

季节性冰冻地区路基温度场分布规律

谭忆秋¹,徐慧宁¹,周纯秀²,张 魁³,陈凤晨⁴

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨, yiqiutan@163.com; 2. 大连海事大学 交通与物流工程学院, 116026 辽宁 大连; 3. 广东华路交通科技有限公司, 510800 广州; 4. 中国民航机场建设集团公司, 100601 北京)

摘 要: 为准确掌握路基结构温度场的分布特点和变化规律,以季节性冰冻地区典型道路结构路基温度场一年多的跟踪观测数据为基础,开展了季节性冰冻地区路基温度场分布规律的研究,并利用统计回归方法建立了观测点所在区域路基温度场的预估模型. 研究显示:路基温度场分布特性以年为周期呈余弦规律变化,不同深度路基的温度变化存在滞后性;热量在路基结构内的传递过程中伴随能量的衰减,且热量沿深度方向呈非线性传递. 夏季温度梯度较小,冬季较大. 在此基础上,基于观测数据,运用统计分析法,建立了观测点区域路基温度场预估模型,实测值与预测值的对比表明,该预估模型具有较好的精确性与实用性.

关键词: 季节性冰冻地区;路基;温度场;分布规律;预估模型

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)08-0098-05

Temperature distribution characteristic of subgrade in seasonally frozen regions

TAN Yi-qiu¹, XU Hui-ning¹, ZHOU Chun-xiu², ZHANG Kui³, CHEN Feng-chen⁴

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, yiqiutan@163.com; 2. School of Transportation and Logistics Engineering, Dalian Maritime University, 116026 Dalian, Liaoning, China; 3. Guangdong Hualu Communications Technology Co. Ltd, 510800 Guangzhou, China; 4. China Airport Construction Group Corporation of CAAC, 100601 Beijing, China)

Abstract: Based on the field data collected from a medium-scale experimental pavement system, temperature distribution characteristic of subgrade in seasonally frozen regions was studied in detail, and the prediction model for subgrade temperature distribution was proposed with regression analysis. Test data illustrated that: The temperature of subgrade changed with time, and it followed cosine distribution; Energy was stored with the heat transfer in subgrade, and it transferred nonlinear with depth. Based on the collected data, the prediction model for subgrade temperature distribution in this area was proposed. The comparison between measured and predicted temperatures indicated that this model had good applicability and accuracy for this area.

Key words: seasonally frozen regions; subgrade; temperature field; distribution characteristic; prediction model

道路结构作为交通运输的载体,除了承受车辆荷载作用以外,还受到外界环境如太阳辐射、天空辐射、外界温度、降水量等因素的影响,因此,道路结构不仅要满足行车荷载的要求,还要适应其所处的自然环境. 据统计,我国 53.5% 的地区属于季节性冰冻地区,大量的使用实践表明,在季节性冰冻地区,随季节变化的温度对道路结构的承

载能力和使用性能有显著的影响. 在冬季,随着气温的下降,道路结构的温度降低到 0℃ 以下,低于水结晶点,道路发生冻结,导致结构体积膨胀,道路不均匀冻胀引起下部结构变形开裂,从而导致路面开裂;到了春季,随着气温的升高,冻结后的道路结构从上层开始融化,但冻土层的下部尚未溶解,水分无法下渗,使上部结构含水量增大,导致结构强度降低,使上部结构发生裂缝、沉陷变形及道路翻浆等现象^[1-2].

在季节性冰冻地区,随季节变化的温度,特别

收稿日期: 2010-03-10.

基金项目: 国家十一五科技支撑计划重点项目(2006BAJ18B05-04).

作者简介: 谭忆秋(1968—),女,教授,博士生导师.

是路基温度是季节性冰冻地区道路修筑技术研究的核心问题^[3-4]. 评价季节性冰冻地区道路稳定性,首先要评价其路基热稳定性. 准确掌握路基结构温度场的分布特点和变化规律,具有重要意义. 然而,目前路基温度场的研究领域大多集中于多年冻土地地区路基温度场^[5-11],而季节性冰冻地区路基温度场则主要以铁路路基为对象进行研究^[12-15],对季节性冰冻地区道路路基温度场的研究相对较少^[16-17].

