

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0004

HUANG Yongting, MA Wei, HE Pengfei, et al. Experimental study of thaw-settlement process of frozen soil under different load conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):184-194. [黄永庭, 马巍, 何鹏飞, 等. 不同荷载条件下冻土融化沉降过程试验研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):184-194.]

# 不同荷载条件下冻土融化沉降过程试验研究

黄永庭<sup>1,2</sup>, 马 巍<sup>1,2</sup>, 何鹏飞<sup>1,2,3</sup>, 栗晓林<sup>1,2,4</sup>

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050; 4. 嘉兴学院 建筑工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

**摘 要:** 融沉是困扰多年冻土区工程建设与安全运营的关键因素之一。通过室内试验, 针对两种初始干密度不同的青藏粉质黏土, 在 $-8\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间正弦波动的周期温度边界条件下, 分别开展了无荷载、静荷载及动荷载作用下冻结饱和试样的融沉试验(试样的初始温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 研究了试样内部温度、变形、孔隙水压力的时间变化过程。结果表明: 温度边界相同时, 在不同荷载作用下试样内部温度响应过程差异显著, 反映了荷载对冻土融化速率的影响。在无荷载作用下, 试样的竖向变形呈线性发展趋势, 每次冻融过程中的融沉变形变化不大。在静荷载和动荷载作用下, 试样的竖向变形呈先快速增加后逐渐稳定的趋势, 且融化沉降变形主要发生在前3~4个冻融循环过程。试验结束时, 在静、动荷载作用下试样最终变形量大于无荷载作用下, 且干密度较小时竖向变形较大。在动荷载作用下, 试样内部孔隙水压力变化幅度大于静荷载, 且在前3次冻融循环过程中, 动荷载作用下试样内部孔隙水压力消散数值大于静荷载, 之后随着冻融循环次数的增加两者差异逐渐减小。试样融沉变形过程与温度变化、孔隙水压力的积累和消散过程密切相关。试验结果可为复杂边界条件下融化固结理论研究和工程中地基土体的融沉变形预测提供依据。

**关键词:** 融化速率; 变形; 孔隙水压力; 冻融循环; 不同荷载

**中图分类号:** P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0184-11

## 0 引言

在多年冻土区, 工程构筑物的修筑与运营, 势必改变下伏多年冻土的局部赋存环境, 进而打破地基土体原有的水热收支平衡<sup>[1-5]</sup>。由此可引发包括活动层厚度增加、多年冻土升温、融化夹层发育等多年冻土退化过程, 并伴随地表的不均匀沉降变形, 进而威胁到工程构筑物的长期稳定性和安全运营。已有工程实践表明, 融沉是引发多年冻土区工程病害的主要因素<sup>[6]</sup>。因此开展融沉变形及其发展过程的研究, 对于多年冻土区工程建设和安全运营至关重要。

关于冻土融化沉降变形的研究, 最早认为融化沉降变形主要包括融沉与压缩变形两部分<sup>[7]</sup>, 其中

融沉主要采用传统经验方法进行预测。经验方法包括干密度法<sup>[8-9]</sup>、含水率法<sup>[10]</sup>、孔隙率-含水率法<sup>[11]</sup>等, 但是这些方法只能预测与压力无关的融沉, 忽略了融化沉降的时间变化特征及其与孔隙水压力消散的密切联系。基于此, 大量的研究人员建立了融化固结理论。Morgenstern等<sup>[12]</sup>基于Terzaghi固结理论, 结合Carslaw和Jaeger提出的融化锋面的移动方程<sup>[13]</sup>, 得到了变边界一维融化固结理论, 但是该理论所采用的融化边界方程仅适用于恒定温度边界。Sykes等<sup>[14-15]</sup>利用Biot三维固结理论, 结合热传导方程给出了三维小变形融化固结理论。但是由于Biot固结理论的限制, 该理论仅限于小变形的情况。为了克服这一不足, Foriero等<sup>[16]</sup>建立了一维大变形融化固结理论, 但是该理论无法扩展到多维

收稿日期: 2020-12-28; 修订日期: 2021-02-08

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目(28Y928581); 国家自然科学基金重点项目(41630636)资助

作者简介: 黄永庭, 博士研究生, 主要从事岩土工程研究. E-mail: huangyongting@lzb.ac.cn

通信作者: 马巍, 研究员, 主要从事冻土力学与工程研究. E-mail: mawei@lzb.ac.cn

状态,不能用于求解二维、三维问题。Wang 等<sup>[17-18]</sup>基于大变形融化固结理论,提出了一种复杂边界下融化固结计算的方法,并通过大量的试验验证了该方法的合理性。马巍<sup>[19]</sup>考虑非线性应力-应变关系,引入损伤的概念,从理论上建立饱冰冻土融化固结的数学模型。Yao 等<sup>[20]</sup>和 Qi 等<sup>[21]</sup>基于欧拉描述提出了三维大变形融化固结理论,并用试验结果验证了该理论的合理性。石峰<sup>[22]</sup>对动荷载条件下的融化沉降变形进行了研究,发现动荷载幅值大小对土体内部温度场的影响较小,对土体的融化沉降变形影响较大。彭丽云等<sup>[23]</sup>进行了正融土在循环荷载作用下的压缩试验,结果表明,动应力幅值越大试样累积塑性应变越大。Yao 等<sup>[24]</sup>对冻结粉质黏土在恒温、静荷载边界条件下融化固结过程中超静孔隙水压力的变化进行了测试,发现在融化固结过程中超静孔隙水压力呈先增大后减小的趋势。明锋等<sup>[25]</sup>以孔隙比变量建立了融化固结变形理论,对冻土融化固结过程中变形、孔隙水压力、孔隙比的变化过程进行了分析。程培峰等<sup>[26]</sup>对冻融循环作用下过湿土的固结变形特性进行研究,发现土体的压缩性随着冻融循环次数的增加呈先增大后平缓的趋势。然而这些研究主要集中在恒温 and 静荷载等相对简单且容易控制边界条件下,这与实际工程复杂边界条件仍有较大距离,难以满足冻土融化固结理论和工程地基融沉变形预测方面的实际需求。

在多年冻土区,地基土体受地表温度的影响,经历着反复的冻融作用。在暖季,地表土体融化,在上覆荷载作用下产生融化固结变形。在冷季,地表土体冻结,排水通道关闭,固结沉降变形停止<sup>[27]</sup>。以青藏公路为例,冻土路基在每年的4月初到11月底处于融沉状态,而在12月初到次年3月底,融沉停止。但由于在融化期有效固结时间随深度逐渐减小,较深处新融化土层中的水分无法排出,孔隙水逐渐地积累,需要额外的剩余固结时间完成固结,从而使得融沉变形持续进行<sup>[28]</sup>。这与常温边界条件下的融化固结力学行为完全不同。为此,通过对现有冻融试验测试设备进行改进,开展了周期温度边界条件下,无荷载、静荷载和动荷载作用下的融沉试验。研究不同荷载作用下试样内部的水、热、力变化过程,揭示试样内部温度变化、竖向变形发展以及孔隙水压力累积与消散等发展规律及其内在联系,以期冻土融化固结理论的建立提供试

