

冻融循环下海相黏土变形特性试验研究

韩昱¹, 李永升², 张亚辉¹, 王育林¹, 刘俊伟^{1,*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛中航工程试验检测有限公司, 青岛 266031)

摘要: 冻融循环作为影响海相黏土动力学特性的关键劣化因素, 其影响机制亟待深入探究。为探究冻融循环作用下海相黏土的动力特征规律, 针对重塑黏土开展一系列不排水循环单剪试验, 研究了冻融循环次数与冻融循环温度对海相黏土动力特性的影响。研究表明: 相同冻融条件下, 循环应力比的增加, 导致应变变化速度加快, 达到破坏应变所需要的次数降低; 冻融循环次数的增加与冷端温度的降低导致土体内部结构发生破坏, 使土样破坏振次提前、软化速度加快, 经历 5 次冻融循环后变化幅度降低趋于稳定; 基于试验结果建立了冻融循环次数与破坏振次的函数关系; 在大循环应力比下, 冻融循环作用对循环剪切软化的影响相对较小。

关键词: 海相黏土; 冻融循环; 应力-应变滞回曲线; 破坏振次; 软化指数

中图分类号: TU411.6; TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)01-0008-08

Experimental study on the deformation characteristics of marine clay under freeze-thaw cycles

HAN Yu¹, LI Yongsheng², ZHANG Yahui¹, WANG Yulin¹, LIU Junwei^{1,*}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Zhonghang Engineering Testing and Testing Co., Ltd., Qingdao 266031, China)

Abstract: Freeze-thaw cycles, as a critical deteriorating factor affecting the dynamic characteristics of marine clay, urgently demands further exploration into its underlying mechanisms. To investigate the dynamic characteristics of marine clay under freeze-thaw cycles, a series of undrained cyclic simple shear tests were conducted on remolded clay to study the effects of the number and temperature of freeze-thaw cycles on the dynamic characteristics of marine clay. The research findings indicate that under constant freeze-thaw conditions, an increase in the stress cycle ratio leads to accelerated strain rates and a lower number of cycles required to reach failure strain. Additionally, as the number of freeze-thaw cycles increases and the cold-end temperature decreases, there is microstructural damage within the soil, resulting in earlier failure vibrations and accelerated softening. However, after five freeze-thaw cycles, the magnitude of these changes stabilizes. A functional relationship between the number of freeze-thaw cycles and failure vibrations has been established based on the test results. It is also observed that the softening behavior of soil becomes less sensitive to freeze-thaw cycles under high stress cycle ratios.

收稿日期: 2024-03-03

基金项目: 山东省优秀青年基金(ZR2021YQ31); 国家自然科学基金(4227135)

作者简介: 韩昱(1999—), 男, 山东济南人。硕士, 研究方向为岩土工程。E-mail: 596400784@qq.com。

* 通信作者: 刘俊伟(1983—), 男, 山东潍坊人。博士, 教授, 主要从事滨海岩土防灾减灾方面的研究。E-mail: liujunwei@qut.edu.cn。

Key words: marine clay; freeze-thaw cycles; stress-strain hysteresis loop; failure vibrations; softening index

随着国家“双碳”目标和“十四五”规划对新能源需求的日益增长,沿海滩涂地区的光伏、风电等能源工程建设逐渐增多。在我国沿海城市的近海地区,淤泥黏土分布广泛。由于其高含水率,淤泥黏土常呈现软塑状态^[1]。这种特殊的物理性质可导致地基承载能力不足,特别是在冻融循环的耦合影响下,海相黏土的结构破坏和强度降低更为显著,这对上部结构的稳定性构成了严重威胁。

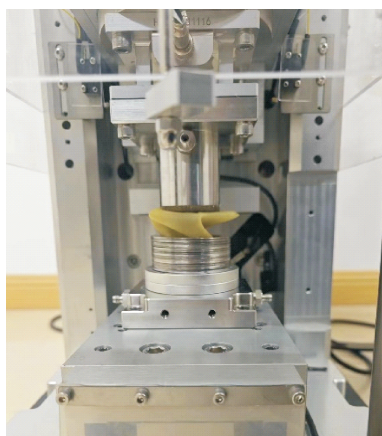
土体在冻融过程中主要受到冻融冷端温度和冻融次数等因素的影响^[2-3]。冻融冷端温度会对土体力学特性产生较大影响^[4-5],冷端温度越低,融化后强度降低越显著。很多学者认为冷端温度的降低会使土体结构发生破坏^[6]。有研究者通过静力试验发现土体黏聚力随冻融循环次数先减小后增大再减小,内摩擦角先增大后减小并趋于稳定^[7-8]。部分学者研究认为,随着冻融循环次数的增加,土体的抗剪强度会下降然后趋于稳定^[9-10]。还有学者认为不同土体存在不同的最不利冻融温度梯度,在此条件下土体的冻融力学性质最差^[11]。

