

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.022

冻融循环下南阳膨胀土直剪试验

许雷, 鲁洋, 宗佳敏, 宋迎俊

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 我国南水北调中线工程沿线的部分膨胀土渠道处在季节性冻土地区。为了探究冻融循环对膨胀土抗剪强度和体积变化的影响规律, 对经历冻融循环的膨胀土和非膨胀性黏土试样进行尺寸测量和直剪试验。试验结果表明: 在冻融循环初始阶段, 土体抗剪强度的降低较为明显, 随后由于含水率的降低, 土体的强度逐渐增强; 在冻融循环的过程中, 非膨胀性黏土的体积变化表现为“冻胀融沉”, 而膨胀土的体积变化表现为“冻缩融胀”。干密度的改变不影响膨胀土的抗剪强度和体积变化的规律形态, 干密度大的膨胀土最终体缩量较小。采取防蒸发措施的膨胀土在冻融循环前3次抗剪强度逐渐减小, 随后趋于稳定, 其最终体积几乎不受干缩的影响。

关键词: 膨胀土; 冻融循环; 直剪试验; 体积变化; 干密度; 含水率

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0922-04

Direct shear test on expansive clay in Nanyang under freeze thaw cycles

XU Lei, LU Yang, ZONG Jia min, SONG Ying jun

(College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Part of expansive clay channel in the Middle Route of South to North Water Transfer Project (SNWTP) in China is located in the seasonal frozen soil region. In order to investigate the effects of freeze thaw cycle on the shear strength and volume change of expansive clay, direct shear test was conducted on the expansive and non expansive clay samples which had experienced the freeze thaw cycle, and then the sizes of samples were measured. The results showed that (1) the shear strength decreases gradually at the initial stage of freeze thaw cycle and then increases gradually with the decreasing of water content; (2) during the process of freeze thaw cycle, the volume change of non expansive clay appears as "frost heaving and thaw collapsing", while the volume change of expansive clay appears as "frost shrinking and thaw expanding"; (3) the variation of dry density does not affect the shear strength and volume change of clay, and the expansive clay with higher dry density has smaller final volume shrinkage; and (4) the shear strength of expansive clay with water retention measure decreases gradually at the first three freeze thaw cycles, then tends to be stable, and its final volume is not affected by drying shrinkage.

Key words: expansive clay; freeze thaw cycle; direct shear test; volume change; dry density; water content

我国秦岭-淮河以北地区分布着大片季节性冻土^[1]。季节性冻土在温度升高时变为三相体系的融土, 温度降低时又变为四相体系的冻土^[2]。冻融循环不仅会改变土体的状态, 还会影响土体的结构性, 进而影响土的力学特性, 降低土体的稳定性^[3-4]。最近已开闸通水的南水北调中线工程穿过了大片季节性冻土地区, 因此会受到冻融作用的负面影响, 尤其是膨胀土渠道。膨胀土作为一种具有多裂隙性和显著胀缩性的典型非饱和土^[5], 遇水膨胀, 失水收缩, 具有很强的结构性。膨胀土在低温冻结时除了水结成冰, 体积膨胀外, 还伴随着土体的失水收缩; 在高温融化时除了冰变为水, 体积缩

小外, 还伴随着土体的遇水膨胀, 其冻融循环过程十分复杂。

目前, 国内外学者针对不同土质开展了一系列的冻融循环试验研究。Eigenbrod K D^[6]发现冻融循环作用会使细粒土产生30%的体积变化; Viklander P^[7]发现冻融循环作用会使松散土体体积减小, 致密土体体积变大; 董晓宏等^[8]对经过冻融循环作用后的黄土进行直剪试验, 发现黄土的凝聚力 and 抗剪强度经3~5次冻融循环后达到最低, 内摩擦角基本不变; 李卓等^[9]研究表明南京某地区黏土的凝聚力随冻结温度的降低和含水率的减小而增加, 内摩擦角则相反; 常丹等^[10]通过试验发现冻结温度对粉砂的力学性质影响微弱,

收稿日期: 2014-12-26 修回日期: 2015-08-18 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2022.001.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2014B36614)

