

曲线梁桥在车辆载荷下的动力响应研究*

刘星¹ 李韶华^{1,2†} 司春棣^{1,2} 任剑莹^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 石家庄 050043) (2. 河北省交通安全与控制重点实验室, 石家庄 050043)

摘要 近年来随着我国公路交通的快速发展,曲线梁桥被大量工程采用.车辆过桥时的曲线桥振动涉及车辆三向载荷和桥梁弯扭耦合振动,有必要对其进行精确建模并深入研究.本文以某五跨连续曲线箱梁桥为背景,采用 ABAQUS 有限元软件建立该桥梁的模型,并利用 Adams 建立了三轴重型汽车整车模型,计算得到了不同工况下的轮胎力.通过编写基于 Fortran 语言的 DLOAD 和 UTRACLOAD 荷载子程序,将六个轮胎载荷作用于曲线桥上,分别进行了不同曲率半径、车速、载重和路面不平顺等条件下的曲线梁桥振动响应计算.研究表明:随着曲率半径的增加,桥梁跨中位移呈现略微下降的趋势;车辆行驶速度对跨中的横向位移及支座的支反力有较大影响;路面不平度等级越高,桥梁竖向挠度及弯矩的冲击效应越大.

关键词 车辆载荷, 有限元法, 弯扭耦合, 响应规律

DOI: 10.6052/1672-6553-2019-055

引言

桥梁结构动力响应是桥梁结构动力学研究中的一项重要课题,随着现代公路交通建设飞速发展,新建桥梁数量日益增加,车辆荷载作用下的桥梁动力问题直接影响到车辆与桥梁安全,愈加不容忽视^[1].在过去的几十年中,设计公路桥梁时大多只作静力分析,动力分析往往也只涉及到结构振动特性和地震响应、风效应方面^[2,3].国内外学者对车-桥耦合系统动力学分析的研究多集中在直线桥上^[4-8],而对于公路曲线桥涉及较少^[9].曲线梁桥静力计算理论经过近年来的发展已经基本完善,曲线梁桥由于其结构型式和车辆载荷的复杂化,车辆载荷引起的桥梁弯扭振动越来越引起国内外的广泛关注^[10-12].但是,目前对于曲线梁桥的研究,多是采用移动荷载进行分析^[13],对于车辆模型没有进行建模,因此,轮胎力的计算不能合理反映车辆过桥时的情况.冲击系数是车辆过桥时对桥梁结构产生的竖向动力效应的增大系数^[14],即车辆荷载的动力影响.近年来,随着结构动力学和计算机水平的发展,现代车辆振动研究,可以更精确地考虑桥梁模型、车辆模型和它们之间的耦合振动.

本文以某座五跨连续曲线箱梁桥为实验背景,采用 Adams 软件建立车辆整车虚拟样机模型,仿真不同工况下的车辆响应,并提取各轮胎力.采用 ABAQUS 软件建立曲线桥有限元模型,通过编写基于 Fortran 语言的 DLOAD 和 UTRACLOAD 荷载子程序,将轮胎力作用于曲线桥上.计算公路曲线桥在移动荷载下的动力响应,在此基础上进一步研究车速、载重、桥梁曲率半径及路面不平度等因素对该公路曲线桥的动力响应的影响.

1 曲线桥和车辆模型的建立

1.1 车辆模型的建立

车辆模型是保证后续改善道路几何线性的基础,利用 ADAMS/Car 选取各个子系统模块,最终装配成车辆模型.

(1) 悬架系统模型

悬架系统是联结车身与轮胎的重要部件,主要由弹簧和减振器组成.

东风 (DFL1250A9) 重型汽车模型.前轮距 2.02m,后轮距 1.7m,前轴与中轴距离 5.3m,中轴与后轴距离 1.3m,前悬架采用非独立悬架,简单可靠,承载力大.中桥和后桥都作为驱动桥的模式,后

悬架采用螺旋弹簧式非独立式悬架,此悬架主要特点是采用螺旋弹簧承受垂向载荷,减震器、横、纵向推力杆等导向部件承受横向和纵向的受力.在 Adams/Car中采用离散梁法建立钢板弹簧模型.

①前悬架模型参数如下

- 质量:110.0 kg;
- 质心坐标:2100.0,-422.66,587.5(mm,mm,mm);
- 方向:0.0,88.30,0.0(deg);
- 转动惯量: I_{xx} : $4.8\times10^7\text{ kg}\cdot\text{mm}^2$;
 I_{yy} : $4.7\times10^7\text{ kg}\cdot\text{mm}^2$;
 I_{zz} : $2.7\times10^6\text{ kg}\cdot\text{mm}^2$;

② 后悬架模型参数如下

- 质量:175.0 kg;
- 质心坐标:7459.0,-305.73,753.054(mm,mm,mm);
- 方向:270.0,0.0,0.0(deg);
- 转动惯量: I_{xx} : $7.25\times10^6\text{ kg}\cdot\text{mm}^2$;
 I_{yy} : $3.25\times10^6\text{ kg}\cdot\text{mm}^2$;
 I_{zz} : $4.25\times10^6\text{ kg}\cdot\text{mm}^2$.

(2) 轮胎模型

轮胎是车辆必不可少的部分,也是非常重要的部分.其主要作用包括:支撑整个车辆;缓冲路面不平引起的振动;传递纵向力实现车辆的加速以及制动;传递侧向力,为车辆提供转向.本文采用 PAC2002 轮胎模型,轮胎参数见表 1.该轮胎的型号为 10.00R20,充气压力 830Kpa,接地长度为 256,接地宽度为 2,该轮胎的理论接地面积为 0.052m^2 ,通过这些参数来确定子程序中面载的边界及位置.

表 1 轮胎参数表

Table 1 Tire parameter table	
Model	10.00R20
pressure/kPa	830
Outer circumference/mm	3303
External diameter/mm	1052
Section width/mm	273
Tire cross section height/mm	272
Grounding length/mm	256
Grounding width/mm	202
Ground area/mm ²	39075
Average ground pressure/kPa	752.4
Hardness coefficient	0.91
Grounding coefficient	1.27

(3) 整车装配

在模板系统中还建立了车厢、车架及驾驶室系

统,得到重型汽车整车模型,然后,借助 ADAMS/Car 系统中的 New Full-Vehicle Assembly 进行整车装配,如图 1 所示.

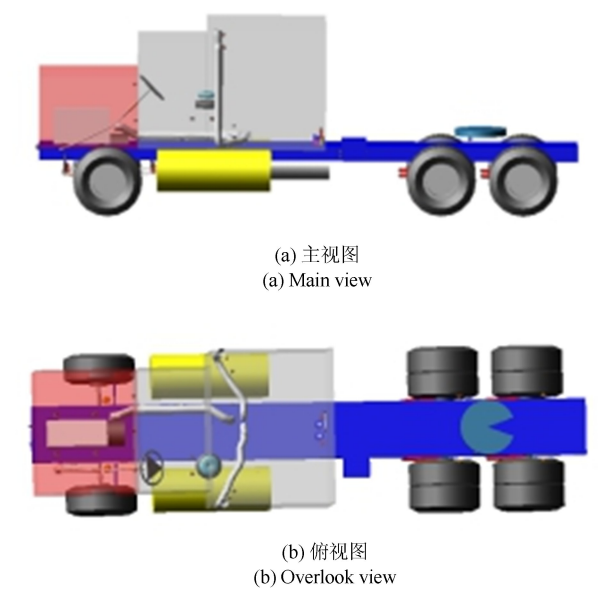


图 1 重型汽车整车模型

Fig.1 Heavy vehicle model

利用 Adams 软件搭建了三轴车辆整车模型和 3D Road 曲线桥.从 ABAQUS 有限元软件中提取出曲线箱梁桥中线处等跨度的节点,使用这些等距节点,在 Adams 中搭建出 3D Road 曲线桥,并将车辆模型置于桥面的零点处,如图 2 所示.本文为了使车辆能够在桥面上更精确地仿真,并完整地跑完整个桥面,在桥头处增设了 30m 长的直线引桥.

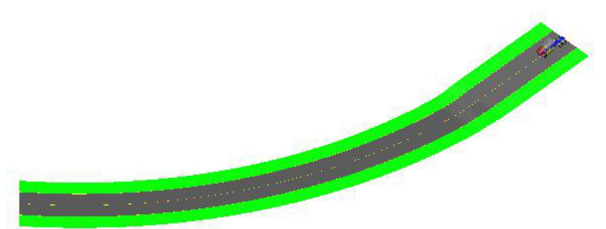


图 2 Adams 车桥模型

Fig.2 Adams vehicle bridge model

1.2 曲线桥有限元模型

采用 ABAQUS 建立曲线箱梁桥模型,桥梁横截面示意图如图 3 所示.桥梁全长为 125.6m,平均跨径 25.1m(五跨),曲率半径为 160m,支座处约束梁体径向位移和竖向位移.

该箱梁顶板宽度为 8.35m,平均厚度 0.2m;底板宽度 5.55m,厚度 0.25m;翼缘板悬臂长 1.4m.

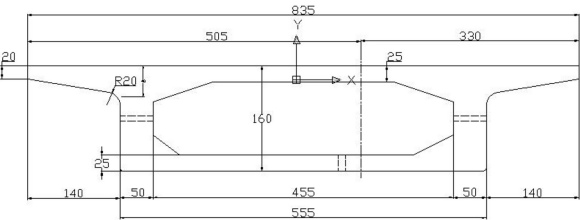


图3 箱梁桥横截面图(单位:cm)

Fig.3 Cross section of box girder bridge (unit: cm)

单元类型采用 C3D8R,即 8 节点线性六面体减缩积分单元,该单元类型计算用时少,位移结果较精确,对于扭曲现象具有很好的适用性.全桥共有 50000 个单元和 80661 个节点.为了避免出现应力集中,边界约束条件按实际支座的布置情况施加在箱梁底板相应于支座位置处的接触面上.曲线梁桥变形前模型和受力变形后应力云图分别如图 4、5 所示.曲线箱梁桥模态分析如图 6 所示.

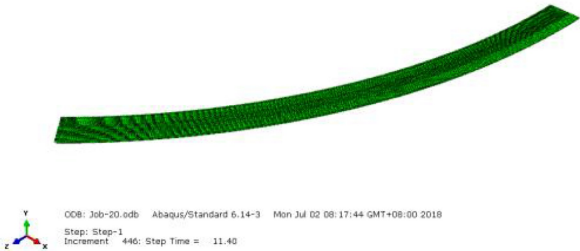


图4 曲线桥变形前模型结构

Fig.4 Model structure of curved bridge before deformation

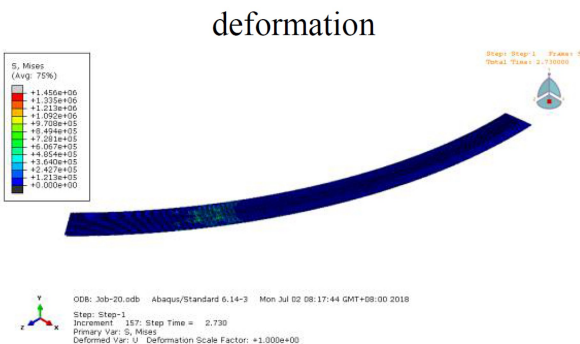


图5 曲线桥受力变形图

Fig.5 Force and deformation diagram of curved bridge

在有限元计算模型中将车辆轮胎力简化为六块面载荷,六组 0.256m×0.5m 的面力.随时间变化的垂向力和侧向力均为在 Adams 软件中仿真得到,作用方向分别为竖直向下和沿径向指向圆弧外侧,车桥位置如图 7 所示.仿真车辆在 40km/h,满载工况下计算得到的轮胎垂向、横向载荷如图 8 示.在 ABAQUS/Standard subroutines 中借助于

Fortran语言环境编写荷载移动的 DLOAD 和 UTRACLOAD 子程序,从而将轮胎力以面载荷的形式加到曲线桥有限元模型上,仿真车辆经过全桥的整个过程,并分析过程中曲线箱梁桥的动力响应.

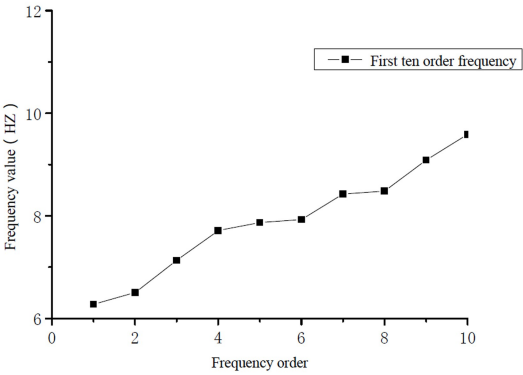


图6 曲线桥前十阶频率结果图

Fig.6 First ten order frequency diagram of curved bridge

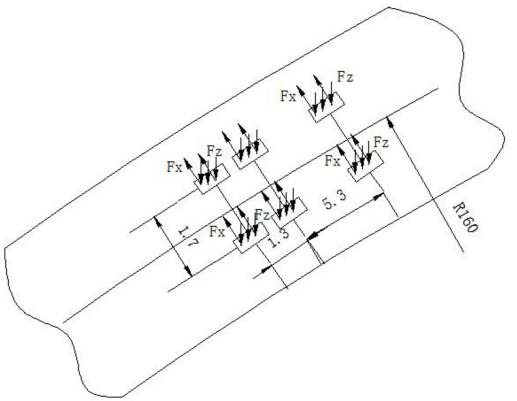


图7 局部桥梁荷载图

Fig.7 Local bridge load diagram

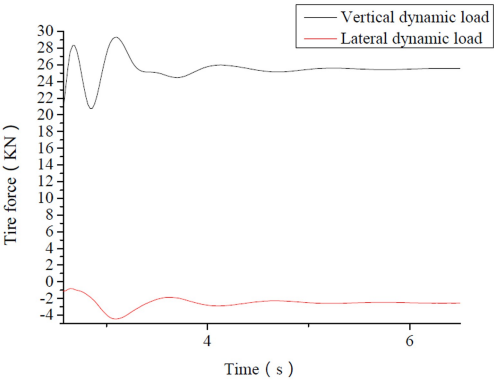


图8 轮胎垂向、横向动载荷

Fig.8 Vertical and lateral dynamic loads of tire

2 曲线箱梁桥车桥振动影响参数分析

车辆与桥梁结构的相互作用,涉及到桥面不平

度、车辆系统振动、桥梁振动和车辆与桥梁的耦合关系.曲线梁桥的动力响应与路面不平顺性、桥梁结构的几何参数、车辆行驶位置、车辆行驶速度、车辆载重、桥梁曲率半径等众多因素有关,这些参数对曲线箱梁桥振动的影响程度值得研究.

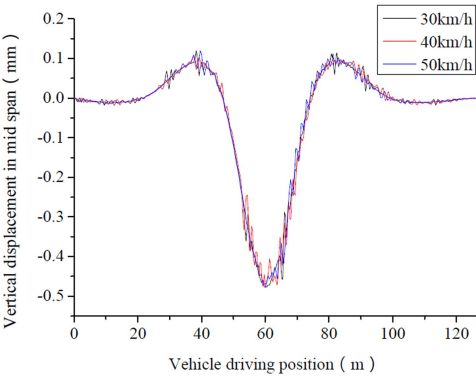
2.1 移动随机载荷作用下桥梁动力响应研究

(1) 车辆行驶速度的影响分析

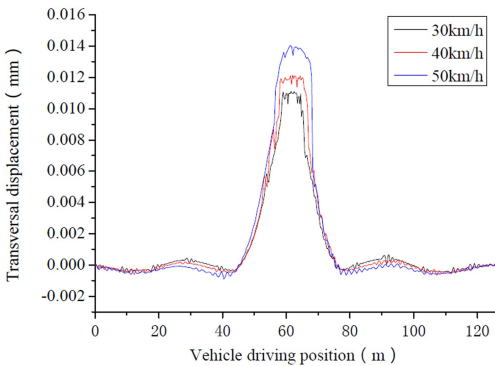
本文采用的是东风重型汽车,其型号是DFL1250A9,在实际应用中满载为 25t,空载时为 7t.载重取车辆满载时 25t,其余参数相同,分别求解车速为 30、40、50km/h 时曲线梁桥的振动响应.

不同移动速度下曲线桥第 3 跨跨中竖向位移、横向位移、截面弯矩以及 4 号支座支反力,如图 9 所示.

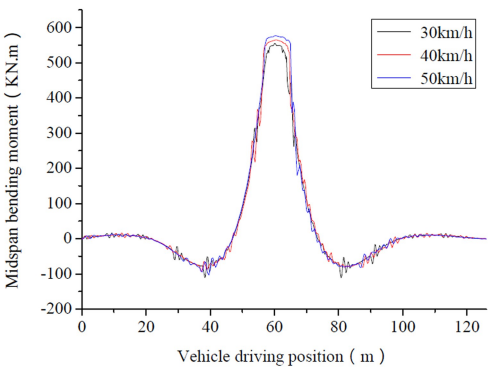
由图 9 可知,车辆行驶速度对桥梁竖向挠度影响很小,对跨中的横向位移、截面弯矩及跨中支座处的支反力均有较大影响,随着速度的增加而增加,其中,横向位移最大增长率达到了 15.7%,支座反力最大增长率为 13.6%.



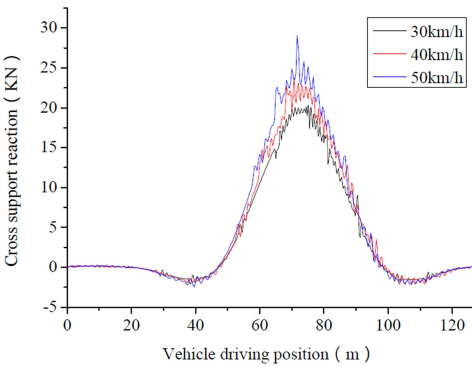
(a) 桥梁跨中动挠度响应
(a) Dynamic deflection response of midspan



(b) 桥梁跨中横向位移响应
(b) Lateral displacement response of midspan



(c) 桥梁跨中弯矩响应
(c) Moment response of midspan



(d) 桥梁跨中支座反力响应（4号支座）
(d) Support reaction of midspan (Support No. 4)

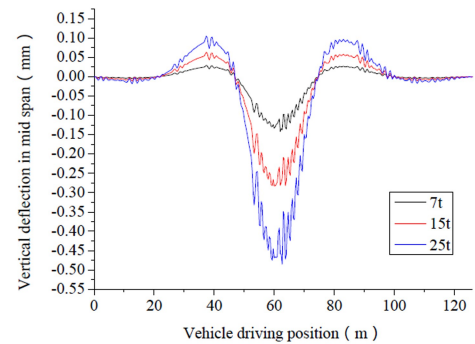
图 9 车辆行驶速度对曲线箱梁桥动态响应的影响
Fig.9 Influence of vehicle speed on dynamic response of curved box girder bridge

(2) 车辆载重的影响

随着交通运输和科技的发展,重型卡车的载重量在逐渐增加,而且时常还伴随着超载现象的出现,因此,研究车辆载重对曲线桥梁动力响应的影响是十分有必要的.

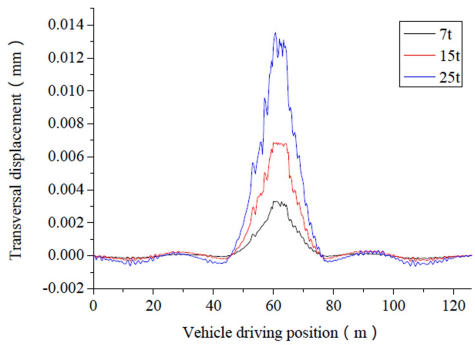
选取车速为 40km/h,载重量分别为 7t(空载)、15t(非满载)、25t(满载)的情况下,通过曲线桥梁,计算得到曲线桥梁的动力响应.不同载重下曲线桥梁跨中竖向位移、横向位移、第三跨跨中截面弯矩以及 4 号支座支反力,如图 10 所示.

从图 10 中可以看出,载重对于曲线箱梁桥第三跨跨中竖向位移、横向位移、截面弯矩和 4 号支座反力的影响,比车辆行驶速度的影响更加显著.随着载重增加,桥梁跨中竖向位移、横向位移、弯矩和支反力均呈现明显的增大趋势.



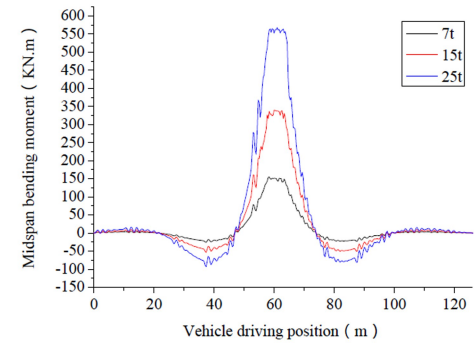
(a) 桥梁跨中动挠度响应

(a) Dynamic deflection response of midspan



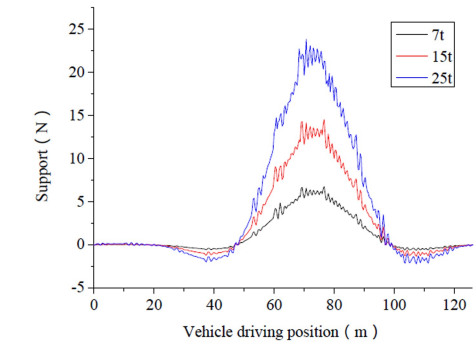
(b) 桥梁跨中横向位移响应

(b) Lateral displacement response of midspan



(c) 桥梁跨中弯矩响应

(c) Moment response of midspan



(d) 桥梁跨中支座反力响应 (4号支座)

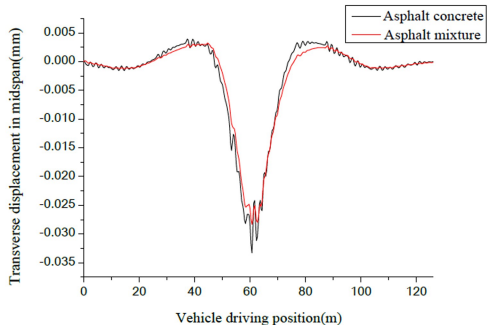
(d) Support reaction of midspan (Support No. 4)

图 10 车辆载重对曲线箱梁桥动态响应的影响

Fig.10 Influence of vehicle load on dynamic response of curved box girder bridge

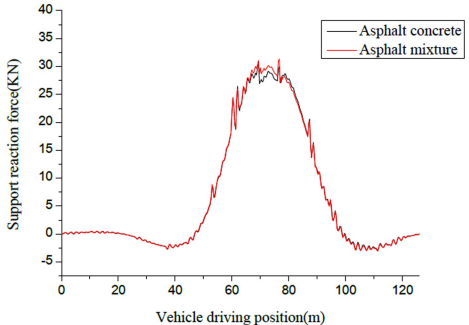
(3) 材料非线性的影响

为了研究材料非线性的影响,桥面材料选用沥青混凝土和沥青混合料.沥青混凝土是一种线性材料,其厚度为 4cm,弹性模量为 1400MPa,泊松比为 0.35.沥青混合料是一种非常复杂的异质性和随时间变化的非线性材料,其面层材料为 SMA-16,厚度为 4cm.分别计算了超载 35t 的情况,提取出箱梁底部各参数的动态响应曲线,如图 11 所示.



(a) 桥梁跨中横向位移响应

(a) Lateral displacement response of midspan



(b) 桥梁跨中支座反力响应 (4号支座)

(b) Support reaction of midspan (Support No. 4)

图 11 材料非线性对曲线箱梁桥动态响应的影响

Fig.11 Effect of material nonlinearity on dynamic response of curved box girder bridge

研究表明,桥面材料参数对桥梁竖向挠度和跨中弯矩影响很小,对跨中的横向位移及四号支座处的支反力均有一定影响,非线性材料相比线性材料,其横向位移减小 15.01%,支座反力增长了 3.47%.

(4) 桥梁曲率半径的影响

曲线桥梁区别于直桥的最重要特征是存在曲率.这样的特征使得曲线梁桥无论荷载作用在桥梁中线还是偏心,都会使桥梁存在弯矩、扭矩.以 40 km/h 的速度通过不同曲率半径的曲线桥梁时,桥梁跨中的竖向位移、横向位移、跨中弯矩和桥墩支座反力,如图 12 所示.

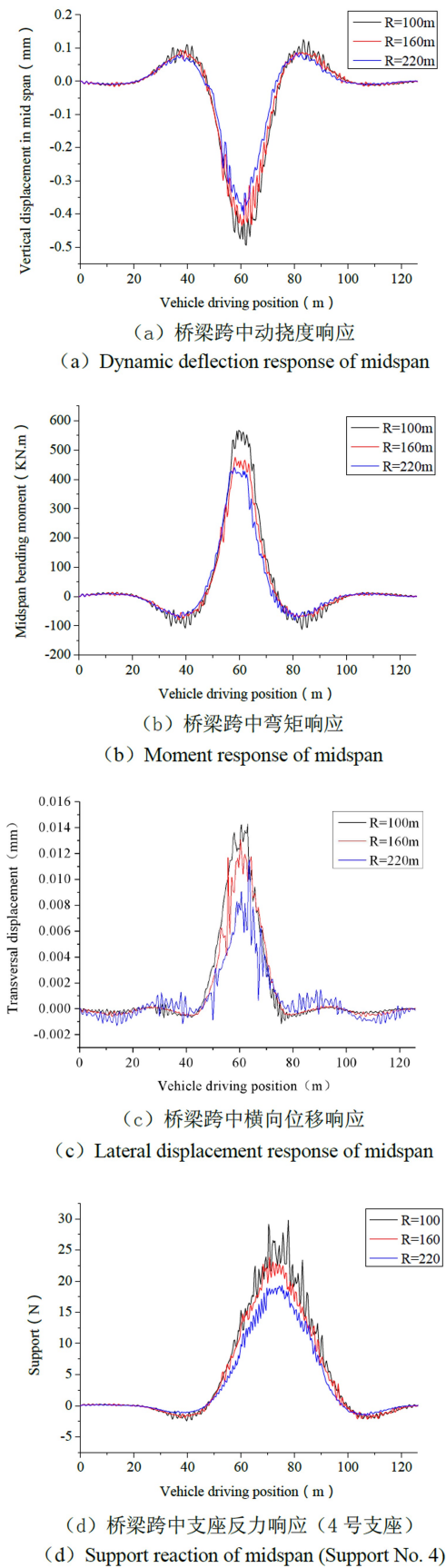


图 12 不同曲率半径对曲线箱梁桥动态响应的影响
Fig.12 Influence of different curvature radius on dynamic response of curved box girder bridge

从图 12 可以看出,曲线梁的弯扭耦合效应随着曲率半径的减小而呈现明显的增大趋势.桥梁跨中竖向位移、横向位移、弯矩和支反力的变化趋势基本一致,都是随着曲率半径的减小在逐渐增大,其中竖向位移最大增长率达到了 11.88%,支座反力最大增长率为 18.3%.

(5) 路面不平度的影响

大量的试验表明,路面不平度是稳定的,各态历经零均值的 Gauss 随机过程,可通过功率谱密度来描述路面的统计特性.本文根据 GB/T7031—86 规定的路面不平度功率谱函数来作为预期路面谱,路面不平度的垂直位移功率谱密度可用下式来拟合:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-W} \quad (n > 0)$$

式中:

n ——空间频率(m^{-1}),是波长 λ 的倒数,表示每米长度中包括几个波长.

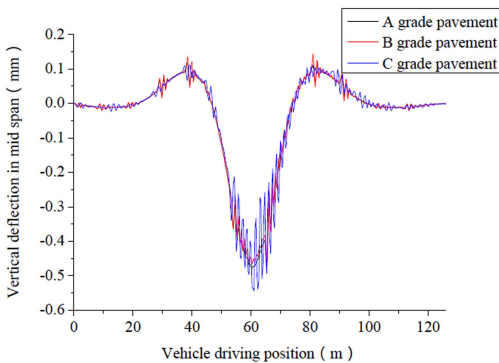
n_0 ——参考空间频率, $n_0 = 0.1 m^{-1}$;

$G_q(n_0)$ ——路面不平度系数,为参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度值,大小取决于公路的路面等级,单位为 $m^2/m^{-1} = m^3$;

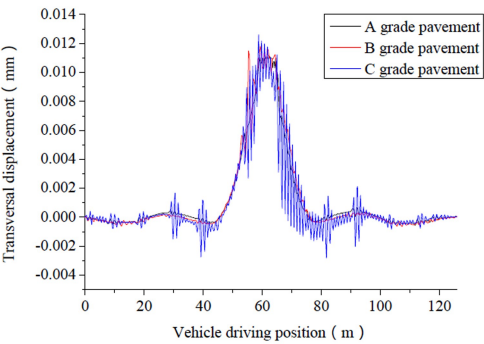
W ——频率指数,决定路面功率谱密度的频率结构,为双对数坐标系下斜线的斜率,一般情况取 $W = 2$.

A 级路面、B 级路面、C 级路面三种状况下,车辆以速度 40 km/h 通过曲线桥梁时,曲线桥梁三跨跨中竖向位移、横向位移、支反力和弯矩的动力响应,如图 13 所示.

从图 13 可以看出,路面不平度对曲线桥梁的动力响应影响很大,尤其是在路面等级较差的情况下.

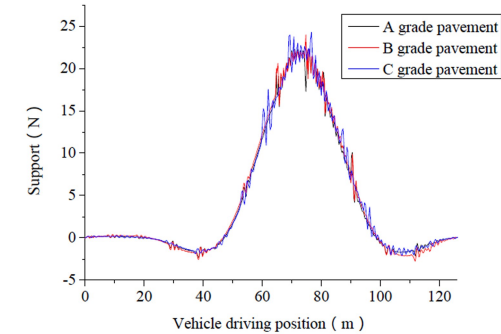


(a) 桥梁跨中动挠度响应
(a) Dynamic deflection response of midspan



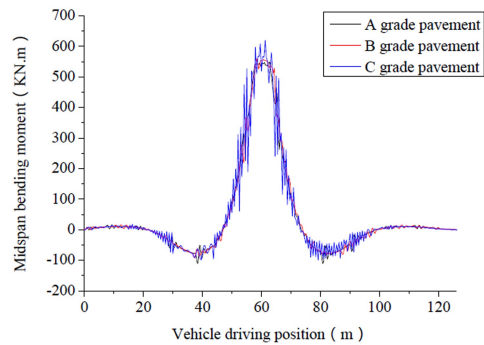
(b) 桥梁跨中横向位移响应

(b) Lateral displacement response of midspan



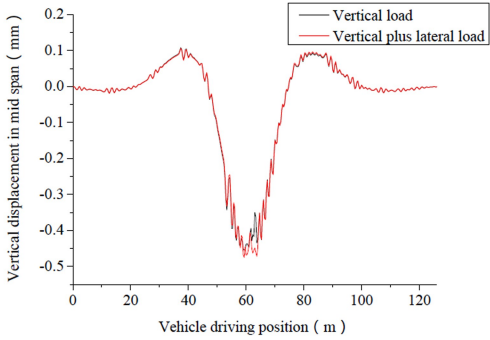
(c) 桥梁跨中支座反力响应

(c) Support reaction of midspan



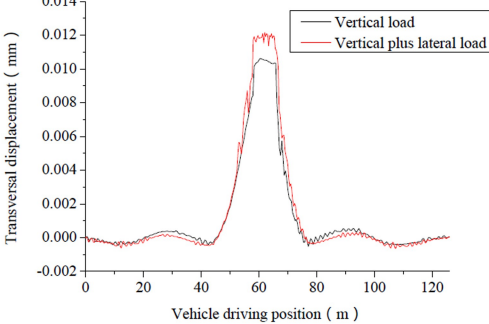
(d) 桥梁跨中弯矩响应

(d) Moment response of midspan



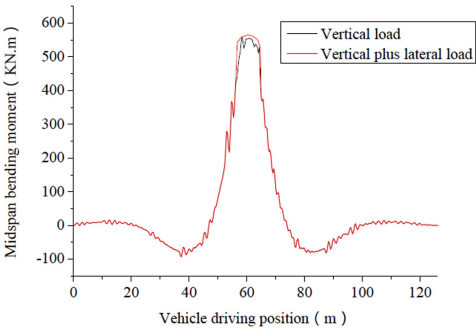
(a) 桥梁跨中动挠度响应

(a) Dynamic deflection response of midspan



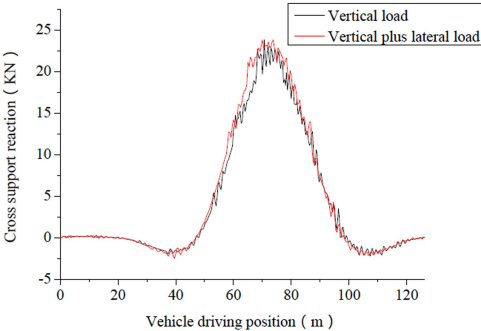
(b) 桥梁跨中横向位移响应

(b) Lateral displacement response of midspan



(c) 桥梁跨中弯矩响应

(c) Moment response of midspan



(d) 桥梁跨中支座反力响应 (4号支座)

(d) Support reaction of midspan (Support No. 4)

图 13 不同路面等级对曲线箱梁桥动态响应的影响
Fig.13 Influence of different pavement grades on dynamic response of curved box girder bridges

随着路面恶化即路面不平度越差,桥梁跨中竖向位移、横向位移、弯矩和支反力的冲击效应越大。

(6) 轮胎横向载荷的影响

为了研究车辆横向载荷对桥梁的影响,本节对比了垂向加横向载荷共同作用,和单独垂向力作用的桥梁响应。曲线桥梁跨中竖向位移、横向位移、支反力和弯矩的动力响应,如图 14 所示。施加横向载荷前后对比如表 2 所示。

图 14 轮胎横向载荷对曲线箱梁桥动态响应的影响
Fig.14 Influence of lateral tire load on dynamic response of curved box girder bridge

表 2 施加横向载荷前后对比

Response maximum	Vertical direction	Vertical direction+ Transverse	Growth rate
Vertical displacement/mm	-0.4466	-0.4686	4.92%
Lateral displacement/mm	0.0106	0.0122	15.09%
Bending moment/N·m	555973	565000	1.62%
Support reaction/N	23094	23849.1	3.27%

由表 2 可以看出:随着横向载荷的施加,桥梁跨中最大竖向位移、横向位移、弯矩和支座反力都有所增大.跨中横向位移的增量最大,增长率为 15.09%,竖向挠度和弯矩均有一定程度的增加.

3 结论

本文基于 ADAMS 建立了重型汽车整车模型,并通过仿真得到了轮胎垂向和横向动载,利用 ABAQUS 建立了曲线梁桥有限元模型.通过荷载子程序,将六个轮胎载荷作用于曲线桥上仿真,研究了车辆行驶速度、车辆载重、桥梁的曲率半径以及路面不平度对桥梁动力响应的影响.研究表明:

- (1) 车辆行驶速度对跨中竖向位移的影响很小,但是对跨中的横向位移及支座的支反力有较大影响.
- (2) 随着载重的增加,曲线桥跨中竖向位移、横向位移、截面弯矩和支座反力均呈现明显增大的趋势.
- (3) 研究表明,桥面材料参数对桥梁竖向挠度和跨中弯矩影响很小,非线性材料相比线性材料,其横向位移减小 15.01%,支座反力增长了 3.47%.
- (4) 随着曲率半径的增加,桥梁跨中位移呈现略微下降的趋势.
- (5) 路面不平度对桥梁的动态响应影响很大.随着路面恶化,即路面不平度越差,桥梁竖向挠度及弯矩的冲击效应越大.
- (6) 随着轮胎横向载荷的施加,桥梁跨中动力响应增大.其中横向位移的增量最大,达到了 15.09%.

参 考 文 献

1 马玉龙. 公路曲线连续梁桥车桥耦合振动研究[硕士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2014 (Ma Y L. Research on vehicle bridge coupling vibration of highway curved continuous girder bridge[Master Thesis]. Changsha: Hu-

nan University, 2014 (in Chinese))

2 沈火明,肖新标. 求解车桥耦合振动问题的一种数值方法. 西南交通大学学报, 2003, 38 (6): 658 ~ 662 (Shen H M, Xiao X B. A numerical method for vehicle bridge coupled vibration problems. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003,38(6):658~662 (in Chinese))

3 邓露,段林利,何维,等. 中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究. 中国公路学报, 2018,31 (7):92~100(Deng L,Duan L L, He W, et al. Study on vehicle model for vehicle-bridge coupling vibration of highway bridges in China. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(7):92~100(in Chinese))

4 蒋培文. 公路大跨径连续体系桥梁车桥耦合振动研究 [博士学位论文]. 西安:长安大学, 2012 (Jiang P W. Coupled vibration between vehicles and highway long-span continuous series bridge [Ph.D Thesis]. Xi'an: Chang'an University,2012 (in Chinese))

5 彭献,游福贺. 车桥耦合系统固有频率的研究. 动力学与控制学报, 2010,8(3):258~262 (Peng X,You F H. Research on natural frequency of vehicle bridge coupled system. *Journal of Dynamics and Control*, 2010,8(3): 258~262 (in Chinese))

6 Law S S, Zhu X Q. Bridge dynamic responses due to road surface roughness and braking of vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 2005,282:805~830

7 曾庆元,郭向荣. 列车桥梁时变系统振动分析理论与应用. 北京:中国铁道出版社, 1999 (Zeng Q Y,Guo X R. Theory and application of vibration analysis for train-bridge time varying system. Beijing: China Railway Press, 1999 (in Chinese))

8 周智辉,张军,秦文孝,等. 金温线武义江桥列车走行性与行车安全指标研究. 振动与冲击, 2011,30(10): 9~13 (Zhou Z H, Zhang J, Qin W X, et al. Train running performance and traffic safety index for Wuyi river bridge of Jinwen line. *Journal of Vibration and Shock*, 2011,30(10):9~13 (in Chinese))

9 郭向荣,何玮,朱志辉,等. 横风作用下货物列车通过大跨度铁路斜拉桥的走行安全性研究. 中国铁道科学, 2016,37(2):41~47 (Guo X R, He W, Zhu Z H, et al. Study on safety of freight trains passing through long span railway cable-stayed bridges under crosswind. *China Railway Science*, 2016,37(2):41~47 (in Chinese))

10 Li S H, Ren J Y. Investigation on three-directional dynamic interaction between a heavy-duty vehicle and a curved bridge. *Advances in Structural Engineering*, 2017,

- 21(5):721~738
- 11 肖祥,薛浩,何雄君,等. 移动荷载作用下索-桥耦合振动分析研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018,42(3):402~406 (Xiao X, Xue H, He X J, et al. Analysis and research on coupled vibration of cable-bridge under moving load. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2018,42(3):402~406 (in Chinese))
 - 12 陈炎,黄小清,马发发. 车桥系统的耦合振动. 应用数学和力学, 2004,25(4):354~358 (Chen Y, Huang X Q, Ma Y F. Coupled vibration of vehicle bridge system. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2004,25(4):354~358 (in Chinese))
 - 13 朱培,任兴民,秦卫阳,等. 移动车辆桥梁系统中的振动能量获取. 动力学与控制学报, 2018,16(4):361~369 (Zhu P, Ren X M, Qin W Y, et al. Piezoelectric energy harvesting in moving-vehicle bridge system. *Journal of Dynamics and Control*, 2018,16(4):361~369 (in Chinese))
 - 14 邓露,王维. 公路桥梁动力冲击系数研究进展. 动力学与控制学报, 2016,14(4):289~300 (Deng L, Wang W. Research progress on dynamic impact factors of highway bridges. *Journal of Dynamics and Control*, 2016,14(4):289~300 (in Chinese))

DYNAMIC RESPONSE OF CURVED GIRDER BRIDGE UNDER RANDOM VEHICLE LOADS

Liu Xing¹ Li Shaohua^{1,2†} Si Chundi^{1,2} Ren Jianying^{1,2}

(1. Shijiazhuang Tiedao University, School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang 050043, China)

(2. Traffic Safety and Control Key Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract When a vehicle crosses the curved bridge, the vibration of the curved bridge is mainly caused by three-direction traffic loads and bending-torsion coupling effects. In this paper, the finite element model of a five-span continuous curved box girder bridge was established by employing ABAQUS, and a full vehicle model of the three-axle heavy-duty truck was established by using Adams. Six tire forces under different working conditions were calculated, applied onto the curved bridge by developing two subroutines DLOAD and UTRACLOAD. The vibration responses of the curved girder bridge with different curvature radius were calculated under different vehicle speeds, traffic loads and road irregularities. The results showed that with the increase in the curvature radius, the transverse displacement of the bridge at midspan decreases slightly, while the vehicle speed has a significant impact on the transverse displacement and support reaction. Moreover, the higher the grade of road roughness is, the greater the vertical deflection and bending moment of the bridge are.

Key words traffic load, finite element method, bending and torsion coupling, dynamic response