

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2020.03.006

公路隧道爆破施工对邻近高铁高架桥梁的影响研究

黄赫焜¹, 黄万刚¹, 张亮²

(1. 杭州地方铁路开发有限公司, 浙江 杭州 310007; 2. 杭州鲁尔物联科技有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要: 本文介绍了某公路隧道爆破施工对邻近铁路桥梁的影响监测方法及数据分析。通过布设传感器对该桥进行环境、结构振动和结构变形等参数的实时监测, 通过监测数据挖掘分析研究隧道爆破和钻孔灌注桩施工对邻近高铁桥梁的影响, 并结合有限元分析等手段, 综合分析桥梁的安全性和可靠性, 确保已有大桥在施工阶段的安全运营。本文创新性的将基于人工智能图像算法的视觉传感系统融入实时监测中, 图像识别技术精度高, 不受爆破振动的影响, 而且可以有效降低监测成本。研究成果为公路隧道的安全施工提供了可靠保证, 可供类似条件下的隧道爆破施工借鉴参考。

关键词: 桥梁监测; 邻近隧道; 数值模拟; 图像识别

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 2096-7195(2020)03-0209-08

Influence of the tunnel blasting on the adjacent high-speed railway viaduct

HUANG He-xuan¹, HUANG Wan-gang¹, ZHANG Liang²

(1. Hangzhou Local Railway Development Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

2. Hangzhou Ruhr IOT Technology Co., Ltd, Hangzhou 311100, China)

Abstract: This article introduces the monitoring method and data analysis of the impact of a highway tunnel blasting construction on adjacent railway bridges. Firstly, the sensors are deployed to realize real-time monitoring of the environment, structural vibration and structural deformation of the bridge. Then, the monitoring data is collected to analyze the impact of tunnel blasting and bored pile construction on the adjacent high-speed railway bridge. In combination with finite element analysis, comprehensive analysis of the safety and reliability of the bridge are carried out to ensure the operation safety of the existing bridge during the construction process. This paper innovatively integrates the visual sensing system based on artificial intelligence image algorithm into real-time monitoring. The image recognition technology has high precision, and it is not affected by blasting vibration, thus this effectively reduce the monitoring cost. The results ensure the security of construction of highway tunnels, and also these results can be used as a reference for tunnel blasting construction under similar conditions.

Key words: bridge monitoring; adjacent tunnels; numerical simulation; image recognition

0 引言

随着我国城镇化的不断推进和国家经济的高速发展, 与国计民生密切相关的高速公路和高速铁路建设已经成为我国工程建设的重要内容。隧道是公路、铁路等建设的重点和关键工程。随着铁路建设

的发展和科技的进步, 隧道开挖方法得到了迅猛发展。比较常用的开挖方法有钻爆法、盾构法和掘进机法。由于钻爆法对地质条件适应性强, 开挖成本低, 特别适用于坚硬岩石隧道、破碎岩石隧道及大量短隧道的施工, 因此钻爆法仍是当前国内外常用的隧道开挖方法。越来越多的爆破施工需要在在建

收稿日期: 2020-05-28

作者简介: 黄赫焜 (1993—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事铁路开发工程管理方面的研究和工程实践工作。Email: 767255693@qq.com。

2.2 监测内容与与方法

(1) 爆破振动及桥梁动力响应监测

爆破振动信号采用实时监测方法,首先对爆破点附近的目标对象进行详细准确调查,确定监测对象,在爆破前对监测系统室内检查、检测和标定,同时根据监测对象与爆破点相对位置关系,确定测点位置及布置方法,进入现场实施安装,根据施工的爆破时间进行爆破振动及结构动力响应的监测。

a) 监测方法

现场安装爆破振速仪,用于监测远端的爆破振动速度。除此之外,还需要对爆破点近端的振动进行监测,以研究爆破振动在土体中的传播及衰减机理。为了获取桥梁的模式参数,现场监测还需要获取爆破震动作用下桥梁振动的加速度数据。因此,须在指定位置增设加速度传感器。主桥结构动力特性的监测采用高铁行车和环境随机振动法,即将速度传感器放在主梁指定位置,根据对随机振动信号的分析,判断结构的自振特性参数,这其中包括自振频率、阻尼比和振型。在加速度选型时,需要考虑加速度传感器的频响特性、量程、精度和工作环境温度。须监测结构前10阶振型,经验估计高阶振型对应频率的不低于20 Hz。综合考虑,选用模拟电压输出的力平衡加速度传感器。

