

基于ABAQUS的大跨度环形钢结构施工监测方法研究

姚 鑫¹, 梅梦钊¹, 金铭浩^{2*}, 匡 昕², 余船强², 陈伏彬²

¹湖南建工集团有限公司, 湖南 长沙

²长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年1月11日; 录用日期: 2025年2月4日; 发布日期: 2025年2月13日

摘要

为了研究在施工过程中钢结构的力学性能变化情况以及保证结构在施工过程中的安全, 利用Abaqus对结构吊装进行数值模拟分析, 根据模拟结果并结合施工方法制定合理的施工实时监测方案。为大跨环形空间钢结构施工的安全性、科学性提供了有力支撑, 也为类似工程提供了借鉴。

关键词

大跨钢结构, 数值模拟, 安全监测, 施工技术

Study on the Construction Monitoring Method for Large-Span Annular Steel Structures Based on ABAQUS

Xin Yao¹, Mengzhao Mei¹, Minghao Jin^{2*}, Xin Kuang², Chuanqiang Yu², Fubin Chen²

¹Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha Hunan

²School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Jan. 11th, 2025; accepted: Feb. 4th, 2025; published: Feb. 13th, 2025

Abstract

To investigate the changes in the mechanical properties of steel structures during construction and to ensure the safety of the structures throughout the construction process, numerical simulation

*通讯作者。

analysis of structural hoisting was conducted using Abaqus. Based on the simulation results and in conjunction with the construction methods, a reasonable real-time monitoring scheme for the construction was developed. This provides strong support for the safety and scientificity of the construction of large-span annular spatial steel structures and offers a reference for similar projects.

Keywords

Large-Span Steel Structure, Numerical Simulation, Safety Monitoring, Construction Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济水平及土木工程建造水平迅速提升，建筑结构的形式趋于多元化[1]。其中大跨度空间钢结构具有结构轻柔、外形美观、优良的抗震性能等特点相较于传统结构有独特的优势，具备更良好的实用性[2]-[4]。目前大跨度钢结构施工技术已经在建筑领域得到了广泛应用，随着钢结构建筑的跨度不断增加、结构形式愈加复杂以及施工工艺的持续进步，施工过程中面临的问题也日益增多，特别是在结构受力和变形方面的关注显著提高[5]。随着大跨度空间结构的监测技术日益完善，既保障了复杂施工过程的顺利实施，又可将监测得到的数据与数值模拟相结合具有重要意义[6] [7]。

针对大跨钢结构项目的施工监测与数值模拟分析相关的研究已有众多学者开展了一系列研究，宋玉普等[8]，通过大跨度钢结构网架的模态应变分析，利用模态应变参数与构件损伤变形之间的映射关系建立神经网络，通过这种形式确定受损结构杆件的具体位置。雷素素[9]等以某钢结构屋盖施工过程为项目背景，选取关键杆件进行应力应变监测，依据施工方法的不同提出不同的监测指标及监测工具，对结构施工过程的受力特征、变形与部分施工质量问题进行详细监测和检查。吴帅[10]等考虑到大跨空间钢结构施工过程中的加载、卸载及拆除杆件后补杆件的操作会引起空间结构的应力重分布，若盲目施工会造成结构发生塑性破坏，因此依托于有限元工具模拟结构的施工过程针对性地制定了安全可靠的施工方案。王秀丽等[11]等利用 abaqus 有限元软件模拟空间桁架结构施工阶段的吊装及卸载过程，依据有限元分析结果对空间结构中的危险杆件进行加固处理，避免施工过程中的安全事故，并将有限元分析结果与实测数据相结合保障了施工过程的顺利进行。

本文依托于长沙海归小镇天空之厅钢结构项目，采用 Abaqus 进行施工阶段的数值模拟，分析了结构在施工过程中结构应力及位移的变化情况，依据有限元分析结果作为施工过程中的实时监测方案依据，有力地保障了施工过程的顺利进行，为后续同类工程提供参考经验。

