

文章编号:1674-599X(2022)04-0087-08

非对称异型箱梁斜拉桥涡振性能试验研究

李春光,毛禹,颜虎斌,梁爱鸿,韩艳

(长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙410114)

摘要:随着现代桥梁美学的不断发展,非对称异型断面主梁在景观桥、人行桥中的应用逐渐广泛,但其气动性能受断面外形影响显著。以某异型箱梁斜拉桥为工程背景,在风洞中测试了在桥梁栏杆处安装分流板、安装主梁断面风嘴、改变栏杆外形等措施的主梁涡振性能。试验结果表明:在设计风速内异型主梁存在明显的竖向涡振,且超过了规范规定的最大幅值;当主梁钝体面迎风时,在栏杆处安装分流板能达到较好的抑制涡振的效果,但当非钝体面迎风时,却产生了负面影响;在主梁断面安装风嘴同样仅在钝体面迎风时达到了较好的抑制涡振的效果,但当非钝体面迎风时不能抑制涡振;改变栏杆外形及安装风嘴的组合措施可抑制主梁涡激共振,且能满足颤振稳定性要求。

关键词:异型箱梁;斜拉桥;涡激共振;风洞试验;减振措施

中图分类号:TU311

文献标志码:A

Experimental study on vortex induced vibration performance of asymmetric special shaped box girder cable stayed bridge

LI Chunguang, MAO Yu, YAN Hubin, LIANG Aihong, HAN Yan

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: With the continuous development of modern bridge aesthetics, the asymmetric special shaped section girder is becoming more and more widely used in landscape bridge and pedestrian bridge. However, the aerodynamic performance is significantly affected by the shape of the section. Based on the engineering background of a special-shaped box girder cable-stayed bridge, the vortex vibration performance of the main girder was tested in the wind tunnel. In test, the splitter plate was added at the railing, the cross section nozzle of main beam was installed, and the shape of railing was changed. The results show that the obvious vertical vortex vibration is induced within the design wind speed, and the vibration exceeds the maximum amplitude specified in the code. The vortex-induced vibration will be restrained by flow suppression plate at the railing, when the blunt face of the main girder is windward side. However, the negative effect can be caused, when the non-blunt face is windward side. Furthermore, the similar results are obtained by installing the cross-section nozzle of the main girder. By changing the shape of the railing and installing the air nozzle, the vortex induced resonance of the main girder can be successfully suppressed, and the requirement of flutter stability can be met.

Key words: special-shaped box girder; cable-stayed bridge; vortex-induced resonance; wind tunnel test; damping measure

收稿日期:2021-06-18

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2020JJ14607);国家自然科学基金项目(51978087、51822083)

作者简介:李春光(1980—),男,长沙理工大学副教授,博士。

随着社会经济的发展,桥梁跨度的增长,桥梁美学也越来越受重视。异型箱梁断面因其视觉上的美观效果,而受到设计者的青睐。大跨度桥梁也朝着低阻尼、轻柔化的方向发展,但这势必会提高桥梁的风致敏感性。因此,气动稳定性成为桥梁建设过程中必须考虑的问题。异型主梁断面的不规则性容易导致来流风产生旋涡脱落,从而激发主梁发生涡振。虽然涡振具有有限幅振动特征,不至于引起类似于桥梁颤振导致的振动发散的后果,但是由于涡振多发生在低风速区间,且桥梁的大幅涡振容易引起公众恐慌,涡振的长期作用也会使结构产生疲劳破坏,影响桥梁安全。国外已有多座大跨度桥梁发生了明显的涡振现象,较早的巴西里约-尼泰罗伊大桥(Rio-Niterói Bridge)的钢箱连续梁桥在使用过程中多次出现强烈的一阶竖向模态大振幅涡振现象,致使桥上开车人员弃车而逃^[1]。日本东京湾通道桥(Trans-Tokyo Bay Bridge)桥面曾在风速达到16~17 m/s时就发生过明显的以一阶竖向模态为主的涡振,跨中单边振动峰值达50 cm^[2]。此外,英国的塞文二桥(Second Severn Bridge)、丹麦的大贝尔特东桥(Great East Belt Bridge)引桥、俄罗斯的伏尔加大桥等世界知名大桥都发生过明显的涡振现象^[3]。国内桥梁涡振现象也时有发生,西堠门跨海大桥自2009年通车运营后多次监测到涡振现象,2020年4月武汉鹦鹉洲长江大桥发生波浪形涡振,2020年5月广东虎门大桥20多小时内发生多次大幅涡振。因此,抑制涡振并探究涡振发生的内在机理是桥梁抗风领域的重要研究方向^[4-5]。

