史长莹,张宝磊,张晔楠.砂性冻土堤防冻融作用下水分迁移试验研究[J].地震工程学报,2019,41(3):688-693.doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2019.03.688

SHI Changying, ZHANG Baolei, ZHANG Yenan. Experimental Study of Moisture Migration of Sandy Frozen Soil Embankment under Freeze-Thaw Cycles[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 688-693. doi: 10.3969/j.issn. 1000 - 0844. 2019.03.688

砂性冻土堤防冻融作用下水分迁移试验研究

史长莹1,张宝磊2,张晔楠3

(1.黑龙江大学水利电力学院,黑龙江哈尔滨150000; 2.黑龙江省水利水电集团有限公司,黑龙江哈尔滨150000;3.浙江同济科技职业学院,浙江杭州311231)

摘要:以工程实际环境为研究基础,阐述砂性土堤防在冻融作用下的破坏机理,并介绍一种新型研 究水分迁移试验装置,利用该装置测量黑龙江干流堤防典型砂性土试样在冻融循环作用下的温度 场、水分场、应力场的时空分布。试验结果表明:堤顶公路破坏与堤身不均匀沉降有关,温度变化引 起含水率出现梯度变化,从而出现应力场变化,且温度梯度含水率梯度呈线性关系。冻结初期土柱 顶部出现应力增加,稳定后应力减小,稳定冻结深度1m左右。 关键词:季节性冻土;水分场;温度场;应力场;有限元分析;冻融 中图分类号:TV871 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2019)03-0688-06 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.688

Experimental Study of Moisture Migration of Sandy Frozen Soil Embankment under Freeze-Thaw Cycles

SHI Changying¹, ZHANG Baolei², ZHANG Yenan³

School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150000, Heilongjiang, China;
 Heilongjiang Province Water Resources and Hydropower Group Co., LTD, Harbin 150000, Heilongjiang, China;
 Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, Zhejiang, China)

Abstract: Based on a practical project environment, in this study, we studied the failure mechanism of a sandy soil embankment subjected to freeze-thaw cycles, and introduced a novel moisture-transfer test device. We used this device to measure the space-time distribution of the temperature, water, and stress fields of typical sandy soil specimens from the main dike of the Heilongjiang River during freeze-thaw cycles. The test results show that the damage to the embankment is related to its uneven settlement. We found the change in the water content gradient to be due to the temperature change, which changes the stress field, and the water content and temperature gradients have a linear relation. The stress increases at the top of the soil column during the initial freezing period and decreases after it has stabilized, with the stable freezing depth occurring at about 1 m.

Keywords: seasonally frozen soil; moisture field; temperature field; stress field; finite element

收稿日期:2019-01-24

基金项目:黑龙江科技厅项目(GZ16B021)

第一作者简介:史长莹(1964-),男,河北乐亭人,博士,教授,研究方向:冻土。E-mail:shicy2004@126.com。

通信作者:张晔楠(1984-),女,河北平山人,硕士,讲师,研究方向:结构工程。E-mail:17075219@qq.com。

analysis; freeze-thaw

0 引言

黑龙江省黑龙江干流堤防工程的建设地点位于 黑龙江省漠河县、塔河县、呼玛县、黑河市爱辉区、黑 河市城区堤防等地区。共布置堤防 74 段,总长 800. 445 km,堤身填土为冬季冻结,夏季融化的季节性 冻土。通过观察与研究发现,黑龙江干流堤防用土 具有明显的结构性,在季节性冻融、渗流和荷载等外 部因素下,内部结构发生了巨大的变化,出现了融 沉、冻胀、强度弱化等一系列特殊现象,造成堤顶公 路的翻浆冒泥、刚性路面的断裂和错缝、柔性路面的 鼓包或开裂等,直接危及堤防的安全运行。

