

文章编号: 0451-0712(2006)05-0035-04

中图分类号: U448.27

文献标识码: B

# 五河口斜拉桥施工控制 中间索力的确定方法

姜竹生<sup>1</sup>, 孙胜江<sup>2</sup>, 冷雪浩<sup>2</sup>

(1. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004; 2. 长安大学公路学院 西安市 710064)

**摘 要:** 合理确定斜拉桥前支点挂篮施工的中间索力, 对于挂篮受力安全和施工方便有重要作用。通过对施工过程的模拟和挂篮实际受力的分析, 提出了混凝土斜拉桥前支点挂篮施工的中间索力的确定方法, 并结合五河口斜拉桥的施工控制, 利用该法确定了中间张拉索力。实际应用表明该方法正确、合理。

**关键词:** 斜拉桥; 中间索力; 力学方法; 前支点挂篮

## 1 前支点挂篮介绍

前支点挂篮悬臂浇注法是目前大跨径混凝土斜拉桥主梁施工的常用方法。前支点挂篮的工作原理是由拉索(通常是当前施工梁段对应索)和已浇梁段来共同承担待浇梁段的重量。在主梁待浇段施工过程中, 利用当前节段的斜拉索充当挂篮的前支点, 与挂篮的中支点和后支点锚固装置(挂篮中、后支点与已浇梁段的连结构造)一起组成挂篮的约束系统, 以充分发挥斜拉索的效用。待混凝土达到设计强度后, 将节段混凝土重量转换到斜拉索上, 拆除斜拉索与挂篮的连接, 前移挂篮。前支点挂篮使挂篮主梁的悬臂受力变为简支受力, 提高了挂篮的承重能力, 加快了施工进度。但有时为减小挂篮的受力, 在混凝土的浇注过程中, 一般需要对斜拉索进行多次张拉, 除了转移锚固的最后一次张拉对结构的受力和线型影响较大外, 其余的各次中间张拉对结构的永久受力和线型影响都较小, 中间张拉只是为了改善挂篮的受力, 而使工艺相对复杂。

## 2 中间张拉次数的确定

中间张拉的次数由施工工艺、拉索、挂篮特性、悬浇段重量决定。中间张拉次数越多, 挂篮和主梁的受力就越小, 使施工工况多而繁琐; 反之亦然。要综合考虑施工的方便和挂篮的受力, 才能合理地确定中间张拉次数及中间张拉力。一般中间张拉可定为 1~3 次。

## 3 前支点挂篮受力分析

### 3.1 前支点挂篮主要构造特点

一般的前支点挂篮构造如图 1 所示(未划出横向横梁)。挂篮主要由承重系统、模板系统、牵索系统、锚固系统及行走系统等 5 大部分组成。主要受力构件有主纵梁、前锚杆和后锚杆。如不再考虑施工工艺, 挂篮改进后, 中间张拉索力的确定, 主要应考虑的是这三个构件的受力。下面以 2 次中间张拉(包括转移锚固后的张拉, 则总共 3 次, 是目前大跨径斜拉桥常用的中间张拉次数)为例, 介绍挂篮中间张拉索力的确定方法。

