

大跨度悬索桥抖振风洞试验与现场实测比较

王守强

(上海隧道工程股份有限公司, 上海市 200032)

摘要: 针对国内典型悬索桥,开展节段模型与全桥模型风洞试验,并结合台风及冬季强风条件下的抖振响应现场实测数据,对比分析了风洞试验与实测结果。研究表明:节段及全桥模型抖振试验在特定流场中与实测值吻合,延长采样时间可提升结果稳定性;桥梁位移响应随风速增大呈非线性增长;相同风速下,斜风(偏角 5°)条件下位移均方值大于垂直来流,斜风更易引发大响应;位移响应随紊流积分尺度增大先减后增。该研究验证了风洞试验设计的合理性与准确性,为同类桥梁风洞试验方案优化、采样参数设定提供科学依据,明确斜风、紊流积分尺度等关键风场参数对抖振响应的影响规律,为悬索桥抗风设计精细化优化及振动控制措施制定提供可靠支撑。

关键词: 悬索桥;抖振响应;风洞试验;现场实测

中图分类号: U441⁺.3;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0145-06

Comparison of Wind Tunnel Tests and Field Measurements for Buffeting of Long-span Suspension Bridges

WANG Shouqiang

(Shanghai Tunnel Engineering Limited Company, Shanghai 200032, China)

Abstract: Aiming at the typical suspension bridges in China, the wind tunnel tests on segmental models and full-bridge models are conducted, and combined with the field measurement data of buffeting response under typhoon and winter strong wind conditions, the wind tunnel test and measured results are compared and analyzed. The research result shows that the buffeting tests of segmental and full-bridge models are consistent with the measured values in specific flow fields, and extending the sampling time can improve the stability of the results. The bridge displacement response increases nonlinearly with the increase of wind speed. Under the same wind speed, the root mean square (RMS) value of displacement under oblique wind (5° angle of attack) is larger than that under vertical inflow, indicating that oblique wind is more likely to induce large responses. The displacement response first decreases and then increases with the increase of turbulence integral scale. The rationality and accuracy of the wind tunnel test design are verified, which provides a scientific basis for the optimization of wind tunnel test schemes and setting of sampling parameters of similar bridges, clarifies the influence laws of key wind field parameters such as oblique wind and turbulence integral scale on buffeting response, and provides reliable support for the refined optimization of anti-wind design and the formulation of vibration control measures for suspension bridges.

Keywords: suspension bridges; buffeting response; wind tunnel tests; field measurement

0 引言

抖振是由风场中的紊流或风速脉动成分引起的随机强迫振动,分为来流紊流抖振和特征紊流抖振。来流紊流抖振是指桥梁结构因风场在到达前形成的紊流引起的振动,特征紊流抖振是指桥梁结构因风场绕过桥梁形成的紊流引起的振动^[1-3]。

桥梁抖振研究常见方法的结果并不能完全统一^[4-6],出现这一现象的主要原因包括:现场实测的影响因素很多,然而在风洞试验和数值模拟的过程中影响因素考虑不能全部考虑,导致和实测结果相差较大^[7]。

随着国内外桥梁健康监测系统的大规模安装,采集到大量的桥梁抖振数据,使得桥梁抖振响应多尺度研究得以开展。国内外研究有:

Miyata等^[8]进行了明石海峡大桥现场实测与数值模拟结果等不同尺度下的抖振响应比较,得出斜风作用下用调整后的风速来预测主梁位移是不充分

收稿日期: 2026-02-04

基金项目: 上海市青年科技启明星计划(21QB1405100)

作者简介: 王守强(1987—),男,博士,高级工程师,从事桥梁结构设计与施工工作。

的,实测响应与数值模拟结果在风向与桥梁轴线的夹角小于30°时符合的较好。

朱乐东等^[9-10]对青马大桥进行了现场实测与数值模拟结果等不同尺度下的比较,得出对于主跨断面,桥梁断面横向、竖向和扭转方向加速度均方值的现场实测与数值模拟结果相近:横向加速度相对差值小于34%,竖向和扭转加速度相对差值小于20%。

