

文章编号:1005-0523(2009)04-0023-07

单车荷载作用下 T 型刚构桥车致振动响应研究

桂水荣,陈水生

(华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:根据车辆-桥梁结构振动特性,研究单车移动荷载作用下,T型刚构桥考虑桥面不平顺影响时桥梁振动响应及冲击特性。通过将T型刚构桥离散为三维梁单元有限元模型,车辆简化为九自由度整车模型(考虑车辆俯仰及侧翻),桥面不平顺激励采用实测和数值模拟(根据国标 GB/T7031-86 给定功率谱密度曲线采用三角级数叠加法模拟)两种激励;以车轮与桥面相互接触处保持不脱离为条件,建立车辆与桥梁耦合振动方程,利用模态综合法并结合 Newmark- β 数值积分方法进行迭代求解。以乔木湾乐安河 T 型刚构桥为工程背景,研究了单车荷载下,最不利位置处的冲击系数随桥梁结构阻尼、行车速度、桥面不平顺及车辆特性的变化关系,并将数值模拟结果与实测结果对比。研究结果表明,实测冲击系数与数值模拟的冲击系数较好吻合,乐安河大桥冲击系数满足 04《桥规》要求。

关键词:T 型刚构桥;整车模型;模态综合叠加法;车桥耦合;振动响应

中图分类号:U441.2 **文献标识码:**A

随着交通事业的迅速发展,车辆的载重与行驶速度越来越高,一方面,车辆对桥梁的动力冲击作用对桥梁的工作状态和使用寿命产生直接影响,另一方面,桥梁上运行车辆的平稳性和舒适性是评价结构设计参数合理与否的重要因素。车辆通过桥梁时引起桥梁结构的振动,而桥梁结构的振动又反过来影响车辆的振动,这种相互作用、相互影响的问题就是车桥耦合振动问题^[1]。

目前,对于公路桥梁车桥耦合振动问题的研究,国外各学者均将车辆与桥梁简化为三维模型来分析桥梁振动响应,文献[2~4]分析了三维车辆模型作用在连续梁桥、中承式拱桥及预应力混凝土桥面板的动响应。国内学者^[5,6]研究公路桥梁振动响应问题,则主要侧重于平面模型分析,且在模拟过程中很少考虑桥面不平顺影响^[1,5],这就使得研究结论不够精确及缺乏实际指导意义。而且,由于车辆结构特性差异及车辆超载的影响,对桥梁的冲击影响也各不相同,各文献均未研究车辆结构特性对桥梁振动响应的影响,即使研究,也只是得出重载车辆作用下桥梁静挠度值增大,而动力冲击作用减少^[2,3,7]。

本文以乔木湾乐安河大桥为工程背景,将整个车桥系统在车轮与桥面接触处划分为车辆与桥梁两个子系统,分别建立车辆与桥梁运动方程,以车轮与桥面相互接触处保持不脱离为条件,建立车桥耦合振动模型。建模过程中,根据载重汽车的结构特点,车辆简化为九自由度整车模型(考虑车辆的俯仰及侧翻),T 型刚构桥简化为三维梁单元模型,利用模态综合叠加法进行迭代求解。由于桥梁振动响应由若干阶低阶模态起控制作用,在系统分析中只需提取若干低阶振型来进行分析。本文研究了单车荷载行驶时 T 型刚构桥最不利位置竖向振动响应,桥面不平顺、行车速度及车辆结构特性对不同等级桥面冲击系数的影响。最后将实测数据与数值模拟结果对比,结果表明该 T 型刚构桥最不利位置处的冲击系数,在该试验车辆的作用下,冲击系数基本满足 04《桥规》^[8]要求。

1 车桥耦合振动模型

1.1 车辆模型

根据载重汽车结构特性,车辆模型简化为具有三轴 3D 的多自由度振动体系,考虑车体竖向振动、纵

收稿日期:2009-03-31
基金项目:国家自然科学基金(50868007);江西省自然科学基金项目(2007GZC0855);华东交通大学科研基金项目(07TM10) 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心开放基金
作者简介:桂水荣(1979-),女,江西九江人,硕士,讲师,主要从事桥梁结构振动与控制研究。

