

文章编号: 1001-4888(2006)04-0418-09

大跨度斜拉桥环境振动试验与分析^{*}

任伟新¹, 林友勤², 彭雪林²

(1. 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 福州大学 土木建筑工程学院, 福州 350002)

摘要: 桥梁环境振动试验具有简单方便和花费少等优点。以青洲闽江大跨度斜拉桥为背景, 介绍了通车前全桥环境激励动力试验, 采用频域峰值法和时域随机子空间识别得到了该桥的基准的动力学特性, 并与三维有限元模型计算结果进行了比较, 二者吻合良好。结果表明环境振动响应足以识别出该桥所感兴趣的模态, 结果可作为该桥的有限元模型修正、损伤检测、使用状态评估和健康监测的基础。

关键词: 斜拉桥; 环境振动; 动力试验; 参数识别; 模态分析; 有限元

中图分类号: U441

文献标识码: A

桥梁动力试验一般有三种方法: 强迫振动法、自由振动法和环境振动法。强迫振动法需要大型的激励设备, 由记录的输入和输出信号对桥梁进行模态参数识别^[1]。自由振动法由记录的自由振动响应信号识别桥梁的动力学特性^[2]。现场实验条件、结构的复杂性和实测数据质量等因素往往限制了专用激励设备的使用。车辆、行人、风等是作用于结构上的环境或自然激励, 仅用环境激励引起的振动响应进行结构参数的识别, 无须贵重的激励设备, 不中断结构的正常使用, 方便省时, 只需测定响应数据等, 因此成为土木工程结构系统识别十分活跃的课题。

环境振动试验时真正的输入情况是没有测量的, 模态参数识别过程是只知输出的识别^[3]。环境振动法已成功地应用于一些大跨度桥梁的动力试验中^[4-8]。本文以主跨 605m 的青洲闽江斜拉桥为背景, 介绍了通车前全桥环境激励动力试验, 用频域的峰值法和时域的随机子空间法, 识别出了该桥的自振频率、阻尼比和完整的三维振型, 并与三维有限元模型计算结果进行了比较。所得结果可用于该桥有限元模型修正、损伤检测、使用状态评估和健康监测的基准。

1 青洲闽江斜拉桥概况

福建青洲闽江斜拉桥位于闽江出海口, 连接福州市马尾区与长乐市, 也是福州市区至长乐国际机场专用路的关键工程。该桥为双塔双索面、钢—混凝土迭合梁斜拉桥, 五跨布置为, 主跨 605m。该桥已于 2002 年 12 月正式通车, 图 1 为该桥结构总体布置图。该桥的主要结构特征如下:

- 1) 中间三跨采用迭合梁, 钢主梁断面为“工”字形, 梁高 2.45m。桥面板为 25cm 厚预制混凝土板, 桥面板通过剪力钉与钢主梁及钢横梁连接。桥面宽 29m, 双向六车道。
- 2) 混凝土桥塔横桥向为钻石形, 主塔高 175.5m, 通航净高 43m。
- 3) 斜拉索采用双索面密索体系扇形布置, 全桥共 168 根索。斜拉索采用 7 ϕ 5 镀锌高强钢绞线, 每根斜拉索中的钢绞线数量从 27 到 85 不等, 共分为 8 组。

^{*} 收稿日期: 2005-04-16; 修订日期: 2006-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378021)

通讯作者: 任伟新(1960—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师。E-mail: renwx@mail.csu.edu.cn

