

原状土冻融过程中水分迁移试验研究

赵 刚, 陶夏新, 刘 兵

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 为了量化原状土中水分在冻融过程中的迁移, 试验采取在其他试验条件相同的条件下, 改变初始含水率或温度模式的方法, 研究了单个因素对水分迁移的影响。经冻结并融化到设定位置后, 从试验中观察到试样未融化部分存在有横向和竖向的裂缝现象、明显的冻融分界线、水分积聚层和融化锋面并不在同一个层面内、土中水的冻结温度各不相同、冻结后含冰不均匀现象等结果, 进而对冻融过程中进行温度场分析以及冻融前后含水率的变化分析, 用具体试验数据得出如下结论: 控制不同顶板温度时, 不同含水率的试样中各点处温度的变化趋势基本相同; 在顶板控温相同的情况下, 初始含水率大的试样, 水分迁移量大, 水分积聚多; 不同冻结温度和融化温度对试样中水分的迁移影响非常明显, 顶板冻结时温度越高, 水分积聚层位置处的含水率越大, 水分积聚越多等。

关键词: 水分迁移; 水分积聚; 温度场; 现象

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2009)12 - 1952 - 06

作者简介: 赵 刚(1970 -), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 从事土木工程研究。E-mail: zhaogang_2004@163.com。

Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process

ZHAO Gang, TAO Xia-xin, LIU Bing

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to quantify the studies on the water migration in undisturbed soil during the freezing and thawing process, under the same experiment conditions, the influence of single factor on water migration is studied by changing the only factor of the initial water content or temperature mode. After freezing and thawing of the pre-set position, the following phenomena are observed: the horizontal and vertical cracks in the unmelt portion, the obvious freezing and thawing boundary, the water accumulation layer and melting layer in different layers, different water freezing temperatures in the soil, and the unevenly distributed water accumulation and ice. Through the studies on the temperature fields during freezing and thawing process and the water contents before and after the freezing and thawing process and the test data, the conclusions are drawn as follows: when the top board temperature of the test case changes, the soil samples with different water contents have the same changing trend at various testing points; when the top board temperature of the test case keeps unchanged, the more the initial water content of the soil samples, the more the water migration and accumulation; the influence of the water migration is obvious under different freezing and thawing temperature modes, and the higher the freezing temperature of the top board of the test cases, the more the water content accumulation at the water accumulation layer.

Key words: water migration; water accumulation; temperature field; phenomenon

0 引 言

我国季节冻土分布广泛, 面积约 $513.7 \times 104 \text{ km}^2$, 约占全国陆地面积的 53.5%。由于许多地区冻结主要发生在地表 2~3 m 的范围内, 主要是非饱和土的冻融问题。在季节冻土区, 许多工程危害与冻融过程中土中水分的迁移有密切关系。作为一类具体的工程问题, 也是寒区常见冻害, 路基边坡的冻融失稳与土中水分的迁移有密切关系。冬季温度降低, 土中的水分向上迁移, 使上层土体中水分充分富集, 形成冰晶或

冰夹层。冬季路基边坡被雪覆盖, 进入春季, 坡面冻土由表及里逐渐融化, 冻结面逐步退向深处, 土中的水分(主要来源为土体中冰的融化和坡面上融化的积雪)逐渐向下渗透。冻结土层不透水, 土中渗透下来的水分在冻结面上积聚, 使冻结面上方的土体的含水率显著增大甚至达到饱和, 导致水分聚集处土体的抗剪强度及摩擦力下降。冻结面形成一斜面滑床, 在重力作用下有可能发生浅层滑塌破坏^[1-4]。

在东北地区正建和已经运营的公路中, 边坡防护采用浆砌混凝土块石和绿色植物植被护坡, 边坡修建完工时是稳定的, 但有些路段冬季随着土体冻胀使浆砌块石胀裂, 春季随着边坡冻土的融化, 边坡土体含水率增加, 土体强度逐渐减小, 多处边坡就出现失稳下滑现象, 特别是春季季节性冻土融化期。土体中水分在冻融过程中的迁移, 是边坡冻融失稳机理的一个核心问题, 以往的研究均不够深入, 发展的分析方法偏于粗糙, 难以定量地描述冻结面上的水分聚积。

