

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111047

# 冻融循环作用下西宁地区黄土动力特性试验研究\*

唐鑫<sup>1,2</sup>, 张吾渝<sup>1,2</sup>, 童国庆<sup>1,2</sup>, 唐雄宇<sup>1,2</sup>, 刘成奎<sup>3,4</sup>

(1. 青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 青海省建筑建材科学研究院有限责任公司, 青海 西宁 810008)

**摘要:**黄土作为一种广泛分布在青海省境内的特殊土,长期承受冻融循环与地震荷载的双重影响,其地震易损性和水敏性的问题一直被广泛讨论。为寻求黄土在冻融循环和动荷载耦合作用下动力特性的变化规律,以西宁地区黄土为研究对象,施加正弦波形式的循环动荷载,开展动三轴试验,分析了围压、冻融循环次数和动剪应变幅值 $\gamma_d$ 对黄土的骨干曲线、动剪切模量 $G_d$ 、动剪切模量比 $G_d/G_{d_{max}}$ 及阻尼比 $\lambda$ 的演变规律。结果表明:黄土的骨干曲线在经历6次冻融循环后趋于稳定,可将骨干曲线的发展过程分为弹性阶段和弹塑性阶段;分别采用Hardin-Drnevich模型和改进的Hardin-Drnevich模型对动剪切模量曲线进行拟合,发现用改进的Hardin-Drnevich模型拟合动力参数效果较好;随着围压的降低, $G_d/G_{d_{max}}-\gamma_d$ 关系曲线分布更为分散且有逐渐减小的变化趋势;随着 $\gamma_d$ 的增大, $\lambda$ 不断增大,且土体在各围压条件下,经历不同冻融循环次数后, $G_d/G_{d_{max}}$ 和 $\lambda$ 存在最大值和最小值。该研究初步掌握了青海地区黄土在冻融循环作用下的动力学参数,研究成果可为寒区抗震设计提供设计参考。

**关键词:**黄土; 冻融循环; 围压; 动剪应变幅值 $\gamma_d$ ; 动力特性参数

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0887-09

## Experimental Study on Dynamic Characteristics of Loess in Xining Area under Freeze-thaw Cycles

TANG Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Wuyu<sup>1,2</sup>, TONG Guoqing<sup>1,2</sup>, TANG Xiongyu<sup>1,2</sup>, LIU Chengkui<sup>3,4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;  
2. Qinghai Province Key Laboratory of Building Energy-saving Materials and Engineering Safety, Xining 810016, China;  
3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Green Building and Eco-community, Xining 810008, China;  
4. Qinghai Building and Materials Research Co., Ltd, Xining 810008, China)

**Abstract:** As a kind of special soil widely distributed in Qinghai Province, loess has long been impacted by both freeze-thaw cycle and seismic loading. The seismic susceptibility and water sensitivity of loess have been widely discussed. Taking loess in Xining area as the research object, the change rule of dynamic properties of loess under the coupling effect of freeze-thaw cycle and dynamic load was studied. The dynamic triaxial test with cyclic dynamic load in the form of sinusoidal wave was carried out, and the evolution laws of perimeter pressure, the number of freeze-thaw cycles and the amplitude

\* 收稿日期:2021-11-11;修回日期:2022-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52168054)、青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室开放基金计划(KLKf-2021-007)资助

作者简介:唐鑫(1998—),男,硕士研究生。主要从事岩土及地下工程研究。E-mail:tx1998thomp@163.com

通讯作者:张吾渝(1969—),女,教授,硕士。主要从事岩土及地下工程研究。E-mail:qdzwy@163.com

of dynamic shear strain  $\gamma_d$  on the backbone curve of loess, the dynamic shear modulus  $G_d$ , the dynamic shear modulus ratio  $G_d/G_{d\max}$ , and the damping ratio  $\lambda$  were analyzed. The results show that: the backbone curve of loess tends to be stabilized after 6 freeze-thaw cycles, and the development process of the backbone curve can be divided into elastic and elastoplastic stages; the dynamic shear modulus curve is fitted by Hardin-Drnevich model and improved Hardin-Drnevich model respectively, and it is found that the dynamic parameters are fitted better with the improved Hardin-Drnevich model; with the reduction of the perimeter pressure, the distribution of  $G_d/G_{d\max}-\gamma_d$  relationship curve is more dispersed and has a tendency to decrease gradually; with the increase of  $\gamma_d$ ,  $\lambda$  is increasing; after the loess experiences different numbers of freezing and thawing cycles, there are maximum and minimum values of  $G_d/G_{d\max}$  and  $\lambda$  under various conditions of perimeter pressures. This study provided a preliminary understanding on the dynamic parameters of loess in the Qinghai region under the action of freeze-thaw cycle, and the research results can provide references for seismic design in cold regions.

