

文章编号:1671-8879(2011)05-0038-06

考虑风偏角影响的大跨径拱桥横向风荷载试验

王 瑀^{1,3}, 马如进², 涂 熙²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092;
3. 宁波通途投资开发有限公司, 宁波 315000)

摘 要:依据某大跨径拱桥全桥气弹模型风洞试验,研究了不同风偏角下结构的横向风荷载响应。试验对模型的动力特性和静力刚度进行了测定,并采用紊流场模拟桥址处的风环境,进行了 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风偏角下不同风速的试验。试验验证了该拱桥的气动安全性。数据分析结果表明:当风向为正横桥向时,桥梁结构的风作用处于最不利状态,结构关键位置随风偏角的增大而增大;斜风向下桥梁实际风荷载效应比采用三角函数分解方法叠加得到结构风荷载效应更为不利。

关键词:桥梁工程;大跨径拱桥;斜风;风荷载;风洞试验;横风效应

中图分类号:U441 **文献标志码:**A

Test on transversal wind load effect of long-span arch bridge with influence of skew wind

WANG Yu^{1,3}, MA Ru-jin², TU Xi²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Ningbo Tongtu Investment Development Co Ltd, Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the wind tunnel tests on the aero elastic model of a long-span arch bridge, this paper researched the effect of structure under transversal wind loads on different skew angles. The dynamic characteristics and static rigidity of model were tested, and the structure was tested under transversal wind loads on different skew angles. The analysis shows that the bridge will come to the role of the most adverse condition when the wind direction is cross-bridge. And the corresponding key position in the bridge enlarged with the increased angle of skew wind. Furthermore, the skew wind load cannot be decomposed by trigonometric function and superposed to obtain the structure wind load effect, because the actual effect will be more negative. 2 tabs, 10 figs, 13 refs.

Key words: bridge engineering; long-span arch bridge; skew wind; wind load; wind tunnel test; transversal wind load effect

0 引 言

随着材料与施工技术的发展,拱桥的跨越能力

也得到了较大提高。在 500 m 左右跨径中,拱桥与斜拉桥、悬索桥相比具有较好的竞争力^[1]。现阶段中国已建成多座大型拱桥,如上海卢浦大桥(550

收稿日期:2010-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50708073)

作者简介:王 瑀(1977-),男,黑龙江尚志人,宁波通途投资开发有限公司工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:zjnbtt@126.com。

m)和重庆朝天门大桥(552 m)等,已引起了全球同行的关注^[2]。然而,拱桥作为一种复杂的结构形式,构件之间的空间关联关系复杂。大型拱桥多由多肢拱肋组成,拱肋间采用横梁连接,使得整体结构复杂度较高,而各个构件受风荷载作用不一,使得结构整体风效应呈现出复杂的空间关系^[3]。尽管大量的工程实践已建立起能够有效验证拱桥正横向抗风安全性的模型,但针对斜向风荷载响应尚无行之有效的分析方法^[4]。

对于斜风向桥梁风荷载,中国桥梁结构抗风规范中尚未进行详细的定义,仅针对顺桥向风荷载作出了规定,这种方法应用于斜风荷载计算时并不可靠^[5]。现阶段桥梁结构斜风向抗风性能研究集中于不同形式的主梁断面的静气动力上,且在结构形式上侧重于长大跨径的缆索承重桥型。Zhu等针对青马大桥的主梁节段进行了 31° 风偏角以内的斜风向测力试验,表明非全封闭主梁断面的风荷载受偏角影响较大,轴向风荷载随偏角增加而显著增大,且并不满足余弦分解规律^[6]。戴伟等针对双层空腹桁架主梁结构斜拉桥的主梁节段模型进行了 30° 风偏角以内斜风向测力试验,表明各风偏角主梁断面顺桥向风荷载系数为横桥向的 $82\% \sim 89\%$,大于规范取值^[7-8]。刘小兵等针对底部开槽的分体斜拉桥主梁断面进行了静气动力的风洞试验研究,表明主梁断面的纵向阻力系数在较大风偏角下明显大于正余弦分解值^[9]。晏致涛等通过对重庆菜园坝长江大桥(420 m)的节段模型风洞试验研究发现,主拱后拱在风荷载下的受力特点比较复杂,拱肋的阻力系数受拱间距影响较大^[10]。综合而言,当前关于桥梁结构斜风向风荷载的研究表明,桥梁风荷载受斜风偏角角度、主梁断面形式、拱肋空间布置等因素影响较大。尽管横桥向风荷载作用下桥梁为最不利状态,但针对斜风情况,采用简化计算方式,并不能真实反映实际结构的风荷载情况,尤其对于风荷载空间效应相对复杂的拱桥而言,采用简化计算方式得到的结果存在较大的不确定性。

