

文章编号: 1001-8360(2003)04-0089-08

# 西宁北川河钢管混凝土拱桥的理论和实验模态分析

宗周红<sup>1</sup>, Bijaya Jaishi<sup>2</sup>, 林友勤<sup>1</sup>, 任伟新<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002; <sup>2</sup> Tribhvan 大学 Pulchowk 校区 工程研究所, 尼泊尔 加德满都)

**摘 要:** 对西宁北川河钢管混凝土拱桥进行了理论与实验模态分析, 该桥为中承式钢管混凝土系杆拱桥, 净跨 90 m, 桥面净宽 21.6 m。本文首先介绍了现场环境脉动实验概况, 利用频域中的单模态识别法 (SDOFI)、峰值法 (PP) 和时域中的随机子空间识别法 (SSI) 分别进行桥梁动力参数识别; 利用 ANSYS 建立了全桥三维有限元模型, 并进行了参数修正, 理论和实验模态分析结果具有相当好的吻合程度。参数分析表明: 不同规范的动力特性计算结果是有一定差别的。此类测试和分析可以提供结构健康监测的基准模型, 服务于结构状态评估和修复。

**关键词:** 钢管混凝土拱桥; 模态分析; 环境振动; 系统识别; 有限元方法

**中图分类号:** U448.225 **文献标识码:** A

## Experimental and analytical modal analysis of a CFT arch bridge over Xining Beichuan River

ZONG Zhou-hong<sup>1</sup>, Bijaya Jaishi<sup>2</sup>, LIN You-qin<sup>1</sup>, REN Wei-xin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

<sup>2</sup> Institute of Engineering, Tribhvan University Pulchowk Campus, Kathmandu, Nepal)

**Abstract:** The paper presents the experimental and analytical modal analysis on a concrete-filled steel tubular (CFT) arch bridge over the Beichuan River in Xining, Qinghai Province, China. The arch bridge is a half-through CFT bridge, with the span of 90 m and the width of 21.6 m. The field test is carried out conducting ambient vibration testing under traffic-induced excitation. The Singular-Degree-of-Freedom identification (SDOFI) method and the peak picking (PP) method in frequency domain and the stochastic subspace identification (SSI) method in time domain are used for the output-only modal identification. A good agreement in identified frequencies has been found among these methods. The 3-D finite element models (FEM) are constructed and an analytical modal analysis is then performed to generate natural frequencies and mode shapes in the 3-orthogonal directions. The finite element model is validated to match the field natural frequencies and mode shapes of the bridge. The parameter analysis indicates that the dynamic calculations from different design codes are different. It is further demonstrated that the results from the FEM agrees well with the field tests and can serve as a baseline model in the seismic evaluation/retrofitting of the bridge.

**Key words:** concrete-filled steel-tubular arch bridge; modal analysis; ambient vibration; system identification; finite element method

西宁北川河桥是位于西宁至湟源一级公路中祁连路高架桥上的一座连线桥 (图 1), 桥型为中承式钢管混凝土系杆拱桥, 净跨 90 m, 矢跨比 1/5, 拱轴线为悬链线, 拱轴系数  $m = 1.167$ ; 桥面净宽 21.6 m, 双向 4 车道, 由吊杆吊在老桥面以上 5.5 m 处。主拱圈采用

4 根  $\phi 650 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  钢管,  $\phi 400 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  上下平联和  $\phi 250 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的直腹杆和斜腹杆组成高 3 m、宽 1.5 m 的桁式主拱肋, 锚固在拱脚处; 钢管内灌筑 C50 混凝土; 吊杆采用 127  $\times \phi 5$  高强碳素钢丝, 全桥共 16 对吊杆, 横梁采用 C40 钢筋混凝土变截面工字梁, 横梁间距 5 m, 桥面现浇 250 mm 厚 C30 混凝土, 水平系杆选用  $\phi 5$  高强钢丝束; 桥面以上设三道横撑, 以增

收稿日期: 2002-09-20; 修回日期: 2003-03-10

基金项目: 福建省教育厅项目 (JA02150) 和福建省科技厅人才创新基金 (2001J010) 联合资助

作者简介: 宗周红 (1966—), 男, 江苏如皋人, 副教授, 博士。

强桥梁整体性和稳定性。下部结构采用群桩式桥台，钻孔灌注桩基础。荷载设计为汽超—20，挂—120，人群荷载 3.5 kN/m<sup>2</sup>。



图 1 西宁北川河桥

目前,对钢管混凝土拱桥的动力性能研究还处于起步阶段,而桥梁的动力特性是进行桥梁动力性能分析的重要参数和基础;现有的理论计算和有限元分析结果往往比实测结果偏大<sup>[3,4]</sup>,而实桥的测试成果又偏少。通过对西宁北川河桥进行环境脉动试验,了解

