

冻融循环对黄土剪切屈服与破坏行为的影响

郑 方¹, 邵生俊², 王松鹤², 刘乃飞¹, 王永鑫³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;
3. 南昌工程学院 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要: 为研究冻融循环作用对黄土剪切屈服与破坏行为的影响, 基于不同冻融循环作用下不同中主应力条件下的真三轴剪切试验结果, 得到了广义剪应变与应力比的关系曲线, 确定出屈服点及其相应的屈服应变和屈服应力, 进一步对屈服应力和破坏应力进行了比较, 并对不同冻融循环作用下的破坏准则的适用性进行了分析。结果表明: 应力比 η 、屈服应力 q_y 、破坏应力 q_f 随着冻融循环次数的增加, 都呈现出先减小后又增大后趋于稳定的变化规律, 随着 b 值的增加都呈现出逐渐减小的变化规律; 屈服应变 ϵ_y 大致分布在 0.3% 到 1.6% 之间, 屈服应力均小于破坏应力; 冻融循环作用对 π 平面上破坏轨迹的形状影响不大, 而对其大小会有显著影响, 且破坏应力点的破坏轨迹与 Lade 准则的预测结果较为一致。

关键词: 冻融循环; 真三轴; 屈服应力; 破坏应力; 破坏准则

中图分类号: TU 444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0669-08

Effects of freeze-thaw cycles on shear yield and failure behavior of loess

ZHENG Fang¹, SHAO Shengjun², WANG Songhe², LIU Naifei¹, WANG Yongxin³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, 330099)

Abstract: In order to study the effect of freeze-thaw cycles on shear yield and failure behavior of loess, based on the true triaxial shear test results under different freeze-thaw cycles and different medium principal stress conditions, the relationship curve between generalized shear strain and stress ratio was obtained, and the yield point and its corresponding yield strain and yield stress were determined. Furthermore, the yield stress and failure stress were compared, and the applicability of failure criteria under different freeze-thaw cycles was analyzed. The results show that the stress ratio η , yield stress q_y , and failure stress q_f decrease first and then increase and then tend to be stable with the increase of freeze-thaw cycles, and decrease gradually with the increase of b value. The yield strain ϵ_y is roughly distributed between 0.3% and 1.6%, and the yield stress q_y is less than the failure stress q_f . The freeze-thaw cycle has little effect on the shape of the failure trajectory on the π plane, but has a significant effect on its size, and the failure trajectory of the failure stress point is consistent with the prediction results of Lade's criterion.

Key words: freeze-thaw cycles; true triaxial; yield stress; failure stress; failure criteria

在我国西北部的基础设施建设和环境保护工程中, 涉及到的许多岩土工程问题都与黄土的工程特性密切相关。而黄土广泛分布的大部分地区又属于干旱、半干旱的季节性冻土区, 这些黄土工程在建设和运行过程中又会受到冻融循环的影响, 冻融循环可能会引发黄土地质灾害或岩土工程问题, 尤其是在春季解冻期间^[1-6]。因此, 探索研究冻融循环对黄土力学行为的影响是很有必

要的。

关于冻融循环对黄土力学特性的影响, 国内外学者通过不同的试验方式进行了大量的研究, 例如胡再强等^[7]、张玲玲等^[8]分别基于常规三轴试验研究了冻融循环作用对不同地区黄土的强度特性的影响。Xu 等^[9]通过常规三轴试验研究了冻融循环作用对含盐黄土剪切强度的影响。宋春霞^[10]、董晓宏等^[11]、李丽等^[12]都是利用直剪试验来研究

干湿和冻融循环对黄土抗剪强度特性的影响。周志军等^[13]等利用单轴固结、直剪试验研究了冻融循环对黄土路用性能的影响。倪万魁等^[14]利用单轴压缩和三轴剪切试验研究了冻融循环对原状黄土和重塑黄土的抗剪强度的影响。许健等^[15]等利用直剪试验研究了重塑黄土在冻融过程中黏聚强度的变化规律。但这些研究多是基于常规三轴试验、单轴试验、直剪试验等常规试验进行的,但事实上在实际工程中土体的受力更为复杂,常规试验所能反映的应力路径有限。

