

# 高墩大跨弯连续刚构桥冲击系数计算公式

周勇军<sup>1</sup>, 韩智强<sup>2</sup>, 赵煜<sup>1</sup>, 杨敏<sup>3</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 太原科技大学交通与物流学院, 山西 太原 030024; 3. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 为研究高墩大跨弯连续刚构桥冲击系数敏感性因素及计算公式, 以陕西某大跨弯连续刚构桥为依托, 基于车-桥耦合振动原理, 采用三轴五自由度车辆模型, 分析了曲率半径、墩高和路面不平度对桥梁结构最不利断面冲击系数的影响, 给出了相应的挠度、弯矩和扭矩冲击系数最大值包络曲线, 通过回归分析提出了弯连续刚构桥冲击系数的计算公式, 并将计算结果与国内外规范进行比较。结果表明, 对于此类特殊桥梁结构, 中国规范冲击系数计算值较其他国家规范值小, 在路面等级较差时, 各国规范冲击系数计算值均偏于不安全, 此时均需考虑不平度对桥梁冲击系数的影响, 研究结果将为该类桥梁冲击系数的精确计算提供参考。

**关键词:** 桥梁工程; 高墩大跨弯连续刚构桥; 车-桥耦合振动; 冲击系数; 路面不平度

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-207-07

## Dynamic load allowance formula of long-span continuous curved rigid frame bridge with high piers

ZHOU Yongjun<sup>1</sup>, HAN Zhiqiang<sup>2</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>, YANG Ming<sup>3</sup>

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an, 710064, China;

2. School of Transportation and Logistic Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, 030024, China;

3. Yunnan Science & Technology Research Institute of Highway, Kunming, 650051, China)

**Abstract:** In order to study the sensitive parameters of dynamic load allowance(DLA) for continuous rigid frame bridge with high pier and long-span and its calculation formulas, a rigid frame bridge in Shaanxi province was taken as example. Based on bridge-vehicle coupled vibration principle, the 5DOFs spatial vehicle model was setup, the effect of pier height, superstructure curvature radius and bridge deck roughness on the DLA of bridge structure was studied, and the maximum DLAs for the bending moment, deflection and torque were put forward. Then by regression analysis, the DLA formulas of the bridge were given, which were compared with those from other country's codes. The results show that for this special kind of bridge, the DLA from Chinese code is less than those of foreign countries. When exposed to the worse roads, all the current countries' codes underestimate the impact factor, so it is considerable that the roughness should be added to the DLA formulas. The results can give reference to computation method of DLA for this kind of bridge.

**Key words:** Bridge engineering; curved continuous rigid frame bridge; vehicles bridge coupled vibration; DLA; pavement roughness

连续刚构桥由于其良好的跨越能力、合理的受力性能和施工方便等特点, 已在我国逐渐应用, 而国外相对较少。与此同时车桥耦合振动分析是公路桥梁上的研究热点问题之一。袁明等<sup>[1]</sup>编制了可用于车-桥系统耦合振动分析的专业程序, 分析了桥梁基频对大跨PC连续刚构桥冲击系数的影响, 并将冲击系数计算结果同规范(JTG D60-2004)计算结果进行了比较。李忠献<sup>[2]</sup>等研究曲线箱梁桥的车桥相互作用, 数值仿真模拟混凝土单箱双室曲线连续箱梁桥的动力特性和车桥相互作用, 并分析了车辆横向位置、车速、桥面不平度、曲率半径等因素对桥梁冲击系数的影响。黄东洲<sup>[3-4]</sup>通过大量计算提出了曲钢箱梁桥的弯矩、挠度、剪力及扭矩冲击系数的计

算公式。李乔<sup>[5]</sup>、李小珍<sup>[6]</sup>讨论了考虑桩土作用的铁路曲线梁桥车桥耦合振动分析, 分析时将车辆和曲线梁桥分为两个振动子系统, 由非线性轮轨接触力所联系, 用迭代法进行求解这两个子系统, 在分析过程中计入了不同车速对曲线连续梁桥振动的影响。盛国刚<sup>[7]</sup>考虑桥面不平顺产生的随机激励, 以简支梁桥为对象, 讨论了不同等级桥面平整度情况下桥梁冲击系数、车辆垂直加速度、车轮对桥的作用力的变化规律。王凌波等<sup>[8-9]</sup>以连续刚构桥梁为背景, 结合正交试验理论, 通过16个计算工况的分析得到各影响因素对车桥耦合振动响应的敏感性排名, 并提出了公路连续刚构桥梁车桥耦合共振判定方法。周勇军<sup>[10-11]</sup>采用能量法提出了连续刚构桥

收稿日期: 2015-07-20

修改稿日期: 2016-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008028); 陕西省交通科技基金资助项目(14-26T); 云南省交通科技基金资助项目(2011-2B05)

作者简介: 周勇军(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁结构动力学方面的研究。E-mail: zyj@chd.edu.cn

基频的计算公式, 并采用4自由度双轴车辆模型给出了一般桥梁冲击系数实用计算方法.

