doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.03.021

不同冻融循环作用下分散土力学性质及微观结构

张亚伟,韩春鹏*
(东北林业大学 土木与交通学院, 哈尔滨 150040)

摘　要:通过探究不同冻融周期条件下分散土的微观孔隙结构及力学特性,分析冻融环境对土体强度的影响。利用三轴试验及扫描电镜分别研究冻融循环下分散土力学性质变化规律及微观结构,并通过图像处理软件 IPP 定量获取土样的微观孔隙参数,包括孔隙率、平均孔径及平均形状系数。研究结果表明,土体结构内部孔隙数量及孔径大小均为呈现增加趋势,土体颗粒间的黏结效果减弱;分散土的破坏强度主要受土体孔隙的数量、大小及孔隙形状的影响,且与平均孔径、孔隙率及平均形状系数均呈负相关。由此得出分散土在不同冻融循环次数条件下微观结构会不断变化,进而导致土体的力学特性发生变化。

关键词:分散土;力学特性;微观孔隙结构;冻融循环;三轴试验;季冻区;定量分析;应力-应变曲线
中图分类号:U414　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0204-08

Mechanical Properties and Microstructure of Dispersed Soils under Different Freeze-thaw Cycles

ZHANG Yawei, HAN Chunpeng*
(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: By exploring the microstructure and mechanical properties of dispersed soil under different freeze-thaw cycles, the influence of freeze-thaw environment on soil strength was analyzed. Triaxial test and scanning electron microscope were used to study the mechanical properties and microstructure of dispersed soil under freeze-thaw cycle, and the image processing software IPP was used to obtain the microscopic pore parameters of soil samples, including porosity, average pore diameter and average shape coefficient. Research results indicated that the number and pore size of pore parameter in the soil structure showed an increasing trend, and the bonding effect between soil particles weakened. The breaking strength of dispersed soil was mainly influenced by the number, size, and shape of soil pores, and was negatively correlated with the average pore diameter, porosity, and average shape coefficient. The results of this study indicated that the microstructure of dispersed soils was constantly changing under the conditions of different numbers of freeze-thaw cycles, which in turn lead to changes in the mechanical properties of the soils.

Keywords: Dispersed soil; mechanical properties; microstructure; freeze-thaw cycle; triaxial test; seasonal freezing zone; quantitative analysis; stress-strain curve

0　引言

黑龙江省地处中国东北部,省内大部分面积属于季节性冻土区,该地区的工程建设必须考虑冻融作用对土力学性能的影响问题[1-2]。因此,人们越来越关注冻融循环对该地区道路基础设施稳定性的影响。土的力学性质是多个因素的综合体现,包括自身性质和环境因素,自身性质如土体矿物成分、含水量和干密度等,环境因素如围压、温度等[3]。同种土体在不同区域的力学特性也不尽相同,其主要决定因素便是环境条件[4-5]。

冻融作用会导致土壤颗粒的重新组合,导致土体由一个稳定状态变为另一新的稳定状态。有学者通过对冻融循环下盐渍土抗剪强度研究,发现黏聚力随着冻融循环次数的增加而降低,同时发现内摩擦角则相对不受影响[6]。Malizia 等[7]通过对 3 种塑性黏土的无侧限抗压强度分析得到无侧限抗压强度随含水量的增加呈先升高后降低的趋势。

收稿日期:2023-10-15
基金项目:黑龙江省交通投资集团有限公司科研项目(JT-100000-ZC-FW-2021-0121)。
第一作者简介:张亚伟,硕士研究生。研究方向为边坡工程。E-mail: zyw6831@163.com
*通信作者:韩春鹏,博士,教授。研究方向为路基与岩土工程。E-mail: hanchunpeng@nefu.edu.cn
引文格式:张亚伟,韩春鹏. 不同冻融循环作用下分散土力学性质及微观结构[J]. 森林工程,2024,40(3):204-211.
ZHANG Y W, HAN C P. Mechanical properties and microstructure of dispersed soils under different freeze-thaw cycles[J]. Forest Engineering, 2024, 40(3):204-211.

