

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.001

循环冻融作用下盐渍土变形及 强度劣化规律研究

吴畏¹, 孟令健¹, 陈玉堃², 宋战平^{2,3,4}

(1. 国家电网有限公司特高压建设分公司, 北京 100052;

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;

3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

4. 西安建筑科技大学 基础设施智能建造研究院, 陕西 西安 710055)

摘要: 循环冻融作用下盐渍土具有冻胀、盐蚀等不良特性, 频繁诱发地基基础的不均匀沉降。为研究循环冻融作用下盐渍土变形特征及强度劣化规律, 对甘肃武威地区某特高压工程的盐渍土开展了不固结不排水三轴试验。结果表明: 盐渍土的应力-应变曲线表现出弹性、弹塑性和塑性破坏的三阶段, 具有典型的硬化特征, 且硬化特征具有显著差异性。循环冻融次数对盐渍土抗剪强度具有显著的劣化效应, 其衰减过程呈先快速后缓慢的对数函数关系; 抗剪强度与冻结温度呈正相关, 衰减率与循环冻融次数呈一阶指数函数关系; 随着循环冻融次数增大, 盐渍土的粘聚力参数呈现先快速减小后趋于稳定的指数函数衰减, 内摩擦角则呈现先快速增大后趋于稳定的指数函数增长。盐渍土的破坏模式表现出包括剪切破坏、鼓胀破坏, 冻胀损伤与盐蚀损伤共同作用, 导致土样由剪切破坏向鼓胀破坏过度。研究揭示了循环冻融作用下盐渍土的变形机制, 可为特高压工程盐渍土地基基础的稳定性分析提供理论依据。

关键词: 盐渍土; 循环冻融作用; 变形特征; 抗剪强度参数; 劣化规律

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0001-07

Deformation Characteristics and Strength Deterioration Law of Saline Soil Under Cyclic Freeze-thaw Action

WU Wei¹, MENG Lingjian¹, CHEN Yukun², SONG Zhanping^{2,3,4}

(1. State Grid Corporation of China UHV Construction Branch, Beijing 100052, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

4. Institute of Intelligent Infrastructure Construction, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: The saline soil has the adverse characteristics of frost heave and salt erosion under the action of freeze-thaw cycle, which frequently induce uneven settlement of foundation. To analyze the deformation characteristics and strength deterioration law of saline soil under cyclic freeze-thaw, unconsolidated and non-drained triaxial test was carried out on saline soil of a UHV project in Wuwei, Gansu province. The results show that the stress-strain curve of saline soil undergoes elastic, elastoplastic and plastic failure hardening stages, but the hardening characteristics are significantly different. The number of freeze-thaw cycles has a significant deterioration effect on shear strength, and the attenuation process shows a logarithmic function relationship from fast to slow; shear strength is positively correlated with freezing temperature, and the attenuation rate shows a first-order exponential function relationship with the number of freeze-

收稿日期: 2025-08-16

修稿日期: 2025-09-25

基金项目: 国家电网有限公司特高压建设分公司科技项目(SGTJ0000BDJS2500217)

作者简介: 吴畏(1970—), 男, 正高级工程师, 主要从事输变电工程管理方面工作。E-mail: 1124981661@qq.com

thaw cycles. With the increase of the number of cycles of freezing and thawing, the cohesion decreases rapidly and then tends to stabilize in exponential function, while the internal friction angle increases rapidly and then tends to stabilize in exponential function. The failure modes of saline soil include shear failure, bulging failure, frost heave damage and salt erosion damage, which lead to the transition from shear failure to bulging failure. The deformation mechanism of saline soil under cyclic freeze-thaw was revealed, which could provide a theoretical basis for the stability analysis of saline soil in UHV engineering.

Keywords: saline soil; cryofreeze-thaw cycle; deformation characteristics; shear strength parameters; deterioration pattern

岩土工程领域将易溶盐含量高于 0.30% 的土体称为盐渍土,我国分布着全球规模最大的盐渍土,分布面积为 $3.69 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1-3],西部地区分布占比约 70%。盐渍土对冻融环境的变化较为敏感,季节性温度变化导致盐渍土经历“冻结+融化”过程。因此,深入研究循环冻融作用下盐渍土的强度劣化机制具有重要应用价值。

随着国家输电工程的快速发展,西部盐渍土地区的输电工程地基基础面临着不均匀沉降问题。盐渍土冻融变形是宏观力学特性劣化的直接体现^[4-5],循环冻融环境下土体中的能量与外界发生交换,引起土体的物理力学特性改变。相比普通土体,盐渍土的冻融损伤更为复杂,这是由于盐渍土的劣化变形属于“水-热-盐”的多场耦合问题^[6]。依托甘肃盐渍土地区的输电工程,张乘来等^[7]发现盐渍土地质评估具有特殊性,盐胀效应是造成基础沉降的重要诱因。Cheng 等^[8]揭示了冻融循环对盐渍土应力-应变关系的影响。赵辉伟等^[9]基于超声波速构建了冻融盐渍土强度预测的 BP 神经网络模型。邓彩虹等^[10]发现粗颗粒盐渍土改良具有复杂性,盐胀与溶陷是引发路基病害的主要诱因。

