

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.009

CRC+AC 复合式路面温度场影响因素研究

程小亮¹,张豪²,李盛²

(1.中冶南方城市建设工程技术有限公司,湖北 武汉 430063;2.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:针对CRC+AC复合式路面温度场影响因素的问题,研究基于气象学和传热学理论,运用Abaqus有限元软件进行三维实体建模与数值模拟,分析了CRC+AC复合式路面结构的温度场分布与影响因素。结果表明:在一定条件下,距路表越深,路面结构温度变化越小,当深度超过0.6 m,温度几乎没有变化且与外界环境温度相差不大。通过增加沥青路面的热传导率、热容量、路面发射率和减小太阳辐射吸收率可降低高温时刻路表温度,减轻路面车辙和裂缝的危害。无论是夜晚低温时刻还是白天高温时刻,改变沥青层厚度对路表温度影响不大,但在白天高温时刻,面层内温度会随着沥青层厚度的增加而降低,并且降低的幅度较大。该文研究结果可为CRC+AC复合式路面的沥青层开裂、车辙等病害预防提供技术支持,并为材料选择和结构设计提供理论依据。

关键词:道路工程;复合式路面;数值模拟;温度场;影响因素

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

0 引言

刚柔性复合路面由高强度刚性基层和柔性沥青混凝土面层组成。连续配筋混凝土(Continuously Reinforced Concrete, CRC)层用作承重结构层,沥青混凝土(Asphalt Concrete, AC)层作为表面功能层。复合路面结构具有较好的行驶舒适性、降低CRC板所承受的荷载及温度疲劳应力、减小雨水对基层和钢筋损害、延长使用寿命、降低维护成本等优势。从长远来看,经济性非常明显。它是中国重载交通长寿命沥青路面的主要结构形式之一^[1-4]。

中国复合路面的早期损坏比较严重,特别是高速公路使用寿命往往低于设计寿命。因此,提高路面结构的耐久性,促进中国高速公路事业又快又好地发展,已迫在眉睫^[5-7]。刚柔复合式路面沥青层的破坏形式主要为沥青层层底反射裂缝和表面温度疲劳裂缝以及车辙,通过使用合理的层间结构和材料可减少这些病害的危害程度。但在沥青层表面出现温缩裂缝后,由于刚柔复合式路面的沥青层较薄,在温度和车辆荷载的共同作用下,裂缝容易贯穿沥青,

显著影响沥青面层的使用寿命^[8-10]。

目前国内外对路面结构温度场的研究方法,分为理论分析法和统计分析法^[11-12];Barber^[13]建立了路表太阳辐射和路面结构不同深度位置处的温度关系式,得到不同沥青路面结构中温度最高值的计算方法;Hermansson等^[14]建立了以太阳辐射和气温为边界参数的路面结构温度预估模型,为进一步的数值模拟预估研究工作提供了有力理论依据;Park等^[15]对在不同温度条件下的路面结构温度场预估进行了数值研究,通过有限差分计算原理准确预估路面结构不同深度的温度分布变化规律。近年来,中国也有许多科研人员对路面温度场进行了较多深入研究,韩子东^[16]研究得出了路面结构温度场的年变化解析表达式;黄立葵等^[17]通过有限差分原理精确分析了高温条件下沥青路面温度场;马正军等^[18]采用有限元软件模拟中国高海拔公路地区的沥青路面温度场及其应力等。

本文通过有限元数值模拟,分析CRC+AC复合式路面结构的温度场分布,并对CRC+AC复合式路面温度场的影响因素进行分析,研究成果可为CRC+AC复合式路面的结构设计和沥青面层开裂分析提供

收稿日期:2022-12-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878076);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(编号:202235)

作者简介:程小亮,男,硕士,高级工程师.E-mail:625112660@qq.com

理论基础,并促进CRC+AC复合式路面的推广应用。

1 CRC+AC复合式路面有限元模型建立

1.1 模型几何尺寸

在正常工作环境下,CRC板会产生许多横向细小裂缝,属于带裂缝工作。因此设置横向裂缝间距为1.5 m,宽度为0.5 mm,纵向裂缝设在模型中间,裂缝宽度取5 mm,裂缝采用虚拟填料的方法模拟其传荷作用。模型沿行车方向取6 m、垂直行车方向取6 m、深度方向取4 m。

