

# 冻融循环作用下膨胀土边坡稳定性模型试验研究

张莹莹<sup>1</sup>, 杨忠年<sup>1</sup>, 时伟<sup>1</sup>, 李国玉<sup>3</sup>, 涂志斌<sup>1</sup>, 凌贤长<sup>1,2</sup>

(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 150001;  
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 采用重塑膨胀土进行室内边坡模型试验, 研究膨胀土边坡在冻融循环作用下边坡模型的位移, 土压力, 含水率和孔隙压力的变化特性, 反应冻融循环对膨胀土边坡稳定性影响。试验发现, 冻融循环作用下膨胀土边坡表面裂隙由初始数量较少的直线型长裂隙向数量较多的网络状短裂隙发展, 对沿深度方向上的裂隙发育亦存在显著影响。土压力在单次冻融中表现随温度降低土压力增大, 反之亦然。边坡在冻融过程中始终表现冻缩膨胀, 但整体上表现出向临空面逐渐变形的趋势。且单个冻融循环周期内位移变化速率与温度绝对值呈正相关关系。含水率在单个冻融循环周期内呈现随温度降低而降低, 温度升高反之, 随试验进行含水率在深度方向表现出明显水分迁移现象。孔隙压力随温度降低先小幅度升高后大幅度下降, 温度升高孔隙压力先升高后下降。孔隙压力受温度传导速度影响很大。首次冻融对边坡变形、含水率和孔隙压力影响很大, 随着试验进行其变化都会趋于稳定。

**关键词:** 膨胀土边坡; 冻融循环; 位移; 土压力; 含水率

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0257-10

## Model test study on the stability of expansive soil slope under freeze-thaw cycle

ZHANG Yingying, YANG Zhongnian, SHI Wei, LI Guoyu, TU Zhibin, LING Xianzhang

(1. School of Civil Engineering, Qingdao university of technology, Qingdao 266033, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. National key laboratory of tundra engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The reconstituted expansive soil was used for the indoor slope model test to study the displacement, soil pressure, moisture content and pore pressure of the expansive soil slope model under the action of freeze-thaw cycle, and to reflect the influence of freeze-thaw cycle on the stability of the expansive soil slope. It is found that the surface fissures of expansive soil slope under the action of freezing-thawing cycle develop from linear long fissures with few initial number to network short fissures with more number, which also has a significant influence on the development of fissures along the depth direction. Soil pressure in single freezing-thawing behavior increases with temperature decrease, and vice versa. In the process of freezing-thawing, the slope always shows freezing-shrinkage and thawing heave, but on the whole, it shows the tendency of deformation to the surface. Moreover, the displacement change rate in a single freezing-thawing cycle positively correlated with the temperature absolute value. The moisture content in a single freezing-thawing cycle decreases with the decrease of temperature, and vice versa. The moisture content in the depth direction shows an obvious water transfer phenomenon. With the decrease of temperature, the pore pressure increases at first and then decreases greatly, while the pore pressure increases at first and then decreases when the temperature increases. Pore pressure is greatly affected by temperature conduction velocity. The first freezing-thawing has a great influence on slope deformation, moisture content and pore pressure.

**Key words:** Expansive soil slope; Freeze-thaw cycle; Displacement; Soil pressure; The moisture content

膨胀土是一种极易吸水膨胀失水收缩的特殊粘性土体, 且分布广泛。当季节冻结深度超过 0.5 m 时, 工程建筑物就会呈现明显的冻-融灾

害<sup>[1]</sup>。以此界定, 中国受冻-融影响的面积占国土总面积的 68.6%<sup>[2]</sup>。2012 年, 吉图珥高铁 GDK283 段膨胀土深路堑边坡在开挖过程中均形成了较大规

收稿日期: 2019-07-25

修改稿日期: 2020-03-25

基金项目: 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201601); 山东省泰山学者专项基金项目(2015-212); 国家重大科研仪器开发基金项目(41627801)

第一作者: 张莹莹(1994-), 女, 硕士生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 1403749862@qq.com

通信作者: 杨忠年(1985-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事岩土工程和隧道工程方面的教学和科研工作。E-mail: yzhnqd@qut.edu.cn

模的工程滑坡,有些滑坍高度约14 m。因此,近年来膨胀土造成的工程问题,尤其是冻融作用导致的工程灾害引起了工程界的广泛关注。在季节性冻土区,由于冬夏温差较大,路堤边坡工程在经历反复冻融后,其土体物理力学性质将逐渐发生变化<sup>[3]</sup>,这对路堤边坡的稳定性会造成不可忽略的影响。Chuvilin等<sup>[4]</sup>发现土体的抗剪强度随着冻融作用次数的增加有所减小;Wang M等<sup>[5]</sup>研究了冻融作用对粘聚力 $c$ 和摩擦角 $\varphi$ 的影响,发现随着冻融次数的增多,土的粘聚力有所减小,而内摩擦角有所增加。王大雁等<sup>[3]</sup>指出经历冻融循环后青藏粘土粘聚力不断降低,内摩擦角无规律,在 $15\sim 30^\circ$ 之间波动。方丽莉等<sup>[6]</sup>以青藏粉质粘土为研究对象,通过CT扫描研究粘聚力变化规律,得出土体经历冻融循环后粘聚力增加,经电阻率测试研究内摩擦角变化规律,得出内摩擦角随冻融循环次数的增加而增加;苏谦等<sup>[7]</sup>以青藏铁路多年冻土区斜坡路基粘土为研究对象,考虑密度影响,指出冻融循环下,低密度粘土粘聚力升高,高密度粘土粘聚力降低,冻融循环作用对内摩擦角影响较小,经历10次冻融循环后,粘聚力及内摩擦角趋于稳定。许颖<sup>[32]</sup>等对考虑温度场对季节性冻土边坡的影响发现低于 $-10^\circ\text{C}$ 边坡变形和冻结深度与温度呈直线相关,但并未给出温度与边坡变形的相关公式。Graham J等<sup>[8]</sup>提出冻融循环下粘土破坏时,其孔压较未冻融粘土高,强度较未经冻融土低。Benson等<sup>[9]</sup>将击实粘土放到野外冻融60天,测量其渗透系数,整体试样的渗透系数本质上没有改变,冻结线以上土试样的渗透系数增加了1.5~2个数量级,试样顶部的渗透系数最高,随着深度的降低,渗透系数下降。Simonsen等<sup>[10-11]</sup>利用变围压三轴试验和固定围压三轴试验研究冻结和融化过程中土的回弹特性,给出了两种试验下,土回弹特性的差异,冻融循环后路基材料回弹模量均降低,并给出了冻融过程中回弹模量与温度的关系曲线。边晓亚<sup>[12]</sup>指出对于冻融前初始干容重较大的黄土边坡,冻融后边坡安全系数明显减小,边坡稳定性减弱。