2. 三维有限元建模

采用 Abaqus 有限元软件进行提升段提升过程的弹塑性分析，建立了工程实际相同尺寸的三维有限元模型，其中 TS1、TS2、TS3 为三个提升段，3A、3B、3C 为原位区结构上的钢结构体系，如图 1 所示，通过对结构吊点位置施加竖直向上的强制位移，分析提升段在提升过程中的应力、位移情况。

有限元建模过程

根据实际施工情况，采用 ABAQUS 软件建立提升钢结构的有限元分析模型。结构整体内径 24 m，

外径 36 m, 垂直于平面方向(沿 Z 方向)深度为 3.9 m, 整体采用两种不同型号钢材分别为 Q234 及 Q345, 钢材的材料属性参数详见表 1。三种不同截面形式钢材分别为: L 形、工字形、箱型, 结构的构件采用 B31 单元模拟, 网格尺寸为 500 mm。在提升过程中, 仅结构的自重产生作用, Z 方向取 -1 为结构自重方向后, 自重由有限元软件自动计算。考虑到节点板和加劲肋等结构的存在, 自重系数乘以 1.35, 采取 Z 方向位移提升 1 m 距离进行结构的有限元计算。

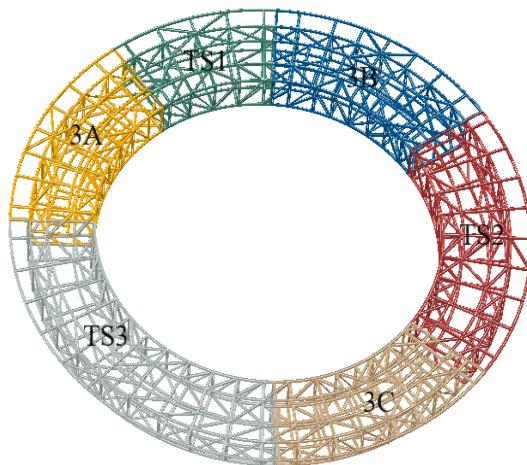


Figure 1. Three-dimensional finite element model of the structure
图 1. 结构三维有限元模型

Table 1. Parameters of steel
表 1. 钢材参数

钢材型号	密度(kg/m ³)	弹性模量(Mpa)	泊松比
Q235	7850	200,000	0.29
Q345	7850	210,000	0.3

3. 有限元分析结果

3.1. 应力分析结果

有限元应力计算结果如图 2 所示。

通过分析结果我们可以发现各吊装段提升过程中的钢结构杆件应力真实值最大为 TS1 段 49.3 MPa、TS2 段 19.5 MPa、TS3 段 30 MPa。各吊装段位移变化最大集中区域各不相同, TS1 段 4 吊点提升下位移变化最大区域集中在外环跨中位置附近。TS2、TS3 段 5 吊点提升下位移变化最大区域集中在结构内环中心侧附近(表 2)。

