

桥梁伸缩缝跳车冲击效应的模型实验研究

林云, 章伟, 丁勇*

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 建立了由弹性车轮和刚性车体组成的车辆模型及槽型铝合金桥梁模型, 通过步进电机控制系统牵引车辆匀速移动, 对移动车辆通过桥梁伸缩缝时的局部冲击与整体冲击效应进行了实验研究. 局部冲击效应用车辆经过伸缩缝处时的前轮动态轮压作为评价指标, 整体冲击效应则用桥梁跨中动挠度代表. 实验表明, 桥梁伸缩缝跳车时的局部冲击效应显著, 而整体冲击效应不明显. 实验同时分析了行车速度、小车质量及伸缩缝宽度等对冲击效应的影响.

关键词: 车辆模型; 桥梁模型; 动态轮压; 跨中挠度; 冲击系数

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 01-0103-05

文献[1-3]表明, 车辆经过桥梁伸缩缝处时会产生跳车现象, 这种跳车不仅会对行车舒适性及驾驶稳定性造成影响, 而且冲击荷载也会加速伸缩缝与桥梁结构的损坏. 这种冲击荷载对桥梁结构的影响可以用车轮荷载的冲击系数表示, 根据影响范围的不同, 又可以分为局部冲击和整体冲击. 美国桥梁规范^[4]和英国桥梁规范^[5]都规定了车轮荷载在伸缩缝上的局部冲击系数, 但是数值相差很大, 分别为 0.75 和 0.33. 中国桥梁规范^[6]尚没有针对伸缩缝的局部冲击系数, 只是对桥梁结构提出局部冲击系数为 0.3. 根据 Roeder 等^[7]的实测, 丁勇等^[8]的数值模拟, 该冲击系数取值偏小. 因此, 桥梁伸缩缝跳车的局部冲击效应还没有形成共识. 伸缩缝跳车对桥梁结构的整体冲击目前没有在各规范中专门规定. González 等^[9]通过数值模拟说明, 伸缩缝跳车对桥梁跨中最大弯矩的影响可忽略, 而对支座最大剪力的影响则不能忽略, 但目前尚没有整体冲击效应的实验研究.

本文采用模型实验的方法^[10], 对伸缩缝跳车造成的局部冲击和整体冲击进行了研究. 期间建立了车辆与桥梁的缩尺物理模型, 对车辆经过桥梁伸缩缝以及全桥时的支座动反力和跨中动挠度

进行了研究, 分析了伸缩缝跳车冲击效应的影响因素, 包括行车速度、小车质量及伸缩缝宽度等, 并探讨了伸缩缝跳车的机理.

1 车辆与桥梁的缩尺模型

1.1 桥梁模型

基于实际桥梁的长宽比, 刚度及自振频率等参数, 最终桥梁模型采用 6063 系列槽型铝合金单梁. 主梁纵断面如图 1(a)所示, 模型桥总长为 380 cm, 计算跨度 377 cm. 横截面尺寸如图 1(b)所示, 底面宽度为 10.5 cm, 截面高度为 5 cm, 底面厚度为 0.16 cm, 侧面厚度为 0.2 cm. 桥体长度及断面尺寸是配合桥梁第一阶自振频率预设值所设计, 梁的第一阶理论自振频率为 9.16 Hz. 通过在跨中底部安装 LVDT 测量的桥梁第一阶自振频率为 8.93 Hz, 误差仅为 4.0%, 表明一阶自振频率理论值与实测值基本一致.

试验桥梁模型如图 2 所示, 槽型铝合金简支梁为三跨简支梁, 主梁支座一端采用滚动轴承简支(图 2(b)); 另一端直接简支在同一水平高度的 2 个竖向动态力传感器之上(图 2(c)). 桥梁支座固定在具有一定重量的型钢上, 从而降低外界振动及噪

收稿日期: 2015-05-03.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究计划(2015C33036); 宁波市自然科学基金(2012A610163); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2015-2-47); 宁波市科技服务业示范项目(2015F1008); 宁波大学科研基金(理)(XYL13011).

第一作者: 林云(1966—), 男, 福建莆田人, 实验师, 主要研究方向: 结构工程. E-mail: linyun1@nbu.edu.cn

*通信作者: 丁勇(1975—), 男, 浙江余姚人, 博士/教授, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

声对桥梁产生的影响,将主梁与边梁之间预留一定宽度的平行缝来模拟实际桥梁伸缩缝(图 2(d)).

