

独塔不对称斜拉桥拉索索力施工监控研究

刘陈韬, 李新生, 贾春鑫, 周苏, 许佳伟

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 斜拉桥拉索索力对结构受力及成桥线形有较大影响, 施工中必须对索力进行精确监测。文中以一独塔双索面斜拉桥施工监控为背景, 先对设计成桥索力进行优化复核, 确定施工阶段索力分批张拉值, 然后通过锚下张拉力识别索力测试公式中的相关参数, 得到用于实桥索力测试的修正公式, 提高索力测试结果的精度。

关键词: 桥梁; 独塔双索面斜拉桥; 拉索; 索力监控

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0105-05

斜拉桥属于高次超静定结构, 施工过程中结构应力、变形不断变化, 为确保成桥后线形、内力符合设计和规范要求, 施工中必须对斜拉桥进行全过程应力、变形监控。拉索索力大小直接影响桥塔、主梁等结构内力及主梁线形, 索力测试是斜拉桥重要监控项目之一。索力测量方法主要有油压千斤顶法、压力传感器测定法、频率法、磁通量法、光纤光栅法。油压千斤顶法直接张拉拉索, 其示值即为拉索索力, 理论上是最准确的方法。频率法是目前工程中最常用的方法, 它根据拉索自振频率与索力之间的关系推算索力, 优点是测试方法简单、快速, 不仅能用于拉索张拉过程索力测量, 还可用于施工后复测等。这 2 种方法配合使用可使索力测试简化、测试结果趋于精准。磁通量法、光纤光栅法也能较准确地测量拉索索力, 但大量应用于工程实践中还少见。运用频率法测试结果换算实际索力时, 需精确测得拉索的振动频率、识别拉索的计算长度与抗弯刚度等特性参数。其中拉索计算长度对索力计算结果的影响最大, 需通过多次拉索锚下千斤顶张拉力与按频率法换算索力值的对比, 才能识别拉索的计算长度, 进而剔除抗弯刚度对索力的影响。该文通过对苏州市城北大道跨京杭大运河的一座独塔斜拉桥的施工监控实践, 研究斜拉桥索力测试与监测方法。

1 工程概况

苏州城北路改建工程跨京杭大运河的长浒大桥辅道桥为独塔不对称单索面斜拉桥, 主跨 104 m, 边跨 75 m。主梁为单箱双室斜腹板箱梁截面, 顶板宽 19 m, 设 1.5% 单向横坡, 主梁采用 C50 砼, 纵、横、竖三向预应力体系。主跨采用复合牵索挂篮悬臂浇

筑, 边跨采用满堂支架整体现浇。索塔采用宝塔形结构, 分为上塔柱、中塔柱、下塔柱和下横梁, 采用 C50 砼。索塔总高 69.457 m, 桥面以上高度为 56 m, 中、下塔柱横桥向外侧面的斜率分别为 1/2.5、1/2.341。中、上塔柱采用空心箱形断面, 下塔柱采用实心断面, 上塔柱为单箱双室截面, 中、下塔柱为不对称单箱单室截面。中塔柱与下塔柱相交处设置一道 3 m×3 m 横梁。

全桥共设置 24 对斜拉索, 平行布置于中央分隔带内, 每对拉索由横向间距为 1.4 m 的 2 根拉索组成。每对拉索均从索塔根部向两侧依次编号, 主跨拉索编号为 C01~C12, 边跨拉索编号为 C01'~C12'; 边跨拉索 C06'~C12' 在主梁上锚固点的间距为 3.5 m, 其余拉索均为 7 m, 在索塔上锚固点的竖向间距均为 1.8 m (见图 1)。拉索采用双层热挤 PE 护套半平行钢丝索体系, 设计标准强度为 1 670 MPa, 弹性模量为 1.95×10^5 MPa。每根拉索两端预埋钢管内均设置体内减振器。

