

Analysis of Mean Aerodynamic Force Coefficient based on the Dynamic Characteristics of Large Span Arch Bridge and the Force

Mingliang ZHANG¹

¹College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, CHINA

Abstract: Based on the flutter response analysis of long-span arch bridge, the finite element analysis software is used to calculate the dynamic characteristics of the bridge, and the natural frequency and vibration mode of the bridge are obtained. Using the fluid analysis software, the section form of the bridge by numerical simulation, mean aerodynamic force coefficient are obtained. The lateral stiffness of the arch bridge is weak, which verifies the correctness of the CFD numerical simulation method.

Keywords: Arch bridge; Dynamic characteristics; Mean aerodynamic force coefficient; Numerical simulation

基于大跨拱桥的动力特性及断面三受力分析

章明亮¹

¹重庆交通大学土木工程学院, 重庆, 中国, 400074

摘要: 基于大跨拱桥的颤振响应分析, 采用有限元分析软件, 计算桥梁的动力特性参数, 得到桥梁的固有频率和振型。利用流体力学分析软件, 对桥梁的断面形式进行数值风洞模拟, 得到断面的三分力系数。反映出拱桥侧向刚度较弱, 验证了 CFD 数值模拟方法的正确性。

关键词: 拱桥; 动力特性; 三分力系数; 数值模拟

1 引言

在我国公路桥梁系列中, 拱桥作为一种古老的桥式以其跨越能力大、承载能力高、可用地方材料、造价经济、养护维修费用少、造型美观等特有的技术优势而成为建筑历史最悠久、竞争力较强。并且常盛不衰, 不断发展的桥梁形式。据统计, 中国已建单跨 100m 以上的拱桥 115 座之多。拱桥仍是我国公路桥梁大跨度桥梁的主要桥型之一。

结构的风致振动是一个气动弹性力学问题, 以区别于研究固定物体绕流的空气动力学问题。在本世纪 20 年代, 由于分析机翼的颤振破坏建立了气动弹性力学的新领域, T. Theodorsen 和 H. G. Kussner 发表了最初的关于机翼非定常气动力理论, 提出了气动导数的概念。

在 Scanlan 桥梁颤振理论中, 提出了非定常自激力公式, 其中的桥梁颤振气动导数 (也称颤振导数或气动导数) 的获取是前提条件。因此, 颤振导数的识别成为桥梁风工程的一个重要研究领域, 近年来也有很大的发展, 如 MITD 法、OLS 法、最小二乘法等。

颤振导数反映了作用在桥梁主梁断面上的非定常自激气动力的大小和相位, 在桥梁抗风设计中有着十分重要的地位。

利用 Midas/civil 大型结构有限元分析软件, 计算桥梁的动力特性参数, 得到固有频率和振型。利用流体力学分析软件, 对桥梁主梁断面进行数值风洞模拟, 得到断面的三分力系数。

2 工程背景

桥梁位于山区河谷深切, 地形上构成了“V”型峡谷, 桥位处两岸地质情况简单, 覆盖层较薄, 基岩裸露, 没有明显的不良地质, 两岸岸坡稳定性较好。

拱桥方案的立面布置如图 1 所示, 主梁断面如图 2 所示。

拱肋采用空间变截面桁架式钢管混凝土组合体系, 矢跨比为 1/4.08。拱肋为等宽变高度矩形截面的钢管混凝土桁架结构, 拱肋截面宽 4.0m, 拱顶截面高度为 6.0m, 拱脚截面高度为 12.0m。单根拱肋采用 4 根 $\phi 1200\text{mm}$ 钢管组成上、下弦管, 钢管壁厚由拱顶至拱脚分别为 $\delta=20$ 、25 和 28mm, 弦管内灌注 C55 微

膨胀混凝土。弦管之间采用竖腹管、斜腹管、横缀管联结，竖腹管和斜腹管采用 $\phi 660 \times 12 \text{mm}$ 钢管，横向缀管采用 $\phi 700 \times 16 \text{mm}$ ，吊杆处缀管内灌注钢砂混凝土。全桥共设 30 对厂制吊杆，吊杆间距为 9.8m。拱