考虑堤防独特的环境系统,堤身含水量大,受季 节气候影响明显,上部荷载较小等特点,研究堤防稳 定主要从荷载、含水量以及冻融的变化方面着手。 目前国内外学者针对铁路、公路路基的结构稳定和 水热力三场耦合模型研究较多,主要涉及荷载变化 和冻胀的影响。Harlan^[1] 1973 年假设冻土中水分 迁移机理在非饱和土的前提下首次提出了水一热迁 移数学模型,考虑温度影响认为土水势梯度是水分 迁移的驱动力。模型的建立使水分迁移的研究进入 多场耦合模型研究阶段。随后 Fremond^[2]、Lundrdini^[3]、Konard^[4]等对冻土热力学性质,融土中热传 导及冻土中的水分迁移模型进行了深入系统的研 究。国内研究起于 20 世纪 60 年代,由于青藏铁路 的建设带动了大批学者对冻土的相关研究,徐学 祖^[5]分别对封闭系统的正冻土、已冻土做了室内水 分迁移试验近一步揭示了水分迁移的驱动力。毛雪 松[6]应用有限元方法对多年冻土路基水热力场耦合 效应进行了研究,基于非稳态温度场控制方程建立 了多年冻土地区伴有相变的路基非稳态温度场控制 方程。原国红^[7]根据能量守恒定律建立了水热耦合 数学模型,并给出边界条件的控制方法,采用加权参 数法对模型进行求解,解决了偏微分方程采用有限 元求解是不收敛的问题。李杨^[8]运用质量平衡原 理、能量平衡原理、热工原理考虑温度变化过程中的 水分相变、应力变化相互之间的影响,建立了非饱和 土热量迁移和水分迁移的耦合数学模型,得出了非 饱和冻土水热耦合控制方程。为进一步研究砂性土 堤防冻融作用下的破坏机理及水分迁移情况,介绍 一种研究水分迁移的新装置,并通过试验数据观察 水分迁移的规律。

1 砂性土堤防冻胀理论分析

1.1 堤防土体的冻胀分析

冻胀最主要的原因是土体中温度场的变化,温 度降低引起水分的相变,土颗粒周围的水化膜变薄, 但即使温度很低的情况下,仍然有未冻水膜的存在, 这就导致了冻土在较高的温度梯度下仍有水分运 动。冻胀可以分为分凝冻胀和原位冻胀,由于冰的 密度小于水的密度,原位冻结的孔隙水会造成体积 增大9%左右,但由于外界的水分补给并迁移到某 一位置冻结,造成实际体积增大远大于9%[9]。所 以在开放或半开放的堤防土体中构成冻胀的主要因 素是分凝冻胀,当温度场变化时,土在0℃以下的某 一温度开始冻结,首先是土孔隙中的自由水原位冻 结形成冰晶体,随着温度的下降,冰晶体在阻力和热 流最小的方向生长,此时会形成所谓的冰锥体--冰 楔,只要孔隙中还存在自由水或从周围迁移过来新 的水分或随温度的降低从土体颗粒的水化膜中新释 放出来的水分子存在就会不断的有新的冰锥体生长 (图1)。

由于水分冻结成冰,相态发生改变,此时会瞬间 释放潜热,这一部分的潜热必须被释放走,因此会阻 碍总的冻结过程。按照热传递、放出的相变潜热和 冻结温度之间的热平衡,冻结锋面会停滞、回缩或继 续扩展。当土体中冻结到某一位置,自由水已全部 冻结,此时若没有水化膜释放出更多水或没有外来 水分的迁移则冻结锋面会根据从冷源传递给冻结锋 面的热流和从冻土中传来的热流进行热量平衡并向 上一层进一步扩展^[10]。如果有外界水分或水化膜 的补给则冰晶体会继续向阻力最小和热流最小的方 向生长,通过不断地水分迁移形成冰晶体;如果不再 有足够的相变潜热和水分迁移维持冻结封面的停滞 则在持续的低温环境下,冻结锋面会进一步向土层 侵入,直到形成新的动态热平衡,这一过程就是冰晶 体的循环生成。冰晶体的厚度根据温度条件、水分 迁移的可能性和土的种类不同而不同,在孔隙水压 力的影响下,冰晶周围的土层如果没有水分迁移过 来,会变得干燥并形成一些薄的裂纹和裂缝,在较大 的温度梯度下水化膜的水形成少量冰晶充填在这些 裂纹和裂缝中,因而冰晶体周围会出现团粒结构。 通过室内冻胀试验利用高速相机观测到冻结封面的 微观结构,在恒定的温度梯度下,观测到规律的冰晶

