

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.09.048

多拱肋异型系杆钢拱桥动载试验分析

冉设强¹,徐松²,华振康²,吴刚³,孙高峰⁴

(1. 中铁四局集团第二工程有限公司,江苏 苏州 215131;2.南京工大桥梁与轨道交通研究院有限公司,江苏 南京 210031;
3.南京市公共工程建设中心,江苏 南京 210019;4.中铁工程设计咨询集团有限公司,北京市 100055)

摘要:通过现场实际对多拱肋异型系杆钢拱桥进行动载试验,详细介绍了异型拱桥动载试验的主要工作内容、试验方法、试验结果分析等。通过现场测试与理论计算分析,桥梁结构各阶自振频率的实测值均比理论计算值大,表明桥梁实际结构刚度好于理论刚度,桥梁实测阻尼比 0.145%~0.390%之间,属于正常范围,桥梁主要振型为主梁一阶扭转,拱肋横向一阶侧弯,拱肋的横向刚度相对较弱。桥梁在各行车工况下的实测冲击系数在 1.04~1.20,与设计所用冲击系数 $1+\mu=1.05$ 较为接近,满足规范要求。

关键词:异型拱桥;动载试验;实测频率;冲击系数

中图分类号:U446

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)09-0201-05

0 引言

近年来,随着城市桥梁建设数量的急剧增长,大量追求美观的异型桥得到更多应用。随着桥梁车致振动问题的愈发突出,仅了解桥梁自身结构动力特性已无法满足桥梁建设领域相关需求,通过桥梁动载试验则可有效对桥梁动态问题展开研究。王建伟^[1]通过模态测试、动应变荷载试验两方面对新建桥梁整体刚度、动力特性进行了全面准确的评价。查日葵^[2]通过静动载试验对桥梁结构实际承载能力做出评估,取得较好效果。周毅^[3]针对连续小箱梁桥开展了动力特性测试和动力响应测试,从自振频率、振型、阻尼比、冲击效应等结果说明桥跨结构动力特性满足设计要求。潘存瑞^[4]基于某市政钢混组合结构桥梁开展现场环境振动试验,对监测数据采用随机子空间方法处理分析,得出的各阶模态频率和振型与理论计算进行对比分析,评价桥梁的动态性能是否符合要求。因此,本文基于某异型系杆钢拱桥实例,对新建异型结构桥梁进行动载试验分析与研究,并进行现场试验,试验成果可供复杂类型桥梁设计参考。

1 工程概况

南京市秦淮湾大桥为单跨 157 m 的多拱肋异型

系杆钢拱桥,桥面全宽 42 m,主梁为单箱五室的正交异性板扁平钢箱梁,跨中梁高 3.030 m,支座处为上下双层钢箱梁,梁高 4.532 m。全桥拱肋分为 A、B、C 三道拱,拱肋 A 在拱顶位置处横桥向分叉为 A1 和 A2 拱肋,拱肋为钢箱拱。每道拱肋通过吊杆与主梁连接,形成空间三索面结构。拱肋 A 和拱肋 B 的吊杆沿主梁纵向轴线对称布置,每一侧分别布置 12 根和 9 根吊杆,拱肋 C 布置 11 根吊杆于主梁纵向轴线上,三道拱肋相邻两根吊杆间距均为 6 m,全桥共计 53 根吊杆。桥梁立面和横断面布置分别见图 1、图 2。

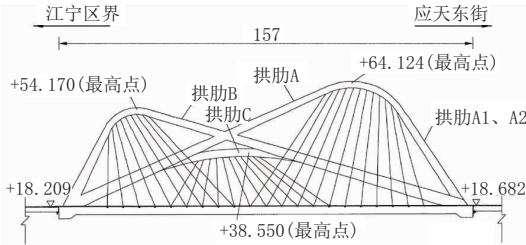


图1 桥梁立面布置(单位:m)

