

半开口式分离双箱梁涡振机理试验研究

阳佳丁¹, 唐文峰², 谢科^{2*}, 龚浩良¹, 罗昌文³

(1. 广东佛盈汇建工程管理有限公司, 广东 佛山 528000; 2. 中交第二公路勘察设计院有限公司;
3. 中交第一航务工程局有限公司)

摘要:半开口式分离双箱梁流线形断面是大跨桥梁较为常见的一种断面形式;然而,既有研究表明:半开口式分离双箱梁容易发生涡激共振;尽管涡激共振不会导致桥梁直接损毁,但是由于其起振风速低,发生频繁,容易造成结构疲劳损伤,并严重影响车辆和行人的舒适性。因此,亟需对该种断面形式的涡激共振的激振机理开展深入研究,以便寻找合理的减振/抑振措施。该文以广东佛山同济大桥主桥为工程背景,开展半开口式分离双箱梁节段模型涡激共振风洞试验,采用扫描阀测压研究了模型表面风压分布规律;通过数值积分方法计算了模型三分力系数时程曲线;进一步对三分力系数进行频谱分析,发现当模型处于 $+3^\circ$ 攻角时,升力系数具有显著的周期性;当升力系数的卓越频率与结构频率接近时发生共振现象,从而导致开口式分离式双箱梁发生涡激共振。

关键词:涡激共振;半开口式分离双箱梁;致振机理;风洞试验

现代桥梁建造技术已经在设计理论、材料性能、施工方法等领域取得了重大突破,桥梁的跨度越来越大、质量越来越轻、结构越来越柔,然而,其对风荷载的作用也越来越敏感,因此,对于超大跨桥梁而言,风荷载和风致振动已经成为桥梁结构设计控制因素之一。

为了提高桥梁的抗风性能,超大跨度桥梁往往选用气动特性较好的流线形箱梁断面。由于半开口式分离双箱梁为流线形断面,线形较好,而且与普通箱梁相比自重更轻、材料更省,近几年半开口式分离双箱梁已在大跨度斜拉桥中得到广泛应用。然而,既有研究发现,半开口式分离双箱断面容易发生涡激共振。例如,方根深等通过风洞试验和数值模拟,研究了半开口分离双箱梁的涡振性能及其气动控制措施;王骑等通过风洞试验发现,鄂东长江大桥的开口式分离双箱梁断面在 $+3^\circ$ 和 $+5^\circ$ 风攻角下发生明显的竖弯涡振;宋锦忠等在对荆岳长江大桥主梁开展节段模型风洞试验时也发现了类似的涡振现象;孟晓亮等研究了椒江二桥分离式双箱梁断面的涡振特性并提出了气动优化措施;朱乐东等提出了一种多孔扰流板用于抑制半开口分离双箱梁的涡激共振。上述研究主要通过风洞试验研究开口式分离双箱梁的涡振特性、气动优化及气动控制措施,对开口式分离双箱梁涡激共振产生的原因

研究较少。

该文以广东省佛山市同济大桥主桥为工程背景,通过刚性节段模型风洞试验,研究开口式分离双箱梁的涡振特性,同时,通过扫描阀测压获得箱梁的风压分布,并解释开口式分离双箱梁涡激共振发生的原因,研究成果对该种断面的同类桥型抗风设计具有一定的指导意义。

1 风洞试验

图1为同济大桥的桥型布置图,桥梁全长314 m,主梁采用开口式分离双箱钢箱梁,如图2所示,主梁高3.5 m、宽38.6 m,附属设施主要包括检修车轨道和轨道遮风板、检修道栏杆、人行道墙式护栏及中心护栏,主梁开口区域每隔3 m设置一道横隔板,图中小圆圈标识为电子扫描阀测压孔的安装位置。

风洞试验的刚性节段模型几何缩尺比选为1:40,节段模型长度为2.0 m,宽度为0.965 m,高度为0.088 m,在模型的两端设置了两块端板,避免端部效应对试验结果的影响,端板高度为5倍梁高。由于涡激共振主要考虑1阶竖弯和1阶扭转模态,模型的质量、质量矩等重要设计参数根据相似关系计算获得,表

收稿日期:2020-04-15(修改稿)

