

某下承式砼系杆拱桥静动力试验研究

周海成

(河北省廊坊市交通运输综合行政执法支队, 河北 廊坊 065000)

摘要: 某下承式预应力砼系杆拱结构上跨铁路, 风致振动显著, 且通车时间超过 20 年, 吊杆底部存在漏油现象。为评价该桥实际使用性能和工作状态, 判断桥梁承载能力及动力特性, 文中对其进行有限元分析及静动力试验研究。结果表明, 桥梁承载能力满足原设计荷载等级要求, 动力特性良好, 但吊杆索力需加强观测。

关键词: 桥梁; 砼系杆拱桥; 荷载试验; 承载能力; 动力特性

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)05-0142-07

1 工程概况

某下承式预应力砼系杆拱结构的计算跨径为 65 m, 计算矢高为 12 m, 矢跨比约为 1/5.417。预应力砼系梁高 2.3 m、宽 1.5 m, 吊杆 30 根, 拱肋 2 道, 桥面板 16 块, 横撑 3 道, 横梁 17 道, 系梁、横梁及拱肋采用 C50 砼。采用双柱式桥墩, 墩柱直径 1.0 m。桥面双向横坡 1.5%, 主桥宽 27.5 m。设计荷载为汽车超-20 级、挂车-120。

桥梁上跨高速铁路, 交角为 $50^{\circ}56'20''$ 。由于高铁速度较快, 风致振动显著, 经现场检测, 部分吊杆下锚头处油渍明显, 吊杆防护钢管存在内壁锈蚀病害(见图 1)。目前该桥服役年限已超过 20 年, 为测试其实际使用性能和工作状态, 判断其承载能力及动力特性, 对桥梁进行静动载试验研究。

2 传感器布置方案

试验主要测试截面包括拱顶截面(A-A)、1/4跨截面(B-B)、3/4跨截面(C-C)、拱脚截面(D-D)、10#中横梁跨中截面(E-E)、系梁跨中截面(F-F)、系梁 3/4 跨截面(G-G)、8#吊杆轴力(H-H)、12#吊杆轴力(I-I, 见图 2)。为测试各荷载工况下主拱肋、系梁、中横梁的应变, 在测试截面布置振弦式传感器(见图 3)。为测试各荷载工况下拱肋与桥面挠度, 在测试截面布置挠度测点(见图 4)。为测试吊杆在各荷载工况下的索力增量, 在两侧 7#、8#、9#、11#、12#吊杆距系梁顶部约 0.5 m 处布置索力测点。

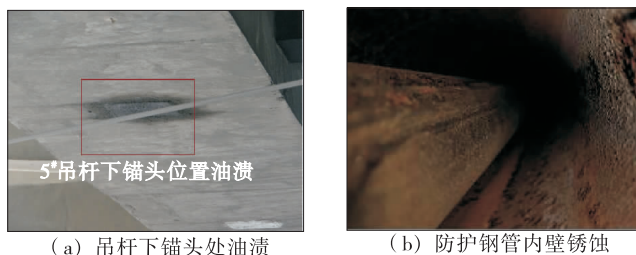


图 1 桥梁病害情况

为测试桥跨结构的动力性能、桥面平整度及运行车辆的动力特性、车速等因素的影响, 在主桥西侧系梁跨中梁底设置动挠度测点。为测得桥梁的自振频率、阻尼比及振型, 按照结构振型形状布置在变位

