

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.018

大跨空间管桁架结构体育场屋盖 卸载全过程模拟与监测

邱伦海¹, 段永山¹, 刘毛方², 孟磊²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省金田建筑设计咨询有限责任公司, 安徽 合肥 231600)

摘要:文章以安徽省天长市某体育场为工程背景,研究大跨空间管桁架钢结构屋盖分区同步卸载方式,提出分区、同步卸载方案,并对钢结构屋盖的卸载全过程进行实时动态监控;运用有限元分析对施工全过程进行模拟计算,并将现场实测数据与数值模拟结果进行对比分析,保障屋盖结构在卸载过程中处于安全稳定状态,圆满完成卸载。屋盖卸载过程中应力与位移变化均在设计范围以内,有限元模拟分析与实测结果吻合较好。研究结果可为其他大跨空间管桁架结构屋盖卸载方案设计、应用及施工过程监控提供参考。

关键词:大跨钢结构;有限元分析;分区同步卸载

中图分类号:TU758.11

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)06-0835-08

Simulation analysis and monitoring of whole unloading process of a stadium roof with large-span spatial pipe truss structure

ZHI Lunhai¹, DUAN Yongshan¹, LIU Maofang², MENG Lei²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Jintian Architectural Design Consulting Co., Ltd., Hefei 231600, China)

Abstract:Based on a stadium project in Tianchang City, Anhui Province, this paper studies the zonal synchronous unloading method of large-span spatial pipe truss steel roof, puts forward the zonal synchronous unloading scheme, and carries out real-time dynamic monitoring of the whole unloading process of steel roof. Finite element analysis was used to simulate the whole construction process, and the field measured data and numerical simulation results were compared and analyzed. The roof structure was in a safe and stable state during the unloading process, and the unloading was successfully completed. The variation of stress and displacement during roof unloading is within the design range, and the finite element analysis agrees well with the measured results. The research results can provide reference for the design, application and construction process monitoring of other large-span spatial pipe truss roof unloading schemes.

Key words: large-span steel structure; finite element analysis; zonal synchronous unloading

0 引言

近年来,随着设计理念的创新、新材料的应用,大跨空间管桁架结构的设计形式越发新颖,结构跨度越来越大,结构受力体系也越来越复杂。

然而大跨空间管桁架结构在施工卸载过程中,由于临时支撑的拆除导致结构受力状态发生骤变,若卸载方案不合理,极易出现结构整体倒塌的事故^[1]。

目前大跨度空间结构的施工卸载方案主要包

收稿日期:2023-02-08;修回日期:2023-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978230;52278495);安徽省自然科学基金杰出青年基金资助项目(2108085J29)

作者简介:邱伦海(1979—),男,山东菏泽人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

括整体同步卸载、分区同步卸载、分区分级卸载,如哈尔滨万达滑雪场和国家体育场由于建筑规模大,采用分区分级分批次卸载^[2-3]、盐城体育场采取分区同步卸载方案^[4]。研究表明,不管采用何种卸载方案,结构卸载方式及施工顺序的选择对结构受力性能有显著影响。随着临时支撑的安装和拆卸,结构体系会发生转变,并直接导致结构产生内力重分布,进而影响结构的施工安全性。此外,大跨度空间结构在施工过程中直接承受温度、强风等环境作用,这些因素也有可能就会导致结构在相对薄弱环节出现损伤或破坏。因此,为保证大跨度空间结构施工卸载安全有序,对结构卸载全过程进行施工模拟和实时监测是不可避免的。

本文以天长市某体育场大跨度空间管桁架结构屋盖为例,利用仿真模拟和施工监测技术对该结构卸载技术进行系统地研究,研究结果为改进大跨度空间钢结构的施工方案及卸载技术提供相关依据和宝贵资料。

1 工程概况及卸载方案

1.1 工程概况

天长市某体育场屋盖建筑造型呈近似钻石切割而成的几何拼接型,环绕体育场一圈。体育场结构分为支座部分、径向桁架、立面桁架、内环桁架、中环片桁架、屋面水平支撑 6 个模块。体育场屋盖结构由主体受力系统、屋面主檩条及交叉支撑系统构成。主体受力系统主要包括朝向体育场中心的径向片桁架、外环环向立体桁架以及墙面弯折向下的平面桁架 3 部分组成。通过支座杆件支撑在下部 7.000~14.805 m 标高的混凝土柱顶。同时悬挑端部设置一圈内环三角桁架以增强结构整体性,并在屋盖中部设置环向片桁架,屋盖上弦每隔一段距离设备了交叉水平支撑以有效传递水平力。天长全民健身中心体育场三维示意图如图 1 所示。

