

广州新体育馆屋盖预应力拉索的张拉顺序

剧锦三

郭彦林

(中国农业大学水利与土木工程学院) (清华大学)

摘要 通过对局部结构模型的计算和分析,得到了预应力拉索在张拉过程中的预应力变化规律及其对结构的影响规律,从而确定了预应力拉索的张拉顺序,为结构的施工提供了可靠的理论依据。

关键词 预应力; 拉索; 张拉顺序

中图分类号 TU 311.41

Tensional Sequence of Prestress Cables of Guangzhou New Gymnasium's Roof

Ju Jinsan

Guo Yanlin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU) (Tsinghua University)

Abstract According to the calculation and analysis of the local model of the structure, the variety regulation of the prestress of the cables and the influence of the prestress to the structure were obtained in the application process of the prestress, consequently the sequence of the prestress application can be determined and the credible theoretical basis for the practical construction can be obtained.

Key words prestress; tensional cable; tensional sequence

1 工程概况

广州新体育馆位于广州天河区,分为主场馆、训练馆和大众活动中心。每个屋盖几何形状均由圆锥体在对称轴两内侧切去一部分再合并而成。表1为各场馆的主要建筑尺寸。图1示出主场馆屋盖的平面布置及辐射桁架与主桁架的连接方式。

表1 各场馆建筑尺寸

建筑参数	主场馆	训练馆	大众活动中心
纵轴长度/m	160	151.5	140
横轴长度/m	110	70	30
投影面积/m ²	12 700	7 748	2 772
上弦圆锥角/(°)	24.5	26	36

屋盖由纵向主桁架、辐射桁架、周边箱形水平钢环梁和支撑拉索组成。屋盖的环梁置于屋盖以下钢筋砼支撑结构上。纵向主桁架断面为梯形,采用钢管连接,沿跨长方向断面变化为跨中断面最大,两端逐渐减小,端部仅保留上弦杆。箱形钢环梁断面高1 200 mm,宽500~ 650

收稿日期: 2000-07-03

剧锦三,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)59信箱,100083

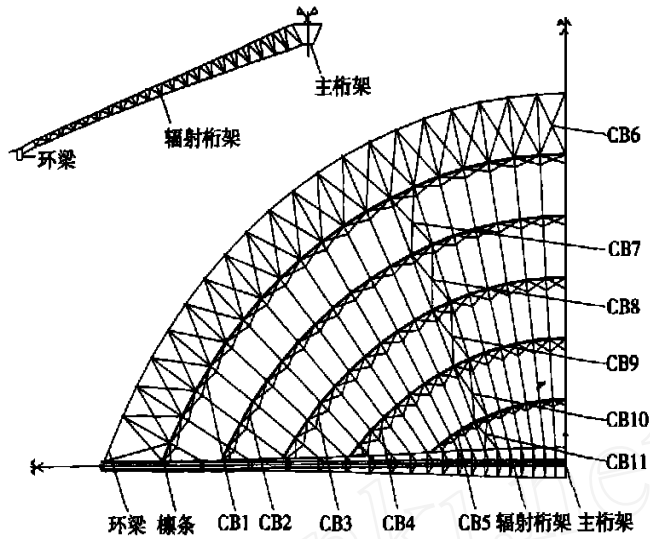


图 1 主场馆屋盖布置及辐射桁架与主桁架连接方式示意

mm, 用 20~ 30mm 厚钢板焊成。辐射桁架上端与主桁架闭合框焊接, 下端用端板与周边钢环梁连接。辐射桁架(图 1)主要尺寸见表 2。

表 2 辐射桁架主要尺寸

建筑参数	主场馆	训练馆	大众活动中心
桁架之间夹角/(°)	3.34	2.88	1.68
下端间距/m	5	5	5
下端高度/m	1.280	1.295	1.305
上端高度/m	4.8	2.7	1.6
投影长度/m	55	35	15
下弦曲率半径/m	461.5	461.5	461.5

2 预应力拉索的种类、作用及张拉顺序

2.1 预应力拉索的种类及作用

预应力拉索分为平面拉索和环向垂直拉索。

平面拉索包括径向平面拉索(图 1, CB 7~ CB 11)和环向平面拉索(CB 6), 其作用是增强结构的整体刚度, 特别是增强屋盖平面的整体刚度, 使其形成一个几何不变体系。环向垂直拉索(CB 1~ CB 5)不仅增强了辐射桁架的空间刚度, 而且更重要的是限制了下弦节点的平面外位移, 保证不发生平面外失稳。

从拉索的功能来看, 平面拉索和环向垂直拉索同样重要; 但从预应力对结构的作用来看, 环向垂直拉索的预应力比平面拉索的预应力要重要。

2.2 张拉顺序

结构的支撑系统主要由预应力拉索构成, 在结构的使用阶段拉索不作为受力结构的一部分, 所以在使用阶段其受力比较简单, 仅受预应力作用以增强结构刚度; 但在施工阶段, 预应力

