

## 轮胎-沥青路面接触效应数值分析

郭红兵<sup>1,2</sup>, 王 宁<sup>3</sup>, 吕光印<sup>1,4</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710018;  
3. 深圳市城市规划设计研究院, 广东 深圳 518034; 4. 中国民用航空深圳安全监督管理局, 广东 深圳 518128)

**摘 要:** 针对轮胎-沥青路面接触效应问题, 传统的基于多层弹性理论的双圆简化模式的分析精度十分有限。为分析轮胎-沥青路面结构的实际接触效应, 通过三维有限元数值方法, 分析了一种典型沥青路面结构在非均布轮胎-路面三向接地压力作用下的 Mises 应力、剪应力和拉应力。研究表明, 在非均布轮胎-路面三向接地压力作用下, 该典型沥青路面结构在轮胎边缘处存在较高水平的剪切应变能和较大的剪应力, 在轮胎横向 5 个矩形接触区域内明显存在 5 个拉应力峰值, 与圆形均布荷 1 载作用下的力学响应存在很大差别。

**关键词:** 道路工程; 接触效应; 三维有限元; 车辆荷载应力; 接地面形状; 三向接地压力

**中图分类号:** U416.224 **文献标志码:** A

### 0 引言

在传统的路面力学计算和我国现行设计规范中, 轮胎-路面接触压力的分布形式被简化为圆形均布荷载。实际中轮胎-路面的相互作用十分复杂: 首先, 轮胎接地形状并不完全是圆形, 它更大程度上表现为矩形, 并随着荷载的增加而愈发接近矩形; 其次, 轮胎接地作用力分布不均匀, 而是随着车辆负荷的增减以及轮胎胎压的不同而有很大变化; 第三, 轮胎的胎面是有花纹存在的, 花纹形式的多样性也决定了轮胎-路面接触压力的非均布性和复杂性<sup>[1]</sup>。对于相同的车辆荷载和路面结构, 轮胎-路面接触压力的大小和分布形式不同, 在路面结构内产生的力学响应, 尤其是轮胎-路面接触区域附近的力学响应会有很大差别。传统的基于多层弹性理论的双圆简化模式的分析精度是十分有限的。因此有必要了解实际轮胎-路面接触压力的分布形式及大小, 研究路面结构的实际力学响应。

### 1 轮胎-路面接地面形状及压力的简化

轮胎-路面接触区域的形状和大小受多种因素影响: 轮胎类型、轮胎压力、轴载、胎体刚度、肋部和槽的数量和维度、车速、汽车转向、路面的微观和宏观结构等<sup>[2-3]</sup>。笔者参考国内外已有研究成果, 采用图 1 标准轴载 BZZ-100 对应的子午

线轮胎接地面简化模型, 其参数见表 1。

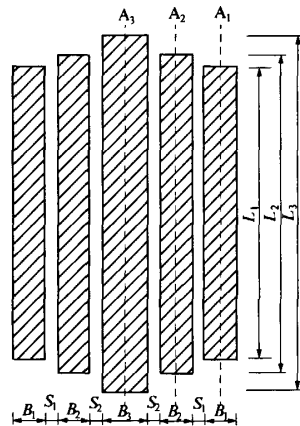


图 1 BZZ-100 对应的子午线轮胎接地面简化模型  
Fig. 1 Simplified calculation model for contact surface of radial tire-pavement structure corresponding to the standard axle load BZZ-100

轮胎-路面接触压力分布形式和大小的描述方法分两种: 一是通过试验仪器直接测量获取, 二是通过数值计算求得。轮胎-路面接触压力受轮胎的类型和结构、轮载和胎压、轮胎的运动状态等因素影响。笔者根据调研地的路面结构及交通组成等参数, 结合国内外已有研究成果<sup>[3-4]</sup>, 采用数理统计的方法得出轮胎-路面接触压力分布函

收稿日期: 2010-08-08; 修订日期: 2010-10-07

基金项目: 国家西部交通建设科技计划资助项目(2006 318 000 05)

作者简介: 郭红兵(1976-), 男, 陕西扶风人, 陕西交通职业技术学院讲师, 长安大学博士生, 研究方向为路面工程。  
E-mail: ghb200507@126.com

数. 将轮胎-路面接触应力分成 3 个组成部分(图 2):垂直接触应力、横向接触应力(与行车方向垂直)、纵向接触应力(行车方向).

