

矩形断面主梁涡激振动气动力展向相关性 试验研究

刘志文^{1,2}, 黄来科^{1,3}, 陈政清^{1,2}

(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. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 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: 桥梁主梁结构涡激振动具有三维特性, 主梁涡激力沿展向并不完全同步。在均匀流场条件下针对宽高比为5的矩形断面主梁分别进行了振动状态和静止状态风洞试验, 对其气动力、尾流风速、表面压力展向相关性等进行研究。结果表明: 振动状态矩形断面主梁气动力展向相关系数比静止状态大, 涡振锁定区内升力系数相关系数最大值位于锁定区间上升段而非振幅最大处。振动状态矩形断面主梁尾流区顺风向及竖向脉动风速展向相关系数小于其气动力展向相关系数; 静止状态矩形断面主梁尾流区顺风向脉动风速和竖向脉动风速展向相关系数沿展向距离呈指数衰减, 且不同风速下对应的衰减曲线比较接近。

关键词: 桥梁工程; 涡激振动; 风洞试验; 展向相关性; 矩形断面主梁

中图分类号: U441.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2017)03-0422-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2017.03.010

引言

大跨桥梁结构一般具有频率低和阻尼比小等特性, 在风作用下易发生风致振动现象。涡激振动是一种带有自激性质的限幅振动, 会引起桥梁结构疲劳, 并影响行车舒适性^[1-2], 实践中有多座大桥发生了涡激振动。如英国 Kessock 桥(主跨为 240 m 的斜拉桥)建成后在风速为 23~25 m/s 时发生了振幅为 ±110 mm 的竖向涡激振动^[3]; 英国第二塞文桥(主跨 456 m 的斜拉桥)在通车后发生了竖向涡激振动^[4]; 巴西 Rio-Niteroi 桥(主跨为 300 m 的连续钢箱梁桥)在 15~17 m/s 左右风速下发生了强烈的竖向涡激振动^[5]; 日本东京湾大桥(主跨 240 m 连续钢箱梁桥)在 16~17 m/s 风速下发生了振幅为 ±50 cm 的竖向涡激振动^[6]; 丹麦大海带东桥主桥(主跨为 1624 m 悬索桥)通车前在风速为 4~12 m/s 范围内发生了竖向涡激振动, 最大振幅达 0.35 m^[7]; 俄罗斯伏尔加河大桥在 18 m/s 风速下发生了大幅竖向涡激振动, 最大振幅达 40 cm。国内西堠门大桥在 6~10 m/s 风速下发生了多次竖向涡激振

动现象, 最大振幅达 23.89 cm^[8-9]。与简单钝体断面(如圆柱、方柱等)涡激振动不同, 桥梁结构涡激振动受振型、风场以及主梁断面周边流场等因素影响, 其振动机理较为复杂^[9]。

桥梁主梁结构涡激振动具有三维特性, 即主梁涡激力沿展向并不完全同步。关于结构气动力展向相关性研究早在上个世纪 60 年代即受到关注。早期认为置于均匀流中的静止柱体气动力展向相关系数仅与流场、展向间距及柱体断面形状等有关, 如 Vickery 研究发现置于均匀流和紊流中的静止方柱升力的展向相关长度分别为 5.6D 和 3.3D (D 为方柱边长)^[10]; Blevins 和 Burton 研究给出均匀流中静止圆柱升力展向相关长度为 5.0D (D 为圆柱直径)^[11]。Wilkinson 针对方柱振动响应对柱体表面脉动压力展向相关性影响进行了研究, 研究表明柱体表面压力展向相关性还与结构振动响应幅值有关^[12]。Ehsan 和 Bosch 针对宽高比为 4 的 H 形断面主梁气动力展向相关性进行了研究, 研究表明主梁气动力展向相关性还与结构振动自由度有关^[13]。Ricciardelli 针对宽高比为 5 的矩形断面主梁研究了不同振动形态对气动力展向相关性的影响, 结果表明结构振动形态对气动

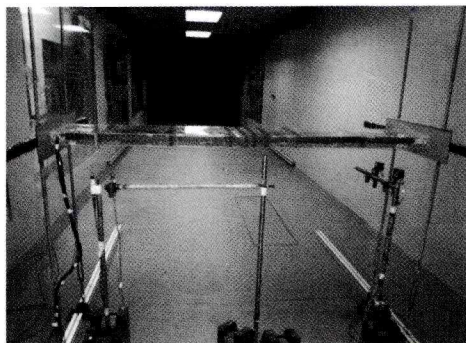
收稿日期: 2016-04-01; 修订日期: 2017-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178181); 湖南省高校创新平台开放基金资助项目(11K015); 湖南大学青年教师成长计划资助项目(2015)

工况	模型系统	试验内容
工况 1	振动状态	位移、表面压力
工况 2		尾流区风速
工况 3	静止状态	表面压力、尾流风速



(a) 测振试验照片
(a) Photo of vibration test



(b) 尾流区眼镜蛇风速仪布置图
(b) Arrangement of cobra probes in the wake

图 2 矩形断面主梁气动力展向相关性试验照片

Fig. 2 Experiment photos of spanwise correlation of aerodynamic forces of the rectangular section girder

