

冻融循环下非饱和膨胀土一维土柱模型试验研究

崔郁雪¹, 杨忠年¹, 时伟¹, 凌贤长^{1, 2}, 涂志斌¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:通过一维土柱模型对非饱和膨胀土进行冻融循环试验,分析了冻融循环过程中不同深度处温湿度、土压力、孔隙水压力和竖向位移的变化规律。试验结果表明:(1)土体在冻结过程中温度可分为过冷、跳跃、恒定、递减和稳定 5 个不同的变化阶段,存在明显跳跃点和冻结点,而升温过程并无明显的过热或突变现象出现。(2)冻结过程中,未冻水含量随温度下降逐渐降低,土体冻结点之后未冻水含量降低速度变快,整个冻融过程始终有未冻水存在。整个冻融过程中不同深度处的土体的温度和未冻水含量的变化均存在滞后现象。(3)温度场和水分场的变化会导致土体应力状态的改变,从而导致土压力和孔隙水压力的变化。其中第一次冻融对土压力和孔隙水压力的影响最大,随着冻融循环次数的增加变化渐缓。(4)冻融过程土体的竖向位移会发生波浪形变化,其中水分相态的转变对位移的影响最大,土颗粒及矿物成分的热胀冷缩带来的影响最小。

关键词:冻融循环;膨胀土;土压力;孔隙水压力;竖向位移

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)03-0393-11

Experimental study on one dimensional soil column model of unsaturated expansive soil under freeze-thaw cycles

CUI Yuxue¹, YANG Zhongnian¹, SHI Wei¹, LING Xianzhang^{1, 2}, TU Zhibin¹

(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, 266033, China;

2. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: This paper uses a one-dimensional soil column model to carry out freeze-thaw cycle tests on unsaturated expansive soils, and analyzes the changes in temperature and humidity, earth pressure, pore water pressure and vertical displacement at different depths during the freeze-thaw cycle. The test results show that: (1) During the freezing process, the soil temperature can be divided into five different stages: supercooling, jumping, constant, descending, and stable, and there are obvious jumping points and freezing points. There is no obvious overheating or sudden change during the heating process. (2) During the freezing process, the unfrozen water content gradually decreases with the decrease of temperature. After the freezing point of the soil, the unfrozen water content decreases faster, and there is always unfrozen water throughout the freezing and thawing process. There is a hysteresis phenomenon in the changes of soil temperature and unfrozen water content at different depths throughout the freeze-thaw process. (3) Changes in the temperature field and moisture field will cause changes in the stress state of the soil, which will lead to changes in earth pressure and pore water pressure. Among them, the first freeze-thaw has the greatest influence on these two pressures, and the changes gradually become slow with the increase of the number of freeze-thaw cycles. (4) During the freezing and thawing process, the vertical displacement of the soil will change in a wave shape. The transformation of the water phase has the greatest influence on the displacement, and the thermal expansion and contraction of soil particles and mineral components have the least influence.

Key words: freeze-thaw cycles; expansive soil; earth pressure; pore water pressure; vertical displacement

冻土在世界范围内分布十分广泛,全球陆地面积有 23% 的范围内分布着多年冻土,季节性冻土区的占比高达 56%^[1]。我国是世界上第三大冻

土国,中国陆地面积中有 75% 的范围分布着多年冻土和季节性冻土,主要分布在西北、华北和东北地区^[2]。其中季节性冻土冬季冻结夏季融化,是

收稿日期: 2020-11-24

修改稿日期: 2021-05-04

基金项目: 国家重大仪器开发项目(41627801); 山东省重点研发项目(2019GHY112075)

第一作者: 崔郁雪(1996—),女,硕士生,主要从事特殊土力学方面研究。E-mail: cyx9656@foxmail.com

通信作者: 杨忠年(1985—),男,博士,副教授,主要从事特殊土力学方面研究。E-mail: yzhnqd@qut.edu.cn

一种含有水分和冰晶体的特殊土水体系,季节性冻融循环对地表的能量和水分平衡有显著影响,我国季节性冻土的面积为 $5.137 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占我国陆地面积的 53.5%^[3-4]. 在这些季节性冻土区中大量分布着膨胀土等非饱和土,非饱和土是一种由气、液、固三相组成的体系,其力学性质和工程特性与饱和土相比更为复杂,极易造成工程冻害问题.在岩土工程实践中,大多数问题均属于非饱和土力学的问题,而太沙基经典土力学已经不能有效解决非饱和土的问题,因此研究非饱和膨胀土对于实际工程和理论革新具有重要意义^[5].膨胀土具有胀缩性、超固结性、裂隙性等不良特性,物理力学性质极为复杂^[6-7].在冻融的影响下,非饱和膨胀土中的水分发生相态的转变,导致土体产生冻胀融沉和水分迁移等现象,大大降低了土体的强度和稳定性,对处于季冻区的公路、铁路、水利、边坡等多种工程造成严重的破坏和经济损失^[8-11].

目前对冻融循环条件下非饱和膨胀土的物理力学性质的研究已有很多.许雷等^[7, 12-13]以南阳膨胀土为研究对象,探究了不同含水率、不同冻结温度和不同冻融循环次数下膨胀土力学性质的变化情况.Tang 等^[14]对经历了最多 9 次冻融循环的膨胀土进行固结不排水(CU)三轴试验,探究了其应力应变、弹性模量、孔隙水压力等力学参数的变化情况.Yang 等^[11]对重塑膨胀土进行动三轴试验,探究了单次冻融和多次冻融下试样竖向位移和动力参数的变化规律.尽管目前针对冻融循环下膨胀土力学特性的试验已有很多,但少有研究人员通过一维土柱模型对非饱和膨胀土进行冻融循环试验.土柱试验在岩土工程、环境科学、生态保护等领域有着广泛的应用,是研究土体中水分迁移、溶质运移、水分入渗及蒸发等现象变化规律的重要手段.覃小华等^[15]利用自行开发的一维土柱装置,模拟并探讨了 4 种不同降雨速率下一维土柱的入渗规律,并提出了计算非饱和土体渗透系数的新方法.Huang 等^[16]制作了 2 个长度为 12.5 m 的土柱,通过水平放置并施以稳定饱和水流的试验条件,探究土柱内部溶质运移的情况.Muhammad 等^[17]进行了一系列饱和黏土土柱的室内试验,探究在低渗透介质中溶质运移的情况.

