

文章编号: 1000-7598 (2009) 08-2511-06

含反射裂纹沥青路面的动力响应分析

苗 雨^{1,2}, 万云冬^{1,2}, 张绍敏³

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 控制结构湖北省重点实验室, 武汉 430074;
3. 漯河市公路管理局, 河南 漯河 462000)

摘 要: 考虑了沥青的黏弹性, 结合动力学理论, 以动态应力强度因子 K_I (dynamic stress intensity factor, *DSIF*) 为表征参量, 主要探讨含裂缝沥青路面结构在垂直载荷作用下的动力学特性, 其中包括车辆行驶速度、阻尼比、基层回弹模量等因素对 K_I 的影响; 同时考虑车辆对路面的水平载荷和垂直载荷共同作用下对 K_I 的影响。结果表明: 车辆高速运行对道路影响要比低速运行影响小; 随着阻尼比的增加, K_I 值降低; K_I 的大小对基层模量很敏感, 基层模量越大, K_I 值也越大; 当有水平载荷与垂直载荷共同作用时, K_I 的峰值有较大提高, 而且对道路体系剪应力和拉应力影响显著。

关 键 词: 沥青路面; 反射裂纹; 黏弹性; 动力载荷; 有限元法

中图分类号: O 241

文献标识码: A

Dynamic response analysis of asphalt pavement with reflective crack

MIAO Yu^{1,2}, WAN Yun-dong^{1,2}, ZHANG Shao-min³

(1. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 3. Luohe Highway Administration, Luohe 462000, China)

Abstract: Based on theory of viscoelasticity and dynamics, the performance of dynamic stress intensity factor (K_I) is discussed under vertical load with different vehicle velocity, rebound modulus and damping ratio by FEM simulation. The influence of K_I with both horizontal and vertical loads is analyzed. The numerical results show that the value of K_I decreased with increase of the vehicle velocity and the damping ratios. The value of K_I increased rapidly with increasing of the base modulus. The peak point of the K_I increased with both horizontal and vertical loads, which would influence the shear stress and tensile stress of the road.

Key words: asphalt pavements; reflective crack; viscoelasticity; dynamic load; finite element method

1 引 言

我国大部分公路在形成和使用过程中会因温度与湿度的变化产生温缩、干缩裂缝, 在交通载荷和温度场不断作用下, 使基层裂纹扩展到面层形成反射裂缝^[1], 如图 1 所示。裂缝的出现导致沥青路面结构寿命的快速衰减, 平整度急剧恶化, 对行车安全构成威胁, 而现行道路研究多未考虑载荷随时间的变化和水平载荷的影响。

郑健龙^[2]、吴赣昌等^[3]就沥青道路反射裂纹的温度特性进行了深入的研究, 并将沥青混合料的黏弹性性能考虑其中, 研究降温速度、道路参数等因素对基层裂纹的影响; Illinois 大学的 Diyar bozkur^[4]在其博士论文中引入的三维模型阐述了反射裂纹的

温度特性; 姚占勇^[5]采用有限元的方法, 研究了半刚性路面基层开裂后路面结构的力学响应, 认为路表弯沉不能准确反映半刚性路面结构的破坏状态, 沥青面层的破坏主要受控于剪应力, 基层底部裂缝两侧的纵向拉应力、剪应力迅速增加, 将使横缝底部两侧形成严重破坏。王金昌、朱向荣等^[6-8]采用平面应变有限单元法, 以路表、基层底、软土地基顶最大竖向位移和 I 型动态应力强度因子作为表征参量, 探讨了车辆单周期动荷载作用下道路结构的阻尼比、复合地基的回弹模量、黏聚力、内摩擦角和厚度的改变对道路结构工作特性的影响。

本文考虑了沥青面层的黏弹性性质, 以动态应力强度因子为表征参量, 探讨了含反射裂缝沥青路面结构在垂直载荷作用下的动力响应, 其中包括车

辆行驶速度、阻尼比、基层回弹模量等因素对表征参量的影响,同时考虑车辆对路面的水平载荷和垂直载荷共同作用下情况对表征参量的影响。

2 基本理论

2.1 动力学基本理论

采用有限单元法分析车辆荷载对路面体作用时的控制方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别为节点加速度、节点速度和节点位移向量; $\{F(t)\}$ 为作用于节点上的荷载向量。