桥梁涡振的控制措施通常可分为机械阻尼措施和空气动力学措施两大类。机械阻尼措施通过增加外部阻尼装置来抑制涡振,但其成本相对较高^[6];空气动力学措施侧重于改变主梁周边的流场,通过抑制来流漩涡来达到控制涡振的目的,因其经济性和有效性,是目前大跨度桥梁设计中首选的涡振抑制措施。国内外研究人员对常规对称的大跨主梁断面进行了大量的涡振性能及控制措施研究,积累了许多有益的研究成果。LARSEN等人^[7]通过在主梁上安装抑流板的风洞试验,成功解决了Storebalt桥箱梁的涡振问题。朱思宇等人^[8-9]

研究了宽幅扁平流线型箱梁的涡振性能,发现外形较锐的风嘴可改善主梁的气动性能,采用圆形高透风率的栏杆也可显著减少主梁的涡振现象。YANG等人^[10]在箱梁底板安装竖向稳定板成功解决了因安装附属管道引起的主梁涡振问题。杨詠昕等人^[11-12]针对分体箱梁涡振性能进行了试验,分析了主梁槽宽、槽间开孔盖板等抑制涡振的效果。战庆亮等人^[13-15]依托具体工程分别对边主梁断面的涡振性能展开研究,发现增加风嘴数量以及安装主梁下稳定板对边主梁断面的涡振具有较好的控制效果。李明等人^[16]研究了在桥梁上布置非对称人行道对涡振的影响,结果表明非对称布置会严重影响主梁的涡振性能。刘叶等人^[17]通过风洞试验分析了风屏障对桥梁及行驶列车抗风性能的影响。

上述研究主要针对常规对称的主梁断面形式,而关于非对称的异型箱梁断面涡振性能的研究鲜有报道。由于非对称特性,相比于常规对称主梁,异型箱梁的涡振减振试验存在两大难点。首先,异型箱梁的非对称性注定了试验工况的复杂性,非对称主梁两侧均需检验其迎风状态下的气动性能;其次,当主梁一侧迎风时所采取的措施有效,但很有可能当主梁另外一侧迎风时会产生负面影响。因此,异型箱梁的涡振减振措施较之常规对称主梁的更加复杂。本研究拟依托某非对称异型箱梁人行斜拉桥,对其涡振性能进行风洞试验研究,提出安装风嘴结合改变栏杆外形的组合措施来抑制主梁涡振,研究成果可为类似工程提供参考。

1 工程背景

本研究所依托的一座在建大跨度人行景桥属于异型箱梁独塔单索面曲线斜拉桥,桥梁总长393.0 m,共5跨,主桥跨的布置为(20.0+124.0+129.0+25.0+30.0) m(图1),桥面宽4.5 m,主梁高约1.5 m(图2)。桥梁主体坡度约为2.5%,其平面为半径218.0 m的圆曲线,曲线外侧朝向索塔方向,在曲线和索塔相交处形成观景平台;曲线内侧方向与曲线顺接形成玻璃铺装挑台。虽然全桥为曲线桥型,但是由于主梁宽度较小,仅为4.5 m,且桥梁宽跨比较小,主梁整体呈细长的带状结构,为了在试验中

