

文章编号:1671-8879(2016)06-0026-06

# 移动非均布荷载下的交叉口路面剪应力分析

张洪伟<sup>1,2</sup>, 王学营<sup>2</sup>, 刘振正<sup>2</sup>, 陈 璐<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 内蒙古自治区交通建设工程质量监督局, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

**摘要:** 交叉口、停车场和长大下坡路段等城市道路受力区域, 行车荷载复杂, 且加速、制动、转向等不同的车辆行驶状态带给路面极其复杂的受力状态。利用 ANSYS 进行移动非均布荷载下的路面剪应力有限元分析, 并采用解耦的方法来解决轮胎与路面接触的复杂问题, 即把轮胎与路面的相互作用分解为 2 个阶段来模拟。首先把路面简化成刚性面来近似处理, 建立轮胎与刚性面接触的静载模型, 并通过实测试验对模型进行验证, 进而得到接触面的应力分布, 然后把该应力结果施加到半刚性路面模型上。该路面模型考虑荷载分布形状和轮胎花纹的影响, 采用移动的横、纵都非均布的加载形式, 针对不同速度、加速度分析路面最大剪应力的分布规律。轮胎对路面的作用可以产生垂直、横向和纵向 3 个方向的应力, 接触面的横向力会显著影响近路表的路面应力情况。研究结果表明: 匀速状态下, 路表最大剪应力出现在第 2 花纹的两侧边缘, 比中点处的剪应力大了约 50%; 减速状态下, 路表最大剪应力在中间花纹; 匀速状态下, 路面最大剪应力出现在距路表约 2~6 cm 的沥青上面层中, 比路表剪应力大 20%; 减速状态下, 最大剪应力移动到路表; 速度和减速度都会影响路面的最大剪应力, 而减速度的变化对剪应力影响显著。

**关键词:** 道路工程; 交叉口; 剪应力; 有限元; 非均布荷载

**中图分类号:** U416.217 **文献标志码:** A

## Analysis on pavement shear stress at intersection under a moving non-uniform distributed load

ZHANG Hong-wei<sup>1,2</sup>, WANG Xue-ying<sup>2</sup>, LIU Zhen-zheng<sup>2</sup>, CHEN Lu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Inner Mongolia Communications Construction Engineering Quality Supervision Bureau, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co. Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract:** Complex road conditions such as complex traffic, complex acceleration, braking, steering and other different driving conditions of the urban road, such as intersection, parking lot and long downhill sections, bring extremely complex stress state to road surface. The pavement shear stress was analyzed under moving non-uniform load using ANSYS. The decoupling method was used to solve the complex issue of tire contact with road surface. Decoupling decomposed the tire-road interaction into two phases. A pavement was simplified to a rigid surface with the

收稿日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178348); 交通运输部建设科技项目(2014318J21060)

作者简介: 张洪伟(1982-), 男, 内蒙古赤峰人, 内蒙古自治区交通建设工程质量监督局正高级工程师, 工学博士, 同济大学博士后, E-mail: hhhtzhw@qq.com。

decoupling method, a static load model about a tire contacting with the rigid surface was established and validated by indoor tests to obtain the stress distribution of the contact surface, and then the stress was applied to the semi-rigid pavement model. The influence of load distribution shape and tread pattern were considered in this model, and the maximum shear stress of pavement was analyzed for different speeds and decelerations under the moving horizontal and vertical non-uniform loads. Considering the effect of load distribution and tread pattern, the pavement model was used to analyze the distribution law of maximum shear stress of pavement for different speeds and accelerations. The effect of tire on road surface could produce vertical, horizontal and lateral stress in three directions, and the contact surface of lateral force will significantly affect the road near the road surface stress. The results show that the maximum shear stress of road surface occurs at the edge of both sides of the second pattern under the uniform speed state, which is about 50% higher than that at the midpoint. The maximum shear stress of road surface occurs in the middle of pattern under the deceleration state. The maximum shear stress of pavement occurs at the top layer of asphalt pavement with a distance of about 2-6 cm to road surface under the uniform speed state, which is 20% greater than the shear stress of road surface. The maximum shear stress occurs at the road surface under the deceleration state. The speed and deceleration may both affect the maximum shear stress of pavement, but the influence of deceleration on the shear stress is significant. 5 tabs, 8 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; intersection; shear stress; finite element; non-uniform distributed load

