

文章编号: 0451-0712(2005)11-0036-04

中图分类号: U448.216

文献标识码: A

# 斜拉拱桥动力特性分析

赵跃宇, 杨相展, 康厚军

(湖南大学土木工程学院 长沙市 410082)

**摘 要:** 斜拉拱桥是一种新型组合桥梁, 以湘潭市湘江四大桥为例, 利用 ANSYS 软件建立了斜拉拱桥的三维空间有限元模型, 对其振动频率及振型进行了分析, 并讨论了主要结构参数对振动频率的影响, 为斜拉拱桥的设计提供参考。

**关键词:** 斜拉拱桥; 动力特性; 有限元法

斜拉拱桥是近年来出现的一种新型组合桥梁, 它是对新型桥梁的一种尝试, 2000 年, 马来西亚建成了跨径为 300 m 的世界上第一座斜拉拱桥。对斜拉拱桥的理论研究目前还处在起步阶段, 赵跃宇等在文献[1]中分析了斜拉拱桥的静力性能和经济性能, 指出可以通过调整斜拉索索力和角度, 改善主拱的受力性能, 增加斜拉拱桥的跨越能力, 降低斜拉拱桥的造价; 另外斜拉索的存在增强了拱结构的刚度, 有利于结构稳定。对斜拉拱桥的动力特性还未见有文献研究, 本文以正在修建的湘潭市湘江四大桥为例, 分析了斜拉拱桥的动力特性。

桥梁结构的动力学特性包括自振频率及主要振型等, 它是桥梁计算的重要课题之一。桥梁结构的动力特性反映了桥梁的刚度指标, 它取决于结构的组成体系、刚度、质量分布、边界条件等, 它对正确地进行桥梁的抗震设计及维护, 有着重要的意义。

## 1 湘江四大桥概况

湘潭市湘江四大桥主桥为 120 m + 400 m + 120 m 斜拉飞燕式系杆钢管混凝土拱桥, 结构以拱结构受力为主, 辅以斜拉索受力。主桥桥型布置如图 1 所示。主拱采用中承式双肋无铰平行拱, 拱肋中心距为 34 m, 计算跨径为 388 m, 拱轴线为 7 次抛物线。拱肋矢跨比为 1/5.19, 拱肋轴线理论矢高为 74.7 m。主拱拱肋采用双肋 6 管桁架截面。钢管壁厚在上、下弦管上沿高度变化, 上弦钢管壁厚分别为 28 mm、24 mm、22 mm; 下弦钢管壁厚分别为

28 mm、24 mm、20 mm。上弦钢管均灌注 C50 无收缩混凝土, 下弦钢管距拱脚中心水平距离 0~116 m 范围内灌注 C50 无收缩混凝土, 其余为空钢管。拱肋高度由拱脚的中心桁高 5.0 m 沿纵向水平直线变化到拱顶中心桁高 9.0 m, 外形呈月牙形。边拱拱肋为上承式, 双肋横向内倾, 计算跨径为 62 m, 西岸矢高为 18.036 m, 东岸矢高为 19.644 m, 拱轴线采用 1.45 次抛物线。主拱共设 1 道“米”字形横撑、8 道“K”字形横撑和 2 道肋间横梁“一”字形横撑。主跨桥面系采用悬吊体系, 桥面结构由钢横梁、钢纵梁、Π 形桥面板组成。桥塔采用直线和圆曲线组成的花瓶形混凝土索塔, 斜拉索的布置采用空间扇形。边跨主梁采用双边主梁截面形式, 边主梁采用箱形截面, 2 片主梁之间用桥面板和横梁连接。边跨主梁与主跨桥面系之间铰接。

## 2 理论计算

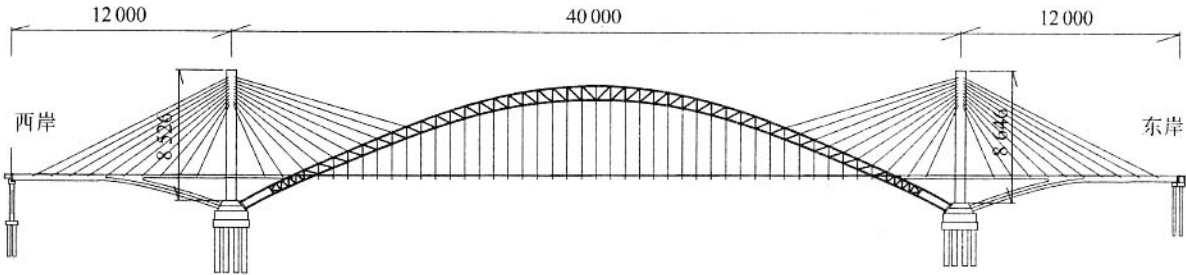
### 2.1 模态分析理论

典型的无阻尼模态分析求解的基本方程是经典的广义特征值问题:

$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\phi_i\} \quad (1)$$

式中:  $[M]$ 、 $[K]$  分别为结构的总质量矩阵、总刚度矩阵;  $\{\phi_i\}$  为第  $i$  阶模态的振型向量;  $\omega_i$  为第  $i$  阶模态的固有频率。

有许多数值方法可以求解式(1)的特征值, 如子空间迭代法、分块 Lanczos 法、缩减法等。从结构分析的角度说, 并不要求出所有的固有频率和振型,



单位:cm

图 1 主桥桥型布置

只要求出较低的特征对就可以了,这样将能大大节省存储振型用的空间,同时大大节省计算时间。所以本文采用子空间迭代法来求解方程(1)的特征值。由 Bathe 提出的子空间迭代法,实质上是由下述 3 步组成的<sup>[3]</sup>:

- (1)确定  $q$  个初始迭代向量,且使  $q > p$ , 其中  $p$  是要计算的特征值和特征向量的个数;
- (2)对  $q$  个向量同时施行反迭代,并用 Ritz 分析从  $q$  个迭代向量中选出“最好”特征值和特征向量的近似值;
- (3)在迭代收敛以后,利用 Sturm 系列检验来证实所要求的特征值和相应特征向量已算出。

2.2 计算模型

采用大型通用有限元计算软件 ANSYS<sup>[2]</sup>建立全桥有限元模型。主拱为钢管混凝土结构,为满足同一位置处混凝土与钢管的变形协调条件,在模型中将 6 根弦管与管内混凝土在同一位置设置成不同的空间梁单元。腹杆、联结系、横撑、桩基础、梁、桥塔及横梁均采用 BEAM44 单元模拟,边梁采用双主梁模式,中跨按桥面板肋的布置用格子梁模拟。腹板与缀板用 SHELL63 单元模拟,斜拉索、系杆、预应力筋、吊杆采用 LINK8 单元模拟。索梁、索塔连接刚臂和支座用实常数不同的 BEAM4 单元模拟。土体弹簧单元按  $m$  法计算其刚度,作为桩周及桩底的支承。空间计算模型如图 2 所示。

