

文章编号: 0451- 0712(2001)02- 0010- 05

中图分类号: U 448. 22; U 441

文献标识码: B

# 钢管混凝土拱桥动力特性分析

陈水盛, 陈宝春

(福州大学土木学院 福州市 350002)

**摘 要:** 结合几座钢管混凝土拱桥的动力测试和有限元动力计算结果, 分析了钢管混凝土拱桥的自振频率、振型及阻尼等动力特性, 并对结构的动力设计提出建议。

**关键词:** 钢管混凝土拱桥; 动力特性

## 0 引言

钢管混凝土拱桥跨径大, 结构形式丰富多样, 主拱圈形式有单圆管、哑铃形、桁式、集束管等。车承形式有上、中、下承式, 以中、下承式为主。横向结构除有横撑(横撑形式也多种多样)外, 还有无风撑和提篮拱。按拱的推力, 又可分为有推力拱和无推力拱。无推力拱又有拱梁组合体系和刚架系杆拱。桥梁也分布于全国各地, 有不少是处于地震区中。我国对钢管混凝土拱桥的静力性能研究已取得了阶段性的成果<sup>[1]</sup>, 动力性能的研究则刚刚开始。钢管混凝土拱桥与我国传统的石板桥和钢筋混凝土拱桥在材料性能、结构体系等方面都有着明显的差异, 其抗震性能、车振性能等均有其自身的特点, 对其动力性能的研究就显得十分必要。

桥梁结构的动力特性是其动力性能分析的重要参数, 它包括自振频率、振型及阻尼比等, 反映了桥梁的刚度指标。它取决于结构的组成体系、刚度、质量分布以及支承条件等, 它对于正确地进行桥梁的抗震设计、车振分析及抗风稳定性分析等都有着重要的意义。本文在收集动力特性分析资料的基础上, 对钢管混凝土拱桥的动力特性进行了初步分析, 为深入开展钢管混凝土拱桥的动力性能研究提供技术准备。

## 1 自振基频

目前, 钢管混凝土拱桥自振频率, 主要通过实桥测试和应用大型通用软件或自行编制的软件计算获得。

收稿日期: 2000- 07- 01

## Research on Construction Technology of an Integrated Installation Towers

Zhang Kaiyin<sup>1</sup>, Liu Sanyuan<sup>2</sup>, He Yuwei<sup>2</sup>

(1. Huazhong University, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Highway and Bridge Company, Wuhan 430052, China)

**Abstract:** In the construction of the long-span concrete filled steel tubular arch bridge by using an integrated installation towers, the key technologies, such as strength and stability of the tower, deformation of a cable, measurement for the tension and control of the arch ribs, are researched in order to assure the construction quality and safety. The design of an integrated installation towers can decrease the input equipments, reduce the engineering costs and pick up the construction speed. This technology can be also used in the construction of the same kind bridge.

**Key words:** Concrete filled steel tubular arch bridge; Arch ribs; Integrated installation towers; Construction



在实桥测试方面,对广东南海三山西大桥、柳州文惠桥、江西瓷都大桥、九畹溪大桥等进行了实桥动载测试<sup>[2~5]</sup>。

三山西大桥为主跨 200 m 的中承式带悬臂钢管混凝土拱桥,文献[2]进行了该桥的动态测试,采用 HP35660A 动态信号分析仪进行数据处理。测试结果,桥面一阶竖向弯曲振型频率为 1.125 Hz。取 3 跨空间结构体系,计算结果,一阶面外自振频率为 0.407 Hz;二阶面内自振频率为 0.655 Hz;三阶扭转自振频率为 0.717 Hz。

文惠桥为 3 跨 108 m 的钢管混凝土中承式拱桥<sup>[3]</sup>,动载测试试验结果,该桥的自振频率在 1.062 5 ~ 1.937 5 Hz 之间。瓷都大桥为主跨 150 m 的中承式钢管混凝土拱,其竖向、横向自振频率的实测值分别为 1.27 Hz、0.98 Hz<sup>[4]</sup>。九畹溪大桥为主跨 76 m 的钢管

