第 36 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 36　No. 1
2023 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2023

重载车辆不同行驶条件下沥青路面结构动态响应分析

郜鑫振[1]，　司春棣[2,3]，　凡涛涛[2,3]，　张孟强[4]，　高海波[4]

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院，河北 石家庄　050043；2. 石家庄铁道大学 交通运输学院，河北 石家庄　050043；
3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室，河北 石家庄　050043；
4. 河北省高速公路京雄筹建处，河北 保定　071799)

摘要：重载车辆在不同行驶条件下对路面的破坏程度有所不同，为定量分析何种行驶条件对路面影响最大，从实际路面结构出发，采用有限元仿真模拟对比分析重载车辆在匀速、制动和加速 3 种行驶状态下对路面不同结构层的动态响应影响规律，以制动为车辆行驶条件，进一步分析不同水平力系数 Φ(0.3、0.5、0.7、0.9)对路面结构动态行为的影响。结果表明，3 种行驶状态下路面结构层的横向应力和竖向应力差距均在 10%左右；而路面结构层在减速和加速行驶状态下的纵向应力和纵向剪应力较匀速增涨幅度可达 100%～150%；在分析的 Φ 范围内，横向应力和竖向应力极值在相邻水平力系数下变化幅度为 1%～5%，而纵向应力和纵向剪应力极值随水平力系数的增加而变大，最大差值分别为 0.596、0.618 MPa。

关键词：沥青路面；移动荷载；行驶状态；水平力系数；动态响应

中图分类号：U416.217　**文献标志码：**A　**文章编号：**2095-0373(2023)01-0048-06

0　引言

在沥青路面设计过程中，各结构层的动态响应不仅可以作为设计的参考依据[1-2]，还能预估其疲劳寿命[3-4]，路面结构在实际动态重载作用下所呈现的力学性能通常与传统的静态模型之间存在较大差异[5]，传统的静力学模式已不能合理地描述沥青路面结构动力响应对轴载、路面结构参数的敏感性[6-7]。

沥青路面的损坏原因是多方面的，现在对其损害原因的研究除了气候条件、工程技术，还有车辆的运行[8-10]。一些学者为了研究车辆荷载对沥青路面结构的影响，已经做了多方面的理论、试验与模拟研究。Dan et al[11]通过现场和实验室试验，研究了沥青混合料在压实荷载下的响应；李赫[12]研究了动静荷载作用下沥青路面的动态响应；Kutay et al[13]进行了模拟并计算不同沥青试样在脉动压力下的动态响应；Li et al [14]利用光纤光栅传感器监测沥青混凝土动态响应。然而这些研究或是基于弹性理论，或是采用静力学分析，虽然对路面质量的提升有一定的帮助，但是由于交通状况的复杂多变[15-16]，这些研究具有一定的局限性。

近些年来，越来越多的人对不同工况下的沥青路面响应做了大量研究，但却少有对重载车辆不同行驶条件下的沥青路面动态响应进行对比分析。Assogba et al [17]研究了车速和超载作用下路面的动态响应；Li et al [18]使用 ALT 双轴加速加载试验设备模拟车辆动荷载分析其对路面结构底部应变的发展规律；Wang et al [19]对比分析了低速和制动行驶条件下的轮胎荷载对沥青路面的影响；程焰兵[20]建立了路面制动模型并研究其对刚柔复合式路面结构力学性能的影响。

因此，以京雄高速公路项目为依托，以黏弹性力学为基础，利用 Abaqus 建立三维沥青路面有限元模

收稿日期：2022-11-16　**责任编辑：**车轩玉　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220346
基金项目：国家自然科学基金(11972237)；河北省交通厅科技计划项目(JD-202007，JD-202006，JX-202010)
作者简介：郜鑫振(1998—)，男，硕士研究生，研究方向为道路与铁道工程。E-mail：1024624835@qq.com
郜鑫振，司春棣，凡涛涛，等. 重载车辆不同行驶条件下沥青路面结构动态响应分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2023，36(1)：48-53.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

型，将沥青面层设置为黏弹性，并用软件中内置的 Prony 级数来描述黏弹性松弛模型。对比分析车辆在匀速、制动和加速 3 种行驶条件，以及车辆在不同水平力系数下的动态响应，总结沥青路面结构的动态响应变化规律，并比较何种行驶条件对沥青路面结构损伤影响最大。

