

大跨异形钢管混凝土拱桥车载冲击效应分析

李岩^{1,2}, 陈彦江³, 黄新艺⁴

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090, liyan_2007@126.com; 2. 哈尔滨工业大学 力学博士后流动站, 哈尔滨 150090; 3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 4. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108)

摘要: 大跨度异形钢管混凝土拱桥的复杂造型使其结构动力特性极为特殊, 车辆激励引起的桥梁振动十分复杂. 为研究该类桥梁车辆冲击效应的特点和规律, 以在建的长春市伊通河大桥为对象, 应用自编的车桥耦合振动分析程序, 对该桥进行了车桥耦合振动响应分析. 从理论上分析了路面粗糙度、车速、结构阻尼对桥梁主梁、拱肋挠度和吊杆索力冲击效应的影响. 结果表明: 路面不平度对多拱肋异形拱桥振动响应的影响十分显著, 维持路面平整可有效降低冲击系数; 行车速度对冲击效应的影响与发生的卓越振动振型密切相关, 并不一直随车速成正比增大; 结构阻尼值在规范给定范围内变动时, 对冲击系数影响不明显, 设计中可偏安全地取阻尼比为 0.5%. 研究给出了该桥各主要构件的设计冲击系数取值的参考范围.

关键词: 桥梁工程; 异形钢管混凝土拱桥; 车桥振动; 动力分析; 冲击效应

中图分类号: U 448.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0109-06

Impact effect study on long-span irregular concrete filled steel tube arch bridge under moving vehicles

LI Yan^{1,2}, CHEN Yan-jiang³, HUANG Xin-yi⁴

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, liyan_2007@126.com; 2. Postdoctoral Station of Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. College of Architecture Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. College of Architecture Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to research the impact effect characteristic of a long-span irregular CFST arch bridge, the dynamic response analysis on the interaction of vehicle and bridge was carried out by the self-compiling computing program for the Yitong River bridge under construction in Changchun city. The influence of road surface roughness, vehicle speed and damping on impact effect of bridge was analyzed by theory. Results show that the effect of road surface roughness on vibration response of the irregular arc bridge is significant, keeping good roughness level will decrease impact factors. The influence of vehicle speed on impact effect is related with the primary modes of response, and hence increasing vehicle speed may not increase impact factors. Damping ratio of the structure does not affect impact factors significantly when it is changed in a given scope by specification, and damping ratio of 5% can be used in the design for security. Moreover, reference values of impact factors of the bridge are given in the study.

Key words: bridge engineering; irregular concrete filled steel tube (CFST) arch bridge; vehicle-bridge vibration; dynamic analysis; impact effect

近年来,大跨度钢管混凝土拱桥以其强度高、

跨越能力强、造型多样的优势,在我国城市桥梁建设中得到广泛应用.其中也涌现出了一些造型独特的多拱肋异形钢管混凝土拱桥,如漳州市龙江大桥、常州东港大桥等^[1].这类桥梁复杂的造型使得其结构的动力特性极为特殊,行车激励引起

收稿日期: 2009-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678051);
黑龙江省教育厅科技项目(11531296).

作者简介: 李岩(1978—),男,博士后,讲师.

的桥梁振动也变得十分复杂。

在以往的车桥耦合振动研究中,对于梁桥、拱桥、缆索体系桥动力冲击系数方面的研究有很多^[2-4],而针对钢管混凝土拱桥动力特性和冲击系数的研究还比较少。HUANG Dongzhou^[5]研究了跨度200 m以内中承式钢管混凝土拱桥的动力特性和冲击系数,提出了相关计算公式。孙潮等^[6]收集了多座钢管混凝土拱桥的实测冲击系数,通过统计分析给出了常规钢管混凝土拱桥冲击系数计算的简化公式;严志刚等^[7]对中承式钢管混凝土拱桥的动力冲击效应进行了理论和实测分析。但上述研究针对的都是平行拱肋的常规中承式拱桥,对于大跨度异形钢管混凝土拱桥车桥动力响应的研究还未见报道。

本文以在建的长春市伊通河大桥为对象,应用作者开发编制的车桥耦合振动分析程序。从理论上探讨了路面粗糙度、车速、结构阻尼对该类桥梁冲击效应的影响,得出的结论在该桥的设计中被参考和应用。

