

文章编号: 1005-0523(2005)04-0022-04

斜拉桥的拉索分析

郭圣栋¹, 陈 晔²

(1. 江西省交通设计院, 江西 南昌 330002; 2. 长安大学, 陕西 西安 710064)

摘要: 介绍斜拉索的工作性能、索力测试的四种方法; 阐述运用频率测定法测定索力; 介绍拉索的温度效应和斜拉桥拉索下料长度的计算方法

关 键 词: 斜拉桥; 拉索; 索力测试; 温度效应

中图分类号: TB12

文献标识码: A

0 前 言

随着我国交通事业的迅速发展, 斜拉桥作为一种美观实用的桥型越来越受到人们的青睐. 作为斜拉桥主要承重构件的斜拉索, 其索力的大小及分布直接影响全桥的工作状态.

1 斜拉索的工作性能

1.1 斜拉索的局部弯曲应力

拉索在梁上锚固点可能发生的变位(挠度和转角), 和因索力的变化而导致拉索垂度的改变都将产生局部弯曲应力, 从而影响拉索的强度, 尤其是拉索的疲劳强度. 为降低局部弯曲应力, 可将拉索的端部设为销接, 使截面可自由转动, 减小因主梁转动而引起的局部弯曲应力; 也可选择适当的结构形式以增加结构的整体刚度来降低拉索的轴向应力变化幅度和局部弯曲应力变化幅度; 还可以妥善处理拉索与梁接头处的构造细节, 以降低索与梁接头处的交角变化幅度. 在安装斜拉索时, 要根据恒载索力作用下的倾角将拉索预先沿弦的方向倾斜个角度, 以消除拉索的局部弯曲应力.

1.2 斜拉索的非线性

斜拉索由于其自重垂度的影响, 索力与索的拉伸量呈非线性关系, 并且随索力减小, 非线性愈加明显. 为了计入斜拉索的这种特性, 同时也便于结构分析, 通常采用斜拉索的表观弹性模量(即有效弹性模量或修正弹性模量)来描述其弹性性能. 一般常用 Ernst 公式来计算拉索的表观弹性模量, 用抛物线代替实际索形悬链线, 将斜拉索模拟成二结点直弦杆, 得到了直弦杆的等效弹性模量公式:

$$E_1 = E/[1 + W^2 L_x^2 AE / (12 T^3)]$$

式中: E_1 : 有效弹性模量, E : 不计拉索垂度影响的弹性模量, W : 索单位长度的重量, A : 索截面的面积, T : 索的拉力; L_x : 索水平投影的长度

因 E_1 是受索力 T 的影响, 当索力由 T_1 变为 T_2 时, 可参照美国土木工程师协会(ASCE)的暂行规定中, 采用如下的修正弹性模量:

$$E_1 = E/[1 + W^2 L_x^2 AE (T_1 + T_2) / (24 T_1^2 T_2^2)]$$

上式表示的修正弹性模量实际上是一种割线模量.

在考虑斜拉索垂度导致的非线性分析中, 通常分级施加荷载并逐步迭代修正. 由于拉索两端的累加位移与索力增量并不存在对应线性关系, 故这种

收稿日期: 2005-01-13

作者简介: 郭圣栋(1966-), 男, 江西吉水人, 高级工程师.

中国知网 <https://www.cnki.net>

算法将导致索力与索的拉伸量之间关系的不闭合. 这种不闭合,正是导致斜拉桥倒退分析过程中出现结果不闭合或发散的主要原因. 经分析得出,斜拉索的垂度仅对基频影响较大,对高阶谐振频率影响很小.

斜拉索垂度对主梁内力的影响较大,对索力几乎没影响.这是因为斜拉桥的主梁主要是以斜拉索为支承,不管索的刚度大小,其所承受的拉力都应主梁荷载平衡,故索力变化微小,而主梁内力变化的原因,则主要是由斜拉索的非线性伸缩变形.