Bietry 等^[11]在 Saint-Nazair 斜拉桥、Macdonald^[12]对 Second Severn Crossing cable-stayed bridge,王浩、李爱群等^[13]对润扬大桥进行了现场实测与数值模拟结果的不同尺度比较,得出现场实测桥梁抖振响应与数值模拟结果存在统一性。

本文通过选取国内典型悬索桥进行了节段模型风洞试验和全桥模型风洞试验研究,同时针对抖振响应现场实测在台风及冬季强风条件下健康监测数据进行分析,并将风洞试验结果与现场实测进行了比较。

1 桥梁抖振风洞试验

桥梁抖振风洞试验进行了节段模型试验和全桥模型试验两种情况。

1.1 节段模型抖振试验

针对节段模型试验进行了不同流场下,主梁位移响应随风速变化试验(见图1),从图中可以得出:桥梁抖振位移均方值随风速上升成非线性增大,在低风速条件下,不同攻角对桥梁振动影响较小,为了简化分析,现场实测桥梁响应分析时可以不考虑风攻角影响;桥梁响应在紊流场条件下比在均匀流场条件下大,这一现象的存在要求现场实测研究重点关注非平稳风场下的桥梁响应。

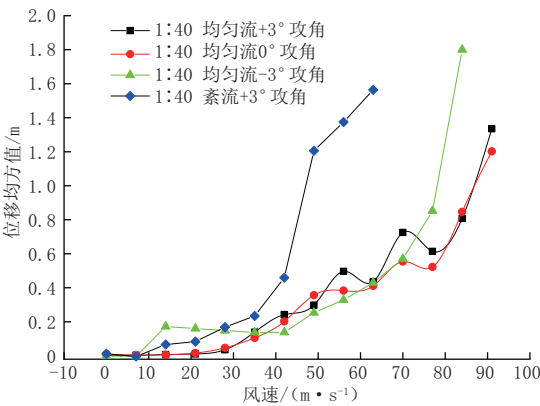


图1 节段模型测振试验结果

由图1对风速为15、20、25 m/s下竖向响应均方值进行总结,如表1所示。

表1 桥梁节段模型抖振试验结果汇总 单位:cm

流场	风攻角/(°)	风速 15 m/s	风速 20 m/s	风速 25 m/s
均匀流	+3	0.7	1.1	3.5
	0	0.5	1.6	4.7
	-3	17.2	16.0	14.9
紊流	0	6.6	8.3	16.8

1.2 全桥模型抖振试验

因为桥梁实测只得出竖向位移,从而全桥模型抖振试验方法只给出竖向位移。在不同流场中,加劲梁的主跨跨中、主跨四分点和边跨跨中位置的竖向位移均方值结果如图2所示,不同风速下桥梁竖向位移结果如表2所示。

