

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20241022001

文章编号:1674-599X(2025)02-0079-07

引用格式:文明,申嘉若,李昂,等.带风屏障并行桥尾流激振响应的尺寸效应研究[J].交通科学与工程,2025,41(2):79-85.

Citation: WEN Ming, SHEN Jiaruo, LI Ang, et al. Size effect of wake-induced vibration response of parallel bridges with wind barriers [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 79-85.

带风屏障并行桥尾流激振响应的尺寸效应研究

文明¹,申嘉若²,李昂¹,向活跃²,杨晓坤¹

(1.宁波市市域铁路投资发展有限公司,浙江 宁波 315012;2.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:【目的】并行双桥之间的气动干扰,且加装风屏障显著增加了桥梁的特征高度,背风侧桥梁易产生尾流激振,为确保试验的准确性以及工程的安全性,有必要研究并行桥尾流激振响应的尺寸效应。【方法】针对某并行斜拉桥,分别进行缩尺比为1:20和1:50的主梁节段模型风洞试验,讨论阻尼比、风攻角和主梁外形对尺寸效应的影响。【结果】两桥主梁均有较为明显的尺寸效应。与铁路桥大比尺模型相比,其常规比尺模型的振幅峰值更大,阻尼比和风攻角对尾流激振响应的尺寸效应的影响相对较小,这两种模型的风速区间基本接近。与公路桥大比尺模型相比,其常规比尺模型的竖向和扭转振动的锁定区间更宽,振幅更大;在 -3° 风攻角下,由于铁路桥风屏障的导流作用与常规比尺模型的抖振作用,常规比尺模型的竖向和扭转振幅峰值较低。【结论】同为流线型闭口箱梁,当截面尺寸不同时,其尾流激振的尺寸效应规律也会不同。

关键词:并行桥;尾流激振;尺寸效应;风洞试验;流线型箱梁

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Size effect of wake-induced vibration response of parallel bridges with wind barriers

WEN Ming¹, SHEN Jiaruo², LI Ang¹, XIANG Huoyue², YANG Xiaokun¹

(1. Ningbo Regional Railway Investment and Development Co., Ltd., Ningbo 315012, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: [Purposes] Due to aerodynamic interference between parallel bridges and the significant increase in the characteristic height of the bridge after installation of wind barriers, the bridge on the leeward side is prone to wake-induced vibration. It is necessary to study the size effect of wake-induced vibration response of parallel bridges for ensuring test accuracy and project safety. [Methods] Wind tunnel tests were conducted on parallel cable-stayed bridges with girder section models at scale ratios of 1:20 and 1:50. The effects of the damping ratio, wind attack angle, and girder shape on the size effect were discussed. [Findings] The girders of both bridges have significant size effects. Compared to the large-scale model of the railway bridge, its normal-scale model has a higher peak amplitude, its damping ratio and wind attack angle have a relatively smaller impact on the size effect of the wake-induced vibration response, but wind speed ranges of the two models are basically similar. Compared to the large-scale model of highway bridge, the vertical and torsional vibration lock-in regions are wider, the amplitudes are larger in the normal-scale model of highway bridge. At a -3° wind attack angle, due to the diversion effect of the wind barrier of the railway bridge and the buffet effect of the normal-scale

收稿日期:2024-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978589)

通信作者:申嘉若(2001—),男,博士生,主要从事车-桥耦合振动方面的研究工作。E-mail:1966300271@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

model, the peaks of vertical amplitude and torsional amplitude in the normal-scale model are lower than those in the large-scale model. [Conclusions] The size effect of wake-induced vibration varies depending on the cross-sectional dimensions of the same streamlined closed box girder.