还有学者则是通过对黏土-碎石土体应力应变行为、破坏强度及弹性模量的分析,发现冻融循环显著改变了黏土-碎石混合试件的力学特性[8-9]。这个过程受到多种因素的影响,包括土壤的含水率、融化程度(土壤中的冰含量和冰的强度)、土壤颗粒的大小和组成,以及周围环境等。这些因素会影响土体的抗剪强度[10-14]。

为了解土体物理力学行为的内在性质,相关学者对土体微结构的变化进行了研究[15-21],采用的研究方法主要有以下几种:光学显微镜、X 射线衍射(XRD)、压汞法、气体吸附法、扫描电镜(SEM)和核磁共振(NMR)等。因此采用 SEM 图像分析不同环境下土体内部微观结构并以此为基础阐述环境作用对土体宏观力学性能的影响是合理有效的。

本研究以黑龙江地区的分散土为研究对象,探究不同冻融循环条件下土体力学性质的变化规律,通过 SEM 试验分析各因素对土体微观孔隙结构的影响,并定量将其宏观特性与微观结构联系起来,为季冻区公路工程分散土边坡稳定性的深入研究提供一定技术支持。

1　试验材料及试验设计

1.1　试验材料

试验用土取自黑龙江省地区绥大高速边坡,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行试验,得到土体基本物理性质,见表 1,颗粒级配曲线如图 1 所示。同时根据现场勘测情况,土体表现出明显的易水蚀的特征,因此对试验土样进行了分散特性研究,发现土样中交换性钠离子含量为 63.97%,超过 60%,见表 2。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007),该土可归类为分散土(特殊土)。

表 1　土体基本性质

Tab. 1 Basic properties of the soil

塑限(%) Plastic limit	液限(%) Liquid limit	塑性指数(%) Plasticity index	天然含水率(%) Natural moisture content	最佳含水率 (%) Optimal moisture content	最大干密度 /(g·cm^{-3}) Maximum dry density
24.65	36.80	12.15	23.73	14.00	1.82

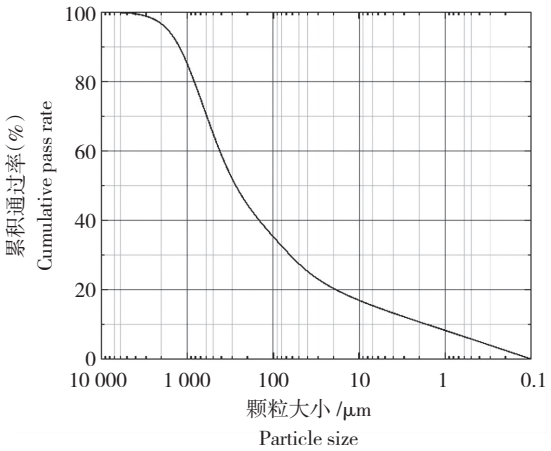


图 1　土样的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curves of soil samples

1.2　试样制备

试样的制备程序按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行:对原始土样进行风干、研磨和过 2 mm 标准筛,加水焖料使其达到设计含水率(本研究中仅选取最佳含水率 14%为目标含水率);采用静压法制备标准三轴试件(Φ39.1 mm×80 mm);制备完成后以保鲜膜包裹试件并将其置于冻融环境中。

1.3　试验方案

为研究试样力学性质在冻融循环作用下的变化规律,选择冻融周期为试验变量,进行单因素试验。

表 2　交换性钠离子试验测试结果

Tab. 2 Exchangeable sodium ion test results

序号 Serial No.	测试项目 Test items	测试结果/(mg·L^{-1}) Test results	其交换性钠离子百分数(%) Percentage of exchangeable sodium ions	技术指标 Technical indicators	单项判定 Individual decisions
1	钾(K)	3.45	63.97	≥60%	符合
2	钙(Ca)	8.78			
3	钠(Na)	23.45			
4	镁(Mg)	0.98			

1)冻融循环试验

由于气象数据得出绥化市在早春期间地下 0~2 m 处温度为-10 ℃,因此选定冻结温度为-10 ℃,融化温度为 20 ℃,冻融循环周期选定为 0、1、3、5、7、10、15 次。冻结时间 12 h,融化时间 12 h。将达到设计冻融次数的试件进行三轴剪切试验及微观测试。

2) 三轴剪切试验

三轴试验选择不固结不排水剪切试验。根据公路路基的水平应力范围,围压取为 100、200、300 kPa。轴向剪切应变速率设置为 0.8 mm/min,控制应变为 15%。作为对比试件变形达轴向应变的 15%时,试验结束,或当试验过程中出现剪切峰值时,超过剪切峰值 5%轴向应变时停止试验,试验方案见表 3。

表 3 三轴试验设计

Tab. 3 Triaxial test design

围压/kPa Pressurization	冻融循环次数/次 Number of freeze-thaw cycles
100、200、300	1、3、5、7、10、15

3) 扫描电镜试验

微观结构特征通过扫描电子显微镜(JSM-7500F)得到,土样冻融循环次数设置同三轴试验。试验土样,喷金后置于扫描电镜下观察其微观结构。

4)微观数据的获取

本研究使用 IPP 软件由 SEM 图像中提取微观孔隙参数。采用放大 1 000 倍的显微照片进行分析,发现阈值为 65 时土体的平均孔隙率非常接近理论孔隙率,因此所有样本均采用相同的标准阈值 65 进行分析。在本研究中,选择以下参数来表征土体中孔隙的大小和形态。各参数的具体含义及计算方法如下。

