

中承式钢筋混凝土拱桥自振特性分析

高大峰, 刘伯栋, 张静娟

西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:利用有限元通用软件 ANSYS, 对一中承式钢筋混凝土拱桥进行了结构自振特性的数值模拟分析, 求出了自振频率、振型等动力参数, 对其模态特征进行了描述, 并通过变换拱桥的主要结构参数对比分析了它们对结构自振特性的影响。结果表明: 自振频率随矢跨比的减小略有提高; 横撑有助于增强拱肋的横向刚度, 减小拱肋面外振动, 提高抗风稳定性; 各振型的自振频率值随拱肋刚度的提高近似成线性增大, 可以通过改变拱肋刚度来调整其自振特性。研究结果可以为同类桥梁的抗震设计提供参考。

关键词: 中承式混凝土拱桥; 自振特性; 矢跨比; 横撑; 拱肋刚度

中图分类号: U441.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)01-0075-05

Analysis on Self-vibration Characteristics of half-through Reinforced Concrete Arch Bridge

GAO Da-feng, LIU Bo-dong, ZHANG Jig-juan

(Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Using the Generic-software ANSYS, numerical simulation analyzing on the dynamics characteristic of a Half-through reinforced concrete arch bridge is done. Its self-vibration parameters such as self-vibration frequencies, modes and so on, are given, as well as its modes characteristics are summarized. Besides, influence of the main structure parameters to the self-vibration characteristic is analyzed by varying these parameters of the arch bridge. The results show that self-vibration frequencies increase with rise/span ratio decrease; transverse support will help to enhance the lateral rigidity, reduce its out arch-plane vibration, and improve the stability in wind; the frequency of each vibration mode is increased with a approximate linearity with improvement of arch stiffness. So we can change arch stiffness to adjust its vibration characteristics. The results can offer reference to the seismic design of the similar bridge.

Key words: Half-through reinforced concrete arch bridge; Self-vibration characteristics; Rise/span ratio; Transverse support; Rigidity of arch rib

0 引言

拱桥是我国公路上使用广泛且历史悠久的一种桥梁结构型式, 在中小跨径的桥梁设计中常常被选用。目前对其静力特性已有较多的研究, 研究已涉及稳定、极限承载能力^[1-2]等领域, 并取得了一系列的成果。但地震等动力特性也是钢筋混凝土拱桥必

须研究的, 其中桥梁结构自振特性是桥梁结构动力分析的前提和基础。目前, 钢筋混凝土拱桥自振频率除实测外, 还可通过计算机程序求解其动力特性, 许多实例^[1,3]表明, 通常所求得的计算结果和实测值比较相近。在已有的拱桥的自振特性分析中, 对中承式钢筋混凝土拱桥研究的较少。本文根据国内

收稿日期: 2008-12-05

作者简介: 高大峰(1962-), 男(汉族), 河北乐亭人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程抗震研究。

已建成的钢筋混凝土拱桥资料,构造了一座中承式钢筋混凝土拱桥,运用有限元分析软件 ANSYS 对其进行了动力特性分析;根据计算结果讨论该拱桥动力特性的一般规律,并对主要结构参数影响进行初步研究。

1 有限元计算理论和方法

桥梁结构的动力特性直接反应了桥梁的刚度指标,是结构动力分析、抗震分析的重要参数,是进行谱响应分析、谱分析和瞬态动力学分析的基础。

桥梁结构动力分析中最基本的问题是计算结构的自振频率和振型,它是计算桥梁结构动力响应的基础。

一般的结构固有振动方程为^[4] $[M]\{\ddot{\delta}\} + [C][\dot{\delta}] + [K][\delta] = [F]$

式中, $[K]$ 为结构刚度矩阵; $[M]$ 为结构质量矩阵; $[C]$ 为结构阻尼矩阵。

因此在进行结构动力分析时,除建立刚度矩阵外,还需要建立结构的质量矩阵和阻尼矩阵。在求结构的自振特性时常忽略阻尼的影响。对混凝土拱桥进行动力分析通常采用有限元法,在建立有限元模型时主要考虑拱圈和吊杆间的相互作用,对桥面系、基础间的作用以及阻尼等因素的影响暂不考虑,即令 $[C]=0$,并取 $\{F\}=0$;运用达朗贝尔原理可得到钢管混凝土拱桥的无阻尼自由振动方程 $[M]\{\ddot{\delta}\} + [K][\delta]=0$,其特征方程(频率方程)为 $|[K]-\omega^2[M]|=0$ 。

