

文章编号: 1674-599X(2022)02-0045-09

# 大跨悬拼钢筋混凝土拱桥施工索力计算分析

余钱华, 李威, 张家琪

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为避免大跨悬臂拼装钢筋混凝土拱桥施工过程中主拱圈出现较大的拉应力, 以净跨径 195 m 的牛路河特大桥为依托, 推导出一种施工索力优化的计算方法。在桥梁结构中, 通过 Midas/Civil 软件进行正装分析, 提取施工过程中的应力影响矩阵。根据拱肋关键截面的应力控制条件, 正装计算确定扣索力的可行域, 选取可行域上、下限的平均值作为扣索力初值来计算, 确定最优施工扣索力。基于水平力相等的原则, 确定锚索力。研究表明: 扣索施工索力值较为均匀, 拱肋施工过程中截面拉应力不超过 1.5 MPa, 压应力不超过 7.0 MPa, 混凝土拱桥施工过程中扣、锚索只需张拉一次就可计算出截面应力, 提高了工作效率, 可为类似工程施工提供借鉴。

**关键词:** 桥梁工程; 钢筋混凝土拱桥; 索力优化; 可行域

中图分类号: U441.5

文献标识码: A

## Calculation and analysis of construction cable force of long-span cantilever reinforced concrete arch bridge

YU Qianhua, LI Wei, ZHA Jiaqi

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To avoid the large tensile stress occurring in the main arch ring during the construction of long-span cantilever assembled reinforced concrete arch bridge, based on the Niuluhe Bridge with a net span of 195 m, an optimization calculation method of construction cable force was derived. The formal analysis was carried out in the general bridge structure analysis software Midas/Civil and the stress influence matrix in the construction process was extracted. According to the stress control conditions of the key section of the arch rib, the feasible region of the buckle force was determined by the formal calculation, and then the average value of the upper and lower limits of the feasible region were selected as the initial value of the buckle force, which was substituted into the iterative equation to determine the optimal construction buckle force, and then the anchor force was determined based on the principle of equal horizontal force. The results of numerical examples show that the cable force value of buckle cable construction is relatively uniform, the tensile stress in cross-section is less than 1.5MPa and the compressive stress less than 7.0 MPa during the construction of arch rib. The stress in cross-section can be calculated when the buckle and anchor cable are be tensioned once. This improves the work efficiency and can provide reference for the construction of similar projects.

**Key words:** bridge engineering; reinforced concrete arch bridge; cable force optimization; feasible area

拱结构与梁结构相比, 最显著的特点是可利用混凝土的高抗压强度来承受自重荷载<sup>[1]</sup>。然而, 随着跨度的增大, 混凝土拱桥的自重效应越来越

显著。由于拱肋内未布设预应力钢筋, 抵抗拱肋开裂的能力不足, 会导致拱肋开裂, 对斜拉扣挂悬臂拼装的混凝土拱桥提出了新的挑战。因

收稿日期: 2020-10-30

作者简介: 余钱华(1969—), 男, 长沙理工大学教授, 博士。

此,对该工法展开深入研究非常必要。

目前,针对拱桥节段吊装施工索力的计算方法主要包括解析法、数值法和基于优化理论的分析方法<sup>[2]</sup>。传统解析法包括零弯矩法和弹性-刚性支撑法。其中,对于零弯矩法的索力计算,会出现负值或者索力均匀性很差的结果,需要对扣点位置进行调整,且无法获得节段施工预抬量<sup>[3]</sup>。对于弹性-刚性支撑法,需求解高次超静定方程,计算量大且准确模拟弹性支撑的刚度难度大<sup>[4]</sup>。数值法包括有限元法、零位移法和定长扣索法。其中,以有限元法为代表的数值法能有效弥补解析法的不足。由零位移法计算出扣点反力的合力方向不一定是扣索设置方向,在实际施工中,很难保证扣点位置位移为零<sup>[5]</sup>。通过定长扣索法确定预抬量十分繁琐,不便于实际应用<sup>[6]</sup>。在基于优化理论的分析方法中,索力由结构的位移或内力相关函数来确定。张治成等人<sup>[7]</sup>首次将优化理论引入到节段吊装索力计算,基于ANSYS软件的优化分析功能,获得精确索力值。徐岳等人<sup>[8-9]</sup>以拱肋安装线形为目标,通过正装插值迭代搜寻最佳索力值,改进3迭代算法加快迭代效率。韩玉等人<sup>[10]</sup>在节段吊装施工过程中以位移最小为目标,合龙松索后拱肋线形与设计线形相符为约束条件,结合影响矩阵,建立了扣索一次张拉的施工索力优化模型。涂光亚等人<sup>[11]</sup>基于影响矩阵法,以一次落架空钢管成拱线形为目标,获得了最大悬臂状态下的扣索力。周银等人<sup>[12]</sup>指出可以将无应力状态法引入到节段吊装的大跨径拱桥中。周倩等人<sup>[13]</sup>提出了考虑温变影响索力计算方法,提高计算效率。刘宇飞等人<sup>[14]</sup>通过研究温度变化对钢管混凝土拱桥吊装施工过程中拱肋线形的影响规律,提出了消除温度影响的方法。这些基于优化理论的施工索力计算方法都是以钢管混凝土拱桥线形为控制目标,而针对悬臂拼装的混凝土拱桥施工索力计算研究较少。卓小丽<sup>[15]</sup>通过正装-倒装循环迭代,获取了各拱肋控制点位移和应力,且均施工索力满足规范要求。朱华栋<sup>[16]</sup>以拱圈应力和扣塔偏位最小为目标,借助有限元软件,通过正装迭代获取合理施工索力。这两种求悬拼钢筋混凝土拱桥索力的方法,由于扣、锚索多次张拉,具有一定施工风险,且需要计算人员有一定的调索经验。

