

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.010

# 温度—移动荷载耦合作用下沥青路面结构力学响应研究

李晗<sup>1</sup>, 严战友<sup>2,3</sup>, 罗成城<sup>1</sup>, 崔向阳<sup>1</sup>, 刘俊灼<sup>1</sup>, 梁加辉<sup>2</sup>

(1.石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2.石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3.石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 建立沥青路面结构有限元模型, 计算沥青路面结构在一天内温度连续变化条件下温度场分布, 在此基础上进行温度与移动荷载耦合, 分析沥青路面结构在温度—移动荷载耦合作用下的力学响应。结果表明, 沥青面层温度场在一天内的变化呈现先减小、后迅速增大、再减小并趋于缓和的趋势, 基层以下路面结构层温度几乎不发生变化; 在温度—移动荷载耦合作用下, 路表最大竖向位移比不考虑温度作用时最大竖向位移增大 8.60%, 沥青层层底拉应变比不考虑温度作用时层底拉应变增大 176.26%; 车辆速度和轴重影响沥青路面的力学响应, 随着荷载移动速度的增大, 路表竖向位移减小、竖向压应力增大, 随着轮胎接地压强的增加, 路表横向压应力、竖向压应力和纵向压应力都增大。

**关键词:** 公路; 沥青路面; 温度场; 移动荷载; 力学响应

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0051-06

车辆拥有量的快速增长, 不仅带来严重的交通拥堵和环境污染, 而且对公路造成各种各样的损坏。公路病害并不是由单一因素导致, 而是各种因素共同作用的结果, 其中温度和车辆荷载是造成沥青路面破坏的重要因素, 有必要研究温度—车辆荷载耦合作用下沥青路面结构的力学响应。王旭东等依托中国足尺路面试验环道 RIOHTrack 开展沥青路面结构内部应力应变等力学响应的持续跟踪观测, 分析了不同影响因素下沥青路面的力学响应<sup>[1]</sup>。郝培文等考虑一天内温度的连续变化, 分析了沥青路面结构的温度场分布<sup>[2]</sup>。艾长发等依据大温差地区季节性温度变化情况, 采用数值模拟方法对比分析了柔性基层和半刚性基层沥青路面结构在温度—荷载耦合作用下的动力响应<sup>[3]</sup>。康晓革等考虑一天内连续变温条件, 分别研究了沥青路面的温度场和应力场<sup>[4]</sup>。张志刚等研究了温度与车辆静载耦合作用下沥青路面的受力特性<sup>[5]</sup>。Ling J. M.、Saad B. 等建立沥青路面有限元模型, 假设路面结构的温度场恒定不变, 路面结构在深度方向的温度线性变化, 对路面结构力学响应进行了分析<sup>[6-7]</sup>。Xue Q. 等建立高温与荷载耦合模型, 基于对流热交换理论、热辐射理论和热黏弹性变形理论, 分析了沥青路面温度场和应力场的分布规律<sup>[8]</sup>。上述研究中, 有的未考虑温度

作用或认为温度恒定不变, 将车辆荷载视为静荷载; 有的考虑了温度的变化, 并进行了温度场分析, 但没有进行温度与车辆荷载耦合分析; 有的虽然建立了路面结构温度与车辆荷载耦合模型, 但没有对路面结构力学响应进行分析。本文建立沥青路面三维结构有限元模型, 在一天内连续变温条件下进行路面结构温度场分析, 并实现温度与移动荷载的耦合, 分析沥青路面结构在温度—移动荷载耦合作用下的力学响应。

## 1 有限元模型构建

### 1.1 计算模型

对典型的沥青路面结构形式进行建模计算。如图 1 所示, 沥青路面结构分为面层、基层、底基层、土基, 其中面层又分为上面层、中面层和下面层, 厚度

改性沥青 SMA-13, 4 cm
改性沥青 SUP-20, 6 cm
重交沥青 SUP-25, 8 cm
水泥稳定碎石, 40 cm
石灰土, 20 cm
土基

