

# 地震作用下高速铁路桥梁动力响应试验分析

孟 鑫, 刘鹏辉, 王 巍, 王 一 千, 董振升, 杨宜谦

(中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081)

**摘要:**通过分析“九寨沟地震”作用下现场实测的高速铁路桥梁结构(距离震中约 195 km)动力响应特征及地震预警时间,并将地震和动车作用下的实测数据进行时域和频域对比,得出:地震 S 波作用下桥梁结构动力响应快速增大,最大值约为 P 波作用下的 2-5 倍;桥址处“异地震前预警”时间约为 50 s,“现地地震 P 波预警”时间约为 15 s;地震作用下桥梁结构以高墩的低频、整体横向振动为主,横向振动数值大于竖向;地震作用下墩顶横向振幅最大值是动车作用下的 43 倍,梁体竖向振幅与桥梁跨度呈正相关;动车组列车作用下的梁体横向和竖向加速度均大于地震作用;对比地震发生前后的桥梁自振特性、竖向刚度、振动参数,表明桥梁结构工作状态无异常变化。

**关键词:** 桥梁; 高速铁路; 动力响应; 地震

**中图分类号:** U441<sup>+</sup>.3; U211.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)06-1250-07

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.06.017

## 引 言

地震是一种突发的地壳剧烈运动,因地震而破坏的桥梁数量远远多于由风振、船撞等其他原因而破坏的桥梁<sup>[1-3]</sup>。中国规划的“四纵四横”客运专线大多处于地震区,高速铁路桥梁抗震性能、地震预警研究是近年来的热点问题。

文献[1-3]利用有限元软件建立了车辆-轨道-桥梁(路基、接触网立柱、声屏障)耦合系统动力学模型,研究地震时列车的运行安全性,得到了高速铁路地震预警系统的报警阈值,探讨了地震发生时高速列车在桥上安全运行的临界速度问题。马莉等<sup>[4]</sup>确定了中国高速铁路地震预警方法、搭建了地震监测台站及铁路局中心系统,将铁路沿线的地震监测台站和地方台站的预警信息进行融合,提高沿线台站 P 波预警的准确性和时效性,并在大西高速综合试验中进行了历时两年的现场试验。余志武等<sup>[5]</sup>针对多动力(列车、地震、侧风)作用下高速列车-轨道-桥梁系统动力学理论与关键技术开展了模型试验、现场测试、理论分析与数值仿真,提出基于概率密度演化理论的多动力作用下轨道-桥梁系统随机振动分析方法和基于可靠度理论的桥上行车安全评定方法,研发了高速铁路轨道-桥梁系统试验平台和成套试验技术,提出高速铁路轨道-桥梁系统抗震设防、防风设计理念和评估方法,并研发了抗震防风及减

灾技术。由于地震的偶发性,地震作用下桥梁动力响应研究多以仿真计算、室内振动台试验的方法为主,实桥现场试验数据较少。在某高速铁路联调联试桥梁动力性能测试期间,发生了“九寨沟地震(7.0 级)”,桥梁测点完整记录了地震作用下桥梁动力响应实测数据。分析研究各类试验数据,可得到真实的桥梁动力响应特征,可为桥梁抗震计算、桥梁运营性能评估和铁路地震预警提供参考。

## 1 试验概况

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,四川省阿坝州九寨沟县发了 7.0 级地震。据国家强震动台网中心测定,震中位于北纬 33.20°、东经 103.82°,震源深度 20 km<sup>[6]</sup>。桥址距离震中约 195 km,位于北纬 32.50°、东经 105.85°。桥址周边分布有 3 个强震动观测台站,国家强震动台网中心发布的地震记录分析如表 1 所示,由地震观测仪器获取的地震烈度最大值为 4.0。

某高速铁路设计速度为 250 km/h,桥梁采用 ZK 活载设计。联调联试桥梁动力性能测试了 24 m 简支箱梁、32 m 简支箱梁和(76+144+76) m 连续箱梁。简支箱梁采用通桥(2009)2229 系列梁图,大跨度连续箱梁特殊设计。桥梁支座采用球型钢支座。桥墩主要采用圆端形墩,嵌岩桩基础,地质条件为弱风化的白云质灰岩。桥上采用 CRTS-I 型双块

