

DOI: 10.11779/CJGE2018S1037

非饱和膨润土失水收缩与冻结体变关系研究

刘振亚¹, 刘建坤¹, 李旭^{1, 2}, 房建宏²

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 多年冻土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室青海研究观测基地, 西宁 青海 810001)

摘要: 与饱和膨润土呈现冻胀现象不同, 非饱和膨润土在冻结过程中体缩现象显著, 其体缩可能与其失水收缩和冰水相变后产生的冰晶胶结作用有关。为探究非饱和膨润土的冻结体变特征, 进行了不同初始孔隙比、饱和度下的三维等温体变试验、常温风干试验。试验结果表明: 非饱和膨润土冻结温度低于粉质黏土, 和其初始含水率正相关; 非饱和膨润土在冻融循环中存在低密度土体被压密, 高密度土体密度减小的现象。非饱和膨润土在冻结过程中, 低饱和度和土样存在明显的体缩现象, 随着饱和度的提高, 其体缩现象逐步消失直至出现明显冻胀; 这种现象说明: 冻结过程中, 不仅存在冰水相变引起的冻胀作用, 而且还存在着由于冰水胶结而产生的体缩作用; 通过进一步的数据分析, 得到了冰水相变导致的体变与土体体积含冰量之间的关系, 它综合反映了饱和度、孔隙比、温度等因素对非饱和膨润土冻结体变特性的影响。

关键词: 非饱和土; 膨润土; 冻缩; 冻胀; 冰水相变

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0229-06

作者简介: 刘振亚(1985-), 男, 博士, 主要从事冻土路基方面的研究工作。E-mail: zhya_liu@163.com。

Experimental study on air-dried shrinkage and frozen deformation characteristics of unsaturated bentonite

LIU Zhen-ya¹, LIU Jian-kun¹, LI Xu^{1, 2}, FANG Jian-hong²

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Qinghai Research and Observation Base, Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Permafrost Regions, Ministry of Transport, Xining 810001, China)

Abstract: Saturated bentonite swells during freezing while unsaturated bentonite may shrink during freezing, which may be related to the water loss-induced shrinkage and ice-water phase transition-induced expansion. In order to investigate the contribution of these two parts, the bentonite samples with various void ratios and degrees of saturation are examined using the frozen deformation tests, air-dried shrinkage tests and freezing point tests. The test results demonstrate that the freezing point of the unsaturated bentonite mainly depends on its gravimetric water content and is much larger than that of unsaturated silt clay. The sample with high density becomes loose and the one with low density becomes dense after being frozen. The bentonite samples with low degree of saturation, i.e., 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, shrink, whereas the sample with high degree of saturation (0.9) swells after being frozen. A linear relationship is found between the volumetric ice content and the ice-water phase transition-induced volumetric deformation, which is a comprehensive reflection of the influence of degree of saturation, void ratio and temperature on the deformation of unsaturated bentonite.

Key words: unsaturated soil; bentonite; frost heave; frozen shrinkage; water-ice transition

0 引言

膨润土具有遇水膨胀、失水收缩的特点, 其体积随含水率变化剧烈。目前, 有关膨润土吸湿和脱湿过程中的变形研究较多, 得到了不同压实状态、含水率、干密度、竖向应力、浸泡液体、吸湿方式等条件下的变形特性, 并提出了相应的膨胀变形和膨胀力计算方法^[1-2]。但是有关膨润土在寒区工程中的应用研究较

少, 主要集中在膨润土合成材料防渗性能方面。Kraus等^[3]、Barast等^[4]、介玉新等^[5]研究了膨润土合成材料的冻融循环特点, 发现: 膨润土合成材料渗透系数受

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479001, 41471052); 上海市科学技术委员会科研计划项目(16DZ1200503)

