

# 大跨径中承式钢管砼拱桥荷载试验分析

郑凯

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

**摘要:** 针对某中承式钢管砼系杆拱桥, 通过静载试验测试试验荷载下结构构件的局部应变分布和结构整体变形, 通过脉动试验、行车试验、跳车试验、制动试验测定桥梁作为一个整体结构在动力荷载作用下的受迫振动特性和结构的自振特性, 分析评定其承载能力、工作性能及运营可靠性。结果显示, 该桥结构受力满足汽一超 20 运营荷载正常使用要求。

**关键词:** 桥梁; 钢管砼拱桥; 荷载试验; 承载能力

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0106-06

## 1 工程概况

某桥梁全长近 750 m, 主桥为三孔 (50+280+50) m 中承式钢管砼系杆拱桥。桥面全宽按双向八车道外加人行道设计, 横桥向为上下行分离完全独立且对称的左、右两幅桥, 每幅桥面宽 26.1 m, 由 4.8 m 人行道+0.5 m 防撞护栏+15.5 m 行车道+0.5

m 防撞护栏+4.8 m 过桥水管和检修道组成。设计荷载为汽一超 20、人群 3.5 kN/m<sup>2</sup>。主拱墩顶间跨度 280 m, 计算跨径 271.5 m, 计算矢高 54.3 m, 计算矢跨比 1/5, 拱轴线采用悬链线, 拱轴系数 1.5, 预拱度在拱顶取值 0.45 m; 边跨计算跨径 89.35 m, 计算矢高 9.1 m, 矢跨比 1/9.819, 拱轴线也采用悬链线, 拱轴系数 1.9。桥型布置见图 1。

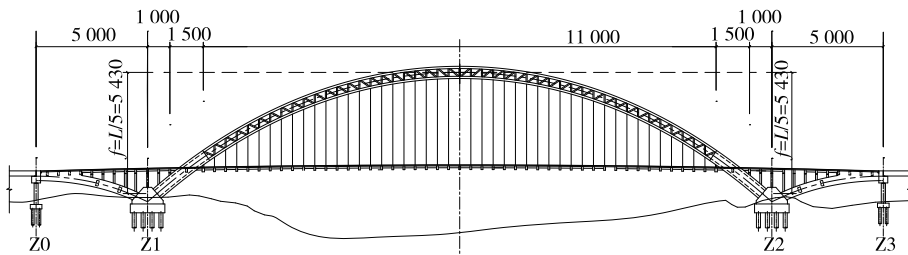


图 1 某中承式钢管砼系杆拱桥桥型布置(单位: cm)

为保证桥梁运营的可靠性, 检验桥梁结构的承载能力 & 工作性能, 对其进行荷载试验。

## 2 荷载试验方案

### 2.1 有限元分析

根据该桥受力特点, 采用空间杆系有限元程序 MIDAS/Civil 对结构受力进行分析, 计算模型见图 2。分别采用梁单元模拟主拱、横梁及墩柱, 桁架单元模拟吊杆和系杆, 板单元模拟桥面结构, 拱肋钢管砼按组合截面考虑, 共采用梁单元 3 677 个、桁架单元 192 个、板单元 1 864 个。结构分析包括汽车荷载效应、试验车荷载效应和结构自振特性分析三方面, 其中: 汽车荷载效应按设计最不利布载进行影响线加载, 计算结构控制截面的设计内力值; 试验车荷载效应按试验车的实际车重和实际轮位进行布载,

计算结构控制截面的试验内力值, 确定满足规范要求的试验荷载效率; 结构自振特性分析采用子空间迭代法, 计算结构前 6 阶自振频率和振型。

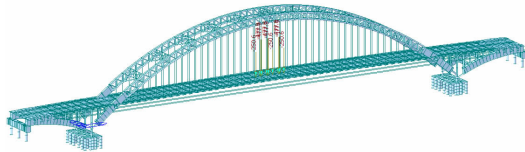


图 2 某中承式钢管砼系杆拱桥结构空间模型

### 2.2 荷载试验内容与工况

静载试验主要从试验荷载下结构构件的局部应变分布和结构整体变形来评定结构的受力性能, 试验内容如下: 1) 测试边跨拱肋  $L/2$  截面、中跨拱肋  $L/4$ 、 $L/2$  和  $3L/4$  截面的竖向位移影响线, 判断结构整体变形能力是否与设计相符; 2) 测试边跨拱肋

