

# 虚拟轨道列车作用下黏弹性路面响应及变形分析

王承萍<sup>1</sup>, 张济民<sup>1</sup>, 周和超<sup>1</sup>, 陆海英<sup>2</sup>

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 中国中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 吉林 130062)

**摘要:** 虚拟轨道列车作为一种新兴的交通工具, 充分发挥了公路运输适应性强和轨道列车运输量大的特点, 经调研发现该车运行线路已产生严重的永久变形。采用解耦的方式将轮胎与刚性路面相互作用模型的三向接触力提取并施加到黏弹性沥青有限元模型, 针对虚拟轨道列车轮胎在匀速、完全制动及转弯3种行驶工况下沥青路面的动力学响应及永久变形进行分析研究。研究结果表明, 路表剪应力和永久变形在匀速行驶时均随速度的增加而减小, 其中, 运行速度为 $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的路表剪应力较 $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的分别增大65%(纵向范围)、54%(横向范围);  $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 较 $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的纵向、横向和垂向永久变形均增大50%左右。在纵向范围内完全制动比匀速行驶的路表最大剪应力增大66%, 沿道路深度方向增大76%。纵向永久变形在完全制动时较匀速行驶时分别增大93%(10.512万次)、99%(52.560万次)、100%(105.120万次)。垂向永久变形在转弯时沿着轮胎转弯内侧累积。完全制动的剪应力最大值相较于匀速时下垂0.01m。因此, 从控制路面剪应力及永久变形的角度, 列车运行速度越高越有利于减缓路面损坏; 在列车制动/启动及转弯位置要提高沥青混合料抗剪强度来预防沥青路面沿纵向和横向的累积变形。

**关键词:** 沥青路面; 接触力; 剪应力; 动力学响应; 永久变形  
**中图分类号:** U416.2 **文献标志码:** A

## Dynamic Response and Permanent Deformation Analysis of Asphalt Pavement under the Virtual Rail Train

WANG Chengping<sup>1</sup>, ZHANG Jimin<sup>1</sup>, ZHOU Hechao<sup>1</sup>, LU Haiying<sup>2</sup>

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. CRRC Changchun Rail Bus Co., Ltd., Jilin 130062, China)

**Abstract:** As a new type of transportation, virtual rail train has brought into full play the characteristics of strong adaptability of road transportation and large

capacity of rail train. It is found that the running line of the virtual rail train has produced serious permanent deformation. Therefore, this paper uses a decoupling method to extract the three-way contact force of the tire-rigid road interaction model and act on the viscoelastic asphalt finite element model, aiming at the virtual track train tires in the three driving states of constant speed, full braking and steering. The dynamic response and permanent deformation of asphalt pavement are analyzed and studied. The research results show that the road surface shear force and permanent deformation both decrease with the increase of speed when driving at a constant speed. Among them, the road surface shear force at a running speed of  $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  increases by 65% respectively compared with that of  $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  (longitudinal range), 54% (transverse range); the permanent deformation of  $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  is about 50% larger than that of  $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ . In the longitudinal range, the maximum shear force of full braking is 66% higher than that of the road surface driving at a constant speed, and 76% is increased along the road depth. Longitudinal permanent deformation increases by 93% (10.512 million times), 99% (52.56 million times), and 100% (105.12 million times) respectively when fully braking compared to when driving at a constant speed. The maximum road surface shear force and the maximum horizontal and vertical permanent deformation are located on the inner side of the steering when turning. The maximum value of shear force under constant speed driving, full braking, and turning is on the upper layer. The maximum value of constant speed driving and turning is 0.03m from the road surface, and the maximum value of full braking is 0.04m away from the road surface. From the perspective of controlling road shear and permanent deformation, the higher the train running speed, the better it is to reduce road damage.

收稿日期: 2020-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1201603-08)

第一作者: 王承萍(1993—), 女, 博士生, 主要研究方向为车辆动力学、道路工程。

E-mail: wangchengping@tongji.edu.cn

通信作者: 张济民(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆动力学、机电一体化、道路工程。

E-mail: zjm2011@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

**Key words:** asphalt pavement; contact stress; shear stress; dynamic response; permanent deformation

虚拟轨道列车兼具公共汽车、有轨电车及轻轨的优点,能够解决中小城市交通难的问题。目前,株洲、哈尔滨、永修、宜宾4个城市已开通虚拟轨道列车示范线或试运营线路,江苏盐城已确定将引进虚拟轨道列车项目,在成都、西安、重庆、多哈等80余个国内外城市进行了虚拟轨道列车项目跟进。因此,虚拟轨道列车在未来具有一定的发展及应用前景。