作者简介:阳佳丁,男,硕士,工程师。E-mail:ouyangjd@yeah.net

* 通信作者:谢科,男,硕士,工程师。E-mail:609541412@qq.com

1 列出了刚性节段模型详细参数。

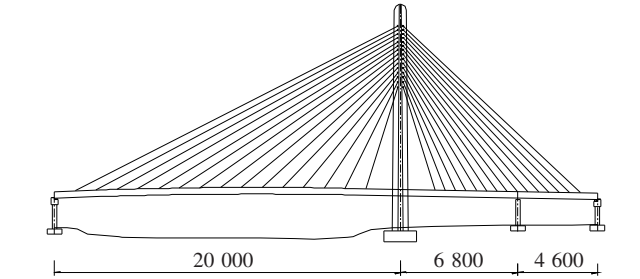


图 1 同济大桥主桥立面布置图(单位:cm)

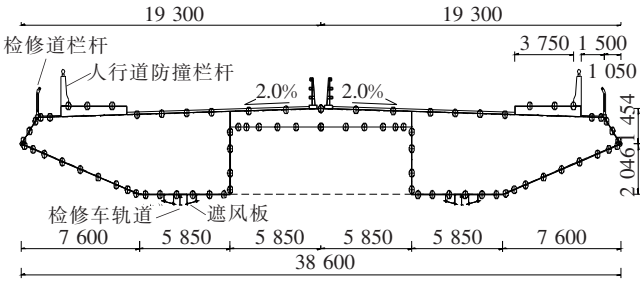


图 2 主跨钢箱梁标准断面图(单位:mm)

表 1 刚性节段模型设计参数

参数名称	单位	设计值	相似常数	模型值
长度 L	m	80	1/40	2.000
宽度 B	m	38.6	1/40	0.965
高度 H	m	3.5	1/40	0.088
等效质量	kg/m	37 775	1/40 ²	23.609
等效质量矩	kg · m ² /m	4 930 150	1/40 ⁴	1.926
1 阶竖弯基频	Hz	0.467 6	1:9.6	4.489
1 阶扭转基频	Hz	1.224 4	1:9.6	11.754
扭弯频率比		2.618	1	2.618
竖弯阻尼比	%	—	—	0.500
扭转阻尼比	%	—	—	0.500
风速比	m/s	37.1	1:4.17	8.900

在开口式分离双箱梁的涡激共振振动特性风洞试验过程中,模型由 4 根弹簧竖向悬挂,在模型的 4 个角分别安装了 4 个激光位移计,激光位移计采样频率为 500 Hz,测量精度为 0.01 mm,通过测量 4 个角点的竖向位移可以计算得到桥梁竖向正对称位移、反对称角度以及扭转角度;在进行扫描阀测压试验时,模型固定在风洞试验室内,表面设置风压测点如图 3 所示,扫描阀风压采样频率为 625 Hz,测量时间为 32 s。

所有风洞试验在中南大学风洞试验室高速试验段中进行,该试验段长 15.0 m、宽 3.0 m、高 3.0 m,试验

风速为 1~94 m/s,连续可调,湍流度小于 0.3%,速度场不均性小于 0.5%,气流偏角小于 0.5°。此次测振试验的风速为 1.5~10.5 m/s,风速增长间隔为 0.5 m/s;测压试验风速为 10 m/s。

