

车辆作用下等截面低墩连续刚构桥与连续梁桥 动力响应对比分析

桂水荣¹,朱朝阳¹,陈水生¹,赵 辉¹,谢阳福²

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;2. 中铁八局集团第二工程有限公司,四川 成都 610000)

摘 要 目的 研究某等截面低墩连续刚构桥的车致振动响应问题,对比分析相同跨径布置下不同桥梁结构类型(连续梁桥和连续刚构桥)的车桥耦合动力响应。方法 运用 ANSYS 软件建立桥梁空间有限元模型,采用 9 自由度空间车辆模型,通过模态综合法和 Newmark- β 数值积分方法对车桥耦合方程进行迭代求解。结果 连续刚构桥跨中挠度大于连续梁桥,跨中正弯矩和墩顶负弯矩小于连续梁桥,连续刚构桥和连续梁桥的第一跨跨中弯矩和挠度均大于第二跨跨中弯矩和挠度。结论 与同跨径连续梁桥相比,墩梁固结的连续刚构桥可以减小主梁正、负弯矩;连续刚构桥的冲击系数需按竖弯振型特征频率计算。

关键词 连续刚构桥;连续梁桥;动力响应;车桥耦合振动;冲击系数

中图分类号 TU37;U441.3

文献标志码 A

Comparative Analysis of Dynamic Response between Continuous Rigid Frame Bridge and Continuous Bridge with Constant Cross Section and Low Pier under Vehicle

GUI Shuirong¹, ZHU Zhaoyang¹, CHEN Shuisheng¹, ZHAO Hui¹, XIE Yangfu²

(1. Department of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013; 2. The Second Construction LTD of China Tiebaju Civil Engineering Group, Chengdu, China, 610000)

Abstract: The purpose of this paper is to study the vehicle-bridge coupling vibration response of a continuous rigid frame bridge with constant cross section and low pier. The dynamic responses of continuous rigid frame bridge subjected to a moving vehicle were compared with the dynamic responses of a continuous bridge with the same cross section and span layout. The software of ANSYS was used to build the bridge space finite element model and the vehicle was simplified to

收稿日期:2020-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(12062006);江西省自然科学基金项目(20181BAB206043, 20181BAB206041)

作者简介:桂水荣(1979—),女,副教授,博士,主要从事公路桥梁车桥耦合振动等方面研究。

a 9-degree-of-freedom model. The model of vehicle-bridge coupling vibration was solved through the Newmark- β numerical integration method while the modal synthesis superposition technology was used in the model. The results show that the mid-span deflection of continuous rigid frame bridge is larger than that of continuous bridge, and the positive bending moment in the mid-span and the negative bending moment on the top of the pier are smaller than the continuous bridge. Both the bending moment and deflection of the first mid-span of the continuous rigid frame bridge and the continuous bridge are greater than the bending moment and deflection of the second mid-span. Compared with the continuous bridge of the same span, continuous rigid frame bridges with piers and beams consolidation can reduce the positive and negative bending moments of the main beam. The impact coefficient of the continuous rigid frame bridge needs to be calculated according to the characteristic frequency of the vertical bending mode.

Key words: continuous rigid frame bridge; continuous bridge; dynamic response; vehicle-bridge coupling vibration; impact coefficient

随着中国经济社会的快速发展,交通运输行业突飞猛进,截至2019年末,我国公路桥梁87.83万座,相比2018年增加了2.68万座。2019年全年公路完成营业性货运量343.55亿吨,占全部货运量74.3%,公路运输已经成为现代运输行业的主力军^[1]。公路运输业快速发展的同时,车辆的超速和超载现象也越来越普遍,给在役公路和城市桥梁的安全运营带来了很大的压力和挑战。

