

车-路耦合作用力特性及混凝土路面动态响应

周玉民¹, 谈至明¹, 田波²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 交通部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 应用1/4车-路耦合动力学模型及直接积分法, 分析车辆以一定速度匀速移动时, 车辆参数(集中质量、悬挂系统弹簧刚度和轮胎弹簧刚度)、路面板参数(路面板厚度、接缝宽度、接缝错台和接缝传荷等)以及地基参数(地基刚度、地基阻尼及地基弱化指数等)对车-路耦合作用力的影响; 给出了动荷系数(动静荷载比)随各参量变化的影响曲线及其统计特征; 探讨了有接缝混凝土路面板动弯沉和动应变的变化规律。结果表明, 随着车速的提高, 车-路耦合作用力的变异性增大, 路面板动弯沉和动应变的波动性增强; 因此, 在水泥混凝土路面设计时, 车-路耦合引起的动态效应应予以考虑。

关键词: 道路工程; 水泥混凝土路面; 车-路耦合动力学; 动荷系数; 动弯沉; 动应变

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

Vehicle-road Coupling Force Characteristics and Dynamic Responses of Concrete Pavements

ZHOU Yumin¹, TAN Zhiming¹, TIAN Bo²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Research Institute of Highway of the Ministry of Transportation, Beijing 100088, China)

Abstract: When vehicles moving at a uniform speed on concrete pavements, the influences of different parameters, such as the vehicle parameters (concentrated mass, suspension stiffness and tyre stiffness), the pavement structure parameters (pavement thickness, joint width, joint faulting, joint load transfer capacity etc.) and the sub-grade parameters (sub-grade reaction modulus, sub-grade damping and sub-grade strength weakening index etc.), on the time-varying force are systematically analyzed with the established quarter vehicle-road coupling dynamics model and the direct integration method. The curves of loading impact factor (dynamic load upon static load) against a variety of parameters are provided, and the statistic characteristics of loading impact factor is also depicted. Then, the dynamic

displacement and strain of concrete pavements are discussed accordingly. The results show that the variance of time-varying force is getting larger with the increase of the vehicle moving speed, and the dynamic effects of displacements and strains on concrete pavements become more remarkable; therefore, while designing concrete pavements, the dynamic effects of concrete pavement arising from vehicle-road interaction shall be considered.

Key words: road engineering; concrete pavement; vehicle-road coupling dynamics; loading impact factor; dynamic displacement, dynamic strain

近年来,随着货运车辆行驶速度、载重量和轮胎接地压力的增大,公路水泥混凝土路面早期损坏现象(破碎、开裂和断角等)日益加剧,特别在接缝部位表现得尤为明显,在开放交通运营的1~3年时间内就需要中修或大修,以改善其行使性能^[1]。调查和研究表明,车辆在载重量和接地压力增大的情况下,随着行驶速度的提高,车-路耦合作用显著增强,对路面结构的破坏加剧^[2-7],而仍按车辆静荷载分析路面结构的变形和受力特性,进行路面结构设计^[8],必然低估车-路耦合作用引起的路面疲劳损伤,导致设计的可靠性不高。

基于此,应用文献[9]已建立的车-路耦合动力学模型,分析车辆、路面结构和地基等各部分参数对车-路耦合作用力的影响,给出动荷系数随各参量变化的影响曲线及其统计特征,探讨路面结构动弯沉、动应变的变化规律,为水泥混凝土路面结构分析由静力学理论向动力学方法转变奠定基础。

1 车-路耦合动力学模型及计算参数

1.1 车-路耦合动力学模型

收稿日期: 2010-12-22

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2007 318 223 01-4, 2007 318 223 01-9)

第一作者: 周玉民(1969—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为道路工程。E-mail: zhouym69@163.com

通讯作者: 谈至明(1960—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为道路工程。E-mail: tanjk@online.sh.cn

车-地基板耦合动力学方程、单元划分、积分时间步选择及求解方法参见文献[9]. 1/4 车-地基板耦合动力学模型见图 1.