该桥梁建成后的基本动力特性并和理论分析相比较可以评估桥梁整体结构的安全承载能力和使用条件,此类测试和分析还可以提供结构健康监测的基准模型,服务于结构长期监测和状态评估,包括使用性能、承载力和抗震性能评估等。因此开展钢管混凝土拱桥的动力特性测试与研究,具有重要的理论意义和工程应用价值。

### 1 环境脉动试验

桥梁动力测试主要有 3 种类型<sup>[5]</sup>: (1) 强迫振动测

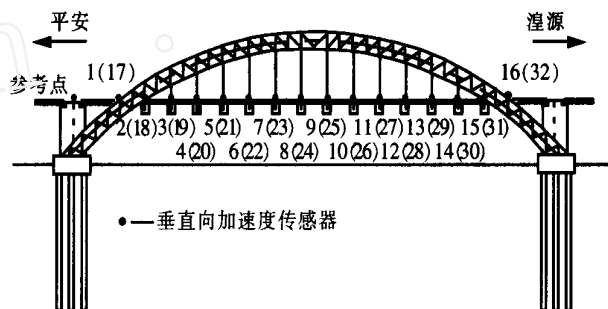


图 2 测点布置图

试; (2) 自由振动测试; (3) 脉动测试。其中第 1 种是由



(a) 传感器竖向布置



(b) 传感器横向布置



(c) INV306 动态数据采集系统



(d) 模拟正常交通的车辆

图 3 现场测试

人工落重或激振装置进行激励,第 2 种是突然释放桥上吊重,使桥梁产生自由振动;这两种方法需要封闭交通、实桥上难以实现或会导致损伤。第 3 种方法是在天然环境脉动条件下,利用随机交通荷载、自然风荷载或其他环境激励如地脉动及其组合等,量测桥梁的动力特性,具有简便、可行、不中断交通等特点,已经越来越受到人们的重视。

本次试验采用北京东方振动与噪声技术研究所 INV306 智能信号自动采集系统和哈尔滨国家地震局工程力学研究所 891-IV 型加速度传感器。全桥上下游两侧横向水平与竖向分别布置测点 32 个,位于每根吊杆处,参考点位于桥面起始处,如图 2 所示。全桥每个方向分 4 组(4 setup)进行测试,每组为 8 个测点,共用一个参考点;信号的采样频率为 80 Hz,低通滤波为 40 Hz,采样时间为 15 min。测试时用一部 10 t 卡车在桥梁上来回行驶,模拟日常交通荷载,如图 3 所示。

## 2 模态识别方法

系统识别<sup>[8]</sup>的基本原理是建立在对已知系统的输入和输出,来寻求频率响应函数(传函)(频域)或脉冲响应函数(时域),从而实现对系统的识别。对大型土木工程结构而言,结构响应是通过安装在结构某些部位的传感器获取的,而对于输入(激励)却不容易量测得到,特别是在现场实桥测试中;因此土木工程的系统识别往往是在环境振动下仅有输出的系统识别;由于环境振动具有响应幅值小、随机性强、噪音干扰大和采集数据量大等特点,因此环境振动的系统识别不同于传统的机械系统识别。

目前,由不同的研究者基于不同的用处提出了一些环境振动的系统识别方法,如基于功率谱密度的峰值法(PP)(频域)<sup>[9]</sup>、基于离散时间数据的 ARAM 模型(时域)<sup>[10]</sup>、随机子空间法(SSI)(时域)以及将环境激励作为假想输入的单模态识别法(SDOFI)(频域)<sup>[12]</sup>等,这些方法各有千秋,在实用中可以相互补充和校核。在本文中,峰值法和随机子空间法是由基于 MATLAB 平台的 MACEC<sup>[13]</sup>(Modal Analysis on Civil Engineering Construction)系统识别软件来实现的,单模态识别法是由 DASP 系统识别软件(北京东方振动与噪声技术研究所开发的与 INV 采集系统相配套)来实现的。

峰值法(PP)最初是基于结构自振频率在其频率响应函数上会出现峰值,峰值的出现可以作为特征频率的良好估计,由于环境振动下无法得到结构的频率响应函数,故只能用环境振动的自谱来代替,此时,特

征频率仅由平均正则化的功率谱密度曲线上的峰值来确定(图 4),因而称之为峰值法。峰值法的基本假定是所测动力响应仅由一种模态确定,因此它比较适用于模态可以很好地分离且阻尼较小的情形,具有处理简单、快速、实用等特点。其不足之处在于峰值的选取比较主观、难以得到比较准确的振型,仅适用于比例阻尼和实模态结构,无法识别模态阻尼比等情形。