$L/2$  和拱脚截面,中跨拱肋  $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$  和拱脚截面在试验荷载作用下的应变分布及拱肋竖向位移,判断结构的局部受力及整体变形状态是否正常;

3) 测试吊杆在试验荷载下的索力,并与理论计算结果对比,判断其受力状态及参与结构整体受力的程度。试验工况及荷载效率分别见表 1、表 2。

表 1 静载试验测试内容

工况号	工况描述	测试内容			
		横向偏载	拱肋应力	拱肋变形	吊杆索力
1	拱肋控制截面竖向位移影响线			✓	
2	主跨拱肋 $L/2$ 截面上弦最大弯矩	✓	✓	✓	✓
3	主跨拱肋 $L/2$ 截面上弦最大轴力		✓	✓	✓
4	主跨拱肋 $L/4$ 截面上弦最大弯矩	✓	✓	✓	✓
5	主跨拱肋 $3L/4$ 截面上弦最大弯矩		✓	✓	✓
6	主跨拱脚 $l=L_1$ 截面最大正弯矩		✓	✓	
7	主跨拱脚 $l=L_1$ 截面最大负弯矩		✓		
8	主跨拱脚 $l=L_1+L_2$ 截面最大正弯矩		✓	✓	
9	主跨拱脚 $l=L_1+L_2$ 截面最大负弯矩		✓		
10	北岸边跨跨中截面最大正弯矩		✓	✓	
11	北岸边跨拱脚截面最大负弯矩		✓		

注: $L_1$ 、 $L_2$  分别为边跨和主跨跨径。

表 2 静载试验各工况的荷载效率

工况描述	试验荷载下内力	设计荷载下内力	荷载效率	对应工况号
主跨跨中上弦最大弯矩	255 kN·m	232 kN·m	1.095	2
主跨跨中上弦最大轴力	-4 271 kN	-4 293 kN	0.995	3
主跨 $L/4$ 上弦最大弯矩	222 kN·m	210 kN·m	1.055	右幅 4、5
主跨 $L/4$ 上弦最大轴力	-4 789 kN	-4 974 kN	0.963	左幅 4、5
主跨拱脚最大正弯矩	31 510 kN·m	38 721 kN·m	0.814	6、8
主跨拱脚最大负弯矩	-32 305 kN·m	-40 976 kN·m	0.788	7、9
边跨跨中最大正弯矩	3 924 kN·m	3 878 kN·m	1.012	10
边跨拱脚最大负弯矩	-7 669 kN·m	-8 423 kN·m	0.911	11

动载试验通过脉动试验、行车试验、跳车试验和制动试验测定桥梁作为一个整体结构在动力荷载作用下的受迫振动特性和结构的自振特性,评价结构的现有工作状态。

2.3 测试截面与测点布置

静载试验测点包括应变测点和位移测点。结构应力测试采用振弦式应变计;主跨位移测试采用数字式全站仪,测点布置在主拱肋各八分点;边跨位移

测试采用数字式百分表,测点布置在边拱跨中截面处;吊杆索力测试采用索力仪。分别以前缀“S-”、“X-”表示每幅桥上游和下游的测点编号,测试截面与测点布置见图 3~5。

3 静载试验分析

3.1 桥梁整体受力性能影响线测试结果分析

结构影响线测试采用 4 辆加载车并排在桥面主

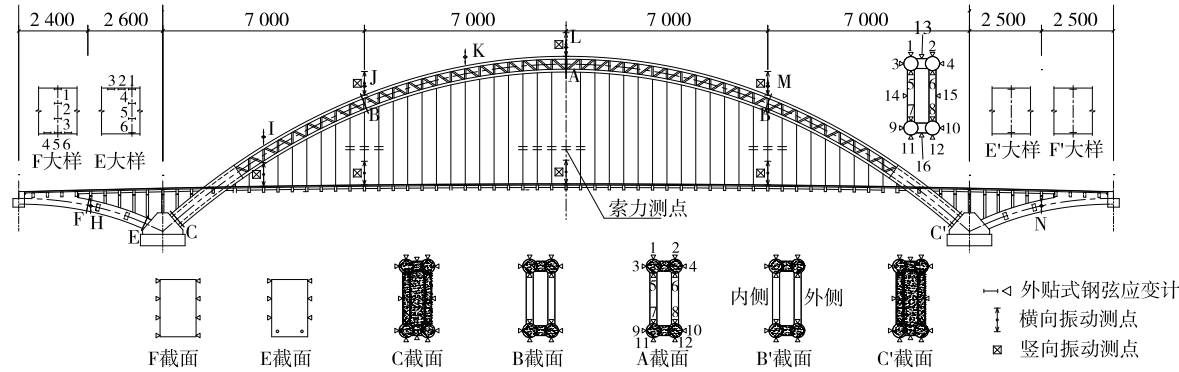


图 3 测试截面、各测试参数测点布置(单位:cm)

