

基于权函数法的沥青路面基-面层裂缝的扩展行为

李 萍,毛 昱,念腾飞,马 科
(兰州理工大学 土木工程学院,兰州 730050)

摘 要:为了研究半刚性基层沥青混凝土路面在行车荷载作用下出现的基层反射裂缝及其扩展规律,基于黏弹性断裂力学理论和权函数法,对反射裂缝的应力强度因子进行了分析,推导了 I - II 复合型裂纹断裂判据理论.采用数值模拟方法分析了结构层厚度及荷载位置对基层反射裂缝的影响,并通过单边切口小梁试验研究了面层裂缝扩展模式.研究表明: I 型(K_I)和 II 型(K_{II})应力强度因子受路面结构层厚度的影响较大,在行车荷载作用下 I 型裂纹扩展模式起主导作用,增加基层厚度对防止反射裂纹的产生有一定的效果;在考虑水平荷载作用时, I 型和 II 型应力强度因子均随荷载位置的变化而变化,随着荷载与裂纹距离的不断增大, K_I 逐渐减小, K_{II} 逐渐增加,反射裂缝逐渐偏向 II 型裂纹扩展模式;在不考虑水平作用时,基层反射裂纹以 I - II 复合型形式出现,并在应力集中下向面层扩展,扩展模式表现为 I - II 复合型.

关键词:沥青路面;半刚性基层;反射裂缝;断裂力学;权函数;应力强度因子

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Crack propagation behavior between base
and surface courses of asphalt pavement based on
weight function method

LI Ping, MAO Yu, NIAN Tengfei, MA Ke
(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the reflection cracks and the crack propagation regularity of semi-rigid base asphalt pavement under traffic load, the stress intensity factor of the reflection crack is analyzed and the fracture criterion of I-II mixed mode crack is established based on the theory of viscoelastic fracture mechanics, using the weight function method. The influence that the structural layer thicknesses and the load position have on the reflection cracks within the base layer is analyzed by numerical simulation. The crack propagation pattern within the surface layer is studied through single-edged notched beam test. The results show that the stress intensity factor of type I (K_I) and that of type II (K_{II}) are both greatly influenced by the structure thicknesses of pavement, and the type I crack propagation pattern plays a leading role when the road is under traffic load. It is also found that increasing the thickness of base layer has some effect on preventing re-

收稿日期:2016-09-30
基金项目:国家自然科学基金(51668041);甘肃省科技支撑重点研发计划(1504GKCA031)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China(51668041); Science and Technology Support Key Research and Development Project in Gansu Province(1504GKCA031)
第一作者:李萍(1972—),女,江苏靖江人,教授,博士,博士生导师.研究方向为沥青路面结构与材料.email:lzlgliping@126.com.
引用格式:李萍,毛昱,念腾飞,等.基于权函数法的沥青路面基-面层裂缝的扩展行为[J].北京交通大学学报,2017,41(3): 61—68.
LI Ping, MAO Yu, NIAN Tengfei, et al. Crack propagation behavior between base and surface courses of asphalt pavement based on weight function method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3): 61—68. (in Chinese)

flection cracks. When the horizontal load is taken into account, K_{I} and K_{II} all change with the change of load position, and with the increase of the distance between the load and crack, K_{I} gradually decreases, while K_{II} gradually increases, so the reflection crack gradually turn to type II crack propagation pattern. When the horizontal action is overlooked, the reflection cracks within the base layer appear in the form of I-II mixed pattern and extend to the surface layer under stress concentration, the extension mode of which is also shown as I-II mixed pattern.

Keywords: asphalt pavement; semi-rigid base; reflection crack; fracture mechanics; weight function; stress intensity factor

半刚性基层沥青路面强度高,整体性好,且具有良好的水稳性,因此在我国公路建设中得到了广泛的应用.但是在交通荷载和温度荷载的反复作用下,半刚性基层沥青路面基层的反射裂缝普遍存在且难于防治.目前研究裂缝问题的方法主要有断裂力学理论、试验及数值模拟^[1].根据裂缝在路面中受力状况的不同将其分为 I 型张开型裂纹、II 型滑开型裂纹和 I-II 复合型裂纹^[2],Majidzadeh 等^[3]最先将断裂力学引入到路面研究中,通过运用断裂力学对路面裂缝进行模拟;Abdulshafi 等^[4]则在 Majidzadeh 的研究基础上进一步提出能量释放率 G_{I} 的概念;随后 Little 等^[5]运用能量释放率做出对沥青混合料低温开裂性能的进一步研究;Seeds 等^[6]在 Little 的基础上通过对裂纹张开位移的参数研究,提出了温缩型反射裂缝疲劳寿命的预估;Monismith 等^[7]利用有限元法分析了裂缝在行车荷载下的开裂模式;吴赣昌等^[8]以二维弹性层状体系理论为基础求得了低温收缩时裂缝尖端应力强度因子的积分表达式,并对路面材料的特性参数进行了数值分析;Zhang 等^[9]建立了线黏弹性断裂力学理论.但以上研究主要围绕 I 型裂纹展开,针对 II 型裂纹及 I-II 复合型反射裂缝的研究尚且不多.

