

DOI: 10.11779/CJGE2024S20027

# 软黏土带压冻融循环下不固结力学特性试验研究

郎瑞卿<sup>1,2,3</sup>, 裴璐熹<sup>1</sup>, 孙立强<sup>\*4</sup>, 冯守中<sup>5</sup>

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 3. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 4. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 5. 滁州学院土木与建筑工程学院, 安徽 滁州 239001)

**摘要:** 人工冻结法和季节性冻土地区土体通常在一定围压下经历冻融循环作用。受到冻融围压和不排水条件影响, 融化后土体残存超孔压, 并非完全固结状态, 开展此工况下土体不排水力学性能研究具有重要工程和科学意义。通过自主改进的温控三轴仪, 对重塑软黏土开展冻融后未完全固结不排水三轴剪切和微观试验, 分析了冻融围压、次数和冻结温度对冻融后软黏土力学特性影响。结果表明: 与零围压相比, 带围压冻融后土体中絮凝结构和孔隙数量增大, 加剧了冻融对土体强度和模量的弱化作用; 随着冻结温度降低和冻融次数增大, 土体力学性能弱化效应越明显。

**关键词:** 冻融围压; 冻融循环; 不排水力学特性; 三轴试验; 微观结构

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0043-06

作者简介: 郎瑞卿(1991—), 男, 副教授, 主要从事土与结构物相互作用方面的研究工作。E-mail: tculrq@163.com。

## Experimental study on unconsolidated mechanical properties of soft clay under freeze-thaw cycles with confining pressure

LANG Ruiqing<sup>1, 2, 3</sup>, PEI Luxi<sup>1</sup>, SUN Liqiang<sup>4</sup>, FENG Shouzong<sup>5</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing City, Jiangsu Province 300401, China; 3. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 4. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 5. School of Civil and Architectural Engineering, Chuzhou University, Anhui 239001)

**Abstract:** The artificial freezing method and the soil in seasonally frozen soil areas usually undergo freeze-thaw cycles under a certain confining pressure. Affected by the freeze-thaw confining pressure and undrained conditions, the residual excess pore pressure of the melted soil results in that the soil is not in a fully consolidated state. Therefore, conducting researches on the undrained mechanical properties of soil under this condition is of great engineering and scientific significance. In this study, the undrained triaxial shear tests and microscopic scanning tests on the remolded muddy clay after freeze-thaw cycles using the self-developed temperature controlled triaxial apparatus are conducted. The effects of freeze-thaw confine pressure, the freeze-thaw cycles and freezing temperature on the mechanical properties of post-freezing and thawing silty clay are analyzed. Compared with that without no confining pressure, the number of flocculation structures and pores in the soil increases after freeze-thaw under confining pressure, thus the weakening effects of freeze-thaw cycles on the strength and modulus of soil are accelerated. As the freezing temperature decreases and the number of freeze-thaw cycles increases, the weakening effects of muddy clay become more obvious.

**Key words:** freeze-thaw confining pressure; freeze-thaw cycle; undrained mechanical property; triaxial test; microstructure

## 0 引言

人工冻结法已在中国软土地区得到了广泛应用<sup>[1]</sup>, 受到既有建筑物、土体埋深等影响, 地基土通常在一定围压下进行冻结和融化。土体主动融化时, 受到围压和解冻速率共同影响, 土体会产生一定量超孔压, 融化后处于未完全固结状态; 季节性冻土地区地基在外荷载作用的同时, 还受到季节交替带来的多次冻融

作用, 若排水条件较差, 融化后土体会残存部分超孔压, 使土体也处于未完全固结状态, 直接影响其力学特性<sup>[2]</sup>。因此, 开展带围压冻融后土体未固结状态下

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277133, 52078336); 中国博士后基金面上项目(2022M721000); 中国科协青年托举工程(YESS20230586); 天津市研究生科研创新项目(2022SKYZ179)

