

文章编号:1671-8879(2011)02-0001-05

水泥混凝土路面的路基温度场测试及数值模拟

毛雪松¹, 陆 鹿², 格桑泽仁³, 侯仲杰¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610061; 3. 西藏自治区交通科学研究所, 西藏 拉萨 850000)

摘 要:路基中温度的分布和变化规律是研究季节性冰冻地区水泥混凝土路面稳定性的基础。基于黑龙江省鸡讷(鸡西—讷河)公路试验路段的路基温度场测试资料,分析温度场的变化规律;建立水泥混凝土路面结构的路基温度场模型,分别在第一类边界条件(附面层理论)和第二、第三类边界条件下对路基温度场进行数值模拟。研究表明:路基内部温度变化滞后于大气温度;第二、第三类边界条件作用下的路基温度场数值模拟结果比第一类边界条件更接近温度实测值;沿深度方向,越靠近路基表面,第一类边界条件下的计算值与现场实测值的差异越大,越往下差异越小;而第二、第三类边界条件下的计算值与实测值的差异沿深度方向变化较小,可应用于路基温度场的数值模拟。

关键词:道路工程;路基;温度场;现场测试;数值模拟;边界条件

中图分类号:U411

文献标志码:A

Test and numerical simulation on subgrade temperature field of cement concrete pavement structure

MAO Xue-song¹, LU Lu², GESANG Ze-ren³, HOU Zhong-jie¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Southwest Geotechnical & Design Institute of China Nuclear Industry, Chengdu 610061, Sichuan, China; 3. Tibet Communications Science Research Institute, Lasa 850000, Tibet, China)

Abstract: The distribution and change of subgrade temperature is critical to the stability of cement concrete pavement in seasonal frost region. Based on the infield test datum of subgrade temperature filed in Jixi-Nahe highway of Heilongjiang Province, the changing law of subgrade temperature is analyzed, and the model is established. The numerical simulation is carried out under the first boundary situation(additional layer theory) and the second, third boundary situation. The results show that the internal temperature change of subgrade lagged is behind the outer climate temperature. The numerical simulation of temperature with the second, third boundary situation is superior to the first boundary situation at accuracy, which is near to the infield test datum. Along the subgrade depth, the temperature difference between the calculation under the first boundary situation and the test is the most, when the site is near to the subgrade surface, and tends to be small little by little when the site is far away the surface. However the difference between the second, third boundary situation is consistent to the infield test data, and can be ap-

收稿日期:2010-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50708009);国家西部交通建设科技项目(2007 318 223 011)

作者简介:毛雪松(1976-),女,吉林珲春人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:xuesongxian@yahoo.com.cn.

plied for predicting the subgrade temperature field. 1 tab, 6 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; subgrade; temperature infield; field test; numerical simulation; boundary situation

0 引言

水泥混凝土路面的常见病害多与水泥板下的不均匀支承有关,当路基或基层的不均匀变形超过一定限度,在行车荷载作用下,水泥混凝土路面将会发生断裂、拱起、唧泥等破坏,直接影响道路的使用功能和寿命。大量工程实践表明,路基不均匀沉陷、季节性冻结与融化引起路基不均匀变形已成为水泥混凝土路面结构早期破坏的重要原因之一^[1-2]。路基不均匀变形与土体的水、热稳定性密切相关。其中,温度是土体中水分迁移的动力和水分发生相变的条件,分析路基中温度的分布和变化规律,是研究季节性冰冻地区水泥混凝土路面稳定性的基础。目前,中国对路基温度场的研究主要集中于多年冻土地区,侧重多年冻土一般路基、热棒等特殊路基的现场测试及数值模拟;季节冰冻区对温度场的研究主要体现在冻深的计算方面,而温度场现场测试资料较少^[3-7]。为此,本文基于黑龙江省鸡讷(鸡西—讷河)公路试验路段的路基温度场测试资料,分析了路基温度场的变化规律;建立了水泥混凝土路面的路基温度场模型,在第一类边界条件(附面层理论)和第二、第三类边界条件下,对路基温度场进行数值模拟,验证温度场模型的合理性和计算结果的可靠性。

1 路基温度场现场测试

1.1 试验路状况

选择黑龙江省鸡讷公路林口—大罗密路段为试验路。该试验路位于黑龙江省东南部,属于深季节性冰冻区。根据气象资料统计,该地区年平均气温为 3.9℃,最高月平均气温在 7 月份,为 21.7℃;最低月平均气温在 1 月份,为 -16.9℃;最大冻结深度为 2.05 m;平均地下水位埋藏较浅。

