

荷载振动频率对冻结兰州细砂蠕变特性的影响

赵淑萍¹, 何平², 朱元林¹, 常小晓¹

(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. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 通过一系列不同振动频率下的蠕变试验, 分析冻结兰州细砂的蠕变变形特性以及频率对蠕变变形和蠕变破坏的影响。发现较高的频率对冻土的蠕变变形、应变速率影响较大; 当动荷载应力幅值较大时, 荷载大小的影响大于频率的影响, 当应力幅值较小时, 必须考虑频率的影响; 当振动频率增加时, 冻土更容易发生破坏, 破坏时间变短; 在此次试验条件下, 土体的破坏应变较小, 为 2.8%~5.1%, 破坏应变时大时小, 总体上呈现变小的趋势; 当最大加载应力不变而频率增加时, 最小蠕变速率的变化幅值不大, 都在一个量级范围内, 当最大加载应力为 4.5 MPa 时, 最小蠕变速率为 $2.2 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 而当最大加载应力为 3.0 MPa 时, 最小蠕变速率为 $2.9 \times 10^{-6} \sim 6.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; 频率变化时, 破坏振动次数并非单一地变化, 存在临界频率, 此时破坏振动次数最大。

关键词: 土力学; 冻结兰州细砂; 荷载振动频率; 蠕变变形; 蠕变破坏

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 4097 - 07

IMPACT OF LOAD VIBRATION FREQUENCY ON CREEP CHARACTERISTICS OF FROZEN LANZHOU FINE-SAND

ZHAO Shuping¹, HE Ping², ZHU Yuanlin¹, CHANG Xiaoxiao¹

(1. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;* 2. *School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract: The creep characteristics of frozen Lanzhou fine-sand and the impact of load vibration frequency on creep strain and creep failure are examined through a series of creep tests with different vibration frequencies. The tests illustrate that both creep strain and creep strain rate are influenced by the frequency of vibrating load, in particular, by higher frequencies. When the stress amplitude of the load has a large value, the load puts more impact on the creep stain and its rate than frequency does. When the stress amplitude of the load becomes small, the impact of the vibration frequency of the load has to be taken into account. With the increase of the frequency, the failure time decreases. The failure strain of frozen Lanzhou fine-sand is relatively small under this test condition, varying from 2.8% to 5.1%. As frequency increases, the failure strain presents a decreasing trend on the whole, though it fluctuates during those processes. With a constant vibrating load, the minimum creep strain rate varies within a small range in response to frequency increment. However, the minimum creep strain rate would be in different orders of magnitude when the soils bear various maximum vibrating loads. The test shows that the minimum creep strain rates vary from 2.2×10^{-5} to $4.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ with a maximal load of 4.5 MPa, while $2.9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ to 6.8×10^{-6} with 3.0 MPa. When the frequency of the vibrating load varies, failure vibration time reacts in a

收稿日期: 2005 - 12 - 21; **修回日期:** 2006 - 02 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40501016); 中国科学院重大项目(KZCX1 - SW - 04)

作者简介: 赵淑萍(1976 -), 女, 硕士, 1998年毕业于兰州大学地质系水文地质与工程地质专业, 现任副研究员, 主要从事冻土力学和寒区工程方面的研究工作。E-mail: shuping@lzb.ac.cn

non-monotonic manner. There exists a critical frequency under which the failure vibration time reaches to its maximum.

Key words: soil mechanics; frozen Lanzhou fine-sand; load vibration frequency; creep deformation; creep failure