目前,关于重塑淤泥黏土的力学特性研究已经取得了一定的成果,黏土动力特性的研究主要集中在动三轴、共振柱等方面,部分学者利用单剪仪研究了未冻融情况下黏土动力特性^[12-13],而冻融循环作用下循环单剪试验相对较少。循环单剪试验能够很好地模拟滨海复杂循环荷载作用下基础与周围土体的相互作用机制,是研究循环荷载作用下土体循环剪切特性的重要手段^[14]。因此,深入研究冻融循环下海相黏土的力学行为,可以更全面地了解沿海地区土体的工程特性,对于完善冻融循环下黏土的本构模型、提高沿海能源基础设计的科学性具有重要意义。

1 试验介绍

1.1 试验设备

本文所运用的动态循环单剪仪(EDCSS)采用叠环式剪切盒设计,在荷载施加方面,动态循环单剪仪分为竖直与水平两部分(图 1)。竖直方向通过伺服电机控制带有透水石的上接触座与土样接触,模拟竖向固结应力;水平方向则以带有透水石的底座与土样下方接触,实现剪切过程。试样为直径 50 mm、高 20 mm 的圆柱体,被橡皮膜包裹并通过聚四氟乙烯低摩擦剪切环进行半刚性侧向约束,确保 K_0 固结(室内土样在侧限条件完成的固结)有效,防止侧向膨胀,保持剪切横截面积恒定。为维持试样密闭性,剪切盒上部与轴向作动器压头间设有密封橡胶圈。试验过程中,竖向位移保持不变,试样环通过低摩擦剪切环滑移实现常体积剪切。



(a) 仪器正面



(b) 剪切盒侧面

图 1 动态循环单剪仪

1.2 试验土样及制备

为避免原状土均匀性差造成的试验误差,本次试验采用重塑土制样。土样取回后用塑料桶密封保存。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行一系列室内土工试验测定出淤泥土的物理性质,如表1所示。

具体制样步骤如下:①试验前将土样烘干、粉碎、过2 mm筛备用。②为确保土样含水率均匀,按照最优含水率15.6%采用喷雾法将蒸馏水均匀喷洒在土料上,并进行充分搅拌。喷雾完成后,将土料密封放置12 h,以确保水分在土样中均匀分布。③试样按照初始压实度95%采用静压法制作,并保持试样处于压缩状态30 min后脱模。④采用真空饱和法将试样抽真空4 h,浸水12 h,饱和完毕后用保鲜膜将试样密封。⑤对试样进行编号后,放入冷冻箱并冻结12 h,冻结完成取出后,再放置在23℃下的恒温恒湿环境中消融12 h,此过程为一次冻融循环。⑥对完成既定冻融循环次数后的试样进行循环单剪测试。

1.3 试验方案

在冻融循环试验中,冷端温度和冻融持续时间是核心参数。本研究设定了2个不同的冻结温度梯度,分别为-15和-5℃,以探究不同低温条件对土体性能的影响。同时,融化温度被设定为试验周期内的室温,即(23±2)℃,以保证试验条件的一致性和可重复性。

鉴于沿海能源结构物的基础埋深以及冻融深度的实际情况,本试验选定在轴向应力为50 kPa的条件下展开试验。正式测试之前为避免固结作用对冻融循环的影响,均将试件置于固结应力状态下20 min,后关闭排水阀开始剪切,视为不固结不排水剪切试验。剪切过程中轴向位移保持不变,实现常体积剪切。为研究风浪等荷载作用下基础周围土的变形特性,剪切加载波形采用正弦波,频率为0.1 Hz,具体试验方案如表2所示。其中循环应力比(CSR)为循环应力幅值与初始轴向固结应力的比值。

表1 土样基本物理参数

含水率 $\omega/\%$	比重 d_s	孔隙比 e	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$
76.10	2.69	1.65	68	35

表2 不固结不排水循环剪切试验方案

组类	冷端温度/℃	循环应力比	冻融循环次数 N_c
1	-5	0.12	
2	-5	0.14	0、1、3、5、7、9
3	-15	0.12	

2 试验结果分析

2.1 剪应力-剪应变关系

图2显示了未冻融循环时重塑海相黏土的剪应力-剪应变关系。由图可以看出,应力-应变滞回曲线关于原点对称,正负剪切方向变化轨迹相似。在循环剪切过程中滞回环的形状逐渐由密集变得稀疏,在剪

