

文章编号:1673-2049(2019)04-0087-07

# 铁路简支梁桥动力响应数值分析与实测验证

张一鸣<sup>1</sup>,王飞球<sup>2</sup>,金顺利<sup>2</sup>,谢以顺<sup>1,2</sup>,王浩<sup>1</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 210096; 2. 中铁二十四局集团有限公司,上海 200071)

**摘要:**以某铁路简支梁桥为工程背景,基于有限元软件 ANSYS 实现了列车荷载作用下简支梁桥自振特性分析与动力响应计算,并利用现场实测加速度响应对有限元计算结果进行了验证。基于验证后的有限元模型,研究了跨径、车速及车重等关键因素对铁路简支梁桥动力响应的影响,采用移动荷载模型分析该简支梁桥在列车荷载作用下的动力响应。结果表明:简支梁桥自振频率及加速度特征值与有限元计算值总体上吻合较好,但由于现场实测存在多种环境因素干扰,局部对比结果存在差异;有限元计算的加速度平均值大于现场实测值,但幅值相差不大且都呈周期性变化;桥梁1阶及3阶自振频率的实测值与有限元计算值较为接近;跨径、车速及车重等关键因素均对桥梁动力响应产生一定影响,随着列车车速的提高,简支梁桥动力响应明显增加,列车驶离桥梁后,桥梁自由振动的振幅随车速的提高显著增大;简支梁桥跨径与车重均对跨中截面挠度影响显著,在设计过程中应予以重视;所得结论可为铁路桥梁的动力性能评价提供参考。

**关键词:**铁路桥梁;简支梁桥;动力响应;现场实测;数值计算

**中图分类号:**U24 **文献标志码:**A

## Numerical Analysis and Field Measurement Validation of Dynamic Characteristics of Simply-supported Beam Railway Bridge

ZHANG Yi-ming<sup>1</sup>, WANG Fei-qiu<sup>2</sup>, JIN Shun-li<sup>2</sup>, XIE Yi-shun<sup>1,2</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

**Abstract:** A simply-supported beam railway bridge was employed as an example, the vibration responses of natural vibration frequency and dynamic characteristics were calculated based on ANSYS. The reliability of the calculated results was validated by the field measured acceleration response. On the basis, some key factors which influence the dynamic characteristics of bridges, including bridge span, velocity and train weight were analyzed based on the finite element model. The dynamic response of the simply supported beam bridge was analyzed based on moving load model. The results show that the measured natural frequency and acceleration can match well with the calculated results in general. However, some of the calculated results deviate from the measured ones due to the interference of external factors. The average acceleration calculated value by finite element method is larger than measured value, but the difference in amplitude is small and periodic. Bridge span, velocity and train weight have an influence on dynamic characteristics, and the bridge deflection increases remarkably with the increasing of these

收稿日期:2018-08-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB060000);江苏省重点研发计划项目(BE2018120)

中国铁路总公司科技研究开发计划重点项目(2017G002-K)

作者简介:张一鸣(1992-),男,河南许昌人,工学博士研究生,E-mail:zhangyiming1992@seu.edu.cn。

factors. With the increase of train speed, the vibration response of simply supported beam bridge is obvious. The bridge vibration increases significantly with the increase of train speed, when the train leaves the bridge. The bridge span and train weight have significant influence on the deflection of bridge midspan, which should be paid more attention to in the design process. The results can provide references for the vibration performance evaluation of railway bridges.