2 试验结果

2.1 展向相关系数

矩形断面主梁涡激力展向相关性系数定义如下^[14]

$$R_{C_i}(\delta/D) = \text{Cov}[C_i(\delta/D)] / \text{Var}[C_i] \quad (1)$$

式中 C_i 为气动力参数 ($i=D, L, M$, 分别表示阻力、升力及升力矩系数); δ 为两断面之间展向距离; D 为主梁断面参考尺寸。

根据已有研究成果可知^[14], 均匀流场中静止主梁气动力展向相关性系数可表示为如下形式, 即

$$R_{C_i}(\delta/D) = \exp\left[-c_i \frac{\delta}{D}\right] \quad (2)$$

式中 c_i 为与气动力系数 C_i 相对应的指数衰减系数。静止主梁气动力系数 C_i 的展向相关性大小也可以用相关长度 L_i 来表示^[13], 即

$$L_i/D = \int_0^{\infty} R_{C_i}(\delta/D) d(\delta/D) = 1/c_i \quad (3)$$

对于振动主梁断面, 其气动力是由外部激励力与与振动相关的自激力组成。为了考虑气动力中与主梁运动相关的自激力影响, Ricciardelli 提出了如下相关性公式^[14]

$$R_{C_i}(\delta/D) = (1 - d_i) \exp\left[-c_i \frac{\delta}{D}\right] + d_i \quad (4)$$

式中 d_i ($i=D, L, M$, 分别表示阻力、升力及升力矩系数) 为该指数衰减函数的渐近值, 即为气动参数中完全相关的部分; c_i, d_i 可通过对试验数据进行最小二乘拟合得到。

2.2 矩形断面主梁气动力展向相关系数

2.2.1 振动状态

图 3 所示为振动状态矩形断面主梁涡激振动响应曲线。从图 3 中可以看出, 矩形断面主梁发生了明显的竖向涡激振动现象, 对应涡振锁定区为 3.0~4.36 m/s, 最大无量纲振幅为 $A_y/D = 0.0474$; 试验过程中未发现明显的扭转涡激共振现象。

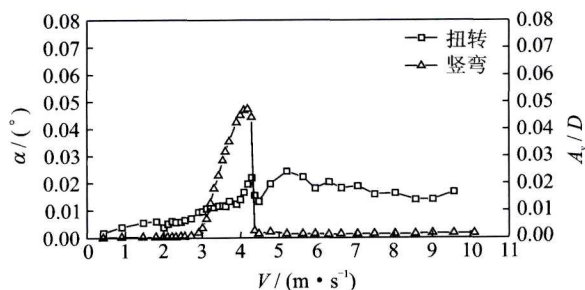


图 3 矩形断面主梁振动响应随风速变化曲线

Fig. 3 Wind-induced vibration responses of the rectangular section girder vs. wind velocities

针对竖向涡激振动时对应气动力展向相关性进行分析, 分别选取 7 个对应风速进行矩形断面主梁气动力展向相关性分析, 如表 3 及图 4 所示。不同风速下气动力沿展向相关系数结果如图 5 所示。需

表 3 矩形断面主梁气动力展向相关性分析风速选取

Tab. 3 Selection of the wind velocities for analysis of correlation of the aerodynamic forces of the rectangular section girder

风速/(m · s ⁻¹)	竖向振幅(y/D)	位置描述
$V_1 = 2.44$	0.0005	涡振锁定区之前
$V_2 = 2.90$	0.0019	涡振锁定区起振点
$V_3 = 3.53$	0.0283	涡振锁定区上升段 1
$V_4 = 3.89$	0.0420	涡振锁定区上升段 2
$V_5 = 4.18$	0.0474	涡振锁定区最大振幅
$V_6 = 4.28$	0.0443	涡振锁定区下降段
$V_7 = 4.36$	0.0026	涡振锁定区之后

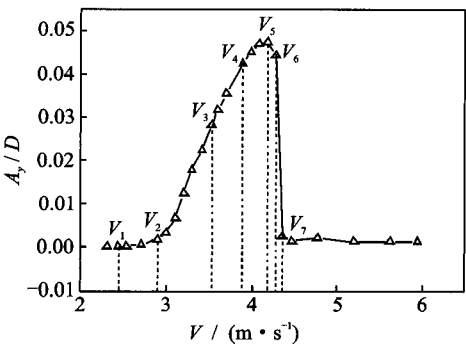
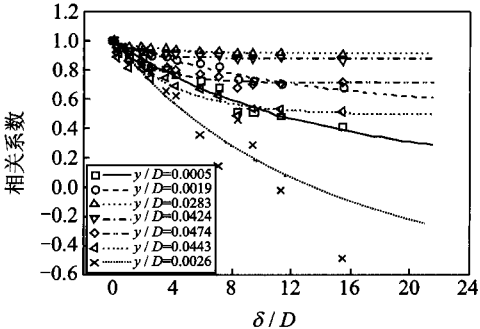