现场路基横断面及温度传感器的布置如图 1 所示。传感器间的水平间距为 1 m,垂直间距为 0.5 m。采用高精度热敏电阻温度传感器进行数据的测试,测试精度为 0.01℃。试验路段于 2007 年 10 月 31 日修筑完毕,每隔 3 个月定期测试一次,目前已经完成 2 次完整的冻融周期(年)现场数据采集。

1.2 测试结果分析

通过对现场实测资料整理分析,应用克里金法

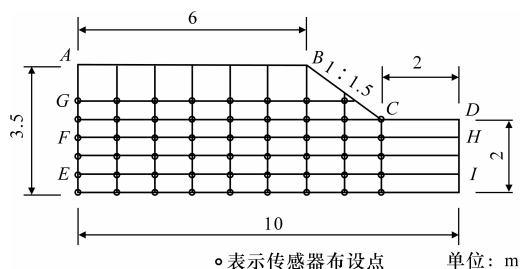


图 1 传感器布设位置与路基断面

对实测点进行插值,得到不同月份的路基温度场等值曲线,如下页图 2 所示(图中等值线上的数字表示温度,单位:℃)。

分析各月份温度场等值线(图 2)可以发现,路基内部温度变化过程与大气温度变化幅度并不相同。当大气温度 1 月份降至最低时,路基内 1.5 m 以下深度仍处于正温,随着外部气温的逐渐升高,路基内部土体的温度仍表现为降低趋势,直至 4 月份,路基完全处于负温状态。当 7 月份气温达到最大值时,仅在路基表面温度达到一年中的最大值,而内部土体并未达到一年中的最大值,直至 11 月份路基内土体一直处于升温状态。由 1 月、7 月及 11 月温度等值线疏密程度可看出(图 2(a)、(c)、(d)),接近路表温度等值线(路基顶部和边坡表面)比路基内部密集,表明路基表面的温度梯度大于下部。4 月份(图 2(b))路基表面温度等值线密度比路基内部稀疏,其原因是路基内部温度变化滞后于大气温度,即大气温度在 4 月份已处于升温状态,而路基内部依然处于降温过程。

2 路基温度场数值模拟

2.1 温度场控制方程

在季节性冰冻地区,路基内部土体的融化和冻结过程必然伴随着相变现象的发生,考虑到土骨架和介质水的热传导、冰水相变以及路基的线形构造,建立路基土体温度带有相变的非稳态热传导二维微分方程,如式(1)所示。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho_i L \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