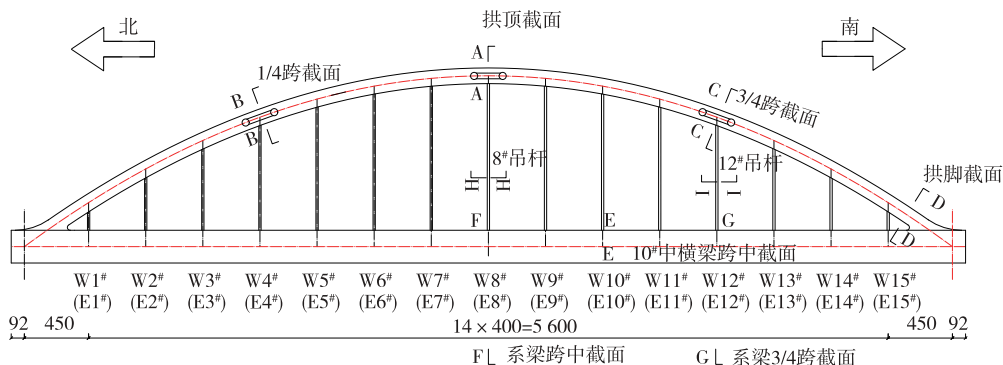


图 2 试验主要测试截面(单位: cm)

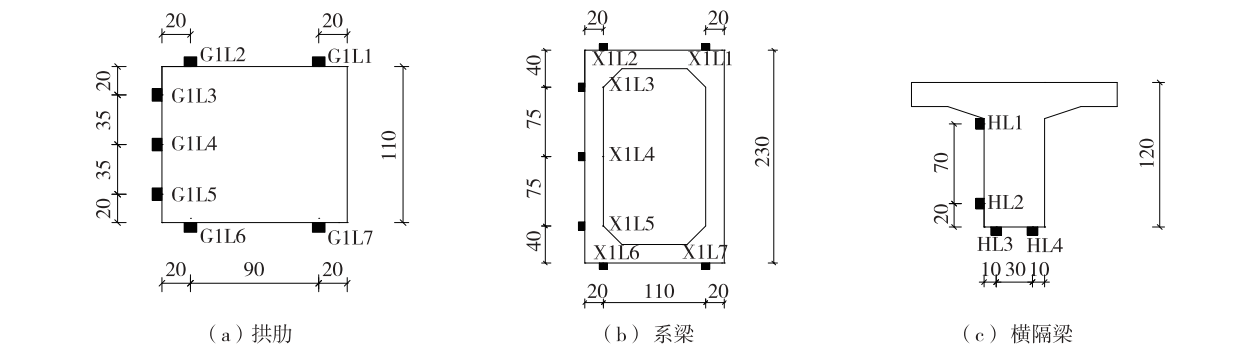


图 3 应变测点布置(单位:cm)

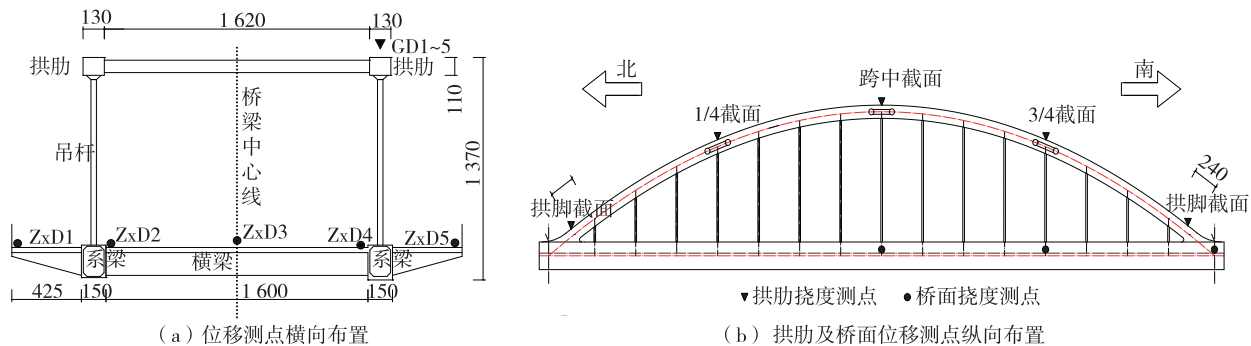


图 4 挠度测点布置(单位:cm)

