

文章编号:1673-9469(2024)03-0086-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.03.012

汽车荷载作用下桥梁冲击系数影响规律研究

林玉森^{1,2}, 石君龙¹, 常雄飞¹, 齐晓轩¹, 王军文¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043)

摘要: 以三跨连续箱梁桥为研究对象, 建立了桥梁模型和车辆模型从而组成车桥耦合动力模型, 并对车辆荷载作用下桥梁结构的冲击系数进行研究分析。研究表明: 增加横向车道数可以使桥梁的冲击系数增大, 纵向距离越大桥梁冲击系数越小; 车辆在制动状态下的桥梁冲击系数明显大于车辆匀速状态时的冲击系数, 并且车辆在桥梁中跨前半部分制动时, 动力冲击系数要大于后半跨; 车辆在跳车冲击作用下, 桥梁跨中冲击系数明显增大, 且在跨中跳车时, 桥梁动力冲击系数为最大。

关键词: 连续箱梁桥; 车桥耦合振动; 动力学分析; 冲击系数

中图分类号: TB132; U441.3

文献标识码: A

Research on the Influence of Impact Coefficients on Bridges Under the Action of Vehicle Loads

LIN Yusen^{1,2}, SHI Junlong¹, CHANG Xiongfei¹, QI Xiaoxuan¹, WANG Junwen¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University),
Ministry of Education, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Taking a three-span continuous box girder bridge as the research object, a bridge model and a vehicle model are established to form a vehicle-bridge coupled dynamic model, and the impact coefficient of the bridge structure under the action of vehicle load is studied and analysed. The study shows that: the number of transverse lanes increases the impact coefficient of the bridge, the greater the longitudinal distance the smaller the impact coefficient of the bridge; the impact coefficient of the bridge in the braking state of the vehicle is significantly greater than the impact coefficient of the vehicle at constant speed, and when the vehicle brakes in the first half of the bridge mid-span, the power impact coefficient is greater than the second half of the span; the vehicle in the jump impact effect, the impact coefficient of the bridge mid-span increases significantly, and in the mid-span jump when the vehicle The bridge power impact coefficient is the largest.

Key words: continuous box girder bridge; vehicle-bridge coupling vibration; dynamics analysis; impact factor

近年来随着交通的发展,公路车桥振动的研究越来越重要,Zamiri等^[1]利用动力分析方法对桥梁进行易损性评估以减少地震作用对桥梁造成的破坏。Wang等^[2]研究了钢箱梁在车辆荷载作用下的竖向刚度、横向刚度和扭转刚度、刚性中心扣

和连接塔与钢箱梁的弹性约束对桥梁响应的影响。Marchesiello等^[3]建立了具备7自由度的简化车辆模型,对多跨连续板桥的动态响应进行了分析。Yao等^[4]研究了钢箱梁混合梁斜拉桥的耦合振动和动力响应。Liu等^[5]把轮胎的真实瞬态跳

收稿日期:2023-07-14

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2019210215)

作者简介:林玉森(1971-),男,黑龙江绥化人,博士,教授,研究方向为桥梁动力学、车桥耦合振动、桥梁施工控制。

跃引入汽车中,并建立了考虑随机波纹和突变波纹的移动汽车模型。李小珍等^[6]对目前车桥耦合的发展理论及分析模型发展进程进行了全面阐述。邓露等^[7-8]研究发现由于轮胎惯性力引起的不平衡离心力会随着车轮荷载和轮胎刚度的降低及车辆速度的增加而增加。于海峰^[9]通过建立车桥耦合振动仿真系统模型分析了跑车影响下波形腹板钢箱-混凝土简支梁桥的动力响应特性,计算了三座桥梁在单车、双车、会车行驶工况下的桥梁跨中挠度及动力冲击系数,对车辆行驶速度、车辆重量、车辆位置、路面平整度等重要因素进行了参数分析。杨建荣^[10]研究了公路桥梁在车桥耦合作用下的局部振动问题,并根据模态综合法推导出了车桥耦合动力平衡方程,利用自主编写程序分析了车桥耦合振动问题。张帆等^[11]对实体汽车进行了简化,并在此基础上对其进行了数值模拟和求解,采用理论计算和工程实验相结合的分析方式,对跨中挠度反映进行对比。进而验证了有限元计算的精度。周子骥等^[12-13]提出了一种基于跳车效应的车-桥耦合振动分析方法。研究了多因素影响下跳车冲击引起的桥梁动力响应。分析还发现,当出现跳车时,桥面的振动反应将会进一步增强。

