第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0215-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:刘万福, 石　强, 王俊生, 等. 黏质粉土冻胀过程中水分重分布和密度变化规律[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 215—220
Liu Wanfu, Shi Qiang, Wang Junsheng, et al. Water redistribution and density change of clayey silt in the process of frost heaving[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 215—220

建筑科学

黏质粉土冻胀过程中水分重分布和密度变化规律

刘万福[1,2]　石　强[1,2]　王俊生[1,2]　王永涛[3]*　张伟东[3]　徐湘田[3]

(国网内蒙古东部电力有限公司经济技术研究院[1],国网内蒙古东部电力有限公司[2],呼和浩特 010020;
内蒙古大学交通学院[3],呼和浩特 010070)

摘　要　为了探究黏质粉土冻胀过程中水分重分布和密度变化规律,通过 4 个不同顶板温度条件下黏质粉土的单向冻结试验,采用切层法和计算机断层扫描(CT)对试样冻结前后的分层含水率数据和分层密度数据进行了分析。结果表明:试样冻胀是由水分迁移和初始土样中的水分重分布后在已冻区和冻结缘区域发生相变后体积膨胀所控制的;试样冻胀后已冻区密度减小,未冻区密度增大,与含水率的变化规律相反。整体试样的宏观冻胀包含了已冻区的冻胀作用和未冻区的固结作用。

关键词　单向冻结　冻胀　水分重分布　CT 扫描　密度

中图法分类号　TU411;　　**文献标志码**　A

冻胀灾害是寒区工程常见的病害之一,如果处理不当,将严重影响工程结构建筑物的正常使用,甚至造成破坏,导致严重的工程事故,因此冻胀的研究对于寒区工程来说有着重要的意义。近些年来,对岩土体的冻胀特性及其影响因素的研究成果较多。马宏岩等对饱和粉质黏土进行了单向冻结试验,得到了影响土体冻胀变形的主要因素以及与土体冻胀变形间的关系,并提出相应的冻胀防治措施[1]。郑美玉等对季冻区粉质黏土的冻胀特性进行了分析,得到其不同冻结条件下的冻胀规律[2]。赵学文提出了新的冻胀融沉试验方法,并对黏土的冻胀特性进行了探究,在试验方法上具有一定的创新性[3]。王永涛等以青藏粉土为研究对象,通过单向冻结试验得到了土样冻胀变形的实时过程及冻胀率的变化特性[4,5]。唐益群等开展了上海淤泥质黏土的人工冻胀试验,得到了冷端温度对土体冻胀力和冻胀率的影响规律,同时揭示出冻结锋面的发展与时间的关系[6]。于琳琳对人工冻结南京粉土的冻胀特性进行了研究[7]。姜龙等、李岩等对路基填土冻胀过程中的法向和水平冻胀力的变化特性开展了相关的研究[8,9]。冷景岩等、张传探究了路基填料中细颗粒含量对其含水量和冻胀率的影响,论证了通过调配细颗粒含量实现填料防冻的可行性,为解决冻胀问题提供了一个新的思路[10,11]。杨国涛等对水泥稳定碎石基床的冻胀特性进行了研究[12]。李锐阳等对深厚表土进行了双向冻结试验,得到了各影响因素对冻胀率影响的主次关系以及冻胀率随含水率和外荷载变化的规律[13]。除此以外,朱武、刘凯等、张运海等均对含盐土的冻胀-盐胀规律进行了研究[14—16]。

以上研究对土冻胀所涉及的影响因素、冻胀特性、冻胀过程、试验方法、防治措施以及特殊岩土的冻胀性能进行了相关研究,但是针对土冻胀过程中水分重分布及密度的变化研究较少,因此在揭示土冻胀机理及冻胀后的状态方面存在不足。因此,本文基于黏质粉土在 4 个不同顶板温度下的单向冻结试验,对试样冻胀过程中的水分重分布及密度变化规律进行了研究,从宏观和细观角度对试样的冻胀机理进行了探讨。

1　土质参数及试验装置

试验用土为黏质粉土,主要分布在中国黄土高

2018 年 3 月 27 日收到　　国网内蒙古东部电力有限公司科技项目(52660616000Q)、内蒙古大学横向课题(22200-5176015)、国家自然科学基金(51769018)和内蒙古自然科学基金(2016MS0530,2017BS0401)资助