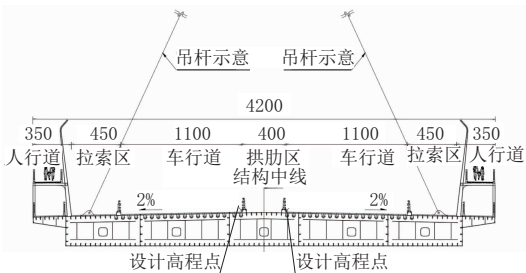


图2 桥梁横断面布置(单位:cm)

收稿日期:2023-08-07

作者简介:冉设强(1980—),男,本科,工程师,主要从事桥梁现场施工管理工作。

2 试验内容及方法

2.1 自振特性试验

2.1.1 测试参数

桥梁自振特性试验主要是对桥梁结构自振特性参数进行测定,其参数主要包含自振频率、振型和阻尼比。这些参数仅与桥梁结构形式、材料特性有关,是桥梁结构自身特性,与桥梁所受外荷载无关。通过自振特性试验,可判断桥梁工作状况和损伤情况,了解桥梁实际工作性能^[5-6]。

2.1.2 试验方法

桥梁自振特性的试验方法有强迫振动法、自由振动衰减法和环境随机激振法。其中,强迫振动法和自由振动衰减法出现并使用得较早,这两种方法测得的数据通常较为直观、简单且易于处理。环境随机激振法是通过监测水流、风荷载、地脉动等环境激励引发的结构微振动,并基于概率统计对桥梁自振特性进行识别的方法,具有测试简单和数据处理方便等优势,常被用作桥梁自振特性试验。本项目异型拱肋系杆钢拱桥尚未通车,现场具备通过环境随机激振法开展桥梁自振特性试验条件,通过拾振器来采集无规则振源引起的桥梁微小振动,从而识别桥梁自振特性参数,对于测定桥梁整体的自振特性特别适用。

2.1.3 试验设备

现场桥梁自振特性试验采用北京东方所 INV9580A 无线采集仪进行测定。采集仪采用双通道 24 位双核分布,其中采集器与传感器一体化设计,特别适用于桥梁现场测试数据的自动采集。分组采集桥梁拱肋及桥面的振动测试数据,通过 DASP-V11 工程版分析软件进行模态分析,得到桥梁的各阶模态固有频率及振型。

2.1.4 测点布置

自振特性试验测点应根据桥梁理论计算振型在振型的峰、谷点等控制断面上进行布设,考虑竖向、横向振动。测点在考虑拾振器数量的同时,还应满足能完整绘制振型曲线需要。测试过程中可选择合适的参考点,避开振型节点,将拾振器静置于参考点上,其余拾振器分批次移动测试所有测点,将测试数据通过参考点进行关联,拟合得到桥梁结构振型。具体试验测点按图 3、图 4 布置。主梁、拱肋现场实际测点布置见图 5。

2.1.5 结果分析

通过拾振器数据采集,采用专业分析软件得到

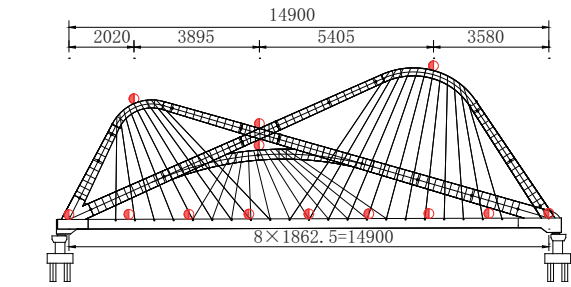


图 3 纵桥向测点向布置(单位:cm)

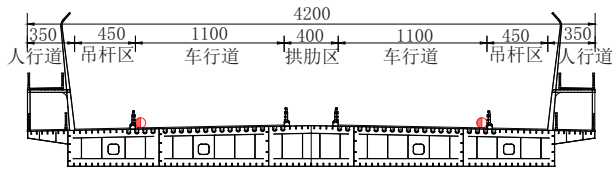


图 4 横桥向测点布置(单位:cm)