CRC板纵向采用 $\phi 16$ mm 螺纹钢筋,配筋率为0.6%,横向采用 $\phi 12$ mm 螺纹钢筋,配筋率为0.1%,钢筋采用T3D2三维二节点线性桁架单元,采用嵌入区域约束类型将钢筋网嵌入到CRC板中位置。路面结构示意图如图1所示。

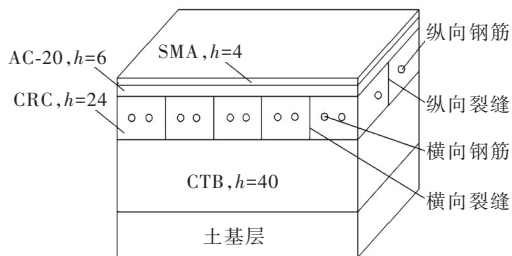


图1 路面结构示意图(单位:cm)

1.2 模型外部气象参数

CRC+AC复合式路面温度场计算过程复杂,外部影响因素包括:外界24 h气温变化、日太阳辐射总量 Q 、日平均风速 v 、日照时间 c 等参数,北京地区7月份一天24 h温度数据如表1所示,外部气象参数如表2所示。

表1 北京地区7月份一天24 h温度数据

时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃
01:00	25.0	09:00	29.5	17:00	33.0
02:00	24.6	10:00	30.5	18:00	31.8
03:00	24.3	11:00	31.6	19:00	30.6
04:00	23.8	12:00	32.8	20:00	28.7
05:00	23.5	13:00	33.7	21:00	27.8
06:00	24.9	14:00	34.0	22:00	27.4
07:00	26.5	15:00	34.2	23:00	26.4
08:00	28.1	16:00	33.7	24:00	25.2

表2 北京地区7月份外部气象参数

日太阳辐射总量 $Q/(MJ \cdot m^{-2})$	日照时间 c/h	日平均风速 $v/(m \cdot s^{-1})$
18.7	8.7	2.5

1.3 CRC+AC复合式路面热物性参数

为开展CRC+AC复合式路面温度场模拟,需要采用沥青路面各结构层材料的热力学参数为基础进行有限元模型的温度计算,路面材料热力学参数如表3所示。

表3 路面材料热力学参数

路面材料	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	热容量 $C/[J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$	热传导率 $k/[J \cdot (m \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1}]$	路面发射率 ϵ	太阳辐射吸收率 α_s	Stefan-Boltzmann常数 $\sigma/[W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}]$	绝对零度 $T_z/^\circ C$
SMA-13	2 000	925	4 680				
AC-20	2 400	900	5 040				
CRC	2 500	780	6 200	0.9	0.9	2.041×10^{-4}	-273
CTB	2 350	830	4 320				
土基	1 900	800	5 400				

2 CRC+AC复合式路面温度场分析

2.1 温度场相关理论

路面结构处在自然环境中,表层与大气直接接触,通过空气对流热交换、太阳辐射、路面有效辐射等方式与大气进行热交换,并沿路面深度方向向下传递热量,形成路面结构内部的温度场。

(1) 太阳辐射

太阳辐射的日变化过程可采用式(1)函数近似表示。通过Abaqus有限元软件中的Load模块,并结合DFLUX子程序,可实现太阳辐射的模拟。

$$q(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 12 - \frac{c}{2} \\ q_0 \cos[m\omega(t - 12)] & 12 - \frac{c}{2} \leq t \leq 12 + \frac{c}{2} \\ 0 & 12 + \frac{c}{2} < t \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_0 为中午最大辐射, $q_0 = 0.131Qm$, Q 为日太阳辐射总量 (J/m^2), $m = 12/t_d$, t_d 为实际有效日照时长 (m); ω 为角频率, $\omega = 2\pi/24$ (rad); c 为实际有效日照时数 (h)。