国内外学者针对重载车辆车桥耦合振动展开了广泛研究。桥面不平顺对桥梁冲击系数影响显著,桥面等级劣化导致冲击系数大幅增加,定期维护能有效减小车辆对桥梁的冲击效应^[2-3];但车速对桥梁动力响应影响呈波动分布,没有明显的规律^[4-5]。相同车辆结构动力参数,轻车能引起较大的冲击系数,但桥梁静态响应较小;重车冲击系数较小,但桥梁静响应较大,对桥梁造成的损伤更大,限制超载尤为重要^[6-7]。车桥耦合振动受车辆参数影响明显,同时桥梁结构动力特性参数对车桥耦合振动响应的影响,将指导桥梁结构动力特性设计。邓露^[8]研究五座简支梁桥冲击系数,结果显示不同截面形式桥梁的冲击系数相差较大,桥梁截面类型引起的冲击系数差异不可忽略。桂水荣^[9]分析相同截面形式的简支梁桥和先简支后连续梁桥的冲击系数,先简支后连续梁桥有更好

的整体性,结构体系转换能有效减小冲击系数。李小珍^[10]、梁爱婷^[11]考虑桩土相互作用,指出软弱地基连续刚构桥的车辆荷载对连续刚构桥横向振动将产生较大影响。周亮福^[12]对比了主跨110 m的刚构-连续组合梁桥、连续梁桥和连续刚构桥的车桥耦合动力响应,研究表明连续刚构桥能显著降低跨中截面的动应变。

已有研究主要针对车辆动力特性、桥梁结构形式等因素对冲击系数的影响展开,结构体系对车致振动响应的研究主要集中于大跨度桥梁,而对中小跨径的连续刚构桥的车桥耦合振动响应研究较少。基于此,笔者以两座相同跨径布置的等截面连续刚构桥和连续梁桥为对象,研究桥梁结构体系对车桥耦合动力响应影响的差异。结果表明,相比于连续梁桥,连续刚构桥的桥墩与主梁固结,减小了主梁所受的弯矩。研究结果可为连续刚构桥和连续梁桥的设计计算及相关研究提供理论参考。

1 车桥耦合方程的建立

1.1 车辆振动方程

选取公路桥梁上常用的三轴自卸汽车为研究对象,考虑车体的竖向振动、纵向点头、侧倾,以及车轮的竖向振动,将自卸汽车简化为三维9自由度的弹簧-质量-阻尼车模

型,车辆模型如图1所示。车辆模型各参数意义同文献[13]。

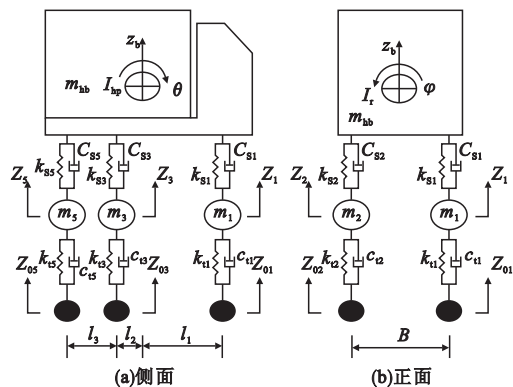


图1 车辆模型的正视图和侧视图

Fig. 1 Front view and side view of vehicle model

根据达朗贝尔原理,建立车辆振动方程如下

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{z} = \mathbf{F}_v^{\text{int}}. \quad (1)$$

式中: \mathbf{M}_v 、 \mathbf{C}_v 、 \mathbf{K}_v 分别为车辆的质量、阻尼、刚度矩阵; $\mathbf{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆行驶过程中,车辆各自由度振动引起的惯性荷载列向量; $\mathbf{z} = [z_1 \cdots z_6 \ z_v \ \theta_v \ \varphi_v]^T$ 为车辆振动自由度列向量。

1.2 桥梁振动方程

运用有限元分析方法,将桥梁结构进行离散,建立桥梁振动方程:

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_b \mathbf{y} = -\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} - \mathbf{F}_g. \quad (2)$$

其中: \mathbf{M}_b 、 \mathbf{C}_b 、 \mathbf{K}_b 分别为桥梁的质量、阻尼、刚度矩阵; \mathbf{y} 为桥梁单元节点位移向量; $\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}}$ 为车辆行驶过程中,车辆振动引起作用于桥面的荷载向量; \mathbf{F}_g 为车辆自重作用于桥面的荷载向量。