更细致地体现主梁细部构造的影响,本研究采用较大比例的刚性节段模型试验来测试主梁的涡振性能。

不同于常规的平直模型,该桥节段模型为带弧度的、真实考虑了实桥主梁曲率影响的刚性模型。

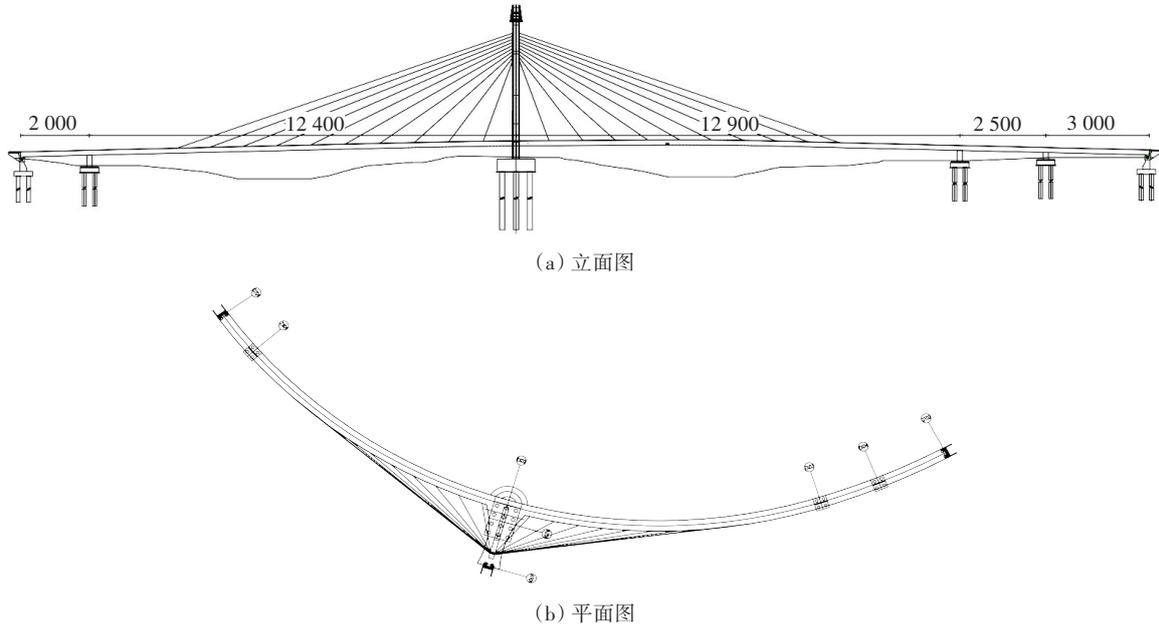


图1 桥型布置图(单位:cm)

Fig. 1 Layout of the bridge (unit: cm)

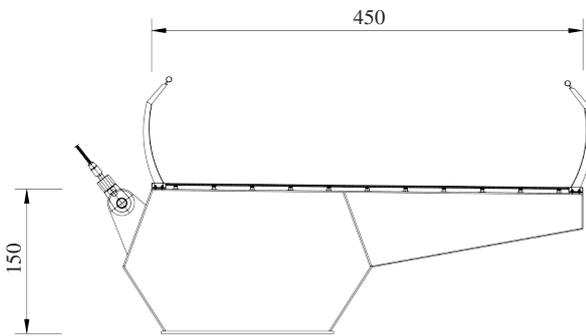


图2 主梁标准断面(单位:cm)

Fig. 2 Standard section of the main girder (unit: cm)

2 风洞试验概况

本试验是在长沙理工大学风工程与风环境研究中心的大型边界层风洞实验室高速段进行的。高速试验段的尺寸为4.0 m × 3.0 m × 21.0 m, 风速范围为1.0 ~ 45.0 m/s, 均匀流场的紊流度小于0.5%。主梁涡激振动响应对外部几何构造十分敏感。为

了尽可能真实地模拟主梁细部构造,同时考虑桥梁断面的雷诺数效应,在试验条件允许的情况下模型的比例越大,则试验结果越接近真实桥梁断面情况。综合考虑模型外部的几何尺寸、质量及风洞条件等因素,最终确定该桥主梁节段模型的几何缩尺比为1:10。主梁标准断面的模型长度 $L=1.50$ m, 主梁宽度 $B=0.45$ m, 模型高度 $H=0.15$ m。模型严格按照实桥的气动外形采用雕刻机加工而成,试验布置如图3所示。模型试验参数见表1。



图3 风洞试验主梁模型

Fig. 3 The main girder model used in wind tunnel test

表1 模型试验参数

Table 1 Parameters of the model test

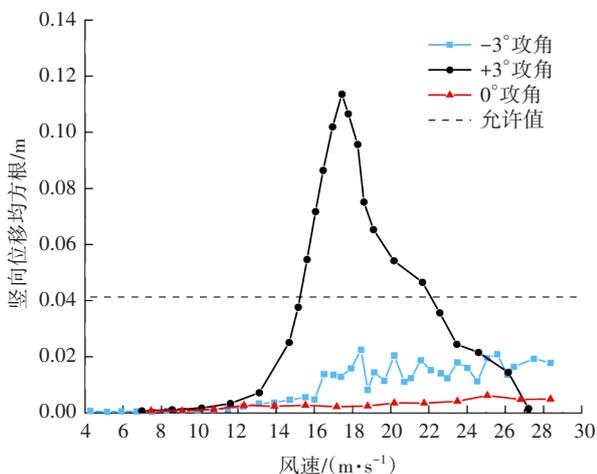
项目	主梁长度/m	主梁宽度/m	主梁高度/m	单位长度质量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	单位长度质量惯矩/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1}$)	竖弯基频/Hz	扭转基频/Hz
实桥值	15.0	4.50	1.50	7 717.683	515.125	0.849	1.947
模型设计值	1.5	0.45	0.15	77.176	0.051	2.091	4.621

用8根弹簧将节段模型自由振动悬挂系统固定在刚性支架上。节段模型通过两端的端轴连接系统与弹簧相连,该模型仅模拟竖弯及扭转两阶模态。采用激光位移计测试主梁断面的振动位移响应时程信号,采样频率为500 Hz。在模型的上游侧主梁高度处设置眼镜蛇风速仪,以监测并记录来流风速、湍流度等参数。

