

全厚式沥青路面温度场预估模型

李 伊, 刘黎萍, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 对沥青层厚大于 30 cm 的全厚式沥青路面的温度场进行分析。基于气温和太阳曝辐量影响的累积性特点, 对我国 4 个地区路面温度实测数据和气象数据进行回归分析, 并建立以气温、太阳曝辐量、路面深度为主要参数的不同地区沥青路面温度场预估模型。分析不同地区预估模型产生差异的原因, 并引入历年的月平均气温作为地区修正系数, 建立适用于各个地区的全厚式沥青路面温度场预估模型。结果表明, 该预估模型具有较强的适应性和较高的预测精度。

关键词: 沥青路面; 温度场; 回归分析; 预估模型

中图分类号: U416

文献标志码: A

Temperature Field Prediction Model for Thick Asphalt Layer

LI Yi, LIU Liping, SUN Lijun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The temperature field of asphalt pavement with thick asphalt layer (>30 cm) was analyzed. Based on the cumulative effect of air temperature and solar radiation on pavement temperature, a regression analysis was conducted on the measured pavement temperature from four selected test sites and the obtained meteorological data. The prediction models for different sites were determined as a function of depth, average air temperature and total solar radiation. Then, the cause for the difference between the models at each site was analyzed, and the historical mean monthly air temperatures were incorporated into the model. The model can be applied to the pavement temperature prediction in different areas. The results show that the model has high applicability and high accuracy.

Key words: asphalt pavement; temperature field; regression analysis; prediction model

路面温度场能显著影响沥青路面的承载能力和使用性能, 沥青路面的各种常见损坏也直接地或间接地与路面温度状况有关^[1-2], 因此准确预测沥青路面在役期间的路面温度分布和变化规律具有重要意义。

多年来, 各国学者对沥青路面温度预估方法做了大量研究。研究方法大致可分为以下两类: 一是基于气象学和传热学的基本原理, 采用数值或解析方法建立沥青路面温度场的预估模型, 称为理论分析法; 二是以路面温度的实测数据和气象资料为基础, 采用回归分析方法建立路面温度场与各环境因素之间的定量关系, 称为统计分析法。

在理论分析法方面, Barber^[3]作为最早的研究者之一, 在 1957 年提出了路面日最高温度的预估模型。随后, Dempsey^[4]在 1970 年建立了基于一维有限差分法的 CMS (climatic-material-structural) 模型, 该模型于 1987 年在 Thompson 等^[5]的研究下得到了进一步的完善。1993 年, Solaimanian 等^[6]依据热传导和能量传递理论, 建立了路面温度极端值的预估模型。基于相同理论, Hermansson^[7]于 2000 年提出了路面最高温度预估模型。这类模型虽然均具有一定的预估精度, 但是形式复杂, 所需参数较多且较难获取, 在实际应用中存在局限性。

更多学者采用统计分析法建立模型。1968 年, Southgate 等^[8]根据所调查的数据, 通过回归分析给出了路表下 2 inch (1 inch=2.54 cm) 及以下的道路温度取值。1970 年, Rumney 等^[9]采用相同的思路, 给出了 2 inch 和 4 inch 处的路面温度及路表温度和太阳曝辐量的关系曲线。90 年代, 随着 Superpave 设计方法的推广, 沥青结合料在不同等级的最高和最低设计温度下的性能要求得到了关注, Bosscher 等^[10]、Marshall 等^[11]和 Diefenderfer 等^[12]等对沥青路面在实际使用过程中所经受的极端温度条件进行了研究。近年来, 关于沥青路面温度状况的研究则主要集中在模拟沥青

收稿日期: 2019-02-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600100); 国家自然科学基金(51678443)

第一作者: 李 伊(1992—), 女, 博士生, 主要研究方向为道路工程。E-mail: liyi92@tongji.edu.cn

通信作者: 孙立军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程。E-mail: ljsun@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

