

# 车辆荷载作用下半刚性基层道路反射 裂缝应力分析与处理

包龙生<sup>1</sup>,魏喜乐<sup>1</sup>,于玲<sup>1</sup>,陈爱宝<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 锦州市正兴置业有限公司,辽宁 锦州 121013)

**摘 要** 为了提高半刚性基层道路的通行能力并延长其使用寿命,对该道路由车辆荷载引起的反射裂缝进行研究,并提出了合理的处理措施。**方法** 应用 ABAQUS 建立含有裂缝的复合路面有限元模型,分析路面结构中的应力、应变随车辆轴重的变化情况。然后对比分析设置与未设置防裂功能层两种情况下路面结构内的应力变化情况。**结果** 路面结构在增设了防裂功能层后的应力、应变均低于不设功能层时的数值,且下降幅度较为明显,在 50% 左右。**结论** 提出的处理措施可以有效地减少半刚性基层道路因车辆荷载引起的反射裂缝数量。

**关键词** 车辆荷载;有限元模拟;防裂功能层;对比分析

中图分类号 TU997

文献标志码 A

## Analysis of Stresses and Processing Method on the Reflection Cracks of Semi-Rigid Base Road Resulting from the Vehicle Loads

BAO Longsheng<sup>1</sup>, WEI Xile<sup>1</sup>, YU Ling<sup>1</sup>, CHEN Aibao<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Jinzhou Zhengxing Real Estate, CO. Ltd., Jinzhou, China, 121013)

**Abstract:** Reflection cracks caused by vehicle load is studied in this paper, to improve the traffic capacity, prolong the service life of the Semi-Rigid Base Road, and put forward measures accord it. The author established the finite element model of composite pavement with cracks by using the finite element software ABAQUS. This paper analyzed stress and strain of the pavement construction with the change of the vehicles' axle-weight. Then, the stress variation in the pavement structure was analyzed and compared in two cases of setting anti-crack function layer or not. After set up the anti-crack function layer, it has an obviously reduce of the stress and strain, about fifty percent lower than before. The treatment measure proposed by the author can effective reduce the reflection cracks caused by the vehicle loads.

**Key words:** vehicle load; finite element simulation; anti-cracking function layer; contrastive analysis

收稿日期:2016-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51078242);住房和城乡建设部科学技术项目(2016-K2-012);沈阳市科学技术基金项目(F16-095-1-00);沈阳市建委科技项目(SJW2016001)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁及道路工程方向的研究。

随着经济的发展,重载车辆数越来越多,导致车辆荷载作用而产生的沥青路面半刚性基层反射裂缝数量也在逐年的增加,一定程度上缩短了道路的使用年限.因此,需要对该类型反射裂缝进行研究,以找出其破坏及发展机理,进而提供合理的处理措施.在对反射裂缝的研究方面,国内外许多科研人员都进行了大量的理论和试验研究,并提出了一系列的预防和处理措施<sup>[1]</sup>.外国学者在对反射裂缝进行的过程中,将断裂力学作为一种重要的研究工具,一定程度上促进了反射裂缝研究的发展.而国内的许多学者,在该领域也做出了卓越的贡献.在简化奇异单元方面,张起森和郑健龙<sup>[2]</sup>的研究起步较早,并做出了较大的贡献,使有限元分析更加方便;符冠华<sup>[3]</sup>通过对路面裂缝强度因子问题进行研究,得到了沥青路面裂缝的产生和发展与路面厚度之间的关系;除此以外,张亚军等<sup>[4]</sup>在参考断裂力学理论的基础上,借助于有限元分析的手段,对半刚性基层道路的裂缝问题也进行了较为系统的研究.

实际工程表明,在预防和处理沥青路面裂缝问题时,若所采用的处理方法不合理,势必会使反射裂缝的产生和扩展速度加快<sup>[5-6]</sup>.笔者从断裂力学的观点出发,结合ABAQUS有限元研究方法<sup>[7-9]</sup>,以辽宁营口地区半刚性基层道路反射裂缝的发展为研究内容,建立三维有限元模型,分析带有裂缝的路面结构在车辆荷载作用下的应力变化情况,以确定裂缝的发展机理,并对提出的处理措施进行有限元模拟分析,确定所提出的处理措施在减少车辆荷载应力、延缓裂缝发展方面所起到的效果.

## 1 工程背景及计算模型

研究路段位于营口澄湖东路,路面基层为 $2 \times 20$  cm的二灰稳定碎石(配合比为 $m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{碎石})=5:10:85$ ),面层为10 cm沥青混凝土.路面机动车道为

18 m宽,两侧有 $2 \times 3$  m分隔带及 $2 \times 3.5$  m非机动车道.

