

引用本文:周云, 胡锦涛, 朱正荣, 等. 深坑大跨屋盖重型钢桁架结构吊装施工过程监测研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(4): 41-51.  
ZHOU Yun, HU Jinnan, ZHU Zhengrong, et al. Research on construction process monitoring on heavy steel truss lifting process of deep pit large-span roof[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 41-51.

DOI: 10.19815/j.jace.2022.01038

# 深坑大跨屋盖重型钢桁架结构吊装施工过程监测研究

周云<sup>1,2</sup>, 胡锦涛<sup>1</sup>, 朱正荣<sup>1,3</sup>, 罗先明<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 长沙市建设工程质量安全监督站, 湖南 长沙 410016)

**摘要:**为探究大跨度钢结构屋盖在施工过程中的荷载转换机理并保证大跨桁架结构吊装过程安全, 针对某深坑大跨屋盖结构中单榀重型主桁架的吊装及安装全过程进行了结构应变监测。通过在结构关键截面位置处布置应变传感器, 对施工过程中结构关键位置的真实应变分布情况进行分析, 从而评估施工过程中结构的安全性。基于大型有限元软件 ABAQUS 建立精细化有限元模型, 将吊装完成后结构测点处的应变响应与有限元计算得到的应变进行了对比。结果表明: 结构在吊装过程中的整体应变响应水平较低, 该桁架结构被吊装到位后, 受焊接固定工作的影响, 结构的应变发展情况较为复杂, 但总体仍处于安全范围之内; 安装完成后, 整体结构的应变水平随外部环境气温升降呈现周期性变化规律; 环状加劲板与底部混凝土间钢板受力最大, 格构柱内侧中部受力偏大, 格构柱外侧两端受力偏大, 桁架部位受力集中在跨中范围内, 两侧受力偏小, 且结构内部加劲板和格构柱间底部混凝土明显降低了结构关键节点的受力。

**关键词:**大跨度钢结构屋盖; 重型桁架; 吊装提升; 施工安全; 施工过程监测

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)04-0041-11

## Research on construction process monitoring on heavy steel truss lifting process of deep pit large-span roof

ZHOU Yun<sup>1,2</sup>, HU Jinnan<sup>1</sup>, ZHU Zhengrong<sup>1,3</sup>, LUO Xianming<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 3. Changsha Construction Project Quality and Safety Supervision Station, Changsha 410016, Hunan, China)

**Abstract:** In order to explore the load conversion mechanism of large-span steel structure roof during construction and ensure the safety of large-span truss structure lifting process, the structural strain monitoring was carried out for the whole process of lifting and installation of single heavy main truss in a deep pit large-span roof structure. By arranging strain sensors at the key sections of the structure, the real strain distribution at the key positions of the structure during the construction process was analyzed to evaluate the safety of the structure during the construction process. Based on the large-scale finite element software ABAQUS, a refined finite

收稿日期: 2022-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878264); 湖南省重点研发计划项目(2022SK2096); 河南省交通科技项目(2020G11); 湖南省交通厅科技进步与创新项目(201912)

作者简介: 周云(1979-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zhouyun05@126.com.

通信作者: 胡锦涛(1997-), 男, 工学硕士研究生, E-mail: hu1110@hnu.edu.cn.

element model was established, and the strain response at the structural measuring point after lifting was compared with the strain calculated by the finite element method. The results show that the overall strain response level of the structure during the lifting process is low. After the truss structure is hoisted in place, the strain development of the structure is complicated due to the influence of welding and fixing work, but it is still within the safe range. After the installation is completed, the strain level of the whole structure changes periodically with the temperature rise and fall of the external environment. The stress of the steel plate between the annular stiffening plate and the bottom concrete is the largest, the stress of the middle part of the inner side of the lattice column is too large, the stress of the two ends of the outer side of the lattice column is too large, the stress of the truss part is concentrated in the middle span, and the stress of the two sides is too small, and the internal stiffening plate and the bottom concrete between the lattice column significantly reduce the stress of the key nodes of the structure.

**Key words:** large-span steel roof; heavy truss; lifting process; construction safety; construction process monitoring

## 0 引言

随着社会经济及生产力水平的提高,大型空间结构体系得到广泛应用,并逐渐成为衡量一个国家建筑科技水平发展的重要标志之一<sup>[1]</sup>。由于相应结构体系及形式复杂多样化,结构性能评估及安全监测存在不确定性,且传统的施工方案和计算方法无法对施工全过程建筑结构的应力状态进行准确预测。若未对建筑施工过程进行准确地跟踪评估并未能对可能发生的破坏现象及时做出预警,则容易造成严重的工程事故。利用实时监测数据可以揭示施工过程中多种荷载作用下结构的力学行为和响应等,并对结构安全性进行评判。因此,为保证建筑结构施工过程的安全性,建立施工全过程的结构性能监测具有重要意义。

结构健康监测技术(Structural Health Monitoring, SHM)最早兴起于 20 世纪末,是指利用现场的无损传感技术对结构整体行为进行实时监测,通过分析特征响应等方式实现对结构损伤程度及定位的判断识别,从而有效反演结构实际承载力及可靠性,并最终为建筑结构的养护维修、损伤预警提供依据和指导<sup>[2]</sup>。目前,结构健康监测技术已被国内外众多学者应用于大跨房屋的性能评估当中。李惠等<sup>[3]</sup>通过在国家游泳中心“水立方”上建立应变监测系统,实现了对结构施工卸载阶段关键杆件应变波动规律的研究分析。罗尧治等<sup>[4]</sup>通过对国家体育场“鸟巢”各部位钢结构的温度与应力情况进行长期监测,研究了均匀与非均匀温度场作用下的结构应力。罗永峰等<sup>[5]</sup>提出了适用于大型钢结构建筑施工过程