已有很多学者对冻融循环作用下土体结构的破坏和土颗粒的聚集进行了报道,连续的冻融循环会影响土体的结构,但其影响的效果尚不确定<sup>[6,13-14]</sup>。

相比于常规土土工试验而言,冻融循环试验复杂的多,加之膨胀土的特殊性,使得有关冻融循环下膨胀土边坡稳定性研究成果相对较少。从

目前的研究结果上可以看出,目前对于冻融循环下粘性土的抗剪强度指标的变化规律尚未形成统一认识。对粘聚力而言,有研究认为冻融循环下粘聚力不断降低,但也有认为粘聚力增大的存在。对于冻融循环下内摩擦角的变化规律则争议更大,认为增加、减小、无规律、基本无变化、先降低后升高等结果均存在。对于边坡稳定性而言,抗剪强度指标是工程上急需的基本参数之一,现有研究很难为季冻区工程问题提供有效的支持。综上所述,冻融循环下膨胀土边坡稳定性的试验研究还很不成熟,需要大量的试验来探索试验结果争议的原因,揭示冻融循环下膨胀土边坡的破坏机制。

因此,本文主要以膨胀土路堑边坡为研究对象进行冻融循环条件下的模型试验,以探究冻融循环对膨胀土边坡的土压力,位移,含水率和孔隙压力等物理力学性质的变化,加深对膨胀土边坡稳定的认识为今后膨胀土边坡的设计和防灾减灾提供理论支持。

## 1 试验方案

### 1.1 边坡模型制备

本试验所用土为重塑膨胀土,通过土工试验规程,测得其基本物理指标,天然含水率为9.62%;最大干密度为 $1.64\text{ g/cm}^3$ ;最优含水率为22%;模型设计含水率为22%;制备土样实际含水率为20.85%;自由膨胀率为70%。进行基本物理性指标和颗粒成分分析(图1),该试样的颗粒大小分布曲线如图1所示。

每次称取最终压实高度为5 cm,最终压实度为79%的土体,进行夯制。每层夯实土体之间进行充分刮毛。制成台阶状边坡,进行削坡处理,制成长85 cm×宽60 cm×高55 cm的边坡模型,坡顶平台长为20 cm,坡比为1:1(见图2)。

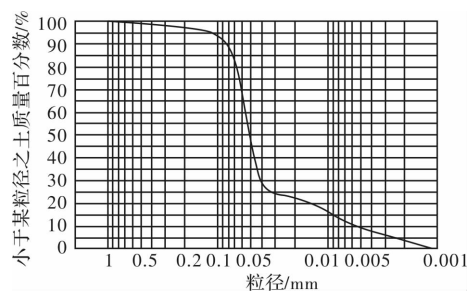


图1 土样颗粒粒径分布级配曲线

Fig. 1 Grading curve of particle size distribution of soil sample

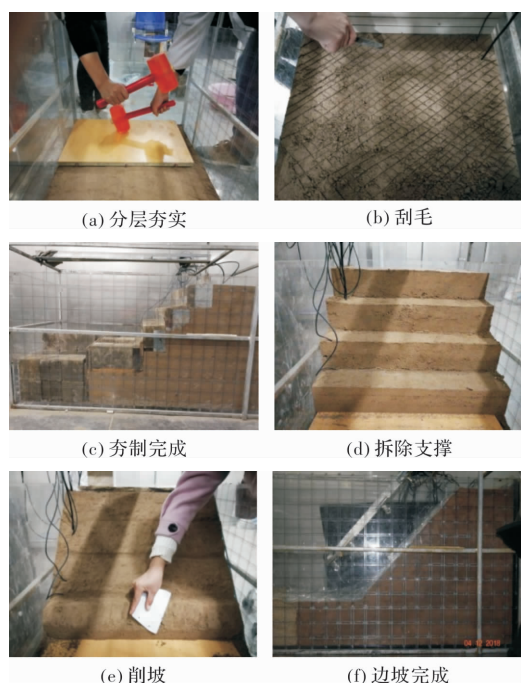


图2 边坡制作过程

Fig. 2 Slope making process

冻融模式下的模型尺寸及监测系统布置见图(3), 试验监测内容包括位移, 土压力, 孔隙压力, 温度和含水率。位移采用 HG-C1100(量测160 mm, 精度  $70\ \mu\text{m}$ ) 微型激光位移传感器检测, 位移监测点由坡顶平台到坡脚平台坡分别记为 D1~D5。土压力采用 DMTY 电阻式应变土压力盒测量(量程为  $0.05\sim 10\ \text{MPa}$ ), 土压力监测点由坡脚到坡顶分别记为 E1、E2、E3, 埋深 10 cm。孔隙压力传感器 DMTB 电阻式应变孔隙压力计测量, 监测点由坡脚到坡顶分别记为 P1、P2、P3, 埋深 5 cm。温度和含水率传感器为一体式传感器, 水分测量范围  $0\sim 100\%$ , 温度测量范围为  $-40\sim 80^\circ\text{C}$ , 精度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。监测点由坡底到坡顶分别记为 W1~W5, 埋深为 5 cm, W1、W2 和 W5 位距坡面同深度但不同坡面位置的三个监测点, W3、W4 和 W5 为竖向方向不同深度的 3 个点。模型边坡削坡完成

