

典型桥梁断面软颤振现象及影响因素

朱乐东^{1,2,3}, 高广中^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 同济大学 桥梁结构抗风技术交通行业重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用弹簧悬挂节段模型测振的试验方法研究了常用的全封闭箱梁断面、中央开槽箱梁断面、半封闭箱断面和双边肋断面等 4 种典型桥梁断面可能出现的软颤振响应。试验结果表明: 上述 4 种断面均可能出现不同尺度的软颤振现象, 软颤振表现为弯扭自由度耦合的单频振动特征, 其耦合程度不仅会随着风速的变化而变化, 而且会随着断面流线性变好而增加; 流线性较差的钝体断面的软颤振风速区间往往很宽。桥面附属结构会增强软颤振响应, 而改变结构阻尼对软颤振稳定振幅的影响并不明显。

关键词: 典型桥梁断面; 软颤振; 弯扭自由度耦合; 非线性自激力

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

Influential Factors of Soft Flutter Phenomenon for Typical Bridge Deck Sections

ZHU Ledong^{1, 2, 3}, GAO Guangzhong^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Wind Resistance Technology of Bridges of the Ministry of Transport, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A series of spring-suspended sectional model tests were carried out to investigate the soft flutter phenomena for four typical bridge deck sections including a flat full-closed box section, a centrally-slotted box section, a semi-closed box section and a twin-side-girder section, which are all common in bridge engineering. The test results show that soft flutter is a single frequency vibration coupled with torsional and vertical degree of freedoms (DOF) and could be observed in the wind tunnel tests of the four typical bridge deck sections under investigation. The degree of the above-mentioned torsional-vertical coupling varied with wind speed, and can be enhanced with the improvement of the streamlining of bridge

deck sections. Generally, the bluffer the deck section is, the wider range of wind speed the soft flutter will cover. The adding of accessories on bridge decks will enhance the vibration response of soft flutter. Whereas, changing structural damping ratios has a limited influence on the stable amplitude of soft flutter.

Key words: typical bridge deck section; soft flutter; torsional-vertical-degree of freedom coupled vibration; nonlinear self-excited force

随着跨度不断被刷新, 现代大跨度桥梁变得更加纤细和柔软, 新材料和自动化施工技术的应用使得结构阻尼比越来越低。因此, 桥梁对风的作用越来越敏感, 风荷载已经成为控制大跨度桥梁施工和运营安全性的关键因素之一。在各种风致桥梁振动效应中, 颤振是最具危险性的发散性振动现象, 发生于 1940 年的美国旧 Tacoma 悬索桥风毁事故就是由于发生了颤振而引起的。对于实际桥梁, 需要在设计阶段通过采取适当的抗风措施杜绝颤振发生的可能性^[1-2]。

目前, 桥梁颤振分析仍然以 Scanlan 建立线性非定常颤振自激力模型为基础, 即认为桥梁颤振是一种线性气动失稳现象, 颤振的发生存在一个明显的“临界点”^[1-2]。事实上, 由于桥梁断面的钝体特性, 自激力不可避免地存在非线性特性, 颤振也会相应地表现出一定的非线性振动现象。近年来, 国内外的一些学者在风洞试验中发现, 一些钝体桥梁断面或者在大攻角情况下, 可能出现非线性的“软颤振”现象, 其振动现象无法用经典的 Scanlan 线性颤振自激力模型解释^[3-6]。国内学者称之为“软颤振”是由于其与经典的“硬颤振”不同, 没有明显的“临界点”, 国外一

收稿日期: 2014-08-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51478360); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215302)。

第一作者: 朱乐东(1965—), 男, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为桥梁与建筑结构抗风。E-mail: ledong@tongji.edu.cn

通讯作者: 高广中(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁结构风致非线性振动。E-mail: guangzhonggao88@gmail.com

些学者如 Náprstek^[3], Amandolese^[4]等则将其视为非线性的颤振后现象,习惯称之为“post critical LCO”(limit cycle oscillation).

软颤振现象的深入研究不论是对更加精细的桥梁颤振理论的建立,还是对于更合理的桥梁颤振稳定性检验准则的建立都具有重要意义.然而软颤振的研究刚刚起步,本文以桥梁工程中常见的断面形式为研究对象,通过弹簧悬挂节段模型测振的方法,详细地研究了软颤振现象及其可能的影响因素.最后,尝试对软颤振产生的机理进行初步的解释.

