

山区大跨斜拉桥悬臂施工期风振响应实测^{*}

刘志文^{1†}, 丁冬¹, 贾亚光^{1,2}, 陈政清¹

(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450052)

摘要:针对湖南郴州赤石大桥施工期桥位风特性及风致振动响应进行了现场实测与分析. 对观测期大风天气桥面高度及桥塔塔顶处平均风速、风向、风攻角及紊流度等风特性参数进行了分析, 并对桥梁结构风致振动响应进行了分析. 结果表明: 当风从北侧吹时风攻角变化范围较大, 而当风从南侧吹时风攻角变化范围较小; 桥梁结构主梁双悬臂施工期在大风作用下风振响应主要表现为“整体侧弯”以及“整体竖摆”振动; 桥梁悬臂施工期结构自振频率实测值与有限元分析结果吻合较好.

关键词:山区地形; 斜拉桥; 风特性; 风振响应; 现场实测

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Field Measurement of Wind-induced Vibration Responses of a Large Cable-stayed Bridge during Construction Stages in Mountainous Terrain

LIU Zhiwen^{1†}, DING Dong¹, JIA Yaguang^{1,2}, CHEN Zhengqing¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Wind Engineering and Bridge Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Field measurement and analysis of wind characteristics and wind-induced vibration responses of Chishi Bridge during construction stages were carried out, where Chishi Bridge is a large-span cable-stayed bridge located in Chenzhou, Hunan, China. The wind characteristic parameters at deck level and pylon top during observation period were analyzed, including the mean wind speeds, wind directions, wind attack angles and turbulence intensities. The wind-induced vibration responses of the bridge were also examined. The results showed that the wind attack angles changed within a rather wide range when the wind blew from the north, while the wind attack angles varied within a narrow range when the wind came from the south. The bridge with double cantilevers during construction stages mainly vibrated in the lateral bending and vertical pendulum modes under strong winds. The measured values of the natural frequencies of the bridge under construction stage agreed well with the analysis results by FEM.

Key words: mountainous terrain; cable-stayed bridges; wind characteristics; wind-induced vibration responses; field measurement

* 收稿日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478180), National Natural Science Foundation of China(51478180)

作者简介: 刘志文(1975-), 男, 山西阳高人, 湖南大学副教授, 工学博士

† 通讯联系人, E-mail: zhiwenliu@hnu.edu.cn

随着我国交通基础设施建设的进一步推进,跨海湾、山区峡谷大跨桥梁将逐渐成为今后若干时期内大跨桥梁建设的重点.目前我国已有多座已建或在建的跨越山区峡谷的大跨桥梁,如贵州坝陵河大桥、湖南矮寨大桥、湖北四渡河大桥、云南普立大桥、湖南赤石大桥等.大跨斜拉桥多采用悬臂施工法进行建造,其主梁悬臂施工期结构自振频率较低,在大风作用下易发生振动,因此大跨斜拉桥施工期风致振动问题是该类桥梁抗风设计重点关注内容之一.

山区峡谷桥址风场特性与沿海及平原地区桥址风场特性有明显的区别,山区峡谷桥位风特性复杂、具有阵风大、湍流度大和非平稳性等特点.复杂山区地形的风特性研究早在 20 世纪 70 年代就受到关注^[1].现场实测是复杂地形风特性研究的有效方法之一.Mouzakis 等对希腊雅典附近某风电场风特性进行了实测研究,分别给出了不同风速范围风速、风攻角、脉动风谱等参数^[2].宋丽莉等对坝陵河大桥桥位风特性进行了实测研究.研究表明:深切峡谷地形完全改变了局地低层风场,不仅风向和最大风速发生了改变,而且风垂直轮廓线也完全不满足幂指数分布;不同风向湍流强度和不同风向大风在纵、横、垂直方向湍流强度比值也有很明显的差异^[3].庞加斌等针对四渡河大桥桥位脉动风特性进行了实测研究.研究表明:山区深切峡谷地形导致脉动风湍流强度明显增大,湍流强度随平均风速增大而减小;湍流积分尺度随平均风速增大而增大^[4].李永乐等针对某 V 型深切峡谷桥位风特性进行了实测研究,提出了深切峡谷区大跨度桥梁复合风速标准概念^[5].