解析法和数值法都可以确定较小跨径拱桥悬臂拼装过程中的扣索力。但随着拱桥跨度的增大,

拱肋分段数量的增加,尤其对于抗拉能力弱的混凝土拱桥,如果扣、锚索力控制不好,容易造成拱肋截面开裂,甚至影响施工安全。从这个角度出发,以拱圈截面的弯矩(或截面上、下缘拉应力)最小为控制目标是最直接和最有效的控制方法<sup>[17]</sup>。本研究在桥梁结构中拟采用Midas/Civil软件进行正装分析,并提取施工过程中的应力影响矩阵。依据拱肋关键截面的应力控制条件,确定扣索力的可行域上、下限的平均值作为扣索力初值,计算最优施工扣索力,再基于水平力相等原则确定锚索力。相对于传统的弯矩控制法,如“零弯矩法”认为拱肋接头处为薄弱截面,人为地调整扣索索力使拱肋接头处的弯矩为零。但实际上最薄弱的截面并不一定是拱肋接头处,本方法可以提前选取每个拱肋节段最薄弱的截面作为控制截面。应力产生的原因除了弯矩还有轴力,应力控制相对于弯矩控制更为直接,而且本方法主要控制拱圈截面的应力不超过容许拉应力。通过设置合理的施工预抬量,达到线形控制的目标。在相应施工阶段,扣、锚索只需张拉一次,提高了工作效率,降低了施工风险。

## 1 计算原理及步骤

扣索力优化计算分三步,计算分析过程中涉及正装计算、影响矩阵法和优化理论等相关原理。

### 1.1 基本原理

在有限元模型中,将已张拉的扣索力作为已知量,将待求解的扣索力作为未知量来进行求解。当前施工阶段,激活的拱肋节段自重产生的应力增量,由当前施工阶段激活的扣索力产生的应力增量来平衡,从而使得拱肋截面应力处于可控范围内,以此构建应力平衡方程。以求可行域下限值为例,仅选取混凝土容许拉应力作为应力控制限值,提取单位索力下控制截面上缘的应力影响矩阵和自重荷载产生的应力列向量。当吊装1<sup>#</sup>节段时,根据1<sup>#</sup>节段控制截面的应力平衡方程,确定1<sup>#</sup>索力的下限值。当吊装2<sup>#</sup>节段时,1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>节段控制截面的应力平衡方程有2个,故可求出2个解,取其中最大值作为2<sup>#</sup>索力的下限值。以此类推,确定3<sup>#</sup>~*n*<sup>#</sup>索力的下限值。

#### 1.1.1 提取影响矩阵

建立拱圈、扣塔和扣索于一体的有限元模型,

在提取单位索力下的应力影响矩阵时, 不计拱圈和扣索自重, 依次对1~ $n$ 号扣索施加单位力。由于拱圈刚度较大, 为避免因单位力过小而引起影响矩阵元素偏小, 将单位力取100 kN。假设有 $n$ 根扣索, 在每个节段选取一个最薄弱的截面为控制截面, 则共有 $n$ 个控制截面。计算由 $n$ 组单位索力产生的拱圈截面应力值, 在有限元模型结果中提取各控制截面的上、下缘应力 $c_{ij}^a$ 、 $c_{ij}^b$ , 生成单位扣索力对拱圈截面上、下缘应力影响矩阵 $[C_i^a]$ 和 $[C_i^b]$ 。

$$C_1^a = [c_{11}^a], C_2^a = \begin{bmatrix} c_{11}^a & c_{12}^a \\ c_{21}^a & c_{22}^a \end{bmatrix}, \dots, [C_n^a] = \begin{bmatrix} c_{11}^a & \dots & c_{1n}^a \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n1}^a & \dots & c_{nn}^a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_1^b = [c_{11}^b], C_2^b = \begin{bmatrix} c_{11}^b & c_{12}^b \\ c_{21}^b & c_{22}^b \end{bmatrix}, \dots, C_n^b = \begin{bmatrix} c_{11}^b & \dots & c_{1n}^b \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n1}^b & \dots & c_{nn}^b \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $c_{ij}^a$ 、 $c_{ij}^b$  分别为第 $j$ 号扣索张拉单位力时, 在第 $i$ 个控制截面的上、下缘产生的应力,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

拱肋控制截面施工阶段的应力主要由自重荷载和索力2个因素产生, 因此, 控制截面上、下缘应力向量可表示为式(3)和式(4):

$$[\sigma_i^a] = [\sigma_{gi}^a] + [C_i^a] [T_j] \quad (3)$$

$$[\sigma_i^b] = [\sigma_{gi}^b] + [C_i^b] [T_j] \quad (4)$$

式中: 列向量 $[\sigma_i^a] = (\sigma_1^a, \sigma_2^a, \dots, \sigma_n^a)^T$ 和 $[\sigma_i^b] = (\sigma_1^b, \sigma_2^b, \dots, \sigma_n^b)^T$ 为拱肋施工到 $i$ 节段时, 自重荷载和索力在拱圈上、下缘产生的应力之和; 列向量 $[\sigma_{gi}^a] = (\sigma_{g1}^a, \sigma_{g2}^a, \dots, \sigma_{gn}^a)^T$ 和 $[\sigma_{gi}^b] = (\sigma_{g1}^b, \sigma_{g2}^b, \dots, \sigma_{gn}^b)^T$ 为拱肋施工到 $i$ 节段时, 自重荷载在拱圈上、下缘产生的应力; 列向量 $[T_j] = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$ 为拱肋施工到 $i$ 节段时, 对应张拉 $j$ 号扣索力,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