现阶段结构风荷载的研究手段主要包括风洞试验和CFD数值计算,相较之下,风洞试验是较合理且可信的方法。本文以某大跨径中承式拱桥为背景,着重研究不同风偏角下横向风荷载响应随风速的变化规律,以及风偏角对大型拱桥抗风性能的影响;并引入拱桥全桥气弹模型试验,以展开拱桥斜风荷载的分析研究。

1 工程概述

某大跨径式拱桥为中承式系杆拱桥,跨径布置为 $100\text{ m} + 450\text{ m} + 100\text{ m} = 650\text{ m}$,桥面宽度为 46 m 。其中,中跨主梁钢结构部分采用双边箱中横梁结构,箱梁高 3.2 m ,宽 6.8 m ,两边箱梁之间设工字形横梁。中跨钢拱肋矢高为 90 m ,主拱矢跨比为 $1:5$,断面为“凸”形断面,上缘宽度为 2.9 m ,下缘宽度为 3.6 m ,拱肋高度从拱顶至拱脚逐渐增大。两肢拱肋呈提篮拱形,与竖直面夹角为 11° 。吊杆间距为 9 m 。桥型布置如图1、图2所示。

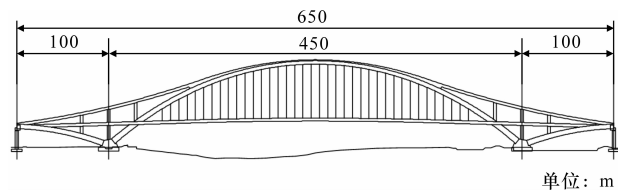


图1 大桥设计立面布置

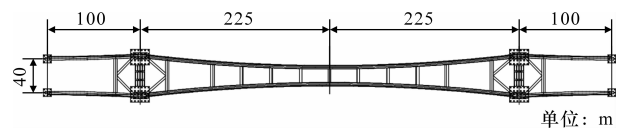


图2 大桥平面

2 风洞试验概况

2.1 全桥模型设计概况

本风洞试验模型设计缩尺比 $\lambda_L = 1/100$ ^[11]。模型由钢质芯棒框架、泡沫外衣及配重3个部分构成。对于桥梁气弹模型,弹性参数和惯性参数是2个重要的物理量,应严格满足相似准则,以保证全桥模型动力特性的相似性和结构位移、内力等力学参量的相似性。拱桥全桥气弹模型的设计及制作难以完全满足刚度的相似关系,原因在于拱肋芯梁断面为矩形,只能满足2个方向的弯曲刚度 EI_y 和 EI_z 的相似关系,其扭转刚度 GJ_d 和拉伸刚度 EA 的误差予以忽略。此外,拱肋芯棒线形以直代曲,芯梁截面尺寸按线性规律渐变,这一近似会带来一定误差。以上两点应在有限元模型设计中予以考虑,并在反复试算和调整中消除这些误差带来的影响。通过动力特性测试,模型各阶振型频率基本符合设计值,阻尼比基本满足全桥气弹模型 0.5% 的要求,因此可以认为,该模型能较好反映实际结构的风振响应。

