

# 基于层间接触含 AR-SAMI 复合路面的力学响应分析

孙雅珍<sup>1</sup>, 范东<sup>1</sup>, 郭学南<sup>1</sup>, 武一<sup>2</sup>, 侯艳妮<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国建筑公司第八工程局天津公司, 天津 300450)

**摘要** 目的 通过设置库伦摩擦接触和粘聚接触建立含橡胶沥青应力吸收层(AR-SAMI)复合路面的有限元模型, 对其进行非线性力学响应分析. 方法 通过对 AR-SAMI 进行界面拉伸实验得出材料的抗拉强度及变形, 为 ABAQUS 道路模型的建立提供合理的参数, 验证了考虑非线性接触的必要性. 然后, 利用非线性力学响应分析裂缝长度对应力强度因子的影响以及 AR-SAMI 的合理厚度、模量进行了设计. 结果 铺设 AR-SAMI 后应力强度因子下降 47%, 面层底部拉应力下降了 17%~35%, AR-SAMI 的模量和厚度建议设成 600 MPa 和 2.5 cm. 结论 铺设 AR-SAMI 能很好地延缓反射裂缝的发生, 并且在很大程度上提升路面结构整体性能, 使路面使用时间得以延长.

**关键词** 层间接触; 界面拉伸试验; AR-SAMI; 复合路面; 力学响应

中图分类号 TU997

文献标志码 A

## Study on the Anti-cracking Performance of Rubber Asphalt Stress Absorbing Layer Considering Interlayer Contact

SUN Yazhen<sup>1</sup>, FAN Dong<sup>1</sup>, GUO Xuenan<sup>1</sup>, WU Yi<sup>2</sup>, HOU Yanni<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Tianjin Corporation of China Construction Company Eighth Engineering Bureau, Tianjin, China, 300450)

**Abstract:** To establish a finite element model of rubber-asphalt stress absorbing layer(AR-SAMI) composite pavement for nonlinear mechanical response analysis by setting Coulomb friction contact and cohesive contact. The tensile strength and deformation of AR-SAMI are obtained by interfacial tensile test, which provides reasonable parameters for the establishment of ABAQUS road model. The necessity of considering nonlinear contact is verified. The influence of crack length on the stress intensity factor and the reasonable thickness and modulus of AR-SAMI are analyzed by using nonlinear mechanical response. After laying AR-SAMI, the stress intensity factor decreased by

收稿日期:2017-05-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51478276);辽宁省自然科学基金项目(20170540770);沈阳市科技计划项目(17-231-1-26)

作者简介:孙雅珍(1970—),女,教授,博士,主要从事路面损伤方面研究.

47% , and the tensile stress at the bottom of the surface layer decreased by 17% to 35% . The modulus and thickness of AR-SAMI are set to 600 MPa and 2. 5 cm. Laying AR-SAMI can delay the occurrence of reflective cracks and improve the overall performance of pavement structure to a great extent , so that the pavement service time can be prolonged.

**Key words:** interlayer contact; interfacial tensile test; AR-SAMI; composite pavement; mechanical response

近年来,我国公路建设高速发展,总里程数也随之高速增长. 虽然我国在道路建设的发展上获得了显著成果,但是在质量上与发达国家仍存在一定的差距<sup>[1]</sup>. 早在 20 世纪 70 年代,国外已经利用橡胶沥青应力吸收层 (AR - SAMI) 来防治反射裂缝<sup>[2]</sup>. 研究表明,旧水泥混凝土极易出现干缩和温缩裂缝,最终将导致面层产生反射裂缝,继而使路面的整体结构强度降低且使用时间显著减少<sup>[3]</sup>. 反射裂缝加快道路损坏,很大程度上影响其使用性能,成为困扰我国道路建设和养护的主要问题. 目前针对这一问题最常用的处理技术就是在水泥混凝土基层和面层中间铺设一层吸收层,达到抑制和减速反射裂缝发生的作用,进而提高路面整体的结构强度和机能,增加路面整体的有效工作时间<sup>[4-5]</sup>. AR - SAMI 是以橡胶沥青为粘结性材料的低模量夹层,具有吸收性能好、施工效率高等特点,能够有效平衡裂缝尖端部位由于应力集中而产生的应力,防止反射裂缝的发展<sup>[6-7]</sup>. 虽然我国现行规范认为沥青路面各结构层间完全连续,但实际铺筑时为分层铺设,路面各层的接触较弱且不能达到规范的理想状态,所以要考虑层间接触对路面结构的影响<sup>[8-9]</sup>. 目前对 AR - SAMI 防治发射裂缝的研究还不能完全模拟实际路面的工作状态,基于此,笔者利用 ABAQUS 有限元软件对路面整体进行模型建立,并通过 AR - SAMI 界面拉伸实验得出拉伸强度和对应的变形来控制 ABAQUS 参数,分别模拟连续条件下和考虑层间接触条件下有无应力吸收层的路面,并进行比较,研究表明,铺设 AR - SAMI 能很好地延缓反射裂缝的发生,并且

