

福州水泥路面的温度预测及气象要素分析

曾惠珍, 吴梅容

(福建船政交通职业学院道路工程系, 福州 350007)

摘要:路面结构温度场受众多外界环境因素的影响。以往研究表明,路面结构温度场与气温、路表温度和辐射大致呈线性关系,与时间和深度呈非线性关系。基于气象资料分析了福建省福州市的气候特点,并给出了路面结构温度及影响因素的测试方案。在实测路面温度数据基础上,采用 STATISTICA 软件回归分析福州路面温度场预估模型,新模型预估温度与实测结果相关系数达到 0.9910,在预测混凝土路面板具有较好的精度。

关键词:水泥混凝土路面;温度场;预估模型

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

准确地分析和预测水泥混凝土路面温度场的分布状况,可为道路设计人员提供最不利的环境参数,从而根据当地具体情况采取有效的措施保证路面结构在最不利条件下不致损坏。本文根据福建省福州地区的气候特点,通过在新建路面内埋设温度传感器,辅以自动气象站跟踪外在气象参数,对路面各结构层的温度变化进行了为期一年的持续观测,并基于得到的观测数据采用 STATISTICA 软件统计回归分析,建立适合福建省福州市水泥混凝土路面结构温度场的统计回归公式,预测福州市路面温度的变化。

1 福州地区气候特征

福州位于欧亚大陆东南边缘,东临太平洋,属典型的亚热带季风气候。福州气候资源丰富,气温适宜,温暖湿润,四季常青,雨量充沛,霜少无雪,夏长冬短,无霜期达 326 天。年平均日照数为 1700~1980 小时;年平均降水量为 900~2100 毫米;年平均气温为 16~20℃,最冷月 1~2 月,平均气温达 6~10℃;最热月 7~8 月,平均气温为 24~29℃。极端气温最高 42.3℃,最低 -2.5℃。年相对湿度约 77%。近年来常出现热岛效

应,又为盆地地形,夏季中午气温高达 36℃以上^[1]。

根据 2005 年福州地区一整年的气象观测数据(气温、辐射),绘制福州地区一整年各月平均气温变化曲线,如图 1 所示。由图 1 可知:在 7 月份平均气温最大值达到 28.8℃,在 1 和 2 月份月平均气温最小值达到 10.6℃。

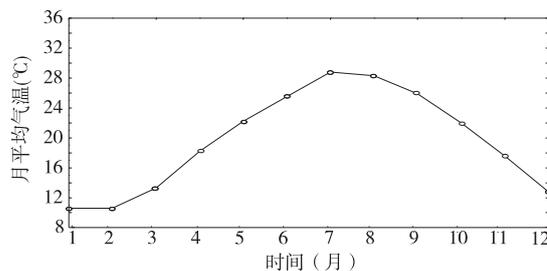


图 1 钻孔对测法

福州市以上气候特点决定了水泥混凝土路面极少出现冻胀现象。但春末夏初、秋末冬初气温骤升骤降时期及夏季高温期易引起水泥混凝土路面产生较大的温差,引起极为不利的水泥混凝土路面温度梯度。

2 路面温度影响因素分析

水泥混凝土路面结构温度场受到以下环境因素的

收稿日期:2013-04-25

基金项目:福建省教育厅科技 B 类项目(JB12362)

作者简介:曾惠珍(1983-),女,福建福鼎人,讲师,硕士,主要从事路基与路面工程方面的研究,(E-mail)121797922@qq.com

影响:大气温度、太阳辐射、风速、降水等。大气温度是当中最重要的一个因素,其次是太阳辐射。昼夜平均气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,路面最高、最低温度相应升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$;总辐射每增加 1 MJ ,路面最高温度升高 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (冬季)~ $0.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ (夏季)^[2]。风速和降水等因素可以通过气温和太阳辐射部分地体现出来。

3 路面温度及影响因素数据测试方案

本文依托工程为福州316国道K19处冲击压实路面作垫层改建路面结构。路面结构及温度传感器埋设情况如图2-图3所示^[3]。温度场监测采用热电偶温度传感器,精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$,监测频率为每30分钟一次,气象资料的测试采用自动气象站PC-3型便携式自动气象站,测试指标包括气温,太阳辐射、风速和净辐射。采集频率为每30分钟一次。自动气象站以及温度采集器将自动采集数据。

