

文章编号:1671-8879(2008)06-0055-05

大跨度双幅桥面桥梁气动干扰效应

刘志文¹, 陈政清¹, 胡建华², 贺拴海³

(1. 湖南大学风工程试验研究中心, 湖南长沙 410082; 2. 湖南省交通规划勘测设计院, 湖南长沙 410008; 3. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要:通过两座双幅桥面桥梁抗风性能的研究,采用节段模型风洞试验对双幅桥面桥梁的气动干扰进行了初步研究。研究表明:对于双幅桥面桥梁的气动干扰效应主要表现为对涡激共振响应的影响;对颤振稳定性的影响则表现为,与单幅桥面桥梁相比双幅桥面桥梁的颤振临界风速有所降低;双幅桥面桥梁三分力系数的气动干扰效应主要表现为,下游桥面阻力系数降低,上游桥面桥梁阻力系数与单幅桥面相比略有降低。

关键词:桥梁工程;双幅桥面;气动干扰;三分力系数;涡激共振;颤振稳定性

中图分类号:U448.2 **文献标志码:**A

Aerodynamic interference effects of twin decks bridges with long span

LIU Zhi-wen¹, CHEN Zheng-qing¹, HU Jian-hua², HE Shuan-hai³

(1. Research Center of Wind Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;
2. Hunan Province Institute of Transportation Plan and Design, Changsha 410008, Hunan, China;
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Aerodynamic interference effects on twin decks bridges with long span were investigated preliminarily based on wind resistant research of two bridges with twin decks using section model wind tunnel tests. The research results show that the vortex shedding of twin decks bridges is effected mostly by aerodynamic interference of the twin decks; aerodynamic instability of the twin decks bridges is effected by the aerodynamic interference of twin decks also, and flutter instability velocity of twin decks bridges is below under that of single deck bridges; the aerostatic coefficients of twin decks bridges are effected by aerodynamic interference of twin decks; the drag coefficient of the leeward deck is much smaller than that of single deck; the drag coefficient of windward deck decreases slightly compared to that of single deck. 4 tabs, 10 figs, 10 refs.

Key words: bridge engineering; twin decks; aerodynamic interference; aerostatic coefficient; vortex shedding resonance; flutter stability

0 引言

目前,国内外双幅桥面桥梁的建设越来越多,主要表现为新建双幅桥面桥梁和为适应日益增加的交通

流量而在已建桥梁附近再建与其平行的一座桥梁两大类。双幅桥面桥梁由于主梁距离较近,在气流作用下,上游桥面与下游桥面之间存在一定的相互影响,如上下游桥面气动干扰所引起的双幅桥面桥梁

收稿日期:2007-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(50608030)

作者简介:刘志文(1975-),男,山西阳高人,副教授,工学博士;E-mail:liuzhiwen757@126.com.

主梁涡激共振、颤振稳定性、抖振响应及上下游桥面的风荷载等问题,可把这些影响称为双幅桥面的“气动干扰效应”,双幅桥之间的气动干扰是大跨度双幅桥面桥梁抗风设计最为关注的问题之一^[1-3]。为此,本文通过风洞试验研究双幅桥面桥梁的气动干扰问题,同时考察了双幅桥面主梁之间的气动干扰对桥梁的颤振稳定性和三分力系数的影响。

1 气动干扰研究的现状

20世纪80年代以来,对气动干扰的研究涉及了气动干扰效应的几个主要方面:①对干扰机理的研究;②对低矮建筑气动干扰效应的研究;③除了矩形断面建筑模型外,对复杂外形建筑模型和大跨屋盖结构模型也进行了研究^[4-5]。同济大学顾明等对高层建筑的气动干扰进行了较为系统的研究^[6]。20世纪90年代以来,除了风洞试验外,关于多个钝体之间的气动干扰的数值计算研究也逐渐为广大研究者所采用^[7]。Kim等采用离散涡对多柱体绕流进行了数值模拟^[8];周志勇等采用离散涡方法对并列

