

π 型截面涡激振动风洞试验及气动抑制措施研究

杨光辉, 屈东洋, 牛晋涛, 方 成

(长安大学 公路学院 陕西 西安 710064)

摘要: 对某大跨斜拉桥进行节段模型风洞试验, 研究该桥采用 π 型断面时抑制主梁涡激振动的气动措施。对其主梁节段模型进行涡激振动试验, 通过对比研究, 检验中央稳定板及改变栏杆透风率的气动措施的有效性。并借助 CFD 仿真技术, 分析主梁断面周边绕流特性, 探索气动措施抑制涡激振动的机理。结果表明, 气动措施可以改善 π 型截面梁空气动力学特性, 得到了抑制涡激振动的目的。

关键词: 斜拉桥; π 型断面; 涡激振动; 减振措施; 风洞试验

中图分类号: U446.1; U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2015)01-0034-06

0 引言

斜拉桥因其具有造型优美、结构传力明确、相对(悬索桥)刚度大、施工方便、下部结构工程量相对较少的特点, 受到了桥梁设计工程师的青睐^[1]。斜拉桥主梁截面型式的选择, 除一般桥梁必须考虑的因素外, 还应充分考虑抗风稳定性, 特别是大跨径斜拉桥的风振问题尤为突出^[2]。 π 型截面是一种较简单的主梁截面形式, 适用于双索面体系的斜拉桥, 两个边主梁之间由桥面板及横梁相连接, 拉索可锚固于边主梁上, 形成多点连续弹性支承, 结构传力途径清晰, 受力明确, 设计中边主梁外侧做成风嘴状以减少迎风阻力。同时考虑结构工程施工, 标准化程度高, 但是这类断面容易出现涡激振动^[3-4]。

涡激振动是大跨度桥梁在低风速下很容易出现的一种风致振动现象, 其带有自激性质, 振动的结构反过来会对涡脱形成某种反馈作用, 使得涡振振幅受到限制。处于流场中的桥梁断面, 在忽略其自身振动的条件下, 可视为一固定不动的刚体。来流经过这一刚体时, 必然会发生绕流现象, 其截面背后的周期性漩涡脱落将产生周期变化的作用力——涡激力。当被绕流的物体是一个振动体系时, 周期性的涡激力将引起结构的涡激振动, 并且在漩涡脱落频率与结构的自振频率一致时发生涡激共振^[5]。

涡振的抑制可分为结构措施、阻尼措施和气动措施^[6-7]。结构措施是通过增加结构的刚度, 即提高结构的固有振动频率用以相应的提高涡激共振的临界风速。阻尼措施主要是通过增加结构阻尼以缩短风速锁定区, 从而降低涡振振幅, 但其造价昂贵且不易维护。考虑到涡激响应对气动外形十分敏感的特点, 可通过设置或调整桥梁的附属结构以改善其抗涡振性能。此外, 在调整桥梁断面的气动外形的同时, 需要综合考虑对其他风致振动如颤振的影响, 避免在降低涡激响应的同时放大其他风致振动。尽管涡激振动不像颤振、驰振一样是发散的毁灭性的振动, 但常在低风速下发生, 且振幅之大足以影响行车安全。此次研究论证的 π 型截面在实际工程中应用广泛, 为避免其在施工或者成桥阶段出现涡激共振或限制其振幅在可接受的范围内, 特此进行风洞试验, 用以研究检验该断面型式下的涡激振动响应, 具有重要意义和工程实用性。

1 研究背景

由于特殊的地理环境, 频发的灾害性气候, 使得某大桥风振问题突出。某主跨 320 m 双塔双索面钢

收稿日期: 2013-10-24 责任编辑: 刘宪福 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2015.01.07

作者简介: 杨光辉(1961-), 男, 副教授, 研究方向为桥梁结构分析。E-mail: yang266@vip.163.com

杨光辉, 屈东洋, 牛晋涛, 等. π 型截面涡激振动风洞试验及气动抑制措施研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2014, 28(1): 34-39.