收稿日期: 2017-06-11

***通讯作者:** (E-mail: ceXuLi2012@163.com)

冻融循环影响较大，而体积变化不显著。霍凯成等^[6]指出掺入膨润土后路基的冻胀变形量明显降低。

由于膨润土冻结过程中存在由于孔隙水降低导致的体缩，其总体冻结变形特征复杂。膨润土失水收缩的原因复杂，既有基质吸力增加导致的毛细黏聚力提高，也有其他物理化学作用，例如结合水膜的变薄。对此，本文不进行区分，统称为失水收缩作用。由于土体的吸湿脱湿曲线和冻结融化曲线具有一定的相似性，可以用脱湿过程中的干燥收缩特性来描述冻结中土体失水收缩过程。

目前关于土体冻结变形规律的研究多着重于于水分迁移，即考虑在水分迁移作用下，土体的最终冻结变形情况^[7-8]；有关水分迁移效应微弱条件下冻土单元体的冻结变形研究较少，使得目前土的冻结变形机理描述具有一定的局限性。为此，本文重点研究了非饱和和膨润土在不补水条件下的三维原位冻结体变特性，结合冻结温度试验、风干试验、直剪试验的结果，分析饱和度和、孔隙比、冻结温度等因素对非饱和膨润土冻结体变特性的影响。

1 土样及试验设计

1.1 土样及其基本物理性质

本试验采用的膨润土为钠基煅烧膨润土，土样的基本性质见表 1。

表 1 膨润土的基本性质

Table 1 Physical parameters of bentonite			
最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数 I_p
33.12	160.79	30.49	130.3
最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	颗粒比重	颗粒大小/ μm	
1.31	2.58	38	

1.2 试验方案

为研究饱和度、初始孔隙比对膨润土的冻结变形的影响，室内冻结变形试验采用的孔隙比为： $e_0=(1.8, 1.4, 1.2, 1.0)$ 共 4 个水平，试验采用的饱和度为 $S_r=(0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9)$ ，共 6 个水平。初始孔隙比 (e_0) 取值为 1.8, 1.4, 1.2, 1.0 时，对应的压实度分别为 0.70, 0.82, 0.89, 0.96。

为了计算土体当中孔隙冰含量，还需要测量土体冻结温度（冰点），冻结温度试验土样和冻结变形试验土样对应，各为 24 个试样。同时进行了相同土样的风干试验，同样为 24 个试样。

在制样时，首先配置给定含水率的土样，静置养护 24 h，然后采用静力压实制样方法制样，得到规定的干密度和饱和度，试样直径为 6.18 cm，高度 4 cm。

将 3 组试验分别用于①温控体变试验，研究不同

饱和度、孔隙比试样在冻融循环作用下的体变规律；②冻结温度试验，研究相同试验条件下试样的冻结温度；③常温收缩试验，研究相同试验条件下试样的常温体缩规律。

2 试验结果分析

2.1 冻结温度试验

非饱和和膨润土在冻结过程中的未冻水含量决定了常温收缩试验的最后状态。冻结温度是冻土的一个基本物理指标，也决定了其未冻水含量^[9]。冻结温度试验设备包括，温控室、DT-80 数采设备以及温度传感器，如图 1 所示。

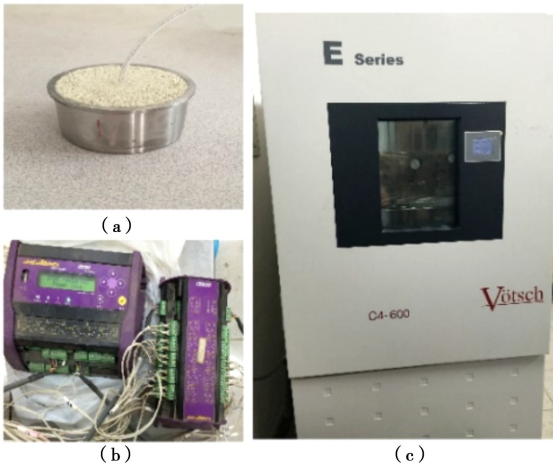


图 1 冻结温度试验

Fig. 1 Frozen temperature test

在冻结温度和冻结变形试验中，首先将温控室温度调整到 1℃并静置 12 h，使试样温度均匀。然后设置控温室温度为-15℃，并开始记录数据。典型冻结温度曲线如图 2 所示。

