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$ 下土体的强度均增大, $\pm 9.1^{\circ}\text{C}$ 下土体强度减小, 这说明冻融温度对原状黄土的原生结构破坏较为严重。

图 4 为冻融温度为 $\pm 9.1^{\circ}\text{C}$ 时不同冻融循环次数下原状黄土的微观图像, 分析图 4 可知, 当原状黄土经过冻融循环前 6 次时小颗粒数量增加, 颗粒间的间距较小, 连接紧密, 而当冻融循环次数增加至 8 次时, 土颗粒间的孔隙较大, 结构疏散, 这也从微观角度解释了原状黄土在 $\pm 9.1^{\circ}\text{C}$ 下强度减小的原因。

对 $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$ 下不同冻融循环次数下的原状黄土进行电镜扫描, 其结果如图 5 所示。从图 5(a) 得出未经过冻融循环的土颗粒以大颗粒为主, 小颗粒少量分布, 且颗粒棱角分明, 大颗粒之间的接触多以面-面接触为主, 颗粒之间的排列方式紧密。由图 5(b)(c)(d) 可见, 经过 8 次冻融循环之前, 原生结构开始被破坏, 大颗粒体积逐渐减小, 小颗粒的数量逐渐增加, 但颗粒间的间距大, 连接弱, 大颗粒由棱角分明向圆滑过渡, 颗粒之间的接触方式由面-面接触过渡为点-面接触。由图 5(e)(f) 可见, 当经历 8 次冻融循环后, 土体

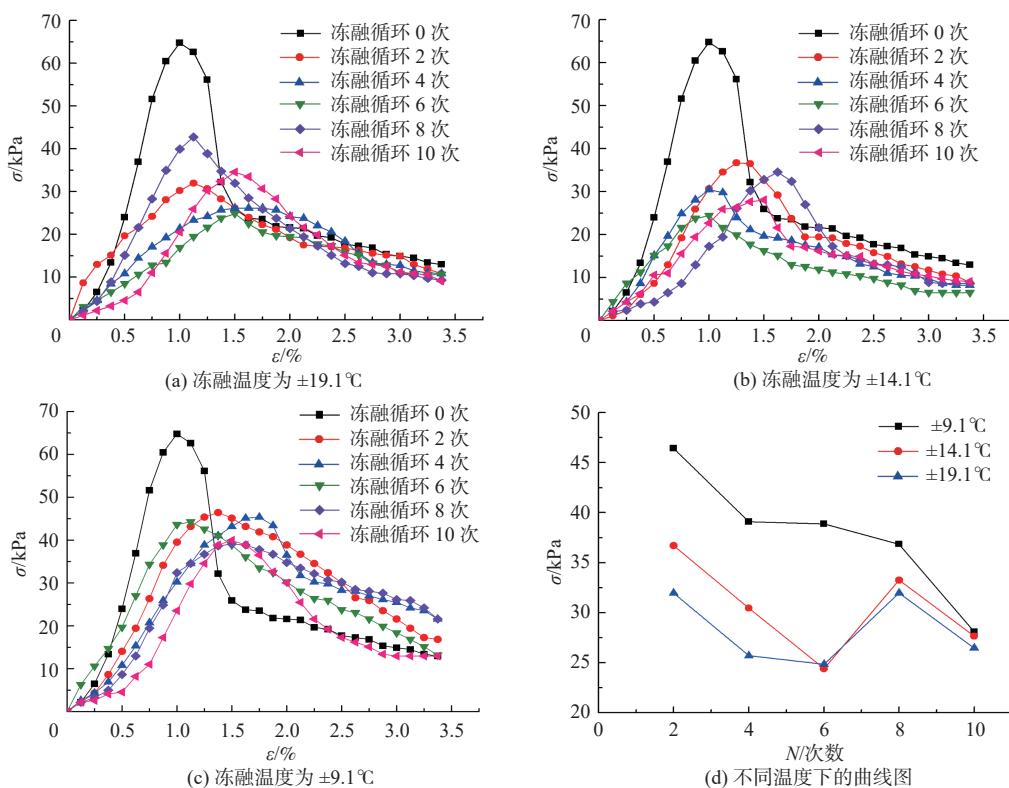
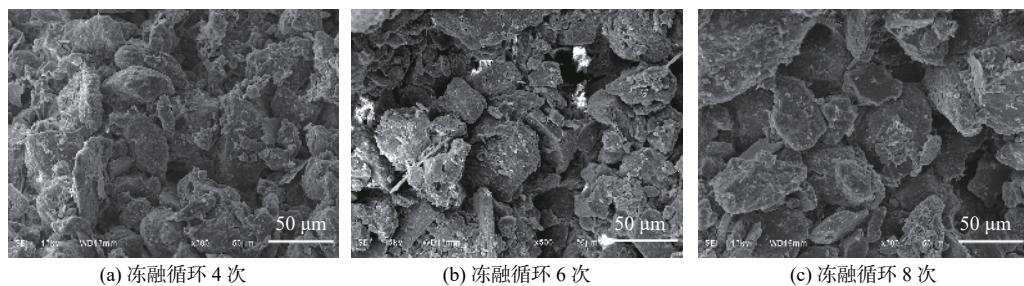
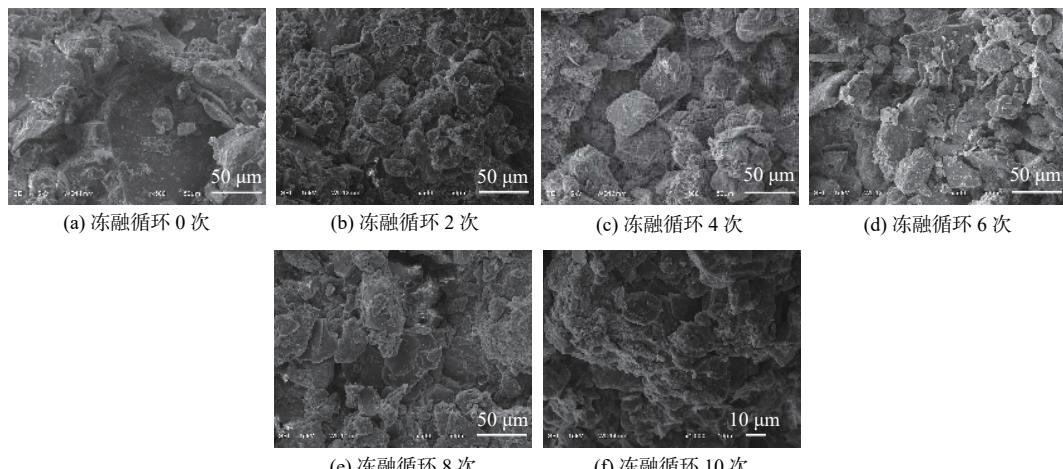