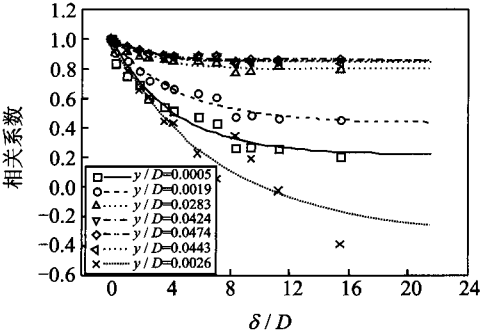
图 4 气动力系数相关性分析风速选取

Fig. 4 Selection of wind velocities for span wise correlation analysis of aerodynamic force coefficients



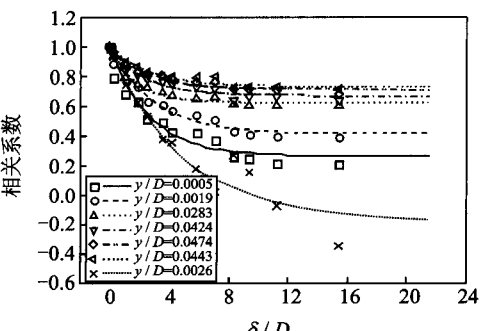
(a) 升力系数展向相关系数

(a) Spanwise correlation coefficients of lift coefficients



(b) 升力矩系数展向相关系数

(b) Spanwise correlation coefficients of pitch coefficients



(c) 阻力系数展向相关系数

(c) Spanwise correlation coefficients of drag coefficients

图 5 振动状态矩形断面主梁气动力展向相关系数

Fig. 5 Spanwise correlation coefficients of aerodynamic forces of the oscillating rectangular section girder

要说明的是由于①号测压断面实测压力数据与其他测压断面测试结果相差较大,故在进行气动力展向相关系数计算时未考虑①号测压断面实测数据,将其他测压断面数据进行不同展向间距组合,共得到 19 组数据。

从图 5(a)中可以看出,当矩形断面主梁“锁定”区起始风速、终止风速对应无量纲振幅分别为 $y/D=0.0005$, $y/D=0.0026$ 时,其升力展向相关系数衰减较快,且锁定区终止风速对应升力展向相关系数衰减最快。在涡振“锁定”区内升力展向相关系数且沿展向在一定范围内衰减,随着展向距离进一步增加而保持不变,趋于某一定值。在涡振“锁定”区上升段升力展向相关系数最大(稳定值为 $R_{c_L}=0.9143$),比振幅最大位置和下降段处对应的升力展向相关系数大,即涡振“锁定”区内升力系数相关系数最大值位于上升段而非振幅最大处。从图 5(b)中可以看出,矩形断面主梁在涡振“锁定”区外,当 $y/D=0.0026$ 和 0.0005 时其升力矩展向相关系数衰减较快,且在锁定区终止风速对应升力矩展向相关系数衰减最快。在涡振“锁定”区上升段升力矩相关性随着竖向振动幅值增大而增加,当 $y/D=0.0474$ 时振动幅值最大,对应升力矩展向相关系数也达到最大。在涡振“锁定”区下降段,升力矩展向相关系数随振幅减小而减小,且衰减要快于上升段。从图 5(c)中可以看出,矩形断面主梁在涡振“锁定”区外,其阻力展向相关系数沿展向变化规律与升力、升力矩展向相关系数沿展向变化规律一致。在涡振“锁定”区内阻力展向相关系数随涡振振幅增大而增大,且阻力系数展向相关系数最大值位于靠近最大涡振振幅下降段处。

根据式(4)对气动力展向相关系数进行拟合,对应气动力沿展向衰减系数 c_i, d_i 如表 4 所示。从表 4 中可以看出,当风速位于涡振“锁定”区之外时,其气动力沿展向相关性系数中完全相关部分均较小,主要表现为气动力展向衰减;在涡振“锁定”区上升段升力相关系数最大,其中升力系数相关性衰减渐近值 $d_L=0.915$,该值的大小反映了升力展向相关系数中完全相关部分。在锁定区由自激力所引起的气动力仅与来流风速、结构几何外形以及结构振动响应位移、速度等有关,对于节段模型这些参数沿展向是不变的,即沿展向是完全相关的,故可认为升力系数展向相关系数中完全相关部分是由结构自激力所引起的,表明该风速下矩形断面柱体气动力绝大

部分为自激力。

表 4 振动状态矩形断面主梁气动力展向相关系数参数拟合

Tab. 4 Fitted parameters values of the spanwise correlation coefficients of the aerodynamic forces of the oscillating rectangular section girder

参数	气动力系数	试验风速						
		V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
c	升力	0.080	0.082	0.413	0.507	0.371	0.243	0.081
	升力矩	0.241	0.216	0.385	0.388	0.380	0.361	0.141
	阻力	0.375	0.337	0.584	0.423	0.410	0.372	0.200
d	升力	0.133	0.526	0.915	0.881	0.706	0.494	-0.523
	升力矩	0.216	0.432	0.798	0.852	0.861	0.842	-0.319
	阻力	0.261	0.415	0.625	0.671	0.716	0.734	-0.178