上立柱采用钢管混凝土截面，钢管尺寸为 $\phi 900 \times 16 \text{mm}$ 。为增加立柱横向稳定性，在较高立柱中间根据需要分别设置 1~4 道横联，横联采用单片钢管桁架形式。

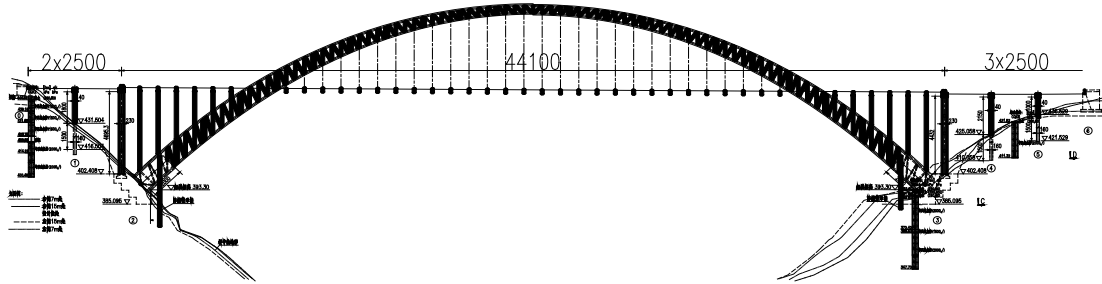


图 1. 拱桥立面布置图 (单位: cm)

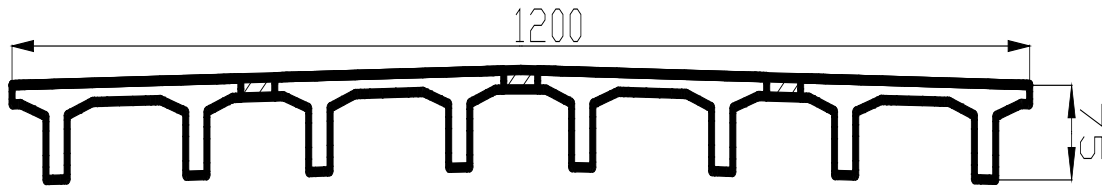


图 2. 拱桥主梁断面图 (单位: cm)



图 3. MIDAS/Civil 有限元模型

主桥行车道系由预制钢筋混凝土 π 型纵梁、预制预应力混凝土横梁和预制混凝土加劲纵梁等组成。 π 型纵梁之间现浇横向接头，纵向在吊杆横梁处现浇接头，形成运营荷载下，全桥连续的纵、横正交梁格体系，桥道板在二期恒载作用下为简支板受力，在二期恒载及活载作用下为多点弹性支承连续梁受力。吊杆横梁之间横桥向设两道钢筋砼预制加劲纵梁，采用现浇湿接缝连接。

3 结构动力特性分析

3.1 有限元模拟

采用有限元模型计算出该桥的动力特性参数。动力特性计算结果的可靠性主要取决于对桥梁的刚度、

质量和边界条件的模拟。因此，需要对桥梁设计图纸、场地等进行仔细分析研究。做桥梁的动力特性分析时，桥梁质量模拟的准确性对结果将产生很大的影响。在分析中采用集中质量模拟，同时将二期恒载亦转换成节点质量。拱桥方案的 MIDAS/Civil 有限元模型 (图 3)。

3.2 动力特性计算结果

计算结果如表 1。其中结构一阶同向侧弯、反对称扭转、反对称竖弯振型分别见图 4~图 6。

根据有限元计算，得出拱桥的动力特性结果。其中拱桥方案一阶侧弯、扭转及竖弯频率分别为 0.14691、0.32298 和 0.32431。

表 1. 拱桥自振频率和振型描述

模态号	频率	描述
1	0.146912	1 阶同向侧弯
2	0.261733	1 阶反向侧弯
3	0.322979	1 阶反对称扭转
4	0.32431	1 阶反对称竖弯
5	0.531703	1 阶对称扭转
6	0.599793	2 阶反对称扭转
7	0.664062	1 阶对称竖弯
8	0.682231	2 阶反对称竖弯
9	0.685432	3 阶反对称扭转