本文研究的土体中水分在冻融过程中的迁移, 是 2007 年已申请黑龙江省科学技术计划项目“高等级公路路堑边坡冻融失稳机理分析和工程防治”课题的重要环节, 该项目计划包括土样试验、模型试验、数值分析和现场原位观测四个部分。为了研究冻融过程中土的水分迁移规律, 首先就要做室内冻融过程中土的水分迁移试验。室内试验是为模型试验和原位试验提供理论支持, 使模型和原位两个试验节约人力和物力; 为数值模拟提供必要参数支持, 使模拟更简便快捷准确; 使室内试验、模型试验、数值模拟和试验路段原位试验成为一个有机的整体。

由于冻土介质的特殊性和土中水分在其中运动的重要性, 冻土中水分运动的研究受到世界上许多国家的重视。已召开的七届国际冻土会议均涉及到这方面的内容, 美国公路研究部门及其他国家的类似组织也多次组织了有关专题会议, 联合国教科文组织专门开办过寒区水土问题讲习班等。除我国外, 目前开展这类研究的主要有俄罗斯、美国、加拿大和瑞典等十多个国家^[5]。

国内从上世纪 60 年代开始, 先后有东北水利科学研究院、长春水利科学研究所、哈尔滨工业大学土木工程系、北京建筑科学研究院及中国科学院兰州冰川冻土研究所等单位开展了冻土中的水相成分测试。进入 70 年代后, 铁路、交通、水利和林业部门的有关单位相继开展了一些现场观测。80 年代, 中国科学院兰州冰川冻土研究所开展了较系统的室内试验研究^[6]。

近 20 年来, 各相关学科的研究工作者从不同角度和研究目的出发, 对冻融过程中土中水、热、盐迁移问题进行了多方位研究, 在冻土水分迁移动力、实验研究及水分迁移数学模型等方面取得的重要成果。

实际观测证明了影响冻土中水分迁移的重要因素有: 地下水埋深的影响, 埋深越浅水分迁移量越大; 温度影响, 土中温度梯度越大水分迁移速度越快; 土质条件的影响, 土的颗粒组成、塑性及其状态是影响土水分迁移强度和冻胀大小的一个重要因素^[6-8]。

起始冻结时的温度随含水率增大而升高。含水率相同时, 冻结时的温度均随颗粒变细或孔隙溶液浓度增大而降低。同时, 含水率相同时, 冻土的融化温度

总是高于冻结温度, 并且经过数次冻融, 融化温度略有升高^[9]。土的起始冻结或融化温度影响土中的温度梯度^[10]。

为了使问题得到足够的简化, 根据我院土木工程低温实验室的仪器设备能力, 本次实验的主要目标设计为: 研究单向冻结模式, 不同温度梯度下、不同结构的土、不同含水率的粉质黏土中水分迁移发展、变化的规律, 和主要试验因素对土中水分迁移的影响。

1 试 验

1.1 采用的试验仪器

哈尔滨工业大学新建的土木工程低温试验室拥有先进的仪器设备, 为本试验提供了技术优势。具体试验仪器设备有:

(1) 冻融循环试验箱

实验所采用的冻融循环箱为 Xutemp 的 XT5405B 系列土工冻胀试验箱, 具有正弦、线性(包括恒温)规律的复合编程能力, 适用于 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内(冻)土的冻融循环试验等。

各温区的温度范围: 箱体 $-35^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$, 热源循环泵 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$, 冷源循环泵 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 。此试验箱的动态恒温控制系统, 整个量程范围内的温度精确控制, 箱体的温度最佳波动度达到 0.2°C , 底板和顶板的温度最佳波动度达到 0.1°C ; 数字显示设置温度和实际温度的设置、显示分辨率均为 0.1°C 。试验箱的三端(箱体、顶板、底板)温度不但可以通过控制显示面板设置、调控, 而且可以由随机附带的软件三端多参数设置来模拟正弦、直线、恒温等三种复杂的温度变化过程, 同时显示温度模拟曲线和实际运行温度曲线的对比结果。