伴随着时间的损伤累积,桥面铺装层会产生裂缝、坑槽、车辙等缺陷,对车辆行驶的安全性和舒适性造成很大的威胁。因此对车-铺装-桥耦合系统进行科学系统分析研究,准确获得桥梁及铺装层在各种状态的动力响应,以更好地为桥梁结构设计提供合理的依据。本文主要研究三跨变截面连续箱梁桥在车辆荷载作用下,桥面铺装层动力响应及桥梁冲击系数的变化规律。分析了桥面铺装层和桥梁结构在车辆行驶过程中横向车道数目、纵向车辆数目、纵向车辆间距、制动初速度、桥面不平整度、制动位置以及制动减速度对三跨变截面连续箱梁桥动力响应及冲击系数的变化规律。

1 车桥耦合振动模型建立

1.1 车辆模型

本文建立了三轴卡车车辆动力学实体模型,并假设车体质量均匀分布,车体左右对称,质心位置固定不变;各刚体之间的连接为线性弹簧,阻尼考虑为滞变阻尼,车辆参数见图1、表1。

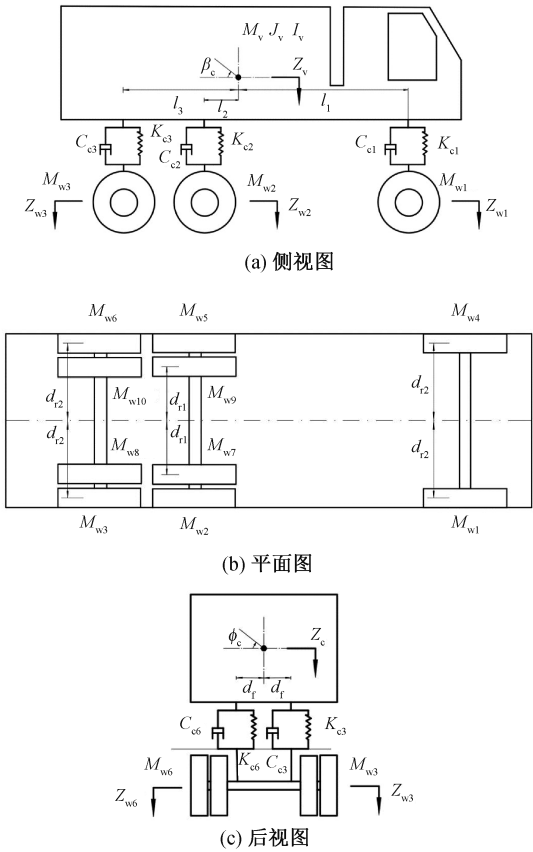


图1 重载车辆动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of heavy-duty vehicle

表1 重载车辆参数

Tab. 1 Parameters of heavy-duty vehicles

参数	数值
满载质量 M_c/t	50
俯仰惯量 $J_c/(kg \cdot m^2)$	845 700
侧倾惯量 $I_c/(kg \cdot m^2)$	34 050
前轴弹簧 $K_{c1}/(kg \cdot m^{-1})$	26 460
前轴弹簧 $C_{c1}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	3 500
后轴弹簧 $K_{c2}/(kg \cdot m^{-1})$	35 561
后轴弹簧 $C_{c2}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	13 658
轮胎质量 M_{wk}/kg	98
前轴到质心距离 l_1/m	3.5
中轴到质心距离 l_2/m	0.6
后轴到质心距离 l_3/m	2.0
车体高/m	1.9
车体长/m	6.5
车体宽/m	2.5
车头高/m	1.75
车头长/m	2.3
车头宽/m	2.4
前后轴距/m	1.37
后轴轴距/m	4.3
前轴轮距/m	2.2
后轴轮距/m	0.36