该体育场由于跨度比较大,且结构形式复杂,现场施工难度较大,在施工时主要面临以下几个问题:① 局部节点杆件交汇密集,焊接和安装难度大;② 吊装单元体积质量较大,需要保证吊装时稳定性,对临时支撑的要求高;③ 悬挑结构由于自重和变形均比较大,卸载不当会造成结构和临时支撑架的破坏。综合以上分析,该体育场施工过程中涉及大构件的吊装、焊接以及临时支撑的安装和拆卸,施工工况较多,制定合理的卸载方

案和施工顺序,并对钢结构卸载全过程的受力性能进行实时监测和控制是保证该工程施工安全性的关键因素^[5]。

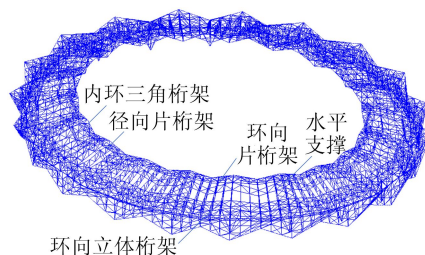


图 1 天长全民健身中心体育场三维示意图

1.2 卸载方案的制定

大跨度空间管桁架结构拼装主要包括单榀小拼拼装、小拼单元转场、分段吊装单元中拼等 3 个拼装阶段。本项目为方便施工,采用 3 个单榀小拼装单元整体联立吊装单元共计 40 个,如图 2 所示。临时支撑主要布置于体育场内部上空桁架吊装对接部位,内圈屋盖临时支撑 80 个,外圈斜柱临时支撑 80 个,共计 160 个支撑,体育场支撑架布置图如图 3 所示。

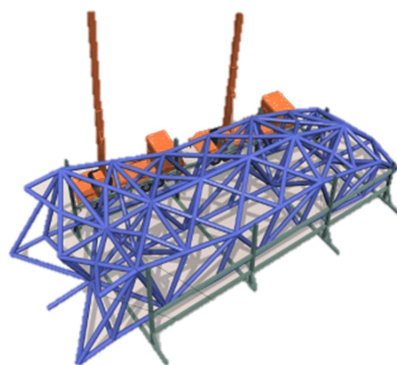


图 2 3 榀径向桁架整体联立吊装单元图

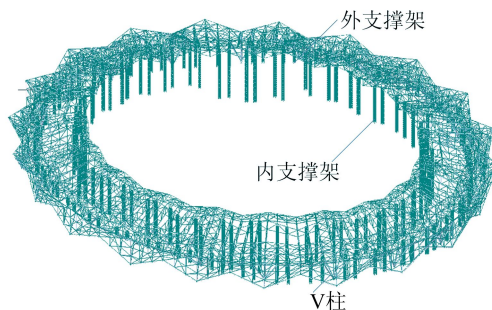


图 3 体育场支撑架布置图

根据现场结构的受力特点,本项目钢结构卸载过程共分 4 步:① 该项目全部焊接工作完成并经三方检测合格为前提条件,将外围 80 个支架由

北向南依次拆除,内圈 80 个支架保留;② 将内圈有 V 柱位置的支撑架,隔一拆一,拆除内圈 20 个支撑架,保留 60 个,拆除顺序按照从看台中间部位向南北两侧依次拆除;③ 将内圈无 V 柱位置的支撑架,隔一拆一,再拆除内圈 20 个支撑架,保留 40 个,拆除顺序同样是按照从看台中间部位向南北两侧分别拆除;④ 保留最后 40 个内圈支撑架,开始循环分区同步卸载,按照由中间往南北两个方向,每个支撑架每次卸载 10 mm,直至顶面与千斤顶及顶部支座脱离视为卸载结束。

2 卸载全过程的仿真模拟

2.1 计算模型的建立

本文通过有限元软件 MIDAS 模拟大跨空间管桁架结构的卸载过程。在建立分析模型时,通过对临时支撑架底部支承施加强制位移的方法模拟其逐步拆卸并脱离屋盖结构的过程^[6]。依据设计图纸与相关资料建立 MIDAS GEN 计算模型。模型共有 15 024 个节点、41 544 个梁单元,包括临时支撑在内创建 15 种截面,主要材料为 Q355 和 Q235 钢材。由于本文研究的大跨空间钢结构杆件众多,要实现完全的刚性连接,在施工现场不具备现实条件,因此从施工角度而言,考虑杆件之间的连接较弱,通过释放梁端约束以实现半刚性连接。在 MIDAS 中可以通过定义边界条件释放梁端约束,定义梁端弯矩传递效率的系数为 0.9 来实现半刚性连接,以达到接近实际施工的目的。模型中下部支座与斜柱底部为一般支承,临时支

