

预应力网架和组合网架的分析与研究

舒赣平 吕志涛 王 培

(东南大学 210096) (江苏省建筑设计院 210029)

摘 要: 分析研究了预应力网架和组合网架的结构性能及其计算方法。对预应力布索方案、预应力对结构的影响、预应力度及设计中的若干问题和指标作了探讨、分析和优化,并提出了相应的设计建议。

关键词: 预应力 网架 组合网架 结构性能 优化设计

THE ANALYSIS AND STUDY OF PRESTRESSED SPACE GRIDS AND COMPOSITE SPACE GRIDS

Shu Ganping Lu Zhitao

(Southeast University 210096)

Wang Pei

(Jiangsu Architectural Design & Research Institute 210029)

Abstract The structural properties of prestressed space grids and composite space grids are analysed in this paper. The methods of analysis, the layouts of high strength cables, the effects of prestressing on the structures, the controlled stress of the cables and several problems in the designs are also studied and optimized. At the same time, some suggestions for the designs are presented.

Keywords: prestressing space grids composite space grids properties of structure optimum design

组合网架是将钢筋混凝土带肋板与钢网架相配合,用其代替网架上弦杆以节约钢材,并充分发挥两种不同材料的强度优势,克服因网架上弦杆突然失稳而引起结构破坏的缺点,同时又兼作楼(屋)面板,是一种受力合理、刚度大、安全经济的新颖结构形式。自60年代提出以来,经过不断地研究开发,在国内迅速发展,尤其在多、高层大柱网楼、屋面结构中具有优越的结构性能和明显的经济效益^[1,2]。目前,国内已建成的组合网架结构已近40个,方兴未艾。

然而,对工业厂房的网架结构,减小诸如悬挂吊车荷载带来的不利影响,提高网架的疲劳强度,仍是有待进一步研究解决的问题。对组合网架,在降低其跨中的应力高峰,改善下弦杆受力状况,充分发挥材料强度,减小挠度,节约钢材等方面也值得进一步努力。分析和工程实践表明,对网架和组合网架结构合理地施加预应力,发挥现代预应力技术和空间结构的特长,是解决上述问题的有效的、经济的手段。

收稿日期: 1997- 03- 27

1 基本理论

对网架和组合网架的分析均有精确计算方法和简化计算方法。网架结构常用的简化计算方法有差分法(交叉梁系)、拟夹层板法、假想弯矩法等;精确分析方法是假想节点为铰节点的空间桁架位移法。组合网架常用的近似分析方法有拟夹层板法,较精确计算方法有采用杆元、梁元和板壳元分析组合结构的组合有限元法或是通过能量原理把组合网架的平板或肋板等代为平面杆系,采用空间桁架位移法求解^[3]。近年来,由于计算机的普及和相关程序的开发,精确计算方法已占网架和组合网架分析的主导地位。

对预应力网架或组合网架,采用空间桁架位移法或多种单元组合的有限元精确分析法是有效的手段,但计算分析时需增添一种预应力索单元。

运用有限元分析时,预应力网架或组合网架一般遵循小变形、线弹性的基本假定。对于非长期所受应力水平较高的高强预应力索,分析可知,钢索的几何非线性和材料非线性的影响较小,可忽略不计。预应力索单元与一般铰接杆单元不同,由于布索的需要,它可以是直线索,也可以是单折线或双折线形索(图1)。通常把整根预应力索作为一个单元来进行有限元分析,其轴向力在索长范围内是个常数;在折线索转折点处,可近似地认为是个滑轮节点,不计该处的摩擦阻力。高强钢索与网架或组合网架的锚固节点为铰接节点。

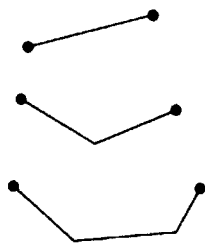


图1 索单元形成

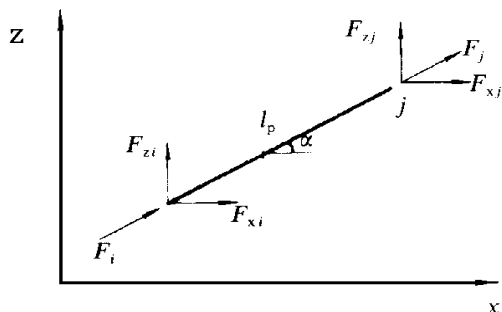


图2 平面坐标系直线索单元

图2为平面坐标系中直线索单元,其单元刚度矩阵为:

$$[\bar{K}]^e = \frac{E_p A_p}{l_p} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha \cos \alpha \sin \alpha - \cos^2 \alpha - \cos^2 \alpha - \cos \alpha \sin \alpha \\ \sin^2 \alpha - \cos \alpha \sin \alpha - \sin^2 \alpha \\ \cos^2 \alpha \cos \alpha \sin \alpha \\ \text{对称} \end{bmatrix}$$

