

# 循环荷载下高温冻土的变形和强度特性

焦贵德<sup>1, 2, 3</sup>, 赵淑萍<sup>1\*</sup>, 马巍<sup>1</sup>, 罗飞<sup>1</sup>, 孔祥兵<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 对 $-1^{\circ}\text{C}$ 的冻土试样在频率为3, 5, 8 Hz的循环荷载下进行了单轴压缩试验, 探讨了冻土在循环荷载下的累积变形和动强度。结果表明: 循环荷载作用下冻土的累积变形大小由加载的最大动应力大小决定, 同一频率下加载的最大动应力越大, 相同循环次数时的累积应变越大; 根据加载的最大动应力的影响, 累积应变与循环次数的关系曲线可表现为破坏型、稳定型和过渡型3种形态之一。加载频率对冻土累积应变的影响规律复杂, 且受加载的最大动应力影响; 当最大动应力较小时, 频率的影响不明显; 当最大动应力比较适中时, 大体上频率越高, 累积应变越大; 当最大动应力比较大时, 频率越高, 累积应变越小。在3%, 5%和10%的破坏应变下, 频率为8 Hz时冻土的动强度最大, 而3 Hz和5 Hz的动强度比较接近。

**关键词:** 高温冻土; 循环荷载; 累积应变; 破坏应变; 动强度

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)08-1553-06

**作者简介:** 焦贵德(1971-), 男, 甘肃秦安人, 博士, 讲师, 从事冻土动力学方面的研究。E-mail: gjiao@lzu.edu.cn。

## Deformation and strength of warm frozen soils under cyclic loading

JIAO Gui-de<sup>1, 2, 3</sup>, ZHAO Shu-ping<sup>1\*</sup>, MA Wei<sup>1</sup>, LUO Fei<sup>1</sup>, KONG Xiang-bing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China Attached to the Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The uniaxial compression tests on frozen soils under  $-1^{\circ}\text{C}$  and cyclic loading are carried out. The vibration frequencies are 3, 5 and 8 Hz. The cumulative deformation and dynamic strength of the frozen soils under cyclic loading are studied. The results show that the cumulative deformation of the frozen soils under cyclic loading is dependent on the maximum cyclic stress. When the frequency is the same, the larger the maximum cyclic stress, the larger the cumulative strain. According to the maximum cyclic stress, the changing curves of the cumulative strain with cyclic number can be divided into failure type, stable type and transition type. The loading frequency affects the cumulative strain in a complex way. When the maximum cyclic stress is small, the frequency has slight effect on the cumulative strain. When the maximum cyclic stress is moderate, on the whole, the higher the frequency, the greater the cumulative strain. When the maximum cyclic stress is large, the higher the frequency, the smaller the cumulative strain. When the failure strains are 3%, 5% and 10%, the dynamic strength is the greatest under loading frequency of 8 Hz, and the dynamic strength under 3 Hz is close to that under 5 Hz.

**Key words:** warm frozen soil; cyclic loading; cumulative strain; failure strain; dynamic strength

## 0 引言

随着土木工程的发展, 各类土在循环荷载下的累积变形和强度问题引起了国内外学者的广泛关注, 对于未冻土的研究, 迄今已有非常丰富的文献资料, 研究方法众多, 其中室内动三轴试验研究是最常用的研究手段之一。Monismith等<sup>[1]</sup>针对循环荷载下软黏土的累积变形特征提出了著名的指数模型; Li等<sup>[2]</sup>, Chai等<sup>[3]</sup>基于Monismith指数模型提出了修正的指数模型;

蔡英等<sup>[4]</sup>对成都黏土进行了动三轴试验, 研究了荷载频率、荷载大小等对路基填土临界动应力和永久变形的影响; Karg等<sup>[5]</sup>对细砂土进行了动三轴试验, 探讨了加载频率对累积变形的影响; Miller等<sup>[6]</sup>通过试验

基金项目: 国家自然科学基金项目(41023003, 40971046); 国家自然科学基金创新群体项目(41121061)

收稿日期: 2012-10-15

\*通讯作者

研究对软黏土的动强度进行了探讨;陈颖平等<sup>[7]</sup>,张勇等<sup>[8]</sup>分别对软黏土进行了循环荷载试验研究;蒋关鲁等<sup>[9]</sup>对红层泥岩的动强度和累积变形,丁祖德等<sup>[10]</sup>对砂质泥岩的累积变形做过试验研究。