混凝土上承式拱,实测的竖向一、二、三阶自振频率分别为 0.637 Hz、0.765 Hz、1.130 Hz<sup>[5]</sup>。

除上述实测外,一些钢管混凝土拱桥通过计算机程序求解其动力特性。表 1 列出收集到的 12 座钢管混凝土拱桥的结构型式和横向、竖向一阶计算频率结果<sup>[4~14]</sup>。

三山西大桥、瓷都大桥、文惠桥等桥的计算结果和实测值比较相近,说明采用有限元计算结构的动力特性,能够基本反映结构的实际状况。

表 1 中数据表明,钢管混凝土拱桥的横向及竖向基频,与桥梁跨径、结构型式及拱圈截面的几何性质有关。它受跨径的影响最大,跨径越大基频越低;其次是结构型式,下承式刚架系杆拱的基频最低,中承式次之,上承式最大。表 1 中,面外(横向)的基频为 0.17~0.27 Hz,面内基频为 0.35~1.49 Hz。

表 1 钢管混凝土拱桥横向和竖向一阶计算频率

序 号	桥 名	跨 度/m	结 构 型 式	拱 肋 截 面		基 频/Hz	
				形 式	高度/m	横 向	竖 向
1	庙沟大桥	76	上承式	四肢桁式变高度	1.4(1.8)	0.72	1.25
2	福州解放大桥	80	中承式	哑铃形	1.8	0.74	1.49
3	莲沱河特大桥	114	中承式刚架系杆拱	哑铃形	3.0	0.59	1.04
4	石潭溪大桥	136	中承式	四肢桁式	3.0	1.24	1.25
5	瓷都大桥	150	中承式	哑铃形	2.5	1.04	1.32
6	深圳北站大桥	150	下承式刚架系杆拱	四肢桁式	3.0	0.33	0.55
7	黄柏河大桥	160	上承式	哑铃形变高度	2.5(2.9)	1.02	1.22
8	天津彩虹桥	160	下承式系杆拱	哑铃形	3.75	0.40	1.07
9	九畹溪大桥	160	上承式	哑铃形	2.4	—	0.60
10	梅溪河大桥	288	上承式桁架拱	四肢桁式变高度	5.0(8.0)	0.20	0.45
11	丫髻沙大桥	360	中承式刚架系杆拱	六枝桁式变高度	4.0(8.04)	0.33	0.44
12	巫峡长江大桥	400	上承式桁架拱	四肢桁式变高度	7.0(12.0)	0.17	0.35

注: 1. 福建福州解放大桥为连续钢管混凝土拱桥,在计算动力特性时,只考虑空间模式时主拱的自振频率; 2. 九畹溪大桥未进行横向一阶频率计算; 3. 庙沟大桥、巫峡长江大桥为方案设计计算结果。

除非跨径特别大(如梅溪河大桥、巫峡长江大桥),其面内、面外基频均大于结构较柔的斜拉桥或悬索桥的基频(通常小于 0.2 Hz,如南浦大桥为 0.148 6 Hz,杨浦大桥为 0.078 Hz,江阴长江大桥为 0.051 Hz,虎门大桥为 0.091 Hz),但又小于一般刚性拱桥的基频(2.5~3.3 Hz)。因此,钢管混凝土拱桥的动力特性与动力性能有其自身的特点。

2 基频分析

2.1 横向基频与横撑

从表 1 可见,钢管混凝土拱桥的面外基频较面内基频略低。如丫髻沙大桥和巫峡长江大桥<sup>[14]</sup>的面内、面外基频之比分别为 0.44/0.33 和 0.35/0.167,反映出钢管混凝土拱桥横向稳定问题较为突出,尤其是长大跨度时。在设计时,可通过优化横撑布置、增加横撑数量、增大拱肋刚度等方法来增加拱的横向整体刚度,以保证其横向稳定性。

拱桥的横向基频与结构型式和横向构造有关,中、下承式拱的横向基频较上承式的低;在下承式中,拱、梁组合体系的横向基频较刚架系杆拱的低。不同

位置的横撑对肋拱的横向基频也有着不同的影响。

瓷都大桥原设计在拱顶设 4 根一字撑和 2 根 K 撑, 拱脚两端各设 1 根 K 撑, 为了分析横撑对自振特性的影响, 分别计算了以下 3 种情况: (1) 减少拱顶 2 根一字撑; (2) 减少拱脚 1 根 K 撑; (3) 横撑刚度增大 10%。计算结果见表 2。

