

doi:10.3969/j. issn. 1006-8023. 2022. 05. 018

人工冻结红黏土冻融特性试验研究

王升福, 吕亮, 刘光炎, 罗成文, 薛凯喜, 李栋伟

(东华理工大学 土木与建筑工程学院, 南昌 330013)

摘要:为探究江西地区典型红黏土层人工冻结条件下冻胀融沉变形、温度场和水分场变化规律, 该文采用封闭系统单向冻融试验, 对不同冻结冷端温度条件下重塑红黏土试样开展研究, 获得冻胀率、融沉系数、冻结温度场和水分场变化规律。试验结果表明, ①试样在单向冻融过程中, 冻胀、融沉位移变化可分为7个阶段; 冻胀率、融沉系数随冻结冷端温度的降低逐渐减小, 且融沉系数大于冻胀率; 冻结冷端温度越低, 冻结完成时间越短, 且冻结完成时间与冷端温度呈指数相关。②土样冻结过程中, 试样冷端温度越低, 冻结锋面高度越高, 冻结锋面高度与冻结时间呈指数关系。③试样在封闭系统单向冻融后水分场发生重分布, 试样近冷端位置土体含水率略有增大, 靠暖端位置含水率减小, 冻结冷端温度越高, 水分迁移量越大, 冷端温度为-5℃时比-15℃时含水率增加了4.97%。

关键词:人工冻结; 红黏土; 冻胀融沉; 温度场; 水分重分布

中图分类号:TU445

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2022)05-0144-07

Experimental Study on Freeze-thaw Characteristics of Red Clay Due to Artificial Freezing

WANG Shengfu, LYU Liang, LIU Guangyan, LUO Chengwen, XUE Kaixi, LI Dongwei

(School of Civil & Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to investigate the freezing and thawing deformation, temperature field and moisture field changes under the artificial freezing conditions of typical red clay layer in Jiangxi area, this paper adopts the closed system one-way freezing and thawing test to study the remodeled red clay specimens under different freezing cold end temperature conditions, and obtain the freezing and thawing rate, thawing coefficient, freezing temperature field and moisture field changes. The test results show that: (1) the freezing and thawing displacement changes of the specimens can be divided into 7 stages during the unidirectional freezing and thawing process; the freezing and thawing coefficients decrease gradually with the decrease of the freezing cold end temperature, and the thawing coefficient is larger than the freezing rate; the lower the freezing cold end temperature, the shorter the freezing completion time, and the freezing completion time is exponentially related to the cold end temperature. (2) In the process of freezing soil samples, the lower the cold end temperature of the specimen, the higher the height of the freezing front, and the height of the freezing front is exponentially related to the freezing time. (3) The moisture field redistribution occurs in the specimen after one-way freezing and thawing in the closed system, the moisture content of the soil near the cold end of the specimen slightly increases, and the moisture content decreases by the warm end, the higher the temperature of the cold end of freezing, the greater the moisture migration, and the difference of moisture content change increases by 4.97% when the cold end temperature -5℃ compared with -15℃.

Keywords: Artificial freezing; red clay; frost heave and thaw settlement; temperature field; moisture redistribution

0 引言

江西省南昌及环鄱阳湖经济带城市群地处鄱

收稿日期:2021-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977236; 42061011; 42167024); 江西省自然科学基金项目(20202BABL214044); 江西省教育厅科技计划项目(GJJ200701); 东华理工大学研究生创新项目(DHYC-202132)

第一作者简介: 王升福, 博士, 副教授。研究方向为环境岩土与地下工程。E-mail: wangsf@ecut.edu.cn

引文格式: 王升福, 吕亮, 刘光炎, 等. 人工冻结红黏土冻融特性试验研究[J]. 森林工程, 2022, 38(5): 144-150.

WANG S F, LYU L, LIU G Y, et al. Experimental study on freeze-thaw characteristics of red clay due to artificial freezing[J]. Forest Engineering, 2022, 38(5): 144-150.

