

斜拉桥 II 型开口断面主梁气动选型风洞试验

董 锐, 杨詠昕, 葛耀君

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 200092 上海)

摘 要: 型钢-混凝土开口 II 型主梁断面是目前斜拉桥中广泛应用的一种形式, 由于其钝体断面特性, 容易出现风致振动问题, 需要对其断面进行优化. 以某主跨 300 m 的斜拉桥为工程背景, 通过一系列节段模型风洞试验, 对 3 种 II 型结合主梁断面进行风洞试验研究, 比较了它们的颤振和涡振性能, 得到了一些有益结论: 在很多情况下, 气动外形对 II 型主梁颤振和涡振性能的影响不同, 在气动选型中应综合考虑; 与均匀流场相比, 紊流场的脉动分量抑制了漩涡的规律性脱落, 使得主梁断面发生涡振的机率和涡振振幅都大大减小.

关键词: II 型主梁断面; 风洞试验; 气动选型; 颤振; 涡激振动

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0109-06

Wind tunnel test for aerodynamic selection of II shaped deck of cable-stayed bridge

DONG Rui, YANG Yong-xin, GE Yao-jun

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

Abstract: Steel-concrete composite bridge decks with II shape are widely used in cable-stayed bridges. Due to the bluff body shape, its aerodynamic properties are not as good as stream-line box decks', and the shape should be optimized to enhance its wind-resistant performance. Based on a 300 m span cable-stayed bridge with II shaped deck, a series of wind tunnel tests of section model are carried out in TJ-1 ABL wind tunnel, Tongji University. The aim of the tests is to select the best aerodynamic bridge deck shape from the three design shapes. After comparing the flutter and vortex-induced vibration aerodynamic performance of the three bridge deck shapes, some valuable conclusions are gotten. The influence of the bridge deck shape to the flutter aerodynamic performance is different with which to the vortex-induced vibration aerodynamic performance in some cases. By comparing with the results in uniform flow, turbulence flow can effectively reduced the risk and amplitude of the vortex-induced vibration due to the fluctuating components.

Key words: II shaped bridge deck; wind tunnel test; bridge deck aerodynamic shape selection; flutter; vortex-induced vibration

型钢-混凝土结合梁具有重量轻, 构造简单, 受力合理, 制作、施工和养护方便, 造价相对较低等优点, 被许多斜拉桥工程所采用^[1], 如加拿大的 Annacis 桥, 我国的南浦大桥、杨浦大桥等. 结

合梁大多采用开口 II 型钝体断面, 开口断面的使用降低了主梁的扭转刚度, 与流线型钢箱梁相比, 其空气动力学性能相对较差, 容易出现风致振动问题. 在开口 II 型结合梁斜拉桥的设计阶段, 有必要对其抗风稳定性能进行研究和评估. 目前, 桥梁抗风研究主要采用理论分析、风洞试验和 CFD 数值模拟 3 种方法^[2]. 由于钝体断面扰流问题的复杂性, 目前理论分析和 CFD 数值模拟很难得到令人信服的结果, 还必须依赖风洞模型试验对其

收稿日期: 2011-11-25.

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作交流项目(51021140005).

作者简介: 董 锐(1982—), 男, 博士研究生;

杨詠昕(1974—), 男, 副研究员, 博士生导师;

葛耀君(1958—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 董 锐, 09dr@tongji.edu.cn.

抗风稳定性进行研究. 本文以某斜拉桥^[3]为工程背景,对3种不同的II型开口主梁断面进行风洞试验,并在此基础上进行了气动选型,得到了一些有益结论.

该桥为一双塔双索面斜拉桥,跨径组合为 $60 + 125 + 300 + 125 + 60 = 670$ m,整体布置见图1. 主梁采用I型钢与混凝土桥面板结合形成的II型组合断面,其主结构宽 18.900 m,中心梁高 2.905 m;桥塔采用钻石型混凝土桥塔,塔高约

91 m;桥塔和主梁通过 $(2 \times 13) \times 4 = 104$ 根斜拉索相连,塔上索距 1.5 m,主梁上索距 10.5 m. 该斜拉桥设计中提出了3种主梁断面(标准主梁断面见图2),分别是无导流板断面,导流板一断面和导流板二断面,见图3. 针对上述3种断面,进行了节段模型颤振和涡激共振风洞试验,在综合评价其抗风性能的基础上优选出气动性能最好的断面. 考虑到紊流场的复杂性,本项研究没有进行抖振试验.