1 工程概况

长春市伊通河大桥位于102国道跨越伊通河处,是长春市四环快速路工程的一个重要组成部分。大桥主桥跨度布置为51 m + 158 m + 51 m,全长260 m(如图1)。主梁中跨为110.8 m钢箱梁,边跨为预应力混凝土箱梁,桥面宽度为40 m。中跨拱肋由3根钢管混凝土拱肋组成,主拱肋平面和副拱肋夹角为21.8°。主拱肋矢跨比为1/4.23,其截面为3根钢管通过拉板连接的三角形截面,截面中大钢管直径1.8 m,小钢管直径1.2 m;副拱肋的直径为1.2 m,主拱肋、副拱肋钢管内均填C50的混凝土。主拱肋与桥面中心之间用斜吊杆连接。主拱肋、副拱肋之间用钢管斜撑相连,副拱肋之间用钢管横撑连接。全桥共设置6根水平系杆,系杆布置在中央分隔带区域桥面上。沿桥纵向双侧共设置32根吊杆,每侧16根。

目前该桥在国内同类异形钢管混凝土拱桥中,跨度最大,结构轻型化和造型复杂致使其动力性能与传统拱桥差异较大,本文对该桥车载下的动力冲击效应进行研究。

2 车桥耦合振动分析原理

2.1 车辆模型

车辆采用了12自由度计算模型,如图2所示。 Z_{vr} , θ_{vr} , φ_{vr} , Y_{vr} 分别为车体竖向沉浮、绕Y轴的转动、绕X轴的侧滚和横向摆动自由度; Z_{sL}^1 , Z_{sR}^1 ,

Z_{sL}^2 , Z_{sR}^2 分别为悬架刚体竖向沉浮自由度; Y_{sL}^1 , Y_{sR}^1 , Y_{sL}^2 , Y_{sR}^2 分别为悬架刚体横向摆动自由度;下标vr表示车体;s表示悬架;L,R分别表示X轴左侧和右侧刚体;1,2表示车轴数。本文分析中采用30 t重车进行,车辆参数详见文献[8]。

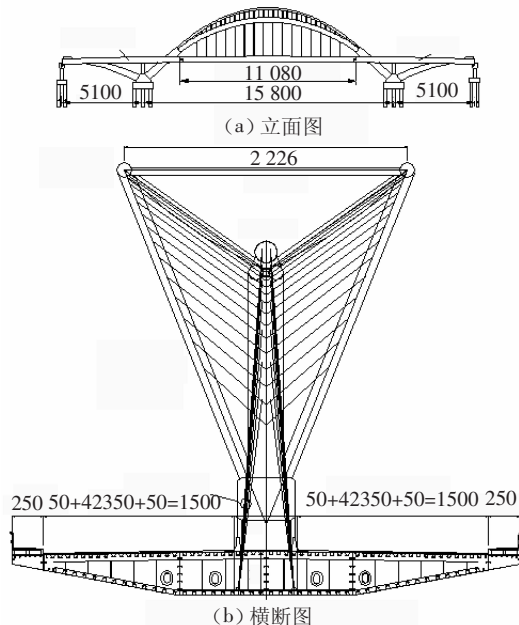


图1 伊通河大桥桥型图(cm)

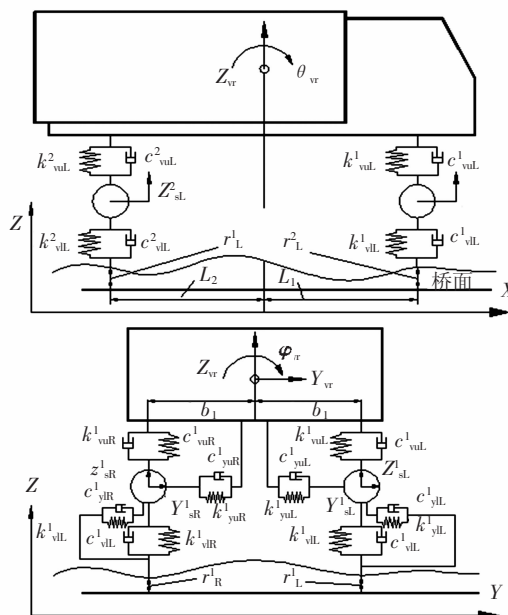


图2 车辆模型

2.2 桥梁模型

考虑到复杂结构的动力反应主要受若干低阶振型控制,结构振动分析中只需计入若干低阶振型和频率就能够满足工程精度要求。首先建立大桥的空间有限元模型,其中对钢管混凝土构件应用统一理论来考虑钢管和混凝土的相互作用,并确定力学参数^[7],采用三维梁单元模拟拱肋、主梁、横撑、斜撑和拱上立柱;吊杆和系杆采用索单

