

# 基于连续变温的沥青路面温度应力分析

郝培文, 张兰峰

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安, 710064)

**摘要:** 为了合理评价温度对沥青路面结构应力影响, 选取冬季 3 种典型连续变化日低温( $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ )工况, 考虑弹性模量及温缩系数随温度变化的特性, 在此基础上建立低温下沥青路面三维有限元模型, 分析降温、弹性模量及温缩系数参数对沥青路面温度应力的影响规律. 研究表明: 在保持沥青面层弹性模量和温缩系数不变时, 温度从  $T_1 \sim T_2$ 、 $T_2 \sim T_3$  降低过程中, 沥青面层各层位温度应力都有显著增加, 说明温度降低对沥青路面层的温度应力增加有重要作用. 在相同温度场作用下, 沥青面层模量及面层温缩系数与沥青面层各层温度应力呈线性关系, 当这两个参数增加时, 温度应力随着线性增大. 所以道路结构设计过程中应充分考虑面层模量及面层温缩系数变化对温度应力的影响.

**关键词:** 沥青路面; 温度场; 温度应力; 弹性模量; 温缩系数

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)02-0176-08

## Asphalt pavement temperature stress analysis based on continuous variable temperatures

HAO Peiwen, ZHANG Lanfeng

(Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to reasonably evaluate the influence of temperature on asphalt pavement structure stress, three typical continuously variable low temperature ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) in winter were selected. Considering the elastic modulus and temperature shrinkage coefficient changing with temperature characteristics, the three-dimensional finite element model of asphalt pavement under low temperature was established, for analysis, cooling, elastic modulus and temperature shrinkage coefficient parameters on the temperature stress of asphalt pavement. Results show that when the elastic modulus and temperature shrinkage coefficient remain same, in the process of temperature reduced from  $T_1$  to  $T_2$ ,  $T_2$  to  $T_3$ , temperature stress of different asphalt layer has increased significantly. So the reduction of temperature plays an important role on the temperature stress increases. Under the effect of the same temperature, elastic modulus and temperature shrinkage coefficient have a linear relation with temperature stress. When these two parameters increase, temperature stress increase with the linear. So the asphalt pavement design should fully consider the influence of elastic modulus and temperature shrinkage coefficient on the temperature stress.

**Key words:** asphalt pavement; temperature field; temperature stress; elastic modulus; temperature shrinkage coefficient

沥青路面早期开裂、车辙等破坏都与路面温度场变化有密切关系. 路面结构完全处在自然环境中, 经受着持续变化的外界环境因素(如外界气温、太阳辐射、地面反射等)的影响<sup>[1]</sup>, 沥青混合料作为一种热敏感性材料, 力学特性受到温度的显著影响<sup>[2]</sup>. 在冬季低温情况下, 寒冷地区具有低温、日均温差大的典型特征, 低温和冰冻容易导致路面产生裂缝. 对沥青路面温度场以及温度应力的研究已有众多, 艾长发<sup>[3]</sup>以 ABAQUS 为计算平

台, 研究了高寒地区沥青路面结构温度特性, 结合正交试验方法及滞后衰减气温模型, 进行了气象参数对沥青路面温度场影响及其参数敏感性分析, 讨论了结构类型、结构层厚度及层间状态等因素对路面温度场及温度应力分布状况的影响. 马磊<sup>[4]</sup>考虑了沥青路面温度沿深度方向的非均匀性分布和温度对沥青混凝土模量的影响, 计算分析了不同面层初始裂缝深度和不同气温下的路面结构温度应力与应力强度因子变化情况. 宋允玲<sup>[5]</sup>考虑

收稿日期: 2017-03-22 修改稿日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578016)

第一作者: 郝培文(1967—), 男, 教授, 主要研究沥青路面材料与结构、沥青与改性沥青技术、机场路面材料与施工技术等.

E-mail: haopw@yahoo.com.cn

了温度变化对沥青混凝土路面结构受力的影响,并应用于路面结构设计中.本着对路面结构实际温度场及温度应力状况充分模拟的目的,利用ABAQUS有限元软件建立典型半刚性沥青路面结构三维模型,对模型施加空气温度、太阳辐射等温度荷载,采用连续变温的日温度循环,考虑沥青混凝土模量、温缩系数随温度变化的特性,从影响沥青混凝土路面低温温度应力的因素出发,探究降温、弹性模量、温缩系数对温度应力的影响及变化规律.

