

# AC + CRC 复合式路面反射裂缝的有限元分析

曾梦澜<sup>1</sup>, 吴正新<sup>1</sup>, 钟梦武<sup>2</sup>, 罗迪<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

**摘要:** 为给复合式路面的使用寿命预估提供参考, 采用有限元软件建立了带裂缝的沥青混凝土罩面连续配筋水泥混凝土(AC + CRC)复合式路面结构应力分析模型, 对在正载和偏载作用下沥青面层正应力和剪应力分布进行了分析. 计算了沥青层荷载型反射裂缝应力强度因子, 分析出结构层厚度、模量、配筋率、层间结合状态对AC层反射裂缝扩展的影响. 分析结果表明, 增加AC层厚度及底基层模量、提高CRC层配筋率、改善层间结合状态等均能较好地抑制复合式路面反射裂缝的发展, 而CRC层厚度及模量、AC层模量对复合式路面反射裂缝的发展基本没有影响. 研究结果可为AC + CRC复合式路面结构设计提供一定的理论依据.

**关键词:** 复合式路面; 有限元; 断裂力学; 反射裂缝; 应力强度因子

中图分类号: U 461. 217

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2013) 10 - 1516 - 05

## Finite Element Analysis of Reflection Crack in AC + CRC Composite Pavement

ZENG Meng-lan<sup>1</sup>, WU Zheng-xin<sup>1</sup>, ZHONG Meng-wu<sup>2</sup>, LUO Di<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

**Abstract:** In order to provide input for estimate the service life of the composite pavement, the authors established the stress analysis model for the continuously reinforced concrete with asphalt concrete overlay (AC + CRC) composite pavement with initial cracking by using the finite element software, and analyzed the corresponding normal stress and shear stress under symmetry and eccentric loading. The stress intensity factors for reflection cracking in the AC layer were quantified with varying structure thickness, modulus, steel ratio and AC-CRC inter-layer conditions. Results of the analysis indicate that increasing thickness of AC layer, modulus of subbase, steel ratio, and inter-layer bonding can delay the propagation of the reflection cracking. However, the modulus and thickness of CRC layer, and modulus of AC layer have little effects on the cracking propagation. These results could provide a theoretical basis for designing AC + CRC composite pavement.

**Key words:** composite pavement; finite element; fracture mechanics; reflection crack; stress intensity factors

## 0 引言

连续配筋混凝土(continuously reinforced concrete, CRC)复合式沥青路面结构是我国目前重

载交通和气候环境下一种重要的长寿路面结构形式<sup>[1]</sup>. 沥青混凝土(asphalt concrete, AC)作为表面层,既能改善CRC层的工作环境又能在很大程度上提高行车舒适性, CRC板作为刚性基础,强度高

收稿日期: 2013-01-14.

基金项目: 交通部西部科技项目资助(2009318785104).

作者简介: 曾梦澜(1954—),男,教授,主要从事道路建筑材料、路面结构分析与设计等方面的研究, E-mail: menglanzeng@hnu.edu.cn.

并且耐久性好,在承受重载交通方面具有较大优势.因此,针对目前国内超载严重,沥青资源不足而水泥资源丰富的现状,结合具体工程,研究这种新型的复合式路面具有很好的经济效益和社会效益.

经验表明,适当增大 AC 加铺层的厚度,能延长裂缝从 AC 层底部扩展至道路表面的距离,从而延长复合式路面的使用寿命.同时由于沥青混合料较低的导热性能,它能吸收大量的太阳辐射能,从而降低 CRC 板内温度梯度.从受力的角度考虑,较厚的沥青层也能增加复合式路面结构的弯曲刚度,从而在一定程度上减少弯曲应力.我国公路水泥混凝土路面设计规范规定,对于高速公路和一级公路,AC 加铺层厚度需按照延缓反射裂缝的要求设计,最小厚度宜为 8 cm.

由于 CRC 板本身固有的材料特性,板内必然存在横向裂缝.在 CRC 板顶部、AC 层底部容易形成薄弱带,在荷载及温度应力作用下产生反射裂缝,加速路面结构的破坏.这些裂缝严重破坏了复合式路面整体性、降低承载能力、影响路用性能,导致雨水等通过裂缝渗入基层,产生错台、脱空、冲蚀等不良现象,严重减少沥青路面的使用年限.虽然当前不少学者对于 CRC 路面进行了大量的研究,提出了很多富有价值的设计理论,但对于 AC + CRC,特别是 CRC 层带缝工作下的力学研究却不是很多.

