

文章编号:1671-1637(2013)04-0022-07

桥隧过渡段重载车辆冲击响应分析

巢万里^{1,2}, 李绪梅³, 王星华¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410075;
3. 新疆交通职业技术学院 道路桥梁工程学院, 新疆 乌鲁木齐 831401)

摘要:考虑车辆的纵向转动与倾覆,将重载车辆通过桥隧过渡段的过程视为一定初始条件下的受迫振动。根据D'Alembert原理,建立了车辆与路面的动力耦合计算模型,并给出振动方程,利用Laplace变换,对车辆的动力响应进行分析,求得车辆各轮胎对路面最大作用力随时间的变化规律。研究了车辆载质量、货物位置、行车速度与差异沉降对汽车动力响应的影响,实测了汽车的加速度,并对计算结果进行了验证。分析结果表明:差异沉降、行车速度以及车辆载质量的增加均使车辆对路面的冲击力增大,影响程度由大到小依次为车辆载质量、差异沉降、行车速度;货物位置对车辆冲击力的影响较小。

关键词:桥隧过渡段;冲击响应;重载车辆;D'Alembert原理;差异沉降

中图分类号:U443.82 **文献标志码:**A

Impact response analysis of heavy vehicle passing bridge-tunnel section

CHAO Wan-li^{1,2}, LI Xu-mei³, WANG Xing-hua¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;
2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410075, Hunan, China;
3. School of Road and Bridge Engineering, Xinjiang Vocational and Technical College of Communications, Urumqi 831401, Xinjiang, China)

Abstract: The rotation and overturn of vehicle in longitudinal direction were considered, and the process of heavy vehicle passing bridge-tunnel section was regarded as forced oscillation under certain initial condition. Based on D'Alembert principle, the calculating model of vehicle-road dynamic coupling was built, and vibration equation was given. The impact response of vehicle was analyzed by using Laplace transform, the change law of maximum impact force of vehicle on road was got. The influences of vehicle load, goods position, vehicle speed, difference settlement on vehicle impact response were researched. The test acceleration value was obtained, and the calculated result of acceleration was verified. Analysis result shows that this impact forces between vehicle and road increase with the increases of difference settlement, vehicle speed and load, the influences from big to small in order are vehicle load, difference settlement, vehicle speed. The goods position has little influence on vehicle impact force. 7 figs, 15 refs.

Key words: bridge-tunnel section; impact response; heavy vehicle; D'Alembert principle; difference settlement

收稿日期:2013-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(50908234);湖南省交通科技项目(200928)

作者简介:巢万里(1978-),男,湖南汨罗人,湖南省交通科学研究院高级工程师,中南大学工学博士研究生,从事桥隧工程结构稳定性研究。

导师简介:王星华(1957-),男,湖南衡阳人,中南大学教授,工学博士。

Author resumes: CHAO Wan-li(1978-), male, senior engineer, doctoral student, +86-731-85118513, 33cwl@163.com; WANG Xing-hua(1957-), male, professor, PhD, +86-731-82655489, xhwang@mail.csu.edu.cn.

0 引言

随着中国交通事业的发展,尤其是山区高速公路的大量修建,出现了较多的桥隧或者路桥过渡工程^[1-2]。作为一种复杂的新型结构形式,其受力情况复杂,涉及研究对象较多,是高速公路施工中的主要技术难题之一^[3-5]。其中,桥梁与隧道或者道路由于结构刚度不一致而引起运营期间的差异沉降,将造成结构损伤和跳车等不良后果,也成为一个亟待解决的重要课题^[5-6]。

国内外学者针对路桥或者桥隧过渡段问题进行了较多的研究^[6-11]。罗强等采用车辆-轨道-路基耦合系统,对高速列车通过路桥过渡段时的动力学性能进行了研究^[12],但其研究模型只适用于铁路机车及轨道的动力分析;赖国麟把桥头跳车问题视作路面一般段的不平整问题,忽略车辆的纵、横向的倾覆和转动,将车辆简化成三自由度的模型,对搭板容许纵坡变化值进行了理论研究^[13],但在其研究过程中,建立的计算模型较为简单,该方法把实际的路面不规则沉降曲线进行了光滑处理,与实际相差不符,计算结果有较大的误差;张洪亮等利用五自由度人-车-路模型,考察了不同桥头搭板纵坡变化值下车辆对路面作用力以及人的加速度变化^[14],但其研究对象局限于普通双轴客车对路面的冲击作用,而实际上,多轴重载货车对路面冲击以及造成的损伤更为严重。