本文作者基于断裂力学和权函数理论,并结合数值模拟和试验分析方法,研究半刚性基层沥青路面基层反射裂缝在行车荷载下的扩展规律,为预测路面开裂及进行路面结构优化设计提供理论依据.

1 基于权函数的 I-II 复合型断裂判据

路面结构层裂缝扩展分析的一个重要内容,就是根据特定的结构形式,荷载大小和分布状况来计算应力强度因子 K ^[10],它是表征裂纹端部应力奇异性强弱的重要参量,是判断裂纹是否进入失稳状态的重要指标.常用的方法主要有解析法和数值法.其中解析法包括复变函数法、积分变化法、权函数法.Bueckner^[11]提出了应力强度因子的权函数法.即任意荷载作用下的裂纹体,基于该权函数,裂纹体在

任意荷载作用下的应力强度因子可通过下式得到

$$K = \int_0^a \sigma(x) m(x, a) dx \tag{1}$$

式中: a 为裂纹长度; $\sigma(x)$ 为裂纹体假设无裂纹时在原裂纹处的应力分布; x 为裂纹扩展过程中的张开位移 ($0 \leq x \leq a$); $m(x, a)$ 为权函数,其表达式为

$$m(x, a) = \frac{E'}{K_r} \cdot \frac{\partial u_r(x, a)}{\partial a} \tag{2}$$

式中: $u_r(x, a)$ 为荷载作用下裂纹张开位移; K_r 为参考荷载下应力强度因子解; $E' = E/(1 - \nu^2)$, 其中 E 为材料的弹性模量, ν 为泊松比.

对于特殊荷载作用下的裂纹体,一般可以通过应力强度因子手册或者数值计算的方法得到其应力强度因子,然而却很难得到相应的裂纹面位移, Petroski 等^[12]将平面问题的裂纹张开位移表示为

$$u_r(x, a) = \frac{\sigma_0}{\sqrt{2E'}} \times \left[4F(a) \sqrt{a(a-x)} + \frac{G(a)(a-x)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{a}} \right] \tag{3}$$

式中: σ_0 为外加正应力, MPa; $G(a)$ 为裂缝长度为 a 时的能量释放率; $F(a)$ 为参考应力强度因子的几何修正系数

$$F(a) = \frac{K_r}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}} \tag{4}$$

记 $K = K_r$, $\sigma(x) = \sigma_r(x)$, 由式(1)和式(2)得

$$K_r = \frac{E'}{K_r} \int_0^a \sigma_r(x) \frac{\partial u_r(x, a)}{\partial a} dx \tag{5}$$

把式(3)带入式(5)则可算得 $G(a)$. 显然 $G(a)$ 也只与几何参数有关, 得到 $G(a)$ 后带入式(3), 再带入式(2)就可以获得权函数公式^[13]

$$m(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a} \right) + M_2 \left(1 - \frac{x}{a} \right)^2 \right] \tag{6}$$

$$\text{式中: } M_1 = \frac{8 \frac{\partial F(a)}{\partial a} + 4F(a) + 3G(a)}{4F(a)} ;$$

$$M_2 = \frac{2 \frac{\partial G(a)}{\partial a} a - 3G(a)}{4F(a)} .$$

把式(6)带入到式(1)可以得到应力强度因子的计算公式

$$K = \int_0^a \sigma(x) \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \times [1 + M_1(1 - \frac{x}{a}) + M_2(1 - \frac{x}{a})^2] \quad (7)$$

实际结构中由于荷载形式、几何形状及裂纹方位等因素的不同,从而使得裂纹不仅仅呈现出 I、II 单一的形式,而是 2 种裂纹类型的某种组合.基于 Hussain 等^[14] 提出的无限小分支裂纹,运用 Griffith-Irwin 能量释放率准则,裂纹在 I-II 复合型加载条件下的应力强度因子

$$K_I = \left(\frac{4}{3 + \cos^2 \theta} \right) \left(\frac{\pi - \theta}{\pi + \theta} \right)^{\theta/2\pi} \times \left(K_I \cos \theta + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) \quad (8)$$

$$K_{II} = \left(\frac{4}{3 + \cos^2 \theta} \right) \left(\frac{\pi - \theta}{\pi + \theta} \right)^{\theta/2\pi} \times \left(-\frac{1}{2} K_I \sin \theta + K_{II} \cos \theta \right) \quad (9)$$