在对该类型的裂缝进行研究分析时,使用ABAQUS建立路面结构的三维立体模型.在建立有限元模型时,假设路面结构层为弹性层状体系,有限元模型由半刚性基层、面层、防裂夹层、道路基础构成,其中半刚性基层带有0.5 cm宽的裂缝.模型及坐标系如图1所示.对道路各结构层作如下假设:①各结构层均匀、连续;②模型基础底面位移限制为零、两个横断面的水平方向位移约束为零;③不计路面结构自重.

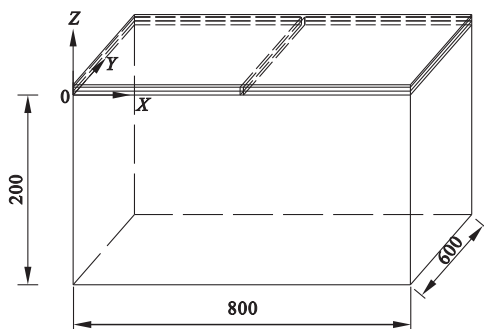


图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

## 2 基本计算参数

营口澄湖东路路面计算参数:选取的道路结构长度为8 m,宽度为6 m,面层厚度为10 cm,半刚性基层厚度为40 cm(实测为双层各20 cm厚的二灰稳定碎石).行车荷载选取标准轴载BZZ—100,则接地压强为0.707 MPa,轴距为1.820 m,不考虑车辆一侧两个车轮之间缝隙的距离,则单侧车轮接地面积为 $37.8 \text{ cm} \times 18.9 \text{ cm}$ .当车辆荷载对称布置时,其中一侧车辆荷载的反向作用会抵消掉一部分的弯沉.而当单侧布置时,在偏载的作用下,没有了另外一侧的反向作用,因此产生的弯沉和不利影响的效果也更为显著.为更加准确地反映其效果,笔者采用单侧布置车辆荷载,研究其作用效果<sup>[10-12]</sup>.车辆荷载的作用位置图及偏载作用时的受力图形分别如图2、

图3所示,利用 ABAQUS 建立的有限元模型如图4所示,参数见表1.

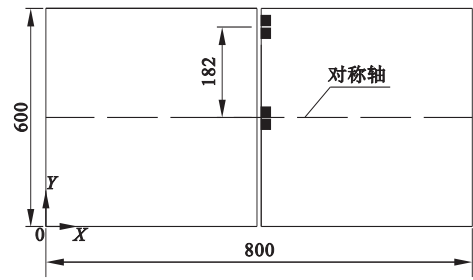


图2 车辆荷载作用位置

Fig. 2 Position of vehicular loading actions

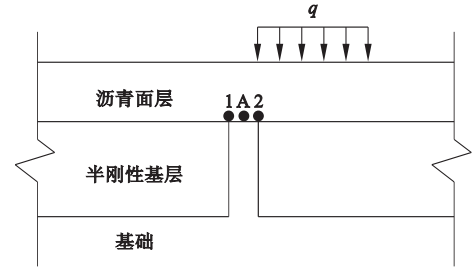


图3 偏载受力图

Fig. 3 Diagram of deflection load-bearing stress

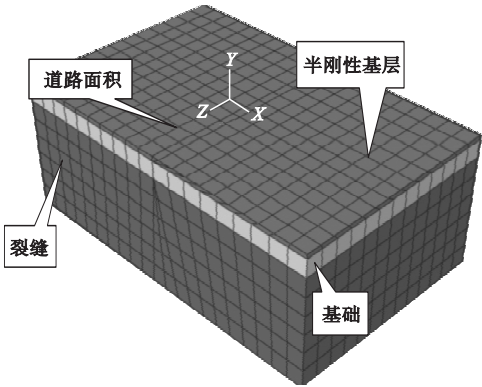


图4 ABAQUS 结构模型

Fig. 4 Structure model of ABAQUS

表1 主要参数

Table 1 Main parameters

路面结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
面层(AC)	6~22	600~2 200	0.25
防裂功能层	2.5	800	0.25
半刚性基层	40	1 300	0.25
基础	—	20~500	0.35

### 3 车辆荷载对开裂区域路面结构层的影响作用

按照相关道路方面设计规范的规定,笔

者采用单轴载双轮组进行力学有限元模拟分析计算,轴载从 100 kN 开始,逐级递增至 240 kN. 计算基本参数:半刚性基层厚度  $h_c=40\text{ cm}$ ,弹性模量  $E_c=1\,300\text{ MPa}$ ;基础当量模量  $E_0=100\text{ MPa}$ ;面层厚度取  $h_a=10\text{ cm}$ ,弹性模量取  $E_a=1\,200\text{ MPa}$ . 对路面结构模型进行网格细化(见图5). 模型在加载后的整体变形如图6所示,不同应力下计算结果见图7~图10.

