

五河口斜拉桥索塔环向预应力筋张拉试验研究

刘世同

(江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004)

摘 要:宿淮高速公路五河口斜拉桥工程,进行了索塔足尺模型试验。针对环向预应力筋张拉伸长值比理论伸长值偏大这一现象,对环向预应力筋的张拉控制进行了研究,测试了6束预应力筋的摩阻系数。同时,还对初始张拉控制应力进行了试验分析,提出了相应的张拉控制程序。最后,对索塔锚固区共290束环向预应力筋实测张拉伸长值结果进行了概率统计分析,证实了理论伸长值修正算法中各项修正的必要性。

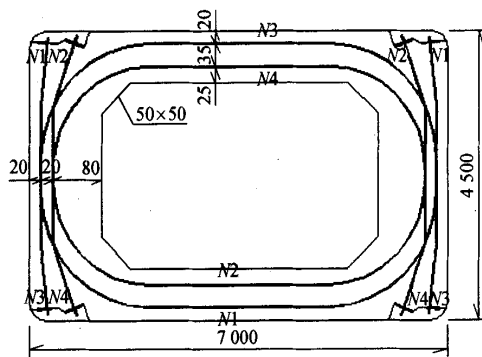
关键词:斜拉桥;环向预应力筋;伸长值;摩阻系数

已建桥梁的实际施工技术资料统计表明,大吨位小半径预应力筋所测得的实际伸长量均大于按现行规范计算的理论伸长量,误差幅度在15%~50%之间,远远超过了规范容许±6%的误差范围,有的实测延伸量甚至大于钢绞线考虑张拉工作长度而不考虑管道摩阻损失的弹性伸长量。同时,实测伸长量值离散性也很大。为了解决这个问题,我们进行了一些试验研究工作。

1 工程概况

宿淮高速公路五河口斜拉桥位于宿迁到淮安高速公路的淮安段,该桥为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,索塔采用H形结构。双塔在承台以上高为137.1 m,上塔柱高77 m,中塔柱高47 m,下塔柱高13.1 m。主跨为152 m+370 m+152 m,桥梁宽度为38.6 m。斜拉索布置非常密集,索塔在123.737 m标高以上拉索竖向间距为1.5 m左右,在该标高以下拉索竖向间距为2.0 m。

索塔采用C50混凝土,箱形截面,断面外形尺寸为7 m×4.5 m,短边壁厚为1.2 m,长边壁厚为0.8 m。为抵抗斜拉索在塔壁上的水平分力,在上塔柱斜拉索锚固区的塔壁内设置了双U形扣合的环向预应力束,图1所示为上塔柱内环向预应力束分布。预应力束为19 φ15.2和12 φ15.2两种钢绞线,采用两端对称张拉工艺,采用塑料波纹管成孔及真空辅助压浆技术。



单位:mm

图1 足尺模型内预应力束平面布置

2 孔道摩阻系数测定试验

为研究塔身U形预应力束两端张拉时的孔道摩阻损失,本次试验利用现场的索塔节段模型进行了U形孔道一端张拉时的摩阻测定。

孔道摩阻测试的基本步骤为:在预应力筋的两端各装一台千斤顶,在被动端安装有精密压力环。测试时首先将固定端千斤顶的油缸拉出少许,并将回油阀关死。然后开动张拉端千斤顶进行张拉,当张拉端压力表读数达到预定的张拉力时,读出固定端压力表读数并换算成张拉力,同时读出精密压力环的读数。两端张拉力差值即为该孔道的摩阻损失。

记主动端的最终张拉力值为 p_1 ,被动端的最终张拉力值(精密压力环读数)为 p_2 ,则:

$$p_2 = p_1 e^{-(kx + \mu p)} \quad (1)$$

由此,可以推算弯曲段的孔道摩阻系数:

$$\mu = -[\ln(p_2/p_1) + kx]/\theta \quad (2)$$

式中: k 为预应力孔道每米局部偏差对摩阻的影响系数; x 为从张拉端至计算截面孔道长度, m ; θ 为从张拉端至计算截面曲线孔道部分切线夹角之和, rad 。

每束均做 3 次张拉试验,以使试验结果能尽量避免试验过程中的误差和试验设备的原因造成的数据失真现象。在孔道摩阻系数计算中, k 取为 0.001。由此而计算出的摩阻系数如表 1。

