

开口桥梁断面颤振及气动措施的数值与试验研究

战庆亮, 周志勇, 葛耀君

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对典型开口桥梁断面颤振抑振措施进行了风洞试验和数值模拟研究. 风洞试验结果表明, 原型断面在较低风速即发生了颤振失稳现象. 通过数值模拟方法进行了颤振模拟, 与风洞试验得到了一致的颤振临界风速, 并研究了其颤振机理, 即高折减风速下断面下表面产生的旋涡脱落及其漂移与断面扭转位移相匹配, 产生了与断面运动方向相同的气动扭矩, 导致了颤振发散. 数值模拟显示, 下稳定板可以有效阻碍断面下表面旋涡的脱落和运动, 使得气动力在断面运动周期内做功为负, 抑制颤振发散. 节段模型风洞试验和全桥模型风洞试验结果显示, 下稳定板是开口桥梁断面颤振的有效气动抑振措施.

关键词: 开口结合梁; 稳定板; 旋涡脱落机制; 气动导数; 颤振

中图分类号: U441

文献标志码: A

Numerical and Experimental Study of the Mechanism of Torsional Flutter for Open-Cross-Section Composite Beams

ZHAN Qingliang, ZHOU Zhiyong, GE Yaojun

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Computational fluid dynamics and experimental methods are utilized to study the flutter characteristic and countermeasure mechanism of open-cross-section. The wind tunnel test results show that the prototype section of one suspension bridge tends to suffer flutter instability at relatively low wind speeds. The flutter critical wind speed is obtained by using the CFD approach, which conforms well with wind tunnel test results. Numerical simulations show that vortex shedding and drift from the lower surface of the section at high wind speeds match with the torsional displacement of the deck section. Vortex drifting produces the same direction aerodynamic torque as the section movement direction, leading to a flutter divergence. The same calculation is done with three sections added with different

types of stabilization plates. The existence of stabilization plate prohibits the development and movement of main vortices, resulting in aerodynamic forces acting on the girder related less to displacement, thus suppress the flutter. Sectional and aerodynamics model wind tunnel tests are conducted to prove the effectiveness of stabilization plates. The results show that the lower stability plate is an effective vibration suppression measure for the flutter of the open-cross-section.

Key words: open-cross-section composite beam; vertical stabilization plate; vortex shedding mechanism; aerodynamic derivatives; bridge flutter

颤振稳定性是大跨度柔性桥梁设计时必须考虑的关键问题之一, 要求桥梁设计选型时必须选择合理的主梁断面气动外形. 如果原始的主梁断面外形不能满足颤振验算要求, 那么增加恰当的气动措施, 能够在不改变原有桥梁受力体系的情况下改善断面的气动性能, 从而提高整体的气动稳定性.

Scanlan^[1]提出了用气动导数表示的自激力模型. 基于风洞试验提取气动导数的颤振分析方法得到了广泛的应用. 气动导数的识别方法分为自由振动法和强迫振动法. 杨詠昕等^[2]对颤振驱动机理和形态进行了更为细致的研究. 随着计算流体力学(CFD)的迅速发展, 基于 CFD 的数值方法逐步成为研究桥梁气动弹性问题的新手段^[3]. Walther 等^[4]首先将离散涡方法应用于桥梁断面绕流计算中, 并采用强迫振动法识别了流线型断面的气动导数. Šarkić 等^[5]采用 RANS 方法结合 SST 湍流模型对箱型桥梁断面的静力系数和颤振导数进行了识别, 认为 RANS 方法可以很好地用于桥梁类钝体断面的颤振导数识别. Shirai 等^[6]采用 $k-\epsilon$ 模型对分离双箱断面的气动导数进行了识别, 得到了与试验一致的结果,

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(91215302); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036300)

第一作者: 战庆亮(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为计算流体力学和结构风工程. E-mail: zhanqingliang@163.com

并进一步对双矩形断面进行计算,分析了中央稳定板对双幅桥提高颤振稳定性的作用机理.祝志文等^[7]和洪亮等^[8]分别采用二阶 Projection 算法和有限体积法,对流线型桥梁断面(大海带桥和苏通大桥)进行了低雷诺数下($Re=300$)强迫振动模拟,并与风洞试验结果进行了对比.以上作者的研究证明了计算流体力学数值模拟方法可以用于桥梁断面颤振问题的模拟,但并未用于进行颤振发散机理和抑振措施的研究中.而由于开口叠合梁断面绕流流场复杂,因此目前针对其颤振模拟和抑振措施等相关研究不多.周志勇等^[9]采用离散涡方法,对开口桥梁断面绕流问题及颤振导数问题进行了一系列详细的研究,包括雷诺数效应、开口断面的气动参数识别等^[10],并对颤振抑振措施的机理进行了细致解释^[11],其结果与试验值吻合非常好.