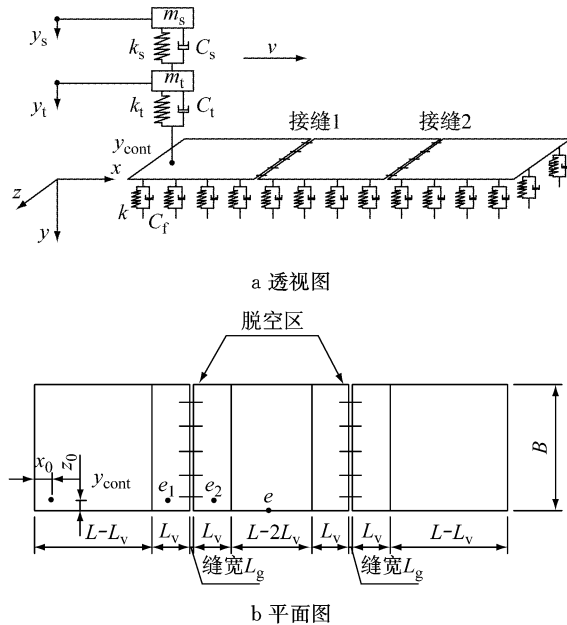


图 1 1/4 车-路耦合动力学模型

Fig.1 1/4 vehicle-road coupling dynamics model

图 1 中: m_s, m_t 分别为车辆悬挂系上部及轮胎的质量; C_s, C_t 分别为车辆悬挂系及轮胎的阻尼系数; k_s, k_t 分别为车辆悬挂系及轮胎的弹簧刚度; y_s, y_t 和 y_{cont} 分别为质量块 m_s, m_t 和轮胎接地点的垂向

位移; v 为车辆匀速行驶的速度; k 为地基反应模量; C_f 为地基阻尼系数; F_{t1}, F_{t2} 分别为接缝 1 和接缝 2 的错台量; L 为单块混凝土路面板板长; B 为单块混凝土路面板板宽; L_v 为接缝附近路面板下脱空(地基弱化)区长度; λ_k, λ_c 为地基模量和阻尼系数弱化指数(脱空区地基模量、阻尼系数与未脱空区的比值), 比例相同, 统一记为 λ ; e, e_1, e_2 分别为路面板纵缝边缘中部及横缝附近的点位; L_g 为接缝缝宽; z_0 为车-路接触点到混凝土路面纵边边缘的距离; x_0 为车-路接触点在混凝土路面 x 方向上的起点坐标.

1.2 计算参数及工况组合

考虑常见货车及混凝土路面结构. 货车车辆参数为: $m_s = 2\,500 \sim 7\,500 \text{ kg}$, $m_t = 440 \text{ kg}$, $k_s = 0.2 \sim 1.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$, $k_t = 1.2 \sim 5.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$, $C_s = 12\,000 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, $C_t = 1\,500 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$. 混凝土路面结构参数为: $L = 5.00 \text{ m}$, $B = 3.75 \text{ m}$, 板厚 $h = 0.18 \sim 0.30 \text{ m}$, $L_g = 5 \sim 20 \text{ mm}$, $k = 50 \sim 200 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$, $L_v = 0.5 \text{ m}$, $C_f = 500 \sim 5\,000\,000 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$, $F_{t1} = 0 \sim 10 \text{ mm}$, $F_{t2} = 0$, 地基弱化指数 $\lambda = \lambda_k = \lambda_c = 0 \sim 1$, 接缝剪切刚度 $k_w = 10 \sim 10\,000 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$, $x_0 = 0$, $z_0 = 0.098\,7 \text{ m}$.

车辆移动速度 $v = 0 \sim 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

改变车辆、路面结构和地基参数, 组合成不同工况, 见表 1.

表 1 车-路耦合作用分析计算工况

Tab.1 Cases for analysis of vehicle-road coupling dynamics

| 工 况 | 车辆参数 | | | 路面参数 | | | | 地基参数 | | |
|--------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|---|-----------|
| | m_s/kg | $k_s/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$ | $k_t/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$ | h/m | L_g/mm | $k_w/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$ | F_{t1}/mm | $k/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$ | $C_t/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3})$ | λ |
| 1 | * | 0.2 | 1.2 | 0.24 | 10 | 10 | 0 | 100 | 5×10^4 | 0.5 |
| 2 | * | 1.0 | 5.0 | 0.24 | 10 | 10 | 0 | 100 | 5×10^4 | 0.5 |
| 3 | 2 500 | 1.0 | 5.0 | * | 10 | 10 | 0 | 100 | 5×10^4 | 0.5 |
| 4 | 2 500 | 1.0 | 5.0 | 0.24 | * | 10 | 0 | 100 | 5×10^4 | 0.5 |
| 5 | 2 500 | 1.0 | 5.0 | 0.24 | 10 | * | 0 | 100 | 5×10^4 | 0.5 |
| 6 | 2 500 | 1.0 | 5.0 | 0.24 | 10 | 10 | * | 100 | 5×10^4 | 0.5 |
| 7 | 2 500 | 1.0 | 5.0 | 0.24 | 10 | 10 | 0 | * | 5×10^4 | 0.5 |
| 8 | 2 500 | 1.0 | 5.0 | 0.24 | 10 | 10 | 0 | 100 | * | 0.5 |
| 9 | 2 500 | 1.0 | 5.0 | 0.24 | 10 | 10 | 0 | 100 | 5×10^4 | * |

注: 标有“*”栏表示该参数取值变化.