①孔隙率(N)

孔隙率能在一定程度上反映土体孔隙含量,表示二值化 SEM 图像中孔隙面积与显微照片总面积的比值。即

$$N = \frac{S_0}{S} \times 100\% \text{ 。} \tag{1}$$

式中:S 为选用图片总面积;S_0 为孔隙面积。

②平均孔径(D)

利用软件可以直接计算微观图像中每个孔的平均直径。该方法通过测量对象轮廓上质心的线段平均长度来确定孔隙的直径,从而反映了样品中孔隙的平均大小。在每张 SEM 图像中,取所有孔隙的直径来计算土壤样品的平均孔径。

③平均形状系数(K)

土体中孔隙的形状可以通过其平均形状系数来反映,计算方法为

$$K = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{2\pi\sqrt{A_i/\pi}}{P_i} \text{ 。} \tag{2}$$

式中:A_i 为得到的各孔隙的实际测量面积;P_i 为每个孔的测量周长;n 为每张 SEM 图像中的所有孔隙数。K 在 0 到 1 之间,K 越大,孔隙的形状越规则,越接近圆形。

对于每个土样,选择 4 张显微图像进行定量分析,得到各个微观孔隙参数值。本研究采用其平均值进行分析。图 2 为二值化处理前后 SEM 图像。

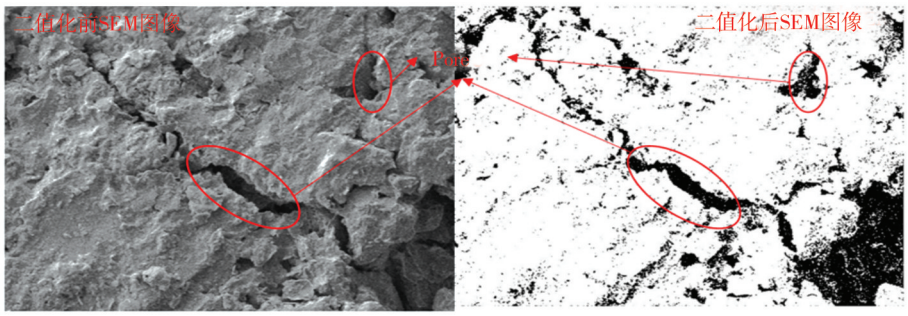


图 2 二值化前后的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images before and after binarization

2 分析与讨论

2.1 土样微观结构特征

图 3 为不同冻融周期下土体的扫描电镜图像。土体的孔隙数量及孔径的大小随着冻融循环次数的增加有明显的增加。在初次冻融循环后试件内部孔隙变大且趋势变化最为明显,在经历 7 次冻融循环后的土体微观状态变化与一次冻融相比并不

明显。SEM 图像结果显示,经过初次冻融循环后由于土中水发生了相变,凝固成冰时体积变大,扩充土体内部孔隙,在后续冻融循环过程中,土中水虽仍凝固体积变大,但不再能充满整个孔隙,因此试件内部的孔隙不再发生明显变化。

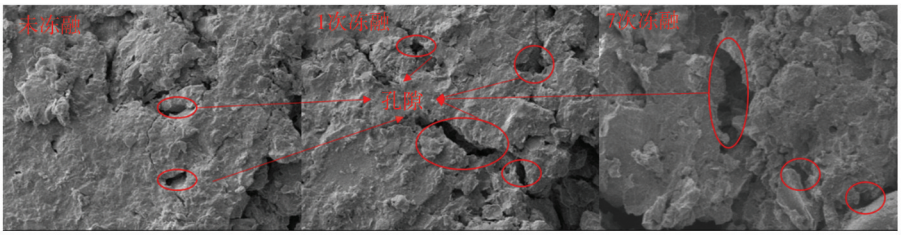


图 3　冻融前后土体电镜扫描图

Fig. 3 Electron microscope scan of soil before and after freeze-thaw

2.2　冻融循环次数对土体强度的影响

图 4 为不同冻融次数下试样的应力-应变曲线。结果表明,不同冻融循环、不同围压条件下土体的应力-应变曲线变化趋势相似。由图 4 可知,试样的应力-应变曲线均呈应变软化型,且应变软化程度会因为冻融循环次数的增加而逐渐降低,且随着冻融次数的增加,峰值强度逐渐减小。以围压 200 kPa 为例,从未冻融到 15 次冻融循环峰值强度依次为 1 014.55、907.87、843.00、838.01、820.85、807.78、806.87 kPa。第一次冻融循环对应力-应变曲线的影响最为显著,土体峰值强度降低 10% 左右,随冻融循环次数增加,土体峰值强度降低幅度趋于平缓,且在 5~7 次冻融后逐渐趋于稳定。