## 0 引言

交叉口是道路的特殊地段,由于车流交织、信号灯、行人等因素的存在,车辆不再平稳高速行驶,而是出现制动、刹车、启动等变速运动,造成了交叉口地区路面损伤演变迅速,而过大的剪应力正是造成这种现象的主因之一<sup>[1-5]</sup>。

目前,路面响应分析的研究主要分室内试验、室外试验和有限元分析等几种。室内试验多为静载试验,难以模拟车辆的行驶过程;室外试验多采用在路面埋设传感器的方法,能很好地采集动态数据,但也受到传感器个数和仪器精度等限制;而利用 ANSYS 等进行有限元分析,则是建立三维有限元模型模拟得到路面的响应,方法适用较为广泛。如 Wang 等用有限元模型分析了三相接触应力和动态荷载对路面力学响应的影 响,并用现场检测结果对模型进行了验证<sup>[6-7]</sup>;孙立军把室外试验数据与有限元分析结合起来研究不同轮载、胎压下的路面力学响应<sup>[8]</sup>。目前,已经有一些利用有限元分析交叉口特殊区域的研究成果,如马新等研究了考虑水平荷载的道路交叉口沥青路面破损机理<sup>[9]</sup>;倪富健等进行了城市道路交叉口沥青路面受力的有限元分析<sup>[10]</sup>。

但是大部分的路面有限元分析仍是围绕一般高

速行驶状态下车辆的匀速、变速等情况,而涉及交叉口这种低速、频繁制动环境下的路面有限元分析则较少,采用的是矩形荷载或条形非均布荷载,且有些只考虑了静载的状态。分析轮胎对路面的作用主要考虑两方面因素:接地形状和接触应力分布。根据 Siddharthan 等研究表明,轮胎路面接触应力的分布情况显著影响路面的力学响应<sup>[11-14]</sup>;姚占勇等研究发现,不同轮压分布形式对路面指标中影响最大的是剪切指标,超载时,轮压非均布下的最大剪应力值超过轮压均布下的 3 倍多<sup>[15]</sup>。而交叉口的车辙、拥包等病害与路面剪应力有很大关系,故采用非均布荷载的形式来研究交叉口的路面响应更加合理。为此,本文采用移动的横、纵都非均布的加载形式,针对不同速度、加速度分析路面最大剪应力的分布规律。轮胎对路面的作用可以产生垂直、横向和纵向 3 个方向的应力,接触面的横向力会显著影响近路表的路面应力情况,因而不能被忽视;同时本文在对路面加载时除了垂直的应力外,还考虑了横向力,而纵向力相比之下较小可忽略不计。

## 1 有限元模型

### 1.1 路面结构参数

路面结构参考中国一般的沥青路面,具体参数

取值见表1。

表1 路面结构参数

Tab.1 Pavement structure parameters

结构层	厚度/cm	动态模量/ MPa	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
中粒式沥青混凝土	4	2 917	0.35	2 600
粗粒式沥青混凝土	6	2 390	0.35	2 600
沥青碎石	7	2 390	0.35	2 600
水稳碎石	25	1 400	0.20	2 100
二灰土	27	800	0.20	1 950
土基		35	0.40	1 600

由于沥青混凝土模量随着温度和车辆行驶状态的变化较明显,故在研究动态荷载时采用动态模量较为合适。考虑到交叉口为低速区,车辙等病害易在高温下产生,因此取低频率、高温下的沥青混凝土动态模量<sup>[16]</sup>。

## 1.2 路面模型的建立和接地形状的简化

利用有限元程序 ANSYS 模拟建立沥青路面。采用六面体 8 节点的 Solid45 体单元建立路面模型,并利用 Plane42 面单元进行荷载的施加。路面厚度取 10 m,移动荷载施加区域距离各水平边界的距离为 2 m,荷载施加区域的长度根据荷载施加的步数来确定。

