

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0089-05

分离双扁平箱梁气动力干扰效应研究

李少杰¹, 刘小兵^{2,3}, 杨 群¹, 刘庆宽^{2,3}, 马文勇^{2,3}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制研究所, 石家庄 050043;

3. 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 石家庄 050043)

摘 要: 通过节段模型风洞试验研究了分离双扁平箱梁气动力的干扰效应, 得到了气动力系数干扰因子随间距的变化曲线。研究表明: 上游箱梁阻力系数的干扰效应不明显, 下游箱梁阻力系数的干扰效应在 $D/B \geq 2$ (D/B 为双箱梁的净间距与单幅箱梁宽之比) 时基本可以忽略, 在 $D/B < 2$ 时为减小效应, 间距越小, 减小效应越显著; 下游箱梁升力系数的干扰效应不明显, 上游箱梁升力系数的干扰效应在 $D/B \geq 2$ 时基本可以忽略, 在 $D/B < 2$ 时为减小效应。

关键词: 分离双扁平箱梁; 风洞试验; 气动力系数; 干扰效应; 间距

中图分类号: U441+; U446 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.S008

STUDY ON INTERFERENCE EFFECT OF AERODYNAMIC FORCE OF TWIN SEPARATE FLAT BOX GIRDERS

LI Shao-jie¹, LIU Xiao-bing^{2,3}, YANG Qun¹, LIU Qing-kuan^{2,3}, MA Wen-yong^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Structure Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Key Laboratory of Structural Health Diagnosis and Control of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The interference effect of aerodynamic forces of twin separate flat box girders were investigated by wind tunnel tests of sectional models. The interference-factor changing curves of aerodynamic coefficients versus separate distance were obtained. The research results show that the interference effect of drag coefficient of a forward box girder is slight. The interference effect of drag coefficient of a leeward box girder can be neglected when $D/B \geq 2$ and can be recognized as a reducing effect when $D/B < 2$. This reducing effect is more remarkable for a small distance. The interference effect of lift coefficient of a leeward box girder is slight. The interference effect of lift coefficient of a forward box girder can be neglected when $D/B \geq 2$ and can be recognized as a reducing effect when $D/B < 2$.

Key words: twin separate flat box girder; wind tunnel test; aerodynamic coefficient; interference effect; distance

分离双扁平箱梁是近年来在大跨度斜拉桥和悬索桥中比较常见的一种桥梁形式。在来流风的作用下, 两箱梁之间存在着明显的气动干扰现象^[1-5]。

随着跨度的不断增大, 气动干扰效应可能会对这种桥梁的抗风性能产生不利影响。研究分离双扁平箱梁之间的气动干扰效应对这种桥梁的抗风设计具

收稿日期: 2016-03-29; 修改日期: 2017-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308359); 河北省高等学校科学技术研究基金项目(QN20131169, QN2015213)

通讯作者: 刘小兵(1982—), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 主要从事桥梁的风致振动与控制研究(E-mail: x_b_liu@126.com)。

作者简介: 李少杰(1990—), 男, 河北人, 硕士生, 主要从事桥梁抗风研究(E-mail: li_shao_jie_123@163.com);

杨 群(1981—), 女, 湖南人, 讲师, 硕士, 从事桥梁工程研究(E-mail: quny123@126.com);

刘庆宽(1971—), 男, 河北人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁与结构的风荷载、风致振动与控制研究(E-mail: lqk@stdu.edu.cn);

马文勇(1981—), 男, 陕西人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗风研究(E-mail: mawenyong@126.com)。

