



基于双裂缝模型的沥青道路裂缝间应力强度因子的影响因素分析

王修山, 朱燮瀚, 郭林, 常晟, 汪俊杰
(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 沥青道路旧裂缝周边往往会产生新的裂缝, 从而演变为间距较短的平行裂缝。为研究不同温度及车辆荷载下旧裂缝对新裂缝应力强度因子的影响, 对道路三维双裂缝模型进行有限元数值模拟, 分析裂缝类型、裂缝间距及荷载形式等因素对裂缝尖端应力强度因子的影响关系。结果表明: 低温时已有的面层裂缝或面层-基层贯穿裂缝会显著增加近距离(约在 0.25 m 内)基层裂缝上边缘的应力强度因子, 车辆荷载下已有的面层裂缝或面层-基层贯穿裂缝同样会增加近距离(约在 0.25 m 内)面层裂缝下边缘的应力强度因子。因此, 面层-基层贯穿裂缝会显著促进周边面层裂缝或基层裂缝的扩展。

关键词: 沥青道路; 裂缝间影响; 有限元模型; 数值分析; 应力强度因子

中图分类号: U411

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)01-0115-07

Analysis on influencing factors of stress intensity factor between cracks of asphalt road based on double crack model

WANG Xiushan, ZHU Xiehan, GUO Ling, CHANG Sheng, WANG Junjie

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The new cracks are often generated around the old cracks of asphalt road, thus evolving into parallel cracks with short gap. In order to investigate the influence of old cracks on stress intensity factor of new cracks under different temperature and vehicle load, finite element numerical simulation was carried out for 3D double crack model of the road to analyze the impacts of crack type, crack interval and load form on stress intensity factor of crack tip. The results show that the existing surface cracks or surface-base penetrating cracks at a low temperature can significantly increase the stress intensity factor of the upper edge of the base cracks in the short distance range about 0.25 m, and the existing surface cracks or surface-base penetrating cracks under vehicle load will also increase the stress intensity factor of the lower edge of the surface cracks in the short distance range about 0.25 m. Therefore, surface-base penetrating cracks will significantly promote the expansion of surrounding surface cracks or base cracks.

Key words: asphalt road; inter-crack effect; finite element model; numerical analysis; stress intensity factor

0 引言

沥青路面在使用过程中, 由于受到温度波动及车辆荷载的长期作用, 容易产生开裂^[1-2]。由于传统的弹性层状连续体力学很难描述裂缝尖端的应力集

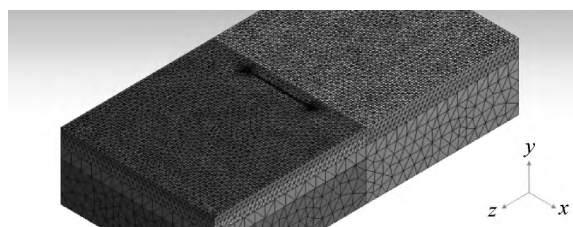
中现象, 因此有很多学者引入断裂力学对此进行描述^[3-5], 其中应力强度因子是断裂力学中表征裂缝尖端应力场强弱的重要指标^[6-7]。目前在利用断裂力学对道路开裂行为的研究中, 较多的是在单一裂缝模型下分析不同影响因素对应力强度因子的影响,

收稿日期: 2019-01-19 网络出版日期: 2019-10-08

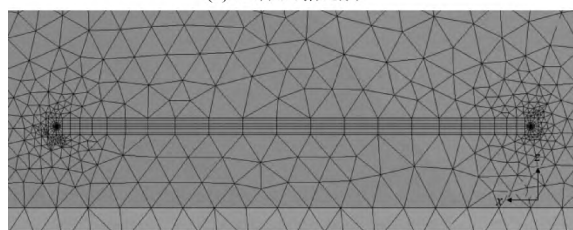
基金项目: 国家自然科学基金项目(51808500); 浙江省基础公益研究计划项目(LGF18E080015); 浙江省土木一流学科(B)建设计划

