

预应力正放四角锥组合网架结构试验研究

韩庆华¹, 艾 军¹, 裴 波², 左克伟³, 刘兴业¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072 2. 江苏省苏州市建筑设计研究院, 江苏苏州 215002;

3. 天津华汇工程建筑设计有限公司, 天津 300381)

摘要: 预应力组合网架是一种基于组合网架和预应力技术发展起来的由钢和钢筋混凝土组合而成的空间结构, 它可以充分发挥钢材抗拉, 混凝土抗压的特点。当采用分批张拉时, 后批索张拉必然会造成前面所有批索实际张力发生改变。本文对一 $3\text{m} \times 3\text{m}$ (网格数为 3×3) 的试验模型的三根预应力下弦拉索, 采用了三种张拉次序 (依次张拉、先张拉两边索再张拉中间索和先张拉中间索后张拉两边索) 进行张拉, 测出了索内预应力及结构内力的变化, 并与基于张力松弛法的索-杆-梁-板系有限元法分析结果进行对比, 结果表明, 采用张力松弛法可以考虑不同张拉次序对索内预应力的影响。

关键词 预应力组合网架; 张拉次序; 应力分布; 模型试验

中图分类号: TU378 TU317.1 **文献标识码:** A

Experimental study on prestressed orthogonal square pyramid composite space truss

HAN Qinghua¹, AI Jun¹, PEI Bo², ZUO Kewei³, LIU Xingye¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Suzhou Institute of Architectural Design, Suzhou 215002, China;

3. Tianjin Huahui Design Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: Prestressed composite space truss is developed on the basis of composite structure and prestress cables. It is a new type of steel-concrete space structures in which the steel is in tension and the concrete is in compression. Different tensioning sequences in batches may lead to different stress distribution and cable controlling forces. In this paper, the test of a $3\text{m} \times 3\text{m}$ (3×3 grids) orthogonal square pyramid composite space truss model with prestressing three bottom cables by three different prestressing sequences in batches were carried out, namely tensioning the cable in order from one side to other side; tensioning the two exterior cables first, then the middle one; tensioning the middle cable first, then the exterior ones. Based on the experimental research of the prestressed square pyramid composite space truss, the internal forces of each element under prestress and loads were analyzed. In comparison with the cable-truss-beam-plate complicated finite element method, it shows that the release tension technology has the merit of considering the effect of different tensioning sequences on the prestresses of cables, so it is more reasonable in calculating the cable controlling forces and internal stresses.

Keywords: prestressed composite space truss; tension sequence; stress distribution; model test

1 引言

基金项目: 天津市应用基础研究项目(033604411)。

作者简介: 韩庆华(1971-), 男, 山东淄博人, 副教授。

收稿日期: 2003 年 8 月

预应力组合网架是一种基于组合网架和预应力技术发展起来的由钢和钢筋混凝土组合而成的空间结构。它将网架上弦用钢筋混凝土平板(或带肋板)代替,

下弦杆和腹杆仍用钢材,并在下弦布置一定数量的预应力拉索,从而形成一种下部是钢结构,上部是钢筋混凝土的新型预应力空间结构体系,它可以充分发挥混凝土抗压、钢材抗拉的强度优势,使结构的承重和围护功能合二为一。

目前,国内外对组合网架结构及预应力网架结构的研究较多^[1~3],但对预应力组合网架结构的研究却较少^[4,5],特别是对施工时索的不同张拉次序的影响等方面的研究尚不多见。对于预应力空间结构,通常采用分组分批张拉预应力索(或筋)的施工方法,此法的优越性在于施工工艺简单。但必须考虑的问题是:分批张拉时,后批索张拉必然会造成前面所有批索实际张力发生改变,当最后一批索张拉完毕时,除最后一批索外,所有索的实际内力值均不是施工时的张力控制值。

张力松弛法^[6]是针对预应力空间结构施工张拉控制值计算和结构在施工期间的受力分析而提出的一种分析方法,目的是使张拉工作全部完成时,各组索的实际内力正好等于张力设计值。张力松弛法针对分组分批张拉施工法,索的分组分批应根据结构中索的分布情况以及施工条件的实际情况而定。同一组索是指同时张拉的若干条索,不同批次是指时间上的区分,即前一组索张拉并固定后再进行后一组索的张拉。张力松弛法的分析步骤与施工顺序正好相反,即假定计算分析的第一状态是所有组索均被张拉到各自的张力设计值,然后按索张拉施工的逆向顺序逐一放松各组索直到第一批次的索,在此过程中逐一计算各组索中主动索的张力施工控制值。张力松弛法不需要多次循环,分析计算过程仅需一轮。