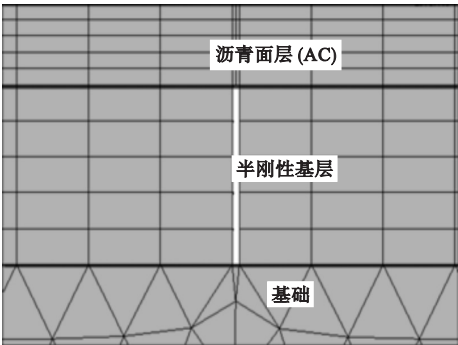


图5 路面结构模型的网格细化

Fig. 5 Refined mesh of pavement structure's

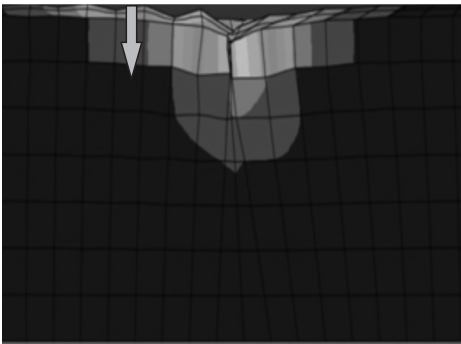
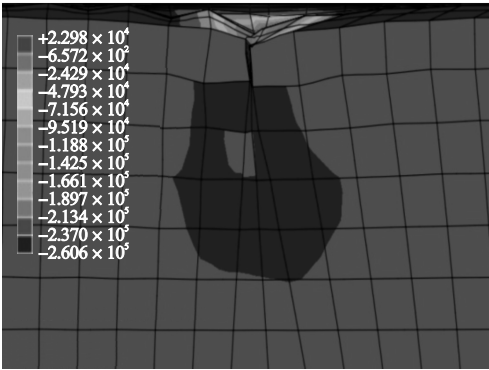


图6 路面受力变形图

Fig. 6 Diagram of load stresses and deformation



(a)轴载P=100 N

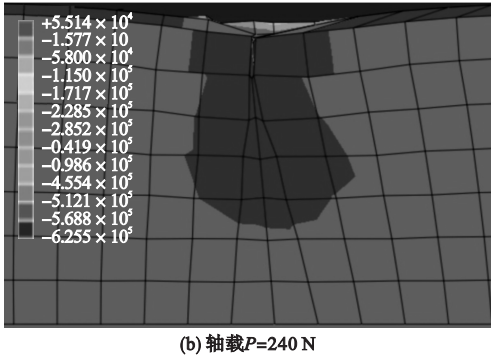


图 7 开裂区域最大主应力  $\sigma_1$  云图

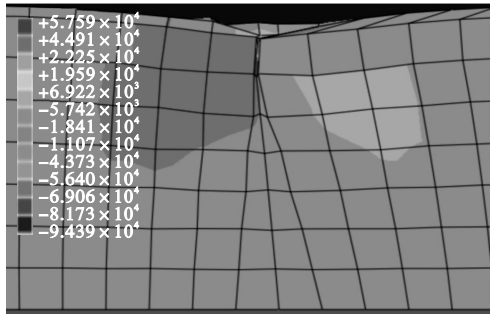
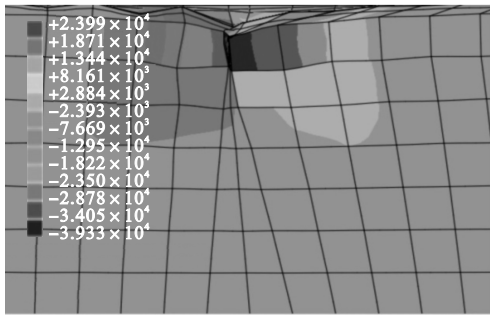


图 8 开裂区域最大剪应力  $\tau_{\max}$  云图

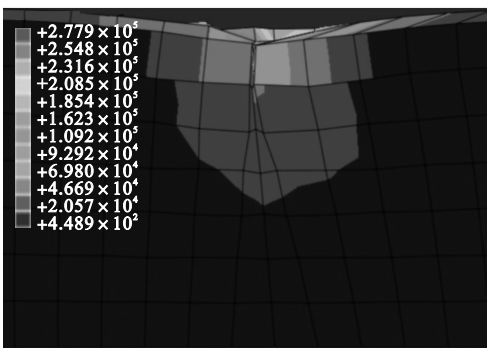
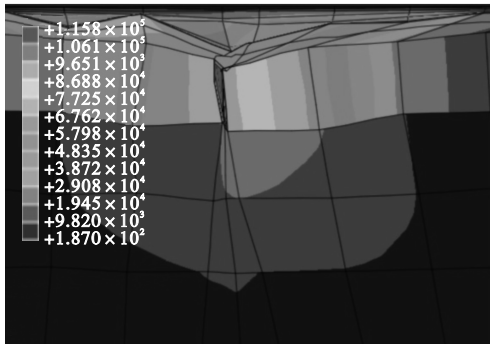