中关键性能监测参数的选取方法及相应测点布置原则,并以抚顺市地标性建筑“生命之环”项目为例进行了验证分析。Xia 等<sup>[6]</sup>提出一种利用实时应变监测结果反演高层结构变形情况的计算方法,并以 600 m 高的广州电视塔为例进行了现场实体验证。宋彪等<sup>[7]</sup>利用光纤光栅传感器对某钢梁在高温下的切割全过程进行了应变监测与分析。孙若含等<sup>[8]</sup>基于儒乐湖大桥的长期温度监测结果,对多室混凝土箱梁的实测温差分布情况进行了统计分析。Catbas 等<sup>[9]</sup>对国家体育场“鸟巢”结构中所建立的应力、风速、变形及振动等实时监测体系进行了系统描述。Li 等<sup>[10]</sup>基于某大型斜拉桥加速度响应监测结果计算了时变模态参数,提出了一种适用于外部环境作用下桥墩冲刷侵蚀量的确定方法。Shahsavari 等<sup>[11]</sup>以在三跨垂直升降桁架桥上进行的受控货车荷载试验所收集的 SHM 数据校准的有限元模型为基准,利用加速度信号的能量速率指数来评估桥梁的整体响应与损伤程度的关系,评估受损桥梁的承载能力,确定受损构件是否符合桥梁分析和设计规范关于轴向和弯曲组合效应的规定。常乐等<sup>[12]</sup>结合大同美术馆钢结构项目施工滑移阶段监测,提出了一种适用于大跨复杂钢结构轨道滑移施工的监测方法,并采用有限元模型对滑移过程进行了数值分析。

在工程建造方面,随着项目施工水平的迅速发展,液压提升技术被逐渐应用到大跨空间结构的施工建造及既有老化结构的改造整修过程当中。通过对大型结构吊装及安装等过程开展必要的施工阶段监测,可实时掌握并评估结构的真实受力状态及性能水平,对于保障现场施工安全具有重要意义。

Zhao 等<sup>[13]</sup>对某大型混凝土拱桥的桥面抬升改造过程进行了应变响应监测,建立了主跨承台梁和支撑梁的三维有限元模型,分析了主梁和支撑梁之间的接触行为和应力分布特征,并对上部结构和支撑结构的诱导应力进行了监测和分析。Stith 等<sup>[14]</sup>对某工字型钢梁吊装过程中的应变响应及位移转动情况进行了监测,并建立了三维非线性有限元模型,该模型能够准确地捕捉曲线钢工字梁在吊装过程中的应力和转动行为,并将模型外推到包括2台起重机和4个升降点的系统中。Yin 等<sup>[15]</sup>通过应变响应监测方式,对某大跨度V形结构体系拱桥在施工过程中的线性行为进行了评估。Holden 等<sup>[16]</sup>对长度为12.62 m、宽度为2.08 m的GFRP混凝土板的吊装过程进行了监测,测试所得结构的应变响应均小于其极限开裂荷载,并对不同吊装布置方式下的板应变进行了研究。Deng 等<sup>[17]</sup>基于有限元数值模拟结果,对某大型轮辐式预应力索桁空间结构在施工过程中关键杆件的位移情况进行了现场监测,通过实测值与计算值的对比分析,指导张拉施工。2018年,Murphy 等<sup>[18]</sup>通过安装无线应变传感器,对某大跨桁架桥施工吊装过程进行监测,通过与有限元模型的对比研究,定量地说明在役钢桁架桥恒载分布的不确定性。

大型结构构件在施工吊装过程中由于受各种不确定因素的影响,容易对构件产生损伤并引发工程安全事故。因此,本文将结构健康监测技术应用到长沙市某深坑世界级大跨钢结构项目,针对其上部大跨度钢屋盖施工过程中单榀重型桁架的吊装安装环节进行了实时监测。通过在结构关键截面位置处布设应变传感器,对施工过程中结构关键位置的真实应变分布情况进行分析,从而评估施工过程中结构的安全性。基于大型有限元软件ABAQUS建立精细化有限元模型,将吊装完成后结构测点处的应变响应与有限元计算得到的应变进行了对比,有限元模拟结果与监测结果基本吻合,进而对吊装完成后结构的各关键受力部位进行了应力分析,由此揭示大跨度钢屋盖施工过程中单榀重型桁架吊装完成后的受力特点和结构的整体安全状态。

## 1 项目背景

### 1.1 工程概况

长沙市某深坑项目占地面积约 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,总投资约120亿元,是世界上惟一悬浮于深坑之上的冰雪游乐项目。该项目以废弃采石矿坑为地基进行建

造,其主体建筑为大跨度重型钢-混组合结构体系,主要由下部竖向支撑、中部混凝土平台和上部钢结构屋盖三部分组成(图1),其中下部竖向支撑为混凝土结构体系,由48根高度为37~60 m的大体积钢筋混凝土柱(最大直径约6 m)和18道混凝土剪力墙(最大跨度约20 m)组成,共同支撑起中部长约220 m、宽度约175 m、面积约 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的巨大混凝土平台;上部钢结构屋盖建于该平台之上,其长度约240 m,宽度约160 m,面积约 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,总用钢量约 $1.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。

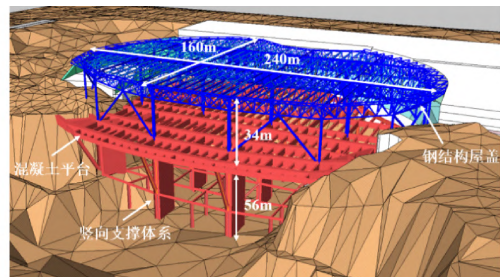


图1 某深坑工程主体结构

Fig. 1 Main structure of deep pit project

### 1.2 屋盖结构体系

该项目工程中上部重型钢结构屋盖整体结构主要由主桁架、次桁架和环桁架三部分组成,如图2所示,其中主桁架为箱型截面组合桁架体系,次桁架为箱型截面单面桁架体系,环桁架为由圆管及箱型截面组合而成的三角桁架体系。在中部混凝土平台施工完成后,依据作业面交付时间,将该屋盖结构划分为9个施工区域,每个区域内的施工顺序依次为主桁架、环桁架、次桁架,均采用先楼面拼装、再整体吊装、后焊接安装的施工方法。所有主桁架的总质量约 $4.9 \times 10^3 \text{ t}$ ,次桁架总质量约 $8.6 \times 10^3 \text{ t}$ ,环桁架总质量约 $4.5 \times 10^3 \text{ t}$ ,整体提升高度约为26 m。依据现场施工分区设置情况,主桁架的吊装顺序依次为 $B_3$ 、 $B_2$ 、 $B_4$ 、 $A_2$ 、 $B_5$ 、 $A_3$ 、 $A_1$ 、 $B_1$ 。每榀主桁架均由上(下)弦杆、腹杆、空间横向撑杆及斜向撑杆组成。

