



大攻角及桥面粗糙度对扁平钢箱梁 涡振性能的影响

杨 阳, 张亮亮, 吴 波, 张亚婷

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要:为探究大攻角及桥面粗糙度对扁平钢箱梁涡振性能的影响,对寸滩长江大桥主梁进行了风洞试验。应用 Matlab 软件模拟桥面粗糙度变化范围,根据模拟结果选取对应的砂纸在试验中模拟桥面粗糙度,分析了攻角及桥面粗糙度对扁平钢箱梁涡振区间及幅值的影响。试验研究表明:在大攻角下扁平钢箱梁的涡振振幅和范围明显增大,对桥址位于山区等容易发生大风攻角的地区的桥梁应进行大攻角试验。扁平钢箱梁的涡振响应随着桥面粗糙度增大而减小。正攻角范围内,桥面粗糙度对涡振响应的影响随着攻角减小而增大。桥面粗糙度发生变化时,扭转涡振响应更加敏感,变化幅度大于竖向涡振响应变化幅度。

关键词:涡振性能;节段模型试验;大攻角;桥面粗糙度

中图分类号:U441.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)06-0032-07

Effects of large attack angle and deck roughness on flat steel box girder vortex-induced vibration

Yang Yang, Zhang Liangliang, Wu Bo, Zhang Yating

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To study effects of deck roughness and large attack angle on vortex-induced vibration, wind tunnel test has been performed. First, deck roughness was obtained in numeric simulation and according to which, the best match sandpapers were selected for the experiment. Tests of bridge section model were performed with different kinds of attack angles and bridge deck roughness. The results show that the vertical and torsional vortex-induced vibration of flat steel box girder with a large aspect ratio increase at the large attack angle. When the bridge locates in the mountains, it is necessary to do bridge section model test at large attack angle. Deck roughness can reduce the vertical and torsional vortex-induced vibration. Deck roughness has influence on vortex-induced vibration which increases correspondingly with the decrease of the attack angle. Response of torsional vortex-induced vibration is more sensitive to deck roughness, and its range is greater than that of vertical vortex-induced vibration. The accuracy of deck roughness affects

收稿日期:2015-07-30

基金项目:国家自然科学基金(51578098);重庆市建委科技项目(20130844)

作者简介:杨阳(1986-),女,博士,主要从事风-汽车-桥梁系统振动研究,(E-mail)20121601009@cqu.edu.cn。

张亮亮(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)zll200510@126.com。

Received:2015-07-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51578098); Science and Technology Project of Chongqing Municipal Construction Commission (No. 20130844)

Author brief: Yang Yang (1986-), PhD, main research interests: vibration of wind-vehicle-bridge system, (E-mail) 20121601009@cqu.edu.cn.

Zhang Liangliang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) zll200510@126.com.

the reliability of wind tunnel test.

Key words: vortex-induced vibration; bridge section model; large attack angle; deck roughness

桥梁涡振通常发生在低风速区间内,长时间涡振会导致结构疲劳并且影响行车的安全性和舒适性。Rio-Niteroi 桥在使用阶段曾经高频率地出现一阶大幅涡振^[1], Second Severn 桥、东京湾道桥、Great Belt East 桥也曾出现过大幅度的涡振^[2-4]。大振幅涡振响应出现频率较高的桥梁需经常关闭,影响正常使用功能并会造成负面社会影响。

管青海等^[5]对倒梯形整体钢箱梁有无栏杆时的涡振性能进行了研究,通过测量箱梁断面表面压力解释了栏杆影响桥梁断面涡振性能的原因。秦浩等^[6]对分离式双幅桥面钢箱梁进行了全桥模型风洞试验,分析了双幅主梁产生两个涡振区间的机理。刘高等^[7]通过比例为 1/50 的节段模型风洞试验分析了分体式钝体双箱钢箱梁两侧有无固定水平气动翼板情况下主梁涡振的变化情况。王骑等^[8]研究了分体式钢箱梁梁底导流板和桥面抑振板对涡振的抑制效果,并用大比例节段模型进行了验证。李春光等^[9]对带悬挑人行道板的扁平钢箱梁进行了节段模型风洞试验,分析了不同位置的检修轨道、附加轨道导流板以及底板竖直稳定板对桥梁涡振振幅的影响。孙延国等^[10]通过大尺度节段模型风洞试验研究了人行道栏杆、检修轨道、导流板对扁平钢箱梁涡振性能的影响。