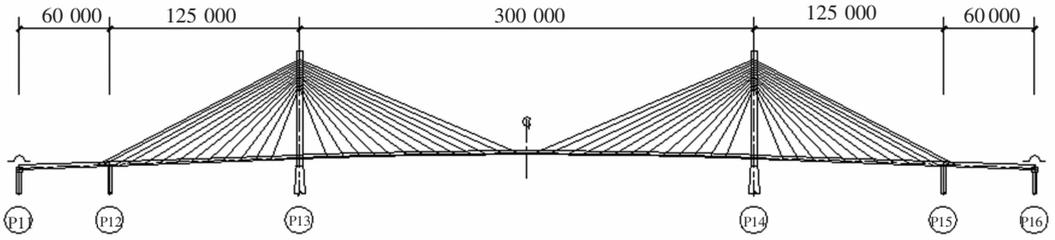


图1 斜拉桥结构布置(mm)

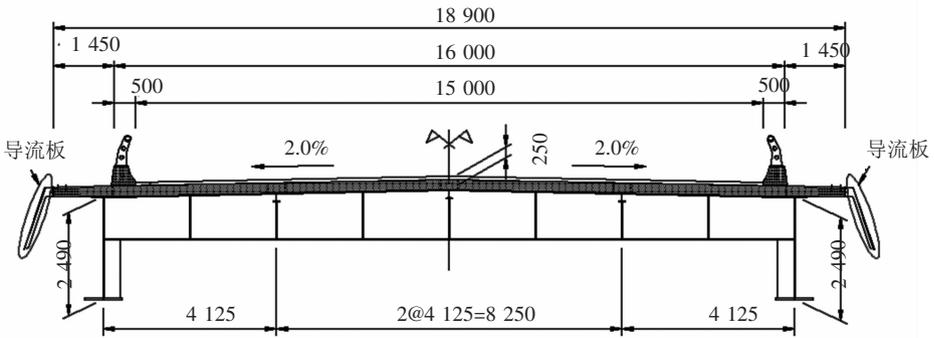


图2 标准主梁断面(mm)

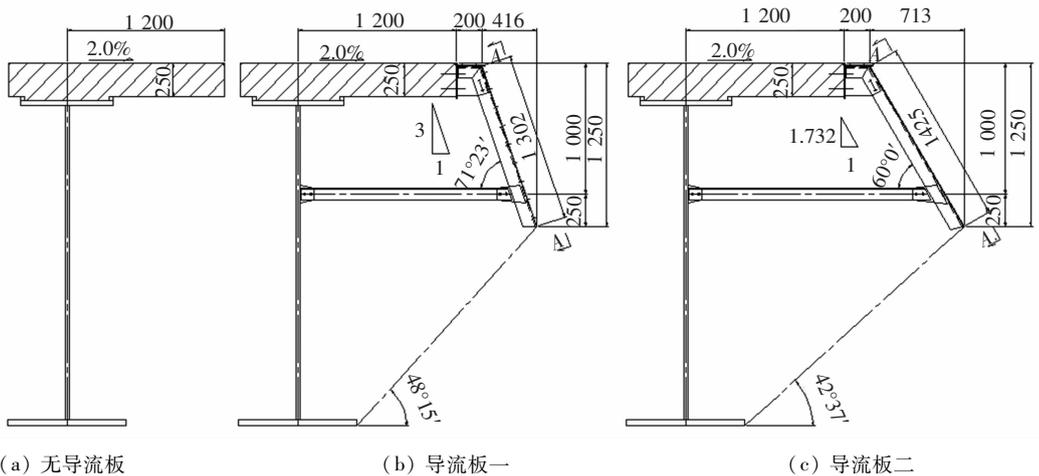


图3 主梁导流板(mm)

1 结构建模与动力特性分析

采用 ANSYS 建立斜拉桥结构有限元计算模型,见图4. 其中,I型钢主梁、次梁、钢横梁、混凝土桥塔、混凝土辅助墩、混凝土过渡墩和承台采用

空间梁单元 Beam 188 模拟;混凝土桥面板采用空间壳单元 Shell 63 模拟;斜拉索采用经过 Ernst 公式修正的杆单元 Link 10 模拟;桥塔和桥墩的群桩基础采用空间弹簧单元 Combine 14 模拟,对于每个群桩基础采用3个力弹簧单元和3个力矩弹

簧单元分别模拟群桩基础沿竖向、沿顺桥向、沿横桥向、绕竖向、绕顺桥向和绕横桥向的作用; 主梁的二期恒载采用 Mass 21 单元模拟. 有限元计算模型的总体坐标系以顺桥向为 X 轴, 横桥向为 Z 轴, 竖向为 Y 轴.

