

文章编号: 1005-0523(2023)02-0047-10

高速列车过桥引起的地面振动特性分析

汪翠¹, 王鹏生², 雷晓燕¹

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013;

2. 中铁六院中铁西安勘察设计研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054;)

摘要:为研究高速列车过桥引起的环境振动问题,以沪昆客运专线某铁路桥梁为工程背景,采用现场实测和有限元法获取地面振动特性。将计算值与实测值对比分析,结果表明:高速列车过桥引起的地面横向振动加速度稍大于垂向振动加速度,频谱曲线的主峰频率点可视为周期载荷诱发的共振频率;横垂向卓越频率分布区间为10~80 Hz,频带内各单频加速度幅值随距离增加呈波动衰减趋势;当不同频率的振动波波峰相遇时,相遇点的振动叠加出现放大现象;横垂向加速度最大振级对应的频带为25~63 Hz,大部分出现在31.5 Hz;实测值和计算值在幅值大小及变化趋势吻合较好,加速度Z振级最大误差为1.4 dB。可见,有限元模型满足精度要求,证明该方法能够有效预测环境振动响应。

关键词:高速列车;地面振动;现场实测;有限元法

中图分类号:U233;TB123

文献标志码:A

本文引用格式:汪翠,王鹏生,雷晓燕. 高速列车过桥引起的地面振动特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 47-56.

Analysis of Ground Vibration Characteristics Caused by High-Speed Train Passing Through the Bridge

Wang Cui¹, Wang Pengsheng², Lei Xiaoyan¹

(1. Engineering Research Center for Railway Environment Vibration and Noise of the Ministry of Education, East China Jiaotong University,

Nanchang 330013, China; 2. China Railway Liuyuan Xi'an Survey Design and Research Institute Co.Ltd., of Crec, Xi'an 710054)

Abstract: In order to study the environmental vibration caused by high-speed trains passing through elevated tracks, an experimental test site was selected, corresponding to a stretch of the railway connection between Shanghai and Kunming. Field measurement and finite element method were used to obtain the ground vibration characteristics. Comparing the calculated value with the measured value, the results show that the ground lateral vibration acceleration caused by the high-speed train passing through the bridge is slightly larger than the vertical vibration acceleration, and the main peak frequency point of the frequency spectrum curve could be regarded as the resonance frequency induced by the periodic load. The excellent frequency distribution range of lateral and vertical acceleration is 10~80 Hz, and the acceleration amplitude of each single frequency in the frequency band tends to fluctuate and decay with increasing distance. When the vibration peaks of different frequencies meet, the vibration superposition at the meeting point shows amplification. The frequency band corresponding to the maximum vibration level of lateral and vertical acceleration shows mainly at 3.15 Hz of the range of 25~63 Hz; The numerical results of ground vibrations show an acceptable agreement with the real measurements in amplitude and changing trend, and the maximum error of acceleration Z vibration level is 1.4 dB. Hence the finite el-

收稿日期: 2022-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978264)

ement model meets the accuracy requirement, which proves that this method can be used to predict the environmental vibration response.

Key words: high-speed train; ground vibration; field test; finite element method

Citation format: WANG C, WANG P S, LEI X Y. Analysis of ground vibration characteristics caused by high-speed train passing through the bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 47–56.

高速铁路桥梁段的环境振动受诸多因素影响,如车辆、轨道和桥梁的动态特性、桥梁-土壤相互作用和周边土体所处复杂地质环境。现有研究通常采用有限元方法,结合现场实测来分析环境振动特性。Santos等^[1]研究分层土体中弹性波传递特性并提出振动预测数值模型。Jesus等^[2-3]建立了三维数值时域模型研究铁路振动,结合现场实测进行验证。Yang和Wu^[4-5]提出高架桥周边振动响应的解析计算模型,结合格林函数求出地面振动响应。古泉等^[6]提出高速铁路车-轨-桥耦合系统的高效计算方法并通过试验验证其可行性。曹艳梅^[7-9]建立车辆-桥梁相互作用模型求解列车轮轨力,加载到周期性桥梁结构模型中求解得到墩底反力。雷晓燕^[9-11]建立了有限元分析模型,分析高架轨道结构引起的结构和环境振动。Zhai等^[12]对京沪高速铁路地面振动进行现场测试,分析地面振动加速度的时域和频域特性。李小珍等^[13-15]研究了高速铁路高架段车致地面振动的传递和衰减规律。高广运等^[16-17]根据桥墩的动力平衡方程求得桥墩对地基的作用力,引入格林函数得到地面振动响应。张允士^[18-19]通过现场试验研究高速列车线路附近自由场中振动信号的传递规律,提出了一种频域预测方法。陈桂媛^[20]对城市高架轨道交通车致场地土展开振动传递特性现场试验,结合解析法和有限元法进行振动预测研究。Bian^[21]基于2.5D有限元建立地层的动力分析模型,结合薄层元素预测移动列车产生的振动。

本文对高架轨道旁侧空地采集振动响应,研究高速列车过桥引起的地面振动加速度时域及频域特性,分析各单频信号传递规律。应用数值模拟方法研究土体振动问题,将计算值与实测值进行对比分析,为列车运行引起环境振动预测提供有效模型。

1 高速列车引起地面振动的现场测试

1.1 测试概况

以沪昆客运专线某铁路桥梁为工程背景,由32 m

多跨双线混凝土简支箱梁组成。测试中运行的高速列车为CRH380A, CRH380B, CRH380D, CR400AF, CR400BF, CRH380BL等规格型号,8节或16车辆编组,设计时速350 km。全线敷设CRTS II型板式无砟轨道结构和60 kg/m无缝钢轨。

测试现场的地质分布对环境振动的特性分析和数值仿真影响较大,因场地土性质复杂多变,获取土层分布和计算参数至关重要。根据地质勘察资料,该区段基岩埋深较浅,从上至下的土类别为全风化千枚岩和强风化千枚岩。采用SWS瑞雷波地质勘探方法对测试位置土层进行勘察,获取地质参数如表1所示。