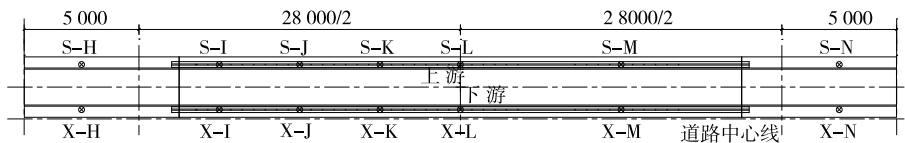


图4 拱肋挠度测点布置(单位:cm)

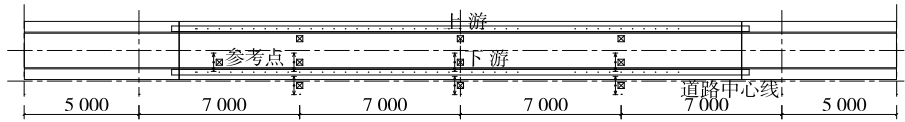


图5 动载试验拾振器布置(单位:cm)

跨各八分点和边跨各四分点进行加载,测试主跨拱肋  $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$  截面和边跨拱肋跨中截面的竖

向位移,得到梁体实际纵向影响线,了解结构的整体工作状态。各截面结构影响线测试结果见图6。

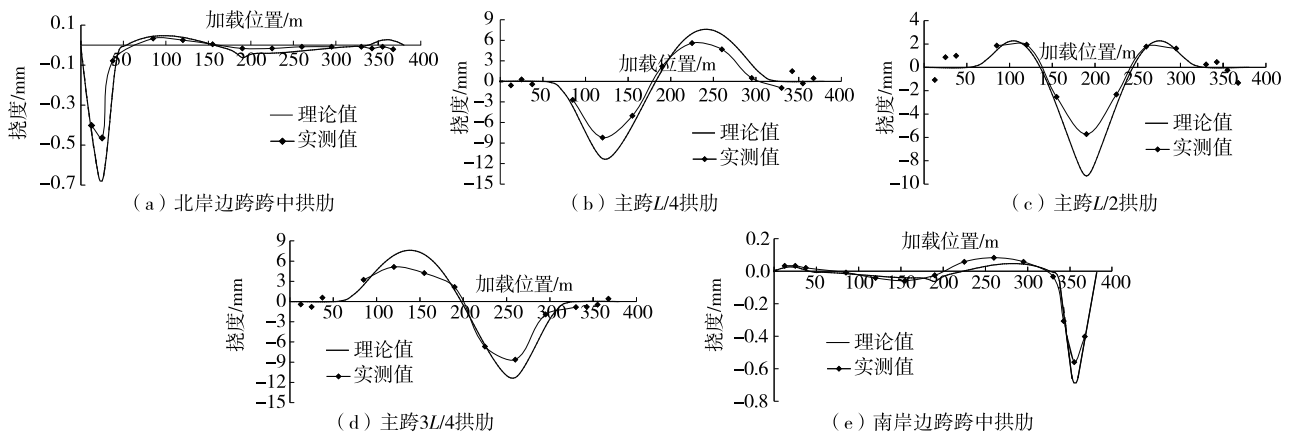


图6 各截面影响线测试结果

由图6可知:拱肋各测试截面竖向位移影响线的实测值与理论值走向一致,符合结构变形的几何特点;实测值与理论值基本吻合,实测值小于理论值,体现了在模拟局部受力时数值计算与实际结构受力之间的差异,也说明结构实际刚度可能大于理论计算所采用刚度。主跨拱肋  $L/2$  截面影响线关于跨中截面的对称性良好,主跨  $L/4$  与  $3L/4$  截面、