1　有限元模型基本理论

基于 Hamilton 理论，可知路面不同结构层结构动力学有限元方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}=\boldsymbol{F}(t) \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵；$\ddot{\boldsymbol{u}}$，$\dot{\boldsymbol{u}}$，$\boldsymbol{u}$ 分别为路面结构动力系统的加速度、速度、位移向量；$\boldsymbol{F}(t)$ 为路面结构动力系统的车辆载荷矩阵。

路面结构阻尼采用瑞利阻尼

$$\boldsymbol{C}=\alpha\boldsymbol{M}+\beta\boldsymbol{K} \tag{2}$$

式中，α、β 为阻尼参数。

2　有限元模型的建立

以京雄高速公路项目为依托，建立三维沥青路面有限元模型，模型尺寸为 8 m×6 m×5 m，路面结构共 6 层，分别为 4 cm 上面层（SMA-13）、8 cm 中面层（AC-20）、10 cm 下面层（ATB-25）、40 cm 基层、20 cm 底基层和土基。如图 1 所示，通过 Vdload 实现移动荷载的施加，为简化模型，移动荷载只在道路中间行驶，简化后的荷载作用面积为矩形，其长 20.0 cm，宽 18.4 cm，轮隙间距 13.5 cm。有限元采用 Implicit 隐式分析，单元形式采用 C3D8R，沥青路面模型网格划分如图 2 所示。

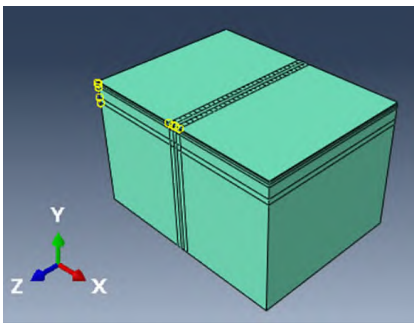


图 1　沥青路面三维模型

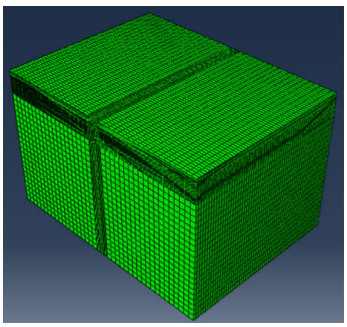


图 2　沥青路面三维模型网格划分

考虑到 ATB-25 大骨料含量多且结构层靠下，且文中仅对路面结构层动态响应进行分析，因此选择常温条件下的前 2 层材料的 Prony 级数。路面各结构层参数如表 1 所示，面层材料 Prony 级数如表 2 所示。

表 1　路面结构层材料参数

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
SMA-13	0.04	8 400	0.35	2 400
AC-20	0.08	9 000	0.25	2 400
ATB-25	0.10	7 000	0.25	2 400
CTB	0.60	9 000	0.25	2 300
路基	4.18	400	0.40	1 800

表 2　面层材料的 Prony 级数(20 ℃)

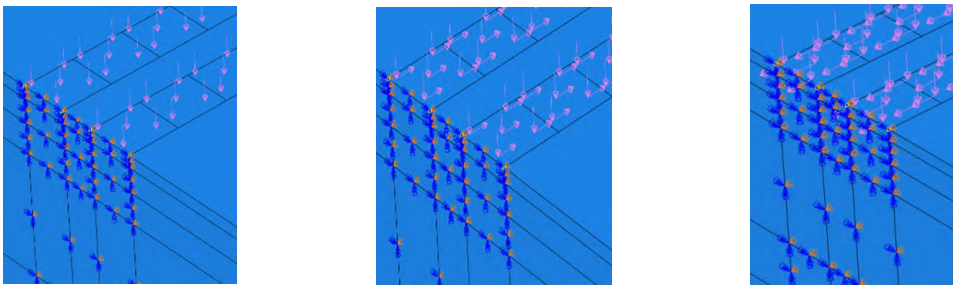
面层材料	0.000 1	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1 000
SMA-13	0.095	0.192	0.281	0.218	0.088	0.028	0.008	0.004
AC-20	0.087	0.043	0.139	0.202	0.245	0.174	0.073	0.022