图3 原状黄土的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of the undisturbed loess

图4 冻融温度为 $\pm 9.1^\circ\text{C}$ 时不同冻融循环次数下原状黄土的微观图像($\times 500$)Fig. 4 Microscopic images of the undisturbed loess under different freezing-thawing cycles at $\pm 9.1^\circ\text{C}$ ($\times 500$)图5 冻融温度为 $\pm 19.1^\circ\text{C}$ 时不同冻融循环次数下原状黄土的微观图像($\times 500$)Fig. 5 Microscopic images of the undisturbed loess under different freezing-thawing cycles at $\pm 19.1^\circ\text{C}$ ($\times 500$)

的原生结构破坏较严重, 多数大颗粒被分解为小颗粒, 并填充到颗粒之间形成次生结构。

冻融温度对原状黄土影响结果如图6所示, 从图6中可知, 冻融温度的变化会使土体内部结构发生改变, 尤其是土颗粒的变化。图6(a)显示, 冻融温度为 $\pm 9.1^{\circ}\text{C}$ 下, 土颗粒逐渐被分解, 但颗粒间的连接能力较强, 排列紧密, 这说明土体结构开始发生破坏, 且破坏程度较弱。图6(c)显示, 当冻融温度为 $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$

时, 大颗粒分解为小颗粒且数量明显增多, 颗粒之间的大孔隙转变为小孔隙, 与图6(a)相比, 其颗粒排列松散, 粘结能力较弱, 结构疏松, 表明冻融温度降低, 土体的内部结构遭受破坏, 这也说明冻融温度越低, 原状黄土内部结构的破坏越严重。

2.2 重塑黄土的试验结果

对重塑黄土进行不同温度、不同冻融循环次数的试验, 得到重塑黄土的应力-应变关系曲线(图7)。由

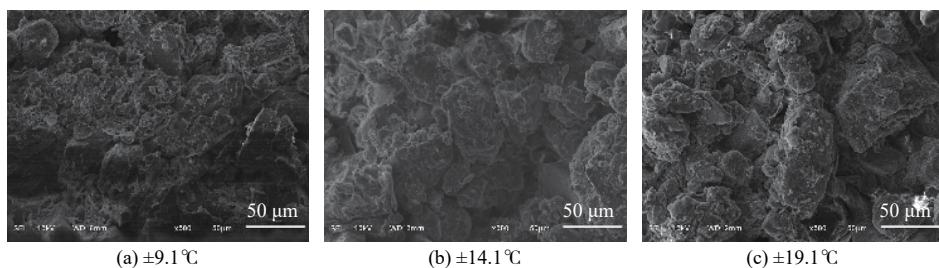


图6 不同冻融温度下原状黄土的微观图像

Fig. 6 Microscopic images of the undisturbed loess under different freezing-thawing temperatures