**Keywords:** loess; freeze-thaw cycle; confining pressure; dynamic shear strain amplitude  $\gamma_d$ ; dynamic characteristic parameter

## 0 引言

黄土古称“黄壤”，主要分布在青海省东部，是一种具有多孔性柱状节理的特殊土<sup>[1]</sup>。近年来随着国家“一带一路”战略实施，沿线西北黄土地区的基础建设快速发展。青海省地理位置特殊，既是黄土高原与青藏高原的交界处，也是“丝绸之路经济带”的重要枢纽。然而在实际工程建设中，由于青海地区常年气温周期波动的影响和黄土自身的遇水湿陷特性，因地震作用产生的地裂、震陷、滑坡等自然灾害给人民群众的生活带来了巨大的影响，阻碍城镇设施的发展。如2010年4月14日青海省玉树市发生7.1级大地震和2021年5月22日玛多县发生7.4级大地震，对青海地区的经济生活产生了巨大的冲击。因此，在青海地区进行工程设计和完善建设法规过程中，不仅要结合当地黄土特殊的力学性质，还需考虑到地震荷载、冻融循环等自然条件带来的影响。

目前国内外进行土体在地震荷载作用下动力特性试验研究主要采用H. B. Seed等<sup>[2]</sup>提出的方法：将不规则的地震波简化为等幅简谐波，通过施加正弦波形式的循环荷载研究土体在地震荷载作用下的动剪切模量、阻尼比等动力学参数。付惠姣等<sup>[3]</sup>基于不同土样研究埋深与动力学参数的关系，以不同深度划分了不同土体的 $G/G_{\max}-\gamma$ 关系曲线。赵杰等<sup>[4]</sup>通过共振柱试验对海洋地基土体进行动力

特性试验研究，发现阻尼比与剪应变呈正相关的关系。许俊豪等<sup>[5]</sup>以温度、含水率和围压为变量，提出用Hardin-Drnevich模型能较好拟合高含冰量冻土在地震荷载作用下动应力应变曲线，且变量对拟合参数影响较大。崔凯等<sup>[6]</sup>通过动三轴试验对川西混合土的动力特性进行分析，得出围压的增大提高了土体的阻尼比和动剪切模量。

在研究地震荷载对黄土动力特性影响之外，还需结合青藏地区的气候特点，分析冻融循环作用对黄土力学性质劣化的影响，之前多数研究主要对冻土进行低温动三轴试验，通过控制不同温控条件研究其动力学特性<sup>[7-8]</sup>，近几年来有部分学者开始考虑冻融循环作用对其他土体动力学参数的影响。孙静等<sup>[9]</sup>对粉砂土进行了动三轴试验，发现冻融循环对阻尼比影响不大，对动模量的影响较为显著。苏永奇等<sup>[10-11]</sup>研究显示，青藏粉质黏土在经历6次冻融循环次数后用Hardin-Drnevich模型表征的动力参数趋于稳定，且阻尼比变化幅度较小。崔高航等<sup>[12]</sup>基于4种环境因素提出粉砂土的动力参数经验公式，认为冻融循环次数与动力特性的关系不是单一线性的趋势。

综上所述，青海地区地处喜马拉雅-地中海地震带，考虑动荷载和冻融作用对黄土动力特性的影响研究成果十分有限，而大震级的地震在青海时常发生，本地区黄土的动力特性规律还需进一步深入的研究。鉴于此，本文以西宁地区黄土为研究对象，通过冻融循环试验，研究不同冻融循环次数、动剪

应力幅值和围压对黄土动力特性的演化规律,通过骨干曲线和动本构模型比较不同冻融循环次数后土体力学性质变化规律,以动剪切模量比  $G_d/G_{d\max}$  和阻尼比  $\lambda$  为动力参数指标,从冻融循环对土体结构改变的机理分析试验数据,以期为寒区工程的设计、抗震计算提供参考依据。

## 1 试验方案

### 1.1 土的基本物理性质试验及试样制备

本试验用土取自西宁市城北区某场地的  $Q_3$  黄土,取土深度为 3~4 m。经观察土样颜色呈黄色,土质较为松散、均匀,基本物理性质指标见表 1。试验前,由于黄土中存在少量植物根系,因此将黄土中的杂物剔除,再对黄土进行碾碎、烘干,然后将土样过 2 mm 孔径筛<sup>[13]</sup>,配置最优含水率的筛下土,平铺在不吸水的托盘内,用保鲜膜密封保存 24 h,使水分在土样中分布均匀。将制备好的土样分 5 层击实,击实后对土表面进行刮毛处理,制成直径为 39.1 mm,高为 80 mm 的圆柱形试样,为减小试验的误差,试样的压实度取 95%,含水率取 13%,每组制备 3 个力学性质相同的平行试样。试样制备完成后用保鲜膜进行包裹,防止试样水分的挥发,便于下一步的冻融循环试验。

表 1 黄土物理性质指标

Table 1 Physical parameters of compacted loess

天然含水率 $\omega/\%$	比重 $G_s$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	最大干密度 $\rho_{d\max}/(g\cdot cm^{-3})$	最优含水率 $\omega_{op}/\%$
7.91	2.71	24.65	14.19	1.84	13.09

### 1.2 试验仪器

冻融循环试验采用 N30 微电脑冷冻控制器如图 1 所示,该控制器提供制冷、供液、化霜等功能,工作温度范围  $-40\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ ,使其具有较高精度满足试验对冻融的要求。动三轴试验采用的设备为英国 GDS 双向动态三轴试验系统如图 1 所示,该系统由加载系统、压力控制系统、通道动态控制系统和软件系统组成,仪器可施加的动荷载范围为 0~20 kN,荷载频率最大为 10 Hz,通过 GDSLAB 软件操控试验和处理数据。