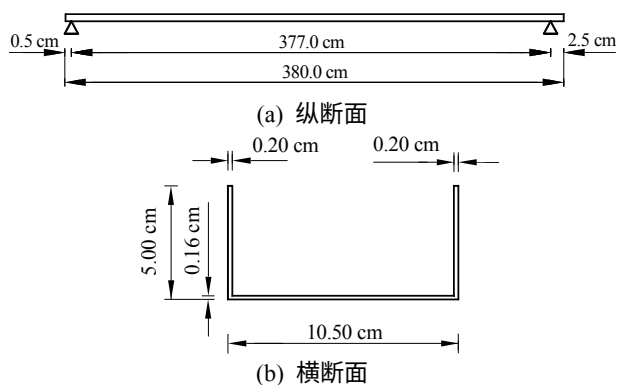


图 1 模型桥梁的构造

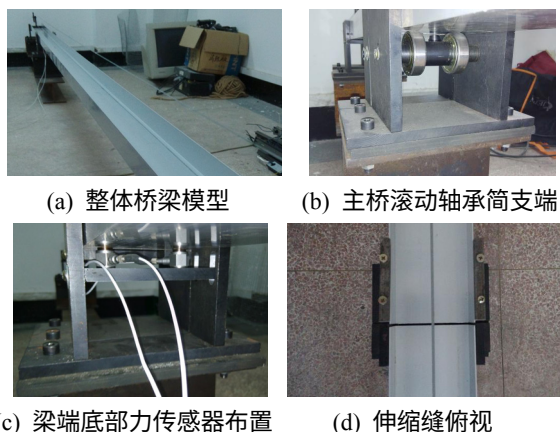


图 2 桥梁模型

1.2 车辆模型

考虑实际车辆的长宽比、轴距、轮距、压痕长度与车轮直径比、车辆重量及悬架系统等参数,最终试验车辆是由弹性车轮和刚性车体组成的车辆模型如图 3 所示。

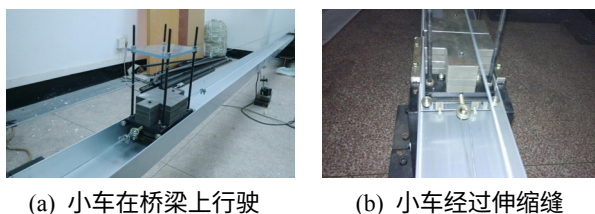


图 3 车辆模型

车辆模型长度为 15 cm, 宽度 9 cm, 前后轴距为 10 cm, 车轮直径为 2.6 cm, 同轴左右轮距 8 cm. 由于悬挂连接杆与车体之间的摩擦阻力过大使得弹簧作用不明显, 实际试验车辆弹簧改为刚性连接. 车体质量可以通过加减砝码块来调整。

车辆模型的轮胎内层为小轴承, 轮胎外层为质地较软的硅胶. 局部冲击试验研究对于车轮模型要求较高, 尤其是轮胎与桥面之间沿行车方向要有一定的接触长度, 可以模拟实际充气车轮与桥面之间的顺桥向接触长度. 因此小车轮胎模型最终选择了材质较软的硅胶材料, 使车辆模型车轮压痕长度与车轮半径的比例与实际车辆相接近. 本例中加载 4.6 kg 的小车, 车轮压痕长度为 6.4 mm.

1.3 测量仪器系统

信号采集系统采用北京东方振动和噪声技术研究所的 INV3018A 数据分析仪, 最高采样频率为 51.2 kHz, 线性位移计(LVDT)为 GA-10 型号, 支座压力用 PCB 压电式动态力传感器, 灵敏度为 $11.11 \text{ mV} \cdot \text{N}^{-1}$, 加速度用扬州科动的压电式加速度传感器测试, 采样频率为 0.2~2 kHz. 小车牵引系统如图 4 所示, 由步进电机、驱动器、控制器、电源组成. 小车由步进电机牵引, 而步进电机可由控制器输入程序来控制改变电机转动速度, 程序可对电机实现无极调节, 试验中小车的实际速度可以控制在 $0 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的任一值。

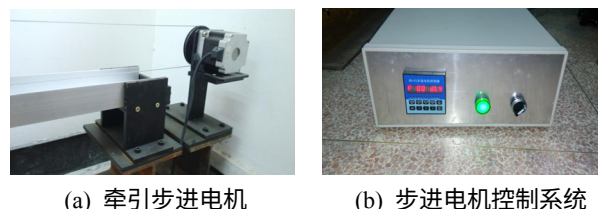


图 4 小车牵引系统

由于小车是从静止开始加速, 为使小车上桥前以一个稳定的车速运行, 在模型桥梁的前段设计一段长为 1.3 m 的加速区段, 相应的在桥梁的另一端设计一段长为 0.5 m 的减速缓冲区段使车辆安全停止, 这样总体上形成了一个 3 跨简支梁桥模型, 如图 5 所示. 缓冲区末端安置调速的步进电机, 另一端为一固定的牵引滑轮, 电机带动连接车辆的钢丝绳作为车辆的动力来源, 试验中通过改变控制器的程序输入来调节电机转速, 使车辆在不同的速度下运行. 通过信号数据线将试验装置上

