

新型弦支空间结构施工过程中受力分析

周春娟^{1,4}, 魏超琪¹, 柳明亮^{1,2}, 李纪明¹, 惠存³

(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;
3. 中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007; 4. 北京工业大学 空间结构研究中心, 北京 100124)

摘要: 西北大学长安校区体育馆为新型弦支空间结构, 其屋盖结构部分上部由辐射状倒三角管桁架结构组成, 下部由环向索及径向索组成, 上部结构与下部结构之间通过竖向撑杆连接, 是一种复杂的空间预应力结构体系。采用有限元软件对该结构进行了施工过程仿真分析, 研究了不同施工阶段结构的应力和变形; 并对拉索分级张拉产生的结构应力与变形进行了分析, 研究了不同卸载方案对结构性能的影响, 提出了合理的结构卸载方案。结果表明: 结构安装所采用的旋转累积滑移施工成型方案是合理的, 施工过程中结构应力和变形较小; 结构整体刚度随施工过程不断增大, 应力呈现不均匀分布。施工过程仿真分析可以为结构现场安装提供指导与预警, 为同类工程建造提供技术参考。

关键词: 新型弦支空间结构; 辐射状倒三角桁架; 施工过程; 结构卸载; 累积滑移

中图分类号: TU395

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0578-08

Stress analysis of new chord-supported space structure in the construction process

ZHOU Chunjuan^{1,4}, WEI Chaoqi¹, LIU Mingliang^{1,2}, LI Jiming¹, HUI Cun³

(1. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710082, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

4. Spatial Structures Research Center, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The gymnasium of Northwestern University Chang'an Campus is a new type of chord-supported space structure, which is a complex spatial prestressed structural system. The upper part of the roof structure is composed of a radial inverted triangular tube truss structure, the lower part is composed of circumferential cables and radial cables, and the upper structure and the lower structure are connected by vertical struts. In this paper, finite element software is used to simulate and analyze the construction process of the structure, and the stress and deformation of the structure in different construction stages are studied. The structural stress and deformation caused by cable tension are analyzed, the influence of different unloading schemes on structural performance is studied, and a reasonable structural unloading scheme is proposed. The results show that the rotary cumulative slip construction scheme adopted for the structure installation is reasonable, the structural stress and deformation are small during the construction process. The overall stiffness of the structure increases with the construction process, and the stress is unevenly distributed. The simulation analysis of the construction process can provide guidance and early warning for the on-site installation of the structure, and provide technical reference for the construction of similar projects.

Key words: new chord-supported space structure; radial inverted triangle truss; construction process; structure unloading; cumulative sliding

随着社会经济的不断发展, 建筑的使用功能和建造工艺不断拓展, 造型复杂、跨度巨大的建筑越来越多, 许多时候普通的钢筋混凝土体系已经无法满足结构受力, 需要通过运用复杂空间桁

架弦支结构进行建设。但大型钢结构杆件数量多, 安装过程结构受力形式复杂多变, 加之施工场地往往非常有限, 施工环境因素复杂多变, 整体结构在施工完成之前, 部分单元构件由于施工顺序

收稿日期: 2022-06-04 修回日期: 2024-06-11

基金项目: 陕西省重点研发计划(2022LL-JB-11)

第一作者: 周春娟(1989—), 女, 博士生, 高级工程师, 主要从事空间结构新体系及健康监测技术方面研究。E-mail: 949676763@qq.com

通信作者: 柳明亮(1986—), 男, 博士生, 教授级高工, 主要从事空间结构新体系方面研究。E-mail: 282586321@qq.com

差异, 在施工过程中可能积累应变及位移, 导致结构整体挠度发生较大变化, 使结构构件实际应力和应变与设计值发生较大变化, 给施工过程和后续使用带来极大的安全隐患, 因此对施工技术提出了更高的要求^[1-3].

近年来施工技术不断更新发展, 侯筱婷等^[4]研究了优选算法在钢结构吊装施工方案优选中的应用, 为后续吊装模拟软件的开发提供理论依据. 王秀丽等^[5]对某体育馆钢屋盖进行施工过程模拟, 并与一次加载下结构的计算结果进行对比, 为优化施工方案提供数据支持. Feng 等^[6]介绍了一种不等高滑移的施工过程, 分析了结构在滑移过程中的状态以及可能对滑移产生的不利影响. Cui 等^[7]考虑大跨度结构施工中滑移支座的尺寸效应和摩擦特性, 对支座的力学性能进行了研究. 田黎敏等^[8]以实际工程为例进行施工过程模拟, 并将计算结果同监测结果进行对比, 为改进施工力学学科提供实例依据. 陈志华等^[9]以天津某文体中心弦支网架为研究对象进行预应力张拉施工模拟, 分析了施工过程中结构位移和构件应力的变化规律, 确定了施工控制阈值. Du 等^[10]针对弦支结构采用刚性索法进行预应力张拉后预应力损失的问题, 提出了一种改进的刚性索法. 张艳芳等^[11]以某体育中心钢屋盖结构施工为例, 对施工过程中索的应力及变形进行了模拟, 根据计算结果提出了合适的张拉方案. 赵文雁等^[12]采用参数化有限元法, 针对索承网格结构张拉、外立面钢结构卸载、各斜撑的安装进行了施工模拟, 研究了结构的整体位移及各个构件的位移及应力, 确定了各施工阶段的允许限值. 于敬海等^[13]将某新建体育馆施工模拟结果与施工监测结果进行对比分析. 结果表明: 各构件内力、网壳起拱值、支座位移等模拟值和工程实际监测值基本一致, 验证了有限元模拟的准确性. 王小盾等^[14]提出一种考虑施工期间环境温度的影响, 模拟钢结构预应力张拉施工全过程的方法, 研究表明, 预应力施工对温度变化敏感, 施工时需要考虑温度变化的影响.