第一作者简介:刘万福(1962—),男,汉族,河北霸州人,博士,高级工程师。E-mail:ttk96@163.com。

*通信作者简介:王永涛(1989—),男,汉族,甘肃庆阳人,博士,讲师。E-mail:wyt_827@imu.edu.cn。

原、山西、内蒙古高原等地，属于风力沉积而成。颗粒分析曲线如图 1 所示，液限含水率为 27.7%，塑限含水率为 18%，塑性指数为 9.7。

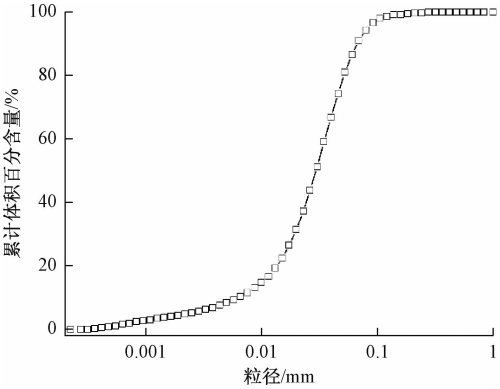
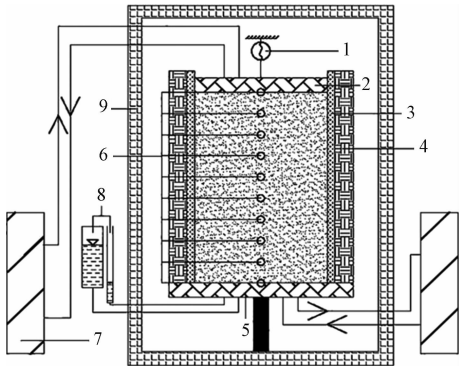


图 1 黏质粉土颗分曲线

Fig. 1 Gradation curve of the tested clayey silt

该试验所用设备为冻融过程试验装置 XT 5405，如图 2 所示。主要由温度控制系统、数据采集系统和水分补给系统三大部分组成。温度控制装置主要由两台独立控制顶底板降温的冷浴与一台控制箱温的冷浴及相关的循环管路组成；数据采集装置包括温度采集传感器和位移采集传感器及 Data taker 数采仪；水分补给装置是由可自由调节水位的马利奥特瓶及连接在试样底板上的水流循环管路组成。



1 为位移计；2 为顶板；3 为试样罐；4 为保温材料；5 为底板；6 为温度探头；7 为冷浴；8 为马利奥特瓶；9 为恒温箱

图 2 试验装置

Fig. 2 Experiment equipment

试验前将土样的含水率配制为 22%，待土样中的水分分布均匀后，将试样采用分层击实法装入直径为 20 cm，高度为 13 cm 的试样筒中，初始试样如图 3 所示。试样的干密度控制为 1.82 g/cm^3，装样完成后将样品放置在恒温箱中使温度分布均匀后接通补水装置开始试验。在试验中，设置的底板温度为 5 ℃，箱温为 5 ℃，顶板温度分别设置为 −3、−6、−9 和 −12 ℃，均保持恒温。在冻结达到稳定后，实

