

文章编号:1000-582X(2008)09-1059-05

# 中承式拱桥主拱静风载试验及数值模拟

晏致涛, 李正良

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**大跨度中承式拱桥属于柔性空间结构,主拱上风荷载往往起控制作用。以重庆菜园坝长江大桥为例,进行主拱单拱及双拱节段模型测力风洞试验。均匀流下的单拱测力试验表明,主拱的阻力系数变异性较小,升力系数与力矩系数变异系数较大。双拱测力试验表明,迎风拱的静力三分力与单拱试验结果相差不大,下风拱静力三分力系数随两拱的间距宽度比及攻角变化。利用流体力学软件 FLUENT 对拱的静力三分力系数进行了数值模拟,模拟结果与试验吻合较好,很好地显示了阻力系数随两拱间距宽度比的变化。

**关键词:**拱桥;风洞;风效应;数值模拟;干扰效应

**中图分类号:**TU311.3;TU317.1

**文献标志码:**A

## Wind tunnel tests and numerical simulation on arches' static wind loads of half-through arch bridge

YAN Zhi-tao, LI Zheng-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Long span half-through arch bridges have the flexible space structure. Wind loads on the arches are usually the key factor to the whole bridge. Taking an example of the Chongqing Caiyuanba Yangzi River Bridge in P. R. China, wind tunnel tests of single arch and double arches section models were conducted. The results of a single arch in the smooth flow show that arch drag variability is small, and the lift and moment variability are significantly large. The results of double arches testing show that the static forces of the windward arch are similar to the single arch. The three force coefficients of leeward arches vary with the space width ratio and the angle between the two arches. Static forces testing was simulated by the CFD software FLUENT. The static forces from the testing and the simulation were compared. The results show that the values match quite well with testing, and the drag forces mainly varied with the space width ratio.

**Key words:** arch bridges; wind tunnels; wind effects; numerical simulations; interference effects

多数中承式系杆拱桥是由两榀拱组合成的空间结构,主拱对桥梁的稳定性往往起控制作用,其风荷载研究是拱桥抗风研究的重要内容。不少学者对拱桥的风荷载进行了研究,如周述华<sup>[1]</sup>等对丫髻沙大桥(钢管混凝土系杆拱桥,主跨 380 m)进行了节段模型以及全桥气动弹性模型风洞试验等研究;廖海黎<sup>[2]</sup>对杭州钱塘江大桥(钢管混凝土系杆拱桥,主跨

190 m)进行了节段模型试验研究;葛耀君<sup>[3]</sup>、胡晓红<sup>[4]</sup>对上海卢浦大桥模型(中承式钢箱系杆拱桥,主跨 550 m)进行了桥位风环境、节段模型测力以及全桥气动弹性模型风洞试验研究等,深入了解风荷载特性及对拱桥的施工阶段和成桥运营阶段抗风性能评估具有重要意义。受迎风拱的遮挡和尾流作用,中承式拱桥的下风拱风荷载特性会因为受干扰

收稿日期:2008-05-06

基金项目:重庆市科委基金资助项目(CYB-DQ-H-0002)

作者简介:晏致涛(1978-),男,重庆大学博士,主要从事结构风工程方向的研究,(E-mail)yanzhitao@cqu.edu.cn。

而发生显著的变化。针对风荷载的干扰问题,有许多学者进行了研究,Simu<sup>[5]</sup>详细讨论了考虑不同间距的桁架对和板梁对的阻力系数的分配和折减情况以及多重框架列的阻力系数干扰现象,中国现行的建筑结构荷载规范以及桥梁抗风设计规范也对常规的桁架风荷载等作了相应规定。Socket<sup>[6]</sup>、Sun<sup>[7]</sup>、Maurizio<sup>[8]</sup>、Mahbub<sup>[9]</sup>以及张誉<sup>[10]</sup>等也分别对 2 个圆柱体、相邻冷却塔以及相邻建筑的风荷载干扰效应等进行了研究。以下以重庆菜园坝长江大桥为例,利用节段模型风洞试验和数值模拟对主拱在均匀流下的风荷载进行较为详细的探讨。