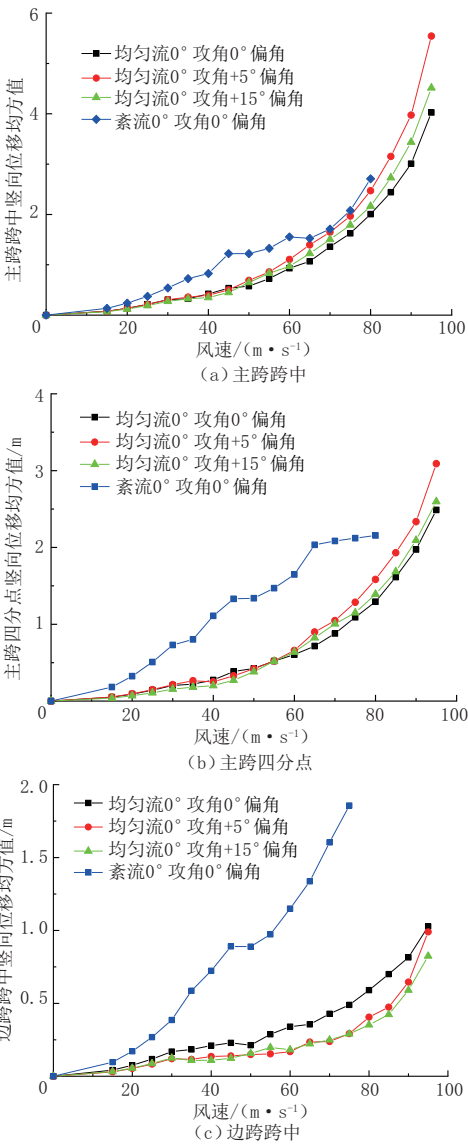


图2 全桥模型抖振试验结果

2 桥梁抖振实测

2.1 实桥抖振响应监测

本文分析国内某典型大跨度悬索桥健康监测系

表2 桥梁全桥模型抖振试验结果汇总				单位:cm	
流场	风偏角/(°)	风速 15 m/s	风速 20 m/s	风速 25 m/s	
主跨跨中	均匀流	0	7.7	13.7	
		+5	7.6	13.6	
		+15	6.8	12.2	
	紊流	0	13.5	23.9	
		0	5.1	9.0	
		+5	5.3	9.5	
主跨四分之一点	均匀流	+15	3.9	6.9	
	紊流	0	18.3	32.5	
		0	4.2	7.5	
	紊流	+5	3.0	5.3	
	紊流	+15	3.1	5.6	
		0	9.6	17.1	
边跨跨中	均匀流	0	4.2	7.5	
	紊流	+5	3.0	5.3	
		+15	3.1	5.6	
	紊流	0	9.6	17.1	
	紊流	0	18.3	32.5	
		0	4.2	7.5	

统采集到的数据,自2009年12月—2016年3月共76个月的风速记录数据,对这些数据进行整理,得出

10 min 平均风速超过 15 m/s 共 62 次,其中台风 11 次,良态风 51 次;10 min 平均风速超过 20 m/s 共 6 次,其中台风 2 次,良态风 4 次。每一次强风选取的记录时间长度不同。本文对在此悬索桥测得 62 次强风进行研究,每次强风选取的研究时间长度不同,总共 2 716 h 数据,这 62 次强风最大 10 min 平均风速及发生时间详如表 3 所示。

通过数据预处理分析,本文最终采用了桥梁跨中处风速仪进行风速数据进行分析,风速玫瑰图如图 3 所示。由风速玫瑰图可以看出,大部分风都是从桥梁右侧吹来,研究中采用的风速风向仪在上风侧,可以有效避免桥梁断面对风场的影响;风场与桥梁轴线基本垂直,便于进一步数据提取及处理。