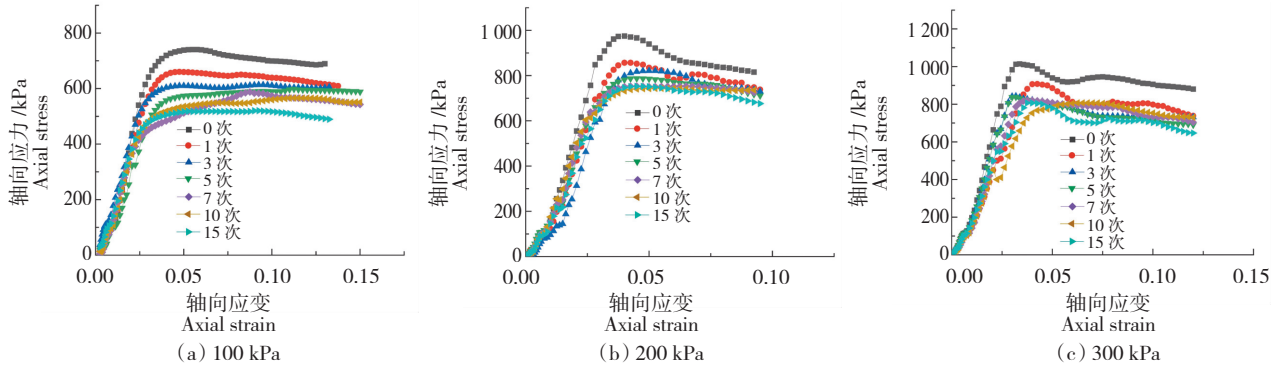


图 4　不同围压下不同冻融循环次数下试样的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of specimens with different numbers of freeze-thaw cycles under different perimeter pressures

为明确冻融循环对分散土土体剪切强度的影响,选取试验得到的黏聚力以及内摩擦角指标进行分析。内摩擦角以及黏聚力是分析土体抗剪强度的主要指标,通过对三轴试验数据的处理可以得到图 5 的变化曲线。由图 5 可以明显地看出,在冻融循环的影响下黏聚力呈下降的趋势,且在经历初次冻融循环时下降趋势最为明显,而内摩擦角的变化趋势则不明显。冻融的过程会导致土体结构的破坏,土孔隙中的水会因为温度的降低冻结成冰,使孔隙水体积增大,在这一过程中孔隙体积因此变大,造成土颗粒间距增大、颗粒间的连结力减弱,导致会使孔隙比增加、土的密实度降低,因此土中的黏聚力也随之降低。对于内摩擦角,其变化主要由土体内部颗粒间的接触面积及土颗粒形状决定,由于土颗粒形状变化趋势不明显,因此内摩擦角的变化则不明显。

为明确冻融循环对土体力学性能的影响,选取应力-应变曲线的上峰值强度为破坏强度,分析土体破坏强度的变化趋势,讨论土体力学性能的变化规律。在 1 次冻融循环作用下 14% 含水率对应降低幅度为 10.51%,当冻融循环达到 5 次时降低幅度为 0.59%,当冻融循环达到 15 次时降低幅度为 0.11%。可见冻融循环使土体破坏强度降低,且在第 1 次下降幅度最大,在 5~15 次冻融循环范围内降低幅度趋于一定值。未冻融时破坏强度为 1 014.55 kPa,当冻融循环进行 15 次后破坏强度为 806.87 kPa。

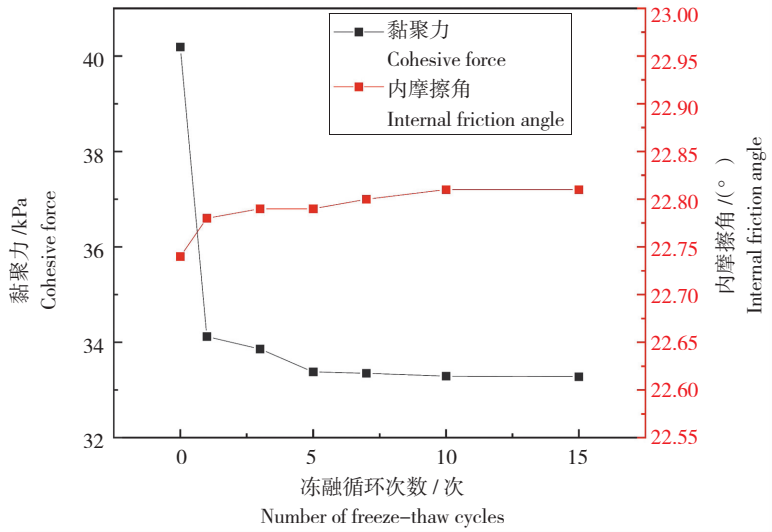


图 5 冻融循环次数下的黏聚力及内摩擦角变化

Fig. 5 Variation of cohesive force and internal friction angle for the number of freeze-thaw cycles

