

车辆随机及移动荷载作用下路面动态响应

李金辉^{1,2}, 何 杰¹, 李旭宏¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 河南科技大学 车辆与动力工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要:为了探讨车辆随机动荷载对道路破坏的影响,基于二自由度 1/4 车辆振动模型,采用 MATLAB/SIMULINK 软件模拟得到车辆对路面作用的动荷载,采用 ANSYS/APDL 二次开发技术建立半刚性沥青路面三维有限元分析模型并实现随机动载加载,计算分析了路面在车辆随机动载作用下的动态响应规律,并与移动恒载计算结果进行比较。研究表明:随机动载与移动恒载作用下路面固定位置处的应力时程变化规律相似,而路面各层的应力极值波动情况明显不同,相对于固定位置处节点应力时程分析,路面各层的应力极值分布可以较好地反映车辆荷载的随机特征;随机荷载下路面各层的应力极值波动频率与所施加的动荷载波动频率相似,而且随着路面深度的增加,应力波动效应降低;随机荷载下路面应力响应数值大于移动恒载值,且随着路面不平度的增加应力响应数值变大,即在良好路面上随机荷载应力响应与移动恒载数值比较接近。

关键词:道路工程;半刚性沥青路面;有限元分析;车辆随机荷载;移动恒载;路面不平度

中图分类号:U416.223

文献标志码:A

Dynamic response of pavement under vehicle random load and moving constant load

LI Jin-hui^{1,2}, HE Jie¹, LI Xu-hong¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. School of Vehicle & Motive Power Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, Henan, China)

Abstract: In order to study the damage performance of random dynamic loaded vehicle on semi-rigid pavement, the random dynamic load of running vehicle was computed by MATLAB/SIMULINK software based on 2-DOF 1/4 vehicle model. A 3-D finite element analysis model of semi-rigid asphalt pavement was established, and the dynamic random load was applied to the pavement by ANSYS/APDL software. Then the dynamic response of the semi-rigid pavement under random loads was analyzed and compared with those under moving constant loads. The results show that, at one fixed position of the pavement, the stress variety laws of dynamic random load are similar to those of moving constant load, but the peak stresses of each pavement layer are obviously different. Compared to the stress time history analysis at one fixed position, the distribution of peak stresses could reflect the stochastic characteristics of vehicle loads well. The wave frequency of peak stress at each pavement layer is similar to that of dynamic random load, and with the increase of pavement depth, the wave effect is decreased. The stress value of dynamic random load is larger than that of moving constant load, and with the increase of

pavement roughness, the stress values of dynamic random load become larger, that is, the peak stress of dynamic random load on good pavement is close to that of moving constant load. 3 tabs, 7 figs, 13 refs.

Key words: road engineering; semi-rigid asphalt pavement; finite element analysis; vehicle random load; moving constant load; pavement roughness

0 引 言

车辆荷载作用下路面动态响应分析是车-路相互作用研究的重要内容之一,从国内外相关文献来看,在以往的路面结构响应分析中,作用在路面上的车辆荷载一般都假设为位置不动的静态载荷、谐波荷载或移动的恒定荷载,与路面作用的真实荷载存在较大差异。中国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D 50—2006)采用双圆垂直均布荷载作用下的多层弹性体系理论,这种设计方法在一定程度上反映了路面的应力应变变化规律,但规范中将车辆荷载假定为静载,与现实的路面受力状况相差甚远^[1];考虑到车辆荷载的动态特性,陈一锴等将车辆荷载简化为位置固定的谐波荷载^[2-3];单景松等将车辆荷载简化为大小不变的移动荷载,分析了路面的动态响应规律,得出了一些有意义的结论^[4-5]。然而采用移动的恒定荷载或位置固定的谐波荷载,都只能对车辆荷载的移动性或动态性之一进行模拟,无法得到车辆动载作用下路面的精确动态响应。实际上,车辆作用在路面上的荷载是一种幅值和作用空间都随时间变化的动态荷载,刘大维等建立三轴货车虚拟样机模型并提前轮胎法向力,分析了三轴货车轮胎荷载下路面动态响应规律,认为路面应力变化与车辆轴数有关、路面各点最大应力随动荷载的不同而随机变化,对随机荷载下路面响应分析进行了有益尝试^[6]。

由路面不平整引起的车辆随机动荷载是造成路面出现早期破坏和影响路面使用寿命的重要因素之一,因此,研究车辆随机荷载作用下路面结构的动态响应规律必将成为车-路相互作用研究领域的热点。为了探究车辆随机荷载作用下路面结构的动态响应规律及与移动恒载作用下路面响应的差异,考虑到车辆-路面系统的“弱耦合”特性^[7-8],本文从模拟车辆作用于路面的随机动荷载角度出发,采用简化的二自由度 1/4 车辆模型模拟汽车振动系统,仿真得到车辆作用于路面的随机动荷载,并依据层状弹性体系理论,建立半刚性沥青路面三维有限元分析模型,分析了路面固定位置处和整个结构体的应力极

