



# 预应力张弦楼盖施工控制研究

段有恒 王 丰 王泽强 尤德清 张 东

(北京市建筑工程研究院有限责任公司 北京 100039)

**摘 要:**大跨度张弦梁浇筑混凝土作为楼盖是一种较新颖的结构形式,但张弦梁楼盖的施工控制一直是施工领域的难题。本文结合河北师范大学张弦梁楼盖结构,对施工过程中的关键技术进行研究,建立了精确的分析模型,分析了张弦梁在平面外失稳,提出了施工过程中的位移控制和索力控制方法。

**关键词:**张弦楼盖 施工控制 仿真分析

## 前言

张弦梁结构是一种整体刚度贡献来自抗弯构件截面和与拉索的半刚性结构。它以其承载能力高,使用荷载作用下结构变形小,结构稳定性强,制作施工方便等特点在我国大量应用。目前我国张弦梁结构大多应用于屋盖结构,而对于张弦梁应用于混凝土楼盖的结构目前很少。本文主要介绍了张弦梁混凝土楼盖以下关键技术:张弦防止侧向失稳的措施、张拉施工的时机选择、施工仿真计算分析、施工监测方案。下面对以上关键技术进行概要分析。

## 1 工程概况

河北师范大学体院学院三层楼盖采用张弦梁浇筑混凝土楼盖结构,张弦梁共13榀,跨度达40m,间距4.0m,张弦梁之间设置稳定横梁与张弦梁刚接,间距8.0m。张弦梁截面为H900×450×16×30,张弦梁中部撑杆最高为1.7m,拉索规格为 $\phi 7 \times 127$ 。轴测图及单榀结构示意图1、图2所示。

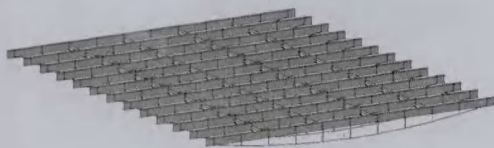


图1 结构轴测图

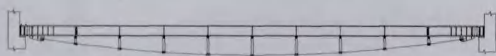


图2 示意图单榀

## 2 施工技术特点

该结构属于大跨度预应力钢结构,拉索的安

装可以穿插在钢构件的安装过程中,待全部钢结构安装完成后,开始张拉钢索,对结构施加预应力。13榀张弦梁之间通过次梁连接,张拉过程中每榀张弦梁相互影响较大,同时楼盖结构对于浇筑完混凝土之后要求楼板无起拱。为了满足结构在施工完成后满足设计的位形需求,需制定详细可行的施工方案,本工程的重点与难点如下:

(1) 分析模型的正确模拟。本工程体量大,施工复杂,在设计阶段假定是一次成型后施加结构自重和荷载的,而实际施工中不同杆件是分阶段安装和拼接起来的,与一次性成型后施加结构自重和荷载的结构受力又很大区别。为此,本文采用了Midas建立了分析模型,对各个施工阶段进行了模拟计算,在计算中考虑了几何非线性、材料非线性。

(2) 选择合理的预应力施工顺序。施工顺序不同结构杆件参与受力的顺序和程度也不同,同时采用不同的施工顺序所需的安装费也不同。如何选择合理的预应力张拉方案对结构的成型及安全性有重要意义。

(3) 张弦梁平面外失稳问题。本工程为张弦梁直梁,且为单向张弦梁,结构在施工过程中容易出现平面外失稳问题,如何通过合理的施工措施来避免侧向失稳的发生至关重要。

(4) 施工精度要求高。施工张拉完成后需在钢结构上方浇筑混凝土楼盖,对钢结构的制作和安装的精度要求比较高,因此必须确定合理的张拉力,使张拉完成后的工程质量才能达到设计要求的预应力状态。为此,本文采用了Midas建

立了分析模型,对各个施工阶段进行了模拟计算,通过科学的计算指导施工,确保结构的尺寸受力参数。在计算中考虑了几何非线性、材料非线性。

### 3 预应力施工分析

#### 3.1 施工仿真分析

为保证混凝土浇注完成后楼板水平,需要混凝土自重抵消预应力张拉产生的起拱。因此必须通过施工仿真分析确定合理的张拉力,以及各个施工阶段张弦梁跨中的起拱值作为校核。针对实际工程施工过程中的每一个施工工况,包括拼装、吊装、安装、张拉的工况,都进行施工仿真计算,施工仿真计算采用目前通用的大型有限元软件Midas进行分析,达到施工中的每一个工况都做到在设计要求的应力及变形控制范围之内。

本工程结构施工顺序如下:①安装外圈支撑系统;②地面拼装每榀张弦梁;③地面对拉索进行预紧;④吊装安装好的张弦梁,并连接其相邻的连系杆件;⑤按分级的方式对结构施加预应力,由一端向另一端逐根张拉;⑥浇注混凝土楼板。

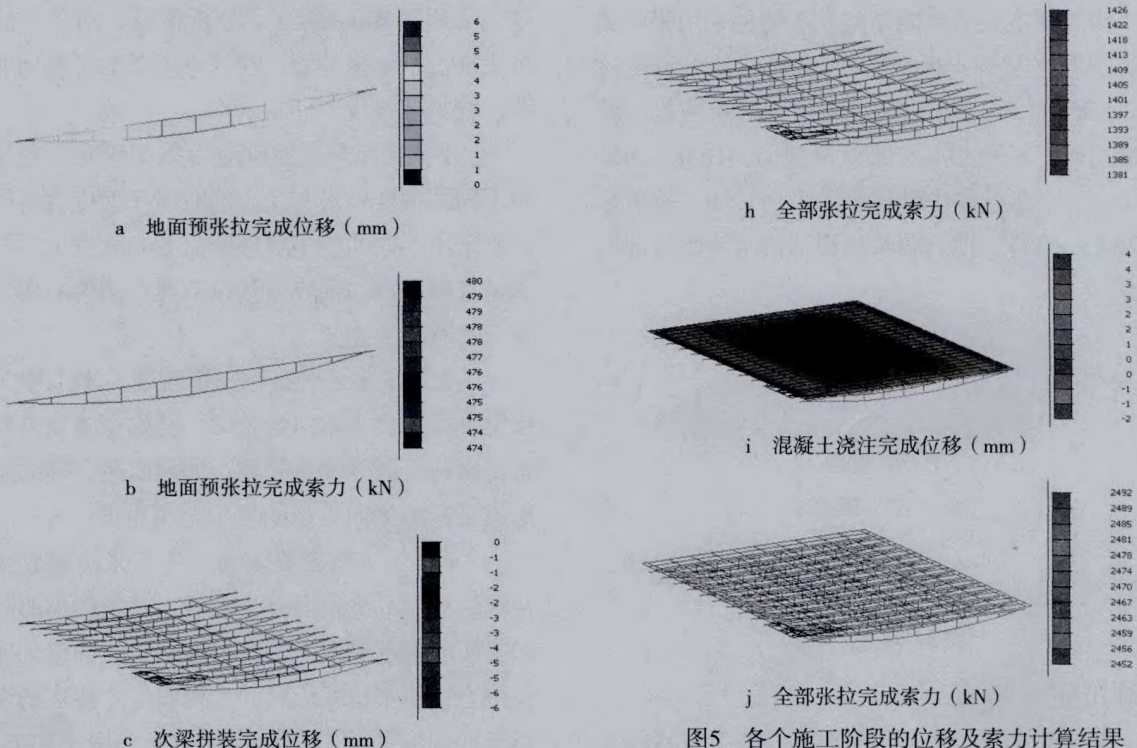
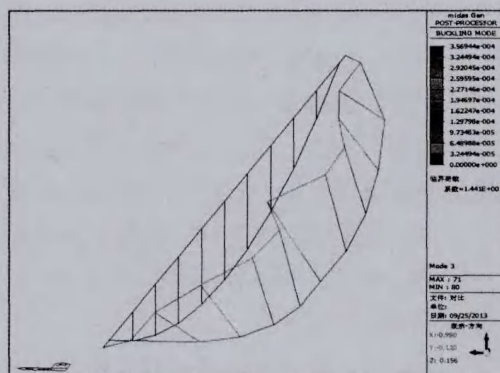


图5 各个施工阶段的位移及索力计算结果

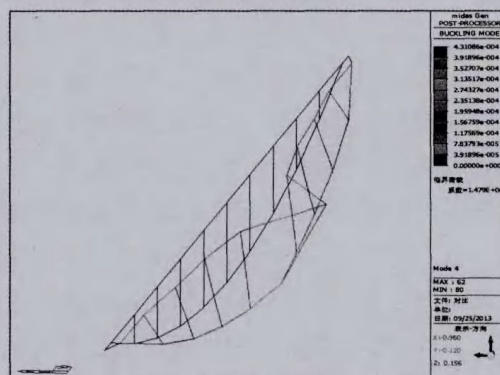
从仿真分析计算结果可以看出随着预应力的施加,整体结构的索力以及竖向起拱值不断增加,张拉施工过程中张弦梁拉索最大张拉力1400kN,竖向起拱值达到190mm。混凝土之后整体,由于混凝土的自重作用,整体结构的拉索索力达到2500kN,竖向起拱值仅有6mm。可以看出通过先张拉、后浇筑混凝土的方法进行施工可以通过调节合理的张拉力达到最终浇筑混凝土后楼板水平的状态,并且可以大幅度减小施工过程中的张拉力。

### 3.2 防止侧向失稳的措施

本工程为张弦梁直梁,且为单向张弦梁结构体系,结构各榀张弦梁之间缺少联系,使平面张弦梁结构的平面稳定性无法得到保证,这时对预应力拉索进行张拉,拼装误差以及张拉索力可能使张弦梁在平面外产生失稳,导致结构的破坏。图3为单榀张弦梁张拉力作用下前四阶失稳模态,可以看出前四阶模态均出现平面外失稳。

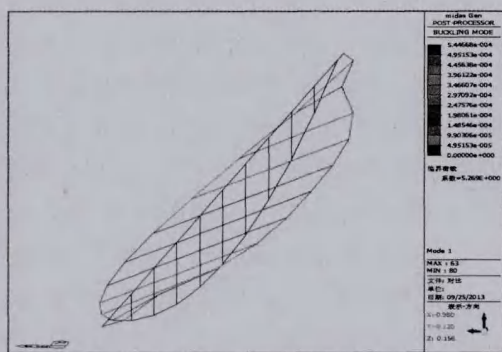


c 第三阶失稳模态

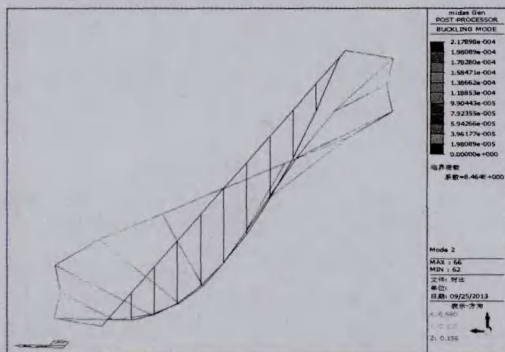


d 第四阶失稳模态

图3 示意图单榀



a 第一阶失稳模态



b 第二阶失稳模态

为防止结构出现平面外失稳问题本工程沿与张弦梁垂直方向设置两道稳定索,稳定索两端连接周围混凝土构件以防止张弦梁平面外失稳。稳定索布置见图4。

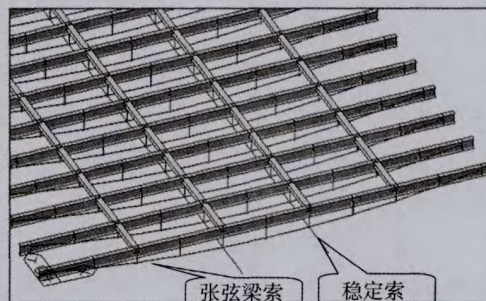


图4 稳定索的布置

### 3.3 拉索施工顺序选择

拉索的张拉时机的选择可以有三个方案:第一个方案可以在张弦梁地面拼装完成之后就进行100%张拉。此时单榀张弦梁结构的刚度及自重较小。可以通过施加一个相对较小的张拉力,待次梁以及混凝土楼板浇筑完成后,拉索索力逐渐提高,使索力达到设计水平。第二种方案是在张

弦梁在地面拼装完成后对拉索进行初张拉,待张弦梁安装就位,稳定索安装完成,次梁拼装完成后对拉索进行张拉,张拉完成后浇筑混凝土。此时的张拉力相对要大一些。第三种方案是在张弦梁在地面拼装完成后对拉索进行初张拉,待张弦梁安装就位,稳定索安装完成,混凝土浇筑完成后对拉索进行张拉,经计算此时的张拉力相对前两种方案要增加50%。

可以看出第一种方案的施工难度较小,工作强度较小。第二种方案作业强度和施工难度要相对大一些,第三种方案作业强度和施工难度最大。但是当采用第一种方案时,在实际施工过程中,张弦梁起吊过程中产生不可忽略的平面外扰动,很容易造成平面外失稳。因此虽然第一种方案具有施工简便的优点,但是却容易造成结构的破坏,是不可行的。按照第二种方案,张弦梁次梁和稳定索安装完成后张拉,可以很好的约束每榀梁,具有较好的侧向稳定性能。因此张拉时机的选择选取第二种方案。

#### 4 施工监测

在每一个预应力施工过程中,结构都经历着一个自适应过程,结构会经过自平衡使内力充分,形状也会随之改变,所以预应力过程的监测是十分重要的。针对本工程,为保证结构最终浇筑混凝土之后满足楼板无起拱且拉索索力在设计范围内的要求。本工程以施工仿真分析得到的索力以及起拱值为控制因素,对各个施工阶段的结构的拉索索力以及起拱值进行监测,索力以及变形通过如下方式监测:

(1) 索力监测:以索力监测为主,保证径向拉杆施加预应力值与施工仿真计算得到的张拉力值相同,施工过程中对每一根索索力均进行监测。对索力的监测采用油泵及油压传感器,如图6所示;

(2) 变形监测:在预应力钢索进行张拉时,钢结构部分会随之变形。在预应力钢索张拉的过程中,结合施工仿真计算结果,对钢结构变形监测可以保证预应力施工安全、有效,对变形的监测采用全站仪;



图6 油泵及油压传感器

#### 5 结论

本文以河北师范大学张弦梁楼盖结构为研究对象,对施工过程中的张弦梁失稳及施工顺序的选择等技术问题进行了分析,对整个施工过程进行了模拟,提出了施工监测方案。主要得出以下结论:

(1) 张弦梁需在整体钢结构拼装完成混凝土浇筑之前张拉。这样不仅能防止由于平面外的扰动导致张弦梁的平面外失稳问题,也可以大幅度减小施工过程中的张拉力,从而降低施工成本。

(2) 本文通过仿真分析,确定了合理的张拉力,钢结构在张拉完成后起拱值达到190mm,浇筑混凝土之后起拱值接近于0。可以看出通过先张拉、后浇筑混凝土的方法进行施工可以达到楼盖在施工完毕以后处于完全平整的状态。

(3) 针对该类工程提出以索力,起拱值共同对施工控制的原则,以保证施工完成后的工程质量。

#### 参考文献

- [1] 王泽强,徐瑞龙,钱英欣,王丰,李国立.大型体育馆弦穹顶结构预应力施工技术[J].2011全国钢结构设计与施工技术学术交流论文集.2011(08)
- [2] 尤德清,王泽强,陈新礼.多跨张弦梁结构设计与分析[J].2011全国钢结构学术年会论文集.2011(10)
- [3] 王泽强,程书华,尤德清,杨国莉,陈新礼,葛家琪,徐瑞龙.索穹顶结构施工技术研究[J].建筑结构学报.2012(04)