不同围压及冻融循环次数的土样破坏强度变化规律相似。不同围压下破坏强度如图 6 所示,其下降幅度如图 7 所示。在 1 次冻融循环作用下 100、200、300 kPa 围压对应降低幅度分别为 10.86%、10.51%、8.81%,当冻融循环达到 5 次时降低幅度分别为 2.78%、0.59%、2.14%,当冻融循环达到 15 次时降低幅度分别为 2.07%、0.11%、1.99%。可见冻融循环使土体破坏强度降低,且在第 1 次下降幅度最大,在 5~15 次冻融循环范围内降低幅度趋于一定值。未冻融时各围压下破坏强度分别为 740.70、1 014.55、1 089.74 kPa,当冻融循环进行 15 次后各围压下破坏强度分别为 520.30、806.87、895.63 kPa。可以发现随着围压变化,土体的破坏强度变化规律相似。

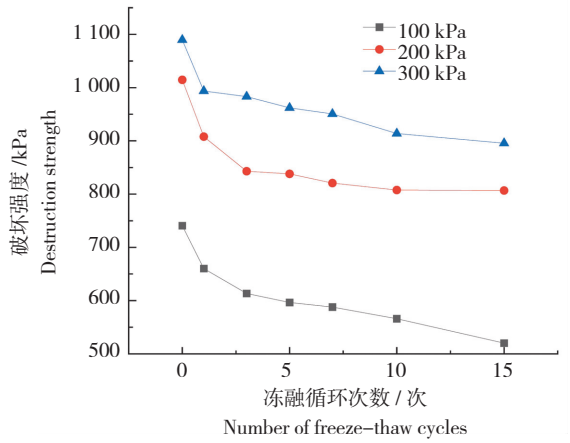


图 6 不同冻融循环及围压下的破坏强度

Fig. 6 Breaking strength degree under different freeze-thaw cycles and perimeter pressure

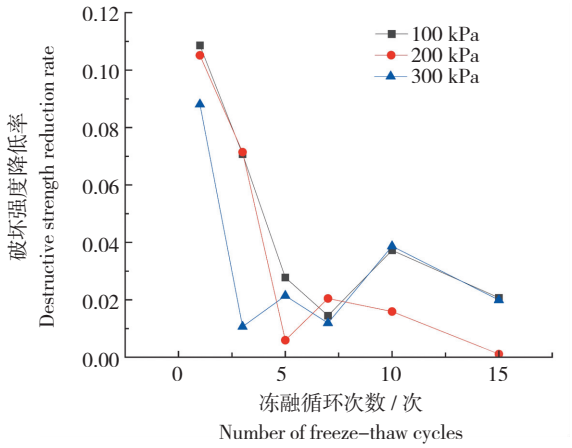


图 7 不同冻融循环及围压下的破坏强度降低率

Fig. 7 Breaking strength reduction rate under different freeze-thaw cycles and perimeter pressure

2.3 冻融循环对土体微观孔隙结构的影响

图 8 为冻融循环条件下的土体孔隙率的变化。由图 8 不难发现,土体的孔隙率随着冻融循环次数的增加呈增加趋势,其中初次冻融循环中孔隙率增加幅度最大,增幅为 9.81%。当经过 7 次冻融循环后孔隙率增幅减小到 4%,这是因为在冻融循环过程中,土体中的水在温度梯度的作用下发生迁移,土体中的孔隙水在冻结过程中会凝固成冰发生膨胀,导致土体孔隙体积增大。但土体并非弹性结构,无法在解冻过程中恢复至初始状态,从而导致孔隙率显著增加。土体孔隙结构并不会一直受冻融循环的影响,随着冻融循环次数的不断增加,土