值分布规律,并与移动恒载作用的结果进行了比较,以期有车-路相互作用的研究提供参考依据。

1 车辆随机动载模拟

常见的车辆行驶动力学模型主要有二自由度单轮模型、4 自由度半车模型、7 自由度整车模型和整车虚拟样机模型等^[8]。有研究表明 1/4 车辆模型在模拟车辆动载时是强有力的^[9],不失一般性,建立图 1 的二自由度 1/4 车辆模型,计算时选用黄河 JN150 重型货车满载时后轴单侧参数,见表 1^[9-10]。

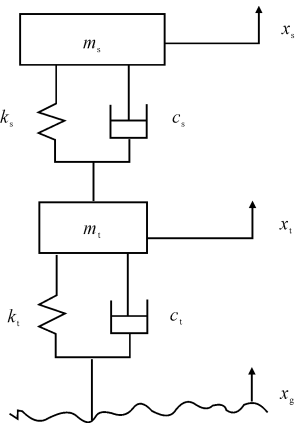


图 1 二自由度车辆模型
Fig. 1 2-DOF vehicle vibration model

表 1 车辆系统参数
Tab. 1 Vehicle system parameters

参数	参数意义	数值
m_s/kg	悬挂质量	4 450
m_t/kg	非悬挂质量	550
$k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	悬架刚度系数	$1\,000 \times 10^3$
$c_s/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	悬架阻尼系数	15×10^3
$k_t/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	轮胎刚度系数	$1\,750 \times 10^3$
$c_t/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	轮胎阻尼系数	2×10^3

对于图 1 所示的 1/4 车辆系统模型,根据牛顿定律建立其运动学微分方程

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s = -k_s(x_s - x_t) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) \\ m_t \ddot{x}_t = k_s(x_s - x_t) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) - k_t(x_t - x_g) - c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_g) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_s 、 x_t 分别为悬挂质量和非悬挂质量的垂向振动位移; x_g 为路面不平度激励位移。

由汽车理论可知,车辆对路面作用的随机动荷

载 F_t 为

$$F_t = F_d + G \tag{2}$$

式中： F_d 为轮胎附加动载荷， $F_d = k_t(x_t - x_g) + c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_g)$ ； G 为车辆静载荷 $G = (m_s + m_t)g$ ， g 为重力加速度。

路面不平度的生成方法主要有谐波叠加法、积分白噪声、滤波白噪声和 AR 法等^[11]，其中滤波白噪声法意义清楚、应用广泛，采用该方法来模拟路面不平度随机激励，其微分方程为