收稿日期: 2024-06-21

\*通信作者(E-mail: slq0532@126.com)

表 1 试验用土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of saturated soft clay

天然重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	重塑土重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	干重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	天然含水 率/%	塑性指 数 $I_p$	液限含水率 $w_L$ /%	相对质量 密度 $G_s$	渗透系数 $k$ / (m·s <sup>-1</sup> )	初始孔隙 比 $e_0$	压缩模量 $E_{s1-2}$ /MPa
17.80	17.80	12.06	48.0	23.7	46.5	2.73	$3.0 \times 10^{-9}$	1.22	3.6

不排水力学特性研究具有重要实践价值。

目前,已有较多国内外学者分析了冻融循环次数<sup>[3-4]</sup>、冻融温度<sup>[5-6]</sup>等因素对土体力学特性的影响,并得出许多值得借鉴的成果。但上述研究均未考虑冻融过程中围压的影响。为此,张建新等<sup>[7]</sup>开展了带围压冻融后土体固结不排水三轴剪切试验,试验表明土体带压冻融后会残存一部分超孔压,但未分析该部分超孔压对其不排水力学特性的影响。因此,对于残余超孔压下土体不排水力学性能的研究还有待深入。

基于此,本文通过自主改进的可控冻融围压温控应力路径仪,对天津滨海地区软黏土带压冻融后未完全国结状态下不排水力学特性展开研究,分析了冻融围压、冻结温度和冻融次数对其力学特性和微观结构的影响。成果可为评估冻融软土地基短期稳定性和承载力提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设备

GDS 温控应力路径仪由温控压力室、温度补给设备和试验控制系统组成(图 1)。该设备利用二甲基硅油向压力室提供冷量和热量,通过增加自动供给阀门实现-40℃~160℃范围内冻结和融化过程中围压稳定控制,压力室内设有温度传感器实时监测土体温度。

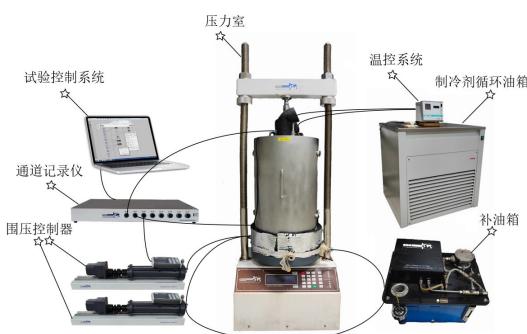


图 1 温控应力路径仪

Fig. 1 Temperature controlled triaxial apparatus

### 1.2 试验用土及试样制备过程

试验用土取自天津滨海某场地。为保障试样均匀性,采用重塑土进行试验:将原状土烘干后进行磨碎,并配制成含水率为48%的土体,均匀填至预压盒后堆载预压14 d,土的物理力学指标如表1所示。将土体制成尺寸为38 mm×76 mm圆柱试样后进行真空饱和。

### 1.3 试验方案及过程

主要分析冻融围压  $\sigma_{3,f}$ 、冻结温度  $T$ 、固结围压(剪切围压)  $\sigma_{3,c}$ 、冻融次数  $n$  对土体力学特性影响,具体试验方案如表2所示。

表 2 试验方案

Table 2 Test programs

序号	因 素	$T/^\circ\text{C}$	$\sigma_{3,c}$ /kPa	$\sigma_{3,f}$ / kPa	$n$
1	$\sigma_{3,f}$	-5	100/200/300	0	1
		-5	100/200/300	100	1
		-5	100/200/300	200	1
2	$T$	-5/-15/-25	100	100	1
3	$n$	-15	100	100	1/3/5/7/9

试验过程为:选取既定围压  $\sigma_{3,c}$  对土样进行固结;固结完成后将冻融围压  $\sigma_{3,f}$  调至既定值并进行冻结;当试样达到既定冷却温度  $T$  后静置 12 h,再将温度调至 20℃对土样进行融化,当温度达到 20℃后静置 12 h。冻融完成后直接进行不排水剪切试验,剪切时轴向应变速率设置为 0.1%/min,最大应变控制为 15%。

