

泰州大桥主梁施工阶段的颤振稳定性及管理对策

李承焱, 陈艾荣, 马如进

(同济大学土木工程学院桥梁工程系, 上海 200092)

[摘要] 以三塔两跨的泰州大桥为研究对象, 根据有限元分析及全桥气弹模型风洞试验的结果, 对主梁对称架设施工阶段的动力特性及颤振稳定性进行了研究。结合桥位地区 30 年的月极大风速分析, 对主梁架设阶段的颤振稳定性进行了评价。最后提出了一套针对悬索桥施工阶段颤振稳定性评价及策略确定的流程, 可供其他桥梁参考。

[关键词] 多塔悬索桥; 施工阶段; 颤振稳定性; 管理对策

[中图分类号] U441+.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0046-05

1 前言

悬索桥在施工阶段的刚度低于成桥状态, 并且其抗风性能随着施工进行而逐渐变化, 因此大型悬索桥在主梁架设阶段的颤振稳定性一直备受设计者关注。目前相关的研究主要集中在结构的动力特性、刚度和阻尼、主梁拼装长度^[1]、主梁截面非线性气动性能^[2]等因素对悬索桥施工阶段颤振稳定性的影响, 以及非对称架设法^[3~9]、迎风侧附加偏心质量^[10]、扰流板^[11]和临时加劲构造(如水平交叉索)^[8]等附加措施的改善情况。

三塔两跨悬索桥同传统悬索桥在结构体系上

有很大的不同^[12,13], 尤其是主梁架设阶段的颤振稳定性及其颤振特征。以泰州大桥为背景, 通过析和风洞试验, 对大桥主梁架设施工阶段的颤振稳定性进行研究, 同时对施工阶段主梁的颤振稳定性能进行评价。

泰州大桥为(390+1 080+1 080+390)m 的三塔两跨悬索桥。主梁采用扁平流线型钢箱梁, 梁高 3.5 m, 梁宽 39.1 m。中塔和边塔采用门式结构, 其中中塔侧面为“人”字形布置。中塔高 194 m, 边塔高 172.7 m, 主缆矢高 120 m。大桥立面布置如图 1 所示, 主梁标准截面示意图如图 2 所示。

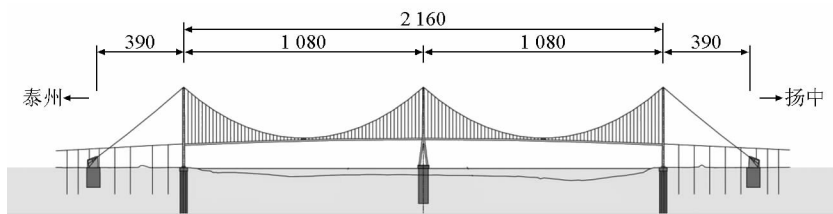


图 1 泰州大桥立面布置图(单位:m)

Fig. 1 Elevation of Taizhou Bridge (unit:m)

[收稿日期] 2012-03-12

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B01); 交通行业联合科技攻关项目(2008-353-332-190)

[作者简介] 陈艾荣(1963—), 男, 贵州遵义市人, 同济大学教授, 研究方向为桥梁结构设计理论; E-mail: a.chen@tongji.edu.cn

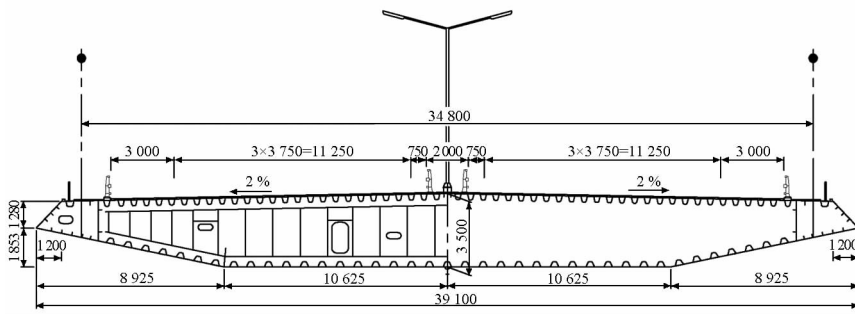


图2 加劲梁标准截面示意图(单位:mm)

Fig.2 Standard cross section layout of stiffness girder(unit:mm)

2 结构动力特性分析

根据主梁对称施工的特点,结构动力特性分析共设置5个施工状态,如图3所示,分别为20%、40%、60%、80%以及100%。施工阶段的动力特性分析是在成桥阶段有限元模型基础之上利用倒拆分析进行。在获得每个施工状态的静力线形后,计