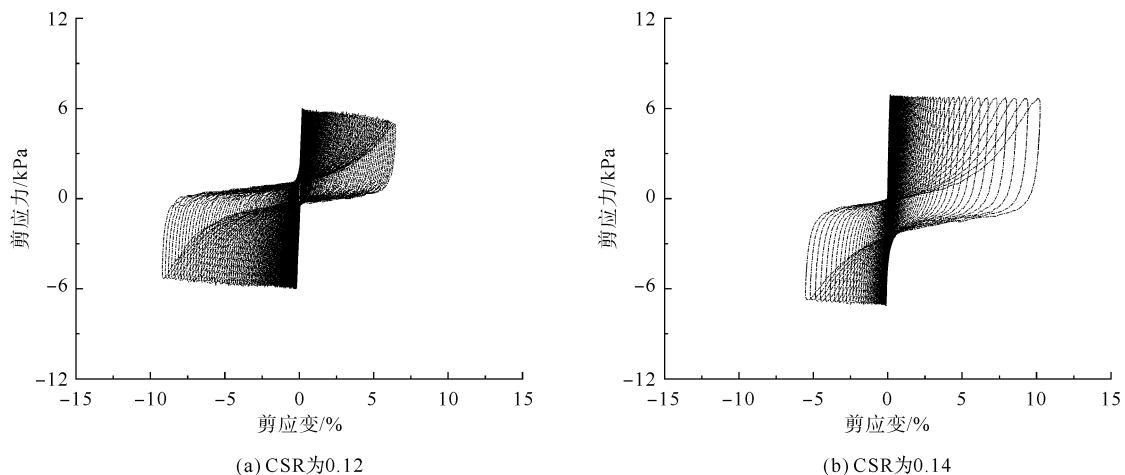


图2 未冻融下剪应力-剪应变关系

切初期,滞回曲线呈现出梭形特征,此时循环剪应变相对较小。随着循环次数的进一步增加,相邻滞回曲线间的应变差值显著增大,滞回曲线的形状也逐渐由梭形转变为 S 形,且整体变得更加稀疏。当循环应力比(CSR)为 0.14 时,循环振次对滞回曲线的影响更为显著,随着循环振次的不断增加,剪应变迅速累积,最终导致土体的完全破坏。

如图 3 所示,在冻融循环影响下,随着冻融循环次数的增加,剪应力-剪应变曲线的变化更加明显,滞回曲线明显稀疏,说明冻融后土体结构发生改变,抗剪强度降低。尤其在第 1 次冻融循环后,土体相较于未冻融前循环剪切弱化现象更加明显。在第 5 次循环后,土体对循环周期敏感性降低,冻融达到稳定状态,滞回曲线变化发展缓慢,同时由于冻融循环使土体结构发生改变,导致破坏不再对称。