砣叠合梁斜拉桥,主梁采用 π 型截面,边主梁外侧做成风嘴状以减少迎风阻力,然而这种非流线型截面本身具有的不稳定的气动特性,使得该桥的涡振问题并没有得到显著改善。其桥型布置及主梁标准横断面如图 1、图 2 所示。

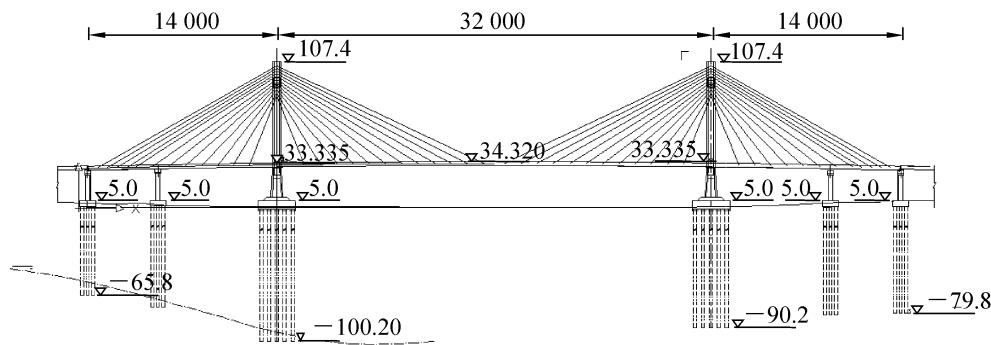


图 1 桥型布置(单位: cm)

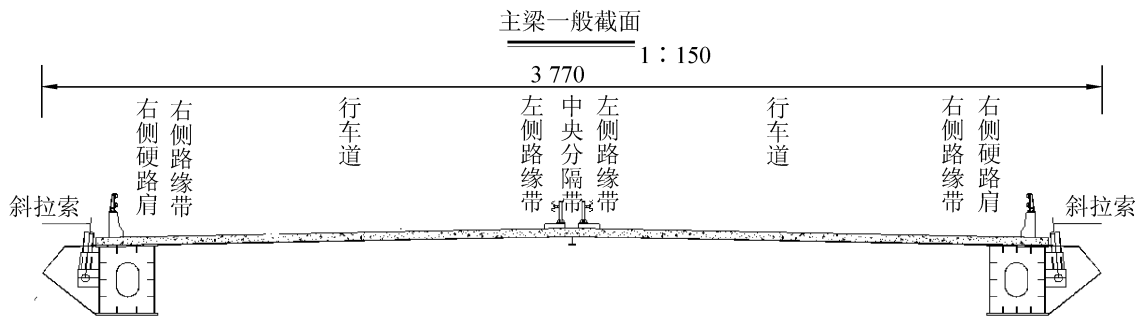


图 2 主梁标准横断面(单位: cm)

2 节段模型涡激振动试验

桥梁结构一般为柔长结构,在一个方向上有较大的尺寸,而在其他两个方向则相对尺寸较小。风对桥梁结构的作用近似得满足片条理论,可通过节段模型试验来研究桥梁结构的风致振动响应。

2.1 风洞试验

根据实桥主梁断面尺寸、风洞试验段尺寸和直接试验法的要求,选取节段模型缩尺比为 1: 60。试验采用悬挂弹簧刚性节段模型,从低风速逐级增加风速,检验涡振发生风速区间,测量涡振的振幅响应。试验所采用的设计主要参数见表 1。

表 1 节段模型设计主要参数

参数名称	实桥值	缩尺比	模型设计值	模型实测值
长度 L /m	—	—	1.500 0	1.500 0
宽度 B /m	37.7	1/60	0.628 3	0.628 3
高度 H /m	3.08	1/60	0.051 3	0.051 3
等效质量 m /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	46 106.2	1/60 ²	12.80	12.79
等效质量惯矩 J_m /($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	14 308 100	1/60 ⁴	1.1	—
竖弯基频 f_b /Hz	0.416 15	60/4.45	5.611	5.493
扭转基频 f_t /Hz	0.699 728	60/4.45	9.435	9.582 5

