

不对称双绳单主塔斜拉桥的风激颤振研究分析

李书嘉

江苏河海建设有限公司, 江苏 镇江 212000

[摘要] 文章研究了一座 310m (主跨, 组合梁)+2×50m+2×40m (协助跨度) 双绳单主塔半浮斜拉桥。针对风力载荷对斜拉桥的敏感作用, 通过使用专业的有限单元软件 and 几何非线性的考虑, 建立了一个恰当的动态计算模型。分析了最大单悬臂梁在建筑阶段的动态行为和完成阶段中的频率, 周期以及振动模式。据此, 估量桥的颤振临界风速。

[关键词] 不对称的; 单主塔斜拉桥; 分析动态行为; 风激颤振

DOI: 10.33142/hst.v5i6.7452

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

Research and Analysis of Wind Induced Flutter of Asymmetrical Cable stayed Bridge with Double Ropes and Single Main Tower

LI Shujia

Jiangsu Hehai Jianshe Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu, 212000, China

Abstract: A 310m (main span, composite beam)+2 × 50m+2 × 40m (auxiliary span) double rope single tower semi floating cable-stayed bridge. In view of the sensitive effect of wind load on cable-stayed bridges, an appropriate dynamic calculation model is established by using professional finite element software and considering geometric nonlinearity. The dynamic behavior of the largest single cantilever beam in the construction stage and the frequency, period and vibration mode in the completion stage are analyzed. Therefore, the flutter critical wind speed of the bridge is estimated.

Keywords: asymmetric; cable stayed bridge with single main tower; analyze dynamic behavior; wind-induced flutter

引言

斜拉桥是典型的柔性结构。这种结构在风力作用下便于变形和振动。所以由风振引起的风坍塌也是很频繁的。而且风阻也应该被重视起来。在斜拉桥研究中, 气动弹性颤振是最火热的研究领域之一。风激颤振是由于弹力, 惯性力, 自激力和阻尼力相互作用引起的一种气动弹性不稳定的表现。在临界速度上, 主梁以一种频散的方式振动, 这样就导致了桥梁的破坏。在大跨度桥的风阻审计中, 风激颤振设计是设计控制中的关键因素。不同结构的斜拉桥研究是具有重要的应用价值的。

1 风致颤振的机理研究

斜拉桥在不定风速下的气弹响应是诸多因素相互作用的结果。桥从风中获得能量, 从而引起自激振动。桥无刚度, 激起振动, 影响气体回流。这样, 风与结构的互动原理就形成了。当风没有影响时, 空气动力引起建筑物的强迫振动, 当风影响大时, 建筑物振动的反作用导致限制性的空气动力。空气流速影响振幅和不同自由度的相位关系, 从而建筑物持续地从流速中获得能量。这种发散的自激振动仅仅是震颤。分组设计的目的是避免危险发散振动和长早大于设计风速的临界速度和一系列可接受的幅度。

1.1 古典耦合震颤理论

席尔道逊通过位势理论-板颤振理论计算出振动板上的空气动力。Bleich 建议对其进行修改, 添加一个代表

桥两端涡流效应的升力并为悬索桥颤振计算出一个合理的临界风速。于是两个自由度的古典颤振理论被创建。Vanderput 发现了转换速度与弯曲频率的关系, 并且扭力在耦合颤振板临界速度研究中接近线性, 还建议用一个近似公式计算板颤振的临界风速。

$$v_{cr} = \eta_s \eta_a [1 + (\varepsilon - 0.5) \sqrt{0.72 \mu (r/b)}] \omega_h b \quad (1)$$

式中, η 是反映主梁断面形状结果的系数, η 是反映碰撞角度结果的系数, ε 是扭力频率与弯曲振频的比率, μ 是桥密度与空气密度的比率, γ 是惯性半径, ω_h 是基本负载弯曲自然圆频率, 而 b 是半桥的宽度。

1.2 分离流扭转颤振理论

R. Scanlan 为了建立一个线性模型, 通过一个特殊的风洞实验, 用小振幅测量出线性非定常空气的动力学参数 (颤振导数), 并以切片理论为基础推导出一个方向垂直于桥轴的二维颤振方程:

$$L_h = \frac{1}{2} \rho V^2 (2B) \left\{ KH_1^* \frac{h}{V} + KH_2^* \frac{\partial B}{V} + K^2 H_3^* \alpha \right\} \quad (2)$$

$$M_e = \frac{1}{2} \rho V^2 (2B^2) \left\{ KA_1^* \frac{h}{V} + KA_2^* \frac{\partial B}{V} + K^2 H_3^* \alpha \right\} \cdot \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} C_h & 0 \\ 0 & C_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_h & 0 \\ 0 & K_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ M \end{bmatrix} \quad (3)$$