作者简介: 许雷(1991-), 男, 江苏盐城人, 主要从事水工结构及特殊土工程特性方面的研究。E-mail: xulei_hhu@163.com

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。E-mail: luyhhu@163.com

而围压与冻融循环次数对其力学性质影响的显著性较强。但是,有关冻融循环下膨胀土力学特性的研究比较少。

本文以南阳膨胀土为研究对象,对冻融循环后的试样进行直剪试验,探究膨胀土在冻融循环下抗剪强度和体积变化的规律,并与南京某地区非膨胀性黏土作对比,进一步认识膨胀土与非膨胀性黏土在强度变形特性方面的差异。

表1 土料的基本物性指标

Tab. 1 Physical property indexes of clay samples

土类	塑限(%)	液限(%)	塑性指数 I_p	自由膨胀率(%)	颗粒级配(%)				
					< 0.075 mm	< 0.25 mm	< 0.5 mm	< 1 mm	< 2 mm
中膨胀土	24	55	31	69	10.5	27.8	45.7	88.2	100.0
非膨胀性黏土	15	37.5	22.5	33	14.3	31.6	49.8	90.5	100.0

本试验采用圆柱形的重塑土试样。根据土工试验规范^[1],将试验土料从现场取回后进行翻晒风干并过 2 mm 筛,测定土料的初始含水率,按照 20% 的含水率向风干土中加水,拌合均匀后装入密封袋润湿一昼夜,使含水率均匀。采用击样法制样,控制试样的干密度为预定值。试样经过冻融循环后再进行直剪试验。为了减小制作直剪试样的过程对试样的扰动,高度取 25 mm,直径取 61.8 mm。

1.2 冻融循环试验

将制备好的中膨胀土和非膨胀性黏土试样进行分组编号后放入河海大学水工结构研究所自研的冻融冻胀模型试验装置^[12]中进行冻融循环控制,温度控制精度为 1℃。在一次冻融循环中,试样冻结 12 h,冻结温度设置为 -20℃;冻结完成后,打开试验装置使试样在室温条件下融化 12 h,平均室温为 20℃。参考已有冻融试验结果^[8-10],本试验冻融循环次数取为 0、1、2、3、5、7、9、11、13,若试样的尺寸与抗剪强度趋于稳定可提前结束冻融循环。冻融循环前后的试样见图 1。



图1 冻融循环前后的试样

Fig. 1 Clay samples before and after the freeze thaw cycles

冻融循环结束后进行试样尺寸(高度和直径)、质量的测量和抗剪强度的测试。将每次冻结完和融化完的试样从试验装置中取出并用数显游标卡尺进行尺寸的测量,同时测量试样的质量。为了保证所测量试样的统一性,选取经历最多冻融循环次数的 8 个试样进行测量,并取平均值。根据试样的质量计算出试样的含水率。土体的抗剪强度通过对经历相应冻融循环次数的试样进行直剪试验所测得,竖向应力分别取 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa。

为了探究不同干密度的试样在冻融循环作用下的抗剪强度和体积变化的规律,试验增加了一组干密度为 1.70 g/cm³ 的中膨胀土试样。考虑到冻融循环会引起土体含水率的降低^[13],进而影响土体抗剪强度与体积变化的规律,因此,还增加了一组采取防蒸发措施的中膨胀土试样,即将制备好的试样装入容积大于试样体积的密封袋中。具体的冻融循环

1 试验概况

1.1 试验土料及试样制备

试验用土取自南水北调中线工程输水总干渠南阳段建设工地的中膨胀土和南京某地区的非膨胀性黏土,其基本物性指标见表 1。

试验方案见表 2。

表2 冻融循环试验方案

Tab. 2 Scheme of freeze thaw cycle test

土料类别	组别	干密度 / (g·cm ⁻³)	防蒸发措施	冻融循环次数
中膨胀土	A-1	1.50	无	0、1、2、3、5、7、9、11、13
	A-2	1.70	无	0、1、2、3、5、7、9、11、13
	A-3	1.70	套密封袋	0、1、2、3、5、7、9
非膨胀性黏土	B-1	1.50	无	0、1、2、3、5、7、9、11、13