本文建立了五自由度体系的重载货车动力模型,运用 D'Alembert 原理对车辆通过桥隧过渡段建立了动力学方程,并运用 Laplace 变换法进行求解,为分析相似问题提供了可供借鉴的思路。

1 模型的建立

有学者考虑车体的纵向倾覆和转动,并以双轴车辆为研究对象,以简化的人-车-路模型研究车辆通过差异沉降处动力响应。但实际上大多数重载卡车为多轴车辆,而且以往研究均没有考虑货物荷载。故本文以三轴货车为研究对象^[15],建立动力计算模型如下。

每个车轮考虑竖向平动,车体考虑其纵向倾覆和转动,将车辆简化为五个自由度模型,见图 1。图 1 中: m 为车体的质量(车体简化为一个长方体); m_1, m_2, m_3 为轮胎质量; J 为车体围绕质心的转动

惯量;轮胎在汽车行驶过程中与路面的相互作用为弹性作用,故分别用线性弹簧和阻尼器模拟车轮及前后轴的弹性和阻尼; k_1, k_3, k_5 分别为前轮及 2 个后轮与路面相互作用的刚度系数, c_1, c_3, c_5 为相应的阻尼系数; k_2, k_4, k_6 分别为前轮轴与 2 个后轮轴的刚度系数, c_2, c_4, c_6 为相应的阻尼系数; a 为前轮到质心的距离; b 为第 1 个后轮轴中心到车体质心的距离; d 为 2 个后轮轴之间的距离。货物质量为作用在车体后方的长度为 l 的均布荷载 q ,荷载大小为 ql ,该均布荷载到车体质心的距离为 e 。

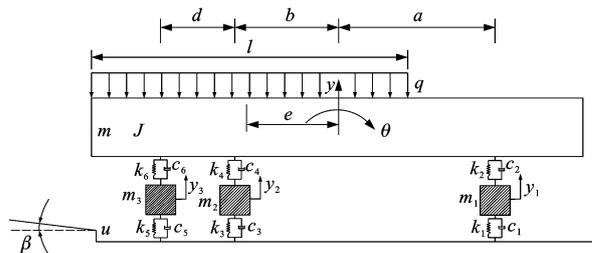


图 1 三轴重载车辆动力模型

Fig. 1 Three-axle heavy vehicle dynamic model

以路面为坐标纵轴的原点,方向以向上为正。 $y_1, y_2, y_3, y, \xi_1, \xi_2, \xi_3$ 分别为前轮、第 1 个后轮、第 2 个后轮、车体、前轮下方路面、第 1 个后轮下方路面、第 2 个后轮下方路面的坐标位移; θ 为车体绕其质心的转角; y_1, y_2, y_3, y 以各个质量体达到静平衡位置时质心所在的位置为原点; β 为桥面沉降前后的转角,其正切值为桥面沉降坡差,其值很小,有 $\beta \approx \tan(\beta)$; u 为台阶高度; v 为车速。

假设各弹簧和阻尼均为线性,变形是小变形,所以建立动力平衡方程时,暂不考虑重力的影响,将静力问题和动力问题分开讨论,最后使用叠加原理即可得到真实作用力的结果。

2 基本振动方程

根据图 1 中几何关系,得 k_2 与 c_2 处 m 的位移为

$$y - a \tan(\theta) \approx y - a\theta$$

k_4 与 c_4 处 m 的位移为

$$y + b \tan(\theta) \approx y + b\theta$$

k_6 与 c_6 处 m 的位移为

$$y + (b + d) \tan(\theta) \approx y + (b + d)\theta$$

运用 D'Alembert 原理,对 m_1, m_2, m_3 建立振动方程为

期; i 为虚数单位; a' 为复变量实部。

将三轴车辆简化为弹簧上的质量刚性系统来进行轴荷分配,各轮轴上的分配荷载由下面公式计算, G 为车体受到的重力,弹簧 k_2 、 k_4 、 k_6 受到的作用力 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为