体孔隙率的变化趋于缓慢。

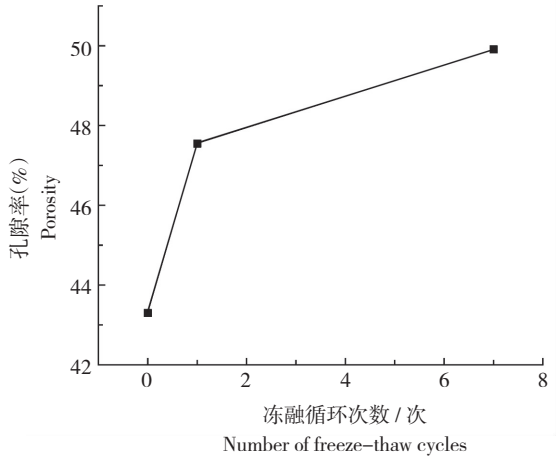


图 8　100 kPa 围压条件下的孔隙率

Fig. 8 Porosity at 100kPa peripheral pressure condition

图 9 为不同冻融循环条件下的土体平均孔径变化。由图 9 不难看出,土体平均孔径随冻融循环的变化趋势与孔隙率的变化趋势大致相似。平均孔径增大的幅度随着冻融循环次数的增加在逐渐减小。在冻融循环进行 1 次以后,平均孔径的增幅最大,为 8%。而当冻融循环进行了 7 次之后,平均孔径的增幅降低到 3% 。这是因为在反复的冻融循环过程中,孔隙水冻结引起的体积膨胀会导致土体中直径较小的孔隙连结为较大的孔隙,较大孔隙的比例增加,导致土壤平均孔径增大。这与上一节孔隙率的变化规律相似,再次验证了水的团聚效应改变了土体的粒径分布,导致孔隙分布的变化。

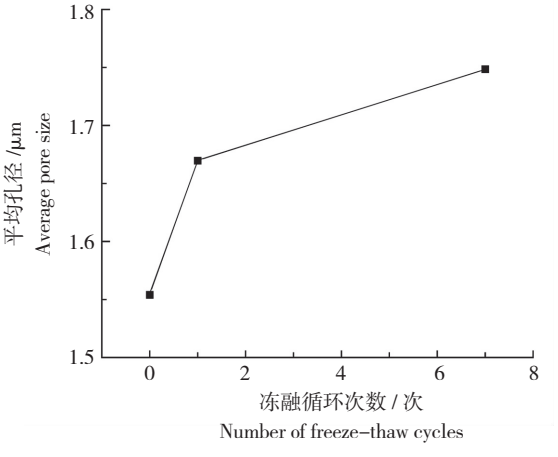


图 9　100 kPa 围压条件下的平均孔径

Fig. 9 Average pore size under 100 kPa perimeter pressure conditions

图 10 为不同冻融循环的土体孔隙的平均形状系数变化曲线。由图 10 不难看出,随冻融循环次数增加,孔隙平均形状系数的变化不明显,变化幅度不显著。孔隙平均形状系数在冻融循环次数为 0、1、7 时的平均形状系数分别为 0. 48、0. 49、0. 50,孔隙平均形状系数呈缓慢上升趋势,这就表明随着冻融循环次数的增加,孔隙的形状逐渐趋于圆形。这可能是因为在多次冻融循环,土壤颗粒团的不规则边界会逐渐趋于圆润,从而导致土壤颗粒之间孔隙的形态发生相应的变化。

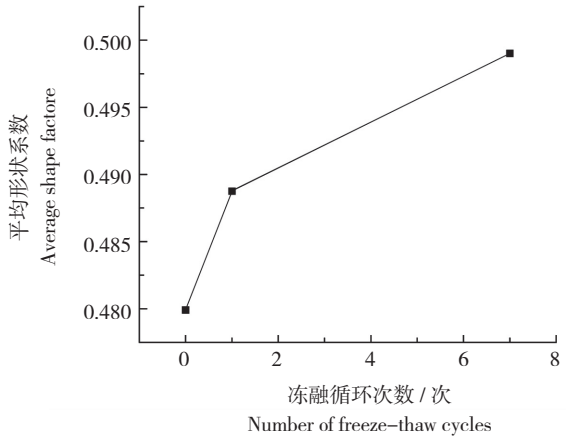


图 10　100 kPa 围压条件下的平均形状系数

Fig. 10 Average shape factor for 100 kPa perimeter pressure conditions

2. 4　宏观力学特性与微观结构的相关性分析

为了研究宏观土体破坏强度与微观孔隙相关系数的关系,利用数据分析软件 SPSS 对不同围压下不同冻融循环次数的土体破坏强度与微观孔隙参数的相关性进行分析,见表 4。由表 4 结果显示,土样破坏强度与土样孔隙率(N)、平均孔径(D)及平均形状系数(K)的相关系数均在 0. 9 以上,均呈显著线性相关。因此,选取 D、N、K 作为自变量,并选取 3 种围压下破坏强度作为因变量,对宏观与微观的相关性进行拟合分析。

表 4　破坏强度与土样微观孔隙参数的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between damage strength and microscopic pore parameters of soil samples

围压/kPa Peripheral pressure	N	D	K
100	−0. 956	−0. 943	−0. 999
200	−0. 974	−0. 964	−0. 993
300	−0. 993	−0. 988	−0. 974

在进行多元线性回归分析时,自变量之间可能存在近似线性关系,称为共线性。当存在严重的共线性问题时,回归方程的稳定性会变差,同时回归

系数的显著性检验会受到影响,这使得模型变得无意义。为了考察 N、D、K 之间是否存在共线性关系,对 3 个变量进行共线性诊断,Pearson 相关矩阵如图 11 所示。

