

DOI: 10.11779/CJGE20211149

# 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

张斌龙<sup>1,2</sup>, 王大雁<sup>\*2</sup>, 马巍<sup>2</sup>, 雷乐乐<sup>3</sup>, 周志伟<sup>2</sup>

(1. 青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;

3. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 冻土作为寒区工程的基础和人工冻结工程的支护壁, 经常承受动荷载的扰动, 研究其在动荷载作用下累积塑性应变和临界动应力特性, 可为寒区工程和人工冻结工程变形控制和稳定评价提供重要参考。为揭示主应力轴旋转对冻结黏土累积塑性应变和临界动应力特性影响, 采用冻土空心圆柱仪进行了一系列考虑围压影响的动三轴试验和纯主应力轴旋转试验, 分析了冻结黏土累积塑性应变、累积塑性应变率和临界动应力特征变化。研究表明, 冻结黏土试样轴向累积塑性应变随着循环次数的增多而增大, 围压的增大则会抑制冻结黏土轴向累积塑性应变发展速度, 而主应力轴旋转效应会加快冻结黏土轴向累积塑性应变发展速度。冻结黏土轴向累积塑性应变率呈现 3 种不同变化趋势, 提出了基于累积塑性应变速率判别的冻结黏土塑性变形行为划分准则, 并建立了冻结黏土塑性安定和塑性蠕变临界动应力表达式, 证实了主应力轴旋转条件下冻结黏土临界动应力显著降低。研究结果对冻土工程的设计、施工、稳定评价和寒区资源开发都具有重要的指导意义。

**关键词:** 主应力轴旋转; 冻结黏土; 累积塑性应变; 安定性理论; 临界动应力

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)03-0551-10

**作者简介:** 张斌龙(1992—), 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: zhangbinlong@nieer.ac.cn。

## Characteristics of cumulative plastic strain and critical dynamic stress of frozen clay under principal stress rotation

ZHANG Binlong<sup>1, 2</sup>, WANG Dayan<sup>2</sup>, MA Wei<sup>2</sup>, LEI Lele<sup>3</sup>, ZHOU Zhiwei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, CAS,

Lanzhou 730000, China; 3. School of Civil and Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** As the foundation of cold region projects and the supporting wall of artificial freezing projects, the frozen soil often bears the disturbance of dynamic loads. Studying the cumulative plastic strain and the critical dynamic stress under the dynamic loads provide an important reference for the deformation design and stability evaluation of the cold region and artificial freezing projects. To reveal the influences of the principal stress rotation on the cumulative plastic strain and the critical dynamic stress characteristics of the frozen clay, a series of dynamic triaxial tests and pure principal stress rotation tests considering the influences of confining pressure are carried out by FHCA-300, and the characteristics of the cumulative plastic strain, the cumulative plastic strain rate and the critical dynamic stress of the frozen clay are analyzed. The results show that the axial cumulative plastic strain of the frozen clay increases with the increase of cycles, the increase of the confining pressure will restrain the development of its axial cumulative plastic strain, and the principal stress rotation will accelerate the development of its axial cumulative plastic strain. The evolution of the axial cumulative plastic strain rate of the frozen clay shows three different trends. The division criterion of plastic deformation behavior of the frozen clay based on the cumulative plastic strain rate is proposed, and the expressions for the critical dynamic stress of the plastic shakedown and plastic creep of the frozen clay are established. It is confirmed that the critical dynamic stress of the frozen clay decreases significantly under the rotation of the principal stress axis. The research results are of important guiding significance for the design, construction and stability evaluation of the frozen soil projects and the development of the resources in cold regions.

**Keywords:** principal stress rotation; frozen clay; accumulative

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41671069; 41871054)

收稿日期: 2021-09-29

\*通信作者 (E-mail: dywang@lzb.ac.cn)

plastic strain; shakedown theory; critical dynamic stress

## 0 引言

在中国西北和东北地区,多年冻土广泛分布。随着国家“西部大开发”、“振兴东北老工业基地”和“一带一路”等战略的相继提出,东北和西北地区经济建设进入加速发展期,修建在多年冻土区的大型工程越来越多,如哈大高铁、漠河机场、青藏高速、青藏铁路和拉洛水库等。冻土地基在服役期不但要承受上部结构荷载,还经常受到地震、交通、波浪等动荷载作用,动荷载作用将导致差异性沉降等工程病害的发生。因此,深入学习动荷载作用下冻土累积塑性应变和临界动应力特性,对多年冻土区工程的设计、维护 and 安全性评价具有重要的现实意义。

目前,关于动荷载作用下冻土累积塑性应变和临界动应力特性的研究以动三轴试验为主,焦贵德等<sup>[1]</sup>、Wang 等<sup>[2]</sup>和 Xu 等<sup>[3]</sup>对青藏铁路沿线冻结红黏土进行了大量动三轴试验,分析了不同围压、应力幅值、频率、温度和冻融循环次数对冻结黏土累积塑性应变和临界动应力的影响,提出了考虑不同因素影响的冻结黏土累积塑性应变经验预测模型;罗飞等<sup>[4]</sup>、Zhou 等<sup>[5]</sup>和刘富强<sup>[6]</sup>研究了围压、应力幅值、频率、含水率和冻融循环次数对冻结黄土累积塑性应变发展规律的影响,并从微观角度解释了冻结黄土变形机理;Zhang 等<sup>[7]</sup>研究了冻结风积土累积塑性应变发展,采用分段函数预测了累积塑性应变发展;Zhang 等<sup>[8]</sup>研究了寒区水库心墙填料冻结混合土的累积塑性应变变化规律,提出了改进的双曲线累积塑性应变预测模型。可见,关于动荷载作用下冻土累积塑性应变和临界动应力特性的研究已经取得显著成果。然而,以上试验研究均在主应力方向固定条件下进行。在实际工程中,动荷载作用下土体单元应力往往发生主应力轴旋转现象<sup>[9]</sup>。而目前主应力旋转条件下累积塑性应变和临界动应力特性的研究主要集中在未冻土,关于主应力旋转条件下冻土累积塑性应变和临界动应力特性的研究尚未报道<sup>[10-18]</sup>。

基于此,本文以冻结黏土为研究对象,采用冻土空心圆柱仪进行了一系列动三轴和纯主应力旋转试验,分析了主应力轴旋转对冻结黏土累积塑性应变和临界动应力特性的影响。

## 1 试样制备与试验方案

### 1.1 试验仪器

试验在冻土工程国家重点实验室与 GCTC 公司联合研发的冻土空心圆柱仪(FHCA-300)上进行,仪器

的简化结构如图 1 所示。仪器主要由压力室、液压控制系统、轴向和扭矩加载系统、温控系统和数据收集系统组成。仪器的可以实现低温环境下轴向、扭矩、外围压和内围压四向应力加载,从而实现动三轴仪器无法实现的多种复杂应力路径<sup>[19]</sup>。冻土空心圆柱仪上试验加载参数与试样单元体应力的转换公式可见文献<sup>[20]</sup>。