目前, 已有冲击系数的研究对象多为简支梁桥和连续梁桥等常规桥梁, 由于弯桥的弯扭耦合效应, 将之应用于高墩大跨弯连续刚构桥这类非规则桥梁结构中还缺乏相应的技术支持, 且以上研究文献大多数是对连续刚构桥动力性能或者曲线梁桥的冲击系数进行定性研究, 对弯连续刚构桥冲击系数的计算公式开展分析的很少. 因此, 研究高墩大跨弯连续刚构桥冲击系数显得尤为重要.

基于车桥耦合振动理论, 通过自编程序和通用有限元软件 ANSYS 分析了不同敏感参数(曲率半径、墩高和不平整度)作用下桥梁结构的动力响应, 并通过大量理论计算回归给出了该类桥梁冲击系数和敏感参数间的函数关系, 研究结果可为该类桥梁冲击系数的精确计算提供参考.

## 1 冲击系数计算表达式

汽车荷载过桥时对桥梁结构产生的竖向动力效应增大系数, 称为冲击系数<sup>[12]</sup>, 其计算表达式为

$$\mu = \frac{Y_{d\max}}{Y_{j\max}} - 1 \quad (1)$$

式中:  $Y_{d\max}$  为桥梁的最大动态效应(如弯矩和挠度);  $Y_{j\max}$  为在同样车辆作用下桥梁的最大静力效应.

各国规范有关桥梁冲击系数的计算公式不尽相同, 这里选取几个代表性规范做简要说明:

(1) 美国 AASHTO LRFD-2012<sup>[13]</sup>: 对于所有构件的疲劳及断裂状态:  $\mu = 0.15$ ; 其它状态:  $\mu = 0.33$ .

(2) 加拿大的桥梁设计规范(DHBDC)(2006)<sup>[14]</sup>: 冲击系数与汽车的轮轴数有关: 当车辆轴数为 1 时,  $\mu = 0.4$ ; 当车辆轴数为 2 时,  $\mu = 0.3$ ; 当车辆轴数大于等于 3 时,  $\mu = 0.25$ .

(3) 英国桥梁设计规范<sup>[15]</sup>: BS5400 (2006)中认为车辆荷载中已包含 25%的冲击效应;

(4) 中国公路桥涵通用规范<sup>[12]</sup>(JTGD60-2004)(下简称 04 规范): 冲击系数与结构基频  $f$  的函数表达式为

$$\mu = \begin{cases} 0.05 & f \leq 1.5 \text{ Hz} \\ 0.176 7 \ln f - 0.015 7 & 1.5 \text{ Hz} < f \leq 14 \text{ Hz} \\ 0.45 & f > 14 \text{ Hz} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f$  为桥梁结构的基频, Hz.

## 2 车桥耦合振动基本理论

### 2.1 基本假定

①车轮与桥面始终紧密结合, 没有分离; ②只考虑车辆的竖向振动; ③结构满足小变形理论; ④不考虑桩、土间相互作用.

### 2.2 车辆振动方程建立

采用 1/2 三轴车辆模型, 其计算图如图 1 所示.

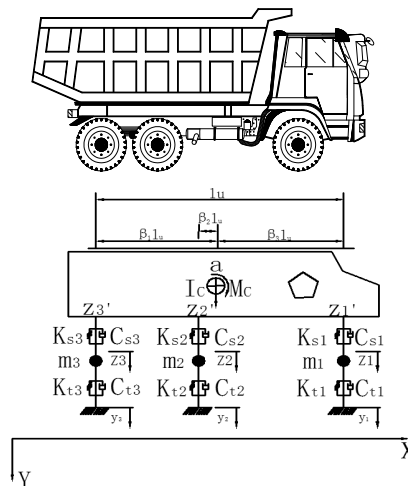


图 1 五自由度三轴平面车型

Fig.1 Half vehicle model with three axles of 5DOFs

图中:  $l_u$  表示车辆前后轴间长度,  $M_c$  表示车体质量,  $\alpha$  和  $Z$  表示车辆绕横轴旋转的自由度和车辆竖向位移,  $I_\alpha$  车体点头刚度,  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  分别表示车辆质心距后轴、中轴和前轴的距离与前后轴之间的比值,  $m_i (i=1,2,3)$  表示轮轴质量块,  $k_{ti} (i=1,2,3)$  为轮胎的刚度;  $c_{ti} (i=1,2,3)$  为轮胎的阻尼系数;  $k_{si} (i=1,2,3)$  为悬挂系统的刚度;  $c_{si} (i=1,2,3)$  为悬挂系统的阻尼系数,  $z_i (i=1,2,3)$  表示质量块竖向位移,  $z'_i (i=1,2,3)$  表示支承车体点的竖向位移自由度,  $y_i(x_i, t)$  表示梁的强迫振动位移.

取初始时车辆弹簧的自然位置为坐标起点, 车辆的待求位移向量  $\{Z_v\}$  为

$$\{Z_v\} = [z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z'_1 \quad z'_3]$$

车辆模型中力分别为: 重力 ( $Mg, m_1g, m_2g, m_3g$ ) 悬置力  $F_{si} (i=1,2,3)$ ; 轮胎力  $F_{ti} (i=1,2,3)$ ; 惯性力 ( $M\ddot{Z}, I_\alpha\ddot{\alpha}, m_iz_i (i=1,2,3)$ ).

