

柔性组合结构的大挠度非线性 有限元分析

裘春航 骆敏 陈勤
(大连理工大学)

摘 要

本文应用预应力柔性索的非线性有限元模型,用折算弹性模量考虑索初始垂度的影响,引入主—从控制原理来克服柔性元素和刚性元素共同作用时易产生的方程病态,在结构变位后的基础上建立平衡方程,采用带有动坐标的刚度矩阵迭代法,分析了斜拉桥、悬索桥等柔性组合结构的大挠度问题。应用本文方法,已经成功地分析了多座斜拉桥实际结构。对于一般柔性组合结构,经过二至六次迭代即可达到相当的精度。

关键词: 柔性组合结构, 大挠度非线性, 刚性、柔性元素, 迭代法

一、概 述

斜拉桥结构的分析,绝大部分均采用经典的线性小位移理论^[6]。事实上,斜拉桥是一种高次超静定的柔性组合结构,即使在正常荷载下,荷载——变形也呈非线性关系,属于几何非线性问题。斜拉桥结构分析的难点主要表现在:第一,索柔性产生大变形,从而也导致主梁的大变位;第二,自重引起的索的初始垂度;第三,刚性元素和柔性元素共同作用,易产生方程病态;第四,梁—柱效应。

本文中,我们用单维直线段有限元模型,用变分原理导出索的几何刚度阵,并在结构变位后的位置建立平衡方程来考虑索及主梁的大变位;用折算弹性模量考虑索的初始垂度影响;对于梁柱效应,根据文献^[6]引入修正系数;利用节点位移间的主—从控制原理,预先找到的约束函数的显式关系,得到一个无约束的非线性方程组,消去了可能产生的方程病态,利用带有动坐标的刚度矩阵迭代法即可求解。

借助本文提出的方法,不仅可以求解斜拉桥结构,而且也可以分析诸如悬索桥、索桁架,索梁等工程实际结构。文中给出了不少有关例题。

二、预应力索的几何非线性刚度阵

索在不受力状态时形状是不定的,必须有一个固定的受力状态,这个固定的受力状态我

们称之为基准态。拿其余的荷载状态和基准态进行比较,也可以求得确定的荷载和状态,这个状态我们称之为荷载态。本文中我们将基准态选为具有确定的初张力 N_0 , 不存在外载, 索的形状是直线的情况。这样选是符合工程背景的, 因为斜拉桥等在施工时拉索具有很大的初张力。

自重引起索的初始垂度, 将损失部分弹性模量。设索的弹性模量为 E_s , 索单元弦线长度为 l , 则索的折算弹性模量为

$$E = \frac{E_s}{1 + \gamma^2 l^2 A^3 E_s / 12 N^3} \quad (2.1)$$

其中 γ 为索的单位容积重, A 为截面积, N 为索张力。

设单元内参照局部坐标系 xyz 的位移 $[uvw]^T$ 由单元节点位移 $\mathbf{u}$ 描述:

$$\mathbf{u} = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad u_j \quad v_j \quad w_j]^T \quad (2.2)$$

如图 1 所示的单元, 有应变

$$e = \frac{u_j - u_i}{l} + \frac{(v_j - v_i)^2 + (w_j - w_i)^2}{2l^2} \quad (2.3)$$

其中 l 为单元的长度。

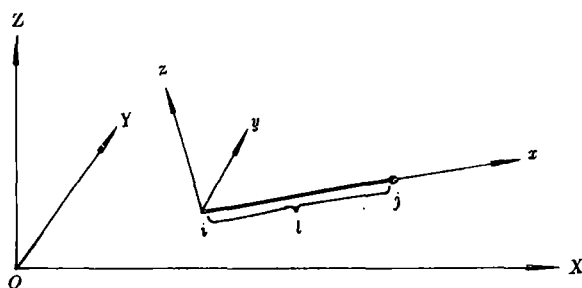


图 1

内力应变关系和应变能密度 ω 分别为

$$\left. \begin{aligned} N - N_0 &= EA(e - e_t) \\ \omega &= \frac{1}{2}EA(e - e_t)^2 + N_0(e - e_t) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

