

DOI:10.11918/201807201

桥梁伸缩缝跳车冲击荷载计算方法与模型实验

丁勇^{1,2}, 王佩¹, 游玖昂¹, 诸葛萍¹

(1. 宁波大学 土木工程系, 浙江 宁波 315211; 2. 桥梁工程结构动力学国家重点实验室(重庆交通科研设计院), 重庆 400067)

摘要: 为实测移动车辆对桥梁伸缩缝的冲击荷载, 防止桥梁伸缩缝在这种冲击荷载作用下发生早期损坏, 制作了缩尺比例为 1/30 的汽车与桥梁实验模型, 进行模型汽车通过模型桥梁的实验研究. 针对车轮经过桥梁伸缩缝时, 轮胎与路面的接触长度发生改变, 提出了两种改进的伸缩缝跳车冲击力计算方法, 分别为改进的假设轮底运动轨迹计算方法和改进的分布式弹簧-阻尼单元计算方法. 然后, 通过数值计算与缩尺模型实验进行了结果比较. 最后, 基于改进的分布式弹簧-阻尼单元, 对三轴载重汽车对单缝式伸缩缝的冲击荷载进行了数值模拟与参数分析. 结果表明: 改进算法得到的伸缩缝冲击荷载与实测值更为接近, 冲击荷载算法有必要考虑轮胎与路面接触长度的改变; 车轮荷载的最大冲击系数超过桥梁设计规范的容许值, 通过调整伸缩缝的开口宽度可以将其控制在容许范围内.

关键词: 桥梁伸缩缝; 冲击荷载; 模型实验; 接触长度; 计算方法

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)03-0129-07

Numerical methods and model experiment for impact load induced by vehicle bumping at bridge expansion joint

DING Yong^{1,2}, WANG Pei¹, YOU Jiuang¹, ZHUGE Ping¹

(1. Department of Civil Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamic (Chongqing Communications Technology Research & Design Institute), Chongqing 400067, China)

Abstract: To measure the impact load of moving vehicles on bridge expansion joint and avoid the early damage of bridge expansion joint under such impact, models of vehicle and bridge were constructed with a scale of 1/30, and the experimental study of the model vehicle passing through the model bridge was carried out. Considering the change of the contact length between the tire and the road when the wheel passes through the bridge expansion joint, two improved calculation methods for the impact load on the expansion joint were proposed, namely improved calculation method with hypothetical trajectory of tire bottom and improved calculation method based on the distributed spring-damper element. Then the numerical calculation was compared with the experimental results of the scale model. Finally, based on the improved distributed spring-damper element, the numerical simulation and parameter analysis of the impact load induced by three-axle heavy vehicle at single-gap expansion joint were carried out. Results show that compared with the previous method, the impact load of the expansion joint obtained by the improved calculation methods was closer to the measured value. Therefore, it is necessary to consider the change of the contact length between the tire and the road for the calculation of impact load. The maximum impact factor of the wheel load of heavy vehicle exceeded the allowable value of the bridge design specification, which can be controlled within the allowable range by adjusting the opening width of the expansion joint.

Keywords: bridge expansion joint; impact load; model experiment; contact length; calculation method

在桥梁结构中, 伸缩缝是最容易发生早期损坏的部件^[1], 与伸缩缝相关的维修花费超过桥梁结构早期维护费用的 20%^[2]. 伸缩缝早期损坏的重要原因是载重汽车轮胎的长期冲击作用, 这个冲击荷载也是伸缩缝设计的主要参数. 遗憾的是, 目前该冲

击荷载的确定还缺乏明确的理论与实验依据, 世界各国的取值差别也很大. 中国伸缩缝设计指南^[3]以 140 kN 作为车辆的标准轴重, 并考虑 0.45 的冲击系数; 美国桥梁规范^[4]以 145 kN 作为标准轴重, 并计入 0.75 的冲击系数; 英国规范^[5]和德国规范^[6]取 200 kN 的车辆轴重, 但冲击系数取值不同, 分别为 0.5、0.4. 因此, 明确伸缩缝冲击荷载, 可为伸缩缝及其周边桥(路)面的设计与维护提供参考^[7-9].

关于伸缩缝跳车冲击荷载的实验研究还很少, 文献^[10]通过测量模数式伸缩缝在车辆作用下的动应变与动位移, 推测汽车轮胎荷载竖向的冲击系

收稿日期: 2018-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51808301);

桥梁工程结构动力学国家重点实验室开放基金(201402);

浙江省自然科学基金(LY19E080009)

作者简介: 丁勇(1975—), 男, 教授, 硕士生导师

通信作者: 丁勇, dingyong@nbu.edu.cn

数为 0.2~0.3, 横向的冲击系数约为 0.15; 文献[11]则认为 0.1~0.5 的冲击系数与其实测结果比较符合. 在上述实验研究中, 由于跳车冲击荷载大, 直接测试困难, 因此都是通过伸缩缝结构动力响应间接获得车轮冲击荷载, 且都没有计及汽车行驶的快慢、伸缩缝开口的大小等对冲击系数的影响.