近年来,针对大跨桥梁风致振动响应实测也逐渐受到关注.Bietry 等针对 Saint-Nazaire 斜拉桥进行风致振动响应实测研究,以获得桥位风特性,同时检验 Davenport 准定常抖振理论^[6].Larose 针对丹麦大海带东桥在桥塔施工期进行了风观测和结构响应实测.研究表明:开阔近海区域脉动风紊流度较低,试验和实测均观测到桥塔顺风向涡振现象^[7].Frandsen 针对丹麦大海带东桥进行了风振响应实测研究.实测表明主梁表面压力与主梁振动加速度响应相关性在“锁定”区较强;实测涡振锁定区与试验预测结果接近,但涡振振幅要大于试验预测结果^[8].Macdonald 针对第二塞文桥施工和成桥运营阶段风振响应进行了实测研究^[9].廖海黎等分别针对苏通长江公路大桥和西堠门大桥进行了施工阶段主桥结构桥位风观测与主桥结构风致振动响应实测研究,对这两座桥施工期抗风性能评估提供了必要依据^[10].Siringoringo 针对日本白鸟悬索桥进行了

大风天气风振响应实测.研究表明主梁竖向振动与桥塔顺风向振动响应随着风速增加而增加;当风速为 14~24 m/s 时观测到桥塔顺风向的明显振动,该振动可能由桥塔前、后塔柱之间气动干扰效应引起^[11-12].

综上所述,尽管已有部分学者针对复杂山区桥位风特性进行了现场实测研究,但鉴于实际桥位地形差别较大,目前对于复杂山区地形桥位风特性的认识还比较粗略;且山区桥梁结构风致振动响应实测研究较少.因此有必要针对复杂山区地形桥位风特性和桥梁结构施工期振动响应进行实测.本文以在建赤石大桥为依托,主要开展施工期桥位风特性和风致振动响应实测研究.

1 桥位风观测系统简介

赤石大桥位于厦门至成都国家高速公路湖南省汝城至郴州段,主桥为四塔五跨预应力混凝土斜拉桥,跨径布置为:165+3×380+165=1 470 m,大桥立面布置图如图 1 所示.桥面距离地面 182 m.混凝土主梁采用挂篮悬臂浇筑法施工,主梁双悬臂施工期结构自振频率较低,对风作用敏感.桥位附近地形较为复杂,在施工过程中桥位处发生过多起突发大风,10 m 高度处瞬时风速最高达 32 m/s.为确保大桥施工期抗风安全,对该桥进行施工期桥位风特性和风振响应实测研究.

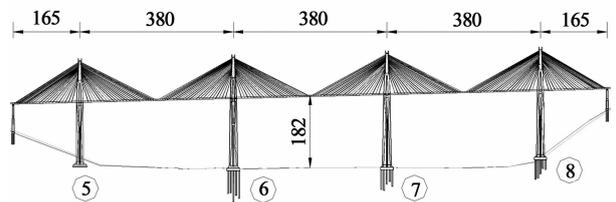


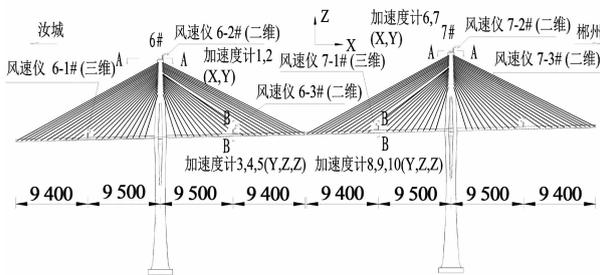
图 1 赤石大桥立面布置图(单位:m)
Fig. 1 Elevation of Chishi bridge(Unit:m)

综合考虑桥位地形特点和大桥施工进度,分别在大桥 6#、7# 桥塔对应的主梁及塔顶位置布置风速仪和加速度传感器,对大桥施工期桥位风特性和风致振动响应进行实测.根据大桥施工进度,实测分两阶段实施.第一期 2014 年 1 月 1 日~2014 年 6 月 10 日,分别在 6#、7# 桥塔塔顶、主梁 2# 块等位置布置风速仪和加速度传感器.第二期 2014 年 6 月 10 日~2014 年 12 月 31 日,分别在 6#、7# 桥塔塔顶、主梁 1/4 跨等位置布置风速仪和加速度传感器,具体布置和现场照片分别如图 2 和图 3 所示.风观测系统由三维超声风速仪(Young81000)、二维机械

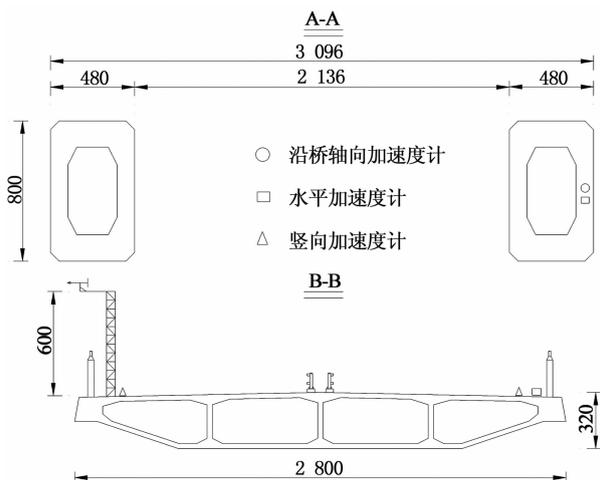
风速仪(Young 05103)、数据采集仪(Campbell 公司 CR1000 动态数据采集仪)、供电系统及无线传输系统等组成,具体布置及采样频率见表 1。桥梁结构振动响应测试系统由加速度传感器(941B 型超低频拾振器)、数据采集仪(UEI Logger300 动态数据采集仪)等组成,具体布置及采样频率见表 2。规定风从正北方向吹来时风向角为 $\beta=0^\circ$ 。