2.2 试验结果分析

在未对原设计方案设置气动措施的情况下,结构在低风速下产生涡激振动,且涡激振动响应最大值不满足规范要求。采用改变中央护栏为全封闭形式,主梁设置一道下稳定板,从而形成 2 道上稳定板加 1 道下稳定板的气动措施,改变了主梁绕流特性。主梁节段模型所取气动措施可明显抑制涡激振动的产生或限制其振幅在可控范围内。其结果对比如图 3 示。

通过风洞试验结果分析对比,原方案在 0°风攻角下,对应实桥风速 13.35 ~ 16.02 m/s、22.35 ~ 33.38

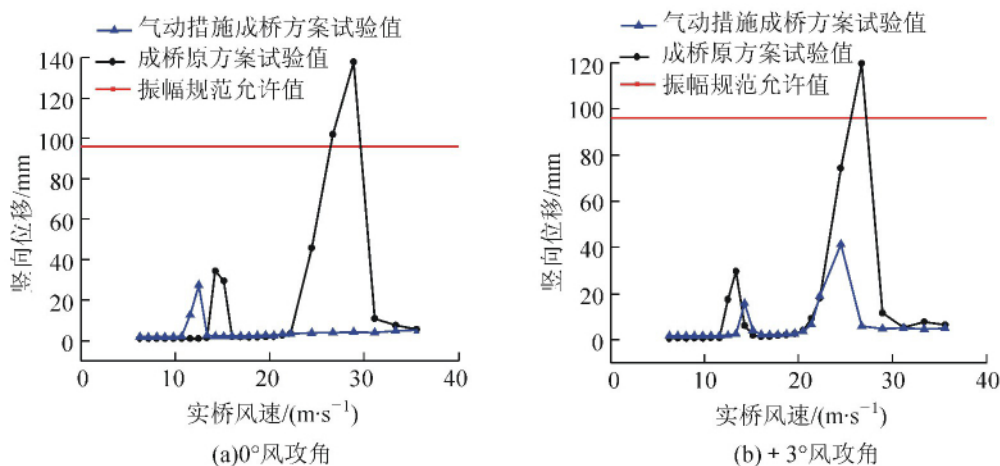


图 3 涡振试验竖向位移结果对比

m/s 时出现了竖向涡振,最大振幅达 0.138 m。 $+3^\circ$ 风攻角下,对应实桥风速 11.57 ~ 14.24 m/s、20.47 ~ 31.15 m/s 时出现了竖向涡振,最大振幅达 0.119 m。其涡振振幅均大于规范允许值。设计采取的气动措施能够有效地抑制桥梁断面涡激振动现象。 0° 风攻角下,对应实桥风速 10.68 ~ 13.35 m/s 时出现了竖向涡振,其峰值为 0.027 4 m。 $+3^\circ$ 风攻角下,在对应实桥风速 13.35 ~ 15.13 m/s、20.47 ~ 28.93 m/s 时出现了竖向涡振,其峰值为 0.041 m。其涡振振幅均小于规范设计要求值。

通过采取气动措施,使其成桥状态下出现涡激振动所对应的实桥风速发生变化,其发生区域移动或者消失,其对应幅值减小。

3 CFD 计算下涡振机理探讨

当主梁截面沿纵桥向为等截面时,如果来流风向与桥梁纵向垂直,则可认为风速在桥梁轴线方向上不存在梯度,即风速沿纵桥向不变。据此,可以将 3 维空间桥梁模型简化为 2 维平面模型用以研究,这样既保证了模型在几何特征上的相似性,又合理降低了计算量,提高计算效率。主梁模型与计算域网格划分如图 4 所示。

