

# 大跨度体外预应力钢梁施工技术研究

谢贻军\*, 洪绍正, 童林浪, 盘洪玉, 沈正峰, 周晓敏

(长江精工钢结构(集团)股份有限公司, 安徽 六安 237161)

**摘要:** 某会议中心观众厅的屋顶结构梁采用了双索实腹式预应力钢梁。借助有限元软件,对高空一次性张拉、地面一次性张拉以及分阶段张拉三种张拉施工方法进行了比较,同时针对张拉过程中可能存在的不同步张拉情况开展了敏感性分析。此外,还对预应力钢梁在施工阶段的全过程以及后期施工荷载作用下的应力和变形进行了分析,并与施工监测结果进行对比。结果表明:预应力张拉偏差在5%以内,对钢梁的应力、变形及稳定性影响均能够有效控制;有限元分析结果与监测数据吻合较好;在整个施工过程以及后期施工荷载的作用下,结构的各项技术指标均在规范要求范围内。

**关键词:** 体外预应力钢梁; 张拉施工方法; 数值模拟; 不同步张拉; 敏感性分析; 施工监测; 应力和变形

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)02-0105-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240920001

## Construction Technology for Large-Span External Prestressed Steel Beams

XIE Yijun\*, HONG Shaozheng, TONG Linlang, PAN Hongyu,

SHEN Zhengfeng, ZHOU Xiaomin

(Changjiang Jingong Steel Structure (Group) Co., Ltd., Lu'an 237161, China)

\*Corresponding author: 2905807322@qq.com

**Abstract:** A double-cable solid-web prestressed steel beam was used for the roof structural beam of a conference center auditorium. Using finite element software, three tensioning methods including overhead one-time tensioning, ground one-time tensioning and phased tensioning were compared. A sensitivity analysis was carried out to investigate the effects of unsynchronized tensioning that may occur during the tensioning process. In addition, the strength and deformation of the prestressed steel beam in the whole process of the construction stage and under the subsequent construction loads were analyzed and compared with the construction monitoring results. The results show that when the prestress tension deviation is within 5%, its effects on the strength, deformation, and stability of the steel beam can be effectively controlled. The finite element analysis results show good agreement with the monitoring data in terms of structural strength and deformation, with variation trends consistent with actual construction conditions. The structural performance indices of the structure are within the specification requirements during the whole construction process and under the subsequent construction loads.

**Keywords:** external prestressed steel beam; tensioning construction method; numerical simulation; unsynchronized tensioning; sensitivity analysis; construction monitoring; stress and deformation

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 安徽省住房城乡建设科学技术计划(2024-YF093)

作者简介:

谢贻军(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事钢结构设计及施工技术方面的研究。E-mail: 2905807322@qq.com。(通信作者)

在钢结构中引入预应力能有效改善结构的力学性能,包括结构的刚度及承载能力。因此,这项技术被广泛应用于大跨度、大空间等复杂钢结构体系中<sup>[1-2]</sup>,如杭州湾跨海斜拉桥、上海浦东国际机场T2航站楼屋顶等。在预应力钢结构施工过程中,预应力张拉方式的选择是一个至关重要的步骤,它不仅影响到张拉工序的可操作性,还直接关系到整个结构的安全性和稳定性。早在20世纪40年代,欧美等地区的国家对预应力钢结构进行了大量的研究,前苏联更是率先颁布了系统的有关预应力钢结构的规范《预应力钢结构设计规程》。MURTHY等<sup>[3]</sup>通过对简支钢梁和连续钢梁施加预应力前后进行受力分析对比,发现预应力钢梁经济效益高,且预应力塑性设计较弹性设计更符合实际工程情况。PONNADA等<sup>[4]</sup>通过理论计算给出了预应力简支工字型钢梁在荷载作用下的挠度公式。KIM等<sup>[5]</sup>对体外预应力钢梁进行了试验研究,结果表明,体外预应力能明显提高钢梁的极限承载力,且能减小钢梁的跨中挠度,有限元模拟与试验结果一致。国内自20世纪50年代开展了首个预应力钢桁架试验研究以来,也取得了一系列研究成果,董越等<sup>[6]</sup>提出了平衡张拉的概念,指出了平衡张拉技术的关键,工程实践表明该张拉方法合理可靠。张行良等<sup>[7]</sup>结合实际工程情况提出了单元滑移、分批张拉的施工方法,保证了总体施工的安全性。周国军等<sup>[8]</sup>提出异形张弦结构非张拉建立预应力施工技术,并经理论分析、仿真模拟及内力检测证实了该技术的可行性。王留成等<sup>[9]</sup>对大跨度张弦梁-悬链梁杂交结构的张弦梁主索、斜拉索和山墙背索张拉相互影响进行分析,根据结构整体刚度及受力情况确定合理的张拉方法和控制要点。

综上,预应力的张拉方式应从结构设计和施工等多方面考虑,应借助有限元方法及监测等多种方式对预应力张拉及安装方式的可行性及合理性进行分析,确保预应力钢结构施工阶段及使用阶段的安全性。

某会议中心项目观众厅屋顶结构由钢结构梁及混凝土屋面板构成,其中钢结构梁为双索实腹式预应力钢梁,属于大跨度预应力结构<sup>[2]</sup>,预应力张拉方式、安装方法需经研究和论证确定,以确保工程施工质量及安全。

## 1 工程概况

某会议中心工程建筑功能包括主舞台及观众厅,总建筑面积为18 830 m<sup>2</sup>,地上总建筑面积为18 438 m<sup>2</sup>,地上四层,局部地下一层,结构高度为23.900 m,建筑造型高度为41.790 m。会议中心设1 460个座位,建筑外围造型为空间曲面,施工难度较大,如图1所示。主体结构采用框架剪力墙,主舞台和观众厅屋顶采用钢结构,如图2

所示,其中观众厅屋顶由14根预应力变截面实腹式钢梁组成,钢梁的跨中截面高度为1.800 m,端部高度0.855~0.943 m,跨度范围为32.000~36.330 m,钢梁均采用Q355B钢,钢梁两端落在成品球铰支座上。每根预应力钢梁两侧距下翼缘310 mm处设置一道直径为65 mm的高钒索,单根最小破坏力为3 680 kN,强度等级1 670 MPa。跨度最大的预应力钢梁详图如图3所示。



图1 会议中心效果图

Fig. 1 Rendering of conference center

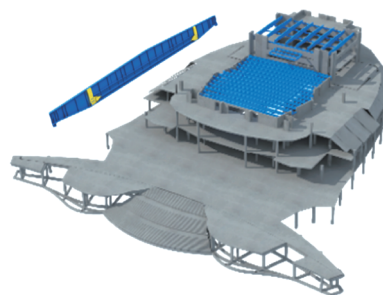


图2 屋顶结构

Fig. 2 Roof structure

## 2 施工重难点分析

### 2.1 场地狭小且交叉施工多

预应力钢梁单根构件最大重量达20 t、跨度达36.330 m。但是,建筑所在的位置三面(东、南、北)环山,仅有西侧提供了一块大约65 m宽的相对开阔场地,其他工种同样需要在此区域施工,实际可用空间受到限制且距离吊装点相对较远。此外,室内的地面空间不足以进行张拉作业。因此,在建筑南侧靠近吊装位置处开挖了一个宽约8 m、长约60 m的平面作为预应力钢梁的拼装场地。

### 2.2 预应力梁张拉及安装方式

预应力钢梁为双索实腹式钢梁,跨度大,两侧张拉不同步、拉索组装误差等因素都可能导致钢梁侧向产生过大的变形。另外,安装方案选择地面一次性张拉、高空张拉还是分批张拉是影响工程安全及成本的关键因素。

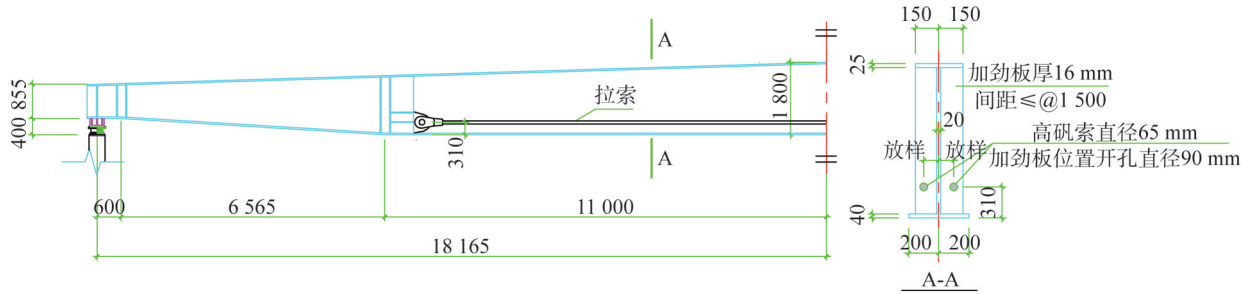


图3 36.330 m跨预应力钢梁详图(单位:mm)

Fig. 3 Detailed drawing of 36.330 m span prestressed steel beam (unit:mm)

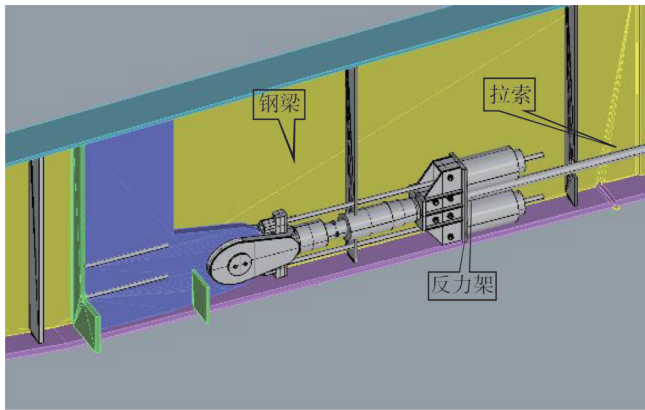


图4 预应力钢梁张拉构造

Fig. 4 Tensioning detail of prestressed steel beam

### 2.3 预应力钢梁受后期施工荷载影响较大

预应力钢梁施工完毕后,其上部钢结构装饰层及幕墙需搭设临时支撑架于预应力钢梁所在的结构层上,因此还需考虑后期施工荷载对整个预应力钢梁的影响及其它施工措施的安全。

## 3 预应力钢梁施工关键技术

### 3.1 预应力张拉方式对比

一般常见的预应力钢结构张拉方式包括高空单次张拉、多次张拉及地面单次张拉<sup>[10-12]</sup>,三种张拉方式具有各自的优点及缺点。结合屋顶结构的特点及施工条件,来确定经济性较好的预应力钢梁张拉方式。采用MIDAS软件,对三种张拉方式进行有限元模拟,分析结果如下:

#### (1) 方案一:高空单次张拉

施工步骤:搭设胎架→钢梁拼装→挂索预紧→吊装就位→次梁组合→按控制应力100%张拉→主次梁终焊(拧)→检查验收。张拉时钢梁不易发生屈曲,然而高空操作需要设置临时措施,成本高、效率低。

#### (2) 方案二:多次张拉

施工步骤:钢梁地面拼装→第一次张拉到控制应力

的20%→吊装就位→次梁组合→二次张拉至100%→主次梁终焊(拧)→检查验收。地面张拉时,预应力索力低,稳定性、应力和变形容易控制且第一次张拉可减小钢梁的吊装变形,但该方案高空和地面均需要考虑张拉设备和施工人员,施工效率低且成本高。

#### (3) 方案三:地面单次张拉

施工步骤:钢梁地面拼装→挂索预紧→按控制应力100%张拉→吊装就位→安装次梁→检查验收。地面张拉操作方便、拉索位置易调整、施工效率高、成本低,但张拉时无次梁支撑,易发生侧向弯曲,因此,需要分析张拉时钢梁的稳定性、应力和变形。

表1 不同张拉方式各项指标

Table 1 Indexes for different tensioning methods

方案	最大应力 /MPa	最大竖向变形/mm	临界荷载/kN
一	121.76	7.38	2 140
二	73.88	4.67	1 182
三	124.53	9.13	1 182

注:最大竖向变形为钢梁跨中变形。

根据设计条件,预应力钢梁的双侧拉索采用1 670级高矾索,公称直径为65 mm,单根最小破断力为3 680 kN,初始张拉力为650~1 110 kN。高空张拉时,支座位于梁两端;而地面实际张拉时,临时支座位于拉索与钢梁的连接处,可提高预应力钢梁的整体稳定性。由表1及图5~图7可知,三种不同的张拉方式下,钢梁的应力和变形均较小,也未超过其临界荷载,故三种不同张拉方式的应力、刚度及稳定性均满足要求。但地面张拉施工效率高,措施费低,最终采用地面单次张拉方案。钢梁地面拼装完成后,采用100 t预应力液压千斤顶和油泵于地面拼装胎架上进行张拉,每次同时张拉2根拉索,如图8所示。

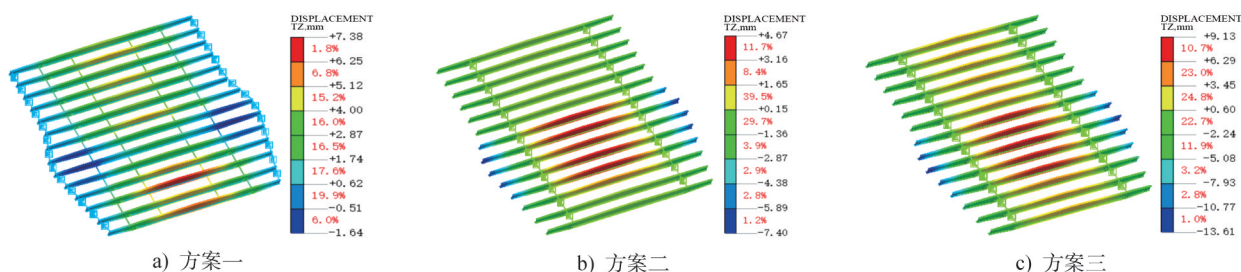


图5 预应力钢梁张拉变形云图(单位:mm)

Fig. 5 Contour of tensiing deformation of prestressed steel beam (unit:mm)

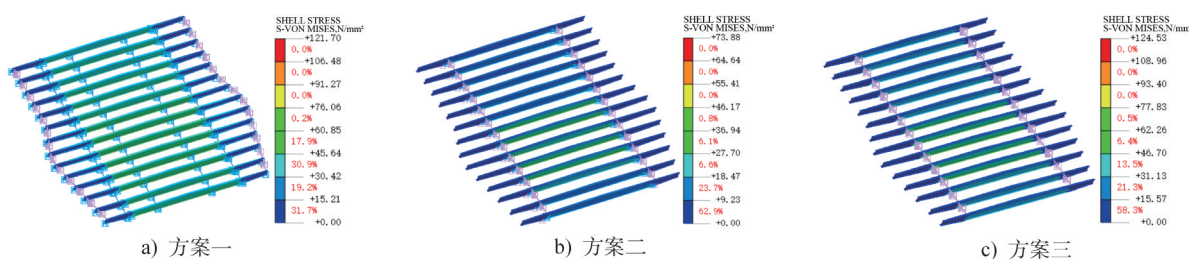


图6 预应力钢梁张拉应力云图(单位:MPa)

Fig. 6 Contour of tensiing stress of prestressed steel beam (unit:MPa)

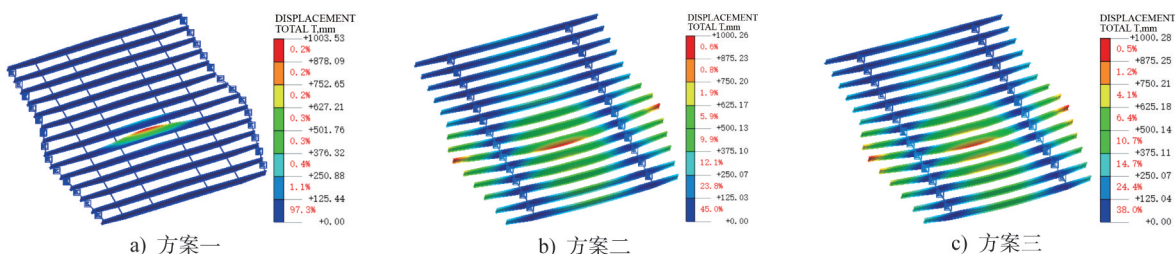


图7 预应力钢梁屈曲变形云图(单位:mm)

Fig. 7 Contour of tensiing buckling deformation of prestressed steel beam (unit:mm)



图8 张拉施工

Fig. 8 Tensioning construction

### 3.2 预应力张拉偏差分析

预应力钢梁两侧均设置拉索,由于H型钢梁平面外刚度相对较弱,在施工时,一旦出现拉索张拉偏差过大,可能会引起钢梁侧向产生较大弯曲变形,进而使构件失效,不满足设计要求,因此,有必要对不同步张拉进行分析,评估不同步张拉对应力、刚度及稳定性的影响。利用

有限元方法对预应力钢梁两侧拉索张拉偏差0%、±2%、±5%、±8%及±10%进行静力分析和屈曲分析。选择36.330 m最大跨的钢梁作为地面张拉时分析对象,临时支座位于拉索与钢梁的连接处。偏张拉施加方式为:通过钢梁一侧预应力保持不变(基准预应力为1110 kN),使另一侧预应力增大(正偏差)或减小(负偏差)来实现偏

差,计算结果如图9~图13及表2所示(限于篇幅,仅选取部分云图展示)。

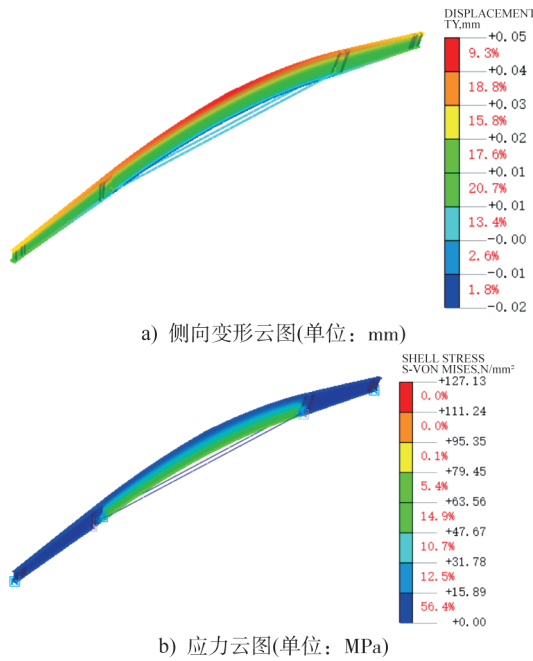


图9 预应力张拉偏差0%分析

Fig. 9 Analysis of 0% deviation in prestressing tension

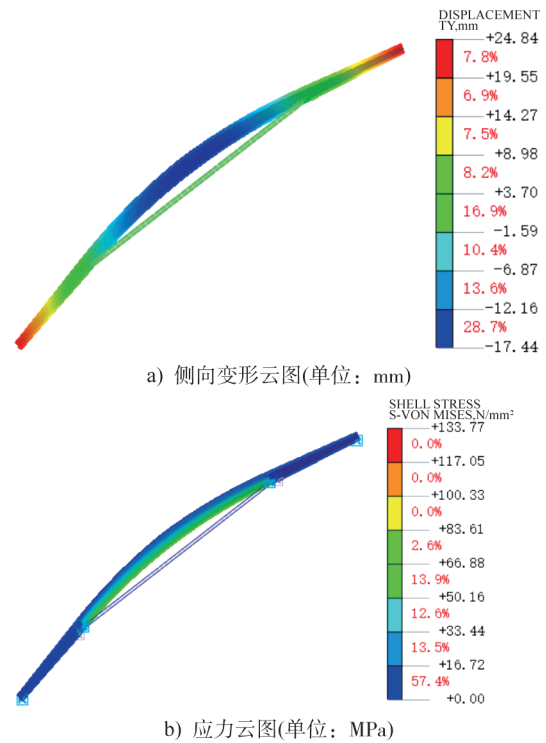


图11 预应力张拉负偏差10%分析

Fig. 11 Analysis of 10% negative deviation in prestressing tension

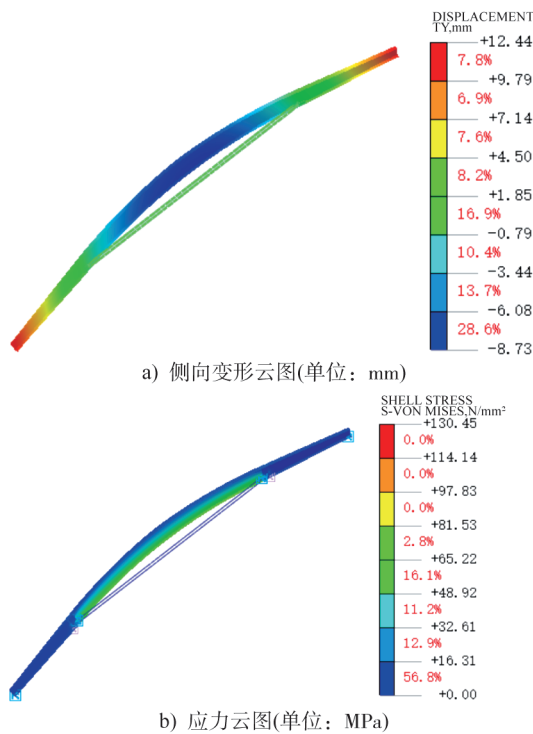


图10 预应力张拉负偏差5%分析

Fig. 10 Analysis of 5% negative deviation in prestressing tension

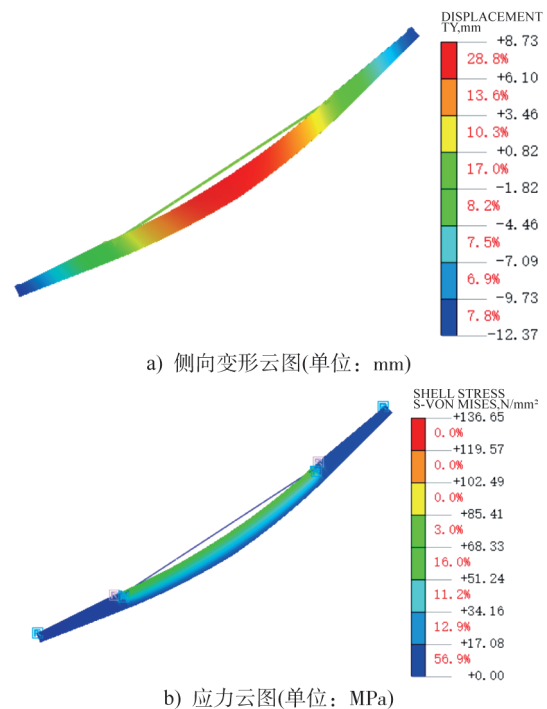


图12 预应力张拉正偏差5%分析

Fig. 12 Analysis of 5% positive deviation in prestressing tension

由表2可知,随着钢梁预应力负偏差绝对值的增大,预应力钢梁的应力、侧向弯曲矢高、侧向变形及屈曲特征

值均呈增大趋势;随着钢梁预应力正偏差的增大,预应力钢梁的应力、侧向弯曲矢高、侧向变形亦呈增大趋势,屈

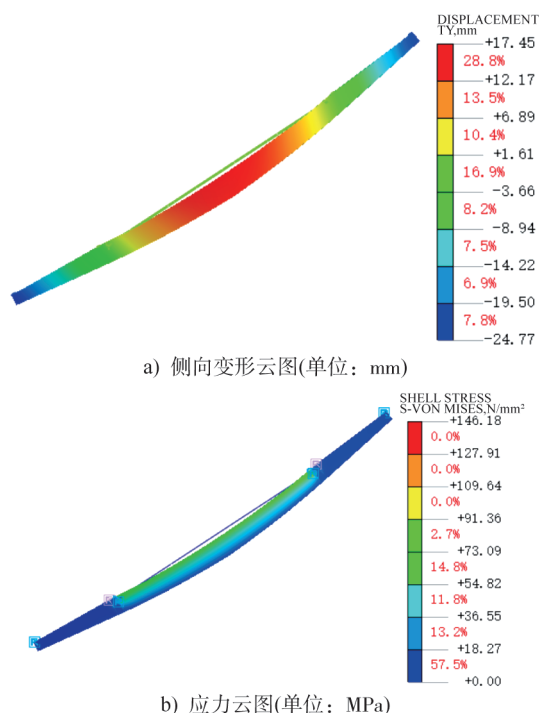


图13 预应力张拉正偏差10%分析

Fig. 13 Analysis of 10% positive deviation in prestressing tension

表2 不同程度张拉偏差分析

Table 2 Analysis of different degrees of tension deviation

偏差幅度	最大应力 /MPa	侧向弯曲矢高/mm	侧向变形/mm	屈曲特征值
-10%	133.77	42.28	24.84	1.234
-8%	132.44	33.84	19.88	1.221
-5%	130.45	21.17	12.44	1.201
-2%	128.45	8.49	4.99	1.182
0%	127.13	0.07	0.05	1.170
2%	130.94	8.44	4.93	1.158
5%	136.65	21.10	12.37	1.140
8%	142.37	33.77	19.81	1.123
10%	146.18	42.22	24.77	1.112

注:侧向变形指钢梁相对于原位的侧向位移。

曲特征值减小,且应力增大幅度较预应力为负偏差时应力增大的幅度大。在正、负偏差绝对值相等的情况下,除最大应力差异较大外,侧向弯曲矢高、侧向变形、屈曲特征值数值基本一致。其中,当正偏差达到5%时,应力增加至136.65 MPa,屈曲特征值降低为1.140,侧向弯曲矢高增加至21.10 mm,约为跨度的1/1722(跨度为36.330 m);当负偏差达到5%时,应力增加至130.45 MPa,屈曲特征值变为1.201,侧向弯曲矢高增加至21.17 mm,约为跨度

的1/1716;当正偏差达到10%时,应力变为146.18 MPa,屈曲特征值变为1.112,侧向弯曲矢高增加至42.22 mm,约为跨度的1/860;当负偏差达到10%时,应力增加至133.77 MPa,屈曲特征值变为1.234,侧向弯曲矢高增加至42.28 mm,约为跨度的1/859。

总体来说,张拉偏差对预应力钢梁的施工有一定影响。结合项目实际情况及文献[2]中第7.3.3条、第7.5.4-4条和文献[13]中表10.4.2的要求,对于跨度大于30.000 m且小于等于60.000 m钢梁的侧向弯曲矢高 $f$ 限值为 $l/1000$ 且不大于30 mm。实际张拉过程中,要求两侧预应力偏差不超过5%,同时控制单侧张拉值偏差不超过2.5%,此时应力、侧向弯曲矢高(变形)均能够得到有效控制并满足设计要求。

### 3.3 施工全过程应力及变形分析

大跨度空间钢结构体系庞大、施工过程复杂,施工阶段与使用阶段性能相差甚远。大跨度空间钢结构通常还需设置大量临时支撑作为辅助结构,因此,对大跨度空间钢结构的施工过程进行应力、变形等分析显得尤为必要<sup>[14-16]</sup>。

观众厅上部有屋顶造型结构,施工过程中,需将临时支撑胎架置于结构层上,因此,需要考虑其对下部预应力钢梁的影响。通过有限元对钢结构屋顶施工全过程进行分析,包括四个施工阶段,第一阶段为钢梁预应力施加,第二阶段为屋面板浇筑,第三阶段为支撑胎架安装及上部屋顶造型构件就位,第四阶段为支撑胎架卸载。

预应力钢梁的翼缘、腹板与加劲肋及混凝土屋面板均采用二维板单元模拟,板单元的尺寸均为50 mm;1670级高矾索与次梁均采用一维桁架单元模拟,拉索单元尺寸为500 mm,次梁尺寸为整根梁跨度。拉索两端与预应力钢梁进行耦合,拉索施加的预应力为初始张拉力,次梁与预应力钢梁铰接。预应力钢梁一端为固定铰支座,另一端为滑动铰支座,将预应力钢梁两端底面区域与支座建立点耦合,并对该点定义约束,模拟球形铰支座,有限元模型如图14所示。

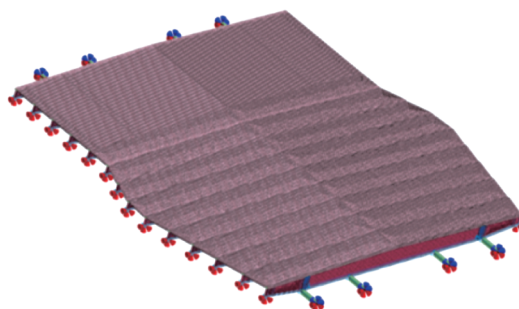


图14 钢结构屋顶有限元模型

Fig. 14 Finite element model of steel roof

为了实时评估施工过程中屋顶的安全性,需对钢梁应力和变形进行监测。选择其中三根具有代表性的预应力钢梁为例,其中6#钢梁的跨度最大,10#钢梁为正常跨度梁,12#钢梁设有梁上柱,需承担排烟机房的荷载。对上述三根钢梁施工过程中的应力及变形进行监测,每根钢梁布置五个挠度监测点,利用激光测距仪及全站仪测量;在预应力钢梁跨中下翼缘布置应力监测点,利用正弦式应变计测量,如图15和图16所示。

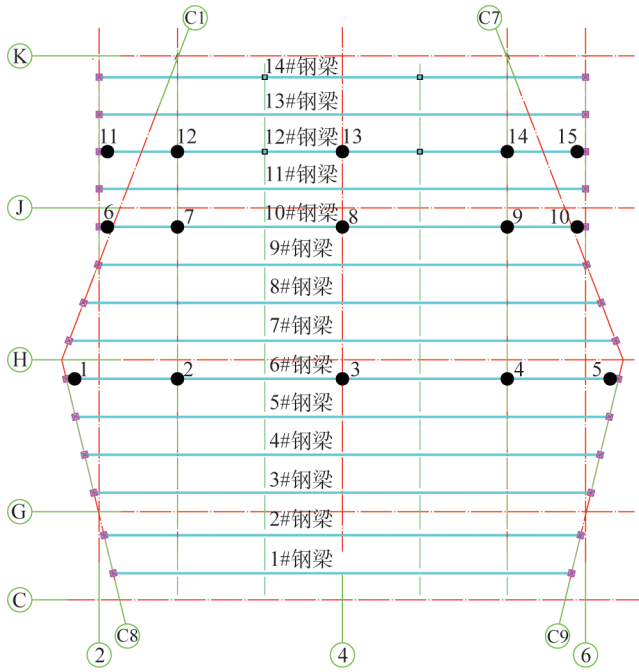


图15 钢梁监测点布置图

Fig. 15 Arrangement of monitoring points of steel beam

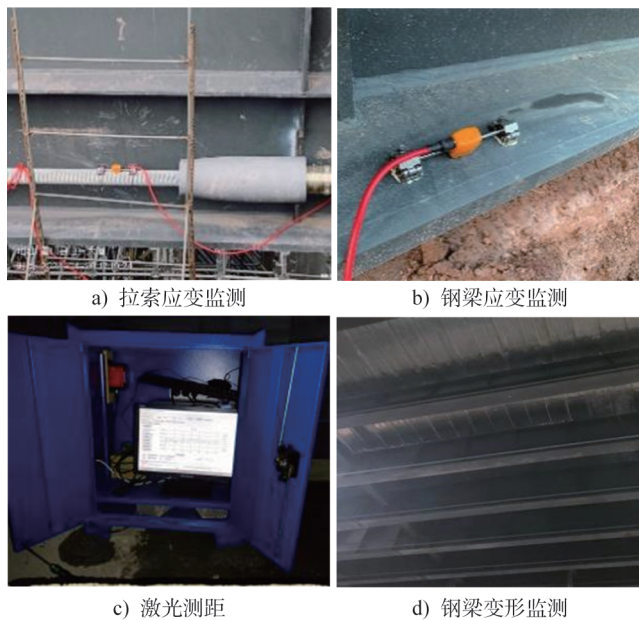


图16 监测照片

Fig. 16 Monitoring photos

由图17、图18和表3、表4可知,第一阶段预应力张拉后,下翼缘受压应力明显增大,最大受压应力为6#钢梁40.00 MPa左右,而变形波动范围较小,均在5.00 mm以内。第二阶段浇筑屋面板混凝土时,下翼缘由受压变为受拉,由于屋面板混凝土未成形,钢梁的挠度增大幅度比较大,监测得到最大挠度为6#预应力钢梁跨中位置,最大挠度为57.00 mm,而有限元模拟得出6#钢梁的跨中挠度为59.64 mm;6#预应力钢梁对应的跨中监测应力为28.72 MPa,有限元结果为27.23 MPa,挠度和应力偏差均小于6%,较为接近。监测得到最大应力出现在10#预应力钢梁,其值为30.83 MPa,有限元分析结果为25.14 MPa,偏差为18.45%;10#预应力钢梁对应的跨中监测挠度为45.60 mm,有限元分析结果为37.98 mm,偏差为16.71%,偏差较大,可能是施工过程中其他集中临时设备及材料堆放导致。第三阶段支撑胎架安装完成及上部构件就位时,监测最大挠度为6#预应力钢梁跨中位置,最大挠度为63.60 mm,有限元模拟得出6#预应力钢梁挠度为66.11 mm,误差为3.95%;6#预应力钢梁对应的跨中监测应力为37.54 MPa,有限元结果为34.86 MPa,应力偏差为7.14%,较为接近。监测得到最大应力出现在10#预应力钢梁,其值为46.56 MPa,而有限元模拟得出10#钢梁的应力为48.17 MPa,误差为3.46%;10#预应力钢梁对应的跨中监测挠度为50.50 mm,有限元分析结果为51.06 mm,偏差为1.11%,偏差较小。第四阶段支撑胎架卸载后,预应力钢梁的挠度及应力基本恢复到第二阶段。

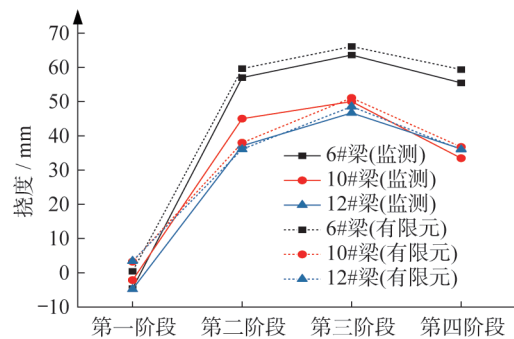


图17 钢梁挠度监测与有限元分析结果对比  
Fig. 17 Comparison of deflection of steel beam between monitoring and FEA results

由图19可知,自钢梁吊装就位后,拉索整个过程的索力呈现先增大后减小的趋势,但整体索力变化较小,有限元分析索力范围为650.00~756.00 kN,相比于拉索的承载力设计值1 840.00 kN,利用率不超过40%设计值。此次,监测中仅10#预应力钢梁的拉索监测数据留存,其余6#及12#预应力钢梁监测应变计均已损坏。10#预应

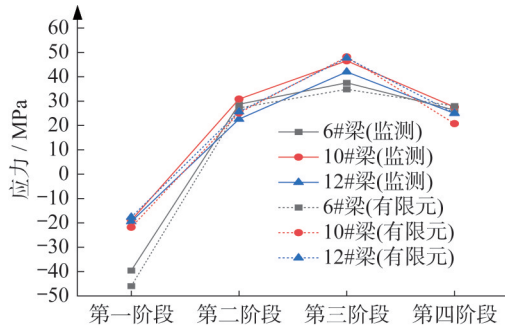


图 18 钢梁应力监测与有限元分析结果对比

Fig. 18 Comparison of stress of steel beam between monitoring and FEA results

表 3 钢梁挠度监测值与有限元计算结果对比

Table 3 Comparison of deflection of steel beam between monitoring and FEA results mm

钢梁编号		挠度			
		第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
6#	监测	-4.56	57.00	63.60	55.46
	有限元	0.46	59.64	66.11	59.37
10#	监测	-2.14	45.60	50.50	33.46
	有限元	3.26	37.98	51.06	36.74
12#	监测	-4.77	37.10	46.70	36.17
	有限元	3.44	36.09	48.54	36.02

表 4 钢梁应力监测值与有限元计算结果对比

Table 4 Comparison of stress of steel beam between monitoring and FEA results MPa

钢梁编号		应力			
		第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
6#	监测	-39.56	28.72	37.54	26.33
	有限元	-45.95	27.23	34.86	27.98
10#	监测	-18.95	30.83	46.56	27.56
	有限元	-21.81	25.14	48.17	20.75
12#	监测	-19.47	22.63	42.00	24.95
	有限元	-17.66	25.65	47.71	25.07

力钢梁的索力监测最大值为 680.21 kN,有限元施工阶段最大拉力为 756.06 kN,最大偏差为 11.15%。

上述结果表明,有限元分析结果总体上与监测数据吻合较好,验证了该模拟方法的可行性和合理性,可采用该模型对整个钢结构屋顶进行理论分析。在屋面板自重作用下,预应力钢梁最大应力出现在拉索与钢梁连接处,为 152.10 MPa;最大挠度出现在跨中,为 59.64 mm,如图

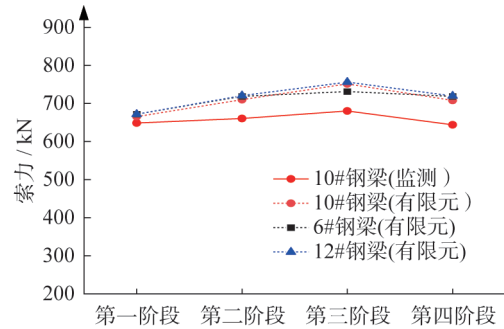


图 19 拉索内力监测与有限元分析结果对比

Fig. 19 Comparison of cable force between monitoring and FEA results

20 和图 22 所示;支撑胎架荷载作用下,预应力钢梁的最大应力同样出现在拉索与钢梁连接处,为 157.12 MPa,最大挠度出现在跨中,为 66.11 mm,如图 21 和图 23 所示。预应力钢梁应力均小于其应力设计值 295.00 MPa,且最大应力也仅为局部,大部分区域应力均在 100 MPa 以内;最大挠度为 66.11 mm,小于容许值 90.83 mm(容许值为跨度的 1/400)。

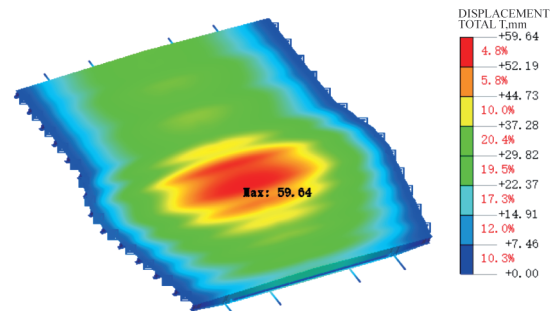


图 20 屋面板自重下结构挠度(单位:mm)

Fig. 20 Structural deflection under the self-weight of roof panel (unit: mm)

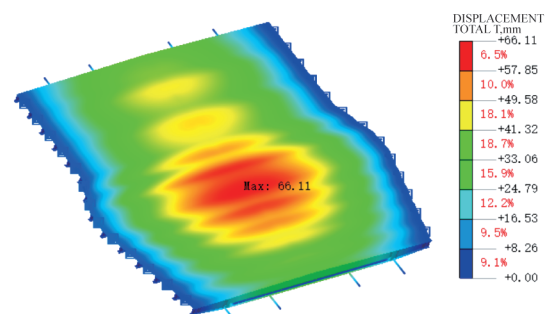


图 21 支撑胎架作用下结构挠度(单位:mm)

Fig. 21 Structural deflection under the action of supporting frame (unit: mm)

在钢结构屋盖预应力的张拉、屋面板浇筑、胎架安装及上部构件施工的整个过程中,结构及构件的各项指标均符合设计、施工规范要求,具体如图 24 所示。

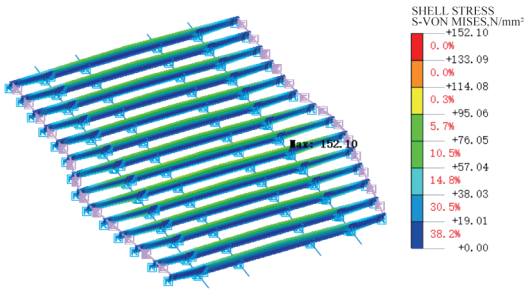


图 22 屋面板自重下预应力钢梁应力(单位:MPa)

Fig. 22 Stress of prestressed steel beam under the self-weight of roof panel (unit:MPa)

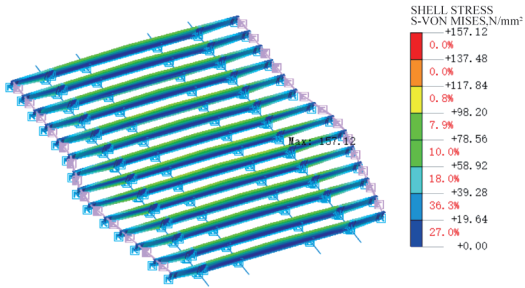


图 23 支撑胎架作用下预应力钢梁应力(单位:MPa)

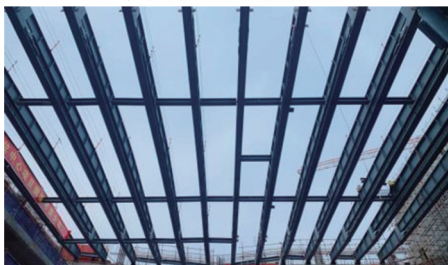
Fig. 23 Stress of prestressed steel beam under the action of supporting frame (unit:MPa)



a) 预应力钢梁吊装



b) 预应力钢梁安装过程



c) 预应力钢梁安装完成

图 24 预应力钢梁施工图

Fig. 24 Construction of prestressed steel beam

## 4 结论

(1) 预应力钢梁采用了现场“分段拼装,地面单次张拉”的施工方案,分析结果表明该方案经济合理,能够保证工程的进度和质量。

(2) 通过有限元软件对不同程度张拉预应力偏差的预应力钢梁进行静力分析及屈曲分析可知,预应力钢梁的应力、侧向位移均随张拉预应力一定程度正负偏差增大而呈增大趋势,屈曲特征值随着张拉的预应力增大而减小,随着张拉预应力减小而增大。在实际施工中,建议控制偏差不超过5%。

(3) 通过有限元分析及施工监测结果的对比表明,有限元分析和监测的结构应力及变形基本一致,且变化趋势符合实际施工状态。在施工过程中,结构及构件各项技术指标均符合设计及施工规范要求。

## 参考文献:

[ 1 ] 贾艳敏, 盖秉政, 张印阁, 等. 预应力钢梁理论分析与试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 161-166. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2003.03.028.  
JIA Yanmin, GAI Bingzheng, ZHANG Yinge, et al. Theoretical analysis and experimental study of prestressed steel girders[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 161-166. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4750.2003.03.028. (in Chinese)

[ 2 ] JGJ/T 497—2023 预应力钢结构技术标准[S].  
JGJ/T 497—2023 Technical standard for prestressed steel structures[S]. (in Chinese)

[ 3 ] MURTHY A V H N, GUPTA L M. Analysis and design of prestressed simply supported/continuous steel beam [J]. Journal of Structural Engineering, 2002,29(2): 129-134.

[ 4 ] PONNADA M R, VIPPARTHY R. Improved method of estimating deflection in prestressed steel i-beams[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2013,14(5):765-772.

[ 5 ] KIM S B, MEHDI A I, KIM M Y. Experimental evaluation on LTB strength of steel beams externally pre-stressed with un-bonded tendon bar [J]. International Journal of Steel Structures, 2024, 24(3): 488-505. DOI: 10.1007/s13296-024-00830-x.

[ 6 ] 董越, 汪凯. 预应力钢结构平衡张拉技术研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊2): 531-533. DOI:10.19701/j.jzjg.2018.S2.106.  
DONG Yue, WANG Kai. Research on balance pretension scheme of prestressed steel structure[J]. Building Structure, 2018, 48(Suppl.2): 531-533. DOI:10.19701/j.jzjg.2018.S2.106.(in Chinese)

[ 7 ] 张行良, 何飞, 陈海阳. 大跨度预应力张弦梁结构施工技术分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(增刊2): 584-587. DOI: 10.19701/j.jzjg.2016.s2.124.  
ZHANG Xingliang, HE Fei, CHEN Haiyang. Analysis of

- construction technology for large span prestressed string beam structure[J]. Building Structure, 2016, 46(Suppl.2): 584-587. DOI:10.19701/j.jzjg.2016.s2.124.(in Chinese)
- [8] 周国军, 刘中华, 俞福利, 等. 温州机场张弦结构非张拉建立预应力施工技术[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(3): 105-112. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.03.012. ZHOU Guojun, LIU Zhonghua, YU Fuli, et al. The non-tensioned prestressing construction technology of string structure in Wenzhou airport[J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(3): 105-112. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.03.012.(in Chinese)
- [9] 王留成, 邹海涛, 仝书敬, 等. 互联网之光张弦梁-悬链梁杂交结构施工关键技术[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(8): 97-104. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.08.011. WANG Liucheng, ZOU Haitao, TONG Shujing, et al. Key techniques for construction of the hybrid structure system of beam string and catenary beam for the light of Internet[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(8): 97-104. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.08.011.(in Chinese)
- [10] 赵眈崑, 张晓光, 王子华. 张弦梁结构张拉阶段受力分析及施工监测[J]. 建筑结构, 2016, 46(增刊1): 532-536. DOI: 10.19701/j.jzjg.2016.s1.113. ZHAO Danwei, ZHANG Xiaoguang, WANG Zihua. Force analysis and construction monitoring of beam string structure in prestressing phase [J]. Building Structure, 2016, 46(Suppl.1): 532-536. DOI:10.19701/j.jzjg.2016.s1.113. (in Chinese)
- [11] 董越, 周小丽. 预应力钢结构张拉方案选取研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊2): 526-530. DOI:10.19701/j.jzjg.2018.S2.105. DONG Yue, ZHOU Xiaoli. Research on cable tensioning scheme of prestressed steel structure[J]. Building Structure, 2018, 48(Suppl.2): 526-530. DOI:10.19701/j.jzjg.2018.S2.105.(in Chinese)
- [12] 宋敏, 张亚飞. 大跨度预应力张弦梁施工技术[J]. 施工技术, 2016, 45(20): 62-67. DOI:10.7672/sgjs2016200062. SONG Min, ZHANG Yafei. Construction technology of large span prestressed string beam [J]. Construction Technology, 2016, 45(20): 62-67. DOI: 10.7672/sgjs2016200062.(in Chinese)
- [13] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S]. GB 50205—2020 Standard for acceptance of construction quality of steel structures[S]. (in Chinese)
- [14] 郑求鑫, 周海锋, 王锦全. 体外预应力结构施工关键技术[J]. 中国建筑金属结构, 2022(9): 4-5. DOI:10.3969/j.issn.1671-3362.2022.09.003. ZHENG Qiuxin, ZHOU Haifeng, WANG Jinqun. Key technologies for construction of external prestressed structures [J]. China Construction Metal Structure, 2022(9): 4-5. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3362.2022.09.003.(in Chinese)
- [15] 高云杰, 曲扬, 罗会健, 等. 大跨度吊挂钢结构预应力拉索安装及张拉施工技术[J]. 建筑施工, 2023, 45(4): 664-667. DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2023.04.013. GAO Yunjie, QU Yang, LUO Huijian, et al. Prestressed cable installation and tensioning construction technology of large span hanging steel structure[J]. Building Construction, 2023, 45(4): 664-667. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2023.04.013.(in Chinese)
- [16] 陈建锋, 董权锋, 郭孟华, 等. 铜仁市奥体中心体育馆钢屋盖施工模拟分析[J]. 空间结构, 2022, 28(4): 64-71, 63. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2022.04.064. CHEN Jianfeng, DONG Quanfeng, GUO Menghua, et al. Construction simulation of long-span steel roof of Tongren Olympic sports center gymnasium [J]. Spatial Structures, 2022, 28(4): 64-71, 63. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2022.04.064.(in Chinese)