

DOI: 10.11779/CJGE2023S20017

复杂循环应力路径下冻结粉质黏土的变形特性与安定性行为研究

王亚鹏^{1,2,3}, 李国玉^{1,2,3}, 陈敦^{*1,3}, 马巍^{1,2}, 张轩⁴

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院大兴安岭冻土工程与环境观测研究站, 黑龙江 加格达奇 165000; 4. 西北民族大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: 复杂循环应力路径下冻土的变形特性与安定性行为研究对寒区工程的长期稳定性具有重要作用。为分析不同复杂循环应力路径对冻土变形特性与安定性行为的影响, 设计不同温度同一水平下的 5 种循环应力路径, 即三轴循环应力路径 (TCSP)、定向循环应力路径 (DCSP)、圆形循环应力路径 (CCSP)、椭圆循环应力路径 (ECSP) 和心形循环应力路径 (HCSP), 分析了粉质黏土的轴向累积塑性应变, 同时利用 3 种安定性评价准则对结果进行评估。研究表明: 不同温度 5 种循环应力路径下的轴向累积塑性应变满足 $DCSP > ECSP > HCSP > CCSP > TCSP$ 。安定性评价结果表明, 定向循环应力路径对土体的安定性行为影响最大, 在 3 种准则下都属于增量破坏。在 -15°C 时, 心形循环应力路径与椭圆循环应力路径试验结果在 Chen-准则评估下也属于增量破坏。

关键词: 复杂循环应力路径; 冻结粉质黏土; 变形特性; 安定性行为

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0134-06

作者简介: 王亚鹏(1997—), 男, 博士, 主要从事冻土力学与寒区工程方面的研究工作。E-mail: wangyapeng@nieer.ac.cn。

Deformation characteristics and shakedown behaviors of frozen silty clay under complex cyclic stress paths

WANG Yapeng^{1,2,3}, LI Guoyu^{1,2,3}, CHEN Dun^{1,3}, MA Wei^{1,2}, ZHANG Xuan⁴

(1. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Da Xing'anling Observation and Research Station of Frozen Ground Engineering and Environment, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Jagdaqi 165000, China; 4. School of Civil Engineering, Northwest MinZu University, Lanzhou 730030, China)

Abstract: The deformation characteristics and stability behaviors of frozen soil under complex cyclic stress paths play an important role in the long-term stability of cold region engineering. To analyze the influences of different complex cyclic stress paths on the deformation characteristics and shakedown behaviors of frozen soil, five cyclic stress paths are designed at the same level, namely triaxial cyclic stress path (TCSP), directional cyclic stress path (DCSP), circular cyclic stress path (CCSP), elliptical cyclic stress path (ECSP) and heart-shaped cyclic stress path (HCSP). The axial cumulative plastic strains of the samples are analyzed, and the results are evaluated by three shakedown evaluation criteria. The axial cumulative plastic strains under five cyclic stress paths at different temperatures satisfy the following: $DCSP > ECSP > HCSP > CCSP > TCSP$. The directional cyclic stress path has the greatest influences on the shakedown behaviors of the soil, and the failure belongs to the incremental one under the three criteria. At the temperature of -15°C , the results of the HCSP and ECSP tests also belong to the incremental failure under the evaluation of Chen criterion.

Key words: complex cyclic stress path; frozen silty clay; deformation characteristic; shakedown behavior

0 引 言

近些年来,随着中国经济的发展和国家战略的需求,寒区基础工程建设日益频繁,这些基础工程往往面临着复杂的动荷载,如波浪荷载、地震荷载及交通荷载等,这对冻土的变形行为以及动力特性的研究要

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (42201162); 甘肃省青年科技基金计划项目 (22JR5RA089); 科技基础资源调查专项项目 (2022FY100703); 国家自然科学基金面上项目 (42272339); 国家电网公司总部科技项目 (5200-202230098A-1-1-ZN)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者 (E-mail: chendun@lzb.ac.cn)

