

# 不同冻结温度条件下膨胀土冻融循环试验

许雷<sup>1</sup>, 薛洋<sup>1</sup>, 鲁洋<sup>1</sup>, 宋迎俊<sup>1</sup>, 张雨灼<sup>2</sup>, 孔维耀<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 为了研究冻融循环次数与冻结温度对膨胀土物理力学性质的影响规律,以南阳中膨胀土为试验对象,在不同冻融循环次数和冻结温度条件下对膨胀土试样进行变形测量和无侧限压缩试验。试验结果表明:膨胀土试样在冻融循环过程中体积变化表现为“冻缩融胀”,随着冻融循环次数的增多,试样的冻缩量 and 融胀量渐趋稳定,不同的冻结温度会改变试样的残余孔隙比。冻融循环作用对膨胀土的力学性质有着显著的影响,其第一次最为强烈,在冻融循环过程中,膨胀土试样的应力应变曲线形态显得越来越“瘦小”,破坏应变、无侧限抗压强度和弹性模量等参数均逐渐减小,当冻结温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ 时,膨胀土的力学参数受冻融循环作用的影响最大。

**关键词:** 膨胀土; 冻融循环; 冻结温度; 体积变化; 应力应变曲线; 强度; 弹性模量

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)05-0189-05

## Test of freeze – thaw cycle of expansive soil under condition of different freezing temperatures

XU Lei<sup>1</sup>, XUE Yang<sup>1</sup>, LU Yang<sup>1</sup>, SONG Yingjun<sup>1</sup>, ZHANG Yuzhuo<sup>2</sup>, KONG Weiyao<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute(group) Co. LTD., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to reveal the rule of influence of freeze – thaw cycles and freezing temperature on physical and mechanical properties of expansive soil, the paper took NanYang expansive soil as test object, and carried out deformation measurement and unconfined compressive test under different freeze – thaw cycles and freezing temperatures. The results showed that the volume change for expansive soil samples under freeze – thaw cycle could be expressed as “frost shrinking and thaw expanding”, with the increase of times of freeze – thaw cycles, the amount of frost shrinkage and thaw expansion of samples intended to be stable, the different freezing temperatures could change the residual porosity ratio of the samples. The mechanical properties of expansive soil could be affected by freeze – thaw cycles intensively, especially in the first time. In process of freeze – thaw cycle, the stress – strain curves of expansive soil samples became thin increasingly, and its failure strain, unconfined compressive strength and elastic modulus decreased gradually. When freezing temperature is  $-10^{\circ}\text{C}$ , the influence of freeze – thaw cycles on mechanical properties of expansive soils is the greatest.

**Key words:** expansive soil; freeze – thaw cycle; freezing temperature; volume change; stress – strain curve; strength; elastic modulus

在我国长江以北地区分布着广袤的季节性冻土,处于这些地区的岩土工程易受到冻融循环作用的影响。作为一种强风化过程,冻融循环作用会改变土体原有的结构性,进而影响其物理力学性质,对

工程的稳定安全构成严重威胁。南水北调中线工程是处于季节性冻土区的典型水利工程,该工程沿线分布着大量易受到冻融循环作用影响的膨胀土渠道边坡,在高低温交替的过程中,膨胀土不仅会产生水

收稿日期:2016-03-22; 修回日期:2016-05-24

基金项目:江苏省普通高校研究生实践创新计划项目(SJZZ15\_0058)

作者简介:许雷(1991-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事特殊土工程特性方面的研究。

通讯作者:鲁洋(1991-),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事水工岩土方面的研究。

分的冻结与融化,还会发生失水收缩与遇水膨胀的胀缩变形,所以无法将非膨胀性黏土的冻融效应直接应用在膨胀土上,因此有必要探究膨胀土自身所特有的冻融效应。

膨胀土作为一种工程上常见的特殊土,已有众多学者对其进行研究。吕海波等<sup>[1]</sup>探究了膨胀土的抗剪强度与含水率、循环次数等参数的关系,结果表明膨胀土的抗剪强度随着干湿循环次数的增加而衰减,最终趋于稳定,强度稳定值随含水率变化幅度的增加而减小。缪林昌等<sup>[2]</sup>通过试验发现膨胀土的强度随着含水量增加明显降低,黏聚力的下降要比摩擦角的下降表现得更明显。杨和平等<sup>[3]</sup>开展了不同荷载作用下干湿循环作用对膨胀强度变形特性影响的试验研究,发现膨胀土的胀缩变形不完全可逆,其抗剪强度随着干湿循环次数的增加逐渐下降。前人的研究很少考虑温度因素对膨胀土物理力学性质的影响,对膨胀土冻融效应的研究更是鲜有报道。因此,本文主要以南阳膨胀土为研究对象,进行了不同冻结温度条件下的冻融循环试验,以探究冻融循环次数和冻结温度对膨胀土物理力学性质的影响,为进一步认识处于季节性冻土区的膨胀土工程特性提供依据。

