

# 冻融作用下初始含水率对膨胀土边坡稳定性的影响研究

郭从洁<sup>1</sup>, 时 伟<sup>1</sup>, 杨忠年<sup>1</sup>, 崔郁雪<sup>1</sup>, 张莹莹<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)

**摘要:** 随着全球气候变暖, 季节性冻土区面积不断增大, 边坡在冻融循环作用下, 极易发生失稳破坏; 由于膨胀土是一种特殊性的土, 膨胀土边坡更易失稳。通过建立不同初始含水率的膨胀土边坡模型, 对多次冻融循环下坡体温度、含水率、土压力以及位移进行实时监测, 研究了冻融循环下, 不同初始含水率膨胀土边坡坡体各指标的变化规律, 进而探究初始含水率对膨胀土边坡稳定性的影响。研究发现: 在多次冻融循环过程中, 膨胀土边坡各监测数据均呈周期性变化, 首次冻融对边坡土体的影响最大, 并且在冻融过程中, 边坡呈现单向冻结, 双向融化现象, 且融化速率大于冻结速率; 边坡初始含水率越高, 到达冻结稳定所需要的时间越长, 土压力变化幅度越大, 冻胀率也越大; 此外, 不同初始含水率边坡土体存在“冻胀融缩”或“冻缩融胀”两种现象, 但边坡整体均向临空面发展。本研究成果对进一步探究季冻区膨胀土边坡稳定性以及失稳机制具有重要意义, 可为季冻区膨胀土边坡稳定性的研究提供更好的理论基础及科学依据。

**关键词:** 冻融循环; 膨胀土; 边坡稳定性; 初始含水率

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0069-11

## Research on the influence of initial moisture contents on the stability of the expansive soil slope under freeze-thaw cycles

GUO Congjie<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, YANG Zhongnian<sup>1</sup>, CUI Yuxue<sup>1</sup>, ZHANG Yingying<sup>1</sup>, LING Xianzhang<sup>1, 2</sup>

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

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

**Abstract:** With global warming, the area of seasonal permafrost is increasing, and the slope is highly susceptible to destabilization under the effect of freeze-thaw cycles. As a special soil, expansive soil slope is more prone to destabilization. The slope temperature, moisture content, soil pressure, and displacement are monitored in real-time under multiple freeze-thaw cycles by modeling expansive soil slopes with different initial moisture contents. The influence of initial moisture content on the stability of slopes of expansive soil is investigated by examining the variation of parameters of slopes of expansive soils with different initial moisture contents under freeze-thaw cycles. Results show that the monitoring data of expansive soil slope show periodic changes in the process of multiple freeze-thaw cycles, and first freeze-thaw has the greatest impact on slope soil. Moreover, the slope shows unidirectional freezing and bidirectional thawing, and the thawing rate is greater than the freezing rate in the freeze-thaw process. The higher the initial moisture content of the slope, the longer the time is needed to reach the freezing stability, the greater the variation range of soil pressure, and the greater the frost heave rate. In addition, there are two phenomena of "frost shrinking and thaw expanding" or "frost expanding and thaw shrinking" in the soil body of the slope with different initial moisture content, but the slope as a whole develops towards the free surface. Research results may provide a theoretical and scientific basis for the study of the slope stability of expansive soil in the seasonally frozen soil zone.

**Key words:** freeze-thaw cycles; expansive soil; slope stability; initial moisture content rate

由于全球气候变暖, 季冻区分布范围逐渐增大, 土体周期性的冻结与融化, 影响着土的结构以及物理力学性质<sup>[1]</sup>, 这是导致季冻区工程病害的主要原因之一。随着经济的快速发展, 我国越来越重

视寒冷地区的工程建设问题, 边坡是工程建设中最常见的形式之一, 其中, 膨胀土边坡相对于其他土体边坡更容易发生失稳破坏。膨胀土主要由亲水性矿物—伊利石及蒙脱石等矿物组成, 易发生吸水膨

收稿日期: 2020-07-23

修改稿日期: 2021-01-12

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

第一作者: 郭从洁(1994—), 女, 硕士生, 研究方向为岩土工程。E-mail: st126guo@126.com

通信作者: 杨忠年(1985—), 男, 博士, 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

胀、失水收缩等现象,因此,初始含水率是影响膨胀土边坡稳定性的重要因素。膨胀土边坡在冻融循环下由于反复胀缩变形从而导致了大量的边坡失稳及滑坡工程事故<sup>[2]</sup>。在膨胀土分布区,大多数边坡由膨胀土填筑而成,均有失稳迹象<sup>[3]</sup>。襄渝线铁路边坡路堤在使用过程中,由于土体软化发生滑坡;焦枝线铁路在建成通车后的第二年雨季发生表面溜坍,同时自轨道下产生滑坡;关于膨胀土边坡的失稳形式以及导致失稳破坏的因素多种多样<sup>[4]</sup>。因此,研究冻融循环下膨胀土边坡稳定性及边坡初始含水率对其影响具有重要意义。

目前,国内外对冻土区边坡稳定性的分析研究日趋成熟,由于研究土类及研究方法的不同,研究内容和研究结果的侧重点也各不相同。周志军等<sup>[5]</sup>通过测试不同温度下的黄土试样的压缩模量及抗剪强度,发现温度对黄土力学性能的影响主要取决于试样的含水率;崔广芹<sup>[6]</sup>通过建立非饱和粉砂土粘聚力、内摩擦角与冻融循环次数参数之间的定量关系,发现土体粘聚力随着冻融循环次数的增加不断减小,而内摩擦角逐渐趋于稳定;LU Ning<sup>[7]</sup>等认为非饱和土的土体类型与土体的含水量极大程度影响了孔隙水压力的大小。当温度下降到冻结温度时,孔隙水压力逐步下降;当温度升高到冻结温度以上时,孔隙水压力快速回升<sup>[8]</sup>;鲜丹<sup>[9]</sup>通过对天水市滑坡土体含水率的实际监测,有效论证土体初始条件对非饱和入渗以及边坡稳定性的影响。程永春等<sup>[10]</sup>发现冻融循环对边坡浅层土体强度的损伤作用,是边坡在融化期发生失稳破坏不可忽视的原因。

对于膨胀土的力学特性,已有了相关研究。冻融作用对土体内部微细结构的变化也直接影响着膨胀土的力学性能<sup>[11]</sup>。初始含水率越小,土样所具有的膨胀潜势越大,吸水后膨胀力的释放更加迅速<sup>[2]</sup>。徐丽丽<sup>[12]</sup>结合工程实际,认为季冻区膨胀土渠坡防护主要目标是抑制破坏区的含水率变化幅度。

可以看出,国内外对于季冻区边坡稳定性的研究,大多基于三轴试验以及数值计算对土体的物理力学性质进行研究,关于膨胀土边坡的模型试验研究较少,不同初始含水率对膨胀土边坡稳定性的影响研究更是不足,未能有效地对膨胀土边坡稳定性进行整体性分析,基于此,对冻融循环下不同初始含水率的膨胀土边坡进行模型试验研究,具有实际的科学价值。本文通过建立不同初始含水率的膨胀土边坡模型,对多次冻融循环下坡体温度、含水