验数据支撑。

## 1 试验方法

### 1.1 试验土样及制备

试验用土采自青藏高原北麓河地区,其颗粒比重为 2.71,液限 32.55%,塑限 21.15%,塑性指数为 11.40,该土为低液限粉质黏土,属冻胀敏感性土,土的颗粒粒径分布如图 1 所示。试样为直径 101 mm,高 100 mm 的圆柱试样,用冻土工程国家重点实验室的自动制样机制备,控制试样干密度为  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。将装有试样的有机玻璃试样罐放到两端固定的刚性支架上,然后一起放入真空饱和装置,进行抽气饱和,所得饱和含水率分别为 27.8% 和 33.8% (通过烘干法测得)。为防止冻结过程中试样内部水分迁移,将饱和试样放入到  $-30^\circ\text{C}$  的恒温箱中快速冻结 48 h。饱和及冻结以后的试样如图 2 所示。以干密度为  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的饱和试样为例,快速冻结后试样高度达到 107 mm。

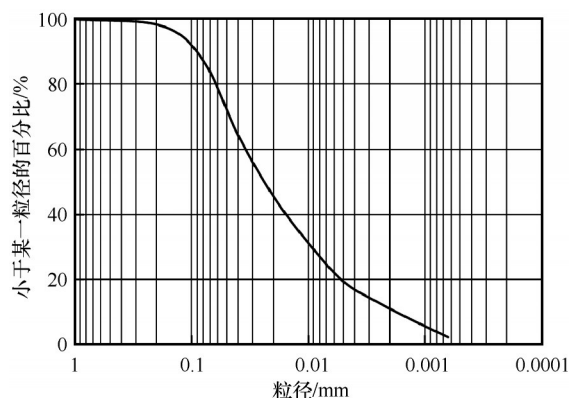
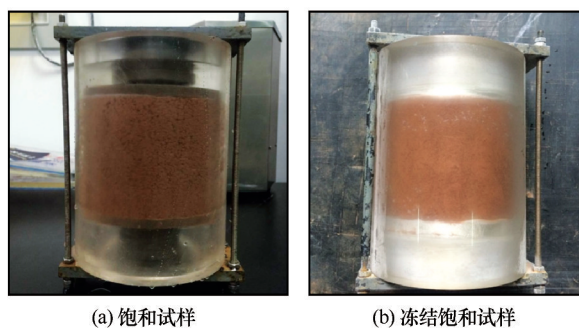


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of tested soil



(a) 饱和试样

(b) 冻结饱和试样

图 2 饱和(a)及冻结饱和(b)试样(干密度为  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

Fig. 2 Saturated (a) and frozen saturated (b) soil samples  
(The dry density is  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

1.2 融化固结试验

表 1 给出了融化固结试验的设计方案,该试验在有压冻融试验机上进行,试验仪器及箱体内部结构如图 3 所示。具体试验步骤如下:首先从-30 ℃的恒温箱中取出装有冻结土样的有机玻璃试样罐,然后快速安装在仪器基座上,并将温度传感器(采用冻土工程国家重点实验室自制的温度传感器,量程为-30~+30 ℃,精度为±0.05 ℃)和孔隙水压力传感器(采用 HC-25 微型孔隙水压力传感器,量程为-0.1~1 MPa,精度为±0.1%)经测试孔插入试样(图 4),然后进行密封和保温棉包裹。完成上述步骤后,将顶板、底板、箱体的温度同时设置为-1 ℃,且在-1 ℃的温度下恒温至少 6 h,待试样温度达到-1 ℃时,在试样顶端施加表 1 所示的设定荷载。其中动荷载变化幅度按照静荷载的 50% 来取,动荷载的振动频率设置为 0.164 Hz<sup>[29]</sup>,其具体的加载方

式如图 5 所示。加载的同时将顶板的温度设置为正弦波动试验温度,如式(2)所示。试验过程中,始终保持底板和箱体的温度为-1 ℃,整个试验持续 24 h,并且始终保持试样的顶端排水。试样顶端位移通过全封闭伺服测控系统进行实时监测,其测量精度为±0.5%,温度、孔隙水压力数据由 DT80 数采仪自动采集。

表 1 试验方案  
Table 1 The test program

试验编号	饱和含水率/%	初始干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	上覆荷载/kPa
1	33.8	1.45	无荷载
2			静荷载(100 kPa)
3			动荷载
4	27.8	1.60	无荷载
5			静荷载(100 kPa)
6			动荷载

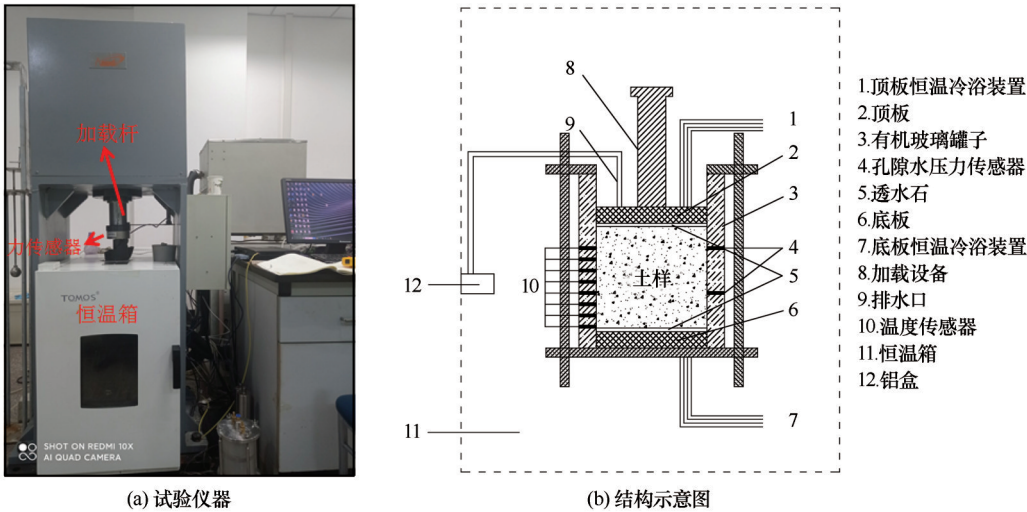


图 3 试验仪器及结构示意图  
Fig. 3 Test apparatus (a) and its structure diagram (b)