图 9 开裂区域等效应力  $\sigma_e$  云图

Fig. 9 Equivalent stress contour plots in cracking area

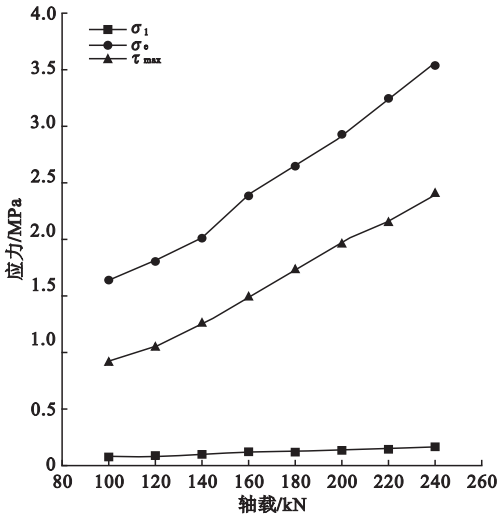


图 10 应力随轴载变化曲线

Fig. 10 Diagram of stresses' change with axle load

由以上有限元分析模拟及计算结果可知,当在裂缝一侧施加偏载作用时,裂缝两侧将会产生弯沉及弯沉差,因此很容易使面层在此作用下产生反射裂缝.从有限元模拟变形图中还可看出,车辆轴载无论是 100 kN 还是 240 kN,由于开裂区域应力集中现象的存在,导致此区域的应力和应变均远大于其他位置.因此可知,基层开裂区域附近,很容易因为车辆偏载的作用,使基层裂缝发展到面层,引起面层开裂<sup>[13]</sup>.

由图 10 可以看出,开裂区域附近沥青面层内的最大主应力  $\sigma_1$ 、等效应力  $\sigma_e$  及最大剪应力  $\tau_{\max}$  与车辆轴重基本呈正比例的线性增长关系,即都是随着车辆轴重的增加而增

Fig. 8 Contour plots of maximum shear stress in cracking area

加<sup>[14]</sup>. 当轴重从最小的 100 kN 增大到最大的 240 kN 时,最大剪应力  $\tau_{\max}$  由 0.912 MPa 增大到 2.410 MPa,等效力  $\sigma_e$  由 1.632 MPa 增大到 3.548 MPa,都有较大增长. 由此可见,超载现象对路面结构反射裂缝的发生有相当大的影响.

模拟计算所得裂缝两侧的弯沉及弯沉差随轴载变化如图 11 所示.

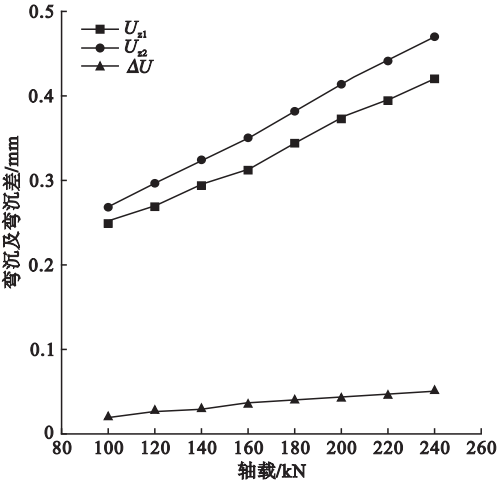


图 11 弯沉和弯沉差随轴载变化曲线

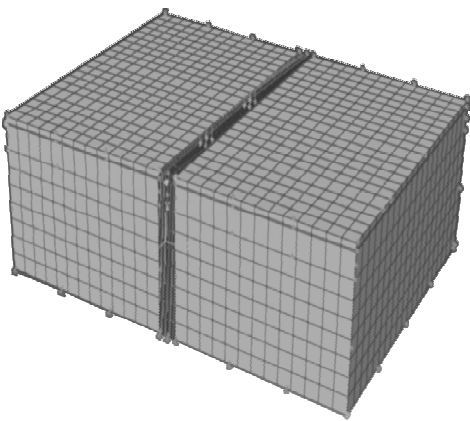
Fig. 11 Diagram of deflection and deflection difference's change with axle load