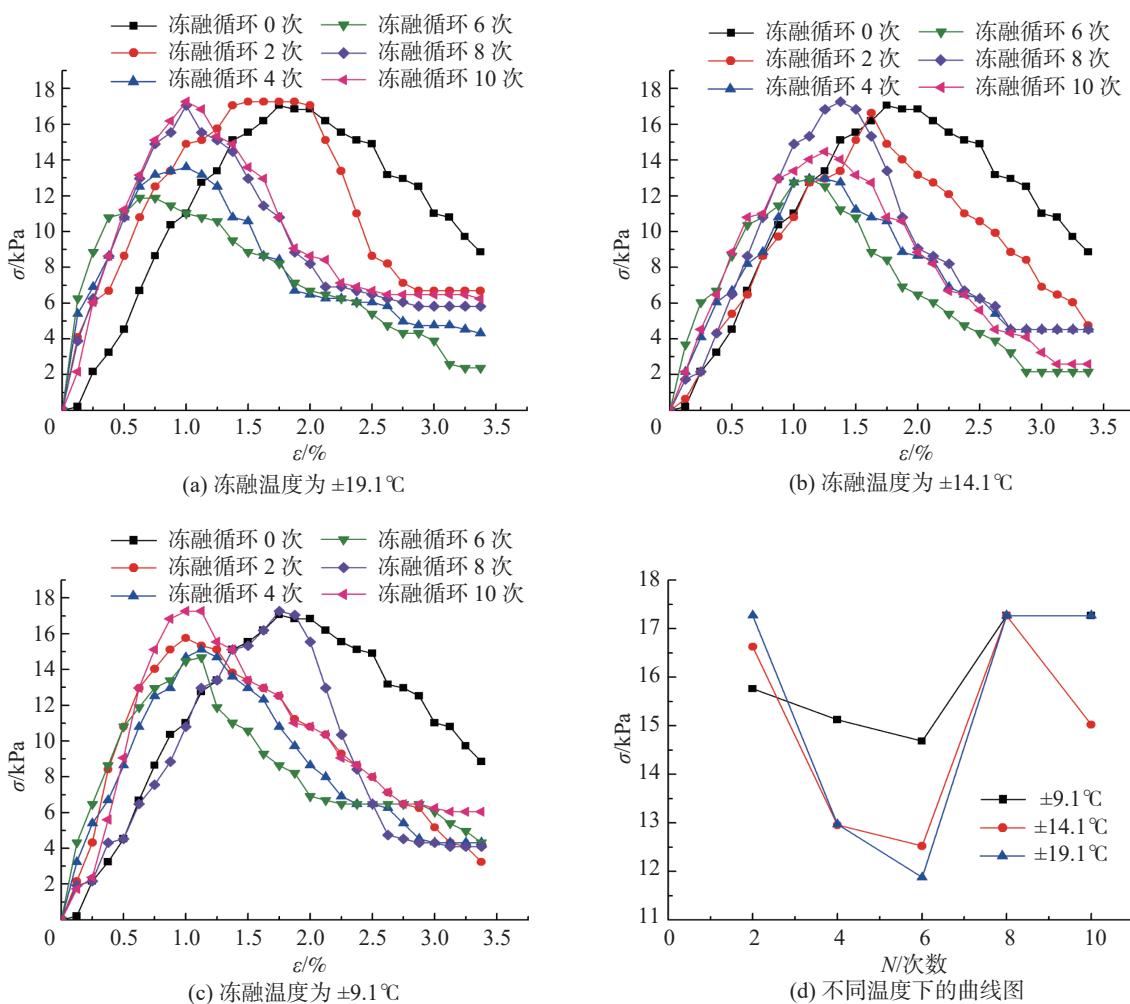


图7 重塑黄土的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of the remolded loess

图7可知,在相同冻融温度下,重塑黄土的无侧限抗压强度与冻融循环次数的变化关系趋势与原状黄土基本一致,均表现出应变软化型。重塑黄土经历0~6次冻融循环后,无侧限抗压强度均随着冻融循环次数的增加而降低,而冻融循环次数达到8~10次时,土样的强度均提高至17 kPa。

