

文章编号: 1002-0268 (2005) 09-0087-03

# 大跨度中承式钢管混凝土拱桥的面内动力特性分析

周劲草<sup>1</sup>, 严志刚<sup>2</sup>, 盛洪飞<sup>3</sup>

(1. 广州市新光快速路有限公司, 广东 广州 510100; 2. 广州市建设投资发展有限公司, 广东 广州 510100;  
3. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 采用钢管混凝土组合性能指标和纤维单元法建立钢管混凝土空间梁单元, 用该单元模拟拱肋弦杆形成空间有限元模型。通过对大量不同跨度大跨度中承式钢管混凝土拱桥的模态分析, 得到其面内反对称和对称第一阶振型的振动频率, 一些桥梁的计算结果得到了试验数据的验证。根据这些计算结果统计得到反对称和对称基频的简化公式。

**关键词:** 纤维单元法; 大跨度; 钢管混凝土; 模态分析; 简化公式

**中图分类号:** U448.52

**文献标识码:** A

## Planar Dynamic Characteristics Analysis for Long-Span Semi-Supported CFST Arch Bridges

ZHOU Jin-cao<sup>1</sup>, YAN Zhi-gang<sup>2</sup>, SHENG Hong-fei<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Xin-Guang Highway Co.LTD., Guangdong Guangzhou 510100, China;  
2. Guangzhou Construction & Investment Development Co.LTD., Guangdong Guangzhou 510100, China;  
3. Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150090, China)

**Abstract:** CFST composite mechanics parameters and fiber element method were used to create 3D CFST finite element, with which the models of concrete filled steel tube arch bridges were built. Modal analysis was applied on a plenty of long-span semi-supported CFST bridges with different span to get their anti-symmetric and symmetric natural frequencies, and the computational results of some of these bridges agreed with dynamic testing results very well. Their empirical formulas of anti-symmetric and symmetric natural frequencies were obtained from these computed results.

**Key words:** Fiber Element Method; Long-span; CFST; Modal analysis; Empirical formulas

钢管混凝土结构在桥梁上的应用, 同时解决了拱桥高强度材料应用和施工技术两大难题, 因此, 钢管混凝土拱桥在我国得到迅速发展。但由于钢管混凝土拱桥跨度大, 质量轻, 特别是一些悬浮体系, 其本身刚度小, 同时钢管混凝土组合材料动力性能较为复杂, 目前在设计中很少考虑其动力特性, 从而给此类拱桥的运营带来安全隐患。模态分析是进行动力响应分析的基础, 钢管混凝土拱桥模态分析通常采用平面

或空间杆系有限元法, 求解结构的自振频率和振型。目前很多研究者只是孤立的对一个或者多个大跨度中承式钢管混凝土拱桥进行模态分析<sup>[1]</sup>, 其结论不足以反映此类桥梁的动力特性。本文采用空间有限元法, 通过对大量不同跨度桥梁的模态分析, 得到其面内反对称和对称第一阶振型的频率, 根据这些计算结果, 统计出相应的经验公式, 可用来初步评价大跨度中承式钢管混凝土拱桥的动力特性, 为工程应用提供参

收稿日期: 2004-05-14

作者简介: 周劲草 (1970-), 男, 安徽安庆人, 工程师, 主要从事公路桥梁工程的施工和管理。

考。

### 1 钢管混凝土材料组合性能指标

钢管混凝土拱桥的动力特性主要依赖于拱肋，而拱肋的材料为钢管混凝土，因此确定钢管混凝土材料的基本工作性能是至关重要的。模态分析是特征值求解问题，不必考虑材料非线性和几何非线性，同时，已有的分析和试验表明，拱圈弦杆在成桥自重作用下一般处于全截面受压状态，可以忽略钢管混凝土截面受拉混凝土开裂引起的构件刚度降低，因此计算只需要钢管混凝土材料组合抗压弹性模量  $E_x$  和组合抗弯弹性模量  $E_x^M$ ，其确定如下<sup>[2]</sup>

$$E_x = f_x^p / \epsilon_x^p \quad (1)$$

$$E_x^M = \frac{E_s I_s + E_c I_c}{E_s A_s + E_c A_c} \cdot \frac{A_{xc}}{I_{xc}} \cdot E_x \quad (2)$$