主梁的涡振是由流经桥梁断面的气流周期性交替脱落的漩涡引起的,扁平钢箱梁桥因其质量轻、阻尼小而对影响涡振的各种因素更加敏感。通常的涡振试验中,主要研究的是附属结构及桥梁断面本身的涡振性能,很少有人研究大攻角及桥面粗糙度对扁平钢箱梁涡振性能的影响。文中以寸滩长江大桥为工程背景,该桥桥址位于山地地区,易形成大风攻角,因此,有必要对大攻角下主梁的涡振性能进行研究。其主梁宽高比大,桥面栏杆多,对各种因素敏感,容易发生涡振,因此,研究了桥面粗糙度对主梁涡振性能的影响。本文首先模拟出了桥面粗糙度变化范围,然后选取对应的砂纸在试验中进行桥面粗糙度模拟,最后研究了不同攻角及 3 种桥面粗糙度下扁平钢箱梁涡振区间及幅值变化情况。

1 工程及试验背景

1.1 寸滩长江大桥概况

寸滩长江大桥全长 1.6 km,包括跨江主桥和南

北引桥两部分,跨径布置为 250 m+880 m+250 m,主跨矢跨比 1/8.8,两根主缆中心距 39.2 m。主梁宽 42.0 m,高 3.5 m,跨中设置中央扣。主梁标准断面见图 1。

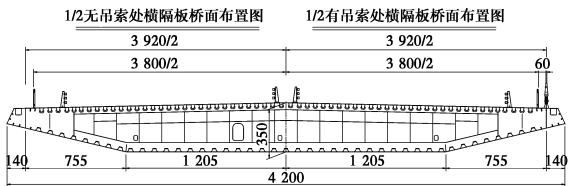


图 1 主梁标准断面(单位:cm)

Fig. 1 Standard cross-section of main girder (unit:cm)

计算出桥梁的主要自振振型及频率能够给节段风洞试验提供数据支撑,用 ANSYS14.0 建模得出该桥梁结构的动力特性,应用空间有限元法对桥梁结构按照实际情况进行离散。主梁各结构构件、索塔和桥墩,离散成空间梁单元,主缆和索离散成空间杆单元,二期恒载离散成质量点单元,图 2 为用 ANSYS14.0 建模得到的寸滩长江大桥有限元模型。表 1 为计算出的桥梁主要自振振型及频率。

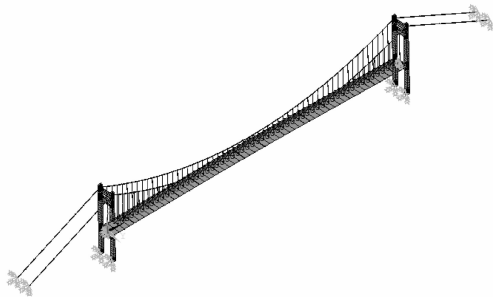


图 2 寸滩长江大桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model of Cuntan Bridge

表 1 桥梁主要自振振型及频率

Table 1 Natural frequencies and mode features of bridge

自振振型	自振频率/Hz
第 1 阶反对称竖弯	0.116 25
第 1 阶对称竖弯	0.174 46
第 1 阶对称扭转	0.397 26
第 1 阶反对称扭转	0.440 29

按第 1 阶反对称竖弯频率计算,成桥状态加劲

梁竖向涡振的振幅容许值^[11]为 0.344 1 m, 按第 1 阶对称竖弯频率计算, 成桥状态加劲梁竖向涡振的振幅容许值为 0.229 3 m, 按第 1 阶对称扭转频率计算, 成桥状态加劲梁扭转涡振的振幅容许值为 0.273 3°, 按第 1 阶反对称扭转频率计算, 成桥状态加劲梁扭转涡振的振幅容许值为 0.246 6°。一般把按竖弯基频和扭转基频计算的涡振振幅作为涡振振幅容许值, 即竖向涡振振幅容许值取 0.344 1 m, 扭转涡振振幅容许值取 0.273 3°。将 0.229 3 m 和 0.246 6°作为参考。

