

混合式桥型对超长跨桥梁的适应性

Nobuyuki Narita (日)

【摘要】本文对中跨为2500m的混合型斜拉悬索桥进行了初步设计, 构想了三种斜拉悬索桥和一种悬索桥桥式。从初步设计结果中比较它们上部结构钢材的重量发现, 考虑到下部结构尺寸, 斜拉悬索桥相对悬索桥具有优越性。另外, 对这几种型式的桥梁进行了抗弯稳定性分析以及耦合颤振分析。分析结果表明, 斜拉悬索桥抗弯稳定性是足够的, 而且其临界风速高于悬索桥的临界风速。所以, 作者认为针对超长跨度桥梁混合型斜拉悬索桥赛过悬索桥。

一、前言

跨长从2000m到3000m的超长跨桥梁的实现取决于它的空气动力稳定性。因此, 对于继明石海峡大桥(Akashi-kaikyo)之后的桥梁建设来说, 主要集中在高经济效益和高扭转刚度的新型斜拉支撑桥的研究。我们推荐作为混合型斜拉悬索桥的长跨度桥梁, 可替代最大可能的跨度仅为1500m的斜拉桥, 并且可证明它作为超长跨桥梁的应用是可行的。在斜拉悬索桥中扭转刚度是通过流线型加劲箱梁悬索桥和斜拉桥的组合来增加的。在本研究中, 我们采用中跨长度2500m并且悬吊部份可变的方式作出了这种桥的初步设计。另外, 我们还集中研究了这种抗弯稳定性和空气动力稳定性, 调查了它作为超长跨桥梁的适用性和可行性。

二、设计方案和初步设计

1、分析模型和初步设计

采用中跨长2500m的模型作为初步研究, 我们设计了三种形式的斜拉悬索桥型, 各具有不同的悬索部份长度与斜拉部份长度的比例, 另外作了一个悬索桥的初步设计见图1, 目的是突出不同悬吊长度的各种结构特色。三种桥式(式1、式2、式3)的中跨悬吊部份长度分别为960, 1280和1600m, 桥式4为悬索桥。主塔高度取决于斜拉部份长度。表1给出了每种桥式的横截面的参数特性。在所有桥式中, 主梁的截面高度为7m, 静力计算是根据顶板厚12mm, 底板厚10mm的基本横截面计算的。超过许用应力部份的截面通过增加板厚来处理。在计算中, 设计和荷载情况根据本州-四国当局的设计说明制订。针对斜拉悬

索桥, 线性有限位移分析用于平面影响线分析, 而有限位移分析用于面外风载分析, 对悬索桥而言, 以刚度矩阵和密斯福侧向荷载分析表示的变分理论分析分别用于面内和面外分析。表2给出了这些分析的荷载情况。