2 试验结果分析

2.1 冻融循环对含水率的影响

试样的含水率随冻融循环次数的变化见图 2。由图可知,未采取防蒸发措施(开放系统)的 A-1、A-2 和 B-1 试样在冻融循环过程中含水率不断下降,这主要由于土体在冻结过程中水分子向表面迁移并不断蒸发所致。而采取防蒸发措施的 A-3 试样由于处在密封袋形成的封闭空间中,土体中的水分蒸发困难,水分损失较少,因此其在冻融循环过程中含水率基本维持不变。

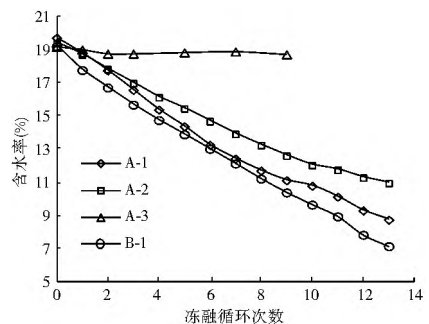


图2 试样的含水率随冻融循环次数的变化

Fig. 2 Variation of water content of clay samples with the numbers of freeze thaw cycles

2.2 冻融循环对抗剪强度的影响

土体的抗剪强度随冻融循环次数的变化见图 3。可以看出,随着竖向压力的增大,土样的抗剪强度均显著增加,表明冻融作用下土样的压硬性依然显著,并且与土样的膨胀性无直接关系。

由图 3(a)可知, A-3 试样的抗剪强度在前 3 次冻融循环中逐渐减小,冻融 3 次以后趋于稳定。这主要由于初始阶段

土体内的水在冻融过程中体积发生了膨胀和收缩,改变了土体的结构性,进而降低了其抗剪强度;随着冻融次数的增加,其对土体强度的削弱作用逐渐减小,膨胀土试样的抗剪强度趋于一个较为稳定的值。而 A-2 试样未采取防蒸发措施,其抗剪强度变化规律与 A-3 试样相差甚大(图 3(b)),分析认为,开放系统中的膨胀土试样,抗剪强度受冻融和含水率变化双重因素的影响。在冻融初始阶段,冻融循环对土体强度的削弱作用较大,初始强度表现出一定的减小,随着冻融次数的增加,冻融对强度的削弱作用逐渐减小并趋于稳定;而持续的蒸发作用下土样含水率不断减小(图 2),使得土体强度增加起主导作用并逐渐增强,最终表现为抗剪强度上升速率的增加。

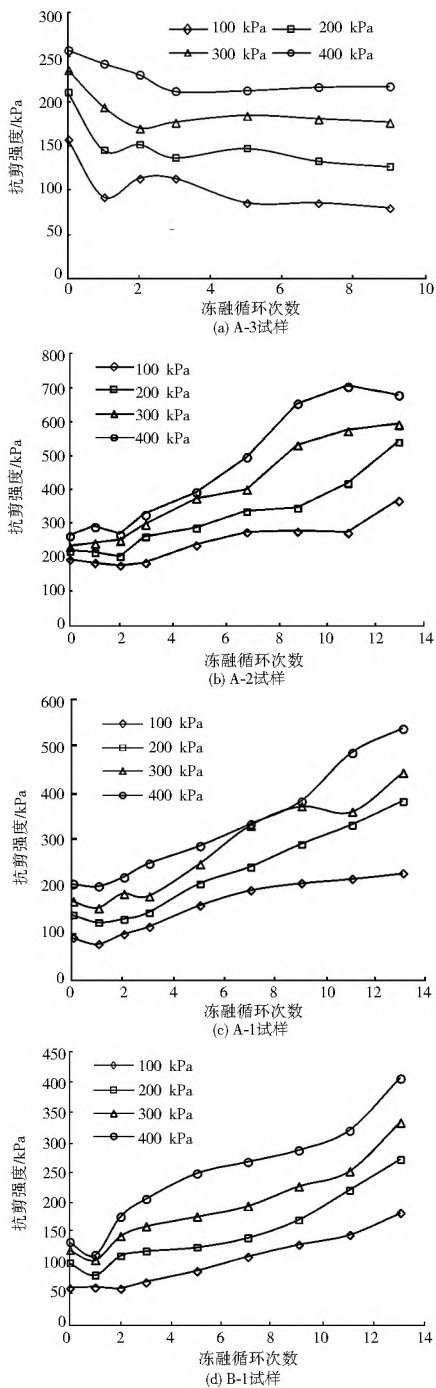


图 3 土体抗剪强度随冻融循环次数的变化

Fig. 3 Variation of shear strength of clay samples with the numbers of freeze thaw cycles