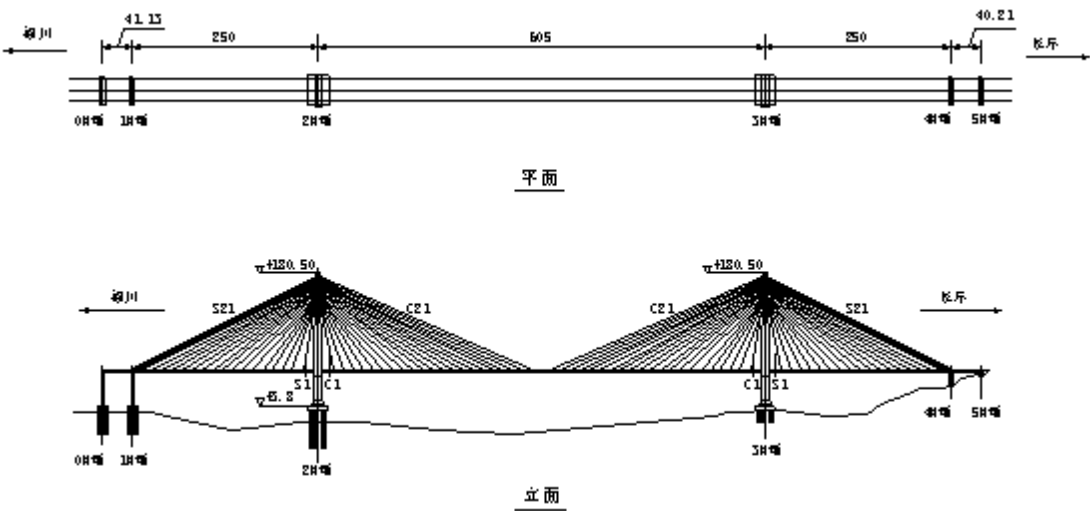


图 1 青洲闽江斜拉桥总体布置图

Fig. 1 Plan and elevation of Qingzhou cable-stayed bridge

2 现场环境振动试验

在青洲大桥正式通车之前,对全桥进行了环境振动试验。测试内容包括全桥竖向、横向和纵向自振特性(自振频率、阻尼比和振型),以及全部斜拉索的索力。试验时桥面采用哈尔滨工程力学所出产的 941-B 型伺服加速度传感器,直接安放在桥面上,竖向和横向传感器如图 2 所示。传感器拾得环境振动响应加速度信号,通过放大器放大并滤波,再由多通道采集仪采集并记录在笔记本电脑的硬盘上。



图 2 桥面加速度传感器

Fig. 2 Accelerometers mounted on the deck

测点数量及测点位置的布置基本原则是能够获得全桥三向(竖向、横桥向和纵向)前若干阶完整的空间振型。因此,桥面两侧各拉索与主梁连接锚固点位置均选为测点,加上支座位置和边跨,桥面总测点数为 180 个。三个固定不动的参考点分别设在主跨跨中、2#塔塔梁连接处和福州侧边跨跨中,这三个参考点每组共有。参考点的选择由有限元分析的初步振型的结果确定,尽量避开所有感兴趣振型的驻点位置。桥面全部测点布置如图 3 所示。

由于传感器和采集仪通道数的限制,试验采用分组的办法。为获得全桥的空间振动特性,每一个测点共测得桥梁纵、横、竖向的 3 个方向的加速度响应。180 个测点一个方向共分 15 组完成,每一组包括 12 个可移动的测点(桥面两侧各 6 个)和 3 个固定不动的参考测点共 15 个通道。现场采样频率为