路面温度场在较短时间间隔下(如1 d或1 h间隔)的变化^[2,13-16],所建立模型的形式比较简单,需要的参数较少,精度可以满足工程需求。

然而,对于全厚式沥青路面上上述模型大多存在适用性问题,难以预估深度大于30 cm的沥青路面温度。BELLS模型^[14]所依据的路面温度数据来自沥青层厚度为4.6~30.5 cm的沥青路面, Park模型所依据的路面温度数据来自沥青层厚度小于18 cm的沥青路面。为了拓展模型的适用范围,对沥青层厚大于30 cm的全厚式沥青路面的温度场进行分析,采用回归分析方法,建立以气温、太阳曝辐量、路面深度、历年的月平均气温为主要参数的沥青路面

温度场预估模型。

1 现场路面温度与气象数据采集

建立全厚式沥青路面温度场预估模型的基础是路面温度和气象数据,在气象数据中太阳曝辐量和气温是影响沥青路面温度的主要因素^[1-2]。利用无纸记录仪和PT100温度传感器采集路面温度数据,利用JTR05太阳辐射仪和气温传感器采集气象数据。同时,为了使模型具有更广泛的适用性,在全国选取了5个观测点进行小时数据采集,各观测点的具体信息如表1所示。

表1 各观测点信息

Tab. 1 Detailed information of test sites

观测点	地区	气候特征	沥青层厚/cm	观测时间	传感器埋设深度/cm	观测数据个数
1	镇江	半干半湿	45	2016.9—2018.7	2.0、6.0、6.3、9.3、12.0、16.0、19.9、23.7、27.0、32.0、37.0、42.0	7 223×12=86 676
2	库尔勒	干旱内陆	50	2016.11—2018.5	0.4、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、13.0、16.0、19.0、22.0、29.0、35.5、37.0、49.0	5 781×14=80 934
3	上海(2002年)	潮湿沿海	15	2002.8—2002.9	0.5、1.7、3.9、6.1、7.5、9.5、12.6、14.5	625×8=5 000
4	乌鲁木齐	干旱内陆	12	2003.3—2003.5	1.0、2.0、3.5、8.0、10.0、11.5	745×6=4 470
5*	上海(2003年)	潮湿沿海	15	2003.11—2003.12	1.4、2.5、4.3、5.9、9.8、11.5、13.8	1 273×7=8 911

注:*表示该观测点的数据用于模型验证。

图1给出了现场采集的小时路面温度、气温以及太阳曝辐量随时间的典型变化曲线。从图1看出,在12:00—14:00达到日最高气温,而在04:00—06:00达到日最低气温。因此,从最低气温上升到最高气温只需要不到10 h,而从最高气温降低至最低气温则需要14 h以上。太阳曝辐量通常在正午前后达到最大值,上升过程和下降过程基本对称。

从图1还看出,路面温度及气温和太阳曝辐量具有较强的相关性。路表和路面结构上层(≤ 30 cm)的路面温度日变化差异较大,通常大于 6°C ,而且靠近路表处的路面温度随着气温和太阳曝辐量的变化同步发生变化,三者几乎在同一时刻达到日最大值,这意味着气温和太阳曝辐量的变化对于路面温度产生了即时影响。随着深度增加,当深度大于30 cm时,气象因素对路面温度的影响程度逐渐减弱,路面温度的日变化差异减小,通常小于 3°C 。由于自上而下的热传导需要一定的时间,路面温度的变化滞后于气温和太阳曝辐量的变化,因此在更晚的时刻达到日最大值。这意味着随着路面深度的增加,气温和太阳曝辐量对路面温度的影响具有累积性特点,即路面温度不仅受当前时刻气象因素的影响,还是气温与太阳曝辐量在一段时间内综合作用的结果^[1]。

