

DOI: 10.11779/CJGE202009008

Na₂SO₄盐渍原状黄土冻融过程劣化特性试验研究

许健^{1,2}, 张明辉¹, 李彦锋¹, 武智鹏¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 选取西安 Q₃ 原状黄土, 人工制备不同 Na₂SO₄ 含量的盐渍原状黄土试样。通过冻融作用下的三轴剪切及 CT 扫描试验, 研究了 Na₂SO₄ 盐渍原状黄土冻融过程劣化规律及微观结构损伤演化机制。结果表明: 冻融作用对应力-应变曲线的类型及特征无明显影响, 均表现为应变硬化型。破坏偏应力随冻融次数增加逐渐减小, 但衰减速率逐渐减小, 表现出减速劣化特征; 冻融条件下破坏偏应力随着含盐量增加逐渐减小, 且表现出线性或加速劣化特征。黏聚力呈现与破坏偏应力相似的劣化特征; 内摩擦角变化幅值较小且无明显规律。冻融与盐蚀劣化因子的比值随冻融次数增加逐渐增大但增速逐渐减小, 随含盐量增大逐渐减小且衰减速率逐渐减小。CT 数 ME 值呈现与破坏偏应力和黏聚力相似的劣化规律; 构建了 CT 细观损伤变量演化方程, 可较好预测试样冻融过程细观结构损伤演化规律。宏细观损伤变量表现出一致的变化规律, 表明 CT 细观结构损伤变量准确揭示了宏观三轴剪切强度指标的劣化机理。

关键词: 硫酸钠; 盐渍原状黄土; 冻融作用; 三轴剪切试验; CT 扫描

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)09-1642-09

作者简介: 许健(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊土与环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: xujian@xauat.edu.cn。

Experimental study on deterioration behavior of saline undisturbed loess with sodium sulphate under freeze-thaw action

XU Jian^{1,2}, ZHANG Ming-hui¹, LI Yan-feng¹, WU Zhi-peng¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Xi'an Q₃ undisturbed loess was chosen to artificially prepare saline undisturbed loess specimens with different gradients of sodium sulphate content. The triaxial shear and CT scanning tests under freeze-thaw action are then conducted to study deterioration behavior and damage mechanism of microstructure of the saline undisturbed loess with sodium sulphate. The results show that the freeze-thaw action has no obvious effect on the type of stress-strain curves, which constantly present characteristics of strain hardening. The failure deviator stress decreases with the increasing number of freeze-thaw cycles while the attenuation rate gradually declines, indicating that freeze-thaw action results in weakening deterioration rate. Moreover, the failure deviator stress experiences a linear or growing decline rate at higher salt content, demonstrating that salt erosion leads to linear or strengthening deterioration rate. The cohesion exhibits the similar characteristics of deterioration with the failure deviator stress. The internal friction angle shows a little variation and no explicit regularity. The ratio of freeze-thaw deterioration factor to that for salt erosion increases with a growing number of freeze-thaw cycles, while its growth rate declines. In addition, the ratio decreases with higher salt content and its attenuation rate also declines. The ME value of CT scanning presents the similar variation with failure deviator stress and cohesion. A formula for microscopic damage variable is then established, and can well predict the damage rules of microstructure of specimens under freeze-thaw action. Both the macroscopic and microscopic damage variables show the consistent variation, indicating that microscopic damage variable well reveals the deterioration mechanism of triaxial shear strength indexes.

Key words: sodium sulphate; saline undisturbed loess; freeze-thaw action; triaxial shear test; CT scanning

0 引言

黄土是指在第四纪地质时代中以风力作用形成的黄色粉土沉积物, 是一种在特定环境中形成的具有特

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878551, 51478385); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201312)

收稿日期: 2019-09-03

殊性质的土。由于黄土地区处于季节冻土区, 黄土受季节性冻融作用的影响显著, 每年春季发生的冻融灾害非常频繁。此外, 对于盐蚀作用诱发的黄土边坡剥落等病害也不容忽视。笔者对陕北黄土高原区边坡盐蚀剥落病害进行了实地调研, 每处调研点由表及里 (0~30 cm) 每隔 5 cm 取一份土样, 用于室内易溶盐分析试验。试验结果表明, 边坡表层主要富集 Na_2SO_4 等易溶盐, 在冻融循环等条件下极易发生反复溶解和结晶的盐蚀作用, 使被侵蚀黄土结构损伤扩展, 劣化破坏, 从而诱发边坡盐蚀剥落病害^[1]。因此, 开展冻融环境下含盐黄土的盐蚀劣化研究具有重要意义。

目前关于冻融循环作用对盐渍土物理力学性质的影响研究已有大量文献资料。高江平^[2]系统开展了盐渍土冻胀、盐胀机理的试验与数值仿真研究工作。李振等^[3]以某干渠渠基盐渍土为研究对象, 研究了冻胀量与各影响因素之间的变化规律。牛玺荣等^[4]推求了考虑冻胀和盐胀耦合作用下硫酸盐渍土体积变化模型并采用自行研制的试验系统对模型进行了验证。黄雪峰等^[5]基于室内单次降温试验, 对宁夏扶贫扬黄灌溉工程沿线硫酸盐渍土盐胀特性及影响因素进行了试验研究。张莎莎等^[6]开展了多因素交互作用下砾类亚硫酸盐渍土的盐胀试验并建立了其盐胀率简化预测模型。此外, 部分学者对冻融作用下黄土强度变形特性进行了研究。胡再强等^[7]探讨了冻融循环条件下杨凌重塑黄土强度变化规律并构建了其强度劣化系数拟合方程。谷琪等^[8]探究了冻融循环过程中湿陷性黄土的变形及湿陷情况。然而关于冻融作用对含盐原状黄土影响的研究较少, 含盐量、冻融循环次数及其耦合效应导致土体强度衰减程度的定量化关系尚不明确。