率、土压力以及位移进行实时监测,研究冻融循环下,不同初始含水率膨胀土边坡坡体各指标的变化规律,进而研究初始含水率对膨胀土边坡稳定性的影响,为季冻区膨胀土边坡建设提供必要的参考依据,对工程实践具有重要的指导作用。

## 1 试验方案及结果

### 1.1 模型制作

试验所用的土为重塑膨胀土,根据土工试验规程<sup>[13]</sup>,测得其基本物理指标见表 1,其中,天然含水率为 9.62%,最优含水率为 20.17%,最大干密度为  $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,自由膨胀率为 50.5%,为弱膨胀土<sup>[14]</sup>。

表 1 膨胀土基本物理指标

Tab. 1 Basic parameters of the expansive soil

天然含水率	最优含水率	最大干密度	自由膨胀率
/%	/%	$/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	/%
9.62	20.17	1.53	50.5

根据设计含水率对膨胀土喷洒相应体积的水,充分拌合后,将其密封完好,密封时间不少于一昼夜。待土样水分分布均匀后,由于试验条件的局限,将模型按照 79% 的最终压实度,在模型试验箱( $2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ )内自下而上分 11 层填筑,每层土填筑厚度为 5 cm。膨胀土边坡模型设计如图 1(a)所示。按模型设计图在相应位置埋设仪器,所有仪器均埋设在模型中轴线上,其中,位移监测点分布于坡面,共埋设五个监测点,自坡顶至坡脚分别标记为 D1~D5,采用 HG-C1100 微型激光位移传感器(量测 160 mm,精度  $70 \mu\text{m}$ )监测;土压力传感器埋设于坡面以下 10 cm 处,共埋设三个监测点,自坡脚至坡顶分别标记为 E1~E3,采用 DMTY 电阻式应变土压力盒(量程为 0.05~10 MPa)监测;温湿一体式传感器可同时监测温度与含水率,共埋设五个监测点,分别标记 W1~W5,其中 W1, W2, W5 分别为坡面以下 5cm 处自坡脚至坡顶不同位置,同一深度的三处监测点, W3, W4, W5 为坡顶处同一位置、不同深度三处监测点,水分测量范围为 0~100%,温度测量范围为  $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ 。填筑完成并埋设好仪器后,将模型按 1:1 的坡比进行削坡处理,最终制成  $85 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$ (长×宽×高)的边坡模型,模型制作完成后的侧视图如图 1(b)所示。

本文试验方案如表 2 所示,在制样过程中,控制边坡模型的干密度为  $1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,坡比为

1 : 1. 根据初始含水率的不同, 分别制作初始含水率为 20%, 30%, 40% 的三种边坡模型, 令其编号为 S1, S2, S3.

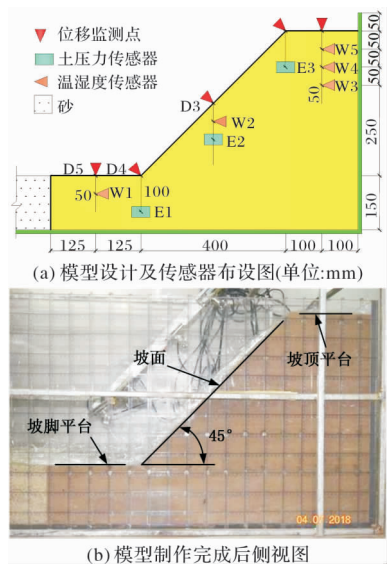


图 1 边坡模型图

Fig. 1 Slope model diagram

表 2 试验方案

Tab. 2 Pilot programme

试验 编号	干密度 /(g · cm <sup>-3</sup> )	坡比	含水率 /%	冻融循 环次数
S1	1.53	1 : 1	20	5
S2			30	
S3			40	

1.2 试验方法

模型试验利用自制的多功能模型环境箱完成, 模型环境箱采用空气循环系统以达到制冷制热效果, 温度控制精度为±0.1℃. 为了防止冻融过程中外界水分补给及边坡自身水分蒸发损失, 将多层保鲜膜覆于边坡表面. 将三种不同初始含水率的模型置于环境箱中, 对边坡侧壁以及底部进行保温处理, 规避环境箱温度对边坡侧壁及底部的影响. 参考前人相关文献<sup>[15]</sup>, 采用-10℃、-20℃和30℃三种环境温度. 整个过程共分为首次降温阶段(降温阶段Ⅰ)、二次降温阶段(降温阶段Ⅱ)、升温阶段. 首先将温度以1℃/min的降温速度降至-10℃温度, 待边坡变形稳定后, 以同样的降温速度将环境温度降至-20℃, 待土体冻结稳定完成后, 以3℃/min的升温速度将环境温度升至30℃, 融化24h, 此为一次冻融完成, 记为FT1. 边坡稳定标准采用土工试验方法中的无荷膨胀试验标准, 即2h内变形不超过0.01mm<sup>[16]</sup>. 本试验共进行了5次冻融循环, 在试验过程中, 仪器每五分钟记录一次数据.

1.3 试验结果

图2、图3分别为冻融循环五次后, 不同初始含水率的膨胀土边坡模型坡面以及侧面裂隙变化情况. 膨胀土由于其膨胀性, 在冻融循环下, 开裂现象较为明显. 随着冻融循环次数的增加, 边坡表面破碎化程度增大. 经过五次冻融循环后, 三组边坡的裂缝分布均出现层次网络结构, 由直线向多边形不断延伸发展, 且发展方向不规则. 初始含水率为20%和30%的膨胀土边坡, 坡面裂缝较为明显, 大裂缝宽度均匀, 同时周边分布很多小裂缝, 构成网状结构; 初始含水率为40%的边坡坡面未见宽度较大的裂缝. 沿深度方向上, 初始含水率为20%的边坡侧面裂隙最大深度达9.2cm, 初始含水率为30%的边坡侧面裂隙最大深度达7.2cm, 而初始含水率为40%的边坡侧面有细微裂隙, 未见较宽主裂隙. 由此可见, 初始含水率越低, 坡面裂隙发育越明显, 侧面裂隙发展深度越深.