表 1 摩阻系数

预应力束编号	第一次张拉	第二次张拉	第三次张拉	平均摩阻
N1(1号)	0.218	0.218	—	0.218
N3(1号)	0.209	0.197	0.197	0.201
N2	0.235	0.256	0.256	0.249
N3(2号)	0.274	0.281	0.279	0.278
N4	0.203	0.217	0.222	0.214
N1(2号)	0.217	0.232	0.232	0.227

注: N1(1号)预应力束由于客观条件,没能测出第三次张拉摩阻系数。

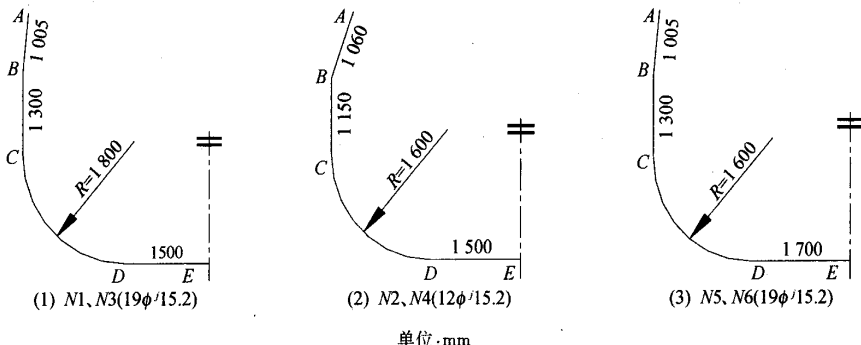


图 2 3 种预应力筋的尺寸示意

采用上面的理论伸长值修正计算方法,可以得出该斜拉桥索塔环向预应力筋 N1 和 N3 (钢绞线长度为 13 060 mm),理论伸长值为 118.2 mm; N2 和 N4 (钢绞线长度为 12 220 mm),理论伸长值为 110.3 mm; N5 和 N6 (钢绞线长度为 12 930 mm),理论伸长值为 116.5 mm。

4 环向预应力束张拉控制试验

为了实现预应力束张拉作业以应力控制为主、伸长量控制为辅的双控,在计算伸长量时,有必要规定一个张拉应力初始读数,从这个初始读数开始量测以后的伸长,作为与理论伸长量比较的依据^[1]。

对于曲率半径较小的环向预应力孔道,显然各根钢绞线的不均匀松散程度较大,作为双控的初张拉力也相应较大。表 2 为该斜拉桥索塔 4 根环向预应

从表 1 中可以看到,各数值的离散性较大,去除最大值和最小值,摩阻系数平均值为 0.227,本次试验是一端张拉的结果,对于两端张拉,结合文献[3]的研究,可以取用 $\mu=0.2$ 。

3 环向预应力束张拉理论伸长值修正算法

在环向预应力束的张拉作业中,与张拉千斤顶油缸伸长量相校准的钢绞线理论伸长量,可按下式计算:

$$\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_a + \Delta L_w + \Delta L_{anc} \quad (3)$$

其中: ΔL_e 为结构内部钢绞线的弹性伸长量,根据规范规定的预应力筋理论伸长值计算方法,按照图 2 所示进行分段计算; ΔL_a 为弯曲段预应力束发生径向位移引起的附加几何伸长量,根据文献已有的研究成果显示,预应力筋在弯曲段的径向位移在 3~6 mm 之间,从而附加几何伸长 $\Delta L_a = \pi s/2$; ΔL_w 为工作长度的弹性伸长量; ΔL_{anc} 为锚具内缩值,根据现场模型试验实测结果,锚具内缩值两端共取 8 mm。

力钢绞线在不同初始张拉力下的实测推算伸长值与理论伸长值的比较。

从表 2 中可以看出,在初始应力为 $0.20\sigma_{con} \sim 0.30\sigma_{con}$ 时,实测推算伸长值与理论伸长值差值范围基本上都是在 $\pm 6\%$ 以内。同时,根据现场施工情况,在采用前卡式千斤顶单根预紧时,预紧荷载应力等级为 $0.1\sigma_{con}$,发现一端预紧后,另一端有的工作夹片依然可以用手松动。因此,有必要将初始张拉控制应力适当提高,本文建议将初始张拉应力为 $0.25\sigma_{con}$ 作为张拉伸长值控制的初始应力值,进行双控。

张拉操作程序建议如下:

$$\begin{aligned} &0.1\sigma_{con} \rightarrow 0.25\sigma_{con} \rightarrow 0.5\sigma_{con} \\ &(\text{小顶两端预紧}) \quad (\text{量测伸长值 } L_{0.25}) \quad (\text{量测伸长值 } L_{0.5}) \\ &\rightarrow 1.0\sigma_{con} \quad (\text{持荷 3 min}) \rightarrow \text{锚固。} \\ &(\text{量测伸长值 } L_{1.0}) \end{aligned}$$