**Key words:** railway bridge; simply-supported beam bridge; dynamic characteristics; field measurement; numerical calculation

## 0 引言

近年来,中国铁路建设发展迅猛。随着列车车速的不断提高及荷载的逐渐加重,列车经过桥梁时所引起的桥梁振动随之增加,将会对行车安全性、平稳性和乘车舒适性造成不同程度的影响。因此,桥梁在列车荷载作用下的动力响应问题越来越受到学术界和工程界的关注<sup>[1-4]</sup>。在铁路桥梁中,简支梁桥量大面广,分析简支梁桥结构在列车作用下的动力响应,对合理进行桥梁结构设计,保障列车安全平稳运行具有重要的现实意义。

车桥相互作用与多种因素相关,研究方法主要包括解析法、数值模拟法以及试验研究法<sup>[5-9]</sup>。单一的分析方法难以准确有效地分析桥梁动力响应,因此,通过理论分析、数值模拟和现场实测相结合的方法,可系统地研究桥梁的动力行为<sup>[10-11]</sup>。张楠等<sup>[12]</sup>通过理论计算研究了高速列车与桥梁的动力相互作用,并开展现场试验进行验证;Zhang 等<sup>[13]</sup>建立了车桥耦合动力系统的分析方法并结合现场实测,认为车桥共振现象使得各项动力指标均呈较为复杂的规律。列车与桥梁结构的相互作用较为复杂,其影响因素具有很强的随机性,因此,对整个车桥系统进行精确求解较为困难。简支梁桥跨径较小,将列车荷载简化为移动荷载,可简单快速又相对真实地模拟列车经过简支梁桥的整个过程,得到列车经过不同位置时的结构响应结果。宋莎嘉等<sup>[14]</sup>采用移动荷载加载方式模拟列车经过便梁的整个过程,得到了便梁在列车荷载作用下的应力和挠度值,并评估了便梁的安全性。邓建良等<sup>[15]</sup>将磁悬浮列车荷载简化为移动均布荷载,指出移动荷载模型可以反映轨道梁振动的主要特征和振动规律。然而,简支梁桥在移动荷载作用下的动力响应分析多停留于理论分析和数值模拟,尚需通过现场实测进一步进行验证。

本文依托某铁路简支梁桥,基于 ANSYS 平台计算该桥在列车荷载作用下的加速度,并通过现场

实测对桥梁加速度响应进行验证。由于车桥相互作用中,桥梁横向加速度响应的研究尚未成熟,故本文只针对桥梁竖向加速度响应开展数值分析和现场实测。选取跨径、车速和车重作为关键因素,探讨不同因素对简支梁桥在列车荷载作用下的动力响应影响,以为同类桥梁的动力响应分析提供参考。

## 1 铁路简支梁桥动力响应数值分析

依托某铁路简支梁桥,基于 ANSYS 平台建立该桥有限元模型。由于加速度是反映列车振动特性的主要指标,因此选取竖向加速度作为主要分析对象,研究该简支梁桥在列车荷载作用下的动力响应。

### 1.1 有限元建模

选取某铁路简支梁桥(图 1)为分析对象,该桥为跨径  $3 \times 24$  m 的预应力混凝土简支梁桥。桥梁横截面为双片式 T 形截面,材料及截面特性值如表 1 所示。所处铁路线属客运专线,客车为 25G 型车,车厢长为 25.5 m,总重 50 t,车厢间距为 1 m,列车过桥时车速为  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

基于 ANSYS 建立该铁路桥梁的中跨简支梁桥有限元模型,如图 2 所示,其中主梁处理成梁单元,用 Beam3 单元模拟,共有 50 个单元和 51 个节点。

### 1.2 有限元计算结果分析

基于 ANSYS 模态分析功能,采用 Block Lanczos 对结构动力特征值进行求解。移动荷载按照《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)<sup>[16]</sup>要求施加,求解加速度时程并进行功率谱分析,研究移动荷载作用下该简支梁桥的加速度响应。

#### 1.2.1 简支梁桥动力特性

对简支梁桥动力特性进行分析,计算模态数量为 10,考虑到主要研究简支梁桥的竖向振动,列出前 3 阶竖向弯曲振型及频率值,如表 2 所示。

#### 1.2.2 列车荷载作用下桥梁跨中加速度响应

基于上述有限元模型,采用完全法计算瞬态动力响应,提取简支梁桥跨中截面的竖向加速度计算结果进行功率谱密度分析,计算结果如图 3 所示,其



图 1 桥梁概况  
Fig. 1 General Status of Bridge

表 1 材料及截面特性

参数	梁高/m	截面面积/m <sup>2</sup>	抗弯惯性矩/m <sup>4</sup>	材料密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
参数值	2.45	2.99	1.652 9	2 500	32	0.2