图 5 主梁、拱肋现场实际测点布置

桥梁各阶模态固有频率、振型和阻尼比等参数。

(1)自振频率可以反映桥梁结构刚度情况,如果自振频率实测值比理论计算值大,则桥梁实际刚度比理论刚度大;如果自振频率实测值比理论计算值小,则桥梁实际刚度比理论刚度小。

(2)实测振型与理论振型相比,如果实测振型出现局部变异,则说明桥梁振型变异区域存在或出现缺损。

(3)桥梁每一个频率对应一个阻尼比,阻尼比只能通过试验得到,阻尼比作为一个人为拟定的参数,刻画了桥梁自由振动衰减的快慢程度。阻尼比大,桥梁振动衰减快,其耗能强;阻尼比小,桥梁振动衰减慢,其耗能弱。通过实测阻尼比与同类型桥梁对比,可大概判断桥梁结构力学性能是否正常。如果阻尼比明显偏大,则表明桥梁结构力学性能不佳,整体结构可能存在施工缺陷或材料劣化。

2.2 动力特性试验

2.2.1 测试参数

桥梁动力特性试验主要测定桥跨结构在车辆活载作用下的动响应,如动应力、动挠度,并由此确定桥梁结构的动态增量。根据车辆在行驶和停驶时分别引起的结构响应的比值,确定桥跨结构的冲击系数。在不同的动载工况下,通过测试桥跨结构的动挠度,得到不同动载工况下的冲击系数^[5-6]。

2.2.2 试验工况

根据规范要求,强迫振动试验工况主要包括无障碍行车试验、制动试验及有障碍行车试验。具体试验工况见表1。

表1 动力特性试验工况		
序号	工况名称	工况名称
1	无障碍行车试验 (跑车试验)	10 km/h 跑车试验
2		20 km/h 跑车试验
3		30 km/h 跑车试验
4		40 km/h 跑车试验
5		50 km/h 跑车试验
6	制动试验 (刹车试验)	30 km/h 刹车试验
7		40 km/h 刹车试验
8		50 km/h 刹车试验
9	有障碍行车试验 (跳车试验)	5 km/h 跳车试验
10		10 km/h 跳车试验
11		15 km/h 跳车试验
12		20 km/h 跳车试验

- (1)桥面无任何障碍下,采用两辆 36 t 四轴加载车,在 10~50 km/h 范围内取多个大致分布的车速进行匀速跑车试验。
- (2)桥面在跨中设置 50~70 mm 高的弓形障碍物,采用两辆 36 t 四轴加载车,在 5~20 km/h 范围内取多个大致分布的车速进行跳车试验。
- (3)采用两辆 36 t 四轴加载车,分别以 30、40、50 km/h 的速度,匀速驶至跨中位置后,采取紧急制动,进行刹车试验。

2.2.3 试验设备

桥梁动态挠度测试采用 HPQN-X 多点视频动静态位移检测系统(见图6),采用国内外先进的图像散斑识别跟踪技术和亚像素图像算法,现场无需靶标或其他特征点,仅一台主机即可同时测量结构体的多点动挠度、冲击系数等数据。



图6 HPQN-X 多点视频动静态位移检测系统

2.2.4 测点布置

动力特性试验振动在桥跨振动最大截面处布置竖向拾振器来测试强迫振动下结构的振动响应,桥梁具体测点布置见图7、图8。

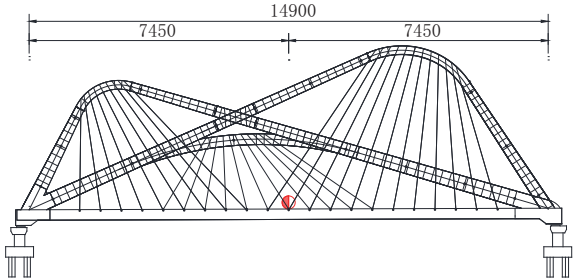


图7 桥梁动力特性测点纵桥向布置(单位:cm)

