

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.027

某大跨度混合梁斜拉桥模态分析与试验研究

钟建国^{1,2}, 范立朋^{1,2}

(1.广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507;

2.广东盛翔交通工程检测有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 桥梁结构的动力特性(如固有频率、阻尼系数和振型等)只与结构本身的固有性质有关,是结构振动系统的基本特征。桥梁结构在运营期间一旦有较大损伤(如梁体开裂、基础状态恶化等),结构的动力参数(如频率、阻尼等)将出现较大变化。文中通过广东汕头礐石大桥主桥模态试验,将试验测试结果与往年测试结果及理论计算结果进行对比,分析大桥结构的实际工作状态,评估桥梁结构的安全可靠性,同时为使用阶段结构评估积累原始数据,修正并完善桥梁的有限元计算模型。

关键词: 桥梁;大跨度混合梁斜拉桥;动力特性;模态分析

中图分类号:U446.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0137-03

了解桥梁在建成后或运营过程中振动特性参数的变化,可及早发现桥梁病害及异常现象,确保桥梁的使用安全。桥梁脉动模态试验是了解桥梁动态参数的重要方法,通过振动特性的连续监测,可考察桥梁的疲劳响应。结构在环境扰动(如自然风、地脉动、机器、车辆引起的扰动等)作用下,虽然结构的振幅较微小,但脉动响应包含的频率相当丰富,可用于分析柔性结构的整体自振特性^[1]。本文通过模态试验,分析广东汕头礐石大桥的实际工作状态。

1 桥梁概况

汕头礐石大桥是中国第一座钢箱梁与预应力混凝土(PC)箱梁混合结构斜拉桥。主桥为双塔空间双索面高应力幅张锚半漂浮体系正交异性板钢箱梁与PC箱梁混合结构斜拉桥,主桥立面布置见图1。跨径组合为47 m PC箱梁+47 m PC箱梁+100 m 钢箱梁+518 m 钢箱梁+100 m 钢箱梁+47 m PC箱梁+47 m PC箱梁,主塔高程为+148 m。主桥

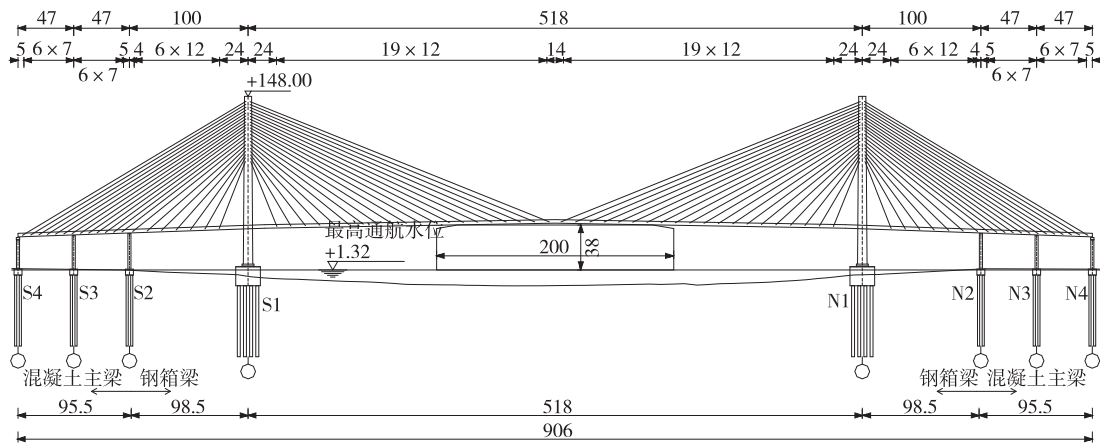


图1 汕头礐石大桥主桥桥型布置(单位:m)