作者简介: 王修山(1974—), 男, 山东枣庄, 副教授, 博士, 主要从事道路结构与道路材料方面的研究。

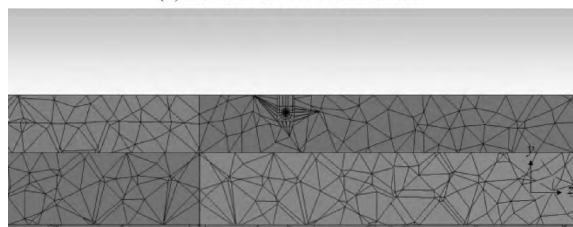
将模型存在开裂行为的面层与上基层进行六面体网格划分,并考虑底基层与土层不需要较高的计算精度,且四面体网格在计算过程中生成较快,故底下两层采用四面体网格划分。对于荷载施加面层,考虑到需要较高荷载布载精度,故进行网格尺寸为 0.05 m 的网格细化;对于面层与上基层,由于在数值模拟中会产生开裂行为,因此需要较高的计算精度,故进行网格尺寸为 0.10 m 的网格细化;底基层与土层采用网格尺寸为 0.20 m 网格细化。网格划分后的模型如图 3 所示。



(a) 总体网格划分



(b) 受约裂缝网格划分-俯视图



(c) 受约裂缝网格划分-截面图

图 3 道路结构模型的网格划分

本文研究的道路模型在设置时满足以下基本假设^[14]:a)模型为均匀各向同性;b)层间接触及导热良好;c)不考虑自重(道路自重不是裂缝开裂的主要因素);d)结构内无初始应力。

1.3 材料参数

在前处理时输入计算结构参数(表 1),其中不同温度下面层的弹性模量及泊松比为所在温度段内的线性插值。

1.4 荷载参数

1.4.1 车辆荷载参数

本文施加的车辆荷载有三种方式:垂直荷载、垂直荷载加正向水平荷载及垂直荷载加负向水平荷载。垂直荷载大小为 0.70 MPa,水平荷载大小为 0.21 MPa。在道路模型中,车辆单组车胎的荷载施加范围如图 3 所示^[7,18]。

表 1 沥青路面结构计算参数^[17]

参数	温度/ ℃	弹性模 量/MPa	泊松 比	热传导率/ (J·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	温缩系数/ ℃ ⁻¹
面层	-20	1800	0.20	4680	2.5×10 ⁻⁵
	20	1400	0.25		
	60	600	0.45		
上基层	—	1500	0.25	5616	1.5×10 ⁻⁵
底基层	—	550	0.35	5148	1.0×10 ⁻⁵
土层	—	50	0.35	5616	5.0×10 ⁻⁵

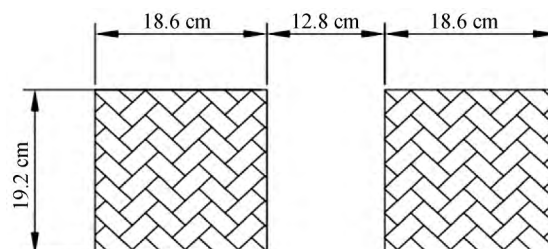


图 4 单组车胎的荷载施加范围

1.4.2 温度荷载参数

本文施加温度荷载为稳定的温度场荷载,温度场参数如表 2 所示。

表 2 温度荷载参数

环境 类型	近地空气温度 (含太阳辐射)/℃	热交换系数/ (W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	参考温 度/℃
低温	-10	12.8	22
高温	60	16.3	

1.5 边界条件

a)静力学边界条件。本文研究将整体模型底面位移约束,四个侧面进行垂直方向位移约束。

b)热传导边界条件。本文在低温分析下,设置整体模型底面温度为 10℃,在高温分析,设置整体模型底面温度为 40℃。

2 数值模拟分析

在研究模型下,由于影响应力强度因子的因素较多,故每个影响因素取少数具有代表性的参数,不进行精细的定量研究,主要做定性分析,例如:a)机械荷载作用类型只取三类, σ 、 $(\sigma, +\tau)$ 及 $(\sigma, -\tau)$;b)温度条件只施加一类高温的外部特征条件与一类低温的外部特征条件;c)制约裂缝类型有无制约裂缝(无裂缝)、基层断裂裂缝(基层裂缝)、面层断裂裂缝与基层-面层贯穿裂缝(面层-基层贯穿裂缝),每种形式裂缝的深度都为该层模型的高度;d)受约裂缝为面层裂缝时,裂缝深度为 0.05 m,受约裂缝为基层裂缝时,裂缝深度为 0.10 m;3)裂缝间距分为 0.25、0.50、1.00 m 三类,表示近距离、中距离及较远距离。