较大的位置,避开各阶振型的节点,在主桥四分点位置布置振动测点。

3 试验方案

3.1 有限元模型建立

采用 MIDAS/Civil 有限元软件对该桥进行建模分析,主拱和系梁采用梁单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟,桥面板采用板单元模拟。全桥共 2 028 个节点、2 722 个单元,其中桁架单元 30 个,梁单元 1 060 个,板单元 1 632 个(见图 5)。

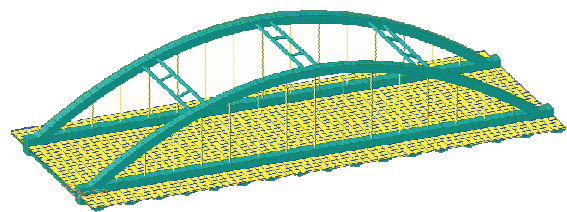


图 5 桥梁有限元模型

3.2 荷载试验效率

荷载试验选用 6 辆车重 350 kN 的加载车,荷载效率见表 1。

3.3 荷载工况及测试内容

3.3.1 荷载工况

工况 1、6、8:拱顶截面最大弯矩工况、系梁跨中

表 1 测试截面荷载效率

构件	工况号	工况	截面位置	荷载效率
拱肋	1	正弯矩最不利工况	拱顶	1.05
	2	正弯矩最不利工况	拱脚	1.01
	3	正弯矩最不利工况	3/4 拱顶	1.04
	4	负弯矩最不利工况	1/4 拱顶	0.95
系梁	5	正弯矩最不利工况	3/4 跨	1.00
	6	正弯矩最不利工况	跨中	1.01
H10 横梁	7	正弯矩最不利工况	跨中	0.97
8# 吊杆	8	最大索力增量工况	D8 吊杆	0.95
12# 吊杆	9	最大索力增量工况	D12 吊杆	0.95

截面最大弯矩工况、8# 吊杆最大索力增量工况,车辆布置见图 6。

工况 2:拱脚最大正弯矩工况。

工况 3、5:3/4 拱肋、3/4 系梁截面最大弯矩工况,车辆布置见图 7。

工况 4、9:1/4 拱肋最大负弯矩、12# 吊杆轴力增量工况,车辆布置见图 8。

工况 7:10# 中横梁最大弯矩工况,车辆布置见图 9。

3.3.2 测试内容

测试各截面测点的应变、挠度并观测裂缝情况。分三级加载,在进行加载试验前,用 2 辆试验车在试验孔跨中部位进行 2~3 次横桥向对称的反复预加

系梁顺桥向布置,三级加载为3列2排6辆加载车满载顺桥向布置。加载车以20、30、40 km/h的速度进行动载试验,测量动挠度测点在桥上行车荷载作用下的动挠度;采用自然脉动方式,即在桥面无交通荷载及桥址附近无规则振源的情况下,测定由桥址处风荷载、地脉动和水流等随机荷载激振引起的桥跨结构微幅振动响应,进而测定桥跨结构固有振动特性(自振频率和阻尼比)。

4 测试结果分析

4.1 静载试验测试结果分析

为检验试验荷载作用下各断面测点的效应实测

值与相应设计理论计算值的差异,采用测点效应校验系数 ζ 进行检验。 ζ 按下式计算:

$$\zeta = S_e / S_s$$

式中: S_e 、 S_s 分别为试验荷载作用下主要测点的实测弹性变位或应变值、理论弹性变位或应变值。

4.1.1 应变结果分析

根据现场分级加载情况,各截面受力最不利测点应变在加载过程中保持线性增长,不同荷载工况下测试截面各测点实测应变值与理论应变值对比见图10。由图10可得实测中性轴高度与理论计算值基本一致,应变沿截面高度分布线性良好,且实测值小于理论值,卸载后基本恢复。