实地调研湖南株洲虚拟轨道列车和四川宜宾智轨的运行线路,发现该车运行线路已产生严重的永久变形,沥青路面永久变形的产生会影响路面的平整度,进而降低乘坐的舒适性,还会影响沥青路面的使用质量和服务寿命,因此,路面永久变形问题值得进一步分析与研究。

轮胎作为虚拟轨道列车载荷的传递媒介,与沥青路面之间的接触力具有非均匀性,并且该接触力的分布对路面的动力学响应有着显著影响<sup>[1-5]</sup>。Jiang等<sup>[6]</sup>研究了匀速行驶工况时非均匀接触力作用下的柔性路面的响应;Shojaeifard等<sup>[7]</sup>分析了匀速和制动行驶工况下的沥青路面的永久变形;黄佳等<sup>[8]</sup>、张宏伟等<sup>[9]</sup>对城市交叉口沥青路面的剪应力及永久变形进行了研究;张兰峰等<sup>[10]</sup>分析了考虑横向力作用下的路面剪应力分布;王扬等<sup>[11]</sup>探讨了复杂匀速运动轮胎力作用下的路面力学行为;钱振东

等<sup>[12]</sup>分析了低速、变速行驶工况下车辆动载对沥青路面结构的动力学响应。

上述研究已取得了一系列有意义的研究结果,但大多将汽车或货车轮胎与路面间的接触力均匀化、行驶工况单一化后研究沥青路面的动力学响应和永久变形,虚拟轨道列车轮胎与路面之间的接触力相较于汽车轮胎与路面之间的接触力而言更具有复杂性以及行驶工况的多样性。

本文重点针对虚拟轨道列车轮胎在匀速、完全制动及转弯3种工况下产生的三向非均匀接触力规律及该接触力作用下沥青路面的动力学响应及永久变形进行研究。

## 1 有限元模型的建立

路面结构模型采用典型的半刚性基层路面结构,基于沥青路面黏弹性层状体系的基本假设,在ABAQUS软件中建立6层沥青路面有限元模型,即上面层、中面层、下面层、基层、底基层、土基,如图1所示,模型X轴方向为行车方向(纵向),Y轴方向为路面宽度方向(横向),Z轴负方向为路面深度方向(垂向),整个路面模型的几何尺寸为长、宽、高分别为3m、2m、3m。对路面有限元模型施加如下边界条件:横向两侧面设置为对称边界条件,对称面为与坐标轴X垂直的平面;纵向两侧面设置为对称边界条件,对称面为与坐标轴Y垂直的平面;底面设置为约束所有自由度。

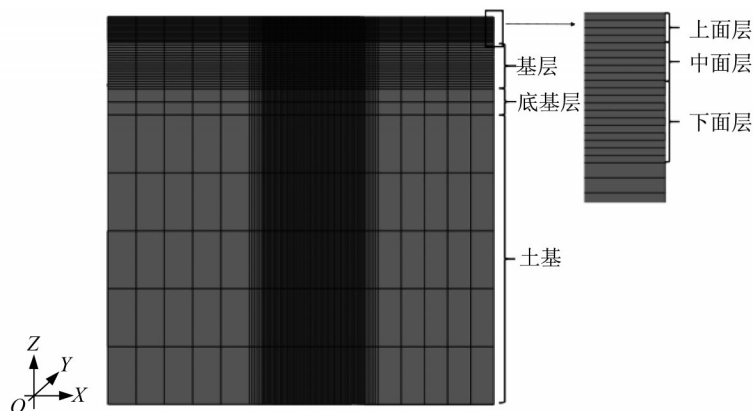


图1 沥青路面有限元模型

Fig. 1 The finite element model of asphalt pavement finite element model

在车辆载荷作用下,某时刻 $t$ 下沥青混合料的总应变 $\epsilon(t)$ 包括弹性应变 $\epsilon_e$ 和非弹性应变 $\epsilon_m$ (包括塑性应变 $\epsilon_p$ 和蠕变应变 $\epsilon_c$ ),当沥青混合料还未进入屈服