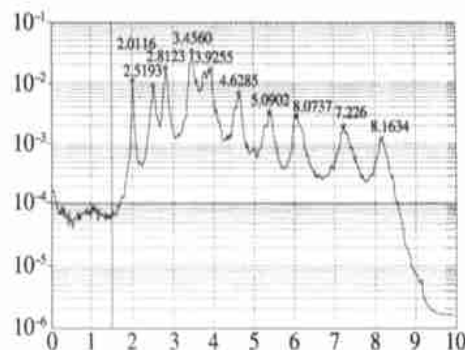


图 4 平均正则化的功率谱密度

单模态识别法(SDOFI)也是一种常规频域方法,它假想某一点的响应为输入(作为参考点),其他测点的响应与此有某种线性相关性,建立起响应点与参考点之间的传递函数来进行系统识别。在环境激励状态下,由于无法或难以进行有效激励,通常假定某点的响应或地脉动作为输入,在 DSAP 软件中参考点的选择有一定的局限性,既不能完全不动,又不能动得很大。由于有了假想的输入,识别的结果相对于峰值法精确一些,但是峰值的选取仍需要一定的工程经验,也带有相当的随机性。

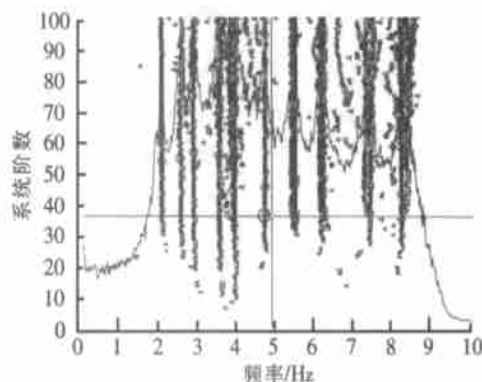


图 5 稳定图

随机子空间法(SSI)<sup>[11, 14]</sup>的核心是把“将来”输出的行空间投影到“过去”输出的行空间上,投影的结果是保留了“过去”的全部信息,并用此预测“未来”。显然,随机子空间识别直接作用于时域数据,而不是协方差矩阵,即不必将时域数据转换为相关函数或谱。

它采用比较有效的数学处理方法如矩阵的 QR 分解和奇异值分解(SVD),以及最小二乘等识别离散后的系统状态空间矩阵,来得到系统的动力参数(频率、阻尼比和振型)。SSI 的最大特点是它可以获得稳定图,比较准确地确定系统模态,避免了模态选择上的盲目性和随机性,识别质量较高(图 5)。由于环境激励时采样时间一般较长,数据量非常庞大,该法的不足之处是计算工作量非常大,耗时长。利用 MACEC 系统处理时,SSI 需做重采样和滤波分析,本文的重采样频率为 20 Hz。

3 种方法识别的结果见表 1 和图 6。由表 1 可知:(1)两种频域识别方法识别的结果比较接近,频谱图的峰值比较明显,但峰值的选取需要经验;(2)时域的随机子空间方法识别结果与频域方法识别结果能够吻合,但不同识别方法识别的结果仍存在一定的差异;(3)从模态振型上可以看到,拱桥的 1 阶竖向振型为标准的正弦波形,不同于其他桥梁的半波振型;(4)本桥的横向振型发生在 2 阶竖向弯曲振动之后,与 1 阶扭转振型比较靠近,表明本桥的横向刚度要大一些;(5)

竖向弯曲振型的识别结果好于扭转振型,扭转的高阶振型的偏差较大;(6)单模态识别法识别的阻尼比一般小于随机子空间方法识别的阻尼比,在 SDOFI 中需要采用较为精确的方法来识别阻尼。

表 1 北川河桥实测结果比较

模态	SDOFI		PP		SSI	
	频率/ Hz	阻尼比/ %	频率/ Hz	频率/ Hz	频率/ Hz	阻尼比/ %
1 阶竖向	2.017	0.98	2.012	2.002	2.002	0.80
2 阶竖向	2.467	1.39	2.519	2.511	2.511	2.40
3 阶竖向	3.480	1.94	3.457	3.473	3.473	1.20
4 阶竖向	4.460	0.98	4.628	4.624	4.624	1.30
1 阶扭转	2.791	0.35	2.812	2.827	2.827	1.00
2 阶扭转	3.803	0.07	3.926	3.864	3.864	1.90
3 阶扭转	5.337	0.81	5.390	5.419	5.419	1.50
4 阶扭转	6.030	0.35	6.074	6.053	6.053	1.10
5 阶扭转	7.258	0.09	7.226	7.192	7.192	1.40
1 阶横向	2.860	2.10	2.774	2.754	2.754	3.20