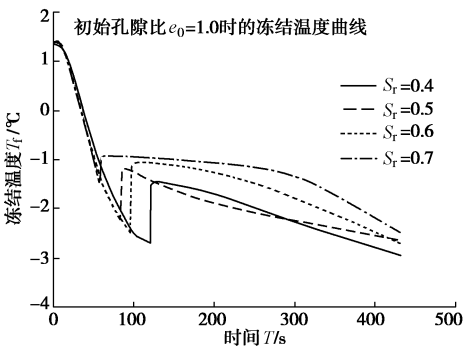


图 2 非饱和膨润土冻结温度曲线

Fig. 2 Curves of freezing point vs. time of unsaturated bentonite

由非饱和和膨润土的冻结温度曲线可知，非饱和和膨润土的冻结温度随着饱和度的提高而提高，且非饱和和膨润土的冻结温度明显低于粉质黏土^[10]。

将相关冻结温度试验结果整理，得到如图 3 所示

的冻结温度含水率关系曲线。由图 3 可知, 孔隙比对膨润土的冻结温度影响很小, 而含水率和冻结温度具有良好的线性关系。数据分析表明: 膨润土的饱和度与其冻结温度并不存在线性关系, 可能的原因是: 冻结温度主要反映的是冰水之间的相变发生, 其相变潜热的释放主要与水的绝对含量有关, 因此, 孔隙比小, 饱和度大的试样, 其含水率可能没有孔隙比大, 饱和度和小的试样多。即含水率是冻结温度的主控因素, 冻结温度与孔隙比、饱和度关系不明显。这与粉质黏土的冻结温度规律类似。

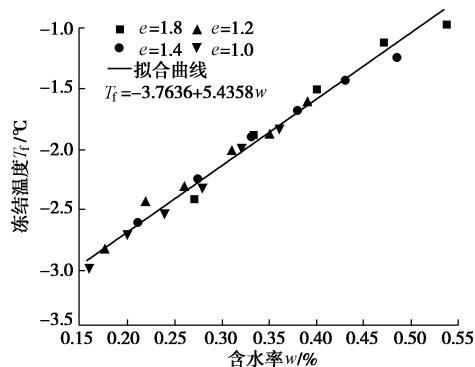


图 3 冻结温度试验结果

Fig. 3 Frozen temperature vs. water content

2.2 三维温控体变试验

冻结变形试验在不补水条件下进行, 试验仪器如图 4 所示, 为自行研制的三维各向等温体变测量仪。该系统采用双温度空间设计: 将试样置于体变盒中, 并包裹橡皮膜, 注入冷冻液直至量筒读数合适为止; 外腔连接 Thermo Fisher 恒温冷浴机控制控温室内的环境温度, 温度控制精度为 0.1℃。

图 4 中体变盒中采用冷冻液降温, 试样四周和顶面温度边界条件相同, 进行三维各向等温冻结变形试验。由于当温度降低至-10℃以后, 土体的未冻水含量变化趋于平缓, 因此本文选取-10℃为冻土最终温度, 并维持该温度直至土体体积不再发生变化。该系统通过压力室内冷冻液体积变化(由和压力室相连的玻璃管读出)精确测量土样冻结融化过程中的体积变形。

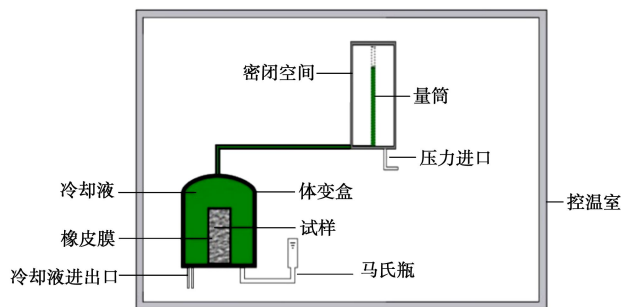


图 4 三维各向等温体变测量

Fig. 4 Isotropic temperature control device with accurate volumetric measurement

为消除体变盒中冷冻液热胀冷缩对土样变形测量结果的影响, 对实测体积变形进行了冷冻液的热胀冷缩量的修正, 具体热胀冷缩量为

$$\Delta V = cV\Delta T \quad (1)$$

式中, c 为该冷冻液在-6℃到 25℃区间的平均热胀冷缩系数, 本研究中所选冷冻液为 60%乙二醇溶液, c 值约为 0.98578, 和 ASHARE 基础手册 2009^[11]结果一致; V 为内腔冷冻液体积; ΔT 为两次体积变形测量时的温度差值。