求也越来越高^[1]。这些复杂循环动力荷载在应力空间内形成定向循环应力路径 (directional cyclic stress path, DCSP), 圆形循环应力路径 (circular-shaped cyclic stress path, CCSP), 椭圆循环应力路径 (elliptical-shaped cyclic stress path, ECSP) 和心形循环应力路径 (heart-shaped cyclic stress path, HCSP) 等复杂循环应力路径^[2]。

然而传统动荷载模拟通常采用动三轴试验进行, 在应力空间内是一条直线, 称为三轴循环应力路径 (triaxial cyclic stress path, TCSP), 这往往是对上述复杂循环应力路径的一种简化与近似^[3]。许多研究表明这种简化模拟会低估土体累积塑性应变以及忽略主应力轴旋转带来的影响^[4-5]。因此, 准确模拟这些不同复杂循环动力荷载对冻土的变形行为以及动力特性的影响, 对寒区基础工程的建设以及人工冻结技术的发展至关重要。

目前, 已有一些学者对冻土动荷载下的变形行为以及动力特性进行了研究。Zhang 等^[6]对圆形循环应力路径和椭圆循环应力路径下冻土累积塑性应变进行了研究。Qian 等^[7]基于永久应变和能量耗散对黏土的累积变形模式进行了分类, 并提出了一种新的定义安定性行为边界的方法; Zhou 等^[8]定义了一种新的划分后循环压实阶段与二次循环压实阶段的方法, 并以此提出针对冻土路基填料的安定性评估准则; 王庆志等^[9]对青藏铁路路基粗颗粒填料进行了不同温度、粗颗粒含量和循环应力路径的变围压三轴循环试验, 并评价了 3 种安定性准则对冻土变形行为的适用性。但是尚无针对复杂循环应力路径下冻土变形行为的安定性分析。

本文基于冻土空心圆柱仪进行了 5 种循环应力路径试验, 研究了不同循环应力路径下冻土轴向累积塑性应变的变化规律, 利用 3 种安定性评估准则对试验结果进行了分析, 为复杂动荷载下寒区基础工程建设与运营提供数据与理论参考。

1 试验简介

1.1 试验土样

试验用土取自青藏铁路北麓河段沿线, 是常见的青藏铁路和青藏公路路基填土。按照《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》得到土体基本物理参数见表 1。试验用土的颗粒级配曲线见图 1, 根据土体的塑性指数与颗粒级配曲线, 将其归为粉质黏土。

1.2 试验设备

试验采用冻土空心圆柱仪 (FHCA-300) 进行, 该仪器可独立控制轴向力、扭矩、外围压、内围压和温度。试验仪器的简化结构如图 2 所示。仪器的加载控

制参数与试样的单元体应力换算公式可见参考文献 [10]。

表 1 试验土体基本物理性质

Table 1 Physical properties of test soil

最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	饱和含水率 $w_{sat}/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P
1.84	17.51	20.12	31.17	17.20	13.97