### 1.4 试验过程中土体温度和孔压变化

以冻融 3 次试验为例,对冻融过程中土体温度和孔压随时间变化进行分析,如图 2 所示。由图 2 和试验过程可知,土体首先在 20℃温度下进行排水固结,该过程中土体内孔压逐渐降低至零;孔压消散完成后进行降温冻结,该过程中土体孔压继续下降,但由于温度降低至负温使水结冰,孔压传感器无法准确测量其内部孔压;土体温度达到-15℃并保持 12 h 后进行升温融化,当温度超过 0℃后孔压传感器正常工作,增温过程中土体孔压不断增大;待温度达到 20℃后稳定 12 h,此时孔压基本不再增加。融化 3 次后,土体内残存超孔压为 31.0 kPa。之后即刻进行不排水剪切试验,剪切过程中孔压急剧增大后降低。

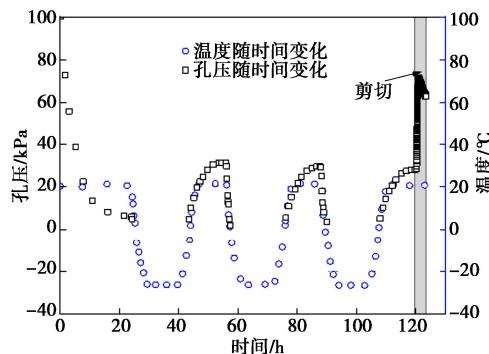


图 2 试验过程中孔压及温度变化

Fig. 2 Variation of pore pressure and temperature during tests

## 1.5 试验结果分析方法

对剪切过程中土体应力应变和孔压变化曲线、不排水强度和割线模量进行分析。其中不排水强度取竖向应变为 15% 时对应的偏应力; 割线模量  $E_u$  的表达式为

$$E_u = q / \varepsilon_a \quad (1)$$

式中:  $q$  为对应偏应力;  $\varepsilon_a$  为轴向应变,  $\varepsilon_a = 0.5\%$ 。

## 2 试验结果

### 2.1 围压对冻融循环结果影响

#### (1) 剪切试验结果

不同冻融围压冻融后土体剪切过程中超孔隙水压力及偏应力随轴向应变变化如图 3 所示。

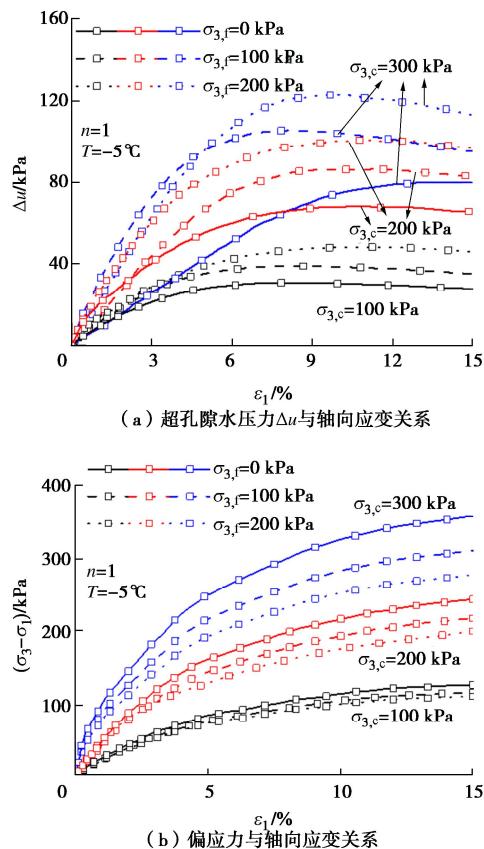


图 3 不同冻融围压下土体剪切试验结果

Fig. 3 Shear test results of soil under different freeze-thaw confining pressures