1.2 节段模型制作

节段模型采用木材制作, 中央分隔带栏杆、桥面防撞护栏、人行道护栏、检修轨道均采用塑料板用机器雕刻而成。几何缩尺比为 1/60, 模型长 $L=2.1$ m, 宽 $B=0.7$ m, 高 $H=0.058\ 33$ m, 由 8 根拉伸弹簧悬挂在支架上, 形成二自由度振动系统, 主要模拟主梁竖向和扭转两个自由度的振动特性, 弹簧之间间距为 108.0 cm。试验中采用激光位移传感器测试桥面边缘处的位移响应, 两个激光位移传感器固定在节段模型下部, 对称放置于模型中心线两侧, 传感器间距为 40.0 cm。

弹簧悬挂二元刚体节段模型风洞试验不仅要求模型与实桥在几何外形上相似, 还要求二者之间的频率比和阻尼比一致。由表 2 可计算出主梁竖向风速比为 4.72, 扭转风速比为 4.41。

表 2 涡振试验模型设计参数

Table 2 Design parameters of vortex-induced vibration mode

参数	实桥值	模型要求值	模型实现值
主梁高/m	3.500	0.058	0.058
主梁宽/m	42.0	0.7	0.7
单位长度质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	27 600	7.667	7.667
单位长度质量惯性矩/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	5 137 700	0.398 7	0.398 7
竖弯频率/Hz	0.174	2.216	2.216
竖弯阻尼比/%	0.500	0.389	0.372
扭转频率/Hz	0.397	5.404	5.404
扭转阻尼比/%	0.500	0.439	0.422

面, 做了很多研究: 罗竹辉等^[12]将一维路面功率谱扩展成了二维功率谱得到了三维路面粗糙度。鲁植雄等^[13]在分形理论基础上采用迭代函数法重构了三维路面粗糙度。吴参等^[14]将二维路面粗糙度在沿道路宽度方向进行拓展, 得到三维路面粗糙度。马麟等^[15]将三维风场模拟理论推广应用得到了三维路面粗糙度, 其研究工作表明, 桥面粗糙度可以用路面粗糙度模拟。本文选择文献[14]中所用理论, 通过 Matlab 软件对 A 级、B 级、C 级桥面粗糙度进行了数值模拟。图 3(a)给出了长×宽尺寸为 150 m×50 m 的 B 级桥面粗糙度的三维示意图, 桥面粗糙度的变化范围在 -0.02~0.02 m 之间。图 3(b)中给出了模拟功率谱与标准功率谱的对比图, 模拟功率谱围绕着标准谱上下波动, 整体趋势与标准谱一致, 因此, 本文中模拟出的三维桥面粗糙度与实际相符。表 3 中给出了模拟出的 A 级、B 级、C 级桥面粗糙度变化范围和在试验中模拟对应等级桥面粗糙度的变化范围。

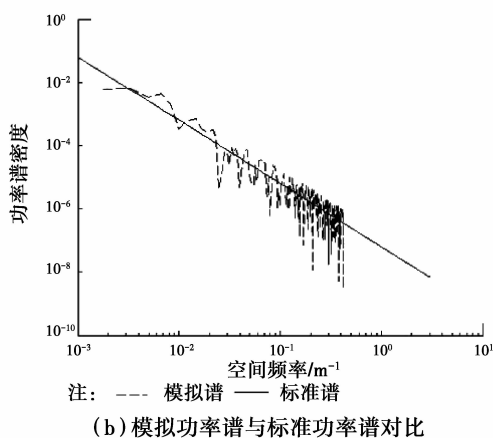
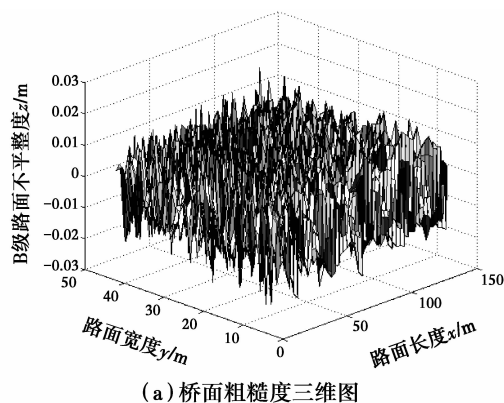