b) 测点布置

爆破振动测点布置一般遵循以下原则:1)最大振动断面发生的位置和方向监测;2)爆破地震效应跟踪监测;3)爆破地震波衰减规律监测。

按照上述原则和爆破地震的传播规律,本次监测共布设14处隧道爆破振动监测点,分别布置在隧道底部、爆破施工隧道及高铁高架桥梁之间的土体上,每个测点布置1个爆破拾震仪。针对已建桥梁结构监测,爆破加速度传感器布置在4孔跨中主梁梁底,用于判断主梁自振特性;桥墩加速度传感器布置在桥墩墩顶及墩底承台处,用于监测爆破振动加速度。安装传感器时必须安装稳固,否则质点的速度监测数据将产生失真现象,一般采用石膏固定传感器效果较好。还应注意对传感器的保护,使其避免受到爆破碎石或其它物体的物理性损伤。另外必须注意传感器的方向性。具体布点位置如图2所示:

(2) 基于视觉传感的桥梁变形监测

针对本项目桥梁结构变形监测,由于现场存在爆破与钻桩等施工内容,传统的接触式测量方法很

容易受到相应震动的影 响,导致测量结果不精确,甚至传感器失效。因此,拟研究一种新型的非接触式视觉感知监测系统,实现对桥墩的变形与沉降进行监测,该系统将具备高精度、远距离、多点同时监测、操作方便等优点,系统的具体性能参数如下表1所示。

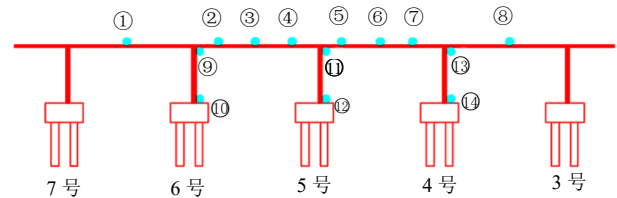


图2 加速度传感器布点图

Fig. 2 Layout of acceleration sensors

表1 视觉传感器参数表

Tab. 1 Parameters of vision sensors

| 相机像素 | 镜头焦距 | 测量距离 | 视野范围 | 算法优化 | 测量精度 |
|---------|--------|-------|---------|------|--------|
| 1 800 万 | 755 mm | 150 m | 1 m×1 m | 有 | 0.1 mm |

此外,根据现场实际情况,应用图像识别技术还要考虑安装供电与照明的问题,具体设计如下:

a) 设备安装

为减少爆破产生的冲击波对仪器的影响,将设备架设到距离桥墩100 m左右的山坡上,同时在架设点附近设置阻尼器与隔振装置。另一方面,山坡架设点的高度尽量保证与桥墩中部的高度相近,从而减少对于镜头俯仰角的调整,并尽量避免周围树木对于测量视线的遮挡。针对研究桥墩目标靶点的固定,采用目标靶点为25 cm×25 cm的定制化二维码,保持在一个平面上进行安装。

b) 夜间监测照明

由于视觉传感设备需要24 h对桥墩变形进行实时监测,且工作距离较远,相机需要配备红外光源对目标靶点进行照射,可采用人工光源或全反射目标板,进行图像捕捉。表2对比了几种常用的机器视觉光源,综合考虑亮度、图像识别效果、形状自由度和使用寿命,LED光源可作为目标靶点进行追踪,保证夜间成像质量。

3 监测数据及数值模拟的分析结果

现场获得的主要有隧道爆破施工引起的周边环境振速数据和高铁高架桥梁梁加速度数据。结合高铁高架桥预制箱梁的有限元数值模拟,对2019年6—9月的自动化监测数据综合进行整理分析,