为保证施工过程安全进行, 本文通过应用数值模拟技术, 对西北大学长安校区体育馆弦支屋盖结构使用有限元软件模拟施工过程, 依次建立主馆格构柱及张弦桁架的滑移、副馆的吊车安装、索结构的分批张拉三个分项工程的施工工况, 对每个分项施工过程进行模拟分析, 严格按照原始工程施工顺序和方法进行荷载施加, 以此寻找类似工程施工过程的结构构件内力和应变发展规律, 为以

后的类似结构设计及施工阶段提供数据支持.

1 工程概况

西北大学长安校区体育馆南北长 229 m, 东西宽 126 m, 建筑高度 37.7 m. 结构主要分为两部分: 中心主馆部分和南北两侧的副馆部分, 建筑总体效果见图 1. 其中, 主馆上部穹顶屋盖为大跨度弦支空间结构, 由钢结构和索结构组成, 钢结构由 20 榀空间倒三角桁架组成, 通过加强平面次桁架和环桁架连接成整体, 每榀倒三角桁架长约 48 m. 索结构由环向索、径向索及撑杆组成. 屋盖整体通过 20 根 Y 型格构柱支撑, 跨度 110 m, 下部结构为钢筋混凝土框架. 副馆结构形式为平面桁架, 每榀桁架通过两根框架柱支撑, 副馆内侧桁架与主馆连接, 最外侧为悬挑结构. 屋盖中心部分内环桁架使用矩形钢管, 倒三角桁架、外环桁架及格构柱均采用圆钢管, 直径范围 102~600 mm, 副馆框架柱截面为 800 mm×200 mm, 主副馆钢结构材质均为 Q345B. 结构的下层由环向索和径向索组成, 拉索采用直径范围 48~100 mm 的高钒索, 主馆钢结构三维图见图 2.



图 1 建筑总体效果图

Fig. 1 Overall rendering of the building

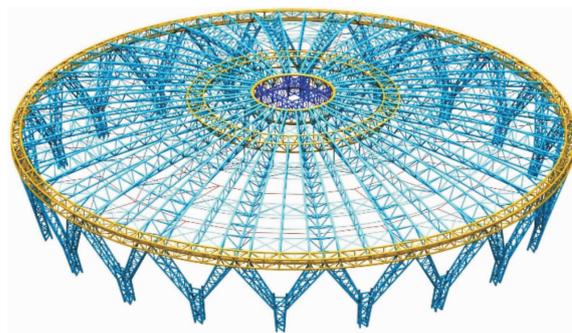


图 2 主馆钢结构三维图

Fig. 2 3D drawing of the steel structure of the main hall

2 施工方案

体育馆钢结构整体施工过程主要分为以下四个

分项工程,分别是主馆桁架及格构柱的安装、主馆中心网壳的安装、副馆钢结构的安装、主馆索结构的安装及张拉,钢结构施工顺序示意图3.

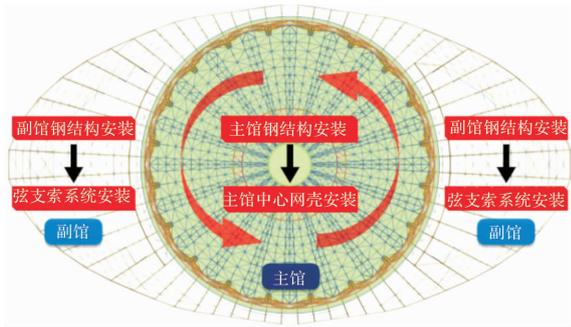


图3 钢结构施工顺序示意图
Fig. 3 Schematic diagram of construction sequence of steel structure

2.1 主馆钢结构滑移施工

由于本工程采用的弦支空间结构体系跨度较大,结构单元较多,自重较大.若采用高空吊装施工,工作量较大,且高空组装和焊接难以保证安装精度,对施工质量和工期均有较大影响.结合以往此类工程的施工方法,本项目主馆采用旋转累积滑移施工方法,该方法可降低高空安装工作量,保障施工质量,同时提高施工作业人员的安全性.

