

曲率半径对连续曲线梁桥车桥耦合振动的影响

陈水生, 罗 浩, 桂水荣

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘 要 目的 研究某一匝道公路曲线连续箱梁桥的空间车桥耦合振动响应问题, 分析曲率半径对该类桥型车桥耦合振动的影响, 为设计提供参考. 方法 考虑桥梁阻尼比和桥面平整度的影响, 采用通用软件 ANSYS 模拟桥梁, 车辆简化为 16 自由度模型, 再用模态组合法编制了求解公路曲线梁桥车桥耦合方程的 MATLAB 程序并进行动载试验验证. 结果 主梁跨中最大位移响应会随着曲率半径的减小而逐渐增大, 且当曲率半径 $R \leq 120$ m 时, 最大位移响应迅速增大; 当曲率半径大于 120 m 时曲线梁桥的位移冲击系数均小于直线梁桥. 结论 随着曲率半径的减小, 弯矩、扭矩最大冲击系数逐渐增大, 而剪力最大冲击系数变化较小; 在曲率半径由 120 m 减小至 60 m 的过程中, 内力相应的最大冲击系数均迅速增加.

关键词 连续曲线梁桥; 车桥耦合振动; 冲击系数; 位移与内力; Runge-Kutta 算法

中图分类号 TU37; U443.3

文献标志码 A

Effect of Curve Radius on Vehicle-Bridge Coupled Vibration of Continuous Curved Girder Bridge

CHEN Shuisheng, LUO Hao, GUI Shuirong

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

Abstract: The purpose of this paper is to studies the coupling vibration response of a curved continuous box girder bridge on a ramp road and analyzes the influence of curvature radius on the coupling vibration of the bridge, which provides reference for the design. The general software ANSYS was used to simulate the bridge and the vehicle was simplified to a 16-degree-of-freedom model. A MATLAB program for solving the vehicle-bridge coupling equation of curved girder bridge were developed by using modal synthesis method and verified by dynamic load test considering the influence of bridge damping ratio and bridge deck irregularity. The results showed that the maximum displacement response increases with the decrease of curvature radius, and the maximum displacement response increases rapidly when curvature radius is less than 120 m. When the curvature radius is greater than 120 m, the displacement impact coefficient of curved girder bridge is smaller than that of straight girder bridge. With the decrease of curvature radius, the

收稿日期: 2019-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51468018); 江西省自然科学基金项目(20181BAB206043, 20181BAB206041)

作者简介: 陈水生(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事土木工程结构振动及控制、地震响应分析等方面研究.

maximum impact coefficients of bending moment and torsion increase gradually, while the maximum impact coefficients of shear force change slightly. The corresponding maximum impact coefficients of internal force increase rapidly in the process of reducing the curvature radius from 120 m to 60 m.

Key words: continuous curved girder bridge; vehicle-bridge coupling vibration; impact coefficient; displacement and internal force; Runge-Kuntta algorithm

近年来,由于公路建设和城市交通系统的迅速发展,曲线梁桥被广泛应用于高速公路的大中跨桥梁的桥头引道和立交中.相较于直线梁桥而言,曲线梁桥的曲率因素使曲线梁桥存在弯扭耦合效应,结构的受力分析变得更复杂^[1-3].目前,国内外研究成果有:D. HUANG 等^[4]以三跨连续曲线钢箱梁桥为桥型建立有限元模型,而车辆采用11自由度的模型,分析了梁桥的动力响应规律. M. AWALL 等^[5]认为曲率半径对自然频率、模态和竖向位移有重要影响. X. LI 等^[6]利用 ABAQUS 建立了桥梁计算模型,分析了货车横向位置和离心力对曲线桥动力响应的影响. S. LI 等^[7]建立考虑悬挂阻尼和轮胎刚度非线性特性的整车模型,分析了曲线桥的垂向、横向和扭转位移的动态影响因素. 黄新艺等^[8-10]基于剪力柔性梁格理论提出三梁式曲线梁桥模型,研究了曲率半径和桥面不平度等因素对梁桥车桥耦合振动的影响. 宋郁民等^[11-12]针对小半径反向曲线上桥梁有限元模型提出基础刚度计算修正的建议.

已有的研究成果主要集中于车辆荷载作用下的位移冲击效应,而对混凝土连续曲线薄壁箱梁桥的内力冲击效应研究较少. 基于此,笔者采用16自由度的三维车辆模型与空间桥梁模型,并考虑阻尼比和桥面平整度的影响,研究曲率半径对混凝土连续曲线箱梁桥位移与内力冲击效应的影响,为混凝土连续曲线梁桥的设计与计算、运营与养护、加固与维修以及相关研究提供一定的参考.

1 车桥耦合振动分析模型

1.1 车辆模型

车辆模型选用典型的三轴重车,将其简化为车体、车轴、轮胎和弹簧式悬架支撑系统组成的空间体系. 该车模型具有16自由度,即为车体竖向和横向振动、纵向俯仰和侧翻振动,其中悬架支撑系统和轮胎均模拟为线弹性弹簧和阻尼器. 三维车辆模型如图1所示. 车辆动力特性参数同文献[13]. 假定车辆运动过程中各集中质量所受的离心力均作用于质心处.

