

文章编号:1001-4888(2022)06-0889-11

双幅钝体钢箱梁间距对涡振性能 的影响及其机理研究^{*}

毛禹¹, 李春光¹, 韩艳¹, 王雷², 梁爱鸿¹, 颜虎斌¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 广东省交通规划设计研究院, 广东广州 510000)

摘要: 为研究双幅钝体钢箱梁桥梁涡激振动性能及其振动机理,进行了节段模型风洞试验。通过测振测压试验获取了模型涡振位移响应和表面各测点压力时程数据,并对比分析了间距从 0.5m 到 3.0m 每 0.5m 变化下箱梁表面测点脉动压力系数均值、均方差以及局部气动力与总体气动力的相关性和贡献系数。研究表明:节段模型在 $\pm 3^\circ$ 、 0° 攻角均发生竖弯涡激振动, -3° 攻角为最不利攻角。间距的变化引起箱梁表面及梁底的脉动压力差异化,间距超过 2m 时变化显著;双幅钝体钢箱梁间距存在一个涡振性能最优值,间距为 1.5m 时,双幅箱梁涡激振动虽未被彻底抑制,但涡振幅值大幅降低,在此间距下,上下游箱梁在桥面区域以及梁底区域表面压力脉动大幅削弱,降低了局部气动力与总体气动力的相关性,从而削弱了涡振幅值。

关键词: 涡振性能; 风洞试验; 双幅钢箱梁; 间距; 表面压力

中图分类号: U448.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-204

0 引言

近年来,我国交通量激增,为满足跨江跨河区域的通行需求,上下行分离式桥梁逐渐受到设计师的青睐。其中大跨度双幅钢箱梁随着跨度的不断增大,结构趋向于低阻尼、轻柔化,对风的敏感性显著增加。在来流风的作用下,上下游箱梁出现的气动干扰效应不容忽视。随着桥梁建设需求的日益增长,认识双幅桥面桥梁的气动干扰规律,确定双幅桥面桥梁之间的气动安全间距尤为重要。

在双幅桥梁气动干扰效应方面,目前国内外学者的研究大多关注的是近流线型断面双幅箱梁。刘志文等^[1]通过风洞试验研究了双幅流线型断面间的气动干扰效应,结果表明:双幅箱梁的净间距以及不同阻尼比对双箱梁涡振风速区间没有影响,但对其振幅幅值有所影响;随着双箱梁断面净间距的增加,气动干扰效应逐渐减弱。周奇等^[2]研究了双幅箱梁桥在 0° 、 $+3^\circ$ 和 -3° 风攻角下双箱梁之间的气动干扰效应,发现双幅箱梁桥不同风攻角对双箱梁之间的气动干扰效应影响有明显差异,气动干扰效应由强到弱分别为 $+3^\circ$ 、 0° 、 -3° 风攻角。Seo 等^[3]通过现场实测和风洞试验结合的方式对双幅斜拉桥进行了研究,结果表明:双幅间的气动干扰效应放大了下游桥面的涡激振动,且传统的气动措施对抑制下游主梁涡振效果不明显,但结构阻尼的逐渐增大对涡振的抑制作用明显。刘志文等^[4]通过风洞试验与数值模拟对比研究了 3 种典型断面下的气动干扰效应,发现随间距比 D/B 的增大,上游箱梁的阻力系数与单幅箱梁类似,而升力系数和升力矩系数气动干扰因子均表现为先增大后减小;下游箱梁的阻力系数随

^{*} 收稿日期: 2021-09-05; 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51822803); 国家自然科学基金项目(51978087); 长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金项目(18ZDXK09)

通信作者: 韩艳(1979—),女,教授,博士。从事大跨度桥梁风致振动控制、风-车-桥耦合振动与行车安全性研究。

Email: ce_hanyan@163.com

间距增加而增加,升力及升力矩系数气动干扰因子明显大于上游箱梁的对应结果。Park 等^[5,6]对双幅斜拉桥进行了风洞试验以及 PIV 试验,结果表明:间距是双幅气动干扰的重要影响因素,且间距比在 5~7 时双幅桥气动干扰最为严重,间距比超过 7.4,气动干扰效应逐渐消失。刘小兵等^[7]通过节段模型风洞测压试验对并列双扁平箱梁和钝体箱梁的 2 种断面进行了研究,结果表明:2 种断面下,气动干扰效应对下游箱梁的影响远大于上游箱梁,且在钝体断面间距比达到 6 时,气动干扰效应仍不可忽略。易征^[8]通过数值模拟的方式对连续钢构桥进行研究,结果表明:下游箱梁受到上游箱梁尾流干扰的影响明显不可忽略;上下游箱梁是否等高对下游箱梁三分力系数影响较大。Alvarez 等^[9]通过数值模拟的方法识别双箱梁断面的基本流动特征,研究平均和脉动压力系数分布,并与试验结果进行了对比和验证。林震云^[10]通过风洞试验以及数值模拟对相邻两桥进行研究,结果表明:上游桥对下游桥的三分力系数影响明显,使得下游桥的阻力系数增大,升力系数降低,升力系数绝对值提高。谭彪等^[11]通过节段模型风洞试验对叠合梁平行双幅桥进行研究,结果表明:双幅桥与单幅桥相比,其气动干扰效应增大了双幅桥的最大涡振振幅和风速锁定区间,且上下游箱梁涡振由于受到间距和上游箱梁振动的影响而存在明显相位差。马凯等^[12]通过对双幅矩形断面进行节段模型测振测压试验以及数值模拟,发现当双幅矩形断面间距比达到 7 时仍存在气动干扰效应;数值模拟结果表明在一个周期内上游断面下侧及下游断面上侧区域流动变化明显。刘小兵等^[13]对不同数量圆柱进行风洞测压试验,结果表明:间距比为 3.5~4 时,前两个圆柱的阻力系数和脉动升力系数会增大;下游圆柱数量的增多对第一个圆柱的气动干扰效应的影响较小。