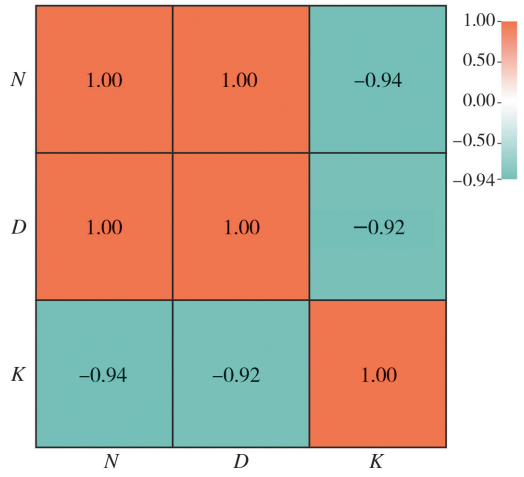


图 11 Pearson 相关矩阵

Fig. 11 Pearson correlation matrix

由图 11 不难看出,孔隙率与平均孔径基本上属于共线,因此取孔隙率、平均形状系数做回归分析。为了消除维数的影响,在主成分回归前,需要标准化处理原始数据。然后利用 SPSS 软件的因子分析模块提取主成分,将标准化后的孔隙破坏强度(τ)、孔隙率及平均形状系数分别记为 Z_τ、Z_N 及 Z_K。通过主成分提取得到一个主成分 F_1,其表达式如下

$$F_1 = 0.503Z_N - 0.503Z_K 。 \quad (3)$$

接下来,对 τ 和 F_1 进行线性回归分析。根据标准化数据与原始数据的关系对回归模型进行恢复,最终拟合结果见表 5。由表 5 结果显示,回归方程调整后的拟合优度(R^2)均在 0.9 以上,说明回归方程拟合良好。根据拟合曲线得到拟合值与试验值相比较发现,试验值均在拟合值附近,说明拟合值与试验值相关性较高,主成分回归得到的拟合方程相对可靠,如图 12 所示。

表 5 主成分回归拟合方程

Tab. 5 Principal component regression fitting equations

围压/kPa Peripheral pressure	主成分回归方程 The principal component regression equation	拟合优度 GF R^2
100	$\tau = -14.30N - 5\,187.17K + 4\,123.35$	0.955
200	$\tau = -29.01N - 1\,964.92K + 3\,476.56$	0.924
300	$\tau = -14.90N - 9\,437.35K + 6\,554.68$	0.914

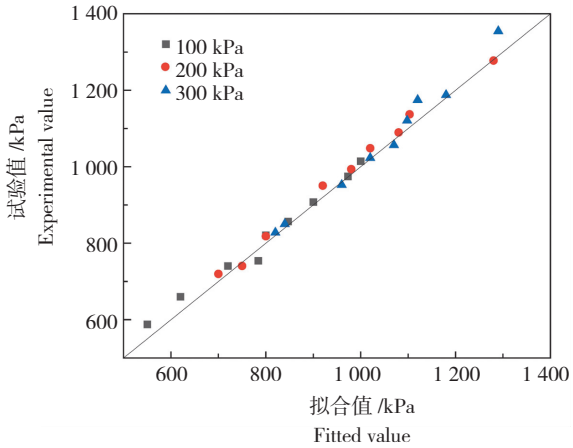


图 12 破坏强度的拟合值与试验值之间的关系

Fig. 12 Relationship between fitted and experimental values of damage intensity

根据分析结果,可以得出以下结论:在不同试验条件下,土样破坏强度主要受到土体孔隙大小和数量的影响。回归方程中的回归系数表明,土体破坏强度与平均孔径、孔隙率和平均形状系数呈负相关。

这就表明了土壤的破坏强度受土体内部的孔隙结构的影响。当经历冻融循环后,土样中的孔隙平均孔径、平均形状系数变大,土颗粒之间的距离增大,结合力变小,土颗粒之间越容易形成剪切面,导致土样越容易被破坏,因此破坏强度会随着冻融循环次数的增加变小。未经历冻融时,土体密实度较大,孔隙的平均形状系数较小,土颗粒之间的摩擦力较大,不容易被破坏,土样的破坏强度就会很大。因此,土体破坏强度的变化源于其微观结构的变化,这种变化又是由冻融循环引发的土体内部水分相变所导致,最终导致了土体破坏强度的变化。

3 结论

1)不同冻融循环的土样的应力-应变特征均属于应变软化型。在不同的试验条件下,土样破坏强度随围压的增大而增大。随着冻融循环次数的增加,土样的黏聚力与破坏强度呈下降趋势,内摩擦角趋势不明显。在初次冻融循环后下降幅度最大为 10%,在 5~7 次后冻融循环范围内下降幅度趋于平缓并逐渐趋于 1%。