其中:

$$\begin{cases} F_{si} = k_{si}(z'_i - z_i) + c_{si}(\dot{z}'_i - \dot{z}_i), i=1,2,3 \\ F_{ti} = k_{ti}(z_i - y_i(x_i, t)) + c_{ti}(\dot{z}_i - \dot{y}_i(x_i, t)), i=1,2,3 \end{cases} \quad (3)$$

由几何关系可知:

$$\begin{cases} Z = \beta_3 z'_1 + \beta_1 z'_3 \\ \alpha = (z'_1 - z'_3) / l_u \\ z'_2 = z'_3 + \alpha(\beta_3 - \beta_2) l_u \end{cases} \quad (4)$$

由广义虚功原理可知:

$$\delta W_v = \sum_{i=1}^3 m_i g \delta z_i + Mg \delta Z - \sum_{i=1}^3 m \ddot{z}_i \delta z_i - M \ddot{Z} \delta Z - I_a \ddot{\alpha} \delta \alpha - \sum_{i=1}^3 F_{si} \delta(z'_i - z_i) - \sum_{i=1}^3 F_{ti} \delta(z_i - y_i) = 0 \quad (5)$$

将式(3)和式(4)带入式(5),展开并移项,得该车辆模型的振动方程为

$$[M_v]\{\ddot{Z}_v\} + [C_v]\{\dot{Z}_v\} + [K_v]\{Z_v\} = \{G_v\} + \{F_{bv}\} \quad (6)$$

其中:  $[M_v]$ 为车辆的质量矩阵;  $[C_v]$ 为车辆的阻尼矩阵;  $[K_v]$ 为车辆的刚度矩阵;  $\{F_{bv}\}$ 为车辆的轮胎与桥面接触点处的瞬时耦合荷载向量;  $\{G_v\}$ 为重力荷载向量. 式中各矩阵表达式由于篇幅不再赘述<sup>[16]</sup>.

### 2.3 桥梁振动方程建立

研究车桥耦合振动时,通常考虑将桥梁离散为空间有限元模型,并假设质量、阻尼和刚度矩阵沿桥跨方向均匀分布,其桥梁相应振动方程:

$$[M]\{\ddot{Y}\} + [C]\{\dot{Y}\} + [K]\{Y\} = \{F\} \quad (7)$$

式中:  $[M]$ 为桥梁结构的质量矩阵;  $[C]$ 为桥梁结构的阻尼矩阵;  $[K]$ 为桥梁结构的刚度矩阵;  $\{\ddot{Y}\}, \{\dot{Y}\}, \{Y\}$ , 分别表示桥梁节点的加速度、速度和位移向量;  $\{F\}$ 为作用在桥梁结构节点上力列向量.

### 2.4 车桥相互作用方程

如果将车辆和桥梁视作两个分离体系,二者之间耦合作用通过轮胎与桥面间的相互作用联系起来. 轮胎与桥梁间的相互作用力描述为

$$F_{ii} = k_{ii} u_i + c_{ii} \dot{u}_i \quad (8)$$

其中:  $u_i$ 为第轮胎与桥梁的竖向联系(相对)位移.

## 3 路面不平度

路面不平度这里表示为桥梁表面偏离理想平面的程度. 根据《车辆振动输入和路面平度表示方法》(GB/T7031-1986)建议的谱密度函数表达式为基础,采用离散傅里叶逆变换法,模拟不同路面等级平整度样本值,其谱密度函数<sup>[16]</sup>如式9所示:

$$G_x = G_x(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (9)$$

式中:  $n$ 为空间频率,  $n_0$ 为参考频率,其值为  $0.1 \text{ m}^{-1}$ ,  $G_x(n_0)$ 为参考频率  $n_0$ 下路面功率谱密度值,  $w$ 为频率指数.

由于我国公路路面谱基本处于 A、B、C 三级范围之内. 因此,利用 Matlab 平台编制程序模拟了 A、B、C 级路面谱,见图2所示.

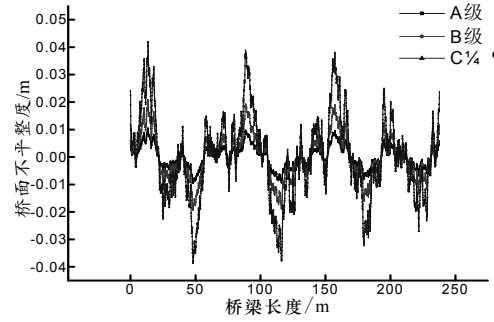


图2 路面不平度模型

Fig.2 Model of bridge deck roughness

## 4 车—桥耦合振动分析

### 4.1 依托工程

陕西省西康高速某高墩大跨连续刚构桥,桥梁全长 239 m,其跨径组合 65+108+65 m(图3),上部结构为单箱单室截面,箱梁根部高度为 6.5 m,跨中梁高 2.5 m,其间梁高按二次抛物线变化,曲率半径  $R=960 \text{ m}$ ,桥墩采用双薄壁空心墩,两薄壁墩高 60 m,墩净距 3.0 m,横桥向 6.5 m,顺桥向 3.0 m,壁厚顺桥向 0.6 m,横桥向 1.0 m.混凝土强度等级:箱梁为 C50,墩身为 C40,承台、桩基为 C25.路面状况属于 B 级.