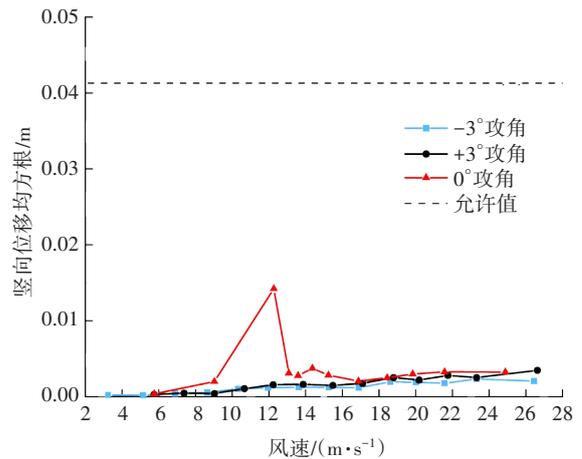
3 主梁涡振性能及优化措施

3.1 原设计断面涡振性能

在均匀场中进行主梁节段模型涡振试验,试验选取的攻角为 0° 、 $\pm 3^\circ$ 。由于标准断面为非对称异型断面,因此将断面分为钝体面迎风和非钝体面迎风两种情况,并分别进行单独试验。原设计方案在钝体面 $+3^\circ$ 攻角工况下,当风速大于11.60 m/s时,主梁出现明显竖弯涡振现象,实桥振幅超出文献[18]中的允许幅值0.041 3 m。其中,当风速达到17.45 m/s时,实桥振幅均方根达到了0.114 0 m,超过允许值176.03%。原主梁断面的涡振性能在钝体面 -3° 、 0° 攻角以及非钝体面的所有攻角情况下表现良好。经试验发现,此异型断面并无扭转响应现象,扭转频率较大,因此仅将竖弯涡振作为减振措施的考虑对象。图4所示为原设计断面涡振竖弯响应随风速的变化曲线。由图4可以看出,原设计方案的主梁断面需要进一步的气动优化措施以达到更好的涡振性能。



(a) 钝体面



(b) 非钝体面

图4 设计断面涡振竖弯响应随风速的变化曲线

Fig. 4 The curves of vertical vortex-induced vibration response of design section with wind speed

3.2 涡振气动优化措施

由于主梁为非对称异型断面,因此一侧来流的满足并不能说明方案的适用性就好。试验考虑了钝体面和非钝体面分别迎风的涡振响应,选取最不利的情况,即钝体面迎风 $+3^\circ$ 攻角进行气动措施优化。根据已有的文献成果,试验测试了增加水平分流板、安装风嘴、改变栏杆外形,以及考虑风嘴及栏杆因素进行气动措施优化,通过节段模型试验研究这些措施对背景工程主梁涡振的抑制效果,试验工况见表2(表中的气动优化措施均是在原设计断面的基础上进行的)。

表2 主梁气动措施优化工况

Table 2 Optimization of aerodynamic measures of the main girder

工况	气动优化措施	来流侧	攻角	模型阻尼比/%	
				竖弯	扭转
1	在钝体面安装0.3 m长的水平分流板	钝体面	$+3^\circ$		
2	在钝体面安装 98° 风嘴	钝体面	0° 、 $\pm 3^\circ$		
3	拆除栏杆	钝体面	0° 、 $\pm 3^\circ$	0.476	0.464
		非钝体面	0° 、 $\pm 3^\circ$		
4	改变栏杆外形	钝体面	0° 、 $\pm 3^\circ$		
		非钝体面	0° 、 $\pm 3^\circ$		
5	改变栏杆外形+两侧向外安装0.3 m长的风嘴	钝体面	0° 、 $\pm 3^\circ$		
		非钝体面	0° 、 $\pm 3^\circ$		

3.2.1 安装水平分流板

LARSEN 等人^[7]在研究箱梁涡振响应时,经过试验分析得出,当风嘴斜腹板的倾角大于 16° 时,来

流风会在主梁下游产生规律性的旋涡脱落,从而导致涡振的产生。而在风嘴处增设水平分流板会打乱来流风对梁体的冲击,扰乱风场,达到抑制涡振的效果。考虑到原设计断面主梁钝体面风嘴的角度已经达到了 127° ,为此在上下腹板之间设置水平分流板,如图5所示。经过试验发现,增加0.3 m长水平分流板的措施依然无明显效果,试验中桥梁发生了明显的涡激共振现象,当风速达到 18.792 m/s 时,实桥振幅达到了 0.0986 m ,超过了规范所规定的 0.0413 m ,其涡振竖向弯响应曲线如图6所示。因此,在梁体增加水平分流板的抑制涡振的效果不理想,需要采取其他有效措施。



图5 在上下腹板间设置水平分流板(工况1)

Fig. 5 Horizontal shunt plate between upper and lower webs (condition 1)