综合以上研究可以看出,关于近流线型双幅箱梁断面的气动干扰效应,国内外学者已取得了丰富的成果^[14-17],但在钝体双幅箱梁断面的气动干扰研究方面还有待深入。本文依托实际工程,针对双幅钝体箱梁桥的涡振性能及气动干扰效应,通过节段模型试验测试了间距对双幅钝体箱梁桥的气动干扰效应,并通过测振测压探究了双幅箱梁间距对涡振的影响机理。

1 工程概况

以国内某三跨钝体连续钢箱梁桥为背景研究双幅钝体箱梁的气动干扰效应。该桥跨布置为 123m+178m+123m,主梁采用双幅单箱钢箱梁,变截面主梁梁高由支座处的 8.5m 连续变化至跨中 4.5m,双幅间距 0.5m,桥型立面布置如图 1 所示,跨中主梁标准断面如图 2 所示。因主梁变截面主要在靠近墩身附件的 1/4 跨范围内,中间 1/2 跨内主梁变化较小,在方案设计阶段,暂不考虑主梁截面变化的影响,以跨中截面为依据测试主梁间距对其涡振性能的影响。

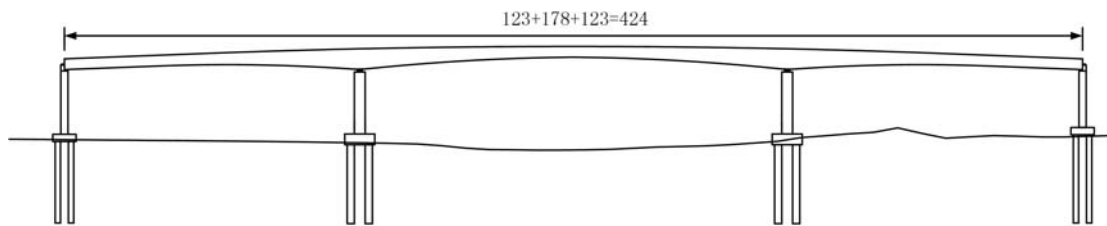


图 1 桥型立面布置图(单位:m)

Fig. 1 Elevation layout of bridge (unit: m)

2 试验结果与讨论

2.1 试验布置

主梁节段模型风洞试验在长沙理工大学风洞实验室完成,双幅箱梁节段模型风洞试验布置如图 3 所示。主梁节段模型缩尺比为 1:40,模型长度取 $L=1.5\text{m}$,主梁宽度为 $B=0.56\text{m}$,故模型长宽比约 2.68,节段模型主要试验参数见表 1。模型芯梁为两根不锈钢空心矩形管,保证了主梁刚度;外衣及栏杆均采用优质材料雕刻制作而成,以保证其几何外形相似。采用传统的 8 根弹簧悬挂方式来形成单个节段模型双自由度振动系统,双节段进行组合悬挂时,将上游节段模型端轴进行延伸处理,以满足质量

性能的影响。

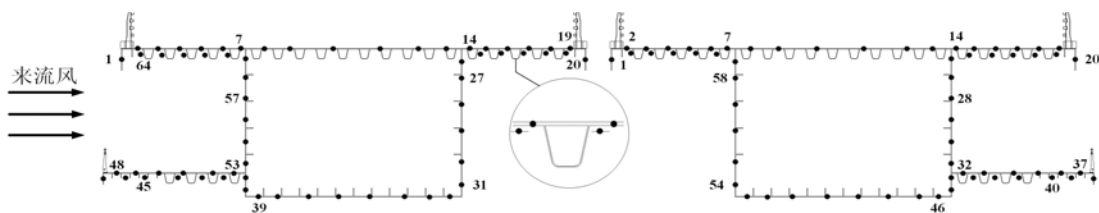


图 4 断面测压点布置

Fig. 4 Layout of pressure measuring points of main beam section

2.2 测振试验结果

图 5 为 -3° 攻角、6 个不同间距工况下双幅箱梁的竖弯涡振位移响应结果,横坐标采用折减风速 $U/(fB)$ 。为了方便对照并与相关文献进行对比,将各个间距值换算为间距比 (D/B , D 为双幅主梁间距, B 为单幅主梁宽度),图 5(a) 为上游箱梁测振试验结果,当间距比从 0.038~0.115 增加时,上游箱梁最大振幅呈现下降趋势;从间距比 0.115 开始,随着间距比的增大,上游箱梁最大振幅不断增大;间距比为 0.231 时,最大振幅达到 0.163m,超出规范限值 257%。由图 5(b) 可以看出,不同间距下下游箱梁与上游箱梁具有相同的随间距变化的振幅规律,但下游箱梁的振幅明显大过上游箱梁,而且在间距比为 0.038 工况下,下游箱梁出现了 2 个明显的涡振锁定区间。上下游箱梁涡振锁定区间为 6.5~11.5,所有间距下上下游箱梁均超过了规范限值^[18],相比较下,间距比为 0.115 工况的涡振振幅最小。