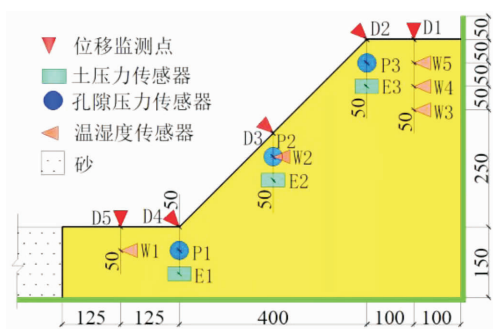


图3 传感器布置图

Fig. 3 Sensor layout

之后, 在表面覆盖多层保鲜膜既不影响温度的传递, 又杜绝了蒸发产生的水分损失。

## 1.2 试验方法

膨胀土边坡模型的冻融循环试验在自制多功能环境箱中进行, 其温度区间为  $-30\sim 80^\circ\text{C}$ , 精度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。冻融过程中在模型土体表面覆盖多层保鲜膜, 确保冻融过程中试样无水分蒸发。此次试验采取了  $-10^\circ\text{C}$ 、 $-20^\circ\text{C}$  和  $30^\circ\text{C}$  三种环境温度。许雷等<sup>[15]</sup>针对不同温度的膨胀土进行试验研究发现冻结温度  $-10^\circ\text{C}$  时对膨胀土的影响最大,  $-20^\circ\text{C}$  次之。冻土的融化过程与冻结工程相反, 但融化温度并不等于冻结温度, 而是要高于冻结温度<sup>[16]</sup>, 因此本文确定融化温度为  $30^\circ\text{C}$ 。试验试样置于环境箱  $-10^\circ\text{C}$  温度下待土体变形稳定时, 进行  $-20^\circ\text{C}$  冻结试验待土体变形稳定时视为冻结完成; 融化温度  $30^\circ\text{C}$  共进行 24 h, 视为一次冻融完成。边坡土的冻融过程可分为四个阶段: I 为冷却阶段, II 为稳定冻结阶段, III 为土温降低阶段, IV 为升温融化阶段。模型试验中每个冻融过程完成的标准参考范秋雁<sup>[17]</sup>边坡试验提出的方法, 即 2 h 内土体变形不超过  $0.01\ \text{mm}$ 。本试验共进行 4 次冻融循环。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 裂隙发育

边坡模型在冻融循环作用下, 坡面会出现明显的裂隙发育现象。图 4 为首次冻融结束后和第四次冻融结束后坡顶和坡面裂隙情况。图 4(a) 显示首次冻融坡顶出现了一条人字形裂隙, 裂隙宽度较小, 裂隙相对数量较少; 图 4(b) 为第四次冻融结束后坡顶裂隙的发育状况, 裂隙宽度明显变大, 裂隙数量显著增多, 且由直线型向多边形发展, 最终演化成网络状分布。图 4(c) 为首次冻融后坡面的裂隙发育情况。可以看出坡面出现 4 条横向裂隙, 在坡面中间位置出现一条斜向裂隙, 裂隙宽度均较小, 呈直线型分布; 图 4(d) 可以看出经过四次冻融后, 整个膨胀土边坡坡面已经全部龟裂, 裂隙基本覆盖整个坡面, 且出现宽度较大的裂隙。总体上看, 边坡表面裂隙发育在首次冻融循环后, 数量相对较少, 基本以直线型长裂隙为主; 而随着冻融循环次数的增加, 由直线型长裂隙会逐渐转换为网络状短裂隙。

已有研究表明, 在高寒季节性冻土区, 膨胀土长期处于冻融循环的环境, 易形成裂隙, 对其强度、渗透及变形特性造成较大影响<sup>[18-19]</sup>。冻融

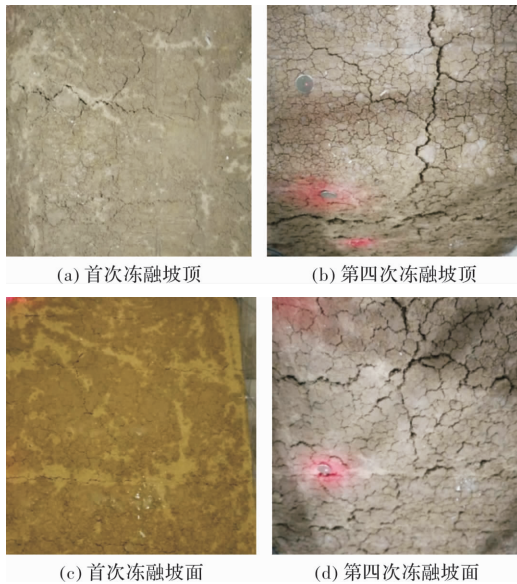


图4 裂隙照片

Fig. 4 Fracture photos

循环作为一种温度变化的具体形式,是一种特殊的强风化作用<sup>[20]</sup>,从微观角度可视为土中矿物、颗粒或土壤团聚体的破碎和重组<sup>[21]</sup>。土颗粒之间孔隙较大,土颗粒大小不均匀,土颗粒之间咬合作用强。在冻融循环作用下,土颗粒会均一化,土颗粒之间相互作用变得不强烈<sup>[22]</sup>。边坡表面生成的裂隙在经历冻融过程后发生破碎断裂,宏观表现为直线型长裂隙向网络状短裂隙的转化。

在裂隙深度方向上,冻融循环作用下,土体上下收缩不均匀,就导致了土体的裂隙延深度方向的发展<sup>[23]</sup>。图5(a)为坡体首次冻融结束后裂隙发育深度的情况,可以看出首次冻融后坡顶产生的裂隙深度就达7 cm。第四次冻融循环结束后,裂隙最大深度高达12 cm(见图5(b))。这就说明冻融过程加剧了边坡裂隙向深部的拓展,宏观表现为裂隙发育深度的增加。对于粘性土边坡可以分为裂隙层和无裂隙层,裂隙层的抗剪强度,粘聚力和内摩擦角都会减小<sup>[19]</sup>,下层无裂隙粘性土强度和粘聚力都很高,滑坡很难穿过下层无裂隙层,

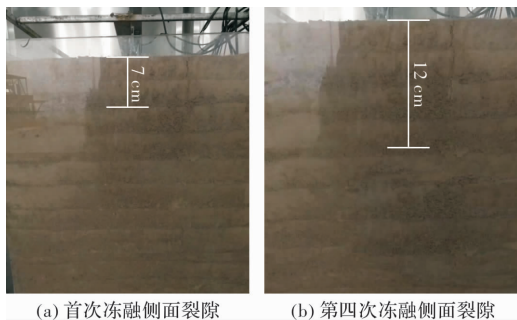


图5 首次冻融后裂隙深度照片

Fig. 5 Photo of crack depth after the first freeze-thaw

所以裂隙发育是导致的强度降低是边坡失稳重要因素。

## 2.2 土压力变化分析

膨胀土边坡不同位置相同埋深的土压力变化规律总体相近,E1处土压力在 $-10^{\circ}\text{C}$ 阶段内呈先减小后增大再减小的趋势,在 $-20^{\circ}\text{C}$ 阶段持续增大, $30^{\circ}\text{C}$ 阶段持续减小;E3处的土压力在 $-10^{\circ}\text{C}$ 阶段内呈平稳趋势,在 $-20^{\circ}\text{C}$ 阶段先陡然增大之后趋于大致平稳, $30^{\circ}\text{C}$ 阶段内持续减小(见图6)。图6中可以看出不同位置的土压力,都会表现出这一现象,温度绝对值越大应力变化越剧烈。徐丽丽<sup>[24]</sup>对膨胀土边坡进行冻融试验,发现土压力随温度降低而增大,与本文研究现象相符。