阳湖平原, 地层分布大量红黏土, 且地下水位较高。近年来地铁建设蓬勃发展, 地铁隧道端头加固和联络通道开挖越来越多地采用人工地层冻结法。红黏土层人工冻融过程温度场、水分场变化规律较复杂, 冻结法施工过程中冻胀、融沉易导致地层变形, 造成建筑物使用寿命减损, 引发严重安全事故^[1-2]。因此探究红黏土冻胀融沉特性尤为重要^[3-4]。

国内外学者对土体冻胀融沉特性开展大量研究工作^[5-7]。通过室内试验模拟人工冻结施工冻融过程, 研究温度变化及水分迁移规律。唐益群等^[8]研究发现淤泥质黏土的冻胀率以及冻胀力与冷端温度具有较好的线性关系; 贾宝新等^[9]研究发现, 在封闭不补水条件下, 初始含水率、干密度和冷端温度都对粉土冻结深度有影响, 粉土的冻胀率与初

始含水率、干密度有较好的线性关系;任秀玲等^[10]研究了黏土在封闭系统下短时、高频、浅冻结条件下试样的冷生构造、水分迁移和冻胀特性;王升福等^[11]采用自制单向封闭冻结试验系统对宁波原状软黏土进行冻胀融沉试验研究,分析了位移及温度场的变化规律;赵刚等^[12-13]基于原状土和重塑土的冻融试验,分析了冻融过程温度场以及冻融前后含水量的变化;孙雯等^[14]研究了补水条件非饱和黏土单向冻融过程中温度场及冻胀融沉变化规律。冻融过程中,土体含水量梯度(土水势梯度)和冻结温度梯度对冻结锋面推移速率有重要影响,而冻结锋面移动是引起土体冻胀位移和水分迁移的主要因素^[15-17]。曹成等^[18]研究发现非饱和土在有水源补给条件下水分迁移范围更大,冻结完成时间更长;薛珂等^[19]研究得出土体冻胀的快慢及冻胀量大小与水分迁移速率及数量具有线性关系;Konrad等^[20]通过进行不同温度梯度下冻土中水分迁移试验得出了水分迁移通量与温度梯度成正比的结论。

表1 试验土样基本物理性能指标

Tab. 1 Basic physical performance indexes of test soil samples

土粒比重(G_s) Soil gravity	液限(W_L)(%) Liquid limit	塑限(W_p)(%) Plastic limit	塑性指数(I_p) Plasticity index	起始冻结温度(T)/℃ Initial freezing temperature	渗透系数(k)/(cm·s ⁻¹) Permeability coefficient	天然含水率(ω)(%) Natural moisture content
2.69	39.05	22.89	16.16	-0.40	1.834×10^{-5}	32.23

采用BT-9300LD激光粒度分布仪测得南昌红黏土的粒径级配曲线,如图1所示。由图1可见,红黏土颗粒较细,黏粒含量较高,粉粒和砂粒含量较低。

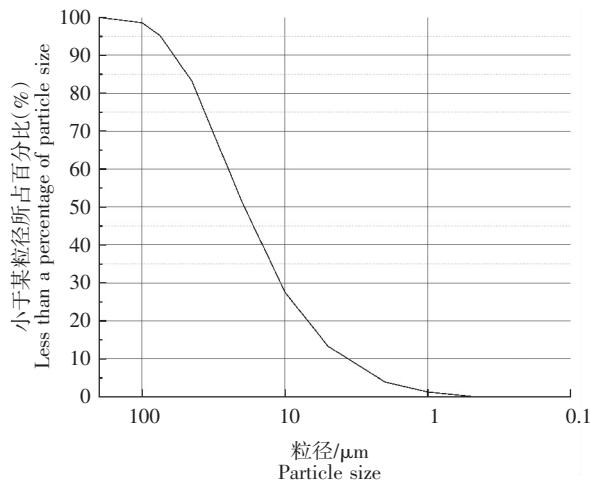


图1 红黏土颗粒级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of red clay particles

本文采用封闭系统单向冻融试验系统,对不同冷端温度冻结条件下的重塑红黏土开展冻融试验,以获得冻胀率、融沉系数随冻结冷端温度变化规律,建立冻结锋面及冻结完成时间随冷端温度变化的定量关系,揭示冻融后试样的水分迁移规律。本文对人工冻结红黏土冻融特性进行了比较全面地分析,为江西地区典型红黏土地层人工冻结施工提供参考。

1 试验概况与试验方案

1.1 试验土样

本文试验用土取自南昌地铁四号线施工穿越红黏土地层,在车站基坑开挖过程中采用挖掘机挖取试验所需土样,放至塑料桶中运至实验室,取土深度约为10~20 m范围,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测得的基本物理参数和热物理参数,见表1。