撑架顶部与屋盖之间设置弹性连接,支撑架底部支座则为固接。

2.2 荷载及约束形式

1) 荷载。施工过程分析主要考虑结构的自重、风荷载与温度荷载的影响,将软件中各杆件单元总质量与设计材料构件质量进行对比,对有限元分析中的自重系数进行修正,从而得到最终荷载组^[7]。

2) 约束。钢桁架屋盖经 40 个成品抗震支座与焊接球支座组合铰接支撑于混凝土柱顶。除结构固有的永久支座外,在安装过程中还需设置 160 个临时支撑架。根据结构卸载的实际情况,160 个临时支撑架仅对钢桁架屋盖起竖向约束作用。

2.3 仿真模拟结果

本文利用 MIADS GEN 有限元软件对该管桁架屋盖卸载全过程进行仿真模拟,模拟过程严格根据卸载方案进行。在进行施工模拟分析时,主要关注各径向片桁架悬挑段下弦杆在临时支撑拆除前后的位移变化、屋盖上弦交叉水平支撑的应变变化以及短轴支撑架连接处径向片桁架的应变变化。根据拟定的卸载方案,本工程卸载步数可分为 4 步,其中第 4 步采用分区同步卸载。考虑到现场实际施工吊装顺序,根据对称吊装的原则,施工时共分为 8 个主要施工区域。卸载工况应细分为 6 个小步进行同步均匀卸载,故有限元软件模拟分为 10 个卸载工况,具体模拟卸载工况见表 1 所列。

表 1 卸载施工工况

工况	工况描述	工况	工况描述
1	外圈支撑架全部拆除	6	2、3、6、7 区支撑架卸载 10 mm
2	内圈隔一拆一 20 个	7	1、4、5、8 区支撑架卸载 10 mm
3	内圈继续隔一拆一 20 个	8	2、3、6、7 区支撑架卸载 10 mm
4	2、3、6、7 区支撑架卸载 10 mm	9	1、4、5、8 区支撑架卸载 5 mm
5	1、4、5、8 区支撑架卸载 10 mm	10	卸载支撑拆除,卸载结束

施工模拟的结果表明,卸载过程中钢结构屋盖最大正应力出现在工况 3 中,其位于西区看台所属桁架下弦杆,最大拉应力值为 167 MPa,小于 355 MPa;最大压应力出现在工况 3 中,位于东区所属桁架下弦杆,最大负应力值为 -189 MPa,小于 355 MPa。屋盖最大变形出现在工况 8 中,位于西区,最大变形值为 48.393 mm,小于文献^[8]规定的正常使用极限状态下,梁挠度限值 $L/400$

(L 为悬挑端跨度)。

3 卸载全过程实时监测

3.1 监测方案

施工监测通常对屋盖结构从安装到卸载全过程中结构变形及应力应变进行实时动态监测,评估卸载过程中钢结构的应力变化、变形与计算模型理论值的差异以及是否符合设计规范要求,进

一步完善施工工艺,并针对施工过程中可能出现的异常情况做出应对方案,直接有效地指导施工^[9],保证卸载过程中结构一直处于安全状态。

天长市体育场基于智慧云平台对结构施工过程中的应力、应变进行了实时监测。所用仪器及系统有应变传感器、数据无线采集收发设备、综合测试仪、云监测平台等监测仪器与系统。其中应变传感器采用 JMZX212AT 振弦式传感器,实物如图 4 所示,该传感器能够实时监测应变和温度数据^[10],自动修正温度对测量的影响,根据修正后的应变获得钢结构表面的应力,从而实现了对关键构件部位的轴向应力和温度的监控。传感器支座通过焊接安装在钢构件表面,以保证支座与钢构件协同变形。天长市体育场钢结构屋盖应变测点主要选择受力较大的部位、关键部位等,测点布置同时需要满足传感器安装条件。根据卸载过程仿真模拟结果,在屋盖上确定了 48 个应力较大的测点,屋盖应力监测点布置图如图 5 所示。