2.2 动力特性分析及实测

拱桥全桥气弹模型风洞试验,关注的是结构整

体的风振响应,特别是拱梁的竖弯、拱肋的侧弯和主梁的扭转等。桥梁发生风振响应时,结构的前几阶振型起主要作用,并且结构模态耦合效应较明显。因此,通常选用1、2阶拱梁竖弯和侧弯振型、1阶扭

转振型进行模拟。对前述拱桥进行有限元程序分析得到的前5阶振型如图3所示;相应频率见表1。结构动力特性分析使用有限元计算分析软件对成桥状态进行了分析,得到其动力特性。

表1 全桥气弹模型成桥状态动力特性测试

振型特征	振型图	阶数	计算频率/ Hz	模型目标 频率/Hz	模型实测 频率/Hz	误差/%	阻尼比/%
拱梁同向正对称侧弯	图3(a)	2	0.411 6	4.116	4.103	-0.32	0.99
拱梁反对称竖弯	图3(c)	3	0.438 4	4.384	4.299	-1.94	0.59
拱梁异向正对称侧弯	图3(b)	4	0.440 4	4.404	4.494	2.04	0.54
拱肋反对称侧弯	图3(d)	5	0.588 8	5.888	5.862	-0.44	0.38
拱梁正对称竖弯	图3(e)	6	0.591 4	5.914	6.057	2.44	0.73

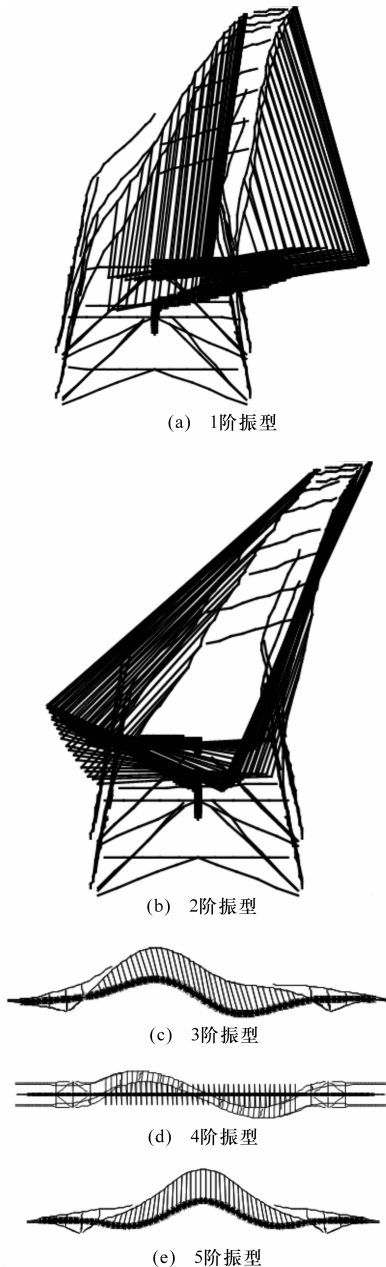


图3 有限元分析前5阶主要振型

2.3 静力校核

模型的动态特性与结构刚度和质量存在密切的关系。动态特性的准确模拟仅意味着结构刚度和质量之比达到要求,而静力刚度反映的静力位移误差是动力测试所不能反映的。在质量一致的前提下,全桥模型能够精确模拟的振型越多,静力刚度的模拟就越准确^[12]。

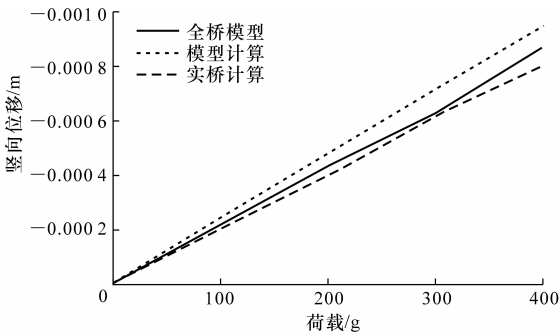
在风洞试验中,模型静力刚度检测先于动态特性检测进行。试验以对称竖向、偏心竖向以及侧向为加载方式对模型施加标准质量,分别考虑竖向、扭转和侧向3个方向的荷载效应,加载位置含主梁中点、主梁1/4点、拱肋中点及拱肋1/4点。与此同时,通过有限元程序获得全桥模型有限元模型的加载结果,以及实桥有限元模型加载结果的缩尺值作为试验测试对照值。主要试验结果如下页图4所示。