风向虽然没有完全垂直于桥梁轴线,结合 Miyata 的研究结论,本文选择风向与桥梁轴线的夹角小于

表3 强风最大 10 min 平均风速记录				单位:m/s			
序号	日期	时刻	风速	序号	日期	时刻	风速
1	2010-03-09	21:00	16.74	32	2013-10-15	16:00	16.63
2	2010-12-02	23:00	17.65	33	2013-10-25	2:00	16.12
3	2010-12-06	14:00	15.76	34	2013-11-17	2:00	15.37
4	2010-12-16	8:00	16.93	35	2013-11-24	22:00	18.11
5	2010-12-31	18:00	23.49	36	2013-11-28	0:00	16.16
6	2011-01-06	13:00	15.51	37	2013-11-29	1:00	16.55
7	2011-03-15	11:00	16.75	38	2013-12-09	15:00	16.91
8	2011-08-07	5:00	26.50	39	2013-12-18	4:00	15.60
9	2011-09-19	18:00	15.68	40	2013-12-26	23:00	19.19
10	2011-11-30	17:00	16.73	41	2014-01-08	11:00	15.47
11	2011-12-08	11:00	17.20	42	2014-02-10	2:00	16.42
12	2012-01-04	0:00	16.11	43	2014-07-09	0:00	15.94
13	2012-02-07	4:00	17.99	44	2014-08-20	10:00	15.04
14	2012-03-15	22:00	15.01	45	2014-09-23	3:00	19.37
15	2012-04-03	6:00	20.38	46	2014-10-12	19:00	20.13
16	2012-04-25	9:00	15.35	47	2014-11-02	9:00	17.00
17	2012-05-30	7:00	15.00	48	2014-12-01	7:00	19.90
18	2012-08-27	19:00	21.33	49	2014-12-04	2:00	17.51
19	2012-09-13	17:00	15.85	50	2014-12-11	2:00	15.96
20	2012-09-16	19:00	17.37	51	2014-12-16	7:00	19.12
21	2012-10-17	6:00	16.43	52	2014-12-31	13:00	19.14
22	2012-11-04	2:00	15.05	53	2015-01-01	3:00	15.95
23	2012-11-10	21:00	18.17	54	2015-01-14	7:00	18.72
24	2012-11-17	2:00	17.18	55	2015-07-11	15:00	19.74
25	2012-11-26	1:00	19.21	56	2015-08-24	14:00	18.22
26	2012-12-05	16:00	17.78	57	2015-10-01	22:00	15.12
27	2012-12-23	10:00	15.81	58	2015-11-26	3:00	19.74
28	2012-12-30	1:00	22.60	59	2015-12-03	21:00	16.83
29	2013-04-06	6:00	19.25	60	2015-12-16	19:00	17.48
30	2013-05-26	10:00	15.73	61	2016-01-24	9:00	23.15
31	2013-07-13	22:00	16.01	62	2016-03-10	4:00	15.45

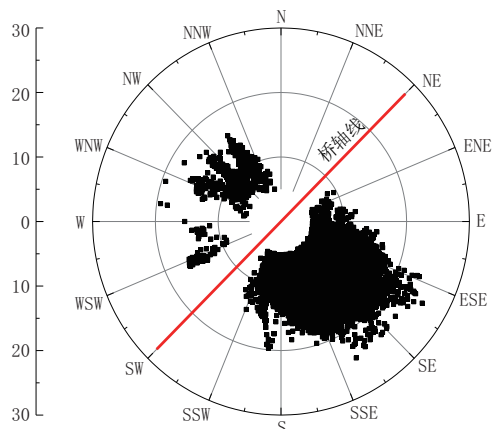


图3 风玫瑰图(单位:m/s)

30°的情况进行分析,对竖向加速度功率谱积分可得出桥梁跨中断面竖向位移响应均方值随平均风速的变化情况,如图4所示。结合抖振响应和风场特性计算结果可以看出抖振竖向位移随平均风速的增大呈增大趋势,这一现象反映了数据的有效性。

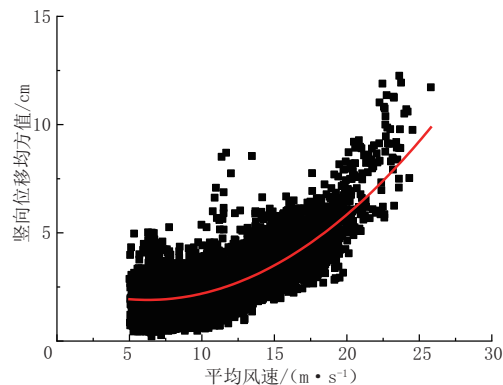


图4 竖向位移均方值随平均风速的变化

通过皮尔逊积矩相关系数方法判断了风场特性(包括平均风速、风攻角、风向角、紊流度以及紊流积分尺度)与桥梁响应的相关性。为了精确判断风场各参数对桥梁响应的影响,下面对风场特性(风攻角、风向角、紊流度与紊流积分尺度)的统计规律进行总结,如图5所示。