在冻结阶段,E1与E3处土压力的差异主要与土体的孔隙体积与水冻结膨胀量有关<sup>[18]</sup>。当土体孔隙内的水分结冰时,水变冰体积膨胀,土颗粒失水收缩,冰会填充颗粒之间的孔隙,张英<sup>[25]</sup>对冻融循环下粉质黏土做了微观研究发现,随着冻融进行,冰晶会挤压土颗粒。但是由于水分较少,冰的膨胀量不足以填充所有孔隙,加之土颗粒失水收缩,反而使土颗粒的状态发生调整,土体更加密实,一定面积的水平面上总应力都会增大,作用于土压力盒的应力也随着增大。

随着温度持续降低孔隙中的水开始结冰,冰膨胀量继续填充孔隙,直至温度达到零下,位于零下温度的土体内的水分瞬间全部结冰,土体土压力出现一个小高峰见图6。随着温度继续降低冷锋线继续下移,土体内土压力表现继续上升趋势。融化过程土颗粒吸水膨胀填充孔隙,使土颗粒再一次调整排列,土骨架较为疏松,作用在一定面积上的总应力变小。

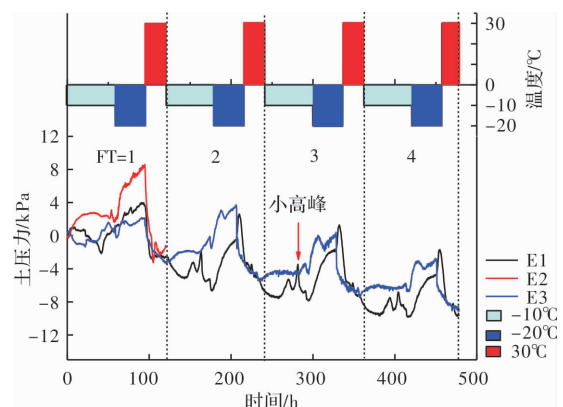


图6 冻融循环土压力变化曲线

Fig. 6 Variation curve of earth pressure in freeze-thaw cycle

从图6整体的变化趋势发现E1和E3处土压力随着冻融循环次数的增加土压力呈下降趋势,



幅值逐渐减小后趋于平稳(见表 1)，E1 首次冻融结束土压力减小了 2.61 kPa，E3 首次冻融结束土压力减小了 3.16 kPa，随着冻融循环进行，土压力的变化量逐步减小，第四次冻融结束后 E1 减小量为 2.15 kPa，E3 为 1.70 kPa。随着冻融循环的进行土中孔隙的挤压和填充以及土颗粒一次次的重新排列导致土体颗粒大小和孔隙大小越来越稳定。而且冻融循环作用使膨胀土颗粒趋向均一化小颗粒，也使得冻融循环次数增加对边坡侧向压力的影响越来越小。

表 1 单次冻融土压力变化总量

Tab. 1 Total variation of soil pressure in a single freezing-thawing process

传感器 标号	第一次冻 融循环	第二次冻 融循环	第三次冻 融循环	第四次 冻融循环
E1	-2.61	-2.55	-2.28	-2.15
E3	-3.16	-2.10	-2.01	-1.70

2.3 位移变化分析

边坡模型单次冻融循环呈现随温度降低而下降，温度升高而增大的现象，即“冻缩融胀”现象。位于坡顶处的沉降最为明显，从坡顶到坡脚的位移变化量越来越小。不同位置的差异性主要因为传感器监测点距离箱体底部之间的土体厚度，D1 位于坡顶(见图 2)土体厚度为 55 cm，此处的体积变化现象会出现叠加放大，坡体位移会表现的较明显，D1~D5 土层厚度依次减小，冻结时和融化时的位移也表现出减小趋势。

由图 7 分析发现不同循环次数的边坡模型的位移变化规律总体相近，呈现随温度降低而降低，温度升高土体膨胀的现象，即“冻缩融胀”。每次冻融循环融胀量大于冻缩量，试验结束土体表现出膨胀的现象。首次冻融循环之后从土体表面位移来看土体发生明显膨胀，最高膨胀量为 2.8 cm，初次冻融变形最大占变形总量的 50% 以上，第二次循环明显减小，第三、四次后趋于稳定。随冻融次数增加，各点位移逐步增加，但增速明显放缓。第一次冻融循环对土体影响最大，使土体结构发生改变，导致土体强度衰减，随着冻融循环进行土体损伤积累最后趋于稳定<sup>[18]</sup>。

Hamilton<sup>[26]</sup>和许雷<sup>[18]</sup>研究指出土在冻结过程中存在收缩行为。这取决于土壤中含水量的多少和土体的孔隙体积与水冻结膨胀量的差值<sup>[18]</sup>。当含水量小于饱和含水率的 70% 时，表现出冻缩现象，含水量太高时冻胀将起主导作用<sup>[27]</sup>。本试验

