

# 预应力钢结构张拉控制应力的取值范围分析( )

王帆<sup>1</sup> 郭正兴<sup>2</sup> 许曙东<sup>3</sup> 韩小雷<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学, 广州 510640; 2. 东南大学, 南京 210018; 3. 北京市建筑工程研究院, 北京 100039)

[摘要] 对预应力钢结构来说,张拉控制应力的确定方法不同于预应力混凝土结构,影响它的因素很多。本文提出了预应力钢结构的张拉控制应力取值原则,并且分别从钢索的平面外稳定、节间钢索的悬垂挠度、钢索的疲劳寿命和弯曲应力、应力腐蚀以及高温影响等方面探讨了张拉控制应力的最大和最小限值。

[关键词] 预应力钢结构; 钢索; 张拉控制应力; 平面外稳定; 悬垂挠度; 疲劳寿命; 弯曲应力; 应力腐蚀

[中图分类号] TU378.1 [文献标识码] A [文章编号] 1001-523X(2004)02-0011-03

## ANALYSIS ON THE RANGE OF TENSION CONTROL STRESS IN PRESTRESS STEEL STRUCTURE ENGINEERING( )

Wang Fan Guo Zheng-xing Xu Shu-dong Han Xiao-lei

[Abstract] In the point of prestress steel structures, the method to determinate the tension control stress ( $\sigma_{con}$ ) is different from that of prestress concrete structures because there are so many factors that can influence the value of  $\sigma_{con}$ . In this thesis, the author brought forward the principle to determinate the value of  $\sigma_{con}$ , discussed the maximum and the minimum values of  $\sigma_{con}$  considering the influences of outside-plate stabilizing of cables, curtaining of cables between nodes, fatigue life of cables, bending stress, stress corrosion and high temperature.

[Keywords] Prestress steel structures; Cable; Tension control stress; Outsideplate stabilizing; Curtaining of cables; Fatigue life; Bending stress; Stress corrosion

### 4 预应力钢结构中 $\sigma_{con}$ 值的确定原则

作者认为:确定预应力钢结构中  $\sigma_{con}$  值首先应以保证结构主体和钢索具有相等的可靠度为原则,同时还应综合考虑结构的安全性、适用性和耐久性。

设计过程中,如果使钢索和钢结构主体构件的破坏条件(例如荷载等)基本一致,可以达到最省材料的目的。由于设计时需要考虑的工况很多,而又如本文( )中所言:很多形式的预应力钢结构在施工和使用过程中,钢索和普通钢构件的内力波动曲线难以确定,所以这一步的工作量较大,不过,电脑技术和分析程序的发展,使得这种调整成为可能。保证结构的安全性,就是满足承载力要求,即是有必要彻底了解结构从安装施工到使用阶段遇到各种荷载基本组合时,钢构件和钢索的内力变化,限制其不能超出某一个范围,同时还要保证结构的整体稳定;保证结构的适用性,就是满足结构在荷载标准组合下的刚度要求,同时两相邻节点之间钢索的悬垂挠度应不超过一定限值;从耐久性来说,在腐蚀介质作用下,预应力钢索可能发生应力腐蚀,如果设计时确定的应

力比控制值较大,则承载力储备可能无法抵消应力腐蚀造成的承载力损失,给结构造成危险。另外,还有个结构耐火的问题,由于大多数预应力钢结构的拉索距离地面较高,通常认为它受火灾影响不大,所以这方面的资料较少,本文为了论述的全面,对这个问题也有涉及。

下面对影响张拉控制应力的取值范围的主要因素加以讨论。

### 5 $\sigma_{con}$ 的最小限值

#### 5.1 钢索的平面外稳定

在有下撑杆的预应力空间钢结构中,预应力钢索布置在平面内,由于撑杆的线刚度很小,甚至有些撑杆两端设置的是万向球铰,无法抵御横向力扰动,一旦施工或使用过程中钢索发生横向偏移,就容易引起钢索的横向失稳。