1 桥梁节段模型的软颤振现象

软颤振是由自激力的非线性效应引起的非线性失稳现象,它与经典的线性失稳现象(硬颤振)的区别,可以用结构稳定理论中的第一类失稳和第二类失稳来类比.硬颤振类似于第一类失稳现象,具体表现为当风速超过一个临界值时,气动负阻尼大于结构阻尼,系统的稳定性出现分叉,桥梁不断从气流中吸收能量使得振幅呈指数增加,在数学上属于特征值问题;而软颤振则类似于第二类失稳,自激力非线性效应使得振动能够稳定到一个固定的振幅,即在某个起始风速以后,振动系统存在一个稳定的极限环(stable limit cycle),并且该稳定振幅也随着风速的增加近似线性地增加,如图1所示.图中,RMS为均方根值(root mean square).图2显示了典型的软颤振稳幅的极限环振荡现象.

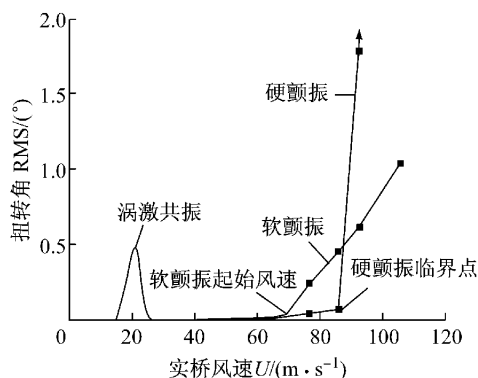


图1 软颤振、硬颤振和涡激共振的振幅随风速的变化曲线示意图

Fig.1 Schematic diagram of RMS of torsional angle vs. wind speed for soft flutter, classical divergent flutter and vortex induced vibration

图1中对比了软颤振、硬颤振和涡激共振的均方根值(RMS)随风速的变化关系,软颤振的起振风速一般明显低于硬颤振的临界风速,所以被有些学

者称为“low speed flutter”^[7].软颤振与涡激共振相似,均表现出稳定振幅的极限环振荡(LCO),但软颤振不存在频率锁定现象;在振动形态上两者也不相同,涡激共振为单自由度振动(纯竖弯或纯扭转),软颤振则表现为弯扭耦合的特征,即软颤振发生在以扭转振动为主的模态上,由于气动力的偏心作用使得该模态的扭转中心向上游偏移.

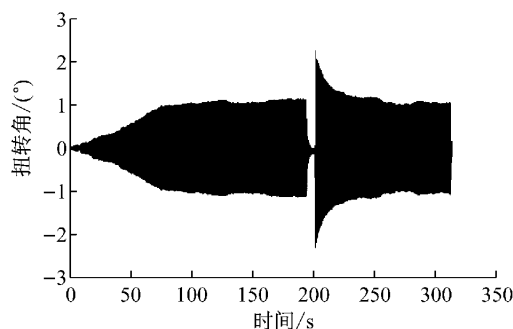


图2 典型的软颤振极限环振荡(LCO)现象

Fig.2 Typical stable limit cycle oscillation (LCO) of soft flutter phenomenon

为了研究桥梁断面的软颤振现象及其影响因素,本文选择桥梁工程中常见的双边肋断面(图3)、半封闭箱断面(图4)、全封闭箱梁断面(图5)和中央开槽断面(图6)等4类断面作为弹簧悬挂节段模型试验的对象.试验中,除了观察到图2所示的典型软颤振现象之外,还观察到介于软颤振和硬颤振之间的过渡振动现象,可以大致总结为分别如图7—10所示的4类现象.其中,图7为软颤振需要初始激励的现象,此时振动系统存在两个稳定状态,当激励振幅小于一定程度时,振动衰减至平衡位置处,当激励振幅大于一定的临界值时,振动则会发展为稳定振幅的极限环振荡,该现象在半封闭箱断面的 0° 、 3° 和 5° 攻角时软颤振起振风速之前出现;图8为软颤振在大振幅下发散的现象,此时振动系统存在一个半稳定的极限环,即模型可以从平衡位置处发展为稳定振幅的极限环,但在大振幅激励下振动发散,该现象在半封闭箱断面 0° 攻角时出现;图9为小振幅激励衰减,大振幅激励发散的现象,该现象在上述4类断面中均有出现;图10为软颤振区间之后缓慢发散的现象,这种现象是由于虽然自激力非线性在较低风速下引起了软颤振现象,但是自激力非线性效应较弱不足以在较高的风速下将振动稳定到一个稳定振幅,但发散过程相对于硬颤振的指数增加要缓慢得多,该现象在上述4类断面中均有出现.