最大双悬臂阶段、最大单悬臂阶段和成桥阶段桥梁结构的一阶模态分别见图 5~7 (图中 S:

symmetric, 对称; A: asymmetric, 反对称; V: vertical, 竖弯; L: lateral, 侧弯; T: torsional, 扭转). 分析发现, 由于在最大双悬臂阶段采用临时约束加强主梁与桥塔的连接, 使得桥梁结构的基频明显高于最大单悬臂阶段, 从工程抗风的角度考虑, 选择结构刚度明显较小的最大单悬臂阶段作为最不利施工状态(以下简称施工状态).

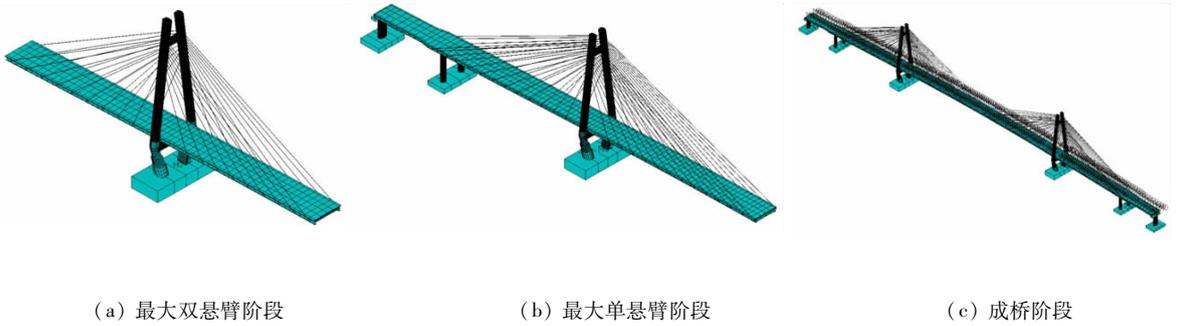


图 4 斜拉桥结构有限元模型

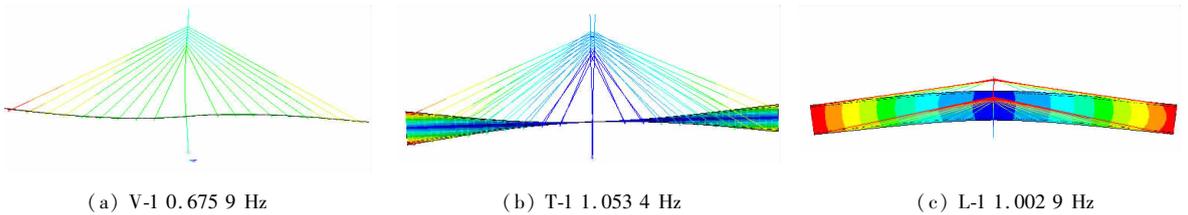


图 5 斜拉桥结构最大双悬臂状态一阶模态

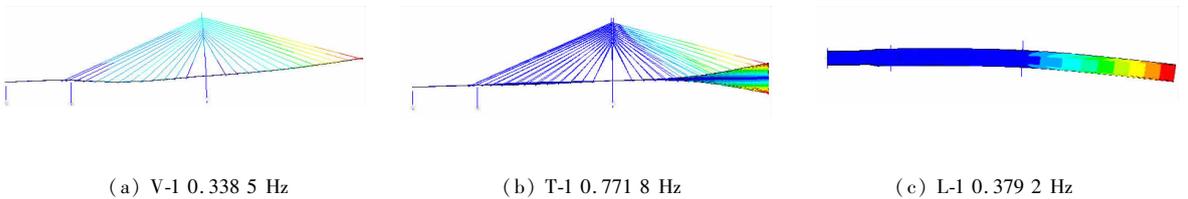


图 6 斜拉桥结构最大单悬臂状态一阶模态

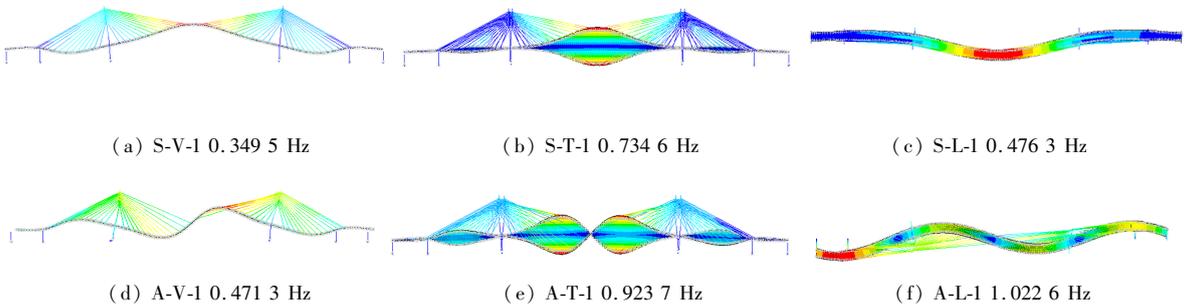


图 7 斜拉桥结构成桥状态一阶模态

2 主梁颤振性能比选

主梁节段模型风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-1 大气边界层风洞中进行. 该风洞为一直流式大气边界层风洞, 试验段宽

1.8 m, 高 1.8 m, 长 12 m, 风速范围 1.0~30.0 m/s 连续可调. 风洞中流场性能良好, 试验区流场的速度不均匀性小于 1%、湍流度小于 0.5%、平均气流偏角小于 0.5°, 满足节段模型试验要求. 风洞试验采用二元刚体节段模型, 节段模型通过 8 根

弹簧悬挂在内支架上. 风洞试验中, 弹簧悬挂二元刚体节段模型除了满足几何外形相似外, 原则上还应该满足以下3组无量纲参数^[1,4]相似.