表2 视觉传感器靶点光源性能对比

Tab. 2 Comparison of the performance of target light sources of vision sensor

| 光源 | 颜色 | 亮度 | 响应速度 | 寿命/h | 形状自由度 |
|--------|--------|----|------|----------------|-------|
| 卤素灯 | 白色, 偏黄 | 高 | 慢 | 3 000~5 000 | 低 |
| 高频荧光灯 | 白色, 偏绿 | 低 | 慢 | 5 000~7 000 | 低 |
| LED 光源 | 红黄蓝绿白 | 高 | 快 | 60 000~100 000 | 高 |

主要结果由下面的3个方面组成。

3.1 爆破施工引起的环境振动监测结果

考虑公路隧道爆破施工对周边高铁高架桥梁的影响,采用爆破振速传感器(采样频率为5 000 Hz)对施工爆破引起的环境振动进行监测,通过对爆破振速的分析达到建立观测爆破振动衰减规律的监测效果。本次监测共布设4处振速监测点,测点一传感器安装在距隧道口约70 m左右,测点二传感器安装在靠近3号桥墩的土体上,测点三和四分别安装在4号和6号桥墩上。传感器监测结果数据如表3所示。通过观察表3中2个监测点各自5—9月的监测数据,可以发现:测点一(位于爆破施工隧道口处)监测到的最大振速均远大于测点二(隧道外土体上)监测到的最大振速值。

通过对4号和6号桥墩的振速数据分析,2个桥墩上监测到的最大振速值均小于0.3 cm/s,符合相关规范的要求。同时,可以统计得到5—9月4号和6号桥墩上最大振速,详见表3。可以看出:从5—9月,随着爆破施工远离隧道口,隧道口(测

点一)和3号桥墩旁边土体(测点二)监测到的振速在逐渐减小。

通过对比测点一、测点二及4号和6号桥墩的最大振速,可以发现如下规律:因为土体材料相对于混凝土结构材料刚度小、阻尼比大,由公路隧道爆破施工引起的振动在土体中的衰减随着距离的增加非常明显,并且爆破振动再经由土体传递到邻近高铁高架桥墩上的振速幅值非常小。因此,基于以上测点的最大振速可以说明,公路隧道爆破施工及桩基施工给高铁高架桥梁带来的影响较小,满足规范的要求。

3.2 高铁高架桥梁动力特性分析及响应监测结果

(1) 高铁高架桥箱梁有限元数值分析

分别采用ANSYS^[5]和Midas/Civil两种通用有限元软件对高铁高架桥32 m跨度的预制箱梁进行数值建模分析,其中ANSYS采用三维实体单元,Midas/Civil采用空间梁单元。分析中预制箱梁尺寸及结构各部件计算参数取值见图3和表4,三维模型如图4。

表3 测点处爆破施工引起的振速统计

Tab. 3 Statistics of vibration speed caused by blasting construction at measuring points

| 月份 | 测点一(爆破隧道口) | 测点二(隧道外土体) | 4号、6号桥墩(测点三和四) |
|----|-------------|-------------|----------------|
| | 最大振速/(cm/s) | 最大振速/(cm/s) | 最大振速/(cm/s) |
| 5月 | 25.0 | 4.10 | 0.165 6 |
| 6月 | 17.0 | 3.70 | 0.239 1 |
| 7月 | 13.0 | 1.10 | 0.109 9 |
| 8月 | 3.0 | 0.15 | 0.108 2 |
| 9月 | 0.2 | 0.13 | 0.098 7 |