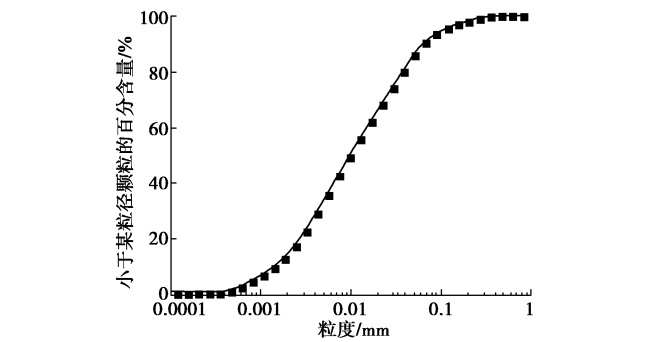


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of test soil

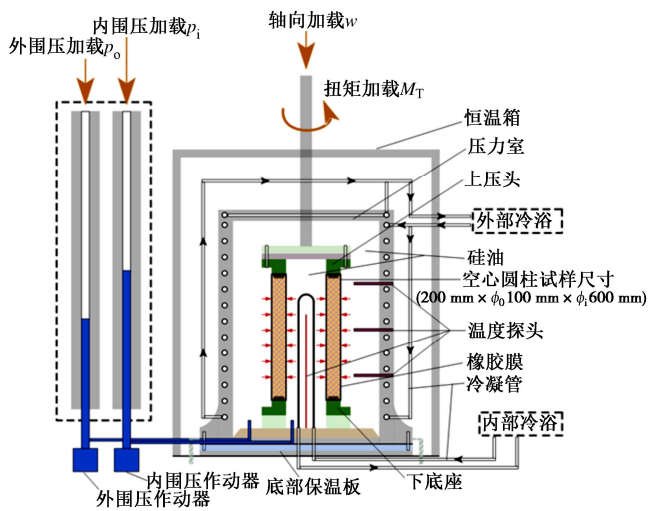


图 2 冻土空心圆柱仪装置示意图

Fig. 2 Schematic representation of hollow cylinder apparatus for frozen soil

1.3 试验条件

选择 $-1.5^{\circ}C$, $-6^{\circ}C$, $-15^{\circ}C$ 作为试验温度。已有研究表明波浪荷载, 地震荷载和交通荷载等动荷载所产生的振动频率约为 1 Hz ^[11]。循环加载次数为 10000 次。试验加载循环应力路径为 5 种, 分别为常规三轴循环应力路径、定向循环应力路径、圆形循环应力路径、椭圆循环应力路径和心形循环应力路径。试验围压参考以往的研究^[6], 设置为 400 kPa 。

1.4 试验方案

为研究 5 种循环应力路径下冻结粉质黏土的变形特性与安定性行为, 需要控制 5 种循环应力路径处于同一水平下。试验选择控制 5 种应力路径的轴向应力

与剪切应力的振幅一致（常规三轴循环应力路径仅轴向应力振幅一致）。以圆形循环应力路径作为参考，轴向应力振幅利用下式确定：

$$CSR = \frac{\sigma_z^{ampl}}{2p_0}, \tag{1}$$

式中：CSR 为循环应力比； σ_z^{ampl} 为轴向应力振幅； p_0 为初始围压。CSR 的选取经过前期试验以及参考他人研究^[5]，为保证试样不发生破坏，且能够发生较为明显的变形，选取-6℃ 和-15℃ 条件下 CSR 为 1.750，由于在-1.5℃ 相同 CSR 下试样在 5 种循环应力路径下都发生了破坏，为保证试样变形在控制范围内，选择 CSR 为 0.875。在圆形循环应力路径下，剪切应力振幅等于轴向应力振幅的两倍，其他路径以圆形循环应力路径的振动参数为参考。其中，定向循环应力路径与椭圆循环应力路径的主应力偏转角为 22.5°，对应 $(\sigma_z - \sigma_\theta) - 2\tau_{\theta\theta}$ 应力空间下倾斜角 45°。试验方案如表 2 所示。心形循环应力路径通过仪器自定义加载波形实现，其他应力路径则通过仪器内的半正弦波加载。试验进行后，实测应力路径如图 3 所示，可以看出经过控制仪器加载参数冻土空心圆柱仪可以较好地实现复杂循环应力路径。

表 2 试验方案
Table 2 Test schemes

试样编号	温度/℃	CSR	应力路径
TN1~5	-1.5	0.875	TCSP, DCSP, CCSP, ECSP, HCSP
TN6~10	-6	1.750	TCSP, DCSP, CCSP, ECSP, HCSP
TN11~15	-15	1.750	TCSP, DCSP, CCSP, ECSP, HCSP