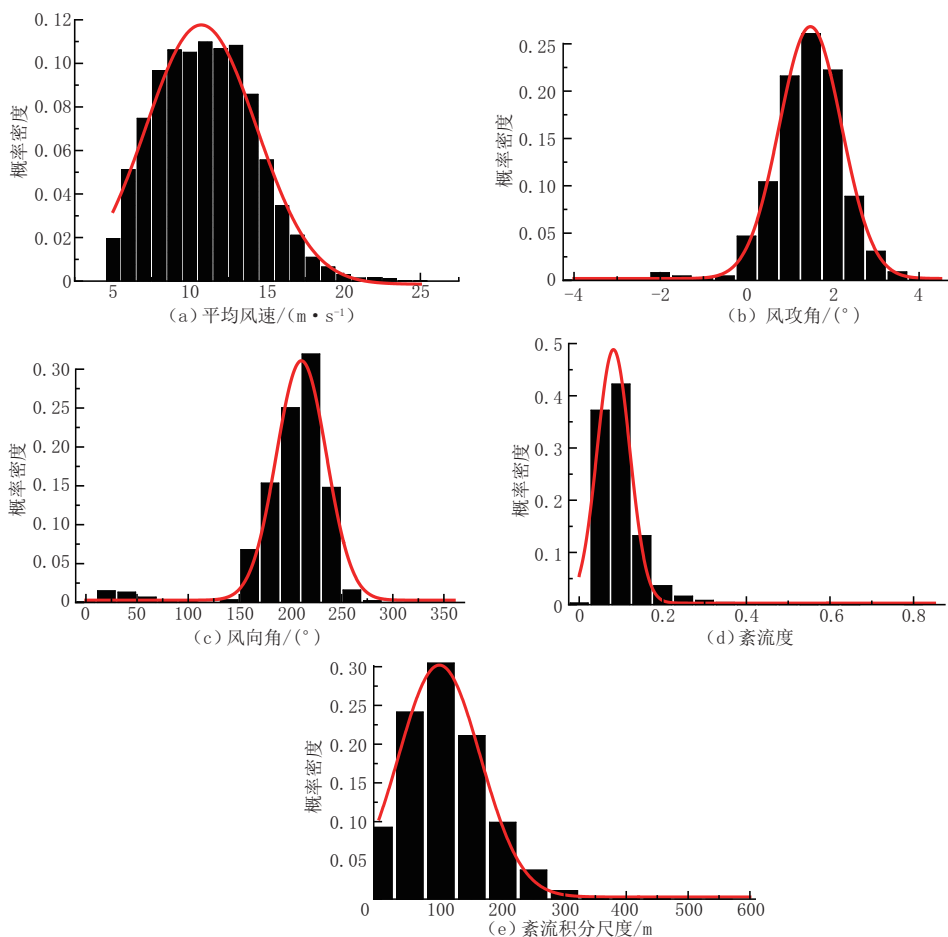


图5 风场各参数概率密度分布

通过图5可看出,10 min 平均风速、风攻角、风向角、紊流度以及紊流积分尺度等风场参数概率较大区间分别为8~14 m/s、1°~2°、180°~240°、0.05~0.15以及50~200 m。为了获得风场特性相近的多个实测数据,本文所选择数据均在以上范围内。

对这些强风条件下桥梁响应均方值随风场参数变化情况,如图6所示,图6(a)为位移响应随风速变化,图6(b)为不同偏角下位移响应随风速变化,图6(c)为不同风速下位移响应随紊流积分尺度变化。

