

大跨度中承式拱桥节段模型风洞试验*

晏致涛¹, 李正良¹, 祁仁俊²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆江北城开发建设公司, 重庆 400020)

摘要:风致振动是大跨度中承式拱桥设计的主要控制因素之一,本文介绍了重庆菜园坝长江大桥风洞主桥节段模型静力三分力试验以及节段模型动态试验的主要内容及相应的结果,介绍了由于双拱干扰下的主拱静力三分力试验和涡振试验及其结论。试验表明,桥梁主桥具有良好的气动稳定性,主拱在风载下受力极为复杂。由于前拱尾流的影响,后拱阻力系数起伏较大。当两拱相距较近时,后拱的阻力系数为负数,随着间距的增大逐渐增大。试验结果将为大桥的抖振、涡振以及颤振分析提供依据。

关键词:节段模型; 风洞试验; 菜园坝长江大桥; 拱桥

中图分类号:U448.22*1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)06-0055-03

Wind Tunnel Tests of Long Span Half-through Arch Bridge Section Model

YAN Zhi-tao¹, LI Zheng-liang¹, QI Ren-jun²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Jiangbei City Development and Construction Company, Chongqing 400020, P. R. China)

Abstract: Wind induced vibration is one of the main control factors in the Long span bridge structure design. The wind tunnel tests for measuring the static wind forces on the bridge girder and the section model wind tunnel dynamic testing for Caiyuanba Yangtze River Bridge in Chongqing are introduced in this paper. The wind tunnel testing for measuring static wind forces and vortex-induced vibration test on the arch are introduced taking account of the influence between two arches. The main contents and outcomes of testing are presented. It is indicated that the bridge girder has excellent wind stability and the arch mechanical characters are rather complicated. The drag force on the hind arch varied a lot because of the front arch interference on the wind flow. The drag force on the hind arch will be negative when two arches are close to each other. It increases with the space of two arches. The results of testing will give the data of buffeting and vortex-induced vibration and flutter analysis of the bridge.

Keywords: section model, wind tunnel tests, Caiyuanba Yangtze River Bridge, arch bridges

拱桥在桥梁的发展史上曾经占有重要地位,迄今为止,已有三千多年的历史。中承式拱桥更是因为其合理的受力型式而得到了广泛的应用,是能够做到较大跨度的一种桥型。重庆菜园坝长江大桥主桥是一座特大公轨两用无推力式钢箱中承系杆拱桥。大桥主桥由420 m中跨和两侧对称布置的102 m+88 m边跨组成。由于该桥主梁采用桁架形式,迎风面积较大,且跨度较大,尤其是施工阶段的最大单悬臂状态,其悬臂长度达到约200 m。另外,该桥的提篮拱跨度达420 m,中间只有6根横撑,在施工阶段,拱的最大悬臂达160 m,侧向刚度较小,结构的柔性较大。因此,抗风性能评估对该桥施工阶段和成桥运营阶段具有重要意义。

由于该拱桥的特殊形式,其节段模型试验存在与许多其它类型的桥梁不同的特点,尤其是双拱的静力三分力试验和涡激振动试验等内容与一般的斜拉桥和悬索桥是不同的。目前国外尚未见有拱桥方面的风洞试验。国内进行的拱桥方面的研究有周述华等^[1]对丫髻沙大桥模型(钢管混凝土系杆拱桥)进行的节段的模型风洞试验、廖海黎等^[2]进行的杭州钱塘江大桥(钢管混凝土系杆拱桥)节段模型试验以及葛耀君等^[3]对上海卢浦大桥(中承式钢箱系杆拱桥)进行的节段模型试验等。与上述研究不同,本文在进行节段模型试验时,考虑了拱的相对位置对静力三分力以及涡激振动的影响。试验在中国空气动力研究与发展中

* 收稿日期:2006-04-15

基金项目:重庆市城市投资公司资助(CYB-DQ-H-0002)

作者简介:晏致涛(1978-),男,江西南昌人,博士,主要从事桥梁抗风研究。

心低速所 1.4 m × 1.4 m 风洞中进行。风洞试验段长 8.0 m, 最大来流风速为 20 m/s, 最小稳定风速为 0.5 m/s。以下将分别针对桁架主桥和主拱节段模型试验作下列介绍。