长 2 940.724 m,其中斜拉桥长 906 m、北主引桥长 880.95 m、南主引桥长 615.15 m。

2 有限元模型建立及计算结果

图2为该桥有限元计算模型,计算结果见表1。

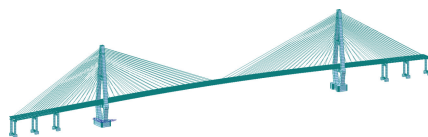


图2 汕头礐石大桥有限元计算模型

表 1 汕头礮石大桥模态分析结果

阶次	理论值/Hz	振型
2	0.226	全桥主梁一阶横弯
3	0.296	主跨主梁一阶正对称竖弯
4	0.386	主跨主梁二阶反对称竖弯
6	0.550	全桥主梁三阶正对称竖弯
7	0.695	全桥主梁四阶反对称竖弯
8	0.704	全桥主梁二阶横弯, 主梁一阶扭转
11	0.828	全桥主梁五阶正对称竖弯
13	0.980	全桥主梁六阶反对称竖弯
14	1.016	主梁二阶扭转

3 模态测试方案

该桥主桥全长 906 m, 分 5 个批次, 每个批次设 5 个测点、1 个参考点 (见图 3), 测量桥梁的竖向、横向振动。6 个双向拾振器各批次布置方案如下: 第一批为 Z1、Z2、Z3、Z4、Z7、Z10; 第二批为 Z5、Z6、Z8、Z9、Z11、Z10; 第三批为 Z12、Z14、Z15、Z17、Z19、Z10; 第四批为 Z13、Z16、Z18、Z20、Z21、Z10; 第五批为 Z8'、Z9'、Z11'、Z12'、Z13'、Z10。

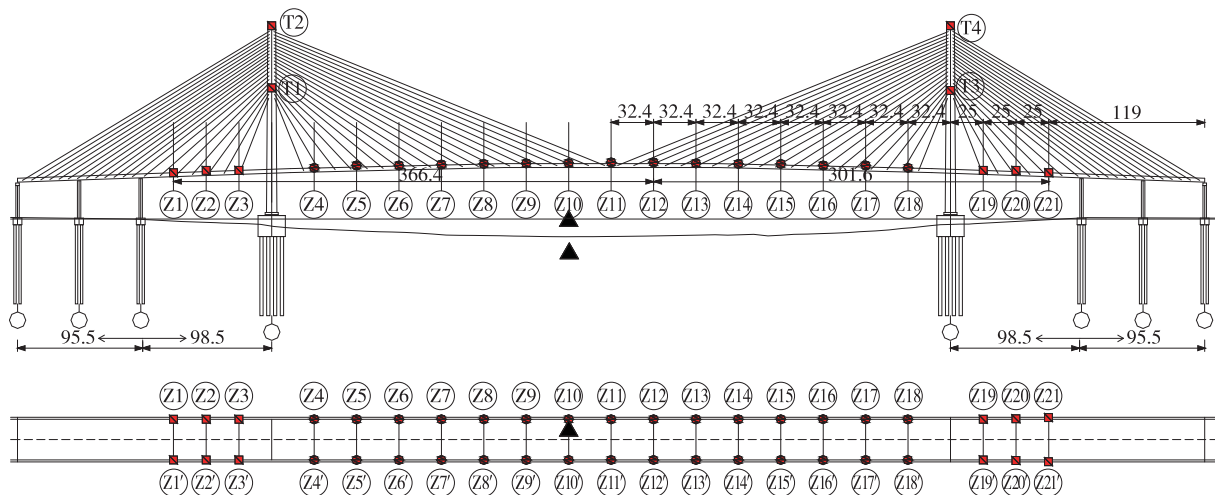


图 3 模态测试测点布置示意图 (单位: m)

本次测点布置与往年略有不同, 往年采用主跨 12 等分, 本次采用 16 等分, 本次测点布置更合理, 能检测到更全面的主跨多阶振动结果。

考虑到该桥规模大, 传统的有线模态测试系统不能满足要求, 采用 6 台 DH5907N 无线桥梁模态测试分析系统进行测试。测试前给每台采集器配备 3 m 延长天线, 增加传输距离。每台采集器都带信号中继传输功能, 采用各测点均分布置分组采集的方法进一步增加信号传输距离。

