

斜拉桥索力监测技术研究与应用

檀兴华

(路桥集团国际建设股份有限公司 北京市 100027)

摘 要: 通过对斜拉桥索力监测技术研究成果及工程经验的回顾和总结,研究了目前常用的索力量测方法(即振动频率量测法)的使用范围及带减振器拉索索力量测的缺陷,分析了带橡胶组合减振器拉索的构造特点及力学特性,建立了带橡胶组合减振器拉索的动力学模型,根据能量原理,推导出考虑减振器影响的索力计算公式,并在青岛丹山斜拉桥进行了应用,取得了预期的效果,为同类桥梁的施工控制与运营管理,特别是为带橡胶组合减振器拉索索力监测提供了理论依据与技术保障。

关键词: 混凝土斜拉桥; 索力监测技术; 振动频率量测法; 减振器效应

斜拉桥属高次超静定结构,施工方法和安装顺序与成桥后的主梁线形及内力状态有密切的关系,且在施工阶段的结构内力和变形在不断变化。特别是斜拉索的存在,使得设计计算和施工控制更加复杂。索力的大小对结构受力的影响很大,由于施工设备数量等条件限制,张拉只能逐根或分组进行。斜拉索的张拉及索力的大小对整个斜拉桥的受力有很大的影响,索力是影响斜拉桥受力的一个核心因素,在施工过程和运营管理中,必须对索力进行监测。

由于风或桥面振动的激励,斜拉索会发生振动。为了抑制拉索的振动,通常在拉索两端靠近锚头的附近安装减振器,这时拉索的固有频率有所提高,拉索的振型也有所变化,通常所采用的振动频率量测法将不再适用。因而,若能对索力计算公式进行修正,考虑减振器的影响,必将方便施工控制,加快施工进度,对斜拉桥施工控制和运营管理带来很大的便利。

1 斜拉桥索力监测技术研究

监测是桥梁施工控制和运营管理的基本内容,是保证桥梁结构顺利修建、安全运营的重要工序,为后期调控提供基础数据的重要手段。索力监测是桥梁结构监测的核心内容,拉索索力的准确与否直接关系到主梁的线形乃至施工安全,因此,必须对施工阶段及运营阶段索力的真实状态进行准确地描述。

桥梁结构竣工投入运营后,梁体线形、主塔变

位、结构应力、拉索索力等是观测的主要内容。

目前可供现场索力量测的方法主要有压力表量测法,压力传感器量测法和振动频率量测法等。由于压力量测法和压力传感器量测法通常受环境条件限制,仅适用于施工索力监测,而振动频率量测法适用于各种工况下索力监测,由于此法具有简单、快速的特点,在应用中通过测量斜拉索的固有频率就可计算出斜拉索的索力,因而得到工程技术人员的青睐。

目前在索力量测方法中,以采用振动频率法较多,但大多数都是采用近似处理,特别是对于安装减振器后,如何考虑减振器对索力的影响这一方面的研究较少。在实际操作过程中,通常根据操作者的经验,采用试算的方法对索长等参数进行修正,缺乏一定的理论依据,因此有必要对这一问题进行研究。

2 斜拉索动力分析

通过对斜拉索的静力研究发现,由于斜拉索的几何非线性,使得其精确解很难导出。尽管从斜拉桥的整体平衡出发,导出了斜拉索索长与索力的关系,但由于其结果仅为一组超越方程,在实际操作中很难方便地应用,因此下面从拉索的动力特性进行研究^[1]。

假设斜拉索的两端是固定不动的,可得:

$$T = \frac{4\rho l^2 f_n^2}{n^2} \quad (1)$$

式中: T 为缆索索力; ρ 为缆索单位长度的质量; l 为缆索的长度; f_n 为第 n 阶固有频率。

对于某一根确定的缆索, 式(1)右边的 ρ 、 l 都是已知值, 如果能精确测定 f_n , 并确定相应的 n , 便可求得索力 T 。

3 带减振器的拉索性能分析

由于风或桥面振动的激励, 斜拉索会发生多种形式的振动, 有时振幅会很大。为了抑制拉索的振动, 常常在拉索两端靠近锚头的附近安装减振器。本文主要对带橡胶组合减振器的拉索性能进行研究, 此处的橡胶不是一般的橡胶, 它是一种粘弹性高阻尼材料, 其阻尼值比一般橡胶大 4~5 倍。用这种材料制作衬套, 嵌在拉索和拉索钢导管之间构成阻尼支点后, 拉索稍有振动, 阻尼衬套就受到挤压并吸收能量, 发挥减振作用。设置附加的阻尼支点后, 除了拉索的振动能量被吸收外, 整根拉索还被分隔成中间长、两边短的三段。这时, 拉索的固有频率有所提高, 拉索的振型也有所变化, 同时也对采用频率法来准确确定拉索索力带来一定的困难。本节试图对带有橡胶减振器的拉索结构性能进行分析。

在施工阶段, 减振器未安装时, 计算索长通常取拉索上下两个索孔出口处锚板中心的空间距离。在安装减振器后, 减振器相当于一个附加的阻尼支点, 整根拉索被分隔成中间长、两端头短的三段。减振器对拉索的约束作用使拉索的自由长度减小, 本文在理论分析中, 仍然取安装前的长度, 但对索力计算公式进行了修正, 考虑了减振器的效应。

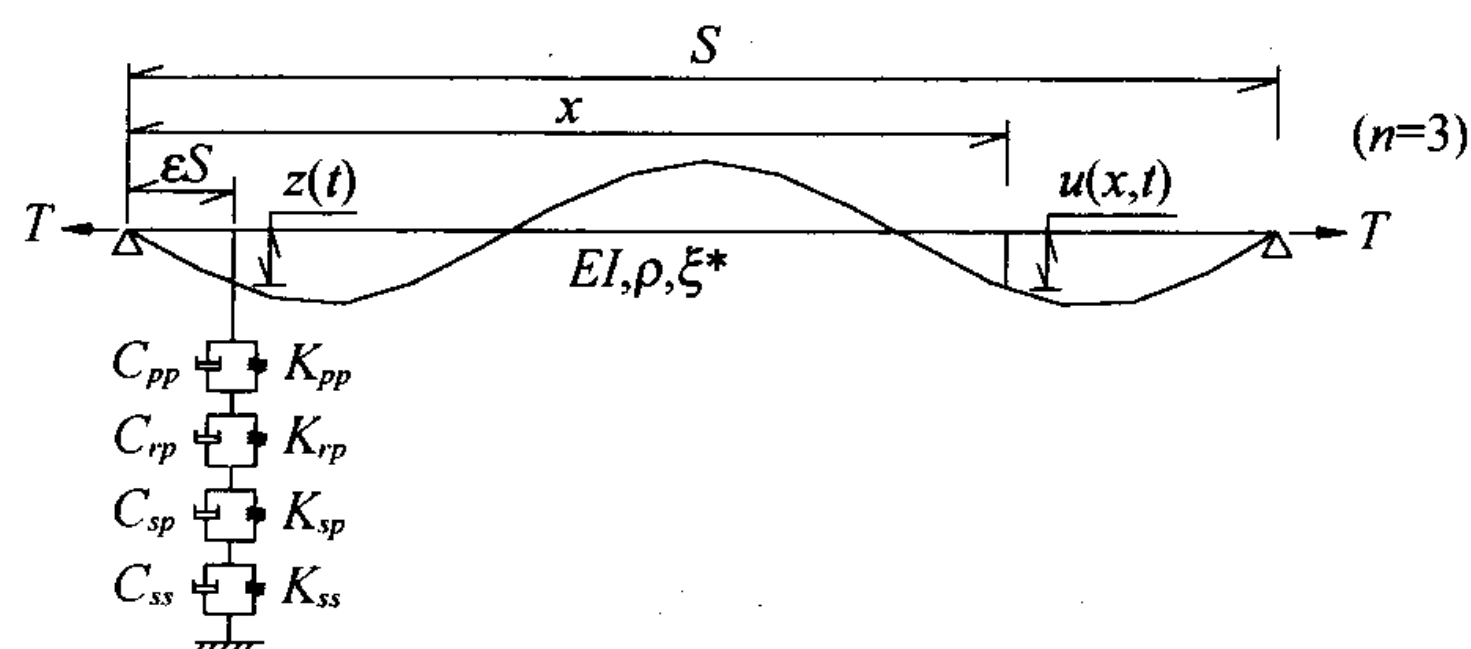
3.1 带橡胶组合减振器的拉索基本构造

带橡胶组合减振器的拉索, 由拉索和橡胶组合减振器两部分组成。其中橡胶组合减振器是由钢套筒、橡胶垫圈和 PE 塑料三部分组成, 由于橡胶垫圈的存在, 使得拉索的振动特性发生变化。本文试图从能量原理方法出发, 通过构造拉索的位移形函数, 对带橡胶组合减振器的斜拉索进行分析。