1 引言

随着西部大开发的进行, 国家投资在青藏高原地区进行多项基础设施建设^[1]。青藏高原有大面积的冻土分布^[2], 也是我国强震多发区之一, 仅 1980 年以来, 就有 14 次 6.0~6.9 级地震、2 次 7.0~8.5 级地震在该地区发生, 特别是 2001 年 11 月 14 日在新疆、青海交界处的昆仑山口发生的 8.1 级地震, 对铁路、公路、地下管线、通信设施等造成了严重破坏^[3], 另外, 车辆的运行会产生由于路面不平顺而引起的振动荷载^[4]。所以, 对于像青藏铁路这样的寒区线路工程来说, 必须同时考虑冻土这种特殊的土体和动荷载这种特殊的荷载。目前, 国内外学者对于冻土的常规土力学性质研究较多, 而对冻土的动力学特性研究还比较少, 主要是进行了不同土质在不同负温、不同频率条件下的动力学参数(动弹性模量、动剪切模量、泊松比及阻尼比)试验^[5~13]。另外, 部分学者^[14~17]进行了冻结兰州黄土(粉质黏土)的动蠕变试验, 分析了单轴、三轴动蠕变模型以及蠕变破坏特征, 而对冻结砂土的研究较少。对于线路工程, 尤其是高速铁路和高速公路路基来说, 往往是在强度还满足要求的情况下, 路基变形超过容许变形, 导致路基不能继续使用^[18]。冻土具有极强的流变性, 蠕变变形明显。本文主要研究动荷载作用下, 冻结细砂的蠕变变形特征, 以及振动荷载最重要的要素——频率对蠕变变形和蠕变破坏的影响。

2 试验条件及方法

试验土质为兰州细砂, 其物性指标见表 1。将野外取回的土样风干、碾碎、过筛, 取粒径小于 2 mm 的土配制成一定含水量的湿土, 根据模具体积和一定的干密度计算所需的湿土质量, 分 3 层将土夯实装入模具中, 将试样和模具一起放入干燥器中, 抽气、饱水 24 h 后脱模。测得试样的含水量为 24.2%, 干密度为 1.56 g/cm³。将试样送入低温冷库中快速冻结 48 h 以上, 取出试样后进行切削, 使样品直径

表 1 兰州细砂物性指标

Table 1 Physical parameters of Lanzhou fine-sand

颗粒级配/%				相对密度
>0.50 mm	0.50~0.25 mm	0.25~0.10 mm	<0.10 mm	
0.2	15.2	73.9	9.3	2.63

为 61.8 mm, 高度为 150 mm, 然后放入恒温箱内, 按要求设定温度, 恒温 48 h 后进行试验。试验在 MTS 材料试验机上进行, 采用正弦波形的恒应力幅值动荷载试验方式, 即荷载最大、最小值都保持恒定。根据马 巍等^[19]的研究推算得到, 当以 10 mm/min 的应变速率加载时, 兰州细砂在 -5 °C 时的单轴强度为 5 MPa, 所以, 设计本次试验时, 试验温度取 -5 °C, 最大加载应力分别取为强度的 60% 和 90%, 即 3.0 和 4.5 MPa, 最小加载应力取一个接近于 0 的很小的值, 振动频率分别取 0.1, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 19 Hz。

3 试验结果及讨论

3.1 蠕变变形

将试验得到的蠕变变形分别绘成蠕变应变 - 时间曲线和蠕变应变 - 振动次数曲线, 如图 1~4 所

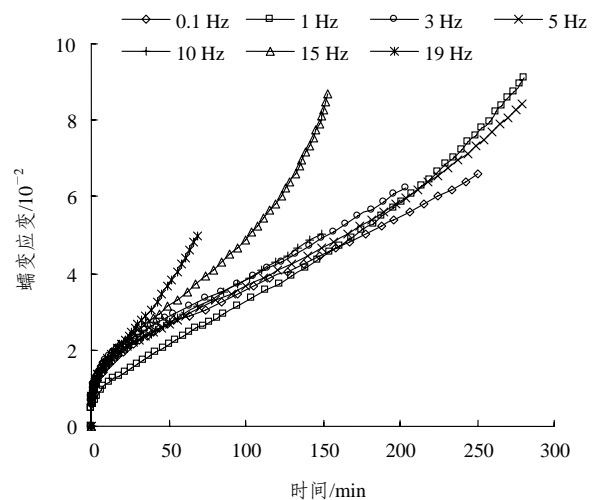


图 1 冻结兰州细砂蠕变应变 - 时间曲线(温度为 -5 °C, 最大加载应力为 3.0 MPa)

