

文章编号: 1000-4750(2013)06-0247-07

半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展过程分析的 Williams 单元

徐 华¹, 杨绿峰^{1,2}, 余振平¹

(1. 广西大学土木建筑工程学院工程防灾与结构安全重点实验室, 广西, 南宁 530004;
2. 广西壮族自治区住房和城乡建设厅, 广西, 南宁 530028)

摘 要: 该文对半刚性基层沥青路面结构采用弹性层状体系平面应变分析模型, 利用改进的 Williams 级数, 结合广义参数有限元法和常规等参元, 建立了反射裂缝裂尖应力强度因子分析的广义参数 Williams 单元, 并推导了 Williams 单元的刚度方程, 据此研究了正对称荷载和偏载分别作用时, 反射裂缝扩展过程中应力强度因子的变化规律; 重点分析了偏载作用下路面结构层参数与应力强度因子之间的关系。Williams 单元中含有与应力强度因子相关的参数, 可以直接获得裂尖应力强度因子。算例分析表明: Williams 单元与传统方法的计算结果吻合较好, 且格式简单, 计算精度高, 适用于沥青路面反射裂缝扩展过程分析。

关键词: 沥青路面; 反射裂缝; Williams 单元; 应力强度因子; 半刚性基层

中图分类号: U416 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.0144

WILLIAMS ELEMENT FOR REFLECTIVE CRACK PROPAGATION IN ASPHALT PAVEMENT ON SEMI-RIGID BASE COURSE

XU Hua¹, YANG Lü-feng^{1,2}, SHE Zhen-ping¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education,
School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
2. Department of Housing and Urban-Rural Development, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi 530028, China)

Abstract: This paper presented a Williams element with generalized degrees of freedom (GDOFs) for stress intensity factor (SIF) analysis of reflective crack in asphalt pavement on semi-rigid base course by means of the layered linear elastic plane strain model and isoparametric element. The stiffness equation was developed for Williams element with GDOFs to yield directly the SIF at the reflective crack tip in the asphalt pavement, as the Williams element contains parameters related to the SIF. The SIF variation is investigated during the propagation of reflective cracking under symmetrical and partial load respectively. The influence of the material and geometrical parameters on the SIF was discussed in details. Numerical example shows that the Williams element has the advantage of simplicity as well as high accuracy. Results from the Williams element agree well with those by the traditional quarter-point element, therefore Williams element can be used for SIF evaluation at the reflective crack tip in the asphalt pavement on the semi-rigid base course.

Key words: asphalt pavement; reflective crack; Williams element; stress intensity factor; semi-rigid base course

收稿日期: 2012-03-02; 修改日期: 2012-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168003); 广西自治区主席基金项目(2010GXNSFD169008); 工程防灾与结构安全教育部重点实验室主任基金项目(2009TMZR004)

通讯作者: 杨绿峰(1966—), 男, 河南鲁山人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程方面的研究(E-mail: lfyang@gxu.edu.cn).

作者简介: 徐 华(1979—), 男, 湖北荆门人, 讲师, 博士, 从事结构工程方面的研究(E-mail: xuhua@gxu.edu.cn);

余振平(1986—), 男, 湖北松滋人, 硕士生, 从事结构工程方面的研究(E-mail: shezhenping1986@tom.com).

半刚性基层沥青路面具有强度高、造价低、整体性和水稳性好等优点,在城市道路和高速公路中得到了广泛应用。但在运营期间,半刚性基层易产生干缩裂缝和低温收缩裂缝,并在轮压荷载和温度的重复作用下逐步扩展到沥青面层而形成反射裂缝,一旦反射裂缝扩展到路表,使得路表水可以由此渗入路基,将导致路基软化,承载力下降,严重时造成路面结构的损伤和破坏。