本文研究纵向花纹轮胎,对实际的轮胎接地形状做了以下简化,如图 1 所示。

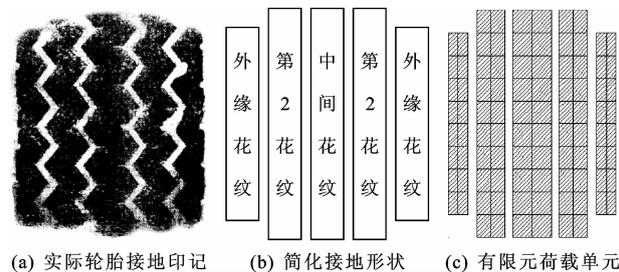


图1 接地形状

Fig.1 Ground shape

## 1.3 横向力与汽车制动力

根据相关研究结果,垂直应力和横向力的比值取  $1 : 0.27$ <sup>[17]</sup>。

车辆的制动力相当于作用在轮胎-路面接触面内的单向均布水平荷载。轮胎对路面的最大作用力  $F_{\max}$  为

$$F_{\max} = F\varphi \quad (1)$$

式中: $F$ 为轮胎对路面的垂直应力; $\varphi$ 为路面的附着系数,对于车辆行驶速度 48 km/h 以下、交通量大的干燥沥青路面,附着系数取  $0.55 \sim 0.75$ <sup>[18]</sup>,本文路面附着系数  $\varphi$  为 0.7。

由  $\varphi=0.7, g=9.8 \text{ m/s}^2$  (重力加速度),可得制动的最大减速度为

$$a_{\max} = g\varphi = 6.86 \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

因此,最大减速度对应最大制动力,而不同的减速度对应的制动力不同。

## 1.4 速度、加速度的选取和荷载步施加时间

考虑到减速度存在急刹车等变速比较大的情况,而加速度绝对值相对较小,故本文的变速情况仅考虑减速的情况。参考相关研究资料,速度、加速度的具体取值如表 2 所示<sup>[19-20]</sup>。

表2 速度、加速度的取值

Tab.2 Velocity, acceleration values

参考资料		本文取值	
交叉口运行车速/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	20~40	匀速状态/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	20, 30, 50
最大加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	1.7~2.3	减速状态/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	2, 4, 6
最大减速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	6.86		

在变速的情况下,每个荷载步的施加时间根据汽车的初始速度和加速度进行计算确定。根据公式,可以得到第  $i$  个荷载步的施加在  $t$  时刻进行,计算过程如下

$$t = \frac{\sqrt{V_0^2 + 2aS} - V_0}{a} \quad (3)$$

式中: $a$ 为车辆加速度; $V_0$ 为初速度; $S=i/d$ ,为第  $i$  个荷载步时车辆走过的距离, $d$ 为单步长度。

将加速度  $a$  值代入,可求出每个荷载步施加的时间。汽车制动减速条件下加速度  $a$  为负值,荷载作用在每个单元上的时间逐渐增加,因此模拟出汽车刹车的效果。

## 1.5 非均布荷载

本文参考 Wang 的研究方式,利用解耦的形式,来解决轮胎与路面接触的复杂问题<sup>[17]</sup>。解耦,即把轮胎与路面的相互作用分解为 2 个阶段来模拟:首先把路面简化成刚性面来近似处理,建立轮胎与刚性面接触的静载模型,得到接触面的应力分布;然后把该应力结果施加到本文的半刚性路面模型上。施加应力的具体做法是:首先根据接触面的应力分布形状确定荷载施加面的尺寸,并根据尺寸划分适当的网格;然后在划分的各个单元施加相应的均布荷载,其荷载大小是落在该方格内的应力散点数据的平均值。如下页图 2 所示, $P11 \sim P15$  是中间花纹的荷载, $P21 \sim P25$  是第 2 花纹的荷载, $P31 \sim P34$  是外缘花纹的荷载。

解耦的第 1 步,建立三维轮胎模型并验证充气

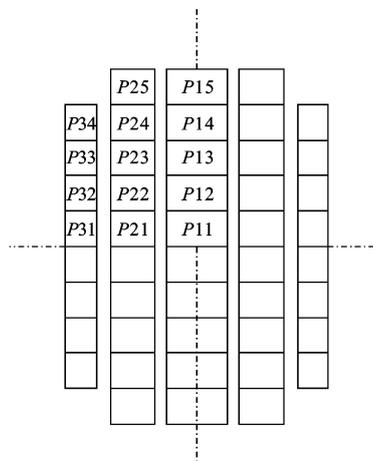


图 2 非均布荷载施加示意

Fig. 2 Schematic of non-uniform load

状态下轮胎变形特性,标定模型。本文选择一种斜交轮胎(9.0-20),花纹考虑纵向花纹一种形式,且考虑的是静止状态。组成轮胎的橡胶材料被假定为线弹性材料,复合材料采用各向异性的层状单元模拟,各个方向的模量通过复合材料理论计算确定,建立轮胎路面接触模型。