将式(3)和式(4)展开:

$$\begin{cases} \sigma_1^a = \sigma_{g1}^a + c_{11}^a T_1 \\ \begin{cases} \sigma_1^a = \sigma_{g1}^a + c_{11}^a T_1 + c_{12}^a T_2 \\ \sigma_2^a = \sigma_{g2}^a + c_{21}^a T_1 + c_{22}^a T_2 \end{cases} \\ \vdots \\ \begin{cases} \sigma_1^a = \sigma_{g1}^a + c_{11}^a T_1 + c_{12}^a T_2 + \dots + c_{1n}^a T_n \\ \sigma_2^a = \sigma_{g2}^a + c_{21}^a T_1 + c_{22}^a T_2 + \dots + c_{2n}^a T_n \end{cases} \\ \vdots \\ \sigma_n^a = \sigma_{gn}^a + c_{n1}^a T_1 + c_{n2}^a T_2 + \dots + c_{nn}^a T_n \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_1^b = \sigma_{g1}^b + c_{11}^b T_1 \\ \begin{cases} \sigma_1^b = \sigma_{g1}^b + c_{11}^b T_1 + c_{12}^b T_2 \\ \sigma_2^b = \sigma_{g2}^b + c_{21}^b T_1 + c_{22}^b T_2 \end{cases} \\ \vdots \\ \begin{cases} \sigma_1^b = \sigma_{g1}^b + c_{11}^b T_1 + c_{12}^b T_2 + \dots + c_{1n}^b T_n \\ \sigma_2^b = \sigma_{g2}^b + c_{21}^b T_1 + c_{22}^b T_2 + \dots + c_{2n}^b T_n \end{cases} \\ \vdots \\ \sigma_n^b = \sigma_{gn}^b + c_{n1}^b T_1 + c_{n2}^b T_2 + \dots + c_{nn}^b T_n \end{cases} \quad (6)$$

### 1.1.2 求解索力可行域

由于混凝土抗压强度较大, 截面抗压能力强, 截面压应力一般不会超过容许压应力值。因此, 仅选取混凝土容许拉应力 $\sigma_t$ 作为应力控制限值。考虑到吊装前几个节段的自重荷载下产生的应力较小, 截面应力控制值不同, 一般强度设计值的50%~80%作为应力控制值。应力控制的表达式为:

上缘拉应力控制条件:

$$[\sigma_i^a] = [\sigma_{gi}^a] + [C_i^a] [T_j] \leq \sigma_t \quad (7)$$

下缘拉应力控制条件:

$$[\sigma_i^b] = [\sigma_{gi}^b] + [C_i^b] [T_j] \leq \sigma_t \quad (8)$$

由于在施工阶段正装分析模型中, 索力 $T_j$ 只对第 $j$ 根扣索至拱脚范围内的截面应力产生影响, 对第 $j$ 根扣索至跨中合龙段内的截面应力不产生影响。因此, 上、下缘应力影响矩阵 $[C_i^a]$ 和 $[C_i^b]$ 是上三角矩阵, 主对角线以下的元素都为零。即:

$$[C_1^a] = [c_{11}^a], [C_2^a] = \begin{bmatrix} c_{11}^a & c_{12}^a \\ 0 & c_{22}^a \end{bmatrix}, \dots, [C_n^a] = \begin{bmatrix} c_{11}^a & \dots & c_{1n}^a \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & c_{nn}^a \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[C_1^b] = [c_{11}^b], [C_2^b] = \begin{bmatrix} c_{11}^b & c_{12}^b \\ 0 & c_{22}^b \end{bmatrix}, \dots, [C_n^b] = \begin{bmatrix} c_{11}^b & \dots & c_{1n}^b \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & c_{nn}^b \end{bmatrix} \quad (10)$$

其次, 扣索的锚固点在拱圈上缘, 索力在拱圈截面, 产生了轴向压力和弯矩, 其组合作用在拱肋上缘产生压应力, 在拱肋下缘产生拉应力。故: 上缘应力值 $c_{ij}^a < 0$ , 下缘应力值 $c_{ij}^b > 0$ , 式(7)~(8)可变为:

$$[C_i^a] \{T_j\} \geq \sigma_t - [\sigma_{gi}^a] = [\sigma_i^{al}] \quad (11)$$

$$[C_i^b] [T_j] \leq [\sigma_t] - [\sigma_{gi}^b] = [\sigma_i^{bl}] \quad (12)$$

先由式(5)和式(11)计算出第1根索的最小值, 再从第2根至第 $n$ 根扣索的顺序逐步确定全

部扣索索力的最小值。对于第一根索:  $T_1 \geq \sigma_1^{al}/c_{11}^a$ 。

在确定第一根索力最小值后, 采用前进计算法, 逐步确定第2根至第 $n$ 根扣索索力的最小值。对于第 $j$ 根索:

$$\begin{cases} c_{11}^a T_1 + c_{12}^a T_2 + \cdots + c_{1j}^a T_j \geq \sigma_i^{al} \\ 0 + c_{22}^a T_2 + \cdots + c_{2j}^a T_j \geq \sigma_i^{al} \\ \vdots \\ 0 + 0 + \cdots + c_{ij}^a T_j \geq \sigma_i^{al} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 第 $j$ 根索有 $i$ 个解  $T_j^1, T_j^2, \dots, T_j^i$ , 取其中最大值作为索力  $T_j$  的最小值  $T_j^{\min}$ 。考虑到索张拉时不能承受压力, 即扣索力的下限值为0。

$$T_j^{\min} = \max(T_j^1, T_j^2, \dots, T_j^i, 0) \quad (14)$$

按照该方法可以确定每一根索的最小值, 从而获得最小索力向量:

$$[T_j^{\min}] = (T_1^{\min}, \dots, T_j^{\min})^T, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