根据现场施工场地条件及主馆钢结构特点,将主馆屋盖桁架进行分割,首个滑移单元由两榀主桁架组成,后续以每榀主桁架作为一个滑移单元,整个屋盖共划分为9个对称单元,每次滑移一个单元,分8次滑移到位,第9个单元在原位拼装,滑移过程中共布置6个顶推器.由于主桁架跨度较大,施工中将其分割成两段吊装,在高空拼装成整体.桁架分段位置需搭设支撑胎架作为高空作业施工平面.屋盖滑移单元划分及顶推器布置见图4,滑移单元示意图见图5.

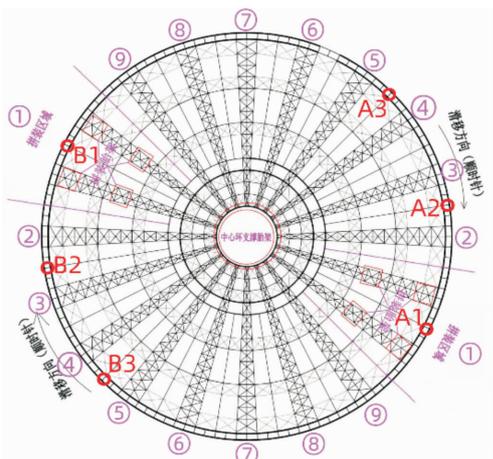


图4 滑移单元及顶推器布置图
Fig. 4 Layout drawing of sliding unit and ejector

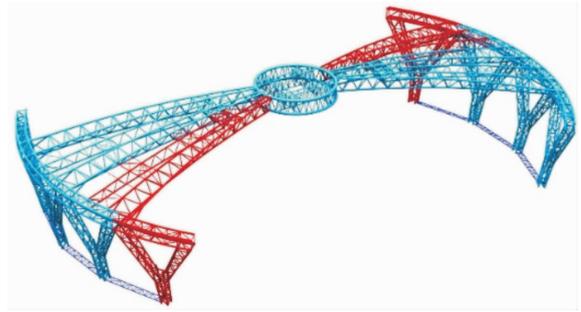


图5 滑移单元示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the slip unit

2.2 副馆钢结构安装

主馆钢结构安装完毕后开始安装副馆钢结构.南北副馆同时施工,安装顺序由中间向两边进行.副馆采用两台100 t汽车吊吊装钢柱、桁架,两台25 t汽车吊配合材料倒运以及中间补空.副馆钢构安装顺序为:靠近主馆内侧立柱→外侧斜钢柱→中间段桁架→最外侧悬挑段桁架→主副馆之间的连接桁架.副馆钢结构示意图见图6.

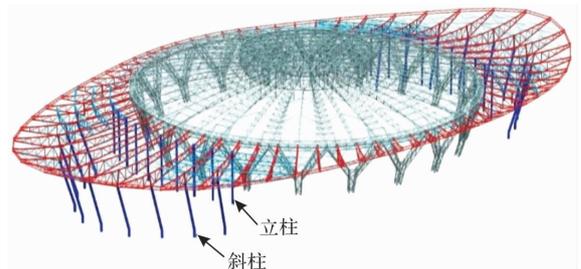


图6 副馆钢结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the steel structure of the auxiliary hall

2.3 索结构安装

主馆钢桁架及中心网壳安装就位后,安装环向索,环向索就位后,开始安装径向索并进行张拉.环向索不张拉,径向索首先由内向外预张拉,张拉力为设计张拉力的10%;再由外向内张拉到设计张拉力的70%,此时主馆钢屋盖卸载;再由内向外张拉到设计力的100%;最后安装并张拉稳定斜索.索结构示意图见图7.

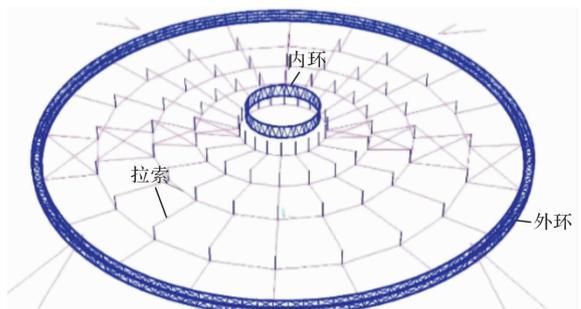


图7 索结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cable structure

3 施工过程模拟

由于大跨度钢结构施工的特殊性, 以最终状态下的结构整体作为研究对象, 使用此种方法对结构进行设计显然是不够全面的, 结构在施工过程可能会产生难以预料的位移和变形. 本文使用有限元计算软件 Midas Gen 进行预应力钢结构的施工仿真计算, 以保证结构施工过程及后续使用安全.

3.1 滑移施工过程分析

建立结构的整体模型, 为使模拟计算与实际施工过程一致, 按以下要求建模:

- (1) 施工模拟时主要考虑结构自重, 由于自重对结构不利而且存在动力荷载, 荷载分项系数取为 1.4, 验算结构位移时取 1.0;
- (2) 格构柱和桁架采用梁单元模拟, 外环轨道滑靴位置按照铰接考虑;
- (3) 滑靴采用有限元软件 Ansys 进行校核, 单元类型选择 Solid185;
- (4) 支撑胎架采用纯受压构件进行模拟.