由此可见,土柱试验可以很好地探究土体中水分迁移、溶质运移等现象的变化规律,但冻融循环下非饱和膨胀土的一维土柱试验尚待研究.实际上,冻融循环作用下的土体不仅涉及温度场

的问题,在冻融过程中发生的冻胀融沉还会导致水分场和力学场的变化,因此土体的冻融往往是一个多场耦合的综合性问题^[18-19].研究发现,实际环境中土体的冻结是一维冻结问题^[20],本文通过一维土柱模型,并在不同高程处安装相应传感器,通过一维冻融试验探究非饱和膨胀土在不同冻融循环次数和不同深度下土体温湿度、土压力、孔隙水压力和竖向位移的变化规律.同时,一维土柱模型使用透明的亚克力材料制成,该材料具有良好的透光性、化学稳定性和耐候性,可在试验过程中直观看到土壤结构的宏观变化情况.使用一维土柱模拟土体的冻融循环过程,可对土体在单向冻融条件下物理力学特性的变化规律和影响机制进行探究,更加贴合实际,具有重要的工程意义.

1 试验材料与方法

1.1 土样的制备

本试验所用膨胀土为弱膨胀土,其基本物理性质如表 1 所示.制样前首先将膨胀土进行烘干、碾碎、过 1 mm 的开孔筛,然后加入蒸馏水配制成含水率为 30% 的土样,放入密封袋中润湿一昼夜,保证样品中的水分均匀分布.试样尺寸采用直径 140 mm、高 400 mm、压实度为 85% 的圆柱形土样.

表 1 土样的基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of soil samples

天然含水率 ω / %	最优含水率 ω_{opt} / %	液限 ω_L / %
9.62	20.17	77.57
塑限 ω_P / %	最大干密度 ρ_{dmax} / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	自由膨胀率 / %
29.17	1.52	50.5

1.2 模型的安装

本试验通过温湿度一体传感器、土压力传感器、应变式微型渗压计和直线位移传感器(图 1)对试验过程中温湿度、土压力、孔隙水压力和竖向位移进行监测.试验所用一维土柱模型由自制的亚克力圆筒柱体、位移传感器安装板以及位移传感器导杆组成,如图 2 所示.柱体为单侧封口圆筒,柱体内径 140 mm、高 600 mm、壁厚 10 mm,底部亚克力封板直径 160 mm,厚 10 mm.为方便传感器的埋设,在距离柱底 50 mm 和 350 mm 的位置处分别设置有两个大小不同的钻孔.其中较小的一个直径为 10 mm,用于埋设土压力传感器和应变式微型渗压计;较大的一个直径为 40 mm,用于安装土壤温湿度一体传感器.柱体上侧装有自制位移传感器安装板,其中每个板面上设置有 4

排5列共20个直径5 mm的钻孔, 以便于直线位移传感器灵活安装. 直线位移传感器与下部导杆通过攻丝连接, 从而间接测得土柱不同深度处的竖向位移变形.



图1 传感器

Fig. 1 Various sensors

装配一维土柱模型时, 首先在模型底面和筒壁内侧薄涂上一层凡士林, 然后进行分层制样, 层厚取为2 mm, 层与层交界处进行刮毛处理, 如图2(a)所示. 当高度达到60 mm时, 按照土压力传感器、应变式微型渗压计和直线位移传感器导向杆的尺寸挖出一组深度为10 mm的凹槽进行第一组传感器和导向杆的埋设(图2(b)), 然后继续进行分层压实, 当土体高度达到360 mm时, 挖出

第二组凹槽进行第二组传感器和导向杆的埋设, 然后继续压实土体达到预定高度400 mm, 填充完的土柱如图3(a)所示. 土柱填充完成后, 在柱体顶部安装上位移传感器安装板, 导杆与直线位移传感器通过活动螺栓连接, 然后再将二者共同固定到位移传感器安装板上, 通过土体对导向杆作用产生的竖向位移间接监测冻融循环下土体竖向胀缩位移的变化情况. 然后在两个直径40 mm的预留孔处进行温湿度一体传感器的安装, 注意安装时需要将传感器探针部分全部插入土体之中, 安装好的传感器通过485转换器与电脑连接进行温湿度数据的采集. 最后, 将柱顶开口处用保鲜膜进行密封防止柱体内水分的蒸发. 此时, 土柱各个部分已制作安装完成. 其中距离柱底350 mm的温湿度一体传感器、土压力传感器、应变式微型渗压计和直线位移传感器分别记为TW1、E1、P1、D1, 距离柱底50 mm的温湿度一体传感器、土压力传感器、应变式微型渗压计和直线位移传感器分别记为TW2、E2、P2、D2.

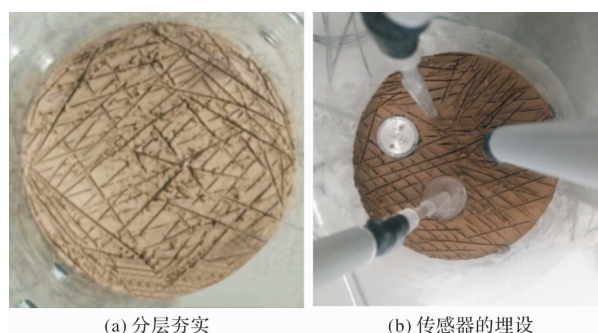


图2 模型的装配

Fig. 2 Installation of soil column model

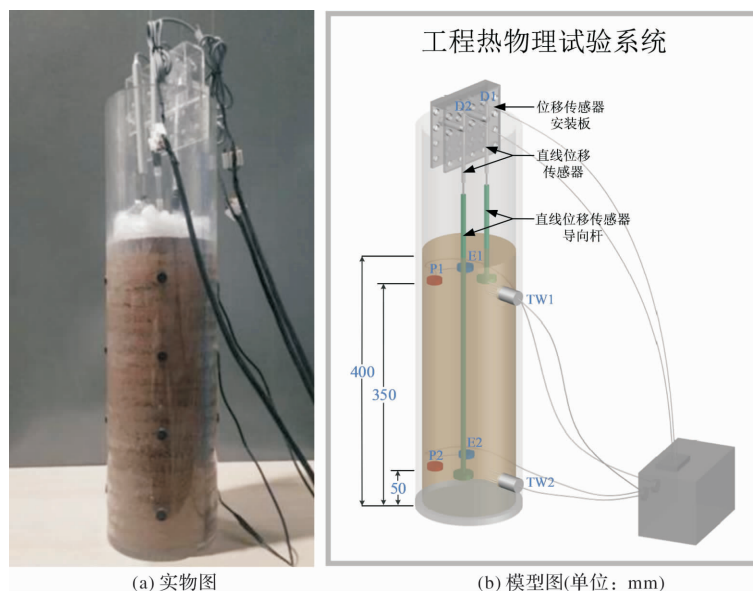


图3 一维土柱模型

Fig. 3 One-dimensional soil column model

1.3 试验方案

本试验使用自制工程热物理试验系统对一维土柱进行冻融循环的系统试验。该设备为一个绝热、保温、保湿、高温与低温交变湿热试验室,可满足试验要求的温度值和湿度值。为了满足土柱一维冻融的目的,采用 10 mm 厚的橡塑保温棉对柱体底部和四周进行两层包裹。然后将包裹完成的土柱放入工程热物理试验系统中,静置 24 h 后进行 3 次冻融循环。考虑我国冬季最低气温的变化情况,本试验确定 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两个典型温度为试验温度。同时在土柱中安置了温度传感器,试验前已通过预试验获得土柱中不同深度温度场在各阶段达到稳定所需的时间,并据此确定了试验过程中的冻结和融化时间,单次冻融循环方案如表 2 所示。