相对于未冻土,针对冻土在循环荷载下的累积变形与动强度特性的研究要少得多,随着中国经济和社会的发展,寒区交通运输工程的建设开始增多,在寒区修建公路、铁路、机场等工程,不可避免地遇到冻土地层,必然会涉及到冻土在循环荷载下的变形和强度以及稳定性问题。朱元林等<sup>[11]</sup>通过对冻结兰州黄土的循环加载试验,提出了一个预测冻土变形的三轴蠕变模型;赵淑萍等<sup>[12]</sup>探讨了冻结兰州细砂的循环蠕变特性;吴志坚等<sup>[13]</sup>研究了冻结兰州黄土在地震荷载作用下的动强度特性;王丽霞等<sup>[14]</sup>对冻结青藏粉质黏土进行了动强度与静强度对比研究;赵淑萍等<sup>[15]</sup>探讨了冻结山东粉土的动蠕变特征,并和静蠕变进行了比较;张淑娟等<sup>[16]</sup>对冻结青藏粉质黏土的动强度进行了试验研究;Zhu等<sup>[17]</sup>对冻结青藏粉质黏土在循环荷载下的累积变形提出了一个预测模型;张向东等<sup>[18]</sup>对辽西地区冻风积土的动强度和变形特性进行了试验研究。上述对各种土质的冻土在循环荷载下的变形和强度特性的研究成果加深了人们对冻土动力特性的认识,但是这些研究都是针对较低温度(低于 $-2^{\circ}\text{C}$ )的冻土而进行的。由于冻土的组成中含有冰和未冻水,表现出很强的温度敏感性和流变性。对于温度较低的冻土,其强度较高,刚度较大,一般都比较稳定。随着温度的升高,冻土的强度将降低,弹性模量减小,高温冻土地层力学性能不稳定,很容易受到人类活动的影响而使其上部工程的服役性能降低甚至发生灾难性事故,因此弄清高温冻土在循环荷载下的力学性能显得更为重要。高志华等<sup>[19]</sup>对高含冰量青藏冻结黏土在 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 和 $-1^{\circ}\text{C}$ ,循环荷载频率为 $1\text{ Hz}$ 的条件下的变形和强度特性进行过一些试验研究;焦贵德等<sup>[20]</sup>对高温冻结粉土的累积变形特性做过一些初步的试验研究。从已有的文献资料可以看到,对于温度较高的冻土( $-1^{\circ}\text{C}$ 左右)在循环荷载下的动力特性的研究非常少,高温冻土在循环荷载下的变形和强度等特性还需要进行更多较为深入的研究。

## 1 试验简介

### 1.1 试验仪器

试验采用冻土工程国家重点实验室 MTS-810 低温材料试验机,该设备最大轴向压力 $250\text{ kN}$ ,最大轴向位移为 $50\text{ mm}$ ,控温箱的温度范围为 $-30^{\circ}\text{C}\sim+30^{\circ}\text{C}$ ,温度控制精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ,频率范围为 $0\sim 50\text{ Hz}$ ,配有计算机自动控制与数据采集系统,如图 1 所示。



图 1 试验仪器

Fig. 1 Test apparatus

### 1.2 试样制备

试样选用从青藏铁路北麓河地区取得的粉质黏土,液限为 $32.88\%$ ,塑限为 $17.5\%$ ,塑性指数为 $15.38$ 。将经过风干的土样碾碎过筛后加蒸馏水配成初始含水率为 $13\%$ 的湿土,然后用压样机压成直径为 $61.8\text{ mm}$ ,高度为 $125\text{ mm}$ 的试样,装入三瓣式试模内后放入抽气饱水缸内进行抽气 $2\text{ h}$ ,然后饱水 $12\text{ h}$ ,饱水后试样含水率为 $17.8\%$ ,干密度为 $1.83\text{ g/cm}^3$ 。将饱水后的试样放入 $-30^{\circ}\text{C}$ 冷冻箱, $48\text{ h}$ 后取出。拆模后套上乳胶套,然后在恒温箱内恒温 $24\text{ h}$ 以上,设定恒温箱的温度与要求的试验温度一致。