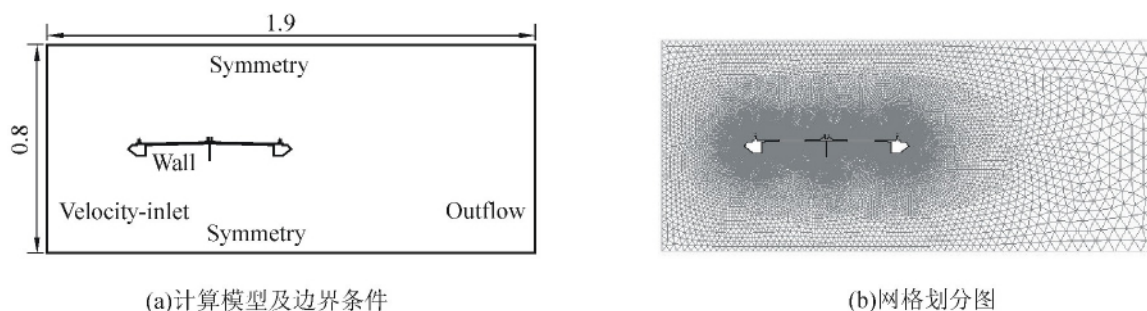


图 4 计算模型及网格划分(单位: m)

主梁选取 π 型截面形式,位于计算域前半部 1/3 处。主梁设置为无滑移的壁面边界 wall,计算域入口采用 Velocity-inlet,出口为 outflow,上下两侧则为 Symmetry。计算域各边界距主梁模型足够远以保证主梁附近空气流动不受边界条件影响。主梁模型对计算域的阻塞率小于 2%,气流的压缩效应可以忽略,满足数值模拟的要求。使用空间适应性强的非结构化三角形网格离散平面计算域,并使用自适应网格技术,对风速梯度大的区域加密了网格密度,以降低数值粘性的影响,提高计算准确度。数值计算采用对钝体绕流有良好适应性的 $k-\omega$ SST 湍流模型,方程求解采用 SIMPLEC 方法,其入口处湍流强度取值 0.5%,湍流粘性比(Turbulent Viscosity Ratio)取值为 10。

为保证数值模拟的可靠性,首先应根据类似风洞试验工况进行试算,将试算结果与风洞试验结果进行对比,证实计算结果准确后再增加数值模拟的工况进行研究。图 5 为成桥状态下数值模拟与风洞试验

在风轴坐标系下 3 分力系数结果对比。

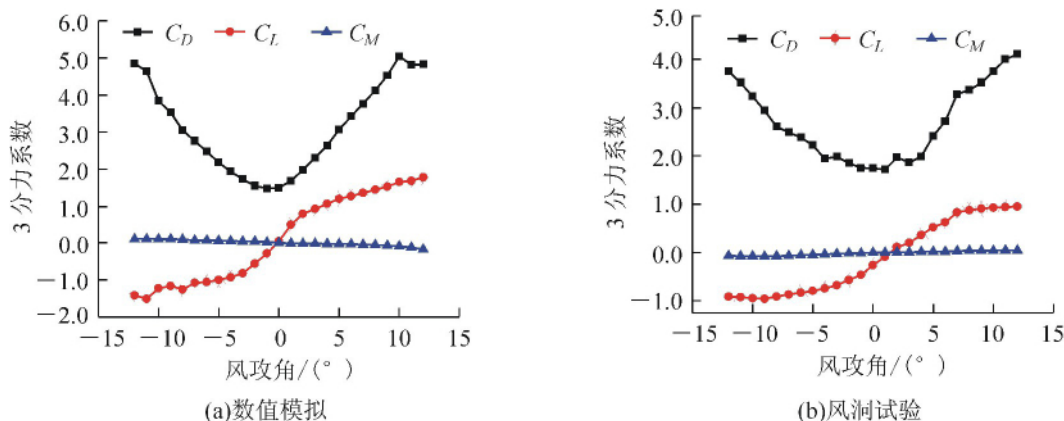


图 5 数值模拟与风洞试验下 3 分力系数结果对比

从图 5 中可以看出,数值模拟结果与试验测得成桥状态下 3 分力系数吻合较好,可以认为所采用的数值模拟方法正确,能够真实反应主梁外部流场绕流特性,满足计算所需准确性要求。