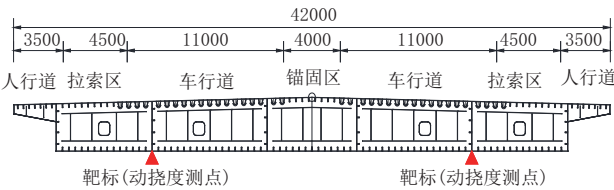


图8 桥梁动力特性测点横桥向布置(单位:cm)

2.2.5 结果分析

为获取试验工况下的桥梁冲击系数,依据仪器记录的动挠度曲线进行计算,计算式见式(1)。

$$\mu = \frac{f_{dmax}}{f_{jmax}} - 1 = \frac{f_{dmax}}{\frac{f_{dmax} + f_{dmin}}{2}} - 1 = \frac{f_{dmax}}{f_{dmax} - \frac{f_{p-p}}{2}} - 1 \quad (1)$$

式中: f_{dmax} 为最大动挠度幅值; f_{jmax} 为波形振幅中心轨迹的顶点值,通过低通滤波求取; f_{dmin} 为与 f_{dmax} 对应的动挠度波谷值; f_{p-p} 为挠度动态分量的峰-峰值。

设计采用计算冲击系数与桥梁结构基本频率有关,按式(2)计算:

$$\begin{aligned} &\text{当 } f < 1.5 \text{ Hz 时, } \mu = 0.05; \\ &\text{当 } 1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 14 \text{ Hz 时,} \\ &\mu = 0.176 \ln f - 0.0157; \\ &\text{当 } f > 14 \text{ Hz 时, } \mu = 0.45. \end{aligned} \quad (2)$$

将实测冲击系数与设计所用冲击系数对比分析,当实测大于设计时分析原因。

3 试验结果分析

3.1 自振特性结果分析

桥梁结构自振特性试验结果见表2,桥梁实测与理论振型对比见图9。

通过分析实测数据可知:

- (1)由于桥梁各阶自振频率实测值均大于理论计算值,桥梁实际刚度大于理论刚度;桥梁实测阻尼比为 0.145%~0.390%,与同类桥梁对比,实测阻尼比属于正常范围。

表 2 自振特性试验结果

阶次	自振频率 /Hz		实测值 / 计算值	阻尼比 /%	振型描述
	实测值	计算值			
一	0.600	0.466	1.29	0.275	主梁一阶扭转,拱肋 横向一阶侧弯
二	1.475	0.942	1.57	0.232	主梁二阶扭转,拱肋 横向二阶反向侧弯
三	1.550	1.161	1.34	0.390	主梁三阶扭转,拱肋 横向三阶反向侧弯
四	1.525	1.291	1.18	0.145	主梁一阶竖弯,拱肋 横向四阶同向侧弯
五	1.850	1.389	1.33	0.283	主梁四阶扭转,拱肋 横向五阶反向侧弯

