

文章编号:1673-2049(2019)04-0047-08

大跨钢箱拱-波形钢-桁架组合梁拱桥抗风性能

涂俊¹,王玉银^{2,3},刘永健⁴,刘昌永^{2,3}

(1. 深圳市市政设计研究院有限公司,广东 深圳 518029; 2. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究深圳前海公园跨湖大桥采用的钢箱拱-波形钢-桁架组合梁拱桥的抗风性能,在保证弗劳德数、柯西数和密度等相似的前提下,按照1:100的比例设计制作了全桥气弹性试验模型,拱肋和主梁采用钢骨架实现刚度相似,通过外包ABS外衣实现几何相似,通过配重实现质量相似,用定制弹簧模拟吊杆的刚度,采用有限元计算验证了试验模型与实桥动力特性的吻合程度。然后进行了C类地貌及均匀流场中全桥气弹性模型风洞试验,实测了不同风偏角(0°,30°,60°,90°)和不同风攻角(-3°,0°,3°)下拱肋和主梁的加速度响应。结果表明:风偏角对拱肋和主梁加速度影响显著,风偏角越大,加速度响应越低;风攻角对拱肋和主梁的加速度响应影响不大;湍流未见涡激共振现象,而均匀流场时拱肋和主梁出现了涡激共振;试验风速超过《公路桥梁抗风设计规范》计算得到的颤振临界风速,未出现颤振。

关键词:拱桥;抗风;全桥气动弹性;风洞试验;加速度

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A

Wind Resistance of Large-span Steel Box Arch-corrugated Steel-truss Composite Beam Arch Bridge

TU Jun¹, WANG Yu-yin^{2,3}, LIU Yong-jian⁴, LIU Chang-yong^{2,3}

(1. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, Guangdong, China; 2. Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 3. Key Laboratory of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the wind resistance performance of the steel box arch-corrugated steel-truss composite beam arch bridge used in the Shenzhen Houhai Park cross-lake bridge, a full bridge aeroelastic model was designed and fabricated according to the ratio of 1:100 on the premise of ensuring similar Froude number, Cauchy number and density to the real bridge. The arch rib and primary beam were fabricated using steel to achieve similar stiffness. ABS garment was placed on outer of the arch rib and primary beam to ensure geometric similarity. Weight was added to ensure mass similarity of the arch rib and primary beam. The stiffness of hanger was simulated by the customized spring. The agreement of dynamic characteristics between the test

收稿日期:2019-05-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701202)

作者简介:涂俊(1984-),男,福建长汀人,高级工程师,E-mail:datujun@qq.com。

通信作者:王玉银(1975-),男,黑龙江逊克人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wangyuyin@hit.edu.cn。

model and the real bridge was verified by finite element calculation. The wind tunnel test of the full bridge aeroelastic model in terrain C and uniform flow filed was conducted to measure the acceleration responses of the arch rib and primary beam under different wind yaw angles (0° , 30° , 60° , 90°) and different wind attack angles (-3° , 0° , 3°). The results show that the wind yaw angle has a significant influence on the acceleration of the arch rib and primary beam. The larger the yaw angle is, the lower the acceleration response is. The wind attack angle has an insignificant influence on the acceleration response of the arch rib and primary beam. The vortex induced vibration of the arch rib and primary beam is not observed in the turbulent flow field, while it occurs in the uniform flow field. No flutter occurs when the test wind speed exceeds the flutter critical wind speed calculated by the code of *Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges*.

Key words: arch bridge; wind resistance; full bridge aeroelastic; wind tunnel test; acceleration

0 引言

风灾是自然灾害中发生最频繁的一种,对于大跨度桥梁等柔性结构影响显著。1940 年,美国华盛顿州塔科马峡谷悬索桥在风速不到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风下发生强烈振动,最终倒塌破坏,成为近代桥梁史上第 1 座因风振发生破坏的大桥,也使得桥梁的风致振动受到越来越多的关注。风致振动可分为涡振、抖振、颤振、驰振等 4 种,涡振和抖振为限幅振动,颤振和驰振为发散振动^[1-2]。为保证桥梁的安全,应采取措施避免桥梁出现上述振动或限制其振幅。

由于风与桥梁结构的相互作用导致风致振动非常复杂,而风洞试验是研究风致振动一种最直接最可靠的方式。黄超^[3]对主跨长 420 m、采用钢箱系杆拱和桁架梁的重庆菜园坝长江大桥进行了全桥气弹模型试验研究;阎卫国^[4]对跨长 278 m 的钢桁架悬索桥桁架加劲梁进行了节段模型试验;徐洪涛^[5]对位于山区峡谷的贵州坝陵河特大跨度桁架加劲梁悬索桥和新疆果子沟大跨度桁架斜拉桥进行了全桥气弹性模型试验;王承启^[6]以朝天门大桥为研究对象,进行了大跨钢桁架拱桥全桥气弹性模型试验;Diana 等^[7]总结了大跨度悬索桥风洞试验方法,指出风-桥相互作用最重要的方面是考虑桥梁不同部位的空气动力现象;Diana 等^[8]以土耳其伊兹米特湾悬索桥为研究对象,进行了 1:220 气动弹性模型试验;Larsen 等^[9]根据工程实例,讨论了悬索桥和斜拉桥的风致振动;Cheynet 等^[10]基于安装在挪威 Lysefjord 桥上的风速计和加速度计的实测数据,研究了复杂地形中悬索桥的抖振响应;Nunez 等^[11]以巴西 Oliveira 悬索桥为研究对象,使用 2 个桥面板