在很大程度上提升了路面结构整体性能,使路面使用时间得以延长.

1 本构关系的建立

在 ABAQUS 对路面的整体分析中,需要对各层间接触进行定义,利用粘聚力模型模拟裂缝扩展是目前常用的方法<sup>[10-11]</sup>. 常用库伦摩擦来描述各层之间的接触作用,各层的接触状态用系数  $\mu$  表示. 笔者分别将 AR - SAMI 与混凝土板之间的接触、底基层与混凝土板之间的接触、混凝土板缝之间的接触设为粘聚接触和库伦摩擦接触<sup>[12]</sup>,具体如图 1 所示. 图中 AC - 13 和 AC - 16 分别代表最大粒径为 13 mm 和 16 mm 的沥青混凝土.

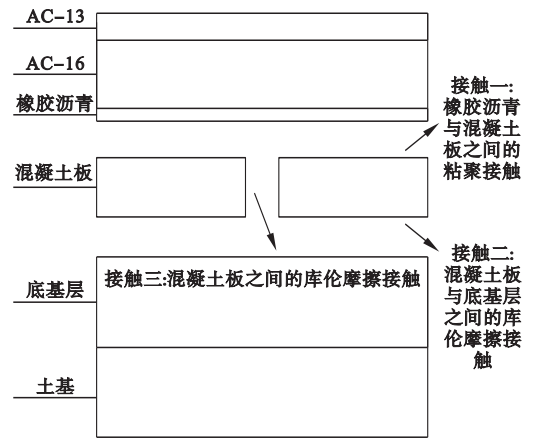


图 1 复合路面力学模型

Fig. 1 Mechanical model of composite pavement

1.1 粘聚接触模型

AR - SAMI 与混凝土板之间定为粘聚接触,  $T_n$  代表法向内聚力<sup>[13]</sup>、 $\delta_n$  代表法向张开位移、 $\delta_f$  代表裂纹尖端的张开位移<sup>[14]</sup>, 粘聚力模型见图 2. 当接触表面有内聚力作用时,断裂过程发生在内聚力所在范围,假定的内聚力范围主要是依靠粘聚力连接<sup>[15]</sup>, 当路

面存在行车荷载时,内聚力随着旧混凝土板裂缝的张开角度和位移的改变而将渐渐变大.

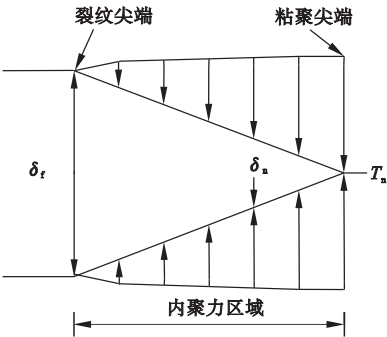


图2 粘聚力模型

Fig.2 Schematic diagram of cohesive force model

1.2 库伦摩擦接触模型

将混凝土板之间的裂缝用库伦摩擦来定义<sup>[16]</sup>,连接面上的切应力和法应力的关系见式(1):

$$\begin{cases} \tau = K_s \omega, & \omega < \omega_s; \\ \tau = \mu p, & \omega \geq \omega_s. \end{cases} \quad (1)$$

式中:τ为剪切应力;K<sub>s</sub>为剪切刚度;p为法向应力;ω为接触面间的相对位移;ω<sub>s</sub>为弹性极限相对位移;μ为连接面之间的摩擦系数<sup>[17]</sup>.