向点头、侧翻以及车轮振动。车辆简化模型如图 1 所示。

根据达朗贝尔原理,建立车辆振动方程:

$$M_v \ddot{Z} + C_v \dot{Z} + K_v Z = \overline{F}_v^{inl} \tag{1}$$

式中: $\overline{F}_v^{inl}$ 为车辆振动过程中,车辆各自由度的惯性荷载列向量; M_v 、 C_v 、 K_v 分别为车辆系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $Z = \{z_1 \cdots z_6 \ z_b \ \theta_b \ \phi\}^T$ 为车辆各自由度向量。

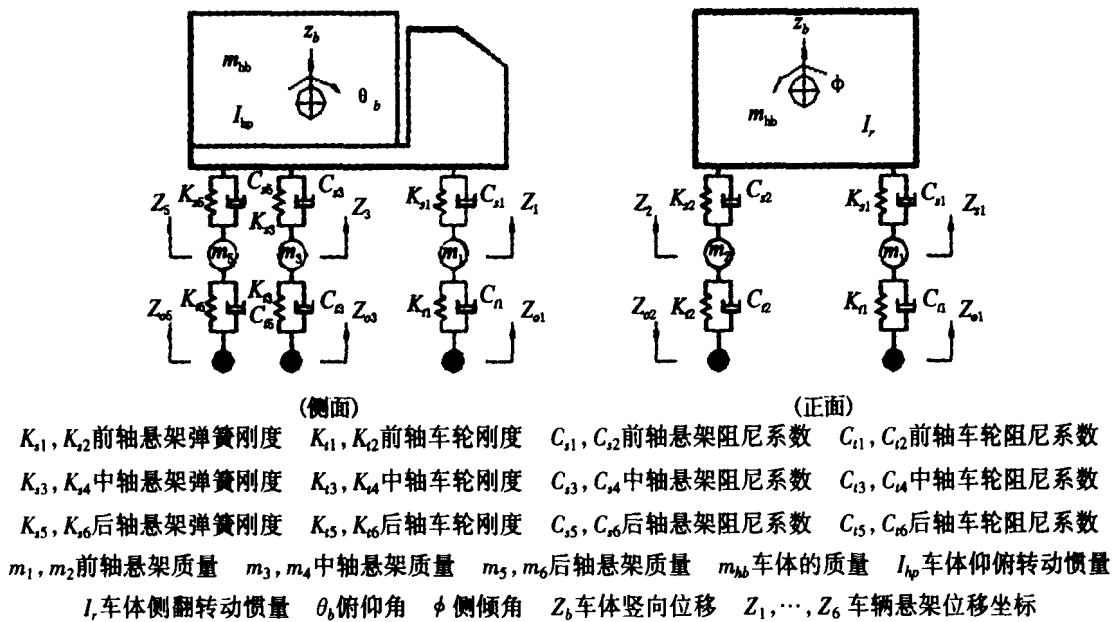


图 1 车辆模型

1.2 桥梁模型

直接采用有限元几何模型时,计算自由度很多,工作量很大,为减少计算自由度,桥梁模型中引进了模态综合技术,即广义坐标离散的方法:首先求出结构自由振动的频率和振型,利用振型的正交性,把相互耦联的数百个节点运动方程解耦,使其转化为相互独立的模态方程。由于结构的动力响应主要由最先的若干个低阶振型起控制作用,这样在计算过程中就大大减少了计算工作量。

采用有限元进行分析时,桥梁的振动方程为:

$$M_b \ddot{U} + C_b \dot{U} + K_b U = F_{bw}^{inl} - F_g \tag{2}$$

式中: F_{bw}^{inl} 为车桥耦合振动过程中,各车轮作用于桥面的惯性荷载向量; F_g 为由车辆重力引起的荷载向量; U 为单元结点列向量; M_b 、 C_b 、 K_b 分别为桥梁系统的质量、阻尼、刚度矩阵。