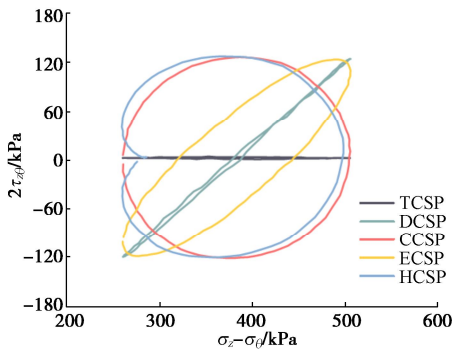


图 3 室内复杂循环应力路径实现

Fig. 3 Implementation of complex cyclic stress paths in laboratory

2 试验结果与分析

图 4 为不同温度下 5 种循环应力路径轴向累积塑性应变随循环次数的变化曲线。从图 4 可以看出 5 种循环应力路径轴向累积塑性应变均随着循环次数的增加而增加。对比图 4 (a) ~ (c) 可以发现 5 种循环轴向累积塑性应变均呈现随着温度降低而降低的规

律。

由图 4 (a) 可以看出，常规三轴循环应力路径轴向累积塑性应变最小，定向循环应力路径轴向累积塑性应变最大，5 种循环应力路径轴向累积塑性应变满足 DCSP>ECSP>HCSP>CCSP>TCSP。在-1.5℃ 下，定向循环应力路径轴向累积塑性应变超过三轴循环应力路径 4.71%，占三轴循环应力路径结果的 65.8%，可见定向循环应力路径对高温冻土的变形影响远超过常规三轴循环应力路径。在-1.5℃ 时，椭圆循环应力路径、心形循环应力路径和圆形应力路径轴向累积塑性应变也分别超过三轴循环应力路径 2.74%，1.73%，0.53%。因此，复杂循环应力路径对高温冻土的变形影响较大。其中，定向循环应力路径与椭圆循环应力路径轴向累积塑性应变在循环次数 $N>5000$ 后呈现明显的快速增加趋势，而其他 3 种循环应力路径轴向累积塑性应变则基本维持在原先的增长速率。

对比图 4 中 (a) ~ (c) 也可以看出，在更低的温度下，复杂循环应力路径轴向累积塑性应变也大于三轴循环应力路径的结果，但是温度会降低这种影响。在-6℃ 和-15℃ 时，试样轴向累积塑性应变都处于稳定状态。在-6℃ 时，5 种循环应力路径轴向累积塑性应变差异随着循环次数的增加逐渐放大。而在-15℃ 时，5 种循环应力路径轴向累积塑性应变差异则主要来自与试样加载初期 ($N<1000$)，这是因为当温度较低时，胶结能力更强，试样具有更高的抵抗变形能力，轴向累积塑性应变率随着循环次数的增加而急剧下降，所以不同循环应力路径下变形差异更多产生在加载初期。图 5 为不同温度 5 种循环应力路径下最终轴向累积塑性应变，可以看出不同循环应力路径下的最终轴向累积塑性应变差异随着温度的上升而增大。

5 种循环应力路径轴向累积塑性应变差异主要与主应力轴方向角有关。与其他 4 种复杂循环应力路径相比，三轴循环应力路径仅存在轴向动应力，也就是轴向压缩状态，许多研究都表明冻土在轴向压缩状态相较于在压剪组合状态下具有更高的抵抗变形能力。对于其他 4 种循环应力路径而言，由于存在循环剪切应力，试样变形会增大，其中定向循环应力路径存在固定的剪切角，这种剪切状态随着循环次数的增加，试样中的冰胶结体与黏聚力也更加容易被破坏和克服。椭圆循环应力路径轴向累积塑性应变仅次于定向循环应力路径，这是由于椭圆循环应力路径虽然没有固定的主应力轴方向角，但是其应力路径整体存在一定的方向性，也就是其长轴所在的方向，所以其变形也很大。心形循环应力路径是动荷载中最为常见的应力路径，不论是列车荷载、汽车荷载还是飞行器荷载，其下土体单元的应力路径变化形状都是心形。在心形