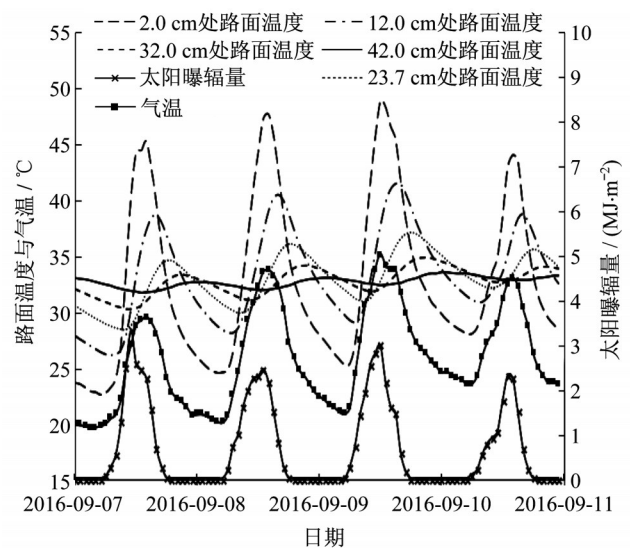


图1 气温、太阳曝辐量与路面温度随时间的变化过程

Fig. 1 Air temperature, solar radiation and pavement temperature over time

2 预估模型基本形式的确定

2.1 自变量形式的确定

根据上述分析可知,气温和太阳曝辐量对路面温度的影响具有累积性特点。例如,路表温度主要受当前气温和太阳曝辐量的影响,而随着路面深度

的增加,路面温度则主要受一段时间内气温和太阳曝辐量的累积影响。因此,为了建立各个深度都适用的路面温度预估模型,首先要分析气温和太阳曝辐量对不同深度处路面温度的累积影响程度,即确定模型中气象因素的自变量形式。

自变量形式选为 N 个小时内累积气温的平均值 $\overline{T_{aN}}$ 和总太阳曝辐量 Q_N 。根据文献[14],考虑到模型的实用性,将 N 的取值范围定为 $0\sim 24$,下限表示路面温度受当前小时气温和太阳曝辐量的影响,上限表示路面温度受一天内累积气温和太阳曝辐量的影响。自变量的具体形式可用下式表达:

$$\overline{T_{aN}} = \frac{1}{N} (T_{a0} + T_{a1} + \dots + T_{aN}) \quad (1)$$

$$Q_N = Q_0 + Q_1 + \dots + Q_N \quad (2)$$

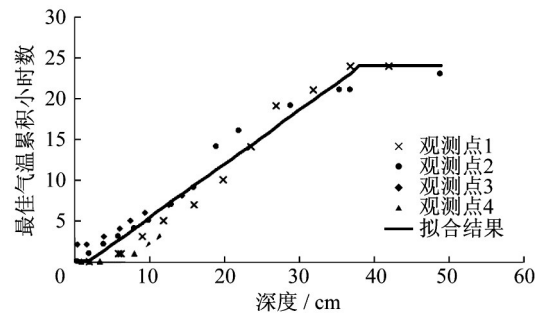
式中: T_{ai} 为当前时刻起第 i 个小时前的气温, $^{\circ}\text{C}$; Q_i 为当前时刻起第 i 个小时前的太阳曝辐量, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

分别对路面温度与气温、路面温度与太阳曝辐量进行相关性分析。对于气温,将各个深度的路面温度序列对 N 个小时内的平均气温 $\overline{T_{aN}}$ 数列求相关系数。由于 N 为 $0\sim 24$,因此每个深度对应得到25个相关系数值,然后找出各个深度最大的相关系数值所对应的 N 值,则认为该 N 值为最佳气温累积小时数,该深度处路面温度与该累积小时数内的平均气温最为敏感。对于太阳曝辐量,按照相同的方法进行分析,得到各个深度的最佳太阳曝辐量累积小时数。

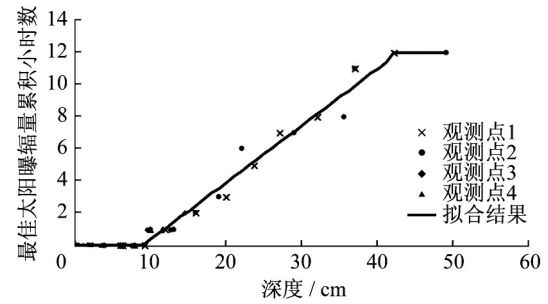
基于表1中观测点1~4各个深度处的路面温度与 $\overline{T_{aN}}$ 、 Q_N 进行相关性分析,图2给出了不同深度所对应的最佳气温和太阳曝辐量累积小时数。从图2可以看出,各观测点最佳累积小时数随深度的变化规律相近,都随着深度增加而增加。同时,最佳气温和太阳曝辐量对应的累积小时数有明显差别,最佳气温累积小时数要显著大于最佳太阳曝辐量累积小时数,并且在10 cm以内,最佳太阳曝辐量累积小时数均为零。这表明,太阳曝辐量能更快地促使不同深度处路面温度上升,相较于气温,太阳曝辐量对路面温度的影响更大。