阶段时,塑性应变 $\epsilon_p = 0$ ,此时总应变 $\epsilon(t)$ 可表达为

$$\epsilon(t) = \epsilon_e + \epsilon_c \quad (1)$$

式中: $\epsilon_e$ 与时间 $t$ 无关; $\epsilon_c$ 是时间 $t$ 、温度 $T$ 、力 $\sigma$ 的函

数。在车辆荷载作用下,固定温度的情况时, $\epsilon_c$ 可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\epsilon_c = f(t, \sigma) = \frac{A}{m+1} \sigma^n t^{m+1} \quad (2)$$

式中: $A$ 、 $m$ 、 $n$ 为材料的蠕变参数。轮胎与路面之间的接触力是非均匀的,采用应变硬化蠕变关系式:

$$\dot{\epsilon}_c = \left\{ A \sigma^n [(m+1) \epsilon_c]^m \right\}^{\frac{1}{m+1}} \quad (3)$$

沥青混合料面层均采用蠕变模型中应变硬化关系式来描述其黏弹性行为,其他各层采用线弹性本构模型,路面结构参数及材料参数如表1所示。

表1 路面结构参数及材料参数<sup>[11]</sup>

Tab.1 Structural and material parameters of pavement<sup>[11]</sup>

结构层	厚度/cm	模量/MPa	泊松比	$A$	$m$	$n$
上面层(改性AC)	4	526	0.45	$1.464 \times 10^{-5}$	0.336	-0.502
中面层(改性AC)	6	440	0.40	$4.802 \times 10^{-6}$	0.595	-0.532
下面层(沥青碎石)	10	710	0.35	$1.956 \times 10^{-8}$	0.830	-0.562
基层(CBG)	36	1 600	0.35			
底基层(CBG)	20	800	0.20			
土基(LFS)		30	0.40			

## 2 接触力及加载方式

虚拟轨道列车采用3节编组,单车的载重为9t,轮胎规格为385/65 R22.5(标准充气压力为900kPa,单轮承载45kN)。虚拟轨道列车每日运行时间为6:00—22:00,每日运行16h。表2为轮胎通过某一断面的次数统计。

表2 通过某一断面的次数统计

Tab.2 Statistics of the number of times through a section

1天	1年	5年	10年
288	105 120	525 600	1 051 200

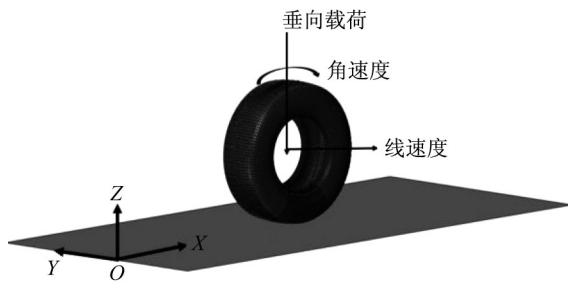


图2 轮胎-刚性路面有限元模型

Fig.2 Finite element model of tire-rigid pavement

轮胎-刚性路面接触模型如图2所示,轮胎(垂向载荷为45kN,充气压力为900kPa)滚动时线速度与滚动角速度之间的关系由式(4)给出:

$$s = \frac{v_x - \omega r}{v_x} \quad (4)$$

式中: $s$ 为滑移率; $v_x$ 为平动速度, $m \cdot s^{-1}$ ;  $r$ 为有效滚动半径, $m$ ;  $\omega$ 为滚动角速度, $rad \cdot s^{-1}$ 。

图3给出了轮胎滑移率与纵向力及扭矩之间的

关系。随着轮胎转动角速度的增加,轮胎的运动工况逐步由制动转变为牵引。当滑移率为 $s=0$ 时,轮胎处于自由滚动状态;当滑移率 $s < -0.1$ 时,轮胎处于完全制动状态;当滑移率 $s > 0.1$ 时,轮胎处于完全牵引状态。轮辋中心在完全制动和完全牵引工况下纵向力最大且方向相反。在后续研究中选取完全制动进行分析计算。

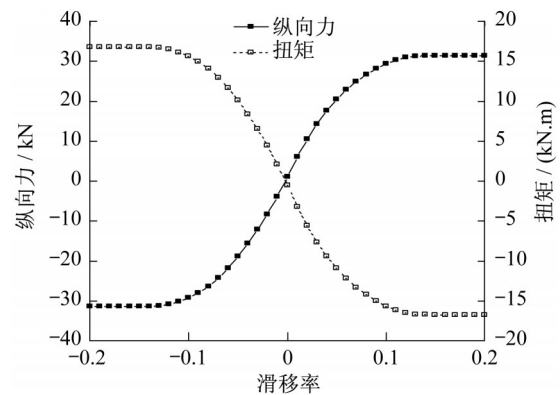


图3 轮辋中心受力情况

Fig.3 Force on the rim center

轮胎的垂向载荷为45kN,充气压力为900kPa,以 $60 km \cdot h^{-1}$ 的速度做匀速运动时的三向接触力如图4所示,垂向接触力最大值在胎冠中心,横向接触力与纵向接触力分别沿着X轴和Y轴对称,相对于垂向接触力来说较小。

