

基于有限元的沥青路面温度场数值模拟方法研究

杨耀辉¹, 刘星坤², 商红发¹, 李利¹

¹山东高速集团有限公司创新研究院, 山东 济南

²东南大学, 江苏 南京

收稿日期: 2021年10月18日; 录用日期: 2021年11月4日; 发布日期: 2021年11月17日

摘要

由于沥青混合料为温度敏感性材料,因此温度场对沥青路面结构的承载能力和使用性能会产生重大影响。通过对沥青路面温度场现有理论及国内外研究者的现有成果进行总结,提出了基于有限元法的沥青路面热平衡方程中材料属性与边界条件的数值模拟方法。同时,通过温度场的数值计算值与RIOHTRACK环道试验场测得的实测值进行对比,验证该数值方法的可行性。最后,依据我国东部某地区典型的气候数据对高温、低温、常温三个典型温度场进行数值计算,分析各路面温度场的特点,为我国路面设计及后续研究提供一定的参考价值。

关键词

沥青路面, 温度场, 数值计算

A Study of Numerical Approach for Asphalt Pavement Temperature Field Simulation Based on the Finite Element Method

Yaohui Yang¹, Xingkun Liu², Hongfa Shang¹, Li Li¹

¹Innovation Research Institute of Shandong High-Speed Group Co., Ltd., Jinan Shandong

²Southeast University, Nanjing Jiangsu

Received: Oct. 18th, 2021; accepted: Nov. 4th, 2021; published: Nov. 17th, 2021

Abstract

Asphalt mixture is a temperature-dependent material and because of that, the temperature field

文章引用: 杨耀辉, 刘星坤, 商红发, 李利. 基于有限元的沥青路面温度场数值模拟方法研究[J]. 土木工程, 2021, 10(11): 1152-1161. DOI: 10.12677/hjce.2021.1011127

has a significant impact on the bearing capacity and performance of the asphalt pavement structure. By summarizing the existing theories of temperature field of asphalt pavement and the existing achievements of researchers at home and abroad, a numerical simulation approach for simulation of temperature field within an asphalt pavement structure is proposed. The feasibility of the numerical method is verified by comparing the numerically predicted temperature distribution with that of the *in situ* measurement at the RIOHTRACK road test field in Beijing. Finally, based on climatic data from an eastern region of China, three typical temperature fields of high temperature, low temperature and normal temperature are numerically calculated and analysed. The case study can serve as an example for using the new approach to improve the asphalt pavement design by considering the effect of temperature in a realistic way.

Keywords

Asphalt Pavement, Temperature Field, Numeral Calculations

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国高等级道路中，沥青路面已经有着广泛的应用。其中用于沥青路面铺筑的沥青混合料力学性能较好，但由于典型的热粘弹性-粘塑性，外界环境温度的周期性变化会对沥青路面的力学响应和长期性能的发展演变产生影响[1]。具体表现为：不同温度场下沥青路面会产生不同类型的损害，如低温开裂，高温车辙等；周期性温度变化也会降低其疲劳寿命。因此，获取更加真实的沥青路面温度场对于沥青路面的设计与养护具有重要意义。

国内外早期对于温度场的预估方法大致分为实测数据的统计分析和理论计算两类。美国有关学者在上世纪二十年代就开始观察和记录路面温度。吴赣昌[2]依据传热学的基本理论，揭示了路面温度场与环境因素之间存在的定量关系，建立了半刚性基层沥青路面二维非线性不稳定温度场的计算理论。随着研究的深入，两类方法逐渐相互融合。Hermansson 提出了一种夏季高温温度场计算方法，综合考虑温度、太阳辐射等条件，得到更准确的道路温度场预测模型[3]；美国的 MEPDG 设计方法中，在设计软件中嵌入了气候模块，综合考虑了道路类型、气候条件等，相关理论较为成熟[4]。随着计算机技术的进步，基于有限元软件研究沥青路面温度场的分布特征并建立相应的数学模型来表征其变化规律，不仅为道路设计人员模拟环境参数提供了便利[5]，并且能够根据实际状况采用有效的技术措施以保证路面结构在此条件下不致损坏，使沥青路面设计更加科学合理、更加具有针对性。