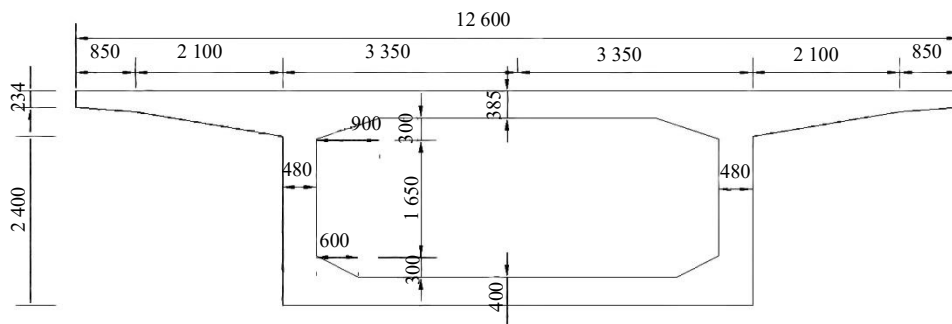
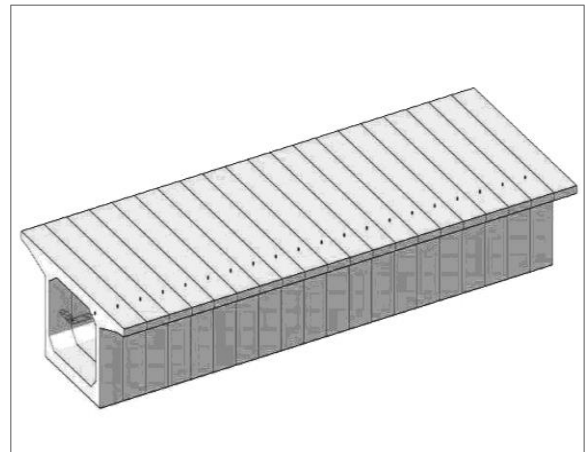


图3 32 m跨度铁预制箱梁截面尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Cross-sectional dimensions of a 32 m-span prefabricated box beam (Unit: mm)



ANSYS 计算模型



Midas/Civil 计算模型

图 4 ANSYS 及 Midas/Civil 有限元分析模型

Fig. 4 Finite element analysis model of ANSYS and Midas/Civil

表 4 结构各部件计算参数

Tab. 4 Calculation parameters of structural components

| 部件 | 密度/kg·m ⁻³ | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|-----|-----------------------|----------|-----|
| 钢轨 | 7 830 | 210 | 0.3 |
| 轨道板 | 2 500 | 31.5 | 0.3 |
| 箱型梁 | 2 500 | 34.5 | 0.2 |

ANSYS 及 Midas/Civil 分别使用 Lanczos 法对简支箱梁进行了模态分析, 前 12 阶自振频率结果如表 5 和表 6 所示。两种有限元方法第一主频比较接近, 整体上 Midas/Civil 采用空间梁单元模拟预制箱梁整体刚度偏大, 故本文以 ANSYS 模态分析结果为依据。

表 5 ANSYS 计算箱型梁模态频率 (单位: Hz)

Tab. 5 Box beam modal frequency of ANSYS calculation (Unit: Hz)

| 阶次 | 频率 | 阶次 | 频率 | 阶次 | 频率 |
|----|--------|----|--------|----|--------|
| 1 | 5.625 | 5 | 21.532 | 9 | 37.220 |
| 2 | 9.904 | 6 | 22.357 | 10 | 49.839 |
| 3 | 15.816 | 7 | 35.326 | 11 | 50.234 |
| 4 | 16.356 | 8 | 36.364 | 12 | 50.635 |

表 6 Midas/Civil 计算箱型梁模态频率 (单位: Hz)

Tab. 6 Box beam modal frequency of Midas/Civil calculation (Unit: Hz)

| 阶次 | 频率 | 阶次 | 频率 | 阶次 | 频率 |
|----|--------|----|--------|----|---------|
| 1 | 5.847 | 5 | 36.805 | 9 | 73.842 |
| 2 | 14.271 | 6 | 43.130 | 10 | 82.052 |
| 3 | 19.854 | 7 | 54.134 | 11 | 87.159 |
| 4 | 27.407 | 8 | 71.002 | 12 | 102.515 |