使用经典 Rayleigh 阻尼,模态空间取 r 阶模态,根据振型分解法有 $U = \sum_{i=1}^r \varphi_i q_i = \Phi q$, 其中, φ_i 为各阶振型向量, q_i 为各阶振型对应广义坐标那么(2)式可以改写为:

$$I \ddot{q} + X \dot{q} + \Omega q = -\Phi^T (F_{bw}^{inl} + F_g) \tag{3}$$

式中:

$$I = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & 1 & \\ & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r} \quad X = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & 2\xi_i \omega_i & \\ & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r} \quad \Omega = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \omega_i^2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r}$$

式中: Φ 为 r 阶振型向量矩阵; ω_i 为各阶自振频率; ξ_i 为各阶自振频率对应阻尼比; q 为振型广义坐标列阵。

1.3 桥面不平顺激励

桥面不平顺采用实测和数值模拟两种不同的桥面不平顺激励。数值模拟根据国标 GB/T7031 - 86 建

议的路面不平度功率谱并结合三角级数叠加法进行模拟,模拟时,桥面不平顺的样本可按下式产生^[10]:

$$r(x)=\sum_{i=1}^m\sqrt{2A_i}\cdot\sin(2\pi\cdot x\cdot n_{mid-i}+\theta_i)\tag{4}$$

式中: x 为汽车前进的纵向位移; A_i 为每一小段频率所对应的不平度幅值; n_{mid-i} 为每一小段空间频率中值; θ_i 为在 $[0,2\pi]$ 上均匀分布的相互独立的随机变量, $r(x)$ 为 x 位置处的桥面不平度幅值。

1.4 车—桥耦合模型

根据作用力与反作用力关系,车辆系统振动对桥梁产生惯性力为:

$$\overline{F}_v^{inl}=F_{bw}^{inl}=k_u\Delta_i+c_u\dot{\Delta}_i\tag{5}$$

式中:下标 i 代表第 i 个车轮接触点;

Δ_i 为第 i 个车轮相对于桥面的垂直位移,且有:

$$\Delta_i=z_o-y_i+r_i\tag{6}$$

式中: y_i 为 i 车轮处桥梁的垂直位移; z_o 为 i 车轮处的车轮垂直位移; r_i 为 i 车轮处的桥面不平度。

以车轮与桥面接触点处不脱离为条件,联立(1)、(3)及(5)式得矩阵

$$M(t)\delta+C(t)\dot{\delta}+K(t)\delta=F(x,t)\tag{7}$$

式中:广义矩阵 $M(t)$ 、 $C(t)$ 、 $K(t)$ 随移动车辆系统在桥上位置的变化而变化;广义荷载列阵 $F(x,t)$ 也随车辆系统在桥上的位置而变化; δ 为 T 型刚构桥模态广义坐标与车辆系统广义坐标组成的列阵,即 $\delta=\{q_1,\cdots,q_r,z_1,\cdots,z_6\}^T$ 。对该时变系统的求解,近似认为每一时步 Δt 内矩阵为常矩阵,采用 Newmak- β 逐步积分法求解。

2 实例分析

2.1 桥梁、车辆概况

乔木湾乐安河大桥主桥为 60 m + 60 m T 型刚构桥,截面为单箱单室箱形截面,施工时采用悬拼法,共分 30 个节段,其结构示意图如图 2 所示。通过对箱梁截面特性分析,箱梁截面具有非常大的横向刚度,横向刚度和竖向刚度相差一个数量级,因而建模分析过程中,忽略主梁横截面的变形,且不考虑基础的沉降。根据上述假设,采用线弹性梁单元将主梁结构离散成三维空间有限元模型,主墩墩身通过换算截面刚度,也离散成三维空间有限元梁单元模型,边墩处支座为滑动铰支座,因而不考虑边墩刚度对主桥结构动力特性的影响。主桥上部结构及墩身材料均主要由钢筋混凝土组成,钢筋对截面特性的影响,通过换算截面刚度进行考虑,钢筋混凝土材料弹性模量为 33 GPa,密度为 2 500 kg·m⁻³,泊松比 0.167。有限元模型中,主桥上部结构的主梁及墩身均采用 Beam4 线弹性梁单元,上部结构每米一个梁单元,每个单元刚度和面积均采用等效截面刚度和面积;主墩墩身也采用 1 m 一个单元,全桥共计 137 个单元,采用有限元软件 ANSYS 对其进行动力特性分析。通过模态分析,提取该桥的前十阶自振频率进行分析,该桥基频 $f_1=2.44$ Hz。