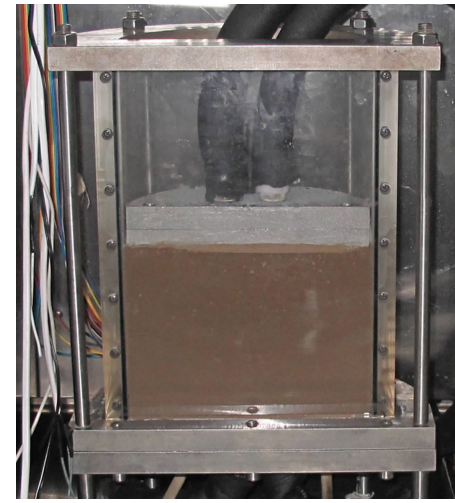


图 3 初始试样

Fig. 3 Initial sample

测得试样的顶板温度分别为 −2.95、−5.67、−7.95、−10.7 ℃，4 个顶板温度对应的试样依次编号为 E1、E2、E3、E4。

2 结果分析

2.1 试样冻胀过程分析

试样在顶底板温度设定之后发生冻结，通过对温度探头采集的数据进行分析得到冻结锋面随冻结时间的变化规律如图 4 所示。可以看出，试样冻结初期，试样中冻结速率较大，冻结锋面快速向下移动，且顶板温度越低，冻结锋面的下移速度越快。当试样冻结 20 ~ 25 h 之后不同顶板温度下的试样冻结均趋于稳定。试样 E1 ~ E4 在冻结过程中均发生了冻胀变形，冻结 120 h 试样 E1 ~ E4 的冻胀变形分别为 2.8、1.6、0.2、0.2 mm。由于试样 E3 与 E4 的顶板温度太低，在同样的冻结时间内，试样基本表现为原位冻胀，冻胀量很小。

由于试样 E1 及 E2 冻胀量较为明显，因此取试样 E1 与 E2 的冻胀过程与水分补给过程进行分析，

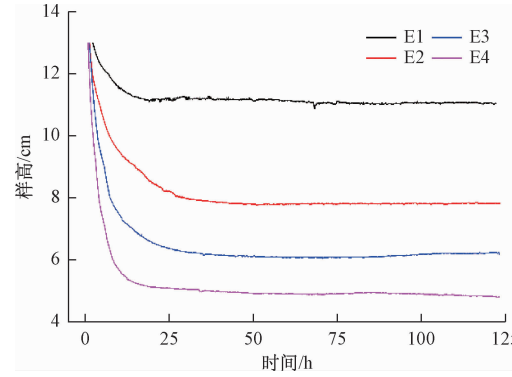


图 4 冻结样高与时间的关系

Fig. 4 Relationship between the freezing front and time

如图 5 所示。从图 5 中可以看出,试样冻胀及补水过程均可以分为两个阶段,第一阶段冻胀量和补水量均较小,其变化较为平缓;第二阶段冻胀量和补水量均线性增加,这说明试样的冻胀变形在一定程度上受到补水过程的控制。同时,可以看出,补水量两个阶段明显的分界范围为试样冻结稳定的时间(20 ~ 25 h),而冻胀量两阶段的分界时间点明显要晚于补水量两个阶段的分界时间点,这说明冻胀的发生要明显滞后于补水量的变化过程,同时也说明试样的冻胀是在试样内部已冻区和未冻区的相互协调下发生的,并不完全由补水过程控制。

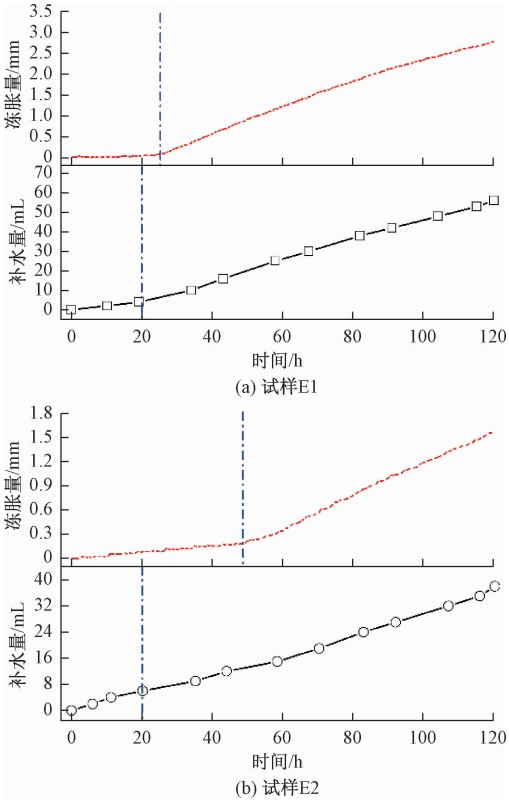
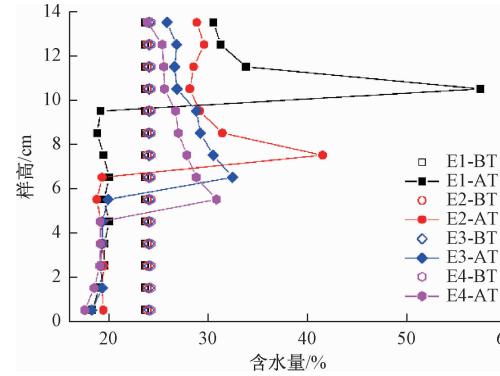