## 1 沥青路面温度场

### 1.1 温度场基本理论

温度的时间域和空间域的分布,称为温度场,可以表示为

$$T=T(x, y, z, t) \quad (1)$$

物体内某一点的温度是其空间与时间的函数.

当温度不随时间的变化而变化时,  $\frac{\partial T}{\partial t}=0$ , 式(1)变为  $T=T(x, y, z)$ , 称为稳态温度场. 当温度沿着  $z$  方向保持恒定时,  $\frac{\partial T}{\partial z}=0$ , 式(1)变为  $T=T(x, y, t)$ , 称为平面温度场. 同一时刻, 温度场内温度相同的各点组成所谓的等温面. 沿着等温面切线方向, 温度保持不变. 而沿着等温面法向, 温度变化率最大, 可以用温度梯度来表示该最大温度变化率, 温度梯度的定义为

$$\nabla T=n_0 \frac{\partial T}{\partial n}=i \frac{\partial T}{\partial x}+j \frac{\partial T}{\partial y}+k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

式中:  $n_0$  是单位矢量, 沿等温面法线方向指向升温方向. 单位时间内通过等温面单位面积的热量称为热流密度  $q$ :  $q=\frac{dQ}{dt}/S$  式中:  $Q$  为通过等温面的热量,  $S$  为等温面面积. 某一点的最大热流密度矢量沿着等温面法线且指向降温方向. 由热传导定律可知, 热密度流与温度梯度成正比而方向相反, 即:

$$q=\frac{dQ}{dt}/S=-\lambda \nabla T \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为导热系数.

### 1.2 周期性变温下的温度场理论

路面除了承受车辆荷载作用外, 还要经受气候周期性变化. 道路结构温度包括不同时间、不同深度的温度. 通过太阳辐射热量和边界的热辐射、与周围空气的对流、内部的热传导进行能量交换. 每天最高最低气温、一天的有效日照时间、一天内

的辐射总量以及风速等, 都是影响温度场的主要因素. 把温度场作为荷载加载到路面结构中后, 温度的变化就会引起路面结构应力场以及应变场的变化. 由于太阳辐射的作用, 环境温度呈周期性变化, 路面温度场模型中, 可以采用周期性变化的边界条件近似描述这种变化. 在路面温度场预估时, 由于作用于路面模型的边界条件具有周期变化的特性, 那么其温度场解也将呈现出周期性的变化<sup>[6]</sup>.

## 2 温度场模型建立

### 2.1 模型建立基本假设

在进行温度应力分析时, 以粘弹性层状体系理论作为道路结构温度应力数值模拟理论基础, 建立三维有限元模型, 并提出如下假定:

- (1)路面层部分为均匀、各向同性的粘弹性材料; 其余的各层均视为线弹性;
- (2)道路各结构层间结合紧密, 位移连续, 层间温度及热流连续;
- (3)忽略路面温度场的横向分布, 认为热流沿垂直于路面方向一维传导忽略各层材料的导热系数受温度变化的影响.

基于半刚性基层沥青路面粘弹性层状结构体系的基本假设, 建立 ABAQUS 三维半刚性基层沥青路面模型. 路面结构模型: 长 6 m, 宽 3.75 m, 高 3 m.

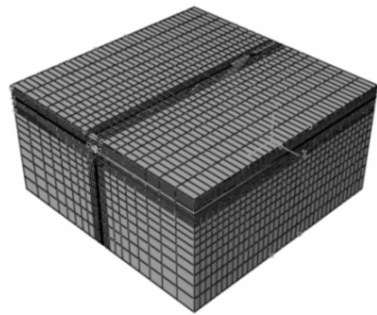


图1 沥青混合料路面结构3维模型

Fig. 1 Asphalt mixture pavement structure 3D model

### 2.2 边界条件

对图1道路模型施加对称边界条件: 将横向两侧面边界条件设置为 XSYMM( $UX=URY=URZ=0$ ), 将纵向两侧面边界条件设置 ZSYMM( $UZ=URX=URY=0$ ), 模型底部边界条件为 YSYMM( $UY=URX=URZ=0$ ). 在荷载与路面接触区域采用密集的网格划分, 非接触区域采用稀疏的网格划分.

### 2.3 温度、路面结构参数

半刚性基层路面结构参数参考[10-11], 如表1—表4所示.