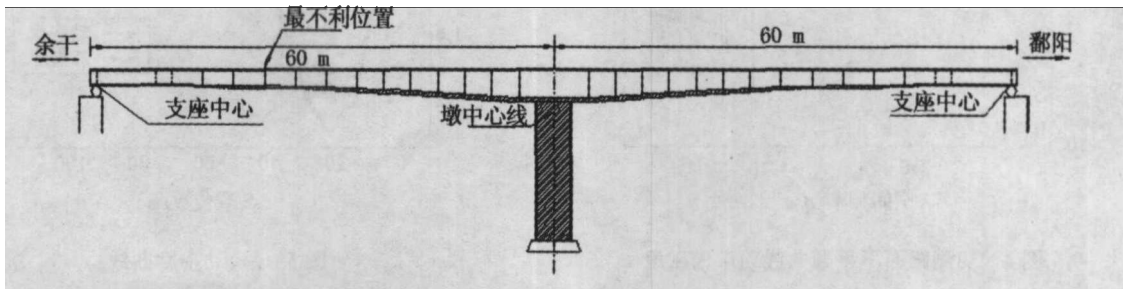


图 2 乔木湾乐安河 T 型刚构桥(主桥)

为了测试最不利位置处的冲击系数,对乔木湾乐安河大桥进行了动载试验。动载试验采用一辆三轴自卸汽车(自重 32 t),试验前测得汽车自振频率为 1.6 Hz,并测得汽车的轴重及轴距。为了研究桥梁在车

辆荷载作用下的振动响应,选取与试验车辆自振频率相接近的车辆参数进行数值模拟分析,根据文献[3]选用车辆参数。动载试验前,测得桥面不平顺曲线如图 3 所示,通过对实测桥面不平顺数据进行快速傅立叶变换分析,并与国标 GB/T7031-86 建议的公路路面功率谱的拟合表达式对比分析(路面功率谱密度曲线如图 4 所示),该桥面状况处于 B~C 级之间。

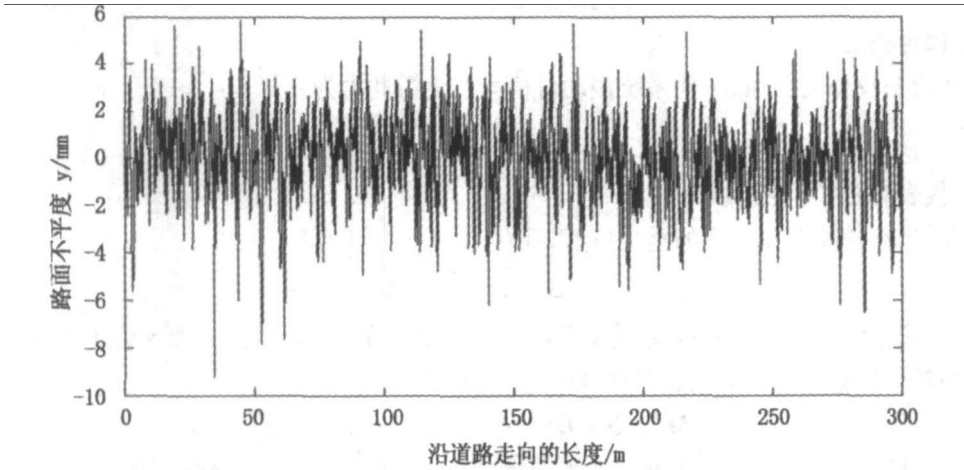


图 3 实测路面不平顺曲线

2.2 数值模拟结果

数值模拟计算前,经过对该桥静力分析,距边支墩 22.4 m 处为最不利截面。因而,本文数值模拟主要研究最不利位置处的竖向振动响应及冲击系数。图 5、图 6 为单车荷载以 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度行驶在 T 型刚构桥上,最不利位置处的竖向位移曲线及位移自谱密度曲线。从位移自谱密度曲线中可以看出,该 T 型刚构桥竖向振动响应以一阶振型为主,高阶振型对该 T 型刚构桥竖向振动响应不明显。