通过图4加载曲线可以看到,逐级加载后的模型结构响应与计算结果吻合较好;且具有良好的线弹性表现。这也表明,模型在吹风工况中的响应能正确反映实际结构的特性。

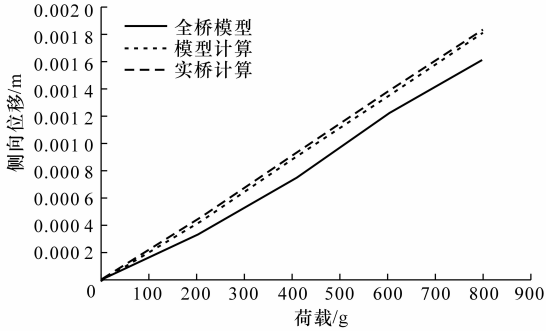
2.4 风场模拟及试验工况

全桥气弹模型风洞测振试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室TJ-3号边界层风洞中进行。根据对桥址处的风环境分析,用尖塔和粗糙元在风洞中模拟了风场指数为0.16的紊流场。根据桥址处的风环境,用尖塔和粗糙元模拟了缩尺比为1:100的B类地貌紊流风场,风速剖面指数口的目标值为0.16。下页图5为风洞中的全桥气弹模型。

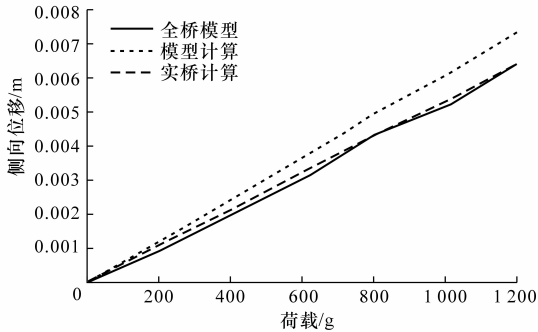
为考虑不利风向的影响,把风偏角定义为来流风向和桥塔平面间的夹角,在紊流场试验中模拟了 0° 攻角下 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 以及 90° 的风偏角。此处, 90° 风偏角为风向正垂直于桥轴方向, 0°



(a) 主梁中跨竖向荷载与竖向位移曲线



(b) 主梁中跨侧向荷载与侧向位移曲线



(c) 拱肋中跨侧向荷载与侧向位移曲线

图 4 静荷载加载影响曲线

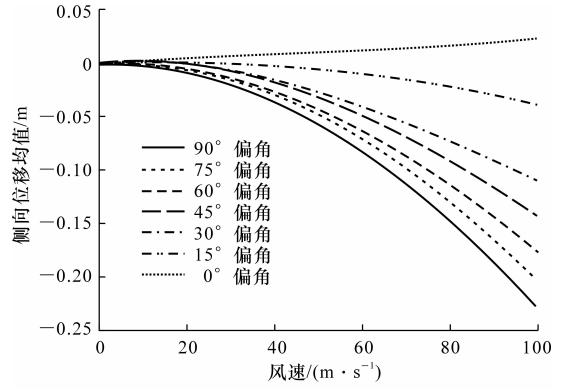


图 5 全桥气弹模型成桥状态(90°风偏角)