表1 九寨沟地震强震动记录

台站名称	经度/纬度/(°)	震中距/km	方位角/(°)	加速度峰值/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ )			仪器烈度
				东西	南北	垂直	
剑阁下寺	105.5/32.3	186.5	302.8	-7.8	7.7	3.5	3.7
剑阁中学	105.5/32.0	206.4	310.6	-7.8	7.6	-2.6	3.4
广元东溪	106.3/32.1	262.8	298.3	-13.2	-15.8	8.1	4.0

式无砟轨道,直线、平坡。试验桥梁概况及测点布置如表2和图1所示。桥梁设计地震参数取值:地震动峰值加速度为 $0.1g$ (相当于地震基本烈度七度),地震动反应谱特征周期为 $0.45\text{ s}$ 。

采用891-II型传感器,采集桥梁跨中截面桥面顶板的振动信号,用硬件积分将速度信号转换为振幅,传感器通频带 $2\text{--}100\text{ Hz}$ 。加速度通频带 $0.5\text{--}$

表2 试验桥梁概况

梁型	结构特征	梁体实测频率	1 <sup>#</sup> ~3 <sup>#</sup> 桥墩
24 m箱梁	单箱单室等高度箱梁,全长 $24.6\text{ m}$ 、 $32.6\text{ m}$ ,宽 $12.2\text{ m}$ ,梁高 $2.635\text{ m}$ ,支座中心距 $4.4\text{ m}$ 。	竖向1阶 $10\text{ Hz}$	横向平均宽度 $5.8, 6.2, 9.6\text{ m}$ ,嵌岩桩;横向自振频率 $3.26, 2.73, 1.61\text{ Hz}$ 。
32 m箱梁	单箱单室变高度变截面箱梁,中墩处梁高 $11\text{ m}$ ,跨中 $6\text{ m}$ 。顶宽 $12.2\text{ m}$ ,底宽 $7.2\text{ m}$ 。支座中心距 $6.4\text{ m}$ 。	横向1阶 $1.22\text{ Hz}$ 竖向1阶 $1.46\text{ Hz}$ 2阶 $2.05\text{ Hz}$	

$80\text{ Hz}$ ,按照规范要求采用 $20\text{ Hz}$ 低通数字滤波后取值。桥梁挠度测试采用位移计法,由梁体底板吊锤至地面。梁体底板应变采用弓式应变计测试。

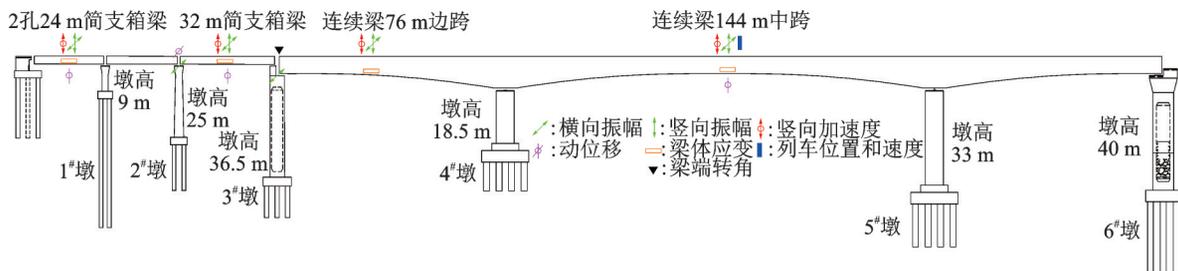


图1 桥梁结构形式及动力响应测点布置示意图

Fig. 1 Bridge structure and dynamic response test points layout

高速铁路联调联试期间,在桥梁上布置了大量试验测点,完整记录了地震作用下桥梁动力响应实测数据。桥梁动力性能测试内容包括:结构振动(梁体横向和竖向振幅、梁体横向和竖向加速度、墩顶横向振幅)、结构动位移(梁体竖向挠度、墩梁横向位移、梁缝横向位移、梁端竖向转角)、结构动应变等。振动测点采用891-II型传感器,应变采用弓式应变计,位移测点采用差动式位移计等。各类传感器与桥梁结构紧密连接,真实反映桥梁结构的动力响应。