综上可知,振动状态矩形断面主梁在涡振“锁定”区内气动力展向相关性主要取决于由结构运动所引起的自激力,其相关性较大;涡振“锁定”区内升力系数相关系数最大值位于上升段而非振幅最大位置处;在非涡振“锁定”区内气动力展向相关系数随展向间距增加而减小。

2.2.2 静止状态

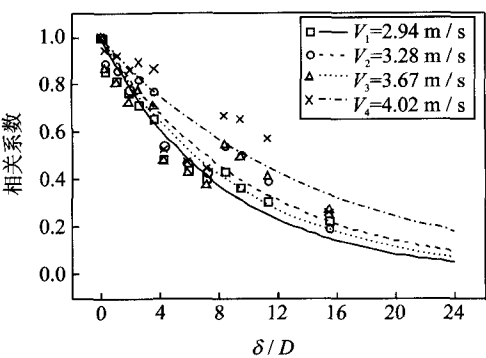
为了对比,针对静止状态矩形断面主梁进行了不同风速下气动力展向相关性试验测试。考虑到矩形断面柱体在静止状态气动力中不包含自激力成分,故采用式(2)对矩形断面主梁气动力相关系数试验结果进行拟合,图 6 分别给出了不同风速下静止矩形断面主梁气动力展向相关系数试验结果与拟合曲线,表 5 分别给出了静止状态矩形断面主梁气动力展向相关系数参数拟合值与展向相关长度。

表 5 静止状态矩形断面主梁气动力展向相关系数参数拟合值

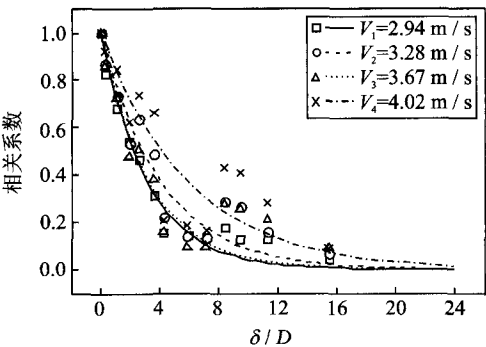
Tab. 5 Fitted parameters values of the spanwise correlation coefficients of the aerodynamic forces of the stationary rectangular section girder

参数	气动力系数	试验风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
		$V_1=2.94$	$V_2=3.28$	$V_3=3.67$	$V_4=4.02$
c	升力	0.123	0.097	0.108	0.070
	升力矩	0.317	0.245	0.303	0.169
	阻力	0.490	0.345	0.526	0.231
L	升力	8.15	10.29	9.23	14.20
	升力矩	3.15	4.08	3.31	5.92
	阻力	2.04	2.90	1.90	4.33

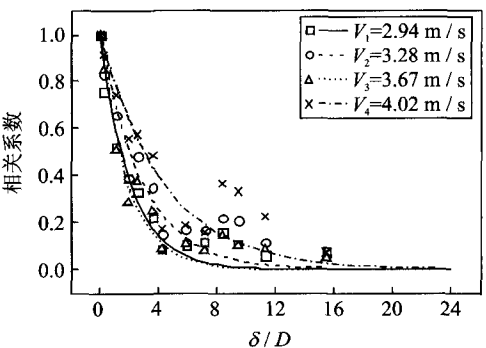
从图 6 中可以看出,静止状态矩形断面主梁气



(a) 升力系数展向相关系数
(a) Spanwise correlation coefficients of lift coefficients



(b) 升力矩系数展向相关系数
(b) Spanwise correlation coefficients of pitch coefficients



(c) 阻力系数展向相关系数
(c) Spanwise correlation coefficients of drag coefficients

图 6 静止状态矩形断面主梁气动力展向相关系数

Fig. 6 Spanwise correlation coefficients of aerodynamic forces of the stationary rectangular section girder

动力展向相关系数随间距增加而减小,不同风速下矩形断面主梁气动力展向相关性存在一定的差异;升力系数展向相关系数衰减较慢,阻力系数展向相关系数衰减最快;与振动状态相比,矩形断面主梁在静止状态气动力展向相关性衰减较快且相关系数较小。从图 5,6 中可以看出,当展向间距比约为 8 时,静止状态和振动状态矩形断面的气动力系数展向相关系数均存在一个突变,可能是由试验模型端板较小,存在端部效应引起的。从表 5 中可以看出,不同

风速下气动力展向相关系数对应的指数衰减系数 c 存在一定的差异,主梁升力沿展向衰减最慢,而阻力沿展向衰减最快。

2.3 矩形断面主梁尾流区风速展向相关系数

2.3.1 振动状态

由于仅有两个眼镜蛇风速仪,故在试验过程中保持风速不变,分别在尾流区沿展向不同位置采用两个眼镜蛇风速仪进行同步测试。具体试验测试风速选择如表6所示。弹性悬挂状态矩形断面柱体尾流区风速展向相关系数随展向间距变化曲线如图7所示。

表6 矩形断面主梁尾流测试风速选取

Tab. 6 Selection of wind velocities for wake measurements of the rectangular section girder