本文以某较低风速即发生颤振失稳问题的开口主梁为例,使其分别进行竖向和扭转向强迫简谐振动.采用基于 $k-\omega$ 湍流模型的 RANS 方法进行绕流计算和颤振导数识别,分析其颤振失稳原因,并同时增设 3 种不同形式稳定板的断面进行模拟,以探讨抑振措施的有效性和工作机理,并通过节段模型风洞试验和全桥气弹模型试验进行验证.

1 节段模型风洞试验

本文所研究的开口钢混结合梁断面如图 1 所示,该断面具有良好的力学性能,既可充分发挥钢与混凝土的力学特性优势,又可减轻自重、节约材料用量.但由于其下表面呈内凹状,可能产生分离涡旋等气流失稳现象,导致主梁受到不利的气动力.

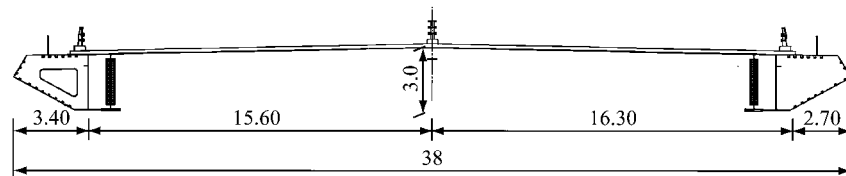


图 1 开口钢混结合梁示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of open cross section (unit: m)

风洞试验在同济大学 TJ-1 风洞实验室进行,如图 2 所示.试验中观测到原型断面出现了单自由度扭转颤振问题,在 $+3^\circ$ 风攻角情况下颤振临界风速为 $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,远低于规范要求.因此需要对其断面的颤振原因进行数值模拟探讨,并针对颤振发散原因进行断面外形优化.

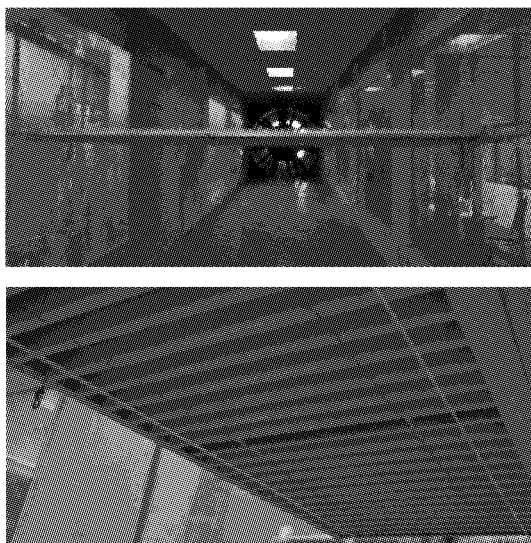


图 2 节段模型试验

Fig.2 Sectional model of wind tunnel experiment

2 数值模拟方法

数值模拟采用基于有限体积法的计算流体力学软件.计算域为 $20B \times 75H$ 的矩形区域,其中 B 为断面宽度, H 为断面高度.主梁断面中心距离入口长度为 $5B$.计算域的空间离散采用非结构化网格,近壁面处进行结构化网格加密处理,尽量准确模拟栏杆等细部结构的影响.局部加密网格划分如图 3 所示.边界条件设置如下:左边为速度入口,右边为压力出口,上、下边为对称边界,壁面处为无滑移壁面边界.

为保证对湍流模拟的准确性,在网格划分时控制了底层网格的高度,以使第 1 层网格在黏性底层高度范围内.底层网格 y^+ 值如图 4 所示,控制大部分底层网格 y^+ 小于 1.湍流模型的壁面处理采用增强型的壁面函数,这样的设置能够保证 $k-\omega$ 湍流模型在近壁面范围内模拟的准确性.