有重要意义。

气动力系数是描述桥梁结构静风荷载的无量纲常数。由于存在气动干扰,分离双扁平箱梁气动力系数与单箱梁的气动力系数有所差别。目前国内外的学者主要通过风洞试验的手段对分离双箱梁气动力系数的干扰效应进行了一些研究。陈政清等^[6-8]以我国的佛山平胜大桥和青岛海湾大桥红岛航道桥为工程背景,通过节段模型风洞试验对分离双箱梁气动力系数的干扰效应进行了研究,结果发现,与单幅箱梁相比,上游箱梁的阻力系数有所降低,升力系数变化不大;下游箱梁由于受到上游箱梁的遮挡,阻力系数明显小于单幅箱梁。曲慧等^[9]通过节段模型风洞试验对崇启大桥分离双箱梁的气动力进行了研究,结果发现,由于上游箱梁的遮挡效应,下游箱梁的阻力系数明显小于上游箱梁的阻力系数。郭震山等^[10]以天津海河桥拓宽工程为背景,通过节段模型风洞试验研究了既有桥梁对新建桥梁气动力系数的干扰效应。研究结果发现,当新建桥梁在既有桥梁上游时,阻力系数会有所增

大,当新建桥梁在既有桥梁下游时,阻力系数会有所减小。

综合以上文献可以看到,目前分离双箱梁气动力的干扰效应研究主要针对特定的实际工程,在一个或少量的几个间距下进行,所得的研究结果尚难以准确地认识分离双箱梁气动力的干扰规律。本文通过风洞试验测试了多个间距下分离双扁平箱梁的气动力系数,并与单幅扁平箱梁的气动力系数进行了对比,对气动力的干扰效应进行了更加系统的研究。

1 风洞试验概况

如图1所示,两个扁平箱梁模型的尺寸、材质和测点布置情况完全相同,单幅扁平箱梁模型的尺寸为2000 mm×370 mm×64 mm,模型由ABS板制成,在模型的中间布置1圈测压孔,共60个测点。由于棱角附近的流动参数变化剧烈,这些位置测压孔相对较密。

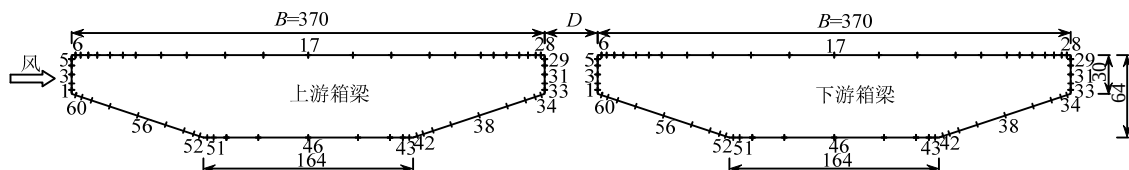


图1 试验模型的尺寸及测点布置 /mm

Fig.1 Dimension and tap arrangement of test model

风洞试验在石家庄铁道大学风工程研究中心STU-1风洞低速试验段进行。首先进行单幅扁平箱梁模型试验,然后进行分离双扁平箱梁模型在多个不同间距下的试验。试验中 D/B (D 为两个箱梁模型的净间距, B 为单幅箱梁模型的宽度)分别为0.025、0.05、0.075、0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8、1、2、3、4。试验在均匀流场中进行,来流风攻角为 0° 。为了避免模型振动,来流风速为6 m/s,箱梁模型不同位置测压孔的压力通过电子压力扫描阀测得,其采样频率为330 Hz,采样时间为30 s。模型风洞试验照片如图2所示。



(b) 分离双箱梁模型

图2 箱梁模型试验照片

Fig.2 Test photo of box girder model

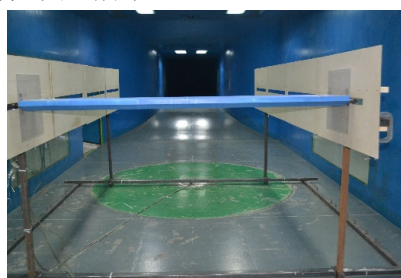
2 分离双箱梁的气动力系数

在来流风作用下,单位长度扁平箱梁模型受到的顺风向阻力 F_D 和横风向升力 F_L 如图3所示。气动力系数定义如下:

$$C_D = 2F_D / \rho U^2 B \quad (1)$$

$$C_L = 2F_L / \rho U^2 B \quad (2)$$

其中: B 为模型的宽度; U 为来流的风速; ρ 为空



(a) 单幅箱梁模型

气密度, 取 1.225 kg/m^3 。作用在单位长度模型上的顺风向阻力 F_D 和横风向升力 F_L 可通过对模型表面各测点的压力进行积分得到。

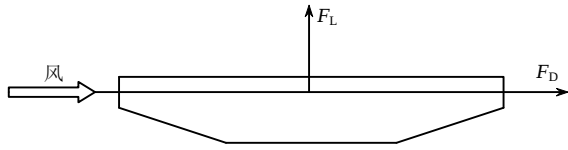
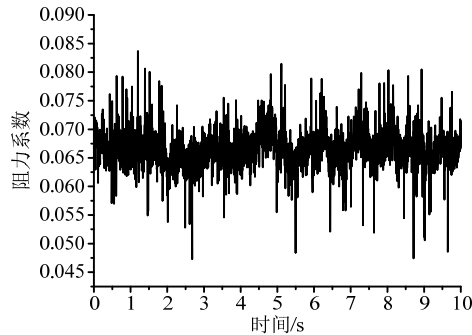


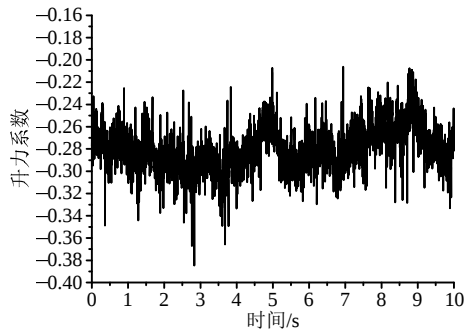
图3 箱梁模型的气动力系数

Fig.3 Aerodynamic coefficients of box girder model

图4显示了单箱梁的阻力系数和升力系数的时程曲线。图5显示了 $D/B=0.6$ 时分离双箱梁的上游箱梁阻力系数和升力系数的时程曲线。图6显示了 $D/B=0.6$ 时分离双箱梁的下游箱梁阻力系数和升力系数的时程曲线。限于篇幅, 其他间距下分离双箱梁的气动力系数时程没有给出。