图 5　试样 E1 及 E2 冻胀及补水过程与时间的关系

Fig. 5　Relationship of frost heave and water supply process with time of sample E1 and E2

2.2　试样冻胀水分重分布规律

为了分析试样发生冻胀后水分重分布的情况,在实验前后采用切层取样法,将试样切成 1 cm 厚度的薄片进行了分析,测得试样冻结后与冻结前的含水率比较如图 6 所示。从图 6 中可以看出,试样冻胀以后已冻区的含水率较初始明显增大,未冻区的含水率较初始明显减小。且已冻区中靠近冻结稳定时的冻结锋面位置的含水率最大,该位置为最暖端厚层冰透镜体的位置。将试样冻结方向按已冻区、未冻区及最大含水率区(冻结缘区)进行分区,统计其平均含水率的分布如图 7 所示。图 7 明显地反映



BT 为对应试样试验前的含水率;AT 为对应试样试验后的含水率

图 6　试验前后含水量分布

Fig. 6　Distribution of water content before and after test

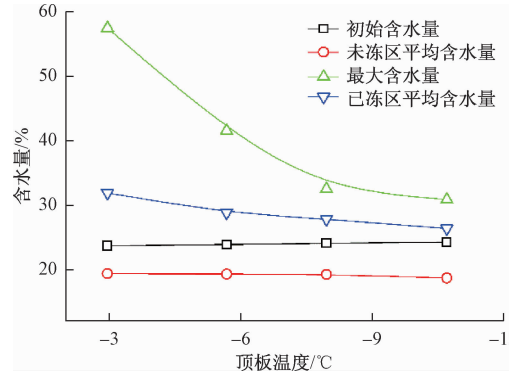


图 7　含水率与顶板温度之间的关系

Fig. 7　Relationship between the water content and top cold temperature

出试样已冻区、未冻区以及最大含水率与设置的顶板温度之间的关系,从图 7 中可以看出,随着顶板温度的降低,试样未冻区含水率、已冻区含水率以及最大含水率均有所降低。其中,最大含水率与顶板温度之间呈指数关系,已冻区平均含水率与未冻区平均含水率均与顶板温度之间呈线性关系。

以上规律显示,试样冻胀过程中不仅存在外来水分的补给及迁移过程,同时土样中初始的水分也会在土样冻胀过程中发生重分布,导致未冻区含水率减少,已冻区的增大,在已冻区中靠近冻结锋面的位置存在含水率最大的区域,即一般意义上的最暖端厚层冰透镜体,该层冰透镜体也是冻胀发生的主要贡献部分。

2.3　试样密度变化结果

为了更好地探究土体在冻胀过程中内部结构发生的变化,对试样不同高度处的横截面在试验前后进行电子计算机断层(computed tomography,CT)扫描,并对扫描获取的图像进行了分析,试样 E1 不同高度位置横截面 CT 扫描图像如图 8 所示。由于冻结前的初始试样各高度位置横截面的 CT 扫描图像