针对盐渍土的盐冻胀问题,张莎莎等^[11]建立了适用于粗粒盐渍土路基的多场耦合数值模型。以盐渍土工程为背景,王景辉等^[12]、周凤玺等^[13]明确了盐分对抑制或加剧冻胀的双重效应。盐渍土的冻胀率并非随含盐量增加而单调变化,而是存在一个“临界盐浓度”^[14-15]。循环冻融作用下盐渍土的劣化变形还与融沉作用有关。唐先习等^[16]研究了含硫酸钠盐黄土在降温过程中基质吸力的变化规律。栾恩铭等^[17]指出硫酸钠冻结相变是导致土体结构破坏的主要原因。由此可见,温度效应和盐胀作用是诱发盐渍土强度劣化的重要诱因。既有研究多通过室内一维冻胀试验,缺乏三维应力状态下盐渍土的变形规律研究。

综上所述,循环冻融对盐渍土的劣化作用已被

工程界广泛关注。针对西部地区的特高压输电工程,实际工程盐渍土承受着三维应力、冻融温度等复杂作用,使得损伤演化远比无荷载的冻融结果更为复杂。因此,以甘肃武威地区某特高压工程的盐渍土为试验对象,研究循环冻融作用下盐渍土变形特征,弄清楚循环冻融温度对盐渍土的影响机制,为特高压工程盐渍土的稳定性分析提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验土样

甘肃武威地区某特高压工程位于武威盆地西北部的民勤县,气象站观测到的冻融深度为 116 cm ~ 141 cm。试验所用的土样取自该工程原样土,取样深度为 -0.30 m。根据工程地质勘察资料,站址地面下 4 m 范围内属盐渍土,以硫酸盐渍土为主。

图 1 为盐渍土的易溶盐含量,盐渍土中的阴离子含量最高的硫酸盐(9.56 mmol/100 g)为主,其次为氯盐(1.82 mmol/100 g);阳离子含量最高的是钙离子(3.05 mmol/100 g),其次是钠离子(1.99 mmol/100 g)。计算盐分比值为 $0.10 < 0.30$,含盐总量 1.92%。

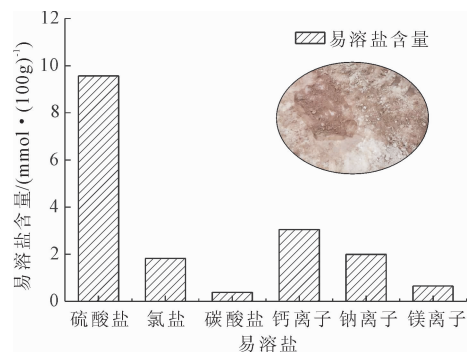


图 1 易溶盐含量

图 2 为盐渍土的粒径级配特性及标准试样,液限和塑限分别为 21.49% 和 18.61%,最大干密度为 1.79 g/cm^3 。根据盐渍土的粒径级配曲线,如图 2(a),盐渍土的不均匀系数、曲率系数分别为

10.15、0.89,属于典型的级配不良土。按照试验方案,制备直径 \times 高=39.10 mm \times 80 mm的柱状土样,部分标准试样如图2(b)所示。

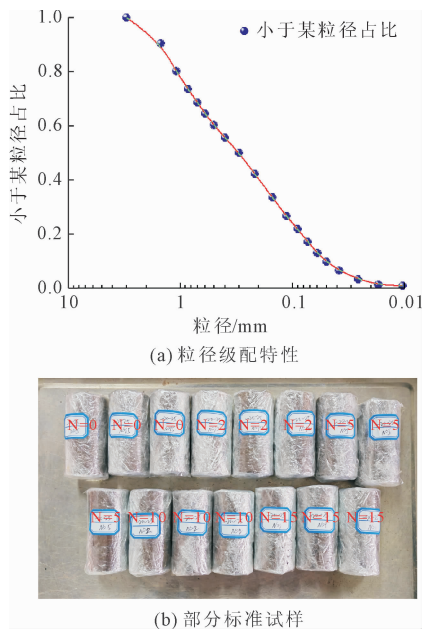


图2 试验土样

1.2 试验设备与方法

冻融设备为 XT5402-TC400 型高低温试验仪,可以满足 $-60^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$ 温度范围的土样高低温处理。采用不固结不排水三轴试验,设备为 TSZ30-2.0 型三轴仪,应变速率为 $0.0024 \text{ mm/min} \sim 4.50 \text{ mm/min}$,围压为 $0 \sim 2 \text{ MPa}$,反压为 $0 \sim 0.80 \text{ MPa}$,孔压为 $0 \sim 2 \text{ MPa}$,可以满足试验需求。

根据武威地区的气温资料,近 10 年最低温度约为 -30°C ,最高温度约为 40°C 。为模拟武威地区冬季降温、春季升温,将冻结温度设置为 -10°C 、 -20°C 、 -30°C ,融化温度为 40°C ,冻结 12 h、融化 12 h 称为一个循环冻融周期。试验设计了 6 组循环冻融次数 (N),即 $N=0$ (未发生冻融)、2、5、10、15 次。三轴剪切试验的剪切速率为 0.40 mm/min ,固结围压为 100 kPa 、 200 kPa 和 300 kPa 。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变响应规律