在任意给定的时间 t , 这些方程可看作是一系列考虑了惯性力 $[M]\{\ddot{u}\}$ 和阻尼力 $[C]\{\dot{u}\}$ 的静力学平衡方程。ANSYS 程序使用 Newmark 时间积分方法在离散的时间点上求解这些方程, 2 个连续时间点间的时间增量称为积分时间步长。

本文动力有限元计算时采用一致质量矩阵。阻尼矩阵采用质量矩阵和刚度矩阵的线性组合:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中: α 、 β 是与结构固有频率和阻尼比有关的常数, 可以由任意 2 个振型的固有频率和相应的阻尼比来确定, 即

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2\omega_i\omega_j(\omega_i\zeta_j - \omega_j\zeta_i)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \\ \beta &= \frac{2(\omega_i\zeta_j - \omega_j\zeta_i)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ω_i 、 ω_j 为结构第 i 阶和第 j 阶振型的圆频率; ζ_i 、 ζ_j 为相应振型对应的阻尼比。由式 (3) 可知, 只有知道对应不同振型的圆频率和相应的阻尼比, 才能得到 α 、 β 值, 但在实际情况下得到振型的圆频率和相应的阻尼比并不是容易的事情, 本文采取如下做法确定 α 、 β 。

假定在结构所关心的频率范围内, ζ_i 、 ζ_j 相差不大, 用相同的阻尼比 ζ 代替, 对结构进行模态分析, 得到关心频率范围内的上限 ω_i 和下限 ω_j (本文取 5 阶振型频率范围) 代入式 (3), 则对于给定的已知的 ζ 值, 就可以解得 α 、 β 值。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2\omega_1\omega_5\zeta}{\omega_1 + \omega_5} = \frac{4\pi f_1 f_5 \zeta}{f_1 + f_5} \\ \beta &= \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_5} = \frac{4\zeta}{\pi(f_1 + f_5)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.2 沥青黏弹性模型

许多材料 (如沥青、岩石和生物体) 常同时具有弹性和黏性两种不同机制的形变, 综合体现黏性流体和弹性固体两者特性, 这种性质称为弹性。

Maxwell 模型由一个弹性元件和一个黏性元件串联而成的力学模型, 如图 1 所示。

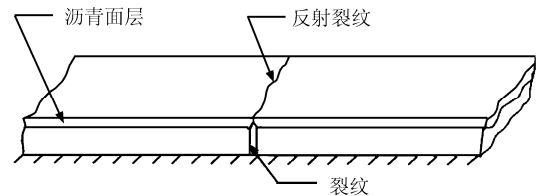


图 1 沥青面层反射裂纹

Fig.1 Reflective crack in asphalt overlays

广义 Maxwell 模型由多个 Maxwell 模型并联而成, 可以解释较为复杂的松弛现象, 如图 2 所示。对于 Burgers 模型, 虽然可描述沥青的主要特征, 但与实际仍不是很符合^[2], 往往需要进行修正, 而 Kelvin 模型不能很好地体现沥青材料的应力松弛特性。根据 Maxwell 模型本构方程、Laplace 变换及其逆变换, 可推导出广义 Maxwell 模型本构方程为

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{E_i} \right) + \sigma \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\eta_i} \right) \quad (5)$$

式中: E_i 为第 i 个单元弹性元件的弹性模量; η_i 为第 i 个单元黏性元件的黏性系数。

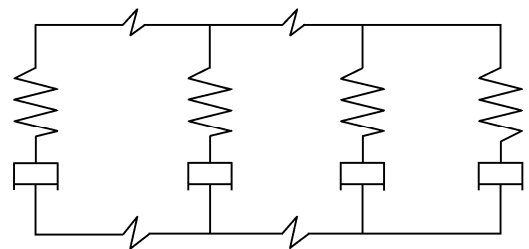


图 2 广义 Maxwell 模型

Fig.2 Generalized Maxwell model

2.3 动态应力强度因子 $K_I(t, \theta)$ 的确定

实际工程问题很难获得应力强度因子解析解, 所以, 一般都采用有限元法进行计算。Ansys 提供了位移外推法求解应力强度因子, 利用位移解析解进行拟合。本文在分析车辆荷载对公路结构作用时, 将车辆荷载简化为对称作用于含裂缝沥青路面结构正上方的正弦分布荷载。由于车辆荷载简化为对称

