

半刚性路面反射裂缝及其应力强度因子的有限元分析

郑健龙 张起森

(长沙交通学院, 路桥系)

提 要

本文从断裂力学的观点出发, 对半刚性基层沥青路面的反射裂缝问题进行了研究; 并通过引入奇异单元, 计算了裂缝尖端的应力强度因子; 探讨了不同弹性模量的应力吸收膜对于反射裂缝的抑制作用。计算表明, 铅垂方向的剪应力是形成半刚性基层沥青路面反射裂缝的主要原因。在沥青面层和半刚性基层之间铺设应力吸收膜, 具有明显的止裂效果。且以低弹性模量、大变形率、不易产生低温脆化的材料最为适宜。

一、前 言

半刚性基层沥青路面由于具有强度高、工程造价低、整体性和水稳性好、使用寿命长等一系列的优点, 因而在国内外的现代城市道路和高等级公路中得到了广泛应用。但是, 这种路面结构也有其不足之处, 即半刚性材料对于温度和湿度的变化比较敏感。所以在其强度形成的过程中, 以及运营期间易于产生干缩裂缝和低温收缩裂缝。而且, 在交通载荷的重复作用下, 半刚性基层中的这种收缩裂缝很容易扩展到沥青面层而形成反射裂缝。其结果一方面破坏了路面的整体性和连续性, 影响了道路的使用品质; 更为严重的是裂缝的存在, 使得路表雨水有可能通过裂缝渗入土基, 大大地削弱了路基的强度和稳定性, 导致路面的早期破坏。针对这一问题, 国内外道路工程界进行了广泛的研究。结果表明, 在半刚性基层和沥青面层之间加铺一层粒料过渡层或是土工布、橡胶沥青一类弹性模量较低的应力吸收膜, 以吸收或缓冲裂缝尖端的应力集中, 对于抑制反射裂缝的产生和扩展具有一定的效果。但到目前为止, 在对反射裂缝形成的力学机理进行理论研究时, 大多没有引入断裂力学的有关概念, 而仅限于用普通线弹性力学的有限元方法对其应力分布规律进行分析^[1-5], 所以不能反映裂缝尖端应力的奇异性这一裂缝的本质特征, 而且, 对于裂缝的扩展规律也难于进行定量的描述。本文从断裂力学的基本原理出发, 通过在裂缝尖端引入应力奇异单元, 得出了半刚性基层开裂以后裂缝尖端的应力强度因子, 以及裂缝的扩展规律, 并通过比较应力强度因子的大小, 对不同弹性模量的应力吸收膜的抗裂性能进行了分析比较。为校核裂缝的稳定性, 预估裂缝的扩展方向, 以及合理地选择应力吸收膜材料提供了理论依据。

二、力 学 模 型

将铺有应力吸收膜的半刚性基层-沥青面层路面结构近似地看作为一平面应变问题的四层连续体系,即将应力吸收膜处理为一独立的结构层次,并且假定在半刚性基层中有一穿透裂缝。