表 1 赤石大桥施工期桥位风观测风速仪布置及采样频率
Tab. 1 Layout and sample frequencies of the anemometers of Chishi bridge during construction

桥塔	测点编号	仪器型号	采样频率 /Hz	备注
	No. 6-1	三维超声风速仪	10.0	靠近汝城侧桥面以上 6 m 高度处
No. 6	No. 6-2	二维机械风速仪	1.0	塔顶以上 3 m 高度处
	No. 6-3	二维机械风速仪	1.0	靠近郴州侧桥面以上 6 m 高度处
	No. 7-1	三维超声风速仪	10.0	靠近汝城侧桥面以上 6 m 高度处
No. 7	No. 7-2	二维机械风速仪	1.0	塔顶以上 3 m 高度处
	No. 7-3	二维机械风速仪	1.0	靠近郴州侧桥面以上 6 m 高度处



(a) 立面布置图



(b) 横桥向布置图

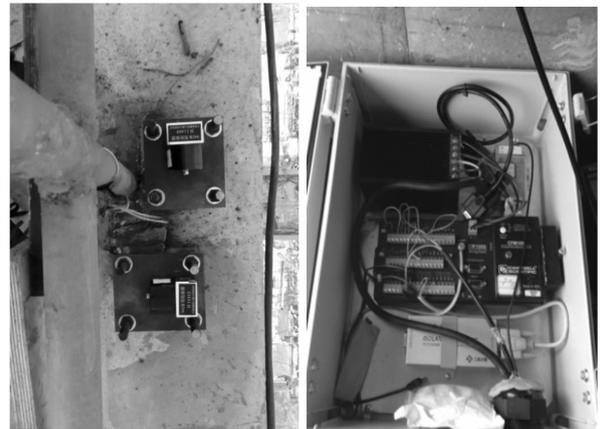
图 2 风速仪、加速度传感器布置图(单位:cm)

Fig. 2 Layout of anemometers and acceleration sensors (Unit:cm)



(a) 桥面二维机械风速仪

(b) 桥面三维超声风速仪



(c) 加速度传感器

(d) 风速数据采集仪

图 3 现场风速仪及加速度传感器照片

Fig. 3 Photos of anemometers and acceleration sensors on the bridge

表 2 6#塔施工期风观测加速度传感器布置汇总表

Tab. 2 Layout of acceleration sensors of pylon No. 6 during construction

测点编号	仪器型号	采样频率 /Hz	备注
1#			塔顶横桥向
2#	941B 型		塔顶顺桥向
3#	超低频	10.0	靠近郴州侧桥面横桥向(上游侧)
4#	拾振器		靠近郴州侧桥面竖向(上游侧)
5#			靠近郴州侧桥面竖向(下游侧)

2 桥位风特性实测结果

2.1 平均风速和风向

限于篇幅,仅给出观测期两个大风天气(2014-07-03,2014-10-05)6#,7#桥塔塔顶、桥面高度处 10 min 时距平均风速和风向曲线。图 4 所示为 2014 年 7 月 3 日全天 10 min 时距平均风速和风向曲线。由图 4 可知,2014 年 7 月 3 日早上 6:40~8:20 期

间风速较大,10 min 时距平均风速最大值约为 12.0 m/s,对应风向大致为南风.图 5 所示 2014 年 7 月 3 日大风时段(6:40~8:20)桥位风观测点 10 min 时距平均风速和风向曲线.由图 5 可知,6-2#测点(6#桥塔塔顶)风速与 6#塔桥面处风速以及 7#塔对应塔顶、桥面处风速相比明显偏小,该大风时段各观测点主导风向基本为南风.

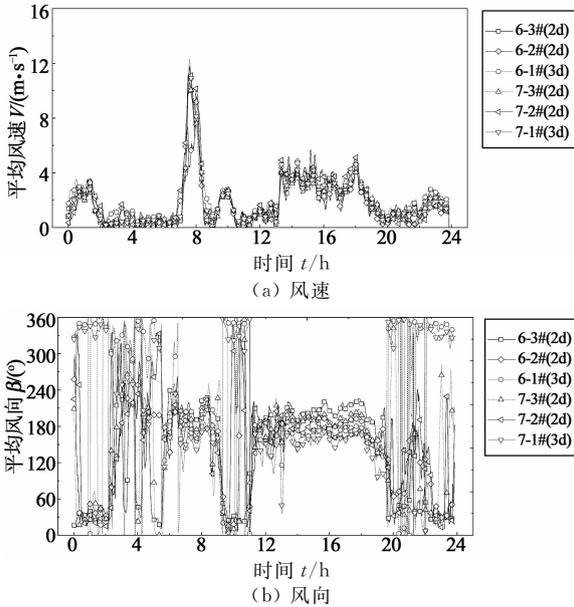


图 4 实测风速风向时程曲线(2014-07-03)
Fig. 4 Time histories of measured wind speeds and directions(2014-07-03)