的施加是一个动态的过程,张拉索对已张拉索和未张拉索的内力有多大的影响,影响是有利的还是不利的,这是设计和施工中非常重要的问题。用整体模型计算内力的变化是最理想的方法,但是计算量较大^[1]。笔者建立计算模型,计算出了在预应力施加过程中索的内力的变化规律,得到了在预应力施加过程中张拉索对其他索内力的影响规律,从而得出以下的张拉顺序。

1) 整体张拉顺序。先拉平面拉索(CB 6~ CB 11),后拉垂直拉索(CB 1~ CB 5);先拉环向平面拉索(CB 6),后拉径向平面拉索(CB 7~ CB 11);先拉外环垂直拉索,后拉内环垂直拉索。

2) 局部张拉顺序。

环向平面拉索:环向平面拉索张拉时,应与辐射桁架对称向钢环梁方向分级张拉。

径向平面拉索:径向平面拉索张拉时,要由里向外,即从主桁架向钢环梁方向张拉,而且要在由檩条和辐射桁架上弦杆构成的闭合框内成对张拉。

环向垂直拉索:环向垂直拉索(图2)张拉时,应与辐射桁架对称向檩条方向分级张拉。

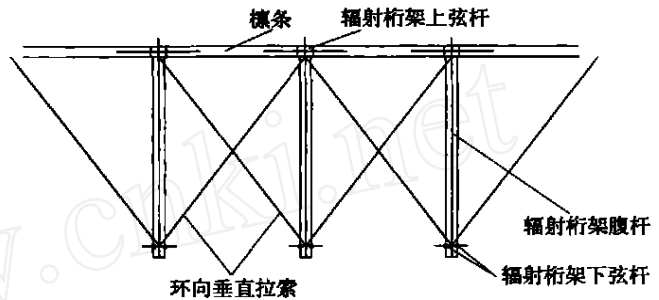


图2 环向垂直拉索的布置形式

3 张拉过程及计算结果分析

1) 环向平面拉索。先拉平面拉索会使屋盖平面形成一个几何不变体系。环向平面拉索CB 6的张拉应该是成对张拉,即在辐射桁架上弦节点处与辐射桁架对称向环梁张拉,张拉完成后,拉索主要对中间撑杆即辐射桁架上弦杆产生压力,对相邻杆件产生的内力迅速减小。由于环梁的刚度非常大,所以在由环梁、辐射桁架上弦杆和檩条构成的闭合框中,成对张拉索CB 6对其他环向平面索的内力影响几乎是0。由此可见,环向平面拉索的张拉顺序可以是任意的,但应满足与整体结构对称张拉的基本原则。

2) 径向平面拉索。径向平面拉索是在由檩条和辐射桁架上弦杆构成的闭合框内成对张拉的,可以发现张拉某一对索对未张拉索和已张拉索的内力影响很小,所以这个张拉方案是可行的。

3) 环向垂直拉索。计算模型的建立考虑了环向垂直拉索、檩条和辐射桁架竖杆。荷载计算仅考虑拉索预应力作用,其值为30 kN。

为了说明环向垂直拉索在张拉过程中对周边其他索内力的影响,可以抽出一局部环向垂直拉索进行研究。图3中的AH为檩条,按照它与辐射桁架的连接方式可视为连续梁;BJ, CL, DM, EN, FP和GQ是径向桁架的腹杆,视为简支杆;1到7表示成对拉索;A和I点是铰支撑点,相当于连接在主桁架的上下弦节点;K是支撑弹簧刚度系数,由辐射桁架上弦与拉索连接处的节点位移决定,即在该点施加单位力,得到该点的位移,从而计算出支撑刚度系数K为 $2.98 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

在环向垂直拉索张拉过程中,辐射桁架会产生变形并影响周边拉索的内力。为了更好地反映辐射桁架变形对拉索内力的影响,在环向垂直拉索平面与檩条连接处加弹簧支撑,以模拟辐射桁架对环向垂直拉索桁架的约束作用。如果辐射桁架的刚度较大,可近似取 $K =$,如果刚

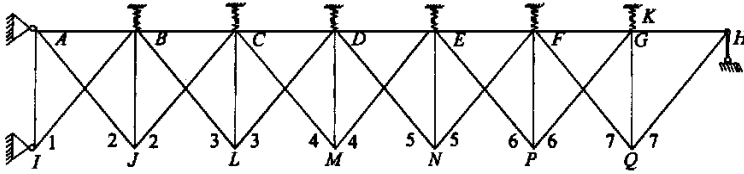


图 3 环向垂直拉索(CB1)张拉过程模型

度较小, 则取 $K = 0$ 。本文中首先讨论这 2 种极端情况, 然后分析 $K = 2.98 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 的实际模型, 探讨拉索内力的损失变化规律。