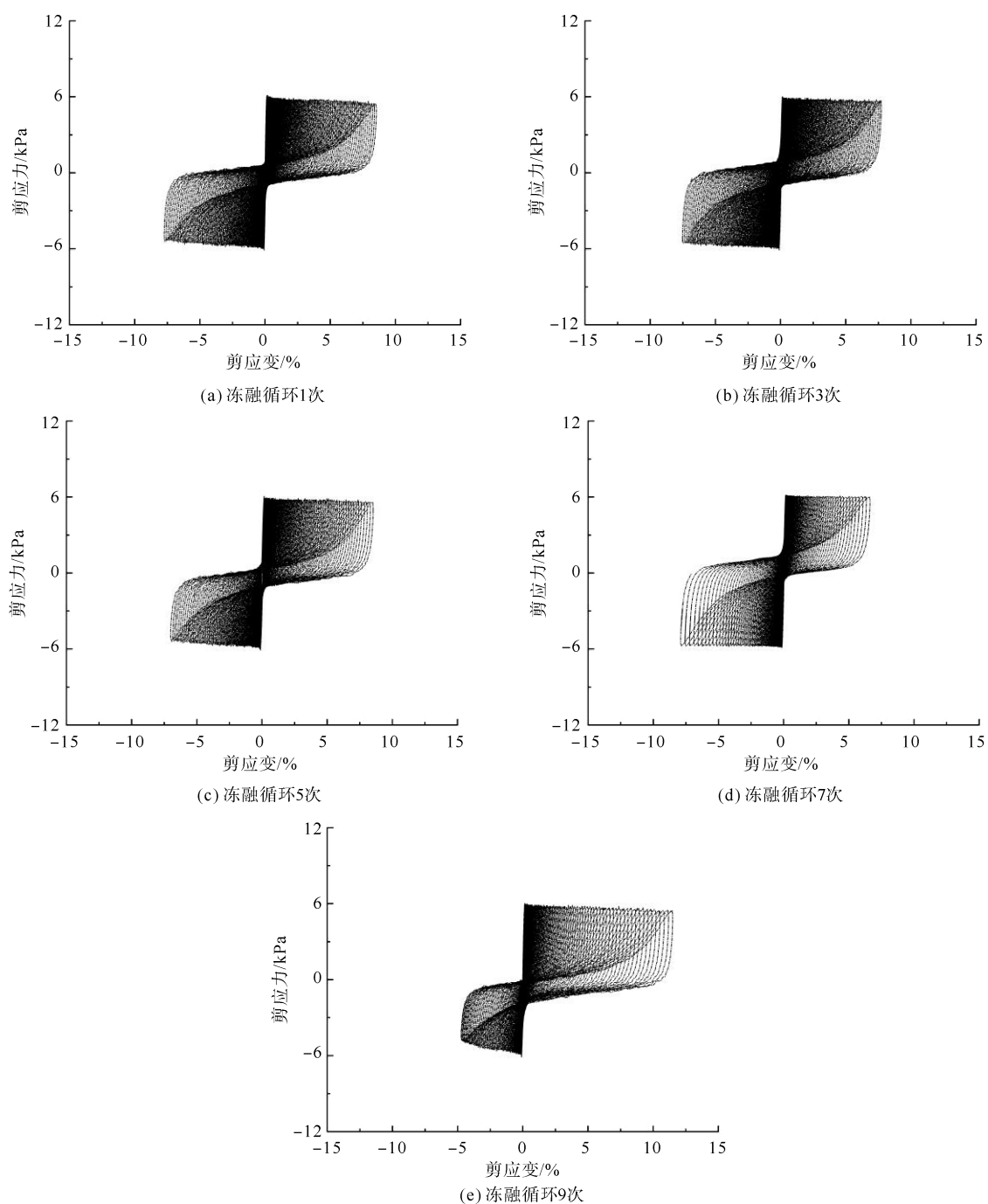


图 3 CSR 为 0.12 时 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环剪应力-剪应变关系

图4为CSR为0.14时剪应力-剪应变曲线,相较于CSR为0.12时,其相邻滞回环差值变大,滞回曲线整体更为稀疏,表明在大应力循环比影响下其剪切破坏速度更快,即相同冻融条件下,循环应力比越大,土体的动强度越低。