节段模型进行风洞试验,研究了不同水平和垂直间隙的干涉效应;Hui 等^[12-13]通过风洞试验研究了香港昂船洲大桥桥址的平均风、湍流强度以及风力特征;Buljac 等^[14]通过试验,研究了道路风障对不同形式桥面板空气动力学和气动弹性的影响;Permata 等^[15]进行了印度尼西亚 Ngarai Sianok 斜拉桥的风洞试验;Kim 等^[16]进行了韩国 The New Millennium 斜拉桥的风洞试验;Ma 等^[17]通过现场测量研究了大跨度斜拉桥在安装阶段的气动特性;白桦等^[18]以刘家峡大桥为例通过风洞试验研究了中央稳定板、导流板、封闭防撞栏等气动措施对钢桁架悬索桥颤振稳定性的影响;王凯等^[19]对坝陵河大桥和抵母河大桥进行了节段模型风洞试验。

目前关于悬索桥和斜拉桥抗风性能的研究较多,而关于拱桥的研究较少。本文将针对采用钢箱拱和波形钢腹板-桁架主梁的深圳后海公园跨湖大桥展开研究,采用风洞试验研究该桥的风振特性,为该桥及类似桥梁的抗风设计提供参考。

1 试验设计

1.1 工程概况

深圳后海公园跨湖大桥为单拱肋拱桥,其拱肋分为钢箱拱肋段和钢-混凝土组合结构拱肋段,如图 1 所示。拱肋拱轴线线形采用拱轴系数 $m=2.514$ 的悬链线和半径 $R=29.45 \text{ m}$ 的圆曲线组成,计算跨径为 220.5 m,计算矢高为 52.5 m,矢跨比为 1/4.2。钢箱拱肋段采用等宽不等高单箱单室截面,截面宽为 4.0 m,高从拱顶的 3.0 m 渐变到拱脚的 6.6 m。为了提高整桥稳定性,拱脚范围内拱肋段采用钢-混凝土组合结构,内灌 C50 微膨胀混凝土。

主梁采用波形钢腹板-桁架组合结构。从主桥

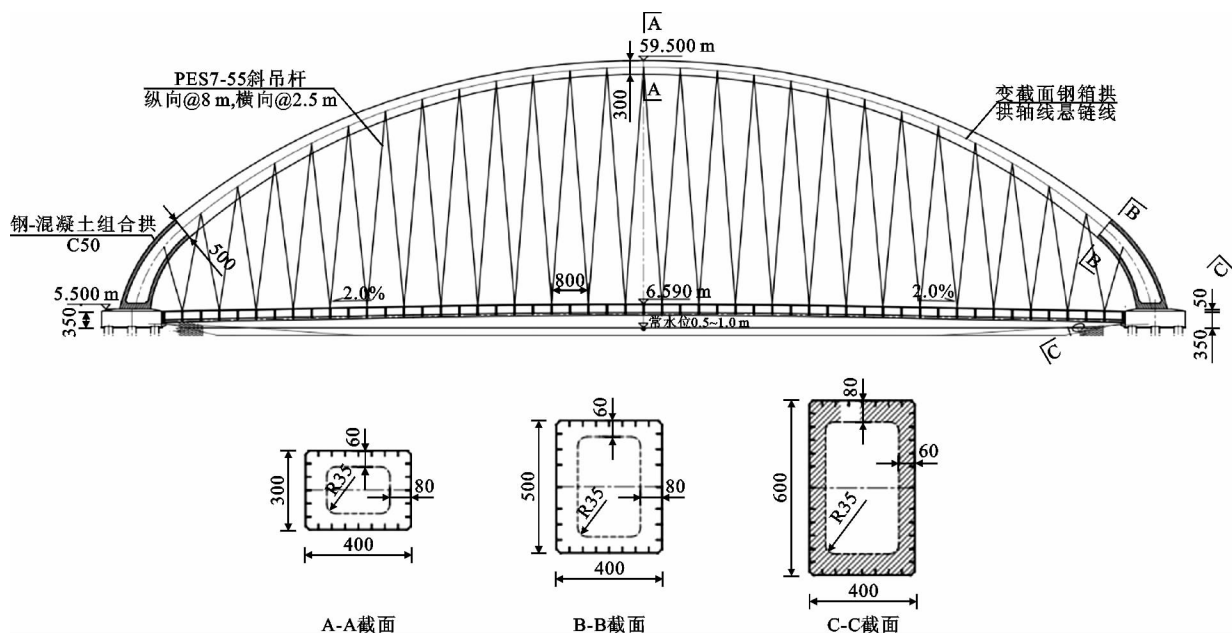


图1 拱肋(单位:cm)