本文以季节性冰冻地区典型道路结构下的路基温度场一年多的跟踪观测数据为基础,开展季节性冰冻地区路基温度场分布规律的研究,并利用回归分析建立了观测点所在区域路基温度场的预估模型.

1 季节性冰冻地区道路结构模型试验

季节性冰冻道路结构大型模型试验台长 5 m,宽 2.1 m,结构见表 1.

表 1 试验台道路结构		
结构层	材料名称	厚度/cm
面层	沥青混凝土	17
基层	三灰碎石	40
路基	粘土	—

注:路基形式为路堑.

在道路结构的不同部位埋设了温度传感器. 采用北京波谱 WS-TS201 型半导体传感器,测量温度为 -40 ~ 120 ℃,测量精度 ±0.5 ℃. 传感器布设位置见图 1(传感器 1 埋深 2 cm;2 埋深 5 cm;3 埋深 10 cm;4 埋深 17 cm;5 埋深 30 cm;6 埋深 43 cm;7 埋深 57 cm;8 埋深 90 cm;9 埋深 130 cm;10 埋深 170 cm;11 埋深 210 cm;12 埋深 600 cm;13 埋深 1 000 cm).

面层	• 1
	• 2
	• 3
	• 4
基层	• 5
	• 6
	• 7
土基	• 8
	• 9
	• 10
	• 11
	• 12
	• 13

图 1 传感器埋设示意

2 观测地点气候条件

哈尔滨市地处我国东北部,属中温带大陆性季风气候. 冬季漫长而寒冷,夏季短暂而炎热,春、

秋季气温升降变化快,属过渡季节,时间较短. 哈尔滨地区年平均气温 4.2 ℃,最冷月(1 月)平均气温 -18.3 ℃;最热月(7 月)平均气温 23.0 ℃,年平均无霜期 143 d,年均风速 3.8 m/s,年日照时数 2 726 h,年太阳总辐射量 491.4 kJ/cm².

3 观测结果分析

观测工作从 2008 年 10 月份开始,现以 2009 年 1 月—2009 年 12 月的观测数据为例进行季节性冰冻地区路基温度场分布规律的研究.

3.1 路基温度场年变化规律

图 2 示出了 2009 年 1 月—2009 年 12 月路基不同深度温度随时间变化的规律.

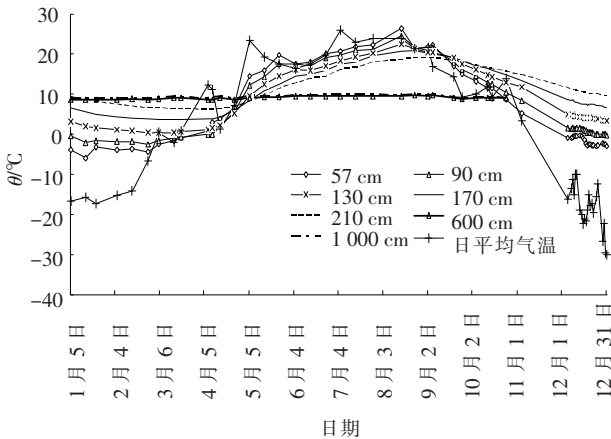


图 2 路基温度和大气温度年变化曲线

1) 路基各深度处的温度年变化近似呈余弦状分布,且周期大致相等,但不同深度处的温度极值、相位均有显著差别. 道路 57 cm 处,年最低温度出现于 1 月中旬,而最高温度出现于 8 月上旬(即此深度处在 1 月中旬由放热状态转变为吸热状态,而在 8 月上旬由吸热状态转变为放热状态. 升温时间 7 个月,降温时间 5 个月);道路 130 cm 处,年最低温度出现于 2 月下旬,而最高温度出现于 8 月中旬;道路 210 cm 处,年最低温度出现于 4 月上旬,而最高温度出现于 9 月上旬.