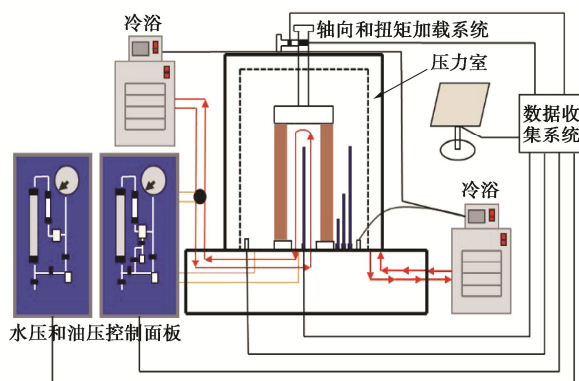


图 1 冻土空心圆柱仪(FHCA-300)结构简化图

Fig. 1 Simplified structural diagram of frozen hollow cylinder apparatus (FHCA-300)

### 1.2 试样制备

试验用土取自青藏铁路北麓河段青藏铁路沿线,采集区是典型的多年冻土区,取回的试验用土,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)<sup>[21]</sup>对其基本物理参数指标进行了测定,试验用土的基本物理参数指标如表 1,试验用土的颗粒级配曲线如图 2,根据土的工程分类标准,可将其归为低液限黏土。

在进行工程建设前,地基一般要经过强夯。因此,按照最大干密度进行空心圆柱试样制备,试样的高为 200 mm,外径为 100 mm,内径为 60 mm。试样的制备过程如下:①取一定质量经碾碎、风干和过 2 mm 筛处理的试验用土和相应的蒸馏水,将蒸馏水加入土中,搅拌均匀并过 5 mm 筛;②将配置的试验用土装入密封袋,保持 24 h 使水分分布相对均匀;③安装自制的空心圆柱制样模具,将闷料分 5 层压实装入模具,为了使每层紧密结合,相邻层之间进行刮毛处理;④以一定的速率正反压实试样,试样高度达到预定值时停止压样,脱模即可得到室温的空心圆柱试样,制备流程如图 3 所示。将室温试样迅速装入冻土空心圆柱仪,使用冷浴快速降温至 $-30^{\circ}\text{C}$ ,防止冻胀发生;然后调节温度至目标温度,保持 24 h 使冻土试样温度分布均匀,得到试验所需的冻土空心圆柱试样。

表 1 试验用土的基本物理参数指标  
Table 1 Basic physical properties of testing soil

颗粒相 对质量 密度 $G_s$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	饱和含 水率 $w_{sat}/\%$	液限 $w_p/\%$	塑限 $w_L/\%$	塑性 指数
2.71	1.72	18.6	34.5	13.9	20.6

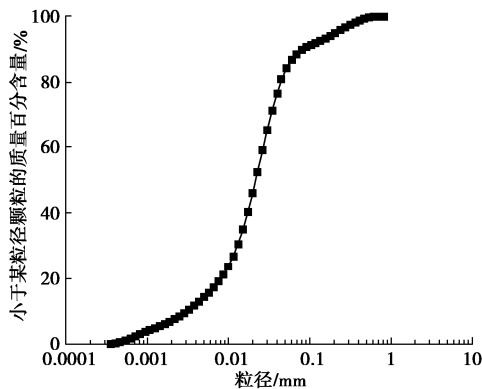


图 2 试验用土颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of test soil

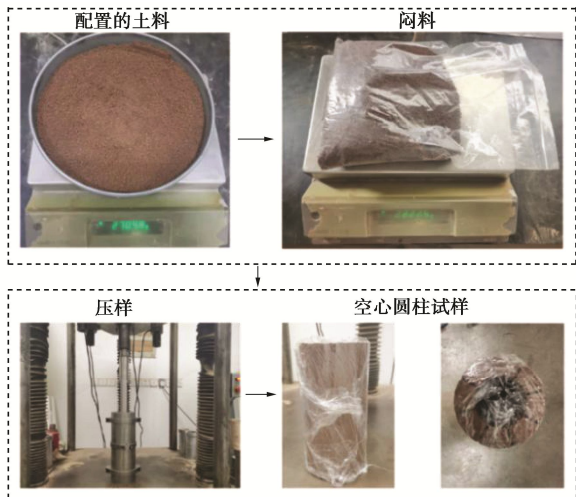


图 3 室温空心圆柱试样制备流程图

Fig. 3 Preparation process of hollow cylinder sample

1.3 试验方法

试验选取 $-5^{\circ}C$ 作为试验参考温度, 动荷载以 1 Hz 频率加载, 因为研究表明慢速列车、波浪和地震等动荷载产生的震动频率在 1 Hz 左右<sup>[22-24]</sup>。而试样围压分别设置为 400, 700, 1000 kPa, 在 $-5^{\circ}C$ 温度下以 1%/min 的轴向应变率进行围压为 400, 700, 1000 kPa 的三轴压缩试验, 确定冻结黏土强度在 4000~5000 kPa, 试样破坏应变在 15%左右; 参考冻结黏土静强度, 动荷载试验的剪应力幅值设定为 2000, 2250, 2500, 2750, 3000 kPa, 剪应力幅值设置相对较大, 主要是为了让冻结黏土试样发生明显的累积塑性应变, 以便研究其冻结黏土塑性变形行为。试验中定义了动剪应力比来反映动剪应力幅值对冻结黏土累积应变的影响, 具体

试验方案如表 2 所示。动剪应力比的定义如下<sup>[25]</sup>:

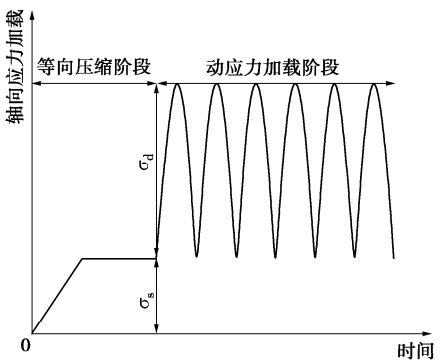
$$CSR = q_{cyc} / 2P_0 \quad , \quad (1)$$