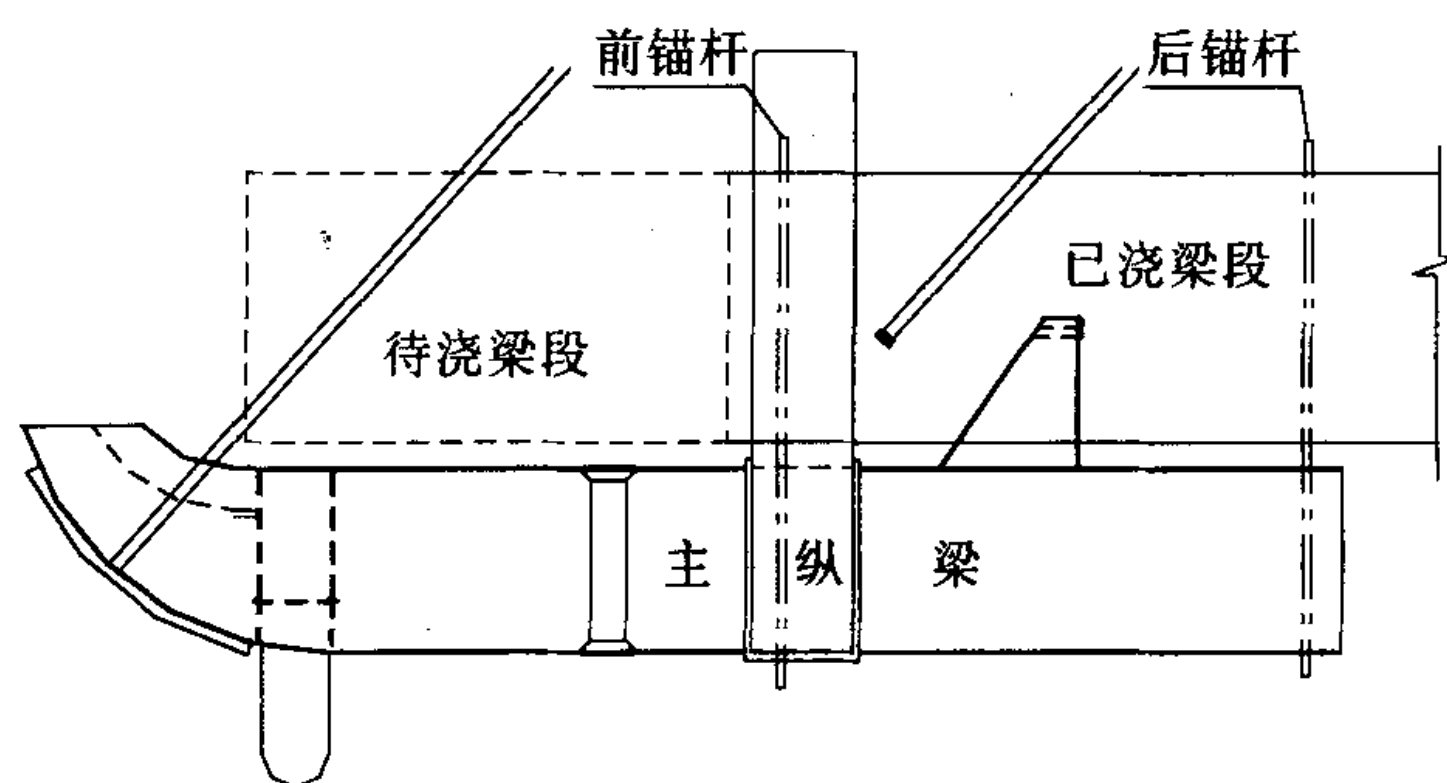


图 1 挂篮构造

### 3.2 前支点挂篮施工步骤

- (1) 挂篮行走, 安装到位;
- (2) 完成斜拉索与牵索系统连接, 进行第 1 次张拉;
- (3) 分层浇注一半悬臂端混凝土;
- (4) 第 2 次张拉斜拉索;



- (5) 浇注完成另一半混凝土;  
 (6) 混凝土养护、待强后, 拆除模板, 施加预应力;  
 (7) 解除牵索系统与斜拉索的连接, 实现挂篮体

系转换;