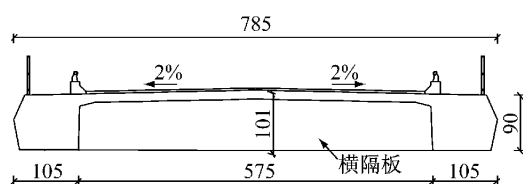


图3 双边肋断面(单位:mm)

Fig.3 Double-girder bridge deck section (unit: mm)

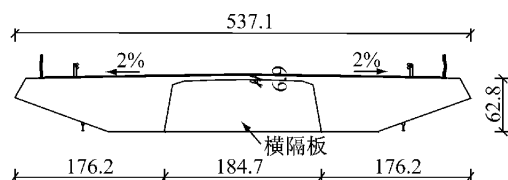


图4 半封闭箱断面(单位:mm)

Fig.4 Semi-closed box girder section (unit: mm)

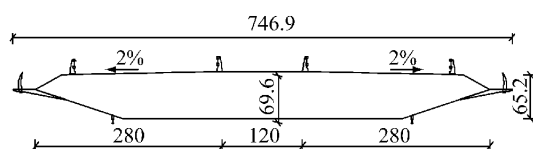


图5 全封闭箱梁断面(单位:mm)

Fig.5 Flat box girder section (unit: mm)

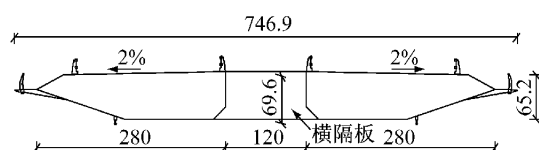


图6 中央开槽断面(单位:mm)

Fig.6 Central slotted box girder section (unit: mm)

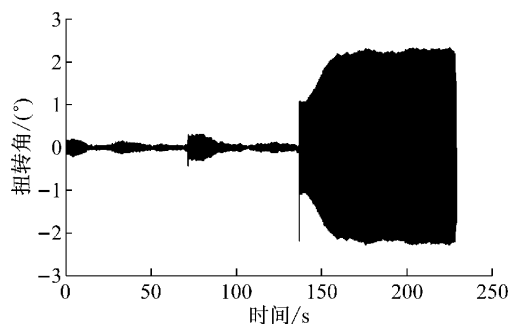


图7 软颤振需要初始激励的现象

Fig.7 Building up of stable amplitude from large initial perturbation and stability of zero position for small initial perturbation

2 软颤振响应的影响因素

2.1 结构阻尼比

在以往研究硬颤振和涡激共振的试验中,结构阻尼是影响振动响应的一个关键参数.在软颤振试验中,结构阻尼比 ξ_s 的影响主要体现在对软颤振稳

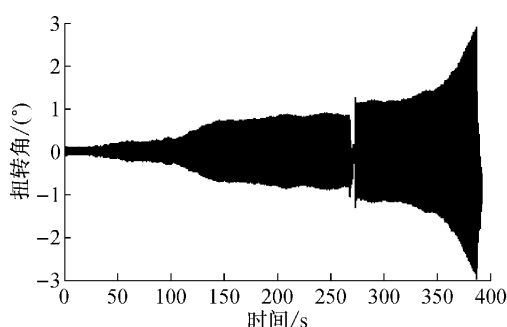


图8 软颤振大振幅激励发散的现象

Fig.8 Building up of stable amplitude from small perturbation and instability of vibration for large perturbation

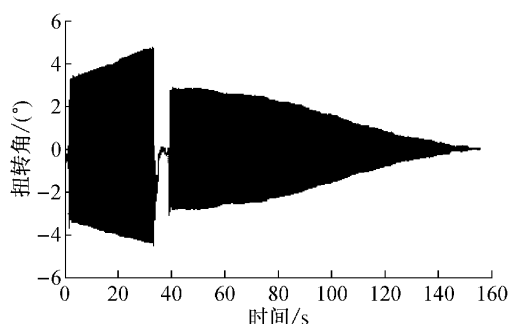


图9 大振幅激励发散,小振幅激励衰减的现象

Fig.9 Stability of zero position for small perturbation and instability for large perturbation

