

文章编号:1671-8879(2016)01-0001-07

沥青路面温度场的全厚式实测分析

延西利¹,张世平²,李艳¹,胡小圆¹

(1. 长安大学公路学院,陕西西安 710064; 2. 四川广巴高速公路有限责任公司,四川成都 610041)

摘要:为了研究沥青路面温度场,在高速公路沥青路面铺筑过程中,从路床顶面开始在各施工结构层之间埋设温度传感器,利用数据采集仪连续 2 年全天候测试路面温度,建立了庞大的路面温度数据库,分析了路面温度的周期性变化;利用数值模拟方法,确定了路表温度,从而完整地建立了沥青路面全部厚度范围内的温度场,分析了高温、低温、常温时期路面温度场的变化规律。研究结果表明:沥青路面的温度呈周期性变化,尤以日周期变化最为显著;路面温度变化主要集中于沥青层内,而在基层顶面以下基本没有变化;测试路段在夏季高温时路表最高温度可达 62℃,高出气温约 22℃~24℃;沥青路面温度场在低温时呈直线增长趋势,在高温时呈幂指数衰减或折线式衰减趋势,而在常温时呈交替变化状态。

关键词:道路工程;沥青路面;温度场;全厚式;全天候;现场测试

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Analysis of temperature field of asphalt pavement by site measurement in full-depth

YAN Xi-li¹, ZHANG Shi-ping², LI Yan¹, HU Xiao-yuan¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Sichuan Guang-Ba Motorway Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: To study the temperature field of asphalt pavement, lots of temperature sensors were buried between each construction structure layer from the top of roadbed during the pavement construction of a motorway. A great databank about pavement temperature was founded after two consecutive years measurement by a data-acquisition central, which permitted an analysis on the periodic variation of asphalt pavement temperatures. The surface temperature of pavement was determined by numerical simulation, and so a whole temperature field in full-depth of pavement structure was drawn, which permitted an analysis on the variation tendency of asphalt pavement temperature field in high, low and normal temperatures. The results show that the temperature of asphalt pavement varies periodically, and the day-periodic variation is the most remarkable. The temperature variation occurs principally in asphalt layers but no great variation below the top of pavement base. The surface maximal temperature of this pavement may take at 62℃ in summer, and be superior of 22℃-24℃ to the air temperature. The temperature of asphalt pavement increases linearly with the depth of pavement at low temperatures, and

收稿日期:2015-09-16

基金项目:四川省交通科技项目(2010.2.23,2011A7-4-1);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD013)

作者简介:延西利(1963-),男,陕西绥德人,教授,工学博士,E-mail:xili.yan@chd.edu.cn.

decreases exponentially or poly-linearly at high temperatures, and varies alternately at normal temperatures period. 1 tab, 11 figs, 18 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; temperature field; full-depth; all weather; site measurement

0 引言

沥青路面全厚式温度测试是指从路床顶面开始在路面结构厚度的全部范围内进行温度测试。

沥青路面广义上承受着行车荷载和自然荷载的作用,自然荷载主要是指降水和温度变化。沥青混合料的粘性性质,使得沥青路面的力学行为和技术性能受温度的影响十分敏感,如高温车辙、低温开裂等病害,因此,长期以来广大科技工作者始终坚持开展沥青混合料的热力学特性研究和沥青路面的温度稳定性研究,这些研究的宏观前提都必然是基于对沥青路面温度场的基本认识^[1-11]。显然,深入开展沥青路面温度场研究,始终具有前提性和基础性意义。目前,关于沥青路面温度场的研究,仍然缺乏系统认识,需要进一步完善和深化,如缺乏基本理论、缺乏完整的实测数据、缺乏理论与实测数据的比对验证(数值模拟)等,以致仍然未能建立较为理想的沥青路面温度场数值模型,不利于路面结构的分析计算和工程设计。本文结合项目研究内容,在完成沥青混合料热传导试验的基础上,主要介绍沥青路面全厚式温度测试分析,下一步将推进沥青路面温度场的数值模型研究^[1-3,12]。