2.1 温度荷载下双裂缝模型分析

2.1.1 受约裂缝为面层裂缝时模型的影响因素分析

该模型控制新裂缝(受约裂缝)为面层裂缝,改变裂缝间距离、旧裂缝(制约裂缝)类型及温度荷载

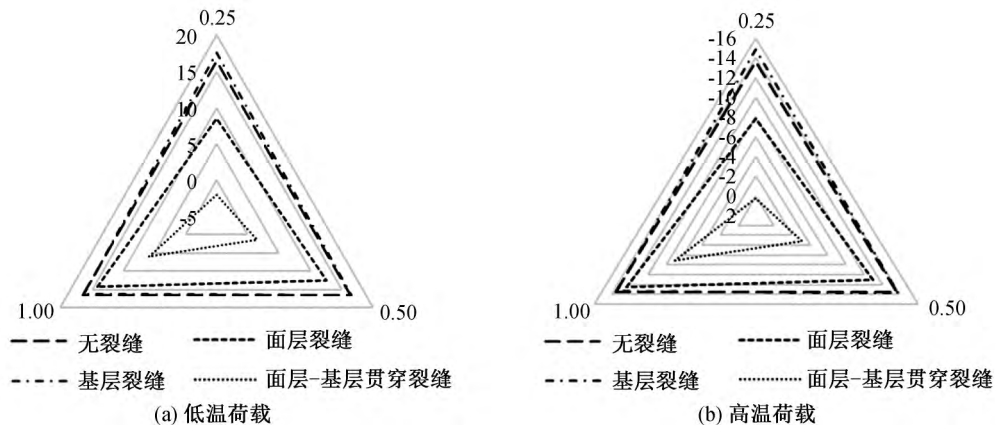


图5 温度荷载下受约裂缝为面层裂缝时的 K_I (单位: $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)

由图5(a)对比三种制约裂缝情况与无制约裂缝情况下I型应力强度因子的大小可以看出,无论裂缝间距为0.25、0.50 m还是1.00 m,低温下不同类型制约裂缝对受约裂缝I型开裂的抑制作用能力为:面层-基层贯穿裂缝>面层裂缝>无裂缝≈基层裂缝。且对比图5(a)、(b)的相似性可以看出,高温下制约裂缝对受约裂缝I型开裂的影响作用与低温相反。

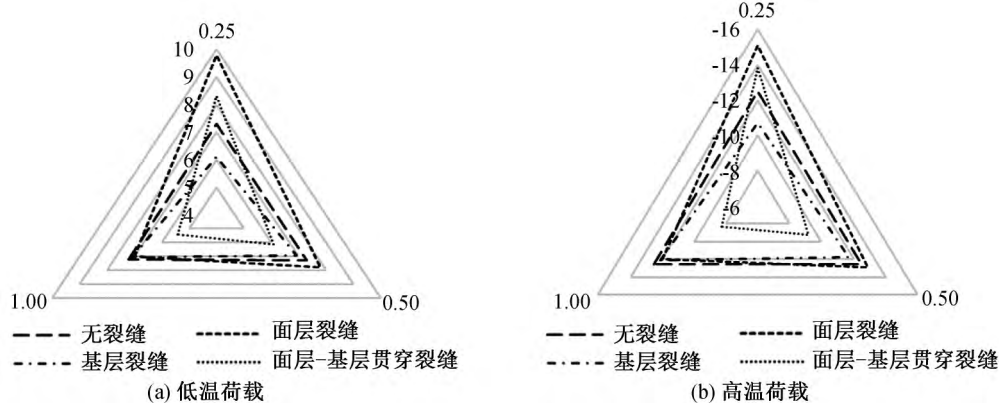


图6 温度荷载下受约裂缝为基层裂缝模型时的 K_I (单位: $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)

由图5(a)对比三种制约裂缝情况与无制约裂缝情况下I型应力强度因子的大小可以看出,低温荷载时,当裂缝间距离为0.50 m或1.00 m时,制约裂缝为面层-基层贯穿裂缝会对受约裂缝的开裂起到一定的抑制作用,当裂缝间距离为0.25 m时,制约裂缝为面层裂缝或面层-基层贯穿裂缝时会显著使受约裂缝的 K_I 增大,促进裂缝I型开裂,当制约裂缝为基层裂缝时会对受约裂缝I型开裂起到一定抑制作用。且对比图5(a)、(b)的相似性可以看出,高温下对基层受约裂缝I型开裂的影响作用和低温相反。