由式(6)、(12)计算出第1根索的最大值, 再按照从第2根至第 $n$ 根扣索的顺序, 逐步确定全部索力的最大值。对于第1根索:  $T_1 \leq \sigma_1^{bl}/c_{11}^b$ 。

确定第1根索力的最小值后, 采用前进计算法, 逐步确定第2根扣索至第 $n$ 根扣索索力的最小值。对于第 $j$ 根索:

$$\begin{cases} c_{11}^b T_1 + c_{12}^b T_2 + \cdots + c_{1j}^b T_j \leq \sigma_i^{bl} \\ 0 + c_{22}^b T_2 + \cdots + c_{2j}^b T_j \leq \sigma_i^{bl} \\ \vdots \\ 0 + 0 + \cdots + c_{ij}^b T_j \leq \sigma_i^{bl} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知, 第 $j$ 根索有 $i$ 个解  $T_j^1, T_j^2, \dots, T_j^i$ , 取最小值作为索力  $T_j$  的最大值  $T_j^{\max}$ 。即:

$$T_j^{\max} = \min(T_1^1, T_2^2, \dots, T_n^i), j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

按照该方法可以确定每一根索的最大值, 从而获得最大索力向量:

$$[T_j^{\max}] = (T_1^{\max}, T_2^{\max}, \dots, T_n^{\max})^T, j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

### 1.1.3 迭代优化

由式(15)和式(18)可确定各扣索力的可行域, 在求得的扣索力可行域中选取一组索力作为扣索力初值, 即  $\{T^0\} = (T_1^0, T_2^0, \dots, T_n^0)^T$ ,  $T_j^0 \in [T_j^{\min}, T_j^{\max}]$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。但实际施工时, 需要一组最优施工扣索力。为提高迭代效率, 可选取可行域上、下限的平均值作为扣索力初值。先将扣索力初值代入式(3)和式(4), 计算出拱肋控制截面初始上缘应力  $[\sigma_i^{a0}]$  和初始下缘应力  $[\sigma_i^{b0}]$ , 再分三步对索力迭代优化:

1) 由式(19)可以求出扣索力的调整量  $\Delta T^a$  和  $\Delta T^b$ 。

$$\begin{cases} \Delta T^a = [C_i^a]^{-1} [\sigma_i^{a0}] \\ \Delta T^b = [C_i^b]^{-1} [\sigma_i^{b0}] \end{cases} \quad (19)$$

2) 扣索力调整量  $\Delta T$  取  $\Delta T^a$  和  $\Delta T^b$  中的最大值, 再将新扣索力  $\Delta T + T^0$  代入式(3)和式(4), 计算出拱肋控制截面上缘应力  $[\sigma_i^{a1}]$  和下缘应力  $[\sigma_i^{b1}]$ 。

3) 若计算出的新扣索力和上、下缘应力可满足以下条件的任意一个条件, 即停止迭代, 取上一次迭代的索力作为最优索力。否则, 则重复步骤1和步骤2, 迭代终止三个条件为:

- ①  $\Delta T + T^0 \notin [T_j^{\min}, T_j^{\max}]$ ;
- ②  $\max \left| (\sigma_i^{ak} - \sigma_i^{a(k-1)}) / \sigma_i^{a(k-1)} \right| \leq 2\%$ ;
- ③  $\max \left| (\sigma_i^{bk} - \sigma_i^{b(k-1)}) / \sigma_i^{b(k-1)} \right| \leq 2\%$ 。

根据扣索和锚索在扣塔锚固位置处的水平倾角, 按水平力相等的原则确定锚索力。

$$T_j \cos \alpha_j = M_j \cos \beta_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中:  $\alpha_j$  和  $\beta_j$  分别为扣塔上扣索和锚索的水平倾角;  $T_j$  和  $M_j$  是扣索力和锚索力。

按式(20)得到对应的锚索力  $[M_j] = (M_1, M_2, \dots, M_n)$ 。

扣索力计算分析流程如图1所示。

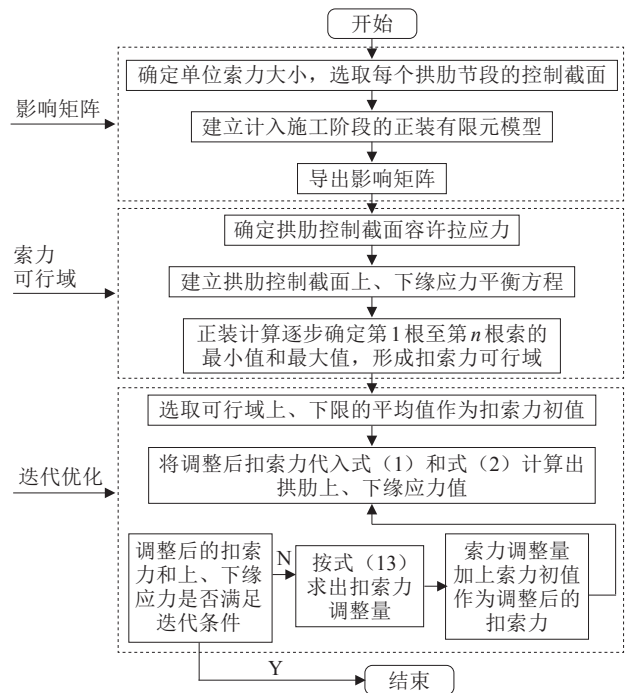


图1 扣索力计算流程

Fig. 1 Flowchart of buckle force calculation



2 算例验证

2.1 算例工程概况

以张花(张家界—花垣)高速公路永顺连接线上的一座净跨径为195 m钢筋混凝土箱型拱特大桥为算例,其净矢跨比为1/5,拱轴系数 $m=1.543$ 。拱圈混凝土强度等级为C50,根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)要求,C50混凝土容许拉应力和容许压应力分别为1.83、22.4 MPa,弹性模量为 $3.45\times 10^4$  MPa。扣塔采用Q345钢材,弹性模量为 $2.06\times 10^5$  MPa。