本文采用扩散模型法进行网格弹性光滑,以模拟动网格.压力-速度耦合采用 PISO (pressure implicit split operator) 算法求解;对流项采用稳定性高且可达到二阶精度的二阶迎风格式;时间推进格式采用二阶隐式算法.

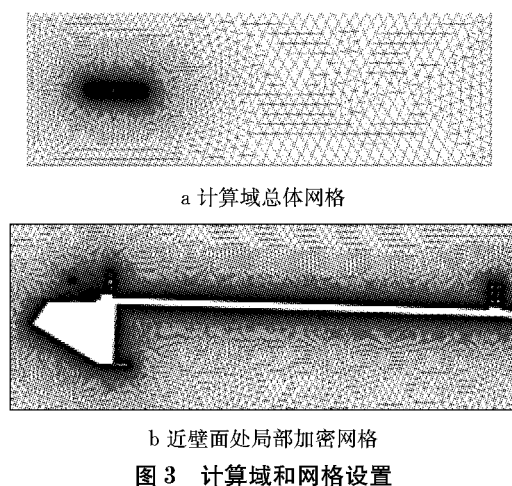
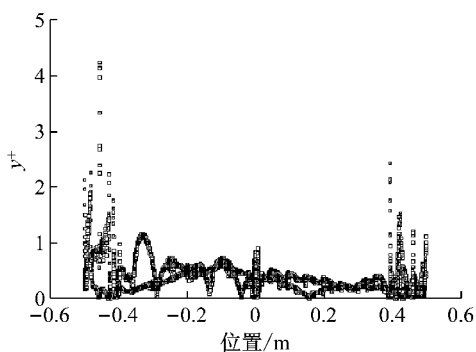


Fig. 3 Computational domain and mesh setup

Fig. 4 y^+ of the first layer mesh near wall

3 数值结果及分析

3.1 典型时刻流场分析

+3°攻角情况下,在桥梁断面做扭转运动的一个周期内,选取 4 个典型时刻进行流场分析,如图 5 所示,其中单线箭头表示断面两端的扭转运动方向。在一个完整的运动周期 T 内,记起始时刻为 t ,表示断面处于扭转简谐运动位移(顺时针为正)最大的时刻。 $t+T/8$ 为扭转角从最大向平衡位置运动过程中的典型时刻。 $t+3T/8$ 为扭转角从平衡位置变为最小过程中的典型时刻,在此过程中断面做逆时针运动,即断面左端向下右端向上。 $t+5T/8$ 和 $t+7T/8$ 为断面左端向上运动,右端向下运动过程中的典型时刻。根据断面周期运动过程中流场作用于断面气动力所做功的变化,分析单自由度颤振发散的原理。

图 6 所示为原型断面在折减风速 $U^* = 4$ 时一个运动周期内典型时刻的流场涡量图和对应的压力云图(图中压力场范围为 $-0.5 \sim +0.5$ Pa,下文亦同)。断面上的旋涡形成及脱落是由于断面相位变化所引起的流场边界条件变化而引起的,其形成机理

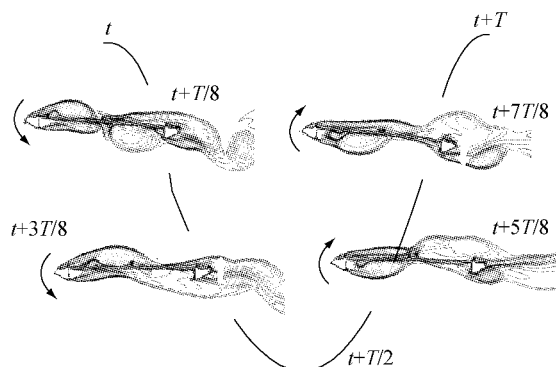


Fig. 5 Scheme of section displacements during one motion cycle

与平板类似,在一个周期内做功为零,因此下文着重对断面下表面旋涡的形成及运动展开分析。图中单线箭头表示断面两端的扭转运动方向,空心箭头表示旋涡位置处气动力方向。

断面逆时针运动过程中,即图 6a 和图 6b 中,可以观察到下表面主要旋涡位于断面下表面下游区,并向尾部运动,旋涡对应着流场负压区,此过程中气动力的扭矩方向与运动方向相反,做负功。图 6c 和图 6d 中,断面做顺时针运动。图 6c 中断面下表面上游纵梁处产生旋涡结构,对应着较大负压区,而下表面下游区并没有旋涡,因此下表面气动力提供的总扭矩为顺时针,仍与断面位移方向相反。图 6d 中,所生成的旋涡结构变大,并向下游方向漂移,其作用力的位置仍在上游处,因此仍提供与运动相反的扭矩。