体,随着冻结速度的增加冰分凝温度开始降低,冰晶体的生长速度增加。冰分凝温度受冻结速度的影

响,同时冰分凝温度是土体冻胀机理的重要影响 因子。





1.2 堤防土体的融沉分析

当环境温度升高时,冻土发生融化,冰晶体融化 成水,体积减小,加上土体在冻结时形成的裂纹、裂 缝在融化时闭合构成融沉。此时在自重应力和堤顶 上覆荷载的作用下土体将发生固结排水,因固结产 生的沉降与土颗粒性质、上覆荷载和含水量有关。 对与融沉而言,融化的方向主要是从上部或上下两 个方向同时发生,当上部土层融化时,下面是冻结的 土层无法排水,水只能从横向排走或向上迁移,冻土 在融化过程中上部已有荷载时产生的沉降量比后加 同样荷载时产生的沉降量大。融沉的计算目前主要 针对冻结深度较深的季节性冻土区,大部分研究通 过现场观察或实验室试验得出的半经验公式针对特 定土层和特定边界条件作为计算指导。当发生均匀 融沉时对堤防的危害很小,反而均匀融沉使土层重 新固结,增加堤防的稳定性和耐久性,提防破坏大部 分发生在非均匀融沉,发生不均匀融沉主要是由局 部含水量差异过大,产生不均匀固结,堤顶公路下层 土体失去整体稳定性,堤顶公路底面受力不均加上 上部荷载产生剪切破坏,产生断裂和裂缝等。

2 冻融作用下水分迁移试验分析

2.1 砂性土堤防的物理力学性质

试样取自黑龙江干流第三标段黑河市爱辉区上

马场乡桩号 6+500 处,试样不含有机质,为保证所 取试样的代表性,所取试样为堤顶向下 1.5 m 的土 柱,用 PVC 管完整运送回实验室。其物理性质如 表 1 所列,试验方法及具体步骤见文献[11-13]。

表1 原状堤防砂性土物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of original

levee sand soil

分类	含水率	干密度 ρ	比重	塑限	塑性指数
	$\omega / \%$	$/(kg \cdot m^{-3})$	G_{S}	$\omega_{\rm P}/\%$	IP/%
SW	7.32	1.80	2.71	7.28	0.18

2.2 试验装置

(1) 试验装置

为了真实反应冻融过程中堤防基础三场的变化 情况,根据研究目标,实验室从英国引进一套全自动 可控温土体一维瞬时渗透系数测定仪(SDSWCC Measurement System),并在此基础上针对北方季 节性气候特征,对试验设备进行了升级改进,该装置 由4部分组成:数据收集系统、荷载系统、温度控制 系统、水分补给系统,图2给出了改进后的试验装置 原理图。

(2) 数据收集系统

数据收集主要收集冻融循环情况下沿土柱垂直 方向不同深度的温度变化和体积含水率变化,以及 一维竖向应力变化。通过 DL6 型体积含水率传感 器自动采集到计算机存储,含水率精度为±1%,主 要特点盐分敏感度低,稳定性高,抗干扰能力强。温 度数据记录利用热敏电阻和 Dater Taker 软件在云 端自动记录数据存储,该软件可以同步显示温度并 能在云端自动绘制温度变化曲线,表现方式多样。