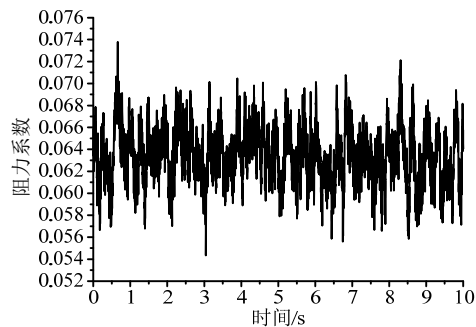
(a) 阻力系数



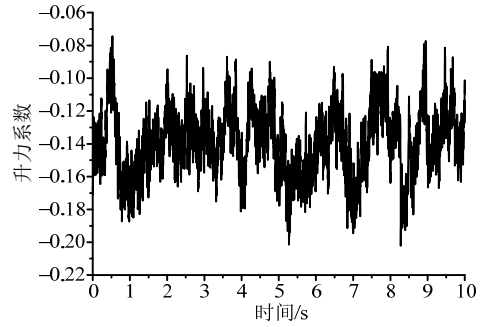
(b) 升力系数

图4 单箱梁的气动力系数时程曲线

Fig.4 Time-history curve of aerodynamic coefficients of single box girder



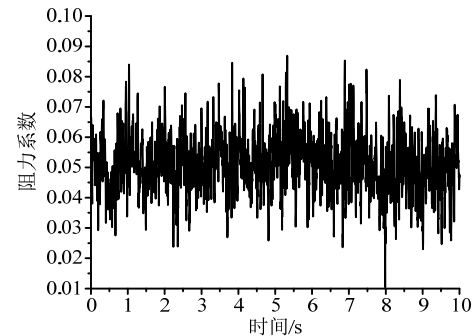
(a) 阻力系数



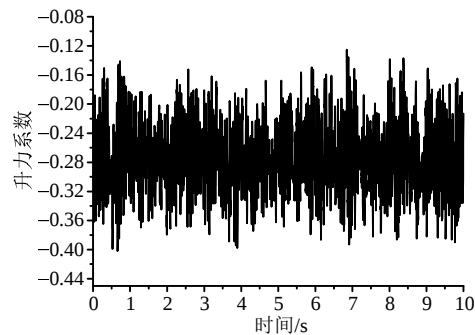
(b) 升力系数

图5 $D/B=0.6$ 时上游箱梁的气动力系数时程曲线

Fig.5 Time-history curve of aerodynamic coefficients of forward box girder at $D/B=0.6$



(a) 阻力系数



(b) 升力系数

图6 $D/B=0.6$ 时下游箱梁的气动力系数时程曲线

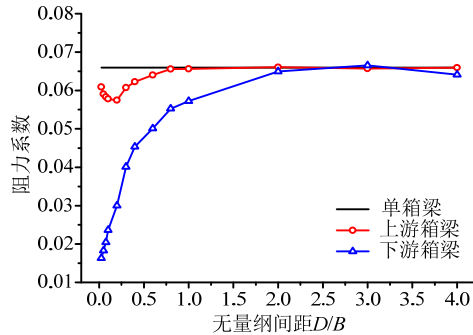
Fig.6 Time-history curve of aerodynamic coefficients of leeward box girder at $D/B=0.6$

图7为单箱梁及不同间距双箱梁的气动力系数随间距的变化曲线。

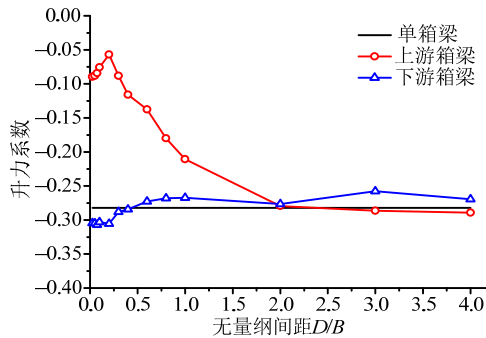
从图7(a)看到: 1) 单箱梁的阻力系数约为0.066; 2) 与单箱梁相比, 上游箱梁的阻力系数与单箱梁的阻力系数比较接近, 仅在 $0.025 \leq D/B \leq 0.6$ 时略小于单箱梁的阻力系数, 其中在 $D/B=0.2$ 时达到最小值; 3) 下游箱梁的阻力系数明显小于单箱梁的阻力系数, 间距越小, 减小幅度越大。当 $D/B \geq 2$ 时, 下游箱梁的阻力系数大体接近单箱梁的阻力系数。

从图7(b)看到: 1) 单箱梁的升力系数约为

-0.282; 2) 与单箱梁相比,上游箱梁的升力系数变化较大。在 $0.025 \leq D/B \leq 1$ 时,上游箱梁的升力系数绝对值小于单箱梁的升力系数绝对值,在 $2 \leq D/B \leq 4$ 时,上游箱梁的升力系数接近单箱梁的升力系数; 3) 下游箱梁的升力系数与单箱梁相比,总体来看变化不大。在 $0.025 \leq D/B \leq 0.3$ 时,下游箱梁的升力系数绝对值略大于单箱梁的升力系数绝对值,在 $0.4 \leq D/B \leq 4$ 时,下游箱梁的升力系数绝对值略小于单箱梁的升力系数绝对值。