库伦接触模型的剪应力与法应力两者的变化关系见图3.从图可以看出,法向应力在逐渐增大的过程中,接触面上的剪切应力也在逐步增加,当剪切应力达到最大值以后,法向应力继续增大,剪切应力值不再发生变化.

摩擦系数小于0.6,面层与基层拉、剪应力会受到较大波动,呈现非线性增长走势.笔

者所取的层间接触摩擦系数分别为0.2、0.3、0.4、0.5.

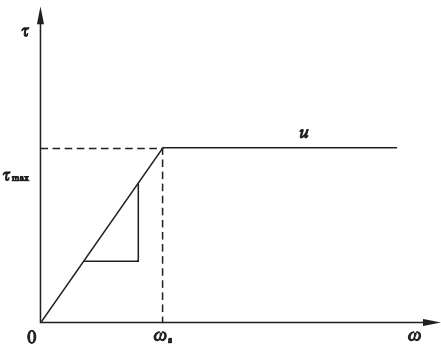


图3 弹塑性库伦摩擦接触模型

Fig.3 Elastoplastic Kulun friction contact model

1.3 AR-SAMI 界面拉伸试验

在有限元分析中将混凝土与 AR-SAMI 之间的接触定义为粘聚带接触,此类接触需要输入路面法向到结构层界面之间的抗拉强度值,即 Normal 的大小<sup>[18]</sup>,为此通过对 AR-SAMI 与混凝土的界面拉伸试验来确定 ABAQUS 有限元模拟相应的参数.

实验将3种不同粒径的碎石和橡胶沥青进行拌合,拌合温度180℃,在拌合前将两个半圆形铁环放置在涂抹了基质沥青的混凝土上.将拌合好的沥青混合料倒入表面处理好的水泥混凝土马歇尔试模中,并进行击实,成型试件如图4所示.采用万能试验机对复合试件进行不同温度(5℃、15℃、25℃)和不同加载速率(5 mm/min、20 mm/min、50 mm/min)下的界面拉伸试验.