式中: θ 为分支裂纹与原裂纹面夹角; $K_I(\theta)$ 为裂纹沿 θ 方向 I 型应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$; $K_{II}(\theta)$ 为裂纹沿 θ 方向的 II 型应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$.

从而裂纹沿 θ 方向的能量释放率 $H(\theta)$ 可以表示为

$$H(\theta) = \frac{1}{E'} \left(\frac{2}{3 + \cos^2 \theta} \right)^2 \left(\frac{\pi - \theta}{\pi + \theta} \right)^{\theta/\pi} \times [(1 + 3 \cos^2 \theta) K_I^2 + 4 \sin 2\theta K_I K_{II} + (9 - 5 \cos^2 \theta) K_{II}^2] \quad (10)$$

基于最大能量释放率准则,裂纹将沿 $H(\theta)$ 取最大方向扩展,则开裂角 θ_0 满足

$$\frac{\partial H(\theta)}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial^2 H(\theta)}{\partial \theta^2} < 0 \quad (11)$$

裂纹起始扩展的判据是 $H(\theta)_{\max}$ 达到某临界值,通常将这一临界值假设成材料为 I 型断裂时的断裂韧性 H_{IC} . 根据 H_{IC} 建立起来的断裂判据为

$$H(\theta)_{\max} = H(\theta_0) = H_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E'} \quad (12)$$

式中: 开裂角 θ_0 由式(11)确定.

把 θ_0 和式(10)带入到式(12)可以得出断裂判据为

$$\left(\frac{2}{3 + \cos^2 \theta_0} \right)^2 \left(\frac{\pi - \theta_0}{\pi + \theta_0} \right)^{\theta_0/\pi} \times [(1 + 3 \cos^2 \theta_0) K_I^2 + 4 \sin 2\theta_0 K_I K_{II} + (9 - 5 \cos^2 \theta_0) K_{II}^2] = K_{IC}^2 \quad (13)$$

将式(7)由权函数法计算的应力强度因子带入到式(13),结合式(11)得到的 θ_0 从而可以进一步得到 K_{IC} , 然后结合应力强度因子手册^[15] 就可以判断出裂缝是否满足 I-II 复合型扩展模式. 通过理论分析可以为后续的单边切口小梁试验和数值模拟研究,进行相应的应力强度因子计算及裂缝的扩展模式判断.

2 基层反射裂缝的数值模拟计算

2.1 基本模型的建立方法

沥青路面在结构设计上的差异会造成基层反射裂缝应力分布不均,当行车荷载在驶近和驶离裂缝时,会使裂缝处于不同的应力状态,这直接影响了裂缝的起裂时间、扩展速率和扩展长度.因此荷载作用位置是计算模型的一个关键问题.

考虑到基层裂缝受力状态接近平面应变状态,本文采用图 1 所示的含反射裂缝的沥青路面二维数值模型来进行计算分析.其中 x 正方向表示车辆行驶方向,其长度设定为 300 cm,反射裂缝的初始长度为 5 cm,行车荷载采用水平荷载和垂直荷载两种,并同时作用于路面.

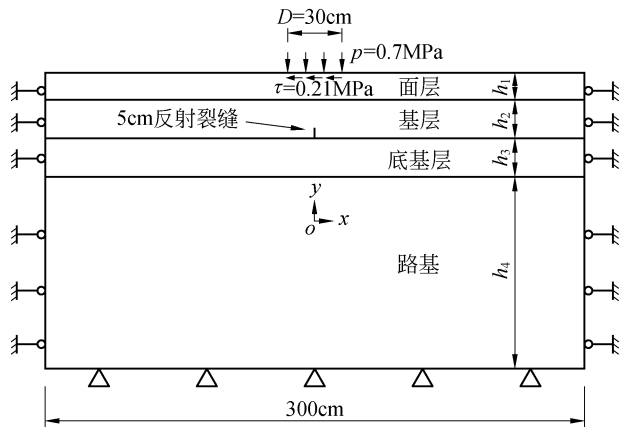


图 1 沥青路面结构模型

Fig.1 Model of asphalt pavement structure

垂直荷载采用我国现行规范中规定的标准轴载 BZZ-100 的轮胎接触压力值 $p = 0.7 \text{ MPa}$ ^[16], 水平荷载 $\tau = 0.21 \text{ MPa}$ (水平力系数取 0.3), 对应标准轴载的当量圆直径 $D = 30 \text{ cm}$ (将轮载用单圆荷载表示). 沥青路面模型有限元分析网格的划分如图 2 所示, 其中对裂纹区域网格进行了加密.