表 2 单次冻融方案

Tab. 2 Single freeze-thaw program

阶段	冻结温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/d
第一冻结阶段(F1)	-10	6
第二冻结阶段(F2)	-20	3
融化阶段(T1)	30	2

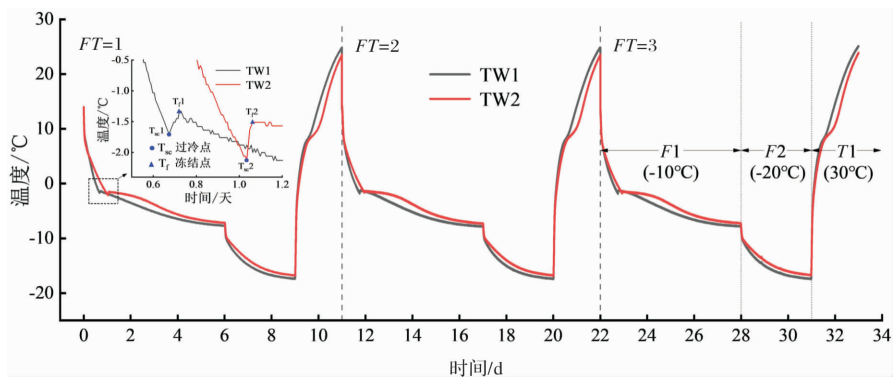


图 4 整个冻融过程中土柱温度-时间曲线

Fig. 4 The temperature-time curve of the soil column during the whole freeze-thaw process

拐点出现,整个过程中土柱的温度始终高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。融化阶段,工程热物理试验系统温度上升到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,土柱的温度迅速上升,短时间内达到一个温度高点,但最高温度仍低于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在人工控制冻融温度的情况下,3 次冻融循环的温度变化情况大致相似。

一般情况下,土体的整个冻结过程可分为过冷、跳跃、恒定、递降 4 个阶段(图 5)^[23]。在冻结的第一个阶段(F1),土体温度首先快速降低进入过冷阶段。该阶段中土体中的水分还未发生冻结,孔隙水处于一个亚稳状态,土柱中无冰晶体出

2 结果与分析

2.1 温度变化及分析

温度是影响冻土强度的一个重要因素,土体的温度变化往往会导致土体中水分发生变化,从而导致土体内应力重分布及土体变形的发生^[21],是土体未冻水含量、土压力、孔隙水压力和竖向位移变化的根本原因。根据冻结温度可以判定土体是否处于冻结状态,同时也是确定寒区冻结深度和人工冻土冻结壁厚度的依据^[2, 22]。本试验通过埋设在土柱不同深度处的 2 个温湿度一体传感器对试验过程的温度数据进行实时监测,得到了整个冻融循环过程中非饱和膨胀土不同深度的温度-时间曲线,如图 4 所示。从图中可以看出,当温度降低到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,土柱的温度首先迅速下降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,然后出现小幅的跳跃回升,回升温度仍低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着冻结时间的继续进行,土柱温度继续降低,降低速度较跳跃点之前变慢并逐渐趋于稳定。整个冻结阶段土柱不同位置处温度均高于此阶段的设定温度($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)。当温度降低到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度首先快速降低然后趋于平缓,并无明显

现^[24]。随着时间的增加,温度-时间曲线出现一个低值点,即过冷点。此时土体中的水分开始发生相变形成冰晶并释放一定热量,导致土柱内温度小幅跳跃升高,达到冻结点。从图中可以得到非饱和膨胀土的冻结温度为 $-1.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻结点过后,自由水发生冻结,冰晶稳定生长,温度保持小范围稳定,冻结过程进入恒定阶段。值得注意的是, TW1 并未出现明显的稳定阶段,这是因为 TW1 处距离土层表面的距离很近,受温度影响大,因此在冻结的情况下土体降温速率较快,开始冻结后温度持续降低,并无明显恒定阶段。随后结

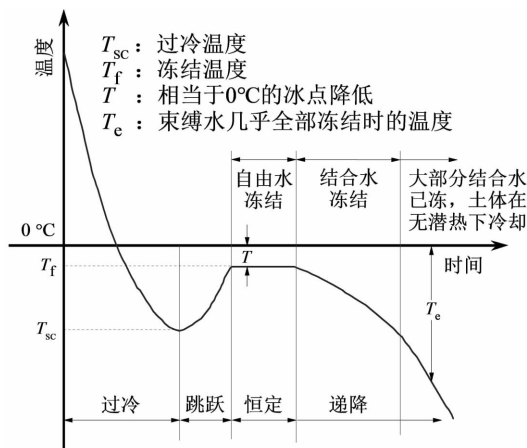


图5 湿土典型降温曲线

Fig. 5 Typical cooling curve of wet soil

合水开始冻结,进入递降阶段,土水体系逐步冻结。融化时,随着时间的增加,土体温度迅速增加,并无明显的过热或突变现象出现。

对比不同深度处土体的温度变化情况可以发现, TW2 较 TW1 相比存在滞后现象。这是因为在降温时浅层土体受温度影响大、先发生冻结,随着温度的一维传导,深层土体也开始受负温的影响,而在传导时会发生能量的损耗,因此达到稳定时 TW1 温度比 TW2 略高一些。融化过程依旧存在能量损耗的现象,浅层土体升温较快,温度曲线整体发生了偏移。在实际工程中,土体表面因工程建设及其他人为因素作用下,地表对于太阳辐射热量的吸收和蒸发散热的不平衡也会导致深层土体的温度变化滞后于浅层土^[25]。