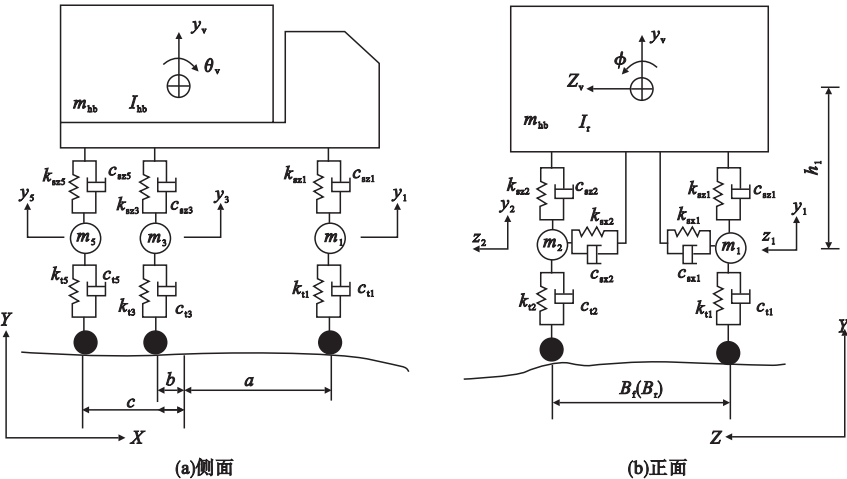


图1 车辆计算模型简图

Fig. 1 Calculation model of the vehicle

根据 D’Alembert 原理,建立车辆运动方程为

$$\boldsymbol{M}_v \ddot{\boldsymbol{Z}} + \boldsymbol{C}_v \dot{\boldsymbol{Z}} + \boldsymbol{K}_v \boldsymbol{Z} = \boldsymbol{F}_v^{\text{int}}. \tag{1}$$

式中: \boldsymbol{M}_v 、 \boldsymbol{C}_v 、 \boldsymbol{K}_v 分别为车辆系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\boldsymbol{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆振动时引起的荷载向量; $\boldsymbol{Z} = [y_1 \ z_1 \cdots y_6 \ z_6 \ y_v \ z_v \ \theta_v \ \phi]^T$ 为车辆各自由度向量.

当车辆通过曲线桥梁时,荷载向量中需考虑离心力.当车辆以速度 v 通过曲率半径为 R 的桥梁时,车体、轮轴质心处产生的离心力 F_{cz} 分别为

$$F_{cz} = \begin{cases} -m_{hb} \frac{v^2}{R_{hb}} & (\text{车体}) \\ -m_i \frac{v^2}{R_i} & (\text{轮轴}) \end{cases} \tag{2}$$

式中: m_{hb} 和 m_i 分别为车体质量和第 i 轮轴质量; R_{hb} 和 R_i 分别为车体重心和车轴质心所处曲线的半径.

1.2 桥梁模型

在笛卡尔坐标系下的桥梁运动方程可表示为

$$\boldsymbol{M}_b \ddot{\boldsymbol{U}} + \boldsymbol{C}_b \dot{\boldsymbol{U}} + \boldsymbol{K}_b \boldsymbol{U} = -\boldsymbol{F}_{bv}^{\text{int}} - \boldsymbol{F}_g. \tag{3}$$

式中: \boldsymbol{M}_b 、 \boldsymbol{C}_b 、 \boldsymbol{K}_b 分别为桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵; \boldsymbol{U} 为桥梁单元节点位移向量; $\boldsymbol{F}_{bv}^{\text{int}}$ 为车辆振动时各车轮作用于桥面的荷载向量; \boldsymbol{F}_g 为车辆自重引起的荷载向量.

采用模态综合法,取 r 阶模态,式(3)可以转换成模态方程,即

$$\boldsymbol{I} \ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{X} \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{\Omega} \boldsymbol{q} = -\boldsymbol{\Phi}^T (\boldsymbol{F}_{bv}^{\text{int}} + \boldsymbol{F}_g). \tag{4}$$

其中,

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

式中: \boldsymbol{q} 为桥梁结构的模态广义坐标列阵; $\boldsymbol{\Phi}$ 为桥梁结构的 r 阶模态向量矩阵; ξ_i 为第 i 阶阻尼比; ω_i 为第 i 阶模态所对应的自振频率.

1.3 模拟桥面平整度

一般情况,可将桥面平整度视为一个平稳的随机过程,可以用功率谱密度函数来描述^[14].通过傅里叶变换后,采用三角级数叠加法对该谱密度函数进行模拟,可得到桥面平整度函数,其桥面平整度样本表达式为^[15]

$$r(x) = \sum_{j=1}^m \sqrt{2} A_j \sin(2\pi x n_{\text{mid},j} + \theta_j). \tag{5}$$

式中: A_j 为每个划分段频率对应的平整度幅值; x 为车辆行驶方向上的位移; $n_{\text{mid},j}$ 为每段空间频率的中值; θ_j 为均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 内的随机变量; m 为空间频率的划分段数.

