

DOI: 10.11779/CJGE2021S1035

# 季冻区黄土微观损伤识别与宏观力学响应研究

刘 宽<sup>1</sup>, 叶万军<sup>1</sup>, 景宏君<sup>1</sup>, 段 旭<sup>1</sup>, 张 吉<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054;2. 中国人民解放军95825部队,湖北 孝感 432011)

**摘要:**针对冻融循环对天然黄土结构性和力学性质的影响,制备不同含水率的原状黄土试样,通过冻融作用下的质子核磁共振(<sup>1</sup>H NMR)测试、扫描电镜(SEM)观测及三轴剪切试验,研究了季冻区黄土微观结构损伤规律与宏观力学响应机制。试验结果表明:土体微观结构受冻融影响显著,孔隙体积、颗粒形状系数均先后出现波动-增长期和平衡-稳定期,孔隙体积在前6次冻融循环期间增幅显著,10次后趋缓;含水率高的试样,冻融前后颗粒形状系数更高;相比冻融循环,试样应力-应变曲线形态更受含水率控制;冻融循环对试样破坏强度的劣化效应很显著,且主要集中在前10次;黏聚力随冻融次数增加呈指数衰减,但整体减幅随含水率增加而降低,内摩擦角则增幅甚微;含水率高的试样,破坏强度和黏聚力衰减至平衡所需的冻融次数均更少;冰水相变引发冻胀应力和水分迁移势反复加载于土骨架,驱动微观结构产生不可逆损伤应是黄土宏观力学性质劣化的潜在机制。

**关键词:**土力学;黄土;冻融循环;微观结构;力学响应

**中图分类号:**TU444      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-4548(2021)S1-0192-06

**作者简介:**刘 宽(1994—),男,博士研究生,从事黄土力学与工程方面的研究工作。E-mail:xust\_liukuan@163.com。

## Microscopic damage identification and macroscopic mechanical response of loess in seasonal frozen areas

LIU Kuan<sup>1</sup>, YE Wan-jun<sup>1</sup>, JING Hong-jun<sup>1</sup>, DUAN Xu<sup>1</sup>, ZHANG Ji<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;2. Chinese People's Liberation Army 95825 Troops, Xiaogan 432011, China)

**Abstract:** Considering the influences of freeze-thaw cycles (FTCs) on the structural and mechanical properties of the natural loess, the intact loess samples with different moisture contents are prepared. The proton nuclear magnetic resonance (<sup>1</sup>H NMR) and the scanning electron microscope (SEM) as well as the triaxial shear tests under FTCs are carried out, and the microstructural damage law and the macroscopic mechanical response mechanism of loess in seasonal frozen regions are studied. The test results indicate that the evolution of the soil microstructure is affected by FTCs significantly. Both the pore volume and the particle shape coefficient go through a fluctuation-growth period and an equilibrium-stable period successively. The pore volume increases markedly during the first six FTCs, and then slows down after ten FTCs. The sample with high water content owns higher particle shape coefficient before and after FTCs. Compared with FTCs, the shape of stress-strain curve is governed by the moisture content more obviously. The degradation effect of FTCs on the failure strength of specimens is prominent, and is mainly embodied in the first ten cycles. The cohesion decreases exponentially with the increase of FTCs, while the overall attenuation amplitude decreases with the increase of water content, and the internal friction angle increases slightly. For the samples with high moisture content, fewer FTCs are required for the failure strength and cohesion tending to equilibrium. The frost-heaving stress and the moisture migration potential caused by phase change between water and ice loading-unloading repeatedly on the soil skeleton, induce the irreversible damage of microstructure, which is the potential mechanism of degradation of macroscopic mechanical properties of loess.