2) 随着深度的增加,温度的年变化幅度逐渐减小:距路表面 57 cm 处(路基顶部)的年变化温差为 32.3 ℃,距路表面 210 cm 处的年温差变化为 13.0 ℃,而距路表面 600 cm 处的年温差变化为 1.1 ℃. 此现象一方面说明路基不同深度处温度的变化主要是由周期变化的环境因素造成的,另一方面,热量在传递过程中伴随着能量的衰减. 210、600 cm 处的年温差分别衰减为路基顶面年温差的 40% 和 4%,因此,考虑环境因素对道路结构的长期影响时,应按照非稳态温度场进行考虑.

图 3 为路基非恒温层范围内不同点的年温差

随深度的变化规律:路基非恒温层范围内的年温差沿深度近似呈指数分布,由式(1)的傅里叶定律可知^[18],温差的非线性分布说明热量沿深度方向的非线性传递.在距路表面较近处,热量衰减较快;随着深度的增加,热量衰减幅度逐渐减弱.

$$q = -\lambda dt/dx. \quad (1)$$

此外,由于路基年温差沿深度递减,据此推断,在某一深度处的年温差很小,可近似视为0℃,即可将此深度范围作为今后研究的深度范围(可按第一类边界条件处理),而在此深度以外的广大区域则认为是恒温层.

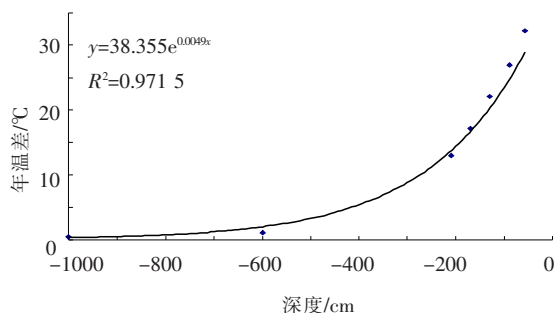


图3 路基处的年温差随深度变化规律

3.2 不同季节路基温度场典型分布

不同季节,路基温度场的分布形式示于图4.

1)不同时期,路基温度场分布形式不同.秋季,随着环境温度的降低,路基内部较浅深度处的温度高于环境温度,热量由路基内部传向周围环境;而路基较深深度处的温度低于较浅深度处,此时还有一部分热量向下部传递,因此,此时路基温度在较浅范围内随着深度逐渐升高,到达一定深度后又降低;进入冬季,路基内部温度显著高于环境温度,热量由路基内部传向周围环境,路基温度随着深度的增加逐渐升高;春季,随着气温的回升,冻结后的道路结构从上层开始融化,而冻结层的下部尚未溶解,温度依然较低.此时,路基处于吸热阶段,一部分热量由周围环境通过路面传向路基,一部分热量由路基深处向路面传递.路基温度沿深度方向呈现先减小后增加的趋势;夏季,周围环境温度高于路基内部温度,热量由周围环境传向路基,路基温度随着深度的增加逐渐降低.

2)3.1节的研究显示,热量沿深度方向呈非线性传递,由此导致了路基温度场沿深度方向呈非线性分布.距路表较近处,外界环境周期性变化所传递的热量较多,因此,此处温度梯度较高;随着深度的增加,外界向内部传递的能量的逐渐衰减,温度梯度逐渐减小.