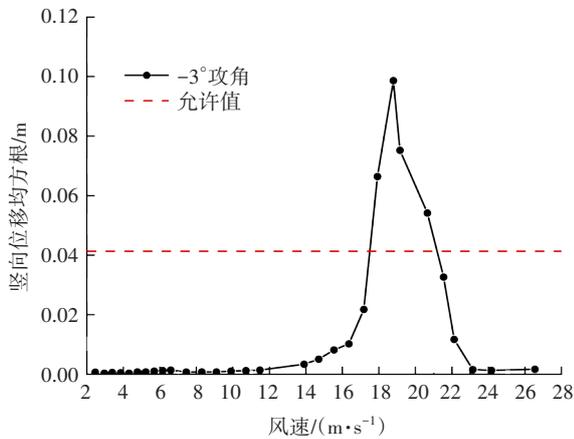


图6 涡振响应随风速的变化曲线(工况1)

Fig. 6 Curves of vortex vibration response with wind speed (condition 1)

3.2.2 改变风嘴角度

主梁断面的钝体特征会显著影响主梁的涡振性能。较小的钝体面风嘴倾角能在一定程度上抑制涡振响应。本研究尝试在钝体面设置 98° 风嘴来抑制涡振,风嘴的设置如图7所示。由于主梁具有非对称异型特征,在钝体面设置风嘴对非钝体面的影响尚未可知,故将钝体面及非钝体面分别作为迎风侧,对两侧的 $0^\circ, \pm 3^\circ$ 攻角进行测振试验,其涡振响应随风

速的变化曲线如图8所示。从图8可以看出,在 $0^\circ, \pm 3^\circ$ 攻角的情况下,当钝体面迎风时主梁无明显涡振现象;但在 -3° 攻角的情况下,当非钝体面的风速为 $11.58\sim 20.45\text{ m/s}$ 时,主梁产生明显的涡激共振。显然,此措施只能在主梁一侧满足要求,对非对称异型箱梁行不通,因此,需要采取其他更加有效的气动措施。

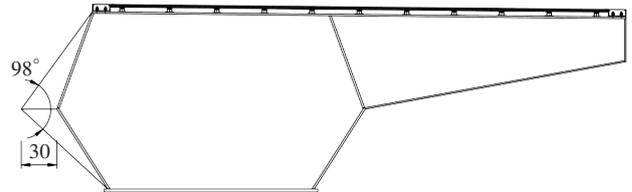
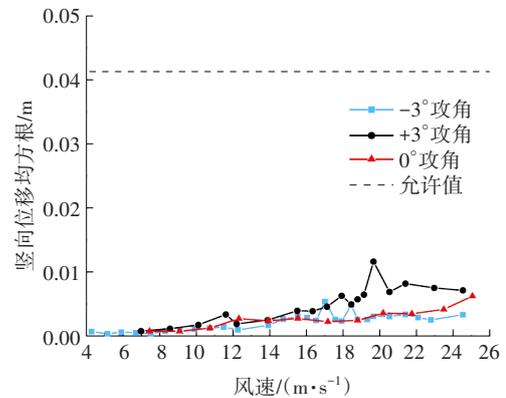
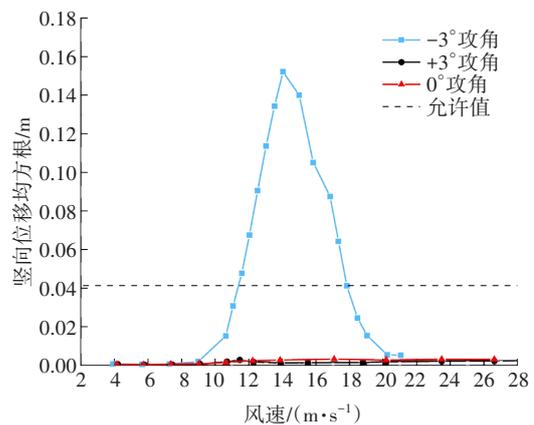


图7 风嘴设置示意图(工况2,单位:cm)

Fig. 7 Layout diagram of the cross-section nozzle (condition 2, unit: cm)



(a) 钝体面



(b) 非钝体面

图8 涡振响应随风速的变化曲线(工况2)

Fig. 8 Curves of vortex vibration response with wind speed (condition 2)

3.2.3 改变栏杆外形

桥面栏杆的形式对来流风的分离及再附着有着很大的影响,已有文献及经验表明栏杆是引起主梁涡激共振的敏感构件。试验中将原桥栏杆拆除以研究栏杆本身对主梁的影响,并设计一种新栏杆以抑制涡振的产生。图9所示为拆除栏杆后的主梁

涡振响应曲线。从图9可以看出,钝体面和非钝体面在无栏杆工况下的振幅均未超过文献[18]所规定的0.0413 m,但在钝体面当风速为15.6~18.8 m/s时仍出现了小幅涡振现象,表明栏杆对于这种异型断面人行桥的影响较大,改变栏杆形式可对涡振有一定的抑制作用。设计的新栏杆形式如图10所示,将此栏杆运用于试验,其布置图如图11所示,其涡振响应随风速变化的曲线如图12所示。