**Key words:** soil mechanics; loess; freeze-thaw cycle; microscopic structure; mechanical response

## 0 引言

黄土独特的松散颗粒及大孔隙特征,造就了其显著的亚稳态结构<sup>[1]</sup>,土体长期处于季节性冻融环境下,力学性质出现劣化,极易酿成地质灾害或工程隐患,其本质与土体微观结构的变化有关<sup>[2]</sup>。因此,开展季冻

区黄土力学性质劣化机制研究时,需重点关注其微观结构的演化。

现阶段,学者们考虑微观结构性对各类土体在冻

基金项目:国家自然科学基金项目(42072319;41672305;41902299)

收稿日期:2020-12-15

表 1 黄土试样物理及矿物指标

Table 1 Physical and mineralogical properties of loess samples

天然含水率/%	天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	液限/%	塑限/%	相对质量密度	矿物成分及占比/%							
						石英	伊利石	绿泥石	高岭石	方解石	长石	白云石	闪石
14.80	1.49	1.08	31.20	20.60	2.71	34	11	14	8	14	12	5	2

融环境下的物理、水理、力学及工程特性进行了许多有益尝试<sup>[2]</sup>。如 Starkloff 等<sup>[3]</sup>对冻融后的挪威粉质及砂质耕植土展开 X 射线断层扫描, 并采用 Image-J 图像处理软件分析了两种土壤孔隙结构演化差异; Liu 等<sup>[4]</sup>借助扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 和压汞技术从微观结构和物化性质等方面分析了冻融对石灰固化盐渍土无侧限抗压强度的影响规律; Ye 等<sup>[5]</sup>基于计算机层析及 SEM 技术, 对黄陵黄土在冻融环境下抗剪强度的劣化机制实现了多尺度研究。

目前, 针对冻融环境下土体宏观物理力学性质的研究多集中于各类试验条件下的客观规律与变形理论<sup>[2]</sup>。如 Konrad<sup>[6]</sup>制备魁北克细粒土的泥浆固结样和传统压实样, 研究了冻融前后土体渗透性的变化规律, 分析了孔隙率、含水率及渗透率之间的关联; Wang 等<sup>[7]</sup>关注季冻区稳定黄土路基破坏现象, 对水泥、石灰、粉煤灰稳定黄土试样进行冻融试验并关注其体积变化, 发现冻融 8 次后, 部分素黄土试样体变过大出现坍塌, 而稳定黄土体变始终较小; 胡再强等<sup>[8]</sup>采集杨凌黄土, 考虑含水率、温度梯度以及冻融次数对季冻区黄土抗剪强度参数的演化机理进行了试验研究。

综上所述, 冻融环境下土体宏-微观物理力学特性的研究逐渐完善, 也取得了不少统一性认知, 为进一步探索土体力学性质的演化机制提供了有益借鉴, 但总体上, 系统关注含水率和冻融循环次数 (freeze-thaw cycles, FTCs), 且着眼于黄土微观结构演化特征探究其宏观力学响应机制的研究报道甚少, 仍亟待开展, 以期为季冻区黄土力学演化认知及生产实践提供理论参考。

鉴于此, 笔者以延安原状黄土为研究背景, 首先制备不同初始含水率的试样并进行冻融循环, 然后分别展开质子核磁共振 (proton nuclear magnetic resonance, <sup>1</sup>H NMR) 和 SEM 测试及三轴抗剪强度试验, 系统研究季冻区黄土微观结构损伤和宏观力学响应规律, 综合分析试验结果, 全面探讨土体在冻融循环效应下微观结构演化过程和宏观力学响应机制。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验材料

土样取自延安市某基坑 (36°38'19"N, 109°29'33"E), 取土深度 1.5~2.0 m, 属于 Q<sub>3</sub> 黄土, 据历年地温资料,

土体埋深位于当地最大冻结深度 (90 cm) 以下。土样基本物理性质及矿物成分归纳于表 1, 结合其颗粒级配特性 (粉粒 53.15%, 砂粒 16.35%, 黏粒 30.50%), 综合判定所取土壤为粉质黄土。