1.4 车桥耦合模型

假定车辆在行驶过程中,车轮与桥面始终保持接触状态,则由车轮与桥面接触处的相互作用力和变形协调条件将车、桥两子系统进行相关联.考虑桥面平整度,可得第 i 个车轮与桥梁之间的相互作用力为

$$F_{vi}^{\text{int}} = -F_{bvi}^{\text{int}} = k_{ui} d_{vb,i} + c_{ui} \dot{d}_{vb,i}, \tag{6}$$

$$d_{vb,i} = y_i - r_i - \overline{w_i}, i = 1, 2, \cdots, 6. \tag{7}$$

式中: k_{ui} 、 c_{ui} 分别为车辆第 i 个车轮的刚度和阻尼; $\overline{w_i}$ 为第 i 个车轮处桥面初始位移量; r_i 为第 i 个车轮处的桥面平整度幅值; y_i 为第 i 个车轮处的车轮竖向位移量; $d_{vb,i}$ 为第 i 个车轮相对于桥面的竖向位移量.

笔者采用空间单元模拟桥梁模型,用壳单元模拟桥面板及铺装层,因此当车辆在桥面上行驶时,需要通过插值函数将车轮处作用力等效到桥梁单元节点上,其插值函数 N 可表示为^[16]

$$\boldsymbol{N} = [N_i \ N_j \ N_m \ N_n]. \tag{8}$$

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{1}{8} [(\xi_0 + 1)(\eta_0 + 1)(2 + \xi_0 + \eta_0 - \xi^2 - \eta^2) b \eta_i (\xi_0 + 1)(\eta_0 + 1)^2 (\eta_0 - 1) - a(\xi_i + 1)^2 (\xi_0 - 1)(\eta_0 + 1)] = [N_{ys} \ N_{\theta zs} \ N_{\theta xs}], \\ s &= i, j, m, n. \end{aligned} \tag{9}$$

式中: $\xi=(x-x_c)/a,\eta=(z-z_c)/b;\xi_0=\xi\xi_i;$
 $\eta_0=\eta\eta_i;\xi_i=x_i/(|x_i|);\eta_i$ 分别为 a 、 b 为桥
梁单元长度, x_c 、 z_c 为桥梁单元中心的坐标。

经等效后,第 i 车轮相对于桥面的位移
及速度可以表示为

$$d_{vb,i}=y_i-r_i-N_{bi}\Phi q.$$

(10)

$$\dot{d}_{vb,i}=\dot{y}_i-(\dot{r}_i+vN_{bi,x}\Phi q+N_{bi}\Phi \dot{q}).$$

(11)

式中: N_{bi} 为第 i 车轮插值函数; v 为车辆行驶
于桥面上的车速。

考虑桥面平整度的影响后,将式(10)和
式(11)代入式(6),可得车辆作用于桥梁的
惯性力为

$$\mathbf{F}_v^{\text{int}}=\left\{\begin{array}{c}0\\-k_{t1}(y_1-r_1-N_{b1}\Phi q)-\\c_{t1}(\dot{y}_1-\dot{r}_1-vN_{b1,x}\Phi q-N_{b1}\Phi \dot{q})\\ \vdots\\0\\-k_{t6}(y_1-r_1-N_{b6}\Phi q)-\\c_{t6}(\dot{y}_1-\dot{r}_1-vN_{b6,x}\Phi q-N_{b6}\Phi \dot{q})\\0\\0\\0\\0\\0\end{array}\right\}_{16\times 1}$$

(12)

车轮荷载作用于桥梁的竖向荷载矩阵可
以写成

$$\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}}=\sum_{i=1}^{nl}N_i\mathbf{F}_{bvi}^{\text{int}}=\sum_{i=1}^{nl}N_i(\mathbf{F}_v^{\text{int}}+\mathbf{F}_{gi}).$$

(13)

式中: nl 为车轮总数。

单个车轮作用于桥梁的荷载写成向量形式

$$\mathbf{F}_{bvi}^{\text{int}}=k_{ti}(y_i-r_i-N\Phi q)+c_{ti}(\dot{y}_i-\dot{r}_i-\\vN_{bi,x}\Phi q-N\Phi \dot{q})-\mathbf{F}_{gi}.$$

(14)

将式(13)代入式(4)可得

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}}+(\mathbf{X}-\sum_{i=1}^{nl}\Phi^{\text{T}}N_i^{\text{T}}c_{ti}N_i\Phi\cos\gamma)\dot{\mathbf{q}}\cdot\\[\mathbf{\Omega}-\sum_{i=1}^{nl}\Phi^{\text{T}}N_i^{\text{T}}(k_{ti}N_i\Phi+c_{ti}N_{i,x}\Phi)]\mathbf{q}+$$

$$\sum_{i=1}^{nl}\Phi^{\text{T}}N_i^{\text{T}}k_{ti}y_i+\sum_{i=1}^{nl}\Phi^{\text{T}}N_i^{\text{T}}c_{ti}\dot{y}_i=\\-\sum_{i=1}^{nl}\Phi^{\text{T}}N_i(k_{ti}r_i+c_{ti}\dot{r}_i)-\sum_{i=1}^{nl}\Phi^{\text{T}}N_i^{\text{T}}\mathbf{F}_{gi}.$$

