

文章编号: 1006-4710(2011)03-0363-05

# 考虑温度作用下的半刚性沥青路面的疲劳断裂分析

刘俊卿<sup>1</sup>, 陈诚诚<sup>1</sup>, 王保实<sup>1</sup>, 郝宁<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西普宁工程结构特种技术有限公司, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 在断裂力学理论的基础上, 采用耦合热应力分析的方法借助三维有限元模型, 研究分析了大温差作用下基层带裂缝半刚性沥青路面结构的应力强度因子, 并与行车荷载作用下的实验结果进行比较分析。研究表明, 随着裂缝长度的增加和实验温度的降低, 张开型应力强度因子和剪切型应力强度因子不断增加; 与行车荷载相比, 低温大温差对路面破坏影响更为严重。研究测算结果显示, 本研究对沥青路面疲劳寿命的估算预测方法与实际更为接近。

**关键词:** 沥青路面; 温度场; 耦合分析; 断裂分析; 疲劳寿命

**中图分类号:** U416      **文献标志码:** A

## The Fatigue Fracture Analysis of Semi-Rigid Base-Course Asphalt Pavement under the Temperature Effect

LIU Junqing<sup>1</sup>, CHEN Chengcheng<sup>1</sup>, WANG Baoshi<sup>1</sup>, HAO Ning<sup>2</sup>

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture &amp; Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Puning Engineering Structure &amp; Special Technology Co., Ltd, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the theory of fracture mechanics, and using a coupled thermal stress analysis method by simulating three-dimensional finite element model, this paper analyzes the stress intensity factors of semi-rigid base asphalt pavement with cracks under the large temperature differences and conducts the comparative analysis of experiment in the case of the vehicle load. The results show that; with the crack length increasing and temperature decreasing, the stress intensity factors of tensile type and shear type continue to increase; compared with the traffic load, cryogenic large temperature difference can cause serious damage to the road; the results from researches and measured calculation indicate that the method of estimation and prediction of fatigue life of asphalt pavement is found to be closer to the reality.

**Key words:** asphalt pavement; temperature load; coupling analysis; fracture analysis; fatigue life

在交通荷载反复作用下, 带裂缝半刚性基层沥青路面的裂缝会发展到面层, 从而形成反射裂缝。在欧、美、非等多个国家沥青混凝土路面结构设计均考虑温度这一影响因素<sup>[1]</sup>, 而目前我国的设计规范<sup>[2]</sup>并没有明确地将温度因素作为一个必须考虑的影响因素。

裂缝尖端应力强度因子是判断裂缝扩展的重要指标, 应力强度因子越大, 裂缝越易开裂扩展, 道路的使用寿命就越短。目前针对裂缝的研究大都集中在面层的反射裂缝上, 认为基层已经开裂, 并在此基

础上研究裂缝在面层中的扩散机理<sup>[3-4]</sup>。本研究对基层含疲劳裂缝路面结构进行分析, 模拟裂缝扩展至面层, 最终引起沥青混凝土面层破坏, 这是高等级沥青路面的主要破坏模式之一, 因此掌握基层裂缝开裂和扩展规律, 确定道路的剩余使用寿命, 为路面结构设计防裂措施提供必要的理论依据。

## 1 基本理论

### 1.1 断裂力学基本理论

以断裂力学为理论基础研究带裂纹或尖缺口的

收稿日期: 2011-04-15

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2009JM1001)。

作者简介: 刘俊卿(1957-), 男, 陕西神木人, 教授, 博士, 研究方向为岩土工程和有限元分析。E-mail: liujunqingjd@126.com。

结构或构件的强度和变形规律,建立构件的裂纹尺寸、工作应力以及材料抵抗裂纹扩展能力三者之间的定量关系,为结构或构件的安全设计、带裂纹构件的寿命估计提供理论依据。

张开型应力强度因子  $K_I$  和滑开型应力强度因子  $K_{II}$  分别用裂纹面的张开位移  $v(r, \pi)$  及滑开位移  $u(r, \pi)$  表示,为<sup>[5]</sup>:

$$K_I = \frac{2\mu}{(\kappa + 1)} \sqrt{2\pi} \frac{v(r, \pi)}{\sqrt{r}}$$

$$K_{II} = \frac{2\mu}{(\kappa + 1)} \sqrt{2\pi} \frac{u(r, \pi)}{\sqrt{r}} \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为材料泊松比,  $\kappa = (3 - \mu)/(1 - \mu)$ 。