试验箱同时装备了风冷和水冷冷却系统, 还具有先进的超温保护和温度传感异常保护及断电保护记忆等功能, 充分保证了试验工作的连续性和稳定性。

通过试验箱的观察窗口可以随时观测其内部的土样的变化、制冷系统的工作是否正常。

(2) 含水率测试仪

用烘干法测, 试验有烘箱和精确的电子天平。

(3) 温度测量仪

用标准的 Type-T 热电偶, 并用 Data Taker15 将其采集的数据记录, 其工作的温度范围($-200^{\circ}\text{C}\sim300^{\circ}\text{C}$)和测量精度(0.1°C)均足以满足该实验的精度要求。为研究温度对水分迁移的影响, 在冻融过程中, 根据不同的试验要求在每隔 2 cm 处测定温度值, 控制冰峰面的位置。

(4) 其它仪器

保温材料, 采用特种有机材料, 厚度根据具体需要定; 盛放试样的有机玻璃筒, 根据试验要求自制。

1.2 试验方案设计

温度梯度和初始含水率是影响土中水分在冻融过程中迁移的众多因素中最突出的两个因素^[11-13]。根据以上分析, 试验研究的重点设定如下: ①对相同含水率的土样, 采取不同温度梯度试验土中水分的迁移结果; ②设定相同温度梯度下, 对不同初始含水率的土样, 进行水分迁移试验; ③对初始含水率均匀的土样, 在土样完全冻结、再从上到下融化到设定位置后两个不同阶段, 分别测试土中含水率的变化; ④研究融化到设定位置后, 冻结面上水分聚集层的位置及其含水率。

试验条件具体设计如表 1 所示。

表 1 原状粉质黏土水分迁移试验的条件

Table 1 Test conditions for water migration in undisturbed soil samples

试验编号	顶板温度/℃		初始含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)
	冻结	融化		
1	-6	+6	26.03	1.54
2			24.69	1.50
3	-8	+8	26.03	1.54
4			31.30	1.45
5			25.38	1.57
6	-10	+10	23.22	1.59
7			23.60	1.59

注: 冻结前没有经过恒温过程, 起始温度为室温。冻结开始时, 顶板有个降温过程; 开始融化时, 顶板有个升温过程。底板和箱体温度在冻融过程中保持+1℃。

试验共选用了 7 个试样, 设置了 3 种温度模式, 进行了 6 种初始含水率的水分迁移试验。

1.3 试验方法及步骤

(1) 试样的制备

选用的原状土取自哈市某地地下 6 m 深层原状粉质黏土, 用钻孔法取样将土样制备成高 280 mm、直径 100 mm 的圆柱体土样。

(2) 具体冻融试验步骤

a) 安装试样, 保证试样只能单向冻结或融化, 且为封闭式补水条件。

b) 试验温度控制。冻结前需要恒温的试验, 调节箱体温度为+5℃, 恒温 8 h, 使试样内的温度达到均匀的+5℃。冻结和融化时, 冻融循环试验箱箱体控制温度调为+1℃, 以减少侧向散热; 底板温度也统一控制在+1℃, 保证试样只从顶端冻结或融化; 控制顶板的温度变化, 使得试样从上向下冻结或从上向下融化。冻结和融化时原状土试样具体控温如表 1 所示。

c) 冻结试验。在试验开始前, 在试样筒周围裹上保温材料。给试样顶端施加恒定不变的负温条件, 进行冻结, 并测试土样不同深度的温度。冻结到底后, 如需测试冻结后的含水率则停止试验, 取出分层测量含水率, 否则, 停止冻结继续进行融化试验。

d) 融化试验。冻结到底后, 调节顶板温度为所需恒定温度, 箱体和底板温度保持不变, 进行单向融化并测试土样不同深度处的温度, 待融化达到设定深度时, 停止融化, 取出分层测量含水率。