曲振型(竖向 1,3,5,7,9 阶),要明显好于竖向反对称弯曲振型(竖向 2,4,6,8 阶)。

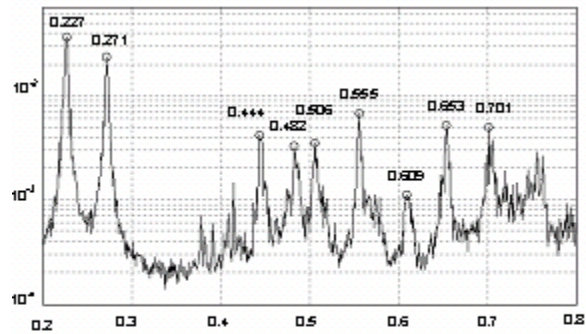


图 5 峰值法竖向自振频率识别

Fig.5 Identified vertical frequencies by peak picking

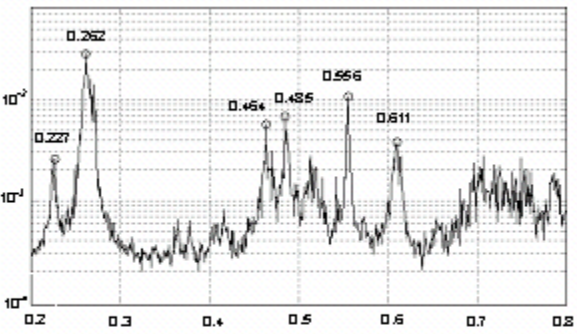


图 6 峰值法横向自振频率识别

Fig.6 Identified transverse frequencies by peak picking

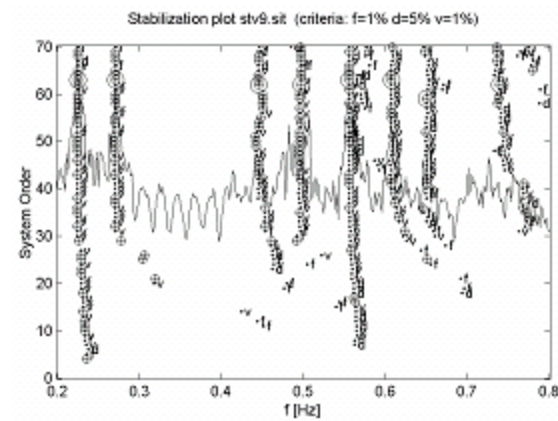


图 7 子空间法竖向稳定图(第 9 组数据)

Fig.7 SST stabilized diagram (vertical data)

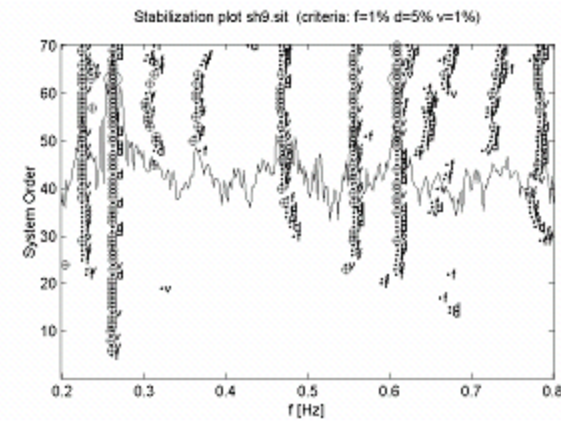


图 8 子空间法横向稳定图(第 9 组数据)

Fig.8 SST stabilized diagram (transverse data)

表 1 青洲闽江大桥动力特性比较

Tab.1 Comparison of modal parameters

阶数	振型性质	有限元 (Hz)	峰值法 (Hz)	随机子空间法	
				频率(Hz)	阻尼(%)
1	一阶竖弯	0.226	0.227	0.226	0.7
2	二阶竖弯	0.272	0.271	0.272	0.7
3	一阶侧弯	0.263	0.262	0.263	1.0
4	三阶竖弯	0.446	0.444	0.446	0.9
5	四阶竖弯	0.480	0.482	0.480	2.8
6	五阶竖弯	0.505	0.506	0.505	1.5
7	一阶扭转	0.556	0.555	0.556	0.4
8	七阶竖弯	0.653	0.609	0.653	0.4
9	二阶扭转	0.610	0.653	0.610	4.6
10	三阶扭转	0.726	0.701	0.726	1.1
11	二阶侧弯	0.628	0.612	0.628	0.5
12	一阶纵向	1.925	1.925	1.925	1.9

4 有限元模态分析

采用了四种单元类型来模拟不同的结构构件:主梁、横梁、小纵梁和混凝土桥塔采用三维实心梁单元来模拟;斜拉索采用只拉不压的杆单元来模拟,斜拉索的初拉力通过输入单元初应变来实现;混凝土桥面板采用板壳单元;桥墩和承台则用实体单元来模拟。青洲闽江斜拉桥空间有限元模型如图 9 所示。

主梁与塔的连接:2#塔为固定铰支座,3#塔处为活动铰支座,且都设有横向限位。而迭合梁桥体(中间三跨)与过渡孔混凝土 T 梁的连接处为固定铰支座。这些支座的模拟是通过耦合模型中相应节点的自由度来实现的。基础及承台全部模拟为固结。另外,主桥两端与引桥相连处设有伸缩缝,在模型中是通过设置纵向弹簧来模拟伸缩缝对主桥的约束作用,弹簧刚度由实测的桥面一阶纵向频率确定。