### 1.3 试验方法

试验在 $-1^{\circ}\text{C}$ 恒温下进行,循环荷载加载频率分别为 $3, 5, 8\text{ Hz}$ 。首先测得 $-1^{\circ}\text{C}$ 时该批试样的瞬时单轴压缩强度 $q_u$ 为 $1.789\text{ MPa}$ 。试验时为了使试件和加压杆头始终保持接触,从而能够满足应力控制模式,且不对试验结果产生明显影响,最小动压应力取 $0.053\text{ MPa}$ ,最大动压应力 $\sigma_{d\max}$ 为 $-1^{\circ}\text{C}$ 下土样瞬时单轴压缩强度的 $20\%\sim 80\%$ 。试验采用应力控制的单轴振动压缩方式,循环荷载采用正弦波<sup>[21]</sup>。试验时根据试样变形发展特征,对于变形不能保持稳定的试样,设定轴向总应变达到 $20\%$ 时由试验系统自动停止试验;而对于变形发展缓慢的试样,循环次数超过 $10\times 10^5$ 次后可手动停止。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 最大动应力对累积变形的影响

图 2 为不同最大动应力下累积应变与循环次数的关系曲线。从图 2(a)可以看到,荷载频率为 $3\text{ Hz}$ ,当加载的最大动应力 $\sigma_{d\max}$ 为 $50\%q_u, 60\%q_u, 70\%q_u, 80\%q_u$ 时,随循环次数的增大,累积应变不断增大,试样最终由于变形太大而破坏,累积应变和循环振次的关系曲线为破坏型,且最大动应力越大,试样达到破坏所需的循环次数越少。当加载的最大动应力 $\sigma_{d\max}$ 为 $20\%q_u, 30\%q_u$ 时,随循环次数的增大,累积应变

增加越来越缓慢, 达到一定循环次数时累积应变趋于稳定, 试样不会破坏, 累积应变和循环振次的关系曲线为稳定型, 且最大动应力越小, 试样的最终累积应变越小。当加载的最大动应力  $\sigma_{dmax}$  为  $40\%q_u$  时, 累积应变和循环振次的关系曲线为过渡型, 随循环次数的增大, 累积应变逐渐增加, 但累积应变的增加速率逐渐变小并趋于稳定值。图 2 (b)、2 (c) 中, 荷载频率为 5, 8 Hz, 当加载的最大动应力  $\sigma_{dmax}$  为  $40\%q_u$ ,  $50\%q_u$ ,  $60\%q_u$ ,  $70\%q_u$ ,  $80\%q_u$  时, 累积应变和循环振次的关系曲线为破坏型; 而当加载的最大动应力  $\sigma_{dmax}$  为  $20\%q_u$  和  $30\%q_u$  时, 累积应变和循环振次的关系曲线为稳定型。从图 2 (a)、2 (b)、2 (c) 可以看出, 当最大动应力大于或等于静强度的 40% 时, 累积变形不会趋于稳定, 因此, 模拟列车动荷载作用下的变形时, 最大列车荷载强度应小于冻土静强度的 40%。