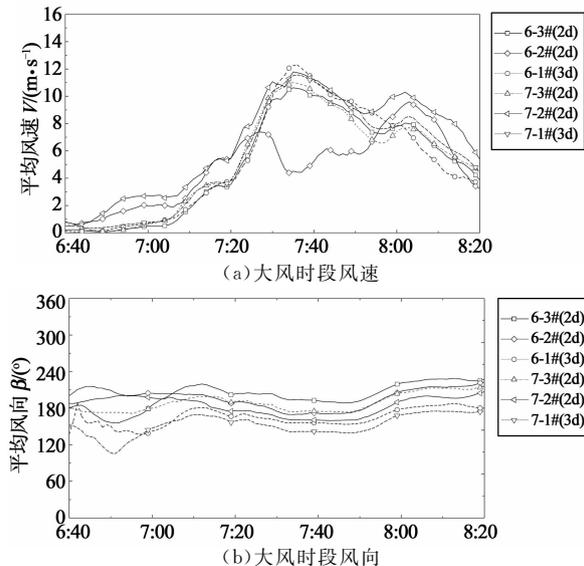


图 5 大风时段风速风向时程曲线(2014-07-03)
Fig. 5 Time histories of wind speeds and directions during gale(2014-07-03)

图 6 所示为 2014 年 10 月 5 日全天 10 min 时距平均风速和风向曲线.由图 6 可知,2014 年 10 月 5 日 17:00~19:00 期间风速较大,10 min 时距平均

风速最大值约为 12.0 m/s,对应的风向大致为北风.图 7 所示为大风时段(17:00~19:00)桥位风观测点 10 min 时距平均风速和风向曲线.由图 7 可知,各测点风速大致相当,6-3#测点风向与其余测点风向差别较大,其主要原因是该时段为北风,地形对桥位风向影响较大.

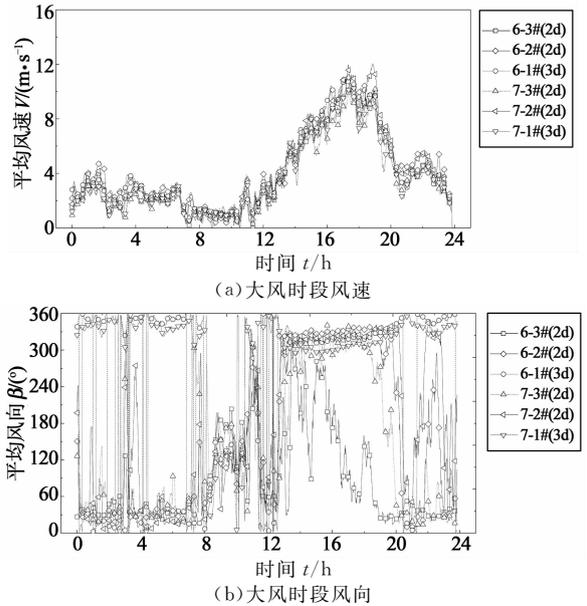


图 6 实测风速风向时程曲线(2014-10-05)
Fig. 6 Time histories of measured wind speeds and directions(2014-10-05)

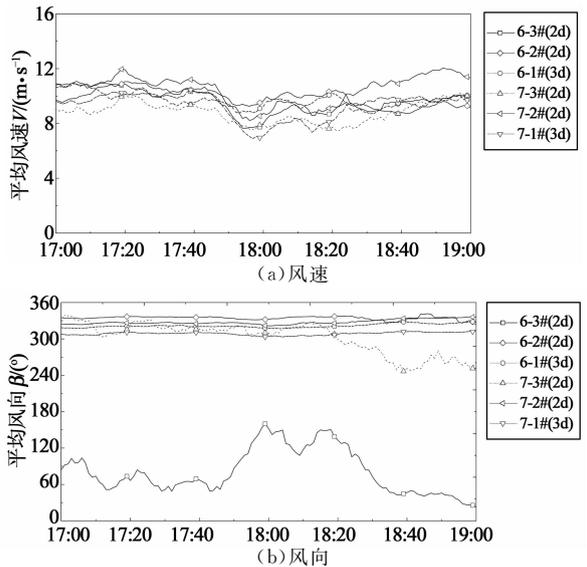


图 7 大风时段风速风向时程曲线(2014-10-05)
Fig. 7 Time histories of wind speeds and directions during gale(2014-10-05)

为进一步分析桥面高度处风速沿桥轴线方向的分布情况,以 6#塔 6-1#测点为参考,分别计算 2014 年 7 月 3 日和 10 月 5 日大风时段桥面高度处测点 6-3#,7-1#,7-3#测点与 6-1#测点风速差,如图 8 所示.从图 8 中可以看出:2014 年 7 月 3 日

大风时段(南风)桥面高度处不同测点与6-1#测点风速差约为-2.0~2.0 m/s;2014年10月5日大风时段(北风)桥面高度处风速与6-1#测点风速差约为-2.5~1.0 m/s.