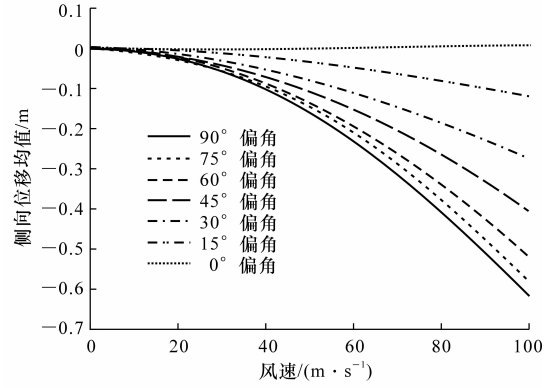
风偏角为风向平行于桥轴方向。试验风速范围为 0~10 m/s,对应于桥面高度处的实桥等效风速为 0~100 m/s。

3 抖振响应试验

本试验中模型关键位置各风偏角下的结构侧向位移响应均值如图 6 所示。由试验结果可知,侧向风荷载不断增大,主梁和拱肋的侧向位移随风偏角的增加而增大。



(a) 主梁中点侧向位移均值



(b) 拱肋中点侧向位移均值

图 6 模型关键位置各风偏角下的结构响应均值

本试验中,实桥等效风速为 90 m/s 的各风偏角模型侧向位移响应均值如图 7 所示。由试验结果可得出:0°风偏角下侧向位移平均值基本为 0;总体规律上,侧向位移均值绝对值随风偏角的增大而增大,但各关键点位移增大的趋势并不一致。

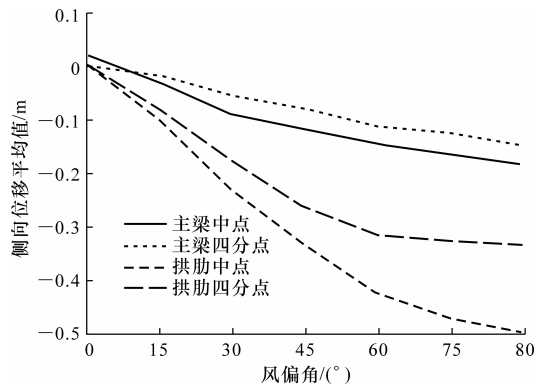


图 7 各关键位置下风偏角与侧向位移平均值的关系 (等效实桥风速为 90 m/s)

本试验中模型关键位置各风偏角下的结构响应根方差如下页图 8 所示。由试验结果分析可知:结构抖振并未在不同风速紊流场中出现不稳定状态;相当于同等规模缆索承重桥型,其抖振振幅较小。试验结果表明,该拱桥对紊流作用敏感度较低,结构内力状态处于安全范围。此外,模型响应根方差随

