

平面预应力索网结构的设计和施工

尚仁杰 李佩勋

摘要:本文介绍了平面预应力索网结构及其受力特点,以 $30 \times 30\text{m}$ 预应力索网为例,计算了各种工况下结构挠度和索的拉力,给出了考虑温度荷载时斜杆预紧力的确定方法等,并简单介绍了施工顺序。

关键词:预应力索网 平面 设计 施工

一、引言

钢材具有很高的强度,特别是预应力钢丝、钢绞线和钢丝绳,其抗拉强度标准值达到 1860MPa ,近来国内外甚至已达到 2000MPa 。但是,钢结构构件在受压时往往是由其稳定性而不是由其强度控制设计,如何能充分发挥材料强度特别是预应力高强钢材的抗拉能力,从而避免高强材料在结构中受压失稳问题是寻求和探索大跨度空间结构的必经之路。

在过去的研究和探索中已经发现了多种受力合理、经济适用的空间结构体系,如:悬索结构、网架网壳结构、张力集成体系等。悬索结构以受拉索作为承重构件,充分利用了预应力索的抗拉强度^[1],网架网壳结构通过减小结构自重、减短受压杆长度及内力提高结构稳定性,张拉整体结构更是充分发挥了钢材的受拉特点,整个结构体系中只有少数杆件承受压力^[2],而本文介绍的预应力索网结构(见图1),则通过上、下弦及斜腹杆施加预应力达到避免受压失稳的目的,其上、下弦均为预应力筋(钢丝束、钢绞线或钢丝绳),只承受拉力;竖向腹杆为钢管,承受压力;斜向腹杆为直径较小($\Phi 16-20$)的圆钢,只承受拉力,整个结构只有竖向腹杆在承受压力,其他所有杆件均处于受拉状态。结构水平布置,由于上下弦存在预应力作用,受力时具有悬索结构的受力特点;又由于节点间腹杆的作用,受力接近平面网架结构,但具有比普通平面网架还要高的刚度,受拉杆在满足强度要求和结构整体刚度要求的情况下可以做得

较为纤细,因此,整个结构轻盈美观,特别适合于需要外露的大跨度采光玻璃天棚、玻璃屋顶等。

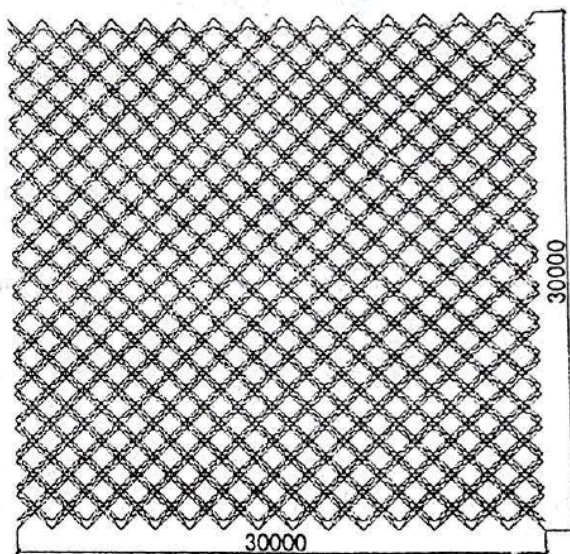


图1 预应力网架空间布置

二、结构体系简介及受力特点

1. 结构体系简介

以图1所示结构为例介绍平面预应力索网结构的受力特点,结构平面尺寸 $30 \times 30\text{m}$,正交斜放,网格大小为 $1414 \times 1414\text{mm}$,周边节点距离为 2000mm ,上、下弦间距为 1500mm ,初步选定上、下弦预应力筋 $A = 300\text{mm}^2$, $E = 1.7 \times 10^5\text{MPa}$;竖向腹杆为 $\Phi 40 \times 4$ 钢管;斜向腹杆为 $\Phi 16$ 圆钢,双向布置。上、下弦预应力筋张拉锚固于周边混凝土结构,见图2,荷载包括:结构自重 0.4kN/m^2 ,玻

璃屋面 0.3kN/m^2 , 活荷载 0.3kN/m^2 。温度荷载为: 春秋为正常温度, 温差为 0°C ; 夏天最高温差为 $+30^\circ\text{C}$, 冬天最低温差为 -30°C , 由此可以得到三种基本荷载工况:

工况 1: 恒载 0.7kN/m^2 , 活荷载 0.3kN/m^2 , 温差 0°C ;

工况 2: 恒载 0.7kN/m^2 , 活荷载 0.3kN/m^2 , 温差 $+30^\circ\text{C}$;

工况 3: 恒载 0.7kN/m^2 , 活荷载 0.3kN/m^2 , 温差 -30°C ;

工况 2 预应力筋处于最松状态, 在此工况下预应力筋拉力最小; 工况 3 预应力索网对周边结构产生最大拉力, 由此工况进行周边结构设计。

2. 计算假定及有限元程序编制

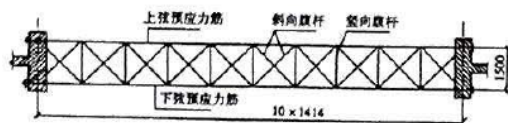


图2 预应力网架剖面

(1) 所有杆件均为轴力杆件, 不存在抗弯刚度;

(2) 索及斜杆只承受拉力, 受拉符合胡克定律, 受压刚度为零;

(3) 竖杆可以承受压力, 受力符合胡克定律;

(4) 节点间距仅为 1414mm , 且预应力索在一段内具有一定的抗弯刚度并存在一定拉力, 因此可以忽略 1414mm 内由于索自重下垂产生的几何非线性;

根据以上假定对预应力索网结构的内力和位移计算编制了考虑几何非线性和材料非线性(杆件受压刚度为零)的非线性有限元计算程序, 非线性方程求解采用了改进牛顿法和增量法相结合的方法。通过有限元程序可以对预应力索网结构进行各种工况的全过程分析, 计算中假设结构四边支承为固定点, 无任何位移。

3. 斜杆中预紧力的确定

根据计算, 工况 1 和工况 3 如果不考虑斜杆的预紧, 有些斜杆将退出工作, 但由于另一方向斜杆的作用, 结构仍能稳定。工况 2 结构升温 30°C , 如果不考虑斜杆的预紧力, 结构会由于某些部位两个方向斜杆均退出工作而失去空间桁架作用, 局部成为悬索结构, 位移变大, 失去原有刚度,

不利于玻璃屋面; 如果考虑斜杆 10kN 的预紧效应后结构稳定, 如何确定斜杆最小预紧力呢?

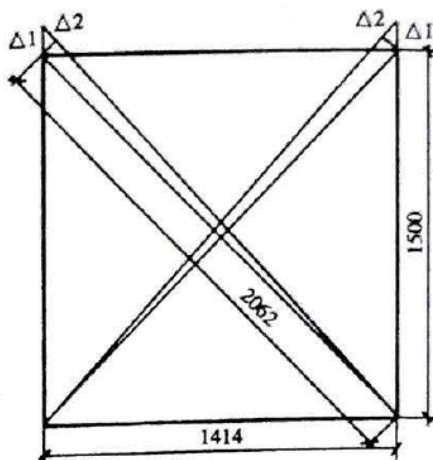


图3 温度变化构件变形

假设周边固定, 结构只有 $+30^\circ\text{C}$ 升温, 斜杆中要出现压应力, 为了斜杆中不出现压应力, 必须先对斜杆预紧, 先加一拉力, 拉力的确定可以通过以下方式近似计算: 不考虑温度对周边结构的影响, 在升温过程中可以认为各节点在水平面内不动而只在竖向有位移(实际计算结果也近似如此), 见图3, 竖杆变形为 $\Delta_1 = 1500 \times 30\alpha$ (其中 α 为线膨胀系数), 要想在斜杆中应力为 0, 必须有 $\Delta_2 = \Delta_1 \times 1500/2062 = 32735\alpha$, 折合温度为 $\Delta t = 32735\alpha/2062 = 16^\circ\text{C}$, 为了抵消升温 30°C 产生的压力, 可以使所有斜腹杆先降温 $30 - 16 = 14^\circ\text{C}$ (取 15°C), 按所计算的腹杆力进行预紧, 根据计算预紧力约为 6kN , 这样在升温 30°C 时斜杆就不会产生压力, 在外荷载和 $+30^\circ\text{C}$ 升温时不会出现两根斜杆同时退出工作的状态, 为了提高结构的整体刚度并考虑一定的富余, 斜杆预紧力取 10kN 。