为了解采取措施及未采取措施的 π 型断面的涡振特性不同,取风速 15 m/s 时,在 0° 风攻角下进行主梁节段模型 CFD 分析计算,通过可视化的风速矢量图,分析主梁断面的绕流特性。图 6 和图 7 分别为原设计断面及采取气动措施的断面流场特性风速矢量图。

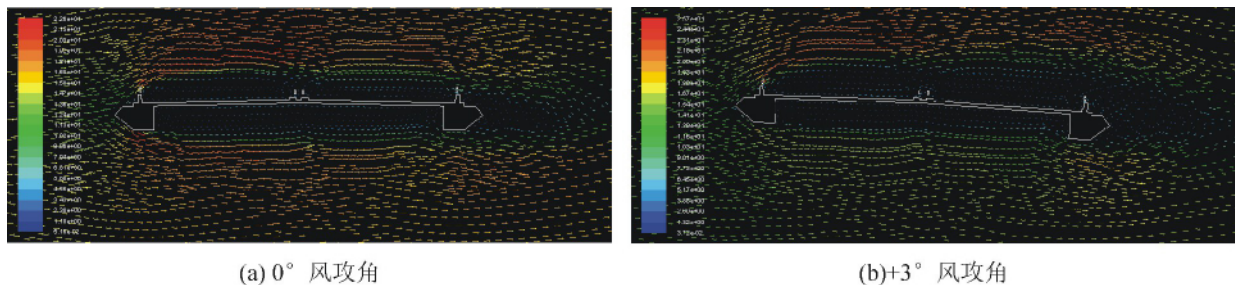


图 6 成桥原方案主梁断面风速矢量

由图 6 可知,在未设置气动措施的情况下,来流在迎风面拐角处发生气流分离,分离后的气流在主梁的上、下表面形成漩涡,并在接近主梁截面末端位置处发生气流再附着,附着后的气流在流经护栏和边主梁后,产生脱落的漩涡。主梁上、下表面所形成的不等值涡量的漩涡,两者差值产生的涡激力,使得主梁产生竖向位移。考虑到处于流场中的 π 形梁是一个振动体系,并带有自激性质,来流所形成的周期性的涡激力将引起结构涡激振动。当漩涡脱落频率与结构的自振频率相一致时,主梁产生涡激共振。

为优化稳定板尺寸,选择了 6 个方案,借助 CFD 技术,通过与原设计方案的 CFD 结算结果的对比(见表 2),研究中央稳定板对 π 型断面的周边绕流特性的影响^[8-10]。

表 2 中央稳定板尺寸表

设计方案	位置(相对于横梁底面)	距离/m	与梁高比例
推荐方案	伸出	0.5	1/5
方案一	伸出	1	2/5
方案二	伸出	1.5	3/5
方案三	伸出	2	4/5
方案四	缩进	0.5	1/5
方案五	缩进	1	2/5

取风速 15 m/s 时,对 0° 风攻角下的主梁节段模型进行 CFD 分析计算,得到不同设计参数下的中央稳定板的风速矢量图,见图 7。

通过对图 7 中 6 种不同方案的对比分析,可得:针对于 π 形截面梁而言,来流在迎风面拐角处发生气流分离,由于设置封闭的中央护栏形式和下设一道中央稳定板,分离后的气流在原先主梁上、下表面形成