表1 土体参数
Tab.1 Soil parameters

| Soil layer number | Soil thickness/m | Density / (kg·m ⁻³) | Elastic modulus/GPa | Poisson ratio |
|-------------------|------------------|---------------------------------|---------------------|---------------|
| Soil layer 1 | 14.8 | 2 150 | 858.9 | 0.22 |
| Soil layer 2 | 15.5 | 2 250 | 1 568 | 0.2 |

测点布置及编号如图1所示,靠近测点的轨道为下行方向。以该桥墩底部中心为基准点,沿垂直线路方向上布置7个测点,其中1#测点距离桥墩中心距离为5 m,最远测点距离为40 m,采样频率为1 000 Hz,每个测点安装水平和垂向2D001磁电振动传感器。

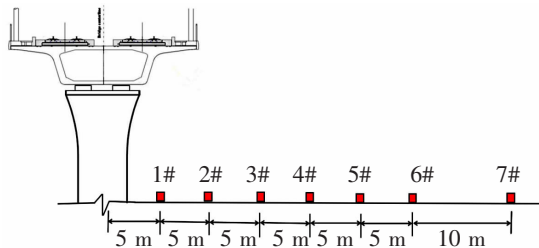


图1 测点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring point layout

1.2 振动信号时域分析

根据加速度拾振器参数和高速铁路引起地面振动特点,通过 0.1~100 Hz 带通滤波器处理每个测点的加速度。本次测试共统计约 100 组多种工况有效数据,选择以 300 km/h 的速度高速通过近轨的 8 节编组、CRH380A 型列车引起各测点的地面振动进行分析。5, 20, 40 m 处的横垂向加速度时程曲线如图 2 所示。各测点可辨别每节车辆的周期性加

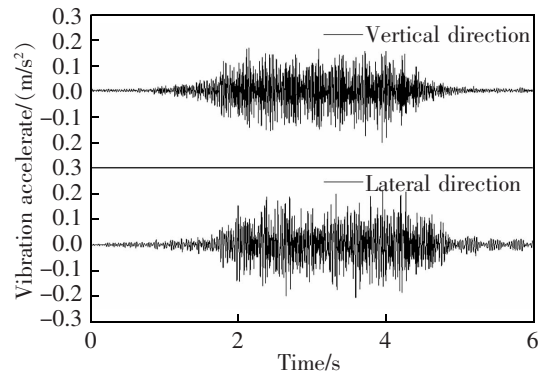
载现象,距离越远,越不明显;横垂向加速度幅值相差不大,衰减趋势相近。

环境振动测量基于 GB 10071-1988《城市区域环境振动测量方法》,并满足 ISO 有关条款规定。交通环境振动问题中,测试过程中均以加速度作为基本测试量,可结合加速度有效值来评价一系列高速列车通过高架轨道时,大地各测点的振动响应及衰减规律,离散时间列加速有效值 a_{ms} 的计算公式如下

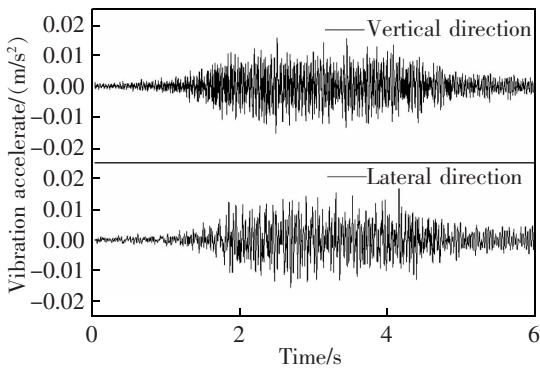
$$a_{ms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N a^2(i)}{N}} \quad (1)$$

式中: a 为测试中采集的加速度; N 为采集点数; i 为用来分析加速度的点数。

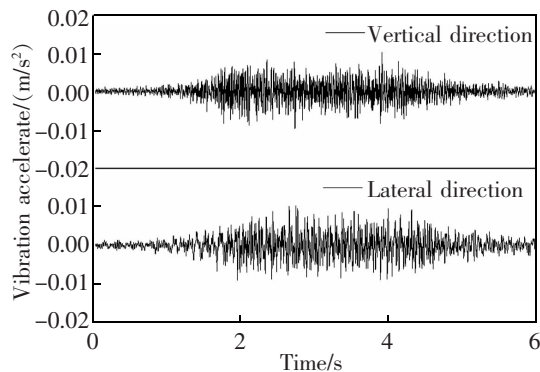
从图 3 中加速度有效值的幅值来看,横垂向相近但垂向振动响应小于横向振动响应;在距离墩底中心线 5~15 m 范围(1#~3#)内,横垂向加速度衰减幅度较大;在 30 m (6#)处,两个方向的加速度有效值出现局部放大现象。



(a) Measuring point 1



(b) Measuring point 4



(c) Measuring point 7#

图 2 测点横垂向加速度时程曲线

Fig.2 Lateral and vertical acceleration time-history curve

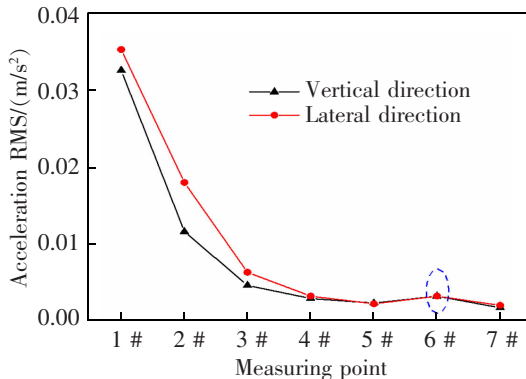


图 3 各测点横垂向加速度有效值

Fig.3 Lateral and vertical acceleration RMS of each measuring point

1.3 振动信号频域分析

1.3.1 频谱分析

为最大限度地减少环境振动影响,消除了电流干扰,对振动信号进行 0~100 Hz 范围内频谱分析,总结高速列车引起周围土体振动响应的卓越频率分布和周期性加载引起周围土体振动的共振频率。与时域分析车型一致,车辆特征长度分别为中间车车钩中心距,转向架中心距,相邻车辆前后转向架中心间距和固定轴距,参数如图 4 所示。分析 1#~7# 测点的垂向加速度频谱,如图 5 所示。

