

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201709140

道面结构不均匀冻胀水热耦合模型试验及现场验证

龙小勇,岑国平,蔡良才,刘均莹

(空军工程大学 航空工程学院,西安 710038)

摘 要:为更加全面客观地认识机场道面结构的温度场、水分场及其耦合作用的基本规律,为季冻区机场道面结构不均匀冻害的防治提供理论依据和措施建议,设计道面结构不均匀冻胀水热耦合模型试验箱,开展外部水分渗入道肩试验和道面结构不均匀冻胀水热耦合模型试验,并利用现场冻胀量监测结果验证了模型的可靠性和适用性.结果表明:模型试验直观地模拟了跑道与道肩冻胀错台现象,阐明了其产生的原因和机理;揭示了机场道面结构温度场、水分场及其耦合作用的基本规律;外部水分入渗对机场道面结构水分场重分布有较大影响;机场道面结构的不均匀冻害是其内部水热耦合作用的产物,降温速率和温度梯度影响冻结时的水分积聚和迁移,反过来水分的重分布也影响温度的传递.采用室内缩尺物理模型试验和现场监测相结合的研究思路和实施方法不仅为季冻区建筑物不均匀冻胀问题的防治提供了理论基础,也丰富了人们探索水热耦合规律的方法,具有一定的参考价值.

关键词: 机场道面结构;不均匀冻胀;模型试验;水热耦合;温度梯度;水分迁移

中图分类号: TU399 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)03-0172-07

Hydro-thermal coupling model test and field validation of
uneven frost heave of pavement structure

LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Liangcai, LIU Jiying

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to understand the basic law of temperature field, water field, and the coupling effects of airport pavement structure, and to provide theoretical basis and measure suggestions for the prevention and control of uneven frost heave damage of airport pavement structures in seasonal frozen regions, we designed a test box and conducted the test of external water infiltration and a model test of uneven frost heave of an airport pavement structure. The reliability and applicability of the model were verified by the results of on-site frost heave monitoring. Results showed that the model test intuitively simulated the phenomenon of faulting of slab ends between runway and shoulder with the reasons and mechanism clarified. It objectively revealed the law of temperature field, water field, and the coupling effects of airport pavement structure. The external water infiltration exhibited a great impact on water field redistribution. Uneven frost heave of airport pavement structure is the result of the coupling of temperature field and water field inside the airport pavement structure. The cooling rate and temperature gradient impact the moisture migration and accumulation, and in turn, the water field redistribution affects the delivery of temperature. The research method of combining the physical model test and the on-site monitoring test not only provides a theoretical basis for the prevention and control of the uneven frost heave of the buildings in the frozen area, but also enriches ways of exploring the law of hydro-thermal coupling.

Keywords: airport pavement structure; uneven frost heave; model test; hydro-thermal coupling; temperature gradient; moisture migration

在季节性冻土地区,建筑物经常遭受错台、波浪、裂缝等冻胀灾害.事实上,建筑物发生上述冻害的主要原因是地基的不均匀冻胀.公路、铁路和机场等建筑物若遭受不均匀冻胀变形的破坏,将对交

通运输安全产生不良影响,其危害程度不容忽视,尤其是对于有严格变形要求的机场跑道而言,不均匀冻胀所造成的局部变形严重影响了平整度,对飞机使用安全有较大危害^[1],因此有必要对不均匀冻胀现象进行研究,为防治不均匀冻胀提供有效建议.

人们对冻胀基本问题进行了大量研究,而关注不均匀冻胀的研究较少,部分研究者对不均匀冻胀的现象、产生原因、分类、危害及防治措施等问题进行了一些探讨^[2-6],为不均匀冻胀的研究打下了基础,然而多数研究往往只是关注不均匀冻胀本身,缺

收稿日期: 2017-09-27
基金项目: 国家自然科学基金(51578540);
民航科研专项资金项目(MHRD20140216)
作者简介: 龙小勇(1990—),男,博士研究生;
岑国平(1962—),男,教授,博士生导师
通信作者: 龙小勇, 18509270709@163.com

乏对不均匀冻胀产生的原因和机理的深入探讨,更没有结合建筑物的结构特点开展针对性的研究.实际上,建筑物的不均匀冻胀与两方面密切相关,其一是建筑物下土基的冻胀水热耦合机理;其二是建筑物本身的结构特点.因此,研究建筑物的不均匀冻胀问题,应该结合建筑物的结构特点,对建筑物地基在冻胀时的水分场和温度场的发展规律,特别是水热耦合规律进行研究.

