

文章编号:1000-0240(2012)03-0625-07

## 青藏粉质黏土冻融循环试验研究

张世民<sup>1,2</sup>, 李双洋<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. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**以青藏公路沿线常遇到的青藏粉质黏土作为研究对象,在室内分别进行了1、2、3、4次冻融循环试验,分析了冻融前后试样的温度分布特征、水分分布特征、冻融位移变化特征。结果表明:多次冻融循环的冻结过程中,温度场分布更趋向均衡和平稳,0℃等温线和低温等温线趋向深部发展;多次冻融循环后,试样含水量可划分4个区域,第1区域为表层冰晶聚集高含水量区,第2区域为低温梯度含水量均衡区域,第3区域为冷锋面冰透镜冰层积聚高含水量区域,第4区域为高温低含水量区域;青藏粉质黏土首次冻结的冻胀位移量和相对冻融位移量都比较大,冻胀量可以达到几十毫米,冻胀率可达8.3%,伴随冻融次数增加,相对冻胀量和相对冻融量幅值逐渐减少。

**关键词:**冻融过程;温度分布;含水量分布;冻胀位移量

**中图分类号:**P642.14 **文献标识码:**A

### 0 引言

多年冻土和季节冻土广泛分布在青藏高原、内蒙古高原及东北地区,由于其对水、热的敏感性,在大气周期性气温的作用下,常常发生季节性冻融循环,甚至日冻融循环<sup>[1]</sup>。在冻融循环的作用下,冻土的温度场、水分场、应力场相应发生着变化,冻土的结构和物理力学性质将明显的改变<sup>[2]</sup>,这些变化常常引起路基的冻胀和融沉变形,严重的影响道路安全运营。在路基坡脚季节性积水区域或路基坡脚排水不畅的区域,在周期性的冻融循环作用下,水分的迁移积累常常造成路基的冻胀、开裂、翻浆等病害,基于冻融循环对于道路工程的影响,开展冻融循环研究非常具有必要性。

目前,冻融循环对重塑土或改良土的物理力学性质、水分迁移等方面的研究较为活跃。在冻融对土物理性质的影响方面,梁波等<sup>[3]</sup>对青藏铁路清水河、北麓河试验段不同土质,在不同含水率、密实度、荷载条件下,反复冻融过程中的融沉特性进行了研究。苏谦等<sup>[4]</sup>系统的研究了冻融循环对青藏斜

坡黏土含水量、密度、黏聚力、内摩擦角的影响。Liu等<sup>[5]</sup>对周期冻融循环下的水泥改良黏土和石灰改良黏土的动力特性,最优配合比,弹性模量等做了详细的试验研究。冯勇等<sup>[6]</sup>分析了冻融循环对不同含水量、密实度、易溶盐含量、黏粒含量的土抗剪强度指标的影响。Ghazavi等<sup>[7]</sup>分析了冻融循环对金属纤维和聚丙烯纤维强化黏土的无侧限抗压强度的影响。王天亮<sup>[8]</sup>等对冻融循环后的水泥及石灰改良土进行了动力特性研究。Hazirbaba等<sup>[9]</sup>对土工纤维和有机液体改良的细颗粒土的加州承载比与冻融循环关系进行了分析。王威娜等<sup>[10]</sup>分析了回弹模量随冻融循环次数变化的特征。董晓宏等<sup>[11]</sup>分析了冻融对不同含水率黄土的抗剪强度的影响,认为3~5次冻融之后,黄土的黏聚力和抗剪强度降到最低。Yao等<sup>[12]</sup>分析了冻融循环作用对青藏粉质黏土储存自由能的影响。刘寒冰等<sup>[13]</sup>对冻融循环下路基土进行了抗剪强度与塑性指数相关性的研究,建立了不同塑性路基土抗剪强度与围压、塑性指数及冻融循环次数的关系。

在冻融对土的水分迁移和孔隙水压力影响方

收稿日期:2011-12-06;修订日期:2012-04-18

基金项目:中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-19);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB026102);国家自然科学基金创新群体项目(41121061);国家自然科学基金项目(50976120)资助

作者简介:张世民(1982—),男,河南洛阳人,2006年在兰州交通大学获硕士学位,现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所读博士研究生,主要从事冻土工程、冻土路基方面研究工作。E-mail: zsmcivil@163.com