图 5 显示各测点的频谱曲线在某固定频率点,

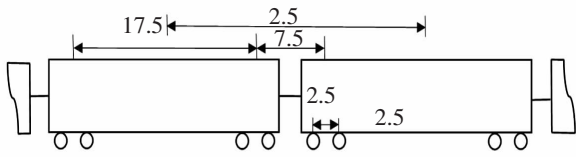


图4 列车特征长度示意图(单位:m)

Fig.4 Schematic diagram of the characteristic length of the train (unit: m)

如3.4,22.2,33.7,48.3 Hz和66.7 Hz,出现加速度较大幅值,这些峰值对应的频率反映了列车的周期性加载,计算车辆的周期性加载频率 f_j

$$f_j = V/L_j \quad (2)$$

式中: $j=1,2,3,4$; V 为列车速度; L_j 为特征长度。

根据式(2), $f_1=V/25=3.33 \text{ Hz} \approx 3.4 \text{ Hz} \times 1$ 为中间车车钩中心距的激励频率; $f_2=V/17.5=4.76 \text{ Hz}$ 对应同一节车辆前后转向架中心距的激励频率,图中的峰值频率 $48.3 \text{ Hz} \approx 4.76 \text{ Hz} \times 10$ 视为周期性加载频率的倍频; $f_3=V/7.5=11.11 \text{ Hz}$ 对应相邻车辆前后转向架间距的激励频率,图中的峰值频率22.2,66.7 Hz可视为相应的倍频; $f_4=V/2.5=33.3 \text{ Hz} \approx 33.7 \text{ Hz} \times 1$ 对应车辆的固定轴距形成的基频。可见车辆轴载荷重复作用下的基本频率 f_1, f_2, f_3 和 f_4 及其倍频对响应峰值起主要控制作用,且随距离的增大主频位置也逐渐向低频移动。反映出土体对高频振动的高阻

尼效应,近场土体振动以较高频为主,远场土体振动以低频为主。

1.3.2 三分之一倍频程分析

通过三分之一倍频程处理,将某频率带内的振动衰减情况及振动响应进行量化,识别出振动响应的卓越频率分布。对每个测量点的三分之一倍频程谱计算每个频带的加速度振级,结果如图6所示。

从图6中可以看出,断面各测点横垂向的卓越频率分布在10~80 Hz,随距离的增加,加速度振级呈衰减趋势,与时域内的规律一致;横垂向加速度振级相差不大,最大振级不超过88 dB,对应的频带为25~63 Hz,大部分出现在31.5 Hz;卓越频带内的10,25,63 Hz对应垂向振级衰减值为11.03,22.97,36.69 dB,对应横向衰减值为7.89,25.32,29.49 dB,反映高频衰减更为突出。

1.3.3 单频加速度振级分析

总结各单频振动信号传递规律,给出单频信号在自由场地中随距离增加的振动衰减情况。为获得较好的数据分析结果,选择振动信号最强烈、信噪比最大的一组数据进行处理,与时域分析同等工况下的振动频带内各中心频率的横垂向加速度振级的空间分布,如图7所示。

列车运行引起频带内各单频加速度振级随距

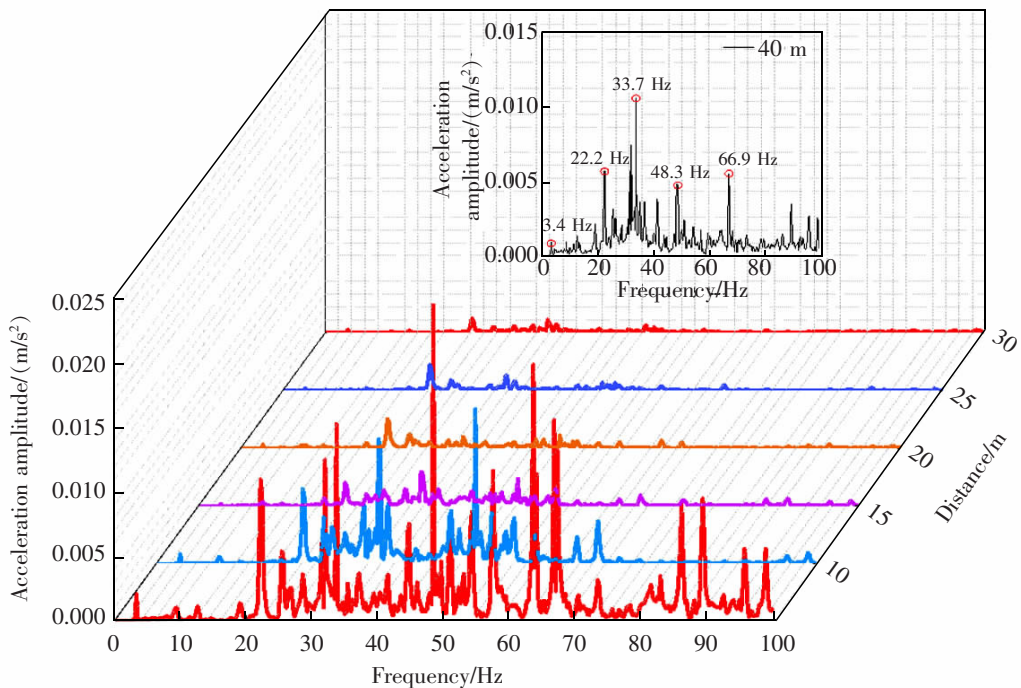
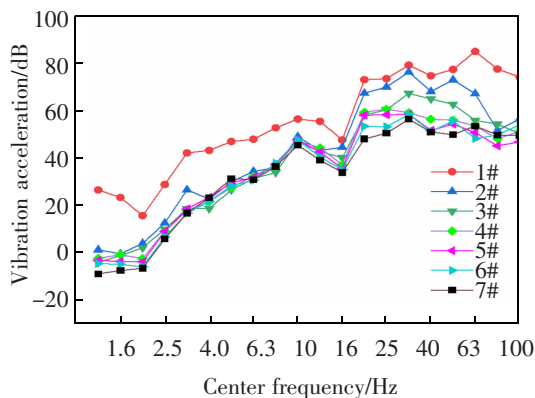
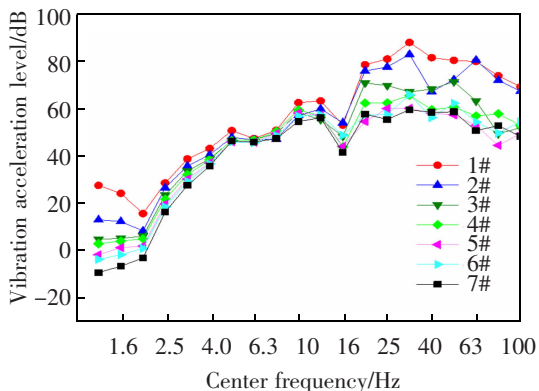