4. 计算结果分析

(1) 预应力索拉力

假定在春秋正常温度下进行预应力张拉, 预应力索具有中等张拉力, 上、下弦张拉力均为 60kN , 斜杆预紧力为 10kN , 计算得:

工况 1(春秋):

下弦索最小拉力为 23.774kN , 最大拉力为 82.680kN ; 上弦索最小拉力为 37.603kN , 最大拉力为 96.379kN ; 共有 48 根斜杆退出工作; 挠度为 38.0mm 。

工况 2(夏季):

下弦索最小拉力为 2.835kN, 最大拉力为 64.546kN; 上弦索最小拉力为 18.291kN, 最大拉力为 76.602kN; 共有 260 根斜杆退出工作; 挠度 39.6mm。

工况 3(冬季):

下弦索最小拉力为 40.969kN, 最大拉力为 101.411kN; 上弦索最小拉力为 57.230kN, 最大拉力为 112.552kN; 没有斜杆退出工作; 挠度为 37.8mm。

夏季温度最高(+30℃温差)进行张拉, 预应力筋具有最小张拉力, 每根预应力筋张拉力减小 19kN; 冬季温度最低(-30℃温差)进行张拉, 预应力筋具有最大张拉力, 每根预应力筋张拉力提高 19kN。

预应力筋内最大拉力发生在工况 3 为 112.552kN, 预应力筋面积为 300mm², 破断强度取 1570MPa, 考虑钢丝绳成束后的不均匀性取 0.8 系数, 则每束破断力为:

$$F_{\text{破}} = 1.570 \times 0.8 \times 300 = 376(\text{kN})$$

安全系数为: $K = 376 / 112.552 = 3.34 > 2.5$

(2) 结构对周边作用

预应力索的张拉力、斜向杆件的预紧力、温度降低使预应力索网结构产生的温度内力都将通过预应力锚具和周边斜杆作用于边梁, 见图 2, 竖向荷载改变上、下弦及斜杆的内分配但基本不改变侧向合力, 因此竖向荷载还会对边梁产生扭矩, 冬季温度最低时预应力结构对周边结构产生最大拉力, 根据计算最大拉力约为 130kN/m, 侧向力会使结构产生侧向变形并在柱子内产生较大剪力, 本文对侧向变形未进行考虑。

如果周边结构为圆形, 预应力索网对周边的作用会使周边结构产生近似径向变形和环向压力, 柱子剪力较小, 因此, 圆形周边结构是采用预应力索网结构的较佳形式。

(3) 结构起拱

起拱度按 $L/500$, 即最大为 60mm, 高度变化按二次抛物线, 不考虑荷载作用, 仅考虑预应力索由于起拱而存在伸直趋势, 由此所产生的竖向变形为 -5mm, 约为起拱的 10%, 可见, 起拱的作用是十分明显的。起拱拆除支架后, 上、下索拉力变化不大, 上弦在 $\pm 3\text{kN}$ 以内, 下弦在 $\pm 5\text{kN}$ 以内, 斜腹杆内力变化 $\leq 1.2\text{kN}$ 。当起拱较大时, 结构

由于上下弦出现压力失稳, 成为悬索结构, 变形增大。

(4) 索拉力对刚度的影响及结构非线性

结构在竖向荷载下的变形与结构的初始位置(起拱大小)和上、下弦的初始预拉力有关, 工况 1 如果不考虑预应力初始拉力, 允许预应力筋受压, 跨中挠度为 40.7mm, 如果考虑初始张拉力, 跨中挠度为 38.0mm, 可见, 预应力可以提高结构刚度。

本文介绍的预应力索网不同于一般的索结构, 由于变形较小, 因此几何非线性几乎不存在, 只是在预应力索和斜杆部分退出工作时结构表现出一定的非线性, 图 4 为工况 2 预应力索拉力为 60kN 和 40kN 下荷载-挠度曲线。预应力索拉力为 60kN, 当荷载达到 100% 使用荷载时, 所有索段都处于受拉状态, 尽管部分斜杆退出工作, 但结构挠度与荷载基本成线性关系; 预应力索拉力为 40kN, 当荷载达到 70% 使用荷载时, 有部分索段退出工作, 结构刚度明显降低, 表现出明显的非线性。