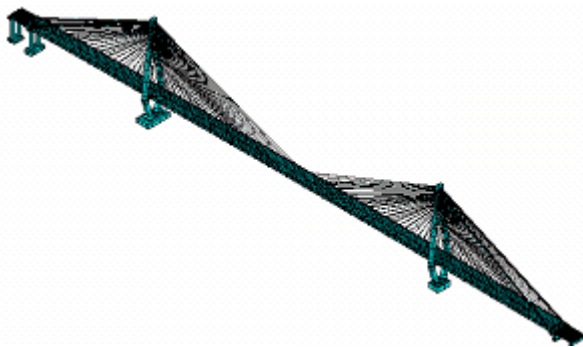


图 9 青洲闽江斜拉桥三维有限元模型

Fig. 9 Three-dimensional finite element model of the bridge

大跨度斜拉桥一个主要特征是恒载占桥梁荷载的大部分,而恒载主要由斜拉索的初拉力来承受,这个特性决定了恒载对斜拉桥的刚度有重要的影响。为考虑这种影响,在有限元动力分析中,需先进行恒载作用下的静力分析,得到一个恒载与斜拉索初拉力作用下桥梁变形的平衡位置——初始平衡构型。初始平衡构型的计算过程为:将设计的斜拉索初应力加到模型上,与桥梁恒载一起进行静力计算,得到该桥在恒载和斜拉索初拉力共同作用下的桥面线形,然后根据桥的设计线形调整索力,直至模型的线形与该桥实际线形基本吻合。后续的桥梁动力分析,如自振特性、动力响应分析,均始于这个初始平衡构型,这样,恒载和索的初拉力的影响就被考虑其中了。在初始平衡构型,斜拉桥中的各构件都已具有很大的“初始应力”,因此斜拉桥的模态分析是一个“带有初应力”的模态分析(Pre-stressed modal analysis),应分为两步进行:第一步先进行恒载和斜拉索初拉力共同作用下的静力分析,得到该桥的初始平衡构型;第二步是以初始平衡构型为基准的模态分析。青洲闽江斜拉桥有限元建模和模态分析细节见文献[11]。

5 试验结果与有限元计算结果比较

实测桥梁动力特性与有限元计算结果的比较,可以通过比较频率和振型的形状来实现。表 1 给出了青洲闽江斜拉桥实测频率值与参考试验结果进行修改后有限元模型计算频率值的比较,可以看出两者吻合良好。图 10 比较了实测与有限元计算的 0~1.0 Hz 低频范围内的主要振型。

为了进一步比较实测与计算振型之间的相关性,采用模态保证准则(Modal Assurance Criterion):

$$\text{MAC}(\phi_a, \phi_e) = \frac{|\{\phi_a\}^T \{\phi_e\}|^2}{(\{\phi_a\}^T \{\phi_a\})(\{\phi_e\}^T \{\phi_e\})} \quad (1)$$

式中, $\{\phi_a\}$ 和 $\{\phi_e\}$ 分别表示有限元模型计算振型和实测振型向量。MAC 值总是介于 0 和 1 之间,MAC 值越接近 1,表示两者的相关性就越好。各阶振型的 MAC 见图 11。可以发现,大多数主要模态的 MAC 值都比较高,这也表明了计算振型和识别振型之间有良好的相关性。个别较小的 MAC 值(低于 0.8)为竖向 2 阶、竖向 4 阶和横向二阶的振型,进一步表明了该桥反对称弯曲振型的识别效果不及对称弯曲振型好。