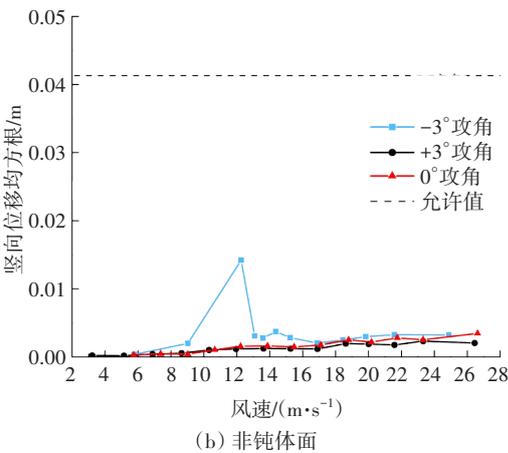
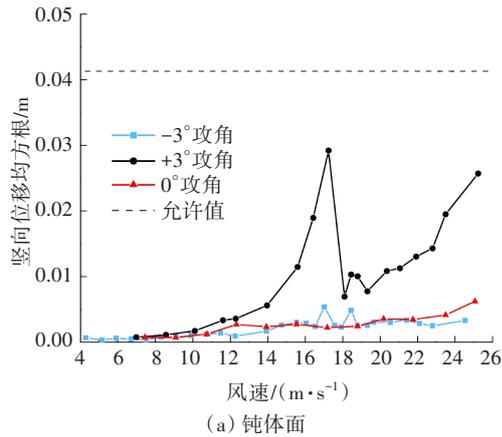


图9 涡振响应随风速的变化曲线(工况3)

Fig. 9 Curves of vortex vibration response with wind speed (condition 3)

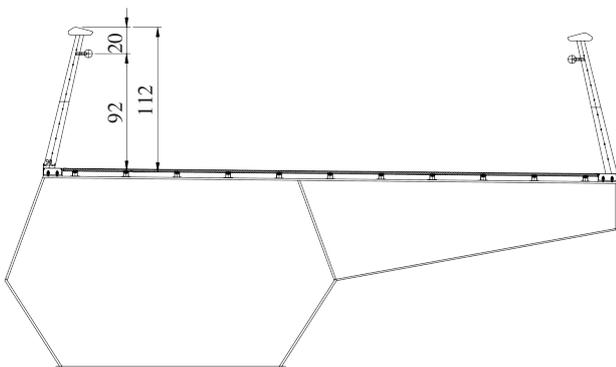


图10 新栏杆设计断面示意图(单位:cm)

Fig. 10 Schematic diagram of the design section of the new railing (unit: cm)

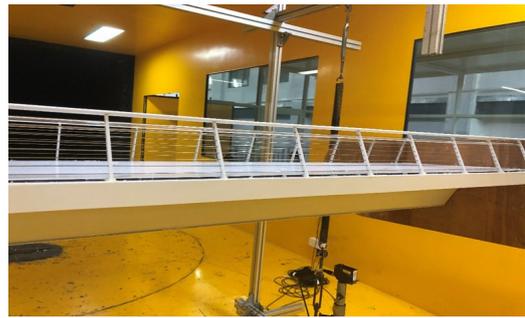


图11 新栏杆试验布置图

Fig. 11 Layout of the new railing test

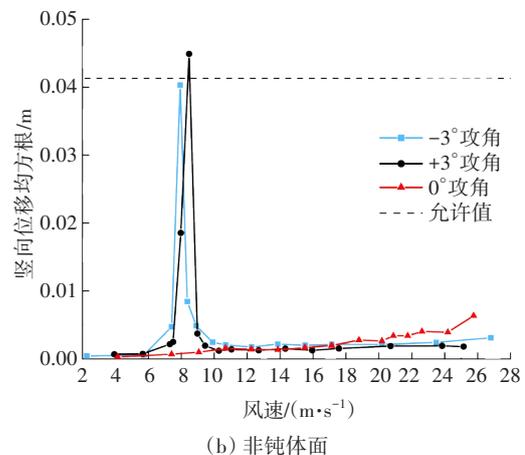
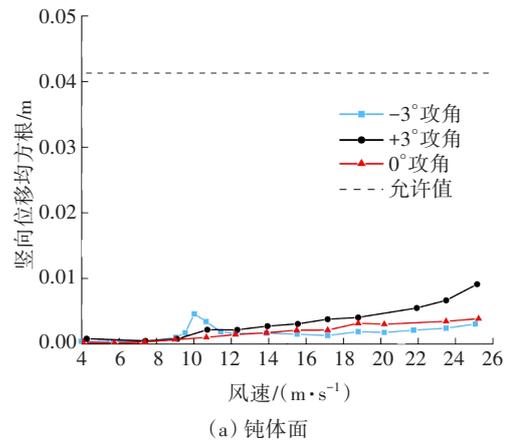