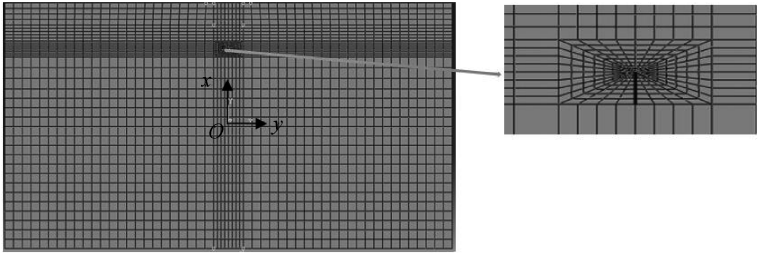


图 2 带反射裂缝的沥青路面有限元网格的划分

Fig.2 Segmentation of finite element mesh for asphalt pavement with reflection cracks

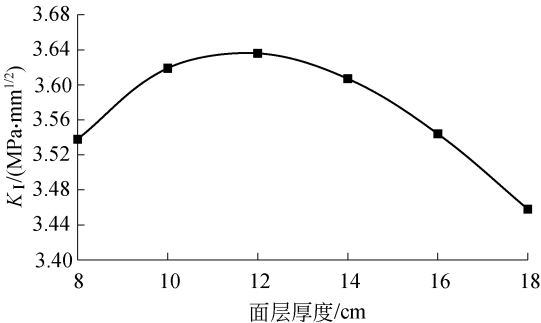
2.2 结构层对基层反射裂缝的影响

基于广义的 Maxwell 模型来描述沥青混合料的应力松弛特性,结合蠕变试验数据,相继而得到松弛模量曲线,并对曲线进行非线性拟合,从而得到了用来表示广义 Maxwell 模型的 Prony 级数.通过采用该 Prony 级数的系数来表示面层和基层弹性的数值参数,其中面层厚度参数为:10、12、14、16 和 18 cm,基层厚度参数为:16、18、20、22 和 24 cm,二者在不同厚度下对应的瞬时弹性模量均为:1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 MPa,且面层和基层的泊松比均为 0.25.底基层厚度 h_3 为 20 cm,回弹模量为 600 MPa,泊松比为 0.30;路基厚度 h_4 为 100 cm,回弹模量为 50 MPa,泊松比为 0.35.

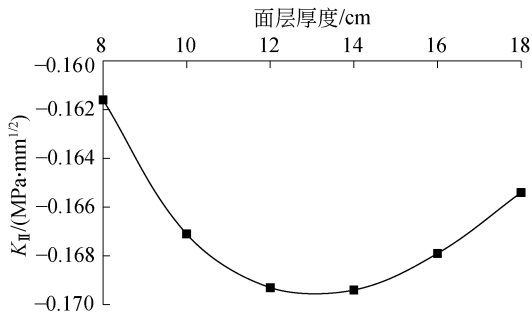
根据结构层的组合参数,进一步分析面层厚度和基层厚度对反射裂缝的影响.面层和基层的厚度

分别用 h_1 和 h_2 表示,面层的模量分别用 E_1 和 E_2 表示.在分析面层厚度对反射裂缝的影响时,取 $E_1=2\,000\text{ MPa}$, $E_2=1\,500\text{ MPa}$, $h_2=20\text{ cm}$,垂直荷载的中心线与裂缝重合.在研究基层厚度对反射裂缝的影响时,取 $h_1=14\text{ cm}$, $E_1=2\,000\text{ MPa}$, $E_2=1\,500\text{ MPa}$,其他条件不变.则 I 型应力强度因子 K_I 和 II 型应力强度因子 K_{II} 随面层和基层厚度的变化趋势分别见图 3~图 4.