式中 E_p —— 高强钢索的弹性模量;
 A_p —— 高强钢索的横截面面积;
 l_p —— 钢索长率。

将式(1)扩展到三维空间坐标系中,可知其形式与一般空间杆单元的单刚形式相同。

图3为x-z平面内单折线索单元,两端锚固节点为i、k,中间折点为j。 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 是各段索节点在单元长度方向的位移(伸缩); $\Delta_1 \sim \Delta_6$ 为索节点在x-z平面内的自由度。可采用直接刚度法推导出其单元刚度矩阵 $[\bar{K}]_{(6 \times 6)}^e$ 。令节点i沿 Δ_1 方向产生单位位移 $\Delta_1 = 1$,则

$$\delta_1 = \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_i = (E_p A_p / l_p) \cdot \delta_1 \quad (3)$$

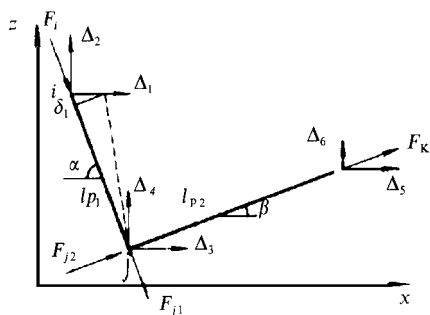


图3 单折线索单元节点力与位移

由基本假定可知:

$$F_i = f_{j1} = F_{j2} = F_K = F = (E_p A_p / l_p) \cos \alpha \quad (4)$$

式中 $l_p = l_p + l_{p2}$

相应于 Δ_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 的各索节点分量则为单元刚度矩阵元素 k_{ii} ($i = 1, 2, \dots, 6$) (1例):

$$k_{11} = F \cos \alpha = (E_p A_p / l_p) \cos^2 \alpha$$

$$k_{21} = F \sin \alpha = (E_p A_p / l_p) \sin \alpha \cos \alpha$$

$$k_{31} = -F_{j1} \cos \alpha + F_{j2} \cos \beta$$

$$= (E_p A_p / l_p) \cos \alpha (-\cos \alpha + \cos \beta)$$

$$k_{41} = -F_{j1} \sin \alpha + F_{j2} \sin \beta$$

$$= (E_p A_p / l_p) \cos \alpha (-\sin \alpha + \sin \beta)$$

$$k_{51} = -F_K \cos \beta = - (E_p A_p / l_p) \cos \alpha \cos \beta$$

$$k_{71} = -F_K \sin \beta = - (E_p A_p / l_p) \cos \alpha \sin \beta$$

同理, 分别在 $\Delta_2 \sim \Delta_6$ 方向上施加单位位移, 则可求出 $[\bar{K}]^e$ 中其余列元素。将 xz 平面内的单元刚度矩阵 $[\bar{K}]^e$ 扩展为 xyz 空间坐标系中, 可得互单折线索单元刚度矩阵 $[\bar{K}]_{9 \times 9}^e$, 详见文献 [4, 5]。对双折线索单元刚度矩阵 $[\bar{K}]_{12 \times 12}^e$ 也可同样求得。

对于预应力网架可组合网架, 叠加上相应的索单元后, 可进行有限分析, 求出各节点力和位移。对预应力索单元, 在求得各节点力后, 尚需求出各段索在每段索在每段单元局部坐标系下的节点力——轴力。如图 3 所示, 取第一段索的力节点分析, 有 $F_1 = F$ (拉为正, 压为负)。将高强钢索内的有效预应力 F_p 相加, $\Delta F = F_p + F$, 且必须 $\Delta F > 0$ 。若 $\Delta F < 0$, 则该高强钢索退出工作。此外, 通过张拉高强钢索对结构施加的预应力, 依据荷载等效原则, 以节点荷载的形式作用结构, 应反映到荷载向量列阵中去。

预应力组合网架的下弦杆、腹杆主要承受轴向力, 离散为空间杆单元进行有限元分析; 其上的钢筋混凝土助板、边助、交叉助离散为梁元, 肋间平板离散为能同时承受平面应力和弯曲应力的若干个三角形板壳单元。杆元与杆元、杆与梁元之间均假设为铰接, 梁元之间及梁元与板壳元之间为刚接。结构仅受节点荷载作用。