1.2 桥梁模型

桥梁模型采用 65 m+110 m+65 m 连续箱梁。箱梁顶板横向宽 16.7 m, 底板横向宽 8.5 m; 翼缘悬臂长 4.1 m。箱梁截面参数详见图 2, 变截面连续箱梁桥有限元模型见图 3。

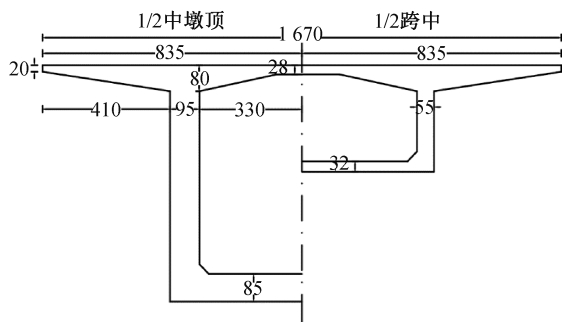


图 2 箱梁桥横截面图(单位:cm)

Fig. 2 Cross section of box girder bridge (unit: cm)



图 3 变截面连续箱梁桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of continuous box girder bridge with variable section

1.3 桥面不平整度

通常情况下,桥面不平整度用功率谱密度函数来表征,国际标准组织使用桥面不平整系数用来评估桥面不平整等级。本文利用谐波叠加法来模拟桥面不平整度。按照《机械振动-道路路面谱测量数据报告》中的规范标准^[14],利用最小二乘法对空间频率的数据进行功率谱密度函数拟合,其表达式如下:

$$G_d(n) = G_d(n_0) (n/n_0)^{-\omega} \quad (1)$$

式中, $G_d(n)$ 表示为位移功率谱密度, m^3 ; $G_d(n_0)$ 表示为参考空间频率处的谱密度, m^3 ; n 表示有效频率带宽范围内的某一空间频率, m^{-1} ; n_0 为参考空间频率,取 0.1 m^{-1} ; ω 表示频率指数,为对数坐标上斜线的频率,它决定路面谱的频率结构。

生成该车桥耦合动力学模型的不平整度谱,如图 4 所示。

2 车桥耦合动力响应求解理论

根据车桥耦合动力系统中车辆与变截面连续梁接触力和位移的关系,建立车桥耦合动力学方程,见式(2)。

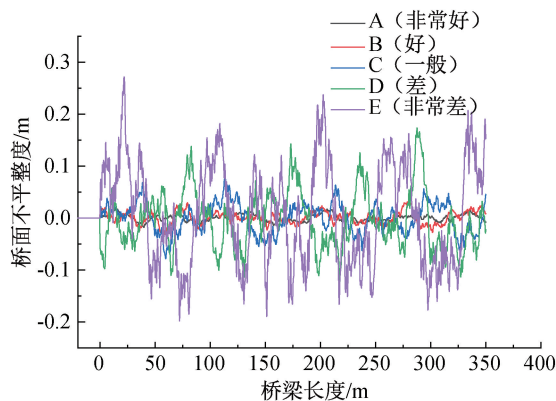


图 4 桥面不平整度等级谱

Fig. 4 Grade spectrum of bridge floor roughness

$$\begin{bmatrix} M_b \\ M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_b \\ \ddot{Z}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b + C_{b-b} & C_{b-v} \\ C_{v-b} & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_b \\ \dot{Z}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b + K_{b-b} & K_{b-v} \\ K_{v-b} & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ Z_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{b-v} \\ F_{v-b} + F_t \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中, M_b, M_v 为车桥耦合系统的质量, $C_{b-b}, C_{b-v}, C_{v-b}$ 为车桥耦合系统的阻尼, $K_{b-b}, K_{b-v}, K_{v-b}$ 为车桥耦合系统的刚度, F_{b-v}, F_{v-b} 为车桥耦合系统产生的作用力, X_b, Z_c 为车桥耦合系统位移, $\dot{X}_b, \dot{Z}_c$ 为车桥耦合系统速度, $\ddot{X}_b, \ddot{Z}_c$ 为车桥耦合系统加速度。

车桥耦合振动方程的求解方法有直接积分法和模态综合法。其中,本文应用的求解方法为模态综合法,其优点在于可以将桥梁响应从物理空间转换到模态空间,并且可以选取桥梁少量模态成分参与积分运算,忽略高阶模态的贡献,从而降低求解的规模,提升计算效率。

