

移动荷载下沥青路面双 Top-Down 裂纹扩展特性

艾长发^{1,2}, 徐 铖^{1,2}, 任东亚^{1,2}, 潘雁石^{1,2}, 邱延峻^{1,2}

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要 目的 研究沥青路面双 Top-Down 裂纹在移动荷载作用下的扩展特性. 方法 基于断裂力学与动力学理论, 考虑沥青混合料的黏弹性特性, 采用有限元数值模拟方法, 研究含双 Top-Down 裂纹沥青路面在移动荷载下的动力响应, 分析裂纹间距与面层材料类型对裂纹尖端应力强度因子的影响. 结果 在移动荷载的作用下, 双裂纹并存时面层加速发生 I、II 型开裂扩展要比单裂纹的情形更为严重; 对于居中裂纹, 随着裂纹间距的增大, K_I 的峰值略有增加, 而 K_{II} 的左峰值逐渐增大, 右峰值则逐渐减小; 对于侧边裂纹, K_{II} 峰值随裂纹间距的变化规律与居中裂纹相反; 当荷载作用在居中裂纹或侧边裂纹正上方时, 就裂纹间距而言, 间距大易引发 I 型裂纹扩展, 间距小易引发 II 型裂纹扩展. 结论 在移动荷载作用下, 对于已存在居中裂纹或侧边裂纹的面层, 改性沥青 SMA 材料 I 的抗开裂扩展性能最优, 改性沥青 AC 材料 III 其次, 而普通沥青 AC 材料 II 最差.

关键词 沥青路面; Top-Down 裂纹; 移动荷载; 黏弹性; 断裂力学; 应力强度因子

中图分类号 U416.217 文献标志码 A

Characterization of Double Top-Down Cracking Propagation in Asphalt Pavement under Moving Load

AI Changfa^{1,2}, XU Cheng^{1,2}, REN Dongya^{1,2}, PAN Yanshi^{1,2}, QIU Yanjun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Chengdu, China, 610031)

Abstract: In order to analyze the characterization of double Top-Down cracking propagation in asphalt pavement under moving load, considering the viscoelasticity of the asphalt mixture, based on fracture and dynamics mechanics, in this paper, the dynamic response of the asphalt pavement with double Top-Down cracks under moving load is discussed by finite elements numerical simulation. For this purpose, the effects of crack spacing and surface layer materials on the stress intensity factors of crack tip are analyzed. The results indicate that the severity of type I and type II crack propagation is greater when the surface layer contains double cracks than the single crack case; for the center crack, as the crack spacing increases, the peak of K_I increases slightly, the left peak of

收稿日期: 2016-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378438)

作者简介: 艾长发(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事路面结构与材料方向研究.

K_{II} increases gradually and the right peak of K_{II} decreases gradually. Moreover, the K_{II} 's peak variation of the side crack and the center crack are the opposite; when the load is above the center crack or side crack, large spacing between two cracks will cause type I crack propagation, while small spacing leads to type II crack propagation. For 3 kinds of asphalt mixture, the crack propagation resistance of material I (modified asphalt SMA) is the best, followed by material III (modified asphalt AC), and the material II (common asphalt AC).

Key words: asphalt pavement; Top-Down crack; moving load; viscoelasticity; fracture mechanics; stress intensity factors

路表开裂是沥青路面的主要病害形式之一,其在行车荷载作用下不断向下扩展,常称之为 Top-Down 裂缝^[1]. Top-Down 裂缝破坏了路面结构的连续性与整体性,其进一步扩展不仅影响行车的舒适性,而且还将进一步导致路面其他病害的形成.鉴于沥青路面路表开裂的危害性,有关其开裂形态与开裂机理一直是行业研究热点.

目前断裂力学是对带裂缝的沥青路面进行结构分析的常用方法.张珊珊^[2]利用有限元分析以及室内评价试验研究了沥青道路 Top-Down 裂缝的开裂机理;赵延庆等^[3]使用平面有限元与断裂力学理论,分析了车速、温度、裂缝长度等因素对表面裂纹裂尖应力强度因子的影响;Myers 等^[4]利用 MPAPs/CRACK3 软件分析了温度与荷载耦合作用对 Top-Down 裂纹的影响,并指出该耦合作用即为 Top-Down 裂纹产生的原因;Miao^[5]则运用混合边界节点与断裂力学相结合的预估方法来分析了水平荷载、沥青面层厚度以及地基模量对 Top-Down 开裂的影响.在有关裂纹扩展路径的研究中,罗辉^[6]基于无单元伽辽金/有限元耦合方法来模拟了沥青道路中的裂纹扩展路径;车法等^[7]使用自编的二维算法子程序对处于刹车荷载作用下的沥青道路开裂的细观响应进行了分析.沥青混合料对温度具有敏感性,其性质的变化将影响路面结构裂缝的产生和扩展.孙雅珍^[8]应用断裂力学与 Sidoroff 损伤模型的耦合分析方法,提出了沥青路面黏弹性损伤的研究方法;李盛等^[9]运用断裂力学、损伤力