入初始的应力状态,采用Block Lanczos方法分析获得每个状态的频率和振型,如图4、图5所示。表1给出了5个施工状态下的主要频率和扭弯频率比。由分析结果可以发现,随着施工阶段的发展,主梁的竖弯频率有下降趋势,而扭转频率逐渐增加,扭弯频率比也逐渐增大。可见,随着施工阶段的发展,主梁的颤振稳定性也随之增加。

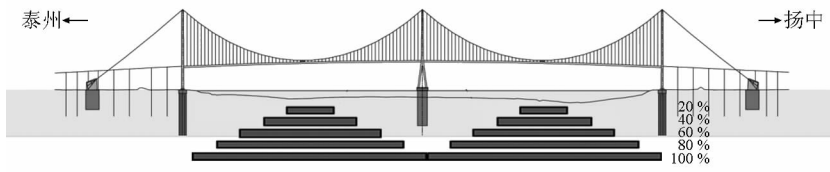


图3 对称拼装情况下施工状态定义

Fig.3 Definition of construction stages under symmetric assembly



图4 60%施工状态一阶竖弯振型
Fig.4 The first vertical mode shape
at the 60% construction stage



图5 60%施工状态一阶扭转振型
Fig.5 The first torsional mode shape
at the 60% construction stage

表1 施工阶段有限元模型动力特性

Table 1 The dynamic property of finite element method at construction stage

拼装率	20%	40%	60%	80%	100%
竖弯基频/Hz	0.088 8	0.078 1	0.074 1	0.072 1	0.071 2
扭转基频/Hz	0.185 6	0.202 5	0.204 9	0.224 1	0.245 4
扭弯比	2.090 1	2.592 8	2.765 2	3.108 2	3.446 6

3 气弹模型设计制作及试验结果

施工状态的颤振稳定性利用全桥气弹模型风洞试验进行研究。模型缩尺比确定为 $C_L = 1:200$,相应的风速比为14.14。模型设计时主缆模拟的基本原则是根据气动力相似、质量相似和拉伸刚度相似,利用康铜丝模拟主缆和吊杆的刚度,铝质量块模拟主缆质量。加劲梁由槽型铝芯梁与泡沫外衣组成,其中铝芯梁模拟加劲梁3个方向的刚度,泡沫外衣

模拟主梁的气动外形,同时还考虑了栏杆以及检修车轨道的影响。施工状态的气弹模型如图6所示。

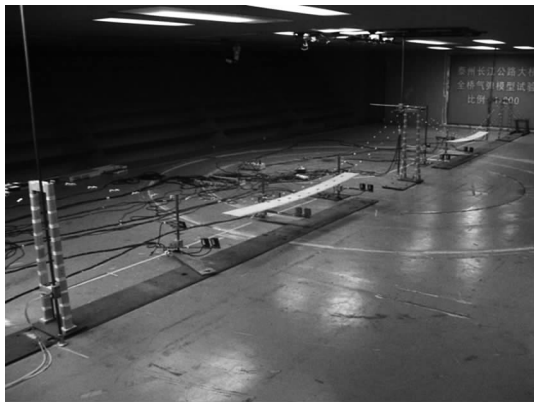


图6 泰州大桥全桥气弹模型(40%拼装率)
Fig.6 The full aeroelastic model of Taizhou Bridge (40% assembly ratio)

颤振稳定性试验主要在均匀流场下进行,采用调坡板实现流场的攻角效应,分别模拟了 3° 、 0° 以及 -3° 攻角的状态。通过该试验所获得的颤振临界风速随拼装率变化曲线如图7所示。由试验结果得出,随着拼装率的增加,颤振稳定性近似呈增加趋势,进一步验证了有限元模型的动力特性分析结果。

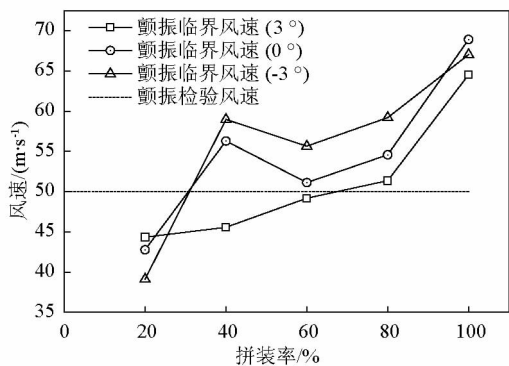


图7 颤振临界风速随拼装率变化曲线
Fig.7 Flutter critical wind speed with the change of assembly ratio

4 施工阶段颤振稳定性评价

根据现行桥梁抗风规范^[14],大桥施工阶段的颤振检验风速为 50 m/s ,如图7中虚线所示。对比可见,施工前期,主梁在3种攻角下的颤振稳定性都不能满足规范要求,其中 3° 攻角的颤振稳定临界风速要在拼装率大于60%后才能满足颤振稳定性的要求。因此在传统意义上,施工阶段的抗风稳定性