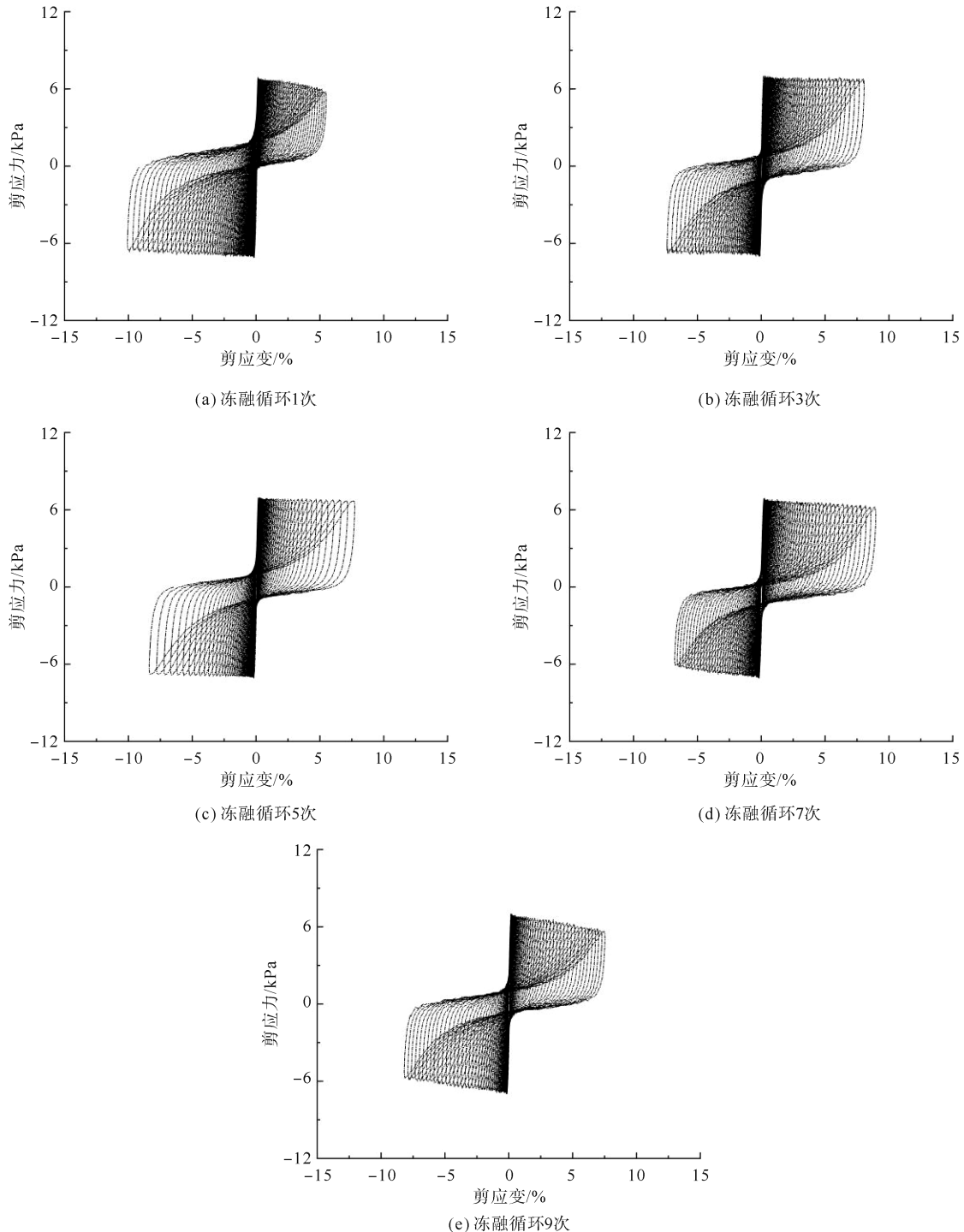


图4 CSR为0.14时 -5°C 冻融循环剪应力-剪应变关系

2.2 破坏振次分析

图5为剪应变与循环剪切次数的关系曲线。由图可以看出,在循环剪切的初期阶段,土体的应变增长幅度相对较小,保持在一个较为稳定的范围内。然而,循环荷载持续作用至一定次数,土样临近破坏的临界状态时,曲线中出现一个明显的应变转折点。在此转折点之后,应变几乎呈现出线性增长的趋势,土样

的变形速率显著加剧,显示出急剧增大的变形特性。在同一冻融温度下,随着冻融循环次数的增加,循环剪切次数逐渐减小,整体曲线向左移动。在第 5 次冻融循环后,左移速度变慢并趋于稳定,冻融循环次数对土体影响逐渐变小。分析认为这是由于土体随着冻融循环次数增加,土体颗粒的大小、形状及孔隙发生破坏重组并逐渐达到稳定状态,表现为土体破坏越来越快,并在 5 次冻融循环后逐渐稳定。

比较相同冻融循环次数下不同冷端温度的循环剪切次数发现,随着冷端温度降低,破坏振次相应减小,但减小的圈数较低。这是由于更低的冷端温度导致土样中水分形成更多的冰晶,增大了土体的空隙,加剧了土颗粒间的破坏作用,但土体的结构性并未完全破坏,冷端温度降低对土体的影响较小。