图 1 沥青路面结构形式示意图

分别为 4 cm、6 cm、8 cm。

假设各层路面结构材料具有各向同性的性质,在受到外荷载后路面各结构层之间产生的变形均匀且连续,考虑层间接触关系完全连续,建立图 2 所示沥青路面结构有限元模型,其中纵向(Z轴)为行车方向,横向(X轴)为垂直于行车方向,竖向(Y轴)为路面深度方向。底面采用固定约束,4个侧面分别施加垂直于该面的水平方向约束。有限元模型长、宽、高分别为 6.00 m、3.75 m、3.00 m。

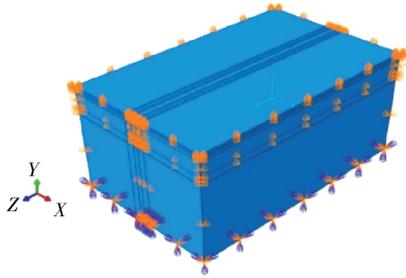


图 2 沥青路面结构有限元模型

沥青路面结构实体模型采取八节点线性六面体单元(C3D8R)的网格类型,对移动荷载施加区域进行网格加密处理,沿深度方向和横向网格逐渐稀疏(见图 3)。

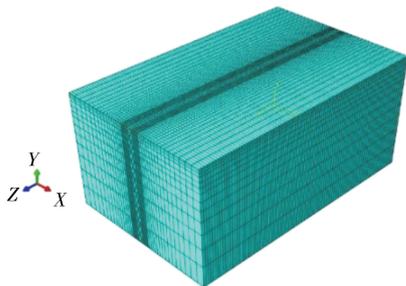


图 3 有限元模型网格划分

### 1.2 计算参数

选取某地区高温季节一天内代表性气温作为本次研究的温度条件,并选取不同路面结构材料热属性参数<sup>[9]</sup>,分析沥青路面结构在连续变温条件下的温度场。

沥青混合料具有很强的温度敏感性,考虑到沥青材料的相关参数随时间和时间变化,参考文献<sup>[9]</sup>,选取各路面结构材料参数。

## 2 路面温度场理论

参考文献<sup>[10]</sup>对路面结构温度场的研究结果,主要考虑气温与对流热交换、太阳辐射效应和路面

有效辐射 3 个影响因素。

### 2.1 气温与对流热交换

以两条幅值和频率均不同的正弦函数曲线线性组合的方式表示气温变化,表达式如下:

$$T_a = \bar{T}_a + T_m [0.96 \sin \omega(t - t_0) + 0.14 \sin 2\omega(t - t_0)] \quad (1)$$

式中: $\bar{T}_a$  为日平均气温(°C), $\bar{T}_a = 1/2(T_a^{\max} + T_a^{\min})$ ;  $T_a^{\max}$  为日最高气温(°C);  $T_a^{\min}$  为日最低气温(°C);  $T_m$  为日气温变化幅度(°C), $T_m = 1/2(T_a^{\max} - T_a^{\min})$ ;  $\omega$  为角频率(rad), $\omega = 2\pi/24$ ;  $t_0$  为初相位,为最大太阳辐射与最高气温的出现时间差加 7,一般设时间差为 2 h,故取  $t_0 = 9$  h。

路面结构与大气之间会产生热交换,热交换与风速有关,两者呈线性关系,表达式如下:

$$h_c = 3.7v_w + 9.4 \quad (2)$$

式中: $h_c$  为热交换系数[W/(m<sup>2</sup>·°C)];  $v_w$  为日平均风速(m/s)。

气温与对流热交换的表达式通过 ABAQUS 软件的 FILM 用户子程序完成定义。

### 2.2 太阳辐射

太阳对路面的辐射作用只在白天发生,晚上没有太阳辐射,故太阳辐射量在一天内随时间变化的函数表达式是一个分段函数,采用 Fourier 变换将分段函数按 Fourier 级数展开成式(3)的级数形式。

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \frac{k\pi(t-12)}{12} \quad (3)$$

式中: $a_0 = 2q_0/(m\pi)$ ;  $a_k$  按式(4)计算; $t$  为时间。

$$a_k = \begin{cases} \frac{q_0}{\pi} \left[ \frac{1}{m+k} \sin(m+k) \frac{\pi}{2m} + \frac{\pi}{2m} \right], & k=m \\ \frac{q_0}{\pi} \left[ \frac{1}{m+k} \sin(m+k) \frac{\pi}{2m} + \frac{1}{m-k} \sin(m-k) \frac{\pi}{2m} \right], & k \neq m \end{cases}$$

