

DOI: 10.11779/CJGE201605018

循环荷载下冻土振陷增长规律试验研究

王 淼^{1, 2}, 孟上九^{*1, 2, 3}, 王兴隆⁴, 袁晓铭^{1, 2}, 孙义强³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 哈尔滨理工大学, 黑龙江 哈尔滨 150080; 4. 黑龙江省交通科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 通过新型低温动三轴仪的等幅循环荷载试验, 以更为符合客观实际的围压、动应力幅值以及固结和冻结方式, 研究了冻土冻结期的残余应变规律, 包括了温度、荷载作用大小和次数对冻土的残余应变的影响。结果表明: 冻土的残余应变随着荷载振动次数的增加不断增长, 随着温度的降低不断减少; 冻土的残余应变增长模式表现为开始阶段残余应变增长较快, 后逐步缓慢增长, 当动应力超过临界破坏应力之后, 土试样残余应变迅速增长并达到破坏; 低温冻土破坏应力较常温较大提高, 低温-5℃提高了 20%~25%, 低温-10℃提高了 45%~50%; 冻土大多数荷载情况下处于非破坏状态, 在一定次数荷载作用后, 不同温度土的残余应变发展近似平行状态, 大动应力幅值下的土试样的残余应变对温度更敏感。试验设计克服了以往试验过大固结应力和过大动应力的缺欠, 得到的结果应符合客观实际。

关键词: 冻土; 振陷; 残余应变; 循环荷载; 低温动三轴试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0916-07

作者简介: 王 淼(1990-), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事土动力学与岩土工程方面的研究。E-mail: jyllwm1990@126.com。

Experimental research on development of vibration excited subsidence of frozen soil under cyclic loading

WANG Miao^{1, 2}, MENG Shang-jiu^{*1, 2, 3}, WANG Xing-long⁴, YUAN Xiao-ming^{1, 2}, SUN Yi-qiang³

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake

Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Harbin

University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 4. Heilongjiang Transport Research Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: Based on the constant-amplitude load tests by a new low-temperature triaxial device under realistic confining pressure, amplitudes of dynamic stress, consolidation and freezing, the residual strain behavior of frozen soil during frozen period is studied considering the influences caused by temperatures, loading amplitudes and loading cycles. The results show that the residual strain during frozen period increases with the increasing cycles of loading, but decreases with the reducing temperatures. The residual strain developing mode shows that it increases dramatically in the initial loading cycles followed by gradual increase of residual strain with time. When the dynamic stress exceeds a critical stress, the residual strain starts to increase dramatically till failure. The critical stress of frozen soil under low temperatures is larger than that under normal temperatures, with increase of 20%~25% at -5℃ and 45%~50% at -10℃. In most cases, the frozen soils tested do not fail and the residual strains under different temperatures develop nearly parallelly after certain cycles of loading. The residual strain is fairly sensitive to the frozen temperatures at large amplitudes of dynamic stress. The proposed test layout overcomes the previous testing limitations such as over consolidating pressure and over dynamic loading, so that the test results are more consistent with the real conditions.

Key words: frozen soil; subsidence; residual strain; cyclic loading; low-temperature dynamic triaxial test

0 引 言

“振(震)陷”是指土壤在一定循环荷载作用下产生的附加沉降^[1]。在道路工程沉降中, 通常以一定的轴载在静力的方式下分析路基的沉降变形, 较少考虑交通荷载动力的特性, 特别是对于冻土振陷规律的

研究更少, 而季冻区在中国分布约占 53%^[2-3], 所以有

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378164); 中央级公益性研究所基本科研业务费专项(2016A02)

收稿日期: 2015-04-17

***通讯作者**

必要对冻土振陷规律进行研究。

对于常温土体循环荷载下残余应变规律, 有一些学者进行了研究。雷华阳等^[4-5]研究了天津滨海新区结构性软土在交通荷载长期影响下的动应变发展情况, 得出了临界应力值以及围压等对应变的影响; 梅英宝等^[6]通过建立经验模型, 研究了孔压对软土地基变形特性的影响; 曹继东等^[7]研究了厦门软黏土的振陷特性, 提出了动孔压发展规律差, 应变达到 5% 土体破坏等结论。