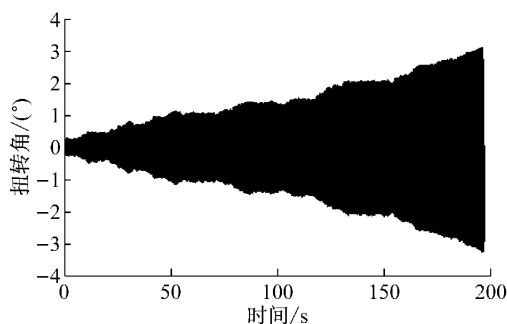


图10 软颤振之后缓慢发散的现象

Fig.10 Slow divergence of vibration when wind speed exceeds the range of soft flutter

定振幅的影响上,图11和图12表明,增加阻尼比对软颤振的起振风速的提高非常有限,然而在软颤振起始风速附近,增加结构阻尼比可以降低软颤振的稳定振幅,但随着折算风速 U^* ($U^* = U/f_t B$,其中 f_t 为扭转频率, B 为断面宽度)的增加,这种降低效应逐渐减弱.另外,结构阻尼比对软颤振的振动形态即弯扭自由度耦合程度的影响并不明显.图11和图12中,不同工况的结构阻尼比用一个范围而不是一个常数表示,这是由于弹簧悬挂节段模型的机械阻尼和刚度也存在不可忽略的非线性效应^[8].结构阻

尼的非线性会增加风场-结构耦合振动系统的非线性程度,若在试验中采用非线性较强的阻尼器,则可能出现异常复杂的软颤振现象.在图11和图12中,软颤振的稳定振幅均大致随风速线性增加,稳定振幅的波动很可能是由于机械阻尼非线性特性造成的.

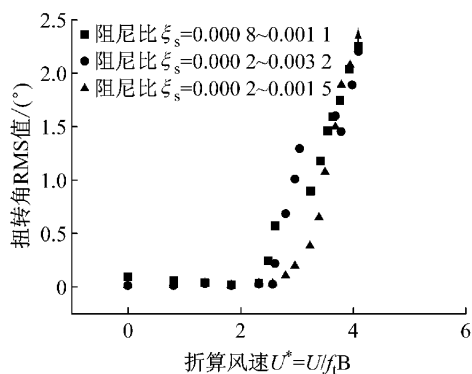


图11 不同结构阻尼比条件下双边肋断面响应曲线(成桥状态,3°攻角)

Fig. 11 Response curve of double-girder bridge deck section under different structural damping ratios (service state, 3°)

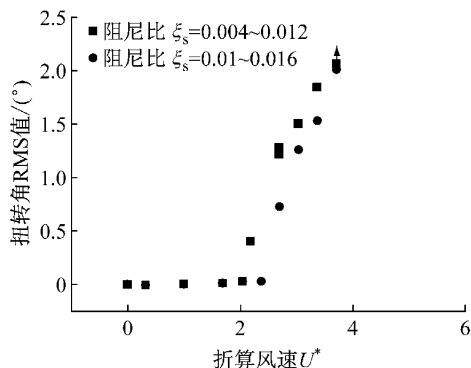


图12 不同结构阻尼比条件下半封闭箱断面的响应曲线(成桥状态,5°攻角)

Fig. 12 Response curves of semi-closed box girder section under different structural damping ratios (service state, 5°)

2.2 桥面附属结构

对于同一种流线性的桥梁断面,桥面附属结构的影响可以初步从成桥和施工状态下软颤振响应的差别进行分析,图13和图14分别给出了半封闭断面和中央开槽断面在施工状态下的响应曲线,分别与图15和图16所示的成桥状态进行对比可知,成桥状态下更容易出现软颤振,而且软颤振的稳定振幅随风速的增加速率比施工状态下慢.这是由于成桥状态中,断面上增加了栏杆和护栏等附属设施,增加了流场的紊流度,流场也更加充分地分离,从而增

强了自激力的非线性特性.中央开槽断面在施工状态没有出现软颤振现象,而是表现出硬颤振发散的现象.