考虑到交通问题, 测试选在凌晨车辆较少时进行。全桥双向六车道全封闭检测, 期间采用间歇性放行的方式, 每采集完一批次放行 25 min。

测试时, 先进行开机联机调试, 试采集 10 min, 观察传感器是否都能正常采集信号。准备就绪后开始采集数据。

4 试验测试结果与分析

模态试验采集的竖向频谱见图 4, 横向频谱见图 5, 主桥主梁实测振型见图 6。将模态测试结果与理论计算结果、历年模态测试结果^[2]进行对比, 结果

见表 2、表 3。

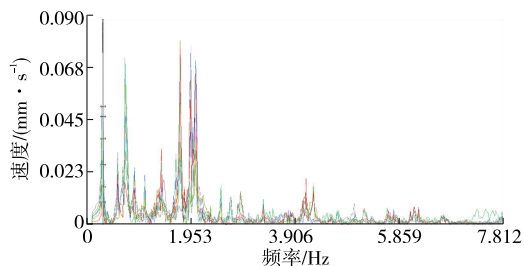


图 4 竖向频谱曲线

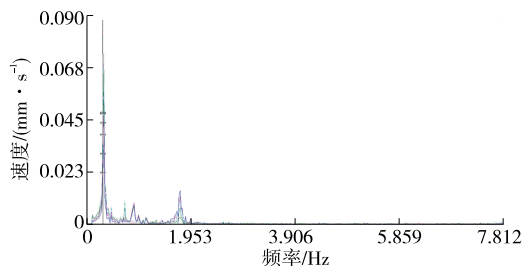


图 5 横向频谱曲线

由图 4~6 可知: 1) 该桥一阶实测频率为 0.303 Hz, 振型为主梁竖向一阶对称弯曲, 主梁主跨振动

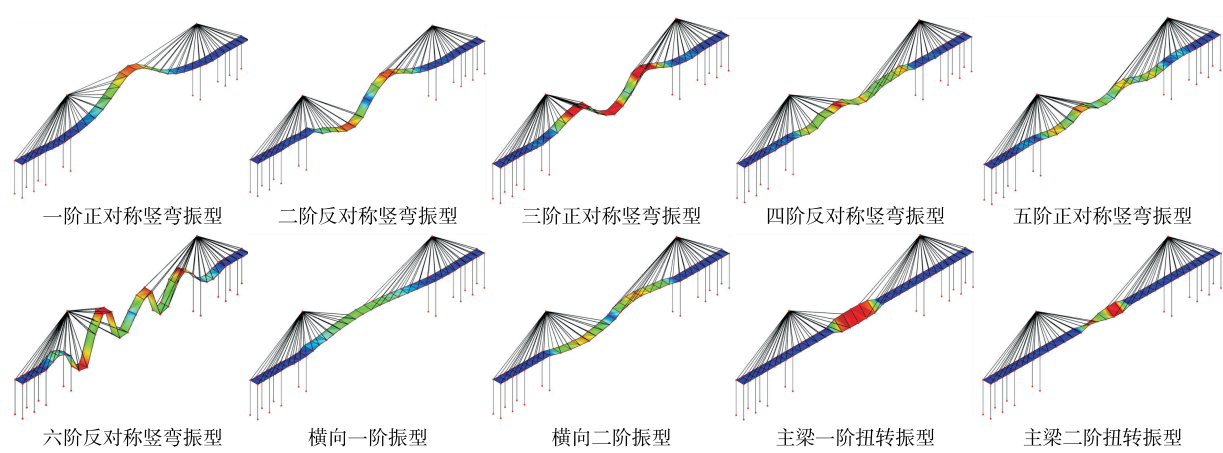


图 6 主桥主梁实测振型

表 2 频率测试结果与理论计算结果和历年频率测试结果的比较

振动阶次	振型描述	试验测试 频率/Hz	计算频率/Hz	历年实测频率/Hz									
				2005	2007	2008	2009	2011	2013	2014	2015	2016	2018
1	主梁一阶正对称竖弯	0.303	0.296	0.293	0.293	0.293	0.293	0.293	0.293	0.303	0.303	0.293	0.303
2	主梁横向一阶对称弯曲	0.327	0.226	0.303	0.342	0.342	0.313	0.342	0.342	0.313	0.313	0.313	0.328
3	主梁二阶反对称竖弯	0.396	0.386	0.391	0.391	0.391	0.401	0.391	0.391	0.400	0.400	0.391	0.395
4	主梁三阶正对称竖弯	0.586	0.550	0.574	0.586	0.586	0.587	0.587	0.586	0.586	0.586	0.566	0.583
5	主梁主跨一阶扭转	0.723	0.704	0.684	0.684	0.684	0.723	0.684	0.684	0.713	0.713	0.694	0.728
6	主梁四阶反对称竖弯	0.751	0.695	0.763	0.732	0.732	0.762	0.733	0.733	0.752	0.752	0.762	0.748
7	主梁横向二阶反对称弯曲	0.771	0.704	0.794	0.781	0.781	0.782	0.782	0.781	0.781	0.781	0.781	0.805
8	主梁五阶正对称竖弯	0.889	0.828	0.869	0.879	0.879	0.880	0.880	0.879	0.869	0.869	0.879	0.889