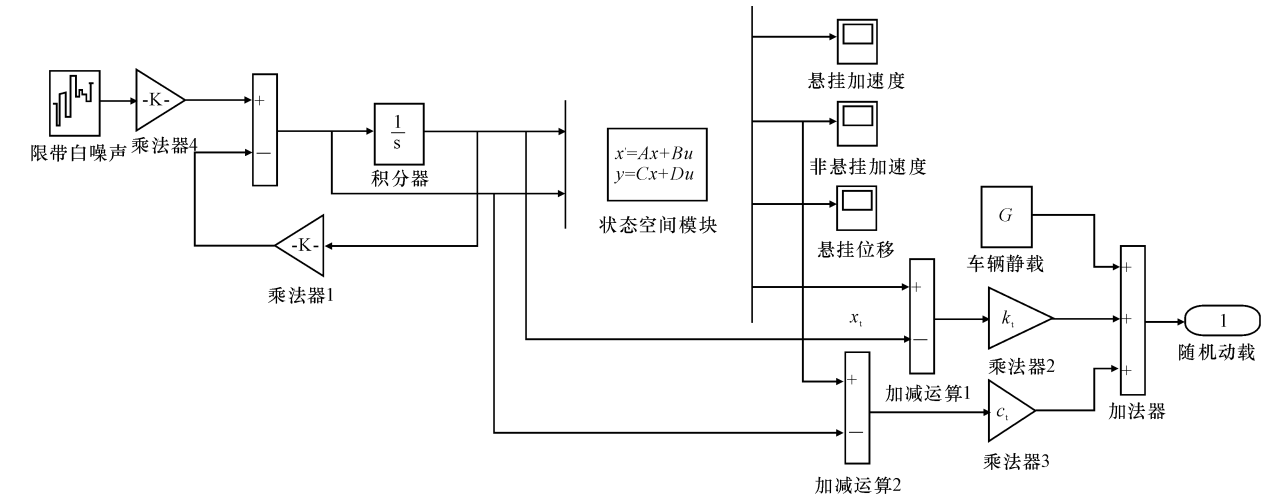


图 2 车辆随机动载 Simulink 模型
Fig. 2 SIMULINK model of vehicle system

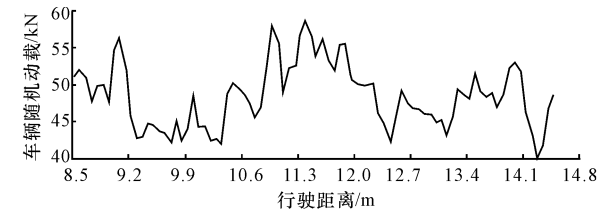


图 3 随机动载加载曲线
Fig. 3 Random dynamic load of vehicle

级路面、车速为 10 m/s)^[12]。

2 路面结构有限元模型

路面结构分为柔性路面、刚性路面和半刚性路面，其中半刚性沥青路面在中国高等级公路中占较大比重。针对半刚性路面的特点，建立其有限元模型，路面参数基于济青（济南—青岛）高速公路实际路面结构参数^[2]，如表 2 所示。

如下假设：①各层都由匀质、各向同性的线弹性/粘弹性材料组成；②土基在水平方向和深度方向均为无限，其上路面各层厚度均为有限，但水平方向仍为无限；③路表面作用有行车荷载，下层无限深度处和水平无限远处的应力和应变为 0；④路面各层

$$\dot{x}_g(t) = -2\pi f_0 x_g(t) + 2\pi \sqrt{G_0 v_0} w(t) \tag{3}$$

式中： G_0 为路面不平度系数； v_0 为车辆行驶速度 (m/s)； $w(t)$ 为均值为 0 的高斯白噪声； f_0 为下截止频率 (Hz)。

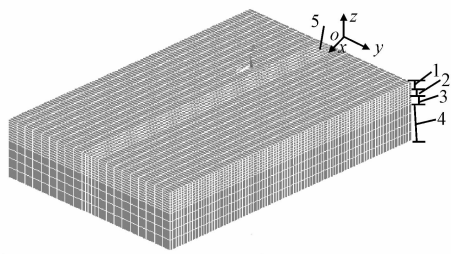
为了便于仿真模拟，运用状态空间法将式(1)转化为状态方程形式，并采用 MATLAB/SIMULINK 软件建立车辆随机动荷载仿真模型，如图 2 所示。图 3 为仿真所得的随机动载曲线（本文仅给出了仿真结果中峰值荷载附近 6 m 范围内的曲线数据，B

表 2 半刚性沥青路面模型参数
Tab. 2 Parameters of semi-rigid asphalt pavement

层	层厚/m	弹性模量/MPa	泊松比 μ	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	阻尼率/%
沥青面层	0.18	1 200	0.25	2 600	0.05
基层	0.20	2 000	0.25	2 300	0.05
底基层	0.20	800	0.25	1 932	0.05
土基	1.00	50	0.40	1 926	0.05

之间接触面为完全连续，其上位移完全连续。为接近实际和便于加载，有限元模型的长、宽、高分别取 6.02、4.08、1.58 m，采用 8 节点 Solid185 实体单元建模。考虑到计算机的计算效率和精度，将路面中央车辆行驶区域的网格划分较密（每个网格的 x 方向为 0.07 m、 y 方向为 0.08 m），其他区域网格粗化。路面各层应用 MERGE 方法粘结到一起，以满足各层连续接触的条件，整个模型共有 30 450 个节点，26 832 个单元，有限元模型如下页图 4 所示。

实际车辆在路面上行驶时，行车方向上路面两端较远处基本无响应，故采用固定约束；路面两侧和底部简化为粘弹性地基，采用三维弹簧元模拟约束。车轮与路面接触条件是有限元分析的关键，中国现行的路面设计规范中采用圆形均布荷载模式，有研



注: 1-沥青面层;2-半刚性基层;3-半刚性底基层;4-土基层;5-轮胎作用区域

图4 半刚性沥青路面三维有限元模型

Fig. 4 3-D FEA of pavement structure

究表明^[13],车轮与路面接触压力分布并非圆形,而是更接近于矩形。本文的货车后轴为双轮组,轮胎型号 11.00R20,依据文献[13]的方法,将轮胎接地印迹简化为近似均匀分布的矩形,大小为 $0.21\text{ m} \times 0.32\text{ m}$,这样在有限元模型中约覆盖 12 个单元格。