元模拟,桥面铺装采用板单元模拟,有限元模型如图3所示.运用通用有限元程序对桥梁进行模态分析得到结构各阶振型和频率,则桥梁侧向运动、扭转运动和竖向运动可分别表示为

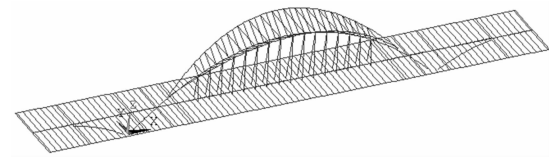


图3 大桥有限元分析模型

$$Y_b(x) = \sum_{n=1}^{N_b} q_n \varphi_h^n(x), \theta_b(x) = \sum_{n=1}^{N_b} q_n \varphi_\theta^n(x),$$

$$Z_b(x) = \sum_{n=1}^{N_b} q_n \varphi_v^n(x)$$

式中: $\varphi_h^n(x)$, $\varphi_\theta^n(x)$, $\varphi_v^n(x)$ 分别为桥梁第 n 阶振型水平分量、扭转分量和竖直分量; N_b 是所采用的振型数; q_n 为第 n 阶振型的广义模态坐标. 各阶振型按广义质量归一化处理.

2.3 桥面不平度

桥面不平度可假定为满足零均值的稳态高斯随机过程,路面不平度的特性可用功率谱密度函数表示为^[2]

$$S_d(f) = S_d(f_0) \cdot (f/f_0)^{-a}.$$

式中: f 为空间频率, $f_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 为参考空间频率; a 为频率指数, $S_d(f_0)$ 为 f_0 下的路面粗糙系数 (m^3/cycle).

ISO 国际标准^[9]将路面粗糙系数划分为5个等级,分别为“很好”,“好”,“一般”,“差”,“很差”.对应的粗糙系数分别取为 0.24×10^{-6} , 0.62×10^{-6} , 2.5×10^{-6} , 10.0×10^{-6} 和 $20.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cycle}$. 为分析不同桥面不平度对拱桥车桥耦合振动响应的影响,计算时分别对“完全光滑”,“好”,“一般”和“差”4种路面状态(第一种为理想状态,后3种为常见路面状态)下的桥梁动力响应进行分析.

2.4 车桥耦合振动方程

车桥耦合振动系统中假定车轮与桥面始终接触,车辆和桥梁在车轮与桥面接触处具有相同的位移协调条件,对于车辆而言桥梁的变形相当于附加桥面不平度.分析中将桥梁变形引起的附加桥面不平度和随机桥面不平度进行组合形成等效粗糙度,将等效粗糙度作为系统激励源.车轮与桥面接触点处,车辆所受荷载和桥梁所受荷载是一组大小相等、方向相反的相互作用力.车轮与桥梁接触点位移可表示为桥梁模态坐标和相应桥面不平度迭加的形式:

$$\begin{Bmatrix} Y_{wij} \\ Z_{wij} \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{N_b} \begin{Bmatrix} q_n [\varphi_h^n(x_{ij})] \\ q_n [\varphi_v^n(x_{ij}) + e_{ij} \varphi_\theta^n(x_{ij})] \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ r_{ij} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

式中: Y_{wij} , Z_{wij} 分别为第 i 辆车第 j 个轮对的横向和竖向位移; e_{ij} 为第 i 辆车第 j 个轮对相对桥面中心线的偏心距离; r_{ij} 为对应位置的桥面不平度幅值.依据前述力和位移耦合条件建立车桥耦合振动方程如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{vv} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_v \\ \ddot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{vv} & \mathbf{C}_{vb} \\ \mathbf{C}_{bv} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_v \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{vv} & \mathbf{K}_{vb} \\ \mathbf{K}_{bv} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_v \\ \mathbf{X}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_v^b \\ \mathbf{F}_b^v \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中:下标 v 和 b 分别表示车辆和桥梁; vb 和 bv 分别表示车桥耦合作用部分; $\mathbf{X}_b = [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_{N_b}]^T$ 为桥梁模态位移子向量; $\mathbf{X}_v$, $\dot{\mathbf{X}}_v$, $\ddot{\mathbf{X}}_v$ 分别为车辆位移、速度和加速度向量;车桥耦合振动方程中质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵和荷载向量可由车桥系统耦合条件推导得到,具体形式和推导过程见文献[10].