采用模态综合叠加技术^[14-15],对式(2)进行分解,桥梁结构取 r 阶模态,式(2)可转化为

$$\mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{X} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Omega} \mathbf{q} = -\mathbf{\Phi}^T (\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} + \mathbf{F}_g). \quad (3)$$

式中: \mathbf{I} 、 \mathbf{X} 、 $\mathbf{\Omega}$ 分别为对角质量、阻尼、刚度矩阵; $\mathbf{\Phi}$ 为模态向量矩阵; \mathbf{q} 为桥梁结构的广义坐标列阵。

1.3 桥面不平顺模拟

桥面不平顺是引起车桥耦合振动的一个

主要激励,国内外学者及规范均采用功率谱来描述路面不平顺^[16]。笔者以文献[17]中建议路面功率谱表达式来研究桥面不平顺引起车桥耦合随机振动响应。

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\omega}. \quad (4)$$

式中: n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_d(n_0)$ 是空间频率为 n_0 时的路面功率谱密度; n 为空间频率, m^{-1} ; ω 为拟合频率指数,取 $\omega = 2$ 。

路面不平顺样本模拟时,国内外学者通常将路面不平顺视为平稳高斯随机过程,将功率谱密度函数进行傅里叶变换,运用谐波叠加法(三角级数法)模拟桥面不平顺:

$$r(x) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2G_d(n_i)\Delta n} \sin(2\pi n_i x + \theta_i). \quad (5)$$

式中: n_i 为第 i 个波频; Δn 为空间频率的间距; x 为车辆行驶方向的位移; θ_i 为 $0 \sim 2\pi$ 均匀分布的随机变量; m 为空间频率的划分段数。

1.4 车桥耦合振动方程

联立式(1)和式(3),结合车轮与桥面接触点的位移协调和相互作用力的条件,可得车桥耦合振动方程

$$\mathbf{M}_{vb} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_{vb} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{vb} \mathbf{u} = \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_g. \quad (6)$$

式中: \mathbf{u} 为车桥耦合广义坐标列向量, $\mathbf{u} = [q_1 \cdots q_r \ z_1 \cdots z_6 \ z_v \ \theta_v \ \varphi_v]^T$; \mathbf{M}_{vb} 、 \mathbf{C}_{vb} 、 \mathbf{K}_{vb} 分别为车桥耦合系统的广义质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{F}_w 为桥面不平顺引起的动荷载列向量; \mathbf{F}_g 为车辆自重引起的动荷载列向量;采用 Newmark- β 数值积分法求解车桥耦合系统^[18-19]。

2 有限元模型建立及动力特性对比分析

桥梁结构动力特性直接决定桥梁动力性能,体现桥梁结构动力特性的参数主要包括自振频率、振型和阻尼比等。桥梁各阶频

率和其振型特征取决于桥梁结构体系、刚度和质量分布以及支承条件,研究桥梁结构动力特性,对桥梁进行抗震、车桥耦合振动及抗风等研究具有重要意义。

2.1 有限元模型建立

某城市高架桥于 2019 年 4 月建成通车,笔者以其中某一联为研究对象,该联为 3 × 35 m 等截面预应力混凝土连续刚构桥。该桥设计为双向六车道,最大车速 80 km/h,相比高墩大跨度连续刚构桥,该桥桥墩较低,采用 10.8 m 的双柱式花瓶墩。主梁采用双箱单室截面,单片主梁高 2.2 m、宽 11.75 m、腹板厚 0.7 m、顶板厚 0.25 m、底板厚 0.3 m,两片箱梁之间通过现浇混凝土湿接缝并张拉横向预应力束连接,桥梁上部结构及桥墩横断面如图 2 所示。连续刚构桥边墩处端横梁下采用 QZ10000-DX 和 QZ10000-SX 球形钢支座,中间两个桥墩与主梁固接。主梁为 C55 节段预制混凝土箱梁,桥墩采用 C40 混凝土,桥面铺装采用 2 mm 聚合物改性沥青防水层 + 6 cm AC-20 中粒式沥青混凝土 + 4 cm SMA-13 细粒式沥青混凝土^[20]。