### 1.2 试验方案

#### (1) 试样制备与冻融循环试验

据取样地水分监测资料, 配制初始含水率分别为 14%, 18%, 22% 的较大土样 ( $\phi 61.8 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ ), 养护 48 h 待其内部水分扩散均匀后将其削制为标准三轴 ( $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ) 试样 2 组、环刀 ( $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ) 试样 1 组, 其中三轴试样组每个含水率包含 12 个土样, 环刀试样组每个含水率 3 个土样, 最后用保鲜膜密封。

将密封的试样放置瑞尔 RTP-175BU 型高低温试验箱内, 模拟多项封闭冻融环境, 参考取样地历年地温资料, 设定冻、融温度分别为 -15 °C, 15 °C, 单次冻融周期为 24 h, 即冻结 12 h, 融化 12 h, 依次冻融循环 0, 1, 3, 6, 10 和 15 次。

#### (2) 微观结构测试

①<sup>1</sup>H NMR 测试:<sup>1</sup>H NMR 的原理是测量当样品处于射频磁场中时质子从磁场所吸收的能量<sup>[9]</sup>, 该方法也适用于土中赋水孔隙的量测<sup>[10]</sup>。首先对各组冻融后的样品进行真空饱和。而后, 采用纽迈科技 MacroMR12-150H-I 型核磁共振测试仪对 1 组历经数次冻融循环的三轴试样展开弛豫时间的测试, 得到试样孔隙水  $T_2$  氢谱, 分析土体孔隙结构演化特性, 方法如下:

为实现孔隙结构定量研究, 参考已有黄土孔隙划分经验<sup>[5]</sup>, 将土样孔隙按其等效直径分为 4 类, 即微孔 ( $d < 5 \mu\text{m}$ )、小孔 ( $5 \leq d < 10 \mu\text{m}$ )、介孔 ( $10 \leq d < 20 \mu\text{m}$ ) 和大孔 ( $d \geq 20 \mu\text{m}$ )。天然岩土材料, 孔隙直径  $d$  与其内部孔隙水的弛豫时间  $T_2$  满足<sup>[10]</sup>

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} \approx \rho_2 \frac{2F_s}{d} \quad (1)$$

式中,  $\rho_2$  为横向弛豫速率, 对于天然多孔介质, 取值范围为 1~10  $\mu\text{m}/\text{s}$ <sup>[11]</sup>, 黄土取  $\rho_2 = 3.0 \mu\text{m}/\text{s}$ <sup>[12]</sup>;  $S/V$  为赋水孔隙的表面积与体积之比;  $F_s$  为孔隙形状因子, 研究假定黄土孔隙为圆柱形, 故  $F_s = 2$ 。

②SEM 测试: 待历经冻融循环后的环刀试样彻底风干 (14 d), 参照文献[13], 制得 SEM 样品, 对扫描面

喷金后采用 JEOL JSM-6390A 型扫描电子显微镜, 拍摄土体微观图像, 借助 Image-J 软件对 500 倍的微观图像进行预处理, 然后识别并提取土体微观几何参数<sup>[3, 13]</sup>, 重点评估土体颗粒形状系数的变化, 计算需引入土颗粒圆形度和凹凸度, 其计算式分别为

$$F_a = \frac{A_f}{A_s}, \quad (2)$$

$$F_b = \sqrt[3]{(I \times B) / L^2}. \quad (3)$$

式中,  $F_a$  为颗粒圆形度;  $A_f$  为所研究颗粒的最大内接圆面积;  $A_s$  为与研究颗粒投影轮廓同周长的圆面积<sup>[14]</sup>;  $F_b$  为颗粒凹凸度;  $L, I, B$  分别代表颗粒长轴、中长轴、短轴长度。因此, 土颗粒形状系数可进一步表示为

$$F = \alpha F_a + \beta F_b. \quad (4)$$

式中,  $F$  为颗粒形状系数,  $\alpha, \beta$  分别为颗粒圆形度和凹凸度所对应的加权系数, 假设颗粒变形过程中转动与平移所占分量相同, 则  $\alpha$  和  $\beta$  均取 0.5。