如图7(d)所示,重塑黄土的曲线图较原状黄土而言波动变化较大,经过2次冻融循环时冻融温度越低,重塑黄土的强度逐渐增加,比 $\pm 9.1^{\circ}\text{C}$ 时的强度增大约9%,这说明2次冻融循环作用破坏了重塑黄土颗粒骨架,固体颗粒之间的大孔隙被小颗粒填充,重塑黄土的整体连接有所提高,且冻融温度越低,对重塑黄土颗粒在2次循环下的破坏作用越显著。

对于经过4次和6次冻融循环的重塑黄土而言,

冻融温度对强度影响的结果与原状黄土一致,均随冻融温度的降低而降低。经过8次冻融循环后,其强度增大至17 kPa并逐渐稳定。由此可见,冻融温度对原状黄土和重塑黄土的影响有所差异,原状黄土的强度随冻融温度降低而降低且变化幅度较均匀,而重塑黄土的强度值波动幅度随冻融温度的变化较明显。

图8为重塑黄土在 $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$ 下经历不同冻融循环次数的微观图像,由图8(a)~(d)可见,随着冻融循环次数的增加,重塑黄土小颗粒的数量逐渐增加,大孔隙转变为小孔隙,颗粒排列松散,颗粒间的胶结能力减小。由图8(e)(f)可见,经过8次冻融循环后,小颗粒的数量显著增多,使颗粒间的连接紧密,导致结构的整体性增强,这也解释了重塑黄土经历8次循环后其强度逐渐增大的原因。

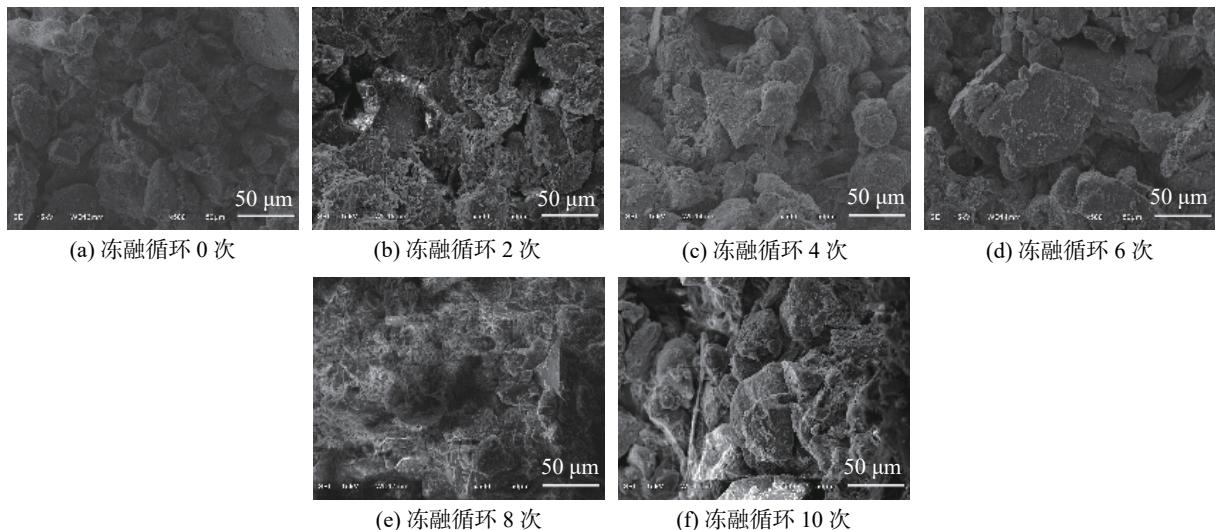


图8 冻融温度为 $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$ 时不同冻融循环次数下重塑黄土的微观图像 ($\times 500$)

Fig. 8 Microscopic images of the reshaped loess under different freezing-thawing cycles at $\pm 19.1^{\circ}\text{C}$ ($\times 500$)

3 结论

(1)随着冻融循环次数的增加,原状黄土和重塑黄土的强度均逐渐下降,但经历8次循环后2种黄土的无侧限抗压强度先增加后基本趋于稳定。

(2)随着冻融温度的降低,原状黄土的无侧限抗压强度也降低,但重塑黄土的无侧限抗压强度变化不均匀,说明温度对重塑黄土的强度影响严重。

(3)冻融温度的降低和冻融循环次数的增加,会使原状黄土和重塑黄土内部的大颗粒逐渐变为小颗粒,小孔隙含量逐渐增大,颗粒排列方式发生变化,黄土结构变得疏松,当经历8次循环后小颗粒含量增多并填充孔隙,使颗粒间排列紧密,连接能力增强。