式中:  $q_{cyc}$  为动剪应力幅值, 数值上等于主应力轴连续旋转圆形应力路径的半径或动三轴加载的动剪应力幅,  $P_0$  为初始围压。

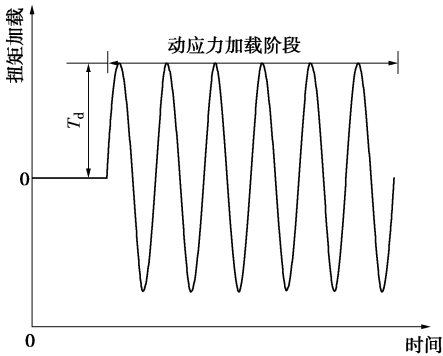
表 2 试验方案  
Table 2 Test schemes

试验 名称	试样 编号	围压/ kPa	动剪应力比 CSR
动三轴 试验	1~5	400	2.500 2.813 3.125 3.438 3.750
	6~10	700	1.429 1.607 1.786 1.964 2.143
	11~15	1000	1.000 1.125 1.250 1.375 1.500
纯主应 力轴旋 转试验	16~20	400	2.500 2.813 3.125 3.438 3.750
	21~25	700	1.429 1.607 1.786 1.964 2.143
	26~30	1000	1.000 1.125 1.250 1.375 1.500

确定试验方案后, 利用冻土空心圆柱仪开展动三轴试验和纯主应力轴旋转试验。试验采用应力方式控制, 首先施加一定的围压和初始静应力使试样等向压缩, 然后开始施加动应力。在进行动三轴试验时, 根据试验仪器特点和以往研究经验, 一般采用如图 4(a) 所示的半正弦波模拟交通、地震等动荷载; 而在进行纯主应力轴旋转试验时, 则需通过施加如图 4(a) 和 4(b) 所示的轴向应力和扭矩组合波形来实现。在进



(a) 轴向应力加载波形



(b) 扭矩加载波形

图 4 试验采用的动应力加载波形

Fig. 4 Dynamic stress loading waveforms used in tests

行动荷载加载时,对于稳定冻结黏土试样,循环加载10000次之后停止;而对于非稳定试样,当轴向应变达到15%时,即动荷载加载停止。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 冻结黏土累积塑性应变分析

图5给出了动三轴试验中不同围压下轴向累积塑性应变随循环次数变化曲线。由图5可以看出,不同围压下冻结黏土轴向累积塑性应变随循环次数变化规律相似,因此以试验条件 $\sigma_3=700$  kPa为例,对动三轴试验的轴向累积塑性应变进行分析(如图5(b)所示)。

由图5(b)可以看出,动剪应力幅值对冻结黏土轴向累积塑性应变影响比较显著,且存在临界动剪应力比 $CSR=0.1786$ ,以动剪应力比 $CSR=0.1786$ 为界限,可以将轴向累积塑性应变曲线大致划分为稳定型和破坏型两种:稳定轴向累积塑性应变曲线随着循环次数增多而缓慢增大,而破坏性曲线在前期随循环次数的增多而快速增大,当达到某一循环次数时,试样瞬间破坏。在稳定型轴向累积塑性应变曲线中,当动剪应力比由 $CSR=1.429$ 增大到 $CSR=1.607$ 时,产生的最终轴向累积塑性应变增大约0.64%;当动剪应力比由 $CSR=1.607$ 增大到 $CSR=1.786$ 时,产生的最终轴向累积塑性应变增大约1.03%。而在破坏型累积塑性应变曲线中,当动剪应力比由 $CSR=1.964$ 增大到 $CSR=2.143$ 时,达到破坏的循环次数减少4970次。可见,当动剪应力幅值超过临界动剪应力时,轴向累积塑性应变对动剪应力幅值的响应将更加显著。这是由于试样中存在微结构,在较小动剪应力幅值作用下,试样经历微结构愈合过程,试样产生的轴向累积塑性应变较小;随着动剪应力幅值的增大,动剪应力幅值将大于试样的临界动剪应力,试样中冰胶结力、黏聚力和摩擦力等被克服,试样中破裂带形成,试样强度骤降,试样产生的轴向累积塑性应变迅速增大。

此外,对比图5(a),(b)和(c)可以看出,围压的变化同样对轴向累积塑性应变具有显著作用:以动剪应力幅值2250 kPa为例,当围压从400 kPa增大到700 kPa时,最终轴向累积塑性应变减小1.09%;当围压从700 kPa增大到100 kPa时,最终轴向累积塑性应变减小0.49%。围压对冻结黏土轴向累积塑性应变的影响主要体现在抑制试样侧向鼓起变形。随着围压的增大,试样中土体颗粒的球应力增大,从而土颗粒间互咬、摩擦等作用增强,产生的轴向累积塑性应变减小<sup>[26]</sup>。

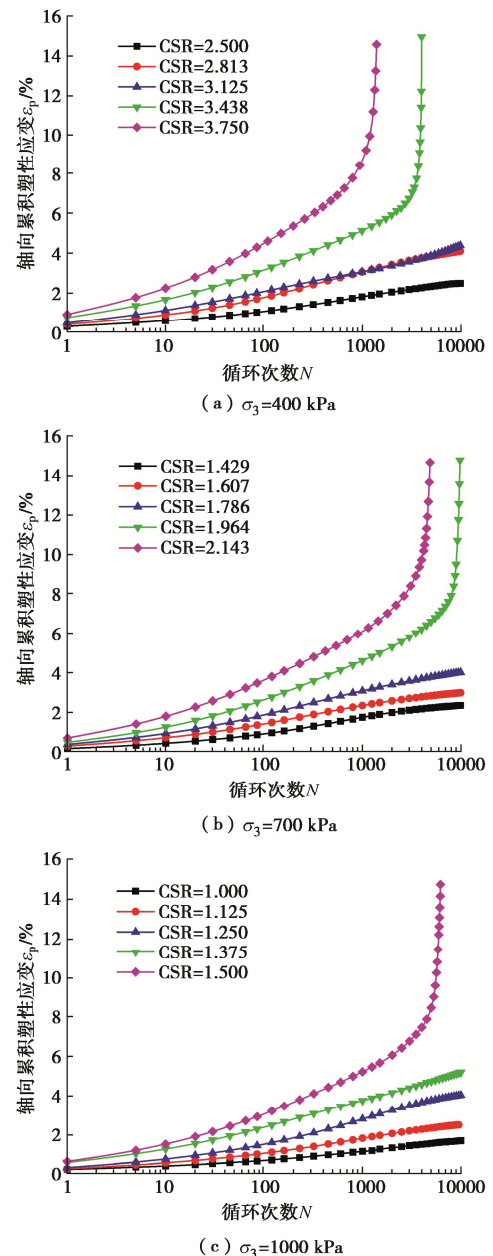


图5 动三轴试验中不同围压下轴向累积塑性应变随循环次数变化曲线

Fig. 5 Variation of axial cumulative plastic strain with cycle times under different confining pressures in dynamic triaxial test