1 静力三分力试验

1.1 试验装置

主梁节段模型采用 1: 70 的几何缩尺比, 模型长 $L = 1.4$ m, 宽 $B = 0.557$ m, 高 $H = 0.157$ m, 长宽比 $L/B = 2.51 > 2$, 符合文献[4]对主梁节段模型的要求。模型用 ABS 塑料板, 优质木材组合而成。主拱采用 1: 20 的几何缩尺比例, 模型长为 1.4 m。试验段中设有专为桥梁节段模型静力三分力试验用的侧壁支撑及测力天平系统, 姿态角调整机构角度变化的范围为 20° , 变化间隔最小为 3° 。试验测量了均匀流条件下的静力三分力系数。试验风速分别为 10 m/s 和 13 m/s, 试验攻角为: $\alpha = -12^\circ \sim +12^\circ, \Delta\alpha = 3^\circ$ 。图 1 和图 2 分别为安装于风洞中的该桥主梁静力节段模型和部分拱肋节段模型。

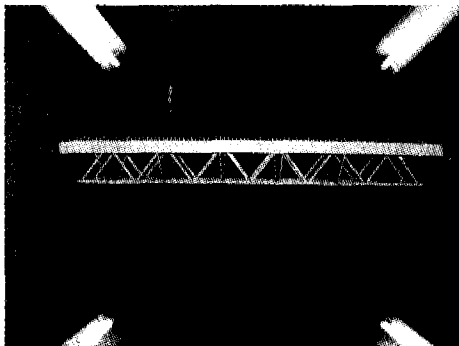


图 1 主桥静力三分力试验节段模型



图 2 主拱静力三分力试验节段模型

1.2 主梁静力三分力试验结果

从图 3 中可以看出, 桥梁主桥桁架断面的升力曲线、阻力曲线等基本上都是正斜率的, 即攻角在为正的范围, 升力或升力矩也是负的。相反, 对于负的攻角也是负值, 表明桥梁具有良好的气动稳定性。试验还进行了有轻轨和无轻轨下静力三分力比较, 由于轻轨相

对主桥桁架面积较小, 因此, 结果相差不多。

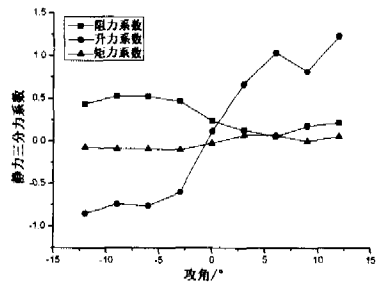


图 3 主梁静力三分力系数

1.3 主拱静力三分力试验结果

菜园坝长江大桥主要受力结构为两榀主拱。因此, 试验重点对主拱的静力三分力系数进行了测试。与目前大多数拱桥试验单独测量一榀拱的静力三分力不同, 试验测量了两榀拱在风速干扰下的静力三分力系数, 考虑了主拱在不同间距下、不同攻角下的 36 种工况。

图 4 表示单拱在风轴系的静力三分力系数。拱的攻角按照其自身的攻角定义。拱的升力与力矩曲线具有典型的矩形截面的特性, 拱主要的受力特征是阻力, 阻力在 0° 攻角附近不是最小值。当两榀拱在受到风荷载作用时, 阻力系数主要与两拱的间距以及相对位置有关, 因此当在进行两拱静力三分力试验时, 拱的攻角定义按照两榀拱的相对变形位置确定, 如图 5 所示。图 6 表示两榀拱相互作用下的后拱的静力三分力系数 (两拱间距为 $1.8d, d = 0.65$ m, 为主拱模型的最小间距), 可以看出, 后拱在前拱的干扰下阻力系数严重降低。由于受到前榀拱的尾流影响, 在试验时, 得出的拱的静力三分力系数是变化的, 图中显示的是平均值。图 7 表明, 前榀迎风拱的静力三分力系数比单独一榀拱的静力三分力系数的数值稍小, 这表明后拱对前拱

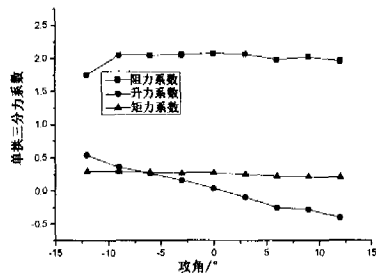


图 4 单拱静力三分力系数

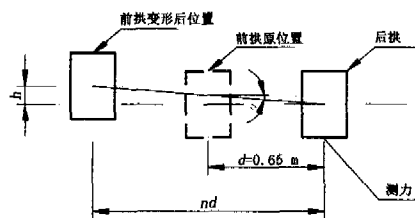


图 5 拱的攻角示意图

的静力三分力系数也是有影响的。图 8 表明,后拱的静力三分力系数尤其是阻力系数与两楣拱的间距有关,当两楣拱相距较近时,后拱的阻力系数有可能为负数,随着间距的增大,后拱的阻力系数逐渐变成正数。