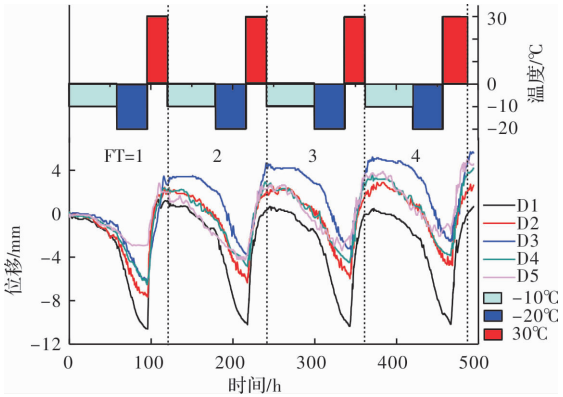


图 7 冻融循环位移变化曲线

Fig 7 Freeze-thaw cycle displacement curve

出现冻缩现象，原因主要有以下两点：(1)因为本土体含气体较多，在液态水变固态冰过程中体积膨胀，会占据孔隙，赶出气体，土颗粒会重新排列，导致体积缩小。(2)加之土颗粒因失水导致的干缩(见图 8(b))。Fleureau 等<sup>[28]</sup>和 Amarasiri 等<sup>[29]</sup>研究发现粘性土在冻结过程冰晶先出现在较大的孔隙中，会迫使小孔隙的水向其迁移，但是由于黏性土孔隙较小，导致低渗透率，这会形成较大的负孔压，导致土体骨架变干并收缩<sup>[27,30]</sup>。当初始结构的孔径变化促使冻结作用下的土体收缩<sup>[31]</sup>。双重原因导致土体有充足的收缩空间，造就了试验土体出现“冻缩”的现象。

在融化过程出现“融胀”的现象有两点原因：(1)冻缩过程干缩的土颗粒吸水膨胀量占据在冻结过程中固态冰扩大了土颗粒之间的孔隙量。土颗粒吸水膨胀加之冻结时冻胀力对土颗粒大小的均一化作用是土颗粒破碎，导致土体结构重新排列，孔隙变大(见图 8(c))。(2)固态冰变液态水体积变小。双重原因导致了土体“融胀”现象。

图 9 对五个不同位置的位移变化速率在 -10℃，-20℃和 30℃三种温度变化区间内随冻融循环次数的变化规律。数据表明无论哪个位置和温度区间，位移变化速率都呈减小趋势。从温度区间角度看，温度的绝对值越大，对土体的位移变化速率影响越大，图中看出 -10℃阶段的位移变化速率<-20℃阶段的位移变化速率<30℃阶段的位移变化速率。从不同位置看出，坡顶的变化速率最大，大于坡面三个位置和坡脚，坡脚最小，由于坡顶土体较厚，可变体积量越多。

本次实验对四次冻融循环的每一温度区间五个不同位置求得平均值，发现 -10、-20 和 30℃温度绝对值与最大位移差呈直线关系(见图 10)。从图 10 可以看出随着冻融循环的位移随温度的变

化曲线越来越平缓,斜率越来越小, $FT=1$ 时为0.343 7, $FT=2$ 时为0.268 1, $FT=3$ 时为0.238 2, $FT=4$ 时为0.236 0.许颖等<sup>[32]</sup>对不同外部温度进行冻土边坡的位移分析发现了类似的规

律,负温下 $-30$ 、 $-20.5$ 、 $-10.5^{\circ}\text{C}$ 三种温度绝对值和最大位移差呈直线相关关系,斜率为0.369 9.这就证明了随着冻融循环的进行,冻融循环对边坡变形的影响越来越小.

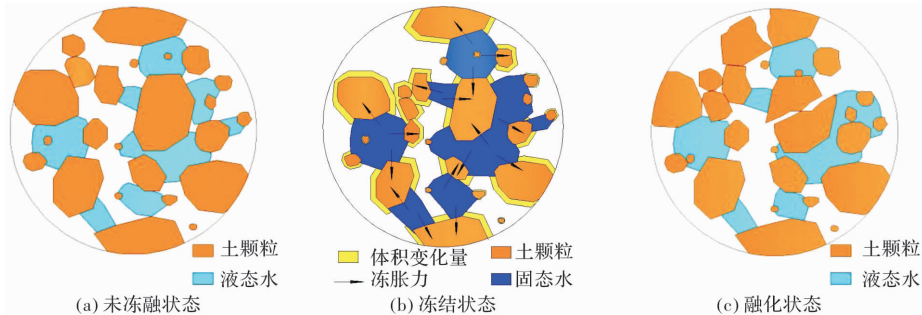


图8 冻融循环下土体体积变化情况

Fig. 8 Variation of soil volume under freeze-thaw cycle

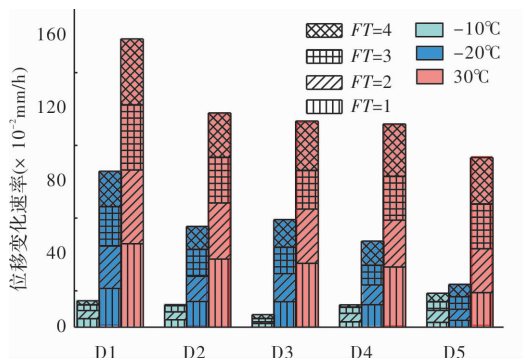


图9 冻融循环初始位移和最小位移位移差曲线

Fig. 9 Initial displacement and minimum displacement differential curves of freeze-thaw cycle

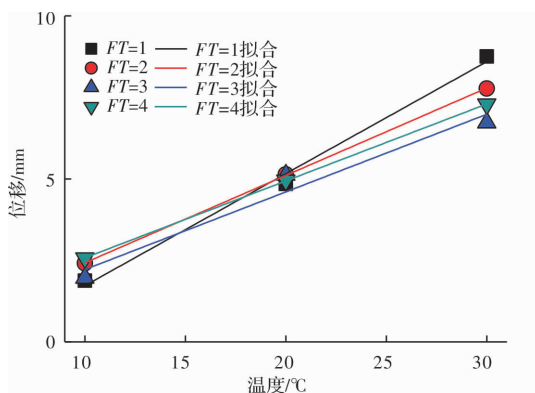


图10 不同冻融循环次数下位移随温度的变化

Fig. 10 The displacement changes with temperature under different freezing and thawing cycle

## 2.4 含水率变化

在季节冻土区,反复冻融作用导致土体孔隙水压力发生变化,进而导致土体中水分的迁移和重分布.从图11可以看出膨胀土边坡坡面不同位置含水率变化规律总体相近,随着冻融循环的

过程均呈先减小后增大的趋势.边坡内含水率变化曲线主要分为三个阶段:降温冻结阶段、冻结稳定阶段和高温融化阶段.含水率与温度变化存在良好的对应关系.随着冻融次数的增加,边坡内部含水量呈稳定的周期性变化.在温度降低过程 $0^{\circ}\text{C}$ 以前含水率呈降低趋势,这时土中液态水分还未结冰,含水率的降低是由于坡体表面温度最先变低,导致水分向表面迁移.温度继续降低,边坡内的液态水变为固态冰,导致含水率继续减小.随着温度的上升传感器位置温度达到 $0^{\circ}\text{C}$ 时,传感器上部土体已达到 $0^{\circ}\text{C}$ 以上,水分会渗透到传感器位置,含水率会不断升高,达到 $0^{\circ}\text{C}$ 以上以后,含水率会有小幅度的升高,这种现象是由于传感器下部固体冰继续融化,含水率升高由水分扩散导致的,而且土体中心温度始终低于外部温度,在低温过程迁至表面的水分,由于温度的原因向中心迁移也导致传感器位置水分有所上升.