由图 3(c) 和图 3(d) 可知,膨胀土和非膨胀性黏土在开放系统的冻融作用下,相同竖向压力下的膨胀土抗剪强度值普遍比非膨胀性黏土要大一些,但强度变化规律相似。即 A-1 和 B-1 试样在第一次冻融循环后,抗剪强度的降低均较为明显,之后随着冻融循环次数的增加,土体的抗剪强度不断增加,其中在 2~10 次循环过程中抗剪强度近似线性增加,10 次以后显示出增加速率变大的趋势;在冻融循环的过程中,A-1 和 B-1 试样的含水率均逐渐减小,水分的减少导致了土体抗剪强度的增加^[13]。

由图 3(b) 和图 3(c) 可知,在冻融循环作用下,不同干密度试样的抗剪强度变化规律相类似。但是,试样的干密度越大,相同竖向压力下的抗剪强度越大,且冻融作用下的初始强度的衰减不太显著,说明本试验中较大的初始干密度可以适当抑制冻融作用对膨胀土强度的弱化。

2.3 冻融循环对土体体积的影响

根据圆柱形试样的直径与高度可计算出试样的体积,试样体积随冻融循环次数的变化见图 4。由图 4(a) 可知,膨胀土试样冻结时体积减小,融化时体积变大,随着冻融循环次数的增多,试样体积波动的幅度逐渐减小,最终趋于稳定;非膨胀性黏土试样冻结时体积变大,融化时体积减小,随着冻融循环次数的增多,试样体积波动的幅度逐渐减小,最终趋于稳定。可见,膨胀土与非膨胀性黏土试样体积变化规律截然相反,非膨胀性黏土符合一般性的规律,即冻胀融沉^[14]:冻融循环导致土体内水的相变,水与冰的体积差异使得普通土在冻结时体积变大,融化时体积减小,随着冻融循环次数的增多,土体内水分减少,试样体积波动减小,逐渐趋于平缓;而膨胀土的胀缩效应大于冰水的体积效应,表现为“冻缩融胀”,当含水率慢慢降低时,胀缩效应不断减弱,使得试样的体积波动趋于平缓。

干密度会影响土体在冻融循环过程中的体积变化^[6,7,15]。由图 4(b) 可知,两种不同干密度的中膨胀土试样在冻融循环过程中体积变化规律的形态相类似,但是经过 13 次冻融循环后,A-1 试样体积缩小 7.5%,A-2 试样体积缩小 3.4%,这是因为干密度大的试样孔隙率较小,相对比较密实,在土体内水分冻结体积膨胀的过程中,冰颗粒对土颗粒进行挤压,使试样产生塑性变形^[16],导致体积增大,这抵消了部分因水分减小而产生的体积减小量。

膨胀土具有干缩湿胀的特性,在冻融循环过程中,土体的体积变化规律随着含水率的变化而变化。由图 4(c) 可知,A-2 和 A-3 试样在冻融循环初期的体积变化规律形态相类似,但是 A-2 试样的最终体积相比于初始体积是减小的,A-3 试样的最终体积是增大的。这可能是由于 A-2 和 A-3 试样的干密度较大,相对密实,其孔隙比大于残余孔隙比,冻融循环后体积会增大^[7],但是 A-2 试样在冻融循环过程中还伴随着含水率的降低,使得土体发生较为严重的干缩效应,从而导致试样最终体积的减小。

