

考虑温度非均匀性的沥青路面温度应力分析

马 翥,胡 浩,汪海年

(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的影响,考虑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,利用有限元法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。结果表明:面层表面开裂后,裂缝处的温度应力显著减小,面层底面的温度应力有所增大;裂缝初始深度越大,日平均温度越低,温差越大,面层底面的温度应力越大,裂缝处的应力强度因子也越大。在青藏公路沿线平均气温低、日温差大的条件下,一旦面层表面开裂,沥青路面结构将产生较大温度应力,导致裂缝快速向下扩展。

关键词:道路工程;沥青路面;温度应力;非均匀性;初始裂缝;应力强度因子

中图分类号:U414.1

文献标志码:A

Analysis of thermal stress on asphalt pavement considering temperature heterogeneity

MA Biao, HU Hao, WANG Hai-nian

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reasonably evaluate the effect of temperature on asphalt pavement structure, the thermal stress and stress intensity factor of pavement structure under different surface initial cracks length and temperatures, were calculated and analyzed using the finite element method considering temperature heterogeneity in depth of asphalt pavement and influence of temperature on the elasticity modulus of asphalt concrete. The results indicate that the thermal stress in crack significantly reduces and the thermal stress on bottom of pavement surface increases while the surface has cracks. The deeper initial crack, the lower daily average temperature and the larger temperature difference, the thermal stress on bottom of pavement surface and the stress intensity factor in crack are greater. So, under the conditions of low daily average temperature and large temperature difference along Qinghai-Tibet highway, once asphalt-concrete surface has cracks, the larger thermal stress will appear in asphalt pavement structure, and cause crack rapidly expand down. 2 tabs, 12 figs, 14 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; thermal stress; heterogeneity; initial cracking; stress intensity factor

0 引 言

沥青路面对温度变化十分敏感,沥青混合料的强度、劲度以及松弛能力等都随着温度的变化而变化,路面结构层随着温度的升高或降低而趋于膨胀或收缩。由于层状路面结构层之间的相互约束,这种变形不能自由发生而产生温度应力。当温度应力超过路面结构层材料的极限强度时,沥青混凝土表面就会开裂并向下扩展,从而形成表面裂缝^[1-9]。如果表面裂缝扩展至基层,夏季雨水沿裂缝渗入后,就会降低基层甚至土基的强度,导致道路的结构性破坏。已有文献分析变温对沥青路面结构的作用时,将沥青混凝土的劲度模量取一个代表性温度下的恒定值,未考虑温度沿路面深度方向的非均匀性和变温过程对沥青混凝土劲度模量的影响,使理论计算结果与实际状况的差异较大。为此,本文在青藏公路沥青路面温度场的基础上,考虑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,对已产生裂缝的沥青路面结构温度应力进行有限元计算分析,为合理评价温度对沥青路面的影响以及完善沥青路面设计方法提供参考依据。

1 计算模型与参数

1.1 计算模型

根据青藏公路沿线的气候,在沥青路面温度场研究的基础上,本文采用二维有限元方法计算分析面层已有裂缝的沥青路面结构温度应力。路面二维平面应变计算模型如图 1 所示,水平方向为道路纵向(x 方向),竖向为道路深度方向(y 方向)。

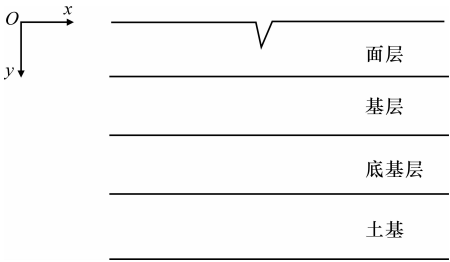


图 1 面层表面裂缝模型

模型满足基本假定:①路面各层均为完全均匀和各向同性的连续体;②温度不随水平坐标的变化而变化;③路面层间接触良好,热传导连续;④各层材料为完全弹性;⑤不考虑自重应力场。模型左右两端施加 x 和 y 方向位移约束,底面施加方向位移约束。计算模型中,路面结构基准温度取 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。