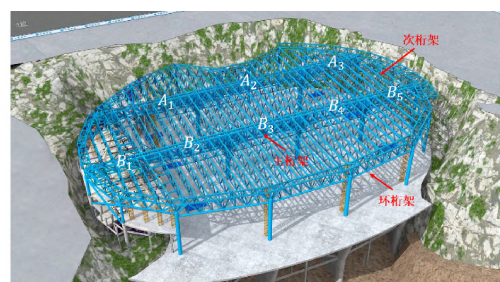


图2 大跨度钢结构屋盖

Fig. 2 Large-span steel roof

### 1.3 屋盖吊装施工方案

为综合考虑操作便捷性及造价经济性等因素,吊装施工中在格构式立柱顶部上吊点两侧分别焊接提升梁,用以安装液压提升器,其受压侧通过承重钢绞线与下吊点桁架表面焊接的吊点牛腿进行相连,并通过液压提升器的重复伸缸和缩缸过程将主桁架吊装至指定设计位置。针对本项目中所监测的主桁架  $B_3$ ,将下吊点牛腿焊接至其端部腹杆连接节点处,并在该节点区域内焊接 20 mm 厚加劲肋进行加固处理。牛腿所用钢材强度等级为 Q345B,其开孔位置与提升梁开孔位置在竖直方向上保持一致,且误差范围控制在 10 mm 之内。为满足结构吊装到位后对安装接口精度及相关规范的要求,在悬臂立柱受拉侧顶部安装背拉提升器,通过柔性钢索与焊接在底部柱脚处的背拉反力架相连进行锚固,使格构柱一侧的 2 台液压提升器用于吊装作业,另一侧的 2 台液压提升器则作为张拉设备进行反向背拉,从而保证格构柱在吊装状态下的水平位移能够处于合理范围内,桁架吊装施工情况见图 3。在所吊装桁架被吊装至指定位置处后,将其与相邻格构柱进行焊接连接。

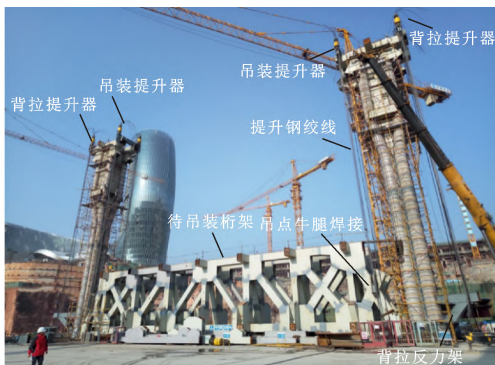


图 3 桁架吊装施工情况

Fig. 3 Construction situation of truss lifting

## 2 主桁架施工全过程监测

### 2.1 测试结构信息

因该项目中  $B_3$  主桁架位于结构中心位置(承受荷载最大处),且  $B_3$  主桁架为最先吊装桁架,后续桁架吊装在  $B_3$  主桁架吊装后以其作为支撑结构进行其余桁架的吊装工作,进而组成重型钢结构屋盖整体结构。2017 年 12 月,湖南大学土木工程结构健康监测研究团队对现场施工一区中单榀主桁架  $B_3$  的吊装过程进行了监测。该被吊装主桁架高度约 8 m,跨度约 48 m,自重约 600 t,提升高度约 26 m,其拼接所用杆件均为矩形截面,部分杆件截面尺寸如

图 4 和表 1 所示。待吊装桁架以两侧大体积钢管-混凝土格构柱作为竖向支撑体系,分别由 4 根圆钢管与矩形薄壁钢板依次拼接组成。钢管所用钢材型号为 Q420GJC,单根钢管柱直径为 1 100 mm,壁厚为 50 mm;拼接所用钢板为 Q345GJC 型钢材,壁厚为 12 mm。格构柱总高度约 35 m,钢管柱内部及格构柱底部 4 m 范围内浇筑 C60 型自密实混凝土。除此之外,在格构柱东西两侧底部分别焊接有反力架以进行背拉操作。

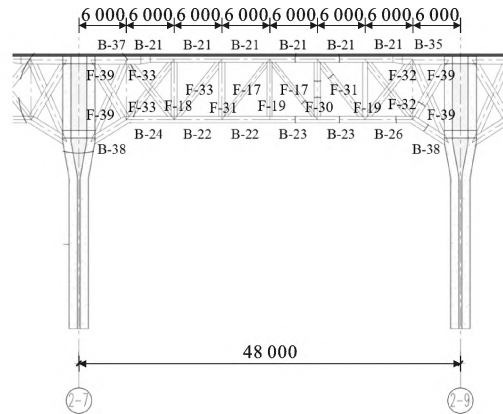


图 4 单榀主桁架  $B_3$  (单位: mm)

Fig. 4 Single main truss  $B_3$  (unit: mm)

表 1 杆件截面尺寸

Table 1 Section dimensions of members

编号	截面尺寸
B-21	800 mm×800 mm×25 mm×25 mm
B-22	800 mm×800 mm×30 mm×30 mm
B-23	800 mm×800 mm×35 mm×35 mm
B-24	800 mm×800 mm×40 mm×40 mm
B-26	800 mm×800 mm×50 mm×50 mm
B-35	1 000 mm×1 000 mm×40 mm×40 mm
B-37	1 000 mm×1 000 mm×60 mm×60 mm
B-38	1 000 mm×1 000 mm×70 mm×70 mm
F-17	600 mm×800 mm×20 mm×20 mm
F-18	600 mm×800 mm×25 mm×25 mm
F-19	600 mm×800 mm×30 mm×30 mm
F-30	800 mm×800 mm×30 mm×30 mm
F-31	800 mm×800 mm×35 mm×35 mm
F-32	800 mm×800 mm×40 mm×40 mm
F-33	800 mm×800 mm×50 mm×50 mm
F-39	1 000 mm×1 000 mm×50 mm×50 mm

### 2.2 监测系统

由于该工程结构具有跨度大、自重大、构件类型多及施工过程复杂等特征,因此监测吊装安全具有重要意义。针对本桁架吊装过程,建立了以关键杆件应力水平观测为主的监测系统,其主要由现场数