### 1.2 热/力耦合基本理论

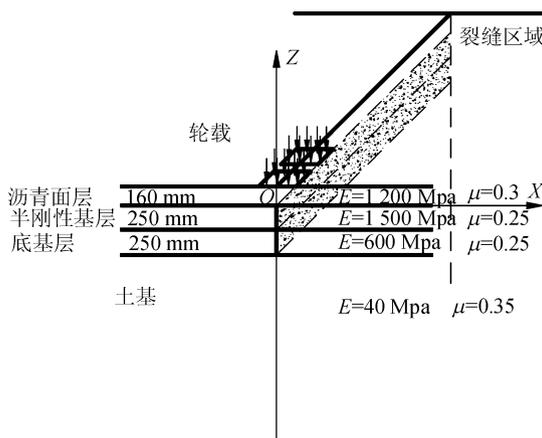
温度场作为外部荷载施加到路面结构上,同时温度场又影响着结构中材料的线收缩系数  $\alpha(T)$  和结构的刚度矩阵  $[K]$ 。

有限元模型中温度荷载引起路面结构应力的发生,根据虚功原理,单元应力场平衡方程为<sup>[6]</sup>:

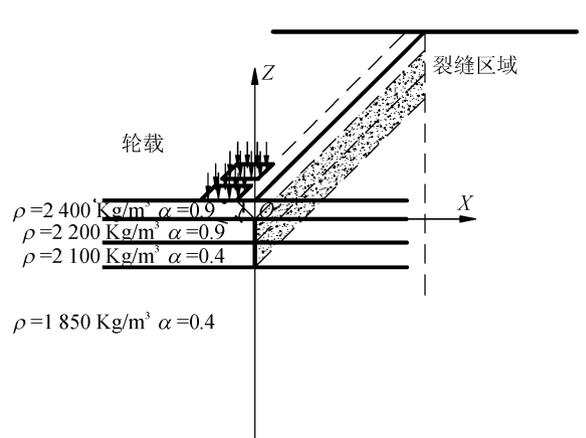
$$[K_e] \{u\} + [C_e] \{\dot{u}\} = \{F_e^{th}\} \quad (2)$$

式中,  $[K_e]$  为单元刚度矩阵;  $[C_e]$  为考虑单元非线性的阻尼矩阵;  $\{\dot{u}\}$  为单元位移对时间的导数矩阵;  $\{u\}$  为单元的位移矩阵;  $\{F_e^{th}\}$  为单元的热荷载。

单元的热荷载被定义为:



(a) 正荷载作用下的力学模型



(b) 偏荷载作用下的力学模型

图1 半刚性基层沥青路面断裂计算结构及参数示意图

Fig. 1 Fracture of Semi-rigid asphalt pavement structure and parameter diagram

### 2.2 基本假定

沥青面层、半刚性基层、底基层和土基均为各向同性线弹性均质材料,且各层间完全连接,没有滑移;横向裂缝贯穿基层的整个宽度,且裂缝面为自由

$$\{F_e^{th}\} = \int_V [B]^T [K_e] \{\epsilon^{th}\} dV \quad (3)$$

式中,  $V$  为路面体体积;  $[B]$  为单元应变矩阵;  $\{\epsilon^{th}\}$  为单元的热应变矩阵。

从而可以得到沥青混凝土路面热力耦合平衡方程<sup>[7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [C'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F^{th}\} \\ \{Q\} + \{Q^{surf}\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $[T]$  为节点温度向量;  $\{\dot{T}\}$  为温度对时间的导数;  $[K']$  为传导矩阵;  $[C]$  为结构体的阻尼矩阵;  $[K]$  为刚度矩阵;  $\{Q\} + \{Q^{surf}\}$  为结构体的热流率及路表通过对流和辐射所吸收的热流。