在应力强度因子计算中,在裂尖设置奇异单元,

在裂尖附近,包含奇异单元的局部网格划分如图 2 所示。

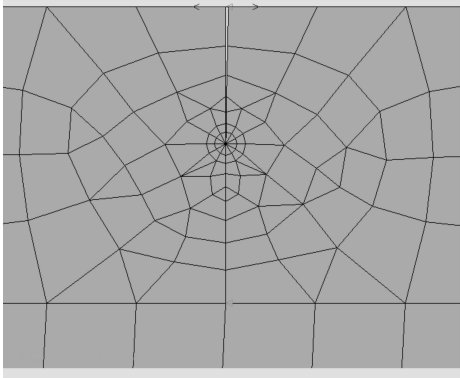


图 2 裂尖附近奇异单元网格划分

1.2 参数取值

计算结构参数和材料参数见表 1、表 2^[11](此处沥青路面弹性模量取其劲度模量)。表 2 中沥青混凝土的劲度模量为室内试验实测结果。具体计算取值时,在前处理器中输入关键层位单元的温度及其对应的劲度模量,其他单元根据温度自动线性插值计算。

表 1 沥青路面结构参数和材料参数

参数	厚度 h/cm	弹性模 量 E/MPa	泊松 比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	导热系数/ $(\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	线膨胀系 数/ 10^{-5}K^{-1}
面层	4+5	见表 2	0.25	2 400	1.12	2.10
基层	20	900	0.30	2 200	1.20	0.98
底基层	20	150	0.30	2 100	2.00	1.60

表 2 沥青混凝土实测劲度模量

温度/ $^{\circ}\text{C}$	-20	-10	0	10	20
劲度模量/ MPa	5 011	3 160	1 986	1 021	784

在温度应力计算模型中,温度边界条件为二维有限元计算得到的青藏公路沥青路面以 1 h 为荷载步的非周期性瞬态温度场结果^[12]。下页图 3 和图 4 分别为青藏公路五道梁 2003 年 11 月 10 日和 2004 年 1 月 10 日温度场计算结果。由图 3、图 4 可以看出,沥青路面结构层温度随着气温而周期性变化,但变化幅度随深度的增加而减小,相位不断滞后,温度分布沿深度方向有明显的非均匀性。

2 温度应力及其影响因素分析

本文以二维热弹性层状体系理论作为沥青路面结构温度应力数值分析的理论基础,分析裂缝深度及气温对路面结构温度应力的影响^[13-14]。

2.1 裂缝深度

下页图 5 为 2003 年 11 月 10 日沥青路面未开裂

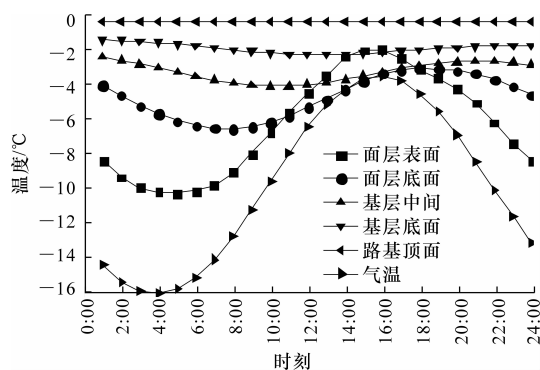


图 3 2003 年 11 月 10 日路面温度场计算结果

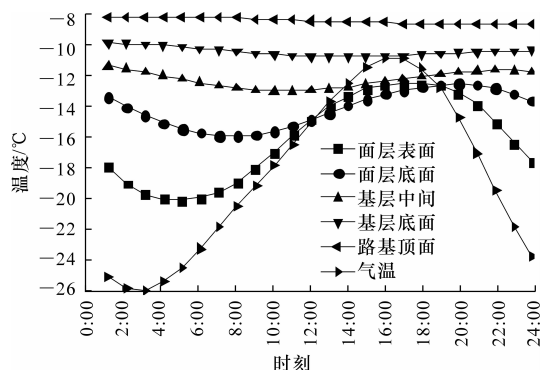


图 4 2004 年 1 月 10 日路面温度场计算结果

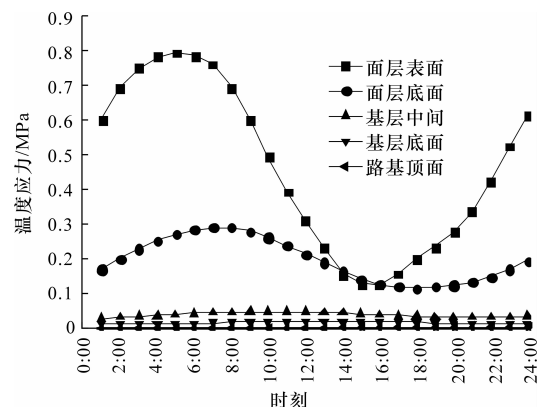


图 5 面层未开裂时路面温度应力

时的温度应力计算结果。由图 5 可以看出,面层未开裂时,路面结构的最大温度应力出现在路表,其值为 0.817 MPa,时间为凌晨 5:00 左右。随着距离路表深度的增加,路面结构层的温度应力值减小较快,且其最大应力值出现时间相对于路表也有所滞后。