移动恒载加载时,采用阶跃加载法,在路面有限元模型上施加移动的恒定荷载,大小等于车辆自重(额载时 49 kN)。随机动载加载时,将 MATLAB 软件输出的车辆随机动载数值读入定义好的 ANSYS 数组中,利用 ANSYS/APDL 语言编程加载,具体步骤:①对 MATALB/SIMULINK 软件输出的随机动载数据进行采样编辑,并将其保存为文本文件,以方便 ANSYS 软件读写;②在 ANSYS 中,按照规定的格式定义荷载数组;③利用 ANSYS 中的 *TREAD 命令,将定义好的荷载数据文件读入到定义好的荷载数组中;④在路面有限元模型中,确定轮迹区域的加载位置,采用阶跃加载法,将随机荷载值加载到路面单元上,以模拟车辆的运动。

3 路面应力响应分析

为对比分析 2 种荷载下路面结构体的应力分布情况,对路面固定位置处各层节点应力时间历程和各层各节点应力极值进行比较。

3.1 路面固定位置应力响应

下页图 5 为路面中央位置处垂向各层节点应力时间历程曲线。

由图 5(a)、图 5(b)可以看出,在垂向路面结构主要承受压应力,且垂向应力随着路面结构深度的增加而减小,沥青表面层(0~6 cm)范围内的垂向应力最大,6 cm 以下压应力减小得较快,当压应力通过半刚性基层和底基层到达土基顶面(曲线 8)时,压应力表现为一个很小的值。经计算可知,随机荷载作用下垂向压应力的最大值(沥青表面层底部)为移动恒载的 1.15 倍。

由图 5(c)、图 5(d)可知,各层的水平应力都是

交变的,既有拉应力又有压应力。沥青面层主要承受压应力,基层和底基层主要承受拉应力。最大压应力发生在路表面(曲线 1),最大拉应力发生在半刚性基层与底基层的结合处(曲线 6),表明基层与底基层结合处最容易受到水平拉应力破坏。经计算可知,随机荷载作用下的最大水平拉应力(基层与底基层的结合处)为移动恒载的 1.13 倍。

由图 5(e)、图 5(f)可知,与水平应力一样,横向动应力也是交替变化的,既有拉应力也有压应力,并且相对于水平应力,各结构层横向应力在数值上要稍大一些,说明横向动应力在路面破坏过程中的作用不容忽视。沥青面层主要承受横向压应力,最大横向压应力出现在沥青层表面(曲线 1),基层及底基层主要承受拉应力,最大横向拉应力出现在半刚性基层与底基层结合处(曲线 6),经计算可知,随机荷载下的最大横向拉应力(基层与底基层结合处)为移动恒载的 1.11 倍。

