

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.11.014

分级加载下冻土阻尼比的试验研究

罗 飞^{1,2}, 何依婷¹, 赵淑萍², 朱占元^{1,2}, 毛 磊¹

(1. 四川农业大学 土木工程学院, 四川 都江堰 611830;

2. 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)

摘 要: 利用 MTS-810 型振动三轴试验机对不同加载频率、围压和温度下冻结黏土和冻结黄土的阻尼比变化规律进行研究。结果表明: 不同频率、围压和温度下, 对于冻结黏土, 随动应变幅的增大, 阻尼比呈先减小再缓慢增大的变化趋势; 对于冻结黄土, 阻尼比随动应变幅的增加先减小再逐渐保持不变。相同动应变幅下, 冻结黏土和冻结黄土的阻尼比随加载频率的增加而减小, 随围压的增加变化不大, 温度为 $-0.2\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 阻尼比的变化规律不明显, 温度为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 阻尼比的取值显著小于 $-0.2\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的阻尼比取值。当动应力水平较低时, 阻尼比受频率的影响程度较大; 当动应力水平较高时, 阻尼比受温度的影响程度较大; 在整个加载过程中, 阻尼比受围压的影响程度最小。当动应变幅较小时, 频率对冻结黄土的影响程度要大于冻结黏土, 随动应力水平的增高, 冻结黄土受频率的影响程度逐渐小于冻结黏土。在整个加载过程中, 温度对冻结黄土的影响程度大于冻结黏土, 而围压对冻结黄土的影响程度小于冻结黏土。

关 键 词: 冻土; MTS-810 型振动三轴试验机; 阻尼比; 动应变幅

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 11-3143-07

Experimental study of damping ratio of frozen soil under stepwise loading

LUO Fei^{1,2}, HE Yi-ting¹, ZHAO Shu-ping², ZHU Zhan-yuan^{1,2}, MAO Lei²

(1. College of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan 611830, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The MTS-810 vibration triaxial testing machine is used to study the change law of damping ratio of frozen clay and loess with different loading frequencies, confining pressures and temperatures. The results show that for frozen clay, the damping ratio firstly decreases and then gradually increases with the increase of dynamic strain amplitude under the conditions mentioned above. For frozen loess, the damping ratio firstly decreases and then tends to be a stable value with the increase of dynamic strain amplitude. Damping ratios of frozen clay and frozen loess decrease with the increase of loading frequencies, and changes slightly with the increase of confining pressure under the same dynamic strain amplitude. The change of damping ratio is insignificant with the confining pressure when the temperature is in the range of -0.2 to $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the value of damping ratio of frozen soil at the temperature of $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ is apparently less than that at the temperature of -0.2 to $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Damping ratio is greatly affected by frequency at a relatively low dynamic stress level and is greatly affected by temperature at a relatively high dynamic stress level. In the whole loading process, damping ratio is minimally affected by confining pressure. The influence of frequency on frozen loess is greater than that on frozen clay when the dynamic strain amplitude is at relative low level. With the increase of dynamic stress, the influence of frequency on frozen loess is gradually less than that on frozen clay. In the whole loading process, temperature has greater influence on frozen loess than on frozen clay, while confining pressure has less influence on frozen loess than on frozen clay.

Keywords: frozen soil; MTS-810 vibration triaxial testing machine; damping ratio; dynamic strain amplitude

收稿日期: 2015-07-20

基金项目: 四川省教育厅项目 (No.035Z1041); 村镇建设防灾减灾四川省高等学校工程研究中心项目 (No.CDPMV1407); 四川农业大学“大学生创新创业训练计划”项目 (No.04060692)。

Foundation item: Project supported by the Project of Sichuan Provincial Department of Education (Grant No.035Z1041), the Center Project of Sichuan Provincial Institution of Higher Learning in the Disaster Prevention and Reduction of Villages and Towns (Grant No.CDPMV1407) and the College Students Innovation Training Program of Sichuan Agricultural University (Grant No.04060692).