从初步设计的结果可知, 悬索桥主梁产生的

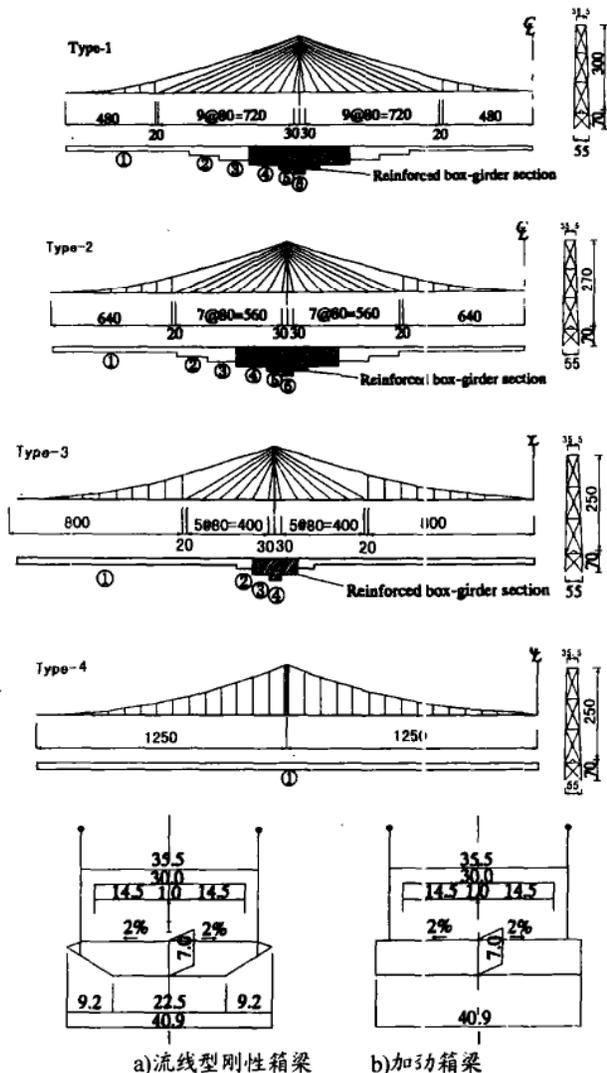


图1 分析模式

译文园地

表1 横截面参数

桥型		①	②	③	④	⑤	⑥
桥式 1	$A_0(m^2)$	1.614	2.191	2.828	3.141	3.418	3.695
	$I_{0a}(m^4)$	13.304	18.304	23.667	30.061	31.088	32.11
	$I_{0aa}(m^4)$	230.576	322.52	410.358	573.465	689.233	805.001
	$J_0(m^4)$	26.923	37.284	51.388	70.565	73.161	74.365
	$A_{aa}(m^2)$	side span: 0.418			center span: 0.405		
	$A_{aa}(m^2)$	0.01861-0.05585					
桥式 2	$A_0(m^2)$	1.614	1.645	2.191	2.408	2.533	2.685
	$I_{0a}(m^4)$	13.304	13.366	18.304	23.656	24.181	24.659
	$I_{0aa}(m^4)$	230.576	240.35	322.523	438.702	499.342	554.469
	$J_0(m^4)$	26.923	27.172	37.284	50.843	52.571	53.415
	$A_{aa}(m^2)$	side span: 0.584			center span: 0.575		
	$A_{aa}(m^2)$	0.01577-0.04851					
桥式 3	$A_0(m^2)$	1.614	1.733	1.992	2.058		
	$I_{0a}(m^4)$	13.304	14.307	18.943	19.182		
	$I_{0aa}(m^4)$	230.576	253.45	381.682	409.246		
	$J_0(m^4)$	26.923	29.932	41.663	42.296		
	$A_{aa}(m^2)$	side span: 0.739		center span: 0.731			
	$A_{aa}(m^2)$	0.01366-0.03861					
桥式 4	$A_0(m^2)$	1.614			main tower		
	$I_{0a}(m^4)$	13.304			/column		
	$I_{0aa}(m^4)$	230.576			$A_T(m^2)$	3.000-5.796	
	$J_0(m^4)$	26.923			$I_{Tm}(m^4)$	22.6-45.9	
	$A_{aa}(m^2)$	0.870			$I_{Taa}(m^4)$	42.3-131.0	
					$J_T(m^4)$	33.0-46.0	

杆端力相当小，因为面内弯矩和面外弯矩在横截面上产生的最大应力分别为400 kg/cm²和 1300 kg/cm²。

表2 荷载情况

		桥式1	桥式2	桥式3	桥式4
活载	集中(tf)	167.365			
	分散(tf)	3.906			
温度(°C)		±30			
风载 (tf/m)	梁	3.233			
	塔	19.133	18.733	18.451	18.451
	主缆	0.658	0.777	0.876	1.043
	拉索	0.133-0.206	0.124-0.158	0.163-0.116	—

在斜拉悬索桥中，悬索部份的基本横截面不存在任何强度问题，但在斜拉部份，由于轴向力和风载增加而产生的面外弯矩作用，故除增加主塔附近加劲梁的板厚外，还有必要采用加强箱梁。斜拉悬索桥的面内变形比悬索桥的要大，这种变形随悬索部份长度的增加而增加。就面外变形而言，桥式1的变形量最大，桥式3的最小，而桥式2和桥式4的变形相似。

2、钢材重量的比较

在4种桥式中，主梁和主塔相对总钢量的重量比桥式1最大，并且桥式1的总钢量亦最大，重约250000吨。相对而言，虽然桥式2斜拉悬索桥主梁和主塔的用钢量高于桥式4，但是由于桥式2中拉索重量较低，桥式2总的用钢量几乎与桥式4相同，桥式2总的用钢量约230000吨。从计算结果可知桥式3总的用钢量最低。在桥式4悬索桥中，包含相当高建造费用的主缆重量是最高的，所以当考虑上部结构的费用时，桥式4悬索桥的经济效益低于桥式2。考虑到包含上下部结构的施工总费用，两种桥式之间施工费用的差别进一步拉大。因此，考虑到经济效益，适当选取悬吊长度后，斜拉悬索桥能全面优于悬索桥，正如在桥式2情况中研究出的结果一样。