2.2 含水率变化及分析

含水率是影响冻土强度的另一重要因素^[26]。研究表明,由于土壤颗粒表面力和土颗粒之间空隙的存在,在 0℃ 以下土体中仍有部分水未发生冻结,即土体在冻融过程中始终有未冻水存在^[27-29]。未冻水的存在可显著影响冻土强度、泊松比、模量等物理力学性质,从而对工程稳定性和环境等造成显著影响^[2, 30, 31]。本试验通过温湿度一体传感器对未冻水含量进行监测,将整个冻融过程未冻水含量的变化绘制成图。从图 6 可以看出,温度变化对未冻水含量影响显著。冻结开始时含水率小幅降低,随后出现一个明显的拐点,该拐点出现的时间与温度的跳跃点出现的时间大致相同,随后含水率继续降低并逐渐趋于稳定。随后,温度下降到 -20℃,土柱含水率继续减少,但减少幅度明显降低,大约为第一冻结阶段的 50%。融化时,温度升高 50℃ 达到 30℃,含水率迅速增加并逐渐趋于初始含水率。对比整个冻融过程含水

率的变化情况可以看出,随着冻融循环次数的增加,含水率变化幅值增大。FT=1、2、3 时,含水率变化范围分别为 21%~34%、18%~33%、17%~32%,3 次冻融结束后大约损耗了 2% 的水分。

(1) 单次冻融对含水率的影响

受土颗粒表面能的影响,土壤中的毛细水、弱结合水、强结合水均受到土颗粒表面静电引力场的作用,且随距离越小,受到的分子引力越大,冻结温度就越低(图 7)。毛细水的冻结点最高,但也略低于 0℃;弱结合水在 -0.5℃ 时外层开始发生冻结, -30~-20℃ 时才能全部冻结;强结合水冻结温度最低,在 -78℃ 时仍不冻结^[32]。以 FT=1 为例。刚开始冻结时,土柱表层有少量冰晶体产生,含水率缓慢降低 2% 左右。到达冻结点之后,土柱内的自由水开始大量冻结成冰晶体,含水率快速减少。随着冻结时间的增加,自由水逐步冻结完成,固态冰阻碍了土柱中水分的运移,未冻水含量降低速度变缓,从快速结晶阶段变为缓慢结晶阶段。当冻结进入到 F2 阶段时,温度与 F1 阶段相比更低,此时,在第一冻结阶段未冻结的部分自由水和距离土颗粒表面较远的弱结合水进一步向冰晶体转换,含水率进一步降低。对比两个不同冻结温度下未冻水含量的变化情况可以发现,温度越低,水分迁移的越迅速,未冻水含量降低速率就越快。融化时,土体温度迅速增加,未冻水含量也迅速增加,并无明显突变现象出现。

(2) 多次冻融对含水率的影响

未经冻融时,土颗粒和水分分布较为均匀,土体结构处于一个相对稳定的状态。第一次冻结后,土颗粒首先冻结收缩,土体中水分形成冰晶体发生冻胀,孔隙增大,土颗粒受到挤压,土柱原有的稳定结构被破坏,如图 8 所示。新形成的冰晶体、未冻水和土颗粒通过空间排列组合形成一种新的冻土结构。融化时,冰晶体受热转化成水,对新产生的较大孔隙进行填充,融化完成后土体重新恢复到一个新的稳定状态。当进行第二次冻融时,由于结构发生了变化,因此在冻结时更多的水分转变成了冰晶体,导致第二次冻结后未冻水的含量比第一次低 4% 左右。随着冻融循环次数的增加,结构进一步遭到破坏,第三次冻结后未冻水的含量比第二次低 1% 左右。在冻结过程中始终存在一定含量的未冻水,这是因为膨胀土的土颗粒非常小,比表面积大,因此颗粒外层不易冻结的强结合水较多,在冻融多次后仍能保持一定

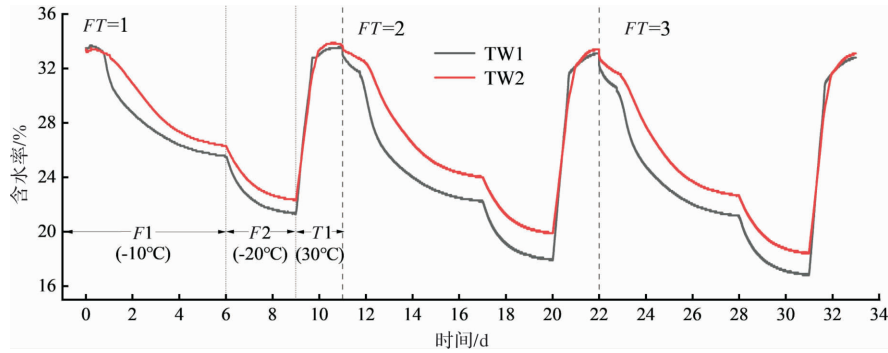


图 6 整个冻融过程中土柱含水率-时间曲线

Fig. 6 Soil column moisture content-time curve during the entire freeze-thaw process

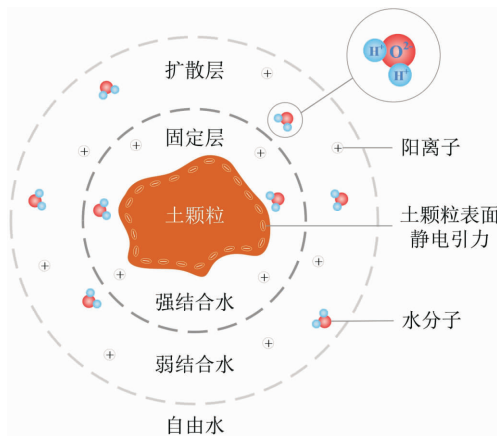


图 7 土颗粒与水分子的相互作用

Fig. 7 The interaction between soil particles and water molecules

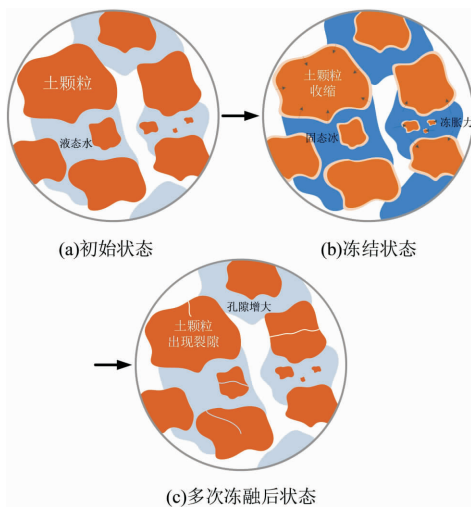


图 8 多次冻融对土水结构的影响

Fig. 8 The influence of repeated freezing and thawing on soil-water structure

的未冻水量。另外,在冻融循环过程中还存在一定量的蒸发损耗,这也是峰值随冻融循环次数增加小幅降低的原因。

(3) 深度对含水率的影响

对比 TW1 和 TW2 曲线可以发现,在冻结过程中浅层土体(TW1)的未冻水含量总是比深层土体中(TW2)的未冻水含量低 1%~2% 左右。这是因为在一维冻融过程中,负温首先到达浅层土体并发生冻结,在毛细作用和冻结区吸引力的影响下,深层未冻结水分逐渐上升,使冻结区得到水分的补给,深层易冻结的自由水减少。随着冷端温度的垂直向下深入,冻结区逐步向下移动(图 9)。同时深层土体受负温影响时间更短,在这些因素的共同作用下使得深层土体的未冻水含量高于浅层土体的未冻水含量。在融化阶段,温度迅速升高 50℃,整个土柱迅速融化且不同深度的土体仍存在小幅的差距。一维冻融过程中土体可以分为主动区和被动区,其中被动区主要进行热传导,而主动区是冰透镜发展的热传导、流体流动和应力发展的耦合过程^[33],因此整个冻融过程中始终伴随着土压力和孔隙水压力的变化。

