

普通松弛平行钢丝斜拉索的可行性探讨

宋 晖

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

摘 要: 在调查目前国内生产技术和深入研究的基础上,对斜拉索用平行钢丝、主缆用平行钢丝的工作应力进行了对比,针对低松弛平行钢丝的特点逐一分析,论证了斜拉索均采用低松弛平行钢丝的必要性并不大,提出了斜拉索可考虑采用普通松弛平行钢丝的观点,供我国斜拉桥的设计者探讨。

关键词: 普通松弛平行钢丝; 斜拉索; 可行性

1 问题的提出

随着材料科学的不断发展,斜拉索用钢材发展至今主要为钢丝、钢绞线两种。针对具体的工程项目,主要根据安装能力、工期、造价及工程所在地的运输条件等综合选定材料种类。

目前,国内斜拉索用平行钢丝一般采用直径为 7 mm 的高强度低松弛(Ⅱ级松弛)钢丝,即在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时,在 70% 公称抗拉强度下持荷 1 000 h,松弛率 $\leq 2.5\%$ 。而钢丝的另一个重要用途是悬索桥的主缆,主缆用平行钢丝(直径 5 mm)则未提出低松弛要求,均采用高强度普通松弛(Ⅰ级松弛)钢丝,即在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时,在 70% 公称抗拉强度下持荷 1 000 h,松弛率 $\leq 8\%$ 。斜拉索、主缆对平行钢丝的松弛率提出了不同的要求,那么:

(1) 普通松弛平行钢丝与低松弛平行钢丝的工艺差别是什么,除松弛率存在差异外,其他指标有何差别;

(2) 平行钢丝在斜拉索、主缆的工作条件有何差别,为何斜拉索用平行钢丝提出低松弛要求;

(3) 斜拉索用平行钢丝可否采用普通松弛平行钢丝,采用普通松弛平行钢丝的优点是什么。

笔者经过调查分析,对上述问题形成了初步认识,供业内同行共同探讨。

2 预应力钢材应力松弛的特点

在分析论证前,首先介绍预应力钢材松弛试验的结果,以了解预应力钢材应力松弛的特点。

松弛试验按国际预应力混凝土协会(FIP)等单

位编制的《预应力钢材等温松弛试验实施规程》进行。试件的初应力取 $0.6\sigma_b$ 、 $0.7\sigma_b$ 和 $0.8\sigma_b$,环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,在松弛试验机上分别读出不同时间的松弛损失率,试验持续 1 000 h 或持续一个较短的期间推算至 1 000 h 的松弛率。图 1 示出了预应力钢绞线和热处理钢筋的应力松弛试验数据。

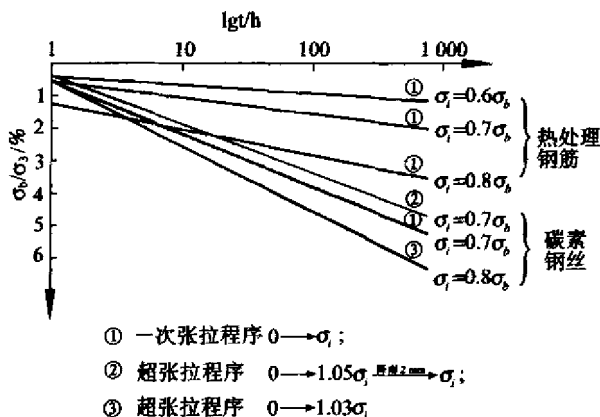


图 1 预应力钢材的应力松弛试验数据

预应力钢材松弛率与时间、钢种、温度的关系如下:

(1) 应力松弛初期发展较快,第一小时相当于 1 000 h 的 15%~35%,以后逐渐减慢,碳素钢丝应力松弛损失率 $R_t = A \lg t + B$,与时间 t 有较好的对数线性关系;

(2) 碳素钢丝的应力松弛率比热处理钢筋和热轧螺纹钢筋大;

(3) 初应力大,松弛损失也大,当 $\sigma_i > 0.7\sigma_b$ 时,松弛损失率明显增大,呈非线性变化;

(4)随着温度的升高,松驰损失率急剧增加,根据国外试验资料,40℃时1 000 h 松驰损失率约为20℃时的1.5倍。

3 普通松驰平行钢丝与低松驰平行钢丝的差别

钢丝的低松驰性能是通过稳定化处理工艺获得的,低松驰平行钢丝比普通松驰平行钢丝多一道稳定化处理工序。稳定化处理就是:将钢丝施加一定的应力(约 $0.4\sigma_b$),同时加热至一定的温度(约400℃),以减少金属蠕变,达到降低钢材应力松驰的热处理过程。由于稳定化处理过程中钢丝承受接近常温状态下破断力的载荷,因此,可以认为具有可靠的抗拉强度。

