

桥梁气动外形改变对大跨桁梁桥抗风性能影响研究

敬大德^{1,2}, 苏益²

(1.拉萨市设计集团有限公司, 西藏 拉萨 850000; 2.西南交通大学 风工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:随着交通业及旅游业的发展,近年来不断出现桥梁在满足其交通运输功能的前提下同时开发诸如旅游等方面的其他可利用功能,导致结构气动外形及透风率发生显著变化。该文以某主跨1 088 m的双塔单跨钢桁架悬索桥为背景,通过全桥气弹模型风洞试验对其抗风性能进行重新评估,在研究结构抗风稳定性的前提下评估行人舒适度问题。结果表明:基于景区开发的桥梁气动外形改变前后结构动力特性几乎不变,且均未发生涡激振动及颤振等空气动力失稳;气动外形改变后结构横向及竖向的静风位移响应明显增大,在扭转方向二者存在一定差异但没有显著的规律性;基于景区开发的桥梁气动外形改变导致结构竖向抖振响应减小,但横向及扭转抖振响应均显著增大,经计算,结构舒适度满足设计要求。

关键词:桥梁结构;抗风性能;静风位移响应;抖振响应;舒适度

中图分类号:U442.5+9

文献标志码:A

Influence of Aerodynamic Shape Change on Wind Resistance Performance of Large Span Truss Bridge

JING Dade^{1,2}, SU Yi²

(1.Lhasa Municipality Design Group Co., Ltd., Lhasa, Xizang 850000, China; 2.Wind Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The development of the transportation and tourism industry has led to bridges fulfilling additional roles, such as tourism, alongside their transportation functions, resulting in significant changes in structural aerodynamic shape and ventilation rate. This paper analyzed a double-tower single-span steel truss suspension bridge with a main span of 1 088 m, re-evaluated its wind resistance performance through the full-bridge aeroelastic model wind tunnel test, and evaluated the pedestrian comfort problem while studying the wind-resistant stability of the structure. The results indicate that the structural dynamic characteristics of the bridge remain almost unchanged before and after altering the aerodynamic shape of the bridge for its scenic spot function, with no aerodynamic instabilities like vortex-induced vibration or flutter. After changing the aerodynamic shape, there is a noticeable increase in both lateral and vertical static-wind displacement responses, with a certain difference between the two in the torsional direction, whereas no clear pattern emerges. The change in the aerodynamic shape of the bridge, designed around a scenic spot, results in a decreased vertical buffeting response, while the lateral and torsional buffeting responses show a significant increase. After calculation, the structural comfort meets design requirements.

Keywords: bridge structure; wind resistance performance; static wind displacement response; buffeting response; comfort

0 引言

大跨度桥梁的抗风性能是当前风工程研究的热

点和难点,这是一个涉及风特性、桥梁结构及二者相互作用的多学科研究课题。尤其对于地形地势复杂的情况,自然风的非平稳特性将对桥梁结构产生非常

收稿日期:2022-09-09(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52008357)

作者简介:敬大德,男,硕士,高级工程师.E-mail:suyi8@my.swjtu.edu.cn

不利的影响,特别是钢桁梁桥的抗风问题。此外,观测资料的匮乏以及不同结构形式和气动外形的结构仍存在规范适用性等问题,采用传统方法进行结构风致特性的研究将得到不准确的结果,且随着当前桥梁跨度的不断增加,其风致特性问题更加棘手^[1-2]。

桥梁的跨度、结构形式、透风率、风环境等诸多因素都是影响大跨度桥梁风致振动的关键因素。反之,大跨度桥梁的静风位移响应及颤振、抖振等风致振动情况也都将对桥梁结构的气动选型等问题有着重要的影响^[3-5]。随着交通业及旅游业的发展,大跨度桥梁不断涌现,并不断出现桥梁结构在满足其交通运输功能的前提下同时开发诸如旅游等方面的其他可利用功能,如坝陵河大桥、海沧旅游区的厦门海沧大桥、景区开发设计中的赤水河大桥及诸多山区观景廊桥等^[6-9]。