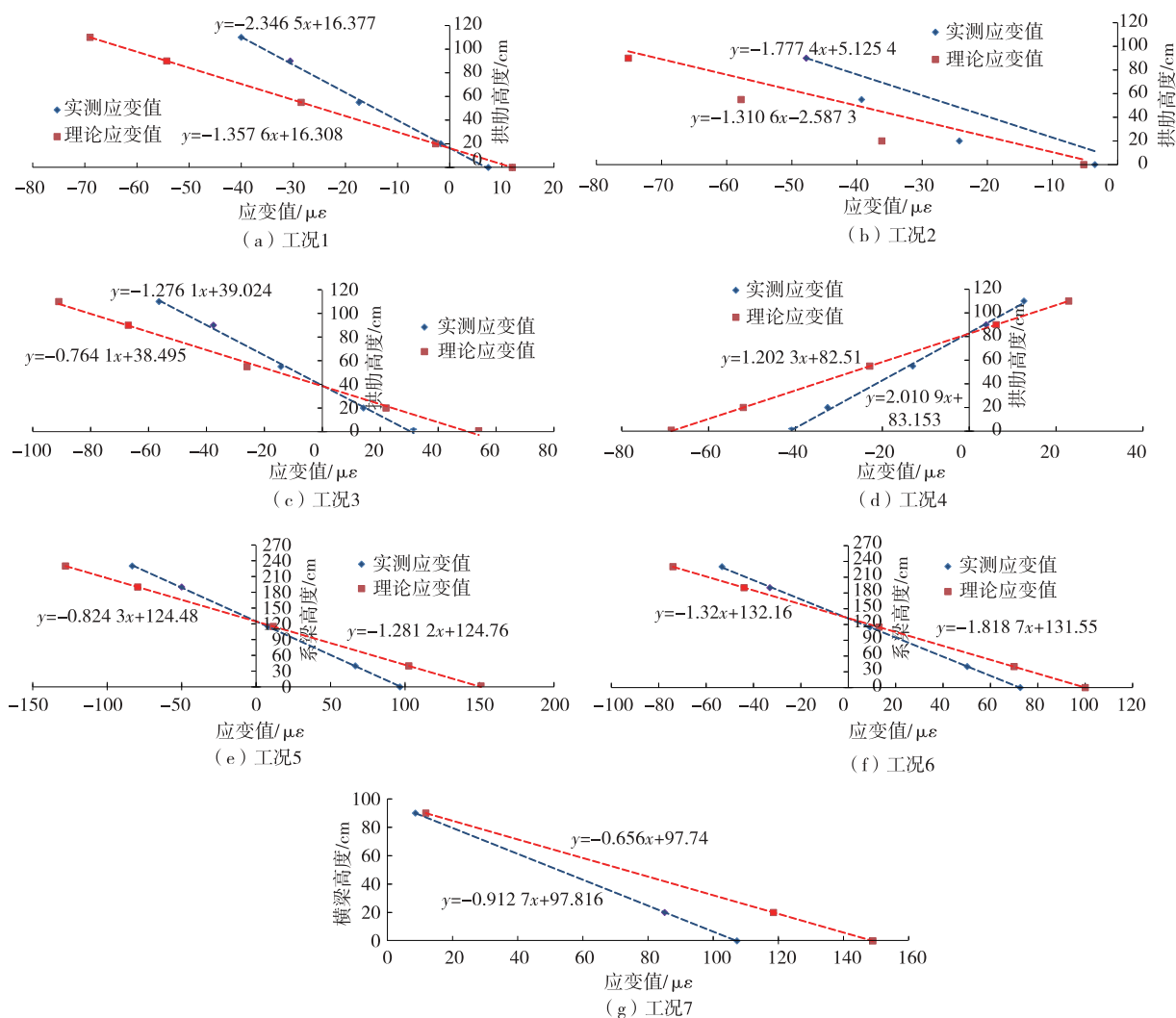


图10 不同荷载工况下测试截面各测点实测应变值与理论应变值对比

在试验荷载作用下,拱肋各测试截面应变校验系数为0.63~0.68,系梁各测试截面应变校验系数为0.70~0.77,横梁测试截面应变校验系数为0.73,均小于1.0,说明桥梁各构件强度在设计荷载作用下