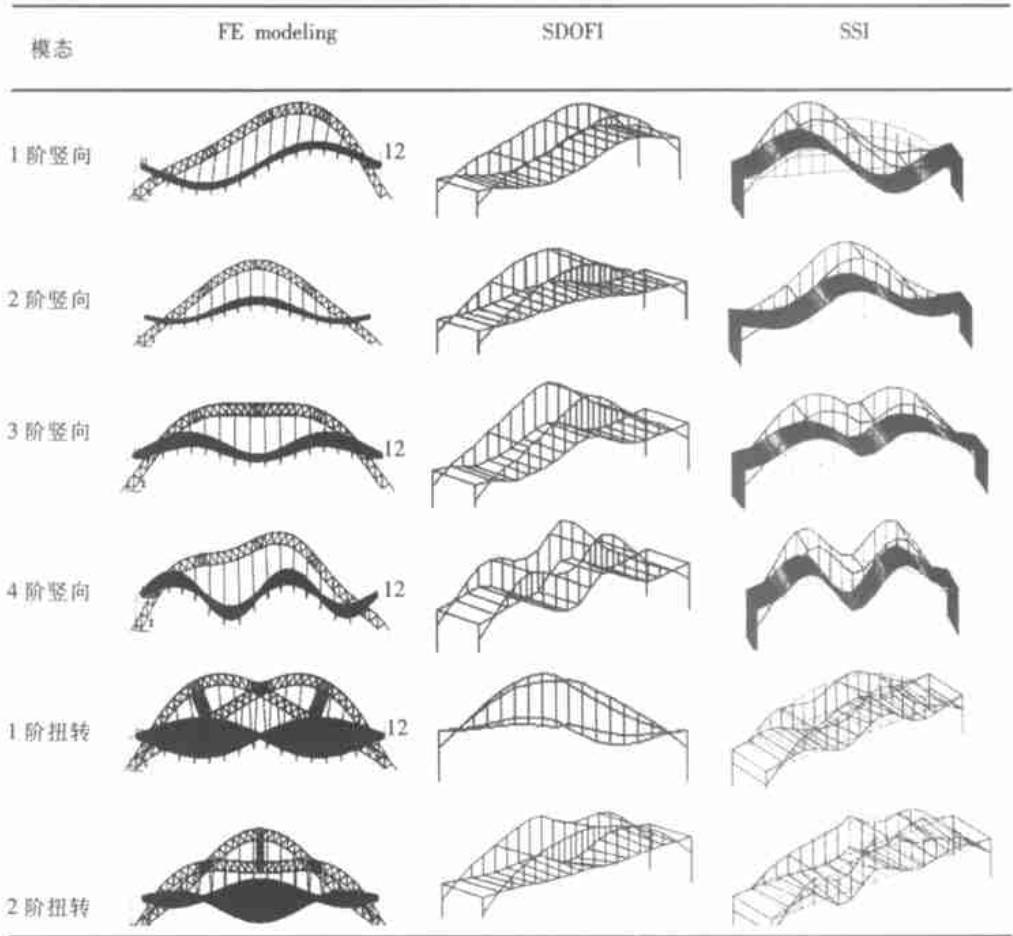


图 6 北川河桥计算和实测振型

3 有限元模拟与分析

3.1 空间有限元模型

采用大型空间有限元结构分析通用软件 ANSYS7.0(高校版)进行计算,全桥空间有限元模型主要以三维梁、杆、板壳单元建模<sup>[15,16]</sup>,用梁单元(Beam4)模拟拱肋、横撑、桩基础、横梁等,用杆单元(Link10)模拟吊杆和水平拉杆,用板壳单元(Shell41)模拟桥面板,空间有限元模型见图 7。桥面边界条件按照一端铰支、一端滑动处理。计算采用的材料初始参数(根据设计图纸):钢材弹性模量  $2.05 \times 10^5$  MPa,高强钢丝弹性模量  $2.0 \times 10^5$  MPa,C50 混凝土弹性模量  $3.45 \times 10^4$  MPa,C40 混凝土弹性模量  $3.25 \times 10^4$  MPa,C30 混凝土弹性模量  $3.0 \times 10^4$  MPa,截面刚度  $EA$ 、 $EI$  计算根据文献[17]推荐公式计算。