1.2 冻融试验系统

试验设备为TMS冻融循环测试系统,由冻融测试系统、TMS8037-R40精度高低温恒温循环液浴槽、数据采集器、电脑和试样恒温专用环境箱等组成。本试验采用封闭系统单向冻融,冻融试验系统如图2和图3所示,包括控温环境箱、试样筒、上下制冷系统、分层温度采集系统和竖向位移采集系统等(冻融测试系统温控范围:-40~60 ℃,控温精度: ± 0.1 ℃,温度均匀度:-0.3~1 ℃)。试验桶材质为有机玻璃,外包裹一层隔热棉,桶高150 mm,内径79.8 mm,壁厚10 mm,沿桶壁每20 mm设有温度传感器插孔设置温度传感器,动态监测试样内各点温度^[6]。控温顶板和控温底板材质采用导热良好的铜合金,与冷浴循环器连接,冷冻液可在其内循环流动,达到降温效果。传感器包括桶壁的温度传感器和竖向位移传感器(位移范围:0~30 mm,线性度:<0.05%,温度范围:-50~100 ℃)。

1.3 试验方法

本试验采用的重塑红黏土,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)规定并进行烘干、碾

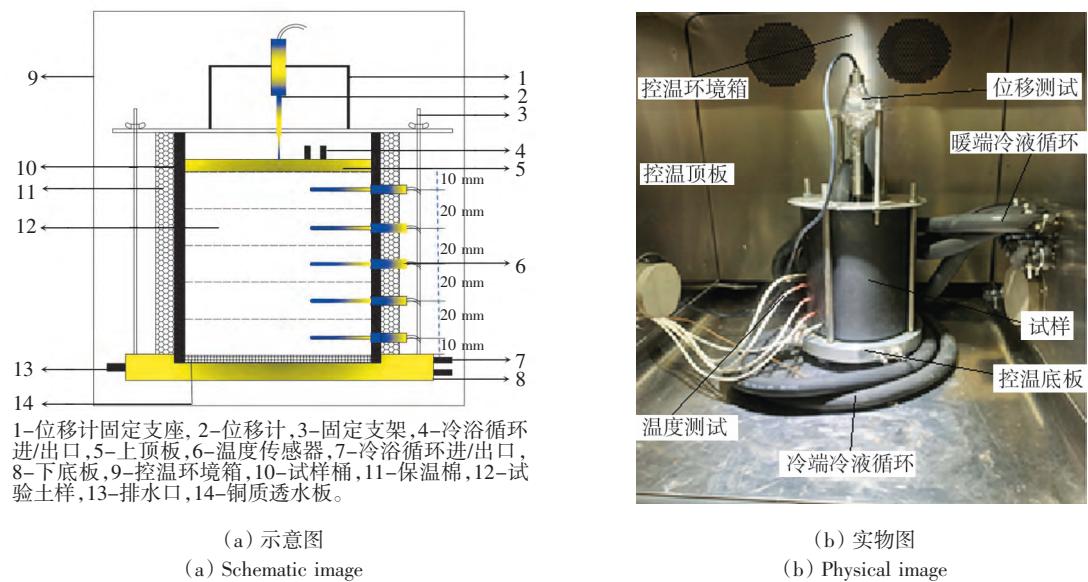


图 2 TMS 冻融试验系统

Fig. 2 TMS freeze-thaw test system

碎,过2 mm筛,根据天然状态初始含水率及考虑液塑限范围,设定试样初始含水率为30%,配好土样后于密封袋中闷置24 h,使土颗粒与水均匀接触;然后,将土样分层装入试样筒中,从上、下两端分别进行压样,且控制每层试样的高度及质量,制备成高度 $h=100$ mm,直径 $d=79.8$ mm的圆柱体试样后用保鲜膜包裹试样后静置24 h。本试验采用封闭单向冻结,冻结下端为冷端。冻胀过程:先将环境温度设为1 °C并恒温6 h,待试样初始温度达到1 °C后将控温冷板设为预定冻结温度开始冻结,从各温度计示数在1 °C附近时开始计时,冷端温度分别设置-5、-7、-10、-15 °C这4个条件。融化过程:试样冻胀位移在2 h内不超过0.02 mm时,关闭冷端的温度控制,为模拟自然解冻,设置恒温环境箱温度为平均室温,为20 °C,至2 h内试样竖向位移不超过0.05 mm时结束试验。试验结束后取出试样,分层用烘干法测试含水率,每组试样进行2组平行试验。

2 冻融特性分析

2.1 冻融过程分析

不同冷端温度冻结条件下试样竖向位移变化如图3所示。由图3可见,试验土样在不同冷端温度条件下,冻胀位移随时间变化规律基本相似,在冻融过程中基本可分为7个阶段:冻结过程包括冻缩、冻胀快速增长、缓慢增长和稳定4个阶段,融化过程则由缓慢融沉、快速融沉和融沉稳定3个阶段