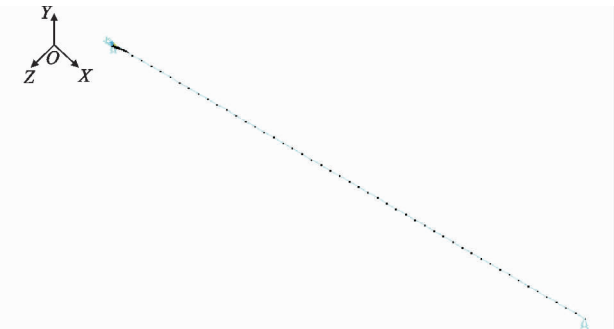


图 2 桥梁有限元模型  
Fig. 2 Finite Element Model of Bridge

表 2 桥梁动力特性

阶次	振型特点	自振频率/Hz
1	对称竖向弯曲	7.22
2	反对称竖向弯曲	28.47
3	对称竖向弯曲	62.65

中共包含 8 295 个数据点,时长 35.8 s,采样频率为 231 Hz。

由图 3 可知,加速度响应交替出现波峰及波谷,

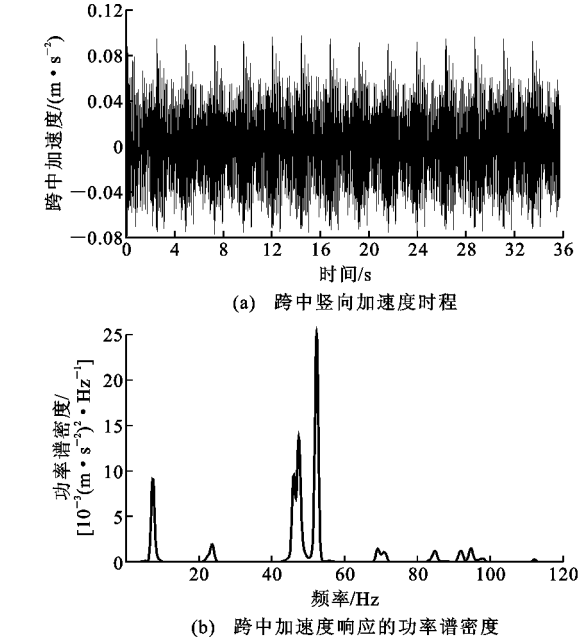


图 3 跨中加速度时程及功率谱密度  
Fig. 3 Acceleration Time History Responses and PSDs in Mid-span

在最小值 $-0.08\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 与最大值 $0.09\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 间波动。在图 3(b)中有 4 个幅值较高的峰点,对应的振动频率分别为 7.35,46.3,47.8,53.4 Hz,其中振动频率为 7.35 Hz 时,与桥梁自振频率(7.22 Hz)接近。

## 2 铁路简支梁桥动力响应现场实测

采用现场实测的方法能够客观且综合地反映简支梁桥在列车荷载作用下的实际工作状况。以上述铁路简支梁桥为研究对象,开展车桥相互作用现场实测研究,主要测试内容为桥梁在环境激励及列车荷载作用下的竖向加速度响应。

### 2.1 简支梁桥竖向加速度现场实测

采用 941B 型拾振器和 AZ316 型数据采集仪(图 4),拾振器选用第一档位,加速度灵敏度为 $0.3\text{ V}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$ ,最大量程为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,通频带为 0.25~80 Hz,实测于 2017 年 4 月 18 日至 4 月 19 日进行,现场气温为 $20\sim28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,桥面地表温度最高达到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其中 18 日 9:10~14:15 测试 10 组,环境激励和列车荷载各 5 组;19 日 16:45~17:00 测试 1 组。