式中: $q_0$  为中午最大辐射(J/m<sup>2</sup>), $q_0 = 0.131mQ$ ;  $m = 12/c$ ;  $c$  为实际有效日照时数(h);  $Q$  为日太阳辐射总量(J/m<sup>2</sup>)。

太阳辐射的表达式通过编写 DFLUX 用户子程序完成定义。

### 2.3 路面有效辐射

太阳辐射作用到路面上,并不是所有能量都被路面吸收,在路面温度、气温及路面发射率(黑度)影响下,太阳辐射有一定折减,须计算路面有效辐射,计算公式如下:

$$q_F = \epsilon \sigma [(T_1|_{z=0} - T_Z)^4 - (T_a - T_Z)^4] \quad (4)$$

式中:  $q_F$  为地面有效辐射 [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ];  $\epsilon$  为路面发射率(黑度), 沥青路面取 0.81;  $\sigma$  为斯帝芬-玻尔兹曼常数(即黑体辐射常数),  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $T_1|_{z=0}$  为路表温度( $^\circ C$ );  $T_a$  为大气温度( $^\circ C$ );  $T_Z$  为绝对零度值( $^\circ C$ ),  $T_Z = -273 ^\circ C$ 。

路面有效辐射通过定义相互作用中的相关参数来实现。

### 2.4 路面蠕变模型

沥青路面具有明显的温度敏感性, 在一天连续变化温度作用下, 沥青路面受到行车荷载的作用会产生蠕变变形。采用 ABAQUS 中应变-硬化模型对沥青路面蠕变进行模拟。蠕变模型表达式为:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = \{Aq^n [(m+1)\bar{\epsilon}_{cr}]^m\}^{1/(m+1)} \quad (5)$$

式中:  $\dot{\epsilon}_{cr}$  为单轴等效蠕变应变率;  $A$ 、 $n$ 、 $m$  为模型参数;  $q$  为应力;  $\bar{\epsilon}_{cr}$  为单轴等效蠕变应变。

沥青路面蠕变模型的各参数在材料特性中完成定义。

## 3 温度-移动荷载耦合理论

### 3.1 车辆荷载理论

按照 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》<sup>[1]</sup> 规定的标准轴载 BZZ-100 进行计算, 单轮荷载为 25 kN, 轮胎接地压强为 0.7 MPa。采用移动荷载模拟车辆行驶过程中对路面结构的力学响应, 在图 2 所示有限元模型的荷载带上施加垂直于路面的移动荷载。

车辆行驶在路面上时, 车轮的接触面积不断变化, 接触形状大致为椭圆形<sup>[12]</sup>。为建模和计算简便, 参考文献<sup>[13]</sup>的研究结果, 将车辆轮胎与路面的接触形状简化为双矩形均布荷载, 简化后的车辆轮胎与路面的接触形状与尺寸见图 4。

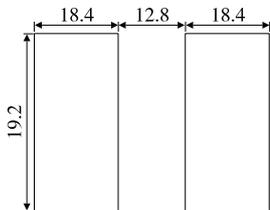


图 4 双矩形均布荷载(单位:cm)

### 3.2 温度-移动荷载的耦合

按照矩形均布荷载的参数将路面划分出两条荷载带, 在荷载带上施加 Dload 荷载。移动荷载在每个单元上的作用时间  $t = L/v$  ( $L$  为每个单元沿行车

方向的长度,  $v$  为荷载移动速度), 可通过控制荷载作用在单元上的时长来实现对不同车辆移动速度的模拟。

此外, 通过预定义场功能对整体模型施加温度作用, 在 Load 模块中引入温度场, 完成温度-移动荷载耦合。

## 4 计算分析

### 4.1 路面结构温度场分析

根据路面结构温度场模拟结果, 路面结构最不利温度场出现在 14:00。图 5 为最不利温度场的模拟结果, 图 6 为各路面结构层在不同时刻的温度分布。

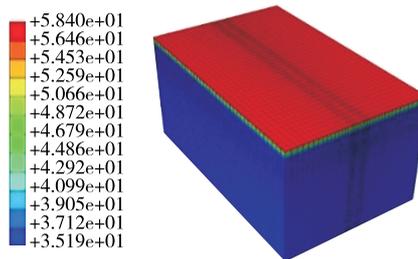


图 5 路面结构最不利温度场(单位:  $^\circ C$ )