由图 3 (a) 可知, 不同冻融围压下试样超孔压随轴向应变发展规律较为接近, 均呈现出先增大后减小的现象。且冻融过程中施加的围压越大, 产生的超孔压越大: 与  $\sigma_{3,f}=0$  kPa 相比,  $\sigma_{3,f}$  为 100, 200 kPa 时, 超孔压峰值分别增加了 25.8%, 58.1% ( $\sigma_{3,c}=100$  kPa)、26.4% 和 44.1% ( $\sigma_{3,c}=200$  kPa), 29.6%, 55.5% ( $\sigma_{3,c}=300$  kPa)。由此可见, 冻融围压对剪切过程中超孔压发展具有较大影响。

由图 3 (b) 可以看出, 偏应力随着轴向应变增大而逐渐增大, 均出现应变硬化现象; 冻融过程中施加的围压越大, 相同应变对应的偏应力越小。

#### (2) 力学指标

不同  $\sigma_{3,f}$  下进行冻融循环后, 土体不排水抗剪强度和割线模量如图 4 所示。

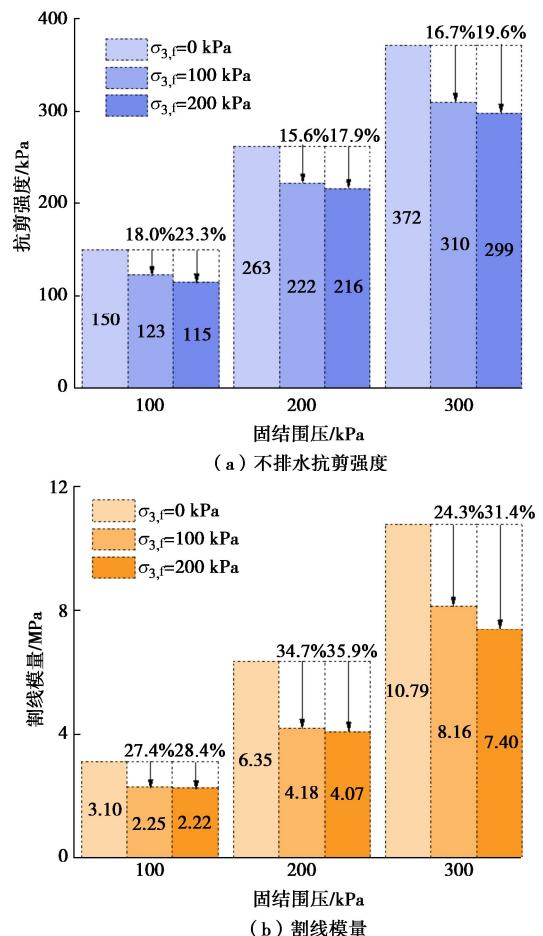


图 4 不同冻融围压下土体抗剪强度与割线模量

Fig. 4 Shear strengths and cut-line moduli of soil under different freeze-thaw perimeter pressures

由图 4 可知, 带围压冻融循环后土体强度和割线模量均小于不带围压冻融时的试验值。且随着  $\sigma_{3,f}$  的增大, 土体抗剪强度和割线模量均减小: 与冻融围压  $\sigma_{3,f}=0$  kPa 时相比, 冻融围压  $\sigma_{3,f}=100$  kPa 时, 土体抗剪强度降低了 18.0% ( $\sigma_{3,c}=100$  kPa); 冻融围压  $\sigma_{3,f}=200$  kPa 时, 土体抗剪强度降低了 23.3% ( $\sigma_{3,c}=100$  kPa), 而割线模量分别降低了 27.4%, 28.4%。

#### (3) 微观结构

对冻融围压为 0, 100 kPa 试样进行扫描电镜试验, 微观结构如图 5 所示。对比可知, 冻融围压  $\sigma_{3,f}=100$  kPa 土体絮凝结构 (方形) 和孔隙 (圆形) 大小及数量要明显多于  $\sigma_{3,f}=0$  kPa 土体:  $\sigma_{3,f}=100$  kPa 时土体孔隙最大孔径为 96 um, 而  $\sigma_{3,f}=0$  kPa 时土体最大孔