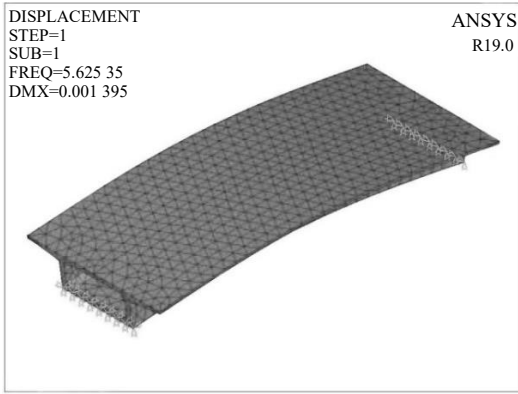
(2) 高铁高架桥箱梁动力响应监测结果
根据监测截面的布置, 使用力平衡加速度测得

3~7 号墩之间高铁高架桥箱梁振动加速度数据, 通过对加速度数据进行频域分析会得到一系列桥梁的动力特性参数。高铁桥梁动力特性参数的变化 (频率、振型、模态阻尼系数) 是桥梁构件性能改变的标志。桥梁的振动水平 (振动幅值) 反映桥梁的安全运营状态。桥梁自振频率的降低、桥梁局部振型的改变预示着结构刚度的退化和局部损伤的发展, 因此结构模态参数是进行结构损伤评估的重要依据。通过频域分解法对 8—9 月内竖向加速度数据进行频域分析, 计算高铁高架主梁的自振频率, 功率谱曲线见图 6。

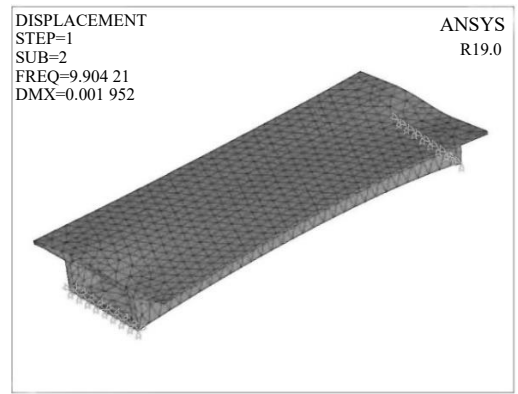
由于环境激励在监测桥梁中产生的激励较小, 不能引起桥梁加速度较明显的变化, 而列车经过时会对桥梁产生一个较大的加速度, 所以采用列车经过的激励来进行模态分析, 可以得到高架桥梁较高振型的自振频率。各个列车大小、载客数量不同引起桥梁产生的加速度也就不同, 此外列车在桥梁位置的不同, 综上所述原因都会对桥梁产生不同的耦合作用, 故会引起桥梁自振频率的微小变化。

依据前述有限分析结果可知: 基于 ANSYS 得到的简支箱梁竖向一阶固有频率为 5.625 Hz, 基于 Midas/Civil 得到的简支箱梁竖向一阶固有频率为 5.847 Hz, 两者较为接近。因此, 3~7 号墩间实际监测得到的第一主频 1.75 Hz 和第二主频 3.6 Hz, 并非简支箱梁结构的竖向一阶固有频率, 而是由于车辆耦合作用产生的振动频率; 而实测得到的第三主频 5.37 Hz 为预制简支箱梁的竖向一阶固有频率。

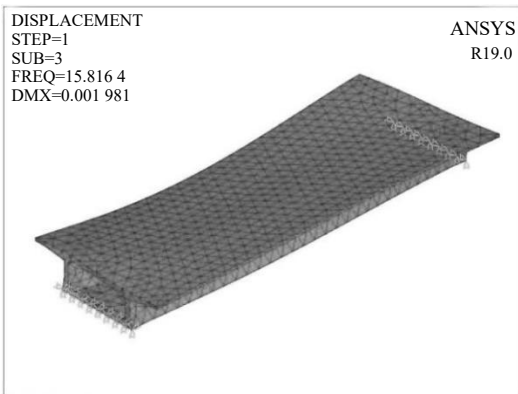
表 7 给出了 8—9 月份 3~7 号桥墩之间预制箱梁加速度的监测结果, 可以发现: 简支预制箱梁结构的竖向一阶固有频率在 5.17~5.37 Hz 之间变动, 变化幅值在 4% 以内, 表明预制箱梁自振频率变化