图 3 B 级桥面粗糙度

Fig. 3 B-level deck roughness

2 扁平钢箱梁节段模型风洞试验

2.1 桥面粗糙度的模拟与实现

前人在应用数值方法模拟桥面和路面粗糙度方

文献[17]在试验中证明了用砂纸模拟桥面粗糙度的方法具有可行性和良好的可信度, 因此, 本文在节段模型风洞试验中也选择了砂纸对桥面粗糙度进

行模拟。经过模拟和换算发现,A级桥面粗糙度变化范围较小,不足0.100 mm,考虑到制作节段模型桥面的木材表面有轻微的粗糙度,所以用未加砂纸的主梁模拟A级桥面粗糙度。B级和C级桥面粗糙度采用砂纸模拟,砂纸粗糙度变化范围具体量测方法为:对砂纸两边沿长度方向(总长2.1 m)用游标卡尺每隔75.0 mm测量一次,共56个测点,记录其变化范围。每种砂纸测量3组,大量的量测结果表明,120目和80目砂纸的平均变化范围的分别为 $-0.487\sim+0.487$ mm和 $-0.640\sim+0.640$ mm,与模拟结果相差不大,因此,选用120目砂纸模拟B级桥面粗糙度,80目砂纸模拟C级桥面粗糙度。

表3 桥面粗糙度变化范围

Table 3 Variation range of bridge surface roughness

粗糙度等级	实际变化范围/mm	模拟变化范围/mm
A级	$-5\sim+5$	$-0.083\sim+0.083$
B级	$-20\sim+20$	$-0.333\sim+0.333$
C级	$-40\sim+40$	$-0.666\sim+0.666$

2.2 试验工况设计

进行涡振节段模型试验时,通常情况下攻角范围取 0° 、 $\pm 3^\circ$ ^[11]。在山区地形及峡谷地带,桥梁风场受局部地形影响非常剧烈,易形成大于 $\pm 3^\circ$ 的大攻角来流风,因此,有必要对复杂地形地貌区的大跨度桥梁开展大攻角情况下涡振性能研究。寸滩长江大桥桥址位于山区,主梁宽高比大,更容易发生涡振,因此,对无砂纸的主梁断面进行了 0° 、 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 7^\circ$ 七种攻角下的涡振试验^[16]。流线型箱梁气动外形对桥梁涡振的影响较大^[18],桥面粗糙度能够影响扁平钢箱梁气动外形,为研究桥面粗糙度对扁平钢箱梁的影响,对3种桥面粗糙度的主梁断面进行了 0° 、 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 攻角试验,A级和C级桥面粗糙度时主梁涡振试验如图4和图5所示,试验来流为均匀流。



图4 A级桥面粗糙度主梁涡振试验

Fig. 4 Vortex-induced vibration experiment with A-level deck roughness



图5 C级桥面粗糙度主梁涡振试验

Fig. 5 Vortex-induced vibration experiment with C-level deck roughness

试验在西南交通大学单回流串联双试验段工业风洞第2试验段中进行,试验过程中控制升压基本步长为0.1 V,为了更好的观察涡振,在涡振发生区适当减小升压步长为0.02 V或者0.03 V。

2.3 大攻角的影响

通常情况下桥面粗糙度等级为A级。为研究大攻角对扁平钢箱梁的影响,在A级桥面粗糙度下对扁平钢箱梁进行了 0° 、 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 7^\circ$ 七种攻角下的涡振试验,竖向涡振和扭转涡振响应如图6和图7所示。