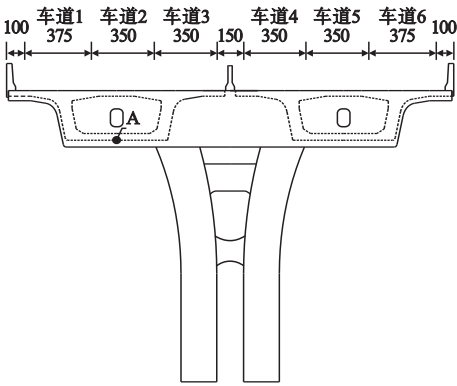


图 2 桥梁横断面及车道布置面

Fig. 2 Bridge cross section and lane layout

以连续刚构桥截面尺寸及跨径布置为基础,建立相同跨径和截面形式的连续梁桥,研究低墩中小跨径连续刚构桥与连续梁桥动力特性的差异。将桥墩的约束设计为一个固定支座,两个单向支座和一个双向支座。连续梁桥的车道布置与连续刚构桥相同。

通过 ANSYS 软件建立桥梁有限元模型。主梁和桥墩采用 Solid64 实体单元模拟,桥面铺装层采用 Shell63 壳单元模拟,纵向每 1 m 一个单元,钢筋及预应力钢束对结构动力特性的影响,通过截面换算刚度予以考虑。连续刚构桥有限元模型如图 3 所示,连续梁桥有限元模型如图 4 所示,其中 X 轴为横桥向,Y 轴为高程,Z 轴为顺桥向。

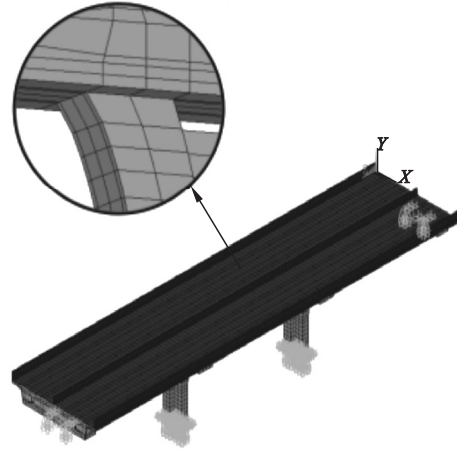


图 3 连续刚构桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of continuous rigid frame bridge

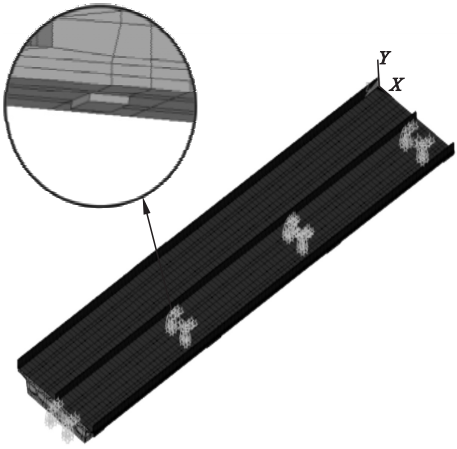


图 4 连续梁桥有限元模型

Fig. 4 Finite element model of continuous bridge

2.2 动力特性对比分析

对连续刚构桥和连续梁桥的有限元模型进行分析,提取成桥状态下连续刚构桥和连续梁桥前 5 阶自振频率及振型,结果见表 1。

表 1 连续梁桥与连续刚构桥前 5 阶振型对比

Table 1 The first five modes of continuous bridge and continuous rigid frame bridge				
阶数	连续梁桥 频率/Hz	振型特征描述	连续刚构 桥频率/Hz	振型特征描述
1	4.696	主梁正对称 竖弯振动	1.967	桥墩顺桥向弯曲振动 + 主梁纵向振动
2	5.389	主梁反对称 竖弯振动	3.807	桥墩横向弯曲振动 + 主梁横向振动
3	6.847	主梁扭转振动	4.636	主梁正对称竖弯振动
4	6.969	主梁扭转振动	5.427	主梁反对称竖弯振动
5	7.158	主梁竖向对称振动	6.105	主梁扭转振动