3.2 索张拉施工过程分析

为保证模型与实际工程一致, 建模要求如下:

- (1) 网壳部分考虑节点重量, 将自重系数取值放大为 1.05;
- (2) 索结构定义为受拉单元, 撑杆定义为梁单元, 并释放梁端约束, 通过改变温度对结构施加预应力.

4 施工过程分析结果

4.1 滑移施工过程

4.1.1 应力分析

选取软件分析结果中具有代表性的第 1、3、

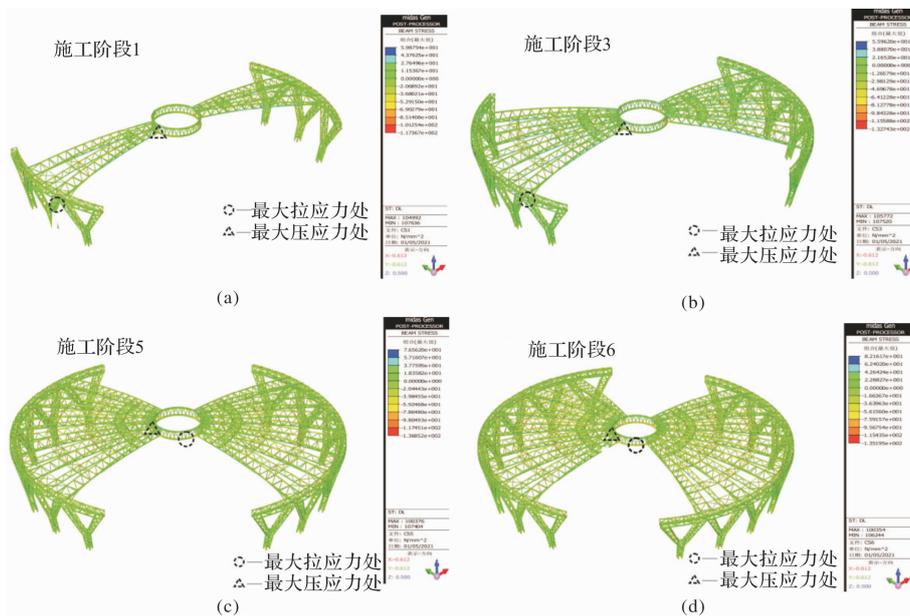
5、6、7、8 施工阶段进行分析. 施工过程中结构杆件的最大应力值见表 1, 各施工阶段的应力云图如图 8 所示. 由结构的应力云图变化情况可以看出, 随着施工过程的逐步进行, 结构的整体性不断完善, 结构杆件中的内力也不断变化, 桁架结构位移逐渐趋于稳定. 结构的最大拉应力在阶段 1、3 中位于外环桁架的竖向腹杆处; 阶段 5、6 中出现在中心环桁架腹杆处; 阶段 7 中出现在中心环桁架的上弦处; 阶段 8 中出现在结构的外环桁架竖向腹杆处. 而结构的最大压应力在整个施工模拟过程中均位于中心环桁架与倒三角桁架的下弦连接处.

由表 1 可知, 结构的最大拉应力出现在阶段 6 中, 最大压应力出现在阶段 5 中, 杆件应力比均小于规范规定的 0.85 限值, 满足施工要求^[15-16]. 根据模拟结果, 外环桁架竖向腹杆、中心环桁架腹杆及上弦等部位应力较为集中, 施工监测时需要密切关注.

表 1 滑移过程模拟最大应力

Tab. 1 Slip process simulates maximum stress

施工阶段	杆件最大拉应力/MPa	杆件最大压应力/MPa
1	59.88	117.37
3	55.96	132.74
5	76.56	136.85
6	82.16	135.20
7	64.45	128.99
8	34.15	104.10



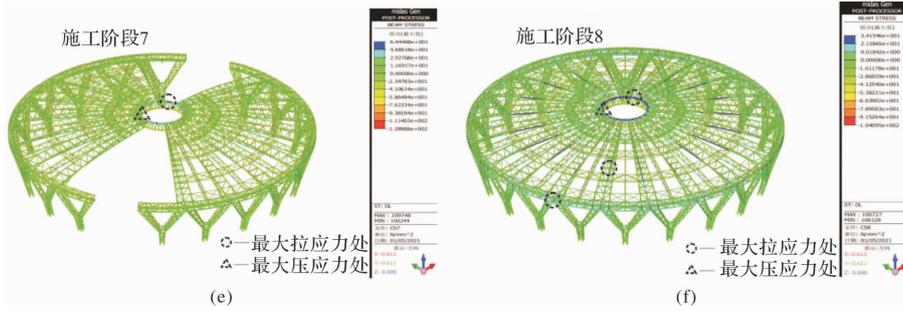


图 8 滑移过程应力云图

Fig. 8 Stress cloud map of slip process

4.1.2 位移分析

根据分析结果,第 1、3、5、6、7、8 施工阶段的位移云图见图 9。阶段 1 结束后,结构位移最大处位于跨中桁架下弦,且在阶段 3、5、6、7 拼装后结构的最大位移持续增大,分别为 25.33、25.40、24.91、23.76mm,均位于结构中间桁架下弦处,同时变形值均小于规范要求的 $L/500 = 97.6 \text{ mm}$,满足规范要求^[15-16];主体结构在完成阶