本文基于有限元法，提出了一种路面温度场的数值模拟方法，并通过试验路段实测数据验证了其可行性。研究进一步基于我国东部某地区气温数据，预测并分析了该地区沥青路面结构内部三种典型温度场的分布和变化规律，为提升我国沥青路面结构设计水平提供了帮助。

2. 沥青路面温度场数值实现方法

2.1. 基本理论

在晴天假设下，影响沥青路面温度场的传热过程主要包括以下四种基本传热过程：

a) 日照辐射

阳光通过辐射将热量传递给路面，黑色沥青路面主要吸收其中的短波部分。日照辐射的吸收方程可用下式表示：

$$q_{abs} = \gamma q_{sol} \quad (1)$$

式中： q_{abs} 为沥青路面的热吸收功率， W/m^2 ；

q_{sol} 为日照辐射功率， W/m^2 ；

γ 为热辐射吸收率。沥青混合料一般在 0.5~0.9 之间，本文取 0.9。

b) 路面逆辐射

沥青路面在接收太阳辐射的同时，也会将热量辐射到大气中。热量的辐射遵循斯特藩 - 玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律：

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{road}^4 - T_{atm}^4) \quad (2)$$

式中： q_{rad} 为路面的逆辐射功率， W/m^2 ；

ε 为黑体发射率。沥青路面一般在 0.8~0.9 之间，本文取 0.89；

σ 为 Stefan-Boltzmann 常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ；

T_{road} ， T_{atm} 分别为路表与大气的绝对温度， K 。

c) 路表 - 大气热交换

天气晴朗情况下，路表与环境之间的接触热交换仅仅发生路表与大气之间。固体与流体之间的热对流遵循牛顿冷却定律，即：

$$q_{conv} = h(T_f - T_s) \quad (3)$$

式中： q_{conv} 为热对流功率， W/m^2 ；

h 为传热膜系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

T_f ， T_s 分别为流体与固体的温度， $^\circ C$ 。

d) 路面内部热传导

路面内部不同温度的材料之间发生热交换遵循傅里叶定律。由于路面长宽在尺度上远大于深度，其温度梯度的处理以沿深度方向的一维的形式展现，即：

$$q_{cond} = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

式中： q_{cond} 为热传导功率， W/m^2 ；

λ 是固体的热传导率， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ；

因此，基于以上四种热交换方程，可以写出路面内部任意点的热平衡方程：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial z} = q_{abs} - q_{rad} + q_{conv} + q_{cond} \quad (5)$$

式中： c 为材料的比热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ；

ρ 为材料的密度， kg/m^3 。

由于降水引起的路面径流较为复杂，因此对因降水引起的路面温度场的变化暂不考虑。

2.2. 材料属性

与温度相关的材料特性主要包括材料密度、比热容和导热系数。密度可在沥青混合料设计过程中获得，比热容和热导率需要通过特定的热测试获得。

根据黄大强等[6]的试验结果, 混合料比热容的试验结果均在 800~920 J/(kg·°C)范围内, 其中密集配混合料较高, 在 900 J/(kg·°C)附近, 而开级配混合料的比热容取值则相对较低; 根据王芳芳等人的研究成果[5], 材料的热传导率具有明显的温度依赖性, 同时热传导系数在道路的常规使用温度条件下(-10°C~60°C), 具有明显的线性特征, 如图 1 所示。

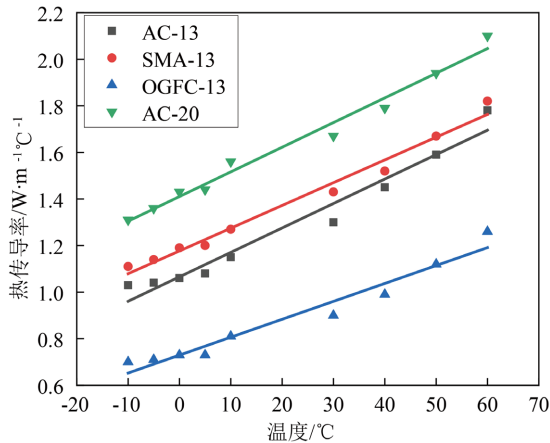


Figure 1. Thermal conductivity of different asphalt mixtures
图 1. 不同沥青混合料的热传导率

本研究取以下代表值进行路面温度场的计算。如表 1 所示。

Table 1. Typical value of thermal parameters of asphalt pavement
表 1. 沥青路面热学参数典型取值