拱圈为箱型截面,高为3.6 m,宽为7.8 m。箱室标准段截面尺寸为:顶底板厚度均为25 cm,边腹板厚度为35 cm,中腹板厚度为30 cm。该桥采用悬臂拼装法施工,主拱圈左、右各分为21个节段,由拱脚向拱顶分别为1#~21#节段,合龙段为60 cm的现浇段,左、右两岸均在安装完第十六节段后浇筑钢纤维混凝土封拱脚,完成体系转换,具体拱肋分段参数见表1。牛路河特大桥永顺县侧拱肋扣索用YKS1~YKS21表示,锚索用YMS1~YMS21表示,牛路河特大桥小龙村侧拱肋扣索用XKS1~XKS21表示,锚索用XMS1~XMS21表示。牛路河特大桥扣、锚索布置如图2所示。

表1 拱肋分段参数表  
Table 1 Parameters of arch rib segments

节段编号	拱脚	1	2	3	4	5	6	湿接缝	7	8	9	10	湿接缝
节段长度/cm	76.0	377.9	400.0	618.8	618.8	500.0	627.1	60.0	470.0	611.5	500.0	544.2	60.0
预制重量/t	—	149.2	157.6	144.3	144.3	155.7	143.8	—	148.0	142.9	155.7	127.9	—

节段编号	11	12	13	14	15	16	湿接缝	17	18	19	20	21	合龙段
节段长度/cm	470.0	546.8	500.0	519.6	500.0	473.1	60.0	470.0	496.4	500.0	415.5	415.1	60.0
预制重量/t	148.0	130.9	155.7	131.9	155.7	127.5	—	148.0	127.5	155.7	106.0	101.1	—

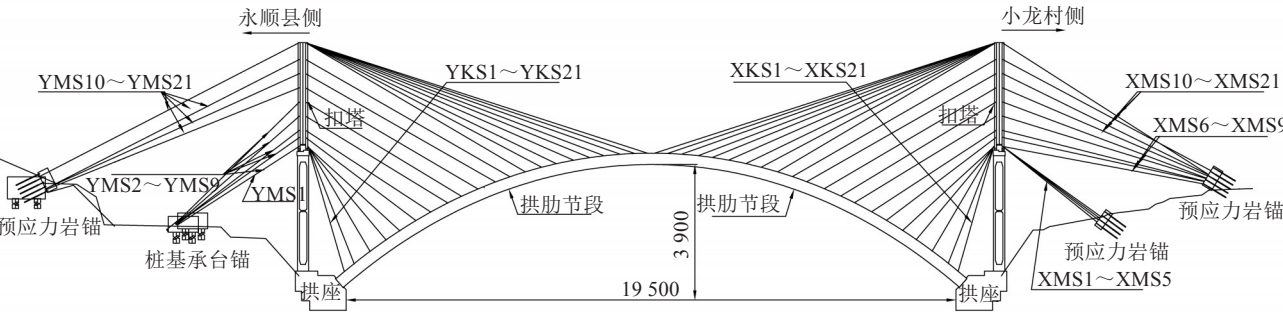


图2 牛路河特大桥扣锚索布置(单位: cm)

Fig. 2 Arrangement of buckle and anchor cables of the Niuluhe Bridge (unit:cm)

2.2 有限元建模

拱圈预制采用C50混凝土,建模采用梁单元模拟。扣、锚索采用 $\phi 15.24$ 高强度低松弛strand1860钢绞线,利用面积等效的原则将截面换算成实心圆形截面,扣、锚索采用Ernst公式修正弹性模量的梁单元模拟。拱脚采用一般支承模拟,封拱脚前约束除 $R_y$ 外的所有自由度,封拱脚后约束所有自由度。扣索与拱圈采用刚臂连接,扣塔与交界墩采用刚臂连接,拱圈节段之间由三腹板和胶接缝横隔板组成。考虑胶接缝横隔板滞后浇筑,利用Midas/Civil软件模拟施工阶段联合截面。牛路