由于混凝土拱桥的结构复杂,自由度数目庞大,因此得到的整个结构的动力方程阶数较高,求解该方程较为困难。而这种大型结构通常是前几阶自振频率和相应振型对结构的位移和内力起着控制作用,因此只需求得对结构起控制作用的前几阶振动频率和相应振型。

2 实例分析

2.1 工程概述

某钢筋混凝土中承式系杆拱桥,也称飞鸟式。主桥主要由拱肋、吊杆和桥面系三部分组成。主跨为一跨,与两边跨半拱构成三跨连续的桥梁,桥跨为 $10\text{ m}+120\text{ m}+10\text{ m}$ 。主桥为等截面抛物线无铰拱,拱肋的理论计算跨径为 120 m ,矢高为 20 m ,矢跨比 $1/6$,理论拱轴线方程为 $Y=20-X^2/120$ 。钢筋混凝土拱肋为高 2 m 、宽 1 m 的截面。主桥共有吊杆 9 对。

2.2 空间有限元模型的建立

钢筋混凝土中承式拱桥的拱与墩台在拱脚处固结,拱的推力由墩台直接传给基础。拱肋不仅要承受压力和弯矩,还要承受风荷载,为压弯扭构件,受力较为复杂。在桥梁的有限元建模中,桥面板及桥面混凝土铺装层模拟为各向同性的板单元(shel163);拱肋、横梁和横撑等构件采用空间梁单元(beam 44);吊杆采用只承受拉力的空间杆单元(link 10)。桥面铺装层和桥面其他构造的质量计入桥面板的密度中,以考虑其质量对自振特性的影响,目的是保证自振特性计算的正确性。该桥的空间有限元模型如图 1 所示。

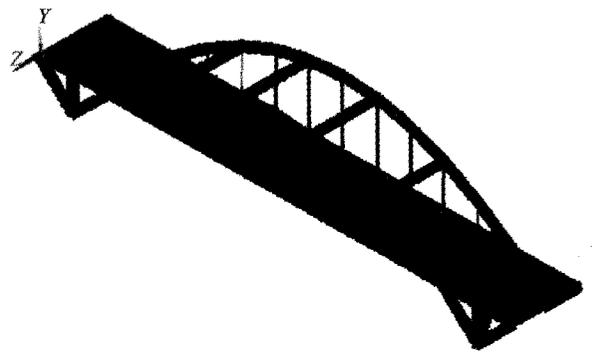


图 1 中承式钢筋混凝土拱桥的空间有限元模型

Fig. 1 The space finite element model of half-through reinforced concrete arch bridge.

2.3 动力特性分析

抗震规范规定,一般情况下仅保证在一个振动方向上有前三阶振型就可以。该桥有拱肋面外横向振动、整体竖向振动和整体扭转三种情况(方向)。根据该桥模型的振型实际分布情况,拱肋面外横向振动的第三阶振型出现在第 5 阶,整体竖向振动的第三阶振型出现在第 7 阶,整体扭转的第三个振型出现在第 12 阶,所以取该桥的前十二阶振型进行分析(图 2)。

从图 2 所示桥梁前 12 阶振型的模态特征可以看出,该中承式钢筋混凝土拱桥的振型比较复杂,总的来看具有下列 4 个方面的特点:(1)中承式混凝土拱桥的振动主要有拱肋的横向面外振动、桥梁整体的竖向振动和扭转振动 3 种振动形式,计算阶数越高振型越复杂;(2)拱肋的面外刚度较小,在桥梁振动中首先出现拱肋的面外振动(第 1 阶振型),表明拱肋面内外刚度相差较大,拱肋的竖向刚度大于其横向刚度;(3)本桥拱肋与桥面系的竖向刚度相对协调,表现在 2, 4, 7, 8, 11 阶的面内竖向振动基本一