满足规范要求。

4.1.2 挠度结果分析

如图11所示,不同荷载工况下测试截面各测点实测挠度与理论挠度曲线接近,且实测值小于理论

值,其中工况1下西侧拱肋拱顶截面各测点的挠度校验系数为0.67~0.79,工况2下西侧拱肋拱底截面各测点的挠度校验系数为0.69~0.80,工况3下西侧拱肋3/4截面各测点的挠度校验系数为0.61~0.68,工况4下西侧拱肋1/4截面各测点的挠度校

验系数为0.67~0.73,工况5下系梁3/4截面各测点的挠度校验系数为0.62~0.70,工况6下系梁跨中截面各测点的挠度校验系数为0.70~0.77,工况7下H10横梁跨中截面各测点的挠度校验系数为0.69~0.77,均小于1.0,表明该桥试验孔整体刚度

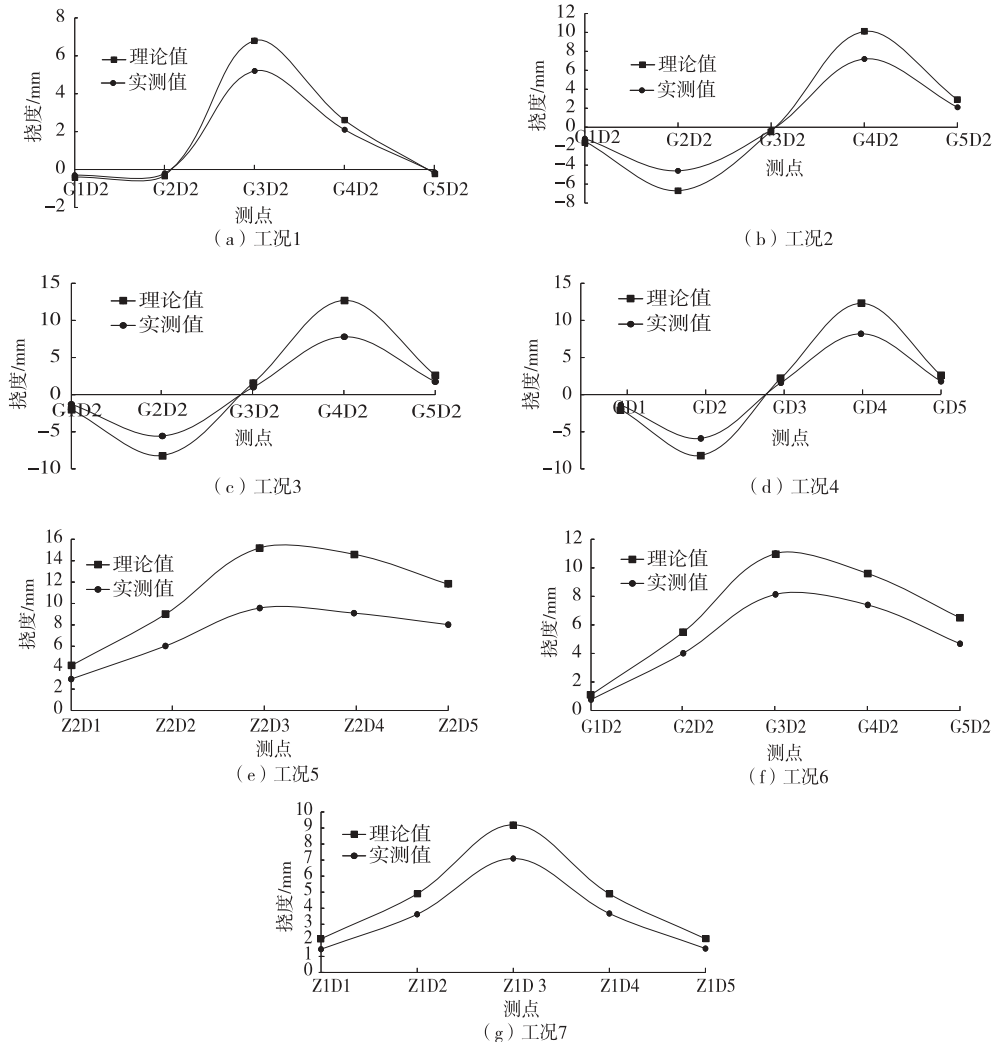


图 11 不同荷载工况下测试截面各测点实测挠度值与理论挠度值对比