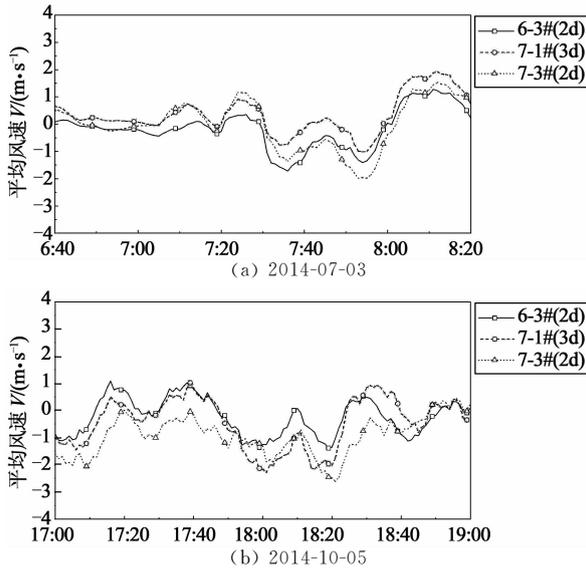


图8 大风时段桥面高度处各测点与6-1#测点风速差

Fig. 8 Wind speed difference between monitoring points and 6-1# point on deck level during gale

2.2 风攻角

仅给出2014年10月5日桥面高度处10 min时距平均风速、风攻角曲线,如图9所示.从图9可以看出,2014年10月5日桥面高度处大风时段(北

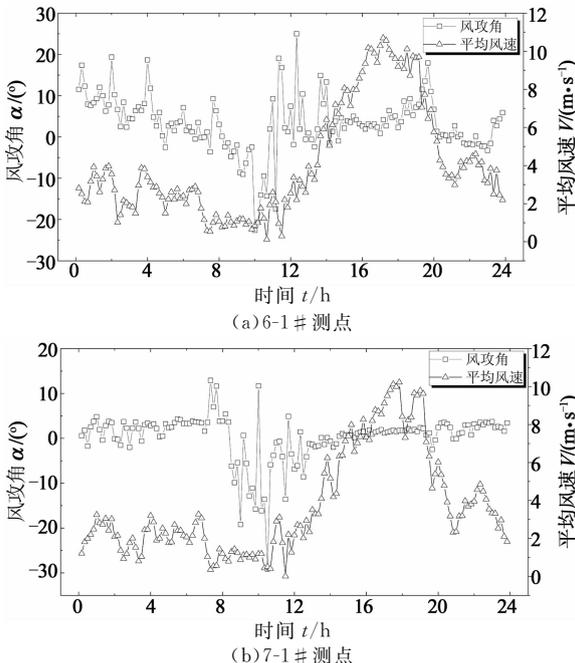


图9 桥面高度10min平均风速和风攻角(2014-10-05)
Fig. 9 Wind speeds and attack angles at deck level (2014-10-05)

风)6-1#测点风攻角变化较大,而7-1#测点风攻角变化相对较小.表3所示为观测期间大风天气10 min时距平均风速风攻角结果汇总.由表3可知,当风从北侧吹时风攻角变化较大,约为-5.4~+25.0°,而当从南侧吹时风攻角变化较小,约为-4.4~+6.4°;大风天气桥面高度处6-1#测点与7-1#测点风向总体比较一致,但风攻角变化范围、平均值等存在一定的差异,表明山区地形对桥面高度处风攻角存在影响.

表3 大风天气桥面高度风速和风攻角汇总
Tab. 3 Summary of wind speeds and attack angles at deck level during gale

测点	参数	2014-05-14/15	2014-07-03	2014-10-05
6-1#	最大风速 V_{max} /($m \cdot s^{-1}$)	11.7	10.9	10.7
	风向角 $\beta/^\circ$	308.9	155.9	317.9
	风攻角 $\alpha/^\circ$	14.6	-2.9	4.2
	攻角范围 $\alpha/^\circ$	9.4~25.0	-4.4~1.3	0.9~9.3
	攻角均值 $\alpha/^\circ$	15.6	-2.9	4.8
7-1#	最大风速 V_{max} /($m \cdot s^{-1}$)	15.1	10.9	10.2
	风向角 $\beta/^\circ$	342.4	141.2	307.9
	风攻角 $\alpha/^\circ$	-1.7	3.1	1.7
	攻角范围 $\alpha/^\circ$	-5.4~0.5	0~6.4	14.~2.4
	攻角均值 $\alpha/^\circ$	-2.6	3.0	1.8

