

# 奉化江大桥结构稳定性有限元分析

王美<sup>1</sup>, 丁勇<sup>1\*</sup>, 葛炜祎<sup>2</sup>, 姚志坤<sup>3</sup>

(1. 宁波大学 校园规划与建设处, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江精工钢结构有限公司, 浙江 绍兴 312030;  
3. 宁波市交通设计研究院, 浙江 宁波 315200)

**摘要:** 鉴于奉化江大桥复杂的空间结构形式, 应用通用有限元程序 Marc 和杆系单元建立有限元模型, 分析其在各种荷载条件下的强度、刚度和稳定性, 确定各结构单元的材料性质、截面几何性质、边界条件等因素, 然后计算其在各荷载工况下的位移和失稳形态. 结果表明: 该桥的刚度和稳定性满足安全要求.

**关键词:** 有限元分析; 钢管混凝土; 稳定性; 拱桥

中图分类号: TU997

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2011) 01-0091-04

宁波市奉化江大桥为主跨 132 m、边跨 47 m 的下承式钢管混凝土拱桥, 受力体系属于梁拱组合结构(图 1). 主桥全长为 226 m, 桥宽 42.1 m, 桥面宽 36 m. 加劲梁采用三跨连续组合梁结构体系, 中跨在中间 96 m 范围内为钢—混凝土叠合箱梁结构, 两侧 18 m 范围为变截面预应力混凝土箱梁. 拱的水平推力由系杆和加劲梁共同承担<sup>[1]</sup>.

与一般钢管混凝土拱桥相比, 奉化江大桥最大的特点为 3 根圆形截面钢管混凝土结构组成桁架异型拱肋结构, 包括 1 根主拱肋和 2 根副拱肋. 3 根拱肋之间形成倒三角截面, 拱肋之间通过横撑、斜

撑组合成桁架拱圈. 钢管内填充 C50 混凝土, 拱脚部位通过混凝土拱座将拱肋荷载传递到加劲梁、桥墩和基础. 3 根拱肋的线形为抛物线, 主拱肋的直径为 1.8 m, 矢跨比为 1/5.5, 位于竖向平面, 副拱肋的直径为 1.5 m.

由于钢管混凝土拱桥具有承载力高、塑性和韧性好、施工方便和经济效果好等优点<sup>[2]</sup>, 是发展前景广阔的一种桥梁结构. 但作为压弯结构, 随着跨径的增大, 其稳定性问题越来越突出<sup>[3]</sup>. 笔者以奉化江大桥为研究对象, 利用有限元方法和 Marc 软件首先模拟了该桥在 3 种典型危险活载工况下的

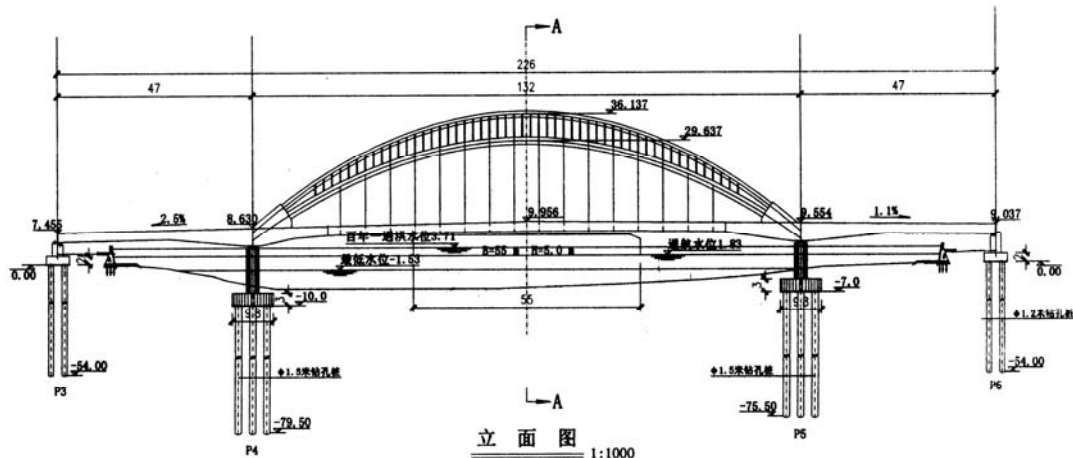


图 1 奉化江桥立面图

收稿日期: 2010-04-14.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(50778160); 宁波市自然科学基金(2009A610157); 宁波市交通局科技项目(200912).