(2) 气温及对流热交换

气温的变化过程可采用正弦函数的线性组合式 (2) 模拟。气温与对流交换使用 Abaqus 有限元软件中的 Interaction 模块与子程序 FILM 实现。

$$T_a = \bar{T}_a +$$

$$T_m \{ 0.96 \sin [\omega(t - t_0)] + 0.14 \sin [2\omega(t - t_0)] \} \quad (2)$$

式中: \bar{T}_a 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), $\bar{T}_a = \frac{1}{2}(T_a^{\max} + T_a^{\min})$;

T_m 为日气温变化幅度 ($^{\circ}\text{C}$), $T_m = \frac{1}{2}(T_a^{\max} - T_a^{\min})$, T_a^{\max} 、 T_a^{\min} 分别为日最高气温与最低气温 ($^{\circ}\text{C}$); t_0 为初相位 (h)。

(3) 路面有效辐射

地面有效辐射可采用式 (3) 直接实现。使用 Abaqus 有限元软件中的 Interaction 模块对路面有效辐射进行定义。

$$q_F = \varepsilon \sigma \left[(T_1|_{z=0} - T_z)^4 - (T_a - T_z)^4 \right] \quad (3)$$

式中: q_F 为地面有效辐射 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]; ε 为路面发射率 (黑度), 沥青路面取 0.81; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$; $T_1|_{z=0}$ 为路表温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_a 为大气温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_z 为绝对零度值 ($^{\circ}\text{C}$), $T_z = -273^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 温度场分析

将上述参数输入有限元模型中进行传热计算, 可得到高温条件下 CRC+AC 复合式路面结构 24 h 各结构层周期性的温度变化情况。模型为一维传热, 故取路面纵向横断面为分析对象, 提取 24 h 内路面不同深度处的温度值, 得到其温度场数据, 不同深度的温度随时间变化情况如图 2 所示。

由图 2 可知:

从路面深度纵向分析, 夏季环境气温高, 平均气温为 28.8°C , 路面结构层温度场整体温度高且大于 24°C , 环境温差为 10.9°C , 沥青层温差为 16.2°C , 沥青层温差为环境温差的 1.5 倍, 结构层深度越深, 温度变化越小, 当深度超过 0.6 m, 温度几乎没有变化且与外界环境温度相差较小。

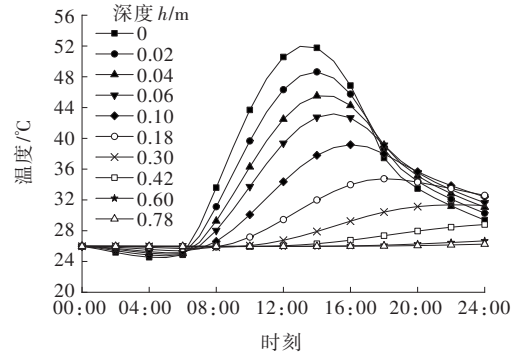
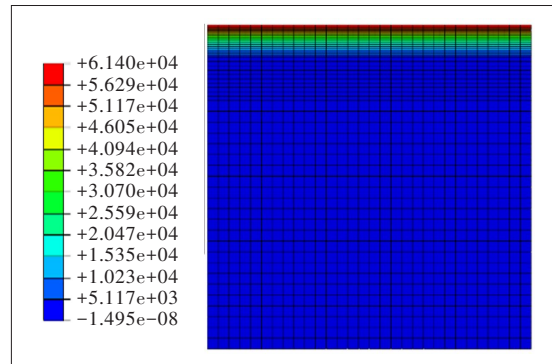