目前,有关冻胀水热耦合机理的研究取得了丰富的成果.文献[7-10]通过数值模拟在冻胀水热耦合理论模型方面进行了大量研究,帮助人们更好地认识了水热耦合规律,但是由于实际当中的参数是不断变化的,部分模型在建立过程中缺乏试验论证,参数难以准确选取,因此通过数值分析得出的理论模型终究与实际存在一定差别,难以完全真实地反映实际冻胀过程中的水热耦合规律.文献[11-14]通过现场试验对温度和水分进行动态监测,在一定程度上客观地揭示了路基内部温度场和水分场的变化规律及其相互关系.由于在实际工程中开展现场试验存在诸多不便,导致试验不够系统和完整,且试验结果难免受到复杂的现场环境影响而不够精确.文献[15-19]通过室内试验分析了温度场和水分场的动态变化规律.精确的室内试验为研究冻胀水热耦合问题提供了一种有效的手段,试验开展比较方便,比较直观和准确地揭示冻胀水热耦合机理和规律.然而室内环境与真实环境仍然存在一定差异,无法完全真实地反映实际情况.以上几种研究冻胀水热耦合的方法各有优缺点,单独采用某一种方法,可能无法全面客观地揭示温度场和水分场的发展变化规律及其耦合规律.因此,采用多种方法相结合对冻胀水热耦合问题进行研究,以相互验证模型的可靠性,提高结果的准确性,是值得尝试的新的研究方法.

基于室内模型试验和现场监测验证相结合的研究手段,本文以季冻区机场道面结构不均匀冻胀作为研究对象,结合现场实际,对不均匀冻胀产生时的冻胀量、温度场和水分场进行综合分析,得出水热耦合规律,为季冻区建筑物不均匀冻胀问题的研究及防治提供借鉴.

1 概况

1.1 试验材料

本文依托果洛机场为研究背景,该机场位于青藏高原季节性砂砾冻土地区,该地区气温低(年均气温为 -4°C)、负温期长、冻深大,且进入负温后降温缓慢,冻结线在某一地带停留时间较长,易引起土

壤中水分向冻结区迁移,造成冻胀加剧^[1];其土壤主要由天然砂砾土和表层细粒土组成,其中表层细粒土不均匀地分布在天然砂砾土中,容易造成土基不均匀冻胀^[1];年降水量为474~541 mm,年降水日数达到118~162 d,地下水位较低,因此试验中不考虑地下水补充对冻胀的影响;果洛机场当地的最大冻深大于2.5 m.

本文选取天然砂砾土和表层细粒土为主要试验对象,对两种土样进行筛分试验,得到结果如图1所示.可以看出,表层细粒土的土粒粒径均小于1 mm;天然砂砾土中的粗颗粒含量较多,而细颗粒含量相对较少.砂砾土的不均匀系数47大于细粒土的不均匀系数25;砂砾土的曲率系数2.1大于细粒土的曲率系数1.4,显然砂砾土的颗粒级配较细粒土更加良好,砂砾土的冻胀敏感性较细粒土更低^[1,20].砂砾土的不均匀系数过大,说明其缺失中间颗粒,而在实际施工过程中,表层细粒土往往容易被掺杂在砂砾土中,不仅使得砂砾土的细粒含量增加,而且还在一定程度上填补了天然砂砾土所缺失的中间粒径,使掺杂了表层细粒土的砂砾土的级配趋于不良,冻胀敏感性提高,导致实际工程中砂砾土地基的冻胀现象更加明显^[1,20].

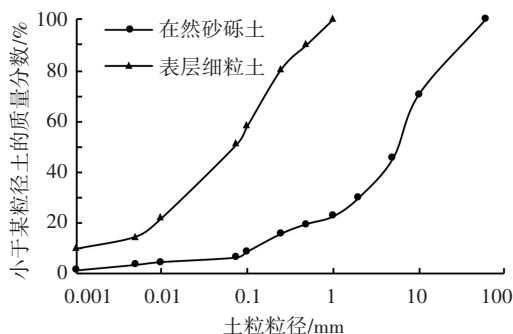


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Particle gradation curve

1.2 试验装置

本文原创设计了道面结构不均匀冻胀水热耦合模型试验装置,主要包括环境箱、试验箱、FDR-100型频域反射式水分传感器、18B20型数字式温度传感器、位移传感器、降温控制系统、计算机测控系统、位移采集卡、水分采集卡、温度采集卡,试验箱是基于传统道面结构以1:10的缩放比例研制而成,其示意图如图2所示.环境箱由普通冰柜改装而成,装配具有自动调节降温速率功能的降温控制系统.

1.3 试验方案及步骤

土体的冻胀特性主要用土体的冻胀量和冻胀率表示.冻胀量是土体在无侧向变形的情况下,经单向冻结而引起的竖向位移,其纵向高度的增量与土样原始高度的比值称为冻胀率(也称冻胀强度或冻

胀系数),通常用高度比表示,计算公式为

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100\%. \quad (1)$$

式中: η 为冻胀率,%; Δh 为冻胀量,mm; H_f 为冻结土层的厚度^[21].