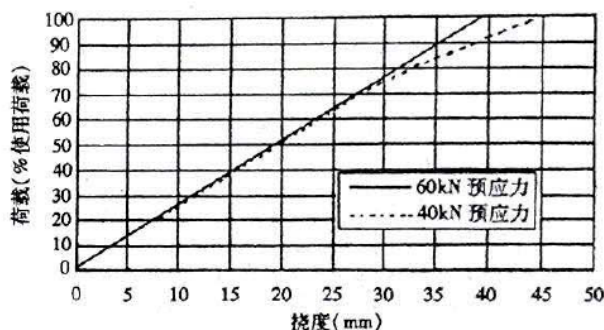


图 4 不同索拉力下构件变形

5. 不确定因素考虑

(1) 周边结构刚度的影响: 计算假设周边结构不发生任何变形, 实际结构是有一定刚度的, 刚度不影响初始预应力的建立, 但会影响外荷载作用下的内力及变形, 当周边结构确定后, 这一影响可以计算考虑;

(2) 周边混凝土结构收缩、徐变对预应力索结构内力的影响: 这一影响是一长期效应, 要根据预应力筋张拉时混凝土龄期及混凝土结构布置来确定;

(3) 温度对周边结构的影响: 当温度发生变化时, 周边混凝土也会存在一定温度变化, 温差的

(下转第 20 页)

面,从而达到防止夹片松动的目的。

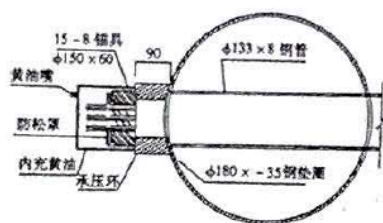


图6 预应力筋张拉端详图

(4) 张拉端防腐保护

由于张拉端锚具不象普通预应力构件一样埋置于混凝土内,因而若不对预应力筋束端部进行处理,将会导致预应力端部配件锈蚀,因而必须将其端部进行相应处理。本工程张拉端防腐处理方法如下:

首先制作一个与锚具配套的密封罩,待预应力筋张拉结束后,切除外部多余的钢绞线,然后按照图7的方法使得密封罩与承压环密封连接,连接完成后,通过油嘴向密封罩内灌注黄油,直至黄油充满整个密封罩,然后密堵住油嘴,从而使得密封罩内部与外界隔绝,最后在密封罩的表面及承压环外露部分涂上一层防腐漆,从而使得整个张拉端与外部空气隔绝,达到防腐的目的。

4 结束语

本工程通过在部分桁架下弦杆中施加适当的预应力,从而有效地平衡了网壳在支座处产生的向外水平推力,并且调整了杆件的内力。通过施工时对支座位移及部分关键点挠度进行监测,基本达到设计要求。

(上接第15页)

符号是相同的,由于混凝土结构径向尺寸大,因此温差要小于预应力索网的温差,但是,周边混凝土结构温度变形对预应力索网结构的稳定性是有利的。

三、施工方法

预应力索网结构的稳定性是建立在上下弦初始预拉力和节点不滑动基础上的,施工依此进行安排。基本施工顺序为:①分级将预应力筋张拉至其控制拉力,张拉控制力要根据施工时实际温度进行调整,张拉时腹杆及配件可以安装但不能固定;②固定竖向、斜向腹杆及节点配件使节点不能滑动;③通过力矩扳手进行斜向腹杆的预紧。施工时可以根据需要通过模板和垫块进行起拱,张拉最好两端进行以便预应力筋两端变形基本相同。

四、结论

(1)通过上、下弦施加预应力突破了常规平面网架在竖向荷载下部分杆件受压的束缚,使上、下弦预应力筋充分发挥其高强抗拉性能,截面尺寸减小,达到美观效果;

(2)通过腹杆及预应力的联合作用,使结构刚度比相同尺寸的网架还要高,避免了平面索结构变形大的弱点;

(3)双向斜腹杆的布置及斜腹杆的预紧避免了斜腹杆的受压,使斜腹杆尺寸减小;

(4)预应力网架结构对周边结构具有较大的拉力,在进行周边结构设计计算时应予以考虑,圆形周边结构是较佳的结构形式。

参考文献

[1]沈世钊,徐崇宝,赵臣. 悬索结构设计. 中国建筑工业出版社,北京,1997

[2]一种新型空间结构——张拉整体体系. 土木工程学报. 1995,4