在该方程里 L_h 是单位长度主梁的升力, M_α 是升力

距, h , a 分别是垂直位移和扭曲位移, ρ 是空气密度, H_i^* 、 A_i^* ($i=1:3$) 是空气动力性衍生物, 比如: 颤振衍生物, J 是每米桥的惯性质量距, C_h 和 C_a 分别代表沿着 h 和 a 方向的阻尼, 而 K_h 和 K_a 分别表示沿着 h 和 a 方向的刚性。

在这个基础上, Herzog 提出一个近似的公式来计算分离流扭曲颤振的临界风速:

$$V_{cr} = T_h^{-1} B f_i \quad (4)$$

这里, 公式后半部分中, B 是整个桥的宽度, f_i 是主梁基础扭曲固有频率。

2 项目资料

新建造的海河位于天津市新港船闸北岸, 是一座双绳单主塔斜拉桥。孔径是 $310\text{m}+2\times 50\text{m}+240\text{m}$ 。主梁中的主孔采取长度为 300m 的钢筋混凝土箱梁, 剩余的桥梁采用的是预应力箱型混凝土结构。梁深度为 3m , 桥面板宽度为 23.17m 。单塔是钻石菱形, 高度为 165.8m 。在该桥的地理位置常年的平均风速为 4.5m/s , 最大风速为 24m/s , 基础风压为 412Pa , 频率为 1.2% , 平均最大风速为每 10_{\min} 为 22m/s 。

该桥位于的海河口伴有强烈的季风。到目前, 主桥正在施工, 为保障后期建设的安全性, 对风阻进行分析研究是十分必要的。

3 海河桥的风激颤振研究

3.1 结构动力学计算模型的建立

动态特性是风阻研究的基础, 不同计算模型的选择对其有直接的影响。在建筑中, 一个运动方程和模型的模拟, 强调结构刚度, 质量和边界条件。结构刚度的模拟主要是轴向模拟, 弯曲度模拟, 切力模拟和扭曲刚性。结构质量的模拟主要是水平位移和旋转质量模拟。频率和振动模式表示的是主要动态特性参数, 并且直接影响结构的稳定性。研究斜拉桥的风阻, 必须要进行自激颤振特性的计算, 其中包括固有频率, 震动模式和阻尼。

通过使用有限元软件, 建立一个有效的三维空间模型。如图 1 所示。对静态特性和动态特性分析完成后, 有 1004 要点, 954 个单元。其中, 有 876 个横梁单元和 78 个线缆单元。

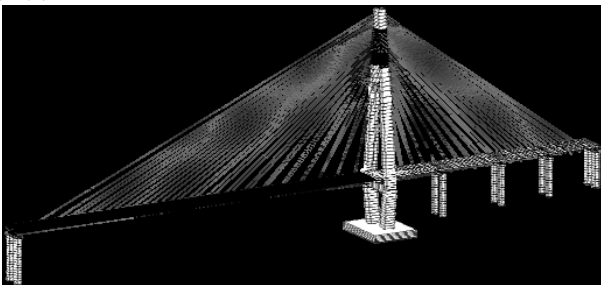


图 1 三维空间模型

3.2 结构动态特性计算分析研究

从桥的动态特性中可以看出, 动力作用主要激起很少低频的震动模式, 高于特定品路的振动模式对结构动态反应不起任何积极作用, 因此可以别忽略。计算式有两种运行条件: 最大单悬臂梁和运行。每一种条件, 开始 50 的振动模式用子空间迭代法计算, 前 10 个动态特性测试值如表 1 所示:

表 1 动态特性测试值

Maximum single cantilever (the ratio of torsion frequency and bending frequency $\varepsilon = 1.828$)				operation (the ratio of torsion frequency and bending frequency $\varepsilon = 1.316$)			
modes of vibration	frequency	period	characteristics	modes of vibration	frequency	period	characteristics
1	0.198122	5.047403	girder lateral flexure	1	0.212569	4.704345	portrait excursion
2	0.353088	2.832152	girder cantilever upward flexure	2	0.428118	2.335803	pylon portrait flexure
3	0.508287	1.967394	pylon cross bending	3	0.494467	2.022381	pylon lateral flexure
4	0.571362	1.750202	girder vertical flexure	4	0.657597	1.520689	auxiliary pier longitudinal flexure
5	0.755251	1.324063	girder vertical flexure	5	0.771893	1.295516	girder vertical flexure
6	1.044304	0.957576	girder torsion	6	1.015490	0.984747	girder vertical flexure
7	1.051216	0.951279	girder vertical flexure	7	1.027127	0.973589	girder vertical flexure
8	1.257899	0.794976	girder torsion	8	1.077756	0.927854	auxiliary pier longitudinal flexure
9	1.260173	0.793542	side pier longitudinal flexure	9	1.184522	0.844223	girder vertical flexure
10	1.383866	0.722613	side pier longitudinal flexure	10	1.260173	0.793542	side pier longitudinal flexure

