

文章编号: 1000-4750(2011)09-0009-08

# 弦支穹顶环索连续贯通的摩擦问题分析

\*郭佳民<sup>1</sup>, 袁行飞<sup>2</sup>, 董石麟<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学海洋环境与工程学院, 上海 200135; 2. 浙江大学空间结构研究中心, 浙江, 杭州 310027)

**摘 要:** 在弦支穹顶结构工程中, 环索通常连续贯通。为了能够准确、便捷地分析摩擦力在贯通环索张拉成型过程中的影响, 该文利用一个 4 节点 4 单元算例, 对张拉过程中单元内力的变化与分布进行了详细的阐述, 并利用贯通环索在张拉滑动前后其无应力长度相等的原则, 提出了贯通环索在张拉过程中摩擦力的计算方法。并利用这一摩擦力的计算方法, 以摩擦系数、张拉点数、张拉力为参数对葵花 1 型与肋环 1 型弦支穹顶的环索贯通张拉成型进行了分析。分析结果表明: 由于摩擦力的存在, 当采用较少的张拉点张拉环索成型时, 葵花型与肋环型弦支穹顶结构分别会产生下部索杆内力分布不均匀、撑杆倾斜等现象。建议在实际弦支穹顶结构的张拉过程中不宜采用以较少的张拉点张拉环索成型的施工方法。

**关键词:** 弦支穹顶; 摩擦力; 无应力长度; 预应力; 索杆

**中图分类号:** TU394 **文献标志码:** A

## FRICION ANALYSIS OF CONTINUOUS HOOP CABLE IN SUSPEND-DOME

\*GUO Jia-min<sup>1</sup>, YUAN Xing-fei<sup>2</sup>, DONG Shi-lin<sup>2</sup>

(1. College of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

2. Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** Hoop cable is generally continuous in suspend-domes. To assess the influence of friction during the construction procedure of tensioning continuous hoop cable of suspend-dome, the paper utilized an example of four nodes and four elements. The change and distribution of element force during tension were examined. The method of calculating friction during tensioning continuous hoop cable was presented according to the fact that the non-stress length of the continuous hoop cable is fixed after slippage. Then, the paper analyzed the construction of sunflower 1 type and rib 1 type suspend-domes considering the change of friction coefficient, tension element and tension force. The results displays an asymmetric distribution of cable-strut force, and strut slant would occur in suspend-dome after construction by tensioning continuous hoop cable because of friction. So it is unfavorable that tensioning continuous hoop cable by fewer tension elements in the practical project.

**Key words:** suspend-dome; friction; non-stress length; prestress; cable-strut

弦支穹顶由上部的单层网壳与下部的索杆弦支部分组成, 国内外对这一新型空间结构已进行了一些理论与试验研究<sup>[1-7]</sup>。在弦支穹顶结构的张拉过程中, 为了减少张拉点的数目, 达到以最少的张拉设备张拉成型的目的, 在结构设计时, 通常将下部环索设置成一条通长的可滑动索<sup>[4-7]</sup>。2000 年,

北京交通大学的徐国彬教授在辽宁鞍山羽毛球馆项目中的弦支穹顶结构中首次采用了滑动索的形式, 节点处理比较巧妙<sup>[7]</sup>。这样设计除了可以实现上述目的外, 在结构的实际受力过程中, 还可有效地降低在实际荷载作用下结构下部索力的不均匀性, 同时也可有效地解决在张拉时由于张拉点过多

收稿日期: 2010-01-26; 修改日期: 2010-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50638050, 51108259); 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金项目

作者简介: \*郭佳民(1979—), 男, 内蒙古四子王旗人, 讲师, 博士, 从事空间结构研究与设计研究(E-mail: guojiamin@zju.edu.cn);

袁行飞(1972—), 女, 浙江舟山人, 教授, 博士, 长期从事空间结构研究与设计(E-mail: yuanxf@zju.edu.cn);

董石麟(1932—), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士, 院士, 长期从事空间结构研究与设计研究。

使张拉无法同步进行而造成张拉控制难度加大的问题。但这样的环索设计方法也存在以下几个计算上与操作上的难点<sup>[8]</sup>: 1) 由于物体与物体之间发生滑动时会或多或少地产生摩擦, 那么在计算中如何考虑产生的摩擦力, 其中包括: 静摩擦系数的选取与滑动开始时滑动摩擦系数与静摩擦系数之间的关系等; 2) 在结构的计算中既包括几何非线性又包括接触非线性, 这样会导致计算量大增; 3) 由于索与节点之间存在摩擦作用, 所以, 以较少的张拉点是否能将整条索各段都张拉到统一的内力值也是一个问题。