形式,受约裂缝应力强度因子 K_I 大小如图5所示,并且由于II型应力强度因子数量级远小于I型应力强度因子,故II型应力强度因子不为开裂主要影响因素,不单独分析。

2.1.2 受约裂缝为基层裂缝时模型的影响因素分析

该模型控制新裂缝为基层裂缝,改变裂缝间距、制约裂缝类型及温度荷载形式,新裂缝应力强度因子 K_I 如图6所示,并且由于II型应力强度因子数量级远小于I型应力强度因子,故II型应力强度因子不为开裂主要影响因素,不单独分析。

2.1.3 相似性分析

从双裂缝模型温度荷载下的研究可以发现,同类模型两种温度荷载下I型应力强度因子的分析图具有相似性,故在该模型下可得出以下结论:设受约裂缝I型应力强度因子可以表示为:

$$K_{I(T, S, x, y)},$$

该式可拆为:

$$K_{I(T, S, x, y)} = f_{1(T)} \times f_{2(S, x, y)},$$

其中: T 表征结构内温度, S 表征双裂缝的平行距离, x 表征制约裂缝类型, y 表征受约裂缝类型。

2.2 车辆荷载下双裂缝模型分析

将图 4 从左向右依次将荷载作为位置标记为 1, 2, ..., 13, 荷载作用类型对照图 4 横坐标轴方向按切应力正负分为 σ 、 $(\sigma, +\tau)$ 和 $(\sigma, -\tau)$, 分析用图采用带平滑曲线的散点图, 横坐标取用荷载作用位置编号, 编号的大小反映荷载作用的位置, 结论曲线反映应力强度因子随着荷载移动的走向趋势。当裂缝间距达到 1.00 m 时, 各曲线几乎重合, 不进行裂缝

间距为 1.00 m 时的影响分析。

2.2.1 受约裂缝为面层裂缝时模型的影响因素分析

a) 裂缝间距为 0.25 m 时。该模型控制裂缝间距为 0.25 m, 受约裂缝为面层裂缝, 改变车辆荷载作用类型、荷载作用位置及制约裂缝类型, 其 I 型应力强度因子和 II 型应力强度因子的大小与作用位置的关系如图 7 所示。

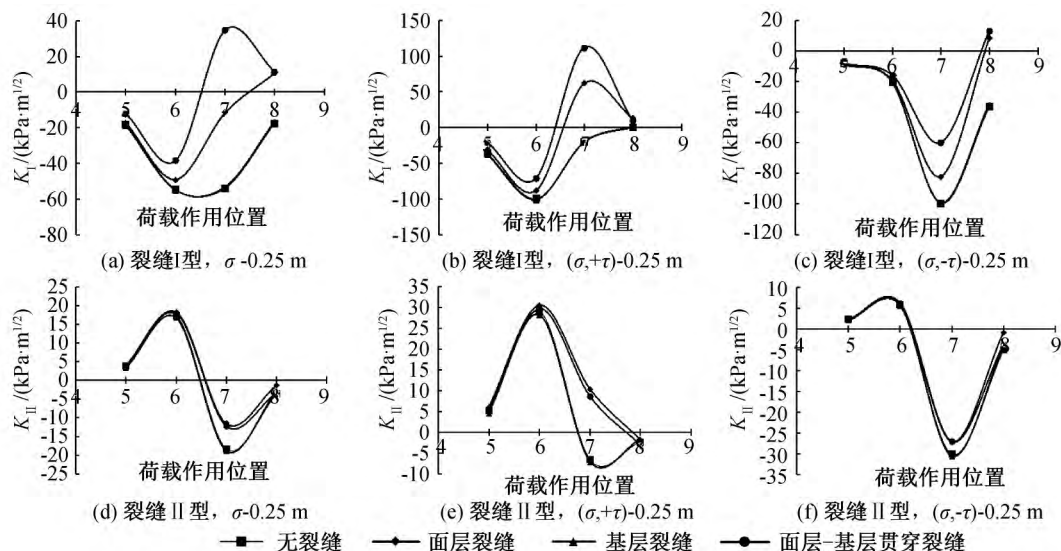


图 7 裂缝间距为 0.25 m 时车辆荷载下受约裂缝为面层裂缝模型的应力强度因子

由图 7 可以看出, 在车辆荷载下, 裂缝间距 0.25 m 时, 不同类型制约裂缝对面层受约裂缝开裂有显著促进作用, 且面层-基层贯穿裂缝 > 面层裂缝 > 无裂缝 \approx 基层裂缝, 且面层-基层贯穿制约裂缝对面层受约裂缝 II 型应力强度因子的影响作用略大于面层制约裂缝, 相比较没有对 I 型应力强度因子