e) 数据采集。用 DataTaker615 每隔 1 min 自动采集一次各测点温度。

取出试样后, 把试样分割成 2 cm 厚的切片, 用烘干法测试含水率。

2 试验结果分析

考虑不同温度模式、不同含水率对冻融过程中水分迁移的影响, 对原状土进行了 7 组试样的试验, 获得了试验数据, 并对试验现象和试验数据进行详细的分析和讨论。

2.1 原状土试样的水分迁移试验

原状土试验分两组来完成, 第一组是在初始含水率相同的条件下研究温度模式对水分迁移的影响; 第二组是在温度模式相同的条件下研究初始含水率对水分迁移的影响。

(1) 裂缝现象

融化到设定深度后, 把试样从恒温箱里取出来。发现在融化面以下, 土柱周围密布许多小冰晶, 并且有横向和竖向裂缝, 横向裂缝稍多, 裂缝从上向下逐渐减少, 裂缝中填充着一层薄冰如图 1。



图 1 横向和竖向裂缝

Fig. 1 Horizontal and vertical cracks

经分析, 认为裂缝产生的原因是: 冻结期间的分凝冰形成冰夹层或冰条带, 当融化时冰相变为水故而形成裂缝。

冻融后, 把土柱切开展现, 试样上端土体成团块状, 并且沿深度方向团块由小变大, 团块之间强度很小, 稍加扰动就会裂开。产生这种现象的原因是: 冻融后, 在横向和竖向裂缝综合作用下, 原来为整体状的土体被裂缝“切割”成团块状。由于裂缝随深度方向减少, 所以团块随深度由小逐渐变大。经分析, 团块也是由冰条带切割作用形成的。

(2) 水分积聚现象

当土样从上至下融化到距试样顶端 8 cm 时, 取出

试样, 发现在距土柱上端 5 cm 处有明显的分界线, 如图 2 所示。把土柱从该处分开, 发现有聚集的水分, 即为水分积聚层, 如图 3 所示。

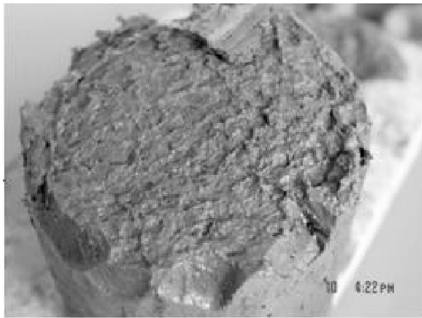


图 2 冻融后土柱表面的分界线

Fig. 2 Demarcation line of soil column after freezing and thawing



(a) 水分积聚层的上部



(b) 水分积聚层的下部

图 3 水分积聚层

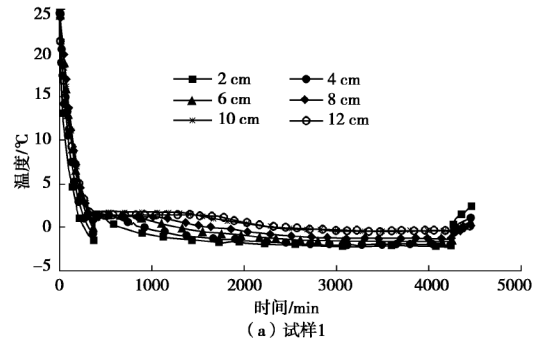
Fig. 3 Upper and lower layers of water accumulated layer

试验现象表明: 经过冻融循环过程后土柱上部各点的含水率增加, 土柱下部各点的含水率减少。在融化锋面以上 2~3 cm 处有水分积聚层, 水分积聚层在土柱中分布是个倾斜的面而不是一个水平面。原因分析为: 冻融过程中土柱中各点温度在同一个平面内分布是不均匀的, 温度梯度导致了含水率在同一个平面内也是不均匀的。反复冻融过程使土柱中水的迁移路径发生了变化。水分积聚层内含水率很大, 并且强度很低, 是土柱的软弱层。