Key words: parallel bridge; wake-induced vibration; size effect; wind tunnel test; streamlined box girder

并行桥之间的气动干扰会加剧桥梁风致振动问题,且因此产生的尾流激振难以被完全抑制,容易导致桥梁构件疲劳破坏,影响行车安全^[1-3]。设置风屏障会增加主梁的特征高度,使得尾流更加复杂,可能进一步恶化尾流激振。风洞试验是目前研究桥梁抗风性能与抑振措施的常用研究手段,受试验条件的限制,该试验往往采用主梁节段缩尺模型进行研究。受雷诺数效应和风洞流场品质的影响,不同尺寸模型的试验结果存在一定差异,因此研究主梁节段模型风洞试验的尺寸效应是必要的。

国内外学者针对主梁节段模型的尺寸效应开展了诸多研究。SCHEWE等^[4]证实了在压力风洞中尾流拓扑结构的变化会引起雷诺数效应,而雷诺数效应是丹麦大贝尔特桥风洞试验得到的涡振起振风速与现场实测结果不一致的主要原因。MATSUDA等^[5]针对分离式双箱梁进行了1:10、1:30、1:80三种几何缩尺比的风洞试验,结果表明几何缩尺比越小,则雷诺数越小,测得的三分力系数越保守。LAROSE等^[6]分别对日本Ikara桥及IHI桥、中国昂船洲大桥进行了不同几何缩尺比的风洞试验,结果表明具有锋利边缘的钝体结构受尺寸效应的影响更明显。张伟等^[7]对西堠门大桥进行了几何缩尺比为1:20和1:40的风洞试验,结果表明,当缩尺比较小时,桥梁涡振的振幅较大。HANSEN等^[8]对流线型箱梁进行了缩尺比为1:10和1:50的风洞试验,并与现场实测的涡振响应进行了对比,结果表明,当缩尺比较小时,桥梁涡振振幅较大,其涡振响应特性与实桥的涡振响应特性较为接近。胡传新等^[9]、李加武等^[10]分别对典型闭口箱梁截面和扁平箱梁截面进行了不同缩尺比的风洞试验,结果表明,小缩尺比主梁节段模型的涡振振幅更小,该结论与文献[7-8]的结果相反。可见,不同断面的尺寸效应对涡振响应的影响有所差异^[11]。

随着并行桥数量的增加,国内外学者对并行桥之间的气动干扰也越来越重视^[12-14]。KIM等^[15]首次现场实测了并行双桥(珍岛大桥)的涡激振动,结果表明当上游桥梁的固有频率比下游桥梁的小时,上游桥梁首先起振,随着风速的增加,涡振移动到下游桥梁,在过渡风速期间,下游桥梁以自身频率和上游桥梁频率

这两个主频率振动,表现出明显的拍振特点。陈政清等^[16]基于广东佛山平胜大桥和青岛海湾大桥的红岛航道桥进行了节段模型风洞试验,研究双幅桥面之间的气动干扰,结果表明双幅桥面之间的气动干扰不可忽视,并可能对桥梁振动产生不利影响。刘小兵等^[17]通过风洞试验研究了大间距并列钝体箱梁的气动干扰对涡振特性的影响,结果表明当间距为梁宽的3倍、风攻角为 $-4^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 时,下游主梁涡振的振幅增大,且风速锁定区间有所增大。

综上所述,虽然国内外学者针对涡激共振响应的尺寸效应进行了深入研究,但当主梁外形不同时,其尺寸效应的规律不尽相同。并行桥之间的气动干扰会加剧桥梁风致振动,而尾流激振具有异于常规涡激共振的特点。因此,有必要针对并行桥尾流激振响应的尺寸效应进行研究。

为研究尺寸效应对并行桥尾流激振响应的影响,本文针对某大跨度并行钢箱梁斜拉桥进行了缩尺比为1:20(大比尺,通常为1:20~1:15)和1:50(常规比尺,通常为1:60~1:45)的主梁节段模型风洞试验,旨在研究不同缩尺比下主梁的涡激共振响应,讨论阻尼比、风攻角及主梁外形等因素对尾流激振尺寸效应的影响。

1 试验概况

1.1 工程背景

某大跨度铁路桥为新建桥梁,与已有的公路斜拉桥并行,两桥孔跨的布设一致,跨径布置均为(82+262+688+262+82)m,两桥主梁的水平净距为50m,在跨中位置铁路桥主梁底面比公路桥的低0.135m,铁路桥立面布置如图1所示。两桥的主梁均为流线型钢箱梁,其中铁路桥主梁梁高4.5m,梁宽21.6m,公路桥主梁梁高3.5m,梁宽34.0m,两桥的主梁断面及空间位置如图1~2所示,模型的相对位置可根据实际工况改变。在公路桥桥面设置高3.5m、透风率为50%的风屏障,其开孔形式为障条式。考虑到行车防风的需要和桥梁的抗风性能,铁路桥也需设置风屏障,风屏障的形式为导流式,轨面以上的高度为3.5m,透风率为50%。