2 车-路耦合作用力特性

车辆以一定速度在水泥混凝土路面上行驶时, 车-路耦合作用力 P 是时间和空间位置的函数, 为了清楚反映这种耦合作用力与车辆作用于路面的静力 P_0 的差异, 定义动荷系数 k_d 如下:

$$k_d = \frac{P}{P_0} = \frac{P}{(m_s + m_t)g} \quad (1)$$

由于车-路耦合作用力 P 随时间和空间位置变化, 相应地, 动荷系数 k_d 亦是时间和空间位置的函数, 一般地围绕 1 波动变化, 其均值及均方差计算式为

$$E(k_d) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{di}$$

$$\sigma_{k_d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_{di} - E(k_d))^2}{n-1}} \quad (2)$$

采用动荷系数 k_d 、均值 $E(k_d)$ 以及均方差 σ_{k_d} 可以很好地反映车-路耦合作用的统计特征。

2.1 车辆参数变化的影响

车辆参数主要包括悬挂系统上部质量 m_s 以及悬挂系统和轮胎的刚度 k_s, k_t 。

图 2 所示为 $m_s=2\,500\text{ kg}$ 时对应于工况 1, 2 的动荷系数 k_d 随车辆移动位置 x 、速度 v 变化的曲线。表 2 列出了工况 1, 2 对应的动荷系数 k_d 均值及均方差。

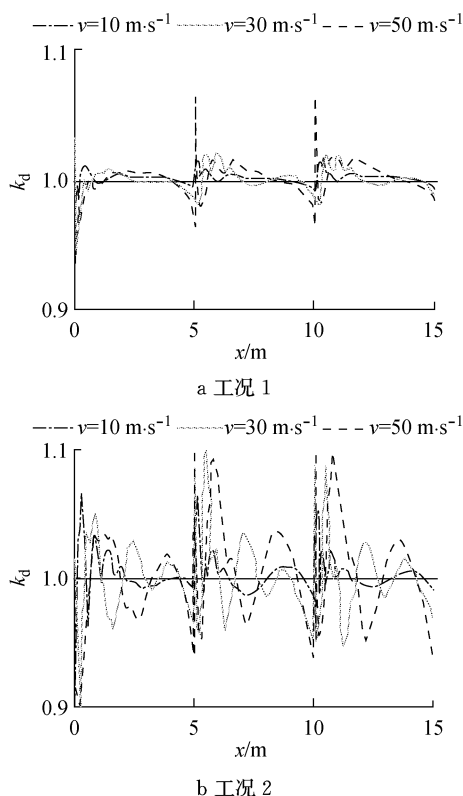


图 2 动荷系数 k_d 随 x, v 变化曲线 ($m_s=2\,500\text{ kg}$)

Fig.2 Curves of k_d with x, v ($m_s=2\,500\text{ kg}$)

表 2 工况 1, 2 的动荷系数 k_d 均值及均方差

Tab.2 Mean values and mean square errors of k_d for Cases 1, 2

| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $m_s=2\,500\text{ kg}$ | | $m_s=3\,000\text{ kg}$ | | $m_s=3\,500\text{ kg}$ | |
|----|--------------------------------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 1 | 10 | 1.000 | 0.005 | 1.000 | 0.005 | 1.000 | 0.005 |
| | 30 | 0.999 | 0.010 | 0.999 | 0.010 | 0.999 | 0.010 |
| | 50 | 0.998 | 0.013 | 0.998 | 0.013 | 0.998 | 0.013 |
| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $m_s=2\,500\text{ kg}$ | | $m_s=5\,000\text{ kg}$ | | $m_s=7\,500\text{ kg}$ | |
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 2 | 10 | 0.999 | 0.015 | 0.998 | 0.018 | 0.999 | 0.016 |
| | 30 | 0.998 | 0.029 | 0.999 | 0.030 | 1.000 | 0.030 |
| | 50 | 0.998 | 0.037 | 0.999 | 0.037 | 0.997 | 0.037 |

依据图 2 和表 2 可以看到, 车辆速度提高, 车辆悬挂系统和轮胎的弹簧刚度较大, 接缝附近动荷系数增大, 波动性增强, 动荷系数均值近似为 1, 其均方差增大; 车辆悬挂系统和轮胎的弹簧刚度较小, 除接缝附近动荷系数波动不大外, 其他动荷系数均值、均方差变化规律与弹簧刚度较大的相同。而悬挂系统上部质量 m_s 变化对动荷系数均方差的影响不大。