面, Hazirbaba 等<sup>[14]</sup>分析了温度、温度路径、冻融路径和次数对超空隙水压力产生的影响。赵刚等<sup>[15]</sup>分析了初始含水率或温度模式对东北粉质黏土水分迁移的影响,同时,对冻结的裂缝现象,水分积聚,含冰量不均匀进行了描述。毛雪松等<sup>[16]</sup>基于自主研发的温度-湿度-荷载综合模型试验测试系统,分析了冻结过程温度梯度变化特征、未冻水变化特征以及冻融次数对路基回弹模量的影响。尽管冻融循环方面开展的诸多科研工作取得了一些有价值的科研成果,但是对于青藏粉质黏土在冻融循环下的温度、水分迁移和冻融位移特征还缺少综合和详细的观察、分析与试验研究。而开展青藏粉质黏土的冻融循环研究,不仅可以详细地了其冻融循环特性,还可以为冻土数值模拟计算提供参考和校验。因此,路基填料的冻融过程研究具有重要的科研价值和工程意义。同时,青藏粉质黏土,在青藏高原北麓河区域分布广泛,在缺少优质路基填料的路段,偶被用做公路路基填料,在地下水、地表水发育区域,冻融循环作用下常常引起路基冻害。因此,开展路基填料土-青藏粉质黏土冻融过程研究,不仅可以了解青藏粉质黏土冻融机理特征,而且可为预防和控制青藏粉质黏土路基病害提供技术支持和参考。

## 1 青藏粉质黏土室内冻融循环试验

### 1.1 室内冻融循环试验条件

青藏粉质黏土取样于北麓河平原,试验颗粒分析如图 1 所示。粒径小于  $2 \mu\text{m}$  的颗粒含量约为

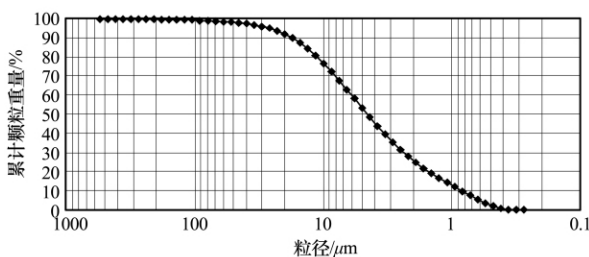


图 1 青藏粉质黏土颗分图

Fig. 1 Particle size analysis of the Tibetan silty clay

表 1 青藏粉质黏土冻融循环试验条件

Table 1 Experimental condition of the Tibetan silty clay for freeze-thaw cycle test

试样编号	冻融次数	顶板温度/ $^{\circ}\text{C}$	底板温度/ $^{\circ}\text{C}$	初始含水量/ $\%$	干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
C1	1	-6	2.0	18.05	1.793
C2	2	-6	2.0	18.13	1.797
C3	3	-6	2.0	18.38	1.792
C4	4	-6	2.0	18.07	1.794

注:冻结前没有经过恒温过程,起始温度为室温。冻结开始时,顶板有个降温过程;开始融化时,顶板有个升温过程。底板和箱体温度在冻融过程中保持  $+1^{\circ}\text{C}$ 。

25%,粒径小于  $0.005 \text{ mm}$  的颗粒含量约为 58%,粒径小于  $0.075 \text{ mm}$  的颗粒含量约为 98%。

试验装置如图 2 所示。整套试验装置由冻融试样筒、恒温箱、制冷与温度控制系统、补水、变形监测等几个部分组成<sup>[17]</sup>,试验过程采用开放无压补水。



图 2 青藏粉质黏土冻融循环过程仪器

Fig. 2 The apparatus of freeze-thaw cycle test

### 1.2 试验方案与试验控制

试验编号及试验条件如表 1 所示,实验设计要点如下:1) 土样采用同一批次青藏粉质黏土,以减小土样的差异性对试验的影响,为保障试样初始含水量的均匀性,土样经过 24 h 时的闷样处理,然后采用分层击实法制样;2) 在相同上下底板温度和箱内温度的条件下,采用初始含水量、初始密度相近的 4 组土样,分别进行 1、2、3、4 个冻融循环周期试验;3) 对初始含水率均匀的试样,在冻融试验箱内进行周期冻结融化,即采用有上而下逐步冻结,每一个冻结过程开始到结束持续 5 d,然后在室温条件下融化 2 d,按设计冻融周期分别进行试验;