2 索力的测试方法

斜拉桥索力测试的准确与否直接关系到斜拉桥施工控制的顺利实施,因此在施工过程中必须较精确的测定索力.目前,普遍采用的方法有:压力表测定液压法、压力传感器直接测定法、磁通法、拉索频率测定法.

1) 压力表测定液压法:通过精密压力表或液压传感器测定油缸的液压,利用油压面积一定时,液压与张拉力成正比,用油压表读数推导千斤顶的张拉力,该法测定的索力有一定的精度.但由于受到锚具变形的影响,张拉索力不一定等于千斤顶回油后的索力,并且千斤顶摩阻力也会产生张拉误差.

2) 压力传感器法:张拉时,千斤顶的张拉力通过连接杆传到拉索锚具,在工具锚杯与千斤顶之间放置传感器测量千斤顶的张拉力,该方法精度较高,操作简单.但传感器一般较重,测试时不方便,并且其价格较高,并且每根索下都要一次性埋设传感器,而且应力传感器在温度和湿度影响下的长期稳定性也是个问题.所以该法只能在特定的场合下使用.

3) 磁通法:通过索中的电磁传感器测定索中磁通量的变化,由此来测定索力与温度.磁通量法是测定斜拉桥索力、监测拉索锈蚀的非破坏性方法.它利用放在索中的小型电磁传感器,测定磁通量变化,根据索力、温度与磁通量变化的关系来推算索力.用磁通量法测定斜拉桥的索力,在国外应用的比较多,但在国内还未见报道.

4) 频率测定法:利用索在张紧、低阶振动模态下,采用拉索索力与基频的平方成比例的理论来计算索力.具体就是用精密拾振仪拾取拉索的振动信号,经过滤波,放大和频谱分析,再根据频谱图来确定拉索的自振频率从而导出索力.此方法适应范围

广,可对张拉后的索进行测试,是目前索力测试普遍采用的方法.

前三种方法一般仅适用于在张拉斜拉索时的索力测定,如果当需要对已施工完毕的斜拉索进行索力复测时,而又没预埋测试的仪器(压力传感器、电磁传感器)时,则只能用频率法进行测试.

3 率测定法

3.1 频率测定法的原理

频率测定法利用索的脉动进行索力测量,将高灵敏度的传感器绑在斜拉索上,经过信号放大,即可测出索的自振频率,再换算成索力.测试的流程为:加速度传感器→滤波放大器→信号分析仪→计算机和软件.

用频率测定法测索力的原理如下:

斜拉索的平衡方程为:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

其中: x :沿索向的坐标; y :斜拉索垂直于索向的挠度; EI :索的抗弯刚度; t :时间; T :索力; m :索单位长度的质量.

假设索的两端为铰支,则该微分方程的解为:

$$T = 4ml^2[f_n/n]^2 - n^2 EI \pi^2 / l^2$$

式中: n :索自振频率的阶数; f_n :索的第 n 阶自振频率; l :索长.

如果索的抗弯刚度很小,与索长的平方相比,可以忽略不计,则上式后一项可省略,则变为:

$$T = 4ml^2[f_n/n]^2$$

由上式可推得: $f_n = n \sqrt{T/4ml^2}$

再令: $f_1 = n \sqrt{T/4ml^2}$ 则可得: $f_n = nf_1$

当索的抗弯刚度不能忽略时,有:

$$f_n = n \sqrt{T/4ml^2 + n^2 EI \pi^2 / (4ml^4)}$$

再令: $f_1 = \sqrt{T/4ml^2}$

则可得:

$$f_n = n \sqrt{f_1^2 + n^2 EI \pi^2 / (4ml^4)}$$

在上述公式中,最为关键的是索长的选取,这是因为斜拉索一般存在垂度,这加大了拉索在锚固间的动力计算长度,同时索在构造上由于设置了刚性锚头,又缩短了拉索的动力计算长度.斜拉索的垂度仅对基频影响较大而对高阶频率则影响较小.索长的修正在工程上一般是凭经验进行的,这对索

