

文章编号:1671-6833(2010)02-0042-05

## 沥青路面表面裂缝扩展分析

张 蓓, 李海龙, 郭成超, 王复明

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 沥青路面早期裂缝的出现,降低了道路的使用年限.为了研究使用状态下沥青路面表面裂缝的扩展行为,基于断裂力学理论,应用有限元软件 ABAQUS,分析了移动荷载下裂缝应力强度因子  $K_{II}$  的变化规律,研究了不同裂缝开裂深度和不同的层间摩擦接触状况下的路面响应,并探讨了面层厚度、面层和基层模量等路面结构参数对裂缝扩展的影响.为半刚性基层沥青路面的合理化设计和沥青路面的维护保养提供一定的理论参考.

**关键词:** 应力强度因子;表面裂缝;移动荷载;沥青路面

**中图分类号:** U416.217

**文献标识码:** A

### 0 引言

近年来,我国的公路建设事业迅速发展,半刚性基层沥青混凝土路面因其承载力高和抗疲劳能力强的优点而获得了广泛应用,并已成为我国高速公路路面的主要形式.但是这种结构形式容易出现裂缝导致早期破坏严重.很多研究者基于断裂力学理论对含表面裂缝或反射裂缝的沥青混凝土路面进行了分析.郑键龙<sup>[1]</sup>、彭妙娟<sup>[2]</sup>、罗睿<sup>[3]</sup>等利用有限元理论对路面体进行解析或数值分析,取得了一定的成果.王金昌等<sup>[4-5]</sup>利用有限元分析了车辆荷载对含裂缝路面体的动态作用和面层与基层间摩擦系数对应力强度因子的影响.黄志义等<sup>[6]</sup>利用有限元技术对路面的接触非线性特性进行了分析.

笔者在已有研究成果基础上,考虑到面层和基层的摩擦接触状况和移动荷载的作用,采用有限元方法,从断裂力学角度对半刚性基层沥青路面表面裂缝进行了计算分析,为半刚性基层沥青路面的合理化设计提供参考.

### 1 路面结构力学计算模型

计算模型采用线弹性层状体系理论,路面结构为4层(即面层、基层、底基层和土基),假定在

面层中存在一条表面裂缝,模型基于以下假设:①各结构层均为均质、各向同性的线弹性体;②面层和基层界面处存在摩擦接触约束,其余各层界面处完全连续;③不考虑材料阻尼的影响.

#### 1.1 路面材料参数选取

利用有限元软件 ABAQUS 分别建立二维和三维有限元模型,进行对比计算分析.材料参数在实验室通过试验获得,结构参数和材料参数如表1所示.

表1 模型结构参数和材料参数

Tab.1 Structure and material parameters of model

路面结构层	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	厚度 /cm	模量 /MPa	泊松 比
面层(沥青混凝土)	2 400	18	3 000	0.25
基层(水泥稳定碎石)	2 100	25	2 000	0.25
底基层(石灰土)	2 000	30	800	0.30
土基	1 800	—	50	0.35

#### 1.2 有限元模型的建立

模型中裂缝深度为9 cm,位于模型中间,沿道路横向完全贯通,裂缝面为垂直面,其沿竖直向下方向扩展.二维模型尺寸为5 m×5 m,裂缝尖端处为三角形单元,其他部分是四边形单元,土基底部各方向位移为零,两个侧面处水平位移为零.三维模型尺寸采用5 m×5 m×5 m,单元类型为

收稿日期:2009-08-03;修订日期:2010-01-16

基金项目:河南省创新型科技人才队伍建设工程(074200510006,084100510006);河南省重大公益性科研招标项目(081100911200)

作者简介:张蓓(1968-),女,河南社旗人,郑州大学教授,博士,主要从事基础工程反演理论与无损检测技术研究,

E-mail:beizhang@126.com.