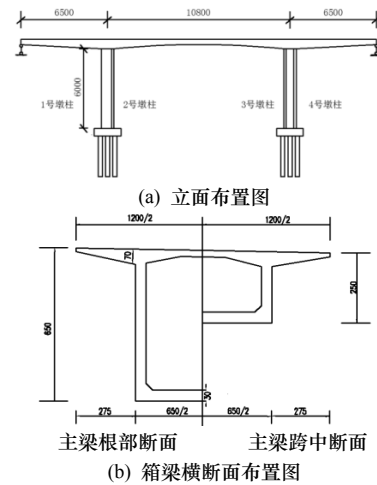


图3 桥梁总体布置(单位: cm)

Fig.3 General layout of bridge(cm)

### 4.2 仿真模型建立

采用 ANSYS 中空间梁单元 BEAM4 模拟桥梁上部结构和下部结构<sup>[17-18]</sup>,仿真模型如图4所示.

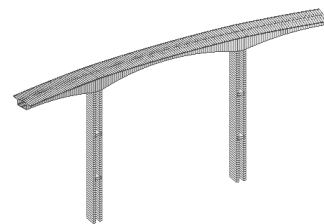


图4 仿真模型示意图

Fig.4 FEM models

两桥台处主梁均约束了横向和竖向位移及绕桥梁纵轴线的转动位移:由《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60-2004)<sup>[12]</sup>可知,当弯桥曲率半径大于250m时,可不计其离心力,因此这里暂不考虑离心力的影响。

4.3 工况分析

公路桥梁冲击系数受多个敏感参数的共同作用,根据前人研究成果可知<sup>[19-21]</sup>,曲率半径、墩高、路面不平整度等参数是影响此类桥梁较为敏感的因素。因此,论文重点分析这三个参数对关键截面

车载动力响应的影响。考虑到目前连续刚构桥有较小半径、桥墩较高且桥面不是很粗糙的现状,故曲率半径分250 m、500 m、750 m、960 m等四个工况,墩高有60 m、80 m和100 m三个工况,路面平整度等级有A级、B级、C级三个工况。冲击系数的研究对象为上部结构主梁最不利截面(边跨跨中、墩顶主梁、中跨跨中)处的弯矩、扭矩及上部结构最不利截面(边跨跨中、中跨跨中)处的竖向挠度,其中所用车辆的基本参数如表1所示。全桥共计12个计算工况(表2)。

表 1 车辆技术参数指标<sup>[22]</sup>  
Tab.1 Technical parameters for vehicle

车辆模型	车轮质量/kg	构架轮对质量/kg	一系垂向刚度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	一系垂向阻尼/ $\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	二系垂向刚度/ $\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	二系垂向阻尼/ $\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	车体质量/ $\text{M}\cdot\text{kg}^{-1}$
三轴平面车辆模型	前轮	500	1 200	5	2 400	6	
	中轮	500	2 400	10	4 800	12	32 005
	后轮	500	2 400	10	4 800	12	

表 2 敏感参数作用下连续刚构桥最不利截面冲击系数理论计算最大值  
Tab.2 The maximum DLAs of rigid frame bridge's critical section under sensitive parameters

曲率半径	墩高	A 级			B 级			C 级		
		挠度	弯矩	扭矩	挠度	弯矩	扭矩	挠度	弯矩	扭矩
250	60	0.090	0.060	0.047	0.182	0.147	0.097	0.392	0.355	0.263
500	60	0.079	0.057	0.058	0.177	0.136	0.122	0.411	0.343	0.316
750	60	0.079	0.058	0.073	0.176	0.126	0.154	0.406	0.310	0.336
960	60	0.079	0.056	0.086	0.174	0.122	0.182	0.401	0.303	0.378
250	80	0.088	0.045	0.039	0.168	0.120	0.114	0.341	0.309	0.334
500	80	0.096	0.066	0.078	0.169	0.146	0.169	0.325	0.337	0.379
750	80	0.096	0.068	0.084	0.167	0.151	0.187	0.319	0.346	0.435
960	80	0.096	0.069	0.084	0.167	0.150	0.191	0.319	0.344	0.476
250	100	0.069	0.049	0.037	0.133	0.109	0.070	0.266	0.329	0.200
500	100	0.055	0.064	0.059	0.111	0.136	0.153	0.271	0.329	0.353
750	100	0.068	0.043	0.068	0.130	0.125	0.160	0.299	0.321	0.381
960	100	0.071	0.040	0.087	0.137	0.140	0.181	0.312	0.340	0.417

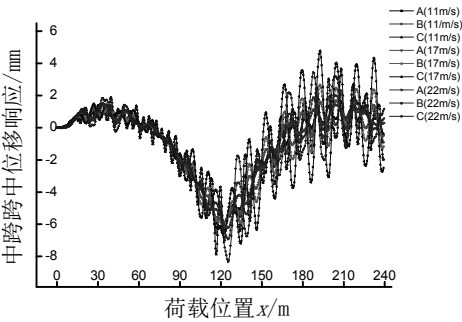


图 5 不同路面平整度下连续刚构桥中跨跨中挠度时程曲线图

Fig.5 Comparison of deflection response of mid-span for rigid frame bridge under different deck roughnes