是难以通过相应要求的。

然而实际主梁架设的施工工期一般只有5~6个月,针对这种架设期短的主梁施工,文章提出一种基于历史月最大风速统计分析的施工期间颤振检验风速分析方法。该方法首先需要建立桥位测站与具有丰富历史气象数据的气象站的风速相关性,由此获得桥位处各月设计基准风速,进一步获得施工期间检验风速随月份的变化曲线。根据这种检验风速的变化规律,可以合理安排施工进度,使最不利的施工状态避开最高的颤振检验风速时段。

以泰州大桥为例具体阐述该方法。根据文献^[15],1974—2005年32年间扬中累年各月10 min平均风速最大值变化曲线见图8。由图8中曲线可以发现,桥位的设计风速有两个非常明显的峰值,分别在4月和8、9月,即存在两个大风期。

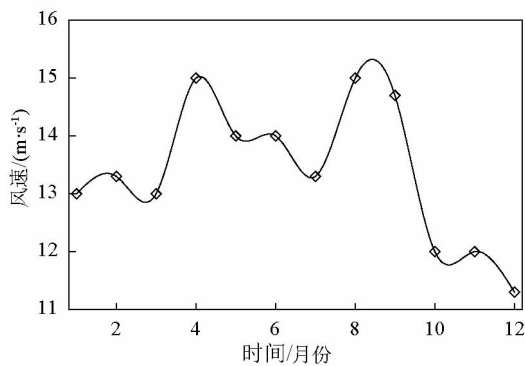


图8 扬中1974—2005年10 min平均风速各月最大值变化曲线
Fig.8 Monthly maximum 10 min wind speed of Yangzhong City during 1974—2005

另外,同步观测资料分析表明2006—2007年间桥位与扬中市气象站日最大风速间的线性相关显著,均能达到0.01以上的信度,相应通过该气象站风速资料推算99%保证率上限的桥位风速计算公式为

$$V_{\text{桥}} = 5.804 + 1.192V_{\text{站}}$$

通过分析,桥位测站与气象站的风速数据的相关系数是0.728,同时扬中的气象站有30年的历史数据,这个时间跨度已经超过了该桥施工阶段的设计重现期。可见,利用该数据进行施工期间的逐月颤振检验风速推算具有较好的可靠性。

根据文献^[16],桥位的风剖面指数为 $\alpha = 0.11$,大桥桥面离水面约68 m。依照抗风规范^[14]计算主

梁架设施工期间的逐月颤振检验风速,如图9所示。

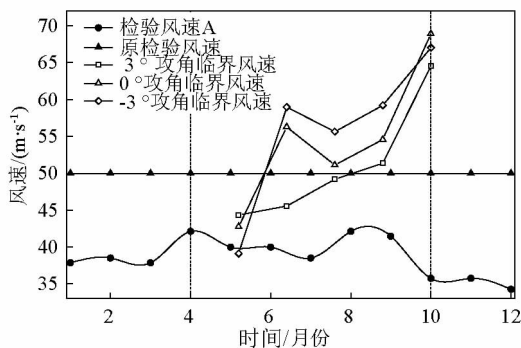


图9 颤振检验风速与施工各阶段颤振临界风速变化曲线图

Fig. 9 Flutter checking wind speed and flutter critical wind speed at construction stages

由图9可以发现,只要合理进行主梁架设阶段的组织安排,避开最不利的大风期,则主梁施工期间的颤振稳定性是有足够保证的。泰州大桥主梁架设实际施工从5月份开始到10月份结束,该施工组织安排能够满足主梁颤振稳定性检验的要求。

基于此,提出了一种针对悬索桥施工阶段颤振失稳风险的管理策略,如图10所示。首先,根据施工速度以及其他不可更改的时间限定因素,制订出初步的施工进度安排。其次,根据有限元计算和风洞试验,对各施工状态下结构的颤振稳定性进行评价。在部分施工阶段颤振稳定性富余度不足的情况下,根据桥位附近风环境周期性特点的研究,对初步的施工组织安排进行调整。如果仍然不满足颤振稳定性检验的要求,则需要采取必要的措施提高结构施工阶段颤振稳定性。