现场实测数据采样频率设定为 256 Hz,加速度传感器布置于简支梁桥中跨的 2 个支座及 1/2 截面处,测点沿顺桥向依次编号为 D-V-01,D-V-02,D-V-03,加速度测试情况如图 5 所示。



图 4 测试仪器  
Fig. 4 Testing Instruments

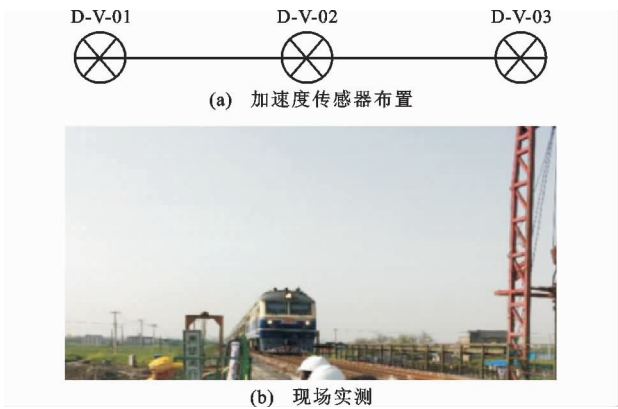


图 5 竖向加速度测试情况  
Fig. 5 Vertical Acceleration Testing Situation

2.2 实测结果分析

本文主要选取中跨跨中截面的加速度响应结果进行分析,基于 MATLAB 平台调用现场加速度实测结果进行功率谱分析,分析时,对实测信号进行加窗以减少由于时域中信号截断而引起的频域中信号泄露,采用峰值法识别桥梁模态参数得到结构固有频率。

2.2.1 环境激励下简支梁桥动力响应分析

结构固有频率及振型虽可通过结构动力学原理计算得到,但由于结构组成材料性能标定值与实际值有时相差较大,因此,有必要通过试验求得桥梁结构动力特性。通过测试环境激励下竖向加速度并进行功率谱分析得到功率谱密度,结果如图 6 所示。

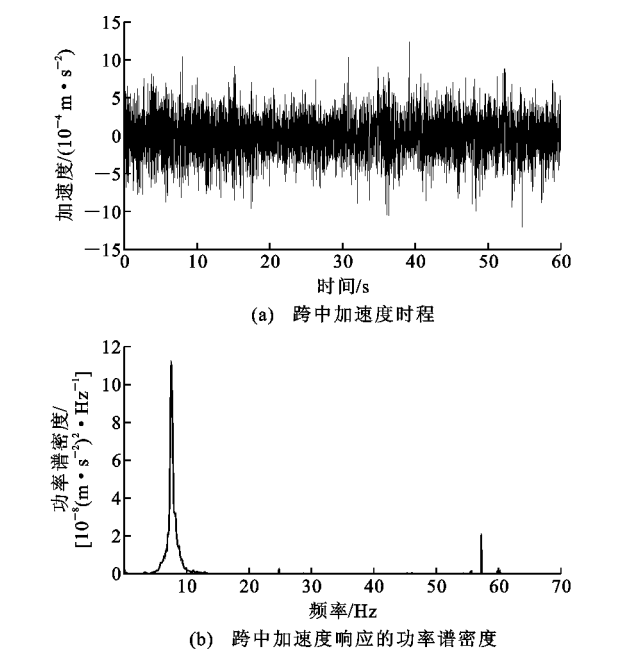


图 6 环境激励下跨中加速度时程及功率谱密度  
Fig. 6 Acceleration Time History and PSDs in Mid-span Under Ambient Excitation

由图 6 可知:无列车经过时的竖向加速度平均幅值约为  $5 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,峰值约为  $9 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,因此,环境激励下的跨中截面竖向加速度极小;桥梁竖向振动效应主要由低阶频率起控制作用,有 2 个明显的峰值,振动频率为 7.53,57.28Hz。