## 2 地震作用下桥梁结构振动响应特征

### 2.1 结构振动及地震预警时间

地震产生的多种地震波中,主要有质点运动方向与波动方向平行的P波(压缩波)、质点运动方向与波动方向垂直的S波(剪切波)。P波传播速度较快(约为 $5.5\text{--}7\text{ km/s}$ ),但振动强度较弱,一般不会造成破坏性后果;S波传播速度较慢( $3.2\text{--}4\text{ km/s}$ ),但振动强度大,是造成破坏性后果的主要原因<sup>[7-9]</sup>。

地震作用下实测桥梁结构梁体跨中的横向、竖

向振动响应典型时域波形如图2所示。P波、S波作用下桥梁结构动力响应波形特征、数值大小区分明显。不同形式的孔跨结构在地震P波作用下,振动响应变化趋势均较为平缓,数值较小。在S波作用下桥梁结构响应迅速增大,振动响应最大值约为P波作用下的2-5倍。S波作用(约 $20\text{ s}$ )结束后,桥梁结构进入较长时间的自由振动衰减,直至相对静止。综合各类测试数据判断,距离震中 $195\text{ km}$ 的桥梁结构处于弹性工作状态。

地震预警基于P波传播速度比S波快(约为 $\sqrt{3}$ 倍)的原理而提出的<sup>[8]</sup>。桥址处P波到达时间与S波到达时间间隔约为 $25.5\text{ s}$ ,桥址距震中约 $195\text{ km}$ ,假定P波波速是S波波速的 $\sqrt{3}$ 倍,推算得到P波波速约为 $5.60\text{ km/s}$ ,S波波速约为 $3.23\text{ km/s}$ ,P波抵达桥址时间约为 $34.8\text{ s}$ 。假定数据分析和信息传递时间为 $10\text{ s}$ ,如铁路地震预警系统与“国家强震动台网中心”信息融合后,距震中 $195\text{ km}$ 桥址处“异地震前预警”时间约为 $50\text{ s}$ ,如仅在高速铁路沿线布设监测点,“现地地震P波预警”时间约为 $15\text{ s}$ 。

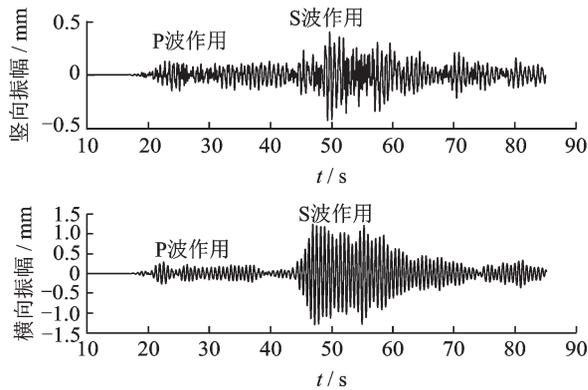


图2 地震作用下梁体跨中振动响应典型时域波形

Fig. 2 Typical time domain waveform of vibration response of bridge structure under earthquake action

## 2.2 桥梁结构振动频谱分析

地震作用下桥梁结构动力响应是对不同频率振动分量响应的叠加,地震波中与结构固有频率接近的谐波分量会被放大,其余频率谐波分量将保持原有作用或者被抑制<sup>[7-9]</sup>。对不同测点位置的桥梁结构动力响应时域波形进行傅里叶变换,频谱分析结果如图3所示。

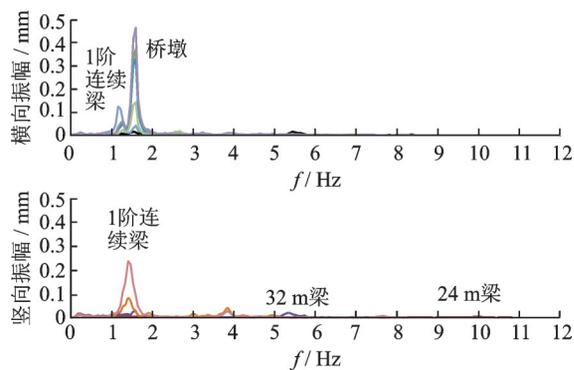


图3 地震作用下桥梁结构动力响应幅值谱图

Fig. 3 Typical frequency domain waveform of vibration response of bridge structure under earthquake action

振动在传播过程中高频成分衰减快于低频成分。对桥梁结构振动响应的频谱分析可知,振动峰值集中在1.1-1.7 Hz区段,与桥梁结构较小数值的自振频率吻合。墩高36.5 m的3<sup>#</sup>桥墩横向自振频率为1.61 Hz,(76+144+76)m连续箱梁横向和竖向第1阶自振频率为1.22和1.46 Hz。桥梁结构以低频横向振动为主,横向振动数值大于竖向。