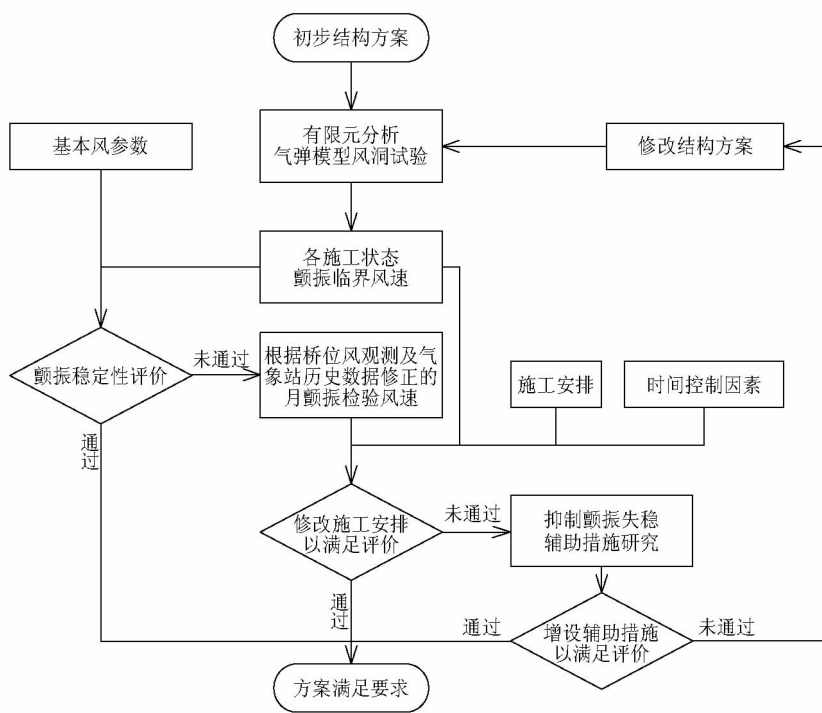


图10 悬索桥施工阶段颤振失稳风险应对策略流程图

Fig. 10 Design strategy for flutter divergence control of suspension bridge during construction stage

5 结语

以泰州大桥为背景,通过有限元方法及全桥气弹模型试验,对三塔两跨悬索桥对称架梁施工过程的颤振稳定性进行了分析及对策研究。施工过程的颤振稳定性试验表明,大桥在60%拼装率以上时,具有较好的颤振稳定性。在针对桥位地区历史风速

数据统计分析的基础之上,提出了一种经济合理的抗风风险管理对策,通过合理改变施工阶段的组织安排,避开大风多发时期,从而达到降低主梁在架设阶段发生颤振稳定失效的风险的目标。

参考文献

[1] 陈艾荣. 宜昌长江公路悬索桥施工全过程的空气动力稳定性

- 试验[C]//第六届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集,2002:17-22.
- [2] Zhang X J, Sun B N, Xiang H F. Nonlinear aerostatic and aerodynamic analysis of long-span suspension bridges considering wind-structure interactions[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90:1065-1080.
- [3] H Tanaka, N J Gimsing. Aerodynamic stability of non-symmetrically erected suspension bridge girders[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 80:85-104.
- [4] Diego Cobo del Arco. Improving the wind stability of suspension bridges during construction[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(8):869-875.
- [5] Ge Y J, Tanaka H. Aerodynamic stability of long-span suspension bridges under erection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126:1404-1412.
- [6] Zhang X J. Investigation on aerodynamic stability of long-span suspension bridges under erection[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92:1-8.
- [7] 张新军,陈艾荣,项海帆,等.大跨度悬索桥施工阶段颤振稳定性研究[J]. *公路*, 2001(10):60-63.
- [8] 刘竹钊,何宪飞,陈艾荣,等.大跨悬索桥施工过程颤振稳定分析[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2002, 30(5):563-568.
- [9] 魏志刚,葛耀君,杨泳昕.大跨悬索桥对称和非对称架梁施工颤振稳定性研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6):75-79.
- [10] Larsen A. Prediction of aero elastic stability of suspension bridges during erection[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72:265-274.
- [11] 刘高.增设主梁下风侧翼板抑制悬索桥架设阶段颤振的研究[J]. *工程力学*, 2001, 18(5):77-83.
- [12] 阮静,马如进.三塔双跨悬索桥动力特性分析[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(8):83-87.
- [13] 王达磊,马如进,陈艾荣,等.泰州长江公路大桥三塔悬索桥的颤振稳定性[J]. *桥梁建设*, 2011(1):26-29.
- [14] 中华人民共和国交通部. JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [15] 江苏省气象科学研究所.泰州公路过江通道气候背景及风参数研究[R]. 江苏:江苏省气象科学研究所, 2008.
- [16] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室.泰州长江公路大桥全桥气弹模型试验研究[R]. 上海:同济大学, 2009.

Flutter stability and management strategy for the deck of Taizhou Bridge during construction stage

Li Chengcheng, Chen Airong, Ma Rujin

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[**Abstract**] In this paper, Taizhou Bridge, a three-tower suspension bridge was investigated to discover the flutter stability of deck under symmetrical construction through FEM(finite element method) analysis and full aero-elastic model tests. The assessment of flutter stability during deck construction stage was performed based on analysis of the monthly maximum wind speed in the past 30 years. In the end, the assessment and management strategy of flutter stability were proposed, which can be referred for other bridges.

[**Key words**] multi-tower suspension bridge; construction stage; flutter stability; management strategy