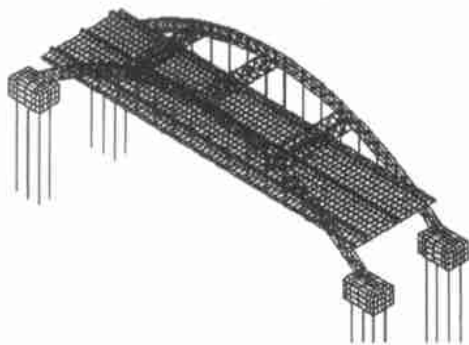


图 7 全桥空间有限元计算模型

3.2 参数修正

影响拱桥结构动力特性的主要参数有:(1)拱桥类型及跨度;(2)主拱肋的结构形式;(3)桥面系结构类型;(4)横向支撑体系;(5)材料特性如拱肋、混凝土弹性模量;(6)构件截面特性如拱肋、纵横梁、吊杆的面积及惯性矩;(7)边界约束条件等。初始的有限元模型是基于设计图纸进行的,由于施工偏差以及材料参数的变异,实际结构的动力特性肯定有别于设计值,因此初始模型必须修正,而基于实测结果可以进行有限元模型的参数修正和模型修正,本文主要进行有限元模型的参数修正。本桥为中承式桁拱结构,能够修正的参数主要为材料特性与截面特性,主要修正的参数见表 3,修正前后有限元计算模态振型比较见图 6,修正前后频率计算结果见表 4,从修正后的有限元模型计算来看,模态频率和振型计算结果与实验结果比较吻合。

大跨径桥梁的横向振动一般难以测试,对于拱桥而言,桥面系的横向振动与拱肋不一定同步,但同阶频率相差不大。本桥的测试只获得了横向基频,进行参数修正后有限元计算结果与实测结果仍有一定差距,

表明有限元模型还需要进一步修正。所以,在建立大跨径桥梁(如拱桥、斜拉桥或悬索桥)有限元模型时,仅依赖设计图纸与理论分析是不够的,特别是横向振动分析,有限元模型能否真实地反映结构实际工作性能,必须经过实验验证和修正。

此外,在本桥的实测与分析中还发现,不同的识别方法,均可能遗漏某些振型;也就是说,在环境激励下,有可能某些振型(或频率)难以被检测。而在有限元计算过程中,如果模型不修正(参数选择或约束条件不当),也可能遗漏某些振型。因此,在动力测试与分析中,仅采用一种识别方法是不够的。

表 3 初始和标定后的材料特性

参数类型	桥面横梁 惯性矩/ $m^4$	吊杆杆面 积/ $m^2$	主拱肋惯 性矩/ $m^4$	混凝土弹 模/MPa	主拱肋弹 模/MPa
初始值	0.075 60	0.030 17	0.010 67	$E_c$	45 600
修正后值	0.089 96	0.027 16	0.012 27	1.20 $E_c$	54 720

表 4 初始和标定后的频率

模态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
振型	竖向	竖向	竖向	竖向	扭转	扭转	扭转	扭转	扭转
初始值	1.842	2.430	3.177	4.150	2.614	3.860	5.746	6.185	8.261
修正后	1.966	2.638	3.501	4.512	2.784	4.106	6.107	6.665	8.686

3.3 参数分析

(1) 拱肋截面面积  $A$

取拱肋截面面积设计值为 1,有限元分析结果见图 8。从图 8 可以看出,在达到面积设计值的 1.6~2.0 倍之前,桥梁频率是随拱肋面积增大而增大的,在此之后反而下降。表明单纯增加拱肋截面面积(保持截面其他参数如惯性矩、弹性模量等不变),来改善拱桥动力特性是有限的,因为增加拱肋截面面积意味着结构自重增加。

(2) 拱肋截面惯性矩  $I$

单纯增加拱肋截面惯性矩(保持截面其他参数如面积、弹性模量等不变),取拱肋截面惯性矩设计值为 1,有限元分析结果见图 9。从图 9 可以看出,拱肋截面惯性矩的改变对竖向频率的影响很小,仅对抵抗扭转有所贡献,当截面惯性矩提高 6 倍时,扭转频率增加不到 13%。计算表明拱肋截面惯性矩对改善拱桥动力特性的作用很小。

(3) 拱肋弹性模量  $E$

单纯增加拱肋截面弹性模量(保持截面其他参数面积、惯性矩等不变),取弹性模量设计值为 1,有限元分析结果见图 10。由图 10 可见,频率随弹性模量变

化而变化的幅度均大与截面面积与惯性矩的影响,当弹性模量提高 6 倍,竖向基频增加约 30%,扭转基频增加约 40%。

从上述参数计算分析可以看出,拱肋的基本特性改变对桥梁动力特性的影响是非常有限的,拱肋设计应当以满足静力要求为主。

#### (4) 设计规范的比较

中外不同规范对钢管混凝土抗压刚度与抗弯刚度的取值是不同的,计算公式见表 5。从表 5 可以看出,就抗压刚度而言,以  $EA = E_s A_c + E_c A_c$  的值为 1,不同