由于高速铁路24,32 m简支箱梁横向自振频率一般大于20 Hz,地震作用下简支箱梁横向振动响应以较低频率的桥墩振动为主;24,32 m简支箱梁竖向自振频率为5.42,10 Hz,实测竖向自振频率处的振动响应虽然有峰值但数值较小。地震作用下(76+144+76)m连续箱梁横向振动表现为桥墩和

梁体的耦合振动,桥墩横向振动幅值大于76 m边跨跨中梁体,144 m中跨跨中横向振动梁体幅值大于桥墩;竖向振动以连续箱梁1阶自振频率为主。地震作用下不同墩高的桥墩横向振动以3<sup>#</sup>墩(墩最高)的自振频率为主。

## 2.3 桥梁结构振动时域分析

桥梁结构由不同跨度箱梁、不同高度桥墩组成。将桥梁不同位置处的实测波形进行局部放大并叠加,进行时域分析,可得到结构在地震作用下整体振动特征,如图4所示。

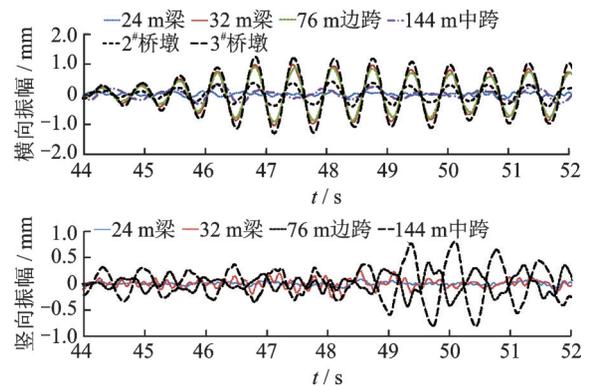


图4 地震作用下桥梁结构振动响应时域波形

Fig. 4 Typical time domain waveform of vibration response of bridge under earthquake action

地震作用下桥梁结构以整体横向振动为主,各孔箱梁、桥墩运动方向一致。振动幅值大小依次为:墩高36.5 m的3<sup>#</sup>墩振动幅值最大,32 m梁和76 m边跨幅值接近且小于3<sup>#</sup>墩,墩高25 m的2<sup>#</sup>墩次之,144 m中跨的墩梁耦合振动特征明显,24 m梁幅值最小。

连续箱梁的竖向振动幅值大于简支梁,边跨与中跨的振动方向相反,与连续箱梁1阶振型一致。

## 3 地震与动车作用下桥梁动力响应数据分析

地震波由桥墩经支座传递至梁体,进而影响桥上轨道结构的稳定性;动车作用由轨道结构传递至梁体,经支座传递至桥墩,二者的作用路径相反。桥梁的设计荷载包括了列车活载和地震力特殊荷载,分析桥梁结构振动、位移、应变实测数据,可得到两种荷载作用下的桥梁工作状态对比。

### 3.1 桥梁振动响应对比

地震与动车作用下的桥梁振动响应实测数值如表3所示。高速铁路联调联试期间,桥上运行的试

表3 地震与动车作用下桥梁振动响应最大值对比

Tab.3 Maximum comparison of bridge vibration response under seismic action and multiple unit train action

测试参数	测试位置	动车	P波	S波
横向振幅/mm	24 m 梁跨中	0.05-0.10	0.05	0.14
	2 <sup>#</sup> 墩墩顶	0.04-0.12	0.11	0.42
	32 m 梁跨中	0.05-0.11	0.22	1.04
	3 <sup>#</sup> 墩墩顶	0.02-0.03	0.29	1.29
	76 m 边跨跨中	0.02-0.05	0.21	0.91
竖向振幅/mm	144 m 中跨跨中	0.01-0.03	0.10	0.45
	24 m 梁跨中	0.15-0.21	0.05	0.12
	32 m 梁跨中	0.25-0.38	0.09	0.28
	76 m 边跨跨中	0.06-0.17	0.15	0.43
横向加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	144 m 中跨跨中	0.07-0.13	0.34	0.80
	24 m 梁跨中	0.18-0.21	0.06	0.11
	2 <sup>#</sup> 墩墩顶	0.19-0.21	0.03	0.08
	32 m 梁跨中	0.19-0.24	0.04	0.15
	76 m 边跨跨中	0.18-0.23	0.04	0.13
竖向加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	144 m 中跨跨中	0.18-0.26	0.03	0.07
	24 m 梁跨中	0.93-1.42	0.09	0.14
	32 m 梁跨中	0.96-1.39	0.08	0.19
	76 m 边跨跨中	0.37-0.62	0.06	0.15
	144 m 中跨跨中	0.38-0.50	0.09	0.18