$$\text{弹性参数: } \frac{U}{\omega_b B}, \frac{U}{\omega_t B} \text{ 或 } \frac{\omega_t}{\omega_b} \text{ (频率比);}$$

$$\text{惯性参数: } \frac{m}{\rho b^2}, \frac{J_m}{\rho b^4} \text{ 或 } \frac{r}{b} \text{ (惯性半径比);}$$

$$\text{阻尼参数: } \zeta_b, \zeta_t \text{ (阻尼比).}$$

式中: U 为平均风速; ω_b, ω_t 分别为弯曲和扭转振动固有圆频率; B 为桥宽, b 为半桥宽; m, J_m 为单位桥长的质量和质量惯性矩; ρ 为空气密度; r 为惯性半径; ζ_b, ζ_t 分别为竖向弯曲和扭转振动的阻尼比. 考虑到斜拉桥规模和 TJ-1 风洞尺寸, 节段模型采用 1:35 的缩尺比. 节段模型在风洞中的布置见图 8.

该桥地表粗糙度类型为 A 类, 成桥阶段的设计基准风速为 37.7 m/s, 成桥和施工状态下的颤振临界风速^[4]见表 1. 主梁节段模型颤振风洞试验共完成了 18 个试验工况, 包括主梁成桥和施工两个阶段, 导流板一、导流板二和无导流板 3 种断面, $-3^\circ, 0^\circ$ 和 $+3^\circ$ 三种风攻角. 所有试验工况均在 10% 结构阻尼比^[4]条件下的均匀流场中完成, 桥梁结构不同断面不同风攻角的颤振临界风速见表 1. 对于不带导流板的断面, 其颤振稳定性不满足规范要求; 导流板一和导流板二断面的颤振稳定性能满足规范要求, 且导流板二断面优于导流板一断面. 如果仅考虑颤振稳定性能, 应该优先采用带导流板二的主梁断面.