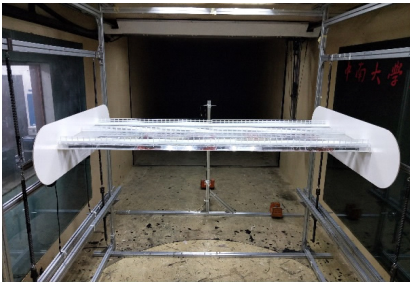


图 3 主梁节段模型风洞试验概况

2 半开口式分离双箱梁的涡振特性

为了研究半开口式分离双箱梁的涡振特性,将模型悬挂支撑于风洞试验中,风速由 1.5 m/s 逐渐增加至 10.5 m/s,增幅为 0.5 m/s,在 3 种攻角工况下,采用激光位移计测量模型在不同风速下四角的竖向位移。测量结果如图 4 所示。图中虚线为 JTG/T 3360—01—2018《公路桥梁抗风设计规范》计算的涡振限值(0.086 m)。结果表明:当风攻角为 0°和-3°时,在测量风速为 4~5.5 m/s,模型发生了小幅的涡激振动,位移均方根值的最大值约为 0.03 m,满足规范的要求。但是,当风攻角为+3°时,模型振幅均方根值随时间的变化曲线上出现两个明显的涡激共振区间,第一涡振区的风速范围为 3.0~4.0 m/s,最大位移均方根值为 0.04 m,小于规范 0.086 m 的要求;第二涡振区的风速范围为 6.5~9 m/s,风速锁定区明显大于第一涡振区,最大涡振位移均方根值为 0.16 m,明显高于规范的要求。如此大幅涡振极有可能威胁桥梁的安全以及桥上汽车的行驶安全和舒适性。以上风洞试验的结果表明:开口式分离双箱梁断面在正攻角下容易发

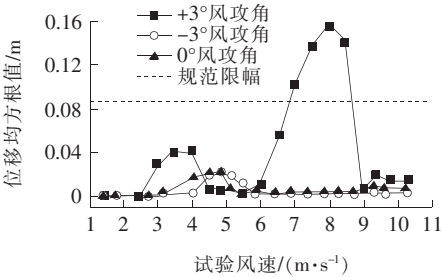


图 4 成桥状态主梁断面位移测点均方根值随风速的变化曲线

生双涡振区的涡激共振,第一涡振区锁定风速范围较窄,振幅较小,且通过对振动位移时程进行频谱特性分析可知,这一涡振区内模型以竖向振动为主;第二涡振区锁定风速范围较大,而且振幅较大,以扭转振动为主。

3 半开口式分离双箱梁的涡振机理

为了进一步研究半开口式分离双箱梁涡激共振发生的原因,将既有节段模型固定于风洞试验室内,在3种风攻角下,采用电子扫描阀测量模型表面风压。电子扫描阀测量的表面风压经过式(1)的无量纲化处理后,得到各个测点*i*的风压系数 $C_{pi}(t)$:

$$C_{pi}(t) = \frac{P_i(t) - P_0}{0.5\rho U^2} \quad (1)$$

式中: $P_i(t)$ 为风洞试验中扫描阀测得的*i*点处风压时程,以压力作用方向指向结构表面为正,离开为负; P_0 为无穷远处试验参考高度处的静压; ρ 为空气密度,取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

当风速为7.5 m/s时,测量结果如图5所示。图中箭头线表示各个测点的平均风压系数,箭头线的长度表示风压的绝对值大小,箭头方向代表风压的方向;曲折线为各个测压点风压系数的均方根值,代表风压系数的脉动强度。当攻角为 0° 时,只有在模型的迎风侧很小区域受正压,其余面均受负压(吸力);当攻角为 -3° 时,迎风侧的上表面风压系数明显减小,下表面的

风压系数明显增大,其余表面的情况与 0° 攻角的风压分布十分类似;当攻角为 $+3^\circ$ 时,上表面的风压系数明显增大,下表面上游箱梁底板的风压系数显著减小,下游箱梁底板的风压系数显著增加。

通过对风压系数的数值积分,可以获得开口式分离双箱梁断面的阻力、升力和扭矩,通过如式(2)所示的无量纲化,可以获得该箱形断面的阻力、升力和扭矩三分力系数。

$$\begin{cases} C_D = F_D / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 H \right) \\ C_L = F_L / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 B \right) \\ C_M = M_T / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_D 、 F_L 、 M_T 分别为模型单位长度上所有的阻力、升力及扭矩; C_D 、 C_L 、 C_M 分别为与之对应的阻力系数、升力系数及扭矩系数; H 为模型高度; B 为模型宽度。