图 6 为面层裂纹深度为 5 cm 时的沥青路面温度应力计算结果。由图 5 和图 6 对比分析得出,面层开裂后,由于裂缝处的能量释放,面层表面的温度应力明显减小,甚至出现压应力;面层底面及其以下结构层温度应力均有所减小,但变化不明显。表面裂缝的出现,使裂缝面上沿附近局部区域成为一个变形不受约束的自由区,而远场的收缩位移将向这

一区域集中并产生推挤,导致裂缝两侧上凸,路表裂缝处受压。路表温度应力、面层底部温度应力与裂缝深度的关系如图 7、图 8 所示。

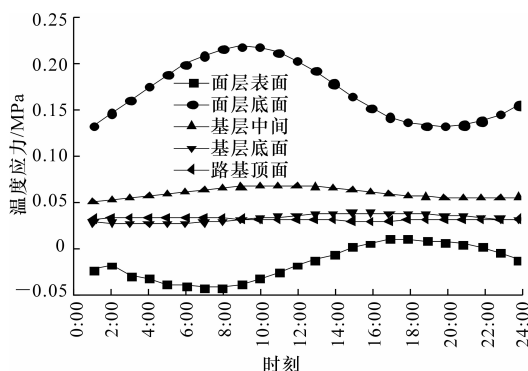


图 6 裂缝深度为 5 cm 时路面温度应力

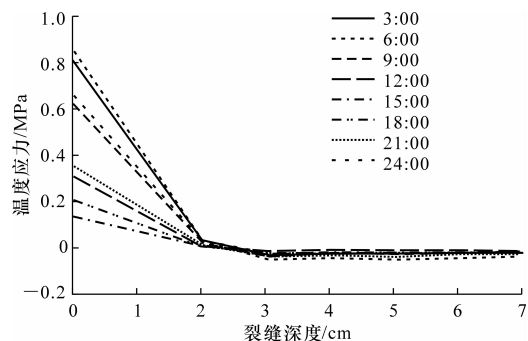


图 7 路表温度应力与裂缝深度的关系

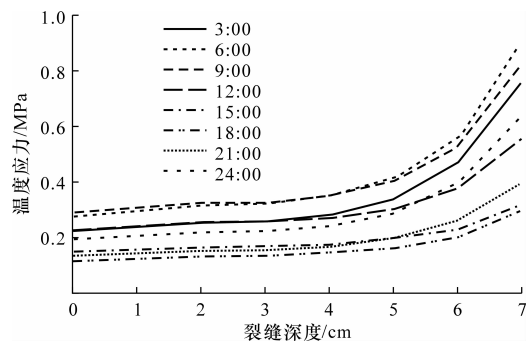


图 8 面层底部温度应力与裂缝深度的关系

由图 7 可知,当面层表面产生裂缝后,裂缝处路表温度应力明显减小;裂缝深度大于 2 cm 后,裂缝深度对路表温度应力的影响很小。

由图 8 可以看出,面层表面的开裂对面层底部的温度应力影响也较大,尤其当裂缝深度大于 4 cm 后,底部温度应力变化幅度明显增多。由此可见,裂缝深度越大,即越接近面层底面,其对面层底部温度应力的影响越大,使裂缝扩展越快。

2.2 温 度

2003 年 11 月 10 日路面最高气温 -3.6°C ,最低气温 -16.1°C ,平均气温 -9.9°C ;2004 年 1 月 10 日路面最高气温 -10.3°C ,最低气温 -25.6°C ,

平均气温约为 $-18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2 d 的日温度变化幅度基本相同,但后者日平均气温比前者低约 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气温对面层温度应力的影响如图 9 所示。