## 1 试验情况

### 1.1 试验土料与试样制备

试验所用的膨胀土取自南水北调中线工程输水总干渠南阳段建设工地,根据土工试验规程<sup>[4]</sup>,测得其基本物性指标:比重为 2.72;最大干密度为 1.78 g/cm<sup>3</sup>;最优含水率为 20%;液限为 42.6%;塑限为 22.5%;自由膨胀率为 67%;土颗粒组成见表 1。该土料属于中膨胀土,呈棕黄色。

表 1 膨胀土的土颗粒组成 %

粒径/mm	<0.075	<0.25	<0.5	<1	<2
组成/%	10.9	38.2	59.3	96.0	100.0

试验采用圆柱形重塑土试样,尺寸为  $\Phi 61.8$  mm  $\times$  125 mm,根据土工试验规程<sup>[4]</sup>,采用共分 5 层的击样法制取试样。具体步骤为:将试验所用膨胀土从现场取回,自然风干后过 2 mm 筛,再用烘干法测得风干土的初始含水率,根据试样所需要的含水率计算一定量的风干土所需加水量,然后用喷壶将称好的水均匀地洒入风干土中,搅拌均匀后装入密封袋中润湿一昼夜,最后将润湿后的蓬松土分 5 次

装入制样器中击实成样。在制样过程中,控制试样的含水率为 20%,干密度为 1.65 g/cm<sup>3</sup>。根据试验时冻结温度的不同,将试验分成 3 组,每组 13 个,其中 4 个用于每次冻结或融化后的变形测量,8 个用于相应冻融循环次数作用后的无侧限压缩试验,1 个备用。

### 1.2 试验方法及研究内容

膨胀土试样的冻融循环试验在自研的冻融循环模型试验装置<sup>[5]</sup>中进行,其温度控制精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,冻融循环过程中试样均无外部水分的补给。为了防止冻融循环过程中试样水分的损失,对每一个试样用保鲜袋进行包裹<sup>[6]</sup>,然后按组别分别放入试验装置中。对于某一冻结温度,试样置于试验装置中冻结 12 h,冻结完成后将试样取出,在室温(约 20 $^\circ\text{C}$ )条件下融化 12 h,此为一次冻融循环。本试验共设置了 3 种冻结温度,分别为  $-5^\circ\text{C}$ 、 $-10^\circ\text{C}$  和  $-20^\circ\text{C}$ 。参考前人的相关文献[7-10],土样经过 10 次左右的冻融循环作用后,其物理力学性质趋于稳定,故本试验共进行了 12 次冻融循环。

为了探究膨胀土试样在冻融循环过程中的体积变化规律,对每次冻结或融化后的试样进行直径与高度的测量,即将每次冻结或融化完的试样从试验装置中小心取出,然后利用数显游标卡尺进行试样的直径与高度测量。

考虑到在冻融循环过程中试样变形的不均匀性,对每个试样进行沿高度方向 5 个断面的直径测量和沿端面两个垂直方向的高度测量,并取其平均值作为试样的直径与高度。与此同时,为了了解冻融循环过程中试样含水率的变化情况,在试样变形测量完成之后进行称重,从而反算出其含水率,结果表明试样的含水率在冻融循环过程中损失不大,均小于 0.5%。

经历 0(初始状态)、1、2、3、5、7、9 和 12 次冻融循环作用后的膨胀土试样的力学参数由无侧限压缩试验测得,试验所用装置为电子万能试验机,其最大轴力 5kN,精度  $\pm 0.5\%$ ,位移精度  $\pm 0.2\%$ ,试验中采用应变控制法进行加载,加载速率均为 1.25 mm/min。

试验研究内容:(1)膨胀土在冻融循环过程中的体积变化规律;(2)冻结温度对膨胀土在冻融循环过程中体积变化规律的影响;(3)冻融循环次数对膨胀土力学参数的影响;(4)冻结温度对膨胀土力学参数的影响。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冻融循环次数与冻结温度对膨胀土试样体积的影响

每次冻结或融化后对试样进行直径与高度测量时,为减少测量误差,取4个试样的平均值作为最终的直径与高度,然后计算出试样的体积。图1为膨胀土试样体积变化率(膨胀为正,收缩为负)随冻融循环次数的变化情况,其中横坐标的0代表初始状态,0.5代表第一次冻结完成,1代表第一次融化完成,以此类推。