(a) 阻力系数



(b) 升力系数

图7 单箱梁及不同间距双箱梁的气动力系数

Fig.7 Aerodynamic coefficients of both single box girder and twin box girders in different spacings

3 分离双箱梁的气动力系数干扰因子

为了定量的分析分离双箱梁气动力系数的干扰效应,定义如下气动力系数干扰因子:

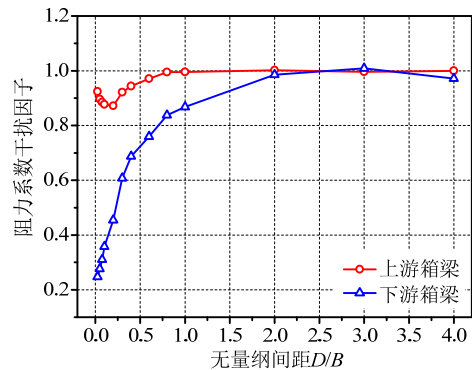
$$IF = \frac{\text{上(下)游箱梁气动力系数}}{\text{单箱梁气动力系数}} \quad (3)$$

从式中可以得出:当 $IF > 1$ 时,气动干扰表现为增大效应,当 $IF < 1$ 时,气动干扰表现为减小效应。

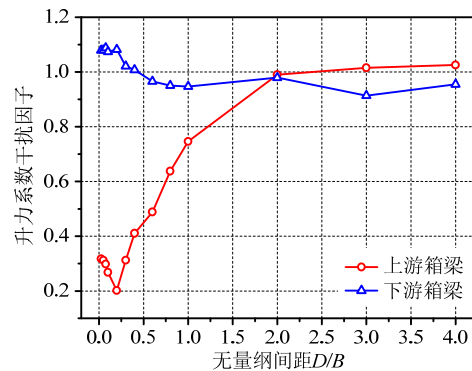
从图 8(a)可以看到: 1) 上游箱梁阻力系数干扰因子的变化范围为 0.87~1.0 左右。在 $D/B \geq 0.8$ 时,上游箱梁阻力系数干扰因子接近于 1,说明气动干扰效应几乎可以忽略;在 $D/B < 0.8$ 时,上游箱梁阻力系数干扰因子略小于 1,说明气动干扰对上游箱

梁阻力系数的影响表现为轻微的减小效应。2) 下游箱梁阻力系数干扰因子的变化范围为 0.25~1.0 左右。在 $D/B \geq 2$ 时,下游箱梁阻力系数干扰因子接近于 1,说明气动干扰效应几乎可以忽略,在 $D/B < 2$ 时,下游箱梁阻力系数干扰因子明显小于 1,间距越小,减小幅度越大,说明气动干扰对下游箱梁阻力系数的影响表现为减小效应,间距越小,减小效应越明显。

从图 8(b)可以看到: 1) 气动干扰对上游箱梁升力系数干扰因子的影响较大,干扰因子的变化范围为 0.20~1.0 左右,在 $D/B \geq 2$ 时,上游箱梁升力系数干扰因子接近于 1,说明气动干扰对上游箱梁升力系数的影响几乎可以忽略,在 $D/B < 2$ 时,上游箱梁升力系数干扰因子明显小于 1,且随着间距的较小先减小后增大,在 $D/B=0.2$ 时,达到最小值。这说明,气动干扰对上游箱梁升力系数的影响表现为减小效应,且这种减小效应随间距的减小先增强后减弱,在 $D/B=0.2$ 时,减小效应最显著。2) 下游箱梁升力系数干扰因子的变化范围为 0.91~1.09 左右,基本上接近 1,说明气动干扰对下游箱梁升力系数的影响基本可以忽略。



(a) 阻力系数干扰因子



(b) 升力系数干扰因子

图8 分离双箱梁的气动力系数干扰因子

Fig.8 IF of aerodynamic coefficients of twin box girders

4 结论

(1) 分离双扁平箱梁上游箱梁阻力系数的干扰效应不明显。下游箱梁阻力系数的干扰效应在 $D/B \geq 2$ 时基本可以忽略, 在 $D/B < 2$ 时为减小效应, 间距越小, 减小效应越显著。