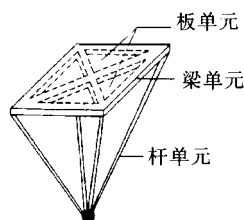


图4 组合网架单元示意

2 预应力的影响

2.1 合理的布索方案

本文分别以 $70m \times 70m \times 3.6m$ 正放四角锥预应力网架和 $24m \times 24m \times 1.8m$ 的正放四角锥预应力组合网架为算例进行了分析。高强钢索采用 1860 级无粘结钢绞线 ϕ_15 , 双向对称施加预应力。

一般而言, 通过施加预应力, 应使尽量多的杆件出现“卸载”, 即产生与使用荷载作用下符号相反的内力; 而与此同时产生的“增载”杆应尽量少, 以最大限度地发挥高强钢索的承载能力。

对正放四角锥网架, 而索方案如图 5 所示。方案 I 沿网架下弦杆布索, 构造简单, 施

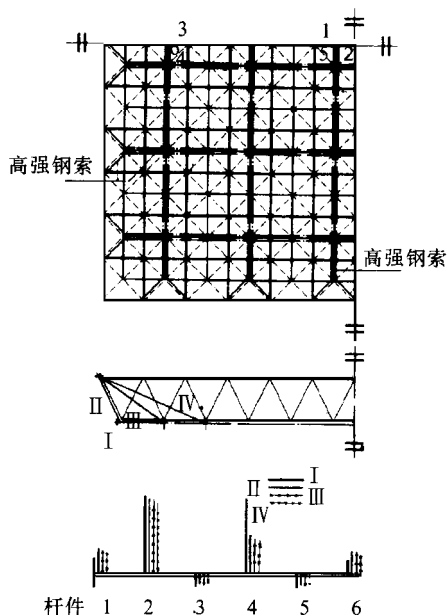


图5 网架不同布索方案比较

工方便,但预应力效果仅以下弦为主,对腹杆作用的卸载杆和增载杆各约 50%,对上弦杆影响较小。施加的预应力值大小由下弦(抗拉设计)的稳定承载力控制,一般不允许数值太大。与普通网架相比,节约钢材不超过 12%~15%。采用折线布索后,下弦跨中内力较大的杆件获得较大的反向应力,而靠近支座的内力较小的杆件获得较小的反向预应力;而且由于锚固端位于承压能力较强的上弦边缘,施加的预应力的大小比方案 I 大,效果明显。腹杆卸载杆增多,上弦跨中也出现卸载;而上弦杆靠近支座钢索锚固端的区域,则不可避免地出现增载杆。这些区域的杆件在荷载作用下内力较小,通常采用大于计算所需的“构造要求截面”。因此,增载后实际杆件截面增加并不多。不同的折线形布索方案预应力对杆件的内力影响如图 5 所示。经综合分析比较可知,方案 III 或方案 II 效果较理想,当网架跨度较大时,可采用方案 I 与方案 III 或方案 II 的共同配索方案,并结合施工过程分阶段张拉。计算和工程实践表明,在不减小预应力总量的前提下,没有必要在每一节间都布索,跨中可隔节间布置,支座附近区域可增大索间距或减小索面积,以节约材料,降低造价。折线形配索后,网架用钢量可节约 20% 左右,大大降低跨中应力,使网架内力分布更均匀、平缓,对网架的疲劳强度的提高大有帮助;同时,网架变形减小,刚度提高。在承受相同荷载时,预应力网架比普通网架高度可减小。

对于组合网架,也采用与网架相似的布索方案进行比较(图 6)。值得注意的是组合网架的上弦是承压能力很强的钢筋混凝土肋板,可以充分利用。所以,折线形布索方案更为合理。高强钢索锚固于肋板上,锚固端压力迅速扩散,仅相当于对肋板施加一个面内压力,对组合网架承载力影响甚微,因为上弦肋板中板主要承受平面应力,肋主要承受弯曲应力。组合网架的承载能力一般都由下弦杆

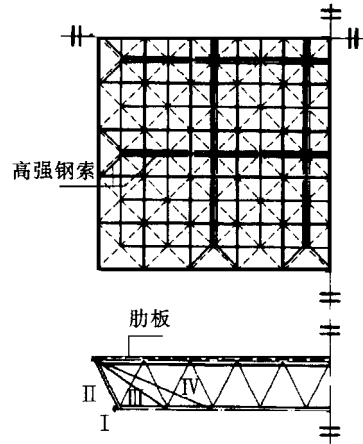


图 6 组合网架布索方案

或腹杆控制。经比较,布索方案 III 或方案 II 仍是较经济合理的方案,但应保证钢索端部锚具固定于肋板上。比较预应力的网架和组合网架,施加相同大小的预应力,其对后者的效果优于前者。预应力组合网架与组合网架比较,可减小跨中下弦内力 30% 以上,用钢量节约 20% 左右,降低造价 12%~15%。就目前我国工程实践而言,全钢网架跨度大于 70m 的不少,组合网架则一般跨度不超过 50m。因此,预应力网架和组合网架有其各自合理的应用领域。