表 1 路面温度场分析热特性参数表

Tab. 1 Pavement temperature field analysis of thermal characteristics parameter table

参数	沥青面层	水稳碎石基层	石灰土底基层	土基	级配碎石
热传导率/[cal·m·h·℃ <sup>-1</sup> ]	1 118	1 341	1 229	1 341	1 032
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 300	2 200	2 100	1 800	2 100
比热容/(J·(kg·℃) <sup>-1</sup> )	924. 9	911. 7	942. 9	1 040	600
太阳辐射吸收率			0. 9		
路面发射率			0. 81		
绝对零度值/℃			-273		
Stefan-Boltzmann 常数/(J·(h·m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> ) <sup>-1</sup> )			2. 041 092×10 <sup>-4</sup>		

表 2 路面材料温缩系数<sup>[12]</sup>

Tab. 2 Asphalt pavement material temperature shrinkage coefficient

材料	不同温度温缩系数/×10 <sup>-5</sup> ℃			
	0	-10	-20	-30
沥青混凝土	2. 4	2. 2	1. 9	1. 6
	2. 4	2. 2	1. 9	1. 6
	2. 4	2. 2	1. 9	1. 6
水泥稳定碎石			1	
级配碎石			1	
石灰土			15	
土基			50	

表 3 沥青混合料抗压回弹模量参数<sup>[13-15]</sup>

Tab. 3 Compression elastic modulus of asphalt mixture parameters

混合料类型	温度/℃	E/MPa
SMA-13	0	1 400
	-10	4 500
	-20	9 000
	-30	12 500
AC-20	0	1 200
	-10	4 200
	-20	8 500
	-30	14 000
AC-25	0	1 000
	-10	3 800
	-20	8 000
	-30	13 000

注：泊松比均按 0. 2 计取

表 4 基层和土基材料的弹性参数

Tab. 4 Compression elastic modulus parameters of base and soil

材料	抗压回弹模量/MPa	泊松比
水泥稳定碎石	1 200	0. 2
石灰土	300	0. 3
级配碎石	500	0. 3
土基	45	0. 4

由于沥青路面面层材料的覆盖，气温对基层和土基的影响已经较小，当面层较厚时尤其如此，基层和土基的弹性参数可取为常数。

### 3 沥青路面结构温度场及温度应力计算

为确定沥青路面结构中温度应力，需要确定以下内容，即：

(1)按照热传导理论，根据结构本身的热学性质、内部热源、初始条件和边界条件，计算结构内各点在各瞬时的温度，这样就可以确定变温场，即前后两个温度场之间的变温；

(2)按照热粘弹性力学理论，根据结构体的变温来求解体内各点的温度应力；

(3)设定模型的初始温度场；

(4)沥青混合料对于不同的温度采用不同的温度系数和回弹模量；

(6)有限单元的属性设为 Coupled Temperature-Displacement.

选取冬季持续低温季节有代表性的 3 天温度循环(T1、T2、T3)进行道路结构温度场模型，详细温度数据见表 5—表 7. 分析主要时刻道路结构的

稳态温度场和瞬态温度场的日变化过程，研究对 的基础上进行瞬态分析，为温度应力计算提供温  
应于该温度场的温度应力日变化规律。在稳态分析 度场基本数据。

表 5 低温季节 1 天 24 h 气温 (T1)<sup>[16]</sup>

Tab. 5 Temperature of a whole day in winter(T1)

时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃
0	-6.9	6	-10.4	12	-1.3	18	-4.9
1	-8.2	7	-11.5	13	-0.6	19	-5.6
2	-7.7	8	-10.7	14	-1.1	20	-5.9
3	-7.1	9	-9.2	15	-1.7	21	-6.1
4	-8.8	10	-4.8	16	-3.1	22	-6.2
5	-9.9	11	-2.8	17	-4.4	23	-7.1

表 6 低温季节 1 天 24 h 气温 (T2)

Tab. 6 Temperature of a whole day in winter(T2)

时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃
0	-17.5	6	-20.8	12	-12.2	18	-13.2
1	-17.4	7	-20.5	13	-10.9	19	-14.1
2	-18.9	8	-20.5	14	-10.9	20	-15.2
3	-19.3	9	-18.5	15	-10.8	21	-14.6
4	-19.9	10	-15.4	16	-11.9	22	-14.4
5	-19.5	11	-13.9	17	-12.9	23	-14.8