3.2 基本模型

模仿梁单元的振动分析方法^[2], 把带减振器的拉索抽象成一个动力学模型, 如图1所示。由于橡胶垫圈和 PE 塑料质量与拉索的质量相比较小, 可忽略不计。

此模型可模拟结构的真实振动特性, 反映出结构的受力特点, 但由于涉及参数较多, 进行结构分析复杂, 可根据结构的实际特点, 对模型进行适当的简化。

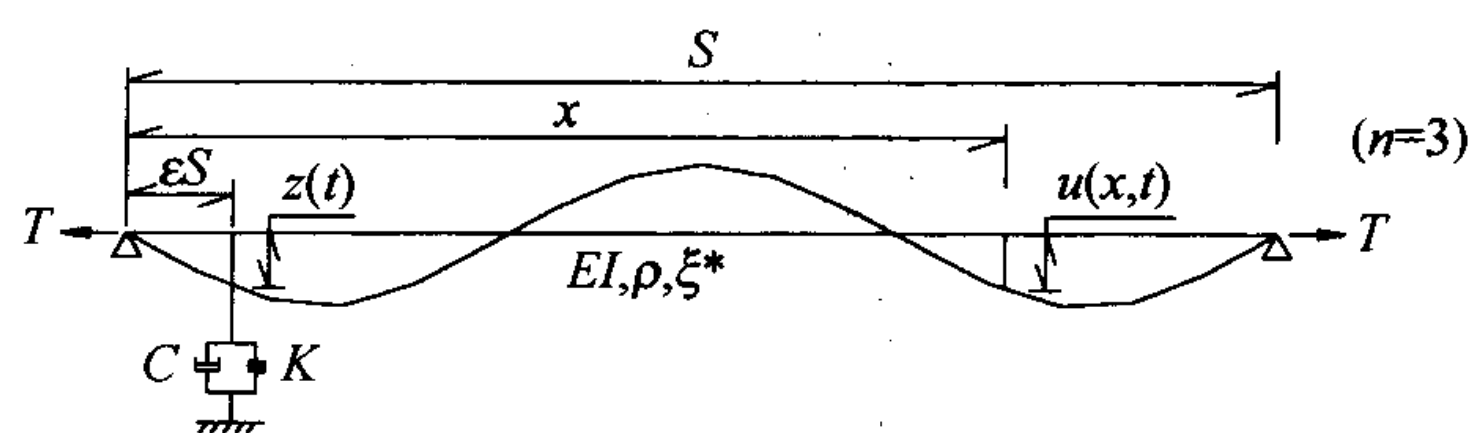


$u(x,t)$ ——拉索各点的位移, $z(t)$ ——减振器安放处拉索的位移, n ——振型阶数, S ——拉索的索长, T ——拉索的索力, ρ ——单位长度拉索的质量, EI ——拉索的弯曲刚度, ϵS ——橡胶垫圈安放处距索端的距离, C_{pp} ——PE 塑料在挤压情况下的阻尼值, K_{pp} ——PE 塑料的挤压刚度, C_{rp} ——橡胶垫圈的阻尼值, K_{rp} ——橡胶垫圈的挤压刚度, C_{sp} ——钢套筒在挤压情况下的阻尼值, K_{sp} ——钢套筒的挤压刚度, C_{ss} ——钢套筒在侧移情况下的阻尼值, K_{ss} ——钢套筒的侧移刚度值, ξ^* ——拉索的广义等效阻尼值

图1 基本模型

3.3 等效模型

由于带橡胶组合减振器的刚度、阻尼元素较为复杂, 因而可根据静力等效原则求其等效刚度、等效阻尼比^[3,4]。减振器的刚度、阻尼元素等效后的带橡胶组合减振器的拉索动力学模型见图2所示。