3.3 路基冻结深度变化规律

冻结初期路基顶面温度变化如图5所示,11

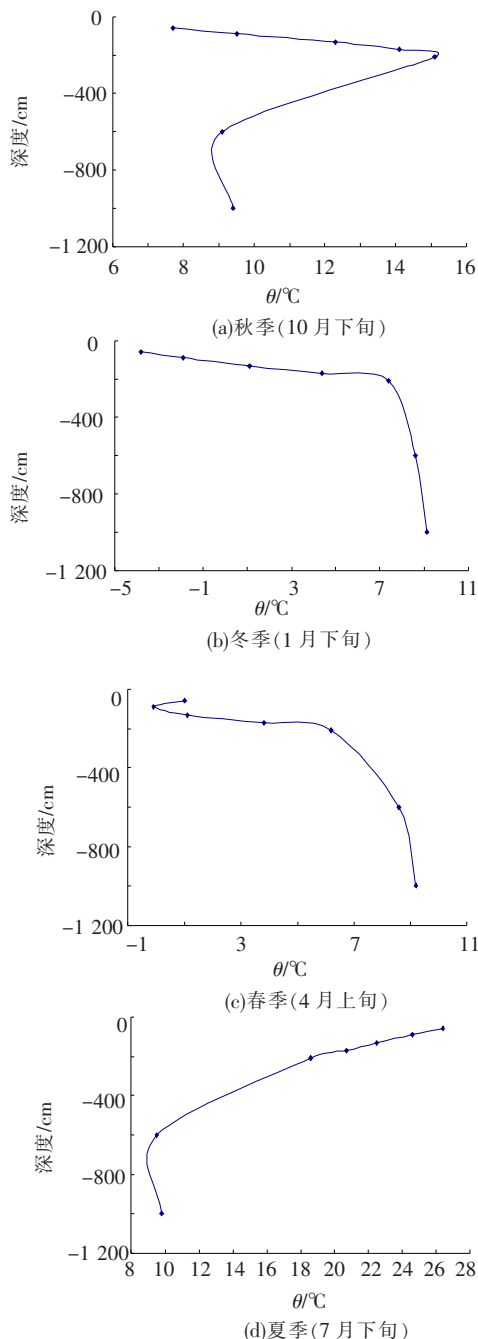


图4 不同季节路基典型温度场分布

月下旬—12月中旬,路基顶部(57 cm)处的温度始终在结冰点附近波动,造成了大量水分由未冻区向冻结面的迁移.而图6所示路基冻结全过程则表明:冻结初期,降温和冻结发展进程较快,在此过程中,随着水分冻结,释放出大量的相变潜热,延缓了冻结锋面的推进速度;2月下旬路基处达到了最大冻结深度123 cm.此后,土壤深处的热流对冻结锋面的影响超过上层,下层路基开始消融,3月中下旬,路面温度回升到0℃以上,路基进入稳定融化阶段,到4月中旬,路基上、下层融化锋面交汇,基层融化全部贯通.

3.4 路基温度梯度的年变化规律

路基内部温度梯度年变化规律示于图7.路

基的温度梯度随着外界环境的变化而产生较大的变化,近似呈余弦状分布.随着环境温度的升高,路基内的温度梯度逐渐减小,并于 8 月下旬达到温度梯度最小值 0.014 ℃/cm,此后,随着环境温度的降低,路基处的温度梯度逐渐增大,并于 1 月中旬达到最大温度梯度 0.094 ℃/cm.年最大温度梯度是年最小温度梯度的 7 倍,且温度梯度较大的月份,均处于冰冻季节.