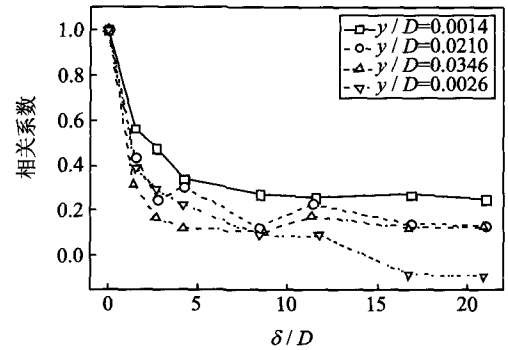
风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	竖向振幅(y/D)	位置描述
$V_1 = 3.06$	0.0014	涡振锁定区起振点
$V_2 = 3.44$	0.0210	涡振锁定区上升段1
$V_3 = 3.81$	0.0346	涡振锁定区上升段2
$V_4 = 4.37$	0.0026	涡振区间下降段

从图7(a)中可以看出,尾流区顺风向脉动风速展向相关系数随着展向距离增加而减小。当风速为 $V_1 = 3.06 \text{ m/s}$ (竖向振幅为 $y/D = 0.0014$) 时,对应涡振锁定区起振点,其顺风向风速相关性最大;在涡振锁定区间上升段($V_2 = 3.44 \text{ m/s}$, $V_3 = 3.81 \text{ m/s}$) 尾流区顺风向脉动风速展向相关系数随竖向振动位移的增大而减小;在锁定区下降段顺风向脉动风速展向相关系数最小。从图7(b)中可以看出,水平横风向脉动风速展向相关系数约为0,其原因是水平横风向脉动风速较小,其展向相关性较差。从图7(c)中可以看出,竖向脉动风速展向相关系数与顺风向脉动风速展向相关系数变化规律相近,均呈指数衰减趋势。

2.3.2 静止状态

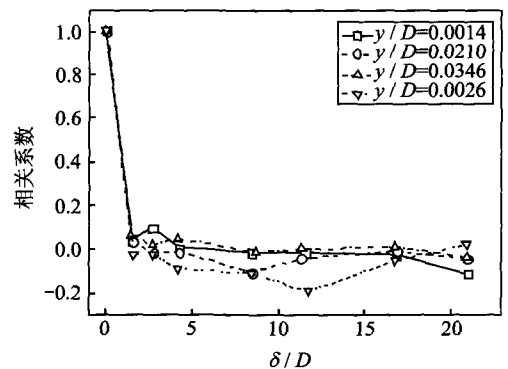
为了对比模型振动幅值对矩形断面主梁尾流区脉动风速展向相关性的影响,针对静止状态矩形断面主梁进行尾流区脉动风速展向相关性测试。试验测试风速与表6中风速接近,静止状态矩形断面主梁尾流区风速展向相关系数随展向间距变化曲线如图8所示。

从图8(a),(c)中可以看出,静止矩形断面主梁尾流区顺风向脉动风速和竖向脉动风速展向相关系



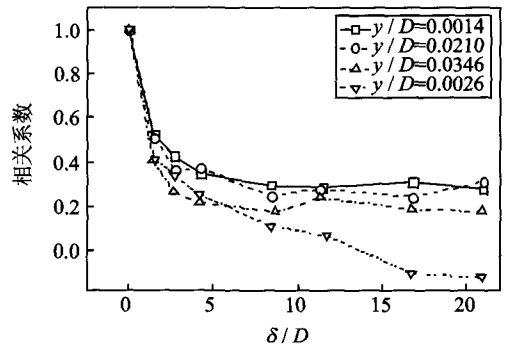
(a) 顺风向脉动风速 $u(t)$ 展向相关系数

(a) Spanwise correlation coefficients of fluctuating wind velocity along the wind



(b) 水平横风向脉动风速 $v(t)$ 展向相关系数

(b) Spanwise correlation coefficients of fluctuating wind velocity in horizontal direction



(c) 竖向脉动风速 $w(t)$ 展向相关系数

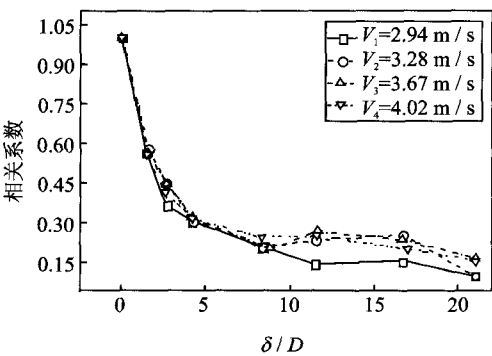
(c) Spanwise correlation coefficients of fluctuating wind velocity in vertical direction

图7 振动状态矩形断面主梁尾流区风速展向相关系数

Fig. 7 Spanwise correlation of wind turbulence in the wake of the oscillating rectangular section girder