循环应力路径中, 主应力轴方向角一直在变化, 主应力轴旋转使试样在剪切过程中胶结较弱的地方发生破坏, 使得试样强度降低, 随着循环次数增加而产生更大的轴向累积塑性应变。圆形循环应力路径状态下, 试样发生主应力轴旋转, 剪切应力会使轴向累积塑性应变变大且大于三轴循环应力路径下的变形。对比心形循环应力路径, 圆形循环应力路径的主应力轴角是以一定速率变化, 且剪切应力在经过最大值后快速减小, 这种影响随着循环次数的放大, 导致试样轴向累积塑性应变在心形循环应力路径下更大。

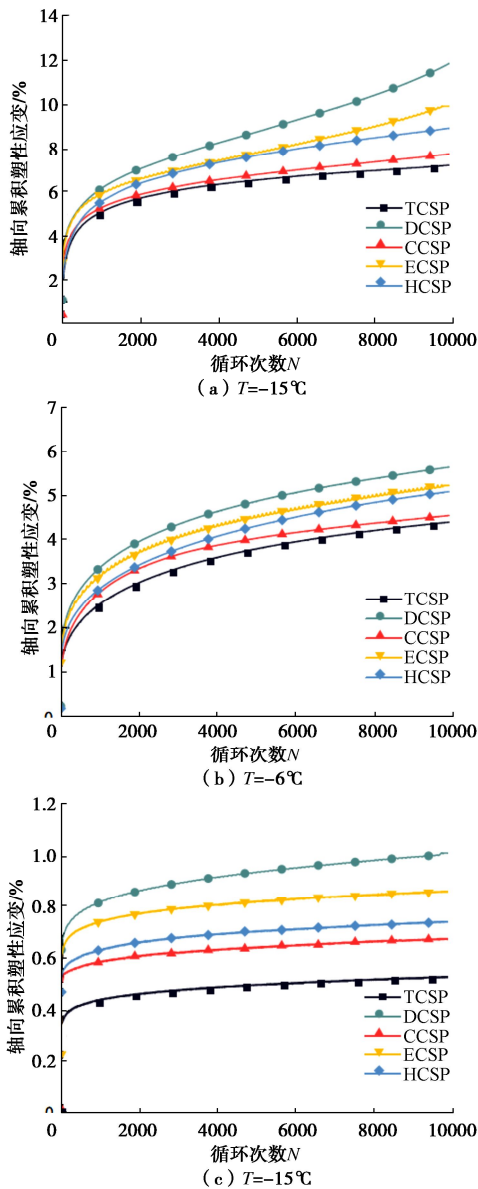


图 4 不同温度下不同循环应力路径轴向累积塑性应变随循环次数的变化

Fig. 4 Axial cumulative plastic strain versus number of vibrations under various cyclic stress paths at different temperatures

3 安定性行为分析

颗粒材料的累积塑性变形行为根据安定性理论可

以分为塑性安定、塑性蠕变和增量破坏 3 种, 3 种变形行为的划分标准是塑性稳定极限与塑性蠕变极限。目前, 常用的安定性行为评价准则有 3 种, 分别是 Werkmeister-准则^[12]、Chen-准则^[13]、马-准则^[7]。

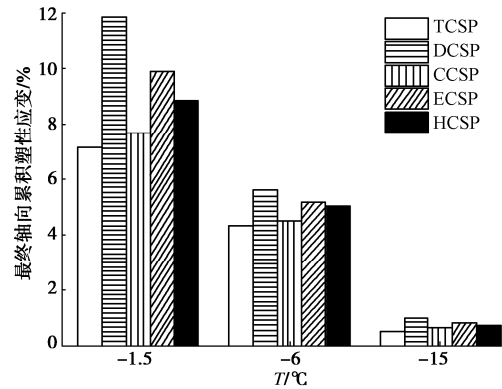


图 5 不同温度下不同循环应力路径最终轴向累积塑性应变

Fig. 5 Axial cumulative plastic strains under various cyclic stress paths at different temperatures