$$R_1 = G - (R_2 + R_3) \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{[(a+b)k_2 + dk_6]Gak_4}{k_6[(a+b+d)^2k_2 + (a+b+d)^2k_4 - (a+b)^2k_4]} + \frac{dG(a+b+d)k_4}{(a+b+d)^3k_2 + (a+b+d)^2k_4 - (a+b)^2k_4} \quad (11)$$

$$R_3 = \frac{Ga - R_2(a+b)}{a+b+d} \quad (12)$$

将各轮轴上的分配荷载、自身质量与动态作用力叠加,即可得到地面对前轮、第 1、2 个后轮的实际作用力,分别记为 $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 、 $F_3(t)$,则有

$$F_i(t) = P_i(t) + R_i + m_i g \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

3 车辆振动初始条件和路面位移

本文以车辆进入隧道为例进行分析。将车辆下桥的过程分为 3 个阶段:第 1 阶段为 2 个后轮在桥面上,前轮在引道路面上;第 2 阶段为前轮和第 1 个后轮在引道路面上,第 2 个后轮在桥面上;第 3 阶段为 3 个车轮都在引道路面上。

3.1 第 1 阶段

以车辆前轮刚好进入台阶下方路面时为初始时刻,以台阶下路面为基准面。当车辆静止时,弹簧 k_2 、 k_4 、 k_6 受到的作用力分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 。故各个弹簧的压缩量 $\Delta x_1 \sim \Delta x_6$ 分别为

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \frac{R_1 + m_1}{k_1}, \Delta x_2 = \frac{R_1}{k_2} \\ \Delta x_3 = \frac{R_2 + m_2}{k_3}, \Delta x_4 = \frac{R_2}{k_4} \\ \Delta x_5 = \frac{R_3 + m_3}{k_5}, \Delta x_6 = \frac{R_3}{k_6} \end{cases} \quad (14)$$

在下台阶过程中,当 $u \leq \Delta x_1$ 时,各个质量体的速度变化可视为 0;当 $u > \Delta x_1$ 时,速度的变化虽然不为 0,但因为 u 值比较小,速度的变化也很小,为此可以将速度变化忽略不计。从而可以得到各个质量体的初始速度分别为

$$\begin{cases} \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(0) = \dot{y}_3(0) = \dot{y}(0) = -v\beta \\ \dot{\theta}(0) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

路面的初始位移为

$$\begin{cases} \xi_1(0) = 0 \\ \xi_2(0) = u + (a+b)\beta \\ \xi_3(0) = u + (a+b+d)\beta \end{cases} \quad (16)$$

在车辆的行驶过程中(经历时间 t 后),各车轮下方路面的位移分别为

$$\begin{cases} \xi_1 = 0 \\ \xi_2 = u + (a+b)\beta - v\beta t \\ \xi_3 = u + (a+b+d)\beta - v\beta t \end{cases} \quad (17)$$

对式(17)进行 Laplace 变换得到

$$\begin{cases} \hat{\xi}_1 = 0 \\ \hat{\xi}_2 = \frac{u + (a+b)\beta}{s} - \frac{v\beta}{s^2} \\ \hat{\xi}_3 = \frac{u + (a+b+d)\beta}{s} - \frac{v\beta}{s^2} \end{cases} \quad (18)$$

各个质量体的初始位移按下面 3 种情况讨论。

当 $u \leq \Delta x_1$ 时,则

$$\begin{cases} y_1(0) = u \\ y_2(0) = u + (a+b)\beta \\ y_3(0) = u + (a+b+d)\beta \\ y(0) = u + a\beta \\ \theta(0) = \beta \end{cases} \quad (19)$$

当 $\Delta x_1 < u \leq \Delta x_1 + \Delta x_2$ 时,弹簧 k_1 已经完全恢复原状,则

$$\begin{cases} y_1(0) = \Delta x_1 \\ y_2(0) = u + (a+b)\beta \\ y_3(0) = u + (a+b+d)\beta \\ y(0) = u + a\beta \\ \theta(0) = \beta \end{cases} \quad (20)$$

当 $u > \Delta x_1 + \Delta x_2$ 时,弹簧 k_1 、 k_2 已经完全恢复原状,则

$$\begin{cases} y_1(0) = \Delta x_1 \\ y_2(0) = \Delta x_2 \\ y_3(0) = u + (a+b+d)\beta \\ y(0) = u + a\beta \\ \theta(0) = \beta \end{cases} \quad (21)$$