(2) 分离双扁平箱梁下游箱梁升力系数的干扰效应不明显。上游箱梁升力系数的干扰效应在 $D/B \geq 2$ 时基本可以忽略, 在 $D/B < 2$ 时为减小效应, 且这种减小效应随间距的减小先增强后减弱, 在 $D/B=0.2$ 时最显著。

(3) 给出了分离双扁平箱梁在不同间距下的气动力系数干扰因子, 可为实际工程中分离双扁平箱梁的抗风设计提供参考。

参考文献:

- [1] Irwin R A, Stoyanoff S, Xie J, et al. Tacoma Narrows 50 years later-wind engineering investigations for parallel bridges [J]. Bridge Structures: Assessment, Design and Construction, 2005, 1(1): 3—17.
- [2] Ju-won Seo, Ho-Kyung Kim, Jin Park, 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(116): 7—20.
- [3] Kimura K, Shima K, Sano K, et al. Effects of separation distance on wind-induced response of parallel box girders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 954—962.
- [4] 朱乐东, 周奇, 郭震山, 等. 箱形双幅桥气动干扰效应对颤振和涡振的影响[J]. 同济大学学报, 2010, 38(5): 632—638.
Zhu Ledong, Zhou Qi, Guo Zhenshan, et al. Aerodynamic interference effects on flutter and vortex-excited resonance of bridges with twin-separate parallel box decks [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(5): 632—638. (in Chinese)
- [5] 刘小兵, 杨群. 双幅典型断面静力系数气动干扰试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊 II): 107—112.
Liu Xiaobing Yang Qun. Experimental study on aerodynamic interference on aerostatic coefficients of twin representative section [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(Suppl II): 107—112. (in Chinese)
- [6] 陈政清, 刘小兵, 刘志文. 双幅桥面桥梁三分力系数的气动干扰效应研究[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 87—93.
Chen Zhengqing, Liu Xiaobing, Liu Zhiwen. Study of aerodynamic interference effects on aerodynamic coefficients of twin-deck bridges [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 87—93. (in Chinese)
- [7] 陈政清, 牛华伟, 刘志文. 双幅桥面桥梁主梁气动干扰效应研究[J]. 桥梁建设, 2007, 25(6): 9—12.
Chen Zhengqing, Niu Huawei, Liu Zhiwen. Study of aerodynamic interference effect on main girders of twin-deck bridges [J]. Bridge Construction, 2007, 25(6): 9—12. (in Chinese)
- [8] 刘志文, 陈政清, 刘高. 双幅桥面桥梁三分力系数气动干扰效应试验研究[J]. 湖南大学学报, 2008, 35(1): 16—20.
Liu Zhiwen, Chen Zhengqing, Liu Gao. Experimental study of aerodynamic interference effects on aerostatic coefficients of twin decks bridges [J]. Journal of Hunan University, 2008, 35(1): 16—20. (in Chinese)
- [9] 曲慧, 马如进, 陈艾荣. 分离式钝体钢箱梁静气动力节段风洞试验研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(3): 89—94.
Qu Hui, Ma Rujin, Chen Airong. Study on static aerodynamic force of separate steel box-girder with bluff body via wind tunnel test of sectional model [J]. Structural Engineers, 2010, 26(3): 89—94. (in Chinese)
- [10] 郭震山, 孟晓亮, 周奇, 朱乐东. 既有桥梁对邻近新建桥梁三分力系数的气动干扰效应[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 181—186.
Guo Zhenshan, Meng Xiaoliang, Zhou Qi, Zhu Ledong. Aerodynamic interferences of an existed bridge on aerodynamic coefficients of an adjacent new bridge [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 181—186. (in Chinese)