首先对 5 种循环应力路径下的累积塑性应变行为根据 3 个安定性行为准则做出划分, Werkmeister 定义第 3000~5000 次循环荷载间轴向累积塑性应变的增量作为划分依据:

$$\varepsilon_{\text{dif}} = \varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000} \quad (2)$$

Chen-准则通过对后循环压实阶段与二次循环压实阶段拟合直线的交点对应的循环次数作为两个阶段的分界点作为划分。为保证所安定性行为评价的准确性, 即用作判断的循环次数均在二次循环压实阶段内以及参考他人研究, 选取第 1000 次循环次数作为两个阶段的分界点。图 6 为二次循环压实阶段轴向累积塑性应变与 $\lg(1+N_s/N_0)$ 的变化曲线, 可以看到二者基本呈现线性关系, 可以通过直线进行拟合, 其斜率为 $1/a_s$, Chen-准则以拟合直线的斜率作为划分依据, 其界限值分别为 0.1, 0.434。可以看到在 $T=-1.5, -6^\circ\text{C}$ 时, 拟合斜率均远远大于塑性蠕变极限, 5 种循环应力路径下累积塑性应变行为均属于增量破坏。在 -15°C 时, 由图 6 (c) 可以看出仅三轴循环应力路径与圆形循环应力路径下的累积塑性应变属于属性安定阶段, 其他 3 种循环应力路径下二次循环压实阶段的轴向累积塑性应变拟合直线斜率大于 0.1, 属于塑性蠕变, 显然不同的复杂循环应力路径对冻土的累积塑性应变安定性行为具有影响, 定向循环应力路径、椭圆循环应力路径和心形循环应力路径对冻土的变形行为影响最大, 使安定性行为划分为对工程更不利的类型。

马-准则对冻土安定性行为划分适用性更好, 以回弹模量变化的稳定变化拐点对应的循环次数 N_c 作为后循环压实阶段与二次循环压实阶段的边界点。通过计算 $10N_c$ 次与 N_c 次循环次数之间的累积塑性应变率

作为评价指标。

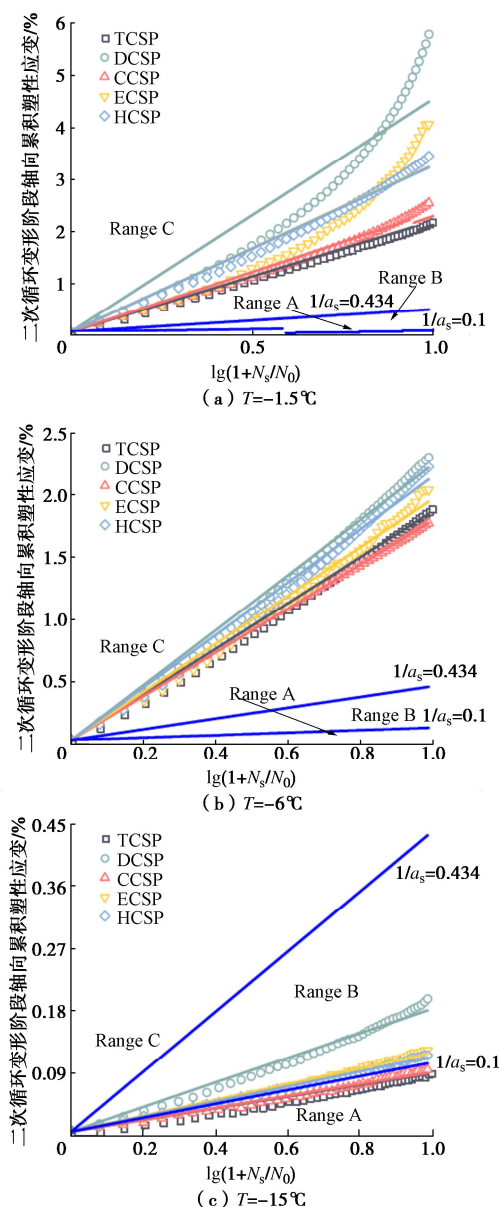
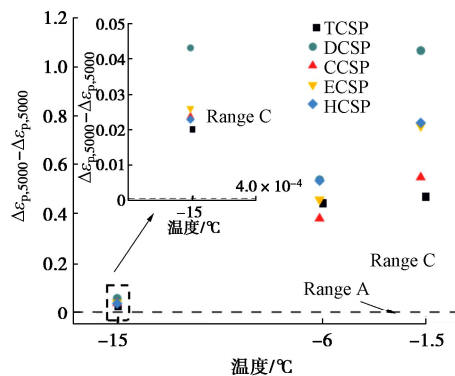