为了讨论反射裂缝在交通荷载作用下的扩展规律,本文着重考虑了图1所示两种最不利的加载位置,且在分析过程中忽略了动荷效应和温度效应的影响。

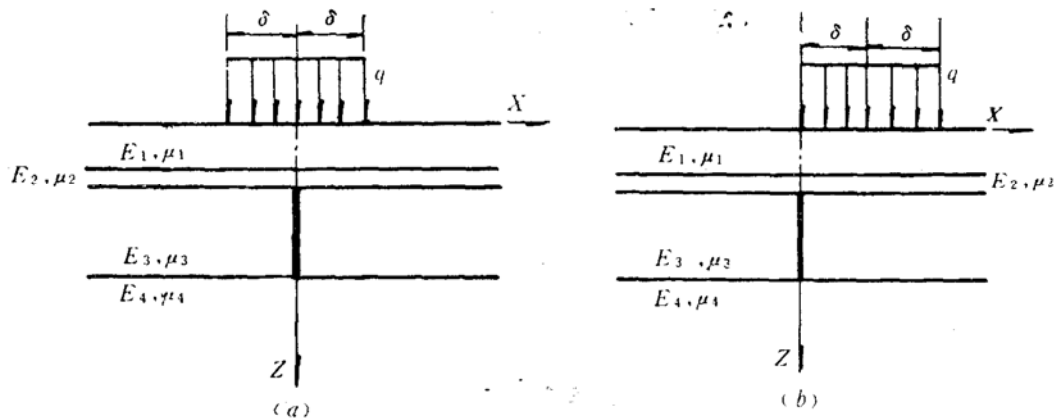


图1

显然,由对称与反对称原理可知,图1(b)所示问题可以进一步分解为图2所示两种基本问题的叠加,而图1(a)所示问题又和图2(a)完全一样,所以,我们只须求得图2(a)所示的对称问题和图2(b)所示的反对称问题,即可由叠加原理求得在图1所示两种最不利加载情况下的解。

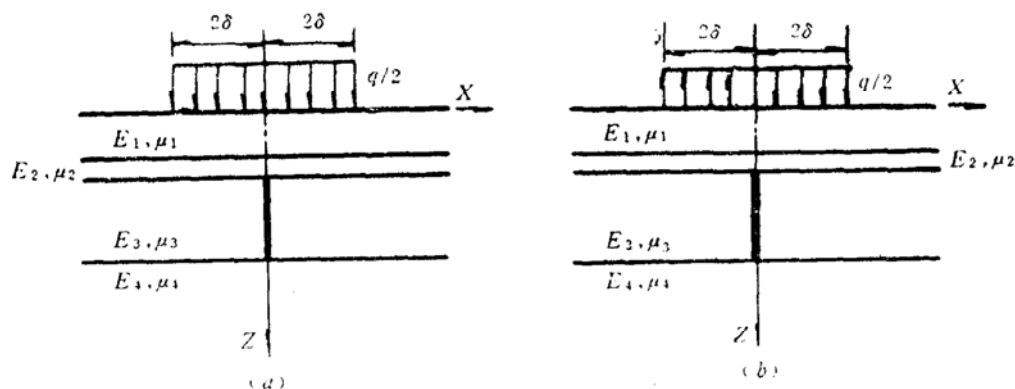


图2

由断裂力学可知^[6],图2(a)所示的问题为一张开型裂缝即I型裂缝问题;与此相应的裂缝尖端附近的应力场可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_z &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xz} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

图2(b)所示的问题为一剪切型裂缝即Ⅱ型裂缝问题; 与其相应的裂缝尖端附近的应力场可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_z &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\sin \frac{\theta}{2} \right) \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xz} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

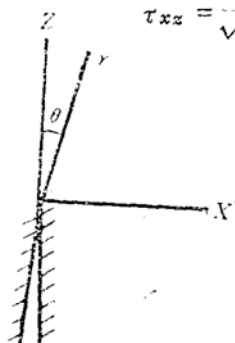


图3

式中 K_I 和 K_{II} 分别称为张开型应力强度因子和剪切型应力强度因子; r 和 θ 的定义则如图3所示。

由式(1)和式(2)不难看出, 在裂缝尖端($r=0$), 应力存在着 $r^{-1/2}$ 阶的奇异性, 而应力强度因子正是裂缝尖端应力奇异性程度的度量。

在式(1), 式(2)中令 $\theta=0$, $r=0$, 即可得应力强度因子的计算公式

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \lim_{r \rightarrow 0} \left(\sqrt{2\pi r} \sigma_x \right) \\ K_{II} &= \lim_{r \rightarrow 0} \left(\sqrt{2\pi r} \tau_{xz} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可见, 只要求得裂缝尖端附近的应力分布, 即可根据式(3), 用外推法^[6]得出相应的应力强度因子, 进而可对裂缝的稳定性进行校核, 并预估裂缝的扩展方向。

为此, 我们用有限元方法对图2所示的两种基本问题作了具体计算。计算过程中应用了八结点等参数矩形单元, 同时, 在裂缝两端分别布置了四个由八结点矩形单元退化而成的三角形六结点奇异单元^[7], 以保证裂缝尖端的应力具有 $r^{-1/2}$ 阶的奇异性。为了减少工作量, 节约内存和CPU时间, 我们利用了问题的对称性和反对称性条件, 仅就图2(a)中的对称轴和图2(b)中的反对称轴右边的一半做了计算。共用了73个单元, 260个结点, 自由度为457。计算机程序是用FORTRAN语言设计的。