影响显著。

b) 裂缝间距为 0.50 m 时。该模型控制裂缝间距为 0.50 m, 受约裂缝为面层裂缝, 改变车辆荷载作用类型、荷载作用位置及制约裂缝类型, 其 I 型应力强度因子和 II 型应力强度因子的大小与作用位置的关系如图 8 所示。

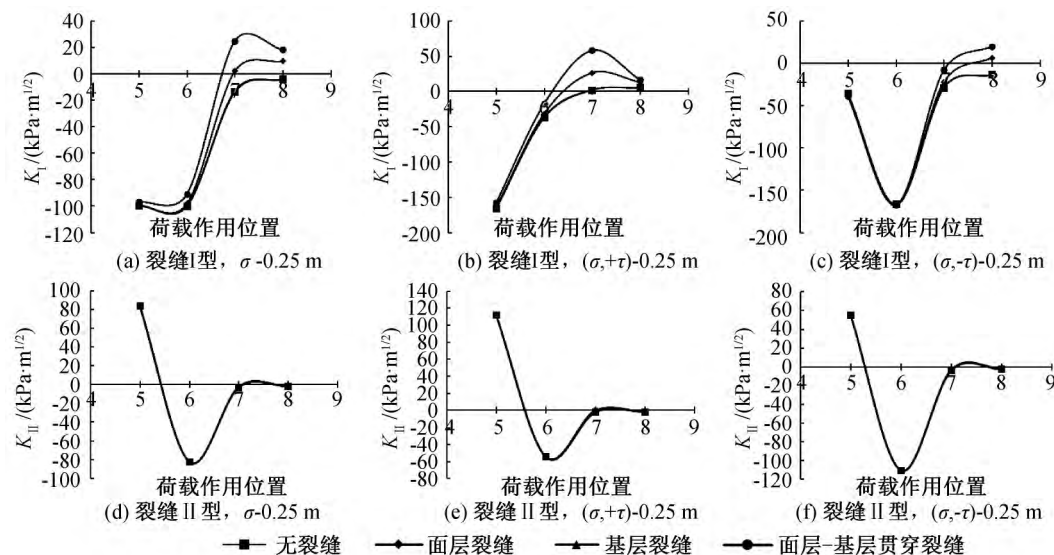


图 8 裂缝间距为 0.50 m 时车辆荷载下受约裂缝为面层裂缝模型的应力强度因子

由图8可以看出,当裂缝间距为0.50 m时,不同类型制约裂缝对面层受约裂缝的 K_I 依然有一定的影响,但相比间距0.25 m时影响不显著;不同类型制约裂缝基本对面层受约裂缝 K_{II} 的影响显著。由 K_I 的影响关系可以看出,当制约裂缝为面层-基层贯穿裂缝时会很大程度地提高 K_I 的曲线的数值,实际工程上的表现就是会促进面层受约裂缝的向下开裂。至于 K_{II} ,由于其值相较 K_I 小,且制约

裂缝对面层受约裂缝影响也小,故不是影响开裂的主要因素,不做进一步分析。

2.2.2 受约裂缝为基层裂缝时模型的影响因素分析

a) 裂缝间距为0.25 m时。该模型控制裂缝间距为0.25 m,受约裂缝为基层裂缝,改变车辆荷载作用类型、荷载作用位置及制约裂缝类型,其I型应力强度因子和II型应力强度因子的大小与作用点的关系如图9所示。