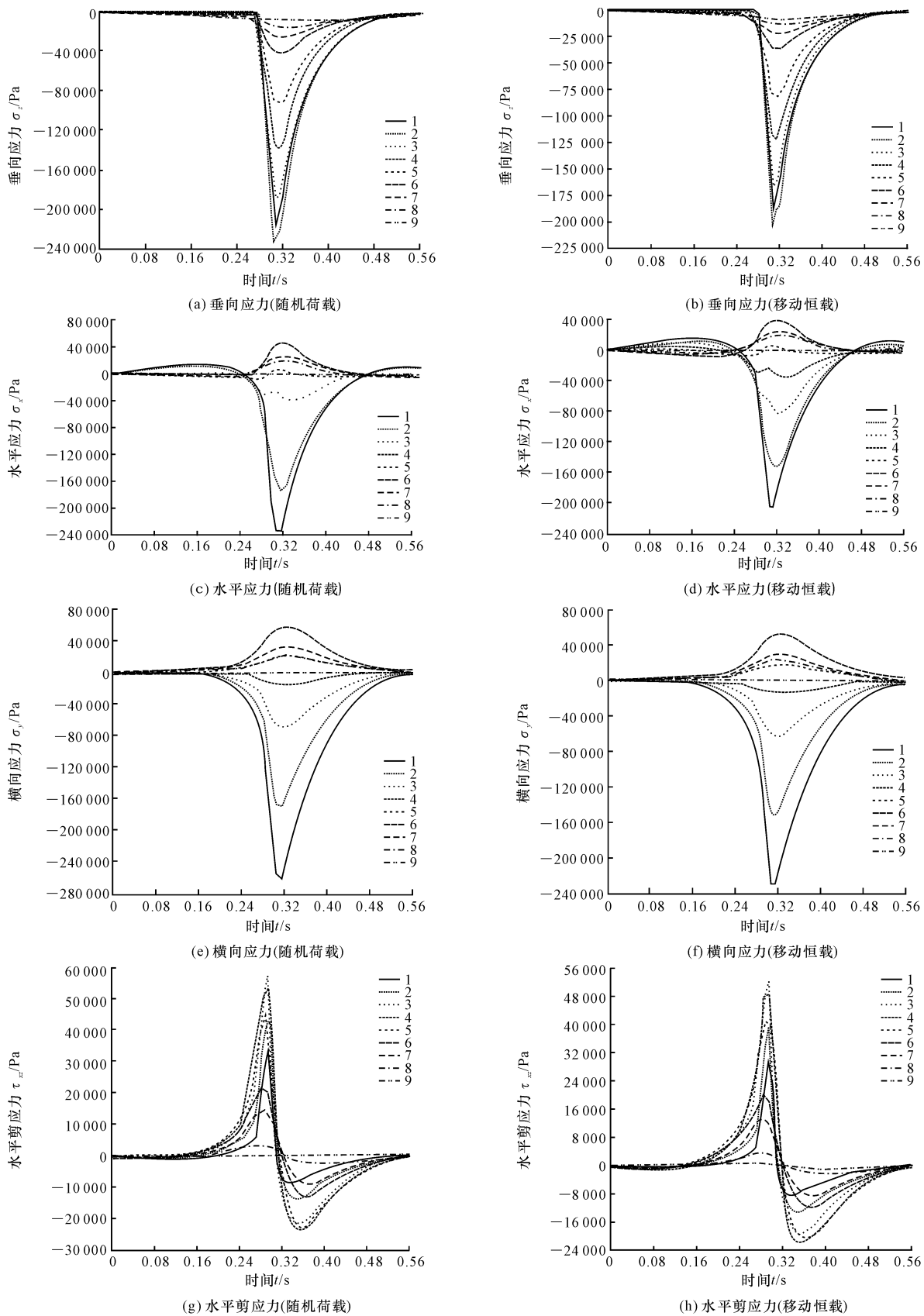
由图 5(g)、图 5(h)可知,路面节点所受的水平剪切应力在轮载作用前后是正负交变变化的,在沥青面层中剪切应力随深度的变化较大,沥青表面层(0~6 cm)剪切应力相对较小,中面层(6~12 cm)附近剪切应力增长很快,在沥青中面层底部(曲线 3)达到最大值,随后,水平剪切应力随着深度而逐渐变小,到土基层达到最小值。计算可知,随机荷载下最大水平剪应力正向峰值(沥青中面层底部)为移动恒载的 1.11 倍。

由上述分析可知,随机荷载下某一固定位置处节点的应力时程曲线的极值均大于移动恒载数值,即考虑车辆荷载随机性的随机荷载对路面的破坏作用较大,将车辆荷载简化为移动的恒定荷载,会低估其对路面的损伤作用。另外,由图 5 还可以看出,2 种荷载作用下路面固定位置处的垂向应力、水平应力、横向应力和水平剪应力的时间历程曲线形状十分相似,可见路面结构某点的应力时程变化无法反映动荷载的随机特征和整个路面结构体随荷载变化的应力分布状况。

3.2 路面体各层应力极值响应

为分析车辆荷载的随机特征和路面体各层应力波动规律,对路面各层的应力极值进行分析(由于路面结构某一节点极值可能存在极大值和极小值 2 种情况,取绝对值较大者)。

下页图 6 为路面轮迹中心线下各层顶面各节点垂向应力、水平应力、横向应力和水平剪应力极值分布曲线。从图 6 可以看出,移动恒载作用下路面各



注：1-沥青表面层顶部；2-沥青表面层底部；3-沥青中面层底部；4-沥青底面层底部与基层结合处；5-基层中部；6-基层底部与底基层结合处；7-底基层中部；8-底基层底部与土基结合处；9-土基中部