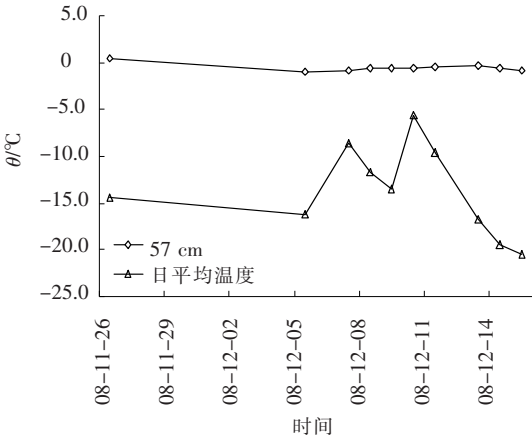


图 5 冻结初期路基顶面温度变化

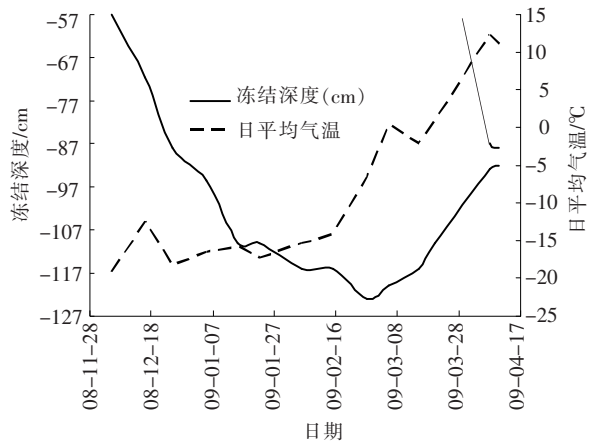


图 6 路基冻结深度变化规律

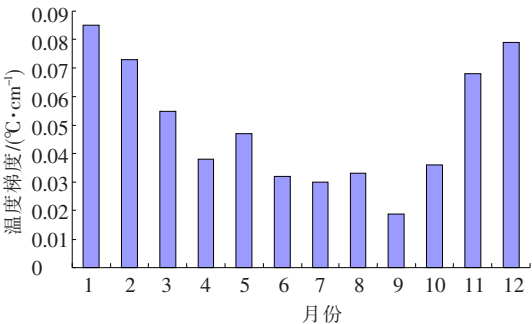


图 7 路基处的年温度梯度变化规律

3.5 基于统计分析的路基温度场预估模型

统计分析法是根据实测的路面温度,结合气象资料,通过回归分析建立路面温度的推算公式,其特点是方法简单,推算精度高,虽然结论具有一定的地域性,但对于某个地区而言,仍不失为一种可行、有效的近似方法.因此,本节将基于观测数

据,开展本地区路基温度场预估模型的研究.

3.5.1 预估模型形式的选择

建立路基温度场预估模型的目的是预测路基温度随时间的变化和沿深度方向的一维分布.目前,国内外学者普遍认为,与路面温度受到多种因素的影响不同,影响路基温度分布的因素比较单一.环境的年变化是影响路基温度场的主要因素,路基温度场的分布形式可表达为

θ_p = θ_a × sin(ω_n(t + 252) + a × H) × f(H) + θ̄ + f. (2)

因此,结合本地区年平均气温(4.2 ℃),年气温振幅(20 ℃),本地区路基温度 θ_p可以表示为时间(t)和路基深度(H)的函数 θ_p = f(t, H) .

路基温度与深度 m 次方(H^m)的相关分析(表 2)表明,路基温度与路基深度的 3 次方相关性最强.

表 2 路基温度与深度的 m 次方的相关分析结果

季节	H	H ²	H ³
春季	0.745	0.894	0.921
夏季	0.871	0.984	0.999
秋季	0.071	0.177	0.995
冬季	0.580	0.816	0.988

基于上述各因素对路基温度场的影响机理分析,在预估模型中引入余弦函数及时间(t),反映环境的周期性变化规律;并通过路基深度(H)的 3 次多项式模拟路基温度沿深度方向的分布状况.综上所述,观测地点路基温度场预估模型为

θ_p = θ_a × cos(2πt/365 + a × H) × (b × H + c × H² + d × H³ + e) + θ̄ + f. (3)

式中: θ_p为沥青路面某一深度处的温度,℃; θ_a为当地年气温振幅,℃; θ̄为当地年平均气温,℃; t 为时间,以 1 月 1 日记为 1,12 月 31 日记为 365; H 为路基内某一点距路表面的距离,m; a ~ f 为待定回归系数.

3.5.2 预估模型系数的确定

对路基温度实测数据和相关数据进行回归分析,即可得到路基温度场预估模型待定回归系数.回归分析结果见表 3. 预估模型的复相关系数 R、判定系数 R²均达到相当高的水平.

3.5.3 预估模型预测效果的评价

对 2008 年 10 月—2008 年 12 月,2010 年 1 月—2010 年 4 月的路基温度实测数据和由预估模型计算得到的预测值进行对比分析,见图 8. 分析显示,数据点均匀且集中在 45°等值线的两侧,实测值与预测值之间具有较好的一致性,最大误差 1.9 ℃,满足工程设计的需要.