在以往的结构计算中, 对于这种环索形式, 在采用环索张拉成型时, 往往采用环索完全滑动的假定<sup>[4]</sup>, 而不考虑摩擦力的作用, 这样完全可以减少结构的张拉点。通过几个张拉点完全可以对结构下部环索进行预应力的施加, 但是在实际结构或试验模型中, 即使在节点上安装了滑轮, 涂抹了润滑剂也不能使结构中的环索在张拉过程中做到完全的滑动<sup>[8]</sup>。摩擦力的存在使得结构在张拉环索成型时很难做到环索完全滑动, 以较少的张拉点对环索进行预应力的施加难度较大, 这一问题在工程中也时有发生。由于计算时的假定与实际情况不符, 以往的计算结果与计算结论的实用性也需进一步研究。

## 1 摩擦问题的计算方法

文献[9-10]对体外预应力索的摩擦问题进行了研究, 并根据滑动索段的无应力索长总和不变的原则, 提出了更加准确的体外预应力索索力计算方法。但其推导的计算公式仅针对于非闭合的预应力索, 对于弦支穹顶中闭合的预应力索仍须在理论上进行完善。本文借鉴文献[10]的研究成果, 并以一个简单的算例对弦支穹顶结构环索贯通时的摩擦问题进行更加详细的研究与分析:

**问题 1.** 首先以一个 4 节点 4 单元的简单模型(如图 1)来研究最简单的一种问题, 在问题研究之前提出以下几点假定:

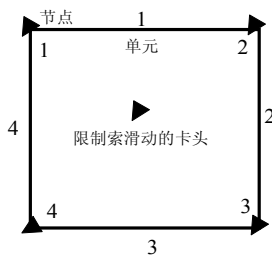


图 1 模型计算简图

Fig.1 Calculation diagram of model

- 1) 张拉过程中, 节点的坐标不发生变化。
- 2) 索在节点处不发生滑动。
- 3) 各单元的长度与截面积分别为  $L_i$  与  $A_i$ , 对结构进行张拉的张拉点布置在单元 1 上。

张拉过程中让单元 1 产生  $N^*$  的内力(本文称这一内力为虚拟内力), 则单元 1 的缩短长度为:

$$\Delta L_1 = N^* L_1 / (EA_1) \quad (1)$$

张拉完成后各单元的内力与应变结果见表 1。对张拉单元施加的预应力在张拉完成后其大小未发生变化, 其他单元的内力都为零。

表 1 张拉完成后各单元内力与应变值

Table 1 Internal force and stress of element after construction

问题	单元内力				单元应变			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	$N^*$	0	0	0	$\frac{N^*}{EA}$	0	0	0
2	$^2N^*$	$^2N^*$	$^2N^*$	$^2N^*$	$\frac{^2N^*}{EA_1}$	$\frac{^2N^*}{EA_2}$	$\frac{^2N^*}{EA_3}$	$\frac{^2N^*}{EA_4}$

**问题 2.** 在问题 1 的基础上将各个节点上限制滑动的卡头拿掉, 索可以滑动, 但不考虑滑动过程中产生的摩擦力。

将各节点的卡头拿掉之后, 结构中各单元的内力会发生重分布, 原先内力为零的单元都会产生内力, 直至最后各单元内力相等, 可表示为如下方程:

$$^j N_i = ^2 N^* \quad (2)$$

式中:  $i$  表示单元编号;  $j$  表示研究的问题编号。

张拉完成后各单元的内力与应变结果见表 1。各单元的长度变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta L_1^2 &= \frac{^2 N^*}{EA_1} L_1, & \Delta L_2^2 &= \frac{^2 N^*}{EA_2} L_2, \\ \Delta L_3^2 &= \frac{^2 N^*}{EA_3} L_3, & \Delta L_4^2 &= \frac{^2 N^*}{EA_4} L_4. \end{aligned} \quad (3)$$

问题 1 与问题 2 在张拉结束后, 其总的单元无应力长度应相等, 也即两问题的各单元伸缩量之和不变, 可表示为:

$$\Delta L_1 = \Delta L_1^2 + \Delta L_2^2 + \Delta L_3^2 + \Delta L_4^2 \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)中可得:

$$^2 N^* = \frac{N^* (L_1 / A_1)}{L_1 / A_1 + L_2 / A_2 + L_3 / A_3 + L_4 / A_4} \quad (5)$$

各单元的长度与截面均相同时  $^2 N^* = N^* / 4$  (问题 2 中各单元的内力为问题 1 中张拉单元内力的 1/4)。

**问题 3.** 假定在张拉过程各节点的位置随单元内力的变化而变化。

当张拉单元 1 产生  $\Delta L_1$  的缩短量后, 将各限制

滑动的卡头拿掉,各单元的内力将发生重分布,由于各节点的位置在内力重分布过程中也会发生变化,所以各单元的内力较问题2中各单元的内力会有所降低,可表示为下式。

$${}^3N_i = {}^3N^* < {}^2N^* \quad (6)$$

这一现象在实际工程中称为预应力损失。这与弦支穹顶结构环索滑动不考虑摩擦的问题相似,可以借鉴文献[4]中的冷冻升温法进行求解,但总的原则应是内力重分布的各个过程中各单元的无应力长度总和保持不变。也可按如下步骤来对这一问题进行求解:

1) 按问题2计算所得的应变作为各单元的初始应变进行施加,各单元的内力分别为 $T_i$ ,然后让各节点按实际情况发生位置变动,内力重新分布后的各单元内力为 $F_i$ ,依据各单元的伸缩量总和不变可以写为:

$$\sum_{i=1}^n \frac{T_i L_i}{EA_i} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i L_i}{EA_i} \quad (7)$$

2) 当计算所得的各单元的内力 $F_i$ 不等时,则利用下面的原则来对各单元的初始应变重新计算。假定内力重分布后结构各单元的内力 $F_i$ 相等且都为 $F$ ,利用式(7)可以求得:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{T_i L_i}{EA_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{EA_i}} \quad (8)$$

将各单元的内力 $F_i$ 与 $F$ 的差值叠加在前一步计算得到的单元内力 $T_i$ 上,如下式所示:

$${}^{k+1}T_i = {}^kT_i + (F_i - F) \quad (9)$$

然后将这一内力换算为结构的初始应变施加在结构上,重复进行上述的计算过程直到内力重分布后结构各单元的内力相等为止,提取结构各单元的内力即为本问题的解答。

**问题4.** 将问题3中节点完全滑动改为有一定摩擦力的情况。

加入摩擦后,情况会更加复杂,在计算过程中不仅要判断节点处是否会发生滑动,还需计算在滑动过程中节点处的摩擦力等问题。对于这类问题,文献[9-10]作了重要的研究,也推导了一些实用计算公式,本文在此对弦支穹顶结构中类似问题做详细的研究。

对这一问题的求解步骤如下:

1) 假定结构中各索单元未发生滑动(即问题1),在当前张拉单元上,施加一定的初始应变,计算当各节点位置发生变化后,其他各段索上的内力值 $T_i$ 。

2) 计算在每一个节点处索是否会发生滑动,其判断条件为节点两侧的索段内力之差是否大于计算出的摩擦力值,如大于则节点处发生滑动。

3) 如果没有滑动,则在本次滑动判断过程中节点两侧的内力值等于计算值。

4) 如果滑动,则检查下一节点处是否也发生滑动,一直检查到不发生滑动的节点为止;按发生滑动的索单元是否首尾相连分成不同的滑动段,如果索段闭合,且每一点都滑动,则定为一整段。

5) 根据滑动段内索单元的无应力索长总和不变的原则,来改变各单元的初始应变,计算各滑动段内每个索单元的内力 $F_i$ ,使节点两端索的内力与摩擦力在节点处平衡。

以一个滑动段为研究对象,假定在这一滑动段内,弦支穹顶结构第 $i$ 根撑杆(G)下节点与环索(Hs)的摩擦系数为 $\mu_i$ ,两段环索之间的夹角为 $2\beta$ ,各单元的截面刚度为 $EA_i$ ,索杆位置关系见图2,由文献[10]可知上述滑动后各单元内力 $F_i$ 之间的关系为:

$$c_i = \frac{1 \pm \mu_i \cos(\beta)}{1 \mp \mu_i \cos(\beta)}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (10)$$

$$D_1 = 1, \quad D_i = \prod_{j=1}^{i-1} c_j, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

$$B_i = \frac{EA_i + T_i}{EA_i + F_1 D_i} \quad (12)$$

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i l_{0i})}{\sum_{i=1}^n (B_i D_i l_{0i})} \quad (13)$$

$$F_i = F_1 D_i \quad (14)$$

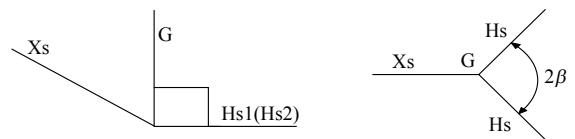


图2 结构下部索杆单元位置图

Fig.2 Position of struts and cables

假定图2中同一节点上两环索的内力值分别为 $T_1$ 与 $T_2$ ,则节点摩擦力 $f$ 的计算公式,与滑动的判断条件可分别写为式(15)与式(16):

$$f = \mu_i (\cos(\beta))(T_1 + T_2) \quad (15)$$

$$|T_1 - T_2| > \mu_i (\cos(\beta))(T_1 + T_2) \quad \text{滑动}$$

$$|T_1 - T_2| < \mu_i (\cos(\beta))(T_1 + T_2) \quad \text{不滑动} \quad (16)$$

$$|T_1 - T_2| = \mu_i (\cos(\beta))(T_1 + T_2) \quad \text{临界状态}$$

利用上述公式计算出滑动后各单元的内力 $F_i$ ,将 $F_i$ 作用于各自单元上,对结构进行整体计算,以新的计算结果将各单元内力 $T_i$ 替换,再重复上述的步骤,直到各节点都不发生滑动为止,便完成了问题4的