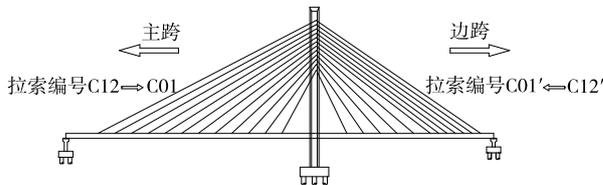


图 1 斜拉桥拉索布置示意图

2 成桥索力与施工索力优化

2.1 成桥索力优化

根据文献[3], 可利用满足结构弯曲应变能最小的原理得到斜拉桥拉索最优成桥索力, 公式如下:

$$([C_L]^T [B] [C_L] + [C_R]^T [B] [C_R]) \{T\} =$$

$$- [C_R]^T [B] [M_{R0}] - [C_L]^T [B] [M_{L0}] \quad (1)$$

式中: $[C_L]$ 、 $[C_R]$ 为索力对单元左、右端弯矩的影响矩阵; $[B]$ 为弯矩影响系数矩阵; $\{T\}$ 为施调索力向量; $[M_{L0}]$ 、 $[M_{R0}]$ 为调索前单元左、右端弯矩向量。

选取斜拉索与主梁连接处单元的左右端弯矩为受调向量,依据式(1)得到索力优化初步结果。优化结果中存在部分索力不合理的现象,需再根据索塔顶端顺桥向位移不超过 10 mm 的约束条件对索力结果进行优化,结果见表 1。按照这一原则得到的最终索力与设计索力误差均在 $\pm 5\%$ 以内。

表 1 长浒大桥拉索成桥索力优化结果

主跨拉索编号	拉索型号	成桥索力/kN	优化索力/kN	误差/%	边跨拉索编号	拉索型号	成桥索力/kN	优化索力/kN	误差/%
C01	7-139	2 043	2 070	1.32	C01'	7-139	1 983	2 013	1.51
C02	7-121	1 527	1 558	2.03	C02'	7-121	1 520	1 550	1.97
C03	7-121	1 705	1 758	3.11	C03'	7-121	1 710	1 754	2.57
C04	7-121	1 775	1 840	3.66	C04'	7-121	1 830	1 889	3.22
C05	7-139	1 986	2 043	2.87	C05'	7-139	2 041	2 128	4.26
C06	7-139	2 096	2 180	4.01	C06'	7-139	2 071	2 145	3.57
C07	7-151	2 207	2 292	3.85	C07'	7-139	2 254	2 344	3.99
C08	7-151	2 311	2 366	2.38	C08'	7-163	2 459	2 511	2.11
C09	7-151	2 433	2 512	3.25	C09'	7-163	2 597	2 625	1.08
C10	7-163	2 657	2 675	0.68	C10'	7-187	2 788	2 797	0.32
C11	7-163	2 706	2 692	-0.52	C11'	7-187	2 873	2 850	-0.80
C12	7-163	2 801	2 772	-1.04	C12'	7-187	3 012	2 972	-1.33

2.2 施工索力优化

根据成桥索力优化终值,结合拟定的施工顺序,采用倒拆法确定施工过程中初始索力终值(见表 2)。

表 2 拉索施工过程中初始索力终值

主跨拉索编号	施工索力终值/kN	边跨拉索编号	施工索力终值/kN
C01	1 670	C01'	1 720
C02	1 270	C02'	1 320
C03	1 380	C03'	1 430
C04	1 500	C04'	1 535
C05	1 605	C05'	1 650
C06	1 725	C06'	1 755
C07	1 830	C07'	1 905
C08	1 925	C08'	2 020
C09	1 995	C09'	2 135
C10	2 090	C10'	2 255
C11	2 160	C11'	2 365
C12	2 240	C12'	2 540