表 3 预估模型回归系数

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>R</i>	<i>R</i> ²
-0.632	0.392	-0.053	0.002	-0.942	5.746	0.961	0.924

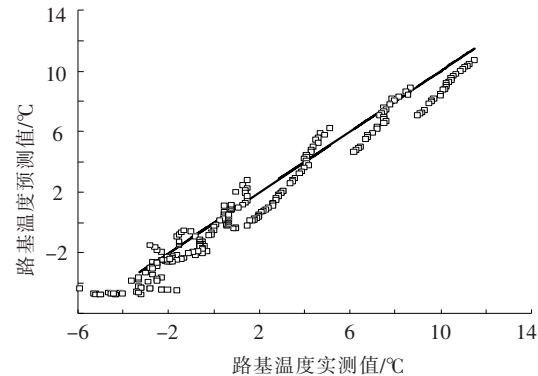


图 8 路面温度实测值与预测值对比

4 结 论

- 1)路基非恒温层范围内不同深度的温度以年为周期随时间呈余弦规律变化;且不同深度路基温度变化存在滞后性.
- 2)路基非恒温层范围内年温差沿深度方向呈指数形式递减,由此说明在热量传递过程中伴随能量的衰减,且能量沿深度方向非线性传递.
- 3)在周期性变化的环境因素作用下,不同季节道路路基温度场分布形式存在较大差异.
- 4)路基温度梯度以年为周期呈余弦规律变化,夏季路基内部的温度梯度较小,冬季较大,路基内部的年最大温度梯度是年最小温度梯度的 7 倍.
- 5)通过回归分析,建立了观测点区域路基温度场预估模型.可以较准确地模拟观测地点处路基温度随时间的变化和沿深度方向的一维分布.

参考文献:

[1] SPENCER G, MICHENER J, WILSON B. Effects of environmental factors on construction of soil-cement pavement layers [J]. Transportation Research Record, 2009,2104:71-79.

[2] ZUO G, DRUMM E, MEIER R. Environmental effects on the predicted service life of flexible pavements [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007(1):47-56.

[3] VASWANI N. Case studies of variations in subgrade moisture and temperature under road pavements in virginia [J]. Transportation Research Record, 1975,532:30-42.

[4] LATHEEF S, RAGHAVAN N. Influence of seasonal variation of subgrade moisture on the design and performance of flexible pavements [J]. Highway Research Bulletin, 1984,24:27-55.

[5] 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.

[6] 丑亚玲, 盛煜, 韦振明. 多年冻土区公路路基阴阳坡温度及变形差异分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9):1896-1903.

[7] DENG Ronggui, DENG Lin, LU Yan. The effect of permafrost preservation of different height subgrade in permafrost regions[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering. Chengdu: ASCE, 2009: 1123-1127.

[8] 汪双杰, 陈建兵. 青藏高原多年冻土路基温度场公路空间效应的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10):1544-1549.

[9] QIN Y, ZHANG J. Estimating the stability of unprotected embankment in warm and ice-rich permafrost region[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010,61: 65-71.

[10] 潘卫东. 青藏高原多年冻土区铁路路基热稳定性研究[D]. 兰州:兰州大学, 2002.

[11] SUN Baochen, DAI Jingyun, ZHANG Wentao. Qinghai-Tibet railway subgrade temperature monitoring system based on FBG sensors [C]//Proceedings of the World Forum on Smart Material and Smart Structures Technology. Chongqing: ASCE, 2007: 147.

[12] LING Xianzhang, ZHANG Feng, ZHU Zhanyuan, et al. Field experiment of subgrade vibration induced by passing train in a seasonally frozen region of Daqing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(1):149-157.

[13] HEYDINGER A. Evaluation of seasonal effect on subgrade soils [J]. Transportation Research Record, 2003,1821:47-55.

[14] SONG Hui, XIE Zishan, ZHENG Hongyang, et al. Numerical simulation for temperature field of subgrade on seasonal frozen area [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Transportation Engineering. Chengdu: ASCE, 2007:1753-1758.

[15] HOSSAIN M, ROMANOSCHI S. Seasonal and spatial variation of subgrade response [J]. Geotechnical Special Publication, 2000,98:150-156.

[16] 侯芸, 田波, 邴文山. 季节性冰冻地区路基内温度场、湿度场耦合计算[J]. 同济大学学报, 2002, 20(3): 296-301.

[17] 宋存牛. 沙漠地区路基路面温度场暨路面工作环境温度指标研究[D]. 西安:长安大学, 2006.

[18] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.

(编辑 赵丽莹)