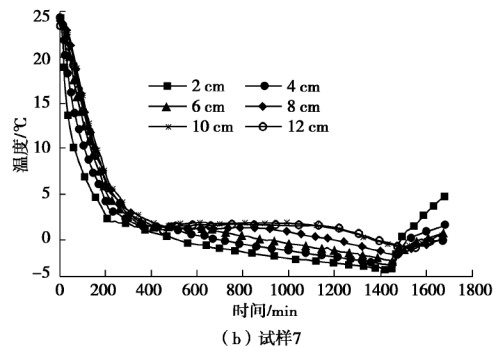
2.2 试样冻融过程中温度场分析

为研究试样竖向温度随时间的变化规律, 在试验时沿土柱高度方向每隔 2 cm 插上热电偶, 每隔 1 min

测试土柱中心各点的温度。图 4 给出了具有代表性的试样 1 和试样 7 的温度随时间的变化曲线 (控温方式见表 1)。



(a) 试样 1



(b) 试样 7

图 4 温度随时间变化曲线

Fig. 4 Temperature - time curves

(1) 从图 4 可以得出, 不同顶板温度、不同初始含水率条件下, 试样竖向各点温度的变化趋势是基本相同的, 可分为四个阶段: ①温度迅速下降阶段, 在此阶段, 温度从室温在短时间内降低到一个很小的正温值, 顶板温度越高用的时间越长; ②温度缓慢降低阶段, 在此阶段, 温度从正温缓慢的向负温降低, 这个阶段持续的时间比较长; ③温度稳定阶段, 当温度缓慢降低到一定的负温时, 温度就稳定下来, 并且要持续一段时间, 该稳定温度就是土中水的冻结温度, 此阶段持续的时间长短与顶板温度及试样的初始含水率有关; ④温度上升阶段, 在此阶段温度上升的特别快, 在很短的时间内达到正温。

(2) 顶板温度越高, 初始含水率越大, 冻结到底需要的时间越长。图 4 (a) 中, 试样的初始含水率是 26.03%, 冻结时顶板温度为 -6°C , 试样冻结到底所需时间为 2500 min; 图 4 (b) 中, 试样的初始含水率为 23.6%, 冻结时顶板温度为 -10°C , 试样冻结到底所需时间为 1450 min。

(3) 同一试样中, 竖向各点温度的变化趋势相同。越靠近试样顶端温度变化越快。从图 4 (a) 可以看出试样上部点的温度处于稳定阶段时, 下部点的温度才处于缓慢降低阶段。

(4) 从图 4 可以看出, 同一试样中不同点的土冻

冻结时的温度不相同,试样顶端的温度低,这是由于在冻结过程中试样中各点处的水分发生迁移引起的。在冻结过程,下面土层中的水分向上面土层中迁移,造成上面土层的含水率增大,下面土层的含水率减小,致使上面土层中水的冻结时的温度比下面土层中水的冻结时的温度低。所以从温度曲线上也能反应冻结过程中水分的迁移。同时,对比两图可以看出,不同试样土中水的冻结时的温度也不同,这是由于试样的含水率和顶板温度不一样而引起的。顶板温度越低,含水率越大,试样中水的冻结时的温度越低。

2.3 试样冻融前后含水率变化分析

(1)相同顶板温度、不同初始含水率试验条件下,冻融前后含水率沿试样深度方向的变化分析。试样的初始含水率是均匀的。给定冻结时顶板温度为 -8°C ,融化时为 8°C ,图5给出了试样5(25.38%)、试样3(26.03%)和试样4(31.03%)的初始含水率和融化到距顶板8 cm处的含水率沿试样深度方向的变化曲线。