北岸与南岸边跨跨中截面影响线也呈现较好的对称性,说明结构整体受力的纵向对称性良好。

### 3.2 截面应变测试结果分析

主要对A截面(主跨拱肋  $L/2$  截面)测试结果进行分析。该截面测试包括工况2和工况3,分别测试主跨拱肋跨中截面应力、吊杆索力和拱肋变形,主要测点数据见表3。由表3可知:拱肋跨中截面

表3 主跨拱肋  $L/2$  截面的实测应变

测点号	工况2下实测应变							工况3实测应变		
	上游偏载/ $\mu\epsilon$	下游偏载/ $\mu\epsilon$	满载/ $\mu\epsilon$	卸载/ $\mu\epsilon$	满载/ $\mu\epsilon$	卸载/ $\mu\epsilon$	相对残余/%	加载/ $\mu\epsilon$	卸载/ $\mu\epsilon$	相对残余/%
S-A-1	-30	-17	-48	5	-46	0	0.0	-71	-1	1.4
S-A-2	-30	-17	-47	2	-43	1	2.3	-69	-2	2.9
S-A-3	-27	-14	-40	-1	-33	0	0.0	-51	1	2.0
S-A-4	-21	-14	-38	5	-36	1	2.8	-58	-1	1.7
S-A-9	24	8	32	5	31	0	0.0	48	0	0.0
S-A-10	21	11	32	5	30	-1	3.3	46	1	2.2
S-A-11	30	11	42	3	42	-1	2.4	63	1	1.6
S-A-12	26	13	39	2	41	-1	2.4	60	1	1.7
X-A-1	-13	-31	-42	4	-42	1	2.4	-64	-1	1.6
X-A-2	-17	-31	-47	3	-44	1	2.3	-68	-1	1.5
X-A-3	-6	-22	-29	7	-31	0	0.0	-46	-1	2.2
X-A-4	-13	-20	-33	1	-29	0	0.0	-44	2	4.5

上、下弦杆应变测点实测残余较小,测点相对残余应变均小于 10%,满足 JTG/T J21—01—2015《公路桥梁荷载试验规程》(以称试验规程)的要求,说明测试截面处于弹性工作状态。

表 4 为 A 截面换算内力及相应理论值。由表 4 可知:拱肋跨中截面上、下弦杆换算弯矩很小,主要承受轴向力,通过弦杆间力矩抵抗外荷载产生的弯矩,与钢管砼拱桥的设计理论相符,也反映了桁架式钢管砼拱桥拱肋的受力特点;从截面整体受力情况来看,主拱肋仍是以受弯为主的压弯构件。弦杆换算内力值基本小于理论值,而全截面换算内力值与理论值有所差异,与拱肋实际刚度及腹杆等局部构造对拱肋上、下弦杆间内力分配的影响有关,体现了结构受力的复杂性。

表 4 主跨拱肋 L/2 截面的换算内力

项目	位置	工况 2 下内力		工况 3 下内力	
		换算值	理论值	换算值	理论值
轴力/kN	上弦	-2 980	-3 211	-3 985	-4 271
	下弦	1 630	2 026	2 580	2 577
	全截面	-1 350	-1 185	-1 727	-2 017
弯矩/(kN·m)	上弦	165	226	250	299
	下弦	191	255	262	343
	全截面	10 729	12 263	16 010	16 776

表 5 为 A 截面换算应力。由表 5 可知:工况 2 和工况 3 下拱肋上弦的最大换算平均应力分别为 -9.5、-14.0 MPa,应力校验系数分别为 0.69、0.73,满足试验规程中钢筋砼拱桥应力校验系数为 0.5~0.9 的要求。其他工况下各测试截面数据均满

表 5 主跨拱肋 L/2 截面的换算应力

截面高/m	工况 2 下换算应力					工况 3 下换算应力				
	上游/ MPa	下游/ MPa	平均值/ MPa	理论值/ MPa	校验 系数	上游/ MPa	下游/ MPa	平均值/ MPa	理论值/ MPa	校验 系数
5.5	-9.8	-9.2	-9.5	-13.7	0.69	-14.4	-13.5	-14.0	-19.2	0.73
5.0	-8	-6.4	-7.2	-9.5	0.76	-11.2	-9.3	-10.3	-13.6	0.76
4.5	-4.2	-4.2	-4.2	-5.3	0.79	-6.1	-5.7	-5.9	-7.9	0.75
1.0	0.7	0.6	0.6	1.6	0.38	1.6	1.8	1.7	1.5	1.13
0.5	6.6	0.6	3.6	6.1	0.59	9.7	1.6	5.7	7.7	0.74
0.0	8.3	5.4	6.9	10.6	0.65	12.6	7.8	10.2	13.9	0.73