3.2 第 2 阶段

以第 1 个后轮刚好接触台阶下引道路面时为 0 时刻,以台阶下路面为基准面。在下台阶过程中,当 $u \leq \Delta x_3$ 时,各个质量体的速度变化可视为 0;当 $u > \Delta x_3$ 时,速度的变化虽然不为 0,但因为 u 值比较小,速度的变化也很小,为此可以将速度变化忽略不计。从而可以得到各个质量体的初始速度分别为

$$\begin{cases} \dot{y}_1(0) = \dot{y}(0) = \dot{\theta}(0) = 0 \\ \dot{y}_2(0) = \dot{y}_3(0) = -v\beta \end{cases} \quad (22)$$

路面的初始位移分别为

$$\begin{cases} \xi_1(0) = \xi_2(0) = 0 \\ \xi_3(0) = u + d\beta \end{cases} \quad (23)$$

在车辆的行驶过程中(经历时间 t 后),各车轮下方路面的位移分别为

$$\begin{cases} \xi_1 = \xi_2 = 0 \\ \xi_3 = u + d - v\beta t \end{cases} \quad (24)$$

对式(24)进行 Laplace 变换得到

$$\begin{cases} \hat{\xi}_1 = \hat{\xi}_2 = 0 \\ \hat{\xi}_3 = \frac{u + d\beta}{s} - \frac{v\beta}{s^2} \end{cases} \quad (25)$$

各个质量体的初始位移按下面 3 种情况讨论。

当 $u \leq \Delta x_3$ 时,则

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = y(0) = 0 \\ y_3(0) = u + d\beta \\ \theta(0) = \beta \end{cases} \quad (26)$$

当 $\Delta x_3 < u \leq \Delta x_3 + \Delta x_4$ 时,弹簧 k_3 已经完全恢复原状,则

$$\begin{cases} y_1(0) = y(0) = 0 \\ y_2(0) = \Delta k_3 \\ y_3(0) = u + d\beta \\ \theta(0) = \beta \end{cases} \quad (27)$$

当 $u > \Delta x_3 + \Delta x_4$ 时,弹簧 k_3, k_4 已经完全恢复原状,则

$$\begin{cases} y_1(0) = y(0) = 0 \\ y_2(0) = \Delta x_2 \\ y_3(0) = \Delta x_3 \\ \theta(0) = \beta \end{cases} \quad (28)$$

3.3 第 3 阶段

以第 1 个后轮刚好接触台阶下引道路面时为 0 时刻,以台阶下路面为基准面。在下台阶过程中,当 $u \leq \Delta x_5$ 时,各个质量体的速度变化可视为 0;当 $u > \Delta x_5$ 时,速度的变化虽然不为 0,但因为 u 值比较小,速度的变化也很小,为此可以将速度变化忽略不计。从而可以得到各个质量体的初始速度分别为

$$\begin{cases} \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(0) = \dot{y}(0) = \dot{\theta}(0) = 0 \\ \dot{y}_3(0) = -v\beta \end{cases} \quad (29)$$

路面的初始位移为

$$\xi_1(0) = \xi_2(0) = \xi_3(0) = 0 \quad (30)$$

在车辆的行驶过程中(经历时间 t 后),各车轮下方路面的位移分别为

$$\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = 0 \quad (31)$$

对式(31)进行 Laplace 变换得到

$$\hat{\xi}_1 = \hat{\xi}_2 = \hat{\xi}_3 = 0 \quad (32)$$

各个质量体的初始位移按下面 3 种情况讨论。

当 $u \leq \Delta x_5$ 时,则

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = y(0) = \theta(0) = 0 \\ y_3(0) = u \end{cases} \quad (33)$$

当 $\Delta x_5 < u \leq \Delta x_5 + \Delta x_6$ 时,弹簧 k_5 已经完全恢复原状,则

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = y(0) = \theta(0) = 0 \\ y_3(0) = \Delta x_3 \end{cases} \quad (34)$$

当 $u > \Delta x_5 + \Delta x_6$, 弹簧 k_5, k_6 已经完全恢复原状,则

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = y(0) = \theta(0) = 0 \\ y_3(0) = \Delta x_3 \end{cases} \quad (35)$$