图6 不同温度下5种循环应力路径二次循环压实阶段的轴向累积塑性应变变化

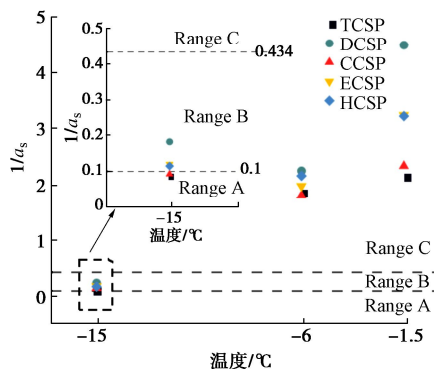
Fig. 6 Change of cumulative plastic strain during second-cycle compaction stage under five cyclic stress paths at different temperatures

图7是3种准则对不同温度五种循环应力路径下冻土轴向累积塑性应变的安定性评价结果。由图7(a)可以看到Werkmeister-准则下所有试验结果都属于增量破坏,且远大于塑性蠕变极限,一方面是由于试验加载循环动应力过大,另一方面与这一准则的适用性有关。Chen-准则与马-准则评估下的结果在-15°C下的局部放大图可以看到,定向循环应力路径都被划分为增量破坏,这表明定向循环应力路径下轴向累积塑性应变的发展往往快且最危险。在Chen-准则的评估下,心形循环应力路径与椭圆循环应力路径下的评价情况

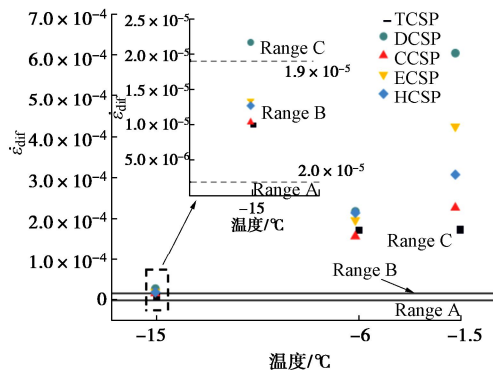
也被划分为增量破坏,表明这两种循环应力路径下的寒区基础工程建设也需要重点分析与研究,来保证基础工程在复杂动荷载下的稳定运营。在-1.5°C和-6°C下,所有评估准则的评价结果都属于增量破坏,但是可以明显看到这种结果在温度升高的情况下,不同循环应力路径的评判结果差异逐渐增大,这说明复杂循环应力路径对冻土轴向累积塑性应变的安定性影响随着温度升高呈现非线性增大。针对高温冻土,即冻土温度接近相变温度时,工程设计与运营越应该根据所受荷载的实际情况进行试验与理论上的分析,以保证土体安定性行为处于塑性稳定或者塑性蠕变,而不是进入增量破坏。



(a) Werkmeister-准则



(b) Chen-准则



(c) 马-准则

图7 不同温度5种循环应力路径轴向累积塑性应变的3种安定性准则评估

Fig. 7 Evaluation of three shakedown criteria for axial cumulative plastic strain under five cyclic stress paths at different temperatures