C ——减振器的等效阻尼, K ——减振器的等效刚度, 其他符号同前。

图2 等效模型

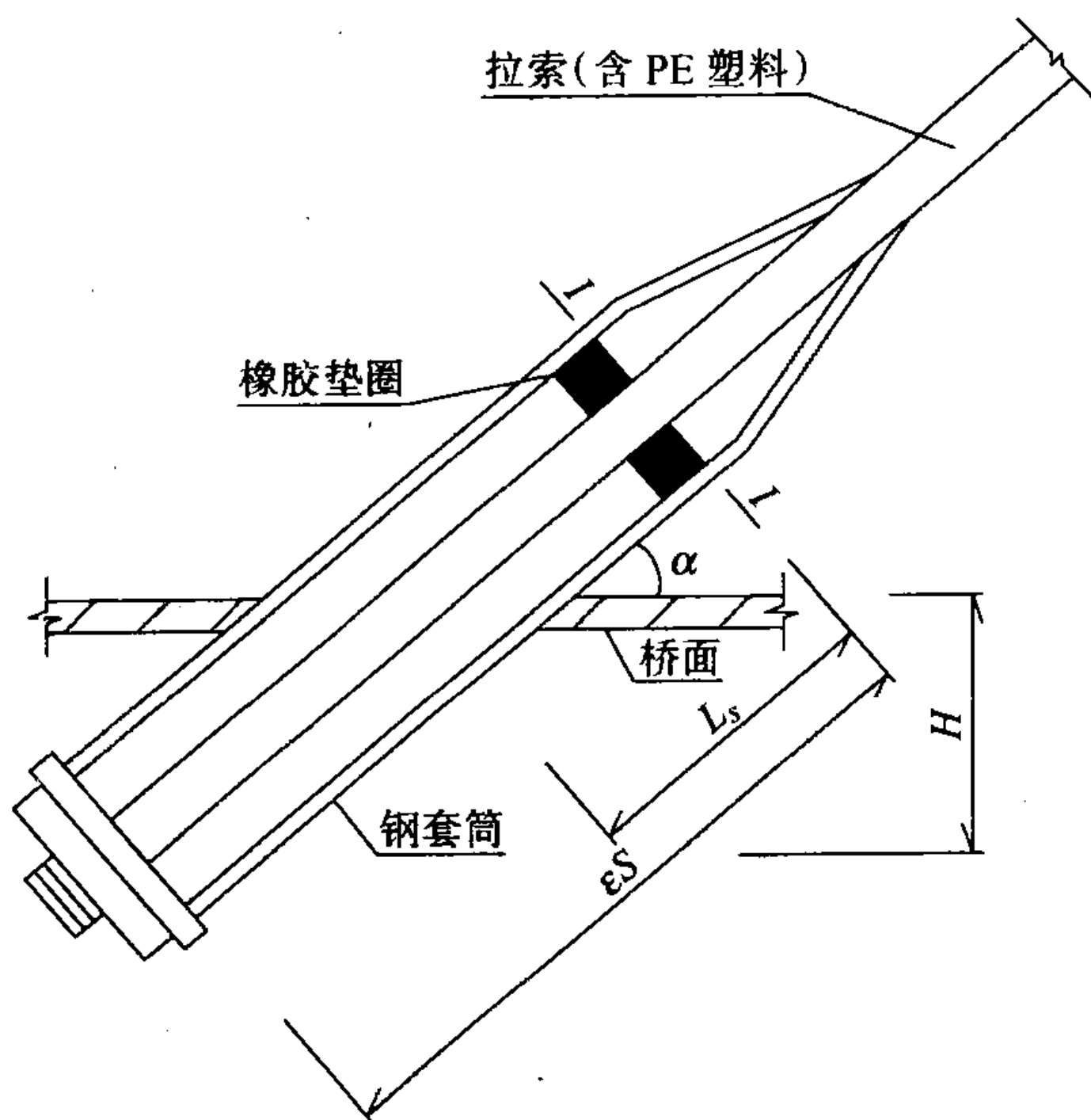
3.4 振动圆频率的求解

根据 Martin Wieland 在研究带减振器(只考虑阻尼)的拉索的位移函数时的假定^[5]以及能量守恒原理, 经过理论推导, 可求出拉索的振动圆频率

$$\omega^2 = \frac{1}{2\rho} \left\{ \left[5T\pi^2 \left(\frac{n}{S} \right)^2 + 2K \left(\frac{n}{S} \right) (\sin^2(n\pi\epsilon) + \sin^2(2n\pi\epsilon)) + 17EI\pi^4 \left(\frac{n}{S} \right)^4 \right] - \left[9T^2\pi^4 \left(\frac{n}{S} \right)^4 + 4K^2 \left(\frac{n}{S} \right)^2 (\sin^2(n\pi\epsilon) + \sin^2(2n\pi\epsilon))^2 + 225(EI)^2\pi^4 \left(\frac{n}{S} \right)^4 + 4KEI\pi^4 \left(\frac{n}{S} \right)^8 (15\sin^2(2n\pi\epsilon) - 27\sin^2(n\pi\epsilon)) + 12KT\pi^2 \left(\frac{n}{S} \right)^3 (\sin^2(2n\pi\epsilon) - \sin^2(n\pi\epsilon)) \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

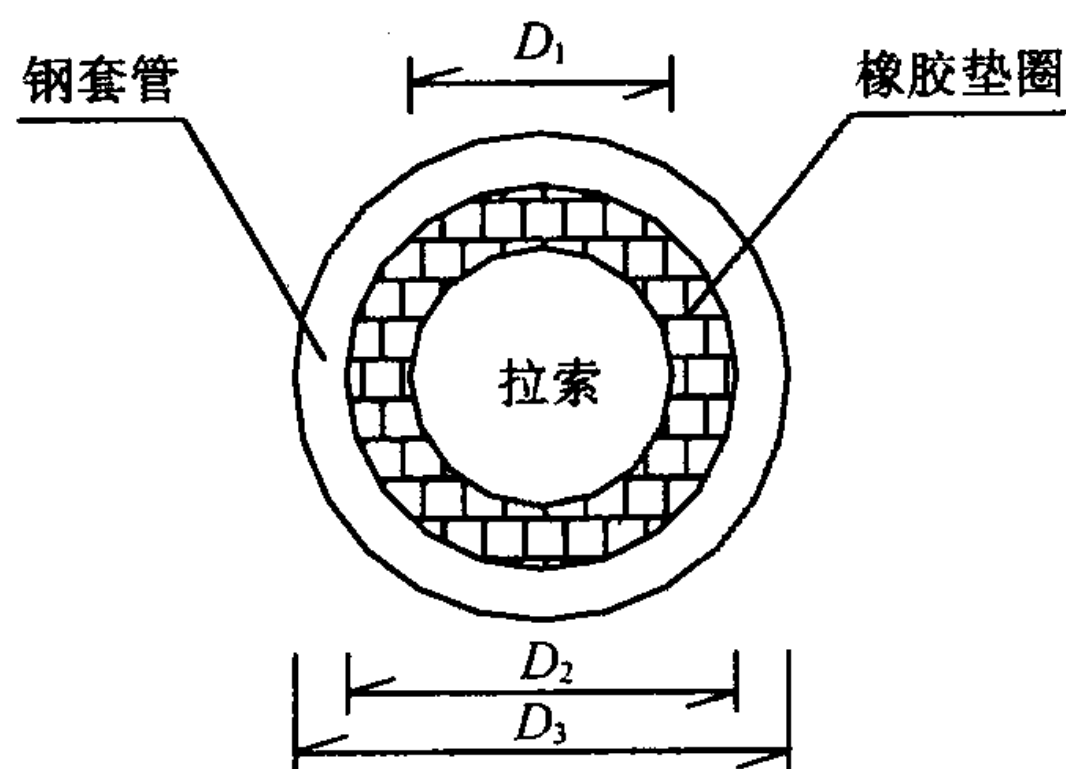
3.5 计算参数的设定

各构造参数如图3、图4所示。



S——索长, L_s ——钢套筒长度, H ——索锚固处距桥面垂直距离, α ——套筒与桥面的夹角

图3 带橡胶组合减振器的拉索锚固区构造



D_1 ——索的直径, D_2 ——橡胶垫圈的外径(钢套筒的内径), D_3 ——钢套筒的外径

图4 减振器橡胶垫圈处断面

3.6 橡胶组合减振器的等效刚度 K 的计算

橡胶组合减振器的等效刚度为两个弹簧串联后的刚度, 钢套筒侧移刚度 K_{ss} ^[6], 橡胶垫圈挤压刚度 K_{rp} 。由串联弹簧刚度计算公式得:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{ss}} + \frac{1}{K_{rp}} \quad (4)$$

把式(4)整理, 得:

$$K = \frac{K_{ss} \cdot K_{rp}}{K_{ss} + K_{rp}} \quad (5)$$

用 K_{rdp} 、 K_{rsp} 代替 K_{rp} , 即可求得橡胶组合减振器的等效动、静刚度。

3.7 索力计算

式(2)即为带橡胶组合减振器拉索的振动圆频

率与索力、索长的关系, 若对公式关于索力 T 进行变换, 即可得到索力计算公式。如果忽略拉索的抗弯刚度 EI , 则式(2)可变为

$$T = \left\{ -0.253K\left(\frac{n}{S}\right)\sin^2(2n\pi\epsilon) - 0.1013K\left(\frac{n}{S}\right) \times \sin^2(n\pi\epsilon) + 0.0633\rho\omega^2 - [6.4162 \times 10^{-4} \times K^2\left(\frac{n}{S}\right)^2\sin^2(2n\pi\epsilon) + 0.0051K^2\left(\frac{n}{S}\right)^2 \times \sin^2(n\pi\epsilon)\sin^2(2n\pi\epsilon) + 0.0019\rho\omega^2K^2\left(\frac{n}{S}\right) \sin^2(2n\pi\epsilon) + 0.0103K^2\left(\frac{n}{S}\right)^2\sin^4(n\pi\epsilon) - 0.0077\rho\omega^2K\left(\frac{n}{S}\right)\sin^2(n\pi\epsilon) + 0.0014\rho^2\omega^4]^{1/2} \right\} \left(\frac{S}{n}\right)^2 \quad (6)$$

如果减振器的等效刚度为零, 或减振器装在索的端点($\epsilon=0$), 则式(2)变为

$$T = 4\rho S^2 \left(\frac{f_i}{n}\right)^2 \quad (7)$$

式(7)与式(1)完全相同。

根据斜拉索的锚固构造特点, 可结合实际情况采用式(6)、式(7)计算求得斜拉索索力的大小。

4 实桥应用的数值结果分析

4.1 工程概况及索力测量

丹山斜拉桥(以下简称丹山桥)位于青银高速公路青岛段, 主桥为半飘浮体系双主塔连体预应力混凝土斜拉桥, 跨径组合为43 m+96 m+136 m=275 m, 两半幅桥塔相互固结, 成双连体结构, 造型新颖, 为国内首创。

采用热挤聚乙烯拉索, 冷铸墩头锚锚固体系, 钢丝直径为7 mm, 根据各拉索的索力并兼顾全桥的整体刚度, 全桥采用91丝、109丝、121丝、139丝及151丝5种规格的共计120根斜拉索。丹山桥采用移动支架现浇施工方法。