表 2 瓷都大桥横撑变化对自振频率的影响

项 目	面外一阶自振频率 Hz	面内一阶自振频率 Hz
原设计	1. 043	1. 320
拱顶一字撑减少 2 根	1. 011	1. 282
拱脚减少 1 根 K 撑 (全桥 2 根)	1. 042	1. 320
横撑刚度增加 10%	1. 054	1. 326

由表 2 可见, 拱顶横撑数量和刚度变化较拱脚的横撑数量变化, 对面外基频影响要明显得多。石潭溪大桥在拱顶设 3 根横撑, 若只有 1 根横撑, 则其面内、面外基频比由原来 2 根横撑时的 1. 251/1. 245 变为 1. 253/1. 125, 使面内、面外的基频之比由 1. 005 增加到 1. 106<sup>[8]</sup>。

由于拱顶的横撑对拱的横向刚度有较大影响, 同时拱顶横撑的数量多, 则拱横向的质量增大、重心提高, 所以拱顶横撑数量增多, 将提高拱的横向基频, 反过来, 横撑数量的减少将降低拱的横向基频。因此, 对于中承式拱在拱脚采用较强的横向联系(如 K 撑、X 撑)、在拱顶采用较少较弱的横撑, 既能满足横向稳定要求, 又能取得较佳的建筑造型, 同时对于地震区的桥梁还有利于减小横向地震力作用<sup>[15]</sup>。

表 3 部分钢管混凝土拱桥前四阶振型类型

桥 名	一阶振型类型	二阶振型类型	三阶振型类型	四阶振型类型
福州解放大桥	(W, D)	(NW, F)	(N, F)	(NW, F)
石潭溪大桥	(W, D)	(N, F)	(N, D)	(W, D)
瓷都大桥	(W, D)	(N, F)	(N, D)	(W, F)
深圳北站大桥	(W, D)	(N, F)	(W, D)	(W, F)
黄柏河大桥	(W, D)	(N, D)	(W, F)	(W, F)
九畹溪大桥	(N, F)	(N, D)	(N, D)	—
梅溪河大桥	(W, MT)	(W, MT)	(W, MT)	(W, MT)
广州丫髻沙大桥	(W, D)	(N, F)	(W, F)	(W, F)
巫峡长江大桥	(W, MT)	(W, MT)	(W, MT)	(N, MT)

注: 1. N 为面内振型; W 为面外振型; F 为反对称振型; D 为对称振型; NW 为面内外耦合; MT 为弯扭耦合; 2. 九畹溪大桥只进行了面内前三阶振型计算。

应该指出, 横撑在增加横向稳定的同时, 使得拱的横向整体刚度有了很大的提高, 对于中、下承式拱更由于拱质量和重心的提高, 使得拱对横向地震波的响应增大, 因此在实际应用中, 不应盲目设置横向联系, 应综合考虑横向稳定与横撑带来的横向地震力的作用。

## 2 2 拱肋刚度的影响

拱肋是拱桥的最重要的构件, 然而, 拱肋刚度的变化对自振频率的影响却不大, 如瓷都大桥将拱肋刚度增加 10%, 分析它的自振特性, 面内、面外基频比由原来的 1. 320/1. 043 变化到 1. 386/1. 060<sup>[4]</sup>。所以在实际设计时, 肋拱刚度以满足静力性能为主, 通过改变拱肋截面尺寸来改变自振频率的效果不大。

## 2 3 支承条件的影响

支承条件对钢管混凝土拱桥的自振特性影响较大, 石潭溪大桥和瓷都大桥计算时, 均将桥面与桥台铰结, 当放松其桥面的纵向约束时, 它们的面内、面外基频分别降到 1. 182/0. 934 和 1. 102/0. 972<sup>[4][8]</sup>, 基频变化较大, 反映桥面和桥台的支承条件对自振频率的影响显著, 因此, 可以通过改变约束条件来调整和改善钢管混凝土拱桥的自振特性, 设计时应采取一定的构造措施, 以满足桥面系的约束条件。