段 8 后成型,最大位移出现在跨中桁架下弦处,为 19.26 mm。

由以上分析可知,由于施工安装存在先后顺序,同类构件在结构安装完成后进入使用状态时其内力分布已经不再均匀,但结构最大竖向位移均位于中间桁架下弦,因此在施工过程中应对此区域位移密切关注。

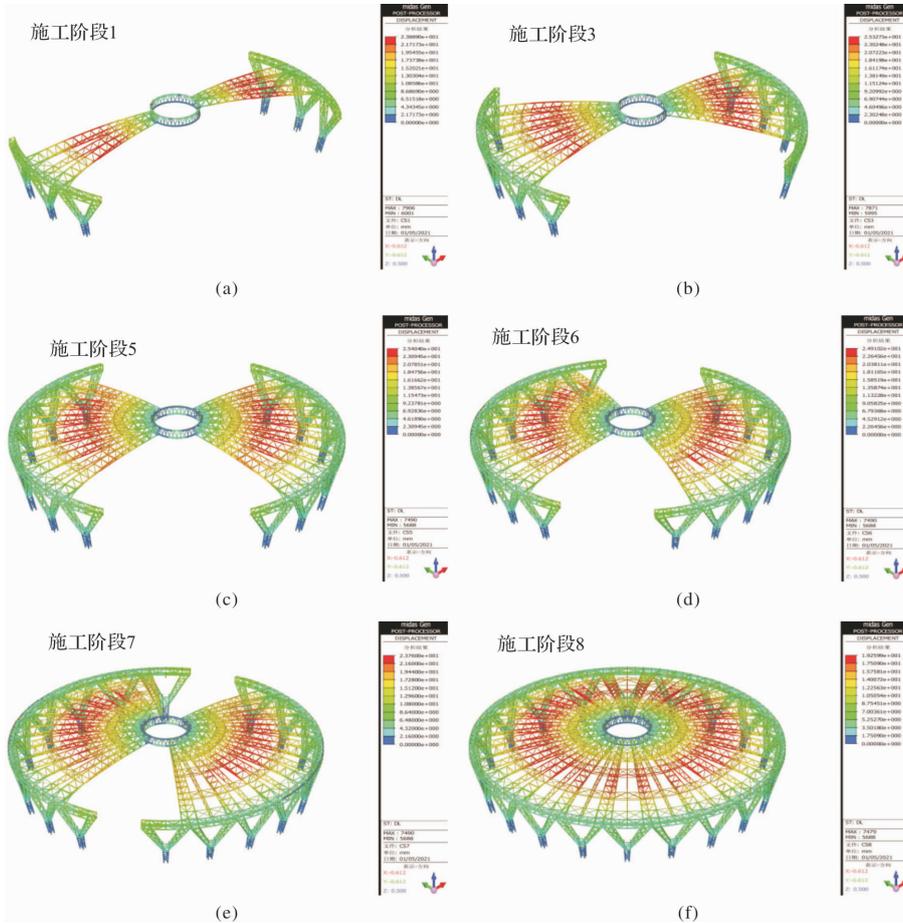


图 9 滑移过程位移云图

Fig. 9 Displacement cloud map of slip process

由图 10 可知,第一单元到第九单元的滑移安装过程中,各滑移单元跨中控制节点的竖向位移,随着施工的推进逐渐增大,构件内力随着施工的

进行亦逐步增大,这说明后续结构的安装会使结构整体内力和位移增大,既有结构的位移在施工安装过程中不断累积,但增加的幅度逐渐降低并

最终趋于稳定, 说明结构的刚度在施工过程中不断增大。

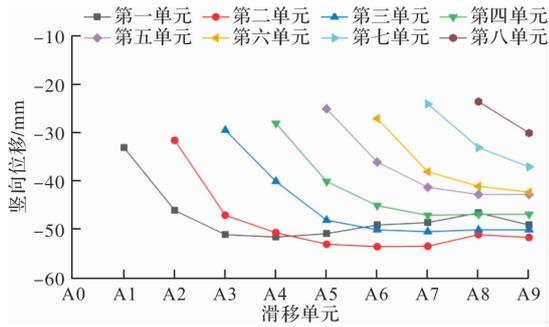


图 10 各滑移单元跨中控制节点位移变化图
Fig. 10 Displacement change diagram of each slip element mid-span control node