本文利用 ANSYS 建立高精度的变截面连续箱梁模型,依托 UM 多刚体动力学软件,建立 Fiala 轮胎模型。将变截面连续箱梁模型导入到 UM 软件中去,剔除刚体模态,结合 UM 中的车辆模型构成车桥耦合动力学模型,如图 5 所示。

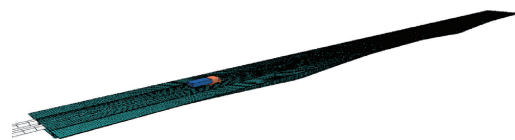


图 5 车桥耦合动力学模型

Fig. 5 Vehicle-bridge coupling dynamics mode

3 三跨变截面连续桥梁动力响应

3.1 冲击系数概述

动力冲击系数通常表征为车辆荷载对桥梁的

动力冲击效应。桥梁在车辆荷载作用下动力响应与车辆荷载静止时动力响应的比值称之为动力放大系数,而冲击系数则等于动力放大系数与1的差值,冲击系数定义如下:

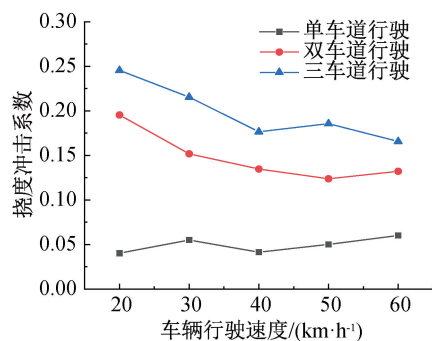
$$\mu = \frac{\delta_d}{\delta_s} - 1 \quad (3)$$

式中, δ_d 为在行车荷载下的最大动力响应; δ_s 为在车辆静态加载时最大静响应,《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[15] 将冲击系数定义为结构基频的函数。

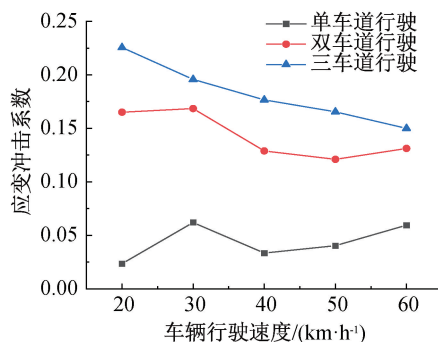
3.2 车队荷载下桥梁动力冲击系数影响

3.2.1 横向加载车道数

车辆行驶速度在 20~60 km/h 这一范围变化,增速为 10 km/h,车辆载重采用 35 t 半载工况,桥面平整度等级设置为 A 级。横向加载车道数为单车道、双车道、三车道,车辆偏载加载,桥梁纵向车辆数布置 1 辆。



(a) 挠度冲击系数



(b) 应变冲击系数

图6 不同横向加载车道数下的桥梁冲击系数

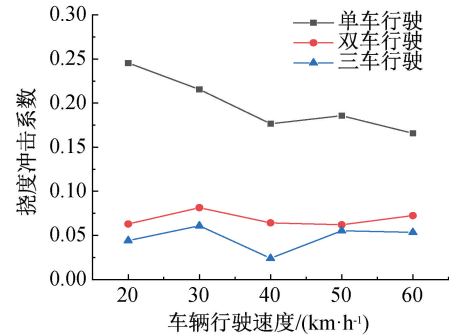
Fig. 6 Impact coefficient of bridge with different number of lanes under lateral load

由图6可知,随着车队荷载横向加载车道数的增加,桥梁中跨跨中动力响应逐渐增大,桥梁动力冲击系数明显增大,这是由于随着车队荷载中横向加载车道数量的增加,桥梁所承受的车辆荷载也随之增加,车辆之间互相作用影响越大,所以导