本文以某山区桁梁悬索桥为背景,开展基于景区开发的气动外形改变对大跨度桁梁桥阶段抗风性能的影响研究。鉴于其地处黄果树瀑布景区,该桥的景区开发应运而生。因该桥桁高较高,跨中位置距地面高差大,其景区开发在桁梁架中设计了旅游通道、

餐厅、酒店、蹦极台等旅游项目,使得结构与传统的桥梁断面形式存在较大的差异。该桥跨度大、自振频率低,对风的作用敏感。而其在景区开发前后结构的气动外形发生显著的变化,因此其在景区开发设计阶段的风致响应及振动问题的研究显得尤为必要。

本文基于全桥气弹模型风洞试验,详细对比结构在成桥运营阶段与景区开发阶段的抗风性能,分析结构气动外形及透风率的改变对静风位移响应、抖振响应及颤振失稳等情况的影响,以此辅助桥梁景区开发阶段的设计及实施,并可为今后类似具有旅游等功能的桥梁结构的设计与研究提供参考。

1 工程概况

该大跨度桁架梁桥主桥采用双塔单跨钢桁架悬索桥,主跨长 1 088 m,主缆矢跨比 1/10.3,桥宽 28.0 m,吊索顺桥向间距为 10.8 m。钢桁梁由主桁架、主横桁架和上、下平联组成,主桁架桁高 10 m。结构设计风速为 25.9 m/s。图 1 为桥梁总体布置图及主梁标准横断面图。

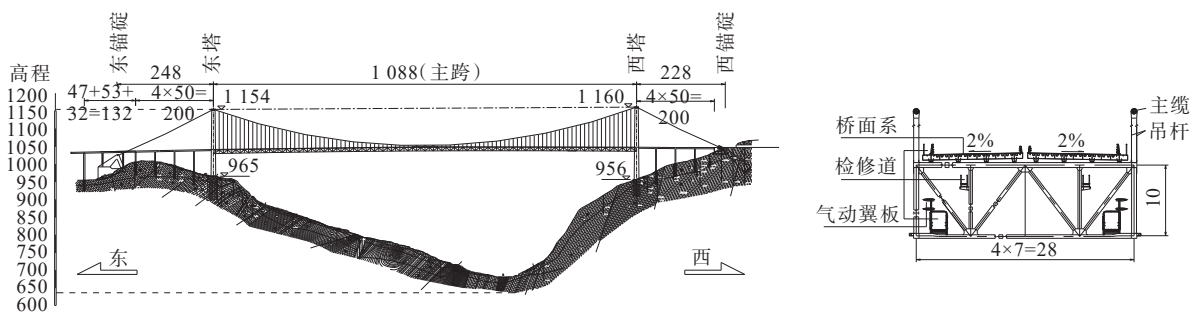


图 1 桥梁总体布置图及主梁标准横断面图(单位:m)

Figure 1 General layout of the bridge and standard cross-section of the main girder(unit:m)

根据该桥旅游开发项目的设置,下检修道内两侧铺设高 1.5 m 的玻璃栏杆,且对其中 10 个节间进行全封闭处理;12 个节间将铺设玻璃地面,并设计封闭的餐厅及酒店;在桥梁跨中位置布置了玻璃栈道、景区眺望台、蹦极跳台等开发项目。鉴于上述旅游开发项目对大桥主梁外形及气动力的影响,为确保桥梁景区开发设计阶段的抗风安全,需对增加旅游开发项目后结构的抗风性能引起足够的重视,对该桥景区开发设计阶段进行全桥气弹模型风洞试验。

2 有限元分析

全桥气弹模型风洞试验包含景区开发前后两阶段,采用 Ansys 有限元软件对该大跨度钢桁梁悬

索桥进行结构动力特性的分析,计算模型见图 2。

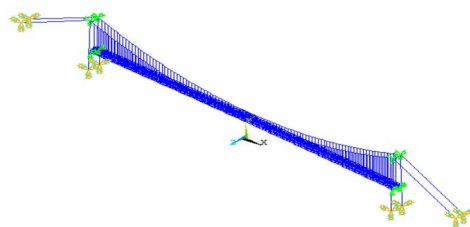


图 2 有限元模型图

Figure 2 Finite element model

采用上述有限元模型,根据子空间迭代法可以求解结构的前 30 阶振型和频率。经计算,增设景区开发项目之后,结构动力特性几乎不变。考虑到旅游开发项目质量相对于主梁质量很小,且其大部分