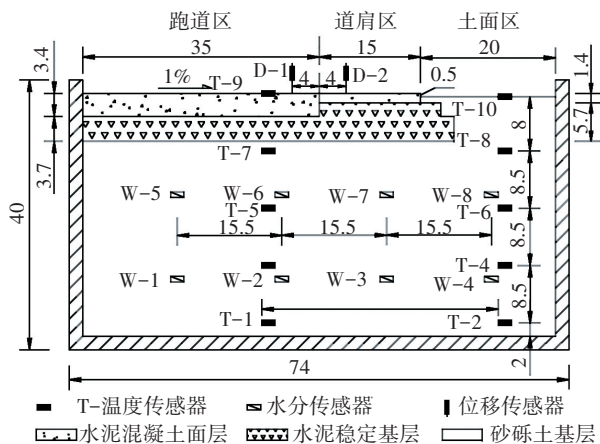


图 2 试验箱示意图 (cm)

Fig.2 Schematic of the test box (cm)

所用试样(天然砂砾土和表层细粒土)全部来自现场试验段.由现场抽样检测结果可知,土基层的平均含泥量约为 9.5%,平均含水率为 7%.因此,在室内试验中,取试样的含泥量为 10%,取初始质量含水率为 7%.筛分试验的结果表明:表层细粒土的含泥量为 50%,天然砂砾土的含泥量为 6.9%^[22].根据试验设计的含泥量和含水率等指标要求,计算两种原始土样的配合比及加水量,然后拌合洒水并焖料 24 h,即可得到试验规定试样.

室内试验方案分为两部分.第一部分是模拟外部水分渗入道肩试验,主要探讨降水和施工养护用水对道面结构内部水分场的影响.第二部分是在第一部分的基础上,对道面结构不均匀冻胀变形所产生的温度场、湿度场及其耦合作用基本规律进行探讨.在室内试验的第一部分中,首先在道面上均匀喷洒经计算所得的水,当水分传感器读数稳定时,得到初始冻结的水分场.室内试验的第二部分包括两个过程:预冷却过程和冻结过程.在预冷却过程中,将冷浴温度设定为 +4 °C,对试验箱整体进行冷却降温,直到 T-9 和 T-10 的读数下降到约 +4 °C,此时开始冻结过程.在冻结过程中,将初始冷浴温度设定为 +4 °C,以 0.1 °C/h 的速率下降,以此来模拟大气降温规律.当 T-3 和 T-4 的读数刚刚降至为 0 °C 以下,而 T-1 和 T-2 的读数仍在 0 °C 以上时,表明冻结线恰好降至约 25 cm 的深度,此时结束冻结.冻结结束之后,采用干燥法测定样品中的水分分布并计算相应结果.

2 试验结果

2.1 跑道和道肩冻胀错台的模型试验结果

图 3 是跑道和道肩总冻胀量随时间发展曲线.仔细观察跑道和道肩总冻胀量的发展过程可知,冻胀基本过程分为 4 个阶段:冻缩阶段,快速增长阶段,缓慢增长阶段和稳定阶段^[23].然而,曲线在几个时间点出现波动较大的情况,分析认为这是由于受到电压和电流的波动而引起的正常现象.对比分析跑道与道肩的总冻胀量发展过程可知,在冻结至 72 h 左右时,跑道和道肩的总冻胀量几乎不再增长,道肩的最终总冻胀量达到 1.83 mm 左右,跑道的最终总冻胀量达到 1.33 mm 左右,两者相差 0.5 mm,考虑到室内模型试验与现场实际工程存在一定缩比,该差值对应到实际工程中将是不小的冻胀错台量.在实际工程当中,如果降雨量增多或者养护措施不当将使更多外部水分渗入道面结构内部,届时将会产生更大程度的不均匀冻害.