径为 55  $\mu\text{m}$ 。由此可见,冻融围压使得土体冻融后孔隙与絮状结构增多,且孔隙变大,验证了冻融围压会加剧土体力学指标衰减的结论。

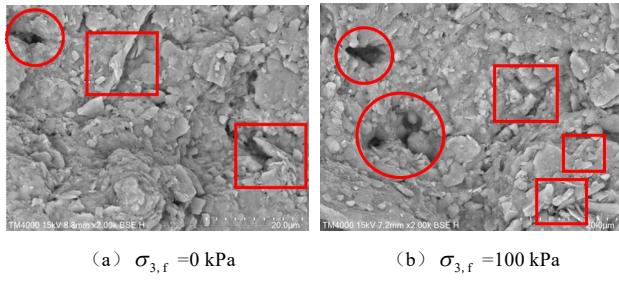


图 5 不同冻融围压下土体微观结构

Fig. 5 Microstructure of soil under different freeze-thaw confining pressures

## 2.2 冻结温度影响

### (1) 剪切试验结果

不同冻结温度冻融后土体剪切过程中超孔隙水压力及偏应力随轴向应变变化如图 6 所示。

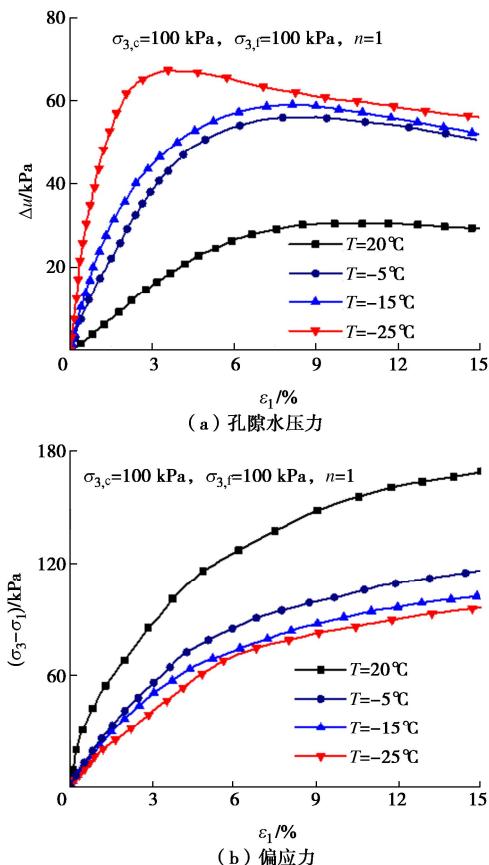


图 6 不同冻结温度下剪切试验结果

Fig. 6 Shear test results of soil under different freezing temperatures

由图 6 可知,不同冻结温度下土体超孔压随应变增大均呈现出先增大后减小的趋势,且冻结温度越低,产生的超孔压越大。不同冻结温度下试样偏应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )随轴向应变发展规律较为接近,均呈现出逐渐增大的现象,且冻结温度越小,相同应变下试样

的偏应力越小。

### (2) 力学指标

不同冻结温度冻融后土体抗剪强度和割线模量如图 7 所示。

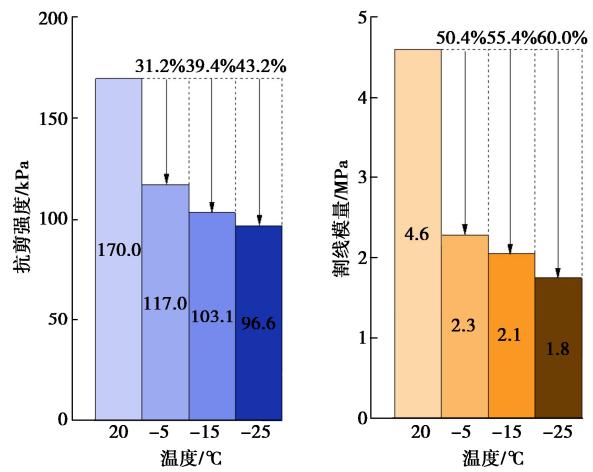


图 7 不同冻结温度下土体剪切强度与割线模量关系

Fig. 7 Relationship between shear strength and cut-line modulus of soil under different freeze-thaw temperatures