图5 各测点加速度频谱图

Fig.5 Acceleration spectrogram of each measuring point



(a) Vertical direction



(b) Lateral direction

图 6 各测点横垂向加速度三分之一倍频程

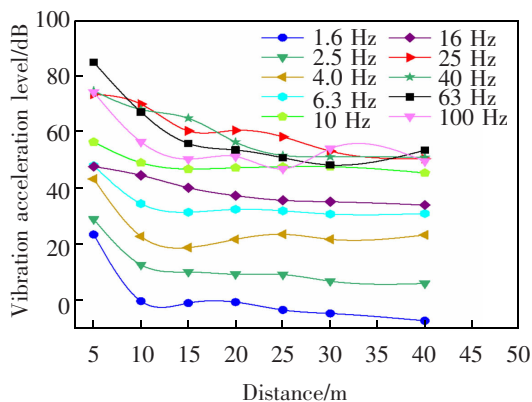
Fig.6 Lateral and vertical acceleration of each measuring point at one-third octave

离的增加呈波动衰减趋势。各频段大部分出现不同位置的振动波峰和波谷, 不同频率的振动波在传递过程中叠加出现放大现象。现场测点布置存在一定间隔, 局部放大现象因出现在某区间范围, 导致部分数据中的测点位置未捕捉放大特征。

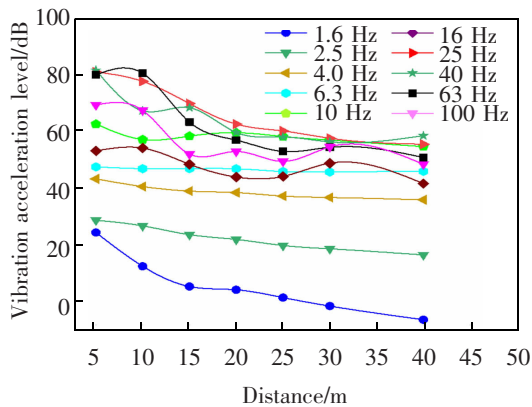
2 高架轨道环境振动仿真分析

2.1 列车-轨道-桥梁模型

将列车-轨道-桥梁模拟成三层板式轨道-桥梁单元模型, 考虑附有二系悬挂的单轮作为车辆单元通过桥梁时引起的垂向振动响应。我国高速铁路高架桥段大量铺设板式无砟轨道, 自上而下由钢轨、扣件、轨道板、CA 砂浆层、混凝土支承层等部分构成, 桥梁仅考虑竖向位移和转动的二维梁单元模拟^[22]。钢轨和轨道板间通过等间距布置的扣件联结, 将扣件和砂浆层模拟为弹簧阻尼元件, 建立车桥动力分析模型如图 8 所示。动轮单元输入 CRH380A 型高速动车的参数, 如表 2 所示, 桥梁结构和轨道结



(a) Vertical direction



(b) Lateral direction

图 7 横垂向加速度分频振级随距离衰减规律

Fig.7 Attenuation law of lateral and vertical acceleration levels with distance at a single center frequency

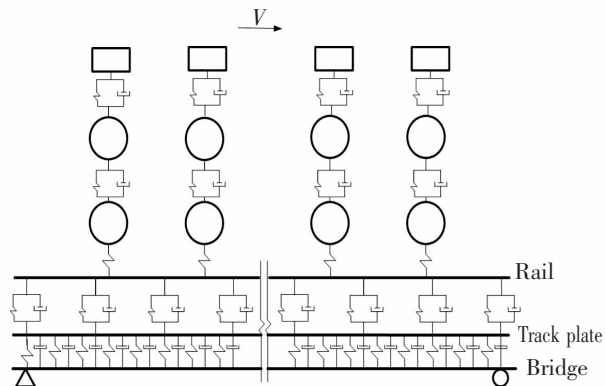


图 8 列车-轨道-桥梁模型

Fig.8 Train-track-bridge model

构参数分别如表 3 和表 4 所示。

考虑轨道随机不平顺影响, 根据德国高速铁路低干扰轨道高低不平顺谱和轨道短波不平顺谱联合生成轨道不平顺样本, 如图 9 所示。整个系统动力有限元方程为

$$M\ddot{a} + C\dot{a} + Ka = Q \quad (3)$$

表2 CRH380A 动车参数
Tab.2 Parameters of CRH380A-type high-speed trains

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|--------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 1/8 body mass/kg | 5 037 | Wheel-rail contact stiffness/(N/m) | 1.5×10^9 |
| 1/4 frame mass/kg | 601.87 | Primary suspension damping/(N·s/m) | 1.0×10^4 |
| 1/2 Wheelset Mass/kg | 800 | Secondary suspension damping/(N·s/m) | 1.04×10^4 |
| Primary suspension stiffness/(N/m) | 0.887×10^6 | Fixed wheelbase/m | 2.5 |
| Secondary suspension stiffness/(N/m) | 0.226×10^6 | Distance between frame center/m | 17.5 |