在这里, e_t 是由温度改变所产生的应变, $e_t = \alpha \Delta T$, α 是热膨胀系数, ΔT 是温度改变值。

假设 q_1 、 q_2 、 q_3 为作用在单元内的荷载强度在 x 、 y 、 z 方向的分量, 则外力功为

$$W_{\text{外}} = \int_0^l (q_1 u + q_2 v + q_3 w) dx \quad (2.5)$$

总势能为

$$\Pi = \int_0^l \left[\frac{1}{2}EA(e - e_t)^2 + N_0(e - e_t) - (q_1 u + q_2 v + q_3 w) \right] dx \quad (2.6)$$

假设位移函数和荷载强度函数均为线性变化, 则有

$$\left. \begin{aligned} u &= u_i + (u_j - u_i) \cdot x/l \\ v &= v_i + (v_j - v_i) \cdot x/l \\ w &= w_i + (w_j - w_i) \cdot x/l \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_{1i} + (q_{1j} - q_{1i}) \cdot x/l \\ q_2 &= q_{2i} + (q_{2j} - q_{2i}) \cdot x/l \\ q_3 &= q_{3i} + (q_{3j} - q_{3i}) \cdot x/l \end{aligned} \right\}$$

代入式 (2. 6) 并积分后得到

$$\begin{aligned} \Pi &= \left[\frac{1}{2} EAe^2 + N_0 e \right. \\ &\quad - \frac{1}{6} (2q_{1i}u_i + 2q_{1j}u_j + q_{1i}u_j + q_{1j}u_i) \\ &\quad - \frac{1}{6} (2q_{2i}v_i + 2q_{2j}v_j + q_{2i}v_j + q_{2j}v_i) \\ &\quad \left. - \frac{1}{6} (2q_{3i}w_i + 2q_{3j}w_j + q_{3i}w_j + q_{3j}w_i) \right] l \end{aligned} \quad (2.8)$$

上式中我们未计及温度变化产生的应变。对式 (2. 8) 以节点位移为独立未知量取变分有

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= \frac{2\Pi}{2u_i} \delta u_i + \frac{\partial \Pi}{\partial u_j} \delta u_j + \frac{\partial \Pi}{\partial v_i} \delta v_i \\ &\quad + \frac{2\Pi}{2v_j} \delta v_j + \frac{2\Pi}{2w_i} \delta w_i + \frac{2\Pi}{2w_j} \delta w_j \end{aligned} \quad (2.9)$$

今有

$$\frac{\partial \Pi}{\partial e} = l \left[EA \left(\frac{u_j - u_i}{l} + \frac{(v_j - v_i)^2 + (w_j - w_i)^2}{2l^2} \right) + N_0 \right] \quad (2.10)$$

由于有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial u_i} &= \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial u_i} - \frac{1}{6} (2q_{1i} + q_{1j}) = \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial u_i} - Q_{1i} \\ \frac{\partial \Pi}{\partial u_j} &= \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial u_j} - \frac{1}{6} (2q_{1j} + q_{1i}) = \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial u_j} - Q_{1j} \\ \frac{\partial \Pi}{\partial v_i} &= \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial v_i} - \frac{1}{6} (2q_{2i} + q_{2j}) = \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial v_i} - Q_{2i} \\ \frac{\partial \Pi}{\partial v_j} &= \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial v_j} - \frac{1}{6} (2q_{2j} + q_{2i}) = \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial v_j} - Q_{2j} \\ \frac{\partial \Pi}{\partial w_i} &= \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial w_i} - \frac{1}{6} (2q_{3i} + q_{3j}) = \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial w_i} - Q_{3i} \\ \frac{\partial \Pi}{\partial w_j} &= \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial w_j} - \frac{1}{6} (2q_{3j} + q_{3i}) = \frac{\partial \Pi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial w_j} - Q_{3j} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

以式 (2. 3) 我们可以有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial u_i} &= -\frac{1}{l}, \quad \frac{\partial e}{\partial u_j} = \frac{1}{l} \\ \frac{\partial e}{\partial v_i} &= \frac{1}{l^2} (v_i - v_j), \quad \frac{\partial e}{\partial v_j} = \frac{1}{l^2} (v_j - v_i) \\ \frac{\partial e}{\partial w_i} &= \frac{1}{l^2} (w_i - w_j), \quad \frac{\partial e}{\partial w_j} = \frac{1}{l^2} (w_j - w_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