## 1 单拱三分力系数

重庆菜园坝长江大桥主桥是特大公轨两用无推力式中承式系杆拱桥。该桥是 1996 年国务院批准的重庆总体规划中的主城区的一条南北大通道上的关键工程。主桥采用刚构与提篮式钢箱系杆拱、桁梁的组合结构。大桥主桥全长为 800 m,由 420 m 中跨和两侧对称布置的 102 m+88 m 边跨组成。提篮拱跨度达 420 m,由两幅 1.6 m×2.4 m 等截面空间拱和横撑组成。在中国空气动力研究与发展中心低速所 1.4 m×1.4 m 风洞中进行了主拱在均匀流下的三分力试验。由于该拱桥每一段拱肋的曲率均不一样,因此,分成多段拱分别测得其单拱与双拱的三分力系数。单拱在风洞中的模型如图 1 所示,其在风轴系的静力三分力表示为

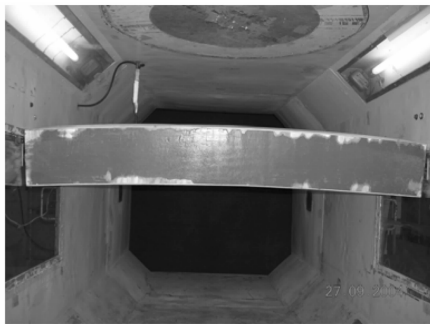


图 1 单拱静力三分力测试模型

升力

$$F_L(\alpha) = \frac{1}{2} \rho V^2 B L C_L(\alpha), \quad (1)$$

阻力

$$F_D(\alpha) = \frac{1}{2} \rho V^2 D L C_D(\alpha), \quad (2)$$

力矩

$$M_X(\alpha) = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 L C_M(\alpha), \quad (3)$$

其中: $V$  为平均风速; $B$  为拱肋宽度; $D$  为拱肋迎风高度; $L$  为拱肋节段长度; $\rho$  为空气密度; $C_D(\alpha)$ 、 $C_L(\alpha)$ 及  $C_M(\alpha)$  分别为在攻角为  $\alpha$  下的阻力系数、升力系数和力矩系数。利用高精度天平测得上述三分力系数如图 2 所示。

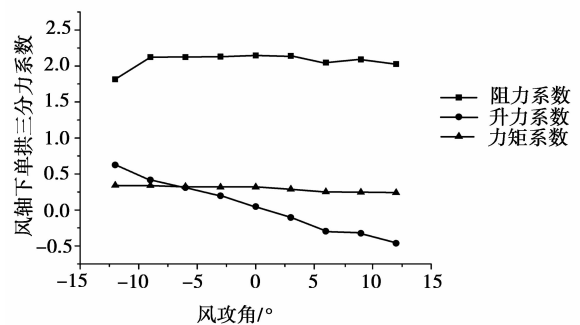


图 2 单拱静力三分力系数

进行了单拱三分力时程数据的采集如图 3 所示,其中:(a)表示升力三分力系数时程曲线;(b)表示阻力三分力系数时程曲线;(c)表示力矩三分力系数时程曲线。可以看出,对于类似于拱体的矩形钝体结构,升力系数和力矩系数具有相当大的波动性,即升力系数和力矩系数离散性相当大,其平均值远远小于脉动均方根差值。拱肋表面产生流动分离与再附,流线非常复杂,从而导致离散度大。因此,在测力试验及分析中阻力系数可以采用平均值,力矩系数和升力系数值应考虑均方根差值的大小。

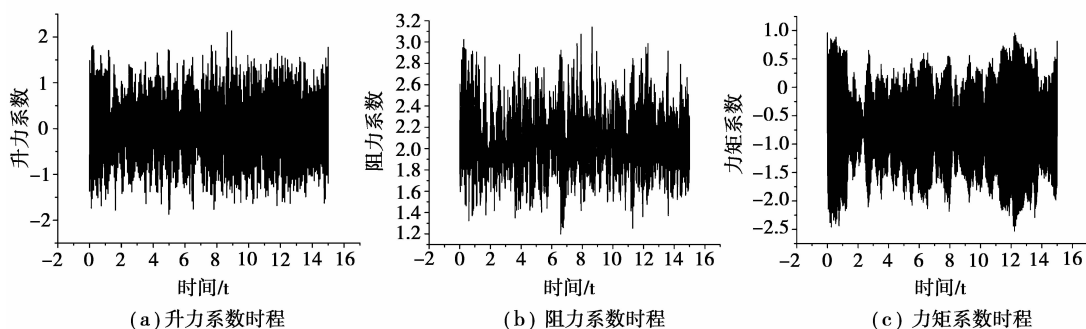


图 3 单拱的静力三分力系数时程曲线

### 2 双拱三分力系数

在中国空气动力研究与发展中心低速所 1.4 m × 1.4 m 风洞中进行了双拱在相互干扰下的静力三分力试验,双拱在风洞中的模型如图 4 所示。考虑了不同间距宽度比(间距宽度比为 3.25~9.75)、不同攻角(-6°~+6°)的 36 种工况。实桥双拱之间有 1 个夹角,大致为 0.3°,考虑到在实验室中实现较难实现,忽略双拱之间的夹角,假定双拱为平面拱,其攻角定义如图 5 所示  $\alpha$ 。由于双拱力矩系数以 2 片拱肋中心的气动力矩可以通过升力系数求得,因此,力矩系数仍然以单片拱肋的中心表示。