表 1 BZZ-100 对应的子午线轮胎接地参数  
Tab.1 The parameters for contact surface of radial tire-pavement structure corresponding to the standard axle load BZZ-100

胎压 kPa/负载 kN	$L_1/mm$	$L_2/mm$	$L_3/mm$	$B_1/mm$
700/25	176.0	222.4	235.8	20.5
$B_2/mm$	$B_3/mm$	$S_1/mm$	$S_2/mm$	
32.0	44.0	10.0	8.0	

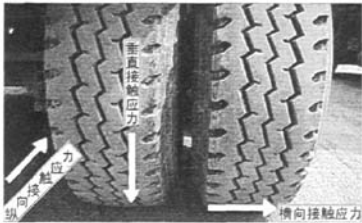


图 2 轮胎-路面接触效应三向接触应力  
Fig.2 3-D contact stress for contact effect of tire-pavement structure

2 有限元计算模型与参数

2.1 计算模型简化处理

根据黏弹性理论,为了便于分析,作如下假定:①沥青路面各结构层为均匀、连续、各向同性的;②各层层间竖向、水平位移均连续;③不计路面结构的自重影响;④将路面结构计算视为平面应变问题.经过计算误差收敛性分析,最终的基础扩大尺寸拟定为 10.50 m×9.00 m×16.00 m.沥青路面结构层的主要计算参数见表 2.行车荷载为标准轴载 BZZ-100,采用图 1 近似矩形轮胎接地面形状以及垂直、纵向和横向三向轮胎-路面接触应力分布函数进行有限元加载.

2.2 轮胎-沥青路面接触效应三维有限元模型

根据路面力学数值计算理论,应力分析时主要考察沥青面层的等效应力(Mises 应力) $\sigma_e$ 、最大剪应力 $\tau_{max}$ 及最大主应力 $\sigma_1$  3 个值<sup>[5]</sup>.此处采用 ABAQUS<sup>[6-7]</sup>进行路面结构的数值仿真分析.将沥青混凝土面层、沥青碎石基层、级配碎石底基层分别假设为一层,各结构层之间完全连续<sup>[8-9]</sup>.单元类型为八节点六面体线性减缩积分单元.轮

表 2 主要计算参数  
Tab.2 Main calculation parameters

项目	路面结构层			
	1	2	3	4
类型	沥青混凝土面层	沥青碎石基层	级配碎石底基层	土基
几何尺寸/m $x \times y \times z$	4.50×0.20×10.00	4.50×0.15×10.00	4.50×0.60×10.00	10.50×9.00×16.00
弹性模量 E/MPa	1 200	1 000	300	35
泊松比 $\nu$	0.25	0.35	0.35	0.40

胎-沥青路面接触效应的三维有限元模型<sup>[10]</sup>如图 3 所示.

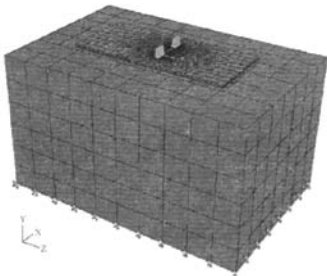
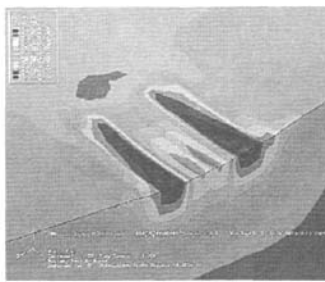


图 3 轮胎-沥青路面接触效应三维有限元模型  
Fig.3 3-D finite element model of contact effect of tire-asphalt pavement structure