综上所述,在折减风速 $U^* = 4$ 运动周期内,气动力方向与物体运动方向相反,即其做功总值为负,阻碍断面的扭转运动,不会发生颤振失稳现象。

在较高折减风速情况下,断面运动频率不变,而流场来流速度变大,此时的旋涡尺度和流场形态较低,折减风速产生较大变化。图 7 所示为原型断面在较高折减风速 $U^* = 10$ 时的流场涡量图(箭头所示与图 6 相同)。

如图 7a 和图 7b 所示,在断面左端由上向下运动过程中,断面下表面上游纵梁处产生旋涡,尺度逐渐增大并向下游运动,断面下表面的下游区无旋涡结构。总的负压合力作用于断面上游区,产生向下的气动力,与断面运动方向相同。在图 7c 和图 7d 中发现,断面做顺时针运动过程中,断面下表面的旋涡漂移至下表面下游区,并逐渐变成一个大尺度的旋涡,继而漂移远离断面。在此过程中,下表面的旋涡作用力方向一直在断面下表面下游方向,其提供的气动力扭矩与断面运动方向相同。

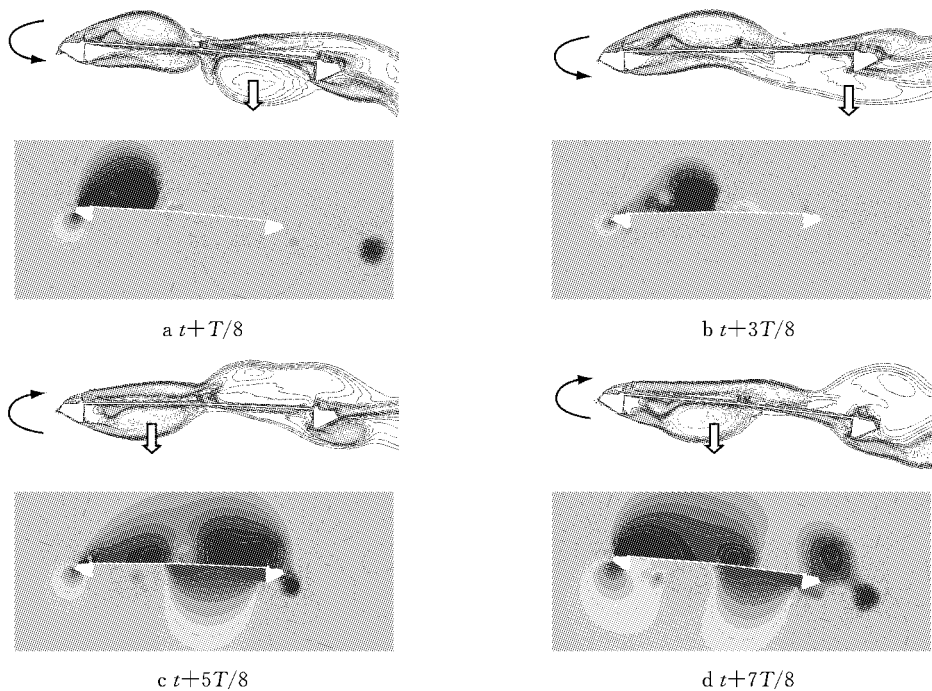


图 6 原型断面扭转运动周期内 4 个时刻涡量和压力云图(折减风速 $U^* = 4$)

Fig.6 Vortex contour of 4 moments during a torsional period of original section at $U^* = 4$