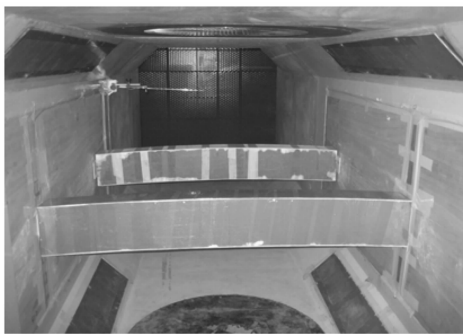


图 4 双拱静力三分力测试模型

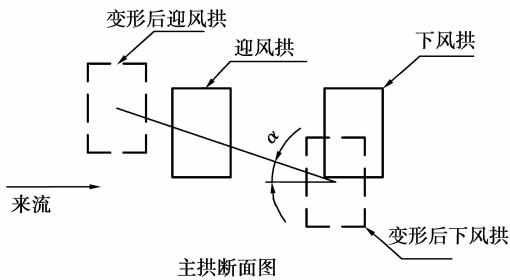


图 5 双拱攻角定义

受下风拱的影响,双拱中迎风拱的阻力系数值较单拱值稍小(宽度间距比为 5.4 时),但数值相差不大,如图 6。

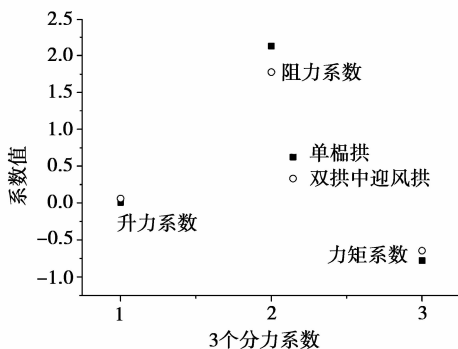


图 6 迎风拱与单榀拱三分力系数

下风拱的试验结果按以下 2 方面分析:

1)三分力系数随间距宽度比的变化。下风拱静力三分力系数(升力系数、力矩系数离散性较大,这里主要讨论阻力系数)与两榀拱的间距宽度比有关,当相距较近时,下风拱的阻力系数为负数,随着间距的增大下风拱的阻力系数逐渐变成正数,并趋于稳定值,如图 7 所示。

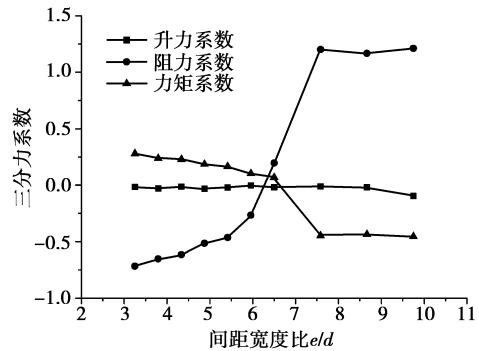
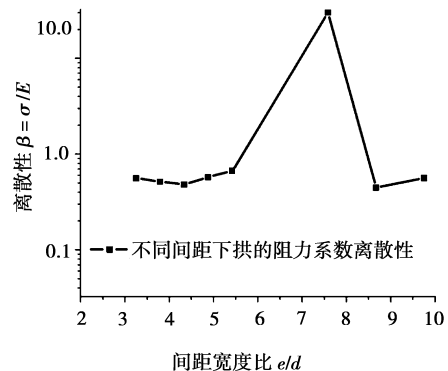


图 7 下风拱静力三分力系数

2)阻力系数的离散性随间距宽度比的变化。定义阻力系数的离散性为均方根差与均值之比( $\beta = \sigma/E$ ),下风拱阻力系数离散性受到迎风拱周期性旋涡脱落的影响而随时间变化。图 8a 表明,在拱的间距宽度比大致在 6~8.6 时,离散性相当大。因此,在计算该间距内的拱段风荷载时,应该考虑阻力系数的均方根差而不是仅仅只考虑阻力系数的平均值。图 8b 表示间距宽度比为 5.4 时,离散性随攻角变化关系,图中表明攻角越大离散性越大。图 8c 表示当宽度间距比为 9.75 时,阻力系数离散性随攻角的变化较小。