图 2 水分迁移装置原理图

Fig.2 Principle diagram of the moisture migration device

(3) 荷载系统

荷载系统主要仿照室外堤防基础上部荷载及其 自重应力的作用。该系统装置由空压机微型往复活 塞空气压缩机、气缸、GEO-Experts力传感器组成, 最大量程 11 bar。

(4) 温度控制系统

温度控制系统是在原设备的基础上自行改进后 配合使用,该系统有温度控制器、冷浴循环装置和保 温羽绒罩。温度控制系统和冷浴循环装置是全封闭 制冷,具有高低水位保护和蜂鸣报警功能,防止槽内 介质烧干导致机器故障和加热管防爆。其次具有内 外循环功能,循环泵会将槽内介质外引,在土柱上部 建立第二恒温场,第二恒温场由铝合金管制成的螺 旋形循环容器,仿照室外降温模式由顶部向下层逐 渐降温或保持恒温,此外还将应力变化传递到力传 感器上。本试验运用防冻液介质,浴槽工作温度范 围-40~200 ℃。液晶显示,分别显示温度的当前 值和设定值,温控精度 0.02 ℃,显示分度 0.01 ℃。

(5) 水分补给系统

该系统装置由电子天平、储水箱、玻璃瓶以及 PVC软管组成,通过试验装置底部孔道实现试验过 程中随时补水及排水测量。

2.3 试样制备

(1)本试验是以仿照工程实际工况环境为前提,试样为重塑土制备符合《土工试验规程》 (SL237-1999)规定。将取回的土样风干、碾碎、过5 mm筛、拌匀并测定其风干含水率。

(2) 根据试验装置的有机玻璃筒尺寸,确定试 样土柱115 cm高,直径14 cm,体积17 702.87 cm²。 控制干密度1.81 g/cm³,控制含水率7.2%。

 (3)经计算试样需风干土 28.87 kg,除汽水(蒸 馏水)2.17 kg,将风干土和水混合、拌匀、密封 24 h, 使水分分布均匀。

(4) 将不锈钢盘放置在底部,里面放过滤棉并 充满除汽水,其上覆盖一张饱和滤纸。

(5)装样前在有机玻璃筒内表面涂一薄层凡士 林,减少筒内壁对试样的影响。

(6)为保证土柱的干密度和含水率上下均匀, 试样分 23 层装样,每次装样 1.529 kg,用压实器将 其压成 5 cm 高土柱(控制干密度和含水率),每层土 样刨毛后装下层土样,直至最后一层。

(7) 土样装填完成后常温放置 1~2 天,使土样 水分分布均匀。

(8)试样土柱左边安装体积含水率传感器(a~ g),同一平面上右侧安装温度传感器(1~7),传感器 距土柱上表面距离已在图1中标注。

2.4 试验结果及分析

影响砂性土堤防破坏的因素有很多,文章主要从 水分补给、温度梯度、荷载变化等三个方面展开研究。 本次试验采用上一节介绍的水分迁移装置,其主要特 点是试验土柱最高可达 140 cm,本次试验设置高度 115 cm,冻融循环次数为 6 次,可以较好地模拟工程 实际情况。使用一维瞬时剖面法测量非饱和土对应 不同冻融循环次数下的温度、含水率和应力变化。自 由设置记录间隔,自动采集同一水平面数据读数。

(1) 温度场变化

图 3 是 1 次冻融循环后土柱温度场随时间的变 化曲线,1~7 号温度传感器顺序依次从土柱顶端到 底端。从图中可以看出,试验进行到第 15 天土柱温 度场达到稳定阶段,稳定期5d,第20天开始进行融 化试验,各土层稳定时温度均不相同且随土层深度 增加温度相应增加。距离冷端距离越近,温度变化 速率越快,第12天顶层1号温度传感器率先达到一 26.86℃并保持稳定,底层7号传感器经历16d达 到恒温0.64℃。经历4d的稳定期后,开始融化阶 段,顶层速率最快,2d达到稳定温度27.21℃,随后 各层均开始温度上升融化,底层速率最慢,用时17d 达到稳定温度27.21℃。