河特大桥有限元模型如图3所示。

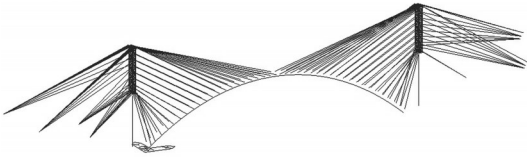


图3 牛路河特大桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the Niuluhe Bridge

2.3 施工阶段的划分

牛路河特大桥主拱圈采用整体截面预制吊装拼接,保证当前节段吊装完成时,扣、锚索张拉到设计施工索力。具体的施工阶段划分见表2。

表2 施工阶段划分

Table 2 Division of construction stages

施工阶段	施工内容	施工阶段	施工内容
1	施工扣塔, 吊装 1 <sup>#</sup> 节段, 张拉 1 <sup>#</sup> 扣、锚索	21	吊装 13 <sup>#</sup> 节段, 张拉 13 <sup>#</sup> 扣、锚索
2	吊装 2 <sup>#</sup> 节段, 张拉 2 <sup>#</sup> 扣、锚索	22	浇筑 11 <sup>#</sup> 、12 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
3	吊装 3 <sup>#</sup> 节段, 张拉 3 <sup>#</sup> 扣、锚索	23	吊装 14 <sup>#</sup> 节段, 张拉 14 <sup>#</sup> 扣、锚索
4	浇筑 1 <sup>#</sup> 、2 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	24	浇筑 12 <sup>#</sup> 、13 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
5	吊装 4 <sup>#</sup> 节段, 张拉 4 <sup>#</sup> 扣、锚索	25	吊装 15 <sup>#</sup> 节段, 张拉 15 <sup>#</sup> 扣、锚索
6	浇筑 2 <sup>#</sup> 、3 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	26	浇筑 13 <sup>#</sup> 、14 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
7	吊装 5 <sup>#</sup> 节段, 张拉 5 <sup>#</sup> 扣、锚索	27	吊装 16 <sup>#</sup> 节段, 张拉 16 <sup>#</sup> 扣、锚索
8	浇筑 3 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	28	浇筑 14 <sup>#</sup> 、15 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
9	吊装 6 <sup>#</sup> 节段, 张拉 6 <sup>#</sup> 扣、锚索	29	浇筑 15 <sup>#</sup> 、16 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
10	浇筑 4 <sup>#</sup> 、5 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	30	拱脚固结, 体系转换
11	浇筑 5 <sup>#</sup> 、6 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	31	吊装 17 <sup>#</sup> 节段, 张拉 17 <sup>#</sup> 扣、锚索
12	吊装 7 <sup>#</sup> 节段, 张拉 7 <sup>#</sup> 扣、锚索	32	吊装 18 <sup>#</sup> 节段, 张拉 18 <sup>#</sup> 扣、锚索
13	吊装 8 <sup>#</sup> 节段, 张拉 8 <sup>#</sup> 扣、锚索	33	吊装 19 <sup>#</sup> 节段, 张拉 19 <sup>#</sup> 扣、锚索
14	吊装 9 <sup>#</sup> 节段, 张拉 9 <sup>#</sup> 扣、锚索	34	浇筑 17 <sup>#</sup> 、18 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
15	浇筑 7 <sup>#</sup> 、8 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	35	吊装 20 <sup>#</sup> 节段, 张拉 20 <sup>#</sup> 扣、锚索
16	吊装 10 <sup>#</sup> 节段, 张拉 10 <sup>#</sup> 扣、锚索	36	浇筑 18 <sup>#</sup> 、19 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
17	浇筑 8 <sup>#</sup> 、9 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	37	吊装 21 <sup>#</sup> 节段, 张拉 21 <sup>#</sup> 扣、锚索
18	浇筑 9 <sup>#</sup> 、10 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板	38	浇筑 18 <sup>#</sup> 、19 <sup>#</sup> 节段之间和 19 <sup>#</sup> 、20 <sup>#</sup> 节段之间胶接缝横隔板
19	吊装 11 <sup>#</sup> 节段, 张拉 11 <sup>#</sup> 扣、锚索	39	合龙段施工
20	吊装 12 <sup>#</sup> 节段, 张拉 12 <sup>#</sup> 扣、锚索	40	分级拆除扣、锚索

2.4 计算结果

2.4.1 扣索力的上、下限值分析

根据牛路河特大桥有限元模型的计算结果,可以得到应力影响矩阵 $[C_i^a]$ 和 $[C_i^b]$ ,以及自重荷载作用下应力列向量 $[\sigma_{gi}^a]$ 和 $[\sigma_{gi}^b]$ 。

由于牛路河特大桥主拱圈的对称性,因此,只考虑永顺县侧的结果。按照图1所示的计算流程,求得扣索力的上、下限值结果,见表3。

表3 扣索力的上、下限值

Table 3 Upper and lower limits of buckle force kN					
扣索编号	上限值	下限值	扣索编号	上限值	下限值
YKS1	650.64	500.32	YKS12	781.95	663.49
YKS2	732.33	371.34	YKS13	996.14	854.54
YKS3	735.16	265.01	YKS14	885.73	766.83
YKS4	655.73	234.68	YKS15	1 225.01	1051.23
YKS5	680.45	244.30	YKS16	987.44	848.48
YKS6	842.41	220.43	YKS17	1 595.00	1106.42
YKS7	896.35	225.28	YKS18	1 125.00	713.85
YKS8	776.97	423.17	YKS19	1626.59	1016.30
YKS9	832.24	670.68	YKS20	1261.56	844.89
YKS10	909.63	581.15	YKS21	1369.65	850.25
YKS11	1169.45	964.58	—	—	—

注:表格中的索力为单束索力,每个拱肋节段上有两束扣索。

由表3可知:

1) 后续的扣索比前面的扣索承担的力变大。这是由于进行吊装时,将扣索的水平夹角变小,需要更大的扣索力来提供弹性支撑。

2) 从5<sup>#</sup>节段开始,拱肋奇数节段的重量大于相邻偶数节段的,9<sup>#</sup>和10<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>和16<sup>#</sup>、18<sup>#</sup>和19<sup>#</sup>之间的重量差值达到67.1 t,导致从第6根扣索开始,扣索力的上、下限值变化规律呈现先同时增大后同时减小再同时增大的循环过程。

3) 可行域中的上、下限范围从第6根扣索开始变小,最小的上、下限差值出现在12<sup>#</sup>和14<sup>#</sup>扣索,差值为118 kN。这主要是因为控制截面数量增多,能满足已吊装完节段控制截面拉应力减少,符合算例的实际情况。

经过3次迭代,满足迭代终止条件一。以永顺县侧为例,优化前、后的扣索力值见表4。

2.4.2 各施工阶段主拱圈截面最大应力值分析

施工过程中的拉应力直接关系到拱圈结构的安全,而且设置的迭代条件都与拱圈节段上、下缘拉、压应力有联系。因此,更关注索力以计算后拱圈截面的拉、压应力大小。拱圈截面优化前、后的各施工阶段的最大应力值结果见表5。