研究学者对黄土及盐渍土微细观结构演化规律亦开展了大量研究工作。陈正汉等^[9]结合 CT 技术和三轴剪切设备, 系统研究了黄土在多种应力路径及浸水湿陷过程中的细观结构演化特性并进一步基于 CT 数据构建了其细观结构演化方程。张伟等^[10]基于 CT-三轴剪切试验, 探究了剪切过程中硫酸盐渍土的应力应变关系和 CT 图像及 CT 数的变化规律。叶万军等^[11]研究了冻融环境下黄土体结构在不同观测尺度下的损伤演变规律。但关于冻融作用下盐渍原状黄土微结构损伤扩展演化模式的研究尚未见有专门研究报道。

盐渍原状黄土是一种具有典型天然结构强度的特殊土, 冻融循环作用对其结构强度影响较大。基于此, 本文选取西安 Q_3 原状黄土, 人工制备不同 Na_2SO_4 含量的盐渍原状黄土试样, 通过冻融循环条件下的三轴剪切及 CT 扫描试验, 研究 Na_2SO_4 盐渍原状黄土冻融过程盐蚀劣化规律及微细观结构损伤演化机制。研究

成果对探究黄土盐蚀作用诱发边坡剥落等病害的成灾机理具有重要的参考意义。

1 试验材料与试样制备

1.1 试验黄土

试验黄土为取自陕西西安某基坑的 Q_3 原状黄土, 基坑深度为 10 m, 取样深度为 8~10 m。原状土样用削土刀在基坑侧壁上刻取。按照 GB/T50123—2019《土工试验方法标准》对原状土样进行基本物理性质分析, 结果如表 1 所示。试样粒组含量: >0.05 mm(5%), 0.01~0.05 mm(52%), 0.005~0.01 mm(24%), <0.005 mm(19%)。

表 1 试样物理性质指标

| Table 1 Physical properties of undisturbed loess | | | | | |
|--|--|---------|-------------|-------------|------------|
| 土粒相对密度 G_s | 干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 孔隙比 e | 液限 $w_l/\%$ | 塑限 $w_p/\%$ | 塑性指数 I_p |
| 2.70 | 1.42 | 0.92 | 34.3 | 19.6 | 14.7 |

1.2 试样制备

三轴剪切和 CT 扫描试样尺寸相同, 均削制成直径 39.1 mm、高度 80 mm 的标准圆柱试样。然后通过向原状土样中浸入不同浓度的 Na_2SO_4 盐水来人工制备含水率 w 为 20%, Na_2SO_4 含量 η 分别为 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% 的盐渍原状黄土试样。关于人工制备盐渍原状黄土试样的方法, 其具体操作流程参见笔者已发表相关文献^[12], 在此不再赘述。为进一步验证上述方法的制样效果, 特选取 3 个制备好的标准圆柱试样, 其编号分别为 T-1 ($w=20\%$, $\eta=0.5\%$)、T-2 ($w=20\%$, $\eta=1.0\%$)、T-3 ($w=20\%$, $\eta=1.5\%$)。将每一个标准试样均等分成 4 块 20 mm 高的小圆柱体, 以代表试样的 4 个不同位置, 其编号依次为 1, 2, 3, 4。然后分别测定每个小圆柱体试块的含水率和含盐量, 试验结果如图 1 所示。由图 1 可见, 试样不同部位含水率和含盐量变化曲线平缓, 趋于一条直线, 即试样内部含水率和含盐量的分布较为均匀。此外, 试样不同部位的含水率和含盐量与目标值基本一致, 因而人工制备盐渍原状黄土试样的方法可以满足试验要求。

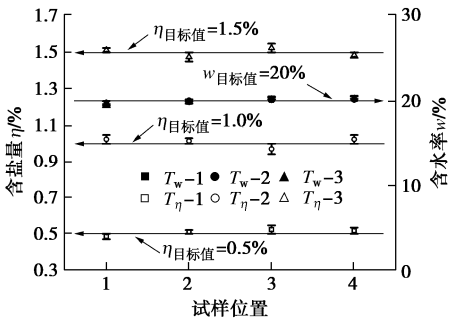


图 1 试样含水率及含盐量分布

Fig. 1 Water and salt profiles for standard specimens

2 试验方案

2.1 冻融试验

利用保鲜膜将制备好的含盐原状试样包裹, 构成一个不补(散)水的密封环境, 随后放入高低温试验箱进行冻融循环试验。由于三轴试样尺寸较小, 土样端部和侧面换热条件虽有所差异, 但影响不大。因此本次冻融循环试验为封闭系统下的多向快速冻融循环试验, 以保证冻融时试样水分迁移较少。

图2所示为陕北榆林和延安地区近十年月平均最低气温变化曲线。从图中可以看出, 环境温度变化区间在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间, 因此以当地最低气温(约 -20°C)为冻结温度, 最高气温(约 20°C)为融化温度, 进行冻融循环试验。试验方案如下: 为保证试样充分冻融, 低温 -20°C 条件下冻结12 h, 高温 20°C 条件下融化12 h, 即一个冻融循环为24 h; 冻融循环次数 N 分别为0, 1, 2, 5, 10。

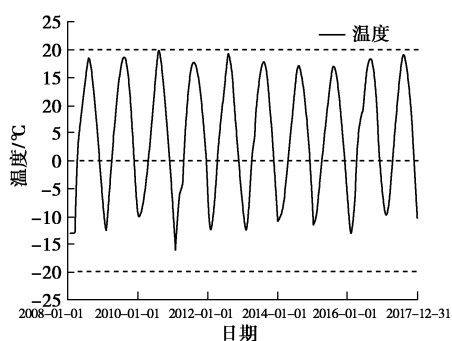


图2 榆林和延安地区月平均最低气温变化曲线

Fig. 2 Curves of meteorological data for Yulin and Yan'an

2.2 三轴剪切试验

试样经受不同冻融循环次数后, 为避免排水固结对冻融损伤后试样结构状态扰动, 进行不固结不排水(UU)三轴剪切试验。试验过程中剪切速率设定为 0.4 mm/min ; 考虑到盐渍原状黄土试样浅层分布特点, 其侧向压力相对较小, 因而三轴剪切试验采用较低围压, 分别为50, 100, 150, 200 kPa。剪切过程中若应力-应变关系表现为有峰值的软化型曲线, 当峰值后轴向应变达到3%~5%时, 结束试验; 反之, 若应力-应变关系表现为应变硬化型曲线, 则以轴向应变达到15%作为剪切终止条件。