- (8) 第 3 次张拉斜拉索, 并锚固于梁端。

### 3.3 前支点挂篮受力分析

挂篮的受力分析简图见图 2 所示。

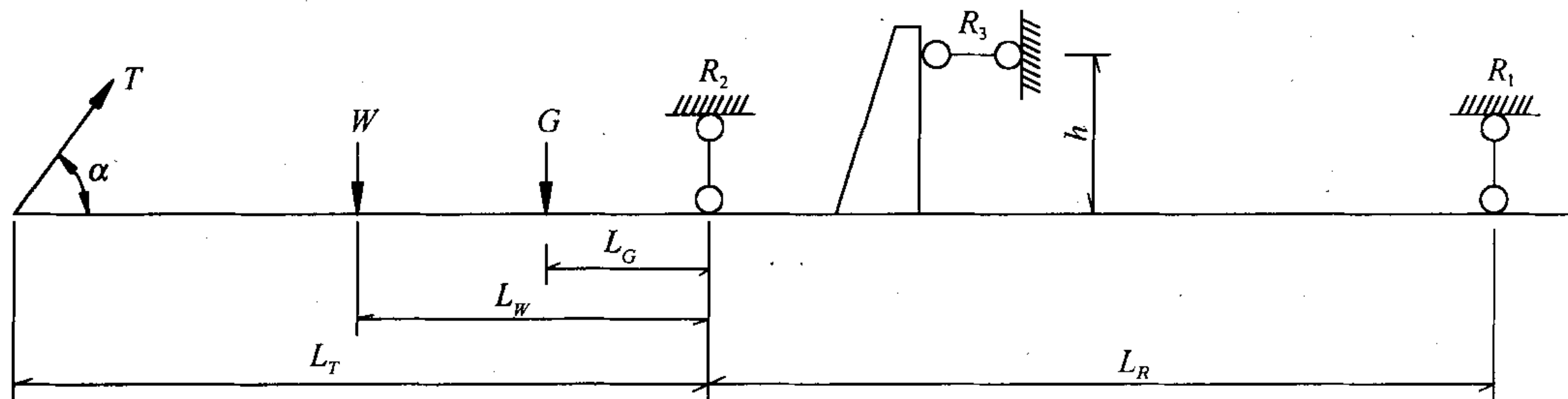


图 2 挂篮受力计算简图

图 2 中, 竖向力以向上为正, 力矩以顺时针为正。\$R\_1\$、\$R\_2\$、\$R\_3\$ 分别为后锚杆、前锚杆和水平止推支座提供的竖向和水平向反力; \$G\$ 为挂篮、模板、施工临时荷载总重; \$W\$ 为待浇梁段自重; \$T\$ 为斜拉索索力。

分析以上结构的受力可知:

$$T \cdot \sin \alpha - W - G - R_1 + R_2 = 0 \quad (1)$$

$$T \cdot \sin \alpha \cdot L_T - W \cdot L_w - G \cdot L_G - R_3 \cdot h + R_1 \cdot L_R = 0 \quad (2)$$

$$T \cdot \cos \alpha = R_3 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中, 得:

$$R_1 = W \cdot \frac{L_w}{L_R} + G \cdot \frac{L_G}{L_R} + T \cdot \cos \alpha \cdot \frac{h}{L_R} - T \cdot \sin \alpha \cdot \frac{L_T}{L_R} \quad (4)$$

再将式(4)代入式(1)中, 得:

$$R_2 = W \cdot \left( \frac{L_w}{L_R} + 1 \right) + G \cdot \left( \frac{L_G}{L_R} + 1 \right) + T \cdot \cos \alpha \cdot \frac{h}{L_R} - T \cdot \sin \alpha \cdot \left( \frac{L_T}{L_R} + 1 \right) \quad (5)$$

前悬臂根部(即 \$R\_2\$ 支点前)负弯矩(下拉为正)为:

$$M^- = G \cdot L_G + W \cdot L_w - T \cdot \sin \alpha \cdot L_T \quad (6)$$

观察式(3)~式(6), 反映出了挂篮反力、弯矩与斜拉索索力及施工荷载间的关系。

现对前支点挂篮各工况下的受力分析如下。

- (1) 挂篮空载时(\$W=0, T=0\$)。

$$R_1' = G \cdot \frac{L_G}{L_R}$$

$$R_2' = G \cdot \left( \frac{L_G}{L_R} + 1 \right)$$

$$M'^- = G \cdot L_G$$

- (2) 斜拉索第一次张拉时(\$W=0, T=T\_1\$)。

$$R_1 = R_1' + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos \alpha - \frac{L_T}{L_R} \cdot \sin \alpha \right) \cdot T_1$$

$$R_2 = R_2' + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos \alpha - \frac{L_T + L_R}{L_R} \cdot \sin \alpha \right) \cdot T_1$$

$$M^- = M'^- - T_1 \cdot \sin \alpha \cdot L_T$$

从前支点挂篮构造可知 \$h\$ 远小于 \$L\_T\$ 及 \$L\_R\$, 所以 \$R\_1\$、\$R\_2\$ 及 \$M^-\$ 均较前减小。

- (3) 浇注一半混凝土时(\$T=T\_1+\Delta T\_1\$(\$\Delta T\_1\$ 为混凝土浇注一半时的索力增量))。

$$R_1 = R_1' + \frac{W}{2} \cdot \frac{L_w}{L_R} + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos \alpha - \frac{L_T}{L_R} \cdot \sin \alpha \right) \cdot (T_1 + \Delta T_1)$$

$$R_2 = R_2' + \frac{W}{2} \cdot \left( \frac{L_w}{L_R} + 1 \right) + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos \alpha - \frac{L_T + L_R}{L_R} \cdot \sin \alpha \right) \cdot (T_1 + \Delta T_1)$$

$$M^- = M'^- + \frac{W}{2} \cdot L_w - (T_1 + \Delta T_1) \cdot \sin \alpha \cdot L_T$$