图 8 斜拉桥节段模型

表 1 桥梁结构颤振临界风速

$m \cdot s^{-1}$

攻角/ $(^\circ)$	成桥状态			施工状态		
	导流板一	导流板二	无导流板	导流板一	导流板二	无导流板
+3	65.0	80.0	30.0	55.0	65.0	35.0
0	75.0	85.0	50.0	75.0	85.0	60.0
-3	>90.0	>90.0	50.0	>90.0	>90.0	85.0
最小值	65.0	80.0	30.0	55.0	65.0	35.0
检验值	56.5	56.5	56.5	47.5	47.5	47.5

3 主梁涡激共振性能比选

主梁节段模型涡振风洞试验共完成了 30 个试验工况, 包括成桥和施工两个阶段, 导流板一、导流板二和无导流板三种断面, $5^\circ, -3^\circ, 0^\circ, +3^\circ$ 和 $+5^\circ$ 五种风攻角. 所有试验工况均在 10% 阻尼比条件下的均匀流场中进行. 根据《公路桥梁抗风设计规范》, 斜拉桥发生涡振时的扭转和竖弯振幅应该控制在一定的范围内, 对于在均匀流场中涡振振幅超限的几种情况, 本研究又进行了 5% 紊流场中的补充试验.

成桥状态, 在 26 个工况下观测到明显的竖

弯/扭转涡激共振现象, 见表 2. 其中在 5° 风攻角成桥导流板一、导流板二和无导流板 3 种工况下的竖弯涡激振动的振幅超过规范允许值; 成桥导流板一 -5° 风攻角, 成桥导流板二 $-5^\circ, -3^\circ, 0^\circ$ 和 $+3^\circ$ 风攻角, 成桥无导流板 -5° 风攻角下的扭转涡激共振振幅超过规范允许值. 对于成桥状态涡激共振振幅超限的 9 种工况, 又进行了 10% 阻尼比 5% 紊流场下的涡振试验, 除成桥状态导流板二 -5° 风攻角下发现扭转涡振外, 其余工况均无涡振现象, 且紊流场中各工况的振幅均不超限. 成桥状态均匀流场中各工况的涡振幅值-风速曲线见图 9.

表 2 成桥状态涡激共振特征参数表

编号	涡振形态	断面形式	攻角/(°)	锁定风速/(m·s ⁻¹)	最大振幅(单峰值)	振幅允许值	St 数
1			-3	8.8 ~ 10.1	0.041 m		0.115
2		导流板一	0	9.2 ~ 10.6	0.027 m		0.110
3		(均匀流场)	+3	10.1 ~ 11.0	0.097 m		0.092
4			+5	11.0 ~ 13.7	0.190 m		0.074
5			-5	7.5 ~ 8.3	0.032 m		0.135
6	竖弯	导流板二	-3	6.2 ~ 7.5	0.041 m	0.114 m	0.153
7		(均匀流场)	+3	11.0 ~ 11.5	0.095 m		0.092
8			+5	9.7 ~ 11.5	0.120 m		0.100
9			-5	9.6 ~ 10.3	0.098 m		0.101
10			无导流板	-3	8.7 ~ 10.0		0.074 m
11		(均匀流场)	0	9.2 ~ 10.1	0.065 m		0.101
12			+3	11.4 ~ 12.2	0.110 m		0.083
13			+5	11.8 ~ 13.1	0.115 m		0.078
14			-5	19.9 ~ 24.3	0.442°		0.097
15		导流板一	-3	20.5 ~ 24.6	0.183°		0.098
16		(均匀流场)	0	22.9 ~ 28.4	0.222°		0.085
17			3	24.6 ~ 31.1	0.277°		0.074
18			-5	19.2 ~ 25.2	0.509°		0.095
19	扭转	导流板二	-3	19.2 ~ 23.5	0.478°	0.328°	0.093
20		(均匀流场)	0	23.0 ~ 28.2	0.459°		0.080
21			+3	26.3 ~ 33.4	0.357°		0.072
22			+5	27.1 ~ 38.3	0.230°		0.066
23			-5	21.2 ~ 27.0	0.407°		0.088
24		无导流板	-3	19.9 ~ 25.2	0.108°		0.097
25		(均匀流场)	+5	18.0 ~ 20.7	0.105°		0.115
26	扭转	导流板二	-5	27.2 ~ 31.2	0.102°		0.071