3 施工过程中索力分批张拉控制

在节段砼悬臂施工中,由于一个标准节段砼自重过大,如果节段浇筑完后再张拉索力,会导致挂篮主要受力构件应力达到 ± 334 MPa,远超材料的允

许值,且挂篮前端变形达 11.4 cm,大大超过变形控制要求,对成桥线形控制非常不利。

为确保施工中挂篮结构稳定、内力符合规范要求、前端变形不过大(不超过 2 cm),使主梁应力符合设计要求、成桥线形尽可能平顺,各节段砼(0# 节段除外)分 3 个阶段浇筑:1) 节段箱梁底板砼浇筑;2) 节段箱梁腹板和横隔板砼浇筑;3) 节段箱梁顶板砼浇筑。每个阶段砼浇筑前张拉 1 次索力,其中:第 1 次张拉为挂篮就位后;第 2、第 3、第 4 次张拉分别对应 3 个阶段砼浇筑结束之前,采取边施工边张拉的方式;第 5 次张拉为阶段砼强度达到设计强度的 80% 后。需合理确定张拉批次与索力大小,表 3 为施工过程中初始索力终值。

4 施工过程中索力参数识别与监测

4.1 索力测量公式

目前斜拉桥拉索索力现场测量基本采用动测法,索力计算公式采用两端铰支的索力测量公式:

$$T = 4ml^2 f_n^2 / n^2 - \pi^2 n^2 EI / l^2 \quad (2)$$

式中: T 为索力; m 为拉索单位长度质量; l 为拉索计算长度; f_n 为拉索第 n 阶自振频率; n 为拉索自振频率的阶数; EI 为拉索抗弯刚度。

表3 斜拉索施工过程中索力

						kN					
主跨拉索编号	第1次张拉力	第2次张拉力	第3次张拉力	第4次张拉力	第5次张拉力	边跨拉索编号	第1次张拉力	第2次张拉力	第3次张拉力	第4次张拉力	第5次张拉力
C01	500	1 000	—	—	1 670	C01'	500	1 000	—	—	1 720
C02	166	322	499	1 100	1 270	C02'	164	319	495	1 100	1 320
C03	182	351	545	1 200	1 380	C03'	179	346	536	1 200	1 430
C04	198	380	590	1 300	1 500	C04'	194	373	578	1 300	1 535
C05	214	409	635	1 400	1 605	C05'	194	398	618	1 400	1 650
C06	230	436	677	1 500	1 725	C06'	222	423	656	1 500	1 755
C07	244	461	716	1 600	1 830	C07'	226	429	666	1 600	1 905
C08	257	485	753	1 700	1 925	C08'	229	434	674	1 700	2 020
C09	269	507	786	1 800	1 995	C09'	232	439	682	1 800	2 135
C10	281	527	818	1 850	2 090	C10'	234	443	689	1 850	2 255
C11	291	545	846	1 900	2 160	C11'	237	448	686	1 900	2 365
C12	301	562	873	2 000	2 240	C12'	239	452	702	2 000	2 540

注:C01、C01'所在节段砼施工在支架上完成,施工组织为一次张拉到位,分批张拉500、1 000 kN的目的是方便动测法测量索力参数的识别与标定。

一般拉索实际锚固状态处于铰支与固支之间,采用式(2)计算的索力与实际索力存在一定误差,现场测试时拉索的自振频率一般采用1阶基频,而索力计算公式中的其他参数需进行一一识别,如拉索单位长度质量、拉索计算长度及抗弯刚度对索力的影响等。为提高索力测试精度,引入修正系数 k_1 ,通过与千斤顶张拉时油压表示值对比确定每根拉索的最终索力计算公式:

$$T = k_1(4ml_0^2 f_1^2 - C) \quad (3)$$

式中: l_0 为拉索无应力长度; C 为抗弯刚度影响值, $C = \pi^2 EI / l_0^2$ 。

4.2 拉索单位长度质量识别

对该项目涉及的5种型号成品索在工厂分别随机截取长度不小于0.5 m的3段进行称重,取其平均值,结果见表4。

表4 拉索质量

拉索类型	质量/ (kg·m ⁻¹)	拉索类型	质量/ (kg·m ⁻¹)
PES7-121	39.7	PES7-163	53.6
PES7-139	45.7	PES7-187	61.5
PES7-151	49.6		