Fig. 1 Arch Rib (Unit:cm)

中轴线向两端每隔 4.0 m 设置 1 道标准波形钢腹板-桁架节段,每隔 8.0 m 设置 1 道吊杆,共 104 道。图 2 为主梁横断面,主梁宽 11.0 m,高 2.55 m,顶板厚 20 mm,侧向悬臂长 3.0 m,主梁中心线上每隔 4.0 m 设置 1 道斜撑,其规格为 $\phi 299 \times 12$,桁架结构下弦杆采用规格为 $\phi 600 \times 12$ 的钢管,桥面板、斜撑及下弦杆材质均为 Q345q-C。腹板采用波形钢腹板,腹板中心距为 3.0 m,波形钢腹板长 1.0 m,波高 16 cm,厚 10 mm,腹板每 4.0 m 设置 1 道加劲肋柱,后浇层与主梁顶板通过抗剪栓钉及加劲肋连接。主梁与下弦杆之间设置 2 道内斜撑,规格为 $\phi 219 \times 10$;2 道下弦杆之间设置 1 道横撑,规格为 $\phi 299 \times 12$ 或 $\phi 219 \times 12$,形成箱内三角形断面,以提高主梁的局部抗扭能力。桥面板为 200 mm 厚钢筋混凝土板,待主梁拼接形成整体结构后一次连续浇筑而成。

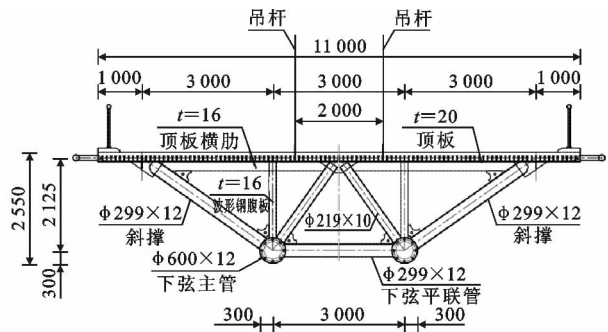


图2 主梁横断面(单位:mm)

Fig. 2 Cross-section of Primary Beam (Unit:mm)

吊杆采用 PES7-55 钢绞线整束挤压吊杆体系,

成品索采用 1860 级环氧喷涂无黏结钢绞线缠包后热挤高密度聚乙烯(HDPE)。

1.2 模型设计

全桥气弹性模型采用 1:100 的几何缩尺比,模型拱肋跨径为 2.205 m,矢高为 0.525 m。除了 Reynolds 数以外,弗劳德数、柯西数和密度等保证严格相似。

为同时保证几何相似和刚度相似,采用钢骨架提供模型的刚度,采用外衣实现几何相似。对于拱肋,根据弯曲刚度、轴向刚度和扭转刚度的相似比要求,设计符合竖弯、侧弯、轴向和扭转刚度要求的截面骨架,并进行精密加工。由于实际拱轴线为悬链线和圆曲线的组合,拱的高度由拱顶到拱底渐变,如果缩尺模型也采用渐变截面,则加工特别复杂,因此采用以直代曲的形式来模拟拱肋。经分析确定将拱肋分为 18 段,可以很好地符合拱轴线。

采用有限元软件计算主梁的竖弯刚度、侧弯刚度、扭转刚度,根据相似比将其等效为 π 形截面,如图 3 所示。采用铜丝(按实际外形的缩尺比考虑)和弹簧模拟吊杆,直径 0.5 mm 的铜丝刚度是等效吊杆刚度的 52.3 倍,缩尺吊杆的轴向刚度采用弹簧模拟。

根据几何相似,采用 130 mm \times 130 mm \times 30 mm 的钢板模拟承台[图 4(a)]。按实际支撑条件,将拱脚与承台固接,即将钢拱与钢块焊接;桥面梁与承台铰接,采用滚轴模拟[图 4(b)]。

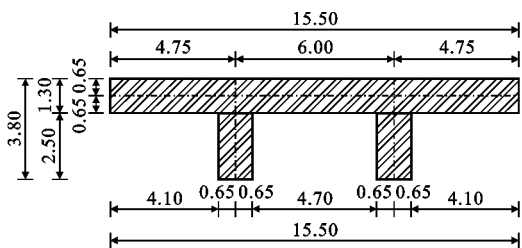
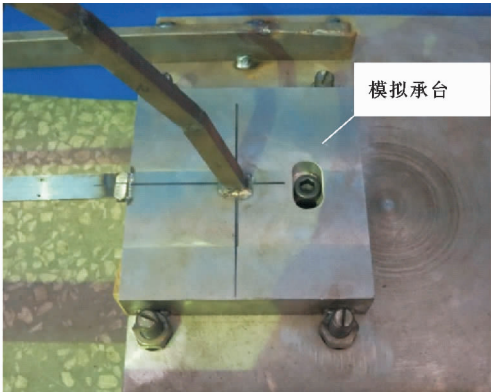
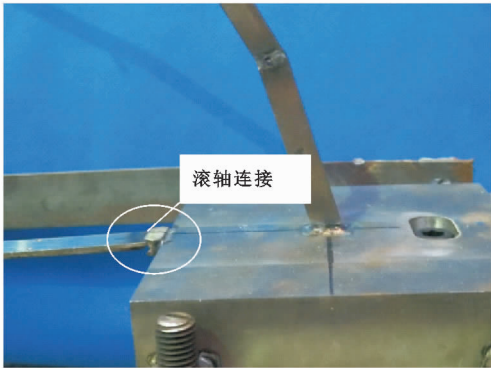