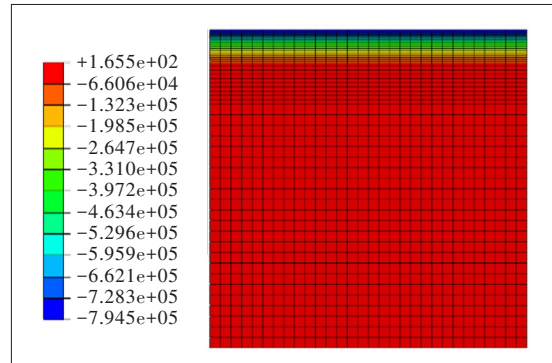
图 2 不同深度的温度随时间变化情况

从时间上横向分析, 路面各结构层温度随时间变化基本一致, 在一个周期内各结构层温度随时间变化先降低后升高再降低, 温度峰值随结构层深度的增加而减小且结构层深度越大温度峰值出现的时间越滞后, 对于夏季高温季节, 当 $h=0$ m 时, $T_{\max}=52.0^{\circ}\text{C}$, 出现在 13:00; 当 $h=0.04$ m 时, $T_{\max}=45.5^{\circ}\text{C}$, 出现在 14:00; 当 $h=0.10$ m 时, $T_{\max}=39.2^{\circ}\text{C}$, 出现在 16:00; 当 $h=0.18$ m 时, $T_{\max}=34.8^{\circ}\text{C}$, 出现在 18:00。

图 3 为 05:00 和 13:00 时的模型纵断面热流变化情况。



(a) 05:00



(b) 13:00

图 3 不同时刻热流分布云图 (单位: J/s)

图3中热流密度(HFL)为正值,表示热流方向向上,此时路面处于放热;当HFL为负值时,则热流方向向下,路面吸热。路面结构05:00时刻没有受到太阳辐射的影响,处于放热状态;路面结构在13:00时刻受太阳辐射影响,处于吸热状态。

在白天,路面受到太阳辐射和空气对流交换的作用,不断吸收热量,温度呈现升高状态,而在夜晚,由于没有太阳辐射作用,只有路面结构与空气发生对流热交换的作用,路面结构又不断放热,温度呈现下降的状态。路表面温度变化受气温影响最大,路面结构最高温度在路表,且路表温度远远大于大气,这主要由于路表对太阳辐射吸收率要远远大于大气。

3 CRC+AC复合式路面温度场影响因素分析

影响路面温度场的因素有外因和内因之分,外因主要为气温、太阳辐射强度、辐射时间、风速等,内因主要为沥青混合料的热传导率、热容量、太阳辐射吸收率、路面发射率以及沥青层厚度和模量,本文重点研究易改变的内因。

3.1 热容量对温度场的影响

热容量表示一定质量的物质提高温度所需要的热量,热容量越大,相同质量和温升时,需要的热量越多。其他层位的热容量不变,只改变沥青材料的热容量,为计算不同热容量与路面结构温度场的关系,分别取热容量为 $600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $1200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $1400 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $1600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $1800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,研究13:00和05:00时刻路面结构不同深度处的温度随热容量的变化情况,结果如图4所示。

由图4可知:①05:00时刻,在路面结构同一深度处,热容量越大,温度越高,随着热容量的增加,沥青层及CRC层的温度随之增加,基层的温度变化较小;②13:00时刻,在路面结构同一深度处,热容量越大,温度越低,随着热容量的增加,沥青层和CRC层的温度随之降低,基层的温度变化不大。热容量从 $600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 增加到 $1800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 的过程中,路表温度降低 3.081°C ,路表以下 0.02 m 、 0.04 m 、 0.06 m 、 0.1 m 、 0.2 m 处温度分别降低 4.144°C 、 4.867°C 、 5.15°C 、 4.517°C 、 2.179°C 。