## 2 有限元计算模型与结果分析

### 2.1 半刚性沥青路面的结构形式和荷载

采用如图1所示的路面结构形式<sup>[8]</sup>。荷载采用双轮垂直荷载,双轮中心间距为0.32 m,车轮荷载<sup>[9]</sup>面积简化为0.2 m × 0.32 m的矩形荷载(见图1(a))。由于考虑反射裂缝,偏荷载作用在不利位置<sup>[10]</sup>(见图1(b))。假设半刚性基层处于完全断裂状态,并且裂缝已平直贯穿整个基层并扩展至沥青路面。

面;路面侧面  $X$  方向的位移自由度约束,土基底部各方向位移自由度均约束。

### 2.3 裂缝尖端的模拟及模型尺寸

模拟裂缝尖端应力场和应变场的奇异性,裂缝

尖端采用带中间节点的二次楔形单元,即为 20 节点六面体楔形单元,其中间节点距裂缝尖端 1/4 边长处。围绕裂缝尖端奇异单元,设置并采用普通的 8 节点六面体减缩单元<sup>[11]</sup>。

本研究选取模型尺寸为 10 m × 3.916 m × 5 m,其中行车方向沿 10 m 方向。由于结构的对称性模型尺寸为 10 m × 1.958 m × 5 m。有限元模型裂缝尖端单元划分如图 2 所示。

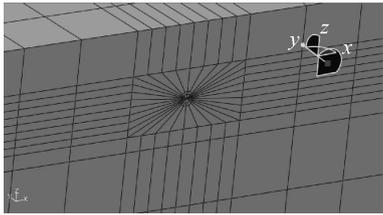


图 2 裂尖附近区域的单元划分示意图  
Fig. 2 Illustration of unit meshing near crack front

## 2.4 结果分析

1) 正荷载与偏荷载作用下路面裂缝扩展深度与应力强度因子的关系

图 3、图 4 分别表示裂缝深度为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm、120 mm 和 140 mm 时,正荷载与偏荷载作用下层不同深度的裂缝尖端的应力强度因子值,即模拟裂缝扩展过程中的应力强度因子变化规律。由图 3 可知,正荷载作用下  $K_I$  随着裂缝的不断扩展而增加,  $K_{II}$  趋于零,即对称荷载作用下  $K_I$  起控制作用。由图 4 可知,在偏荷载作用下,随着裂缝的不断扩展,  $K_I$  呈现负值表示裂缝尖端处于受压状态,对裂缝扩展不起作用。  $K_{II}$  对应于剪切型开裂,故无论  $K_{II}$  值是正值还是负值,都将对裂缝扩展起作用。因此,  $K_{II}$  随着裂缝的扩展而不断增大,而起主要控制作用的为  $K_{II}$ ,也是后期裂缝的扩展速度急剧增加,直到破坏的原因。

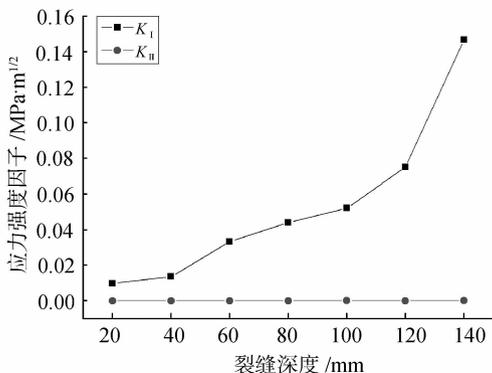


图 3 正荷载作用下层不同裂缝长度时的  $K_I$  值  
Fig. 3 Curves of  $K_I$  with different surface crack under the centric load

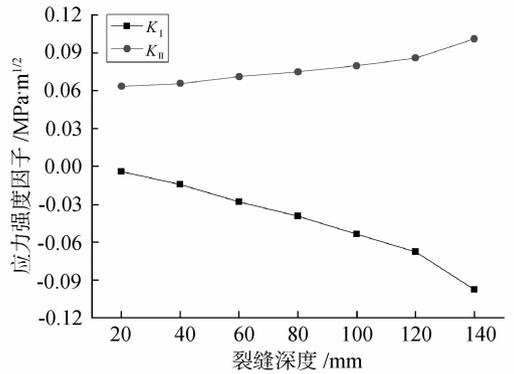


图 4 偏荷载作用下层不同裂缝长度时的  $K_I, K_{II}$  值  
Fig. 4 Curves of  $K_I, K_{II}$  with different surface crack under the eccentric load