圆柱的气动干扰进行了数值模拟^[9];楼小峰等对钝体的绕流进行了计算^[10]。可以看出,对多钝体的气动干扰目前主要的研究手段仍以风洞试验为主,数值模拟为辅。综上所述,多个钝体的气动干扰研究具有十分重要的理论意义和实际价值。大量研究表明,气动干扰效应会增加建筑结构的气动响应,如果考虑不周,将会引起建筑结构的破坏。

目前,针对大跨度双幅桥面桥梁的气动干扰研究文献相对较少,主要针对特定工程来研究双幅桥面的气动干扰效应,如表1所示。随着双幅桥面桥梁的建设,关于双幅桥面桥梁气动干扰研究就显得十分必要。作者在承担中国两座双幅桥面桥梁抗风性能的研究时,通过风洞试验发现双幅桥面气动干扰效应比较突出。双幅桥面桥梁之间的气动干扰效应主要表现为:由于上下游桥面之间的气动干扰而导致上下游桥面的三分力系数、颤振稳定性、涡激共振响应以及抖振响应都不同于单幅桥面桥梁。因此,着重研究了双幅桥面桥梁气动干扰导致的涡激共振问题。

表1 国内外双幅桥面桥梁基本参数及抗风研究状况

桥名	国家	特点描述	单幅桥面 宽度 W/m	净间距 D/m	$\frac{D}{W}$	抗风研究重点
Fred Hartman Bridge	美国	主梁为钢-混组合截面,主跨为381 m,塔高为133 m	23.83	4.67	0.196	双幅桥面气动干扰
名港西大桥	日本	主跨405 m的斜拉桥,分两期建设	14.50	35.50	2.448	一期、二期桥梁气动干扰节段模型和全桥模型试验
尾道大桥	日本	主跨215 m的斜拉桥,并列两座桥	10.40	37.30	3.587	节段模型试验
2004年建设的新塔科马桥	美国	与1950年建成的塔科马桥平行并列的悬索桥	18.30	42.70	2.333	双幅桥面气动干扰
苏通长江公路大桥辅航道桥	中国	主跨为268 m的钢连续梁方案	16.40	1.20	0.073	三分力系数的测试,双幅桥面的涡激振动
广州平胜大桥	中国	主跨350 m的独塔自锚式、分离双桥面悬索桥	26.10	3.80	0.146	双幅桥面气动干扰,双主缆气动干扰
青岛海湾大桥红岛航道桥	中国	主跨120 m的并列两座独塔斜拉桥	23.00	7.50	0.326	双幅桥面的气动干扰效应

2 气动干扰的试验研究

通过节段模型风洞试验来研究双幅桥面的气动干扰对桥梁涡激振动、颤振稳定性及静力三分力系数的影响。双幅桥面桥梁的气动干扰研究的风洞试验在湖南大学风工程试验研究中心 HD-2 边界层风洞中进行。该风洞风速的调节和控制采用计算机终端集中控制的可控硅直流调速系统;风洞的试验段截面尺寸为3.0 m(宽)×2.5 m(高)×17.0 m(长),试验风速范围为0.50~58 m/s;该试验段的方向不均匀性为 $\Delta\alpha \leq 0.5^\circ$ 、 $\Delta\beta \leq 0.5^\circ$ ($\Delta\alpha$ 为竖向攻角,

$\Delta\beta$ 为水平偏角),湍流度 $\epsilon \leq 0.2\%$,速度场不均匀性 $\mu \leq 1\%$;采用弹性悬挂系统,对双幅桥面主梁进行风洞试验。

本文针对3种不同桥型:悬索桥、斜拉桥和拱桥,进行了双幅桥面桥梁的气动干扰研究。双幅桥面桥梁主梁断面见图1~图3(见下页),相应的一阶对称竖弯自振频率分别为0.308 4、0.765 8、0.915 1 Hz;一阶对称扭转频率分别为1.154 2、2.265 4、2.118 4 Hz;双幅桥面的间距D与梁宽B之比D/B分别为0.146、0.65和0.40。相应的节段模型风洞试验模型缩尺比及试验照片见图4、图5(见下页)。