荷载, 裂尖附近的应力场和位移场由 I 型动态应力强度因子控制。在图 3 所示的坐标系下, 裂尖附近位移场可表示如下:

$$\left. \begin{aligned} u(t, \theta) &= \frac{K_I(t, \theta)}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ v(t, \theta) &= \frac{K_I(t, \theta)}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k-1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: G 为剪切模量, $G = E / 2(1 + \mu)$; $k = 3 - 4\mu$ (平面应变); $u(t, \theta)$ 、 $v(t, \theta)$ 分别为沿 x 和 y 轴方向的位移, 同时为时间 t 的函数。根据断裂力学, 可确定 $K_I(t, \theta)$:

$$K_I(t, \theta) = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+k} \frac{|\Delta v|}{\sqrt{r}} \quad (7)$$

当裂尖设置奇异单元后, $v(t, \theta) / \sqrt{r}$ 可近似视为 r 的线性函数:

$$\frac{|v(t, \theta)|}{\sqrt{r}} = A(t, \theta) + B(t, \theta)r \quad (8)$$

对上式取极限, 可得

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{|v(t, \theta)|}{\sqrt{r}} = A(t, \theta) \quad (9)$$

只要确定出裂尖附近奇异单元上 A 、 B 、 C 、 D 节点的竖向位移, 就可以通过式 (8) 确定出 $A(t, \theta)$, 进而由式 (7) 得出 $K_I(t, \theta)$ 。从上面的分析过程可知, $K_I(t, \theta)$ 是一个导出参量, 可由动位移场唯一确定。

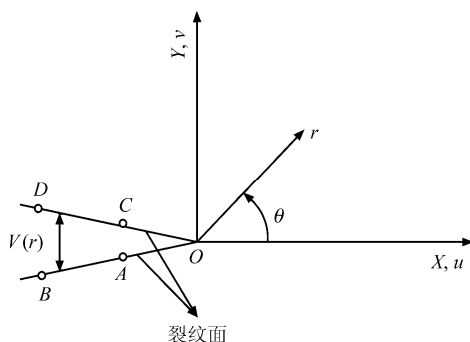


图 3 裂纹坐标图

Fig.3 Coordinates of crack

3 数值算例

本文模拟以一定速度行驶的动荷载, 荷载采用标准轴载 BZZ-100, 轮胎接地压力取 0.7 MPa [9]。

道路模型所采用参数见表 1。根据公路沥青设计规范(JTG D50-2006), 荷载变化规律采用黄仰贤^[10]在 Kenlayer 程序中给出的简化形式, 车辆动荷载对某一点的作用等效为正弦分布荷载作用于该点正上方, 计算模型见图 4。

$$q(t) = q_{\max} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{T} \right), \quad T = \frac{12L}{V} \quad (10)$$

式中: T 为荷载作用周期; L 为轮胎接触面积半径, 一般取 15 cm ; V 为车辆行驶速度。

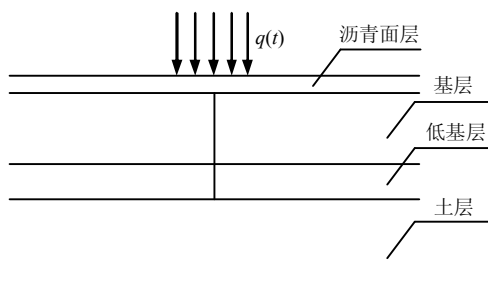


图 4 含反射裂纹道路结构图

Fig.4 Road structure with reflective crack

变换式 (10), 将荷载作用时间转换到 $[0, T]$ 区间上, 可得

$$q(t) = q_{\max} \sin^2 \left(\frac{\pi t}{T} \right), \quad T = \frac{12L}{V} \quad (11)$$