稳定化处理还使得钢丝获得了良好的直线性,从而有利于缆、索制作。《桥梁缆索用热镀锌钢丝》(GB/T 17101-1997)的规定中可佐证这一点,I级松驰要求的钢丝的自由圈径应不小于5 m,而要求弦长1 m的Ⅱ级松驰钢丝弦与弧的最大自然矢高不得大于30 mm(相当于自由圈径不小于8 m)。

此外钢丝经过稳定化处理后,比例极限升高,屈服强度升高6%。这一点同样可从GB/T 17101—1997的规定中得到佐证。以抗拉强度1 670 MPa,直径为5 mm的钢丝为例:I级松驰要求的标准钢丝的屈服强度不小于1 330 MPa,Ⅱ级松驰要求钢丝屈服强度不小于1 410 MPa。

设计者着眼于低松驰平行钢丝的上述优点,从而选择它作为斜拉索的用材。

但经过稳定化处理的低松驰平行钢丝疲劳性能降低,法国和我国标准就仅对低松驰平行钢丝的疲劳性能提出了考核指标见表1。

表1 法国和我国对低松驰平行钢丝疲劳性能的考核指标

| 国家与标准 | 循环次数 | 上限应力 | 应力幅/MPa |
|--------------------|---------------|----------------|---------|
| 法国 NFA35—035 | 2×10^6 | $0.45\sigma_b$ | 300 |
| 中国 GB/T 17101—1997 | 2×10^6 | $0.45\sigma_b$ | 360 |

4 斜拉索和主缆用平行钢丝的工作条件比较

斜拉索用平行钢丝与主缆用平行钢丝的工作条件比较即工作应力比较,主要从理论计算及实际成桥状态两个角度进行。

4.1 理论计算

由于局部构造的原因,斜拉索用平行钢丝与主缆用平行钢丝的工作应力除一次应力(结构总体计

算应力)外,局部部位还均存在二次应力。这些局部部位的二次应力与一次应力叠加后,构成了斜拉索或主缆的控制性工作应力。

4.1.1 一次应力

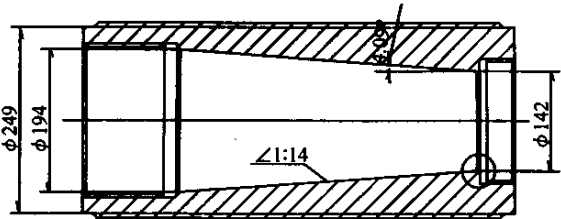
《公路斜拉桥设计规范》(试行)(JTJ 027—96)第4.3.1条及第4.3.2条规定,荷载组合I下斜拉索的容许应力 $[\sigma]\leq 0.4R^b$ (斜拉索抗拉标准强度)。亦即要求斜拉索的一次应力具有不小于2.5倍的安全系数。

《公路悬索桥设计规范》(报批稿)第9.3.3条规定,在恒载+汽车活载+体系温度组合下,主缆应力验算安全系数 K_c 不宜小于2.5。同样要求主缆的一次应力具有不小于2.5倍的安全系数。虽然该规范目前尚未颁布实施,但设计者一般均按此要求控制。

因此,从目前我国规范的要求及设计者的具体掌握两方面看,相同强度级别的斜拉索与主缆的一次应力是相同的。

4.1.2 二次应力

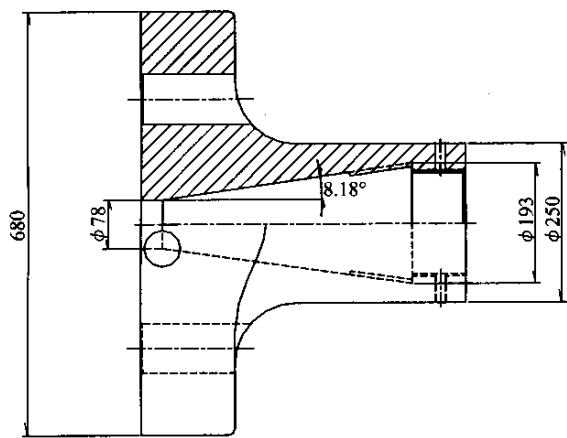
斜拉索的平行钢丝丝数相对较少,钢丝受力比较均匀;长度相对较短,垂度影响较小;同时除锚头部分外,其他部分处于无约束状态。因此,斜拉索的二次应力成因及位置较明确,即锚头部位的直径变化处(见图2所示),与127丝主缆索股锚头构造(见图3)相比较,钢丝偏转角度为主缆钢丝的1/2,而钢丝面积为主缆钢丝的1.96倍,因此,斜拉索锚头部位的二次应力略小于主缆索股锚头部位的二次应力。需要指出的是:锚头部位直径变化处的二次应力是可通过优化该部位的线形来降低的。