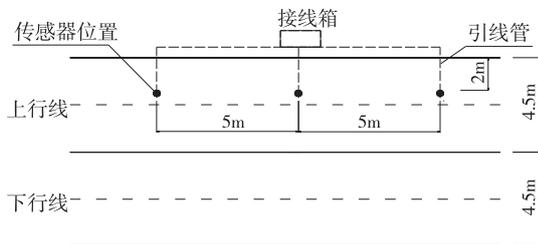


图2 温度传感器平面布置示意图

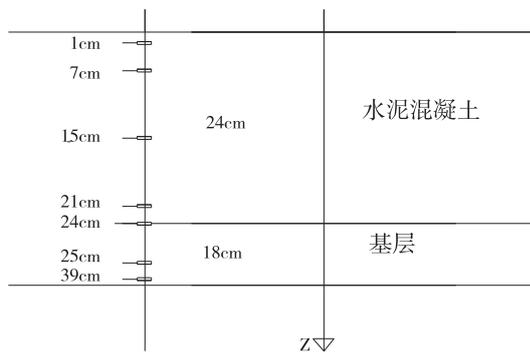


图3 路面结构及温度传感器位置示意图

4 温度场预估模型的构建

本文主要将得到的观测数据采用 STATISTICA 软件进行统计回归分析。

4.1 统计回归方法分类

基于 STATISTICA 软件的功能,统计回归方法主要包括:多重回归分析(Multiple Regression)、固定非线性回归分析(Fixed Non-linear)和非线性估计法(Nonlinear Estimation)。

多重回归分析(Multiple Regression)是研究一个或多个自变量与一个因变量之间是否存在某种线性或非线性关系的一种统计学方法。

多重回归分析的固定非线性回归分析(Fixed Non-linear)在寻找非线性回归模型时,提供了多种不同的最基本非线性转换函数(包括:幂函数,平方根函数,自然对数函数,常用对数函数,指数函数,以10为底的幂函数以及倒数函数等,并由此可以组合成多种其他非线性模型)。

非线性估计法(Nonlinear Estimation)用以处理因变量与自变量之间的非线性回归分析。它可以是:用户指定回归分析,逻辑斯谛回归分析,概率单位回归分析,指数增长回归分析,分段线性回归分析,而所以的方法有最小二乘法,最大似然估计法,或用户自定义损失函数法等。

水泥路面结构温度场可采用非线性估计的统计回归法,建立预估模型,得出相关系数,最终确定适用于福州地区的水泥路面的统计预估公式。

4.2 预估模型的建立

结合南方地区路面温度场特性,本文参考国内外文献,选取了三种水泥混凝土路面温度场预估模型框架,将路面结构温度场与气温和路表温度等建立联系,并且考虑路面温度场随结构深度变化而产生的滞后现象,根据实测数据进行统计回归,得到三个预估公式。

4.2.1 预估公式一

采用孙立军等^[4]提出的推导公式思想,认为气温和太阳辐射强度与路面温度具有相似的变化规律,可以用以反映路面温度场随时间的变化。但是气温和太阳辐射强度对路面温度的影响可能呈非线性,采用气温和太阳辐射强度的幂函数表达二者对路面温度的影响。本文为对比预估模型在预测沥青路面与水泥混凝土路面温度场的差别,将沥青路面温度场预估模型运用到水泥混凝土路面当中,采用 STATISTICA 软件进行回归分析,得到预估模型的最佳待定回归系数和相应的相关系数,如式(1)所示。

$$T_p = 5.5596 + (0.8142T_{as} + 1.1556Q_s^2) + H(-0.007T_a + 0.0810Q) + (-0.0362H + 0.0024H^2 - 0.00001H^3) \quad (1)$$

$$(R = 0.7516)$$

式中: T_p 为水泥混凝土路面某一深度处的温度($^{\circ}\text{C}$); T_a 为当前气温($^{\circ}\text{C}$); Q 为当前太阳辐射强度(kW/m^2); T_{as} 为此前5h平均气温($^{\circ}\text{C}$); Q_s 为此前5h平均太阳辐射强度(kW/m^2); H 为路面深度(cm)。

4.2.2 预估公式二

结合谈至明、严作人等^[5-6]推导公式思想,以气温作为基准,考虑到福州地区气候特点,一天中气温的平均值在 9 点左右达到,因此取 9 点为起点,路面结构随着气温升降的不对称性变化而变化,可采用两个正弦组合来描述;由于热量通过介质的热传导逐渐向面层的深度传递,不同深度处温度日变化曲线的波动幅度随深度而衰减,温度变化曲线峰值出现的时间也随深度增加而越来越滞后^[7-8],可采用指数函数考虑其随深度的影响变化。得到回归公式如式(2)所示。

$$T_p = 1.1564\bar{T}_a - 2.5296 + \tilde{T}_a \times e^{-57.9925z} \times [1.4267 \times \sin(\frac{\pi}{12}t - 57.9925Z + 0.4004) - 0.0119 \times \sin(3.5076t - 57.9925Z)]$$