图6给出了纯主应力轴旋转试验中不同围压下轴向累积塑性应变随循环次数变化曲线。由图6可以看出,纯主应力轴旋转试验中轴向累积塑性应变随循环次数变化规律与动三轴试验结果相似,大体上也可以将轴向累积塑性应变随循环次数变化曲线划分为稳定型和破坏型两种。然而,不同于动三轴试验结果,纯主应力轴旋转试验中稳定性和破坏型曲线的临界动剪应力比将明显降低。如 $\sigma_3=700$  kPa时,动三轴试验中临界动剪应力比 $CSR=1.786$ ,而纯主应力轴旋转试验中临界动剪应力比 $CSR=1.607$ 。



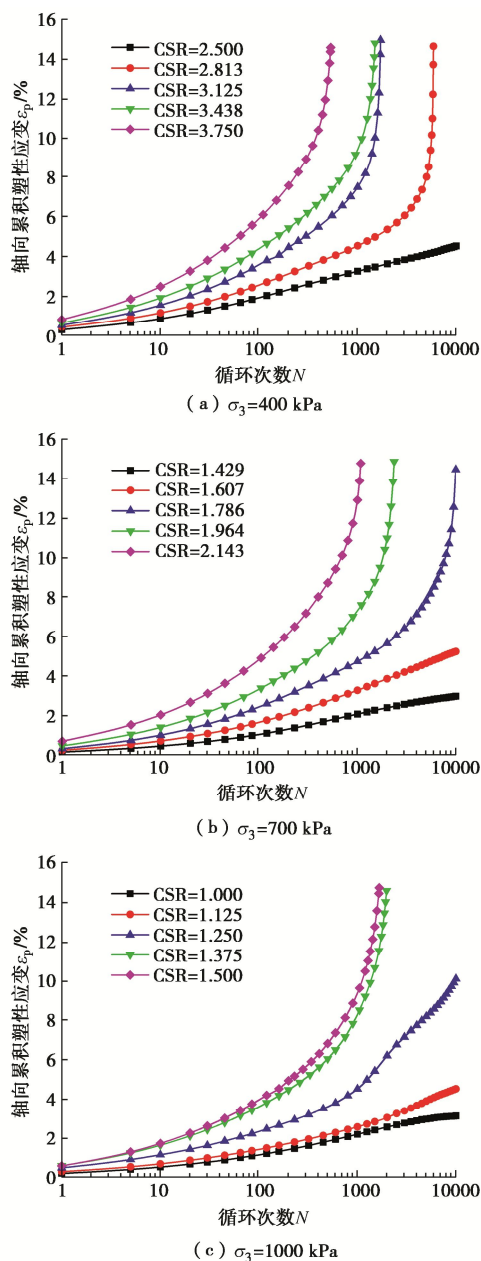


图6 纯主应力轴旋转试验中不同围压下轴向累积塑性应变随循环次数变化曲线

Fig. 6 Variation of axial cumulative plastic strain with cycle times under different confining pressures in principal stress rotation

为了更加直观体现纯主应力轴旋转试验和动三轴试验中轴向累积塑性应变差异, 图7给出了不同加载方式下轴向累积塑性应变随循环次数变化曲线。由图7可以看出, 对于未破坏冻结黏土试样, 在相同的循环次数, 纯主应力轴旋转试验中产生的轴向累积塑性应变明显大于动三轴试验中产生的轴向累积塑性应变, 主应力轴旋转条件下轴向累积塑性应变增大最大可达6.24%左右; 而对于破坏试样, 纯主应力轴旋转试验中发生破坏所需的循环次数明显少于动三轴试验中发生破坏所需的循环次数。可见, 主应力轴旋转

现象可以加快轴向累积塑性应变的发展。这是由于黏土颗粒一般呈片状, 应力诱导产生各向异性, 试样沿轴向强度大于水平方向<sup>[27]</sup>。在动三轴试验中主应力始终沿轴向方向作用, 试样承载力较强, 试样产生的轴向累积塑性应变较小; 而主应力轴旋转试验中耦合了剪应力作用, 水平向的剪应力能促进试样沿水平向弱胶结和咬合部位的剪切破坏, 从而导致试样强度降低, 试样产生的轴向累积塑性应变明显增大。

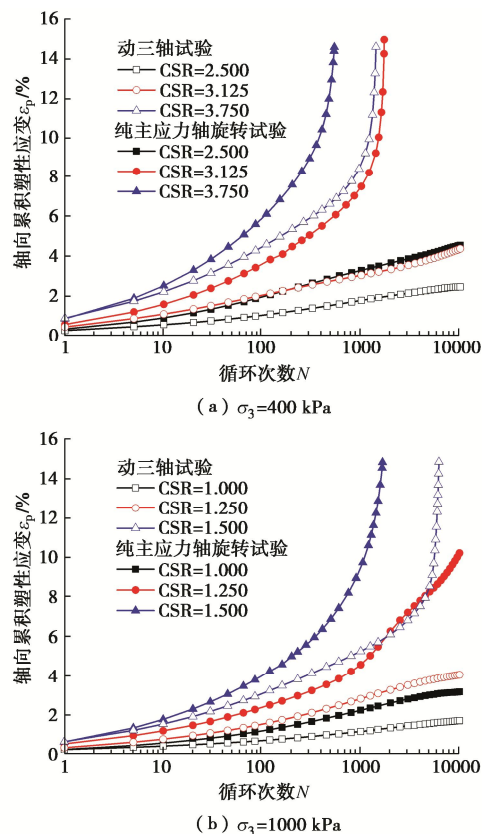


图7 不同加载方式下轴向累积塑性应变随循环次数变化曲线  
Fig. 7 Variation of axial cumulative plastic strain with cycle times under different loading modes