2)SEM 试验表明,未经历冻融循环的土样表面较为平整密实,而经历冻融循环后,土样中孔隙比例增加,结构变松,且土样微观结构发生变化在首次冻融循环中最为明显。定量分析结果表明,随着冻融循环次数的增加,孔隙率和平均孔径均呈现增大的趋势,孔隙平均形状系数变化相对较小。

3)基于主成分回归分析,建立合理的土样微观孔隙参数与破坏强度之间的回归模型。结果表明,土的破坏强度主要受土体中孔隙大小、方向和孔隙形态的影响,且土体破坏强度与孔隙大小、孔隙率及平均形状系数均呈负相关。冻融循环在一定程度上通过影响土体内部水分的相变影响土体的微观结构,进而导致土体破坏强度的变化。

【参　考　文　献】

[1] LIU X, WEI X, QIN H. Characterizing compressive strength of compacted saline loess subjected to freeze-thaw cycling with wave velocity[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(4): 168.

[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] DA SILVA R B, DE SOUZA DIAS M J, IORI P, et al. Prediction of soil shear strength in agricultural and natural environments of the Brazilian Cerrado[J]. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 2015, 50(1): 82-91.

[4] WU D, WANG C M, LIU H L, et al. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties of compacted volcanic ash[J]. Construction and Building Materials, 2023, 369: 130637.

[5] KONG F S, NIE L, XU Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the erodibility and microstructure of soda-saline loessal soil in Northeastern China[J]. CATENA, 2022, 209: 105812.

[6] WANG J Q, WANG Q, LIN S, et al. Relationship between the shear strength and microscopic pore parameters of saline soil with different freeze-thaw cycles and salinities[J]. Symmetry, 2020, 12(10): 1709.

[7] MALIZIA J P, SHAKOOR A. Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils[J]. Engineering Geology, 2018, 244: 125-131.

[8] ZHANG Y G, LIU S H, DENG G, et al. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of clay-gravel mixtures[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(12): 3615-3626.

[9] LU Y, LIU S H, ALONSO E, et al. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 157: 206-214.

[10] WANG L X, SONG X J, HUANG M. Deformation characteristics and mechanism of dispersive soil under freeze-thaw cycles[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(10): 981.

[11] 王清,王凤艳,肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工学院学报,2001,28(2):148-153.
WANG Q, WANG F Y, XIAO S F. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to the engineering[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2): 148-153.

[12] YANG S Y, HAN M, CHEN X L, et al. Influence of sulfate crystallization on bond-slip behavior between deformed rebar and concrete subjected to combined actions of dry-wet cycle and freeze-thaw cycle[J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128368.

[13] SHEN J J, WANG Q, CHEN Y T, et al. Evolution process of the microstructure of saline soil with different compaction degrees during freeze-thaw cycles[J]. Engineering Geology, 2022, 304: 106699.

[14] 刘峥嵘,刘江鑫,蔡利平,等. 黏土质砾强度特性与影响因素研究[J]. 公路工程,2023,48(4):127-133.
LIU Z R, LIU J X, CAI L P, et al. Study on strength characteristics of clay-gravel soil and influencing factors[J]. Highway Engineering, 2023, 48(4): 127-133.

[15] LI Z Y, YANG G S, LIU H. The influence of regional freeze-thaw cycles on loess landslides: analysis of strength deterioration of loess with changes in pore structure[J]. Water, 2020, 12(11): 3047.

[16] ZHANG T, CHE A L. A study on macro and micro characteristics and correlation of soil under cyclic freeze-thaws[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(9): 04022232.

[17] RAO M J, LI M X, YANG H Q, et al. Effects of carbonation and freeze-thaw cycles on microstructure of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2016, 31(5): 1018-1025.

[18] NAN J Y, LIU J K, CHANG D, et al. Mechanical characteristics and microstructure study of saline soil stabilized by quicklime after curing and freeze-thaw cycle[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 201: 103625.

[19] 唐朝生,施斌,王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2008,30(4):560-565.
TANG C S, SHI B, WANG B J. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565.

[20] ZHOU W J, WANG Q Z, FANG J H, et al. Study of the mechanical and microscopic properties of modified silty clay under freeze-thaw cycles[J]. Geofluids, 2022, 2022: 9613176.

[21] 戴文亭,刘德浩,司泽华,等. 稻壳灰纤维水泥改性盐渍土的力学性能研究与机理分析[J]. 公路工程,2022,47(3):137-142.
DAI W T, LIU D H, SI Z H, et al. Study on mechanical properties and mechanism analysis of modified salted soil with rice husk gray fiber cement[J]. Highway Engineering, 2022, 47(3): 137-142.