为了证明模型的正确性和合理性,对轮胎与路面接触的静载模型进行实测验证。由于直接实测 9.0-20 规格的斜交轮胎难度较大,为了方便 MTS 试验机施加荷载,如图 3 所示,验证试验中采用 MMLS3 轮胎。胎压选择 0.7 MPa,荷载水平选择标准荷载(2.7 kN)和 60%标准荷载(1.6 kN)。使用压力传感器法实测静载条件下轮胎路面接触应力。

实测结果和相应的 MMLS3 轮胎有限元模型计算结果见表 3。可以看出,2 种荷载水平下,各花纹带范围内轮胎路面接触应力大小呈现出明显的非均布特征。计算值和实测值之间可较好吻合,最大偏差仅为 0.05 MPa。实测值总体上大于计算值,这可能是由于真实轮胎的胎面花纹造成实际接触面积偏小,进而导致接触应力增大。

上述分析表明,采用三维有限元模型计算得到的接触应力分布计算结果与实测结果吻合度很高,可以采用它作为输入。然后,建立斜交轮胎(9.0-20)-刚性面模型,并计算得到接触面应力分布,如图 4 所示,对应的实际工况为胎压 0.81 MPa,轴载 13.25 kN。

### 1.6 移动荷载的施加

移动荷载模拟轮胎的移动过程,如图 5 所示。通过沿荷载移动方向设置荷载移动带来实现,如下页图 6 所示。移动带长度为轮载行驶的距离,将荷载移动带根据非均布荷载分布网格的大小细分成许



(a) 室内非均布荷载施加



(b) 接触应力实测试验

图 3 室内非均布荷载施加与接触应力实测试验示意  
Fig. 3 Schematic of non-uniform load and contact pressure test indoor

表 3 轮胎路面接触应力分布验证

Tab. 3 Validation of tire contact pressure distribution

工况		平均接触	中间花纹	第 2 花纹	第 3 花纹	外缘花纹
		应力/ MPa	平均应 力/MPa	平均应 力/MPa	平均应 力/MPa	平均应 力/MPa
低载(60% 标准荷载)	计算值	0.35	0.54	0.38	0.12	0.01
	实测值	0.36	0.50	0.43	0.16	0.01
标准荷载	计算值	0.42	0.61	0.51	0.26	0.11
	实测值	0.44	0.66	0.52	0.28	0.15

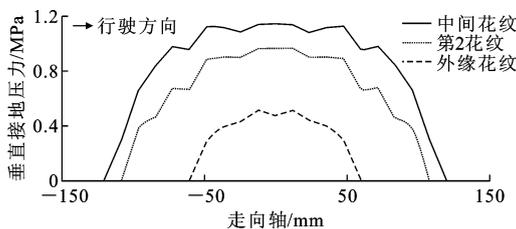


图 4 轮胎接地压力分布

Fig. 4 Tire contact pressure distribution

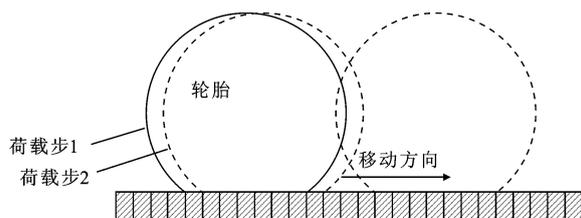


图 5 荷载步模拟轮胎移动的过程

Fig. 5 Mobile tire load step simulation process

多小矩形。加载过程是在1个接触面积上加载较短时间作为1个荷载步,求解结束后将该荷载删除;将同样的非均布荷载施加在第2个相连的接触面积上,继续求解,重复上述步骤直到将荷载施加到行车道上最后1个单元为止,利用循环语句来实现重复荷载的施加过程。

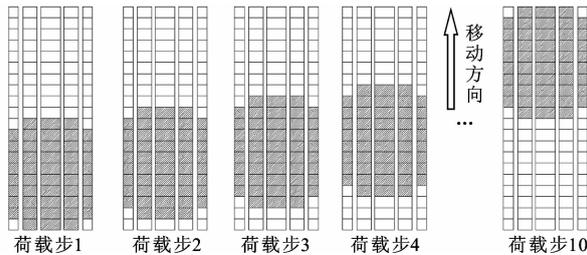


图6 移动荷载施加方式

Fig. 6 Way of moving loads applied

## 2 交叉口路面剪应力规律分析

### 2.1 匀速、减速状态下深度方向路面剪应力分布

取各个花纹的中间点为观测点,图7为匀速(速度30 km/h)与减速(初速度30 km/h,减速度 $6 \text{ m/s}^2$ )情况下,在深度方向 $0 \sim 0.38 \text{ m}$ 计算范围内,路面剪应力随深度的变化趋势,可以看出以下几点。