在理论算法上, 往往通过分析车辆通过伸缩缝时的振动来计算冲击荷载, 其中轮底在伸缩缝上的局部脱空现象是分析的难点. 文献[12]假设车轮通过伸缩缝时的轮底运动轨迹是长 20 cm, 深 2~4 cm 的凹台, 这个假设源于对伸缩缝的外形量测, 与实际的轮底轨迹存在差别. 文献[13]提出了一种基于分布式弹簧-阻尼单元 (distributed spring-damp element, 以下简称 DSD 单元) 的计算方法, 可以模拟车轮通过伸缩缝时的局部脱空情况, 并用于计算作用在伸缩缝上的车轮冲击荷载, 但是该方法忽略了轮胎通过伸缩缝时接触长度的变化, 并且还缺乏实验验证.

本文在上述工作基础上, 对桥梁伸缩缝跳车冲击荷载问题进行了算法改进和实验研究. 首先制作了桥梁与车辆的缩尺实验模型, 实测缩尺模型在伸缩缝跳车时的车轮冲击力. 然后改进了假设轮底运动轨迹的车轮荷载计算方法, 考虑了荷载大小、轮胎和伸缩缝尺寸对轮底运动轨迹的影响. 同时, 也改进了基于 DSD 单元的车轮荷载计算方法, 考虑了车

轮经过伸缩缝时轮胎-路面接触长度的变化. 最后, 对典型三轴载重汽车经过伸缩缝时的冲击荷载进行了数值模拟, 讨论了伸缩缝宽度、车辆速度对轮载冲击系数的影响.

1 模型实验

以图 1 所示的单缝式桥梁伸缩缝为例, 建立缩尺模型实验装置. 实验装置的设计图和制作完成后的照片如图 2 所示. 桥梁采用 1:30 的单车道铝合金梁缩尺模型, 相当于宽度为 3 米的桥. 桥梁模型分 3 段: 第 1、3 段为引桥, 第 2 段为简支梁主桥. 每两段模型连接处布置单缝式伸缩缝. 车辆模型采用 1:30 的两轴车模型, 车轮用弹性橡胶制作, 受压变形后, 可以反映轮胎与路面之间的接触长度. 车辆动力由牵引电机通过钢丝绳提供, 运动路径包含 3 段桥梁模型, 因此可以模拟车辆通过桥梁伸缩缝时的跳车现象.

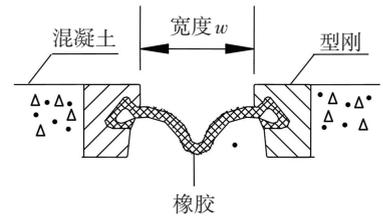
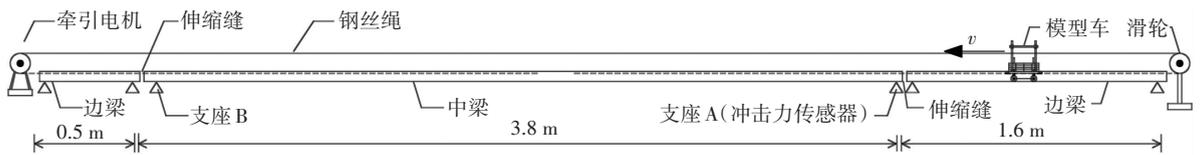
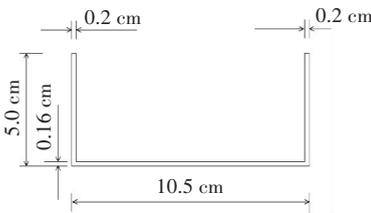


图 1 单缝式桥梁伸缩缝

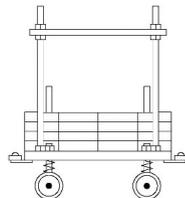
Fig.1 Bridge expansion joint with single gap



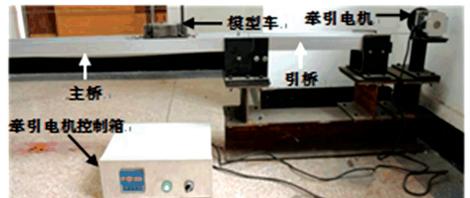
(a) 实验装置全国



(b) 梁横截面



(c) 模型车侧视图



(d) 实验装置照片

图 2 缩尺模型实验装置

Fig.2 Reduced-scale experimental model

测试系统主要是伸缩缝冲击力测试装置, 该装置由冲击力传感器和信号处理系统组成. 如图 2(a) 和图 3 所示, 冲击力传感器有两个, 为美国 PCB 公司的 200B02 型石英冲击力传感器, 代替支座 A 支撑简支梁主桥, 位于伸缩缝旁, 直接实测车轮冲击力导致的支座竖向支撑力. 因为作为支座 A 的冲击力传感器距离梁端只有 0.5 cm, 简支梁长度达 3.8 m,

所以当模型车的前轮经过伸缩缝上中梁时, 竖向支座反力之和与两前轮冲击荷载之和差别很小, 可以认为两者相等.