2.3 CT扫描试验

CT试验采用Brilliance 16螺旋CT机, 其空间分辨率为 0.208 mm , CT值范围为 $-1024 \sim +3071$ 。试验时将经受不同冻融循环次数的含盐原状黄土试样每次扫描3个断面, 每个断面之间均间隔 20 mm , 3个断面从土样底部到顶部依次标记为 a , b , c 截面。通过

CT扫描得到试样的细观结构图像, 然后根据CT成像原理, 基于物质吸收系数运算可以得到材料内部任意一点的CT数, 进一步统计分析可以获得图像任意一个区域CT数均值ME。ME值体现扫描断面内所有物质点的平均密度, 密度越小则试样ME值越小, 因而其数值变化可以反映试样内部损伤扩展过程^[13]。

3 试验结果与分析

3.1 三轴试验结果分析

(1) 应力-应变关系曲线

图3所示为试样应力-应变曲线变化规律。从图中可以看出, 冻融循环过程对黄土试样应力-应变曲线的类型及特征无明显影响, 冻融循环前后均表现为应变硬化型。此外, 相同冻融循环次数条件下, 含盐量变化对应力-应变曲线的变化特征亦无显著影响, 亦均表现为“硬化型”的变化趋势。

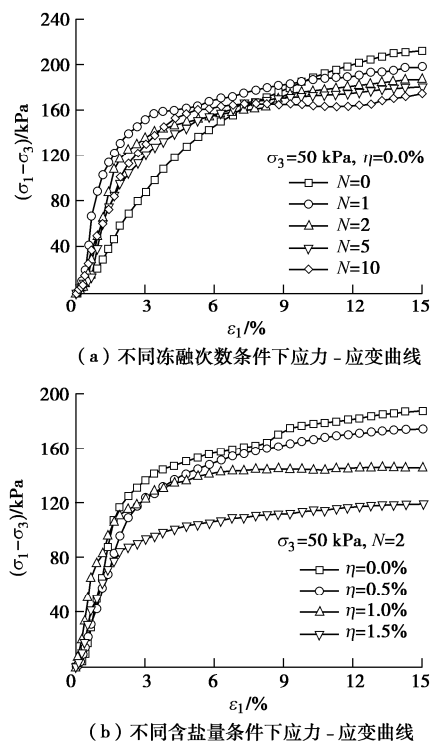


图3 冻融作用下试样应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under freeze-thaw action

为深入揭示冻融条件下 Na_2SO_4 盐渍原状黄土强度劣化特性, 取轴向应变 ϵ_1 为15%时的偏应力作为破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 亦即试样的强度值, 如图4所示。从图中可以看出, 冻融循环对强度产生明显的劣化效应, 破坏偏应力随着冻融循环次数增加逐渐减小, 但降低速率逐渐减小, 表现出显著的减速劣化特征; 冻融条件下 Na_2SO_4 含量亦对强度产生显著的盐蚀劣化效应, 破坏偏应力随着含盐量增加逐渐减小, 且呈现显著的线性或加速劣化特征。

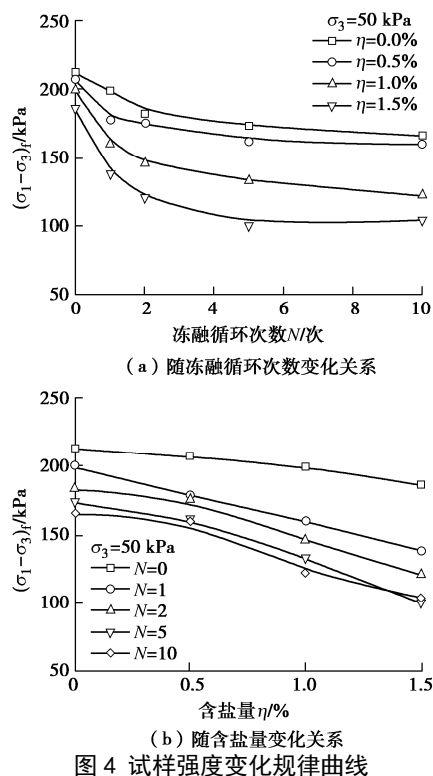


图 4 试样强度变化规律曲线

Fig. 4 Variation of strength of specimens

(2) 黏聚力

图 5 (a) 所示为黏聚力随冻融循环次数变化规律曲线。由图可见, 随着冻融循环次数增加, 黏聚力逐渐减小, 但衰减主要集中在前 5 次冻融循环, 之后逐渐趋于稳定, 表现出减速劣化特征, 这与前述三轴破坏偏应力随冻融循环次数的劣化规律是一致的 (图 4 (a))。分析其原因, 冻融循环作用下孔隙水相态变化对土颗粒产生挤压力, 破坏了土颗粒之间的原生结构强度, 导致黏聚力降低。多次冻融循环条件下土颗粒排列趋于平衡状态, 颗粒联结强度达到稳定残余强度, 黏聚力亦趋于稳定。

黏聚力随含盐量变化规律曲线如图 5 (b) 所示。从图中可以看出, 除了未经受冻融循环 ($N=0$) 试样的黏聚力随含盐量增加无明显变化外, 其它试样的黏聚力均随含盐量的增加逐渐减小, 且衰减速率逐渐增大, 表现出加速劣化特征, 这亦与前述三轴破坏偏应力随含盐量的劣化特性表现出了很好的一致性 (图 4 (b))。分析其原因, 冻融循环条件下试样内部 Na₂SO₄ 可溶盐的结晶—溶解—重结晶过程的反复盐蚀作用使得黄土体结构受到破坏并变得较为松散, 强度显著降低。未经受冻融循环黄土试样内部的硫酸钠无相态变化亦即无法表现出盐蚀作用, 因而其黏聚力无明显变化。