2 2 预应力索的张拉顺序和控制应力

对预应力网架和组合网架,预应力索往往遵循“双向布置,对称张拉”的原则。由于结构处于小变形、线弹性阶段,计算表明,预应力索的张拉顺序对结构的内力分布和基本动力特征影响很小,可不予考虑。

预应力网架和组合网架属于无粘结预应力结构体系。参照《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)的规定,后张法张拉的高强钢绞线 $\sigma_m = 0.7f_{p,tk0}$ 为充分发挥高强钢材的强度,考虑到目前国内钢绞线生产质量的稳定和提高,预应力网架和组合网架的良好塑性和空间工作特性,宜将张拉控制应力提高到 $0.75f_{p,tk0}$ 。对螺栓球节点的结构,张拉时应进

行预张拉和超张拉施工工序,以消除高强栓松动带来的不利影响。

2 3 高强预应力索及其锚固

考虑到防护和耐久性等原因,高强钢索应外裹油脂和加厚塑料保护层。如有可能,高强钢索应在下弦钢管内穿管而过。高强钢索转折点处应过渡平缓,减小摩阻力,以尽量减小预应力损失并符合计算假定。

锚具应选用锚固损失小,安全可靠且便于施工的张锚体系,如QM、OVM及镦头锚体系。对预应力网架,锚固点常为球节点,必须保证锚具与球节点连接可靠,以满足球节点的承压强度要求。图7所示的是一种简便可靠的构造。当高强钢索锚固于网架上有困难时,也可将其锚固于刚劲的边缘构件上。对预应力组合网架,应将锚固点定在肋板的肋交叉处并验算其局部承压强度,索的张拉应在灌缝混凝土达到设计强度后进行。

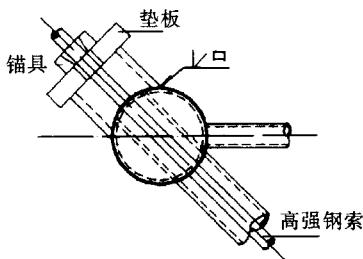


图7 锚固节点

3 优化设计

杆系结构采用满应力设计优化方法是行之有效的。对预应力组合网架,若将上弦肋板离散为等代交叉梁系,满应力法仍是可行的。基于可靠度分析的优化设计方法目前仍是正在探讨的问题,分析比较困难。通常将结构的耗钢量作为目标函数。影响预应力网架和组合网架耗钢量的因素较多,但其中支承条件、荷载取值、网架或组合网架类型乃至结构跨度往往是可先确定的,布索方案根据上节内容也可初定。因此,结构高度(高跨比)、网架

格数和预应力值是影响设计耗钢量的主要指标。此外,在满应力设计过程中还应将杆件截面尺寸规格化,使其满足构造要求,对受压杆还应满足稳定承载力要求。

根据优化计算结果,预应力正放四角锥网架(轻质屋面,四周支承,跨度大于60m)高跨比在 $1/18 \sim 1/20$ 为宜,网格数在 $14 \sim 18$ 为宜,单向预应力总量以平衡下弦杆单向跨中总拉力的 $35\% \sim 45\%$,以此确定高强预应力钢索的面积。对预应力组合网架,由于其所受荷载变化大,上弦肋板厚度还受网格形式、尺寸和整浇层的影响,目前尚不能给出某个定量优化指标。

实际上,优化设计的目的是通过合理的设计杆件和选择设计参数,使结构造价最低。上述优化分析尚无法完全反映造价优化的情况,例如,高强钢索与普通钢材的差价、锚具和张拉费用的增加以及网架高度降低带来围护结构费用的减少等因素尚不能精确分析。

4 结 语

预应力网架和组合网架在现代预应力技术、网架和组合网架发展日益成熟的今天,已具备在我国推广运用的条件,其良好的结构性能和经济、安全性,开拓了空间结构的一个新的领域。

参 考 文 献

- 1 董石麟,马克俭,严慧等 组合网架结构与空腹网架结构 浙江大学出版社,1992
- 2 程万海,杜光兴 网架—平板组合结构的有限元分析及试验研究 第四届空间结构学术交流会议论文集,1988
- 3 董石麟,杨永革 网架—平板组合结构的简化算法 建筑结构学报,1985(4,5):10~20,29~35
- 4 曾志攀 预应力斜放四角锥网架的研究及优化设计: [学位论文] 南京:东南大学,1992
- 5 Bial M. Ayyub, etc Posttensioned Truss: Analysis and Design Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116(6): 1491~1505