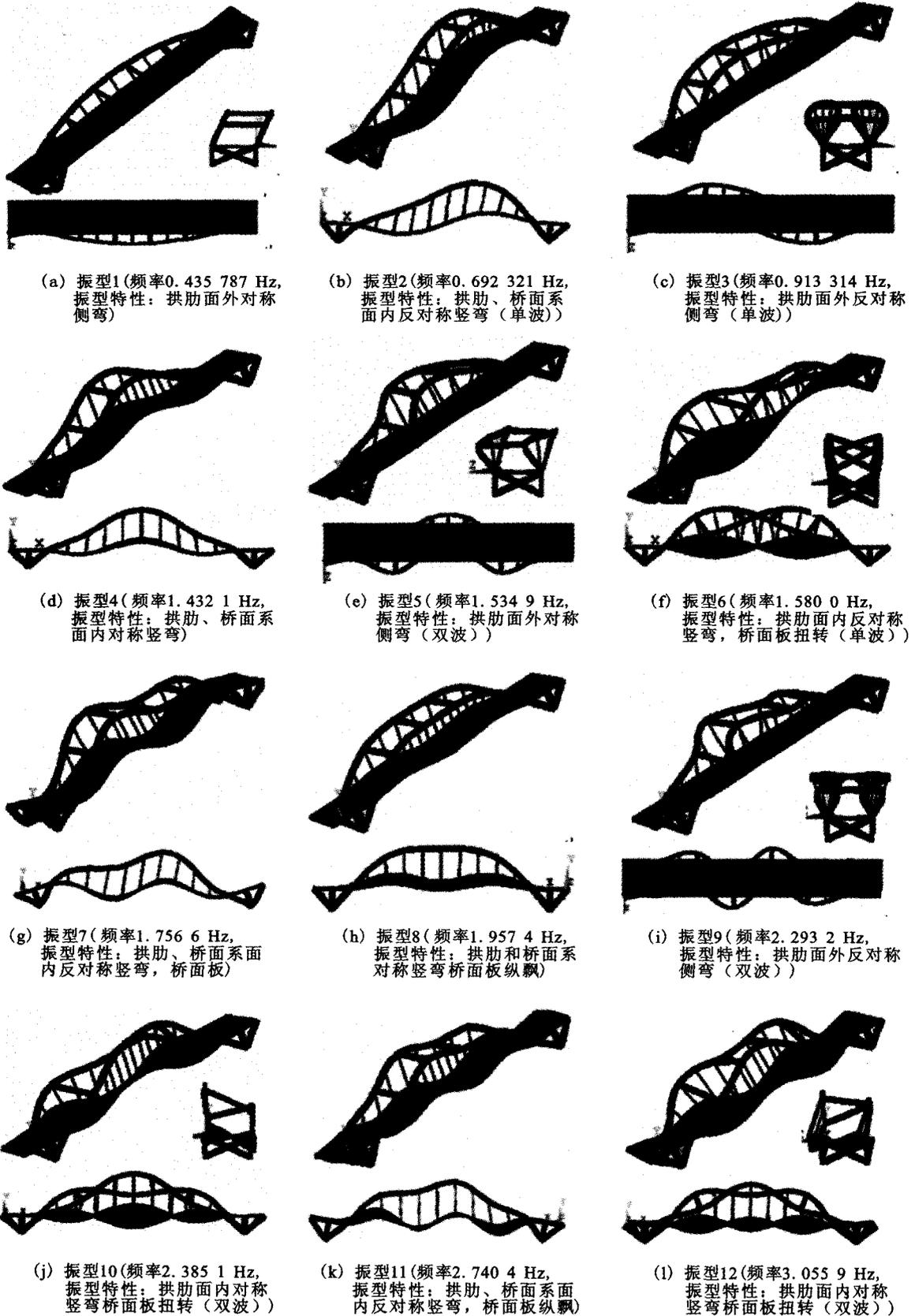


图 2 前 12 阶振型图

Fig. 2 The bridge's vibration modes in preceding 12 orders.