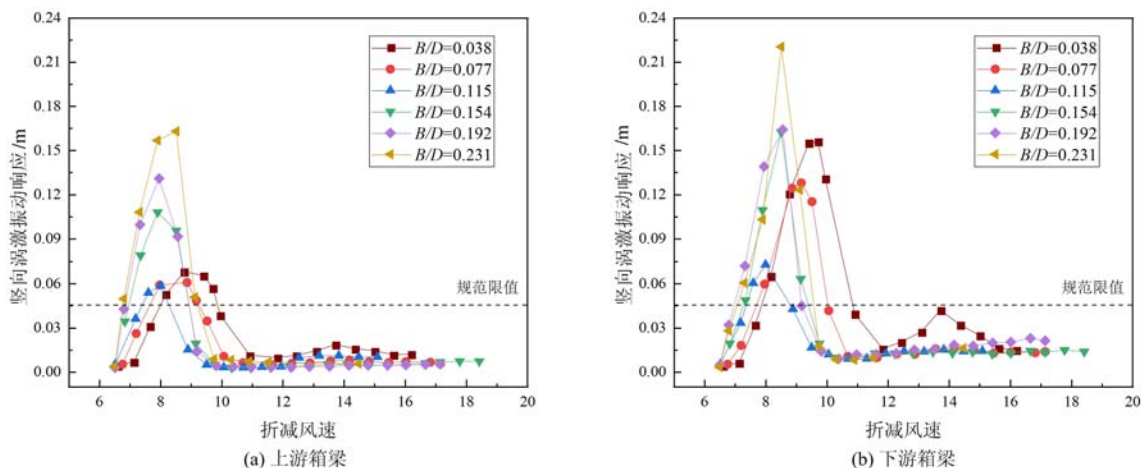


图 5 测振试验结果

Fig. 5 Results of vibration test

3 节段模型测压试验分析

测压试验是分析涡激振动发生机理的重要手段,主梁断面气体绕流状态及断面所受气动力可以通过测量主梁表面压力来获取。由不同间距下的断面气动分布状况,可以分析到不同工况条件下的气动力演变特性,从而可探究其主梁断面的涡激振动演变机理。

测点 i 风压系数定义^[19]为

$$C_{pi}(t) = \frac{p_i(t) - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (1)$$

式中: $p_i(t)$ 为 i 测点风压时程; U_0 为相应工况下来流平均风速; $C_{pi}(t)$ 为测点 i 风压系数时程; p_0 为参考点静压。

3.1 压力系数均值

箱梁表面各测点压力系数均值可以反映气流在箱梁表面的分离和再附情况。气流的加速和减速会

产生顺压梯度和逆压梯度,气流的转换和分离常在逆压梯度区发生,而气流分离容易引起规律性的涡旋脱落,从而诱发主梁涡激振动^[20]。

图6为双幅箱梁各间距下的风压系数均值变化曲线。由图6(a)可知,上游箱梁各间距下的风压系数均值分布趋势大致相同;上游箱梁迎风侧表面的平均风压系数从测点1的正值突变到测点2的负值,说明来流在遇到栏杆时发生了明显的分离。分离形成的旋涡在桥面再附点之前表现为负压区(测点2~17)。从上表面中部(测点9)开始,风压系数绝对值逐渐减小,说明上表面前段的吸附强度大于上表面后段的吸附强度。随后桥面后部(测点18~19)的压力系数均值均为正值,表明气流分离后在模型上表面后部发生再附;测点19与测点20由正突变为负,说明气流在栏杆处再次发生分离。在箱梁下表面(测点46~48)同样出现了正负突变点,意味着气流在人行道挑臂前段发生了分离,因此箱梁底板处(测点32~46)基本处于水平稳定负压区,箱梁底面没有出现气流再附情况。在间距比为0.115时,桥面上(测点2~19)各测点风压系数均值最先变为正值,表明在间距比的影响下气流最先在桥面上发生再附,其他间距下的气流在桥面后部均出现再附,再附现象不明显。箱梁底板处(测点32~39)风压系数均值出现了明显差异,间距比为0.115的风压系数均值的绝对值最小,当间距比从0.115开始逐渐增大,或者逐渐减少时,箱梁底板处的风压系数均值的绝对值均逐渐增大,且间距比为0.231时绝对值最大。