为了研究不同张拉次序对索的预应力的影响,了解预应力组合网架结构在荷载作用下的应力分布特点,并验证采用索-杆-梁-板系有限元法及张力松弛法的合理有效性,本文对正放四角锥预应力组合网架进行了模型试验研究。

2 模型试验

2.1 模型设计与制作

模型平面尺寸取为 $3\text{m} \times 3\text{m}$,网格数为 3×3 ,网格尺寸为 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$,网架高度 0.6m ,支承方式为上弦四边简支。模型取材:

(1) 上弦 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 带肋板板厚 25mm ,内置双向钢筋网片 $\Phi 4@50$,肋高 35mm ,宽 50mm ,上下各配 $2\Phi 4$,箍筋 $\Phi 4@50$,钢筋为冷拔低碳钢丝,配筋如图 1 所示;

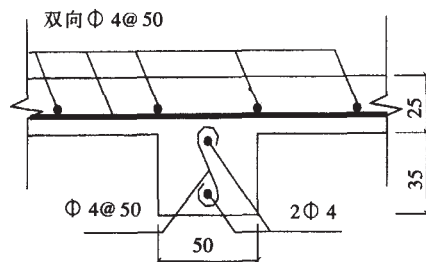
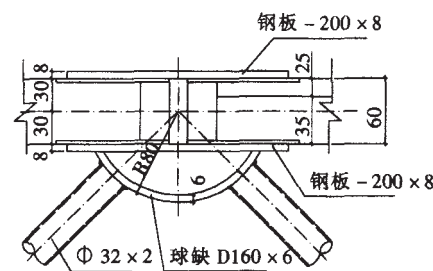


图 1 带肋混凝土板配筋示意图

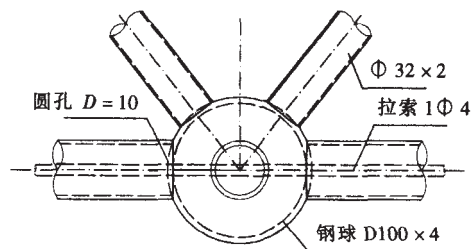
Fig. 1 Reinforcement of the ribbed concrete slab

(2) 腹杆采用 $\Phi 32 \times 2$ 钢管,下弦杆采用 $\Phi 42 \times 2$ 钢管;三个钢材试件的弹性模量实测值均为 $E_{s1} = 2.10 \times 10^{11}\text{MPa}$;

(3) 沿下弦单向布置的预应力索采用 $\Phi 5$ 的冷拔高强钢丝,长 3m ,共 3 根;其弹性模量实测 E_{s1} 为 $2.06 \times 10^{11}\text{MPa}$, $2.07 \times 10^{11}\text{MPa}$, $2.07 \times 10^{11}\text{MPa}$,平均值为 $E_{s2} = 2.07 \times 10^{11}\text{MPa}$;



(a) 上弦节点



(b) 下弦节点

图 2 节点示意图

Fig. 2 Illustration of the nodes

(4) 上弦节点采用 $\Phi 160 \times 6$ 焊接空心球缺, 共 16 个, 下弦节点采用 $\Phi 100 \times 4$ 焊接空心球, 共 9 个, 下弦穿预应力筋的节点球沿下弦杆方向打直径为 10mm 的圆孔, 以备穿入预应力筋。上下弦节点如图 2 所示。网架模型及索张拉节点如图 3 和图 4 所示。