2.3 湍流度

图10所示为2014年10月5日桥面高度处10 min时距平均风速及湍流度曲线.表4给出了观测期间大风天气大风时段湍流度变化范围及均值.由图10及表4可知,不同大风天气大风时段6-1#测点顺风向湍流强度平均值约为0.15~0.23,横风向湍流强度平均值约为0.13~0.17,竖向湍流强度平均值约为0.13~0.19,对应湍流度平均值的比值为1:0.79:0.84,顺风向与水平横风向的湍流强度比值接近于规范推荐值1:0.88,而顺风向与竖向湍流强度的比值则比规范推荐值1:0.5大.不同大风天气大风时段7-1#测点顺风向湍流强度平均值约为0.17~0.32,横风向湍流强度平均值约为0.14~0.21,竖向湍流强度平均值约为0.08~0.12,对应湍流度平均值的比值为1:0.71:0.41,接近于规范推荐值1:0.88:0.5.

3 风振响应实测结果

分别针对观测期大风天气5个样本进行风振响应分析,即2014年3月20日10:30-11:30,12:15-13:15,

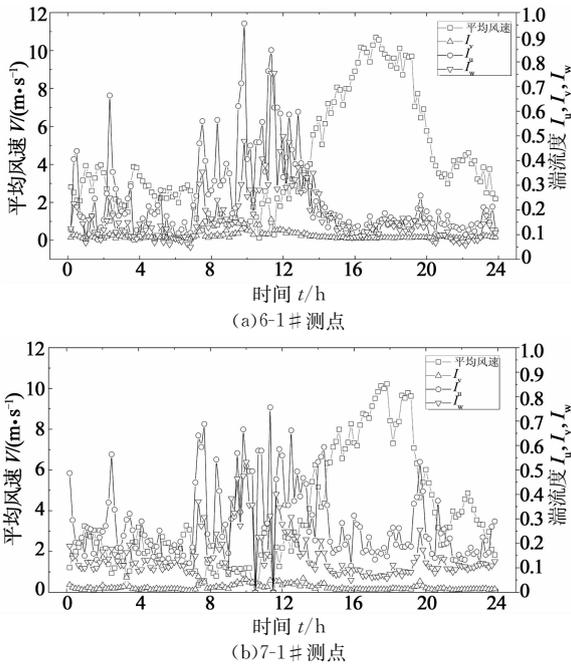


图 10 桥面高度 10min 平均风速和湍流度(2014-10-05)
Fig. 10 Wind speeds and turbulence intensity at deck level(2014-10-05)

表 4 大风天气桥面高度处风速和湍流度汇总
Tab. 4 Summary of wind speeds and turbulence intensity at deck level during gale

测点	参数	大风日期		
		2014-05-14/15	2014-07-03	2014-10-05
6-1#	最大风速 ($m \cdot s^{-1}$)	11.7	10.9	10.7
	I_u	范围 0.09~0.83 均值 0.23	范围 0.14~0.33 均值 0.22	范围 0.11~0.19 均值 0.15
	I_v	范围 0.06~0.60 均值 0.16	范围 0.08~0.26 均值 0.17	范围 0.11~0.16 均值 0.13
	I_w	范围 0.11~0.53 均值 0.19	范围 0.09~0.20 均值 0.15	范围 0.09~0.17 均值 0.13

	7-1#	最大风速 ($m \cdot s^{-1}$)	15.1	10.9
I_u		范围 0.09~0.64 均值 0.32	范围 0.10~0.28 均值 0.17	范围 0.13~0.26 均值 0.19
I_v		范围 0.08~0.47 均值 0.21	范围 0.06~0.21 均值 0.14	范围 0.13~0.21 均值 0.16
I_w		范围 0.03~0.23 均值 0.12	范围 0.09~0.16 均值 0.12	范围 0.06~0.11 均值 0.08

注: I_u 为顺风向湍流度, I_v 为横向脉动风湍流度, I_w 为竖向脉动风湍流度.

18:45-19:45 和 5 月 15 日 1:00-2:00,2:00-3:00,这些时段内风速较大、风向稳定且基本垂直于桥面. 仅给出 2014 年 5 月 15 日凌晨 2:00-3:00 时 6# 塔对应的桥梁加速度响应实测数据分析结果,需要说明的是该阶段 6# 塔对应桥梁施工完 12 号块主梁节段(近 1/4 跨),桥面加速度传感器布置于靠近桥塔处桥面上.