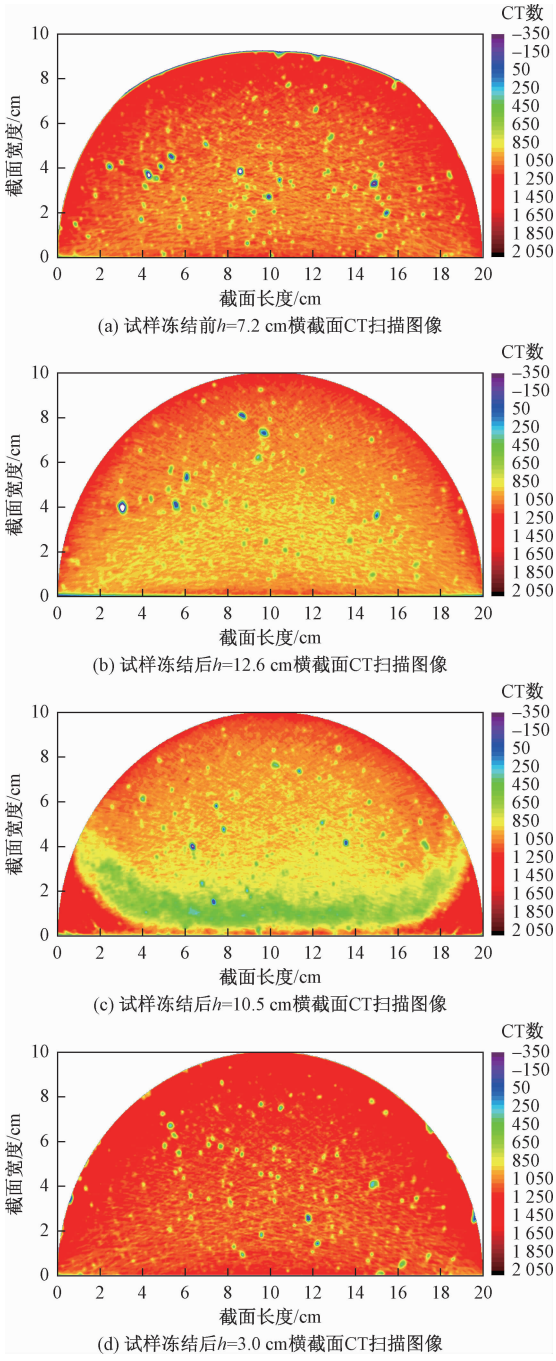


图 8 试样 E1 不同高度 CT 扫描图像

Fig. 8 CT scanning pictures of sample E1 in different height

基本一致,即初始试样基本均匀,因此图 8(a)选用试样冻结前高度为 7.2 cm 处横截面的 CT 扫描图像(由于扫描过程中试样较软,发生部分变形)作为代表;图 8(b)为试样冻结后高度为 12.6 cm 处横截面上的 CT 扫描图像,位于已冻区;图 8(c)为试样冻结后高度为 10.5 cm 处横截面上的 CT 扫描图像,位于冻结缘区域;图 8(d)为试样冻结后高度为 3.0 cm 处横截面上的 CT 扫描图像,位于未冻区。从图 8(a)中可以看出,试样冻结前 CT 数分布较为均匀。将图 8(b) ~ 图 8(d)与图 8(a)进行对比可以看出,试样发生冻结后,已冻区和冻结缘 CT 数较初始值均减少,其中冻结缘的 CT 数减少最为明显,同时未冻区的 CT 数较初始值增大。虽然发生冻结,但是未冻区和已冻区的 CT 数分布较为均匀,而冻结缘区域的试样则出现了明显的不均匀性与各向异性,CT 数的分布基本集中在 350 ~ 2 000 之间,可以分析得到该截面上同时存在冰、水和土体(水的 CT 为 0,冰小于 0,土颗粒远大于 0)。试样的密度变化在一定程度上可以反映其物质形态,而 CT 数的变化本质上是不同物质的密度差异造成对 X 射线的吸收不同所产生的,因此通过反演的方式建立了试样干密度与 CT 数以及试样含水率之间的关系:

$$\bar{\rho}_{\mathrm{d}} = (\bar{H}_{\mathrm{u}}/1\,000 + 1)/(1.023 + \bar{\omega}) \quad (1)$$

式(1)中:$\bar{\rho}_{\mathrm{d}}$ 为试样扫描层平均干密度;$\bar{\omega}$ 为试样扫描层平均含水率;$\bar{H}_{\mathrm{u}}$ 为试样扫描层平均 CT 数。

将 CT 扫描得到的分层 CT 数及切层法测到的含水率数据代入式(1)中换算得到试样冻结方向不同高度的平均干密度数据,如图 9 所示。在已冻区,由于试样中原位水分的冻结以及未冻区的水分迁移到已冻区的孔隙中发生冻结,致使已冻区土体内部空隙增大,因此已冻区的干密度在冻结后较初始干密度减小。在未冻区,由于冻结时冰分凝的压力作用以及水分从未冻区向已冻区迁移后土体固结,孔隙减小,土体更加密实,因此未冻区的干密度较初始干密度增大。同时,从图 9 中可以看出干密度的变化趋势与含水率的变化趋势基本相反,冻结缘区域靠近已冻区一层也就是最厚层冰透镜体发育的位置,这个区域的干密度也是最小的,这与图 8 中 CT 扫描图像得到的结论一致。