沥青路面温度场研究或命题的提出由来已久,研究方法也是多种多样,但综观国内外研究状况,大致可归纳为2大类:理论分析法和试验测试法^[13-17]。理论分析法按照传热学原理,选取适当的材料热物性参数,以数理力学方法定性描述温度场,但定量上缺乏系统的实测数据拟合验证,有些理论分析模型的计算值与实测结果存在很大差距,如在高温期路面基层为零下摄氏度,显然是不符合实际的^[12,18]。对于沥青路面温度场的试验测试,根据温度传感器的布设方法不同,目前大多采用3种方法:芯样回置法;开槽埋设法;室内测试法。采用这些方法测试沥青层的温度,分析特定时段的温度场变化规律,取得了一些重要成果,但存在的问题也很显然:①一般仅限于沥青层的温度测试,而非路面全厚度范围;②一般仅限于设定时段的温度测试,而非全景式的长期连续测试;③对沥青层造成破坏或扰动,

结构层的均匀性发生变化。为此,本文提出全厚式长期连续实测法。以四川省广元—巴中高速公路为依托工程,在沥青路面的铺筑过程中,从路床顶面开始在路面各施工结构层之间埋设温度传感器,利用数据采集仪连续2年实测了路面和桥面温度,建立了庞大的温度数据库。另外,通过数值模拟确定了路表温度,建立了完整的沥青路面温度场。

1 现场测试技术方案

1.1 依托工程简介

广元—巴中高速公路路线全长121 km,设计车速80 km/h,双向4车道,半刚性基层沥青路面。沥青表层采用70[#] SBS改性沥青和辉绿岩,中下面层采用70[#] 基质沥青和石灰岩。道路路面和桥梁路面结构如图1所示(图中黑点及数字为温度传感器布设点及编号)。

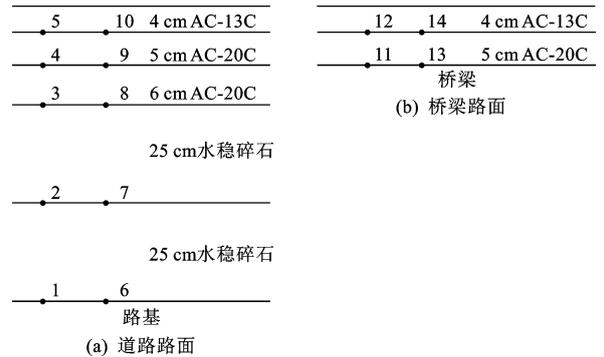


图1 沥青路面结构及温度传感器布设点

Fig. 1 Asphalt pavement structure and positions of temperature sensors in pavement

该依托工程位于四川盆地北缘,行政区域属于广元市元坝区和旺苍县、巴中市南江县和巴州区,地理坐标为东经105°44′~106°45′,北纬31°49′~32°27′。地貌形态上,从元坝—旺苍—巴中依次为微丘区、过渡区、山岭区。沿线年平均气温15℃,极端最低气温-8.2℃、极端最高气温39.7℃;雨量丰沛,年降雨量607.1~1 845.2 mm。

1.2 温度传感器布设

温度传感器型号SZW-18,精度为±0.5℃。根据实体工程的路面铺筑进展,从路床顶面开始在各施工结构层之间,埋设了温度传感器(图2),并且在

同一层位间距 1 m 埋设了 2 个传感器。基本目的为:①保证至少 1 个温度传感器能正常使用;②通过 2 组测试数据来简单判断其可靠性。数据处理时可取 2 个传感器的平均值,实际上对于高精度的温度传感器,2 组测试值相差很小。



(a) 温度传感器埋设

(b) 数据采集仪

图 2 温度传感器的埋设和数据采集仪

Fig. 2 Temperature sensors buried in layers and data-acquisition central

and data-acquisition central

测试点的平面位置选择在超车道的轮迹下面,传感器距离中央分隔带边缘 2 m。总共埋设了 14 个温度传感器:道路路面 10 个,桥梁路面 4 个,并依次进行了编号(图 1)。现场测试原本选取了微丘区、山岭区、过渡区 3 个路段^[12],但由于区域气候差异很小,实测结果差别不大,故在本文分析中选取任意一个路段的路面温度测试结果。