组成。结合图4进行分析。

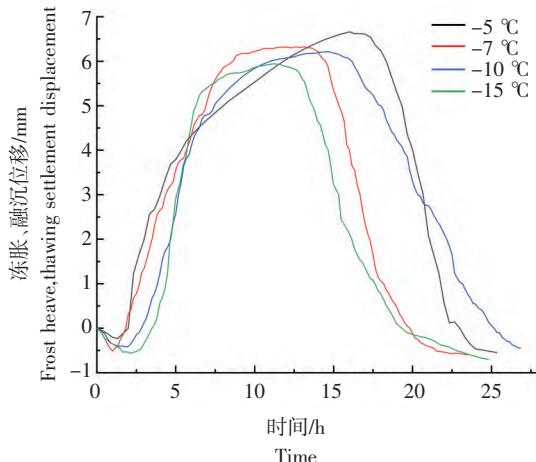


图 3 不同冷端温度下冻胀、融沉位移随时间变化关系

Fig. 3 The relationship between frost heave and thaw settlement displacement with time under different cold end temperatures

由图3和图4可知,冻结起始时冻胀位移出现负增长,在1~2 h后位移出现正增长,此过程为第1阶段,温度降低使土颗粒受冷收缩,孔隙水结冰增大的体积不足以抵消土颗粒收缩的体积,形成冻缩;当温度达到某一冻胀温度后,为第2阶段,此时土体冻胀量超过土颗粒冻缩量,冻胀开始,土体内部水分发生迁移冻胀及原位冻胀,水分开始在冻结锋面处聚集并形成冰,冻胀位移快速增长;第3阶段时,冰分凝过程完成,冻结锋面附近形成的冰透镜体厚度及连续程度持续增大,冻胀位移匀速增长;

第4阶段,冻结锋面推移基本停止,冰透镜体停止生长,冻胀位移曲线趋于平缓;冷端低温循环系统关闭,环境箱温度改变,试样两端冻土融化,土体内部部分冰透镜体融化成水,因土体内部存在冰晶,融化速率较慢,冰水相变体积变化不明显,融沉较慢,为第5阶段;试验进行至试样整体温度高于冻结温度时为第6阶段,土中冰完全融化成水,土中孔隙被水填充,水在自重荷载下被挤压排出,土颗粒结构发生重组,表现为压密沉降,试样体积变化较大,融沉位移呈直线变化;融化后期,土样在自重作用下孔隙压缩完成,在无外荷载作用下融沉变形稳定,为第7阶段。

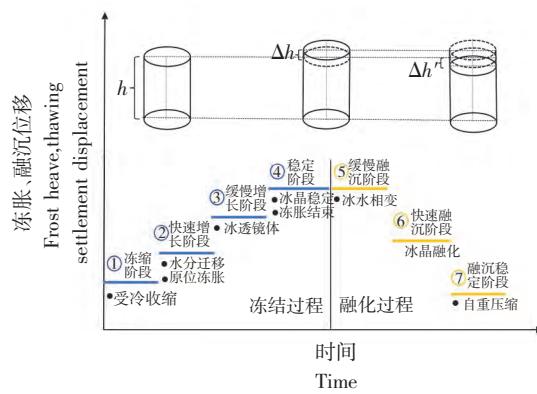


图4 冻融过程位移与时间关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the relationship between displacement and time during freeze-thawing process

2.2 冻胀率及融沉系数

土体单向冻融过程产生冻胀、融沉变形特性,用冻胀率和融沉系数来描述,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),计算不同冷端温度下的冻胀率和融沉系数,如图5所示。冻胀率和融沉系数随冷端温度降低而减小,冷端温度由-5 ℃降至-10 ℃过程中,试验土样冻胀率和融沉系数变化较大,冻胀率由7.37%减小至6.55%,融沉系数由6.81%减小至6.08%,在-10 ℃至-15 ℃过程中,冻胀率和融沉系数下降趋于平缓。

不同冻结冷端温度条件下,试样融沉系数均大于冻胀率。这与已有文献关于黏性土相关研究结论一致^[11,21]。究其原因,冻结过程土体内部水分在温度梯度作用下迁移,形成冰透镜体,水分相变体积增大了土颗粒间隙,冻胀导致下部未冻土产生一定压密,冻胀量实际是土样冻胀与部分压缩之后的值。融化时土中冰透镜体和冰夹层等受热消融,体积减小,土体原有结构受冻结作用发生扰动和损伤,结构发生变化,出现热融下沉;另一方面,冰晶

相变成水部分排出,孔隙增加,在自重荷载下冻土段压缩沉降,融沉量为冻胀所产生的压缩量加上融化过程的沉降量,试样表现为初始含水率及冷端温度相同条件下,融沉率均大于冻胀率。