性能良好,在设计荷载作用下满足规范要求。

4.1.3 相对残余变位结果分析

各荷载工况下相对残余变位情况见图 12。卸载后拱肋各控制测点的最大相对残余变位为 9.46%,系梁各控制测点的最大相对残余变位为

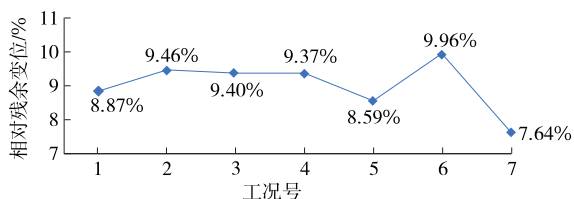


图 12 各荷载工况下相对残余变位

9.96%,横梁各测点的最大相对残余变位为 7.64%,均满足规范对相对残余变位不大于 20%的要求。

4.1.4 吊杆索力增量结果分析

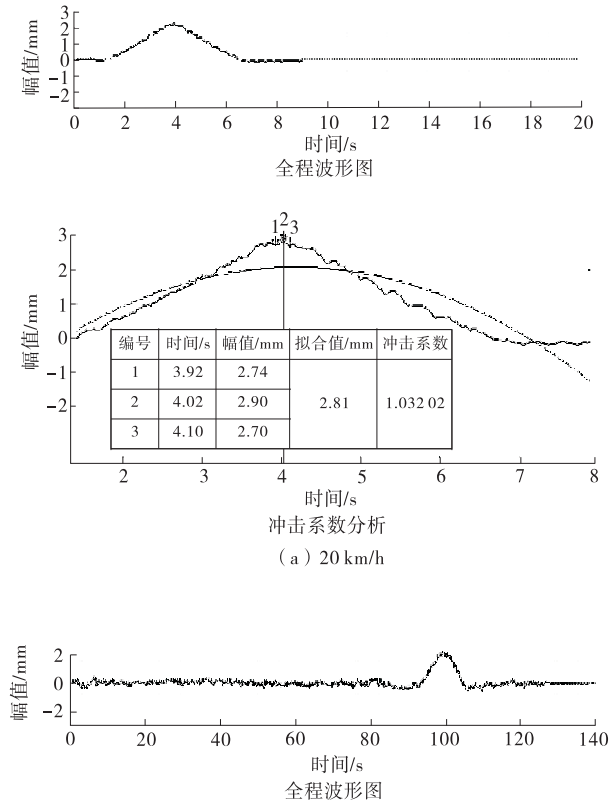
在工况 8 各级试验荷载加载作用下,8# 吊杆索力弹性增量在加载过程中保持线性增长,线性关系良好,卸载后相对残余 5.27%;满载时,7#~9# 吊杆索力弹性增量实测值均接近理论值,校验系数最大为 0.92。