虽然也有少数学者开始利用平面应变试验^[16]、真三轴试验进行^[17]冻融循环作用对黄土力学行为影响的试验研究,由在常规应力路径下冻融循环作用的研究逐步发展到多种复杂应力路径下的研究,但是目前对于在复杂应力路径下冻融循环对黄土力学行为的研究进行得还较少,目前还处于一个探索阶段,而且多是限于对其应力应变、强度特性的研究,而对于复杂应力路径下冻融循环对黄土剪切屈服和破坏特性的研究更少。一般根据屈服状态和破坏状态下的应力、应变发展水平不同,将岩土材料受荷后弹性变形和塑性变形的临界状态定义为屈服状态,而应力水平保持不变但变形持续发生塑性流动的状态定义为破坏状态^[18-20]。对于土体屈服状态的判别不同学者给出不同的判定方法, Jardine^[21]以 0.04% 以内的应变为标准。Prashant 等^[22]以应变能和应力矢量长度间关系曲线双线性化后的交叉点为屈服点。周小文等^[23]以归一化的刚度与轴向应变双对数后关系曲线的转折点为屈服点。张玉等^[24]以小主应变与轴向应变间关系曲线切线的交点为屈服点。王智^[25]以应力比与轴向应变间关系曲线的切线交点为屈服点。

因此,本文基于不同冻融循环作用下黄土的真三轴剪切试验结果,研究了在三维应力作用下冻融循环对黄土初始剪切屈服特性和破坏特性的影响,对屈服应变、屈服应力、破坏应力随冻融循环和中主应力的变化进行分析,并对不同冻融循环作用下破坏准则的适用性进行探讨,为冻融作用引发的黄土工程灾害提供理论基础。

1 试验材料及方案

1.1 试验土样

试验用土取自西安市东郊某地,取土深度为 3~5 m,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)测得试验用土的基本物理性质参数见表 1。

参考文献[14]的真三轴试样制备方法,制备含水率为 18.6%,干密度为 1.5 g/cm³,尺寸为 7.0 cm×7.0 cm×14.0 cm 的立方体重塑黄土试样。

表 1 试验用土的基本物理性质参数

Tab. 1 Physical parameters of specimen

土粒比重	天然干密度	含水率	液限	塑限	塑性指数
G _s	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	$w/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	IP
2.70	1.40	21	34.2	18.6	15.6

1.2 试验仪器

本次试验采用的是一向刚性加载,两向柔性加载的刚柔复合型真三轴试验仪,如图 1 所示。该仪器主要包括:(1)压力室;(2)液压囊;(3)轴向及侧向应力加载系统;(4)变形量测系统;(5)水-气控制系统等几个部分。该仪器可以实现对试样进行三向独立加载,互不干扰,更加真实地模拟土体在实际工程中可能受到的非对称受力情况。



图 1 真三轴试验仪

Fig. 1 True triaxial apparatus

1.3 试验方案

将制备好的真三轴试样密封在塑料袋内,然后将试样放置在恒温箱内,通过调节恒温箱的温度,使试样经历冻融循环作用。先设置恒温箱温度为 -20°(12 h)使试样冷冻,然后设置温度为 20°(12 h)使试样融化,此为一次冻融循环。本次试验设计冻融循环次数 N 分别为 $N=0$, $N=1$, $N=3$, $N=5$, $N=10$ 。

对经历不同冻融循环后的试样分别进行固结排水真三轴剪切试验,加载应力路径采用等 b 等 p 剪切路径,如图 2 所示。设定中主应力参数 $b=0$, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 球应力 $p=300$ kPa。剪切

时采用应变控制方式,剪切速率为 0.05 mm/min,剪切试验的终止条件为轴向应变达到 15%。

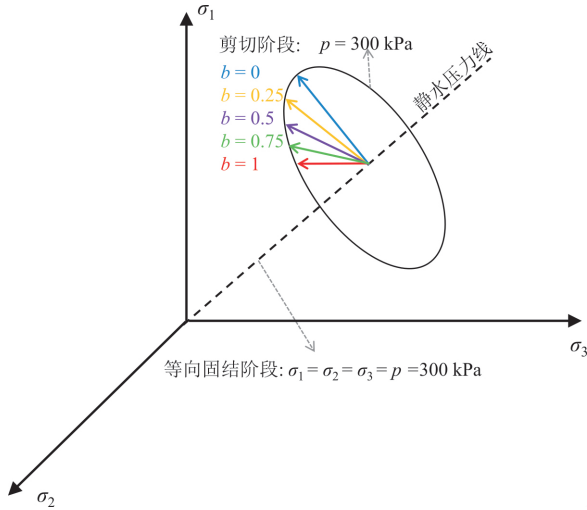


图2 剪切路径

Fig. 2 Shearing path

2 试验结果分析

为了以下叙述方便,对涉及到符号在此进行说明:

中主应力参数, b

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

球应力, p

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

广义剪应力, q_s

$$q_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (3)$$

广义剪应变, ϵ_s

$$\epsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \quad (4)$$

应力比, η

$$\eta = \frac{q_s}{p} \quad (5)$$

2.1 试验结果

图3给出广义剪应变 ϵ_s 与应力比 η 的关系曲线,可以看出不同中主参数条件下,应力比 η 呈现出相似的变化规律,随着冻融循环次数的增加,应力比 η 先减小后又增大后趋于稳定,未经历冻融循环的土样的应力比 η 始终最大. 这一现象主要是由于冻融循环过程中土体内部孔隙结构发生了变化. 由于孔隙中水分的冻结,土孔隙变大,而不是所有的孔隙在冰融化后都能完全恢复到初始状态. 因此,土体结构趋向于变得相对松散,导致土体强度降低,应力比减小. 经过多次冻融循环,土体结构达到一个新的平衡,对应一个基本恒定的土体强度,应力比也趋于稳定. 对比不同 b 下的广义剪应变 ϵ_s 与应力比 η 的关系曲线,可以看出随着 b 值从 0 变化到 1,同一冻融循环下应力比 η 逐渐减小,且随着 b 值的增大,不同冻融循环间应力比 η 的差值逐渐减小.

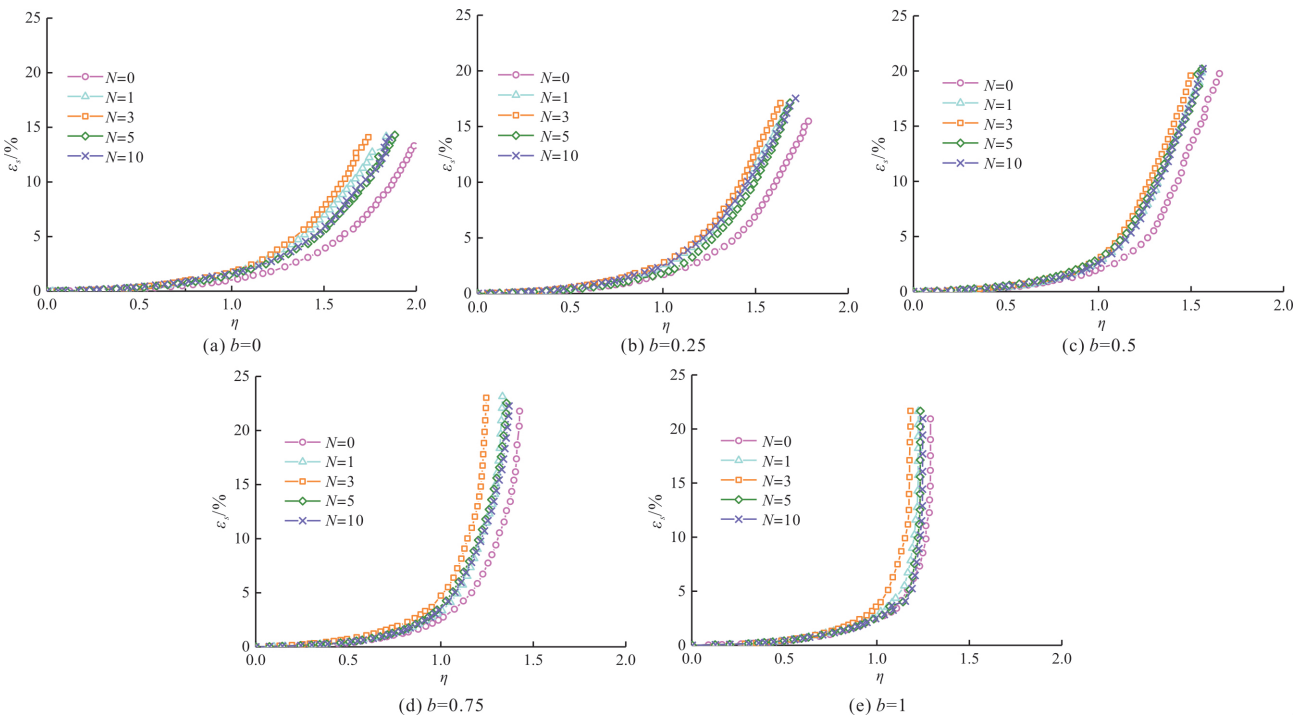


图3 广义剪应变随应力比的变化

Fig. 3 Change of generalized shear strain with stress ratio

2.2 屈服特性

参考文献[22-25], 随着真三轴剪切过程的持续发展, 广义剪应变 ϵ_s 与应力比 η 的关系曲线有明显的转折点, 通过分别做出 $\epsilon_s \sim \eta$ 关系曲线首、尾两部分的切线, 两条切线的交点可作为试样的屈服点, 如图4所示, 交点所对应的应变和应力比可作为屈服应变(ϵ_y)和屈服应力比(η_y).