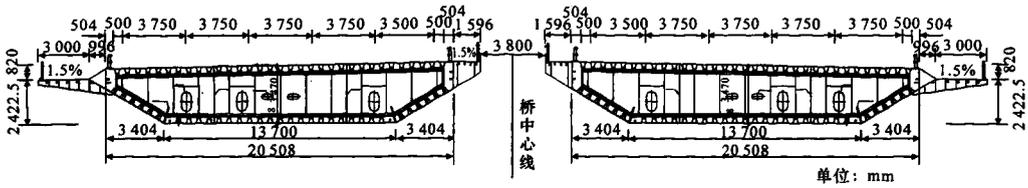


图 1 广州平胜大桥双幅桥面主梁断面

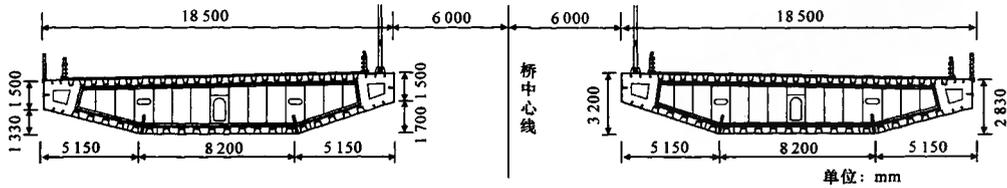


图 2 青岛海湾大桥红岛航道桥斜拉桥方案双幅桥面主梁断面

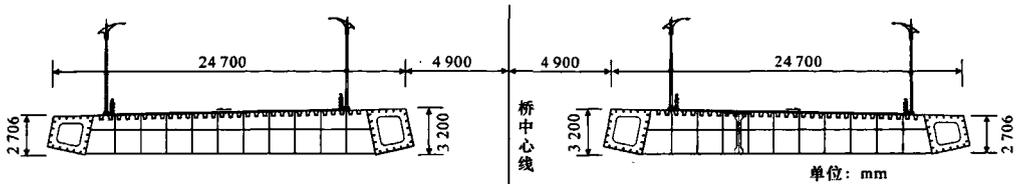
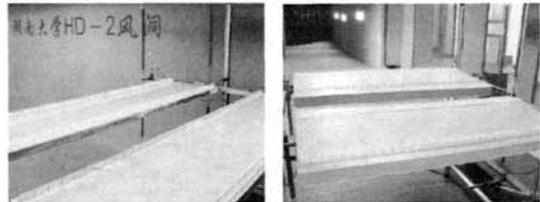


图 3 青岛海湾大桥红岛航道桥拱桥方案双幅桥面主梁断面



图 4 广州平胜大桥节段模型试验(1:50)



(a) 斜拉桥方案(1:50) (b) 拱桥方案(1:50)

3 气动干扰对涡激振动的影响

3.1 广州平胜大桥气动干扰效应

为了进行试验对比,首先对广州平胜大桥进行了单幅桥面的涡激振动试验,模型试验参数见表 2。

表 2 广州平胜大桥双幅桥面涡激共振试验模型参数

试验模型	有限元分析参数			节段模型参数		
	竖向频率 f_b /Hz	等效质量/kg	模型质量/kg	竖向频率 f_b /Hz	竖向阻尼 ζ_b	扭转频率 f_a /Hz
上游模型	4.060 0	16.115 0	16.948 0	4.102 0	0.009 9	8.887 0
下游模型	4.060 0	16.115 0	15.542 0	4.102 0	0.001 8	8.691 0