第一作者简介: 罗飞, 男, 1985 年生, 硕士, 讲师, 主要从事冻土力学和寒区工程方面的研究工作。E-mail: luofei20052104@163.com

1 引言

阻尼比是对冻土地基进行动力反应分析必不可少的参数之一,是衡量土体吸收振动能量能力的一个重要指标。关于冻土阻尼比的研究,国内外学者取得如下主要研究成果:阻尼比随温度的降低而减小^[1],但阻尼比随含水率的变化较复杂;赵淑萍等^[2]的研究结果表明,冻结粉质黏土和冻结细砂的阻尼比随含水率的增加而增大,而徐春华等^[3]的研究结果表明,当含水率变化时,哈尔滨冻结粉质黏土的阻尼比变化不明显;Vinson^[4]的研究表明,阻尼比随含水率和围压的变化较分散;何平^[5]、徐学燕等^[6]、施焯辉^[7]等的研究表明,阻尼比随振动频率的增加而减小,Czajkowski 等^[8]的研究结果表明,频率对冻土阻尼比没有影响;高志华等^[9]的研究结果表明,冻结粉质黏土的阻尼比随围压的增加而增大,随动应变幅的变化较离散;吴志坚等^[10]的研究结果表明,阻尼比随应变幅的增加而减小;王丽霞等^[11]的研究结果表明,冻土的阻尼比随应变幅的增加而减小。

上述成果对生产实践具有一定的理论价值和指导意义,但土具有很强的区域性,不同类别土的工程性质可能存在较大差异,对不同类别的土在不同影响因素下的阻尼比进行测试,研究各个因素对冻土阻尼比的影响程度可为场地土层动力反应分析提供基本保障。鉴于此,利用 MTS-810 型振动三轴试验机对 $-0.2\sim-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内的冻结黏土和冻结黄土开展动三轴试验,研究不同频率、围压和温度下阻尼比随动应变幅的变化关系,及频率、围压和温度对阻尼比的影响规律。

2 试验简介及阻尼比的计算

2.1 试验简介

试验在 MTS-810 型振动三轴试验机上进行,仪器的控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验采用青藏铁路沿线黏土和兰州黄土,物理参数见表 1。参照标准^[12]和规范^[13]制备重塑土样,按 Seed 等^[14]建议的方法,对试样分级施加轴向动荷载,每一个试样的加载过程一共分为固结过程、轴向静荷载施加过程、轴向静荷载保持过程和轴向动荷载施加过程。每一级动荷载振动 10 次,动荷载为正弦波。

表 1 物理参数条件表
Table 1 Table of physical parameters

土质	液限/%	塑限/%	塑性指数	含水率/%	干密度/(g/cm ³)
黏土	39.3	20.8	18.5	21.5	1.77
黄土	29.36	14.92	14.44	16.2	1.72

对不同频率、围压和温度下冻结黏土和冻结黄土的阻尼比进行试验研究,具体条件如下:①当 $T=-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma_3=0.3\text{ MPa}$ 时,频率分别为 0.5、1、3、5、7、10、13、15、17、20 Hz;②当 $T=-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f=5\text{ Hz}$ 时,围压分别为 0.3、0.6、1、2 MPa;③当 $f=5\text{ Hz}$, $\sigma_3=0.3\text{ MPa}$ 时,温度分别为 -0.2 、 -0.6 、 -1 和 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当试样累积应变达到 25%,或加载级数达到 27 级时,试验终止。

2.2 阻尼比的计算

对于黏-弹性材料,阻尼比的计算公式为

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A_L}{A_T} \quad (1)$$

式中: A_L 为滞回曲线 ABDEA 所围成的面积,如图 1 所示(图中 σ_d 和 ε_d 分别为各个时刻的动应力和动应变),等于系统在一个荷载周期内耗损的能量; A_T 为三角形 OMN 的面积,等于振动系统在一个荷载周期内储蓄的最大弹性应变能。