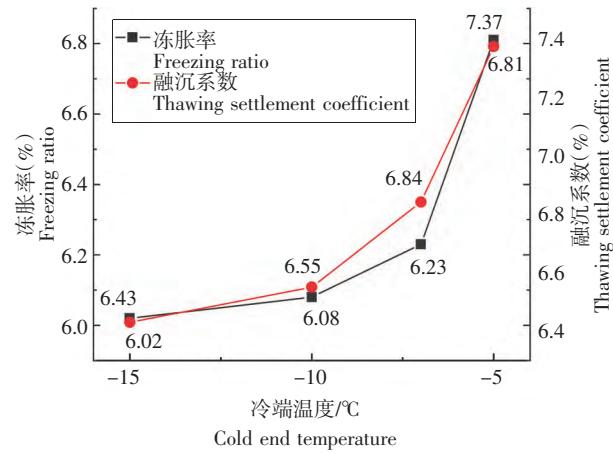


图5 不同冷端温度条件下的冻胀率和融沉系数

Fig. 5 Frost heave rate and thaw settlement coefficient under different cold end temperatures

2.3 冻结锋面移动规律

冻结锋面定义为冻结土与未冻土之间可移动的接触面^[11]。基于封闭系统自下而上单向冻结,土样冻结时冻结锋面由冷端向暖端发展。土的起始冻结温度用于判断土体冻结状态起点,本文中用于确定冻结锋面所在位置。根据试验过程中记录不同位置温度随时间的变化情况,得出冻结锋面(-0.4 ℃等温线)高度随冻结时间的变化关系,如图6所示。

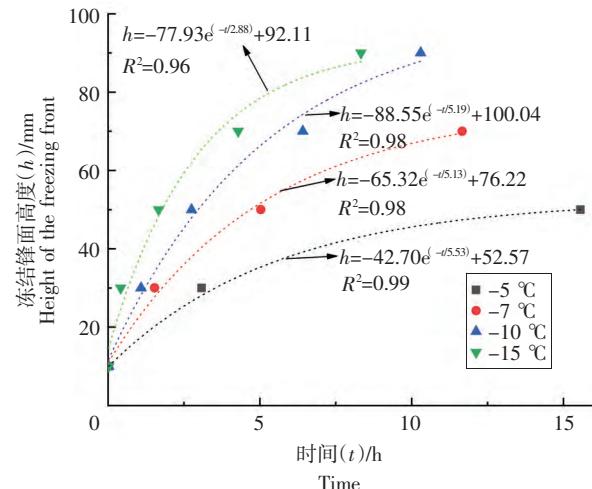


图6 不同冷端温度下试样冻结锋面变化曲线

Fig. 6 Variation curve of freezing front surface of sample under different cold end temperature

相同冷端温度条件下,冻结锋面推进速率随冻结时间的延长而减小;相同冻结时间条件下,试样冷端温度越低,冻结锋面高度越高。不同冷端温度条件下,冻结锋面高度随时间呈指数增长关系,可由公式(1)拟合。

$$h(t) = ae^{(-t/b)} + c \quad (1)$$

式中: $h(t)$ 为任意时刻试样冻结锋面高度, mm; t 为冻结时间, h; a , b , c 为拟合参数, 主要与冷端温度有关。

试样冻结初期,土体温度下降较快,这时冻结锋面向上推进,温度下降减慢,推进速度逐渐减小。冻土构造的纵剖面分4个带^[22]:整体状构造带、纤维状构造带、微薄层状构造带和整体构造带,分别与水分原位冻结带、分凝冻结带和冻结缘带相对应。冻结开始时,温度梯度越大,冻结速度越快,上部水分来不及迁移,试样下端出现原位冻结,形成原位冻结带,冻结带上方则出现纤维状构造带,内部冰片密布,由于形成整体构造带,其热阻增大,冻结速度降低,冻结锋面向上发展但推进减慢,逐渐形成冰透镜体的层状构造带,未冻区水分向下迁移,分凝冰厚度向上逐渐减小,冻结锋面推进到此区域时速度逐渐降低直至冰结缘带,冻结锋面逐渐停止推进。

2.4 冷端温度与冻结完成时间关系

土体在封闭系统单向冻结条件下,不同冻结温度试样的冻结完成时间不同。冻结2 h内试样高度变化值小于等于0.02 mm,视为冻结完成,不同冷端温度得到的冻结完成时间关系如图7所示。