4.3 张拉设备校验

拉索张拉采用液压穿心式拉伸设备,它由油压千斤顶和配套的高压油泵、压力表及外接油管等组成。由于每台千斤顶液压配合面实际尺寸和表面粗糙度不同、密封圈和防尘圈松紧程度不同,不同千斤

顶的内摩阻力不同,而且摩阻会随油压高低和使用时间而改变,需定期对千斤顶和配套的油压表、油管及油泵进行校验,减少累计误差,提高张拉控制力精度。该桥共采用4台YC400×200油压配套千斤顶进行拉索张拉,初次使用前采用压力试验机进行校验,根据千斤顶所测作用力和油压进行线性回归,利用最小二乘法原理求得回归方程(见表5)。

表5 千斤顶校验回归分析结果

千斤顶编号	用途	校验回归方程
1	主梁南侧	$T_1 = 76.34\sigma - 74.89$
2	主梁北侧	$T_2 = 74.63\sigma + 14.89$
3	索塔南侧	$T_3 = 75.19\sigma - 35.98$
4	索塔北侧	$T_4 = 76.92\sigma - 99.32$

注: T 为千斤顶张拉力(kN); σ 为油压表读数(MPa)。

4.4 拉索索力计算参数识别

采用式(3)计算拉索索力时,需进行抗弯刚度影响值 C 和修正系数 k_1 识别。公式中有2个未知数,至少需经历2次索力张拉标定。方法是根据千斤顶张拉第1、第2次索力时油压表显示的索力 T_1 、 T_2 ,运用索力动测仪获得对应拉索第1阶自振频率 \bar{f}_{11} 、 \bar{f}_{12} ,代入式(3)求出每根拉索的 C 、 k_1 。采用该方法识别的全桥各拉索索力计算参数见表6。

由表6可知:索长较小时,实测修正系数 k_1 较小,随着索长的增大, k_1 值逐渐增大,初始变化幅度较快,后期变化幅度变缓,总体呈幂函数曲线形式变化。故采用幂函数对 k_1 值进行拟合,结果见图2,

表6 全桥拉索索力参数识别结果

主跨拉索编号	第1次张拉力/kN	第2次张拉力/kN	k_1 识别值	C 识别值/kN	边跨拉索编号	第1次张拉力/kN	第2次张拉力/kN	k_1 识别值	C 识别值/kN
C01(N)	500	1 000	0.935 8	8.4	C01'(N)	500	1 000	0.936 0	9.5
C01(S)	500	1 000	0.935 3	8.7	C01'(S)	500	1 000	0.936 5	9.2
C02(N)	499	1 100	0.943 1	6.9	C02'(N)	495	1 100	0.945 6	6.7
C02(S)	499	1 100	0.944 0	6.1	C02'(S)	495	1 100	0.945 1	7.1
C03(N)	545	1 200	0.951 8	4.8	C03'(N)	536	1 200	0.953 3	5.0
C03(S)	545	1 200	0.952 8	3.9	C03'(S)	536	1 200	0.952 9	4.6
C04(N)	590	1 300	0.958 9	2.8	C04'(N)	578	1 300	0.959 0	3.1
C04(S)	590	1 300	0.958 3	3.4	C04'(S)	578	1 300	0.959 1	1.9
C05(N)	635	1 400	0.963 7	3.0	C05'(N)	618	1 400	0.963 9	3.7
C05(S)	635	1 400	0.962 9	1.9	C05'(S)	618	1 400	0.964 0	2.2
C06(N)	677	1 500	0.966 7	2.0	C06'(N)	656	1 500	0.967 9	1.7
C06(S)	677	1 500	0.966 0	2.8	C06'(S)	656	1 500	0.968 7	0.8
C07(N)	716	1 600	0.971 0	2.6	C07'(N)	666	1 600	0.970 6	3.0
C07(S)	716	1 600	0.970 8	2.3	C07'(S)	666	1 600	0.969 1	0.5
C08(N)	753	1 700	0.973 0	2.5	C08'(N)	674	1 700	0.972 8	3.3
C08(S)	753	1 700	0.974 0	1.4	C08'(S)	674	1 700	0.971 2	0.5
C09(N)	786	1 800	0.975 9	1.3	C09'(N)	682	1 800	0.973 4	2.1
C09(S)	786	1 800	0.975 3	0.2	C09'(S)	682	1 800	0.972 9	1.2
C10(N)	818	1 850	0.978 2	2.1	C10'(N)	689	1 850	0.974 5	1.7
C10(S)	818	1 850	0.979 3	0.7	C10'(S)	689	1 850	0.974 7	2.0
C11(N)	846	1 900	0.982 0	1.8	C11'(N)	686	1 900	0.976 0	0.1
C11(S)	846	1 900	0.983 2	0.2	C11'(S)	686	1 900	0.974 9	1.5
C12(N)	873	2 000	0.984 9	0.2	C12'(N)	702	2 000	0.977 6	1.7
C12(S)	873	2 000	0.984 9	0.2	C12'(S)	702	2 000	0.978 7	0.3