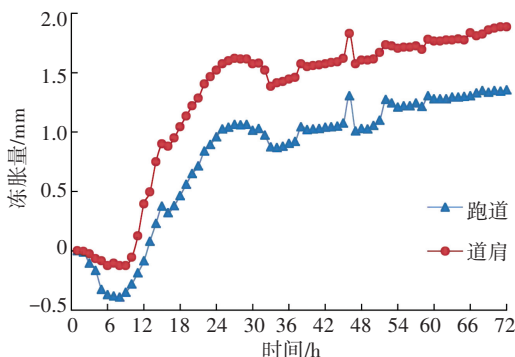


图 3 跑道和道肩的总冻胀量随时间变化曲线

Fig.3 Variation of total frost heave of runway and shoulder with time

2.2 现场冻胀量监测结果与模型试验结果对比分析

为验证道面结构模型试验的适用性,本文进行了一个冻结周期的现场冻胀监测试验,得到跑道和道肩的总冻胀量随时间的变化情况如图 4 所示.对比图 3 和图 4 可知:现场试验结果与室内模型试验结果的基本趋势是相吻合的,二者总冻胀量的发展过程都历经 4 个典型阶段;道肩的总冻胀量始终大于道面的总冻胀量,证实了道面与道肩部位的确发生了一定程度的错台破坏.在室内模型试验中,道肩的最终总冻胀量约为 1.83 mm,跑道的最终总冻胀量约为 1.33 mm,冻胀错台高度为 0.5 mm,对应的冻胀率为 0.2%;在现场试验中,道肩的最终总冻胀量约为 6.84 mm,跑道最终总冻胀量约为 2.86 mm,错台冻胀差为 3.98 mm,对应的冻胀率为 0.16%.对比室内试验和现场监测的最终冻胀错台量 3.98 mm 和 0.5 mm,可以发现,前者是后者的 8 倍左右,与

10 : 1 的缩尺比例大致相符,且两者的冻胀率 0.2% 和 0.16% 相差较小,说明二者具有一定的相似性. 本文在设计室内模型试验时,各种试验条件和参数尽量参考实际情况,所以尽管室内试验条件与现场环境不完全相同,但是对比分析二者的结果,本文认为二者所揭示的跑道和道肩的总冻胀量的发展规律是大致相同的. 因此本文认为二者的所揭示的位移场规律也具有一定的相似性,所设计的室内模型试验具有一定的可靠性和适用性.

总体来看,室内模型试验与实际道面结构具有较好的相似性,因此本文采用室内模型试验探索机场道面结构的温度场、水分场基本规律及其耦合作用规律. 现场试验存在一定的复杂性和不确定性,且数值模拟存在一定的不可靠性,而室内模型试验具有精确性和客观性的特点,从而可以利用室内模型试验帮助人们更加全面客观地认识机场道面结构的温度场和水分场水热耦合基本规律,为解决实际道面结构不均匀冻胀问题提供理论基础.

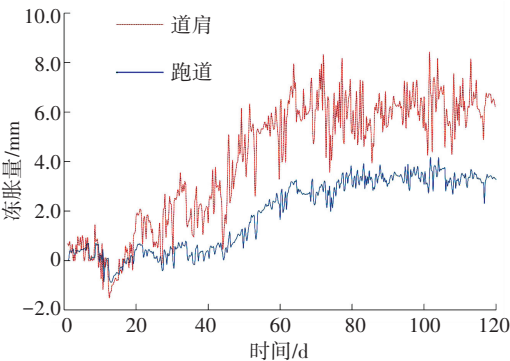


图4 跑道和道肩的总冻胀量随时间变化曲线

Fig.4 Variation in the amount of frost heave of runway and shoulder with time

2.3 温度场

2.3.1 温度变化

图5 当中,红色虚线从上到下,依次表示温度传感器 T-1、T-3、T-5、T-7 和 T-9 所监测的温度变化情况,蓝色实线从上到下,依次表示温度传感器 T-2、T-4、T-6、T-8 和 T-10 所监测的温度变化情况. 由图5 可知,所有温度传感器的值都随时间而递减,温度在冻结初期下降很快,随着冻结的进行,降温速率不断减小;代表跑道表面温度的最下方的红色虚线(T-9),因为受环境箱温度的影响最大,故其温度下降最快,波动最大,而代表土面区表面温度的最下方的蓝色实线(T-10),其温度下降稍微慢,波动稍小,因为砂砾土的比热容比混凝土大,其热稳定性较混凝土好;除 T-9 和 T-10 之外,其他传感器均呈现大致相同的规律:在同一深度处,土面区的温度大于跑道区的温度.

仔细观察图5,可以发现一个有趣的现象:当上方四组曲线(T-1~T-8 号传感器)的温度降至 0℃ 左右时,其下降速率明显变小,甚至在零温线上停滞较长一段时间. 分析认为这种现象的本质是水热耦合作用:当温度降至 0℃ 时,水在结冰的同时释放热量,减缓了温度的下降,正是这种相变潜热作用导致了温度在零温线停滞的现象. 另外可以看出,T-1~T-8 号传感器的零温停滞线均出现在冻结开始 16 h 以后,说明冰水相变对冻结中后期的降温起到一定的减缓作用. 然而试验结果表明,T-9 和 T-10 号传感器并未出现明显的零温停滞现象,分析认为跑道的混凝土土层和土面区表面的含水率均可以近似为 0,冰水相变作用并不明显. 另外仔细观察图5 当中最上方的红色虚线(T-1)和最上方的蓝色实线(T-2),可以发现在冻结过程中,他们的温度值始终大于 0℃,而他们下方的 T-3 和 T-4 的温度值在最后时刻降至 0℃ 以下,这正是本文为了判断冻结线的深度而作的设计. T-3 和 T-4 号传感器的位置为 $H = 25.5\text{ cm}$,对照 1 : 10 的缩尺比例和 2.5 m 的最大冻深,反映了该模型试验的冻深和冻结时间等方面与实际情况比较相符.