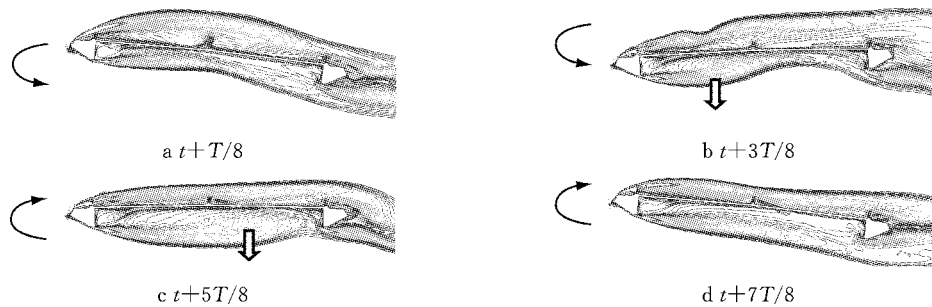


图 7 原型断面扭转运动周期内 4 个时刻涡量图(折减风速 $U^* = 10$)

Fig.7 Vortex contour of 4 moments during a torsional period of original section at $U^* = 10$

因此,在高折减风速下,断面运动过程中下表面的旋涡生成及运动所产生的气动力与断面扭转运动相位发生匹配,所做总功为正,导致了单自由度颤振动力发散.

综上所述,原型断面在做正弦扭转简谐运动时,来流流经断面在上、下表面发生分离.在低风速时,流场分离形成的旋涡对应的压力对断面运动做负功,阻碍断面扭转运动.而在高风速情况下,断面下表面形成的旋涡运动速度与断面运动形式相匹配,形成了与断面运动方向相同的扭矩,使得结构运动发散.

3.2 抑振措施及颤振导数识别

针对上述分析结果,提出 3 种不同形式稳定板的断面进行数值计算.具体断面形式如图 8 所示.图 8a 表示主梁上表面中栏杆间增设一竖直稳定板,高度与中栏杆一致,为 $0.4H$;图 8b 表示主梁上表面中

栏杆间设一竖直稳定板,并在下表面四分点处增设两道竖直稳定板,高度为断面高度;图 8c 表示主梁

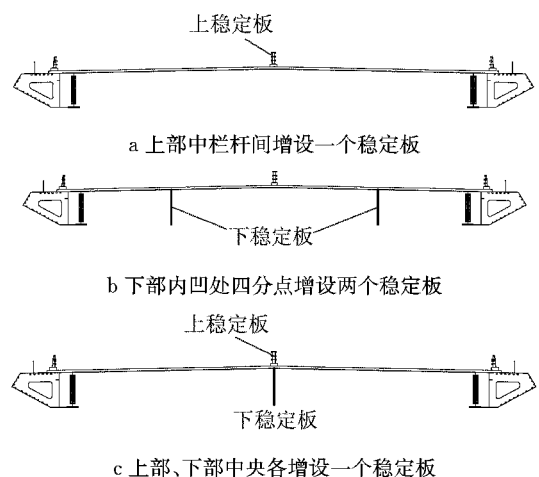


图 8 增设 3 种不同形式稳定板断面

Fig.8 Three different arrangements of stabilizers

上表面中栏杆间与下表面中部同时增设一道竖直稳定板。

对增加抑振措施的断面进行强迫振动颤振导数识别,模型从 $+3^\circ$ 攻角的平衡位置分别作竖向运动和扭转运动,并采用最小二乘法进行颤振导数的拟合,其中颤振导数 A_2^* 的结果如图 9 所示。从图 9 可见,原型断面颤振导数 A_2^* 在所计算的折减风速区间由负变正,说明其发生了单自由度扭转颤振;对于下部增设两个稳定板,上、下各增设一个稳定板布置方案,颤振导数 A_2^* 在所计算的折减风速范围均保持为负值,因此这两种断面的颤振形态为弯扭耦合

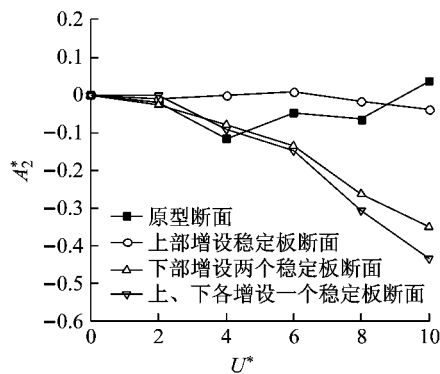


图 9 4 种断面颤振导数 A_2^* 计算结果

Fig.9 Flutter derivatives A_2^* of four types of sections

颤振形态,说明恰当的稳定板布置方案可以将主梁断面的颤振形态由单自由度扭转颤振转变为耦合颤振;对于仅增设上稳定板断面,在折减风速 U^* 约为 6 时,气动导数 A_2^* 由负值转变为正值,该断面的颤振形态仍为单自由度扭转颤振形态。