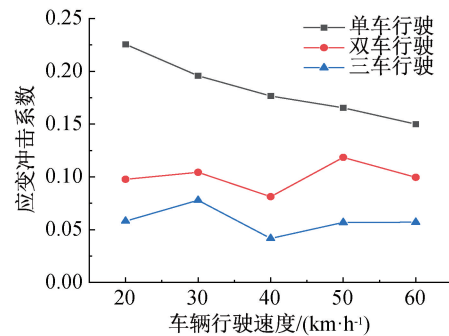
致桥梁动力冲击系数增大。

3.2.2 纵向车辆数

本节选用横向加载车道数为单车道偏载行驶工况,车辆行驶速度在 20~60 km/h 这一范围变化,增速为 10 km/h,车辆载重采用 35 t 半载工况,桥面平整度设置为 A 级,纵向车辆数分别选取 1 辆、2 辆、3 辆,车头间距设置为 10 m。



(a) 挠度冲击系数



(b) 应变冲击系数

图7 不同纵向车辆数下的桥梁冲击系数

Fig. 7 Impact coefficient of bridge under different longitudinal vehicle number

由图7可知,车队荷载中纵向车辆数增加,桥梁中跨跨中动力冲击系数明显减小,这是因为当纵向车辆数增多时增大了桥梁结构的质量,最大动响应增大的幅度不及最大静响应增大的幅度,因此导致冲击系数减小。

3.2.3 纵向车辆间距

用横向加载车道数为单车道偏载加载工况,纵向车辆数布置 3 辆,车辆行驶速度在 20~60 km/h 这一范围变化,增速为 10 km/h,车辆载重采用 35 t 半载工况,桥面平整度设置为 A 级,纵向车辆间距分别设置为 10、20、30 m 的工况。

由图8可知,随着车队荷载纵向车辆间距的增加,桥梁中跨跨中挠度冲击系数与应变冲击系数呈现减小的趋势,且车头间距在 20、30 m 时,桥梁动力冲击系数大小相差不大,这是因为当车队纵向车辆间距较大时,车队在行驶过程中不同车辆

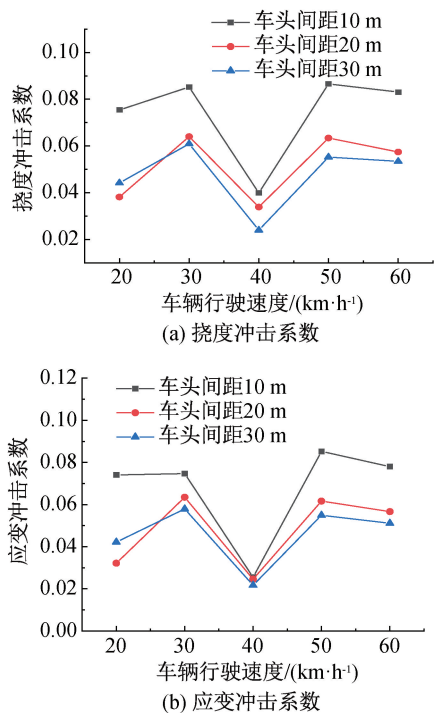


图 8 不同纵向车辆间距下的桥梁冲击系数

Fig. 8 Impact coefficient of bridge under different longitudinal vehicle spacing

之间相互影响的作用就会被削弱,极大程度上减少了车辆对桥梁的冲击作用,从而导致冲击系数减小。

3.3 制动作用下桥梁动力冲击系数分析

3.3.1 初速度及桥面不平整度的影响

车辆在制动状态下车辆初速度和桥面不平整度对冲击系数的影响。车辆初速度控制在 10 ~ 50 m/s,增速为 10 m/s,车辆在桥梁中跨 $L/4$ 处开始制动,减速度 $a = -2 \text{ m/s}^2$,桥面不平整度等级分别为 A、C、E。

由图 9 可知,在车辆以 10 ~ 50 m/s 的初速度通过桥梁时,车辆制动状态与匀速状态下桥梁动力冲击系数变化规律保持一致,与匀速状态下桥梁动力冲击系数相比车辆制动作用下桥梁动力冲击系数要偏大,且应变冲击系数要比挠度冲击系数普遍偏大。因此,在研究车桥耦合作用时,考虑车辆制动作用下的桥梁动力响应尤为重要。