双幅桥面涡激振动试验结果见图 6、图 7(见下页)。从图 6、图 7 可以看出:对于攻角为 $+3^\circ$ 时,并列双幅桥面在实际桥位处桥面风速为 8 m/s 下发生涡激共振响应,响应根方差为 0.008 m,考虑涡激共振响应修正系数后,亦小于允许值 0.130 m,故可满足要求;攻角为 0° 、 -3° 时,虽然没有发生明显的涡激共振响应,但双幅桥面的气动干扰作用仍存在,随着风速的增加,下游桥面的竖向振动响应明显大于上游桥面的竖向振动响应。在攻角为 $+3^\circ$ 、 0° 、 -3°

涡激共振试验的试验风速范围为 $0\sim 15$ m/s,相当于成桥状态实桥风速的 $0\sim 52$ m/s。试验结果表明,在风攻角为 $+3^\circ$ 、 -3° 范围内的均匀流作用下,在上述试验风速范围内单幅桥面主梁没有出现明显的扭转涡激共振和竖向涡激共振现象。

时均未发现有扭转涡激共振现象,但扭转振动响应随着风速的增加,下游桥面的扭转振动响应明显大于上游桥面的扭转振动响应。

3.2 青岛海湾大桥红岛航道桥气动干扰效应

双桥面的涡激共振试验模型参数见表 3,对应的双幅桥面的涡激共振响应见图 8、图 9(见下页)。从图 8、图 9 可以看出,对于斜拉桥方案,双幅桥面在 $+3^\circ$ 、 0° 攻角未发生涡激共振现象,但在 -3° 攻角下发生了涡激共振现象,锁定风速为 19.0~21.4 m/s。对

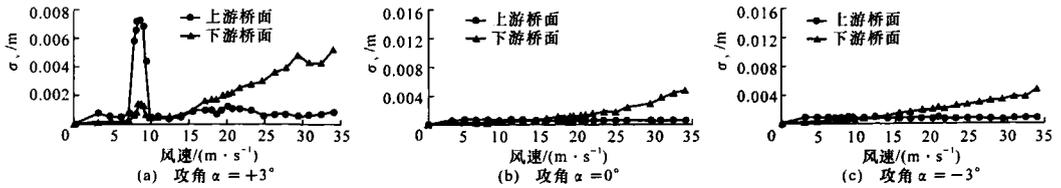


图6 广州平胜大桥竖向涡激振动位移根方差响应 σ_y 随风速的变化曲线

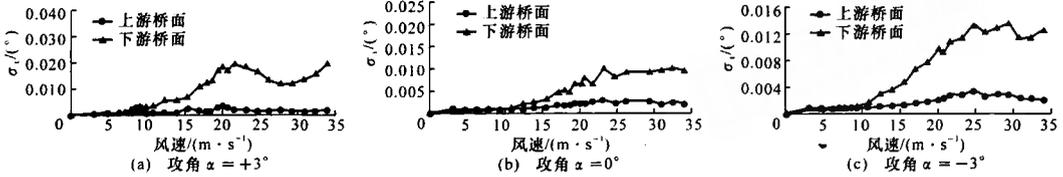


图7 广州平胜大桥扭转涡激振动扭转角根方差响应 σ_θ 随风速的变化曲线

于拱桥方案,攻角为 $+3^\circ$ 时,双幅桥面在实际桥位处桥面风速为 $22.2\sim 26.2\text{ m/s}$ 下均发生了涡激共振响应,且下游桥面的振动响应要大于上游桥面的振动响应;攻角为 0° 时,双幅桥面在实际桥位处桥面风速为 $19.15\sim 24.19\text{ m/s}$ 下均发生了涡激共振响应,且下游桥面的振动响应要大于上游桥面的振动响应;攻角为 -3° 时,未发现明显的锁定现象,即未

发生涡激共振现象。

表3 双幅桥面涡激共振试验模型参数

工况	试验模型	模型质量/kg	竖向频率 f_n /Hz	竖向阻尼 ζ_n
斜拉桥方案	上游模型	8.043	4.758	0.49
	下游模型	8.110	4.883	0.48
拱桥方案	上游模型	9.105	4.492	0.50
	下游模型	9.210	4.590	0.51