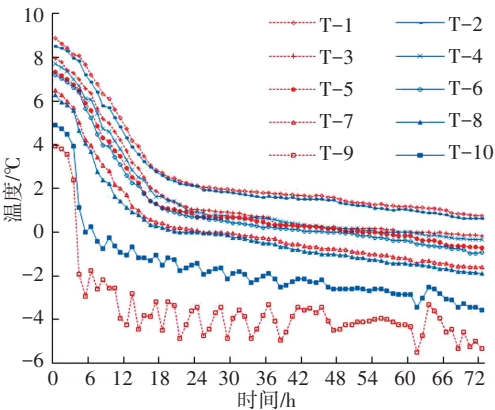


图5 各温度监测点的温度随时间的变化曲线

Fig.5 Variation of temperature with time of all temperature monitoring points

2.3.2 降温速率

为了更加详细地对比分析不同区域、不同测点的温度在不同时段的变化速率,本文按照曲线的大致变化趋势将其划分为 0~16 h 和 17~72 h 这两个时间段,然后分别对两个时间段内的曲线进行拟合分析,得到各个曲线的斜率即为降温速率,然后将两个时段内的不同区域、不同测点的降温速率绘制成沿深度分布的条形图(图6、7). 对比可知,0~16 h 内的降温速率远大于 17~72 h 内的降温速率,说明冻结初期的降温速率远大于冻结中后期的降温速率,分析认为冻结中后期的冰水相变作用对降温起到一定的减缓作用.

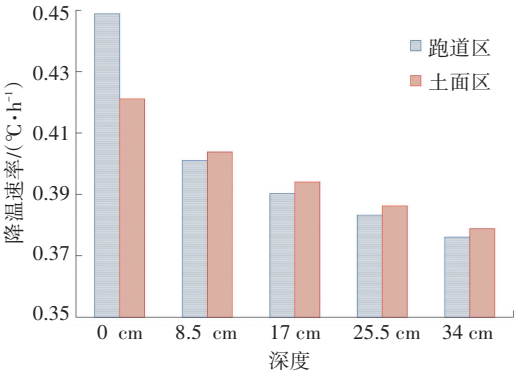


图 6 0~16 h 内各温度测点的降温速率对比

Fig.6 Comparison of cooling rates of all temperature monitoring points in the period of 0-16 h

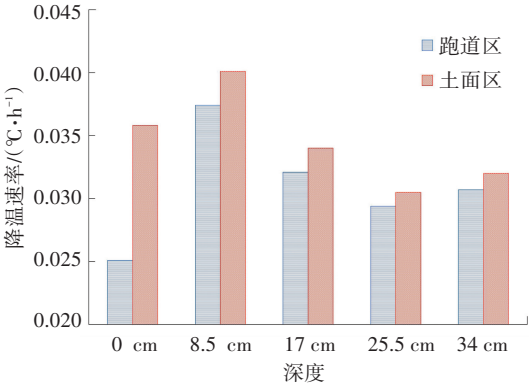


图 7 17~72 h 内各温度测点的降温速率对比

Fig.7 Comparison of cooling rates of all temperature monitoring points in the period of 17-72 h

在 0~16 h 时间段内,跑道区和土面区的降温速率均沿深度的增加而递减,这是因为在此时间段内,冰水相变尚未发生,负温在土层当中自上而下依次传递的过程中不断衰减,因此各测点的降温速率沿深度增加而递减;在同一深度处,跑道区的降温速率小于土面区的降温速率,分析认为水泥混凝土面层和水泥稳定基层具有一定的保温作用,其对跑道区的降温起到一定的减缓作用。

在 17~72 h 时间段内,不同测点在不同深度范围内的降温速率呈现不同的变化规律。在主要冻结区深度范围内(14~26 cm),跑道区和土面区的降温速率均沿深度的增加而递减,其原因主要是负温自上而下的传递和冰水相变对降温的减缓作用;在未冻结区深度范围内(26~36 cm),跑道区和土面区的降温速率均沿深度的增加而递增,并且在冻结线附近($H = 25.5\text{ cm}$),降温速率达到最小值,分析认为这是典型的水热耦合现象:未冻结区的水分在温度梯度的作用下自下而上迁移,水分场的变化引起温度场的改变,水分自下而上迁移,即水分从暖端迁移至冷端,在一定程度上减缓了负温自上而下传递,从而减缓降温,而越靠近冻结线附近,则水分迁移越剧烈,减缓降温的作用越明显,因此冻结线附近的降温