因此式 (2. 9) 的展开形式为

$$\delta \Pi = l \left[EA \left(\frac{u_j - u_i}{l} + \frac{(v_j - v_i)^2 + (w_j - w_i)^2}{2l^2} \right) + N_0 \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{1}{l}\delta u_i + \frac{1}{l}\delta u_j + \frac{v_i - v_j}{l^2}\delta v_i + \frac{v_j - v_i}{l^2}\delta v_j \right. \\ & \left. + \frac{w_i - w_j}{2l^2}\delta w_i + \frac{w_j - w_i}{2l^2}\delta w_j \right) - Q_{1i}\delta u_i \\ & - Q_{1j}\delta u_j - Q_{2i}\delta v_i - Q_{2j}\delta v_j - Q_{3i}\delta w_i - Q_{3j}\delta w_j \end{aligned} \quad (2.13)$$

写成矩阵形式有

$$\delta\pi = (\delta\mathbf{u})^T \mathbf{K}\mathbf{u} - (\delta\mathbf{u})^T (\mathbf{Q} + \mathbf{Q}^{(0)}) \quad (2.14)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} (\delta\mathbf{u})^T &= [\delta u_i, \delta v_i, \delta w_i, \delta u_j, \delta v_j, \delta w_j] \\ \mathbf{Q} &= [Q_{1i}, Q_{2i}, Q_{3i}, Q_{1j}, Q_{2j}, Q_{3j}] \\ \mathbf{Q}^{(0)} &= [N_o, 0, 0, -N_o, 0, 0] \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

$\mathbf{Q}$ 为单元内荷载所对应的等效节点荷载向量, $\mathbf{Q}^{(0)}$ 为初始张力所对应的等效节点荷载向量, $\mathbf{K}$ 为单元的出口刚度矩阵, 可进一步表求为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{K}}_* + \tilde{\mathbf{K}}_*) & -(\bar{\mathbf{K}}_* + \tilde{\mathbf{K}}_*) \\ -(\bar{\mathbf{K}}_* + \tilde{\mathbf{K}}_*) & (\bar{\mathbf{K}}_* + \tilde{\mathbf{K}}_*) \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (2.16)$$

其中

$$\bar{\mathbf{K}}_* = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 \\ & N_o/l & 0 \\ \text{对称} & & N_o/l \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

为单刚的线性部分, 是常数矩阵, 而

$$\tilde{\mathbf{K}}_* = \begin{bmatrix} 0 & EA(v_j - v_i)/2l^2 & EA(w_j - w_i)2l^2 \\ EA[(u_j - u_i)/2l^2 + (v_j - v_i)^2/2l^3 & & EA(v_j - v_i)(w_j - w_i)/3l^3 \\ + (w_j - w_i)^2/6l^3] & & \backslash \\ \text{对称} & & EA[u_j - u_i)/2l^2 + (w_j - w_i)^2/2l^3 \\ & & + (v_j - v_i)^2/6l^3] \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

是单刚的非线性部分, 和位移有关。以上式中的 E 就是式 (2.1) 表示的折算弹性模量。

三. 包含主—从关系的刚度矩阵迭代法

引入节点位移间的主—从控制关系, 给构造计算模型带来很大的效益和灵活性, 同时也减少了求解未知数的数目, 并可避免不必要的联立方程病态等⁽¹⁾。

对于具有大变位的柔性组合结构, 必须在结构变位后的位置建立平衡方程。这样, 就需要构造一个迭代过程。对第 m 次迭代, 应根据上一次的位移, 对每一节点 j , 重新生成

- (1) 节点坐标 $x_j^{(m)}, y_j^{(m)}, z_j^{(m)}$;
- (2) 位移的主—从关系变换矩阵 $\tau_j^{(m)}$

$$\delta_j^{(m)} = \tau_j^{(m)} d_{ij}^{(m)} \quad (3.1)$$

式中, $\delta_j^{(m)}$ 表示某一单元第 j 个出口点的位移向量, $d_{ij}^{(m)}$ 是这一节点的控制位移向量, i_j 为同一

节点 j 在结构中的编号。每一节点可有三个线位移 u, v, w 和三个角变位 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 。显然, 当 j 号节点有从属(非独立)位移时, $d_i^{(m)}$ 中包含控制这些从属位移的其它主节点的独立位移。由于允许有多重主—从关系 $d_i^{(m)}$ 可由不同节点的独立位移组成。

在我们程序系统中, 有下列三种坐标系:

(1) 单元局部坐标系 $\delta_i^{(m)}$ 及相应的单元刚度阵系数参照这类坐标系;