温度传感器布置于桥面和相邻约 30 m 的半填半挖或挖方路段,相邻布置主要是考虑数据采集仪的共享、方便线缆布设及后期管理保护。由于测试点位于超车道靠近中央分隔带一侧的轮迹下,所以从温度场的几何边界来看,路基的结构形式不会对温度测试造成影响。

1.3 温度数据采集

图 1 中 1~14 号测点的温度数据采集使用 SZZX-MCU14 数据采集仪及其配套的软件测试系统。对数据采集仪进行初始化设置,设定数据采集频率为 1 次/30 min,启动系统即开始自动温度测试及数据存储。测试系统供电采用蓄电池 6-QA-105,供电续航能力约 40~45 d,故每个月需要人工用电脑转存数据一次和更换蓄电池一次。

需要注意的是,为了保证测试系统的稳定运行及安全,数据采集仪和蓄电池用防水土工布包裹,置于自制的带锁铁箱中,铁箱焊接固定于钢管立柱上并隐蔽线缆^[12]。

经过测试系统的调整、试运行,从 2010 年 5 月 1 日~2012 年 5 月 1 日持续 2 年,全天候连续测试路面温度,建立庞大的温度数据库。

2 路面温度的周期性变化

随着一年四季更替、日出日落辐射,路面温度随着气温呈周期性变化^[12-15]。按照气象学原理,连续 3 d 的日平均气温低于或达到某一温度值时,即进入低温期或高温期,介于二者之间即为常温期。通常情况下,12 月和 1 月为低温期,7 月和 8 月为高温期,4 月和 10 月为常温期。

通过整理分析路面温度的实测数据,测试路段的最低温发生在 1 月份,最高温发生在 7 月份。为了全景式展示路面温度随日期的连续变化,作为典型范例,选取 7 月份连续 20 d 的温度变化,如下页图 3 所示。不同埋深的温度传感器在低温期和常温期的温度变化见下页图 4、图 5。

由图 3~图 5 可以看出:①路面温度变化主要表现为日周期性变化,随着日出日落而发生剧烈变化,符合大气辐射或气温周期变化规律;②温度变化主要集中于沥青层内,基层顶面以下的路面温度在各季节基本保持恒定,反映了不同材料的传热性能或蓄热性能;③常温期路面基层温度变化在 23 ℃~27 ℃之间,高温期在 25 ℃~35 ℃之间,低温期在 6 ℃~9 ℃之间;④夏季最高温时,路表下 4 cm 处温度达到 57 ℃,冬季最低温时约为 0 ℃,当然具体温度值取决于极端气候条件;⑤桥梁路表下 4 cm 处的温度在高温期和低温期时总是比道路路面高出或降低约 1 ℃,表现为热时更热、冷时更冷,从而导致夏季车辙和冬季冰雪的加剧,主要原因是桥梁路面的下卧层和周边临空面的不同。

3 路表温度的确定

需要注意的是,上述路面温度实测分析中未涉及到路表温度。缺失了路表温度,则路面温度场也并不完整。由于受到行驶车辆的干扰和可能的人为损坏等因素影响,在路表布设温度传感器进行长期连续的温度测试是不可能也不现实的。故本文采用有限元分析计算方法,通过数值模拟来确定路表温度^[18],具体方法如下。