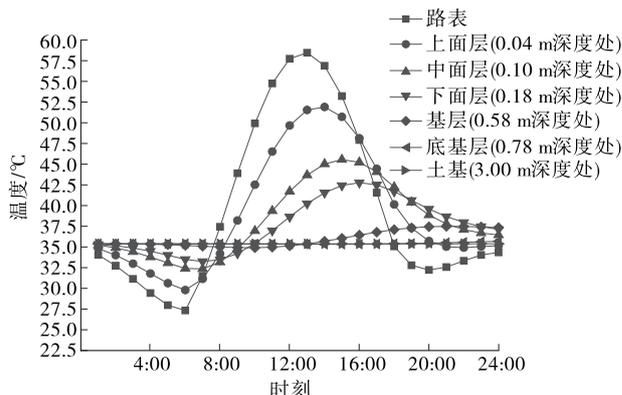


图 6 各路面结构层在不同时刻的温度分布

由图 6 可知: 1) 一天中路面结构最高温度和最低温度均出现在道路表面, 最低温度 ( $27 ^\circ C$ ) 出现在 6:00, 最高温度 ( $58 ^\circ C$ ) 出现在 14:00, 路面结构在一天内的最大温差为  $31 ^\circ C$ 。2) 上面层、中面层和下面层的温度变化虽然没有路表那样剧烈, 但也非常明显; 基层的温度变化不明显, 在 10:00 后有微小变化; 底基层和土基温度几乎没有变化。3) 从路表到土基, 随着深度的增加, 温度变化曲线的斜率和温度峰值都降低, 并且路面结构温度变化主要集中在沥青混合料层, 说明沥青面层结构具有明显的温度敏

感性,而底基层和土基受温度的影响很小。

### 4.2 温度一荷载耦合作用下路面结构的力学响应

#### 4.2.1 温度影响下的力学响应

根据温度场分析结果,分别将路面温度的两个极值时刻(6:00和14:00)的温度场施加于路面结构,实现温度一移动荷载的耦合作用,其中移动荷载速度为20 m/s,分析温度一移动荷载耦合作用下这两个时刻沥青路面的力学响应,并与不考虑温度作用时的力学响应进行对比。

按照 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》<sup>[11]</sup>,选择图7所示点位进行力学响应分析,结果显示:各路面结构层中A点(行车荷载带中心点的竖向位置处)的力学响应最大。因此,选择各路面结构层的A点进行分析,结果见图8~13。