(R = 0.9456) (2)

式中: \bar{T}_a 为日平均气温; \tilde{T}_a 为日气温振幅; Z 为距路表的深度(m); t 为时间变量,以早晨 9 点为 0 计算。

从式(2)中可知当采用气温作为基准时,福州温度场统计回归预估公式的复相关系数 R 相对于预估公式一大大提高,预估公式的精度也达到较高。当气温容易获得,太阳辐射不容易取得时,福州温度场可以采用预估公式二进行预估。

4.2.3 预估公式三

与第二个预估模型类似,结合谈至明、严作人等^{[4][5]}推导公式思想,但是以路表温度作为基准,得到回归公式如式(3)所示。

$$T_p = 0.9263A_0 - 1.7381 + 0.4594 \times A \times e^{-40.2454z} \times [1.4268 \times \sin(\frac{\pi}{12}t - 40.2454Z + 0.1019) - 0.4351 \times \sin(0.4396t - 40.2454Z + 9.761857)]$$

(R = 0.9910) (3)

式中: A_0 为路表日平均温度(°C); A 为路表温度的日变化幅度(°C); Z 为距路表的深度(m); t 为时间变量,以早晨 9 点为 0 计算。

从式(3)中可知当采用路表温度作为基准时,福州温度场统计回归预估公式三的复相关系数 R 为 0.9910,相对于前面两个公式均有较大的提高,尤其在预测路面高温时,有一定程度的提高。因此,当有条件取得路表温度时,福州温度场可以采用预估公式二进行预估。

4.3 预测偏差分析

对预估公式计算得到的预测值和福州路面温度场实测值进行对比分析,以验证三个预估公式的预测精度(表 1)。

表 1 预测值与实测值误差对比分析

预估公式类型	预估参数	分布在 45°线的两侧	主要误差范围	个别误差极值
预估公式一	T_a, Q, T_{a5}, Q_5, H	有一部分	$\leq 5^\circ\text{C}$	20°C
预估公式二	$\bar{T}_a, \tilde{T}_a, Z, t$	居多集中分布	$\leq 3^\circ\text{C}$	10°C
预估公式三	A_0, A, Z, t	比较均匀且集中	$\leq 2^\circ\text{C}$	5°C

为验证预估公式的适用性,分析三个公式在同路表下 3 cm、9 cm 和 17 cm 深度处实测值和预测值的偏差,如图 4 - 图 6 所示。

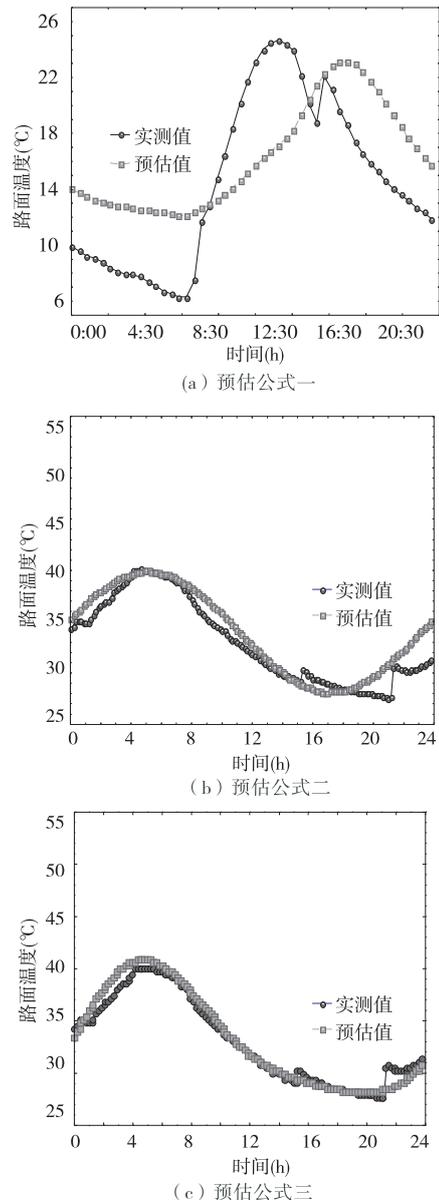
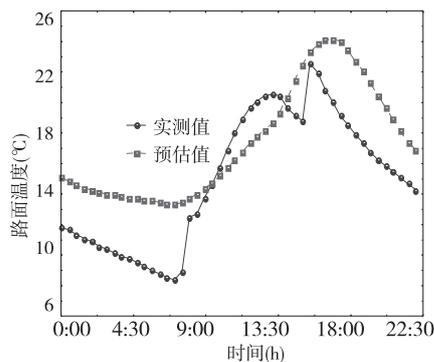
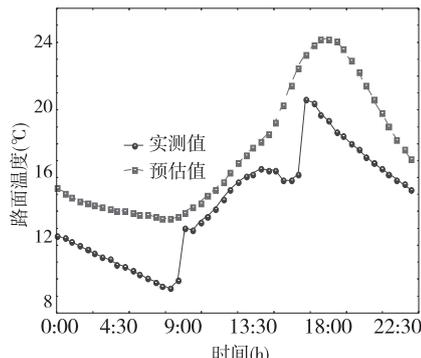