3.3 抑振措施工作机理分析

以断面下表面 2 个四分点处增加稳定板措施为例,说明其抑振机理。折减风速 $U^* = 10$ 时计算结果如图 10 所示。图 10a 和图 10b 为断面逆时针转动典型时刻的涡量和压力云图,对比图 7 中相应的流场图,可以发现下表面绕流涡量图和压力分布发生明显改变:在下表面下游区产生了固定的旋涡结构,并形成了较强的负压区,在断面逆时针运动时,此处所产生的气动力方向与断面运动方向相反,阻碍了颤振发散。同时,在图 10c 和图 10d 中可以发现,断面做顺时针扭转运动时,下稳定板的存在阻碍了上游区旋涡向下游的漂移,形成了固定的负压区,这与前文原型断面形成了强烈的对比。由于旋涡无法漂移,其作用力作用于断面上游,与运动方向相反。

由此分析,可知断面下表面的稳定板主要通过形成固定的旋涡,使得流场形态改变,不能形成于断面扭转运动相匹配的气动力,成功阻碍了扭转运动发散。

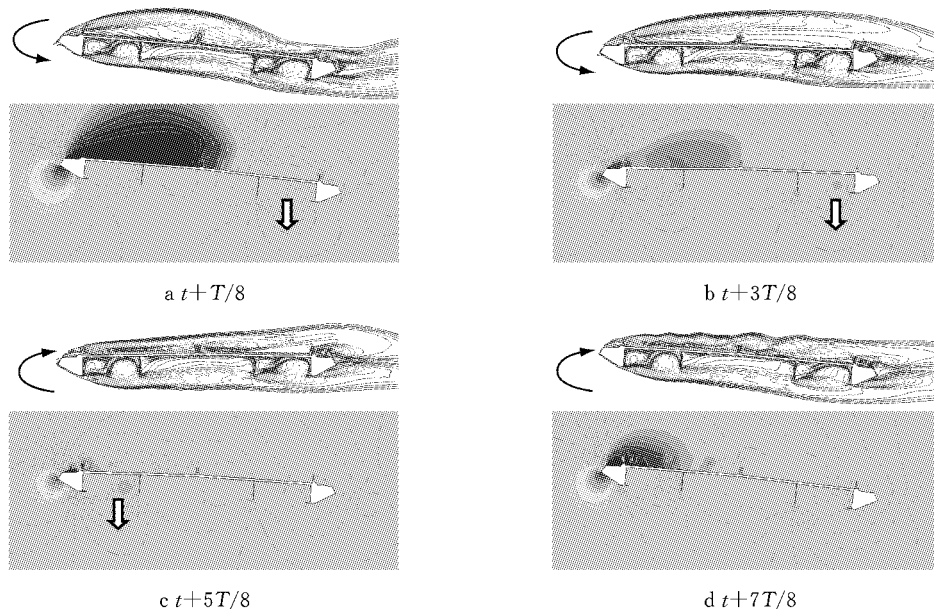


图 10 下部增设两个稳定板断面扭转运动周期内 4 个时刻涡量图(折减风速 $U^* = 10$)

Fig.10 Vortex contour of 4 moments during a torsional period of the section with two lower stabilizer at $U^* = 10$