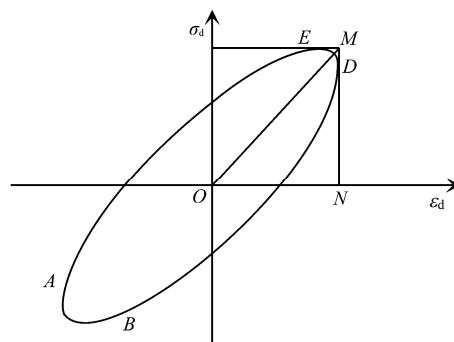


图 1 黏-弹性模型中滞回曲线示意图

Fig.1 Hysteretic curve in visco-elastic model

由于动三轴试验测试的动应变幅范围^[15]为 $10^{-2}\sim 10^{-4}$,且冻土不是理想黏-弹性材料,当动应变幅处于该范围内时,土中会产生残余应变,在滞回曲线中表现为不闭合,如图 2 所示。由图可知,滞回曲线不是光滑曲线,也不是真椭圆。在计算冻土滞回曲线的面积时,常用的方法有两类:①采用椭圆曲线拟合数据点,以椭圆的面积作为滞回曲线面积;②将实测数据点首尾用直线相连形成闭合多边形,将多边形的面积作为滞回曲线面积。根据文献^[16],连接加载起点和加载终点,以多边形的面积作为土体一个周期内耗散的能量。

关于冻土最大弹性应变能的计算,各位学者对三角形的取法不尽相同。例如,在如图 3 所示滞回曲线中,施焯辉^[7]取为三角形 OM_1N ,高志华等^[9]

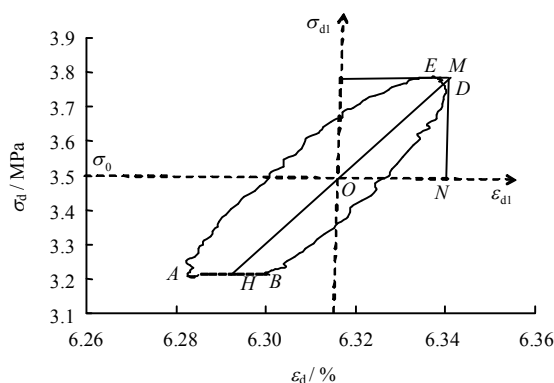


图 2 冻土中滞回曲线示意图
Fig.2 Hysteretic curve of frozen soil

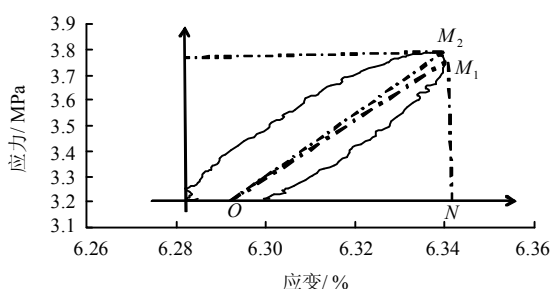


图 3 滞回曲线中三角形的选取
Fig.3 Triangle selection in hysteretic curve

取为三角形 OM_2N ，分别将三角形 OM_1N 和三角形 OM_2N 面积的 1/4 作为系统储存的最大弹性应变能。本文采用三角形 OM_2N 的面积作为一个周期内土体存储的最大应变能。

3 试验结果分析

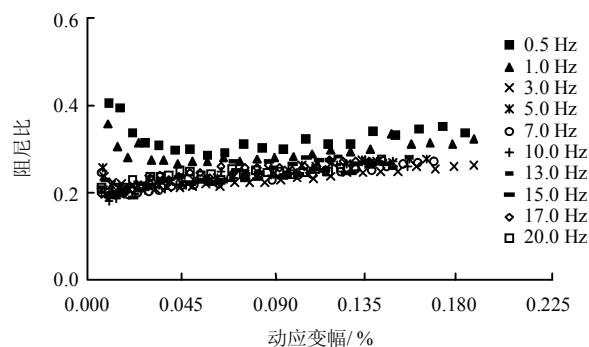
为了探索荷载振动频率、围压、温度和动应变幅对冻土阻尼比的影响规律，利用式 (1) 对其阻尼比进行计算，分别绘制不同频率、围压和温度下冻土阻尼比随动应变幅的变化关系曲线，以下基于试验结果分别详细讨论。