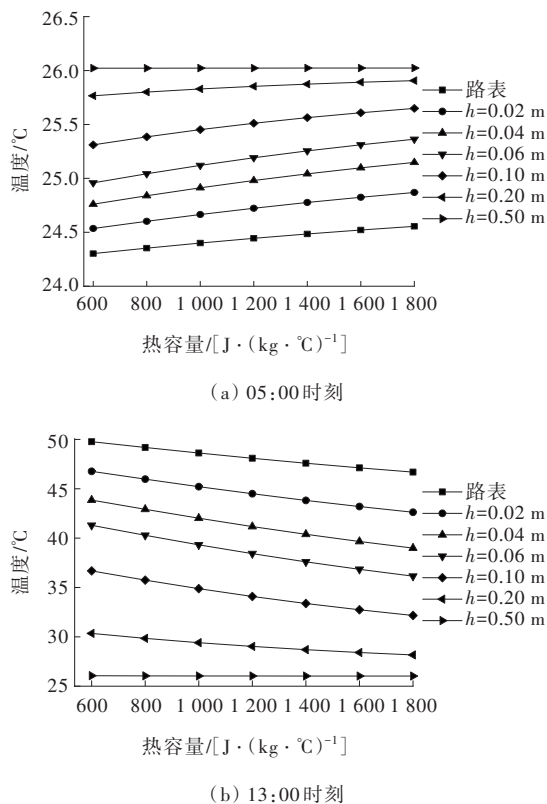


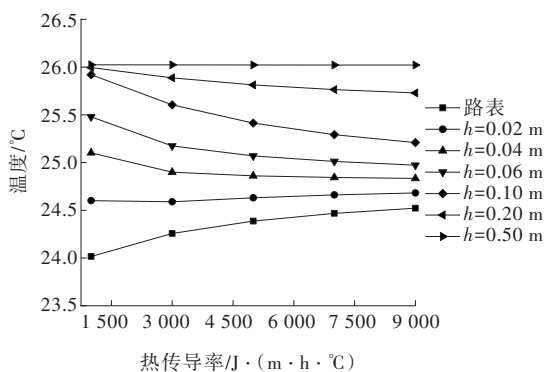
图4 不同时刻热容量对温度场的影响

热容量对温度的影响在沥青层范围内更明显,当路面深度超过 0.5 m ,热容量对此深度处的结构层温度几乎没有影响。增加热容量会使路面温度在夜间有所上升,但总体温度不高,即使夜间行车,也不会造成车辙、裂缝等病害加剧,而增加热容量可减小白天高温时刻面层的温度,防止路面出现过高的温度,以减小路面出现裂缝、车辙等病害的概率。

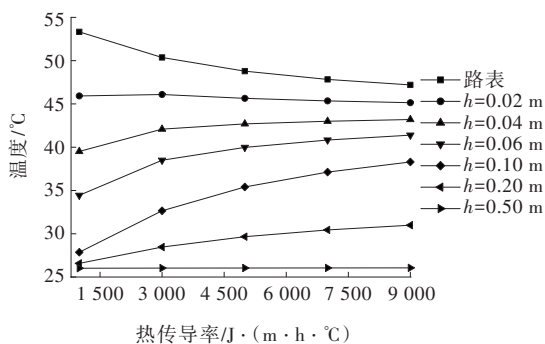
3.2 热传导率对温度场的影响

热传导率表征路面材料传递热量的能力。其他层位的热传导率不变,改变沥青层热传导率,为计算不同热传导率与路面结构温度场的关系,分别取热传导率为 $1000 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $3000 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $5000 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $7000 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $9000 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,研究05:00和13:00时刻路面结构不同深度处的温度随热传导率的变化情况,结果如图5所示。

由图5可知:①05:00时刻,随着热传导率的增加,路表温度随之升高,在沥青面层和CRC层内温度随之减小,基层温度变化不大,因为在夜间路面持续向外界环境释放能量,路表温度低于其他层位的温度,减小路面材料的热传导率,可使路表在夜间保持



(a) 05:00时刻



(b) 13:00时刻

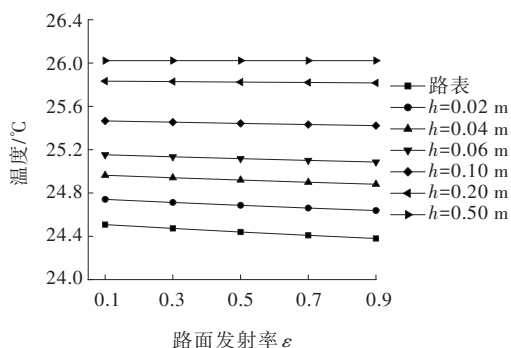
图 5 不同时刻热传导率对温度场的影响

较低的温度;② 13:00时刻,在路表面处,随着热传导率的增加,温度逐渐降低,当热传导率从1 000 J/(m·h·°C)增加到9 000 J/(m·h·°C)时,路表温度降低6.129 °C;而在路表以下0.04 m、0.06 m、0.10 m、0.20 m处温度随着热传导率增加而逐渐升高,所以在同一时刻,热传导率越低,路表温度越高,而在结构内部则是热传导率越低,路表温度越低,即出现了隔热作用。