### (3) 三轴抗剪强度试验

选取同一含水率、历经相同次数冻融循环的 4 枚三轴试样, 采用 Wille-Geotechnik LO7010/5DYN 型三轴仪, 展开各级围压(50, 100, 150, 200 kPa)下的固结不排水剪切试验, 剪切速率为 0.033 mm/min, 当轴向应变达到 16% 时, 结束试验。每级冻融循环进行 3 组平行试验, 记取平均值。校核所得应力-应变曲线, 测记偏应力峰值, 对于硬化型曲线, 取 15% 应变所对应的偏应力, 继而分析破坏强度演化规律, 结合 Mohr-Coulomb 准则评估试样抗剪强度参数的变化趋势。

## 2 试验结果

### 2.1 土体微观结构的冻融效应

#### (1) 孔隙结构特征

由于篇幅所限, 现仅给出部分试样( $w = 18\%$ )的<sup>1</sup>H NMR 测试结果, 详见图 1, 由图 1 可知, 土样历经数次冻融循环后, 其  $T_2$  氢谱整体上呈多峰态分布, 包含 1 个主峰 2 个次峰。其次, 各谱线的主峰与次峰峰值点随冻融次数的增加均呈上移趋势, 且主峰上移幅度较次峰显著。冻融循环 6 次后, 主峰出现了首个较大的上移幅值, 随后在 10 次冻融循环后, 出现了第二个上移幅值, 但较首个弱。此外, 值得注意的是随着冻融次数的增多, 试样氢谱存在轻幅右移趋势。考虑  $T_2$  值与孔径尺寸成正比, 且  $T_2$  氢谱的积分总面积反映了土体内水分总量(赋水孔隙总体积)<sup>[13]</sup>, 因此可推断冻融循环后土样孔隙体积提升显著。

图 2 为试样( $w = 18\%$ )各尺寸孔隙体积平均含量与冻融循环次数的关系曲线, 由图 2 可知, 随着冻融周

期的增加, 微孔隙在首个冻融期间有所增加, 随后在 10 次冻融循环后趋向平衡; 小孔在首次冻融循环后呈小幅波动性增加, 之后呈减少趋势, 且减幅较初始增幅显著; 大孔在前 3 次冻融期间减幅较大, 持续冻融转变为轻幅增加; 介孔仅在前 3 次冻融期间增幅较为显著, 随后就进入缓慢增加阶段, 直到 10 次冻融循环后步入动态平衡。可见, 土体孔隙在一定次数的冻融作用下, 由波动—调节状态向平衡—稳定状态过渡。

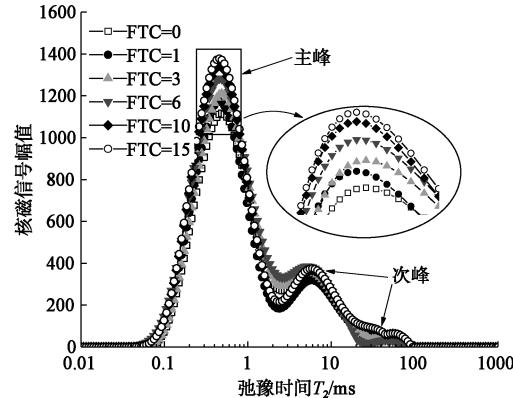


图 1 冻融循环下试样  $T_2$  氢谱( $w = 18\%$ )

Fig. 1  $T_2$  hydrogen spectrum of samples under freeze-thaw cycles ( $w = 18\%$ )