(1)选取全年特征季节最低温、最高温、常温的代表性日期,数值模拟在这几个日期时路面各结构层的实测温度结果。

(2)对比分析模拟值与实测值,进行误差分析,并进一步调整计算参数,优化计算精度,确认具有较高的可信度。

(3)以同样的计算方法,分析确定相同代表性日

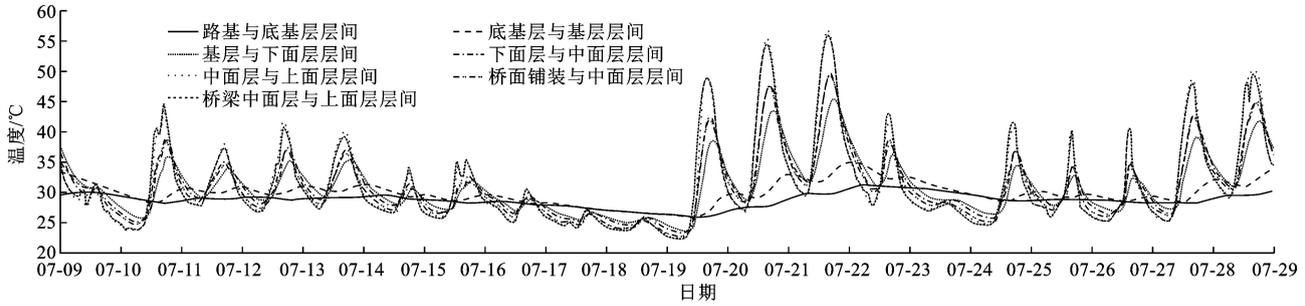


图3 高温期(2010年7月)连续20 d路面各结构层的温度变化

Fig. 3 Variations of temperature in pavement layers during continuous 20 days (July, 2010)

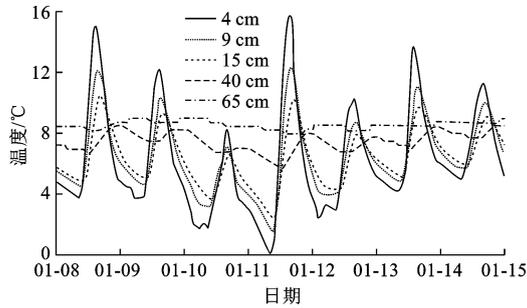


图4 低温期(2011年1月)路面温度的日周期变化

Fig. 4 Variations of temperature in pavement layers during low-temperature periods (January, 2011)

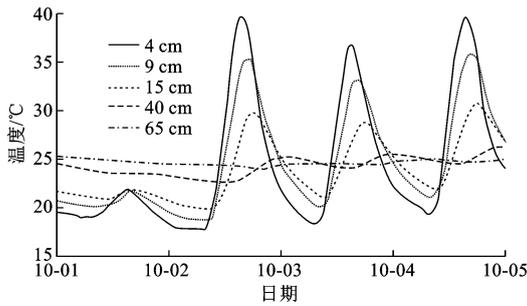


图5 常温期(2010年10月)路面温度的日周期变化

Fig. 5 Variations of temperature in pavement layers during normal-temperature periods (October, 2010)

期的路表温度。

通过分析2010年5月1日~2012年5月1日共2年的温度数据库,提取特征季节的温度片段(图3~图5)和极端温度对应的日期,从而确定特征季节的代表日期,如表1(常温日期为任选)所示,用于数值模拟路表温度和路面温度场分析。

表1 特征温度的代表日期选取

Tab. 1 Chose dates for typical extreme temperatures

特征温度	最低温	最高温	常温
代表日期	2011-01-11	2010-07-21	2010-10-02

在数值模拟的实际计算中,模拟值与实测值的最大相对误差为6.76%(波峰与波谷间),表明精度优良,方法可靠,可以确定路表温度^[18]。针对最低

温、最高温和常温日期的数值模拟及其对应的路表温度确定结果见图6、图7及下页图8。

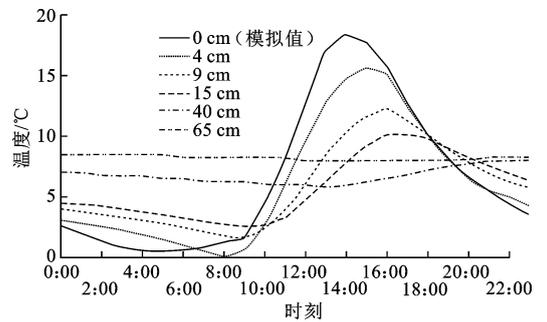


图6 最低温日期的模拟结果(2011-01-11)