3　不同行驶条件下路面结构动态响应分析

采用双轮矩形荷载，车辆的制动和加速通过加速度控制，即在 Fortran 里输入不同水平力系数。选取

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

重载车辆的轴载为 170 kN,车速 100 km/h,水平力系数为 0.7。车辆匀速行驶时,假设路面只受垂直方向上的力,制动和加速条件下同时承受垂直方向的力和水平力。3 种荷载模型施加情况如图 3 所示。

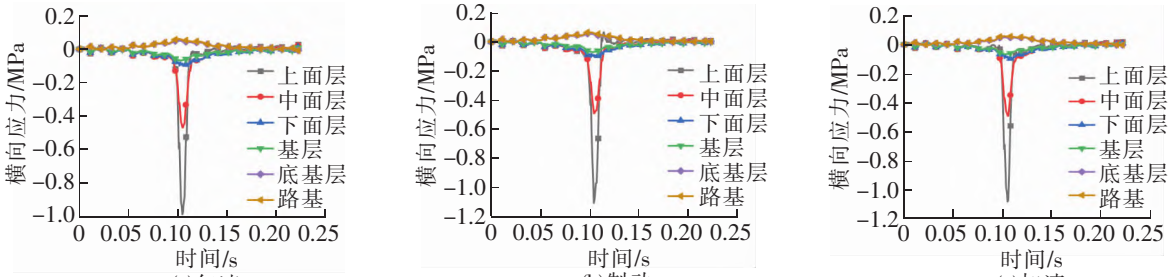


(a)匀速 (b)制动 (c)加速

图 3 荷载模型施加图

3.1 路面结构横向应力时程响应分析

选取路中央位置处双轮矩形均布荷载中右侧矩形的中心点作为计算点。图 4 为车辆在匀速、制动和加速行驶状态下输出的横向应力时程曲线图。从图 4 可分析得出,随着时间的增加,横向应力呈波浪式向前移动,当移动到计算点附近时,横向应力达到极值。3 种工况下的横向应力变化趋势几乎完全相同。制动和加速运动条件下的各结构层最大横向应力均大于匀速,但增长幅度很小。各层计算点横向应力极值从上向下依次减少,从上面层到基层的横向应力主要为压应力,底基层则主要为拉应力,且离表面层越远,相邻层横向应力极值的差越来越小,这说明离轮载作用点越远,动荷载的影响程度越小。制动和加速条件下其上面层横向压应力最大,基层横向压应力最小,最大值与最小值的差分别为 1.036、1.017 MPa。制动条件下的横向应力极值略大于加速。

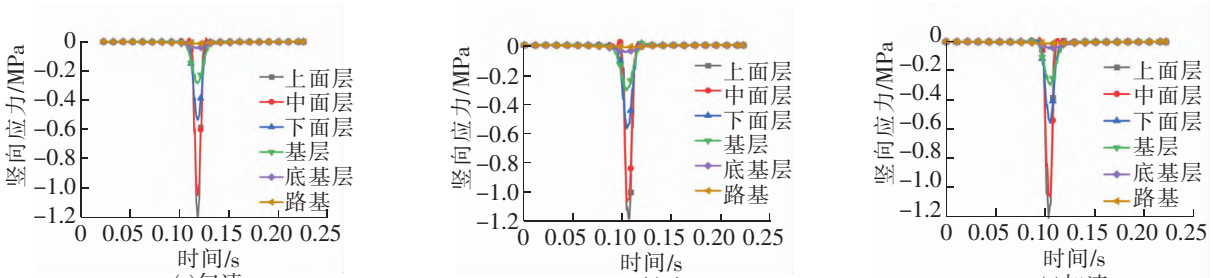


(a)匀速 (b)制动 (c)加速

图 4 横向应力时程曲线

3.2 路面结构竖向应力时程响应分析

图 5 为车辆匀速、制动和加速行驶情况下输出的竖向应力时程曲线图。从图 5 可以看出,竖向应力时程曲线主要以压应力为主。上面层表面的竖向压应力最大,各面层竖向应力从上向下依次减少,到了路基层表面竖向应力已经趋于 0。制动和加速行驶条件下的各结构层最大竖向应力均大于匀速。制动和加速 2 种行驶条件下竖向应力极值的最小值与最大值比值分别为 1.266%、1.235%。沥青路面面层很容易因竖向应力受到挤压变形,从而引发一系列路面危害,因此施工过程一定要注意对沥青面层进行充分压实。