索力测量。由于青岛日照温差较大, 因此规定在一天中日照温差对结构变形影响最小的时候测量索力, 夏季选择在凌晨进行, 秋季选择在每天日出之前。施工现场测量索力采用了振动法和索力仪测试相结合的方法。振动法是通过频率采集仪采集斜拉索振动的频率谱, 再利用振动公式计算出索力。

索力测量的内容包括:(1)在每一施工阶段张拉斜拉索之前, 对已安装全部拉索进行统测;(2)在本阶段落架及拉索张拉过程, 进行适时测控, 保证张拉力的准确;(3)本阶段结束后, 再对全部索力进行统

测;(4)斜拉桥合拢段施工时进行全过程测控。

4.2 施工索力计算

在实际工程应用中,可不考虑拉索的刚度效应。

施工阶段,在减振器尚未安装时,索力计算可采用式(1)直接求得。下面对采用公式计算结果和采用索力仪测试结果进行比较说明。

用索力仪测索力与计算索力结果见表1、表2和图5、图6,索力误差变化见图7和图8。

表1 振动频率法计算索力与索力仪测试索力值比较(1)

索号	索每延米质量 kg/m	索长 m	测量频率 Hz	索力仪 测试索力 kN	计算索力 kN	误差比 %
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
A1	30.4	35.201	3.718 8	2 111	2 083.7	1.29
A2	30.4	42.604	2.781 3	1 731	1 707.3	1.37
A3	30.4	51.337	2.375 0	1 834	1 807.7	1.44
A4	35.5	58.545	2.031 3	2 039	2 008.1	1.51
A5	35.5	66.884	1.921 9	2 307	2 346.3	-1.70
A6	39.7	74.363	1.703 1	2 588	2 547.2	1.58
A7	39.7	82.017	1.484 4	2 392	2 353.7	1.60
A8	49.0	89.451	1.343 8	2 879	2 831.8	1.64
A9	39.7	97.099	1.234 4	2 319	2 281.3	1.63
A10	39.7	104.800	1.156 3	2 371	2 331.7	1.66
A11	45.4	112.668	1.085 9	2 765	2 718.5	1.68
A12	39.7	120.350	1.039 1	2 526	2 483.3	1.69
A13	39.7	128.016	0.914 1	2 212	2 174.5	1.69
A14	39.7	135.703	0.898 4	2 402	2 360.3	1.74
A15	39.7	143.419	0.871 1	2 522	2 478.6	1.72
A1'	30.4	33.756	3.703 1	1 924	1 900.1	1.24
A2'	30.4	43.308	2.734 4	1 729	1 705.2	1.37
A3'	30.4	50.496	2.421 9	1 845	1 818.7	1.43
A4'	35.5	58.939	2.000 0	2 003	1 973.1	1.49
A5'	35.5	66.220	1.796 9	2 041	2 010.5	1.49
A6'	39.7	74.124	1.656 3	2 432	2 393.4	1.59
A7'	39.7	81.809	1.453 1	2 281	2 244.2	1.61
A8'	49.0	89.182	1.343 8	2 861	2 814.8	1.61
A9'	39.7	96.859	1.265 6	2 426	2 386.4	1.63
A10'	39.7	104.494	1.265 6	2 755	2 777.4	-0.81
A11'	45.4	112.297	1.046 9	2 552	2 509.8	1.65
A12'	39.7	119.910	1.046 9	2 545	2 502.4	1.68
A13'	39.7	127.643	0.929 7	2 275	2 236.3	1.70
A14'	39.7	135.327	0.937 5	2 600	2 556.0	1.69
A15'	39.7	143.124	0.839 8	2 334	2 294.2	1.71

注:表中误差比⑦=(⑤-⑥)/⑤×100。

表2 振动频率法计算索力与索力仪测试索力值比较(2)

索号	索每延米质量 kg/m	索长 m	测量频率 Hz	索力仪 测试索力 kN	计算索力 kN	误差比 %
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
B1	30.4	34.875	3.718 8	2 072	2 045.3	1.29
B2	30.4	42.305	2.796 9	1 726	1 702.4	1.37
B3	30.4	51.056	2.390 6	1 838	1 811.5	1.44
B4	35.5	58.284	2.046 9	2 052	2 021.0	1.51
B5	35.5	66.635	1.921 9	2 289	2 328.9	-1.74
B6	39.7	74.127	1.703 1	2 572	2 531.0	1.59
B7	39.7	81.793	1.484 4	2 379	2 340.8	1.60
B8	49.0	89.239	1.343 8	2 865	2 818.4	1.63
B9	39.7	96.897	1.234 4	2 310	2 271.8	1.65
B10	39.7	104.606	1.156 3	2 362	2 323.1	1.65
B11	45.4	112.481	1.059 4	2 756	2 578.6	6.44
B12	39.7	120.169	1.039 1	2 518	2 475.8	1.68
B13	39.7	127.842	0.914 1	2 205	2 168.6	1.65
B14	39.7	135.545	0.898 4	2 396	2 354.8	1.72
B15	39.7	143.257	0.871 1	2 516	2 473.0	1.71
B1'	30.4	33.433	3.765 6	1 952	1 927.3	1.26
B2'	30.4	43.007	2.765 6	1 744	1 720.3	1.36
B3'	30.4	50.218	2.421 9	1 825	1 798.7	1.44
B4'	35.5	58.675	2.015 6	2 016	1 986.2	1.48
B5'	35.5	65.973	1.796 9	2 027	1 995.5	1.55
B6'	39.7	73.889	1.671 9	2 462	2 423.4	1.57
B7'	39.7	81.586	1.453 1	2 268	2 232.0	1.59
B8'	49.0	88.971	1.343 8	2 848	2 801.5	1.63
B9'	39.7	96.658	1.265 6	2 416	2 376.5	1.64
B10'	39.7	104.301	1.250 0	2 711	2 699.3	0.43
B11'	45.4	112.111	1.046 9	2 543	2 501.5	1.63
B12'	39.7	119.731	1.046 9	2 538	2 494.9	1.70
B13'	39.7	127.471	0.929 7	2 269	2 230.3	1.71
B14'	39.7	135.161	0.945 3	2 638	2 592.3	1.73
B15'	39.7	142.963	0.839 8	2 329	2 289.0	1.72

注:表中误差比⑦=(⑤-⑥)/⑤×100。

从用振动频率法计算索力与用索力仪测试索力的结果及图5、图6中可以得到如下结论。

(1)在未安装减振器前,用振动频率法计算的索力与索力仪测试索力值进行比较,除B11索由索力计算公式计算的结果偏离索力仪测试数据较大外(误差达6.44%),其余斜拉索的索力计算结果均与索力仪测试结果较为接近,说明由索力计算公式计算的结果是可靠的,同时也验证了式(1)的准确性。