应用作者基于 Matlab 开发的车桥耦合振动分析程序,对伊通河大桥车载下的动力冲击效应进行了分析.

3 计算结果及分析

3.1 结构动力特性分析

基于前述模型,运用 ANSYS 对伊通河大桥进行模态分析,前10阶振型和频率如表1所示.

表1 主要振型和频率

阶数	频率/Hz	振型描述
1	0.55	一阶拱肋侧弯
2	1.65	一阶拱肋反对称扭转
3	1.98	一阶反对称竖弯
4	2.59	一阶拱肋对称扭转
5	2.71	一阶对称竖弯
6	2.95	拱肋对称侧弯+扭转
7	3.38	二阶拱肋对称扭转
8	3.53	二阶反对称竖弯
9	3.62	二阶对称竖弯
10	4.41	三阶对称竖弯

3.2 动轮压荷载放大效应

为了比较路面不平度对动轮压荷载的影响,首先计算了单辆车以 40 km/h 速度沿桥右侧中间车道行驶时结构的振动响应,桥梁阻尼比取为 0.01 ,得到的单车动轮压总荷载如图4所示.结果显示,当路面完全光滑时总轮压荷载基本为常数 294 kN (30 t),随着路面粗糙度恶化,轮压荷载的振幅增大,在粗糙度等级为“差”条件下,荷载增

幅超过30%,说明确保路面平整可大幅降低交通振动造成的荷载放大作用。

表2列出不同路面条件下总轮压荷载最大值以及它与车重的比值。4种路面粗糙度条件下得到的轮压动力放大系数分别为1.04,1.17,1.26和1.33,其中后3种路面条件下的动力放大系数已超过我国现行城市桥梁设计荷载标准规定的该桥荷载冲击系数1.10。

为研究路面粗糙度对桥梁振动响应的影响,图5给出了“完全光滑”、“好”、“一般”和“差”4种情况下中跨跨中主梁挠度的振动时程曲线。由图5可知,随着粗糙系数的增大,梁的振动幅度也相应增大,变化幅度与轮压荷载增大幅度基本一致。

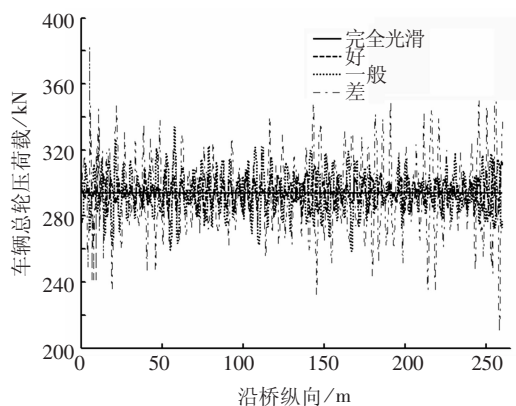


图4 单车40 km/h过桥的总轮压荷载

表2 最大轮压荷载及其动力放大系数

路面条件	总轮压最大值/kN	动力放大系数
完全光滑	294.19	1.04
好	332.12	1.17
一般	357.33	1.26
差	376.64	1.33