已开裂基层在裂缝处不能很好地传递拉应力和剪应力,在裂尖处容易产生应力集中,一旦应力超过材料强度时,裂纹将失稳扩展,因此准确分析裂缝尖端应力集中程度是正确判断反射裂缝形成与扩展的关键。采用传统的连续力学方法处理反射裂缝问题难以真实反映裂尖区域的应力集中程度^[1],因而可以将断裂力学理论引入反射裂缝研究中,并利用应力强度因子(Stress Intensity Factor, SIF)准确评估裂尖应力集中程度。郑健龙和张起森^[2]将断裂力学理论应用到半刚性基层沥青路面的开裂研究,利用平面应变多层连续体系模型,在反射裂缝尖端引入应力奇异单元计算 SIF。周志刚^[3]根据界面断裂力学理论,运用 Williams 级数和平面应变有限元方法,研究了路面等层状结构中垂直界面裂缝尖端应力场的奇异性 and 裂缝的扩展方向。元松和李雪莲^[4]采用断裂力学理论,通过适当的条件假定,利用奇异单元法建立了带裂缝的沥青路面结构 4 层体系平面应变分析模型,对不同加载情况和层间结合状态的 SIF 进行了回归分析。Dave 等^[5]采用了基于断裂力学的粘着断裂模型来模拟反射裂缝,分析了温度应力作用下沥青路面反射裂缝问题。Back 等^[6]通过三维有限元模型来模拟带反射裂缝的沥青路面结构,并引入 ABAQUS 分析软件中的粘着单元对裂尖单元进行处理。由于采用完全的三维有限元模型往往需要更高的计算机配置和更多的计算时间,Ceylan 等^[7]开发了能表征空间特性的神经网络模型来模拟计算裂尖处的 SIF。利用奇异单元法计算反射裂缝裂尖 SIF 时,不仅单元构造理论复杂,而且需要根据裂纹之外的位移或应力,通过插值和外推计算确定裂尖处 SIF,因此其结果将受拟合直线方向和插值点位置等人为因素的影响;通过常规有限元计算裂尖 SIF 时,需要细密离散裂尖区的有限元网格,从而增大计算工作量,导致计算精度不高,且需要后处理方能得到裂尖处的 SIF。

本文根据广义参数有限元法^[8-9]和 Williams 级

数^[10]及其改进表达式研究建立了半刚性基层沥青路面反射裂缝 SIF 分析的广义参数 Williams 单元(简记为 W 单元)。利用普通等参元构造的裂尖处 W 单元计算模型,避免构造复杂的奇异元和细密离散网格,格式简单,计算量小,而且该模型中含有与 SIF 相关的参数,可以直接确定裂尖的 SIF,避免人为因素的影响,可以获得很高的计算精度和效率。

1 路面结构计算模型

根据路面结构的组合形式,可将其看作为一个长条形大面积的层状结构,且支撑在无限深的地基上。对此模型,学者和工程技术人员早在 19 世纪就已开始探索适用于路面结构设计的力学理论,并得到了很好的发展。20 世纪 40 年代以来,Burmister 最先推导了双层体系的解,而后将其扩大到三层体系,随着计算机的发展,这一理论可以应用于路面多层体系计算分析中^[11]。对沥青路面结构反射裂缝进行力学分析时,因路面宽度较大,通常可采用平面应变模型^[12],将其近似看作四层弹性层状连续体系,取轮压荷载作用,如图 1 所示。结构层自上而下分别为面层、半刚性基层、底基层和土层,表征结构各层所需参数包括结构各层的厚度 h 、弹性模量 E 和泊松比 μ 。根据断裂力学理论,含裂纹体结构在外荷载作用下,其行为模式可以根据裂纹的开裂方式和外力作用形式分为 3 种基本类型:张开型(I 型)、剪切型(II 型)和撕开型(III 型)。真实结构受力开裂时通常表现为这 3 种基本类型的混合型,道路结构中反射裂缝常以 I-II 复合型出现^[13]。

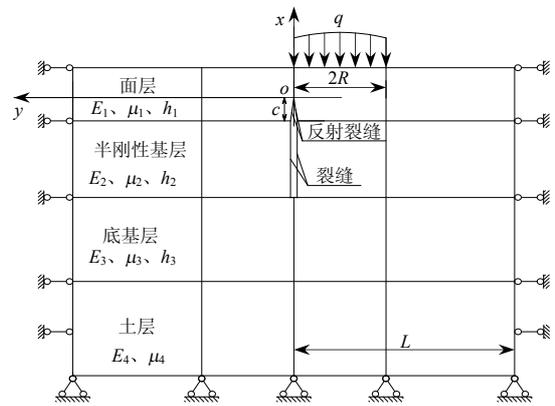


图 1 路面结构平面分析模型

Fig.1 Planar model for pavement structure

本文主要研究交通荷载作用下半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展行为,分析过程中忽略温度效应影响。其力学模型基于以下假定^[11]: 1) 各层都由均质、弹性和各向同性材料组成; 2) 各层之间接

触良好,表现出连续分布状态;3)沿横向贯穿路面的裂缝在面层中仅沿竖直方向扩展;4)不计路面结构自重的影响;5)土层底面在水平方向和深度方向位移为零,且各结构层两端横截面水平位移为零。