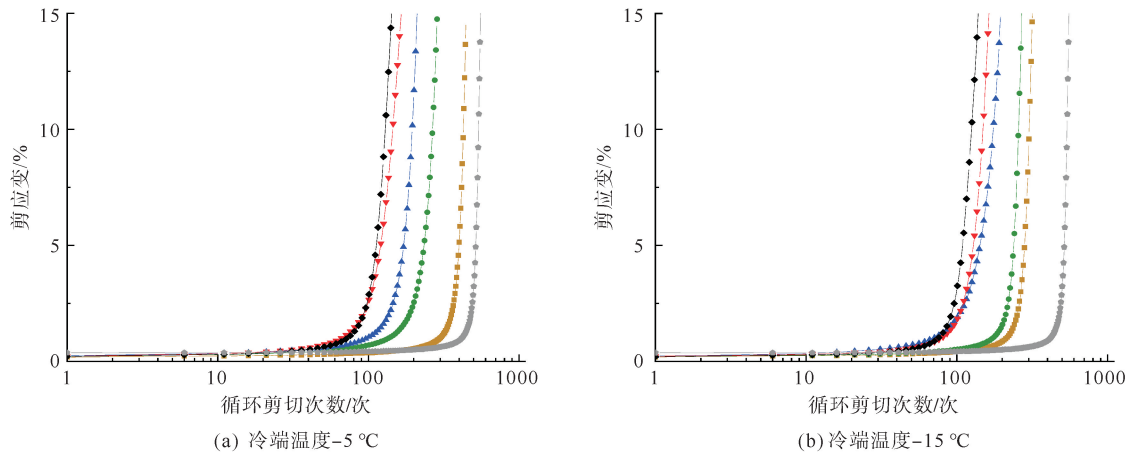


图 5 CSR为0.12时循环剪切次数与剪应变关系

—●— $N_c=0$; —■— $N_c=1$; —▲— $N_c=3$; —◆— $N_c=5$; —▼— $N_c=7$; —◆— $N_c=9$

选取不同循环应力比,相同温度下第 1、5、9 次冻融循环进行比较。如图 6 所示,随着循环应力比增大,破坏振次逐渐降低,土体破坏越来越快,这与未冻融条件下的趋势相似。同时,不同循环应力比对土体破坏振次的影响存在差异,在小循环应力比(0.12)时,冻融次数的增加对破坏振次的减小影响较为明显,随着冻融循环次数增加,破坏振次逐渐降低。而在大循环应力比(0.14)下,虽然随着冻融循环次数增加,破坏振次逐渐提前,但相较于 CSR 为 0.12 时,破坏振次下降不明显且速度较小。这一差异现象表明,在循环剪切过程中,循环应力比对土体抗剪强度的影响更为显著。

定义应变曲线的 2 条切线形成夹角的角平分线与应变曲线交点对应的应变为破坏点,达到破坏点所需循环圈数为破坏振次 N_f 。破坏振次 N_f 与冻融循环次数 N_c 关系为

$$N_f = A - BN_c + CN_c^2 \tag{1}$$

式中: A 、 B 、 C 均为常数,其具体数值及拟合效果已通过回归拟合得出,如图 7 所示。

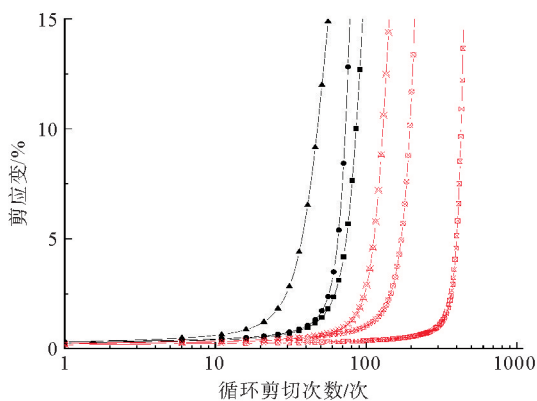


图 6 -5 °C冻融温度下剪切次数与剪应变关系

CSR为0.12: —○— $N_c=1$; —□— $N_c=5$; —△— $N_c=9$
 CSR为0.14: —■— $N_c=1$; —◆— $N_c=5$; —▲— $N_c=9$

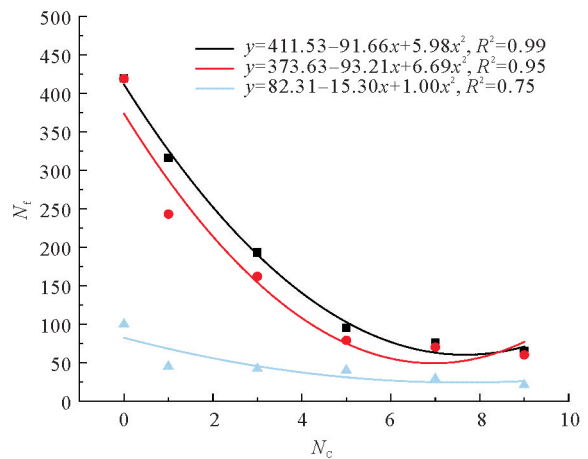


图 7 破坏振次拟合

■ -5 °C, CSR为0.12; ● -15 °C, CSR为0.12; ▲ -5 °C, CSR为0.14

由图7可知,该拟合公式具有较高的相关性,拟合效果良好,能够准确描述海相黏土在经历冻融循环后,土体的破坏振次与冻融循环次数之间的预测关系。

2.3 软化指数

参照 IDRISSE^[15]等对软化指数的定义,本文定义软黏土软化指数:

$$\delta = \frac{G_N}{G_1} = \frac{\frac{\tau_{N\max} - \tau_{N\min}}{\gamma_{1\max} - \gamma_{1\min}}}{\frac{\tau_{1\max} - \tau_{1\min}}{\gamma_{1\max} - \gamma_{1\min}}} = \frac{\frac{2\tau_d}{\gamma_{N\max} - \gamma_{N\min}}}{\frac{2\tau_d}{\gamma_{1\max} - \gamma_{1\min}}} = \frac{\gamma_{1\max} - \gamma_{1\min}}{\gamma_{N\max} - \gamma_{N\min}} \quad (2)$$