显然, 货车较大的悬挂系统刚度、较高的轮胎充气压力、较高的速度, 均使动荷系数增大, 即车对路面的动态作用增强。

2.2 路面结构参数变化的影响

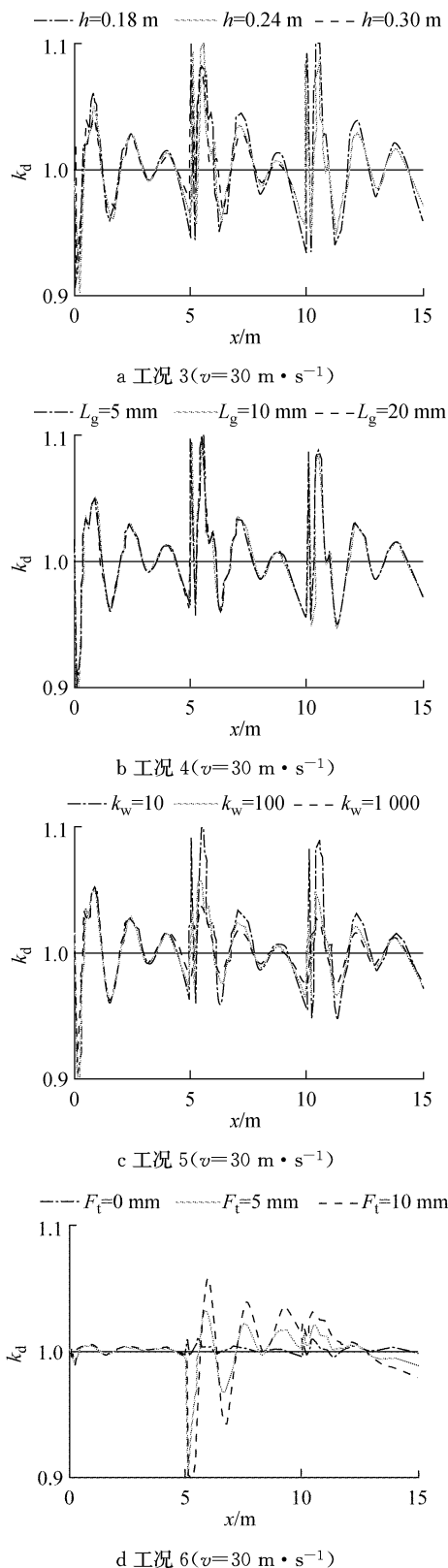
路面结构参数有路面板厚 h 、接缝宽度 L_g 、接缝剪切刚度 k_w 和接缝错台量 F_{t1}, F_{t2} 等。表 3 列出了工况 3~6 对应的动荷系数 k_d 均值及均方差。动荷系数 k_d 随车辆移动位置 x 、路面板厚 h 、接缝宽度 L_g 、接缝剪切刚度 k_w 和接缝错台量 F_{t1} 等变化的曲线见图 3。

表 3 工况 3~6 的动荷系数 k_d 均值及均方差

Tab.3 Mean values and mean square errors of k_d

| for Cases 3~6 | | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|--|----------------|---|----------------|--|----------------|
| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $h=0.18\text{ m}$ | | $h=0.24\text{ m}$ | | $h=0.30\text{ m}$ | |
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 3 | 10 | 1.000 | 0.017 | 0.999 | 0.015 | 1.000 | 0.013 |
| | 30 | 0.997 | 0.037 | 0.998 | 0.029 | 0.999 | 0.025 |
| | 50 | 0.997 | 0.045 | 0.998 | 0.037 | 0.999 | 0.032 |
| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $L_g=5\text{ mm}$ | | $L_g=10\text{ mm}$ | | $L_g=20\text{ mm}$ | |
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 4 | 10 | 1.000 | 0.015 | 0.999 | 0.015 | 0.999 | 0.015 |
| | 30 | 0.998 | 0.030 | 0.998 | 0.029 | 0.998 | 0.029 |
| | 50 | 0.998 | 0.037 | 0.998 | 0.037 | 0.998 | 0.037 |
| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $k_w=10\text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ | | $k_w=100\text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ | | $k_w=1\,000\text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ | |
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 5 | 10 | 0.999 | 0.015 | 1.000 | 0.013 | 1.000 | 0.012 |
| | 30 | 0.998 | 0.029 | 0.998 | 0.024 | 0.998 | 0.021 |
| | 50 | 0.998 | 0.037 | 0.997 | 0.030 | 0.997 | 0.025 |
| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $F_{t1}=0$ | | $F_{t1}=5\text{ mm}$ | | $F_{t1}=10\text{ mm}$ | |
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 6 | 10 | 0.999 | 0.015 | 0.998 | 0.089 | 0.997 | 0.165 |
| | 30 | 0.998 | 0.029 | 0.991 | 0.167 | 0.991 | 0.274 |
| | 50 | 0.998 | 0.037 | 0.985 | 0.220 | 0.993 | 0.338 |