材料	密度 kg/m ³	比热容 J/(kg·°C)	热传导率 W/(m·°C)
细粒式密集配沥青混合料	2400	900	0.00964T + 1.10
细粒式开级配沥青混合料	2300	820	0.0077T + 0.729
中粒式与粗粒式沥青混合料	2400	850	0.0106T + 1.41
水泥稳定粒料材料	2300	800	1.4
级配碎石	2200	700	1.2
路基	1800	1300	1.5

2.3. 路面温度场边界条件

路面温度场的边界条件与三种与路表相关的热传递方式: 日照辐射、路面逆辐射、路表 - 大气热交换相对应。

a) 日照辐射边界条件

在 ABAQUS 中通过 Load 模块的 Surfaceheatflux 功能进行实现日照辐射对应的热边界, 内容包含日照辐射幅值。可以用分段余弦函数表示太阳辐射功率随时间的变化规律:

$$q_{sol}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 12 - \frac{c}{2} \\ q_0 \cos \omega(t-12) & 12 - \frac{c}{2} < t \leq 12 + \frac{c}{2} \\ 0 & 12 + \frac{c}{2} < t \leq 24 \end{cases} \quad (6)$$

式中: q_0 为日照辐射功率峰值, W/m^2 ;

c 为日有效日照时长, h ;

ω 为日照辐射变化角频率, $\omega = 2\pi/2c$ 。

单日辐射总能量与日照辐射功率峰值之间的关系可以基于上式得到:

$$q_0 = \frac{1}{3600} \frac{\omega}{2} Q = \frac{\pi}{7200c} Q \quad (7)$$

式中: Q 为日辐射总能量, 可以从气象网站的地区历史数据中的查询。

b) 路面逆辐射边界条件

在 Abaqus 中通过 Interaction 模块中的 Surfacerradiation 功能实现路面逆辐射边界条件, 内容包含发射率(Emissivity)以及环境温度。本研究采用 Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, 绝对零度 $T_{abs} = -273.15^\circ\text{C}$ 。在路面设计或路面性能的长期预测中, 使用二阶傅里叶级数模拟温度的日变化, 结果与实际情况吻合较好。

$$T_a(t) = \bar{T}_a + T_m [0.96 \sin \omega(t-8) + 0.14 \sin 2\omega(t-8)] \quad (8)$$

式中: $T_a(t)$ 为大气温度;

\bar{T}_a 为日平均气温, $\bar{T}_a = 0.5(T_{\max} + T_{\min})$;

T_m 为日气温变化极值, $T_m = 0.5(T_{\max} - T_{\min})$;

T_{\max} , T_{\min} 分别为日最高气温与日最低气温。

c) 路表 - 大气热交换

在 ABAQUS 中通过 Interaction 模块中的 Surfacefilmcondition 进行定义路表 - 大气热交换, 包含传热膜系数以及环境温度。根据流体热力学经验公式, 半无限空间体间传热膜的系数 h 可表示为[7]:

$$h = 5.6 + 0.332 Re^{0.5} Pr^{0.33} \frac{K_{air}}{L} \quad (9)$$

式中: Re 为空气的雷诺数 Re ;

Pr 为佩克莱特数(pecllet number), 表示对流与扩散的相对比例;

K_{air} 为空气的热传导率;

L 为固定的特征长度;

为方便表示不同季节条件下的传热膜系数, 使用 Barber 的经验公式进行表示[4]:

$$h = 3.7v + 9.4 \quad (10)$$

式中: v 为风速, m/s , 可使用实测数据或当地多年气象数据。

3. 温度场数值模拟方法的验证与应用

3.1. 温度场数值模拟可行性验证

通过将本研究所使用的温度场的数值计算值与北京足尺路面试验环道 RIOHTRACK 试验项目采集数据进行对比, 对上述沥青路面数值模拟方法准确性进行验证。选取柔性路面结构 STR19 断面, 结构示意图如图 2 所示。试验场的气象数据如图 3 所示, 其中气温数据为试验场实测数据, 依据天气情况对北京的近 3 年四月份平均月辐射数据进行修正, 即: 晴天为月平均日照辐射, 雨天无日照辐射, 阴天为月平均日照辐射的一半。

$$\bar{Q}_m = (Q_{\text{晴}} * d_{\text{晴}} + Q_{\text{阴}} * d_{\text{阴}} * 0.5) / (d_{\text{晴}} + d_{\text{雨}} + d_{\text{阴}}) \quad (11)$$