由图 7 可以看出,土体抗剪强度和割线模量均随着冻结温度降低而逐渐减小,且明显小于未冻融试验值;当冻结温度为-25℃时,土体强度较未冻融试验值降低了 42.2%,模量降低了 62.0%。

### (3) 微观结构

冻结温度为-5℃和-25℃下土体微观结构如图 8 所示。可以看出冻融后土体孔隙的大小和数量以及絮凝结构的大小随着冻结温度的降低逐渐增大和增多。该结果也验证了土体力学指标会随着冻结温度的降低而不断降低的结论。

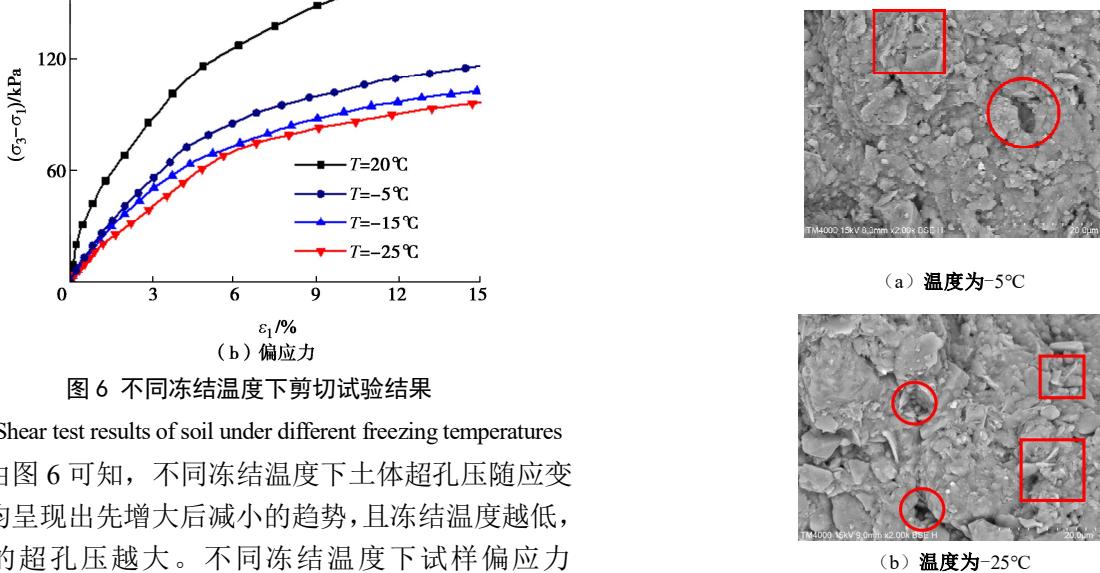


图 8 不同冻结温度下土体微观结构

Fig. 8 Microstructure of soil under different freezing temperatures

### 2.3 循环次数影响

#### (1) 剪切试验结果

不同冻融次数后土体剪切过程中超孔隙水压力及偏应力随轴向应变变化如图 9 所示。

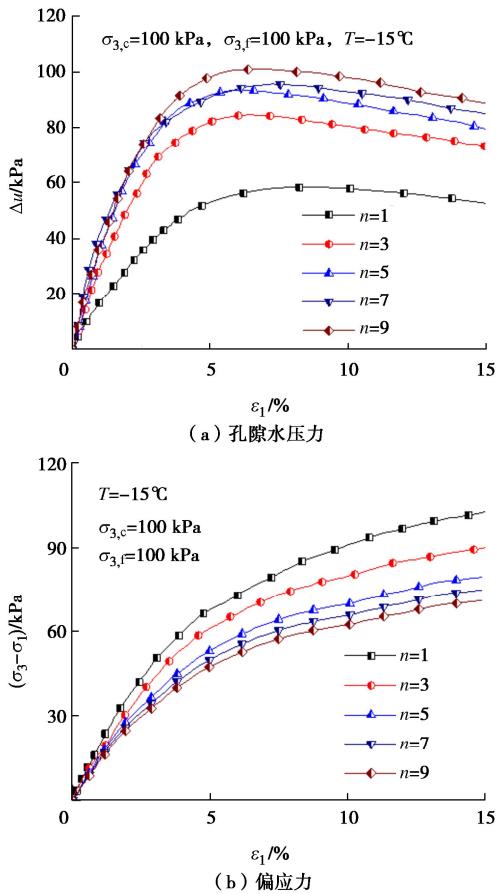


图 9 不同冻融次数下剪切试验结果

Fig. 9 Shear test results under different freeze-thaw cycles