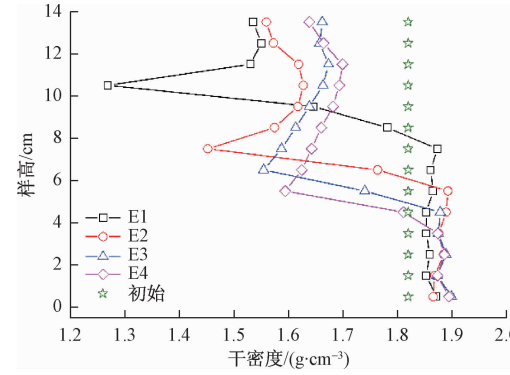


图 9 试样冻结前后干密度变化规律

Fig. 9 Dry density change of the samples before and after test

3 结论

(1)试样冻结 20 ~ 25 h 之后,冻结锋面趋于稳定,试样冻胀量与补水量正相关,但冻胀量的变化过程相对于补水量的变化具有滞后性。

(2)试样冻胀后已冻区含水率增大,未冻区含水率减小,试样含水率最大位置为已冻区中靠近冻结锋面的位置,该位置也是厚层冰透镜体发育的位置。

(3)基于 CT 扫描试验反演得到了试样冻胀后干密度的分布规律,发现其与含水率的变化负相关。试样冻胀后已冻区的空隙增大,发生冻胀;未冻区的孔隙减小,发生固结。

致谢:感谢中国科学院冻土工程国家重点实验室为本课题的开展提供了试验条件支持!

参 考 文 献

1 马宏岩, 张　锋, 冯德成, 等. 单向冻结条件下饱和粉质黏土的冻胀试验研究. 建筑材料学报, 2016; 19(5): 926—932
Ma Hongyan, Zhang Feng, Feng Decheng, *et al*. Experimental study on frost heave of saturated silty clay under single side freezing. Journal of Building Materials, 2016; 19(5): 926—932

2 郑美玉, 左蓓蓓. 季节冻土区粉质粘土冻胀特性试验分析. 水电能源科学, 2017; (5): 153—156
Zheng Meiyu, Zuo Beibei. Analysis of frost heaving characteristics of silty clay in seasonal frozen region. Water Resources and Power, 2017; (5):153—156

3 赵学文. 冻胀融沉试验方法及粘土冻胀特性研究. 北京: 北京交通大学, 2014
Zhao Xuewen. The experimental technique for studying the soil deformation in the freezing-thawing cycles and the freezing induced deformation features of clay. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014

4 王永涛, 王大雁, 郭　妍, 等. 青藏粉土单向冻结冻胀率变化特性研究. 冰川冻土, 2016; 38(2): 409—415
Wang Yongtao, Wang Dayan, Guo Yan, *et al*. Experimental study of the development characteristic of frost heaving ratio of the saturated Tibetan silt under one-dimensional freezing. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016; 38(2): 409—415

5 王永涛, 王大雁, 马　巍, 等. 青藏粉质黏土单向冻结冷生构造发育及冻胀发展过程试验研究. 岩土力学, 2016; 37(5): 1333—1342
Wang Yongtao, Wang Dayan, Ma Wei, *et al*. Experimental study of development of cryostructure and frost heave of the Qinghai-Tibet silty clay under one-dimensional freezing. Rock and Soil Mechanics, 2016; 37(5): 1333—1342

6 唐益群, 洪　军, 杨　坪, 等. 人工冻结作用下淤泥质黏土冻胀特性试验研究. 岩土工程学报, 2009; 31(5): 772—776
Tang Yiqun, Hong Jun, Yang Ping, *et al*. Frost-heaving behaviors of mucky clay by artificial horizontal freezing method. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009; 31(5): 772—776

7 于琳琳. 不同人工冻结条件下土的冻胀试验研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
Yu Linlin. Test research on frost heave of soils under different artificial freezing conditions. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006