编制了车桥耦合振动程序,求得桥梁结构的动态响应曲线。限于篇幅,仅列出中跨跨中挠度时程曲线如图5所示。为减小计算误差,本文分别研究了11 m/s、17 m/s以及22 m/s三种不同速度下截面动力响应的时程曲线,最后冲击系数计算时均按其平均值进行处理。

4.4 冲击系数包络曲线图

在依托工程时程曲线的基础上,考虑路面不平整度因素的影响,利用公式(1)计算上部结构各截面在敏感参数作用下的弯矩、扭矩、挠度冲击系数,然后将这些冲击系数最大值沿桥纵向连成一条曲线,从而形成依托工程连续刚构桥的冲击系数包络图,同时与我国04规范<sup>[12]</sup>进行比较,如图6所示。

图6中,如果取相应的弯矩、扭矩或挠度冲击系数最大值作为整个桥梁相应的理论冲击系数值,则在12种工况下连续刚构桥冲击系数最大值如表2所示。

由表2和图6可知:

- (1) 各个控制截面的冲击系数最大值并不相同,而是呈起伏状分布;
- (2) 在路面状况较好时(A级),我国现有04规范满足要求,而随着路面状况的恶化(C级),桥梁最不利截面冲击系数均大于其规范值,建议在后续

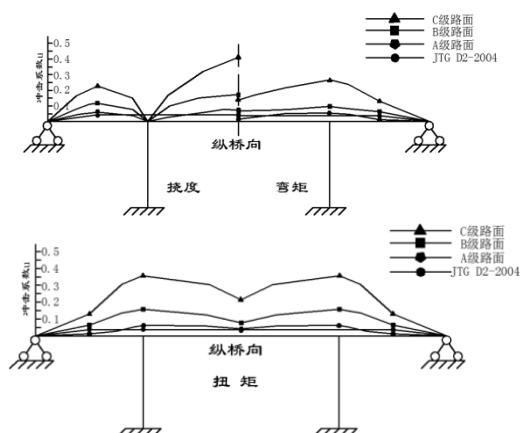


图6 依托工程主梁挠度、弯矩和扭矩冲击系数最大值包络曲线

Fig.6 The maximum DLA for the deflection, bending moment and torsion

计算冲击系数中应考虑路面不平度影响<sup>[23]</sup>;

(3) 结合上述依托工程主梁冲击系数计算值,给出相应冲击系数建议取值范围: A 级路面:  $\mu=0\sim 0.09$ ; B 级路面:  $\mu=0\sim 0.19$ ; C 级路面:  $\mu=0\sim 0.41$ 。

#### 4.5 冲击系数回归分析

为了精确给出连续刚构桥的冲击系数,通过对以上数据进行分析,并利用数据处理软件 Istopt 对各个敏感参数变化时桥梁冲击系数值进行拟合,给出连续刚构桥冲击系数的回归公式,其相关系数如表3所示和图7所示。

##### ① A 级路面状况

最大挠度、弯矩和扭矩冲击系数与曲率半径  $R$ 、墩高  $h$  之间的关系为

$$\begin{cases} \mu_d = -0.189 - 3.73 \times 10^{-5} \times R + 3.192 \times 10^{-8} \times R^2 + 0.008H - 5.055 \times 10^{-5} H^2 \\ \mu_M = -0.112 + 0.001R - 4.867 \times 10^{-7} R^2 + 2.368 \times 10^{-10} \times R^3 + 0.003H - 2.144 \times 10^{-5} H^2 \\ \mu_G = -0.07 + 6.1 \times 10^{-5} R + 0.003H - 1.721 \times 10^{-5} H^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\mu_d$ 、 $\mu_m$ 、 $\mu_c$  分别表示挠度、弯矩和扭矩的冲击系数,  $R$  为桥梁曲率半径值(m);  $H$  为桥墩高度(m), 下同。