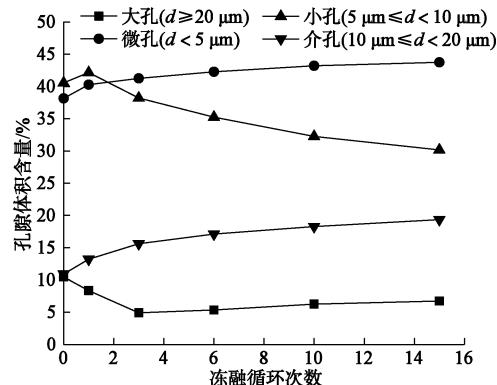


图 2 冻融循环下土样孔隙含量分布

Fig. 2 Distribution of pore content of soil samples under freeze-thaw cycles

#### (2) 颗粒结构特征

图 3 为不同含水率试样颗粒形状系数随冻融次数的演化曲线, 由图 3 可知, 各组试样的颗粒形状系数整体上随冻融次数的增加呈先小幅增加再稳定的趋势。此外, 值得注意的是各组试样的颗粒形状系数在首个冻融循环后均出现轻幅减小趋势。对于含水率偏低的试样( $w = 14\%$  和  $w = 18\%$ ), 颗粒形状系数在前 6 次冻融期间增幅显著, 随后稳定, 但数值上整体增幅甚微, 以  $w = 18\%$  试样为例, 其颗粒形状系数整体上仅增加了 0.087。此外, 对比可知, 含水率高的试样( $w = 22\%$ ), 颗粒形状系数在冻融始末数值均更大, 且需要更少的冻融循环(3 次)便可增至平衡。

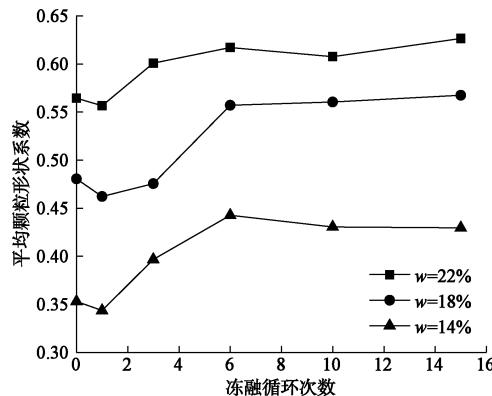


图 3 冻融循环下土样颗粒形状系数分布曲线

Fig. 3 Distribution of particle shape coefficients of soil samples under freeze-thaw cycles

## 2.2 冻融效应下土体宏观力学响应

### (1) 应力-应变曲线

图 4 反映了含水率、冻融循环次数对土体应力-应变曲线的影响趋势。由图 4(a)可知,低围压(50 kPa)且未冻融时,试样含水率增加,应力-应变曲线由弱应变软化型向应变硬化型调整,冻融 6 次后,各含水率试样应力-应变曲线均呈应变硬化型,且硬化幅度随含水率的增加而减小。可见,相比冻融循环,黄土应力-应变曲线形态更受初始含水率控制。此外,冻融作用下,样品达到相同轴向应变所对应的主应力差不断减小。可见,土体力学性能弱化效应显著,且主要集中在前 6 次冻融循环,10 次后渐趋平衡。

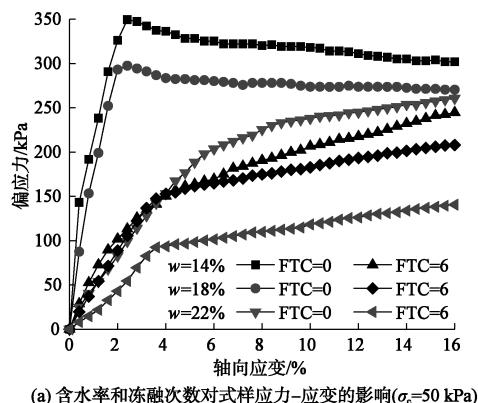
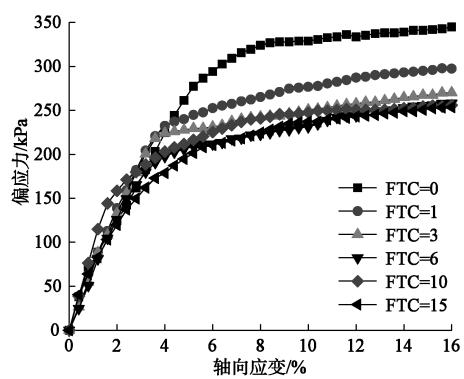
(a) 含水率和冻融次数对式样应力-应变的影响( $\sigma_c=50 \text{ kPa}$ )(b) 冻融循环次数对式样应力-应变的影响( $\sigma_c=50 \text{ kPa}, w=18\%$ )