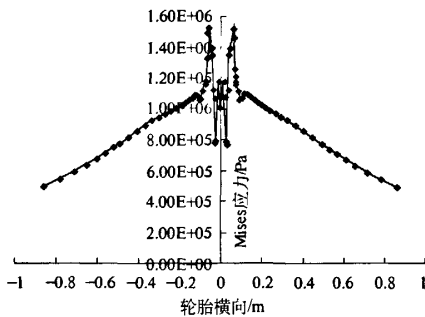
3 沥青路面结构应力分析

3.1 Mises 应力分析

Mises 应力是基于剪切应变能的一种等效应力,形状改变比能是引起材料破坏的主要原因.图 4 为轮胎-沥青路面接触效应的 Mises 应力云图及分布曲线.由图 4(a)可知:在轮胎纵向上,Mises 应力的分布在路面与轮胎接触的中前部存在最大值,向两侧逐渐减小,直至无穷远处应力逐渐消散.由图 4(b)可知,Mises 应力的最大值并未出现在矩形接触区域内部,而是位于路面与轮胎接触前部边缘的外侧.这说明在轮胎边缘处存在较高水平的剪切应变能,路面与轮胎接触区域的轮迹带边缘处容易出现剪切型开裂破坏.



(a) Mises 应力云图(路表及深度方向)



(b) Mises 应力分布曲线

图4 轮胎-沥青路面接触效应 Mises 应力

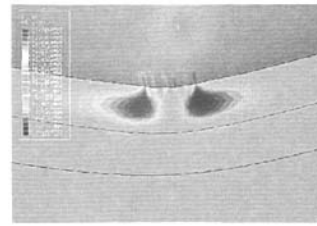
Fig.4 Mises stress of contact effect of tire-asphalt pavement structure

### 3.2 剪应力分析

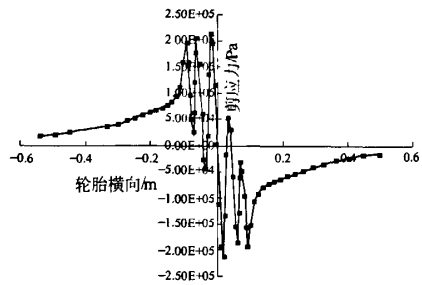
图5为轮胎-沥青路面接触效应的剪应力云图及分布曲线.由图5(a)可知,剪应力 $\tau_{\max}$ 在路表的分布与Mises应力的分布规律相类似.剪应力 $\tau_{\max}$ 的峰值在路表的分布位于轮胎边缘的两大区域,而路表与轮胎接触区域的内部剪应力 $\tau_{\max}$ 较小.由图5(b)可知,在两侧轮胎边缘附近明显存在两个剪应力的最大值,由边缘最大值处向接触区域中心和远离接触区域的方向逐渐减小,直至消散.轮迹带边缘的剪应力最大值是接触中心区域的6倍.图5(c)为轮迹带边缘沿深度向下剪应力分布曲线,由图可知剪应力由路表向下逐渐增加,在50~100 cm深度处(级配碎石底基层内)出现最大值.如此高的剪应力分布于路表轮迹带边缘,比较容易导致路表发生剪切型开裂破坏.

### 3.3 拉应力分析

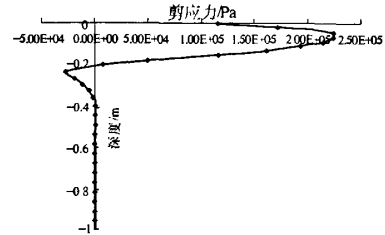
图6为轮胎-沥青路面接触效应的拉应力云图及分布曲线.由图6(a)可知,拉应力的分布与Mises应力和剪应力不同,其在路表分布较为复杂.在轮胎横向上,与轮地接触应力的分布较为类似,明显在5个矩形接触区域内存在5个峰值,在路面与轮胎接触区域的前部存在一片较大的压应



(a) 剪应力云图(路表及深度方向)



(b) 路表剪应力分布曲线



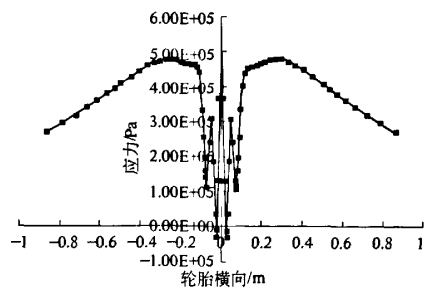
(c) 轮迹带边缘沿深度向下剪应力分布曲线

图5 轮胎-沥青路面接触效应剪应力

Fig.5 Shear stress of contact effect of tire-asphalt pavement structure



(a) 拉应力云图(水平及深度方向)