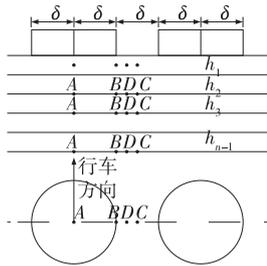


图7 力学响应计算点位置示意图

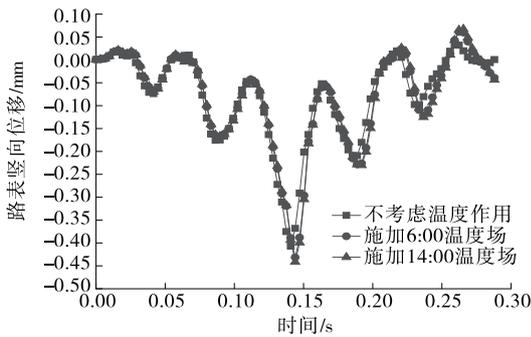


图8 路表竖向位移时程曲线

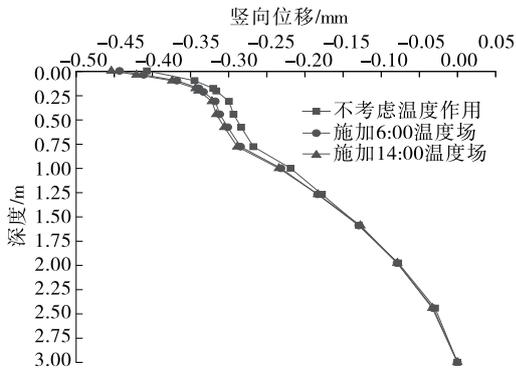


图9 竖向位移沿路面结构深度的变化

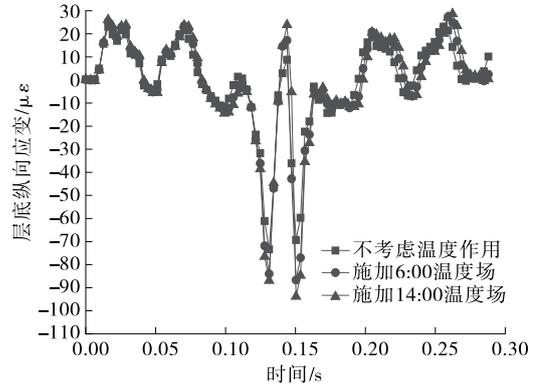


图10 沥青混合料层层底纵向应变时程曲线

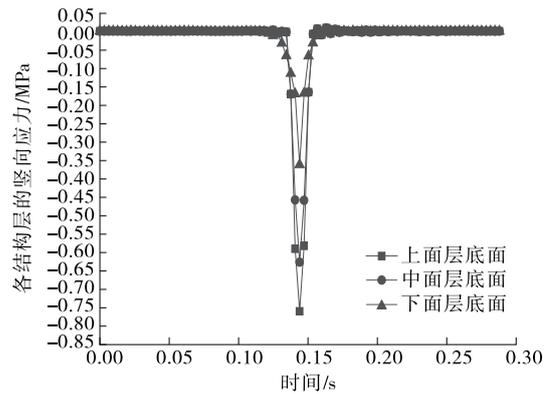


图11 不考虑温度作用时沥青面层各结构层的竖向应力时程曲线

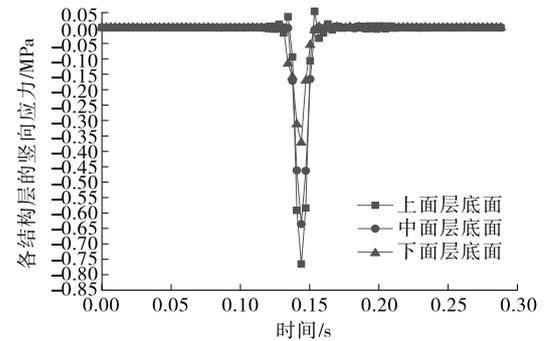


图12 施加6:00温度场时沥青面层各结构层的竖向应力时程曲线

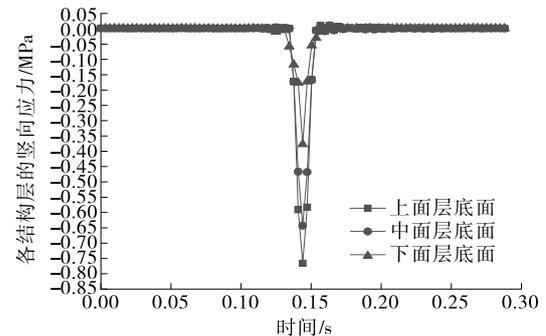


图13 施加14:00温度场时沥青面层各结构层的竖向应力时程曲线

从图8可以看出:不考虑温度作用时,路表最大竖向位移为0.407 mm,在6:00、14:00时的最大竖向位移分别为0.432 mm、0.442 mm,比不考虑温度作用时的竖向位移分别增大6.14%、8.60%,温度作用对路面结构的影响很大,不能忽视。

从图9可以看出:施加温度场后路面结构的竖向位移都比没有施加温度作用时的竖向位移大,并且这种情况主要体现在沥青路面面层,基层以下结构几乎不受温度作用的影响。

从图10可以看出:不考虑温度作用、施加6:00温度场、施加14:00温度场时沥青混合料层层底纵向应变的变化趋势基本一致,在移动荷载经过时,沥青层层底纵向应变出现波动和拉压应变交替变化。随着移动荷载靠近计算点,沥青层层底纵向应变整体呈现压应变越来越大的趋势;在荷载通过计算点前后出现拉压应变突变的情况,沥青层层底拉应变达到最大;移动荷载远离计算点时,沥青层层底应变逐渐减小。沥青层层底拉压应变的交替变化会使路面材料产生疲劳,导致沥青路面疲劳开裂。此外,温度-移动荷载耦合作用下沥青层层底弯拉应变比只考虑荷载作用时的弯拉应变大,施加6:00温度场和施加14:00温度场产生的沥青层层底拉应变比不考虑温度作用时分别增大97.89%、176.26%,温度对沥青层层底弯拉应变的影响很大。