速率最小;同样,因水泥混凝土面层和水泥稳定基层的保温作用,在同一深度处,跑道区的降温速率小于土面区的降温速率。

2.3.3 温度梯度

选取冻结过程中 10 个时刻,分别计算这些时刻的跑道区和土面区的温度梯度,得到结果如图 8 所示,可以看出,土面区的温度梯度在每一个时刻都大于跑道区的温度梯度,这是因为水泥混凝土面层和水泥稳定基层对跑道区的降温具有一定的减缓作用,二者具有相同的整体变化趋势:温度梯度在冻结初期呈现逐渐增大的趋势,在 $t = 8\text{ h}$ 左右时达到最大值,然后逐渐减小, $t = 24\sim 36\text{ h}$ 期间达到最小值,然后以平缓增长的趋势逐渐回升,直至冻结结束。在冻结初期,温度梯度自上而下依次传递,温度梯度从零开始不断增大,并在 $t = 8\text{ h}$ 左右时达到最大值,顶端部分土层开始冻结,逐渐产生的冰水相变作用导致降温减缓,因此土层的温度梯度在达到其最大值之后开始不断减小;温度梯度最小的时候($24\sim 36\text{ h}$ 期间)恰是冻结最剧烈、水分迁移最剧烈的时候,此时冰水相变最明显,水结成冰所释放的热量减缓了冻结锋面的推进,因此表现为温度梯度最小,随着冻结的稳定进行,温度梯度有所回升,但是由于冰水相变的持续存在,冻结中后期的温度梯度仍然远远小于冻结初期的温度梯度。

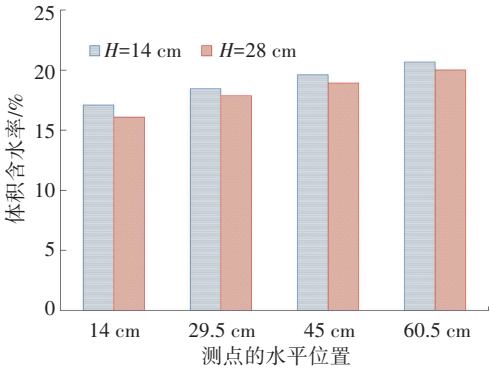


图 8 跑道区和土面区温度梯度对比

Fig.8 Comparison of temperature gradients of all temperature monitoring points

2.4 水分场

2.4.1 外部水分入渗对水分场的影响

外部水分入渗后的机场道面结构水分分布如图 9 所示。由图可知,横坐标从左至右依次代表跑道区($X = 14\text{ cm}, 29.5\text{ cm}$)、道肩区($X = 45\text{ cm}$)、土面区($X = 60.5\text{ cm}$),在同一高度处,含水量从大到小的顺序为:土面区,道肩区和跑道区;在相同竖直方向上, $H = 14\text{ cm}$ 处的含水率均大于 $H = 28\text{ cm}$ 处的含水率。这是因为道面面层不渗水,洒向道面结构表面的大部分外部水顺着道面结构横坡流向道肩旁边

的土面区,在重力的作用下,大部分水分向下渗透,小部分水分沿水平方向渗透至道肩区和跑道区,所以出现“右边>左边,上部>下部”的水分分布情况.对比 T-2 和 T-5、T-3 和 T-6、T-4 和 T-7 的读数(具体位置参照图 2 所示),可以发现当传感器的水平间距(15.5 cm)和竖直间距(14 cm)大致相等的情况下,T-2>T-5、T-3>T-6、T-4>T-7,说明竖直方向的渗透系数大于水平方向的渗透系数.

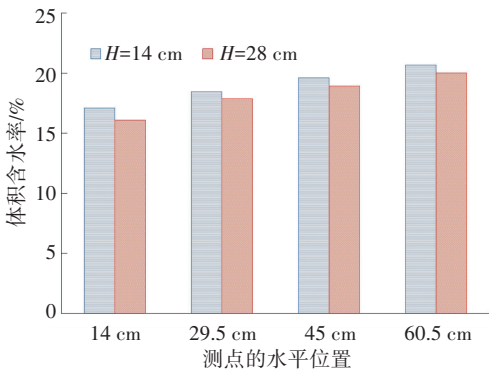


图9 外部水分入渗后的水分分布

Fig.9 Water distribution after the external water infiltration

2.4.2 冻结前后水分分布对比

将道面结构回升至正温后 8 个水分传感器的读数与外部水分入渗后、冻结前的含水率进行对比,得到结果如图 10 所示. 由图可知,无论冻结前后,在相同深度处,含水率排序均为:土面区>道肩区>跑道区. 冻结之后,冻结区的含水率增大了,而未冻结区的含水率却减小了,这是因为在温度梯度的作用下,未冻结区的水分不断向上迁移至冻结区并凝结成冰,融化之后聚集在冻结区,导致含水率增大,这也是冻土当中的典型的水热耦合现象.