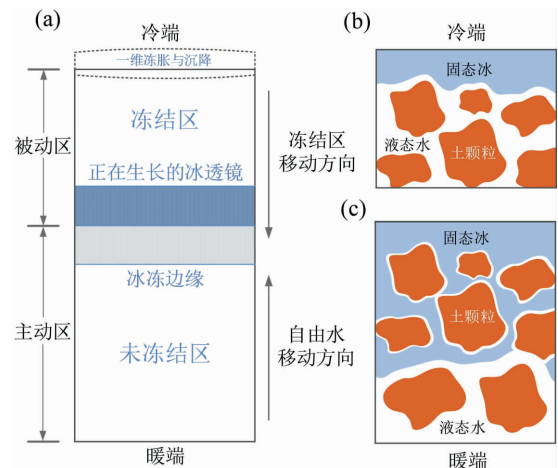


图 9 土柱的冻结过程

Fig. 9 Freezing process of soil column

2.3 土压力变化及分析

温度和水分的变化是产生冻胀和冻胀力的根本原因. 由于土体温度的变化, 土体中的水分在冻结时发生迁移并产生冰晶体从而产生冻胀, 融

化时水分融化孔隙被压缩产生融沉, 冻融循环产生的体积变化对土体的应力应变状态有显著影响^[34-35]. 整个冻融过程中土压力的变化情况如图10所示.

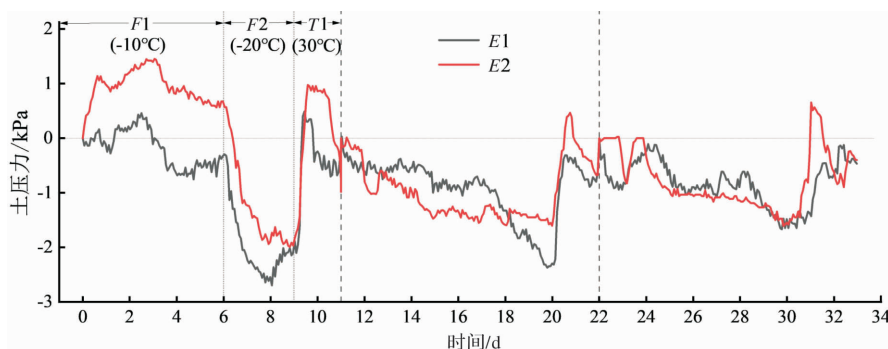


图10 整个冻融过程中土柱土压力-时间曲线

Fig. 10 The earth pressure-time curve of the soil column during the whole freeze-thaw process

(1) 单次冻融对土压力的影响

以 $FT=1$ 为例, 在冻结第一阶段, 温度降到 -10°C , 孔隙中的水分逐渐冻结成冰体积膨胀并对颗粒之间的孔隙进行填充, 随着冰晶体的逐渐增多, 土颗粒受到挤压(图8(b)). 土柱原有的稳定结构发生改变, 土中的应力状态发生改变, 作用于一定面积水平面上的总应力会增大, 其中 $E1$ 增长了 0.4 kPa , $E2$ 增长了 1.4 kPa . 随着冻结温度的继续降低和冻结时间的增加, 冰晶逐渐将土颗粒包围, 此时土颗粒变成了独立的“冰晶土”, 颗粒与颗粒之间的作用力减小, 其中 $E1$ 降低了 3.2 kPa , $E2$ 降低了 3.4 kPa . 融化时, 温度迅速升高, 冰晶体融化, 土颗粒接触面积增加, 同时土颗粒吸收自由水和受热也会发生膨胀, 三者的共同作用使得土颗粒之间的作用力增大, $E1$ 和 $E2$ 增加, 并略大于初始压力.

(2) 多次冻融对土压力的影响

$FT=1、2、3$ 时, 土压力变化幅值分别为 3.3% 、 1.8% 、 1.4% , 呈递减趋势. 这是因为土压力的大小与土颗粒骨架直接相关: 未冻融时, 土体结构较为密实, 土颗粒之间的接触点较多, 力的传导较均匀. 开始冻融后, 土颗粒发生重分布, 土体结构先有的稳定状态发生破坏, 土压力变化显著. 随着冻融循环次数的增加, 土体颗粒逐渐均一化、土颗粒之间的孔隙大小逐渐稳定, 在反复冻融的影响下土压力变化的幅值逐渐变小. 第二次冻融和第三次冻融在刚开始冻结时土压力出现了与第一次冻融不同的变化情况, 这是因为经历一次冻融后的土柱中大孔隙体积增加和裂隙的出现大大降低了土颗粒之间的接触点, 冻结过

程中冰晶体更易发生冻结且优先对大孔隙和裂隙处进行填充, 从而导致土压力降低.

(3) 深度对土压力的影响

一维冻融时, 土柱由浅到深依次受温度影响. 冻结时, 表层土体($E1$)开始发生冻结并逐渐向深层深入, 由于模型三向约束的条件限制, 土体只能向上发生自由冻胀, 而对下层产生挤压作用, 使下层土颗粒接触更为紧密, 深层土($E2$)的土压力增加. 同时深层土所承受上层土的自重更大, 二者的共同作用下使得深层土($E2$)的土压力大于浅层土的($E1$)土压力. 融化时, 温度快速增加, 冰晶体由浅入深融化成水, 土颗粒之间的接触点增多, 作用力增加, 但在自重应力作用下深层土体($E2$)的土压力仍大于浅层土体($E1$). 多次冻融后, 土体内产生了大孔隙和裂隙, 冻结时冰晶体优先对大孔隙和裂隙进行填充, 产生的冻胀力对其他土颗粒造成挤压, 使得刚冻融时浅层土的土压力比深层的大. 当冻结进入第二阶段($F2$), 土柱深处也发生冻结, 土颗粒逐渐被冰晶体包围, 土颗粒之间的作用力减小. 此时冻胀力依旧存在但变得很小, 土体的自重应力占主导作用, 因此冻结后期深层土($E2$)的土压力大于浅层土($E1$).