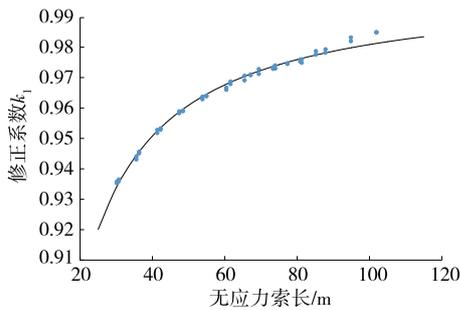


图2 索力测试公式修正系数 k_1 与无应力索长的拟合关系曲线

拟合公式见式(4)。相关性系数 $R^2 = 0.992 3$, 拟合曲线与实测结果有较高拟合度, 式(4)可直接用于后续阶段索力测试。

$$k_1 = 1.000 - 2.207l_0^{-1.031} \quad (4)$$

4.5 成桥阶段索力监测

成桥阶段索力调整中, 以成桥索力为目标值, 按指定的张拉顺序进行拉索张拉, 根据前述修正公式确定是否张拉到位, 并以锚下张拉力进行检验。最终实测索力与目标索力对比见表7。从表7可看出: 实测索力与目标索力的误差均在 $\pm 5\%$ 以内。

表7 成桥索力实测值与目标索力对比

主跨拉索编号	式(4)计算 k_1 值	实测索力/kN	目标索力/kN	误差/%	边跨拉索编号	式(4)计算 k_1 值	实测索力/kN	目标索力/kN	误差/%
C01(N)	0.934 1	2 081.0	2 043	1.86	C01'(N)	0.935 3	1 899.1	1 983	-4.23
C01(S)	0.934 1	1 977.3	2 043	-3.22	C01'(S)	0.935 3	1 905.0	1 983	-3.93
C02(N)	0.944 4	1 527.2	1 527	0.01	C02'(N)	0.945 6	1 573.3	1 520	3.51
C02(S)	0.944 4	1 552.8	1 527	1.69	C02'(S)	0.945 6	1 465.2	1 520	-3.61
C03(N)	0.952 4	1 688.6	1 705	-0.96	C03'(N)	0.953 5	1 662.2	1 719	-3.30