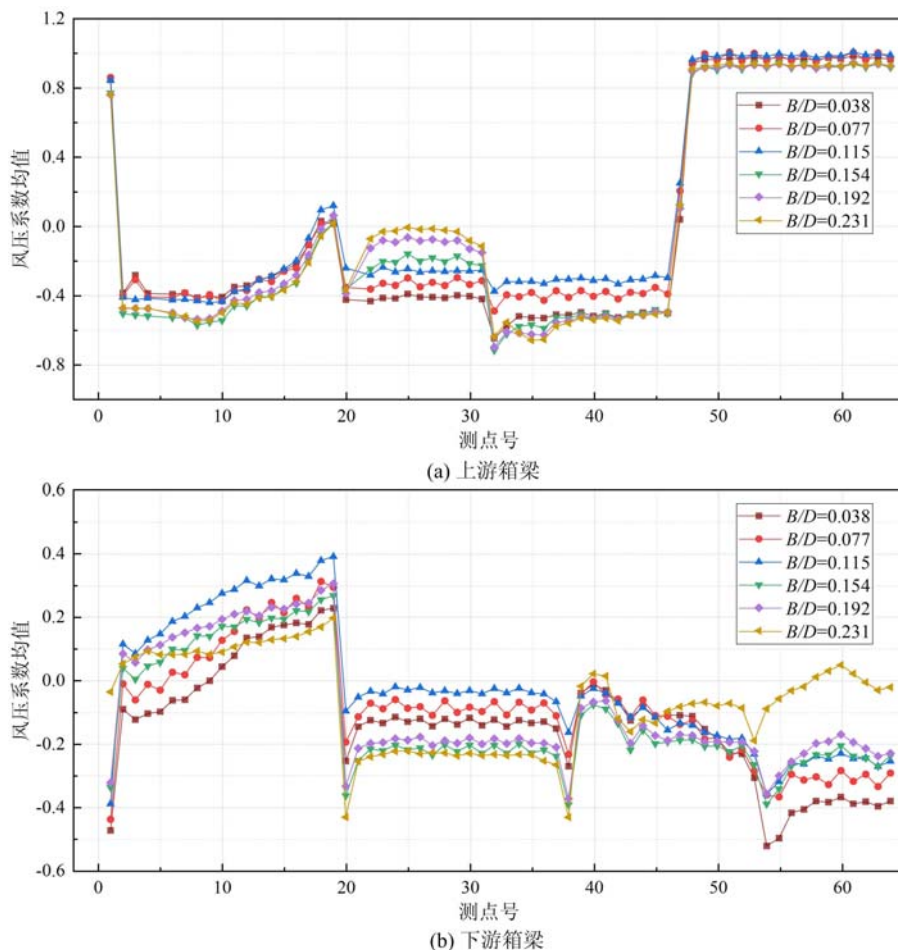


图6 不同间距主梁表面风压系数均值

Fig. 6 The mean of wind pressure coefficient on main girder surface with different spacing

由图6(b)可知,在桥面处(测点2~19)均发生气流的再附现象,不同间距下的气流再附点不同。间距比为0.038时,气流再附点在桥面中部位置(测点9);间距比为0.077的气流再附点发生在桥面上游(测点5~6)位置;其他间距下的气流再附点发生在桥面栏杆处。测点19与测点20由正突变为负,说明气流在栏杆处再次发生分离。下游箱梁除桥面的其他位置基本为负压区,下游箱梁下桥面(测点21~25)风压系数均值的绝对值呈现规律性,间距比为0.115的绝对值最小,间距比为0.231的绝对值最

大。

由上下游箱梁表面风压系数均值分布可得,上下游箱梁间距的不同,会使得两箱梁之间形成气流差异,从而使上下游箱梁相互影响。上游箱梁分离再附的气流对下游箱梁产生了显著的气动干扰,促进了下游箱梁涡振。随着间距的增大,下游箱梁的桥面再附点逐渐提前,下游箱梁对上游箱梁的影响由强变弱,使得上游箱梁下桥面(测点 21~25)风压系数均值的绝对值依次递增。

3.2 压力系数均方差

在涡激振动中,主梁表面压力脉动主要提供大跨度桥梁涡激振动中的动力部分。而脉动压力的强弱可以用风压系数根方差来表示:

$$C_{p, rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (C_p(t_i) - C_{p, mean})^2 / (m-1)} \quad (2)$$

式中: $C_p(t_i)$ 为风压系数; $C_{p, mean}$ 为风压系数均值; $C_{p, rms}$ 为风压系数均方差。

图 7 所示为不同间距下主梁表面的风压系数均方差变化曲线。由图 7(a)可知,风压系数均方差较大的区域为上游箱梁梁底(测点 30~35)区域,表明在上游箱梁梁底附近出现了明显的旋涡脱落,从而引起上游箱梁发生涡振。且当间距比 $D/B \geq 0.154$ 时,上游箱梁上表面(测点 2~19)发生了较大的压力脉动,因此激起主梁涡激振动的因素是上游箱梁梁底和上表面同时作用。当间距比为 0.077、0.115 时,上游箱梁梁底的风压系数均方差较小,所以测振试验响应中,其间距下的涡振振幅较小;当间距比 $D/B \geq 0.154$,上游箱梁梁底的风压系数均方差逐渐增大,在间距比为 0.231 时,上游箱梁梁底风压系数