从连续梁桥和连续刚构桥的频率和振型可知:

(1)连续梁桥和连续刚构桥前两阶竖弯振型对应的频率相差仅 1.5%,但连续梁桥首阶竖弯振型出现在第 1 阶频率,连续刚构桥首阶竖向弯曲振型出现在第 3 阶频率。

(2)连续刚构桥第 1 阶振型为桥墩顺桥向弯曲振型,桥墩弯曲伴随引起全桥顺桥向水平振动,连续刚构桥顺桥向抗推刚度小,这一性能能有效减小温度、混凝土收缩徐变和水平地震等作用引起桥梁次内力的影响。第 2 阶振型为全桥横向振动,桥墩横向刚度对连续刚构桥的动力特性有较大影响,该类桥梁横桥向动力响应同样是研究重点。

表 2 连续刚构桥与连续梁桥各跨跨中最大动响应对比

Table 2 Comparison of maximum mid-span response of continuous rigid frame bridge and continuous bridge							
荷载工况	桥梁类型	第一跨跨中		第二跨跨中		第三跨跨中	
		位移/ mm	弯矩/ (kN·m)	位移/ mm	弯矩/ (kN·m)	位移/ mm	弯矩/ (kN·m)
工况一	连续刚构桥	0.594 1	2 421	0.533 7	2 110	0.589 0	2 403
	连续梁桥	0.551 3	2 495	0.429 7	2 292	0.556 4	2 483
工况二	连续刚构桥	0.499 7	2 080	0.431 4	1 772	0.495 1	2 074
	连续梁桥	0.469 7	2 159	0.360 3	1 938	0.468 1	2 150
工况三	连续刚构桥	0.393 7	1 694	0.328 2	1 449	0.393 3	1 706
	连续梁桥	0.382 9	1 822	0.285 1	1 553	0.381 6	1 827

连续刚构桥和连续梁桥支点负弯矩对跨中正弯矩有卸载作用。从表 2 中可以看出,

3 车致振动响应对比分析

3.1 车辆加载位置

此次研究的连续刚构桥和连续梁桥上部结构均为双箱单室宽箱梁,两片主梁横向通过预应力钢束连接,车道横向加载对主梁内力影响较明显。为研究车辆横向加载车道位置对桥梁结构动力响应的影响,选取 1.1 节三轴自卸车,车辆分别沿车道 1(工况一),车道 2(工况二),车道 3(工况三)中心线匀速行驶(见图 2)。车道 2 和车道 3 设计车速为 80 km/h,车道 1 设计车速为 60 km/h,下文车辆行驶速度 60 km/h,桥面路况采用文献[20]建议的 B 级桥面,其中正弯矩和挠度的研究点位为每跨跨中箱梁底板中心,即图 2 中 A 点。各跨跨中最大动响应对比结果见表 2。

三种工况下连续梁和连续刚构桥边跨跨中动力响应均大于中跨跨中动力响应,后续研究

以第一跨跨中截面为研究截面进行分析。

连续刚构桥第一跨跨中位移动响应与连续梁桥动响应相比,工况一下提高了7.76%,工况二下提高了6.39%,工况三下提高了2.82%;连续刚构桥第一跨跨中正弯矩动响应与连续梁桥动响应相比,工况一下降低了2.97%,工况二下降低了3.66%,工况三下降低了7.03%。车辆荷载对边跨跨中截面动响应的影响,连续刚构桥跨中动位移大于连续梁桥,连续刚构桥跨中正弯矩小于连续梁桥。

对于第一跨跨中响应,工况一作用下连

续刚构桥桥跨中位移和弯矩分别是工况三的1.51倍和1.43倍,是工况二的1.19倍和1.16倍;工况一作用下连续梁桥的跨中位移和弯矩分别是工况三的1.44倍和1.37倍,是工况二的1.17倍和1.16倍。连续刚构桥动响应受车辆横向加载位置的影响比连续梁桥略大,且车辆越靠近桥梁中心线行驶,桥梁的动响应曲线越平滑。