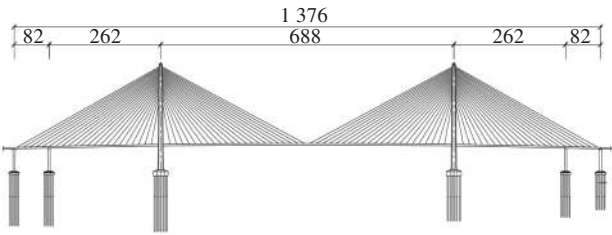


图1 铁路桥立面布置图(单位:m)

Fig. 1 Railway bridge facade layout (unit: m)



图2 并行桥截面布置图

Fig. 2 Section configuration of parallel bridges

1.2 节段模型风洞试验

采用几何缩尺比为1:20和1:50的主梁节段模型进行主梁尾流激振响应试验。对于缩尺比为1:20的节段模型,为减小质量,在模型内部采用木制格构结构,以保证模型的强度,在其外部采用木板包裹,桥面的附属设施采用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile-butdiene-styrene, ABS)板雕刻拼接而成。对于缩尺比为1:50的节段模型,由于部分构件过于细小,受加工工艺及材料强度的限制,对其进行了放大处理,相比之下,大比尺模型在模拟节段模型的细节方面更为精准。这两个缩尺模型的长宽比均大于2,风洞阻塞率均小于5%,符合抗风规范的要求。其参数见表1~2(对铁路桥进行了两种阻尼比试验)。

表1 公路桥主梁节段模型参数

Table 1 Parameters of highway bridge girder section model

研究对象		质量/(kg·m ⁻¹)	质量惯性矩/(kg·m ² ·m ⁻¹)	频率/Hz		阻尼比/%		风速比	
				竖向	扭转	竖向	扭转	竖向	扭转
实桥		27 030.000	2 589 000.000	0.256	0.795	0.300	0.300	—	—
节段模型	1:20	67.433	16.184	1.285	2.675	0.311	0.223	3.58	6.13
	1:50	10.812	0.410	2.035	5.275	0.340	0.300	6.29	7.56

表2 铁路桥主梁节段模型参数

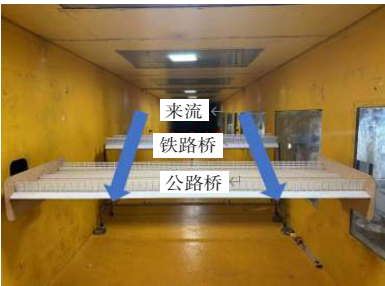
Table 2 Parameters of railway bridge girder section model

研究对象		质量/(kg·m ⁻¹)	质量惯性矩/(kg·m ² ·m ⁻¹)	频率/Hz		阻尼比/%		风速比	
				竖向	扭转	竖向	扭转	竖向	扭转
实桥		37 200.000	1 611 000.000	0.235	0.832	0.300	0.300	—	—
节段模型	1:20	92.888	10.106	1.205	2.870	0.775/0.319	1.034/0.292	3.72	5.636
	1:50	14.064	0.273	1.792	6.247	0.837/0.306	1.053/0.312	6.40	6.540

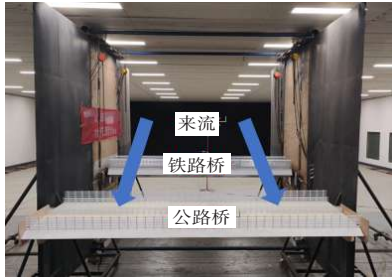
常规比尺(1:50)节段模型的风洞试验是在西南交通大学XNJD-1风洞中进行的。该风洞为闭口回流风洞,第二试验段的截面尺寸为2.4 m(宽)×2.0 m(高),风速范围为1~45 m/s。

大比尺(1:20)节段模型的风洞试验是在西南交通大学XNJD-3大气边界层风洞中进行的。该风洞试验段的截面尺寸为22.5 m(宽)×3.6 m(高),风速范围为1.0~16.5 m/s。该模型由两块4.0 m高的挡风板悬挂,挡风板的尖端为流线型,可减小对风洞流场的干扰。