3.1 频率对冻土阻尼比的影响

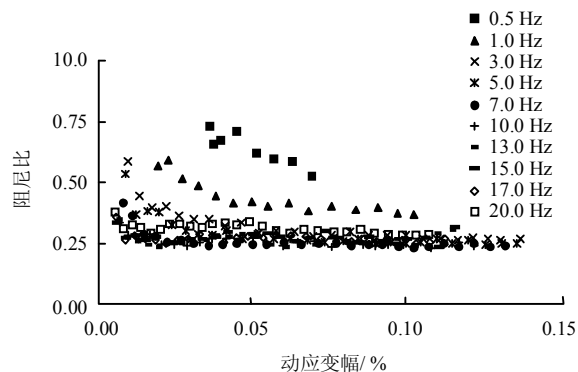
不同频率下，冻结黏土和冻结黄土的阻尼比随动应变幅的变化关系曲线如图 4 所示。从图中可以看出，随着动应变幅的增加，对于冻结黏土，阻尼比呈先减小再缓慢增大的变化趋势；对于冻结黄土，阻尼比先减小再逐渐趋于稳定。

相同动应变幅下，冻结黏土和冻结黄土的阻尼比随加载频率的增加而减小，变化规律基本相同。当频率较低 (<3 Hz) 时，相同动应变幅下阻尼比值变化较显著；当频率较高 (≥ 3 Hz) 时，阻尼比值的变化不明显，表明低频加载对冻土阻尼比的影响

较大，高频加载对阻尼比的影响较小。这是因为动荷载振动频率反映加、卸载过程的快慢，随加载频率的增大，加、卸载过程时间较短，土中变形尚未完全呈现加载过程就已结束，土中耗能较少，阻尼比呈逐渐减小趋势。



(a) 冻结黏土 ($\sigma_3 = 0.3$ MPa, $T = -1$ °C)



(b) 冻结黄土 ($\sigma_3 = 0.3$ MPa, $T = -1$ °C)

图 4 不同频率下阻尼比随动应变幅的变化关系
Fig.4 Relationships between damping ratio and dynamic strain amplitude with different vibration frequencies

另外，动荷载作用过程中，土中冰颗粒之间、矿物颗粒之间以及冰颗粒与矿物颗粒之间存在相对滑移，颗粒趋于定向排列，在该滑移和定向排列的过程中，颗粒间的摩擦作用、冰或未冻水的黏滞性等内部阻力消耗能量。频率越高，颗粒间的滑移和定向排列时间越短、程度越弱，有利于阻尼比减小。

3.2 围压对冻土阻尼比的影响

不同围压下，阻尼比随动应变幅的变化关系曲线如图 5 所示。由图可知，加载初期土颗粒、土-冰颗粒及冰-冰颗粒之间滑移和定向排列较显著，阻尼比逐渐减小；随加载过程的持续，动应变幅逐渐增大，对于冻结黏土，阻尼比再缓慢增大；对于冻结黄土，阻尼比逐渐趋于稳定。

围压反映土中应力水平的高低，对土体具有强化作用和弱化作用。一定范围内，围压越高，强化

作用越显著,土颗粒、土-冰颗粒及冰-冰颗粒之间滑移和定向排列越困难,耗能也越少,阻尼比较小。相同动应变幅下,对于冻结黏土和冻结黄土,阻尼比随围压的增加变化不明显,阻尼比变化幅度大约为 0.06。可见,试验围压(0.3~2 MPa)对冻土的阻尼比影响较小。这是因为在试验围压范围内,冻土骨架尚处于稳定状态,阻尼比不随围压的增加显著变化。