Fig.1 Creep strain-time curves of frozen Lanzhou fine-sand (temperature is -5 °C, the maximum stress loaded is 3.0 MPa)

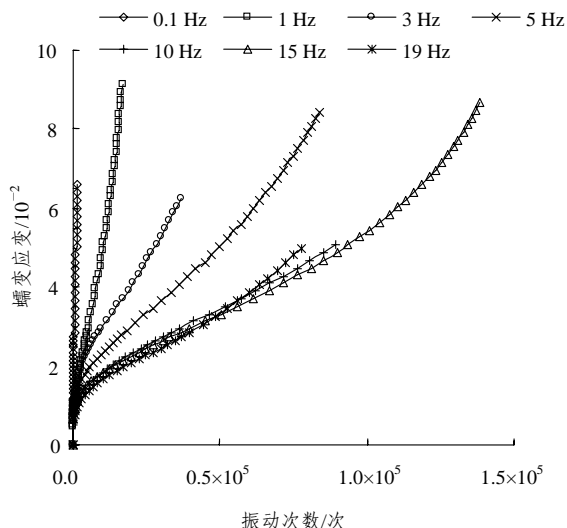


图2 冻结兰州细砂蠕变应变 - 振动次数曲线(温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大加载应力为 3.0 MPa)

Fig.2 Creep strain-vibration number curves of frozen Lanzhou fine-sand(temperature is $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，the maximum stress loaded is 3.0 MPa)

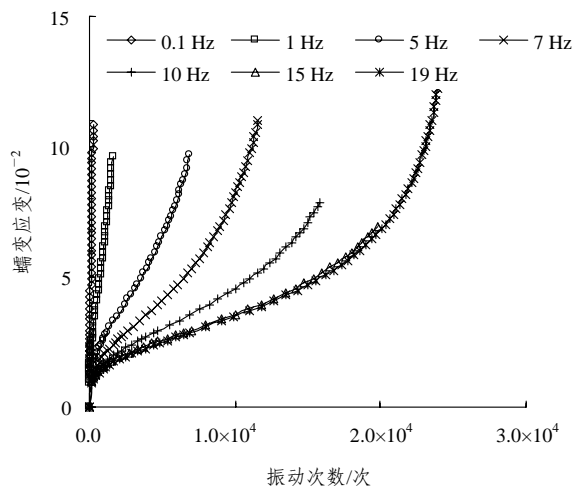


图4 冻结兰州细砂蠕变应变 - 振动次数曲线(温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大加载应力为 4.5 MPa)

Fig.4 Creep strain-vibration number curves of frozen Lanzhou fine-sand(temperature is $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，the maximum stress loaded is 4.5 MPa)

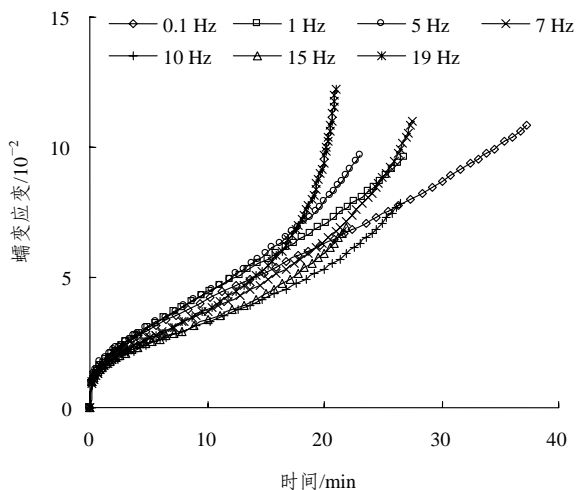


图3 冻结兰州细砂蠕变应变 - 时间曲线(温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大加载应力为 4.5 MPa)

Fig.3 Creep strain-time curves of frozen Lanzhou fine-sand (temperature is $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，the maximum stress loaded is 4.5 MPa)