通过以上研究可以得出 新建的海河斜拉桥的动态特性:

(1) 该结构为周期性结构, 第一个振动模式为肖像位移, 跟半浮式斜拉桥的特点一直。并且基本周期为 4.7s 。

(2) 从预期的风阻分析中可以看出, 一个较长的周期是好的, 因为这会有一个较大的位移。所以, 为了防止主梁有一个过于大的位移, 要设计一个纵向阻尼器放在塔梁下方。

3.3 临界颤振速度的估量

在该桥两种不同的工作条件下, 扭曲基本频率都比垂直弯曲基本频率要大。因此, 临界风速在扭曲颤振中要比在弯曲扭转耦合颤振中要快。只有当临界风速在弯曲扭转耦合颤振中比测试风速快时, 临界风速才能在扭曲颤振中满足需求。

3.3.1 弯曲扭转耦合颤振和分离流动耦合颤振

根据标准风阻设计, 自激颤振的计算风速是设计风速的 1.2 倍。为了从宏观上掌握该桥的风阻稳定性, 弯曲扭转耦合颤振的临界风速使用 Vanderput 公式来估算。

以前, 颤振临界风速是由前面提到的 Herzog 公式决定的。不同工作条件的检查计算结果就如表 2 中所示:

在完成桥的建造条件下, 主梁的标准风速在设计中是:
 $V_d = V_{s10} (Z/10)^{0.3} = 31.3 (38.433/10)^{0.3} = 46.87 (\text{m/s})$

$[V_{cr}] = 1.2 \mu_f V_d = 1.2 \times 1.249 \times 46.87 = 70.25 (\text{m/s})$ 是完成阶段振动测试风速

$[V_{cr}] = \eta V_d = 0.78 \times 46.87 = 36.56 (\text{m/s})$ 是建造阶段振动测试风速

表 2 工作条件计算

process	r/b	ε	μ	$f_r /$ (Hz)	η	T_h^{-1}	$V_{\alpha 1} /$ ($r \cdot s^{-1}$)	$V_{\alpha 2} /$ ($r \cdot s^{-1}$)	$[V_{\alpha}] /$ ($r \cdot s^{-1}$)	I_f
Maximum single cantilever	1.005	1.828	635.6	1.044	0.64	63.2	124.90	1528	36.56	1.51
operation	1.005	1.316	635.6	1.015	0.64	63.2	105.89	1486	70.25	2.98

表 2 中显示主梁的临界颤振风速达到了跟建造条件时一样高的 124.90m/s, 这比在颤振时相应的测试风速 36.56m/s 要大, 主梁的临界颤振风速在完成阶段是: 105.89m/s, 比相应的颤振测试风速 70.25m/s 要大。分离流动耦合颤振条件下, 风速要远远大于相应的工作条件下的测试临界风速。而且在当地最大风速下没有颤振不稳定性的表现。

3.3.2 颤振稳定性指数

在表 2 中显示, 该桥的颤振稳定性系数 I_f 比建筑阶段中的 2.5 要小, 而 I_f 在完成阶段大于 2.5 且小于 4.0. 建议通过断面模型风洞实验来进行检测。

4 结论

通过计算分析, 临界颤振风速在新建的海河大桥建造

和完成阶段都比主梁自激颤振的测试风速要大。因此, 整个建筑过程和完成阶段的运行能够有效的防止发散自激颤振, 但是在桥的完成阶段的稳定系数 I_f 大于 2.5 且小于 4.0. 所以建议通过一个断面模型风洞实验来检测相关系数。

[参考文献]

- [1]张超,傅光辉,林志滔,等.主塔类型对斜拉桥横向地震响应的影响[J].地震工程与工程振动,2020,40(3):97-107.
 - [2]唐俊,翟溯.BIM 技术在空间扭曲复杂线形钢主塔斜拉桥中的应用[J].上海建设科技,2018(5):46-47.
 - [3]彭精,赵国锋.液压爬模在变截面菱形主塔斜拉桥施工中的应用[J].中国高新科技,2018(12):66-68.
 - [4]程金泉.不同边界条件下水滴形钢结构主塔斜拉桥地震响应研究[J].施工技术,2015,44(11):47-51.
- 作者简介:李书嘉(1987.12-),男,学历:本科,目前职务:项目经理。