验动车为CRH380AJ-0203综合检测列车,平均轴重12.85 t,试验速度范围180-275 km/h。地震发生前后的桥梁动力响应数据均来自同一列车。

地震作用下桥梁结构横向振幅数值远大于动车作用,墩高36.5 m的3<sup>#</sup>桥墩墩顶横向振幅差异最为显著,最大值为1.29 mm,幅值比约为43倍;76 m边跨跨中梁体横向振动幅值比约为18倍。由于动车质量较小、激励能量有限,桥上正线轮轴横向力实测值小于17 kN,实测各梁型梁体及桥墩横向动力响应数值均较小。大跨度桥梁桥上存在多节车辆,各节车辆之间的振动相位不同而被相互抵消,且连续箱梁质量较大,实测大跨度连续箱梁横向振动数值小于简支箱梁。

地震作用下梁体竖向振幅与桥梁跨度呈正相关,144 m连续箱梁中跨竖向振幅数值最大,为0.80 mm。动车作用下梁体竖向振幅与梁体竖向下挠同时发生,刚度相对较小的连续箱梁竖向振幅小于简支梁。动车作用下24,32 m简支箱梁跨中竖向振幅略大于地震作用。连续箱梁跨中竖向振幅动车作用小于地震作用,76 m边跨幅值比约为2.5倍,144 m中跨幅值比约为6.1倍。

实测动车组列车作用下的梁体横向和竖向加速

度均大于地震作用。动车作用下横向和竖向加速度最大值为0.26和1.42 m/s<sup>2</sup>,地震作用下横向和竖向加速度最大值为0.15和0.19 m/s<sup>2</sup>。

### 3.2 桥梁其他参数对比

地震与动车作用下桥梁位移、应变、挠度最大值对比如表4所示。地震作用下的实测数值小于动车作用,说明桥梁梁体位移、应变、挠度参数相对于振动参数而言,对地震响应不敏感。地震发生前后,桥梁结构无残余变形,处于弹性工作状态。

由上节振动响应数据可知,动车作用下的横向振动小于地震作用,但地震作用下桥梁结构以整体横向振动为主,实测桥墩与梁体、桥面梁缝横向相对位移数值均较小,且与动车作用接近。实测动车组列车作用下的纵向梁体应变、梁体竖向挠度大于地震作用,与振动响应规律一致。

表4 地震与动车作用下桥梁位移、应变、挠度最大值对比

Tab.4 Maximum comparison of bridge displacement, strain and deflection under seismic action and multiple unit train action

测试参数	测试位置	动车均值	P波	S波
桥墩与梁体横向相对位移/mm	2 <sup>#</sup> 桥墩、32 m梁	0.02	0.01	0.02
桥面梁缝横向相对位移/mm	24 m梁和32 m梁之间梁缝	0.14	0.04	0.13
	24 m简支梁跨中	10.13	1.17	2.17
	32 m简支梁跨中	16.42	1.67	2.85
	76 m边跨跨中	10.56	1.31	4.28
纵向梁体应变/ $\mu\epsilon$	144 m中跨跨中	29.42	4.46	9.43
	24 m梁跨中	0.37	0.07	0.12
梁体竖向挠度/mm	32 m梁跨中	0.98	0.11	0.25

### 3.3 桥墩振动状态分析

由3.1节桥梁振动响应对比分析可知,地震作用下墩高36.5 m的3<sup>#</sup>桥墩横向振动占据主导地位,墩顶横向振幅最大值为1.29 mm,动车作用下的墩顶横向振幅最大值仅为0.03 mm,二者幅值比约为43倍。3<sup>#</sup>桥墩支撑的32 m梁、76 m梁跨中横向振幅数值同样较大,与动车组作用最大值幅值比约为9倍、18倍。速度为275 km/h的动车作用下桥墩振动响应时域波形及幅值谱如图5所示。