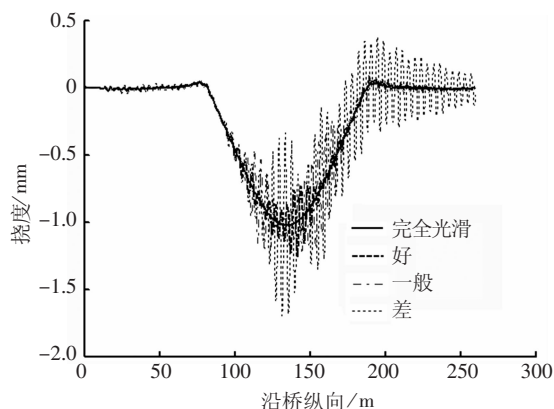


图5 主梁跨中挠度响应

3.3 结构挠度和吊杆拉力冲击系数

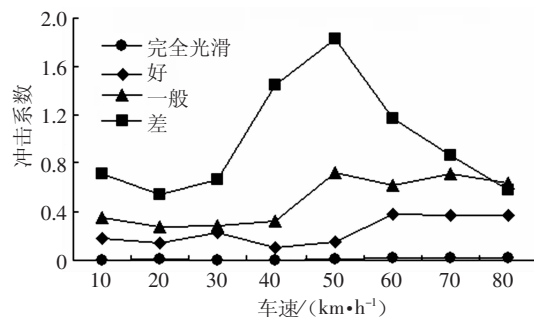
荷载冲击系数 μ 定义为

$$\mu = (Y_{dmax} - Y_{smax}) / Y_{smax}$$

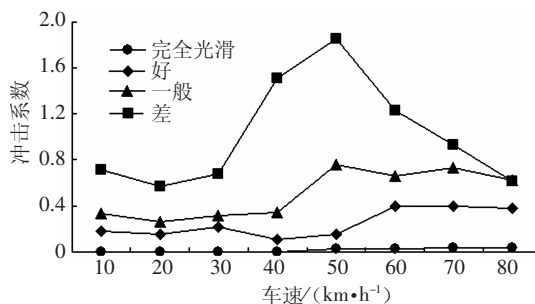
式中： Y_{dmax} , Y_{smax} 分别为车辆通过桥梁结构响应时

程上的最大动力效应和最大静力效应。

图6为拱肋跨中的挠度冲击系数计算结果。由图6可知主拱肋和副拱肋的挠度冲击系数在同一截面位置的值比较接近,在不平度为“差”的路面条件下,跨中截面的最大挠度冲击系数达1.84,随路面条件恶化,冲击系数迅速增大。从图6还可发现,行车速度也是影响冲击系数的一个重要因素。对于拱肋跨中截面而言,车速从10 km/h增加到50 km/h时,其挠度冲击系数增加到最大,当车速达到80 km/h时,冲击系数迅速减小。图7为主梁中跨跨中截面的挠度冲击系数计算结果,随着行车速度、路面不平度变化,冲击系数的变化规律与拱肋响应比较一致,当行车速度超过50 km/h时,跨中截面的冲击系数呈下降趋势,高速行驶时冲击系数变化比较缓慢。在路面条件为“一般”及以上时,拱肋和主梁冲击系数基本一致,当路面条件恶化至“差”时,拱肋冲击系数远大于主梁对应值,表明总体而言,拱肋的动载响应敏感度高于主梁,设计中应适当加强对其冲击效应的考虑。



(a) 主拱肋跨中挠度冲击系数



(b) 副拱肋跨中挠度冲击系数

图6 拱肋挠度冲击系数

由图6和图7的挠度冲击系数分布可知,行车速度超过50 km/h后跨中挠度的冲击系数迅速下降,这表明车辆的冲击效应不一定随车速增大而加大。图8给出了车速为50 km/h,路面不平度为“一般”时主梁跨中截面加速度响应的频谱曲线。从图8和表3可看出,该车速时车辆引起桥梁加速度振动响应的卓越频率与大桥的竖弯振型频率(第3,5,9阶)非常接近,而分析表明其他车速

时桥梁振动卓越频率则不同程度偏离桥梁的面内竖弯自振频率,因此各截面挠度冲击系数大幅下降.表明行车速度对冲击效应的影响与发生的卓越振动振型密切相关.