示。因为本次试验的目的是研究频率对冻土蠕变特性的影响，而频率本身是与时间相关的。譬如对于路基来说，相同的使用时间内，列车通过次数越多，则说明使用频率越高，此时就要考虑不同频率时蠕变特性和时间的关系，而当每一辆列车通过时，路基上某点所受的振动次数是一样的，车速越大，则振动频率越大，此时就要考虑蠕变特性和振动次数的关系。

冻结兰州细砂的蠕变应变 - 时间曲线见图 1，3。由图中可以看出，当荷载振动频率变化时，应变曲线的初始蠕变阶段基本重合，进入稳定蠕变阶段后，低频条件下的应变过程曲线表现出一定差别，但差别不大，且没有一定规律；而高频条件下(最大加载应力 3.0 MPa 时为 15 Hz 和 19 Hz ， 4.5 MPa 时为 19 Hz)的应变过程线则发生较大偏离，应变迅速增大，蠕变曲线迅速进入流变阶段。这是因为当荷载作用时间相同时，频率越高，试样所受的荷载振动次数越多，试样内部的结构变化越明显，所以在高频时，应变增加明显。

从图 2，4 可以看出，冻结兰州细砂的应变随振动次数的变化规律是，频率越低，蠕变应变越大，且低频时的差异更为明显，这充分说明了冻土的流变性质，当振动次数相同时，低频条件下的试样经受的荷载作用时间长，所以应变大。

3.2 蠕变速率

不同条件下，冻结兰州细砂的蠕变速率 - 时间曲线及蠕变速率 - 振动次数曲线如图 5~8 所示。图 5，7 显示，冻结兰州细砂的蠕变速率随时间的变化规律是达到最小蠕变速率之前，不同频率条件下的蠕变速率曲线基本重合，而最小蠕变速率之后，曲线发生偏离，高频条件下的蠕变速率明显变大，而低频条件下的蠕变速率随着频率的增加稍有增加。

图 6，8 显示，冻结兰州细砂的蠕变速率随振动

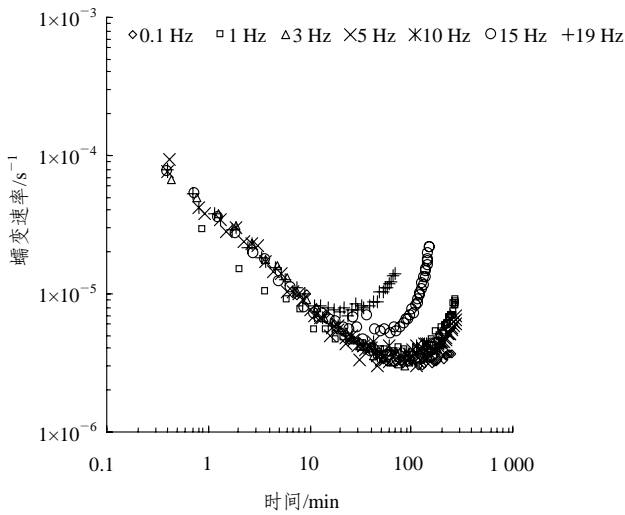


图 5 冻结兰州细砂蠕变速率 - 时间曲线(温度为 -5 °C, 最大加载应力为 3.0 MPa)

Fig.5 Creep velocity rate-time curves of frozen Lanzhou fine-sand(temperature is -5 °C, the maximum stress loaded is 3.0 MPa)

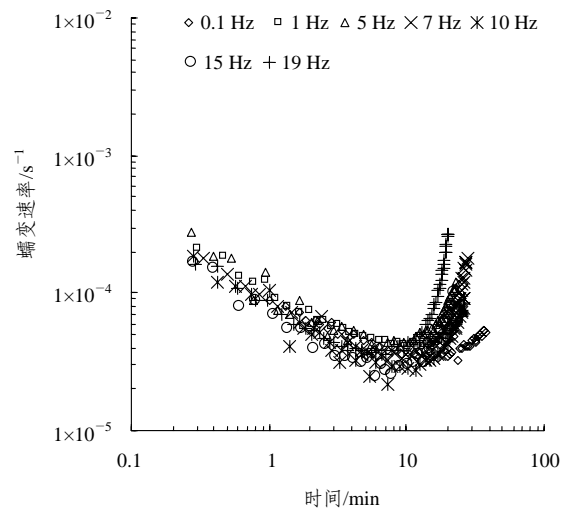


图 7 冻结兰州细砂的蠕变速率 - 时间曲线(温度为 -5 °C, 最大加载应力为 4.5 MPa)