单位:mm

图2 7—163斜拉索锚头构造

主缆除锚头部位同样存在二次应力外,其他部位产生的原因比较复杂,要全面地、精确地计算尚需进行深入研究和实验验证,但主要原因有8项:(1)索股制作误差;(2)调股误差;(3)钢丝弹性模量误差;(4)鞍槽弯曲产生的钢丝弯曲;(5)索夹夹紧产生的局部弯曲;(6)空缆至成桥状态主缆弯曲;(7)活载



单位:mm

图3 127丝主缆索股锚头构造

状态主缆弯曲;(8)锚跨张力误差,均可定量计算。

其中第(1)~(3)项原因产生的误差是随机的、离散的,为极个别钢丝的受力情况,并不代表截面的二次应力结果,因此不予叠加;第(5)项索夹夹紧产生的二次应力计算值虽然比较大,只能代表边缘小部分钢丝的受力情况,经过截面二次应力重分布后,不会对主缆安全度造成大的影响,亦不代表截面的二次应力结果;但出鞍处的第(6)、第(7)项二次应力是在全截面发生的,代表截面的二次应力,应予叠加。下面以舟山大陆连岛工程西堠门大桥(主跨1 650 m悬索桥)的主缆为例说明。

按照Wyatt. T. A公式计算得:临近主索鞍的封闭索夹段第(6)项二次应力为123 MPa、第(7)项二次应力为91 MPa,二者叠加后二次应力为214 MPa。该桥主缆采用强度为1 770 MPa的平行钢丝,一、二次应力叠加后对主缆抗拉安全系数为1.89。虽然按Wyatt. T. A公式计算,一些经验参数国内缺乏试验数据,导致计算结果可能偏大,但也能够说明主缆二次应力的量级。

上述分析表明,主缆的二次应力大于斜拉索的二次应力。

4.1.3 小结

综上所述,斜拉索与主缆的一次应力是相同的,但主缆的二次应力大于斜拉索的二次应力。从理论计算角度看,主缆的工作应力大于斜拉索的工作应力。

4.2 实际成桥状态

实际施工过程中,由于加工制造、安装等方面的误差,斜拉索或主缆的实际工作应力将发生变化,往

往是实际工作应力增大。要准确地计算实际的工作应力有一定的难度,但对斜拉索或主缆而言,对影响因素估算的难度及准确度是不同的。

影响主缆工作应力的施工误差主要是荷载集度和主缆矢跨比误差,荷载集度误差包括加劲梁、吊索及主缆本身的重量误差,加劲梁的重量误差可通过对梁段称重或根据实际尺寸计算确定,吊索及主缆本身的重量误差可通过量测直径及长度确定;主缆矢跨比误差则可通过测量确定,其中已包括了索塔的压缩量。因此,计算主缆的实际工作应力相对而言难度较小,准确度较高。

斜拉索类同,影响工作应力的施工误差主要是荷载集度和几何参数(角度及长度)误差,荷载集度误差的测定方法及准确度与主缆相同。但几何参数误差的影响确定难度较大,主要原因是:斜拉索索力调整的原则是索力及桥面标高双控,以桥面标高控制为主,而桥面标高是结构总体刚度的综合体现,结构总体刚度包括索塔、斜拉索、主梁的截面特性及弹性模量和斜拉索、主梁的重量,将这些因素的施工误差一一测定难度较大。因此,往往是桥面标高达到较理想的状态后,索力超出设计值一定数值,尤其是混凝土斜拉桥,主梁刚度大,要保证桥面标高达到较理想的状态,索力超出设计值更大,同时桥面标高的确定还需考虑主梁收缩徐变的影响,难度可想而知。

可见,斜拉索的实际工作应力的确定存在未定因素,其实际工作应力较难预计和控制,因此设计者从结构安全考虑,对斜拉索用平行钢丝提出低松弛要求,以避免斜拉索的实际工作应力较大和斜拉索应力松弛损失过大。

5 斜拉索用普通松弛平行钢丝的可行性

从上述分析中可看出,设计者之所以对斜拉索用平行钢丝提出低松弛要求,主要着眼于低松弛平行钢丝的以下几个优点:(1)松弛率低,应力松弛损失小;(2)直线性好;(3)屈服强度升高6%。

然而结合国内目前的制造加工水平,进一步分析,斜拉索均采用低松弛平行钢丝的必要性并不大,可考虑采用普通松弛平行钢丝。

预应力钢材松弛的特点之一是:初应力大,松弛损失也大。当 $\sigma_i > 0.7 \sigma_b$ 时,松弛损失率明显增大,呈非线性变化。从理论计算角度看,斜拉索和主缆均处于低应力工作状态,主缆的工作应力大于斜拉索的工作应力。即便是偏大地计算二次应力,主缆的工作