2.4 孔隙水压力变化及分析

非饱和土在冻融过程中因相变会导致毛管势和吸附势发生显著变化, 固体基质在冻融过程中会产生变形, 二者的共同作用是冻融过程中非饱和和土孔隙水压力变化的主要原因. 孔隙水压力对研究冻土退化、冻胀融沉等现象的机理具有重要意义^[36-37]. 整个冻融过程中孔隙水压力的变化情况如图11所示.

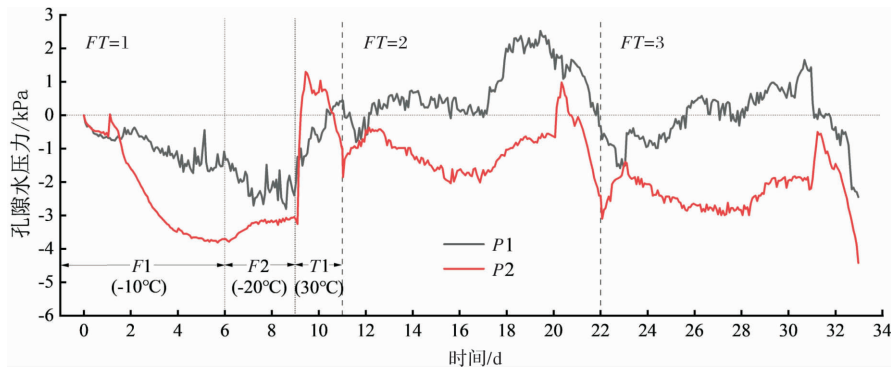


图 11 整个冻融过程中土柱孔隙水压力-时间曲线

Fig. 11 The pore water pressure-time curve of the soil column during the whole freeze-thaw process

(1) 单次冻融对孔隙水压力的影响

以 $FT=1$ 为例。在冻结的第一阶段 ($F1$), $P1$ 、 $P2$ 随着温度的降低小幅降低了 0.7 kPa 左右, 这是因为温度突然降低, 土颗粒发生收缩开裂, 有效孔隙增加, 因此孔隙水压力小幅下降。由于温度一维传导的滞后性, $P2$ 比 $P1$ 降低量略小。达到冻结温度之后, 土柱内部形成大量冰晶体, 孔隙水压力快速减小, $P1$ 、 $P2$ 降低显著。当进入第二个冻结阶段时, 温度降低到一个更低的温度, 部分自由水和弱结合水继续向冰晶体转化, $P1$ 随温度的降低继续降低到 -3 kPa, 但速率变缓。而深层土体在上层土冻结后失去自由面, 随着冰晶体的产生, 下层土体受到冻胀压力的作用, 因此 $P2$ 在 $F2$ 阶段小幅升高。融化阶段, 冰晶体随温度的升高快速融化成水, 因此 $P1$ 、 $P2$ 在融化阶段呈快速上升趋势, 但 $P2$ 在快速上升后又出现了一小段降低的情况, 这是因为在一维融化的影响下上层土体先发生融化, 对下层产生的冻胀力降低, 孔隙水压力降低。

(2) 多次冻融对孔隙水压力的影响

观察整个冻融过程可以发现, 初次冻融时不同深度处的孔隙水压力随温度的降低均呈降低趋势, 而多次冻融时浅层土体 ($P1$) 的孔隙水压力随温度的降低首先小幅降低, 而深层土体 ($P2$) 则呈现相反的趋势。这是因为初次冻融时, 土体随温度的降低发生收缩开裂, 有效孔隙增加, 因此不同深度土体的孔隙水压力均小幅降低。多次冻融时, 前一次的冻融完成后仍存在部分未融化的冰晶体, 当再次开始降温, 土体温度低于冻结温度, 冰晶体继续融化成水, 因此 $P2$ 小幅增大。观察不同次冻融对孔隙水压力的影响, 可以发现第一次冻融时孔隙水压力的变化幅值最大, 随着冻融循环次数的增加变化逐渐减小。以深层土体 ($P2$) 为例, $FT=1$ 时, 孔隙水压力变化幅值约为 -3.8~1.3 kPa; $FT=2$ 时, 变化幅值为 -2~1 kPa; $FT=3$ 时, 变化幅值为 -3~-0.5 kPa。这是因为孔隙水压力的大小与孔隙结构

密切相关, 第一次冻融之前土体内部孔隙处于一个稳定状态, 尚未形成有效通道, 具有良好的持水性能。当开始第一次冻融时, 水分变化主要以原位相变为主, 因此孔隙水压力变化幅度较大。随着冻融的进行, 土体的孔隙结构遭到破坏, 土体内部逐渐形成细小的水流通路, 持水性能降低, 孔隙水压力变化幅值减小。

(3) 深度对孔隙水压力的影响

对比整个冻融过程 $P1$ 、 $P2$ 的变化情况可以发现, $P1$ 的变化波动与 $P2$ 相比更为剧烈。这是因为一维冻融时, 浅层土体受温度影响更为剧烈, 因此温度梯度相对较大, 温度变化速率更快, 因此土体结构受到的扰动更为剧烈, 孔隙水压力变化波动更大。另外一维冻结时, 上层土体冻结过程产生的冻胀力及自重应力作用于下层土体, 因此 $P2$ 波动变化较缓。

2.5 位移变化及分析

当经历冻融循环的土体达到土中水的冻结点时, 便逐渐形成冰晶体, 导致土体体积增大, 即冻胀的发生。此时从宏观层面上可以发现土体在纵向产生位移 (图 9), 对土体强度和稳定性造成影响, 当位移超过一定的限值就会对工程造成安全隐患^[38-39]。本试验通过直线位移传感器对位移数据进行监测, 整个冻融循环过程中的位移-时间曲线如图 12 所示, 其中位移为正表示隆起, 位移为负表示沉降。

(1) 单次冻融对位移的影响

在冻融作用下, 非饱和膨胀土的胀缩变形主要由以下几个部分组成: 土体中的水分发生相态的转变, 不同相态的体积差造成土体的胀缩变形; 冻结时, 未冻水转化成冰晶体, 土颗粒失水收缩, 融化时冰晶体又转化为未冻水, 土颗粒吸水膨胀; 土颗粒本身及土中的矿物成分受温度的影响发生热胀冷缩。三者的共同作用造成竖向位移的变化, 其中水分相态的转变对位移的影响最大, 土颗粒及矿物成分的热胀冷缩带来的影响最小。