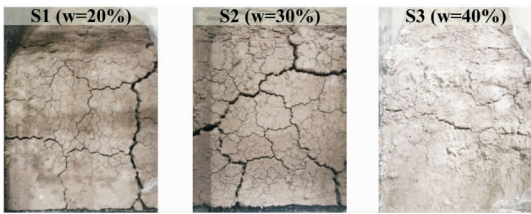


图 2 冻融五次后初始含水率为 20%、30% 和 40% 的土体裂隙变化情况

Fig. 2 Changes in soil fractures with initial moisture content of 20%, 30% and 40% after five freeze-thaw cycles

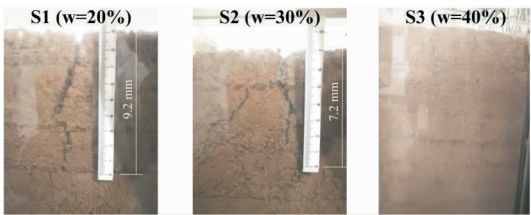


图 3 冻融五次后初始含水率为 20%、30% 和 40% 的土体侧面裂隙情况

Fig. 3 Lateral cracking of soil with initial moisture content of 20%, 30% and 40% after five freeze-thaw cycles

坡体温度、含水率变化规律分别如图4、图5所示, 各监测点温度与含水率随着外界温度降低而不断下降, 随着外界温度的回升而上升. 首次冻融过程中, 模型S1, S2, S3在坡面下5cm处W1, W2, W5三个侧点的温度变化范围分为-19.8~25.6℃, -18.0~24.1℃, -19.4~19.0℃; 含水率变化范围为8.6%~30.2%, 16.2%~33.5%, 13.1%~45.5%. 随着冻融次数的增加, 三种不同初始含水率的边坡温度以及含水率随着外界温度的变化呈现周期性变化, 且变化幅度相近.

图 6 是冻融循环下不同初始含水率膨胀土边坡模型浅层土压力变化曲线。由于传感器设备问题,部分数据丢失。在首次冻融过程中,各监测点土压力值随着外界温度降低而不断增大,随着外界温度的回升而减小,模型 S2 的 E3 处略有所不同。在降温阶段,模型 S1、S2、S3 在坡面下 10 cm 处 E1、E2、E3 三个侧点的土压力可低至  $-12.80$  kPa、 $-14.00$  kPa、 $-7.90$  kPa;升温阶段,模型 S1、S2、S3 土压力值分别升至  $23.23$  kPa、 $29.90$  kPa、 $23.96$  kPa,土压力随外界环境温度的变化呈现周期性变化,不同位置的土压力的变化幅度不同,不同初始含水率边坡同一位置的土压力也呈现不同的变化规律。

不同初始含水率膨胀土边坡坡面位移变化曲线如图 7 所示。在首次冻融过程中, S1, S2, S3 位移变化量最大值可达  $8.73$  mm,  $12.35$  mm,  $18.77$  mm, 膨胀土边坡位移随着温度的降低而下降,随着温度的增大而升高。但在后续的冻融循环过程中,初始含水率为 40% 的膨胀土边坡呈现相反的规律。由此可见,初始含水率为 20% 和 30% 的膨胀土边坡内部土体在冻融过程中表现出“冻缩融胀”现象,初始含水率 20% 时最为明显;初始含水率为 40% 的膨胀土边坡内部土体表现出“冻胀融缩”现象,边坡整体向临空面发展变形。

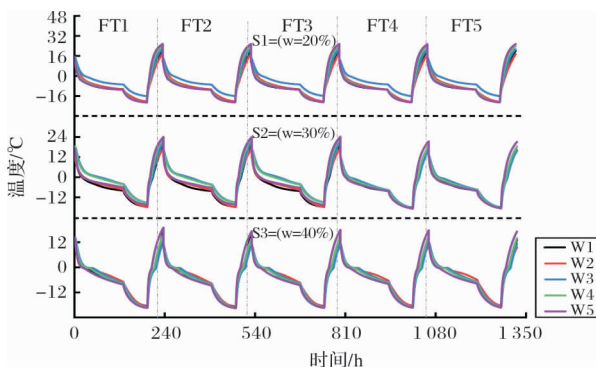


图 4 坡体温度变化曲线

Fig. 4 Slope temperature variation curve

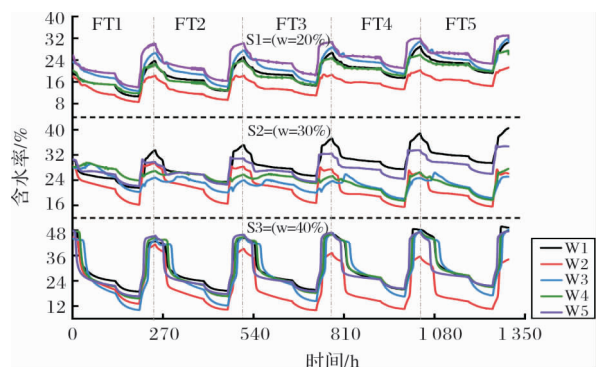


图 5 坡体含水率变化曲线

Fig. 5 Slope water content variation curve

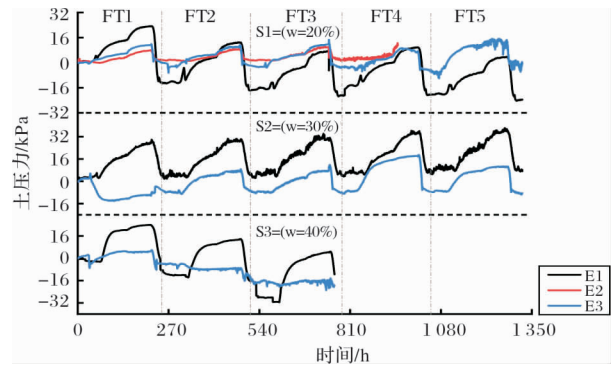


图 6 坡体土压力变化曲线

Fig. 6 Slope soil pressure variation curve

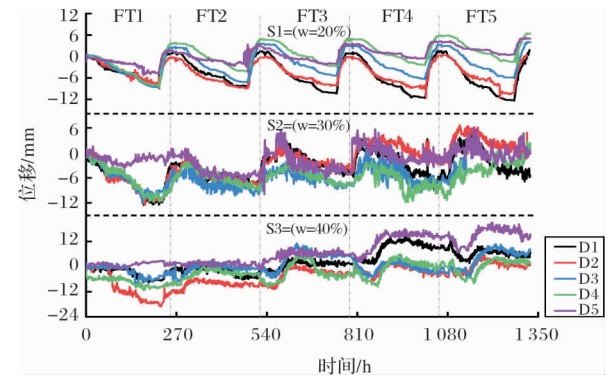


图 7 坡面位移变化曲线

Fig. 7 Slope displacement variation curve

## 2 冻融循环下膨胀土边坡响应特征分析

### 2.1 坡体温度变化规律

为了进一步研究单周期土体温度变化趋势,选取初始含水率为 20% 的膨胀土边坡首次冻融时的温度变化进行分析。坡顶处同一位置、不同深度 W3、W4、W5 三处监测点温度变化曲线如图 8 所示。W3、W4、W5 三处在冻结稳定后的温度分别为  $-16.1^{\circ}\text{C}$ 、 $-19.9^{\circ}\text{C}$ 、 $-19.8^{\circ}\text{C}$ ,待边坡融化稳定后的温度分别为  $21.7^{\circ}\text{C}$ 、 $24.0^{\circ}\text{C}$ 、 $25.6^{\circ}\text{C}$ ,其温度变化幅度为  $37.8^{\circ}\text{C}$ 、 $43.9^{\circ}\text{C}$ 、 $45.4^{\circ}\text{C}$ 。试验结果表明:随着深度的增加,在坡顶同一位置不同深度处的温度变化幅度呈减小趋势。主要由于温度从边坡表层向下传导时,会发生能量损耗,从而导致土体内部温度的波动幅值随着深度的增加而逐渐减小;并且土体的内部温度传递是一个传导过程,温度变化随着深度的增加也具有一定的滞后性<sup>[17]</sup>。