节段模型的两端通过上下各4个弹簧悬挂在支架上,形成可竖向运动和绕模型轴线转动的二自由度振动系统。为避免三维扰流效应,节段模型两端与挡风板(风洞内壁)之间的间隙足够小,但不会发生接触^[6]。激光位移器放置于节段模型悬挂弹簧的支架下方的一定高度处,对称布置于模型中心线两侧。在调整攻角时,需要保证两桥的相对空间姿态不变。将皮托管风速计置于迎风侧模型高度处,以测量试验风速。主梁节段模型的风洞试验如图3所示。



(a) 常规比尺节段模型



(b) 大比尺节段模型

图3 主梁节段模型风洞试验图

Fig. 3 Wind tunnel test diagram of girder section model

当两桥位于迎风侧时均无明显振动,位于背风侧时其振动对迎风侧模型流场的影响较小。两桥频率有一定差异,不会同时起振,因此将其中一个模型固定,仅采集作为试验对象的模型的风致振动响应。大比尺模型试验在XNJD-3风洞中进行,均匀流下的紊流度约为1.00%^[18];常规比尺模型试验在XNJD-1风洞中进行,该风洞均匀流下的紊流度为0.52%。这两个风洞的紊流度略有差异,但对于流线型截面而言,紊流度的小幅变化对试验结果的影响较小^[19]。

2 结果讨论

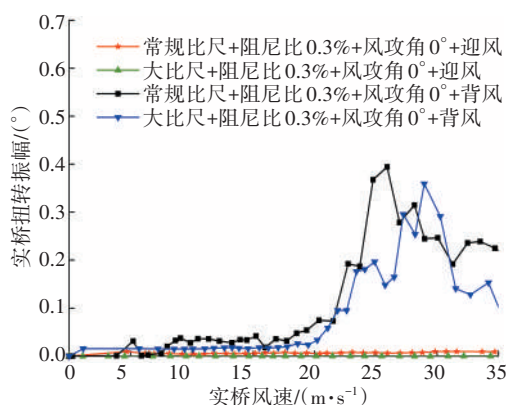
本文对并行双桥进行大比尺和常规比尺主梁节段模型尾流激振试验,实桥风速均为0~35 m/s。在试验中分别测试了双桥在不同来流方向、阻尼比和风攻角下节段模型的尾流激振响应特性,以研究并行桥尾流激振尺寸效应的影响因素。

2.1 风向的影响

本文的研究对象为并行双桥,风向会对桥梁的风致振动响应特性产生较大的影响。位于迎风侧的桥梁直接受到自然来流的作用,产生常规涡振;位于背风侧的桥梁由于双桥之间的气动干扰,受到迎风侧桥梁尾流的作用,产生尾流激振。为研究风向对尺寸效应的影响,本文分别测试了铁路桥模型位于迎风侧和背风侧时的风致振动响应特性,不同比尺下铁路桥的风致振动响应如图4所示。

由图4可知,当铁路桥位于迎风侧时,两种比尺模型均未观测到明显的涡激振动;而当铁路桥位于背风侧时,两种比尺模型均在风速区间5~10 m/s出现了明显的竖向振动,在风速区间20~35 m/s出现了扭转振动,两种比尺模型的锁定区间接近,但振幅峰值有一定差异,说明存在尺寸效应。因此,在接下来的研究中只研究模型位于背风侧时尾流激振响应的尺寸效应。

当铁路桥位于背风侧时,在风速区间15~30 m/s,常规比尺模型出现了较大的竖向振动,对该风速区间的竖向振动进行频域分析后发现,此时的振动具有两



(b) 扭转涡振响应

图4 尾流激振对铁路桥尺寸效应的影响

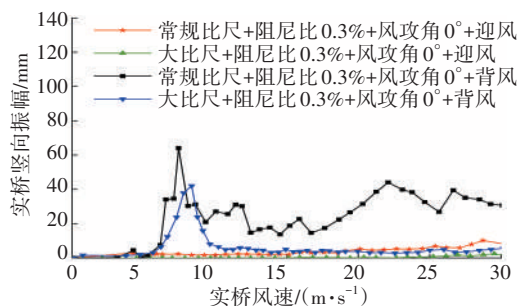
Fig. 4 Influence of wake-induced vibration on the size effect of railway bridge