在工况 9 各级试验荷载加载作用下,12# 吊杆索力弹性增量在加载过程中保持线性增长,线性关系良好,卸载后相对残余 4.33%;满载时,11#、12#

吊杆索力弹性增量实测值均接近理论值,校验系数最大为 0.90。

4.1.5 裂缝结果分析

在各试验荷载作用下,该桥试验孔构件未产生裂缝。

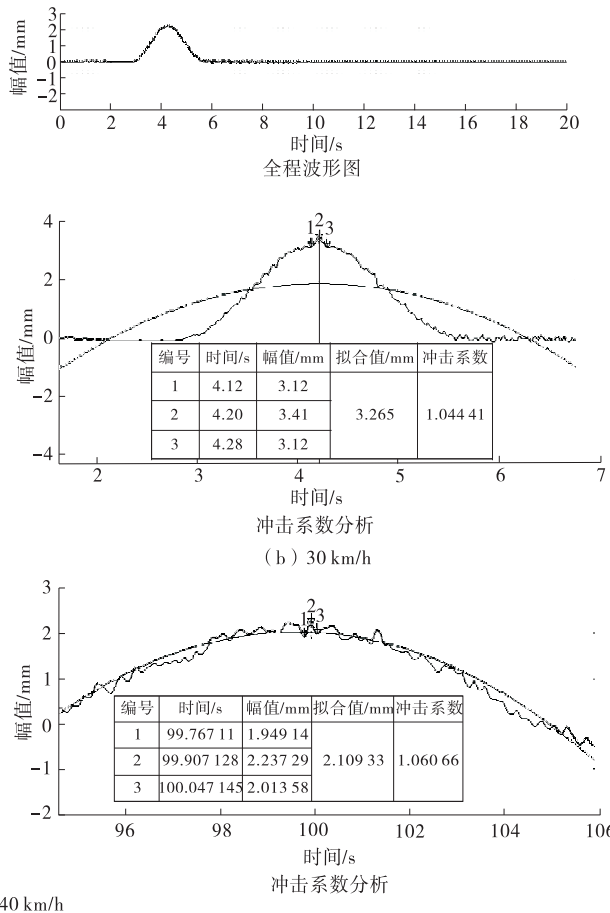


(a) 20 km/h

4.2 动载试验测试结果分析

4.2.1 桥梁冲击系数结果分析

采用光电挠度仪测试跑车工况下桥梁动挠度, 20~40 km/h 下桥梁挠度时程曲线见图 13,实测冲击系数为1.032~1.061,均小于理论值1.095,表明



(c) 40 km/h

图 13 不同车速下桥梁挠度时程曲线

该桥桥面平整度较好,车辆冲击作用较小,满足行车要求。

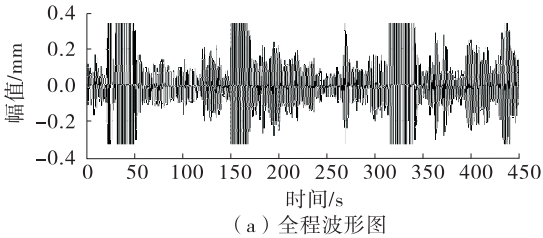
4.2.2 自振频率与阻尼比结果分析

试验中采用加速度传感器及智能信号采集处理分析仪记录桥跨结构的振动响应信号,结果见图 14、图 15。通过对测得的振动信号进行自功率谱分析及互功率谱分析,得到桥梁结构的一阶竖向频率