图 5 路面中央节点应力时间历程曲线
Fig. 5 Time history of stress of oad central node

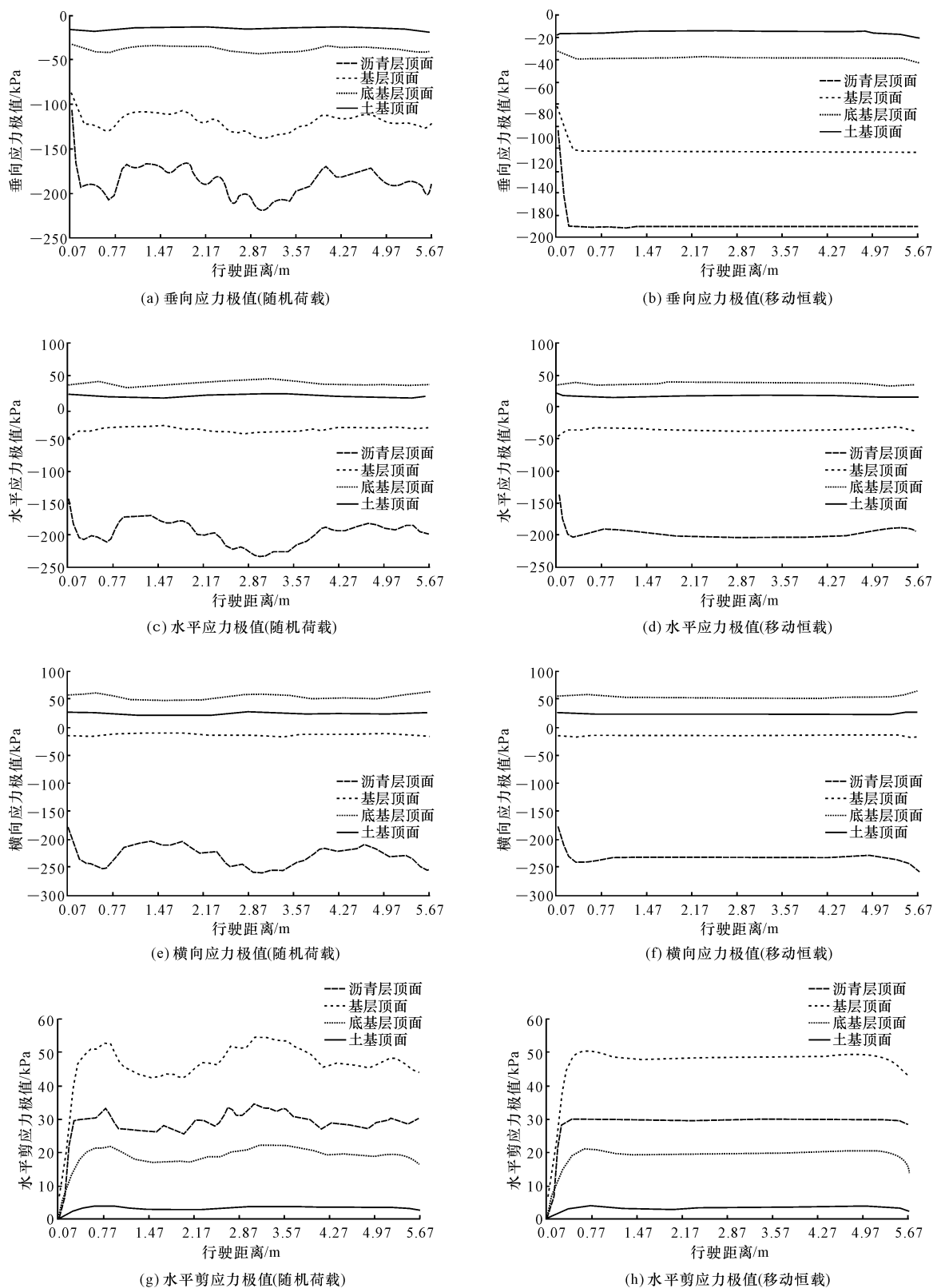


图 6 路面各层顶面各点应力极值曲线

Fig. 6 Extreme value of stress of each point in top surface layers of pavement

层的应力极值基本不变,而随机荷载作用下路面各层的应力极值是随着车辆行驶距离的变化而不断变化的,其变化的频率与轮胎随机荷载频率变化相似,

见图 3(水平剪应力由于取的是正向峰值,故与其他应力曲线和随机荷载形状对称);另外还可以看出,随机荷载作用下路面应力的波动变化随着路面深度

的增加而降低,即离路面加载区域的深度越远,应力的波动特性越不明显,可见荷载随机变化对上层路面结构的影响较强。

对图 6 中 2 种荷载模式下的应力极值曲线的峰值进行统计比较,得到表 3。由表 3 可知,随机荷载下路面结构体各层应力极大值均大于移动荷载值,可见车辆随机荷载的破坏效应要大于移动恒载的影响,在路面结构分析时,除了要考虑荷载的动态性之外,还需考虑荷载的随机性变化情况。

3.3 路面不平度的影响

车辆在不同等级路面上行驶时,轮胎动荷载存在较大差异。为分析路面不平度对路面随机动载响应的影响,依据国家标准 GB 7307—87 中路面不平度系数值,运用本文的方法,仿真得到不同等级路面下的动荷载并进行路面有限元响应求解,得到不同路面不平度等级条件下,车辆随机荷载作用下沥青面层顶面各点的应力极值变化曲线,如图 7 所示。