式中: Q_m 为月平均日照辐射; Q 为对应天气日照辐射; d 为对应天气的天数。

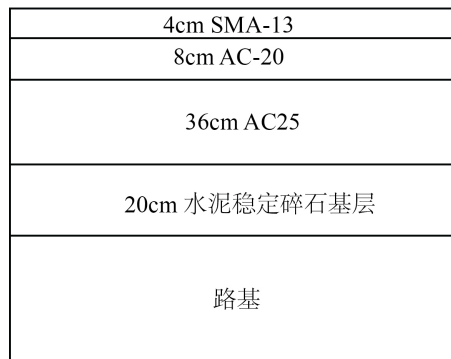


Figure 2. Schematic diagram of STR19 section structure in RIOHTRACK

图 2. RIOHTRACK 中 STR19 断面结构示意图

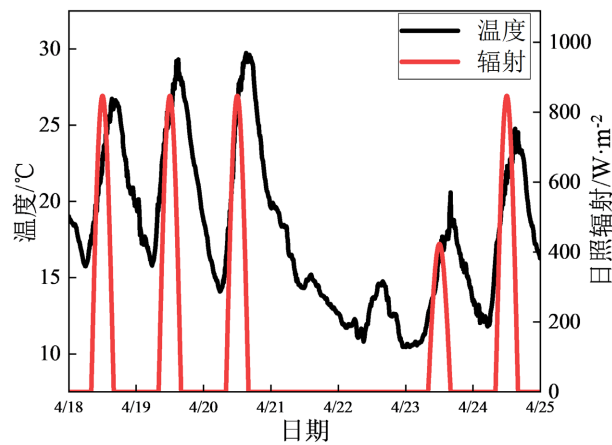
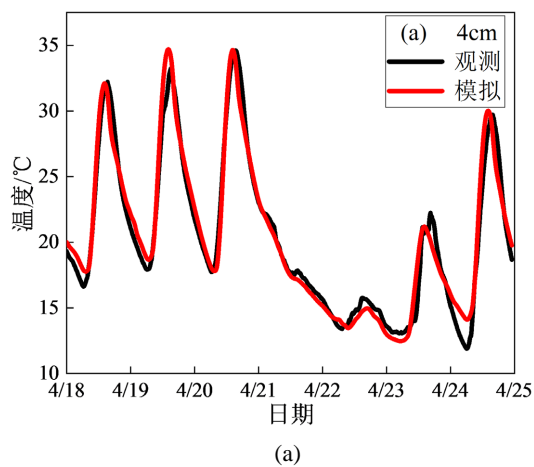


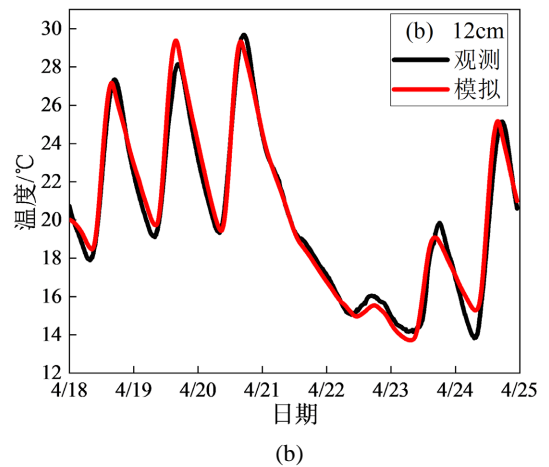
Figure 3. Value of atmospheric temperature and sunshine radiation during temperature field test