可见,在风荷载作用下主拱的受力特点比较复杂,尤其是下风拱,随着间距的不同有正值、有负值。当间距宽度比为 6~8.6 时,下风拱阻力系数变异性较大,受攻角的影响也较大。由于拱的跨度较大,拱的节段模型接近长方体,因此,上述工作对所有类似于长方体形状钝体的风荷载是有参考价值的。



(a)不同间距下拱的阻力系数离散性

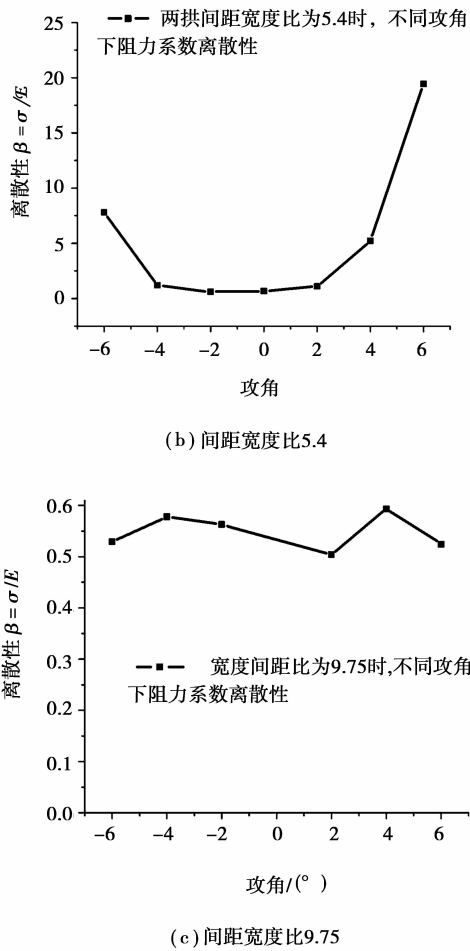


图 8 下风拱阻力系数离散性

### 3 数值模拟

由于实桥的主拱间距以及高度等都随空间位置变化而变化,确定这些工况下的静力三分力系数需要做大量的节段模型试验。并且,在不同间距、不同攻角下两拱的相对横向位置和相对竖向位置变化极大,在风洞实验室难于实现。此次试验由于条件限制也仅仅只能实现间距宽度比最大为 9.75 的情况。许多学者用流体计算软件 Fluent 进行流场模拟,取得了不错的效果。如 Flowe<sup>[11]</sup>、Kim<sup>[12]</sup>、Reichrath&Davis<sup>[13]</sup>、Leitl<sup>[14]</sup> 以及杨伟<sup>[15]</sup> 等均采用不同的三维湍流计算模型对各种结构风载问题进行了分析。可见,利用 Fluent 进行流体力学的数值模拟是基本可行的。笔者尝试利用流体力学软件对主拱风荷载进行数值仿真并进行参数分析。

利用 Gabbit 建立单双拱模型,采用非结构化四面体单元进行网格划分。拱肋外部网格为均匀流的三维风场,截取部分区域划分网格如图 9。计算设定入口条件与风洞试验基本保持一致,出口条件为

流场任意物理量  $\phi$  沿出口法向的梯度为零,假定拱表面及计算域壁面为无滑移。选用了 RSM 湍流模型进行计算,采用一阶迎风格式离散化处理控制方程。选择 SIMPLE 算法求解有限体积分得到压力-速度相关控制方程组。通过监测控制方程的迭代残余量以及各表面压力变化来判定是否收敛。模拟结果显示的阻力系数、升力系数和弯矩系数和试验吻合较好,如图 10。双拱中迎风拱的静力三分力系数与单拱模拟结果类似。下风拱(受遮挡拱)的三分力系数在两拱间距宽度比较小时与试验相比有些误差,如图 11。表明在迎风拱的尾流干扰区风速变化相当复杂,但是模拟结果很好地显示了两拱间距宽度比较大时阻力系数的变化,这是在风洞实验室无法实现的。