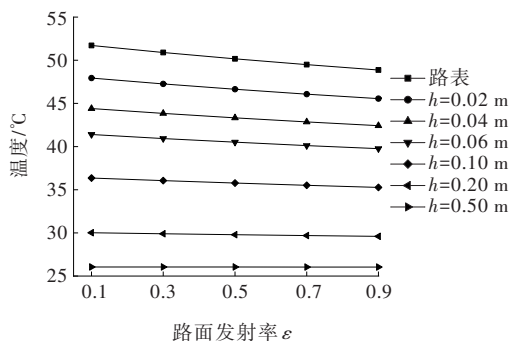
通过改变沥青材料的一些基本属性如空隙率、级配类型等可减小其热传导率,热传导率的减小可降低夏季高温时刻路表温度,减轻路面病害的程度。

3.3 路面发射率对温度场的影响

路面发射率描述路面以外红外辐射的形式向外发射热量的能力,发射率的取值一般小于1。其他层位的路面发射率不变,只改变混合料的发射率,为计算不同发射率与路面结构温度场的关系,分别取发射率为0.1、0.3、0.5、0.7和0.9,研究05:00和13:00时刻路面结构不同深度处的温度随路面发射率的变化情况,结果如图6所示。



(a) 05:00时刻



(b) 13:00时刻

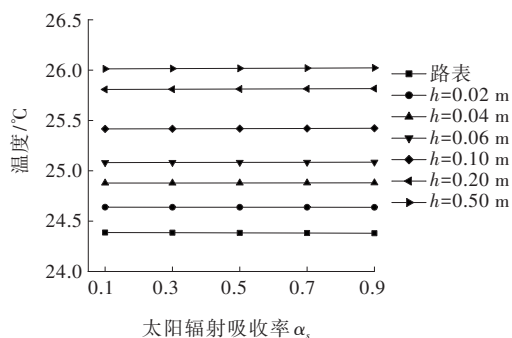
图 6 不同时刻路面发射率对温度场的影响

由图6可知:① 05:00时刻,路面结构层的温度随发射率的增加而线性降低,但降低的幅度较小,也就是说,即使没有太阳辐射,当路面材料的发射率增大后,路面结构的温度也是降低的。因此可通过涂刷特殊涂料增加路面发射率以降低路面结构温度;② 13:00时刻,同一深度路面结构内,随着路面发射率的增加,面层内的温度都随之降低,发射率对温度的影响在沥青层范围更明显;发射率从0.1升高到0.9的过程中,路表温度降低了2.837 °C,沥青层和CRC层的温度均有不同程度的下降。

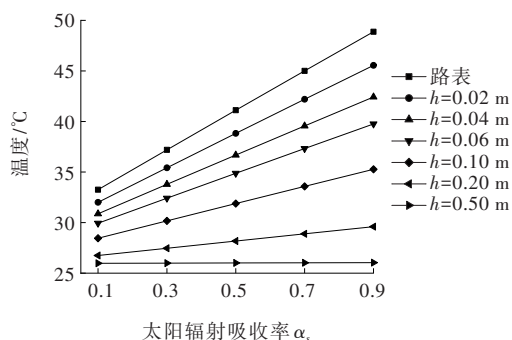
3.4 太阳辐射吸收率对温度场的影响

太阳辐射吸收率表征材料对太阳辐射的吸收能力,为无量纲参数。其他层位的吸收率不变,只改变沥青面层吸收率,研究此变量对路面结构温度场的影响。分别取吸收率为0.1、0.3、0.5、0.7和0.9,研究05:00和13:00时刻路面结构不同深度处的温度随太阳辐射吸收率的变化情况,结果如图7所示。