本文引入断裂力学基本原理<sup>[2-5]</sup>,并借鉴国内外现有的研究成果,采用经典的有限元软件 ABAQUS 建立带裂缝的复合式路面结构力学响应模型<sup>[6-11]</sup>,计算出不同的层间结合状态下的沥青层反射裂缝尖端应力强度因子,对复合式路面结构设计具有较好的参考价值及现实意义.

## 1 AC + CRC 复合式路面分析模型

### 1.1 相关理论基础

根据断裂力学相关观点,带缝工作的复合式路面在荷载作用下,裂缝处的变形分为 3 种类型:张开型裂缝(表现为正应力方向与裂缝扩展方向垂直,亦称 I 型),剪切型裂缝(表现为剪应力方向与裂缝方向垂直,亦称 II 型)以及撕开型裂缝(表现为剪应力方向与裂缝方向平行,亦称 III 型),如图 1 所示.

通常情况下,将应力强度因子与应力的关系定义为

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y (r, \rho) \quad (1)$$

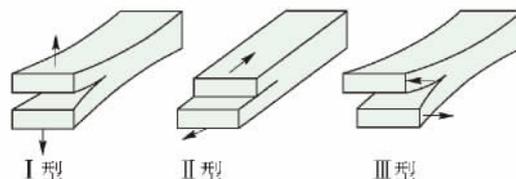


图 1 裂缝扩展模式

Fig. 1 Cracking expanding mode

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy} (r, \rho) \quad (2)$$

$$K_3 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{yz} (r, \rho) \quad (3)$$

式中:  $K_1$  表示张开型应力强度因子;  $K_2$  表示剪切型应力强度因子;  $K_3$  表示撕开型应力强度因子;  $r$  为裂缝尖端处某点的极径;  $\sigma_y$  为该点的正应力;  $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$  为该点的剪应力.

根据以上各式应用外推法,可得到该处的应力强度因子.由最大周向拉应力判断依据,即可判断该处裂缝是否失稳.

$$K^* = \cos \frac{\theta^*}{2} \left[ K_1 \cos^2 \frac{\theta^*}{2} - \frac{3}{2} K_2 \sin \theta^* \right] \geq K_{IC} \quad (4)$$

式中:  $K^*$  为裂缝的扩展角;  $K_{IC}$  为沥青混合料断裂韧性.

### 1.2 计算参数的选取

针对国内的典型复合式路面结构,引入断裂力学基本原理,设置能较好反映裂缝尖端应力场的奇异性奇异的单元来模拟沥青层.对于 CRC 板则认为其中混凝土为各向同性的均质材料,而配筋部分将钢筋连续化处理,并等效为各向异性的薄层,主要计算参数<sup>[12-13]</sup>如表 1 所示.其中 CRC 板配筋率设为 0.7%.在分析某结构参数对应应力强度因子的影响时,保持其他参数不变.这里各结构参数的变化范围为:AC 层模量 1.2 ~ 2 GPa,厚度 5 ~ 13 cm; CRC 板模量 24 ~ 32 GPa,厚度 19 ~ 27 cm;底基层模量 0.4 ~ 1.2 GPa;夹层模量 20 ~ 120 MPa;配筋率 0.2% ~ 1.8%.假定 CRC 中有一穿透的裂缝,并且扩展至 AC 层内部 0.6 cm.

表 1 路面结构参数

Table 1 Parameters of pavement structure

结构层	厚度/cm	E/MPa	$\mu$
AC 层(面层)	6	1 500	0.25
CRC 层(基层)	22	30 000	0.15
二灰土(底基层)	20	800	0.3
土基		40	0.35

### 1.3 典型加载模式下应力计算

借助于有限元软件 ABAQUS, 主要讨论正载(对应于张开型裂缝)以及偏载(对应于剪切型裂缝)2种不利的荷载位置下 AC + CRC 复合式路面 AC 层应力强度因子, 用于指导复合式路面抗裂设计工程实际。