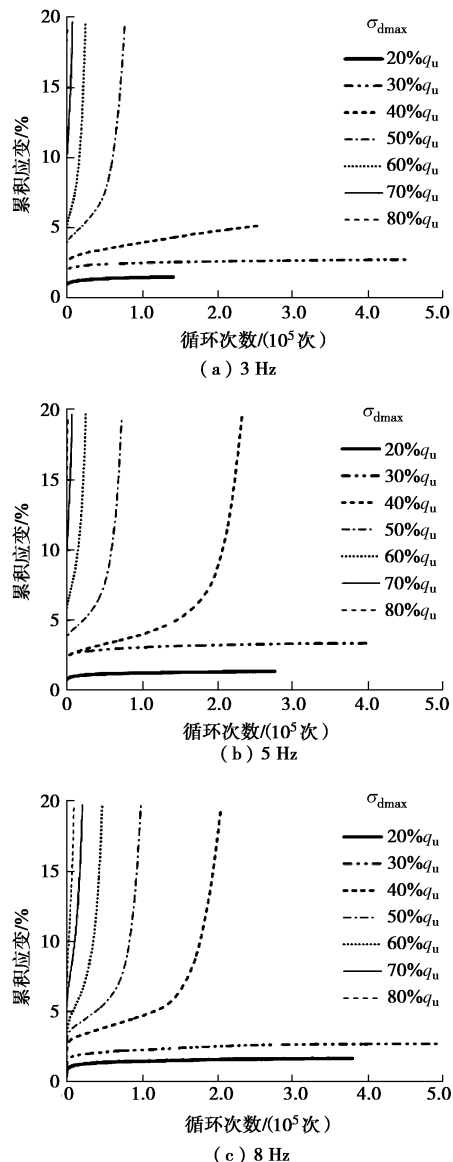


图 2 不同最大动应力下累积应变与循环次数关系曲线

Fig. 2 Changing curves of cumulated strain with cyclic number under different maximum cyclic stresses

破坏型曲线表现出三阶段特征。初始阶段, 变形速率迅速衰减; 等速阶段, 变形速率达到最小值并保持恒定; 加速阶段, 变形速率迅速增大。三阶段在整个循环中的长度不同, 初始阶段最小, 等速阶段最长, 且等速阶段的长短和加载的最大动应力大小密切相关, 最大动应力越小, 等速阶段越长, 三阶段特征越明显。稳定型曲线表现出两阶段特征。初始阶段, 变形速率迅速衰减; 稳定阶段, 变形速率基本接近于零, 变形发展极其缓慢。过渡型曲线也表现出两阶段特征。初始阶段, 变形速率迅速衰减; 稳定阶段, 变形速率保持稳定值, 变形继续发展。

比较图 2 中的各图可以看到, 当加载的最大动应力从  $20\%q_u$  到  $80\%q_u$  依次增大时, 累积应变发展曲线也按照从低到高的次序依次排列, 可见同一加载频率下, 当最小动应力恒定时, 累积应变的大小由最大动应力决定。另外, 从图 2 还可以看出, 各种频率条件下, 稳定型曲线的应变均小于 3.5%

## 2.2 频率对累积变形的影响

图 3 为不同最大动应力时, 不同频率条件下累积应变与循环次数的关系曲线。从图 3 (a)、3 (b) 可以看到, 当最大动应力为  $20\%q_u$ ,  $30\%q_u$  时, 3 种频率下的曲线差异不大、且没有明显规律, 可见, 对于最大动应力较小时的稳定型曲线, 频率对累积变形的影响亦较小。从图 3 (c) 可以看到, 当最大动应力为  $40\%q_u$  时, 大体上频率越高, 累积应变越大。从图 3 (d)、3 (e)、3 (f) 可以看到, 当最大动应力为  $50\%q_u$ ,  $60\%q_u$ ,  $70\%q_u$  时, 频率为 3, 5 Hz 下的累积应变非常接近, 而在相同循环次数时, 频率为 8 Hz 下累积应变最小。从图 3 (g) 可以看到, 当最大动应力为  $80\%q_u$  时, 频率越高, 相同循环次数下的累积应变越小。

综合比较图 3 中的各图可知, 频率对冻土累积变形的影响没有一致性的规律, 表现出频率对累积变形影响的复杂性, 这主要由循环荷载的速率效应与循环效应(疲劳效应)的综合效果所决定, 而这两种效应在不同的最大动应力下的表现是不相同的。当加载的最大动应力在某一较高范围时, 冻土表现出频率越高, 同一循环次数下累积变形越小的特征, 也就是频率越高, 强度和刚度越大, 这时速率效应的影响占主导, 图 3 (g) 就是这样的例证。当加载的最大动应力在某一适中范围时, 冻土表现出频率越高, 同一循环次数下累积变形越大的特征, 这时循环效应的影响大于速率效应, 图 3 (c) 就是这样的例证。当最大动应力较小时, 频率的影响不明显, 图 3 (a)、3 (b) 就是这样的例证。