Table 2. Parameters of finite element analysis results
表 2. 有限元分析结果参数

吊装段编号	最大应力(Mpa)	最大位移(cm)
TS1	49.3	9
TS2	19.5	4
TS3	30	8

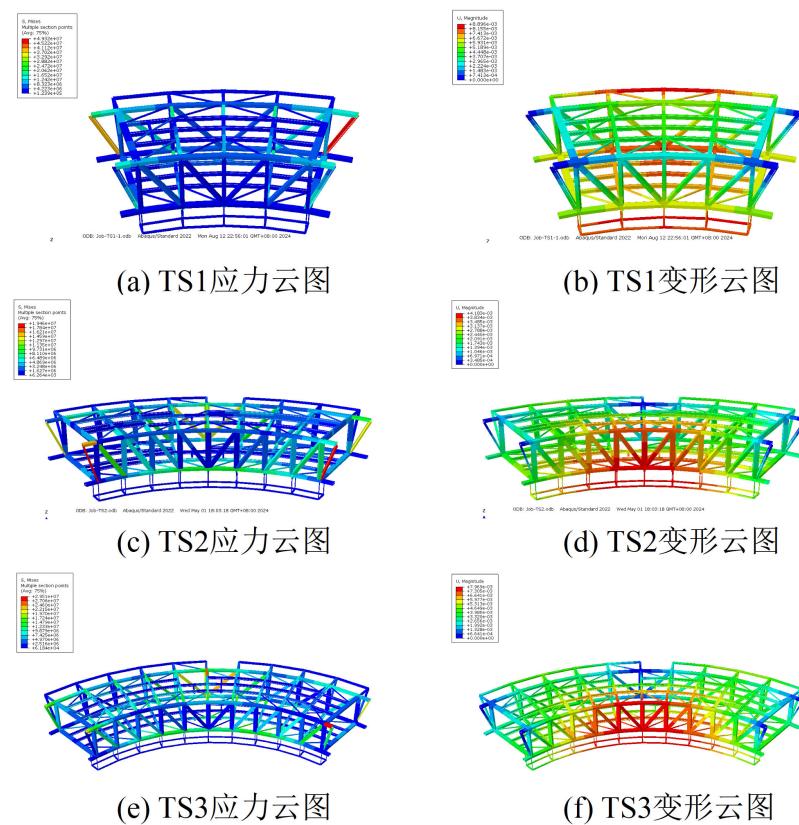


Figure 2. Finite element stress and displacement contour maps of the hoisting segment
图 2. 吊装段有限元应力、位移云图

3.2. 极限承载力分析结果

3.2.1. 结构承载极限验算

根据《钢结构设计标准》(GB50017-2017) [12]可知，吊装段所用钢材材质均为 Q355b 级钢且钢材厚度在 $16 \text{ mm} < \text{厚度} < 40 \text{ mm}$ 范围，此类范围 Q355b 级钢材抗拉、抗压、抗弯强度设计值为 295 MPa。根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) [13]可知承载能力极限状态表达式，吊装段最大应力 $49.3 \text{ MPa} < \text{钢材屈服强度设计值 } 295 \text{ MPa}$ ，符合规范要求。

3.2.2. 结构挠度极限验算

根据《钢结构设计标准》(GB50017-2017)，对于以受弯为主的大跨度钢桁架跨中区域(屋盖)准许挠度值为 $L/400$ ，其中 L 表示钢结构跨度。同时对于大跨度钢结构桁架可以预先起拱，钢结构施工设计单位提供的各提升段预起拱值分别为 $TS1 = 3 \text{ cm}$ 、 $TS2 = 8 \text{ cm}$ 、 $TS3 = 12 \text{ cm}$ (表 3)。根据下式计算：

$$\text{监测跨中挠度数值} \leq \text{跨中挠度准许值} + \text{预拱度}$$

Table 3. Validation of deflection monitoring values
表 3. 挠度监测数值验证

吊装段编号	监测跨中位移(cm)	预起拱值(cm)	准许挠度值 $L/400$ (cm)
TS1	9 (外环)	3	5.6
TS2	4 (内环)	8	9.5
TS3	8 (内环)	12	17.125

通过计算得到：TS1 为 $9 < 5.6 + 3$ ；TS2 为 $4 < 9.5 + 8$ ；TS3 为 $8 < 17.125 + 12$ ；三段吊装段均满足规范变形允许值要求。

4. 监测方案

大跨度钢结构在施工过程中发生危险事故的概率显著高于其他类型结构的施工。如果在施工过程中出现安全隐患或事故，后果不堪设想。因此，在施工阶段，实施有效的安全保障措施并进行实时监测，以确保施工的全面安全，显得尤为重要[14]。