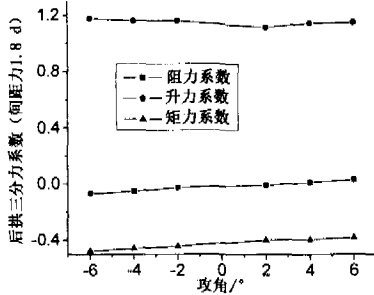


图 6 后拱静力三分力系数 (间距 1.8 d)

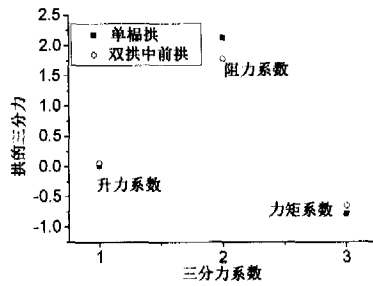


图 7 前拱静力三分力比较

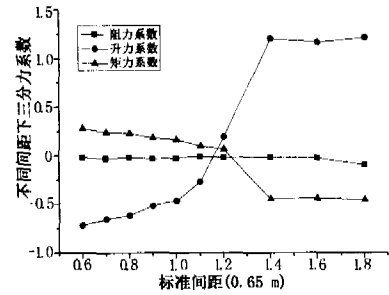


图 8 后拱静力三分力系数随间距变化

2 主梁节段模型动态试验

利用自由衰减法来实现涡激振动和颤振试验。通过悬挂模型两端的 8 根弹簧来实现节段模型的二自由度运动,其中在一端下部连接有位移测量传感器和加速度传感器,分别测量二自由度运动的位移和加速度。涡激振动试验表明,在设计风速下,该桥主梁不会发生涡激振动。

表 1 颤振试验模型设计参数

参数	符号	单位	相似比	实桥值	模型要求值	模型实现值
长度	L	m	1: 70	98	1.4	1.4
宽度	B	m	1: 70	39.6	0.557	0.557
高度	H	m	1: 70	11	0.157	0.157
单位长度质量	m	kg/m	1: 70 ²	32 317.5	6.595	6.595
单位长度质量惯矩	J_m	kg·m ² /m	1: 70 ⁴	20.7e6	0.862	0.862
竖弯频率	f_h	Hz	2.977	0.537 4	1.6	1.58
扭转频率	f_t	Hz	2.977	1.286	3.8	3.8
扭转频率比	ε	/	1	2.04	2.04	2.04

在中国空气动力研究与发展中心低速所 1.4 m 风洞中的颤振导数动力测量装置中实现基于自由振动的

在试验过程中发现,当两楣拱的间距为 4.3d ~ 8.6d 时,由于前拱的尾流的影响,后拱阻力系数上下起伏较大,有时甚至为零。经过傅立叶变换,发现其变化的频率基本上符合 Strouhal 数为常数的规律。

动力衰减试验。采用直接测量法进行颤振试验时,要求模型系统满足动力节段模型的相似律,即要求模型与原型(实桥)之间保持三组无量纲参数一致。

根据实桥自振特性计算结果,该桥的成桥状态的颤振应以最低阶的反对称模态起控制作用,即颤振试验按第一反对称竖弯($f_h = 0.535$ Hz)和第一反对称扭转($f_t = 1.286$ Hz)两个模态组合来确定模型系统的扭转频率比($\varepsilon = f_t/f_h = 2.4$),具体设计参数如表 1。颤振导数是分析大跨度桥梁主梁断面颤振特性的重要气动参数。由于大多数桥梁主梁断面为非流线体,目前无论是用解析方法,还是数值计算求解都还存在一定的困难,因此,主要依靠风洞试验,通过参数识别技术来获取。

采用文献[7]的方法对重庆菜园坝长江大桥的主梁标准断面进行了 8 个颤振导数的识别,其中 H_1^* 、 A_2^* 、 A_3^* 如图 9。从图中可以发现。与 α 有关的扭转空气阻尼项的 A_2^* 随折算风速 $k(u)$ 增大而单调减少,即风速愈高,空气对扭转振动的阻尼也愈大,使振动衰减更快,因此,桥梁的临界颤振风速愈高,表明主桥具有良好的气动稳定性。