均为沿桥宽两侧对称布置等,其对结构动力特性影响较小,试验中采用在正确模拟原桥动力特性的基础上,准确模拟旅游开发项目的几何尺寸、质量及其布置位置,即可正确模拟桥梁景区开发阶段的动力特性。表1为结构与主梁振动有关的主要模态的结构动力特性结果。

表1 成桥态结构动力特性

Table 1 Structural dynamic characters in completed state

阶次	频率/Hz	振型特点	阶次	频率/Hz	振型特点
1	0.057 3	横向1阶正对称	4	0.157 5	竖向1阶正对称
2	0.111 7	竖向1阶反对称	9	0.273 0	扭转1阶正对称
3	0.144 2	横向1阶反对称	13	0.332 2	扭转1阶反对称

3 风洞试验

3.1 试验设备

全桥气动弹性模型风洞试验在西南交通大学风工程试验研究中心XNJD-3风洞中进行。该风洞是一座回流式低速风洞,试验段尺寸为36 m(长)×22.5 m(宽)×4.5 m(高),风洞空置时,风速范围为1.0~16.5 m/s,紊流度1.0%以下。风洞配备了模拟大气边界层的装置,可以实现建筑结构荷载规范要求的各类风场特性的模拟。该风洞的各项技术指标均达到世界先进水平,是目前世界上尺寸最大的土木工程类(风工程)专用风洞。

风速测量采用TFI眼镜蛇三维脉动风速测量仪,位移测量采用非接触式激光位移测量传感器(型号Micro-Epsilon optoNCDT1401)。试验采样频率512 Hz,采样时长64 s。

3.2 大气边界层模拟

试验段配备由尖塔、挡板和粗糙元组成的大气边界层模拟装置,粗糙元覆盖长度约25 m(通常为产生合理的紊流区域,覆盖长度为尖塔高度的6倍),可模拟出《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)要求的风剖面、紊流度及风速谱等。

试验分别在均匀流场及D类风场中进行,其中D类风场采用被动方法模拟大气边界层。试验中,需重点保证桥面高度的平均风速及紊流度。

3.3 试验工况

考虑到桥梁跨度及风洞试验段尺寸,将模型几何缩尺比定为 $C_L=1/80$,模型在风洞中的空气阻塞率小于5%,满足风洞试验要求。

根据研究目的及试验需要,桥梁颤振及涡激振动试验在均匀流场中进行(图3),并同时测量结构在均匀流场中的静风位移响应。抖振试验在紊流场(D类风场)中进行(图4)。试验设置了 0° 和 $+3^\circ$ 两个风攻角。考虑到旅游开发项目沿桥梁展向方向的不对称性,试验在 0° 和 180° 两个风偏角下分别进行。为关注桥梁景区开发前后变化对结构的影响,试验先对原桥进行试验,后再安装旅游开发项目模型进行试验。

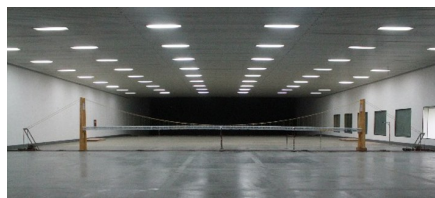


图3 均匀流场中全桥气动弹性模型

Figure 3 Full-bridge aeroelastic model installed in uniform flow field



图4 D类风场中全桥气动弹性模型

Figure 4 Full-bridge aeroelastic model installed in Class D wind field

4 试验结果及分析

由试验结果发现,桥梁景区开发前后在设计风速范围内没有涡激振动发生,且在 $0\sim 84.97$ m/s风速下均未发生颤振等空气动力失稳,该最大风速已远大于该桥的颤振检验风速($[U_{cr}]=41.1$ m/s),表明桥梁景区开发前后均具有很强的气动稳定性^[10]。