足规范要求,在此不再详细分析。

主拱拱肋为四肢矩形格构式截面,每根弦杆为独立的哑铃形,上、下弦杆由竖腹杆和斜腹杆连接共同工作。图 7 为工况 2 和工况 3 下拱肋跨中截面实测应变沿截面高度的分布。由图 7 可知:每根弦杆的变形呈较好的线性关系;从全截面变形角度来看,测试截面处局部荷载效应明显,桁架式结构由于受弦杆节间局部弯曲的影响,截面变形以弦杆的独立变形为主。

3.3 截面挠度测试结果分析

工况 2 和工况 3 试验荷载作用下拱肋实测变形见表 6、图 8。由表 6、图 8 可知:实测拱肋竖向变形与理论值吻合良好,反映了结构的变形特点;相对于其他测点,跨中加载截面部分实测值与理论值相差略大,这与在考虑局部受力时理论计算和结构实际受力的差异有关。工况 2 和工况 3 下拱肋最大竖向变形均发生在跨中截面,上下游两侧拱肋实测变形平均值分别为 15.7、26.0 mm,挠度校验系数分别为 0.76、0.88,满足试验规程中挠度校验系数为 0.5~

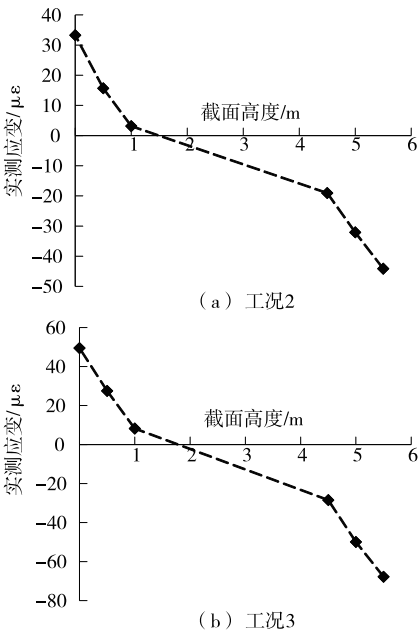


图 7 拱肋应变沿截面高度的分布

1.0 的要求。根据工况 3 下拱肋跨中实测竖向变形推算,使用汽车荷载(不计冲击力)作用下拱肋跨中

表6 主跨拱肋L/2截面竖向变形

测点	工况2下变形					工况3下变形				
	上游/ mm	下游/ mm	平均值/ mm	理论值/ mm	校验 系数	上游/ mm	下游/ mm	平均值/ mm	理论值/ mm	校验 系数
S/X-I	1.9	2.6	2.3	3.1	0.74	3.8	4.8	4.3	3.9	1.10
S/X-J	2.7	5.0	3.8	4.9	0.78	2.4	8.6	5.5	4.4	1.25
S/X-K	-5.3	-5.0	-5.1	-6.0	0.85	-13.9	-15.0	-14.5	-12.7	1.14
S/X-L	-15.3	-16.2	-15.7	-20.6	0.76	-28.1	-24.0	-26.0	-29.7	0.88
S/X-M	1.9	5.0	3.5	3.0	1.17	2.0	7.4	4.7	7.2	0.65