图 3 主梁芯梁截面(单位:mm)
Fig. 3 Cross-section of Core Beam of Primary Beam (Unit:mm)



(a) 拱与支座连接



(b) 主梁与支座连接

图 4 拱与支座及主梁与支座的连接

Fig. 4 Connections Between Arch and Support, Primary Beam and Support

按照几何相似比的要求,采用 ABS 制作外衣模

拟实际结构的外形(图 5)。外衣按一定间隔分段,段与段之间预留 1 mm 间隙,避免外衣参与受力。为确保结构动力特性的相似性,质量必须保持相似。在骨架和外衣质量基础上,采用补充质量对称粘贴在外衣的内侧。

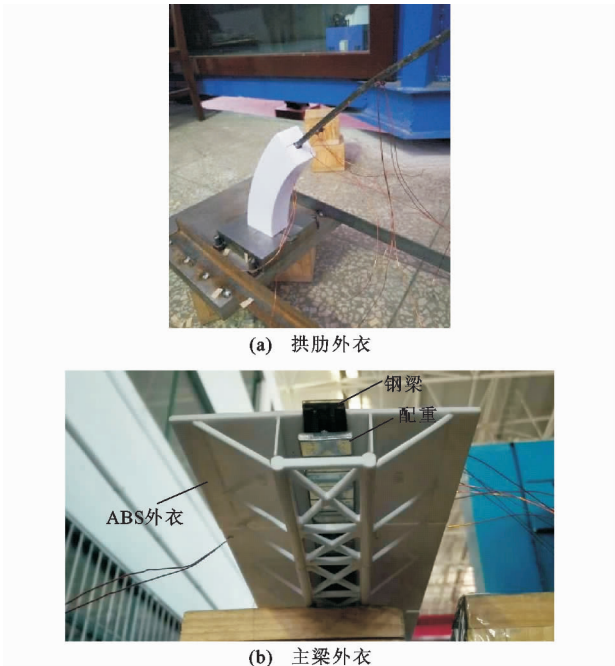


图 5 拱与主梁的外衣

Fig. 5 Outerwears of Arch and Primary Beam

根据几何相似、刚度相似与质量相似的原则设计了全桥气弹性模型,进行实桥与缩尺模型的动力特性分析,计算得到的实桥与模型的振型、频率以及振型参与质量如表 1 所示。按照相似率,模型的频率应为实桥的 10 倍。可见模型的动力特性与实桥吻合较好。

2 风洞试验

风洞试验在哈尔滨工业大学大气边界层风洞与浪槽联合实验室中进行,该风洞为闭口回流式矩形

表 1 实桥与缩尺模型动力特性对比

Tab. 1 Comparison of Dynamic Characteristics Between Real Bridge and Scale Model

阶次	振型		自振频率/Hz			模型自振频率的相对误差/%	振型参与质量/%	
	实桥	模型	实桥	模型			实桥	模型
				理论	计算			
1	桥面侧弯	桥面侧弯	0.509	5.09	5.35	5.05	31.57	33.58
2	拱肋侧弯	拱肋侧弯	0.559	5.59	5.40	−3.40	12.41	12.63
3	拱肋及桥面竖弯	拱肋及桥面竖弯	1.031	10.31	8.78	−14.86	0.62	0.70
4	拱肋及桥面竖弯	拱肋及桥面竖弯	1.319	13.19	12.72	−3.60	17.62	4.63
5	桥面扭转	拱肋扭转	1.435	14.35	14.61	1.84	0.02	0.00
6	拱肋及桥面扭转	桥面扭转	1.484	14.84	17.05	14.87	0.26	0.35

截面风洞,分大小 2 个试验段,该试验在小试验段中进行,其尺寸为宽 4.0 m,高 3.0 m,长 25 m,试验风速在 $3\sim 50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内连续可调,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 0.46%,平均气流偏角小于 0.5° 。

采用加速度传感器和与之相匹配的电荷放大器进行全桥桥面跨中竖向、侧向和扭转加速度以及拱的侧向加速度测量。采用热线风速仪测量主桥旋涡脱落频率及来流的紊流强度等。大气边界层流场模拟装置由尖塔、锯齿板和粗糙元构成,并根据模拟指标确定粗糙元排数及其间距,该流场模拟装置置于气弹模型的来流前方,如图 6 所示。



图 6 大气边界层的模拟

Fig. 6 Simulation of Atmospheric Boundary Layer

风剖面测量时高度在 1 m 以下采用 50 mm 为间隔,探头最低测量高度为 50 mm,1 m 以上采用 100 mm 为间隔,归一化的参考高度 Z_{ref} 取 1.0 m,参考风速 V_{ref} 取 1.0 m 高度处的样本平均风速。试验模拟实际工程中的 C 类地貌,实测风洞中不同高度风速、紊流强度与理论值的对比如图 7 所示。