从图2可以看出,最佳太阳曝辐量和气温累积小时数可以用分段线性回归模型来拟合,具体回归式如下所示:

$$N_T = \begin{cases} 0, & 0 \leq d \leq 2 \\ 0.6574d - 1.2714, & 2 < d < 38 \\ 24, & d \geq 38 \end{cases} \quad (3)$$



a 各地区不同深度对应的最佳气温累积小时数



b 各地区不同深度对应的最佳太阳曝辐量累积小时数

图2 最佳气温与太阳曝辐量累积小时数分析结果

Fig.2 Analysis results for optimized cumulative hour of air temperature and solar radiation

$$N_Q = \begin{cases} 0, & 0 \leq d < 10 \\ 0.3562d - 3.1651, & 10 \leq d < 42 \\ 12, & d \geq 42 \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: N_T 为最佳气温累积小时数; N_Q 为最佳太阳曝辐量累积小时数; d 为路面深度,cm。由于本研究气温与太阳曝辐量数据以小时为最小单位,在 N 值不为整数的情况时,对 N 值四舍五入取整后再求各深度对应的气温和太阳曝辐量序列。

2.2 模型形式的确定

在确定模型中气温和太阳曝辐量的自变量形式后,可将不同深度的路面温度 T_d 表示为平均气温 $\overline{T_{aN}}$ 、总太阳曝辐量 Q_N 引起的温度差以及常数修正项之和,如下所示:

$$T_d = F \overline{T_{aN}} + G Q_N + C \quad (5)$$

式中: F 为气温系数; G 为太阳曝辐量系数; C 为常数修正项。

使用不同地区不同深度的路面温度和相应的气温与太阳曝辐量按照式(5)进行回归分析,可以得到各地区 F 值、 G 值和常数项 C 值随深度的变化情况。以镇江为例,各系数随深度变化情况如图3所示。

从图3可以看到,各回归系数均随着深度呈规律性变化,对气温系数 F 使用深度 d 的一次方形式,对太阳曝辐量系数 G 使用深度 d 的二次方或者指数形式,对常数修正项 C 使用深度 d 的三次方形式,分

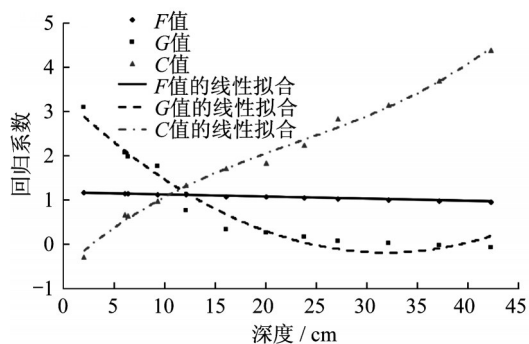


图3 镇江地区各回归系数随深度变化情况

Fig. 3 Chang of regression coefficient with depth for Zhenjiang site

别能达到最好的拟合效果。其他地区均有类似规律。将系数代入式(5),预估模型可改为以下形式:

$$T_d = (a_1 d + a_2) \overline{T_{aN}} + (a_3 d^2 + a_4 d + a_5) Q_N + a_6 d^3 + a_7 d^2 + a_8 d + a_9 \quad (6)$$

式中: a_i 为回归系数。

2.3 各地区回归分析结果

在确定模型形式后,分别对表1中前4个观测点的实测路面温度、气温和太阳曝辐量进行回归分析,各地区的回归分析结果如表2所示。从表2中可以看出,各地区的回归模型均有较高的 R^2 和较小的标准预估误差,可以说明各地区的预估模型精度较高。同时所有的 t -值绝对值均大于5%置信区间下检测统计量临界值 $t_{\alpha/2}(1.9570)$ 。因此,所有参数都显著,对模型重要。然而,该模型形式也具有局限性。由于各个地区的模型仅由当地的路面温度、气温和太阳曝辐量得到,因此不能较好地预估其他地区的温度。例如,如果使用镇江地区回归得到的预估模型来预测库尔勒地区的温度,预估精度将大大下降。因此,该模型存在地区差异性,不具备较好的地区适应性,还需要进一步改进。