实测得到的典型冲击力曲线如图 4 所示, 其中两条曲线分别为模型车辆通过伸缩缝时两个冲击力传感器测得的力, 图 4 对应的模型车速度为 0.4 m/s, 伸缩缝宽度为 3 mm.

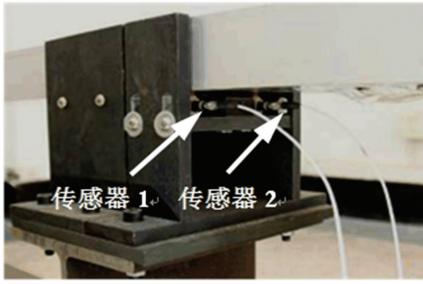


图3 冲击力传感器(支座 A)

Fig.3 Impact force sensor(bearing A)

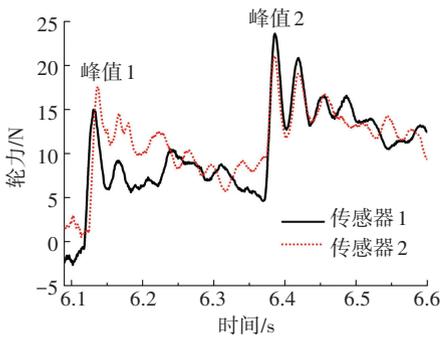


图4 车辆冲击力实测值

Fig.4 Measured impactload of vehicle

在图4中,峰值1是图2(c)所示模型车前轮通过伸缩缝时的冲击力峰值,峰值2是后轮通过伸缩缝时的冲击力峰值.因为压电式冲击力传感器测得的力随时间衰减,所以实测结果中的峰值1精度较高,反映了前轮的冲击荷载.实测结果中的峰值2包含了后轮冲击荷载和前轮荷载的影响,由于前轮冲击荷载测试值的衰减,所以峰值2的精度受到干扰,不宜用于分析车轮的冲击荷载.

由于实验误差,图4中的左前轮和右前轮的冲击力略有不同,因此本文取两者的平均值作为前轮的平均冲击力,这也和下文采用二维的车辆模型计算伸缩缝冲击荷载相一致.

2 计算方法

实测得到的车轮冲击力可以用来检验对应的计算方法,此时通过对车辆在伸缩缝上的动力响应进行有限元分析,得到车轮的冲击荷载.以缩尺模型实验中的小车为例,如图2(c)所示,相应的二维有限元模型,如图5所示,包含7个节点,6个单元.其中车体用刚性梁单元模拟,车体悬挂系统用弹簧-阻尼单元模拟^[14],对应于不同的计算方法,弹性车轮分别选用弹簧-阻尼单元或分布式弹簧-阻尼单元来模拟^[15].

通过对模型车辆的实测,得到图5所示车辆有限元模型的计算参数. l_1 为0.05 m, h_1 、 h_2 分别为

0.013、0.054 m, m_1 、 m_2 分别为4.35、0.125 kg, J_1 为0.007 9 kg·m².由压缩试验得到轮胎刚度 k_1 为53.4 kN/m,由自由振动衰减曲线测得轮胎阻尼 c_1 为61.4 N·s/m.由于轮胎以上部分为钢结构,其支撑刚度远大于轮胎刚度,因此 k_2 取为远大于 k_1 的常数,阻尼 c_2 则取为远小于 c_1 的常数.

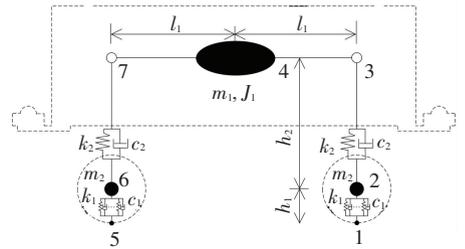


图5 试验小车的有限元模型

Fig.5 FEM model of the vehicle model in experiment
经过单元组集,获得模型车的振动方程组为

$$M_v \ddot{u}_v + C_v \dot{u}_v + K_v u_v = F_v(t). \quad (1)$$

其中: u_v 为节点位移向量; M_v 、 C_v 、 K_v 分别为质量、阻尼、刚度矩阵; F_v 为车辆所受荷载向量; t 为时间.

方程(1)用Newmark法在时域内积分求解,求解难点在于车轮经过伸缩缝时轮底局部脱空,导致轮底位移是未知量^[13].在图5所示的有限元模型中,1号、5号节点在车轮通过伸缩缝时的位移即为未知量.为了确定伸缩缝上的轮底脱空段位移,本文提出了以下两种方法.