4 全桥气弹模型试验及验证

为验证上述节段模型试验和数值模拟计算结

果,对增加抑振措施断面分别进行了节段模型风洞试验(图 11),并进一步进行了全桥气弹模型试验,风洞试验在同济大学 3 号风洞进行,试验结果如表 1 所示。

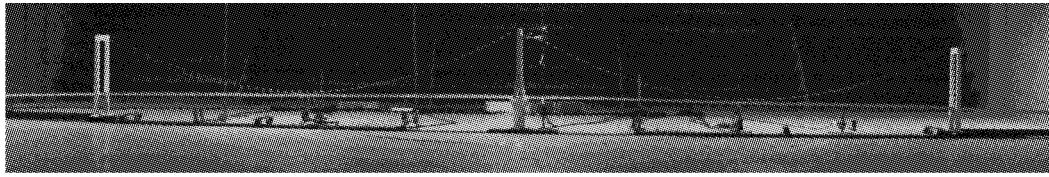


图 11 全桥气弹模型试验

Fig.11 Full bridge aerodynamic model wind tunnel test

表 1 颤振临界风速结果汇总

Tab.1 Critical flutter wind speeds of wind tunnel test

断面形式	颤振临界风速/($m \cdot s^{-1}$)						
	+3° 节段试验	+3° 数值计算	+3° 全桥试验	0° 节段试验	0° 全桥试验	-3° 节段试验	-3° 全桥试验
原型断面	37.0	42.1	42.5	49.5		>54.0	
增设上稳定板	42.0	44.0	49.0				
增设下稳定板	48.0	72.6	52.5	57.0	64	>57.0	>71.0
增设上、下稳定板	>57.0	70.6					

对比可以发现,全桥气弹模型与数值计算和节段模型的颤振临界风速结果是一致的,+3°均为最不利风攻角且气动措施均可提高颤振临界风速.对于原型断面,全桥气弹模型的颤振临界风速为 $42.5 m \cdot s^{-1}$,与本文数值模拟的 $42.1 m \cdot s^{-1}$ 非常吻合.对于增加上稳定板断面,本文数值模拟结果为 $44.0 m \cdot s^{-1}$,与节段模型的 $42.0 m \cdot s^{-1}$ 非常接近,然而全桥气弹模型结果稍偏大.增加下稳定板和增加上、下稳定板均能大幅提高颤振临界风速,这在节段模型、数值模拟和全桥气弹模型中都可以得到验证.在全桥气弹模型试验中还可以观测到增加稳定板后颤振形态由单自由度扭转变为弯扭耦合颤振,与 CFD 结果及节段模型结果一致.

5 结论

本文针对典型开口桥梁断面颤振发散机理和抑振措施机理进行了数值模拟研究和风洞试验验证,结论如下:

(1) 来流绕过振动的开口桥梁断面时,在主梁下侧上游区形成分离并发展成为旋涡结构,旋涡沿主梁断面下表面漂移并经主梁断面后缘进入尾流,主涡结构的形成时间及沿主梁断面的漂移过程对气动力及颤振稳定性起直接的主导作用.

(2) 在低折减风速时,断面下表面旋涡的生成及漂移所产生的升力方向与断面运动方向相反,阻碍了运动发散;而高折减风速下表面旋涡的生成及漂移所产生的气动力在断面运动周期内做正功,是导致颤振发散的主要原因.

(3) 对断面下表面增加稳定板可以提高颤振临

界风速,其作用机理是在断面下表面产生固定的旋涡区域,阻碍了旋涡运动漂移而产生与断面运动方向相匹配的气动力.

(4) 通过节段模型和全桥气弹模型验证了本文数值模拟的准确性以及下稳定板在开口断面颤振抑制方面的有效性.

参考文献:

- [1] SCANLAN R H. Airfoil and bridge deck flutter derivatives[J]. Journal of Asce, 1971, 6(1): 1717.
- [2] 杨咏昕,葛耀君,项海帆. 大跨度桥梁典型断面颤振机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 455.
YANG Yongxin, GE Yaojun, XIANG Haifan. Flutter mechanism of representative sections for long-span bridges[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2006, 34(4): 455.
- [3] GE Y J, XIANG H F. Recent development of bridge aerodynamics in China[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 736.
- [4] WALTHER J H, JENSEN J T, SØRENSEN J N, *et al.* Discrete vortex method for two-dimensional flow past bodies of arbitrary shape undergoing prescribed rotary and translational motion [D]. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 1994.
- [5] ŠARKIĆ A, FISCH R, HÖFFER R, *et al.* Bridge flutter derivatives based on computed, validated pressure fields[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104(1): 141.
- [6] SHIRAI S, UEDA T. Aerodynamic simulation by CFD on flat box girder of super-long-span suspension bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1): 279.
- [7] 祝志文,陈政清. 数值模拟桥梁断面气动导数和颤振临界风速[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 41.