图6~8为3种风攻角下阻力系数和升力系数的时程曲线及其频谱曲线,扭矩系数的分析结果与阻力系数类似。当风攻角为 0° 和 -3° 时,断面的升力系数和阻力系数呈现很强的随机特性,频谱分析曲线中没有明显的卓越频率出现;然而,当风攻角为 $+3^\circ$ 时,断面的升力系数呈现明显的周期特性,升力系数的频谱分析曲线中卓越频率为12.1 Hz(风速为7.5 m/s);阻力系数依然表现为随机性。升力的周期性波动是由于卡门涡周期性脱落产生,脱落的频率(f)与来流风速(U)成正比,与断面特征尺寸(H)成反比,满足如式(3)的线性关系:

$$f = S_r \frac{U}{H} \quad (3)$$

式中: S_r 为Strouhal数,是表征断面漩涡周期性脱落特性的一个无量纲系数。对于该文采用的开口式分离双箱梁,以主梁的高度为模型断面特征尺寸,可计算得到断面的Strouhal数为 $S_r = \frac{fH}{U} = \frac{12.1 \times 0.088}{7.5} = 0.14$ 。将此Strouhal数代入式(3),可知:第一涡振风速区间时,断面漩涡脱落频率与模型竖弯基频十分接近;第二涡振风速区间时,断面漩涡脱落频率与模拟的扭转频率十分接近。由此可以判断,开口式分离双箱梁周期性漩涡脱离产生周期性升力,是导致其涡激共振的原因。