在正载及偏载<sup>[14]</sup>2种加载情况下, 该路面结构的应力计算结果如表2所示。可以看到, 对于正载作用, 该荷载作用关于裂缝面对称, 在裂缝尖端端正应力小于0, 即该处主要受压, 由此可见, 对于正载作用, 张开型应力强度因子  $K_1$  等于0; 同时该处剪切应力等于0, 可知剪切型应力强度因子  $K_2$  亦等于0。

对于偏载作用, 由表2可知, 在裂缝尖端端正应力为负数, 即 AC 层中张开型应力强度因子  $K_1$  等于0, 而剪应力具有较大的奇异性。故作者着重讨论在偏载作用下, 针对不同的结构层参数, 计算并分析出其对复合式路面结构裂缝尖端应力强度因子的影响规律。

表2 裂缝尖端处的应力计算

Table 2 Shear stress and normal stress at crack up

$z/cm$	$\sigma_x$ (正载)	$\tau_{xz}$ (正载)	$\sigma_x$ (偏载)	$\tau_{xz}$ (偏载)
0	-2.624	0	-1.844	0
2	-1.832	0	-1.327	-0.424
4	-1.225	0	-1.022	-0.690
5	-0.821	0	-0.695	-0.513
5.2	-0.402	0	-0.224	-0.594

## 2 计算结果分析

### 2.1 AC层厚度对应应力强度因子 $K_2$ 的影响

由图2可知, 当 AC 层厚度从6 cm 增大到10 cm 时,  $K_2$  由  $0.17 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  减小到  $0.15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 减幅为12.1%。随着 AC 层厚度的增大, 相应的应力强度因子  $K_2$  呈不断减少的趋势。由此可见, 为减缓复合式路面反射裂缝的发展, 增加表面 AC 层厚度是

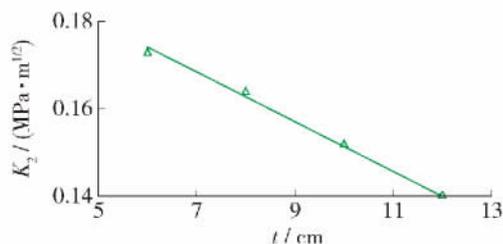


图2 沥青层厚度与  $K_2$  的关系

Fig. 2 Relation between thickness of AC layer and  $K_2$

一种较好的抗裂设计措施, 能减少应力强度因子  $K_2$ , 提高复合式路面服务寿命。

### 2.2 AC层模量对应应力强度因子 $K_2$ 的影响

沥青混合料是一种对温度比较敏感的材料, 其不同温度下模量变化较大, 根据《JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范》<sup>[15]</sup>, 通常取  $20^\circ\text{C}$  时的模量作为设计值, 对应的沥青混合料模量为  $1.2 \sim 1.6 \text{ GPa}$ , 考虑到防止反射裂缝的要求, 拟定其模量为  $1.2 \sim 2 \text{ GPa}$ , 进而在该基础上分析出 AC 层模量变化对反射裂缝应力强度因子的影响。为简化, 本文不考虑荷载作用时间以及泊松比的变化。

由图3可知, 随着 AC 层模量的增加, AC 层底部的反射裂缝应力强度因子会有小幅度的增加, AC 层模量从  $1.3 \text{ GPa}$  增加到  $1.7 \text{ GPa}$  时, 相应的  $K_2$  增大了4%。由此可见, 降低沥青层模量有利于降低裂缝发展的可能性, 尽管效果不是很显著。

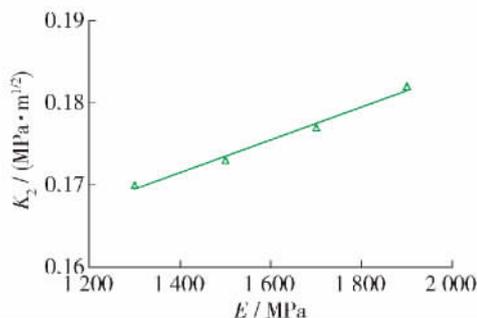


图3 沥青层模量与  $K_2$  的关系

Fig. 3 Relation between modulus of AC layer and  $K_2$

### 2.3 CRC板模量对应应力强度因子 $K_2$ 的影响

保持其他参数不变, 通过调整 CRC 板的厚度及模量, 求出在偏载作用下反射裂缝尖端处的应力强度因子  $K_2$ , 计算结果见图4、5所示。由图可知, CRC 板的厚度及模量对 AC 层底部应力强度因子  $K_2$  的发展影响较小。