由图 11 可以看出,车辆轴载增大时,裂缝两边的弯沉和弯沉差也相应增大,两者大致呈线性增长的关系,而且当轴载从 100 kN

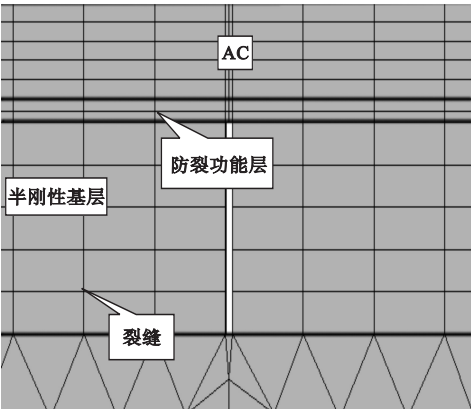
变化到 240 kN 时,裂缝两边的弯沉  $U_{c1}$ 、 $U_{c2}$  以及弯沉差  $\Delta U$  也都有较大增加. 计算表明,较大的车辆轴载容易导致裂缝两侧的弯沉差增加,进而诱发剪切型反射裂缝的发生. 因此,需要对车辆轴载予以足够的重视以控制或减少剪切型反射裂缝的产生.

#### 4 改性沥青防裂功能层对车辆荷载应力的延缓作用分析

为了延缓并减少营口地区道路反射裂缝的产生和进一步的加剧,考虑在沥青面层和半刚性基层之间增设一层以橡胶聚合物改性沥青混合料制备而成的防水抗裂功能层<sup>[15]</sup>,利用该功能层模量低、柔性强、防水且自身不易开裂的特点,以达到延缓并减少半刚性基层反射裂缝产生的目的. 以下对含有该防裂功能层的路面结构进行有限元模拟分析计算,主要计算参数:车辆荷载为 100 kN 的标准轴载;半刚性基层厚度  $h_c = 40$  cm,弹性模量  $E_c = 1\ 300$  MPa;基础当量模量  $E_0 = 100$  MPa;功能层厚  $h_s = 2.5$  cm,弹性模量  $E_s = 800$  MPa;沥青面层模量  $E_a = 1\ 200$  MPa,取面层厚度  $h_a$  分别为 6 cm、8 cm、10 cm、12 cm、14 cm、16 cm、18 cm. ABAQUS 模型如图 12 所示,模拟结果见图 13 ~ 图 16.



(a) 模型图



(b) 网格细化图

图 12 ABAQUS 模型及网格细化图

Fig. 12 Model of ABAQUS and diagram of mesh refine



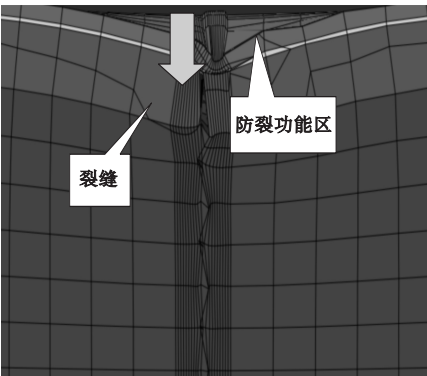


图 13 剪切变形模拟图

Fig. 13 Diagram of simulation shear deformation

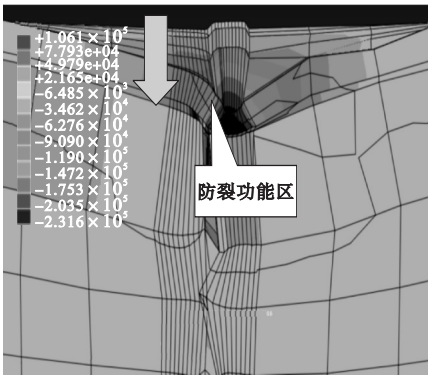


图 14 最大主应力  $\sigma_1$  图

Fig. 14 Diagram of maximum principal stress

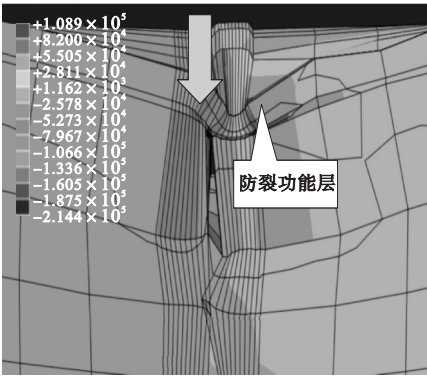


图 15 最大剪应力  $\tau_{\max}$  图

Fig. 15 Diagram of maximum shear stress

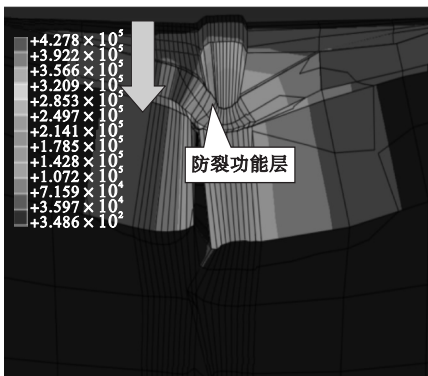


图 16 等效应力  $\sigma_e$  图

Fig. 16 Diagram of equivalent stress

为了能够更加深入的了解增设防裂功能层后的路面结构对于减少车辆荷载应力进而延缓反射裂缝的发生所起到的作用,现假设两种对比模拟模型<sup>[16]</sup>:一种设有防裂功能层,另外一种不设该功能层. 第一种对比方