致;(4)扭转振动出现在第 6,10,12 阶,振型出现相对偏后,说明该桥的抗扭刚度较大,可以满足抗震要求。

3 结构构造参数对混凝土拱桥自振特性的影响

根据拱桥理论的观点,在钢筋混凝土拱桥的有限元模拟中,主拱的矢跨比、横撑布置、拱肋刚度等因素的变化均对其动力特性有较大影响,故将这些因素列为研究的主要对象来探讨其变化规律。

3.1 矢跨比的影响

为了比较矢跨比对中承式钢筋混凝土拱桥的动力特性的影响,分别计算了矢跨比为 1/5,1/6,1/7 的三种情形。图 3 为不同矢跨比对结构自振频率的影响。由图可见,矢跨比的变化对其自振频率的影响不大,自振频率随矢跨比的减小略有提高。三种矢跨比的第 2、4 阶自振频率对应点几乎重合在一起,即矢跨比的变化对竖向面内振动影响甚小;在第 3、5 阶自振频率随矢跨比的减小有一定的增大,即矢跨比的变化对竖向面外的振动影响相对较大。

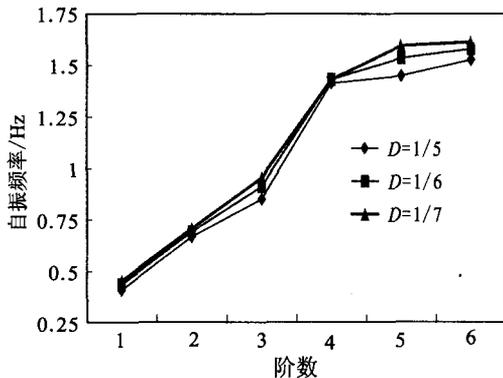


图 3 不同矢跨比对结构自振频率的影响
Fig. 3 Influence of different rise/span ratios to the self-vibration frequencies of the bridge.

3.2 横撑的影响

为了分析横撑对动力特性的影响,在基本模型的基础上分别除去部分横撑和所有横撑来分析其对桥梁动力特性的影响。模型 2 是除端横撑后的模型,模型 3 是除去所有横撑得模型(图 4)。分析结果见表 1。

从表 1 可以看出:当减少桥面上横撑数量由基本模型的四根变成两根时,前六阶振型的频率只是发生了微小的变化,变化率在 5% 以内;横撑对拱肋和桥面系的横向振动和扭转都有一定程度的影响,当横撑减少时多数振动频率值都有所降低;当去掉

全部横撑时结构振动频率值降低较大,说明横撑的存在与否对结构的刚度影响较大。横撑有助于增强拱肋的横向刚度,减小其拱肋面外振动,表现在模型 3 的 1,3,5 阶频率比均小于 0.55,即横撑可以有效地提高拱桥的抗风稳定性

表 1 模型 2、模型 3 和基本模型的频率值比较

阶次	基本模型		模型 2		模型 3	
	频率/Hz	频率/Hz	频率比	频率/Hz	频率比	
1	0.435 79	0.414 00	0.950	0.229 66	0.527	
2	0.692 32	0.651 47	0.941	0.488 09	0.705	
3	0.913 31	0.929 75	1.018	0.463 05	0.507	
4	1.432 1	1.454 2	1.015	0.785 00	0.648	
5	1.534 9	1.496 6	0.975	0.785 52	0.512	
6	1.580 0	1.502 7	0.951	1.269 1	0.803	