(3) 内摩擦角

图 6 所示为内摩擦角随冻融循环次数及 Na₂SO₄ 含量变化规律。由图 6 可见, 部分试样的内摩擦角随冻融循环次数增加逐渐减小, 部分试样的内摩擦角表现出波动变化特征, 但整体变化幅值均较小; 随含盐

量增加大体上表现出先减小而后增大的特征, 但变化幅值亦很小, 可以认为内摩擦角随含盐量增大无显著变化。总体而言, 笔者分析认为冻融作用下 Na₂SO₄ 盐渍原状黄土试样内摩擦角变化幅值较小且无显著变化规律。这是由于内摩擦角大小主要取决于土颗粒间的摩阻力和咬合作用, 而冻融循环和盐蚀作用对上述因素并无显著影响。

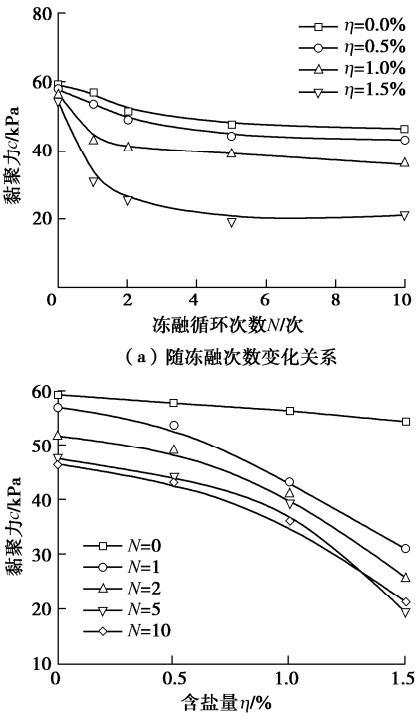


图 5 黏聚力变化规律曲线

Fig. 5 Variation of cohesion

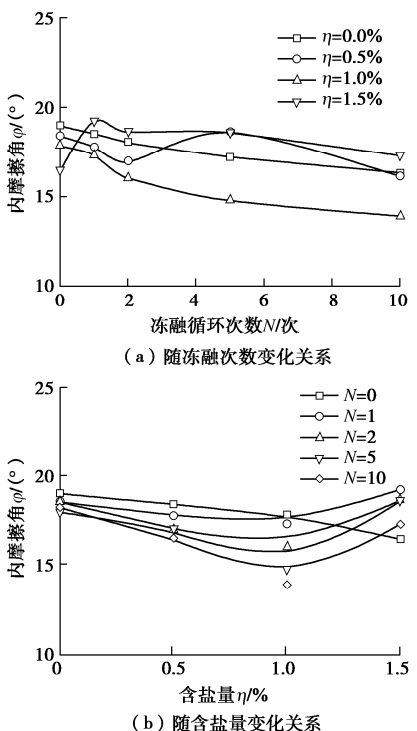


图 6 内摩擦角变化规律曲线

Fig. 6 Variation of internal friction angle

(4) 冻融与盐蚀劣化作用解耦分析

冻融循环条件下 Na_2SO_4 盐渍原状黄土不仅受到孔隙水相变引起的冻融劣化作用, 且要受到 Na_2SO_4 易溶盐相态改变引起的盐蚀劣化作用。为定量分析冻融与盐蚀劣化规律及相互关系, 以下基于冻融循环条件下黏聚力变化规律, 对冻融与盐蚀劣化作用进行解耦分析。

图 7 所示为冻融与盐蚀劣化作用解耦路径示意图。图中路径 $a-b$ 表示在 5 次冻融循环后仅冻融作用引起的劣化值; 路径 $b-c$ 表示 5 次冻融循环后, 含盐量 0.5% 时仅盐蚀作用引起的劣化值; 路径 $b-d$ 表示 5 次冻融循环后, 含盐量 1.0% 时仅盐蚀作用引起的劣化值; 路径 $b-e$ 表示在 5 次冻融循环后, 含盐量 1.5% 时仅盐蚀作用引起的劣化值。

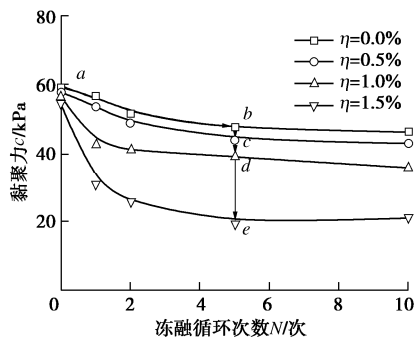


图 7 解耦路径示意图

Fig. 7 Schematic diagram of decoupling path

为量化揭示任意损伤过程中冻融与盐蚀劣化作用的贡献, 采用归一化处理分别定义冻融与盐蚀劣化因子, 可通过下式计算:

$$D_1 = \frac{c_0 - c_{i-0}}{c_0 - c_{i-j}} \quad (1)$$

$$D_2 = \frac{c_{i-0} - c_{i-j}}{c_0 - c_{i-j}} \quad (2)$$

式中 D_1 为冻融劣化因子, 亦即冻融损伤占比; D_2 为盐蚀劣化因子, 亦即盐蚀损伤占比; c_0 表示初始状态试样黏聚力; c_{i-0} 表示冻融循环次数为 i 、含盐量为 0.0% 时黏聚力; c_{i-j} 表示冻融循环次数为 i 、含盐量为 j % 时黏聚力。(其中 i 取 1, 2, 5, 10; j 取 0.5, 1, 1.5)。

进一步由式 (1), (2), 可推得以下关系式:

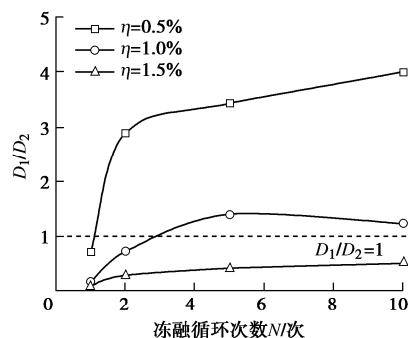
$$D_1 + D_2 = 1 \quad (3)$$

式 (3) 表明, 任意损伤过程归一化处理, 冻融和盐蚀劣化因子 D_1 , D_2 即分别量化揭示了冻融和盐蚀损伤的贡献, 其物理意义直观明了。

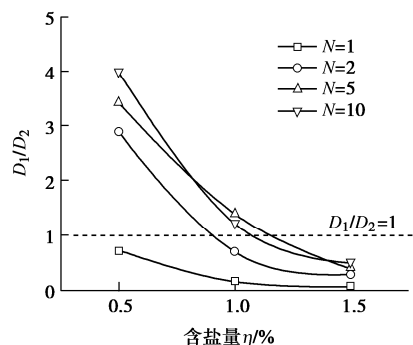
图 8 (a) 所示为冻融与盐蚀劣化因子的比值随冻融循环次数变化规律。从图中可以看出, 冻融与盐蚀劣化因子的比值随冻融次数增加逐渐增大, 亦即冻融

作用对试样强度劣化的影响逐渐增强; 但随着冻融次数持续增大, 其增速逐渐减小, 趋于一个稳定数值。值得注意的是, 冻融作用下含盐量较高试样 (1.5%) 冻融与盐蚀劣化因子的比值始终小于 1, 亦即冻融劣化效应弱于盐蚀劣化效应。分析其原因, 由前述盐蚀劣化因子 D_2 的计算公式可知, 对于含盐量较高试样, 其计算值显著增大, 从而导致冻融与盐蚀劣化因子的比值急剧减小。

冻融与盐蚀劣化因子的比值随含盐量变化规律如图 8 (b) 所示。由图可见, 冻融与盐蚀劣化因子的比值随含盐量增大逐渐减小, 亦即盐蚀作用对试样强度劣化的影响逐渐增强; 随着含盐量持续增大, 其衰减速率逐渐减小, 趋于一个较小数值。此外, 仅冻融循环 1 次条件下, 冻融劣化因子与盐蚀劣化因子的比值始终小于 1, 亦即冻融劣化效应弱于盐蚀劣化效应。分析其原因, 由前述冻融劣化因子 D_1 的计算公式可知, 对于仅冻融循环 1 次试样, 其计算值显著减小, 从而导致冻融与盐蚀劣化因子的比值亦显著减小。



(a) 随冻融次数变化关系



(b) 随含盐量变化关系

图 8 冻融与盐蚀劣化因子比值的变化规律曲线

Fig. 8 Variation of ratio of freeze-thaw deterioration factor to that by salt erosion

3.2 CT 扫描试验结果分析

(1) 冻融循环次数对细观结构的影响规律

图 9 所示为 Na_2SO_4 含量 1.0% 试样冻融过程不同截面的 CT 细观结构图像。图中白色区域代表试样密度较大处, 黑色区域代表试样中孔洞、裂隙发育的位

置。从图中可以看出, 冻融循环条件下不同扫描断面的细观结构损伤表现出相似的变化规律: 冻融前黄土试样内部存在一定的孔洞及微裂纹且无序分布, 从而导致试样产生一定的初始损伤效应。随着冻融循环次数增加, 受冰水相变的影响, 微小孔洞逐渐扩大, 且有互相贯通之势; 初始微裂纹逐渐发展成裂隙, 其长度及宽度均有不同程度扩展。

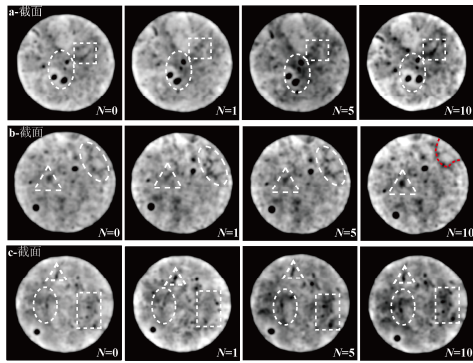


图9 不同冻融循环次数下 CT 图像

Fig. 9 CT images under different freeze-thaw cycles

图 10 所示为 CT 数 ME 值随冻融循环次数变化规律曲线。由图可见, 冻融初期阶段试样的 CT 数 ME 值衰减速率较大, 随着冻融次数持续增大, CT 数 ME 值逐渐趋于稳定, 表现出减速衰减特征。上述变化规律反映出冻融初始阶段试样细观结构损伤演化速率较大, 亦即试样内部微裂隙增长较快; 多次冻融循环后, 试样细观结构损伤劣化作用减弱。这很好的解释了前述三轴破坏偏应力和黏聚力随冻融循环次数的变化关系 (图 4 (a), 5 (a))。

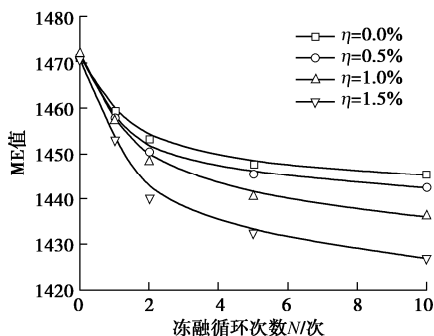


图 10 CT 数 ME 值与冻融循环次数关系

Fig. 10 Variation of ME with freeze-thaw cycles

(2) Na_2SO_4 含量对细观结构的影响规律

图 11 所示为冻融循环 5 次条件下不同 Na_2SO_4 含量盐渍原状黄土试样 c 截面 CT 细观结构扫描图像。由图可见, 冻融作用下不含盐试样内部大孔隙或裂隙发育相对较少。随着含盐量增加, CT 图像灰度有一定程度的加深, 特别是图像下部裂隙有一定的扩展和发育, 出现新的细小孔隙及裂隙, 盐蚀劣化程度较不含盐试样显著增大; 对含盐量为 1.5% 试样, 裂缝扩展