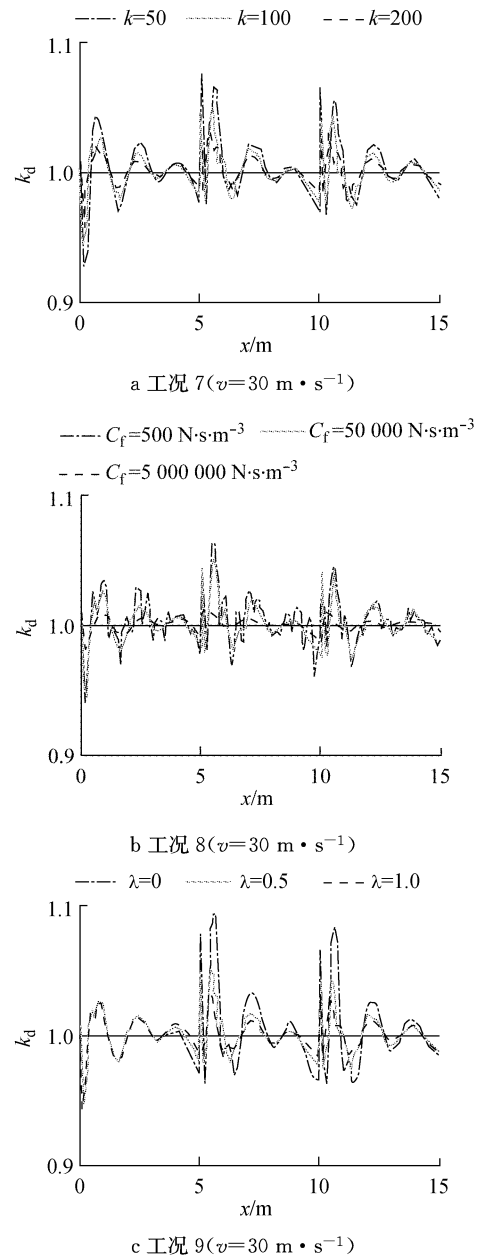
综合图 3 和表 3 来看, 路面板厚 h 、接缝宽度 L_g 对动荷系数、动荷系数均值及其均方差的影响不大。而接缝剪切刚度 k_w 、接缝错台量 F_{t1} 对动荷系数、动荷系数均值及其均方差的影响是明显的, k_w 提高, 接缝附近动荷系数最大值下降, 动荷系数均值接近 1, 均方差下降, 均方差降幅与车辆速度有关, 车速增大, 降幅明显, 反之, 则相反。 F_{t1} 增长, 接缝附近动荷系数最小值接近于 0, 最大值显著增大, 超过 1 很多,

图3 动荷系数 k_d 随 x , h , L_g , k_w , F_t 变化的曲线Fig.3 Curves of k_d with x , h , L_g , k_w , F_t

动荷系数均值略低于1,而其均方差明显增大.路面结构参数变化,车辆速度提高,动荷系数均方差均呈现增长的趋势.

2.3 地基参数变化的影响

地基参数包含地基反应模量 k 、地基阻尼系数 C_f 以及地基弱化指数 λ 等.工况 7~9 对应的动荷系数 k_d 随车辆移动位置 x 和地基反应模量 k 、阻尼系数 C_f 以及地基弱化指数 λ 等变化的曲线如图 4 所示.表 4 列出了动荷系数 k_d 均值及均方差.

图4 动荷系数 k_d 随 x , k , C_f , λ 变化的曲线Fig.4 Curves of k_d with x , k , C_f , λ

根据图 4 和表 4 易见,车辆速度提高,地基反应模量 k 、阻尼系数 C_f 以及地基弱化指数 λ_k , λ_c 等增大,接缝附近动荷系数最大值下降,动荷系数均值为1,动荷系数均方差减小;反之,除动荷系数均值为1不变外,其他则相反.

地基阻尼系数影响动荷系数的波动性,其值较小(如 $C_f < 5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$),动荷系数的波动性显著,其值较大(如 $C_f > 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$),动荷系数变异性几乎不受车速的影响,也就是说,提高地基的阻尼,对于减小车-路的相互作用是有帮助的.地基弱化指数 λ 反映了板下脱空的状况,当板下完全脱空时($\lambda=0$),接缝附近动荷系数明显增大,显见板下脱空对路面板的受力是非常不利的.