## 3 振型分析

### 3 1 振型

钢管混凝土拱桥的振型分析, 对钢管混凝土抗震性能的研究有着重要的意义, 为了便于比较, 表 3 列出了部分钢管混凝土拱桥的前四阶振型类型<sup>[4~14]</sup>。

图 1 列出了深圳北站大桥的前八阶振型计算结果。

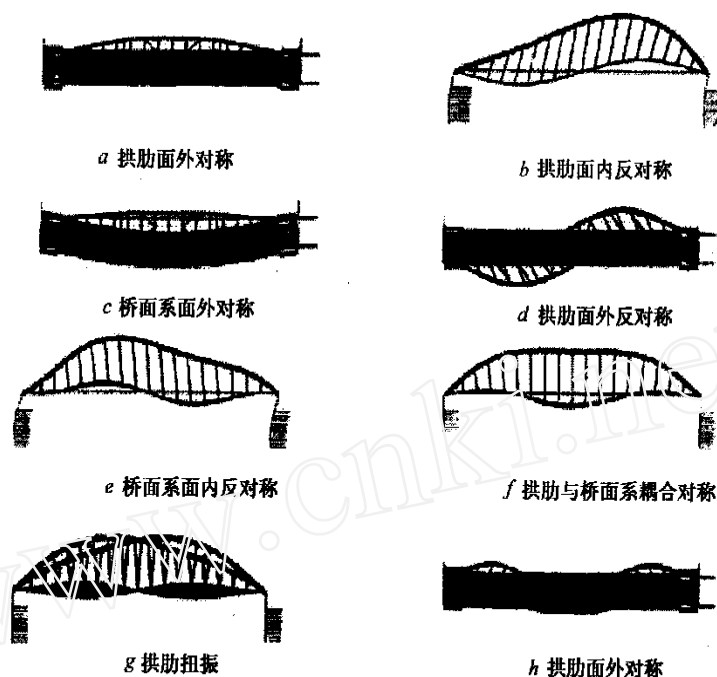


图 1 深圳北站大桥振型

### 3.2 振型序列

从表 3 几座钢管混凝土拱桥的振型分析, 其第一主振型均为主拱对称侧倾, 表明拱肋的面内刚度大于面外刚度。因为拱肋面内振动要引起桥面系的振动, 所以阻力大, 频率高, 面内振型出现晚于面外振型。对于一般跨度的钢管混凝土拱桥, 其第二振型通常为面内反对称挠曲, 而面内反对称振型出现较晚, 这主要是因为面内反对称振动时, 振动引起的附加力为 0, 阻力最小, 其固有频率较低缘故。对于跨径特大的钢管混凝土拱桥, 通常第二振型为面外弯扭耦合振型, 如巫峡长江大桥、梅溪河大桥。

另外, 在大跨径钢管混凝土拱桥振型中, 既包含面内或面外振动为主的模式, 又包含面内、面外有强烈耦合的模式, 如巫峡长江大桥和梅溪河大桥的面外振型均为弯扭耦合, 故在分析它们的自振特性时, 应采用三维空间模型。

### 3.3 桥面系振型

对于面内振型, 桥面系与拱肋的振动基本同步, 因为拱肋与桥面系的重力方向一致。而桥面系的面外振型和拱肋与桥面系之间的联接方式有很大的关系。对于上承式拱, 因桥面系与拱肋之间采用刚度较大的立柱联结, 所以桥面系的振动基本与拱肋同步。

对于下承式钢管混凝土拱桥, 因基本上采用柔

性吊杆联结, 所以桥面系与拱肋在面内基本上是相互独立的结构, 在振型计算结果中表现为二者的振动不同步 (通常桥面系振动滞后于拱肋的振动); 在实桥使用中表现为车辆经过时桥面振动较大。因此, 应注意加强下承式拱桥的桥面刚度, 尤其是桥面系的横向刚度, 并注意研究其车振问题。

对于中承式拱桥, 则主要看其上承与下承部分之间的比值。上承部分所占比例大, 则桥面系振动与拱肋同步, 若下承部分所占比例大, 则不同步。

### 4 阻尼

对于面内振型, 桥面系与拱肋的振动基本同步, 因为拱肋与桥面系的重力方向一致。

阻尼对钢管混凝土拱桥的动力特性影响较大, 阻尼主要来自于结构与支承之间的摩擦, 材料之间的摩擦及周围介质之间的阻力等等。但是, 由于阻尼计算相对较复杂, 目前只能通过实测求得。目前仅见文献[3]对柳州文惠桥实测结果, 其阻尼比在 0.05 ~ 0.03 之间。