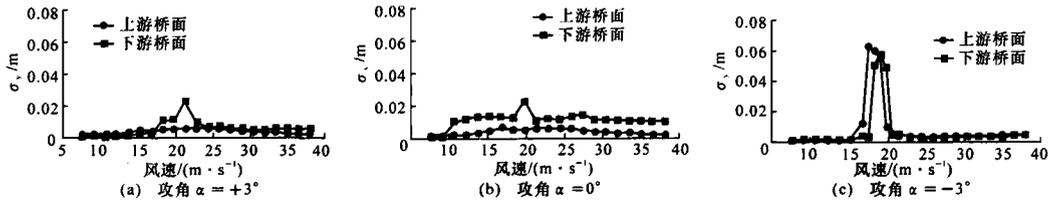


图8 青岛海湾大桥红岛航道桥斜拉桥方案的竖向涡激振动位移根方差响应 σ_y 随风速的变化曲线

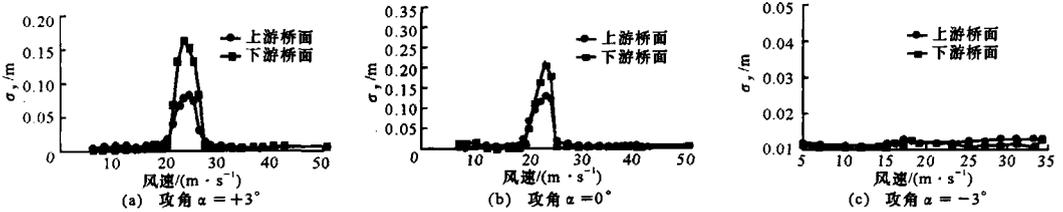


图9 青岛海湾大桥红岛航道桥拱桥方案的竖向涡激振动位移根方差响应 σ_y 随风速的变化曲线

4 气动干扰对桥梁颤振稳定性的影响

双幅桥面桥梁气动干扰对桥梁颤振稳定性的影响主要表现为由于气动干扰而导致的双幅桥面桥梁气动稳定性的下降。目前,一般设计的双幅桥面桥梁,由于其跨度不是特别大,因此双幅桥面桥梁的气动稳定性问题相对显得不是十分突出。本文仅对广州平胜大桥和青岛海湾大桥红岛航道桥初步设计阶段的斜拉桥方案进行了单、双幅桥面桥梁的颤振稳定性对比试验。表4给出了这两座桥的单、双幅桥

面的颤振稳定性试验结果(见下页)。从表4可以看出,双幅桥面桥梁的颤振临界风速与单幅桥面桥梁相比有所降低。

5 气动干扰对三分力系数的影响

对广州平胜大桥进行了双幅桥面桥梁的三分力系数风洞试验。图10为该桥的单幅桥面和双幅桥面的上游主梁和下游主梁的三分力系数试验结果(见下页)。从图10可看出,双幅桥面主梁断面(较流线型):上游桥面主梁阻力系数与单幅桥面主梁阻

表 4 两座桥的单、双幅桥面的颤振稳定性试验

桥名	攻角 $\alpha/$ ($^{\circ}$)	颤振临界风速/ ($m \cdot s^{-1}$)		临界风速 降低比/%
		V_1	V_2	$\frac{V_1 - V_2}{V_1}$
广州平胜大桥	+3	189.0	132.0	30.16
	0	201.0	139.0	30.85
	-3	247.0	151.0	38.87
青岛海湾大桥红岛 航道桥初步设计价 段斜拉桥方案	+3	222.0	193.4	12.88
	0	257.0	230.1	10.47
	-3	293.8	269.3	8.34

注: V_1 、 V_2 分别为单、双幅桥面颤振临界风速。

力系数相比略小,下游桥面主梁阻力系数则明显小于上游桥面主梁阻力系数;上游桥面主梁升力系数与单幅桥面主梁升力系数接近,下游桥面主梁升力系数小于上游桥面升力系数;上游桥面主梁升力矩系数与单幅桥面主梁升力矩系数接近,下游桥面主