规范的计算结果为,DL/T5085-1999 ESC28-90 AII-1997 BS-5400 JCI01-89 ACI318-89 = 1.02 1.0 1.0 1.0 0.86 0.57,以美国规范 ACI318-89 计算拱桥的自振频率最低,其他几种规范相差不大。就抗弯刚度而言,以  $EI = E_s I_s + E_c I_c$  的值为 1,不同规范的计算结果为,DL/T5085-1999 ESC28-90 AII-1997 BS-5400 JCI01-89 EC4 = 0.84 1.0 0.55 1.0 0.71 0.89,不同规范的计算结果有一定差距,其中以日本规范 AII-1997 计算的自振频率最低。

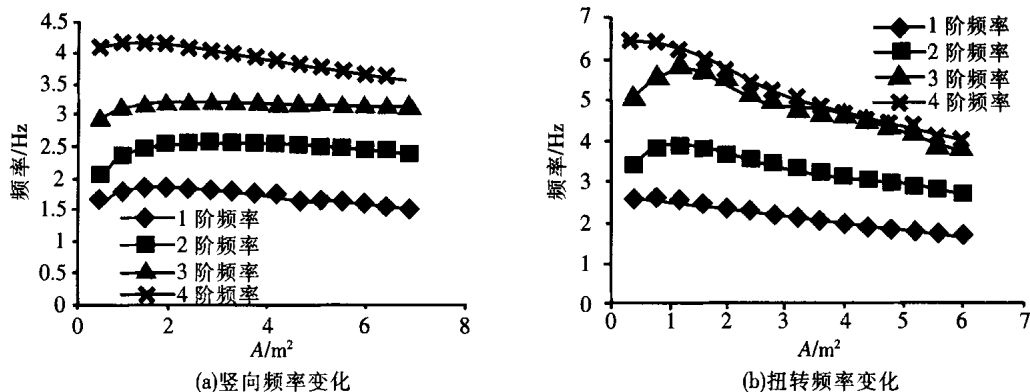


图 8 频率与拱肋抗弯刚度变化关系

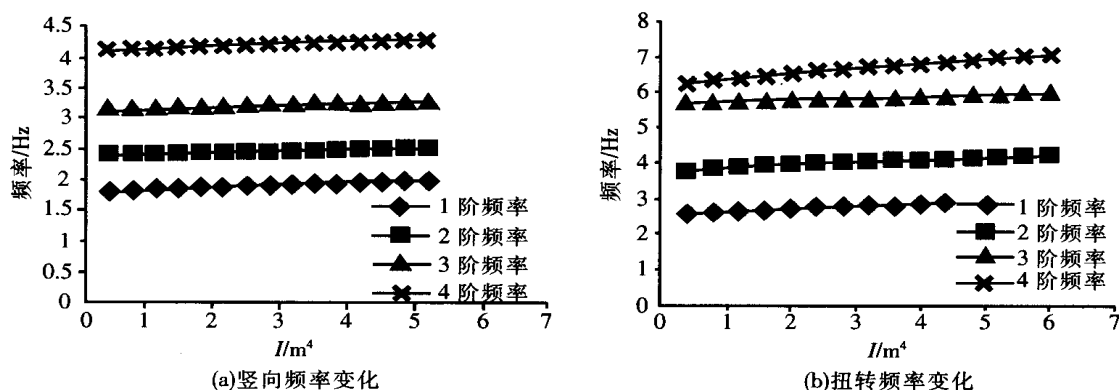


图 9 频率与拱肋截面惯性矩变化关系

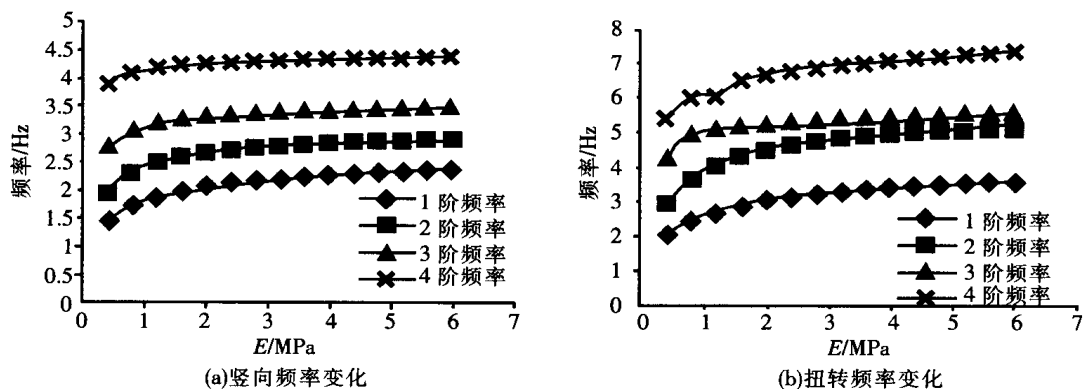


图 10 频率与拱肋弹性模量变化关系

表 5 不同抗压、抗弯刚度取值的计算结果

规范	CESC 28:90 <sup>[17]</sup>	AII-1997 <sup>[18]</sup>	BS-5400 <sup>[19]</sup>	JCJ01-89 <sup>[20]</sup>	DL/T 5085-1999 <sup>[21]</sup>	ACI 318-89 <sup>[22]</sup>	EC4 (1992,1997) <sup>[23]</sup>
抗压 公式	$E_s A_s + E_c A_c$	$E_s A_s + E_c A_c$	$E_s A_s + E_c A_c$	$E_{sc} = 0.85 [E_s + (1 - ) E_c]$	$E_{sc} = 45\,600$ MPa	$E_s A_s + 0.4 E_c A_c$	——
刚度 /N	$1.487 \times 10^{10}$	$1.487 \times 10^{10}$	$1.487 \times 10^{10}$	$1.285 \times 10^{10}$	$1.513 \times 10^{10}$	$0.842 \times 10^{10}$	——
抗弯 公式	$E_s I_s + E_c I_c$	$E_s A_s + 0.2 E_c I_c$	$E_s I_s + E_c I_c$	$E_{sc} = 0.85 [E_s + (1 - ) E_c]$	$E_{sc} = 45\,600$ MPa	——	$E_s A_s + 0.8 E_c I_c$
刚度 /N·m <sup>2</sup>	$4.778 \times 10^8$	$2.644 \times 10^8$	$4.778 \times 10^8$	$3.394 \times 10^8$	$3.996 \times 10^8$	——	$4.245 \times 10^8$