图 3 为循环冻融作用下盐渍土的剪切应力-应变曲线, q 为偏应力, ε_d 为剪应变。土样骨架主要由盐渍土颗粒组成,剪切变形由冻融温度、剪应力扰动引起的土颗粒移位造成。

由图 3 可知,循环冻融作用下应力-应变曲线形态相似,演变路径与冻融损伤密切相关。当 N 小

于 5 时, 100 kPa 、 200 kPa 、 300 kPa 条件下的应力-应变曲线均为强硬化型^[15,17]。特别是未发生冻融时($N=0$),应力-应变曲线比较光滑,未出现局部劣化特性。当 $N>5$ 时,应力-应变曲线由强硬化型转变为弱硬化型,曲线增幅速度减缓。当 N 达到 15、冻结温度 -10°C 、 -20°C 条件下曲线发生明显偏离,表明抗剪强度发生弱化。

根据硬化特征的差异性,两类剪切变形的阶段划分如图 4 所示,阶段 I ($\varepsilon_d < 2\%$) 以弹性变形为主,应力-应变曲线呈线性增长,此时土颗粒因牢固粘结而未发生移位。阶段 II ($2\% \leq \varepsilon_d \leq 10\%$) 以弹塑性变形为主,土颗粒逐渐产生损伤,土样发生缓慢变形、结构错动,导致应力-应变曲线开始呈屈服增长。随着土颗粒损伤快速累积^[18],导致阶段 III ($\varepsilon_d > 10\%$) 无限趋近于极限偏应力。这表明盐渍土产生了显著塑性变形,即将产生剪切破坏。

由图 3、图 4 可知,相同冻融温度下盐渍土的硬化程度与围压呈正相关,与循环冻融次数呈负相关。这是由于循环冻融是一个能量输入和水分迁移的过程,重塑土体结构后土颗粒排列更加紧密,冻结温度越低,土样的有效应力增加造成偏应力峰值增大。围压增大会进一步抑制土体孔隙体积的扩展,提高抗剪切变形能力。

2.2 强度劣化特征分析

2.2.1 冻融次数-抗剪强度关系

为研究循环冻融次数对盐渍土抗剪强度的劣化规律,硬化型曲线以 $\varepsilon_d=0.18$ 对应的偏应力确定抗剪强度。图 5 为抗剪强度与冻融次数的柱状分布图,相同围压与冻结温度下,抗剪强度随着循环冻融次数的增大均呈“快速衰减、缓慢趋于稳定”的对数劣化,分界点大致为 $N=10$ 。以 $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 、 100 kPa 的土样为例分析,未发生冻融时($N=0$),土样的抗剪强度分别为 138.99 kPa 、 125.89 kPa 、 117.69 kPa 、 94.55 kPa 、 80.94 kPa 。相比未发生冻融时($N=0$),抗剪强度在不同循环冻融次数($N=2$ 、 5 、 10 、 15)下分别降低 9.43% 、 15.33% 、 38.97% 、 41.77% 。

当固结围压为 200 kPa 时,抗剪强度分别降低 9.07% 、 13.26% 、 34.63% 和 35.71% ;当固结围压升至 300 kPa 时,抗剪强度分别降低 11.08% 、 18.68% 、 33.10% 和 34.87% 。当 N 达到 10 后,盐渍土劣化程度大致相同。这表明不同固结围压下盐渍土的抗剪强度劣化趋势基本一致,但抗剪强度的劣化幅度存在显著差异,这与土颗粒的累计损伤、硫酸盐晶体析出机制^[3,5]密切相关。