图12 涡振响应随风速的变化曲线(工况4)

Fig. 12 Curves of vortex vibration response with wind speed (condition 4)

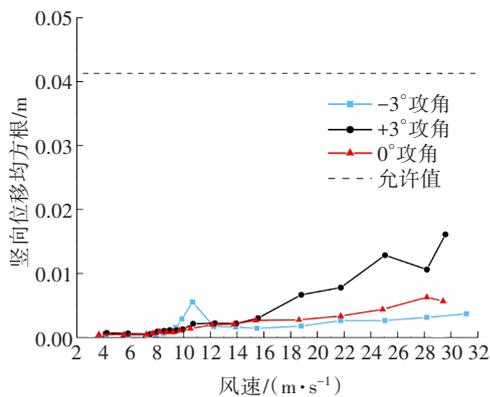
从图12可以看出,改变栏杆外形在钝体面达到了较好的抑制涡振的效果;在非钝体面,当攻角为-3°、0°,风速为7.5~9.3 m/s时,主梁产生了明显的涡激共振。随后,将阻尼由0.476%升至0.771%后,发现在非钝体面仍有涡振现象,但振幅降为0.02 m左右,低于规范所规定的振幅0.0413 m,但仍存在明显涡振现象。

3.2.4 改变栏杆外形+两侧向外安装0.3 m长的风嘴
根据工况2的试验结果可知,断面形式对于涡

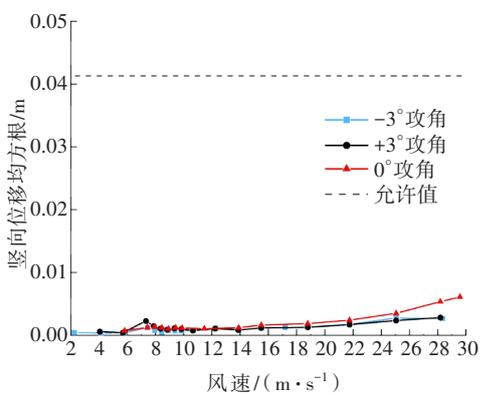
振的影响较大,安装风嘴可以在一定程度上抑制涡振;根据工况3的试验结果可知,栏杆也是涡振的敏感构件。因此,本研究采取风嘴+新栏杆的组合气动措施,即将工况2的一侧风嘴改为双侧风嘴,栏杆依旧采用工况4的新栏杆进行试验。图13为试验布置图,图14所示为在工况5下涡振响应随风速的变化曲线。



图13 改变栏杆外形+两侧向外安装0.3 m长的风嘴试验布置图
Fig. 13 Experimental layout of changing the shape of the railing and installing 0.3-meter-long air nozzles outward on both sides



(a) 钝体面



(b) 非钝体面

图14 涡振响应随风速的变化曲线(工况5)

Fig. 14 Curves of vortex vibration response with wind speed (condition 5)

从图14可以看出,在风速为0~30 m/s时,改变栏杆外形和安装风嘴的组合措施对主梁的涡振有

较好的抑制效果。在工况4仅改变栏杆外形的情况下,主梁出现了低风速涡振现象。因此,本研究着重测试了工况5组合措施情况下低风速时的涡振响应,加密了低风速测点,结果表明:组合措施抑制涡振的效果良好,能够有效改善这种非对称异型箱梁斜拉桥的涡振性能。

4 结论

针对非对称异型箱梁斜拉桥进行了风洞试验,分钝体面和非钝体面迎风两种情况,对比分析了安装水平分流板、安装风嘴、改变栏杆外形、安装风嘴+改变栏杆外形等多种气动控制措施的效果,得到的结论为:

1) 由于异型箱梁的非对称性,需在钝体面和非钝体面分别对主梁的风致位移响应进行试验,改变栏杆外形、安装风嘴的措施仅在钝体面达到了较好的抑制涡振的效果,在非钝体面反而产生了不利影响。

2) 改变栏杆外形对抑制非对称异型箱梁的涡振效果明显。栏杆对于异型箱梁来流风的分流再附着有很大的影响,是涡振的敏感构件。

3) 改变栏杆外形和安装两侧风嘴的组合措施对抑制涡振效果明显,对于异型箱梁断面,组合措施比单一措施更加有效。

参考文献(References):

[1] BATTISTA R C, PFEIL M S. Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niterói Bridge by dynamic control devices [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(3): 273-288.

[2] FUJINO Y, YOSHIDA Y. Wind-induced vibration and control of Trans-Tokyo Bay Crossing Bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(8): 1012-1025.