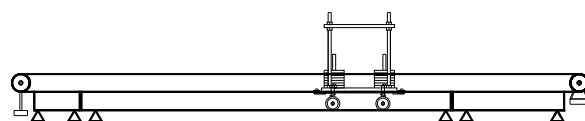


图 5 总体桥梁模型示意图

的力传感器和位移传感器与信号采集系统相连接。

2 冲击实验工况

2.1 局部冲击试验

伸缩缝局部冲击试验时, 小车总重先定为 4.6 kg。局部冲击试验具体步骤如下:

(1) 将伸缩缝宽度设置成 0 mm。

(2) 车辆速度从 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 分为 10 个不同速度进行试验, 测量桥梁端底部冲击力并对试验数据进行采集记录。

(3) 将伸缩缝距离设置成 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm, 重复进行试验步骤(2)。

梁端底部设置 2 个冲击力传感器, 传感器所测合力应为桥梁端部对传感器的动态压力变化值。由图 1 可以看出, 传感器接触点位置距离桥端部仅为 0.5 cm, 因此在小车经过伸缩缝上桥的短距离内, 通过力的平衡关系将动态压力变化值与轮压对滚动轴承筒支端取矩应相等计算出的差值非常小可忽略不计, 可将所测得传感器合力等同于前轮动态轮压。

2.2 整体冲击试验

整体冲击试验主要研究小车在伸缩缝上的跳车对于桥梁跨中最大弯矩、挠度的影响。整体冲击试验具体步骤如下:

(1) 先将伸缩缝宽度设置成 0 mm。

(2) 车辆速度从 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 分为 10 个不同速度进行试验, 测量桥梁跨中挠度, 并对实验数据进行采集记录。

(3) 小车上加载不同质量的砝码块, 每次加载重复进行试验步骤(2), 直至增加到车辆总质量为 4.6 kg 为止, 实验中小车共有 5 种不同的质量状态。

(4) 将伸缩缝距离设置成 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm, 重复进行试验步骤(2)和(3)。

3 实验结果及分析

3.1 局部冲击结果及分析

根据图 6 可以看出, 小车动态轮压峰值与伸缩缝宽度呈线性增加关系, 意味着相同速度情况下, 前轮轮压峰值随着伸缩缝的宽度增大而增大。伸缩缝宽度为 1.5 mm 时, 小车前轮轮压峰值随行车速度变化(图 7)。在 4 种不同宽度伸缩缝情况下, 计

算出小车前轮轮压冲击系数(图 8)。从图 8 可看出, 速度小于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 无论是哪一种伸缩缝宽度, 小车前轮轮压峰值是随小车行驶速度增大而增大, 并且局部冲击系数最大为 0.75, 已远超中国规范所规定的 0.3 局部冲击系数的上限值。