由图7可知:① 05:00时刻,随着太阳辐射吸收率的增加,由于夜晚没有太阳辐射,路面各结构层的温度没有变化;② 13:00时刻,通过降低路面沥青层吸收率可有效降低路面各结构层的最高温度,尤其



(a) 05:00时刻



(b) 13:00时刻

图7 不同时刻路面太阳辐射吸收率对温度场的影响

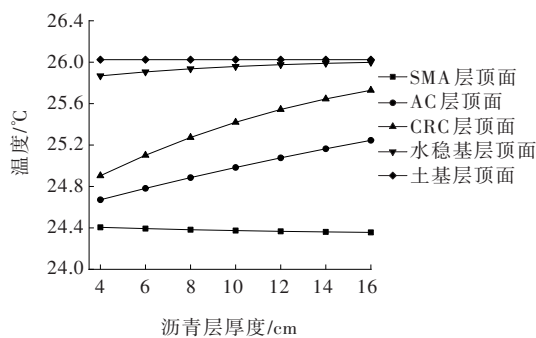
对路表温度影响最突出。当吸收率从0.9下降到0.1时,路表温度降低了15.617℃,路表以下0.02 m、0.04 m、0.06 m、0.1 m、0.2 m处温度分别降低了13.547℃、11.551℃、9.815℃、6.818℃、2.855℃,随着路面结构深度的增加,其温度随着吸收率的减小有明显的降低。

降低路面材料的吸收率就是降低其对太阳辐射量的吸收,从而降低了路面各层的温度,对CRC+AC复合式路面来说,降低太阳辐射吸收率,也就是增加路面的发射率,可以通过在路表面铺设反射涂层来实现。

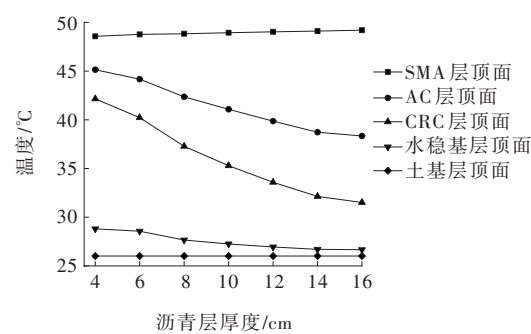
3.5 沥青层厚度对温度场的影响

CRC+AC复合式路面的特点之一就是沥青层较薄,因此研究沥青层厚度对路面结构温度场的影响意义较大。其他层位的厚度不变,只改变沥青面层厚度,为计算不同沥青层厚度与路面结构温度场的关系,分别取沥青层厚度为4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、12 cm、14 cm和16 cm,研究05:00和13:00时刻路面结构不同深度处的温度随沥青层厚度的变化情况,结果如图8所示。

由图8可知:① 05:00时刻,随着沥青层厚度的增加,路表温度变化不大,结构层内部温度会逐渐增



(a) 05:00时刻



(b) 13:00时刻

图8 不同时刻沥青层厚度对温度场的影响

加,总体结构层内部温度不会超过26℃;② 13:00时刻,随着沥青层厚度的增加,路表温度几乎没有变化,而路面结构层内温度逐渐降低,尤其是对沥青层和CRC层温度的影响最显著;当沥青层厚度从4 cm增加到16 cm时,路表温度升高了0.629℃,而AC层顶部温度降低了6.799℃,CRC层顶部温度降低了10.635℃,水稳基层温度降低了2.134℃。由于路表温度直接受太阳辐射的影响,因此改变沥青层厚度对路表温度几乎没有影响,但是沥青层厚度的增加会使层内温度降低,即表现出一定的隔热作用。

无论是05:00时刻还是13:00时刻,改变沥青层厚度对路表温度影响不大,但在高温13:00时刻,面层内温度会随着沥青层厚度的增加而降低,并且降低的幅度较大。因此适当增加沥青层厚度可减小高温时刻面层内的温度,减轻路面车辙、裂缝的危害程度。