(2) 相对坐标系为便于结构模型化, 允许不同节点的位移参照不同的坐标系。这样, 实际上就存在一个相对坐标系集合。例如, 对于 $d_i^{(m)}$ 的位移分量可参照各自的相对坐标系。

(3) 绝对坐标系通常用来描写节点的坐标和大部分节点位移的参照方向, 它只是一个特殊的相对坐标系。

对于第 m 次迭代, 整个结构的总势能为:

$$\Pi^{(m)} = \frac{1}{2} [D^{(m)}]^T K^{(m)} D^{(m)} - [P]^T D^{(m)} \quad (3.2)$$

其中, $D^{(m)}$ 为参照相对坐标系集合的结构总独立位移向量, 它由 $d_i^{(m)}$ 累加而成; $K^{(m)}$ 为相应的总刚度阵; P 为作用在节点上的等效外力向量, P 的分量值不变, 只是其作用点坐标随迭代过程被拖动。

令 $\delta_e^{(m)}$, $d_e^{(m)}$ 和 $\tau_e^{(m)}$ 分别为某一具有 n 个出口节点的单元的位移向量、相应的控制位移向量和其间的主—从关系变换矩阵, 即

$$\delta_e^{(m)} = \begin{Bmatrix} \delta_1^{(m)} \\ \vdots \\ \delta_j^{(m)} \\ \vdots \\ \delta_n^{(m)} \end{Bmatrix} \quad d_e^{(m)} = \begin{Bmatrix} d_1^{(m)} \\ \vdots \\ d_j^{(m)} \\ \vdots \\ d_n^{(m)} \end{Bmatrix} \quad \tau_e^{(m)} = \begin{bmatrix} \tau_1^{(m)} & & \\ & \ddots & \\ & & \tau_j^{(m)} & \\ & & & \ddots \\ & & & & \tau_n^{(m)} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

则由式 (3.1) 可得

$$\delta_e^{(m)} = \tau_e^{(m)} d_e^{(m)} \quad (3.4)$$

这样, $\pi^{(m)}$ 中的应变能部分可改写成

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} [D^{(m)}]^T K^{(m)} D^{(m)} &= \frac{1}{2} \sum_e [\delta_e^{(m)}]^T k_e^{(m)} \delta_e^{(m)} \\ &= \frac{1}{2} \sum_e [d_e^{(m)}]^T [\tau_e^{(m)}]^T k_e^{(m)} \tau_e^{(m)} d_e^{(m)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

此即表明, 只需把 $[\tau_e^{(m)}]^T k_e^{(m)} \tau_e^{(m)}$ 的元素, 按单元累加到总刚度阵结构的相应位置上, 即可获得供第 m 次迭代用的总刚度 $k^{(m)}$ 的元素。

在一般的情况下, 节点位移的主—从关系变换矩阵 $\tau_j^{(m)}$ 的形成, 是由坐标变换、提取变换和刚臂变换等组成的循环递推过程, 已完全在程序中实现。为明确起见, 现给出一种典型情况: 设节点 i_j (该节点在单元中的局部编号为 j) 和主节点 l 均由 6 个位移, 其分量的次序依次为 $u, v, w, \theta_x, \theta_y$ 和 θ_z ; 并设 i_j 的这 6 位移直接 (单重主—从关系) 按刚体运动规则受主节点 l 的位移控制。此时, 我们有

$$\tau_j^{(m)} = T_{i_j, l} \quad R_{i_j, l}^{(m)} \quad T_{e, i_j} \quad (3.6)$$

式中, $T_{i_j, l}$ 为 i_j 号节点所参照的相对坐标系到局部坐标系的变换阵, T_{e, i_j} 为 l 号节点所参照的相

对坐标系到 i_j 号节点所参照的相对坐标系的变换阵, $R_{i_j}^{(m)}$ 为 i_j 号节点与 l 号节点间的刚臂变换阵

$$R_{i_j}^{(m)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \bar{z}_{i_j}^{(m)} - \bar{z}_l^{(m)} & \bar{y}_l^{(m)} - \bar{y}_{i_j}^{(m)} \\ 0 & 1 & 0 & \bar{z}_l^{(m)} - \bar{z}_{i_j}^{(m)} & 0 & \bar{x}_{i_j}^{(m)} - \bar{x}_l^{(m)} \\ 0 & 0 & 1 & \bar{y}_{i_j}^{(m)} - \bar{y}_l^{(m)} & \bar{x}_l^{(m)} - \bar{x}_{i_j}^{(m)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