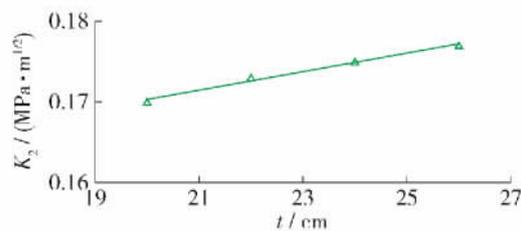


图4 CRC板厚度与  $K_2$  的关系

Fig. 4 Relation between thickness of CRC layer and  $K_2$

### 2.4 底基层模量对应应力强度因子 $K_2$ 的影响

保持面层厚度、模量以及 CRC 板厚度、模量不

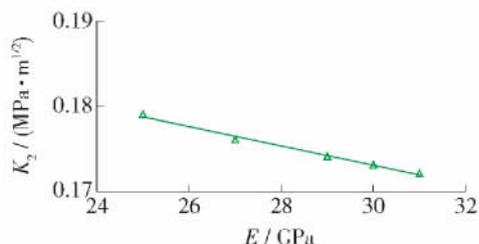


图 5 CRC 板模量与  $K_2$  的关系

Fig. 5 Relation between modulus of CRC layer and  $K_2$

变, 调整底基层模量, 得出不同强度下 AC 层底部的反射裂缝应力强度因子. 由图 6 可以看出, 随着基层模量的增加, 反射裂缝应力强度因子  $K_2$  有较大幅度的减少. 这是因为在偏载作用下, 如果底基层模量较大, 裂缝两侧的相对位移就较小, 在一定程度上能抑制反射裂缝的发展.

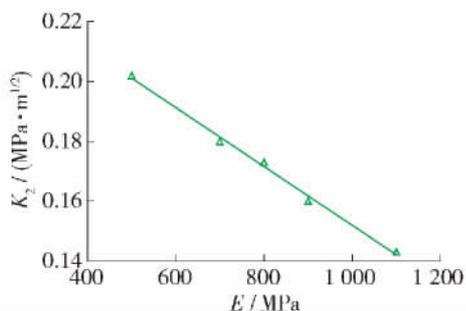


图 6 底基层模量与  $K_2$  的关系

Fig. 6 Relation between modulus of subbase and  $K_2$

### 2.5 应力吸收夹层对应力强度因子 $K_2$ 的影响

为了防止反射裂缝的发展, 通常在 AC 层和 CRC 层间加铺应力吸收夹层, 从而能较好地吸收 CRC 板因相对位移而产生的拉应力及剪应力, 减缓反射裂缝的发展、提高复合路面的路用性能以及使用寿命. 作者在 AC 层与 CRC 板之间设置了应力吸收夹层, 厚度为 1 cm, 通过调整该层模量求得反射裂缝应力强度因子  $K_2$  的值, 图 7 为相关的计算结果.

由图 7 可知, 在 AC 层与 CRC 层间加铺应力吸

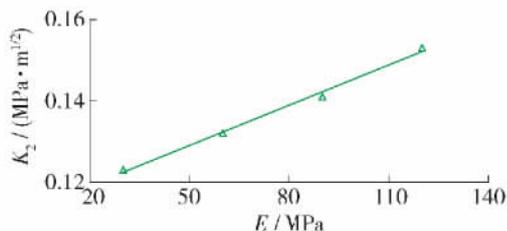


图 7 夹层模量与  $K_2$  的关系

Fig. 7 Relation between modulus of interlayer and  $K_2$

收夹层后  $K_2$  值大大减少. 在一定范围内, 随着该层模量的减少,  $K_2$  值随之减少, 故为了减缓复合式路面反射裂缝的发展, 建议选用模量较低的夹层材料.