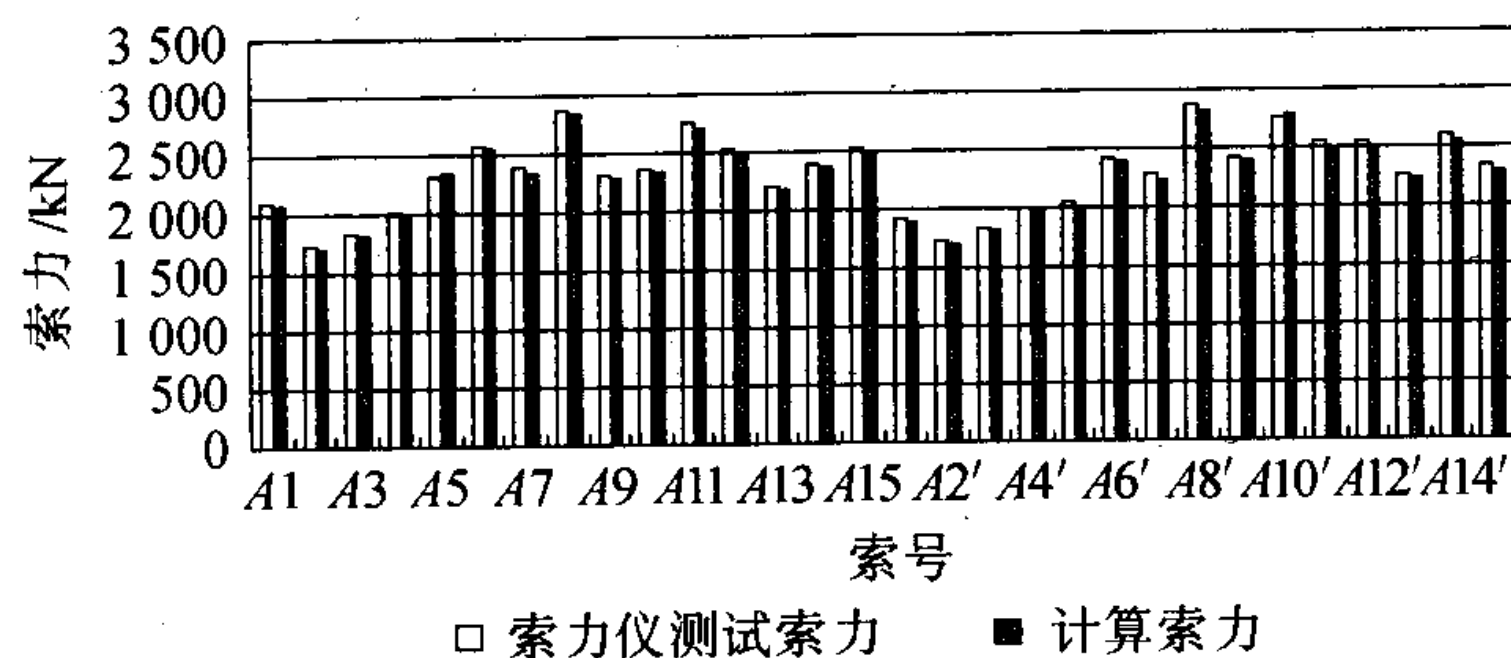


图5 振动频率法计算索力与索力仪测试索力值比较(1)

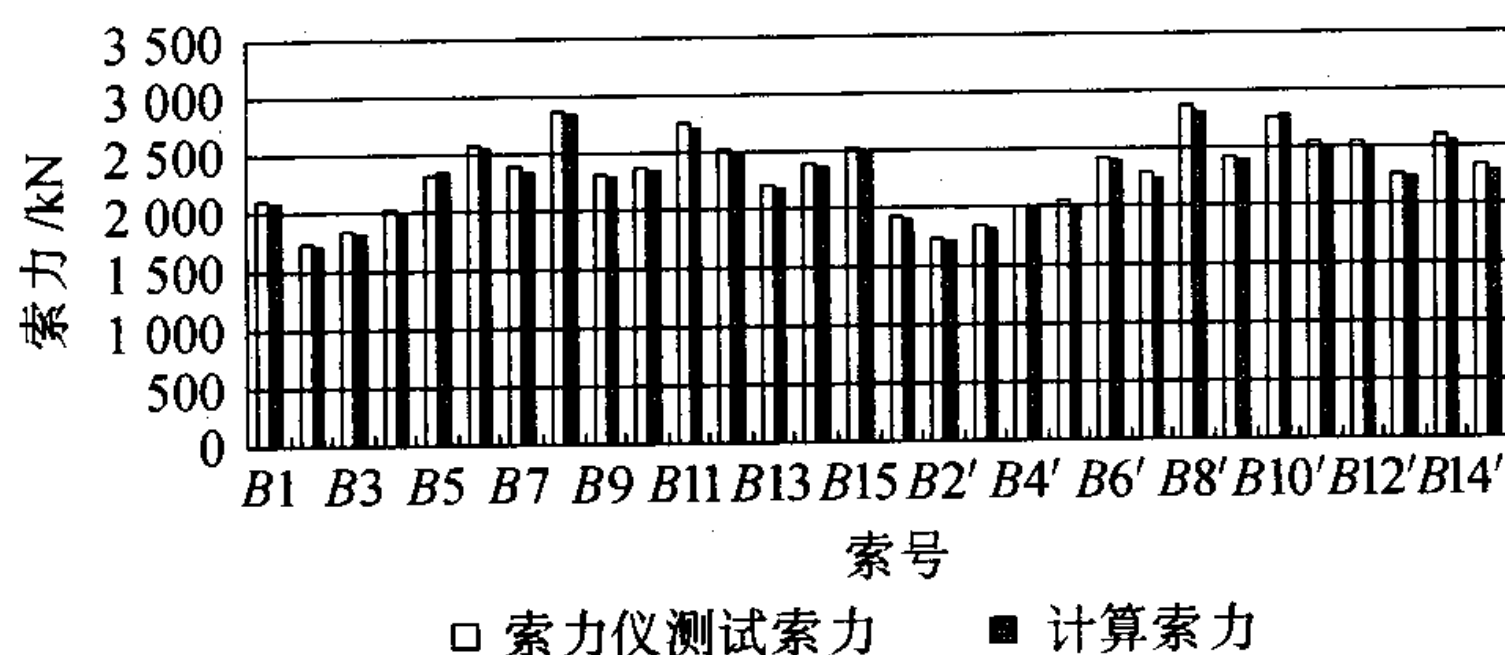


图6 振动频率法计算索力与索力仪测试索力值比较(2)

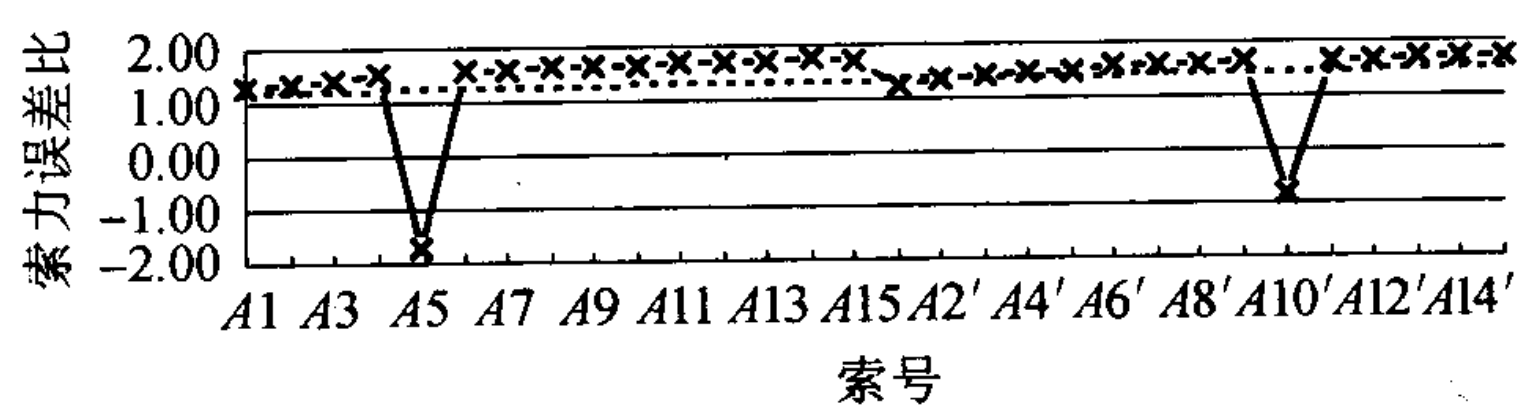


图7 索力误差比变化趋势(1)



图8 索力误差比变化趋势(2)

(2)通过对A、B索面共60根拉索的索力误差比较,其误差比除A5、A10'、B5索为负值外,其余均为正值,且A索面误差比均值为1.58%,B索面误差比均值为1.57%,说明由索力计算公式计算的结果与实际索力之间存在一定的比例关系,是由于频率采集仪器的系统误差造成的,可通过在索力计算公式前乘一个提高系数对公式进行修正。