C3D8R 六面体单元,裂缝区域采用楔形单元,手动 + 自动划分网格。边界条件为下底面固支,平行行车方向的两个侧面滑动支撑,上表面和垂直行车方向的两个侧面为自由面。这两种模型能较好地模拟路面真实情况,计算的弯沉值和理论解比较接近。二维模型裂缝尖端网格划分图与三维模型网格划分图见图 1 和图 2。

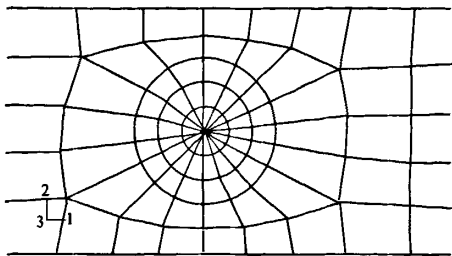


图 1 二维模型裂缝尖端网格划分图  
Fig.1 Mesh near the crack tip of two-dimensional model

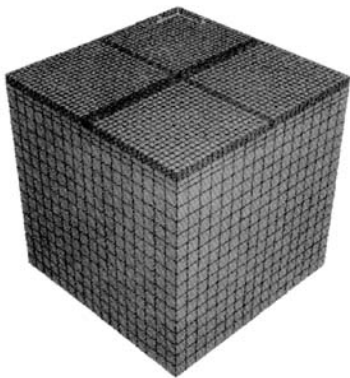


图 2 三维模型网格划分图  
Fig.2 Mesh of three-dimensional model

1.3 荷载与接触模型设置

模型中荷载采用行车移动荷载,只分析单轮荷载的作用,将传统的圆形荷载简化为矩形荷载。为了实现荷载的移动,通过 ABAQUS 的 DLOAD 子程序中步长时间  $t$  与设计时速  $v$  的乘积来反映行车荷载移动情况。本文中行车速度设为 90 km/h,荷载尺寸为 25 cm × 15 cm,大小为 700 kPa<sup>[7]</sup>,方向竖直向下,不考虑水平荷载作用,荷载移动方向与表面裂缝垂直。

在沥青混凝土面层与水泥稳定碎石基层之间设置接触面,接触面处仅竖向应力和位移连续,假定两个接触面竖向不会分离,一直处于粘结状态。接触面处水平应力传递采用库伦摩擦模型,摩擦系数为 0.3。

1.4 裂缝尖端应力强度因子的计算

由于裂缝尖端的应力场是奇异场,故用应力强度因子  $K$  来表示裂缝尖端附近应力应变场的强度。笔者采用位移法计算应力强度因子<sup>[8]</sup>,利用有限元模型计算结果得到的某一时刻裂缝尖端附近裂缝面上对应点的相对位移,求得对应距离  $r$  上的  $K$ ,将这些离散的点用最小二乘法拟合合成直线:

$$K_r = K(t) + a \cdot r$$

然后,外推到  $r = 0$ ,即可得到裂缝尖端应力强度因子  $K$ 。

1.5 模型验证

用有限大板纯 II 型裂缝计算结果与无限大板纯 II 型裂缝的精确解做比较<sup>[9]</sup>:取有限大板为正方形,边长为 0.15 m,边界受剪应力为 1 000 kPa,在中心位置有一平行于一边的裂纹,裂纹长为 0.02 m,弹性模量  $E = 3\,000\text{ kPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.25$ 。

理论解通过查应力强度因子手册<sup>[10]</sup>求得,有限元解和理论解的对比见表 2。

表 2 应力强度因子计算结果对比  
Tab.2 Stress intensity factor calculation result

指标	理论解	有限元解	相对误差/%
$K_I / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	0	$9.630\,8 \times 10^{-6}$	
$K_{II} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	0.177 2	0.184 9	4.3

通过对比表中两种方法的结果,说明有限元法计算结果是有效的。

2 移动荷载作用下表面裂缝扩展分析

由于撕开型(Ⅲ型)裂缝在实际路面结构中出现的比较少,故不做计算分析,只分析张开型裂缝应力强度因子  $K_I$  和滑开型应力强度因子  $K_{II}$ 。经过计算,表面裂缝在距离行车荷载较远时处于微弱张开状态,距离荷载较近时,裂缝处于闭合状态,应力强度因子  $K_I$  为负值,故在表面裂缝计算分析中只考虑剪切型应力强度因子  $K_{II}$  的变化规律。