为了检验计算程序的可靠性, 我们用该程序对一悬臂梁作了计算, 所得梁端位移为

3.913cm, 而文献[8]就同一问题解得的数值为3.91cm, 计算结果完全吻合。

三、数值结果与分析

我们参照试验路上的情况, 取材料和结构参数如下:

$$\delta = 15\text{cm}$$

$$E_2/E_1 = 0.02, \quad E_3/E_1 = 2 \quad E_4/E_1 = 0.02$$

$$H_1 = 8\text{cm}, \quad H_2 = 1\text{cm}, \quad H_3 = 25\text{cm}$$

$$\mu_1 = 0.25, \quad \mu_2 = 0.25 \quad \mu_3 = 0.25, \quad \mu_4 = 0.35$$

所得图1(a)所示相对于裂缝对称加载与图1(b)所示相对于裂缝非对称加载两种情况下的部分计算结果如表1, 表2所示。其中, 表1给出了沥青面层中和裂缝面共面的横截面上, 正应力 σ_x , 剪应力 τ_{xz} 随纵向坐标 Z 的变化以及相应的裂缝尖端的应力强度因子; 表2则给出了表面弯沉 w 随横向坐标 x 的变化。

表1 裂缝上端横截面上的应力($x=0$)

Z (cm)		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	8.75
对称加载	σ_x/q	-4.061	-2.919	-1.837	-0.911	-0.091	-0.520
	τ_{xz}/q	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$K_I/q(\text{cm}^{1/2})$	0.0					
	$K_{II}/q(\text{cm}^{1/2})$	0.0					
非对称加载	σ_x/q	-2.791	-2.190	-1.653	-1.167	-0.782	-0.364
	τ_{xz}/q	0.0	-0.573	-0.786	-0.622	-0.393	-0.609
	$K_I/q(\text{cm}^{1/2})$	0.0					
	$K_{II}/q(\text{cm}^{1/2})$	0.7155					

表2 表面弯沉值($Z=0$)

x (cm)		0.0	2.0	6.0	10.0	15.0	20.0	30.0	44.0	62.0	92.0
$E_1 w$	对称加载	96.60	96.49	95.63	93.96	90.75	87.16	80.96	73.23	63.25	47.20
$q\delta$	非对称加载	91.15	92.60	94.55	95.45	95.55	94.30	89.10	80.85	72.20	56.95

为了更为直观地反映过裂缝面的横截面上应力的变化规律以及弯沉盆的形状, 我们还进一步给出了与表1和表2的数值结果相应的分布曲线(如图4—图6所示)。

(一)对称载荷作用下裂缝尖端的应力分析

在这种情况下, 由于载荷相对于裂缝面对称, 所以, 裂缝尖端的剪应力为零, 即剪切型应力强度因子 K_{II} 为零。同时, 由表1可以看出, 裂缝尖端 x 方向的正应力为负, 即裂缝尖端没有垂直于裂缝面的张拉应力, 可见, 张开型应力强度因子 K_I 亦为零。由此证明, 对称载荷作用下, 半刚性基层中的穿透裂缝为闭合型裂缝。