图 7 为车辆以 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度分别行驶在光滑和实测桥面不平顺激励上,桥梁结构阻尼对车桥耦合振动响应的影响,从图中可以看出,结构阻尼的大小对桥梁振动响应影响显著,阻尼越低,桥梁振动响应越强烈,冲击系数越大;但当阻尼比增大到一定程度时,对冲击系数的影响不明显。图 8 给出了不同路况下,冲击系数随车速变化关系。从图中可以看出,同一车速下,冲击系数随路况等级的增加而加大;路况越差,冲击系数随车速波动越大。

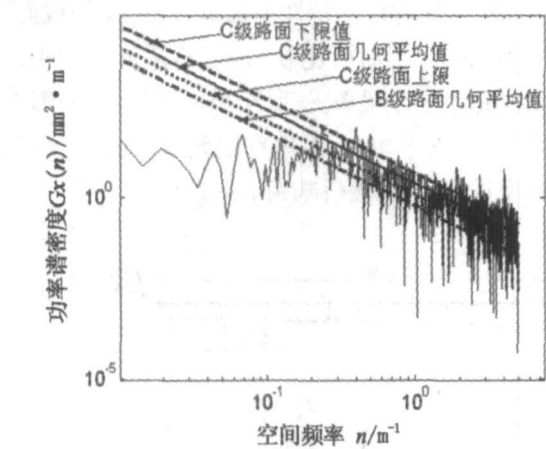


图 4 实测路面不平顺曲线功率谱密度

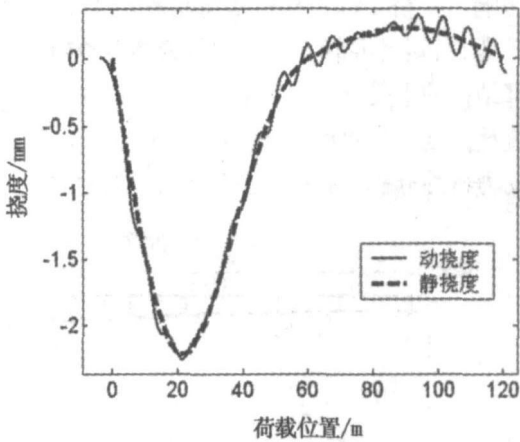


图 5 静、动挠度曲线

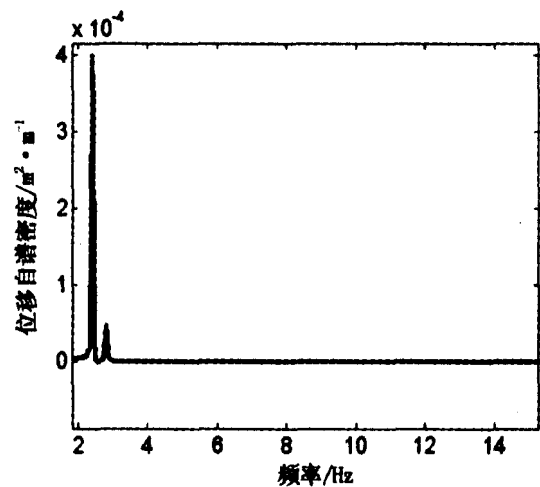


图 6 位移自谱密度

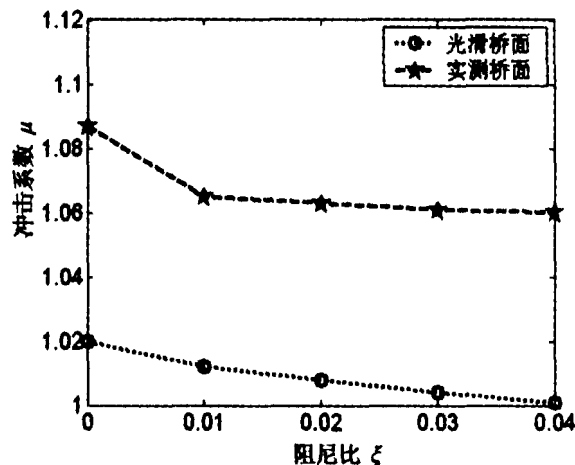


图 7 阻尼比对冲击系数的影响

根据结构动力学的基本原理,当荷载频率与结构的自振频率相等或接近时,体系将发生共振,共振引起很大的动力响应。为了研究车辆自振频率对桥梁振动响应的影响,通过改变钢板弹簧刚度或轮胎刚度来改变车辆自振频率。文中车辆模型参数记为 Vehicle1;增加钢板弹簧刚度为:前钢板 $ks_1 = ks_2 = 1.26 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,中钢板 $ks_3 = ks_4 = 1.58 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,后钢板 $ks_5 = ks_6 = 1.58 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,此时车辆自振频率为 2.155 Hz,车辆模型记为 Vehicle2;减小轮胎刚度为:前轮 $kt_1 = kt_2 = 1.4 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,中轮 $kt_3 = kt_4 = 1.8 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,后轮 $kt_5 = kt_6 = 