(3)通过对比分析可以看出,在本桥施工控制过程中,运用频率量测法确定拉索的索力时,若不考虑斜拉索的刚度影响,可以满足本工程的实际需要。

4.3 安装减振器后的索力计算

安装减振器后,若不考虑减振器的影响,直接按照式(1)计算索力将引起较大的误差,B11'索的误差比达到23.51%。从60根拉索的统计数据可得A索面误差为-14.331%,B索面误差为-14.343%。

若采用式(6)计算索力,考虑减振器的影响。下面以A14索为例,说明其计算方法。

4.3.1 钢套筒侧移刚度 K_{ss} 的计算

$$\begin{aligned} K_{ss} &= \frac{3\pi E_s}{64L_s^3} (D_3^4 - D_2^4) \\ &= \frac{3 \times \pi \times 2.0 \times 10^{11}}{64 \times 0.42^3} \times (0.26^4 - 0.24^4) \\ &= 5.00 \times 10^8 \text{ N/m} \end{aligned}$$

橡胶垫圈挤压刚度 K_{rp} 的计算

$$\begin{aligned} K_{rp} &= \frac{\pi G_{rp} [5(D_2 - D_1)^2 + 3.290 l_r^2] \cdot l_r}{(D_2 - D_1)^2 \cdot \ln(D_2/D_1)} \\ &= \frac{\pi \times 7.10 \times 10^5 \times [5 \times (0.24 - 0.14)^2 + 3.290 \times 0.14^2] \times 0.14}{(0.24 - 0.14)^2 \times \ln(0.24/0.14)} \\ &= 6.63 \times 10^6 \text{ N/m} \end{aligned}$$

4.3.2 等效刚度 K 的计算

由式(5)

$$\begin{aligned} K &= \frac{K_{ss} \cdot K_{rp}}{K_{ss} + K_{rp}} = \frac{5.00 \times 10^8 \times 6.63 \times 10^6}{5.00 \times 10^8 + 6.63 \times 10^6} \\ &= 6.54 \times 10^6 \text{ N/m} \end{aligned}$$

4.3.3 索力 T 的计算

把 $K = 6.54 \times 10^6 \text{ N/m}$, $S = 135.70 \text{ m}$, $\rho = 39.7 \text{ kg/m}$, $\omega = 3\pi \times 0.9822 = 6.17 \text{ rad/s}$, $n = 1$, $\epsilon = 0.026$,代入式(6)得:

$$T = 2.369 \times 10^6 \text{ N} = 2369 \text{ kN}.$$

同理可计算出其他拉索的索力,考虑减振器效应后计算索力与实际索力比较见表3、表4和图9、图10所示。

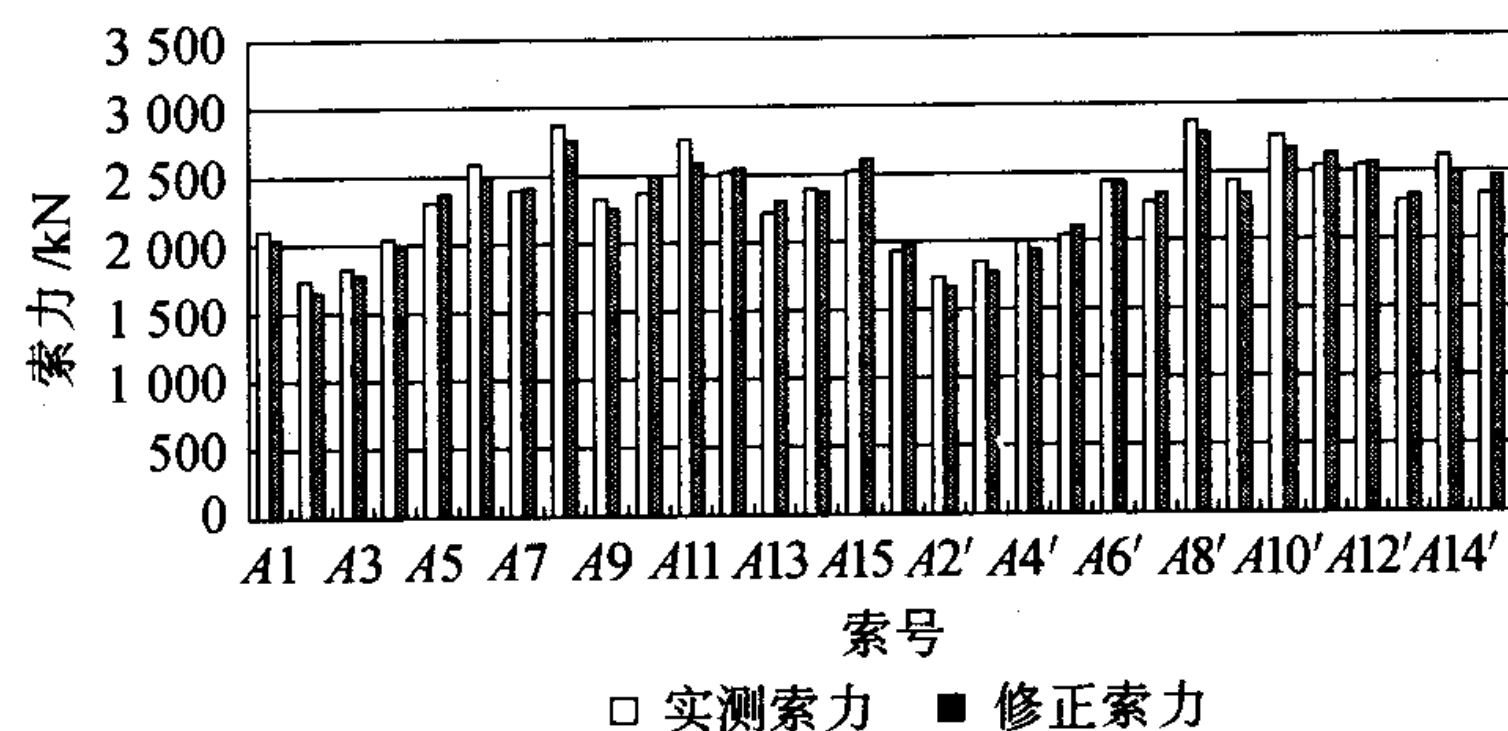


图9 考虑减振器效应后计算索力与实际索力比较(1)