三、稳定性检查

在斜拉悬索桥中，随着斜拉部份长度的增加，主梁的轴力成为控制因素，它能引发抗弯稳定问题。从而，利用下述基于公路桥规范的稳定性等式，我们校核了位于主塔处主梁轴力最大的主梁断面的稳定性。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{haa}(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}})} \leq 1, \sigma_{ca} = \sigma_{cag} \cdot \sigma_{cai} / \sigma_{cao}$$

$$l_e = \pi \sqrt{\frac{EI}{\lambda N}}$$

此处

σ_c : 由作用于所检查横截面的轴力所产生的压应力;

σ_{bc} : 作用于整个短轴上弯矩所产生的弯曲压应力;

σ_{be} : 没考虑局部屈曲的许用弯应力上限。

σ_{ca} : 沿短轴许用欧拉抗弯应力。

σ_{cag} : 没考虑局部弯曲的许用轴向压应力。

σ_{cal} : 局部允许用弯应力。

σ_{cao} : 没考虑局部弯曲的许用轴向压应力的上限。(单位:kgf/cm²)

译文园地

l_c : 每区的有效长度(m)

在这里, 荷载工况等效于活载, 以便使最大的主梁轴力位于主塔处, 而它分别由导出的影响线分析结果确定, 另外在以上讨论严重活载应用的基础上, 我们利用线性屈曲特征值分析得出了弯曲特征值。在这种稳定检查中, 使用假设横断面的特性。

稳定性检查结果表明: 在桥式1中斜拉长度部份长度是最大的, 但弯曲稳定性最差, 不过还是满足了稳定性检查的等式。桥式1中跨斜拉部份的总长度近1400m, 但未超过斜拉桥临界跨长。

四、耦合颤振的特性

1、自振特性

在进行耦合颤振分析前, 我们进行了结构的自振分析。作为分析结果的部份, 图2给出了主要基本模态(1阶对称弯曲模态和1阶对称扭转模态)的示意图和振动频率。弯曲频率随悬吊部份长度的增加而增加, 而扭转频率则降低。从这两类模态结果判断, 其频率比越接近悬索桥桥式越增加。

2、临界风速的确定

通过板壳理论应用不稳定的空气动力载荷考虑前40阶自振模态, 基于模态分析的利用我们得出了耦合振动分析颤振的临界风速。

图3表示临界风速与用钢量之间的关系。结果显示对应于斜拉悬索桥桥式1, 桥式2, 桥式3以及桥式4悬索桥的临界风速分别为76、71、65

和63m/s, 这表明斜拉悬索桥的空气动力稳定性比悬索桥更优, 结果还显示在斜拉悬索桥中, 临界风速随斜拉部份长度的增加而增加。这是因为增加的斜拉部份长度增强了整体结构刚度。

相对桥式2和桥式4而言, 将其主梁断面放大2~4倍, 然后计算临界风速。计算的临界风速和总的用钢量之间的关系也在图3中表示。针对桥式2和桥式4两种桥, 如果我们给定相同的临界风速, 那么桥式4悬索桥必须消耗非常大的钢材量。如果只是由增加主梁的断面而达到80m/s的临界风速, 那么桥式2斜拉悬索桥的总钢量近300000吨, 而桥式4则接近360000吨, 因此, 相对正常重量而言, 桥式2总钢量的增加约30%。在实际的桥梁设计中桥梁的空气动力稳定性不能采用这样简单的方式来确定, 不过针对超长跨桥梁可预测, 斜拉悬索桥优于悬索桥。

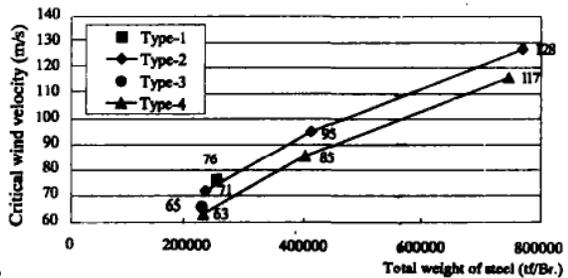
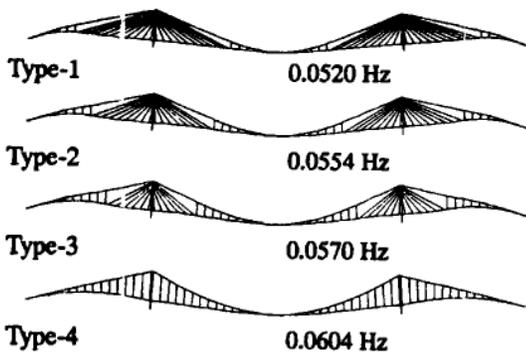