保持钢索的横向稳定主要是控制其预应力不致过低。根据能量原理,钢索的张力正增量有使索的长度恢复最短的趋势。如图 7 示意:设预应力钢索的张拉力为  $\sigma_0$ , O 点为撑杆和拱梁的连接节点, X 向为预应力钢结构纵向, Y 向为横向,取钢索上某任意两个相邻节间分析,钢索长度为  $l_c$ :

$$l_c = 2 \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

收稿日期:2003-11-02

当撑杆和钢索发生出平面偏摆时,钢索长度变成  $l_c$  :

$$l_c = 2 \sqrt{a^2 + b^2} \tag{2}$$

显然有  $b < b_0, l_c < l_0$ , 索的张力变为

$$\sigma = \sigma_0 + E \frac{l_0 - l_c}{l_c} > 0 \tag{3}$$

所以,如果合理控制钢索的张拉控制应力值,使其工作时的应力  $\sigma_0$  能够保持在某一限值之上,那么当钢索发生横向偏摆趋势时,其内力增量能使钢索恢复在初始平衡位置的稳定。

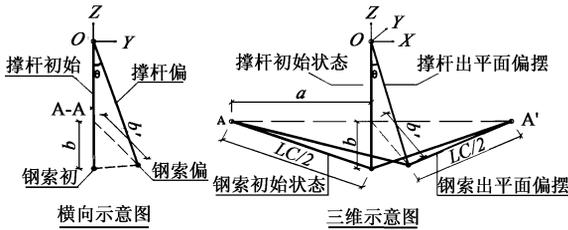


图 7 预应力钢索的出平面偏摆

### 5.2 钢索的悬垂挠度

体外或廓外配索的预应力钢结构中,预应力钢索的悬垂挠度必须满足结构的正常使用要求,如果挠度过大,一来会因很明显的下垂而影响观感,二来有些建筑构件是连接在预应力钢索上的,如马道、屋面板(在双层索结构中)等,过大的钢索悬垂挠度会引起这些建筑构件的变形损坏或者屋面材料的开裂渗漏。

关于拉索悬垂挠度的限值,目前还没有一个明确的规定,作者建议参考《悬索结构技术规程》(报批稿)中对悬索结构的允许变形值所作的规定:

单层悬索体系: 1/200(初始几何态);

双层悬索体系、索网、及横向加劲索系: 1/250(预应力态);

在《悬索结构技术规程》(报批稿)中,这其实是对承重索跨中竖向位移与其总跨度的比值所作的限制,考虑到预应力钢结构有明显的柔性特征以及施工工艺的不同,该规程分初始几何态和预应力态两种不同的情形对钢索的挠度加以限制。作者认为该规定也可以作为限制节间钢索悬垂挠度的参考。虽然适用性主要针对使用过程(荷载态),但仍可以通过限制预应力态时的悬垂挠度来控制荷载态时钢索的变形,预应力态时,节间悬垂挠度限值取 1/250。

对于较短的钢索,其挠度主要由弯曲引起,所以可近似按下式计算:

$$f_{max} = \frac{5ql^4}{384EI} \tag{4}$$

考虑到钢索的抗弯刚度随其拉力的增大而增大,也就是说,存在应力刚化的作用,采用钢索的修正弹性模量:

$$E_{eq} = E \left[ 1 + \frac{r^2 l}{12 s^3} E \right] \tag{5}$$

其中:  $r$  ——钢索的密度;

——钢索的应力;

$l$  ——钢索的水平投影长度。

故 
$$f_{max} = \frac{5ql^4}{384 E_{eq} I} \tag{6}$$

其中:  $q$  ——包括钢索自重在内的纵向分布荷载。

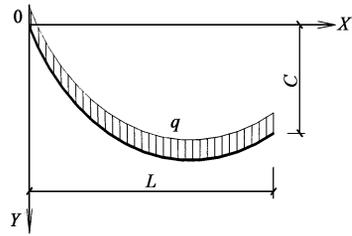


图 8 节间预应力钢索的悬垂挠度

如果钢索较长,将表现出充分的柔性特征,则其节间悬垂挠度可参考图 8 与下列等式计算<sup>[5]</sup>:

$$f_{max} = \left[ \frac{A}{q} \left[ \cosh \left( \frac{2}{l} \right) - \cosh \left( \frac{2}{l} - \right) \right] - \frac{c}{2} \right] / \sqrt{1 + \left( \frac{dz}{dx} \right)^2} \tag{7}$$

$$= \sinh^{-1} \left[ \frac{(c/D)}{\sinh} \right] + \tag{8}$$

$$= \frac{ql}{2H} \tag{9}$$

由于悬垂挠度一般不大,故预应力钢索中张力的水平分量  $H \approx A \sigma_0$ 。

## 6 钢索的最大限值

### 6.1 钢索的疲劳寿命和弯曲应力

所有类型的钢索都有疲劳寿命,超过疲劳寿命后钢索内线材将会开始疲劳断裂,疲劳寿命取决于钢索内的应力幅值和工作条件。轻质大跨的预应力钢结构中,脉动风效应会使钢索产生很明显的变幅度应力。德国曾做过相关实验,表明为了确保钢索具有不少于 200 万次循环的疲劳寿命,其工作应力应不超过  $200 \sim 250 \text{ N/mm}^2$ ,这个值相当于  $0.15 \sim 0.2 N_c/A$  ( $N_c$  为钢索的比例极限对应的拉力)<sup>[6]</sup>。

另外,钢索在转向钢套管处,因为弯曲会产生附加的弯曲应力,该应力值为:

$$\sigma_b = \frac{EdA}{D} \tag{10}$$

其中:  $d$  ——外圈线材的直径;

$A$  ——钢索的直径;

$D$  ——钢索的弯曲直径。

故此时钢索中实际最大应力应为:

$$\sigma = \frac{EdA}{D} + \sigma_0 \tag{11}$$

其中:  $\sigma_0$  ——钢索均匀拉应力。

很明显,为了防止钢索的局部破坏,对钢索张拉力的控制,应该考虑式(10)。

### 6.2 钢索的应力腐蚀

氯盐的侵入会引起预应力钢丝的锈蚀,当钢丝处于高应力状态下,锈蚀更容易发生,由此导致钢材力学性能的退化。钢材发生坑状锈蚀以后,力学性能退化明显,屈服强度与延

伸率随钢材锈蚀率的增加而减小。预应力钢索中存在拉应力,坑状锈蚀的锈坑附近会产生明显的应力集中,引起钢索局部提前达到屈服点。所以,有学者提出:在考虑腐蚀作用的设计中,应该采用名义强度来代替规范中的钢材极限强度<sup>[7]</sup>。所谓名义强度,即实际承载能力与名义钢索面积之比。钢索受锈蚀量越大,实际的屈服强度与极限强度下降,则名义屈服强度与极限强度也随之下降。在钢束截面锈蚀损失率 > 5% 的条件下,由试验和有限元计算总结出的名义屈服应力公式如下:

$$\sigma_y = (0.962 - 0.848 \lambda) \sigma_y \quad (12)$$

这样,  $\sigma_{con}$  的比值基数就会减小,从而导致在初始张拉力一定的情况下,实际  $\sigma_{con}$  增大的情况,所以,考虑钢索应力腐蚀的影响,  $\sigma_{con}$  应受到限制。

另外,研究发现,对于碳钢和高强度钢材来说,在预拉应力和电化学腐蚀共同促成裂纹产生后,裂纹的开展速度分别是 1 mm/h 和 10 mm/h,处于高应力状态的预应力钢索,一旦裂纹萌生成核,将很快脆断,这比普通钢筋的坑蚀更加危险。由于预应力钢索横截面小,即使在轻微腐蚀的情况下,断面损失率也比较大,在大应力的作用下,裂纹扩展非常迅速,这个现象也值得关注<sup>[8]</sup>。