从图 3~图 4 可以看出:1) K_I 和 K_{II} (K_{II} 的负值只表示方向)随面层厚度变化是先增大后减小. K_I 在面层厚度为 12 cm 时达到最大值,且最大值为 $3.638\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$,小于沥青混合料断裂韧性 K_{IC} ($K_{IC}\approx 15.811\sim 25.298\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$)^[17],说明在以上参数组合下,12 cm 的面层对基层反射裂缝的影响最大,此时的反射裂缝最容易扩展,但在单



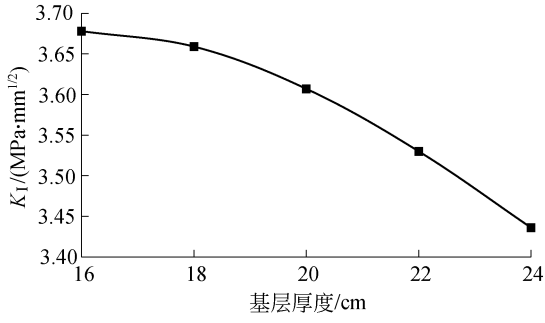
(a) I 型应力强度因子



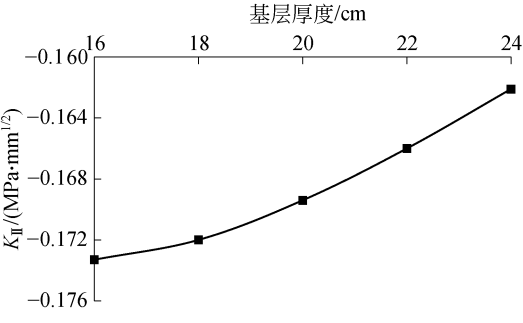
(b) II 型应力强度因子

图 3 不同面层厚度下应力强度因子曲线

Fig.3 Curves of stress intensity factors under different surface layer thicknesses



(a) I 型应力强度因子



(b) II 型应力强度因子

图 4 不同基层厚度下应力强度因子曲线

Fig.4 Curves of stress intensity factors under different base layer thicknesses

次标准行车荷载作用下一般不会发生裂纹扩展。 K_{II} 的最大值出现在 12.5 cm 到 13 cm 的面层厚度之间.对比图 3(a)和图 3(b)可以看出在行车荷载作用下, K_I 的值大约是 K_{II} 的 20 倍,表明 I 型裂缝扩展模式起主导作用.2)相同裂缝长度的情况下,两种应力强度因子均随基层厚度的增加而非线性减小,且减小速率逐渐增加.表明增加基层厚度对防治反射裂缝的产生有一定的效果,并且对两种形式裂缝的影响大致相同.

2.3 荷载位置对基层反射裂缝的影响

在沥青路面开裂的研究中,水平荷载的作用往往容易被忽略.为了反映水平荷载对反射裂缝的影响,有必要对有水平荷载和无水平荷载的应力强度因子进行对比分析,为了进一步研究行车荷载在通过反射裂缝的过程中,荷载位置对基层反射裂缝的影响,依次选取荷载中心与裂缝的水平距离为 0 cm、±10 cm、±15 cm、±20 cm(负值表示行车在驶近裂缝,正值则表示驶离裂缝).在研究荷载位置对反射裂缝的影响时,取 $h_1=14$ cm, $h_2=20$ cm, $E_1=2\,000$ MPa, $E_2=1\,500$ MPa.不同荷载位置对应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的影响如图 5 所示.

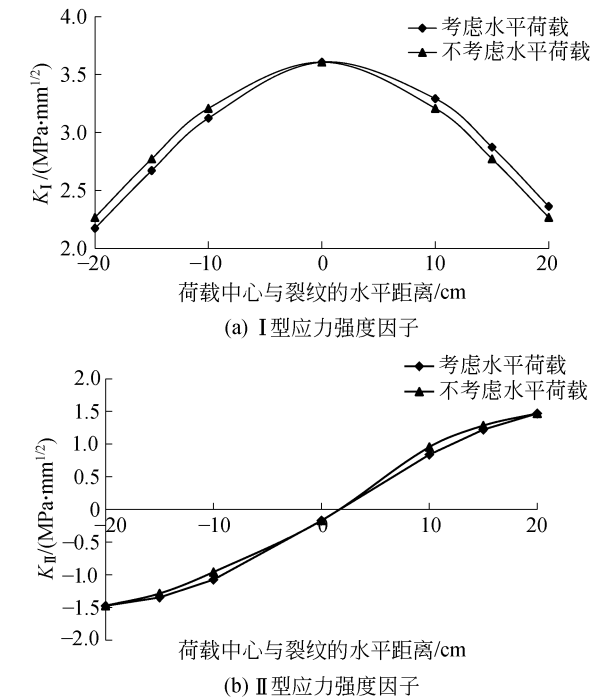


图 5 不同荷载位置下应力强度因子曲线

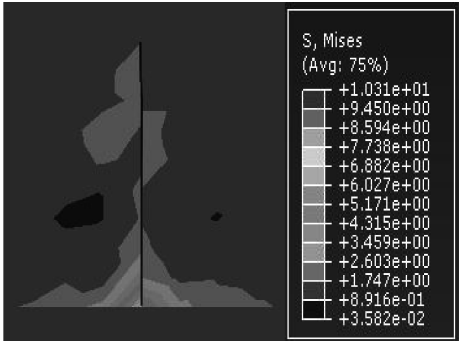
Fig.5 Curves of stress intensity factors under different load positions