$$\theta_i = f(T) \quad (2)$$

式中: ρ 为土体的密度; C 为土体比热容; T 为土体的

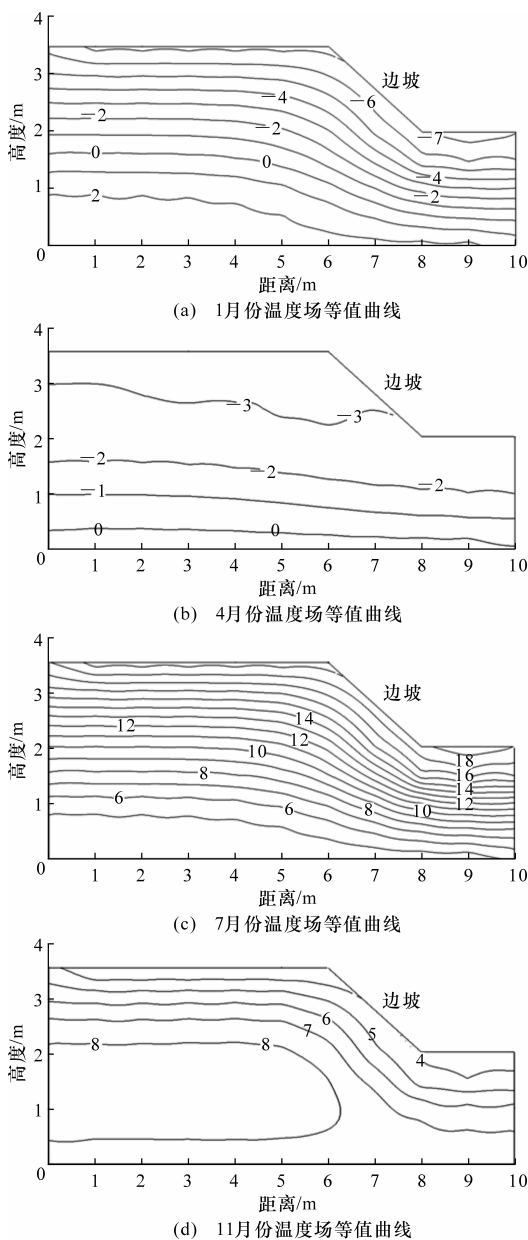


图2 路基温度场等值曲线

瞬态温度; t 为过程进行的时间; λ 为土体导热系数; ρ_i 为冰的密度; x, y 为直角坐标; θ_i 为冰的体积分数; L 为土冻结或融化相变潜热。

2.2 相关参数

(1) 土体热物理参数

在前人测试砂砾土热物理参数的基础上,分析影响比热容和导热系数的因素,以土的干密度和含水量为参变量对 λ 和 C 进行回归分析,确定温度场的土体热物理参数^[8]。其关系式为

$$\begin{aligned}\lambda_f &= 0.162 \times 10^{-3} \rho_d^{1.169} + 5.72 \times 10^{-5} \rho_d \theta_g \\ \lambda_u &= 0.127 \times 10^{-3} \rho_d^{1.18} + 3.81 \times 10^{-5} \rho_d \theta_g \\ C_f &= \rho_d (0.732 + 0.021 \theta_g) \\ C_u &= \rho_d (0.795 + 0.042 \theta_g)\end{aligned}\quad (3)$$

式中:下标 f 表示冻结土;下标 u 表示未冻土; ρ_d 为干密度; θ_g 为含水质量分数。

(2) 冰的体积分数(体积含量)

$$\theta_i = \theta_0 - 29.63 |T|^{0.3498} \quad (4)$$

式中: θ_0 为土体初始含水量(体积分数)。

2.3 边界条件

为进一步明确边界条件对路基温度场影响,在两类不同边界条件下对路基温度场进行数值模拟。

2.3.1 第一类边界条件(附面层理论)

采用第一类边界条件对模型进行模拟。起始计算时间为10月10日,初始温度为6.6℃。根据附面层原理,采用国家气象局数据中心提供的累年月份天然地面以下40 cm处土体的实测地温,以拟合出的正弦函数作为上边界条件^[9]。底边界的变化相对于上边界和左右边界的要小,采用折线的形式施加,见表1;施加边界条件的位置如图1所示。

表1 模型底部边界条件

日期	10-31	1-11	4-12	6-10	7-20	11-9
温度/℃	7.6	2.6	-0.3	0.5	4.2	7.1

温度场边界条件为,图1中 AB 、 BC 和 CD 段。

$$T_B = 5.64 + 3.4 \times 10^{-8} t' - 13.33 \sin(2.04 \times 10^{-7} t' - 56.84) \quad (5)$$

式中: T_B 为路基边界点的温度; t' 为距10月10日的时间。

2.3.2 第二、第三类边界条件

太阳和天空的一部分辐射从地表反射,其余部分(即净辐射)被吸收并转化为热能,在这部分热能以及地气温差、风力作用产生的对流换热作用下,产生不稳定热流,从路表逐渐向下传导,进而改变路基内部土体的温度^[10]。模拟路基温度场时,将太阳辐射作用下产生的最终作用于路表的那部分热量转化为热流密度(第二类边界条件)、地气温差和风力作用下产生的热量差异(第三类边界条件)进行叠加,可模拟自然环境下的路基温度场。

(1) 第二类边界条件

① 路表面热流密度。在计算进入路表面的热流密度时,考虑路面对道路结构温度场的影响,按式(6)计算地面净辐射。

$$R_g = Q(1 - \alpha) - F_0 \quad (6)$$

式中: R_g 为地面净辐射; Q 为到达地面的太阳总辐射,由当地气象资料获取; α 为地面对总辐射的反射率,则 $(1 - \alpha)$ 即为路面的吸收率,基于前人的试验资料,水泥混凝土路面的太阳辐射吸收率为0.76; F_0 为地面有效辐射,由当地气象资料获取。

② 边坡热流密度。在计算进入边坡坡面的热流密度时,近似采用国家气象中心提供的地面净辐射值。地面净辐射为正,表示地表收入的辐射能大于支出的辐射能,即地表增热;净辐射为负,表示地表损失热量。根据该地区日均净辐射资料,统计出各月的日均净辐射值。该值为各月一天当中进入单位面积土体的净辐射总量(即该月每天的日均净辐射值相同),将其视为持续均匀的热流并转化为各月的热流密度,采用折线的形式施加于上边界。路面材料及边坡施加热流密度如图 3 所示。路面材料吸收的热流密度值总比坡面土体所吸收的大,这主要是因为材料吸收太阳辐射能力的不同而引起的差异,吸收率大则热流密度值相应增大。