2) 不同温度荷载作用下路面裂缝扩展深度与应力强度因子的关系

图 5 表示温度分别为 30℃、20℃、10℃、-10℃、-20℃ 和 -30℃ 时面层不同深度的裂缝尖端应力强度因子值,即模拟各个温度作用下裂缝扩展过程中的应力强度因子变化规律。由图 5 可知,由于温度荷载为对称荷载,起主要控制作用的是  $K_I$ ,而  $K_{II}$  约为零。计算表明温度升高时应力强度因子呈现负值,裂缝处呈现受压状态,对裂缝扩展不起作用。温度降低时应力强度因子呈现正值,裂缝处呈现受拉状态,对裂缝扩展起控制作用,且随着裂缝深度的增加呈线性增长。

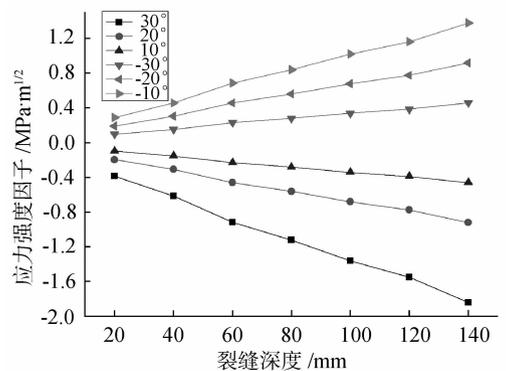


图 5 不同路表温度作用下层不同裂缝长度时的  $K_I$  值  
Fig. 5 Curves of  $K_I$  with different surface crack under the effect different temperature

3) 同时考虑温度荷载作用下路面裂缝扩展深度与应力强度因子的关系

图 6 分别表示温度变化 20℃ 和 -20℃ 时在偏荷载共同作用下层不同深度的裂缝尖端应力强度因子值,即模拟两种不同温度与偏荷载共同作用下裂缝扩展过程中的应力强度因子变化规律。由图 6 可知,在温度升高 20℃ 和偏荷载的共同作用下,面层裂缝尖端应力强度因子  $K_I$  呈现负值,  $K_{II}$  随着裂缝

深度增加而呈增长趋势,  $K_{II}$  对裂缝扩展起控制作用; 在温度降低 20℃ 和偏荷载的共同作用下, 面层裂缝尖端应力强度因子  $K_I$ 、 $K_{II}$  随着裂缝深度的增加而呈增长趋势; 升温与降温作用下分别获得的  $K_{II}$  曲线基本重合, 证明剪切型开裂是由偏荷载引起的。通过数据分析显示, 温度荷载对路面结果的影响值大于垂直偏荷载作用下对路面的影响, 即温度升高时垂直偏荷载对裂缝扩展起控制作用, 温度降低时温度对裂缝扩展起控制作用。

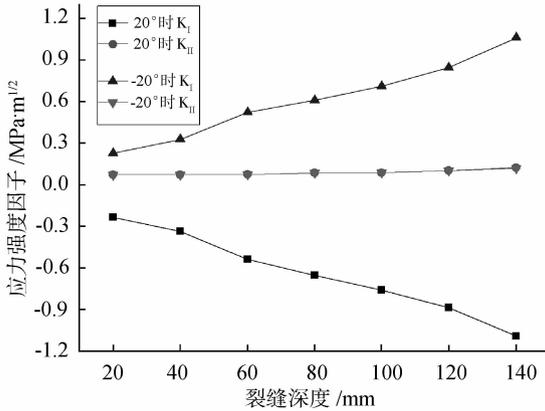


图6 温度和偏荷载作用下面层不同裂缝长度时的  $K_I$ 、 $K_{II}$  值

Fig. 6 Curves of  $K_I$ 、 $K_{II}$  with different surface crack under the effect temperature and eccentric load