3 试验结果

试验过程中实测了不同风偏角 $\beta(0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ)$ 和不同风攻角 $\alpha(-3^\circ, 0^\circ, 3^\circ)$ 下拱肋和主梁的加速度响应,通过换算得到的加速度响应均方值如图 8,9 所示。由图 8,9 可见,风偏角对拱肋和主梁的加速度均方值影响显著,而风攻角对加速度均方值的影响较小。随着风偏角从 0° 到 90° 变化,拱肋侧向、竖向以及主梁侧向、竖向和扭转的加速度均方值均显著降低。风攻角在 $-3^\circ\sim 3^\circ$ 之间变化对拱肋侧向、竖向以及主梁侧向、竖向和扭转的加速度影响都不大。

此外,图 10 给出了 0° 风偏角、 0° 风攻角在风速最大时对应的加速度时程曲线。结合图 8,9 中不同风速、不同风攻角的试验结果,主梁高度处风速在

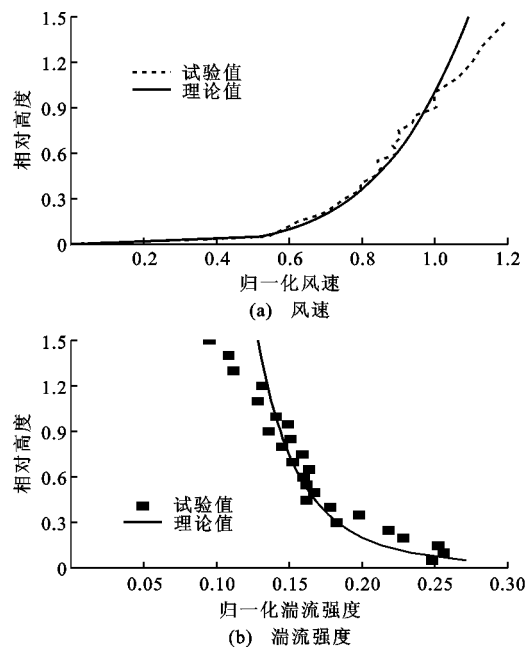


图 7 风速与湍流强度

Fig. 7 Wind Speed and Turbulence Intensity

$4.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应实桥中主梁高度处风速 $47\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应桥址处设计风速 $52.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 范围内拱及主梁未发生颤振振动,也无明显的涡激振动现象出现。按照《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004) 计算,该桥不会发生涡激振动,因此风洞试验结果与计算结果吻合。根据《公路桥梁抗风设计规范》计算得到的颤振临界风速为 $56.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,为此在均匀流场中进行风洞试验,测量拱肋和主梁的加速度响应,结果如图 11 所示,试验风速达到 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应实桥风速 $70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 时主梁未发生颤振,颤振检验通过。均匀流场中拱肋和主梁出现了涡激共振现象[图 11(b),(d)],通过与 C 类地貌结果对比,可以发现湍流可以抑制涡激振动的发生。

4 结 语

(1) 根据相似比设计制作了试验模型,其动力特性与实桥吻合较好,能够反映风荷载下桥梁的动力响应。

(2) 风偏角对拱肋和主梁的加速度响应影响显著,风偏角从 0° 变化到 90° ,拱肋和主梁的加速度均逐渐降低;风攻角在 $-3^\circ\sim 3^\circ$ 之间变化对拱肋和主梁的加速度影响较小。

(3) C 类地貌下该桥不会发生涡激振动现象,与《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004) 计算的结果一致。