相比而言, 对于冻土在循环荷载下残余应变规律的研究较少。朱元林等^[8]对冻结粉土在不同围压下的蠕变特性进行了研究, 提出了冻土在振动荷载作用下的三轴蠕变模型; 朱占元等^[9]基于低温动三轴试验资料, 研究了青藏铁路粉质黏土在往返长期加荷作用下的变形特征, 在不同温度、动应力幅、频率、围压条件下考察冻土轴向残余应变与振次的试验关系曲线, 对朱元林提出的蠕变模型进行了修正, 建立了冻土振陷模型; 王立娜^[10]研究了青藏铁路冻土路基列车振动特性及路基累计变形规律。

以上冻土变形特性研究在不同程度上揭示了各个因素对冻土残余应变的影响, 但由于冻土试验较常温土试验复杂得多, 冻土试验设备水平和功能远落后于常规土试验设备, 因此由于试验条件限制, 以往相关研究和结果存在以下不足: ①试验中所采用的围压过大, 在 0.3~3.5 MPa 之间, 而永久冻土的最大深度为 10 m 左右^[11-12], 且处于退化状态, 因而这样的固结应力无法客观反映路基土实际埋深的应力状态, 所以对于冻结试验围压选取应约在 0.1 MPa 左右; ②试验土样降温冻结过程一般采用在恒温箱中快速降温方式, 由于恒温箱的温度达到设定温度较快, 相当于试验土试件所处的环境瞬间达到所设置的负温, 与实际降温过程不符; ③试样冻结过程均处于无围压冻结, 而采用先冻结而后固结的过程与实际土体先固结再冻结的过程不符; ④试验中采用的动应力幅值过大, 离实际动荷载大小较远。这些由于试验条件限制导致的偏离客观实际情况的结果, 难以反映冻土在客观条件下的残余应变特性, 应用上也受到限制。

本文对冻土试验振陷试验过程中的固结压力、冻结过程和动荷载大小进行改进。采用新型低温动三轴仪, 将土样先以接近路基实际围压的固结应力在仪器上直接完成固结, 再通过仪器自身低温控制系统设定温度, 使土体逐步达到所需的试验冻结状态, 最后进行较为符合实际大小的动载试验, 可更为真实地揭示冻土在交通循环荷载下的残余应变规律, 为建立合理的冻土残余应变增长模型奠定基础。

1 试验简介

1.1 试验仪器

本次试验采用英国 GDS 仪器设备有限公司生产的 GDS 新型低温振动三轴仪, 主要的技术指标如下: 温度控制范围 $-25^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$, 最小度量值 0.01°C , 压力室内温度波动在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 之内; 最大轴力 10 kN, 最小度量值 0.001 kN; 频率控制范围 0.001~5 Hz; 位移控制值 90 mm, 最小度量值 0.0001 mm; 围压控制值 1 MPa (可加到 3.5 MPa); 反压控制值 1.5 MPa (试验中不能超过围压)。试验仪器如下图 1 所示。