采用格拉布斯准则对实测数据进行预处理以剔除野点,该准则具有误剔除率低、可靠性好等特

点^[13]. 对实测加速度数据采用格拉布斯准则(样本 $n = 50$)对野点进行剔除. 图 11 所示分别为桥塔塔顶顺桥向、横桥向和主梁横桥向、竖向加速度响应时程曲线. 采用韦尔奇方法对加速度响应实测数据进行频谱分析. 在分析时将实测样本分为若干段,每段数据点数为 8 192 个,相邻两段重叠 4 096 个点,频率分辨率为 $10/8\ 192 = 0.001\ 2\ \text{Hz}$;同时为了减少振动信号因截断造成的“频谱泄露”,采用了加哈明窗技术,基于以上方法编写相应 MATLAB 程序进行加速度响应频谱分析.

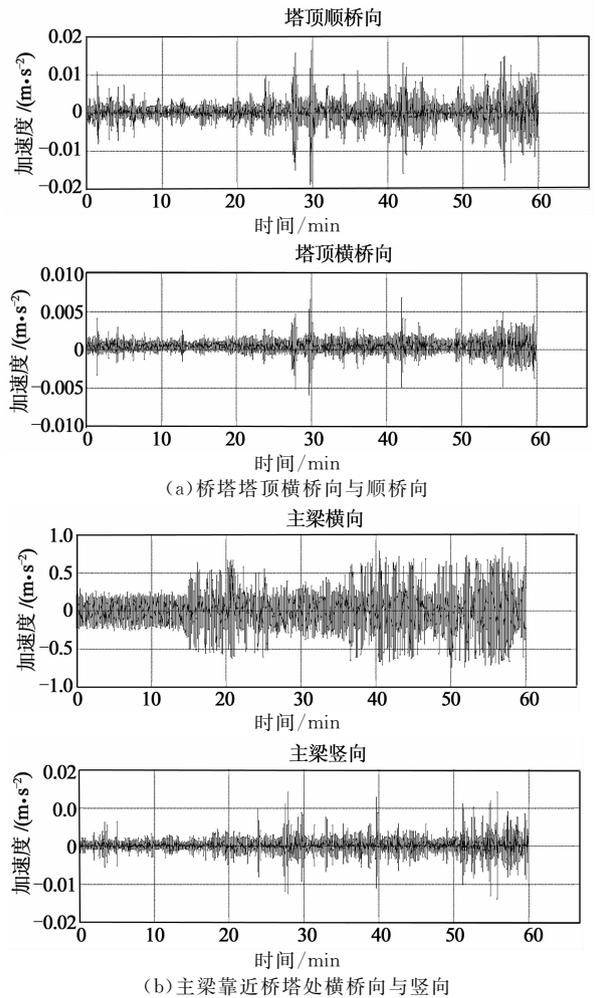


图 11 6# 塔塔顶及靠近桥塔处主梁加速度响应时程曲线(2014-05-15(2:00~3:00))
Fig. 11 Time history of wind-induced acceleration responses at deck and pylon top (2:00~3:00, May 15, 2014)

图 12 所示为主梁及桥塔塔顶加速度响应频谱曲线. 由图 12 可知,桥塔顺桥向振动卓越频率为 0.150 2 Hz,横桥向振动卓越频率为 0.251 5 Hz;主梁竖向振动响应卓越频率为 0.150 2 Hz,横向振动卓越频率为 0.241 7 Hz.

为便于比较,对 6# 塔对应桥梁主梁施工完 12# 梁段时动力特性进行有限元分析. 主梁、桥塔分别

采用空间梁单元模拟,斜拉索采用空间杆单元模拟,桥梁施工荷载及横隔板质量等采用质量单元进行模拟.边界条件及约束条件为:桥塔在承台处固结,塔梁之间固结.表5所示为该施工状态主桥结构动力特性分析结果.由表5可知,该状态桥梁结构一阶整体竖摆频率为0.1389 Hz,桥塔侧弯频率为0.2503 Hz,主梁整体横摆频率为0.3533 Hz.

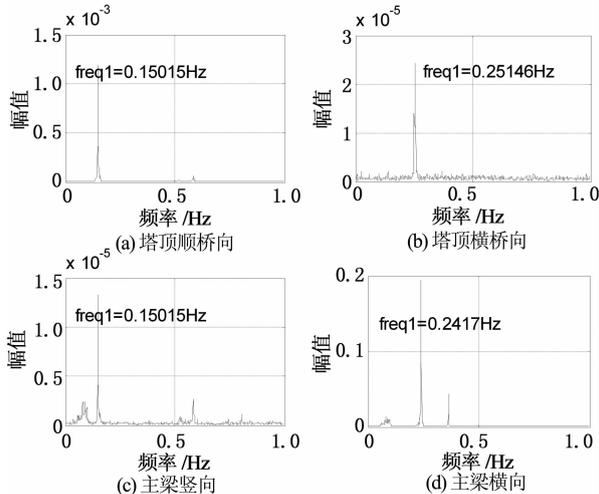


图12 主梁和塔顶加速度功率谱的幅频曲线

Fig. 12 Frequency-amplitude curves of acceleration power spectrum of deck and pylon top