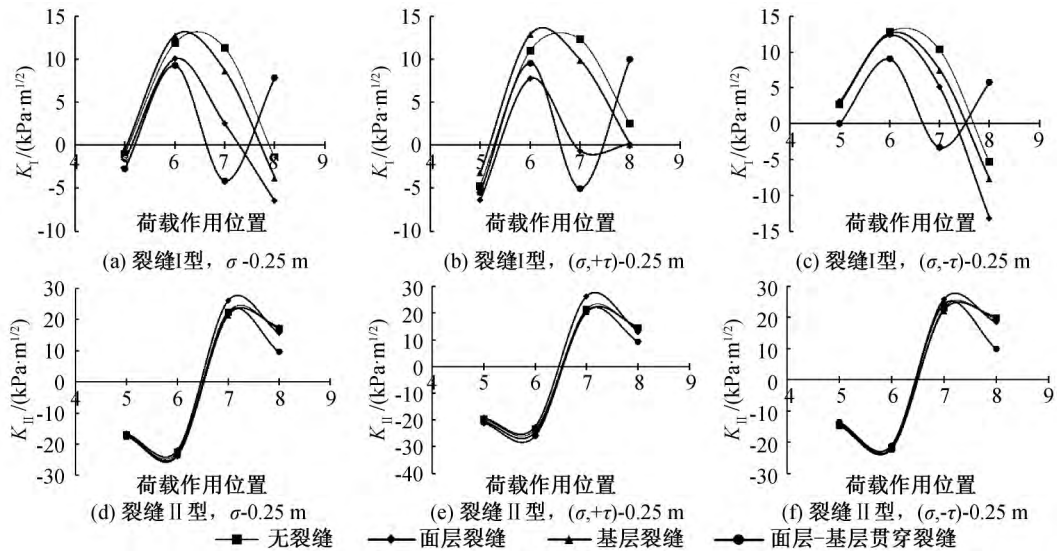


图9 裂缝间距为0.25 m时车辆荷载下受约裂缝为基层裂缝模型的应力强度因子

由图9可以看出,当制约裂缝为面层-基层贯穿裂缝时,基层受约裂缝I型应力强度因子在荷载在7号位置后出现了上升,其余三种不同制约裂缝类型下基层受约裂缝I型应力强度因子大小为:无裂缝>基层裂缝>面层裂缝。对比 K_{II} 的图与 K_I 的图发现,制约裂缝对受约裂缝的II型开裂影响不显著,制约裂缝为面层裂缝时对基层受约裂缝II型略

有促进作用,制约裂缝为面层-基层贯穿裂缝时对基层受约裂缝II型开裂略有抑制作用。

b) 裂缝间距为0.50 m时。该模型控制裂缝间距为0.50 m,受约裂缝为基层裂缝,改变车辆荷载作用类型、荷载作用位置及制约裂缝类型,其I型应力强度因子与II型应力强度因子的大小与作用点的关系如图10所示。

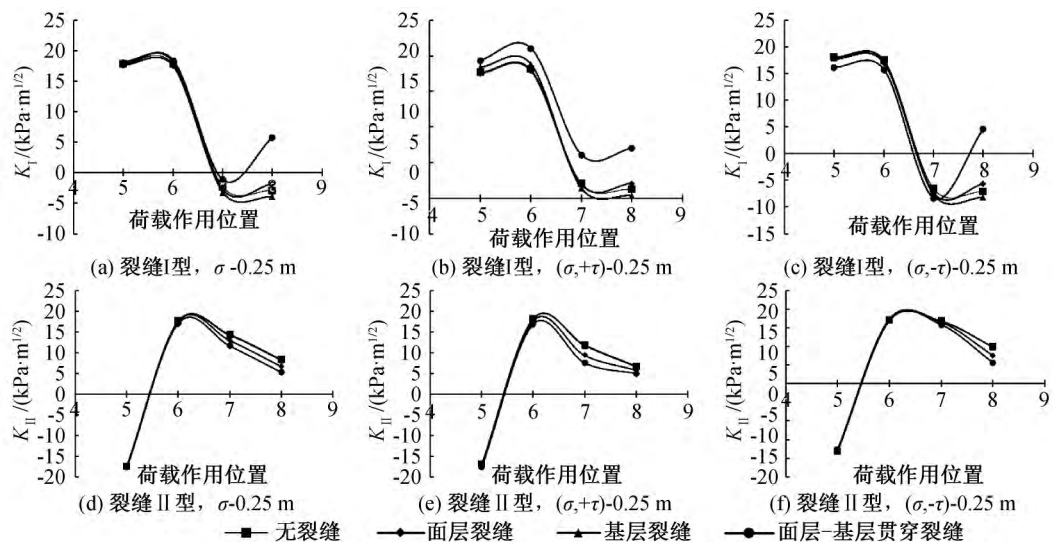


图10 裂缝间距为0.50 m时车辆荷载下受约裂缝为基层裂缝模型的应力强度因子

由图 10 可以看出,当制约裂缝为面层-基层贯穿裂缝时会促进基层受约裂缝的 I 型开裂,其余两种制约裂缝类型对受约裂缝 I 型开裂影响不显著。相比较受约裂缝为面层裂缝,受约裂缝为基层裂缝时的 I 型及 II 型应力强度因子的值小很多,工程表现在车辆荷载作用下旧裂缝对周边基层的新裂缝影响较小,但对周边同间距的面层新裂缝影响更为显著。