Fig. 6 Simulation curves of pavement temperature at low-temperature date (January 11, 2011)

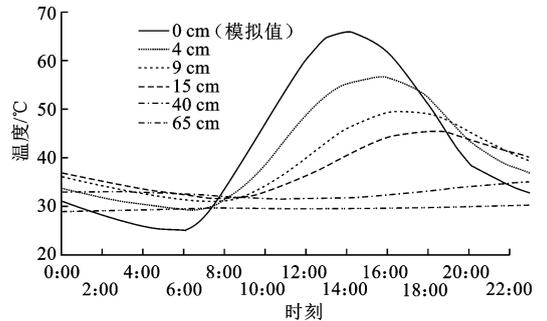


图7 最高温日期的模拟结果(2010-07-21)

Fig. 7 Simulation curves of pavement temperature at high-temperature date (July 21, 2010)

分析图6~图8所示的数值解,并与图3~图5所示的实测值对比,可以看出:①路面各结构层温度的模拟结果,无论在变化规律还是数值上,均与实测结果具有较好的一致性;②在最低温和最高温时,路面温度的模拟值比实测值平均高出约1.5°C,常温时则基本一致;③路表温度的变化规律与其他结构层步调一致,且对气温的感应从时间上总是超前于其他结构层。

数值模拟分析表明,数值解与实测值具有较好的一致性,能较好地反映路面内部温度变化的实际

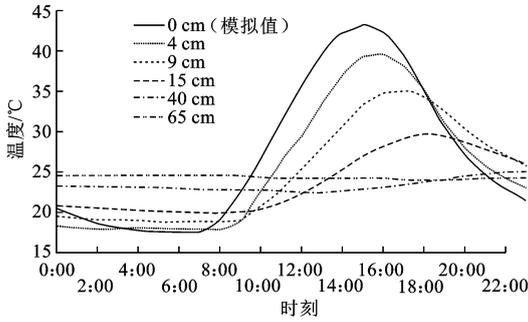


图 8 常温日期的模拟结果(2010-10-02)

Fig. 8 Simulation curves of pavement temperature at normal-temperature date(October 2, 2010)

情况,可用于路表温度的数值确定。数值模拟结果的有效性还可通过路面温度场的变化规律来验证。

4 沥青路面温度场分析

路面温度场是指在不同时刻路面温度随深度的分布情况,一般表述为 $T=f(h,t)$,其中 T 为路面温度, h 为路面深度, t 为时间。分析时通常取时间为某一时刻 t_0 即 $t=t_0$,来考察路面温度随深度的分布,此时温度场为 $T|_{t=t_0}=f(h)$,时间 t 可以取若干个不同时刻 t_0 。

温度场分析时选择了数据库中最低温和最高温对应的代表日期,并任意选取了常温日期(表 1)。针对这 3 个代表日期,以路表温度的模拟值为补充,绘制沥青路面在不同时刻、全厚度范围内的温度分布图,依次为低温温度场(图 9)、高温温度场(下页图 10)和常温温度场(下页图 11),以期进一步分析研究沥青路面的温度场。综合考察实测温度场发现:外界气候对沥青路面的影响深度在 40 cm 左右;路面每日的最低温发生在凌晨 6:00~8:00 时段,最高温发生在下午 14:00~16:00 时段。