4 结论

基于气象学和传热学理论,运用有限元建模方法,首先分析了路面结构不同深度处的温度场变化情况,重点分析了热容量、热传导率、路面发射率、太

阳辐射吸收率和沥青层厚度对温度场的影响,得出以下结论:

(1) 路面结构越深处,温度变化越小,当深度超过 0.6 m,温度几乎没有变化且与外界环境温度相差不大;路面内最高温度的出现滞后于外界环境最高气温。白天,路面由于受到太阳辐射与空气对流交换共同作用,不断吸收热量,温度呈现升高状态;夜晚,由于无太阳辐射作用且路面结构处于不断放热状态,因此路面结构温度呈现下降状态。

(2) 增加热容量会使路面温度在夜间有所上升,总体温度不超过 26℃,且可减小白天高温时面层温度。夜晚,太阳辐射吸收率不断增加,路面各结构层的温度无变化;而在白天高温时刻,通过降低路面太阳辐射吸收率可有效降低路面各结构层的最高温度。

(3) 不管是在夜晚还是在白天高温时刻,发射率从 0.1~0.9 的过程中,沥青层和 CRC 层的温度均有不同程度的下降。太阳辐射吸收率的变化对夜晚路面结构温度并无影响,在白天高温时刻,降低路面太阳辐射吸收率可有效降低路面各结构层的最高温度。

(4) 无论是夜晚低温时刻还是白天高温时刻,改变沥青层厚度对路表温度影响不大,但在白天高温时刻,面层内温度会随着沥青层厚度的增加而降低,并且降低的幅度较大。

参考文献:

- [1] 朱春福,程培峰,赵广宇.荷载与温度耦合作用下“白加黑”复合式路面沥青加铺层的受力分析[J].中外公路,2020,40(2):40-45.
- [2] 肖润谋,李彬,陈荫三.2013年中国高速公路网运输状态[J].交通运输工程学报,2014,14(6):67-73,99.
- [3] 李盛,刘朝晖,李宇峙.CRC+AC复合式路面结构层厚度对温度效应及车辙变形的影响[J].中国公路学报,2012,25(1):21-28.
- [4] 陶泽峰,钱劲松,凌建明,等.湿度影响下的重载交通沥青路面动力响应[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(5):734-739.
- [5] 刘朝晖,王骁帆,李盛,等.温缩和干缩对连续配筋混凝土路面纵向配筋的影响[J].中国公路学报,2016,29(11):1-9.
- [6] 李盛,李宇峙,刘朝晖.刚柔复合式路面沥青层温度疲劳损伤及开裂研究[J].工程力学,2013,30(10):122-127.
- [7] 孙雅珍,刘畅,王金昌,等.复合式路面层间界面力学特性试验研究[J].公路,2016,61(4):36-40.
- [8] 骆成.连续配筋混凝土路面温度场研究及设计参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(3):76-80.
- [9] 苏宇,杨文臣,田毕江,等.海南高速公路沥青路面路表温度分布规律与预估模型[J].中外公路,2018,38(6):53-57.
- [10] 康晓革,郑耀,张慧梅.基于连续变温的沥青路面温度场与应力场有限元分析[J].公路,2020,65(1):191-195.
- [11] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, LYTTON R L. Neural networks modeling of stress growth in asphalt overlays due to load and thermal effects during reflection cracking[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2011,23(3):221-229.
- [12] LI S, LIU Z H. Study on crack extension of the AC layer of CRC+AC composite pavement[J].Mechanika,2012,18(2):141-147.
- [13] BARBER E S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports[J]. Highway Research Board Bulletin,1957(168):1-8.
- [14] HERMANSSON Å. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2000,1699(1):134-141.
- [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(1):97-111.
- [16] 韩子东.道路结构温度场研究[D].西安:长安大学,2001.
- [17] 黄立葵,贾璐,万剑平,等.沥青路面高温温度场数值分析与试验验证[J].岩土力学,2006,27(S1):40-45.
- [18] 马正军,谈至明,钱晨.沥青路面面层温度分布规律[J].中国公路学报,2014,27(4):9-15.