据采集及无线传输、数据存储及管理、结构预警及评估三部分组成,可有效实现监测数据的连续采集、自动储存及可视化监测等功能,如图 5 所示。

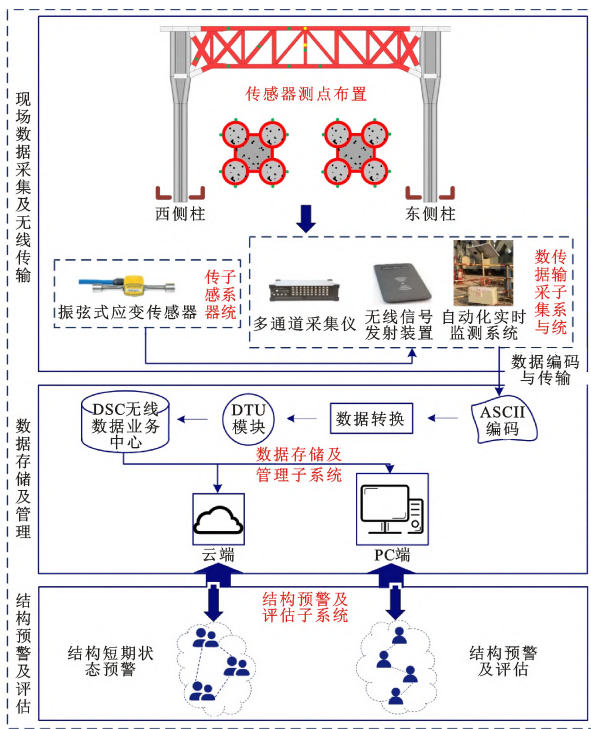


图 5 实时监测系统构成

Fig. 5 Composition of real-time monitoring system

根据结构的几何特征和受力特点以及对施工过程的分析,确定结构各构件的测点位置,据此本文提出以下应变测点布置方案:

(1)对于双轴对称的桁架结构,当结构承受较大的压力时,结构跨中可能出现挠曲变形。因此在桁架结构中间下弦杆对称布置 2 个测点(测点 2、3),中间上弦杆(测点 8)、中间空间横向撑杆(测点 9)各布置 1 个测点,以了解可能挠曲最大处结构受弯矩作用产生的弯曲变形。

(2)为了解桁架可能挠曲最大处杆件受轴向力产生的轴向应变,在桁架中间的竖向腹板(测点 1)、空间斜杆(测点 10)各布置 1 个测点。

(3)为获取桁架吊装过程和桁架与格构柱连接后桁架两侧边界处以及桁架杆件变截面处杆件的弯曲变形,并考虑到工程实际情况无法在焊接处安装应变传感器,因此在焊接位置最近处的上下弦杆中心(测点 5、7)和斜腹杆(测点 6)下侧中心各布置 1 个测点,其中测点 5、7 位于桁架杆件变截面处。考虑以上测点布置情况的基础上,为全面了解桁架结构各部位的变形以及单个斜腹杆的轴向变形布置测点 4。

(4)对于东西两侧大体积钢管-混凝土支撑格构柱,每根格构柱底部(其受力最大处)沿截面圆周方向环绕均匀布置 8 个测点。

在结构上进行测点布置时,由于构件靠近节点处受力较为复杂,且实测值与理论分析结果常有较大差异,因此各传感器均沿杆件轴线方向在跨中进行安装,避开节点及焊缝所在位置。测点选取位置综合考虑背拉反力架的安装区域。各测点编号、桁架吊装部分(红色区域)及桁架吊装受力情况详见图 6。吊装施工中,格构式立柱顶部上吊点的吊装提升器通过提升钢绞线与下吊点桁架表面焊接的吊点牛腿腿相连,进而经过液压提升器的重复伸缸和缩缸过程将桁架吊装部分(红色区域)提升至指定设计位置。

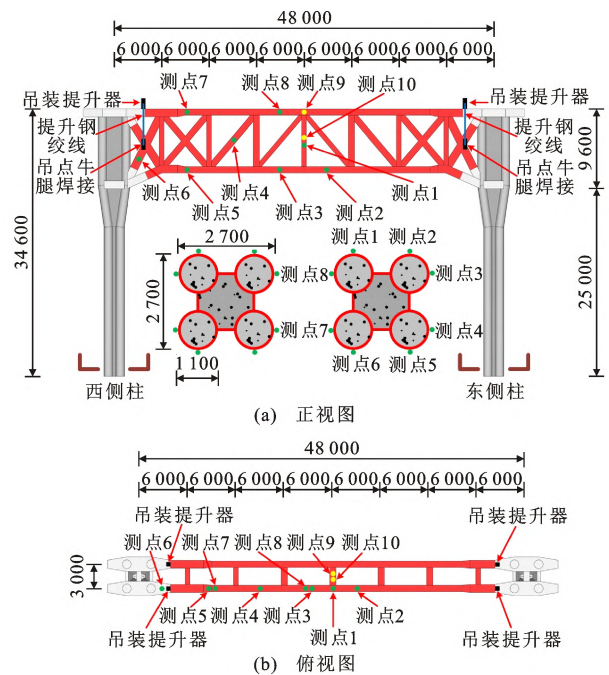
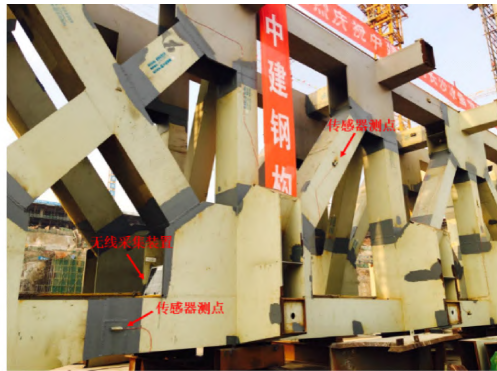


图 6 主桁架 B<sub>3</sub> 测点布置情况及吊装施工概念图

(单位: mm)

Fig. 6 Main truss B<sub>3</sub> measuring point layout and lifting construction concept map (unit: mm)

振弦式应变传感器适用于安装在钢结构及其他建筑物表面,其安装较常规电阻应变计更为简易,且具有较高的测量精度,对安装环境要求也较低,具有一定的防水性、耐腐蚀性和长期稳定性,适合复杂环境下的长期监测。因此,本项目选用 JMZX-212 型振弦式应变传感器(量程为  $\pm 1.5 \times 10^{-3}$ , 灵敏度为  $1 \times 10^{-6}$ ),通过焊接方式固定于钢结构表面,如图 7 所示。同时为避免雨水、灰尘等对传感器灵敏度造成的干扰,在传感器外侧焊接有金属外壳进行仪器