表 7 表低温季节 1 天 24 h 气温 (T3)

Tab. 7 Temperature of a whole day in winter(T3)

时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃
0	-25.5	6	-31.1	12	-15.8	18	-22.5
1	-26.4	7	-31.0	13	-16.0	19	-25.1
2	-28.5	8	-32.0	14	-15.4	20	-27.6
3	-27.9	9	-27.1	15	-15.9	21	-28.9
4	-30.4	10	-21.8	16	-17.2	22	-29.1
5	-30.2	11	-18.8	17	-19.9	23	-29.9

3.1 路面结构各层温度场计算

道路结构暴露在自然环境中，当外界温度发生变化时，道路内的温度也随之变化。当温度变化时，沥青混合料的性能会受到很大影响，计算半刚性基层沥青路面在冬季低温 T1、T2、T3，3 种不同温度循环下的温度场及温度应力。

图 2 表明沥青路面各层温度变化与外界空气温度变化规律大致相同，其中路表面温度波动幅度最大，其温度变化受气温影响最大；随着深度的增加，其他各层温度波动幅度逐渐减小，石灰土基层和土基温度受气温影响最小，波动幅度平。

3.2 路面结构各层温度应力

Zbeck 和 Vinson 指出，路面温度应力是由于降温以及基层与面层间的约束力造成的。基于上述

理论，进而得出沥青混凝土面层温度应力的最大值是温度和面层基层间约束力的函数。Shahin 为了减少路面温度裂缝，于 1977 年提出了一个设计体系，并指出了以下温度应力预测公式：

$$\Delta\delta(t, \Delta T) = s(t, \Delta T) \cdot \alpha(\overline{T_\Delta}) \cdot \Delta T \quad (10)$$

式中： $\Delta\delta(t, \Delta T)$ 为特定加载时间和温度变化量时，温度应力变化量； $S(t, \Delta T)$ 为特定时间和温度下的沥青混凝土模量； $\alpha(\overline{T_\Delta})$ 为特定温度下沥青混凝土的温缩系数。

3.2.1 不同日温度下的路面各层温度应力

图 3 表明，表面层温度应力波动幅度最大，受气温变化影响最大。随着层位深度增加，影响效果逐渐减弱。路面表面层温度应力最先达到最大值，随着深度增加，其他各结构层依次达到温度应力

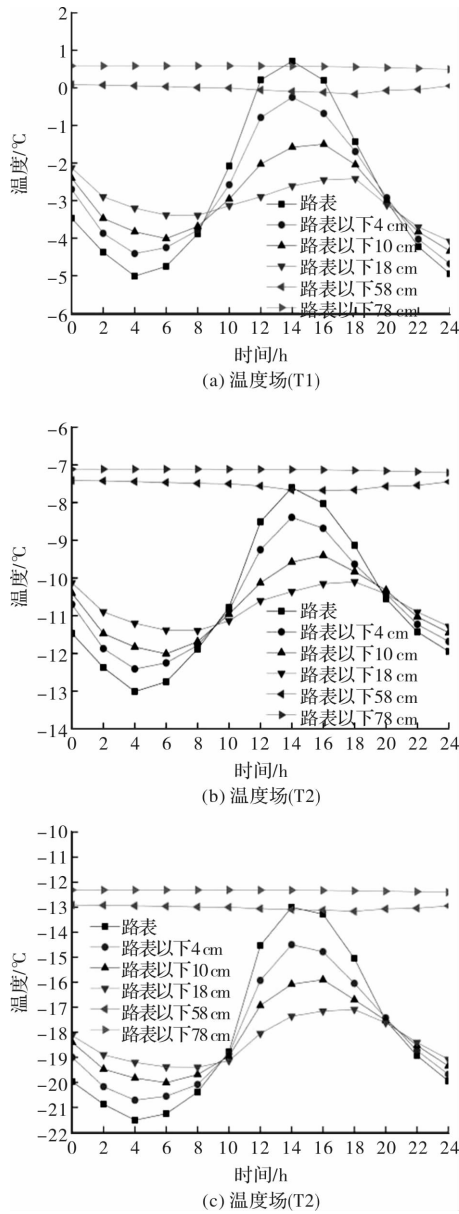


图2 路面各层冬季低温24 h温度场  
Fig. 2 A 24 h temperature field of asphalt pavement each layer in winter