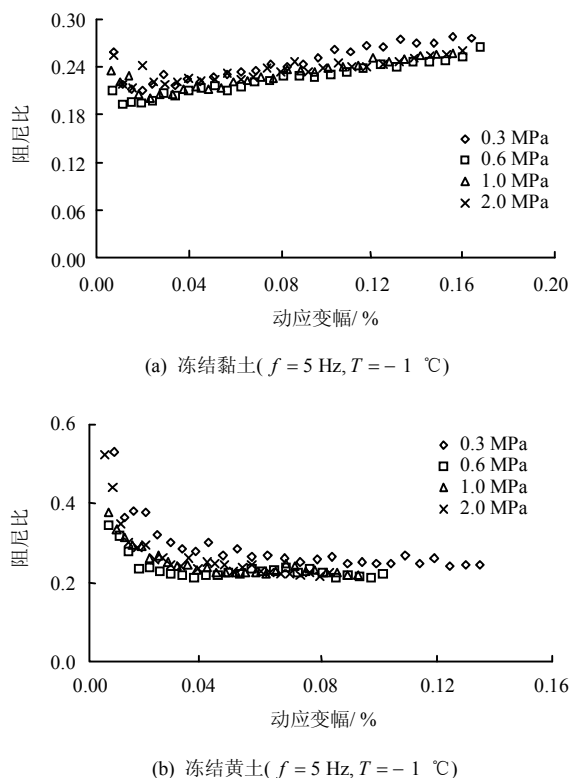


图 5 不围压下阻尼比随动应变幅的变化关系
Fig.5 Relationships between damping ratio and dynamic strain amplitude with different confining pressures

3.3 温度对冻土阻尼比的影响

不同温度下,阻尼比随动应变幅的变化关系曲线如图 6 所示。从图中可以看出,对于冻结黏土,当动应变幅较小(<0.02%)时,土中产生的残余变形较小,阻尼比具有略有减小趋势,随着动应变幅的增大,阻尼比缓慢增大;对于冻结黄土,随着动应变幅的增大,阻尼比先减小再逐渐保持不变。

当温度处于-0.2~-1.0 °C之间时,所取温度区间较小,冻结黏土和冻结黄土的阻尼比随温度的变化规律不明显,但整体具有逐渐减小趋势,当温度为-2 °C时阻尼比最小。这是因为温度较低,土中未冻水的含量较少,固态冰晶对土颗粒的胶结作用较强,土对动能吸收的能力越弱,阻尼比也较小。

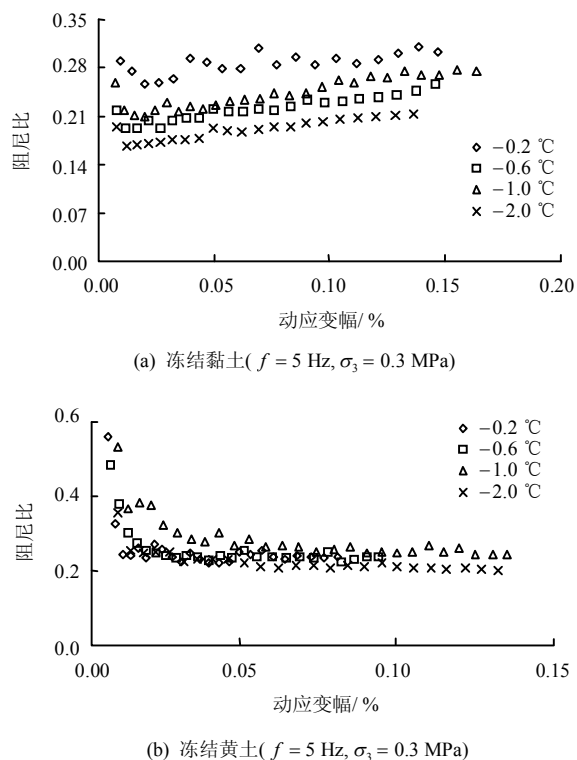


图 6 不同温度下阻尼比随动应变幅的变化关系
Fig.6 Relationships between damping ratio and dynamic strain amplitude with different temperatures