3.3.2 制动位置的影响

桥面不平整度等级为 A 级,采用半载 35 t 的车辆以 30 m/s 的初速度通过桥梁,且车辆前轮分别达到桥梁中跨 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 、 $L/2$ 、 $5L/8$ 、 $3L/4$ 、 $7L/8$ 位置处开始制动,减速度 $a = -2 \text{ m/s}^2$ 。车辆在 7 个位置处制动时桥梁的动力冲击系数如图 10 所示。

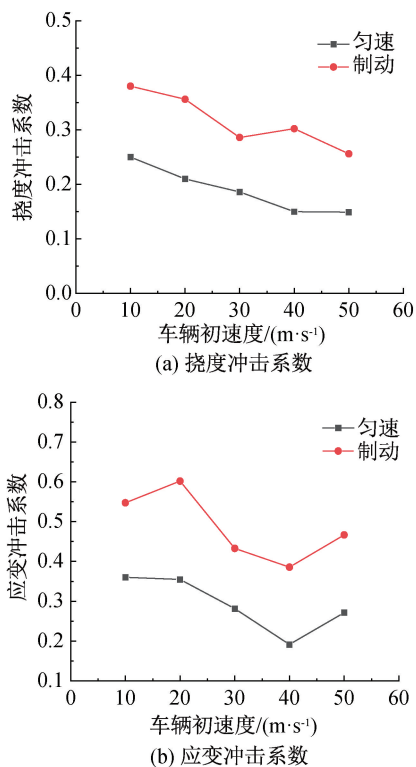


图 9 不同初速度下的桥梁冲击系数

Fig. 9 Impact coefficient of bridge at different initial velocities

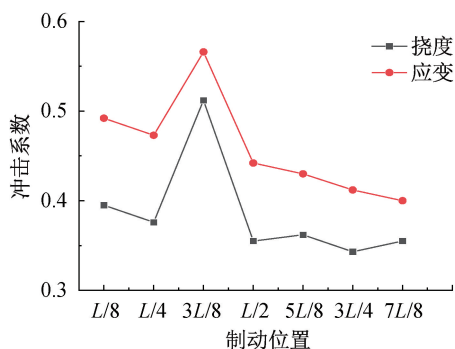


图 10 不同制动位置下的桥梁冲击系数

Fig. 10 Impact coefficient of bridge under different braking position

车辆在桥梁中跨 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 、 $L/2$ 、 $5L/8$ 、 $3L/4$ 、 $7L/8$ 位置处开始制动时,其桥梁动力冲击系数没有单调增加或者单调减少,挠度冲击系数与应变冲击系数保持一致的变化规律。汽车在桥梁 $3L/8$ 处刹车产生的动力冲击系数最大,这是因为汽车制动产生的力发生在跨中附近,故汽车在桥梁 $3L/8$ 处刹车时,桥梁动力冲击系数为最大值。

3.3.3 减速度的影响

桥面不平整度等级定为 A 级,半载 35 t 的汽车以 30 m/s 的初速度通过桥梁,且车辆在桥梁中跨 $L/4$ 位置处开始制动,减速度分别为 $a = 0 \text{ m/s}^2$ 、 $a = -2 \text{ m/s}^2$ 、 $a = -4 \text{ m/s}^2$ 和 $a = -6 \text{ m/s}^2$ 。车辆以不同减