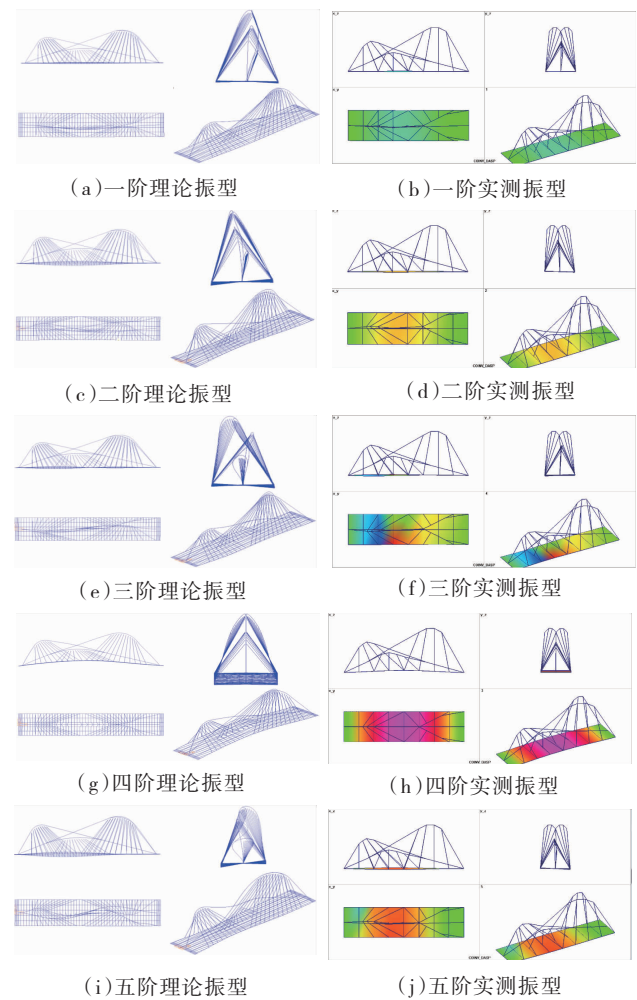


图 9 理论振型与实测振型对比

(2)桥梁主要振型分为三种:拱肋面外弯曲、主梁面内弯曲、主梁空间扭转。该桥自一阶振型起,便出现拱肋横向弯曲与主梁空间扭转的耦合振动,当振型阶次逐渐增长,耦合振动也越发明显。

(3)桥梁一阶面外振动为拱肋发生横向弯曲,对应基频为 0.6 Hz;一阶扭转振动为主梁的空间扭转振动,对应基频为 0.6 Hz;一阶面内振动为主梁的竖

向弯曲振动,对应基频为 1.525 Hz。由此可知,该桥拱肋的横向刚度相对较弱。

3.2 动力特性结果分析

各测试工况下实测冲击系数测试结果见表 3,部分行车工况下的实测动挠度曲线及冲击系数见图 10~图 12。

表 3 桥梁实测冲击系数分析

工况		实测冲击系数
无障碍行车	10 km/h	1.06
	20 km/h	1.04
	30 km/h	1.06
	40 km/h	1.05
	50 km/h	1.05
有障碍行车	5 km/h	1.20
	10 km/h	1.20
	15 km/h	1.09
	20 km/h	1.18
制动	30 km/h	1.10
	40 km/h	1.12
	50 km/h	1.15