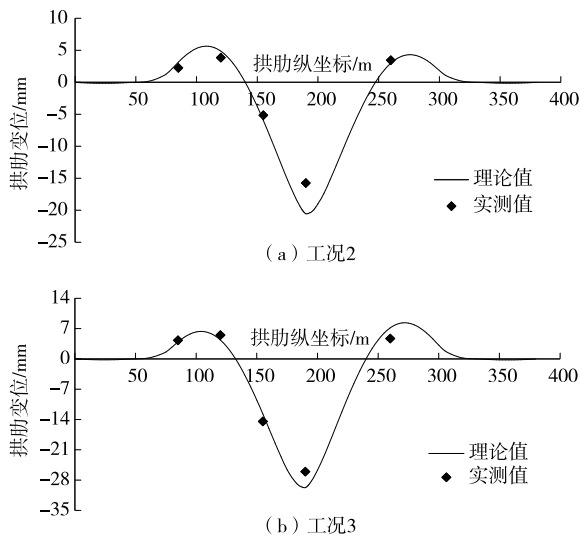


图8 拱肋实测变形与理论值对比

挠度为 25.0 mm, 挠跨比 =  $25.0/280 = 1/11\ 200 < 1/1\ 000$ , 结构刚度满足规范要求。

### 3.4 吊杆索力测试结果分析

索力测试结果见图9。由图9可知: 换算索力与理论索力的分布特点一致, 但测试截面附近吊杆换算索力小于理论值, 而远离测试截面处的吊杆换算索力比理论值大, 说明桥面铺装等参与结构受力, 实测吊杆索力的分布比理论值更均匀。工况2和工况3下索力最大值均出现在24#吊杆, 其上下游平均实测索力分别为228.1、304.8 kN, 理论值分别为328.2、387.7 kN, 索力校验系数分别为0.70、0.79, 满足试验规程的要求。

## 4 动载试验分析

结构实测自振频率、理论频率、阻尼比和振型见表7, 图10、图11为典型工况下脉动试验频谱分析结果, 图12、图13分别为1、2阶理论计算振型与频率。

从表7、图10~13可以看出: 结构第1阶振型为拱肋正对称横向变形, 基频为0.38 Hz; 第2阶自

振频率为0.60 Hz, 振型以拱肋竖向反对称变形为主; 第3阶振型以桥面横向变形为主, 自振频率为0.66 Hz; 第4阶振型以拱肋竖向正对称变形为主, 自振频率为0.97 Hz; 第6阶振型以整体扭转为主, 自振频率为1.15 Hz。结构实测基频高于理论计算值, 说明拱肋实际横向刚度比理论值大; 实测竖向振

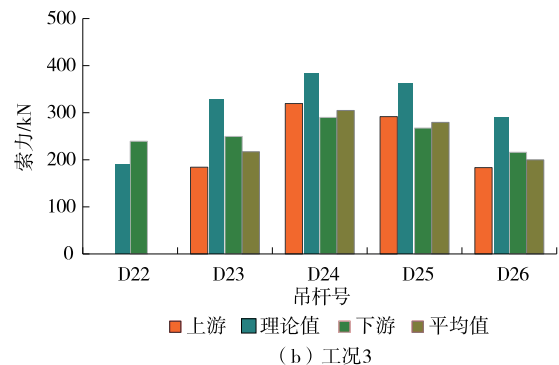
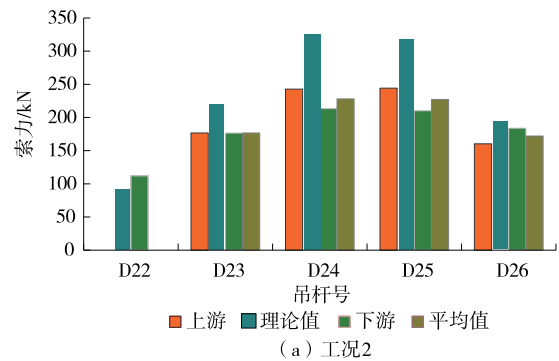


图9 吊杆索力分布

表7 实测自振频率和振型阻尼比

阶次	实测自振 频率/Hz	理论频 率/Hz	阻尼比/ %	振型主 要特征
1	0.39	0.38	—	拱肋横向变形
2	0.62	0.60	2.85	竖向反对称弯曲
3	0.68	0.66	1.66	桥面横向变形
4	0.98	0.97	2.14	竖向对称弯曲
5	1.53	1.13	1.96	扭转变形
6	2.05	1.15	1.85	竖向弯曲变形