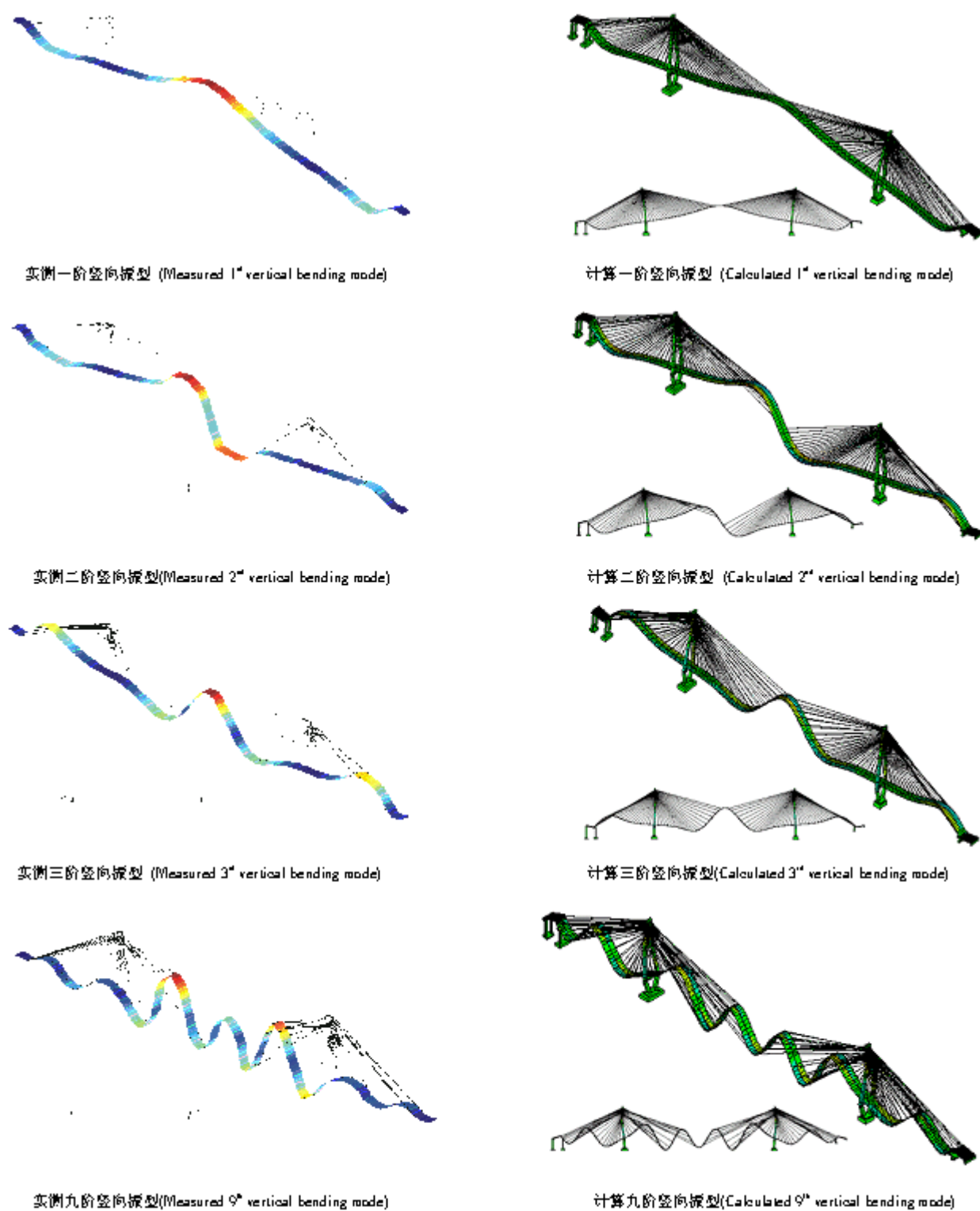


图10 实测振型与有限元计算振型比较

Fig. 10 Comparison of measured