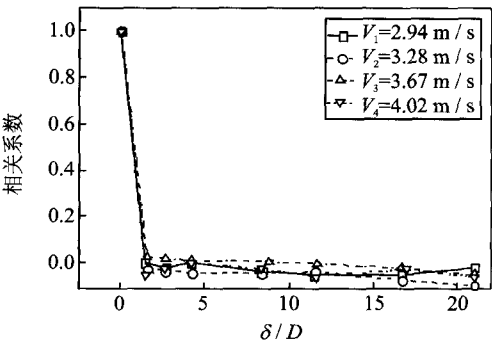
数沿展向距离整体呈指数衰减,且不同风速下对应的衰减曲线比较接近,表明静止状态下试验风速范围内矩形断面主梁尾流区顺风向脉动风速和竖向脉动风速展向相关系数沿展向变化规律与来流风速关系不大。从图8(b)中可以看出,水平向脉动风速展向相关系数在0附近波动,即水平向脉动风速展向

相关较差。



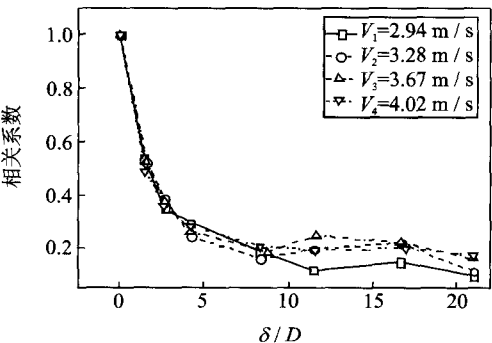
(a) 顺风向脉动风速 $u(t)$ 展向相关系数

(a) Spanwise correlation coefficients of fluctuating wind velocity along the wind



(b) 水平横风向脉动风速 $v(t)$ 展向相关系数

(b) Spanwise correlation coefficients of fluctuating wind velocity in horizontal direction



(c) 竖向脉动风速 $w(t)$ 展向相关系数

(c) Spanwise correlation coefficients of fluctuating wind velocity in vertical direction

图 8 静止状态矩形断面主梁尾流区风速展向相关系数

Fig. 8 Spanwise correlation of wind turbulence in the wake of the stationary rectangular section girder

2.4 矩形断面主梁表面压力分布

2.4.1 矩形断面主梁表面压力分布

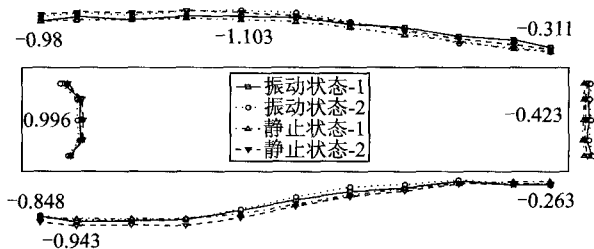
分别对振动状态及静止状态矩形断面主梁表面压力分布进行分析。选择涡振起振点风速和“锁定”区上升段风速,如表 7 所示。图 9 所示为矩形断面主梁 5# 截面(截面位置如图 1(a)所示)表面压力分

布均值及均方差分布,图 9 中仅给出风速为 $V=3.53\text{ m/s}$ (振动状态-2)对应的压力数值,其余 3 个状态数值未标注。

表 7 矩形断面主梁表面压力分析风速选择

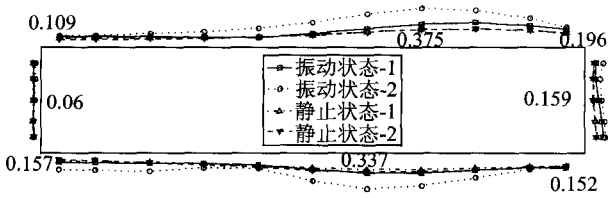
Tab. 7 Selection of wind velocities for analysis of pressures on surface of the rectangular section girder

状态	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	位置描述	雷诺数 Re
振动状态	2.90	振动状态-1 (涡振起振点)	1.16×10^4
	3.53	振动状态-2 (锁定区上升段)	1.41×10^4
静止状态	2.94	静止状态-1	1.18×10^4
	3.67	静止状态-2	1.47×10^4



(a) 压力系数均值

(a) Mean values of pressure coefficients



(b) 压力系数根方差

(b) RMS values of pressure coefficients

图 9 矩形断面主梁模型表面压力系数分布

Fig. 9 Pressure coefficients on rectangular section girder surfaces

从图 9(a)中可以看出,振动状态和静止状态下不同风速作用下矩形断面主梁表面压力系数均值分布接近;且上、下表面上游侧压力系数均值较大,下游侧压力系数均值较小,压力系数均为负(即为吸力);迎风侧压力系数为正(即为压力),背风侧压力系数为负(即为吸力)。从图 9(b)中可以看出,振动状态涡振“锁定”区上升区段对应模型上下侧表面在下游位置压力脉动根方差较大,明显大于振动状态涡振起振点和静止状态对应的脉动压力跟方差,表明涡振振幅较大时,其上下侧表面下游位置以及下游侧面的脉动压力根方差较大。