由图 9 可知, 不同冻融循环次数后土体超孔压呈现出先增大后减小的现象, 且冻融过程中冻融循环次数越多, 产生的超孔压越大, 对应的峰值超孔压也越大。不同冻融循环次数下试样偏应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 随轴向应变发展均呈现出逐渐增大的现象, 且冻融循环次数越大, 相同应变下试样的偏应力越小。

#### (2) 力学指标

不同冻融循环次数下土体抗剪强度和割线模量如图 10 所示。由图 10 可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 土体剪切强度和模量逐渐减小, 但减小幅度随着循环次数的增加逐渐降低, 冻融次数超过 3 次后, 降低幅度较小; 当冻融循环次数为 9 次时, 土体强度较未冻融试验值降低了 57.8%, 模量降低了 62.5%。

#### (3) 微观结构

冻融 1 次和 3 次的土体微观结构如图 11 所示。由图 11 可以看出, 冻融后土体出现了一定量的孔隙和絮凝结构, 且孔隙的大小和数量以及絮凝结构的大小随

着冻融次数的增大而增多, 说明土体结构损伤会随着冻融次数的增加而不断增大。

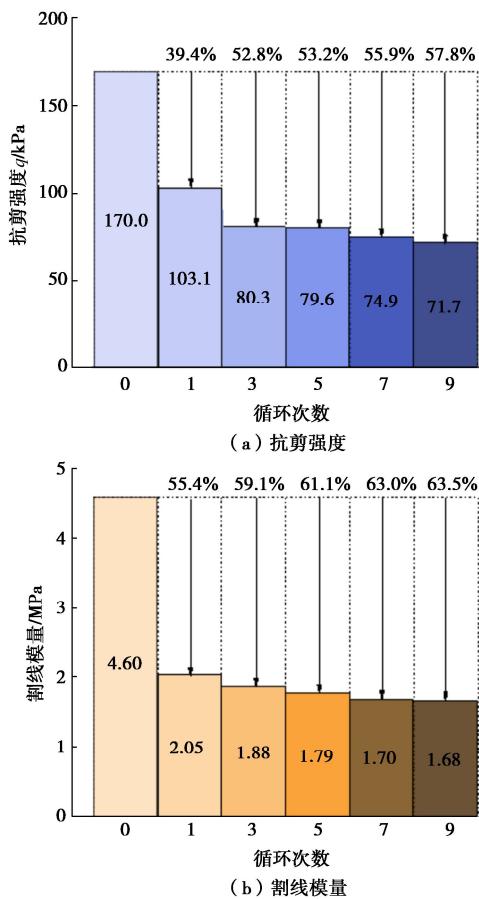


图 10 不同冻融循环次数下土体剪切强度与割线模量

Fig. 10 Shear strengths and cut-line modulus of soil under different numbers of freeze-thaw cycles