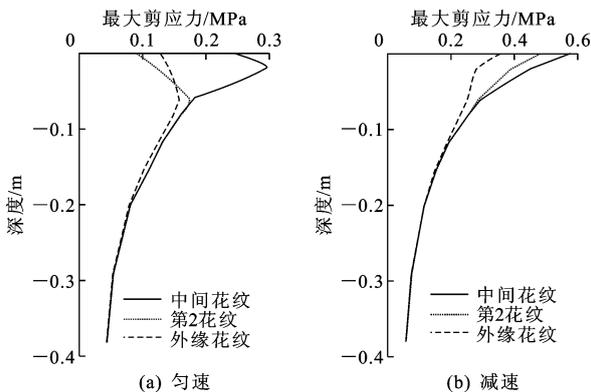


图7 匀速与减速情况下路面剪应力随深度的变化

Fig. 7 Changes of shear stresses of pavement with depth under the conditions of constant speed and deceleration

(1)采用本文提出的非均布荷载计算得到的剪应力分布与采用常用的矩形荷载和简化条形非均布荷载得到的计算结果差异十分明显。例如,在相同的匀速和减速条件下,当采用常用的矩形均布荷载(双轮中心距32 cm,接地压力0.7 MPa,单轮轮印长度22 cm,宽16.2 cm)计算时,所得路表最大剪应力分别为0.13 MPa和0.44 MPa,且在横向上均位于轮胎接地面的外侧。非均布荷载作用下路表最大剪应力的分别是其1.9倍和1.4倍。

(2)匀速状态下的各花纹路面最大剪应力位于距

路表约 $2 \sim 6 \text{ cm}$ 的沥青上面层,比路表处大 $20\% \sim 90\%$ 。其中,中央花纹的剪应力最大,最大剪应力分别比第2花纹和外缘花纹大 $70\%、86\%$ 。第2花纹在上面层的最大剪应力大于外缘花纹,但路表剪应力则小于外缘花纹。

(3)减速状态下的最大剪应力在路表,中央花纹的剪应力最大,分别比第2花纹和外缘花纹大 $20\%、62\%$ 。

(4)减速状态下的路面最大剪应力约比匀速状态下的大 $1 \sim 2.5$ 倍。

### 2.2 匀速、减速状态下路表剪应力分布

匀速与不同减速度情况下的路表剪应力横向分布如图8所示(初速度均为 $30 \text{ km/h}$ ,其中 $a=0$ 为匀速情况),可以总结出以下几点。

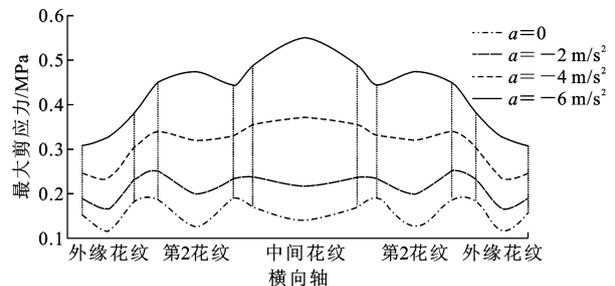


图8 匀速与不同减速度下的路表剪应力横向分布

Fig. 8 Lateral distribution of shear stresses of surface under the conditions of constant speed and different decelerations

(1)路表最大剪应力的分布与花纹和减速度有很大关系,其中减速度的影响显著。当减速度从 $2 \text{ m/s}^2、4 \text{ m/s}^2$ 到 $6 \text{ m/s}^2$ ,以中间花纹中点的剪应力为例,分别比匀速状态下相同位置的高 $54\%、165\%$ 和 $292\%$ 。

(2)匀速状态下,花纹边缘的剪应力明显大于花纹中间,中间花纹、第2花纹、外缘花纹的边缘剪应力分别比花纹中间的应力大 $22\%、50\%、57\%$ ,最大剪应力出现在第2花纹的两侧边缘,并不在整个轮迹带的边缘。

(3)随着减速度的增加,花纹中间的剪应力逐渐变大并超过边缘应力,最大剪应力逐渐移动到中间花纹条。可以看出由于减速度越大,制动力带来的水平力越大,水平剪应力的大小已经超过了花纹边缘的竖向剪应力而成为主导。