## 2.2 冻结黏土塑性变形行为划分准则

Werkmeister<sup>[28]</sup>基于颗粒材料的安定性理论, 将颗粒材料的塑性变形行为划分为塑性安定、塑性蠕变和增量破坏型3种, 发现不同类型塑性变形行为对应的累积塑性应变率变化规律存在显著差异 (如图8), 统计了不同类型塑性变形行下累积塑性应变速率变化, 给出了粗粒土3种塑性变形行为的应变率划分标准。聂如松等<sup>[29]</sup>基于该方法提出了间歇性荷载下细粒土填料的累积塑性应变划分标准。而冻土的力学性质不同于融土, 其塑性变形行为评判标准也与融土存在显著差异, 因此提出冻土的塑性变形行为评判标准, 对寒区和人工冻结工程稳定评价至关重要。其中轴向累积塑性应变率的定义如下:

$$\dot{\varepsilon}_p = d\varepsilon_p/dN \quad , \quad (2)$$

式中： $d\epsilon_p$  为每一次荷载循环中的轴向累积塑性应变增量； $N$  为循环加载的次数。

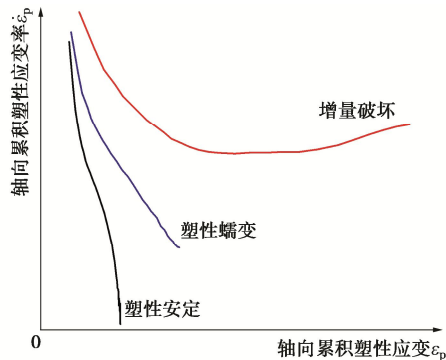


图 8 基于累积应变速率的土体塑性变形行为划分方法

Fig. 8 Division method for plastic deformation behavior of soil based on cumulative strain rate

为研究冻结黏土塑性变形行为，对试验数据进行处理，得到了轴向累积塑性应变速率。图 9，10 分别给出了动三轴试验和纯主应力轴旋转试验中  $\sigma_3=700$  kPa 时轴向累积塑性应变速率随轴向累积塑性应变变化曲线。由图 9，10 可以清晰地看出，冻结黏土轴向累积塑性应变速率呈现 3 种变化趋势：第一种，轴向累积塑性应变速率逐渐减小，而轴向累积塑性应变趋于稳定；第二种，轴向累积塑性应变速率逐渐减小，轴向累积塑性应变逐渐增大；第三种，轴向累积塑性应变速率先减小后增大，轴向累积塑性应变快速增大。

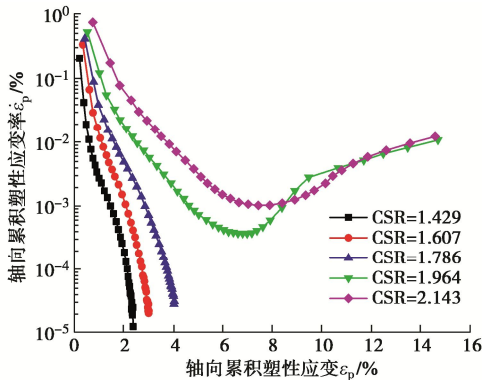


图 9  $\sigma_3=700$  kPa 时动三轴试验中轴向累积塑性应变速率随累积塑性应变变化曲线

Fig. 9 Variation of axial cumulative plastic strain rate with axial cumulative plastic strain in dynamic triaxial tests at  $\sigma_3=700$  kPa

对比图 8~10 可知，冻结黏土塑性变形行为与融土类似，同样存在塑性安定、塑性蠕变和增量破坏型 3 种类型，且不同塑性变形行为对应的轴向累积应变速率变化存在显著差异。统计塑性安定试样和塑性蠕变试样的最终轴向累积塑性应变速率、破坏试样的最小轴向累积塑性应变速率，绘制出不同塑性变形行为下轴向累积塑性应变速率分布，如图 11 所示。由图 11 看

出，塑性安定试样的轴向累积塑性应变速率分布在下半区，塑性蠕变试样的轴向累积塑性应变速率分布在中间区域，而破坏试样的轴向累积塑性应变速率全部分布在上半区，且冻结黏土试样不同塑性变形行为对应的轴向累积塑性应变速率分布带之间存在明显的界限区域。但塑性安定极限和塑性蠕变极限应该是处于相邻塑性变形行为之间的某一特定值。因此，参考聂如松等<sup>[29]</sup>的方法，取界限区上下边界值的平均值作为评判冻结黏土不同塑性变形行为的临界轴向累积塑性应变速率，具体如下：

- 塑性安定： $\dot{\epsilon}_p < 4.7 \times 10^{-5} \%$ ，
- 塑性蠕变： $4.7 \times 10^{-5} \% < \dot{\epsilon}_p < 2.3 \times 10^{-4} \%$ ，
- 增量破坏： $\dot{\epsilon}_p > 2.3 \times 10^{-4} \%$ 。

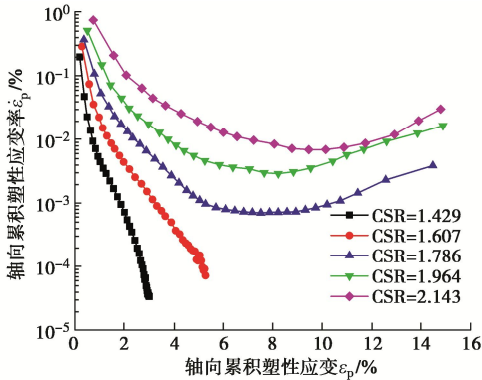


图 10  $\sigma_3=700$  kPa 时纯主应力轴旋转试验中轴向累积塑性应变速率随轴向累积塑性应变变化曲线

Fig. 10 Variation of axial cumulative plastic strain rate with axial cumulative plastic strain in principal stress rotation tests at  $\sigma_3=700$  kPa

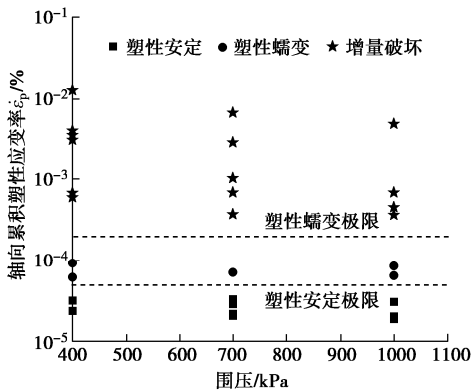


图 11 冻结黏土不同塑性行为下轴向累积塑性应变速率变化  
Fig. 11 Variation of axial cumulative plastic strain rate of frozen clay under different plastic behaviors

表 3 给出了不同类型土的塑性响应方式的轴向累积塑性应变速率划分标准。由表 3 可以看出，冻结黏土塑性安定的临界轴向累积塑性应变速率大于粗粒土填料和间歇荷载下粉土的临界轴向累积塑性应变速率；而冻