速度通过桥梁时的动力冲击系数如图 11 所示。

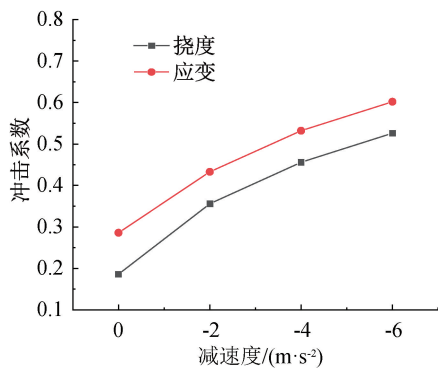


图 11 不同减速度下的桥梁冲击系数

Fig. 11 Impact coefficient of bridge under different acceleration reduction

从图 11 可以看出,车辆减速度绝对值越大,桥梁冲击系数越大。这是因为车辆制动减速度越大,制动力也就越大,轴重重分配之后的前轮力也就越大,故桥梁的冲击系数越大。

3.4 跳车作用下桥梁动力冲击系数分析

3.4.1 跳车高度的影响

桥面不平整度等级设置为 A 级,车速为 20 km/h,车辆中心加载,车辆载重为半载 35 t 加载工况,车辆跳车高度为 6、8、10 cm。

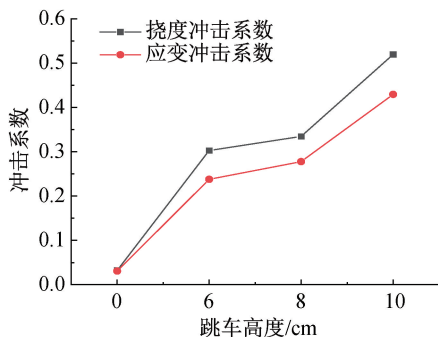


图 12 不同跳车高度下的桥梁冲击系数

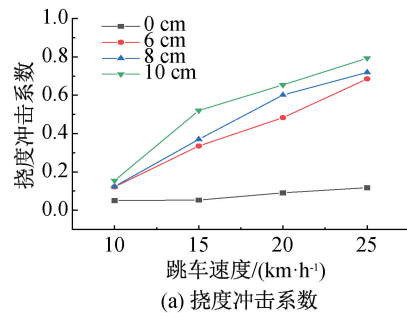
Fig. 12 Impact coefficient of bridge under different jump height

从图 12 可以看出,桥梁动力冲击系数均随着跳车高度的增加而增加,这是因为随着跳车高度的增加,车辆系统所积聚的能量就越大,对桥梁的冲击作用就越明显。

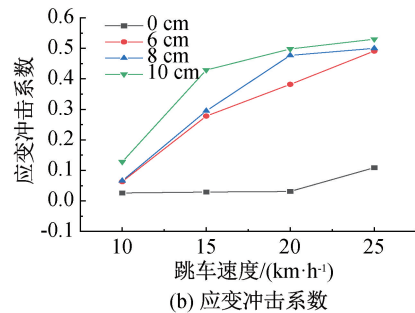
3.4.2 跳车速度的影响

考虑 A 级桥面不平整度,车辆载重设置为半载 35 t,跳车高度为 0、6、8、10 cm,跳车速度为 10、15、20 和 25 km/h。

由图 13 可知,桥梁动力冲击系数均随着跳车速度的增加而增加,且随着跳车高度的增加,桥梁动力冲击系数增加的趋势愈加明显,这是由于速



(a) 挠度冲击系数



(b) 应变冲击系数

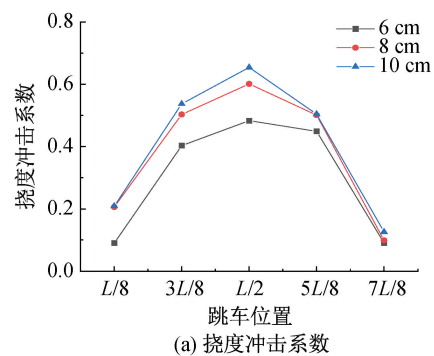
图 13 不同跳车速度下的桥梁冲击系数

Fig. 13 Impact coefficient of bridge under different jump velocities

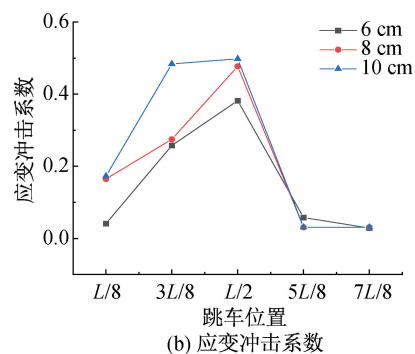
度的增加使车辆系统内的动能增大,而跳车高度的增加,放大了车辆对桥梁的冲击作用。

3.4.3 跳车位置的影响

桥面不平整度等级设置为 A 级,车辆载重设置为半载 35 t,跳车高度为 6 cm,跳车速度为 20 km/h,跳车位置分别设置在中跨 $L/8$ 、 $3L/8$ 、 $L/2$ 、 $5L/8$ 、 $7L/8$ 处,以研究不同跳车位置对三跨变截面连续箱梁桥动力冲击系数的影响规律。