计算结果表明, 对于全是刚性铰支撑的情况, 张拉索的顺序对其他拉索的内力没有任何影响(见表 3); 而对于约束完全释放的情况, 张拉过程对其他拉索的内力有一定影响(见表 4)。

表 3 刚性铰支撑($K =$)情况下环向垂直拉索张拉过程中索的内力变化 kN

预应力施加顺序	索 1	索 2	索 3	索 4	索 5	索 6	索 7
1) 张拉索 1 和 2	29.3	29.3	0	0	0	0	0
2) 张拉索 3	29.3	29.3	29.3	0	0	0	0
3) 张拉索 4	29.3	29.3	29.3	29.3	0	0	0
4) 张拉索 5	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	0	0
5) 张拉索 6	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	0
6) 张拉索 7	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3

表 4 约束完全释放($K = 0$)情况下环向垂直拉索张拉过程中索的内力变化 kN

预应力施加顺序	索 1	索 2	索 3	索 4	索 5	索 6	索 7
1) 张拉索 1 和 2	25.9	27.9	12.7	12.2	8.8	5.9	3.0
2) 张拉索 3	30.3	28.0	27.6	11.7	10.8	6.8	3.5
3) 张拉索 4	33.6	28.9	27.4	26.9	9.1	8.1	3.7
4) 张拉索 5	36.4	29.6	28.2	26.3	25.8	5.5	4.7
5) 张拉索 6	38.3	30.1	28.7	26.8	24.8	24.3	1.3
6) 张拉索 7	39.1	30.4	29.0	27.0	25.1	23.0	22.5

从表 4 可以看到, 对于约束完全释放的情况, 张拉索对已张拉索和未张拉索的内力影响都很大。以索 1 为例, 在后续索的张拉过程中, 其内力一直是增大的, 甚至超出了预定的预拉力。

根据上述 2 种极端情况的计算结果可以得到这样的结论: 完全放松 B, C, D, E, F, G 点的约束会放大张拉索对周围索的内力影响, 而完全约束这些点会忽略张拉索对周围索的内力影响, 这 2 种极端情况与实际出入较大, 不能作为索预应力损失评估的根据。

表 5 给出了弹性支撑模型的计算结果。从表中可以看出, 张拉环向垂直索对相邻已张拉索的影响很小, 增大的内力最大值是已张拉索内力的 1%, 而且在后续索的张拉过程中, 已张拉索的内力马上趋于稳定; 对相邻未张拉索来说, 产生的内力增量为张拉索预应力的 1/20; 而对于隔跨未张拉索的内力几乎没有影响。因此可见张拉过程中张拉索对其他已张拉索及未张拉索的内力影响可以忽略。

表5 有弹簧支撑时环向垂直索张拉过程中索的内力变化 kN

预应力施加顺序	索 1	索 2	索 3	索 4	索 5	索 6	索 7
1)张拉索 1 和 2	29.6	29.1	1.9	0	0	0	0
2)张拉索 3	29.3	29.4	29.1	1.4	0	0	0
3)张拉索 4	29.3	29.3	29.4	29.1	1.4	0	0
4)张拉索 5	29.3	29.3	29.3	29.4	29.1	1.4	0
5)张拉索 6	29.3	29.3	29.3	29.3	29.4	29.1	1.5
6)张拉索 7	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.4	29.2

4 结 论

1) 径向平面拉索和环向平面拉索可增强结构的整体刚度, 特别是增强屋盖平面的整体刚度, 所以应该先拉环向平面拉索和径向平面拉索。

2) 环向平面拉索的张拉顺序可以是任意的, 但应满足对称张拉的基本原则。径向平面拉索应该从内向外张拉。

3) 环向垂直拉索不仅增强桁架的空间刚度, 而且更重要的是限制下弦节点的平面外位移, 保证不发生平面外失稳。张拉垂直索对相邻已张拉索的影响很小, 对相邻未张拉索来说产生的内力增量是张拉索预应力的 $1/20$, 而对于隔跨未张拉索的内力几乎没有影响。因此张拉过程中张拉索对其他已张拉索及未张拉索内力的影响可以忽略。

4) 总体张拉顺序是: 先拉平面拉索, 后拉垂直拉索; 先拉环向平面拉索, 后拉径向平面拉索; 先拉外环垂直拉索, 后拉内环垂直拉索。

参 考 文 献

- 1 剧锦三, 郭彦林 网壳结构稳定研究的现状及展望 见: 中国建筑金属结构协会及清华大学编 '98 中国建筑钢结构工程暨学术会议论文集 北京: 企业出版社, 1998 40~ 44