2.1 假设轮底运动轨迹

图6为载重车的轮胎在路(桥)面和伸缩缝上行驶时的变形情况.由图可见,车轮在伸缩缝外的路面上时,轮胎压缩量为 ΔR ,轮胎-路面接触长度为 a ;车轮通过伸缩缝时,轮底局部脱空,最大脱空长度即为伸缩缝宽度 w ,此时轮胎压缩量为 $\Delta R'$,轮胎-路面接触长度为 a' .文献[12]假设车轮通过伸缩缝时的轮底运动轨迹如图7所示,该轨迹来自对特定伸缩缝、在特定时间的测量,适用面不广.

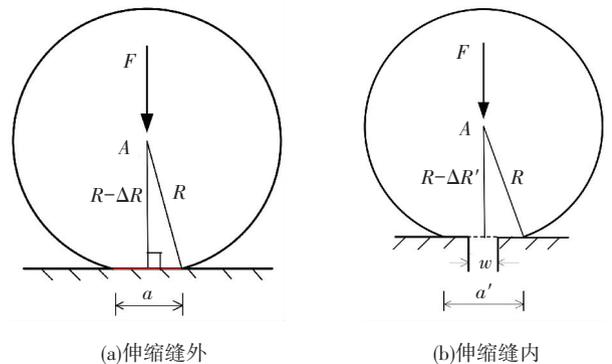


图6 载重车轮胎变形

Fig.6 Deformation of the tire of heavy vehicle

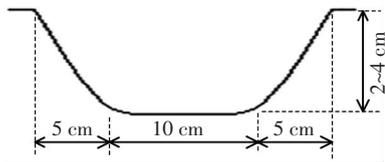


图 7 假设的轮底位移曲线^[12]

Fig.7 Assumed displacement curve of the tire bottom^[12]

本文对上述假设轮底轨迹方法进行了改进,考虑了轮载大小、轮胎和伸缩缝尺寸对轮底运动轨迹的影响.如图 6(a)所示,当轮胎在普通路面上时,轮轴荷载 F 作用下的竖向压缩量为

$$\Delta R = F/K,$$

其中 K 为轮胎的刚度.

当车轮位于伸缩缝中心时,如图 6(b)所示,由于轮底局部脱空,脱空部分不受路面的支持,所以车轮的竖向压缩量为

$$\Delta R' = F / \left(K \frac{a' - w}{a'} \right) = \Delta R \frac{a' - w}{a'}. \quad (2)$$

假定轮胎在变形前后的半径 R 不变,那么图 6(b)中轮胎与地面的接触长度为

$$a' = 2\sqrt{R^2 - (R - \Delta R')^2}. \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得关于 a' 的方程为

$$\frac{(a')^2}{4} = R^2 - \left[R - \Delta R \frac{a' - w}{a'} \right]^2. \quad (4)$$

由式(4)求得 a' ,再由式(3)可得轮胎在伸缩缝内的压缩量 $\Delta R'$.

轮胎在伸缩缝内和普通路面上的压缩量之间的差别为 $\Delta R' - \Delta R$.考虑到伸缩缝中的车轮底部局部脱空,因此车轮的实际支撑刚度减小.但是在有限元计算模型中,轮胎单元的刚度 K 大小不变,因此在有限元计算中,需要将轮胎在伸缩缝内、外的压缩量之差作折减,即

$$h = (\Delta R' - \Delta R) \frac{(a' - w)}{a'}, \quad (5)$$

其中 h 为折减后的轮胎压缩量之差.

假设式(5)所示的压缩量之差为车轮跨越伸缩缝过程中的轮底最大位移,整个跨越过程中轮底的运动轨迹如图 8 所示.过伸缩缝前、后的轮底位移为零;在上、下伸缩缝的 w 长度段内,轮底位移为余弦函数;中间 $a - w$ 长度段内,轮底位移保持为 h .

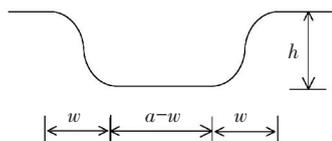


图 8 车轮底部的运动轨迹

Fig.8 Trajectory of the tire bottom

上述假设轮底位移是对文献[12]假设轮底位移的改进,考虑了轮胎-路面接触长度、伸缩缝宽度的影响,使之可以用于各种类型的车轮通过桥梁伸缩缝的情况,包括缩尺模型车辆的车轮.

2.2 改进的分布式弹簧-阻尼单元

文献[13]曾用一种分布式弹簧-阻尼单元(DSD单元)代表汽车轮胎的力学特性,进一步分析汽车轮胎对伸缩缝的冲击力,但是该工作假定车轮经过伸缩缝时,与路面的接触长度保持为常数 a .由于轮胎在伸缩缝上的脱空情况,该假定会带来一定的计算误差.为此,本文改进了上述分布式弹簧-阻尼单元,其结构如图 9 所示.该单元中轮胎经过伸缩缝时与路面接触长度为 a' , a' 由式(3)计算.因为伸缩缝中的车轮压缩量 $\Delta R'$ 与车轮所在位置和振动位移有关,所以 a' 不再保持为常数.