梁升力矩系数小于上游桥面升力矩系数。

6 结 语

(1) 对于双幅桥面桥梁的气动干扰主要表现为涡激振动,桥梁断面的流线型程度是影响双幅桥面桥梁涡激共振响应的一个重要的因素;另外,主梁间距也是影响双幅桥面桥梁气动干扰的一个主要因素,在一定的范围内,双幅桥面主梁间距越大,由此引起的桥梁涡激共振现象越明显。

(2) 双幅桥面桥梁之间的气动干扰对颤振稳定性的影响与单幅桥面桥梁相比,颤振临界风速有所降低。

(3) 双幅桥面桥梁的气动干扰主要表现在对下游桥面三分力系数的影响,上游桥面桥梁除阻力系数与单幅桥面相比有所降低外,升力系数和升力矩系数与单幅桥面桥梁的相差不大。

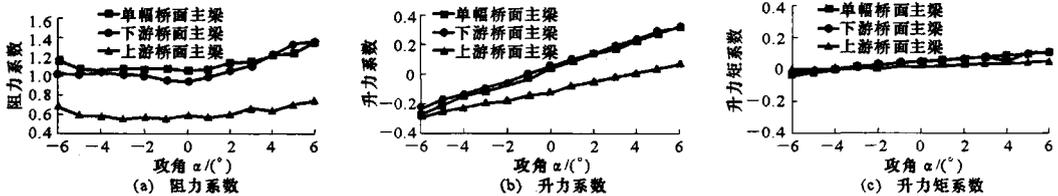


图 10 广州平胜大桥主梁三分力系数随攻角的变化曲线

参考文献:

References:

[1] Rowan A I, Stoyan S, Jiming X, et al. Tacoma narrows 50 years later-wind engineering investigations for parallel bridges[J]. Bridge Structures: Assessment, Design and Construction, 2005, 11(1): 3-17.

[2] 湖南大学风工程试验研究中心. 广州平胜大桥抗风性能试验研究(之一): 节段模型风洞试验研究报告[R]. 长沙: 湖南大学, 2005.

[3] 湖南大学风工程试验研究中心. 青岛海湾大桥一期工程结构初步设计抗风性能研究(之一): 红岛航道桥节段模型风洞试验研究[R]. 长沙: 湖南大学, 2005.

[4] Zdravkovich M M. Review of flow interference between two cylinders in various arrangement[J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 99: 618-633.

[5] Khanduri A C, Stathopoulos T, Bedard C. Wind-induced interference effects on building: A review of the state-of-the-art[J]. Engineering Structures, 1998, 20(7): 617-630.

[6] 顾明, 黄鹏. 群体高层建筑风荷载干扰的研究现状及展望[J]. 同济大学学报, 2003, 31(7): 762-766. GU Ming, HUANG Peng. Research history and state-of-art of interference effects of wind loads of a cluster of tall buildings[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(7): 762-766.

[7] 张相庭. 风力下不同地貌高层建筑群相互干扰影响及相应规范条文研究[C]//张相庭. 结构风工程研究及进展. 重庆: 重庆大学出版社, 1995: 210-215.

[8] Kim T, Flynn M R. Numerical simulation of air flow around multiple objects using the discrete vortex method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56(2/3): 213-234.

[9] 周志勇, 陈艾荣, 项海帆. 涡方法分析并列圆柱的旋涡脱落现象[J]. 空气动力学学报, 2003, 21(1): 38-46. ZHOU. Zhi-yong, CHEN Ai-rong, XIANG Hai-fan. Numerical analysis of interactive vortex-shedding from a pair of circular cylinders in a transverse arrangement by random vortex method[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2003, 21(1): 38-46.

[10] 楼小峰, 曹丰产, 林志兴. 串列钝体绕流的数值计算[J]. 同济大学学报, 2002, 30(5): 604-608. LOU Xiao-feng, CAO Feng-chan, LIN Zhi-xing. Numerical simulation of flows around two bluff bodies in tandem arrangements[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(5): 604-608.