图 1 动三轴试验设备

Fig. 1 Dynamic triaxial test apparatus

1.2 试样制备

本试验土样直径 D 为 39.1 mm, 高 H 为 80 mm, 满足 H/D 在 2.0~2.5 之间。用土取自黑龙江省哈尔滨市呼兰区景观大道路路基土, 土质类型为粉质黏土, 其塑限为 15%, 液限为 28%, 颗粒密度 2.7 g/cm^3 。按照《土工试验规程》(GB/SL237—1999)^[13]中扰动土样制备方法(击实法)制备土样, 具体操作如下: ①取一定数量的土样, 经风干、碾压、过筛, 测定风干含水率, 按照最佳含水率算出所需增加的水量。②将所需加的水喷洒到土样中, 搅拌均匀, 保证土粒大小均匀, 静止后装入塑料袋密封, 放在密闭容器内 24 h, 使含水率均匀。开袋搅拌, 取 3 盒土测定含水率, 保证两盒及以上含水率差别小于 1%。③将击实筒内壁涂抹一层油, 取干密度为 1.75 g/cm^3 , 按照测出的含水率计算湿土质量, 分 4 层击实, 同一批件, 每一层击实数保持基本一致。④土样制备完成之后, 在抽气罐中抽气饱和, 抽气 3 h, 浸泡 24 h 以上, 最终土样饱和密度控制在 2.10 g/cm^3 , 每批土样密度差异均在 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 。

1.3 冻结方式

本试验降温过程完全在新型低温动三轴仪器上完成, 区别以往, 采用改进的试验方法。试件以 100 kPa

固结压力等压固结 12 h 之后, 维持围压不变, 打开降温系统, 设定温度值, 采取保温措施, 待温度逐步稳定到设定温度之后, 稳定 22 h (试验初期, 对试验仪器进行温度精度的调试, 待温度达到稳定之后, 土试样上中下温度一致, 充足的冻结时间, 也保证了压力室内及土试样温度均匀), 整个降温过程在围压作用下进行, 模拟了新建公路完工之后, 路基先固结沉降, 秋冬大气环境降温, 冻土路基逐级降温的冻结过程。

1.4 破坏准则

图 2 中 σ_1 为土样试件受到的竖向应力, σ_3 为围压, 动应力幅值以 $\sigma_D = \sigma_1 - \sigma_3$ 表示, 动应力以 σ_d 表示。 A_0 对应的应变 A'_0 为固结过程产生的应变; $B_0 = \sigma_D/2$ 是循环荷载加载的初始点, 对应的应变 B'_0 实际上为试验过程中加载起始所产生的瞬时应变, 与动应力幅值有关。对于残余应变通常有两种取法, 第一种以每一圈加载开始时的 A_0 点对应的应变值 A'_0 为起点, 以后每一圈加载结束对应的应变 A'_1, \dots, A'_n 为残余应变, 即以动应力为零对应的应变为残余应变, 郁寿松等^[1, 14]采用这种方法; 第二种取正弦波平衡位置 B_0 点 (幅值的一半, 正弦波的平衡位置) 对应的 B'_0 为起始应变, 以后每一圈加载结束对应的应变 B'_1, \dots, B'_n 为残余应变, 朱元林等^[8]、朱占元等^[9]采用这种方法。对于这两种残余应变的取值方法, A 点对应的残余应变为动应力为零时的土体变形, 但受试验采集点密度的影响, 试验点采集难以每一次循环都采集到动应力为零时的数据点; B 点对应的残余应变为正弦波平衡位置点, 也是加载开始点和结束稳定点, 存在两个问题: ①数据采集时不能正好采集到稳定点, 但可以通过两点的差值得到较为准确的 B 点位置; ②采集的变形包括一小部分的弹性变形, 通过上图 2 可以看出, A 点对应的残余应变及 B 点对应的残余应变几乎是平行的曲线, 所以取 A 点及 B 点对应的残余应变对试验规律影响很小。综上, 本试验考虑仪器、处理数据及后期工作的需要, 选取 B 点对应的应变 B' 做为试验的残余应变。

试验停止条件取下面三者之一: ①试样应变达到 5%; ②加载循环次数达到 10000 次; ③试验过程中, 随着加载持续, 明显达不到预设加载动应力幅值, 加载曲线出现明显破坏特征。3 次试验结果一致, 停止试验。

本试验试件含水率为饱和含水率, 参照软土破坏准则, 通过应变控制的静三轴试验, 常温土样应变达到 5% 之前, 应力不再增长, 对于低温 -10℃ 试样, 应变达到 4% 之前, 土样应力趋于稳定, 观察试验过程, 土样应变达到 7% 左右时已出现明显的斜截面破坏。