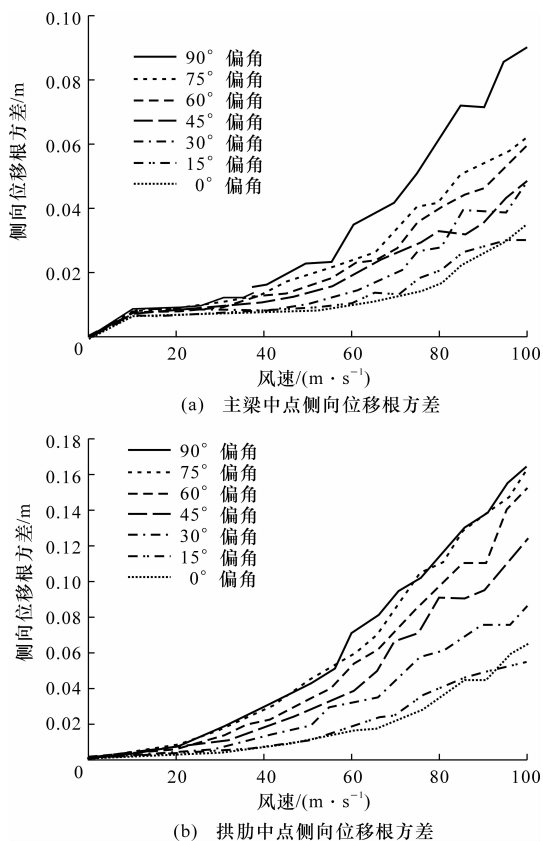


图8 模型关键位置各风偏角下的结构响应根方差

风偏角的增大而增大,即风向为正横风向时模型的风振响应根方差为最大;而当风偏角减小时,风向与桥轴方向逐渐一致,响应则不断减弱。尽管主梁在 0° 风偏角下与风向一致,但由于拱梁体系的空间相关性,主梁仍产生相对较大振动。拱肋相对于主梁更大程度暴露在风作用下,其侧向位移响应根方差总体上要比主梁大约60%。从各偏角的根方差曲线来看,小偏角下的模型风振响应随风速增加的趋势有所减弱,在60 m/s的高风速之后才开始显著增加^[13]。

4 模型斜风响应的计算分析

工程上多将斜风的风速按正余弦方式分解到顺桥向和横桥向的两组风,并将其作用在结构上得到的风效应进行直接叠加,风速分解如图9所示。若这一方法成立,则全桥风洞模型的响应也应满足以上组合特征。

现以各风偏角下实桥等效风速为100 m/s的主梁横向位移均值为对象,研究斜风向风荷载横向位移组合规律。研究方法为:以某个风偏角为研究角度,将该风速(100 m/s)按当前风偏角分解到顺桥向和横桥向2个方向的风速,将各自的风速对应的横

桥向主梁位移试验值均值进行叠加,与实际试验结果进行比较。若分解后在目标方向无对应风速,则按线性方法对已有试验风速点试验值进行插值。

本拱桥风洞试验以 15° 为间隔,共7个风偏角,模型响应实测等效值与目标风偏角风速三角分解叠加值(简称叠加值)的比较如图10所示;分析结果见下页表2。其中,模型实测等效值表示模型实测的位移响应换算到实桥的均值,而将目标风偏角风速分解到顺桥向和横桥向2个方向;通过已有对应风速下的结构响应值进行内插,得到2个方向各自的位移响应,求和后得到响应叠加值。

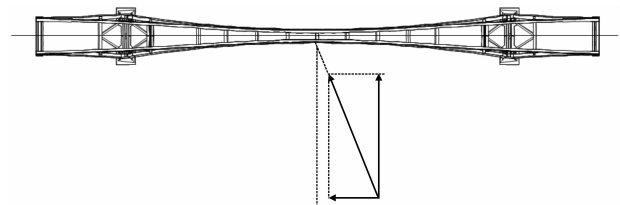


图9 目标风偏角风速分解

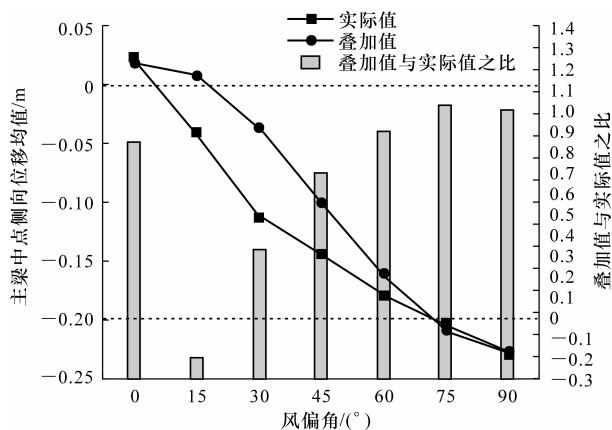


图10 模型响应实测等效值与三角分解叠加值的比较

由计算结果比较分析可知,按传统的三角分解方法,不能真实地得到结构实际风荷载响应。在较小偏角范围内($15^\circ \sim 45^\circ$),三角分解方法得到的叠加值与实际响应相差较大。因此,实际考虑斜风对复杂结构的影响,需要进行更深入的研究。