以反射裂缝裂尖为坐标原点 o , 沿着反射裂缝扩展方向作为 x 轴, 逆时针旋转 90° 为 y 轴, 建立坐标系 oxy , 如图 2 所示。围绕裂尖 o 确定一矩形应力奇异域, 其外围作为常规区域。奇异域内以裂尖 o 为中心用一组射线沿转角方向将奇异域离散为多个扇形条元, 利用一组环绕裂尖 o 且相互平行的折线(记为 $\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_n$)进一步将扇形条元离散为 n 个几何形状相似的梯形单元和一个三角形微子域 oCD , 其中任意两相邻折线 Γ_i, Γ_{i-1} 到裂尖 o 的距离之比为常数 $\alpha, \alpha \in (0,1)$, 分别称 n, α 为奇异域条元径向子单元数和径向离散比例因子; 奇异域外围常规域通过普通有限元法进行离散、分析。

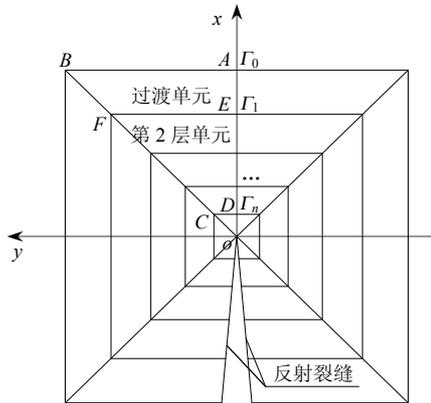


图 2 反射裂缝裂尖奇异区离散单元

Fig.2 Discretization of singular region around the reflective crack tip

2 广义参数 Williams 单元

2.1 裂尖应力奇异域位移场及应力强度因子

将断裂力学引入半刚性基层沥青路面结构开裂破坏行为分析及计算模型中, 重要任务之一是简单、准确的计算裂尖 SIF。广义参数有限单元法^[9]分析含反射裂缝半刚性基层沥青路面结构时, 首先需要利用改进的 Williams 级数建立裂尖应力奇异域的整体位移场:

$$\begin{cases} u = u_0 + \sum_{j=1}^{\infty} r^{j/2} [a_j f_{j,11}(\theta) + b_j f_{j,12}(\theta)] \\ v = v_0 + \sum_{j=1}^{\infty} r^{j/2} [a_j f_{j,21}(\theta) + b_j f_{j,22}(\theta)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u, v 分别表示 x, y 坐标方向的位移分量;

u_0, v_0 表示裂尖平动位移; $f(\theta)$ 为三角函数, 且有:

$$\begin{aligned} f_{j,11}(\theta) &= \left(\kappa + \frac{j}{2} + (-1)^j \right) \cos \frac{j}{2} \theta - \frac{j}{2} \cos \left(\frac{j}{2} - 2 \right) \theta, \\ f_{j,12}(\theta) &= \left(\kappa + \frac{j}{2} - (-1)^j \right) \sin \frac{j}{2} \theta - \frac{j}{2} \sin \left(\frac{j}{2} - 2 \right) \theta, \\ f_{j,21}(\theta) &= \left(\kappa - \frac{j}{2} - (-1)^j \right) \sin \frac{j}{2} \theta + \frac{j}{2} \sin \left(\frac{j}{2} - 2 \right) \theta, \\ f_{j,22}(\theta) &= \left(-\kappa + \frac{j}{2} - (-1)^j \right) \cos \frac{j}{2} \theta - \frac{j}{2} \cos \left(\frac{j}{2} - 2 \right) \theta, \end{aligned}$$

这里: μ 表示路面结构层的泊松比; 参数 $\kappa = 3 - 4\mu$ 。 a_i, b_i 是待定系数, 由外荷载和边界条件确定, 其中, a_1, b_1 与位移表达式中 $r^{1/2}$ 项对应, 可以表征裂尖周围应力场的 $r^{-1/2}$ 奇异性, 它们同 I 型、II 型应力强度因子 K_I, K_{II} 之间分别具有如下关系:

$$K_I = \sqrt{2\pi G} a_1, \quad K_{II} = \sqrt{2\pi G} b_1 \quad (2)$$

式中, G 表示路面结构层的剪切模量。由式(2)可以看出, 只要确定了系数 a_1 和 b_1 , 便可直接求得 SIF。

位移表达式(1)中采用了改进的 Williams 级数, 与文献[10]相比, 式(1)将裂尖位移 u_0, v_0 单独列为一项, 保证了本文建立的反射裂缝分析的 W 单元对局部坐标原点位置的选择具有很强的适应性, 可以根据裂纹在结构中的位置加以具体处理; 式(1)的级数表达式中去掉了剪切模量 G , 从而避免了刚度矩阵出现病态。