从图 7 可以看出:①随机动载作用下沥青面层顶面各点的应力极值曲线是波动变化的,且随着路面不平度的增加,路面应力极值的波动效应增加;②

表 3 随机荷载与移动恒载应力极大值的比较

Tab. 3 Comparison of maximum stress value between random load and moving load

节点位置	荷载模式	垂向应力/kPa	水平应力/kPa	横向应力/kPa	水平剪应力/kPa
沥青层顶面	随机荷载	-218.5	-234.4	-261.8	34.6
	移动恒载	-189.6	-205.4	-232.2	29.9
基层顶面	随机荷载	-138.7	-40.6	-16.4	54.7
	移动恒载	-121.9	-37.2	-14.7	48.6
底基层顶面	随机荷载	-42.1	44.9	58.9	22.3
	移动恒载	-37.5	39.8	53.2	19.9
土基顶面	随机荷载	-15.7	21.1	25.1	3.9
	移动恒载	-14.2	18.8	22.8	3.5

路面各应力极值曲线的峰值均大于移动恒载的数值,且随着路面不平度的增加,应力峰值增加;③车辆在较好路面(如 A、B 级路面)行驶时,应力极值曲线波动效应降低,随机荷载应力响应与移动恒载应力响应比较接近。另外,对比相关文献可知^[9],路面结构体应力极值的变化情况大体上与不平路面激励下车辆动荷载的变化规律是一致的。

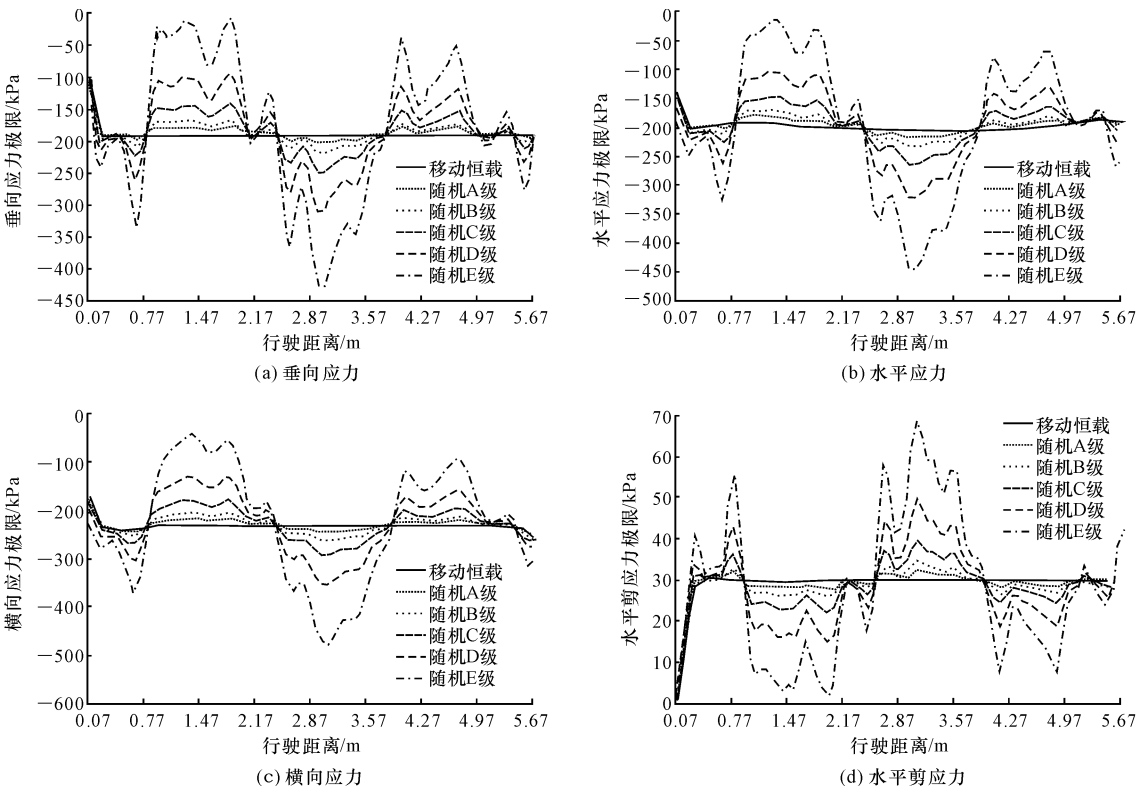


图 7 不同路面不平度下沥青层顶面应力极值曲线

Fig. 7 Extreme value curve of stress at top surface of asphalt layer under different surface roughness