本研究中的冻结变形试验, 均在大气压进行, 未考虑外界荷载对冻结变形的影响, 无需对实测体积变形进行压力修正。

2.3 各向等温冻结变形试验数据分析

图 5 为多个冻融循环过程中, 土样孔隙比变化曲线。由图 5 可知, 非饱和和膨润土冻结变形由如下特征:

(1) 孔隙比较低时($e_0=1.0, 1.2$)冰水相变的作用影响较小, 冻结过程中体缩现象明显, 融化后冻胀现象明显, 这是因为孔隙比小时, 土样密度较大, 冻融循环导致其密度减小。孔隙比较高时($e_0=1.4, 1.8$)冻结过程中基本以体缩为主, 仅在饱和度较高时有冻胀现象出现, 但是融化后部分土样表现出了与低孔隙比时相反的现象, 出现了融沉的现象。这是因为孔隙比较高时, 土样压实度不高, 密度较小, 冻融循环对其有明显的压密作用。

(2) 随着孔隙比升高, 土样冻胀融沉绝对值都逐渐增加, 这说明土样的先期受力状态对冻胀融沉有抑制作用。

(3) 随着饱和度的升高, 冻结过程中的体缩现象减弱, 这是因为饱和度的提高导致冰水相变产生的绝对值越来越大, 这部分不可消除的体积增加导致土样的体缩越发不明显甚至出现冻胀现象。

如图 5 所示, 与齐吉琳等关于非饱和粉质黏土的研究类似^[12], 非饱和膨润土也存在冻融循环过程中, 低密度土被压缩, 高密度土密度减小的情况。

饱和度较低土体冻缩原因可能是: 冻结之后, 失水收缩作用导致土体体积收缩。而此时由于土体中的含冰量不高, 由冰水相变导致的体积增加并不能填满土样的孔隙, 不会造成土体孔隙结构的破坏, 引起土体体积的膨胀。因此, 饱和度较低的土样都有冻缩融胀的趋势。而初始孔隙比越低, 这种冻缩融沉影响越弱, 孔隙比在冻结时的降低也越不明显。

饱和度较高土体冻胀原因可能是: 当饱和度较高时, 孔隙冰增多, 大量孔隙冰的产生撑大了原有的土体孔隙, 破坏了土体孔隙结构, 引起土体体积的增加。而此时失水收缩作用并不明显, 土样宏观体积变形表现出冻胀融沉。