另外,路面的初始位移 $\xi_1(0), \xi_2(0), \xi_3(0)$ 均为 0,在车辆的行驶过程中(经历时间 t 后),前轮和后轮下方路面的位移 ξ_1, ξ_2, ξ_3 均为 0,对其进行 Laplace 变换后得到 $\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2, \hat{\xi}_3$ 均为 0。

4 算例及参数影响分析

4.1 基本参数取值

汽车计算参数具体如下: m, m_1, m_2, m_3 分别为 8 000、800、800、800 kg; $k_1 \sim k_6$ 分别为 4.8×10^5 、 9.5×10^5 、 19×10^5 、 1.7×10^5 、 19×10^5 、 1.7×10^5 N·m⁻¹; $c_1 \sim c_6$ 分别为 2 000、7 000、3 000、14 000、3 000、14 000 N·s·m⁻¹; a, b, l, e 分别为 2.5、2.5、1.0、0.5 m; q 为 24 500 N·m⁻¹; θ 为 0°; J 为 37 432 kg·m²。

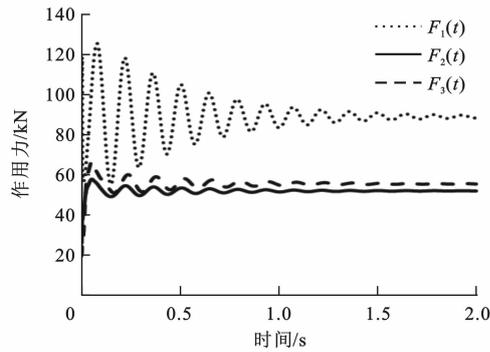
4.2 数值计算结果

假定台阶高度 u 分别为 0.01、0.05 m,汽车的行进速度 v 为 30 m·s⁻¹,货车载质量 W 为 10 t, Laplace 变换中的容许误差 E' 为 10^{-3} , T 取为 2 s, 计算间隔取 0.01 s。Laplace 逆变换使用 Crump 算法,当前后两项累计求和差值不大于 10^{-4} 时,结束求和。因篇幅所限,仅分析第 1 阶段的车辆动力响应过程。输入各参数,计算得到路面对各车轮的作用力随时间的变化,见图 2。

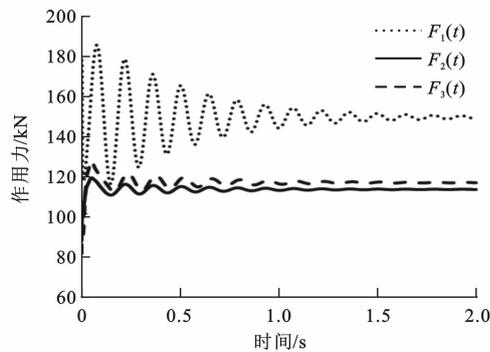
当 u 为 0.01 m 时,前轮受到的最大作用力 $F_{1\max}$ 为 125.70 kN,第 1 个后轮受到的最大作用力 $F_{2\max}$ 为 58.20 kN,第 2 个后轮受到的最大作用力 $F_{3\max}$ 为 66.80 kN,这 3 个力的合力为 250.70 kN。而路面对车辆的静态作用力 F_N 为 207.00 kN,因此,由于台阶的存在,使路面对车的最大支持力超过了静支持力的 21%。当 u 为 0.05 m 时,这 3 个力的合力为 407.30 kN,超过了静支持力的 97%,这说明台阶高度越高,动力反应越强烈,对路面的损伤越大。