学与传热学等基本理论对刚柔复合式路面沥青面层温度疲劳损伤与开裂进行了研究;马培建^[10]使用断裂力学与疲劳破坏理论对含应力吸收层与不含应力吸收层的加铺层路面结构的疲劳开裂寿命进行了预估;黄志义等^[11]对含裂纹的沥青道路进行了黏弹性断裂分析.运动车辆的动载效应也将影响裂缝的开裂特征,苗雨等^[12]、黄志义等^[13]、梁俊龙等^[14]对包含裂纹的黏弹性沥青路面的动力响应进行了研究,探讨了车辆行驶速度、阻尼比以及基层回弹模量等相关因素对裂尖应力强度因子的影响.

以上研究成果对指导路面抗裂设计具有重要意义,然而大部分研究主要针对含单条裂缝的路面结构,其动荷载形式常简化为定点正弦荷载.而笔者考虑了沥青混合料的黏弹特性,基于线弹性断裂力学中的应力强度因子理论,通过 ABAQUS 子程序中的 DLOAD 以实实现车移动荷载,研究含双 Top-Down 裂纹的沥青路面在不同裂纹间距、不同面层材料下的动力响应,分析其对断裂应力强度因子的影响,探讨路面开裂扩展特性.

1 基本理论与方法

沥青混合料具有黏弹特性,笔者考虑使用广义 Maxwell 模型来模拟这一特性.广义 Maxwell 模型是将 n 个并联的 Maxwell 元件和一个线弹性弹簧元件并联组成的.它在参考温度 T_0 下的应力松弛模量为

$$E(T_0, t) = E_c + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \quad (1)$$

式中: E_e 为弹簧元件的弹性模量; E_i, τ_i 分别为第 i 个 Maxwell 模型弹簧的弹性模量和松弛时间。

ABAQUS 通用有限元软件中的 Prony 级数^[15]与式(1)的数学表达形式是一致的,因此可以较好地模拟沥青混合料的黏弹特性。

裂纹尖端设置四分之一奇异单元之后,就

$$u = \frac{K_I}{4G\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\chi - 1)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2}] + \frac{K_{II}}{4G\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\chi + 3)\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2}], \quad (2)$$

$$v = \frac{K_I}{4G\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\chi + 1)\sin\frac{\theta}{2} - \sin\frac{3\theta}{2}] - \frac{K_{II}}{4G\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} [(2\chi - 3)\cos\frac{\theta}{2} + \cos\frac{3\theta}{2}]. \quad (3)$$

式中: G 为剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$; E 为弹性模量; μ 为材料的泊松比; $\chi = 3 - 4\mu$ (平面应变); u, v 分别为沿着 x, y 轴方向的位移, 为时间 t 的函数; K_I, K_{II} 分别为裂纹尖端 I 型与 II 型应力强度因子, 其表达式为

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+\chi} \frac{|\Delta v|}{\sqrt{r}}, \quad (4)$$

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+\chi} \frac{|\Delta u|}{\sqrt{r}}. \quad (5)$$

使 $\frac{v}{\sqrt{r}} = A + Br$, 则 $\lim_{r \rightarrow 0} \frac{v}{\sqrt{r}} = A$,

可以实现裂尖处应力的奇异性. 使用基于节点位移的外推法^[16], 即通过先提取出裂纹前端各节点的位移, 然后再根据裂缝前端各节点位移表达式来反推出其对应的应力强度因子 K , 通过构造数据对 (r_i, K_i) , 再使用最小二乘法进行拟合, 这样就可以得到裂纹尖端的应力强度因子. 其裂尖附近的位移场可表示为

$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2GA}{1+\chi}$, 所以 I 型应力强度因子可由竖向位移场导出. 同理, II 型应力强度因子可根据水平位移场来导出.