10	0.849442	2 阶对称扭转
11	0.915097	3 阶对称扭转
12	0.929908	立柱对称纵向侧弯
13	0.932862	立柱反对称纵向侧弯
14	1.0288	立柱对称纵向侧弯
15	1.030343	立柱反对称纵向侧弯
16	1.064184	4 阶反对称扭转
17	1.107679	5 阶反对称扭转
18	1.147036	3 阶反对称竖弯
19	1.184133	4 阶对称扭转
20	1.185972	2 阶对称竖弯

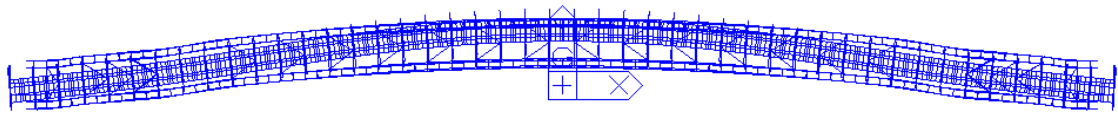


图 4. 拱桥第一阶同向侧弯模式

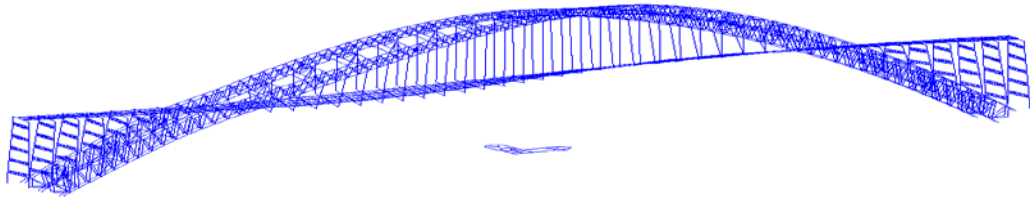


图 5. 拱桥第一阶反对称扭转模式

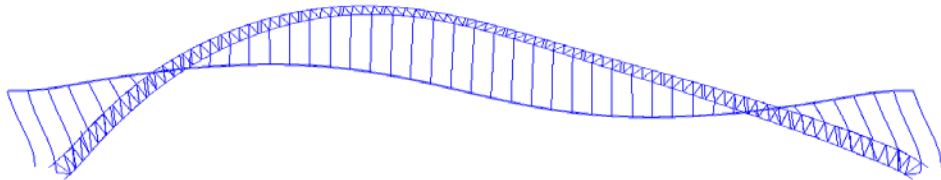


图 6. 拱桥第一阶反对称竖弯模式

4 主梁断面的三分力系数

处于风场中的桥梁断面，在忽略其自身振动的条件下，可以视为风场中固定不动的一个刚体。来流经过这一刚体时，必然会发生绕流现象，使得流线分布发生改变。于是，在桥梁断面表面那些流动较快的点上，压强 P 将小于流动较慢点上的对应值，对桥梁断面上下表面压强差的面积分，就是桥梁所受的升力荷载。同时，桥梁断面前后表面的压强差的面积分，则是桥梁所受的风阻力荷载，也就是通常所说的风荷载。此外，由于升力和阻力的合力作用点往往与桥梁断面的形心不一致，于是还会产生对形心的扭矩。因

此整个断面的风荷载包含升力 F_V 、阻力 F_H 与扭矩 M_T 三个分量，如图 7 所示。

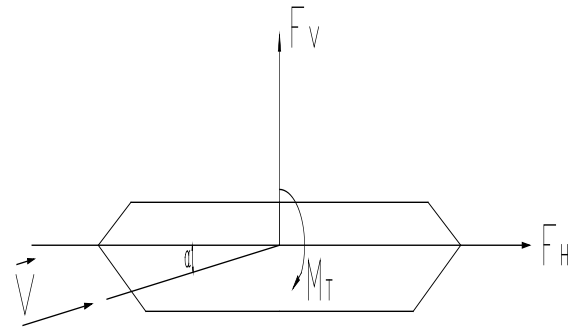


图 7. 风荷载在体轴坐标系下的三分力

根据上述，风荷载产生的根本原因是桥梁断面的存在改变了流场的分布和特性。在其他条件相同的情况下，形状相似的两个截面的静力风荷载应当与它们的特征尺寸成比例，这样就引入无量纲的静力三分力系数，用来描述具有同样形状截面的静力风荷载的共同特征。利用三分力系数，体轴坐标下，静力风荷载可以表示为：