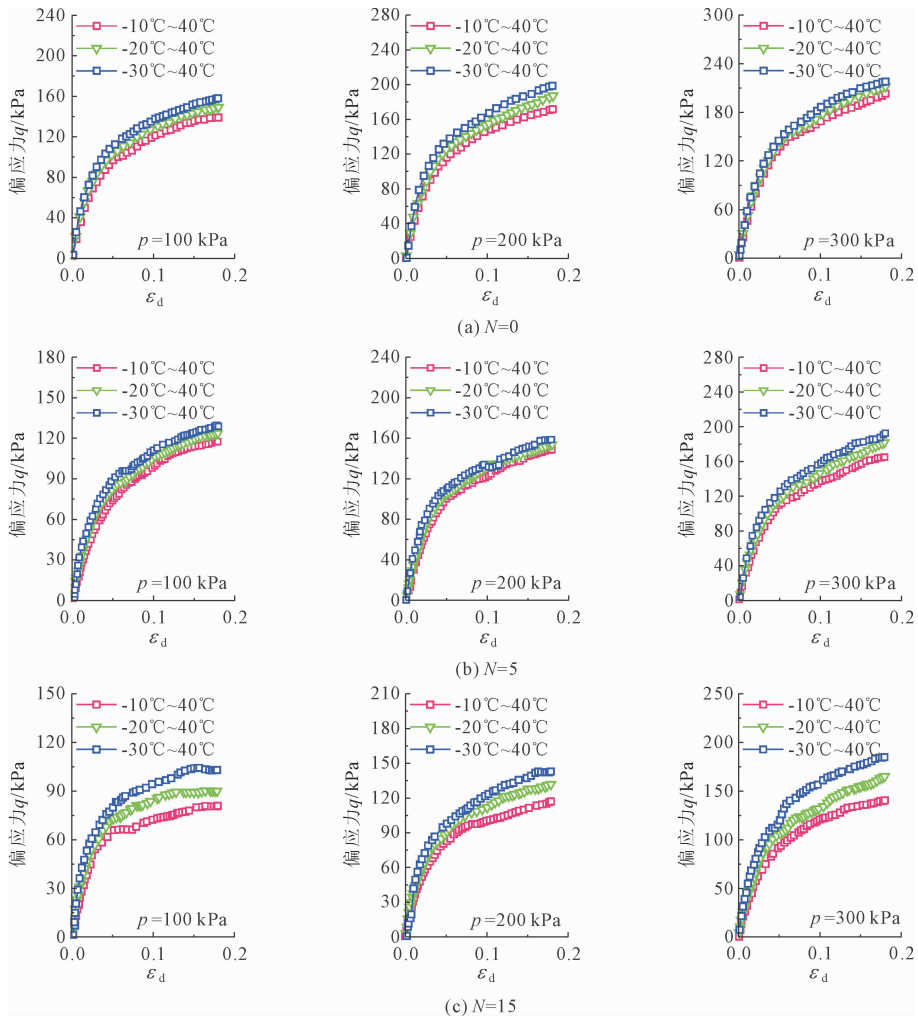


图 3 三轴剪切应力-应变响应曲线

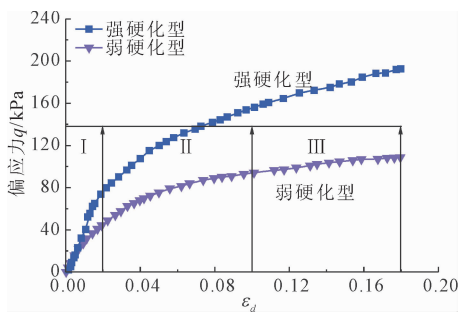


图 4 剪切变形阶段划分

图 6 为循环冻融作用下盐渍土的临界状态线, K 、 β_q 分别表示盐渍土的临界状态线斜率、临界状态线截距, q 、 p 分别表示偏应力、固结围压。临界状态线表示为:

$$q = Kp + \beta_q \quad (1)$$

对比图 6 可知, 循环冻融作用下盐渍土的偏应力、固结围压具有较好的线性相关。临界状态线的斜率大体呈“先降低、后增大”的发展趋势, 特别是

未发生冻融时 ($N=0$) 和 $N=10$ 时, 临界状态线增幅比较显著。当 N 为 2 和 5 时, 临界状态线的增幅相对减缓。相同循环冻融温度下, 临界状态线的截距随着循环冻融次数的增大而衰减, 这与抗剪强度的劣化趋势基本一致。

2.2.2 冻融温度-抗剪强度关系

图 7 为循环冻融作用下盐渍土的抗剪强度分布规律。循环冻融作用下抗剪强度的分布特征具有一致性。当冻结温度相同时, 抗剪强度随着冻融次数的增加而降低, 表现出明显的负相关性。尤其当 N 为 0~5 时, 抗剪强度分布较为集中; 当 N 达到 10~15 时, 抗剪强度出现快速劣化, 表明循环冻融效应对土体损伤具有累积效应。

由图 7 可知, 相同固结围压下抗剪强度与冻结温度呈正相关, 冻结温度越低, 冻结深度越大, 融化过程越不充分, 导致土体抗剪强度相对较高, 这与研究^[19]相符。若以固结围压 100 kPa 为例分析 ($N=5$), 冻结

温度 -10°C 下,抗剪强度达到 117.69 kPa ;当冻结温度降低至 -30°C 时,抗剪强度提高约 9.50% 。当固结围压为 300 kPa ($N=5$) 时,冻结温度达到 -10°C