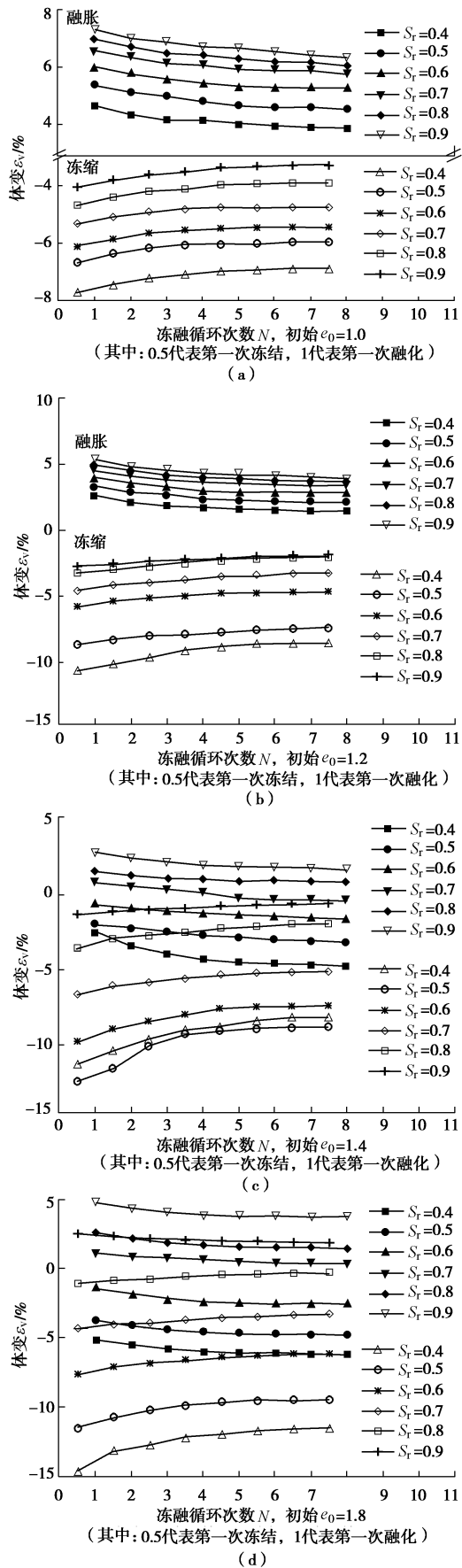


图5 不同饱和度和初始孔隙比土体冻融循环中孔隙比变化曲线

Fig. 5 Variation of void ratio with different degrees of saturation and original void ratio during freeze-thaw cycles

孔隙比较小的土样则仅出现冻缩现象, 饱和度较高时也没有出现冻胀现象, 可能是因为其含冰量并不多, 而失水收缩力较大引起的。

由图 5 的试验数据可知, 土体在经历 5 次或者 6 次冻融循环以后土壤孔隙比基本有趋于稳定的趋势。在冻融循环的过程中, 土样孔隙比变化与其冻结状态有关。如果土样有冻胀融沉现象, 则孔隙比会随着冻融循环次数增加而逐渐增大并趋于稳定。如果土样具有冻缩冻胀特征冻胀现象, 则土样孔隙比会随着冻融循环次数增加而逐渐减小并趋于稳定。

2.4 常温收缩试验

Black 等^[13], Azmatch 等^[14]研究表明: 在冻结过程中, 未冻水含量和基质吸力的关系 (SFCC) 和土壤干燥过程中的土水特征曲线关系非常接近。因此, 风干土样的体缩可以用来表征冻结过程中的不考虑冰水相变造成体缩的影响。

在冻结温度试验的基础上得到冻结试样的未冻水含量。将此未冻水含量作为常温收缩试验的最终状态含水率进行常温收缩试验。非饱和膨润土在常温收缩过程中, 其表面在收缩力的作用下会产生龟裂^[15]。以未冻水含量对应的质量为最终风干状态, 将龟裂土样采用蜡封法进行体积测量。

非饱和膨润土常温体变试验结果如图 6 所示。由图 6 可知, 常温条件下非饱和膨润土体缩趋势明显, 且随着饱和度的增加, 体缩绝对量增加, 不同孔隙比下, 随着孔隙比的增加, 体缩绝对值增加, 说明土样的前期受力状态也影响其风干体缩状态。栾茂田等^[16]关于黏土的研究表明, 饱和度小于 0.9 以后, 体缩现象迅速减小, 饱和度小于 0.7 以后, 体积基本不发生变化, 对于非饱和膨润土来说, 其体变规律与黏土类似, 非饱和状态时, 体变远小于饱和状态, 但与普通黏土相比, 非饱和膨润土收缩量较大, 且相对应的饱和度和范围更宽泛。

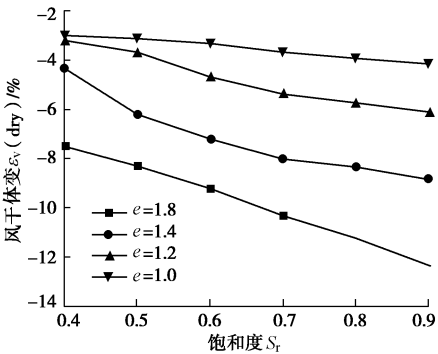


图6 常温体变试验

Fig. 6 Volumetric change at normal temperature (25°C)