求解。

## 2 算例 1——葵花 1 型

图 3 为一跨度为 122m、矢高为 12.2m 的葵花 1 型弦支穹顶。结构下部索杆特性见表 2，网壳中的杆件均采用  $\phi 325 \times 10$  的圆管。其弹性模量为  $2.06 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，密度为  $7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。下部环索采用连续贯通的做法，结构采用 3 点环索张拉成型，张拉点位于单元 1、单元 7、单元 13 上。各张拉点施加大小为  $4.0 \times 10^6 / (0.011236 \times 1.9 \times 10^{11}) = 0.00187$  的初始应变(在问题 1 中相当于给各张拉点施加了 4000kN 的虚拟内力)。

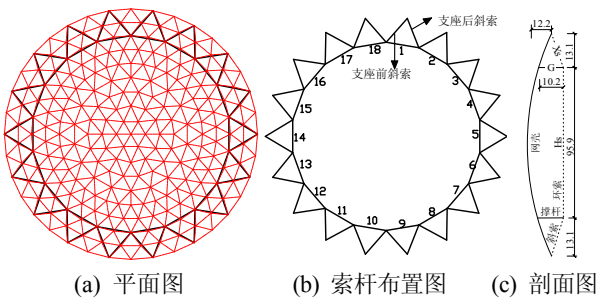


图 3 模型计算简图

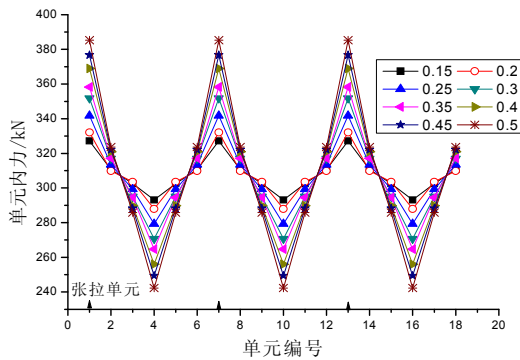
Fig.3 Calculation diagram of model

表 2 下部索杆特性

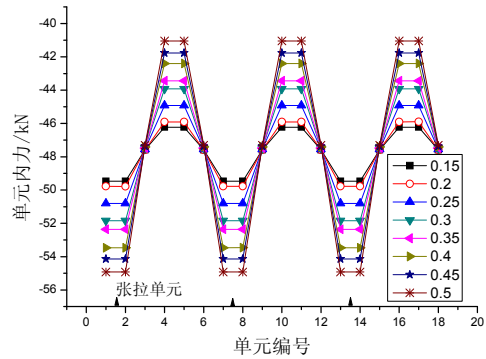
Table 2 Characteristic of cable-strut

构件	截面积/m <sup>2</sup>	弹性模量/(N/m <sup>2</sup> )	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	长度/mm
Hs	0.011236	$1.9 \times 10^{11}$	$6.55 \times 10^3$	16648.7
Xs	0.005700	$1.9 \times 10^{11}$	$6.55 \times 10^3$	17000.9
G	0.004662	$2.06 \times 10^{11}$	$7.85 \times 10^3$	10218.7

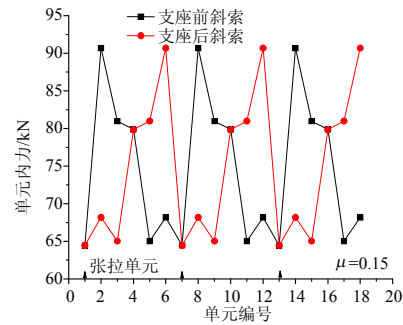
为研究摩擦系数  $\mu$  的大小对张拉成型后结构下部索杆内力的影响， $\mu$  分别取 0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5 这 8 种情况。张拉成型后环索与撑杆内力分布见图 4，并绘制了  $\mu = 0.15$  与  $\mu = 0.5$  这两种情况下斜索内力分布，见图 4，分布图中支座前斜索为同一支座节点上的两个斜索中按顺时针方向看前面的一根，支座后斜索为后面的一根。