2.2.2 列车荷载作用下简支梁桥动力响应分析

通过对列车荷载作用下的简支梁桥中跨跨中截面竖向加速度进行功率谱密度分析,得到其竖向加速度功率谱,如图 7 所示。

3 实测结果与数值模拟结果对比分析

将桥梁动力特性及跨中截面加速度响应的实测结果与基于 ANSYS 平台的有限元计算结果进行对比,分析误差产生原因。

3.1 简支梁桥动力特性对比分析

现场实测结果与有限元计算的自振频率对比结果见表 3,同时列出了计算值与实测值的相对误差。

由表 3 可知,实测自振频率与有限元计算结果总体上相对误差较小,表明实测值与有限元计算值吻合较好。由于 2 阶振型为反对称竖弯,跨中节点无法反映 2 阶振型的特性,因此无法通过实测加速度响应识别出 2 阶频率。

3.2 动力响应对比分析

对比列车荷载作用下现场实测与有限元计算的加速度幅值,结果如表 4 所示。

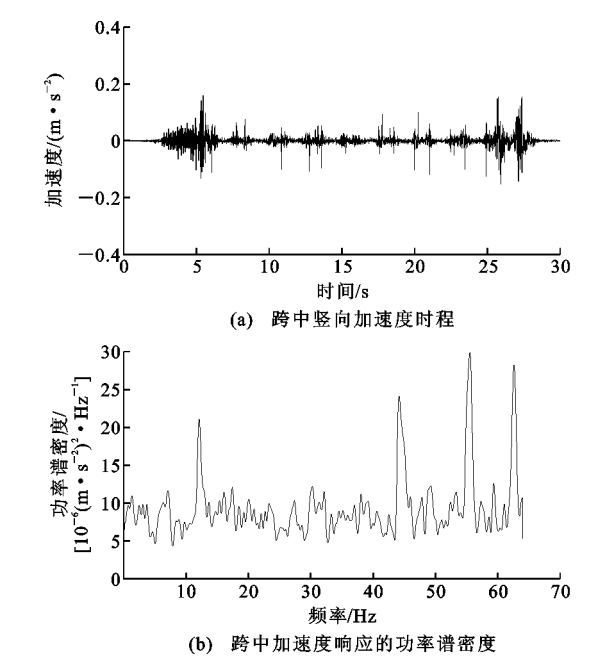


图 7 列车荷载作用下跨中加速度时程及功率谱密度

Fig. 7 Acceleration Time History and PSDs in Mid-span Under Train Loading

表 3 自振频率实测值与有限元计算值比较

Tab. 3 Comparison of Measured Values and Finite Element Calculation Values of Natural Vibration Frequency

阶次	自振频率实测值/Hz	自振频率有限元计算值/Hz	相对误差/%
1	7.53	7.22	4.1
2		28.47	
3	57.28	62.65	9.4

表 4 加速度实测值与有限元计算值比较

Tab. 4 Comparison of Measured Values and Finite Element Calculation Values of Acceleration

参数	加速度实测值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	加速度有限元计算值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	相对误差/%
最大峰值	0.18	0.10	-44.4
平均幅值	0.04	0.05	25.0

由表 4 可知,有限元动力响应加速度平均幅值比实测值高出  $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,主要是因为实际每节车厢与铁轨有数个轮对相接触,而有限元计算分析时把每节车厢荷载集中化处理,集中力的作用效果大于分布力,故有限元分析时加速度幅值稍大。二者均呈周期性变化,且幅值相差不大,表明基于 ANSYS 的简支梁桥动力响应分析较为合理。

对比实测功率谱与有限元计算所得功率谱可知,实测功率谱图中峰值较多,主要是由于实际振动相比于理论振动更为复杂,现场其他干扰也会诱导频谱出现多个峰值。列车荷载作用下,实测峰值对