冻结完成时间与冻结锋面移动速度相关,而温度是影响冻结锋面移动速度的主要影响因素^[11]。由图7可知,冻结完成时间冷端温度-15 ℃时为12.8 h,而-5 ℃为20.4 h,增加了1.6倍。可见冷端温度越低,冻结完成时间越快。冷端温度越低时,大量冷量促使冻结锋面快速移动,土中水主要产生原位冻胀,冻结过程迅速完成,冻结完成时间相对越短;冷端温度较高时,冷端产生冷量较低,冻结锋面推移缓慢,但推移距离较远,土中水分迁移冻胀明显,冻结时间延长,冻结完成时间增大。根据冷端温度与冻结完成时间进行拟合,并用公式(2)中指数关系表示

$$t = 217.36e^{(T/1.47)} + 12.63 \quad (2)$$

式中: t 为冻结完成时间, h; T 为冻结温度, ℃。

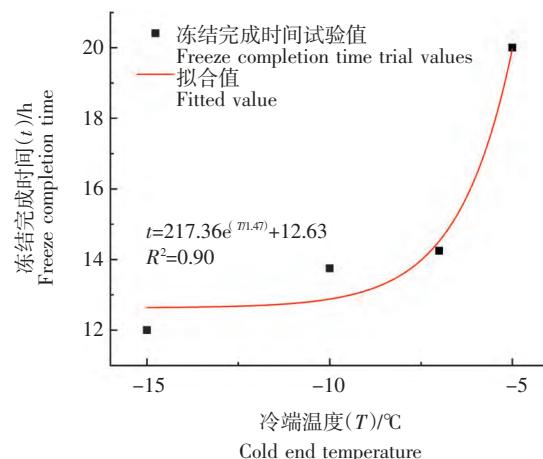


图7 不同冷端温度下冻结完成时间曲线

Fig. 7 Freezing completion time curve at different cold end temperatures

2.5 冻融过程含水率变化

试验结束后,在试样中心沿高度按每层20 mm取5层土样,采用烘干法测其含水率变化情况。不同冷端温度冻融后沿试样高度不同位置的含水率变化情况如图8所示。

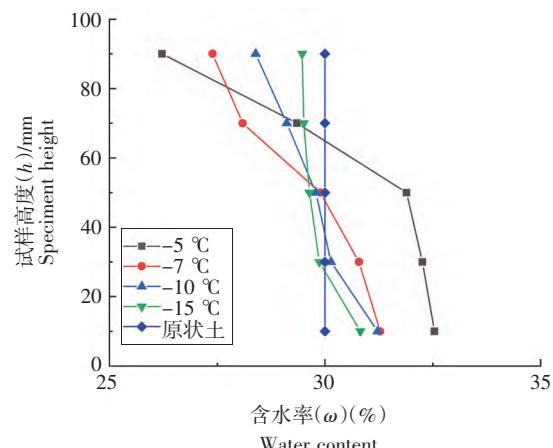


图8 试样冻融前后含水率分布

Fig. 8 Distribution of moisture content before and after freezing and thawing of samples

由图8可以看出,试验土样只改变冻结冷端温度条件下,冻融后水分重分布,各温度梯度冻结后含水率变化规律基本一致。试样靠近冷端位置冻融后土体含水率较初始含水率略有增大,远离冷端位置含水率降低。冻结温度从-5 ℃至-15 ℃,试样暖端含水率较冷端分别降低了6.32%、3.89%、2.83%、1.35%;-5 ℃时,最多降低了6.32%, -15 ℃时降低最少,为1.35%。同时,试样较未冻土来说,上面2层土体在冻结后平均含水率均减小,且温度梯度越小,含水率变化值越大;试样下部土体中,冻融后含水率均增大,且温度梯度越大,变化值越小。

试样在封闭单向冻结过程中冻结锋面向暖端推移,此期间会产生负压使土中水发生迁移,试样暖端的水分不断向冷端聚集,造成试样两端出现含水率差异。冻结锋面推进速度对水分迁移量的大小有直接影响,冷端温度越低,冻结速率越快,冻结锋面处水分原位冻结,冻结锋面相对稳定时间较短,迁移水分不足以维持相变;因此,冻结锋面推进加快,水分迁移时间短,上部水分来不及迁移,迁移量较小。冷端温度越高,冻结速率越小,冻结锋面推进缓慢,冻结时间相对越长,上部水分向冻结锋面迁移时间充足,此时水分迁移量更大。