### 3 半刚性基层沥青路面结构疲劳寿命预估

路面结构疲劳寿命受裂纹尖端应力强度因子与材料性质控制, 由 Paris 公式表示为<sup>[5]</sup>:

$$da/dN = A(\Delta K)^n \quad (5)$$

式中,  $a$  为裂纹长度;  $N$  为疲劳作用次数;  $A$ 、 $n$  为材料的参数;  $\Delta K$  为每一荷载循环时裂纹尖端的应力强度因子之差。

在疲劳裂纹的扩展过程中, 扩展速率是随着应力强度因子的不断变化而变化的。通过计算表示应力强度因子的变化规律, 并对 Paris 公式进行变形积分, 可以得到裂纹疲劳寿命的公式, 即:

$$N_f = \int_{a_{in}}^{a_{cr}} [1/(A(\Delta K)^n)] da \quad (6)$$

式中,  $a_{in}$  和  $a_{cr}$  分别为裂纹初始长度和失稳扩展裂纹长度;  $N_f$  为疲劳寿命。

温度荷载和行车荷载对路面疲劳寿命影响很大, 且二者耦合作用的分析更为符合实际情况。根据图 6 的分析数据, 对其进行疲劳寿命预估。依据最大周向正应力理论, 对 I + II 复合型裂缝的扩展角、复合应力强度因子进行计算, 分析结果见表 1。

表1 断裂分析结果

Tab. 1 Result of fracture analysis

裂缝深度/mm	应力强度因子 $K_I$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	应力强度因子 $K_{II}$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	复合应力强度因子 $K^*$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	裂缝扩展角 $\alpha$ /(°)	$\tan\alpha$
20	2.29E-01	7.31E-02	0.304 850	30.454 475	0.587 975
40	3.27E-01	7.42E-02	0.404 693	23.409 981	0.432 945
60	5.24E-01	7.56E-02	0.603 045	15.788 401	0.282 753
80	6.10E-01	8.56E-02	0.698 995	15.398 712	0.275 422
100	7.10E-01	8.85E-02	0.802 572	13.795 722	0.245 544
120	8.46E-01	1.02E-01	0.952 692	13.421 204	0.238 625
140	1.06E+00	1.20E-01	1.181 437	12.647 373	0.224 395

根据表 1 的断裂分析结果, 对裂缝深度与扩展角用最小二乘法进行拟合得到裂缝扩展路径曲线, 为:

$$f(\alpha) = 43.74985 - 0.7766b + 0.00679b^2 - 2.02279 \times 10^{-5}b^3 \quad (7)$$

式中,  $b$  表示裂缝深度,  $\alpha$  表示对应的扩展角。对(7)式进行积分得到对应于不同裂缝深度时的裂缝长度值; 以裂缝长度为自变量, 用最小二乘法对复合应力强度因子进行拟合得到其表达式, 为:

$$K^* = 0.31678 + 0.19434L - 0.10149L^2 \quad (8)$$

当裂缝尖端应力强度因子达到或者超过其断裂韧性时, 结构将失稳破坏。根据相关试验资料<sup>[12]</sup> 选

取沥青的断裂韧性, 令  $K^* = K_{IC} = 0.45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 则  $L = 0.538 \text{ m}$ , 此时裂缝深度 37 mm。对于本结构当  $b = 40 \text{ mm}$  时裂缝尖端复合强度因子值已经达到了沥青混合料的断裂韧性, 裂缝将出现失稳扩展并达到沥青面层上表面, 且迅速形成反射裂缝。

根据文献[13], 取  $n = 2.71$ ,  $A = 3.44 \times 10^{-6}$ , 最后计算得到沥青面层的疲劳寿命为  $2.28 \times 10^6$  轴次。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006), 我国中等交通公路沥青路面的设计累计轴次为 300 ~ 1 200 万次/车道。可见, 预测的疲劳寿命符合实际情况, 同时预估的疲劳寿命与规范值在同一数量级, 可见, 温度荷载与行车荷载耦合的计算