坡面以下 5 cm 处同一深度、不同位置 W1、W2、W5 三处监测点的温度曲线如图 9 所示,当边坡在  $-10^{\circ}\text{C}$  及  $-20^{\circ}\text{C}$  环境温度下变形稳定后,各测点温度基本趋于一致。

对于初始含水率为 30% 及 40% 的膨胀边坡模



型, 与以上初始含水率为 20% 的膨胀土边坡呈现相同规律。

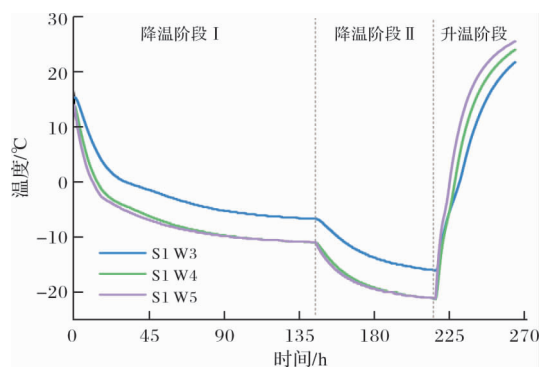


图 8 坡顶不同深度温度变化曲线

Fig. 8 Temperature variation curves at different depths at the top of the slope

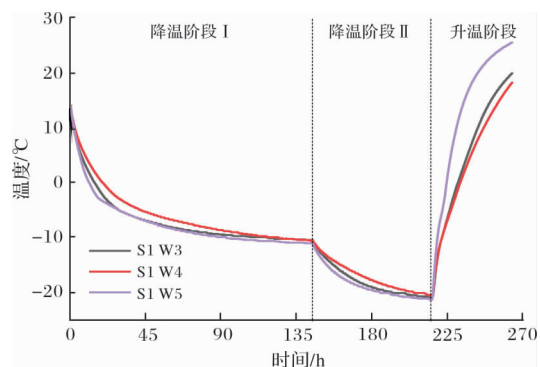


图 9 沿坡面同一深度不同位置温度变化曲线

Fig. 9 Temperature variation curves at different locations along the same depth of slope

## 2.2 含水率及水分迁移规律

对于单次冻融, 边坡内部含水率变化过程主要分为三个阶段: 冻结阶段、稳定阶段和融化阶段。如图 6 所示, 当土体在  $-10^{\circ}\text{C}$  的环境温度下冻结时, 土体含水率曲线急剧下降, 后趋于缓慢, 当环境温度降至  $20^{\circ}\text{C}$  继续冻结时, 土体含水率继续下降后趋于平缓, 当环境温度升高时, 土体内部含水率分两次抬高。在冻融过程中, W3、W4、W5 三处含水率均呈现出  $W5 > W3 > W4$  现象。由 W3、W4、W5 三个位置的含水率变化, 可知, 随着深度的增加, 边坡土体会出现明显的水分迁移现象, 且相较于边坡表层土体, 坡体内部含水率较低。

以初始含水率为 20% 的膨胀土边坡模型在 221 h 与 265 h 时的温度监测数据作为边坡模型冻结稳定状态及融化稳定状态的温度, 通过专业插值软件利用克里格插值法绘制等温线图如图 10 所示, 可以明显看出边坡模型在冻结状态下以及融化状态下的内部温度场分布状况, 越接近坡体表面, 等温线越密集, 温度梯度越大, 这一现象与上文温度变

化分析结果一致。

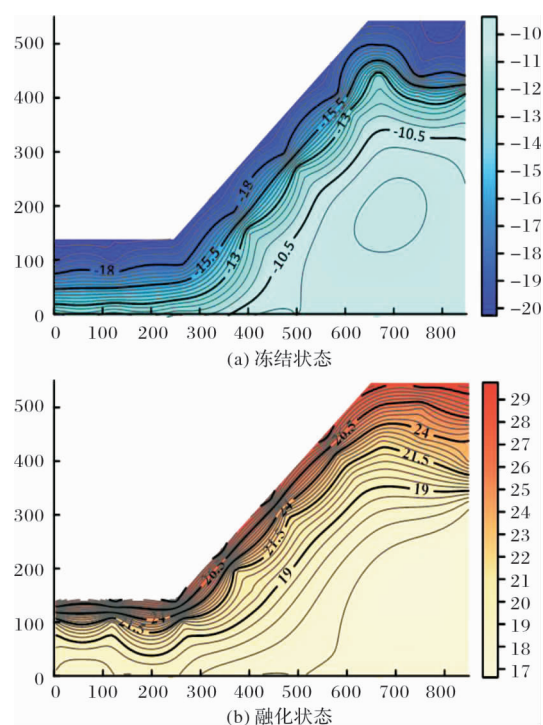


图 10 边坡内部温度场分布图

Fig. 10 Temperature field distribution inside the slope

土体温度变化是冻结融化发展的基本原因, 也是水分迁移的主要驱动力<sup>[19]</sup>。温度的变化会影响土壤颗粒间的相互作用以及孔隙结构, 从而引起土壤水力传导度的动态变化。在冻结阶段, 土体表面温度最先下降, 并向土体内部逐渐传递, 造成土体内部温度逐渐降低, 而未冻土中的毛细孔隙水首先在吸力作用下向温度较低的土体表面迁移, 从而导致土体内部含水率不断下降。当边坡内部温度接近冻结温度时, 土体中的含水率以及内部温度的下降速度放缓, 这是由于土体中的水由液态水转变为固态冰发生相变时, 未冻水逐渐减少, 并且在此过程中也会释放一定热量, 从而影响土体内部温度的变化, 对含水量变化也产生一定影响。当边坡内部温度降至冻结温度以下时, 土体内部逐渐形成冻结锋面, 土体中的未冻水也不断向冻结锋面迁移, 导致冻结锋面以下土体含水率继续下降。在融化阶段, 环境温度回升时, 坡体内部温度也持续回升, 土体颗粒间的粘结强度降低, 土壤持水能力下降<sup>[20]</sup>, 土体含水率不断增加。

随着冻融次数的增加, 膨胀土边坡模型中五个监测点的含水率变化逐渐趋于稳定。主要由于土颗粒的均一化导致土体孔隙越来越小, 并且土颗粒和孔隙大小变得越来越稳定, 水分迁移量减小, 含水量的周期性变化波幅也越小并趋于稳定<sup>[21]</sup>。

2.3 土压力变化规律

通过图 11 可知,在 $-10^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下降温冻结时,土体的土压力先增大后趋于平缓,当环境温度由 $-10^{\circ}\text{C}$ 降至 $-20^{\circ}\text{C}$ 冻结时,土压力继续增大后趋于平缓;当环境温度升至 $30^{\circ}\text{C}$ 土坡融化时,土压力急剧下降. E1, E2, E3 三处监测点的土压力均表现出这同一变化趋势. 此外,三处土压力 $E1>E3>E2$ ,由此可见,在单次冻融循环中,最大压应力均出现在边坡底部,并且在边坡融化阶段,随着温度的升高,拉应力区不断增加;此外, E1 处土压力变化幅度最明显,降温时增至 23.23 kPa,升温后降低 36.03 kPa,在升温与降温过程中,坡底的土压力变化幅度明显高于坡中、坡顶变化幅度.