2 计算模型与参数

使用 ABAQUS 软件进行分析, 建立沥青路面三维有限元模型, 模型宽度为 6 m、高度为 6.68 m、沿行车方向长度为 12 m. 模型整体如图 1、图 2 所示.

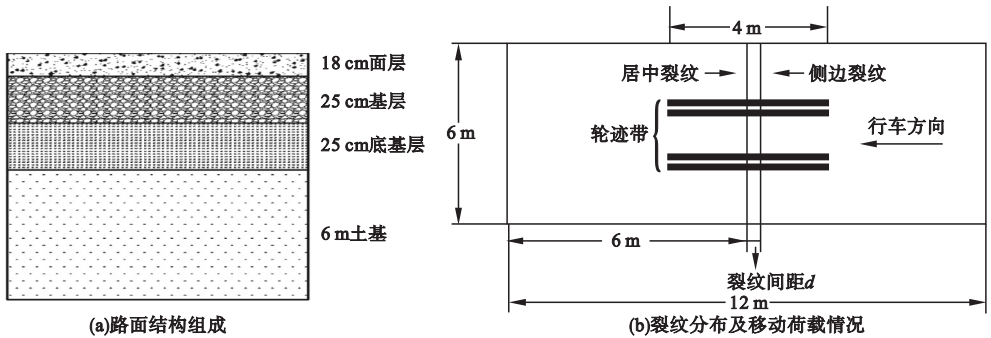


图 1 结构计算模型示意图

Fig. 1 The structural calculation model

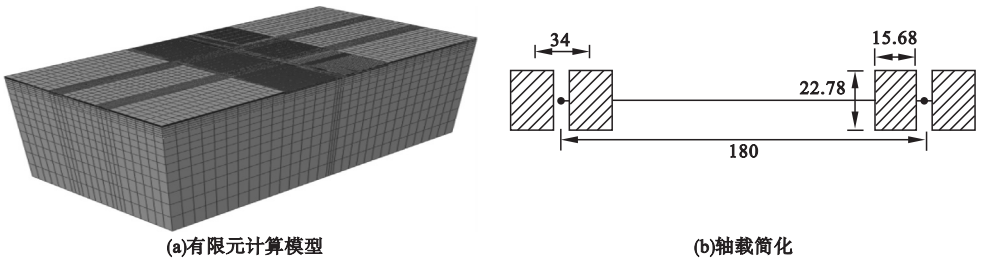


图 2 有限元模型与轴载分布图

Fig. 2 FEM model and the load distribution

如图 1(b)所示,在路面正中央有一条横向 Top - Down 裂纹,另外其右侧还有一条平行的 Top - Down 裂纹. 对于荷载作用下路面结构内部的力学行为,当裂纹间距小时,双裂纹对其具有叠加干涉效应,而当裂纹间距大时,无该效应,故本研究考虑裂缝间距小的情形,取裂纹间距 d 的范围为 0 ~ 500 mm,两条裂纹深度均为 50 mm. 行车距离为路面中央 4 m 范围,模拟移动荷载以中速 20 m/s (72 km/h) 的速度由右向左沿着荷载区域行驶,移动荷载通过 ABAQUS 子程序中的 DLOAD 实现. 行车荷载使用标准轴载 BZZ - 100,将其简化为矩形均布荷载(见图 2(b)),大小取为 0.7 MPa^[17]. 考虑 3 种沥青面层材料类型,其参考温度 45 °C 下的黏弹性参数见表 1^[18],面层、基层、底基层及土基等材料基本参数见表 2.

表 1 面层材料 Prony 参数

Table 1 Prony parameters of surface materials

松弛时 间 τ_i/s	相对剪切模量 g_i		
	面层材料I(改性 沥青 SMA 型)	面层材料II(普通 沥青 AC 型)	面层材料III(改性 沥青 AC 型)
0.000 01	0.749 0	0.393 3	0.369 6
0.000 1	0.106 3	0.235 7	0.201 1
0.001	0.064 3	0.186 7	0.194 2
0.01	0.029 0	0.116 8	0.122 3
0.1	0.014 5	0.043 8	0.057 4
1	0.006 8	0.015 3	0.023 5
10	0.003 6	0.004 4	0.010 0
100	0.001 7	0.000 7	0.004 1
1 000	0.001 3	0.001 8	0.002 7

表 2 材料基本参数

Table 2 Basic parameters of Materials

层位	材料类型	动态模量/ MPa	泊松比	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)
面层	材料 I	1 550	0.35	2 400
	材料 II	1 250	0.35	2 400
	材料 III	2 450	0.35	2 400
基层	水泥稳定碎石	10 000	0.25	2 100
底基层	石灰稳定土	2 000	0.35	1 900
土基	土基	250	0.4	1 900

注:表中面层材料参数为基于 45 °C 条件下的取值.