从图11~13可以看出:不考虑温度作用、施加6:00温度场、施加14:00温度场时沥青面层各结构层底面竖向应力的变化趋势一致,均随着时间的增加而增加,荷载移动到计算点位正上方时竖向压应力达到最大,之后随着移动荷载远离计算点,竖向压应力减小。上面层底面受到的竖向压应力最大,下面层底面受到的竖向压应力最小。不考虑温度作用、施加6:00温度场、施加14:00温度场时,上面层底面最大压应力分别为0.760 MPa、0.765 MPa、0.766 MPa,中面层底面最大压应力分别为0.627 MPa、0.637 MPa、0.643 MPa,下面层底面最大压应力分别为0.362 MPa、0.373 MPa、0.378 MPa。

#### 4.2.2 速度影响下的力学响应

选取15 m/s、20 m/s、25 m/s 3种常见车辆速度作为移动荷载速度,分析不同速度下沥青路面结构的力学响应,结果见图14、图15。

从图14可以看出:荷载移动速度为15 m/s和20 m/s时路表竖向位移的变化规律一致,0:00—

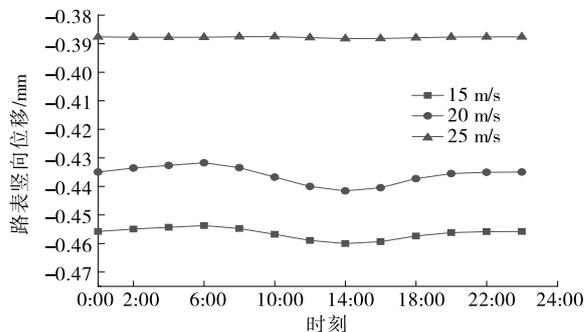


图14 不同速度下路表竖向位移的变化

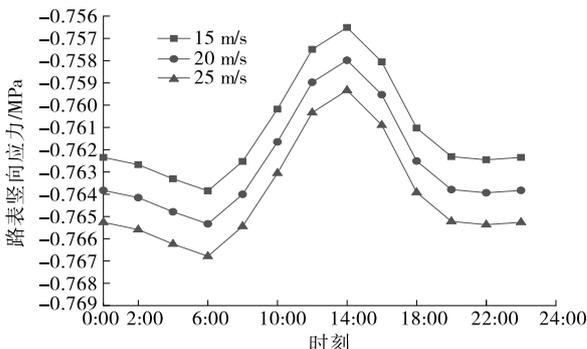


图15 不同速度下路表竖向应力的变化

6:00时路表竖向位移逐渐减小,6:00—14:00时路表竖向位移逐渐增大,14:00—24:00时路表竖向位移逐渐减小。荷载移动速度为25 m/s时,路表竖向位移在一天内各个时刻变化很小。速度越低,路表竖向位移越大,速度25 m/s、20 m/s、15 m/s对应的最小竖向位移分别为0.387 mm、0.432 mm、0.454 mm,最大竖向位移分别为0.388 mm、0.442 mm、0.460 mm;竖向位移随速度的变化呈现非线性的规律,速度为20 m/s时最大竖向位移比15 m/s时减小3.91%,而速度为25 m/s时最大竖向位移比20 m/s时减小15.65%。

从图15可以看出:荷载移动速度为15 m/s、20 m/s、25 m/s时路表竖向应力的变化规律一致,0:00—6:00时竖向压应力逐渐增大,6:00—14:00时竖向压应力逐渐减小,14:00—24:00时竖向压应力逐渐增大,最终趋于平缓。路表竖向压应力随速度的增大而增加,速度为15 m/s、20 m/s、25 m/s时最小压应力分别为0.756 MPa、0.758 MPa、0.759 MPa,对应的时刻为14:00,速度为15 m/s、20 m/s和25 m/s时最大压应力分别为0.764 MPa、0.765 MPa、0.767 MPa,对应的时刻为6:00。