根据图4确定出, 不同冻融循环作用下不同中主应力参数下试验测试结果的屈服点, 得到屈服点的屈服应变(ϵ_y)和屈服应力比(η_y). 图5给出屈服应力比随冻融循环作用的变化曲线, 可以看出不同中主应力参数的屈服应力比随冻融循环次数的变化规律基本一致, 呈现出先减小后增大而后又趋于稳定的变化趋势, 且 $b=0$ 时的屈服应力比 η_y 与其他 b 值的屈服应力比 η_y 差值较大.

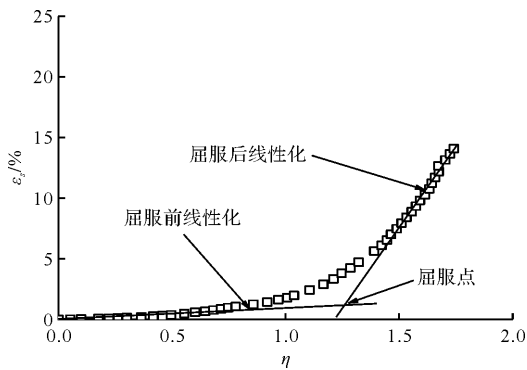


图4 屈服点的确定示意图

Fig. 4 Schematic diagram for determining yield point

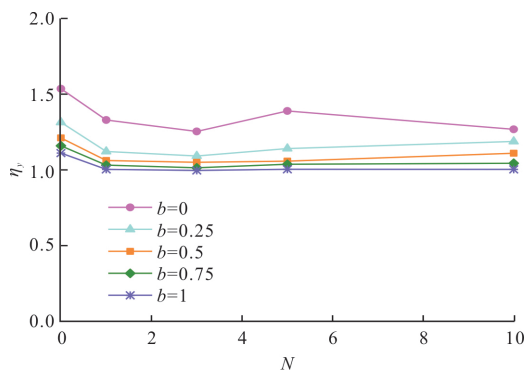


图5 屈服应力比随冻融循环次数的变化

Fig. 5 Change of yield stress ratio with the number of freeze-thaw cycles

图6给出屈服应力比 η_y 随中主应力参数 b 的变化曲线, 可以看出不同冻融循环作用下屈服应力比 η_y 随中主应力参数 b 的变化规律基本一致, 随着 b 的增大都呈现出减小的趋势, 且 $N=0$ 时屈服应力比 η_y 与其他冻融循环作用下的屈服应力比 η_y 差值较大. 图7给出屈服应变 ϵ_y 随冻融循环作用的变化曲线, 可以看出不同中主应力参数 b 的屈

服应变 ϵ_y 随冻融循环次数的变化规律基本一致, 大致呈现出先减小后增大后又减小而后趋于稳定的变化趋势. 图8给出屈服应变 ϵ_y 随中主应力参数 b 的变化曲线, 屈服应变 ϵ_y 随 b 没有呈现出明显的变化规律, 屈服应变 ϵ_y 大致分布在 0.3% 到 1.6% 之间.