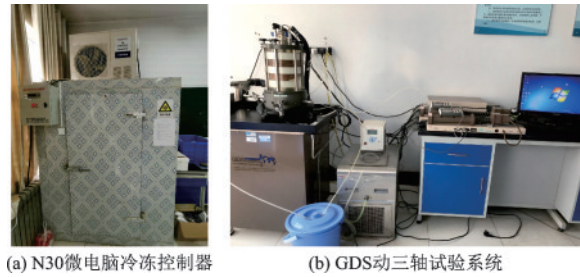


图 1 试验仪器

Fig.1 Test instruments

### 1.3 试验方案

试样的冻结使用 N30 微电脑冷冻控制器冻结 12 h,冻结采用的温度根据 W. Zhang<sup>[14]</sup>的研究经验,结合西宁市气象局相关资料所示,确定为  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 。融化过程的温度与室温相同,在恒定温度作用下解冻 12 h。根据现有的研究成果<sup>[14-15]</sup>,该地区重塑黄土经历 7~10 个冻融循环周期后强度特性趋于稳定,因此本实验设定 6 组不同冻融循环次数试验,冻融循环周期分别为 0、2、4、6、8、10 次。有研究表明<sup>[14]</sup>重塑黄土在经历 1~10 个冻融循环次数后体积的增幅约为 1%~2%,变化不显著。试验过程中为尽量减小初始体积的改变,冻融循环过程中试样采用密封袋和保鲜膜双重密封,以确保试验的准确性。

动三轴加载过程分为固结阶段和循环荷载施加阶段。固结阶段采用等压固结的方式,即固结应力比  $K_c = \sigma_{1c}/\sigma_{3c} = 1$ 。根据取土深度和土质情况设定  $\sigma_3 = 30、60、90\text{ kPa}$ 。当 1 h 试样内固结排水量变化不大于  $0.1\text{ cm}^3$ ,试样固结完成<sup>[13]</sup>。循环荷载施加的方式采用分级加载,以正弦波波形加载,按青海省最大抗震设防烈度 VIII 度,设定分级加载的每个阶段振动 20 次<sup>[2]</sup>,加载频率为 1 Hz,第一级动荷载  $\sigma_d$  取 10 kPa,每级逐级累加 10 kPa。取应变标准作为试样的破坏标准,当试样的轴向变形达到 5% 时,于本阶段振动结束后停止加载,具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 2 Test program

试样编号 $l$	冻融循环次数	动应力 $\sigma_d/\text{kPa}$	围压 $\sigma_3/\text{kPa}$	循环振动次数
1~18	0, 2, 4, 6, 8, 10	10, 20, 30, 40, 50, ...	30, 60, 90	每个阶段 20 次

## 2 试验结果分析

### 2.1 骨干曲线

通过数据采集系统可得到动三轴试验过程中每一级加载轴向动应力 $\sigma_d$ 与轴向动应变 $\epsilon_d$ 的关系,由下式算出动剪应力幅值 $\tau_d$ 和动剪应变幅值 $\gamma_d$ :

$$\tau_d = \sigma_d / 2 \quad (1)$$

$$\gamma_d = \epsilon_d (1 + \mu) \quad (2)$$

式中, $\mu$ 表示试样的动泊松比,根据徐学燕等<sup>[16]</sup>之前对动泊松比的分类,取值为0.4。

为直观体现循环荷载与冻融循环耦合作用对黄土动力特性的影响,采用骨干曲线( $\tau_d$ - $\gamma_d$ 曲线)对试样的动应力应变关系进行表征。试验数据选取

一定间隔动剪应变幅值 $\gamma_d$ 及其对应的动剪应力幅值 $\tau_d$ ,便于后续直观的比较和分析。

图2为黄土在不同围压条件下的骨干曲线。由图可看出,当冻融循环次数从0-6次增加时,在相同动剪应变条件下动剪应力逐渐降低,且随着冻融循环次数的增加幅度降低逐渐减小;当冻融循环次数由6~10次增加时,黄土在不同围压对应的骨干曲线不尽相同, $\sigma_3=30$  kPa时,骨干曲线整体上变化趋势随冻融循环次数的增大呈下降的变化,6次冻融循环后曲线趋于稳定,下降的速率大幅减缓;当 $\sigma_3$ 增大到60 kPa时,骨干曲线出现先缓慢上升后有所下降的趋势。而当 $\sigma_3$ 增大到90 kPa时,6次冻融循环后骨干曲线随冻融循环次数的增加逐渐缓慢上升。由此可见,试样在6次冻融循环后剪应力-应变曲线趋于稳定。