2.2 广义参数子单元位移场

由图 2 可见反射裂缝裂尖奇异域内 W 单元 oAB 由最外层(第 1 层)的过渡子单元 $ABFE$ 、梯形 $CDEF$ 中的 $n-1$ 个相似梯形子单元和裂尖三角形子单元 oDC (第 $n+1$ 层)这 3 部分组成。该奇异域内位移场可用式(1)表示。取其前 m 项, 并改写成矩阵形式:

$$\mathbf{w} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{a} \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{w} = [u, v]^T,$$

$$\mathbf{a} = [u_0, v_0, a_1, b_1, \dots, a_m, b_m]^T,$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & r^{\frac{1}{2}} f_{1,11} & r^{\frac{1}{2}} f_{1,12} & \dots & r^{\frac{m}{2}} f_{m,11} & r^{\frac{m}{2}} f_{m,12} \\ 0 & 1 & r^{\frac{1}{2}} f_{1,21} & r^{\frac{1}{2}} f_{1,22} & \dots & r^{\frac{m}{2}} f_{m,21} & r^{\frac{m}{2}} f_{m,22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由文献[14]可知, 裂尖三角形子单元 oDC 对单元 oAB 的总势能的贡献可以忽略不计, 因此条元 oAB 的刚度矩阵可由梯形 $CDEF$ 中的 $n-1$ 个子单元和过渡子单元 $ABFE$ 集成。对于其中的任一梯形子

单元 e , 可根据普通有限元理论建立单元位移场:

$$\mathbf{u}^e = \bar{\mathbf{N}}^e \cdot \mathbf{d}^e \quad (5)$$

式中: \mathbf{u}^e 表示子单元位移场; $\bar{\mathbf{N}}^e$ 表示子单元形函数; \mathbf{d}^e 表示子单元的节点位移向量。

由于子单元 e 的位移场必须与 W 单元 oAB 的总体位移场相协调, 即满足式(1), 所以可将子单元 e 的全部节点(这里采用八节点四边形等参元)坐标 (r_i, θ_i) 依次代入总体位移场表达式(3)中, 可得:

$$\mathbf{d}^e = [u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_8, v_8]^T = \mathbf{T}^e \cdot \mathbf{a} \quad (6)$$

式(6)建立了子单元 e 的节点位移 \mathbf{d}^e 与总体位移场参数列阵 \mathbf{a} 之间的转换关系, 矩阵 \mathbf{T}^e 称为位移场转换矩阵, 其维数为 $16 \times (2m+2)$, 且:

$$\mathbf{T}^e = [[\mathbf{H}(r_1, \theta_1)]^T \quad [\mathbf{H}(r_2, \theta_2)]^T \quad \dots \quad [\mathbf{H}(r_8, \theta_8)]^T]^T \quad (7)$$

根据式(7), 代入 W 单元内任意子单元相应结点坐标即可形成该单元的转换矩阵。进一步分析可知, W 单元内任意第 i 层子单元与第 1 层过渡子单元转换矩阵之间存在 α^{i-1} 的比例关系。

将式(6)代入式(5), 可得:

$$\mathbf{u}^e = \bar{\mathbf{N}}^e \cdot \mathbf{T}^e \cdot \mathbf{a} = \mathbf{N}^e \cdot \mathbf{a} \quad (8)$$

式(8)是 W 单元 oAB 内典型子单元 e 的广义参数位移场, 其中的待定参数 \mathbf{a} 不局限于特定的物理意义, 是广义的, 所以称这类子单元为广义参数子单元。

2.3 W 单元刚度方程

如前所述, W 单元 oAB 的刚度由梯形 $CDEF$ 中 $n-1$ 个梯形子单元和最外层过渡子单元 $ABFE$ 集成。

1) 梯形 $CDEF$ 的刚度方程。

根据式(8)定义的广义参数子单元 e 的位移场, 利用变分原理可以建立其刚度方程:

$$\mathbf{K}^e \cdot \mathbf{a} = \mathbf{F}^e \quad (9)$$

式中: \mathbf{K}^e 和 \mathbf{F}^e 分别表示广义参数有限元的刚度矩阵和荷载列阵, 且有:

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{T}^{eT} \cdot \bar{\mathbf{K}}^e \cdot \mathbf{T}^e, \quad \mathbf{F}^e = \mathbf{T}^{eT} \cdot \bar{\mathbf{F}}^e \quad (10)$$