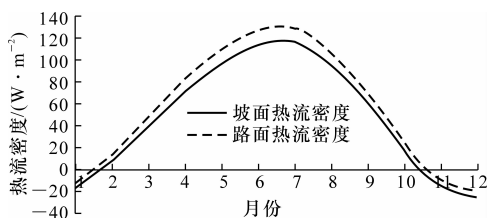


图 3 路面、坡面热流密度的月变化曲线

(2) 第三类边界条件

地气温差及风力作用引起的对流换热系数经验公式如式(7)所示。

$$B = 5.5 + 1.6v \quad (7)$$

式中: B 为对流换热系数; v 为地表的风速。

式(7)中对流换热系数由两项组成:常数项是静风项,与风力无关,为地气温差引起的对流;第二项是强迫对流项,与风力密切相关,为风速作用引起的对流。根据试验路所在地区平均 2 min 风速的月气象资料,整理出各月风速的平均值。已知作用于路表面的风速,根据式(7)可计算出各月的对流换热系数,并采用折线的形式施加于路面和边坡坡面,即图 1 中的 AB、BC 和 CD 段,对流换热系数曲线如图 4 所示。

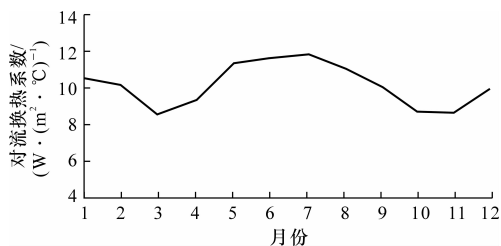
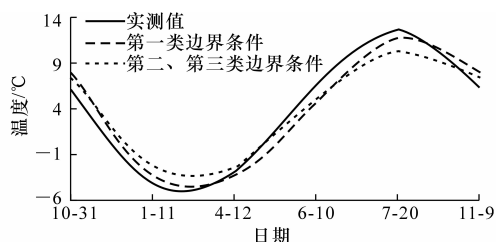


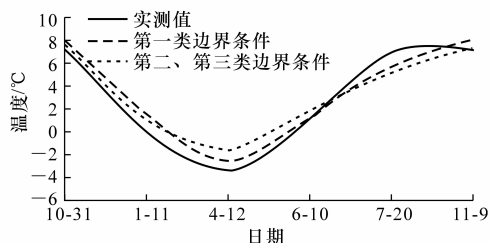
图 4 对流换热系数的月变化曲线

2.4 两类边界条件计算结果分析

取路中以下 1.5 m 和 2.5 m 深度处土体的实测值与不同边界下的计算值进行对比(图 5)。以实测值作为参考标准,对比第二、第三类边界条件作用



(a) 1.5 m 深度不同边界计算值与实测值的对比



(b) 2.5 m 深度不同边界计算值与实测值的对比

图 5 不同深度不同边界条件下计算值与实测值的对比

下模型的计算值与第一类边界条件作用下模型的计算值。从图 5 可以发现,第二、第三类边界条件作用下的模型较第一类边界条件下的模型更接近实际工程情况,最高温度与最低温度处表现尤为明显。图 5(a)中,土体实测值于 4 月初达到最低温度 $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,而第二、第三类边界条件下的计算值为 $-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,第一类边界条件下的计算值为 $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;图 5(b)中,土体实测值于 7 月份达到最高温度 $12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,第二、第三类边界条件下的计算值为 $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,而第一类边界条件下的计算值为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这说明,采用第二、第三类边界条件计算所得结果更接近实测值。

由下页图 6 对比可以发现,越靠近路表面,第一类边界条件下的计算值与实测值的差异越大,越往下差异越小。如图 6(a)所示,距路表面 1.1 m 处的土体,1 月中旬的实测温度为 $-6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,第一类边界条件下的计算值为 $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,二者相差 $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;距路表面 3 m 处的土体,实测温度为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,第一类边界条件下的计算值为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,二者只相差了 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这说明,采用地温边界条件时,由于忽略了路表面的综合环境因素,导致路基表面差异较大。从图 6 还可以看出,第二、第三类边界条件下的计算值与实测值的差异沿深度方向变化均较小,表明第二、第三类边界条件下计算结果更可靠。