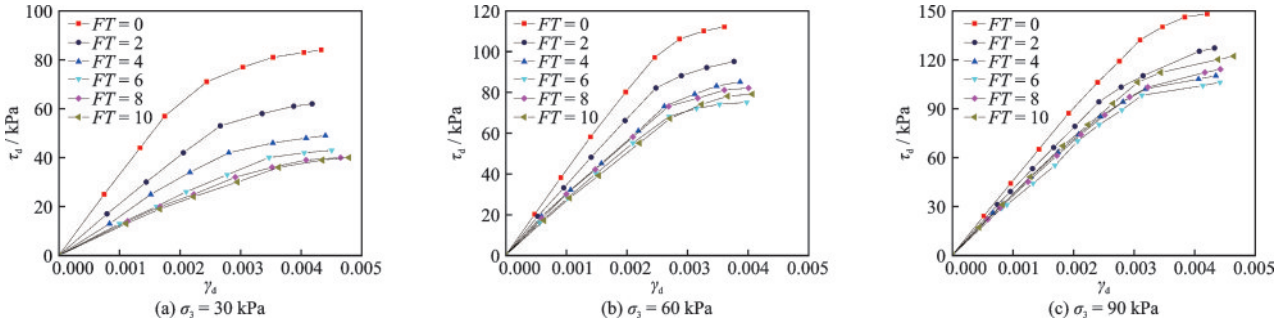


图2 不同围压条件下黄土的骨干曲线

Fig.2 The backbone curves of loess under different confining pressures

注:图中FT代表冻融循环次数

从剪应力-应变图像中可看出,加载的过程可分为两个阶段,初期为土体的弹性阶段,在动剪应变幅值 $\gamma_d < 0.003$ 时剪应变随剪应力的增长近似呈线性增长;当 $\gamma_d > 0.003$ 土体进入弹塑性阶段,剪应变依旧随剪应力增长但增长速度明显减缓,为直观体现两阶段冻融循环和围压对黄土动力特性的影响,取 $\gamma_d = 0.001$ 和 $\gamma_d = 0.0035$ 时动剪应力变化的曲线进行分析如图3所示。对于相同围压,动剪应力幅值 $\tau_d$ 在两阶段随冻融循环次数变化的规律趋势一致。对于不同围压, $\tau_d$ 在同一阶段随冻融循环次数变化的差异较大,如 $\sigma_3 = 30$  kPa, $\gamma_d = 0.0035$ 的试样在经历2,4,6,8,10次冻融循环后 $\tau_d$ 相对未冻融试样分别减少了27.1%,43.1%,50.3%,55.5%,56.0%,当 $\sigma_3$ 增大到90 kPa时,试样在经历2,4,6,8,10次冻融循环后 $\tau_d$ 相对未冻融试样分别减少了17.7%,25.9%,28.7%,24.9%,19.9%。

上述试验结果表明,围压对骨干曲线的影响尤为显著,随着围压的增大,冻融循环对土体强度的衰减作用逐渐减弱。试样在冻融循环的过程中伴随着土体结构的改变和水分的迁移,在冻结的过程中,土中液态的水转化为固态冰,且整个系统处于封闭状态,试样的质量未发生变化,水分凝固的过程伴随着体积的膨胀,对土颗粒产生了挤压,改变了原有土体的孔隙特征和土骨架的结构,土体内部形成了新的水分迁移通道,因此在经历2次冻融循环作用后土体强度出现明显的衰减,骨干曲线出现大幅的下降,冻融循环作用对土体的损坏尤为明显。在试样经过6次冻融循环后,土体水分的重分布逐渐形成,水分迁移通道趋于稳定,同时围压对土体的压密作用,抵消了一部分因冻融循环对土体强度的劣化作用,这解释了当 $\sigma_3 = 60$  kPa和 $\sigma_3 = 90$  kPa时黄土骨干曲线出现了缓慢的上升。

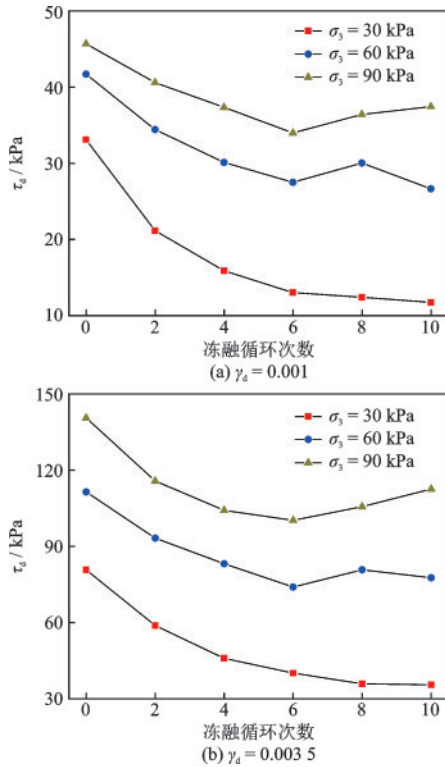


图3  $\tau_d$ 随不同冻融次数的变化曲线

Fig.3 Variation curves of  $\tau_d$  with different freezing and thawing cycles

## 2.2 动本构模型与拟合参数

常见描述动剪切模量曲线的模型包括 Hardin-Drnevich 模型<sup>[17]</sup> (简称 H-D 模型), 改进的 Hardin-Drnevich 模型 (简称改进的 H-D 模型) 等。其中最为经典的 Hardin-Drnevich 关系式如下:

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \quad (3)$$

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma_d} \quad (4)$$

$$G_{d\max} = G_d|_{\gamma_d \rightarrow 0} = 1/a \quad (5)$$

$$\tau_{dult} = \tau_d|_{\gamma_d \rightarrow +\infty} = 1/b \quad (6)$$

式中,  $a, b$  为试验的拟合参数,  $G_d$  为动剪切模量,  $G_{d\max}$  为最大动剪切模量,  $\tau_{dult}$  为最终剪应力幅值。根据试验结果, 绘制  $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$  关系曲线, 令该关系式中  $\gamma_d \rightarrow 0$ , 通过拟合得到拟合曲线截距的倒数  $1/a$ , 即可得到最大动剪切模量, 拟合参数  $a$  越大, 对应试样的最大动剪切模量越小; 令关系式(3)中  $\gamma_d \rightarrow +\infty$ , 同样通过拟合得到曲线截距的倒数  $1/b$ , 拟合参数  $b$  越大, 对应试样的最终剪应力幅值越小。由于不同试样在不同条件对应的骨干曲线不同, 因此拟合参数  $a, b$  取值不同。在对数据的拟合过程中发现模拟效