表3 桥梁结构参数
Tab.3 Bridge structural parameters

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|-------|
| Elastic modulus/(N/m ²) | 36.2×10^9 | Bridge span/m | 20×32 |
| Density/(kg/m ³) | 2500 | Element length/m | 0.5 |

表4 中国 CRTS II 板式轨道结构参数
Tab.4 Structural parameters of CRTS II slab track in China

| Structural | Parameter | Value | Structural | Parameter | Values |
|-------------|------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Rail | Elastic modulus/MPa | 2.059×10^5 | | Inertia moment of rail/m ⁴ | 3.217×10^{-5} |
| | Wire mass/(kg/m) | 60.64 | | Bulk density/(kN/m ³) | 78.5 |
| Track board | Length/mm | 6450 | Concrete supporting layer | Length/mm | 6 450 |
| | Width/mm | 2550 | | Width/mm | 2 950 |
| | Thickness/mm | 200 | | Thickness/mm | 300 |
| | Density/(kg/m ³) | 2500 | | Density/(kg/m ³) | 2 500 |
| CA mortar | Elastic modulus/MPa | 3.9×10^4 | Cushion | Elastic modulus/MPa | 3.0×10^4 |
| | Stiffness coefficient/(MN/m) | 900 | | Stiffness coefficient/(MN/m) | 60 |
| | Damping coefficient/(kN·s/m) | 83 | | Damping coefficient/(kN·s/m) | 47.7 |

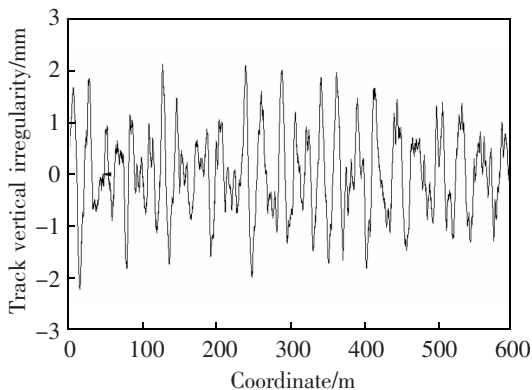


图9 轨道不平顺
Fig.9 Track irregularities

式中： M 、 C 、 K 、 Q 分别为列车-轨道-桥梁结构的总质量矩阵，总阻尼矩阵、总刚度矩阵、总荷载向量； \ddot{a} 、 \dot{a} 和 a 为轨道-桥梁结构和动轮单元的节点加速度、速度和位移。

2.2 桥墩支座反力

列车高速通过桥梁时，引起车辆、轨道和桥梁结构动力响应，动载经箱梁、支座传递至桥墩，再以列阵点振源的方式通过桥墩-大地引起环境振动。本文采用两步法开展研究，首先确定墩顶动反力，然后把墩顶动反力施加在桥墩-大地模型计算环境振动。基于本文提出的列车-轨道-桥梁垂向耦合系统分析模型，选取 8 车编组列车以 300 km/h 的速度

通过 20 跨简支梁,计算的时间步长为 0.001 s,对墩顶垂向动反力的随机特征进行研究。以 11 号墩为例,桥墩顶部受到墩顶动反力 F_1 和 F_2 作用,如图 10 所示。

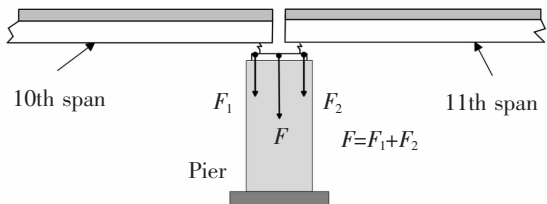
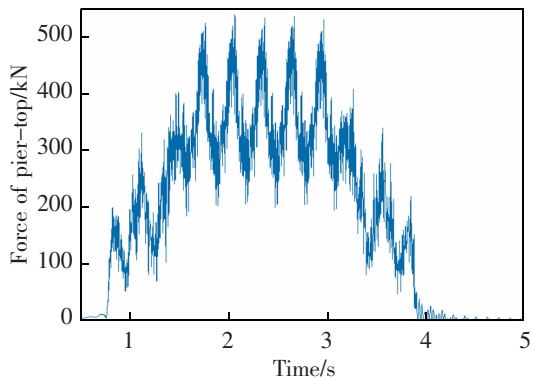


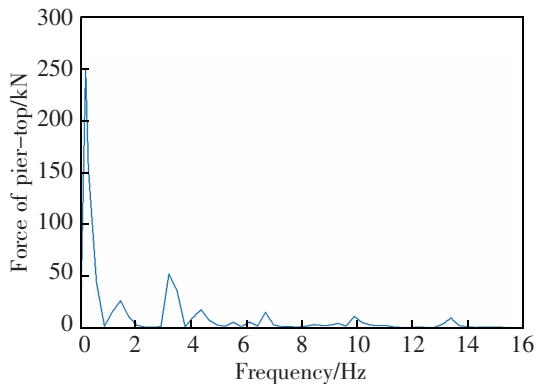
图 10 墩顶动反力示意图

Fig.10 Schematic diagram of the dynamic reaction force at the top of the pier

MATLAB 程序中,初始时刻 8 节车厢全部在桥上,第 8 节车厢的最后一个轮对位于桥梁左侧 1 号支座,当全部车厢驶离 20 跨桥梁,计算时间历程为 5 s。由墩顶动位移和对应节点刚度矩阵可提取跨中桥墩的墩顶力时程曲线如图 11(a)所示,墩顶动反力最大峰值为 540 kN,以重力加载成分为主。对同一桥墩的墩顶动反力做傅里叶变换得到频域的变化