4.1 静风位移响应

主梁的静风位移响应在均匀流场中测量。图5为结构跨中及1/4跨位置处的平均位移响应与风速的关系曲线(已换算至实桥)。

由图5可知:结构跨中位置横向及扭转平均位移响应明显大于1/4跨,竖向位移响应在 0° 攻角时1/4跨大于跨中位置, $+3^\circ$ 攻角时二者相差很小;风攻角的改变对横向平均响应影响不大,但对竖向及扭转平均响应影响显著;来流方向对结构竖向平均响应影响不大,但对横向及扭转平均响应影响显著;景区

开发阶段的诸多结构变化使得透风率有较大幅度减小,结构风阻力明显增大,进而导致结构横向位移响应增大。另在部分节间下平联均铺设玻璃地面,会引起结构所受升力的变化,进而影响结构的竖向位移响应。桥梁景区开发后横向及竖向平均响应明显高于景区开发前,扭转平均位移响应在两阶段存在一定的差异但没有显著的规律性。

4.2 抖振响应

作为一种限幅振动,抖振虽不像颤振那样会引起结构的灾难性破坏,但其起振风速低、发生频率高,并且持续的抖振可能引起桥梁结构的局部疲劳破坏,进而影响桥梁的寿命。此外,强风作用下桥梁

结构会出现过大的抖振响应同样将危及人员及器械安全,以及结构行车及行人等的舒适度等问题^[11-14],尤其对于具有旅游功能的结构显得更加重要。图6为结构在各工况下的抖振响应均方根与桥面风速之间的关系(均已换算为实桥值)。

由图6可知: $+3^\circ$ 风攻角下结构横向及扭转抖振响应要大于 0° 风攻角,竖向抖振响应差异不明显。对于同一风攻角,跨中位置横向及扭转抖振响应普遍大于 $1/4$ 跨,竖向抖振响应普遍小于 $1/4$ 跨。因结构气动外形及透风率的显著变化,比较结构在景区开发前后的抖振响应试验结果发现,对于 0° 攻角下的横向抖振响应,风速小于 20 m/s 时景区开发前的结构