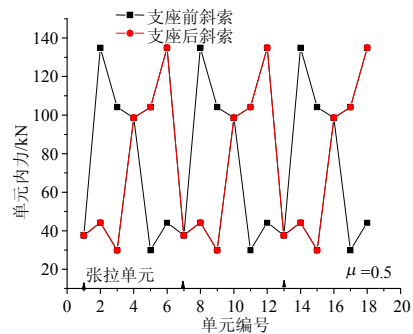
(a) 环索内力分布



(b) 撑杆内力分布



(c)  $\mu = 0.15$  斜索内力分布



(d)  $\mu = 0.5$  斜索内力分布

图 4 张拉成型后下部索杆内力分布

Fig.4 Inner force distribution of strut-cable after tension

由图 4 可以看出，当考虑张拉过程中环索的摩擦力时，结构下部同类型的单元在张拉结束后会出现内力不相等的现象，摩擦系数越大内力分布的不均匀性越显著。同时可以看出在张拉点附近的单元内力最大，各单元与张拉点之间的距离越大，单元的内力越小。整个下部索杆的内力分布以 3 个张拉点分为 3 个对称区间。张拉完成后各张拉点的预应力由于摩擦的存在而没有向其附近的单元进行完全的传递。同时由图 4(c)、图 4(d)可以看出与同一支座节点相连接的两根斜索内力也不相同，摩擦系数越大其内力相差越大，为更加全面地了解结构张拉成型后下部索杆的内力分布规律，将与同一支座相连的一对斜索内力之差中的最大值列于表 3。将同类单元在不同摩擦系数下计算得到的内力结

果之差的幅值列于表 4。

表 3 同一支座节点上两斜索内力之差的最大值 /kN

Table 3 Maximum inner force difference of two radial cables in the same supports point

摩擦系数	0.15	0.2	0.25	0.3
内力差/kN	22.52	26.03	38.81	51.83
摩擦系数	0.35	0.4	0.45	0.5
内力差/kN	58.12	72.18	80.67	90.72

表 4 同类单元最大与最小内力之差 /kN

Table 4 Difference between maximum and minimum of inner force for the same style element

单元类别	摩擦系数							
	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
环索	34.1	44.2	62.5	81.1	93.6	113.0	127.3	143.0
斜索	26.3	36.1	47.6	59.3	70.1	82.1	93.4	105.0
撑杆	3.24	3.88	5.88	7.91	8.92	11.07	12.4	13.88

由表 3 可以看出，与支座相连的一对斜索当考虑张拉过程中的摩擦时其内力也有较大的差异，随着摩擦系数的增大，所有与同一支座相连的两斜索内力之差中最大值也在不断增加，最大时同一对斜索中的较大内力为较小内力的 2 倍~3 倍。由表 4 可以看出，随着摩擦系数的增加，各类单元的内力相差程度不断增加，就环索而言当摩擦系数取 0.5 时，其内力差值为 143.0kN。

下面来研究当结构的摩擦系数不变( $\mu=0.3$ )，张拉点数(3 点张拉)不变的情况下，各张拉点施加表 5 所示的 6 种虚拟内力后下部索杆内力的分布与传递情况，为了节约篇幅仅对计算结果中的环索内力进行了分析，见图 5。为了对不同虚拟内力情况进行比较，将各段单元的内力与单元内力最大值之比这一无量纲值作为图形的纵坐标。

表 5 张拉点施加的预应力值 /1000kN

Table 5 Prestress value according to tension points

预应力编号	1	2	3	4	5	6
预应力值(虚拟内力)	1	2	3	4	5	6

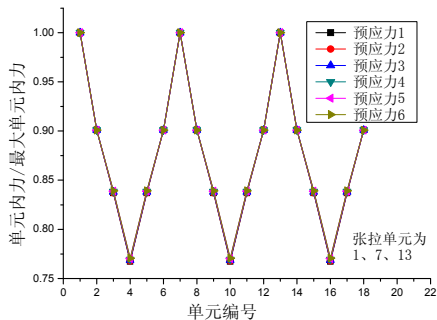


图 5 不同预应力下环索内力分布

Fig.5 Inner force distribution of hoop cable under different prestress

分别以表 6 所示的不同单元作为张拉点， $\mu=0.3$ ，施加 4 号预应力时，对结构进行张拉成型计算，张拉成型后下部环索的内力见图 6 与表 7，同样为了对采用不同张拉点时结构的张拉结果进行比较，将各段单元的内力与单元内力最大值之比作为图形的纵坐标。