(a) Time course curve



(b) Spectrum curve

图 11 墩顶动反力时程和频谱图

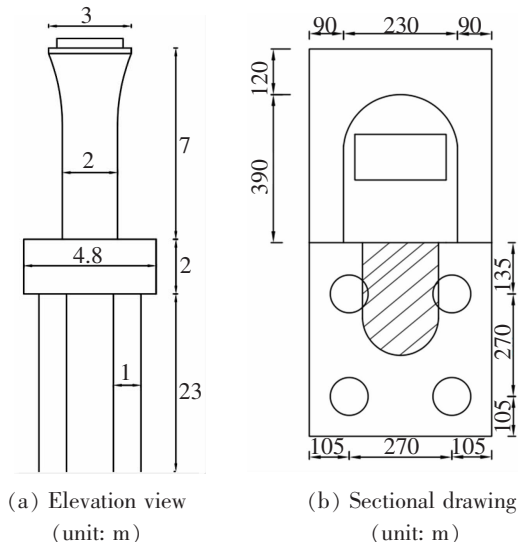
Fig.11 Time history and frequency spectrum of dynamic reaction force at the top of the pier

化曲线如图 11(b)所示,当列车高速通过时,主频与列车车长、轴距和通过全桥的时间有关。

2.3 桥墩-大地系统

在 ANSYS 中建立三维桥墩-大地有限元模型,考虑桥墩典型立面及剖面、群桩尺寸如图 12 所示。墩高 7 m,桩孔灌注桩长 23 m,桩基材料属性和承台相同,均采用 C35 混凝土。考虑计算效率,本文采用桩土共节点模型,建立高架轨道环境振动的桥墩-大地模型,如图 13 所示。支座底、墩身、承台和大地均采用 3 维结构实体单元 SOLID45 模拟。大地采用粘弹性人工边界对模型边界进行处理,在模型边界节点上施加弹簧-阻尼器消除模型的边界效应^[25]。

将计算得到的各墩顶支座反力视为随时间变化的移动荷载,在 ANSYS 软件中利用 APDL 语言编写 DO 循环,采用节点加载方式实现振源输入。为提高计算效率,提取 9~12 号墩的作用力时程加载到 3 跨 4 桥墩模型对应位置。



(a) Elevation view (unit: m)

(b) Sectional drawing (unit: m)

图 12 桥墩与基础示意图

Fig.12 Bridge pier and foundation diagram

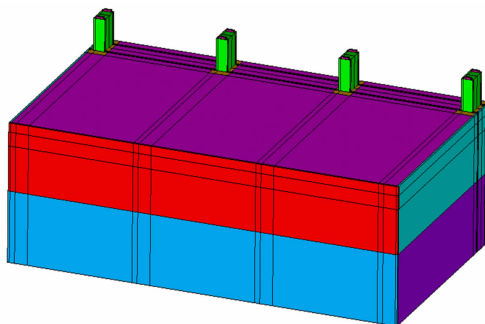


图 13 桥墩-大地有限元模型

Fig.13 Bridge pier-earth finite element model

3 仿真与实测对比分析

将墩顶动反力加载到 ANSYS 三维桥梁-大地系统动力有限元模型中,沿列车前进方向选取中间桥墩侧面作为分析截面提取振动响应。观测截面及测点位置如图 14 所示,其中 1# 测点距离桥墩中心线的距离为 5 m。将有限元模型得到的测点垂向加速度时程与同工况下的实测值进行对比分析,如图 15 所示。可见,高架轨道交通引起的大地垂向振动的实测值和计算值在幅值大小、曲线形状吻合较好。高速列车到达前,自由场地具有本底振动,振动的实测值稍大于计算值。

将仿真得到的振动加速度转换成加速度有效值、未加权振级和 Z 计权振级来评价环境振动,并与实测数据进行对比,结果如图 16,图 17 所示。可见,同一测点垂向加速度有效值在 20~80 Hz 范围内,仿真计算结果与现场实测值吻合良好;加速度振级的最大误差为 3.24 dB,各测点 Z 振级随距离衰减趋势一致,最大误差为 1.4 dB。造成这种误差主要原因是试验结果的随机性和数值模拟的近似性。证明本文采用的方法能够有效计算高速列车过桥引起自由场地的竖向振动,可采用有限元模型进行环境振动预测。

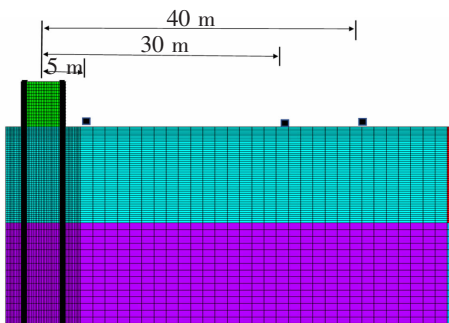
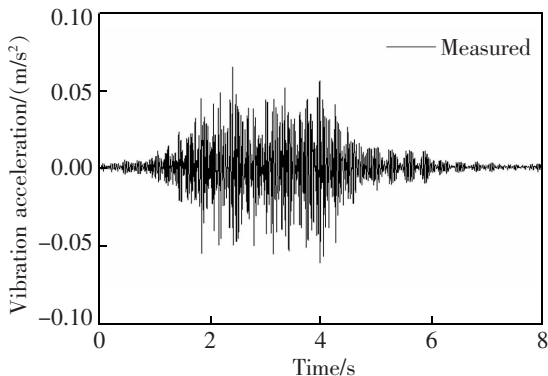
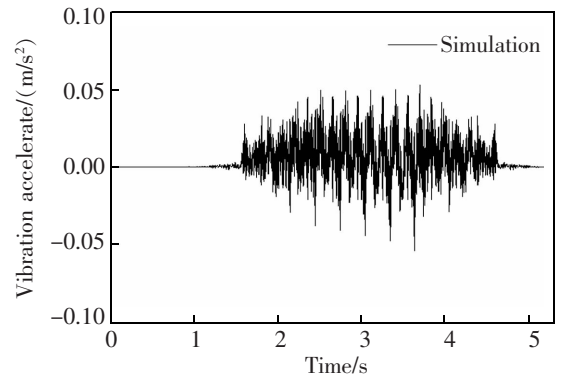