结黏土塑性蠕变的临界轴向累积塑性应变率大于粗粒土填料的临界轴向累积塑性应变率, 但小于间歇性荷载下粉土的临界轴向累积塑性应变率。这是由于冻结黏土中孔隙水变成了孔隙冰, 孔隙冰有很强的胶结作用, 而孔隙水压对土体结构影响减弱, 使得冻结黏土可承载动应力能力强于融土, 从而冻结黏土的塑性安定临界轴向累积塑性应变率大于融土。但当动应力幅值达到一定程度后, 粗粒填料作为一种类似的散体材料, 颗粒间胶结性和基质吸力较小, 试样最易发生破坏, 导致粗粒填料塑性蠕变的临界轴向累积塑性应变率最小; 而间歇性荷载下粉土孔隙水压在间歇期消散, 粉土结构发生多次调整适应, 粉土抵抗破坏能力增强, 使得间歇性荷载下粉土塑性蠕变的临界轴向累积塑性应变率最大。

表 3 不同类型土塑性响应方式的应变速率划分标准对比  
Table 3 Comparison of strain rate classification criteria of plastic response modes for different soils

不同类型土	塑性响应方式的应变速率划分标准		
	塑性安定	塑性蠕变	增量破坏
Werkmeister <sup>[28]</sup>	$<1\times10^{-5}$	$1\times10^{-5}\sim8\times10^{-5}$	$>8\times10^{-5}$
聂如松等 <sup>[29]</sup>	$<3.9\times10^{-5}$	$3.9\times10^{-5}\sim2.7\times10^{-4}$	$>2.7\times10^{-4}$
本文	$<4.7\times10^{-5}$	$4.7\times10^{-5}\sim2.3\times10^{-4}$	$>2.3\times10^{-4}$

2.3 冻结黏土临界动应力分析

根据冻结黏土累积塑性应变速率变化规律, 对冻结黏土试样的塑性变形行为进行了划分, 结果如表 4。由表 4 可以清楚地看出, 动三轴试验中冻结黏土试样发生破坏需要的动剪应力比较大, 未破坏试样明显更多; 主应力轴旋转条件下冻结黏土试样发生破坏所需动剪应力比减小, 试样发生破坏概率增大, 这是由于主应力旋转条件下增加了剪应力, 而剪应力沿水平方向对冰颗粒、冰与颗粒之间弱胶结部位, 以及固体颗粒进行剪切, 导致冰颗粒、冰与颗粒之间弱胶结部位和固体颗粒发生剪切破坏, 导致冻结黏土试样出现结构损伤, 从而试样临界动应力降低。根据表 4 绘制出不同加载方式下动剪应力比与围压的关系曲线, 如图 12 所示。图 12 清楚地显示出, 塑性安定冻结黏土试样主要分布在围压-动剪应力比坐标系的右下区; 塑性蠕变冻结黏土试样分布在中间区域, 而增量破坏冻结黏土试样全部分布在围压-动剪应力比坐标系的左上区。对比图 12 (a), (b) 可以发现, 考虑主应力轴旋转条件下冻结黏土塑性蠕变区域下移, 围压越小时, 塑性蠕变区域下移量越大; 表明主应力轴旋转将导致冻结黏土临界动应力减小, 而围压的增大可以抑制主应力轴旋转效应对冻结黏土临界动应力的影响。根据冷伍明等<sup>[30]</sup>和杨志浩等<sup>[31]</sup>研究结果, 塑性蠕变区的上下界限可以采用幂函数描述, 表达式为

$$CSR = \alpha \sigma_3^\beta, \tag{3}$$

式中: CSR 为动剪应力比,  $\sigma_3$  为围压,  $\alpha$  和  $\beta$  为拟合参数。

表 4 试验土样变形状态统计表  
Table 4 Deformation states of test soil samples

围压 $\sigma_3$ /kPa	动剪应力 幅值 $q_{amp}$ /kPa	CSR	动三轴试验		主应力轴旋转试验	
			试样 编号	状态	试样 编号	状态
400	2000	2.500	1	塑性安定	16	塑性蠕变
	2250	2.813	2	塑性安定	17	增量破坏
	2500	3.125	3	塑性蠕变	18	增量破坏
	2750	3.438	4	增量破坏	19	增量破坏
	3000	3.750	5	增量破坏	20	增量破坏
700	2000	1.429	6	塑性安定	21	塑性安定
	2250	1.607	7	塑性安定	22	塑性蠕变
	2500	1.786	8	塑性安定	23	增量破坏
	2750	1.964	9	增量破坏	24	增量破坏
	3000	2.143	10	增量破坏	25	增量破坏
1000	2000	1.000	11	塑性安定	26	塑性安定
	2250	1.125	12	塑性安定	27	塑性蠕变
	2500	1.250	13	塑性安定	28	增量破坏
	2750	1.375	14	塑性蠕变	29	增量破坏
	3000	1.500	15	增量破坏	30	增量破坏

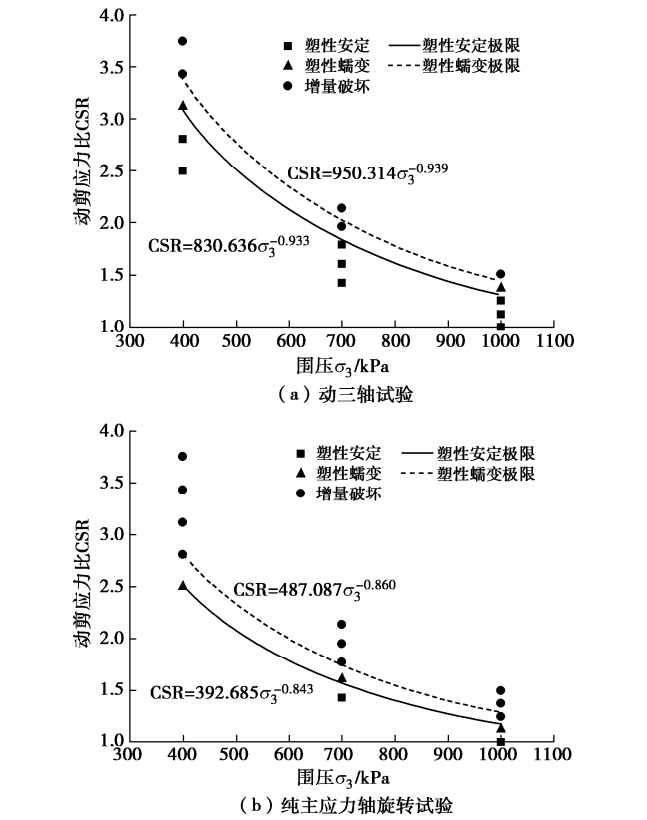


图 12 不同加载方式下动剪应力比与围压关系

Fig. 12 Relationship between dynamic stress ratio and confining pressure under different loading modes