对于反映不同试验冻土破坏准则, 通常取值均超出实际破坏所产生的应变, 本文的破坏准则降为 5%, 比以往小, 但究竟多大合适, 仍是以后要专门研究的课题。

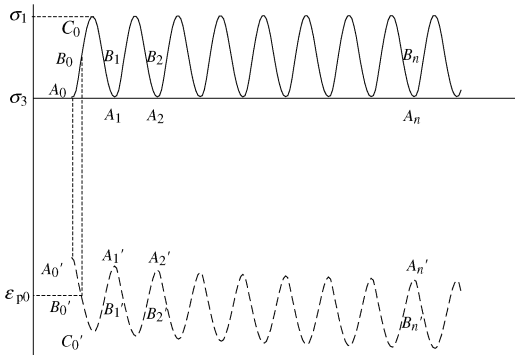


图 2 加载 - 应变图
Fig. 2 Loading-strain scheme

1.5 试验过程

试样安装完成后, 采用更接近于实际的固结应力 100 kPa 的围压进行等压固结, 即 $\sigma_3 = 100$ kPa, 固结时间 12 h, 满足规范中对于固结标准的要求, 固结完成之后, 打开低温控制系统, 设定设计温度值, 待温度逐步降到所设定温度之后, 保持 22 h, 以不同的动应力幅值进行动力加载试验, 应变达到破坏准则即停止试验。

2 试验方案

试验条件: 等压固结, 等幅循环荷载, 力控制固结排水低温振动三轴试验, 围压 100 kPa, 频率 2 Hz, 含水率饱和含水率, 干密度 1.75 g/cm³, 饱和密度 2.10 g/cm³, 试验控制温度及动应力幅值 σ_D 为可变条件, 具体值及组合方案如下表 1 所示。

表 1 低温动三轴试验方案

Table 1 Test conditions of low-temperature dynamic triaxial tests	
温度 $T/^\circ\text{C}$	动应力幅值 σ_D/kPa
常温	70, 100, 130, 170, 200
-5	100, 130, 170, 200, 250
-10	100, 150, 200, 250, 300

注: 方案中共 15 种工况, 每种工况至少做 3 个试件, 其中保证两个及两个以上残余应变相近。其中常温为 15℃。

3 试验结果

3.1 数据处理方法

加载模式采用压压正弦波, 由于仪器条件所限, 加载起点处为动应力幅值一半, 即 $\sigma_D/2$ 处, 为得到同起点增长规律, 将土的变形分为两部分: 第一部分加

载起点处瞬时应变, 即图 2 中 B_0 所对应的的应变值 B'_0 , 可称做起始应变; 第二部分, 随加载次数增加的累计变形, 定义为本文的累计残余应变。

3.2 起始应变值

通过表 2, 图 3 初始位移值可以看出: 一定温度下, 随着动应力的增加, 起始变形不断增加; 同等应力下, 温度越低, 起始变形越小, 明显能够看出低温土变形较常温小。

表 2 不同温度及动应力下土的起始轴向位移

Table 2 Initial axial displacements of soil samples under different temperatures and dynamic loadings (mm)

动应力幅值 /kPa	常温	-5℃	10℃
70	0.6604	—	—
100	0.6986	0.4784	0.4641
130	0.7359	0.6541	—
150	—	—	0.5000
170	0.7792	0.6960	—
200	1.3708	0.7391	0.5525
250	—	0.8045	0.6518
300	—	—	0.7772

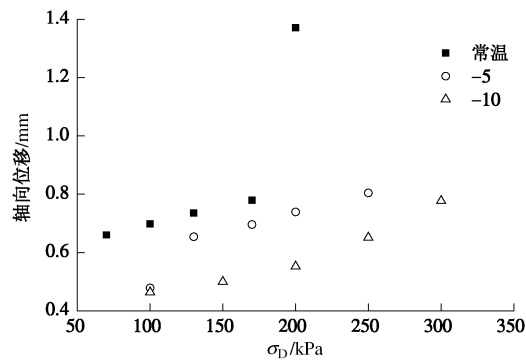


图 3 土试样起始轴向位移

Fig. 3 Initial axial displacements of soil samples under different temperatures and dynamic loadings