与实际更为接近,说明该方法有一定的精度,但计算得到沥青面层的疲劳寿命轴次比设计轴次略小,可能由于材料参数  $A$ 、 $n$  的取值和裂缝扩展路径的计算也存在一定的偏差;在温度应力长时间作用下<sup>[14]</sup>,由沥青混合料粘弹性质引起的应力松弛现象将起重要作用;另外温度较高时,该模型应采用沥青混合料粘弹塑性本构关系的断裂力学理论进行分析,对沥青路面疲劳寿命进行预测将更接近实际情况。

## 4 结 论

基于有限元断裂分析,研究了各个工况下不同裂缝深度时沥青面层裂缝尖端应力强度因子的变化规律;并运用 Paris 公式,对行车荷载与温度荷载共同作用下沥青面层的疲劳寿命进行预测,结果表明:

1) 在荷载不利位置标准轴载作用下  $K_{II}$  随着裂缝的扩展而不断增大,对裂缝的扩展起主要控制作用的为  $K_{II}$ ,也是后期裂缝的扩展速度急剧增加,直到破坏的原因;

2) 温度升高时应力强度因子呈现负值,裂缝处呈现受压状态,温度升高对裂缝扩展不起作用;温度降低时应力强度因子呈现正值,裂缝处呈现受拉状态,温度降低对裂缝扩展起控制作用,且随着裂缝深度的增加呈线性增长;

3) 在荷载不利位置标准轴载作用下裂缝尖端应力强度因子小于温度荷载作用下裂缝尖端应力强度因子的值,可见与行车荷载相比低温大温差对路面破坏影响更为严重;温度升高时垂直偏荷载对裂缝扩展起控制作用,温度降低时温度对裂缝扩展起控制作用;

4) 对考虑温度因素的沥青路面的疲劳寿命预测方法更接近实际情况,符合现行规范,具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 姚祖康. 对国外沥青路面设计指标的评述(连载一)[J]. 公路,2003,3(3):18-25.  
Yao Zukang. Asphalt pavement design index of foreign commentary(Part I)[J]. Highway,2003,3(3):18-25.
- [2] 杨孟余,冯德成,沙爱民,等. JTG D50-2006. 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [3] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

- [4] 彭妙娟,张登良,夏永旭. 半刚性基层沥青路面的断裂力学计算方法及其应用[J]. 中国公路学报,1998,11(2):30-38.  
Peng Miaojuan, Zhang Dengliang, Xia Yongxu. Fracture mechanics for the asphalt pavement on semi-rigid type base course[J]. China Journal of Highway and Transport,1998,11(2):30-38.
- [5] 王自强,陈少华. 高等断裂力学[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [6] 艾长发,邱延峻,毛成,等. 不同沥青混凝土路面结构的大温差温度行为分析[J]. 公路,2008,4(4):14-19.  
Ai Changfa, Qiu Yanjun, Mao Cheng, et al. Analysis of temperature action on different asphalt concrete pavement structures by large temperature changing[J]. Highway,2008,4(4):14-19.
- [7] Ai Changfa, Qiu Yanjun, Mao Cheng, et al. Influence of Interlayer Condition on Structural Responses of Asphalt Pavements: Proceedings of the First International Conference[C]. Chendu: China, 2007,22-24.
- [8] Zhao Yanjing, Ni Fujian. Reflective cracking viscoelastic response of asphalt concrete under dynamic vehicle loading[J]. Journal of Southeast University, 2009, 25(3):391-394.
- [9] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [10] Lou Hui, Hao Xingzhou, Zhu Hongping. The Fracture Analysis of Semi-rigid Base-course Asphalt Pavement under the Temperature and Tire load: The Ninth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts[C]. Fuzhou & Xiamen: China, 2006.
- [11] 廖公明,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.
- [12] 郑建龙,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.
- [13] 罗辉,朱宏平. 基于断裂分析的沥青路面疲劳寿命预测[J]. 中外公路,2007,8(4):49-52.  
Luo Hui, Zhu Hongping. Based on fracture analysis for fatigue life of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,8(4):49-52.
- [14] 关宏信,郑健龙. 沥青路面粘弹性疲劳损伤分析[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2008,9(3):54-57.  
Guan Hongxin, Zheng Jianlong. The viscoelastic fatigue damage developing of asphalt pavement[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition),2008,9(3):54-57.