第一作者: 王美(1983-), 女, 浙江龙泉人, 助理工程师, 主要研究方向: 土木工程及造价. E-mail: wangmei@nbu.edu.cn

\*通讯作者: 丁勇(1975-), 男, 浙江余姚人, 博士/副教授, 主要研究方向: 计算结构力学. E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

变形, 然后对该桥在这 3 种活载和恒载联合作用下的稳定性进行了分析。

## 1 有限元分析基本原理

### 1.1 线弹性有限元法的基本步骤<sup>[4]</sup>

线弹性有限元分析主要包括以下步骤: (1)定义形函数  $N(x)$ , 进而通过单元节点变量  $a$  描述单元域内连续的变量  $u(x)$ ,  $u(x) = N(x)a^e$ ; (2)利用节点变量描述单元响应, 如应变  $\varepsilon(x) = L[u(x)] = Ba^e$ , 应力  $\sigma = \sigma(\varepsilon) = D\varepsilon(x)$ ; (3)形成单元刚度矩阵, 建立单元与外力的平衡关系:  $K^e a^e + f^e = 0$ ; (4)单元集成, 将覆盖结构全域所有单元的刚度矩阵和节点外力对平衡的贡献集成, 建立整体结构的平衡方程:  $Ka + f = 0$ ; (5)求解平衡方程, 得到节点位移; (6)回代求得单元应变、应力等量。

### 1.2 特征值稳定性方法的基本公式

考虑初应力对于刚度矩阵的影响后, 结构的平衡方程为<sup>[5]</sup>:

$$\{[K_0] + [K_\sigma]\} \{d\} = \{F\}, \quad (1)$$

其中,  $[K_0]$  为结构的整体线性刚度矩阵;  $[K_\sigma]$  为结构的初应力刚度矩阵。由(1)式可以推导得到线性稳定性问题的特征方程为:

$$[K_0] + \lambda[K_\sigma] = 0. \quad (2)$$

从(2)式求得的  $\lambda$  即为结构的稳定系数, 稳定系数可以有多个, 对应的特征向量即为结构的失稳模态, 对应的屈曲荷载可由下式给出:

$$\{F_\lambda\} = \lambda\{F\}. \quad (3)$$

## 2 有限元模型建立基本步骤

利用 Marc 软件剪力有限元模型, 分如下几步:

(1)生成网格: 桥模型采用杆系模型, 由 320 个节点, 479 个两节点梁、索单元组成, 如图 2 所示; (2)定义边界条件; (3)定义材料特性; (4)定义几何特性; (5)定义荷载工况。对本桥梁模型的荷载工况定义大致分别为满跨正载的静力分析、半跨正载的静力

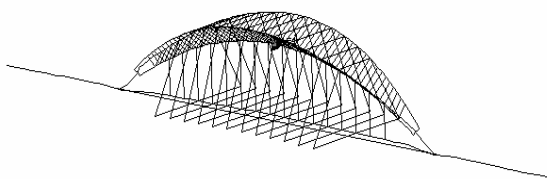


图 2 奉化江桥整体有限元模型

分析、满跨偏载的静力分析、满跨正载的屈曲分析、半跨正载的屈曲分析、满跨偏载的屈曲分析。

## 3 活载作用下奉化江大桥的受力分析

### 3.1 满跨正载下的位移

此种活载工况下, 主跨作用有  $33 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$  的均布荷载, 跨中作用有  $990 \text{ kN}$  的集中荷载荷载分布。满跨正载下的大桥的变形图如图 3 所示。考察垂直方向( $Y$  方向)的位移, 满跨正载作用后最大位移为  $0.0112 \text{ m}$ , 发生在跨中。

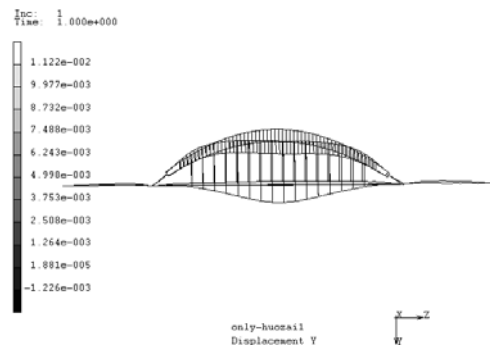


图 3 满跨正载下的变形(放大 1000 倍)

### 3.2 半跨正载下的位移

此种活载工况下, 主跨半跨作用的均布荷载和跨中作用的集中荷载与满跨正载相同。半跨正载下大桥的变形图如图 4 所示。考察垂直方向( $Y$  方向)的位移, 满跨正载作用后最大位移为  $0.0092 \text{ m}$ , 发生在  $1/3$  主跨附近。