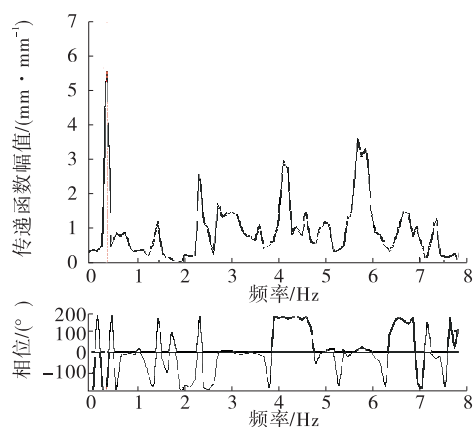


图 10 拱顶横向振动测点与参考点的传递函数图

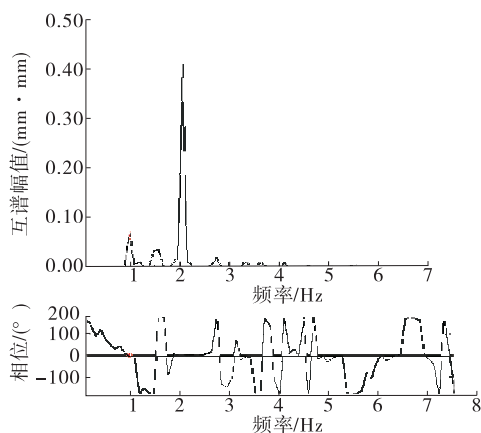


图 11 桥面跨中上、下游竖向互谱图

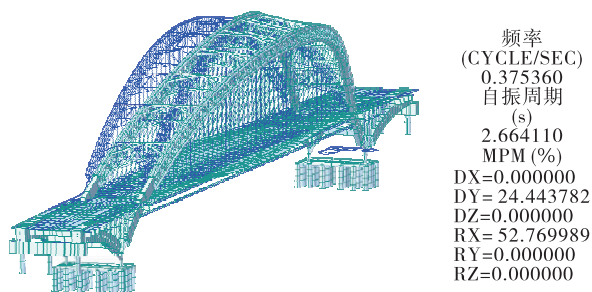


图 12 1 阶理论计算振型与频率(横向正对称一次弯曲)

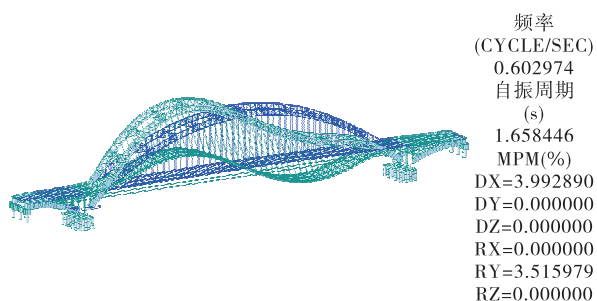


图 13 2 阶理论计算振型与频率(结构竖向反对称二次弯曲)

动自振频率高于理论值,说明结构实际竖向刚度比理论值大。

## 5 结论与建议

(1) 静、动载试验结果反映了中承式钢管砼系杆拱桥在成桥状态的受力特点,实测结果与理论计算结果一致,结构实际受力状态与设计相吻合。

(2) 静载试验荷载作用下结构主要构件受力状态正常,结构横向、纵向受力对称性良好,实测结果均小于理论计算值,应力、变形、索力校验系数均满足试验规程的要求;动载试验结果显示结构自振频率、振型和振型阻尼比等动力特征指标均正常,满足结构正常运营要求。静载和动载试验结果表明结构受力满足汽一超 20 运营荷载正常使用要求。

(3) 为提高结构的耐久性,建议管养单位加强运营阶段的养护维修,做好主拱等钢结构的防锈、吊杆和桥面的养护等,对结构关键部位进行定期检查、维护和监测,保证桥梁长期安全、可靠地运营。

## 参考文献:

- [1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,1993.
- [2] 邱顺冬.桥梁工程软件 midas Civil 应用工程实例[M].北京:人民交通出版社,2011:163—227.
- [3] 长安大学.公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21—01—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [4] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [5] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 申哲会.三肋钢管混凝土系杆拱桥动力特性分析[J].公路,2014(7):150—153.
- [7] 刘大洋,黄福伟,张朋,等.公路桥梁荷载试验应变数据异常分析[J].公路与汽运,2018(1):141—144.
- [8] 周磊,杨成铭,丁瑞.清水江大桥成桥荷载试验研究[J].公路与汽运,2016(6):182—186.
- [9] 许君臣,刘全忠.中承式钢管混凝土拱桥荷载试验[J].吉林建筑工程学院学报,2005,22(4):6—10.
- [10] 何周通.某中承式钢管混凝土拱桥荷载试验分析[J].建筑监督检测与造价,2017,10(3):32—37.
- [11] 周建宾,杨永超.中承式钢管混凝土拱桥静载实验及桥况分析[J].建筑与环境,2014(3):83—86.
- [12] 沈川.大跨度中承式钢管混凝土拱桥静风荷载效应研究[D].南宁:广西大学,2018.

收稿日期:2020—06—28