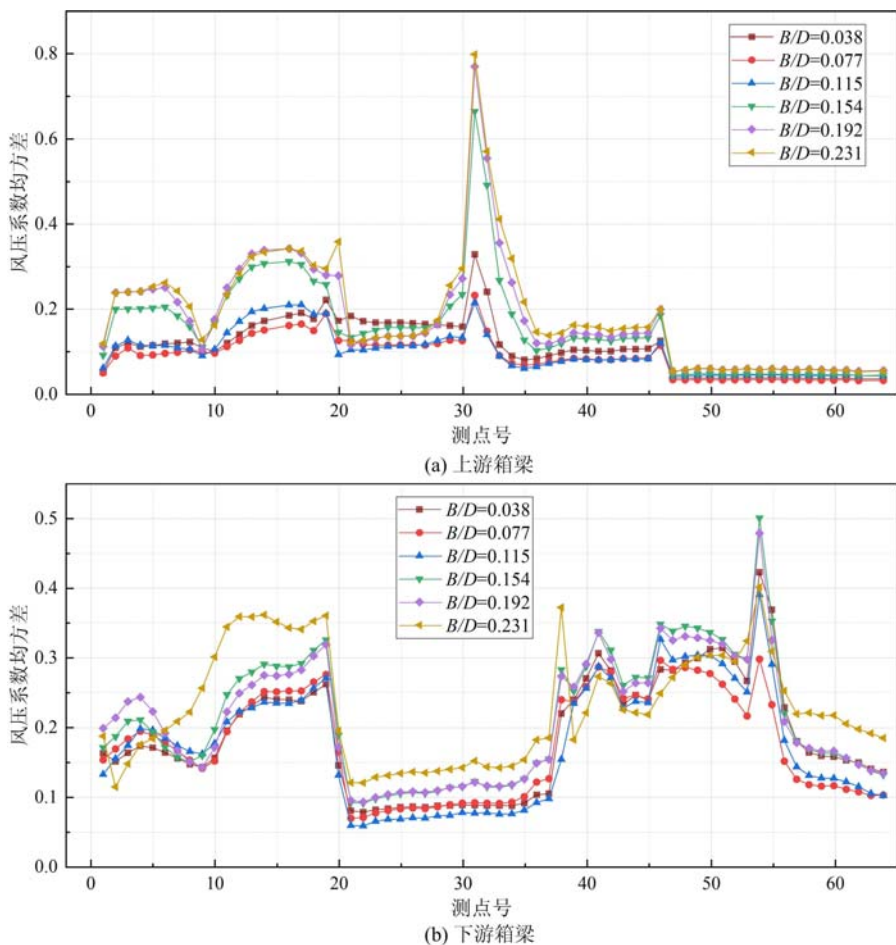


图 7 不同间距主梁表面风压系数均方差

Fig. 7 Mean square deviation of wind pressure coefficient on main girder surface with different spacing

均方差达到最大,与测振位移响应的结果一致。由图 7(b)可知,由于气流在尖角处及栏杆会发生分离,使得各个间距下下游箱梁的压力系数均方差都在测点 19、测点 54 发生了突变。下游箱梁表面风压系

数均方差较大的区域为桥面的上表面(测点 2~19)以及梁底表面(测点 38~54),说明该区域是引起下游箱梁发生涡激振动的主要区域。当间距比为 0.231 时,下游箱梁表面风压系数均方差最大。

综上所述,间距的变化,使得上下游箱梁表面风压系数均方差呈现差异,间距比大于 0.154 时,上下游箱梁的相互影响减小,其涡振位移响应均增大;间距比小于 0.115 时,上下游箱梁间的影响增大,下游箱梁对上游箱梁涡振起到抑制作用,上游箱梁对下游箱梁的涡振位移响应有增大作用。

3.3 局部气动力与总体气动力的相关性

各测点压力与其在主梁断面表面代表的面积的乘积即为局部气动力,将模型表面所有测压点局部气动力进行周向矢量积分,可获得整个测压断面总体气动力。相关系数反映了局部气动力与总体气动力的相关程度,相关系数^[21]定义为

$$\rho_i = \frac{\text{cov}(F_{\text{aero}}(t), p_i(t))}{D(F_{\text{aero}}(t)) D(p_i(t))} \quad (3)$$

式中: $p_i(t)$ 为某测点处的局部气动力; $F_{\text{aero}}(t)$ 为断面总体气动力; $\text{cov}(F_{\text{aero}}(t), p_i(t))$ 为总体气动力与局部气动力的协方差; $D(F_{\text{aero}}(t))$ 、 $D(p_i(t))$ 分别为总体气动力、局部气动力的标准差; 相关系数 ρ_i 的取值范围为 $[-1, 1]$, 其正负表示两者相关的方向, 绝对值的大小表示两者相关程度的强弱。

图 8 所示为不同间距主梁表面风压相关系数曲线。由图 8(a) 可知, 上游箱梁桥面前部分呈现正相关, 后部分呈现负相关, 随着间距的增大, 前部分各测点的相关性区域在变大, 而后部分只有间距比为 0.115 的相关性最小。因为上下游箱梁的相互影响, 使得桥面下表面(测点 21~25)呈现出差异性的结