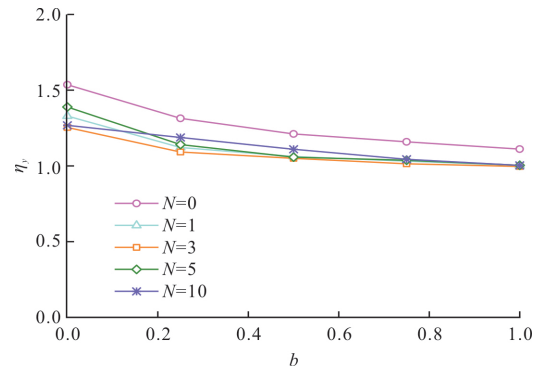


图6 屈服应力比随 b 的变化

Fig. 6 Change of yield stress ratio with b

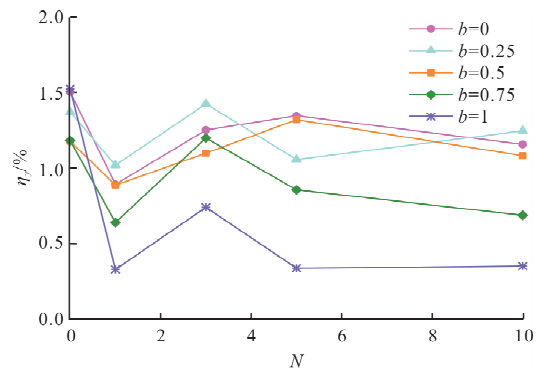


图7 屈服应变随冻融循环次数的变化

Fig. 7 Change of yield strain with the number of freeze-thaw cycles

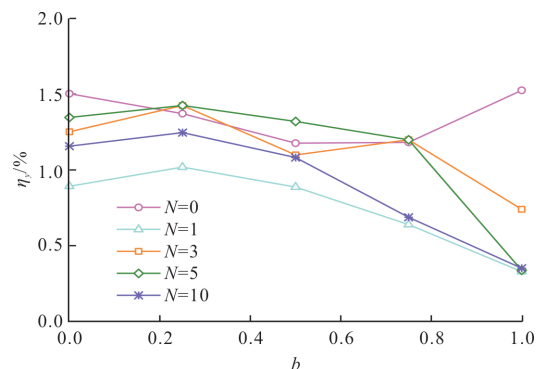


图8 屈服应变随 b 的变化

Fig. 8 Change of yield strain with b

2.3 屈服应力与破坏应力的对比

定义试样破坏点为轴向应变 ϵ_1 达到 15% 所对应的点, 该点对应的剪切应力为破坏应力 q_f , 图9、图10分别给出屈服应力 q_y 、破坏应力 q_f 随 b 的变化曲线, 可以看出不同冻融循环次数下的屈

屈服应力 q_y 、破坏应力 q_f 随着 b 值的增大呈现出基本一致的变化规律,都是随着 b 值的变化而逐渐减小的.图 11、图 12 分别给出屈服应力 q_y 、破坏应力 q_f 随冻融循环次数 N 的变化曲线,可以看出不同 b 值下的屈服应力 q_y 、破坏应力 q_f 随着 b 值的增减呈现出基本一致的变化规律,都是随着冻融循环次数 N 先减小后又增大而后又趋于稳定.

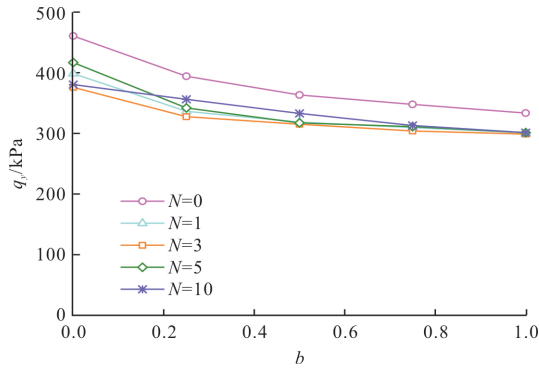
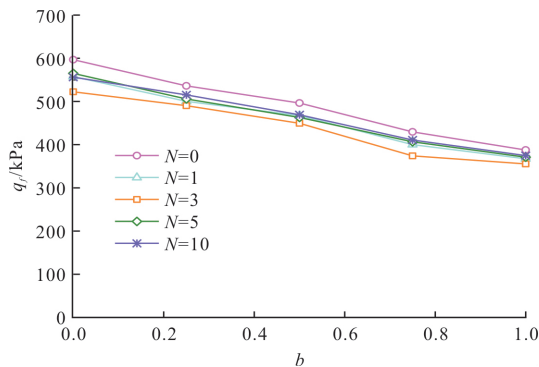
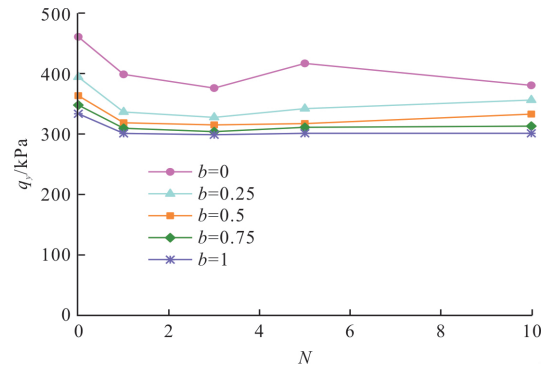
图9 屈服应力随 b 的变化Fig. 9 Change of yield strain with b 图10 破坏应力随 b 的变化Fig. 10 Change of failure stress with b 