应力也仅为 $0.53 \sigma_b$ (见前例), 因此松弛损失较小。

从成桥状态的实际工作应力看, 对主缆而言, 估算施工误差对主缆工作应力的影响程度相对而言难度较小、准确度较高, 而且目前国内企业加工制造主缆、吊索及加劲梁已达到一定的水平, 能够有效地控制产品的公差, 也就保证了成桥状态的实际工作应力与理论计算工作应力基本吻合, 因此, 主缆用平行钢丝均采用普通松驰平行钢丝。对斜拉索而言, 如主梁为钢箱梁或钢桁梁, 主梁始终处于弹性工作状态, 弹性模量确定, 加之主梁刚度较小, 预计和控制施工误差对斜拉索工作应力的影响程度难度虽然大于主缆, 但目前国内施工监控的分析计算能力能够解决, 同时在保证桥面标高的前提下, 索力超出设计值不多。国内多座斜拉桥的工程实例也证明了这一点, 因此, 钢箱梁或钢桁梁斜拉桥的斜拉索成桥状态的实际工作应力与理论计算工作应力也是基本吻合的, 完全可考虑采用普通松驰平行钢丝。如主梁为混凝土梁, 预计和控制施工误差对斜拉索工作应力的影响程度难度则比较大, 最主要的难度在于对混凝土主梁参数施工误差的测定, 尤其是弹性模量和收缩徐变参数, 同时主梁刚度大, 在保证桥面标高的前提下, 索力往往超出设计值比较大, 斜拉索容易进入高应力工作状态, 采用普通松驰平行钢丝还需慎重考虑。

稳定化处理并不是钢丝获得良好直线性的唯一手段, “规圆”工艺即能达到同样的效果, 该工艺是一种控温状态下的矫形工艺, 在江阴长江大桥、宜昌长江大桥、润扬长江大桥、西堠门大桥等主缆钢丝生产过程已成功地采用。

屈服强度升高 6% 是稳定化处理带来的一个结果, 并不是斜拉索或主缆工作所必需的, 因为普通松驰平行钢丝的屈服强度已相当于 $0.8 \sigma_b$, 远高于斜拉索或主缆的工作应力。屈服强度高对常常处于高应力工作状态的钢绞线有意义, 可尽量避免钢绞线发生流变。

斜拉索采用普通松驰平行钢丝, 不仅可充分利

用其优点, 还可获得其他的收益。

普通松驰平行钢丝疲劳性能好。

低松驰平行钢丝疲劳性能虽然能够满足标准的要求, 但斜拉索锚头须采用冷铸锚, 而不能采用热铸锚。因为热铸锚的浇铸温度达 460°C , 会破坏锚杯范围内钢丝的晶格排列, 从而影响其强度和疲劳性能。而普通松驰平行钢丝疲劳性能优于低松驰平行钢丝, 悬索桥主缆索股锚头和吊索锚头就均采用热铸锚。斜拉索采用普通松驰平行钢丝, 疲劳性能好, 同时为锚头型式增加了一种选择。

目前斜拉索或主缆用平行钢丝多采用热镀锌作为防腐涂层, 而实际锌-铝合金的防腐效果远优于锌, 见表 2。锌-铝合金镀层钢丝现已投产。

表 2 热镀锌钢丝与锌-铝合金镀层钢丝盐雾试验结果比较

| 镀层材料 | 热镀锌钢丝 | 锌-铝合金镀层钢丝 |
|----------------------------|------------|--------------|
| 镀层重量/(g/m ²) | 380 | 210~270 |
| 腐蚀时间 | 72 h 已见腐蚀点 | 240 h 未见腐蚀点 |
| 腐蚀速率/(g/m ² ·h) | 0.236 | 0.0282~0.064 |

但由于锌-铝合金的熔点为 350°C , 而低松驰平行钢丝的稳定化处理温度为 400°C 左右, 锌-铝合金镀层应用于低松驰平行钢丝的难度较大。而普通松驰平行钢丝则无需稳定化处理, 可采用锌-铝合金作为防腐涂层, 从而提供更好的防腐效果。

6 结论及建议

综上所述, 斜拉索的工作应力低于悬索桥的主缆, 采用低松驰平行钢丝的必要性并不大, 可考虑采用普通松驰平行钢丝。建议对斜拉桥不同的主梁型式区别对待: 钢箱梁或钢桁梁斜拉桥的斜拉索完全可考虑采用普通松驰平行钢丝, 混凝土主梁的斜拉索采用普通松驰平行钢丝还需慎重考虑。

参考文献:

[1] 林长川. 悬索桥主缆的二次应力[C]. 第十一届全国桥梁学术会议论文集.