4.3 参数影响分析

为了分析不同因素对重载汽车动力响应的影



(a) $u=0.01$ m



(b) $u=0.05$ m

图 2 作用力-时间曲线

Fig. 2 Curves of force and time

响,本文讨论了行车速度、差异沉降、车辆载质量、货物位置等条件改变时,各车轮对路面作用力的变化规律,见图 3~6。

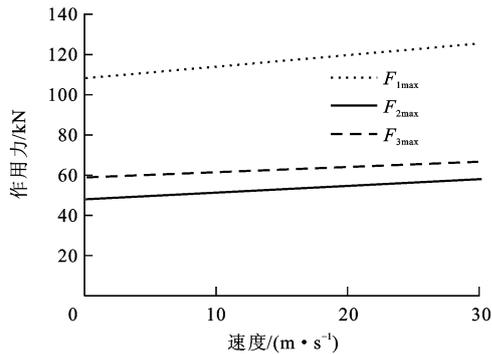


图 3 行车速度与作用力之间的关系

Fig. 3 Relationship between vehicle speed and force

5 实测对比

考虑到测量车轮对路面的时变作用力存在一定的困难,而由式(8)可得到频域内车体的位移,利用 Laplace 变换的微分性质 $\hat{y} = s^2 \hat{y} - sy(0) - \dot{y}(0)$ 和初始条件可得到频域内车体的加速度,再对其进行 Laplace 逆变换即得到时域内车体的加速度。在型号为 EQ5254CCQ 的东风牌货车车身内安装加速度测试仪,货车满载通过差异沉降为 0.01 m 桥隧过

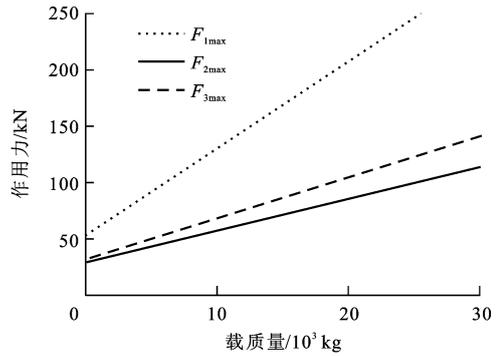


图 4 载质量与作用力之间的关系

Fig. 4 Relationship between vehicle load and force

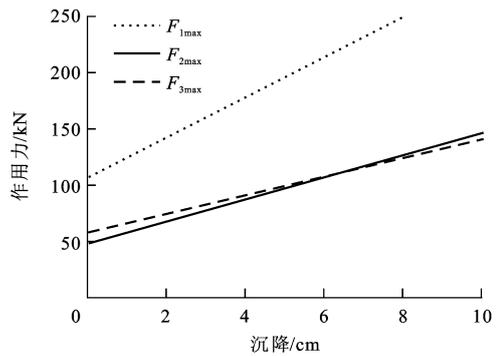


图 5 差异沉降与作用力之间的关系

Fig. 5 Relationship between difference settlement and force

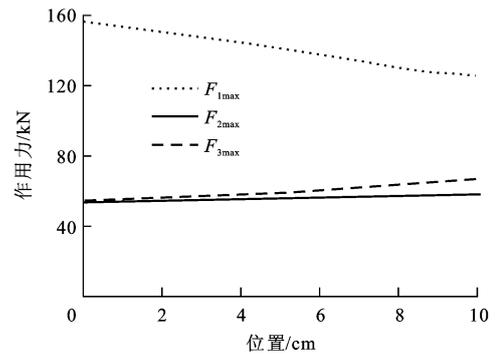


图 6 货物位置与作用力之间的关系

Fig. 6 Relationship between goods position and force

渡段时,得到这一过程的加速度变化值,与前文计算得到的理论值进行比较,结果见图 7。

由图 7 可知,实测值和理论值两条曲线几乎吻合,这说明数值分析结果比较合理。

6 结语

本文考虑车辆的倾覆和转动,给出了三轴重载货车装载货物时通过差异沉降处的动力模型以及振动方程,并通过 Laplace 变换,得到了 Laplace 形式下的计算公式。编制了计算程序,计算了各车轮对路面冲击力随时间的变化规律,结果表明,由于差异

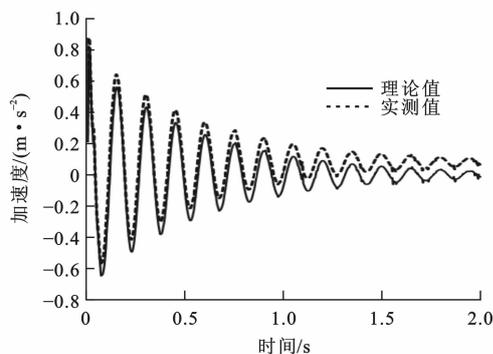


图 7 加速度实测值与理论值比较

Fig. 7 Comparison between measured value and theoretical value of acceleration

沉降的存在,路面对车轮的作用力较静态时有明显增加,且 3 个轮轴中,前轮的作用力大于单个后轴的作用力。分析了差异沉降、车辆速度、车辆载质量以及货物位置对路面最大作用力的影响,其中差异沉降与车辆载质量对该作用力的影响较大,而其他 2 个因素的影响不明显,且 2 个后轴的变化规律基本一致。下一步的研究方法可考虑车辆水平方向的倾覆,建立三维条件下车-路耦合计算模型。