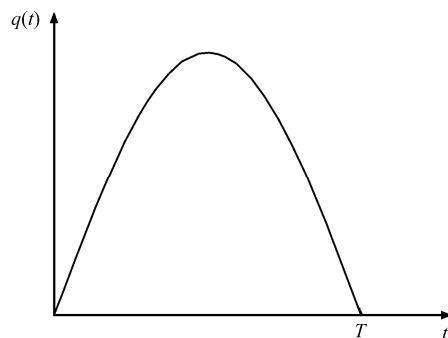


图 5 垂直荷载曲线图

Fig.5 Sketch of vertical load

表 1 道路结构参数

Table 1 The parameters of road structure

道路结构	弹性模量 /MPa	泊松比	厚度 /m	密度 /(g/cm ³)
沥青面层 (AC-16 I)			0.08	2.40
基层 (水泥稳定碎石)	1 500	0.30	0.32	2.10
底基层 (水泥稳定碎石)	550	0.35	0.16	2.10
土基	30	0.40	8.00	1.85

注: 沥青层参数见文献[11]。

3.1 车速对动态应力强度因子 K_I 的影响

首先, 对道路结构进行模态分析, 计算得 1 阶

振型频率 $f_1 = 3.9 \text{ Hz}$, 5 阶振型频率 $f_5 = 9.3 \text{ Hz}$, 代入式 (4), 则可以解出常数阻尼 ζ 下的 α 、 β 值。

在探讨车辆行驶速度对含反射裂缝路面结构影响时, 由式 (7) 可确定出不同车速时对应的加载周期。

图 6 为车辆不同行驶速度时所对应的 I 型动态应力强度因子 K_I 随时间变化曲线。由图可以看出, 随着行驶速度的增加, K_I 的峰值逐渐降低, 50 m/s 的车速对应的 K_I 峰值比 10 m/s 的车速对应的 K_I 峰值降低了 18.6 %, 可知高速行驶对道路裂纹的扩展影响较小, 而超载运输由于车辆载重量较大、车速较低, 对基层裂纹的影响较大, 加速裂纹扩展。

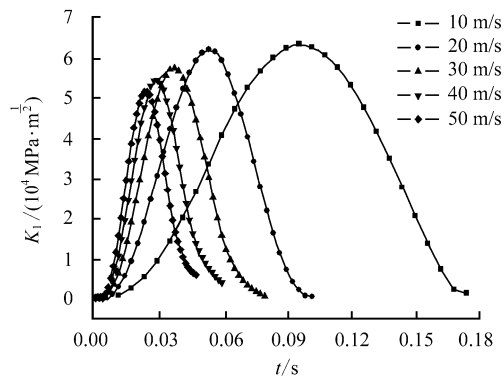


图 6 I 型动态应力强度因子 K_I 的时间历程曲线
Fig.6 K_I with different vehicle velocities

图 7 为正则化动态应力强度因子 K_r (动态应力强度因子/静态应力强度因子) 随时间变化曲线。由图可以看出, 动态载荷对 K_I 的影响与静态载荷作用机制不太相同, 表现与车速相关的复杂性: 车速小于 30 m/s 时, K_I 的峰值大于静态应力强度因子; 当车速大于 30 m/s 时, K_I 的峰值小于静态应力强度因子, 同样可以说明车辆高速行驶对道路裂纹的影响较低速行驶影响小。

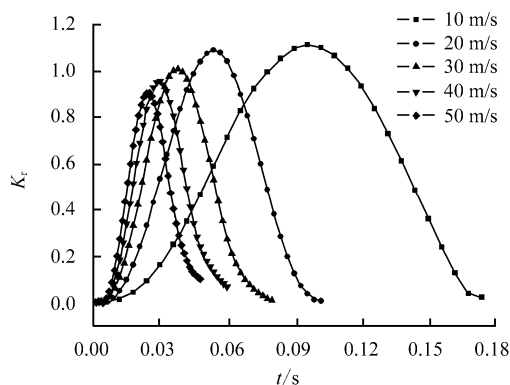


图 7 正则化 I 型动态应力强度因子时间历程曲线
Fig.7 Regular I-type DSIF different vehicle velocity

3.2 阻尼比对动态应力强度因子的影响

通过模态分析, 确定 1 阶振型频率 $f_1 = 3.9 \text{ Hz}$, 5 阶振型频率 $f_5 = 9.3 \text{ Hz}$, 通过式 (4) 确定 α 、 β 值, 车辆行驶速度取 10 m/s。