以裂缝的 2.5 m 处为裂缝中心,裂缝中心尖端的应力强度因子  $K_{II}$  在移动荷载作用下的变化规律如图 3 所示。可见,在荷载移动过程中,当荷载距离表面裂缝较远时,对裂缝的影响较小,当荷载移动到裂缝附近时,即距离裂缝前后 0.5 m 时,才对表面裂缝产生显著影响。随着荷载驶近,裂缝中心尖端的应力强度因子  $K_{II}$  先急剧变化到较大的负值,在荷载到达裂缝中心正上方时候,迅速变换方向,值变为 0,然后变为较大的正值,最后随

着荷载的远去又变为较小的值,呈反对称分布.说明在荷载经过裂缝中心上方时,裂缝经历了两次方向相反的剪切作用.总的来看,三维模型与二维模型里的应力强度因子 $K_{II}$ 变化规律相同,但是三维模型下 $K_{II}$ 的值比二维的要小一些,原因在于三维模型更符合实际路面情况,计算结果更为准确可靠,二维模型做简化处理后引起荷载形式的变化和边界条件设置的改变,影响了荷载作用下应力和位移的分布.

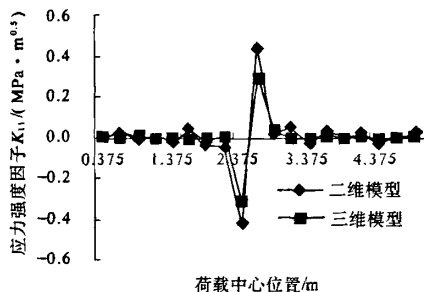


图3 应力强度因子 $K_{II}$ 随荷载中心所在位置的变化规律

Fig.3 Change law of the stress intensity factor  $K_{II}$  varying with the position of load center

### 3 表面裂缝扩展影响因素分析

由于在移动荷载作用下,应力强度因子是动态变化值,分析不同因素对裂缝扩展的影响的时候,主要分析各种因素对应力强度因子最大值 $K_{II\max}$ 的影响.

#### 3.1 裂缝开裂深度

为了分析在表面裂缝发展的不同阶段荷载对裂缝扩展的影响,改变裂缝深度为3,6,9,12 cm,分别为面层厚度的1/6,1/3,1/2,2/3,保持模型其他参数不变,来进行计算分析.依然以裂缝的2.5 m处为裂缝中心,计算出不同的裂缝开裂深度对裂缝中心尖端应力强度因子 $K_{II\max}$ 的影响如图4所示.三维模型和二维模型里的 $K_{II\max}$ 变化规律相同,均是先迅速增加后减少,在裂缝扩展到面层厚度一半(本模型中为9 cm)的时候,裂缝中心尖端应力强度因子 $K_{II\max}$ 达到峰值.因此,对于沥青路面表面裂缝,应在裂缝出现的早期进行修复养护,从而避免沥青路面加剧破坏后造成的维修困难,也节省养护维修费用.

#### 3.2 层间摩擦系数

由于在实际路面结构体中,沥青面层和半刚性基层的粘结状况是不尽相同的,因此有必要探讨一下层间粘结状况对表面裂缝的影响.保持模

型结构层参数和材料参数不变,改变层间摩擦系数为0.1,0.3,0.5,0.7,以裂缝的2.5 m处为裂缝中心,计算不同的层间摩擦系数对裂缝中心尖端应力强度因子 $K_{II\max}$ 的影响如图5所示.三维模型和二维模型的结果是相似的,增加层间摩擦系数能减小应力强度因子 $K_{II\max}$ 的值,实际工程中可以考虑增加沥青面层和半刚性基层的粘结程度,既增加了结构体刚度,也能减缓表面裂缝的扩展.

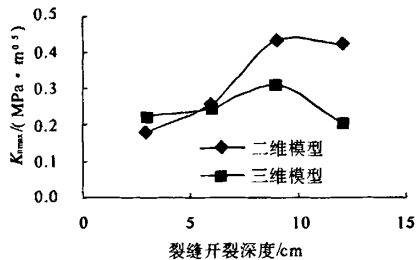


图4 裂缝开裂深度对表面裂缝 $K_{II\max}$ 影响规律

Fig.4 Influence law of surface crack  $K_{II\max}$  by crack depth

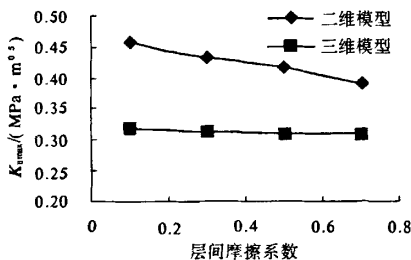


图5 层间摩擦系数对表面裂缝 $K_{II\max}$ 影响规律

Fig.5 Influence law of surface crack  $K_{II\max}$  by friction coefficient between layers