图 4 是土柱不同深度的日温度变化曲线,从图 中可以看出,土柱冻结深度在 106.5 cm 左右,根据 冻结深度 106.5 cm 和冻结时间 17 天(2 月 6—22 日)可以计算出土柱冻结封面移动速度为 6.26 cm/d,冬季低温堤防冻结时冻结封面随温度降低向 土体内部移动,根据非饱和砂性土的热传导系数和 能量损失最终保持在 1.1 m 左右,该部分可以认为 是冻胀破坏主要区域,而实际现场勘测也发现拆除 堤顶破坏的混凝土路面后,观测到砂土结构发生破 坏主要在 1 m 以内。



Fig.4 Daily temperature change curves of soil column

(2) 水分场变化

图 5 是一次冻融循环体积含水率随时间的变化 曲线,从图中可以看出,冻结开始阶段6天内含水率 基本保持不变 13.21%,第7天以后含水率开始下降, 第19天从土柱顶部到底部的含水率传感器均达到稳 定保持稳定,目不同土层含水率稳定值均不相同顶层 为 4.7%, 最下层为 12.1% 减少了 1.11%。只有当各 土层温度下降到0℃以后才开始变化,土层内自由水 结成冰晶透体,体积增加改变了土层内原有的应力结 构,越靠近顶部含水率变化越大,产生的破坏越严重。 21 天后开始升温,变化趋势与温度类似,都是越靠近 热源,升温越快,含水率变化率越快,远端则一次减 缓,但是变化时间不同,以0℃为明显分界面,0℃以 下变化幅度小,以上则迅速增加,结合图4可知,含水 率随温度的降低而降低,且滞后现象明显,以温度和 含水率都稳定为标准,含水率滞后大约1~2天的时 间,这也证实在实际堤防中,即使温度开始回升,堤防 也会继续发生鼓包、开裂的现象[14-18]。



图 6 是冻结时期土柱顶部发生的冻胀力,在冻结时期随温度的降低冻胀力持续增大,当温度稳定时, 期冻胀力也随之稳定,保持在 106.5 kPa 左右。由于 升温时主要发生融沉现象,力传感器无法记录数据。



Fig.6 Stress change curves at the top of soil column

3 结论

(1)北方季节性堤顶公路破坏主要由下部堤身 基础冻胀导致,首要原因是温度变化导致其含水量 分布不均,在堤身内部形成冻胀,产生不均匀沉降, 致使堤顶公路受力不均发生破坏。

(2)利用该套改造升级的实验装置可以较好的 模拟室外冻融作用下的水分迁移情况,所测试验数 据能够代表堤防内温度、含水率和冻胀力的实际情况,可以作为堤防破坏分析的理论依据。

(3)黑龙江干流砂性土堤防冻结深度平均 110 cm 左右,且主要相变区在顶部向下 1 m 深度内变 化,最大温度梯度为 42.84 ℃,最小 0.2 ℃。含水率 随温度梯度有明显的滞后现象,冻结稳定后土层内 残余含水量为 5%左右。

参考文献(References)

- [1] HARLANR L. Analysis of Coupled Heat-Fluid Transport in Partially Frozen Soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9 (5):1314-1323.
- [2] FREMOND M, MIKKOLA M. Thermomechanical of Freezing Soil[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Ground Freezing. Rottendam: A. A. Balkema, 1991.
- [3] LUNARDINIV J. Heat Transfer with Freezing and Thawing[M]. Tokey: Elseviver, 1991.
- [4] KONRAD J M, DUQUENNOI C. A Model for Water Transport and Ice Lensing in Freezing Soils[J].Water Resources Research, 1993, 29(9): 3109-3124.
- [5] 徐学祖,邓友生.冻土中水分迁移的实验研究[M].北京:科学出版社,1991.