计算中模型基本假定:①面层材料视为

黏弹性材料,采用广义 Maxwell 模型模拟;半刚性基层、底基层与土基则视为线弹性材料;②模型边界条件四周法向固定,底部三向约束;③路面结构各层层间位移连续. 整个模型共包括 96 540 个 C3D8 单元.

3 裂纹间距对裂纹扩展特性的影响

研究裂纹间距对双 Top - Down 裂纹扩展的影响,考虑沥青面层为材料的结构组合.

3.1 对居中裂纹扩展的影响

通过节点位移外推法计算出移动荷载作用下不同裂纹间距情形下不同时刻的 I、II 型应力强度因子,将其绘成时程曲线图(见图 3).

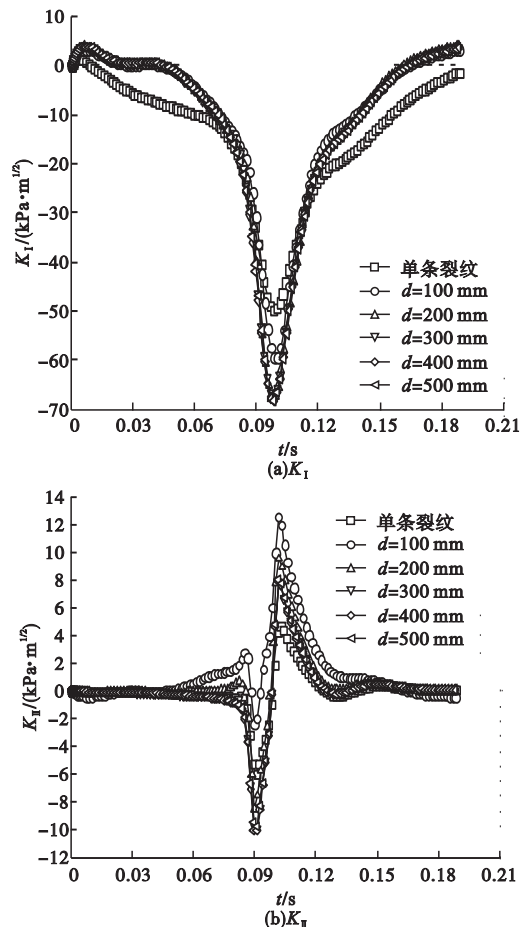


图 3 不同裂纹间距下居中裂纹应力强度因子时程图

Fig. 3 K time-history curves of center crack with

different crack spacing

由图 3(a)可知,随着车辆的行驶, K_I 呈

现出先减小后增大的变化趋势,当车辆行驶到路面正中央,即裂纹正上方时 K_I 达到极值.对于 I 型应力强度因子而言,只有在其值大于 0 时才对裂纹扩展起促进作用,若其值小于 0 则有利于裂纹的闭合.由 K_I 时程图可以看出,双裂纹情况下居中裂纹的 K_I 值比单裂纹情形下的 K_I 值大,且促进开裂的时间也比单裂纹情形下的时间长.裂纹间距为 100 mm 时, K_I 极值比单裂纹情形下大 19.4%;而当裂纹间距分别为 300 mm、400 mm、500 mm 时, K_I 极值大致相同,相对于间距为 100 mm 的情形增大 13.7%.因此,对于路表出现双 Top-Down 裂纹时,裂纹间距大,在移动车辆荷载作用下更容易加速居中裂纹的张开扩展.

由于 II 型应力强度因子不论其值为正

为负,都会促进裂纹发生剪切型开裂.对比图 3(a)、(b)可以看出,裂纹大部分时刻是由 II 型剪切开裂来控制.当车辆在荷载区域行驶时, K_{II} 值先慢慢达到负极值 $K_{II\max1}$,之后迅速达到正极值 $K_{II\max2}$,再缓缓接近平缓.