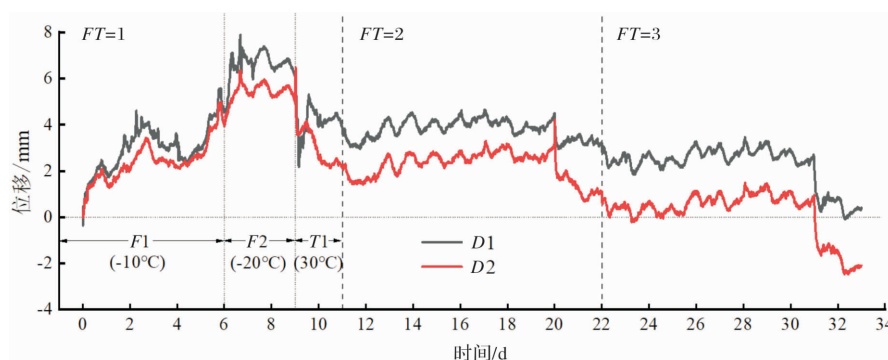


图12 整个冻融过程中土柱位移-时间曲线

Fig. 12 The displacement-time curve of the soil column during the whole freeze-thaw process

以 $FT=1$ 为例,在冻结的第一个阶段($F1$),两个位置的土体中的水分依次发生冻结,未冻水转化为冰晶体造成土体发生冻胀,位移增加.由图8可知, $F1$ 阶段结束后未冻水含量并未降到最低,当进入冻结第二阶段时,部分自由水和距离土颗粒表面较远的弱结合水进一步向冰晶体转换,因此 $F2$ 阶段位移进一步增加.融化时,冰晶体融化成水体积减小,位移减小.整个冻融过程土颗粒及矿物成分造成的胀缩变形可忽略不计.

不管是位移的增大还是减小阶段,竖向位移的变化情况始终以波浪形发生变化.这是因为一维土柱模型内侧和土体之间为直接接触状态,在位移变形时产生了摩擦阻力,限制了土体的竖向位移变形.

(2) 多次冻融对位移的影响

观察整个冻融过程的位移-时间曲线可以发现,不同深度的土体在第一次冻融过程中位移的变化幅度最大.这是因为冻融之前的土体结构处于一个相对稳定的状态,在冻融的作用下,土体的冻胀融沉和水分迁移使得原有的孔隙结构发生破坏、土颗粒之间的连结作用发生改变,因此位移变化幅度较大.经历第一次冻融循环后土体的稳态结构已经发生破坏,土体内部形成一定数量的“水分迁移通道”,随着冻融循环次数的增加逐渐趋于稳定,位移变化幅值也逐步减小.

$FT=1$ 时,土柱因冻胀产生的位移约为6 mm,而融沉产生的位移为-4 mm,冻胀大于融沉.随着冻融循环次数的增加,冻胀位移逐渐小于融沉位移.刚开始冻融时,膨胀土土颗粒之间的粘聚力较大,具有较好的抵抗冻融变形的能力,因此第一次冻融循环时冻胀位移大于融沉位移.多次冻融后冰晶体融化造成土颗粒及孔隙重新分布,土体结构发生破坏,粘聚力减弱,土体抵抗变形能力降低,在上层土体自重的作用下进一步沉降变形,同时非饱和膨胀土中存在吸力促进土体产生固结,因此整个冻融过程中融沉位移逐渐

大于冻结位移,这与王建平等的研究结果相同^[20].

(3) 深度对位移的影响

当 $FT=1$ 时,浅层土体($D1$)的位移变化幅值明显大于深层土体($D2$).研究发现,土体表面的冻胀量是下层冻结区各土层产生的冻胀量总和,而土体表面的隆起量是冻结区冻胀量及未冻结区固结的总和.浅层土体下部土体较多,产生的冻胀量与固结量较大,因此位移变化较大,深层土体反之.随着冻融循环次数的增加,土体结构发生破坏并逐渐达到一个新的稳定结构,不同深度处位移差距减小.

3 结 论

本文通过自制一维土柱模型对非饱和膨胀土进行冻融循环试验,通过在2个不同深度处理设温湿度一体传感器、土压力传感器、应变式微型渗压计和直线位移传感器对不同深度的温湿度、土压力、孔隙水压力和竖向位移的变化情况进行实时监测并对这些参数的变化情况进行规律分析,得到以下几个结论:

(1) 一般情况下,土体的冻结过程可分为过冷、跳跃、恒定、递降和稳定5个阶段.从过冷点开始,土体中的水开始形成冰晶,到冻结点之后冰晶稳定发展,本试验中所用非饱和膨胀土的冻结温度为 -1.33°C .而土体的融化过程中并无明显的过热或突变现象.

(2) 在冻结过程中,未冻水含量的变化存在一个明显的转折点,发生时间与冻结点相对应,整个冻结过程始终有未冻水存在.随着冻融循环次数的增加,未冻水含量有降低趋势.由于毛细作用和冻结缘对自由水的吸引,在冻结过程中浅层土体的未冻水含量总是比深层的低.

(3) 温度场和水分场的变化使土体孔隙结构发生变化,进而使土体内部的应力状态发生改变,这是土压力和孔隙水压力变化的根本原因.

(4) 整个冻融过程中, 竖向位移以波浪形发生变化。FT=1 时, 土体的冻胀量大于融沉量。随着冻融的进行, 土体的冻胀融沉和水分迁移使得原有的孔隙结构发生破坏、土颗粒之间的连结作用发生改变, 粘聚力和摩擦力减弱, 土体抵抗沉降的能力降低, 沉降量逐渐大于冻胀量, 多次冻融后土体相对于初始状态表现为整体下沉。