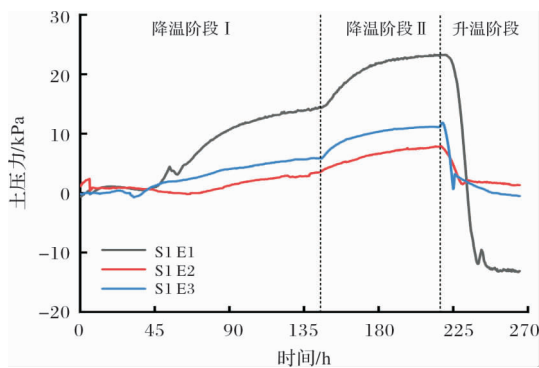


图 11 首次冻融土压力变化曲线图

Fig. 11 First freeze-thaw soil pressure variation plot

冻融循环过程中,膨胀土的土压力大小与孔隙水压力密切相关. 膨胀土边坡的孔隙水压力变化受温度、冻结速率、冻融循环以及土质的影响. 冻结过程中,孔隙水压力不断下降,土体吸力不断增加,水分从未冻区向冻结区迁移,在自重作用下坡底变化更明显,水分越多,析冰量越多,伴随冰晶的生长,土颗粒的团聚现象越来越明显,对土颗粒的挤压作用越强,土压力不断增加. 而融化过程中,由于边坡融化后浅层水分不断增加,使得孔隙水压力不断增大,水膜厚度增大,颗粒有效接触面积减小,部分土体抗剪强度降低,形成塑性变形区,拉应力不断增加,土压力相对减小<sup>[1]</sup>.

随着冻融循环次数的增加,每次冻融结束后,土压力变化量逐渐减小(图 7). 多次的冻融循环破坏了土壤原有的多孔特征,改变了土壤的内部骨架,较大的削弱了粘聚力与内摩擦角,但随着冻融循环次数的增加<sup>[22]</sup>,土骨架与土颗粒间的排列越来越稳定,土压力值趋于稳定,冻融作用改变了土壤颗粒间的组合和排列,进而改变了土壤的力学性

质<sup>[23]</sup>,与张英<sup>[24]</sup>等试验结果一致.

3 初始含水率对膨胀土边坡稳定性的影响

3.1 初始含水率对坡体温度传递的影响

不同初始含水率的膨胀土边坡温度相关变化量均值如表 3 所示. 边坡初始含水率为 20%时,温度变化幅度最大,降温幅度与升温幅度分别高达 $31.80^{\circ}\text{C}$ 、 $41.72^{\circ}\text{C}$ ;初始含水率为 30%时,次之,分别为 $30.93^{\circ}\text{C}$ 、 $37.17^{\circ}\text{C}$ ;初始含水率为 40%时,温度变化幅度最小,为 $28.87^{\circ}\text{C}$ 、 $31.43^{\circ}\text{C}$ ,即无论降温阶段还是升温阶段,随着边坡初始含水率的增加,温度变化幅度减小;并且通过对比不同初始含水率膨胀土边坡模型同一监测位置的温度变化,可知环境温度由 $-20^{\circ}\text{C}$ 升至 $30^{\circ}\text{C}$ 时,初始含水率为 20%的边坡土体温度在 213.39 h 时最先升温,且温度回升速率最高,为 $0.882^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,由此可见,初始含水率越低的坡体,温度最先回升,并且回升的速率最快. 产生这种现象的原因,主要是由于热量损耗会随着土壤含水量的增加而增加,从而导致边坡初始含水量越低温度变化幅度变化越大,且变化越快<sup>[25]</sup>.

表 3 不同初始含水率的温度变化量均值

Tab. 3 Mean values of temperature variation for different initial moisture contents

温度变化量均值	初始含水率		
	20%	30%	40%
降温幅度/ $^{\circ}\text{C}$	31.80	30.93	28.87
升温幅度/ $^{\circ}\text{C}$	41.72	37.17	31.43
降温速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$	0.221	0.288	0.218
升温速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$	0.882	0.778	0.535
升温时间点/h	213.390	214.937	214.524

3.2 初始含水率对水分迁移以及冻深发展过程的影响

从图 4 和图 5 可知,边坡坡体温度与含水率变化趋势一致,都随着外界温度的变化呈现相似的周期性规律变化;对比不同初始含水率的膨胀土边坡,土体中的含水率与温度也都呈现相同的变化趋势. 由此可见,受外界环境温度的影响,土体水分的运动与土体热量的传输变化是一个相互作用的过程. 当环境温度改变时,土体温度最先发生变化,含水率随之变化. 此外,以首次冻融 W2 处监测点为例,经过计算,在冻结阶段, S1、S2、S3 模型

W2 处含水率下降幅度分别为 9.4%、12.2%、31.4%，在融化阶段，S1、S2、S3 模型 W2 处含水率上升幅度分别为 9.7%、13.3%、28.1%，即对于含水率变化幅度， $S3 > S2 > S1$ ，其他监测点以及后续循环都具备相同规律，即对于单次冻融，无论是冻结阶段还是融化阶段，边坡初始含水率越低，含水率的变化幅度越小，主要由于试验封闭进行，无水分补充，每次冻融循环结束，不同土层含水量均匀，冻融后土体内含水率更接近初始含水率<sup>[19]</sup>。

首次冻融前，每组模型沿深度方向的含水率变化不大，各监测点平均值分别为 23.1%、29.0%、46.5%，说明模型制备时，初始含水率控制较好。每次冻融后，三组模型含水率均有不同程度的变化，如图 12 所示，首次冻融循环结束后，土体的含水率变化量最大，S1 增大 3.4%，S2、S3 分别减小 1.9%、2.0%，经历两次冻融循环后，随着冻融循环次数的增加，含水率变化量逐渐趋于稳定。五次循环结束后，模型 S1 整体变化量最大，S1 各测点平均变化量为 7.6%，而 S2、S3 各测点平均变化量分别为 2.6%、1.5%。由此可知，初始含水率越低的膨胀土边坡，冻融结束后，含水率变化量越大。主要由于初始含水率越小，膨胀土的吸水能力越强，与王理想等<sup>[26]</sup>试验现象一致。