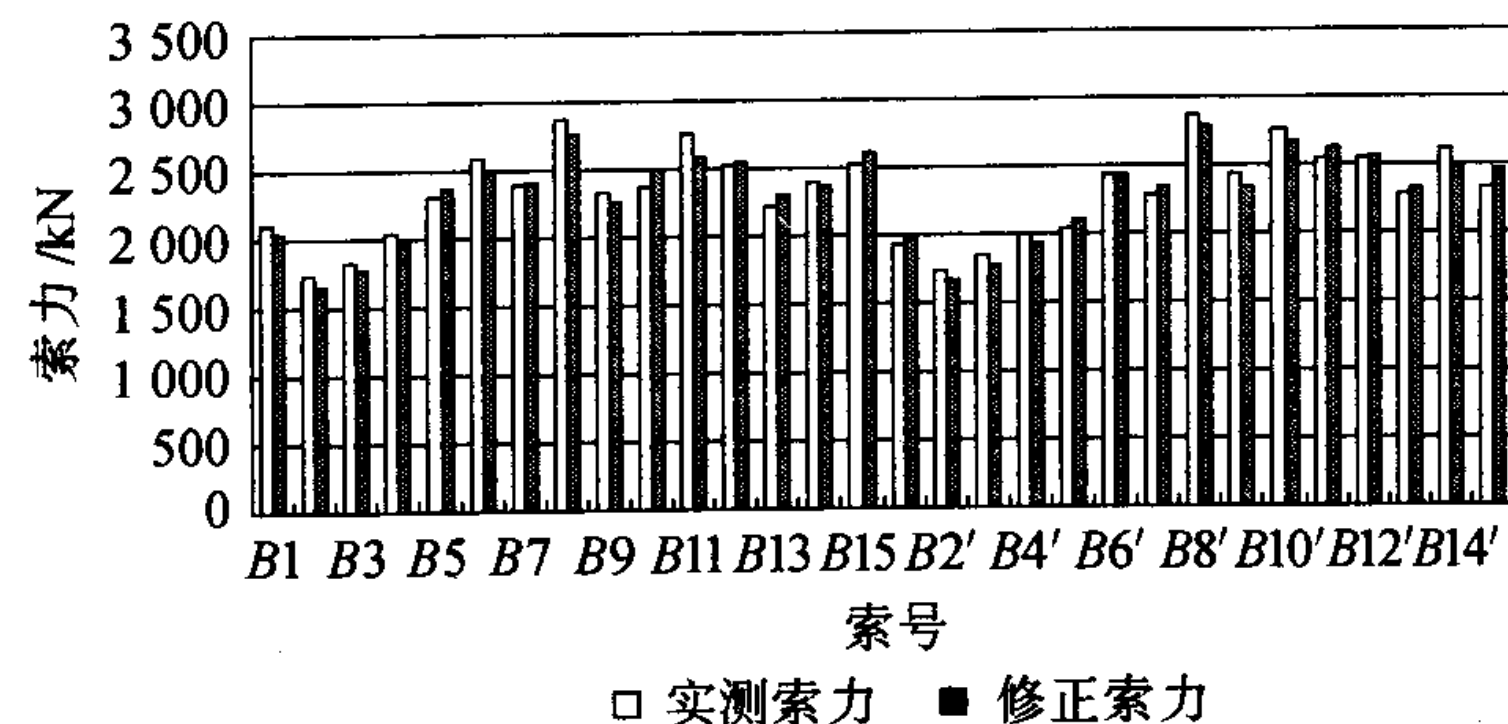


图10 考虑减振器效应后计算索力与实际索力比较(2)

表 3 考虑减振器影响后计算索力(1)

索号	安装减振器前 实际索力/kN	安装减振器后 测量频率/Hz	减振器等效刚度 $K/(\times 10^6 \text{ N/m})$	索长/m	索每延米质量 kg/m	减振器位置比 ϵ	按式(6)计算 索力/kN	误差比/%
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
A1	2 111	3.965 6	6.62	35.201	30.4	0.047 8	2 051	2.84
A2	1 731	2.981 3	6.62	42.604	30.4	0.039 0	1 662	3.97
A3	1 834	2.531 3	6.62	51.337	30.4	0.036 8	1 787	2.57
A4	2 039	2.195 3	6.62	58.545	35.5	0.036 3	1 982	2.79
A5	2 307	2.000 0	6.62	66.884	35.5	0.037 1	2 362	-2.38
A6	2 588	1.873 4	6.62	74.363	39.7	0.036 2	2 502	3.32
A7	2 392	1.651 6	6.62	82.017	39.7	0.033 9	2 424	-1.33
A8	2 879	1.439 1	6.86	89.451	49.0	0.034 0	2 757	4.23
A9	2 319	1.324 2	6.62	97.099	39.7	0.030 1	2 269	2.15
A10	2 371	1.214 8	6.62	104.800	39.7	0.030 4	2 501	-5.49
A11	2 765	1.212 5	6.86	112.668	45.4	0.029 3	2 588	6.41
A12	2 526	1.107 0	6.62	120.350	39.7	0.028 6	2 537	-0.43
A13	2 212	1.021 9	6.62	128.016	39.7	0.026 4	2 304	-4.18
A14	2 402	0.982 2	6.62	135.703	39.7	0.026 0	2 369	1.36
A15	2 522	0.970 4	6.62	143.419	39.7	0.026 6	2 617	-3.76
A1'	1 924	3.965 6	6.62	33.756	30.4	0.047 8	1 968	-2.30
A2'	1 729	2.965 6	6.62	43.308	30.4	0.038 9	1 681	2.78
A3'	1 845	2.628 1	6.62	50.496	30.4	0.037 1	1 785	3.28
A4'	2 003	2.131 3	6.62	58.939	35.5	0.035 8	1 942	3.02
A5'	2 041	1.943 8	6.62	66.220	35.5	0.035 1	2 100	-2.88
A6'	2 432	1.761 9	6.62	74.124	39.7	0.035 8	2 445	-0.55
A7'	2 281	1.548 4	6.62	81.809	39.7	0.033 4	2 353	-3.14
A8'	2 861	1.437 5	6.86	89.182	49.0	0.034 2	2 782	2.76
A9'	2 426	1.359 1	6.62	96.859	39.7	0.030 7	2 353	2.99
A10'	2 755	1.324 2	6.62	104.494	39.7	0.031 5	2 673	2.97
A11'	2 552	1.107 8	6.86	112.297	45.4	0.029 6	2 631	-3.09
A12'	2 545	1.170 3	6.62	119.910	39.7	0.028 8	2 567	-0.86
A13'	2 275	0.995 3	6.62	127.643	39.7	0.026 6	2 335	-2.66
A14'	2 600	0.975 3	6.62	135.327	39.7	0.026 7	2 494	4.07
A15'	2 334	0.893 6	6.62	143.124	39.7	0.025 7	2 447	-4.83

注:表中误差比⑨=(②-⑧)/②×100,表4相同。

表 4 考虑减振器影响后计算索力(2)

索号	安装减振器前 实际索力/kN	安装减振器后 测量频率/Hz	减振器等效刚度 $K/(\times 10^6 \text{ N/m})$	索长/m	索每延米质量 kg/m	减振器位置比 ϵ	按式(6)计算 索力/kN	误差比/%
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
B1	2 072	3.965 6	6.62	34.875	30.4	0.047 8	2 032	1.91
B2	1 726	2.981 3	6.62	42.305	30.4	0.039 0	1 651	4.35
B3	1 838	2.532 8	6.62	51.056	30.4	0.036 4	1 738	5.42
B4	2 052	2.195 3	6.62	58.284	35.5	0.036 2	1 963	4.36
B5	2 289	2.031 3	6.62	66.635	35.5	0.037 6	2 424	-5.89
B6	2 572	1.873 4	6.62	74.127	39.7	0.035 7	2 428	5.58
B7	2 379	1.654 7	6.62	81.793	39.7	0.034 0	2 431	-2.17
B8	2 865	1.434 4	6.86	89.239	49.0	0.034 0	2 751	3.97
B9	2 310	1.326 6	6.62	96.897	39.7	0.030 1	2 264	1.98
B10	2 362	1.217 2	6.62	104.606	39.7	0.030 4	2 506	-6.09
B11	2 756	1.217 2	6.86	112.481	45.4	0.029 4	2 592	5.96
B12	2 518	1.109 4	6.62	120.169	39.7	0.028 6	2 541	-0.90
B13	2 205	1.024 6	6.62	127.842	39.7	0.026 4	2 301	-4.36
B14	2 396	0.982 8	6.62	135.545	39.7	0.026 0	2 367	1.23
B15	2 516	0.985 2	6.62	143.257	39.7	0.026 6	2 619	-4.08
B1'	1 952	3.973 4	6.62	33.433	30.4	0.0483	1 991	-1.98
B2'	1 744	2.979 6	6.62	43.007	30.4	0.038 9	1 669	4.29
B3'	1 825	2.629 8	6.62	50.218	30.4	0.036 9	1 756	3.80
B4'	2 016	2.125 0	6.62	58.675	35.5	0.035 8	1 934	4.06
B5'	2 027	1.943 8	6.62	65.973	35.5	0.035 1	2 092	-3.21
B6'	2 462	1.770 3	6.62	73.889	39.7	0.035 9	2 453	0.37
B7'	2 268	1.540 0	6.62	81.586	39.7	0.033 4	2 347	-3.47
B8'	2 848	1.435 9	6.86	88.971	49.0	0.034 2	2 776	2.54
B9'	2 416	1.365 6	6.62	96.658	39.7	0.030 7	2 348	2.80
B10'	2 711	1.326 6	6.62	104.301	39.7	0.031 2	2 617	3.46
B11'	2 543	1.107 0	6.86	112.111	45.4	0.029 6	2 635	-3.64
B12'	2 538	1.163 8	6.62	119.731	39.7	0.028 9	2 571	-1.32
B13'	2 269	0.996 1	6.62	127.471	39.7	0.026 8	2 368	-4.36
B14'	2 638	0.997 7	6.62	135.161	39.7	0.027 0	2 546	3.48
B15'	2 329	0.892 1	6.62	142.963	39.7	0.025 7	2 444	-4.95