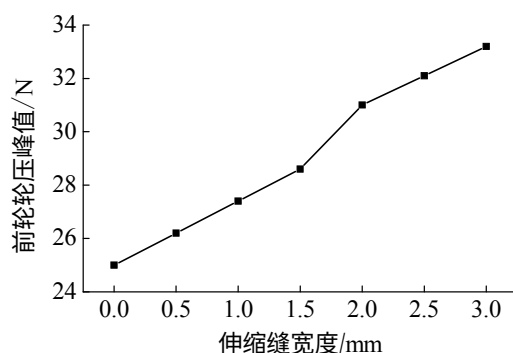


图6 前轮轮压峰值与伸缩缝宽度关系

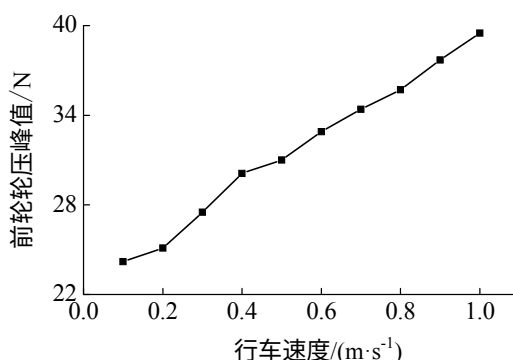


图7 前轮轮压峰值与行车速度关系

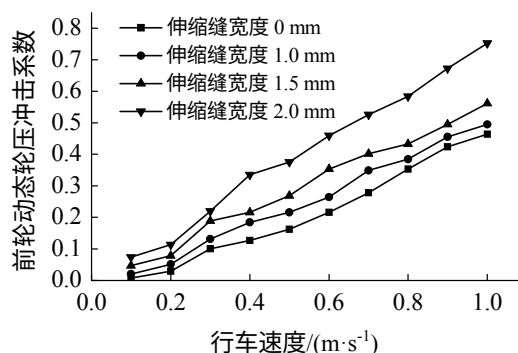


图8 前轮轮压局部冲击系数与行车速度关系

从图 9 可以看出, 在不同伸缩缝宽度下前轮动态轮压峰值出现的位置都是在离伸缩缝端部 4~5.5 mm 范围内, 即在车轮压痕长度 6.4 mm 范围, 因此对于伸缩缝附近位置在实际桥梁设计及运营过程中要加强重视局部冲击的影响。在这样短距离内就达到最大, 同样也验证了 2.1 节所述可将传

感器动态力峰值近似等同于动态轮压峰值。

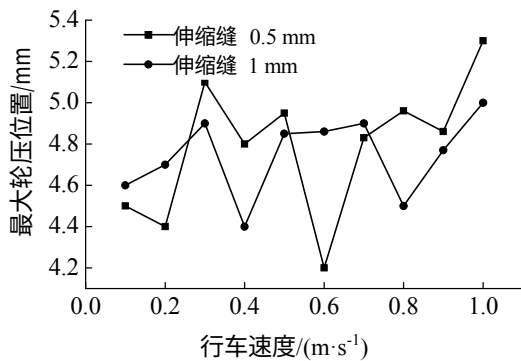
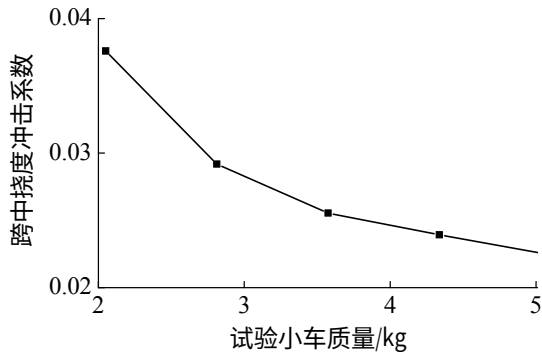


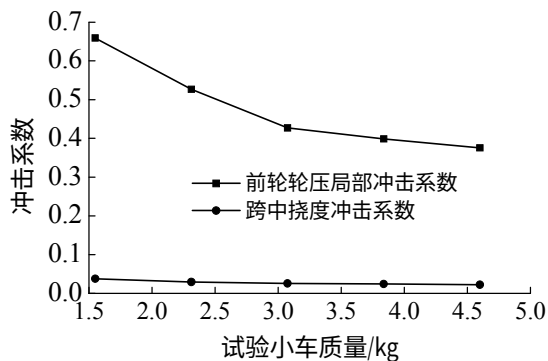
图9 最大轮压位置与行车速度关系

3.2 整体冲击结果及分析

首先研究车辆质量对跨中挠度冲击系数的影响。根据试验结果绘制 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速和 1.5 mm 伸缩缝宽度下的跨中挠度冲击系数与质量关系曲线,如图 10(a)所示。从图 10(a)可以看出,跨中挠度冲击系数随小车质量的增大而减小。但是跨中挠度的冲击系数比伸缩缝跳车导致的局部轮压冲击系数小得多,如图 10(b)所示。



(a) 跨中挠度冲击系数



(b) 局部与整体冲击系数对比

图10 冲击系数与小车质量关系

跨中挠度冲击系数与模型桥伸缩缝宽度的关

系如图 11 所示。从图 11 可以看出,在相同速度情况下,伸缩缝宽度对于桥梁跨中挠度影响很小, $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速, 4.6 kg 车重时,跨中挠度冲击系数基本在 0.022 左右微小波动。