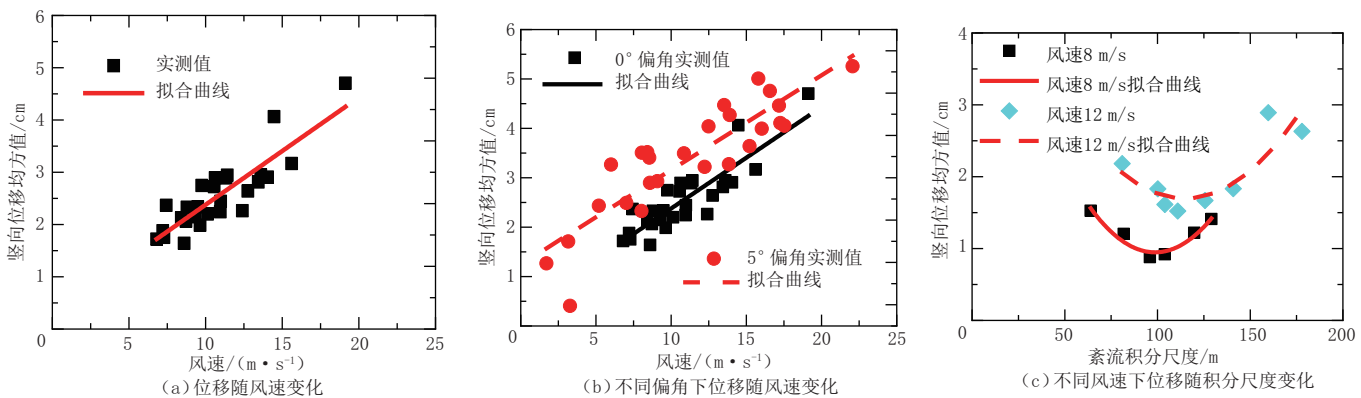


图6 桥梁响应均方值随风场参数变化情况

由图6可以看出,风速相同时,偏角为5°时桥梁位移均方值比垂直来流要大,这也说明在斜风条件下桥梁响应有可能增大;风速相同时,桥梁位移响应随紊流积分尺度的增大先减小后增大。

2.2 桥梁抖振比较

汇总节段模型试验、全桥模型试验、实桥抖振监测的结果,如表4所示。

二维桥梁抖振数值方法与节段模型抖振试验只给出主跨跨中结果,由表4可以看出:节段模型抖振试验在+3°攻角和0°攻角的均匀流中桥梁竖向响应比实测值小,在-3°攻角的均匀流中桥梁竖向响应比实测值大,在0°攻角的紊流中桥梁竖向响应与实测值吻合较好(特别是在风速为15 m/s和20 m/s时),造成这一现象的原因是:风洞试验中难于控制低风速加载过程,低风速下一方面紊流度很高,另一方面

紊流会影响风速在一定范围内波动。
全桥模型抖振试验在均匀流条件下,风速为15 m/s时与实测值相吻合,然而随着风速的增加全桥模型抖振试验比实测值偏大,在紊流场中这种现象尤为明显,研究时在对应风速区间进行适当多的数据采集可以一定程度上提高数据准确度。

3 结 语

本文选取国内典型悬索桥进行了节段模型风洞试验、全桥气弹模型风洞试验和实桥抖振响应监测,多种结果比较了典型桥梁断面抖振响应,验证了风洞试验设计的合理性与准确性,为后续同类悬索桥风洞试验方案优化、采样参数设定提供了科学依据,同时明确了斜风、紊流积分尺度等关键风场参数对桥梁抖振响应的影响规律,为桥梁抗风设计的精细

表4 桥梁抖振多尺度分析 单位:cm

位置	抖振分析方法	特性	风速 15 m/s	风速 20 m/s	风速 25 m/s
主跨跨中	实测	风场特性变化	6.6	8.2	12.3
		+3°攻角均匀流	0.7	1.1	3.5
	节段模型试验	0°攻角均匀流	0.5	1.6	4.7
		-3°攻角均匀流	17.2	16.0	14.9
		0°攻角紊流	6.6	8.3	16.8
		0°偏角均匀流	7.7	13.7	21.3
	全桥模型试验	+5°偏角均匀流	7.6	13.6	21.2
		+15°偏角均匀流	6.8	12.2	19.0
		0°偏角紊流	13.5	23.9	37.4
		0°偏角紊流	13.5	23.9	37.4
主跨四分区	实测	风场特性变化	5.5	6.8	12.3
		0°偏角均匀流	5.1	9.0	14.1
	全桥模型试验	+5°偏角均匀流	5.3	9.5	14.8
		+15°偏角均匀流	3.9	6.9	10.8
		0°偏角紊流	18.3	32.5	50.7
		0°偏角紊流	18.3	32.5	50.7
边跨跨中	实测	风场特性变化	7.3	6.5	11.0
		0°偏角均匀流	4.2	7.5	11.8
	全桥模型试验	+5°偏角均匀流	3.0	5.3	8.3
		+15°偏角均匀流	3.1	5.6	8.7
		0°偏角紊流	9.6	17.1	26.8
		0°偏角紊流	9.6	17.1	26.8

