

文章编号: 1002-0268 (2004) 05-0057-04

静风效应和架设方法对悬索桥施工过程中颤振稳定性的影响研究

张新军
(浙江工业大学, 浙江 杭州 310032)

摘要: 悬索桥在施工过程的结构刚度比较小, 空气静力作用产生的非线性效应以及桥面主梁架设方法都将对悬索桥施工过程的颤振稳定性产生重要的影响。运用大跨度桥梁颤振分析的三维非线性方法, 分析宜昌长江大桥采用不同主梁架设方法时的颤振稳定性变化趋势, 并探讨静风效应和主梁架设方法对悬索桥施工过程中颤振稳定性影响的程度、机理和规律。

关键词: 悬索桥; 施工过程; 颤振稳定性; 静风效应; 架设方法

中图分类号: U448.25 **文献标识码:** A

Effects of the Static Wind Action and Erection Sequence on Flutter Stability of Suspension Bridges under Erection

ZHANG Xin-jun
(Zhejiang University of Technology, Zhejiang Hangzhou 310032, China)

Abstract: Structural stiffness of suspension bridge under erection is low so that its flutter stability is remarkably affected by the nonlinear effect due to the static wind action and the deck erection sequence. Taking the Yichang Bridge over Yangtze River as example, evolutions of flutter stability with the deck erected by different sequences are determined by three-dimensional nonlinear flutter analysis, the role and mechanism of the static wind action and erection sequence in flutter stability of suspension bridges under erection are investigated and discussed in the paper.

Key words: Suspension bridges; Erection stage; Flutter stability; Static wind action; Erection sequence

颤振是一种重要的空气动力失稳现象, 它的形成将会对结构物产生毁灭性的破坏。悬索桥由于其柔性较大而对风的作用非常敏感, 风作用下的颤振稳定性更是成为影响悬索桥安全运营和顺利架设的重要问题。在施工过程中, 悬索桥的刚度尤其是扭转刚度同成桥运营状态相比大为降低, 导致施工过程悬索桥的颤振稳定性反而比成桥状态更差。因此, 施工过程悬索桥的抗风稳定性已经成为大跨度桥梁抗风研究的重要问题。

近几年来, 国内外一些学者相继对悬索桥施工过程的颤振稳定性问题进行了研究。Brancaleoni^[1]和

Tanaka^[2,3]等人对影响悬索桥施工过程中颤振稳定性的一些重要因素如结构动力特性、刚度、阻尼、主梁拼装长度、非对称架设、附加偏心质量和人工阻尼等进行了分析和研究。Cobo Del Arco^[4]则研究了在迎风侧附加偏心质量、增设扰流板和运用非对称架设顺序等措施对提高悬索桥施工过程中颤振稳定性的作用。Larsen^[5]在恒比尔桥和大海带桥施工过程的颤振稳定性分析中也采用了附加偏心质量和非对称施工顺序等措施, 并就这些措施对提高颤振稳定性的机理进行了研究。

上述的这些研究主要是针对一些结构和气动方面的辅助措施对悬索桥施工过程中颤振稳定性的影响进行

收稿日期: 2003-04-07
基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (502118), 中国博士后科学基金资助项目 (2002031245)
作者简介: 张新军 (1971—), 男, 浙江东阳人, 博士后, 副教授, 主要研究方向为大跨度桥梁风致振动理论与控制。

了探讨,但是对于各种桥面主梁架设方法对施工过程中颤振的影响则研究得比较少。此外,在以上的这些研究中基本上都采用了线性的颤振分析方法,即颤振分析都是在未变形的初始结构形态上进行,没有充分考虑结构的非线性、风与结构相互作用产生的非线性效应及其三维效应对施工过程中悬索桥颤振稳定性的影响。但是在施工过程的实际情形中,由于结构的整体刚度较低,在静风荷载作用下结构将产生较大的变形,达到静风平衡状态时结构的形态以及内力状态,同初始未变形状态相比将有明显的改变,尤其是主梁断面与气流间的有效攻角,这必将引起结构的动力特性以及作用在结构上空气力随结构变形的非线性变化。此外,在以往的分析中都假定空气力沿桥跨方向是均匀分布的。实际上,由于沿桥跨各个位置处的变形是不同的,因此形成的风与桥面主梁断面间的有效攻角沿桥跨方向也是变化的,使得作用于桥面上空气力的不均匀分布即三维效应。随着风速的增加,分布的不均匀性即将逐渐加剧。以上这些因素都将不同程度地对悬索桥的颤振稳定性产生影响^[6,7],因而需要深入地研究它们对施工中悬索桥颤振稳定性的影响。