4 温度、频率和围压的影响程度分析

在试验频率、围压和温度内,对于冻结黏土,随动应变幅的增加,阻尼比先减小再缓慢增大;对于冻结黄土,阻尼比先减小再逐渐保持不变。Vinson等^[4]的研究结果表明,当应变小于 10^{-5} 时,各类土的阻尼比几乎不变;当应变在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 时,对于粉土和黏土,随应变幅的增加阻尼比会逐渐增大,但对于砂土,阻尼比随应变幅的增加而逐渐变小。可见,不同土质的阻尼比随动应变幅的变化具有不同的变化规律。

为了综合评价试验频率、围压和温度对冻结黏土和冻结黄土的阻尼比的影响程度,采用相同动应变幅下阻尼比的相对极差来研究数据点的离散程度。相同动应变幅下,阻尼比的相对极差可表示为

$$R_{\lambda\lambda} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\bar{\lambda}} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 和 $\lambda_{\min}$ 分别为相同动应变幅值下试验温度、频率和围压变化范围内阻尼比的最大值和最小值; $\bar{\lambda}$ 为阻尼比的平均值; $R_{\lambda\lambda}$ 反映相同动应变幅值下阻尼比的离散程度, $R_{\lambda\lambda}$ 越大,表明土的阻尼

比受到的影响程度越大。

在试验频率范围 (0.5~2.0 Hz)、围压范围 (0.3~2.0 MPa) 和温度范围 (-0.5~-10.0 °C) 内, $R_{\lambda\lambda}$ 随动应力幅的变化关系曲线如图 7 所示。由图可知, $R_{\lambda\lambda}$ 随动应变幅的增加具有逐渐减小趋势, 加载初期时 $R_{\lambda\lambda}$ 较大, 在冻结黄土中表现更明显。主要是因为加载初期时外荷载破坏土的结构, 使得阻尼比受频率、围压和温度影响较显著, 随动应变幅的逐渐增加, 动应力水平增高, 外荷载对土体的压密作用增强, 土的结构趋于稳定, 阻尼比受频率、围压和温度的影响程度逐渐减小, $R_{\lambda\lambda}$ 具有逐渐减小趋势。

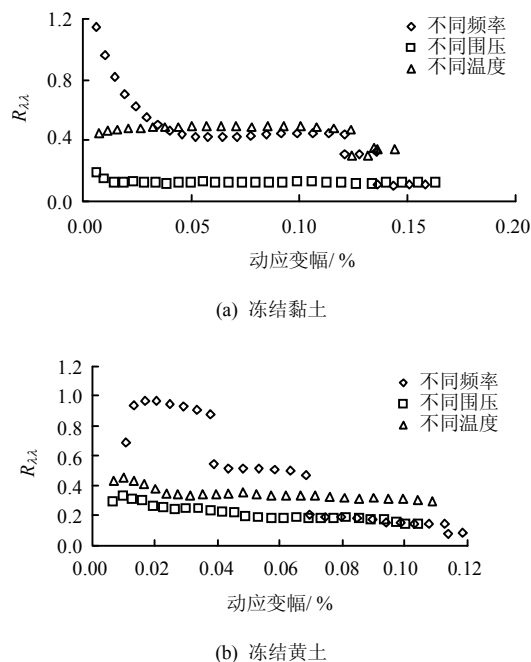


图 7 两类土的相对极差—动应变幅关系曲线

Fig.7 Relationships between relative range and dynamic strain amplitude of two categories of soil

当动应变幅较小时, 在试验频率内, 两类土的 $R_{\lambda\lambda}$ 较大; 试验围压内, $R_{\lambda\lambda}$ 最小; 在试验温度内, $R_{\lambda\lambda}$ 居中。当动应变幅较大时, 试验温度内, $R_{\lambda\lambda}$ 较大; 试验频率和围压内, $R_{\lambda\lambda}$ 较小。可见, 当冻结黏土和冻结黄土处于较低动应力水平时, 其阻尼比受频率影响较严重; 当处于较高动应力水平时, 阻尼比受温度影响较严重; 在整个加载过程中, 阻尼比受围压的影响程度最小。