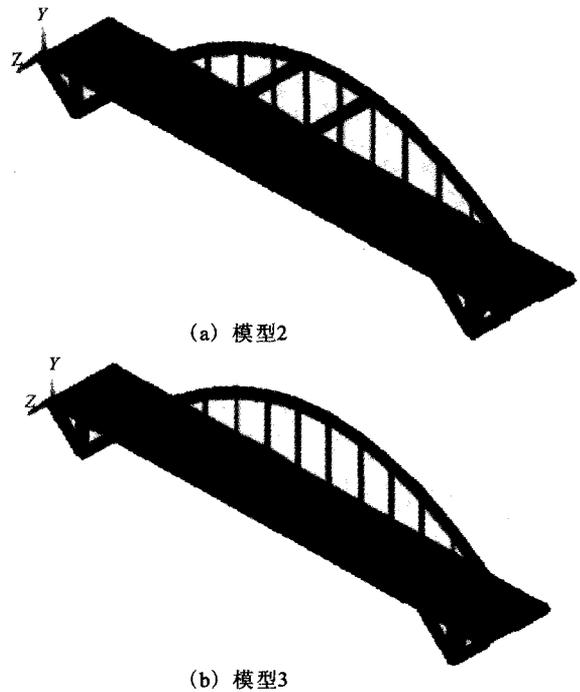


图 4 改变横撑数量的模型图

Fig. 4 Models with different numbers of transverse support.

3.3 拱肋刚度的影响

拱肋是拱桥最重要的构件。为了分析拱肋刚度对动力特性的影响,将该桥的拱肋刚度减小 50% 为模型 4,其相对拱肋刚度为 0.5;拱肋刚度减小 37.5% 为模型 5,其相对拱肋刚度为 0.625;拱肋刚度减小 25% 为模型 6,其相对拱肋刚度为 0.75;拱肋刚度减小 12.5% 为模型 7,其相对拱肋刚度为 0.875;拱肋刚度增加 12.5% 为模型 8,其相对拱肋刚度为 1.125。其动力特性运算结果见图 5。

图 5 中数据表明,拱肋刚度的增加可以使自振频率明显提高。这反映了混凝土拱桥拱肋刚度的变化对拱桥整体刚度影响较大,各振型的频率值随拱肋刚

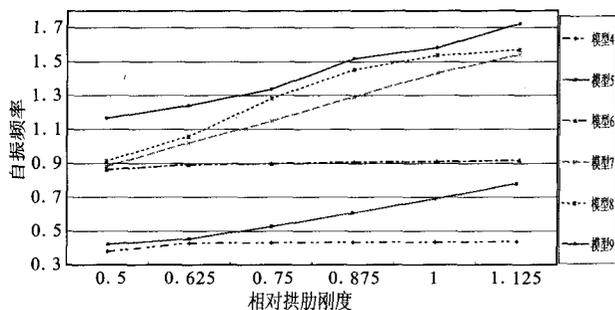


图5 各阶振型频率与相对拱肋刚度的关系曲线

Fig. 5 The relationship curves between each frequency and the relative rigidity.

度的提高近似成线性增大。

4 结论

(1) 中承式钢筋混凝土拱桥的振动主要有拱肋的面外横向振动、整体的竖向振动和整体扭转振动3种振动型式,计算结果表明:阶数越高振型越复杂;拱肋的面外刚度较小;桥面系面内刚度较小,桥面系通过吊杆与混凝土拱肋连为一体,表现为桥面系和拱肋整体竖向振动。

(2) 通过变化设计参数分析发现,中承式钢筋混凝土拱桥结构自振频率随矢跨比的减小略有提高;横撑有助于增强拱肋的横向刚度,减小其拱肋面外振动,提高抗风稳定性;各振型的频率值随拱肋刚度的提高近似成线性增大,可以通过改变拱肋刚度来调整其自振特性。

[参考文献]

- [1] 张正权. 刚架拱桥的受力分析与加固[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [2] 奉龙成, 罗小华. 钢筋混凝土拱桥面内极限承载力的非线性分析[J]. 土木工程学报, 2002, 7: 20-24.
- [3] 汪斌, 陈志忠, 蔡敏. 混凝土拱桥静载试验及仿真分析[J]. 工程与建设, 2006: 181-183.
- [4] 项海帆, 刘光栋. 拱结构的稳定与振动[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [5] 苏军, 高大峰. 中国木结构古建筑抗震性能的研究[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 239-244.
- [6] 冯仲仁, 李彩霞, 吴刚刚. 下承式钢管混凝土拱桥自振特性的有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 28(7): 50-54.
- [7] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.