4)最后一个冻融周期循环,冻结结束后,试样不进行融化,直接拆样进行分层切片水分分布测试,以防止冰层冰晶融化,造成含水量分布改变. 试验中试样直径为 20 cm,高度为 22 cm.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冻融循环温度变化分析

在图 3~6 中,由于一次冻结过程简单,所以采用特征时刻剖面温度曲线有利于分析冻结平衡界限. 而多次冻融温度周期性重复,数据量大,因此采用等温线云图较有利综合观察分析总体温度时程特征和冻融平衡界限. 结合图 3 分析一次冻融循环过程,可见冻结 2 d 后,温度变化比较平稳,0 °C 等值线最后稳定在深度 14 cm 左右.

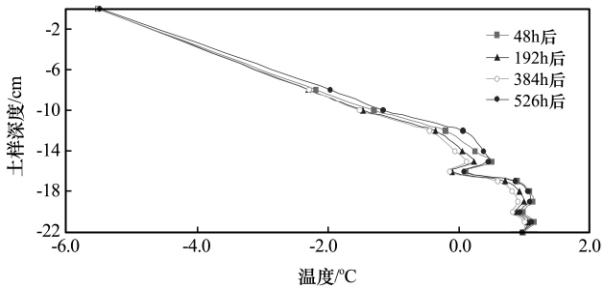


图 3 青藏粉质黏土 1 次冻融循环前后剖面温度变化  
Fig. 3 The temperature profiles of Tibetan silty clay after one freeze-thaw cycle(°C)