表 4 工况 7~9 的动荷系数 k_d 均值及均方差
Tab.4 Mean values and mean square errors of k_d
for Cases 7~9

| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $k=50$ $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ | | $k=100$ $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ | | $k=200$ $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ | |
|----|--------------------------------------|--|----------------|--|----------------|--|----------------|
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 7 | 10 | 0.999 | 0.023 | 0.999 | 0.015 | 1.000 | 0.010 |
| | 30 | 0.999 | 0.042 | 0.998 | 0.029 | 0.998 | 0.021 |
| | 50 | 0.999 | 0.054 | 0.998 | 0.037 | 0.998 | 0.025 |
| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $C_f=5 \times 10^2$ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ | | $C_f=5 \times 10^4$ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ | | $C_f=5 \times 10^6$ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ | |
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 8 | 10 | 1.000 | 0.022 | 0.999 | 0.015 | 1.000 | 0.011 |
| | 30 | 0.999 | 0.033 | 0.998 | 0.029 | 1.000 | 0.012 |
| | 50 | 1.000 | 0.039 | 0.998 | 0.037 | 1.000 | 0.012 |
| 工况 | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $\lambda=0$ | | $\lambda=0.5$ | | $\lambda=1.0$ | |
| | | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} | $E(k_d)$ | σ_{k_d} |
| 9 | 10 | 0.999 | 0.026 | 0.999 | 0.015 | 1.000 | 0.013 |
| | 30 | 0.999 | 0.047 | 0.998 | 0.029 | 0.998 | 0.024 |
| | 50 | 0.998 | 0.063 | 0.998 | 0.037 | 0.998 | 0.028 |

综上,基于车-路耦合作用力特性的分析,车辆的影响因素在于悬挂系统、轮胎的弹簧刚度,也包括车辆速度.路面结构影响因素最大的是接缝错台,其次是接缝剪切刚度,至于接缝宽度和路面板厚,其影响是很小的.地基参数中地基反应模量、地基弱化指数的影响基本相当,当地基阻尼系数 $C_f > 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,车辆速度的影响可忽略.

3 路面板动弯沉和动应变

路面板的弯沉、应变受车辆速度、荷载、路面板厚度、接缝剪切刚度、地基反应模量、阻尼和地基弱化指数等的影响.以工况 8 为例,讨论路面板接缝两侧点 e_1, e_2 和纵边中点 e 的动弯沉和动应变值随车辆速度、地基阻尼和位置 x 变化的趋势.

3.1 路面板动弯沉

混凝土路面板接缝两侧点 e_1, e_2 动弯沉 w 随车辆速度 v 、地基阻尼系数 C_f 和位置 x 变化的曲线见图 5 和图 6.

从图 5 和图 6 可以发现,地基阻尼增大,弯沉的波动幅度减小;反之,则相反.车辆速度提高,地基阻尼较大时($C_f > 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$),弯沉最大幅值呈稳定下降趋势;地基阻尼较小时($C_f < 5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$),弯沉最大幅值波动变化.

3.2 路面板动应变

表 5 为不同车辆速度下,点 e_1, e_2 的最大动弯沉值以及点 e_1, e_2 和 e 的最大动应变值.图 7 和图 8 所示为路面板接缝两侧点 e_1 和纵边中点 e 的动应变随车辆速度 v 、地基阻尼系数 C_f 和位置 x 变化的曲线.

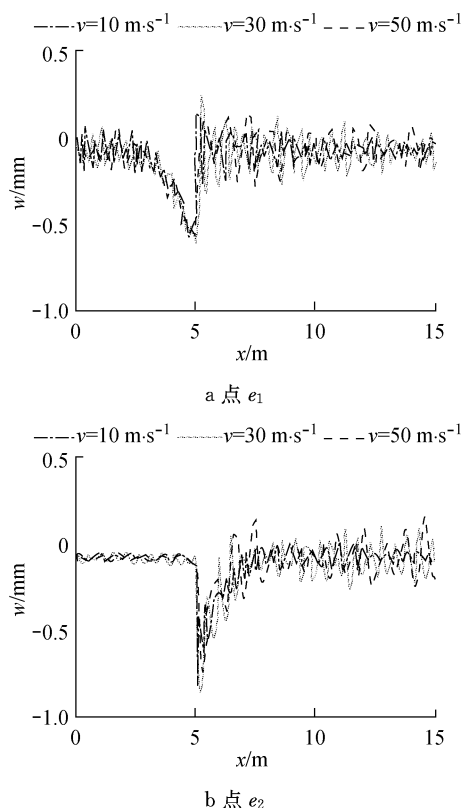


图 5 动弯沉 w 随 v, x 变化曲线(工况 8, $C_f=5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)
Fig.5 Curves of w with v, x (Case 8, $C_f=5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

从表 5 可以看到,地基阻尼较小($C_f < 5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)时,随车辆速度提高,无论动弯沉还是动应变的最大值均呈现出波动性.地基阻尼较大($C_f > 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)时,路面板的附加振动可以忽略,此时,随车辆速度提高,路面板一点的动弯沉、动应变最大值单调下降.

由图 7 和图 8 可见,路面板动应变与动弯沉随车辆速度 v 、地基阻尼系数 C_f 变化的规律是相似的,在此不再赘述.