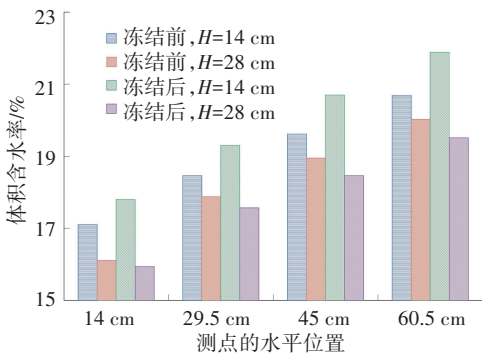


图10 冻结前后未冻结区水分变化对比图

Fig.10 Comparison of water content before and after freezing

2.4.3 冻结后实测水分分布

将各实测点的含水率绘制成沿深度分布条形图,结果如图 11 所示. 由图可知,在经历一个冻融循环之后,道面结构土基内部水平方向的含水率分布情况为:土面区>道肩区>跑道区,竖直方向的含水率分布情况为:在主要冻结区深度范围内(14~

26 cm),含水率随深度增加而减小,因为在此范围内,水热耦合作用随着深度增加而减弱,总体来看主冻结区的含水率在整个道面结构范围内最大,这是因为主冻结区的冻胀最剧烈,水分迁移积聚也最剧烈,所以形成的冰分凝最多,因此冻结之后其含水率最大;在土基未冻结区深度范围内(26~36 cm),含水率随深度的增加而增大,冻结深度线附近的含水率最小,这是因为在温度梯度的作用下,未冻结区的水分不断向上迁移,越靠近冻结锋面的土层水分迁移越剧烈;在道面结构表层深度范围内(0~14 cm),跑道区和道肩区的水泥混凝土面层和水泥稳定基层的含水率可近似为 0,在此不予讨论,土面区表层土层的含水率随深度的减小逐渐减小,因为该区域温度梯度过大,水分来不及迁移就被原地冻结成冰,水分迁移的通道被阻塞,下部水分很难迁移至该区域,故其含水率反而小于冻结区的其他部分^[22].

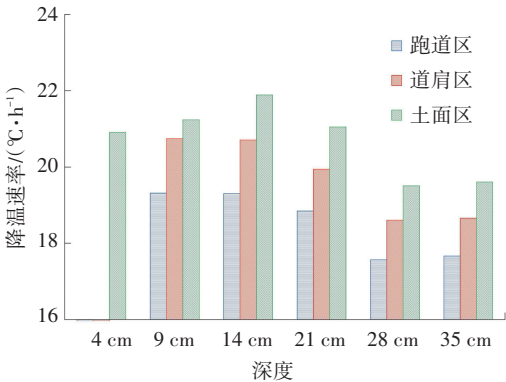


图11 冻结后实测水分场分布

Fig.11 Measured water distribution after freezing

3 结 论

- 1)外部水分入渗对机场道面结构水分场的重分布有显著的影响,入渗后的水平方向的含水率分布情况为:土面区>道肩区>跑道区,竖直方向的含水率随着深度的增加而递减;道面结构的不均匀冻胀是水热耦合作用和道面结构自身特点综合的产物,温度场的降温速率和温度梯度影响着冻结过程中水分的迁移和积聚,反过来水分场的重分布也影响着温度的传递和变化.
- 2)传统的跑道与道肩不等厚且道肩最后施工的道面结构将造成大量的外部水分渗入道肩下土基,将造成不均匀冻胀的加剧,建议采用跑道与道肩一体化的道面结构,道肩不仅与跑道等厚度,而且与跑道同时施工,能有效阻止外部水渗入道肩下土基,从而有效防治道面结构不均匀冻胀病害.
- 3)从水热耦合的角度,针对道面结构不均匀冻胀问题开展了室内缩尺物理模型试验,并与现场冻胀量监测结果进行了对比分析,验证了模型的可靠性和适

用性. 本文研究思路和实施方法对人们进一步研究水热耦合环境下的建筑物不均匀冻胀问题提供了参考.