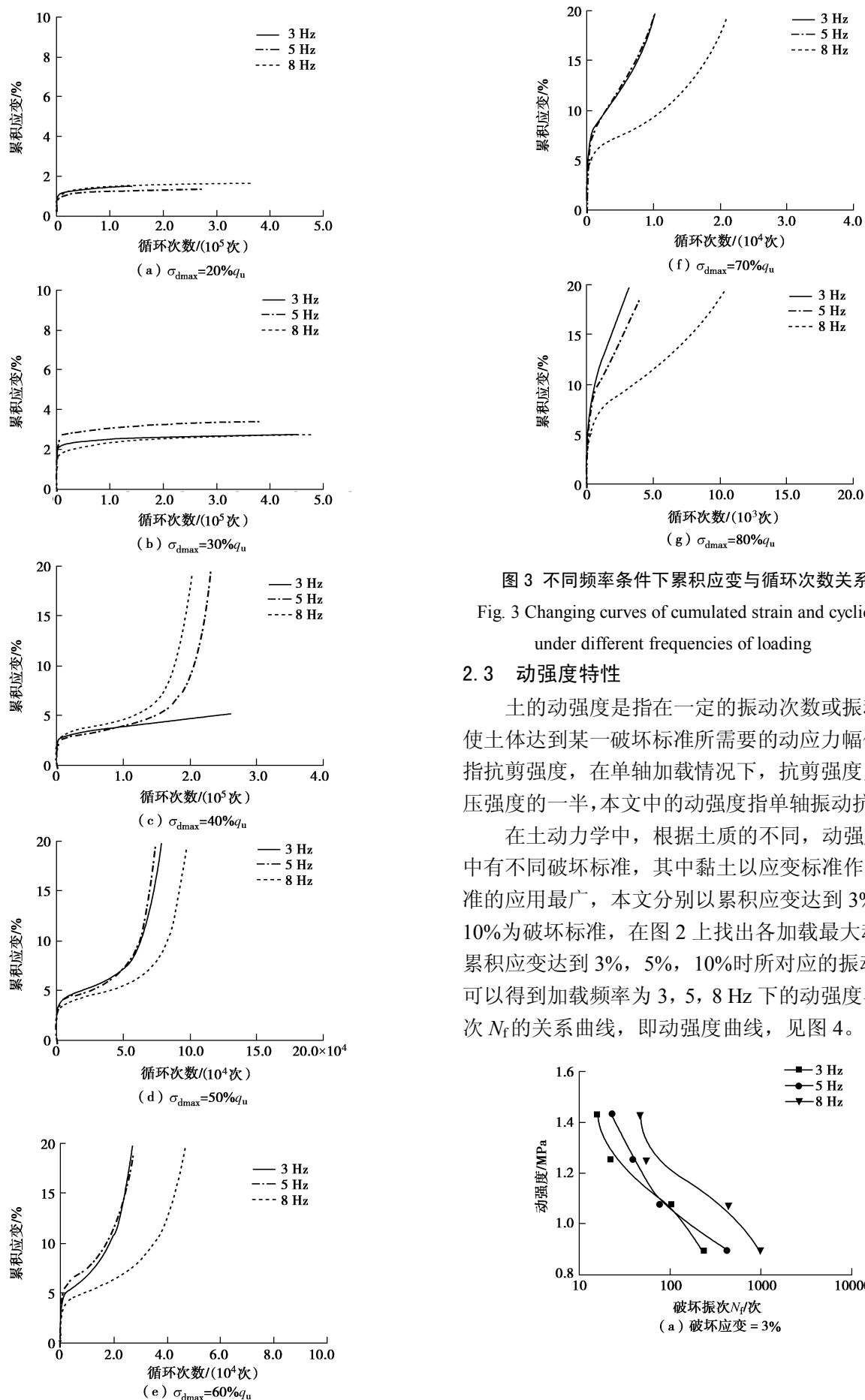


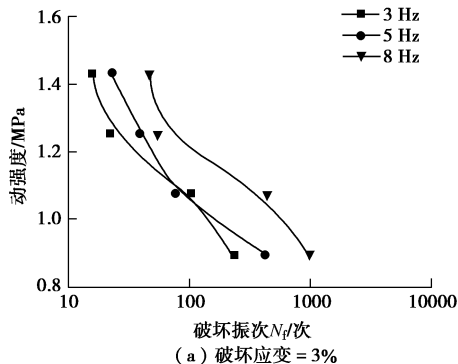
图3 不同频率条件下累积应变与循环次数关系曲线

Fig. 3 Changing curves of cumulated strain and cyclic number under different frequencies of loading

### 2.3 动强度特性

土的动强度是指在一定的振动次数或振动时间下使土体达到某一破坏标准所需要的动应力幅值,一般指抗剪强度,在单轴加载情况下,抗剪强度为轴向抗压强度的一半,本文中的动强度指单轴振动抗压强度。