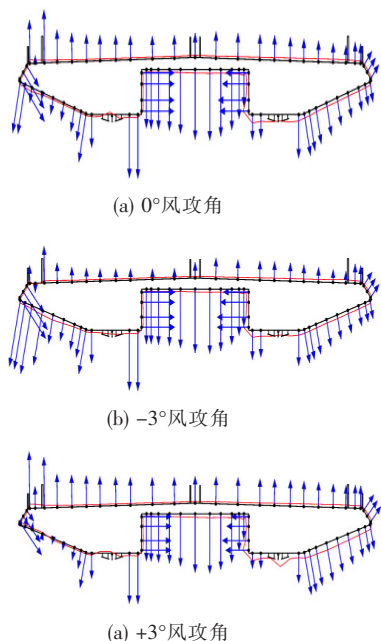


图5 不同风攻角下开口式分离双箱梁表面风压系数

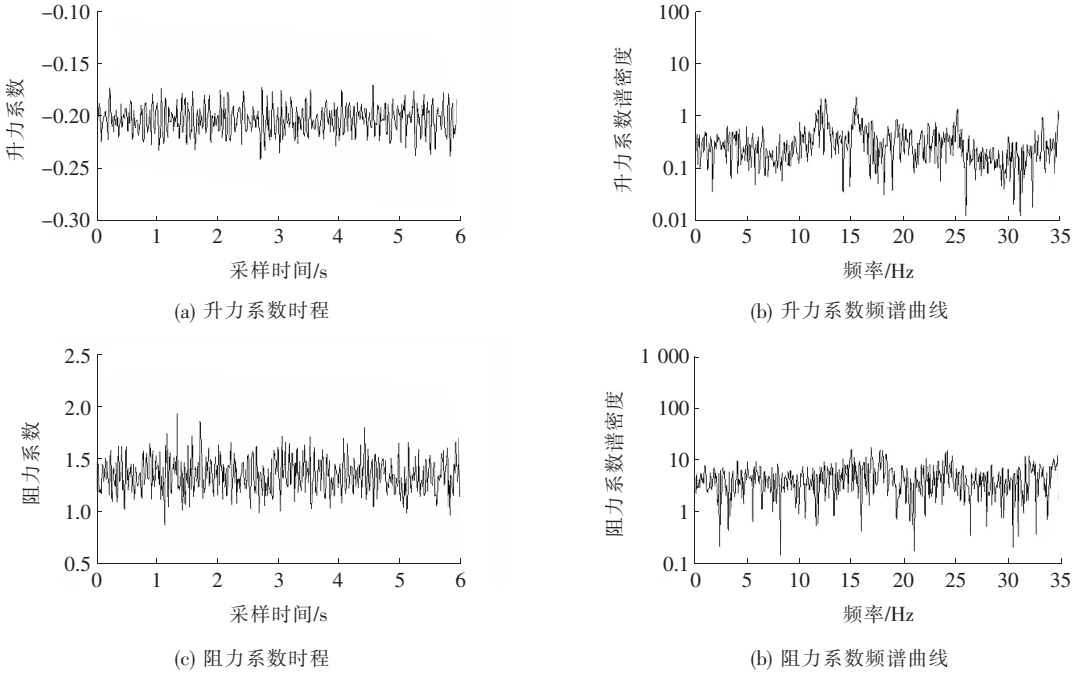


图 6 0° 风攻角下升力系数、阻力系数时程及频谱分析

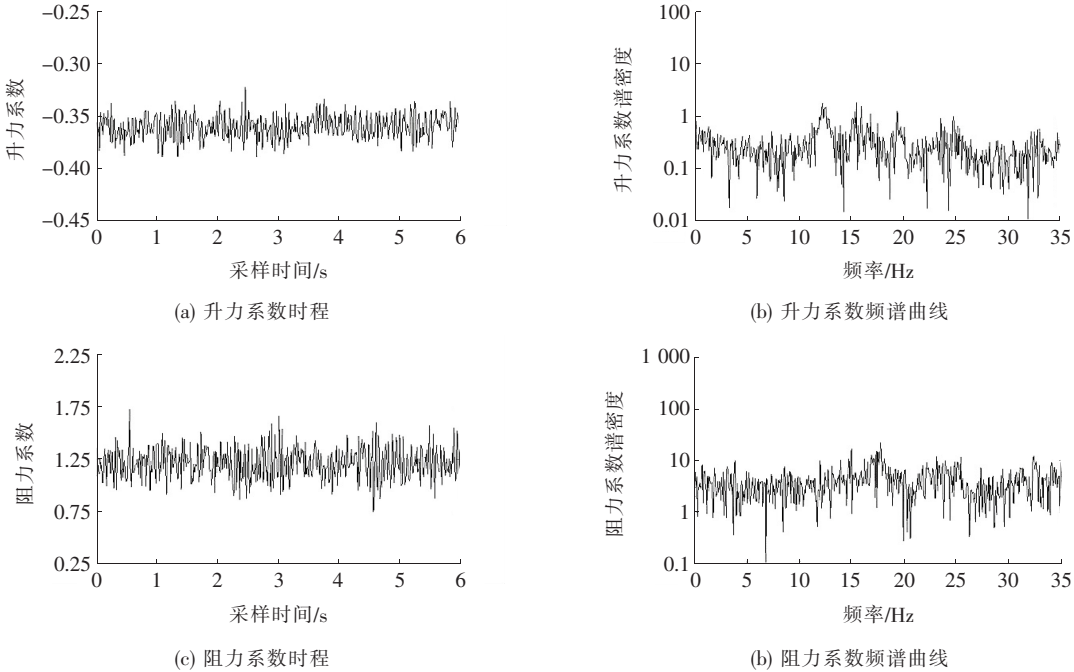


图 7 -3° 风攻角下升力系数、阻力系数时程及频谱分析

4 结论

通过对同济大桥主桥的开口式分离双箱梁断面开展节段模型风洞试验,研究了开口式分离双箱梁的涡振特性及其发生原因,得到以下主要结论:

- (1) 半开口式分离双箱梁断面在 0° 和 -3° 风攻角下,不易发生大幅涡激共振;但是在 $+3^{\circ}$ 风攻角下会发生大幅涡振,且存在竖向涡振和扭转涡振两个涡振风速区间。
- (2) 在 $+3^{\circ}$ 风攻角下,半开口式分离双箱梁断面尾流漩涡周期性脱落,脱落频率满足卡门涡街的特性。