(15)

联立式(1)、式(2)和式(15)可得车桥耦
合振动方程为

$$\mathbf{M}_{vb}\ddot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{C}_{vb}\dot{\boldsymbol{\delta}}+\mathbf{K}_{vb}\boldsymbol{\delta}=\mathbf{F}_w+\mathbf{F}_{gc}.$$

(16)

式中: \mathbf{M}_{bv} 、 \mathbf{C}_{bv} 、 \mathbf{K}_{bv} 分别为车桥系统的广义质
量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{F}_w 为桥面平整度引起
的荷载向量; \mathbf{F}_{gc} 为车辆自重和离心引起的荷
载向量; $\boldsymbol{\delta}$ 为桥梁模态广义坐标与车辆系统
运动自由度组成的列阵,即 $\boldsymbol{\delta}=[q_1\cdots q_r\ y_1$
 $z_1\cdots y_6\ z_6\ y_v\ z_v\ \theta_v\ \phi]^{\text{T}}$. 求解该系统运动方程
时,采 Runger-Kutta 数值算法求解^[17-18].

1.5 数值算法和程序设计

笔者基于通用有限元软件 ANSYS 和
MATLAB 平台,先由 ANSYS 生成桥梁的有
限元模型得到桥梁前 20 阶频率和相应的振
动模态,然后采用 Runge-Kutta 数值算法通
过 MATLAB 语言编制相关程序对式(16)进
行求解,并综合考虑了桥面不平度及其速度
项. 求解流程如图 2 所示。

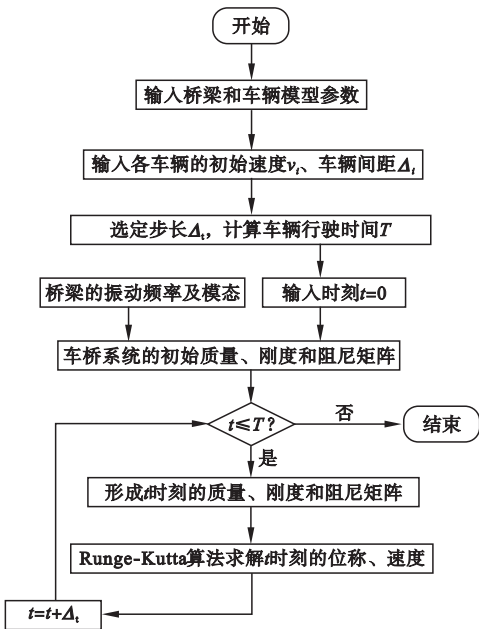


图 2 车桥耦合振动响应求解流程图
Fig. 2 Flow chart of calculating vibration response

2 模态向量的转换

车辆匀速行驶在曲线桥梁上时,其几何位置关系是速度 v 、时间 t 和空间坐标的函数,需要通过坐标转换建立相关联系。

首先在车辆上建立任意运动时刻的移动坐标系,再通过坐标变换得到该时刻车辆在

曲线桥梁上的几何位置. 具体内容如下:

(1)对车辆每个轮轴沿桥梁中心线上建立移动坐标系,以与桥梁中心线相应的轮轴处作为坐标系原点,其中 x 方向沿曲线切向前, y 方向沿桥面垂直向上, z 方向沿曲线法向向外,即图 3 所示的坐标系。

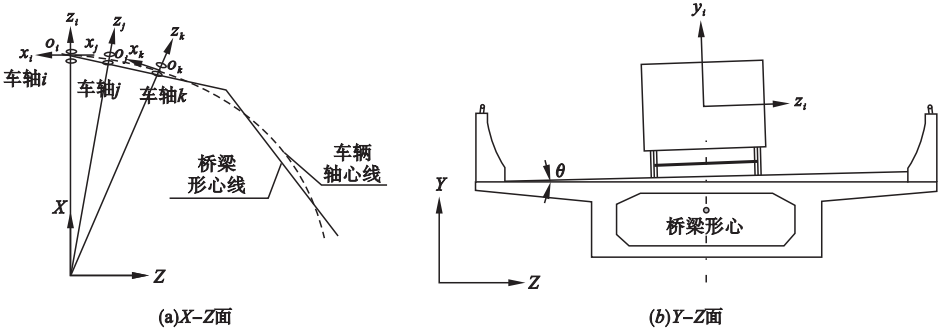


图 3 移动坐标系

Fig.3 Moving coordinate

(2)设车速为 v 的车辆沿桥匀速行驶, t 时刻所驶过的路程为 S_i . 由 S_i 可确定移动坐标系原点在整体坐标系下的坐标 (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) 及其切线与 ox 轴的夹角 α_i 、曲率 ρ_i 和超高角 θ_i ,并建立各移动坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ 、 $o_j x_j y_j z_j$ 和 $o_k x_k y_k z_k$.