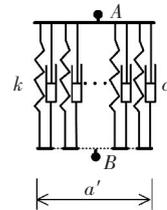


图 9 改进的分布式弹簧-阻尼单元

Fig.9 Improved distributed spring-damper (DSD) element

如图 10 所示,当用改进的 DSD 单元所代表的汽车轮胎通过伸缩缝时,仍然分为 3 阶段:下缝段、跨缝段、上缝段,单元底部 B 点的等效位移为

$$u_B = u_1 \frac{a_1'}{a'} + u_2 \frac{a_2'}{a'} + u_3 \frac{a_3'}{a'}.$$

其中 u_1, u_2, u_3 分别为轮底在 a_1', a_2', a_3' 段的竖向位移.

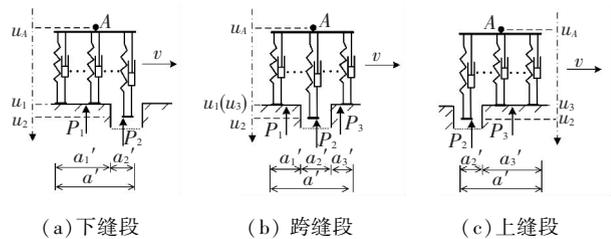


图 10 车轮 DSD 单元通过伸缩缝

Fig.10 DSD element of the wheel passing through the expansion joint

分布式弹簧-阻尼单元的平衡方程依旧和普通的弹簧-阻尼单元一样^[15].有限元分析获得节点位移和速度后,进一步可求得轮压荷载为

$$P = k(u_B - u_A) + c(\dot{u}_B - \dot{u}_A). \quad (6)$$

也可得到轮胎作用于伸缩缝结构 a_1', a_2', a_3' 段的压力分别为

$$P_1 = k \frac{a_1'}{a'} (u_1 - u_A) + c \frac{a_1'}{a'} (\dot{u}_1 - \dot{u}_A), \quad (7)$$

$$P_2 = k \frac{a_2'}{a'}(u_2 - u_A) + c \frac{a_2'}{a'}(\dot{u}_2 - \dot{u}_A) + \frac{c}{a'}(\dot{a}_1' u_1 + \dot{a}_{2,in}' u_2), \quad (8)$$

$$P_3 = k \frac{a_3'}{a'}(u_3 - u_A) + c \frac{a_3'}{a'}(\dot{u}_3 - \dot{u}_A) + \frac{c}{a'}(\dot{a}_{2,out}' u_2 + \dot{a}_3' u_3), \quad (9)$$

其中: \dot{a}_1' 、 \dot{a}_3' 分别为单元 a_1' 、 a_3' 段长度的变化率; $\dot{a}_{2,in}'$ 是由于单元 a_1' 段跨入 a_2' 段引起的长度变化率, $\dot{a}_{2,out}'$ 是由于单元 a_2' 段跨入 a_3' 段引起的的长度变化率。

前述各段的长度变化率与轮胎所处的位置有关,当轮胎位于下缝段时, $\dot{a}_1' = -v$, $\dot{a}_{2,in}' = v$, $\dot{a}_{2,out}' = 0$, $\dot{a}_3' = 0$ 。当轮胎在跨缝段时, $\dot{a}_1' = -v$, $\dot{a}_{2,in}' = v$, $\dot{a}_{2,out}' = -v$, $\dot{a}_3' = v$ 。当轮胎在上缝段时, $\dot{a}_1' = 0$, $\dot{a}_{2,in}' = 0$, $\dot{a}_{2,out}' = -v$, $\dot{a}_3' = v$ 。其中 v 为行车速度。

用改进的 DSD 单元模拟轮胎,建立汽车有限元模型,如图 5 所示,进一步建立式(1)所示的振动方程组。该方程组求解时,由于车轮经过伸缩缝时 a_2' 段脱空, u_2 是未知量,导致轮底等效位移 u_B 也是未知量。因此,汽车过伸缩缝时,求方程组(1)的解还要增加 a_2' 段的脱空条件方程,并由迭代方法获得轮底位移。迭代方法如图 11 所示,增加的方程组为