1.8 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,此时车辆自振频率为 1.535 Hz,车辆模型记为 Vehicle3;为了研究车辆钢板弹簧刚度及轮胎刚度对冲击系数的影响,轮胎刚度不变,使车辆自振频率为 1.535 Hz 时,此时前钢板 $ks_1 = ks_2 = 5.2 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,中钢板 $ks_3 = ks_4 = 6.4 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,后钢板 $ks_5 = ks_6 = 6.4 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,此时车辆模型记为 Vehicle4。

图 9 为最不利位置冲击系数随车辆自振频率变化关系,从图中可以看出,光滑路面下,车辆自振频率和桥梁结构基频越接近,冲击系数越大,这也就是我们所说的共振效应。同时从图 9、10 中可以看出,光滑路面下,当车速在 $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时候冲击系数最大(也即最大动挠度响应最大),桥梁结构竖向振动响应在该速度下出现一个临界速度。这主要与桥梁与车辆结构的动力特性有关,该结论与文献[9]结论一致。图 10 反映的是在光滑路面下,相同自振频率不同的车轮刚度和钢板弹簧刚度的两种车辆模型作用下,桥梁冲击系数随速度变化关系,从图中可以看出,在光滑路面下,无论通过哪一种方法来获得相同的车辆自振频率,对桥梁冲击系数影响不大。

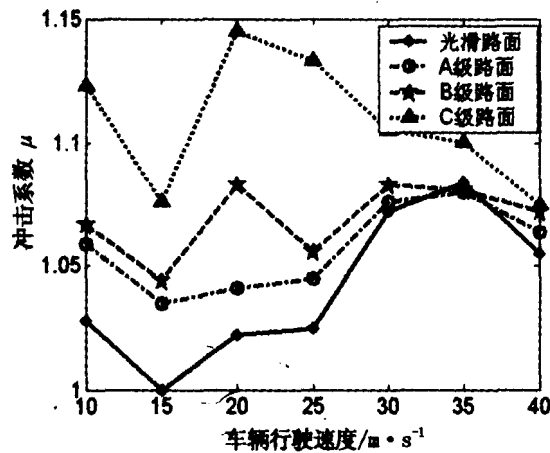


图 8 不同路况下冲击系数曲线

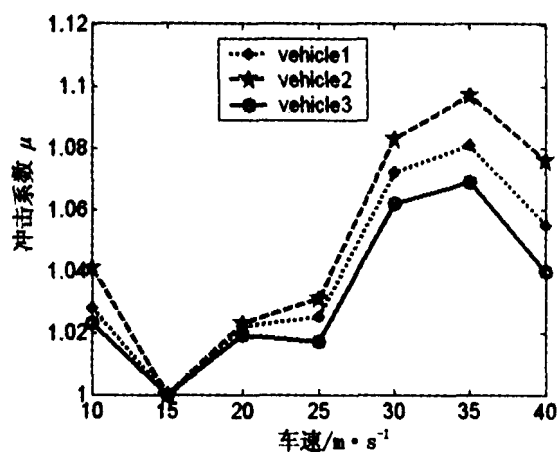


图 9 光滑路面冲击系数随自振频率变化曲线

图 11 反映的是实测路面不平顺情况下,相同自振频率的不同车辆参数对桥梁冲击系数的影响。从图中可以看出,冲击系数并没有图 9 中那样明显的车辆自振频率和桥梁结构基频越接近,冲击系数越大的效果;相同自振频率、不同的车轮刚度和悬架刚度的两种车辆参数所得冲击系数不如光滑路面冲击系数那样接近。这说明简单的以车辆自振频率与桥梁结构基频的关系来说明其对桥梁冲击系数的影响并不确切。