笔者以第一个固结墩的墩顶主梁为研究对象,不同工况下连续刚构桥和连续梁桥的墩顶负弯矩时程曲线如图5所示。

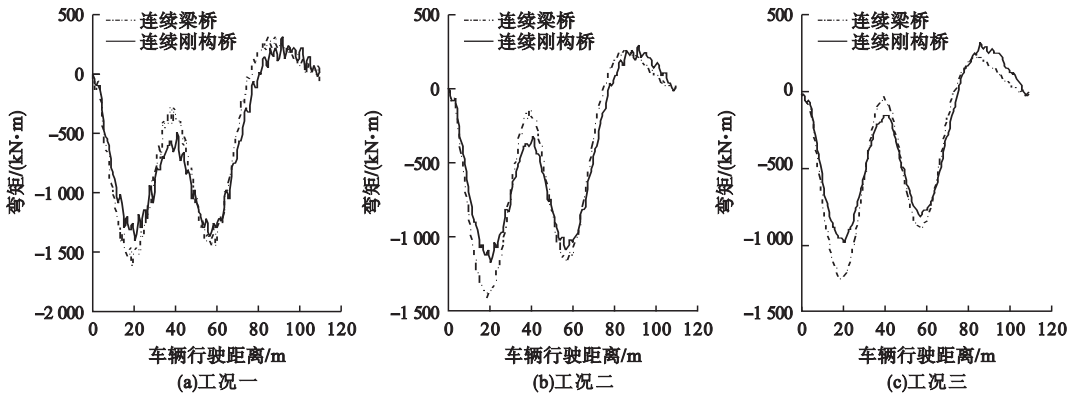


图5 连续梁桥与连续刚构桥墩顶弯矩图

Fig. 5 Comparison of negative bending moment of continuous bridge and continuous rigid frame bridge

从图5可以看出,3种工况下连续梁桥墩顶负弯矩峰值均大于连续刚构桥。连续刚构桥和连续梁桥的工况一负弯矩均最大,分别为1 415 kN·m和1 620 kN·m。3种工况下连续梁桥的负弯矩分别为连续刚构桥的1.14倍、1.20倍和1.24倍。桥梁结构体系对负弯矩的影响大于对正弯矩的影响。

3.2 车速

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),当结构基频 f 在1.5~14 Hz时,冲击系数 μ 可按式(7)计算:

$$\mu = 0.1767 \ln f - 0.0157. \tag{7}$$

将表1结构的竖向频率带入式(7),可得连续梁桥和连续刚构桥规范的冲击系数,结果见表3。表中 μ_1 为跨中挠度和跨中弯矩冲击

系数, μ_2 为支点负弯矩冲击系数。连续刚构桥因第一阶为桥墩顺桥向弯曲+主梁顺桥向移动振型,第二阶为桥墩横桥向弯曲+主梁横桥向移动振型,计算冲击系数 μ_1 的频率取第三阶频率, μ_2 的频率取第四阶频率。

表3 连续梁桥与连续刚构桥冲击系数对比

Table 3 Impact coefficient of continuous bridge and continuous rigid frame bridge

桥梁类型	计算方法	μ_1	μ_2
连续刚构桥	按竖弯振型	0.255	0.283
	按频率阶次	0.104	0.221
连续梁桥	按竖弯振型	0.258	0.282