分离再附点可以由压力系数均值 C_p 以及压力

系数根方差 C'_p 体现,钝体断面流场再附位置一般介于 C_p 的最小值以及 C'_p 的最大值之间^[18]。考虑到风攻角为 0 度时矩形断面上、下侧流场总体对称,故仅对模型上表面的压力系数 C_p 最小值及 C'_p 最大值对应的位置进行分析。表 8 所示为不同振动状态不同试验风速下矩形断面主梁上表面分离流再附点对应的位置。从表 8 中可以看出,在静止或振动状态时,矩形断面主梁周围流场分离流再附点位置距离上游迎风侧边缘约为 $(3.0\sim4.0)D$,与文献^[18]中的 $4.375D$ 较为接近。

表 8 矩形断面主梁上表面再附点位置

Tab. 8 Reattachment point positions on the upper side of the rectangular section girder

状态	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	位置描述	再附点位置(x/D)	
			C_p 最小值	C'_p 最大值
振动状态	2.90	振动状态-1 (涡振起振点)	3.5	3.5
	3.53	振动状态-2 (锁定区上升段)	3.5	4.0
静止状态	2.94	静止状态-1	3.0	3.5
	3.67	静止状态-2	3.5	3.5

注: x 为距离矩形断面迎风侧边缘的距离, D 为矩形断面高度。

2.4.2 上表面及断面整体升力展向相关系数

选取表 7 所对应的风速对模型上表面、断面整体单位长升力沿展向相关性进行分析。模型单位长度升力计算公式如下:

$$L_U = - \int p_U(x,y)dx \tag{5}$$

$$L_L = \int p_L(x,y)dy \tag{6}$$

$$L = L_U + L_L \tag{7}$$

式中 $p_U(x,y)$, $p_L(x,y)$ 分别为矩形断面主梁某一排测压断面上、下表面测点 (x,y) 的压力值; L , L_U , L_L 分别表示矩形断面柱体上、下表面以及断面整体单位长度升力。图 10 所示为不同风速下模型上表面及模型整个断面升力展向相关系数。

从图 10 中可以看出,振动状态风速为 $V=2.90\text{ m/s}$ 时,矩形断面柱体上表面升力与模型整个断面升力沿展向相关系数较为接近;风速为 $V=3.53\text{ m/s}$ 时,整个断面升力展向相关系数要大于上表面升力展向相关系数。静止状态风速分别为 $V=2.94\text{ m/s}$ 及 $V=3.67\text{ m/s}$ 时,模型整个断面升力展向相关系数均小于上表面升力展向相关系数。

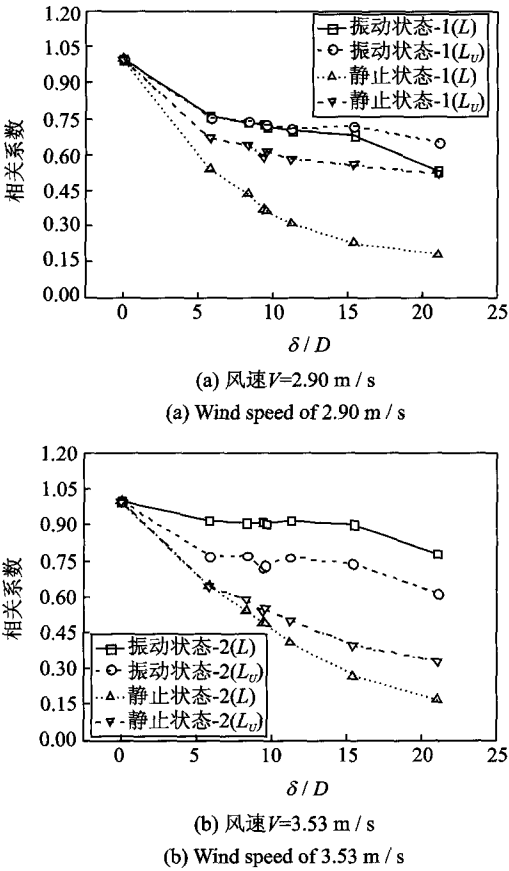


图 10 上表面及断面整体升力展向相关系数

Fig. 10 Spanwise correlation coefficients of the lift of the upper side and the global section

3 结 论

针对宽高比为 5 的矩形断面主梁在均匀流场条件下分别进行了振动状态和静止状态下气动力、尾流区脉动风速及表面压力展向相关性研究,得到如下主要研究结论:

- (1)矩形断面主梁在振动状态下气动力展向相关系数比静止状态下气动力展向相关系数大;涡振锁定区内气动力展向相关系数主要取决于结构振动所引起的自激力,比锁定区外气动力展向相关系数大;涡振锁定区内升力系数展向相关系数最大值位于锁定区间上升段而非振幅最大处。
- (2)振动状态下矩形断面主梁尾流区顺风向及竖向脉动风速展向相关系数小于其气动力展向相关性;静止状态下矩形断面主梁尾流区顺风向脉动风速和竖向脉动风速展向相关系数沿展向距离整体呈指数衰减,且不同风速下对应的衰减曲线比较接近。
- (3)振动状态及静止状态不同风速下矩形断面

主梁表面压力系数均值分布接近;振幅较大时其上下侧表面下游位置以及下游侧脉动压力根方差较大;静止及振动状态时矩形断面主梁周围流场分离流再附点位置距离上游迎风侧边缘约为 $(3.0 \sim 4.0)D$ 。