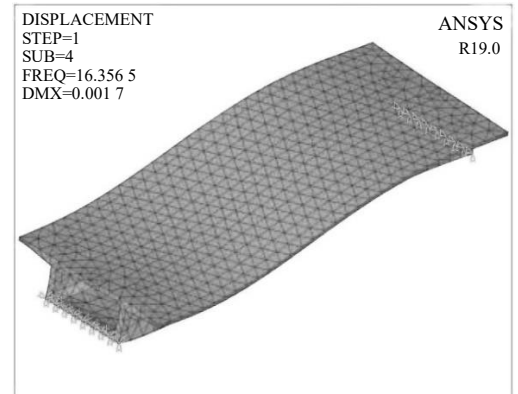
ANSYS 一阶振型图



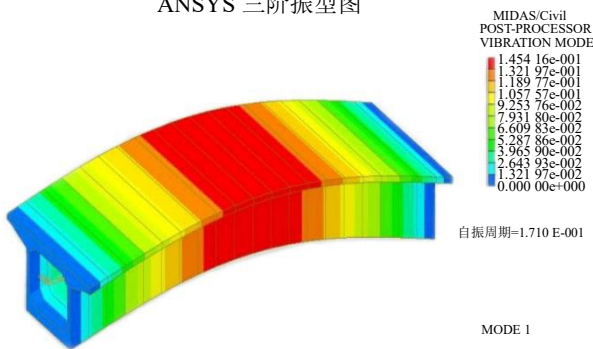
ANSYS 二阶振型图



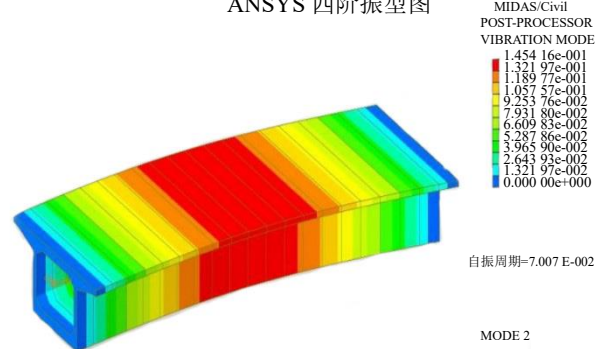
ANSYS 三阶振型图



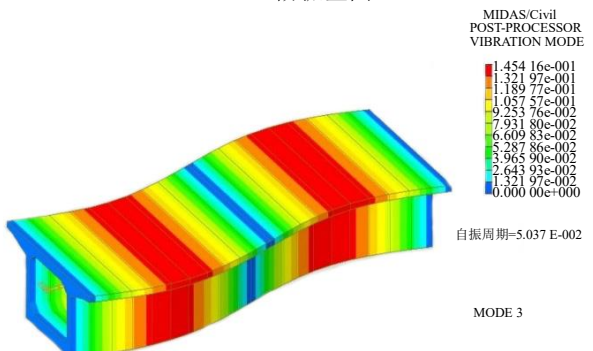
ANSYS 四阶振型图



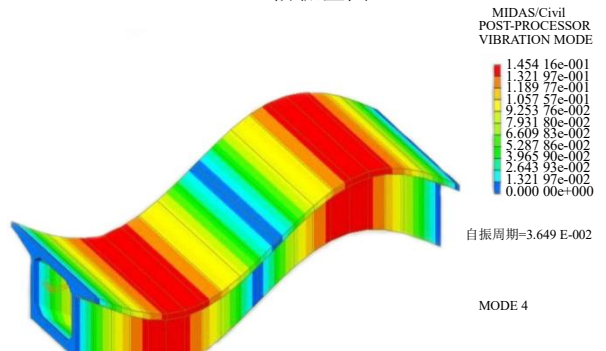
Midas/Civil 一阶振型图



Midas/Civil 二阶振型图



Midas/Civil 三阶振型图



Midas/Civil 四阶振型图

图5 ANSYS及Midas/Civil模态分析结果

Fig. 5 Modal analysis results of ANSYS and Midas/Civil

表7 3~7号桥墩之间预制箱梁振动频率(8—9月份)