最大值。在相同气温影响下,路面结构层各时刻温度应力随着的深度增加而减小。沥青路面同一层位的在温度从  $T_1 \sim T_2 \sim T_3$  的变化过程中,温度应力呈大幅度增加,气温变化对沥青面层温度应力影响十分显著,不同层位温度应力随着温度降低而线性增加(图4)。日周期内沥青面层各层的温度应力随气温变化而改变,由于路面结构受到每日周期性的热胀冷缩的反复作用,路面很容易产生疲劳性的破坏。基层中的温度应力明显低于面层的温度应力。这正是气温降低时在路表面附近容易出现裂纹的原因。在后续的研究中,也是因为沥青面层部分所受温度应力远高于基层,所以重点研究面层温缩系数和弹性模量对面层温度应力影响。

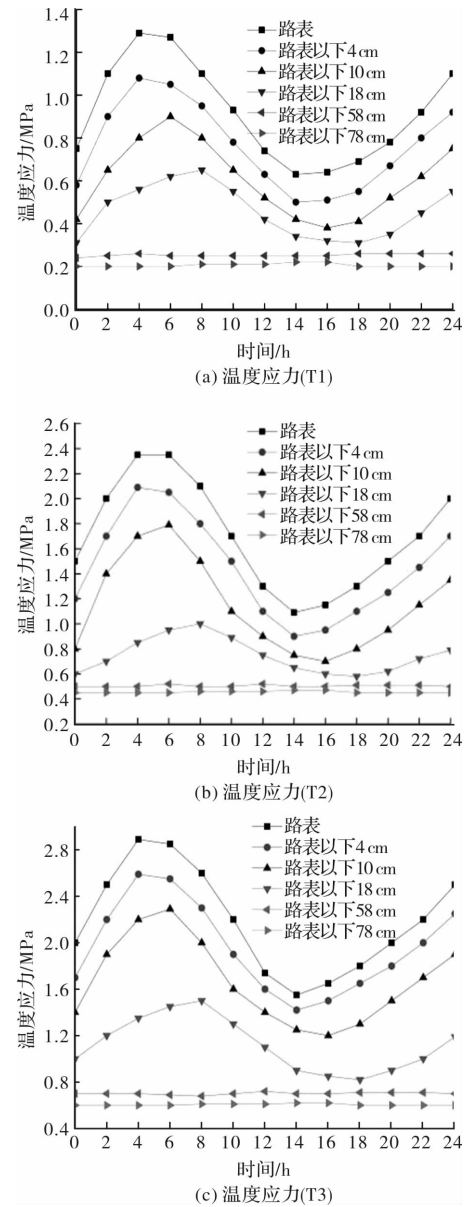


图3 路面各层冬季低温24 h温度应力变化  
Fig. 3 A 24 h temperature stress of asphalt pavement each layer in winter

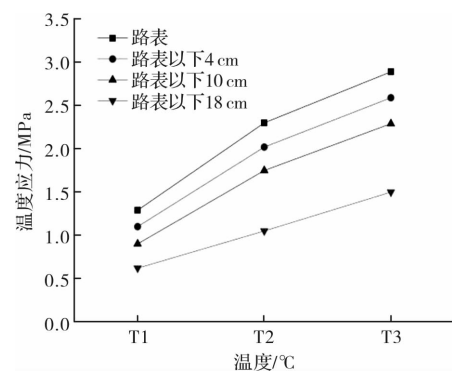


图4 不同温度与各层最大温度应力  
Fig. 4 Relationship between different temperature and maximum temperature stress of asphalt pavement each layer

### 3.2.2 沥青面层温缩系数

根据式(10)所示,除了温度变化幅度外,影响温度应力的主要因素还有沥青混合料的弹性模量和收缩系数,这两个指标都是随着温度的变化而改变。取冬季日气温为温度  $T_2$ ,保持沥青混凝土弹性模量为表3中数值不变,改变沥青混凝土在不同温度下温缩系数,改变依据为在表2的基础上增加分别  $0.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,  $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,  $1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,以研究温缩系数对沥青路面温度应力的影响。

图5—图6表明,在相同温度场作用下,当沥青混凝土面层温缩系数发生变化时,随着面层温缩系数的增加,路面各层位的温度应力都随着增大,并且各层最大温度应力随沥青面层温缩系数的增加呈线性关系增加。