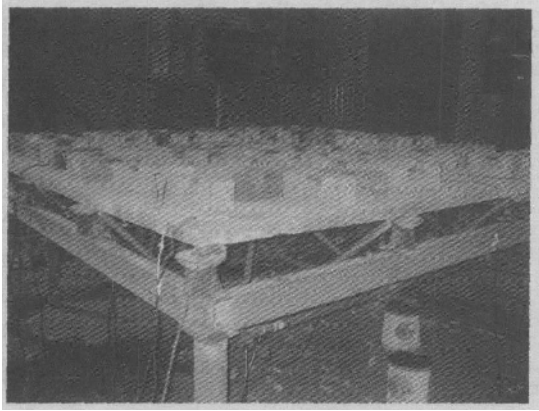


图 3 网架模型加载示意图

Fig. 3 Model loading sketch

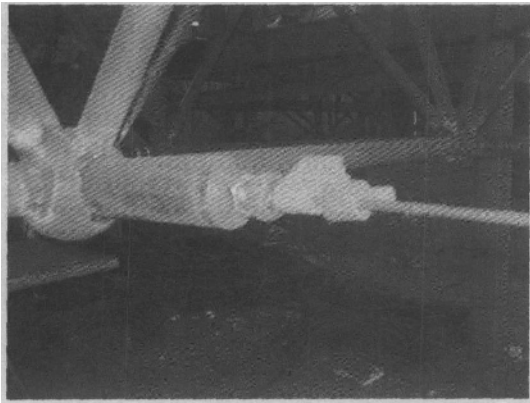


图 4 索张拉节点

Fig. 4 Tension node sketch

2.2 试验仪器

- (1) 本试验 35 个测点 布置见图 5) 的应变使用 ZSY-256D 智能应变仪进行测量;
- (2) 网架挠度使用百分表测量 百分表位置见图 6);
- (3) 使用 M20 螺栓实现索的张拉, 预应力的由预应力筋上的电阻应变片控制, 索两端均采用圆锥夹具锚固。

2.3 试验过程

- (1) 网架就位妥当, 静停 30min;
- (2) 预应力索的张拉:

本试验采用三种方案进行预应力索的张拉, 索编号如图 5e 所示:

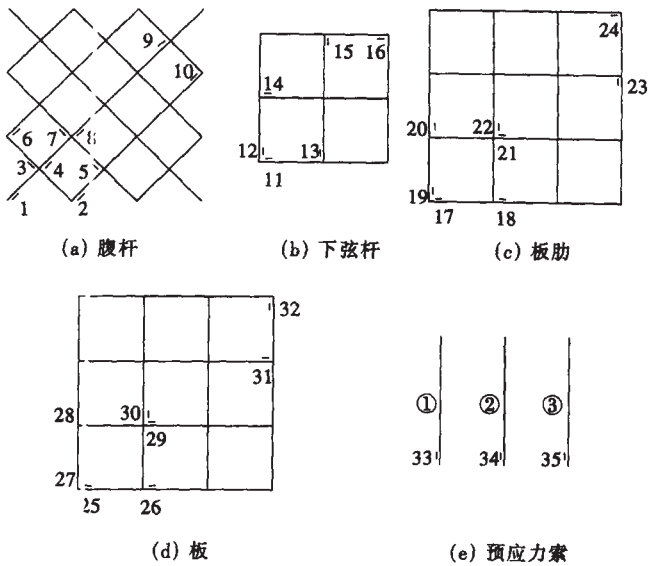


图 5 应力测点布置图

Fig. 5 Arrangement of stress measurement points

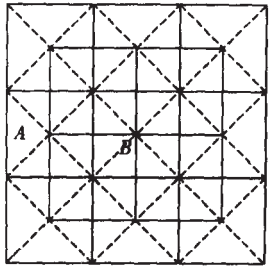


图 6 挠度测点布置图

Fig. 6 Arrangement of displacement measurement points

方案 I : 从左向右依次张拉①②③号索;

方案 II : 先张拉①号索, 接着是③号索, 最后张拉②号索;

方案 III : 先张拉②号索, 然后张拉①号索, 最后是③号索。

根据张力松弛法可计算出各种方案的索施工张拉控制值。

(3) 上弦加载 按照荷载大小在上弦板上施加砝码):

- ① 均布荷载 2 kN/m^2
- ② 均布荷载 3 kN/m^2
- ③ 均布荷载 5 kN/m^2

每次加载完毕后稳定 15min, 由测试系统进行测试, 输出测量结果。

2.4 试验工况

工况 1 方案 I 张拉①号索;

工况 2 方案 I 张拉②号索；
工况 3 方案 I 张拉③号索；
工况 4 方案 II 张拉①号索；
工况 5 方案 II 张拉③号索；
工况 6 方案 II 张拉②号索；
工况 7 方案 III 张拉②号索；
工况 8 方案 III 张拉①号索；
工况 9 方案 III 张拉③号索；
工况 10：三根索全部张拉完成后，上部施加均布荷载 $2\text{kN}/\text{m}^2$ ；
工况 11：三根索全部张拉完成后，上部施加均布荷载 $3\text{kN}/\text{m}^2$ ；
工况 12：三根索全部张拉完成后，上部施加均布荷载 $5\text{kN}/\text{m}^2$ 。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