其中, $\bar{x}_{i_j}^{(m)}$, $\bar{y}_{i_j}^{(m)}$, $\bar{z}_{i_j}^{(m)}$ 和 $\bar{x}_l^{(m)}$, $\bar{y}_l^{(m)}$, $\bar{z}_l^{(m)}$ 分别表示第 m 次迭代时节点 i_j 和 l 的坐标。这 6 个坐标都是在 i_j 号节点所参照的相对坐标系中描写的。

按最小总势能原理, 结构的真实变位应使 (3. 2) 式对独立位移的变分为零, 由此可得相应第 m 次迭代的正则方程及解

$$K^{(m)} D^{(m)} = P \quad D^{(m)} = [K^{(m)}]^{-1} P \quad (3.8)$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots)$$

这样, 首先求出对应于结构初始位置的独立位移向量

$$D^{(0)} = [K^{(0)}]^{-1} P \quad (3.9)$$

然后, 在绝对坐标系下重新形成节点坐标

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + u_i^{(0)}, y_i^{(1)} = y_i^{(0)} + v_i^{(0)}, z_i^{(1)} = z_i^{(0)} + w_i^{(0)} \quad (3.10)$$

以及相应于这些坐标的单刚 K_e 、主—从关系变换阵 $\tau_e^{(1)}$ 和总刚 $K^{(1)}$ 等, 再通过 (3. 8) 式求出 $D^{(1)}$ 。这种迭代过程一直可以进行下去, 直到

$$\|D^{(m+1)} - D^{(m)}\| \leq \text{指定允许误差} \quad (3.11)$$

为止。

四、例题及结果分析

首先求解一个纯索结构。

例 1 如图 2 为二根相互正交的悬索 AB 和 $A'B'$, 相交于 D 。截面积为 1cm^2 , 初始张力 N_0 为 1200kg 。在最后态时, DB 索中点 E 承受垂直荷载 $Q = 50\text{kg}$ 。已知: $E = 2.0 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$, $A'B' = 30\text{m}$, $AB = 20\text{m}$ 。求最后态时 D 点的垂直变位 Δ , 水平变位 h , E 点的垂直变位 w , 及 AB , $A'B'$ 两索中的张力 N_{AB} 、 $N_{A'B'}$

经过 6 次迭代, 结果列于表 1。文献^[3]是和本文不同的方法, 用经典理论求解。

表 1:

(单位: m, kg)

	Δ	h	w	$N_{A'B'}$	N_{AB}
本 文	0.05668	0.0806×10^{-2}	0.1179	1214.3	1393.5
文 献 ^[3]	0.0570	0.0806×10^{-2}	0.1180	1214.0	1392.0
最大误差	0.56%				

表 3:

轴力	N_2	N_3	N_7	N_{12}
本 文	-28.9880	-29.1335	-23.5469	-30.5711
线 性 理 论	-24.5442	-32.0955	-20.4489	-31.7649
误 差	15.33%	10.17%	13.16%	3.90%
位移平衡方程在 变形前位置列出	-25.5179	-30.9108	-21.5920	-31.4025

以上我们列出了 4、6、7、10 点的弯矩和 2、3、7、12 号梁元轴力。从表 2. 表 3 我们可以看出，用线性理论求解，误差很大。即使是考虑了非线性因素，但如果位移平衡方程仍在变形前位置列出，误差仍很大，因此平衡方程必须要在变形后位置列出。

例 3 这是一个工程实例。某输水管斜拉桥，二管直径 1.2m，跨度 90m，图 4 是它的正视图，俯视图，索拉在连接两管用的加劲肋上的中点。整个结构柔性较大，当两管满水时，将产生较大的挠度，必须用大挠度理论进行分析。