由图1可知,在冻融循环过程中,膨胀土试样的体积变化规律呈现为“冻缩融胀”,即在冻结时体积减小,融化时体积增大,随着冻融循环次数的增多,试样的冻缩量与融胀量渐趋稳定,两者的数值大小也渐趋相近。膨胀土具有失水收缩、遇水膨胀的显著胀缩性,在冻结过程中,除了会发生水分冻结成冰,体积膨胀外,还会因为失水发生体积收缩,在融化过程中,除了会发生冰融化成水,体积减小外,还会因为遇水发生体积膨胀。当膨胀土的胀缩性在冻融过程中起主导作用时,其体积变化规律就会呈现“冻缩融胀”,随着冻融循环次数的增多,膨胀土试样从不稳定态向动态稳定态转变<sup>[11]</sup>,其冻缩量与融胀量渐趋稳定。

在膨胀土试样冻结过程中,不同的冻结温度会导致试样的冻结程度和试样内部冷生结构发育方式的不同<sup>[12]</sup>,从而使得试样的微观结构变化和宏观体积变化的不同。由图1可知,在冻融初始阶段,冻结温度对冻融后试样体积变化的影响不大,随着冻融循环作用的持续进行,不同冻结温度所造成的试样体积变化的差异性逐渐累积起来,表现得越来越明显。当冻结温度为 $-5^{\circ}\text{C}$ 时,由于温度较高,冻结程度较低,冻融循环作用对试样体积的改变较小,每次冻融过程中的冻缩量与融胀量基本保持稳定,数值上相差不大,经过12次冻融循环作用后体积缩小1.25%。当冻结温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ 和 $-20^{\circ}\text{C}$ 时,在冻融初始阶段,试样的冻缩量比融胀量来的小,随着冻融循环次数的增多,冻缩量与融胀量逐渐趋于稳定和相等,其中冻结温度越高,冻融对试样体积变化的影响越大,经过12次冻融循环作用后, $-10^{\circ}\text{C}$ 条件下的试样体积膨胀2.48%, $-20^{\circ}\text{C}$ 条件下的试样体积膨胀1.82%。

由文献[13]可知,对重塑土来说,冻融循环作用会使密实土的孔隙比增大,使松散土的孔隙比减

小,密实土与松散土经过冻融循环后其孔隙比趋向于一个稳定值——残余孔隙比。由图1可知,不同冻结温度条件下,试样经过12次冻融循环后的体积可能增大,可能减小,即不同冻结温度下试样的残余孔隙比不同,这也就表明冻结温度会改变试样的残余孔隙比。

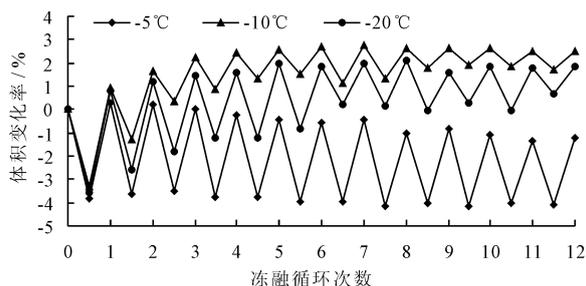


图1 试样体积变化率随冻融循环次数的变化情况

### 2.2 冻融循环次数与冻结温度对膨胀土力学性质的影响

在膨胀土的冻融循环过程中,除了发生冻结时冰胶结体的形成和融化时冰胶结体的消失,还会产生失水收缩和遇水膨胀的胀缩变形,这使得多次冻融后膨胀土的孔隙特征发生变化,导致土颗粒骨架与土颗粒特征发生改变,土颗粒得以重新排列,土骨架发生结构性转移,最终导致整个受力体系发生改变,力学性质也随之发生变化<sup>[14]</sup>。不同的冻结温度会使得膨胀土的冻结程度与土体内部冷生结构发育方式的不同,从而导致冻融循环作用对膨胀土力学性质影响程度的不同。

(1)应力应变曲线分析。图2为不同冻融循环次数条件下膨胀土试样的应力应变曲线,由图可知,本次试验中的膨胀土试样在无侧限压缩过程中均呈现为应变软化型。冻融循环作用对膨胀土的应力应变曲线有着显著影响,尤其是第一次冻融循环作用,主要表现在土体的应力应变曲线形态的改变上。冻融后的土体与未冻融土体相比,其应力应变曲线变得更加“瘦小”。破坏应变随着冻融循环次数的增加有着逐渐减小的趋势,即冻融循环作用可使得土体的韧性减小,脆性增加。