3 结论

(1) 膨胀土在冻融循环过程中的抗剪强度变化规律与非膨胀性黏土相似,即开放系统中,冻融初始阶段,冻融循环对

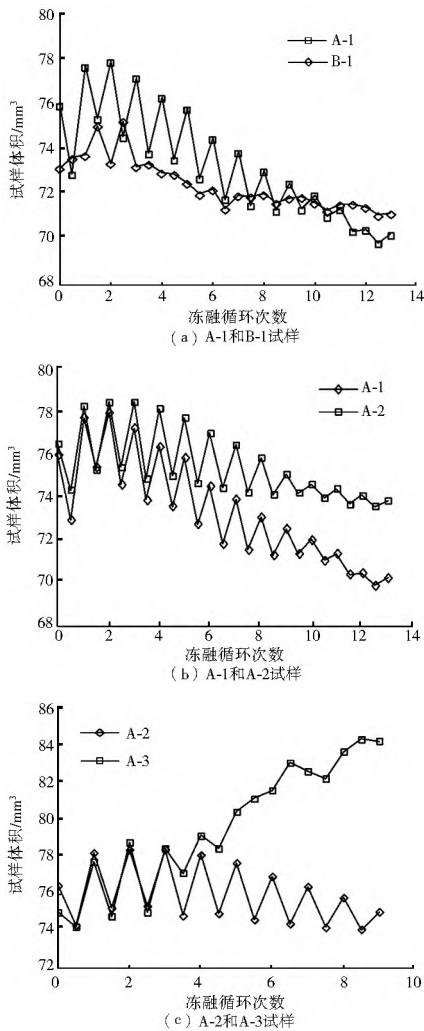


图4 试样体积随冻融循环次数的变化

Fig.4 Variation of volume of clay samples with the numbers of freeze thaw cycles

抗剪强度的削减作用起主导,随着冻融循环的持续进行,含水率减小对抗剪强度的增强作用逐渐起主导;若膨胀土试样采取防蒸发措施,其抗剪强度在前3次冻融循环过程中逐渐减小,冻融3次以后趋于稳定。

(2)膨胀土在冻融循环过程中的体积变化规律与非膨胀性黏土相反,即呈现为“冻缩融胀”,随着冻融循环次数的增多,试样体积波动的幅度逐渐减小,最终趋于稳定;若采取防蒸发措施,膨胀土试样基本不受干缩影响;较大干密度的膨胀土试样在冻融循环作用下的最终体积有所膨胀。

参考文献(References):

[1] 程国栋,杨成松.青藏铁路建设中的冻土力学问题[J].力学与实践,2006,28(3):1-8. (CHENG Guo-dong, YANG Cheng-song. Mechanics related with frozen ground in construction of Qinghai-Tibet railway[J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28(3): 1-8. (in Chinese))

[2] ANDERSLAND O B, LANDANYI B. Frozen ground engineering[M]. New York: Chapman & Hall, 2003.

[3] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze thaw cycles

and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway [J]. Catena, 2006, 67(3): 175-182.

[4] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1): 1-8.

[5] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te hong. Expansive soil problems in engineering construction [M]. Beijing: China building industry press, 1997. (in Chinese))

[6] Eigenbrod K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 529-537.

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

[8] 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): 767-772. (DONG Xiao-hong, ZHANG Ai-jun, LIAN Jiang-bo, et al. Study of shear strength deterioration of loess under repeated freezing thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 767-772. (in Chinese))

[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. (LI Zhuo, LIU Si hong, WANG Liu jiang, et al. Freeze thaw strength test of clay soil around Nanjing City under extreme climatic conditions[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(1): 40-44. (in Chinese))

[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. (CHANG Dan, LIU Jian kun, LI Xu, et al. Experiment study of effects of freeze thawing cycles on mechanical properties of Qinghai Tibet silty sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1496-1502. (in Chinese))

[11] JTGE 40-2007. 公路土工试验规程[S]. (JTGE 40-2007. Test Methods of Soils for Highway Engineering[S]. (in Chinese))

[12] 河海大学. 一种冻融冻胀模型试验装置及其试验方法[P]. 中国: CN201210425614. 5, 2012. (Hohai University. A model of freeze thaw and frost heaving test apparatus and its test method[P]. China: CN201210425614. 5, 2012. (in Chinese))

[13] 马巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 158-160. (MA Wei, XU Xue zu, ZHANG Li xin. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 158-160. (in Chinese))

[14] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133-143. (QI Ji lin, MA Wei. State of art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133-143. (in Chinese))

[15] Qi J, Ma W, Song C. Influence of freeze - thaw on engineering properties of a silty soil[J]. Cold regions science and technology, 2008, 53(3): 397-404.

[16] 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. (TAN Yun zhi, WU Pian, FU Wei, et al. Strength and micromechanism of improved silt under freeze thaw cycle effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2827-2834. (in Chinese))