表2 各地区回归分析结果

Tab. 2 Regression results for each site

回归系数	镇江		库尔勒		上海		乌鲁木齐	
	系数值	t -值	系数值	t -值	系数值	t -值	系数值	t -值
a_1	-0.005 6	-91.010 5	-0.002 1	-27.133 0	-0.042 0	-9.726 7	-0.016 3	5.050 2
a_2	1.209 2	877.530 8	1.010 1	612.305 8	1.587 8	-8.511 7	0.922 5	-7.557 1
a_3	0.001 7	88.582 5	0.000 2	9.522 4	0.010 9	40.220 1	0.009 5	60.039 4
a_4	-0.122 8	-107.635 7	-0.021 6	-15.306 2	-0.263 6	4.184 1	-0.813 9	3.543 3
a_5	2.137 9	134.100 9	0.592 7	26.897 4	1.406 0	-5.768 5	9.356 0	-3.483 4
a_6	$-9.100 0 \times 10^{-5}$	-16.624 3	$6.800 0 \times 10^{-5}$	12.610 7	-0.008 5	8.213 9	-0.012 0	17.395 3
a_7	0.006 9	19.544 7	-0.003 6	-9.607 7	0.166 9	-9.010 4	0.188 9	-5.481 7
a_8	-0.041 7	-6.445 6	0.049 3	6.852 1	0.316 4	8.354 0	-0.626 6	4.482 9
a_9	0.593 1	15.637 6	2.111 5	54.696 3	-10.235 5	3.766 7	1.793 9	-3.608 4
R^2	0.966 3		0.930 0		0.901 4		0.916 3	
标准预估误差/ $^{\circ}\text{C}$	2.094 6		3.621 3		2.767 9		3.325 1	
观测数据个数	86 676		80 934		5 000		4 470	

3 预估模型的改进

3.1 地区差异产生的原因

根据上述分析,式(6)的地区差异性限制了该预估模型在实际中的推广和使用。为了进一步改进该模型,需建立具有广泛适用性的全厚式沥青路面温度场预估模型。

研究发现,路面温度不仅受到每日周期性变化的气温和太阳曝辐量的影响,还与处于路面结构下方的大地产生着持续的热交换。热交换是由路面温度与地温之间的差异决定的,所以路面温度必然受到地温的影响。因此,路面温度可以视为由两部分叠加而成,即由气候长周期变化所决定的相对稳定的当地大地基准温度和由当地气候短期波动所决定

的周期性变化叠加而成^[2]。随着路面深度的增加,气候短期波动的影响减弱,地温的影响增强,使得路面温度的变化更接近于地温的变化,这也很好地解释了图1中较深处路面温度日变化差异较小的现象。

式(6)所示的预估模型仅考虑了气温和太阳曝辐量每日周期性变化对路面温度的影响,而没有考虑地温对路面温度的长期作用,这会造成气温和太阳曝辐量相同而地温不同的地区具有相同的温度场预估结果。因此,地温是造成预估模型地区差异最主要的原因,需要在预估模型中加入地温参数。然而,由于地温数据难以获取,因此需要在模型中引入一个参数来反映地温对路面温度的长期影响。

研究发现^[2,17],不同地区历年的月平均气温可以

在很大程度上反映气候的长期变化,从而反映地温的变化情况。收集了上海市1981年—2010年月平均气温和月平均地温,如图4所示。从图4可以看出,两者变化趋势相同,具有较好的相关性。因此,采用历年的月平均气温来反映地温的影响。

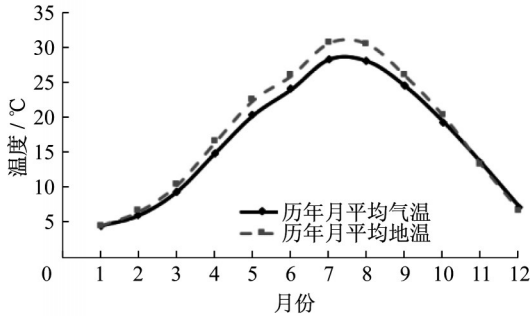


图4 上海市1981年—2010年月平均气温与地温

Fig. 4 Mean monthly ground temperature and mean monthly air temperature from 1981 to 2010 in Shanghai