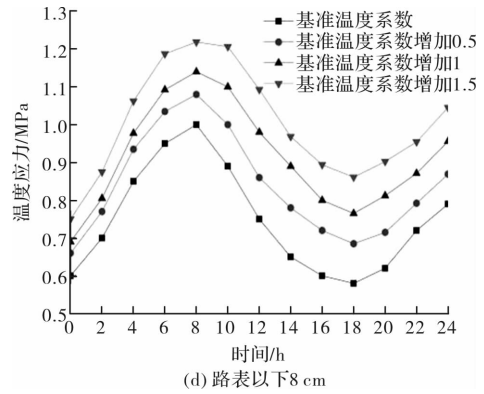
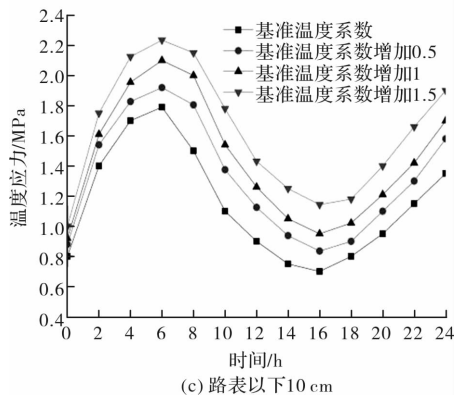
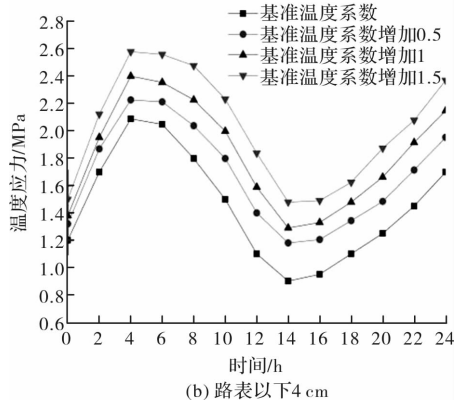
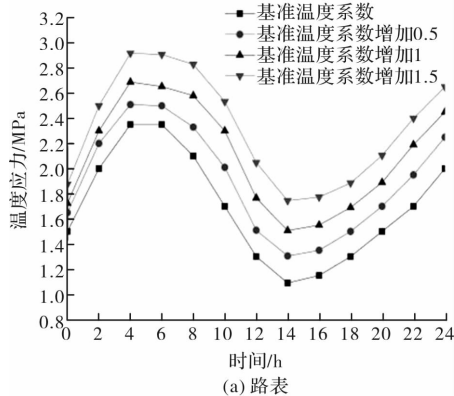


图5 路面各层不同温缩系数冬季低温24 h温度应力

Fig. 5 A 24 h temperature stress of asphalt pavement each layer at different temperature shrinkage coefficient

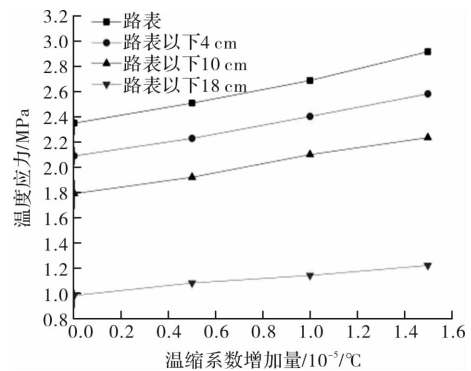


图6 温度收缩系数增量与最大温度应力关系

Fig. 6 Relationship between temperature shrinkage coefficient increments and maximum temperature stress

### 3.2.3 沥青面层弹性模量

沥青的弹性模量与温度有极大关系,随温度的升高而降低,由低温下的脆硬性固体发展到常温下的黏弹性体或高温下的流体状态<sup>[4]</sup>。取冬季气温为温度  $T_2$ ,保持沥青混凝土温缩系数为表2中数值不变,改变沥青混凝土在不同温度下弹性模量,改变依据为在表3的基础上增加分别 300 MPa, 600 MPa, 900 MPa,以研究弹性模量对沥青路面温度应力的影响。

图7—图8表明,在相同温度场作用下,当沥青混凝土面层弹性模量发生变化时,随着面层弹性模量的增加,路面各层位的温度应力都随着增大,最大温度应力随沥青面层弹性模量的增加也呈线性关系同步增加。