(3)将桥梁 $oxyz$ 坐标下节点 $B_i(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$ 的第 k 阶振型位移向量 Φ 转换到移动坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ 下,即

$$\Phi_{i,B} = T\Phi. \tag{17}$$

式中: $\Phi_{i,B}$ 为移动坐标系下的振型位移向量; T 为坐标转换矩阵,其移动坐标系相对整体坐标系绕 Y 轴平面旋转 α_i 角后,又绕 X 轴旋转超高角 θ_i 表达式为

$$T = T_2 T_1 = \begin{bmatrix} \eta & 0 \\ 0 & \eta \end{bmatrix}. \tag{18}$$

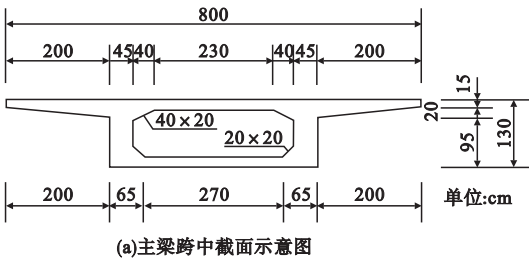
其中,

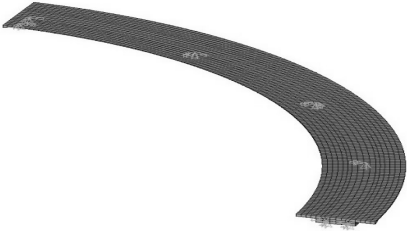
$$\eta = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & 0 & \sin\alpha_i \\ -\sin\alpha_i \sin\theta_i & \cos\theta_i & \cos\alpha_i \sin\theta_i \\ -\sin\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i \end{bmatrix}. \tag{19}$$

3 数值分析方法的工程应用

3.1 工程概况

研究的桥梁对象为位于新余市长青南路立交 A 匝道的普通钢筋混凝土连续曲线箱梁桥^[19],跨径为 4×20 m,主梁为半径 53 m,宽 8 m,高 1.3 m 的单箱单室曲形箱梁,顶板板厚度为 22 cm,腹板厚度为 45 cm,底板厚度为 20 cm. 正中间墩采用 GPZ6GD 盆式橡胶支座进行三向固结和扭转约束,内侧墩采用 GPZ6DX 盆式橡胶支座进行竖向、切向铰接和扭转约束,桥台采用 GPZ2.5SX 盆式橡胶支座进行竖向铰接和扭转约束. 桥梁跨中截面及其有限元模型如图 4 所示。





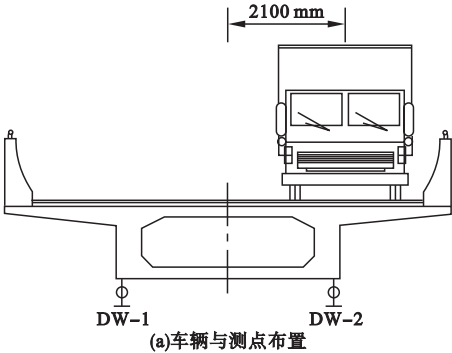
(b)曲线梁桥有限元模型

图4 曲线梁示意图

Fig. 4 Diagram of curved beam

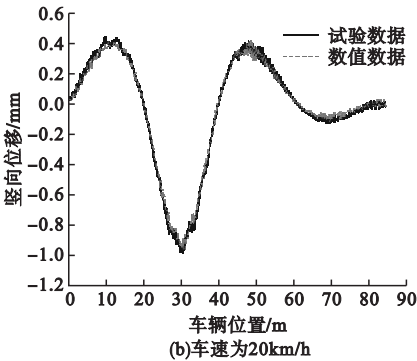
3.2 动载试验研究

为分析车辆荷载对曲线梁桥的振动问题,对3.1节所述的桥梁进行了动载试验,其中选用的试验车辆为32 t三轴载重汽车,轮胎和悬架的刚度系数和阻尼系数见文献[13],



(a)车辆与测点布置

并根据实验结果修改有限元模型,利用笔者编制的数值程序计算桥梁在匀速行驶车辆作用下的动力响应和冲击系数.数值程序计算中,采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比取为 2%,而该桥面铺装完好故平整度等级为“A 级”.图 5 给出了靠外侧行车道行驶且偏心距 $e_0 = 2.1\text{ m}$ 的试验车辆和测点布置,以及试验车速为 20 km/h 时的第二跨跨中外腹板位置 (DW - 2) 的实测和数值计算结果.由图 5 (b)可以看出两者的时程曲线吻合较好,说明了计算程序的适用性.其中有些数据相差较大主要因为检测的数据为毫米级,精度要求高,且难以保证实测时的初始条件与模拟时保持完全一致.



(b)车速为20km/h

图5 跨中竖向位移实测与数值计算时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of measured and numerically calculated vertical displacements in midspan

4 曲率半径对耦合振动的影响

以动载试验的桥型为基础,通过改变曲率半径这一重要影响因素来深入地探讨了车-曲线桥耦合振动问题,着重对曲线桥梁的位移和内力响应变化规律进行了分析,得到一些有益结论,为该类曲线梁桥设计关于曲率半径的取值提供一定的参考.采用笔者编制的数值程序,分别对曲率半径由 60 m 到 300 m,以 30 m 为间距递增以及直线桥,车速由 4 m/s 到 50 m/s,以 2 m/s 为间距递增的各种工况进行了计算与分析.