表5 6#塔对应桥梁主梁施工完12#块动力特性分析结果
Tab. 5 Dynamic features of the bridge with pylon No. 6 after casting of No. 12 segment deck

序号	振型描述	频率/Hz
1	整体竖摆	0.138 9
2	整体侧弯	0.250 3
3	整体横摆	0.353 3
4	主梁一阶反对称竖弯	0.477 1
5	主梁一阶对称竖弯	0.736 3
6	主梁一阶对称侧弯	0.993 1

由图12与表5可知,6#塔对应桥梁施工完12#梁段后,在大风作用下主梁竖向振动响应卓越频率与桥塔塔顶顺桥向振动响应卓越频率均为0.1502 Hz,比该状态“桥梁整体竖摆”频率计算结果偏大8.1%;主梁横向振动卓越频率为0.2417 Hz,塔顶横向振动卓越频率为0.2515 Hz,与桥塔横向侧弯频率计算结果较为接近.实测结果表明:6#塔施工完12#梁段时,在大风作用下桥梁结构风振响应表现为“整体侧弯”以及“整体竖摆”振动;桥梁悬臂施工期结构动力特性实测值与有限元分析结果吻合较好.

4 结论

以在建的赤石大桥为依托,开展了山区地形高墩大跨桥梁施工期桥位风特性与风致振动响应实测研究与分析,得到如下主要结论:

1)复杂山区地形桥面高度处风速、风向沿桥轴线方向存在一定的不均匀性;大风天气当风从北侧吹时,风攻角变化较大;而当风从南侧吹时,风攻角变化较小.

2)主梁施工期在大风作用下桥梁结构风振响应主要表现为“整体侧弯”及“整体竖摆”振动.

3)桥梁悬臂施工期结构自振频率实测值与有限元分析结果吻合较好.

参考文献

- [1] WOOD N. Wind flow over complex terrain: A historical perspective and the prospect for large-eddy modeling[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000,96:11-32.
- [2] MOUZAKIS F, MORFIADAKIS E, DELLAPORTAS P. Fatigue loading parameter identification of a wind turbine operation in complex terrain[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999,82(1/3):69-88.
- [3] 宋丽莉,吴战平,秦鹏,等.复杂山地近地层强风特性分析[J]. *气象学报*, 2009,67(3):452-460.
SONG Lili, WU Zhanping, QIN Peng, et al. An analysis of the characteristics of strong winds in the surface layer over a complex terrain[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009,67(3):452-460. (In Chinese)
- [4] 庞加斌,宋锦忠,林志兴.四渡河峡谷大桥桥位风的湍流特性实测分析[J]. *中国公路学报*, 2010,23(3):42-47.
PANG Jiabin, SONG Jinzhong, LIN Zhixing. Field measurement analysis of wind turbulence characteristics of Sidu River Valley Bridge site[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010,23(3):42-47. (In Chinese)
- [5] 李永乐,唐康,蔡宪棠,等.深切峡谷区大跨度桥梁的复合风速标准[J]. *西南交通大学学报*, 2010,45(2):167-173.
LI Yongle, TANG Kang, CAI Xiantang, et al. Integrated wind speed standard for long-span bridges over deep-cutting gorge[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010,45(2):167-173. (In Chinese)
- [6] BIETRY J, DELAUNAY D, CONTI E. Comparison of full-scale measurement and computation of wind effects on a cable-stayed bridge[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995,57(2/3):225-235.
- [7] LAROSE G L, ZASSO A, MELELLI S, et al. Field measurements of the wind-induced response of a 254mhigh free-standing bridge pylon[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998,74(2):891-902.
- [8] FRANDSEN J B. Simultaneous pressures and accelerations measured full-scale on Great Belt East suspension bridge[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001,89(1):95-129.
- [9] MACDONALD J H G. Evaluation of buffeting predictions of a cable-stayed bridge from full-scale measurements[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003,91(12/15):1465-1483.
- [10] 廖海黎,李明水.大跨度桥梁施工阶段抗风性能现场实测研究[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集.北京,2009:575-579.
LIAO Haili, LI Mingshui. Field measurement research of wind resistance of large-span bridges during construction stages [C]//The Proceeding of 14th National Conference on Structural Wind Engineering. Beijing, 2009:575-579. (In Chinese)
- [11] SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Observed along-wind vibration on structural engineering and construction[J]. *Procedia Engineering*, 2011,14:2358-2365.
- [12] SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Observed along-wind vibration of a suspension bridge tower[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012,103(1):107-121.
- [13] 贾亚光.复杂山区高墩多塔斜拉桥桥位风特性及振动响应实测[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2015:41-58.
JIA Yaguang. Field measurements of wind characteristics in complex terrain and wind-induced response of multi-pylon cable-stayed bridge [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2015:41-58. (In Chinese)