## 4 结论

(1)采用连续变温的日温度循环和随温度变化的沥青混凝土模量与温缩系数,计算沥青路面温度场和温度应力,更符合路面结构实际受力状况。

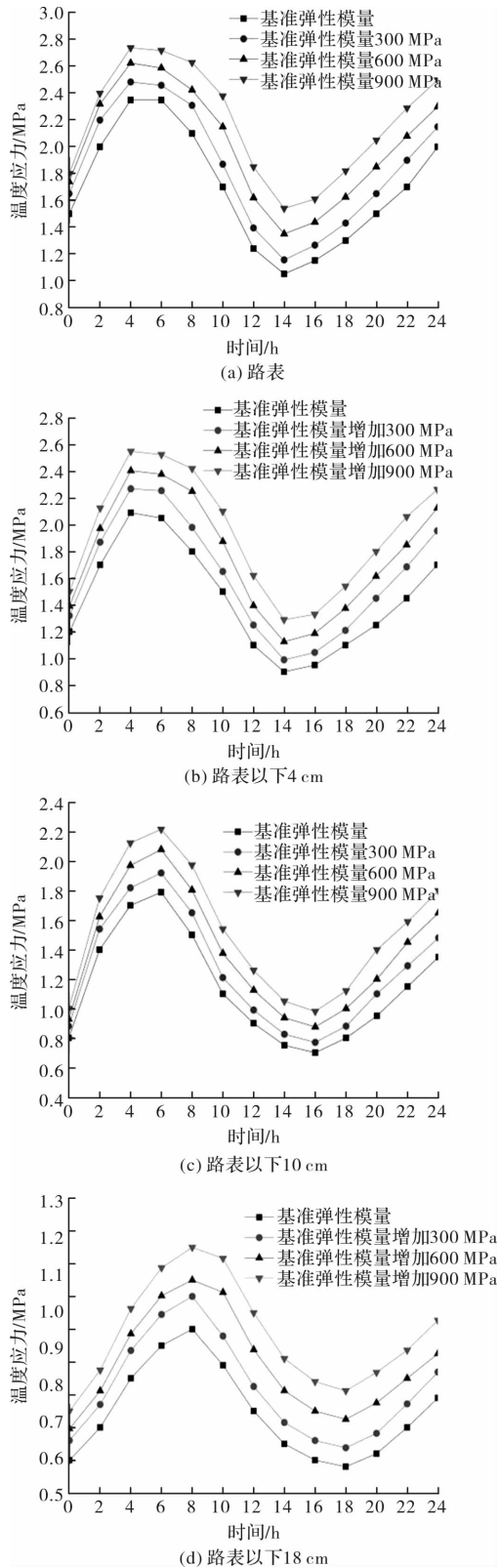


图7 路面各层不同弹性模量冬季低温24 h温度应力变化  
Fig. 7 A 24 h temperature stress of asphalt pavement each layer at different elastic modulus increments

路面表面层温度应力最先达到最大值,随着深度增加,其他各结构层依次达到温度应力最大值。

(2)取冬季3种典型日连续变温低温循环(T1、T2、T3),保持沥青面层弹性模量和温缩系数不

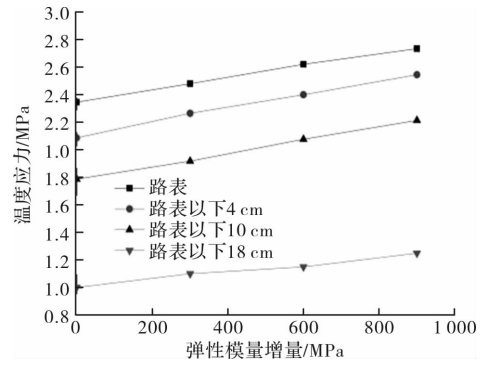


图8 弹性模量增量与最大温度应力关系  
Fig. 8 Relationship between elastic modulus increments and maximum temperature stress

变,温度从T1-T2、T2-T3降低过程中,沥青面层各层位温度应力都有显著增加,说明温度降低对沥青路面层的温度应力增加有重要作用。

(3)在相同温度场作用下,沥青面层模量及面层温缩系数的变化对结构内的温度应力影响都呈线性变化,当这两个参数增加时,温度应力随着线性增大。道路结构设计过程中应充分考虑面层模量及面层温缩系数变化对温度应力的影响。在低温地区设计沥青路面时,为减小路面结构层在低温变化产生的温度应力,应尽量选用温缩系数小的材料。