式:如图 17 标准模式 I 和对比模式 II 所示,计算点都为图中 A 点;第二种对比方式:如图 17 标准模式 I 和对比模式 III 所示,标准模式 I 的计算点为 B 点,对比模式 III 的计算点为 A 点,且  $h_2 = h_1 + 2.5$ .

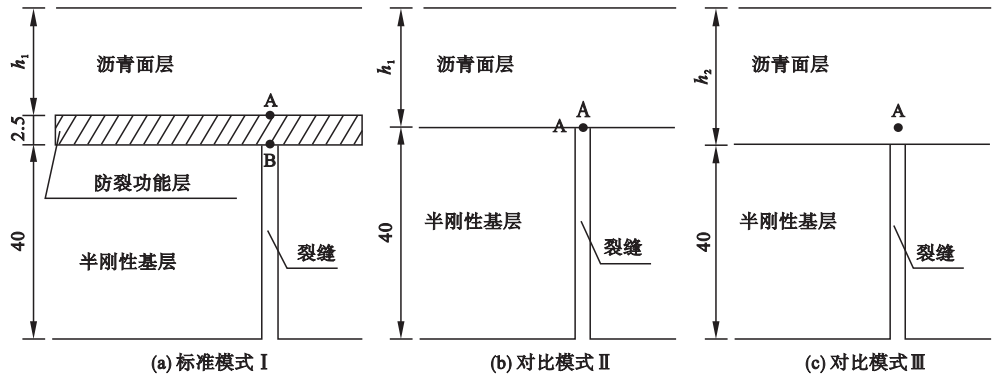


图 17 路面结构对比计算模式图

Fig. 17 Diagram of pavement structure's contrastive computations

(1) 第一种对比模式  
图 17 中模式 I、模式 II 下 A 点等效应力

$\sigma_e$  及最大剪应力  $\tau_{\max}$  对比计算结果见图 18、图 19.

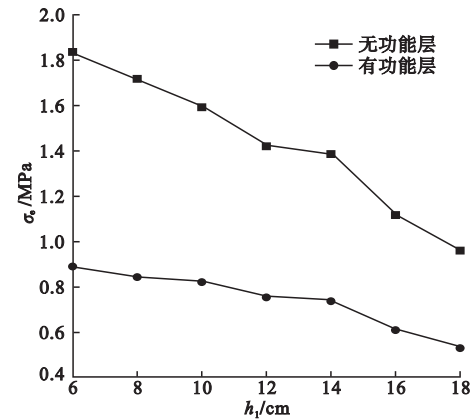


图 18 等效应力  $\sigma_e$  随厚度变化曲线

Fig. 18 Diagram of equivalent stress' change with the thickness

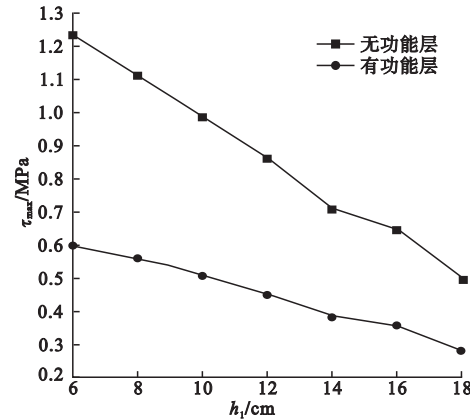


图 19 最大剪应力  $\tau_{\max}$  随厚度变化曲线

Fig. 19 Diagram of maximum shear stress' change with the thickness

由图可知,在面层和基层之间增设了一层防裂功能层后, $\sigma_e$  和  $\tau_{\max}$  相对于不设功能层而言均有较大减小,说明在面层和基层之间增设防裂功能层后,可以很好地减小车辆荷载的影响,对于反射裂缝的产生和发展可以起到很好的抑制作用. 另外,随着沥青面层厚度的增加<sup>[17]</sup>, $\sigma_e$  和  $\tau_{\max}$  的减小幅度在减小,说明防裂功能层在较薄的沥青面层路面结构中所起到的防裂作用更为显著<sup>[18]</sup>.

(2) 第二种对比模式

图 17 中模型 I 中计算点 B 与模型 III 中计算点 A 的  $\sigma_e$ 、 $\tau_{\max}$  对比计算结果见图 20、图 21.