在冻土区,浅层地表土体经历季节冻融过程,温度呈现周期性变化,其时间变化过程可用正弦函数描述<sup>[30-31]</sup>:

$$T = T_0 + \alpha t + A \sin(2\pi \frac{t}{\tau} + n\pi) \tag{1}$$

式中: $T_0$ 为平均温度; $t$ 为时间; $\alpha$ 为气温增温速率; $A$ 为温度振幅; $\tau$ 冻融周期; $n\pi$ 为初始相位。试验忽略初始相位以及气温增温速率的影响<sup>[32]</sup>,故将其式(1)简化为:

$$T = T_0 + A \sin(2\pi \frac{t}{\tau}) \tag{2}$$

从式(2)中可以看出,控制边界温度的主要因素有平均温度、温度振幅、冻融周期,本次试验采用

了周期温度边界,其具体的温度控制参数见表 2 所示。表中平均温度与温度振幅主要是根据试样尺寸、冻结融化深度以及温度梯度来获取。

2 试验结果及分析

2.1 温度变化过程

图 6 给出了无荷载、静荷载和动荷载作用下,初始干密度为 1.60 g·cm<sup>-3</sup> 试样内部温度变化过程。可以看出,尽管试样顶、底板及环境箱体温度控制相同,但三种荷载作用下试样内部温度时间响应过程存在显著差异,如无荷载作用下试样在第 1 次冻融过程中,融化锋面的高度为 52 mm,当冻融循环至



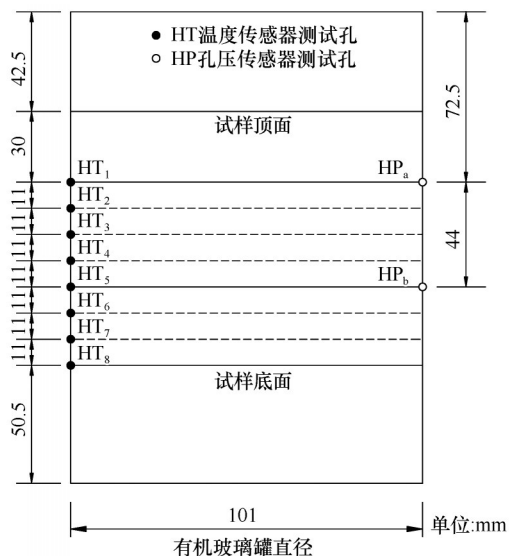


图4 温度及孔隙水压力测试传感器布设位置

Fig. 4 Locations of sensors of temperature and pore water pressure

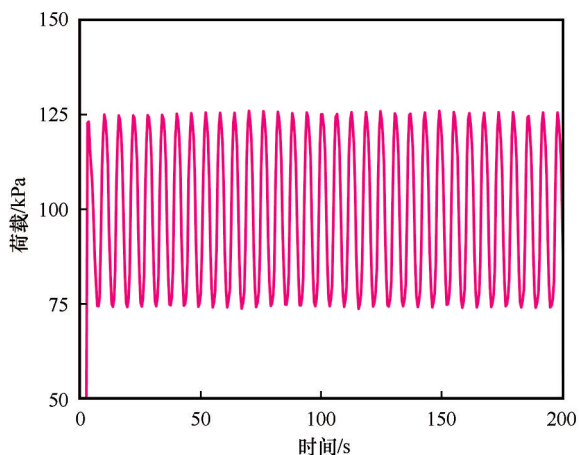


图5 动荷载变化过程

Fig. 5 Variations of dynamic load

表2 试样顶板周期温度边界控制参数

Table 2 Periodical temperature boundary controlling parameters at the top of soil samples

边界条件	平均温度/℃	温度振幅/℃	冻融周期/h
周期温度	8	16	4

第4次时,试样融化锋面的高度为16.5 mm,之后在每次冻融过程中融化锋面高度基本保持不变;静荷载和动荷载作用下,试样在第1次冻融过程中,融化锋面的高度为30 mm,至第2次冻融过程试样已全部融化,即静荷载和动荷载作用下,试样融化锋面的向下移动速率快于无荷载作用下。从图中还可以看出,不同荷载作用下,试样融化深度均随着冻融循环次数的增大而加深。这里需要说明的是为防止测温

探头对试样竖向变形产生影响,试样顶端30 mm范围内无测温,故图6只给出了试样0~77 mm高度范围内温度随时间的变化过程。

## 2.2 试样竖向变形

图7给出了周期温度边界条件下,不同初始干密度试样竖向变形随时间的变化过程。从图中可以看出,三种荷载作用下试样竖向变形均表现为沉降,但其发展过程、趋势以及量值存在明显不同,具体表现为:(1)在无荷载作用下,试样每次冻融过程中融化下沉量大于冻胀量,试样总体表现为沉降,其随时间呈线性增加趋势,在每次冻融循环过程中试样竖向变形的发展可分为4阶段,即融化下沉、下沉稳定、冻结膨胀和冻胀稳定;(2)在静荷载作用下,试样竖向变形先快速增加而后逐渐趋于稳定。在每次冻融过程中试样竖向变形呈台阶状,即融化期沉降冻结期相对稳定。相较于无荷载作用下,试样在冻融循环过程中,基本无冻胀变形发生;(3)在动荷载作用下,每次冻融过程中试样竖向变形发展可分为融化沉降和冻结膨胀2个阶段,与静荷载相比,动荷载作用下试样的冻胀量较大。另外,对比分析发现,6次冻融循环后,试样最终竖向变形量:动荷载>静荷载>无荷载,如初始干密度为 $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,试样竖向最终变形量分别为无荷载2.7 mm、静荷载10.5 mm、动荷载12.2 mm,静、动荷载作用下试样最终变形量分别是无荷载作用下的3.9倍、4.5倍。

为了进一步分析试样在冻融过程中融化沉降变形的变化特征,图8给出了每次冻融循环过程中试样的融沉变形。可以看出,在无荷载作用下,试样融沉变形随着冻融循环次数的增加变化不大。在上覆荷载作用下,试样融沉变形随着冻融循环次数的增加逐渐减小,其中第1次冻融过程中试样融沉变形发展迅速,随后试样融沉变形速率有所下降,至3~4个冻融循环过程后,试样融沉变形逐渐趋于稳定,且动荷载作用下试样的融沉变形大于静荷载作用下。如初始干密度为 $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 试样,无荷载作用下,第1次冻融过程中的融沉变形约为0.8 mm,之后随着冻融循环次数的增加,每次冻融过程中的融沉变形逐渐稳定在0.7 mm。在静荷载作用下,第1次冻融过程中的融沉变形为5.7 mm,之后随着冻融循环次数的增加,每次冻融过程中的融沉变形逐渐稳定在0.5 mm,其中前3次冻融过程中融沉变形占总变形的83%。在动荷载作用下,第1次冻融过程中的融沉变形为6.2 mm,之后随着冻