个卓越频率,分别为与模型竖向振动基频(1.792 Hz)接近的1.823 Hz和与模型扭转振动基频(6.247 Hz)接近的6.055 Hz。此时风速较大,加之常规比尺模型的质量较轻,模型产生了较为剧烈的扭转振动,这可能是模型质心与截面受力中心存在差异导致的;大比尺模型的质量为360 kg,受此影响较小,因而在风速区间15~30 m/s未观测到明显的竖向振动。

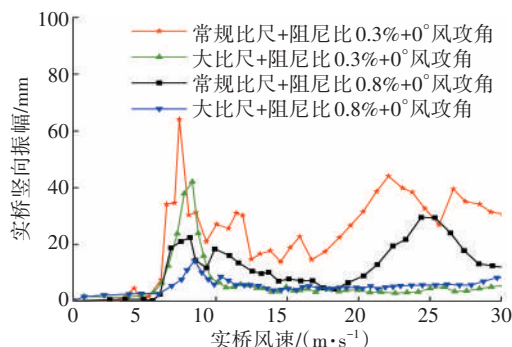
2.2 阻尼比的影响

为研究阻尼比对尺寸效应的影响,本文设置了竖向和扭转阻尼比均为0.3%的低阻尼比工况,和竖向阻尼比为0.8%、扭转阻尼比为1.0%的高阻尼比工况。由于阻尼比具有非线性特征,在模态测试中对模型施加激励,并在模型振动振幅与涡振振幅接近时测试模型阻尼,以确保不同比尺模型在发生涡振时具有相同的阻尼。本文分别测试了大比尺和常规比尺下铁路桥主梁节段模型位于背风侧时的尾流激振特性,结果如图5所示。

由图5可知,在不同阻尼比下,两种比尺模型的尾流激振起振风速比较接近,常规比尺模型的竖向和扭转振幅普遍比大比尺模型的大。随着阻尼比的增大,两种比尺模型的竖向振幅峰值的差异变小,而扭转振



(a) 竖向涡振响应



(a) 竖向涡振响应

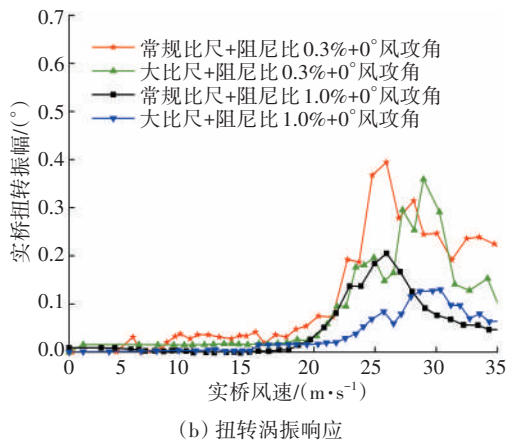


图5 阻尼比对铁路桥尺寸效应的影响

Fig. 5 Influence of damping ratio on the size effect of railway bridge

幅峰值的差异变大。这可能是大比尺模型的实际扭转阻尼比(0.25%)略小于常规比尺模型的实际扭转阻尼比(0.3%),导致大比尺模型的扭转振幅略大,但尺寸效应规律总体上并未随阻尼比的变化而变化。

2.3 风攻角的影响

为对比不同风攻角下尺寸效应的影响,本文分别测试了大比尺和常规比尺下主梁节段模型在 0° 、 $+3^\circ$ 风攻角下的尾流激振特性。图6所示为不同风攻角下的尾流激振响应。