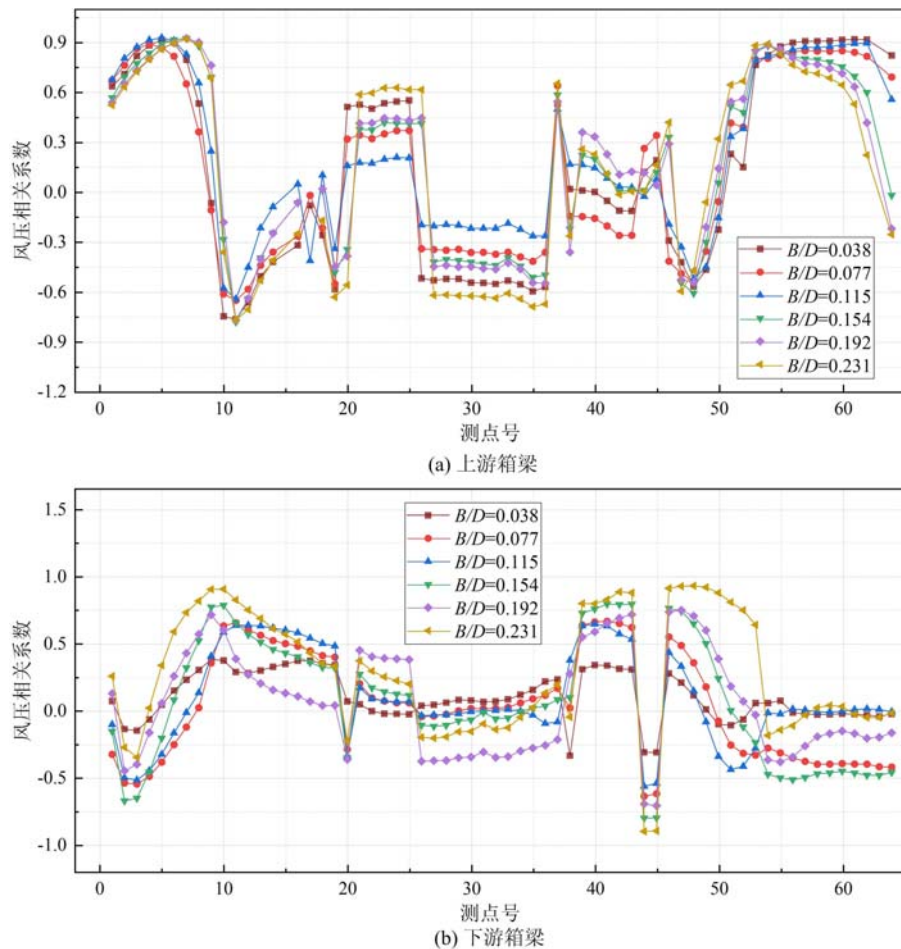


图 8 不同间距主梁表面风压相关系数

Fig. 8 Wind pressure correlation coefficient of main girder surface with different spacing

果,间距比为 0.115 时的相关系数值最小,间距比为 0.231 时的相关系数值最大,两者最大相差 0.4。箱梁底部(测点 32~39)区域也得到相似结果,整体呈现负相关性,且间距比为 0.115 时相关系数值最小,

这是因为改变间距并没有完全抑制主梁的涡激振动,只是最大振幅有一定的减弱。

由 3.2 小节可知脉动压力较强的区域主要集中在桥面及桥底,而风压的脉动成分和相关性直接影响主梁总体涡激气动力。由图 8(b)可知,在下游箱梁桥面和梁底处,各间距下的相关性有所差异,导致各间距下游箱梁涡振振幅存在差异。间距比为 0.231 时,桥面区域除测点 2、测点 3 外所有测点均呈现正相关性,且相关系数值均大于其他间距,最大值接近于 1;梁底区域结果更加显著,所有测点呈现正相关性,其值也远远超过其他间距。

3.4 局部气动力对总体气动力的贡献

表面各测点局部气动力对总体气动力的贡献是测点压力脉动值与其涡激力的相关系数的乘积,主梁表面各测点分布气动力对涡激力贡献系数可采用式(4)计算^[21]:

$$C_{aero-i} = C_{\alpha} \rho_i \quad (4)$$

式中: ρ_i 为 i 测点压力与涡激力的相关系数; C_{aero-i} 为主梁表面各测点的分布气动力对涡激力的贡献值; C_{α} 为测点压力系数根方差。

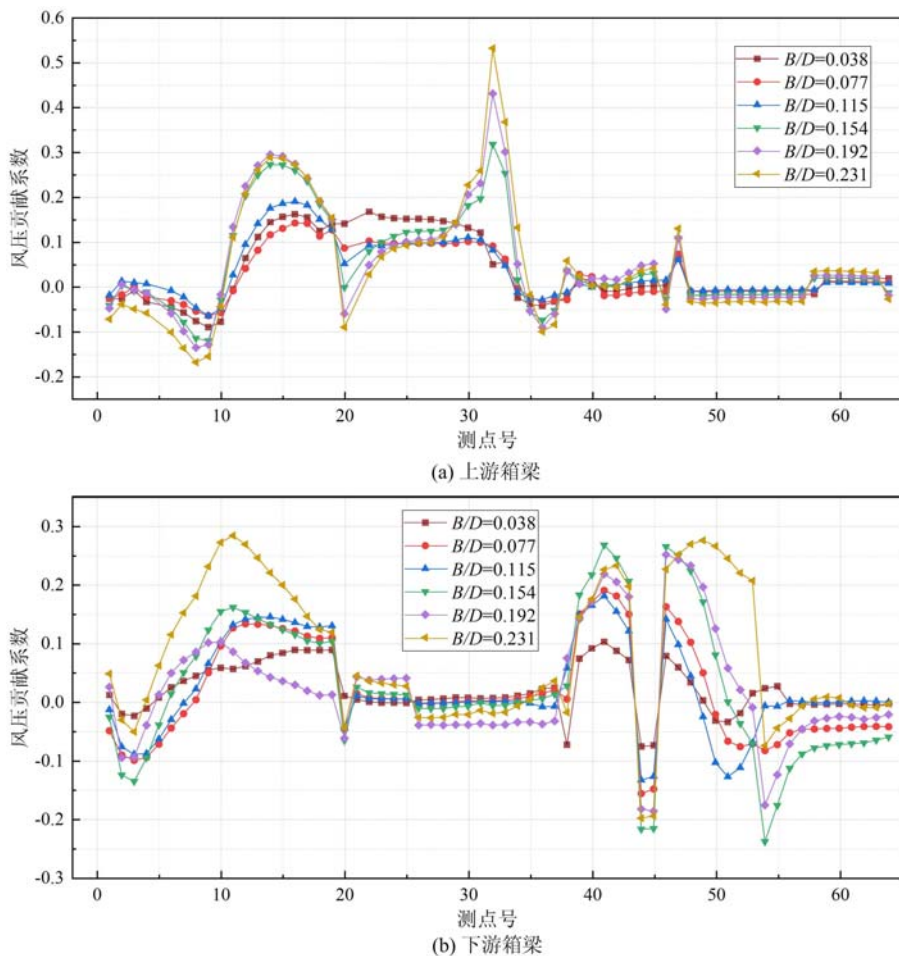


图 9 不同间距主梁表面风压贡献系数对比

Fig. 9 Comparison of wind pressure contribution coefficient of main girder surface with different spacing