(a) 钢桁架处传感器监测测点



(b) 格构柱处自动化采集装置

图7 监测所用仪器设备

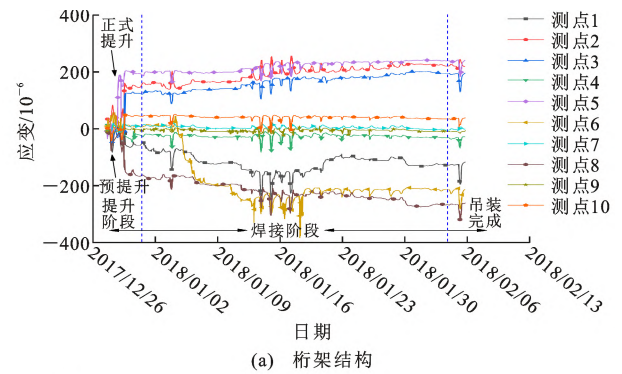
Fig. 7 Instrument devices of monitoring system

保护。选用 JMZX-32A 型综合采集模块,并配合无线发射技术,有效实现可视化的实时数据监测及超出阈值后的报警提示功能。通过太阳能电池板进行能源供应。

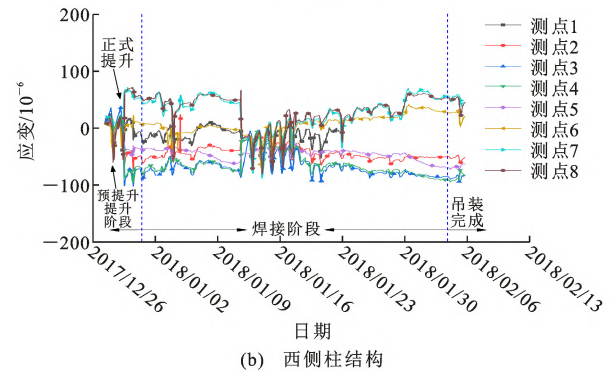
### 2.3 监测结果

本项目中所监测的主桁架 B<sub>3</sub> 于 2017 年 12 月 25 号下午 5 时左右开始进行吊装工作,号称“三湘第一吊”。整体结构首先进行了高度约为 10 cm 的预提升,用以检查各项设备的工作性能及关键构件的受力情况是否处于正常状态;在静置约 15 h 后,该桁架于 2017 年 12 月 26 号 10 时左右进行正式吊装。液压同步提升速度保持为  $4\sim 5\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ,总提升高度为 26 m。在历经 4 h 后,整体结构于当日 14 时左右吊装完毕。在对接接口定位确认后,即开展主桁架与相邻格构柱之间的焊接工作。整个过程中监测所得的结构应变响应情况如图 8 所示,其中信号采样频率设置为  $10\text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$ ,以桁架吊装起始时刻为应变零点。图 8 中曲线标志符仅用于区分各测点,不代表采样点。

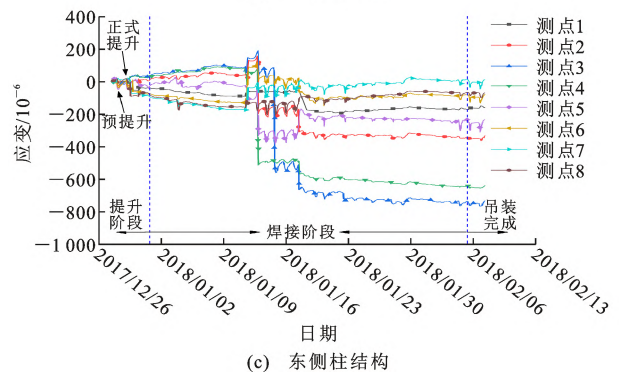
在整个吊装过程中,所监测位置处结构的应变响应均较小。主桁架结构大部分测点处的应变响应不超过  $100\times 10^{-6}$ ,部分测点处应变响应达至  $200\times$



(a) 桁架结构



(b) 西侧柱结构



(c) 东侧柱结构

图8 实时应变监测结果

Fig. 8 Results of real-time stress monitoring

$10^{-6}$ ;对于两侧格构式支撑柱,其平均应变响应幅值在  $40\times 10^{-6}\sim 100\times 10^{-6}$  之间波动,并处于合理范围内。在吊装提升工作初期,整体结构的内力重分布情况较为明显,但在施工过程中后期波动情况有所减缓。对于横向撑杆(测点 9)及空间斜撑(测点 10)处,其在吊装过程中监测所得的应变响应情况变化较小,表明吊装过程整体平缓稳定,桁架结构未发生倾斜及平面外转动等情况。结构吊装过程中及焊接完毕后关键测点处的应变响应如表 2 所示。

在整体结构被提升至指定位置、并与相邻格构柱预留接口对接定位完成后,开始进行相应焊接工作。由于该桁架的杆件截面尺寸较大,焊接工作持续时间长,总共耗时 3~4 周。焊接过程中,桁架结构的边界条件不断发生变化,从而导致其应变发展水平较为复杂,但整体仍处于安全范围内。在焊接

表 2 结构施工过程关键测点应变响应

Table 2 Strain responses of key measurement points during structural construction

待测结构	测点编号	吊装过程峰值应变/ $10^{-6}$	焊接完毕实测应变/ $10^{-6}$	焊接完毕实测应力/MPa
主桁架	测点 5	+199	+254	+52
	测点 8	-202	-275	-57
西侧柱	测点 3	-103	-93	-19
	测点 7	+65	+67	+14
东侧柱	测点 3	+104	-749	-154
	测点 7	-172	+21	+4

注：“+”表示受拉；“-”表示受压。

阶段中期,桁架与格构柱的连接区域进行了集中的焊接工作,桁架与两侧格构柱的连接方式不断改变,整体结构不断进行内力重分布,使得桁架结构应变出现较大波动且两侧格构柱应变出现较为明显的应变重置问题。焊接阶段后期,桁架与两侧格构柱的连接方式基本稳定,应变波动情况也有所减缓。在此期间,相邻东侧主桁架  $B_1$  也进行了相应的吊装工作,从而造成  $B_3$  结构体系的受力情况发生明显波动。由于主桁架  $B_1$  在提升过程中以原有东侧柱作为支撑体系,导致监测所得两侧格构柱的应变响应变化趋势开始发生不同。

在与相邻格构柱之间的焊接工作完成后,开始陆续进行与主桁架  $B_3$  相交次桁架的吊装及焊接工作,该过程导致结构体系的内力进一步发展。在相关工序完成后,结构的内力发展水平开始趋于稳定,整体响应基本仅随外界气温昼夜升降而发生周期性变化。现场吊装施工情况如图 9 所示。