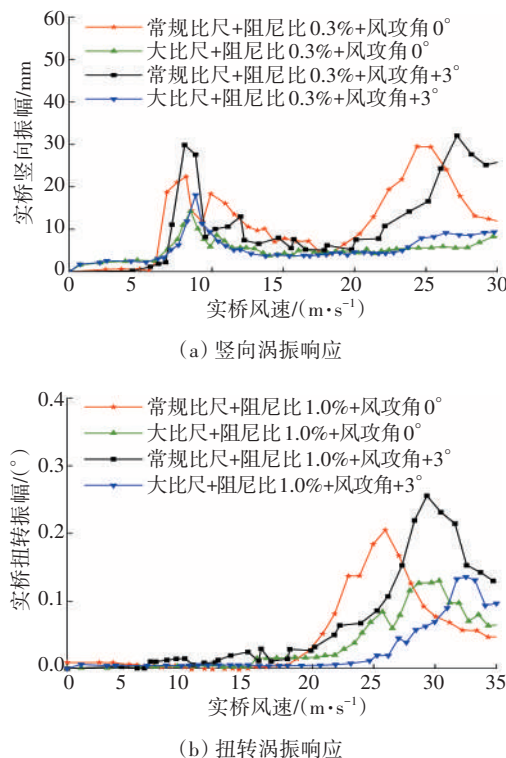


图6 风攻角对铁路桥尺寸效应的影响

Fig. 6 Influence of wind attack angle on the size effect of railway bridge

由图6可知,在不同风攻角下,常规比尺模型的竖向和扭转振幅均比大比尺模型的大,但两种比尺模型的起振风速接近,且其竖向和扭转振幅的峰值也比较接近。随着风攻角的增大,主梁结构流线型的优势被弱化,主梁结构表现出类似钝体结构的特性,导致振动振幅增大^[20-21]。不过,风攻角对尾流激振响应尺寸效应的影响较小。

2.4 主梁外形的影响

本文所研究的两座并行桥的主梁截面均为流线型闭口钢箱梁,但断面外形存在明显差异。其中,铁路桥主梁的梁高为4.5 m,梁宽为21.6 m,宽高比相对较小;而公路桥主梁的梁高为3.5 m,梁宽为34.0 m,宽高比相对较大,主梁更加扁平。为分析这两种桥梁外形下尾流激振尺寸效应的差异,本文分别将公路桥模型、铁路桥模型置于背风侧,在风速区间 $0 \sim 35$ m/s测试其尾流激振响应。公路桥模型位于背风侧时的尾流激振响应如图7所示。

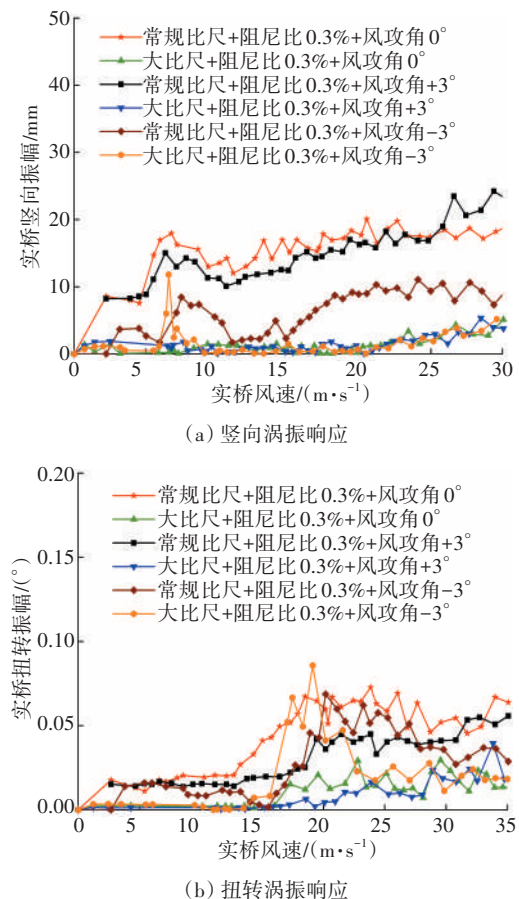


图7 公路桥的尺寸效应

Fig. 7 Size effect of highway bridge

由图7可知,当风攻角为 0° 和 $+3^\circ$ 时,常规比尺模型的竖向与扭转振幅始终比大比尺模型的大。但在 -3° 风攻角下,常规比尺模型的竖向与扭转振幅峰值均

比大比尺模型的小。

由图6~7可知,当公路桥位于背风侧时,其竖向和扭转振动的锁定区间更大,且在风速区间的后半段,随着风速的增大,振幅的下降变平缓,说明此时振动受紊流所产生的抖振的影响较大。因此,与铁路桥位于背风侧时的响应相比,公路桥位于背风侧时的锁定区间并不明显。