程度较大, 且中部产生较大孔隙。

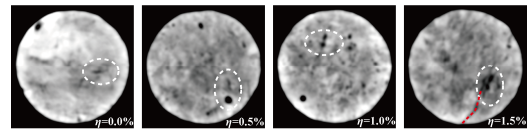


图 11 不同含盐量下 CT 图像

Fig. 11 CT images of specimens with different salt contents

图 12 所示为 CT 数 ME 值随含盐量变化曲线。由图可见, 冻融条件下 CT 数 ME 值随含盐量增大呈现出近似线性或加速衰减特征。上述变化规律反映出冻融条件下试样细观结构损伤演化速率随含盐量增大有增大的趋势, 亦即试样内部微裂缝扩展速率逐渐增大, 盐蚀劣化作用增强。这亦很好的解释了前述三轴破坏偏应力和黏聚力随含盐量的变化规律 (图 4 (b), 5 (b))。值得注意的是, 未经受冻融循环 ($N=0$) 试样的 CT 数 ME 值随含盐量增加无显著变化, 这是由于未冻融条件下试样内部 Na_2SO_4 易溶盐无相态变化, 盐蚀劣化作用无法产生, 因而 CT 数 ME 值无明显变化。

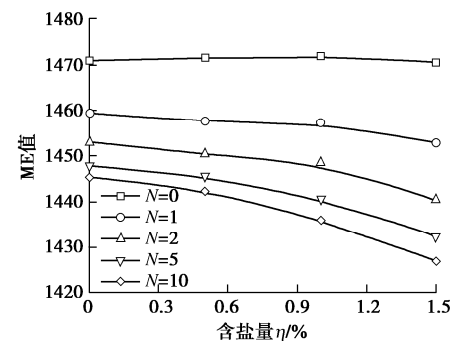


图 12 CT 数 ME 值与含盐量关系

Fig. 12 Variation of ME with salt content

(3) CT 细观损伤变量 D_{ME}

根据 CT 原理^[14]可以得到

$$\rho = \rho_0(1000 + H)/(1000 + H_0) \quad (4)$$

式中 ρ 为试样的密度; ρ_0 为初始状态下试样的密度; H , H_0 分别为与 ρ 和 ρ_0 所对应的试样 CT 数 ME 值。

令

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5), 则有

$$\Delta\rho = \left(\frac{1000 + H}{1000 + H_0} - 1 \right) \times \rho_0 \quad (6)$$

根据密度损伤变量公式^[15], 可以得到 CT 细观结构损伤变量 D_{ME} 的表达式如下:

$$D_{\text{ME}} = -\frac{1}{m_0^2} \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (7)$$

式中, m_0 为 CT 机空间分辨率。

将式 (6) 代入式 (7), 则可以最终得到基于 CT 数 ME 值的损伤变量 D_{ME} 表达式:

$$D_{ME} = \frac{1}{m_0^2} \times \left(\frac{H_0 - H}{1000 + H_0} \right), \quad (8)$$

式中, D_{ME} 数值越大表示试样损伤幅值越大, $D_{ME}=0$ 代表试样初始状态。

图 13 所示为 CT 细观损伤变量 D_{ME} 变化规律。从图中可以看出, 细观损伤变量随着冻融循环次数增加逐渐增大, 但增速逐渐减缓, 表现出减速劣化特性; 细观损伤变量随着含盐量增加近似线性或加速增大, 表现出等速或加速劣化特性。

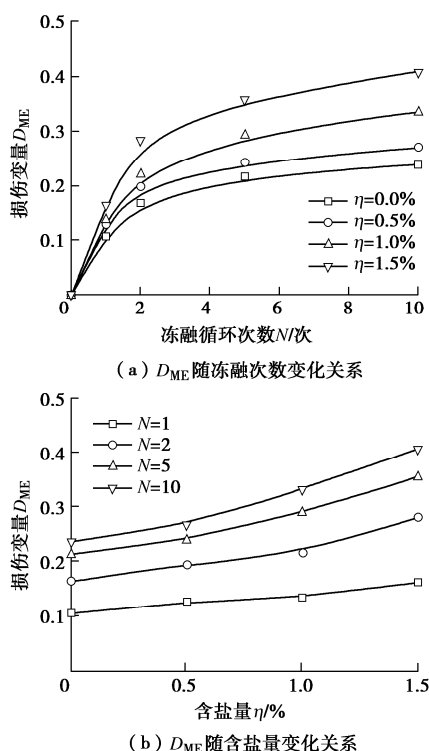


图 13 细观损伤变量 D_{ME} 变化规律曲线

Fig. 13 Variation of mesoscopic damage variable

进一步根据细观损伤变量 D_{ME} 随冻融循环次数变化曲线, 发现损伤变量 D_{ME} 与冻融循环次数 N 具有如下关系:

$$D_{ME}(N) = \frac{N}{a + bN}, \quad (9)$$

式中, N 为冻融循环次数, a , b 均为拟合参数。

将损伤变量 D_{ME} 随冻融循环次数变化结果按 $N/D_{ME} - N$ 的关系进行拟合分析, 结果如图 14 (a) 所示。从图中可以看出, 二者近似呈线性关系, 其中拟合参数 a 为直线的截距, b 为直线的斜率。