综合有限元分析工作及设计、施工单位建议重点关注部位等因素，整体监测方案共分为两部分：应变监测及挠度监测。

4.1. 应变监测

通过在应力较大的构件表面设置应变片，并涂抹环氧树脂来保护应变片，将应变片与应变采集仪连接，实时获取吊装及卸载过程中构件的应变变化数据。依据监测得到的数据进行现场施工指导，正确控制提升段提升速率；及时发现危险的先兆，分析原因，判断工程的安全性，采取必要的工程措施，防止发生工程事故和环境事故，确保结构施工中的安全和稳定，控制和保证工程质量；评价工程的技术状况，预测沉降量，验证设计参数和设计理论的正确性，使工后构件的应力值控制在设计的允许范围之内。

4.1.1. 应变监测方案

应变监测点主要集中于吊装段结构跨中及原位区连接处，主要将应变片布置在关键部位，如图 3 所示，从上到下依次为 TS1、TS2、TS3 三个提升段的应变监测点位布置示意。

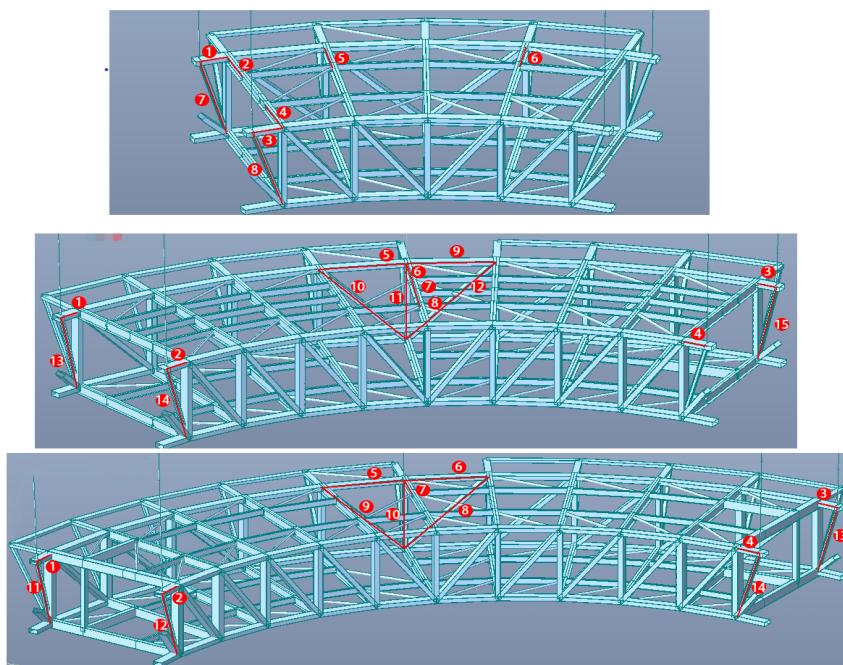


Figure 3. Schematic diagram of strain monitoring point layout
图 3. 应变监测点位布设示意图

4.1.2. 应变监测结果

依据现场实际情况，在提升过程中通过应变采集仪实时采集，监测点位的应力值是通过实际测量的

应变值以及相应的计算公式计算而来的。本次监测数据分析是依据不同的提升工况下进行的，部分测点应力在不同提升工况下的情况如表 4 所示。

Table 4. Partial point monitoring results

表 4. 部分点位监测结果

吊装段编号	监测点位	实时监测应力值(Mpa)	有限元计算应力值(Mpa)
TS1	3	17.683	16.523
	7	40.7672	39.0735
TS2	13	18.40644	15.5936
	15	18.85715	15.7853
TS3	11	22.60335	19.7320
	13	25.08495	24.3975

从部分监测点位的应力实测及有限元应力值对比可以看出，虽然部分测点有限元数值模拟结果与实测数据存在细微偏差，但总体吻合较好。

4.2. 挠度监测

根据《空间网格结构技术规程》[15]的要求，空间结构安装完成后应对挠度进行测量空间结构的挠度测量也能综合反映设计和施工的质量。由于天空之厅自重较大，且提升段跨度较大，因此必须对施工过程进行挠度监测。通过在观测点位点焊反光片，用全站仪测量各点位的高度，计算出结构的挠度，保证施工质量。挠度监测点位布设位置见图 4。