(a) 击实后试件



(b) 成型试件

图4 试验试件

Fig.4 Test specimen

通过万能试验机采集到不同温度和加载速率下 AR - SAMI 和混凝土界面之间的力与位移曲线如图 5 ~ 图 7 所示。

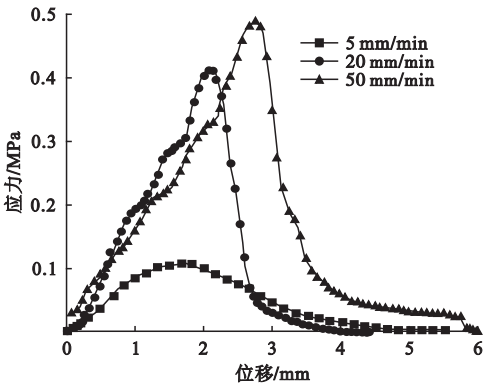


图 5 25 °C 界面拉伸应力与位移曲线

Fig. 5 Tensile stress and displacement curves at 25 °C

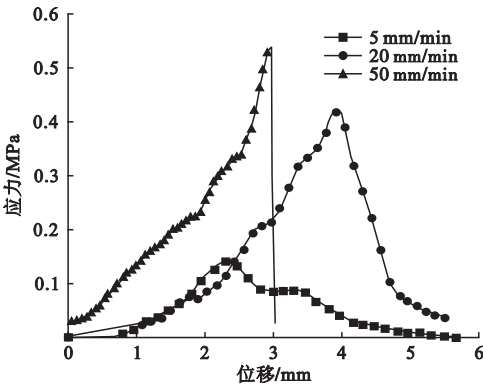


图 6 15 °C 界面拉伸应力与位移曲线

Fig. 6 Tensile stress and displacement curves at 15 °C

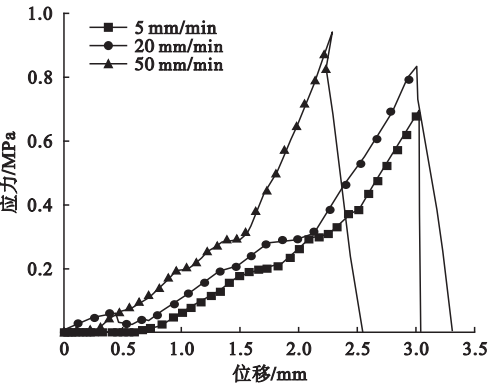


图 7 5 °C 界面拉伸应力与位移曲线

Fig. 7 Tensile stress and displacement curves at 5 °C

由图可知,保持温度不变,AR - SAMI 与混凝土界面抗拉强度将随着加载速率的增大而增大;当保持试验速率恒定,AR - SAMI 与混凝土界面之间抗拉强度随着温度的上升而下降.从而可知在夏季高温时,AR - SAMI 与混凝土之间的界面容易发生拉伸破坏.温度 25 °C、加载速率 5 mm/min 时界面拉伸强度为 0.108 MPa,此时变形为 1.77 mm,笔者将其作为 ABAQUS 路面整体模型粘聚带接触法相拉应力和拉伸变形的参数值。

## 2 有限元模型的建立与结果分析

### 2.1 路面结构尺寸的确定和网格划分

当车辆行驶在基层带裂缝的路面上时,由于混凝土基层上存在裂缝,基层上面的 AR - SAMI 经历拉伸和剪切两个受力过程,路面各结构层如图 8(a)所示.将沥青上面层设为厚度 4 cm 的 AC - 13,下面层设为厚度 8 cm 的 AC - 16,道路基层的厚度为 20 cm,强度等级 C30 的混凝土,底基层是 20 cm 的级配碎石,其下为土基,路面结构的有限元模型如图 8(b)所示.运用 ABAQUS 三维空间进行道路分析,几何模型取为 10 m × 5 m × 5 m,采用 C3D8R 单元进行网格划分,车轮轴间距为 1.8 m,本模型对行车路线设计时,将行车路线设置在靠近模型边缘处,以便在分析应力大小时进行数据采集。

### 2.2 考虑非线性接触和完全连续的对比分析

为了说明 AR - SAMI 的抗裂性和考虑各层接触和完全连续之间的区别,将通过 ABAQUS 有限元模型进行计算,对比在考虑各层接触和完全连续条件下,有无 AR - SAMI 的层底最大拉应力,结果如图 9 所示,其中 A 表示考虑层间接触、无 AR - SAMI;B 表示考虑层间接触、有 AR - SAMI;C 表示不考虑层间接触、无应力吸收层;D 表示不考虑层间接触、有应力吸收层。