4.1 位移响应

图 6 给出主梁跨中最大位移与位移冲击

系数随曲率半径和车速的变化关系.由图可看出,主梁跨中最大位移响应会随着曲率半径的减小而逐渐增大,且当曲率半径 $R \leq 120\text{ m}$ 时,最大位移响应急剧增大.虽然最大位移冲击系数在车速 $4 \sim 26\text{ m/s}$ 内不随曲率半径单调增大或减小,但在车速 $26 \sim 50\text{ m/s}$ 内会随着半径的增大而减小.此外,曲率半径在 $120 \sim 300\text{ m}$ 时,曲线梁桥在车速 $4 \sim 50\text{ m/s}$ 内的最大位移冲击系数基本一致,均在 $0.137 \sim 0.141$,且均小于直线梁桥的冲击系数 0.143 ,说明对于曲率半径 $R > 120\text{ m}$ 的混凝土曲线梁桥可以采用直线梁桥的最大位移冲击系数来计算汽车荷载的效应.而当曲率半径 $R < 120\text{ m}$ 时,位移冲击系数迅速增

加,且半径为 60 m 时,冲击系数已达 0.191,

是直线梁桥冲击系数的 1.35 倍.

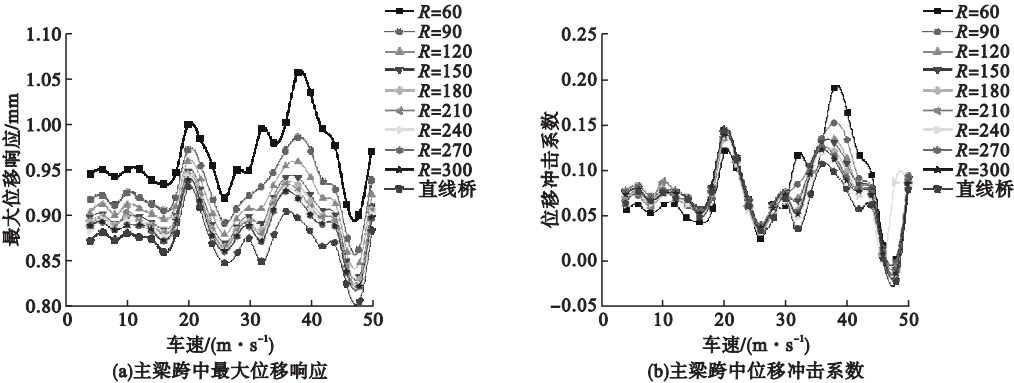


图 6 曲率半径对跨中最大位移与位移冲击系数的影响

Fig. 6 Effect of curvature radius on maximum displacement and displacement impact coefficient in span

4.2 弯矩响应

图 7 为曲率半径对弯矩冲击系数的影响曲线. 由图可知,随着曲率半径的增大,支点弯矩最大冲击系数逐渐减小. 当曲线半径大于 120 m 时,支点、跨中弯矩最大冲击系数随曲率半径的增加其变化均较小. 但在曲率半

径由 120 m 减小至 60 m 的过程中,支点、跨中弯矩最大冲击系数均迅速增加,且支点弯矩最大冲击系数大于跨中. 此外,主梁弯矩冲击系数与位移冲击系数一样,不随车速的增大而单调增大或减小.

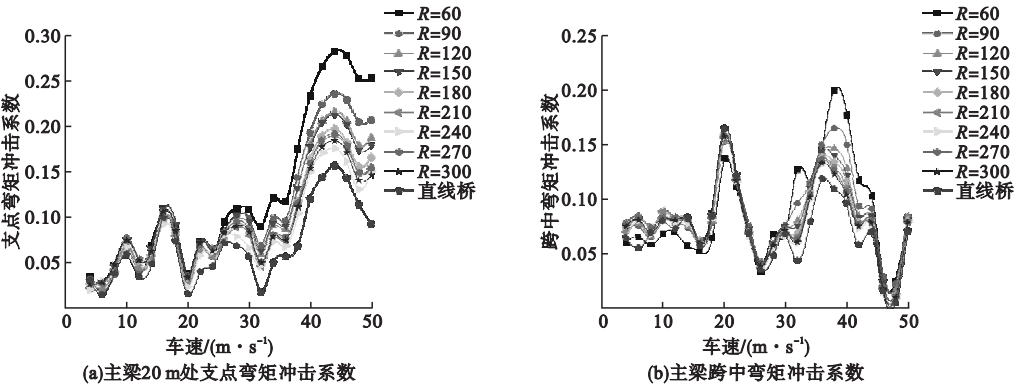


图 7 曲率半径对主梁弯矩冲击系数的影响

Fig. 7 Effect of curvature radius on the moment impact coefficient of main girder

4.3 剪力响应

图 8 为曲率半径对主梁剪力冲击系数的影响曲线. 由图可知,当曲率半径 $R \leq 120$ m 时,支点、跨中剪力冲击系数均随之减小而明显增大. 不同曲率半径下的支点、跨中剪力最大冲击系数基本一致,且支点剪力最大冲击系数大于跨中,表明曲率半径对剪力响应的影响较小. 剪力冲击系数随车速变化而变化,跨中剪力冲击系数不存在随车速单调增大或减小,而支点剪力冲击系数会随车速增大呈

现整体增大趋势.