轮胎的垂向载荷为45kN,充气压力为900kPa,以 $60 km \cdot h^{-1}$ 的速度,滑移率为0.1做完全制动时的三向接触力如图5所示,纵向接触力相对于匀速时明显增大且均为正值,垂向接触力和横向接触力最大值相对于匀速时基本无差别。



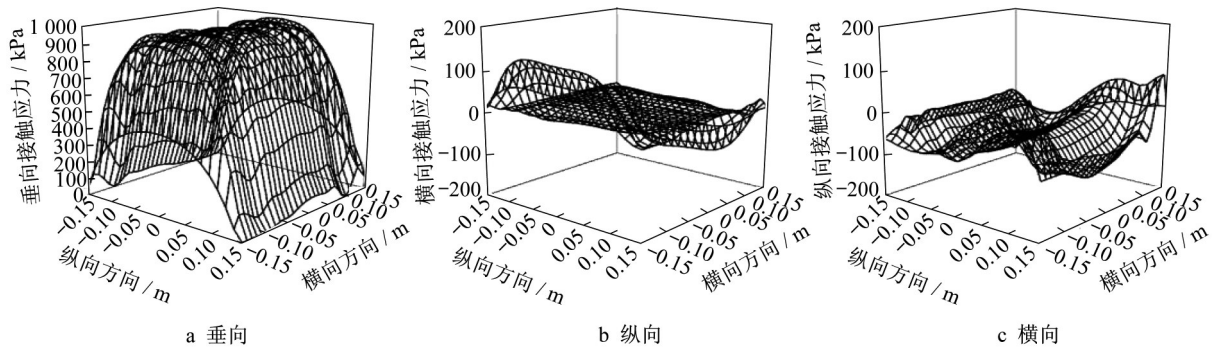


图 4 匀速时轮胎-路面三向接触力

Fig. 4 Tire-pavement contact stresses at the uniform motion condition (a: vertical; b: longitudinal; c: lateral)

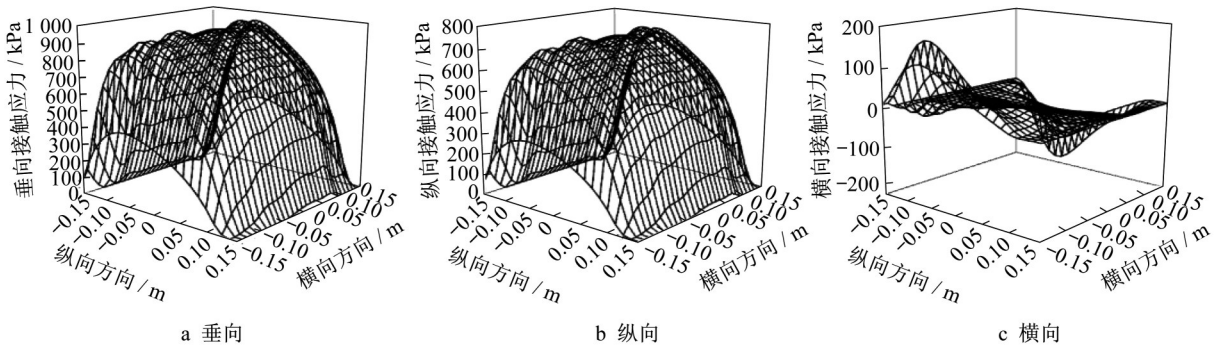


图 5 完全制动时轮胎-路面三向接触力

Fig. 5 Tire-pavement contact stresses at the fullbrake condition (a: vertical; b: longitudinal; c: lateral)

侧偏角是由于轮胎在转弯过程中行驶方向偏离原行驶方向所产生的,有相关研究<sup>[3]</sup>表明:垂向接触力会随着侧偏角的增大而增大,当侧偏角的角度达到5°后,垂向接触力会趋于一个稳定值。图6给出了

轮胎转弯(运行速度为10km·h<sup>-1</sup>,侧偏角度5°)轮胎-路面三向接触力,垂向接触力与横向接触力的最大值均位于转弯内侧,纵向接触力的值相对于垂向和横向接触力较小。