(a) 挠度冲击系数



(b) 应变冲击系数

图 14 不同跳车位置下的桥梁冲击系数

Fig. 14 Impact coefficient of bridge under different jump position

由图 14 可知,桥梁动力冲击系数均随着跳车位置的改变而改变,具体表现为当跳车障碍物布置在中跨跨中位置处($L/2$ 处)时,挠度冲击系数与应变冲击系数皆达到最大,跳车障碍物的布置使得桥梁动力冲击系数明显增大,在布置跳车障碍物的工况下,桥梁动力冲击系数明显大于规范设定值,因此在实际交通中,对障碍物和桥面损伤的检测尤为重要。

4 结论

利用有限元软件 ANSYS 建立桥梁有限元模型,利用多刚体动力学软件 UM 建立 Fiala 轮胎模型以及整车模型,分析了箱梁桥在车队荷载、车辆制动和跳车冲击作用下动力冲击系数的变化规律。可得出如下结论:

1)在车队荷载影响下,横向加载车道数的增加使桥梁动力冲击系数变大,但桥梁动力冲击系数随着纵向车载数量的增加和车辆间距的增大而减小。

2)车辆在制动状态下的桥梁动力响应要大于车辆匀速状态下的动力响应,并且随着桥面不平整度变差,冲击系数不断增大。

3)在制动力的影响下,桥梁动力冲击系数随着减速度绝对值的增大而增大,且车辆在桥梁前半跨制动比车辆在桥梁后半跨制动产生的冲击系数要大,因此要加强对桥梁的检修工作,以延长其使用寿命。

4)车辆在跳车冲击作用下,桥梁跨中截面动力响应及冲击系数明显增大,且随着跳车高度的增大呈现增大的趋势;当车辆以较高车速跳车时,车辆跳车冲击作用对桥梁动力响应影响显著,桥梁冲击系数远超规范设定。

参考文献:

- [1] ZAMIRI Arya, BANAN Mohammad-Reza, BANAN Mahmoud-Reza. Fragility assessment for horizontally curved reinforced concrete box girder bridges using as-built data [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2020, 45(3): 1349-1369.
- [2] WANG Shunfeng, YU Long, YANG Fei, et al. Effect of steel fiber distribution on the mechanical properties of UHPC caused by vehicle-bridge coupling vibration [J]. Composites Part B, 2022, 245: 110201.
- [3] MARCHESIello S, FASANA A, GARIBALDI L, et al. Dynamic of multi-span continuous straightbridges subject to multi-degrees of freedom moving vehicle excitation [J]. Journal of Soundand Vibration, 1999, 224(3): 541-561.
- [4] YAO Yadong, XU Baishun, WANG Yan. Research on the train-bridge coupled vibration and dynamic performance of steel box hybrid girder cable-stayed railway bridge [J]. Tehnicki vjesnik-Technical Gazette, 2020, 27(2): 656-664.
- [5] LIU X W, LUO H Z, HUANG X C. Simulation of vehicle-bridge coupling vibration considering the transient jump of the wheel [J]. International Journal of Computational Methods, 2008, 5(04): 595-606.
- [6] 李小珍, 王 铭, 晋智斌, 等. 车-桥耦合振动 2020 年度研究进展 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(S1): 135-141.
- [7] 邓 露, 凌天洋, 何 维, 等. 用于公路车-桥系统振动分析的精细化轮胎模型 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(04): 108-116.
- [8] 邓 露, 陈雅仙, 韩万水, 等. 中小跨径公路混凝土简支梁桥冲击系数研究及建议取值 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 69-78.
- [9] 于海峰. 基于 UM 仿真的波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥车桥耦合振动研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [10] 杨建荣. 车-桥耦合作用下公路桥梁局部振动研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [11] 张 帆, 李之达, 彭龙帆. 基于跳车试验的桥梁动力响应数值模拟 [J]. 交通科技, 2017(06): 51-53.
- [12] 周子骥, 高芳清, 米聪聪. 跳车冲击过程中的桥梁动态位移响应分析 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(02): 133-137.
- [13] 周子骥. 跳车冲击作用下的桥梁动力响应研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 机械振动-道路路面谱测量数据报告: GB/T 7031—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

(责任编辑 王利君)