目前,对预应力钢索发生应力腐蚀的控制手段基本是通过防护层,但如本文( )部分所述,预应力钢结构中钢索的防护手段难以和预应力混凝土相比,所以,如何通过控制钢索的应力比来减小应力腐蚀的影响也应该作为一种防护手段加以研究。

### 6.3 拉索的防火

和应力腐蚀一样,火灾造成的温度升高也会使预应力钢索的极限强度、名义屈服强度以及弹性模量下降。钢材在火灾中的升温规律,国内外学者都有研究,文献<sup>[9]</sup>中详细介绍了在无保护层、有保护层及截面非均匀分布三种情况下钢构件的升温计算方法。

文献<sup>[10]</sup>中根据试验结果得到的预应力钢索力学性能与温度的关系如下:

钢索的极限强度:

$$\sigma_T = (1.0144 - 2.3688 \times 10^{-4} T - 2.0552 \times 10^{-6} T^2) \sigma_0 \quad (13)$$

其中:  $T$ ——温度;

$\sigma_T$ ——温度  $T$  下的极限强度;

$\sigma_0$ ——室温下的极限强度。

钢索的名义屈服强度

$$\sigma_{0.2T} = (1.0169 - 2.7889 \times 10^{-4} T - 2.0053 \times 10^{-6} T^2) \sigma_{0.2} \quad (14)$$

其中:  $\sigma_{0.2T}$ ——温度  $T$  下的名义屈服强度;

$\sigma_{0.2}$ ——室温下的名义屈服强度。

可以看出:预应力钢索经历高温作用后的极限强度、名义屈服强度,随所经历温度的增加,总体是下降的。这种现象造成了  $\sigma_{con}$  的比值基数减小,而在初始张拉力一定的情况下,实际  $\sigma_{con}$  增大的情况。所以,在设计防火要求较高的结构时,应该适当控制  $\sigma_{con}$  值。

## 7 结论

由于预应力钢结构和预应力混凝土结构的成形和工作条件不同,所以对预应力混凝土结构常用的  $\sigma_{con}$  取值不能直接用于预应力钢结构中,很难对预应力钢结构规定一个统一的  $\sigma_{con}$  取值标准。

要确定预应力钢结构中的  $\sigma_{con}$  值,应该以保证钢结构主体和拉索具有相等的可靠度为原则,综合考虑结构的安全性、适用性和耐久性来确定。本文从控制钢索的平面外稳定以及节间钢索的悬垂挠度出发,提出了确定  $\sigma_{con}$  的最小限值的方法,又从钢索的疲劳寿命和弯曲应力、应力腐蚀以及高温影响等提出确定  $\sigma_{con}$  的最大限值的方法。

## 参考文献

- 1 吕志涛,孟少平. 现代预应力设计. 北京:中国建筑工业出版社, 1998
- 2 舒赣平. 预应力钢结构的理论分析、试验研究与应用. 东南大学博士学位论文, 1997
- 3 王帆. 索穹顶结构的设计与施工技术研究. 东南大学博士学位论文, 2002
- 4 卓新. 空间结构施工全过程力学分析. 浙江大学博士学位论文
- 5 沈世钊,徐崇宝,赵臣. 悬索结构设计. 北京:中国建筑工业出版社, 1997
- 6 张其林. 索和膜结构. 上海:同济大学出版社
- 7 徐力,杨小平,刘荣桂,姜小云. 预应力结构设计使用寿命模型. 江苏大学学报(自然科学版), 2002, (1)
- 8 袁迎曙,贾福萍,蔡跃. 锈蚀钢筋的力学性能退化研究. 工业建筑, 2000, (1)
- 9 蒋首超,李国强. 火灾下钢结构构件的升温. 钢结构, 1996, (2)
- 10 范进,吕志涛. 高温(火灾)下预应力钢丝性能的试验研究. 建筑技术, 32, (12)

欢迎订阅《建筑技术开发》(月刊)

邮发代号:82-230

刊号:  $\frac{CN11-2178/TU}{ISSN1001-523X}$

联系电话: (010) 68229551  
(010) 68249088 (兼传真)