and calculated mode shapes

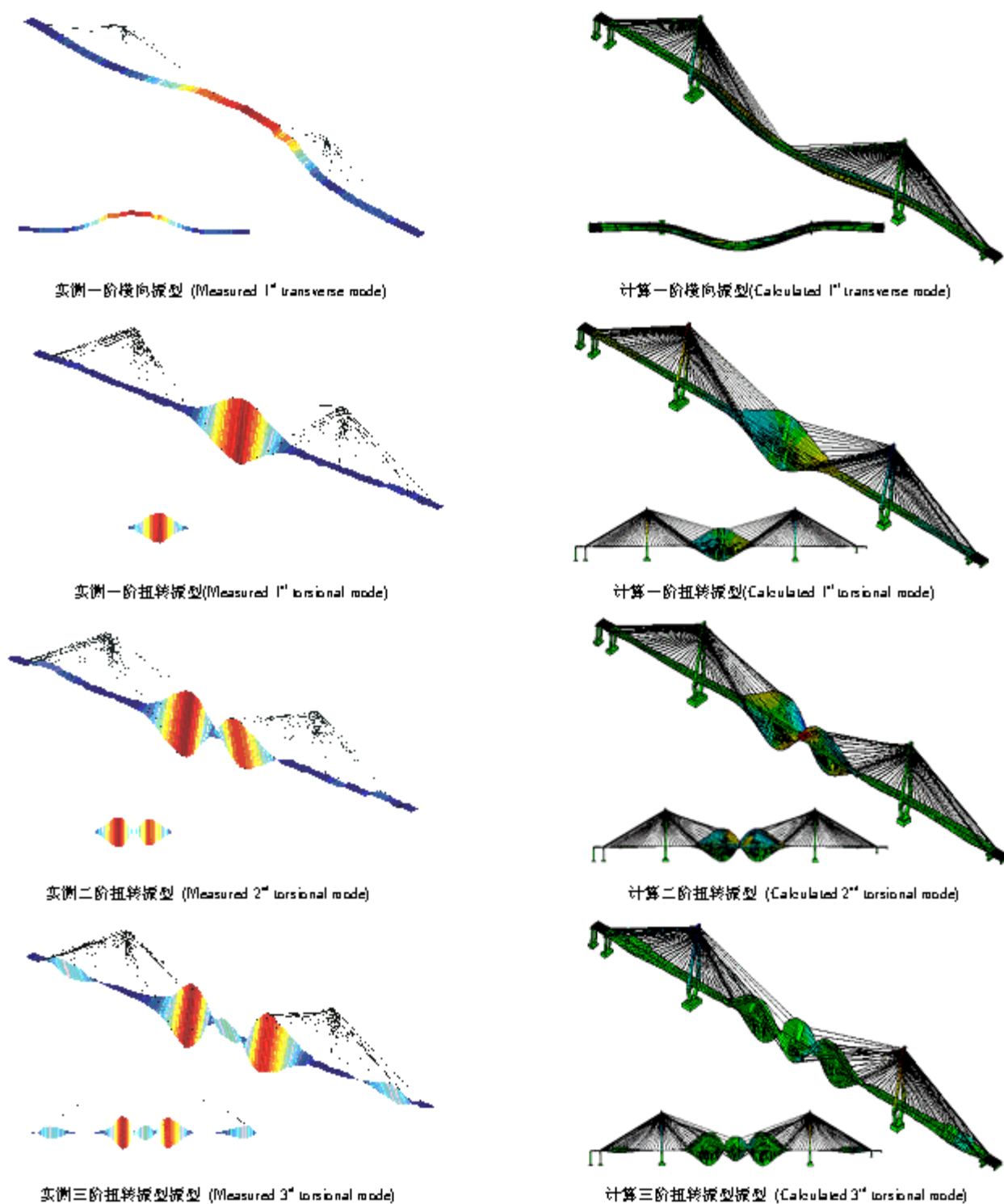


图 10 实测振型与有限元计算振型比较 (续)