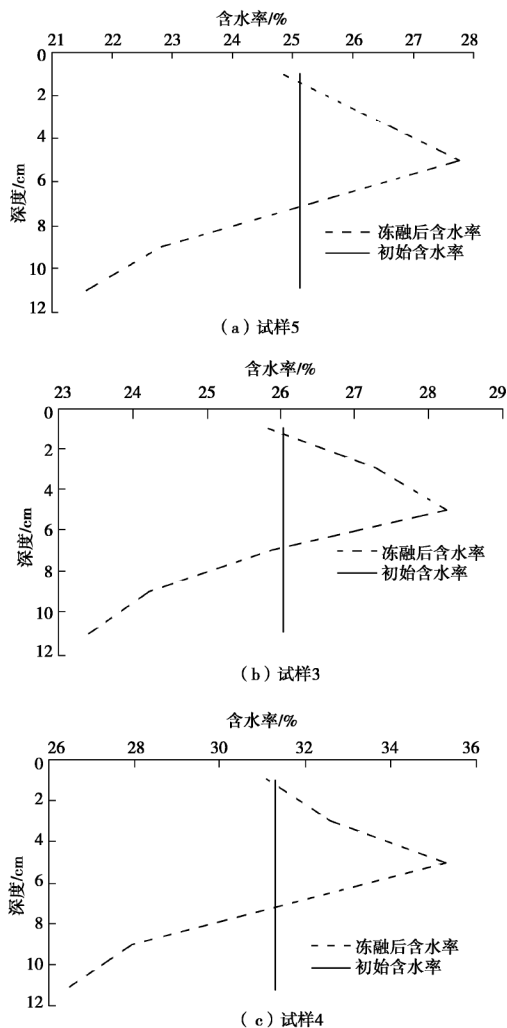


图5 沿深度方向的含水率

Fig. 5 Water content of samples along depth direction

分析如下:①由图5可以看出,试样中含水率分布曲线的变化趋势是相同的。试样上部土层的含水率增加,下部的则减少。在5 cm处含水率很高,产生水分积聚,这和上面观察到的分界线吻合。②对比图5可得出,在顶板控温相同的条件下,初始含水率大的试样,水分迁移量大,水分积聚多。试样4在距顶端5 cm处,融化后含水率比初始含水率增加了3%,试样5增加了2.39%。③对比图5(a)和5(b)发现,在顶板控温相同的情况下,初始含水率相差不大的试样,水分迁移量相差不大,5 cm处水分积聚基本上一样。这从侧面说明试验仪器的控温能力是可靠的。

(2)相同含水率、不同顶板温度条件下,冻融前后含水率沿试样深度变化分析。给定试样初始含水率为26.03%,图5(b)和图6分别给出了试样3(顶板温度 -8°C)和试样1(顶板温度 -6°C)的含水率沿深度方向的分布曲线。

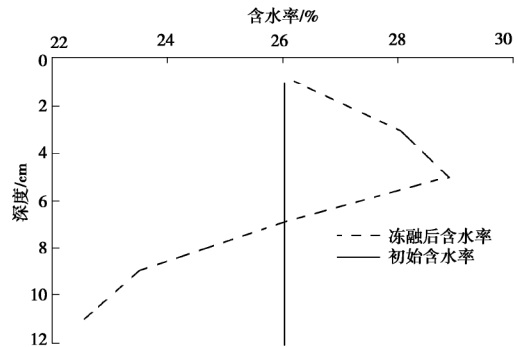


图6 试样1沿深度方向的含水率

Fig. 6 Water content of 1st sample along depth direction

对比图5(b)和图6可以看出在初始含水率相同时,不同温度模式对试样中水分的迁移影响非常明显。顶板冻结时的温度越高,融化后距顶板5 cm处的水分积聚越多。由下部还处于冻结状态土层中的含水率减少量可以看出,冻结时的温度高的试样,水分向上迁移的多。图5(b)试样的冻结时的温度为 -8°C ,融化温度为 8°C ,最下层含水率减少到23.41%,5 cm处含水率增加到28.25%。图6试样的冻结时的温度为 -6°C ,融化温度为 6°C ,最下层含水率减少到22.548%,5 cm处含水率增加到28.93%。说明冻结时的温度越低越不利于水分迁移。

3 结 论

原状粉质黏土试样的自上而下冻结并自上而下融化到设定位置的试验结果表明:

(1)经冻结并融化到设定位置后,试样表面的下部未融化部分存在有横向和竖向的裂缝。试验中可以明显地发现冻融分界线。

(2) 控制不同顶板温度时, 不同含水率的试样中各点处温度的变化趋势是基本上相同, 可分为四个阶段: 温度迅速下降阶段、温度缓慢降低阶段、温度稳定阶段、温度上升阶段。