3.2 考虑地区修正系数的预估模型

路面在与大地进行热交换的过程中,越靠近底层的路面结构受地温的影响越大。因此,预估模型中增加月平均气温 T_m 和月平均气温与深度的乘积 $T_m d$ 两项变量,以反映地温对不同深度路面的影响。改进后的预估模型形式如下所示:

$$T_d = (b_1 d + b_2) \overline{T_{aN}} + (b_3 d^2 + b_4 d + b_5) Q_N + b_6 d^3 + b_7 d^2 + b_8 d + b_9 + (b_{10} d + b_{11}) T_m \quad (7)$$

式中: b_i 为回归系数。对表1中前4个观测点的实测路面温度和气温与太阳曝辐量进行回归分析,得到以下计算式:

$$T_d = (-0.0096d + 0.9037) \overline{T_{aN}} + (0.0010d^2 - 0.0756d + 1.4518) Q_N - 3 \times 10^{-5} d^3 + 0.0028d^2 - 0.0183d + 1.6052 + (0.0075d + 0.2288) T_m \quad (8)$$

式(8)的 R^2 为0.9513,标准预估误差为2.8948℃,说明式(8)的回归精度较高。同样,各参数的 t -值均大于5%置信区间下检测统计量的临界值 $t_{\alpha/2}$,因此所有参数都具有显著性。

图5给出了4个地区共177 080个实测值和对应预测值的对比。从图5可以看到,从-15℃到50℃的所有温度的数据点都均匀分布在 $Y=X$ 等值线周围,偏离等值线的最大误差小于6℃,说明该预估模型能适应全年中各个地区的温度变化情况,有很好的预估效果。

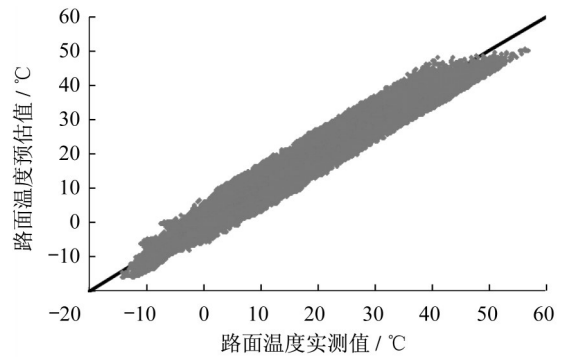


图5 路面温度实测值与预估值对比

Fig. 5 Comparison of measured value with predicted value of pavement temperatures

4 改进模型的验证

为了验证改进后模型的地区适用性,使用未曾参与建模的上海市2003年实测数据(观测点5)来验证。需要提出的是,由于数据观测点建立不便且观测时间较长,针对全厚式沥青路面的温度场观测工作仍在不同地区进行,相关数据尚不完备,因此地区适用性验证选择了沥青层厚为15 cm的观测点5的数据。使用改进后的模型对该观测点不同深度的路面温度进行预测, R^2 为0.8800,标准预估误差为3.0300℃,观测点5的8 911个实测值和预估值的对比结果如图6所示。从图6可以看出,所有温度的数据点都均匀地分布在 $Y=X$ 等值线周围,说明该预估模型能适应不同地区的温度变化情况。

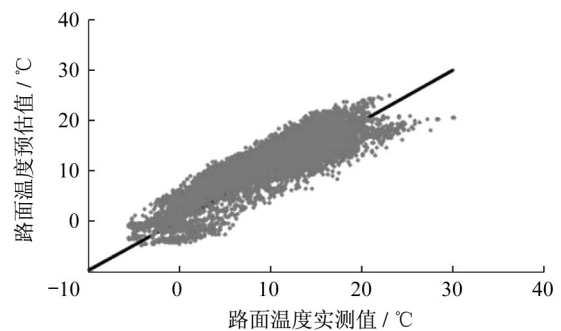


图6 路面温度实测值与预估值对比(模型验证)

Fig. 6 Comparison of measured value with predicted value of pavement temperature (model validation)