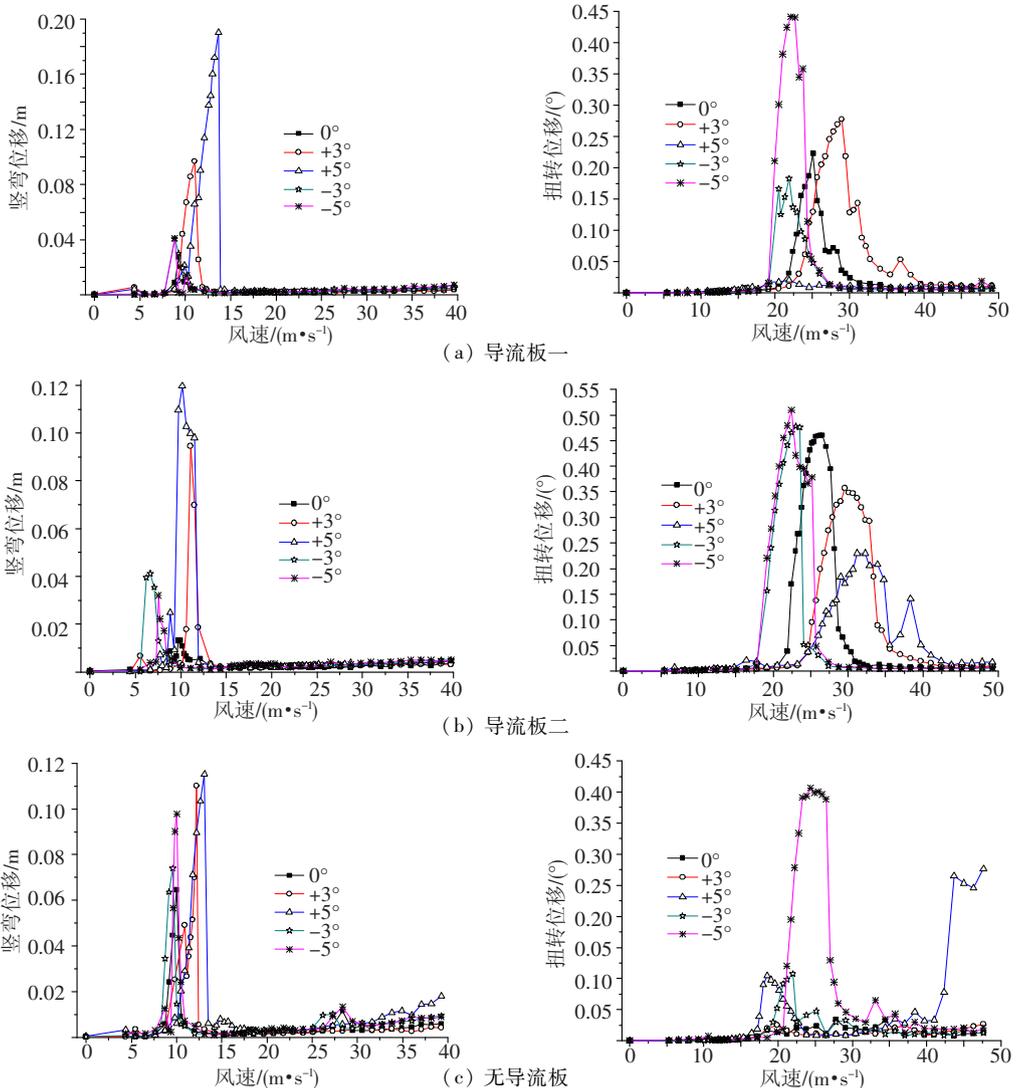


图 9 斜拉桥成桥状态节段模型涡振位移 - 风速曲线

施工状态,在 11 个工况下观测到明显的竖弯/扭转涡激共振现象,见表 3. 其中在 5°风攻角施工导流板一和导流板二两种工况下的竖弯涡激振动的振幅超过规范允许值. 对于施工状态涡激共振振幅超限的 2 种工况,也进行了 10‰阻尼比 5% 紊流场下的涡振试验,均无涡振现象,且紊流场中各工况的振幅均不超限. 考虑到施工阶段属于临时期,涡振性能的比选以成桥阶段为主,限于篇幅此处不再给出施工阶段的涡振幅值-风速曲线.