表 1 给出了部分工况下 A、B 点 (图 6) 的计算位移和试验位移,并计算了相对误差。因篇幅所限,本文仅列出工况 3 和工况 12 的应力值,如表 2 和表 3 所示。其中理论计算结果采用了索-杆-梁-板系有限元法,即拉索采用只拉不压的索单元,下弦杆及腹杆采用杆单元,板肋采用梁单元而上弦板采用板单元,下弦节点为铰接,上弦板肋节点为刚接,而腹杆与上弦板肋节点的连接为铰接。采用主从节点的方法,考虑了节点偏心的影响^[7]。

表 1 模型在各种工况下的位移值

Table 1 Displacements of all load cases of the model		工况							
		1	2	3	5	7	10	11	12
计算位	A	0.0028	0.0177	0.0211	0.0063	0.0096	-0.0309	-0.0569	-0.1090
移/mm	B	0.0012	0.0319	0.0430	0.0125	0.0207	-0.0613	-0.1134	-0.2176
试验位	A	0.0023	0.0165	0.0150	0.0081	0.0110	-0.0355	-0.0590	-0.1040
移/mm	B	0.0014	0.0330	0.0361	0.0163	0.0196	-0.0560	-0.0964	-0.1953
相对误	A	17.8	6.8	28.9	28.6	14.6	14.9	3.7	4.6
差/%	B	16.6	3.4	16.0	30.4	5.3	8.6	15.0	10.2

3.2 误差分析

- (1)模型本身的误差。实际模型的上弦板相对较柔,在试验前由于运输原因就已经产生了一定的挠曲变形,另外模型制作安装的质量也会影响试验结果。
- (2)试验仪器存在误差。电测仪器在测量时有零点

表 2 模型在工况 3 下的试验应力与计算应力

Table 2 Experimental stresses and calculated stresses of No. 3 load case of the model

测点	计算应	试验应	相对误	测点	计算应	试验应	相对误
号	力/MPa	力/MPa	差/%	号	力/MPa	力/MPa	差/%
1	3.571	4.540	27.1	17	0.004	0.005	25.0
2	3.048	3.550	16.5	18	0.017	0.020	17.6
3	-4.958	-3.861	22.1	19	0.031	0.040	29.0
4	-0.104	-0.136	30.7	20	0.003	0.004	33.3
5	-2.802	-2.621	6.4	21	0.055	0.070	27.3
6	-1.457	-1.473	1.1	22	-0.016	-0.021	31.3
7	1.689	1.520	10.0	25	-0.158	-0.163	3.2
8	0.136	0.148	8.8	26	-0.038	-0.041	7.8
11	-1.289	-1.239	5.0	27	-0.144	-0.132	8.3
12	-7.682	-7.576	1.4	28	-0.067	-0.065	3.0
13	-11.180	8.774	21.5	29	0.015	0.017	13.3
14	-7.682	-8.320	8.3	30	-0.160	-0.182	13.8

表 3 模型在工况 12 下的试验应力与计算应力

Table 3 Experimental stresses and calculated stresses of No. 12 load case of the model

测点	计算应	试验应	相对误	测点	计算应	试验应	相对误
号	力/MPa	力/MPa	差/%	号	力/MPa	力/MPa	差/%
1	4.154	5.337	28.5	17	0.038	0.035	7.9
2	13.200	15.390	16.6	18	-0.028	-0.031	10.7
3	4.296	5.073	18.1	19	0.066	0.052	21.2
4	-19.541	-21.840	11.8	20	-0.042	-0.049	16.6
5	-12.965	-13.120	1.2	21	-0.125	-0.143	17.6
6	8.366	9.752	16.5	22	-0.201	-0.254	26.4
7	-8.134	-6.834	16.0	25	-0.024	-0.018	25.0
8	0.136	0.157	15.4	26	0.027	0.030	11.1
11	6.674	8.032	20.3	27	-0.009	-0.011	22.2
12	-0.036	-0.047	30.5	28	-0.003	-0.002	33.3
13	4.073	3.780	7.2	29	0.176	0.198	12.5
14	-0.036	-0.046	27.7	30	-0.013	-0.014	7.7

漂移现象,电阻应变片粘贴角度、粘贴质量的影响也会造成误差。预应力索张拉时本身的徐变以及锚具的滑移也易产生误差。施加荷载过程中,由于砝码块的摆放不均匀以及砝码块本身的质量不匀也有一定的影响。