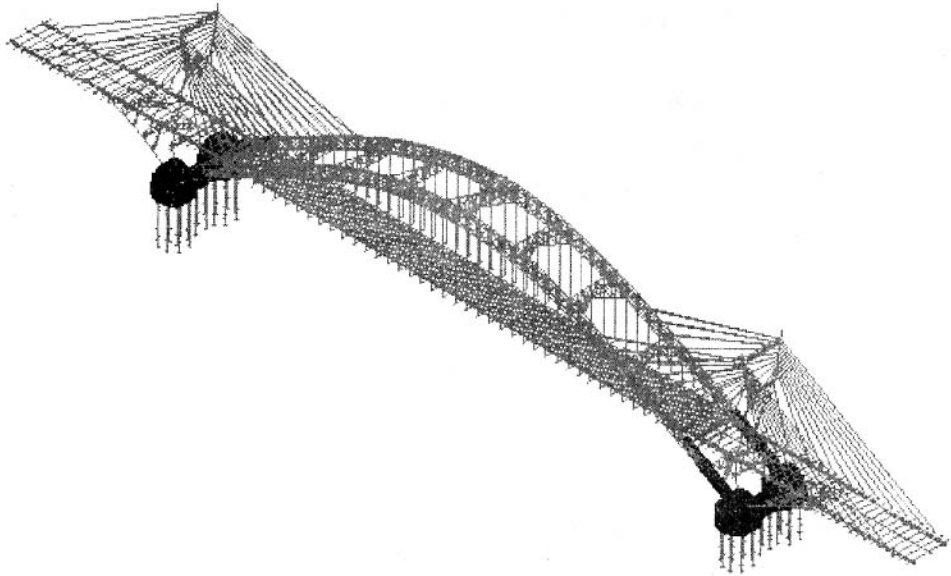


图 2 全桥有限元模型

3 计算结果和动力参数分析

3.1 自振特性分析

成桥状态下,湘江四大桥的自振特性见表 1。  
从表 1 可见:(1)本桥的基本频率为 0.21 Hz,模

态为主拱肋对称侧弯;(2)斜拉钢管混凝土拱桥因为是以拱受力为主的结构体系,所以振型与钢管混凝土拱桥相似,但又有其自身的特点;(3)由于斜拉索的存在,本桥的面内刚度比同类型的钢管混凝土

表 1 湘江四大桥前 10 阶成桥状态动力特性

模态序号	频率/Hz	振型描述
1	0.21	主拱一阶对称侧弯
2	0.231	桥面系纵漂
3	0.303	主拱与桥面系异步对称侧弯
4	0.423	主拱反对称侧弯
5	0.459	主拱桥面系一阶反对称竖弯
6	0.636	主拱桥面系对称竖弯
7	0.643	主拱二阶对称侧弯
8	0.772	主拱与桥面系异步反对称扭转
9	0.774	主拱桥面系二阶反对称竖弯
10	0.808	主拱桥塔对称侧弯(主),桥面系对称扭转

拱桥的面内刚度要大,所以面内基频出现的较晚,第 5 阶才出现,一般同类型钢管混凝土拱桥的面内基频出现在第 2 或第 3 阶(如茅草街大桥第 3 阶为面内基频<sup>[4]</sup>,丫髻沙大桥第 2 阶为面内基频<sup>[5]</sup>),并且面内基频与面外基频的比为 0.459/0.21,均大于同类型钢管混凝土拱桥的面内基频与面外基频的比(如茅草街大桥频率比为 0.446/0.24,丫髻沙大桥频率比为 0.44/0.33),所以本桥的横向稳定问题突出;(4)由于本桥主跨桥面系为飘浮体系,所以第二阶振型出现了桥面系纵飘;(5)由于本桥采用了柔性吊杆,所以桥面系与拱肋在面外表现为二者振动不同步,而在面内由于拱肋与桥面系的重力方向一致,所以二者振动基本同步。

3.2 拱肋钢管混凝土长度的影响分析

湘江四大桥主拱肋下弦离西岸拱脚中心线116~272 m 范围内为空钢管,本文分析比较了下弦全灌注

C50 混凝土对自振频率的影响,计算结果见表 2。

表 2 钢管混凝土长度对自振特性的影响 Hz

项目	面外自振频率		面内自振频率	
	一阶	二阶	一阶	二阶
原桥	0.21	0.303	0.459	0.636
下弦全灌注	0.186	0.302	0.471	0.65

从表 2 可见,下弦全灌注混凝土后,降低了斜拉拱桥的面外自振频率,其中对一阶面外频率的影响最大,由原桥的 0.21 Hz 变为 0.186 Hz,但对高阶的面外频率影响较小。面内自振频率却有所提高,一阶频率由原桥的 0.459 Hz 变为 0.471 Hz。下弦全灌注混凝土增加了拱肋的刚度,所以提高了面内的自振频率,但在增加刚度的同时也提高了拱肋的重心,所以面外的自振频率反而降低了。原桥面内基频与面外基频之比为 0.459/0.21=2.186,下弦全灌注混凝土之后面内基频与面外基频之比为 0.471/0.186=2.532,从该数据可知,钢管里混凝土灌注长度对斜拉拱桥的动力性能有一定的影响,拱脚段混凝土长度越长,对斜拉拱桥面外稳定性越不利。所以,如果拱肋能满足面内承载力的强度要求,不必过分增加拱脚段钢管混凝土长度。

3.3 风撑的影响分析

风撑的布置直接影响着拱肋的横向刚度,所以不同位置的横撑对斜拉拱桥的横向基频有着不同程度的影响。本桥横撑布置如图 3 所示,图中只给出了主拱肋半跨的横撑布置,另半跨对称布置。