图 4 冻融循环下试样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of samples under freeze-thaw cycles

### (2) 破坏强度

各含水率试样破坏强度( $\sigma_c = 100 \text{ kPa}$ )随冻融循环次数的演化曲线如图 5 所示。由图可知,冻融作用对各组含水率试样破坏强度的劣化效应非常显著,且演化趋势较为相似,可粗略将其划分为骤减期、缓减期和平衡期,但各组样品破坏强度衰减至平衡期所需的冻融次数并不一致。定量分析可知,初始含水率为 14% ,18% 和 22% 的试样在整个冻融循环期间破坏强度的损失(较初值之差除以初值)分别为 28.30% ,26.47% ,23.30% 。此外,对于含水率最高( $w = 22\%$ )的样品,经历 3 次冻融后破坏强度衰减至稳定,而含水率最低( $w = 14\%$ )的样品需要 6 次。由此可见,在最初的 3 次冻融循环中,土体初始含水率越高,破坏强度的劣化效应越剧烈,但整个冻融期间,含水率越低的样品破坏强度的劣化幅度反而更大。

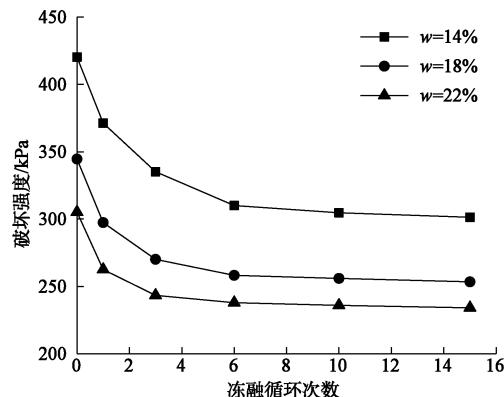
图 5 冻融循环下试样破坏强度演化曲线( $\sigma_c = 100 \text{ kPa}$ )

Fig. 5 Evolution of failure strength of samples under freeze-thaw cycles ( $\sigma_c = 100 \text{ kPa}$ )

### (3) 抗剪强度参数

图 6 为试样( $w = 18\%$  和  $w = 22\%$ )黏聚力及内摩擦角随冻融次数的关系曲线。由图可知,随着冻融次数增加,黏聚力基本呈指数趋势衰减,且在一定次数冻融循环后趋于稳定。但随着试样含水率的增加,黏聚力衰减至平衡所需的冻融次数相对更少,这与前述

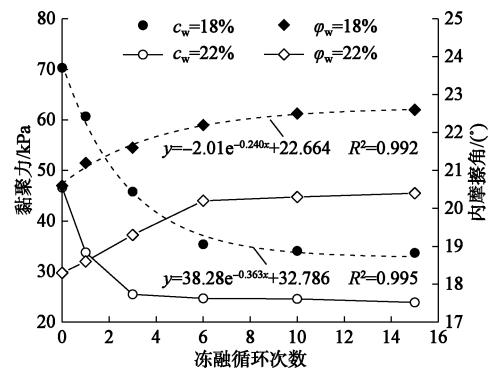


图 6 冻融循环下土体黏聚力和内摩擦角演化曲线

Fig. 6 Evolution of soil cohesion and internal friction angle under freeze-thaw cycles

试样破坏强度的衰减趋势比较相似,如含水率分别为18%,22%的试样在前3次冻融期间,黏聚力损失分别为34.85%,45.28%,而6次冻融循环后,前者损失49.64%,后者损失47.21%,可见,含水率高的试样,其黏聚力在冻融循环初期(前3次)更敏感,而含水率较低的试样,在整个冻融期间黏聚力损失更显著,衰减至稳定所需的冻融次数也更多。