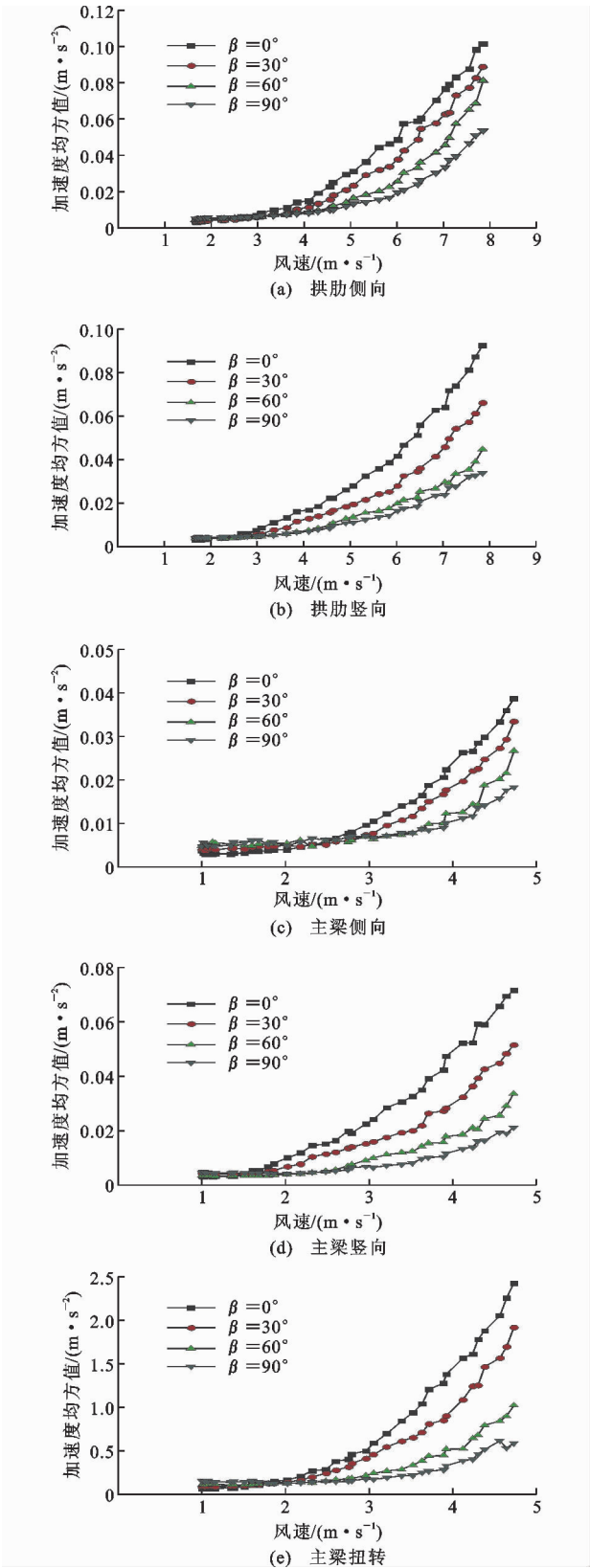


图8 C类地貌拱肋和主梁的加速度均方值(风攻角为 0°)

Fig.8 Mean Square Value of Acceleration of Arch Rib and Primary Beam in Terrain C (Wind Attack Angle Is 0°)

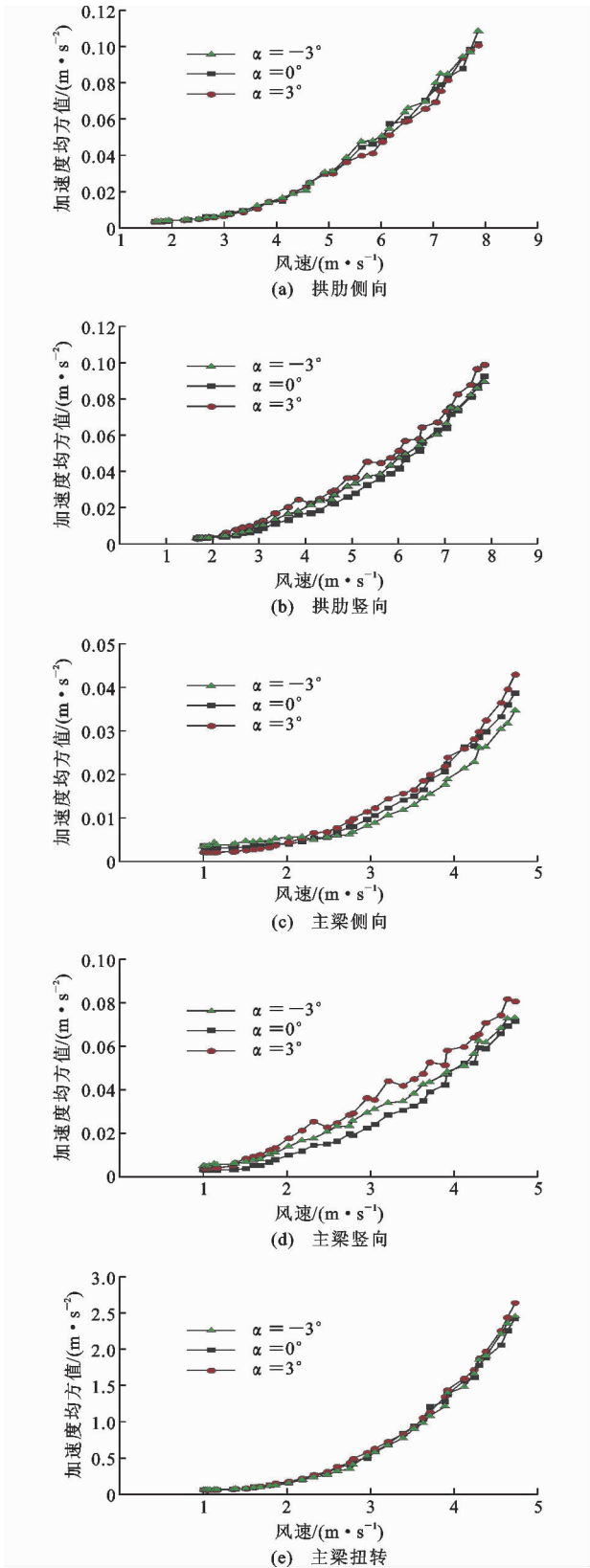


图9 C类地貌拱肋和主梁的加速度均方值(风偏角为 0°)