图 8 为阻尼比对 K_I 的影响。由图可知, 随着阻尼比的增加, K_I 的峰值逐渐降低, 而且峰值有逐渐滞后的趋势, 但峰值降低并不是十分明显, 阻尼比从 0.02 增加至 0.15, K_I 的峰值降低了 4.4 %, 降低幅度并不是很大。但在文献[12]中, 同样阻尼比从 0.02 增加至 0.15, K_I 的峰值降低了 20 % 左右。数据存在很多差别, 笔者分析了其中的原因: 除了参数选择差异外, 系数 α 、 β 的选取方式的不同也是导致结果差异较大的原因。在本文中, 模态分析时选择计算了 5 阶振型所对应得 1 阶振型频率和 5 阶振型频率, 代入式 (4) 计算得出 α 、 β 的值, 而在文献[12]中, 只取 1 阶频率, 按 $\alpha = \zeta_1 \omega_1$, $\beta = \zeta_1 / \omega_1$, 计算得出 α 、 β 的值。对于同样的 ζ 值, 得到不同 α 、 β , 所以在结果上存在较大差异。

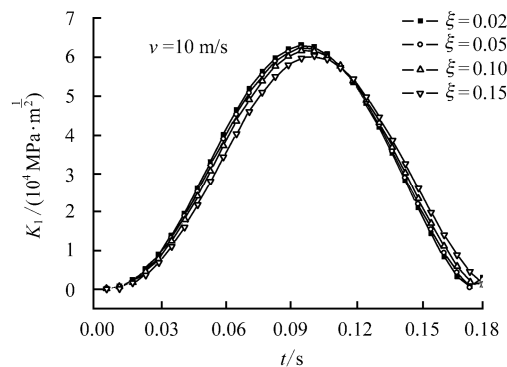


图 8 阻尼比对 I 型动态应力强度因子的影响
Fig.8 K_I with different damping ratios

3.3 基层回弹模量对动态应力强度因子的影响

图 9 为基层回弹模量对 K_I 的影响, 由图可以看出, 随着回弹模量的增加, K_I 的数值明显的增加, 回弹模量数值从 900 MPa 增加到 1 800 MPa 时, 增加 1 倍, K_I 的峰值大小从 $42\,265.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 增加到 $82\,126.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 增加了 94.3 %, 增加近 1 倍, 可知 K_I 对基层模量数值大小非常敏感。半刚性基层由于基层回弹模量比较大, 萌生的裂纹 K_I 值较大, 裂纹易扩展, 因此, 裂纹病害比较普遍。

3.4 考虑非均布水平载荷对道路体系的影响

车辆行驶的动力是由地面的摩擦力反作用于车轮产生的, 因此, 车辆对地面的载荷不仅包括垂直载荷, 还包括水平力作用。车辆正常行驶时, 水平力系数一般取为 0.28; 减速制动时, 水平力系数一