从图 4(a)中可见,2 次冻结循环过程后,第 1

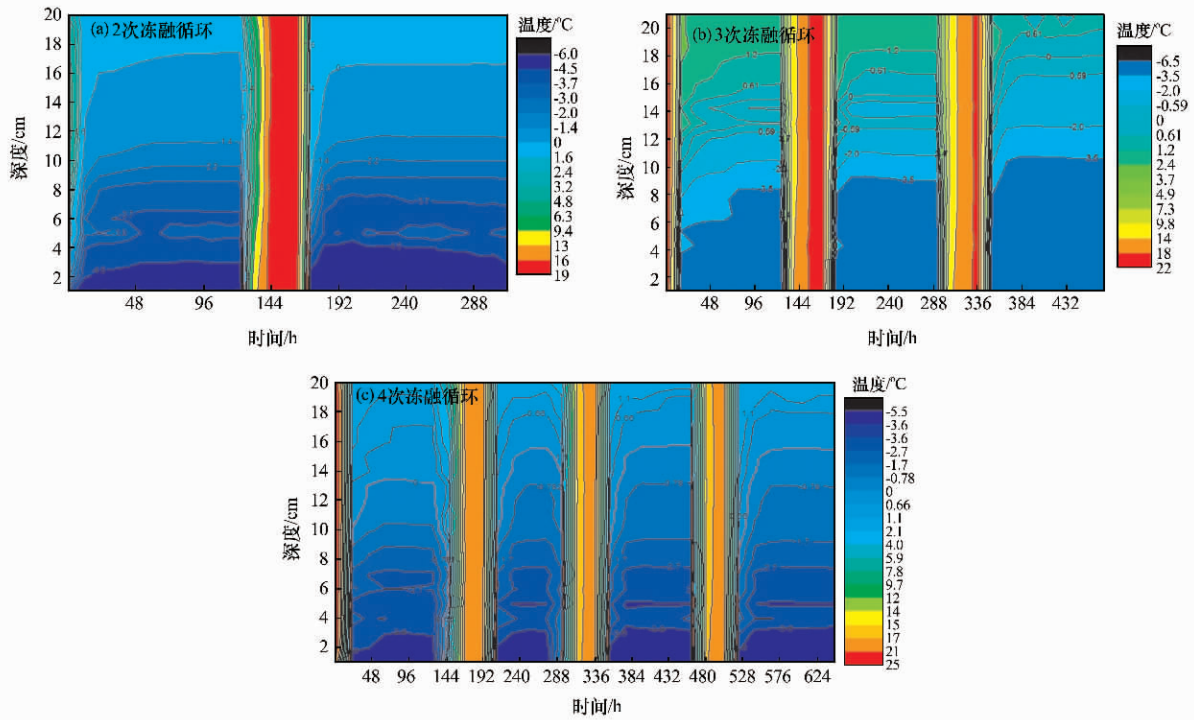


图 4 青藏粉质黏土 2 次(a),3 次(b),4 次(c)冻融循环前后温度变化云图

Fig. 4 The isothermal cloud diagrams of Tibetan silty clay for 2(a), 3(b) and 4(c) freeze-thaw cycles

次冻结大约 48 h 后,冻结状态基本稳定;0 °C 等值线随着冻结逐渐增深,最后稳定在深度 15 cm 左右. 第 2 次冻结,0 °C 等值线最后稳定在深度 16 cm 左右. -1.4 °C 和 -2.0 °C 温度等值线在第 1、2 次冻结过程发展平稳,-3.0 °C 和 -3.7 °C 温度等值线随冻结次数向深部发展明显.

3 次冻融循环过程参图 4(b),可见,第 1 次冻结稳定后,0 °C 等值线最后稳定在深度 13 cm 左右;第 2 次冻结,0 °C 等值线最后稳定在深度 14 cm 左右;第 3 次冻结,0 °C 等值线最后稳定在深度 16 cm 左右. -3.5 °C、-2.0 °C、-0.59 °C 温度等值线伴随冻融次数增加逐渐向下移动.

依据图 4(c)分析 4 次冻融循环过程可知,第 1 次冻结稳定后,0 °C 等值线最后稳定在深度 13 cm 左右;第 2 次冻结,0 °C 等值线最后稳定在深度 15 cm 左右. 第 3 次冻结,0 °C 等值线最后稳定在深度 15 cm 左右;第 4 次冻结,0 °C 等值线最后稳定在深度 15 cm 左右. -0.78 °C、-1.7 °C、-3.6 °C 温度等值线一伴随冻融次数增加逐渐向下移动.

从以上分析可以得出,伴随冻融次数的增加,0 °C 等温线逐渐向深部发育,同时低温区逐渐向深部发展,冻结温度场分布趋向均衡分布.

### 2.2 冻融循环前后含水量变化分析

试样经过冻融循环作用,含水量发生了明显的

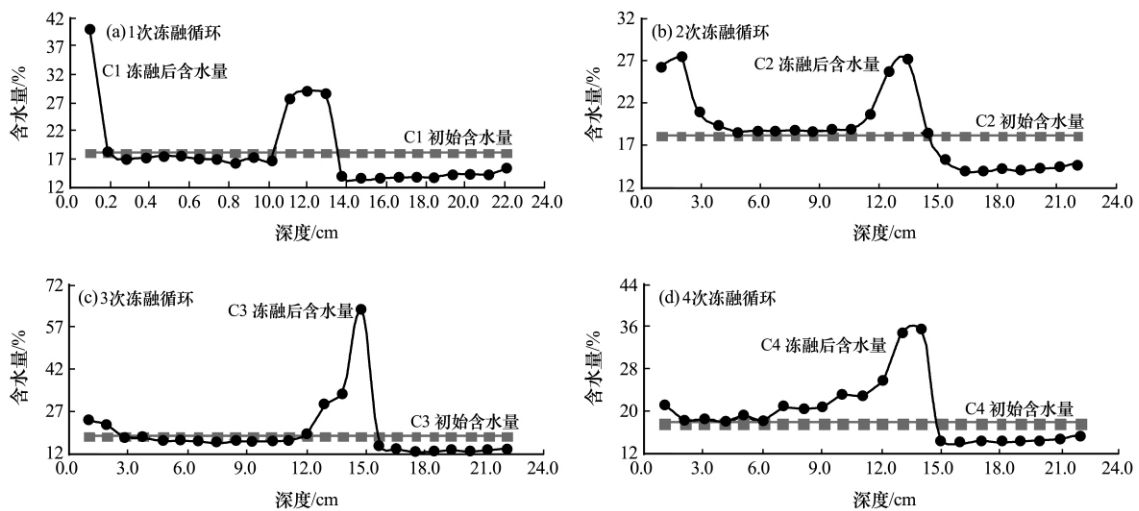


图5 青藏粉质黏土1次(a)、2次(b)、3次(c)、4次(d)冻融循环前后含水量变化曲线

Fig. 5 The moisture content vs. depth curves for 1(a), 2(b), 3(c) and 4(d) freeze-thaw cycles