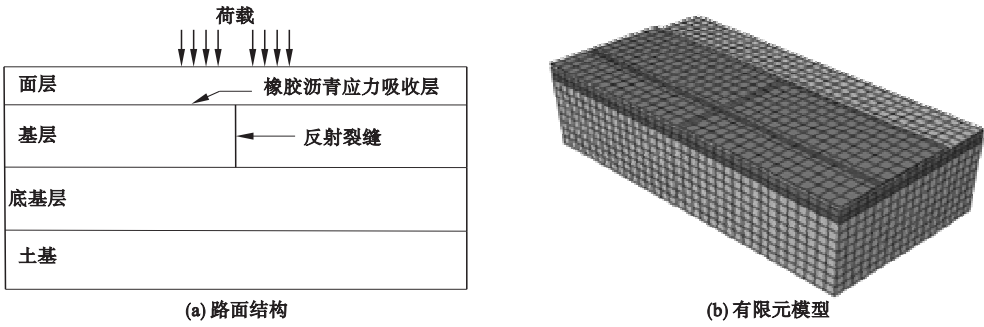


图8 路面结构和有限元模型

Fig. 8 Pavement structure and finite element model

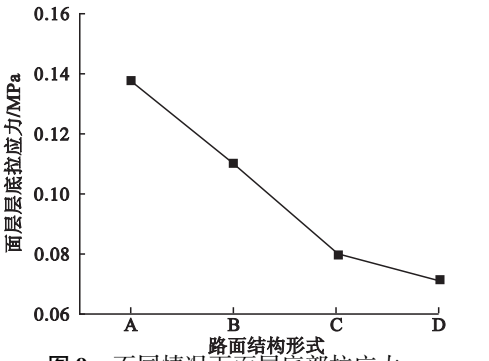


图9 不同情况下面层底部拉应力

Fig. 9 The bottom tensile stress at the bottom of different conditions

由图9可知,没有设AR-SAMI的路面面层底部拉应力均比有AR-SAMI的面层底部应力值大,考虑层间接触条件时比完全连续条件时其底部的应力增大了20%~30%,从以上数据可以分析考虑层间接触对路面结构的影响较大,同时也说明了考虑层间接触来分析路面结构的必要性.设有AR-SAMI的面层底部拉应力降低了约17%~35%,说明面层底部的应力能够被AR-SAMI有效地减小,达到阻止和减缓反射裂缝发生的目的.

2.3 有无AR-SAMI的应力强度因子分析

应力强度因子是裂缝在受到外界荷载时其顶端的力学性质<sup>[19]</sup>,用 $K$ 来代表.从破损路面的特征不难看出,由于外界荷载导致的I型裂缝为混凝土基层裂纹典型形式.笔者通过讨论裂缝顶端应力强度因子受有无AR-SAMI变化情况,来研究AR-SAMI抗裂性能.结果如图10所示.

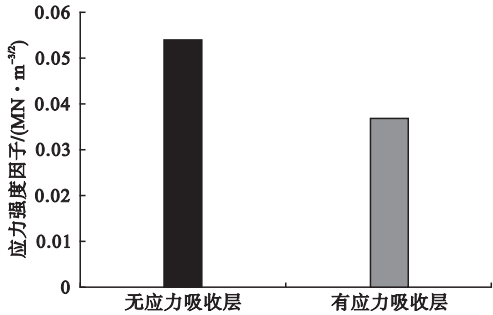


图10 有无应力吸收层对应力强度因子影响

Fig. 10 The influence of the stress intensity factor on the stress absorption layer

由图10可以看出,各层之间接触的路面整体在外界载荷的作用下,保持温度恒定,铺设AR-SAMI后,应力强度因子 $K_I$ 由 $0.0537\text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 下降至 $0.0366\text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ ,下降幅度为47%.可见,在铺设AR-SAMI后,使I型裂缝的应力强度因子大幅度降低,可以很好地预防裂缝的产生.

3 应力吸收层设计与研究

3.1 弹性模量和摩擦系数对应力的影响

首先对面层层底拉应力大小受AR-SAMI弹性模量和摩擦系数的影响进行力学分析,由于文中研究的是考虑层间接触的路面结构,所以应考虑摩擦系数对面层底部拉、剪应力的作用<sup>[20]</sup>.将AR-SAMI的厚度定为2.5 cm,弹性模量定为200~1 000 MPa,摩擦系数定为0.2~0.5,以上述参数研究面层底部两种应力的变化情况,结果见图11、图12.



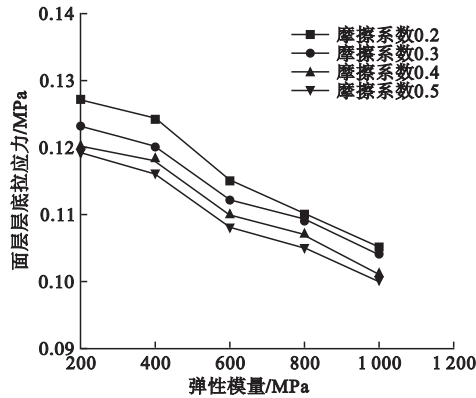


图 11 弹性模量、接触状态对层底拉应力的影响  
Fig. 11 The influence of elastic modulus and contact state on the tensile stress at the bottom of the layer

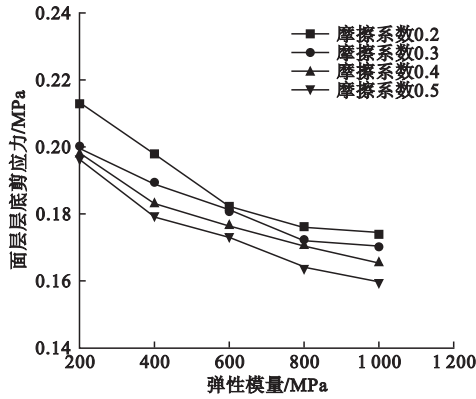


图 12 弹性模量、接触状态对层底剪应力的影响  
Fig. 12 The influence of modulus of elasticity and contact state on the shear stress at the bottom of the layer