4.1.3 滑靴校核

滑靴的计算采用有限元软件 Ansys 进行, 设置单元类型为 Solid185, 材质为 Q345B, 根据上部结构传递的荷载, 滑靴底部最大承受荷载标准值为 650 kN, 考虑动力效应, 竖向荷载设计值确定为 $1.4 \times 650 = 910$ kN, 分析结果见图 11。

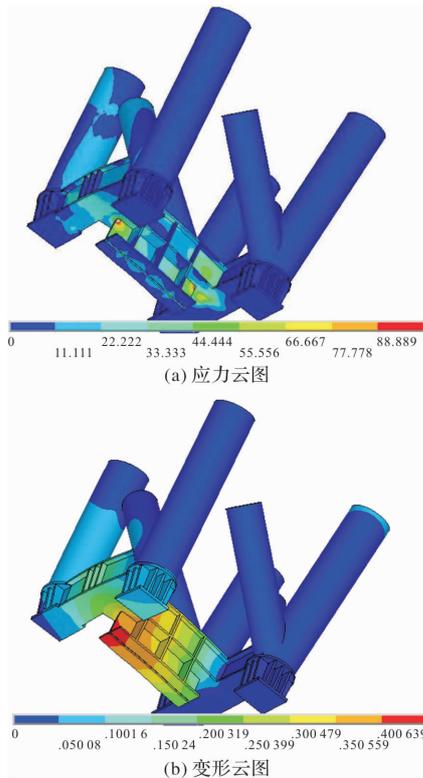


图 11 滑靴应力和变形云图

Fig. 11 Stress and deformation cloud map of the slipper

由图 11 可知, 不考虑应力集中的情况下, 滑靴最大应力约为 89 MPa, 最大变形不超过 0.5 mm, 应力比满足规范中 0.85 限值的要求^[15-16]。

4.1.4 应力监测对比分析

滑移施工阶段分别在桁架结构上弦杆和下弦

杆的两端及中部、桁架中部腹杆位置布置应力传感器作为代表性测点, 从而监测施工过程中杆件的应力变化, 应力模拟值与监测值对比如图 12 所示。

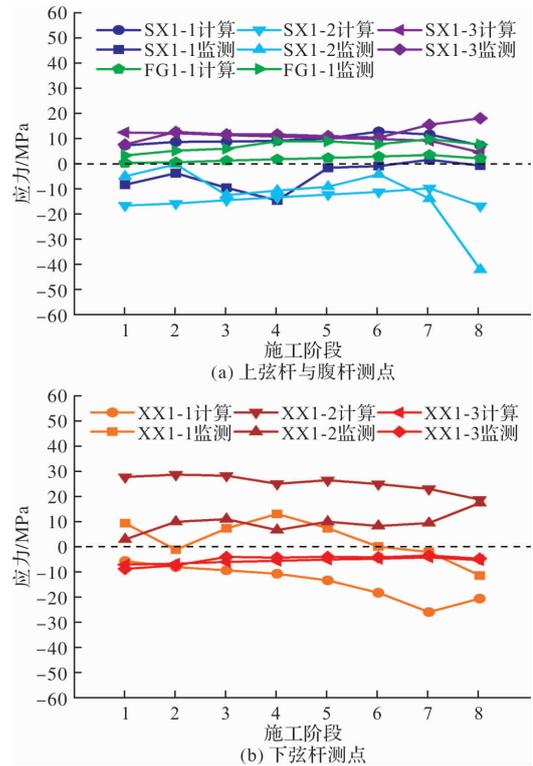


图 12 应力结果对比

Fig. 12 Comparison of stress results

由图 12 可知, 虽然部分测点的模拟与监测结果存在偏差, 但两者变化趋势基本一致。中心环附近测点的模拟与监测结果差异较大, 原因是由于简化计算, 模型中未建立中心环支撑胎架引起的。

4.1.5 位移监测对比分析

空间结构施工中杆件位移作为结构安全的重要控制指标之一, 分别选取辐射状倒三角桁架下弦杆的 2 处测点进行位移监测, 各测点的位移模拟值与监测值结果对比如图 13 所示。

由图 13 可得, 施工过程中结构沿 X 与 Y 方向上的位移较小, 在施工 5、6 阶段时个别测点发生突变。结构位移主要发生在 Z 方向(竖直方向), 但随着施工的进行, 结构竖直位移呈减小趋势。

根据以上应力、位移监测数据可知, 由于施工现场受温度、天气等多种因素影响, 结构随着滑移拼装的进行逐步受力, 杆件的内力位移发生重分布, 很难与理想状态下的模拟结果完全一致, 但模拟与监测结果的变化趋势相似且节点位移方向基本相同, 说明结构模拟计算具有一定准确性,