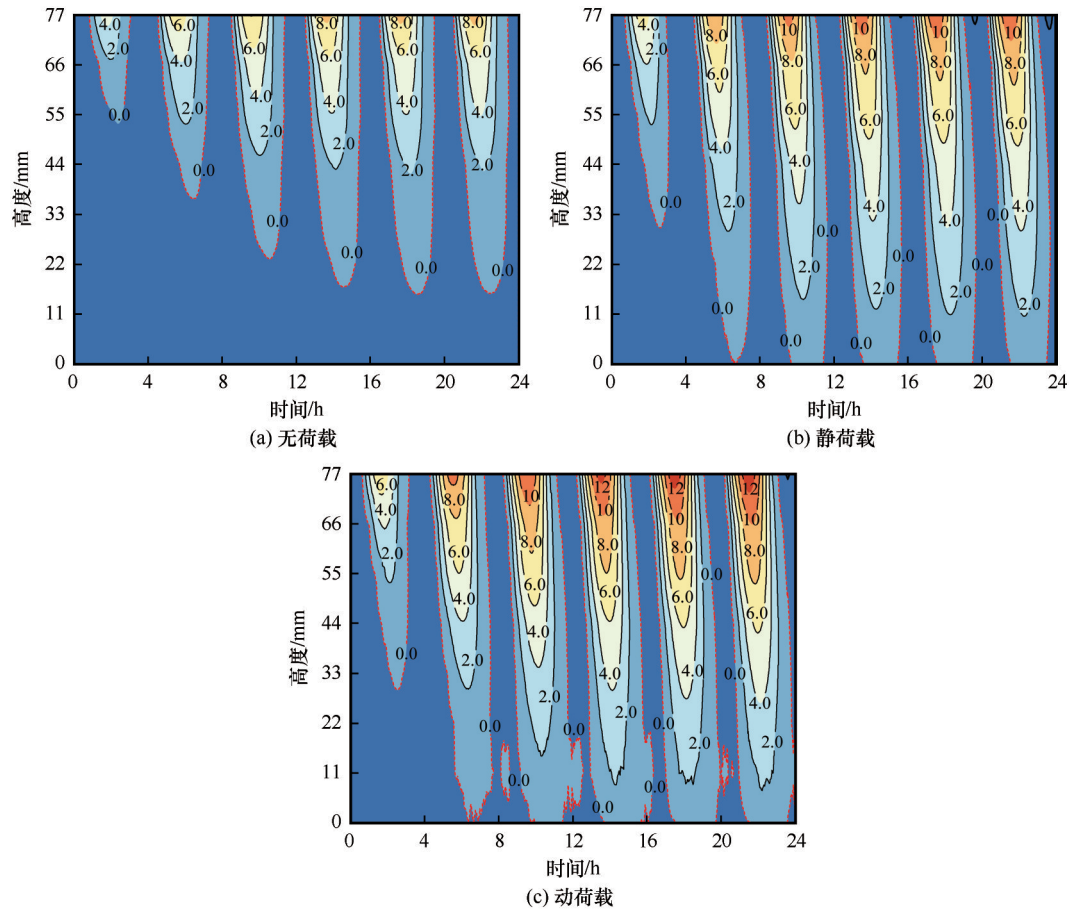


图6 不同荷载作用下试样内部温度变化

Fig. 6 Variations of the temperatures in soil samples under different loads: unload (a), static load (b), dynamic load (c)

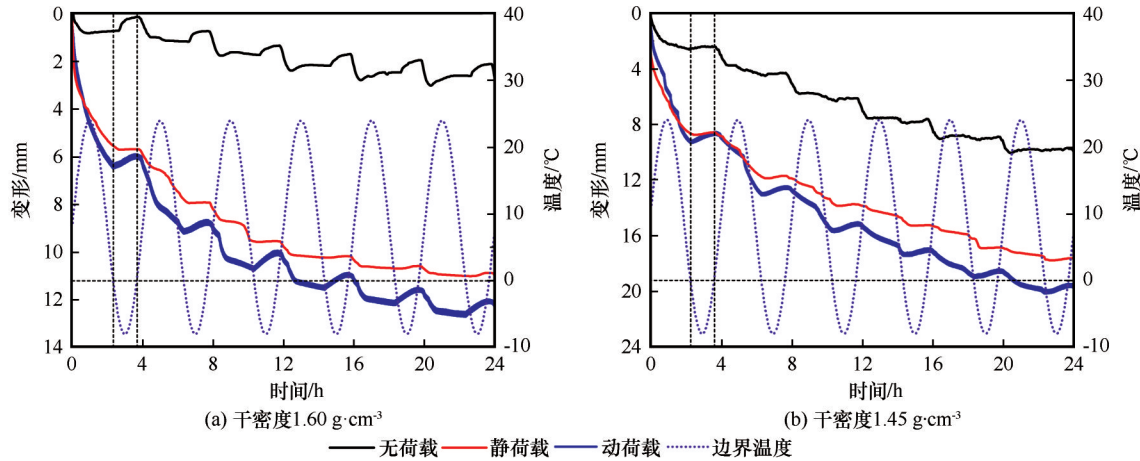


图7 不同荷载作用下试样竖向变形随时间的变化

Fig. 7 Variations of the vertical deformation with time under different loads:  $1.60\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (a),  $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (b)

融循环次数的增加,每次冻融过程中的融沉变形逐渐稳定在1 mm,其中前3次冻融过程中融沉变形占总变形的89%。这主要是由于在无荷载作用下,试样中的水分没有排出,故试样的竖向变形主要为冰水相变产生的变形和已融区自重作用下土体颗粒重组而产生的变形。在上覆荷载作用下,已融区由

于荷载的作用使得土体内部孔隙变小,水分逐渐排出,发生压缩变形。而对于动荷载作用下的试样而言,在卸载时,孔隙回弹产生吸力,水分向上迁移<sup>[29]</sup>,从而使得土体在加载时加速了水分的排出,故与静荷载相比,动荷载作用下试样的融化沉降变形较大。