续表 7

主跨拉索编号	式(4)计算 k_1 值	实测 索力/kN	目标 索力/kN	误差/%	边跨拉索编号	式(4)计算 k_1 值	实测 索力/kN	目标 索力/kN	误差/%
C03(S)	0.952 4	1 702.7	1 705	-0.13	C03'(S)	0.953 5	1 661.3	1 719	-3.36
C04(N)	0.958 7	1 837.5	1 775	3.52	C04'(N)	0.959 6	1 824.0	1 830	-0.33
C04(S)	0.958 7	1 829.0	1 775	3.04	C04'(S)	0.959 6	1 878.9	1 830	2.67
C05(N)	0.963 8	2 065.3	1 986	3.99	C05'(N)	0.964 5	2 124.0	2 041	4.07
C05(S)	0.963 8	2 041.8	1 986	2.81	C05'(S)	0.964 5	2 123.3	2 041	4.03
C06(N)	0.967 8	2 146.4	2 096	2.40	C06'(N)	0.968 5	2 147.0	2 071	3.67
C06(S)	0.967 8	2 171.6	2 096	3.61	C06'(S)	0.968 5	2 169.6	2 071	4.76
C07(N)	0.971 1	2 249.8	2 207	1.94	C07'(N)	0.970 4	2 327.6	2 254	3.27
C07(S)	0.971 1	2 272.5	2 207	2.97	C07'(S)	0.970 4	2 322.1	2 254	3.02
C08(N)	0.973 9	2 231.0	2 311	-3.46	C08'(N)	0.972 1	2 525.5	2 459	2.70
C08(S)	0.973 9	2 229.0	2 311	-3.55	C08'(S)	0.972 1	2 525.1	2 459	2.69
C09(N)	0.976 2	2 406.1	2 433	-1.11	C09'(N)	0.973 7	2 619.6	2 597	0.87
C09(S)	0.976 2	2 477.5	2 433	1.83	C09'(S)	0.973 7	2 555.7	2 597	-1.59
C10(N)	0.978 1	2 710.5	2 597	4.37	C10'(N)	0.975 0	2 904.3	2 788	4.17
C10(S)	0.978 1	2 703.5	2 597	4.10	C10'(S)	0.975 0	2 867.4	2 788	2.85
C11(N)	0.979 8	2 629.6	2 706	-2.82	C11'(N)	0.976 3	3 005.5	2 873	4.61
C11(S)	0.979 8	2 676.0	2 706	-1.11	C11'(S)	0.976 3	3 004.2	2 873	4.57
C12(N)	0.981 2	2 779.9	2 801	-0.75	C12'(N)	0.977 4	3 140.6	3 012	4.27
C12(S)	0.981 2	2 819.5	2 801	0.66	C12'(S)	0.977 4	3 132.6	3 012	4.00

5 结论

(1) 斜拉桥监控中需对设计成桥索力、施工阶段索力进行复核与优化。

(2) 采用悬臂施工的预应力砼斜拉桥,一般标准节段较长,质量较重,砼浇筑中应进行分阶段分批索力张拉,以确保成桥线形符合设计要求。

(3) 拉索索力监测不能简单地套用理论公式进行实桥测试,必须进行索力公式中相关参数识别、修正,以提高测试精度。

参考文献:

- [1] 孟少平,杨睿,王景全.一类精确考虑抗弯刚度影响的系杆拱桥索力测量新公式[J].公路交通科技,2008,25(6):87-91.
- [2] 张戎社,杜彦良,孙宝臣,等.光纤光栅压力传感器在斜拉索索力监测中的应用研究[J].铁道学报,2002,24(6):47-49.
- [3] 郝卓佳.预应力混凝土斜拉桥索力优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.
- [4] 李新生,项贻强.基于挠度曲线振型函数的系杆拱桥柔性吊杆索力测量公式[J].工程力学,2010,27(8):174-178.

- [5] 孙良凤.短索张力和弯曲刚度的识别方法研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [6] 全国钢标准化技术委员会.预应力混凝土用钢丝:GB/T 5223-2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [7] 周争菊,杨聪,曾有艺,等.独塔混合梁斜拉桥合龙段施工控制技术研究[J].公路与汽运,2018(6):99-101+105.
- [8] 李晓林,邓洁.基于改进粒子群算法的斜拉桥索力优化方法[J].公路与汽运,2021(5):106-110.
- [9] 叶海强.不对称独塔单索面斜拉桥索力优化[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [10] 张海禄.独塔斜拉桥钢绞线拉索施工过程中索力控制方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [11] 缪长青,王义春,黎少华.矮塔混凝土斜拉桥成桥索力优化[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(3):526-530.
- [12] 张浩.公路运输独塔不对称斜拉桥施工控制研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [13] 任一博.某斜拉桥索力分析与施工监控[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [14] 邵景松,李国柱.斜拉桥索力监控研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017(9):189-190.

收稿日期:2021-04-01