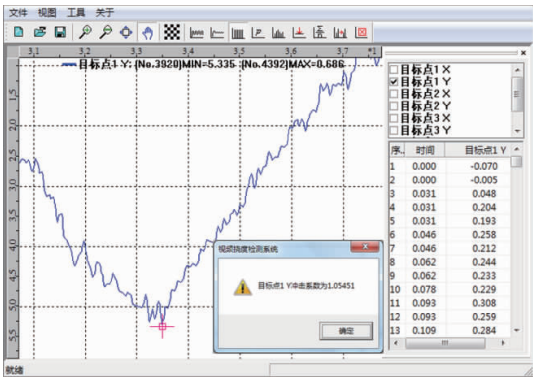


图 10 50 km/h 无障碍行车实测动挠度冲击系数分析

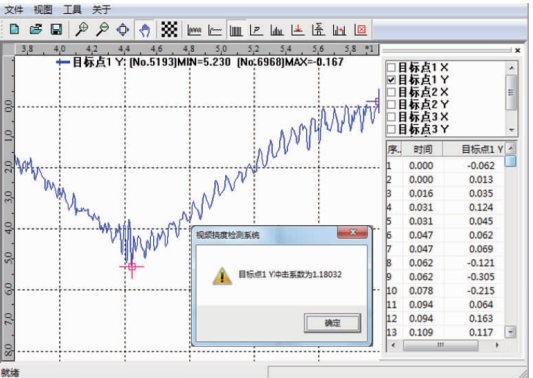


图 11 20 km/h 有障碍行车实测动挠度冲击系数分析

通过对实测数据进行分析可知,桥梁实测无障碍行车冲击系数介于 1.04~1.06,实测有障碍行车冲击系数介于 1.09~1.20,实测制动冲击系数介于

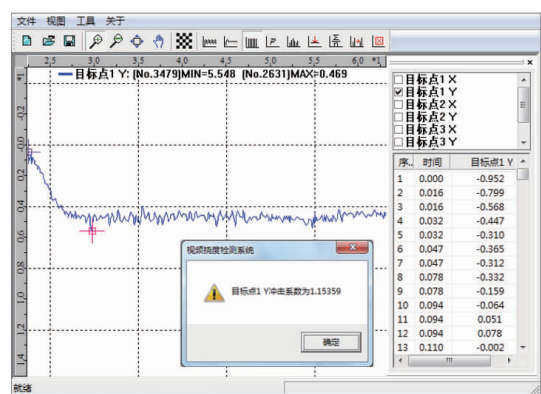


图 12 50 km/h 制动实测动挠度冲击系数分析

1.10~1.15。实测无障碍行车冲击系数与设计所用冲击系数 $1+\mu=1.05$ 相比,两者较为接近,与同类桥梁相比,属于正常范围,满足规范要求。

4 结 语

通过对多拱肋异型系杆钢拱桥动载试验分析研究可得出以下结论:

(1)桥梁结构各阶自振频率实测值均大于理论计算值,桥梁实际刚度比理论刚度大,结构整体刚度

好。桥梁实测阻尼比为 0.145%~0.390%,与同类桥梁对比,属于正常范围。

(2)桥梁实测振型与理论计算振型基本一致,未见明显变异区段,桥梁振型主要为拱肋面外弯曲振动、主梁面内弯曲振动和主梁空间扭转振动,拱肋的横向刚度相对较弱。

(3)桥梁在各行车工况下的实测冲击系数在 1.04~1.20,与设计所用冲击系数 $1+\mu=1.05$ 相比,较为接近,与同类桥梁相比,属于正常范围,满足规范要求。

参考文献:

[1] 王建伟.对某新建桥梁的模态测试及动载试验分析研究[J].山西建筑,2021,47(20):153-155.
[2] 查日葵.桥梁静动载试验检测分析[J].安徽建筑,2019,26(12):217-218.
[3] 周毅.某桥梁动载试验实例分析[J].安徽建筑,2019,26(9):235-238.
[4] 潘存瑞.基于实测数据的钢-混组合桥梁结构动力特性分析[J].城市道桥与防洪,2018(12):70-75.
[5] CJJ/T 233—2015,城市桥梁检测与评定技术规范[S].
[6] JTG/T J21-01—2015,公路桥梁荷载试验规程[S].

(上接第 193 页)

墩台结构类型相近、墩台数量较多的水上桥梁,采用此工艺可以最大限度地减少资源投入,高效周转使用钢吊箱。本项目实施经验可为其他类似桥梁施工提供很好的借鉴作用。

参考文献:

[1] 郭主龙,周先念,宋伟峰.海上桥梁承台与承台防撞设施一体化施工[J].公路,2006(3):30-35.
[2] 赵传林,刘明虎,孙鹏.港珠澳大桥青州航道桥主塔墩钢套箱设计

与施工[J].中国港湾建设,2013(8):1-6.
[3] 陈卫国,唐衡.金塘大桥索塔墩 1600 t 防撞钢套箱安装施工技术[J].公路,2009(1):133-138.
[4] 刘华,唐斌华,李永重,等.椒江二桥主墩防撞钢套箱施工技术[J].中外公路,2012(4):173-175.
[5] 张晓元,黑世强,苏杰,等.苏拉马都跨海大桥主桥钢套箱设计与施工[J].公路,2011(2):199-202.
[6] 党权交.舟岱跨海大桥主通航孔桥双层防撞钢套箱快速安装技术[J].施工技术,2021(6):31-35.