应频率与有限元计算结果相比,总体上相对误差较小,吻合度较好,但由于实测过程中存在大量复杂因素和不确定性,个别实测值与有限元计算结果相差较大。

## 4 列车荷载作用下桥梁动力响应影响因素分析

车桥振动问题是车辆和桥梁 2 个动力系统耦合振动的问题,与多种因素有关。根据文献[17]~[21]可知,车速、轨道不平顺、行车数和车重等因素均对桥梁动力响应产生影响,本文根据铁路简支梁桥特点,选取跨径、车速以及车重作为关键因素进行研究。

### 4.1 跨径对桥梁动力响应的影响

选取跨径  $L=16, 24, 32 \text{ m}$  的 3 种铁路简支梁桥进行分析,列车行车速度为  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,主梁抗弯刚度  $EI=2.05 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。基于 ANSYS 软件分别求解主梁跨中截面的位移响应,不同跨径简支梁桥跨中位移比较结果如图 8 所示。

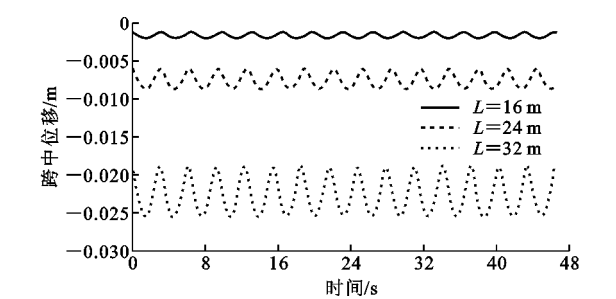


图 8 桥梁跨中位移比较

Fig. 8 Comparison of Displacements in Mid-span of Girder

由图 8 可知,桥梁跨中静位移和车桥动力响应位移随着跨径的增加而显著增大。跨径为  $16 \text{ m}$  时,跨中最大位移为  $2 \text{ mm}$ ,跨径为  $32 \text{ m}$  时,跨中最大位移已增至  $26 \text{ mm}$ ,因此简支梁桥位移响应幅值与跨径呈非线性正相关,实际桥梁设计中应充分考虑跨径对车桥动力响应的影响。

### 4.2 车速对桥梁动力响应的影响

采用控制变量法,以跨径为  $24 \text{ m}$ 、主梁抗弯刚度  $EI=2.05 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$  的简支梁桥为分析对象,分析车速对桥梁动力响应的影响。根据《铁路桥涵设计基本规范》规定,旅客列车最高行车速度为  $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,货物列车为  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,因此选取车速  $v$  为  $40, 80, 120, 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时简支梁桥跨中截面的位移时程进行对比,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,桥梁跨中截面在不同行车速度下的时程曲线表现出不同的波动性,车速越大,简支梁

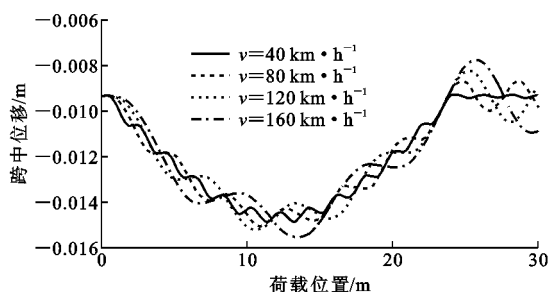


图9 各车速下桥梁动力响应比较

Fig. 9 Comparison of Dynamic Responses at Different Speeds of Vehicles

桥振动响应越大,且随着车速增加,控制点位移明显增大。当车速达到  $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,跨中截面挠度为  $15.8 \text{ mm}$ ,小于《铁路桥涵设计基本规范》规定限值  $30 \text{ mm}(L/800)$ ;列车驶出桥梁后,桥梁自由振动的振幅随车速的提高逐渐增大。

#### 4.3 车重对桥梁动力响应的影响

以跨径为  $24 \text{ m}$ 、主梁抗弯刚度  $EI=2.05 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$  的简支梁桥为分析对象,当车速为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,分别求解车重  $m$  为  $20, 60, 100, 140, 180 \text{ t}$  时的桥梁跨中位移,并绘出不同车辆荷载下简支梁桥跨中截面的位移时程曲线,如图 10 所示。