表 4 优化前后的扣索力值对比

Table 4 Comparison of buckle force values before and after optimization

kN

扣索编号	优化前	优化后	扣索编号	优化前	优化后	扣索编号	优化前	优化后
YKS1	575.48	590.32	YKS8	600.07	602.57	YKS15	1138.10	1090.03
YKS2	551.83	562.38	YKS9	751.46	710.61	YKS16	917.96	890.27
YKS3	500.08	522.57	YKS10	745.39	700.22	YKS17	1350.71	1250.64
YKS4	445.21	463.21	YKS11	1067.02	1005.85	YKS18	919.42	924.55
YKS5	462.38	455.33	YKS12	722.72	725.44	YKS19	1321.45	1295.24
YKS6	531.42	510.57	YKS13	925.34	895.33	YKS20	1053.23	1075.34
YKS7	560.82	545.68	YKS14	826.28	810.64	YKS21	1109.95	1090.27

表 5 各施工阶段主拱圈截面最大应力值

Table 5 Maximum stress values of main arch ring section in each construction stage

MPa

优化前			优化后			优化前			优化后		
施工阶段	最大拉应力	最大压应力	施工阶段	最大拉应力	最大压应力	施工阶段	最大拉应力	最大压应力	施工阶段	最大拉应力	最大压应力
1	0.161	−0.095	1	0.165	−0.099	21	0.729	−2.880	21	0.655	−3.181
2	0.236	−0.258	2	0.221	−0.247	22	0.639	−2.959	22	0.535	−3.260
3	0.134	−0.304	3	0.125	−0.277	23	0.899	−3.202	23	0.827	−3.522
4	0.110	−0.293	4	0.143	−0.285	24	0.684	−3.286	24	0.594	−3.607
5	0.053	−0.359	5	0.369	−0.409	25	1.053	−3.622	25	0.937	−3.994
6	0.074	−0.403	6	0.103	−0.453	26	0.817	−3.709	26	0.700	−4.081
7	0.014	−0.574	7	0.013	−0.540	27	1.140	−3.961	27	1.033	−4.36
8	0.016	−0.575	8	0.015	−0.541	28	0.928	−4.050	28	0.785	−4.448
9	0.213	−0.703	9	0.178	−0.676	29	0.821	−4.149	29	0.711	−4.547
10	0.239	−0.709	10	0.203	−0.683	30	0.821	−4.149	30	0.711	−4.547
11	0.180	−0.723	11	0.160	−0.697	31	0.722	−4.141	31	0.536	−4.807
12	0.063	−1.175	12	0.058	−1.212	32	0.642	−4.215	32	0.596	−4.940
13	0.289	−1.440	13	0.292	−1.473	33	0.721	−4.397	33	0.686	−5.065
14	0.399	−1.730	14	0.304	−1.828	34	0.652	−4.410	34	0.625	−5.170
15	0.322	−1.773	15	0.268	−1.871	35	0.953	−5.210	35	0.955	−5.210
16	0.771	−1.851	16	0.612	−2.019	36	0.834	−5.241	36	0.813	−5.317
17	0.533	−1.910	17	0.451	−2.078	37	1.226	−6.105	37	1.204	−5.741
18	0.491	−1.993	18	0.394	−2.161	38	1.329	−6.240	38	1.304	−5.875
19	0.713	−2.278	19	0.516	−2.541	39	1.435	−6.452	39	1.409	−6.116
20	0.708	−2.551	20	0.586	−2.221						

注：表格中的拉应力为正，压应力为负。

由表 5 可知，从第 7 个施工阶段开始，优化后的各施工阶段拱圈的最大拉应力明显减小，在第 19 个施工阶段，最大拉应力减小值为 0.197 MPa，降幅达到 28%。施工过程中，拱圈最大拉应力和最大压应力出现在第 39 个施工阶段。浇筑合龙段混凝土时，拱脚下缘产生最大拉应力 1.409 MPa，小龙村侧 1# 节段上缘产生最大压应力 6.116 MPa，但均小于设计容许拉、压应力值，具有较大的安

全储备，且大多数节点接近于“零”拉应力状态。表明：拱圈弯矩很小，不会出现开裂现象，可满足施工控制的要求，能达到施工控制的目标。

3 结论

以悬拼钢筋混凝土拱桥的扣索索力对拱圈的应力影响为切入点，以拱肋施工过程中应力不超

过容许拉应力为目标,推导出了确定拱桥斜拉扣挂施工扣、锚索力的方法。以牛路河特大桥为实例,采用桥梁结构分析软件,检验了该方法的正确性和计算效率,得到以下结论:

1) 基于影响矩阵和应力平衡方程,确定扣索力的可行域,保证扣索力在合理范围内,确保拱圈在施工过程中拉应力不超过设计容许拉应力值。再通过设置合理目标,迭代求解,得到满足施工控制要求的最优施工扣索力。

2) 在悬臂拼装过程中,扣索力较为均匀,拱圈最大拉应力为1.409 MPa,小于设计容许拉应力值。扣、锚索只需一次张拉,提高了工作效率,降低了施工风险,证明了该方法的可行性。可为采用悬臂施工法的混凝土拱桥施工控制提供有力依据,也可以用来确定斜拉桥施工索力。