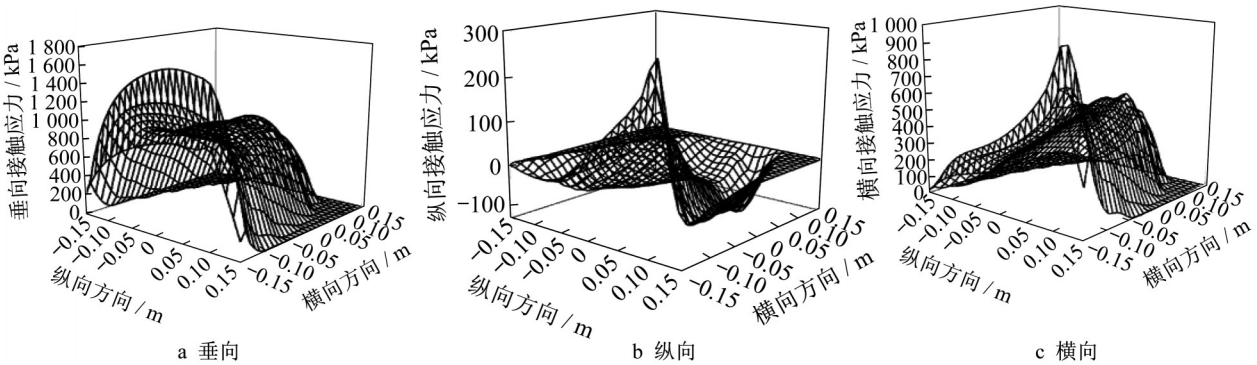


图 6 转弯时轮胎-路面三向接触力

Fig. 6 Tire-pavement contact stresses at the cornering condition

将轮胎与路面的接触区域划分为若干个子区,每一个子区对应接触区域内的一个单元,并将各个单元的接触力视为均布力,基于解耦的思想,将各个单元的接触力以等效载荷<sup>[7]</sup>的方式作为外载荷施加到沥青路面有限元模型进行计算分析。

### 3 沥青路面动力学响应及永久变形分析

#### 3.1 匀速行驶下沥青路面动力学响应及永久变形分析

分析虚拟轨道列车在匀速行驶工况下的沥青路面动力学响应及永久变形分析,能为列车运行速度提出建议,减缓路面损伤。计算分析轮胎在垂向载

荷为45kN、充气压力900kPa、运行速度为20km·h<sup>-1</sup>、40km·h<sup>-1</sup>和60km·h<sup>-1</sup>下的沥青路面动力学响应及永久变形。

接触力作用1次后的剪应力分布如下:图7a、7b分别给出沥青路面表面在行车横向和纵向范围的变化趋势,路表剪应力的最大值随着速度的增大而减

小,20km·h<sup>-1</sup>运行速度下的剪应力比60km·h<sup>-1</sup>运行速度下的剪应力增大65%(纵向范围)、54%(横向范围)。图7c表示不同行驶速度下剪应力沿着道路深度方向的分布,剪应力的最大值0.0027MPa(20km·h<sup>-1</sup>)、-0.0023MPa(40km·h<sup>-1</sup>)、-0.0017MPa(60km·h<sup>-1</sup>)位于距离路表0.03m上面层。