5 结论与展望

(1) 路表与路面结构上层(≤ 30 cm)的温度主要受实时气温与太阳曝辐量的影响,温度日变化显

著,通常大于 6°C ,而且靠近路表处的路面温度随气温和太阳曝辐量同步变化。

(2) 路面结构下层($>30\text{ cm}$)的温度主要受一段时间内气温和太阳曝辐量的累积影响,温度日变化差异较小,通常小于 3°C ,路面温度变化滞后于气温和太阳曝辐量的变化。

(3) 气温和太阳曝辐量的累积影响可用累积小时内的平均气温和太阳曝辐总量来表征。累积小时数随着深度的增加而增加,可用以深度为自变量的分段线性模型来描述。气温和太阳曝辐量对应的累积小时数有明显差别,最佳气温累积小时数要显著大于最佳太阳曝辐量累积小时数,并且路面深度 10 cm 以内的太阳曝辐量累积小时数均为零,即太阳曝辐量能更快地促使不同深度处路面温度上升,对路面温度的影响更大。

(4) 路面温度不仅受到每日周期性变化的气温和太阳曝辐量的影响,还受到地温的影响。在模型中引入历年的月平均气温来表征地温的影响,可以解决模型的地区差异性,提高模型的适用性。

由于数据观测点建立不便且观测时间较长,全厚式沥青路面的温度场观测工作仍在全国不同地区进行,因此所采用的路面结构并非全是全厚式沥青路面结构。随着相关数据的积累,未来可对该模型的标定和地区适用性验证等方面进一步展开工作。

参考文献:

- [1] 秦健, 孙立军. 沥青路面温度场的分布规律[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 18.
QIN Jian, SUN Lijun. Study on asphalt pavement temperature field distribution pattern [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 18.
- [2] 孙立军, 秦健. 沥青路面温度场的预估模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 480.
SUN Lijun, QIN Jian. Prediction model on temperature field in asphalt pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(4): 480.
- [3] BARBER E S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports [C]//Highway Research Board. Washington DC: National Research Council, 1957: 1-8.
- [4] DEMPSEY B J. A heat transfer model for evaluating frost action and temperature related effects in multilayered pavement systems [C]//Highway Research Board. Washington DC: National Research Council, 1970: 39-56.
- [5] THOMPSON M R, DEMPSEY B J, HILL H, *et al.* Characterizing temperature effects for pavement analysis and design [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1987(1121): 14.
- [6] SOLAIMANIAN M, KENNEDY T W. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1993(1417): 1.
- [7] HERMANSSON A. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000(1699): 134.
- [8] SOUTHGATE H F, DEEN R C. Temperature distribution within asphalt pavements and its relationship to pavement deflection [R]. Lexington: Kentucky Department of Highways, 1968.
- [9] RUMNEY T N, JIMENEZ R A. Pavement temperatures in the southwest [C]//Highway Research Board. Washington DC: National Research Council, 1970: 1-13.
- [10] BOSSCHER P J, BAHIA H U, THOMAS S, *et al.* Relationship between pavement temperature and weather data: Wisconsin field study to verify Superpave algorithm [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998(1609): 1.
- [11] MARSHALL C, MEIER R, WELCH M. Seasonal temperature effects on flexible pavements in Tennessee [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001(1764): 89.
- [12] DIEFENDERFER B K, AL-QADI I L, DIEFENDERFER S D. Model to predict pavement temperature profile: development and validation [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(2): 162.
- [13] BALZER S, ERTMAN-LARSON H J, LUKANEN E O, *et al.* Prediction of AC mat temperature for routine load/deflection measurements [C]// Fourth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields. St Paul: Minnesota Department of Transportation, 1994: 401-412.
- [14] LUKANEN E O, STUBSTAD R, BRIGGS R C. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavements [R]. McLean: U.S. Department of Transportation, 2000.
- [15] PARK D Y, BUCH N, CHATTI K. Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001(1764): 97.
- [16] JIA L, SUN L, YU Y. Asphalt pavement statistical temperature prediction models developed from measured data in China [C]// Seventh International Conference of Chinese Transportation Professionals Congress (ICCTP). Shanghai: Tongji University, 2007: 723-732.
- [17] TOY T J, KUHAIDA A J, MUNSON B E. The prediction of mean monthly soil temperature from mean monthly air temperature [J]. Soil Science, 1978, 126(3): 181.