般取为 0.61, 计算取水平力系数为 0.2 (水平载荷/垂直载荷的比值)。

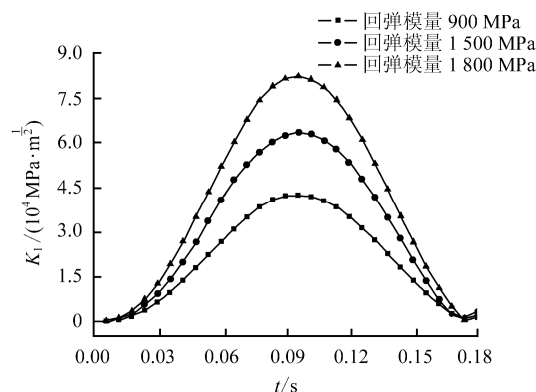


图 9 基层回弹模量对 I 型动态应力强度因子的影响
Fig.9 I-type DSIF with different Rebound moduli

图 10 为在有水平力载荷作用下的 K_I 的时间历程曲线, 当有水平载荷作用时, 其影响程度要远大于只有垂直荷载作用下的情况。取水平力系数为 0.2 时, K_I 的峰值从 $0.0635 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 提高至 $0.08332 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 提高了 31%, 可见在水平及垂直荷载共同作用下, 对基层裂纹的 K_I 数值有很大影响, 当水平力系数较大时 (刹车、启动), 对道路影响会更加突出。因此, 在交叉路口、红绿灯位置的道路设计时, 应将此影响考虑在内, 提出针对性方案。

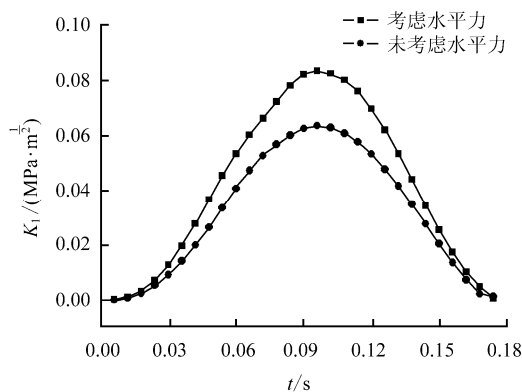


图 10 水平力 I 型对动态应力强度因子的影响
Fig.10 K_I with time under horizontal force

图 11 和图 12 分别探讨了在有水平荷载作用时, 对基层剪应力 τ_{xy} 及弯拉应力 σ_y 的影响。由结果可知, 在有水平荷载作用时, 基层节点 (基层下 2 cm, 基层中点) 的剪应力和拉应力皆有较大提高, 提高幅度约 20% 左右。可见, 在有水平荷载作用时, 将影响道路体系应力场。

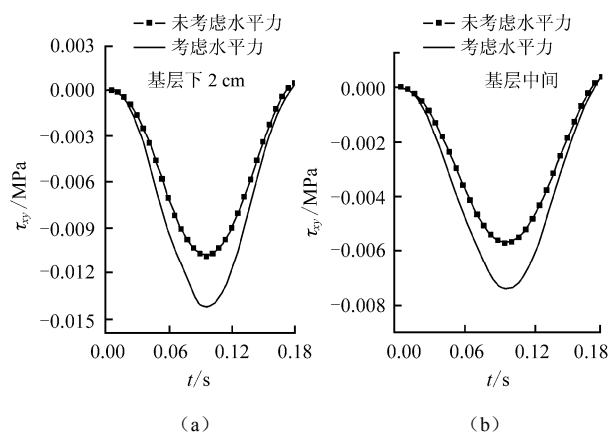


图 11 水平力对基层剪应力的影响
Fig.11 Shear stress of base with horizontal force

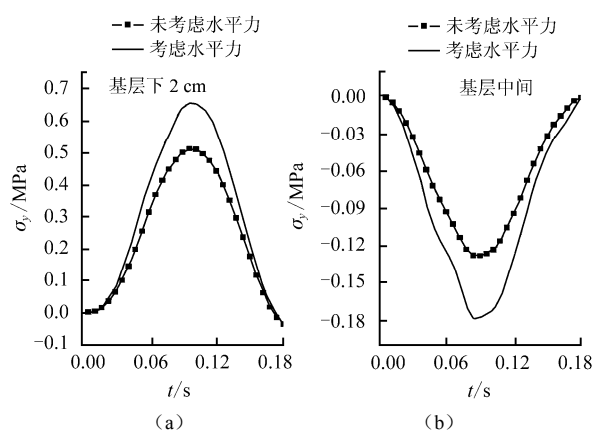


图 12 水平力对基层弯拉应力的影响
Fig.12 Tensile stress of base with horizontal force

4 结 论

本文在考虑沥青面层的黏弹性情况下, 探讨含裂缝沥青路面结构在垂直荷载作用下的动力学特性, 同时考虑车辆对路面的水平荷载和垂直荷载共同作用下情况对 K_I 的影响。通过数值模拟, 得出以下几点结论:

(1) 在不考虑车辆水平荷载作用下, 裂纹尖端 K_I 随着行车速度的增加而减小, 50 m/s 的车速对应的 K_I 峰值比 10 m/s 的车速对应的 K_I 峰值降低了 18.6%, 而且当速度超过某一临界速度时, K_I 的峰值将小于静态应力强度因子数值。可见, 高速行驶车对道路体系影响较低速行车影响小。

(2) 随着阻尼比的增加, K_I 的数值逐渐减小, 阻尼比从 0.02 增加至 0.15, K_I 的峰值降低了 4.4% 且峰值有逐渐滞后的趋势, 但由于实际情况道路结构振型频率及其阻尼比难以确定, 在道路设计过程基本不考虑阻尼的相关影响。

(3) 基层模量的大小对 K_I 影响较大, 当基层模

量增大时, K_I 随之增大, 回弹模量数值从 900 MPa 增到 1 800 MPa 时, K_I 的峰值增加 94.3 %。

(4) 当有水平载荷作用时, K_I 的峰值有较大增加, 在水平系数为 0.2 时, K_I 的峰值从 $0.063\ 5\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ 提高至 $0.083\ 32\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$, 提高了 31 %; 水平载荷会使道路结构剪应力和拉应力有较大的提高, 影响到道路体系更深的范围, 频繁的启动、刹车会加速裂纹的扩展。

(5) 本文对含裂纹道路体系的动力特性作了一定的探讨, 分析了影响含反射裂缝沥青路面性能的各种因素, 得到了一些有益的结论。对于该方向的研究可在以下几个方面深入: 采用三维模型, 采用一定的概率分布模型来布置裂纹, 使结构初始缺陷更为合理; 结合概率断裂力学和数理统计理论, 应用于裂纹萌生条件和裂纹扩展条件等, 这将是下一步研究工作的重点。

参 考 文 献

- [1] 郑健龙, 周志刚, 等. 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] 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 Jian-long, GUAN Hong-xin. 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
- [3] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] DIYAR BOZKURT. Three dimensional finite element analysis to evaluate reflective cracking potential in asphalt concrete overlays[D]. [S. l.]: University of Illinois, 1997.
- [5] 姚占勇, 练继建, 任宪勇. 半刚性路面基层开裂的力学响应[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2250—2254.
YAO Zhan-yong, LIAN Ji-jian, REN Xian-yong. Mechanical responses of base cracking in semi-rigid pavement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2250—2254.
- [6] 王金昌, 朱向荣. 软土地基上含反射裂缝沥青道路的动力响应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 1(17): 1—6.
WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Dynamic analysis of asphalt pavement with reflective cracking on the soft clay ground[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 1(17): 1—6.
- [7] 王金昌, 朱向荣. 软土地基上沥青混凝土路面动力分析[J]. 公路, (3): 6—11.
WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Dynamic analysis of asphalt concrete pavement on soft clay ground[J]. **Highway**, (3): 6—11.
- [8] 王金昌, 朱向荣, 叶俊能, 等. 动荷载作用下含裂缝公路结构体的应力强度因子[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 114—118.
WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong, YE Jun-neng, et al. SIF of pavements with cracks under dynamic loading[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2003, 16 (1): 114—118.
- [9] 中交公路规划设计院. JTG D50—2006 公路沥青设计规范. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [10] 黄仰贤(美). 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [11] 钱国平, 郭忠印, 郑健龙, 等. 环境条件下沥青路面热粘弹性温度应力计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 150—155.
QIAN Guo-ping, GUO Zhong-yin, ZHENG Jian-long, et al. Calculation for thermal stresses of asphalt pavement under environmental conditions based on thermal viscoelasticity theory [J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2003, 31 (2): 150—155.
- [12] 黄志义, 王金昌, 朱向荣. 动荷载下含反射裂缝沥青路面结构黏弹性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 114—119.
HUANG Zhi-yi, WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Viscoelastic analysis of asphalt pavement with reflective cracks and subjected to dynamic loading[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2007, 41 (1): 114—119.