图 3 湘江四大桥横撑布置

为了分析横撑对自振特性的影响,分别计算了 5 种情况,计算结果见表 3。

表 3 湘江四大桥横撑变化对自振频率的影响 Hz

项 目	面外一阶自振频率	面内一阶自振频率
原设计	0.21	0.459
去掉拱顶“米”字撑	0.21	0.459
去掉拱脚 2 根 K 撑	0.21	0.459
去掉 3/8 跨 2 根 K 撑	0.195	0.46
去掉 1/4 跨 2 根 K 撑	0.172	0.46
去掉 1/8 跨 2 根 K 撑	0.165	0.46

由表 3 可见,拱顶和拱脚的横撑对四桥的横向基频基本没有影响,而中间横撑对四桥的横向基频却有很大影响,而且越往拱脚影响越大。分析原因,可能是由于本桥在拱肋中间段拉有斜拉索,使中间段拱肋刚度增大,拱顶段相对于中间段就显得比较柔,并且拱顶下弦一段是空钢管,拱肋的重心比较低,所以拱顶横撑对自振特性没有多大影响,而中间段的横撑对自振频率却有很大影响。

3.4 设计规范的比较

我国现有的 3 本规范,对钢管混凝土的抗压刚

度和抗弯刚度的取值是不同的,《CECS28:29》给出的钢管混凝土构件的刚度计算公式为: $EA=E_cA_c+E_sA_s$ , $EI=E_cI_c+E_sI_s$ ;《JCJ01-89》不区分受压和受弯弹性模量,两者都采用统一的弹性模量 $E_{sc}=0.85[(1-\rho)E_c+\rho E_s]$ ;《DL5099-97》分别给出了受压和受弯变形弹性模量: $E_{sc}^N=f_{sc}^p/\varepsilon_{sc}^p$ , $E_{sc}^M=k/E_{sc}^N$ ,由于公式很繁琐,所以《DL5099-97》列表给出了不同钢号、不同等级混凝土和不同含钢率的数值<sup>[7]</sup>。本文分别采用 3 种规范的抗压刚度值,计算了斜拉拱桥的频率,计算结果见表 4。

表 4 湘江四大桥采用不同规范计算的自振频率 Hz		
项 目	面外一阶自振频率	面内一阶自振频率
《CECS28:29》	0.21	0.459
《JCJ01-89》	0.194	0.451
《DL5099-97》	0.206	0.462

从表 4 可见,采用《JCJ01-89》计算的自振频率最低,采用《CECS28:29》和《DL5099-97》计算的频率比较相近。

#### 4 结语

斜拉拱桥是一种新型的组合桥式,结构体系复杂,动力学特性有其自身的特点,斜拉索的存在对主

拱面内刚度的贡献比面外要大,所以斜拉拱桥的面内基频与面外基频的比,比同类型的钢管混凝土的面内基频与面外基频的比要大,因此斜拉拱桥的横向稳定性比较突出。由于斜拉索承担了部分荷载,改善了主拱的受力性能,可以考虑将拱顶段作成空钢管,这样有利于斜拉拱桥的横向稳定。斜拉拱桥拱脚和拱顶段的横撑对自振频率没有多大影响,而中间段横撑却对自振频率有很大影响,因此可以通过优化横撑的布置,来提高斜拉拱桥的横向稳定。

#### 参考文献:

[1] 赵跃宇,吕建根,易壮鹏. 斜拉拱桥的力学性能及经济性能的研究[J]. 世界桥梁,2005,(1).

[2] Ansys 动力学分析指南[Z].

[3] K J 巴斯. 工程分析中的有限元法[M]. 北京:机械工业出版社,1991.

[4] 韩艳,陈政清. 茅草街大桥动力特性有限元模拟与分析[J]. 公路,2003,(3).

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

[6] 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,(2).

[7] 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.

## Analysis of Dynamic Characteristics for Cable-Stayed Arch Bridge

ZHAO Yue-yu, YANG Xiang-zhan, KANG Hou-jun

(Department of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The cable-stayed arch bridge is a new type of composite bridge. In this paper, the 3-D finite element models (FEM) are erected based on the Fourth Bridge over Xiangjiang River in Xiangtan City for analysising dynamic characteristics of cable-stayed bridges including self-vibration frequency and mode of vibration. The effects of major structure parameters on dynamic characteristics are also discussed. Some suggestions about design of the structure are presented.

**Key words:** cable-stayed arch bridge; dynamic characteristics; finite element method