对式 (9) 进一步求导可得

$$\frac{d(D_{ME})}{dN} = \frac{a}{(a + bN)^2}. \quad (10)$$

在曲线的起始点, $N=0$, 则式 (10) 可表示为

$$I_{D_{ME}} = \frac{1}{a}, \quad (11)$$

式中, $I_{D_{ME}}$ 即为损伤变量 D_{ME} 的初始斜率。

当 $N \rightarrow \infty$ 时, 从式 (9) 中可得出

$$(D_{ME})_{ult} = \frac{1}{b}, \quad (12)$$

式中, $(D_{ME})_{ult}$ 为损伤变量 D_{ME} 的极限值, 表示试样达到冻融破坏极限时损伤变量的峰值。

由此可以看出, a 代表损伤变量 D_{ME} 的初始斜率 $I_{D_{ME}}$ 的倒数; b 为损伤变量 D_{ME} 极限值 $(D_{ME})_{ult}$ 的倒数。

图 14 (b) 所示为拟合参数与含盐量变化关系。从图中可以看出, 拟合参数 a , b 随含盐量可近似表示为线性变化关系。因此, 进一步考虑含盐量的影响, 建立拟合参数 a , b 与含盐量关系式:

$$a = \alpha\eta + a_0, \quad (13a)$$

$$b = \beta\eta + b_0, \quad (13b)$$

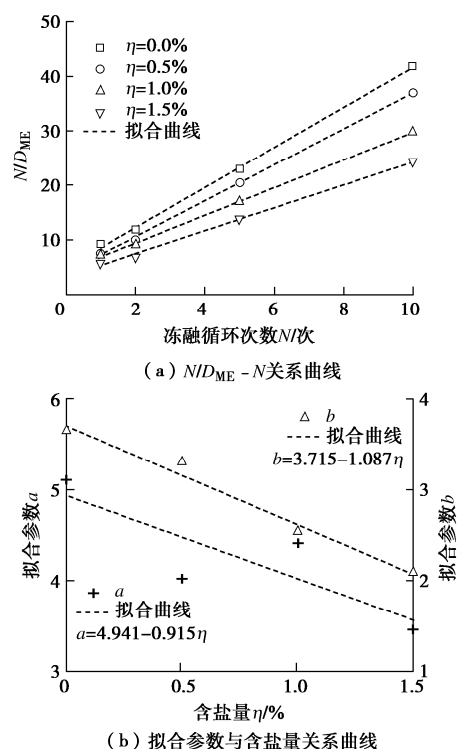
式中, η 为试样含盐量 (%); a_0 , b_0 和 α , β 分别为图中直线的截距与斜率。

将式 (13) 代入式 (9) 中, 可得到细观损伤变量 D_{ME} 在不同冻融循环次数及含盐量下的多变量演化方程:

$$D_{ME}(N, \eta) = \frac{N}{(\alpha\eta + a_0) + (\beta\eta + b_0)N}, \quad (14)$$

式中, 所有参数均通过试验结果拟合得到, $a_0=4.941$, $b_0=3.715$, $\alpha=-0.915$, $\beta=-1.087$ 。

图 14 (c) 是含盐量分别为 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% 下的损伤变量试验值与计算值对比图。从图中可以看出, 损伤变量试验值与计算值均匀分布于直线 $y=x$ 两侧, 拟合相关性较好, 表明该模型可较好预测 Na_2SO_4 盐渍原状黄土冻融过程细观结构损伤演化规律。



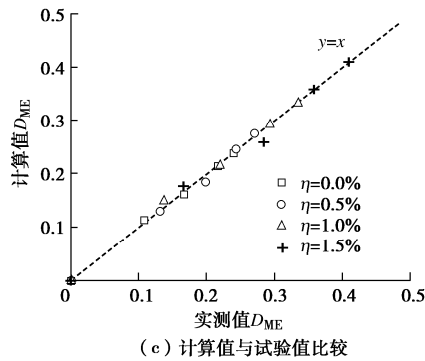
图 14 细观损伤变量 D_{ME} 拟合分析

Fig. 14 Fitting analysis of mesoscopic damage variable

4 讨 论

Na₂SO₄ 盐渍原状黄土宏观损伤特征表现为强度劣化, 劣化过程中必然伴随着试样内部细观裂隙的产生和发展, CT 扫描试验可以量化研究试样细观结构损伤演化规律。基于此, 分别定义基于黏聚力的宏观损伤变量 λ_C 和 CT 数 ME 值的细观损伤变量 D_{ME} , 以对比分析宏观细观损伤演化规律的相互关系。CT 细观损伤变量 D_{ME} 已通过前述式 (8) 得到, 基于黏聚力宏观损伤变量 λ_C 可通过下式计算:

$$\lambda_C = \frac{c_0 - c_{i-j}}{c_0}, \quad (15)$$

式中, λ_C 数值越大表示试样损伤幅值越大, $\lambda_C=0$ 代表试样初始状态, $\lambda_C=1$ 代表完全损伤状态; c_0 , c_{i-j} 的含义如前述公式 (1) 和 (2) 所示。

宏观损伤变量 λ_C 和细观损伤变量 D_{ME} 变化规律如图 15 所示。由图可见, 宏观细观损伤变量表现出相似的变化规律: 冻融初始阶段宏观细观损伤变量均增速较大, 随着冻融次数持续增加, 逐渐趋于稳定, 表明冻融作用会导致试样的减速劣化效应。此外, 宏观细观损伤变量随含盐量增加其增速均逐渐增大, 表明盐渍作用会导致试样的加速劣化效应。综上, 宏观细观损伤变量表现出的一致变化规律表明 CT 细观结构损伤变量准确揭示了宏观三轴剪切力学强度指标的劣化机理。