考虑上述风与结构相互作用产生的非线性效应及其三维效应,本文运用大跨度桥梁颤振分析的三维非线性方法^[7]分析了宜昌长江大桥采用不同主梁架设方法时施工过程中颤振稳定性的变化趋势,并探讨了主梁架设方法和静风作用产生的非线性效应对施工过程中悬索桥颤振稳定性影响的程度、机理和规律。

1 桥面主梁架设方法和桥梁简介

悬索桥桥面主梁的架设方法将直接影响到施工过程的安全性以及时间计划等问题。因此,必须综合考虑施工方案的实际可行性、几何控制因素、结构构件应力状况以及桥梁的颤振稳定性等因素来选择合适的施工架设方法。总体上,悬索桥桥面主梁的架设方法可以分为以下 3 类(如图 1 所示)。

(1) 由跨中向两侧桥塔对称拼装(简称架设方法 A):这种架设方法是目前悬索桥桥面主梁拼装应用最多的一种方法。施工时,主梁节段将从跨中位置开始向着两侧桥塔对称拼装。因此,在整个施工过程中始终只有一个架设梁段,而且梁段两端都是自由的。

(2) 由两侧桥塔开始向跨中对称拼装(简称架设方法 B):这种架设方法在施工时将从两侧桥塔位置开始向着跨中对称拼装主梁节段。因而在施工过程中将有两个独立的架设梁段,梁段的一端是自由的,而另一端则是搁置在桥塔上。

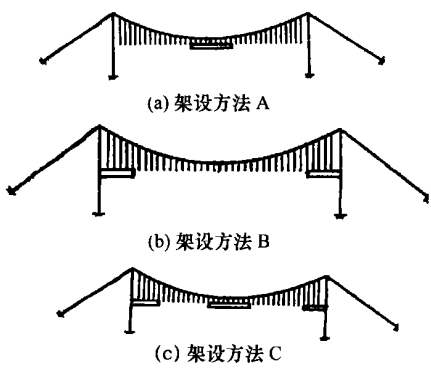


图 1 悬索桥桥面主梁的架设方法

(3) 分别从桥塔和跨中位置开始相向拼装(简称架设方法 C):这种方法实际上是以上两种方法的组合,主梁节段拼装将同时从两侧桥塔以及跨中的两侧开始同时向着 1/4 点位置推进,因此在施工过程中将具有 3 个独立的架设梁段。

在已建成的大跨径悬索桥中,其主梁架设基本上都采用 A 和 B 这两种架设方法,至于架设方法 C 则到目前为止还没有被采用过。

本文以已建成的宜昌长江大桥为工程背景进行施工过程颤振稳定性的分析和研究。宜昌长江大桥是一座主跨为 960m 的单跨悬索桥,主缆矢跨比为 1/10,主梁采用宽 30m,高 3m 的扁平流线型钢箱梁,如图 2 所示。该桥主梁架设采用铰接法进行施工,主梁拼装则采用了由跨中向两侧桥塔对称拼装的架设方法。在架设期间各加劲梁节段间临时铰接,待加劲梁全部架设完毕并准确就位后再进行刚接。最后,实施栏杆、桥面铺装等二期恒载的施工。