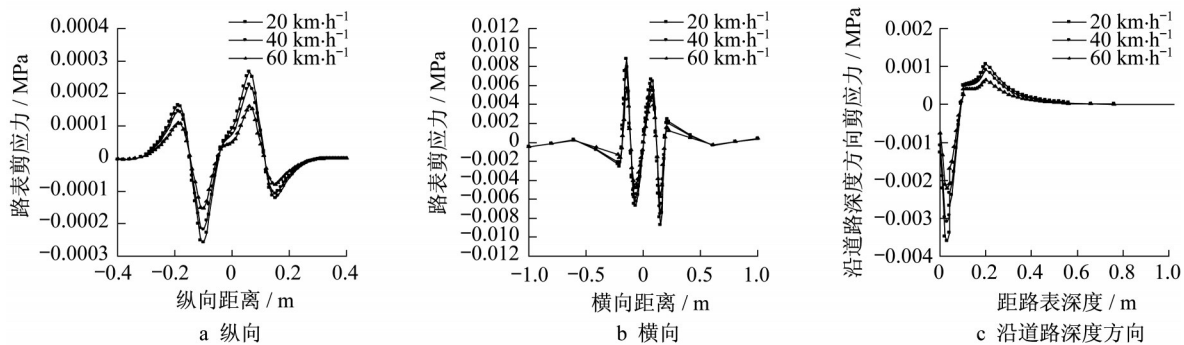


图7 匀速工况下的剪应力分布

Fig. 7 Shear stress distribution at uniform speed condition

由表3可以看出,匀速行驶工况下3个方向上的永久变形随着速度的增加而减小,同一断面行驶105.12万次后,20km·h<sup>-1</sup>比40km·h<sup>-1</sup>纵向、横向和垂向永久变形分别增大18%、18%、16%,20km·h<sup>-1</sup>比60km·h<sup>-1</sup>纵向、横向和垂向永久变形分别增大56%、56%、52%。从控制沥青路面的永久变形方面来说,列车运行速度越高越有利于减缓沥青路面的永久变形。

表3 匀速工况下的永久变形

Tab.3 Permanent deformation at uniform speed condition

次数/万	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	永久变形/mm		
		纵向	横向	垂向
105.12(1年)	20	9.50	8.48	11.88
	40	7.93	7.05	9.97
	60	5.83	5.19	7.41
52.560(5年)	20	18.85	16.79	22.84
	40	15.92	14.14	19.47
	60	11.84	10.56	14.69
105.120(10年)	20	24.91	22.18	29.61
	40	21.13	18.73	25.46
	60	15.95	14.21	19.50

### 3.2 完全制动下沥青路面动力学响应及永久变形分析

虚拟轨道列车在车站、交叉路口等位置会反复制动和启动,由图3可知,完全制动/牵引行驶下轮胎所受到的纵向力最大。计算分析轮胎在垂向载荷为45kN、充气压力900kPa、运行速度60km·h<sup>-1</sup>、滑移

率为-0.1下的沥青路面动力学响应及永久变形,能够对车站、交叉路口等位置的沥青混合料选择和铺设提供指导性建议。

三向接触力作用1次后的路表剪应力分布如图8所示,剪应力在纵向范围内的最大值比同速度下的匀速行驶工况增大66%,沿道路深度方向增大76%,横向范围内相差不大。剪应力沿道路深度方向的最大值在距离路表0.04m处的上面层。

从表3和表4可知,完全制动下的纵向永久变形比匀速行驶时增大93%(10.512万次)、99%(52.560万次)、100%(105.120万次),横向和垂向永久变形相差不大。

### 3.3 转弯时沥青路面动力学响应及永久变形分析

通过对比图4和图6可知,横向接触力在轮胎转弯时比匀速行驶时显著增大,通过对轮胎在垂向载荷为45kN、充气压力900kPa、运行速度10km·h<sup>-1</sup>、侧偏角为5°的沥青路面动力学响应及永久变形的研究,可以有效地控制弯道区域的路面损坏现象,并能够为列车运行提供指导。

三向接触力作用1次后剪应力的分布情况如图9所示,路表剪应力的最大值在靠近转弯内侧,沿道路深度方向的剪应力的最大值在距离路表0.03m处的上面层。图10表示路面的永久变形量变化趋势,沿着纵向方向的永久变形较小,横向和垂向的最大永久变形均靠近转弯内侧。从控制剪应力及永久变形的角度来说,弯道处的沥青路面应该提高抗剪强

度, 预防沥青混合料的侧向推移。

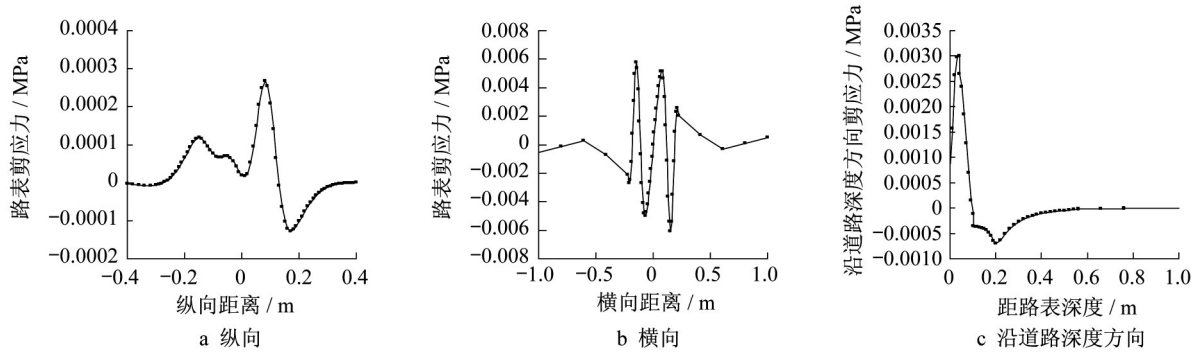


图 8 完全制动工况下的剪应力分布

Fig. 8 Shear stress distribution at fullbrake condition

表 4 完全制动工况的永久变形

Tab.4 Permanent deformation at the fullbrake condition

次数/万	永久变形/mm		
	纵向	横向	垂向
10.512(1年)	11.23	4.92	6.76
52.560(5年)	23.58	10.22	13.48
105.120(10年)	32.40	13.88	17.91