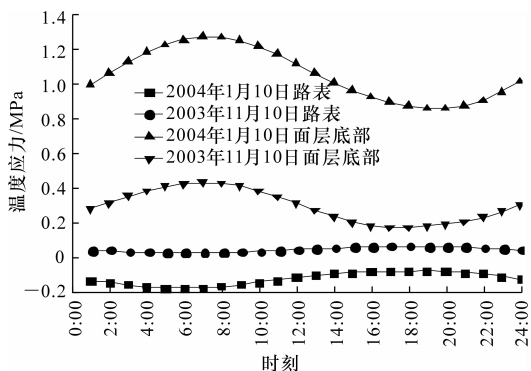


图9 气温对面层温度应力的影响

由图 9 可以看出,当日平均温度较低、变温幅度较大时,气温对面层表面及底面的温度应力影响较大。2003 年 11 月 10 日 6:00(未开裂时,路表温度应力最大时刻)路表裂缝处压应力为 0.05 MPa ,而 2004 年 1 月 10 日 6:00 时为 -0.18 MPa ,增大了 2.6 倍。2003 年 11 月 10 日面层底部温度应力最大时刻 9:00 裂缝处面层底部温度应力为 0.40 MPa ,而 2004 年 1 月 10 日 9:00 为 1.23 MPa ,增大了 2.1 倍。由此可见,气温对面层表面及底面的温度应力的影响都比较大。

3 应力强度因子及其影响因素分析

根据断裂力学理论,含裂缝结构体因裂缝的形状和外荷载方式的不同而产生 3 种类型的应力强度因子:Ⅰ型(张开型)、Ⅱ型(剪切型)、Ⅲ型(撕开型)。本文主要研究低温收缩裂缝,且裂缝横向贯穿沥青混凝土路面,所以裂缝属于Ⅰ型。

图 10 给出了一个以裂缝端点为原点的坐标系。 x 方向是裂缝正前方, y 方向是裂缝面的法线方向。考虑一个离裂缝端点较远、极坐标为 (r, θ) 的单元,其应力状态可以用 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 3 个应力分量来表示,这里的 r 值远小于裂缝长度。由断裂力学的解析解,可得裂缝端点附近的应力场和应变场;通过应变位移关系,可以计算得到裂缝区位移场。

3.1 裂缝深度

应力强度因子唯一地表征了裂缝尖端场的强度,是判定沥青面层断裂的重要参量。应力强度因子越大,裂缝越容易继续向下扩展。面层裂缝应力强度因子 K_I 与裂缝深度的关系如图 11 所示。

由图 11 可以看出,当沥青面层厚度一定时,面

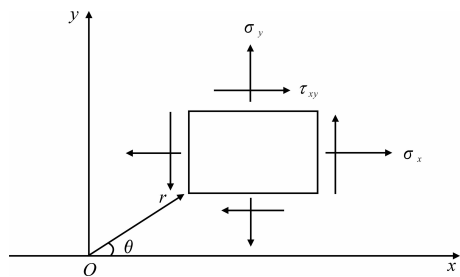


图10 平面应力状态

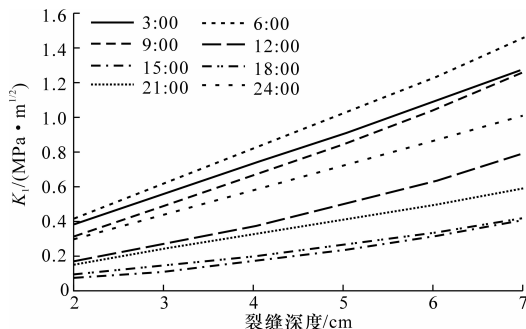


图11 面层裂缝应力强度因子与裂缝深度的关系

层裂缝应力强度因子 K_I 随裂缝深度的增加而近似线性增大;1 d 内不同时间的应力强度因子变化情况基本相同,但变化速率有所不同。

3.2 温度

变温对面层裂缝应力强度因子的影响见图 12。

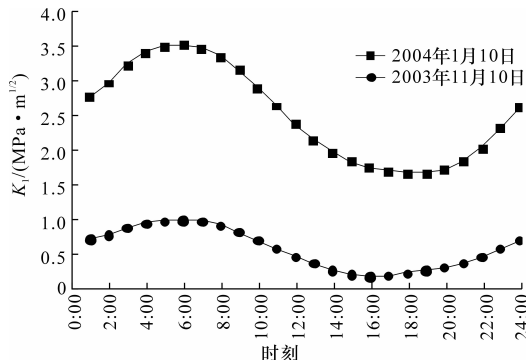


图12 变温对面层裂缝应力强度因子的影响

由图 12 可以看出,沥青面层开裂后,1 d 内裂缝处应力强度因子随着气温的波动而变化;不同气温条件下,其应力强度因子有所不同,但变化情况基本一致。当面层表面出现 7 cm 裂缝时,2003 年 11 月 10 日裂缝应力强度因子最大时刻 6:00 为 $1.02\text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$,而在 2004 年 1 月 10 日 6:00 却为 $3.52\text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$,增大了 2.45 倍。由此可见,日平均温度越低,变温幅度越大,裂缝应力强度因子越大,面层裂缝扩展越快。