8 姜　龙, 王连俊, 张喜发, 等. 季冻区公路路基低液限黏土法向冻胀力试验. 中国公路学报,2008; 21(2): 23—27
Jiang Long, Wang Lianjun, Zhang Xifa, *et al*. Experiment on normal frozen-heave force of low liquid-limit clay of highway roadbed in seasonal frost region. China Journal of Highway and Transport, 2008; 21(2): 23—27

9 李　岩, 刘　波, 张建新. 竖向直排冻结条件水平冻胀力试验研究. 岩土力学, 2014; 35(11): 3199—3206
Li Yan, Liu Bo, Zhang Jianxin, *et al*. Experimental research on horizontal frost heaving force of vertical straight freezing. Rock and Soil Mechanics, 2014; 35(11): 3199—3206

10 冷景岩, 付新平, 杨军杰. 高速铁路路基填料冻胀试验研究. 冰川冻土, 2015; 37(2): 440—445
Leng Jingyan, Fu Xinping, Yang Junjie. Experimental research of the subgrade padding frost heaving of high-speed railway. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015; 37(2): 440—445

11 张　传. 季冻区路基填料冻胀与防治的试验研究. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012
Zhang Chuan. The study of experiment of the roadbed filler's frost heave and prevention in seasonal frozen ground area. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012

12 杨国涛, 高　亮, 王天亮, 等. 严寒地区高速铁路水泥稳定碎石基床冻胀性能试验研究. 中国铁道科学, 2016; 37(6): 1—10
Yang Guotao, Gao Liang, Wang Tianliang, *et al*. Experimental study on frost heave properties of cement stabilized macadam subgrade bed of high speed railway in severe cold regions. China Railway Science, 2016; 37(6): 1—10

13 李锐阳, 朱　杰. 双向冻结下深厚表土冻胀特性试验研究. 煤炭技术, 2017; 36(2): 87—89
Li Ruiyang, Zhu Jie. Study for frost heaving characteristics of deep overburden in double direction freezing mode. Coal Technology, 2017; 36(2): 87—89

14 朱　武. 基土盐-冻胀特性研究. 中国水能及电气化, 2017; 12(8): 33—36
Zhu Wu. Characteristic research of geotinite-frost heaving. China Water Power & Electrification, 2017; 12(8): 33—36

15 刘　凯, 张远芳, 潘　蕾, 等. 不同压力条件下罗布泊地区天然亚氯盐渍土盐-冻胀试验研究. 新疆农业大学学报, 2016; 39(5): 419—423
Liu Kai, Zhang Yuanfang, Pan Lei, *et al*. Study on salt and frost-heaving law of natural sub-chlorine saline soil in Lop Nur under different pressure conditions. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2016; 39(5): 419—423

16 张运海, 张远芳, 刘　凯, 等. 天然盐渍土冷端阶梯式持续降温盐-冻胀及水盐迁移试验研究. 科学技术与工程, 2016; 16(31): 265—269
Zhang Yunhai, Zhang Yuanfang, Liu Kai, et al. Natural saline soil salt-frost heave cold end step continuous cooling and experimental study on water salt migration. Science Technology and Engineering, 2016; 16(31): 265—269

Water Redistribution and Density Change of Clayey Silt in the Process of Frost Heaving

LIU Wan-fu[1,2], SHI Qiang[1,2], WANG Jun-sheng[1,2], WANG Yong-tao[3*], ZHANG Wei-dong[3], XU Xiang-tian[3]
(State Grid East Inner Mongolia Economic Research Institute[1], State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited[2], Hohhot 010020, China; Institute of Transportation, Inner Mongolia University[3], Hohhot 010070, China)

[**Abstract**] In order to explore the water content redistribution and density change in the frost heave process, four samples under different top cold temperature were performed based on the one-dimensional freezing experiment in an open system. The water contents, computed tomography (CT) scanning pictures and dry density in different height of the samples were analyzed. The results show that the frost heave amounts of the samples are controlled by the water absorbed process and the redistribution of the water content from the unfrozen to frozen zone. After the tests, the dry density increased in unfrozen and decreased in frozen zone, which had the opposite law with the water content change.

[**Key words**] one-dimensional freezing frost heaving water redistribution computed tomographc (CT) scanning density