根据力学原理可知, 挂篮支反力 \$R\_1\$ 和 \$R\_2\$ 及弯矩 \$M^-\$ 均较前增大。

- (4) 斜拉索第二次张拉时(\$T=T\_2\$)。

$$R_1 = R_1' + \frac{W}{2} \cdot \frac{L_w}{L_R} + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos \alpha - \frac{L_T}{L_R} \cdot \sin \alpha \right) \cdot T_2$$

$$R_2 = R_2' + \frac{W}{2} \cdot \left( \frac{L_w}{L_R} + 1 \right) + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos \alpha - \frac{L_T + L_R}{L_R} \cdot \sin \alpha \right) \cdot T_2$$

$$M^- = M'^- + \frac{W}{2} \cdot L_w - T_2 \cdot \sin \alpha \cdot L_T$$

斜拉桥第二次张拉力 \$T\_2 > T\_1 + \Delta T\$, 所以, \$R\_1\$、\$R\_2\$ 及 \$M^-\$ 均较前减小。

- (5) 浇注完全部混凝土时(\$T=T\_2+\Delta T\_2\$(\$\Delta T\_2\$ 为



混凝土浇完剩下一半时的索力增量))。

$$R_1 = R'_1 + W \cdot \frac{L_W}{L_R} + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos\alpha - \frac{L_T}{L_R} \cdot \sin\alpha \right) \cdot (T_2 + \Delta T_2)$$

$$R_2 = R'_2 + W \cdot \left( \frac{L_W}{L_R} + 1 \right) + \left( \frac{h}{L_R} \cdot \cos\alpha - \frac{L_T + L_R}{L_R} \cdot \sin\alpha \right) \cdot (T_2 + \Delta T_2)$$

$$M^- = M'^- + W \cdot L_W - (T_2 + \Delta T_2) \cdot \sin\alpha \cdot L_T$$

同理根据力学原理,挂篮反力 $R_1$ 、 $R_2$ 及 $M^-$ 均较前增大。

由以上分析可见,在混凝土浇注前,若斜拉索索力增大,则挂篮结构反力 $R_1$ 、 $R_2$ 及 $M^-$ 均会减小;随混凝土的浇注,反力 $R_1$ 、 $R_2$ 及 $M^-$ 又会渐增;故在斜拉桥结构设计和挂篮设计中,一般以中支点反力和后锚点反力最大值不超过空载时的 $R'_1$ 、 $R'_2$ 及 $M'^-$ 最大值不超过容许 $M'^-$ 。同时,当斜拉索张拉时,又应尽量避免中支点反力减小至变为正值(反向)、后锚点反力变为负反力,或者超出后锚杆的承载力及弯矩控制点弯矩超过 $M'^-$ 的现象发生。按以上挂篮的受力要求,可得到斜拉索中间各次索力的范围。对于主梁自重过大的情况,为满足上述要求,斜拉索中间索力分次张拉次数势必增加,这时为减小施工难度,也可对结构进行临时补强,同时可通过对挂篮的设计和张拉力进行优化等办法,来确定合理的张拉次数。

### 3.4 综合已浇梁段主梁受力确定中间索力大小

当确定了中间张拉次数和索力后,要验算已浇段主梁的受力,避免主梁负弯矩过大。选取索力范围内的一值(通常选用上、下限的平均值),代入施工正装计算中试算;然后根据计算主梁施工的应力情况,在索力允许范围内,对中间张拉索力做适当调整。

## 4 五河口斜拉桥计算示例

现以五河口斜拉桥施工中采用的前支点挂篮为例,介绍其中间索力的确定。

挂篮基本数据:

挂篮(主跨)总重 $G=2\,200\text{ kN}$ ;

主梁待浇段(主跨)总重 $W=4\,800\text{ kN}$ ;