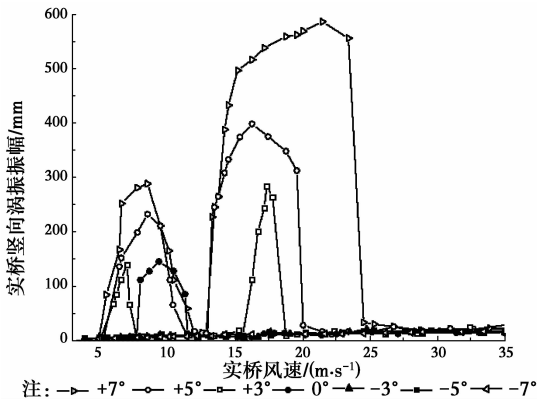


图6 竖向涡振响应

Fig. 6 Response of vertical vortex-induced vibration

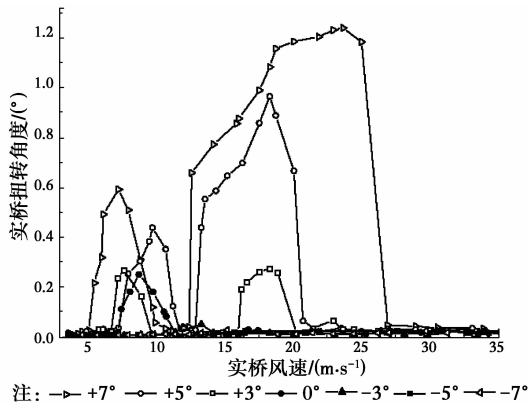


图7 扭转涡振响应

Fig. 7 Response of torsional vortex-induced vibration

在试验过程中观察到涡振振动形式有竖向涡振、弯扭耦合涡振、扭转涡振 3 种形式。由图 6 和图 7 可知,主梁在正攻角情况下出现了明显涡激振动响应。 $+3^\circ$ 、 $+5^\circ$ 、 $+7^\circ$ 攻角下该扁平钢箱梁存在着 2 个涡振区,第 2 涡振区间涡振响应明显大于第 1 涡振区的涡振响应。 0° 攻角下出现了一个明显的涡振区。负攻角下未出现明显涡振区。 $+7^\circ$ 攻角下竖向涡振响应最大幅值为 586.46 mm,扭转响应最大角度为 1.238° 。 $+5^\circ$ 、 $+7^\circ$ 大风攻角下的涡振区间明显增大,涡振响应增幅较大,均超过涡振允许值。 $+3^\circ$ 攻角下扭转角度超过允许值 0.18%,其余工况均在允许值范围内。未进行大攻角试验时主梁涡振性能基本满足要求,但是在在大攻角下涡振响应最大值均远超过允许值。气流的不同绕流形态与断面振动相互作用,形成了两个不同的气流涡脱,存在着两个斯托哈数,产生了两个不同的涡振区间。扁平钢箱梁因其流线型结构而具有良好的气动特性,但在大攻角下流线形结构接近钝体结构,产生了较大的涡振响应。因此,桥址位于山地地区时,应进行大攻角工况下涡振性能试验。

2.4 桥面粗糙度的影响

为研究 3 种桥面粗糙度对扁平钢箱梁涡振性能的影响,对 3 种桥面粗糙度的主梁节段模型进行了 0° 、 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 五种攻角下的涡振试验。

通过试验发现,3 种桥面粗糙度在 -3° 、 -5° 时都没有明显的涡振区。从图 8~10 可看出,竖向涡振振幅随着桥面粗糙度的增加不断减小, $+5^\circ$ 风攻角和 $+3^\circ$ 风攻角作用下,3 种桥面粗糙度都存在着两个涡振区间,说明桥面粗糙度没有能改变斯托哈数的数量。 $+5^\circ$ 风攻角时桥面粗糙度从 A 级到 B 级涡振振幅下降了 7.36%,从 B 级到 C 级涡振振幅下降了 9.20%。 $+3^\circ$ 风攻角时桥面粗糙度从 A 级到 B 级涡振振幅下降了 25.8%,从 B 级到 C 级涡振振幅下降了 14.39%。 0° 风攻角时桥面粗糙度从 A 级到 B 级涡振振幅下降了 32.63%,从 B 级到 C 级涡振振幅下降了 17.53%。在正攻角均匀流下,桥面粗糙度对主梁竖向涡振响应降低幅随着风攻角的减小而增大,风攻角越小对桥面粗糙度变化越敏感,竖向涡振响应变化幅度越大。