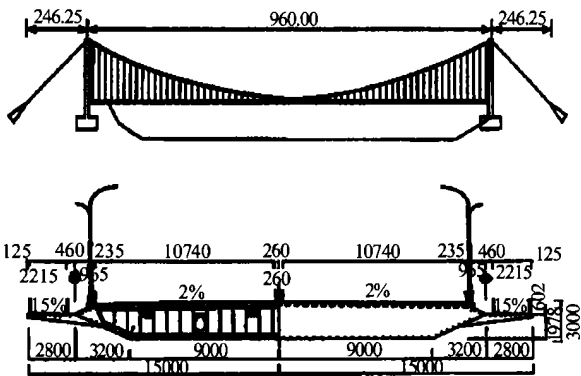


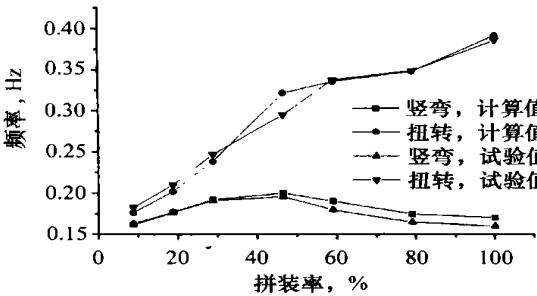
图 2 宜昌长江大桥总体布置

2 不同主梁架设方法的结构动力特性变化分析

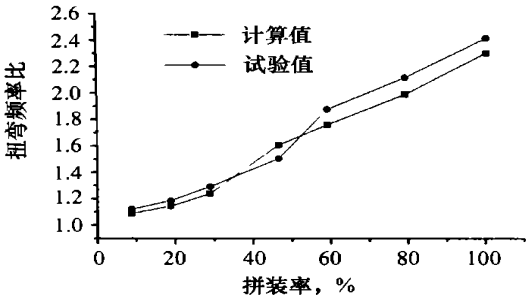
采用基于子空间迭代法的结构动力特性有限元分析方法,对上述 3 种主梁架设方法下结构的动力特性进行了分析。分析时,将该大桥离散为三维杆系结构有限元计算模型,其中桥面主梁采用脊梁式计算模型,

主梁、塔柱和塔横梁等简化为非线性空间梁单元,主缆和吊杆则用非线性空间杆单元来模拟,主梁和吊杆间采用刚性横梁联系。分析时,首先模拟主梁架设过程采用结构三维几何非线性有限元分析程序确定出施工过程每一个阶段在相应自重作用下悬索桥的静力平衡状态,而后再在此状态上运用基于子空间迭代法的结构动力特性有限元分析程序进行动力特性分析。

图3给出了该桥采用架设方法A时一阶对称竖弯和扭转振动频率以及扭弯频率比的计算值与试验值的比较。可以看出,程序计算结果与试验值相当吻合,从而进一步说明了其它两种情况程序分析结果的可信度。



(a) 一阶对称竖弯和扭转振动频率



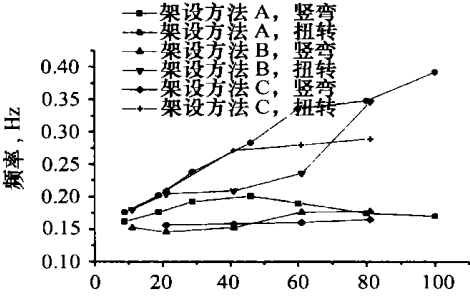
(b) 扭弯频率比

图3 一阶竖弯和扭转频率及频率比计算值与试验值的比较

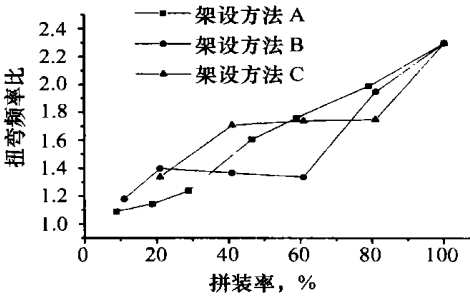
图4中给出了3种主梁架设方法下一阶对称弯曲和扭转频率以及扭弯频率比随主梁拼装长度增加的变化趋势。从图中可以看到,主梁拼装长度和架设方法对悬索桥的一阶对称竖弯振动频率的影响不大。这主要是由于随着主梁拼装长度的增加,主梁的质量和主缆的重力刚度将随之增大,但是刚度的增大在一定程度上被质量的增加所抵消,使得刚度和质量的比值改