参考文献

- [1] 龙小勇, 岑国平, 蔡宛彤, 等. 砂砾土地基道面结构不均匀冻胀防治[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2018, 1(19): 106
LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Wantong, et al. Prevention of uneven frost heave of pavement structure on gravel soil foundation [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2018, 1(19): 106
- [2] 刘晓东. 路面容许冻胀与不均匀冻胀[J]. 黑龙江交通科技, 2006, 4: 37
LIU Xiaodong. The facultative frost heave and uneven frost heave of pavement[J]. Journal of Heilongjiang Transportation Science and Technology, 2006, 4: 37
- [3] 刘勇. 哈大高铁轨道变形与路基冻结深度的关系[J]. 铁道建筑, 2016, 10, 79
LIU Yong. Analysis on relationship between frost depth and track deformation for Harbin-Dalian High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2016, 10, 79
- [4] SAARENKETO T, MATINTIPA A, VARIN P. The use of ground penetrating radar, thermal camera and laser scanner technology in asphalt crack detection and diagnostics [C]. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Rovaniemi: Springer, 2012: 137
- [5] ROY L P, BURN C R. A modified landform development model for the topography of drained thermokarst lake basins in fine-grained sediments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41: 1504
- [6] WANG T F, LIU J K, TIAN Y D, et al. Frost jacking characteristics of screw piles by model testing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 138: 98
- [7] PHILIP J R, VRIES DAD. Moisture movement in porous material under temperature gradient[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1957, 38: 222
- [8] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314
- [9] 曹宏章, 刘石. 饱和颗粒土冻结过程的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2007, 1(28): 128
CAO Hongzhang, LIU Shi. Numerical simulation of saturated granular soil freezing process[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 1(28): 128
- [10] JANSSON P E, MOON D S. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 16(1): 37
- [11] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 退化性多年冻土地区公路路基地温 and 变形规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 7(28): 1477
WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Ground temperature and deformation laws of highway embankments in degenerative permafrost regions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 7(28): 1477
- [12] 温智, 马巍, 薛珂, 等. 基于 pF meter 基质势传感器的冻土水分迁移研究[J]. 土壤通报, 2014, 2(45): 370
WEN Zhi, MA Wei, XUE Ke, et al. Study on moisture migration in frozen soil by soil matric potential sensor [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 2(45): 370
- [13] 毛雪松, 陈燕琴, 樊宇朔, 等. 基于水热变化的青藏公路路基纵向裂缝现场测试及成因分析[J]. 西安理工大学学报, 2014, 3(30): 340
MAO Xuesong, CHEN Yanqin, FAN Yushuo, et al. The Qinghai-Tibet Highway subgrade longitudinal cracks hydrothermal field testing and cause analysis based on moisture and heat changes [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 3(30): 340
- [14] 毛云程, 李国玉, 张青龙, 等. 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, 4(36): 1011
MAO Yuncheng, LI Guoyu, ZHANG Qinglong, et al. Research on the moisture and temperature variation of loess roadbed in seasonally frozen ground regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 4(36): 1011
- [15] KONRAD J M, MOGENSTERN N R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17: 437
- [16] 毛雪松, 胡长顺, 窦明健, 等. 正冻土中水分场和温度场耦合过程的动态观测与分析[J]. 冰川冻土, 2003, 1(25): 55
MAO Xuesong, HU Changshun, DOU Mingjian, et al. Dynamic observation and analysis of moisture and temperature field coupling process in freezing soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 1(25): 55
- [17] 赵刚, 陶夏新, 刘兵. 重塑土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 2(40): 519
ZHAO Gang, TAO Xiaxin, LIU Bing. Experimental research on water migration in remoulded soil during freezing and thawing process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 2(40): 519
- [18] 明锋, 李东庆. 非饱和正冻土一维水热耦合模型与试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 3(45): 889
MING Feng, LI Dongqing. Modeling and experimental investigation of one dimension coupled moisture and heat inunsaturated freezing soil [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 3(45): 889
- [19] THOMAS H R, CLEALL P, LI Y C, et al. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils [J]. Geotechnique, 2009, 59(3): 173
- [20] 龙小勇, 岑国平, 蔡宛彤, 等. 压实度及水分对青藏高原季冻区砂砾土冻胀特性的影响[J]. 科技导报, 2018, 36(6): 112
LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Wantong, et al. Influence of compaction degree and moisture on frost heaving properties of gravel soil in seasonally frozen region of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science and Technology Review, 2018, 36(6): 112
- [21] 岑国平, 龙小勇, 洪刚, 等. 含泥量对砂砾土冻胀特性的影响[J]. 科技导报, 2015, 5(33): 78
CEN Guoping, LONG Xiaoyong, HONG Gang, et al. Influence of silt content on frost heaving properties of gravel soil [J]. Science and Technology Review, 2015, 5(33): 78
- [22] 龙小勇, 岑国平, 蔡良才, 等. 道面结构不均匀冻胀模型试验及数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 9(50): 68
LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Liangcai, et al. Model test and numerical simulation of uneven frost heave of pavement structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 9(50): 68
- [23] 岑国平, 龙小勇, 洪刚, 等. 青藏高原季冻区砂砾土冻胀特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 3(48): 53
CEN Guoping, LONG Xiaoyong, HONG Gang, et al. Frost heaving properties of gravel soil in seasonal frozen region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 3(48): 53

(编辑 魏希柱)