参考文献 References

- [1] SONG W, ZHANG Y, LI B, et al. A lattice Boltzmann model for heat and mass transfer phenomena with phase transformations in unsaturated soil during freezing process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 94: 29-38.
- [2] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XU Xuezu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] ZHANG T, ARMSTRONG R L. Soil freeze/thaw cycles over snow - free land detected by passive microwave remote sensing[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(5): 763-766.
- [4] 石刚强. 严寒地区高速铁路路基冻胀和工程对策研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
SHI Gangqiang. Research on subgrade frost heave of high-speed railway in cold regions and its engineering countermeasures[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [5] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. John Wiley & Sons, 1993.
- [6] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.
BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 26(1): 1-15.
- [7] 许雷, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J]. 岩土力学, 2016(S2): 167-174.
XU Lei, LIU Sihong, LU Yang, et al. Physico-mechanical properties of expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016 (S2): 167-174.
- [8] 刘辉. 季节性冻土地区高速铁路设计施工技术[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(10): 1-10.
LIU Hui. Design and construction technology of high speed railway in seasonal frozen soil region[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(10): 1-10.
- [9] LU Y, LIU S, ALONSO E, et al. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 157: 206-214.
- [10] LU Y, LIU S, WENG L, et al. Fractal analysis of cracking in a clayey soil under freeze-thaw cycles[J]. Engineering Geology, 2016, 208: 93-99.
- [11] YANG Z, ZHANG L, LING X, et al. Experimental study on the dynamic behavior of expansive soil in slopes under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 163: 27-33.
- [12] 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(5): 922-925.
XU Lei, LU Yang, ZONG Jiamin, et al. Direct shear test on expansive clay in Nanyang under freeze-thaw cycles[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(5): 922-925.
- [13] 许雷, 薛洋, 鲁洋, 等. 不同冻结温度条件下膨胀土冻融循环试验[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 189-193.
XU Lei, XUE Yang, LU Yang, et al. Test of freeze-thaw cycle of expansive soil under condition of different freezing temperatures [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(5): 189-193.
- [14] TANG L, CONG S, GENG L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 197-207.
- [15] 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等. 降雨条件下一维土柱垂直入渗模型试验研究及其渗透系数求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 475-484.
QIN Xiaohua, LIU Dongsheng, SONG Qianghui, et al. Experimental study on one-dimensional vertical infiltration in soil column under rainfall and the derivation of permeability coefficient[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (2): 475-484.
- [16] HUANG K, TORIDE N, VAN Genuchten M T. Experimental investigation of solute transport in large, homogeneous and heterogeneous, saturated soil columns[J]. Transport in Porous Media, 1995, 18(3): 283-302.
- [17] MUHAMMAD Z, ZHANG W, HONGBIN Z, et al. An experimental study on solute transport in one-dimensional clay soil columns[J]. Geofluids, 2017 (4): 17.
- [18] 何平, 程国栋, 俞祁浩, 等. 饱和正冻土中的水、热、力场耦合模型[J]. 冰川冻土, 2000(2): 135-138.
HE Ping, CHENG Guodong, YU Qihao, et al. Acouple model of heat, water and stress fields of saturated soil during freezing[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2000(2): 135-138.
- [19] 何平, 程国栋, 朱元林. 土体冻结过程中的热质迁移研究进展[J]. 冰川冻土, 2001(1): 92-98.
HE Ping, CHENG Guodong, ZHU Yuanlin. Thep-

- progress of study on heat and mass transfer in freezing soils[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2001 (1):92-98.
- [20] 王建平,王文顺,史天生. 人工冻结土体冻胀融沉的模型试验[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(4):3-5.
WANG Jianping, WANG Wenshun, SHI Tiansheng. Model experiment of frost heave and thawing settlement of artificially frozen soils[J]. Journal of China University of Mining & Technology,1999,28(4):3-5.
- [21] FAROUKI O T. The thermal properties of soils in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, 5(1): 67-75.
- [22] 崔广心. 厚表土层湿土结冰温度与冻结壁厚度确定的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1997(3):1-4.
CUI Guangxin. Study on freezing point of wet soil and thickness determining of freezing wall in deep alluvium [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997(3):1-4.
- [23] LAI Y, WU D, ZHANG M. Crystallization deformation of a saline soil during freezing and thawing processes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 463-473.
- [24] BITTELLI M, FLURY M, CAMPBELL G S. A thermoelectric analyzer to measure the freezing and moisture characteristic of porous media[J]. Water resources research, 2003, 39(2):1-10.
- [25] 毛雪松. 多年冻土地区路基水热力场耦合效应研究[D]. 西安:长安大学, 2004.
MAO Xuesong. Study on coupling model of the moisture-heat-stress fields in the permafrost subgrade[D]. Xian: Chang'an University, 2004.
- [26] CHRIST M, KIM Y C. Experimental study on the physical-mechanical properties of frozen silt[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2009, 13(5): 317-324.
- [27] WATANABE K, MIZOGUCHI M. Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(2): 103-110.
- [28] WATANABE K, WAKE T. Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59(1): 34-41.
- [29] LIU B, LI D. A simple test method to measure unfrozen water content in clay-water systems[J]. Cold regions science and technology, 2012, 78: 97-106.
- [30] ZHOU X, ZHOU J, KINZELBACH W, et al. Simultaneous measurement of unfrozen water content and ice content in frozen soil using gamma ray attenuation and TDR[J]. Water Resources Research, 2014, 50(12): 9630-9655.
- [31] 王丽霞,胡庆立,凌贤长,等. 青藏铁路冻土未冻水含量与热参数试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(10): 1660-1663.
WANG Lixia, HU Qingli, LING Xianzhang, et al. Test study on unfrozen water content and thermal parameters of Qinghai-Tibet railway frozen silty clay[J]. Journal of Harbin institute of Technology, 2007, 39(10):1660-1663.
- [32] 张宝平,何金良,康鹏,等. 冻土冲击特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16):143-147.
ZHANG Baoping, HE Jinliang, KANG Peng, et al. Experimental study on impulse characteristics of frozen soil[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16):143-147.
- [33] ZHOU G, ZHOU Y, HU K, et al. Separate-ice frost heave model for one-dimensional soil freezing process [J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(1): 207-217.
- [34] ULITSKII V M, SAKHAROV I I, PARAMONOV V N, et al. Bed-structure system analysis for soil freezing and thawing using the termoground program[J]. Soil mechanics and foundation engineering, 2015, 52(5): 240-246.
- [35] 张钊,吴紫汪. 渠道基土冻结时温度场和应力场的数值模拟[J]. 冰川冻土, 1993(2):331-338.
ZHANG Zhao, WU Ziwan. Numerical analysis of temperature and stress on the canal subsoil during freezing[J]. Journal of glaciology and geocryology, 1993(2):331-338.
- [36] ZHANG L, MA W, YANG C, et al. Investigation of the pore water pressures of coarse-grained sandy soil during open-system step-freezing and thawing tests [J]. Engineering geology, 2014, 181: 233-248.
- [37] 肖东辉,马巍,赵淑萍,等. 冻融与荷载作用下土体内孔隙水压力、水分变化规律及其模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4):977-986.
XIAO Donghui, MA Wei, ZHAO Shuping, et al. Research on pore water pressure and moisture content in soil subjected to freeze-thaw cycles and loading action by model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4):977-986.
- [38] LAI Y, XU X, DONG Y, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 6-18.
- [39] ZHANG Y, MICHALOWSKI R L. Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2015, 141(7): 1-9.

(编辑 吴海西 沈波)