(a)匀速 (b)制动 (c)加速

图 5 竖向应力时程曲线

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3　路面结构纵向应力时程响应分析

图 6 为车辆匀速、制动和加速行驶情况下输出的纵向应力时程曲线图。由图 6 可以看出,不同于匀速,制动和加速条件下当荷载移动至计算点附近出现拉应力,出现这种情况的原因与施加水平力有关。制动和加速行驶条件下路面所受的拉压应力均明显大于匀速,且拉应力变化最为明显。制动和加速条件下最大纵向拉应力分别为 0.584 、0.462 MPa,相较于匀速两者分别是其 13.581 倍和 10.744 倍。可以看出,制动条件下的纵向拉应力要明显大于加速。车辆在减速和加速过程中路面结构产生了非常明显的拉压交替现象,易产生疲劳破坏。

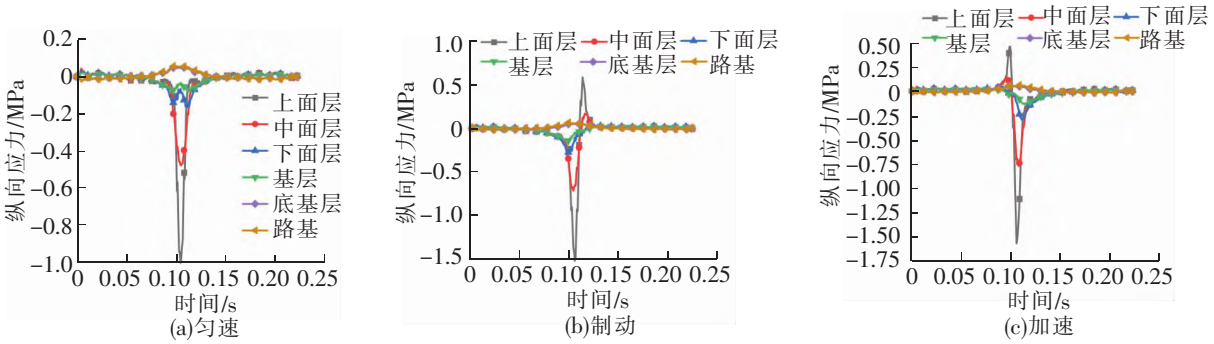


图 6　纵向应力时程曲线

3.4　路面结构纵向剪应力时程响应分析

图 7 为车辆在匀速、制动和加速行驶情况下输出的纵向剪应力时程曲线图。从图 7 可分析出,匀速行驶条件下各面层的纵向剪应力正负是交替变化的,各面层纵向剪应力从上向下变化规律为:从上面层开始增加,到中面层纵向剪应力达到极值,从中面层开始减少,到路基层表面纵向剪应力已趋于 0。不同于匀速,制动和加速行驶条件下的纵向剪应力呈现“一边倒”趋势,即制动行驶条件下的纵向剪应力主要表现为压应力,加速行驶条件下主要表现为拉应力,出现这种差别的原因与水平力的施加及方向有关。水平力使得面层的纵向剪应力极值变大,但影响程度随深度的增加而减小。制动和加速行驶条件下的最大纵向剪应力分别为匀速条件下的最大纵向剪应力的 16.444 倍和 16.178 倍。制动条件下的上面层纵向剪应力极值为 0.740 MPa,路基层的纵向剪应力极值为 0.006 MPa,两者相差 0.734 MPa,前者是后者的 12.333 倍。因此在经常发生车辆制动行驶路段,要加强面层接触面的抗剪能力。