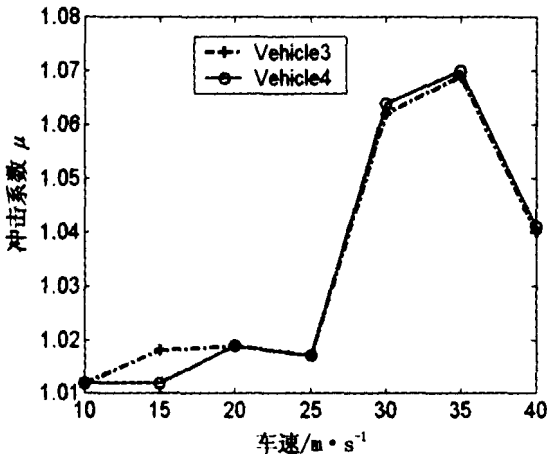


图 10 光滑路面下车辆结构特性对冲击系数的影响

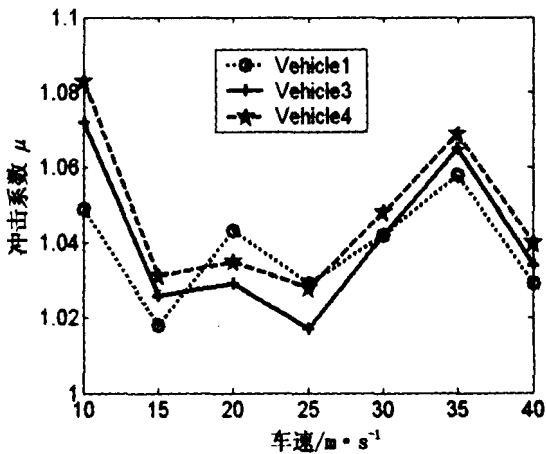


图 11 实测路面不平度冲击系数随车辆特性变化曲线

2.3 试验结果

本次 T 型刚构桥强迫振动响应动载试验测试分析主要依据动挠度测试结果。表 1 为实测最不利位置最大动挠度响应,表 2 为根据实测桥面不平度模拟的最不利位置最大动响应。从表 1~表 2 中可以看出,当试验车以不同车速驶过 T 型刚构桥时,冲击系数与车速之间并没有确定的关系。实测桥梁平均冲击系数为 1.122,根据实测桥面不平顺模拟的桥梁冲击系数为 1.102,而按照我国 04《桥规》计算桥梁冲击系数,当 $1.5\text{ Hz} \leq f \leq 14\text{ Hz}$ 时, $\mu = 0.1767 \ln f - 0.0157$,可得该桥冲击系数为 $1 + \mu = 1.142$ 。偏载的冲击系数大于中载的冲击系数,主要是由于测试点的位置布置在箱梁的翼缘,且与路面不平顺有直接关系;同时,各种速度下偏载和中载工况的冲击系数均较实测结构基频按 04《桥规》计算的冲击系数小,这也说明该桥的桥面状况较好,该种车辆作用下,冲击系数基本满足 04《桥规》要求。

表 1 实测桥梁最不利位置动响应

动力指标	10 km·h ⁻¹		20 km·h ⁻¹		30 km·h ⁻¹		40 km·h ⁻¹		50 km·h ⁻¹	
	偏载	中载	偏载	中载	偏载	中载	偏载	中载	偏载	中载
动挠度/mm	2.277	2.264 6	2.428 7	2.196 6	2.179 6	2.163 1	2.475 0	2.370 8	2.334	2.257 8
冲击系数	1.114	1.108	1.188	1.074	1.066	1.058	1.210	1.159	1.141	1.104

表 2 根据实测桥面不平顺模拟的最不利位置动响应

动力指标	10 km·h ⁻¹	20 km·h ⁻¹	30 km·h ⁻¹	40 km·h ⁻¹	50 km·h ⁻¹
动挠度/mm	2.435	2.500	2.385	2.470	2.367
冲击系数	1.103	1.133	1.081	1.119	1.072