图3 临界风速与用钢量之间的关系

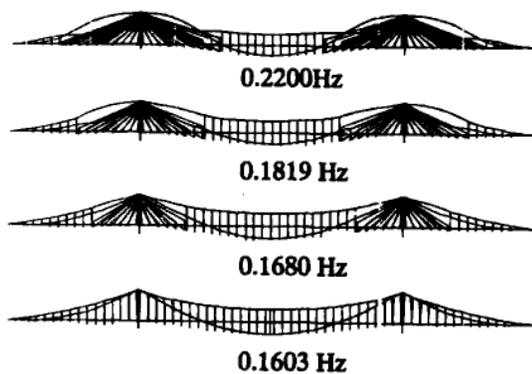
五、斜拉悬索形式对超长跨桥的适应性

基于以上研究结果, 以对超长跨桥的适应性, 归结起来说斜拉悬索桥有以下特点:

1、通过悬索部份和斜拉部份长度的合理设置, 可提高设计的多样性及使不同边跨比成为可



a)一阶对称弯曲模态



b)一阶对称扭转模态

图2 基本模态的自振分析

能, 这意味根据边跨比及跨长不同条件, 可选择的不同结构体系, 而且主梁的轴力和弯矩大小都能得到控制。另外, 由于地锚斜拉索用作边跨的主缆, 因此, 地锚斜拉索桥的特点可以利用。

2、由于斜拉部份和悬索部份在主梁施工期间可同时施工, 因而施工周期可缩短, 进一步讲, 在主塔完工后, 可采用悬臂施工方法架设斜拉部份的主梁。

3、关于空气动力稳定性问题, 整桥的刚度可通过设置合理的斜拉部份长度得以加强。因而与悬索桥相比可得到更好的空气动力稳定性。另外, 利用结构部份灵活的特点, 保证空气动力稳定性的多种措施了得到实现。

4、在超长跨度悬索桥中, 主缆的重量占建设费用的大部份变得尤为突出。因此, 在大多数情况下, 斜拉悬索桥具有重量较低的经济优势, 这明显超过悬索桥。

5、综上所述, 对超长跨桥梁来说, 斜拉悬索桥与悬索桥相比更为完善。正因为它利用了悬

索桥和斜拉桥所有的优点, 而同时又弥补了各自的不足。

六、结论

为了研究斜拉悬索形式对超长跨桥梁的适用性, 我们作了三种不同悬吊部份长度的斜拉悬索桥的初步设计, 并且针对经济效益, 证实了斜拉悬索桥与悬索桥相比更为完美。在斜拉悬索桥中, 主要影响超长跨桥可用性的空气动力稳定性, 与悬索桥相比, 在同等经济效益条件下得到了改善。影响超长跨桥可用性的抗弯稳定性, 在斜拉悬索桥的安全性检查中未发现问题, 也就是说只要斜拉部份的长度未超过斜拉桥的临界跨长。另外, 也能缩短工期。

如上所述, 与悬索桥比, 斜拉悬索桥可有效地用于跨度超2000m的超长跨桥, 而且更为经济, 更为适用。

注: 本文由易刚祥译自98日本神户IABSE国际会议论文集, 陈云翔校

(上接第10页)

过程中, 当该索已经过98万次荷载循环后, 应设计院的建议, 对正在试验的第三索的动载试验应力作如下调整: 动载应力上限 $\sigma_{\max}=0.20 \sigma_b$, 即 $F_{\max}=941.6\text{KN}$; 动载应力下限 $\sigma_{\min}=0.10 \sigma_b$, 即 $F_{\min}=470.82\text{KN}$, 参数改变后继续进行试验, 又经过102万次(累计200万次)荷载循环后, 试验索没有出现断丝, 锚板与夹片无松脱现象, 锚具完好。

七、结论

从OVM250-19平行钢绞线拉索组装件在低应力状态下动载试验结果可以得出如下结论:

1、OVM250平行钢绞线拉索锚具构造合理, 制索、安装方便;

2、在低应力态下锚具夹片对钢绞线夹持性能可靠;

3、试验结果表明:没有防松装置的拉索和有防松装置的拉索循环200万次后, 无断丝、滑丝和夹片脱落现象, 同样能满足低应力状态下的动载试验要求;

4、OVM250平行钢绞线拉索在夹片不灌浆的情况下能满足工程实际中低应力状态下的受力要求。

参考文献

1. 《OVM250-19平行钢绞线拉索低应力状态下的动载试验报告》 铁道部大桥局桥梁科学研究院
2. GB/T14370-93《预应力筋锚具和连接器产品标准》