从图 11、图 12 可以看出,伴随着弹性模量的增加,面层层底拉、剪应力均逐渐减小,在弹性模量达到 600 MPa 时变化趋于平缓.摩擦系数为 0.4,模量从 600 MPa 上升到 1 000 MPa,层底的两种应力分别降低 20%.保持弹性模量不变,面层层底应力值伴随摩擦系数的扩大而渐渐变小.以弹性模量 600 MPa 为例,摩擦系数从 0.2 增至 0.5,面层层底拉应力降低幅度为 6.5%,剪应力降低幅度为 5.1%.分析可知,应力吸收层的弹性模量建议取 600 MPa,这样既能充分发挥 AR-SAMI 的抗裂性能,又不至于自身发生破坏.

3.2 厚度和摩擦系数对应力的影响研究

研究 AR-SAMI 在载荷作用下厚度和摩擦系数对沥青面层底部应力产生的影响,将 AR-SAMI 的厚度设为 1~3 cm,摩擦系数的变化设为 0.2~0.5,弹性模量为 600 MPa,研究沥青混凝土面层层底拉、剪应力的变化规律,并计算 AR-SAMI 的最佳铺设厚度,结果见图 13 和图 14.

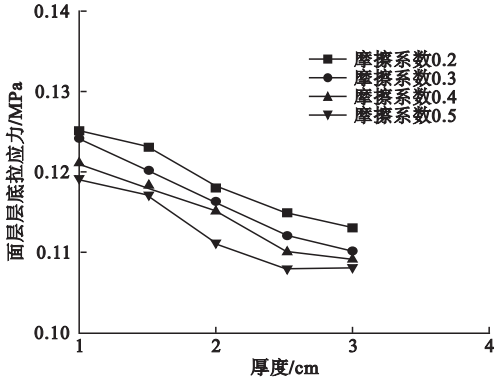


图 13 厚度和摩擦系数对面层层底拉应力的影响  
Fig. 13 The influence of thickness and friction coefficient on the tensile stress at the bottom of layer

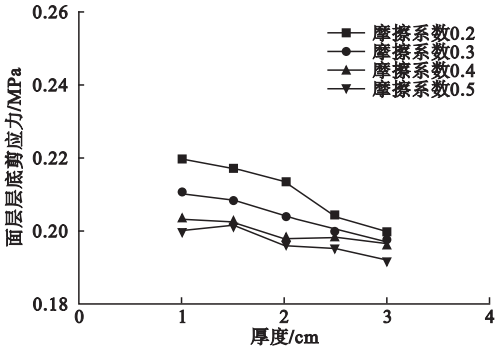


图 14 厚度和摩擦系数对面层层底剪应力的影响  
Fig. 14 The Influence of thickness and friction coefficient on the shear stress in the bottom layer

通过图 13、图 14 可以得出,层底拉、剪应力受 AR-SAMI 的厚度和摩擦系数的规律基本相同.层底和 AR-SAMI 的拉应力伴随厚度的增大逐渐变小,当其值超过 2.5 cm,拉应力所受厚度变化的影响较小.当摩擦系数设为 0.4,并且 AR-SAMI 厚度从 1 cm 增至 3 cm,其拉、剪应力分别减少了 18% 和 17%.摩擦系

数从 0.2 增至 0.5, 面层底部两种应力逐渐变小. 以厚度 2.5 cm 为例, 摩擦系数从 0.2 增至 0.5, 面层层底拉应力降低幅度为 11%, 剪应力降低幅度为 19.5%. 顾及施工方式与经济等因素, AR-SAMI 的厚度不宜太厚也不宜太薄, 应控制在合理范围以内, 建议将 AR-SAMI 的厚度定为 2.5 cm.

### 3.3 基层裂缝长度对裂缝顶端应力的影响

由于半刚性基层的特性, 在行车荷载的反复作用下, 反射裂缝将成为高发性问题, 它是因为裂缝尖端出现应力集中, 使裂缝向上发展而形成的<sup>[21]</sup>. 笔者讨论路面整体受基层裂缝的影响, 分析其在受到对称荷载作用时裂缝长度对裂缝尖端应力的作用, 结果见图 15.