由于第一次冻融循环作用对膨胀土试样的应力应变曲线影响最大,故选取不同冻结温度条件下经过一次冻融循环作用后膨胀土试样的应力应变曲线进行比较,如图3所示。由图可知,膨胀土试样在 $-20^{\circ}\text{C}$ 和 $-5^{\circ}\text{C}$ 条件下的应力应变曲线形态相差不大,在 $-10^{\circ}\text{C}$ 条件下曲线显得较为“瘦小”,其破坏应变也是最小的。由此可以说明,冻结温度为

-10℃时,冻融循环作用对膨胀土应力应变曲线的影响最大。

(2)无侧限抗压强度分析。对于应力应变曲线呈软化型的膨胀土来说,取其应力峰值点作为试样的无侧限抗压强度。为方便比较不同冻结温度条件下膨胀土试样的无侧限抗压强度受冻融循环作用的影响程度,引入一个无量纲参数  $Q$ , 定义为冻融循环作用后膨胀土试样的无侧限抗压强度与初始试样

的无侧限抗压强度之比。由图4可知,膨胀土的无侧限抗压强度随着冻融循环次数的增多而减小,7次冻融循环作用后,其无侧限抗压强度逐渐趋于稳定,其中第1次冻融循环作用对膨胀土强度的破坏最为显著,使其损失了39%以上。这主要因为冻融循环作用会对土体造成结构性损伤<sup>[15]</sup>,其中第一次损伤最为厉害,随着冻融循环次数的增多,这种损伤逐渐变弱,仅产生累积效应。

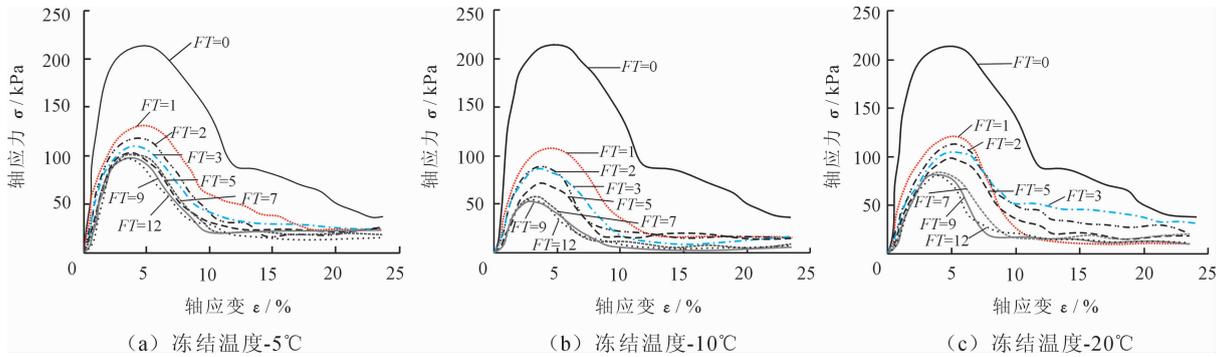


图2 不同冻融循环次数条件下膨胀土试样的应力应变关系曲线

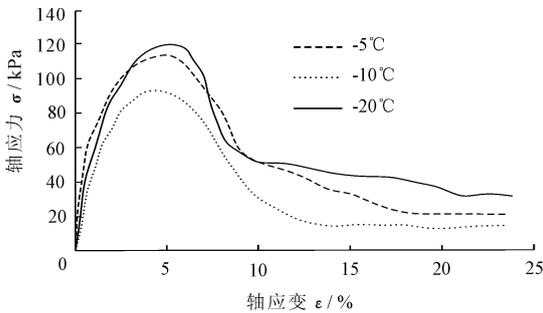


图3 不同冻结温度条件下膨胀土试样的应力应变关系曲线(冻融1次)

在膨胀土的冻融循环过程中,土体的冻结程度随着冻结温度的降低而升高,但是其内部冷生结构却随着冻结温度的升高而发育得更好,故存在着一个对土体强度破坏最为严重的冻结温度。如图4所示,在本次试验中,冻结温度为-10℃时,冻融循环作用对膨胀土强度的破坏最为严重,12次冻融循环作用后强度降低了75%, -20℃次之, -5℃最小。