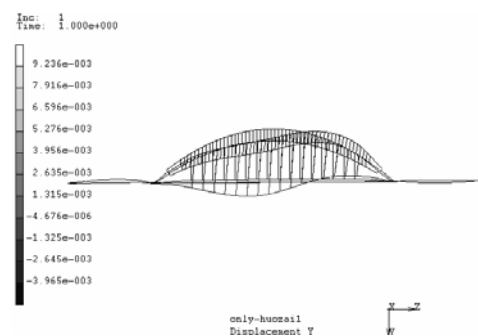
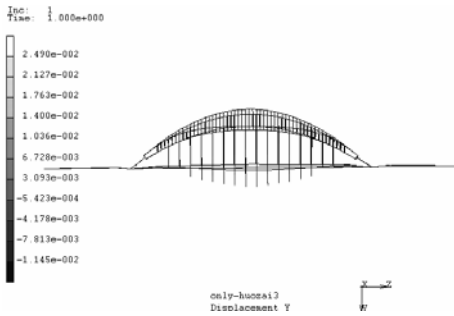


图 4 半跨正载下的变形(放大 1000 倍)

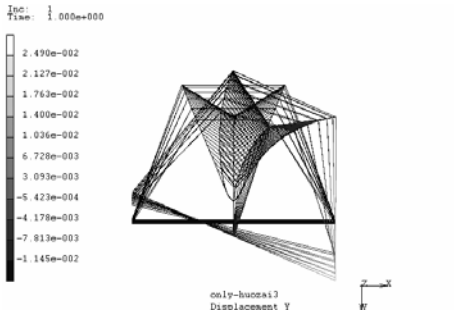
### 3.3 满跨偏载下的位移

此种活载工况下, 偏心荷载将对桥梁中轴线产生扭矩, 当模型中竖向荷载的作用位置仍在桥梁中心线上时, 需在中心线上加上 1 个扭矩。按偏心距  $10 \text{ m}$  计算, 主跨作用有  $20 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$  的竖向均布荷载, 相应单位长度均布扭矩为  $200 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ , 跨中作用有  $600 \text{ kN}$  的集中荷载相应的集中扭矩为  $6000$

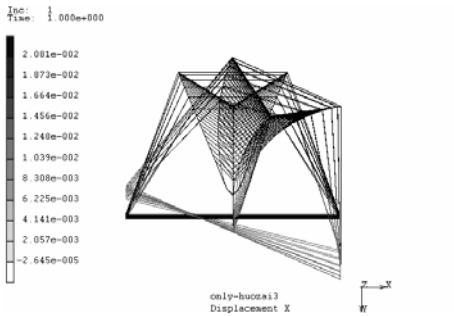
kN·m. 满跨偏载下大桥的变形图如图 5 所示. 由图可见大桥有扭转变形, 桥面横向倾斜. 主跨跨中倾斜最大, 最右端下沉 0.025 m, 最左端上翘 0.011 m, 因此跨中桥面的高度差约为 0.036 m. 横桥向最大水平位移为 0.021 m, 发生在副拱肋最高点.



(a) 满跨偏载下的 Y 向位移正视图(放大 500 倍)



(b) 满跨偏载下的 Y 向位移左视图(放大 500 倍)



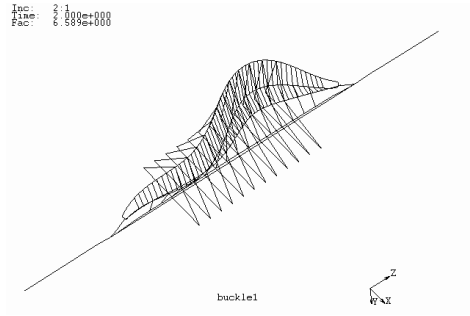
(c) 满跨偏载下 X 向位移左视图(放大 500 倍)

图 5 满跨偏载下的变形情况

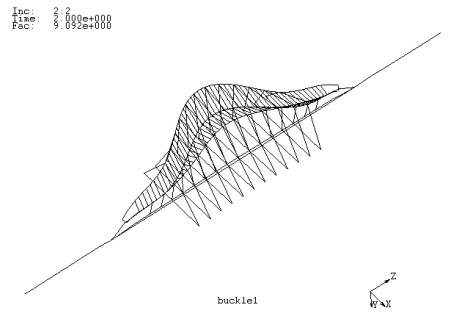
## 4 奉化江大桥的稳定性分析

### 4.1 满跨正载下的稳定系数

满跨正载下, 拱肋将产生最大的压力. Marc 有限元程序分析所得的第一、第二阶失稳形态如图 6 所示, 限于篇幅, 其他几阶失稳形态不再图示. 每阶的稳定系数可由相应失稳形态图左上角的参数 Fac 读出, 如满跨正载下第一阶失稳系数为 6.589. 具体满跨正载下第一阶至第五阶的相应稳定系数见表 1.