表 6 张拉点位置

Table 6 Position of tension points

张拉点数	2	3	4	6	9
张拉点单元	1、10	1、7、13	1、5、10、14	1、4、7、10、13、16	1、3、5、7、9、11、13、15、17

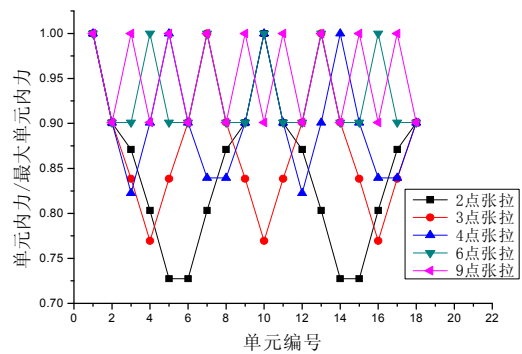


图 6 不同张拉点下索杆内力分布

Fig.6 Inner force distribution of hoop cable at different tension points

表 7 各段环索内力与最大内力之比

Table 7 Ratio between inner force of each hoop cable and maximal inner force

单元编号	张拉种类(张拉点数)				
	2 点	3 点	4 点	6 点	9 点
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.901	0.901	0.901	0.901	0.901
3	0.871	0.839	0.823	0.901	1.000
4	0.803	0.769	0.901	1.000	0.901
5	0.727	0.839	1.000	0.901	1.000
6	0.727	0.901	0.901	0.901	0.901
7	0.803	1.000	0.839	1.000	1.000
8	0.871	0.901	0.839	0.901	0.901
9	0.901	0.839	0.901	0.901	1.000
10	1.000	0.769	1.000	1.000	0.901
11	0.901	0.839	0.901	0.901	1.000
12	0.871	0.901	0.823	0.901	0.901
13	0.803	1.000	0.901	1.000	1.000
14	0.727	0.901	1.000	0.901	0.901
15	0.727	0.839	0.901	0.901	1.000
16	0.803	0.769	0.839	1.000	0.901
17	0.871	0.839	0.839	0.901	1.000
18	0.901	0.901	0.901	0.901	0.901
标准偏差	0.086	0.074	0.063	0.048	0.051

由图 5 可以看出当结构的摩擦系数与张拉位置确定时不论施加的预应力为多少，整个环索单元上的内力分布完全一致，这也说明：当结构确定、张拉点确定、摩擦系数确定时结构张拉成型后下部索

杆的内力分布也确定, 各张拉单元向确定单元传递的预应力百分比也确定。但在实际结构的张拉过程中节点的摩擦系数会随着张拉的进行而不断发生改变, 这仍须进行深入的研究。

由图 6 与表 7 可以看出, 在张拉过程中, 通过增加张拉点的数目可以明显地减少单元内力的不均匀性, 2 点张拉时单元最小内力为最大内力的 72.7%, 整个单元内力的标准偏差为 0.086。而 9 点张拉时单元最小内力为最大内力的 90.1%, 整个单元内力的标准偏差为 0.051。综上所述, 若以较少的张拉点通过环索张拉实现结构张拉成型后各段索的内力相等是不可能的, 只能通过为每一段单元进行预应力的施加才能实现结构张拉成型后各段索内力相等的目标。从这一点来说环索张拉相对于斜索张拉和撑杆顶升已无优势可言。

### 3 算例 2——肋环 1 型

为了能够更加全面地了解结构在张拉成型过程中摩擦力的影响, 下面设计了如图 7 所示的肋环 1 型弦支穹顶(与算例 1 中结构仅下部索杆布置有别)。结构下部环索采用连续贯通的做法, 结构采用 3 点环索张拉成型, 张拉点位于单元 1、单元 7、单元 13 上。各张拉点上施加大小为 0.00187 的初始应变。

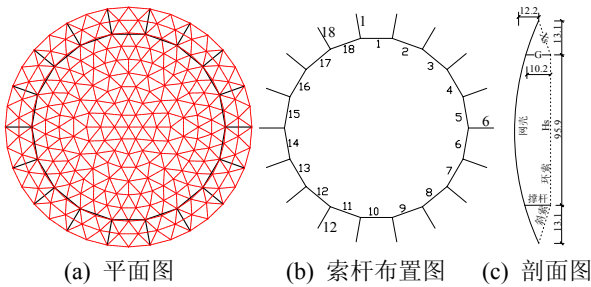
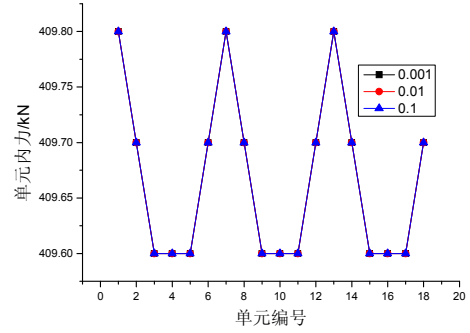


图 7 模型计算简图

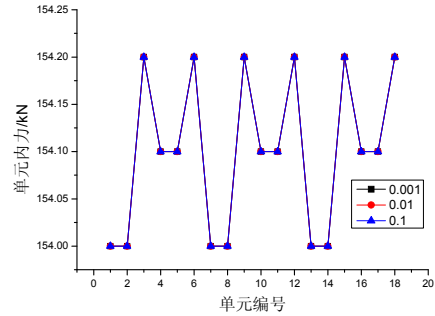
Fig.7 Calculation diagram of model

当结构摩擦系数分别取 0.001、0.01、0.1 时, 结构张拉成型后下部索杆的内力分布见图 8。

由图 8 可以看出, 不同摩擦系数下结构张拉成型后下部索杆的内力值基本相等。在计算过程中发现, 三种情况下结构的任何一段环索均未发生滑动, 各段环索的内力未出现因滑动而调整的现象。下部相邻段环索的最大内力差为 0.1kN, 由式(16)可以计算出环索滑动所要求的临界摩擦系数为 0.0007, 所以在上述几个摩擦系数下结构下部的环索均未发生滑动。