图11 屈服应力随冻融循环次数的变化

Fig. 11 Change of yield stress with the number of freeze-thaw cycles

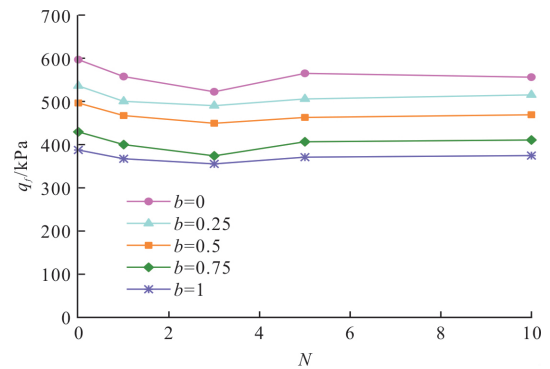
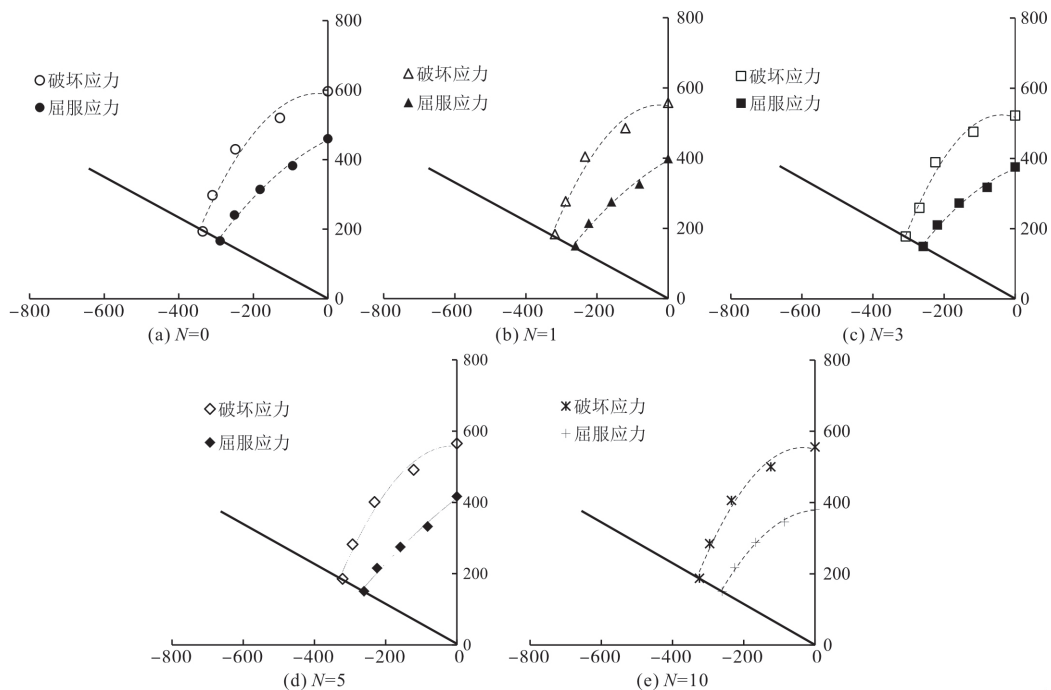


图12 破坏应力随冻融循环次数的变化

Fig. 12 Change of failure stress with the number of freeze-thaw cycles

图 13 给出在 π 平面上不同冻融循环次数的屈服应力点、破坏应力点,可以看出屈服应力均小于破坏应力,不同冻融循环化下的屈服应力点的轨迹形状相似,破坏应力点的轨迹相似,屈服点应力点的轨迹与破坏应力点的轨迹不同.

图13 π 平面上的屈服应力和破坏应力的比较Fig. 13 Comparison of yield stress and failure stress on π plane

2.4 破坏准则的适用性分析

图 14 给出 π 平面上试验测试所得的不同冻融循环作用下的破坏点应力及广义 Mises 准则、Lade 准则、M-C 准则(Mohr-Coulomb 准则)的预测破坏轨迹,可以看出冻融循环作用对 π 平面上试样的破坏轨迹形状的影响不明显,不同冻融循环作用下

试验结果测试所得的结果基本一致,破坏点的破坏应力都与 Lade 准则预测的破坏轨迹较接近,而广义 Mises 准则的预测结果偏大, M-C 准则的预测结果偏小,分析原因为广义 Mises 准则中假定中主应力 σ_2 与小主应力 σ_3 的作用是相等的,而 M-C 准则中未考虑中主应力 σ_2 的作用。