#### 3.3 面层厚度

不同的路面结构层组合对表面裂缝扩展的影响是不同的.而在路面结构参数正常取值的范围内,对表面裂缝的扩展影响较大的是面层厚度、面层模量、基层模量,而土基模量、底基层厚度、底基层模量、基层厚度对表面裂缝扩展的影响很小<sup>[11]</sup>.

保持基层、底基层的厚度和面层、基层、底基层、土基的模量不变,改变面层厚度为12,15,18,21 cm,仍以裂缝的2.5 m处为裂缝中心,来计算面层厚度变化对裂缝中心尖端应力强度因子 $K_{II\max}$ 的影响.不同面层厚度对 $K_{II\max}$ 的影响如图6所示.可见,随着面层厚度的增加,三维模型和二维模型里的应力强度因子 $K_{II\max}$ 变化规律相同,均是先增加后减小,因为厚度的增加增长了裂缝扩

展的路径,延缓了表面裂缝贯穿面层的时间.因此采用厚沥青面层来预防表面裂缝的扩展是可行的,但又容易引起车辙,工程上需综合考虑.

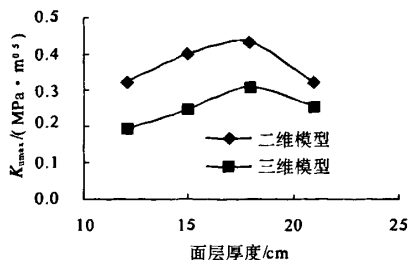


图6 面层厚度对表面裂缝  $K_{II,max}$  的影响规律图

Fig.6 Influence law of surface crack  $K_{II,max}$  by surface thickness

### 3.4 面层弹性模量

保持面层、基层、底基层的厚度和基层、底基层、土基的模量不变,改变面层模量为 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000 MPa, 以裂缝的 2.5 m 处为裂缝中心,来计算面层弹性模量变化对裂缝中心尖端应力强度因子  $K_{II,max}$  的影响如图 7 所示.可以看出,随着面层弹性模量的增加,三维模型和二维模型的应力强度因子  $K_{II,max}$  变化规律相似,都先增加后减小,因此面层弹性模量的选择不宜太高,在本模型中模量在 2 500 ~ 3 000 MPa 时反而会加剧表面裂缝的扩展.

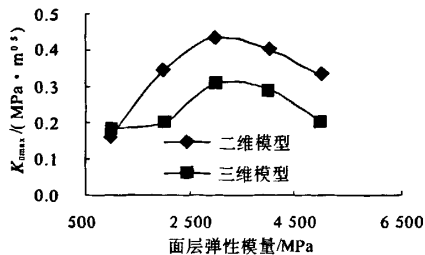


图7 面层弹性模量对表面裂缝  $K_{II,max}$  影响规律

Fig.7 Influence law of surface crack  $K_{II,max}$  by surface modulus

### 3.5 基层弹性模量

保持面层、基层、底基层的厚度和面层、底基层、土基的模量不变,改变基层模量为 1 000, 1 500, 2 000, 2 500, 3 000 MPa, 以裂缝的 2.5 m 处为裂缝中心,计算出来的基层弹性模量变化对裂缝中心尖端应力强度因子  $K_{II,max}$  的影响如图 8 所示.可见,随着基层弹性模量的增加,三维模型的应力强度因子  $K_{II,max}$  略微减小,二维模型的应力强度因子  $K_{II,max}$  则减小得更为明显.因此可以考虑增

加基层的弹性模量,这样既增加了整体承载能力,也可以减缓表面裂缝的扩展.