连续刚构桥和连续梁桥的冲击系数随车速的变化关系见图6。从图中可以看出,除个别车速外,不同车速下连续刚构桥的挠度、

正弯矩和负弯矩冲击系数均大于连续梁桥的冲击系数;冲击系数与车速未展现明显的变化规律,但两种桥型冲击系数峰值对应的车速相同。

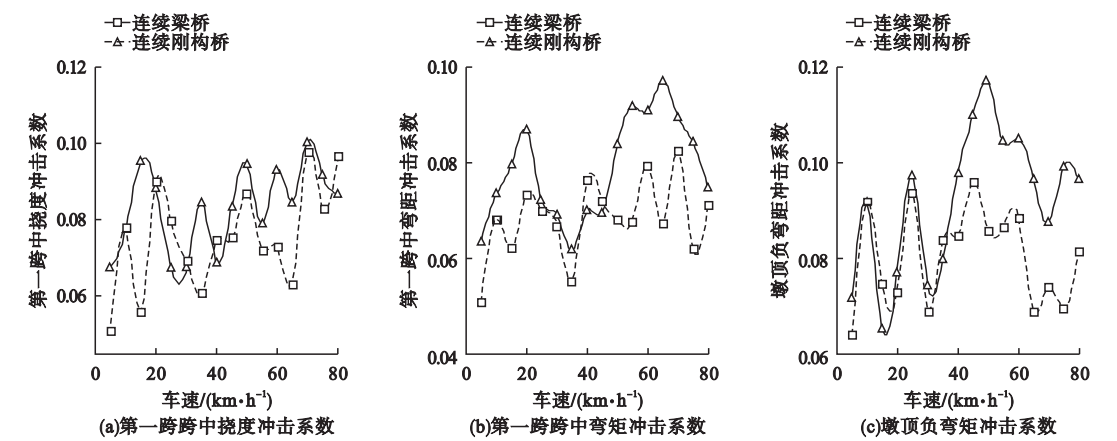


图6 连续梁桥与连续刚构桥冲击系数对比分析

Fig. 6 Comparison of impact coefficients of continuous rigid frame bridge and continuous bridge

按第一阶频率计算的连续刚构桥冲击系数为0.104,第二阶频率负弯矩冲击系数为0.221。车速为70 km/h,第一跨跨中挠度冲击系数最大,为0.097 7;车速为65 km/h,第一跨跨中弯矩冲击系数最大,为0.097 2。跨中弯矩和挠度冲击系数的最大值均接近0.104,按频率计算的连续刚构桥冲击系数偏不安全。竖向弯曲振型对应频率所得冲击系数为0.255,能包含不同车速的冲击系数。连续刚构桥设计时,冲击系数取值按振型特征对应频率来计算更合理。

4 结 论

- (1)连续刚构桥与连续梁桥主梁动力特性接近,一阶竖弯振型对应频率相差1.3%。连续刚构桥桥墩与主梁固结,第一阶、第二阶振型表现为桥墩弯曲振型。
- (2)等跨布置的三跨连续刚构桥和三跨连续梁桥,边跨对中跨受力具有卸载作用,连续刚构桥跨中动位移大于连续梁桥,连续刚构桥跨中正弯矩和墩顶负弯矩小于连续梁桥。
- (3)荷载横向布置对宽箱连续刚构桥和连续梁桥的动力响应影响较大,车辆行驶在外侧车道时桥梁的动力响应明显大于车辆行驶在内侧车道,且横向布载方式对连续刚构

桥的影响大于连续梁桥。

(4)连续刚构桥跨中挠度、正弯矩和负弯矩冲击系数均大于连续梁桥;连续刚构桥的冲击系数需按竖弯振型特征频率计算。

参考文献

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2019 年交通运输行业发展统计公报 [N]. 中国交通报, 2020-05-12(002).
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on transportation development in 2019 [N]. China transport news, 2020-05-12(002).)

[2] 冀伟,邓露,何维,等. 公路波形钢腹板 PC 简支箱梁桥冲击系数的计算分析 [J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 35-39.
(JI Wei, DENG Lu, He Wei, et al. Calculation and analysis of impact factors of highway simply supported pc box girder bridge with corrugated steel webs [J]. Bridge construction, 2016, 46(3): 35-39.)

[3] 罗媛,颜东煌,袁明. 随机车辆冲击作用下简支梁桥疲劳可靠度评估 [J]. 计算力学学报, 2018, 35(4): 417-423.
(LUO Yuan, YAN Donghuang, YUAN Ming. Fatigue reliability assessment of simply supported bridges subject to impact of stochastic vehicle loads [J]. Chinese journal of computational mechanics, 2018, 35(4): 417-423.)