### 4 结论

基于轮胎与刚性路面及黏弹性沥青路面有限元模型, 分析并提取轮胎与路面相互作用下的三向非均匀接触应力作用于沥青路面模型, 研究分析在匀速、完全制动、转弯 3 种工况下沥青路面的动力学响应及永久变形, 结论如下:

(1) 路表剪应力和路面永久变形在匀速行驶时

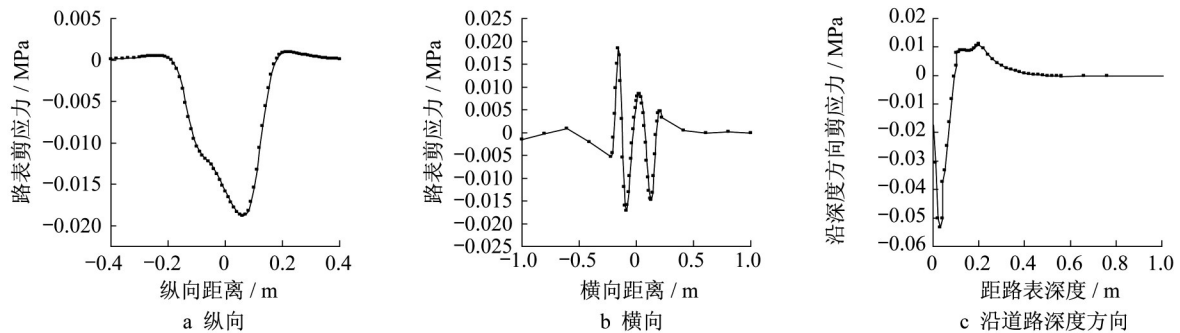


图 9 转弯工况下的剪应力分布

Fig. 9 Shear stress distribution at cornering condition

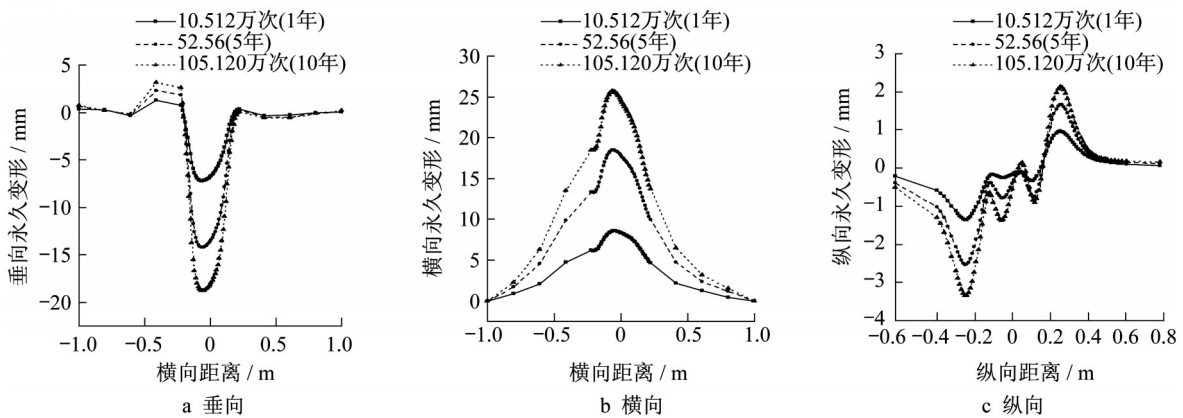


图 10 转弯工况下的永久变形

Fig. 10 Permanent deformation at cornering condition



均随速度的增加而减小。运行速度为 $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的路表剪应力较 $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的在纵向与横向范围内分别增大65%和54%。 $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 较 $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的纵向、横向和垂向永久变形均增大50%左右。因此,从控制路表剪应力及路面永久变形角度来说,列车运行速度越高越有利于减缓路面损坏。