3.3 不同温度下残余变形

(1) 常温试验

从图 4 中可以得出, 非破坏状态下, 常温土试样残余应变随着振动次数的增加不断增加, 开始阶段增长较快, 后逐步缓慢增长; 常温土试样残余应变随着动应力幅值的增加不断增加, 残余应变增长速率也随着动应力幅值的增加而不断增大; 当动应力幅值达到 200 kPa 时, 残余应变快速增加, 对常温土试样造成了严重的破坏, 据此可以将破坏型的临界应力定义在 170~200 kPa 之间。

(2) -5℃ 试验

从图 5 中可以得出, 非破坏状态下, 低温-5℃土试样残余应变随着振动次数的增加不断增加, 开始阶段增长较快, 后逐步缓慢增长; 低温-5℃土试样残余应变随着动应力幅值的增加不断增加, 残余应变增长速率也随着动应力幅值的增加而不断增大; 当动应力幅值达到 250 kPa 时, 残余应变快速增加, 已呈现出破坏状态, 据此可以将低温-5℃土试样破坏的临界应力定义在 200~250 kPa 之间。

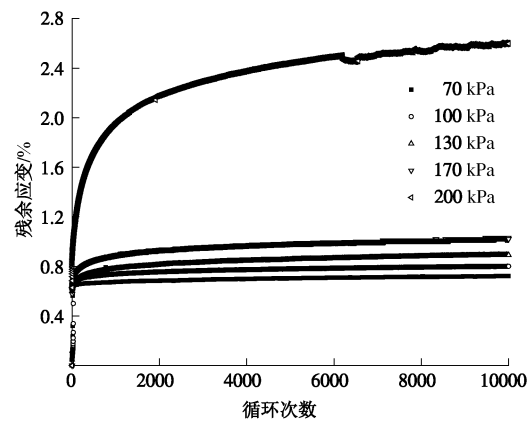


图 4 不同动应力下常温土试样残余应变试验结果

Fig. 4 Residual strains of normal-temperature soil samples under different dynamic stresses

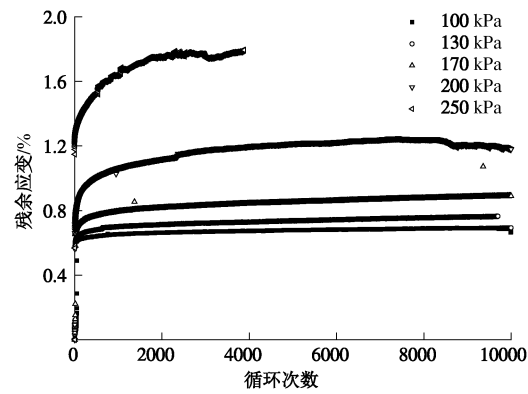


图 5 不同动应力下-5℃土试样残余应变试验结果

Fig. 5 Residual strains of soil samples at -5℃ under different dynamic stresses

(3) -10℃ 试验

从图 6 中可以得出, 非破坏状态下, 低温-10℃土试样残余应变随着振动次数的增加不断增加, 开始阶段增长较快, 后逐步缓慢增长; 低温-10℃土试样残余应变随着动应力幅值的增加不断增加, 残余应变增长速率也随着动应力幅值的增加而不断增大; 当动应力幅值达到 300 kPa 时, 残余应变快速增加, 已呈现出破坏状态, 据此可以将低温-10℃土试样破坏的临界应力定义在 250~300 kPa 之间。