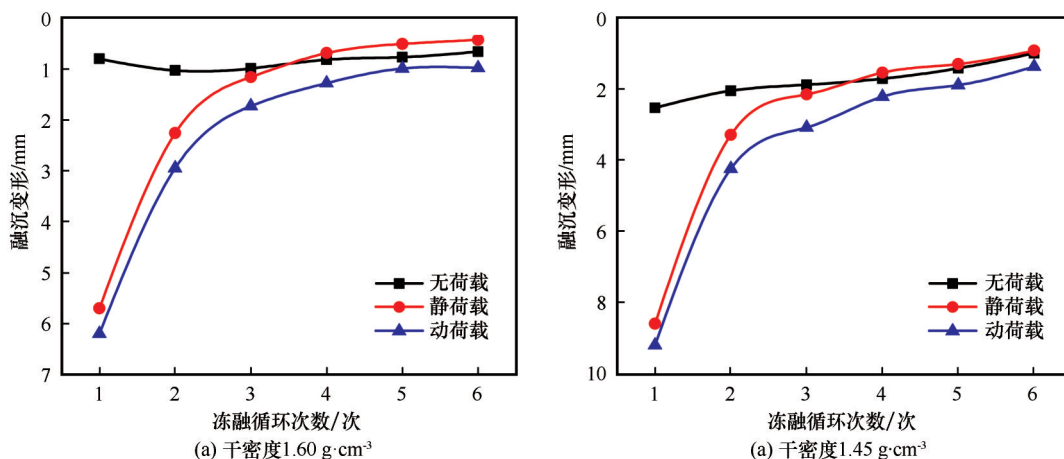


图8 不同荷载作用下融沉变形随冻融循环次数的变化

Fig. 8 Variations of the thaw settlement with increasing freeze-thaw cycles under different loads: 1.60 g·cm<sup>-3</sup> (a), 1.45 g·cm<sup>-3</sup> (b)

两种初始干密度条件下的试验结果表明,初始干密度较小的试样的融沉变形大于干密度较大的试样。在相同上覆荷载作用下,试验结束后,初始干密度较大时,融沉变形已趋于稳定。初始干密度较小时,融沉变形并未达到稳定,且随时间增加其增加速率仍然可观,反映了试样在融化过程中的压密变形与其自身干密度大小之间的关系。

### 2.3 孔隙水压力变化特征

图9给出了干密度为1.60 g·cm<sup>-3</sup>时,试样不同位置处孔隙水压力与温度随时间的变化特征,图中 $P_a$ 、 $P_b$ 分别为传感器HP<sub>a</sub>、HP<sub>b</sub>测得孔隙水压力, $T_a$ 、 $T_b$ 分别为HP<sub>a</sub>、HP<sub>b</sub>位置处的温度,由温度传感器HT<sub>1</sub>、HT<sub>5</sub>测得,具体位置见图4。可以看出,周期温度边界条件时,不同荷载作用下孔隙水压力呈周期性的变化,且随着深度的增加,孔隙水压力受周期温度

边界的影响逐渐减小。

在无荷载作用下,孔隙水压力 $P_a$ 、 $P_b$ 在每个冻融过程中的变化不大。在静荷载作用下, $P_a$ 在每次冻融中的时间发展过程大致分为4个阶段,即稳定阶段(I)、快速增加阶段(II)、消散阶段(III)、减小阶段(IV),且随着冻融循环次数的增加, $P_a$ 的变化幅度逐渐减小。为了详细分析孔隙水压力变化的4个阶段,图10给出了静荷载作用下,第1次冻融过程中 $P_a$ 随 $T_a$ 的变化过程。可以看出,当边界开始温度升温时,传感器HP<sub>a</sub>处的温度为负温, $P_a$ 保持在A点。当融化深度到达HP<sub>a</sub>处时,该处孔隙冰发生相变,而融化的孔隙水因排水受阻,在上覆荷载作用下, $P_a$ 快速增加到B点,之后随着水分的逐渐排出, $P_a$ 开始消散到C点。当边界温度下降到0℃以下时,土体又开始自上而下冻结,当冻结深度到达HP<sub>a</sub>处时, $P_a$ 下

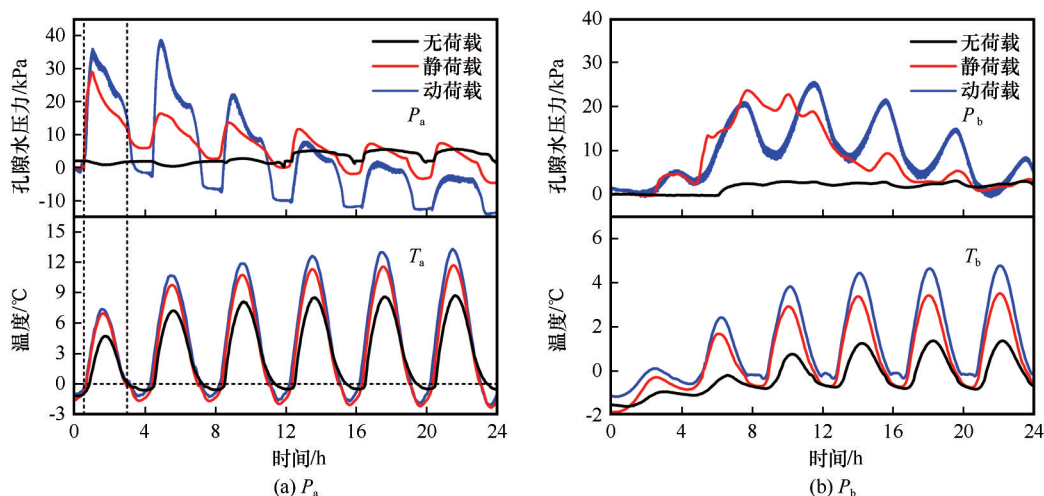


图9 不同荷载作用下孔隙水压力的变化

Fig. 9 Variations in pore water pressures of  $P_a$  (a),  $P_b$  (b) under different loads



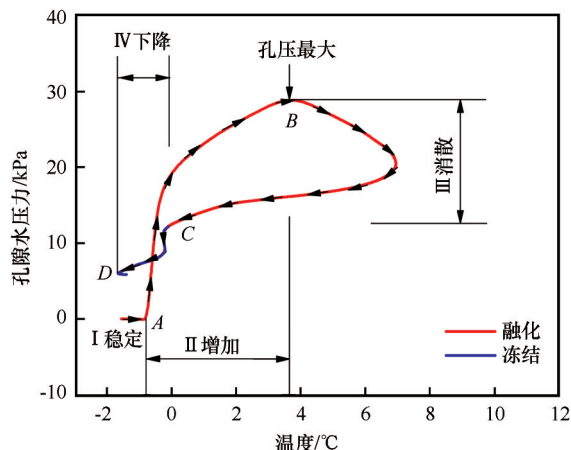


图 10 静荷载作用下第 1 次冻融过程中孔隙水压力  $P_a$  随温度  $T_a$  的变化

Fig. 10 Variations of pore water pressure  $P_a$  with temperature  $T_a$  during the 1st freeze-thaw cycle under static load