图 4 为 $K_{II\max1}$ 与 $K_{II\max2}$ 的绝对值随裂纹间距的变化曲线.由图可知,随着裂纹间距的增大, $K_{II\max1}$ 的绝对值总体上在增大,当裂纹间距大于 300 mm 时趋于平缓; $K_{II\max2}$ 的绝对值随着裂纹间距的增大,总体呈现出减小的趋势,当裂纹间距大于 300 mm 时变化也趋于平缓.综合比较得出,当裂纹间距为 100 mm 时, K_{II} 峰值最大,由此可判定该情形下最容易引发剪切型开裂的进一步扩展.

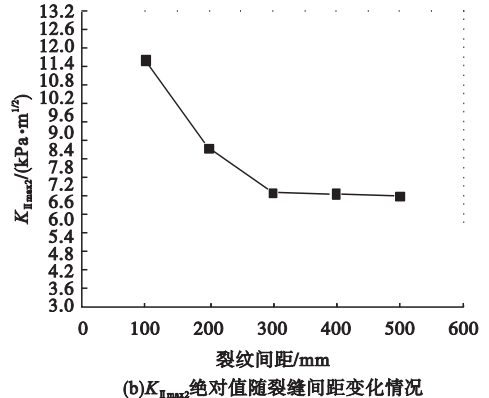
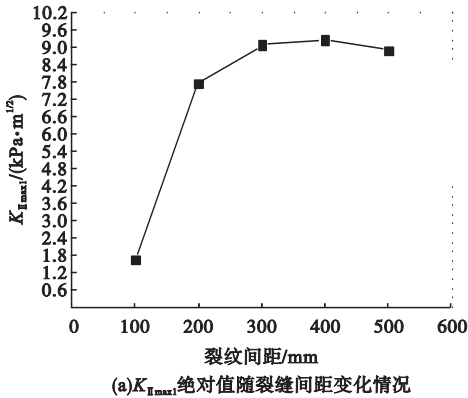


图 4 不同裂纹间距下居中裂纹 $K_{II\max1}$ 与 $K_{II\max2}$ 绝对值变化图

Fig. 4 The absolute value variation of $K_{II\max1}$ and $K_{II\max2}$ of center crack with different crack spacing

3.2 对侧边裂纹扩展的影响

与前文类似,同样将移动荷载下不同裂纹间距情形中各时刻侧边裂纹的 I、II 型应力强度因子提取出并绘成应力强度因子时程曲线(见图 5).从图中可以看出,当移动荷载作用在侧边裂纹正上方时, I 型应力强度因子达到峰值,且随着裂纹间距的增大,移动荷载越早到达其正上方,侧边裂纹达到 K_I 峰值的时刻越早.对比 K_I 峰值,裂纹间距为 200~500 mm 时,比间距 100 mm 的情况大 15% 左右,因此从整体上看,裂纹间距大,移

动荷载的作用更容易引发侧边裂纹 I 型开裂的扩展.与 K_I 时程图的规律类似,随着裂纹间距的增大, K_{II} 达到峰值的时刻也均提前.

不同裂纹间距下侧边裂纹 $K_{II\max1}$ 与 $K_{II\max2}$ 绝对值变化见图 6.比较 $K_{II\max1}$ 与 $K_{II\max2}$ 的绝对值可以发现,随着裂纹间距的增大, $K_{II\max1}$ 的绝对值逐渐变小,而 $K_{II\max2}$ 的绝对值则逐渐增大.同时,当裂纹间距为 100 mm 时, K_{II} 峰值绝对值在所有情形中最大,同理可判定该情形下最容易引发侧边裂纹 II 型开裂的进一步扩展.