## 参考文献 References

- [1] 余红海,吴东强,李超华. 周期性变温条件对沥青路面车轮荷载应力分析的影响[J]. 公路交通技术. 2006. 2(1):35-37.  
YU Honghai, WU Dongqiang, LI Chaochua. Influence of periodical dynamic heating condition on asphalt pavement wheel load stress analysis[J]. Technology of Highway and Transport. 2006. 2(1):35-37.
- [2] YAVUZTURK C, KSAIBATIK, Chiasson Andrew D. Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional transient finite difference approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(4): 465-475.
- [3] 艾长发. 高寒地区沥青路面温度行为数值分析[J]. 重庆交通大学学报. 2017. 36(2):24-31.  
AI Changfa. Numerical analysis of asphalt pavement structure temperature behavior in cold regions[J]. 2017, 36(2): 24-31.
- [4] 马磊. 考虑温度非均匀性的沥青路面温度应力分析[J]. 长安大学学报, 2011, 1(1):1-5.

- MA Biao. Analysis of thermal stress on asphalt pavement considering temperature heterogeneity[J]. Journal of Chang'an University. 2011,1(1):1-5.
- [5] 宋允玲. 考虑温度影响时沥青混凝土路面荷载应力分析[D]. 西安:长安大学,2010.
- SONG Yunling. Load stress analysis on asphalt pavement subjected to temperature change[D]. Xi'an: Chang'an University,2010.
- [6] 郭学东. 沥青混凝土温度应力影响因素分析[J]. 公路,2015,11(11):4-5.
- GUO Xuedong. Asphalt concrete temperature stress influence factors analysis[J]. Highway, 2015, 11(11): 4-5.
- [7] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报,1984(3):76-85.
- YAN Zuoren. Temperature field analysis of layered pavement system[J]. Journal of Tongji University. 1984(3):76-85.
- [8] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析[M]. 北京:北京科学出版社. 1995:33-40.
- WU Ganchang. Semirigid pavement temperature stress analysis[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1998: 33-40.
- [9] 郑健龙,周志刚,张起森. 沥青路面抗裂设计理论与方法[M]. 北京:人民交通出版社,2002:169-179.
- ZHENG Jianlong, ZHOU Zjigang, ZHANG Qisen. Asphalt pavement design theory and method of crack resistance[M]. Beijing: China Communications Press, 2002:169-179.
- [10] 廖公云、黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京:东南大学出版社,2008,2042-225.
- LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. ABAQUS finite element software application in road engineering[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008, 2042-225.
- [11] 何金龙. 温度场下城市沥青路面车辙成因力学机理分析[D]. 长沙:中南大学土木工程学院,2015,32-39.
- HE Jinlong. Mechanical analysis of rutting causes considering temperature field for asphalt pavement in urban road[D]. Changsha: Central South University. 2015,32-39.
- [12] 姚祖康. 公路设计手册——路面[M]. 北京:人民交通出版社. 1999:17-21.
- YAO Zukang. The hand book of highway design-pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 1999: 17-21.
- [13] 周继业. 沥青路面低温开裂的分析研究[J]. 华东公路,1982,11(3):20-27.
- ZHOU Jiye. The analysis and research of the low temperature crack of asphalt pavement[J]. East China Highway,1982,11(3):20-27.
- [14] 郑健龙,关宏信. 温缩型反射裂缝的热粘弹性有限元分析[J]. 中国公路学报. 2001,14(3):1-5.
- ZHENG Jianlong, GUAN Hongxin. A finite element analysis based on thermal viscoelasticity theory of reflective crack resulting from low temperature shrinkage[J]. China Journal of Highway and Transport,2001,14(3):1-5.
- [15] 陈玉. 沥青路面低温缩裂分析[D]. 西安:长安大学, 2006:10-12.
- CHEN Yu. Low temperature shrinkage crack of asphalt pavement analysis[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006: 10-12.
- [16] 王孙富. 沥青路面结构温度场与温度应力的数值模拟分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:27-30.
- WANG Sunfu. Study on simulation analysis of temperature field and thermal stress for bituminous pavement structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010:27-30.

(编辑 沈 波)