(a) 环索内力



(b) 斜索内力图

图 8 张拉成型后下部索杆内力分布

Fig.8 Internal force distribution of strut-cable after tension

由图 8 也可以看出, 肋环型弦支穹顶在张拉成型后, 下部环索的内力分布也具有离张拉点越近的环索单元其内力值越大的特点, 但斜索的分布并不符合这样的规律, 这可能是由于张拉成型后斜索位置发生改变造成的。结构张拉成型后下部索杆的变形如图 9 所示, 图 9 中虚线为未张拉前结构下部索杆的几何构形, 实线为张拉成型后结构下部索杆的几何构形。

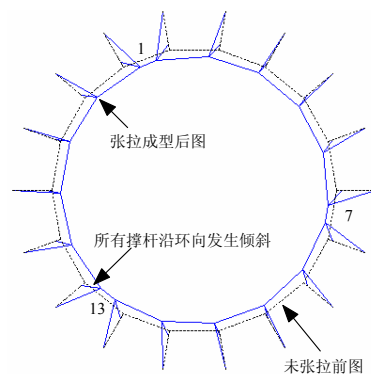


图 9 张拉成型后下部索杆变形图

Fig.9 Deformation of strut-cable after construction

当结构各张拉点施加预应力后, 由于结构摩擦系数大于其滑动时的临界摩擦系数, 环索未发生滑动, 但由图 9 可以看出结构的所有撑杆均有不同程度的沿圆周切线方向上的倾斜, 距离张拉点越近的撑杆, 其倾斜的程度越大。由此可见, 真正使预应

力从张拉点传递到其他各段上的原因不是环索发生了滑动,而是结构的撑杆发生了倾斜,是撑杆的倾斜导致了环索预应力的传递,这与问题3中不拿掉限制滑动的卡头这一情况下结构的传力机理一致。

当保持张拉点数目、摩擦系数 $\mu=0.01$ 不变时,不断增大结构各张拉点上的虚拟内力,随虚拟内力的增加结构撑杆的最大倾斜量的变化规律见图10。利用下部环索的内力由式(16)计算出的环索滑动临界摩擦系数随虚拟内力的变化趋势见图11。

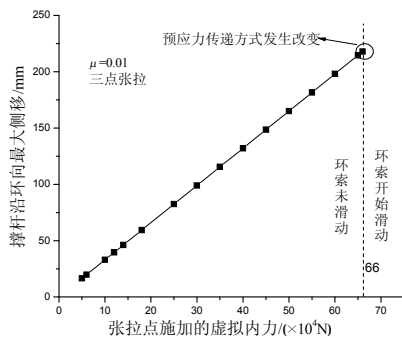


图10 撑杆倾斜随张拉力变化

Fig.10 Slant of strut with different prestress

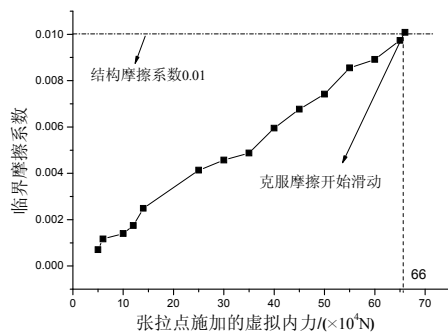


图11 临界摩擦系数随张拉力变化

Fig.11 Critical friction index with different prestress

由图10可以看出在环索未发生滑动之前撑杆沿环向的最大侧移与张拉点施加的虚拟内力基本呈线性关系。当撑杆的最大侧移达到一定程度时,随着虚拟内力的继续增加,环索开始发生滑动。当环索发生滑动时,预应力的传递方式发生了根本变化,由单纯依靠撑杆倾斜来传递预应力的方式转化为由撑杆倾斜与环索滑动共同传递预应力的方式。预应力传递方式发生改变时,各张拉点所施加的虚拟内力为660kN,而此时结构撑杆倾斜量也已超出0.2m,这一倾斜程度是建筑结构中所不允许的。由图11可以看出结构的滑动临界摩擦系数随虚拟内力的增加而不断增加,当虚拟内力为660kN时,结构的滑动临界摩擦系数正好与结构的摩擦系数

(0.01)相等,环索开始克服摩擦发生滑动,预应力的传递方式发生改变,此后撑杆的倾斜程度将不断加剧。

对于肋环型弦支穹顶,采用这样的施工张拉将会有两种结果产生:1)施工结束,撑杆倾斜,下部索杆的内力分布呈现极不均匀的现象;2)施工过程中由于撑杆倾斜程度过大,导致预应力未施加到位时,撑杆在切线方向上的偏移量达到了最大偏移量而必须重新张拉。