从图 5 可以看出:1)两种情况的 I 型应力强度因子随荷载分布位置的变化趋势大致相同.在行车驶近裂缝的过程中,考虑有水平荷载的 K_I 相对于不考虑水平荷载的值偏小, K_{II} 则偏大.在行车驶离

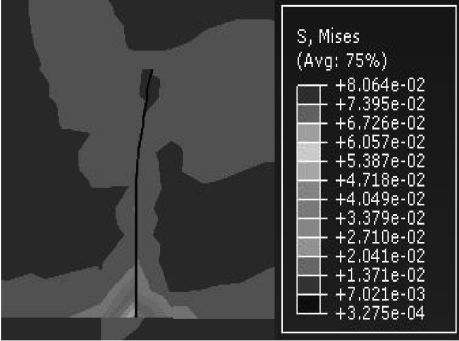
裂缝的过程中,考虑有水平荷载的 K_I 相对于无水平荷载的值偏大, K_{II} 则偏小.2)行车荷载在驶近裂缝的过程中 K_I 表现出逐渐增大的趋势,在驶离裂缝的过程中 K_I 又表现出逐渐减小的趋势,在荷载中心与裂纹重合时 K_I 达到最大值,并且在与裂缝水平距离相等的情况下,行车荷载驶离的 K_I 比驶近的大,且距离裂缝越远,差异越明显.3)行车荷载在驶近裂缝的过程中 K_{II} 表现出逐渐减小的趋势,在驶离裂缝的过程中 K_{II} 又表现出逐渐增大的趋势,且方向也发生了变化,在荷载中心与裂纹重合时, K_{II} 达到最小值,并且在与裂缝水平距离相等的情况下,行车荷载驶近时的 K_{II} 比驶离时的大,且距离裂缝越近,差异越明显.

通过以上对不同荷载位置下应力强度因子的分析可以看出,在考虑水平荷载和不考虑水平荷载时, I 型和 II 型裂缝的应力强度因子随荷载分布位置的变化趋势大致相同,且在数值上也相差不多,因此为了简化后续的模拟和试验研究,进一步分析在无水平荷载情况下,基层反射裂缝在不同位置荷载作用下的裂缝扩展情况.图 6 给出了不同荷载位置的反射裂缝的应力变化情况.

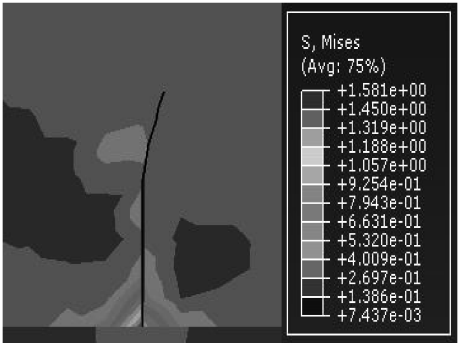
由图 6(a)可以看出,在无水平荷载作用下,当荷载作用在切口的中心位置时,裂缝纵向扩展,表现出 I 型张开型扩展模式.由图 6(b)~图 6(d)可以看出,随着行车荷载偏离切口位置,纵向裂缝开始横向扩展,表现出 II 型滑开型扩展模式,且荷载偏离切口



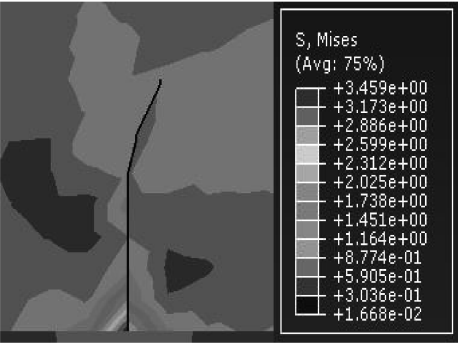
(a) 切口至荷载作用中心的水平距离为0cm



(b) 切口至荷载作用中心的水平距离为10cm



(c) 切口至荷载作用中心的水平距离为15cm



(d) 切口至荷载作用中心的水平距离为20cm

图 6 不同荷载位置反射裂缝的应力云图

Fig.6 Stress nephogram of reflection cracks under different load positions

位置越远,Ⅱ型扩展模式越明显.总体来看,在行车荷载偏离裂缝的过程中基层反射裂纹表现出Ⅰ-Ⅱ复合型裂纹扩展模式.同时还发现,基层反射裂缝的顶部出现应力集中现象,说明基层反射裂缝很有可能向上扩展.