3 结论

通过对30%初始含水率重塑红黏土试样进行室内封闭单向冻胀融沉试验,开展不同冻结负温下冻胀率、融沉系数及其水分迁移规律研究,得出以下结论。

(1) 试样在单向冻融过程中,冻胀、融沉位移变化可划分为7个阶段;冻胀率、融沉系数随冻结冷端温度的降低逐渐减小,且融沉系数大于冻胀率,土样融沉量均大于冻胀量;冻结冷端温度越低,冻结完成时间越短,冷端温度-15℃时为12.8 h,而-5℃为20.4 h,增加了1.6倍,且冻结完成时间与冷端温度呈指数相关。

(2) 土样冻结过程中,试样冷端温度越低,冻结锋面高度越高,冻结锋面高度与冻结时间呈指数关系。

(3) 试样冻融后水分场随冻结锋面作用发生重分布,试样近冷端位置土体含水率略有增大,而靠暖端位置含水率减小,试样冷端温度越高时,水分迁移量越大,冷端温度-5℃时较-15℃含水率增加了4.97%。

(4) 在实际人工冻结工程中,可参照试验获得的重塑红黏土起始冻结温度、冻结完成时间和冻融过程水分迁移,设置实际冻结工程积极冻结阶段冻结温度及冻结完成时间的判断标准。

【参考文献】

- [1] 黄磊,刘文博,吴雨薇,等.南宁地铁东滨区间联络通道冻结法加固施工监测分析研究[J].森林工程,2019,35(6):77-85.
HUANG L, LIU W B, WU Y W, et al. Monitoring and analysis of freezing reinforcement of Dongbin Section Communication Channel of Nanning Metro[J]. Forest Engineering, 2019, 35(6): 77-85.
- [2] 王晨星,刘远才,刘德稳.基于土体冻结理论在地铁施工中的应用[J].森林工程,2018,34(2):89-94,99.
WANG C X, LIU Y C, LIU D W. The study of the soil freezing method in subway construction [J]. Forest Engineering, 2018, 34(2): 89-94, 99.
- [3] 张婷,杨平.人工冻结法在地铁建设中的应用与发展[J].森林工程,2012,28(6):74-78.
ZHANG T, YANG P. The application and development of artificial freezing method in the subway construction [J]. Forest Engineering, 2012, 28(6): 74-78.
- [4] 周永毅,张建经,闫世杰,等.土体冻融特性试验研究现状与思考[J].岩石力学与工程学报,2022,41(6):1267-1284.
ZHOU Y Y, ZHANG J J, YAN S J, et al. Advance and review on the experimental researches of the freezing and thawing characteristics of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1267-1284.
- [5] DINULESCU H A, ECKERT E R G. Analysis of the one-dimensional moisture migration caused by temperature gradients in a porous medium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1980, 23(8): 1069-1078.
- [6] WANG S F, YANG P, YANG Z H. Characterization of freeze-thaw effects within clay by 3D X-ray computed tomography [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 148: 13-21.
- [7] WANG Y T, WANG D Y, MA W, et al. Laboratory observation and analysis of frost heave progression in clay from the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 381-389.
- [8] 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[J].岩土工程学报,2009,31(5):772-776.
TANG Y Q, HONG J, YANG P, et al. Frost-heaving behaviors of mucky clay by artificial horizontal freezing method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 772-776.
- [9] 贾宝新,杨成方,王荷,等.封闭不补水条件下粉土冻胀特性试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2020,39(3):219-225.
JIA B X, YANG C F, WANG H, et al. Experimental study on frost heaving characteristics of silty soil under closed and non-hydrating conditions[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2020, 39(3): 219-225.
- [10] 任秀玲,俞祁浩,王金国,等.黏土单向冻融作用下冷生构造及冻胀特性试验研究[J].水利学报,2021,52(1):81-92.
REN X L, YU Q H, WANG J G, et al. Experimental study on the characteristics of cryostructure and frost heave of clay under one-dimensional freeze-thaw [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 81-92.
- [11] 王升福,樊文虎,戴道文,等.人工冻结作用下原状软黏土冻融特性试验[J].林业工程学报,2020,5(4):154-160.
WANG S F, FAN W H, DAI D W, et al. Experimental study on freeze-thaw characteristics of undisturbed soft clay under artificial freezing[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(4): 154-160.
- [12] 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.
ZHAO G, TAO X X, LIU B. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (12): 1952-1957.