参考文献:

References:

- [1] CHEN D H, NAZARIAN S, BILYEU J. Failure analysis of a bridge embankment with cracked approach slabs and leaking sand[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2007, 21(5): 375-381.
- [2] 张子洋. 岩溶隧道桥隧相连段施工力学行为与支护结构受力特性研究[D]. 长沙:中南大学,2008.
ZHANG Zi-yang. Study on construction mechanical behavior and supporting structure's forced characteristics of bridge and tunnel linked segment in karst tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [3] 王树仁,张海清,慎乃齐,等. 下伏采空区桥隧工程变形及受力响应特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(6): 1144-1151.
WANG Shu-ren, ZHANG Hai-qing, SHEN Nai-qi, et al. Analysis of deformation and stress characteristics of highway tunnels above mined-out regions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1144-1151. (in Chinese)
- [4] 施成华,雷明锋,彭立敏,等. 桥隧相连结构静动力特性影响因素分析[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2011, 42(4): 1085-1091.
SHI Cheng-hua, LEI Ming-feng, PENG Li-min, et al. Influenced factors of static-dynamic character about tunnel-bridge structure[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(4): 1085-1091. (in Chinese)
- [5] 孙广臣,傅鹤林,巢万里. 桥隧邻接工程多源损伤室内模型试验研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(11): 157-165.
SUN Guang-chen, FU He-lin, CHAO Wan-li. Indoor model tests of multiple-source damages of bridge and tunnel adjacent project[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2011, 31(11): 157-165. (in Chinese)
- [6] KWASNIEWSKI L, LI H Y, WEKEZER J, et al. Finite element analysis of vehicle-bridge interaction [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2006, 42(2): 950-959.
- [7] KIM S M, MCCULLOUGH B F. Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(9): 1179-1188.
- [8] LEFEUVE-MESGOUEZ G, PEPLow A T, LE H D. Surface vibration due to a sequence of high speed moving harmonic rectangular loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(6): 459-473.
- [9] 明祖涛,游振兴,张 届,等. 高速铁路桥隧沉降预测模型的研究[J]. *测绘通报*, 2011(8): 17-19, 41.
MING Zu-tao, YOU Zhen-xing, ZHANG Jie, et al. The research of settlement prediction model for the bridge and tunnel on high-speed railway[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011(8): 17-19, 41. (in Chinese)
- [10] WAHLS H E. Design and construction of bridge approaches [R]. Washington DC: TRB, 1990.
- [11] STARK T D, OLSON S M, LONG J H. Differential movement at the embankment/structure interface-mitigation and rehabilitation[R]. Washington DC: TRB, 1995.
- [12] 罗 强,蔡 英,翟婉明. 高速铁路路桥过渡段的动力学性能分析[J]. *工程力学*, 1999, 16(5): 65-70.
LUO Qiang, CAI Ying, ZHAI Wan-ming. Dynamic performance analyses on high speed railway bridge-subgrade transition[J]. *Engineering Mechanics*, 1999, 16(5): 65-70. (in Chinese)
- [13] 赖国麟. 关于桥头搭板沉降坡差容许值 Δi_{as} 的建议[R]. 南京:东南大学,1994.
LAI Guo-lin. Suggestion for allowable differential slope Δi_{as} of the approach slab[R]. Nanjing: Southeast University, 1994. (in Chinese)
- [14] 张洪亮,胡长顺. 基于五自由度车辆模型的桥头搭板容许纵坡变化值研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(6): 125-131.
ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun. A study on the allowable differential slope of the approach slab with five-degree-freedom vehicle model[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(6): 125-131. (in Chinese)
- [15] 王兴东,杨 波,邹光明. 多轴汽车轴荷分配和转移的计算方法研究[J]. *湖北工业大学学报*, 2006, 21(3): 165-167.
WANG Xing-dong, YANG Bo, ZOU Guang-ming. Computing methods for distribution and transfer of multi-axle vehicles' vertical axle loads[J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2006, 21(3): 165-167. (in Chinese)