图 14 观测截面及大地测点位置

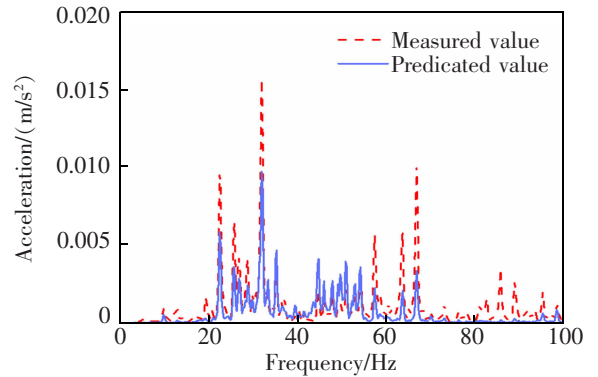
Fig.14 Observation section and earth measuring point position



(a) Measured and calculation value



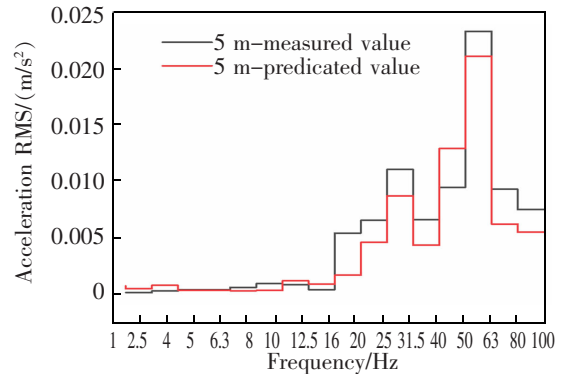
(b) Calculation results



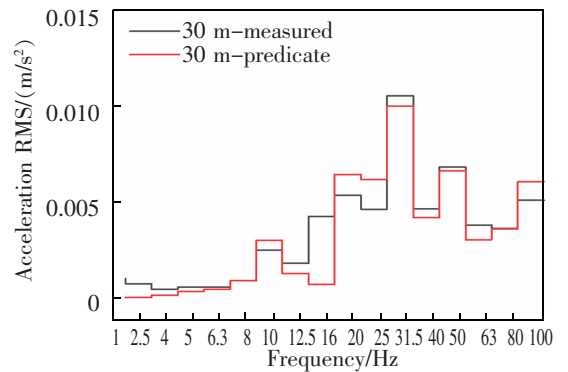
(c) Frequency spectra of the acceleration

图 15 计算值和实测值加速度时程和频谱对比图

Fig.15 Comparison of acceleration time history and spectrum between calculated and measured values



(a) 5 m position



(b) 30 m position

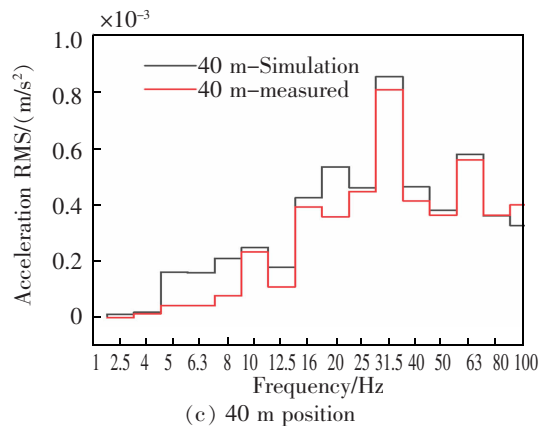
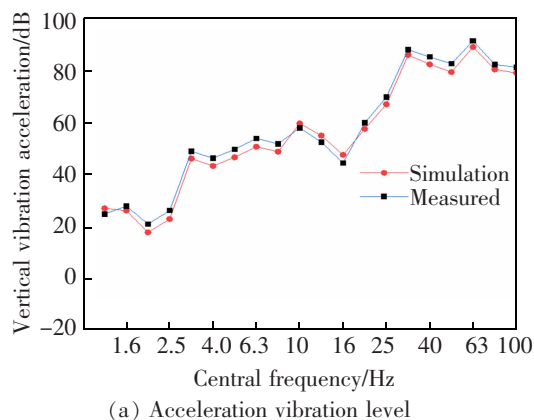
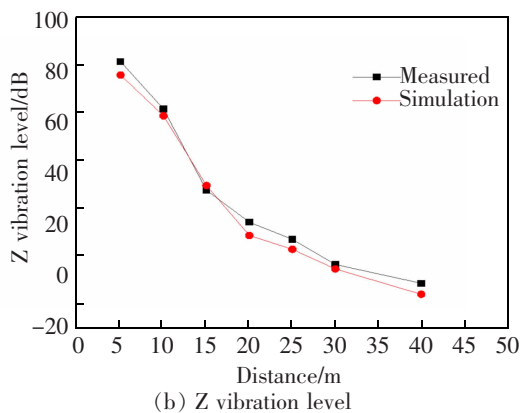


图 16 各测点振动加速度对比分析

Fig.16 Comparative analysis of vibration acceleration at each measuring point



(a) Acceleration vibration level



(b) Z vibration level

图 17 计算值与实测值对比

Fig.17 Comparison of calculated and measured values

4 结论

1) 高速列车过桥引起的地面横向振动加速度稍大于垂向振动加速度,在距离墩底中心线 5~15 m 范围内,横垂向加速度衰减幅度较大;在 30 m 处,两个方向的加速度有效值出现局部放大现象。

2) 横垂向卓越频率分布在 10~80 Hz, 振动加

速度频谱中的主峰频率点可视为周期载荷诱发的共振频率,卓越频带内各单频加速度振级随距离增加呈波动衰减趋势;加速度最大振级不超过 88 dB,对应的频带为 25~63 Hz,大部分出现在 31.5 Hz,且卓越频带内的高频对应垂向振级的衰减更为突出。