式中， $E_s$ 、 $E_c$  分别为钢材和混凝土的弹性模量； $I_s$ 、 $I_c$  分别为组合截面钢材部分和混凝土部分的惯性矩； $A_s$ 、 $A_c$  分别为组合截面钢材部分和混凝土部分的面积； $A_{xc}$ 、 $I_{xc}$  分别为组合截面的面积和惯性矩。

## 2 大跨度中承式钢管混凝土拱桥空间有限元模型

### 2.1 钢管混凝土空间梁单元

普通梁单元把截面当成一个点，忽略截面上各点



图1 大跨度中承式钢管混凝土拱桥空间有限元模型

### 3 大跨度中承式钢管混凝土拱桥模态分析

忽略阻尼的影响，得到拱桥的自由振动方程为

$$(-\omega_i^2 [M] + [K]) \{\varphi\}_i = \{0\} \quad (4)$$

式中， $\omega_i$  为第  $i$  阶自振频率（特征值）； $\{\varphi\}_i$  为第  $i$  阶自振振型向量； $[M]$ 、 $[K]$  分别为结构的整体质量矩阵和整体刚度矩阵。

采用 Block Lanczos 法就可得到拱桥的振型与振频。拱桥面内振动主要表现为前几阶振型，分析得到大跨度中承式钢管混凝土拱桥的面内振动第1阶反对称振型和对称振型，如图2所示。一般反对称基频比对称基频要小，这与单个拱构件的振型一致，说明此类桥梁的动力特性主要依赖拱肋。

为研究大跨度中承式钢管混凝土拱桥面内动力特

的应力应变的发展。为了方便在非线形分析中研究构件截面上各点应力与应变的发展以及两者的关系，本文采用纤维单元法来建立钢管混凝土空间梁单元，首先形成构件的截面刚度矩阵，然后通过形函数积分得到其单元刚度矩阵<sup>[3]</sup>。对于3节点的直线梁单元，每个节点具有6个自由度，每个单元有18个自由度，根据能量平衡原理可以得到空间梁单元的单元刚度矩阵为

$$[K^e] = [B]^T [D] [B] \quad (3)$$

式中， $[B] = \frac{d[N]}{dx}$ ； $[N]$  为形函数向量； $[D]$  为截面的刚度矩阵<sup>[3]</sup>。

单元的质量矩阵与阻尼矩阵可按普通梁单元的公式得到。

### 2.2 大跨度中承式钢管混凝土拱桥空间有限元模型

大跨度中承式钢管混凝土拱桥的主要组成构件有：拱圈、吊杆、拱上立柱、吊杆（立柱）横梁、拱肋间横撑以及桥面系。拱圈弦杆可用上节介绍的钢管混凝土空间梁单元模拟，采用只能受拉不能受压的两节点杆单元来模拟吊杆，采用两节点的普通空间梁单元来模拟拱上立柱、横梁、拱肋间横撑和弦杆间的腹杆，用4个节点的壳单元来模拟桥面系<sup>[4]</sup>。得到几个典型的大跨度中承式钢管混凝土拱桥的空间有限元模型如图1。



图2 大跨度钢管混凝土拱桥面内振动振型

性（特别是第1阶和第2阶振型）的共性，对大量此类桥梁进行模态分析，得到其反对称基频和对称基频，见表1。

其中依兰牡丹江大桥的对称基频的计算值为1.693Hz，动力试验值为1.725Hz<sup>[5]</sup>；丫髻沙大桥反对称基频和对称基频的计算值分别为0.430Hz和0.661Hz，动力试验值分别为0.430Hz和0.664Hz<sup>[6]</sup>，计算值和试验值非常接近。说明本文计算理论、方法和计算程序是正确的。