Fig.7 Creep velocity rate-time of frozen Lanzhou fine-sand (temperature is -5 °C, the maximum stress loaded is 4.5 MPa)

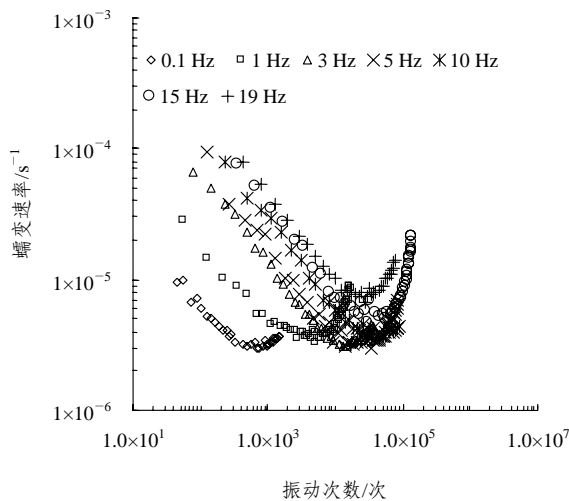


图 6 冻结兰州细砂蠕变速率 - 振动次数曲线(温度为 -5 °C, 最大加载应力为 3.0 MPa)

Fig.6 Creep velocity rate-vibration times of frozen Lanzhou fine-sand(temperature is -5 °C, the maximum stress loaded is 3.0 MPa)

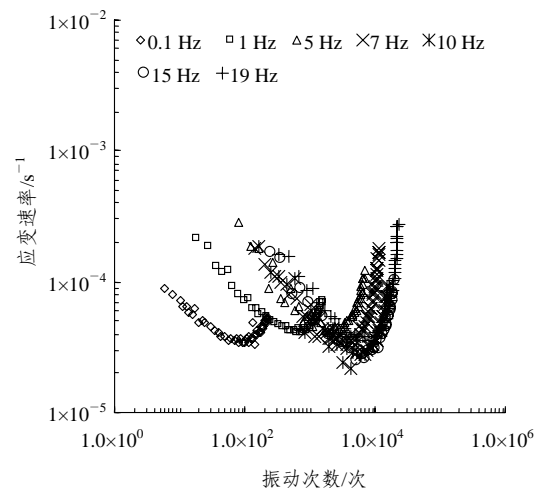


图 8 冻结兰州细砂的蠕变速率 - 振动次数曲线(温度为 -5 °C, 最大加载应力为 4.5 MPa)

Fig.8 Creep velocity rate-vibration times of frozen Lanzhou fine-sand(temperature is -5 °C, the maximum stress loaded is 4.5 MPa)

次数的变化规律是, 频率越低, 蠕变速率越小, 而且低频时(0.1 和 1 Hz)的变化更为明显。

3.3 蠕变破坏特征

将应变速率 - 时间双对数图上的拐点, 即应变速率达到最小时定义为试样破坏, 此时的时间、振动次数、应变、应变速率分别为破坏时间、破坏振动次数、破坏应变和最小蠕变速率。其与频率之间的关系分别如图 9~12 所示。

由图 9 可以看出, 最大加载应力为 4.5 MPa 时的破坏时间明显低于 3.0 MPa 时的, 频率增加时, 破坏时间变短, 也就是说, 在经受相同的荷载作用时间条件下, 振动频率越高, 冻土越容易发生破坏。图 10 显示, 最大加载应力为 4.5 MPa 时, 破坏振动次数随频率的增加稍有增加, 最大加载应力为 3.0 MPa 时, 破坏振动次数随频率的变化则是先增加后减小。由图 9, 10 也可以看出, 当加载应力的幅值