$$阻力 F_H = \frac{1}{2} \rho U^2 C_H D \quad (1)$$

$$升力 F_V = \frac{1}{2} \rho U^2 C_V B \quad (2)$$

$$扭矩 M_T = \frac{1}{2} \rho U^2 C_M B^2 \quad (3)$$

式中，U 为断面足够远的上游来流平均风速， C_H 、 C_V 、 C_M 分别表示阻力系数、升力系数、与扭矩系数，D、B 分别为桥梁断面高度与宽度。式(1)至(3)表示的是单位长度的风荷载。

CFD 的基本思路可以归结为：把在时间域及空间域上连续的物理量（如速度和压力），用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过流动的基本方程建立关于这些离散点上变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值[7]。计算流体力学可以看作是在流动基本方程（质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程）控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟，可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量（如速度、压力、温度等）的分布，以及这些物理量随时间的变化情况。

4.1 主梁断面三分力系数计算结果

通过 CFD 数值模拟方法，建立了断面的流体力学模型，拱桥主梁断面在来流平均风速（10m/s）作用下的风压云图如图 8 所示。

图 9—图 11 给出了来流风速 $U=10\text{m/s}$ 时计算得到的三分力系数随风攻角（ -5° — 5° ）变化的结果，图 12—图 14 给出了来流风速 $U=10\text{m/s}$ 时计算得到的三分力系数导数随风攻角（ -5° — 5° ）变化的结果。

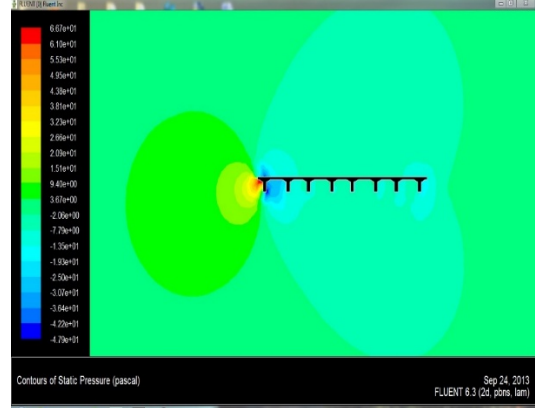


图 8. 主梁截面 CFD 数值模拟的风压云图(风速)