可为施工中结构监测方案的制定提供依据。

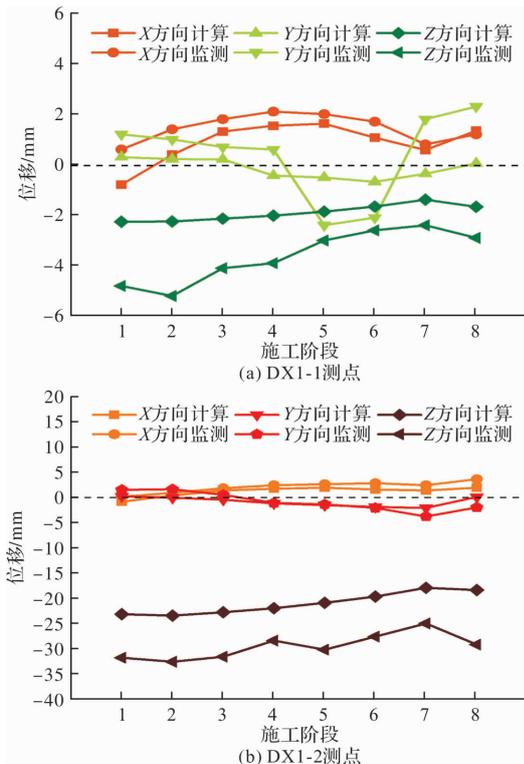


图 13 位移结果对比

Fig. 13 Comparison of displacement results

4.2 索张拉施工过程

由于索结构的张拉最大应力及位移均发生在最后阶段,张拉完毕结构应力和云图见图 14~图 16,张拉过程中各预应力张拉控制节点竖向位移见图 17.

由图 14~图 16 可知:

(1)安装张拉过程中,钢结构最大拉应力为 62 MPa,最大压应力为 74 MPa;

(2)拆除中心胎架并完成第三级张拉后,环向索最大拉力为 1648 kN,径向索最大拉力为 517 kN;

(3)张拉完成后拉索索力值从内到外逐渐增大,索力分布较为均匀.

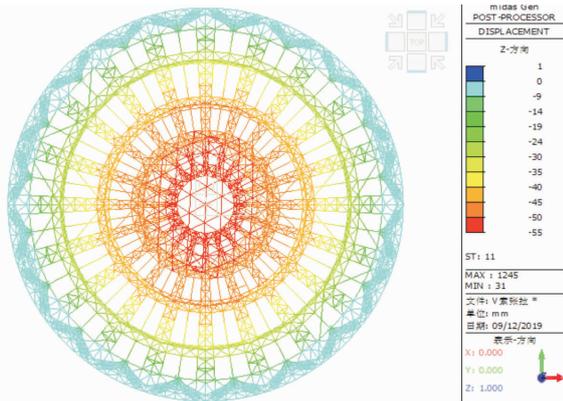


图 14 张拉完毕钢结构位移云图

Fig. 14 Displacement cloud map of steel structure after tensioning

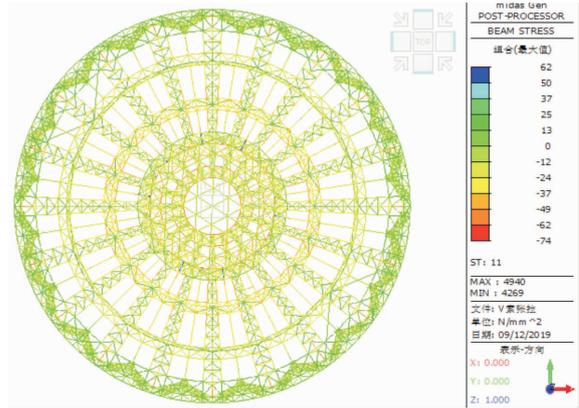


图 15 张拉完毕钢结构应力云图

Fig. 15 Stress cloud diagram of steel structure after tensioning

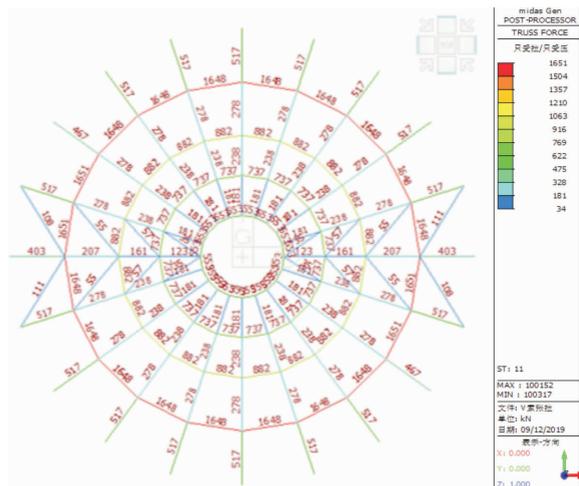


图 16 张拉完毕索结构拉力云图

Fig. 16 Tension cloud diagram of cable structure

由图 17 可知,在完成前两级张拉但未拆除中心胎架前,钢结构竖向变形较小,最大变形为 50 mm;拆除中心胎架后,完成第三级张拉,钢结构最大变形迅速增加到 75 mm,但变形值满足规范要求的 $L/500=97.6\text{ mm}$ [15-16]. 从结果来看,张拉过程对结构位移的影响非常有限.