果不佳, 则可采用改进的 Hardin-Drnevich 模型进行拟合:

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a_1 + b_1\gamma_d + c_1\gamma_d^2} \quad (7)$$

$$G_{d\max} = G_d|_{\gamma_d \rightarrow 0} = \frac{1}{a_1 + b_1\gamma_d + c_1\gamma_d^2}|_{\gamma_d \rightarrow 0} \quad (8)$$

为找出更适合冻融循环后黄土的动剪切模量模型, 以  $\sigma_3=90$  kPa 得到的数据为例, 进行  $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$  关系绘制, 分别用一次函数和二次函数进行拟合, 得到的拟合结果如图 4, 表 3 所示。由图和表可知, 改进的 H-D 模型的拟合系数  $R_1^2$  均大于 H-D 模型的

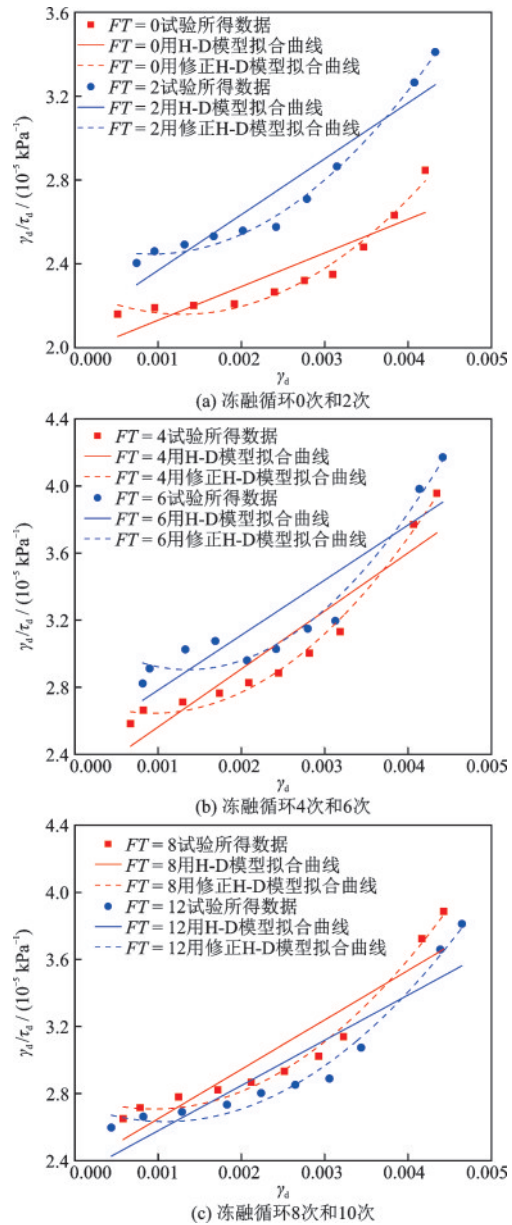


图4  $\sigma_3=90$  kPa 条件下  $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$  关系曲线和模型拟合

Fig.4 Relationship curves and model fitting of  $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$  at  $\sigma_3=90$  kPa

表3  $\sigma_3=90$  kPa条件下H-D模型参数及改进的H-D模型参数

Table 3 H-D model parameters and improved H-D model parameters under the condition of  $\sigma_3=90$  kPa

冻融循环次数	H-D模型参数			改进的H-D模型参数			$R_1^2$
	$a$	$b$	$R^2$	$a_1$	$b_1$	$C_1$	
0	$1.956 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-3}$	0.890	$2.205 \times 10^{-5}$	$-8.397 \times 10^{-4}$	0.594	0.988
2	$2.109 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-3}$	0.912	$2.457 \times 10^{-5}$	$-9.155 \times 10^{-3}$	0.691	0.991
4	$2.187 \times 10^{-5}$	$3.58 \times 10^{-3}$	0.898	$2.666 \times 10^{-5}$	$-1.46 \times 10^{-3}$	1.013	0.996
6	$2.295 \times 10^{-5}$	$4.64 \times 10^{-3}$	0.946	$2.792 \times 10^{-5}$	$-2.841 \times 10^{-4}$	0.951	0.998
8	$2.287 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-3}$	0.889	$2.722 \times 10^{-5}$	$-1.41 \times 10^{-3}$	0.945	0.997
10	$2.251 \times 10^{-5}$	$2.99 \times 10^{-3}$	0.850	$2.691 \times 10^{-5}$	$-1.76 \times 10^{-3}$	0.927	0.995

拟合系数,且 $R_1^2$ 的值均大于0.98,说明采用改进的H-D模型能更好拟合冻融循环作用下黄土的动力特性的演化特征,原因是通过图4绘制黄土 $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$ 关系曲线的变化趋势分为两个过程,第一个阶段随着 $\gamma_d$ 的逐渐增大, $\gamma_d/\tau_d$ 变化较为缓慢,曲线对应的斜率较大,在第二阶段随着 $\gamma_d$ 的增大 $\gamma_d/\tau_d$ 变化较为迅速,曲线对应的斜率较小。而H-D模型 $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$ 模型拟合的变化趋势是一条斜率 $b$ 恒定的线性变化过程,不能体现出黄土两阶段的变化特征。因此改进的H-D模型得到的 $a_1$ 相比H-D模型的 $a$ 更大,通过计算得出的 $G_{d,max}$ 更小,能对初始阶段动剪切模量减小缓慢的特征进行较好地描述。