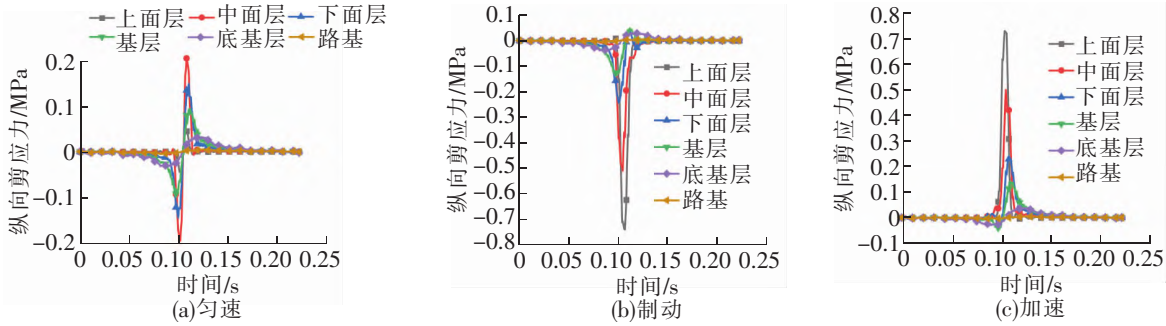


图 7　纵向剪应力时程曲线

通过上面的分析可以得出制动和加速行驶条件下的横向应力和竖向应力时程曲线较匀速并无明显改变,极值虽有所增加,但变化不大,这说明水平力对路面结构的横向应力和竖向应力的时程变化影响很小。但纵向应力和纵向剪应力变化却很明显,车辆经过计算点前后纵向应力有了明显的突变,面层区域内纵向剪应力不再经历拉压交替变化,除了趋势的改变,这 2 项动态相应指标的极值较匀速也增加了很多,且制动又大于加速。因此可得出制动对路面结构层造成的影响更大。建议在经常发生制动的路段,面层尽量选用抗剪切和抗疲劳能力强的材料。

3.5　不同水平力系数下路面结构动态响应

Φ(轮胎与路面的水平力系数)不仅影响水平荷载的大小,也影响制动加速度。通过前面的分析得出

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

了车辆在制动行驶条件下对路面结构的损害更严重,车辆在紧急制动时 Φ 可达0.9,因此在本小节以制动为车辆的行驶条件,分别选取0.3、0.5、0.7、0.9这4种水平力系数进行路面结构动态响应研究。表3为不同水平力系数下上表面层计算点最大横向应力、最大竖向应力、最大纵向应力以及最大纵向剪应力极值对比情况。

表3 不同 Φ 下路面上表面层动态响应极值对比 MPa

Φ	横向应力	竖向应力	纵向应力	纵向剪应力
0.3	0.999	1.194	1.138	0.330
0.5	1.053	1.190	1.366	0.525
0.7	1.108	1.185	1.520	0.740
0.9	1.162	1.181	1.734	0.948

从表3的数据可以分析出,横向应力和竖向应力极值在相邻水平力系数下变化幅度为1%~5%,横向应力极值虽然随着水平力系数的增加有所增加但增长幅度很小,竖向应力极值随着水平力系数的增加有所减小但减小幅度很小。而纵向应力和纵向剪应力的极值随着水平力系数的增加增长幅度很大,最大值和最小值相差分别为0.596、0.618 MPa。这也更说明了制动条件下水平力的存在主要对路面结构层的剪应力影响大。

4 结论

通过Abaqus建立三维沥青路面结构模型,对比分析车辆在匀速、制动和加速行驶条件下沥青路面结构动态响应,得到结论如下:

(1)制动和加速行驶条件下的横向应力、竖向应力、竖向剪应力极值较匀速有所增加,增涨幅度约为10%,变化并不大,这说明水平力对路面结构的横向应力、竖向应力、竖向剪应力的时程变化影响很小。

(2)制动和加速条件下的纵向应力在车辆经过计算点前后有了明显的突变,且处于面层区域内的纵向剪应力不再经历拉压交替变化,极值较匀速也增加了很多。其中最大纵向拉应力增涨幅度为126%,最大纵向剪应力增涨幅度为154%。

(3)通过对比制动和加速这2种行驶情况下的动态响应指标极值,得出制动行驶条件对路面结构层造成的影响更大。在分析的4个水平力系数下,纵向应力和纵向剪应力随水平力系数的增加而增长,纵向应力极值在相邻水平力系数下变化幅度为10%~20%,纵向剪应力极值在相邻水平力系数下变化幅度为28%~60%。因此对于车辆频繁制动路段,要注意车辆行驶安全和路面材料的选取,加强路面结构层的抗剪切能力。

参 考 文 献

[1]孙立军. 沥青路面结构行为学[M]. 上海:同济大学出版社, 2013.

[2]Zafir Z, Siddharthan R, Sebaaly P E. Dynamic pavement-strain histories from moving traffic load [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(5):821-842.