4.1 低温温度场

图 9 所示的低温温度场为测试路段的最低温温度场,主要考察沥青路面的低温状态。由图 9 可以看出:路面在 10:00 之后的白天,路表温度升高,路面内部的温度变化主要发生在沥青层和基层内,底基层则没有走势上的变化;而在 10:00 之前基本上处于低温状态。总体走势分析为:①统计意义上的指数式增长;②热传导理论上的折线式增长,如图 9 中的走向线 ABCD。指数式分布表达式为

$$T(h) = T_{s,\min} e^{\alpha h} \quad (1)$$

式中: $T_{s,\min}$ 为路表温度最小值; α 为回归常数。

折线式的分段直线转折点刚好以沥青层、基层、底基层为分界,反映了不同材料或结构层不同的热

传导性能,具有重要的理论意义,将在下一步作数值模型研究。折线式分布表达式为

$$T(h) = \begin{cases} T_{s,\min} + k_a h & \text{沥青层内} \\ T_B + k_j h & \text{基层内} \\ T_C + k_d h & \text{底基层内} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_B 、 T_C 分别为图 9 中 B、C 点的温度; k_a 、 k_j 、 k_d 分别为折线对应于沥青层、基层、底基层的斜率。

由于指数式曲线的曲率变化很小,折线式各直线的斜率差别也很小,故从低温最不利因素考虑,可将式(1)和式(2)简化为简单直线,亦即低温温度场可以用直线增长来描述,函数表达式为

$$T(h) = T_{s,\min} + k_w h \quad (3)$$

式中: k_w 为低温温度场分布直线的斜率。

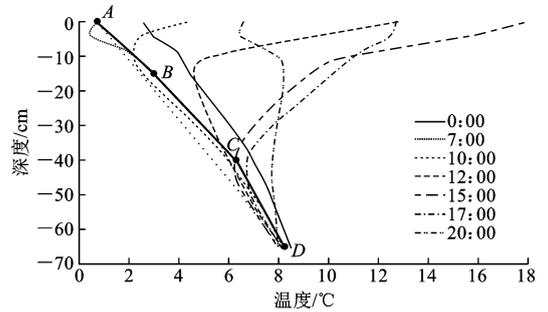


图 9 最低温日期(2011-01-11)不同时刻的路面温度场

Fig. 9 Temperature fields in pavement at different times of low-temperature date(January 11, 2011)

4.2 高温温度场

下页图 10 所示的高温温度场为测试路段的最高温温度场,主要考察沥青路面的高温状态。由图 10 可以看出:路面在 10:00 之前内部温度基本表现平稳,从底基层直至沥青层的温度均表现为大致相同的量值;而在 10:00 之后的白天,路表温度急剧升高,路面内部的温度发生根本性变化,表现为沥青层温度最高,随深度又急剧衰减,这种衰减可以简单回归为幂指数衰减或折线式衰减,如图 10 中的走向线 ABCD,折线的转折点也以结构层界面为分界。

与低温温度场分布规律一样,高温温度场也具有相同的数学表达式,只是方向相反,变为衰减,幂指数衰减见式(4),折线式衰减见式(5)

$$T(h) = T_{s,\max} e^{-\alpha h} \quad (4)$$

$$T(h) = \begin{cases} T_{s,\max} - k_a h & \text{沥青层内} \\ T_B - k_j h & \text{基层内} \\ T_C - k_d h & \text{底基层内} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $T_{s,\max}$ 为路表温度最大值;B、C 点见图 10。

显然,高温温度场的分布规律与低温温度场完全相同,只是方向相反(增长或衰减)。由于低温时

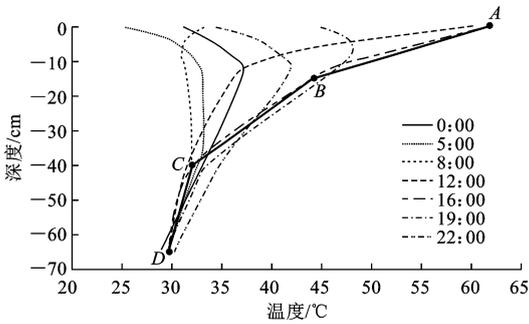


图10 最高温日期(2010-07-21)不同时刻的路面温度场

Fig. 10 Temperature fields in pavement at different times of high-temperature date (July 21, 2010)