化优化、风致振动控制措施的制定提供了可靠的试验与实测支撑。

参考文献:

- [1] 葛耀君.大跨度悬索桥抗风[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] Scanlan R H. The action of flexible bridges under wind, I: Flutter theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 60(2):187-199.
- [3] Scanlan R H. The action of flexible bridges under wind, II: Buffeting theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 60(2):201-211.
- [4] 葛耀君,项海帆.大跨度桥梁风致振动控制研究[C]//全国结构风工程实验技术研讨会论文集.北京:中国土木工程学会与中国空气动力学会,2004.
- [5] 陈斌,高文军,张玉杰.厦漳跨海大桥南汉主桥抗风试验研究[C]//中国公路科技创新高层论坛论文集.北京:中国公路科技创新高层论坛,2013.
- [6] 于洪刚.大跨度拱桥气动参数识别及风致响应研究[D].上海:同济大学,2008.
- [7] 王守强,赵林,葛耀君.大跨度悬索桥涡振风洞试验与现场实测比较[J].结构工程师,2018,34(3):122-127.
- [8] Miyata T, Yamada H, Katsuchi H, et al. Full-scale measurement of

Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12):1517-1527.

- [9] Zhu L D, Xu Y L. Buffeting response of long-span cable-supported bridges under skew winds. Part 1: theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 281(3):647-673.
- [10] Xu Y L, Zhu L D. Buffeting response of long-span cable-supported bridges under skew winds. Part 2: case study [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 281(3):675-697.
- [11] Bietry J, Delaunay D, Conti E. Comparison of full-scale measurement and computation of wind effects on a cable-stayed bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57(2-3):225-235.
- [12] Macdonald J H G, Irwin P A, Fletcher M S. Vortex-induced vibrations of the Second Severn Crossing cable-stayed bridge: Full-scale and wind tunnel measurements[J]. Structures and Buildings, 2002, 152(2):123-134.
- [13] Wang H, Li A, Hu R. Comparison of ambient vibration response of the Runyang Suspension Bridge under skew winds with time-domain numerical predictions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4):513-526.

(上接第131页)

- 理研究——以咸宁市第三小学为例[J].交通科技与管理,2024,5(21):42-45.
- [6] 湛丽,尚佳雪,李进微,等.我国城市儿童友好环境建设的问题与思考[J].中国名城,2025,39(1):74-78.
- [7] 郑德高.城市更新助力儿童友好空间建设[J].城乡建设,2024(22):16-19.
- [8] 何嘉希,王梦休.基于城市美学启蒙的儿童友好型街区有机更新实践探索——以成都驷马桥片区街道改造为例[J].四川建筑,2024,44(增刊1):204-206.
- [9] 毕波,杨婷婷,马春叶,等.儿童友好的街区中小学生学习空间与行为互动研究——以万柳片区和大栅栏片区为例[J].风景园林,2022,29(2):119-126.
- [10] 刘雪.北京海淀万寿路街道:儿童友好视角下的城市街区公共

空间改造策略研究[J].北京规划建设,2023(6):75-79.

- [11] 黄庭晚,张大玉.北京车公庄街区:基于出行环境调查的儿童友好型街道空间研究[J].北京规划建设,2024(2):81-85.
- [12] 孙青丽.儿童友好理念助推城市公共空间微更新策略解析[J].广东园林,2023,45(1):55-58.
- [13] 孙宇萱.“儿童友好”视角下的城市老旧街区公共空间设计研究——以广州市越秀区先烈中路小学周边街区为例[J].工业设计,2022(12):85-87.
- [14] 刘悦来,王嘉颖,谢宛芸,等.儿童参与式社区规划路径及策略框架探索以浦东新区东明路街道为例[J].时代建筑,2023(4):69-75.
- [15] 颜日锦.儿童友好街区在广州市道路设计中的实践探讨[J].城市建筑,2023,20(18):65-68.