Fig.9 Mean Square Value of Acceleration of Arch Rib and Primary Beam in Terrain C (Wind Yaw Angle Is 0°)

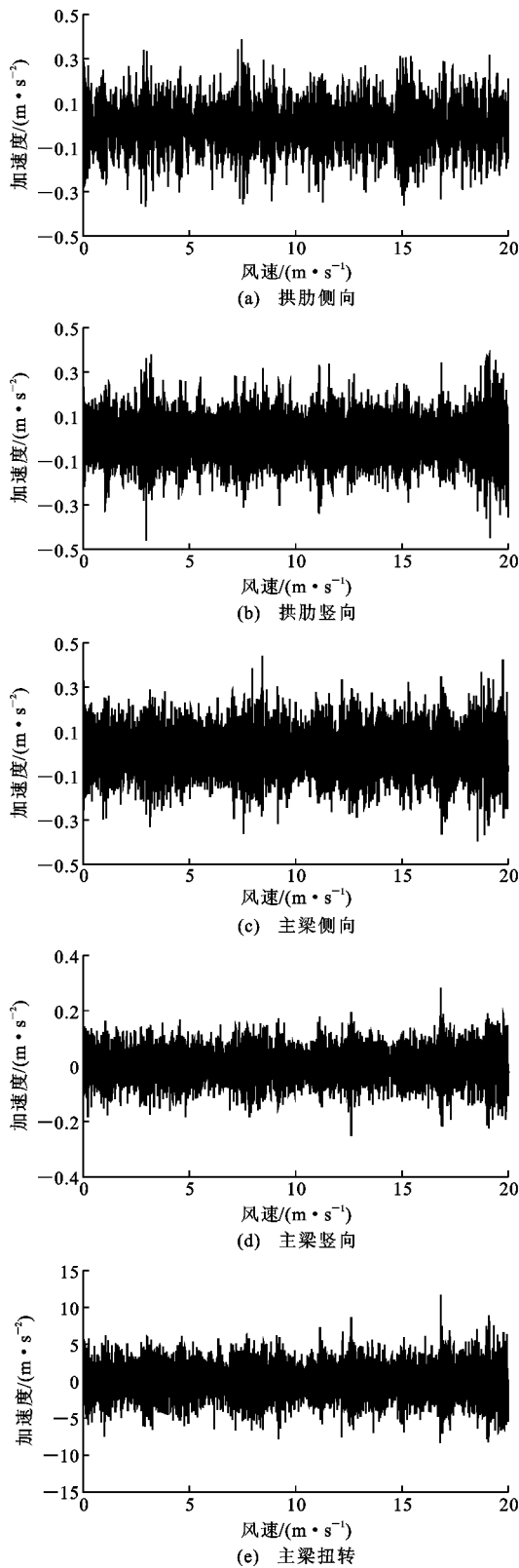


图 10 C 类地貌拱肋和主梁的加速度时程曲线
(风攻角为 0°,风偏角为 0°)

Fig. 10 Acceleration Time History Curve of Arch Rib and Primary Beam in Terrain C (Wind Attack Angle Is 0°, Wind Yaw Angle Is 0°)