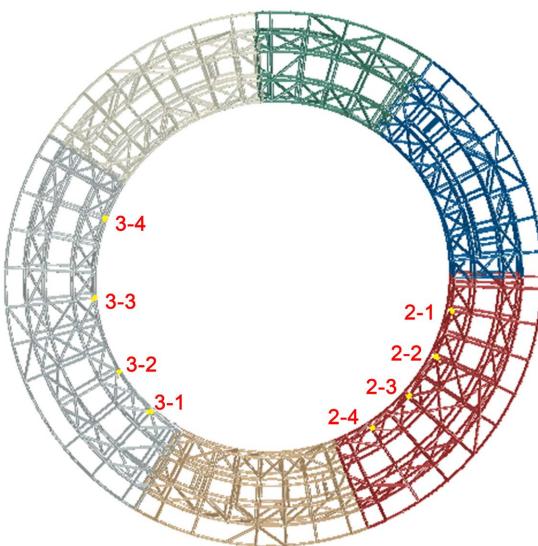


Figure 4. Schematic diagram of deflection monitoring point layout
图 4. 挠度监测点位布设示意图

5. 结论

本文基于长沙市海归小镇项目天空之厅大跨钢结构吊装，对大跨度空间弧形钢结构的施工技术进行研究，应用 Abaqus 建模等信息化、智慧化手段，对钢结构吊装段提升进行模拟计算，为结构吊装的精细

化施工提供了可靠的技术手段。依据有限元模拟分析结果作为施工实时监测方案依据，精细化有限元分析与实时监测有力保障了吊装段提升全过程的精准控制。该工程的顺利实施可为后续类似项目提供示范。

参考文献

- [1] 郑永峰, 郭正兴, 张新. 套筒内腔构造对钢筋套筒灌浆连接黏结性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 158-166.
- [2] 李国建, 王国佐, 沙萍. 苏州现代传媒广场大跨度空间预应力柔性钢结构M形屋架施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(22): 1-7.
- [3] 王仕统. 大跨度空间结构的进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1996, 24(10): 20-27.
- [4] 董石麟, 罗尧治, 赵阳. 大跨度空间结构的工程实践与学科发展[C]//第十一届空间结构学术会议论文集. 南京: 中国土木工程学会空间结构委员会, 2005: 1-11.
- [5] 朱张峰, 郭正兴, 朱寅, 等. 不同连接构造的装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 55-60.
- [6] 孙学根, 牛忠荣, 李兆峰, 等. 大跨度空间结构卸载过程模拟分析与监测[J]. 建筑结构, 2018, 48(11): 70-77.
- [7] 周云, 胡锦楠, 朱正荣, 等. 深坑大跨屋盖重型钢桁架吊装结构施工过程检测研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(4): 41-51.
- [8] 宋玉普, 刘志鑫, 纪卫红. 基于模态应变能与神经网络的钢网架损伤检测方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 13-18.
- [9] 雷素素, 刘宇飞, 段先军, 等. 复杂大跨空间钢结构施工过程综合监测技术研究[J]. 工程力学, 2018, 35(12): 203-211.
- [10] 吴帅, 刘海生, 刘刚, 等. 空间管桁架结构卸载方法的有限元仿真模拟分析[J]. 钢结构(中英文), 2022, 37(9): 25-29.
- [11] 王秀丽, 荣子豪, 杨本学, 等. 空间管桁架结构体育馆施工全过程模拟分析与健康监测[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 18-25.
- [12] 国家标准化管理委员会. GB50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [13] 国家标准化管理委员会. GB50009-2012 建筑结构荷载规[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 张旭辉, 吴海粟, 马捷, 等. 某钢结构连廊吊装施工过程的应力监测分析[J]. 空间结构, 2020, 26(1): 82-89.
- [15] 住房和城乡建设部. JGJ138-2016 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.