在 -3° 风攻角下,铁路桥的风屏障将气流导向了公路桥下方。由于风攻角的变化,公路桥上表面所受到的铁路桥的遮挡作用有所减弱,公路桥易发生振动,而常规比尺模型受抖振影响较大,进而会对流场产生干扰,所以此时公路桥的尾流激振响应较小。

3 问题与展望

针对桥梁风致振动尺寸效应的研究已有较多,但当桥梁断面不同时,其研究结论也存在较大差异。本文讨论了并行桥尾流激振的尺寸效应特性:同为流线型闭口钢箱梁,铁路桥大比尺模型的振幅要比其常规比尺模型的小;而在 -3° 风攻角下,公路桥大比尺模型的振幅要比其常规比尺模型的大。这说明即使是相同的截面类型,不同桥梁尾流激振(涡激共振)的尺寸效应规律也会不同,但其普适性还需要进一步研究。

本文只进行了1:20和1:50两种几何缩尺比下主梁节段模型的风洞试验,且缩尺模型试验是在最不利的状态下进行的。今后可以有针对性地开展现场实测,以研究试验结果与实测值之间的差异。

4 结论

本文通过风洞试验,对某大跨度并行双桥进行了风洞试验,对比了几何缩尺比1:20和1:50下主梁节段模型的尾流激振响应,研究了并行桥尾流激振响应的尺寸效应,得出以下结论:

1) 当桥梁位于迎风侧时无明显涡振;当桥梁位于背风侧时,受并行桥之间气动干扰的影响,出现了明显的尾流激振。

2) 铁路桥大比尺节段模型的尾流激振响应比其常规比尺节段模型的小,阻尼比与风攻角对尾流激振响应的尺寸效应影响较小。使用小比尺节段模型的试验结果来预测实桥涡振振幅偏于保守。

3) 主梁外形对尺寸效应的影响较大。对于相同的截面类型(流线型闭口箱梁),在 -3° 风攻角下,公路桥大比尺模型的主梁尾流激振振幅峰值比其常规比尺模型的大,该试验结果与铁路桥的试验结果相反。

参考文献(References):

- [1] 宋玉冰, 蒯子龙, 杨凌, 等. 大跨度双幅非对称平行主梁涡激振动干扰效应研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(7): 1-9, 29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.07.001.
SONG Yubing, TI Zilong, YANG Ling, et al. Influences of aerodynamic interference effect on VIV performance of large-span asymmetrical twin parallel decks [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(7): 1-9, 29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.07.001.
- [2] 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.
- [3] 郭向荣, 肖一凡. 并列相邻桥梁气动干扰对车桥耦合振动的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3831-3840. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221970.
GUO Xiangrong, XIAO Yifan. Influence of aerodynamic interference of parallel adjacent bridges on coupled vibration of train-bridge system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3831-3840. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221970.
- [4] SCHEWE G, LARSEN A. Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 829-838. DOI: 10.1016/S0167-6105(98)00075-0.
- [5] MATSUDA K, COOPER K R, TANAKA H, et al. An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1:10 scale bridge deck section model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(7-8): 619-632. DOI: 10.1016/S0167-6105(01)00062-9.
- [6] LAROSE G L, D'AUTEUIL A. On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(5): 365-376. DOI: 10.1016/j.jweia.2006.01.011.
- [7] 张伟, 魏志刚, 杨咏昕, 等. 基于高低雷诺数试验的分离双箱涡振性能对比[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 6-11. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-374X.2008.01.002.
ZHANG Wei, WEI Zhigang, YANG Yongxin, et al. Comparison and analysis of vortex induced vibration for twin-box bridge sections based on experiments in different Reynolds numbers [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(1): 6-11. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-374X.2008.01.002.
- [8] HANSEN S O, HORN A D, SROUJI R G. Wind actions on cable-supported bridges [C]//Geotechnical and