$$\begin{cases} P_2 = 0, \\ P_1 + P_3 = P. \end{cases} \quad (10)$$

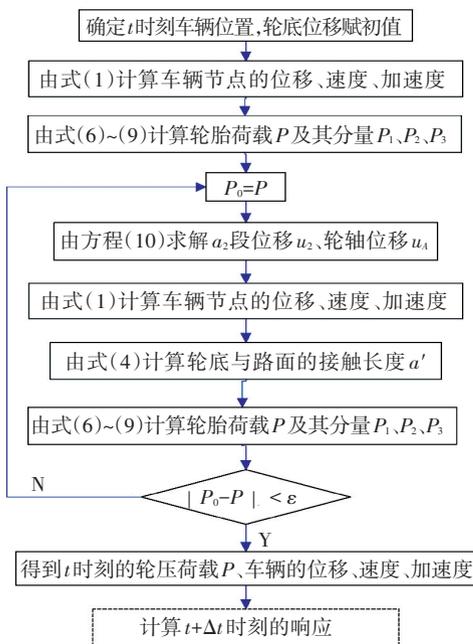


图 11 分析汽车通过伸缩缝的迭代算法

Fig.11 Iteration algorithm in the analysis of vehicle bumping at expansion joint

需要说明的是,本文模型实验和数值计算研究的都是竖向的轮压荷载,而不是横向(顺桥向)的轮压荷载,对顺桥向冲击荷载的研究还有待开展。

3 模型实验与理论计算结果

3.1 轮胎对伸缩缝的动力荷载

以图 5 所示模型车以 0.4 m/s 的速度通过 3 mm 缝宽的伸缩缝为例,用第 2 节方法计算车轮动力荷载。以前轮为例,结果如图 12 所示。

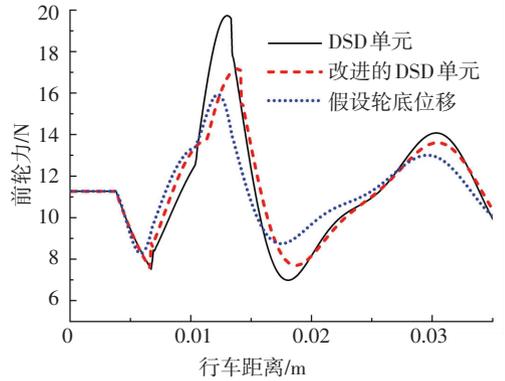


图 12 轮胎对伸缩缝的动荷载

Fig.12 Dynamic load of vehicle tire on expansion joint

由图 12 可知, DSD 单元^[13]、改进的 DSD 单元、假设轮底位移这 3 种算法得到的车轮冲击荷载变化趋势一致; DSD 单元得到的冲击力偏大,原因是 DSD 单元没有考虑车轮通过伸缩缝时轮底接触长度的增大,高估了此时轮胎对车体的支撑刚度。

用冲击系数度量轮胎荷载的动力效应,有

$$\mu = (P_{max} - P_s) / P_s. \quad (11)$$

其中 P_{max} 为最大动荷载, P_s 为静力荷载。根据图 4、12 和式(11),计算模型车轮对伸缩缝的荷载冲击系数。由 DSD 单元、改进的 DSD 单元、假设轮底位移方法得到的前轮荷载冲击系数分别为 0.75、0.52、0.41,而实验平均值为 0.44,由此可知,用改进的 DSD 单元和假设轮底位移算法得到的冲击系数更接近实测值。

3.2 轮载冲击系数的影响因素

以伸缩缝开口宽度、汽车行驶速度作为影响轮胎荷载冲击系数的主要参数,进一步进行缩尺模型实验和相应的理论计算。

首先维持模型车的速度不变,为 0.4 m/s,测试和计算伸缩缝开口宽度变化时的车轮荷载冲击系数,所得结果参见图 13。由此可知:1) 轮胎荷载的冲击系数与伸缩缝的开口宽度近似成正比;2) 改进的 DSD 单元和假设轮底位移方法得到的冲击系数比 DSD 单元方法更接近实测值,在伸缩缝开口宽度较大时,以往的 DSD 单元误差较大。

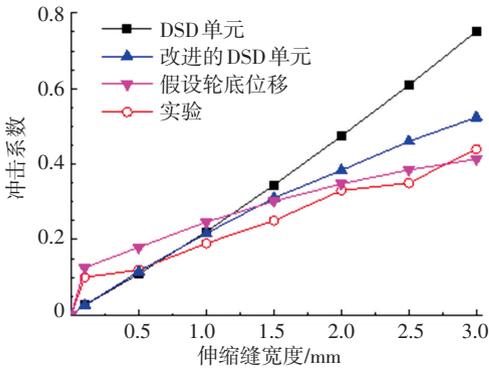


图 13 伸缩缝开口宽度对车轮荷载的影响

Fig.13 Effect of opening width of expansion joint on impact load

如保持伸缩缝宽度为 1.5 mm 不变,测试和计算不同速度时模型车的跳车冲击荷载,获得的冲击系数如图 14 所示,图 14 表明:1)当模型车的速度小于 0.5 m/s 时,轮胎荷载冲击系数的实验与计算值都随着车速的增加而增大;当车速大于 0.5 m/s 后,冲击系数计算值不再增加,保持稳定,实测值则继续增加,但是实验中发现,当模型车的速度大于 0.5 m/s 后,车身左右摇晃运行不稳,车桥系统运行振动较大,影响了实验的可靠性。2)用改进的 DSD 单元或假设轮底位移计算方法得到的冲击系数比以往的 DSD 单元计算方法所得结果更接近实测值。

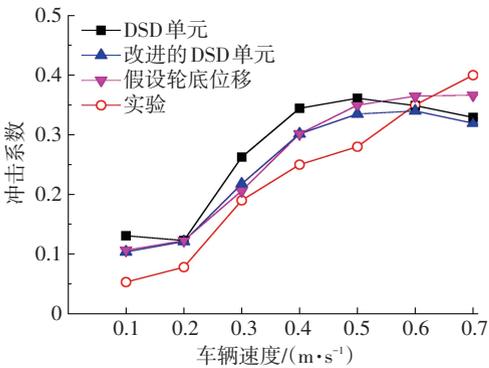


图 14 不同车速下的冲击系数

Fig.14 Impact factor at different velocities

对比模型实验与理论计算的结果,基于改进的 DSD 单元的计算方法所得结果与实测接近;相比假设轮底位移的计算方法,其假定也较少,因此更适合用于分析车辆轮胎对桥梁伸缩缝的冲击荷载。

4 载重汽车对伸缩缝的冲击荷载分析与控制

为了研究实际载重汽车对于桥梁伸缩缝及其周边桥(路)面的冲击荷载,本节采用基于改进的 DSD 单元的方法,对典型的三轴载重汽车对伸缩缝的冲击荷载进行了计算。二维的车辆有限元模型如图 15 所示,车辆的计算参数见文献[16],其所通过的伸

缩缝为图 1 所示的单缝式伸缩缝。

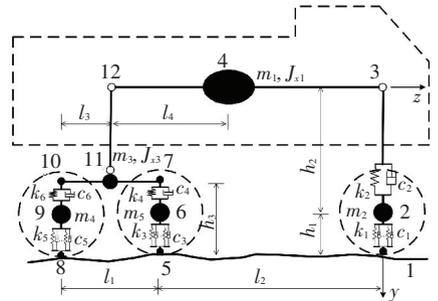


图 15 典型的三轴载重汽车模型

Fig.15 Model of typical three-axle heavy vehicle

采用式(11)定义的轮胎荷载冲击系数来度量载重汽车对伸缩缝的冲击力。针对实际桥梁上常见的单缝式伸缩缝,为了涵盖一般工况下的伸缩缝冲击荷载,综合考虑伸缩缝的开口宽度 w 、载重汽车的速度 v 的变化,其中开口宽度为 1~9 cm,汽车速度为 10~80 km/h,求解各种工况(参数组合)下轮胎对伸缩缝的冲击荷载。分析结果用车轮荷载冲击系数的三维云图来表示,如图 16~18 所示。

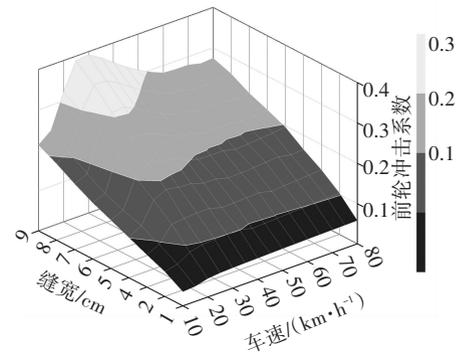


图 16 由改进的 DSD 单元得到的前轮荷载冲击系数

Fig.16 Impact factor of front tire obtained by improved DSD element

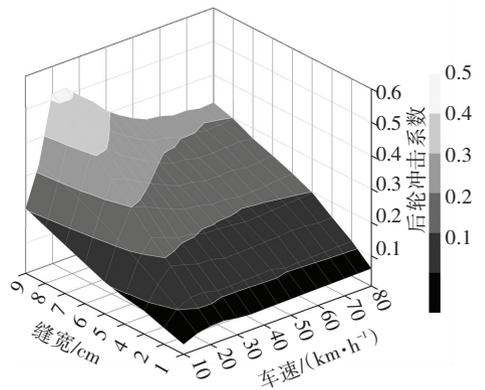


图 17 改进的 DSD 单元得到的中轮荷载冲击系数

Fig.17 Impact factor of middle tire obtained by improved DSD element

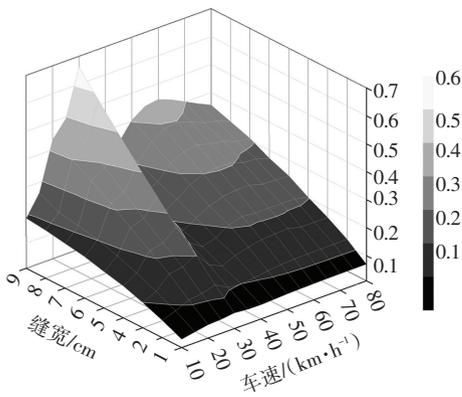


图 18 改进的 DSD 单元得到的后轮荷载冲击系数

Fig.18 Impact factor of rear tire obtained by improved DSD element

由图 16~18 汇总得到三轴载重汽车轮胎荷载的最大冲击系数. 由改进的 DSD 单元得到的前轮荷载冲击系数最大值为 0.39, 该值比中国伸缩缝设计指南^[3]的给定值 0.45、美国 AASHTO 规范^[4]的给定值 0.75 小, 但是大于中国桥梁规范^[17]和欧洲桥梁规范^[18]的设计值 0.3. 中轮和后轮的冲击系数仍然小于美国 AASHTO 规范的给定值, 但是大于其他规范或者设计指南的推荐值. 由此可知, 当前中国伸缩缝设计指南和桥梁设计规范对伸缩缝跳车荷载冲击系数的估计略有不足, 可能会导致桥梁伸缩缝及其前后桥面的设计强度不足.