4 结 论

本文利用冻土空心圆柱仪进行了不同温度下 5 种循环应力路径试验, 得到以下两点结论。

(1) 不同温度下 5 种循环应力路径轴向累积塑性应变均随循环次数的增大而增大, 且随着温度减小而减小, 5 种循环应力路径下的轴向累积塑性应变满足 $DCSP > ECSP > HCSP > CCSP > TCSP$ 。

(2) 基于三类安定性评估准则, 评价了不同温度下五种循环应力路径轴向累积塑性应变, 发现 Werkmeister-准则评估下, 所有试验结果均属于增量破坏; Chen-准则评估下, -15°C 时 TCSP 和 CCSP 试验结果属于塑性蠕变, 其余属于增量破坏; 马-准则评估下, -15°C 时 HCSP、ECSP、CCSP 和 TCSP 试验结果属于塑性蠕变, DCSP 试验结果属于增量破坏。

参考文献:

- [1] NIE R S, LI Y F, LENG W M, et al. Deformation characteristics of fine-grained soil under cyclic loading with intermittence[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(11): 3041-3054.
- [2] LIN T S, ISHIKAWA T, MARUYAMA K, et al. Pavement design method in Japan with consideration of climate effect and principal stress axis rotation[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, **28**: 100552.
- [3] WU T Y, JIN H X, GUO L, et al. Predicting method on settlement of soft subgrade soil caused by traffic loading involving principal stress rotation and loading frequency[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, **152**: 107023.
- [4] 董 彤, 郑颖人, 孔 亮, 等. 考虑主应力轴方向的砂土各向异性强度准则与滑动面研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(4): 736-742. (DONG Tong, ZHENG Yingren, KONG Liang, et al. Strength criteria and slipping planes of anisotropic sand considering direction of major principal stress[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(4): 736-742. (in Chinese))
- [5] 陈 敦, 马 巍, 王大雁, 等. 定向剪切应力路径下冻结黏土变形特性试验[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(7): 2483-2490. (CHEN Dun, MA Wei, WANG Dayan, et al. Experimental study of deformation characteristics of frozen clay under directional shear stress path[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(7): 2483-2490. (in Chinese))
- [6] 张斌龙, 王大雁, 马 巍, 等. 主应力轴旋转条件下冻结黏土累积塑性应变与临界动应力特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(3): 551-560. (ZHANG Binlong, WANG Dayan, MA Wei, et al. Characteristics of cumulative plastic strain and critical dynamic stress of frozen clay under principal stress rotation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(3): 551-560. (in Chinese))
- [7] QIAN J G, WANG Y G, YIN Z Y, et al. Experimental identification of plastic shakedown behavior of saturated clay subjected to traffic loading with principal stress rotation[J]. *Engineering Geology*, 2016, **214**: 29-42.
- [8] ZHOU Z W, MA W, LI G Y, et al. A novel evaluation method for accumulative plastic deformation of granular materials subjected to cyclic loading: taking frozen subgrade soil as an example[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, **179**: 103152.
- [9] 王庆志, 周志伟, 张淑娟. 青藏铁路路基粗颗粒填料动力特性和安定性行为研究[J]. *冰川冻土*, 2022, **44**(2): 566-582. (WANG Qingzhi, ZHOU Zhiwei, ZHANG Shujuan. Study on dynamic properties and shakedown behaviors of coarse-grained fillers in Qinghai-Tibet Railway subgrade[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, **44**(2): 566-582. (in Chinese))
- [10] CHEN D, WANG D Y, MA W, et al. A strength criterion for frozen clay considering the influence of stress Lode angle[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, **56**(11): 1557-1572.
- [11] GU F, ZHANG Y Q, LUO X, et al. Characterization and prediction of permanent deformation properties of unbound granular materials for Pavement ME Design[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, **155**: 584-592.
- [12] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Pavement design model for unbound granular materials[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2004, **130**(5): 665-674.
- [13] CHEN W B, FENG W Q, YIN J H, et al. Characterization of permanent axial strain of granular materials subjected to cyclic loading based on shakedown theory[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, **198**: 751-761.

(编校: 孙振远)