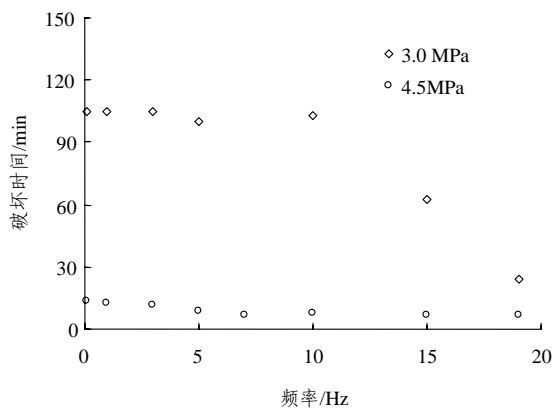


图9 破坏时间与频率的关系

Fig.9 Relation between failure time and frequency

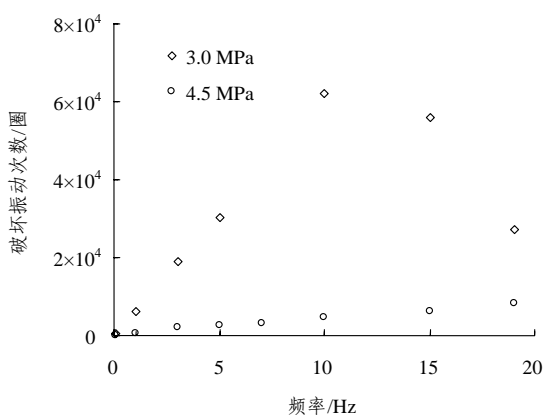


图10 破坏振动次数与频率的关系

Fig.10 Relation between failure vibration number and frequency

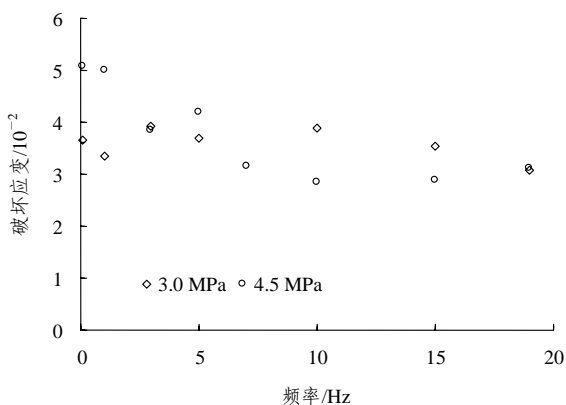


图11 破坏应变与频率的关系

Fig.11 Relation between failure strain and frequency

较大时, 破坏时间、破坏振动次数本身的值很小, 随频率的变化也就不大, 此时, 对于冻土的抗振动破坏能力来讲, 更多地应该考虑荷载大小的影响, 而频率高低的影响可以忽略。当应力幅值较小时, 频率的影响就显得比较重要了。

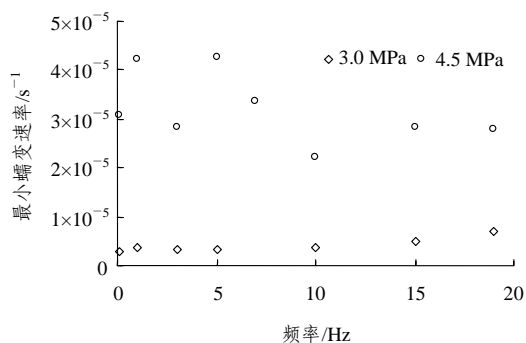


图12 最小蠕变速率与频率的关系

Fig.12 Relation between the minimum creep velocity rate and frequency

在本次试验条件下, 冻结兰州细砂的破坏应变比较小, 为 2.8%~5.1%。图 11 显示, 频率增加时, 破坏应变时大时小, 总体上表现出变小的趋势。一方面, 加载初期, 土体还处在弹性变形阶段, 频率较小时, 加、卸载的速率都慢, 土体有足够的时间调整来适应由于外载引起的内部结构变化, 所以在相同的荷载作用时间内, 低频条件下土体的应变小于高频条件下的。但是, 也正是由于振动荷载引起的循环效应, 使得经受高频振动荷载的土体更容易被破坏, 即低频条件下土体的破坏时间长, 而由于冻土的流变性, 土体的变形随着时间的延长一直在变大。由于这两方面的作用, 频率增大时, 破坏应变时大时小, 从总体趋势来看, 后者影响因素占更主要的作用。