### 3 机制探讨

冻结时,土体内水分相变成冰会带来约9%的体积增加量,这源自水的摩尔体积凝固膨胀。但更多的冻胀来自未冻水补给至冻结面形成的冷生组织(如冰透镜体,ice lenses)对周围土颗粒或孔隙产生的挤压<sup>[15]</sup>,由于土体各矿物粒径和硬度的不均匀性,会阻碍其冻胀挤压路径而伴生张拉应力,使得其内部微孔体积增大(见图1)。同时,温度升降带来反复的水分迁移和重分布会对孔隙内壁产生冲刷和磨蚀<sup>[5]</sup>,使得局部小孔贯通成较大一级的孔隙(见图7),促进介孔含量增加(见图2)。融化时,增加的液相水会对前述冷生组织挤压形成的次生颗粒产生分解,使得土样内孔隙也相应的缩小一级,但冻融循环带来的这两种效应并非完全可逆,因此各尺寸孔隙含量也在数次冻融循环调节后趋于互馈平衡状态(见图2)。此外,水分迁移势和冻胀应力还会使土体内原本粗糙的颗粒轮廓趋于平滑,但经历多次冻融之后,形态复杂的集粒反复聚散,颗粒接触形式由原本的嵌埋-架空状变得破碎,颗粒形态受到改造,持续冻融循环,这一改造效应不再显著,颗粒形状系数也相应地由波动性增加转向平衡(见图3)。

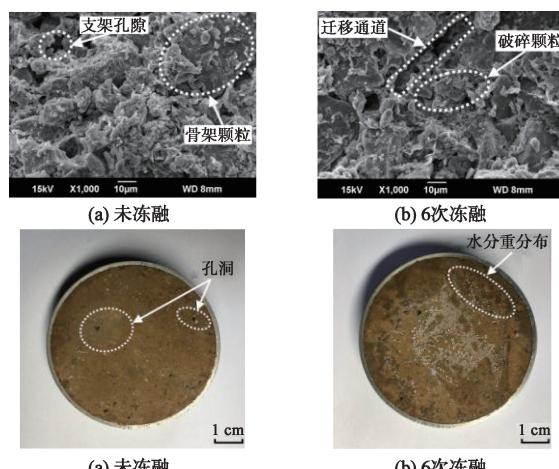


图7 冻融循环下样品微观结构与表现冻结效应照片

Fig. 7 Photos of microstructure and apparent freezing effects of samples under freeze-thaw cycles

土体的黏聚力主要由粒间引力产生的原始黏聚力和微观结构之间的固化黏聚力组成<sup>[13]</sup>。前述的微观

结构损伤反映在宏观层面即为试样表观孔隙增多、析冰效应加剧及完整度退化(见图7),加之土体内较大的骨架颗粒持续分解成次一级颗粒,粒间原始黏聚力减弱。同时,水分迁移势也会促进构成土体胶结强度的易溶盐水解,直接弱化结构间固化黏聚力,在这两个机制共同效应下,黏聚力显著衰减(见图6)。对于含水率较高的试样,其自身初始结构性差,初始黏聚力低,因而其黏聚力只需较少的损失就可劣化至极限。此外,反复的冻融会引起土颗粒破碎、穿插,形成接触点更复杂的次生颗粒,颗粒(孔隙)间摩擦效应得以提升,继而内摩擦角也呈小幅增加趋势(见图6)。

综上所述,归纳季冻区黄土宏观力学响应的潜在微观机理,即冻融环境下,土体内冰水反复相变诱发冻胀应力、迁移势,反复加卸载于土体微观结构,驱动土骨架产生不可逆疲劳损伤,促使土体结构疏松、完整度退化、力学性能降低。

### 4 结 论

(1) 冻融环境下,黄土微观结构指标变化显著,但经历数次冻融循环调节后趋于平衡状态。试样孔隙体积在前6次冻融期间增幅显著,10次后稳定。颗粒形状系数均随冻融次数的增加而增大,且含水率高的试样颗粒形状系数更大,增加至平衡所需的冻融循环次数更少。