时的抗剪强度为 165.18 kPa ,相比冻结温度 -10°C 下抗剪强度提高了 1.41 倍。由此可见,抗剪强度与冻结温度、固结围压等因素密切相关。

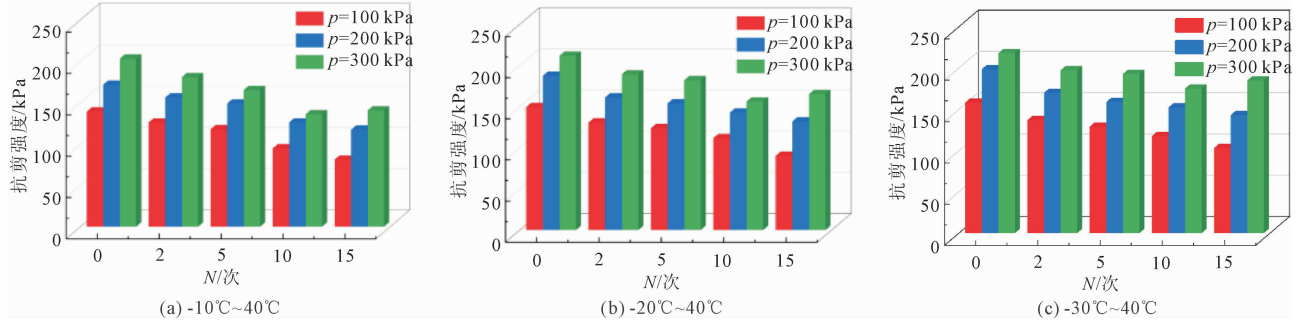


图 5 抗剪强度与冻融次数的柱状分布图

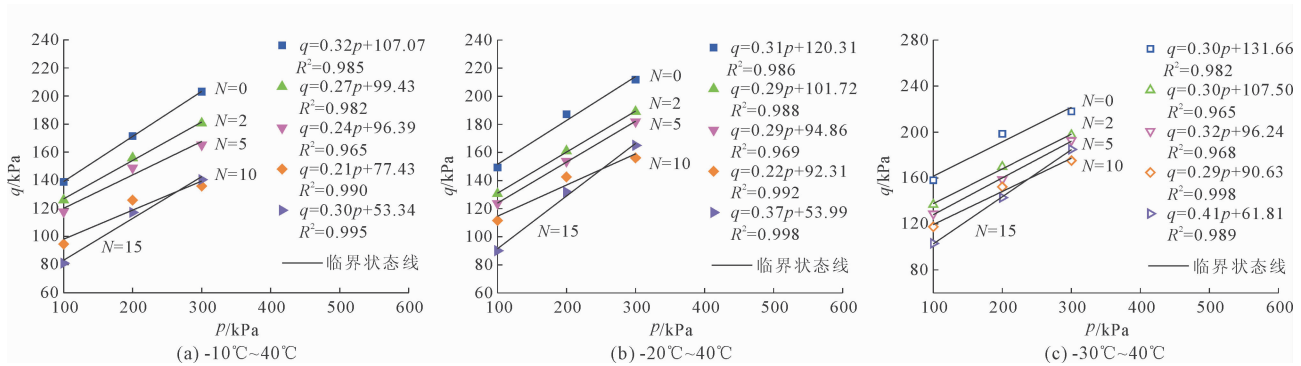


图 6 盐渍土临界状态线的分布特征

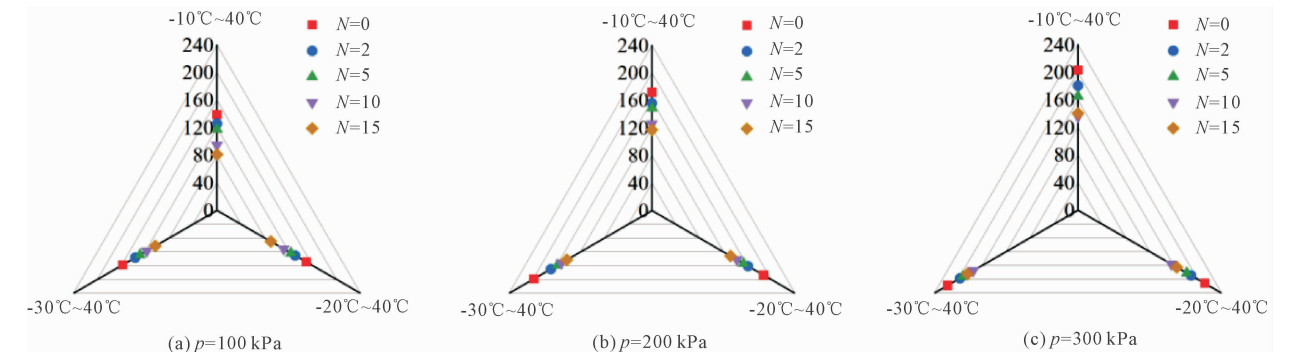


图 7 盐渍土的抗剪强度分布规律

图 8 为盐渍土抗剪强度劣化率与循环冻融温度的关系,冻结温度、循环冻融次数均对抗剪强度衰减率具有显著影响。当 N 小于 2 时,抗剪强度衰减率快速增大;当 N 增至 $5\sim 10$ 时,抗剪强度衰减率逐渐区域平缓。当固结围压为 100 kPa 、 200 kPa 、 300 kPa 时,最大抗剪强度衰减率范围分别为 $0.24\sim 0.27$ 、 $0.23\sim 0.26$ 、 $0.20\sim 0.23$,表明固结围压值增大或盐渍土埋深可以有效抑制土体抗剪强度劣化。

当盐渍土的固结围压值恒定时(如图 8(a)) $p=100\text{ kPa}$,抗剪强度衰减率的增长趋势与冻结温

度呈负相关性。当冻结温度为 -10°C 时,抗剪强度衰减率为 0.27 ,而 -30°C 下的抗剪强度衰减率则降低了 11.29% 。当固结围压提高至 300 kPa 时(图 8(c)),相比冻结温度 -10°C 环境, -30°C 下的抗剪强度衰减率则降低 10.56% 。基于抗剪强度劣化率分析,盐渍土的抗剪强度衰减率与循环冻融次数呈一阶指数函数关系:

$$f(N) = f_1(1 - T) \text{Exp}\left(\frac{N}{f_2(1 - T)}\right) + f_3(1 - T) \quad (2)$$