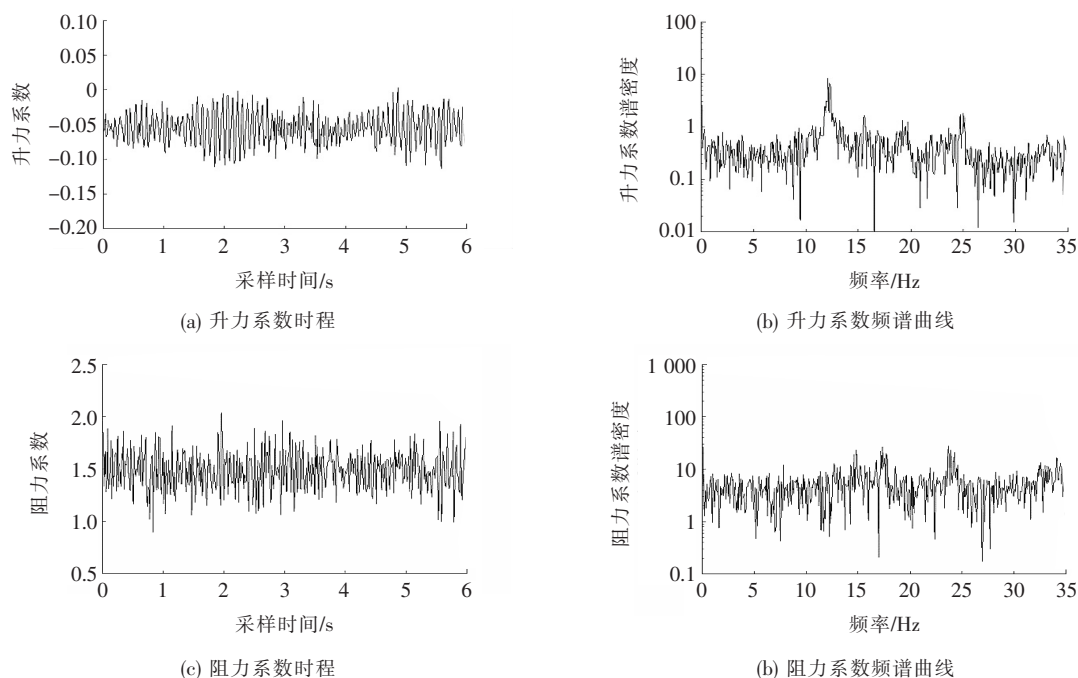


图8 $+3^\circ$ 风攻角下升力系数、阻力系数时程及频谱分析

(3) 周期性的漩涡脱落导致半开口式分离双箱梁断面的升力系数呈现显著的周期特性。

(4) 升力系数卓越频率与模型的自振频率接近时发生共振现象,是导致该断面发生大幅涡振的原因。

参考文献:

- [1] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 徐欣,周国玲. 中欧规范桥梁结构风荷载计算方法对比研究[J]. 中外公路,2019(5).
- [3] 杨吉新,黎建华,杜蕊蕊,等. 考虑流固耦合 CFRP 拉索风振响应分析[J]. 中外公路,2018(5).
- [4] 蒋永林,张龙奇,郑史雄,等. 基于虚拟激励法的多维多点随机风作用下大跨度斜拉桥抖振响应研究[J]. 中外公路,2017(6).
- [5] 宋锦忠,林志兴,徐建英. 桥梁抗风气动措施的研究与应用[J]. 同济大学学报,2002(5).
- [6] 许福友,丁威,姜峰,等. 大跨度桥梁涡激振动研究进展与展望[J]. 振动与冲击,2010(10).
- [7] 方根深,杨脉听,葛耀君. 半开口分离双箱梁涡振性能及其气动控制措施研究[J]. 土木工程学报,2017(3).
- [8] 王骑,陶奇,廖海黎,等. 鄂东大桥主梁大尺度节段模型涡激振动特性试验研究[C]. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集,2007.
- [9] 宋锦忠,丁望星,丁泉顺,等. 湖北荆岳长江公路大桥抗风性能试验研究[C]. 第十四届全国结构风工程学术会议论文集,2009.
- [10] 孟晓亮,郭震山,丁泉顺,等. 风嘴角度对封闭和半封闭箱梁涡振及颤振性能的影响[J]. 工程力学,2011(S1).
- [11] 朱乐东,张海,张宏杰. 多孔扰流板对半封闭窄箱梁涡振的减振效果[J]. 试验流体力学,2012(3).
- [12] JTG/T 3360—01—2018 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [13] 陈尚峰. 考虑行车安全性的桥梁竖向涡振限值计算[J]. 中外公路,2019(6).
- [14] 陈凯,赵利红,韩艳. 山区窄幅悬索桥静风稳定影响参数分析[J]. 中外公路,2018(3).
- [15] 陈政清,黄智文. 大跨度桥梁竖弯涡振限值的主要影响因素分析[J]. 中国公路学报,2015(9).