(3) 不同试样中土中水的冻结时的温度不同, 同一试样中不同点土中水的冻结时的温度也不相同。

(4) 不同初始含水率试样, 融化到 8 cm 处时, 试样中含水率的分布曲线的趋势是相同的。试样上部土层的含水率增加下部土层的含水率减少。在 5 cm 处有水分积聚。水分积聚层和融化锋面不在同一个层内。

(5) 在顶板控温相同的情况下, 初始含水率大的试样, 水分迁移量大, 水分积聚越多。

(6) 不同冻结温度和融化温度对试样中水分的迁移影响非常明显。顶板冻结时的温度越高, 融化后 5 cm 处的含水率越大, 水分积聚越多。

参考文献:

- [1] 许姗姗, 高 伟. 寒区公路路堑边坡抗冻融稳定性分析[J]. 低温建筑技术, 2006, 110(2): 10 - 12. (XU Shan-shan, GAO Wei. Anti-freezing and thawing stability analysis about road cutting and slope in cold area[J]. Low Temperature Construction Technology, 2006, 110(2): 10 - 12. (in Chinese))
- [2] 武 鹤, 高 伟, 王国峰, 等. 寒区公路土质路堑边坡滑塌原因及其防治[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 66 - 70. (WU He, GAO Wei, WANG Guo-feng, et al. Slump reasons of road cutting and slope and prevention in cold area[J]. Disaster Journal, 2006, 15(3): 66 - 70. (in Chinese))
- [3] 陈玉超. 冻融环境下岩土边坡稳定性研究初探[D]. 西安: 西安科技大学, 2006: 3 - 20. (CHEN Yu-chao. Research study on stability of geotechnical and slope under freezing and thawing[D]. Xi'an: Xi'an Science and Technology University, 2006: 3 - 20. (in Chinese))
- [4] 吴玮江. 季节性冻融作用与斜坡整体变形破坏[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(4): 59 - 64. (WU Wei-jiang. Seasonal freezing and thawing & slope deformation[J]. China Geological Disasters and Prevention Journal, 1996, 7(4): 59 - 64. (in Chinese))
- [5] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 2 - 40. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental research on water migration in frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 1991: 2 - 40. (in Chinese))
- [6] 原国红. 季节冻土水分迁移的机理及数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2006: 5 - 30. (YUAN Guo-hong. Mechanism and numerical simulation on seasonal frozen soil water migration[D]. Changchun: Jilin University, 2006: 5 - 30. (in Chinese))
- [7] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 5 - 30. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 5 - 30. (in Chinese))
- [8] 陈肖柏, 王雅卿, 刘建坤, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 3 - 60. (CHEN Xiao-bai, WANG Ya-kun, LIU Jian-kun, et al. Soil frozen and base[M]. Beijing: Science Press, 2006: 3 - 60. (in Chinese))
- [9] 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 Lin-lin. Experimental study on soil freeze and expansion under artificial freezing[D]. Harbin: Harbin Industry and Technology University, 2006: 9 - 10. (in Chinese))
- [10] 郑秀清, 樊贵盛, 邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 3 - 25. (ZHENG Xiu-qing, FAN Gui-sheng, XING Shu-yan. Water movement in the soil of seasonal unsaturated freezing and thawing[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 3 - 25. (in Chinese))
- [11] PRAT M. Analysis of experiments of moisture migration caused by temperature differences in unsaturated porous medium by means of two-dimensional numerical simulation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986, 29(7): 1033 - 1039.
- [12] PHILIP J R, De VERIES D A. Moisture movement in porous material under temperature gradient[J]. Trans Am Geophys Union, 1957, 38(2): 222 - 232.
- [13] 谷宪明, 王海波, 梁士忠, 等. 季冻区路基土水分迁移数值模拟分析[J]. 公路交通科技, 2007(9): 51 - 55. (GU Xian-ming, WANG Hai-bo, LIANG Shi-zhong, et al. Numerical simulation analysis on road base water migration in cold area[J]. Road Communication Technology, 2007(9): 51 - 55. (in Chinese))