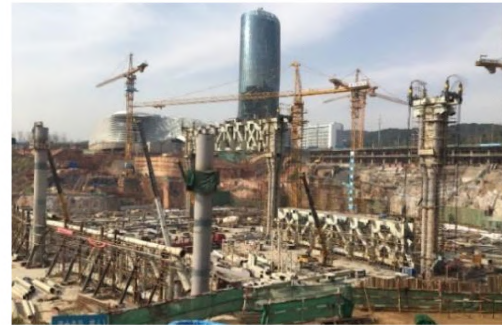
### 3 有限元模型吊装模拟

#### 3.1 建模过程

本文采用大型有限元计算软件 ABAQUS 对吊装前后结构的受力进行模拟。管内混凝土在轴压作用下受到钢管壁的侧向压力约束而处于三向受力状态,单轴的抗压承载力提高,为考虑钢管约束作用对管内混凝土应变的影响,混凝土的受压本构关系采取韩林海<sup>[19]</sup>提出的管内混凝土应力-应变( $\sigma-\epsilon$ )关系模型,并通过约束效应系数指标控制约束对应变的影响规律,该本构模型的准确性已得到钢管混凝土构件与节点试验的验证<sup>[19-20]</sup>。在不同约束条件下混凝土的受拉性能相差不大,因此混凝土的受拉本构关系统一采用沈聚敏等<sup>[21]</sup>建议的受拉应力-应变关系模拟混凝土在受拉状态下的本构关系,该本构关系与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[22]</sup>



(a) 吊装过程

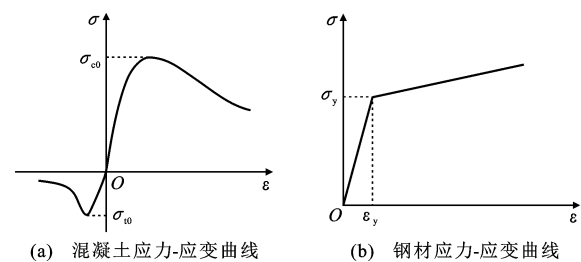


(b) 吊装完成

图 9 现场吊装施工情况

Fig. 9 On-site lifting construction situation

给出的本构关系形式一致。本文研究结构的钢材主要包括钢管、桁架、加劲板,采用双线性各向同性线性强化模型。本文采取的混凝土和钢材应力-应变曲线见图 10,其中, $\sigma_{c0}$ 、 $\sigma_{t0}$  分别为混凝土抗压强度和抗拉强度, $\sigma_y$ 、 $\epsilon_y$  分别为钢材屈服强度和屈服应变。



(a) 混凝土应力-应变曲线

(b) 钢材应力-应变曲线

图 10 材料应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of materials

本文根据单榀重型桁架的吊装及安装过程,建立了和试件相同尺寸和边界条件的有限元模型,见图 11。混凝土采用能较好模拟混凝土三维受力的三维六面体减缩积分实体单元(C3D8R),网格尺寸为 200 mm,钢管和桁架部分采用壳单元 S4R,网格尺寸为 600 mm。钢管混凝土和钢管之间采用 Tie 绑定约束,结构底面采用完全固支约束。在建立的模型基础上,缓慢地施加重力场,取光滑的加载幅值曲线,并尽可能地延长加载时间以减小荷载冲击的影响来模拟静力加载,通过在悬臂立柱受拉侧的桁

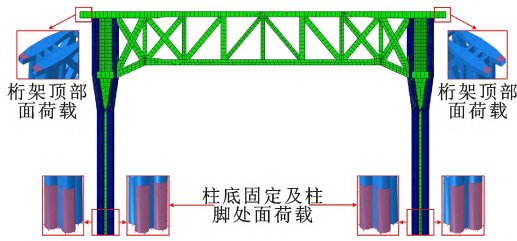


图 11 有限元模型

Fig. 11 Finite element model

架顶部施加向下的面荷载和底部柱脚处施加向上的面荷载来分别模拟背拉提升器和背拉反力架对结构的作用,进而得到试件吊装前后的受力情况。

### 3.2 吊装前桁架构件分析

为保证桁架吊装焊接时的精度,对吊装前桁架静置期间桁架的变形进行了分析。待吊装桁架吊装前在桁架底部各弦杆的节点处放置垫块使桁架静置,此时桁架部分竖向的变形情况如图 12 所示,其中“+”表示竖直向上的变形,“-”表示竖直向下的变形。可以看出,桁架静止时整体变形都很小,桁架部分竖向变形最大的位置为两端,腹杆和上下弦杆节点处支座部位变形为正,节点间变形为负,说明在重力荷载作用下,节点间弦杆向下变形,腹杆和上下弦杆节点处变形向上。

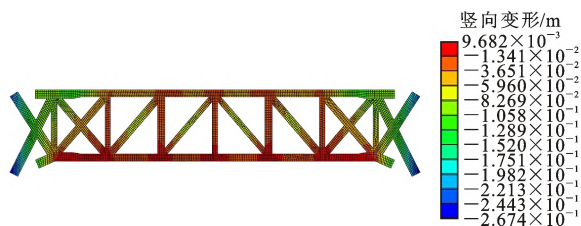


图 12 吊装前桁架竖向变形

Fig. 12 Vertical deformation of truss before lifting

### 3.3 吊装后模拟分析与校验

为了保证桁架吊装过程的顺利实施,利用建立的有限元模型对桁架吊装焊接后的状态进行了系统的计算分析,并与结构焊接完毕后关键测点处的应变响应进行对比,吊装完成后实测应变与有限元模拟应变的对比见表 3。可以看出,测点 5 位于桁架下弦杆截面尺寸变化焊接过渡位置和桁架吊装过程中桁架表面吊点牛腿的内侧,因此在桁架结构的实际吊装过程中,测点 5 位置处受到了其内侧大跨度桁架结构自重和残余应力的双重作用,使得该测点处产生的拉应变较模拟值偏大。主桁架上弦杆跨中测点 8 位置产生了较大压应变,且模型计算结果与实测结果吻合良好。西侧柱外侧测点 3 位置受压,

表 3 吊装完成后实测与有限元模拟应变对比

Table 3 Comparison of measured and finite element simulation strains after completion of welding