图 3. 温度场测试期间大气温度与日照辐射取值

依据上文所述的沥青路面温度场的数值计算方法，计算得到路面温度场数据的模拟值与实测值的对比如图 4 所示，图 4(a)~(c)分别为距离路表 4 cm，12 cm，24 cm 深度处沥青路面的温度场实测值与观测值之间的对比。



(a)



(b)

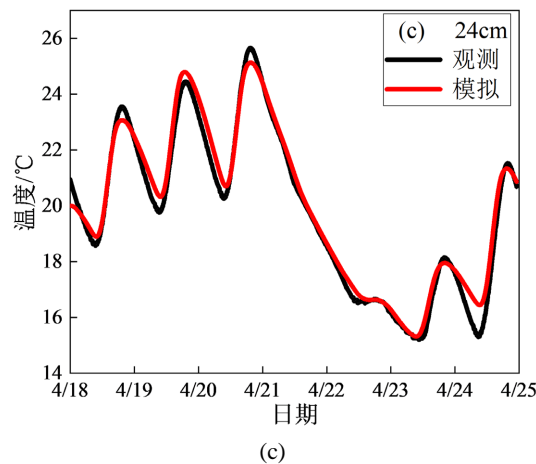


Figure 4. Comparison between simulated and measured temperature changes at different depths of road surface: (a) 4 cm away from road surface; (b) 12 cm away from the road surface; (c) 24 cm away from the road surface

图 4. 路面不同深度温度变化模拟值与实测值对比: (a) 距路表 4 cm 处; (b) 距路表 12 cm 处; (c) 距路表 24 cm 处

图 4(a)结果表明, 在距路表 4 cm 深度处, 通过温度场数值模拟计算得到数据与实测数据基本一致。其中偏差主要发生在 4 月 22 日至 4 月 24 日阴雨天部分, 是由于实际当日日照辐射与月均日照辐射之间存在差异; 同时, 实测值与预测值之间最大偏差为 3.48°C, 在可接受的范围内; 图 4(b), 图 4(c)结果表明, 在路面结构较深处, 该方法同样适用。因此, 本研究所述的沥青路面的温度场数值模拟实现方法可行。

3.2. 我国东部某地区典型温度场分析

依据气象网站的公开数据, 我国东部某地区的 2014~2016 年的平均气象数据如表 2 所示。

Table 2. Average meteorological parameters of a certain area in eastern China in recent years

表 2. 我国东部某地区近年平均气象参数

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月均气温/°C	2.4	4.2	8.7	15.2	20.5	24.4	27.8	27.4	22.8	17.1	10.4	4.5
月均最高气温/°C	7	8.8	13.3	20.3	25.6	28.7	31.9	31.7	27.3	22.2	15.9	10
月均最低气温/°C	-1.2	0.6	4.7	10.6	15.9	20.7	24.5	24.2	19.3	12.9	6.1	0.4
日辐射峰值/W·m ⁻²	674	732	789	847	905	857	948	1026	981	806	629	630
月均风速/m·s ⁻¹	2.3	2.6	2.9	2.7	2.6	2.6	2.5	2.6	2.3	2.1	2.2	2.2
日照时间/h	4.4	4.2	4.5	5.1	5.6	5.4	7.5	7.8	5.4	5.2	5	4.8

典型路面结构选用柔性沥青路面厚度为 36 cm 的沥青层, 32 cm 的级配碎石层。针对沥青层的热学材料属性, 以细粒式密集配沥青混合料的热学参数为统一标准。假设每月为 30 天, 并忽略阴雨天云层对日照辐射的遮蔽作用, 利用前文所述温度场模拟方法计算得到沥青路面全年温度场全年变化如图 5 所示。

结果表明, 路表的温度变化最为剧烈, 其中 8 月的日变化最大, 为 27.8°C, 常温季节与低温季节变化相对较小; 路面温度的最大值出现在夏季 8 月, 为 54.7°C; 而路面温度的最小值出现在冬季 1 月, 为

1.1℃；由于路面受到大气 - 路表热交换及日照辐射的热量输入，导致在绝大部分时间内，道路内部的温度均高于大气的月平均温度；同时，温度的日变化随路面的深度增加而逐渐减小，路表下方 32 cm 处，温度的日变化仅为 2~3℃。