不同深度的含水率对温度的敏感度随深度而不同,顶面的W5变化大于中间W4和底面的W3,但W5、W4和W3含水率变化趋势相似.含水量的变化受深度的影响较大<sup>[33]</sup>,土体含水率变化量随深度增加而逐渐减小<sup>[34]</sup>.这与土体水分迁移有关,温度降低使毛细水自由能发生了变化,促使水分朝着温度更低的方向迁移<sup>[35]</sup>.埋深最浅的W5最先感应温度,水分一直向表面迁移,由图11和12可以看出W5含水率由第二次冻融之后含水率明显高于W3和W4,后续冻融循环并趋于稳定.赵刚<sup>[36]</sup>对冻融循环下黏土水分迁移现象研究发现多次冻融后水分会在一浅层深度聚集.也就解释

了埋深为 15 cm 的 W5 含水率明显高于 W3 和 W4 的现象. 结合图 12, 发现后期含水率表现  $W5 > W3 > W4$ , 由于膨胀土黏性大, 低孔隙和低渗透率的性质, 导致位于中间埋深的 W4 先响应水分迁移, 此处周围的水分向坡面迁移, 导致水分迅速低于其他位置. 在冻结过程中水分向冻结锋面迁移, 在融化过程中水在自重作用下, 向下迁移, 但是由于土的阻滞力作用, 水分不能返回原位置, 导致土体内部水分的重分布<sup>[37]</sup>. 含水量变化趋于稳定后, 由于土体自重应力的影响, 土体下部孔隙率最小, 孔隙的持水性降低, 导致边坡底部的含水量较小, 而边坡表面由于孔隙率较大, 在冻融过程中水分向冻结锋面迁移, 导致边坡表面含水量最大.

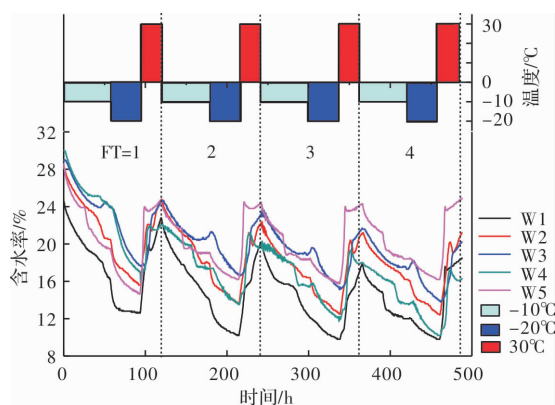


图 11 多次冻融循环含水率变化曲线

Fig. 11 Variation curve of moisture content in multiple freeze-thaw cycles

当含水量随温度呈周期性变化时, 选取一个冻融周期进行单个冻融循环周期分析发现, 在降温过程中, 当温度高于冻结点时, 边坡内未融化的冰继续融化, 导致含水量持续增大, 而当温度低于冻结点时, 土体内部水分开始冻结, 水分相变成冰, 导致含水量降低; 在升温过程中, 当温度低于冻结点时, 水分继续相变成冰, 含水量继续减小, 当温度高于冻结点时, 冰开始融化, 变成水, 含水量增大. 而且从图 11 中还可以发现, 随着深度的增加, 含水量的周期性变化波幅越小, 造成这种变化的原因是边坡上部的温度周期性变化波幅较大, 更多水分进行冰-水相变, 导致含水量的周期性变化波幅变大, 而随着深度的增加, 温度周期性变化波幅变小, 参与相变的水分越少, 含水量的周期性变化波幅也越小.

图 12 是对每次冻融循环结束时的位移值进行了曲线拟合, 得到冻融循环过程中含水率变化的曲线:

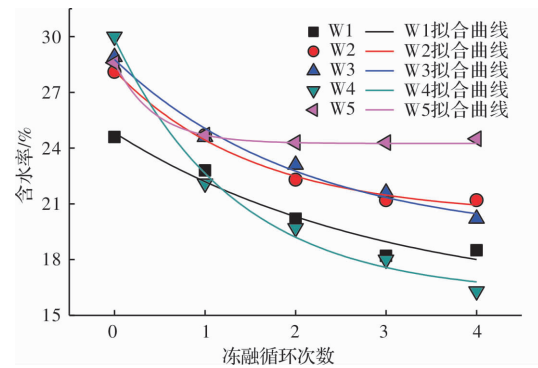


图 12 含水率和冻融循环次数拟合曲线

Fig. 12 The fitting curve of moisture content and freeze-thaw cycle times

$$y = 15.5871 + 9.2395e^{-n/2.9817}$$

$$y = 20.3664 + 7.8034e^{-n/1.5342}$$

$$y = 19.0514 + 9.7167e^{-n/2.0778}$$

$$y = 16.1038 + 13.7709e^{-n/1.3420}$$

$$y = 24.2484 + 4.3515e^{-n/0.4424}$$

由此, 冻融循环次数和含水率的变化关系可以归纳为式(1):

$$w_n = C + De^{-n/t} \quad (1)$$

式中:  $w$  为含水率;  $C$ ,  $D$ ,  $t$  为与初始含水率和位移有关的系数;  $n$  冻融循环次数.

从图 12 可以看出冻融循环的作用后, 边坡内总体含水率先降低, 后逐渐趋于稳定. 在经历冻融循环作用下, 可以看出边坡内部含水率总体上呈递减的分布规律, 而边坡表面的含水率略有增加, 这也很好的印证了裂隙由边坡表面向内部逐渐发育的现象.