待测结构	测点编号	焊接完毕实测应变 $\epsilon_t/10^{-6}$	焊接完毕模拟应变 $\epsilon_s/10^{-6}$	$\epsilon_s/\epsilon_t$
主桁架	测点 5	+254	+46	0.181
	测点 8	-275	-273	0.993
西侧柱	测点 3	-93	-93	1.000
	测点 7	+67	+65	0.970
东侧柱	测点 3	-749	-93	0.124
	测点 7	+21	+68	3.238

注:“+”表示受拉;“-”表示受压。

西侧柱底部测点 7 位置内侧受拉。东侧柱测点 3、7 位置的模拟应变与实测应变相差较大,主要原因是相邻东侧主桁架也进行了相应的吊装工作,造成东侧柱承受的荷载变大,产生了较大的压应变,进而造成测点 3、7 的实测压应变偏大、拉应变偏小。通过以上分析可以看出,有限元模拟结果与监测结果大致吻合,总体误差较小。

吊装完成后结构整体及结构内部格构柱之间加劲板和底部混凝土的受力分布见图 13。可以看出:结构整体受力最大位置位于两侧格构柱下部环状 I 类加劲板和底部混凝土之间钢板部位;格构柱之间的桁架部位受力集中在跨中范围内,两侧受力偏小; I、II 类加劲板和格构柱间底部混凝土部位结构的受力相较周围偏小,说明钢管混凝土之间加劲板和底部混凝土降低了结构可能最大受力位置的应力,对结构整体的受力情况起到了有利作用;格构柱中环状 I 类加劲板受力集中在两侧格构柱内侧,两侧格构柱间底部混凝土受力集中在两侧格构柱的外侧;格构柱上部 II 类加劲板从上到下受力从格构柱外侧转向内侧。

吊装完成后结构整体钢材部分及两侧格构柱内部混凝土受力分布见图 14。可以看出:结构整体与钢材部分的受力分布相似,但两侧格构柱钢管部分的间距过渡区域内侧受力偏大而外侧受力偏小,格构柱底部钢管部分内侧受力偏小而外侧受力偏大;内侧钢管混凝土柱在间距过渡区域受力偏大且随着逐渐靠近顶部和底部而减小,钢管混凝土柱在环状加劲板位置受力最大;外侧钢管混凝土柱从间距过渡区域到底部受力逐渐变大,且底部受力最大。根据模型计算结果,结构在混凝土的浇筑受压应力发生完毕后钢材所受最大应力为 118.2 MPa,混凝土所受最大应力为 7.9 MPa,表明桁架吊装施工后处于弹性阶段,施工方案安全。

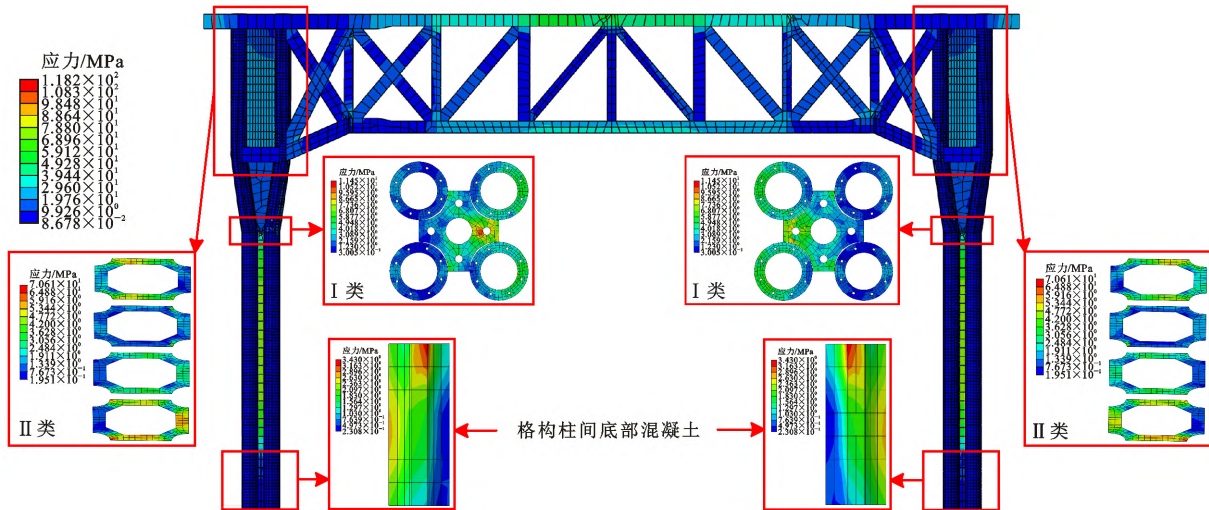


图 13 吊装后结构整体受力分布

Fig. 13 Overall force distribution of structure after lifting

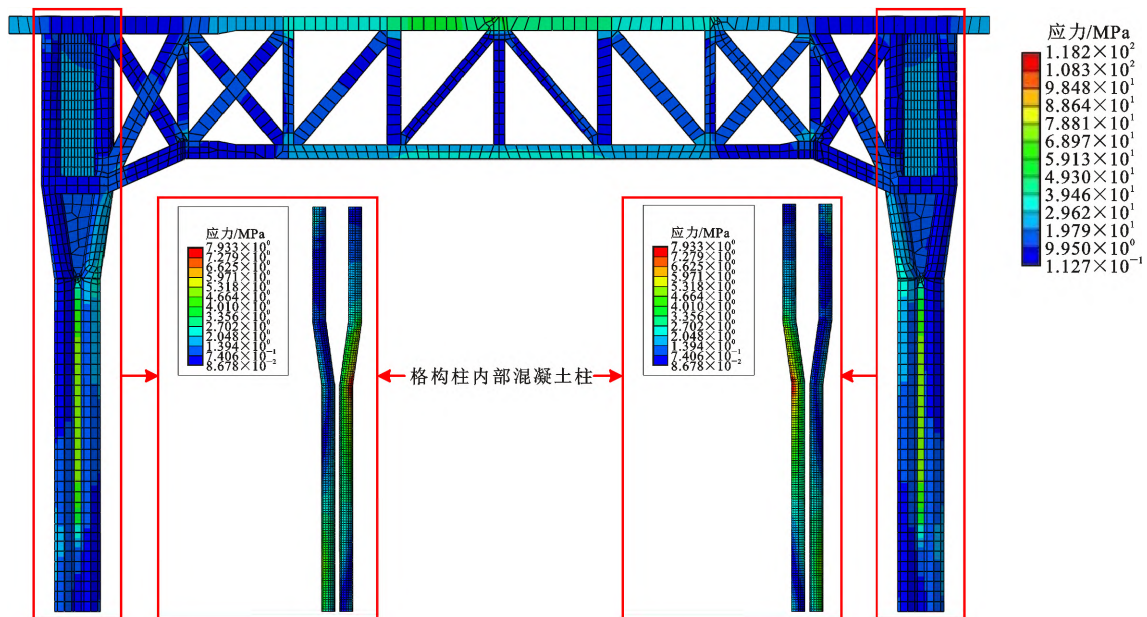


图 14 吊装后结构钢材及格构柱内部混凝土受力分布

Fig. 14 Force distribution of structural steel and concrete inside lattice columns after lifting

### 4 结 语

(1) 对该工程中单榀重型桁架吊装及安装环节的全过程实时应变监测结果表明,结构关键部位处的应变响应未达到相应材料的屈服强度,施工过程中整体结构处于弹性工作状态。同时吊装过程中桁架结构空间横向及斜向撑杆处的应变值保持平稳。

(2) 在所监测桁架被吊装至指定位置后,将其与两端格构式支撑立柱进行焊接安装。由于桁架结构的边界条件随焊接过程的持续进行而不断发生变化,其特征应变响应演变过程较为复杂;当焊接工作

完成温度达到常温后,其应变发展水平较为平缓,随昼夜气温升降而发生周期性波动。

(3) 建立了精细化有限元模型,将模型模拟结果与实测结果进行了对比分析,并对吊装完成后结构整体、钢材部分及格构柱内部 I、II 类加劲板和内部混凝土的受力情况进行了分析,钢材与混凝土均处于较低的应力水平,表明桁架吊装施工后处于弹性阶段,验证了施工方案的可行性。格构柱内部加劲板和格构柱间底部混凝土明显降低了结构关键节点的受力。

## 参考文献:

## References:

- [1] 李惠,鲍跃全,李顺龙,等. 结构健康监测数据科学与工程[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 1-7.  
LI Hui, BAO Yuequan, LI Shunlong, et al. Data science and engineering for structural[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 1-7.
- [2] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.  
LI Hongnan, LI Dongsheng. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82-90.
- [3] 李惠,周峰,朱焰煌,等. 国家游泳中心钢结构施工卸载过程及运营期间应变健康监测及计算模拟分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 1-9.  
LI Hui, ZHOU Feng, ZHU Yanhuang, et al. An analysis of monitored and computed strain of the National Aquatics Center in the states of unloading and daily use[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 1-9.
- [4] 罗尧治,梅宇佳,沈雁彬,等. 国家体育场钢结构温度与应力实测及分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 24-32.  
LUO Yaozhi, MEI Yujia, SHEN Yanbin, et al. Field measurement of temperature and stress on steel structure of the National Stadium and analysis of temperature action[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 24-32.
- [5] 罗永峰,叶智武,陈晓明,等. 空间钢结构施工过程监测关键参数及测点布置研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 108-115.  
LUO Yongfeng, YE Zhiwu, CHEN Xiaoming, et al. Research on key parameter selection and monitoring point arrangement in construction monitoring of spatial steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 108-115.
- [6] XIA Y, ZHANG P, NI Y Q, et al. Deformation monitoring of a super-tall structure using real-time strain data[J]. Engineering Structures, 2014, 67: 29-38.
- [7] 宋彪,李宏男,任亮,等. 某钢结构梁高温切割全过程的监测与分析[J]. 工程力学, 2016, 33(9): 69-75.  
SONG Biao, LI Hongnan, REN Liang, et al. Structural health monitoring and analyzing for the whole high temperature cutting process of a steel structure beam[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(9): 69-75.
- [8] 孙若晗,任伟新,阳霞,等. 多室混凝土箱梁二维温度梯度研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(12): 1680-1687.  
SUN Ruohan, REN Weixin, YANG Xia, et al. Study of two-dimensional temperature gradient of multi-room concrete box girder[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(12): 1680-1687.
- [9] CATBAS F N, CELIK O, AVCI O, et al. Sensing and monitoring for stadium structures: a review of recent advances and a forward look[J]. Frontiers in Built Environment, 2017, 3: 1-18.
- [10] LI S L, HE S Y, LI H, et al. Scour depth determination of bridge piers based on time-varying modal parameters: application to Hangzhou bay bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(12): 04017107.
- [11] SHAHSAVARI V, MEHRKASH M, SANTINIBELL E. Damage detection and decreased load-carrying capacity assessment of a vertical-lift steel truss bridge[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(2): 04019123.
- [12] 常乐,黄翔,赵有山,等. 跨度 120 m 三角锥体钢结构施工滑移监测方法研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 251-259.  
CHANG Le, HUANG Xiang, ZHAO Youshan, et al. Research on construction slip monitoring method of spatial steel structure with triangular cone shape spanning 120 meters[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(9): 251-259.
- [13] ZHAO Y, WANG J F, PANG M. Integral lifting project of the qifeng bridge[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(3): 353-361.
- [14] STITH J C, HELWIG T A, WILLIAMSON E B, et al. Comparisons of the computed and measured behavior of curved steel I-girders during lifting[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(1): 1-10.
- [15] YIN T, ZHANG W, ZHAO Y B, et al. Construction monitoring technology research on large-span V structure tied arch bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351-352: 1240-1243.
- [16] HOLDEN K M, PANTELIDES C P, RIES J M, et al. Lifting of GFRP precast concrete bridge deck panels[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(3): 04014075.
- [17] DENG H, LI H Y, SU C, et al. Monitoring and analyzing displacement of large-span spoke-type cable structure roof[J]. Journal of Surveying Engineering,

- 2017,143(4):06017001.
- [18] MURPHY B, LOCUM J, BELSER M, et al. Dead load evaluation through truss bridge deconstruction monitoring[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(1): 04017115.
- [19] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016.  
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures — theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [20] 李威. 圆钢管混凝土柱-钢梁外环板式框架节点抗震性能研究[D]. 北京:清华大学,2011.  
LI Wei. Study on the seismic performance of circular concrete-filled steel tubular column to steel beam joint with external diaphragm[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [21] 沈聚敏,王传志,江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993.  
SHEN Jumin, WANG Chuanzhi, JIANG Jianjing. Finite element analysis of reinforced concrete and limit analysis of plate and shell[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [22] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
Code for design of concrete structures; GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.