表1 大跨度中承式钢管混凝土拱桥面内振动频率值

桥名	计算跨径/m	反对称基频/Hz			对称基频/Hz		
		有限元	简化计算	试验值	有限元	简化计算	试验值
依兰牡丹江大桥	100	1.693	1.500	1.725	2.514	2.440	-
文惠桥	108	1.206	1.389	-	2.012	2.222	-
潮白河大桥	108	1.004	1.389	-	1.814	2.222	-
莲沱大桥	114	1.217	1.316	-	2.366	2.105	-
新安江大桥	120	1.033	1.250	-	1.830	2.000	-
江湾大桥	120	0.933	1.250	-	1.825	2.000	-
石潭溪大桥	136	1.254	1.103	-	1.789	1.765	-
浑河长青大桥	140	1.251	1.071	-	1.749	1.714	-
三山西大桥	200	0.602	0.750	-	1.083	1.200	-
龙潭河大桥	208	0.799	0.721	-	1.171	1.154	-
象山铜瓦门大桥	238	0.737	0.630	-	1.163	1.008	-
健跳大桥	245	0.725	0.612	-	1.115	0.979	-
青干河大桥	256	0.500	0.586	-	0.863	0.978	-
三岸崑江大桥	270	0.518	0.556	-	0.951	0.889	-
丫髻沙大桥	344	0.440	0.436	0.430	0.661	0.698	0.664

对一般工程技术人员而言, 采用有限元法计算振动频率比较困难, 因此有必要提出一个简化计算公式, 以便对大跨度中承式钢管混凝土拱桥的动力特性做快速评价。根据表1中有限元计算结果, 提出如下简化计算公式:

$$f_a = \frac{150}{L} \quad (5)$$

$$f_s = \frac{240}{L} \quad (6)$$

图3为反对称和对称基频简化统计公式计算结果与有限元计算结果比较图, 可见虽然数值上存在一定差别(误差基本在±20%以内), 数据上的差别主要是由拱圈截面型式差异所造成的; 但变化趋势比较一致, 振动频率值随着跨度的增加而降低。因此, 可以用来快速评价大跨度中承式钢管混凝土拱桥的动力特性。

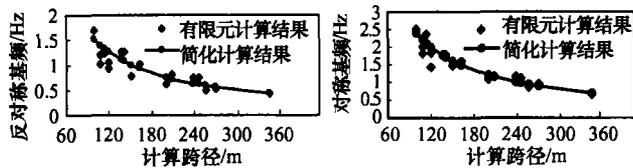


图3 振动基频与跨径的关系

#### 4 结语

(1) 采用空间有限元法, 选择正确的单元来模拟大跨度中承式钢管混凝土拱桥的各个组成构件, 建立拱桥结构空间有限元模型, 进行模态分析, 计算结果与动力试验结果吻合较好, 验证了计算理论的正确性。

(2) 为了便于工程设计应用, 根据大量计算统计出大跨度中承式钢管混凝土拱桥面内振动反对称和对称基频的简化计算公式, 可供工程应用。

(3) 用钢管混凝土梁单元可以通过纤维单元法首先形成其截面刚度矩阵, 再建立其单元刚度矩阵, 并采用合适单元来模拟大跨度中承式钢管混凝土拱桥其它主要构件, 模态分析计算结果与动力试验结果符合较好。

(4) 计算得到我国部分大跨度中承式钢管混凝土拱桥反对称基频在0.440~1.693Hz之间, 对称基频在0.661~2.514Hz之间。人体对振动感觉比较敏感的频率范围是2~6Hz, 上述桥梁的反对称基频不在此范围, 说明此类桥梁具有合理的动力特性。

(5) 大跨度中承式钢管混凝土拱桥的面内第1阶反对称振型和第2阶对称振型的频率值随着跨度的增加而减小, 二者可简化为反比例关系。

#### 参考文献:

- [1] 李延强, 安蕊梅, 张红妹. 钢管混凝土拱桥动力特性分析[J]. 石家庄铁道学院学报. 2001, 14 (2): 39-42.
- [2] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999.
- [3] 严志刚, 王德军, 盛洪飞. 钢管混凝土三维非线性梁单元的研究与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35 (3): 334-337.
- [4] 严志刚. 大跨度中承式钢管混凝土拱桥在车辆荷载下的动力分析[D]. 哈尔滨工业大学博士论文, 2003.
- [5] 严志刚, 陈彦江, 盛洪飞. 钢管混凝土拱桥在车辆荷载作用下的非线性动力响应分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16 (1): 58-61.
- [6] 李万恒, 张劲泉, 何玉珊. 丫髻沙大桥主桥荷载试验与评价[J]. 铁道标准设计, 2001, 21 (6): 40-42.