之所以出现这种情况, 除了应力吸收膜的作用外, 半刚性基层的弹性模量和厚度都大于

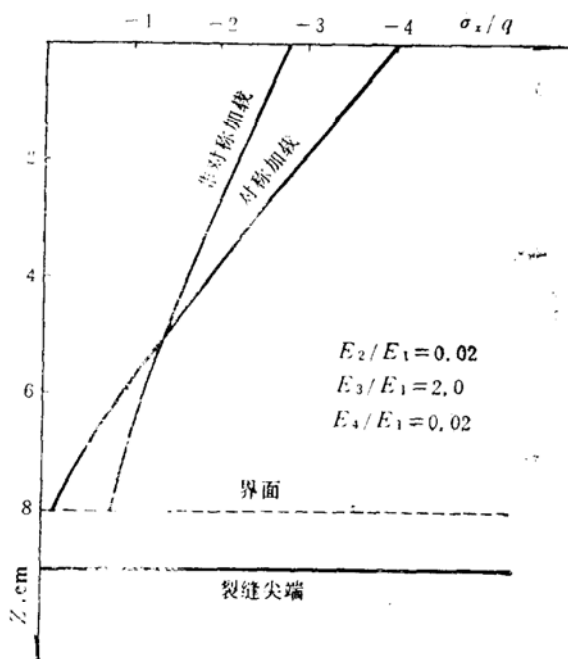


图 4

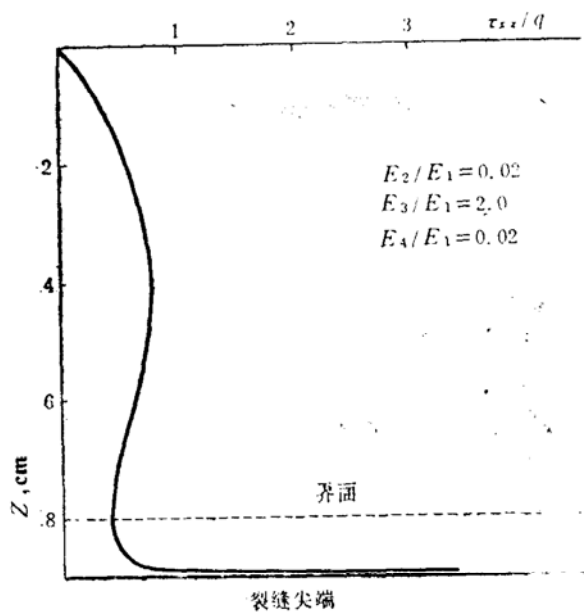


图 5

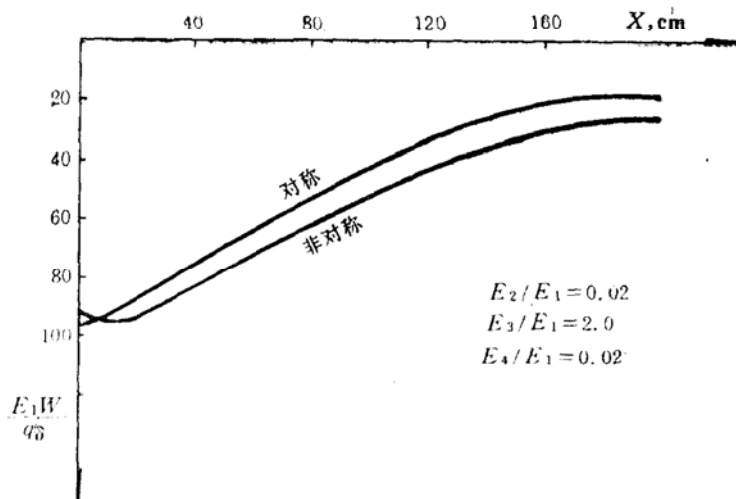


图 6

沥青面层是其主要原因。这是因为，当基层的刚度大于面层刚度时，基层的变形规律将在结构的整体变形中起主导作用，而开裂以后的半刚性基层近似于一弹性地基支承的半无限大板，所以，在靠近自由边界的外荷载作用下，其上表面必将产生拉伸变形，故在自由端引起裂缝面外法线方向的位移，最终导致裂缝上端闭合。

为了进一步说明这一点，我们在其它计算参数不变的情况下，分别就几种不同的基层模量作了进一步计算，所算得的裂缝上端横截面上正应力的数值结果如表 3 所示。

由表中的数值结果可以看出，随着基层模量的减小，在沥青面层中 $x=0$ 的横截面底部 ($Z=8\text{cm}$)，正应力 σ_x 将由负值逐渐变为正值。可见，提高基层模量，可在一定程度上起到抑制 I 型反射裂缝的作用。

表3 基层模量对裂缝尖端应力 σ_x 的影响

σ_x/q E_3/E_1 $Z(\text{cm})$	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	8.75
0.1	-6.307	-3.709	-1.315	1.122	3.729	-0.0810
0.3	-5.426	-3.450	-1.654	0.1584	2.084	-0.1864
0.5	-5.085	-3.361	-1.801	-0.2452	1.350	-0.2829
0.7	-4.860	-3.291	-1.876	-0.4804	0.8991	-0.3527
2.0	-4.064	-2.919	-1.887	-0.9114	-0.0914	-0.5197