Tab. 7 Vibration frequency of prefabricated box beams between No.3~No.7 bridge piers (August to September)

| 日期 | 阶数 频率/Hz | | | | | | |
|-------|----------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8月1日 | 1.76 | 3.32 | 5.08 | 7.13 | 8.98 | 10.60 | 12.30 |
| 8月12日 | 1.66 | 3.31 | 5.37 | 7.23 | 8.98 | 10.80 | 12.40 |
| 8月17日 | 1.66 | 3.40 | 5.17 | 7.12 | 8.98 | 10.70 | 12.40 |
| 8月21日 | 1.66 | 3.44 | 5.27 | 7.32 | 8.79 | 10.70 | 12.40 |
| 8月25日 | 1.76 | 3.60 | 5.37 | 7.23 | 8.89 | 10.60 | 12.40 |
| 8月29日 | 1.66 | 3.42 | 5.37 | 7.23 | 8.89 | 10.30 | 12.40 |
| 9月2日 | 1.76 | 3.32 | 5.27 | 7.32 | 8.89 | 10.20 | 12.30 |
| 9月8日 | 1.76 | 3.42 | 5.27 | 7.13 | 8.79 | 10.60 | 12.40 |
| 9月15日 | 1.76 | 3.23 | 5.17 | 7.23 | 8.98 | 10.10 | 12.40 |
| 9月24日 | 1.76 | 3.34 | 5.37 | 7.32 | 8.89 | 10.20 | 12.40 |

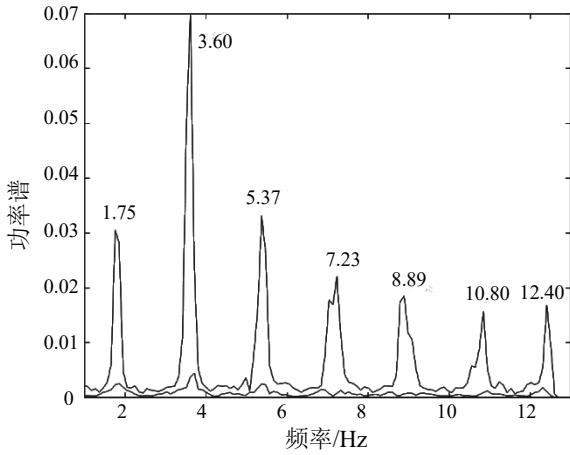


图6 竖向加速度响应频域分解功率谱曲线

Fig. 6 Frequency spectrum decomposition power spectrum curve of vertical acceleration response

不大, 结构刚度并未发生明显退化。因此, 邻近公路隧道爆破施工及桩基施工对高铁高架桥梁结构整体动力性能没有太大的影响。

3.3 视觉传感器桥梁变形监测结果

为了测量隧道爆破及桩基施工等条件下高铁高架桥梁变形的大小, 根据现场的架设条件, 对4号、5号和6号桥墩进行了沉降监测, 同时对3号、4号桥墩之间的桥跨跨中进行了动挠度监测, 视觉传感器布设点及监测点位如图7所示, 图7(b)中的三角形所在即为监测点位。

选取2019年10月21—24日采集的数据进行统计分析, 结果如表8所示, 得到如下结论:

(1) 施工现场环境噪声干扰较大, 设备端无法保证绝对固定, 由此引发较大测量误差, 远超桥



(a)



(b)

图7 视觉传感器布设点及监测点位示意图

Fig. 7 Schematic diagram of visual sensors and monitoring points

梁自身沉降变形;

(2) 受设备架设点环境振动影响, 4号、5号桥墩相对沉降均超过预警值; 其中4号桥墩最大相

表8 杨梅岭桥墩沉降及跨中挠度统计表(单位: mm)

Tab. 8 Pier settlement and mid-span deflection of Yangmeiling bridge (Unit: mm)

| 序号 | 监测位置 | 最大值 | 最小值 | 最大相对位移 | 预警值 | 是否超阈值 |
|----|-------------------|------|-------|--------|------|-------|
| 1 | 4号桥墩 | 1.82 | -1.81 | 1.82 | 0.8 | 是 |
| 2 | 5号桥墩 | 1.21 | -1.53 | 1.53 | 0.8 | 是 |
| 3 | 6号桥墩 | 0.48 | -0.79 | 0.79 | 0.8 | 否 |
| 4 | 4号、5号桥墩 之间桥跨跨中 | 1.18 | -1.21 | 1.21 | 32.6 | 否 |