##### ② B 级路面状况

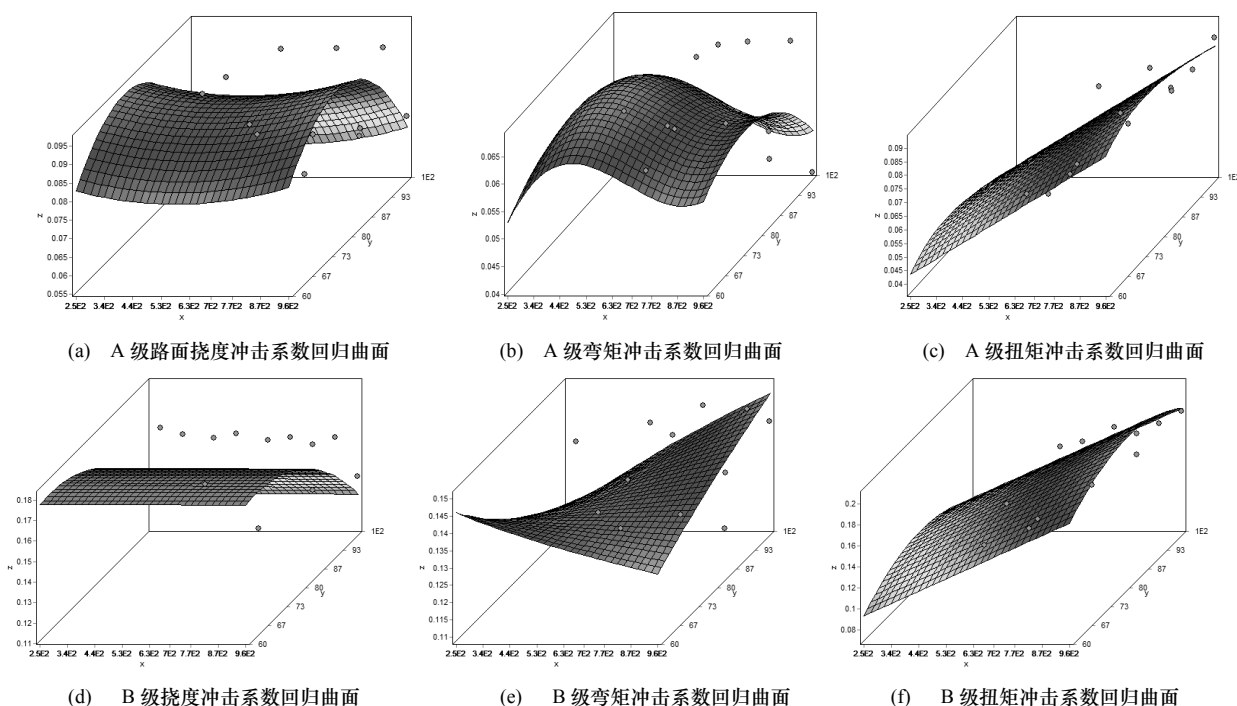
最大挠度、弯矩和扭矩冲击系数与曲率半径  $R$ 、墩高  $H$  之间的关系为

$$\begin{cases} u_d = 0.029 - 1.802 \times 10^{-7} \times R + 0.005H - 3.730 \times 10^{-5} H^2 \\ u_M = 5.497 - 0.134R^{0.569} - 4.74H^{0.287} + 0.119R^{0.569} H^{0.029} \\ u_G = -0.328 + 0.001R + 0.010H - 6.451 \times 10^{-5} H^2 \end{cases} \quad (11)$$

##### ③ C 级路面状况

最大挠度、弯矩和扭矩冲击系数与曲率半径  $R$ 、墩高  $H$  之间的关系为

$$\begin{cases} u_d = 0.851 - 1.618 \times 10^{-5} R - 0.011H + 4.758 \times 10^{-5} H^2 \\ u_M = 4.589 - 0.435R^{0.362} - 3.213H^{0.064} + 0.328R^{0.362} H^{0.064} \\ u_G = -0.963 + 0.001R + 0.035H - 0.001H^2 \end{cases} \quad (12)$$



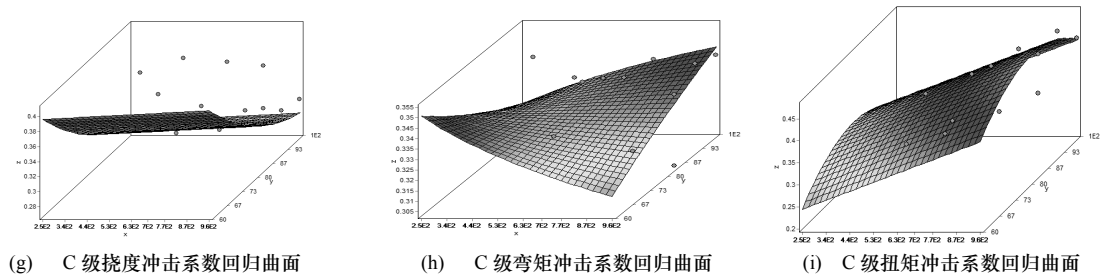


图 7 各级路面冲击系数拟合曲面图  
Fig.7 DLA under different deck roughness

表 3 各级路面冲击系数计算公式拟合相关系数  
Tab.3 Correlation coefficient of calculation DLA under different deck roughness

不平整度等级		A 级路面			B 级路面			C 级路面		
相关系数 $R^2$		挠度	弯矩	扭矩	挠度	弯矩	扭矩	挠度	弯矩	扭矩
		0.932	0.704	0.938	0.964	0.705	0.938	0.970	0.649	0.944

由式 10-12、图 7 和表 3 可知:

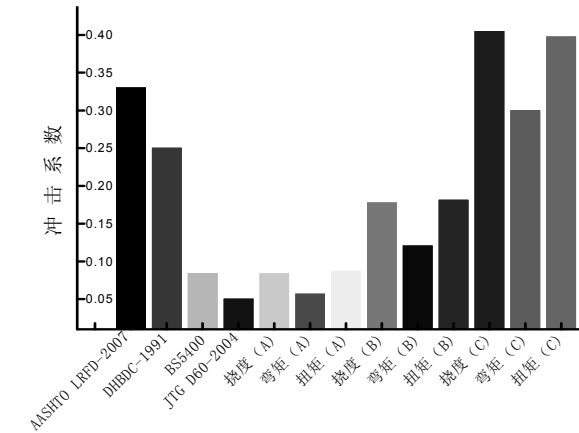
- (1) 不同路面等级下, 挠度和扭矩冲击系数拟合公式较好, 其相关系数均在 0.9 以上, 而弯矩冲击系数拟合公式相关系数相对较差, 建议在后续工程应用时, 优先考虑挠度和扭矩冲击系数公式;
- (2) 在同一路面等级下, 随着桥梁曲率半径增大, 结构挠度和弯矩冲击系数值变化不大, 而扭矩冲击系数变化较大, 符合弯连续刚构桥受力特点;
- (3) 随着桥墩高度的变化, 挠度、弯矩和扭矩的冲击系数呈起伏状分布, 说明墩高的变化对弯连续刚构桥最不利截面冲击系数变化有一定影响; 建议在计算弯连续刚构桥梁冲击系数中考虑墩高变化的影响。