(a) 第一阶失稳形态



(b) 第二阶失稳形态

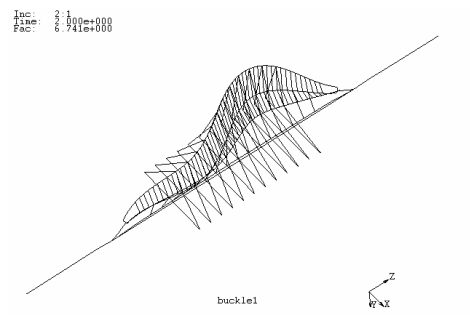
图 6 满跨正载下的第二阶失稳形态

表 1 满跨正载下第一阶至第五阶的稳定系数

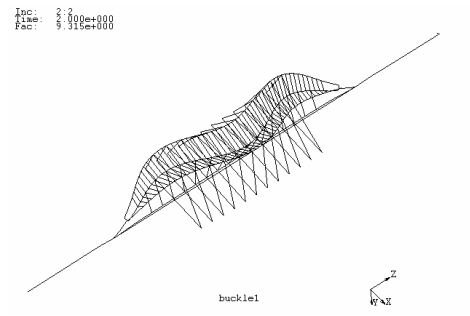
阶数	一	二	三	四	五
稳定系数	6.589	9.092	15.92	16.36	16.65

### 4.2 半跨正载下的稳定系数

半跨正载下, 桥梁将产生最大的不对称荷载. 其第一、第二阶失稳形态如图 7 所示. 半跨正载下



(a) 第一阶失稳形态



(b) 第二阶失稳形态

图 7 半跨正载下的失稳形态

第一阶至第五阶的相应稳定系数见表 2.

表 2 半跨正载下第一阶至第五阶的稳定系数

阶数	一	二	三	四	五
稳定系数	6.741	9.315	16.36	16.77	17.15

#### 4.3 满跨偏载下的稳定系数

满跨偏载下, 桥梁将产生最大的偏心荷载, 其第一阶失稳形态如图 8 所示, 稳定系数为 2.565.

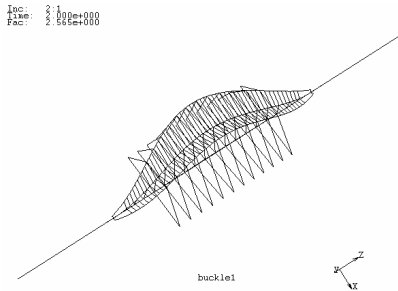


图 8 满跨偏载下的第一阶失稳形态

## 5 结语

根据奉化江大桥的设计图, 建立该桥的 Marc 有限元力学分析模型, 然后计算大桥在活荷载作用下的变形. 在正载下垂直位移最大为 0.011 2 m, 在满跨偏载下有 1 个扭转变形, 此时最大垂直位移为 0.025 m, 桥面横向高度差 0.035 m, 横向最大水

平位移为 0.021 m, 发生在副拱肋最高点, 上述位移符合刚度要求. 最后分析 3 种活载工况下的稳定性, 满跨偏载下的第一阶稳定系数最小, 为 2.565, 符合大桥安全需要.

钢管混凝土拱桥在建筑上造型美观, 并且由于采用了钢管与高强混凝土相结合的高强材料, 使得桥梁自重大大减轻, 强度提高, 但是同时也带来了结构面外刚度偏弱, 面外稳定性问题突出的难题. 因此, 在充分利用钢管混凝土拱桥优点的同时, 还需解决一系列与稳定性相关的技术问题.

#### 参考文献:

- [1] 丁勇, 黄剑源. 多拱肋桁架异形拱桥结构力学特性分析以及拱座局部应力研究[R]. 宁波: 宁波大学, 2006.
- [2] 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.
- [3] 张建民, 郑皆连, 秦荣. 拱桥稳定性研究与发展[J]. 南宁: 广西交通科技, 2000, 25(1):1-7,18.
- [4] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.

## Analysis on the Structural Stability of Fenghuajiang Bridge Using Finite Element Method

WANG Mei<sup>1</sup>, DING Yong<sup>1\*</sup>, GE Wei-yi<sup>2</sup>, YAO Zhi-kun<sup>3</sup>

( 1.Department of Campus Planning and Construction, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Jinggong Steel Building Group, Shaoxing 312030, China; 3.Ningbo Communication Planning and Prospecting Design Academy, Ningbo 315200, China )

**Abstract:** The Fenghuajiang River Bridge is a three-crossing arched bridge with continuous bottom-road constructed with concrete filled steel tubes, and its system load-capacity belongs to the category of composite structure of beam and arch. Due to the complexity of the spatial structural form, a finite element method is used to analyze the strength and stability under the given loads. As an object of the bridge, the general finite element program Marc is used to simulate the practical components including the material properties, sectional properties, load conditions, the boundary conditions, etc. These elements are input to the computational model as entries and then the stiffness and stability of bridge are checked after analyzing the displacement and buckling model.

**Key words:** finite element analysis; concrete filled steel tube; stability; arch bridge

( 责任编辑 章践立 )