[3] MACDONALD J H G, IRWIN P A, FLETCHER M S. Vortex-induced vibrations of the Second Severn Crossing cable-stayed bridge: full-scale and wind tunnel measurements [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2002, 152(2): 123-134.

[4] 赵林,刘丛菊,葛耀君. 桥梁结构涡激共振的敏感性[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(4): 694-704. (ZHAO Lin, LIU Congju, GE Yaojun. Vortex-induced vibration sensitivity of bridge girder structures [J]. Acta

- Aerodynamica Sinica, 2020, 38 (4) : 694-704. (in Chinese))
- [5] 葛耀君,赵林,许坤.大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考[J].中国公路学报,2019,32(10):1-18.(GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Kun. Review and reflection on vortex-induced vibration of main girders of long-span bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10):1-18.(in Chinese))
- [6] WANG W X, WANG X Y, HUA X G, et al. Vibration control of vortex-induced vibrations of a bridge deck by a single-side pounding tuned mass damper[J]. Engineering Structures, 2018, 173:61-75.
- [7] LARSEN A, ESDAHL S, ANDERSEN J E, et al. Storebælt suspension bridge: vortex shedding excitation and mitigation by guide vanes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88(2-3):283-296.
- [8] 朱思宇,李永乐,申俊昕,等.大攻角来流作用下扁平钢箱梁涡振性能风洞试验优化研究[J].土木工程学报,2015,48(2):79-86.(ZHU Siyu, LI Yongle, SHEN Junxin, et al. Optimization of vortex-induced vibration of flat steel box girders at large attack angle by wind tunnel test[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2):79-86.(in Chinese))
- [9] 李明,孙延国,李明水,等.宽幅流线型箱梁涡振性能及制振措施研究[J].西南交通大学学报,2018,53(4):712-719.(LI Ming, SUN Yanguo, LI Mingshui, et al. Vortex-induced vibration performance of wide streamlined box girder and aerodynamic countermeasure research [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4):712-719.(in Chinese))
- [10] YANG Y, KIM S, HWANG Y, et al. Experimental study on suppression of vortex-induced vibration of bridge deck using vertical stabilizer plates [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 210:104512.
- [11] 杨咏昕,周锐,罗东伟,等.不同槽宽分体箱梁桥梁的涡振及其控制措施[J].工程力学,2017,34(7):30-40.(YANG Yongxin, ZHOU Rui, LUO Dongwei, et al. Vortex-induced vibration and its control for twin box girder bridges with various slot widths [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(7):30-40.(in Chinese))
- [12] 潘韬,肖海珠,赵林,等.大跨度桥梁超宽分体三箱梁抗风性能及控制措施研究[J].桥梁建设,2020,50(S2):29-35.(PAN Tao, XIAO Haizhu, ZHAO Lin, et al. Study of wind-resistant performance and control measures for very wide girder with three separated boxes in long-span bridge [J]. Bridge Construction, 2020, 50(S2):29-35.(in Chinese))
- [13] 战庆亮,周志勇,葛耀君.开口叠合梁断面气动性能的试验研究[J].桥梁建设,2017,47(1):17-22.(ZHAN Qingliang, ZHOU Zhiyong, GE Yaojun. Experimental study of aerodynamic performance of open cross sections of composite girders [J]. Bridge Construction, 2017, 47(1):17-22.(in Chinese))
- [14] 李欢,何旭辉,王汉封,等. π 型断面超高斜拉桥涡振减振措施风洞试验研究[J].振动与冲击,2018,37(7):62-68.(LI Huan, HE Xuhui, WANG Hanfeng, et al. Wind tunnel tests for vortex-induced vibration control measures of a super high cable-stayed bridge with π -cross section [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7):62-68.(in Chinese))
- [15] LI K, QIAN G, GE Y, et al. Control effect and mechanism investigation on the horizontal flow-isolating plate for PI shaped bridge decks' VIV stability [J]. Wind and Structures, 2019, 28(2):99-110.
- [16] 李明,孙延国,李明水,等.非对称 Π 型梁和流线型箱梁气动性能风洞试验研究[J].振动与冲击,2019,38(8):54-60.(LI Ming, SUN Yanguo, LI Mingshui, et al. A study on the aerodynamic characteristics of an asymmetric Π shaped girder and an asymmetric streamlined box girder via a wind tunnel test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(8):54-60.(in Chinese))
- [17] 刘叶,王方立,韩艳,等.风屏障对平层公铁桥上列车防风效果分析[J].交通科学与工程,2021,37(1):51-59,74.(LIU Ye, WANG Fangli, HAN Yan, et al. Study on the protective effects of wind barriers on the train on highway and railway same-story bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1):51-59,74.(in Chinese))
- [18] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗风设计规范:JTG/T 3360-01—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018. (in Chinese))
- (责任编辑:石月珍;校对:罗容 欧兆虎;英文编辑:陈璐)