4 结 语

(1)对于路面某一固定位置节点而言,随机动载

和移动恒载作用下的应力响应规律十分相似,分析路面结构固定节点的应力时程变化情况,无法反映车辆荷载的随机特征和路面结构体应力波动状况。

(2)对于轮迹中心线下路面各层而言,车辆随机动载作用下路面各层各点的应力极值随着车辆行驶距离的改变而变化,其波动频率与随机荷载的频率变化相似,且随着路面深度的增加,路面应力响应的波动强度降低。

(3)无论是路面某一固定点的应力、还是路面结构体各层的应力极值,随机荷载作用下的路面动态应力均大于移动恒载的数值,即车辆荷载的随机性对路面结构的破坏作用不可忽视。在路面设计和分析时,除考虑荷载的动态性,还需考虑荷载的随机性,采用随机荷载进行分析更符合实际情况。

(4)在路面状况良好时,随机动载作用下路面应力响应与移动恒载比较接近,且随着路面不平度的增加,路面应力的波动效应和极大值逐渐增大;在路面比较平整即车辆振动较小时,才可用空间变化、载荷不变的移动恒载来模拟车辆对路面作用的荷载。

(5)基于本文提出的分析思路和方法,进一步可分析车辆系统参数如悬架刚度和阻尼、轮胎刚度和阻尼变化时路面结构的随机动态响应变化规律,以及车辆加速、转向、制动工况下随机轮胎切向力对路面动态响应的影响。

参考文献:

References:

- [1] 牛玺荣,韩 萍,张晓燕.车轮荷载下路基和基底竖向应力计算[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(1):26-30.
NIU Xi-rong,HAN Ping,ZHANG Xiao-yan. Calculation of vertical stress in subgrade and foundation base under wheel road[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(1): 26-30. (in Chinese)
- [2] 陈一锴,何 杰,彭 佳,等.基于动载模拟的半刚性沥青路面响应分析[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(3):593-598.
CHEN Yi-kai,HE Jie,PENG Jia,et al. Dynamic analysis of semi-rigid asphalt pavement subjected to simulant dynamic loads[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(3): 593-598. (in Chinese)
- [3] Blab R,Harvey J T. Modeling measured 3D tire contact stresses in a viscoelastic fe pavement model[J]. The International Journal of Geomechanics, 2002, 2(3):271-290.
- [4] 单景松,黄晓明,廖公云.移动荷载下路面结构应力响应分析[J].公路交通科技,2007,24(1):10-13.
SHAN Jing-song,HUANG Xiao-ming,LIAO Gong-yun,et al. Dynamic response analysis of pavement

structure under moving load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(1):10-13. (in Chinese)

- [5] Wu J M,Liang J P,Adhikari S. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6):439-447.
- [6] 刘大维,李国政,陈焕明,等.车辆随机动载作用下路面动态响应研究[J].农业机械学报,2011,42(2):28-32.
LIU Da-wei,LI Guo-zheng,CHEN Huan-ming,et al. Dynamic response of pavement based on random dynamic load of vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 28-32. (in Chinese)
- [7] 吕彭民,董忠红.车辆-沥青路面系统力学分析[M].北京:人民交通出版社,2010.
LU Peng-min,DONG Zhong-hong. Mechanical analysis of vehicle-asphalt pavement system[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)
- [8] 任卫群.车-路系统动力学中的虚拟样机:MSC. ADAMS 软件应用实践[M].北京:电子工业出版社,2005.
REN Wei-qun. Virtual prototype of vehicle-road system dynamics: the application of MSC. ADAMS software in[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [9] Sun L,Kennedy T. Spectral analysis and parametric study of stochastic pavement load[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(3):318-327.
- [10] 李皓玉,杨绍普,李韶华.车、路相互作用下沥青路面动力学特性分析[J].振动与冲击,2009,28(4):86-89.
LI Hao-yu,YANG Shao-pu,LI Shao-hua. Dynamical analysis of asphalt pavement due to vehicle-road interaction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(4):86-89. (in Chinese)
- [11] 陈一锴,何 杰,李旭宏,等.基于模糊控制的重型货车空气悬架性能多目标优化[J].东南大学学报:自然科学版,2008,38(2):319-323.
CHEN Yi-kai,HE Jie,LI Xu-hong,et al. Integrated performance optimum design of heavy truck air suspension based on fuzzy control[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(2): 319-323. (in Chinese)
- [12] Cole D J,Cebon D. Truck suspension design to minimize road damage[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineer, 1996, 210(Part D):95-107.
- [13] 黄仰贤.路面分析与设计[M].北京:人民交通出版社,1998.
HUANG Yang-xian. Pavement analysis and design [M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese)