

大跨度拉索张弦桁架的实验研究

张焕华, 杜庆远

辽宁工程技术大学研究生学院, 辽宁阜新 (123000)

E-mail: huazhi170@163.com

摘要: 结合管桁架和张弦梁^[1]的力学和构造特点, 通过在管桁架结构的下弦加竖直撑杆, 配置拉索并施加预应力, 得到一种新型空间结构形式——拉索张弦桁架结构, 它可以看作是张弦梁加竖直撑杆时的一种特殊结构形式。这种结构不仅具有管桁架的优点, 同时又能克服张弦梁的许多不足之处。

关键词: 新型拉索桁架结构; 管桁架; 张弦梁; 预应力

中图分类号: TU973.2

1. 引言

在钢结构中采用加预应力的方法, 在 19 世纪末就已出现。它们都是利用各种手段在承受全部荷载之前单次或多次的引用预应力一对多数杆件卸载, 降低内力峰值或提高结构刚度。管桁架和张弦梁结构^[1]由于其经济性、适用性的优点, 国内许多大专院校及科研机构对这两类结构进行了大量的研究, 我们以承担设计的工程实例为模型, 进行了仿真试验, 目的在于: 分析在预应力阶段桁架的内力分布特点以及在荷载作用阶段索与下弦管共同工作的原理; 检验设计计算结果的准确性; 用试验数据检测预应力空间管桁架的安全度。本文主要研究了竖向均布荷载作用下新型张弦桁架结构^[2]的工作情况, 并得到主要试验研究结果。

1.2 实验简介

1.2.1 试件

试件是在原成都国际会议展览中心空间预应力钢桁架模型(缩尺 1/9)的基础上改进得到的新型空间预应力张弦桁架, 桁架的几何尺寸如图 1 所示, 跨度 11.6m, 下弦布置一根 $7\phi 5$ 钢绞。本试验相当于柱距 6m, 恒载 $0.5\text{KN}/\text{mm}^2$, 活载 $0.5\text{KN}/\text{mm}^2$ 的实物试验, 不采用相似理论。桁架支座采用橡胶支座, 如图 2 所示。桁架下撑杆构造见图 3。钢管的弹性模量: $E=2.05\times 10^5\text{N}/\text{mm}^2$ ^[3], 钢绞线的弹性模量 $E=1.95\times 10^5\text{N}/\text{mm}^2$ ^[3], 钢管的强度设计值: $f=215\text{N}/\text{mm}^2$ ^[3], 钢绞线的强度标准值: $f_k=215\text{N}/\text{mm}^2$ ^[3], 钢绞线的强度设计值: $f_p=1320\text{N}/\text{mm}^2$ ^[3]。

1.2.2 试验方法

用 TDS-602 型数据采集箱配合 ASW-50C 扫描箱测试钢管的应变。用 YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪配合电位移传感器来测量各测点的竖向位移, 精度为 0.001mm。张拉预应力分四级, 每级 30 KN, 一端固定, 另一端作为张拉端, 桁架在水平方向可自由滑动。本试验的设计荷载为 $1\text{KN}/\text{m}^2$ (柱距 6 m 实物荷载), 实际加载为 $2.311\text{KN}/\text{m}^2$, 超载 131%。试验采用铁块均布加载, 每块质量为 20kg 。荷载分五级加载, 第一级加载为 $5.177\text{KN}/\text{m}^2$ (模型实际均布荷载), 第二至第五级每级加载 $15.52\text{KN}/\text{m}^2$, 30 min 后开始读数。荷载实验采用现场实物测试分析而排除采用缩尺模型试验时采用相似理论带来的误差。