不同类别的土的结构可能存在较大不同, 从而阻尼比受频率、围压和温度的影响程度可能存在一定差异。绘制相同条件下冻结黏土和冻结黄土的

$R_{\lambda\lambda}$ 随动应力幅的变化关系曲线如图 8 所示。由图可知, 当动应变幅较小时, 频率对冻结黄土的影响程度要大于冻结黏土, 随动应力水平的增高, 冻结黄土受频率的影响逐渐小于冻结黏土。在整个加载过程中, 温度对冻结黄土的影响程度大于冻结黏土, 而围压对冻结黄土的影响程度小于冻结黏土。

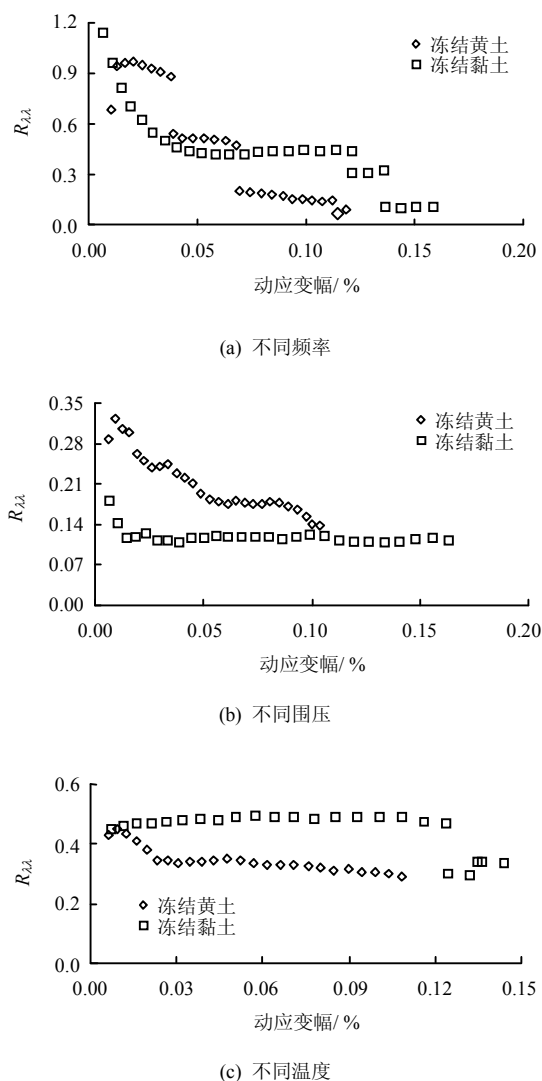


图 8 不同试验条件下相对极差—动应变幅关系曲线

Fig.8 Relationships between relative range and dynamic strain amplitude with different test conditions

5 结 论

(1) 随动应变幅的增加, 冻结黏土的阻尼比呈先减小再缓慢增大的变化趋势, 而冻结黄土的阻尼比先减小再逐渐保持不变。

(2) 相同动应变幅下, 两类土的阻尼比随加载频率的增加而减小, 随围压的增加变化不大, 温度为 -0.2~-1.0 °C 时, 阻尼比的变化规律不明显, 温度为 -2 °C 时阻尼比最小。

(3) 当土体处于较低动应力水平时, 阻尼比受频率影响较严重, 而较高动应力水平时阻尼比受温度影响较严重; 在整个加载过程中, 阻尼比受围压的影响程度最小。

(4) 动应变幅较小时, 频率对冻结黄土的影响程度要大于冻结黏土, 随动应力水平的增高, 冻结黄土受频率的影响程度逐渐小于冻结黏土。在整个加载过程中, 温度对冻结黄土的影响程度大于冻结黏土, 而围压对冻结黄土的影响程度小于冻结黏土。