使用式 (3) 对图 12 中数据进行拟合, 得到动三

轴试验和主应力旋转试验中冻结黏土塑性安定和塑性蠕变临界动应力的大致范围,临界动应力表达式如下:

塑性安定临界动应力

$$\left. \begin{aligned} \text{CSR} &= 830.636\sigma_3^{-0.933} && (\text{动三轴试验}) \\ \text{CSR} &= 392.685\sigma_3^{-0.843} && (\text{主应力旋转试验}) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

塑性蠕变临界动应力

$$\left. \begin{aligned} \text{CSR} &= 950.314\sigma_3^{-0.939} && (\text{动三轴试验}) \\ \text{CSR} &= 487.087\sigma_3^{-0.860} && (\text{主应力旋转试验}) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

### 3 结 论

本文进行了动三轴和纯主应力轴旋转试验,重点讨论了不同围压下主应力轴旋转对冻结黏土累积塑性应变和临界动应力特性的影响。得到以下两点结论。

(1) 冻结黏土轴向累积塑性应变随着循环次数的增多而增大;围压越大,冻结黏土轴向累积塑性应变增加速率越小;而主应力轴循环旋转将会促进冻结黏土轴向累积塑性应变增加速率,以往没有考虑主应力轴旋转影响的动三轴试验将低估冻结黏土累积塑性应变变化。

(2) 根据冻结黏土试样轴向累积塑性应变率变化的分界特征,提出了基于轴向累积塑性应变率判别的冻结黏土塑性变形行为划分准则;将不同条件下冻结黏土试样变形状态划分为塑性安定、塑性蠕变和增量破坏3种,建立了冻结黏土塑性安定和塑性蠕变临界动应力表达式,发现主应力旋转条件下冻结黏土塑性安定和塑性蠕变临界动应力将减小,表明未考虑主应力轴旋转将高估冻土地基的承载力。

建立基于轴向累积塑性应变率判别的冻结黏土塑性变形行为划分准则,以及准确确定冻结黏土临界动应力都需要大量试验数据,本文试验数据有限,后续有待进一步细化研究。

### 参考文献:

- [1] 焦贵德, 马 巍, 赵淑萍, 等. 高温冻结粉土的累积应变和临界动应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3193-3198. (JIAO Guide, MA Wei, ZHAO Shuping, et al. Accumulated strain and critical dynamic stress of frozen silt at high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3193-3198. (in Chinese))
- [2] WANG J H, LING X Z, LI Q L, et al. Accumulated permanent strain and critical dynamic stress of frozen silty clay under cyclic loading[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 130-143.
- [3] XU X T, ZHANG W D, FAN C X, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the accumulative deformation of frozen clay under cyclic loading conditions: experimental evidence and theoretical model[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(4): 925-941.
- [4] 罗 飞, 赵淑萍, 马 巍, 等. 循环荷载下冻结兰州黄土变形性质的实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1128-1133. (LUO Fei, ZHAO Shuping, MA Wei, et al. Experimental study on deformation behaviors of frozen Lanzhou loess under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1128-1133. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] 刘富强. 冻融循环作用下高含水率黄土动力变形特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. (LIU Fuqiang. Study on Dynamic Deformation Characteristics of Loess with High Moisture Content under Freeze-Thaw Cycles[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. (in Chinese))
- [7] ZHANG S, TANG C A, ZHANG X D, et al. Cumulative plastic strain of frozen aeolian soil under highway dynamic loading[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 120: 89-95.
- [8] ZHANG D, LI Q M, LIU E L, et al. Dynamic properties of frozen silty soils with different coarse-grained contents subjected to cyclic triaxial loading[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 157: 64-85.
- [9] 程晓辉, 陈志辉. 纯主应力旋转条件下饱和黏土累积变形的热力学模型分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1581-1590. (CHENG Xiaohui, CHEN Zhihui. Thermodynamic modeling of accumulated deformation of saturated clays under pure principal stress rotation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1581-1590. (in Chinese))
- [10] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 11-26.
- [11] 严佳佳, 周 建, 龚晓南, 等. 主应力轴纯旋转条件下原状黏土变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 474-481. (YAN Jiajia, ZHOU Jian, GONG Xiaonan, et al. Deformation behavior of intact clay under pure principal stress rotation[J]. Chinese Journal of Geotechnical



- Engineering, 2014, **36**(3): 474-481. (in Chinese))
- [12] SYMES M J P R, GENS A, HIGHT D W. Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand[J]. Géotechnique, 1984, **34**(1): 11-27.
- [13] WANG Y K, GAO Y F, GUO L, et al. Cyclic response of natural soft marine clay under principal stress rotation as induced by wave loads[J]. Ocean Engineering, 2017, **129**: 191-202.
- [14] 沈 扬, 陶明安, 王 鑫, 等. 交通荷载引发主应力轴旋转下软黏土变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(6): 1569-1578. (SHEN Yang, TAO Mingan, WANG Xin, et al. An experimental study of the deformation and strength characteristics of soft clay under principal stress axis rotation caused by traffic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(6): 1569-1578. (in Chinese))
- [15] 钱建固, 王永刚, 张甲峰, 等. 交通动载下饱和软黏土累计变形的不排水循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1790-1798. (QIAN Jiangu, WANG Yonggang, ZHANG Jiafeng, et al. Undrained cyclic torsion shear tests on permanent deformation responses of soft saturated clay to traffic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1790-1798. (in Chinese))
- [16] 郭 莹, 栾茂田, 何 杨, 等. 主应力方向循环变化对饱和松砂不排水动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 403-409. (GUO Ying, LUAN Maotian, HE Yang, et al. Effect of variation of principal stress orientation during cyclic loading on undrained dynamic behavior of saturated loose sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 403-409. (in Chinese))
- [17] 翁效林, 李 豪, 尚许雯, 等. 循环荷载下重塑黄土变形特性[J]. 交通运输工程学报, 2019, **19**(3): 10-18. (WENG Xiaolin, LI Hao, SHANG Xuwen, et al. Deformation properties of remolded loess under cyclic loading[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, **19**(3): 10-18. (in Chinese))
- [18] 伍婷玉, 郭 林, 蔡袁强, 等. 交通荷载应力路径下  $K_0$  固结软黏土变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(5): 859-867. (WU Tingyu, GUO Lin, CAI Yuanqiang, et al. Deformation behavior of  $K_0$ -consolidated soft clay under traffic load-induced stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(5): 859-867. (in Chinese))
- [19] 郭 妍, 王大雁, 马 巍, 等. 冻土空心圆柱仪的研发与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, **48**(12): 114-120. (GUO Yan, WANG Dayan, MA Wei, et al. Development and application of frozen hollow cylinder apparatus[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, **48**(12): 114-120. (in Chinese))
- [20] 雷乐乐, 王大雁, 王永涛, 等. 定向剪切应力路径下冻结黏土强度特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, **50**(6): 103-109. (LEI Lele, WANG Dayan, WANG Yongtao, et al. The strength characteristics of frozen clay under the different principal stress directions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, **50**(6): 103-109. (in Chinese))
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123 — 2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [22] 王康宇, 庄 妍, 耿雪玉. 铁路路基粗粒土填料临界动应力试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(6): 1865-1873. (WANG Kangyu, ZHUANG Yan, GENG Xueyu. Experimental study on critical dynamic stress of coarse-grained soil filler in railway subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(6): 1865-1873. (in Chinese))
- [23] 周 健, 简琦薇, 张 姣, 等. 循环荷载下铁精矿动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2346-2352. (ZHOU Jian, JIAN Qiwei, ZHANG Jiao, et al. Dynamic behaviors of iron ore concentrate under cyclic loading by hollow cylinder apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2346-2352. (in Chinese))
- [24] 吴志坚, 马 巍, 王兰民, 等. 地震荷载作用下温度和围压对冻土强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(6): 648-652. (WU Zhijian, MA Wei, WANG Lanmin, et al. Laboratory study on the effect of temperature and confining pressure on strength of frozen soil under seismic dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(6): 648-652. (in Chinese))
- [25] 王钰轲, 黎 冰. 扭剪作用下饱和软黏土轴向纯压循环变形及模量软化特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, **49**(5): 981-988. (WANG Yuke, LI Bing. Experimental study on one-way cyclic deformation and softening behavior of saturated soft clay under principal stress rotation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, **49**(5): 981-988. (in Chinese))
- [26] 庄心善, 赵汉文, 陶高梁, 等. 循环荷载下弱膨胀土累积变形与动强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(10): 3192-3200. (ZHUANG Xinshan, ZHAO Hanwen, TAO