2. 主要试验结

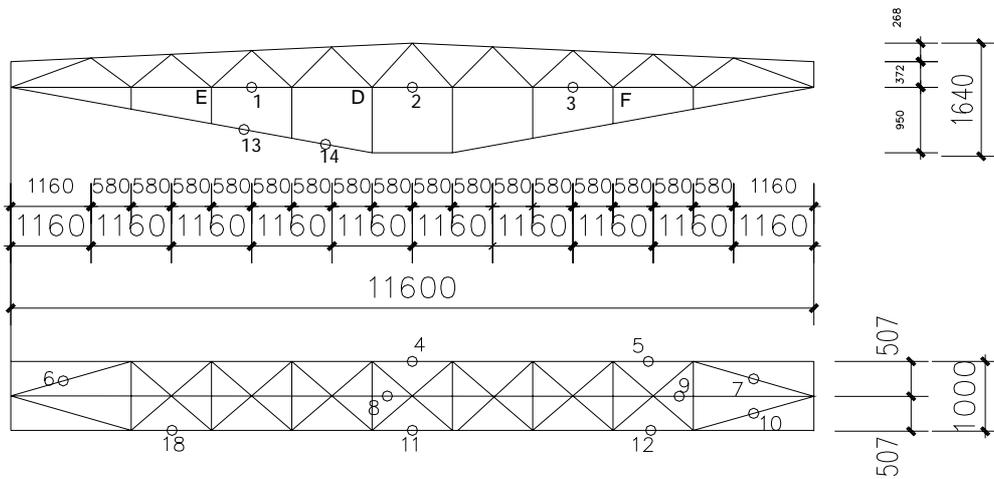


图 1 桁架的几何尺寸及测点布置
Fig1 the physical dimension of truss and the position of survey point

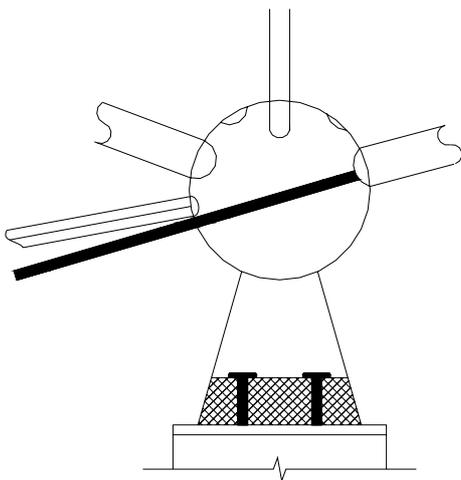


图 2 桁架支座构造图
Fig2 The structure drawing of truss bearing

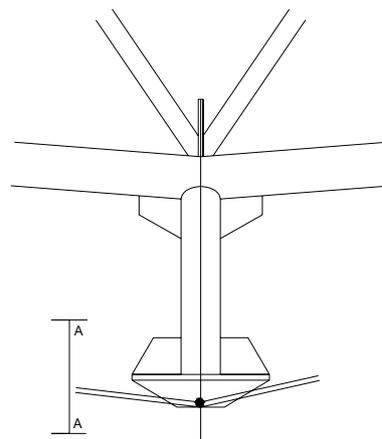


图 3 下撑杆构造图
Fig3 The structure drawing of bar stay

2.1 预应力阶段

2.1.1 杆件的轴力

表 1 杆件实测轴力 K N
Tab.1 The actual measurement axis force of member bar

测点	预应力等级				
	30	60	90	120	121.5
1	-25.98	-60.78	-94.36	-128.9	-131.85
2	-29.40	-64.78	-100.86	-134.20	-139.87

3	-29.08	-64.44	-100.80	-132.40	-139.44
4	4.40	9.80	13.93	22.11	22.00
5	4.31	8.69	12.77	17.66	18.89
6	2.74	6.55	9.86	13.33	14.20
7	5.56	12.88	19.40	27.94	30.44
8	-0.19	-0.59	-0.67	-0.88	-0.98
9	-1.39	-2.88	-4.75	-6.55	-6.79
10	6.65	14.78	23.45	32.88	34.57
11	3.88	9.33	14.32	19.08	21.37
12	5.26	12.37	20.03	25.13	27.35
13	19.32	45.38	70.02	92.55	96.23
14	25	51.79	78.03	100.41	103.15

表 2 杆件理论轴力 KN
Tab.2 The theory axis force of member bar

测点	预应力等级				
	30	60	90	120	121.5
1	-41.07	-82.14	-123.21	-164.29	-166.34
2	-42.39	-84.78	-127.17	-169.55	-171.67
3	-41.07	-82.04	-123.21	-164.29	-166.34
4	6.64	13.28	19.92	26.54	26.87
5	4.04	8.08	12.12	16.15	16.36
6	3.58	7.16	10.74	14.30	14.48
7	3.58	7.16	10.74	14.30	14.48
8	-0.59	-1.18	-1.77	-2.34	-2.37
9	-1.52	-3.04	-4.56	-6.06	-6.14
10	3.58	7.16	10.74	14.30	14.48
11	6.64	13.28	19.92	26.54	26.87
12	4.04	8.08	12.12	16.15	16.36
13	30	60	90	120	121.5
14	30	60	90	120	121.5

对比表 1 和表 2 数据, 可看出, 在预应力的作用下, 桁架下弦杆件产生的轴力较大(如测点 1、2、3), 在桁架的工作阶段, 预应力阶段产生的轴力将抵消工作荷载产生的内力, 桁架下弦杆件内力会大幅度减小, 相应下弦杆件的截面面积就大大减小, 产生良好的经济效益。同时我们也注意到, 在预应力作用下, 桁架结构上弦杆件和腹杆产生的内力较小, 在工作阶段, 其对抵消工作荷载的贡献就不是很大。但是, 一般桁架的下弦杆件往往是整个桁架结构受力最大, 也是最耗材的部分, 所以能够大幅度的减小下弦杆件的截面尺寸, 就能够在整体上产生很大的经济效益。在整个加载预应力过程中, 大多数杆件轴力都要小于理论轴力, 说明此预应力桁架结构有足够的安全储备。对比表也能看到, 张拉端的轴力大于固定端轴力, 张拉端有几根杆的轴力还大于理论值, 这主要是由于张拉各阶段的间隔时间太短, 索的内力分布还未趋于稳定便读数, 以致造成较大误差。即使索的内力趋于稳定, 若索只在一端张拉, 索的内力分布也不可能是完全均匀的。因此, 在实际张拉过程中, 应采用两端张拉。

2.2 荷载作用

2.2.1 桁架杆件轴力

表 3 杆件实测轴力 KN
Tab.3 The actual measurement axis force of member bar

测点	载等级/ KN m^{-2}				
	5.17	7.76	10.34	12.93.	15.52
1	-77.21	-45.25	-18.54	-7.82	-40.36
2	-92.35	-68.39	-46.16	-25.83	-16.84
3	-84.67	-51.08	-24.87	1.87	34.21
4	-8.24	-19.72	-36.57	-52.55	-64.74
5	-11.34	-23.54	-40.47	-53.78	-65.76
6	-22.54	-41.54	-59.37	-69.68	-89.78
7	-7.14	-27.36	-43.67	-63.15	-79.61
8	-7.91	-10.04	-13.54	-17.38	-18.34
9	3.45	9.17	-13.74	-16.47	-18.34
10	-3.11	22.41	-38.44	-64.17	-76.98
11	-10.78	-22.74	-41.08	-57.67	-66.82
12	-2.79	-15.69	-32.11	-45.16	-60.04
13	110.12	116.97	123.59	169.88	140.24
14	133.09	138.56	147.72	156.34	177.46

表 4 杆件理论轴力 KN
Tab.4 The actual measurement axis force of member bar

测点	载等级/ KN m^{-2}				
	5.17	7.76	10.34	12.93.	15.52
1	-79.22	-46.50	-13.80	18.91	51.63
2	-93.49	-65.59	-37.70	-9.80	18.10
3	-79.22	-46.50	-13.80	18.91	51.63
4	-12.05	-29.76	-47.46	-65.17	-82.87
5	-19.74	-36.73	-53.71	-70.70	-87.69
6	-20.01	-36.31	-52.61	-68.91	-85.21
7	-20.01	-36.31	-52.61	-68.91	-85.21
8	-7.55	-10.29	-13.04	-15.79	-18.52
9	3.74	8.29	12.82	17.36	21.91
10	-20.01	-36.31	-52.61	-68.91	21.91
11	-12.04	-24.75	-47.45	-65.16	-82.86
12	-19.74	-36.73	-53.71	-70.70	-87.69
13	120.30	127.78	135.25	142.73	150.21
14	120.30	127.78	135.25	142.73	150.21

对比表 3 与表 4 数据可看出,在整个加载过程中,每根杆件的轴力基本上保持线性变化,且比理论值要小 15%至 20%左右,结果比较理想,也证明了此桁架结构具有一定的安全储备。13 号预应力索的应力值一直比理论值小 10%左右,而 14 号预应力索的应力值一直比理论值要大 10%左右,其原因是桁架下弦撑杆加工时有尺寸误差,导致撑杆不在一条直线上造成的。

2.3 误差分析

(1)模型制作产生的误差

模型在几何尺寸的制作上存在一定的误差,同时,为了保证模型的稳定性和加载方便,模型中用钢管连接平面和空间桁架,而节点的处理也不是很精确,这使得桁架的受力会有一

定的影响，从而带来误差。

(2)加载方案产生的误差

本试验采用人工加铸铁块来模拟竖向均布荷载，这种模拟方式存在很大的近似性，加载后荷载不可能完全均匀地分布于整个桁架上，这样也会产生一定的误差。

(3)测试本身的缺陷引起的误差

鉴于模型的实际情况及试验条件，电阻应变片只能贴在钢管的表面，且对于主要受力的地方，也只能用个或两个应变片来代替整个截面，这样，由于应变片粘贴位置的误差以及粘贴质量的误差，都将带来测试

结果的误差。

(4)张拉阶段产生的误差

模型在张拉阶段时，由于张拉各阶段的间隔时间太短，索的内力分布还未趋于稳定便读数，以致造成了一定的误差。即使索的内力趋于稳定，若索只在一端张拉，索的内力分布也不可能是完全均匀的，这也提醒我们在实际张拉过程中，应采用两端张拉。

3. 试验结论

通过对该模型结构测试结果分析及对试验结果与理论计算结果的比较，得到以下结论：

3.1 张拉阶段应变测试结果分析

a. 无论是理论结果还是测试结果，腹杆和上弦杆的内力均较小，张拉力主要由下弦杆承担。

b. 张拉端下弦杆内力大于固定端的下弦杆内力，并大于理论计算结果，而支座三方向约束端的内力小于理论计算值，其原因已在上面的误差分析中提出。

3.2 加载阶段节点挠度及应力测试结果分析

由前面图表可直观地看出，理论结果与测试结果在弹性阶段吻合得较好，特别是跨中挠度，误差仅5%。结构的整体性好、刚度大，在竖向均布荷载作用下，荷载传递、分配可靠，结构变形小。结构的承载力大、安全度高。超载20%后变位未达到限值，结构仍然安全可靠，且结构在长期荷载作用下(超载20%后)，仍然正常工作，说明该结构具有较高的安全储备

3.3 大跨度管内预应力空间管桁架结构在施工上的可行性分析

试验模型的制作验证了大跨度管内预应力空间管桁架结构在施工上的可行性，可用于实际工程。目前已经超载近两个月，测试点的挠度几乎没有变化，通过试验检验了理论分析正确性和安全储备。

参考文献

- [1]董石麟. 空间结构[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
[2]刘锡良, 白正仙. 新型空间结构型式—张弦梁结构[J]. 空间结构, 2001, (6): 56—60
[3]GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].

Experiment Study on the Large Span Truss String Structure

Zhang Huanhua, Du Qingyan

LiaoNing Technical University, FuXin, LiaoNing, PRC (123000)

Abstract

In combination with mechanical behaviors and structure feature of Pipe Truss Structure and Beam String Structure. Through disposal of dragline and pre—stressed in vertical support of bars in Beam String Structure. a new type space structure—The New Type Truss String Structure was developed. It is a special kind of structure in which vertical support of bars is added in Beam String Structure. The structure not only holds the advantages of Pipe Truss Structure but also remedies its disadvantages.

Keywords: the new type truss string structure; pipe truss structure; the bottom pipe pre—stressed truss;

作者简介:

张焕华, 男, 1982 年生, 研究生, 主要研究方向是大跨度空间结构;
杜庆远, 男, 1982 年生, 研究生, 主要研究方向是大跨度空间结构。