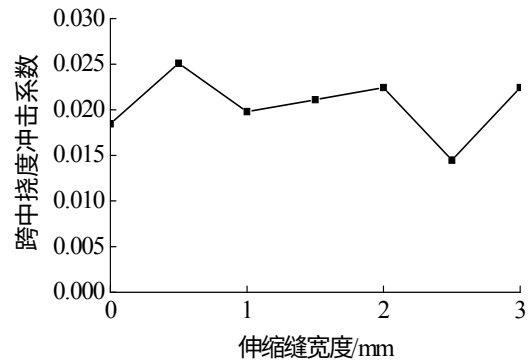


图11 跨中挠度冲击系数与伸缩缝宽度关系

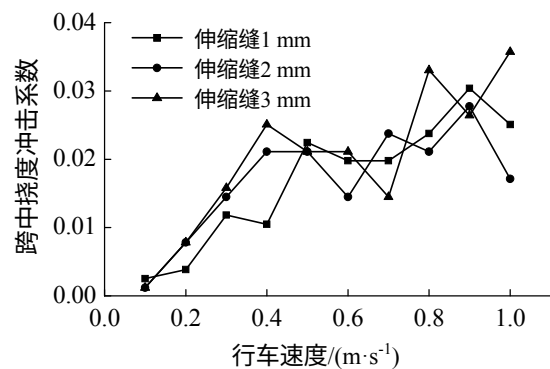


图12 跨中挠度冲击系数与行车速度关系

跨中挠度冲击系数与行车速度的关系如图 12 所示。当行车速度大于 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,模型车状态不是很平稳,桥梁有扭转振动,跨中挠度冲击系数有一定波动,但是最大冲击系数仅为 0.036,比起局部轮压冲击系数小很多。

4 结论

针对车辆对桥梁的局部与整体冲击效应建立了车辆和桥梁的缩尺模型并进行了相关试验。通过测试车轮轮压和桥梁跨中挠度研究了行车速度、伸缩缝宽度、车辆质量对冲击效应的影响,判断了车轮轮压到达最大峰值的位置,得到如下结果:

(1) 试验小车经过伸缩缝处时轮压局部冲击系数随伸缩缝宽度增大而线性增大; $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速范围内局部冲击系数随速度的增大而增大,局部冲击系数随小车质量的增大而减小,局部轮压冲击系

数最大可达到 0.75.

(2)伸缩缝跳车对桥梁跨中挠度的整体冲击系数影响不大, 因此桥梁结构跨中最大动挠度、弯矩分析可以不考虑伸缩缝跳车的影响.

(3)伸缩缝跳车中模型车动态轮压达到最大时, 车轮位置离伸缩缝端部距离在车轮压痕长度范围内, 因此伸缩缝附近桥梁结构设计要予以加强.

参考文献:

- [1] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2002:14.
- [2] LIMA J M, BRITO J D. Inspection survey of 150 expansion joints in road bridges[J]. Engineering Structures, 2009, 31(5):1077-1084.
- [3] 张景会, 杨晨霞, 苏国宏. 桥梁伸缩缝损坏原因及防治[J]. 中国市政工程, 2004, 108(2):21-22; 26; 66.
- [4] AASHTO USA 2010, LRFD bridge design specifications [S].
- [5] BSI 2003, Eurocode 1: Actions on structures part 2: Traffic loads on bridges[S].
- [6] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范(JTJ D60-2004)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 26
- [7] ROEDER C W. Fatigue and dynamic load measurements on modular expansion joints[J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(2/3):143-150.
- [8] 丁勇, 黄奇, 谢旭, 等. 载重汽车桥梁伸缩缝跳车动力荷载计算方法与影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7):98-107.
- [9] GONZÁLEZ A, CANTERO D, O'BRIEN E J. Dynamic increment for shear force due to heavy vehicles crossing a highway bridge[J]. Computers & Structures, 2011, 89(23/24): 2261-2272.
- [10] 林云, 章伟, 丁勇. 桥梁结构静荷载实验的物理与虚拟仿真研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2015, 28(1):102-106.

Experiment-based Study: Small Model on Impact Factor of Vehicle Bumping at Bridge Expansion Joint

LIN Yun, ZHANG Wei, DING Yong*

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: When a vehicle traversing a bridge expansion joint, the vehicle bumping occurs and the impact load of the tire is the main cause of the damage of the bridge structure. In this study, the vehicle model composed of elastic tire and rigid body is established, and the bridge model is represented by U-bar of aluminum alloy. Using a step motor control system to drag the vehicle at a constant speed, the local and global impact of the vehicle crossing the bridge expansion joint is investigated experimentally. The effect of local impact is represented by dynamic load of front tire while it is running over the expansion joint, and that of global impact is represented by the dynamic deflection at the middle span of bridge model. The experimental results indicate that the local impact is significant from the vehicle bumping at the expansion joint, but the global impact is not obvious. In addition, the effect of the width of expansion joint, the velocity and the mass of vehicle on the impact load are also discussed.

Key words: vehicle model; bridge model; dynamic wheel load; middle span deflection; impact factor

(责任编辑 史小丽)