注：EA 为拱肋钢管混凝土的抗压刚度；EI 为拱肋钢管混凝土的抗弯刚度；E<sub>s</sub>、E<sub>c</sub> 分别为其中钢材和混凝土的弹性模量；I<sub>s</sub> 和 I<sub>c</sub> 分别为钢管截面和混凝土截面的惯性矩；A<sub>s</sub> 和 A<sub>c</sub> 分别为钢管截面和混凝土截面的面积。

4 结论

采用有限元动力分析和现场的环境振动实验,对新建的钢管混凝土拱桥进行了动力特性研究,主要结论有:

(1) 对桥梁进行环境脉动实验具有简便、可靠、不中断交通运营等特点,是桥梁动力特性检测的有效手段;

(2) 可采用频域或时域方法进行实桥参数识别,其中,频域的单模态识别法和基于平均正则化功率谱密度的峰值法具有处理简单、快速、实用等特点,可用于现场测试时初步判断实测数据的有效性,检验测试质量。而时域的随机子空间方法能够提供稳定图,有助于准确地确定系统频率和模态,避免了模态选择上的盲目性和随机性,因而识别结果要好于频域的方法。在动力测试与分析中,仅采用一种识别方法是不够的,需要几种方法综合运用,相互校核和补充。

(3) 拱桥的 1 阶竖向振型一般为标准的正弦波形,而横向振型为半波振型;本桥的面内基频要高于面外基频,表明本桥的横向刚度较大。

(4) 在影响拱桥动力特性的参数中,拱肋材料弹性模量的影响不可忽视,而拱肋截面面积与惯性矩的影响较小。总体而言,拱肋的基本特性改变对桥梁动力特性的影响是非常有限的,拱肋设计应当以满足静力要求为主。

(5) 采用不同设计规范计算的拱桥动力特性存在一定的差别,与实测结果相比,抗压刚度采用美国规范 ACI318-89 计算的拱桥自振频率最低,抗弯刚度采用日本规范 AII-1997 计算的拱桥自振频率最低。

(6) 对拱桥采用空间有限元分析是可行的,但计算结果必须经过实验的验证。利用实测结果进行有限

元模型参数标定和修正,能够有效地提高有限元模型的质量,这种模型参数修正有助于建立结构的基准有限元模型,而基准模型对于评估桥梁整体结构的安全承载能力和使用条件、结构长期监测和状态评估是非常重要的。

参考文献:

[1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,1999.

[2] 陈宝春,郑皆连. 钢管混凝土拱桥实例集(一)[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[3] 陈水盛,陈宝春. 钢管混凝土拱桥动力特性分析[J]. 公路, 2001,2(2):10—14.

[4] 孙潮,陈宝春,陈水盛. 钢管-钢管混凝土复合拱桥动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(2):48—52.

[5] Harris C M, Crede C E. Shock and Vibration Handbook (4<sup>th</sup> Edition) [M]. McGraw-Hill, 1996.

[6] Ewins D J. Modal testing: Theory and Practice [M]. Research Studies Press Ltd., 1995.