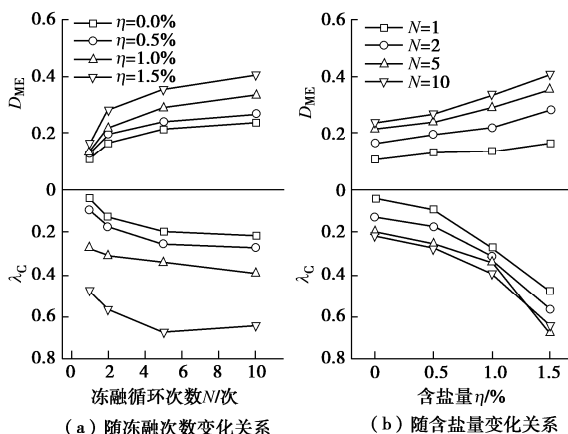


图 15 宏观细观损伤变量变化规律曲线

Fig. 15 Variation of macroscopic and mesoscopic damage variables

5 结 论

(1) 冻融作用对应力-应变曲线的类型及特征无明显影响, 均表现为应变硬化型。破坏偏应力随着冻融次数增加逐渐减小, 但降低速率逐渐减小, 表现出减速劣化特征; 冻融条件下破坏偏应力随着含盐量增加逐渐减小, 且表现出线性或加速劣化特征。

(2) 黏聚力呈现与破坏偏应力相似的劣化特征; 内摩擦角变化幅值较小, 无显著变化规律。

(3) 冻融与盐渍劣化因子的比值随冻融次数增加逐渐增大但增速逐渐减小, 随含盐量增大逐渐减小且衰减速率逐渐减小。

(4) CT 数 ME 值表现出与破坏偏应力和黏聚力相似的劣化规律; 构建了 CT 细观损伤变量演化方程, 可较好预测冻融过程细观结构损伤演化规律。

(5) 宏观细观损伤变量表现出一致的变化规律, 表明 CT 细观结构损伤变量准确揭示了宏观三轴剪切强度指标的劣化机理。

参考文献:

- [1] 许健, 郑翔, 王掌权. 黄土边坡盐蚀剥落病害特征调查及其水盐迁移规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 741 - 748. (XU Jian, ZHENG Xiang, WANG Zhang-quan. Investigation for water and salt migrations on spalling disease of loess slope caused by salification erosion[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 741 - 748. (in Chinese))
- [2] 高江平. 盐渍土工程与力学性质研究进展[J]. 力学与实践, 2011, 33(4): 1 - 7. (GAO Jiang-ping. Research progress in engineering and mechanical properties of the saline soil[J]. Mechanics in Engineering, 2011, 33(4): 1 - 7. (in Chinese))
- [3] 李振, 邢义川, 张宏. 盐渍土冻胀性的试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(7): 73 - 76. (LI Zhen, XING Yi-chuan, ZHANG Hong. Experimental study on frost heaving of saline soil[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2005, 33(7): 73 - 76. (in Chinese))
- [4] 牛玺荣, 高江平. 综合考虑盐胀和冻胀时硫酸盐渍土体积变化关系式的建立[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 755 - 760. (NIU Xi-rong, GAO Jiang-ping. Expression for volume change of sulphate saline soil considering salt expansion and frost heave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 755 - 760. (in Chinese))
- [5] 黄雪峰, 邱爽, 付正锋, 等. 宁南黄河灌区硫酸盐渍土盐胀规律及特性研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(6): 114 - 117. (HUANG Xue-feng, QIU Shuang, FU Zheng-feng,

- et al. Study in the salt expansion and characteristic of sulfate saline soil in Ningnan irrigation area of the Yellow River in Ningxia[J]. Sichuan Building Science, 2010, **36**(6): 114 - 117. (in Chinese))
- [6] 张莎莎, 王永威, 杨晓华, 等. 砾类亚硫酸盐渍土盐胀率的简化预测模型[J]. 中国公路学报, 2015, **28**(11): 1 - 14. (ZHANG Sha-sha, WANG Yong-wei, YANG Xiao-hua, et al. Simplified prediction model of salt expansion rate for gravel sulfite saline soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, **28**(11): 1 - 14. (in Chinese))
- [7] 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]. 水力学报, 2014, **45**(增刊 2): 14 - 18. (HU Zai-qiang, LIU Yin, LI Hong-ru. Influence of freezing-thawing cycles on strength of loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(S2): 14 - 18. (in Chinese))
- [8] 谷琪, 王家鼎, 司东东, 等. 不同含水率下黄土冻融循环对湿陷性影响探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(7): 1187 - 1192. (GU Qi, WANG Jia-ding, SI Dong-dong, et al. Effect of freeze-thaw cycles on collapsibility of loess under different moisture contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(7): 1187 - 1192. (in Chinese))
- [9] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 1 - 11. (CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, ZHU Yuan-qing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [10] 张伟, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 硫酸盐渍土的力学和细观特性试验研究[J]. 建筑科学, 2012, **28**(1): 49 - 54. (ZHANG Wei, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Research on mechanical and microscopical characteristics of sulfate saline soil[J]. Building Science, 2012, **28**(1): 49 - 54. (in Chinese))
- [11] 叶万军, 李长清, 杨更社, 等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. 岩土力学, 2018, **39**(7): 2336 - 2343, 2360. (YE Wan-jun, LI Chang-qing, YANG Geng-she, et al. Scale effects of damage to loess structure under freezing and thawing conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(7): 2336 - 2343, 2360. (in Chinese))
- [12] XU J, LI Y F, WANG S H, et al. Shear strength and mesoscopic character of undisturbed loess with sodium sulfate after dry-wet cycling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, **79**(3): 1523 - 1541.
- [13] 杨更社, 张全胜. 冻融环境下岩体细观损伤及水热迁移机理分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006. (YANG Geng-she, ZHANG Quan-sheng. Analysis for Mechanism of Rock Microscopic Damage and Moisture-Heat Transfer under the Frost and Thaw Condition[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2006. (in Chinese))
- [14] PEYTON R L, HAEFFNER B A, ANDENSON S H, et al. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores[J]. Geoderma, 1992, **53**(3/4): 329 - 340.
- [15] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(3): 279 - 285. (YANG Geng-she, XIE Ding-yi, ZHANG Chang-qing. The quantitative analysis of distribution regulation of CT values of rock damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(3): 279 - 285. (in Chinese))