(3)支座条件的影响。计算模型假定的边界条件为周边简支,而实际模型周边支承于弹性钢梁上,两者之间的偏差也会产生误差。

3.3 试验结果分析

3.3.1 挠度分析

模型试验实测最大挠度值为 -0.1953mm ；所有工况

中最大位移相对误差是 30.4%,最小误差是 3.4%。

3.3.2 预应力组合网架应力分布特点

(1)分批张拉预应力索时,张拉索附近的腹杆应力变化大,有的甚至成几倍量级变化;

(2)边跨的腹杆应力值较大,垂直于索方向的尤其明显;

(3)布索可明显降低下弦杆的应力值,有的杆件会由拉变为压;

(4)分批张拉预应力索时,张拉索附近的下弦杆应力变化相对较大;

(5)位于预应力组合网架中间部位的板应力值相对较大,边跨和角点处的板肋应力值较中间部位的大。

3.4 张拉次序对索内预应力的影响

本试验采用三种方案进行了预应力索的张拉,从表 4 中索的应力值可以看出,计算应力与实测应力非常接近,误差都在 5% 以内。另外,使用张力松弛法计算出的预应力索施工张拉控制值进行施工,可以使张拉工作全部完成时,各组索的实际张力与张力设计值非常接近。

采用不同的张拉方案,预应力索的施工张拉控制值会有所不同,如图 7 所示。但当全部张拉完成后,不同张拉方案下索的实际内力却完全相同。可见,不同的张拉次序对索内的最终应力没有影响,而对索的施工张拉控制值有所影响。

在实际工程中,应根据实际情况确定简单易行的张拉方案,再采用张力松弛法对预应力索进行分组分批张拉,从而大大降低了施工的难度,简化了施工的过程。

表 4 索预应力的计算控制值和试验值
Table 4 Calculated and experimental controlling values of prestressed cables

张拉 方案	张拉 序号	索①		索②		索③	
		计算应力	试验应力	计算应力	试验应力	计算应力	试验应力
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
I	①	154.2	154.0	0	0	0	0
	②	153.2	153.3	204.8	205.8	0	0
	③	153.0	152.7	204.1	204.5	153.0	152.9
II	①	154.2	154.0	0	0	0	0
	③	154.0	153.7	0	0	154.0	154.1
	②	153.0	152.7	204.1	204.5	153.0	152.9
III	②	0	0	205.5	205.4	0	0
	①	153.2	153.3	204.8	205.8	0	0
	③	153.0	152.7	204.1	204.5	153.0	152.9

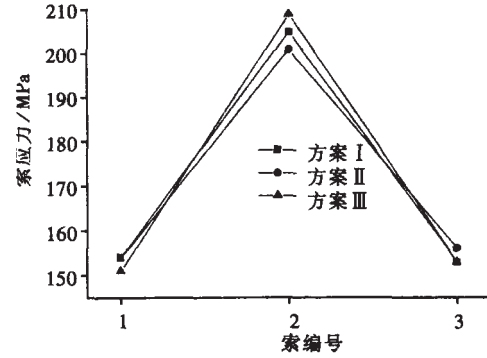


图 7 不同张拉方案下索的施工张拉控制值的比较

Fig. 7 Comparison of the tension values of the cables in different tensioning sequences

4 结论

通过上述试验研究,可以得出如下结论:

(1)采用索-杆-梁-板系有限元法对预应力组合网架结构进行内力及位移分析是合理的;

(2)施加预应力将会使网架内力产生不同的变化,其变化趋势在下弦、腹杆及上弦板中各不相同。

(3)预应力拉索采用不同的张拉次序,索的施工张拉控制值及结构内力将有不同的变化,采用张力松弛法计算出的控制值进行施工,可以使张拉工作全部完成时,各组索内的实际张力接近于张力设计值,不必反复调整张力。

参 考 文 献

[1] 高博青,董石麟. 组合网架有限元分析和受力特性的研究 [A]. 新型空间结构论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.

[2] 林翔,董石麟. 组合网架动力特性的研究及电算程序的编制[A]. 新型空间结构论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.

[3] 丁阳. 预应力斜放四角锥平板网架静力分析及模型试验研究[D]. 天津大学,1991.

[4] 张其林,沈祖炎,李良勇等. 拉索预应力组合网架的非线性分析[A]. 新型空间结构论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.

[5] 舒赣平,吕志涛. 预应力网架和组合网架的分析和研究 [J]. 工业建筑, 1997, 27(7).

[6] 卓新,董石麟. 张力松弛法及其在预应力空间结构中的应用[J]. 工业建筑增刊, 2002.

[7] 韩庆华,裴波,杨志等. 预应力组合网架结构的理论分析与应用研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1).