材料的导热系数差别较小^[1-2],所以低温时的温度场可以简化为简单直线,而高温时则有较大差异。

4.3 常温温度场

图11所示的常温温度场为测试路段最普通的温度场,主要认识沥青路面的一般温度状态。由图11可以看出:常温温度场基本处于上述最低温直线和最高温折线之间,表现为一种常温的交替变化;在10:00之前,路面温度为常温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$;在10:00之后的白天,路表温度升高可达 $43.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度变化主要在沥青层内,基层和底基层则基本为常温。

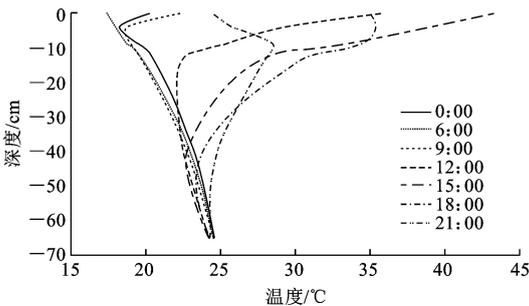


图11 常温日期(2010-10-02)不同时刻的路面温度场

Fig. 11 Temperature fields in pavement at different times of normal-temperature date (October 2, 2010)

5 结语

(1)连续2年实测了全厚式路面温度,建立了温度数据库,数值模拟了路表温度,分析了路面温度场,测试数据稳定连续,规律性极强,说明路面温度测试系统稳定可靠。

(2)沥青路面的温度变化宏观上随一年四季、日出日落而发生变化,最为显著的是日周期性变化,且这种变化主要集中于沥青层内,基层顶面以下在各季节的温度变化极小或基本不变化,反映了不同材料的传热性能或蓄热性能。

(3)沥青路面总体上在10:00之前保持实时季节的温度,在10:00之后的白天沥青层内的温度大

幅升高,直至在14:00~16:00之间出现当日最高温。在路表下4 cm处,实测最低温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,实测最高温度为 $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4)路面温度的模拟值和实测值具有良好的相关性,方法可行有效。测试路段的路表温度在冬季最低温时为 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季最高温可达 $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。路表最高温度高出大气温度约 $22\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(5)沿着路面深度的分布,沥青路面的低温和高温温度场均呈指数式或折线式变化,但方向相反(增长或衰减),折线的转折点出现在结构层的交界面。低温温度场可简化为直线增长,高温温度场具有明显的幂指数或折线式衰减现象;常温温度场则介于低温和高温之间,呈先衰减后增长或反向曲线,反映了一定的不规律性交替变化。

(6)桥梁路面具有不同的下卧层和临空面,其温度总比道路路面要高出或降低约 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (路表下4 cm处的实测值),表现为热时更热、冷时更冷,从而进一步说明了桥梁沥青加铺层在夏季易产生车辙、冬季易积雪结冰的基本原因。

(7)今后进一步研究将以热传导原理为基础,数值模拟路面温度的实测值,开展沥青路面温度场的数值模型研究。

参考文献:

References:

- [1] 延西利,李绪梅,孙毅,等.基于傅立叶导热定律的沥青混合料热传导试验[J].交通运输工程学报,2013,13(6):1-6.
YAN Xi-li, LI Xu-mei, SUN Yi, et al. Heat conduction experiment of asphalt mixture based on Fourier's heat conduction law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 1-6. (in Chinese)
- [2] 徐达.沥青混合料的热传导试验研究[D].西安:长安大学,2012.
XU Da. Experimental study on the heat conduction of asphalt mixtures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [3] 白伟.沥青路面传热性能的试验分析研究[D].西安:长安大学,2012.
BAI Wei. Experimental analysis on the characteristic of heat transfer for asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [4] LUCA J, MRAWIRA D. New measurement of thermal properties of superpave asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(1): 72-79.