### 5 结论

钢管混凝土拱桥的基频一般大于悬索桥和斜拉桥等柔性结构, 但小于传统的钢筋混凝土拱、石板拱

等刚性拱桥, 因此其动力性能有其自身的特点。

钢管混凝土拱桥的面内基频一般较面外基频大, 尤其是长大跨度拱桥, 应注意保证拱的横向稳定性。但同时要注意横向联系对横向自振频率和横向地震力的影响。对于中承式拱的横向联系宜以拱脚处的 K 撑或 X 撑为主。桥面系的面内振动与拱肋基本同步。桥面系的面外振动受桥面系与拱肋之间联结形式的影响较大, 采用立柱或刚性吊杆联结时, 二者振动基本同步。对于采用柔性吊杆悬吊桥面系的下承式钢管混凝土拱桥, 桥面系的面外振动与拱肋相对独立。应注意加强此类桥梁的桥面系刚度和车振问题研究。

桥面系的边界条件对基频和振型影响较大, 设计时可以通过改变约束条件来改善桥梁的抗震性能, 并采取相应的构造措施保证约束条件的实现。

阻尼值是桥梁动力特性的重要参数, 在钢管混凝土拱桥中的研究还较少, 应引起重视。

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工. 人民交通出版社, 1999.
- [2] 赖泉水. 南海三山西大桥主桥设计. 全国城市桥梁青年科技学术会议论文集, 1996.
- [3] 欧享德, 韦明吉. 柳州文惠钢管混凝土中承式拱桥. 中国公路学会桥梁和结构工程学会 1996 年桥梁学术讨论会论文集. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [4] 许士杰. 钢管混凝土肋拱桥自振特性及汽车荷载作用下动力响应的研究. 北方交通大学硕士学位论文, 1999.
- [5] 经柏林, 胡小庄. 九畹溪大桥动载实验及动力分析. 中国公路学会桥梁和结构工程学会 1999 年桥梁学术讨论会论文集, 2000.
- [6] 江忠贵. 铁路钢管混凝土拱桥结构分析及截面拟定. 桥梁建设, 1999(1).
- [7] 彭大文, 颜海. 连续钢管混凝土拱桥的动力特性分析. 混凝土结构基本理论及工程应用. 天津大学出版社, 1998.
- [8] 彭大文, 王忠. 中承式钢管混凝土肋拱桥的地震响应分析. 工程力学, 1997(增刊).
- [9] 李勇, 孙潮, 陈宝春. 深圳北站大桥动力特性分析. 哈尔滨建筑大学学报, 1999(3).
- [10] 李涛. 大跨度钢管混凝土拱桥的抗震分析. 公路, 1996(1).
- [11] 铁道部科学研究院铁道建筑研究所. 160 米钢管混凝土系杆拱整体模型试验. 1997.
- [12] 李美军, 郑远鹄, 王孝国, 唐亮. 梅溪河大桥空间动力特征及欧拉稳定分析. 哈尔滨建筑大学学报, 1999(3).
- [13] 郑史雄, 周述华, 丁桂保. 大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能. 西南交通大学学报, 1999(6).
- [14] 谢邦珠, 王孝国, 唐亮. 巫峡长江大桥空间动力特性及欧拉稳定分析. 哈尔滨建筑大学学报, 1999(3).
- [15] 刘玉擎, 陈宝春, 彦坂熙等. コンクリート充填钢管アーチ橋の非線形地震応答特性. 第 25 回地震工学研究発表会講演论文集, 1999(7).

## Analysis of Dynamic Characteristics of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge

Chen Shuisheng, Chen Baochun

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The dynamic characteristics including self-vibration frequency, mode of vibration and damping of concrete filled steel tubular arch bridges are analyzed with the results of dynamic tests and finite element calculations of several such bridges. Some suggestions about the dynamic design of the structure are presented.

**Key words:** Concrete filled steel tubular arch bridge; Arch bridge; Dynamic characteristics