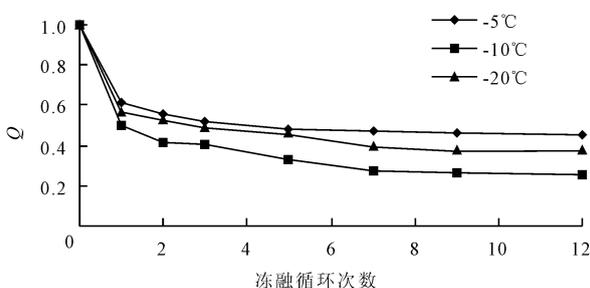


图4  $Q$  随着冻融循环次数的变化

(3)弹性模量分析。根据文献[16],取应力应变曲线中应变为1.0%所对应的割线模量作为融土的弹性模量。为方便比较不同冻结温度条件下膨胀土试样的弹性模量受冻融循环作用的影响程度,引入一个无量纲参数  $F$ , 定义为冻融循环作用后膨胀土试样的弹性模量与初始试样的弹性模量之比。图5为不同冻结温度条件下膨胀土试样的  $F$  随冻融循环次数的变化情况。

由图5可知,膨胀土的弹性模量随着冻融循环次数的增多而减小,其中第1次冻融循环作用对膨胀土弹性模量的影响最为显著。对于不同的冻结温度来说, -10℃和 -20℃时,冻融循环作用对膨胀土弹性模量的影响最为严重。

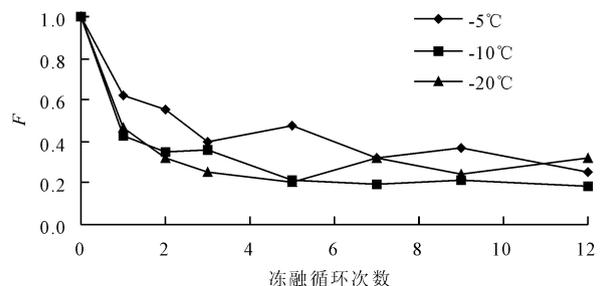


图5  $F$  随着冻融循环次数的变化

### 3 结论

(1)膨胀土试样在冻融循环过程中体积变化表现为“冻缩融胀”,随着冻融循环次数的增多,试样的

冻缩量 and 融胀量渐趋稳定,两者的数值大小相差不大。经过12次冻融循环作用后,  $-10^{\circ}\text{C}$  与  $-20^{\circ}\text{C}$  条件下的膨胀土试样表现为体积膨胀,即孔隙比变大,  $-5^{\circ}\text{C}$  条件下的膨胀土试样表现为体积缩小,即孔隙比变小,表明冻结温度会改变试样的残余孔隙比。

(2) 冻融循环作用对膨胀土的力学性质有着显著的影响,其中第一次冻融循环作用最为强烈。在冻融循环过程中,膨胀土试样的应力应变曲线形态显得越来越“瘦小”,破坏应变、无侧限抗压强度和弹性模量等参数逐渐减小,并趋于稳定。

(3) 冻结温度影响着膨胀土的冻结程度与其内部冷生结构的发育方式,故在冻融循环过程中存在着一个对土体物理力学性质影响最大的冻结温度,本次试验中,这样的冻结温度为  $-10^{\circ}\text{C}$ 。

### 参考文献:

[1] 吕海波,曾召田,赵艳林,等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(12):3797-3802.

[2] 缪林昌,仲晓晨,殷宗泽. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学,1999,20(2):71-75.

[3] 杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):1936-1941.

[4] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

[5] 王柳江,刘斯宏,高军军,等. 一种冻融冻胀模型试验装置及其试验方法[P]. 中国:CN201210425614.5,2012-10-31.

[6] 许雷,鲁洋,宗佳敏,等. 冻融循环下南阳膨胀土直剪试

验[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(5):922-925.

[7] Zaman M M, Naji K N. Effect of freeze-thaw cycles on class C fly ash stabilized aggregate base[C]//Proceedings of the 82nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, DC, CD-Rom. 2003.

[8] 王天亮,刘建坤,田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学,2011,32(1):193-198.

[9] 李卓,刘斯宏,王柳江,等. 极端气候条件下南京附近黏土冻融强度试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):40-44.

[10] 常丹,刘建坤,李旭等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(7):1496-1502.

[11] 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.

[12] 宋春霞. 冻融作用对土物理力学性质影响的试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.

[13] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998,35(3):471-477.

[14] 张英,邴慧,杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3597-3603.

[15] 谈云志,吴翩,付伟,等. 改良粉土强度的冻融循环效应与微观机制[J]. 岩土力学,2013,34(10):2827-2834.

[16] Lee W, Bohra N C, Altschaeffl A G, et al. Resilient modulus of cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997,123(2):131-136.