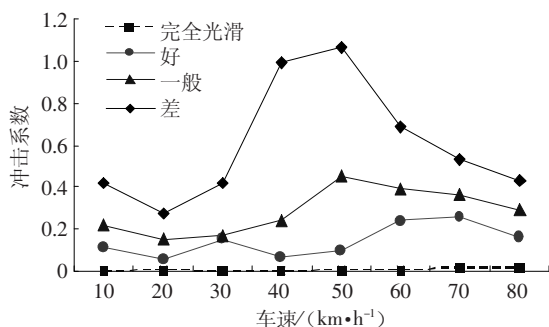


图7 主梁跨中挠度冲击系数

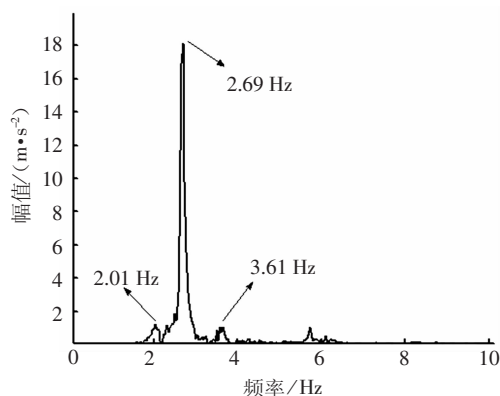


图8 主梁跨中竖向加速度谱分析结果

在中下承式拱桥结构中,吊杆将桥面荷载传至拱肋,其拉力变化关系到结构的安全性,变化过大时还容易引起疲劳破坏,因此合理计算吊杆张力是结构设计的重要内容之一.这里选取2根有代表性的吊杆,分析不同粗糙度和车速条件下的拉力冲击系数.图9为靠近跨中的8号吊杆张力增量的时程曲线.从图9可看到,路面完全光滑时吊杆张力增量和静力荷载作用相当,而粗糙路面条件下的拉力时程曲线是在静力与动力响应叠加得到的.粗糙度为“差”时吊杆张拉的振动幅度为路面约为“完全光滑”时计算结果的2倍.

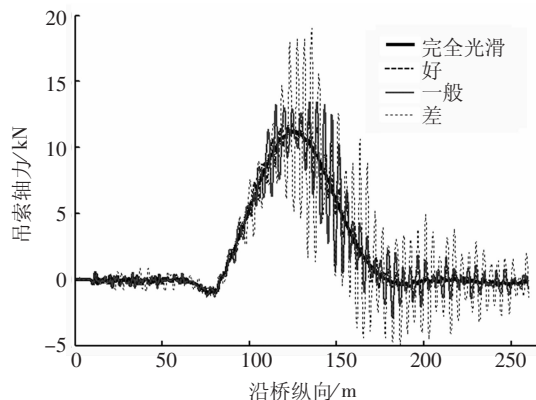
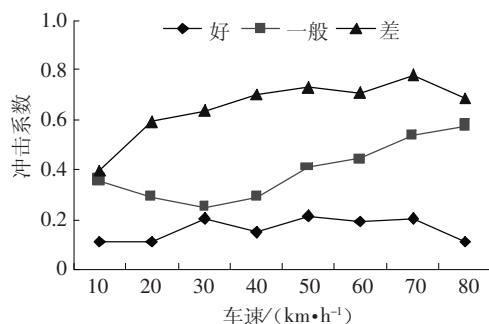


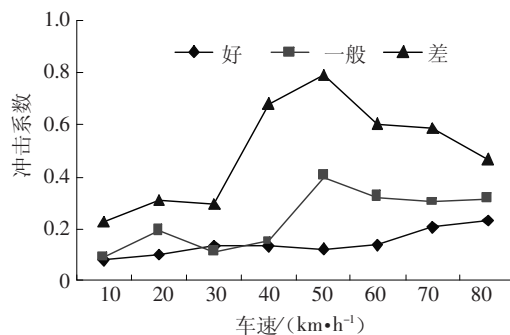
图9 跨中8#吊杆张力时程曲线

图10为梁端和跨中斜吊杆的张力增量冲击

系数.从图可看出,梁端吊杆张力冲击系数随车速提高缓慢增长,同一路面条件下,梁端吊杆冲击系数高于跨中吊杆冲击系数.表明异形拱桥同一般的中承式、下承式拱桥一样,桥梁端部的短吊杆张力冲击系数均大于跨中的长吊杆.另外,行车速度对跨中吊杆张力冲击系数的影响同主梁相似,当速度为50 km/h时为最大.



(a) 梁端1#吊杆张力冲击系数



(b) 跨中8#吊杆张力冲击系数

图10 吊杆张力冲击系数

3.4 阻尼比对冲击系数的影响

阻尼是影响结构动力响应的一个重要因素.为了分析阻尼取值大小对本桥梁冲击系数的影响,依据文献[11],阻尼比分别取为0.5%、1%和2%进行对比计算.路面不平度为“一般”,车速为50 km/h时,大桥拱肋和主梁跨中挠度冲击系数计算结果如图11所示.从图11可看出,随阻尼比的增加,冲击系数有所下降,但是在本文考虑的阻尼比范围内,其变化对计算结果影响很小.说明在规范给定的经验范围内,阻尼比对该桥挠度冲击系数影响较小.