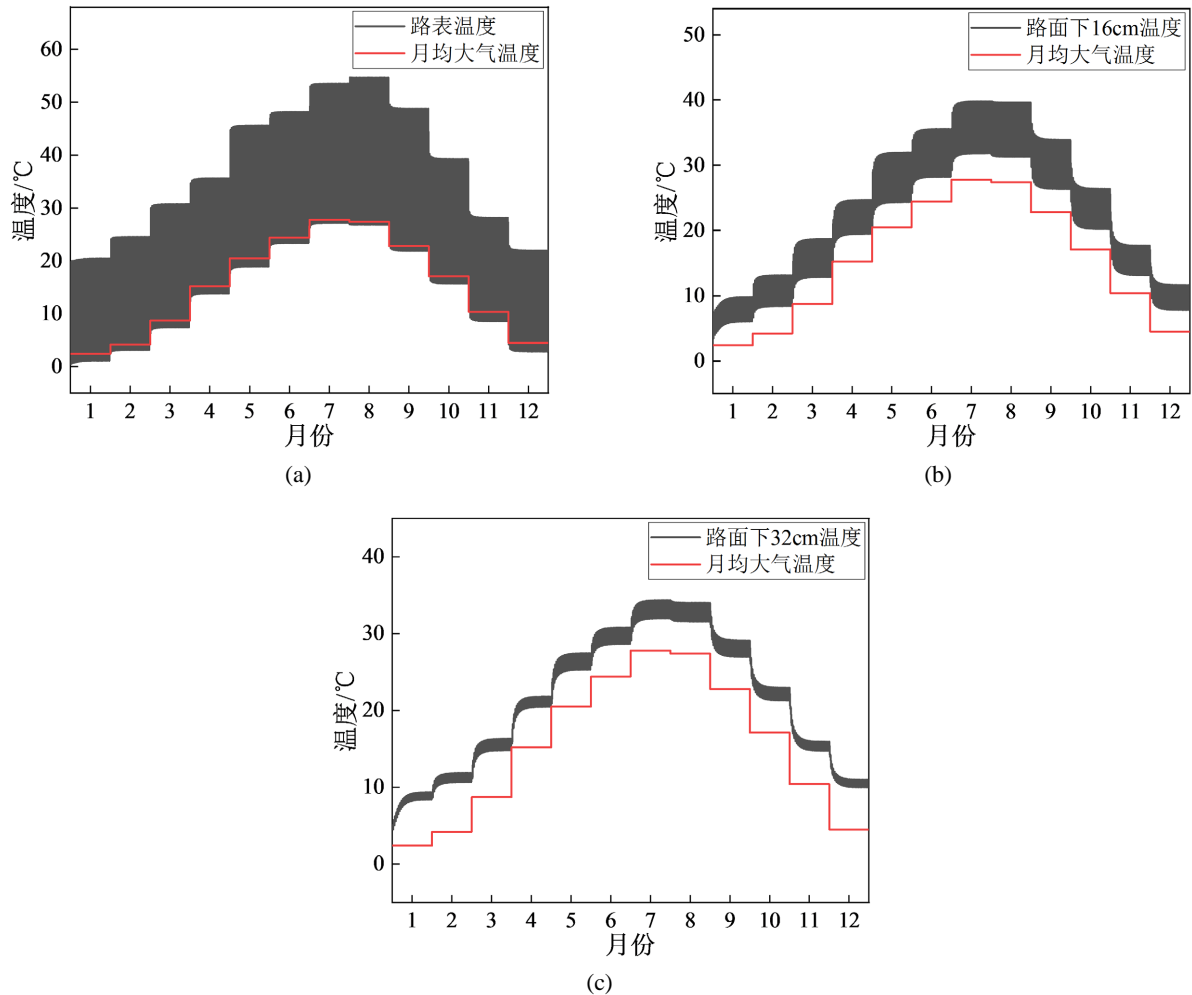


Figure 5. Annual variation of temperature field of asphalt pavement: (a) road surface; (b) 16 cm away from the road surface; (c) 32 cm away from the road surface