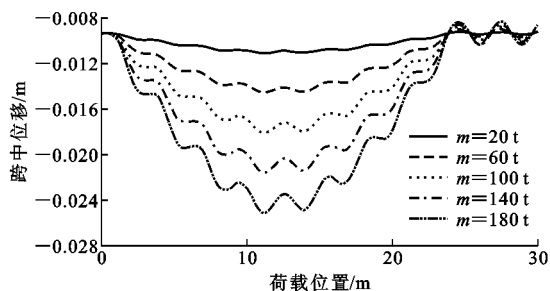


图10 不同车重跨中位移响应比较

Fig. 10 Comparison of Mid-span Displacement Responses of Different Weights of Vehicles

由图 10 可知,当车重为  $20 \text{ t}$  时,简支梁桥跨中位移值相对于其他车辆荷载波动极小,且最大位移值仅为  $11.5 \text{ mm}$ 。随着车重的增加,跨中挠度变化显著,当车重为  $180 \text{ t}$  时,跨中挠度达到  $25.6 \text{ mm}$ ,接近《铁路桥涵设计基本规范》规定限值 ( $30 \text{ mm}$ ),因此应充分考虑过大的列车荷载对桥梁动力响应造成的影响。

## 5 结语

(1)采用移动荷载模型分析该简支梁桥在列车荷载作用下的动力响应,有限元计算的加速度平均幅值大于实测值,但相差不大且都呈周期性变化,验

证了移动荷载模型在铁路简支梁桥动力响应计算中的有效性。

(2)桥梁 1 阶及 3 阶自振频率的实测值与有限元计算结果较为接近,吻合度较好,可认为基于 ANSYS 的桥梁动力特性计算较为合理。

(3)随着车速的提高,简支梁桥振动响应明显,列车驶离桥梁后,桥梁自由振动的振幅随车速的提高显著增大。跨径和车重对跨中截面挠度影响显著,在设计过程中应予以重视。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 翟婉明,夏禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2011.  
ZHAI Wan-ming, XIA He. Train-track-bridge Dynamic Interaction: Theory and Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.  
LI Guo-hao. Stability and Vibration of Bridge Structures[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.
- [3] 夏禾,张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京:科学出版社,2005.  
XIA He, ZHANG Nan. Dynamic Interaction Between Vehicle and Structure[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [4] 李小珍,张志俊,刘全民. 任意移动荷载列作用下简支梁桥竖向振动响应解析分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 137-142.  
LI Xiao-zhen, ZHANG Zhi-jun, LIU Quan-min. Vertical Dynamic Response Analysis of a Simply Supported Beam Bridge Under Successive Moving Loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 137-142.
- [5] ZHANG Y W, ZHAO Y, ZHANG Y H, et al. Riding Comfort Optimization of Railway Trains Based on Pseudo-excitation Method and Symplectic Method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(21): 5255-5270.
- [6] AN L, LI D, YU P, et al. Numerical Analysis of Dynamic Response of Vehicle-bridge Coupled System on Long-span Continuous Girder Bridge[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2016, 6(4): 186-194.
- [7] 桂水荣,万水,陈水生. 移动车辆荷载过桥耦合振动精细积分算法[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(2): 56-62.