9	主梁主跨二阶扭转	1.072	1.016	1.026	1.074	1.074	1.036	1.075	1.075	1.035	1.035	1.074	1.069
10	主梁六阶反对称竖弯	1.112	0.980	1.115	1.123	1.123	1.124	1.124	1.124	1.133	1.133	1.113	1.115

表 3 阻尼比测试结果与历年阻尼比测试结果的比较

振动阶次	试验测试 阻尼比/%	历年测试阻尼比/%									
		2005	2007	2008	2009	2011	2013	2014	2015	2016	2018
1	0.617	1.43	1.53	1.50	3.10	1.02	1.21	2.36	1.65	1.83	0.47
2	0.822	1.23	1.29	1.22	2.91	1.06	1.01	3.12	1.20	1.67	1.28
3	0.514	0.94	1.07	1.20	1.68	1.65	1.83	1.40	1.43	1.94	0.49
4	1.680	0.55	0.64	0.61	1.90	1.43	1.23	1.79	1.82	2.21	0.33
5	1.475	0.80	0.60	0.80	1.85	1.82	1.44	1.51	1.51	1.91	0.25
6	0.886	1.37	0.87	0.75	0.92	1.65	1.53	2.20	1.40	1.63	0.32
7	5.026	0.83	0.91	0.86	1.02	1.40	1.29	1.03	2.03	2.03	1.02
8	0.458	0.72	0.68	0.70	2.56	1.20	1.37	1.43	1.78	1.75	0.18
9	2.219	0.82	0.63	0.60	0.79	1.15	1.65	0.87	1.15	2.56	0.30
10	0.066	0.99	0.67	0.66	0.95	1.02	1.11	0.99	1.02	1.02	0.35

较明显,边跨振动轻微。二阶实测频率为 0.327 Hz,振型为主梁横向一阶对称弯曲,主梁主跨振动较明显,边跨振动轻微。竖向一阶对称弯曲和横向一阶对称弯曲的实测频率相近,说明结构的一阶振型为主梁主跨竖向、横向耦合的平面振动。2) 三阶实测频率为 0.396 Hz,振型为主梁竖向二阶反对称弯曲,耦合索塔纵向同向弯曲,主梁主跨振动较明

显,边跨振动轻微。四阶实测频率为 0.586 Hz,振型为主梁竖向三阶反对称弯曲,耦合索塔纵向反向弯曲,主梁主跨振动较明显,边跨振动轻微。主梁的竖向振动与塔索的纵向振动耦合较明显。3) 七阶实测频率为 0.771 Hz,振型为主梁横向二阶反对称弯曲,耦合索塔横向反向弯曲,主梁主跨振动比边跨

(下转第 152 页)

稳定性。

参考文献:

- [1] DENG L, WANG W, YU Y. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(2): 04015005.
- [2] 马玉荣, 陈海波, 吕改锋, 等. 独柱墩桥梁上部结构抗倾覆稳定性分析[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(4): 316—322.
- [3] XIONG W, CAI C S, KONG B, et al. Overturning-collapse modeling and safety assessment for bridges supported by single-column piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(11): 04017084—1—13.
- [4] 彭卫兵, 潘若丹, 马俊, 等. 独柱墩梁桥倾覆破坏模式与计算方法研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(2): 25—30.
- [5] PENG W B, ZHAO H, DAI F, et al. Analytical method for overturning limit analysis of single-column pier bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(4): 04017007.
- [6] 周子杰, 阮欣, 石雪飞. 梁桥横向稳定验算中倾覆轴的选取[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 907—910.
- [7] 姜爱国, 杨志. 独柱墩曲线梁桥倾覆轴线研究[J]. 世界桥梁, 2013, 41(4): 58—61.
- [8] 李盼到, 张京, 王美. 独柱支承梁式桥倾覆稳定性验算方法研究[J]. 世界桥梁, 2012, 40(6): 52—56.
- [9] SONG G H, CHE D L, LI M H. Overturning axis selection in curved box-girder bridges with single-column piers [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018 (104): 1—9.
- [10] ZHUANG D, XIAO R, JIA L, et al. Failure analysis for overall stability against sliding and overturning of a girder bridge [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104271.
- [11] 鲁圣弟, 熊文, 丁旭东, 等. 桥型布置对独柱墩曲线梁桥抗倾覆性能的影响[J]. 公路交通科技, 2017, 34(5): 95—101.
- [12] 宫亚峰, 何钰龙, 谭国金, 等. 三跨独柱连续曲线梁桥抗倾覆稳定性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 113—120.
- [13] 何雄君, 刘鑫, 梁亚兰. 大跨度小半径曲线梁桥抗倾覆性能研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 89—93.
- [14] LUO X. Research on anti-overturning performance of multi-span curved girder bridge with small radius [J]. Acta Mechanica Malaysia, 2017, 1(1): 4—7.
- [15] 吕毅刚, 饶攀, 韩伟威, 等. 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆实用计算方法研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 35—40.
- [16] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTGD60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

收稿日期: 2022-04-05

(上接第 139 页)

明显, 边跨振动轻微。综上, 该桥主梁的竖向振动和扭转振动振型基本以中振动为主, 耦合索塔纵向振动; 主跨边跨多参与横向振动, 耦合索塔的横向振动。各阶频谱图中主频明显, 结构目前整体工作状态良好。

由表 2、表 3 可知: 各阶实测频率与历年测试结果基本一致, 阻尼比与历年测试结果相比较小, 表明目前结构的整体刚度未出现较明显变化, 约束(支撑)体系亦无明显变化。有限元模型计算各阶振型出现的顺序与实测各阶振型出现的顺序不完全一致, 对有限元模型还需不断进行修正。

5 结论

(1) 汕头碧石大桥各阶振型以主梁主跨振动为主, 边跨多参与横向振动, 实测结构横向一阶振动以主梁主跨的平面摆动为主。

(2) 各阶实测频率与历年测试结果基本一致, 阻尼比与历年测试结果相比较小, 表明目前结构的整体刚度未出现明显变化, 约束(支撑)体系亦无明显变化; 各阶频谱图中主频明显, 表明结构目前整体工作状态良好。

(3) 有限元模型计算各阶振型出现的顺序与实测各阶振型出现的顺序不完全一致, 说明有限元模型还需不断修正, 与实测情况一致后才能作为该桥的基准有限元模型。

参考文献:

- [1] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程: JTGT J21—01—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [2] 湖南中大建设工程检测技术有限公司. 汕头碧石大桥 2018 年度全桥常规(定期)检测报告 [R]. 长沙: 湖南中大建设工程检测技术有限公司, 2018.

收稿日期: 2022-01-13