力变化量影响不大。

由参考资料 1 中可知,经大量实际资料推导可用下式修正索长:

$$L = L_0 - T \cdot (S_1 + S_2)$$

式中: L_0 : 索两锚固点之间的弦长; S_1 、 S_2 : 索两端刚性长度(锚环长); T : 调整系数,可取 $0.35 \sim 0.48$ 。

如要进行较精确的计算,可根据斜拉索的锚固支承条件,引用动力计算长度概念,将复杂的两端固结支承的拉索振动模型等效成两端铰结支承的拉索振动模型。

3.2 频率测定法的影响因素

影响拉索索力计算精度一般有五种情况:边界约束、刚度、垂度、温度、斜度和减震器。

在实际工程中斜拉索皆两端不等高,亦即存在一定的斜度;但实际上拉索的斜度影响很小可以忽略不计。斜拉索的垂度的影响可通过 Ernst 简化公式来考虑一般就可满足工程要求;而减震器对拉索频率的影响应视减震器具体的工作性能分析。索的边界条件实际上是介于铰接和固接之间,一般在不考虑垂度和斜度影响时,当抗弯刚度为零时,两种边界条件下索力的计算结果是一致的。若考虑垂度、斜度和抗弯刚度影响时,两种边界条件下索力的计算结果则有所不同,此时需要先将斜拉索离散成若干杆单元,再用有限元法求拉索的自振频率再推求索力。

3.3 频率处理方法

直接频差法就是利用频谱图中相邻两谐振之间的频率差推求基频,从而推求索力。但在用动测仪测索力时,因传感器一般只能安装在桥面附近,传感器检取的信号中基频成分相对较小,而高频相对较大,从而会造成在频谱图中基频不明显,而高频明显的现象。并且在实际工程中,因素作为弦振动的简化是不精确的,其两端既不是固接又不完全是铰接,并且固定索的主梁及主塔自身也在振动,还有其它各种干扰,这都影响了两频率差的准确性,所以,采用直接频差法监测索力的精度并不高。

可利用各高次谐振峰来推算桥索振动基频,先从频谱图中选择一处幅度最大的谐振峰值,其频率为 f_n ,即为第 n 阶自振频率。先假设它是索的 n' 次谐振频率形成的峰,算出假设基频 $F' = f_n / n'$ 。按照弦振动理论,其余各次谐振峰为 F' 的整数倍。如果各次谐振峰与基频 F' 的比值非常接近于整数,则可认为此 F' 是基频 F 。否则,可将 n' 加 1 或减 1 试算,

直到找出满足要求的基频 F 。若始终找不出这样的 n' ,则表明信号中的干扰太大,应重新采集。采用后一方法的误差比直接频差法要小。

4 拉索的温度效应

施工的设计索力是在规定桥梁结构温度的情况下确定的,而在具体施工阶段,桥体温度处于一个复杂的随机状态,因此施工间索力调整除考虑设计温度下的设计索力外,还必须考虑张拉时全桥实际温度场与设计温度场的差异对梁、索、塔产生的温度变形,以及因拉索自身的内外温度的不同而产生的温度场导致的一根索内索力的分布不均。

当需要检测全桥的索力时,因为在实际检测中不可能在同一瞬间拾取到全桥所有斜索的频率信号,通常完成全桥拉索的检测工作,往往需要很长的时间。全天的温差变化,使测出的索力并不能反映桥梁同一时刻真实受力状态。为消除温度变化对索力的影响,可通过选一天典型天气进行定时跟踪监测,同时观察温度变化,给出温度与斜索频率之间的关系曲线,再据此来修正拉索的频率。