其中, $\bar{\mathbf{K}}^e$ 和 $\bar{\mathbf{F}}^e$ 分别表示普通等参元刚度矩阵和荷载列阵。

由式(9)可以看出, 梯形 $CDEF$ 中的各个子单元刚度方程均带有相同待定参数 \mathbf{a} , 因此可将它们的刚度方程直接进行叠加, 得到梯形 $CDEF$ 的总体刚度方程:

$$\mathbf{K}'_w \cdot \mathbf{a} = \mathbf{F}'_w \quad (11)$$

式中:

$$\mathbf{K}'_w = \sum_{k=2}^n \mathbf{K}^{(k)}, \quad \mathbf{F}'_w = \sum_{k=2}^n \mathbf{F}^{(k)} \quad (12)$$

由此可以看出, 只需求得 W 单元内第 1 层子单元的刚度方程, 然后根据式(10)将其转换为广义参数刚度矩阵和荷载列阵, 再根据等比级数求和公式即可容易求得 \mathbf{K}'_w 和 \mathbf{F}'_w , 大大减小了计算工作量, 且易于编程实现。

2) 过渡子单元 $ABFE$ 的刚度方程。

过渡子单元 $ABFE$ 的边 AB 同时也是 W 单元与常规域的交界, 该边上的 3 个节点参数具有特定物理意义——通常代表节点位移, 剩余 5 个节点位于奇异域内, 其位移可通过式(6)用节点参数 \mathbf{a} 表示。则过渡子单元 $ABFE$ 的位移列阵可分块表示为:

$$\mathbf{d}^e = \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_b^e \\ \mathbf{d}_s^e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}' \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_b^e \\ \mathbf{a} \end{Bmatrix} = \mathbf{T}^{(0)} \cdot \mathbf{d}^{(0)} \quad (13)$$

式中: \mathbf{d}_b^e 表示过渡子单元 AB 边上的 3 个节点位移参数; \mathbf{d}_s^e 表示过渡子单元上位于奇异域内 5 个节点的位移参数, 且 $\mathbf{d}_s^e = \mathbf{T}' \cdot \mathbf{a}$; 矩阵 \mathbf{T}' 可通过将过渡子单元的节点坐标依次代入式(7), 并取其中后 10 行得到; $\mathbf{T}^{(0)}$ 表示过渡子单元的位移场转换矩阵。

根据式(9), 可得过渡子单元广义参数刚度矩阵, 并结合式(13), 将刚度矩阵分块表示:

$$\mathbf{K}^{(0)} = (\mathbf{T}^{(0)})^T \cdot \bar{\mathbf{K}}^e \cdot \mathbf{T}^{(0)} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}}_{bb}^e & \mathbf{K}_{bs}^e \\ \mathbf{K}_{sb}^e & \mathbf{K}_{ss}^e \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:

$$\mathbf{K}_{bs} = \bar{\mathbf{K}}_{bs} \cdot \mathbf{T}' = \mathbf{K}_{bs}^T, \quad \mathbf{K}_{ss} = \mathbf{T}'^T \cdot \bar{\mathbf{K}}_{ss} \cdot \mathbf{T}'$$

其中, 上划线“-”表示普通有限元刚度矩阵中相应的分块矩阵; 下标 b 代表位于 W 单元与常规域交界上的节点; 下标 s 代表 W 单元的过渡子单元上位于奇异域的节点。

集合过渡子单元 $ABFE$ 和梯形单元 $CDEF$ 的刚度方程, 即可形成广义参数 W 单元 oAB 的刚度方程, 且可以分块表示为:

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}}_{bb}^e & \mathbf{K}_{bs}^e \\ \mathbf{K}_{sb}^e & \mathbf{K}_{ss}^e + \mathbf{K}'_w \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_b^e \\ \mathbf{a} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_b^e \\ \mathbf{F}_s^e + \mathbf{F}'_w \end{Bmatrix} \quad (15)$$

将裂尖奇异域的所有 W 单元与常规区普通单元的刚度方程集合, 得到路面结构的整体刚度方程。引入边界条件并求解, 可以求得待定参数向量 \mathbf{a} , 将其中的参数 a_1 和 b_1 代入式(2)可以直接求得反射裂纹裂尖的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 。由于 W 单元和普通单元的几何尺寸相似, 所以裂尖奇异域不需要细密离散, 而且由于 W 单元和普通单元交界

线上的节点参数与普通单元相同，所以很容易与普通单元搭接、集成，便于和商业通用软件衔接，方便实用。

3 算例分析

选择一典型路面结构，如图 1 所示，其数值计算模型如前所述。结构体系中各层材料参数见表 1，单位荷载集度 $q=0.7\text{MPa}$ ，作用线长 $2R=0.30\text{m}$ ，以反射裂缝为对称轴取路面结构半长 $L=5.30\text{m}$ ，反射裂缝长度为 c 。根据 1/4 结点奇异单元和本文建立的广义参数 W 单元，利用 FORTRAN95 语言编制并调试了相应的计算程序，分别计算了反射裂缝裂尖应力强度因子 K_I 和 K_{II} ，并研究其变化规律。