Fig. 10 Comparison of measured and calculated mode shapes

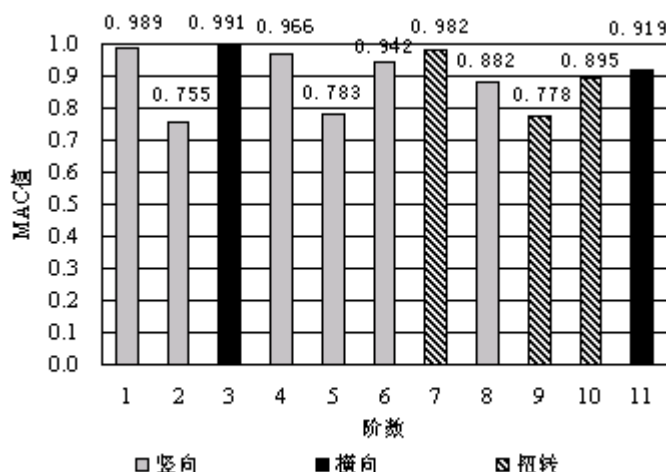


图11 模态准确判据(MAC)图

Fig. 11 Modal Assurance Criterion (MAC) values

6 结论

环境振动法是桥梁结构动态试验的实用方法,使得经常性的全桥动力检测和健康寿命监测成为可能。结果表明,采用自然环境振动的方法,足以识别出青洲闽江大跨度斜拉桥,频率密集分布于低频0~1.0Hz范围内所感兴趣的主要模态参数。由于输入未知,本文采用两种独立的技术进行环境振动模态参数识别:频域峰值法和先进的时域随机子空间识别法,两种方法可以实现互补和验证。

综合理论和试验结果是桥梁动力分析的可靠方法。理论模态分析通过建立有限元模型可以提供桥梁结构详细的物理与模态特性,而实桥动力测试可以获得桥梁真实的动力特性。经试验验证的青洲闽江大跨度斜拉桥有限元模型,能够反映桥梁在运营前的真实动力特性,可以作为该桥的“基准”的动力有限元模型,为该桥的各种复杂动力响应分析、损伤检测、状态评估和长期健康检测提供可靠的参照标准。

桥梁的阻尼机制是十分复杂的,对实际桥梁阻尼的精确估计非常困难。通过环境振动测试识别的阻尼的适用性仍然是需要进一步讨论的课题,它需要通过使用其他识别技术或其他精心设计的动力试验来验证。

参考文献:

- [1] Okauchi I, Miyata T, Tatsumi M, Sasaki N. Field vibration test of a long span cable-stayed bridge using large exciters [J]. J. Struct. Engrg./Earthquake Engrg., Tokyo, 1997, 14(1):83~93.
- [2] Cunha A, Caetano E, Delgado R. Dynamic tests on large cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering ASCE, 2001, 6(1):54~62.
- [3] Ren W X, Zong Z H. Output-only modal parameter identification of civil engineering structures [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004, 17(3-4):429~444.
- [4] Wilson J C, Liu T. Ambient vibration measurements on a cable-stayed bridge [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, 20:723~747.
- [5] Chang C C, Chang T Y P, Zhang Q W. Ambient vibration of long-span cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2001, 6(1):46~53.
- [6] Xu Y L, Ko J M, Zhang W S. Vibration studies of Tsing Ma Suspension Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 1997, 2:149~156.
- [7] Ren W X, Harik I E, Blandford G E, Lenett M, Basehearh T. Roebling Suspension Bridge:II. ambient testing and live load response [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2004, 9(2):119~126.

- [8] Ren W X, Peng X L, Lin Y Q. Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(4):535~548.
- [9] Peeters B. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering [D]. Ph. D. thesis, Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Belgium, 2000.
- [10] Van Overschee P, De Moor B. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications [M]. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996.
- [11] Ren W X, Peng X L. Baseline finite element modeling of a large span cable-stayed bridge through field ambient vibration tests [J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(8-9):536~550.

Ambient Vibration Tests and Analysis of a Large Span Cable-Stayed Bridge

REN Wei-xin¹, LIN You-qing², PENG Xue-lin²

(1. Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 2. Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Bridge ambient vibration test has an advantage of being simple, fast and cheap. A full ambient vibration test of the newly constructed Qingzhou cable-stayed bridge was carried out just prior to the opening of the bridge. The dynamic properties were identified by using the peak picking of the average normalized power spectral densities in frequency-domain and stochastic subspace identification in time-domain. The experimental results agree well with those obtained from three-dimensional finite element modal analysis. It is demonstrated that the ambient vibration tests are sufficient to identify the most significant modes below 1.0 Hz for this kind of large span cable-stayed bridges. The identified dynamic properties can be served as the basis in the finite element model updating, damage detection, condition assessment and health monitoring of the bridge.

Key words: cable-stayed bridge; ambient vibration; dynamic test; parameter identification; modal analysis; finite element method