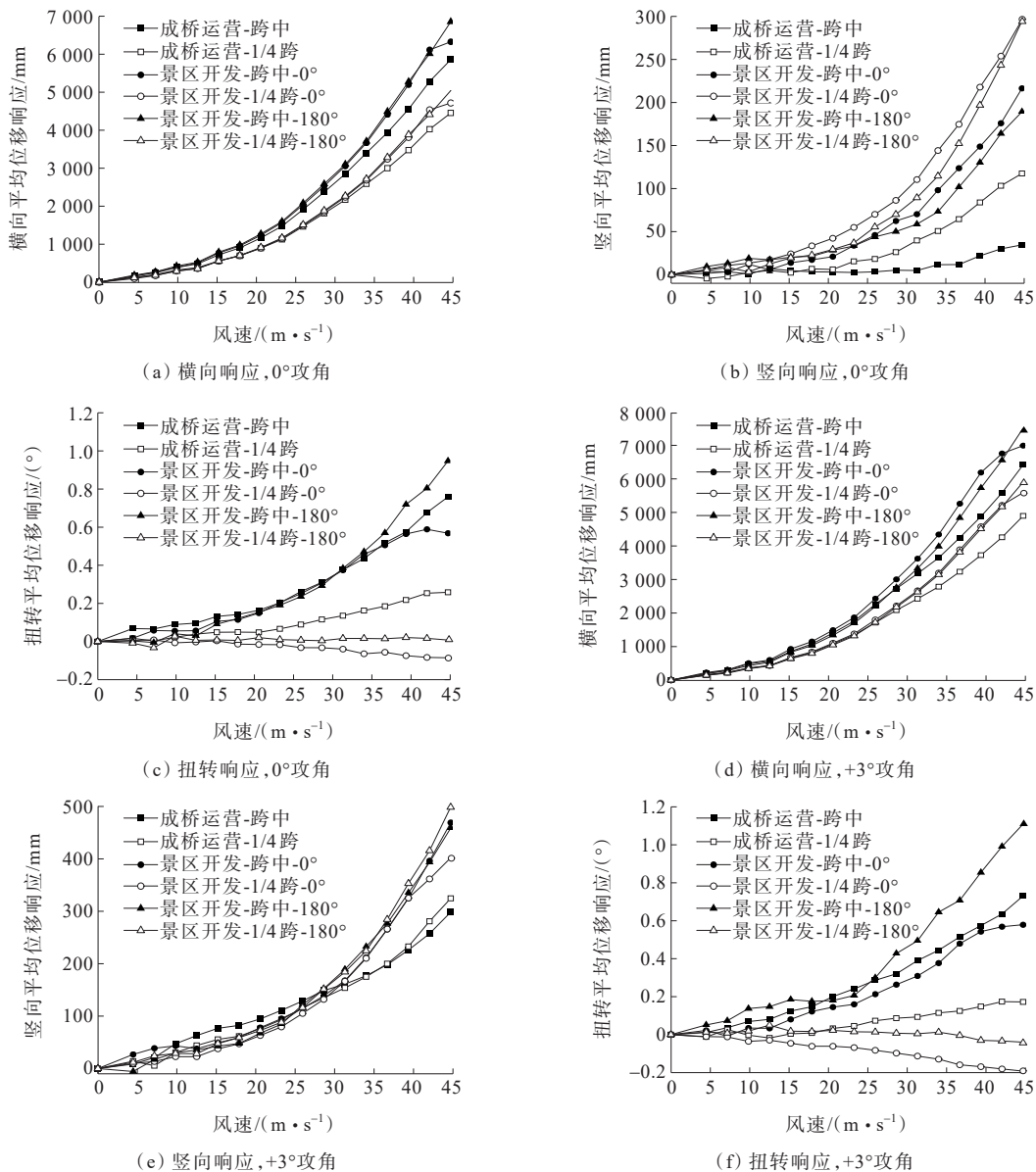


图5 景区开发前后桥梁结构静风位移响应

Figure 5 Static wind displacement responses of the bridge before and after scenic spot development

响应要大于景区开发后,随着风速的增大差异减小;对于 $+3^\circ$ 攻角下的横向抖振响应,风速小于 20 m/s 时不同工况响应值差异较小,随着风速的增大,景区开发后 0° 风偏角下的响应值最大,成桥运营阶段响应值最小。对于竖向抖振响应,景区开发前抖振响应值明显大于景区开发后,后者在 0° 风偏角下的响应值要稍大于 180° 风偏角。对于扭转抖振响应, $+3^\circ$ 攻角下景区开发后响应值明显大于景区开发前,且随着风速的增大,前者响应的增速大于后者, 0° 攻角存在类似的趋势但不明显。

以上试验结果表明:鉴于景区开发导致结构的

气动外形及透风率等的改变,结构抖振响应发生了显著的变化,竖向抖振响应减小,除上述个别工况,结构横向及扭转抖振响应大体显著增大,如 $+3^\circ$ 攻角、设计风速下结构扭转抖振响应增大了 150% 以上,虽不会引发结构的破坏性问题,但对于此类具有旅游功能的桥梁结构而言,抖振响应的显著变化将严重影响结构上行人舒适度等问题,因此需要对其进行重新评估^[15-16]。