为 2.734 Hz。采用半功率带宽法计算得阻尼比为 0.073 5。

桥梁一阶竖向阵型理论计算结果见图 16,一阶竖向振动频率理论值为 1.875 Hz。一阶竖向振型实测振动频率为 2.322 Hz。

实测频率/理论频率 = 2.322/1.875 = 1.24 > 1.1,表明该桥上部结构实际整体刚度大于理论刚



(a) 全程波形图

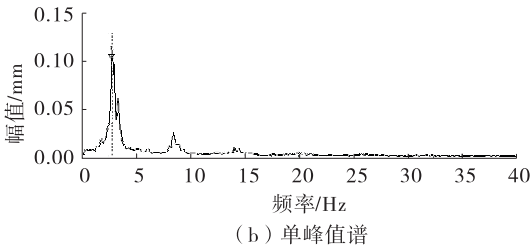


图 14 桥梁自功率谱分析频谱图

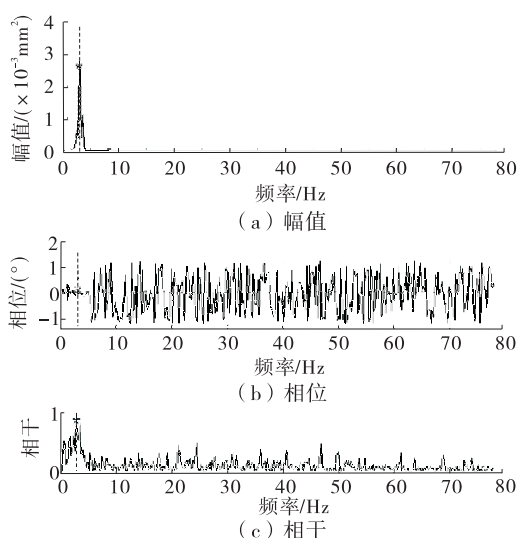


图 15 桥梁互功率谱分析频谱图

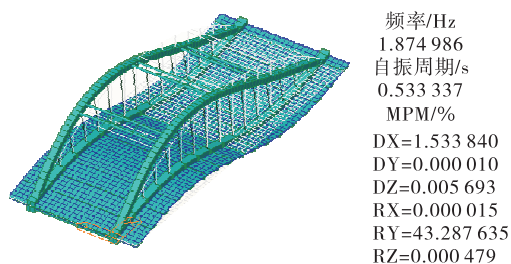


图 16 竖向一阶频率振型理论值

度,结构动力性能良好。

5 结论

通过对存在吊杆病害的拱桥进行有限元分析与动静载试验,得到以下结论:

(1) 桥梁应力和变形实测结果在分级加载过程中呈线性增长,实测值与理论值规律一致且实测值均小于理论值,相对残余变位较小,加载过程中无裂缝产生,说明桥梁的静载强度及刚度在设计荷载作用下满足规范要求。

(2) 桥梁吊杆索力增量在试验车辆荷载分级加载作用下线性关系良好,但实测值接近理论值,需加强观测。

(3) 桥梁冲击系数小于理论值,一阶竖向自振频率大于理论值,桥梁的动力性能良好。

参考文献:

- [1] 李勇,赵晓莎,陈彦江,等.钢管混凝土拱桥缩尺模型静动力试验研究[J].公路,2019(3):99—105.
- [2] 郑晓斌,高锐涛.某钢管混凝土系杆拱桥荷载试验研究[J].公路交通技术,2017,33(2):31—34.
- [3] 朱劲松,盛荣荣.中承式系杆拱桥体系冗余度分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(7):1—8.
- [4] 金世安,汪锋.拱桥吊杆的病害成因与力学性能试验分析[J].现代交通技术,2017,14(4):48—51.
- [5] 孙现国.系杆拱桥吊杆索力增量测试方法对比研究[J].中国市政工程,2018(3):96—99.
- [6] ZONG Zhou-Hong, BIJAYA Jaishi, GE Ji-Ping, et al. Dynamic analysis of a half-through concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Engineering Structures, 2005, 27(1):3—15.

收稿日期:2020—03—03

长沙理工大学简介

长沙理工大学(Changsha University of Science & Technology)是国家交通运输部和湖南省人民政府共建高校,属于湖南省“国内一流大学建设高校”(A类),入选“中西部高校基础能力建设工程”、教育部“卓越工程师教育培养计划”、教育部“大学生创新性实验计划”,是中国电力高校联盟、绿色交通联盟、中俄交通大学联盟成员之一,是全国毕业生就业典型经验高校、全国深化创新创业教育改革示范高校。

长沙理工大学由原长沙交通学院、长沙电力学院于2003年合并组建。原长沙交通学院的前身是交通部1956年创办的长沙航务工程学校,原长沙电力学院的前身是电力工业部1956年创办的长沙水力发电学校。创办于1956年的湖南省水利水电学校和创办于1958年的湖南省轻工业学校(后更名为湖南轻工业高等专科学校)相继于2001年和2002年并入原长沙电力学院。

截至2020年11月,长沙理工大学占地面积2980亩,校舍总建筑面积140余万平方米,图书馆纸本藏书360万册;有21个教学学院(系)、1个独立学院和1个继续教育学院,设有76个本科专业、6个一级学科博士学位授权点、27个一级学科硕士学位授权点;有全日制在校学生40000余人,其中博士、硕士研究生6500余人,独立学院学生6900余人。