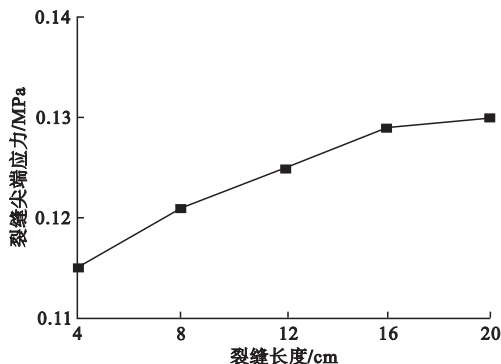


图 15 裂缝长度对裂缝顶端应力大小的影响

Fig. 15 The effect of crack length on the stress size of crack tip

通过图 15 可以看出, 裂缝尖端应力随着裂缝长度不断增加而增大, 且裂缝长度越长, 裂缝之间的影响也就越大, 越容易形成贯穿裂缝. 裂缝从 4 cm 增长到 12 cm, 裂缝顶端的应力值很快变大, 当其长度为 20 cm 时, 会最终形成贯穿形式, 此时应力会因贯穿裂缝使路面的有效横截面面积显著减小, 并且出现明显的奇异性.

## 4 结 论

(1) 在复合道路面铺设 AR-SAMI 能够有效减小面层层底的应力值, 并且抗反射裂缝效果明显, 能够提高路面整体结构性能和使用寿命.

(2) 对考虑接触和完全连续两种路面形式的面层底部拉应力进行比较, 考虑接触时面层底部拉应力值比完全连续时要增加 20%~30%, 因此考虑层间接触会让道路有限元模拟计算更加接近路面真实使用情况.

(3) 裂缝尖端应力会伴随裂缝长度不断增大而逐渐提高, 当裂缝变为贯穿形式时, 裂缝尖端应力达到最大值.

(4) 以强度因子为衡量指标, 对比裂缝尖端应力在铺设 AR-SAMI 前后的不同, 结果表明裂缝尖端应力强度因子在铺设 AR-SAMI 后下降了 47%, 能够看出 AR-SAMI 能很好地控制反射裂缝的发生.

## 参考文献

- [1] SHATNAWI S, PAIS J, MINHOTO M. Asphalt rubber interlayer benefits in minimizing reflective cracking of overlays over rigid pavements[C]// 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Netherlands: Springer, 2012.
- [2] 蔡燕霞. 橡胶沥青应力吸收层结构行为与路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.  
(CAI Yanxia. Study on structure behavior and road performance of stress absorption layer of rubber asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.)
- [3] 李秋平, 陈霞, 黄自文. 橡胶沥青应力吸收层的作用机理及施工技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011(4): 115-118  
(LI Qiuping, CHEN Xia, HUANG Ziwen. Study on the action mechanism and construction technology of stress absorption layer of rubber asphalt[J]. Highway traffic science and technology (applied technology edition), 2011(4): 115-118)
- [4] 冯志宏. 橡胶沥青应力吸收层在路面改造工程中的应用[J]. 山西建筑, 2015(13): 154-155.  
(FENG Zhihong. Application of stress absorption layer of rubber asphalt in pavement reconstruction project[J]. Shanxi architecture, 2015(13): 154-155.)
- [5] 张秋福, 禹文涛. 橡胶沥青应力吸收层的施工技术及其质量控制[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015(21): 121-126.  
(ZHANG Qiufu, YU Wentao. Construction technology and quality control of stress absorption layer of rubber asphalt[J]. Urban construction theory research (electronic edition), 2015(21): 121-126.)