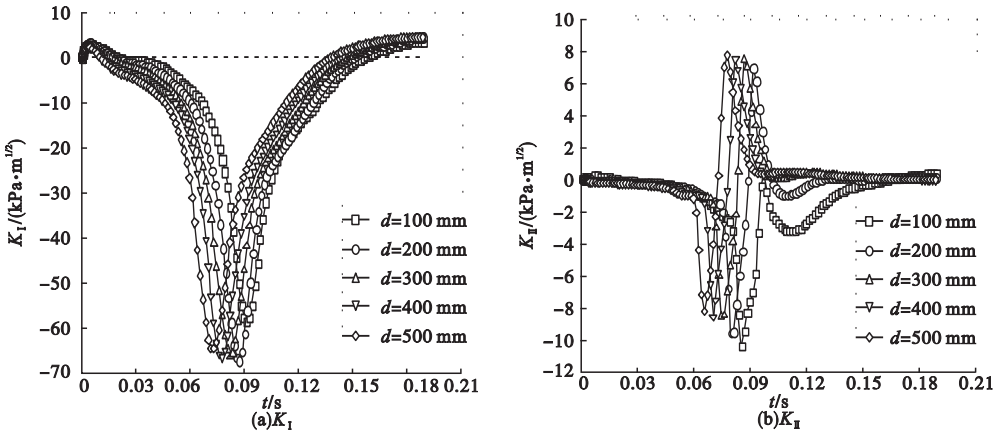


图5 不同裂纹间距下侧边裂纹应力强度因子时程图

Fig. 5 K time-history curves of side crack with different crack spacing

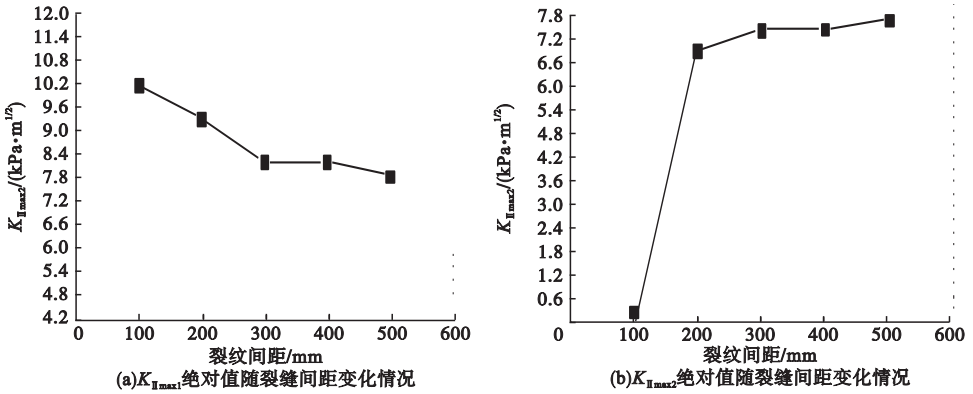


图6 不同裂纹间距下侧边裂纹 $K_{\parallel \max 1}$ 与 $K_{\parallel \max 2}$ 绝对值变化图

Fig. 6 The absolute value variation of $K_{\parallel \max 1}$ and $K_{\parallel \max 2}$ of side crack with different crack spacing

4 面层材料类型对裂纹扩展特性的影响

笔者研究不同沥青面层材料类型对双 Top-Down 裂纹扩展影响,取裂纹间距为 200 mm.

4.1 对居中裂纹扩展的影响

将3种面层材料参数分别代入计算,得到移动荷载作用下三种情形内各个时刻 K_I 与 K_{II} 值,并将其绘成应力强度因子时程曲线进行对比(见图7).

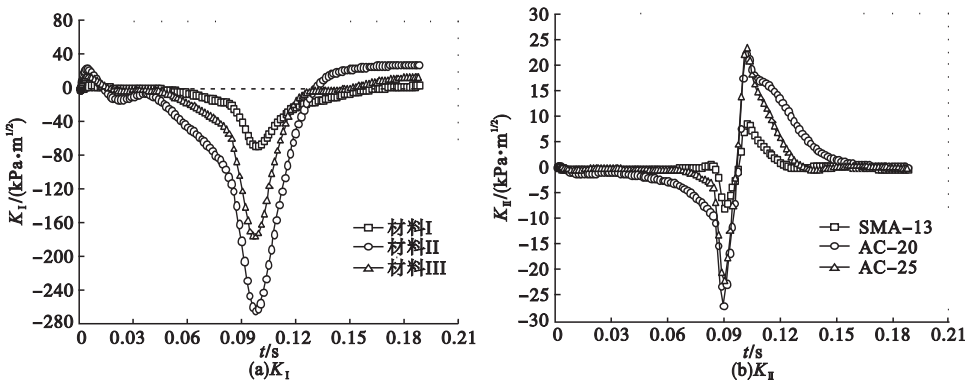


图7 不同面层材料下居中裂纹应力强度因子时程图

Fig. 7 K time-history curves of center crack with different surface material

由图 7(a)可以看出,当移动荷载作用在居中裂纹正上方时,材料 II 的 K_I 正值最大,材料 III 其次,材料 I 则最小. 其中,材料 II 比材料 III 大 49.08%,而材料 III 则是材料 I 的 2.6 倍. 因此,材料 I 具有最好的抗 I 型裂纹扩展性能. 从图 7(b)可以看出,材料 II 与材料 III 的 K_{II} 峰值绝对值远大于材料 I 情形下的 K_{II} 峰值绝对值,材料 II 面层的 $K_{II\max1}$ 比材料 III 的大 21.3%,而材料 III 的 $K_{II\max1}$ 则是材料 I 的 2.8 倍;对于 $K_{II\max2}$ 值,材料 III 与材料 II 较为接近,而材料 II 则是材料 I 的 2.54 倍. 因此,就居中裂纹来讲,材料 I 具有最好

的抗 II 型裂纹扩展性能,材料 III 其次,而材料 II 最差.