- Structural Engineering Congress 2016. Phoenix: American Society of Civil Engineers, 2016. DOI: 10.1061/9780784479742.010.
- [9] 胡传新, 赵林, 陈海兴, 等. 流线闭口箱梁涡振气动力的雷诺数效应研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 118-125. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.12.017.
- HU Chuanxin, ZHAO Lin, CHEN Haixing, et al. Reynolds number effects on aerodynamic forces of a streamlined closed-box girder during vortex-induced vibrations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(12): 118-125. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.12.017.
- [10] 李加武, 林志兴, 金挺. 压力积分法在桥梁断面雷诺数效应研究中的应用[J]. 振动工程学报, 2006, 19(4): 505-508. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2006.04.013.
- LI Jiawu, LIN Zhixing, JIN Ting. Application of pressures integration in effects of bridge decks [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(4): 505-508. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2006.04.013.
- [11] 刘志文, 林子楠, 邵超逸, 等. 流线型箱梁涡激共振响应模型尺寸效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 109-118. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2023011.
- LIU Zhiwen, LIN Zinan, SHAO Chaoyi, et al. Model size effects on vortex-induced vibration responses of a streamlined box girder [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 109-118. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2023011.
- [12] 刘斌. 甬舟铁路桃夭门大桥方案研究与设计[J]. 铁道标准设计, 2017, 60(5): 77-81. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2017.05.017.
- LIU Bin. The research and design of taoyaomen bridge on Ningbo-Zhoushan railway [J]. Railway Standard Design, 2017, 60(5): 77-81. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2017.05.017.
- [13] 李鸣鹤. 公铁并行桁架主梁与Π型梁气动干扰效应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2023.002638.
- LI Minghe. Study on aerodynamic interference effects of truss girder and Π-shaped girder of the parallel long-span highway and railway bridges [D]. Changsha: Hunan University, 2023. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2023.002638.
- [14] 罗士瑾, 徐力, 华旭刚, 等. 新建桥梁与邻近既有桥梁主梁涡振气动干扰效应风洞试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2561-2571. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221347.
- LUO Shijin, XU Li, HUA Xugang, et al. Wind tunnel tests on aerodynamic interference effect of parallel bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(7): 2561-2571. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221347.
- [15] KIM S J, KIM H K, CALMER R, et al. Operational field monitoring of interactive vortex-induced vibrations between two parallel cable-stayed bridges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 143-154. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.10.001.
- [16] 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, 37(6): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2007.06.003.
- CHEN Zhengqing, NIU Huawei, LIU Zhiwen. Study of aerodynamic interference effect on main girders of twin-deck bridges[J]. Bridge Construction, 2007, 37(6): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2007.06.003.
- [17] 刘小兵, 李少杰, 陈帅, 等. 大间距并列双钝体箱梁气动干扰效应试验研究[J]. 世界桥梁, 2018, 46(2): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2018.02.008.
- LIU Xiaobing, LI Shaojie, CHEN Shuai, et al. Experimental study of aerodynamic interference effects of twin parallel bluff box girders with large intervals[J]. World Bridges, 2018, 46(2): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2018.02.008.
- [18] XIANG H Y, LI Y L, WANG B. Aerodynamic interaction between static vehicles and wind barriers on railway bridges exposed to crosswinds [J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 237-247. DOI: 10.12989/was.2015.20.2.237.
- [19] 张天翼. 紊流场中矩形和流线型箱梁涡激振动响应及气动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.003636.
- ZHANG Tianyi. The response and aerodynamic characteristic of vortex-induced vibration of rectangular and streamlined box girder in turbulent flow [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.003636.
- [20] 朱思宇, 李永乐, 申俊昕, 等. 大攻角来流作用下扁平钢箱梁涡振性能风洞试验优化研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 79-86.
- ZHU Siyu, LI Yongle, SHEN Junxin, et al. Optimization of vortex-induced vibration of flat steel box girders at large attack angle by wind tunnel test [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 79-86.
- [21] 王传福, 杨定军. 挪威哈罗格兰德大桥主缆猫道抗风系统构造与性能研究[J]. 公路与汽运, 2023(1): 107-110, 115. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.021.
- WANG Chuanfu, YANG Dingjun. Study on the structure and performance of the wind-resistant system of the main cable catwalk of Hålogaland Bridge in Norway [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(1): 107-110, 115. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.021.

(责任编辑:石月珍)