表 1 典型路面结构各层材料参数

Table 1 Material parameters of typical pavement structure layers

结构层	材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	厚度 h/m
沥青面层	沥青混凝土	$E_1=1200$	0.25	$h_1=0.16$
半刚性基层	水泥稳定碎石	$E_2=1600$	0.30	$h_2=0.20$
底基层	石灰土	$E_3=600$	0.35	$h_3=0.30$
土层	土	$E_4=40$	0.40	$h_4=4.00$

计算模型中：取矩形应力奇异域(如图 2 所示)，边长为 1.0cm 。采用 W 单元法时，可将奇异域在每个坐标象限内离散为 2 个 W 单元即可保证计算结果的精度和收敛性；采用 1/4 结点奇异单元时，每个坐标象限离散为一个矩形奇异单元；2 种方法在常规区域都采取相同的离散网格和单元类型。以反射裂缝为中心，按照轮压荷载作用位置的不同分 2 种情况讨论：1) 在对称荷载作用下，常规域离散为 346 个四边形 8 节点等参单元，整个计算模型共有 1104 个结点，107 个受约束结点位移；2) 偏载作用下，常规域离散为 286 个四边形 8 节点等参单元，919 个结点，99 个受约束结点位移。

这里定义 $\zeta=c/h_1$ ，它表示反射裂缝长度与沥青面层厚度的比值。通过 c 和 ζ 的同步增大来模拟反射裂缝从发生到接近穿透整个沥青面层的扩展过程。上述 2 种方法的计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知，随着 ζ 值的增大，裂尖处 SIF 的绝对值逐渐增大，该现象符合工程实际，且本文建立的 I-II 混合型 W 单元与常规的 1/4 结点奇异单元的计算结果基本吻合，证明了本文方法在半刚性基层沥青路面结构开裂破坏行为分析方面的适用性和正确性。结合文献[9,14]可知，W 单元具有比 1/4

表 2 应力强度因子与反射裂纹扩展比例 ζ 的关系
Table 2 The relationship between SIF and the ratio ζ of reflection crack propagation

$\zeta=c/h_1$	正对称荷载作用				偏载作用			
	本文方法		奇异单元		本文方法		奇异单元	
	K_I	K_{II}	K_I	K_{II}	K_I	K_{II}	K_I	K_{II}
0.125	-0.1549	0.0000	-0.1487	0.0000	-0.1725	0.1480	-0.1653	0.1400
0.250	-0.2042	0.0000	-0.1968	0.0000	-0.2185	0.1569	-0.2110	0.1513
0.375	-0.2652	0.0001	-0.2540	0.0000	-0.2739	0.1684	-0.2653	0.1652
0.500	-0.3415	0.0000	-0.3332	0.0000	-0.3411	0.1816	-0.3303	0.1789
0.625	-0.4462	0.0001	-0.4228	-0.0001	-0.4287	0.2037	-0.4119	0.1970
0.750	-0.6024	0.0001	-0.5791	-0.0001	-0.5571	0.2365	-0.5386	0.2282
0.875	-0.8971	-0.0000	-0.8704	-0.0002	-1.0826	0.3740	-1.0346	0.3474

结点奇异单元更好的计算精度和计算效率。主要原因在于 1/4 结点奇异单元需要在奇异区内选择一条通过裂尖的射线，根据射线上特定点的位移计算其表观 SIF，然后通过线性外推获得裂尖处的应力强度因子，这样不仅降低了计算精度，而且人为选择射线方向时难免受到主观因素的影响；而采用 W 单元时可以根据其计算模型中的参数 a_1 和 b_1 直接求得反射裂缝裂尖处的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 。另外，1/4 结点奇异单元的构造理论复杂，而 W 单元可通过常规等参数元简单叠加得到，所以后者计算格式简单，容易为普通工程技术人员理解、应用。

从表 2 能够看出，正对称荷载作用时， $K_{II}=0.0$ ， K_I 为负值，说明路面受压，反射裂缝处于纯压缩状态，此时反射裂缝不会继续扩展，且有闭合趋势；偏载作用时， K_I 仍为负值， K_{II} 为正值，说明裂尖区处于 I-II 复合受力状态，且裂纹面受剪是导致裂缝继续扩展的主要因素。从表中数据还可以看出，在裂纹扩展前期，SIF 变化较平缓，随着裂缝长度增大，SIF 变化逐渐加剧，特别是当裂纹扩展到面层厚度的 62.5% 以上时，SIF 变化异常明显。