式中: G_1 、 G_N 为第1次和第 N 次循环土体的动剪切模量; τ_{\max} 、 τ_{\min} 分别为该次循环中最大剪应力与最小剪应力; γ_{\max} 、 γ_{\min} 分别为最大剪应变与最小剪应变。

图8为本试验中软化指数与循环剪切次数 $\delta - (\lg N)^2$ 的发展曲线。由图8(a)可知,在未冻融条件下,随着循环应力比的增大,土体软化指数呈非线性下降,软化速度逐渐加快,与应力-应变滞回曲线相关联,表明在大循环应力比下土体软化速度更快,循环抗剪强度低。

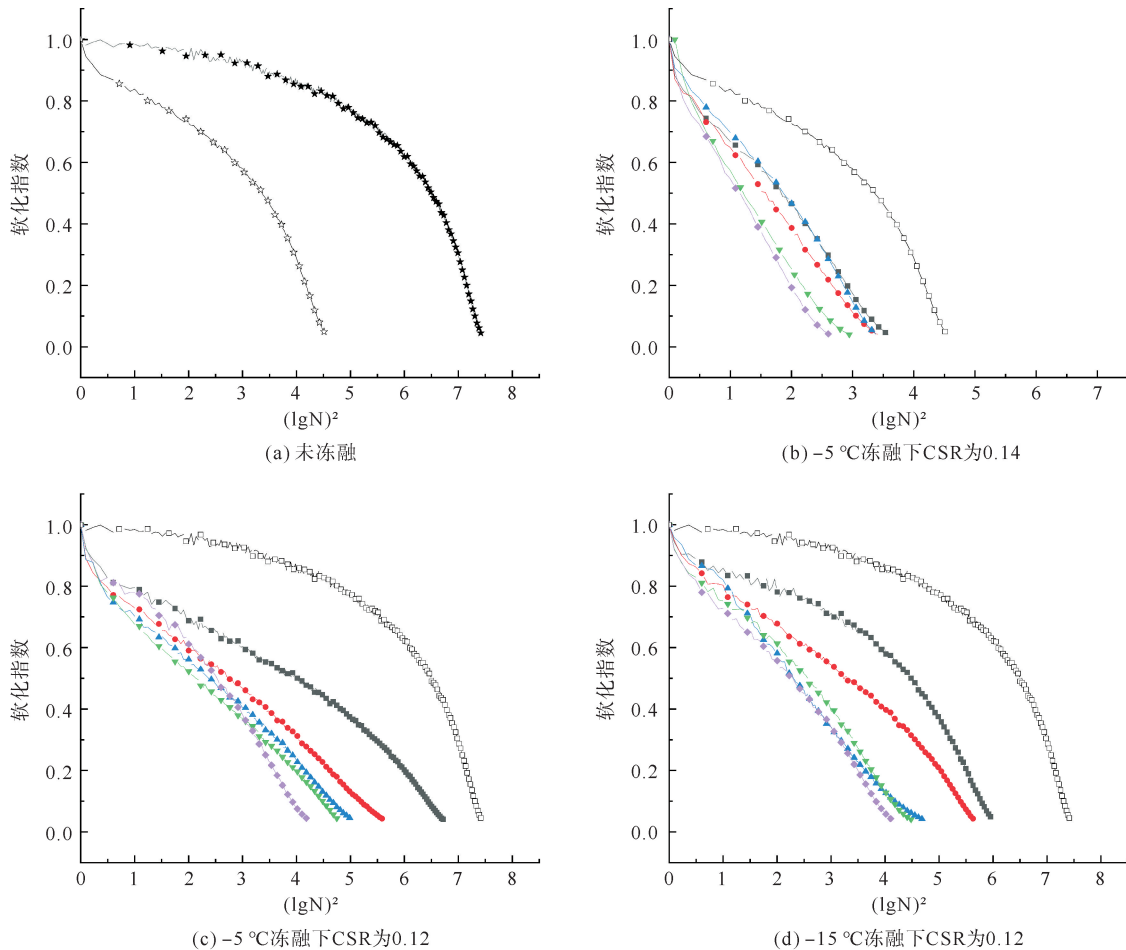


图8 软化指数与剪切循环次数关系

—★—CSR为0.12; —◆—CSR为0.14; —□— $N_c=0$; —■— $N_c=1$; —●— $N_c=3$; —▲— $N_c=5$; —▼— $N_c=7$; —◇— $N_c=9$