4.2 对侧边裂纹扩展的影响

不同面层材料下侧边裂纹应力强度因子时程图见图 8. 从图中可以看出,其整体规律与居中裂纹基本一致. 对于 K_I 峰值,材料 II 比材料 III 的 K_I 峰值大 45.2%,材料 III 的 K_I 峰值是材料 I 的 2.57 倍. 对于 K_{II} 峰值绝对值,材料 II 与材料 III 较为接近,均约为材料 I 的 2.2 倍. 同理,就侧边裂纹来讲,也表现出材料 I 具有最好的抗 II 型裂纹扩展性能,材料 III 其次,而材料 II 最差.

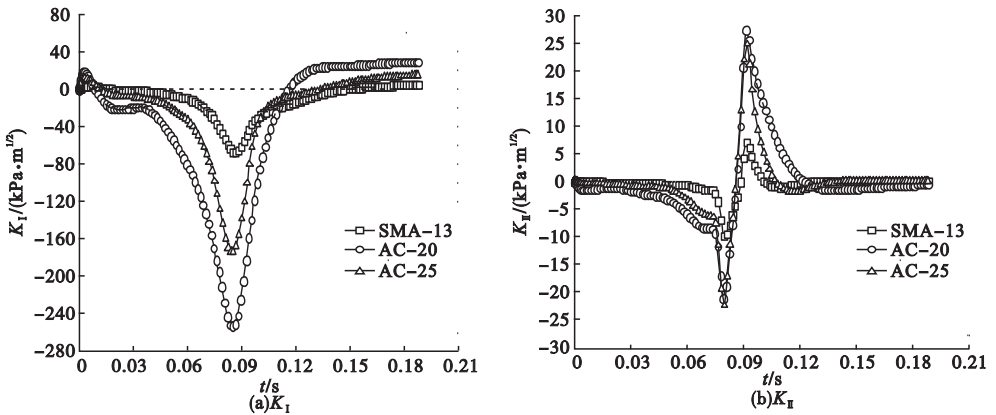


图 8 不同面层材料下侧边裂纹应力强度因子时程图

Fig. 8 K time-history curves of side crack with different surface material

5 结论

(1) 在双裂纹并存情况下,居中裂纹 I、II 型开裂扩展的程度要比单裂纹的情形更严重;裂纹间距对居中裂纹的 I 型开裂应力强度因子影响不明显,但对 II 型开裂应力强度因子影响显著,随其间距增大, $|K_{II\max1}|$ 逐渐增大,而 $|K_{II\max2}|$ 则逐渐减小;对于侧边裂纹, $|K_{II\max1}|$ 随着裂纹间距的增大而减小, $|K_{II\max2}|$ 则与之相反.

(2) 移动荷载作用在居中裂纹或侧边裂纹正上方时,裂纹间距大更容易加速对应的 I 型裂纹扩展,裂纹间距小更容易加速对应的 II 型裂纹扩展.

(3) 由于材料的黏弹性性质,不同面层材料类型其抗开裂扩展特性不同. 在移动荷

载作用下,对于已存在居中裂纹或侧边裂纹的面层,改性沥青 SMA 材料 I 的抗开裂扩展性能最优,改性沥青 AC 材料 III 其次,而普通沥青 AC 材料 II 最差.