迁移和重新分布现象. 从图5(a)中, 可以看到1次冻融循环过程后, 在深度2.0 cm以内含水量显著增加, 1.0 cm深度内含水量增加达40.2%; 在深度10.4~13.5 cm, 最大含水量为29.1%, 含水量也显著增加, 此高含水量区域主要为冻结锋面区域, 水分迁移积聚量相对比较大; 13.5 cm深度一下, 含水量相比初始含水量有所减少, 减少量约2.5%~5.5%, 主要是水分迁移所致.

经过2次冻融循环过程, 如图5(b), 在深度4.0 cm以内含水量显著的增加, 2.0 cm处含水量达28%; 在深度10.6~14.4 cm, 最大含水量27.2%; 14.4 cm深度一下, 含水量相比初始含水量有所减少, 减少量约3.3%~4.9%. 结合图5(c), 可见, 经过3次冻融过程, 在深度2.5 cm以内含水量显著的增加, 1.0 cm处含水量达23.9%; 在深度12.0~15.0 cm, 最大含水量63.49%; 15.0 cm深度一下, 含水量相比初始含水量有所减少, 减少量约3.5%~5.1%.

经过4次冻融循环过程(图5d), 在深度2.0 cm以内含水量显著的增加, 1.0 cm处含水量达22.44%; 在深度7.0~14.5 cm, 最大含水量35.66%; 14.5 cm深度一下, 含水量相比初始含水量有所减少, 减少量约3.4%~3.8%.

由图6及上述分析, 可以看到C1、C2、C3、C4试样的冻融过程后, 含水量总体划分为4个区域: 第1区域, 在试样表层深度4 cm以内, 含水量都有增加的现象, 主要是反复冻融作用下, 试样表面冰晶积聚的缘故, 可定名为表层冰晶聚集高含水量区; 第2区域大约在4~10 cm之间, 含水量比第1

和第3区域要小, 但和初始含水量相比, 增减幅度较小, 可能与制样、土质、水分初始分布不均有关系, 有待进一步研究, 可定名为低温梯度内含水量均衡区; 第3区域在多次冻融稳定后冷锋面附近区域, 其含水量增加尤为显著, 主要分布在深度10~16 cm, 由水分迁移, 冰晶和冰透镜体析出积聚、发育所造成. 冻融作用后, 试样分层切片测试含水量时, 明显可观察到, 稳定冻结锋面区域, 有相对较宽冻胀裂隙发育(图7), 有显著积聚层状冰附着(图8), 可定名此区域为冷锋面冰透镜冰层积聚高含水量区; 第4区域约在16~22 cm, 含水量仍有所减少, 主要是由于在温度梯度下, 水分向第3区域迁移所造成的, 尽管有开放无压补水作用, 其含水量明显小于第1、第2和第3区域含水量, 此区域可定名为高温低含水量区域.

### 2.3 冻融循环位移变化分析

在冻融循环试验中, 冻融呈现周期性变化. 为表述清晰, 对本文所用名词(冻胀量、冻胀位移、相对冻胀量和相对冻融量)进行解释. 冻胀量是以试样初始状态为基准, 第一次冻结最终位移增加量; 冻胀/融沉位移是以试样初始状态为基准, 计算的某次冻胀/融沉位移量; 相对冻胀量是以前一次融化稳定后的位移为基准, 计算冻结过程中的位移增加量. 相对冻融量是以某次冻胀位移最大值为基准, 计算其融化沉降量.