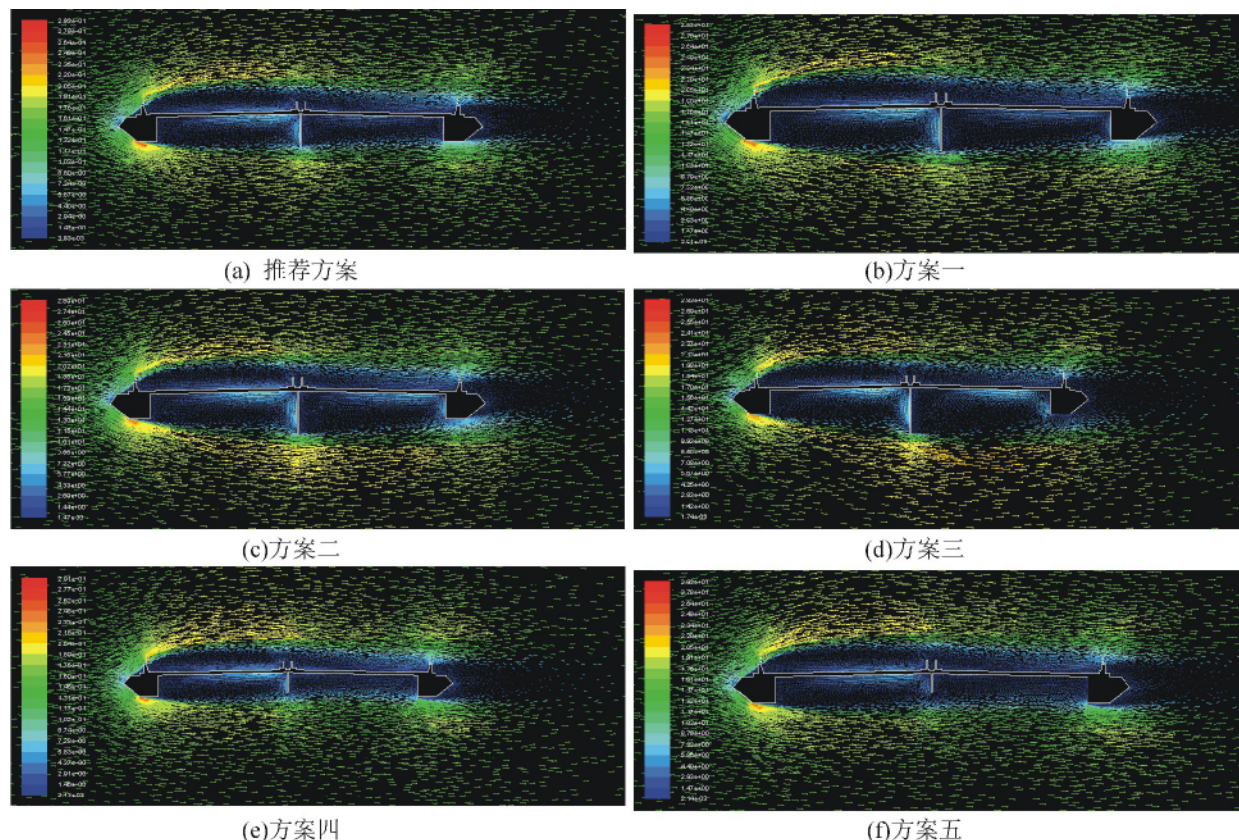


图 7 采用气动措施成桥方案主梁断面风速矢量

的一个大的漩涡被分割成两个相对较小的漩涡,并在接近主梁截面末端位置处发生气流再附着,附着后的气流在流经护栏和边主梁后,产生脱落的漩涡。分割后两个较小漩涡所具有的涡量被减弱,其差值所产生的涡激力不足以使得主梁产生竖向位移,或其位移量明显减小,从而达到消除或者减弱涡振响应的目的。与此同时,观察得:推荐方案相较其他方案而言,来流流经截面梁后形成的流迹线更为平滑、呈流线型,使得气流能够更为顺畅的通过主梁截面,降低涡激振动发生的可能性。