变不大,致使与刚度和质量比直接相关的一阶竖弯振动频率变化不明显。与之相反,一阶扭转振动频率受主梁架设长度和架设方法的影响则非常明显。随着主梁拼装长度的增加,一阶扭转振动频率随之明显提高。究其原因主要是:随着主梁拼装的不断进行,扭转刚度逐步增大,而缆索和桥面系统的有效质量回转半径却在逐步减小,因而促使扭转频率的逐渐增大。

上述两种情况的综合作用,导致了如图4(b)所示的扭弯频率比随主梁拼装长度的变化趋势。总体上,随着主梁架设长度的增加,各种架设方法的扭弯频率比都随之增大,但其变化规律则有所不同。



(a) 一阶对称竖弯和扭转振动频率

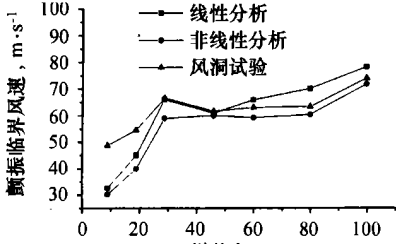


(b) 扭弯频率比

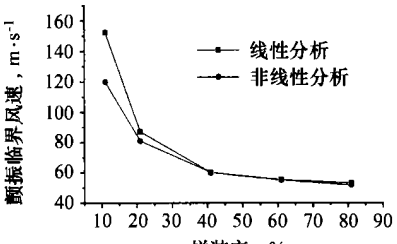
图4 不同架设方法下一阶对称竖弯和扭转振动频率以及扭弯频率比随拼装率的变化趋势

3 不同主梁架设方法的颤振稳定性变化分析

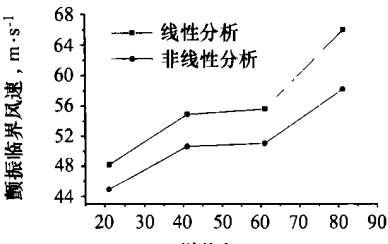
运用大跨度桥梁三维非线性颤振分析程序,采用施工状态下由节段模型试验测得的气动导数以及静风系数^[8],在0°初始风攻角下,进行了各种主梁架设方法施工过程的颤振稳定性分析。图5显示了不同主梁



(a) 架设方法A



(b) 架设方法B



(c) 架设方法C

图5 各架设方法下颤振临界风速随拼装率的变化趋势

架设方法的颤振临界风速随拼装率的变化趋势,不同架设方法间颤振临界风速的比较如图6所示。

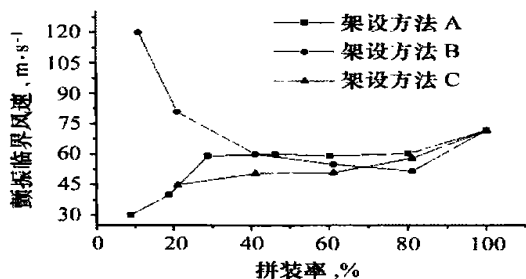


图6 不同架设方法间颤振临界风速的比较

对图5和图6的各项结果进行比较和分析,从中可以得出以下一些结论:

(1) 由图5(a)的试验值与计算值的比较可以看出:虽然在架设早期两者间存在一定的差异,但在总体趋势上两者还是比较一致的。产生差异的原因可能是源于结构动力特性计算上的差异、计算中所采用的阻尼值与试验情况不一致以及忽略作用于主缆上的气动力等因素。通过比较,验证了程序计算结果的有效性和可靠性,同时也说明了其它两种情况分析结果的可信性。