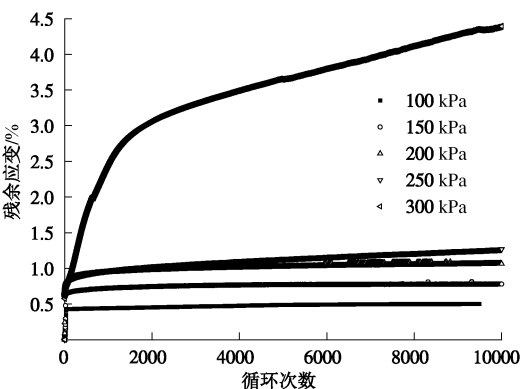


图 6 不同动应力下-10℃土试样残余应变试验结果

Fig. 6 Residual strains of soil samples at -10℃ under different dynamic stresses

3.4 温度对残余应变的影响

通过图 7, 8 可以看出, 同等动应力以及同等振次下, 随着温度的降低, 土的残余应变减少; 随着动应力的增加, 低温土试件残余应变明显低于常温土体; 在一定次数后, 不同温度土的残余应变发展近似平行状态。10000 振次, 100 kPa 动应力下, -5℃试样残余应变较常温试样折减 17%, -10℃试样较常温试样变形折减 38%; 200kPa 动应力下, -5℃试样较残余应

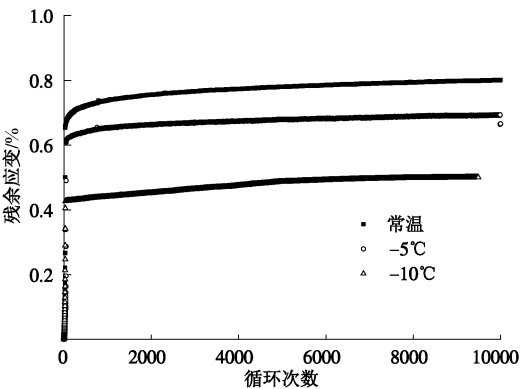


图 7 不同温度下动应力幅值 100 kPa 残余应变试验结果

Fig. 7 Residual strains of different temperatures with dynamic stress of 100 kPa

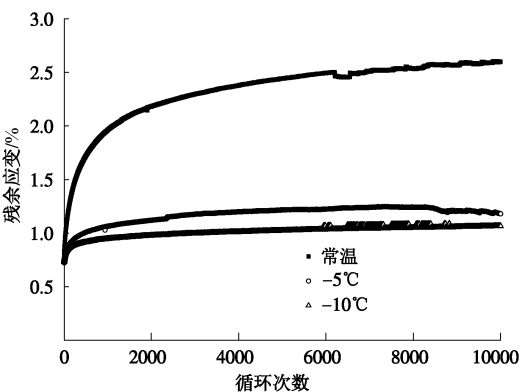


图 8 不同温度下动应力幅值 200 kPa 残余应变试验结果

Fig. 8 Residual strains of different temperatures with dynamic stress of 200 kPa

变常温试样折减 52%, -10℃试样较常温试样变形折减 60%。同时也可以看出, 在本文温度设定范围内, 大动应力幅值下的土试样的残余应变对温度更敏感。

3.5 临界应力

通过 3.3 节的数据, 根据动应力的特点, 可以得出在 100 kPa 围压下, 不同温度的临界动应力, 如表 3 所示, 图 4 以图形的方式表达了不同温度下的临界动应力的界限值。