图 9 所示为不同间距下上下游箱梁表面局部气动力与总体气动力贡献系数的对比曲线。由图 9(a)可知,在测点 32 处出现了明显的突变点,说明间距比为 0.154、0.194 和 0.231 工况下,上游箱梁梁底后缘对总体气动力的贡献巨大,是导致上游主梁发生大幅涡激振动的主要原因。与间距比超过 0.154 相比,间距比小于 0.115 时,上游箱梁梁底后缘的压力脉动和气动力相关性均被大幅破坏,因此间距比小于 0.115 时,此区域内的气动力对总体涡激气动力的贡献大幅降低,但在各间距下,上游箱梁桥面中后部对总体气动力的贡献也很大,因此,在各个间距下均发生了不同振幅的涡激振动。上下游箱梁的气动干扰效应,使得下游箱梁表面局部气动力与总体气动力贡献与上游箱梁差异较大。由图 9(b)

可知,下游箱梁桥面中后部以及梁底包括挑臂底面对总体气动力的贡献巨大,而在梁底与挑臂的尖角位置测点 44、测点 45 的分布气动力对总体气动力的贡献为抑制效果。尤为明显的是间距比为 0.231 工况,在桥面中部区域以及梁底区域气动力对总体气动力的贡献巨大,是导致下游主梁发生大幅涡激振动的主要原因。间距比为 0.154、0.192 的工况在测点 54 出现了明显的突变,表现为此区域的分布气动力对涡激力的贡献为抑制效果。

4 结论

通过节段模型风洞试验,研究了双幅箱梁断面间距对上下游箱梁涡激振动的影响,得到如下结论:

(1) 依托工程主梁设计断面在 $\pm 3^\circ$ 、 0° 攻角下均出现了竖向涡激共振现象,响应幅值超过规范允许值,且 -3° 攻角下为最不利攻角。上游箱梁在桥面分离的气流以及下游箱梁在桥面前端再附的气流发生了强烈的压力脉动,上下游箱梁的桥面区域以及梁底区域局部气动力与总体气动力具有很强的相关性,这些区域对主梁断面提供了绝大部分的动力,导致主梁断面发生了竖向涡激振动。

(2) 改变上下游箱梁间距会导致各间距上下游箱梁桥面区域及梁底区域的脉动压力发生变化,当双幅箱梁间距比大于 0.154 时,其下游箱梁表面风压系数受上游箱梁的影响逐渐增强,从而使得桥面区域和梁底区域的局部气动力与总体气动力相关性增强,这些区域的局部气动力对总体气动力的贡献增大,因此当双幅箱梁间距比大于 0.154 时,箱梁涡振振幅逐渐增大。

(3) 上下游箱梁间距存在一个最优值,由测振试验结果可得间距 1.5m 为最优结果。当箱梁间距为 1.5m 时,桥面区域和梁底的压力脉动和气动力相关性均被大幅破坏,因此该区域内局部气动力与总体气动力贡献大幅减小,主梁涡激振动响应虽未完全消除,但涡振振幅得到显著抑制。

参考文献:

- [1] 刘志文, 栗小祜, 陈政清, 等. 串列双流线型断面涡激振动气动干扰试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3):51—57 (LIU Zhiwen, LI Xiaohu, CHEN Zhengqing, et al. Aerodynamic interference test on vortex-induced vibration of two streamline cylinders in tandem[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3):51—57 (in Chinese))
- [2] 周奇, 朱乐东. 平行双幅斜拉桥涡振特性气弹模型试验研究[J]. 振动工程学报, 2013, 26(4):522—530 (ZHOU Qi, ZHU Ledong. Study on vortex-induced oscillation of parallel bridge with twin-decks via aeroelastic model test [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(4):522—530 (in Chinese))
- [3] Seo J-W, Kim H-K, Park J, et al. Interference effect on vortex-induced vibration in a parallel twin cable-stayed bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 116:7—20.
- [4] 刘志文, 陈政清. 串列双幅典型断面三分力系数气动干扰效应[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5):6—13 (LIU Zhiwen, CHEN Zhengqing. Aerodynamic interference effects on aerostatic coefficients of typical sections in tandem arrangement[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5):6—13 (in Chinese))
- [5] Park J, Kim S, Kim H-K. Effect of gap distance on vortex-induced vibration in two parallel cable-stayed bridges [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2017, 162:35—44.
- [6] Park J, Kim H-K. Effect of the relative differences in the natural frequencies of parallel cable-stayed bridges during interactive vortex-induced vibration[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2017, 171:330—341.
- [7] 刘小兵, 李少杰, 杨群, 等. 并列双箱梁的气动干扰效应对阻力系数的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11):108—114 (LIU Xiaobing, LI Shaojie, YANG Qun, et al. Influence of aerodynamic interference effect on drag coefficient of twin parallel box girders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11):108—114 (in Chinese))
- [8] 易征. 连续刚构桥梁气动干扰效应数值模拟[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(3):20—26 (YI Zheng. Numerical simulation of aerodynamic interference effect of continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3):20—26 (in Chinese))
- [9] Alvarez A J, Nieto F, Kwok K C S, et al. Aerodynamic performance of twin-box decks: a parametric study on