4 结 语

(1)考虑沥青路面温度沿深度方向的非均匀性

分布和混合料模量的变化,由沥青路面温度应力分析得出,当面层表面开裂后,路表裂缝处的温度应力显著减小,甚至出现压应力;面层底部的温度应力有所增大,但变化不明显。

(2)初始裂缝深度、温度对沥青面层的温度应力及裂缝应力强度因子均有明显影响,裂缝初始深度越大,日平均温度越低、温差越大,面层底部温度应力与裂缝处应力强度因子越大,裂缝越易向下扩展。

参考文献:

References:

[1] 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,2003.

[2] Guy D, Hannele K. Cold regions pavement engineering[M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2009.

[3] 巴桑顿珠,黄晓明. 西藏沥青路面裂缝温度疲劳扩展寿命分析[J]. 东南大学学报:自然科学版,2006,36(6):1013-1017.

BASANG Dun-zhu, HUANG Xiao-ming. Analysis for fatigue life of asphalt pavement temperature crack in Tibet[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36(6): 1013-1017.

[4] 元 松,谈至明. 沥青路面荷载型竖向反射裂缝疲劳断裂分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(10):1352-1357.

YUAN Song, TAN Zhi-ming. Analysis of fatigue fracture on vertical reflective crack under traffic load on asphalt pavement[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(10): 1352-1357.

[5] 耿立涛,钟 阳,乔 娜. 考虑材料特性随温度变化时沥青路面的温度应力[J]. 公路交通科技,2009,26(11):16-20.

GENG Li-tao, ZHONG Yang, QIAO Na. Thermal stresses of asphalt pavement with material property dependent on temperature[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(11): 16-20.

[6] 周庆华,沙爱民. 沥青高温流变评价指标对比[J]. 交通运输工程学报,2008,8(1):27-30,35.

ZHOU Qing-hua, SHA Ai-min. Comparison of high-temperature rheological evaluation indices for bitumen[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 27-30, 35.

[7] 王 磊,胡 浩,马 磊,等. 青藏公路沥青路面结构

温度应力影响因素分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(4):28-33.

WANG Lei, HU Hao, MA Biao, et al. Analysis of influence factor on thermal stress of asphalt pavement structure on Qinghai-Tibet highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(4): 28-33.

[8] 锁利军,王秉纲,陈拴发. 沥青路面多孔混凝土基层温度应力数值分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2007,28(2):23-26.

SUO Li-jun, WANG Bing-gang, CHEN Shuan-fa. Numerical analysis of thermal stress for porous concrete base in asphalt pavement[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2007, 28(2): 23-26.

[9] 陈拴发,郑木莲,杨 斌,等. 破裂水泥混凝土路面板沥青加铺层温度应力影响因素[J]. 交通运输工程学报,2005,5(3):25-30.

CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, YANG Bin, et al. Thermal stress influence factors of asphalt overlay on cement concrete pavement cracking slab[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 25-30.

[10] 周生金. 沥青路面荷载与温度耦合作用疲劳特性分析[D]. 西安:长安大学,2005.

[11] 黄志义,王金昌,朱向荣. 含裂缝沥青混凝土路面的粘弹性断裂分析[J]. 中国公路学报,2006,2(3):18-22.

HUANG Zhi-yi, WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Viscoelastic fracture analysis of asphalt concrete pavement with cracks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 2(3): 18-22.

[12] 贾利强. 多年冻土地区沥青路面温度场研究[D]. 西安:长安大学,2009.

[13] 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):7-11.

ZHENG Nan-xiang, NIU Si-sheng, XU Xin-quan. Temperature, axle load and axle load frequency model of rutting prediction of heavy-duty asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 7-11.

[14] 郭红兵,陈拴发. 沥青路面热-荷载耦合应力数值分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(2):15-19.

GUO Hong-bing, CHEN Shuan-fa. Numerical analysis of temperature load coupling stress for asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 15-19.