4.4 扭矩响应

图 9 为曲率半径对主梁扭矩冲击系数的影响. 由图可知,曲率半径对扭矩效应有重要影响. 扭矩冲击系数随着曲率半径的减小而逐渐增大,当曲率半径 $R \leq 120$ m 时,扭转冲击系数对曲率半径的减小更加敏感,曲率半径为 60 m 时,扭矩最大冲击系数已达到 2.10. 支点扭矩冲击系数和跨中扭矩冲击系数基本相同. 此外,扭矩冲击系数虽不存在随

车速的增大而增大或减小,但其整体上是呈增大趋势.

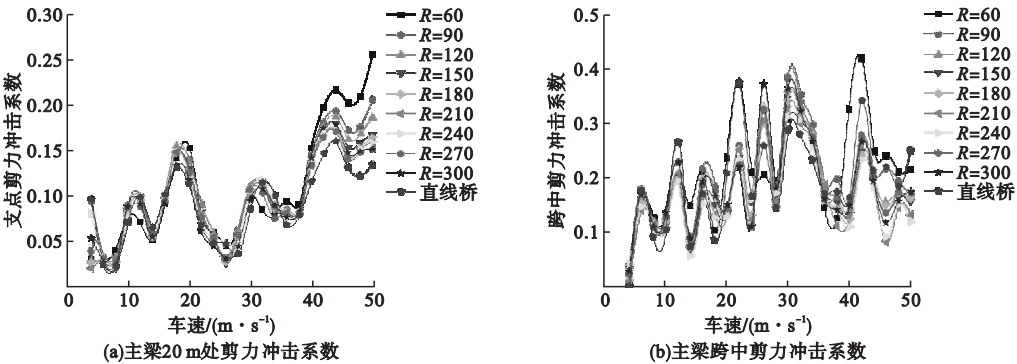


图8 曲率半径对主梁剪力冲击系数的影响

Fig. 8 Effect of curvature radius on shear impact coefficient of main girder

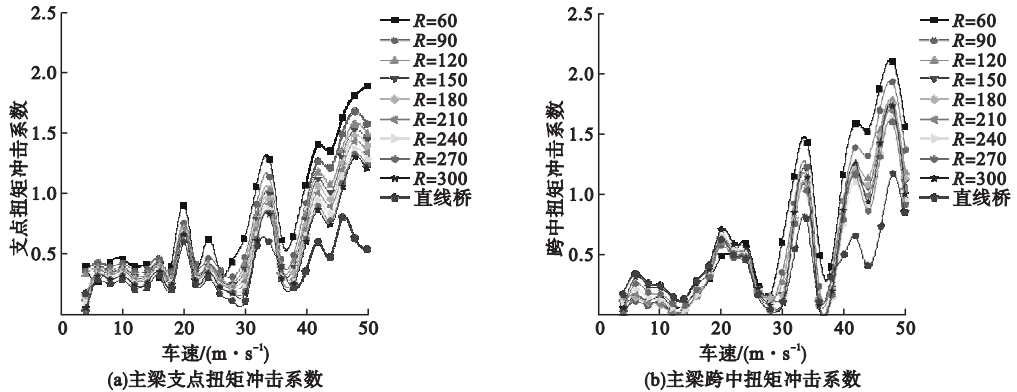


图9 曲率半径对主梁扭矩冲击系数的影响

Fig. 9 Effect of curvature radius on torque impact coefficient of main girder

5 结 论

(1)主梁跨中最大位移响应会随着曲率半径的减小而逐渐增大,且当曲率半径 $R \leq 120$ m 时,最大位移响应迅速增大. 在车速26~50 m/s 内最大位移冲击系数会随着半径的增大而减小. 对于曲率半径 $R > 120$ m 的混凝土曲线梁桥可以采用直线梁桥的最大位移冲击系数来计算汽车荷载的效应.

(2)随着曲率半径的增大,支点弯矩最大冲击系数逐渐减小. 曲率半径对剪力响应的影响较小,且支点剪力最大冲击系数大于跨中. 扭矩冲击系数随着曲率半径的减小而逐渐增大,支点扭矩冲击系数和跨中扭矩冲击系数基本相同. 在曲率半径由120 m 减小至60 m 的过程中,内力相应的最大冲击系数

均迅速增加.

(3)位移和内力响应均不随车速的增大而单调增大或减小,但其中扭矩冲击系数整体上随车速的增大呈增大趋势.

参考文献

[1] 王彪,胥燕军,徐金辉,等. 客货共线铁路桥上曲线参数动力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(8):2891-2899.
(WANG Biao, XU Yanjun, XU Jinhui, et al. Dynamic analysis of mixed passenger and freight railway curve parameters on bridge[J]. Journal of central south university(science and technology),2016,47(8):2891-2899.)