(2) 运用架设方法A和C进行桥面主梁拼装时,在架设早期(拼装率约为20%以前)的颤振临界风速均小于该桥施工阶段的颤振检验风速值(37m/s),因此将面临严重的颤振稳定性问题。但此后的颤振临界风速迅速上升,均超过了颤振检验风速。总的趋势是:随着拼装长度的增加,桥梁的颤振稳定性逐步提高,这与如图4(b)所示的扭弯频率比的变化趋势比较一致。颤振临界风速的增加一方面主要是如图4(a)所示的扭转频率随着拼装率的增加而增大,另一方面是由于多模态耦合产生的正效应。随着施工的不断推进,结构的颤振形态也将发生变化,它由架设早期的弯扭二振型参与的经典耦合颤振转变为由多个振型参与的多模态耦合颤振。

(3) 当采用架设方法B拼装桥面主梁时,其颤振临界风速的变化趋势与其它两种情况大不相同。颤振临界风速在架设早期非常高,随着主梁架设的不断推进而逐步减小,但是整个施工过程的颤振临界风速均超过了该桥施工过程的颤振检验风速值。因此,采用这种架设方法时将不会遭遇颤振失稳问题。从图6的比较可以看到,从抗风稳定性角度上讲,它比其它两种方法更适合用于悬索桥施工过程中桥面主梁的架设。

(4) 从图5各种情况下线性和非线性分析结果的比较可以看出,风与结构相互作用产生的非线性效应

显著地降低了悬索桥施工阶段的颤振临界风速。因此,非线性效应对施工阶段颤振临界风速的影响比较重要,不容忽视。产生的原因可以从结构变形引起的附加攻角效应中得到解释。悬索桥在施工中由于其总体刚度比较小,在静风荷载作用下结构产生了较大变形,其中的扭转变形显著地增大了气流与桥面间的有效攻角,因而严重地钝化了桥面主梁的流线型气动外形,导致了颤振临界风速的显著降低。

4 结论

采用充分考虑结构非线性、风与结构相互作用产生的非线性效应以及三维效应影响的大跨度桥梁三维颤振非线性分析程序,对宜昌长江大桥采用不同主梁架设方法时施工过程的颤振稳定性进行了分析,同时还得到了以下两点主要结论:

(1) 主梁的架设方法对悬索桥施工过程的颤振稳定性影响比较大。从抗风稳定性角度上讲,采用由两侧桥塔向跨中对称架设的方法比较适合用于悬索桥施工过程中桥面主梁的拼装。

(2) 风与结构相互作用产生的非线性效应以及三维效应将会显著地降低悬索桥施工过程的颤振稳定性,因此建议在施工过程颤振分析时应当充分地考虑此项因素的影响。

参考文献:

- [1] Brancaloni F. The Construction Phase and Its Aerodynamic Issues [C]. Balkema: Aerodynamics of Large Bridges, 1992: 147—158.
- [2] Tanaka H. et al Aerodynamics of Long-span Bridges During Erection [C]. Bridge Aerodynamics, 1998: 119—127.
- [3] Tanaka H., Gimsing N.J. Aerodynamic Stability of Non-symmetrically Erected Suspension Bridge Girders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80: 85—104.
- [4] Cobo del Arco. Improving the Wind Stability of Suspension Bridges During Construction [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2001, 127 (8): 869—875.
- [5] Larsen A. Prediction of Aeroelastic Stability of Suspension Bridges During Erection [C]. Proceeding of 9th International Conference on Wind Engineering, New Delhi, 1995: 917—927.
- [6] Zhang Xinjun, Sun Bingnan, Xiang Haifan Nonlinear Aerostatic and Aerodynamic Analysis of Long-span Suspension Bridges Considering Wind-structure Interactions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (9): 1065—1080.
- [7] Zhang Xinjun, Sun Bingnan, Xiang Haifan Three-dimensional Nonlinear Flutter Analysis of Long-span Suspension Bridges During Erection [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2003, 4 (1): 21—27.
- [8] 陈艾荣. 宜昌长江公路大桥施工全过程的抗风稳定性研究报告 [R]. 上海: 同济大学风洞实验室, 1999.