(b) 拉应力分布曲线

图6 轮胎-沥青路面接触效应路表拉应力

Fig.6 Tensile stress of contact effect of tire-asphalt pavement structure

力.在深度方向上,拉应力的最大值出现在路表且为压应力,并且沿深度方向向下逐渐减小.由图6(b)可知,5个较明显的拉应力峰值.接触区域与中心处的最大拉应力和轮迹带外侧的最大拉应力值大小相近.轮迹带边缘向无穷远处拉应力的消散较慢,在1m处仍然保持较高水平.所以按照拉应力的分布规律,在拉应力较高的轮迹带边缘和轮胎中心下方的路表位置,由于较高的拉应力的存在,从而导致路表产生沿轮迹带方向的张开型裂缝.

#### 4 结论

Mises 应力分析表明,在轮胎边缘处存在较高水平的剪切应变能,沥青路面与轮胎接触区域的轮迹带边缘处容易出现剪切型开裂破坏;剪应力分析表明,在路表轮迹带边缘处存在较大的剪应力,容易导致路表发生剪切型开裂破坏;拉应力分析表明,在轮胎横向上的5个矩形接触区域内明显存在5个拉应力峰值,在拉应力较高的轮迹带边缘和轮胎中心下方的路表位置,由于较高的拉应力的存在,从而导致路表产生沿轮迹带方向的张开型裂缝.

研究表明,沥青路面结构在非均布轮胎-路面接触应力作用下的力学响应与圆形均布荷载作用下的力学响应存在很大差别.

#### 参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 催胜明,余群. 汽车轮胎行驶性能与测试[M]. 北京:机械工业出版社,1995:20-47.
- [3] 陆金燕. 轮胎接地面三向力的动态测量[J]. 橡胶工业,1992,(10):609-614.
- [4] 酒井秀男著. 关于橡胶以及轮胎接触压力分布的测定和图像处理研究[J]. 管建民译. 橡胶工业,1995(11):30-38.
- [5] 王秉刚,邓学钧. 路面力学数值计算[M]. 北京:人民交通出版社,1992.
- [6] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [7] 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,2008.
- [8] 胡小弟,孙立军. 不同车型非均布轮载作用力对沥青路面结构应力影响的三维有限元分析[J]. 公路交通科技,2003,20(1):1-5.
- [9] 胡小弟,孙立军. 实测重型货车轮载作用下沥青路面力学响应[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,35(1):64-68.
- [10] 付其林,陈拴发,彭翀. 贫混凝土基层沥青路面温度-荷载耦合应力分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(3):82-86.

### Numerical Analysis on Contact Effect of Tire-Asphalt Pavement Structure

GUO Hong-bing<sup>1,2</sup>, WANG Ning<sup>3</sup>, LV Guang-yin<sup>1,4</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication and Technology, Xi'an 710018, China; 3. Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518034, China; 4. CAAC Shenzhen Safety Oversight Bureau, Shenzhen 518128, China)

**Abstract:** According to the problem of the contact effect of tire-asphalt pavement structure, the analysis accuracy of the simplified two-round model based on the traditional multi-layer elastic theory is very limited. In order to analyze the practical contact effect of tire-asphalt pavement structure, by using of the 3-D finite element method, under the action of non-uniform 3-D load, mises stress, shear stress and tensile stress of a typical asphalt pavement structure has been analyzed. The results show that, under the action of non-uniform 3-D load, there are a high level of shear strain energy and greater shear stress in the tire edge of the typical asphalt pavement structure, there are five peaks of tension stress in the transverse five rectangular contact area of the tire-asphalt pavement structure, its mechanical response is very different from that of the round uniform load.

**Key words:** road engineering; contact effect; 3-D finite element; vehicles load stress; contact shape; 3-D contact pressure