(2)在纵向范围内完全制动较匀速行驶的路表最大剪应力增大66%,沿道路深度方向增大76%。纵向永久变形在完全制动时较匀速行驶时分别增大93%(10.512万次)、99%(52.560万次)、100%(105.120万次)。由此可知,在列车制动/启动的区域要提高沥青混合料的抗剪强度以预防沥青混合料沿纵向方向的推挤和堆积。

(3)在转弯时,路表剪应力最大值位于轮胎转弯内侧,进而导致垂向永久变形量沿内侧累积。转弯区域应提高沥青混合料的抗剪强度来减缓沥青混合料的侧向推移。

(4)沿道路深度的剪应力在3种行驶工况下的变化趋势基本一致,其最大值均出现在上面层,匀速行驶和转弯的最大值距离路表0.03m,完全制动的最大值距离路表0.04m。

#### 作者贡献申明:

王承萍:构建模型进行数值模拟,对结果进行分析并撰写论文。

张济民:提出了研究方案,设计了论文框架,审阅、修改论文。

周和超:课题负责人,提出理论及指导论文撰写。

陆海英:提供数据及整理资料。

#### 参考文献:

- [1] ZHENG B, CHEN J, ZHAO R, *et al.* Analysis of contact behaviour on patterned tire-asphalt pavement with 3-D FEM contact model [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020(6):1.
- [2] XIE Y, YANG Q. Tyre-pavement contact stress distribution considering tyre types[J]. *Road materials and pavement design*, 2019, 20(8): 1899.
- [3] WANG H, AL-QADI I L, Stanciulescu I. Simulation of tyre-pavement interaction for predicting contact stresses at static and various rolling conditions [J]. *The international journal of pavement engineering*, 2012, 13(4): 310.
- [4] 凌建明, 朱立国. 高胎压下机场环氧沥青道面结构动力响应分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(10): 1538.
- [5] LING Jianming, ZHU Ligu. Dynamic response analysis of airport epoxy asphalt pavement structure under high tire pressure [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(10): 1538.
- [5] 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, 34(1):64.
- [6] HU Xiaodi, SUN Lijun. Measured mechanical response of asphalt pavement under heavy truck wheel load[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2006, 34(1): 64.
- [6] JIANG X, ZENG C, GAO X, *et al.* 3D FEM analysis of flexible base asphalt pavement structure under non-uniform tyre contact pressure [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, 20(9): 999.
- [7] SHOJAEIFARD M, BAGHANI M, SHAHSAVARI H. Rutting investigation of asphalt pavement subjected to moving cyclic loads: an implicit viscoelastic-viscoplastic-viscodamage FE framework [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, 21(11): 1393.
- [8] 黄佳, 赵晓文, 徐瑞聪, 等. 城市道路交叉口沥青路面抗剪强度及车辙分析[J]. *湖南交通科技*, 2019, 45(3): 1.
- [9] HUANG Jia, ZHAO Xiaowen, XU Ruicong, *et al.* Analysis of shear strength and rutting of asphalt pavement at urban road intersections [J]. *Hunan Transportation Science and Technology*, 2019, 45(3): 1.
- [9] 张洪伟, 王学营, 刘振正, 等. 移动非均匀荷载下的交叉口路面剪应力分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*. 2016, 36(6): 26.
- [10] ZHANG Hongwei, WANG Xueying, LIU Zhenzheng, *et al.* Shear stress analysis of intersection pavement under moving uneven load [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(6): 26.
- [10] 张兰峰, 汪海年. 考虑横向接地应力的沥青路面剪应力分析[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(2): 236.
- [11] ZHANG Lanfeng, WANG Hainian. Shear stress analysis of asphalt pavement considering lateral ground stress [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2018, 39(2): 236.
- [11] 王扬, 王丽娟, 路永婕, 等. 复杂移动轮胎力作用下沥青路面黏弹性力学行为模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(15): 181.
- [12] WANG Yang, WANG Lijuan, LU Yongjie, *et al.* Simulation of viscoelastic behavior of asphalt pavement under complex moving tire forces [J]. *Vibration and Shock*, 2017, 36(15): 181.
- [12] 钱振东, 杨宇明, 陈团结, 等. 低速与变速动载作用下沥青路面动力响应[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(3): 1140.
- [13] QIAN Zhendong, YANG Yuming, CHEN Tuanjie, *et al.* Dynamic response of asphalt pavement under low-speed and variable-speed dynamic loads [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2015, 46(3): 1140.