参考文献

- [1] HUNAIDI M O, CHEN P A, RAINER J H, et al. Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 510—514.
- [2] 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(增刊 2): 2677—2681.
ZHAO Shu-ping, ZHU Yuan-lin, He Ping, et al. Testing study on dynamic mechanics parameters of frozen soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.2): 2677—2681.
- [3] 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 Chun-hua, XU Xue-yan, QIU Ming-guo, et al. Experimental study on dynamic damping ratio of frozen soil under cyclic loading[J]. **Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture**, 2002, 35(6): 22—25.
- [4] VINSON T S. Response of frozen ground to dynamic loadings: Chapter 9 in geotechnical engineering in cold regions[M]. [S. l.]: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1978: 405—458.
- [5] 何平. 饱和冻结粉土的动力特性[D]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1993.
HE Ping. Dynamic mechanics characteristics of saturated frozen soil[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 1993.
- [6] 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 Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(5): 77—81.
- [7] 施焯辉. 动荷载作用下高温冻土路基的动力响应分析[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006.
SHI Ye-hui. Study on the dynamic response of high-temperature frozen soil roadbed under dynamic road[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [8] CZAJKOWSKI R L, VINSON T S. Dynamic properties of frozen silt under cyclic loading[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Div., ASCE**, 1980, 106(GT9): 963—980.
- [9] 高志华, 赖远明, 熊二刚, 等. 循环荷载作用下高温-高含冰量冻土特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1744—1751.
GAO Zhi-hua, LAI Yuan-ming, XIONG Er-gang, et al. Experimental study of characteristics of warm and ice-rich frozen clay under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1744—1751.
- [10] 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-ming, 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.
- [11] 王丽霞. 冻土动力性能与冻土地路基地震响应反应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
WANG Li-xia. Study on frozen soil dynamic behavior and earthquake response of embankment on frozen soil site[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2004.
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50123/T-99 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50123/T—99 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50269/T-97 地基动力特性测试规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

- The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50269/T—97 Foundation dynamic properties test specification[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [14] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, 1971, 97(9): 1249—1273.
- [15] 张克绪. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 9—29.
- ZHANG Ke-xu. Soil dynamics[M]. Beijing: Earthquake Press, 1989: 9—29.
- [16] 罗飞, 赵淑萍, 马巍, 等. 青藏冻结黏土滞回曲线形态特征的定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 208—215.
- LUO Fei, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Quantitative research on morphological characteristics of hysteretic curves of frozen Qinghai-Tibet clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(1): 208—215.
- [17] 罗飞. 冻土动力学参数的计算方法及试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- LUO Fei. Study of computational and experimental method on mechanical parameters of frozen soil under dynamic loading[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.
-
- 上接第 3127 页
- [18] 董陇军, 李夕兵. 岩石试验抗压、抗拉区间强度及代表值可信度研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 31(12): 1969—1975.
- DONG Long-jun, LI Xi-bing. Interval parameters and credibility of representative values of tensile and compression strength tests on rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 31(12): 1969—1975.
- [19] 凌建明, 刘尧军. 卸荷条件下地下洞室围岩稳定的损伤力学分析方法[J]. 石家庄铁道学院学报, 1998, 11(4): 10—17.
- LING Jian-ming, LIU Yao-jun. Damage mechanics theory for stability analysis of surrounding rock of underground excavation[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute**, 1998, 11(4): 10—17.
- [20] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 岩体边坡非连续非线性卸荷及流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(6): 210—216.
- ZHOU Wei-yuan, YANG Ruo-qiong, YAN Gong-rui. Nonlinear and discontinuous deformation and rheological analysis for unloaded rock slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(6): 210—216.
- [21] 赵明阶, 许锡宾, 徐蓉. 岩石在三轴加卸荷过程中的一
- 种本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 626—631.
- ZHAO Ming-jie, XU Xi-bing, XU Rong. Constitutive model of rock under triaxial loading and unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(5): 626—631.
- [22] 高延法, 陶振宇. 岩石强度准则的真三轴压力试验检验与分析[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(4): 26—32.
- GAO Yan-fa, TAO Zhen-yu. Examination and analysis of true triaxial compression testing of strength criteria of rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(4): 26—32.
- [23] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 11(27): 2205—2213.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 11(27): 2205—2213.
- [24] 高玉春, 徐进, 何鹏. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456—460.
- GAO Yu-chun, XU Jin, HE Peng. Study of mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 456—460.