### 2.3 动剪切模量比 $G_d/G_{d,max}$

由试验所得数据绘制不同围压条件下 $G_d/G_{d,max}-\gamma_d$ 关系曲线,如图5所示。相比较分析动剪切模量 $G_d$ ,动剪切模量比 $G_d/G_{d,max}$ 能体现土体在加载过程中刚度衰减的变化趋势。由图可知,动剪切模量比在每一个围压条件下与 $\gamma_d$ 的关系都在一个狭长的范围内,且随着围压的降低, $G_d/G_{d,max}-\gamma_d$ 曲线范围明显的向下偏移,且随着围压的减小动剪切模量比的分布逐渐趋于分散。 $\sigma_3=30$  kPa动剪切模量比在0.4~0.78附近, $\sigma_3=60$  kPa动剪切模量比在0.5~0.85附近, $\sigma_3=90$  kPa动剪切模量比在0.6~0.97附近,说明随着围压的减小土体刚度有明显的衰减趋势。

图6为取 $\gamma_d=0.001$ 和 $\gamma_d=0.0035$ 时,动剪切模量比与不同冻融循环次数的关系曲线,可代表土体在两个阶段时 $G_d/G_{d,max}$ 与不同循环次数的关系。由图可知, $G_d/G_{d,max}$ 的变化趋势随冻融循环次数的增加为先减小后增大,且在下降的过程中曲线都存在一个平缓-骤降的变化过程。以 $\gamma_d=0.001$ 为例,每个围压对应的的动剪切模量比最低点不同, $\sigma_3=$

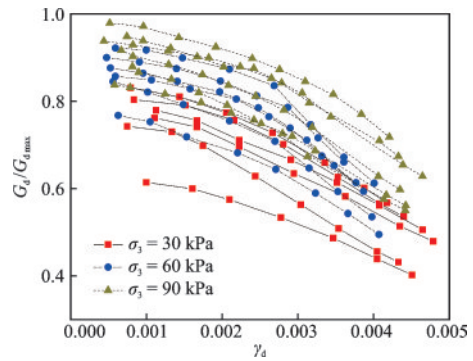


图5 不同围压条件下 $G_d/G_{d,max}$ 与 $\gamma_d$ 关系

Fig.5  $G_d/G_{d,max}-\gamma_d$  curves under different confining pressure conditions

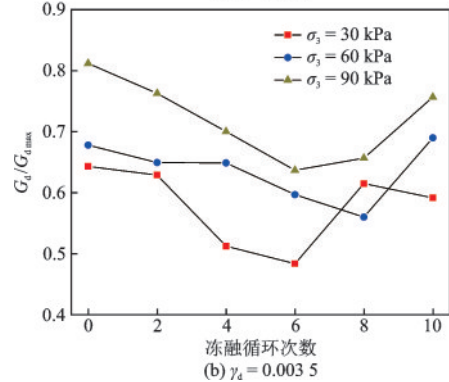
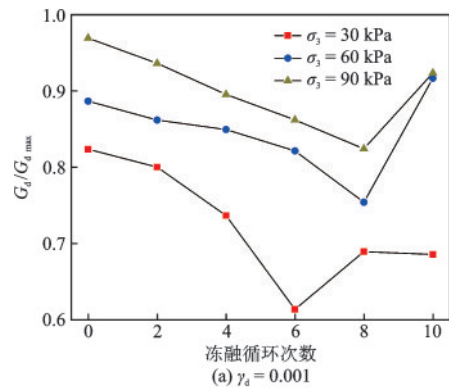


图6  $G_d/G_{d,max}$ 随不同冻融次数的变化曲线

Fig.6 The change curves of  $G_d/G_{d,max}$  with different freezing and thawing cycles

60 kPa 和  $\sigma_3=90$  kPa 的  $G_d/G_{d\max}$  最低点在 8 次冻融循环后, 而  $\sigma_3=30$  kPa 其对应的最低点在 6 次冻融循环后, 10 次冻融循环后  $G_d/G_{d\max}$  产生了较大的恢复。结合图 6 可以发现, 随着围压的增大,  $G_d/G_{d\max}$  的变化范围逐渐密集, 以  $\gamma_d=0.001$  为例,  $G_d/G_{d\max}$  的变化区间由  $\sigma_3=30$  kPa 的 0.614~0.824 增至  $\sigma_3=90$  kPa 的 0.824~0.969,  $G_d/G_{d\max}$  变化的幅度降低了 31.0%, 体现了围压的增加, 一定程度地减小土体刚度变化, 使得冻融循环后的土体动剪切模量更为接近未冻融时的情况。

#### 2.4 阻尼比 $\lambda$

阻尼比  $\lambda$  是土体动力特性中的重要参数, 体现了土体在循环荷载作用下, 由于土体内部颗粒间内存在的摩擦造成动应变滞后于动应力的现象, 结果表现为土体在动荷载作用下受到越大的阻尼, 产生更多的能量损耗和振动衰减, 土体阻尼比  $\lambda$  由下式计算:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (9)$$