图 12 显示, 当最大加载应力为 4.5 MPa 时, 最小蠕变速率为 $2.2 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 而当最大加载应力为 3.0 MPa 时, 最小蠕变速率为 $2.9 \times 10^{-6} \sim 6.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。确定土体的破坏时, 综合考虑了变形与时间关系曲线上从稳定蠕变阶段进入流变阶段, 以及蠕变速率与时间关系曲线上从降低到增加的变化阶段, 并不是绝对的一个点, 而蠕变速率随时间的变化曲线, 并不是像应变随时间的变化曲线那样光滑, 而是不停地有小的波动。此次试验结果显示, 在相同的加载应力条件下, 频率变化时, 最小蠕变速率的变化幅值不大, 都在一个量级范围内, 可以认为频率对于最小蠕变速率的影响不大。而从最大加载应力为 3.0 和 4.5 MPa 的两组试验来看, 加载应力变大时, 最小蠕变速率发生量级上的变大。

4 结 语

与非冻土不一样, 冻土是由土颗粒、冰、未冻

水、气体组成的多相体系。冰和未冻水的存在，使冻土具有明显的流变性，即施加一定的荷载后，虽然荷载不再变化，但土体的应变会不断增加，而且当应变增加到一定程度时，土体还可能发生破坏，这就是冻土的蠕变特性。对于寒区工程来说，必须考虑冻土的蠕变。针对冻结兰州细砂，本文进行了一系列不同频率条件下的动荷载试验，从试验结果也可以看出，冻土的动蠕变变形是非常明显的，虽然实际工程中土体中的应力远小于此次室内试验时土体中的应力，一般情况下，也不会允许土体达到破坏，但是从本次试验可以得到一些定性的结论和规律，尤其是动荷载的频率对冻土的动蠕变性质的影响：

(1) 荷载振动频率变化时，冻结兰州细砂蠕变曲线的初始蠕变阶段基本重合，进入稳定蠕变阶段后，低频条件下的应变过程曲线表现出一定差别，但差别不大，且没有一定规律，高频条件下的应变过程线则发生较大偏离，应变迅速增大，蠕变曲线迅速进入流变阶段。应变随振动次数的变化规律是，频率越低，应变越大，且低频时的差异更为明显。

(2) 最小蠕变速率之前，不同频率条件下的蠕变速率曲线基本重合，而最小蠕变速率以后，高频条件下的蠕变速率明显变大，而低频条件下的蠕变速率则随着频率的增加稍有增加。蠕变速率随振动次数的变化规律是，频率越低，蠕变速率越小，且低频时的变化更为明显。

(3) 当动荷载应力幅值较大时，荷载的影响大于频率的影响。当应力幅值较小时，必须考虑频率的影响。破坏时间随着频率的增加而变短，破坏振动次数随频率的变化则是先增加后减小。

(4) 本次试验条件下冻结兰州细砂的破坏应变较小，为 2.8%~5.1%，频率增加时，破坏应变时大时小，总体上呈现变小的趋势。在相同的最大加载应力条件下，频率变化时，最小蠕变速率的变化幅值不大，都在一个量级范围内，而当频率相同、加载应力增加时，最小蠕变速率会在量级上变大。

参考文献(References):