式中: $f(N)$ 为抗剪强度衰减率; N 为循环冻融次数, 次; T 为冻结温度, $^{\circ}\text{C}$; f_1, f_2, f_3 表示为一阶指数函数

的回归参数, 与冻结温度 T 呈线性关系。

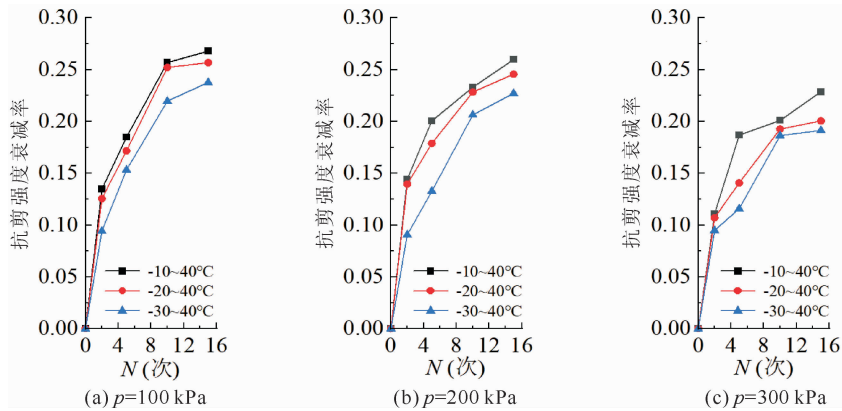


图 8 抗剪强度劣化率与冻融次数的关系

2.3 抗剪强度参量分析

图 9、图 10 为盐渍土的抗剪强度参量。随着循环冻融次数增大, 黏聚力经历了快速衰减、缓慢降低、逐渐趋于稳定的演化规律, 快速衰减发生在第 2

次冻融附近, 黏聚力在 N 为 5~10 时衰减幅度减缓。当循环冻融次数增至 15 次时, 损伤累积速度减缓, 黏聚力逐渐趋于稳定。

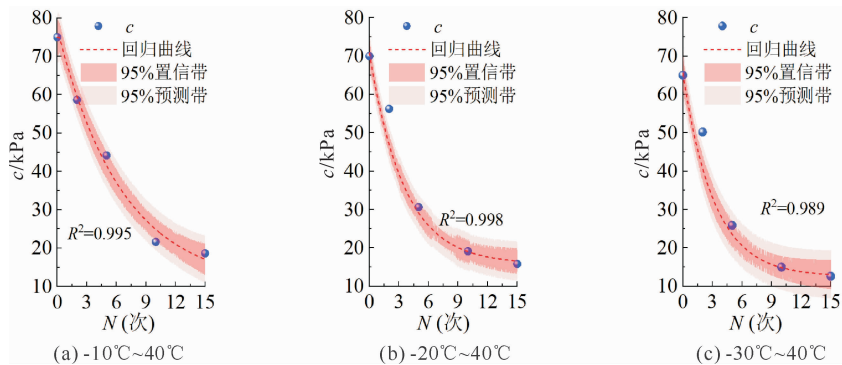


图 9 循环冻融效应下黏聚力的演化规律

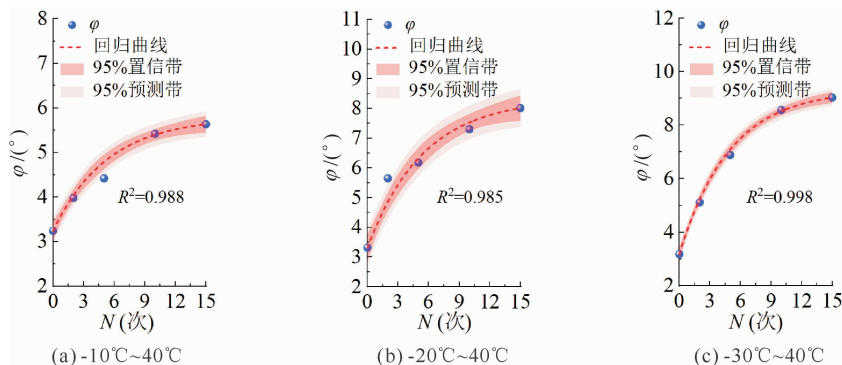


图 10 循环冻融效应下内摩擦角的演化规律

若以固结围压 100 kPa 为例分析, 冻结温度为 -10°C 时, 未发生冻融时 ($N=0$) 黏聚力为 75 kPa。当 N 增至 2、5、10 和 15 时, 黏聚力分别降低

22.75%、60.15%、76.92% 和 80.58%。当冻结温度为 -10°C 时, 未发生冻融时 ($N=0$) 黏聚力为 70 kPa, 当 N 增至 2、5、10 次和 15 次时, 黏聚力分别降