综合以上分析可知,路面板某点的动弯沉、动应变与静态受力时的弯沉、应变有明显区别,原因在于移动车辆与路面板产生耦合作用,而这种耦合作用又受车辆速度和地基阻尼的影响.当车辆移动到路面板某处,该处由于板的振动产生的附加动弯沉、动应变与车-路耦合力产生的动弯沉、动应变方向一致时,路面板总的动弯沉、动应变增大;反之,方向不一致,总的动弯沉、动应变减小.

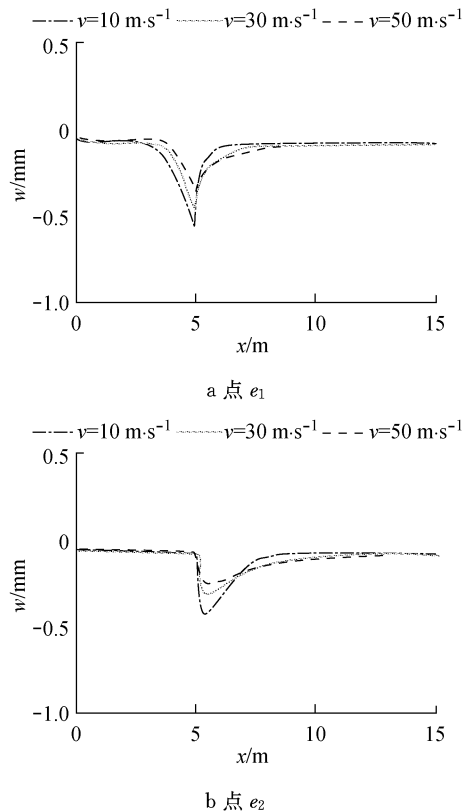


图 6 动弯沉 w 随 v, x 变化曲线(工况 8, $C_f = 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.6 Curves of w with v, x (Case 8, $C_f = 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)

表 5 点 e_1, e_2 和 e 的弯沉、应变最大值(工况 8)

Tab.5 Maximum deflections and strains at Points e_1, e_2 and e (Case 8)

| $C_f / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3})$ | $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 弯沉 w / mm | | 应变 $\varepsilon / \mu\text{m}$ | | |
|---|--------------------------------------|--------------------|--------|--------------------------------|-------|------|
| | | e_1 | e_2 | e_1 | e_2 | e |
| 5×10^2 | 0 | -0.633 | -0.633 | 39.2 | 39.2 | 48.9 |
| | 10 | -0.646 | -0.838 | 38.8 | 38.8 | 49.1 |
| | 30 | -0.640 | -0.863 | 36.1 | 40.5 | 54.3 |
| | 50 | -0.584 | -0.757 | 38.0 | 40.8 | 50.7 |
| 5×10^6 | 0 | -0.633 | -0.633 | 39.2 | 39.2 | 48.9 |
| | 10 | -0.566 | -0.428 | 37.4 | 37.8 | 47.7 |
| | 30 | -0.458 | -0.314 | 35.0 | 35.6 | 44.2 |
| | 50 | -0.380 | -0.259 | 33.4 | 34.2 | 41.6 |

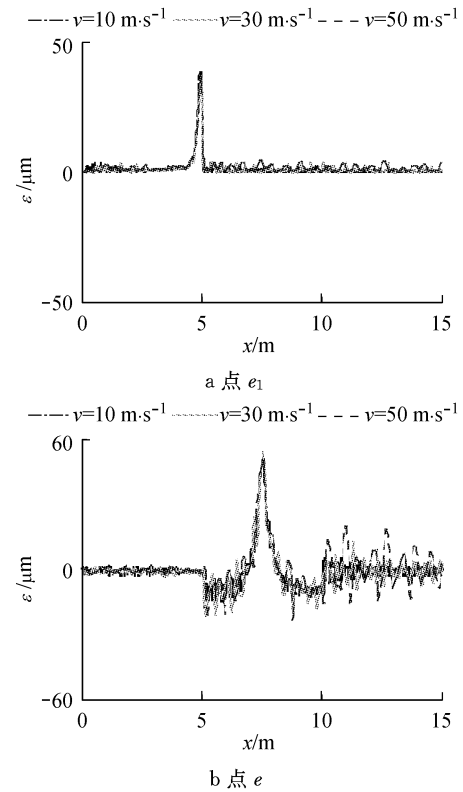


图 7 动应变 ε 随 v, x 变化曲线(工况 8, $C_f = 5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.7 Curves of ε versus v, x (Case 8, $C_f = 5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)