图 11~13 为 3 种桥面粗糙度在 $+5^\circ$ 、 $+3^\circ$ 、 0° 时的扭转角度。在 $+5^\circ$ 和 $+3^\circ$ 时有两个明显的扭转区, 0° 时有一个扭转涡振区。 $+5^\circ$ 风攻角时桥面粗糙度从 A 级到 B 级涡振振幅下降了 10.27%,从 B 级到 C 级涡振振幅下降了 27.91%。 $+3^\circ$ 风攻角时

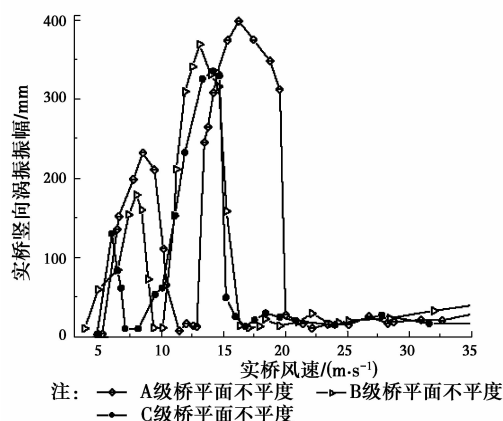


图 8 $+5^\circ$ 风攻角下竖向涡振响应

Fig. 8 Response of vertical vortex-induced vibration at $+5^\circ$ attack angle

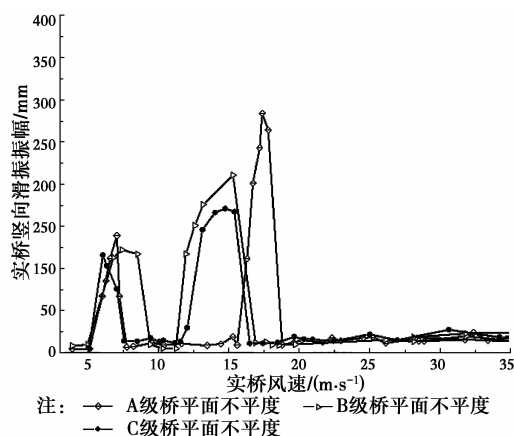


图 9 $+3^\circ$ 风攻角下竖向涡振响应

Fig. 9 Response of vertical vortex-induced vibration with $+3^\circ$ attack angle

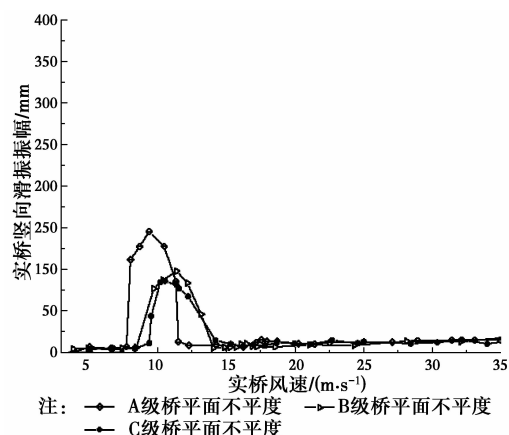


图 10 0° 风攻角下竖向涡振响应

Fig. 10 Response of vertical vortex-induced vibration at 0° attack angle

桥面粗糙度从 A 级到 B 级涡振振幅下降了 41.76%,从 B 级到 C 级涡振振幅下降了 22.01%。

0°风攻角时桥面粗糙度从A级到B级涡振振幅下降了49.8%,从B级到C级涡振振幅下降了50.79%。扭转涡振角度、扭转涡振区间随着桥面粗糙度的增加而不断减小,风攻角越小对桥面粗糙度变化越敏感,扭转涡振响应变化幅度越大。桥面粗糙度发生相同变化时,扭转涡振响应变化幅度大于竖向涡振响应变化幅度。扁平钢箱梁的竖向涡振振幅和扭转涡振角度都随着桥面粗糙度的增加而不断减小,推测其原因,作者认为经过主梁断面的气流发生周期性交替脱落,引起了扁平钢箱梁的涡振响应,因其气动力外形特征而对各种外在因素比较敏感,桥面粗糙度改变了该主梁的雷诺数,雷诺数随着桥面粗糙度的增加而增大,因雷诺数效应的存在,使经过扁平钢箱梁的气流所受阻力增大,从而降低了其涡振响应。