低 19.64%、56.22%、72.65% 和 77.39%。当冻结温度为 -10°C 时,未发生冻融时 ($N=0$) 黏聚力为 65 kPa,当 N 增至 2、5、10 和 15 时,黏聚力分别降低 21.80%、41.08%、71.16% 和 75.09%。由此表明,黏聚力下降幅度在前期 (2~10 次) 非常剧烈,后期 (10~15 次) 趋于平缓。当冻结温度降至 -20°C 和 -30°C 时,黏聚力表现出劣化趋势。由此表明,冻结温度越低导致的土体结构弱化程度加深,引起盐渍土黏聚力降低。当循环冻融超过一定次数时,土颗粒排列逐渐趋于稳定状态,黏聚力逐渐趋于稳定。

随着循环冻融次数增加,内摩擦角表现为先迅速增加后缓慢增加的指数增长,增大主要集中于第 1、2 次循环冻融,平均增长率达到 10.70%、12.60%、13.56%。当 N 达到 15 时,平均增长率分别为 3.30%、5.26% 和 6.58%。研究表明,循环冻融作用破坏了盐渍土的原始胶结结构,较大土颗粒因冻胀损伤而破碎为小颗粒,土颗粒接触点增多诱使内摩擦角增大。

2.4 盐渍土破坏模式分析

盐渍土的典型破坏模式,包括剪切破坏、鼓胀破坏两类。由于试验数据偏多,以典型破裂为例分析如图 11 所示,图中左侧 $N=0$ 、 $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$,作为对比;右侧 3 个: $N=10$ 、 $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。由图 11 可知,未发生循环冻融时 ($N=0$),100 kPa~300 kPa 条件下土样表面析出较少硫酸盐晶体,均发生显著剪切破坏。围压约束作用下,土样表面未出现明显的微裂隙。加载作用下土样因内部损伤累积产生了一条对向贯穿的剪切裂隙 (S_1),导致端面向右下侧滑移而破坏。由此可见,未发生循环冻融作用时,应力扰动是诱使盐渍土发生土颗粒损伤累积的主要原因。

随着循环冻融次数增多,土样逐渐析出硫酸盐晶体,冻胀损伤和盐蚀损伤逐渐累积^[19],剪切破坏或鼓胀破坏。当固结围压为 100 kPa 时,盐渍土表面附着了大量白色硫酸盐晶体,复杂应力环境下形成了两条局部未贯通的剪切裂隙 (S_2 、 S_3),以剪切破坏为主(微鼓胀)。当固结围压增至 200 kPa 时,盐渍土出现了典型的鼓胀破坏,加载作用下土样上端形成了一条非贯通剪切裂隙 (S_4)。当固结围压增至 300 kPa 时,土样出现了明显鼓胀破坏,土样因压裂隙 (T_1) 与剪切裂隙 (S_5) 的交叉形成了局部破裂区。由此可见,循环冻融过程中,土样中硫酸盐晶体的析出、冻胀和盐蚀的累积损伤共同导致了土体劣化,最终表现出不同破坏形态,破裂模式因固结围压

增大由剪切破坏向鼓胀破坏转变。

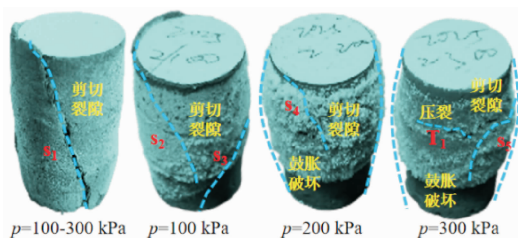


图 11 盐渍土的典型破坏模式

3 结论

(1) 盐渍土在阶段 I 以弹性变形为主,应力-应变曲线呈线性增长。阶段 II 以弹塑性变形为主,应力-应变曲线呈屈服增长。阶段 III 的应力-应变曲线无限趋近于极限偏应力,产生显著的塑性变形。

(2) 随着循环冻融次数增大,抗剪强度呈先快速衰减后缓慢稳定的对数函数变化,临界状态线斜率呈先降低后增大的趋势。抗剪强度与冻结温度呈正相关,抗剪强度衰减率与循环冻融次数呈一阶指数关系。

(3) 随着循环冻融次数增大,黏聚力经历快速衰减、缓慢降低、逐渐趋于稳定的演化特征,内摩擦角表现为先迅速增加后缓慢增加。盐渍土的抗剪强度参量均与循环冻融次数呈指数函数关系。

(4) 循环冻融作用下破坏模式包括剪切破坏、鼓胀破坏。未发生循环冻融时,以剪切破坏为主。随着循环冻融次数增大,冻胀损伤与盐蚀损伤共同导致土样由剪切破坏向鼓胀破坏过渡。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报,2022,59(1):10-27.
- [2] 周佳逸,宁琪,李祥,等. 不同有机物料施用对滨海盐渍土降盐培肥及大豆促生抗逆的影响[J]. 土壤,2025,57(3):612-620.
- [3] 郑方,邵生俊,王松鹤. 复杂应力条件下冻融作用对黄土强度的影响[J]. 岩土工程学报,2021,43(S1):224-228.
- [4] 郑方,宋战平,王加辉,等. 大温差下乌兹别克斯坦盐渍土力学特性及路基边坡稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S1):149-153.
- [5] 李宏波,李盛,于广云,等. 超硫酸盐渍土固化强度及冻融特性试验研究[J]. 工程科学与技术,2024,56(6):147-160.