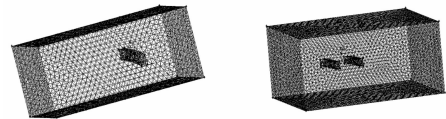


图 9 单拱及双拱模拟网格划分

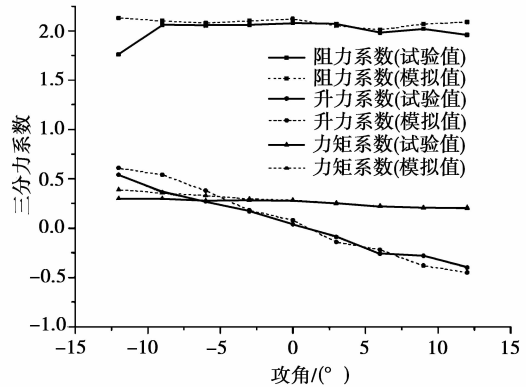


图 10 单拱肋静力三分力系数模拟

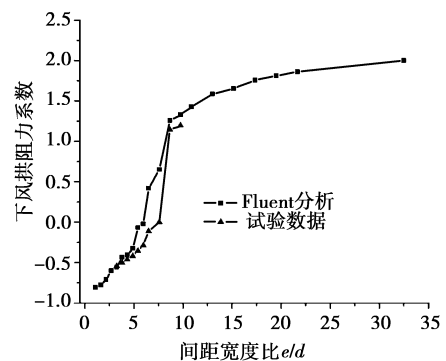


图 11 双拱肋静力三分力系数模拟

## 4 结 论

1) 矩形单拱阻力系数的离散性较小,升力系数和力矩系数离散性相当大,平均值远远小于脉动均方根差值。

2) 双拱中迎风拱的阻力系数值由于下风拱的影响而较单拱值稍小,但相差不大。下风拱的阻力系数主要由两拱的间距宽度比以及攻角决定。当间距宽度比小于6或大于8.6时,下风拱阻力系数比较稳定,离散性较小。当两拱间距宽度比介于6与8.6之间时,下风拱阻力系数离散性较大,受攻角的影响也较大。当间距宽度比超过一定程度以后,阻力系数趋于稳定。

3) 利用流体力学软件 Fluent 模拟了单双拱的风荷载。结果表明,单拱静力三分力系数计算结果与试验值吻合较好;双拱风荷载的模拟结果很好地显示了阻力系数随两拱间距宽度比的变化。

### 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[C]//第五届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集. 成都: [s. n.], 2002.
- [2] 廖海黎. 杭州市钱江四桥风洞模型试验与分析研究[R]. 成都: 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[C]//第十五届全国桥梁学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [4] 胡晓红. 大跨度拱桥等效风荷载试验研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2002.
- [5] 埃米尔·希缪, 罗波特·H·斯坎伦. 风对结构的作用: 风工程导论[M]. 刘尚培, 项海帆, 谢芥明, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [6] SOCKEL H, WATZINGER J. Vibrations of two circular cylinders due to wind-excited interference effects[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(74-76): 1029-1036.
- [7] SUN T F, GU Z F. Interference between wind loading on group of structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995(54-55): 213-225.
- [8] ORLANDO M. Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers [J]. Engineering Structures, 2001(23): 979-992.
- [9] ALAM M, MORIYA M, TAKAI K, et al. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003(91): 139-154.
- [10] 张誉, 李正良, 王汝恒, 等. 建筑结构风荷载干扰效应的试验研究[J]. 西南科技大学学报, 2007, 22(3): 20-23. ZHANG YU, LI ZHENG-LIANG, WANG LU-HENG, et al. Experimental research of interference effects of wind loads on buildings [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2007, 22(3): 20-23.
- [11] FLOWE A C, KUMAR A. Analysis of velocity elds and dispersive cavity parameters as a function of building width to building height ratio using a 3-D computer model for squat buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 86: 87-122.
- [12] KIM S E. Application of CFD to environmental flows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 145-158.
- [13] REICHRATH S, DAVIS T W. Computational aid dynamics simulations and validation of the pressure distribution on the roof of a commercial multi-span Venlo-type glasshouse [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 139-149.
- [14] LEILAL B M, KASTNER-KLEIN P. Concentration and flow distributions in the vicinity of U-shaped buildings: wind-tunnel and computational data [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, (67-68): 745-755.
- [15] 杨伟, 顾明. 高层建筑三维定常风场数值模拟[J]. 同济大学学报, 2003, 36(6): 647-651. YANG WEI, GU MIN. Numerical simulation of steady flow around a 3D high-rise building [J]. Journal of Tongji University, 2003, 36(6): 647-651.

(编辑 赵 静)