### 2.3 匀速状态不同速度下的最大剪应力

根据前面章节的分析,选择 $20 \sim 50 \text{ km/h}$ 的速度范围来研究速度对于剪应力的影响,见下页表4。

表 4 不同速度下的最大剪应力

Tab. 4 Maximum shear stress under different speeds

匀速/(km·h <sup>-1</sup> )	20	30	50
最大剪应力/MPa	0.205	0.200	0.184

由表 4 可以看出,最大剪应力随车速的降低而增加,从 50 km/h 降到 20 km/h,最大剪应力增幅约为 11%。交叉口的车速普遍较低,因此也造成了交叉口路面剪应力水平偏大。

## 2.4 减速状态不同减速度下的最大剪应力

减速度的变化对最大剪应力的影响更加显著,见表 5。

表 5 不同减速度下的最大剪应力

Tab. 5 Maximum shear stress under different decelerations

加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	0	-2	-4	-6
最大剪应力/MPa	0.200	0.265	0.396	0.651

最大剪应力呈现出随减速度的增加而增加的趋势。减速度为 4 m/s<sup>2</sup> 和 6 m/s<sup>2</sup> 时,分别比 2 m/s<sup>2</sup> 时的最大剪应力高 49% 和 146%,比匀速状态下的约高 1~2.5 倍。

## 3 结 语

(1)本文在传统的均布荷载、条形非均布荷载的基础上,考虑接地形状和轮胎花纹,细化了荷载分布,采用横、纵向都非均布的荷载形式,更加接近真实的轮胎-路面作用。并通过室内实测试验对模型进行验证,结果证明模型合理可靠。模型分析结果表明,非均布荷载形式下路面剪应力计算结果与传统荷载形式下的计算结果有显著差异,该模型对于研究交叉口等复杂区域的路面受力分析有一定优势。

(2)匀速状态下,花纹边缘的剪应力明显大于花纹中间,路表最大剪应力不在整个接触面的边缘,而是出现在第 2 花纹的两侧边缘;减速状态下,随着减速度的增加,路表最大剪应力向花纹中间移动,最大剪应力在中间花纹的中点。

(3)匀速状态下,路面的最大剪应力出现在距路表约 2~6 cm 的沥青面层中;减速状态下,随着减速度的增加,最大剪应力向着路表移动。

(4)交叉口车速普遍较低,刹车和启动频繁,而最大剪应力随车速的降低而增加,变速行驶时路表的最大剪应力又明显大于静止和匀速行驶时的值,所以,交叉口路面过大的路表剪应力很容易引起沥青路面的剪切变形和剪切型的疲劳开裂。

(5)进行交叉口路面结构组合设计时,有必要引

入剪切指标并采用移动非均布荷载。

(6)在计算机硬件允许的条件下,下一步可以对轮胎模型进行改进,考虑更为复杂的胎面花纹,对于与路面发生直接接触的胎面橡胶材料使用超弹性本构模型模拟。

## 参考文献:

### References:

- [1] HU X, WALUBITA L F. Effects of layer interfacial bonding conditions on the mechanistic responses in asphalt pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(1): 28-36.
- [2] WANG H, AL-QADI I L. Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking[J]. Road Materials and Pavement Design, 2010, 11(1): 101-121.
- [3] ALKAN V, KARAMIHAS S M, ANLAS G. Finite element modeling of static tire enveloping characteristics[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(4): 529-535.
- [4] WANG H, AL-QADI I L. Importance of nonlinear anisotropic modeling of granular base for predicting maximum viscoelastic pavement responses under moving vehicular loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(1): 29-38.
- [5] HARMELINK D, SHULER S, ASCHENBRENER T. Top-down cracking in asphalt pavements: causes, effects, and cures[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(1): 1-6.
- [6] WANG H, AL-QADI I L. Combined effect of moving wheel loading and three-dimensional contact stresses on perpetual pavement responses[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2095: 53-61.
- [7] AL-QADI I L, WANG H, YOO P J, et al. Dynamic analysis and in-situ validation of perpetual pavement response to vehicular loading[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2087: 29-39.
- [8] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
SUN Li-jun. Structural behavior study for asphalt pavements[M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 马新, 郭忠印, 杨群. 考虑水平荷载的道路交叉口沥青路面破损机理力学分析[J]. 公路工程, 2008, 33(5): 74-76, 81.

(下转第 47 页)