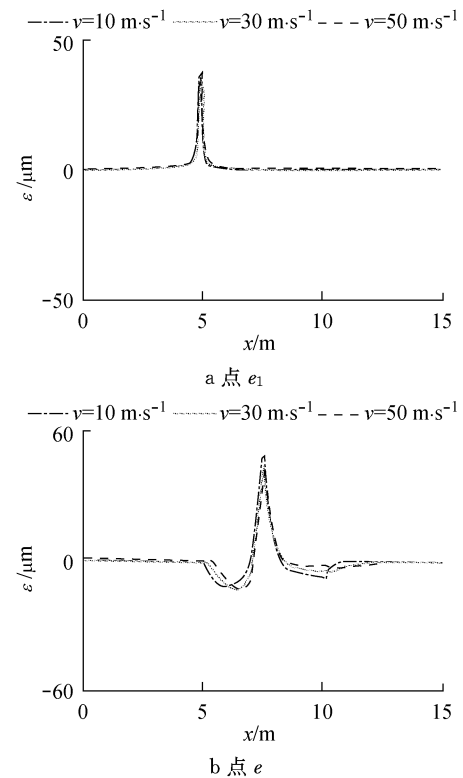


图 8 动应变 $\varepsilon \sim v, x$ 曲线(工况 8, $C_f = 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.8 Curves of ε with v, x (Case 8, $C_f = 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)

4 结论

应用车-路耦合动力学模型,分析各种因素(车辆、路面和地基各部分参数)变化对车-路耦合作用力的影响,以及水泥混凝土路面弯沉和应变的动态特性,所得初步结论如下:

(1) 分析表明,在无错台情况下,动荷系数是以1为均值的随机变量.随着车辆速度的提高,动荷系数的均方差 σ_{k_d} 增大,反之,则相反.接缝剪切刚度、地基反应模量、地基阻尼系数、地基弱化指数增大,动荷系数的均方差降低.车辆悬挂系统上部质量、接缝宽度对动荷系数的影响很小.当接缝存在错台时,动荷系数的均值小于1,而其均方差则随错台量增加而显著增大.

(2) 在所有影响车-路耦合作用力的因素中,接缝错台的影响最大,接缝错台量越大,车辆驶经接缝时的冲击作用越明显.

(3) 对于有限尺寸路面板而言,车辆速度、地基阻尼是影响路面板动弯沉、动应变的主要因素.地基阻尼较小($C_t < 5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$),随着车辆速度的提高,板上一点的最大弯沉、应变值并不是单调下降的,而是呈现出明显的波动性,这种波动性是路面板振动产生的附加动弯沉、动应变与车-路耦合作用力引起的路面板动弯沉、动应变叠加的结果.地基阻尼系数很大($C_t > 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$),路面板的附加振动可以忽略,此时,随车辆速度提高,路面板一点的动弯沉、动应变最大值单调下降.

接缝是整个路面结构的薄弱环节,若接缝传荷设计不当,或接缝传荷能力丧失,或接缝附近板下脱空,重车作用下,接缝附近动荷系数明显增大,将引起路面板破碎、开裂和断角破坏.

参考文献:

- [1] 谈至明,刘伯莹,唐伯明.等.水泥混凝土路面断板分析与防治技术研究总报告[R].上海:同济大学交通运输工程学院,2005.
TAN Zhiming, LIU Boying, TANG Boming, et al. General report (2005): research on fracture mechanism and cracking prevention & treatment of cement concrete pavements [R]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation, 2005.
- [2] Cebon D. Theoretical road damage due to dynamic tyre forces of heavy vehicles. part 1: dynamic analysis of vehicles and road surfaces [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 1988, 202(2): 103.
- [3] 邓学钧,孙璐.车辆-地面结构系统动力学[M].北京:人民交通出版社,2000.
DENG Xuejun, SUN Lu. Vehicle-ground structure system dynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [4] Chiu Liu, McCullough B Frank, Hong S Oey. Response rigid pavements due to vehicle-road interaction [J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(3): 237.
- [5] Kim Seongmin, McCullough B Frank. Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude[J]. Engineering Structures 2003, 25:1179.
- [6] 郑仲浪,吕彭民.大型货车对地面的动作用力[J].长安大学学报,2009,29(2):101.
ZHENG Zhonglang, LV Pengmin. Dynamic load of large trucks acting on pavement [J]. Journal of Chang'an University, 2009, 29(2):101.
- [7] ZHOU Yumin, TAN Zhiming, GUO H. Analysis of dynamic effects of concrete pavement slabs based on a simplified vehicle-road interaction model [C/CD]//Proceeding of 7th DUT-Workshop. Carmona: [s.n.].
- [8] 中华人民共和国交通部.JTG D40-2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2002.
Ministry of Transport of P R China. JTG D40-2002 specification of cement concrete pavement design for highway[S]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [9] 周玉民,谈至明,刘伯莹.1/4车-路耦合动力学模型研究[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(3):51.
ZHOU Yumin, TAN Zhiming, LIU Boying. Study on the quartered vehicle-road coupling dynamics models [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(3):51.