3) 数值分析高速列车通过桥梁引起的动力响应,基于动轮单元和三层板式轨道-桥梁模型计算桥梁支座反力,将墩顶动反力以节点方式加载于 ANSYS 三维桥墩-大地模型计算环境振动,实测值和计算值在加速度幅值大小、曲线形状、衰减趋势等方面吻合较好,Z 振级最大误差为 1.4 dB,证明该方法的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] SANTOS C, BARBOSA J, CALCADA R, et al. Track-ground vibrations induced by railway traffic: experimental validation of a 3D numerical model[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 97: 324-344.
- [2] JESUS F R, ALVES C P, CALCADA R, et al. Study of ground vibrations induced by railway traffic in a 3D FEM model formulated in the time domain: experimental validation[J]. *Structure & Infrastructure Engineering*, 2017, 13(5): 652-664.
- [3] JESUS F R, LUIS E, MEDINA R G, et al. Benchmarking of two three-dimensional numerical models in time/space domain to predict railway-induced ground vibrations [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2021, 20(1): 245-256.
- [4] YANG Y B, WU Y S. Transmission of vibrations from high-speed trains through viaducts and foundations to the ground [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2005, 28(2): 251-266.
- [5] WU Y S, YANG Y B. A semi-analytical approach for analyzing ground vibrations caused by trains moving over elevated bridges[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2004, 24(12): 946-962.
- [6] 古泉, 张德宇, 国巍, 等. 高速铁路车-轨-桥耦合系统实时混合试验的高效计算方法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 123-130.
- [7] GU Q, ZHANG D Y, GUO W, et al. An efficient computation method for real-time hybrid testing of vehicle-track-bridge coupling system of high-speed railway[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(3): 123-130.
- [8] 曹艳梅, 杨林, 李东伟. 高速铁路周期性桥梁频域有限元法及墩底动反力分析[J]. *铁道学报*, 2020, 42(11): 146-154.
- [9] CAO Y M, YANG L, LI D W. Study on FEM in frequency domain and analysis of dynamic reactions at pier bottom of

- periodic bridge of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(11): 146-154.
- [8] 曹艳梅, 杨林, 李喆, 等. 高速铁路高架桥周围场地振动反应谱分析[J]. 振动工程学报, 2022, 35(1): 93-102.
CAO Y M, YANG L, LI Z, et al. Response spectrum analysis of field vibrations surrounding high-speed railway bridge[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(1): 93-102.
- [9] 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
LEI X Y. High speed railway track dynamics[M]. Second Edition, Beijing: Science Press, 2021.
- [10] 雷晓燕, 张新亚, 罗锟. 高架轨道桥梁结构振动与噪声预测方法及控制研究进展[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 150-161.
LEI X Y, ZHANG X Y, LUO K. Research progress on prediction methods and control of vibration and noise of elevated track bridge structure[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(12): 150-161.
- [11] 雷晓燕, 汪振国, 罗锟. 城市轨道交通简支箱梁桥结构振动特性分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(9): 96-102.
LEI X Y, WANG Z G, LUO K. Analysis of structural vibration characteristics of simply supported box girder bridge in urban transit[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 34(9): 96-102.
- [12] ZHAI W, WEI K, SONG X, et al. Experimental investigation into ground vibrations induced by very high-speed trains on a non-ballasted track[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2015, 72: 24-36.
- [13] 李小珍, 刘全民, 张迅, 等. 高架轨道交通附近自由地表振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 56-61.
LI X Z, LIU Q M, ZHANG X, et al. Ground vibration induced by inter-city express train[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16): 56-61.
- [14] 李小珍, 张志俊, 冉汶民, 等. 桥上列车高速运行引起的地面振动试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 815-823.
LI X Z, ZHANG Z J, RAN W M, et al. Field test of ground vibration induced by high-speed train on elevated bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 815-823.
- [15] 李小珍, 陈桂媛, 朱艳, 等. 高速铁路轨道-桥梁-土体系统的振动传递特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 58-64.
LI X Z, CHEN G Y, ZHU Y, et al. Tests for vibration transmission characteristics of a high-speed railway track-bridge-soil system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 58-64.
- [16] 高广运, 谢伟, 陈娟, 等. 高铁运行引起的高架桥群桩基础地面振动衰减分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3197-3206.
GAO G Y, XIE W, CHEN J, ZHAO H. Ground vibration attenuation of viaduct and pile-group foundation induced by moving high-speed train[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3197-3206.
- [17] GAO G Y, BI J W, CHEN Q S, et al. Analysis of ground vibrations induced by high-speed train moving on pile-supported subgrade using three-dimensional FEM[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(8): 2455-2464.
- [18] ZHANG Y S, LOU Y, ZHANG N, et al. Attenuation and prediction of the ground vibrations induced by high-speed trains running over bridge[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021.
- [19] 张允士. 交通荷载影响下土体振动传递规律及预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Y S. Study on propagation laws of the vibration in soil and prediction method for buildings induced by traffic loads[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [20] 陈桂媛. 高架轨道交通车致地面微振动的预测研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2018.
CHEN G Y. Prediction study on ground micro-vibrations caused by elevated urban rail transit[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [21] BIAN, X C, JIANG J Q, CHEN R P, et al. Numerical analysis of soil vibrations due to trains moving at critical speed[J]. Acta Geotechnica: An International journal for Geo-engineering, 2016, 11(2): 281-294.
- [22] 雷晓燕, 王鹏生, 翁凌霄, 等. 时速 300 km/h 高速列车诱发高架箱梁结构振动特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 18-26.
LEI X Y, WANG P S, WENG L X, et al. Analysis of vibration characteristics of elevated box girder structure induced by high-speed train at 300km/h[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 18-26.
- [23] 陈宝魁, 王东升, 成虎. 粘弹性人工边界在地震工程中的应用研究综述[J]. 地震研究, 2016, 39(1): 137-142.
CHEN B K, WANG D S, CHENG H. Research review on the application of viscous-spring artificial boundary in earthquake engineering[J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(1): 137-142.



第一作者: 汪翠(1990—), 女, 博士研究生, 研究方向为轨道交通环境振动控制。E-mail: 2019019082300008@ecjtu.edu.cn。