5 结语

(1)在各风偏角下全桥模型整体上产生的位移响应均值相对较小,而对应的根方差表明,模型振动处于可接受的范围内,实际桥梁结构具有一定的抗风安全性。

(2)试验结果表明,当风向为正横桥向时,为桥梁结构的风作用最不利状态,结构关键位置基本出现最大响应,而该响应随风偏角的增大而增大。

表2 模型响应实测等效值与三角分解叠加值计算比较

风偏角/(°)	模型实测等效值/m	顺桥向		横桥向		响应叠加值/m	叠加值与实际值之比
		风速分量/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	对应响应/m	风速分量/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	对应响应/m		
90	-0.229 1	0.00	0.000 8	100.00	-0.229 1	-0.228 3	1.00
75	-0.203 4	25.88	0.006 0	96.59	-0.214 4	-0.208 4	1.02
60	-0.178 8	50.00	0.011 1	86.60	-0.171 5	-0.160 4	0.90
45	-0.143 5	70.71	0.013 3	70.71	-0.113 7	-0.100 4	0.70
30	-0.110 7	86.60	0.019 6	50.00	-0.056 3	-0.036 6	0.33
15	-0.039 2	96.59	0.021 9	25.88	-0.014 3	0.007 6	-0.19
0	0.023 1	100.00	0.023 1	0.00	-0.003 5	0.019 6	0.85

(3)试验结果表明,按风偏角进行三角分解得到的风荷载响应与实际值,在一定风偏角范围内存在较大的差异,对该类桥梁的风荷载,需要借助风洞试验进行更深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] Chen W F. Bridge Engineering Handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [2] Tang M C. Evolution of bridge technology[R]. Weimar: Keynote Lecture, IABSE Symposium, 2007.
- [3] 陈 峰, 胡大琳. 大跨径钢管混凝土拱桥非线性静风稳定性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 42-46.
CHEN Feng, HU Da-lin. Aerostatics stability of long-span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 42-46.
- [4] 王爱勤, 李龙安. 公路大跨度桥梁抗风性能评价方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 58-61.
WANG Ai-qin, LI Long-an. Evaluation method of wind-resistance capability of large-span bridge on highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 58-61.
- [5] JTG/T D60-01—2004, 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [6] Zhu L D, Xu Y L, Zhang F, et al. Tsing Ma bridge deck under skew winds, Part I: aerodynamic coefficients[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 781-805.
- [7] 戴 伟. 桥梁桁架构件气动力参数研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [8] 戴 伟, 马如进. 上海闵浦大桥桁架结构主梁斜风下的气动力参数研究[J]. 上海公路, 2009(1): 26-30.
DAI Wei, MA Ru-jin. Study on the aerodynamic pa-

rameters of truss girder of Shanghai Minpu bridge under skew wind [J]. Shanghai Highway, 2009 (1): 26-30.

- [9] 刘小兵, 陈政清, 刘志文. 斜风下大跨度桥梁主梁三分力系数试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(9): 10-14.
LIU Xiao-bing, CHEN Zheng-qing, LIU Zhi-wen. Experimental study on the aerodynamic coefficients of long span bridge deck under skew winds[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2008, 35(9): 10-14.
- [10] 晏致涛, 李正良, 祁仁俊. 大跨度中承式拱桥节段模型风洞试验[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(6): 55-57.
YAN Zhi-tao, LI Zheng-liang, QI Ren-jun. Wind tunnel tests of long span half-through arch bridge section model[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(6): 55-57.
- [11] 陈艾荣. 宁波东外环路甬江大桥抗风性能试验研究[R]. 上海: 同济大学, 2009.
- [12] 涂 熙, 马如进, 陈艾荣. 拱桥气弹模型的设计、修正与测试[J]. 上海公路, 2008(1): 44-48.
TU Xi, MA Ru-jin, CHEN Ai-rong. Designing updating and calibrating of a full bridge aeroelastic model for an arch bridge[J]. Shanghai Highway, 2008(1): 44-48.
- [13] 胡庆安, 乔云强, 刘健新, 等. 斜风作用下桥塔施工阶段抖振性能[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 40-43.
HU Qing-an, QIAO Yun-qiang, LIU Jian-xin, et al. Buffeting performance of bridge tower under yawed wind during construction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 40-43.