- [5] 延西利,封晨辉,梁春雨. 沥青与沥青混合料的流变特性比较[J]. 长安大学学报:自然科学版,2002,22(5):5-8.
YAN Xi-li, FENG Chen-hui, LIANG Chun-yu. Comparison of mechanical behaviour between bitumen and bituminous mix[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2002,22(5):5-8. (in Chinese)
- [6] 延西利,梁春雨,艾涛,等. 基于沥青与石料界面剪切的黏塑性流变模型研究[J]. 土木工程学报,2014,47(2):136-144.
YAN Xi-li, LIANG Chun-yu, AI Tao, et al. Study on the visco-plastic model of the interfacial shear between bitumen and stone[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(2):136-144. (in Chinese)
- [7] 尹利华,延西利,陈晓瑛. 沥青材料感温性与其混合料高温稳定性关系研究[J]. 公路交通科技,2008,25(1):38-42.
YIN Li-hua, YAN Xi-li, CHEN Xiao-ying. Study of relation between asphalt temperature susceptibility and its mixture high temperature stability[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2008,25(1):38-42. (in Chinese)
- [8] 郑南翔,牛思胜,许新权. 重载沥青路面车辙预估的温度-轴载-轴次模型[J]. 中国公路学报,2009,22(3):7-13.
ZHENG Nan-xiang, NIU Si-sheng, XU Xin-quan. Temperature, axle load and load frequency model of rutting prediction of heavy-duty asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22(3):7-13. (in Chinese)
- [9] 申爱琴,蒋庆华. 沥青混合料低温抗裂性能评价及影响因素[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):1-6.
SHEN Ai-qin, JIANG Qing-hua. Influencing factor and appraising on anti-cracking of asphalt mixture at low temperature[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2004,24(5):1-6. (in Chinese)
- [10] 马正军,谈至明,钱晨. 沥青路面面层温度分别规律[J]. 中国公路学报,2014,27(4):9-15.
MA Zheng-jun, TAN Zhi-ming, QIAN Chen. Distribution law of asphalt pavement temperature[J]. China Journal of Highway and Transport,2014,27(4):9-15. (in Chinese)
- [11] 董泽蛟,李生龙,温佳宇,等. 基于光纤光栅测试技术的沥青路面温度场实测[J]. 交通运输工程学报,2014,14(2):1-6.
DONG Ze-jiao, LI Sheng-long, WEN Jia-yu, et al. Real-time temperature field measurement of asphalt pavement based on fiber Bragg grating measuring technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2014,14(2):1-6. (in Chinese)
- [12] 胡小圆. 沥青路面温度场的测试与分析[D]. 西安:长安大学,2011.
HU Xiao-yuan. Measure and analysis on thermal field of asphalt pavement[D]. Xi'an:Chang'an University,2011. (in Chinese)
- [13] 吴赣昌. 层状路面体系温度场分析[J]. 中国公路学报,1992,5(4):17-25
WU Gan-chang. The analysis of pavement temperature field of multi-layer system[J]. China Journal of Highway and Transport,1992,5(4):17-25. (in Chinese)
- [14] 吴建良,孙立军. 路面非周期一维温度场的傅里叶级数解[J]. 中国公路学报,2012,25(1):29-34.
WU Jian-liang, SUN Li-jun. Fourier series of non-periodic 1-D temperature field of pavement[J]. China Journal of Highway and Transport,2012,25(1):29-34. (in Chinese)
- [15] 康海贵,郑元勋,蔡迎春,等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析[J]. 中国公路学报,2007,20(6):13-18.
KANG Hai-gui, ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, et al. Regression analysis of actual measurement of temperature field distribution rules of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(6):13-18. (in Chinese)
- [16] 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):18-21.
QIN Jian, SUN Li-jun. Study on asphalt pavement temperature field distribution pattern[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2006,23(8):18-21. (in Chinese)
- [17] 贾璐. 沥青路面高温温度场数值分析和实验研究[D]. 长沙:湖南大学,2004.
JIA Lu. Numerical analysis and experimental research of high temperature fields in asphalt pavement[D]. Changsha:Hunan University,2004. (in Chinese)
- [18] 曹久林. 沥青路面温度场及应力场的数值模拟研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
CAO Jiu-lin. The numerical simulation of temperature field and stress field for asphalt pavement[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2012. (in Chinese)