- [1] 程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 213 - 217.(Cheng Guodong, He Ping. Linearity engineering in permafrost area[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 213 - 217.(in Chinese))
- [2] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.(Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Chinese Permafrost[M]. Beijing: Science Press, 2000.(in Chinese))
- [3] 郭恩栋, 王东升, 陆鸣, 等. 青新交界 8.1 级地震生命线工程震害[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 77 - 81.(Guo Endong, Wang Dongsheng, Lu Ming, et al. Damage to lifelines during $M_s = 8.1$ earthquake near Qinghai - Xingjiang border[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 77 - 81.(in Chinese))
- [4] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 84 - 88.(Liang Bo, Cai Ying. Dynamic analysis on roadbed of high speed railway in geometric irregular[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(2): 84 - 88.(in Chinese))
- [5] Vinson T S. Geotechnical Engineering in Cold Regions[M]. New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1978.
- [6] Vinson T S, Wilson C R, Bolander P. Dynamic properties of naturally frozen silt[A]. In: Proc. of the 4th International Conference on Permafrost[C]. Alaska, USA: National Academy Press, 1983. 1 315 - 1 320.
- [7] 何平, 朱元林, 张家懿, 等. 饱和冻结粉土的动弹模和动强度[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 170 - 174.(He Ping, Zhu Yuanlin, Zhang Jiayi, et al. The dynamic elastic modulus and dynamic strength of water-saturated frozen silty clay[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(1): 170 - 174.(in Chinese))
- [8] 沈忠言, 张家懿. 冻土退荷回弹动弹模[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增): 35 - 40.(Shen Zhongyan, Zhang Jiayi. Unloaded dynamic elastic modulus of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(Supp.): 35 - 40.(in Chinese))
- [9] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 77 - 81.(Xu Xueyan, Zhong Congli, Chen Yaming, et al. The dynamic characteristic of frozen soil and determination of parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 77 - 81.(in Chinese))
- [10] 凌贤长, 徐学燕, 徐春华, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 456 - 459.(Ling Xianzhang, Xu Xueyan, Xu Chunhua, et al. Study on frozen Harbin silty clay through its measuring tests of ultrasonic velocity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 456 - 459.(in Chinese))
- [11] 徐春华, 徐学燕, 邱明国, 等. 循环荷载下冻土的动阻尼比试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(6): 22 - 25.(Xu Chunhua,

- Xu Xueyan, Qiu Mingguo, et al. Test study on the damping ratio of frozen soil under cyclic vibrating load[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(6): 22 - 25.(in Chinese)
- [12] 赵淑萍, 朱元林, 何平, 等. 冻土动力学参数测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2 677 - 2 681.(Zhao Shupin, Zhu Yuanlin, He Ping, et al. Study on dynamic mechanical parameters of frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 2 677 - 2 681.(in Chinese))
- [13] 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 Lixia, Ling Xianzhang, Xu Xueyan, 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))
- [14] Ladanyi B, Paquin J. Creep behavior of frozen sand under a deep circular load[A]. In: Proc. of the 3rd International Conference on Permafrost[C]. Edmonton, Canada: Nat. Res. Council of Canada, 1978. 679 - 686.
- [15] 朱元林, 何平, 张家懿, 等. 围压对冻结粉土在动荷载下蠕变性能的影响[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增): 20 - 25.(Zhu Yuanlin, He Ping, Zhang Jiayi, et al. Effect of confine pressure on creep behavior of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(Supp.): 20 - 25. (in Chinese))
- [16] 朱元林, 何平, 张家懿, 等. 冻土在振动荷载下的三轴蠕变模型[J]. 自然科学进展, 1998, 8(1): 60 - 62.(Zhu Yuanlin, He Ping, Zhang Jiayi, et al. Triaxial creep model of frozen soil under dynamic loading[J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(1): 60 - 62.(in Chinese))
- [17] 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 Shuping, He Ping, Zhu Yuanlin, et al. The creep characteristic of frozen sand under dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 270 - 274.(in Chinese))
- [18] 杨广庆, 张兴明, 蔡英. 关于高速铁路路基几个问题的分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 1998, 11(1): 56 - 60.(Yang Guangqing, Zhang Xingming, Cai Ying. Analysis of several questions for express railway roadbed[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1998, 11(1): 56 - 60.(in Chinese))
- [19] 马巍, 吴紫汪, 盛煜. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 7 - 11.(Ma Wei, Wu Ziwang, Sheng Yu. Effect of confining pressure on strength behavior of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 7 - 11.(in Chinese))