- [6] 刘许锋. 设应力吸收层的水泥混凝土路面力学特性分析[D]. 西安:长安大学,2009.  
(LIU Xufeng. Analysis of mechanical characteristics of cement concrete pavement with stress absorbing layer[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.)
- [7] 孙雅珍,唐雪莹,张思博,等. 重载和温度作用下橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(1):98-105.  
(SUN Yazhen, TANG Xueying, ZHANG Sibbo, et al. Cracking resistance of stress absorption layer of rubber asphalt under heavy load and temperature[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(1):98-105.)
- [8] LUO X, LUO R, LYTTO R L. Characterization of asphalt mixtures using controlled-strain repeated direct tension test[J]. Journal of materials in civil engineering, 2013, 25(2):194-207.
- [9] 刘红坡. 层间接触对半刚性沥青路面力学响应的影响[D]. 成都:西南交通大学,2006.  
(LIU Hongpo. Influence of interlayer contact on mechanical response of semi rigid asphalt pavement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.)
- [10] 吴仕磊,宗俊泽. 层间接触状态对沥青路面剪切应力的影响[J]. 公路与汽运,2013(6):115-117.  
(WU Shilei, ZONG Junze. Influence of interlayer contact state on shear stress of asphalt pavement[J]. Highway and automotive application, 2013(6):115-117.)
- [11] 朱俊,李亚卓,陈玮,等. 不同层间接触状态下的沥青路面结构力学响应分析[J]. 中国水运月刊,2013,13(12):312-314.  
(ZHU Jun, LI Yazhuo, CHEN Wei, et al. Mechanical response analysis of asphalt pavement under different interlayer contact conditions[J]. China water transport monthly, 2013, 13(12):312-314.)
- [12] 石学斌,程毅,陈拴发,等. 水泥混凝土路面加铺应力吸收层结构应力分析[J]. 公路,2006,10:86-90.  
(SHI Xuebin, CHENG Yi, CHEN Shuanfa, et al. Structural stress analysis of stress absorbing layer for cement concrete pavement[J]. Highway, 2006, 10:86-90.)
- [13] 李铁洪,李春晓. 半刚性路面层间实际结合状态的有限元模拟与分析[J]. 公路交通技术,2010(1):1-5.  
(LI Tiehong, LI Chunxiao. Finite element simulation and analysis of the actual joint state of semi-rigid pavement[J]. Highway traffic technology, 2010(1):1-5.)
- [14] 严明星. 基于扩展有限元法的沥青混合料开裂特性研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.  
(YAN Mingxing. Study on cracking characteristics of asphalt mixture based on extended finite element method[D]. Dalian: Maritime Affairs University of Dalian, 2012.)
- [15] 张毅,聂欣. 层间接触状态对半刚性路面的力学响应[J]. 华东公路,2012(2):44-47.  
(ZHANG Yi, NIE Xin. Mechanical response of semi rigid pavement to interlayer contact state[J]. East China highway, 2012(2):44-47.)
- [16] 张久鹏,武书华,裴建中,等. 基于剪切弹性柔量的基-面层间接触状态及路面力学响应分析[J]. 公路交通科技,2013,30(1):6-16.  
(ZHANG Jiupeng, WU Shuhua, PEI Jianzhong, et al. Analysis of mechanical contact between pavement base and interlayer and mechanical response of pavement based on shear elastic compliance[J]. Highway traffic science and technology, 2013, 30(1):6-16.)
- [17] 彭贝贝. 模型分析层间接触状态对沥青路面结构力学响应[J]. 建筑工程技术与设计,2015(20):201-209.  
(PENG Beibei. Model analysis of interlayer contact state on mechanical response of asphalt pavement structure[J]. Architectural engineering technology and design, 2015(20):201-209.)
- [18] 孙雅珍,翟晓星,李宁. 沥青路面反射裂缝扩展机理与防裂效果分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(6):1023-1029.  
(SUN Yazhen, ZHAI Xiaoxing, LI Ning. Analysis of reflection crack propagation mechanism and effect of asphalt pavement[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(6):1023-1029.)
- [19] 赵孝辉. 考虑层间接触状态的路面结构有限元分析[D]. 广州:华南理工大学,2011.  
(ZHAO Xiaohui. Finite element analysis of pavement structure considering interlayer contact state[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.)
- [20] 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):2758-2764.  
(WANG Jinchang, ZHU Xiangrong. Study on the influence of friction coefficient between surface layer and base course on stress intensity factor[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2005, 24(15):2758-2764.)
- [21] 邓利强. 半刚性基层裂缝对沥青路面结构的影响规律研究[J]. 科技资讯,2012(21):21.  
(DENG Liqiang. Study on the influence of semi-rigid base crack on asphalt pavement structure[J]. Science and technology information, 2012(21):21.)