3 结 论

本文针对沥青道路旧裂缝对新裂缝影响行为,通过对道路三维双裂缝模型进行有限元数值模拟,建立了不同裂缝类型、不同裂缝间距、不同荷载形式的三维模型,分析了旧裂缝对新裂缝的影响关系,主要结论如下:

a)低温下,制约裂缝类型为面层或面层-基层贯穿裂缝都会对面层受约裂缝 I 型开裂起到抑制作用,且距离越近影响越大。

b)低温下,当裂缝间距离较远时,制约裂缝为面层-基层贯穿裂缝会对基层受约裂缝的向上开裂起到一定的抑制作用,当裂缝间距离较近时,制约裂缝为面层或面层-基层贯穿裂缝时都会显著促进基层受约裂缝向上扩展。

c)车辆荷载作用下,制约裂缝为面层及面层-基层贯穿裂缝都会显著促进面层受约裂缝的向下扩展,且对 K_I 的影响大于 K_{II} 。

d)在整个车辆荷载作用过程中,无论制约裂缝是什么类型,对基层受约裂缝都不会产生固定的促进或抑制作用。

参考文献:

- [1] 韩仲奇.基于使用功能的城市主干道大修养护方法简述[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(7):202-203.
- [2] 李新宏.温度作用下半刚性基层道路反射裂缝的应力分析与处理方法研究[J].公路,2017,62(6):54-60.
- [3] 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.
- [4] Coetzee N F, Monismith C L. Analytical Study of

Minimization of Reflection Cracking in Asphalt Concrete Overlays by Use of a Rubber-asphalt Interlayer[M]. California: Department of Civil Engineering and Institute of Transportation Studies,1979.

- [5] 王宏畅,黄晓明.高等级沥青路面基层底裂缝三维数值分析[J].公路交通科技,2005,22(12):1-4.
- [6] 王宏畅,李国芬,黄晓明.高等级沥青路面表面裂缝扩展规律及寿命研究[J].公路交通科技,2007,24(7):10-14.
- [7] 梁俊龙.沥青路面动态模量及裂缝扩展研究[D].西安:长安大学,2016:82-85.
- [8] 罗睿,黄晓明.利用权函数计算沥青路面层间部分约束的面层底裂缝应力强度因子[J].岩土工程学报,2001,23(5):610-613.
- [9] 易昕.三维有限元方法分析沥青路面自上而下裂缝的扩展[D].长沙:湖南大学,2006:19-23.
- [10] Zhang T G, Raad L. Numerical methodology in fatigue analysis: Basic formulation[J]. Journal of Transportation Engineering, 1999, 125(6):552-559.
- [11] Svasdisant T, Schorsch M, Baladi G, et al. Mechanistic analysis of top-down cracks in asphalt pavements[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2002(1):126-136.
- [12] 李禹德,王朝辉.旧沥青路面开裂状况对加铺层结构的影响[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(11):66-68.
- [13] 葛辉,王宏畅.动荷载作用下沥青路面基层底裂缝扩展研究[J].林业工程学报,2016,30(4):141-148.
- [14] 李文成,李郑斌,张青军,等.沥青路面多裂纹温度应力的数值模拟[J].华中科技大学学报(城市科学版),2010,27(3):16-20.
- [15] 沈新,洪哲.基于断裂力学的沥青路面断裂研究综述[J].城市道桥与防洪,2018(11):155-159.
- [16] 郭鑫峰,徐勋倩,仇云强,等.基于应力强度因子的旧水泥路面沥青加铺层反射开裂特性研究[J].中外公路,2019,39(2):42-47.
- [17] 张红.沥青路面近荷载区 Top-Down 裂缝形成机理及扩展规律分析[D].西安:长安大学,2011:22-24.
- [18] 邱洋杰.温拌 Thiopave 沥青路面的路用性能及车辙数值模拟研究[D].杭州:浙江理工大学,2018:31-32.

(责任编辑:康 锋)