## 2.5 孔隙压力变化

由图 13 可见, P2 和 P3 的规律基本一致, 温度降低时孔隙压力呈下降趋势, 而在融化阶段, 孔隙压力亦随温度的升高而升高随后有所降低. P1 处首次冻融孔隙压力亦随温度升降而升降随着冻融循环次数的增加, 孔压相对变化比较稳定. P1 处孔隙压力出现无规律现象, 分析原因可能 P1 位于坡底, 土层较浅, 温度传输较快加之有裂隙产生所导致. 这与张莲海<sup>[38]</sup>等人发现现象相同, 土体冻结融化速率大, 经历冻融循环影响的程度更加剧烈, 从而土体结构的破坏或改变更加严重, 所以孔隙压力变化无规律.

选择埋深距坡顶 5 cm 的 E3 作为对象进行单个冻融循环周期分析发现, 如图 14 所示. 在降温过程中, 随着温度的下降, 孔隙压力先增大, 后减小; 在升温过程中, 随着温度的升高, 孔隙压力先迅速增加, 后降低. 孔隙压力产生这种变化



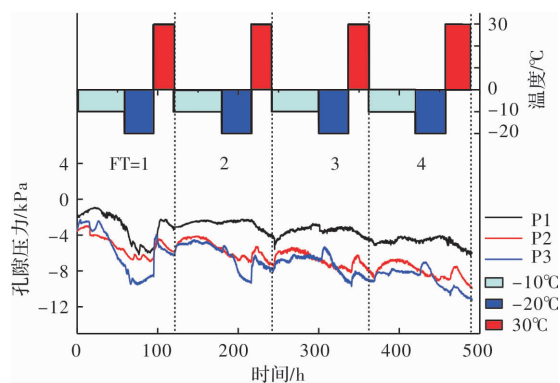


图13 冻融循环下孔隙压力变化曲线

Fig. 13 Variation curve of pore pressure under freeze-thaw cycle

的原因是,在升温过程中,当温度高于冻结点时,由于冰继续融化成水,土体孔隙中水分含量增大,孔隙压力也随之增大,而当温度低于冻结点时,水开始相变成冰,土中水的毛细势和吸附势均减小,从而导致孔隙压力减小。毛细势主要由冰水界面曲率半径来控制,冰水界面曲率半径越小,毛细势越小,孔隙压力越小。吸附势主要由未冻水膜的厚度来控制,未冻水膜的厚度越小,吸附势越小,孔隙压力越小。随着温度的降低,未冻水膜的厚度越来越小,所以吸附势越来越小,孔隙压力越小。

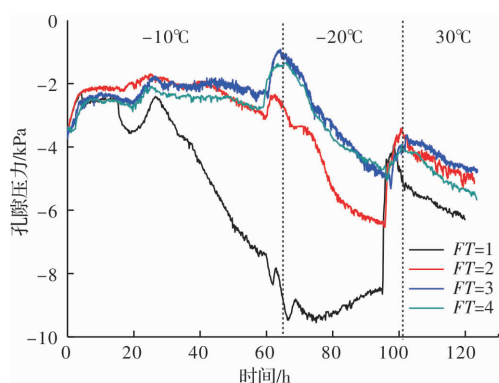


图14 冻融循环坡顶位置孔隙压力变化曲线

Fig. 14 Variation curve of pore pressure at the top of freeze-thaw cycle

由图14可以明显看出,在升温阶段孔隙压力先小幅度上升,后大幅度下降。这主要由于非饱和土是一种三相土,气体的存在是非饱和土和饱和土性质不同的主要原因,包承纲提出“气相四形态”<sup>[39,40]</sup>即:气相完全连通、气相部分连通、气相内部连通和气相完全封闭四种状态。本次试验用土压实度较大且颗粒极小,加之在毛细水不断向表面迁移<sup>[39]</sup>,使得埋深较浅的孔隙压力周围处于内部连通状态,温度降低时孔隙中的水被冻结,

孔隙中的气由于热力学原理收缩加之水分减少,毛细势和吸附势均减小,导致孔隙压力变小。温度升高时增大,增大的原因是热力学原理加之水分增多。随后降低的原因是由于固态冰融化成液态水,部分气体溶于液态水。另一方面裂隙的存在会降低孔隙压力。图13中可以发现,每次冻融结束后孔隙压力减少量越来越小,裂隙的存在会使土体处于部分连通状态,但是土颗粒在冻融循环下颗粒会均一化,小的颗粒会填充裂隙或大的孔隙<sup>[22]</sup>,随着试验的进行部分连通区域越来越小,越来越稳定,导致孔隙压力减小量越来越稳定。

### 3 结论

(1)冻融循环作为一种强风化作用,会改变膨胀土边坡土体的物理力学性质。冻融循环作用下边坡表面裂隙发育,且由初始数量较少的直线型长裂隙向数量较多的网络状短裂隙发展。冻融循环对裂隙发育沿深度方向上同样存在显著影响。

(2)冻融循环过程中土压力呈现出随温度降低而升高的趋势,反之亦然。这主要是由于土体在冻融循环过程中其内部水的相变和迁移导致作用于一定面积上的应力发生变化。

(3)冻融循环过程中边坡存在冻缩融胀的现象,但整体上仍表现出向临空面逐渐变形的趋势。首次冻融循环对土体的变形影响最为显著,其变形量占总变形量的50%之多,随着冻融循环次数的增加变形量增长的趋势变缓。且单个冻融循环周期内位移变化速率与温度绝对值呈正相关关系。

(4)含水率在单个冻融循环周期内呈现随温度降低而降低,反之亦然,整体上含水率变化随试验进行趋于稳定。导致这种现象的原因主要是水相变化和水分迁移。在冻融循环进行中埋深较浅的含水率呈现略有增加趋势并明显高于埋深较深处的含水率的现象很好的印证了水分迁移现象的存在。

(5)冻融循环作用导致土中水相变化,影响毛细势和吸附势,促使孔隙压力的变化趋势随温度降低孔隙压力减小,温度升高孔隙压力增大。首次冻融孔隙压力变化很大,随着试验进行孔隙压力变化趋于稳定。每次融化阶段孔隙压力升高后会下降,主要是因为部分土体处于内部连通状态,土中气体在升温阶段会溶于水,导致孔隙压力减小。

### 参考文献 References

- [1] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.