由实测数值、振动时域波形、幅值谱图对比分析可知,桥墩在地震和动车两种荷载作用下的工作状态差

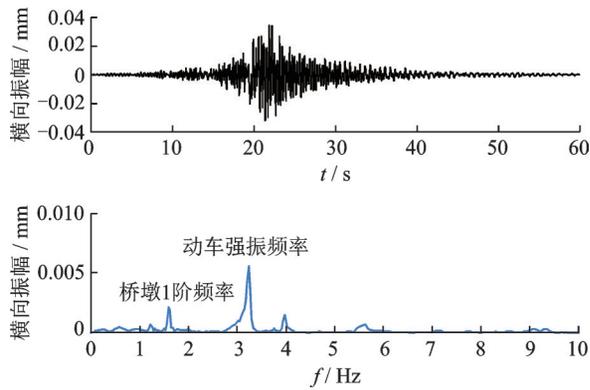


图5 动车作用下桥墩振动响应时域波形及幅值谱图

Fig. 5 Waveforms of pier vibration response in time domain and frequency domain under multiple unit train action

异明显。地震作用下桥墩以1阶自振频率、整体振动为主,横向振幅数值较大。动车作用下桥墩以列车强振频率、局部振动为主,横向振幅数值较小。列车对桥梁的强振频率主要取决于列车速度和车辆长度<sup>[10-12]</sup>。

### 3.4 地震前、后桥梁振动状态对比

高速铁路桥梁需要控制动车作用下的梁体竖向振动加速度、横向和竖向振幅等动力响应参数,以保证桥上轨道结构的稳定性<sup>[10-12]</sup>。将地震发生前后、动车作用下桥梁振动参数进行对比,判断桥梁工作状态有无异常,是否满足运营要求。

以连续箱梁76 m边跨和3<sup>#</sup>桥墩为例,不同速度动车作用下实测梁体和桥墩振动数值如图6-9所示,竖向加速度按照规范要求采用20 Hz低通数字滤波。从整体趋势看,梁体和桥墩动力响应数值随车速的提高缓慢增大,由于轨道不平顺状态、车辆状态和车速等因素的综合影响,动力响应实测值存在一定的离散性。对比地震发生前后梁体和桥墩动力响应数值可知,不同车速动车作用下的梁体振动趋势一致、数值大小相当。

另外,通过对地震发生前后桥梁结构自振频率、动车作用下挠跨比和梁端竖向转角等参数进行对比可知,该处桥梁结构工作状态无异常变化,能够满足运营要求。地震前后桥梁自振频率幅值谱如图10

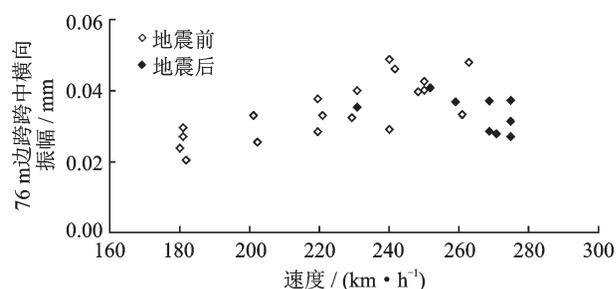


图6 梁体横向振幅与行车速度关系图

Fig. 6 Relationship diagram of beam body lateral amplitude and train speed

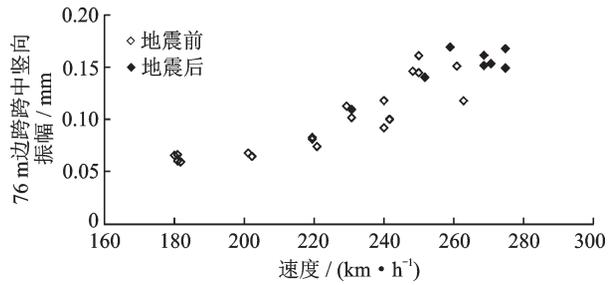


图7 梁体竖向振幅与行车速度关系图

Fig. 7 Relationship diagram of beam body vertical amplitude and train speed

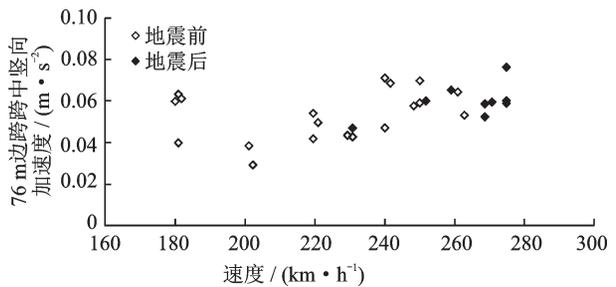


图8 梁体竖向加速度与行车速度关系图(20 Hz滤波)