4.3 景区开发阶段舒适度评估

根据中国桥梁通行的有关规定,当风速大于 25 m/s 时,桥梁限制通行。鉴于此,本文通过 25.9 m/s 设计

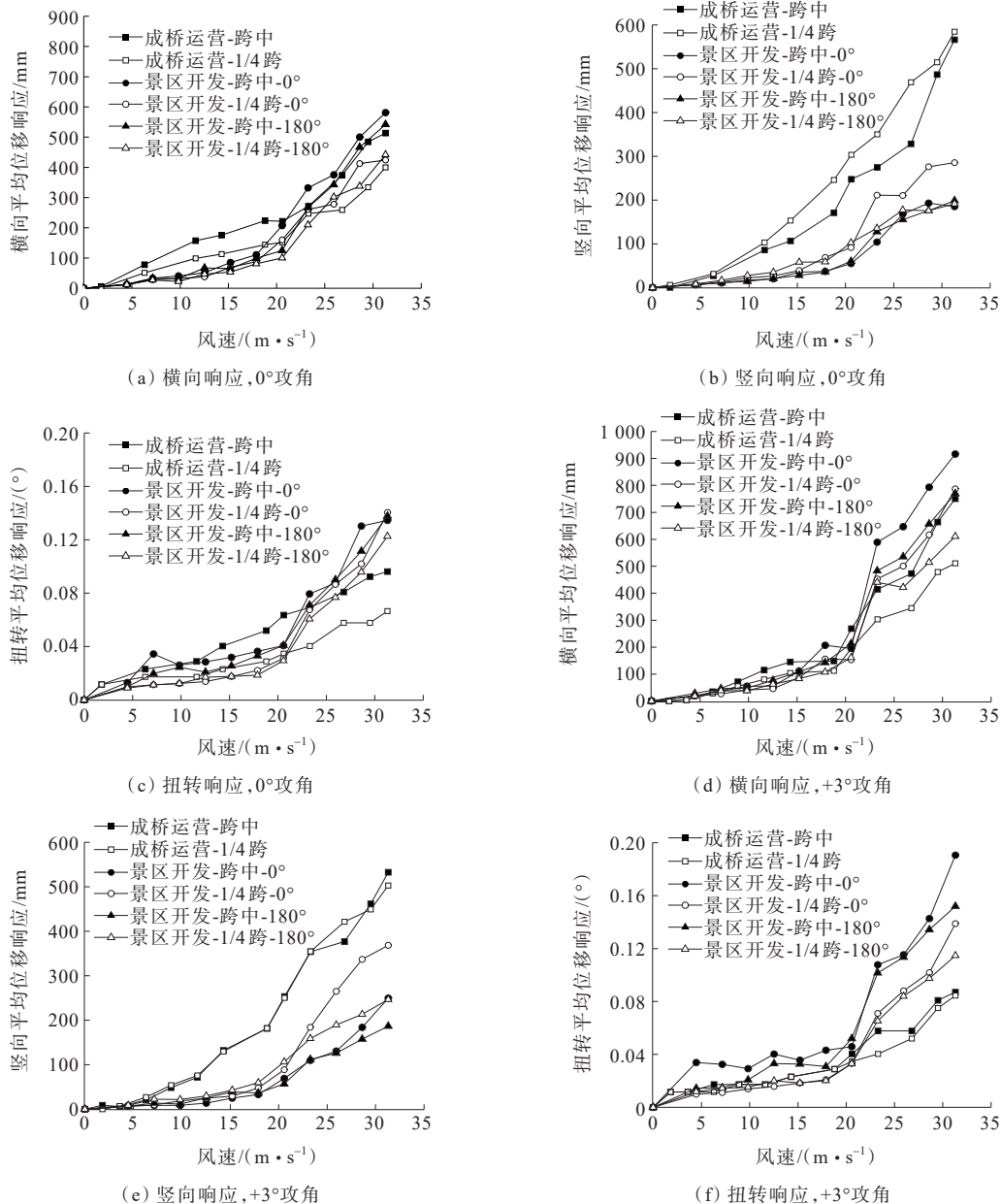


图6 景区开发前后桥梁结构抖振响应

Figure 6 Buffeting responses of the bridge before and after scenic spot development

风速下的风致响应试验结果获取结构风致加速度响应(设计风速 25.9 m/s 略高于 25 m/s, 计算偏于保守, 结果偏于安全)。

根据结构动力学相关知识, 在 $t = t_0$ 时间步开始的运动方程为:

$$m\ddot{v}_0 + c\dot{v}_0 + kv_0 = p_0 \quad (1)$$

则初始加速度的解为:

$$\ddot{v}_0 = \frac{1}{m} (p_0 - c\dot{v}_0 - kv_0) \quad (2)$$

为了列出数值逐步法, 需将初始速度和加速度项近似表示为有限差分表达式。首先近似表达 t_0 时刻前后步长中点的加速度、速度:

$$\dot{v}_{-1/2} = \frac{v_0 - v_{-1}}{h}; \quad \dot{v}_{1/2} = \frac{v_1 - v_0}{h} \quad (3)$$