由于斜拉桥主要由钢材和混凝土两种材料组成,二者线膨胀系数不同,相同的温度变化引起的变形不一致。而且由于斜拉索与混凝土构件对外界温度变化响应的程度和快慢不同,从而在同一时刻结构的温度变形不同,并且因各部位日照强度和方向不同而导致结构中温度场的变化不同。故在施工中一般采用避免温度变化和消除温度影响相结合的办法控制温度影响,一般选择在夜间或清晨气温比较平稳时再进行索力的测量其效果较理想。经研究表明:

1) 索力的温度效应与缆索的安装位置有关,靠近桥塔附近的缆索当温度升高时索力减少,反之索力增大,缆索越靠近主梁梁端,则表现出温度升高索力增加,反之索力减小的趋势;

2) 日照温差及方向对索力有一定的影响,受日照辐射强烈的一侧其索力变化比另一侧明显,并且日照温差对斜拉桥索塔、主梁的变形有着重要影响。

3) 当斜拉桥结构整体均匀升或降温时,温度变化对主梁的挠度的影响较小,在施工控制中可不考虑季节温差对主梁线型的影响。

4) 日照温差对主梁的挠度影响较大,并且,主梁悬臂的长度越长,其影响也就越大。

另外,如果结构需要进行索力调整,则应尽量做好实际结构的温度监测工作,而且应选择合适的时间来调整索力,尽量避免不均匀温差等因素的影响.

5 下料索长的计算

公路斜拉桥设计规范(试行)(JTJ027—96)给出了斜拉索在设计温度时的无应力下料长度计算公式:

$$L=L_0-\Delta L_e+\Delta L_f+\Delta L_{ML}+\Delta L_{MD}+2L_D+3d$$

(该式适用于冷铸锚)

式中:

L : 拉索下料长度;

L_0 : 每根拉索的长度,是该拉索上、下两个索孔出口处在拉索张拉完成后锚固面的空间距离;

ΔL_e : 初拉力作用下拉索的弹性伸长修正;

ΔL_f : 初拉力作用下拉索垂度修正;

ΔL_{ML} : 张拉端锚具位置修正,最终位置可设定螺母定位于锚杯的前 1/3 处;

ΔL_{MD} : 锚固端锚具位置修正,可设定螺母定位于锚杯的前 1/2 处;

L_D : 锚固板厚度; $3d$: 拉索两端所需的钢丝镦头长度, d 为钢丝直径.

其中,弹性伸长量和垂度修正值按下式计算:

$$\Delta L_e=L_0T/(EA)$$
$$\Delta L_f=W^2L_x^2L_0/(24T^2)$$

式中:

T : 拉索设计索力; E : 拉索弹性模量; A : 拉索截面积; L_x : L_0 的水平投影长度; W : 拉索每单位长度质量.

在计算拉索下料长度中,其关键就在于索长 L_0 和拉索的初拉力 T 的计算.对于索长 L_0 ,一般可取成桥时的理想状态的桥塔和主梁的设计线形,即采用此时两锚垫板顶面中心的空间距离.但这未考虑到索塔的成桥变位,并且活载预拱度也会影响索长 L_0 取值.如要精确下料则必须计算各塔上锚点的实际成桥时的变位.对于索力 T 可取成桥状态时的单根斜拉索的平均索力.

参考文献:

[1] 贺修泽,付晓宁.斜拉索的索力测试[J].中外公路.2002,(6):38~39.

[2] 侯俊明,彭晓彬,叶方才.斜拉索索力的温度敏感性[J].长安大学学报(自然科学版)2002,(4)34~36.

[3] 陈明宪.斜拉桥的建造技术[M].北京:人民交通出版社:2003.

[4] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社:2005.

Cable Analysis of Cable-stayed Bridge

GUO Sheng-dong¹, CHEN Ye²

(1. Communications Design Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330002; 2. Chang 'an University, Xi 'an 710064, China)

Abstract: This paper introduced work performance of cable and four methods about testing cable force and described the vibration frequency method of testing cable force, the calculation methods about the temperature effect and cable construction length.

Key words: cable-stayed bridge; cable; cable force test; temperature effect