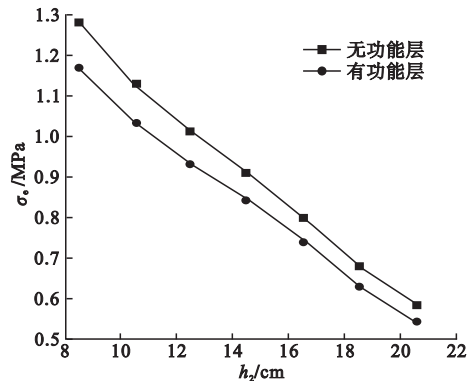


图 20 等效应力  $\sigma_e$  随厚度变化曲线

Fig. 20 Diagram of equivalent stress' change with the thickness

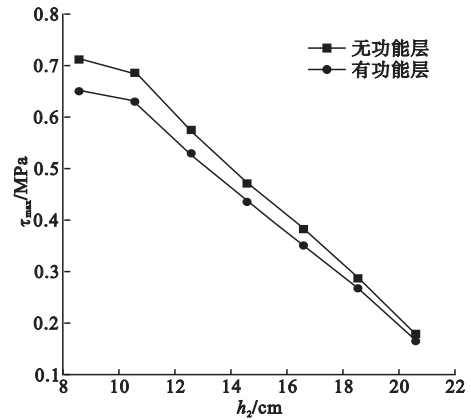


图 21 最大剪应力  $\tau_{\max}$  随厚度变化曲线

Fig. 21 Diagram of maximum shear stress' change with the thickness

从图中可以看出,当面层总厚度相同时,设置防裂功能层时的  $\sigma_e$  和  $\tau_{\max}$  还是低于未设置防裂功能层时的数值.

由以上两种对比模式可知,无论是第一种计算模式还是第二种计算模式,在沥青面层和半刚性基层之间设置由橡胶聚合物改性沥青混合料制备而成的防裂功能层后<sup>[19]</sup>,面层内的应力都有较大幅度的降低,说明由橡胶聚合物改性沥青混合料制备而成的防裂功能层对于预防剪切型的反射裂缝可以起到很好的作用.

5 结 论

(1) 营口澄湖东路路面反射裂缝的产

生,主要是由于软土路基的不均匀沉降以及道路在修筑时路基没有得到很好的处理而使半刚性基层首先开裂,导致在开裂处存在应力集中现象,使沥青面层承担了该处大部分的弯拉应力和剪应力,加上长期车辆荷载的作用,很容易使裂缝向上发展导致面层的开裂.当车辆荷载仅作用于裂缝一侧时,无论是100 kN的较小荷载还是240 kN的较大荷载,基层开裂区域的应力和应变均比其他区域大很多,而且随着轴重的增加而增大.当轴重从最小的100 kN增大到最大的240 kN时,最大剪应力 $\tau_{\max}$ 增大了1.6倍,等效应力 $\sigma_e$ 增大了1.2倍,都有较大增长.由此可见,超载现象对路面结构反射裂缝的发生有相当大的影响.

(2)随着面层厚度的增加,设置防裂功能层后的 $\sigma_e$ 和 $\tau_{\max}$ 的减小幅度在降低,说明防裂功能层在薄面层的路面结构中所起到的防裂作用更为显著.

(3)在第一种对比模式情况下,当两种路面结构的 $h_1$ 相同时,增设防裂功能层后的 $\sigma_e$ 和 $\tau_{\max}$ 均小于未设置功能层的应力值.在第二种对比模式情况下,当 $h_2 = h_1 + 2.5$ 时,仍然是设置了防裂功能层的 $\sigma_e$ 和 $\tau_{\max}$ 小于未设置功能层的应力值.说明在面层以下、基层以上区域设置一层由橡胶聚合物改性沥青混合料制备而成的防裂功能层,可以减少由车辆荷载产生的不利影响,延缓面层反射裂缝的发生.

## 参考文献

[1] MEHTA Y A. Determination of the linear viscoelastic limit of asphalt concrete at low intermediate temperature[J]. Proceeding of AAPT, 2000,69:281-312.

[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):22-26.

(ZHENG Jianlong,ZHANG Qisen. Finite element analysis of reflective crack and stress in-

tensity factor of semi rigid pavement[J]. Journal of geotechnical engineering,1990,12(3):22-26.)