Fig. 8 Relationship diagram of beam body vertical acceleration and train speed (20 Hz filtering)

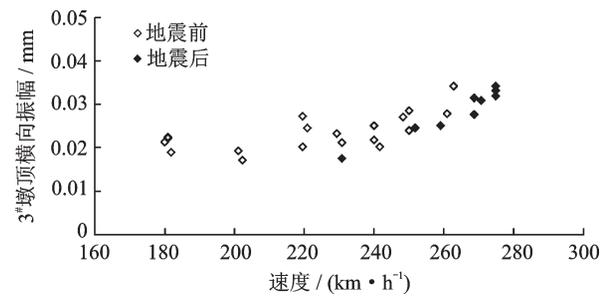


图9 桥墩横向振幅与行车速度关系图

Fig. 9 Relationship diagram of pier lateral amplitude and train speed

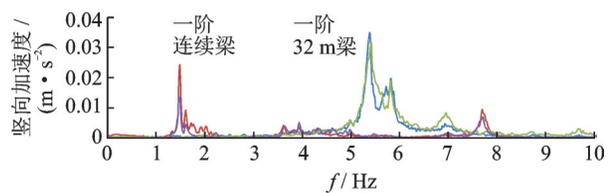


图10 地震前后桥梁自振频率幅值谱图

Fig. 10 Natural frequency of bridge structure before and after the earthquake

所示,图中不同颜色为地震前后不同时间采集波形的分析结果。

## 4 结论

地震作用下高速铁路桥梁动力响应实测试验数据稀少,通过对地震作用下的高速铁路桥梁结构动力响应特征及地震预警时间进行分析,并将地震作

用下和动车作用下的实测数据进行时域和频域对比,得出如下结论:

(1)地震S波作用下桥梁结构动力响应迅速增大,最大值约为P波作用下的2-5倍,P波作用下桥梁结构动力响应变化趋势较为平缓。距震中195 km桥址处“异地震前预警”时间约为50 s,“现地地震P波预警”时间约为15 s。

(2)地震作用下桥梁结构以高墩的低频、整体横向振动为主,横向振动数值大于竖向。连续箱梁横向振动表现为桥墩和梁体的耦合振动。梁体竖向振动以结构自振频率为主。动车作用下桥梁以列车强振频率、局部振动为主。

(3)地震作用下桥梁结构横向振幅数值远大于动车作用,墩顶横向振幅最大幅值比约为43倍,梁体跨中横向振动最大幅值比约为18倍。地震作用下梁体竖向振幅与桥梁跨度呈正相关,动车作用下的连续竖向振幅略大于地震作用,动车作用下的连续竖向振幅小于地震作用。实测动车组列车作用下的梁体横向和竖向加速度均大于地震作用。应变、位移等参数相对于振动参数而言,对地震响应不敏感。