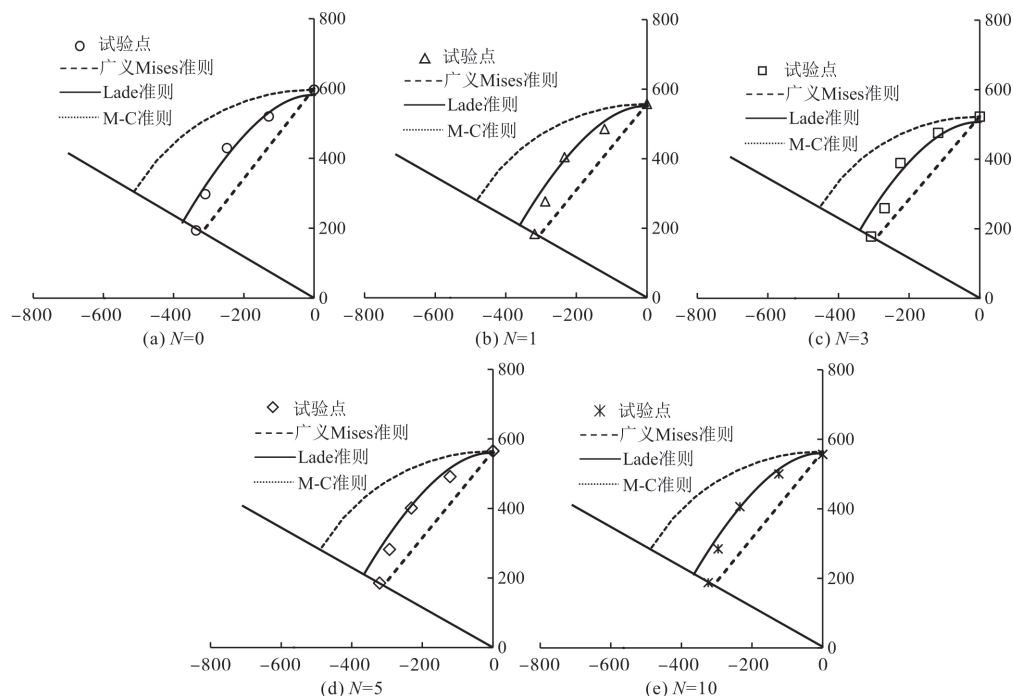


图 14 π 平面上的破坏准则分析

Fig. 14 Failure criterion analysis on π plane

3 结论

本文基于不同冻融循环作用下不同中主应力条件的黄土真三轴剪切试验,探讨了在复杂应力路径下冻融循环作用对黄土剪切屈服与破坏行为的影响,得到的主要结论如下:

(1)随着冻融循环次数的增加,应力比先减小后增大后又趋于稳定,随着 b 值的增大,应力比逐渐减小,且应力比的差值逐渐减小;

(2)屈服应力比、屈服应力、破坏应力都随着冻融循环次数的增加先减小后又增大后又趋于稳定,随着 b 值的增加逐渐减小;

(3)屈服应力均小于破坏应力, π 平面上屈服应力点的轨迹与破坏应力点的轨迹不同,但不同冻融循环作用下的屈服应力点轨迹、破坏应力点轨迹基本相似;

(4)不同冻融循环下破坏点应力与广义 Mises

准则、Lade 准则、M-C 准则的预测破坏轨迹相比较, Lade 准则与破坏应力点的轨迹较为一致,且破坏轨迹的形状受冻融循环作用的影响不大。

参考文献 References

- [1] LI G Y, MA W, MU Y H, et al. Effects of freeze-thaw cycle on engineering properties of loess used as road fills in seasonally frozen ground regions, North China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(2): 356-368.
- [2] QI, J L, PIETER A V, CHENG G D. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17: 245-252.
- [3] ZHOU Z, MA W, ZHANG S, et al. Damage evolution and recrystallization enhancement of frozen loess [J]. International Journal of Damage Mechanics,