(2) 黄土应力-应变曲线形态最受含水率控制,冻融循环对其影响相对有限。冻融循环对黄土破坏强度的劣化效应很显著,但主要集中在前6次,10次后趋缓。前3次冻融期间,含水率越高,试样破坏强度劣化越剧烈,但整个冻融期间,含水率越低,试样破坏强度的劣化幅度反而更大。

(3) 天然黄土黏聚力随冻融次数的增加呈指数形式衰减,但经历一定次数冻融后趋稳,含水率低的试样,黏聚力损失更显著,衰减至平衡所需的冻融次数更多,而含水率高的试样,黏聚力损失较低,衰减至平衡所需的冻融次数也更少。内摩擦角随冻融次数的增加稍有强化,但增幅甚微。

(4) 冻融环境下,土体内冰水相变和运移产生反复的冻胀应力和迁移势,驱动土体微观结构形成不可逆损伤是其宏观力学性能劣化的潜在机制。

### 参考文献:

- [1] 谢定义,邢义川. 黄土土力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2016. (XIE Ding-yi, XING Yi-chuan. Soil Mechanics for Loess Soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese))
- [2] QI J L, VERMEER P A, CHENG G D. A review of the

- influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, **17**(3): 245–252.
- [3] STARKLOFF T, LARSBO M, STOLTE J, et al. Quantifying the impact of a succession of freezing-thawing cycles on the pore network of a silty clay loam and a loamy sand topsoil using X-ray tomography [J]. *Catena*, 2017, **156**: 365–374.
- [4] LIU Y W, WANG Q, LIU S W, et al. Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, **161**: 32–42.
- [5] YE W J, LI C Q. The consequences of changes in the structure of loess as a result of cyclic freezing and thawing [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, **78**(3): 2125–2138.
- [6] KONRAD J M. Hydraulic conductivity changes of a low-plasticity till subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(9): 679–690.
- [7] WANG S L, LV Q F, BAAJ H. Volume change behaviour and microstructure of stabilized loess under cyclic freeze-thaw conditions [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2016, **43**(10): 865–874.
- [8] 胡再强, 刘 寅, 李宏儒. 冻融循环作用对黄土强度影响的试验研究 [J]. *水利学报*, 2014, **45**(增刊 2): 14–18. (HU Zai-qiang, LIU Yin, LI Hong-ru, et al. Influence of freezing-thawing cycles on strength of loess [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **45**(S2): 14–18. (in Chinese))
- [9] SARAF D N, FATT I. Effect of Electrolytes on moisture determination by nuclear magnetic resonance [J]. *Nature*, 1967, **214**: 1219–1220.
- [10] MEYER M, BUCHMANN C, SCHAUMANN G E. Determination of quantitative pore-size distribution of soils with <sup>1</sup>H NMR relaxometry [J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**(3): 393–406.
- [11] ANOVITZ L M, COLE D R. Characterization and analysis of porosity and pore structures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2015, **80**(1): 61–164.
- [12] JAEGER F, GROHMANN E, SCHAUMANN G E. <sup>1</sup>H NMR relaxometry in natural humous soil samples: Insights in microbial effects on relaxation time distributions [J]. *Plant and Soil*, 2006, **280**: 209–222.
- [13] 刘 宽, 叶万军, 高海军, 等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(10): 2148–2159. (LIU Kuan, YE Wan-jun, GAO hai-jun, et al. Multi-scale effects of mechanical properties degradation of expansive soil under drying-wetting environment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(10): 2148–2159. (in Chinese))
- [14] 孔 亮, 彭 仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(10): 2112–2119. (KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(10): 2112–2119. (in Chinese))
- [15] REMPEL A W, WETTLAUFER J S, WORSTER M G. Premelting dynamics in a continuum model of frost heave [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, **498**: 227–244.

(编校:孙振远)