[2] WODZINOWSKI R, SENNAH K, HAMDY M. Free vibration analysis of horizontally curved composite concrete-steel I-girder bridges [J]. Journal of constructional steel research,2018,140:47-61.

[3] 马坤全,张骏. 小半径曲线段槽型梁桥车桥耦合振动研究[J]. 桥梁建设,2018,48(6):24-28.
(MA Kunquan, ZHANG Jun. Study on vehicle-

- bridge coupled vibration of small-radius-curved trough girder bridge[J]. Bridge construction, 2018, 48(6): 24-28.)
- [4] HUANG D. Dynamic analysis of steel curved box girder bridges[J]. Journal of bridge engineering, 2001, 6(6): 506-513.
- [5] AWALL M, TOSHIRO H, TAKASHI M, et al. Effects of bottom bracings on torsional dynamic characteristics of horizontally curved twin I-girder bridges with different curvatures[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2012, 11(2): 149-162.
- [6] LI X, REN J, LIU X. The dynamic response analysis of curved bridge under the moving load[C]. The 3rd international forum on energy, environment science and materials (IFEESM 2017). Paris: Atlantis Press, 2018.
- [7] LI S, REN J. Investigation on three-directional dynamic interaction between a heavy-duty vehicle and a curved bridge[J]. Advances in structural engineering, 2018, 21(5): 721-738.
- [8] 黄新艺, 陈彦江, 李岩, 等. 曲率半径对曲线箱梁桥车辆荷载作用下冲击效应的影响[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 38-42.
(HUANG Xinyi, CHEN Yanjiang, LI Yan, et al. Influence of curvature radius on impact effects of a box-girder curved bridge under moving vehicle loads[J]. Journal of vibration and shock, 2010, 29(1): 38-42.)
- [9] 黄新艺, 杨宁, 卓卫东, 等. 不平度下曲线箱梁桥冲击系数的参数相关性[J]. 公路交通科技, 2015, 32(5): 75-80.
(HUANG Xinyi, YANG Ning, ZHUO Weidong, et al. Parameter correlation of impact factors of curved box-girder bridges under roughness condition[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2015, 32(5): 75-80.)
- [10] 黄晓敏, 黄新艺, 卓卫东, 等. 混凝土连续曲线箱梁桥在多车荷载作用下的冲击效应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 137-142.
(HUANG Xiaomin, HUANG Xinyi, ZHUO Weidong, et al. Impact effect analysis for a continuous concrete curved bridge due to multi-vehicle loading[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(24): 137-142.)
- [11] 宋郁民, 吴定俊, 李奇. 小半径反向曲线桥梁车致振动试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 126-133.
(SONG Yumin, WU Dingjun, LI Qi. Experimental study on train induced vibration of radius and reverse curve bridge[J]. Journal of the China railway society, 2017, 39(9): 126-133.)
- [12] 宋郁民, 吴定俊, 李奇. 小半径曲线上长大桥梁车桥耦合振动分析[J]. 力学季刊, 2013, 34(2): 240-245.
(SONG Yumin, WU Dingjun, LI Qi. Coupling vibration analysis of train curving multi-span bridges on small radius curve[J]. Chinese quarterly of mechanics, 2013, 34(2): 240-245.)
- [13] 桂水荣, 陈水生, 万水. 基于路面一致激励车桥耦合非平稳随机振动分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 908-915.
(GUI Shuirong, CHEN Shuisheng, WAN Shui. Analysis of consistent stimulus of road roughness on vehicle-bridge coupling nonstationary random vibrations[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2018, 38(5): 908-915.)
- [14] DENG L, WANG F, HE W. Dynamic impact factors for simply-supported bridges due to vehicle braking[J]. Advances in structural engineering, 2015, 18(6): 791-801.
- [15] 桂水荣, 陈水生, 万水. 路面谱函数对车桥耦合随机振动敏感性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 353-359.
(GUI Shuirong, CHEN Shuisheng, WAN Shui. Sensitivity analysis of vehicle-bridge coupling random vibration based on road roughness spectral function[J]. Journal of vibration, measurement and diagnosis, 2018, 38(2): 353-359.)
- [16] 胡于进, 王璋奇. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
(HU Yujin, WANG Zhangqi. Finite element analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.)
- [17] 邓露, 何维, 王芳. 不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 70-75.
(DENG Lu, HE Wei, WANG Fang. Dynamic impact factors for simply supported bridges with different cross-section types[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(14): 70-75.)
- [18] 陈水生, 李孟廷, 桂水荣, 等. 多车激励公路简支梁车桥耦合振动响应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3): 101-106.
(CHEN Shuisheng, LI Mengting, GUI Shuirong, et al. Analysis on the vehicle-bridge coupling vibration for highway simple bridges due to moving multi-vehicles loading[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2014, 36(3): 101-106.)
- [19] 晏路曼, 陈水生. 公路曲线梁桥车桥耦合振动分析[C]. 第六届全国土木工程研究生学术论坛论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2009.
(YAN Luman, CHEN Shuisheng. Vibration analysis of vehicle bridge coupling system on highway horizontally curved beam bridge[C]. Proceedings of the 6th national civil engineering graduate academic forum. Beijing: China Civil Engineering Society, 2009.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)