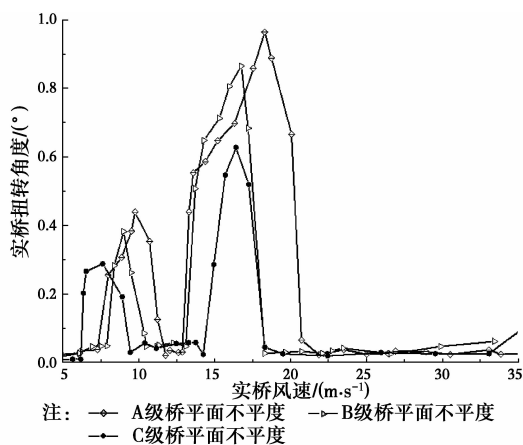


图 11 +5°风攻角下扭转涡振响应

Fig. 11 Response of torsional vortex-induced vibration at +5° attack angle

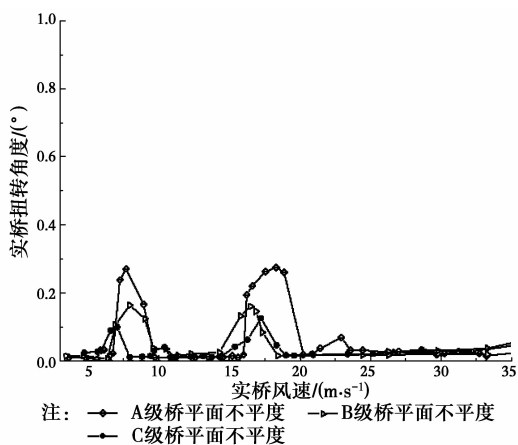


图 12 +3°风攻角下扭转涡振响应

Fig. 12 Response of torsional vortex-induced vibration at +3° attack angle

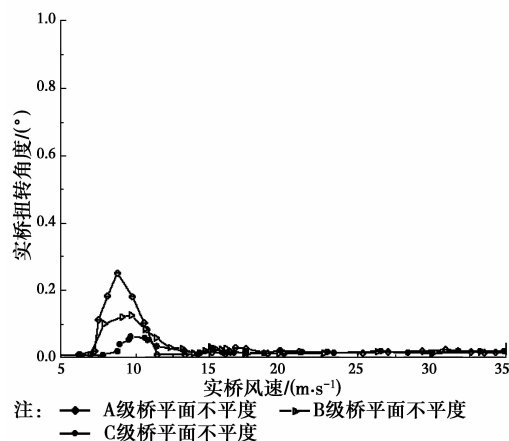


图 13 0°风攻角下扭转涡振响应

Fig. 13 Response of torsional vortex-induced vibration at 0° attack angle

3 结 论

1)扁平钢箱梁因其流线型结构而具有良好的气动特性,但在大攻角下流线形结构接近钝体结构,其涡振响应幅值和范围远远大于正常攻角。因此,桥址位于山地地区时,应进行大攻角工况下涡振性能试验。

2)扁平钢箱梁的竖向涡振振幅和扭转涡振角度、扭转涡振区间都随着桥面粗糙度的增加而不断减小。竖向涡振区间随着桥面粗糙度变化情况在本次试验中无规律,有待通过更多试验总结规律。

3)正攻角范围内,桥面粗糙度对涡振响应的影响随着角度减小而增大。桥面粗糙度发生变化时,扭转涡振响应更加敏感,变化幅度大于竖向涡振响应变化幅度。桥面粗糙度能够影响扁平钢箱梁气动外形,而流线型箱梁气动外形对桥梁涡振的影响较大,因此,精确地模拟桥面粗糙度更能提高节段模型涡振试验结果的可靠性,模型桥面粗糙度与实际桥面粗糙度相差越大,涡振试验结果偏差越大。

参考文献:

- [1] Battista R C, Pfeil M S. Reduction of vortex-induced oscillations of rio-niteroi bridge by dynamic control devices [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(3): 273-288.
- [2] Irwin P A. Bluff body aerodynamics in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 701-712.
- [3] Frandsen J B. Simultaneous pressures and accelerations measured full-scale on the great belt east suspension bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(1): 95-129.