在土动力学中,根据土质的不同,动强度的研究中有不同破坏标准,其中黏土以应变标准作为破坏标准的应用最广,本文分别以累积应变达到 3%, 5%, 10% 为破坏标准,在图 2 上找出各加载最大动应力下累积应变达到 3%, 5%, 10% 时所对应的振动次数,可以得到加载频率为 3, 5, 8 Hz 下的动强度与破坏振次  $N_f$  的关系曲线,即动强度曲线,见图 4。



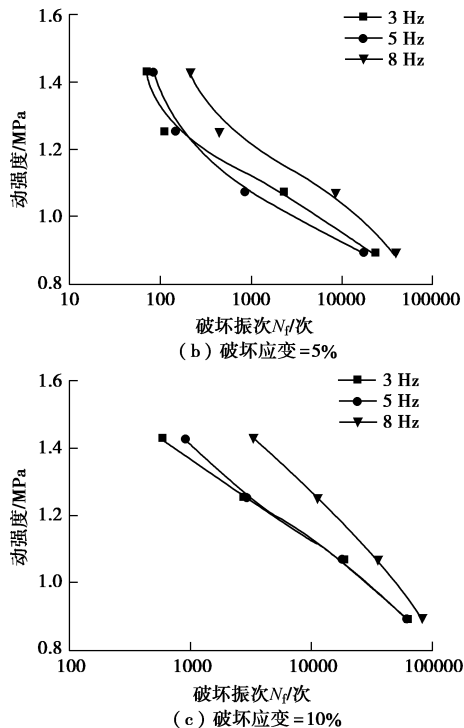


图4 动强度曲线

Fig. 4 Curves of dynamic strength

从图4可以看出, 动强度随振次的增加而降低, 即强度衰减特性; 3种破坏应变标准下频率对动强度曲线变化的影响规律相近, 即8 Hz时的动强度明显大于5 Hz和3 Hz时的, 而频率为5 Hz和3 Hz时的动强度比较接近, 说明在此范围内频率对动强度的影响不明显。

### 3 结 论

为了探讨高温冻土在循环荷载下的变形和强度特性, 对 $-1^{\circ}\text{C}$ 的冻土试样在频率3, 5, 8 Hz的循环荷载下进行了单轴压缩试验, 得到以下结论:

(1) 循环荷载作用下, 冻土的累积变形大小由加载的最大动应力(动应力幅值)的大小决定, 在加载频率相同时, 加载的最大动应力越大, 相同循环次数下的累积应变越大。

(2) 循环荷载作用下, 根据加载的最大动应力的大小, 冻土试样的累积应变与循环次数的关系曲线表现为破坏型、稳定型、过渡型3种形态。破坏型曲线的累积应变随循环次数的增大表现为减速变形阶段、等速变形阶段、加速变形阶段的三阶段特征; 稳定型曲线的累积应变随循环次数的增大表现为减速变形阶段、变形基本恒定阶段的两阶段特征。过渡型曲线的累积应变随循环次数的增大表现为减速变形阶段、变形恒速发展的两阶段特征。

(3) 循环荷载的加载频率对冻土累积应变的影响

规律复杂, 且受加载的最大动应力影响。当最大动应力较小时, 频率的影响不明显; 当最大动应力比较适中时, 大体上频率越高, 冻土试样的累积应变越大; 当最大动应力比较大时, 频率越高, 相同循环次数下的累积应变越小。

(4) 循环荷载作用下冻土的动强度随振次的增加而降低, 3%、5%、10%三种破坏应变标准下, 8 Hz时的动强度明显大于5 Hz和3 Hz时的, 而频率为5 Hz和3 Hz时的动强度比较接近, 说明在某一频率范围内加载频率对动强度的影响不明显。

### 参考文献:

- [1] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[R]// Transportation research record 537. Washington D C: Transportation Research Board, 1975: 1 - 17.
- [2] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006 - 1013.
- [3] CHAI J C, MIURA N. Traffic load induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907 - 916.
- [4] 蔡 英, 曹新文. 重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 1 - 5. (CAI Ying, CAO Xin-wen. Study of the critical dynamic stress and permanent strain of the subgrade-soil under the repeated load[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [5] KARG C, HAEGEMAN W. Elasto-plastic long-term behavior of granular soils: experimental investigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(2): 155 - 172.
- [6] MILLER G A, TEH S Y, LI D Q, et al. Cyclic shear strength of soft railroad subgrade[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(7): 139 - 147.
- [7] 陈颖平, 黄 博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1065 - 1071. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1065 - 1071. (in Chinese))
- [8] 张 勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1542 - 1548. (ZHANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al.

- Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1542 - 1548. (in Chinese))
- [9] 蒋关鲁, 房立凤, 王智猛, 等. 红层泥岩路基填料动强度和累积变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 124 - 129. (JIANG Guan-lu, FANG Li-feng, WANG Zhi-meng, et al. Experimental study on dynamic strength and accumulated deformation characteristics of red-mudstone filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 124 - 129. (in Chinese) )
- [10] 丁祖德, 彭立敏, 施成华, 等. 循环荷载作用下富水砂质泥岩动变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 534 - 539. (DING Zu-de, PENG Li-min, SHI Cheng-hua, et al. Experimental study on dynamic deformation behaviors of water-rich sandy mudstone under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 534 - 539. (in Chinese))
- [11] 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 dynamic loading[J]. Progress in Natural Science, 1998, **8**(1): 60 - 62. (in Chinese))
- [12] 赵淑萍, 何平, 朱元林, 等. 冻结砂土在动荷载下的蠕变特征[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 270 - 274. (ZHAO Shu-ping, HE Ping, ZHU Yuan-lin, et al. Creep characteristics of frozen sand under dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(3): 270 - 274. (in Chinese))
- [13] 吴志坚, 王兰民, 马巍, 等. 地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究[J]. 西北地震学报, 2003, **25**(3): 210 - 214. (WU Zhi-jian, WANG Lan-min, MA Wei, et al. Laboratory study on dynamics parameters of frozen soil under seismic dynamic loading[J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, **25**(3): 210 - 214. (in Chinese))
- [14] 王丽霞, 凌贤长, 徐学燕, 等. 青藏铁路冻结粉质黏土动静三轴试验对比[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 202 - 205. (WANG Li-xia, LING Xian-zhang, XU Xue-yan, et al. Comparison of dynamic and static triaxial test on frozen silty clay of Qinghai—Tibet railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(2): 202 - 205. (in Chinese))
- [15] 赵淑萍, 何平, 朱元林, 等. 冻结粉土的动静蠕变特征比较[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2160 - 2163. (ZHAO Shu-ping, HE Ping, ZHU Yuan-lin, et al. Comparison between dynamic and static creep characteristics of frozen silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2160 - 2163. (in Chinese))
- [16] 张淑娟, 赖远明, 李双洋, 等. 冻土动强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 595 - 599. (ZHANG Shu-juan, LAI Yuan-ming, LI Shuang-yang, et al. Dynamic strength of frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 595 - 599. (in Chinese))
- [17] ZHU Zhan-yuan, LING Xian-zhang, CHEN Shi-jun, et al. Experimental investigation on the train-induced subsidence prediction model of Beiluhe permafrost subgrade along the Qinghai-Tibet Railway in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, **62**(1): 67 - 75.
- [18] 张向东, 刘家顺, 兰常玉, 等. 辽西地区冻风积土动力特性试验分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, **22**(2): 135 - 142. (ZHANG Xiang-dong, LIU Jia-shun, LAN Chang-yu, et al. Dynamic test analysis of frozen aeolian soil under earthquake loading[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, **22**(2): 135 - 142. (in Chinese))
- [19] 高志华, 石坚, 张淑娟, 等. 高含冰量冻土动强度和残余应变的试验研究[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(6): 1143 - 1149. (GAO Zhi-hua, SHI Jian, ZHANG Shu-juan, et al. Experimental study of the dynamic strength characteristics and residual strain of ice-rich frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(6): 1143 - 1149. (in Chinese))
- [20] 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 Gui-de, ZHAO Shu-ping, MA Wei, 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))
- [21] 宫全美, 罗喆, 袁建议. 提速铁路基床长期累积沉降及等效循环荷载试验研究[J]. 铁道学报, 2009, **31**(2): 88 - 93. (GONG Quan-mei, LUO Zhe, YUAN Jian-yi. Experimental study on long-term cumulative settlement and equivalent cyclic load of speed-up railway subgrade soil[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, **31**(2): 88 - 93. (in Chinese))