- Gaoliang, et al. Accumulated deformation and dynamic strength properties of weak expansive soil under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(10): 3192-3200. (in Chinese))
- [27] 王丹. 冻土冻结缘室内试验及机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. (WANG Dan. Laboratory Test and Mechanism Study of Frozen Soil Edge[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese))
- [28] WERKMEISTER S. Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions[D]. Dresden: Dresden University of Technology, 2003.
- [29] 聂如松, 李亚峰, 冷伍明, 等. 列车间歇荷载作用下路基细粒土填料的塑性变形行为及临界动应力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(4): 828-841. (NIE Rusong, LI Yafeng, LENG Wuming, et al. Plastic deformation and critical dynamic stress of fine-grained soils under intermittent loading of trains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(4): 828-841. (in Chinese))
- [30] 冷伍明, 刘文劼, 周文权. 振动荷载作用下重载铁路路基粗颗粒土填料临界动应力试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, **34**(16): 25-30. (LENG Wuming, LIU Wenjie, ZHOU Wenquan. Testing research on critical cyclical stress of coarse-grained soil filling in heavy haul railway subgrade[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, **34**(16): 25-30. (in Chinese))
- [31] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平, 等. 级配碎石填料大三轴试验及累积塑性应变预测模型[J]. 岩土力学, 2020, **41**(9): 2993-3002. (YANG Zhihao, YUE Zurun, FENG Huaiping, et al. Large scale triaxial tests on graded macadam filling and its accumulated plastic strain prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(9): 2993-3002. (in Chinese))

## 第十五届全国桩基工程学术会议

第十五届全国桩基工程学术会议定于2023年4月6—8日在浙江杭州召开,会议以“桩基技术创新发展”为主题,届时将邀请桩基工程领域的知名专家学者作特邀报告、大会报告、专题报告,展现新时代桩基工程领域的最新研究成果与工程应用技术。

**主办单位:**中国土木工程学会土力学与岩土工程分会;中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会;国家建筑工程技术研究中心;建筑安全与环境国家重点实验室。

**会议主题:**①桩基基本理论与试验研究;②桩基工程设计与实践;③桩基工程施工新方法及装备;④桩基动力响应与防震、减振技术;⑤桩基工程新材料与制作新工艺;⑥桩基工程检测与监测;⑦桩基工程典型案例与事故处理;⑧海洋工程中的桩基技术;⑨桩基工程技术标准有关问题;⑩其他与桩基有

关的工程技术问题。

**报名须知:**4月1日之前报名:正式代表1200元/人;学生代表600元/人,4月1日之后报名:正式代表1500元/人;学生代表800元/人,住宿统一安排,费用自理。

**联系方式:**中国土木工程学会土力学与岩土工程分会桩基基础专业委员会,中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会,联系人:沙安,13701097952,邮箱:13701097952@163.com,地址:北京市北三环东路30号中国建筑科学研究院地基基础研究所。浙江大学:丁元新,13626711239,dyx@zju.edu.cn,浙江大学紫金港校区安中大楼。

**会议注册及展览展示:**周梅 15910323004,李荣霞 15300268669。

(会议组委会)

## 第三届亚洲隧道青年论坛

2023年 中国·长沙

第三届亚洲隧道青年论坛(SYTA)于2023年4月21—23日长沙举行。SYTA是为亚洲隧道行业的青年专业人士举办的年度研讨会,第一届、第二届论坛分别由马来西亚、印度承办。本次大会的主题是隧道低碳建造及可持续发展,旨在为隧道及地下工程领域青年工程师和科研人员提供一个交流平台,探讨隧道和地下工程的设计、施工和安全维护方面的最新进展,以促进隧道低碳建造及可持续性发展。

**会议内容:**①隧道工程低碳建造及可持续发展新理念;②隧道工程钻爆法低碳建造技术;③隧道支护低碳新材

料、新结构;④低碳型隧道防排水系统设计与施工;⑤高寒、高海拔地区隧道低碳施工;⑥隧道工程渣土资源化再利用;⑦隧道低碳环保智能化施工与运营;⑧能源地下结构与工程;⑨地下工程低碳可持续发展。

**联系方式:**中国长沙市韶山南路22号中南大学土木工程学院,王树英:sywang@csu.edu.cn,蒋曦:xjiang29@utk.edu,傅金阳:jy.fu@csu.edu.cn,潘秋景:qiuqing.pan@csu.edu.cn,张丰收:fengshou.zhang@tongji.edu.cn。

(会议组委会)