几何长度 $L_R=6.3\text{ m}$ ,  $L_W=3.325\text{ m}$ ,  $L_G=1.27\text{ m}$ ,  $h=2.76\text{ m}$ ,  $L_T=6.642\text{ m}$ ,  $\alpha=69.3728^\circ$ (以主跨Z4号索为例),由挂篮纵梁截面尺寸确定的容许弯矩为 $7\,740\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

### 4.1 根据挂篮受力情况初步确定中间索力

(1)空挂篮工况。

$$R'_1 = G \cdot \frac{L_G}{L_R} = 2\,200 \times \frac{1.27}{6.3} = 443.5\text{ kN}$$

$$R'_2 = G \cdot \left( \frac{L_G}{L_R} + 1 \right) = 2\,200 \times \left( \frac{1.27}{6.3} + 1 \right) = 2\,643.5\text{ kN}$$

$$M'^- = G \cdot L_G = 2\,200 \times 1.27 = 2\,794\text{ kN}\cdot\text{m}$$

(2)B4索第一次张拉工况。

$$\begin{aligned} R_1 &= R'_1 + A \cdot T_1 \\ &= 443.5 - 0.832\,4T_1 > -R'_{\text{后锚}} \\ &= -1\,920\text{ kN} \end{aligned}$$

$$R_2 = R'_2 + B \cdot T_1 = 2\,643.5 - 1.768\,3T_1 > 0$$

$$\begin{aligned} R'_{\text{后锚}} &= [R] \cdot A' = 300 \times 10^3 \times 64 \times 10^{-4} \\ &= 1\,920\text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{式中: } A = \frac{h}{L_R} \cdot \cos\alpha - \frac{L_T}{L_R} \sin\alpha;$$

$$B = \frac{h}{L_R} \cdot \cos\alpha - \frac{L_T + L_R}{L_R} \cdot \sin\alpha;$$

$[R]$ =后锚杆许用应力; $A'$ =后锚杆截面面积。

(3)浇注一半混凝土工况。

$$\begin{aligned} R_1 &= 443.5 + 2\,400 \times \frac{3.325}{6.3} - 0.832\,4(T_1 + \Delta T_1) < 443.5\text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_2 &= 2\,643.5 + 2\,400 \times \left( \frac{3.325}{6.3} + 1 \right) - 1.768\,3(T_1 + \Delta T_1) < 2\,643.5\text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |M^-| &= |G \times L_G + W/2 \cdot L_W - T \cdot \sin\alpha \cdot L_T| \\ &= |2\,794 + 2\,400 \times 3.325 - \sin\alpha \cdot L_T \cdot (T_1 + \Delta T_1)| < 7\,740\text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

综合(2)、(3)工况,解上述方程,当 $R_1$ 控制在 $R'_{\text{后锚}} < R_1 < 443.5\text{ kN}$ 的要求范围内时,一张索力需要满足 $1\,521.7\text{ kN} < T_1 + \Delta T_1 < 2\,839.4\text{ kN}$ ;当 $R_2$ 控制在 $0 < R_2 < 2\,643.5\text{ kN}$ 的要求范围内时,一张索力需要满足 $2\,073.5\text{ kN} < T_1 + \Delta T_1$ ,同时满足 $T_1 + \Delta T_1 < 1\,494.9\text{ kN}$ ;由 $|M^-| < M'^-$ 可得出 $487.5\text{ kN} < T_1 + \Delta T_1 < 2\,978.4\text{ kN}$ 。同时满足所有条件并不可行,这要通过增加张拉次数来达到满足所有条件的目的,但增加张拉次数会带来施工时间的大幅增加,对混凝土应力状况也将产生不利影响。本桥确定仍按3次张拉;只要对挂篮前锚杆(中支点处)进行必要的加固和采取一定的固定措施,使得其在受压状态下仍保持较大的稳定性和较小的非弹性变形,在受拉状态下能够承受更大的荷载,来保证主梁悬臂浇注的施工安全和准确性。这样可近似简化得出Z4号索第一次张拉索力范围:

$$2\,037.5\text{ kN} < T_1 + \Delta T < 2\,978.4\text{ kN}$$



经计算得出 $\Delta T \approx 140$  kN, 在满足其他条件的前提下, 为使中锚杆所受压力最小, 确定一张索力 $T_1$ 为2 000 kN。