随着冻融循环次数的增加，三组模型含水率整体存在上升趋势，不利于边坡的稳定性<sup>[27]</sup>。并且在坡顶沿深度方向上，膨胀土边坡含水率均呈现出上高下低的分布状态，与前文所述水分迁移现象相一致。

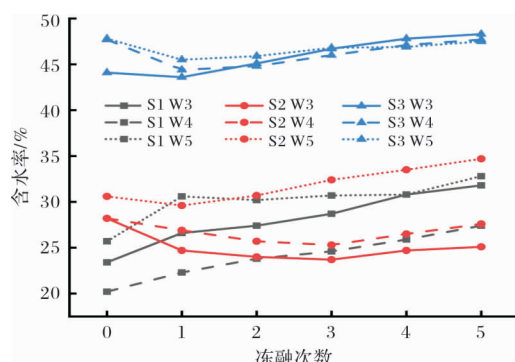


图 12 每次冻融后含水率变化曲线

Fig. 12 Change in water content after each freeze-thaw period

试验土体的冻结温度为  $-0.2^{\circ}\text{C}$ ，利用冻结温度等温线深度代替冻结锋面，计算冻结深度<sup>[28]</sup>。多次冻融下，距坡顶 15 cm 范围内的冻深发展线如图 13 所示。从图 13(a) 中可以看出，冻结阶段，模型 S1 在  $-5 \sim -10$  cm 间的冻结速率相较于  $-10 \sim -15$  cm 的冻结速率更快，模型 S2、S3 反

之。初始含水率对冻深发展起着关键性作用，高含水率的膨胀土边坡能够获得较多的孔隙水以供冻结，但低含水率又限制了温度引起的孔隙水运动<sup>[29]</sup>。初始含水率较高时，坡体内部向坡体表面迁移的水分较多，内部含水率下降，致使边坡表面水分多于坡体内部水分，冻结时所需的热量较多，冻结速度放缓；并且土壤水分扩散能力以及导热能力随土壤温度的降低不断降低，但随着深度的增加，不断增强，到达一定深度稳定冻结时，才减缓并趋于稳定，从而边坡表层的冻结速率与冻结锋面的位置以及向下迁移的速率相关，导致不同初始含水率边坡，冻结速率呈现不同的变化状态<sup>[20]</sup>。且随着深度的增加，边坡的初始含水率越高，到达冻结稳定所需要的时间越长。当环境温度升至  $30^{\circ}\text{C}$  时，坡体开始进入融化阶段，从图 13(b) 中可以看出，初始含水量越小，融化速率越快。边坡平均冻结速率为  $0.75 \text{ cm/h}$ ，平均融化速率为  $1.19 \text{ cm/h}$ ，融化速率明显大于冻结速率，主要由于在融化阶段，土体表面逐渐向下融化的同时，土体内部也自下而上逐渐融化，致使融化速率大于冻结速率<sup>[19]</sup>。整个冻融过程呈现单向冻结，双向融化状态，即冻结阶段，由土体表层向深层逐渐冻结；融化阶段，坡面表层以及坡体深层土体最先融化，中间土层随后融化，直至整个冻结区域完全融化贯通，与季节性冻土区的实际冻融情况相一致。

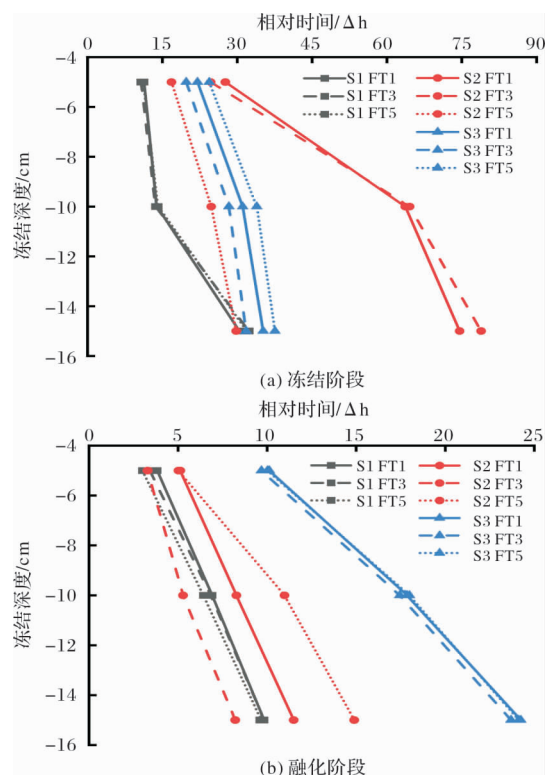


图 13 冻深发展线

Fig. 13 Frozen depth development line



### 3.3 初始含水率对膨胀土边坡压力变化的影响

不同初始含水率膨胀土边坡的土压力呈现出不同变化特征,如图 6 所示, S3 模型土压力变化幅度最大, 经过计算, 首次冻融最大变化幅度为 36.08 kPa, 而 S1、S2 分别为 31.03 kPa、35.80 kPa, 即边坡初始含水率越高, 土压力变化幅度相对越大, 并且从图中可以看出, 随着冻融循环次数的增加, S1、S3 模型土压力值继续逐步下降, S2 模型土压力值逐步增加. 首次冻融对土压力的影响最大, 土压力变化量也最大, 随着冻融循环次数的增加, 土压力值变化量逐渐减小, 土压力值逐渐趋于稳定, 土体状态由不稳定状态向动态稳定状态发展.

在冻结期间, 孔隙中产生的冰晶会破坏土壤颗粒间的内部连接, 从而削弱了土体的结构<sup>[22]</sup>, 并且随着含水量的增加, 对土颗粒间的相互作用影响越大<sup>[30]</sup>. 经过多次冻融, 初始含水率为 20% 和 40% 的边坡土压力值逐步下降, 而 30% 含水率的边坡整体有上升趋势. 造成这一现象主要与土体的孔隙体积、水的冻结融化以及膨胀土颗粒的收缩膨胀有关. 不同初始含水率的膨胀土冻融体积变化状态示意图如图 14 所示, 土压力的增大与减小取决于土体单位面积上的应力大小, 与土体内孔隙密切相关. 在冻结阶段, 初始含水率为 20% 的膨胀土边坡, 由于水冻结成冰, 体积膨胀, 土体内含水量下降, 土颗粒失水收缩, 总体上孔隙面积减小, 土颗粒受到挤压, 土压力增大<sup>[11]</sup>. 但由于含水率较低, 融化时, 冰融化成水增大的孔隙大于土颗粒吸水膨胀填充的孔隙量. 土颗粒间的相互作用减小, 整个过程中, 土体颗粒分布重排列, 土压力有整体下降的发展趋势; 对于初始含水率为 40% 的膨胀土边坡, 土体含水率较大, 水冻结成冰, 冰晶生长较多, 对土骨架的影响较大, 对土颗粒的挤压作用越明显, 土颗粒团聚现象越明显, 冻融结束后, 土压力发展趋势也整体下降; 初始含水率为 30% 的膨胀土边坡在冻融过程中, 由于含水率相对来说较为适中, 土压力变化过程中需要整体考虑的因素较多, 主要取决于融化过程土颗粒吸水膨胀量可否填补冻结过程导致水相变体积收缩量, 由于冻结时土体的收缩导致孔隙减小以及融化后的土颗粒体积膨胀<sup>[11]</sup>, 使得土颗粒间的作用力明显增大, 导致随着冻融循环的增加, 土压力整体有上升趋势, 其中, E3 监测点处首次冻融与后续冻融中变化规律的差异, 或受水分迁移以及土体自重应力影响有关.