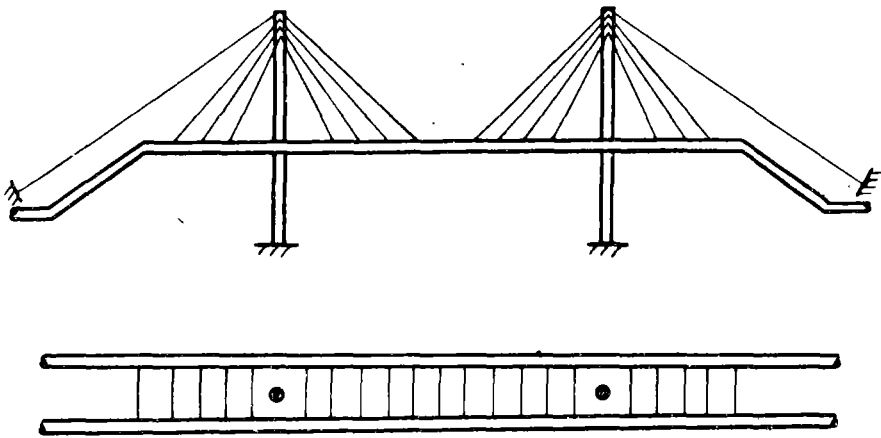


图 4

把结构分为 78 个节点，16 个预应力索单元，94 个梁元，总未知数为 416 个。经过 4 次迭代计算，求得所有位移及内力。在双管满水的情况下，计算得到的最大挠度为 12cm，塔的最大弯矩为 76t · m，最大轴力为 -167t。目前，该输水管桥已投入使用，情况良好。

例 4 如图 5 为一平面索桁架结构，四角点固支。设杆元的 $EA=15000t$ ，索的初张力 N_0 为 30t， $E=3.0 \times 10^6t/m^2$ ， $A=0.004m^2$ 。

经过 3 次迭代计算，得到杆和索的轴向力，分别列于表 4、表 5 中。

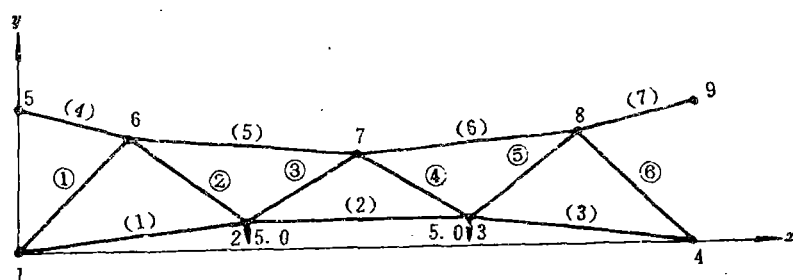


图 5

表 4:

索张力

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
27.9499	30.6322	27.9499	35.5129	28.0637	28.0637	35.5129

表 5:

杆轴力

①	②	③	④	⑤	⑥
1.4128	9.4235	4.8946	4.8946	9.4235	1.4128

五、结束语

根据本文提出的方法,我们开发了一个多单元,多工况的大挠度有限元微机分析程序,装有杆、索、梁、板、各类膜、块体等各种单元,在模型化上没有任何限制,并配有前、后处理,各种图形功能。程序实行分棒运行,各接力棒之间相互独立,实行内、外存信息交换,因此解题规模大,在微机上能求解几千个自由度结构。本软件开发以来,已成功地完成了多项实际工程的分析。

参考文献

- [1] 钟万镛, 计算结构力学微机程序设计, 水利电力出版社, 1986 年。
- [2] 裴春航, PASCAL 程序设计实用手册, 大连工学院出版社, 1986 年。
- [3] 金同鲁, 悬挂结构计算, 中国建筑工业出版社, 1975 年。
- [4] 金同鲁, 悬挂结构计算理论, 浙江科技出版社, 1981 年。
- [5] M. S. Troitsky, 斜拉桥的理论与设计, 中国铁道出版社, 1980 年。
- [6] 陈德伟, 斜张桥二阶理论实用计算, 中国土木工程学会第一次城市桥梁工程学术会议, 1987 年。

LARGE DEFLECTION NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FLEXIBLE COMPOUNDED STRUCTURE

Qiu Chunhang Lu Min Chen Qin

(*Dalian University of Technology*)

Abstract

A nonlinear finite element model is presented for the pres-tressed flexible cable which takes into account the effect of initial deflection on stiffness using a conversion modulus of elasticity. To overcome the ill-condition of stiffness matrix caused by cooperation of flexible and stiff elements, Master-Slave relations between the nodal displacements are introduced. And then a new stiffness matrix iteration method with movable nodal coordinates and Master-Slave relations is developed to analyse flexible compounded structures such as cable-stayed bridges, suspension bridges etc., in which the equilibrium equations set up for the structure subjected to deflection.

The method developed in this paper has been successfully applied to analyse many cable-stayed bridge structures in practice. Usually a satisfactory accuracy can be obtained after 2 to 6 iterations.

Keywords: Flexible compounded structure, Large deflection Nonlinear, Stiff, Flexible element, Iteration method.