表2 钢绞线束的实测推算伸长值与理论伸长值的比较

初始 张拉力	理论伸长值	预应力束编号			
		N1(上)	N1(下)	N3(上)	N3(下)
		118.2	118.2	118.2	118.2
0.10 σ_{con}	实测值推算伸长量 mm	134.44	122.22	122.22	117.78
	实测与理论相差/%	13.74	3.40	3.40	-0.36
0.20 σ_{con}	实测值推算伸长量 mm	116.25	111.25	120	115
	实测与理论相差/%	-1.65	-5.88	1.52	-2.71
0.30 σ_{con}	实测值推算伸长量 mm	121.43	110	115.71	114.29
	实测与理论相差/%	2.73	-6.94	-2.11	-3.31

5 张拉伸长值的概率分析

5.1 实测张拉伸长值均值的点估计分析

假定实测伸长值服从正态分布,对实测伸长值进行点估计^[6]。样本均值 \bar{x} 是参数 μ 的估计值,样本方差 s^2 是参数 σ^2 的估计值。以无偏估计的标准评选,则应以修正的样本方差 s^{*2} 作为参数 σ^2 的估计值。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

$$s^{*2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

根据以上的分析,可以得出桥塔锚固区3种预应力束实测伸长值总体的点估计的正态分布图,见图3所示。

5.2 理论伸长值均值的区间估计及置信度分析

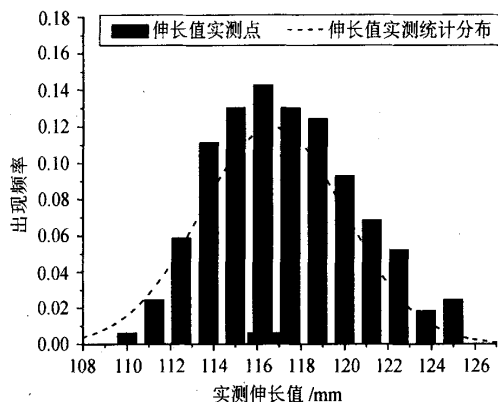
这里,理论伸长值是未知的,但实测伸长值的均值和方差已知。因此,根据区间估计的理论,可以采用实测伸长值的均值和方差对理论伸长值进行估计。得出理论伸长值总体均值 μ 的置信度为95%的置信区间为:

$$\mu \in \left(\bar{x} - \frac{S^*}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1), \bar{x} + \frac{S^*}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right) \quad (6)$$

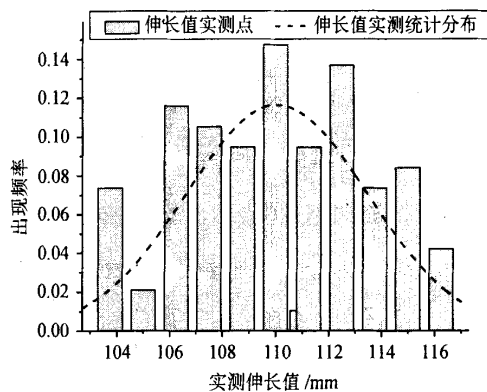
式(6)中, α 为分位点,这里 $\alpha=0.05$,如果 $n-1 < 45$ 时, $t_{\alpha/2}(n-1) = z_{\alpha/2}$, $z_{0.025} = 1.96$ 。得出理论伸长值的总体均值 μ 的置信度为95%的置信区间见表3。

由表3,对于N1、N2、N3、N4、N5和N6预应力束,理论伸长值在置信度为95%的置信区间之内,证明了理论伸长值计算方法中各项修正的合理性和必要性。

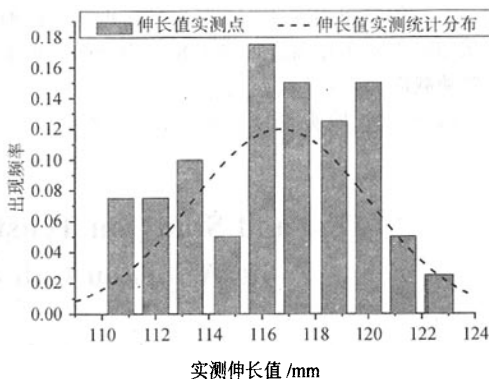
5.3 理论伸长值均方差的区间估计及置信度分析



(1) N1和N3预应力束



(2) N2和N4预应力束



(3) N5和N6预应力束

图3 实桥施工中全部实测预应力束伸长值正态分布

由于理论伸长值的均方差未知,但实测伸长值的方差 σ 已知,根据区间估计的理论,可以采用实测伸长值的方差对理论伸长值的均方差进行估计。由此得出理论伸长值的均方差的置信度为95%的置信区间为:

$$\sigma \in \left(\frac{\sqrt{n-1}S^*}{\sqrt{x_{\alpha/2}^2(n-1)}}, \frac{\sqrt{n-1}S^*}{\sqrt{x_{1-\alpha/2}^2(n-1)}} \right) \quad (7)$$

表 3 理论伸长值均值和均方差的置信度为 95 % 的置信区间

mm

钢绞线编号	理论伸长值	样本均方差 s^*	理论伸长值 μ 均值置信度为 95 % 的置信区间	理论伸长值均方差 σ 置信度为 95 % 的置信区间
N1 和 N3	118.2	3.180 5	(116.696 6, 118.682 2)	(2.105 3, 3.873 5)
N2 和 N4	110.3	3.430 9	(109.339 1, 110.756 7)	(2.998 8, 4.035 0)
N5 和 N6	116.5	3.330 4	(115.632 4, 117.762 6)	(2.728 1, 4.276 1)

式中, α 为分位点, 这里 $\alpha=0.05$, 如果 $n-1>45$ 时, $x_{\alpha/2}^2(n-1) \approx \frac{1}{2}(z_{\alpha/2} + \sqrt{2n-3})^2$, $z_{0.025} = 1.96$, $z_{0.975} = -1.96$ 。得出理论伸长值的均方差 σ 置信度为 95 % 的置信区间见表 3 所示。

从表 3 统计分析的理论伸长值 μ 置信度为 95 % 的置信区间与理论伸长值之间的关系可以得出: 对于 N1、N2、N3、N4、N5 和 N6 预应力束, 理论伸长值均方差的点估计值 s^* 在理论伸长值的均方差 σ 置信度为 95 % 的置信区间之内, 从另一个方面证明了理论伸长值计算方法中各项修正的合理性和必要性。

6 结语

(1) 对于 U 形预应力束为小曲率半径布置情况, 为避免实测张拉伸长值超过理论伸长值的 $\pm 6\%$, 初始张拉控制应力宜适当提高, 本文推荐取初始张拉控制应力为 $0.25\sigma_{con}$, 而且在正式张拉前, 宜采用前卡式千斤顶进行单根预应力筋两端预紧, 预紧荷载应力为 $0.1\sigma_{con}$ 。

(2) 本次试验实测的一端张拉摩阻系数平均值

μ 为 0.227, $k=0.001$ 。对于两端张拉, 结合文献[3]的研究, 可以取用 $\mu=0.2$, $k=0.001$ 。

(3) 理论伸长值均值和均方差的区间估计结果与实测统计分析结果之间存在偏差, 但基本上都在置信度为 95 % 的置信区间, 从而证明了理论伸长值计算方法中各项修正的合理性和必要性。

参考文献:

- [1] JTJ041-2000, 公路桥涵施工技术规范[S].
- [2] 江苏省高速公路建设指挥部, 东南大学华东预应力技术联合开发中心. 五河口斜拉桥索塔锚固区足尺模型试验研究报告[R]. 2005.
- [3] 刘智. 润扬大桥斜拉桥预应力混凝土索塔节段试验研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2003.
- [4] 陈建阳, 等. 大吨位小半径环向预应力在斜拉桥索塔锚固区中的应用研究[J]. 桥梁建设, 2001, (2).
- [5] 刘应贵. 环向预应力体系在索塔中的应用及其试验研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2003.
- [6] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.

Test and Study on Tension Control of Ring Tendons in Wuhekou Cable-stayed Bridge Tower

LIU Shi-tong

(Headquarter of Expressway Construction of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China)

Abstract: Aimed at the phenomenon of the deviation of measured elongation and calculated one, the test and study on tension control of ring tendons with small curvature are carried out in this paper combined with Wuhekou Cable-stayed Bridge. The friction coefficients of six tendons are tested. At the same time, the test of the initial stress for tension control is analyzed and the corresponding procedure for tension control is presented. Finally, the statistic analysis of 290 measured elongations is constructed, which confirms the necessity of several modified items in the calculation method of elongation for small curvature tendons.

Key words: cable-stayed bridge; ring tendons; elongation; friction coefficient