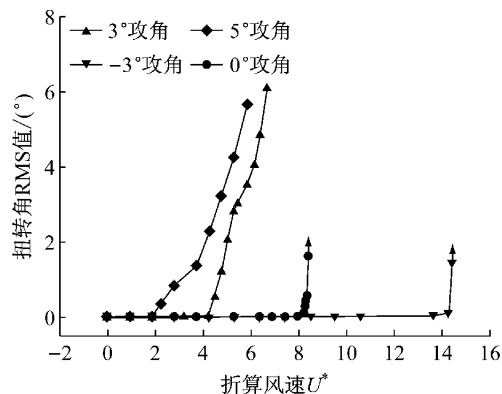


图13 半封闭箱断面响应曲线(施工状态)

Fig. 13 Response curve of semi-closed box girder section (construction state)

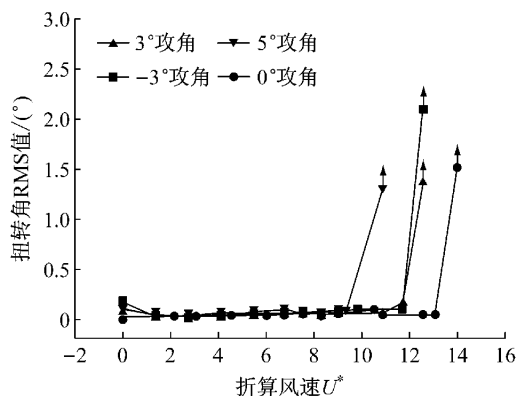


图14 中央开槽断面响应曲线(施工状态)

Fig. 14 Response curve of central slotted box girder section (construction state)

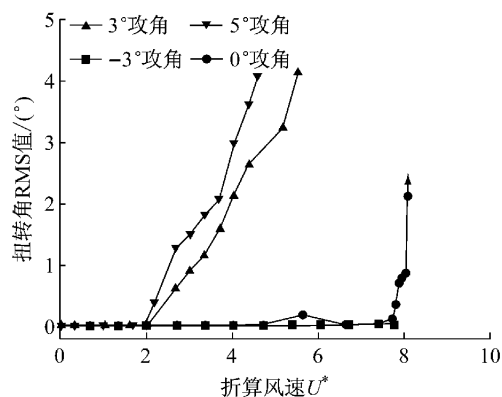


图15 半封闭箱断面响应曲线(成桥状态)

Fig. 15 Response curve of semi-closed box girder section (service state)

2.3 断面的流线性程度

为了研究桥梁断面流线性程度对软颤振响应的

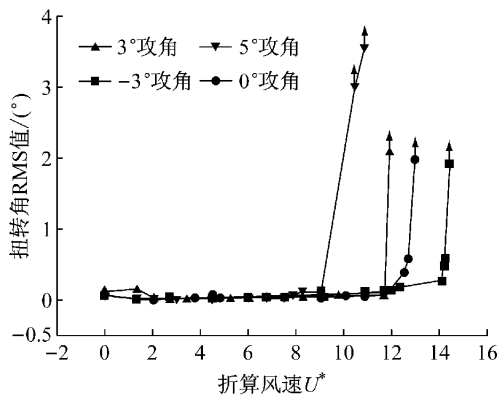


图 16 中央开槽断面响应曲线(成桥状态)

Fig. 16 Response curve of central slotted box girder section (service state)

影响,图 15—18 分别给出了上述 4 种断面的节段模型在成桥状态、无附加阻尼器情况下,各级试验风速的扭转角 RMS 值。从图中可以发现,流线性较差的钝体断面(双边肋断面和半封闭箱断面)比流线性较好的断面(全封闭箱梁断面和中央开槽断面)更容易

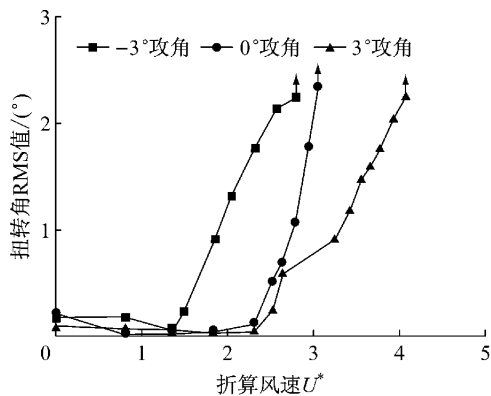


图 17 双边肋断面响应曲线(成桥状态)