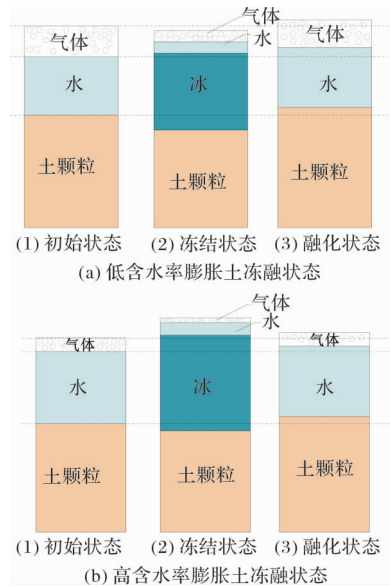


图 14 不同初始含水率膨胀土冻融体积变化示意图

Fig. 14 Schematic diagram of freeze-thaw volume variation of expansive soils with different initial moisture content

### 3.4 初始含水率对边坡冻胀率的影响

冻胀率是综合反映土体冻胀效果和冻胀能力的特性指标, 冻胀率计算采用公式(1), 为

$$K_d = (h/H) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $h$  为冻胀量;  $H$  为冻结深度;  $K_d$  为土的冻胀率(%).

结合试验监测数据, 当第一次冻融循环冻深达到 5 cm 时, 边坡浅层冻胀率如表 4 所示.

表 4 边坡冻胀率

Tab. 4 Slope frost inflation rate

边坡位置	初始含水率		
	20%	30%	40%
坡顶/%	7.9	31.5	26.5
坡中/%	5.3	33.0	13.1
坡脚/%	3.5	4.8	11.5

对比同一初始含水率不同位置的冻胀率大小, 坡中与坡顶的冻胀率较高, 坡脚的冻胀率较小, 主要由于坡顶、坡中受环境温度的影响较大, 水分迁移较多. 而对于不同初始含水率的膨胀土边坡, 初始含水率 30% 与 40% 的冻胀率相对较高, 而初始含水率为 20% 的边坡冻胀率较低, 即初始含水率越高, 冻胀率越大. 主要由于当土体含水率较高时, 析冰量相对较大, 土颗粒的位移变化较大<sup>[12]</sup>; 而 20% 初始含水率含水量相对较少, 冻胀率小, 导致位移变化量偏小; 初始含水率为 40% 的膨胀土边坡坡顶及坡中部位相对于 30% 的边坡冻胀率略低, 或受冻结锋面向深处不断迁移以及冻胀力的大小有关, 已有研究证明<sup>[31]</sup>, 成冰的多少不仅取



决于初始含水率的大小,也受水分运动状况的影响,当未冻水含水量较高时,土体冻结较慢,冻结锋面所需水分较多,水分向坡体内部迁移较多,致使坡面的水分丧失较多;其次土体冻胀力随着含水率的增加而增大,但达到某一极值时,冻胀力区域稳定并有一定的减少趋势<sup>[32]</sup>,从而影响冻胀量的大小,水分重分布是造成土体冻胀的根本<sup>[33]</sup>。此外,冻胀量也受冻结速度的影响,初始含水率不同,冻结速率不同,从而导致冻胀量差异。位移的发展趋势与前文分析的冻深发展速率以及土压力的变化趋势相互印证。

含水率是影响膨胀土冻胀量和冻胀力大小的决定性因素。冻结时,水分向冻结锋面迁移,导致浅层坡面某处含水量增加,在负温下土体发生冻胀。一般情况下,随着含水率的增加,冻胀量也增加<sup>[13]</sup>。但水分迁移量是有限的,并非含水量越大冻胀量越大,当土颗粒间的孔隙较小时,不利于水分迁移,对冻胀量也有一定影响<sup>[34]</sup>,冻融过程中,由于水分相变以及膨胀土吸水膨胀,失水收缩的特性,膨胀土边坡极易产生不均匀冻胀变形,冻胀作用通过改变土壤颗粒间的缔结和排列,从而改变了土壤的力学性质,坡面在不均匀的冻胀变形和冻胀力的作用下,拉应力区域逐渐变大,导致土体位移以及裂缝的产生<sup>[35]</sup>,进而影响边坡稳定性。

## 4 结论

通过建立不同初始含水率的膨胀土边坡模型试验,对边坡土体坡体温度、含水率、土压力、位移进行监测,研究冻融循环下,膨胀土边坡稳定性以及初始含水率对膨胀土边坡模型的影响。通过对试验结果进行边坡稳定性机理分析研究,总结规律变化,得出以下主要结论:

(1)在多次冻融循环过程中,膨胀土边坡坡体温度、含水率、土压力、位移都呈现周期性变化,首次冻融对边坡土体的影响最大,随着冻融次数的增加,土骨架与土颗粒间的排列越来越稳定,各指标变化量逐渐减小并趋于稳定,土体状态由不稳定状态向动态稳定状态发展;

(2)对于同一初始含水率的膨胀土边坡,在冻结过程中,边坡温度最先下降,含水率随之发生变化出现水分迁移或相变现象,继而导致土体内部土压力及位移发生相应变化。当环境温度升高后,变化过程同样适用。边坡在整个冻融过程中呈现单向冻结,双向融化现象,且融化速率大于冻结速率。随着深度的增加,温度的变化幅度逐渐减小,此

外,坡顶受温度影响较大;冻结过程中,最大压应力大多出现在边坡底部;

(3)对于不同初始含水率的膨胀土边坡,边坡的初始含水率越高,到达冻结稳定所需要的时间越长,土颗粒的团聚现象越明显,土压力变化幅度越大;在冻融过程中,由于初始含水率的不同,边坡土体出现“冻胀融缩”或“冻缩融胀”两种现象,但边坡整体向临空面发展;土体的冻胀会导致坡面浅层产生裂隙,并出现位移变化;随着初始含水率的增大,冻胀率越大,控制初始含水率,能够有效的控制冻胀量的发展。