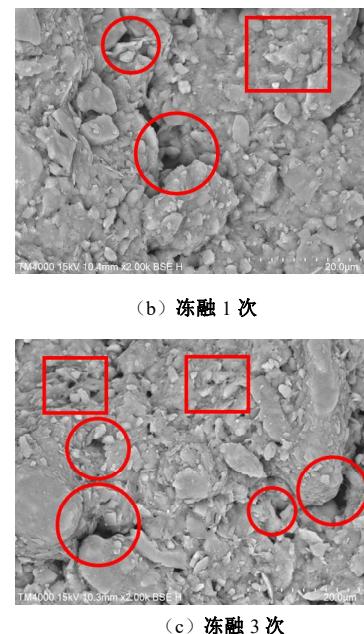


图 11 不同冻融循环次数下土体微观结构

Fig. 11 Microstructure of soil under different freeze-thaw cycles

### 3 结 论

本文通过自主改进的温控三轴仪，对重塑软黏土开展带压冻融后未完全固结状态下不排水剪切试验，分析了冻融过程围压、冻结温度、冻融次数对土体力学特性的影响，同时采用 SEM 试验分析了冻融前后土体微观结构变化，得到以下 3 点结论。

(1) 冻融围压会使融化后土体内部残存部分超孔压，直接影响其不排水力学性能，且随着冻融围压的增大，冻融后土体剪切过程中超孔隙水压力越高，土体中絮凝结构和孔隙大小及数量均有所增加，导致其不排水强度和割线模量降低。

(2) 冻结温度越低，软黏土强度和模量弱化效应越明显，剪切过程中超孔隙水压力越高，冻融后土体中絮凝结构和孔隙大小及数量增加。

(3) 随着冻融次数的增大，软黏土抗剪强度和模量逐渐降低，但降低幅度逐渐减缓，冻融超过 3 次后，抗剪强度和割线模量降幅较小。

### 参 考 文 献：

- [1] 张冬梅, 逢 健, 任 辉, 等. 港珠澳大桥拱北隧道施工变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1632-1641. (ZHANG Dongmei, PANG Jian, REN Hui, et al. Observed deformation behavior of Gongbei Tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge during construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1632-1641. (in Chinese))
- [2] 郝冬雪, 王 磊, 陈 榕, 等. 冻融循环下粉砂中螺旋锚抗拔稳定模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 57-65. (HAO Dongxue, WANG Lei, CHEN Rong, et al. Experimental investigation on uplift stability of helical anchors in silty sand under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(1): 57-65. (in Chinese))
- [3] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[M]// Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1979: 73-92.
- [4] 王 伟, 池旭超, 张 芳, 等. 冻融循环对滨海软土三轴应力应变曲线软化特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 140-144. (WANG Wei, CHI Xuchao, ZHANG Fang, et al. Effect of freeze-thaw circles on softening behaviors of triaxial stress-strain curve of costal soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 140-144. (in Chinese))
- [5] KIM I, LEE D H, KIM Y, et al. Effects of pore water volume on  $K_0$  for sand subject to freezing and thawing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(3): 04020173.
- [6] 马芹永, 黄 坤, 马冬冬, 等. 不同中主应力系数和负温条件下冻结砂土真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 870-878. (MA Qinyong, HUANG Kun, MA Dongdong, et al. True triaxial tests on frozen sandy soil under different intermediate principal stress coefficients and negative temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 870-878. (in Chinese))
- [7] 张建新, 马昌虎, 郎瑞卿, 等. 带围压冻融循环下滨海重塑软土力学特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(7): 1863-1874. (ZHANG Jianxin, MA Changhu, LANG Ruiqing, et al. Experimental study on mechanical properties of coastal remolded soft soil subjected to the freeze-thaw cycle under confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(7): 1863-1874. (in Chinese))

(编校：孙振远)