表 3 不同温度下土体破坏应力界限值

Table 3 Dynamic failure stress thresholds under different temperatures

温度	常温	-5℃	-10℃
破坏应力范围/ kPa	170~200	200~250	250~300

注: 实验室室温为 15℃, 常温土体与室温一致。

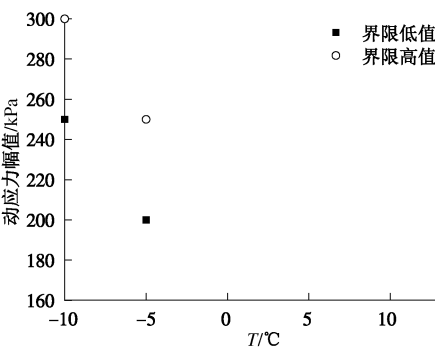


图 9 不同温度下临界动应力幅值界限

Fig. 9 Dynamic failure stress thresholds under different temperatures

4 与以往试验结果的对比

以往的试验结果与本文的相似之处在于, 随着振动次数的增加, 残余应变均不断增加, 随着温度的降低残余应变不断降低。但在破坏准则、残余应变变化模式以及残余应变定量结果上, 本文的试验结果与以往有明显区别。

(1) 以往冻土试验定义的破坏准则有 3 种: 10%, 12%, 甚至 15%。通过一系列冻土静三轴试验及冻土动三轴试验发现, 冻土试样在试验过程中应变达到 10%时, 土试样破坏已经非常显著, 真实的路基破坏很难达到如此大的应变值, 这表明以往冻土动三轴试验破坏准则过高。本文的破坏准则降为 5%, 比以往小, 但究竟多大合适, 仍是以后要专门研究的课题。

(2) 以往试验的冻土残余应变增长模式与本文有很大差别。以往试验中, 随振动次数的增加, 冻土残余应变增加的速率很大, 迅速达到破坏, 即如本文图

6 中动应力为 300 kPa 时的结果; 而本文的基本结果为, 冻土残余应变增加速率初始时较大, 但随后明显变小, 并存在水平渐近线, 大多情况下不会达到 5% 的应变破坏, 本文的结果应更为合理。

(3) 以往试验的冻土残余应变与本文在定量上有较大差别。以往试验在振次 3000 次时, 土体残余应变达到 2%, 甚至 10%, 14% 的应变; 相比之下, 本文试样的普遍结果为, 在 10000 振次时, 残余应变均在 1.2% 以下, 并且基本为非破坏状态, 应更符合客观事实。

以往的试验与本文在残余应变变化模式以及残余应变定量结果上的差异, 主要原因是由于以往试验采用很大的围压和很大的动应力幅值, 也包括了与本文不同的固结和冻结方式, 初步分析表明, 以往试验中采用的动应力幅值 (大多为 0.5~3.0 MPa) 过大, 而本文的动应力幅值 (大多为 0.1~0.2 MPa) 更为接近实际, 这是造成差异的首要原因。从理论上讲, 本文采用的围压, 动应力以及固结和冻结方式, 能更好地代表客观实际。

5 结 论

本文通过新型低温动三轴仪的等幅循环荷载试验, 以更为符合实际的围压、动应力幅值以及固结和冻结方式, 研究了冻土冻结期的残余应变规律, 得到以下 5 点结论。

(1) 冻土冻结期的残余应变, 随着荷载振动次数的增加, 土体的残余变形不断增长; 随着温度的降低, 土试样残余应变不断减少。

(2) 冻土体的残余应变增长模式为: 随着振动次数的增加, 开始阶段残余应变增长较快, 后逐步缓慢增长; 当动应力超过临界破坏应力之后, 土试样残余应变迅速增长并达到破坏。

(3) 与常温试样相比, 冻土冻结期在不同温度的临界破坏应力有较大提高。常温时破坏应力在 170~200 kPa 之间, 低温-5℃在 200~250 kPa 之间, 提高了约 20%~25%, 低温-10℃在 250~300 kPa 之间, 提高了约 45%~50%。

(4) 冻土大多数荷载情况下处于非破坏状态, 且随着温度的降低土的残余应变减少; 随着动应力的增加, 低温土试件残余应变明显低于常温土体; 在一定次数荷载作用后, 不同温度土的残余应变发展近似平行状态; 在本文温度设定范围内, 大动应力幅值下的土试样的残余应变对温度更敏感。

(5) 本文的试验设计克服了以往试验过大固结应力和过大动应力的缺欠, 因此得到的结果符合客观实

际。

参考文献:

- [1] 郁寿松, 石兆吉, 谢俊斐, 等. 上海地铁隧道振陷的计算分析[J]. 地震工程与工程振动, 1986, 6(1): 51 - 60. (YU Shou-song, SHI Zhao-ji, XIE Jun-fei, et al. Analysis of permanent deformation for tunnel of Shanghai underground[J]. Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 1986, 6(1): 51 - 60. (in Chinese))
- [2] 孟上九, 程有坤. 车辆荷载作用下季冻土路基永久变形研究综述[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(2): 1 - 5. (MENG Shang-jiu, CHENG You-kun. The review on permanent deformation of seasonal frozen soil subgrade under the action of vehicle load[J]. Journal of Harbin University of Science & Technology, 2014, 19(2): 1 - 5. (in Chinese))
- [3] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1 - 10. (ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. Frozen ground of China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1 - 10. (in Chinese))
- [4] 雷华阳, 姜 岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动应力-动应变关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 17(增刊 1): 3052 - 3057. (LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi, et al. Experimental study of dynamic stress-strain relation of structural soft soil under traffic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2008, 17(S1): 3052 - 3057. (in Chinese))
- [5] 雷华阳, 姜 岩, 陆培毅. 循环荷载作用下软黏土的强度判别标准试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(6): 54 - 58. (LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi. Test on shear strength criterion of soft soil under cyclic loading[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2009, 29(6): 54 - 58. (in Chinese))
- [6] 梅英宝, 朱向荣, 吕凡任. 交通荷载作用下道路与软土地基弹塑性变形分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 997 - 1002. (MEI Ying-bao, ZHU Xiang-rong, LÜ Fan-ren. Elasto-plastic deformation analysis of pavement and soft subsoil under traffic load[J]. Journal of Zhejiang University Engineering (Science), 2005, 39(7): 997 - 1002. (in Chinese))
- [7] 曹继东, 陈正汉, 王权民. 厦门软黏土的振陷特性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 160 - 164. (CAO Ji-dong, CHEN Zheng-han, WANG Quan-min. Study on characteristics of seismic depression of soft clay in Xiamen[J]. Rock & Soil

- Mechanics, 2004, **25**(1): 160 - 164. (in Chinese))
- [8] 朱元林, 何平, 张家懿, 等. 冻土在振动荷载作用下的三轴蠕变模型[J]. 自然科学进展, 1998, **8**(1): 60 - 62. (ZHU Yuan-lin, HE Ping, ZHANG Jia-yi, et al. Triaxial creep model of frozen soil under vibratory load[J]. Progress in Natural Science, 1998, **8**(1): 60 - 62. (in Chinese))
- [9] 朱占元, 凌贤长, 胡庆立, 等. 动力荷载长期作用下冻土振陷模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(4): 955 - 959. (ZHU Zhan-yuan, LING Xian-zhang, HU Qing-li, et al. Experimental research of vibration excited subsidence of frozen soil under long-term dynamic loads[J]. Rock & Soil Mechanics, 2009, **30**(4): 955 - 959. (in Chinese))
- [10] 王立娜. 青藏铁路多年冻土区列车行驶路基振动反应与累积永久变形[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (WANG Li-na, Train-Induced dynamic response and permanent deformation of embankment in permafrost region along Qinghai-Tibet railway[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese))
- [11] SHAN Wei, JIANG Hua, HU Zhao-guang, et al, Island permafrost degrading process and deformation characteristics of expressway widen subgrade foundation[J]. Disaster Advances, 2012, **5**(4): 1291 - 1296.
- [12] 张书良. 北黑高速公路岛状冻土退化对路基稳定性影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012. (ZHANG Shu-liang, The BeiHei black highway island permafrost degradation effect on Subgrad Stability Research[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese))
- [13] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [14] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷实验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(4): 35 - 44. (YU Shou-song, SHI Zhao-ji. Experimental investigation of soil settlement due to earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **11**(4): 35 - 44. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compindex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)