降到 D 点。其原因是由于该处孔隙水相变为冰,未冻水膜厚度与冰水界面曲率半径减小<sup>[33]</sup>,从而导致孔隙水压力下降。 $P_a$ 受周期温度边界的影响较小,总体上呈先增大后减小的变化趋势。在动荷载作用下, $P_a$ 时间变化过程与静荷载基本相同,但两者的发展趋势存在一定的不同,同时从量值上看动荷载作用下  $P_a$  的变化量值明显大于静荷载,且在后期出现了明显的负压。负压主要是由于该处土体完全冻结时内部产生吸力引起的,这种负压与孔隙冰压力共同分担了部分应力,使得试样处于相对稳定的状态。动荷载作用下, $P_a$ 存在明显的周期波动特征,这与静荷载作用下相同位置的孔压变化存在明显不同。

通过对比发现,动、静荷载作用下孔隙水压力的变化幅度远大于无荷载。以传感器 HP<sub>a</sub>测得孔隙水压力  $P_a$  为例,在无荷载作用下, $P_a$ 变化幅度大约为 2 kPa。在静荷载作用下, $P_a$ 第 1 次冻融过程中的变化幅度约为 23 kPa,经历 6 次冻融作用后,变化幅度约为 9.5 kPa。在动荷载作用下, $P_a$ 第 1 次冻融过程中的变化幅度约为 38 kPa,经历 6 次冻融作用后,变化幅度约为 11 kPa。

#### 2.4 孔隙水压力消散与融化沉降率的关系

为了进一步的分析周期温度边界条件下冻土的融沉变形与孔隙水压力的关系,图 11 给出了干密度为  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时,孔隙水压力的消散数值与融化沉降率随着冻融循环次数的变化。由于传感器 HP<sub>a</sub> 最接近加载面,最能反映孔隙水压力与融化沉降变形的关系,故图 11 只给出了孔隙水压力  $P_a$  在融化阶

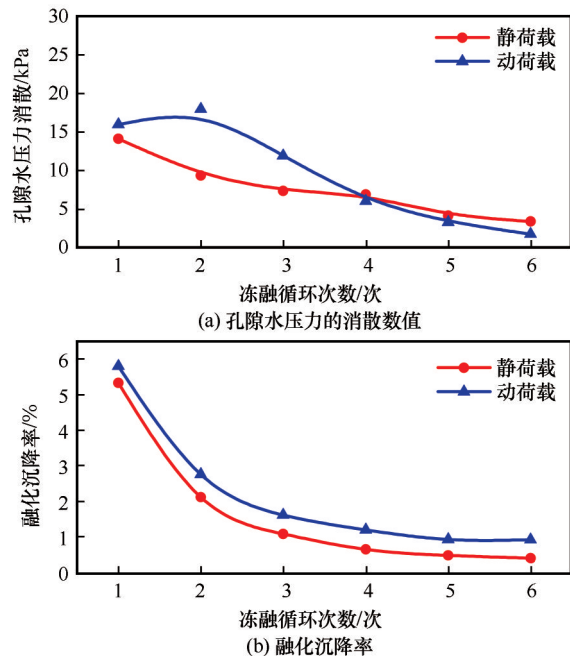


图 11 孔压消散与融化沉降率随冻融循环次数的变化  
Fig. 11 Variations of thaw settlement rate and pore water pressure dissipation with increasing freeze-thaw cycles under static and dynamic load conditions

段孔隙水压力消散与融化沉降率的关系。融化沉降率的计算如式(3)所示。

$$\eta = \frac{\Delta H_{ii}}{H_0} \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为融化沉降率; $\Delta H_{ii}$ 为每次冻融过程中的融化沉降变形; $H_0$ 为试样高度。

可以看出,孔隙水压力消散越快融化沉降率越大。这主要是由于在融化阶段,孔隙水压力消散越快,土体融化固结度越大,进而引起融化沉降率越大。另外还可以看出,孔隙水压力的消散数值与融化沉降率都随着冻融循环次数的增加而减小,最后趋于稳定。前 3 次冻融过程中动荷载作用下的孔隙水压力消散数值要大于静荷载,之后随着冻融循环次数的增加,两种荷载作用下孔隙水压力消散数值相差逐渐减小。这主要是由于上覆荷载作用使得已融区土体内部孔隙变小,水分逐渐排出,而排出的水分会随着冻融循环次数的增加而减小,故使得融沉变形以及孔压消散数值逐渐减小。而对于动荷载而言,在卸载时,孔隙回弹产生吸力,加速了水分的排出,而试验又无外界补水,使得前几次冻融过程中孔隙水压力消散数值大于静荷载。

#### 2.5 不同高度处含水率的变化

图 12 给出了干密度为  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时,试验完成后试样在不同高度处的含水率分布。可以看出试

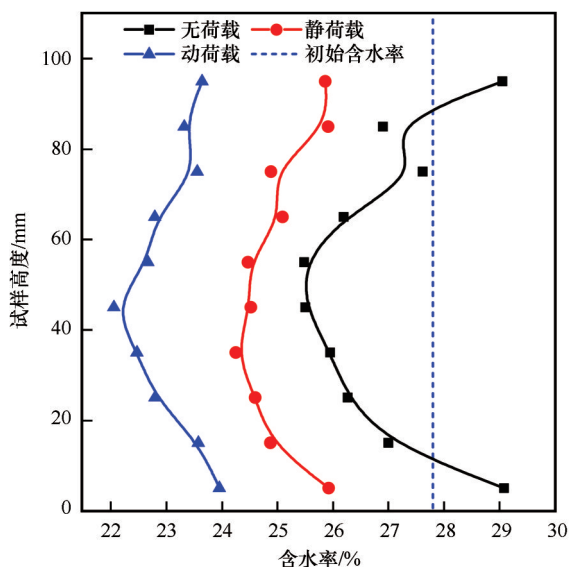


图12 不同荷载作用下含水率沿试样高度的分布

Fig. 12 Distributions of water content along the samples under different loads

样内部含水率沿高度出现先减小后增大的趋势,且与初始含水率相比出现了大幅度的下降。这主要是由于当顶板边界温度上升到 $0^{\circ}\text{C}$ 时,试样开始融化,在已融区,上覆荷载挤压土体,孔隙变小,水分逐渐排出,从而使得土体内部含水率大幅度下降。当顶板边界温度下降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下时,试样开始冻结。由于在进行试验时,试样底端温度始终保持 $-1^{\circ}\text{C}$ ,试样产生双向冻结,这就使得试样中间位置处的水分开始向试样两端迁移,从而导致含水率沿高度呈先减小后增大的趋势。动荷载作用下的含水率下降幅度要比静荷载作用下大。这主要是由于在融化阶段,动荷载卸载时,孔隙会产生真空吸力,水分向上迁移,从而使得加载时加速了水分向外排出的速度,故含水率下降幅度变大<sup>[29]</sup>。