- [3] 符冠华,杨军.夹层防裂作用的深入分析[J].公路交通科技,2000,17(4):1-3.
- (FU Guanhua,YANG Jun. Deep analysis of anti cracking effect of interlayer[J]. Highway transportation technology, 2000, 17(4):1-3.)
- [4] 张亚军,李春雷,黄晓明,等.基于有限元的半刚性基层沥青路面裂缝断裂力学分析[J].公路工程,2007,32(3):102-105.
- (ZHANG Yajun,LI Chunlei,HUANG Xiaoming,et al. Fracture mechanics analysis of semi rigid base asphalt pavement based on finite element method[J]. Highway engineering,2007,32(3):102-105.)
- [5] BUCHANAN M S. Field tack coat evaluator (AttackeTM) [R]. American: Fhwa/MS-DOT-RD-04-168,2004.
- [6] 顾金亮.半刚性基层沥青路面反射性裂缝的防治[J].黑龙江科技信息,2012(23):243.
- (GU Jinliang. The prevention and cure of reflection crack of semi rigid base asphalt pavement[J]. Heilongjiang science and technology information,2012(23):243.)
- [7] ANDERSON R M. Voids in the mineral aggregate (VMA) on the mechanical properties of coarse and fine asphalt mixture. [J]. Proceedings of AAPT,2001,70:156-162.
- [8] ZHOU Zhigang,ZHENG Jianlong. The reinforcing effect of reinforcement materials in preventing asphalt pavements from reflective cracking[C]. Shanghai: In: The 1st China International Geosynthetics Conference,2000.
- [9] SIMON A H. Effect of the filler particle size on the low and high temperature performance in asphalt mastic and concrete[J]. Journal of the association of asphalt paving technologists, 2001,70:125-132.
- [10] KANDHAL P S. Water damage to asphalt overlays: case histories[J]. Association of asphalt paving technologists proc,1989,58:20-22.
- [11] NEJAD Z. A Comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pave-



- ment distress[J]. Expert systems with applications, 2011(38):2857-2872.
- [12] HUANG Y X. Automatic inspection of pavement cracking distress[J]. Journal of electronic imaging, 2006, 15(1):185-188.
- [13] 郝金东. 旧水泥混凝土路面加铺沥青层反射裂缝的成因与防治措施[D]. 重庆:重庆交通大学, 2010.  
(HAO Jindong. The cause of reflection crack of asphalt overlay on old cement concrete pavement and its prevention measures [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.)
- [14] 但瑞强, 李绍鹏, 彭凯, 等. 碾压混凝土基层沥青路面荷载应力三维有限元分析[J]. 公路与汽运, 2015, 5:69-72.  
(DAN Ruiqiang, LI Shaopeng, PENG Kai, et al. Three dimensional finite element analysis of load stress of roller compacted concrete base asphalt pavement[J]. Highway and transportation, 2015, 5:69-72)
- [15] ZHOU Zhigang, ZHENG Jianlong, ZHANG Qisen. Prediction of fatigue cracking life of reinforced asphalt concrete pavements[C]. Kunming: In: Proceedings of 4th Int. Conf. on Road & Airfield Pavement Technology, 2002.
- [16] 仇为波. 旧水泥混凝土路面加铺沥青面层防裂机理分析[D]. 重庆:重庆交通大学, 2007.  
(QIU Weibo. The asphalt pavement cracking mechanism analysis of old cement concrete pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2007.)
- [17] 周富杰, 孙立军. 复合路面沥青面层最佳厚度[J]. 同济大学学报, 2001, 29(10):1234-1239.  
(ZHOU Fujie, SUN Lijun. Optimal thickness of asphalt overlay on existing concrete pavement[J]. Journal of tongji university, 2001, 29(10):1234-1239.)
- [18] KRUNTCEVA M R, COLLOP A C. Effect of bond condition on flexible pavement performance[J]. Journal of transportation engineering, 2005, 131(11):880-888.
- [19] 张忠明. 水泥橡胶综合改性沥青混合料水稳定性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2014.  
(ZHANG Zhongming. Study on water stability of asphalt mixture with cement and rubber [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.)

## 我校学报自然科学版首次入选 CSCD 数据库

近日,中国科学院文献情报中心完成了中国科学引文数据库(CSCD)2017-2018年来源期刊遴选工作,我校学报自然版实现历史性突破,首次入选。这对我校学报自然科学版的广大读者、作者来说,无疑都是一个喜讯。至此,《沈阳建筑大学学报(自然科学版)》已被国内三大期刊检索机构(另两个机构为“中文核心期刊要目总览(北大核心)”和“中国科技期刊引证报告(核心版)”)全部收录。我刊将从更高、更广泛的视野,交流与建筑科学领域相关的高技术研发成果,与业界人士一起,共同促进土木建筑工程学科的发展。

我校学报自然版的入选,是在学校的统筹部署下,在学报全体工作人员长期努力下取得的成绩,是我校一流大学和一流学科建设显著成效的重要组成部分,学报编辑部将以此为动力,继续加强编校质量,为广大师生和学者做好学术成果的传播服务。