### 2.6 CRC 层配筋率对 AC 应力强度因子 $K_2$ 的影响

保持其他结构层参数不变, 分别计算在不同的 CRC 层配筋率  $\rho$  下 AC 层反射裂缝应力强度因子  $K_2$ , 计算结果如图 8 所示. 可以看到, 在一定范围内增大配筋有效率能减小  $K_2$  值, 而继续增大配筋率,  $K_2$  基本不变. 由此可见, 在 AC + CRC 复合式路面中存在一最佳的配筋率, 既能有效地抑制反射裂缝的发展, 又能降低材料成本.

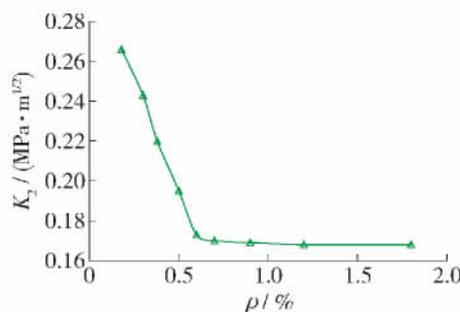


图 8 CRC 板配筋率与  $K_2$  的关系

Fig. 8 Relation between steel ratio of CRC layer and  $K_2$

## 3 结论

1) AC + CRC 复合式路面应力分析计算结果表明, 偏载作用下, 剪切型应力强度因子  $K_2$  是 AC 层反射裂缝发展的主要原因.

2) CRC 层模量、厚度对 AC 层反射裂缝的发展影响较小. 采用低模量的沥青层有利于减少开裂的可能性, 不过效果有限.

3) 提高 AC 层厚度及基层模量, 采用较低模量的夹层能有效的降低  $K_2$ , 能对反射裂缝的发展起到较好延缓作用. 合理的配筋率在一定程度上也能缓解反射裂缝的发展, 可结合经济成本综合考虑.

### 参考文献:

[1] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计原理与施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 4-150.  
 [2] 沈成康. 断裂力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 6-100.  
 [3] 黄仰贤. 路面分析与设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.  
 [4] 车法, 陈拴发, 李增宏, 等. 荷载作用下沥青路面表面开裂的扩展 [J]. 公路交通科技, 2010, 27(5): 26-29.  
 CHE Fa, CHEN Shuan-fa, LI Zeng-hong, et al. Analysis

- of cracks propagation on asphalt pavement surface under load [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(5): 26-29. (in Chinese)
- [5] VERHOEVEN K. Cracking and corrosion in continuously reinforced pavements [C] // fifth international conference on concrete pavement design and rehabilitation. West Lafayette, Indiana, USA: Purdue University, 1993.
- [6] 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*, 2007, 25(12): 76-79.  
YUAN Song, LI Xue-lian. Regression analysis of stress intensity factors of reflective crack in asphalt pavement under traffic load [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 25(12): 76-79. (in Chinese)
- [7] 周富杰. 防治反射裂缝的措施及其分析 [D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 1998.  
ZHOU Fu-jie. Study on methods of retarding reflective cracking [D]. Shanghai: Traffic and Transportation Engineering College, Tongji University, 1998. (in Chinese)
- [8] NISHIZAWA T, MATSUNO S. A mechanical model for the rational design of CRCP [C] // Third international conference on concrete pavement design and rehabilitation. West Lafayette Indiana, USA: Purdue University, 1985: 341-350.
- [9] 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): 22-30.  
ZHENG Jian-long, ZHANG Qi-sen. The finite element analysis of reflecting crack in semi-frigid pavement and its stress intensity factor [J]. *Journal of Rock and Soil Engineering*, 1990, 12(3): 22-30. (in Chinese)
- [10] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2002: 15-200.
- [11] HIBBITTE D, KARLSSON B, SORERSON P. ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.11 [M]. Rhode Island, USA: Hks Inc, 2005.
- [12] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 5-150.
- [13] 倪富健, 卢杨, 顾兴宇, 等. 沥青混凝土与连续配筋混凝土复合式路面承载力分析 [J]. *交通运输工程报*, 2007, 7(1): 43-48.  
NI Fu-jian, LU Yang, GU Xing-yu, et al. Carrying capacity analysis of asphalt concrete and continuously reinforced concrete composite pavement [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(1): 43-48. (in Chinese)
- [14] 郑建龙, 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: 53-60.
- [15] 中交公路规划设计院. JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
(责任编辑 郑筱梅)