(二)非对称载荷作用下裂缝尖端的应力分析

由表1和图4可以看出,在图1(b)所示非对称载荷作用下,裂缝尖端 x 方向的正应力为负,所以,张开型应力强度因子 K_I 亦为零,但剪应力 τ_{xz} 却具有明显的奇异性,因此,剪切型应力强度因子 K_{II} 不为零。根据所解得的裂缝尖端附近剪应力的分布规律,用外推法所求得的剪切型应力强度因子如表1所列。

由于作用于路面的实际荷载为运动荷载,总会经历上述非对称加载过程,可见,导致半刚性基层中的裂缝向沥青面层反射的主要原因是裂缝尖端剪应力的奇异性。

(三)反射裂缝的稳定性及其扩展方向

由断裂力学中裂缝失稳扩展的判别准则可知,当剪切型应力强度因子 K_{II} 大于沥青混合料抵抗剪切型裂缝扩展的断裂韧性 K_{Ic} 时,半刚性基层中的裂缝就会产生失稳扩展而形成反射裂缝。但由于用试验确定材料的 K_{Ic} 比较困难,所以,须将 K_{II} 转化为混合型应力强度因子 K^* 后按复合型断裂判据判定。

按照最大周向应力断裂判据,裂缝产生失稳扩展的判定条件为

$$K^* = \cos \frac{\theta^*}{2} \left[K_{II} \cos^2 \frac{\theta^*}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta^* \right] \geq K_{Ic} \quad (4)$$

式中 θ^* 即为裂缝的扩展方向,由下列方程解得

$$K_{II} \sin \theta^* + K_{II} (3 \cos \theta^* - 1) = 0 \quad (5)$$

在纯剪切情况下, $K_I = 0$, 故由式(4)和式(5)可得

$$\theta^* \approx 70^\circ, \quad K^* \approx 1.15 K_{II} \quad (6)$$

根据有关的试验资料,沥青混合料的断裂韧性 K_{Ic} 一般为 $0.5 \sim 0.8 \text{ kN}/(\text{cm})^{3/2}$, 取 $q = 0.07 \text{ kPa}$, 得本文算例的复合型应力强度因子 $K^* = 0.05 \text{ kN}/(\text{cm})^{3/2}$, 该值大大地小于沥青混合料的断裂韧性。可见,当仅考虑交通载荷的作用时,半刚性基层中的穿透裂缝一般不会出现失稳扩展,但由于载荷的重复作用,有可能因裂缝的疲劳扩展而形成反射裂缝,裂缝的扩展方向与裂缝面之间的夹角约为 20° 左右。

四、应力吸收膜的止裂作用

大量的试验资料表明,在半刚性基层和沥青面层之间加铺一层应力吸收膜,对于抑制反射裂缝具有一定效果。为此,我们从断裂力学的基本原理出发,以应力强度因子的大小为依据,对于弹性模量不同的应力吸收膜的止裂效果,从理论上进行了分析比较。

(一)应力吸收膜对于张开型反射裂缝的止裂作用

由表3可以看出,对于基层模量大于面层模量的半刚性路面而言,由于裂缝尖端受到压应力作用,所以一般不会形成张开型反射裂缝;但当基层模量小于面层模量时,一般都会在面层底部产生一拉应力区,不过,由于应力吸收膜的作用,在裂缝尖端附近,仍可维持一范围较小的压应力区,从而保证了裂缝尖端的张开型应力强度因子为零。

为了说明这一点,我们在其它参数不变的情况下令: $E_2/E_1 = 1$, $E_3/E_1 = 0.1$,即假设基层和面层之间没有应力吸收膜,然后就图1(a)所示加载情况进行计算,其结果如表4所示。为了便于比较,表中同时给出了有应力吸收膜情况下的计算结果($E_2/E_1 = 0.02$, $E_3/E_1 = 0.1$)

表4 应力吸收膜对于张开型反射裂缝的影响

Z (cm)		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	8.75
σ_x/q	$E_2/E_1 = 1.0$	-6.090	-3.810	-1.764	0.3072	2.649	2.315
	$E_2/E_1 = 0.02$	-6.307	-3.709	-1.315	1.122	3.729	-0.0809
K_I/q ($\text{cm}^{1/2}$)	$E_2/E_1 = 1.0$	2.453					
	$E_2/E_1 = 0.02$	0.0					