#### 4.2.3 轴重影响下的力学响应

选取0.5 MPa、0.7 MPa和0.9 MPa 3种轮胎接

地压强,对荷载移动速度 25 m/s 下沥青路面结构的力学响应进行对比分析,结果见图 16~18。

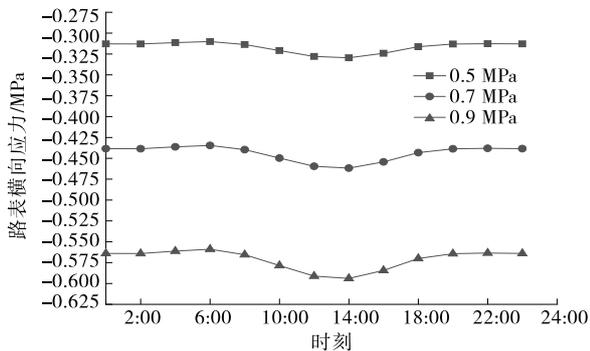


图 16 不同接地压强下路表横向应力的变化

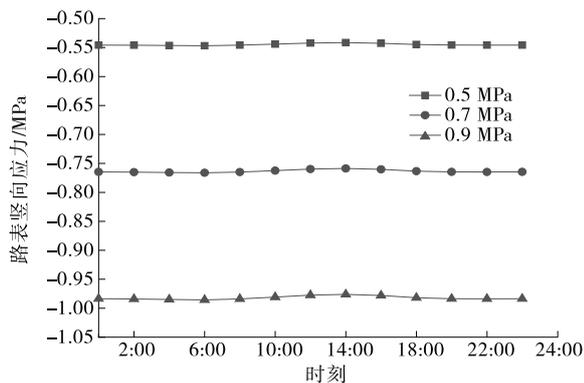


图 17 不同接地压强下路表竖向应力的变化

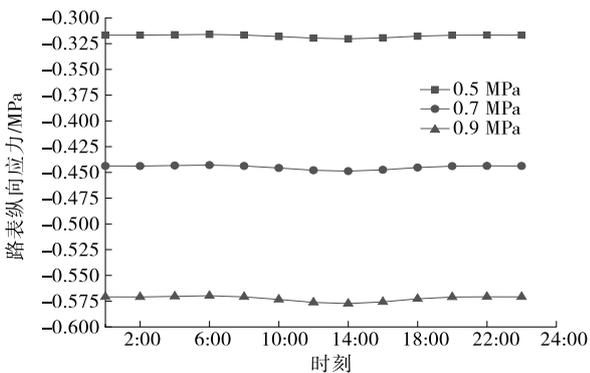


图 18 不同接地压强下路表纵向应力的变化

由图 16 可知:路表横向压应力在一天内的变化呈现先缓慢减小、后迅速增大、再减小并趋于平缓的趋势,轮胎接地压强 0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa 对应的最大横向压应力分别为 0.330 MPa、0.462 MPa 和 0.594 MPa。

由图 17 可知:路表竖向压应力在一天内的变化呈现先缓慢增大、后减小、再增大并趋于平缓的趋势,轮胎接地压强 0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa 对应的最大竖向压应力分别为 0.548 MPa、0.767 MPa、0.986 MPa。

由图 18 可知:路表纵向压应力在一天内的变化与横向压应力相似,呈现先缓慢减小、后迅速增大、再减小并趋于平缓的趋势,轮胎接地压强 0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa 对应的最大纵向压应力分别为 0.321 MPa、0.449 MPa、0.577 MPa。

综上,路表计算点位的横向压应力、竖向压应力和纵向压应力会因不同轴重对应的轮胎接地压强不同而不同,而且轮胎接地压强越大,路表竖向压应力越大。

## 5 结论

(1) 沥青面层温度场在一天内的变化呈现先减小、后迅速增大、再减小并趋于缓和的趋势,基层以下路面结构层的温度场变化很小,表明沥青面层具有明显的温度敏感性,温度峰值出现在沥青面层表面,而底基层和土基受温度的影响很小。

(2) 对沥青路面结构施加 14:00 温度场和移动荷载实现温度-荷载耦合,温度-荷载耦合作用下路表最大竖向位移比不考虑温度作用时最大竖向位移增大 8.60%,沥青层层底弯拉应变比不考虑温度作用时增大 176.26%,温度对沥青路面的影响不可忽视。