- GUI Shui-rong, WAN Shui, CHEN Shui-sheng. Precise Integration Method for Bridge Subjected to Moving Vehicle Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(2): 56-62.
- [8] ZOU Q, DENG L, GUO T, et al. Comparative Study of Different Numerical Models for Vehicle-bridge Interaction Analysis[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016, 16(9): 1550057.
- [9] MIGUEL L F, LOPEZ R H, TORII A J, et al. Robust Design Optimization of TMDs in Vehicle-bridge Coupled Vibration Problems[J]. Engineering Structures, 2016, 126: 703-711.
- [10] 戴公连, 龙绿军, 刘文硕. 纵连板式无砟轨道简支梁桥动力响应试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(9): 105-112.
- DAI Gong-lian, LONG Lu-jun, LIU Wen-shuo. Experimental Study on the Dynamic Response of Continuous Slab Tracks and Simply Supported Bridges[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(9): 105-112.
- [11] 张 铎, 李小珍. 移动简谐荷载列作用下简支梁竖向动力响应的解析解及其应用研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(1): 144-149, 13.
- ZHANG Duo, LI Xiao-zhen. Analysis and Application of Vertical Dynamic Response of Simply Supported Beam Bridge Under Moving Harmonic Load Series[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(1): 144-149, 13.
- [12] 张 楠, 夏 禾. 铁路桥梁在高速列车作用下的动力响应分析[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 144-151.
- ZHANG Nan, XIA He. Dynamic Analysis of Railway Bridge Under High Speed Train[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 144-151.
- [13] ZHANG N, TIAN Y, XIA H. A Train-bridge Dynamic Interaction Analysis Method and Its Experimental Validation[J]. Engineering, 2016, 2(4): 528-536.
- [14] 宋莎嘉, 李永乐, 任 森, 等. 下穿胶济铁路施工连续梁整体受力分析方法[J]. 铁道建筑, 2017(4): 22-25.
- SONG Sha-jia, LI Yong-le, REN Sen, et al. Global Stress Analysis Method of Temporary Continuous Beam During Underground Construction of Crossing Qingdao-Jinan Railway[J]. Railway Engineering, 2017(4): 22-25.
- [15] 邓建良, 吴定俊, 李 奇. 移动均布荷载作用下简支梁桥动力系数分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 56-62.
- DENG Jian-liang, WU Ding-jun, LI Qi. Impact Factor Analysis of Simply-supported Girder Bridges Traversed by Uniformly-distributed Moving Loads[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 56-62.
- [16] TB 10002—2017, 铁路桥涵设计规范[S].
- TB 10002—2017, Code for Design on Railway Bridge and Culvert[S].
- [17] 刘 波, 王有志, 王 涛, 等. 大件运输中简支梁桥的动力响应分析及监测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3): 313-319.
- LIU Bo, WANG You-zhi, WANG Tao, et al. Dynamic Response Analysis and Monitoring of a Simply Supported Bridge in Oversize Transport[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(3): 313-319.
- [18] 张向东, 杜东宁, 柴 源, 等. 基于车-桥耦合振动理论的连续梁桥影响因素分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(8): 2848-2854.
- ZHANG Xiang-dong, DU Dong-ning, CHAI Yuan, et al. Analysis of Influences of Different Factors on Continuous Rigid Frame Bridges Based on Theory of Vehicle[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(8): 2848-2854.
- [19] 梁安宁, 涂 勇. 简支梁桥车桥耦合振动响应[J]. 南昌大学学报: 理科版, 2016, 40(5): 459-464.
- LIANG An-ning, TU Yong. Analysis the Response on Vehicle-bridge System Coupling Vibration of Simply-supported Beam Bridge[J]. Journal of Nanchang University: Natural Science, 2016, 40(5): 459-464.
- [20] 余志武, 谈 遂, 毛建锋. 基于车桥耦合随机振动的桥梁动力安全性分析[J]. 铁道工程学报, 2016(9): 55-61, 112.
- YU Zhi-wu, TAN Sui, MAO Jian-feng. Safety Analysis of the Bridge Dynamic Performance Based on Train-bridge Coupling Random Vibration[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016(9): 55-61, 112.
- [21] 黄文杰, 罗光财, 彭 丹, 等. 高速铁路简支梁桥参数变化对竖向共振影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1474-1481.
- HUANG Wen-jie, LUO Guang-cai, PENG Dan, et al. Analysis on the Vertical Resonance Effect of Simply-supported Beam Bridge Parameters on High-speed Railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1474-1481.