3 沥青混合料单边切口小梁试验

3.1 试验概况

基于以上对基层反射裂缝的研究,发现裂纹顶部出现应力集中现象,说明基层反射裂缝很有可能向面层扩展.因此通过单边切口小梁的断裂试验对沥青混合料Ⅰ-Ⅱ复合型裂纹的开裂和扩展进行进一步研究.

试验采用的沥青为 AH-90 的镇海重交石油沥青,粗细集料为兰州市 S409#路拓建工程所用集料,矿粉为兰州市永登通沟湾水泥厂生产的石灰岩矿粉.

3.2 试验步骤

1)依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[18]的标准方法制备尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的 AC-13 沥青混合料标准试件.

2)标准板成型并养护后,在板表面设计好切割小梁的数目并做好标记,然后依次按照小梁的尺寸

250 mm×50 mm×50 mm 进行切割.待切割完成后,依次对试件进行编号.其中小梁的预裂缝切口通过金刚石锯片切割成“U”形,同理论的基层向上的反射裂缝相一致.切口深度则采用了 10 mm,20 mm 及 30 mm.预制切口与荷载作用中心的距离分别设为 0 mm、10 mm、20 mm、30 mm 和 40 mm.试验加载设备为长沙亚星沥青混合料弯拉试验系统,加载温度为 25 ℃,加载速率为 50 mm/min.

3)将预制切口的小梁放置于加载设备上,进行三点弯曲试验,待试验完成后对相应的试验数据进行处理.

3.3 试验结果分析

试验获得了不同切口位置的沥青混凝土小梁起裂荷载 P_B 随切口相对位置 γ 的变化关系如图 7 所示,其中 ρ 为切口深度与梁高(50 mm)的比值, γ 为荷载相对切口的距离与 1/2 梁跨径(200 mm)的比值,切口小梁的尺寸图如图 8 所示.试验结束后切口小梁的裂纹扩展情况如图 9 所示.

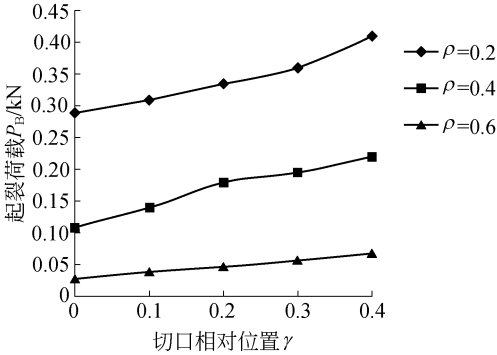


图 7 P_B 随切口相对位置 γ 的变化关系

Fig.7 P_B vs. beam notches' relative position γ

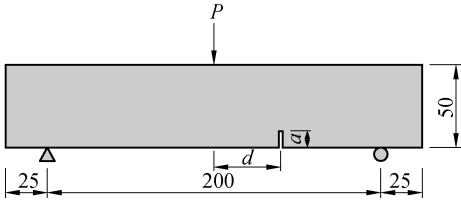


图 8 切口小梁的尺寸图(单位:mm)

Fig.8 Dimensions of notched beam(unit:mm)

从图 7 可以看出在相同切口长度下,切口距离荷载越近,起裂荷载 P_B 越小,距离荷载越远,起裂荷载 P_B 越大,这与基层反射裂纹的起裂情况相一致.同时也看出在切口相对位置 γ 相同的情况下,切口越深则相应的起裂荷载越小.这也表明当基层反射裂纹向上扩展,很大程度上会对裂纹延伸的面层处产生影响,并且在很小的荷载作用下就会使面层发生开裂.