Fig. 17 Response curve of double-girder bridge deck section (service state)

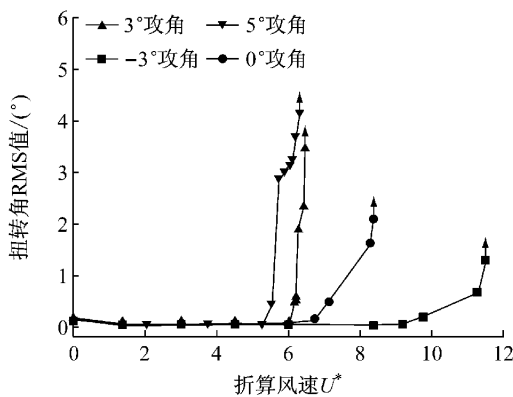


图 18 全封闭箱梁断面响应曲线(成桥状态)

Fig. 18 Response curve of flat box girder section (service state)

出现软颤振,中央开槽断面仅仅在 -3° 和 0° 攻角下出现了极其微弱的等幅振荡现象,而且断面越钝,软颤振的区间越大,软颤振的稳定振幅增长越缓慢,双边肋断面和半封闭箱断面(3° 和 5° 攻角)在软颤振的稳定振幅超过弹簧的线性范围时,仍然未观察到明显的发散现象,而流线性较好的全封闭箱梁断面的软颤振区间窄得多,软颤振区间之后很快就出现了发散振动。攻角也会影响断面的流线性程度,同一种断面下攻角越大,软颤振越容易发生,而且起振风速往往更低(双边肋断面例外)。

为了定量地研究软颤振时弯扭耦合程度的强弱,图 19 中定义“弯扭耦合气动力偏心系数”(简称“气动力偏心系数”) R 为气动中心的偏心距 e 与半桥宽 b 之比。 H 为断面高度。虽然在软颤振过程中,气动中心的偏心距 e 会有稍许波动,但不同流线性断面偏心距 e 的波动范围仍存在明显的差别。图 20 和图 21 显示了两种钝体断面的气动力偏心系数 R 在软颤振区间内,随攻角和风速的变化情况,可以发现,随着风速的增加,钝体断面的弯扭耦合程度均有增强的趋势,即风速越大气动中心越往上游移动,与经典的线性理论的结论相同。

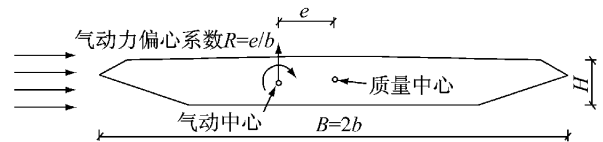


图 19 弯扭耦合气动力偏心系数

Fig. 19 Coefficient of eccentricity for coupled vertical-torsional vibration

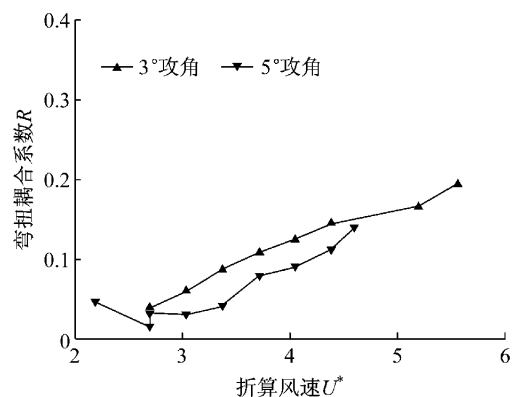


图 20 半封闭箱断面的弯扭耦合系数

Fig. 20 Coefficient of eccentricity for semi-closed box girder section

表 1 进一步给出了 4 种不同流线性断面气动力偏心系数的取值范围,可知断面流线性越差,颤振时弯扭自由度耦合的程度也越弱,这就是导致钝体断

面软颤振的容易发生和较低的起振风速的原因,由于软颤振是发生在单个模态的气动不稳定现象,其仅仅从扭转振动吸取能量,竖弯振动额外提供了一部分正阻尼,相当于附加了调谐质量阻尼器(TMD),因而,弯扭耦合越强烈软颤振就越不容易发生。