4 结论

(1) π 型截面梁本身具有不稳定的空气动力学特性,在不设置任何抗风措施情况下,该类主梁断面容易出现明显的涡激振动,且幅值会超过规范允许值,设计时应该检验涡振发生情况。

(2) 在风洞试验的基础上,结合 CFD 仿真模拟,使流经主梁断面气流可视化。针对不同下稳定板尺寸,通过比对,得到以伸出横梁底面 $1/5$ 倍梁高时,气流流经断面后所形成流迹线更为平滑,呈流线型。

(3) 通过设置封闭的中央防撞护栏,加设中央稳定板的气动措施,可以较大程度改善断面周边流态,提高结构气动稳定性,抑制该类断面涡激振动的发生,此结论可供类似桥梁参考。

参 考 文 献

- [1] Freire A M S, Negrão J H O, Lopes A V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges [J]. Computers & Structures, 2006, 84: 2128-2140.
- [2] 顾安邦. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [3] KU BO Y, SADASHIM A K, YAMAGUCHI E, et al. Improvement of aeroelastic instability of shallow π section [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 98 (14/ 15): 1445-1457.
- [4] IRWIN P A. Bluff body aerodynamics in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/ 7): 701-712.

- [5] 陈政清. 桥梁风工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [6] 陈艾荣, 项海帆. 斜拉桥涡激扭转振动的被动控制 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1994, 22(4): 487-492.
- [7] 葛耀君, 丁志斌, 赵林. 缆索承重桥梁桥塔自立状态涡激共振及其控制 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 1008-1012.
- [8] 朱乐东. 桥梁涡激共振试验节段模型质量系统模拟与振幅修正方法 [J]. 工程力学, 2005, 22(5): 204-208.
- [9] 李立, 廖锦翔. 涡激振动问题的有限元计算研究 [J]. 工程力学, 2003, 20(5): 200-203.
- [10] 何晗欣, 李加武, 周建龙. 中央开槽箱形断面斜拉桥的涡激振动试验与分析 [J]. 桥梁建设, 2012, 42(2): 34-40.

Researches on π -Section Vortex-Induced Vibration Wind Tunnel Testing and Aerodynamic Suppression Measures

Yang Guanghui, Qu Dongyang, Niu Jintao, Fang Cheng

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A section model wind tunnel test is conducted for a large span cable-stayed bridge and the aerodynamic measures to restrain the bridge girder vortex-induced vibration with a π -section are studied. The comparison of the vortex-induced vibration tests for main beam segment model is made to verify the effectiveness of central stabilizer and drafty openings in rail. With CFD simulation technology, flow characteristics around the main girder section are also analyzed to find the mechanism of aerodynamic measures to resist vortex-induced vibration. The results indicate that the aerodynamic measures can improve the aerodynamic characteristics of π -section and reduce vortex-induced vibration.

Key words: cable-stayed bridge; π -section; vortex-induced vibration; damping measures; wind tunnel test
 (上接第 11 页)

Influence of Wind Attacking Angle on Aerodynamic Characteristic of Rectangular Girder with Aspect Ratio 5

Yang Qun¹, Liu Xiaobing²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Wind Engineering Research Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: A pressure-measured sectional model wind tunnel test of rectangular girder with aspect ratio 5 was performed. The changing rule of aerodynamic characteristic of rectangular girder versus wind attacking angle was studied. The study results show that when wind attacking angle is in range of $0^\circ \sim 6^\circ$, the change of wind attacking angle has little effect on Strouhal number. The galloping force coefficients under different wind attacking angles are greater than zero. Compared with point-pressure in center of upper surface, point-pressure in the edge of upper surface is more correlated with lift force and torque. With the increase of the wind attacking angle, the correlation of point-pressure in edge of upper surface with lift force and torque changes little, while correlation of point-pressure in center of upper surface with lift force and torque increases dramatically.

Key words: rectangular girder; aerodynamic force; wind tunnel test; pressure-measured