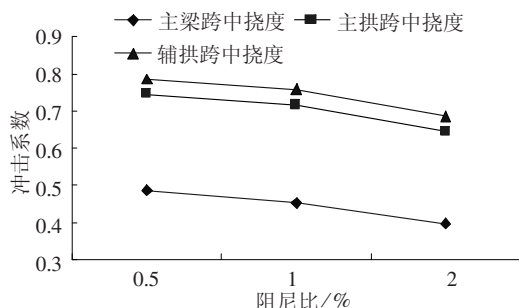


图11 阻尼比对挠度冲击系数的影响

4 结 论

1) 路面粗糙度对多拱肋异型拱桥的振动响应的影响显著,确保路面平整是减轻车辆通行对桥梁影响的重要途径。

2) 行车速度对桥梁冲击系数的影响与发生的卓越振动振型有关,当振动卓越频率与结构自振频率一致时,冲击系数明显增大,分析表明本桥的卓越频率激励车速在 50 km/h 附近。

3) 本桥由车辆引起的振动形式比较复杂,不同构件的冲击系数差异较大. 设计中可按照不平度为“一般”考虑:对于拱肋,冲击系数可取为 0.6~0.8,主梁冲击系数取为 0.4~0.5,端部吊杆张力冲击系数大于跨中吊杆,可偏安全的取用端部吊杆的张力冲击系数 0.6 作为设计冲击系数。

4) 结构阻尼比在经验范围内变动时,对荷载冲击系数的影响不明显,设计中可偏安全的取阻尼比为 0.5%。

参考文献:

- [1] 中国土木工程学会桥梁及结构分会. 中国优秀桥梁 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [2] LAW S S, ZHU X Q. Bridge dynamic responses due to road surface roughness and braking of vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(4): 805 - 830.

(上接第 108 页)

参考文献:

- [1] 李剑, 王文, 陈子辰. 自由曲面测量若干关键问题的研究[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(5): 764 - 766.
- [2] 李全胜, 成晔, 张伯鹏. 光学自由曲面计算机控制加工中的形面检测研究[J]. 光学精密工程, 1996, 7(3): 89 - 96.
- [3] LI Yadong, GU Peihua. Free-form surface inspection techniques state of the art review[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(13): 1395 - 1417.
- [4] FAN Kin, TSAI T. Optimal shape error analysis of the matching image for a free - form surface[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 17(3): 215 - 222.
- [5] LI Yi, GU Peihua. Featured-based alignment and comparison between portion and whole of free-form surface [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005,

- [3] GUO W H, XU Y L. Fully computerized approach to study cable - stayed bridge - vehicle interaction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(4): 745 - 761.
- [4] CAI C S, CHEN S R. Framework of vehicle - bridge - wind dynamic analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(2): 579 - 607.
- [5] HUANG Dongzhou. Dynamic and impact behavior of half - through arch bridges [J]. Journal of Bridge engineering, 2005, 10: 133 - 141.
- [6] 孙潮, 吴庆雄, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥车振性能分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 54 - 59.
- [7] 严志刚, 盛洪飞, 陈彦江. 桥面平整度对大跨度钢管混凝土拱桥车辆振动的影响[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 41 - 43.
- [8] 李岩. 大跨度斜拉桥风车动力响应及拉索疲劳可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [9] HONDA H, KAJIKAWA Y, KOBORI T. Spectra of road surface roughness on bridges [J]. J Struct Div ASCE, 1982, 108(ST9): 1956 - 1966.
- [10] 李岩, 盛洪飞, 陈彦江, 等. 强风环境下斜拉桥车桥系统动力响应分析研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(7): 59 - 64.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG/T 60 - 01 - 2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 15 - 18.

(编辑 赵丽莹)

54(23): 135 - 138.

- [6] KO K, MAEKAWA T, PATRIKALAKIS N. An algorithm for optimal free-form object matching[J]. Computer-Aided Design, 2006, 35(32): 913 - 923.
- [7] MURRAY M, RICHARD I, LI Zexiang, et al. A mathematical introduction to robotic manipulation [M]. New York: CPC Press, 1994.
- [8] COHEN C. Attitude determination Global positioning system: theory and applications [J]. Computer-Aided Design, 1996, 2(1): 519 - 538.
- [9] MA Wei, ZHAO Ning. Catmull - Clark surface fitting for reverse engineering applications [J]. Geometric Modeling and Processing, 2005, 3(2): 273 - 283.
- [10] LI Xi, BARHAK J, GUSKOV I, et al. Automatic registration for inspection of complex shapes[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2007, 2: 75 - 88.

(编辑 赵丽莹)