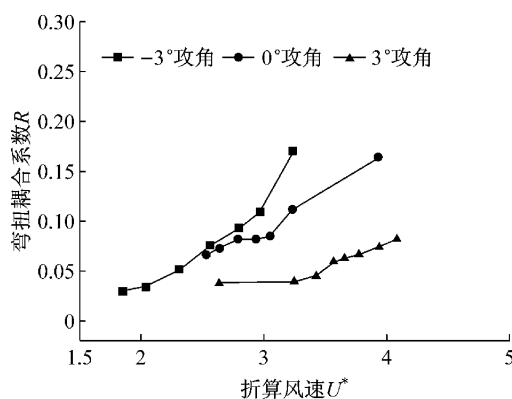


图 21 双边肋断面的弯扭耦合系数

Fig.21 Coefficient of eccentricity for double-girder bridge deck section

表 1 不同断面在软颤振区间内的气动力偏心系数

Tab.1 Coefficient of eccentricity for different sections

断面类型	弯扭耦合系数 R	弯扭耦合程度
双边肋断面	0.05~0.15	极弱
半封闭箱断面	0~0.20	弱
全封闭箱梁断面	0.15~0.30	强
中央开槽断面	0.40~0.70	极强

3 关于软颤振产生机理的讨论

上述常见桥梁断面的软颤振风洞试验结果表明,气动自激力和节段模型弹簧悬挂系统的非线性效应使桥梁断面呈现出异常丰富的非线性软颤振响应。在软颤振风速区间内,气动阻尼不再只跟断面的外形有关,而是随着模型振动状态的变化而改变^[9]。从图 7—10 所示的介于软颤振与经典硬颤振之间的现象可知,软颤振自激力对振动状态的依赖效应主要体现在气动参数随着振动振幅而变化^[9]。因此,在后期建立软颤振的非线性自激力模型时,需要考虑自激力参数随着振幅的变化关系。

钝体断面的软颤振起振风速往往较低,而软颤振发生后振幅在一定风速范围内却不大,不会带来发散性振动的灾难性后果。与经典的硬颤振不同,软颤振很难通过改变结构阻尼比或者桥面附属结构大幅度改变起振风速。因此,在桥梁风工程应用中,软

颤振可以采取类似于涡激共振的设计方法,不需要也不可能完全杜绝其发生,只需要将其稳定振幅限制在一定范围内即可。

4 结论

本文通过节段模型自由振动试验,以桥梁工程中常见的双边肋断面、半封闭箱断面、全封闭箱梁断面和中央开槽断面为研究对象,揭示了其可能出现的软颤振现象,通过试验结果的对比和总结,可以得到如下结论:

(1) 软颤振是单模态的非线性自激振动,表现出弯扭自由度耦合的振动形态。

(2) 桥梁断面流线性越差,越容易发生软颤振,发生软颤振的风速区间也相应地越大,其弯扭自由度耦合程度也就越差;桥面附属设施(栏杆、护栏等)会增加软颤振响应;结构阻尼对软颤振振动响应的影响不显著。

(3) 软颤振是由自激力的非线性效应引起的,而自激力的非线性效应主要体现在气动阻尼不仅跟断面气动外形有关,而且随着结构振动状态而改变。

参考文献:

- [1] Simu E, Scanlan R H. Wind effects on structures: fundamental and applications to design[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [2] 项海帆,葛耀君,朱乐乐,等.现代桥梁抗风理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005.
XIANG Haifan, GE Yaojun, ZHU Ledong, et al. Modern theory and practice on bridge wind resistance [M]. Beijing, China: China Communications Press, 2005.
- [3] Náprstek J, Pospíšil S, Hračov S. Analytical and experimental modeling of non-linear aeroelastic effects on prismatic bodies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 1315.
- [4] Amandolese X, Michelin S, Choquel M. Low speed flutter and limit cycle oscillations of a two-degree-of-freedom flat plate in a wind tunnel [J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 31: 244.
- [5] 张朝贵.桥梁主梁“软”颤振及其非线性自激气动力参数识别[D].上海:同济大学,2007.
ZHANG Zhaogui. “Soft” flutter and parameters identification of nonlinear self-excited aerodynamic force of bridge girders [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [6] 许福友,陈艾荣.印尼 Suramadu 大桥颤振试验与颤振分析[J].土木工程学报,2009,42(1): 35.
XU Fuyou, CHEN Airong. Flutter test and analysis for the Suramadu Bridge in Indonesia [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(1): 35.