对沉降达到 1.82 mm (设备布设在现场钢筋加工棚内), 5号桥墩最大相对沉降达到 1.53 mm (设备布设在重型车道附近的路面);

(3) 6号桥墩相对沉降较小为 0.79 mm, 满足规范要求; 原因是由于其架设在桥墩附近的土体之上, 周围环境振动较小, 因此测量结果较为稳定, 并且桥墩实际沉降变形会小于当前测量值;

(4) 4~5号桥墩之间桥跨跨中相对挠度为 1.21 mm (设备布设在现浇混凝土平台上, 相比路面等其他布设点更加稳固, 受环境影响相对较小), 满足规范要求, 实际桥梁动挠度小于测量值, 隧道爆破及桩基施工对高铁高架桥梁影响较小, 桥梁安全状态良好。

4 结 论

本文基于 2019年5—10月期间的监测数据, 分析了杨梅岭公路隧道施工爆破及桩基施工对邻近高铁高架桥梁结构性能的影响, 主要结论如下:

(1) 通过不同监测位置由爆破施工引起的振速监测数据的对比分析, 爆破振动在土体中的衰减随着距离的增加非常明显, 并且爆破振动再经由土体传递到邻近高铁高架桥墩上的振速幅值非常小;

(2) 根据高铁高架桥墩上监测的振速数据表明: 公路隧道爆破施工及桩基施工给高铁高架桥梁带来的影响比较小, 爆破施工及桩基施工控制均符合规范的要求;

(3) 使用 ANSYS 及 Midas/Civil 两种通用有限元软件对高铁 32 m 跨度简支箱梁使用进行模态分析, 得到 32 m 跨高铁预制箱梁的模态参数和相关文献中的结果吻合;

(4) 通过对高铁高架箱梁结构的动力响应监测, 结合有限元分析结果分析, 预制箱梁一阶固有频率变化不大, 结构刚度未发生明显退化。因此, 邻近公路隧道爆破施工及桩基施工对高铁高架桥

梁结构整体动力性能没有太大的影响;

(5) 视觉传感系统尤其本身高精度高采集频率的特点, 监测数据的质量对于设备布设处的环境振动非常敏感; 后期需要在设备的隔振及布设点的选择上保证该设备的适用性;

(6) 视觉传感系统对高铁高架桥梁跨中动挠度的监测表明, 公路隧道爆破施工及桩基施工对高铁桥梁的影响不明显, 均满足规范的要求;

(7) 本项目在监测方案中引入了自主研发的基于人工智能图像算法的视觉传感系统, 目的在于尝试和探索该视觉传感系统在高铁高架桥梁结构变形(尤其动挠度)监测场景中的实际应用可行性。通过本项目的实践可以初步得到如下结论: 视觉传感系统具备高精度高采集频率等特点, 监测结果对于设备布设处的环境条件特别敏感: a) 本项目3个桥墩沉降监测点中只有1个监测点位相对环境振动较小, 输出的结果较好, 其余2个实际沉降值被环境噪音覆盖; b) 高铁高架桥梁跨中挠度监测结果较好, 精度可达到毫米级。因此, 本项目使用的视觉传感系统具备在高铁高架桥梁结构变形监测上的应用前景, 监测数据的质量取决于实际监测场景的环境情况。

参考文献

- [1] 付士根, 许开立. 爆破振动效应预报及减震措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(6):45-48.
- [2] 蔡路军, 朱方敏, 吴亮, 等. 上穿公路隧道爆破对下方供水隧洞的振动影响研究[J]. 公路工程, 2015, 40(3): 28-32.
- [3] 杨超. 爆破地震波作用下桥梁结构的安全评估[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [4] 秦权. 桥梁结构的健康监测[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 37-42.
- [5] 尚晓江, 等. 编著. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.