图8(b)(c)展示了在相同冻融条件下,不同循环应力比对应的软化指数关系。通过对比分析,发现与未冻融状态不同,在冻融循环的影响下软化指数与 $(\lg N)^2$ 呈现出近似的线性关系。随着循环剪切次数增加,软化指数下降。在CSR为0.12时,土体软化指数曲线随着冻融循环次数增加不断下移,特别是第1次循环后有相对较大的软化加速现象,说明冻融循环导致土体结构产生破坏,土体软化屈服速度加快。待

冻融循环稳定后,整体强度不再发生剧烈改变,软化速度下降缓慢。而在大循环应力比(0.14)时,虽然冻融循环初期也引发了软化指数的降低,但随后软化指数变化趋于稳定。这表明在大循环应力比的影响下,土体对冻融次数的敏感性相对较低。

对比图 8(c)与图 8(d)可知,不同冷端温度下土体的软化速率存在显著差异,冷端温度越低,软化指数下降速度越快,说明冻融温度的降低加剧了对土体结构的破坏。且经过 5 次冻融循环之后,软化指数曲线下降速度逐渐减缓,这是由于冻融循环过程中土体内部结构的改变逐渐趋于稳定,软化指数受冻融循环次数影响逐渐降低。

3 结论

本文围绕海相黏土进行不固结不排水循环单剪试验,研究了冻融循环次数、冷端温度与循环应力比对土体动强度的影响,主要得出以下结论:

1) 随冻融循环次数的递增,土体的剪应力-剪应变滞回曲线呈现由紧密到疏松的变化趋势,所需的剪切次数逐渐减少。相同冻融条件下,应力循环比越大,剪应力-剪应变曲线越稀疏。

2) 在冻融循环影响下,冻融循环次数的增加导致土体内部结构发生改变,使破坏振次提前,土体循环抗剪强度降低,在相同温度下循环应力比越大破坏振次越低。破坏振次与冻融循环次数可通过二次函数良好拟合。

3) 土体在循环剪切过程中会发生软化现象,冷端温度与冻融次数的增加都会使软化速度加快,并且在冻融循环下软化指数与 $(\lg N)^2$ 呈现线性关系。在大循环应力比下,土体的软化过程极为迅速,此时冻融循环作用对循环剪切软化的影响相对较小。

参考文献(References):

- [1] 徐杨青,郭见扬.海洋土特殊工程性质的成因分析[J].岩土力学,1989,10(4):67-74.
XU Yangqing, GUO Jiangyang. Analyses of formation cause for special engineering properties of marine soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, 10(4): 67-74.
- [2] 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.
- [3] 刘寒冰,张互助,王静.冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响[J].岩土力学,2018,39(1):158-164.
LIU Hanbing, ZHANG Huzhu, WANG Jing. Effect of freeze-thaw and water content on mechanical properties of compacted clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 158-164.
- [4] HORPIBULSUK S, SUKSIRIPATTANAPONG C, SAMINGTHONG W, et al. Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymers and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(1): 04015078.
- [5] 邴文山.道路冻害与防治译文集[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1992.
BING Wenshan. A collection of road frost damage and prevention[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1992.
- [6] 陶勇,杨平,杨国清,等.冻融作用对海相软土压缩性及抗剪强度影响研究[J].冰川冻土,2019,41(3):637-645.
TAO Yong, YANG Ping, YANG Guoqing, et al. A study on influence of freezing and thawing on compressibility and shear strength of marine soft soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 637-645.
- [7] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471-477.
- [8] SUN Y, MENG S, WANG M, et al. Deterioration effect of freeze-thaw on mechanical properties of roadbed clay under unfavorable conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 4773-4790.
- [9] 卢智,谢波,宋飞,等.冻融循环作用下砂质黄土强度劣化特性及影响因素研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(4):106-112.
LU Zhi, XIE Bo, SONG Fei, et al. Study on strength deterioration characteristics and influencing factors of sandy loess under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2023, 40(4): 106-112.

(下转第 33 页)