3 结语

以乔木湾乐安河 T 型刚架桥为工程背景,对单车荷载作用下 T 型刚架桥的振动响应进行了详细分析,并与试验结果进行对比,得出以下几点结论:

- (1) 该 T 型刚构桥竖向振动响应以一阶振型为主,高阶振型对桥梁竖向振动响应影响不大;
- (2) 结构阻尼对桥梁振动响应影响显著,阻尼越低,桥梁振动响应越强烈,相应的冲击系数越大;

- (3) 光滑桥面下,行车速度较低时,行车速度对冲击系数影响不大;路面状况越差,冲击系数随行车速度波动越大;
- (4) 同一车速度下,路况越差,冲击系数越大;
- (5) 光滑路面下,自振频率相同的车辆,其冲击系数相接近;桥面状况较差时,即使相同自振频率车辆,冲击系数也会有较大的波动;
- (6) 通过试验测试和数值模拟可知,乔木湾乐安河大桥的冲击系数基本满足 04《桥规》要求。

参考文献:

- [1] 李小珍,马文彬,等.车桥系统耦合振动分析的数值解法[J].振动与冲击,2002,21(3):21-25.
- [2] Claude Broquet, Simon F Bailey, Mario Fafard, and Eugen Bruhwiler. Dynamic behavior of deck slabs of concrete road bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(2): 137-146.
- [3] Dongzhou Huang, Ton-Lo wang, Mohsen Shahawy. Impact analysis of continuous multigirder bridges due to moving vehicles[J]. The Journal of Structural Engineering, 1992, 118(12): 3427-3443.
- [4] Dongzhou Huang. Dynamic and impact behavior of half-through arch bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 133-141.
- [5] 陈 荣,唐 意,黄文机.多车荷载下刚架拱桥车振仿真可视化研究[J].工程力学,2005,22(1):218-222.
- [6] 盛国刚,彭献,李传习.连续梁桥与车辆耦合振动系统冲击系数的研究[J].桥梁建设,2003,(6):5-7.
- [7] K Henchi, M Fafard, M Talbot and G Dhatt. An efficient algorithm for dynamic analysis of bridges under moving vehicles using a coupled modal and physical components approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 212(4): 663-683.
- [8] 公路桥涵设计通用规范[S].中华人民共和国行业标准 JTG D60-2004.
- [9] 瞿伟廉,刘 嘉.万州长江大桥车桥耦合振动的研究[J].华中科技大学学报,2004,21(3):1-4.
- [10] 桂水荣.公路梁桥在移动荷载作用下车桥耦合振动响应研究[D].南昌:华东交通大学,2007,27-28.

Vehicle-induced Dynamic Response Analysis of T-type Rigid-frame Bridge under a Vehicle Load

GUI Shui-rong, CHEN Shui-sheng

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper is to present the results of an investigation of the dynamic and impact characteristics of T-type rigid-frame bridge with rough decks caused by vehicle moving across it. By separating T-type rigid-frame bridge into three-dimensional finite element model, the vehicle is reduced to freedom model of nine degrees (considering pitch and roll of the vehicle). Incentives of bridge irregularity include practical measuring and digital simulating (according to the international standard GB/T7031-86). By establishing the equations of motion for the bridge and the vehicles respectively, an iteration solution method is presented to analyze the coupling vibration response of vehicle bridge system based on the same displacement and coupling force at the interface. The Newmark- β method is used to solve the motion equations and the results of a parametric study are presented. Based on the numerical analysis of T-type rigid bridge of the Le'an river which locates in Qiaomuwang town, compared with the experimental results, the DAFs of the T-type Rigid Bridge vary with its structural damping, the vehicle speed, the rough decks, and the frequency of the vehicle are studied. The results indicate that the DAFs obtained from numerical simulation are in line with experiment results and the DAFs of the T-type rigid bridge meet a criterion of Chinese Bridge Standard in 2004.

Key words: T-type rigid-frame bridge; full-vehicle model; modal superposition method; vehicle-bridge interaction; vibrating response

(责任编辑:王全金)