(3) 在温度-荷载耦合作用下,沥青面层力学响应还会受到车速和轴重的影响。随着荷载移动速度的增加,路表竖向位移减小,路表竖向压应力增大;随着轮胎接地压强的增加,路表横向压应力、竖向压应力和纵向压应力都增大。

## 参考文献:

- [1] 王旭东,周兴业,关伟,等.沥青路面结构内部的力学响应特征及分析[J].科学通报,2020,65(30):3298-3307.
- [2] 郝培文,张兰峰.基于连续变温的沥青路面温度应力分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(2):176-183.
- [3] 艾长发,黄大强,余孝丽,等.基于季节时温的沥青路面温荷耦合动力性能分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(4):66-73.
- [4] 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.
- [5] 张志刚.温度和荷载耦合作用下沥青路面力学性能分析[J].道路与安全,2014,14(2):1-5+9.

(下转第 60 页)

在实际路面服役过程中,当路表沥青膜在行车作用下剥落后,作为粗集料的钢渣将较传统集料发挥更好的抗滑性能。

### 3 结论

(1) 掺钢渣与再生沥青可提高沥青混合料的高温稳定性,且高温性能随着再生沥青掺量的增大而提高。

(2) 掺钢渣再生沥青混合料的低温抗裂性能、水稳定性比普通 SMA 混合料差,且再生沥青对二者有不利影响。为保障掺钢渣再生沥青混合料的水稳定性符合要求,建议控制再生沥青掺量在 20% 以内,并根据工程项目所在气候分区的低温破坏应变要求选取再生沥青控制掺量。

(3) 采用半圆弯曲试验进行沥青混合料抗断裂性能评价时,应优先采用断裂能作为评价指标。掺钢渣再生沥青混合料的抗断裂性能比普通 SMA 混合料高,但随着再生沥青掺量的增大略有降低。

(4) 综合分析,掺钢渣再生沥青混合料的各项路用性能均符合规范要求,且掺钢渣可以显著提高沥青混合料的摆值,掺钢渣再生沥青在沥青路面养护(如薄层罩面)中具有较好的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部.2020 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].[2021-05-19].http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/19/content\_5608523.htm.

[2] 徐金枝,郝培文,郭晓刚,等.厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J].中国公路学报,2021,34(10):

72-88.

[3] 郭鹏,谢凤章,孟建玮,等.沥青再生过程中新一旧沥青界面混溶行为综述[J].材料导报,2020,34(13):13100-13108.

[4] 首钢资源综合利用科技开发公司,冶金工业信息标准研究院.耐磨沥青路面用钢渣:GB/T 24765-2009[S].北京:中国标准出版社,2010.

[5] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

[6] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[7] 交通运输部公路科学研究院.公路路基路面现场测试规程:JTG 3450-2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[8] 朱洪洲,范世平,李正浩.基于 SCB 试验的沥青混合料宏观断裂愈合性能研究[J].建筑材料学报,2018,21(3):426-432.

[9] 冯德成,崔世彤,易军艳,等.基于 SCB 试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J].中国公路学报,2020,33(7):50-57.

[10] 薛佳悦.基于扩展有限元的沥青路面反射裂缝扩展行为研究[D].南京:东南大学,2020.

[11] 谭忆秋,肖神清,熊学堂.路面抗滑性能检测与预估方法综述[J].交通运输工程学报,2021,21(4):32-47.

[12] 孔令绅,李雪萍,冯志强.超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):9-15.

收稿日期:2022-04-25

\*\*\*\*\*  
(上接第 56 页)

[6] LING J M, WEI F L, ZHAO H D, et al. Analysis of air-field composite pavement responses using full-scale accelerated pavement testing and finite element method[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212:596-606.

[7] SAAD B, MITRI H, POOROOSHASB H. Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(6):460-469.

[8] XUE Q, LIU L, ZHAO Y, et al. Dynamic behavior of asphalt pavement structure under temperature-stress coupled loading [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(1):1-7.

[9] 廖公云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].2 版.南京:东南大学出版社,2014.

[10] 严作人.层状路面体系的温度场分析[J].同济大学学报,1984,12(3):76-85.

[11] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[12] 谢浩,谢军,汤旭,等.基于路面平整度的车辆动荷载影响分析[J].交通科学与工程,2023,39(3):26-37.

[13] 严明星,王金昌.ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2016.

收稿日期:2021-11-05