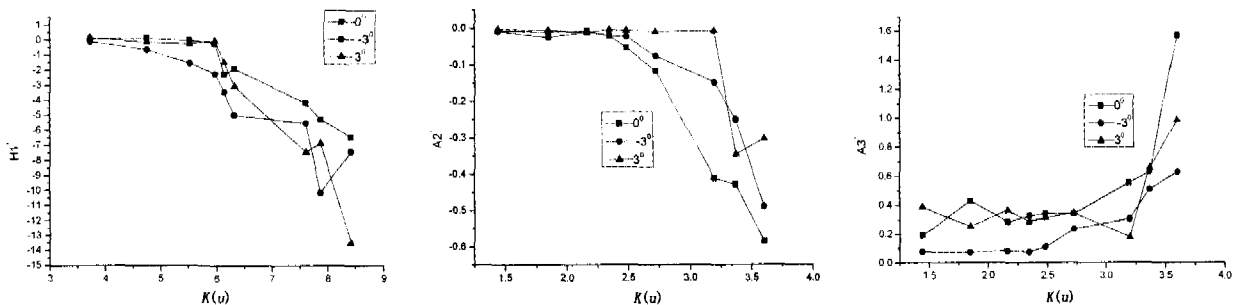


图 9 主梁颤振导数

3 结论

通过对重庆菜园坝长江大桥的主桥、主拱的静力

三分力试验、颤振试验、涡振试验等的研究,得出了桥梁计算的各种参数。重点介绍了由于双拱干扰下的静 (下转第 98 页)

是连续式的,而是间歇式的。对于处于夏热冬冷地区的上海,夏季夜间有开窗通风的习惯(有72.5%的住户有此习惯),只有空调开启时才关窗。所以,其通风量大小也应是变化的。再者,房间的功能不同,其人员、设备、灯光的发热量及作息会有很大差别,按各功能房间分别给出其逐时值也是有必要的。

对于增强外窗的保温性能,两种计算模式给出不同的评价,主要是由于通风模式的影响,在计算模式2中,当外温较高时,好的外窗保温性能可以隔热,当夏季夜间外温较低时,可以通过增加通风量来散掉室内发热量,因此双层窗要好于单层窗;而在计算模式1中,当外温高时,双层窗可以更好地隔热,但外温低时,由于通风量不变,反而不利于室内向室外散热,这就造成了双层窗反而不利于降低夏季制冷耗电量。

从居民的生活习惯来看,计算模式2显然更为合理,在对外窗的评价上,根据计算模式2得出的结果也更为符合定性的分析,因此,在计算上海地区住宅能耗时,应该采用计算模式2。

5 结论

研究表明,计算模式的不同对住宅建筑采暖

空调能耗的模拟结果影响非常大,甚至会得到相反的结论,确定能够反映真实情况的计算模式对住宅建筑采暖空调能耗大小的评价是至关重要的。本文依据上海地区住宅建筑热状况的调查结果确定的计算模式能较为真实地描述室内居住人员的行为方式,用此计算模式进行模拟计算更能正确反映上海地区住宅建筑采暖空调能耗的大小,可用于上海地区住宅建筑采暖空调的能耗分析与评价,并正确指导住宅建筑的节能设计。

参考文献:

- [1] 李峥嵘,钱必华.住宅建筑能耗的特点及其评价指标的确定[J].节能技术,2001(1):10-12.
- [2] 朱光俊,张晓亮,燕达.空调运行模式对住宅建筑采暖空调能耗的影响[J].重庆建筑大学学报,2006,(5):119-121.
- [3] JGJ 134-2001,夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S].
- [4] 简毅文.住宅热性能评价方法的研究[D].北京:清华大学,2003.

(上接第57页)

力三分力试验。主梁静力三分力节段试验表明重庆菜园坝长江大桥有良好的空气气动性能。主拱静力三分力节段试验表明,主拱后拱在风载下的受力特点比较复杂。当两樘拱相距较近时,拱的阻力系数为负数,随着间距的增大拱的阻力系数逐渐增大。当两拱的间距宽度比 e/d 为 $4.3d \sim 8.6d$ 时,由于上樘拱的尾流的影响,后拱阻力系数上下起伏较大,有时甚至为零。当两拱相距较远时,两樘拱的静力三分力系数逐渐逼近单拱三分力系数。节段模型试验的结果为大桥的抖振及颤振分析提供了依据。

参考文献:

- [1] 周述华,廖海黎,李永乐,等.大跨度拱桥全桥气动弹性模

型风洞试验研究[A].第五届全国风工程及土业空气动力学学术会议论文集[C].四川成都,2002.

- [2] 廖海黎.杭州市钱江四桥风洞模型试验与分析研究[R].西南交通大学风工程试验研究中心,2003.
- [3] 葛耀君,宋锦忠,曹丰产,等.上海卢浦大桥风荷载及抗风稳定性研究[A].第十五届全国桥梁学术会议论文集[C].2002.
- [4] JTG D60-2004,公路桥涵设计通用规范[S].
- [5] 杜晓庆,顾明,全涌.斜拉桥拉索风雨激振控制的试验研究[J].同济大学学报,2003,31(11):1266-1269.
- [6] 吴太成,强士中,陈东红.大型体育场屋面风压风洞试验研究[J].重庆建筑大学学报,2003,25(3):36-40.
- [7] 廖海黎.大跨度悬索桥风致振动研究[D].成都:西南交通大学,1996.