在无荷载作用下,试验结束后试样的平均含水率为26.9%,较初始含水率下降了1%。在静荷载作用下,试验结束后试样的平均含水率为25%,较初始含水率降低了2.8%,在试样顶部和底部含水率分别为25.9%、25.8%,较初始含水率降低了2%。在距离试样顶面大约65 mm位置处含水率下降的幅度最大,约为24.2%,较初始含水率降低了3.6%。在动荷载作用下,试验结束后试样的平均含水率为23.1%,较初始含水率降低了4.7%,在试样顶部和底部含水率分别约为23.9%、23.6%,较初始含水率减小了3.9%。在距离试样顶面大约55 mm位置处含水率下降的幅度最大,约为22%,较初始含水率

降低了5.8%。

### 3 讨论

在周期温度边界条件下,冻土的融化沉降变形主要受荷载类型、初始干密度等参数的影响。通过研究发现,这些参数对融化沉降变形的影响,都主要归结于孔隙水压力的消散与分布。在无荷载作用下,由于水分无法排出,孔隙水压力消散数值较小,故融沉变形较小。在静、动荷载作用下,由于水分的逐渐排出,孔隙水压力消散较快,且消散数值动荷载大于静荷载,从而导致动荷载作用下的融沉变形大于静荷载。另外根据章节2.5中试验结束后试样平均含水率的变化情况,进一步说明了无荷载、静荷载、动荷载作用下融沉变形的差异。

研究中试样的变形是通过伺服控制系统测得(变形测量精度为 $\pm 1\%$ )。对于孔隙水压力,试验中采用微型孔隙水压力传感器测得。该传感器采用电压输出,主要由陶土头、硅压阻芯片、放大器三部分组成。但由于传感器陶土头与试样的接触面较小,从而使得研究中测出的孔隙水压力偏小。因此,为了能够更加准确的研究孔隙水压力的变化,在其测试手段以及传感器方面,还有待进一步的改善。

### 4 结论

通过系列室内试验,研究了青藏粉质黏土试样在周期温度边界和上覆荷载共同作用下竖向变形以及孔隙水压力的变化规律,分析了试样内部温度、竖向变形、孔隙水压力随时间的变化过程,以及试验结束后含水率沿试样高度方向的分布情况。结合试验结果及分析,得到主要结论如下:

(1)在 $-8\sim 24^{\circ}\text{C}$ 之间正弦波动的周期温度边界条件下(试样初始温度为 $-1^{\circ}\text{C}$ ),不同荷载作用下试样内部温度响应过程差异显著,反映了荷载对冻土融化速率的影响。在无荷载作用下,当冻融循环至第4次时,试样融化锋面的高度为16.5 mm,之后随着冻融循环次数的增加,融化锋面基本保持不变。在上覆荷载作用下,试样在第2次冻融过程中已全部融化。

(2)在无荷载作用下,试样的竖向变形呈线性发展趋势,而静荷载和动荷载作用下试样的竖向变形呈先快速增加后逐渐稳定的趋势,且融沉变形主要发生在前3~4个冻融循环过程。在无荷载和动荷



载作用下,冻结过程中试样存在明显冻结膨胀变形,而静荷载作用下试样无此变形过程。静、动荷载作用下试样竖向变形大于无荷载。

(3)在无荷载作用下,试样的孔隙水压力变化过程周期特征不明显且变化幅度小。而在静、动荷载作用下,试样的孔隙水压力变化过程表现出明显的周期特征,其积累与消散过程明显,量值较大。在动荷载作用下,试验后期孔压的负压过程较静荷载明显。孔隙水压力消散越快试样融化沉降率越大。在前3次冻融循环过程中,动荷载作用下的孔隙水压力消散数值要大于静荷载,之后随着冻融循环次数的增加,两者差异逐渐减小。

(4)受融化固结过程中排水固结过程影响,试验结束后试样内部含水率减小,其中试样中部的含水率减小幅度最大。在静、动荷载作用下试样含水率减小幅度明显大于无荷载作用下的数值。