由上述两个算例可以看出,在施工张拉时,由于摩擦力的存在,不宜采用环索贯通,仅以几个张拉点张拉成型的施工方案。摩擦力的存在使得结构下部索杆的内力传递不能完全进行,导致结构下部索杆内力分布不均匀。对于同一节点有两根斜索的弦支穹顶结构来说,预应力可以通过环索的滑动由张拉点向其他位置单元传递。而对于肋环型的结构来说,预应力主要是通过撑杆倾斜来传递,由于斜索内力投影到环索环上的分量很小,而使得环索相邻两段的内力差很小,当结构的预应力达到一定量级时,环索才能发生滑动协助结构下部索杆的预应力传递,而结构张拉结束后撑杆会发生明显的倾斜。所以对于肋环型弦支穹顶来说更不宜将环索设计为连续贯通,而采用较少的张拉点进行环索张拉成型的实际张拉施工。

## 4 结论

(1) 对于葵花型弦支穹顶,当采用较少的张拉点张拉连续贯通的环索成型时,由于摩擦的存在,下部同种类型的单元在张拉结束后会出现内力分布不相等的现象,摩擦力越大内力分布越不均匀。张拉点数目的增加可以明显地减少单元内力分布的不均匀性,只有当环索各单元都进行张拉时其不均匀性才能完全消除,从这一点来说环索张拉相对于斜索张拉和撑杆顶升已无优势可言。

(2) 对于肋环型弦支穹顶,当采用较少的张拉点张拉连续贯通环索成型时,由于摩擦的存在,张拉结束后结构的所有撑杆沿圆周切线方向均有不同程度的倾斜,距离张拉点越近,倾斜的程度越大。当环索发生滑动时,预应力的传递方式发生了根本变化,由单纯依靠撑杆倾斜来传递预应力的方式转化为由撑杆倾斜与环索滑动共同传递预应力的方式。

(3) 对于葵花型弦支穹顶来说不宜将环索设计

为连续贯通的形式,采用较少的张拉点进行环索张拉成型的实际张拉施工,对于肋环型弦支穹顶更不宜将环索设计为连续贯通的形式,采用较少的张拉点进行环索张拉成型的实际张拉施工。

(4) 在实际结构的张拉过程中节点的摩擦系数会随着张拉的进行而不断发生改变,这仍须进行深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] Kawaguchi M, Abe M, Tatemichi I. Design, test and realization of "suspend-dome" system [J]. Journal of IASS, 1999, 40(131): 179—192.
- [2] 李阳. 弦支穹顶结构的稳定性分析与静力试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.  
Li Yang. Stability analysis and static experimental study on suspenddome [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- [3] 郭佳民, 董石麟, 袁行飞. 弦支穹顶结构的形态分析问题及其实用分析方法[J]. 土木工程学报, 2009, 41(12): 1—7.  
Guo Jiamin, Dong Shilin, Yuan Xingfei. Morphological analysis of suspend-dome structures and its practical analysis method [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 41(12): 1—7. (in Chinese)
- [4] 崔晓强, 郭彦林, 叶可明. 滑动环索连接节点在弦支穹顶结构中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1300—1303.  
Cui Xiaoqiang, Guo Yanlin, Ye Keming. Application of Gliding hoop cable joint in suspend-dome structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(10): 1300—1303. (in Chinese)
- [5] 张国军, 葛家琪, 秦杰. 2008 奥运会羽毛球馆弦支穹顶预应力张拉模拟施工过程分析研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(4): 31—38.  
Zhang Guojun, Ge Jiaqi, Qin Jie. Simulating analysis of prestressing construction process of the suspend-dome of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 31—38. (in Chinese)
- [6] 王永泉, 郭正兴, 罗斌. 常州体育馆大跨度椭圆形弦支穹顶预应力拉索施工[J]. 施工技术, 2006, 37(3): 33—36.  
Wang Yongquan, Guo Zhengxing, Luo Bin. Prestressed cable construction of large-span elliptic suspend-dome in Changzhou Gymnasium [J]. Construction Technology, 2006, 37(3): 33—36. (in Chinese)
- [7] 吕晶, 郭彦林, 徐国彬. 劲柔索张拉穹顶结构施工仿真分析[J]. 施工技术, 2007, 36(3): 18—20.  
Lu Jing, Guo Yanlin, Xu Guobin. Construction simulation of stiff and soft cable dome structure [J]. Construction Technology, 2007, 36(3): 18—20. (in Chinese)
- [8] 郭佳民. 弦支穹顶结构的理论分析与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
Guo Jiamin. Theoretical and experimental research on suspen-dome structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [9] 张国发, 董石麟, 卓新. 弦支穹顶结构施工滑移索研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1051—1056.  
Zhang Guofa, Dong Shilin, Zhuo Xin. Research on sliding cable in construction of suspend-dome structures [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1051—1056. (in Chinese)
- [10] 李传习, 李德慧, 贺玲凤. 体外预应力索索力计算的新方法[J]. 土木工程学报, 2005, 38(6): 54—58.  
Li Chuanxi, Li Dehui, He Lingfeng. A new method of analysis for the force of the external prestressed cables [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(6): 54—58. (in Chinese)