- gap width effects based on validated 2D URANS simulations[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 182:202–221.
- [10] 林震云. 大跨度相邻桥梁气动干扰效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018 (LIN Zhenyun. Aerodynamic interference effect between long span adjacent bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018 (in Chinese))
- [11] 谭彪, 操金鑫, 檀小辉, 等. 间距比对叠合梁双幅桥涡振性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9):1264–1270 (TAN Biao, CAO Jinxin, TAN Xiaohui, et al. Effect of gap distance ratio on vortex-induced vibration performance for bridge with twin composite girders[J]. *Journal of Tongji University*, 2020, 48(9):1264–1270 (in Chinese))
- [12] 马凯, 胡传新, 袁万城, 等. 基于风洞试验和数值模拟的双矩形断面涡振气动干扰研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1):157–168 (MA Kai, HU Chuanxin, YUAN Wancheng, et al. Aerodynamic interference in vortex-induced vibration of dual-rectangular sections based on wind tunnel tests and numerical simulation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(1):157–168 (in Chinese))
- [13] 刘小兵, 吴倩云, 姜会民, 等. 串列多圆柱气动干扰效应的试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7):37–44 (LIU Xiaobing, WU Qianyun, JIANG Huimin, et al. Tests for aerodynamic force interference effect of tandem cylinders[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(7):37–44 (in Chinese))
- [14] 易伟建, 王力力, 黄亮雄, 等. 连续梁桥拓展多跨双曲拱桥的分析与控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1):25–30 (YI Weijian, WANG Lili, HUANG Liangxiong, et al. Analysis and control of multi-span double arch bridge expanded by continuous bridge[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2010, 27(1):25–30 (in Chinese))
- [15] 郭夏. 分离式双箱梁断面气动参数及气动干扰特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018 (GUO Xia. Aerodynamic parameters and aerodynamic interference characteristics of twin box girder[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018 (in Chinese))
- [16] Meng Xiaoliang, Zhu Ledong, Guo Zhenshan. Aerodynamic interference effects and mitigation measures on vortex-induced vibrations of two adjacent cable-stayed bridges[J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, 5(4):510.
- [17] Argentini T, Rochi D, Zasso A. Aerodynamic interference and vortex-induced vibrations on parallel bridges: the Ewijk Bridge during different stages of refurbishment [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147:276.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 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, 2018 (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01-2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018 (in Chinese))
- [19] 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 (in Chinese))
- [20] 管青海, 崔欣, 王方亮, 等. 气动措施抑制钝体箱梁竖向涡振的风洞试验研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1):56–62 (GUAN Qinghai, CUI Xin, WANG Fangliang, et al. Wind tunnel test study of vertical vortex-induced vibration of bluff box girder suppressed by aerodynamic measure[J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(1):56–62 (in Chinese))
- [21] 郭增伟, 赵林, 葛耀君, 等. 基于桥梁断面压力分布统计特性的抑流板抑制涡振机理研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7):89–94, 117 (GUO Zengwei, ZHAO Lin, GE Yaojun, et al. Mechanism analysis for vortex-induced vibration reduction of a flat streamlined steel box-shaped girder with airflow-suppressing board based on statistical property of surface pressure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(7):89–94, 117 (in Chinese))

Study on the mechanism of the influence of spacing on vortex-induced vibration of double bluff body steel box girders

MAO Yu¹, LI Chunguang¹, HAN Yan¹, WANG Lei², LIANG Aihong¹, YAN Hubin¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

2. Guangdong Communication Planning & Design Institute, Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the vortex induced vibration (VIV) performance and vibration mechanism of double amplitude bluff body steel box girder bridge, wind tunnel test of segmental model was carried out. The displacement response of vortex vibration and the time history data of pressure at each measuring point on the surface were obtained through the vibration and pressure measurement test. Taking a working condition every 0.5m, the mean value and standard deviation of the fluctuating pressure coefficient of the measuring points on the box girder surface with a spacing of 0.5m to 3m, as well as the correlation and contribution coefficient of local aerodynamic force and overall aerodynamic force are compared and analyzed. The results show that: Vertical bending vortex-induced vibration occurs at the Angle of attack of $\pm 3^\circ$ and 0° , and the Angle of attack of -3° is the most unfavorable Angle. The variation of spacing causes the difference of pulsating pressure on the surface and bottom of the box girder, and the variation is significant when the spacing is more than 2m. There is an optimal value of vortex vibration performance of the double amplitude bluff body steel box girder bridge. When the spacing is 1.5m, the vortex vibration of the double bluff body steel box girder is not completely suppressed, but amplitude of vortex-induced vibration is greatly reduced. Under this interval, the pressure pulsation of the upper and lower box girders in the deck area and the bottom area of the girder is greatly weakened, which destroys the correlation between the local aerodynamic force and the overall aerodynamic force, thus amplitude of vortex-induced vibration is reduced.

Keywords: vortex vibration performance; wind tunnel test; twin box bridge; space; surface pressure