(下转第 48 页)

- 观孔隙及抗渗性能影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(8):823-830.
- [18] 刘旭. 低气压环境对混凝土引气效果及孔结构影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [19] Chen Xin, Liu Xu, Tian Bo, et al. Effect of low atmospheric pressure on air entrainment in cement. Based materials: An on-site experimental study at different elevations[J]. Materials, 2020, 13(18):3975.
- [20] Zuo Shenghao, Yuan Qiang, Huang Tingjie, et al. Rheology and air entrainment of fresh Portland cement mortars in simulated low air pressure environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 135:104848.
- [21] Gao Wenzhong, Qi Jiaye, Yang Xuan, et al. Experimental investigation on bubble departure diameter in pool boiling under sub-atmospheric pressure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134:933-947.
- [22] Yagov V V, Gorodov A K, Labuntsov D A. Experimental study of heat transfer in the boiling of liquid sat low pressures under conditions of free motion. Pdf[J]. Plenum Publishing Corporation, 1970, 18(4):624630.
- [23] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [24] 李祝文, 桂霖彬, 张飞, 等. 粉煤灰及矿粉对 C40 高性能混凝土性能影响的研究[J]. 建材世界, 2025, 46(2):24-28.
- [25] 陈平, 夏海洋, 胡成, 等. 多元固废基复合胶凝材料的硬化特征与抗蚀性能研究[J]. 混凝土, 2025(3):24-28.
- [26] 屠艳平, 白登显, 程书凯, 等. 矿粉和生石灰高温改性对磷石膏水泥基材料性能影响[J]. 无机盐工业, 2024, 56(6):94-101.
- [27] 赵杰. 掺矿粉与粉煤灰高强度水工混凝土性能研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(2):36-39.
- [28] 田威, 万嘉豪, 程续, 等. 钢渣矿渣基胶凝材料协同固碳性能与微观结构[J/OL]. 建筑材料学报, 1-9 [2025-04-21]. <https://link.cn.net/urlid/31.1764.tu.20241129.1344.006>.
- [29] Cheng Xu, Tian Wei, Yuan Qiang, et al. Effect of carbon dioxide mineralization curing on mechanical properties and microstructure of Portland cement-steel slag-granulated blast furnace slag ternary paste[J]. Construction and Building Materials, 2024, 431:136553.
- [30] 吴泽媚, 毛浩宇, 郑新颜, 等. 高原复杂环境下水泥基材料微结构及性能研究进展[J/OL]. 湖南大学学报(自然科学版), 1-19 [2025-04-21]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1061.n.20250417.175.002>.
- [31] 符睿, 段旭, 刘建宇, 等. 大理、理塘和林芝气象要素的日变化特征对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(3):12-17.
- [32] 水泥胶砂抗冻性试验方法:GB/T 41060—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

(上接第 7 页)

- [6] 夏映映, 姜李潮. 海相盐渍土电阻率预测模型研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(9):12-16, 84.
- [7] 张秉来, 刘宇平, 周林虎, 等. 盐渍土地地区某输电线路地质灾害分布特征及危险性现状评估[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(5):37-38, 43.
- [8] Cheng Shukai, Wang Qing, Wang Jiaqi, et al. Effects of freeze-thaw cycle on mechanical properties of saline soil and Duncan-Chang model[J]. Geomechanics and Engineering, 2024, 38(3):249-260.
- [9] 赵辉伟, 邴慧. 基于超声波速的冻融盐渍土强度预测模型构建[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2):612-624.
- [10] 邓彩虹, 郝广延, 吴勇刚, 等. 粗颗粒盐渍土工程特性与路基改良方法研究进展[J]. 公路, 2025, 70(6):25-31.
- [11] 张莎莎, 叶素纤, 张林, 等. 粗粒盐渍土路基水热盐力耦合方程修正及试验验证[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3):31-40.
- [12] 王景辉, 张卫兵, 唐莲, 等. 水盐运移对硫酸盐渍土盐-冻胀规律的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6):108-115.
- [13] 周凤玺, 周志雄, 赵文沧, 等. 寒旱区硫酸盐渍土特征温度及盐冻胀特性[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4):58-67.
- [14] 周志雄, 周凤玺, 张明礼, 等. 降雨作用下硫酸盐渍土水-热-盐迁移及变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(8):2056-2068.
- [15] 张少英, 邵帅, 邵生俊, 等. 冻融循环下盐渍水泥改良风积沙三维力学特性[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(6):1648-1663.
- [16] 唐先习, 吕闻起, 李明泽, 等. 温度对含硫酸钠盐黄土土水特性影响规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(1):131-139.
- [17] 栾恩铭, 唐先习, 吕闻起. 冻融环境下石灰对盐渍土强度与稳定性影响机理[J]. 公路, 2025, 70(9):236-247.
- [18] 张莎莎, 钱宇, 王利鑫, 等. 砾质硫酸盐渍土道基水盐迁移及变形特征[J]. 湖南大学学报, 2025, 52(9):48-58.
- [19] 张喆, 李盛, 李宏波, 等. 盐渍土盐冻胀机理及多场耦合模型研究进展[J]. 西北工程技术学报(中英文), 2025, 24(3):262-273.