式中,  $\Delta W$  为图 7 所示一个滞回圈所围成的面积(红

色区域),  $W$  为图 7 所示原点、滞回圈最大剪应变对应的横坐标和对应在滞回圈上的坐标三点围成的面积(黑色区域)。

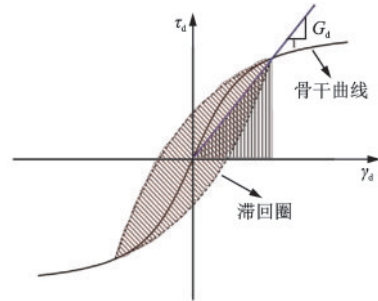


图 7 滞回圈示意

Fig.7 Schematic diagram of hysteresis loop

阻尼比  $\lambda$  随动剪应力幅值  $\gamma_d$  的变化如图 8 所示。由图可知, 在动荷载的作用下, 黄土的阻尼比均随着  $\gamma_d$  的增加而增加, 变化的趋势接近线性, 没有明显减小的幅度。曲线随着冻融循环次数的增加有骤升-平缓下降的过程, 冻融循环后土样的阻尼比均大于未冻融的阻尼比, 与骨干曲线的变化趋势截然相反。

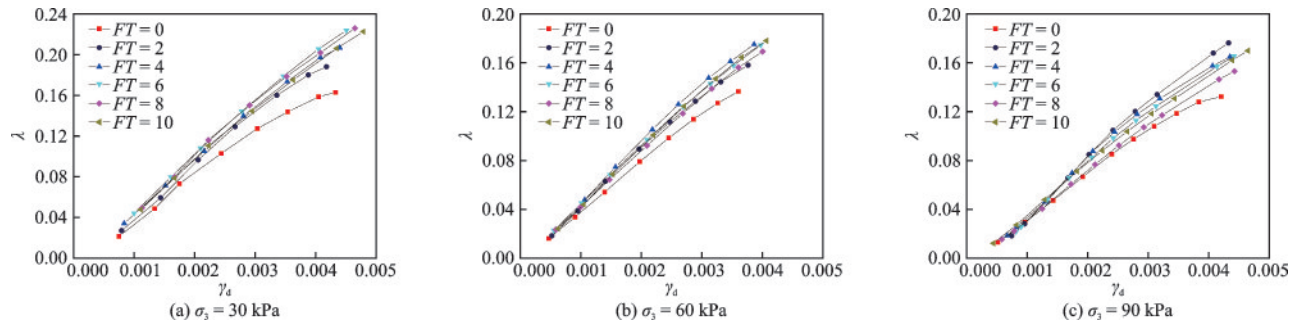


图 8 不同围压下  $\lambda$  与  $\gamma_d$  关系

Fig.8 Relationship between  $\lambda$  and  $\gamma_d$  under different confining pressures

由于阻尼比  $\lambda$  与  $\gamma_d$  的关系接近线性, 因此仅取  $\gamma_d=0.0035$  时  $\lambda$  随不同冻融次数的变化曲线如图 9 所示。黄土的阻尼比  $\lambda$  随围压的增加出现较小的变化, 在各围压条件下, 2 次冻融循环后相比未冻融时的  $\lambda$  在围压 30、60、90 kPa 状态下分别提高了 16.2%、12.3%、23.1%, 曲线均存在较大幅度的上升; 未冻融时  $\lambda$  最小, 随着冻融循环次数的增大, 土体消耗的能量在不同的围压条件下存在一定的阈值, 说明在 0~10 次冻融循环过程中存在一个最大阻尼比  $\lambda_{\max}$ , 此时造成能量的损失最大。

试验结果表明, 冻融循环次数和围压的改变对土体的阻尼比  $\lambda$  存在一定的影响。受冻融循环作用

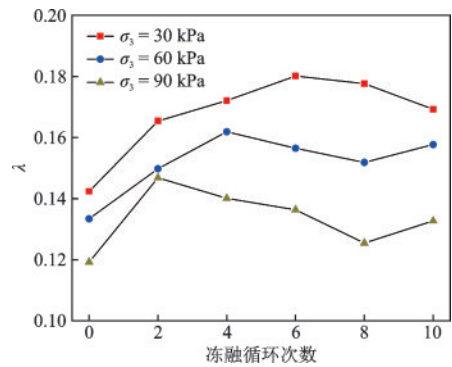


图 9  $\lambda$  随不同冻融次数的变化曲线

Fig.9 Variation curve of  $\lambda$  with different freezing and thawing cycles

的影响,土体在水分迁移的过程中结构相对松散,原有土体结构中较大的孔隙结构在动荷载的作用下遭到破坏,颗粒之间接触的有效面积减小,导致土体中的颗粒重新排列,因此需要消耗足够的动能抵抗相应的动应力,结果表现为冻融循环后的土体阻尼比大于未冻融的土体;但随着冻融循环次数的进一步增加,土体的孔隙结构和土骨架结构趋于稳定,反复的冻融使土体颗粒间重新连接紧密,导致了结构整体性的恢复,这解释了阻尼比在阈值后逐渐平缓下降的原因。随着围压的增加,对土体产生了额外的径向约束,在动荷载的作用下土颗粒连接更为紧密,形成的摩擦力和咬合力使土骨架结构能承受更大的动应力,土体消耗的能量随之减小,结果表现为阻尼比 $\lambda$ 的减少。

### 3 结 论

根据对西宁地区黄土在冻融循环作用下进行了一系列的动三轴试验,分析了不同围压和冻融循环次数条件下黄土动力特性,在试验条件范围内所得结论如下:

(1)通过各试验条件得出冻融循环作用下西宁地区黄土骨干曲线、 $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$ 关系模型参数、动剪切模量比 $G_d/G_{d\max}$ 和阻尼比 $\lambda$ ,结果可为寒区土体在相关动力响应分析中提供参考依据。

(2)冻融循环对骨干曲线的影响较为显著。随着冻融循环次数增加,骨干曲线趋势均下降,经历6次循环后基本趋于稳定。

(3)动荷载加载过程中土体发展阶段可分为弹性阶段和弹塑性阶段,采用改进的H-D模型可将两阶段过程较好地刻画,且对 $\gamma_d/\tau_d-\gamma_d$ 关系进行拟合相关系数明显高于H-D模型。

(4)冻融循环作用下黄土的 $G_d/G_{d\max}$ 与 $\gamma_d$ 呈负相关性,曲线随围压的增加呈宽窄变化的波动带分布,且变化的范围区间更密集。

(5)冻融循环作用下黄土的阻尼比 $\lambda$ 与 $\gamma_d$ 存在近似的线性关系,在冻融循环过程中各围压条件都对应一个最大阻尼比 $\lambda_{\max}$ ,此时土体消耗能量最大。

#### 参考文献:

[1] 张吾渝.黄土工程[M].北京:中国建材工业出版社,2018.

Zhang W Y. Loess Engineering [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2018. (in Chinese)

[2] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(9): 1249-1273.

[3] 付惠姣,谭慧明,高志兵.考虑埋深影响的长江下游江苏地区粘性土动剪切模量与阻尼比试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):872-877.  
Fu H J, Tan H M, Gao Z B. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of cohesive soil in Jiangsu area of the lower reaches of the Yangtze River considering the effect of buried depth[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 872-877. (in Chinese)

[4] 赵杰,云高杰,王桂萱.某大型填海造地工程护岸地基动力特性及残余变形研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(4):452-457.  
Zhao J, Yun G J, Wang G X. Research on the dynamic characteristics and residual deformation of the bank protection foundation of a large reclamation project [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(4): 452-457. (in Chinese)

[5] 许俊豪,陈页开,霍晓辉,等.地震荷载下高含冰量冻土的动力特性试验研究[J].铁道标准设计,2019,63(12):25-31.  
Xu J H, Chen Y K, Huo X H, et al. Experimental study on dynamic characteristics of frozen soil with high ice content under earthquake load[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 25-31. (in Chinese)

[6] 崔凯,荆祥.地震荷载作用下粗颗粒含量对川西混合土动剪切模量和阻尼比的影响[J].中国公路学报,2019,32(12):123-131.  
Cui K, Jing X. Influence of coarse particle content on dynamic shear modulus and damping ratio of mixed soil in western Sichuan under seismic load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 123-131. (in Chinese)

[7] Ling X Z, Zhu Z Y, Zhang F, et al. Dynamic elastic modulus for frozen soil from the embankment on Beiluhe Basin along the Qinghai-Tibet Railway [J]. Cold Regions Science & Technology, 2009, 57(1): 7-12.

[8] Zhu Z Y, Ling X Z, Wang Z Y, et al. Experimental investigation of the dynamic behavior of frozen clay from the Beiluhe subgrade along the QTR[J]. Cold Regions Science & Technology, 2011, 69(1): 91-97.

- [9] 孙静, 公茂盛, 熊宏强, 等. 冻融循环对粉砂土动力特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 747-754.  
Sun J, Gong M S, Xiong H Q, et al. Experimental study on the influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of silt soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 747-754. (in Chinese)
- [10] 苏永奇, 马巍, 钟秀梅, 等. 冻融循环对青藏粉质黏土动力非线性参数影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增1): 2973-2985.  
Su Y Q, Ma W, Zhong X M, et al. Experimental study on the influence of freeze-thaw cycles on dynamic non-linear parameters of Qinghai-Tibet silty clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup1): 2973-2985. (in Chinese)
- [11] 苏永奇, 马巍, 钟秀梅, 等. 冻融循环对重塑青藏粉质黏土阻尼比影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增1): 2960-2967.  
Su Y Q, Ma W, Zhong X M, et al. Experimental study on the influence of freeze-thaw cycles on the damping ratio of reshaped Qinghai-Tibet silty clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup1): 2960-2967. (in Chinese)
- [12] 崔高航, 朱成浩. 冻融循环下饱和含黏粒粉砂土力学参数试验[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(3): 77-82.  
Cui G H, Zhu C H. Experiment on kinetic parameters of saturated clay-containing silt under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(3): 77-82. (in Chinese)
- [13] 土工试验方法标准: GB/T50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [14] Zhang W, Guo A, Lin C. Effects of cyclic freeze and thaw on engineering properties of compacted loess and lime-stabilized loess [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9): 04019205. 1-04019205. 12.
- [15] 刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 等. 冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 109-115.  
Liu L Q, Zhang W Y, Zhang B Y, et al. Experimental study on unconfined compressive strength and microscopic laws of loess under freeze-thaw cycles[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(4): 109-115. (in Chinese)
- [16] 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 X Y, Zhong C L, Chen Y M, et al. Research on dynamic characteristics of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 77-81. (in Chinese)
- [17] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil mechanics and Foundations Division, 1972, 98(7): 667-692.

(本文编辑: 苏泽云)