## 参考文献 References

- [1] 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.
- [2] 杨俊,童磊,张国栋,等.初始含水率对风化砂改良膨胀土胀力影响[J].河南理工大学学报(自然科学版),2014,33(3):382-387.  
YANG Jun, TONG Lei, ZHANG Guodong, et al. Research on the influence of initial moisture content on expansive force of weathered sand improved expansive soil[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science Edition), 2014, 33(3): 382-387.
- [3] 杨和平,郑鹏.南友路膨胀土堑坡滑坍的地质调查与思考[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2004(1):14-19.  
YANG Heping, ZHENG Peng. Geological investigation and reflection on the expansive soil in Nanning-Youyiguan highway[J]. Journal of Hunan Light Industry College(Natural Science Edition), 2004(1): 14-19.
- [4] 汪明元,杨洪,徐晗.膨胀土特性对边坡稳定性的影响极其模拟方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(11):203-208.  
WANG Mingyuan, YANG Hong, XU Han. Effect of expansive soil's behavior on the stability of slope and the analysis method[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences) 2008, 35(11): 203-208.
- [5] 周志军,吕大伟,宋伟,等.基于含水率和温度变化的冻融黄土性能试验[J].中国公路学报,2013,26(3):44-49.  
ZHOU Zhijun, LU Dawei, SONG Wei, et al. Experiment on loess characteristics after freeze-thaw circle

- based on changes of moisture content and temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 44-49.
- [6] 崔广芹, 尚志成, 秦迪. 基于冻融循环试验的季节性冻土区边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(8): 102-105.
- CUI Guangqin, SHANG Zhicheng, QIN Di. Stability analysis of seasonal frozen soil slope under cyclic freezing and thawing test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(8): 102-105.
- [7] 卢宁, Likos William J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- LU Ning, Likos William J. Unsaturated soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press. 2012.
- [8] EIGENBROD K D, KNUTSSON S, SHENG D. Pore-water pressures in freezing and thawing fine-grained soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10(2): 77-92.
- [9] 鲜丹, 杨仲康. 不同含水率条件下非饱和边坡的稳定性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 123-129.
- XIAN Dan, YANG Zhongkang. Stability of unsaturated slope under different initial water contents[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 123-129.
- [10] 程永春, 葛琪, 何锋. 季冻区土质边坡滑动界面临界深度的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1042-1046.
- CHENG Yongchun, GE Qi, HE Feng. Experimental research on critical depth of slip surface of soil slope in seasonal frozen area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1042-1046.
- [11] 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, 2018, 37(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, 2018, 37(S2): 167-174.
- [12] 徐丽丽, 刘丽佳, 徐昭巍, 等. 季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 216-220.
- XU Lili, LIU Lijia, XU Zhaowei, et al. Integrated protection technology for expansive soil slopes in seasonally frozen zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 216-220.
- [13] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL237-1999 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1980.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification of soil test: SL237-1999 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 1980.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB50112-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Technical code for buildings in expansive soil regions: GB50112-2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [15] 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 and Water Engineering, 2016, 27(5): 189-193.
- [16] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123-2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [17] 肖东辉, 马巍, 赵淑萍, 等. 冻融与荷载作用下土体内部孔隙水压力、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.
- [18] 靳婉莹. 季冻区渠道土质边坡冻融条件下水热耦合分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- JIN Wanying. Coupled analysis of water and heat under freezing and thawing conditions of soil slope in seasonal frozen area slope in seasonal frozen area [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [19] 徐昊. 考虑土中水分迁移的路堑边坡冻融失稳数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- XU Hao. Numerical analysis of cutting slope stability with moisture migration during freeze-thaw process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [20] 马效松, 付强, 徐淑琴, 等. 不同冻融时期土壤水分运动参数特征分析及数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报: 2020, 28(4): 774-787.
- MA Xiaosong, FU Qiang, XU Shuqin, et al. Analysis and simulation of soil moisture movement parameters during different freezing-thawing periods[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(4): 774-787.
- [21] 张莹莹, 杨忠年, 时伟, 等. 冻融循环作用下膨胀土边坡稳定性模型试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(2): 257-266.

- ZHANG Yingying, YANG Zhounian, SHI Wei, et al. Model test study on the stability of expansive soil slope under freeze-thaw cycle[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(2): 257-266.
- [22] CHEN Yanlong, WU Peng, YU Qing, et al. Effects of freezing and thawing cycle on mechanical properties and stability of soft Rock Slope[J]. Advances in Materials and Engineering, 2017, 1-10.
- [23] GUO Ying, SHAN Wei. Monitoring and experiment on the effect of freeze-thaw on soil cutting slope stability[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1115-1121.
- [24] 张英, 祁慧, 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]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3597-3603.
- ZHANG Ying, BING Hui, YANG Chengsong. Influences 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.
- [25] HUA Zhong, XIU Fen Wang, BIN Zhang. Research on hydraulic soil slope frost heaving damage model test [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2156.
- [26] 王理想, 袁晓铭, 苏安双, 等. 非饱和分散性黏土多次冻融特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020: 1-8.
- WANG Lixiang, YUAN Xiaoming, SU An-shuang, et al. Experimental study on multiple freeze-thaw properties of unsaturated dispersive clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020: 1-8.
- [27] 罗强, 朱江江, 张瑞国, 等. 砂土边坡稳定性土工离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1252-1259.
- LUO Qiang, ZHU Jiangjiang, ZHANG Ruiguo et al. Geotechnical centrifugal model test on sandy soil slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1252-1259.
- [28] 汪恩良, 孙景路, 高占坤, 等. 季节冻结深度自动监测技术试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 87-89.
- WANG Enliang, SUN Jinglu, GAO Zhankun, et al. Automatic monitoring technology for depth of seasonal freezing[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 87-89.
- [29] HAN S J, GOODINGS D J. Practical model of frost heave in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 92-101.
- [30] 翟聚云, 卫国祥, 郝晓, 等. 温度影响下膨胀土强度的试验研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 629-633.
- ZHAI Juyun, WEI Guoxiang, HAO Xiao et al. Experimental study of the strength of expansive soil changing with temperature [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 629-633.
- [31] 张国光. 多年冻土区浅埋建筑物水平冻胀力的理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- ZHANG Guoguang Theoretical study on horizontal frost heaving force of shallow buildings in permafrost regions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [32] 徐学祖. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- XU Xuezu. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [33] 刘凤波. 季冻区渠基土冻胀及边坡冻融试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- LIU Fengbo. Study on frost heaving of canal base soil and freezing and thawing of canal slope in seasonal frozen region [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [34] 赵安平, 王清, 陈慧娥, 等. 基于季节冻土微观结构特征的神经网络冻胀率仿真预测[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 638-644.
- ZHAO Anping, WANG Qing, CHENG Huie, et al. Simulation and prediction model of frost heaving ratio of neural network based on microstructure characteristics of seasonal frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 638-644.
- [35] LU Y, LIU S H. Cracking in an expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2017, 9: 392-397.

(编辑 沈 波)