(4) Z4 号索第二次张拉工况。

$$R_1 = 443.5 + 2\,400 \times \frac{3.325}{6.3} - 0.832\,4T_2 > -1\,920 \text{ kN}$$

$$R_2 = 2\,643.5 + 2\,400 \left( \frac{3.325}{6.3} + 1 \right) - 1.768\,3T_2 > 0$$

根据以上两式计算结果可知,  $T_2 < 3\,671$  kN。

(5) 浇注完全部混凝土工况。

$$R_1 = 443.5 + 4\,800 \times \frac{3.325}{6.3} - 0.832\,4(T_2 + \Delta T_2) < 443.5 \text{ kN}$$

$$R_2 = 2\,643.5 + 4\,800 \times \left( \frac{3.325}{6.3} + 1 \right) - 1.768\,3(T_2 + \Delta T_2) < 2\,643.5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} |M^-| &= |G \cdot L_G + \frac{W}{2} \cdot L_W - T \times \sin \alpha \cdot L_T| \\ &= |2\,794 + 4\,800 \times 3.325 - \sin \alpha \cdot L_T| \cdot (T_2 + \Delta T_2) = 7\,740 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

综合工况(4)、(5), 解上述方程, 当 $R_1$ 控制在 $R_{\text{后锚}} < R_1 < 443.5$  kN 的要求范围内时, 二张索力需要满足 $3\,043 \text{ kN} < T_2 + \Delta T_2 < 4\,361 \text{ kN}$ ; 当 $R_2$ 控制在 $0 < R_2 < 2\,643.5$  kN 的要求范围内时, 二张索力需要满足 $4\,147 \text{ kN} < T_2 + \Delta T_2$ , 同时满足 $T_2 + \Delta T_2 < 3\,568 \text{ kN}$ ; 由 $|M^-| < |M'^-|$ 可得出 $1\,771.9 \text{ kN} < T_2 + \Delta T_2 < 4\,262.2 \text{ kN}$ 。由于前锚杆(中支点处)得

到加固和锚固, 故不构成确定中间索力的关键因素。参见一张索力的确定, 可近似简化得出Z4 号索第二次张拉索力范围: $3\,043 \text{ kN} < T_2 + \Delta T_2 < 4\,262.2 \text{ kN}$ 。

经计算得出 $\Delta T \approx 130$  kN, 在满足其他条件的前提下, 为使中锚杆所受拉力尽可能地小, 确定二张索力 $T_2$ 为4 100 kN。

#### 4.2 通过计算已浇梁段的受力情况最终确定中间索力

选取 $T_1 = 2\,000$  kN、 $T_2 = 4\,100$  kN 代入模拟施工正装计算, 计算已浇主梁段上下缘应力, 结果拉应力在1 MPa 以内, 压应力在6 MPa 以内, 均满足要求。这样Z4 号索悬臂浇注中间索力值就最终确定了。

#### 5 结语

由以上分析可见, 挂篮中间张拉索力的确定需要全面考虑前锚杆、后锚杆及主纵梁的受力。一般情况下, 若各种计算结果有交叉, 则在交叉中取值为好, 否则应根据实际情况对挂篮或中间张拉索力做相应调整, 合理变化张拉次数和张拉索力, 最终通过对已浇梁段主梁应力的安全验算来确定中间张拉索力。

#### 参考文献:

- [1] 王伯惠. 斜拉桥结构发展和中国经验(下册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]. 湖南大学博士学位论文, 2001.

## Method of Determining Middle Cable Force in Construction Control of Wuhekou Cable-stayed Bridge

JIANG Zhu-sheng<sup>1</sup>, SUN Sheng-jiang<sup>2</sup>, LENG Xue-hao<sup>2</sup>

(1. Expressway Construction Headquarters of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China;

2. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** It is important for safety of the suspended wagon and convenient construction to determine the middle cable force rationally when the cable-stayed bridge is constructed by suspended wagon which has a support at front end. Through simulating the construction process and analyzing the actual force of the suspended wagon, a method of determining the middle cable force is put forward for the concrete cable-stayed bridge constructed by suspended wagon. Associating the construction control of Wuhekou Cable-stayed Bridge, the middle cable forces of the bridge are determined by the method. The practical application shows that the method is correct and rational.

**Key word:** cable-stayed bridge; middle cable force; mechanics method; suspended wagon at front support