参考文献

- [1] ROQUE R, BIRGISSON B, DRAKOS C, et al. Development and field evaluation of energy-based criteria for top-down cracking performance of hot mix asphalt [J]. Journal of the association of asphalt paving technologists, 2004, 73: 229 - 235.
- [2] 张珊珊. 沥青路面 Top-Down 裂缝开裂机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012. (ZHANG Shanshan. The cracking mechanism of Top-Down cracking in the asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)
- [3] 赵延庆, 王抒红, 周长红, 等. 沥青路面 Top-Down 裂缝的断裂力学分析 [J]. 同济大学学

- 报(自然科学版),2010,38(2):218-222.
(ZHAO Yanqing, WANG Shuhong, ZHOU Changhong, et al. Analysis of Top-Down cracking of asphalt pavements based on fracture mechanics approach[J]. Journal of tongji university(natural science),2010,38(2):218-222.)
- [4] MYERS L A, ROQUE R. Evaluation of Top-Down cracking in asphalt pavements and implications for pavement design[J]. Transportation research circular,2001(S):79-87.
- [5] MIAO Y, HE T G, YANG Q, et al. Multi-domain hybrid boundary node method for evaluating Top-Down crack in asphalt pavements[J]. Engineering analysis with boundary elements,2010,34(9):755-760.
- [6] 罗辉. 沥青路面黏弹性响应分析及裂纹扩展研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
(LUO Hui. The viscoelastic response analysis and crack propagation study of asphalt pavement[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2007.)
- [7] 车法,陈拴发,李增宏,等. 荷载作用下沥青路面表面开裂的扩展[J]. 公路交通科技,2010,27(5):26-29.
(CHE Fa, CHEN Shuanfa, LI Zenghong, et al. Analysis of cracks propagation on asphalt pavement surface under load[J]. Journal of highway and transportation research and development,2010,27(5):26-29.)
- [8] 孙雅珍. 沥青混凝土路面黏弹性损伤演化与防裂控制研究[D]. 沈阳:东北大学,2009.
(SUN Yazhen. A research on viscoelastic damage evolution and cracking control of AC pavement [D]. Shenyang:Northeastern University,2009.)
- [9] 李盛,李宇峙,刘朝晖. 刚柔复合式路面沥青层温度疲劳损伤及开裂研究[J]. 工程力学,2013,30(10):122-127.
(LI Sheng, LI Yuzhi, LIU Chaohui. Research of temperature fatigue damage and cracking in asphalt layer of rigid-flexible composite pavement [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(10):122-127.)
- [10] 马培建,曹高尚,王杰,等. 加铺应力吸收层的复合式路面开裂寿命预测[J]. 公路交通科技,2013,30(9):18-26.
(MA Peijian, CAO Gaoshang, WANG Jie, et al. Cracking life prediction of composite pavement with stress absorbing layer[J]. Journal of highway and transportation research and development,2013,30(9):18-26.)
- [11] 黄志义,王金昌,朱向荣. 含裂缝沥青混凝土路面的黏弹性断裂分析[J]. 中国公路学报,2006,19(2):18-23.
(HUANG Zhiyi, WANG Jinchang, ZHU Xianrong. Viscoelastic fracture analysis of asphalt concrete pavement with cracks[J]. China journal of highway and transport,2006,19(2):18-23.)
- [12] 苗雨,万云冬,张邵敏. 含反射裂纹沥青路面的动力响应分析[J]. 岩土力学,2009,30(8):2511-2516.
(MIAO Yu, WAN Yundong, ZHANG Shaomin. Dynamic response analysis of asphalt pavement with reflective crack[J]. Rock and soil mechanics,2009,30(8):2511-2516.)
- [13] 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 Zhiyi, WANG Jinchang, ZHU Xianrong. 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.)
- [14] 梁俊龙,高江平,裴亮. 基于动态模量的含多裂缝沥青路面开裂分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,41(1):246-252.
(LIANG Junlong, GAO Jiangping, CHANG Liang. Cracking analysis of asphalt pavement with multi-crack based on dynamic modulus [J]. Journal of Guangxi university(natural science),2016,41(1):246-252.)
- [15] HIBBI T, KARLSSON, SORENSON B. ABAQUS/CAE user's manual [M]. America: HKS INC,2005.
- [16] 解德,钱勤,李长安. 断裂力学中的数值计算方法及工程与应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
(XIE De, QIAN Qing, LI Changan. Numerical methods and engineering application in fracture mechanics [M]. Beijing:Science Press,2009.)
- [17] 中交公路规划设计院. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2006 [S]. 北京:人民交通出版社,2006.
(CCCC Highway Consultants. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2006 [S]. Beijing: China Communications Press,2006.)
- [18] 董泽蛟,谭忆秋,欧进萍. 三向非均布移动荷载作用下沥青路面动力响应分析[J]. 土木工程学报,2013,46(6):122-130.
(DONG Zejiao, TAN Yiqiu, OU Jinping. Dynamic response analysis of asphalt pavement under three-directional nonuniform moving load[J]. China civil engineering journal,2013,46(6):122-130.)