图 5. 沥青路面温度场年变化：(a) 路表处；(b) 距路表 16 cm 处；(c) 距路表 32 cm 处

另外，沥青层底温度与大气平均温度之间呈现出明显的相关性。通过对二者进行线性拟合，如图 6 所示。

可以得到沥青层底部的平均温度在大气平均温度之上 6.5℃，即：

$$T_{bottom} = \bar{T}_a + 6.5 \quad (12)$$

式中： T_{bottom} 为沥青层底月平均温度， \bar{T}_a 为大气月平均温度。

将全年的 12 个月归类为低温、常温、高温三个典型温度场：低温温度场包括 1、2、12 月，常温温度场包括 3、4、5、9、10、11 月，高温温度场包括 6、7、8 月。以 1 月、4 月、7 月为代表的路面典型温度场的日变化如图 7 所示。

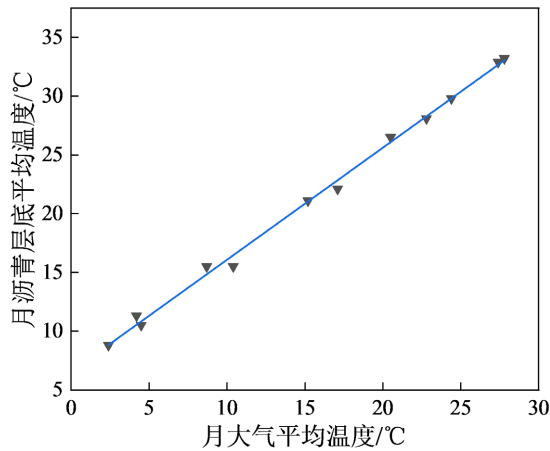


Figure 6. Relationship between average temperature of asphalt layer and average temperature of atmosphere