XU Xuezu, DENG Yousheng. Eeperimental Research of Moieture Migration in Permafrost[M].Beijing:Science Press, 1991.

[6] 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]. Xi´an: Changan University,2004.

[7] 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.

YUAN Guohong. The Mechanism and Numerical Simulation of Water Transfer in Seasonal Freezing Soil[D]. Changchun: Jilin University, 2006.

- [8] 李杨.季节冻土水分迁移模型研究[D].长春:吉林大学,2008. LI Yang.A Study on the Moisture Content Migration Model of Seasonal Frozen Soil.[D].Changchun;Jilin University,2008.
- [9] 齐吉琳,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(增刊2):2690-2694.
 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(Supp2):2690-2694.

- [10] 张树光.辽西地区风积土的强度、冻融特性及其分形性质的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2004.
 ZHANG Shuguang. Study on the Strength, Frost-Sweal and Fractal Character of the Aeolian Soil in the West of Liaoning Province[D].Fuxin; Liaoning Technical University,2004.
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组.土工试验方法标准(GB/T50123-1999)[S].北京:中华人民共和国水利部,1999.
 The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for Soil Test Method : GB50123-1999[S].Beijing: The Ministry of Construction of the People's Republic of China,1999.
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组.冻土工程地质勘察规范 (GB50324-2001)[S].北京:中华人民共和国建设部,2001. The National Standards Compilation Group of People's Republic of China.Code for Engineering Ivestigation of Frozen Ground:GB50324-2001[S].Beijing:The Ministry of Construction of the People's Republic of China,2001.
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组.土工试验规程(SL237-1999)[S].北京:中华人民共和国水利部,1999.
 The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China.Specification of Soil Test:SL237-1999[S].
 Beijing: The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China,1999.
- [14] 史长莹,张宝磊,申阳,等.城镇污物排放对河流泥沙粒度侵蚀 作用的分析[J].黑龙江大学工程学报,2016,7(3):7-11.
 SHI Changying,ZHANG Baolei,SHEN Yang, et al. Analysis about River Silt Particles Erosion Effect by Town Filth[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2016,7 (3):7-11.
- [15] 史长莹,李子晗,张宝磊,等.激光粒度分析仪在非黏性土颗粒 分析中的应用[J].黑龙江大学工程学报,2016,7(4):20-23.
 SHI Changying,LI Zihan,ZHANG Baolei, et al. Application of Laser Particle Analyzer in Particle Size Analysis of Cohesionless Soils[J].Journal of Engineering of Heilongjiang University,2016,7(4):20-23.
- [16] 史长莹,部迪,魏凌傲,等.堤顶公路路面材料冻融破坏的数值 模拟[J].黑龙江大学工程学报,2018,9(3):5-8,20. SHIChangying,GAO Di,WEI Ling'ao,et al.Numerical Modeling of Pavement Materials of Levee Crown Highway Destroyed by Freeze-Thaw[J].Journal of Engineering of Heilongjiang University,2018,9(3):5-8,20.
- [17] 韩雷,史长莹,张宝磊.黑龙江干流堤防砂性土物理特性试验 分析[J].黑龙江水利,2017,3(6):11-14.
 HAN Lei,SHI Changying,ZHANG Baolei.Heilongjiang River Levee Sand Soil Physical Properties Test Analysis[J].Heilongjiang Water Resources,2017,3(6):11-14.
- [18] 张宝磊.季节性冻土区堤顶公路耦合冻融特性机理研究[D].
 黑龙江大学,2017.
 ZHANG Baolei.Study on Mechanism of Coupled Freeze-Thaw

Characteristics of Embankment-Top Highway in Seasonal Frozen Soil Region [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2017.