[4] LI Y, CAI C S, LIU Y, et al. Dynamic analysis of a large span specially shaped hybrid girder bridge with concrete-filled steel tube arches [J]. Engineering structures, 2016, 106(1): 243-260.

[5] DENG L, YU Y, ZOU Q L, et al. State-of-the-art review of dynamic impact factors of

- highway bridges [J]. Journal of bridge engineering, 2014, 20(5): 04014080.
- [6] 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.
(DENG Lu, CHEN Yaxian, HAN Wanshui, et al. Studying impact factors for short-and medium-span simply supported concrete highway bridges and its suggested values [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(1): 69–78.)
 - [7] HAN W S, YUAN Y G, HUANG P M, et al. Dynamic impact of heavy traffic load on typical T-beam bridges based on WIM data [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2017, 31(3): 1–14.
 - [8] 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.)
 - [9] 桂水荣, 陈水生, 任永明. 先简支后连续梁桥车辆冲击系数影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 54–60.
(GUI Shuirong, CHEN Shuisheng, REN Yongming. Research on influencing factors of impact coefficient of continuous beam bridge transformed from simply-supported structure subjected to moving vehicle loads [J]. Journal of highway transportation research and development, 2011, 28(5): 54–60.)
 - [10] 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 bridges and vehicles with soil-structure interaction [J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(2): 54–58.)
 - [11] 梁爱婷, 王世斌, 李林安, 等. 非线性桩–土作用对车桥耦合振动的影响研究[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 96–103.
(LIANG Aiting, WANG Shibin, LI Lin'an, et al. Study on influence of soil-pile nonlinear interaction on vehicle bridge coupling vibration [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(12): 96–103.)
 - [12] 周亮福, 扈振涛, 李杰, 等. 基于 LS-DYNA 的偶数跨刚构–连续梁桥车桥耦合振动分析[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 90–97.
(ZHOU Liangfu, HU Zhentao, LI Jie, et al. Vehicle-bridge coupling vibration of even span rigid frame-continuous beam bridge based on LS-DYNA [J]. Highway engineering, 2019, 44(4): 90–97.)
 - [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 and diagnosis, 2018, 38(5): 908–915.)
 - [14] 陈水生. 公路车桥耦合振动响应计算方法对比研究[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(3): 18–25.
(Chen Shuisheng. Comparative research on the calculating methods for coupling highway vehicle-bridge system [J]. Journal of east China jiaotong university, 2011, 28(3): 18–25.)
 - [15] 陈代海, 李整, 刘琼, 等. 公路桥梁 2 种车桥耦合振动分析方法的对比研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7): 1449–1456.
(CHEN Daihai, LI Zheng, LIU Qiong, et al. Comparative research on two analysis methods for vehicle-bridge coupling vibration of highway bridges [J]. Journal of railway science and engineering, 2017, 14(7): 1449–1456.)
 - [16] 陈水生, 罗浩, 桂水荣. 曲率半径对连续曲线梁桥车桥耦合振动的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 290–298.
(CHEN Shuisheng, LUO Hao, GUI Shuirong. Effect of curve radius on vehicle-bridge coupled vibration of Continuous curved girder bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 290–298.)
 - [17] 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/T7031–2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data: GB/T7031–2005 [S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2005.)
 - [18] 桂水荣. 基于桥面不平顺公路梁桥车桥耦合随机振动研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
(GUI Shuirong. Research of deck irregularity excitation on highway vehicle-bridge coupling random vibrations [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
 - [19] 陈水生, 赵辉, 李锦华, 等. 车桥耦合振动的非平稳桥面激励的模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 808–818.
(CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, et al. Simulation of nonstationary bridge deck excitation of vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 808–818.)
 - [20] 桂水荣, 尧晨, 谢阳福, 等. 逐跨节段拼装连续刚构桥力学性能及桥墩参数研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(5): 57–62.
(GUI Shuirong, YAO Chen, XIE Yangfu, et al. Study of mechanical property and pier parameters for continuous rigid-frame bridge constructed using span-by-span segmental assembly [J]. World bridges, 2020, 48(5): 57–62.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)