#### 参考文献(References):

- [1] Wu Qingbai, Mi Haizhen. Changes in permafrost processes and control suggestions for warm permafrost sections of Qinghai-Tibet Highway[J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 2000, 27(20): 14-17. [吴青柏, 米海珍. 青藏公路高温冻土路段冻土过程的变化和控制建议[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(20): 14-17.]
- [2] Cheng Guodong, Zhao Lin. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Tibetan plateau[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(6): 521-531. [程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题[J]. 第四纪研究, 2000, 20(6): 521-531.]
- [3] Wang Shaoling, Zhao Lin, Li Shuxu, et al. Study on thermal balance of asphalt pavement and roadbed stability in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 111-118. [[王绍令, 赵林, 李述训, 等. 青藏公路多年冻土段沥青路面热量平衡及路基稳定性研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 111-118.]
- [4] Li Shuxun, Wu Ziwang. The change of thaw bulb under asphalt pavement in the region of permafrost on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(2): 133-140. [李述训, 吴紫汪. 青藏高原多年冻土区沥青路面下融化盘形成变化特征[J]. 冰川冻土, 1997, 19(2): 133-140.]
- [5] Wu Qingbai, Liu Yongzhi, Zhu Yuanlin. Thermal state of active layer under asphalt pavement of Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(2): 23-25. [吴青柏, 刘永智, 朱元林. 青藏公路沥青路面下活动层的热状态分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(2): 23-25.]
- [6] Li Yongqiang, Han Limin. Engineering geological characteristic and evaluation of permafrost ground along Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(2): 245-249. [李永强, 韩利民. 青藏铁路多年冻土工程地质特征及其评价[J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 245-249.]
- [7] Ma Wei, Wang Dayan. Frozen Soil Mechanics[M]. Beijing: science press, 2014. [马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014]
- [8] Watson G H, Slusarchuk W A, Rowley R K. Determination of some frozen and thawed properties of permafrost soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, 10(4): 592-606.
- [9] Speer T L, Waston G H, Rowley R K. Effects of ground ice variability and resulting thaw settlements of buried warm oil pipelines [C]//Proc. 2nd Int. Cont. permafrost, Yakutsk, U. S. S. R., 1973: 746-751.
- [10] Mcroberts E C, Law T C. and Moniz E. Thaw settlement studies in the discontinuous permafrost zone [C]//Proc. 3rd Int. Cont. permafrost, Edmonton, Canada, 1978, 700-706.
- [11] Nelson R A, Luscher U, Rooney J W, et al. Thaw strain data and thaw settlement predictions for Alaskan soils [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost. Washington, DC: USA Natl Acad Press, 1983, 912-917.
- [12] Morgenstern N R, Nixon J F. One dimensional consolidation of thawing soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1971, 8(4): 558-565.
- [13] Carslaw H S, Jaeger J C. Calculation of heat in soils [M]. Clarendon Press, Oxford, 1947.
- [14] Sykes J F, Lennox W C, Charlwood R G. Finite element permafrost thaw settlement model [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1974, 100(GT11): 1185-1201.
- [15] Sykes J F, Lennox W C, Unny T E. Two-dimensional heated pipeline in permafrost [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1974, 100(GT11): 1203-1215.
- [16] Foriero A, Ladanyi B. FEM assessment of large-strain thaw consolidation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(2): 126-138.
- [17] Wang W, Wang L, Yu Fan, et al. One dimensional thaw consolidation behaviors with periodical thermal boundaries [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015: 1-9.
- [18] Wang Lanming, Wang Wenli, Yu Fan. Thaw consolidation behaviors of embankments in permafrost regions with periodical temperature boundaries [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 109: 70-77.
- [19] Ma Wei. The theory model of frozen soil thaw-consolidation process [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 1988. [马巍. 冻土融化固结问题的理论模型[D]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1988.]
- [20] Yao Xiaoliang, Qi Jilin, Wu Wei. Three dimensional analysis of large strain thaw consolidation in permafrost [J]. Acta Geotechnica, 2012, 7(3): 193-202.
- [21] Qi Jilin, Yao Xiaoliang, Yu Fan. Consolidation of thawing permafrost considering phase change [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(6): 1293-1301.
- [22] Shi Feng, Liu Jiankun, Du Yan. Study on thawing settlement under dynamic loading in 109th National Highway [C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2013, 405: 270-274.
- [23] Peng Liyun, Liu Jiankun. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 32(4): 567-572. [彭丽云, 刘建坤. 正融粉质黏土在循环荷载作用下的变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(4): 567-572.]
- [24] Yao Xiaoliang, Qi Jilin, Liu Mengxin, et al. Pore water pressure distribution and dissipation during thaw consolidation [J]. Transport in Porous Media, 2017, 116(2): 435-451.

- [25] Ming Feng, Li Dongqing, Zhang Yu. One dimensional thaw settlement of saturated frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016 38(4): 1067-1073. [明锋, 李东庆, 张宇. 一维饱和冻土融化固结分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(4): 1067-1073. ]
- [26] Cheng Peifeng, Wang Jiakang. Effect of freezing-thawing cycles on consolidation deformation characteristics of natural over-wet soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019 41(4): 858-864. [程培峰, 王佳康. 冻融循环对原状过湿土固结变形特性的影响[J], *冰川冻土*, 2019, 41(4): 858-864. ]
- [27] Liu Yongzhi, Wu Qingbai, Zhang Jianming. et al. Deformation of highway roadbed on permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau [J] *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 10-15. [刘永智, 吴青柏, 张建明, 等. 青藏高原多年冻土地区公路路基变形[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 10-15. ]
- [28] Qi Jilin, Yao Xiaoliang, Yu Fan, et al. Study on thaw consolidation of permafrost under roadway embankment [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 81: 48-54
- [29] Zhang Kun, Zhang Ze, Shi Xiangyang, et al. The temperature and pore water pressure in soil subjected to dynamic load [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2018, 35(2): 111-118. [张坤, 张泽, 史向阳, 等. 动荷载下土体温度和孔隙水压力的变化规律[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2018 35(2): 111-118. ]
- [30] Li Xin, Cheng Guodong. A GIS-aided response model of high altitude permafrost to global change [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(2): 185-192.
- [31] Cheng Guodong. The impact of local factors on permafrost distribution and its inspiring for design Qinghai- Xizang Railway [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(6): 602-607.
- [32] Wang Wenli, Wang Lanmin, Wang Qian. One-dimensional thawing consolidation behavior with periodical thermal boundary [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 895-901. [王文丽, 王兰民, 王谦. 周期温度边界条件下二维融化固结特性研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 895-901. ]
- [33] Zhang Lianhai, Ma Wei, Yang Chengsong. Pore water pressure measurement for soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1856-1864. [张莲海, 马巍, 杨成松. 冻融循环过程中土体的孔隙水压力测试研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1856-1864. ]

## Experimental study of thaw-settlement process of frozen soil under different load conditions

HUANG Yongting<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>1,2</sup>, HE Pengfei<sup>1,2,3</sup>, LI Xiaolin<sup>1,2,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Jiaxing University, Jiaxing 314001, Zhejiang, China)

**Abstract:** Thaw settlement is one of the key factors those could affect the construction and safety of projects in permafrost areas. Through experimental tests, thawing settlement tests of the frozen saturated soil samples with the initial temperature of  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  under unload, static and dynamic loads are carried out for two soil samples of Qinghai-Tibet silty clay with different initial dry densities at periodical temperature boundary conditions with sinusoidal fluctuations between  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . and the variation of temperature, vertical deformation and pore water pressure in soil samples under different loads are investigated. The results show that the temperature response processes in the soil samples vary significantly under different loads when the temperature boundary conditions are same, reflecting the effect of load on the thawing rate of frozen soil. The vertical deformation of the soil samples under unload shows a linear development trend, and the thaw settlement changes little during each freezing-thawing process. However, the vertical deformation of the soil samples tends to increase rapidly and then stabilize gradually under the static and dynamic loads, and the thaw settlement deformation mainly occurs in the first 3~4 freeze-thaw cycle process. At the end of the test, the final vertical deformation of the soil samples under the static and dynamic loads is greatly larger than that under the unload, and the final vertical deformation is larger when the initial dry density is smaller. The changing amplitude of pore water pressure in the soil samples under the dynamic load is significantly larger than that under the static load, and during the first three freeze-thaw cycles, the pore water pressure dissipation value under the dynamic load is larger than that under the static load, and then the difference in pore water pressure gradually decreases with increasing freeze-thaw cycles. The thaw settlement deformation of the soil samples is closely related to the temperature change, pore water pressure accumulation and dissipation process. The test results could provide a basis for the theoretical study of thaw consolidation under complex boundary conditions and the prediction of thaw settlement deformation of foundation soil in engineering practice.

**Key words:** thawing rate; deformation; pore water pressure; freeze-thaw cycles; different loads

(责任编辑: 李国玉; 编辑: 周成林)