图 4 路表以下 3cm 深度处实测值和预测值的对比

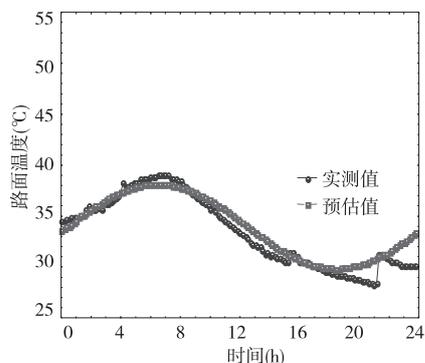
图 4 可知,路面结构层以下 3 cm 处,公式一所预测的温度偏差比较大;公式二和公式三误差基本控制在 1 °C,能够很好的预测这一深度处的温度。图 5 可知,路面结构层以下 9 cm 处,公式一的预测精度相对比 3 cm



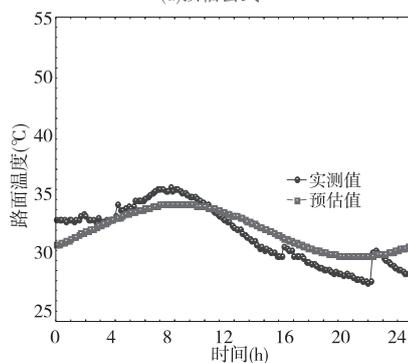
(a)预估公式一



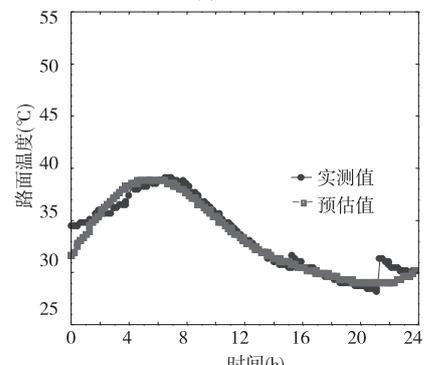
(a)预估公式一



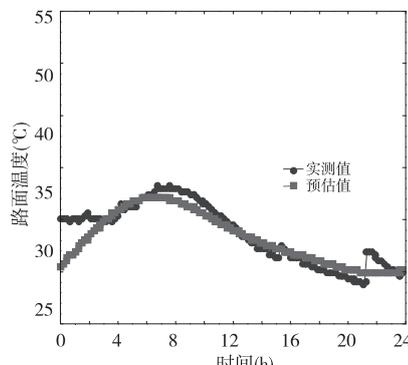
(b)预估公式二



(b)预估公式二



(c)预估公式三



(c)预估公式三

图5 路表以下9cm 深度处实测值和预测值的对比

图6 路表以下17cm 深度处实测值和预测值的对比

处要高一些,但其与公式二、三之间还是有较大差距,公式二、三实测值与预测值误差与 3 cm 处基本一致。图 6 可知,在路面结构层以下 17 cm 处,公式一的预测值比实测值误差比较大,不能很好的预测高温值,公式二的预测偏差有所加大,预测值变化幅度不如实测值大,个别点最大误差达到 2 °C 左右。公式三相对较好的预测了这个深度的路面温度,误差一般能控制在 1 °C 以内。但随着深度加深,预估公式三在预测凌晨 0 点~2 点路面结构温度还是存在一定的误差,距离路表 17 cm 处个别最大误差达到 5 °C 左右。