(4)距离震中约195 km高速铁路桥梁,将地震发生前后、动车作用下的桥梁振动参数进行对比,试验数据表明该处桥梁结构工作状态无异常变化,能够满足运营要求。

#### 参考文献:

- [1] 张 骞. 基于耦合系统动力学仿真的高速铁路地震监测预警阈值研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2014.  
Zhang Qian. Research on threshold of earthquake early warning for high-speed railways based on coupling system dynamics simulation [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2014.
- [2] 陈令坤. 地震作用下高速铁路列车-无砟轨道-桥梁系统动力响应及走行安全研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.  
Chen Lingkun. Seismic responses of high-speed railway train-ballastless track-bridge system and train-running safety during earthquake [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [3] 乔 宏. 地震作用下车桥系统动力响应分析的若干关键问题研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.  
Qiao Hong. Study on several key problems about the dynamic response of train-bridge system subjected to earthquake action [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [4] 马 莉,张格明,史建平,等. 高速铁路地震预警监测系统测试评价方法的研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2017, 30(3): 40-44.  
MA Li, ZHANG Ge-ming, SHI Jian-ping, et al. Research on test evaluation method of high-speed railway earthquake early-warning system [J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2017, 30(3): 40-44.
- [5] 余志武,何华武,蒋丽忠,等. 多动力作用下高速铁路轨道-桥梁结构体系动力学及关键技术研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 1-9.  
Yu Zhiwu, He Huawu, Jiang Lizhong, et al. Dynamics and key technology research on high-speed railway track-bridge system under multiple dynamic sources [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 1-9.
- [6] 陆新征,顾栋炼,林旭川,等. 2017.08.08四川九寨沟7.0级地震震中附近地面运动破坏力分析[J]. 工程建设标准化, 2017, (8): 68-73.  
Lu Xinzheng, Gu Donglian, Lin Xuchuan, et al. Analysis of ground motion damage near the epicenter of the Jiuzhaigou earthquake [J]. Standardization of Engineering Construction, 2017, (8): 68-73.
- [7] 温瑞智. 我国强地震动记录特征综述[J]. 地震学报, 2016, 38(4): 550-563.  
Wen Ruizhi. A Review on the characteristics of Chinese strong ground motion recordings [J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(4): 550-563.
- [8] 马 强. 地震预警技术研究及应用[D]. 北京:中国地震局工程力学研究所, 2008.  
Ma Qiang. Study and application on earthquake early warning [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics China Earthquake Administration, 2008.
- [9] 高 峰,杨学山,马树林. 地震预警系统综述[J]. 自然灾害学报, 2014, (5): 62-69.  
Gao Feng, Yang Xueshan, MA Shulin, et al. Summary of earthquake early warning system [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, (5): 62-69.
- [10] 杨宜谦,姚京川,孟 鑫,等. 时速300-350 km高速铁路桥梁动力性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 14-19.  
Yang Yiqian, Yao Jingchuan, Meng Xin, et al. Experimental study on dynamic behaviors of bridges for 300-350 km/h high speed railway [J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 14-19.
- [11] 陈令坤,蒋丽忠,余志武,等. 高速铁路简支梁桥地震反应特性研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 216-222.

- Chen Lingkun, Jiang Lizhong, Yu Zhiwu, et al. Study on earthquake characteristics of high-speed railway simply-supported girder bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12): 216-222.
- [12] 孟 鑫, 刘鹏辉, 姚京川, 等. 高速铁路 32m 简支箱梁动力特性试验分析[J]. 铁道建筑, 2016, (1): 10-15.
- Meng Xin, Liu Penghui, Yao Jingchuan, et al. Testing and analysis of dynamic performance of simple supported box girder with the span of 32 m high speed railway [J]. Railway Engineering, 2016, (1): 10-15.

## Dynamic responses test analysis of high-speed railway bridges under earthquake action

MENG Xin, LIU Peng-hui, WANG Wei, WANG Yi-gan, DONG Zhen-sheng, YANG Yi-qian

(Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Taking the high speed railway bridge structure which is about 195 km from the Jiuzhaigou earthquake epicenter as research object, the dynamic response characteristics and earthquake warning time of the bridge structure under the action of earthquake are analyzed, and the measured data are compared in time domain and frequency domain under the action of earthquake and multiple unit train. The results show that under the action of shear waves, the bridge structure dynamic response rapidly increase, the maximum value under shear wave is about 2 to 5 times of that under pressure wave. At the bridge, the pre-seismic allopatic early warning is about 50 s, on-the-spot seismic P-wave early warning is about 15 s. Under the action of earthquake, the bridge structure is dominated by the low frequency and overall transverse vibration of the high pier, and the transverse vibration value is larger than the vertical vibration value. Under the action of earthquake, the maximum lateral amplitude of the pier top is 43 times that of the multiple unit train, and the vertical amplitude of beam body is positively correlated with the span of bridge. Because the multiple unit train directly on the bridge, the transverse and vertical acceleration of the beam body are greater than the seismic effect. Before and after the earthquake, the comparison of bridge vibration parameters under the action of multiple unit train shows that the bridge structure has no abnormal changes in its working state.

**Key words:** bridge; high-speed railway; dynamic response; earthquake

作者简介: 孟 鑫(1982-),男,副研究员。电话:(010)51874867; E-mail:sdjxmx@sina.com

通讯作者: 王 巍(1987-),男,副研究员。电话:(010)51874867; E-mail:23156783@qq.com