3) 通过水平力相等的原则确定锚索力,确保扣塔在施工过程中不会出现过大的不平衡水平分力,保证施工安全。

### 参考文献(References):

- [1] TIAN Z C, PENG W P, ZHANG J R, et al. Determination of initial cable force of cantilever casting concrete arch bridge using stress balance and influence matrix methods [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(11): 3140-3155.
- [2] 梅盖伟,张勇,高维.拱桥缆索吊装法施工中索力计算方法探讨[J].重庆建筑,2012,11(10):42-44. (MEI Gaiwei, ZHANG Yong, GAO Wei. Calculation method of cable force of arch bridge in cable-hoisting construction[J]. Chongqing Architecture, 2012, 11(10): 42-44. (in Chinese))
- [3] 张玉平,李传习,董创文.“零弯矩法”应用于斜拉扣挂索力确定的讨论[J].长沙交通学院学报,2004,20(1):15-18. (ZHANG Yuping, LI Chuanxi, DONG Chuangwen. Discussion on “zero moment method” in the Cable calculation of cable-stay[J]. Journal of Changsha Communications University, 2004, 20(1): 15-18. (in Chinese))
- [4] 刘智慧,喻光勇,乔文庭.大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装施工索力计算方法探讨[J].北方交通,2013(10):29-32. (LIU Zhihui, YU Guangyong, QIAO Wenting. The calculating method discussion on the lifting construction cable force of longspan concrete-filled steel tubes arch bridge and arch rib[J]. Northern Communications, 2013 (10): 29-32. (in Chinese))
- [5] 胡咏.大跨混凝土箱型拱桥斜拉扣挂系统与施工工艺分析研究[D].长沙:长沙理工大学,2019. (HU Yong. Analysis and research on the cable-stayed suspension system and construction technology of long-span concrete box arch bridge[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. (in Chinese))
- [6] 袁鹏,刘建.基于弹性-刚性支撑法的钢拱架预抬高值确定[J].公路与汽运,2018(6):113-115,145. (YUAN Peng, LIU Jian. Determination of pre-elevation value of steel arch based on elastic-rigid support method[J]. Highways & Automotive Applications, 2018(6): 113-115, 145. (in Chinese))
- [7] 张治成,叶贵如,王云峰.大跨度拱桥拱肋线形调整中的扣索索力优化[J].工程力学,2004,21(6):187-192. (ZHANG Zhicheng, YE Guiru, WANG Yunfeng. Optimization of stayed-buckle cable forces during adjustment of the line-shape on long span arch bridge[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 187-192. (in Chinese))
- [8] 徐岳,展丙来,李扬,等.钢管混凝土拱桥斜拉扣挂施工扣索索力的优化计算方法[J].公路交通科技,2016,33(6):61-67. (XU Yue, ZHAN Binglai, LI Yang, et al. An optimum calculation method of cable force of CFST arch bridge in inclined cable hoisting construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(6): 61-67. (in Chinese))
- [9] 徐岳,申成岳,朱谊彪,等.确定拱桥斜拉扣挂施工扣索张力的改进迭代算法[J].桥梁建设,2016,46(2):65-69. (XU Yue, SHEN Chengyue, ZHU Yibiao, et al. Improved iteration algorithm for determination of tension of fastening stays for cantilever construction of arch bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(2): 65-69. (in Chinese))
- [10] 韩玉,秦大燕,郑健.CFST拱桥斜拉扣挂施工优化计算方法[J].公路,2018,63(1):100-104. (HAN Yu, QIN Dayan, ZHENG Jian. Optimization calculation method of CFST arch bridge cable-stayed buckling construction[J]. Highway, 2018, 63(1): 100-104. (in Chinese))
- [11] 涂光亚,孙盛,颜东煌,等.钢管混凝土拱桥最大悬臂合理施工状态的确定方法[J].公路,2019(9):159-163. (TU Guangya, SUN Sheng, YAN Donghuang, et al. Method for determining the reasonable construction state of the maximum cantilever of CFST arch bridge[J]. Highway,



- 2019,64(9):159-163.(in Chinese))
- [12] 周银,张雪松,丁艳超.无应力状态法在大跨径拱桥施工中的应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(8): 6-10, 74. (ZHOU Yin, ZHANG Xuesong, DING Yanchao. Application of stress-free state method in long-span arch bridge construction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(8): 6-10, 74. (in Chinese))
- [13] 周倩,周建庭,马虎,等.钢管拱肋分段吊装扣索一次张拉索力改进算法[J].交通运输工程学报,2020,20(1):92-101. (ZHOU Qian, ZHOU Jianting, MA Hu, et al. Improved algorithm of cable force for one-Time cable tensioning on steel tube arch ribs with segmental hoisting [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020,20(1):92-101. (in Chinese))
- [14] 刘宇飞,李传习,于孟生,等.大跨拱桥拱肋拼装温差效应分析及控制方法[J].交通科学与工程,2020,36(1):63-69. (LIU Yufei, LI Chuanxi, YU Mengsheng, et al. Analysis and control method of temperature difference effect in arch rib assembly of large span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020,36(1):63-69. (in Chinese))
- [15] 卓小丽.悬拼钢筋混凝土箱拱合理施工索力与拱轴线的优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2015. (ZHUO Xiaoli. Research on reasonable construction and the optimization of arch axis in reinforced concrete box arch with cantilever method[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese))
- [16] 朱华栋.200 m跨钢筋混凝土拱箱节段预制拼装构形控制及施工索力优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2016. (ZHU Huadong. The research on 200 m span reinforced concrete box arch segmental prestressed assembly configuration control and construction of cable force optimization[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016. (in Chinese))
- [17] 胡大琳,陈定市,赵小由,等.大跨径钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑施工控制[J].交通运输工程学报,2016,16(1):25-36. (HU Dalin, CHEN Dingshi, ZHAO Xiaoyou, et al. Construction control of cantilever casting of long span reinforced concrete arch bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 25-36. (in Chinese))

---

(上接第12页)

- Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [16] 李九苏,唐旭光.土木工程材料[M].长沙:中南大学出版社,2009. (LI Jiusu, TANG Xuguang. Civil engineering materials [M]. Changsha: Central South University Press, 2009.(in Chinese))
- [17] 邹桂莲,秦欢,鄢然,等.基于黏弹特性的SBS改性沥青多次再生效果评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(7): 75-82.(ZOU Guilian,QIN Huan,YAN Ran,et al.Effect evaluation of multiple recycled SBS modified asphalt based on viscoelastic properties[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2019,47(7):75-82.(in Chinese))