由表中的数据可以看出,没有应力吸收膜时,裂缝尖端 x 方向的正应力 σ_x 具有奇异性,相应的I型裂缝应力强度因子不为零,而在有应力吸收膜的情况下,应力强度因子为零。可见,应力吸收膜可完全避免张开型反射裂缝。

(二)应力吸收膜对于剪切型反射裂缝的止裂作用

为了分析应力吸收膜对于剪切型反射裂缝的止裂作用,我们在图1(b)所示非对称加载情况下,保持其它参数不变,仅改变应力吸收膜的弹性模量,所得裂缝上端横截面上的剪应力如表5所示。为便于比较,表中同时给出了没有设置应力吸收膜时的计算结果(相应于 $E_2/E_1 = 1.0$ 的情况)。表6则为根据表5的数值结果用外推法求得的剪切型应力强度因子。为了更为直观地反映它们的变化规律,我们在图7和图8中进一步给出了 τ_{xz} 和 K_{II} 的分布曲线。

由表5,表6和图7,图8可以看出,铺了应力吸收膜以后,裂缝尖端附近剪应力的奇异性可明显减弱,相应的剪切型应力强度因子也大为减小。可见,应力吸收膜对于半刚性基层沥青路面中的剪切型反射裂缝亦具有明显的抑制作用,而且,应力吸收膜的弹性模量越低,其止裂效果越好。

表5 应力吸收膜的弹性模量对裂缝面上端横截面上剪应力 τ_{xz} 的影响

$Z(\text{cm})$ τ_{xz}/q E_2/E_1	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	8.75
0.02	0.0	-0.5730	-0.7862	-0.6229	-0.3980	-0.6090
0.04	0.0	-0.5730	-0.8015	-0.6450	-0.5810	-0.9845
0.06	0.0	-0.5750	-0.8137	-0.7935	-0.7132	-1.279
0.08	0.0	-0.5750	-0.8197	-0.8450	-0.8165	-1.524
0.1	0.0	-0.5740	-0.8215	-0.8835	-0.9010	-1.735
1.0	0.0	-0.5130	-0.7112	-1.056	-1.768	-4.630

表6 应力吸收膜的弹性模量对应力强度因子 K_I 的影响

E_2/E_1	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	1.0
$K_I/q(\text{cm}^{1/2})$	0.7155	1.159	1.541	1.861	2.137	3.975

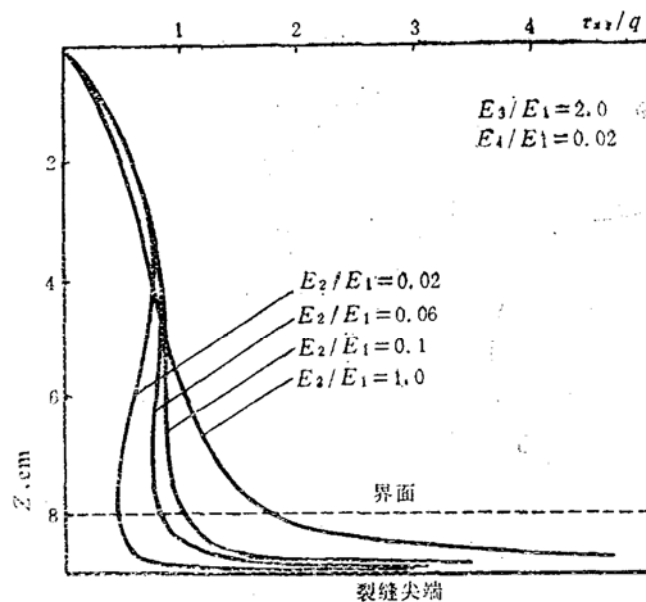


图7

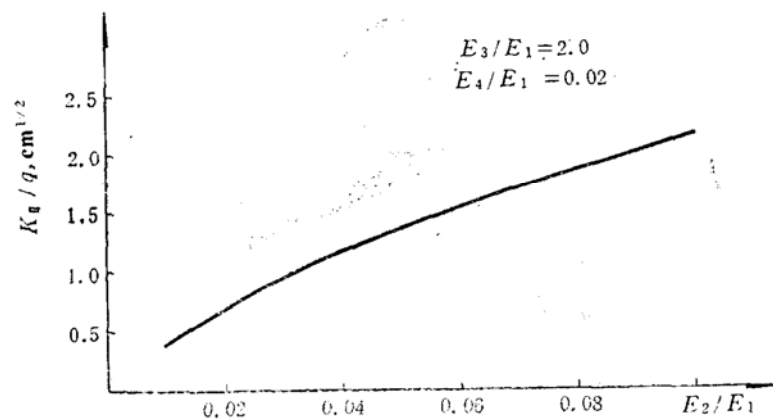


图8

五、结 论

根据以上分析,我们可得如下结论:

1. 半刚性基层开裂以后,一般不会因交通载荷的作用而导致裂缝的失稳扩展。但在载荷的重复作用下,裂缝有可能产生稳定的疲劳扩展并在沥青面层中形成反射裂缝。

2. 在基层刚度大于面层刚度的情况下,半刚性基层中的穿透裂缝为剪切型的(张开型应力强度因子为零),即裂缝产生稳定的疲劳扩展并形成反射裂缝的直接原因是裂缝尖端剪应力的奇异性。

3. 如果层间界面具有足够的粘结强度,则裂缝的扩展方向与层间界面之间的夹角约为 20° 左右。但实际上由于界面的粘结强度较低,所以,裂缝沿界面扩展的可能性更大。其结果,将因裂缝顶端附近的界面脱胶而造成基层和面层之间小范围内的脱空,导致裂缝顶端附近的沥青面层形成局部区间的拉应力集中,并由此引起面层底部的强度破坏,形成垂直向上扩展的反射裂缝。

4. 在半刚性基层和沥青面层之间加铺一层弹性模量较低,变形率较大的应力吸收膜,可有效地吸收和缓冲裂缝尖端剪应力的奇异性,具有较好的止裂效果。

5. 在旧路补强或是在旧水泥混凝土路面上加铺沥青面层时,基层的裂缝往往都是具有一定宽度的缝隙。在这种情况下,由于裂缝没有尖端,所以不存在所谓的裂缝尖端应力的奇异性问题,因此不能应用本文所提出的断裂力学的理论和方法进行研究,而应采用普通弹性力学的有限元方法进行分析。

参 考 文 献

- [1] Monismith, C. L., Coetzee, N. F., Reflection Cracking: Analyses, Laboratory Studies, and Design Considerations, 1980, 49 pp.268—313
- [2] Chen Nan Jim, Divito, J.A., Morris, G.R., Finite Element Analysis of Arizona's Threelayer Overlay System of Rigid Pavements to Prevent Reflective Cracking, AAPT, 1982, 51, pp.150—168.
- [3] Rooker, T. B., Foulkes, M.D., Kennedy, K.C., Influence of Mix Design on Reflection Cracking Growth Rates Through, Sixth International Conference Structural Design of Asphalt Pavements. 1987, pp.935—945.
- [4] 倪明,姚祖康,旧水泥混凝土路面上沥青加铺层的应力分析,同济大学学报, 1989, 1, pp.33—42
- [5] 张起森,半刚性基层沥青面层断裂应力分析及反射裂缝研究综述,国外公路, 6, 1987, pp.40—46.
- [6] 李灏,陈树坚,断裂理论基础,四川人民出版社, 1983年。
- [7] Barsoum, R.S., Triangular Quarter Point Elements as Elastic and Perfectly-Plastic Crack Tip Elements, Int.J. Num. Meth. Eng., 1977, 11, pp.85—98.
- [8] 沈蒲生,结构分析的计算机方法,湖南科学技术出版社, 1985, pp.413—417.

Finite Elements Analysis of Reflection Crack and Stress Intensity Factors in Half Rigid Pavements

Zheng Jianlong Zhang Qisen

(Changsha Communications College)

Abstract

On the basis of fracture mechanics, the problem of reflection crack in half rigid pavements is studied in this paper by use of isoparametric finite elements method. And by introducing singular elements, Stress intensity factors at crack tip are calculated. The function of stresses absorbing membrane to prevent reflection crack from growing is investigated. Numerical results show that the shear stress is the main cause of producing reflection crack in half rigid pavements. Laying a stresses absorbing membrane between surface layer and basic layer can prevent reflection crack from developing to a certain extent. Moreover, the material with properties of small Young's modulus, large permissible strain and non-brittleness under low temperature is most suitable for the stresses absorbing membrane.