[3]Mateos A, Ayuso J, B Jáuregui. Shift factors for asphalt fatigue from full-scale testing [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2225:128-136.

[4]Zhao J, Wang H. Mechanistic-empirical analysis of asphalt pavement fatigue cracking under vehicular dynamic loads [J]. Construction and Building Materials, 2021, 284:1-10.

[5]Cao D, Zhao Y, Liu W, et al. Comparisons of asphalt pavement responses computed using layer properties backcalculated from dynamic and static approaches[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(5): 1114-1130.

[6]张丽娟.重载作用下沥青路面结构动态响应敏感性分析 [J].上海师范大学学报(自然科学版),2015,44(2):138-145.

[7]杨春风,王雷.移动非均布荷载作用下的沥青混凝土路面动力响应分析 [J].公路,2012(4):74-77.

[8]胡晓宇,陈辉亚.沥青路面早期水损坏演化分析及评价指标研究 [J].公路,2022,67(7):130-134.

[9]穆秀雯,龚莉,张锦生.沥青路面压实度的质量控制标准探讨 [J].森林工程,2011,27(6):62-64.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[10]郑仲浪. 重载车辆作用下沥青路面层间力学行为研究 [D]. 西安:长安大学,2010.
[11]Dan H C, Yang D, Liu X, et al. Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247:1-19.
[12]李赫. 动静荷载作用下沥青混合料及沥青路面黏弹性力学响应分析 [D]. 长春:吉林大学,2021.
[13]Kutay M E, Aydilek A H. Dynamic effects on moisture transport in asphalt concrete [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(7):406-414.
[14]Li K, Xie J G. Experiment and research of using fiber Bragg grating to monitor the dynamic response of asphalt concrete [C]// Applied Mechanics and Materials. [S. l.]:Trans Tech Publications Ltd, 2011, 97: 301-304.
[15]申飞. 复杂行驶工况下考虑沥青路面变温黏弹性的动态轴载换算 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2016.
[16]宋小金,樊亮. 移动荷载作用下沥青路面应力响应的持续时间[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(7):71-76.
[17]Assogba O C, Tan Y, Sun Z, et al. Effect of vehicle speed and overload on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement [J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(3): 572-602.
[18]Li J, Li Y, Xin C, et al. Dynamic strain response of hot-recycled asphalt pavement under dual-axle accelerated loading conditions [J]. Coatings, 2022, 12(6): 843.
[19]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.
[20]程焰兵. 移动荷载下 CRC+AC 复合式路面结构的动力响应研究 [D]. 长沙:湖南大学,2015.

Dynamic Response Analysis of Asphalt Pavement Structure Under Different Driving Conditions of Heavy-Duty Vehicles

Gao Xinzhen[1], **Si Chundi**[2,3], **Fan Taotao**[2,3], **Zhang Mengqiang**[4], **Gao Haibo**[4]

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
4. Jing-Xiong Expressway Preparatory and Construction Office of Hebei Expressway Group Ltd., Baoding 071799, China)

Abstract: Heavy-duty vehicles might exert different degrees of damage to the road surface under different driving conditions. In order to quantitatively analyze which driving conditions have the greatest impact on the road surface, this paper started from the actual road surface structure, and used finite element simulation to compare and analyze the dynamic response of heavy-duty vehicles to different structural layers of the road surface under three driving conditions of uniform speed, braking, and acceleration. Taking braking as the driving condition of the vehicle, the influence of different horizontal force coefficients Φ (0.3,0.5,0.7,0.9) on the dynamic behavior of the road surface structure was further analyzed. The results show that the difference between transverse stress and vertical stress of pavement structure layer under three driving conditions is about 10%. The longitudinal stress and longitudinal shear stress of pavement structure layer under the condition of deceleration and acceleration can increase by about 100%～150% compared with constant speed. In the range of Φ analyzed, the extreme values of transverse stress and vertical stress change by 1%～5% under the adjacent horizontal force coefficient, while the extreme values of longitudinal stress and longitudinal shear stress increase with the increase of horizontal force coefficient. The maximum differences are 0.596 MPa and 0.618 MPa, respectively.

Key words: asphalt pavement; moving load; driving status; horizontal force coefficient; dynamic response

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net