从实际计算结果及图9、图10可以得到如下结论。

(1)若在安装减振器后,仍然按照安装减振器前的理论进行索力计算,将会产生很大的误差。以A14号索为例,若在索力计算中,忽略减振器对索力计算的影响,直接按式(1)计算得到的索力 $T_{假}=2\,821.1\text{ kN}$,而拉索安装减振器前的真实索力为 $T_{真}=2\,402\text{ kN}$,则:

$$\text{误差比1} = \frac{T_{真}-T_{假}}{T_{真}} = \frac{2\,402-2\,821.1}{2\,402} = -17.45\%$$

若按照修正后的索力计算公式计算,计算结果为 $T_{计算}=2\,369\text{ kN}$,则:

$$\text{误差比2} = \frac{T_{真}-T_{计算}}{T_{真}} = \frac{2\,402-2\,369}{2\,402} = 1.36\%$$

从而说明采用式(6)进行计算可以很好地考虑减振器的影响。

(2)通过对A、B索面共60根拉索的修正索力误差进行统计分析,除A10、A11、B3、B5、B10、B11等6根拉索索力误差比超过5%外,其余误差比均小于5%,占总数的90%,满足规范要求。说明式(6)理论可行,具有应用价值,可在工程实际中得到推广。

(3)由观测的数据可以看出,在安装减振器后拉索的振动频率高于安装减振器前的振动频率,与理论规律相符合,说明测试数据有效可靠。

5 结论

本文对斜拉桥索力监控技术进行了研究,对目前常用的斜拉索振动频率量测法进行了详细的分析,指出了这种索力量测方法在带减振器的拉索索力计算中的局限性。对目前比较流行的带减振器(橡胶组合减振器)的拉索性能进行了分析,建立了带橡胶组合减振器拉索的动力学模型,根据能量原理,推导出了考虑减振器影响的拉索索力计算公式。所得研究成果,有些是前人经验的系统总结,有些是已有成果的进一步完善和应用范围的进一步推广。随着认识的深化和斜拉桥建设经验的积累,对有关问题的研究也需要不断地发展。

通过本文研究,可以得到以下结论。

(1)斜拉桥拉索索力的大小和变化情况直接决定桥梁结构体系的受力、变形状态,索力监测是施工控制的关键内容,而且也直接影响桥梁结构的运营

安全性能,因此必须进一步研究可靠有效的索力监测方法和计算理论。

(2)由于温度对索力、主梁挠度的影响较为明显,且温度变化时刻都在发生,其影响也无时不在,因而可通过选择适宜的观测时间,如日出之前或温度变化较小时观测,来减小日照温差和体系温差的影响。

(3)由于斜拉索的几何非线性,使得拉索的精确解很难导出。尽管从斜拉桥的整体平衡出发,通过静力分析可导出索长与索力的关系,但其为超越方程,不便应用,而若从动力学着手,对拉索的动力特性进行研究,建立振动微分方程,即方便得出索长与索力的关系。

(4)在测量拉索索力时,采用常规的振动频率量测法,对于不带减振器的拉索来讲,直接采用式(1)计算的索力误差较小,可满足工程需要;而对于带减振器的拉索,若直接采用该式计算,将产生较大的误差,因此必须进行修正。

(5)本文根据能量原理,推导出了考虑橡胶组合减振器影响的拉索索力计算式(式(6)),并在丹山斜拉桥中应用,取得了预期的效果,为同类桥梁的施工及运营管理提供了理论依据与技术保障。

参考文献:

- [1] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,1995.
- [2] 顾群. 斜拉索的振动和振动控制[D]. 同济大学硕士学位论文,1993.
- [3] 振动和冲击手册[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
- [4] 翁智远. 结构振动理论[M]. 上海:同济大学出版社,1988.
- [5] Martin Wieland, Prakash Shrestha. Vibration and Vibration control of stay cables in cable-stayed bridge. 1991.
- [6] P K 弗雷克利. 橡胶在工程中的应用的理论与实践[M]. 北京:化学工业出版社,1985.
- [7] 俞载道. 结构动力学[M]. 上海:同济大学出版社,1987.
- [8] 铁摩辛柯 S P. 工程中的振动问题[M]. 北京:中国铁道出版社,1978.
- [9] 尼尔斯丁,吉姆辛. 姚玲森,林长川,译. 缆索承重桥梁构思与设计[M]. 北京:人民交通出版社,1992.
- [10] 龙驭球,包世华. 结构力学(下册)[M]. 北京:高等教育出版社,1996.

文章编号: 0451-0712(2006)03-0154-04

中图分类号: U433.35

文献标识码: B

丽水紫金大桥斜拉桥主梁施工测量控制

郭彦领

(中交路桥北方工程有限公司 北京市 101119)

摘 要: 以丽水紫金大桥斜拉桥为例, 介绍斜拉桥主梁线型的控制, 以及主梁索导管、锚箱、挂篮弧形垫板的定位及计算, 并且总结施工中的经验教训, 以期为同类型的桥梁施工提供有益的借鉴。

关键词: 斜拉桥; 主梁; 线型; 索导管

1 工程概述

丽水紫金大桥位于浙江省丽水市段江上, 所在线形为直线, 主桥跨径 2×160 m。主梁标准断面为肋板式结构, 桥面总宽 30.5 m, 断面上二肋中距为 24.1 m, 肋宽 1.8 m, 梁高 2.5 m, 桥面板厚 25 cm, 每隔 4.0 m 设预应力混凝土横梁一道。主梁采用前支点牵索挂篮对称分段悬浇施工, 标准段长度为 8 m。

2 主梁施工测量控制

主梁施工的许多工序与测量有着密切的联系, 测量工作的好坏不仅影响着进度, 还对质量有很大影响。为了更好地阐述主梁测量控制, 首先介绍一下

主梁标准段的施工基本流程: 挂篮前移→挂篮到位(调整挂篮横向偏位、控制挂篮纵向间距)→调整模板标高→绑扎钢筋(安装主梁索导管)→斜拉索第一次张拉→浇筑混凝土至一半→斜拉索第二次张拉→浇筑完毕→养生→主梁纵向预应力张拉→斜拉索第三次张拉→挂篮下降前移。

2.1 主梁线形的控制

广义的主梁线形控制包括主梁轴向偏位控制及主梁高程控制等。

由于主梁是采用前支点牵索挂篮对称分段悬浇施工, 所以主梁轴向偏位与挂篮的设计和加工有着密切的关系。主梁轴线偏位控制分为事前、事中和事

收稿日期: 2006-01-16

A Study and Application of Monitoring and Measurement Technology for Cable Tensions on Cable-Stayed Bridge

TAN Xing-hua

(CRBC International Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Through reviewing and summarizing to the existing study achievements and project experiences, the common method used to measure cable force (method of measuring vibration frequency) is studied, its adaptive limits and the shortage in measuring the force in cables with shock absorber are pointed out. The structural characters and mechanics properties of cable with shock absorber are also analyzed and the dynamics model is set up. According to the energy principle, the calculation method considering with the effect of shock absorber is carried out, and is applied to Danshan cable-stayed bridge in Qingdao City, and the expected results are obtained, which provides theoretic basis and technological preservation to the construction control and operation management of same type bridge especially to force monitoring in the cables with shock absorber.

Key word: concrete cable-stayed bridge; technology of monitoring cable force; method of measuring vibration frequency; effect of shock absorber