[7] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:交通大学出版社,2000.

[8] Juang J N. Applied System Identification [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc, 1994.

[9] Bendat J S, Piersol A G. Engineering applications of correlation and spectral analysis[M]. 2<sup>nd</sup> edition, New York: John Wiley & Sons, 1993.

[10] Andersen P, Brinker R, Kirkegaard P H. Theory of covariance equivalent ARMAV models of civil engineering structures[M]. Proceedings of IMAC14, 1996,518—524.

[11] Van Overschee P, De Moor B. Subspace identification for linear system theory, implementation and applications[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[12] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京:中国铁道出版社,1983.

[13] De Roeck G, Peeter B. MACEC2.0- Modal Analysis on Civil Engineering Constructions[ R]. Belgium: Department of Civil Engineering , Catholic University of Leuven , 1999.

[14] 任伟新. 环境振动系统识别方法的比较分析[J]. 福州大学学报(自然科学版) ,2001 ,29(6) :80 —86.

[15] Wei-xin Ren , Zhao T , Harik I E. Experimental and Analytical Modal Analysis of a Steel Arch Bridge [J]. To be published in Journal of Structural Engineering , ASCE , 2004 ,8 (1) .

[16] Morteza A M , Torkamani M , Lee H E. Dynamic behavior of steel deck tensionrtied arch bridge to seismic excitation [J]. ASCE , Journal of Bridge Engineering , 2002 ,7 (1) : 57 —67.

[17] 中国工程建设标准化协会标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程(CECS28 :90) [S]. 北京 :中国计划出版社 ,1990.

[18] Architectural Institute of Japan (AIJ) . Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Tubular Structures[ S]. Japan , 1997.

[19] England ,British Standards Institute ,BS5400. Part 5 ,Concrete and Composite Bridges[ S]. 1997.

[20] 国家建筑材料工业局标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程(JCJ01 —89) [S]. 上海 :同济大学出版社 ,1989.

[21] 中国电力行业标准. 钢管混凝土组合结构设计规程(DL/ T5085 —1999) [S]. 北京 :中国电力出版社 ,1999.

[22] American Concrete Institute. Building Code Requirement for Reinforced Concrete And Commentary —ACI318 —89 [ S]. 1989.

[23] European Committee for Standardization. Eurocode No. 4 , Design of Composite Steel and Concrete Structures [ S]. Part1. 1: General rules and rules for buildings , Revised draft : March , 1992 ; Part2 : Bridge , Third draft : January , 1997.

(责任编辑 张武美)

2002 年度《茅以升铁道工程师奖》获奖人员名单

中国铁道学会根据《关于设立茅以升铁道工程师奖》的规定 ,经茅以升铁道工程师奖评审委员会评审、茅以升科技教育基金委员会批准 ,决定对 27 名铁道行业工程技术人员在铁路设计、施工、运输、装备、基础设施运营管理等领域取得新的业绩的人员 ,授予 2002 年度《茅以升铁道工程师奖》。获奖人员及所在单位见附表。

附表 2002 年度《茅以升铁道工程师奖》获奖人员名单

所获奖项	获奖人	所在单位	获奖人	所在单位
铁道基础设施奖 (9 人)	刘嘉武	石家庄铁道学院国防交通研究所	文武松	中铁大桥局集团有限公司
	乔 健	铁道部经济规划研究院基础部	陆明强	中铁电气化勘测设计研究院
	朱健身	上海铁路建设集团有限公司	包黎明	铁道第一勘察设计院地路处
	肖广智	中铁(洛阳)隧道勘测设计院	盛黎明	铁道专业设计院技术处
	陈克坚	铁道第二勘察设计院桥隧处		
铁道装备奖 (8 人)	王维胜	南京浦镇车辆厂	王国建	郑州铁路局洛阳机务段
	吴昭平	永济电机厂	郭洪涛	安康铁路分局安康车辆段
	胡海平	株洲车辆厂	冯江华	株洲电力机车研究所
	杨林勇	襄樊金鹰轨道车辆有限责任公司	欧阳泉	中铁一局集团有限公司
铁道运输奖 (7 人)	彭乃昱	成都铁路局科研所	吴 毅	兰州铁路局电子计算技术中心
	王小敏	哈尔滨铁路局减速顶调速系统研究中心	张小勇	乌鲁木齐铁路局科研所
	李 方	铁道部信息技术中心	金德瑞	济南铁路局电子计算技术中心
	郑以锋	乌鲁木齐铁路局信息技术处		
铁道管理奖 (3 人)	潘浚源	广州铁路(集团)公司	张 通	济南铁路局工务处
	詹子宁	铁道部运输局		

(摘自中国铁道学会文件学秘[2003]14 号)