- [4] 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.
- [5] 管青海, 李加武, 胡兆同, 等. 栏杆对典型桥梁断面涡激振动的影响研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 150-156.
- Guan Q H, Li J W, Hu Z T, et al. Effects of railings on vortex-induced vibration of a bridge deck section [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3): 150-156. (in Chinese)
- [6] 秦浩, 廖海黎, 李明水. 大跨度双幅连续钢箱梁桥涡激振动特性风洞试验研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 206-210.
- Qin H, Liao H L, Li M S. Vortex induced vibration performance of long span continuous steel twin box beam bridge based on wind tunnel test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 206-210. (in Chinese)
- [7] 刘高, 刘天成. 分体式钝体双箱钢箱梁斜拉桥节段模型风洞试验研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(Sup2): 49-54.
- Liu G, Liu T C. Sectional model wind tunnel test of a cable-stayed bridge with separated bluff steel twin-box girder [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup2): 49-54. (in Chinese)
- [8] 王骑, 林道锦, 廖海黎, 等. 分体式钢箱梁涡激振动特性及制振措施风洞试验研究 [J]. 公路, 2013, 7(7): 294-299.
- Wang Q, Lin D J, Liao H L, et al. Vortex induced vibration performance of separated type box beam bridge based on wind tunnel test [J]. Highway, 2013, 7(7): 294-299. (in Chinese)
- [9] 李春光, 陈政清, 韩阳. 带悬挑人行道板流线型箱梁涡振性能研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 19-25.
- Li C G, Chen Z Q, Han Y. Vortex induced vibration performance of a streamlined box girder with a cantilevered walking slab [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24): 19-25. (in Chinese)
- [10] 孙延国, 廖海黎, 李明水. 基于节段模型试验的悬索桥涡振抑振 [J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(2): 218-223, 264.
- Sun Y G, Liao H L, Li M S. Mitigation measures of vortex-induced vibration of suspension bridge based on section model test [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(2): 218-223, 264. (in Chinese)
- [11] JTG/TD 60-01—2004 公路桥梁抗风设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- JTG/TD 60-01—2004 Wind-resistant design specification for highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [12] 罗竹辉, 魏燕定, 周晓军, 等. 随机激励三维路面空间域模型建模与仿真 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 68-72.
- Luo Z H, Wei Y D, Zhou X J, et al. 3-D random excitation road surface modeling and simulation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 68-72. (in Chinese)
- [13] 鲁植雄, 徐浩, 刘奕贯, 等. 基于分形插值的三维路面重构与分析 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 188-194.
- Lu Z X, Xu H, Liu Y G, et al. Reconstruction and analysis of 3D road based on 3D fractal interpolation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 188-195.
- [14] 吴参, 王维锐, 陈颖, 等. 三维路面谱的仿真建模与验证 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(10): 1935-1938.
- Wu C, Wang W R, Chen Y. Simulation and validation of three-dimensional road surface spectrum [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(10): 1935-1938. (in Chinese)
- [15] 马麟, 韩万水, 吉伯海. 实际交通流作用下的车-桥耦合振动研究 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 80-87.
- Ma L, Han W S, Ji B H, et al. Study of vehicle-bridge coupling vibration under actual traffic flow [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 80-87. (in Chinese)
- [16] 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 S Y, Li Y L, Shen J X, 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)
- [17] 罗东伟, 葛耀君, 虞乐宸, 等. 桥面不平度对桥梁节段模型涡振试验结果的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, 29(2): 193-198.
- Luo D W, Ge Y J, Yu L C, et al. The effect of bridge deck roughness the results of vortex-induced vibration tests of bridge section model [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2013, 29(2): 193-198. (in Chinese)
- [18] 王骑, 廖海黎, 李明水, 等. 流线型箱梁气动外形对桥梁颤振和涡振的影响 [J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 44-52.
- Wang Q, Liao H L, Li M S, et al. Influence of aerodynamic shape of streamline box girder on bridge flutter and vortex-induced vibration [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(8): 44-52. (in Chinese)