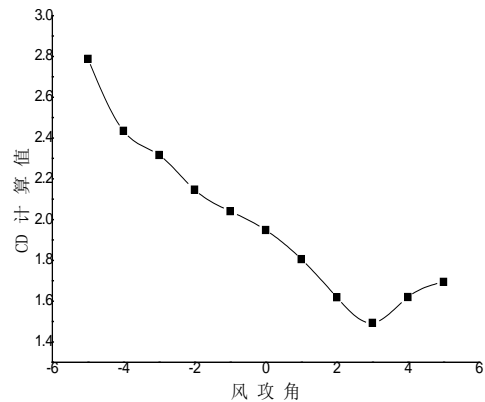


图 9. 主梁断面阻力系数 CD

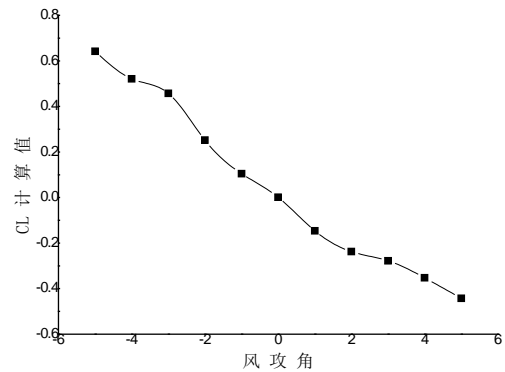


图 10. 主梁断面升力系数 CL

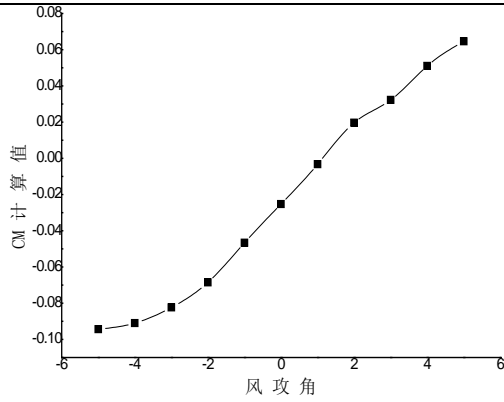


图 11. 主梁断面扭矩系数 CM

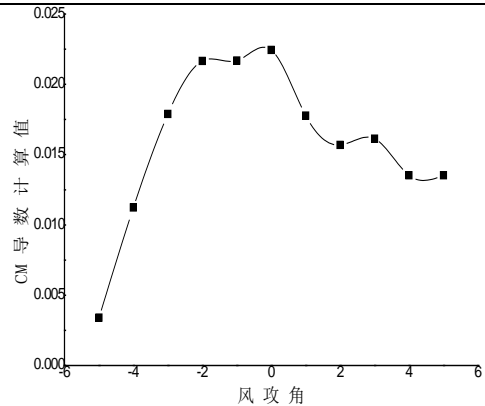


图 14. 主梁断面扭转导数计算值

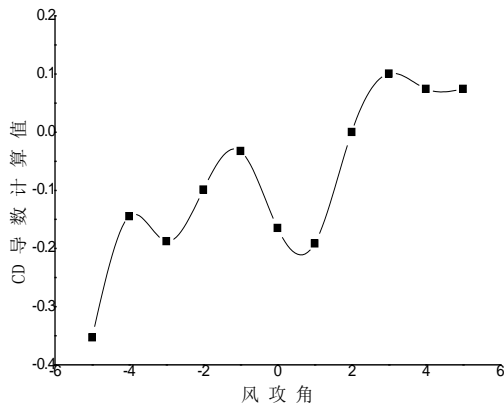


图 12. 主梁断面阻力导数计算值

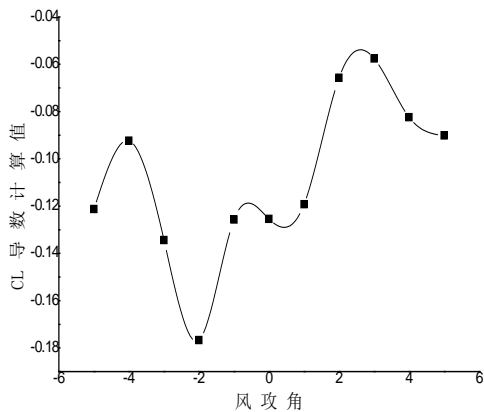


图 13. 主梁断面升力导数计算值

5 结论

1) 根据有限元计算, 得出该大桥的动力特性结果。其中拱桥方案一阶侧弯、扭转及竖弯频率分别为 0.14691、0.32298 和 0.32431;

2) 建立了基于流体力学 CFD 数值模拟的桥梁断面三分力系数计算方法, 结果表明采用数值模拟的三分力系数值能够与风洞实验结果很好的吻合, 验证了方法的正确性。

3) 本文基于动网格技术, 采用强迫振动法对桥梁断面的气动导数进行模拟计算, 该计算方法具有很好的可靠性, 能够应用于工程实践。

References (参考文献)

- [1] 项海帆. 进入 21 世纪的桥梁风工程研究[J]. 同济大学学报, Vol.30, No.5, 2002.
- [2] 瞿伟廉, 刘琳娜. 基于 CFD 的桥梁三分力系数识别的数值研究[J]. 武汉理工大学学报, Vol. 29, No. 7, 2007.
- [3] 祝志文. 桥梁风效应的数值方法及应用[D]. 长沙:中南大学博士学位论文, 2002.
- [4] Y.J.Ge, H.F.Xiang, H.Tanaka. Application of a Reliability Analysis Model to Bridge Flutter under Extreme Winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.2000, (86): 155-167.
- [5] J.H.Walther, A.Larsen. Two Dimensional Discrete Vortex Method for Application to Bluff Body Aerodynamics[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1997, 67&68:183-193.