从图9(a)中可见, 黏土试样C1经过526 h冻结, 在补水的条件下, 粉质黏土冻胀量达到18.25 mm, 冻胀率达8.3%. 经过2次冻融循环过程的青藏粉质黏土参图9(b), 试样第1次冻结融化过程

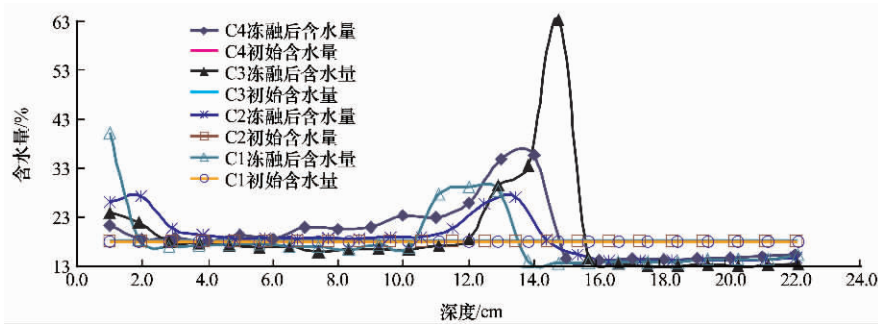


图 6 青藏粉质黏土冻融循环前后含水量变化

Fig. 6 The moisture content curves of Tibetan silty clay before after freeze-thaw cycle test



图 7 青藏粉质黏土冻胀裂隙

Fig. 7 The fissuring within the specimen of Tibetan silty clay after freeze-thaw cycle test



图 8 青藏粉质黏土冻融循环后裂隙面中层状冰

Fig. 8 The lamellar ices within the specimen of Tibetan silty clay after freeze-thaw cycle test

中, 冻胀量为 2.71 mm, 融化位移达到 -7.07 mm,

相对冻融量为 9.78 mm; 在第 2 次冻结过程, 冻胀位移达到 -3.94 mm, 相对冻胀量为 4.13 mm.

从图 9(c)可见, 经过 3 次冻融循环过程的青藏粉质黏土, 第 1 次冻胀量为 3.36 mm, 融沉位移为 -4.97 mm, 相对冻融量为 8.33 mm; 第 2 次冻胀位移为 0.35 mm, 融沉位移为 -4.79 mm, 相对冻融量为 5.14 mm; 第 3 次冻胀位移为 0.27 mm. 由此可见, 多次冻胀位移量有逐渐减少的趋势, 融沉位移量也有减小的趋势, 但第 1 次相对冻融量较大.

由图 9(d)可见, 经过 4 次冻融循环过程的青藏粉质黏土, 第 1 次冻胀量为 5.47 mm, 融沉位移为 -2.77 mm, 相对冻融量为 8.24 mm; 第 2 次冻胀位移为 0.44 mm, 融沉位移为 -2.89 mm, 相对冻融量为 3.33 mm; 第 3 次冻胀位移为 1.13 mm, 融沉位移为 -3.05 mm, 相对冻融量为 4.18 mm; 第四次冻胀位移为 1.18 mm. 由此可见, 第 1 次冻胀量、融沉量和相对冻胀融沉量都比其后的第 2、3、4 次要大.

结合图 10, 可见 C1、C2、C3、C4 试样的冻融循环过程中, 位移量有一定的差异, 可能与重塑土的土质及试样制作的差异性有关. 但是 4 个试样第 1 次冻胀位移变化趋势基本一致, 长期冻结过程中, 粉质黏土的冻胀量可达到几十毫米, 冻胀量较大. 首次冻胀和融沉的位移量也比较大, 多次相对冻融量约为首次冻融量的 40%~60%, 伴随多次冻融作用, 冻胀量和融沉量会有平稳减小的趋势.

### 3 结论

经过冻融循环试验, 对 4 个青藏粉质黏土试样的冻融前后的温度分布特征、水分分布特征和冻融位移特征进行分析, 可得到如下结论:

(1) 多次冻融循环后, 粉质黏土试样温度场分布更加均衡和平稳, 0 °C 等温线和低温等温线趋向



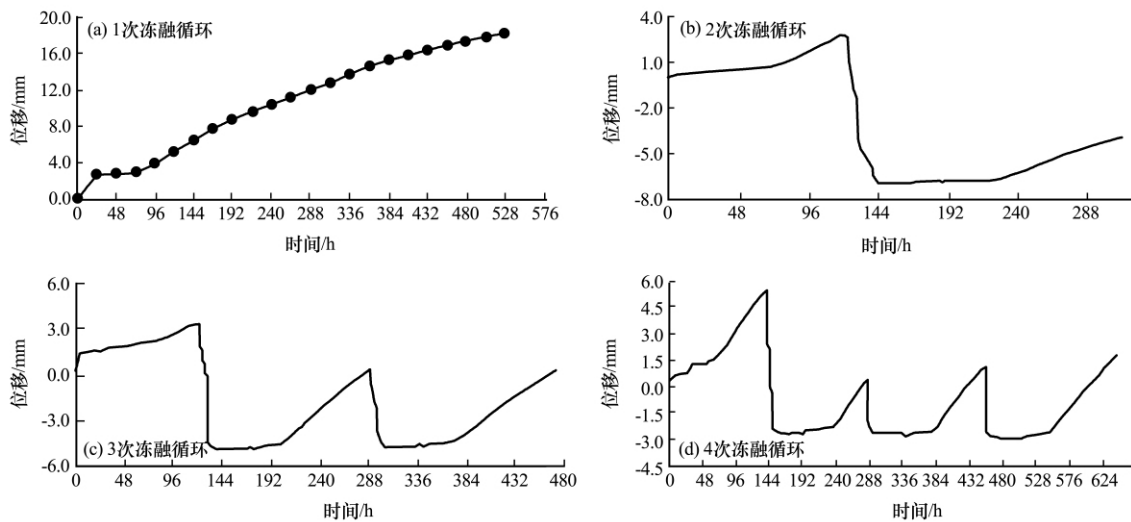


图9 青藏粉质黏土1次(a),2次(b),3次(c),4次(d)冻融循环前后位移变化

Fig. 9 The displacement vs. time curves for 1(a), 2(b), 3(c) and 4(d) freeze-thaw cycles

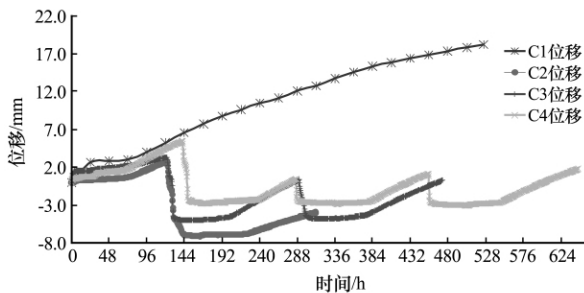


图10 青藏粉质黏土冻融循环前后位移变化

Fig. 10 The displacement vs. time curves for different freeze-thaw cycle process

深部发展。

(2) 多次冻融循环后,粉质黏土试样含水量主要分4大区域,第1区域为表层冰晶聚集高含水量区,一般深度在0~4 cm;第2区域为低温梯度内含水量均衡区域,一般深度在4~13 cm;第3区域为冷锋面冰透镜冰层积聚高含水量区域,一般深度在13~16 cm;第4区域为高温低含水量区域,深度在16~22 cm。

(3) 青藏粉质黏土首次冻结的冻胀位移量和相对冻融位移量都比较大,长期冻结过程,冻胀量可以达到几十毫米,冻胀率可达8.3%。伴随冻融次数增加,冻胀位移量和相对冻融位移量会逐渐减少。

#### 参考文献 (References):

[1] Yang Meixue, Yao Tandong, Hirose Nozomu, *et al.* Daily freeze-thaw cycle of surface soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(16): 1974-1976. [杨梅学, 姚檀栋, Hirose Nozomu, 等. 青藏高原表层土壤的日冻融循环[J]. 科学通报, 2006, **51**(16): 1974-1976.]

[2] Henry H A L. Soil freeze thaw cycle experiments; Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, **39**: 977-986.

[3] Liang Bo, Zhang Guisheng, Liu Deren. Experimental study on thawing subsidence characters of permafrost under frost heaving and thawing circulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1213-1217. [梁波, 张贵生, 刘德仁. 冻融循环条件下土的融沉性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1213-1217.]

[4] Su Qian, Tang Dijia, Liu Shen. Test on physico-mechanical properties of Qinghai-Tibet slope clay under freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(Suppl. 1): 2990-2995. [苏谦, 唐第甲, 刘深. 青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(Suppl. 1): 2990-2995.]

[5] Liu Jiankun, Wang Tianliang, Tian Yahu. Experimental study of the dynamic properties of cement-and lime-modified clay soils subjected to freeze thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, **61**: 29-33.