4. 6 冲击系数公式验证分析

采用上述拟合公式分别计算依托工程在不同路面平整度下的桥梁冲击系数, 并与国内外已有常规桥梁汽车荷载冲击系数的理论计算结果进行对比, 计算结果列于表 4 及图 8。

表 4 冲击系数理论值比较

Tab.4 Impact coefficients comparison of theoretical value			
路面不平 整度		类别	冲击系数理论 计算值 $\mu$
各国规 范计算 值	/	AASHTO LRFD-2007	0.330
		DHBDC-1991	0.250
		BS5400	0.084
		04 规范	0.050
本文拟 合公式	A 级	挠度	0.084
		弯矩	0.057
		扭矩	0.087
	B 级	挠度	0.178
		弯矩	0.120
		扭矩	0.181
	C 级	挠度	0.405
		弯矩	0.300
		扭矩	0.397



注: 图中挠度(A)为路面不平整度为 A 级时最大挠度冲击系数回归公式计算值, 以此类推。

图 8 冲击系数比较柱状图  
Fig.8 Histogram of DLA comparison

由表 4 及图 8 可以看出:

- (1) 对于依托工程而言, 结构挠度、弯矩和扭矩的冲击系数随路面状况的恶化而逐渐增大, 其中挠度冲击系数变化最大, 其值由 0.084(A 级)增长到 0.405(C 级), 而弯矩冲击系数理论值增长相对较小, 从 0.057(A 级)增长到 0.3(C 级), 因此, 针对弯连续刚构桥等异性结构而言, 挠度、弯矩和扭矩的冲击系数应分开计算;
- (2) 在 B 级路面状况下, 以依托工程为例, 分别计算其挠度、弯矩和扭矩的冲击系数为 0.178、0.120 和 0.181, 均大于我国 04 规范(0.05)和英国 BS5400 规范(0.084), 而小于美国 AASHTO 规范(0.330)和加拿大 DHBDC 规范(0.250), 进一步验证了公式的正确性, 同时也说明美国与加拿大的规范在计算此类桥梁冲击系数时偏于保守, 而英国和我国 04 规范在计算该类桥型冲击系数时可能存在一定安全风险;
- (3) 假定依托工程路面状况较差(C 级路面), 本

文推荐的挠度、扭矩冲击系数计算值均大于各国规范取值,其中挠度计算值最大,为0.405。因此,各国规范在路面损坏较为严重时,取值偏于不安全,其中我国和英国规范计算值偏小,而加拿大和美国规范与本文回归公式相差不大,建议今后在制定冲击系数规范时综合考虑桥梁路面不平整度对冲击系数的影响。

## 5 结论

(1) 以三轴五自由度汽车模型为基础,通过车桥耦合计算模块,采用单一参数法研究了墩高、曲率半径和路面不平整度对桥梁冲击系数的影响;提出了在不同路面不平整度等级下,桥梁结构冲击系数与结构的曲率半径、墩高之间的函数关系与变化规律,并给出相应三维曲面图。

(2) 基于依托工程,一般弯高墩连续刚构桥(曲率半径大于250 m)冲击系数建议取值范围: A 级路面:  $\mu=0\sim0.09$ ; B 级路面:  $\mu=0\sim0.19$ ; C 级路面:  $\mu=0\sim0.41$ 。

(3) 通过文中计算公式和各国规范进行对比分析,得出各国冲击系数计算值大于我国规范规定值;在 C 级路面不平整度下,各国规范偏于不安全,因此,建议在后续规范编制中应适当考虑路面不平整度的影响。