根据图 9 切口小梁裂纹的延伸情况来看,在荷

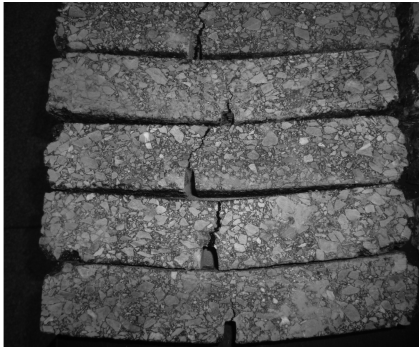


图 9 切口小梁的裂纹扩展

Fig.9 Crack propagation of notched beam

载作用下裂纹均是延着切口位置开始蔓延,然后贯穿整个小梁.在裂缝扩展的过程中,裂缝首先沿着切口方向纵向扩展,表现出Ⅰ型张开型扩展模式,但是随着加载时间的推移,裂纹尖端方向随即发生改变,转变为横向扩展,表现出Ⅱ型滑开型扩展模式.从裂纹总体扩展情况来看,在荷载作用下切口小梁的裂缝扩展表现为明显的Ⅰ-Ⅱ复合型裂纹的扩展模式,这与基层向上的反射裂纹相一致.

4 结论

首先通过断裂力学理论、权函数法计算,以及数值模拟的方法,对半刚性基层沥青路面、基层反射裂缝的应力强度因子和裂纹的扩展规律进行了研究.其次,在基层反射裂缝向上扩展的基础上,通过单边切口小梁的三点弯曲试验对面层反射裂纹的扩展规律进行了进一步研究,主要结论如下.

1)Ⅰ型和Ⅱ型裂缝应力强度因子随面层厚度的增加呈现出先增大后减小的趋势,在相同的行车荷载作用下,Ⅰ型裂缝表现出主导作用;基层厚度的增加对防止裂缝的扩展有一定的效果.

2)在考虑水平荷载作用的情况下,当荷载中心相对于裂缝的水平距离由远到近、再由近到远时,Ⅰ型裂缝应力强度因子先增大后减小,并且在荷载中心与裂缝位置重合的时候达到最大值.Ⅱ型裂缝应力强度因子的变化趋势则与其相反.

3)在不考虑水平荷载作用的情况下,基层反射裂缝主要以Ⅰ-Ⅱ复合型的形式出现,并且在应力集中的作用下向上扩展,致使裂纹向面层发展.

4)预裂缝切口的位置和深度对小梁的裂缝扩展影响较大,切口距离荷载越近或切口越深,起裂荷载越小,且开裂后切口尖端的裂纹都是首先沿着切口方向纵向扩展,随后转变为横向扩展,表现出Ⅰ-Ⅱ复合型开裂模式.

参考文献(References):

- [1] IRWIN G R, KIES J A, SMITH H L. Fracture strengths relative to onset and arrest of crack propagation[C]// Proceedings of the American Society for Testing Materials, 1958: 640—657.
- [2] RICE J R. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 98—103.
- [3] MAJIDZADEH K, BURANAROM C, KARAKOUZ- IAN M. Application of fracture mechanics for improved design of bituminous concrete: final report; prepared for federal highway administration, offices of research and development [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1976.
- [4] ABDULSHAFI A A, KALOUSH K E. Modifiers for asphalt concrete[R]. Florida: Air Force Engineering and Services Center, 1990.
- [5] LITTLE D N, MAHBOUB K. Engineering properties of first generation plasticized sulfur binders and low temperature fracture evaluation of plasticized sulfur paving mixtures[J]. Transportation Research Record, 1985 (1034): 103—111.
- [6] SEEDS S B, MCCULLOUGH B F, CARMICHAEL R F. Asphalt concrete overlay design procedure for Portland cement concrete pavements[J]. Transportation Research Record, 1985(1007): 26—36.
- [7] MONISMITH C L, COETZEE N F. Reflection cracking: analyses, laboratory studies, and design considerations [C]// Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings. St Paul, 1980: 268—313.
- [8] 吴赣昌, 张益生. 沥青路面温缩裂缝的应力强度分析[J]. 中国公路学报, 1996, 9(1): 37—44.
WU Ganchang, ZHANG Gansheng. Thermal stress intensity factor analysis for asphalt concrete pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 1996, 9(1): 37—44. (in Chinese)
- [9] ZHANG C Y. Viscoelastic fracture mechanics analysis of a concrete dam[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 1989, 11(2): 122—130.
- [10] 张淳源. 粘弹性断裂力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994: 98—106.
ZHANG Chunyuan. Viscoelastic fracture mechanics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science Press, 1994: 98—106. (in Chinese)
- [11] BUECKNER H F. Novel principle for the computation of stress intensity factors[J]. Zeitschrift Fuer Angewandte Mathematik & Mechanik, 1970, 50(9): 529—546.
- [12] PETROSKI H J, ACHENBACH J D. Computation of

-

[16] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(12): 1006—1013.