[6] Feng Yong, He Jianxin, Liu Liang, *et al.* Experimental study of the shear strength characteristics of fine-grained soil under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(6): 1013-1017. [冯勇, 何建新, 刘亮, 等. 冻融循环作用下细粒土抗剪强度特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(6): 1013-1017.]

[7] Ghazavi K M, Roustaei M. The impudence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, **61**: 125-131.

[8] Wang Tianliang, Liu Jiankun, Tian Yahu. Dynamic properties of cement-and lime-improved soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1733-1737. [王天亮, 刘建坤, 田亚护. 水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1733-1737.]

[9] Hazirbaba K, Gullu H. California bearing ratio improvement and freeze-thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid[J]. Cold Regions Science and

- Technology, 2010, **63**: 50–60.
- [10] Wang Weina, Zhi Xilan, Mao Xuesong, *et al.* Experimental study of resilience modulus of subgrade soil under circles of freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(5): 954–959. [王威娜, 支喜兰, 毛雪松, 等. 冻融循环作用下路基土回弹模量试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(5): 954–959.]
- [11] Dong Xiaohong, Zhang Aijun, Lian Jiangbo, *et al.* Study of shear deterioration of loess under repeated freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(4): 767–773. [董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(4): 767–773.]
- [12] Xiaoliang Yao, Jilin Qi, Wei Ma. Influence of freeze-thaw on the stored free energy in soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, **56**: 115–119.
- [13] Liu Hanbing, Wang Jing, Wei Haibin, *et al.* Correlation of subgrade soils shear strength and plasticity index under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology edition), 2011, **41**(Suppl. 2): 149–152. [刘寒冰, 王静, 魏海斌, 等. 冻融循环下路基土抗剪强度与塑性指数相关性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, **41**(Suppl. 2): 149–152.]
- [14] Hazirbaba K, Zhang Y, Hulse J L. Evaluation of temperature and freeze-thaw effects on excess pore pressure generation of fine-grained soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, **31**: 372–384.
- [15] Zhao Gang, Tao Xiaxin, Liu Bing. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009, **31**(12): 1952–1957. [赵刚, 陶夏新, 刘兵. 原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1952–1957.]
- [16] Mao Xuesong, Yang Jinfeng, Zhang Zhengbo, *et al.* Experimental study of integrated temperature-moisture-load effect on subgrade during freeze-thaw cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **32**(5): 427–435. [毛雪松, 杨锦凤, 张正波, 等. 温度-湿度-荷载综合作用下路基冻融过程试验研究[J]. 冰川冻土, 2012, **32**(5): 427–435.]
- [17] Xu Jian, Niu Fujun, Niu Yonghong, *et al.* Experimental analysis of frost susceptibility for remolded clayey loess[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2010, **32**(1): 24–30. [徐健, 牛富俊, 牛永红, 等. 重塑粉质黏土冻胀敏感性试验分析[J]. 土木建筑与环境, 2010, **32**(1): 24–30.]

## Experimental Study of the Tibetan Silty Clay under Freeze-Thaw Cycles

ZHANG Shi-min<sup>1, 2</sup>, LI Shuang-yang<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China; 2.Civil Engineering School, Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The Tibetan silty clay along the Qinghai-Tibet Highway was taken as the study object. The distribution of temperature and water content and freeze-thaw displacement of the specimens after 1, 2, 3 and 4 freeze-thaw cycles were obtained and analyzed. It is found that after freeze-thaw cycles, the temperature fields of the specimens will be more stable and proportionate distribution, the 0 °C isotherm and subzero isotherm will be deeper. The water content profile of the specimens can be divided into four sections. The first section is the surface layer one of high water content with ice

crystal accumulation. The second section is water content equilibrium one with low temperature gradient. The third section is high water content one with ice lens and ice layers. The fourth section is lower water content one at high temperature. For the first freeze-thaw cycle, there are large frost heaving displacement, even reaching dozens of millimeters, and large relative freeze-thaw displacement, even reaching 8.3%. As the freeze-thaw cycles increases, the frost heaving displacement and the relative freeze-thaw displacement will gradually drop off.

**Key words:** freeze-thaw process temperature distribution; water content profile; frost heaving displacement