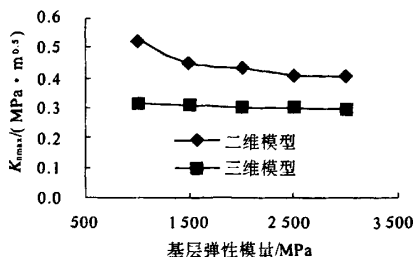


图8 基层弹性模量对表面裂缝  $K_{II,max}$  影响规律

Fig.8 Influence law of surface crack  $K_{II,max}$  by base modulus

## 4 结论

(1)只有当行车荷载移动到裂缝附近时,才对表面裂缝尖端产生显著影响.在荷载经过裂缝上方,裂缝经历了两次方向相反的剪切作用,应力强度因子  $K_{II}$  迅速从较大负值变化到较大正值,呈明显的反对称分布,移动荷载的反复作用,导致了裂缝的扩展.

(2)随着表面裂缝的不断向下扩展,其应力强度因子增大到一个峰值(开裂到 1/2 面层厚度)后下降,表明表面裂缝在初期阶段发展较快,所以当路面出现裂缝时应及早进行修复养护,以免病害的进一步发展.

(3)增加面层和基层间的整体性,能有效减缓表面裂缝的扩展.所以在施工过程中,应加强层间的粘结.

(4)不同的结构设计对表面裂缝扩展存在影响,增加基层模量能减缓表面裂缝的扩展,而增大面层厚度和面层模量对减缓表面裂缝的扩展却不一定是有益的.所以在进行路面设计的时候,应综合各种因素进行合理的结构组合设计.

## 参考文献:

- [1] 郑健龙,张起森.半刚性路面反射裂缝及其应力强度因子的有限元分析[J].岩土工程学报,1990,12(3):22-31.
- [2] 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.
- [3] 罗睿,黄晓明.沥青路面表面裂缝应力强度因子计算方法研究[J].公路交通科技,2002,19(1):12-15.
- [4] 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.
- [5] 王金昌, 朱向荣. 面层与基层层间摩擦系数对应力强度因子影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2757 - 2764.
- [6] 黄志义, 潘伟兵, 徐兴, 等. 路面接触非线性特性研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(5): 1 - 4.
- [7] 谢水友, 郑传超. 轮胎接触压力对沥青路面结构的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 12 - 16.
- [8] 乐金朝, 丁武洋, 谢丽. 路面结构裂缝应力强度因子数值计算[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002, 23(2): 41 - 43.
- [9] 毛成. 沥青路面裂纹形成机理及扩展行为研究[D]. 西南交通大学 土木工程学院, 2004: 81 - 132.
- [10] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [11] 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.

## Analysis of Surface Crack Propagation of Asphalt Pavement

ZHANG Bei, LI Hai-long, GUO Cheng-chao, WANG Fu-ming

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The usage limit of road decreases with the appearance of asphalt pavement early crack. In order to study the propagation behavior of asphalt pavement surface crack in use, the change law of the stress intensity factor  $K_{II}$  of surface crack was analyzed under moving load with the commerce FEM software ABAQUS based on fracture mechanics theory. The response of asphalt pavement with surface crack was studied under the condition of different crack depth and different frictional contact status between layers. The effects of pavement parameters such as surface thickness and surface modulus and base modulus on the crack propagation were discussed. Some theoretical reference was provided for the rational design of semi-rigid asphalt pavement and for the maintenance and rehabilitation of asphalt pavement.

**Key words:** stress intensity factor; surface crack; moving load; asphalt pavement; finite element

(上接第 41 页)

## Influences of Mineral Admixtures on Performances of High Flowing Lightweight Concrete Mixtures

WANG Zhen-jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Institute of Building Materials, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In view of the phenomena that mixtures of lightweight concrete were prone to be in separation in condition of high fluidity, which resulted in the bad workability of mixtures, a mended L-800 rheological testing apparatus of concrete mixtures and the testing methods of concrete mixtures workability were adopted to study influences of mineral admixtures, fly ash and silicon fume, on workability of the mixtures of high flowing lightweight concrete (HFLC), such as the value of  $t(40, T)$ , which was the time when concrete mixtures flowing the length of 40 cm at the different time intervals, slump and spread values. The results indicate that the addition of the mineral admixtures is a key measure to make the mixtures have good performances and the optimal dosage of first grade fly ash and is 30% and 2% cement mass respectively.

**Key words:** high flowing lightweight concrete; mineral admixture; mixture; performance