图 6. 沥青层底层平均温度与大气平均温度关系

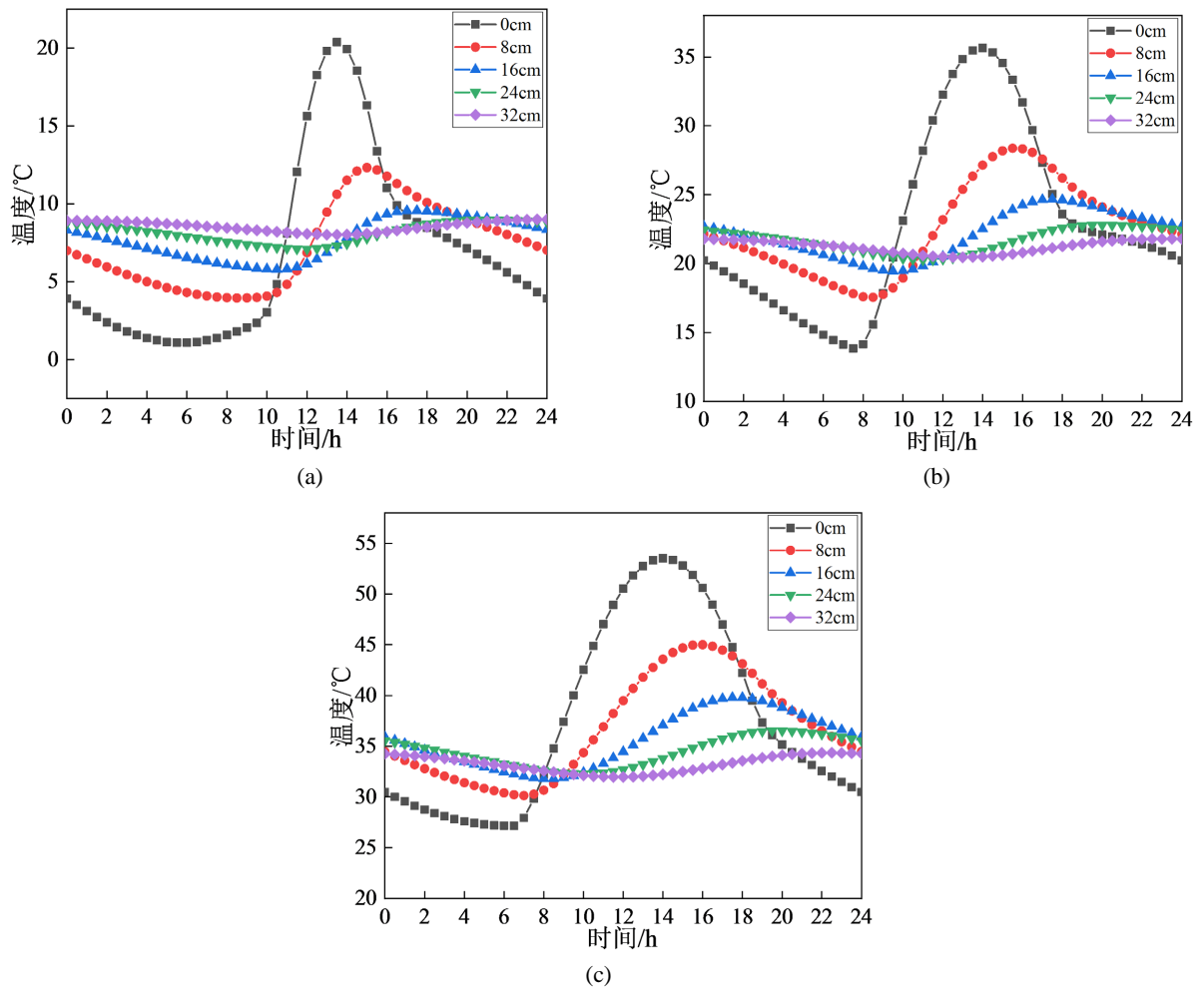


Figure 7. Diurnal variation of typical temperature field of asphalt pavement: (a) low temperature field; (b) normal temperature field; (c) high temperature field

图 7. 沥青路面典型温度场日变化: (a) 低温温度场; (b) 常温温度场; (c) 高温温度场

结果表明：低温温度场、常温温度场、高温温度场整体上具有相同的温度变化规律。路表温度首日照辐射影响巨大，缓慢的降温阶段出现在日出前与日落后，其中常温温度场与高温温度场均在日出时刻附近达到最低值，低温温度场由于日照时间较短，在 6 时附近即达到最低值；此外，对于不同温度场，温度随深度的变化规律基本相同。随着深度的增加，温度的变化表现出滞后性且逐渐稳定。距离路表下 16 cm 处，温度的日变化仅有 5℃左右。

4. 结论及展望

本文关注了沥青路面设计过程中温度场的应用问题，提出基于有限元法的沥青路面温度场数值实现方法，取得了如下结论：

a) 对沥青路面温度场边界条件进行研究，综合考虑风速、太阳辐射等条件，提出了沥青路面温度场的数值模拟预测方法；

b) 通过与试验路段的实测数据进行对比分析，验证了此方法具有可行性及较高的精度；

c) 建立了我国东部某地区三种典型温度场并分析其特征，发现路表温度受日照辐射影响巨大，日变化最为剧烈；沥青层底温度与大气平均温度之间呈现出明显的相关性；对于不同温度场，柔性路面结构的温度随深度变化规律基本相同，具有滞后性。

本文提出的沥青路面温度场数值仿真预测方法，对进一步优化我国目前道路设计方法具有一定的实用价值。此外，由于路面径流较为复杂，本文暂未考虑因降水引起的路面温度场的变化，在后续研究中需要进一步完善。

基金项目

山东省交通运输厅科技计划项目(项目编号：2020B63)。

参考文献

- [1] 冯德成, 胡伟超, 于飞, 曹鹏, 张鑫. 沥青路面材料热物性参数对温度场的影响及敏感性分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(11): 12-19.
- [2] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] Hermansson, Å. (2000) Simulation Model for Calculating Pavement Temperatures Including Maximum Temperature. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1699**, 134-141. <https://doi.org/10.3141/1699-19>
- [4] Jablonski, B., Regehr, J. and Rempel, G. (2001) Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report Part Design Analysis.
- [5] 王芳芳. 沥青路面温度场的数值模型研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [6] 黄大强. 高寒地区沥青路面温度与荷载耦合动力行为[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [7] Qin, Y. (2016) Pavement Surface Maximum Temperature Increases Linearly with Solar Absorption and Reciprocal Thermal Inertial. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **97**, 391-399. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.032>