参考文献:

- [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 Communication Press, 2005.
- [2] 陈政清.工程结构的风致振动、稳定与控制[M].北京:科学出版社,2013.
CHEN Zheng-qing. Wind-Induced Vibration, Stability and Control of Engineering Structures[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2013.
- [3] OWEN J S, VANN A M, DAVIES J P, et al. The prototype testing of Kessock Bridge: Response to vortex shedding[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 60: 91—108.
- [4] MACDONALD J H G, IRWIN P A, FLETCHER M S. Vortex-induced vibration of second severn crossing cable-stayed bridge full-scale and wind tunnel measurements[J]. Structures & Buildings, 2002, 152(2): 123—134.
- [5] BATTISTA Ronaldo C, PFEIL Michele S. Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niteroi Bridge by dynamic control devices[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84: 273—288.
- [6] FUJINO Yozo. Vibration, control and monitoring of long-span bridges-recent research, developments and practice in Japan[J]. Journal of Construction Steel Research, 2002, 58: 71—97.
- [7] 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: 95—129.
- [8] LI Hui, LAIMA Shujin, ZHANG Qiangqiang, et al. Filed monitoring and vibration of vortex-induced vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 124: 54—67.
- [9] LI Hui, LAIMA Shujin, OU Jingping, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements[J]. Engineering Structures, 2011, 33: 1894—1907.
- [10] VICKERY B J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross section in a smooth and in a turbulent flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1966, 25(3): 481—493.
- [11] BLEVINS R D, BURTON T E. Fluid forces induced by vortex shedding[J]. Journal of Fluids Engineering, 1976, 19-26, Paper No. 75-FE-10.
- [12] WILKINSON R H. Fluctuating pressures on an oscillating square prism. Part II. Spanwise correlation and loading[J]. Aero. Quarterly, 1981, 32: 111—125.
- [13] EHSAN F, BOSCH R H. Modeling of the effect of the spanwise coherence of aerodynamic forces on full-bridge response, wind and seismic effects. NIST SP 760[C]. Proceeding of the 20th Joint Meeting of the US-Japan Cooperative Program in Natural Resources panel on Wind and Seismic Effects. Washington: National Institute of Standards and Technology, 1989: 3—17.
- [14] RICCIARDELLI Francesco. Effects of the vibration regime on the spanwise correlation of the aerodynamic forces on a 5 : 1 rectangular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 98(4-5): 215—225.
- [15] NAGAO F, UTSUNOMIYA H, NODA M, et al. Basic study on spatial correlations of fluctuating lifts acting on plates[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2003, 91: 1349—1361.
- [16] 鲜 荣.大跨度桥梁沿跨向主梁涡激振动研究[D].成都:西南交通大学,2008.
XIAN Rong. Research on vortex-induced vibration of the main deck of large-span bridge in spanwise[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [17] 张冠华,赵 林,葛耀君.流线型闭口箱梁断面风荷载空间相关性试验研究[J].振动与冲击,2012,31(2): 76—80.
ZHANG Guan-hua, ZHAO Lin, GE Yao-jun. Spatial correlation of wind loads for cross-section of a streamlined closed box girder[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 76—80.
- [18] MATSUMOTO Masaru, HIROMICHI Shirato, KENJI Araki, et al. Spanwise coherence characteristics of surface pressure field on 2-D bluff bodies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 155—163.

Experimental study on spanwise correlation of aerodynamic forces of VIV of the rectangular section girder

LIU Zhi-wen^{1,2}, HUANG Lai-ke^{1,3}, CHEN Zheng-qing^{1,2}

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

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

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

Abstract: The vortex-induced vibration of the bridge deck is of three-dimensional characteristics, and the vortex-exciting forces on the bridge deck are not completely synchronous in spanwise direction. The wind tunnel tests of the stationary and oscillating rectangular section girder with aspect ratio of 5 in smooth flow were conducted to investigate the spanwise correlation coefficients of the aerodynamic forces, the turbulent wind in the wake and pressures on the rectangular section girder. The research results show that the spanwise correlation coefficients of the aerodynamic forces of the oscillating rectangular cylinder are larger than that of the stationary rectangular cylinder. The maximum spanwise correlation coefficients of the lift coefficients of the rectangular cylinder are located in the ascending side of the lock-in region rather than the maximum amplitude. The spanwise correlation coefficients of the longitudinal and vertical turbulent wind in the wake of the oscillating rectangular cylinder are less than that of the aerodynamic forces of the cylinder. The spanwise correlation coefficients of the longitudinal and vertical turbulent in the wake of the stationary rectangular cylinder decrease exponentially with the increasing of the distance in spanwise direction. And the corresponding decay curves for different wind speeds are similar to each other.

Key words: bridge engineering; vortex-induced vibration(VIV); wind tunnel tests; spanwise correlation; rectangular section girder

作者简介: 刘志文(1975—),男,副教授,博士。电话:(0731)88821424; E-mail: zhiwenliu@hnu.edu.cn