- [13] 赵刚,陶夏新,刘兵.重塑土冻融过程中水分迁移试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(2):519-525.
ZHAO G, TAO X X, LIU B. Experimental research on water migration in remoulded soil during freezing and thawing process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(2) : 519-525.
- [14] 孙雯,宋玲,陈新瑞,等.补水与制冷不同初始条件对黏土冻融过程影响的试验研究[J].干旱区研究,2020,37(6):1590-1597.
SUN W, SONG L, CHEN X R, et al. Experimental study on the influence of different initial conditions of water replenishment and refrigeration on clay freeze-thaw processes [J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (6) : 1590-1597.
- [15] 魏厚振,周家作,韦昌富,等.饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J].岩土力学,2016,37(9):2547-2552,2560.
WEI H Z, ZHOU J Z, WEI C F, et al. Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9) : 2547-2552, 2560.
- [16] 张辉,王铁行,罗扬.冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J].工程地质学报,2015,23(1):72-77.
ZHANG H, WANG T H, LUO Y. Experimental study on moisture migration of unsaturated loess under freezing effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1) : 72-77.
- [17] 唐益群,赵文强,周洁.封闭系统单向冻结淤泥质黏土水分迁移特性研究[J].工程地质学报,2020,28(5):935-941.
TANG Y Q, ZHAO W Q, ZHOU J. Laboratory test study on moisture migration within mucky clay under unidirectional freezing in closed system [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28 (5) : 935-941.
- [18] 曹成,陆建飞,李清涛.室内土体单向冻结水分迁移的试验研究[J].科学技术与工程,2015,15(9):114-118,124.
CAO C, LU J F, LI Q T. The experimental study of unilateralist freezing on the moisture migration of indoor soil[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9) : 114-118, 124.
- [19] 薛珂,温智,张明礼,等.土体冻结过程中基质势与水分迁移及冻胀的关系[J].农业工程学报,2017,33(10):176-183.
XUE K, WEN Z, ZHANG M L, et al. Relationship between matric potential, moisture migration and frost heave in freezing process of soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (10) : 176-183.
- [20] KONRAD J M, MORGESTERN N R. The segregation potential of a freezing soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18 (4) : 482-491.
- [21] 赵智辉,杨双锁,郝瑞卿,等.不同土样冻胀沉特性实验和数值模拟研究[J].科学技术与工程,2019,19(21):245-252.
ZHAO Z H, YANG S S, HAO R Q, et al. Experimental and field measure of frozen heave properties of different soil sample [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21) : 245-252.
- [22] 徐殿祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2010.
XU X Z, WANG J C, ZHANG L X. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2010.

(上接第143页)

- [12] 张露,王少华,王彬,等.全钢载重子午线轮胎等效模型研究[J].机械强度,2019,41(3):647-652.
ZHANG L, WANG S H, WANG B, et al. Research on equivalent model of TBR tire[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41 (3) : 647-652.
- [13] 景立新.全钢载重子午线轮胎特性有限元分析及验证[D].长春:吉林大学,2007.
JING L X. Finite element analysis and validation for all steel radial tire[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [14] 钱振东,杨宇明,陈团结,等.低速与变速动载作用下沥青路面动力响应[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(3):1140-1146.
QIAN Z D, YANG Y M, CHEN T J, et al. Dynamic response of asphalt pavement under moving loads with low and variable speed [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46 (3) : 1140-1146.
- [15] 王滔,徐恭义,常城,等.大跨径低刚度钢桥面铺装三维仿真力学分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(9):67-73.
WANG T, XU G Y, CHANG C, et al. Three-dimension simulation mechanical analysis of deck pavement of long-span and low-stiffness steel bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(9) : 67-73.
- [16] 张利东,曹健,张羽彤,等.季冻区中小跨径钢桥面铺装的力学响应[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(6):38-43.
ZHANG L D, CAO J, ZHANG Y T, et al. Mechanical responses of steel deck pavement on small-medium span bridges in seasonally frozen area[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2020, 37 (6) : 38-43.
- [17] 王柏文,唐焱,刘扬,等.基于正交试验设计的正交异性钢桥面系多因素优化研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(6):842-849,855.
WANG B W, TANG Y, LIU Y, et al. Research on multi-factor optimization of the orthotropic steel bridge deck pavement system based on orthogonal experimental design[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, 50 (6) : 842-849, 855.
- [18] 隆凯,林帆,张林艳,等.基于桥面铺装受力分析的正交异性钢桥面结构优化研究[J].公路工程,2021,46(3):86-92,104.
LONG K, LIN F, ZHANG L Y, et al. Optimization design of orthotropic steel bridge deck structure based on force analysis of bridge deck pavement[J]. Highway Engineering, 2021, 46 (3) : 86-92, 104.
- [19] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].北京:人民交通出版社,2005.
SUN L J. Structural behavior study for asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.