由图 16~18 还可得到轮载冲击系数的变化规律: 1) 在伸缩缝的开口宽度不变情况下, 随着汽车速度的增加, 车轮对伸缩缝结构的冲击力上下波动, 最大的冲击系数在车速为 25~30 km/h 时出现, 因此减小汽车速度不一定能降低车轮对伸缩缝的冲击力, 除非是车辆速度很小时; 2) 车轮对伸缩缝的荷载冲击系数与伸缩缝的开口宽度近似成正比例, 可以通过减少伸缩缝开口宽度来降低车轮冲击力. 根据图 16~18, 为了控制车轮对伸缩缝的冲击系数小于中国设计指南的给定值 0.45, 载重车前轮、中轮、后轮要求的伸缩缝最大开口宽度分别为 9.0、7.7、6.4 cm, 取三者中的最小值, 即要求伸缩缝开口宽度应小于 6.4 cm. 因此, 该方法也可用来确定保证伸缩缝结构强度安全所容许的开口宽度.

5 结 论

1) 设计并制作车辆通过桥梁伸缩缝的缩尺实验模型, 实现了对作用于桥梁伸缩缝上的车轮冲击力的实测.

2) 提出了汽车轮胎对伸缩缝冲击荷载的两种改进算法, 即假设轮底位移的方法和改进的 DSD 单元方法, 通过与缩尺模型实验的比较, 证明改进算法

提高了轮胎冲击荷载的计算精度.

3) 用改进的 DSD 单元方法, 计算了三轴载重汽车的轮胎对桥梁伸缩缝的冲击荷载, 结果表明, 最大荷载冲击系数超过现行伸缩缝结构设计取值.

4) 车轮对伸缩缝的荷载冲击系数与伸缩缝的开口宽度近似成正比, 通过减少伸缩缝开口宽度能降低车轮冲击力, 由此可以确定保证伸缩缝结构强度安全所容许的开口宽度.

参考文献

- [1] YANEV B. Joints: the weak link in bridge structures and lifecycles [J]. *Smart Structures & Systems*, 2015, 15 (3): 543. DOI: 10.12989/sss.2015.15.3.543
- [2] LIMA J M, DE BRITO J. Management system for expansion joints of road bridges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2010, 6 (6): 703. DOI: 10.1080/15732470802087823
- [3] 中国交通企业管理协会. 公路桥梁伸缩装置设计指南: JTQX-2011-12-1[S]. 北京: 中国交通企业管理协会, 2011
China Transportation Enterprise Management Association. Design guide of highway bridge expansion joint: JTQX-2011-12-1[S]. Beijing: China Transportation Enterprise Management Association, 2011
- [4] AASHTO. LRFD bridge design specifications[S]. 8th ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017
- [5] UK Highways Agency. Expansion joints for use in highway bridge decks; BD 33/94[S]. Birmingham: UK Highways Agency, 1994
- [6] Deutschland Bundesministerium für Verkehr. Technische Liefer- und prüfvorschriften für wasserundurchlässige fahrbahnübergänge von straßen- und wegbrücken; TL-TP-FÜ 92[S]. Berlin: Deutschland Bundesministerium für Verkehr, 1993
Germany Federal Ministry of Transport. Technical delivery and test specifications for waterproof expansion joints of road and root bridges; TL-TP FÜ 92[S]. Berlin: Germany Federal Ministry of Transport, 1993
- [7] SUN Z, ZHANG Y. Failure mechanism of expansion joints in a suspension bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(10): 05016005-1-13. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000942
- [8] 邓露, 闫王晨, 朱全军. 路桥过渡段容许台阶高度的确定[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(3): 101
DENG Lu, YAN Wangchen, ZHU Qianjun. Determination of allowable differential settlement between the bridge and the approach embankment[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2015, 42(3): 101
- [9] 韩万水, 李彦伟, 乔磊, 等. 基于车-桥耦合振动理论的移动荷载识别[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(1): 74
HAN Wanshui, LI Yanwei, QIAO Lei, et al. Moving load identification based on vehicle-bridge coupling vibration theory[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(1): 74. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2013.01.011
- [10] ROEDER C W. Fatigue and dynamic load measurements on modular expansion joints[J]. *Construction and Building Materials*, 1998, 12 (2/3): 143. DOI: 10.1016/S0950-0618(97)00016-0

(下转第 146 页)