参考文献 (References) :

- [1] 张吾渝. 黄土工程[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018. [ZHANG Wuyu. Loess engineering[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2018. (in Chinese)]
- [2] 李宝平, 平高权, 张玉, 等. 平面应变条件下冻融循环对黄土力学性质的影响[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-8 [2020-09-17]. [LI Baoping, PING Gaoquan, ZHANG Yu, et al. Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of loess under plane strain[[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-8[2020-09-17]. (in Chinese with English abstract)] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20200423.1009.002.html>.

- [3] 张遂, 匡航, 靳占英, 等. 高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 116 – 124. [ZHANG Sui, KUANG Hang, JIN Zhanying, et al. An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 116 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 周有禄, 武小鹏, 李奋, 等. 冻融循环作用下重塑黄土强度劣化试验研究 [J]. *铁道建筑*, 2018, 58(10): 78 – 80. [ZHOU Youlu, WU Xiaopeng, LI Fen, et al. Experimental study on strength deterioration of remolded loess under freeze-thaw cycles [J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(10): 78 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LI G Y, WANG F, MA W, et al. Variations in strength and deformation of compacted loess exposed to wetting-drying and freeze-thaw cycles [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 151: 159 – 167.
- [6] 柯睿, 汪洪星, 谈云志, 等. 冻融循环对固化淤泥土力学性质的影响 [J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(8): 136 – 139. [KE Rui, WANG Hongxing, TAN Yunzhi, et al. Effect of freeze-thaw cycle on mechanical properties of solidified silt [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(8): 136 – 139. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 崔宏环, 秦晓鹏, 王文涛, 等. 冻融条件下非饱和路基土的强度及微观特性研究 [J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1115 – 1121. [CUI Honghuan, QIN Xiaopeng, WANG Wentao, et al. Study on the strength and microscopic characteristics of unsaturated subgrade soil under freezing-thawing conditions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1115 – 1121. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨更社, 尤梓玉, 吴迪, 等. 冻融环境下原状黄土孔径分布与其力学特性关系的试验研究 [J]. *煤炭工程*, 2019, 51(3): 107 – 112. [YANG Gengshe, YOU Ziyu, WU Di, et al. Experimental study on the relation of undisturbed loess' pore size distribution and mechanical property under freezing-thawing environment [J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(3): 107 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 魏尧, 杨更社, 叶万军. 冻结温度对冻融黄土力学特性的影响规律研究 [J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(8): 61 – 66. [WEI Yao, YANG Gengshe, YE Wanjun. Impact of freezing temperature on mechanical properties of loess under cyclic freezing and thawing [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(8): 61 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 叶万军, 刘宽, 杨更社, 等. 冻融循环作用下黄土抗剪强度劣化试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(3): 313 – 318. [YE Wanjun, LIU Kuan, YANG Gengshe, et al. Experimental study on shear strength deterioration of loess under freeze-thaw cycling [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(3): 313 – 318. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 叶万军, 李长清, 董西好, 等. 冻融环境下黄土微结构损伤识别与宏观力学响应规律研究 [J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 546 – 555. [YE Wanjun, LI Changqing, DONG Xihao, et al. Study on damage identification of loess microstructure and macro mechanical response under freezing and thawing conditions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 546 – 555. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张泽, 周泓, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土的孔隙特征试验 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(3): 839 – 847. [ZHANG Ze, ZHOU Hong, QIN Qi, et al. Experimental study on porosity characteristics of loess under freezing-thawing cycle [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(3): 839 – 847. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 赵鲁庆, 杨更社, 吴迪, 等. 冻融黄土微观结构变化规律及分形特性研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(6): 1680 – 1690. [ZHAO Luqing, YANG Gengshe, WU Di, et al. Micro structure and fractal characteristics loess under freeze-thaw cycles [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(6): 1680 – 1690. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 肖东辉, 冯文杰, 张泽. 冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律 [J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 907 – 912. [XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze. The changing rule of loess 's porosity under freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 907 – 912. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环作用下黄土渗透性与其结构特征关系研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(4): 43 – 49. [XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze, et al. Research on the relationship between permeability and construction feature of loess under the freeze-thaw cycles [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(4): 43 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响 [J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 922 – 927. [NI Wankui, SHI Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 922 – 927. (in Chinese with English abstract)]