3 结 语

(1)对季节性冰冻地区试验路段路基现场实测资料进行整理,得出 1 月、4 月、7 月和 11 月温度等值曲线图;分析了各月份温度在路基中的分布情况以及温度随时间的变化规律。

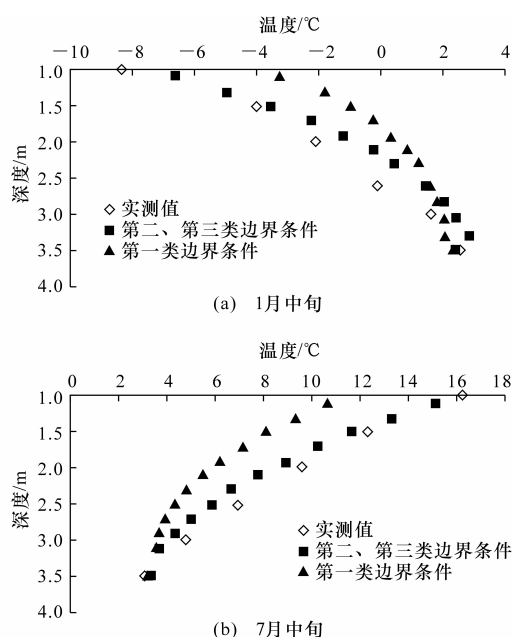


图6 不同边界条件下计算值与实测值随深度变化的曲线

(2)建立了伴有相变的路基温度场控制方程,分别在第一类边界条件(附面层理论)和第二、三类边界条件下对路基温度场进行了数值模拟。

(3)以实测值作为参考标准,对比了各类边界条件对路基温度场的影响,计算结果表明,第二、三类边界条件作用下的温度场计算结果较第一类边界条件下的模型更接近实际工程情况;沿深度方向,越靠近路基表面,第一类边界条件下的计算值与现场实测值的差异越大,越往下差异越小;第二、三类边界条件下的计算值与实测值的差异沿深度方向变化较小,可应用于路基温度场预测。

参考文献:

References:

[1] 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,2002,30(3):296-301.
HOU Yun, TIAN Bo, BING Wen-shan. Numerical simulation of coupling field of temperature and humidity on subgrade in frost zone[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(3): 296-301.

[2] 牛开民,田波.水泥混凝土路面等效疲劳温度应力系数[J].中国公路学报,2006,19(5):23-28.
NIU Kai-min, TIAN Bo. Equivalent fatigue thermal stress coefficient of cement concrete pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 23-28.

[3] 王大鹏,傅智,易洪,等.多年冻土区水泥混凝土路面下冻土路基温度场数值分析[J].公路交通科技,2009,26(1):45-50,56.
WANG Da-peng, FU Zhi, YI Hong, et al. Numerical simulation of thermal field of roadbed under cement concrete pavement in permafrost region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(1): 45-50, 56.

[4] 汪双杰,陈建兵,黄晓明.热棒路基降温效应的数值模拟[J].交通运输工程学报,2005,5(3):41-46.
WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, HUANG Xiao-ming. Numerical simulation of cooling effect for heat pipe subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 41-46.

[5] 侯曙光,沙爱民.土体冻融过程温度场与位移场耦合分析[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(5):25-29.
HOU Shu-guang, SHA Ai-min. Temperature-displacement field coupling analysis in freeze-thaw process of soil[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 25-29.

[6] 汪海年,窦明健,吴敏慧.青藏高原冻土区路面类型对路基温度场影响的非线性分析[J].冰川冻土,2005,27(2):169-175.
WANG Hai-nian, DOU Ming-jian, WU Min-hui. Non-linear analysis of the influence of pavement types on embankment thermal regime in permafrost regions on the Tibetan plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 169-175.

[7] 邴文山,周军,王新发.道路冻深计算方法的研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1995,28(2):11-16.
BING Wen-shan, ZHOU Jun, WANG Xin-fa. Calculating methods research of road frost depth[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1995, 28(2): 11-16.

[8] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2001.

[9] 国家气象局数据中心.地面气象资料三十年数据汇编[Z].北京:国家气象局数据中心,2008.

[10] 魏锦萍.混凝土浇筑层温度场边界条件的选择及其对解答的影响[J].石河子大学学报:自然科学版,1995,30(2):64-70.
WEI Jin-ping. A numerical comparison of temperature solutions of concrete lift with different boundary condition[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 1995, 30(2): 64-70.