根据上述分析可知：II 型应力强度因子(K_{II})是影响反射裂缝扩展的主要因素，而温度应力主要影响反射裂缝裂尖的张拉应力和 I 型应力强度因子(K_I)，对反射裂缝的扩展影响不大。而且，当面层厚度超过 12cm 时，路面降温产生的最大温度应力仍发生在表面层^[15]。因此本论文计算模型中尽管没有考虑环境温度，但并不影响研究结果的合理性。

因为正对称荷载作用时裂纹不会进一步扩展，所以这里只讨论偏载作用时不同面层结构参数对反射裂缝扩展过程中应力强度因子 K_{II} 的影响，如图 3、图 4 所示。

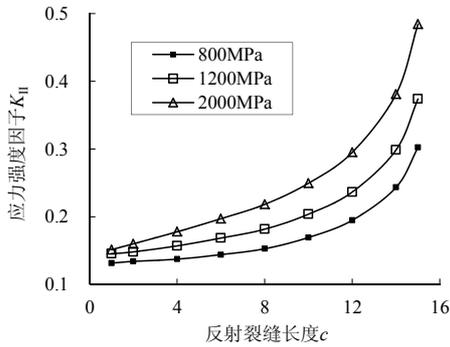


图3 不同面层模量中 K_{II} 随反射裂缝长度 c 的变化

Fig.3 K_{II} versus the length c of reflective cracking within different surface layered modulus

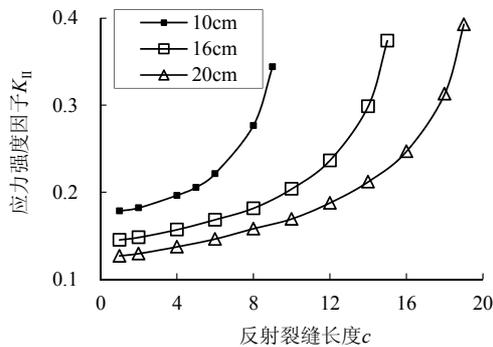


图4 不同面层厚度中 K_{II} 随反射裂缝长度 c 的变化

Fig.4 K_{II} versus the length c of reflective cracking within different surface layered thickness

图3表示面层厚度一定时(取 $h_1=16\text{cm}$), 应力强度因子 K_{II} 在取不同面层模量时与反射裂缝扩展长度之间的关系,从图3可以看出面层模量增大时, K_{II} 随之递增。图4表示面层模量一定时(取 $E_1=1200\text{MPa}$)应力强度因子 K_{II} 在不同面层厚度 h_1 中随反射裂缝扩展长度而变化,从图4可以看出 K_{II} 随面层厚度的增加而递减。因此对偏载作用下含反射裂缝的半刚性基层沥青路面,降低面层模量或增加面层厚度均可以有效降低裂尖处的 K_{II} ,从而抑制反射裂缝的扩展。

4 结论

本文建立了半刚性基层沥青路面反射裂缝裂尖处复合应力强度因子分析的弹性层状计算模型,并利用广义参数 W 单元直接求得了裂尖处的 SIF,避免了奇异单元法必须通过外推和拟合计算才能间接获得 SIF,并造成计算效率和计算精度都降低的缺陷。计算分析表明,裂尖奇异区 W 单元构造简单、灵活,计算精度高,应用于含反射裂缝的半刚性基层沥青路面结构分析时具有显著的优越性。

通过对反射裂缝扩展行为的模拟,计算并分析

了沥青面层中反射裂缝从形成直至接近穿透面层过程中 SIF 的变化规律。通过面层模量和厚度的变化对应力强度因子的影响分析可知,适当减小面层模量或增大面层厚度可以有效抑制反射裂缝的扩展,但减小面层模量会降低沥青路面结构的整体强度,易引起早期破坏,该结论符合工程实际。

参考文献:

- [1] 虞文锦. 半刚性基层沥青路面的裂缝成因分析及处理研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
Yu Wenjin. Analysis and treatment of cracked formation in asphalt pavement on semi-rigid base course [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [2] 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.
Zheng Jianlong, Zhang Qisen. Finite element analysis of reflection crack and stress intensity factor in semi-rigid pavement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 22-31. (in Chinese)
- [3] 周志刚. 交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
Zhou Zhigang. A research on the fatigue damage cracking in asphalt pavement under traffic load [D]. Changsha: Central South University, 2003. (in Chinese)
- [4] 元松, 李雪莲. 沥青面层反射裂缝荷载型应力强度因子回归分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(12): 76-79.
Yuan Song, Li Xuelian. Regression analysis of stress intensity factors of reflective cracks in asphalt pavement under traffic load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(12): 76-79. (in Chinese)
- [5] Dave E V, Buttlar W G. Thermal reflection cracking of asphalt concrete overlays [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2010, 11(6): 447-488.
- [6] Baek J, Al-Qadi I L. Finite element modeling of reflective cracking under moving vehicular loading: Investigation of the mechanism of reflective cracking in Hot-Mix asphalt overlays Reinforced with interlayer systems [C]// Edited by Roesler J R, Bahia H U, Al-Qadi I L, Murrell S D. Proceedings of the 2008 Airfield and Highway Pavements Conference. Bellevue, Washington, USA: ASCE, 2008: 74-85.
- [7] Ceylan H, Gopalakrishnan K, Lytton R L. Neural networks modeling of stress growth in asphalt overlays due to load and thermal effects during reflection cracking [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(3): 221-229.
- [8] Li Q S, Yang L F, Ou X D, et al. The quintic finite element with generalized degrees of freedom in structural analysis [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 5355-5372.
- [9] 杨绿峰, 徐华, 李冉, 彭隍. 广义参数有限元法计算应力强度因子[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 48-54.
Yang Lufeng, Xu Hua, Li Ran, Peng Li. The finite

- element with generalized coefficients for stress intensity factor [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(3): 48—54. (in Chinese)
- [10] Williams M L. Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension [J]. *Journal of Applied Mechanics*, ASME, 1952, 19: 526—528.
- [11] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 40.
Huang Yangxian. Pavement analysis and design [M]. Beijing: China Communications Press, 1998: 40. (in Chinese)
- [12] Miao Y, He T G, Yang Q, Zheng J J. 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.
- [13] Khodaii A, Fallah S, Nejad F M. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(1): 1—8.
- [14] 杨绿峰, 徐华, 汪梅兰. 应力强度因子分析的三角形 Williams 单元[J]. *应用力学学报*, 2011, 28(6): 570—575, 670.
Yang Lufeng, Xu Hua, Wang Meilan. Triangular Williams element for stress intensity factor [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2011, 28(6): 570—575, 670. (in Chinese)
- [15] 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, 2003: 7.
Zheng Jianlong, Zhou Zhigang, Zhang Qisen. Design theory and method for prevention of crack in asphalt pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 7. (in Chinese)

(上接第 235 页)

- [4] Wang J G, Liu G R. A point interpolation meshfree method based on radial basis functions [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2002, 54: 1623—1648.
- [5] Belytschko T, Lu Y Y, Gu L. Element free Galerkin methods [J]. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 1994, 37: 229—256.
- [6] Liu G R, Zhang G Y, Gu Y T, et al. A meshfree radial point interpolation method (RPIM) for three-dimensional solids [J]. *Computational Mechanics*, 2005, 36: 421—430.
- [7] Wang J G, Liu G R, Lin P. Numerical analysis of Biot's consolidation process by radial point interpolation method [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(6): 1557—1573.
- [8] Wu Y L, Liu G R. A meshfree formulation of local radial point interpolation method for incompressible flow simulation [J]. *Computational Mechanics*, 2003, 30: 355—365.
- [9] 张琰. 高土石坝张拉裂缝开展机理研究与数值模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
Zhang Yan. Mechanism study and numerical simulation of tensile crack propagation in high earth and rockfill dam [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [10] Belytschko T, Krongauz Y, Organ D, et al. Meshless methods: An overview and recent development [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 139: 3—47.
- [11] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 173—177.
Wang Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 173—177. (in Chinese)
- [12] 周艳国, 陈盛宏, 张雄, 傅少君. 改进的等参逆变换算法在耦合场分析中的应用[J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 3170—3173.
Zhou Yanguo, Chen Shenghong, Zhang Xiong, Fu Shaojun. Improved inverse isoparametric mapping method and its application to coupled analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2008, 29(11): 3170—3173. (in Chinese)
- [13] Rots J G. Computational modeling of concrete fracture [D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 1988.
- [14] 张美聪. 土石坝裂缝计算分析方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
Zhang Meicong. A study on analysis method for earth-rockfill dam cracking [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [15] 李全明. 高土石坝水力劈裂发生的物理机制研究及数值仿真[D]. 北京: 清华大学, 2007.
Li Quanming. Mechanism study and numerical simulation of hydraulic fracture in high earth and rockfill dam [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)