- 2018, 27(8): 1131-1155.
- [4] 刘华, 胡鹏飞, 王梦南, 等. 冻融循环对酸污染黄土抗拉特性劣化试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2021, 53(4): 493-501.
- LIU Hua, Hu Pengfei, Wang Mengnan, et al. Experimental study on degradation of tensile properties of acid-contaminated loess by freeze-thaw cycles[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 493-501.
- [5] ZHANG H, ZHANG Z, ZHANG K, et al. Effects of freeze-thaw on the water-heat process in a loess subgrade over a cut-fill transition zone by laboratory investigation[J]. Cold Region Science and Technology, 2019, 164: 1027.
- [6] 许健, 郑翔, 张辉. 黄土地区边坡冻融剥落病害机理及稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2018, 50(4): 477-484.
- XU Jian, ZHENG Xiang, ZHANG Hui. Analysis on mechanism and stability of freeze-thaw spalling disease for slope in loess region[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(4): 477-484.
- [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]. 水利学报, 2014, 45(S2): 14-18.
- HU Zaiqiang, LIU Yin, LI Hongru. Influence of freezing-thawing cycles on strength of loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S2): 14-18.
- [8] 张玲玲, 龙建辉, 邢鲜丽, 等. 冻融循环作用下吕梁地区马兰黄土性质研究[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(4): 557-563.
- ZHANG Lingling, LONG Jianhui, XING Xianli, et al. Study on the properties of Malan Loess in Lyuliang area under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(4): 557-563.
- [9] XU J, LI Y F, LAN W, et al. Shear strength and damage mechanism of saline intact loess after freeze-thaw cycling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 164: 102779.
- [10] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1086.
- SONG Chunxia, QI Jilin, LIU Fengyin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1086.
- [11] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 767-772.
- DONG Xiaohong, ZHANG Aijun, LIAN Jiangbo, et al. Study of shear strength deterioration of loess under repeated freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 767-772.
- [12] 李丽, 张坤, 张青龙, 等. 干湿和冻融循环作用下黄土强度劣化特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1142-1149.
- LI Li, ZHANG Kun, ZHANG Qinglong, et al. Experimental study on the loess strength degradation characteristics under the action of dry-wet and freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1142-1149.
- [13] 周志军, 吕大伟, 宋伟, 等. 基于含水率和温度变化的冻融黄土性能试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 44-49.
- ZHOU Zhijun, LÜ Dawei, SONG Wei, et al. Experiment on loess characteristics after freeze-thaw circle based on changes of moisture content and temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 44-49.
- [14] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922-927.
- NI Wankui, SHI Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922-927.
- [15] 许健, 王掌权, 任建威, 等. 重塑黄土冻融过程抗剪强度劣化特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2017, 49(2): 200-206.
- XU Jian, WANG Zhangquan, REN Jianwei, et al. Experimental research on shear strength deterioration of remolded loess under the freeze-thawing cycle[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 200-206.
- [16] 李宝平, 平高权, 张玉, 等. 平面应变条件下冻融循环对黄土力学性质的影响[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(2): 41-48.

- LI Baoping, PING Gaoquan, ZHANG Yu, et al. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties of loess under plane strain[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 41-48.
- [17] 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.
- ZHENG Fang, SHAO Shengjun, WANG Songhe. Influences of freeze-thaw on strength of loess under complex stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 224-228.
- [18] 郑颖人, 孔亮. 岩土弹塑性力学[M]. 中国建筑工业出版社, 2010.
- ZHENG Yingren, KONG Liang. Geotechnical Plastic Mechanics[M]. China Architecture & Building Press, 2010.
- [19] 陈菲, 邵生俊, 邵帅. 基于应变能的黄土初始屈服和强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 4151-4157.
- CHEN Fei, Shao Shengjun, Shao Shuai. Experimental study on primary yield and strength characteristics of loess based on strain energy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 4151-4157.
- [20] JARDINE R J. Some observations on the kinematic nature of soil stiffness[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(2): 111-124.
- [21] ROTTA G V, CONSOLI N C, PRIETTO P D M, et al. Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress[J]. Geotechnique, 2003, 53(5): 493-501.
- [22] PRASHANT A, PENUMADU D. Effect of intermediate principal stress on overconsolidated kaolin clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(3): 284-292.
- [23] 周小文, 刘攀, 胡黎明, 等. 结构性花岗岩残积土的剪切屈服特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 157-163.
- ZHOU Xiaowen, LIU Pan, HU Liming, et al. An experimental study of shear yield characteristics of structured granite residual soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 157-163.
- [24] 张玉, 邵生俊, 何晖, 等. 原状黄土的平面应变剪切、屈服性状的试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 111-120.
- ZHANG Yu, SHAO Shengjun, HE Hui, et al. Experimental study on plane-strain shear and yield characteristics of intact loess[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 111-120.
- [25] 王智. 平面应变条件下黄土剪切破坏与屈服特性研究[D]. 西安: 西安工业大学. 2018.
- WANG Zhi. Study on the shear failure and yield characteristics of loess under plane strain condition[D]. Xi'an: Xi'an Technology University, 2018.

(编辑 桂智刚)