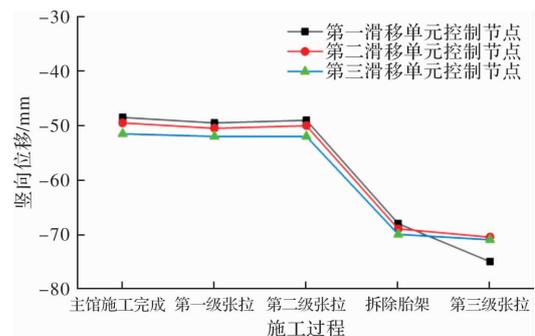


图 17 预应力张拉控制节点竖向位移

Fig. 17 The vertical displacement of the prestressed tension control node

4.3 副馆安装施工

由于副馆钢结构本身结构形式相较于主馆钢

结构较为简单,其桁架部分可以视为一个三跨的连续梁,跨度最长的为中间跨,经计算得出的中间跨竖向位移极小,远不及需要考虑安全问题的程度.本工程采用副馆安装后再张拉主馆拉索的施工顺序,拉索张拉时,主体结构已经安装完成并形成整体,结构受力合理,副馆安装和拉索张拉不会造成不利影响.

5 结论

(1)大跨度弦支空间结构的杆件变形随着施工过程逐渐稳定,内力不断增大并趋于稳定,说明施工过程中结构刚度是逐步形成的,结构薄弱部位与一次成型时相比发生变化;

(2)有限元模拟结果与实测数据对比较为接近,应力、位移的计算与模拟曲线变化趋势基本一致,杆件的受力特性与测点的位移方向相符.有限元数值模拟可有效反映滑移施工过程中结构的力学状态,为工程现场监测点的布置提供依据;

(3)主馆累积滑移施工过程中位移和内力满足规范要求,说明该施工方案合理可行;

(4)预应力拉索的张拉对主馆屋面竖向位移的改善作用不大,卸载时需要充分考虑结构位移的变化并及时进行调整.

参考文献 References

- [1] 陈志华. 张弦结构体系研究进展及发展展望[J]. 工业建筑, 2015, 45(8): 1-9.
CHEN Zhihua. Research progress and development prospect of Zhangxian structural system[J]. Industrial Architecture, 2015, 45(8): 1-9.
- [2] 刘中华, 李建洪, 苏英强, 等. 现代空间钢结构施工方法综述[J]. 空间结构, 2016, 22(3): 70-76.
LIU Zhonghua, LI Jianhong, SU Yingqiang, et al. A review of modern spatial steel structure construction methods[J]. Space Structure, 2016, 22(3): 70-76.
- [3] 张爱林, 刘廷勇, 张艳霞, 等. 基于智能建造的快速全装配大跨度预应力空间钢结构体系创新研究展望[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(6): 591-603.
ZHANG Ailin, LIU Tingyong, ZHANG Yanxia, et al. Prospects of innovative research on rapid fully assembled large-span prestressed spatial steel structure system based on intelligent construction[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(6): 591-603.
- [4] 侯筱婷, 李昌华, 鲁萍. 钢结构吊装施工方案多目标

模糊优选研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(2): 275-279.

HOU Xiaoting, LI Changhua, LU Ping. Research on multi-objective fuzzy optimization of steel structure hoisting construction scheme[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(2): 275-279.

- [5] 王秀丽, 冯竹君, 任根立, 等. 大型复杂体育馆钢结构施工过程模拟分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(6): 17-24.

WANG Xiuli, FENG Zhujun, REN Genli, et al. Simulation analysis of steel structure construction process of large complex gymnasium[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(6): 17-24.

- [6] FENG Ren. Overhead accumulative sliding construction technology of unequal height of large span spatial steel[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 392(2), 1303-1318.

- [7] CUI Can, SUN Bowen. FEM analysis of long-span steel structure considering bearings size effect and friction characteristic[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351-352: 812-817.

- [8] 田黎敏, 郝际平, 郑江, 等. 大跨度复杂钢结构施工力学模拟的研究与应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(3): 324-330.

TIAN Limin, HAO Jiping, ZHENG Jiang, et al. Research and application of construction mechanics simulation of large-span complex steel structures[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, 44(3): 324-330.

- [9] 陈志华, 何永禹, 王小盾, 等. 弦支网架预应力张拉施工模拟分析[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(5): 59-65.

CHEN Zhihua, HE Yongyu, WANG Xiaodun, et al. Simulation analysis of prestressed tension construction of chord support grid[J]. Progress in Building Steel Structures, 2016, 18(5): 59-65.

- [10] DU Wenfeng, ZHU Liming, SUN Zhifei. Improved rigid cable method for prestress optimization in suspend-dome structures[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 438-439: 815-818.

- [11] 张艳芳, 王海龙, 闫智. 多重弦支结构安装及张拉工艺[J]. 施工技术, 2017, 46(11): 144-146.

ZHANG Yanfang, WANG Hailong, YAN Zhi. Installation and tensioning technology of multiple string-braced structures[J]. Construction Technology, 2017, 46(11): 144-146.