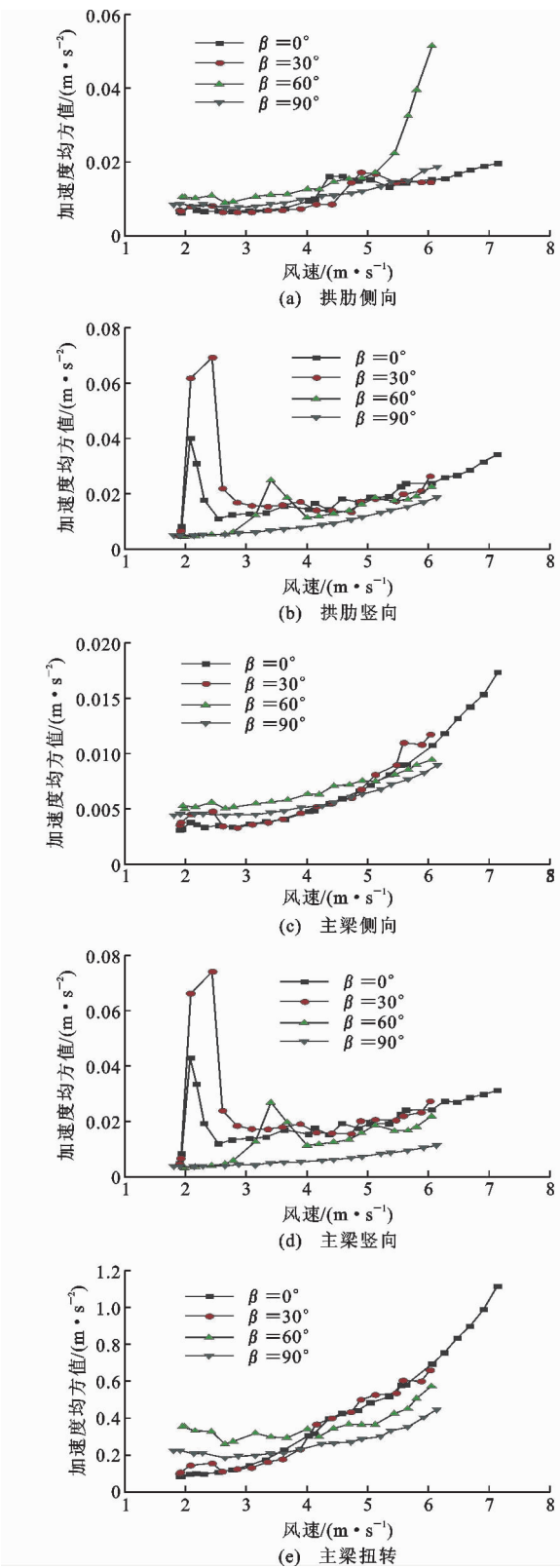


图 11 均匀流场拱肋和主梁的加速度均方值
(风攻角为 0°)

Fig. 11 Mean Square Value of Acceleration of Arch Rib and Primary Beam in Uniform Flow Field (Wind Attack Angle Is 0°)

(4) 该桥的颤振临界风速超过颤振检验风速 $56.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 颤振检验通过。

参考文献:

References:

- [1] 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.
XIANG Hai-fan, GE Yao-jun, ZHU Le-dong, et al. Modern Theory and Practice on Bridge Wind Resistance[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 葛耀君. 大跨度拱式桥抗风[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.
GE Yao-jun. Wind Resistance of Long Span arch Bridges[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2014.
- [3] 黄超. 大跨度拱桥空气动力特性风洞试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
HUANG Chao. Wind Tunnel Test Research on Aerodynamic Characteristics of Long Span Arch Bridge[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [4] 阎卫国. 超窄悬索桥抗风稳定性研究及风振响应控制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
YAN Wei-guo. Research on Wind-resistant Stability and Vibration Control Measures of Narrow Width Suspension Bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [5] 徐洪涛. 山区峡谷风特性参数及大跨度桁梁桥风致振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
XU Hong-tao. Research of Wind Characteristic Parameters and Wind-induced Vibration of Long Span Bridge with Truss Girder in Mountainous Area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [6] 王承启. 大跨度钢桁架拱桥风振研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
WANG Cheng-qi. Investigation on Wind-induced Vibration of Long-span Steel Trussed Arch Bridges[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [7] DIANA G, FIAMMENGHI G, BELLOLI M, et al. Wind Tunnel Tests and Numerical Approach for Long Span Bridges: The Messina Bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 122: 38-49.
- [8] DIANA G, YAMASAKI Y, LARSEN A, et al. Construction Stages of the Long Span Suspension Izmit Bay Bridge: Wind Tunnel Test Assessment[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 300-310.
- [9] LARSEN A, LAROSE G L. Dynamic Wind Effects on Suspension and Cable-stayed Bridges[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 334: 2-28.
- [10] CHEYNET E, JAKOBSEN J B, SNAEBJORNSSON J. Buffeting Response of a Suspension Bridge in Complex Terrain[J]. Engineering Structures, 2016, 128: 474-487.
- [11] NUNEZ G J Z, LOREDO-SOUZA A M, ROCHA M M, et al. Aerodynamic Behavior of a Cable-stayed Bridge Section Composed by Inclined Parallel Decks[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173: 156-170.
- [12] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind Turbulence Characteristics Study at the Stonecutters Bridge Site; Part I — Mean Wind and Turbulence Intensities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 22-36.
- [13] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind Turbulence Characteristics Study at the Stonecutters Bridge Site; Part II: Wind Power Spectra, Integral Length Scales and Coherences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 48-59.
- [14] BULJAC A, KOZMAR H, POSPISIL S, et al. Aerodynamic and Aeroelastic Characteristics of Typical Bridge Decks Equipped with Wind Barriers at the Windward Bridge-deck Edge[J]. Engineering Structures, 2017, 137: 310-322.
- [15] PERMATA R, ANDIKA M G, HAKIM N, et al. Wind Resistant Design of Ngarai Sianok Bridge in Bukittinggi, West Sumatera-Indonesia[J]. Procedia Engineering, 2017, 171: 1214-1221.
- [16] KIM Y M, KWAY Y H, CHOI M S, et al. Wind Engineering on the New Millennium Bridge in South Korea[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 1472-1479.
- [17] MA C, DUAN Q, LI Q, et al. Aerodynamic Characteristics of a Long-span Cable-stayed Bridge Under Construction[J]. Engineering Structures, 2019, 184: 232-246.
- [18] 白桦, 李宇, 李加武, 等. 钢桁架悬索桥颤振稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(4): 90-95.
BAI Hua, LI Yu, LI Jia-wu, et al. Flutter Stability of a Steel Truss Girder Suspension Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4): 90-95.
- [19] 王凯, 廖海黎, 刘君. 山区峡谷大跨钢桁梁桥抗风特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 169-174.
WANG Kai, LIAO Hai-li, LIU Jun. Wind Resistance Tests for Long-span Steel Truss Bridges Across Gorges of Mountainous Area[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 169-174.