式中: h 为时间步的持续时间。

这些时间中间的加速度由响应的速度表示:

$$\dot{v}_0 = \frac{\dot{v}_{1/2} - \dot{v}_{-1/2}}{h} = \frac{1}{h^2} (v_1 - v_0) - \frac{1}{h^2} (v_0 - v_{-1}) \quad (4)$$

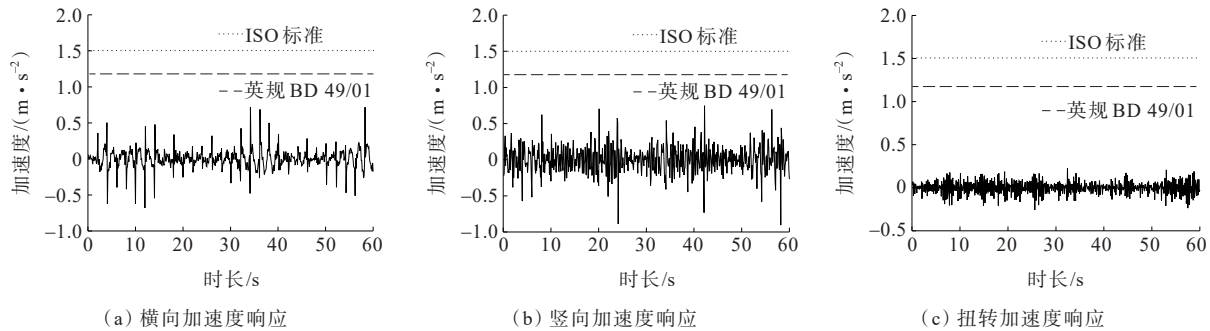


图 7 景区开发阶段加速度响应

Figure 7 Acceleration response in scenic development phase

通过上述试验及计算结果发现, 结构在设计风速下加速度小于规范限值, 舒适度满足要求。即使这样, 鉴于此类具有旅游功能的结构对舒适度要求明显较高, 因此对该问题仍需足够重视。

景区开发阶段横向及竖向的静风位移响应明显高于成桥运营阶段, 在扭转方向二者存在一定差异但没有显著的规律性; 景区开发导致结构竖向抖振响应减小, 但横向及扭转抖振响应均显著增大, 经计算, 结构舒适度满足设计要求。

5 结论

为评估大跨度桁梁桥景区开发阶段抗风性能, 进行了均匀流场及紊流场中全桥气弹模型风洞试

从而得:

$$\ddot{v}_0 = \frac{1}{h^2} (v_1 - 2v_0 + v_{-1}) \quad (5)$$

根据试验结构位移响应时程, 利用上述二阶中心差分思想, 可以得到桥梁景区开发设计阶段跨中及 1/4 跨加速度时程, 并得到各个方向的加速度时程。本文根据结构抖振响应时程, 时间步长取为 0.1 s, 获得其加速度时程。

根据英国规范 BD 49/01 中相关规定, 动力放大因子 K_D 需满足 $K_D \leq 30 \text{ mm/s}^2$, 通过换算, 其相当于加速度 $a \leq 1.18 \text{ m/s}^2$; 另 ISO 标准中规定 $a \leq 1.5 \text{ m/s}^2$ 。为防止赘余, 在此根据上节抖振响应试验结果及结论中的各方向最不利工况, 仅给出桥梁景区开发阶段在 0° 风偏角 + 3° 风攻角、25.9 m/s 的设计风速下跨中位置处横向、扭转加速度响应及 1/4 跨位置处竖向加速度响应如图 7 所示(图中将扭转加速度以其在竖向的响应体现)。

验, 得出如下主要结论:

(1) 增设景区开发项目前后结构动力特性几乎不变。

(2) 沿顺风向及竖向降低结构的透风率使得结构横向及竖向的静风位移响应明显增大, 扭转静风位移响应存在一定差异但没有显著规律。

(3) 相比于原桥梁结构, 景区开发导致结构竖向抖振响应减小, 横向及扭转抖振响应均显著增大, 但行人舒适度仍满足要求。

(4) 结构景区开发设计导致静风位移响应及抖振响应发生显著变化, 需对具有此类功能的结构重点评价其舒适度等问题。

参考文献:

References:

- [1] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures: Fundamentals and applications to design[M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 1996.
- [2] 李明, 孙延国, 李明水. 大跨度钢桁梁悬索桥颤振稳定措施试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 182-189.
LI Ming, SUN Yanguo, LI Mingshui. Tests for flutter stability measures of a long-span suspension bridge with steel truss girders[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 182-189.
- [3] 周亚栋, 孙延国, 李明. 大跨度斜拉桥桥塔自立状态抗风性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 52-57.
ZHOU Yadong, SUN Yanguo, LI Ming. Experimental research on wind resistant performance of free-standing pylon of long-span cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(3): 52-57.
- [4] 李少鹏, 李明水, 马存明. 矩形断面抖振力展向相关性的试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 39-46.
LI Shaopeng, LI Mingshui, MA Cunming. Experimental investigation of the span-wise correlation of buffeting forces on a rectangular section[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 39-46.
- [5] 张太科, 唐茂林, 李旻拾, 等. 大跨悬索桥加劲梁吊装过程强静风安全性研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 30-35.
ZHANG Taike, TANG Maolin, LI Minshi, et al. Study of aerostatic safety of long-span suspension bridge in process of stiffening girder hoisting[J]. Bridge Construction, 2019, 49(6): 30-35.
- [6] 王帆, 赖亚平, 乔云强, 等. 合川渠江景观大桥三角拱形桥塔设计研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 109-112.
WANG Fan, LAI Yaping, QIAO Yunqiang, et al. Study on design of triangular arch tower of He-Chuan qu-Jiang landscape bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2): 109-112.
- [7] 苏益, 李明水, 杨阳, 等. 山区单悬臂廊桥结构抖振响应及等效风荷载[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(1): 121-128.
SU Yi, LI Mingshui, YANG Yang, et al. Buffeting response and equivalent wind load of single cantilever corridor bridge in mountainous areas[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(1): 121-128.
- [8] 乔耀星, 张红喜, 刘世明. 斜拉索辅助人行悬索桥总体设计[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 86-89.
QIAO Yaoxing, ZHANG Hongxi, LIU Shiming. Overall design of suspension footbridge assisted with stayed cable [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 86-89.
- [9] 周诗云, 李国平, 骆梦. 景区人行悬索桥受力特征研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 151-157.
ZHOU Shiyun, LI Guoping, LUO Meng. Study on force characteristic of scenic pedestrian suspension bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 151-157.
- [10] 同济大学. 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, 2019.
Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [11] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
CHEN Zhengqing. Bridge wind engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [12] 杨勇. 钢桁梁悬索桥抖振响应及其影响参数分析[J]. 世界桥梁, 2012, 40(1): 32-36.
YANG Yong. Analysis of buffeting responses and their influential parameters of steel truss girder suspension bridge[J]. World Bridges, 2012, 40(1): 32-36.
- [13] 狄谨, 周绪红, 张茜. 斜拉桥主塔施工过程风致抖振时域分析及安全性评定[J]. 桥梁建设, 2006, 36(5): 68-71.
DI Jin, ZHOU Xuhong, ZHANG Qian. Time-domain analysis and safety evaluation of wind-induced buffeting on pylon of cable-stayed bridge at construction stage[J]. Bridge Construction, 2006, 36(5): 68-71.
- [14] 张亮亮, 李少鹏, 李明水. 流线型箱梁抖振力双指数广义相干函数模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 65-73.
ZHANG Liangliang, LI Shaopeng, LI Mingshui. Double-exponential generalized coherence model of buffeting forces on streamlined girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(11): 65-73.
- [15] 杨天才, 王波, 王新华, 等. 大跨连续刚构桥最大悬臂施工阶段风致抖振响应[J]. 世界桥梁, 2008, 36(1): 34-37.
YANG Tiancai, WANG Bo, WANG Xinhua, et al. Wind-induced buffeting response of long span continuous rigid-frame bridge at the longest cantilever construction stage[J]. World Bridges, 2008, 36(1): 34-37.
- [16] 曾广平. 大跨径悬索桥风场特征监测及其与振动加速度关联分析[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 142-147.
ZENG Guangping. Wind field characteristic monitoring of long-span suspension bridge and analysis on its correlation with vibration acceleration[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 142-147.