对于斜拉桥的涡振稳定性,在均匀流场 10‰

阻尼比条件下,均存在不同程度的涡振振幅超限情况;施加紊流度为 5% 的紊流场后,除导流板二-5°攻角工况外均无涡振现象,且所有工况的振幅均满足规范要求;可见,紊流的加入有效地抑制了涡激共振的发生. 由于无导流板断面的颤振性能不满足规范要求,此处不再考虑其与其他两种断面涡振性能的比较. 通过表 1 和表 2 可以发现,导流板一断面的涡振性能要优于导流板二断面,如果仅从涡振稳定性考虑,应该优先选用带导流板一的主梁断面.

表 3 施工阶段涡激共振特征参数表

编号	涡振形态	断面形式	攻角/(°)	锁定风速/(m·s ⁻¹)	最大振幅(单峰值)	振幅允许值	St 数	
1	竖弯	导流板一	+3	10.0 ~ 11.5	0.072 m	0.118 m	0.103	
2			+5	9.5 ~ 11.7	0.119 m		0.084	
3		导流板二	+3	10.8 ~ 12.3	0.069 m		0.083	
4			+5	11.7 ~ 14.3	0.130 m		0.073	
5		无导流板	-3	-5	8.6 ~ 10.8		0.033 m	0.101
6				-3	8.6 ~ 10.8		0.037 m	0.101
7			0	8.6 ~ 10.3	0.044 m		0.104	
8			+3	9.7 ~ 11.8	0.087 m		0.086	
9			+5	11.2 ~ 12.5	0.118 m		0.079	
10			扭转	导流板二	+3		16.6 ~ 19.7	0.123°
11	无导流板	+3			15.5 ~ 19.4	0.093°	0.131	

4 结 论

大跨度斜拉桥属于柔性风敏感结构,风致振动现象明显,颤振和涡振是其中最重要的两种风致振动灾害. 本文以某斜拉桥为工程背景,通过一系列节段模型风洞试验对 3 种开口 II 型主梁断面进行了颤振和涡振性能的气动选型,得到以下结论:

1) 颤振试验结果表明,无导流板的断面不满足规范要求,导流板一断面和导流板二断面的颤振性能均满足规范要求,且导流板二断面优于导流板一断面;如果仅考虑颤振稳定性能,应该优先选用导流板二断面;

2) 涡激振动试验结果表明,在均匀流场中,3 种断面均存在不同程度的涡激共振现象. 对于涡振振幅超限的工况,又进行了 5% 紊流场中的补充试验,结果表明紊流的存在抑制了漩涡的规律性脱落,使得涡激振动发生的几率和涡振振幅明显减小,且均满足规范要求. 比较导流板一断面和导流板二断面的位移-风速曲线可以发现,导流板一断面的涡振性能要优于导流板二断面,如果仅考虑涡振稳定性能,应该优先选用导流板一断面;

3) 颤振是发散性的自激振动,在桥梁的设计使用寿命内应该严格避免;涡激振动是限幅振动,在桥梁的设计使用寿命内其幅值应限制在规范允许的范围. 由于自然界的风属于紊流风场,紊流

成分明显抑制了漩涡的规律性脱落,故涡激振动在自然界风场中发生的几率要小于风洞试验中的均匀流场;

4) 外形对主梁颤振和涡振性能的影响有时存在不同,在结构的气动选型时,应该对两者进行综合考虑. 当颤振和涡振试验均满足规范要求的情况下,如果颤振性能安全储备的富余量不大,应该优先选用颤振性能较好的断面,如果颤振性能安全储备的富余量较大,可优先选用涡振性能较好的断面. 对于本文中的案例,因颤振性能安全储备的富余量不是很大,故应优先选用颤振性能较好的导流板二断面.

参 考 文 献:

[1] 宋锦忠, 哈鸿, 毛鸿银. 开口主梁断面的气动选型 [C]//第五届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集. 张家界: 中国空气动力学学会风工程和工业空气动力学专业委员会, 1998: 240-245.

[2] 项海帆, 葛耀君, 朱乐东, 等. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[3] YANG Yongxin, DONG Rui. Wind tunnel study on wind-resistant performance of Co Chien cable-stayed bridge in Vietnam (Research Report) [R]. Shanghai: State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, 2011.

[4] 中华人民共和国交通部. JTG/T D60—01—2004 公路桥梁抗风设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (编辑 赵丽莹)