## 参考文献 References

- [1] 袁明,余钱华,颜东煌.基于车-桥系统耦合振动理论的大跨 PC 连续刚构桥冲击系数研究[J].中国公路学报,2008,21(1):72-76,120.  
YUAN Ming, YU Qianhua, YAN Donghuang. Research on impact coefficient for PC continuous rigid frame bridges with long-span under theory of vehicle-bridge system coupling vibration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 72-76, 120.
- [2] 李忠献,陈锋.曲线箱梁桥的车桥相互作用分析[J].工程力学,2007,24(11):93-99.  
LI Zhongxian, CHEN Feng. Analysis Of interaction between vehicle and bridge with curved box girders[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 93-99.
- [3] 黄东洲.曲钢箱梁桥冲击系数的实用计算方法[C]//第十八届全国桥梁学术会议论文集(下册).北京:中国土木工程学会 2008, 819-825.  
HUANG Dongzhou. A practical computation method for impact coefficient of curved beam bridge[C]//The 18th annual national academic conference proceedings bridge. Beijing: China Civil Engineering Society, 2008, 8.
- [4] HUANG D Z. Dynamic analysis of steel curved box girder bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(6): 506-513.
- [5] 单德山,李乔.考虑桩土作用的铁路曲线梁桥车桥耦合振动分析[J].重庆交通学院学报,2004,23(6):10-14.  
SHAN Dshan, LI Qiao. Coupled vibration analysis of rail-way simple supported curved-girder bridges and vehicles with soil structure interaction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(6): 10-14.
- [6] 李小珍,刘孝寒,刘德军.考虑桩-土相互作用的连续刚构桥车桥耦合振动分析[J].振动与冲击,2011,30(12):54-58.  
LI Xiaozhen, LIU Xiaohan, LIU Dejun. Coupled vibration analysis of a railway continuous rigid frame bridge and vehicles with soil-structure interaction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12): 54-58.
- [7] 盛国刚,李传习,赵冰.桥梁表面不平顺对车桥耦合振动系统动力效应的影响[J].应用力学学报,2007,24(1):124-127.  
SHENG Guogang, LI Chuanxi, ZHAO Bing. Dynamic behavior of coupled vehicle bridge systems considering bridge surface roughness[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(1): 124-127.
- [8] 王凌波,马印平,蒋培文,等.连续刚构体系车桥耦合振动敏感性参数研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(8):901-906.  
WANG Linbo, MA Yinping, JIANG Peiwen et al. Sensitive parameter analysis of vehicles-bridge coupled vibration based on continuous rigid frame system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2014, 37(8): 901-906.
- [9] 王凌波,蒋培文,康馨,等.公路连续刚构桥梁车桥耦合共振判定方法[J].中南大学学报(自然科学版),2014, 45(11): 4050-4058.  
WANG Linbo, JIANG Peiwen, KANG Xin. et al. Judging method for coupled vibration resonance of vehicle-bridge of continuous rigid frame bridges[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 4050-4058.
- [10] 周勇军,张晓栋,宋一凡,等.高墩连续刚构桥纵向振动基频的能量法计算公式[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(3):48-54.  
ZHOU Yongjun, ZHANG Xiaodong, SONG Yifan et al. Calculation formula of longitudinal fundamental vibration frequency for continuous rigid frame bridge with high piers based on energy method[J]. Journal of Chang'an University (Natural science edition), 2013, 33(3): 48-54.
- [11] 周勇军,蔡军哲,石雄伟.基于加权法的桥梁冲击系数计算方法[J].交通运输工程学报,2013,8(4): 29-36.  
ZHOU Yongjun, CAI Junzhe, SHI Xiongwei. Computing method of bridge impact factor based on weighted method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 8(4): 29-36.
- [12] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2004 [S].北京:人民交通出版社  
General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60-2004[S]. Beijing: China Communication Press.
- [13] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [14] Canadian Highway Bridge Design Code [S]. Canadian Standards Association, 2006.

- [15] Steel, Concrete and Composite Bridges. Part 2: Specification for Loads: BS 5400-2[S]. British Standards Institute, 2006.
- [16] 蒋培文. 公路大跨径连续体系桥梁车桥耦合振动研究[D]. 陕西: 长安大学, 2012.  
JIANG Peiwen. Coupled vibration between vehicles and highway long-span continuous series bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [17] 周勇军, 赵煜, 贺拴海. 刚构\_连续组合桥梁冲击系数多因素灵敏度分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 97-101.  
ZHOU Yongjun, ZHAO Yu, HE Shuanhai. Multi-parameters sensitivity analysis of impact factors for rigid continuous combine bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 97-101.
- [18] 孙建鹏, 李青宁. 基于传递矩阵法曲线桥的振动特性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(4): 518-523.  
SUN Jianpeng, LI Qingning. The vibration characteristic analysis of curved bridge based on transfer matrix method[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2009, 41(4): 518-523.
- [19] 牛俊武, 郭楠楠, 马文涛. 不同曲率半径对高墩大跨径连续刚构桥抗震性能影响分析[J]. 公路, 2011, 9(9): 137-141.  
NIU Junwu, GUO Nannan, MA Wentao. Effect influence of continuous rigid frame bridge's seismic response under different curvature radius[J]. highway, 2011, 9(9): 137-141.
- [20] 李加武, 卢斌, 刘健新. 墩高及支座剪切刚度对连续梁减震性能影响的试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 39-41.  
LI Jiawu, LU Bin, LIU Jianxin. Experimental study on the effect of pier high and bearing shear stiffness on the seismic-induced behavior of continuous beam[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 3(2): 39-41.
- [21] 宋一凡, 陈榕峰. 基于路面不平整度的车辆振动响应分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 39-43.  
SONG Yifan, CHEN Rongfeng. Analysis method of vehicle vibration response caused by pavement roughness[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 39-43.
- [22] 韩万水, 王涛, 李永庆. 基于模型修正梁格法的车桥耦合振动分析系统[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 47-55.  
HAN Wanshui, WANG Tao, LI Yongqing. Analysis system of vehicle bridge coupling vibration with grillage method based on model updating[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 47-55.
- [23] LIU Xiaogang, FAN Jiansheng, NIE Jianguo, et al. Behavior of composite rigid frame bridge under bidirectional seismic excitations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 1(1): 63-71.

(编辑 吴海西)