就会造成模型在预估路表高温时存在较大的误差。预估公式三以路表温度为基准,能准确地预测路面结构的温度场。对预测精度相对比较高的预估公式三进行分析,模型在预测不同深度处的温度,精度情况:3 cm > 9 cm > 17 cm,在 3 cm 深度处路面结构最高温为 40.11 °C,9 cm 深度处路面结构最高温为 39.11 °C,17 cm 处路面最高温为 38.21 °C。路面结构温度随外界环境昼夜变化呈周期性变化,且随着深度增加,温度波动的幅度逐渐减小,温度变化曲线峰值出现的时间也随深度增加而越来越滞后。

对比研究表明,预估公式一是根据沥青路面的温度场的特性来建立的,用于统归水泥混凝土路面温度场时就会存在较大的误差。预估公式二只以气温作为基准,没有考虑太阳辐射量对水泥混凝土路面升温的贡献,这

综上所述,当路表温度相对容易取得的情况下,福州地区水泥路面温度场的预测可采用预估公式三。当气温相对容易取得的情况下,则可采用以气温作为基准的预估公式二。由于收集的资料有限,本文建立的预估公

式二、三均没有考虑太阳辐射,需要在进一步的研究中加与完善;本文建立的水泥混凝土路面温度场预估模型仅适用于福州地区。

5 结 论

(1) 福州地区属典型的亚热带季风气候,气候特点造成了福州地区水泥混凝土路面少冻胀、气温垂直差异大,立体差别显著的复杂温度场特点。年平均气温为 16~20℃,最冷月 1~2 月,平均气温达 6~10℃;最热月 7~8 月,平均气温为 24~29℃。极端气温最高 42.3℃,最低 -2.5℃。由于气温的影响水泥混凝土路面温度场也随之发生年周期变化。

(2) 水泥混凝土路面温度场公式与沥青路面温度场公式不能够互相应用,夏季最高温时,沥青路面路表温度比水泥混凝土路面高;水泥混凝土路面结构最高温度是在路表达达到,而沥青路面是在路面以下达到。

(3) 通过对所测得的数据进行统计回归分析,得到当路表温度相对容易取得的情况下,福州地区水泥路面温度场的预测可采用预估公式三,预测值和实测值相关系数 R 可达到 0.9910,能预测 0—17cm 深度范围内的路面温度场。当气温相对容易取得的情况下,则可采用以气温作为基准的预估公式二,预测值和实测值相关系

数 R 可达到 0.9456。

(4) 福州地区预估模型的分析,得到路表温度、气温和太阳辐射是影响路面结构的最主要因素,路面结构温度受气温、太阳辐射的影响随着深度增加而衰减,使得预估模型在预测深度越深的地方存在越大的误差。

参 考 文 献:

- [1] 鹿世瑾.福建气候[M].北京:气象出版社,2002.
- [2] 张倩倩.新铺和硬化水泥混凝土路面温度场研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [3] 胡昌斌,曾惠珍.福建省水泥混凝土路面结构温度场监测试验研究[J].公路,2007(8):69-77.
- [4] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [5] 谈至明,姚祖康.非线性温度场下的水泥混凝土路面温度应力[J].中国公路学报,1993,6(4):9-17.
- [6] 吴贇昌.半刚性路面温度应力分析[M].北京:科学出版社,1995.
- [7] 张倩倩,田波,谢晋德.北京地区水泥混凝土路面温度场研究及气象要素分析[J].公路,2011(7):44-48.
- [8] 沈正伟,邵先胜,王暖续.寒冷地区实测沥青路面温度场预估模型[J].中外公路,2011(6):129-133.

Cement Concrete Pavement Temperature Forecast and Meteorological Elements Analysis in Fuzhou

ZENG Hui-zhen, WU Mei-rong

(Department of Road Engineering, Fujian Communications Technology College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The temperature field of the pavement structure is influenced by many environmental factors. Previous studies show that the temperature field is roughly linear related to temperature, road surface temperature and radiation, and is non-linear related to time and depth. Basing on the meteorological data, the article analyzes the climate characteristics in Fuzhou, and proposes a testing program of the pavement structure temperature and its influencing factors. Based on the measured data about the temperature field of the pavement structure, the article analyzes the statistical forecast model of the temperature field which is suitable in Fuzhou by using STATISTICA software. The correlation coefficient between the predictive temperature and measured results is 0.9910. The new model shows preferable accuracy for prediction of concrete pavement.

Key words: cement concrete pavement; temperature field; prediction model