3 非饱和膨润土冻结体变机理分析

徐学祖等^[17]研究指出了冻结温度和未冻水含量

之间存在如下关系:

$$\frac{\omega_0}{\omega_u} = \left(\frac{T}{T_f} \right)^B \quad (T < T_f) \quad , \quad (2)$$

式中, T_f 为土体冻结温度, w_0 为土体的初始含水率, w_u 为负温度为 $T^\circ\text{C}$ 时的未冻水含量, B 为常数, 与土类和含盐量有关, 可根据文献[17]中的一点法测定。

假设冻结过程中非饱和膨润土体变 ε_v , 风干过程中体变 $\varepsilon_v(\text{dry})$, 冰水相变导致的体变 $\varepsilon_v(\theta_i)$ 三者之间存在以下关系:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v(\text{dry}) + \varepsilon_v(\theta_i) \quad . \quad (3)$$

如果上述关系成立, 则冰水相变导致的体变 $\varepsilon_v(\theta_i)$ 应该与体积含冰量 θ_i 存在对应关系。体积含冰量 θ_i 可以根据未冻水含量和土力学基本公式, 可以得到下式:

$$\theta_i = \alpha S_r \cdot \frac{G_s - R_c \rho_{d\max}}{G_s + G_s \cdot \theta_u} \quad (T < T_f) \quad , \quad (4)$$

式中, T_f 为土体冻结温度 ($^\circ\text{C}$); θ_i 为土体的未冻水含水率 (%); θ_u 为负温度为 $T^\circ\text{C}$ 时的未冻水含量 (%)。

对于冻结过程中的体积变化, 因为在冻融循环中还存在水分迁移的作用和多次循环中的吸力变化, 物理变化等, 体变复杂, 因此取第一次冻结过程的数据进行分析, 建立与一次风干过程中土样的体变关系, 其结果如图 7 所示。为了验证本文的设想, 将体积含冰量与冰水相变导致的体变 $\varepsilon_v(\theta_i)$ 之间的关系绘制成曲线, 如图 8 所示。从图中可知本文假设基本成立, 但冰水相变虽然绝对的导致了体积的增加, 但是却对体变产生了负的影响, 这可能是因为冰水相变过程中产生的冰与土胶结, 冰水胶结作用也会导致土体的体积缩小。膨润土在冻结过程中随着饱和度的提高先冻缩后冻胀, 即饱和度较低时, 膨润土表现出冻缩趋势, 饱和度较高时, 膨润土表现出冻胀的趋势。

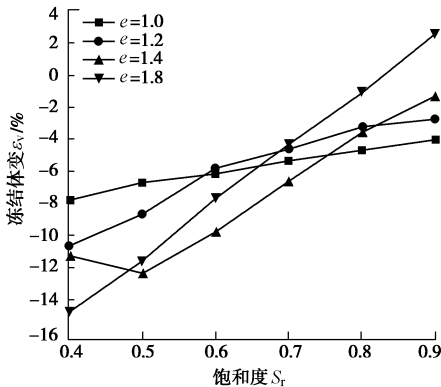


图 7 冻结体变与饱和度关系曲线

Fig. 7 Curves of volumetric deformation vs. degree of saturation under frozen temperature

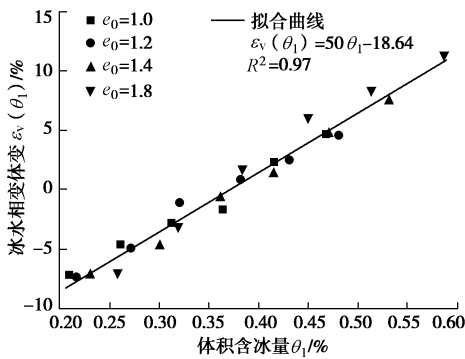


图 8 体积含冰量与冰水相变体变之间的关系

Fig. 8 Volumetric ice content vs. water-ice phase change

4 结 论

本文对非饱和膨润土的冻结体变特性进行了试验研究, 试验结果表明:

(1)非饱和膨润土的冻结温度主要由其初始含水率决定, 与孔隙比关系不明显, 且其冻结温度低于粉质黏土等其他不含盐土体。

(2)非饱和膨润土在冻融循环中出现了低密度土体被压密, 高密度土体密度减小的现象。

(3)非饱和膨润土在冻结过程中其体变受到三方面的作用, 即失水收缩作用、冰水相变的膨胀作用、以及冰晶胶结产生的体缩作用。三者的共同作用导致非饱和膨润土在低饱和度时表现出明显的体缩现象, 在高饱和度和时表现出冻胀现象。

(4)膨润土体变与土体体积含冰量之间存在线性关系。这一关系可以综合反映未冻水含量、孔隙比、饱和度等因素对冻结体变的影响。

参考文献:

- [1] 秦 冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2008(7): 1005 - 1010. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behaviour of Gaomiaozi bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(7): 1005 - 1010. (in Chinese))
- [2] 赖小玲, 叶为民, 刘 毅, 等. 高庙子膨润土膨胀力时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 574 - 579. (LAI Xiao-ling, YE Wei-min, LIU Yi, et al. Experimental investigation on ageing effects on swelling pressure of unsaturated GMZ01 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36: 574 - 579. (in Chinese))
- [3] KRAUS J F, BENSON C H, ERICKSON A E, et al. Freeze-thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonitic barriers[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1997,

- 123(3): 229 - 238.
- [4] BARAST G, RAZAKAMANANTSOA A R, DJERAN-Maigre, et al. Swelling properties of natural and modified bentonites by rheological description[J]. *Applied Clay Science*, 2017, **142**: 60 - 68.
- [5] 介玉新, 彭涛, 傅志斌, 等. 土工合成材料黏土衬垫的渗透性研究[J]. *土木工程学报*, 2009(2): 92 - 97. (JIE Yu-xin, PENG Tao, FU Zhi-bin, et al. A study on the permeability of geosynthetic clay liners[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009(2): 92 - 97. (in Chinese))
- [6] 霍凯成, 黄继业, 罗国荣. 路基冻胀机制及冻害防范整治措施探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **21**(7): 1099 - 1103. (HUO Kai-cheng, HUANG Ji-ye, LUO Guo-rong. On mechanism of freeze-heave and its treatment in roadbeds[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **21**(7): 1099 - 1103. (in Chinese))
- [7] O'NEILL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. *Water Resources Research*, 1985, **21**(3): 281 - 296.
- [8] 曾桂军, 张明义, 李振萍, 等. 饱和正冻土水分迁移及冻胀模型研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(4): 1085 - 1092. (ZENG Gui-jun, ZHANG Ming-yi, LI Zhen-ping, et al. Study of moisture migration and frost heave model of freezing saturated soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(4): 1085 - 1092. (in Chinese))
- [9] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. *Frozen soil physics*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [10] 周家作, 谭龙, 韦昌富, 等. 土的冻结温度与过冷温度试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(3): 777 - 785. (ZHOU Jia-zuo, TAN Long, WEI Chang-fu, et al. Experimental research on freezing temperature and super-cooling temperature of soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(3): 777 - 785. (in Chinese))
- [11] American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers. *Ashare handbook of fundamentals*[S]. 2009.
- [12] 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(12): 2082 - 2086. (QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(12): 2082 - 2086. (in Chinese))
- [13] BLACK P B, TICE A R. Comparison of soil freezing and soil water curve data for Windsor sandy loam[J]. *Water Resources Research*, 1989(25): 2205 - 2210.
- [14] AZMATCH T F, SEGO D C, ARENSON L U, et al. Using soil freezing characteristic curve to estimate the hydraulic conductivity function of partially frozen soils[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2012(S0): 83 - 84: 103 - 109.
- [15] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-Minh, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011(8): 1271 - 1279. (TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-Minh, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011(8): 1271 - 1279. (in Chinese))
- [16] 栾茂田, 汪东林, 杨庆, 等. 非饱和重塑土的干燥收缩试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(1): 118 - 122. (LUAN Mao-tian, WANG Dong-lin, YANG Qing, et al. Experimental study on drying shrinkage of unsaturated compacted soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(1): 118 - 122. (in Chinese))
- [17] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]北京: 科学出版社, 1991. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. *Experimental study on water migration in freezing and frozen soils*[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)