- MA Wei, WANG Dayan. Mechanics of Frozen Ground[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 童长江, 管枫年. 冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- DONG Changjiang, GUAN Fengnian. Frost heave and prevention and cure of building frost damage[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1985.
- [3] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313-4319.
- WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of qinghai-tibet clay due to freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319.
- [4] CHUVILIN, Y M, YAZYNNIN O M. Frozen soil macro-and microtexture formation [C]//Proc. Int. Conf. Permafrost, 5th. Norway. Trondheim: 1988, 2-5.
- [5] WANG M, MENG S, SUN Y, et al. Shear strength of frozen clay under freezing-thawing cycles using tri-axial tests[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17(4): 761-769.
- [6] 方丽莉, 齐吉林, 马巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 435-440.
- FANG Lili, QI Jilin, MA Wei. The influence of freezing-thawing on soil structure and its strength change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 435-440.
- [7] 苏谦, 唐第甲, 刘深. 青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J]. 岩石力学与工程学报. 2008, 27(S1): 2990-2994.
- SU Qian, TANG Dijia, LIU Shen. Test on Physical-mechanical properties of qinghai-tibet slope clay under freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2990-2994.
- [8] GRAHAM J, AU V C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(1): 69-78.
- [9] BENSON C H, OTHMAN M A. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(2): 276-294.
- [10] SIMONSEN E, ISACSSON U. Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(4): 863-875.
- [11] SIMONSEN E, JANOO V C. Isacsson U. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16(1): 28-50.
- [12] 边晓亚, 白俊龙, 张军. 冻融对黄土边坡稳定性的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(4): 425-429.
- BIAN Xiaoya, BAI Junlong, ZHANG Jun. Influence of Freeze-Thaw on Stability of Loess Slope[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018, 40(4): 425-429.
- [13] 齐吉林, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2690-1694.
- QI Jilin, ZHANG Jianming, ZHU Yuanlin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2690-1694.
- [14] STARICKA J A, BENOIT G R. Freeze-drying effects on wet and dry soil aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(1): 218-223.
- [15] 许雷, 薛洋, 鲁洋. 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. 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.
- [16] 于琳琳. 不同人工冻结条件下土的冻胀试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 9-10.
- YU Linlin. Test research on frost heave of soils under different artificial freezing conditions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 9-10.
- [17] 范秋雁, 刘金泉, 杨典森, 等. 不同降雨模式下膨胀岩边坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3401-3409.
- FAN Qiuyan, LIU Jinqian, YANG Diansen, et al. Model test study of expansive rock slope under different types of precipitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3401-3409.
- [18] 许雷, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 冻融环境下膨胀土物理力学特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 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, 37(2): 167-174.
- [19] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 727-731.
- LIU Huaqiang, YIN Zongze. Research on analytical method of stability of expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 727-731.
- [20] 郑娜, 马巍, 郝慧. 等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2336-2344.
- ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui, et al. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1282-1287.
- [21] 冯德成, 林波, 张锋, 等. 冻融作用对土的工程性质影响的研究进展[J], 中国科学: 技术科学, 2017, 47(2): 111-127.
- FENG Decheng, LIN Bo, ZHANG Feng, et al. Re-

- search progress of freezing-thawing effect on engineering properties of soil[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2017, 47(2): 111-127
- [22] 叶万军, 李长清, 杨更社, 等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2336-2344.
- YE Wanjun, LI Changqing, YANG Gengshe, et al. Scale effects of damage to loess structure under freezing and thawing conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2336-2344.
- [23] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2155-2161.
- YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2155-2161.
- [24] 徐丽丽, 张滨, 李兆宇, 等. 冻融环境下加筋膨胀土边坡力学模型试验与研究[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2014, 5(3): 234-237.
- XU Lili, ZHANG Bin, LI Zhaoyu. Experimental study of reinforced expansive soil slope in freeze-thaw environment[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2014, 5(3): 234-237.
- [25] 张英, 郗慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. *岩土力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 35967-3603.
- ZHANG Ying, BING Hui, YANG Chengsong. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of silty clay based on SEM and MIP test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3597-3603.
- [26] HAMILTON, B A. Freezing Shrinkage in Compacted Clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1966, 3(1): 1-17.
- [27] DAGESSE, D. F. Freezing-induced bulk soil volume changes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(3): 389-401.
- [28] FLEUREAU Jean-Marie, KHEIRBEK-SAOUD Siba, SOEMITRO Ria, and, Said Taibi. Behavior of clayey soils on drying-wetting paths[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(2): 287-296.
- [29] AMARASIRI A L, KODIKARA J K, COSTA S. Numerical modelling of desiccation cracking[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35(1): 82-96.
- [30] NOWAMOOZ H, MASROURI F. Relationships between soil fabric and suction cycles in compacted swelling soils[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3-4): 444-455.
- [31] ASTM. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))[S]. ASTM International, 2000.
- [32] 许颖, 丁春林, 吴科亮. 基于温度-应力耦合效应的冻土高边坡稳定特性分析[J]. *华东交通大学学报*, 2015, 10(32): 19-26.
- XU Ying, DING Chunlin, WU Keliang, et al. Stability characteristics of permafrost high slope based on temperature-stress coupling effect[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2015, 10(32): 19-26.
- [33] 杨果林. 膨胀土高边坡支挡结构设计方法与加固技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- YANG Guolin. Design method and strengthening technique for retaining structure of high expansive soil slope. Beijing: Science Press, 2018.
- [34] 毛云程, 李国玉. 季节冻土区黄土路基水分与温度变化规律研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 1011-1015.
- MAO Yuncheng, LI Guoyu. Research on the moisture and temperature variation of loess roadbed in seasonally frozen ground regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 1011-1016.
- [35] 杨果林, 刘义虎. 膨胀土路基含水量在不同气候条件下的变化规律模型试验研究[J]. *岩土力学与工程学报*, 2005, 24(24): 4524-4523.
- YANG Guolin, LIU Yihu. Experimental study on moisture content of expansive soil roadbed under different water conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4524-4523.
- [36] 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 Gang, TAO Xiaxin, LIU Bing. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1952-1957.
- [37] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [38] 张莲海, 马巍, 杨成松. 冻融循环过程中土体的孔隙水压力测试研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1856-1864.
- ZHANG Lianhai, MA Wei, YANG Chengsong. Pore water pressure measurement for soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1856-1864.
- [39] BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2004, 1(1): 1-15.
- [40] XU Peiji, CHEN Yujiong. The relationship between water-gas morphology and mechanical properties of unsaturated soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1965, 1: 16-23.

(编辑 桂智刚)