图 4 振弦式应力应变计

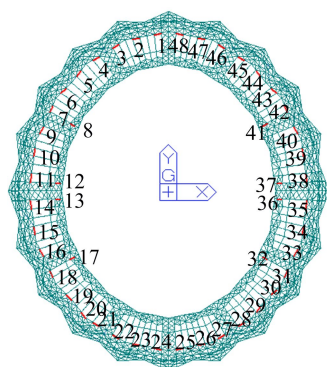


图 5 屋盖应力监测点布置图

天长市体育场屋盖竖向变形采用了瑞士 TC2002 徕卡全站仪进行测量,现场变形测量如图 6 所示。变形监测过程中,在变形监测节点中心位置布设反光片。通过测量变形监测点空间坐标的变化情况,判断结构的变形情况。变形监测点布置的密度要合规,能反映结构整体的变形情

况,并且能够满足施工监测效率高、数据精确的要求^[11]。结合卸载过程仿真模拟确定了 128 个测点,变形测点具体布置如图 7 所示。

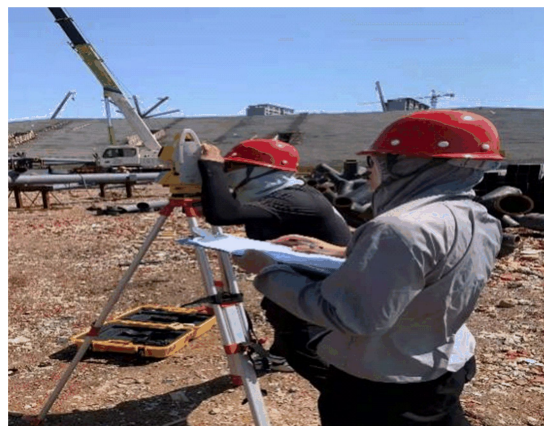


图 6 现场变形测量

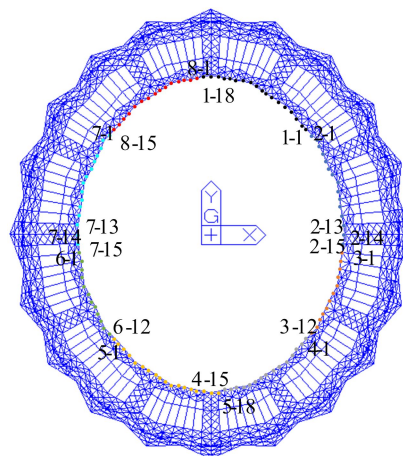


图 7 变形测点布置图

3.2 位移监测结果

本文位移监测点较多,主要分布在径向片桁架悬挑端。通过仿真模拟已初步发现短轴东西方向悬挑端竖向位移最大,属于最不利位置,故在施工监测时重点测量短轴东向测点 2-13、2-14、2-15 与短轴西向测点 7-13、7-14、7-15 竖向位移实测的变化趋势。通过屋盖结构卸载过程中测点的变形实测值与仿真模拟计算值对比分析,位移监测结果表明,卸载最终位移均在 40 mm 以上,其中测点 7-14 为变形最不利控制点,实测竖向位移最大,为 55 mm,模拟值为 39 mm。而根据实测值与模拟值对比发现,实测均略高于模拟值,差值在 10 mm 左右。主要由于现场施工精度难以保障,在模拟过程中边界条件的设置以及荷载的添加在实际施工中无法达到模拟的理想状态,但是其位移远小于文献^[8]中限值($L/400$,即 140 mm),结

构位移变形处于安全状态。

东向卸载变形变化图如图 8 所示,西向卸载变形变化如图 9 所示。由图 8、图 9 可知,各变形监测点位移随卸载工况的变化趋势是一致的。由于结构对称,东西向各测点位移变化呈对称分布。由于本文采取的分区、同步卸载方案,故卸载过程中,卸载区对周边未卸载区存在一定的影响,远离卸载区影响较弱。由图 8、图 9 分析可知,变形监测点竖向位移模拟值与实测值在分级卸载过程中随着工况的变化而产生交替变化,满足卸载方案预期实际卸载要求^[12]。

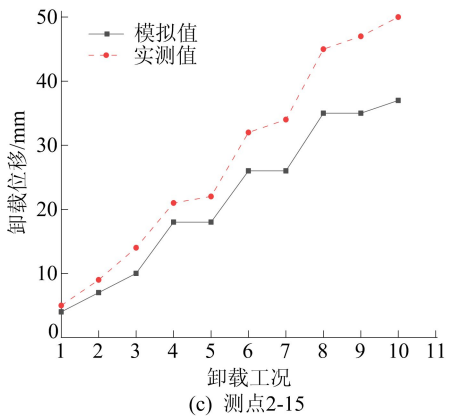
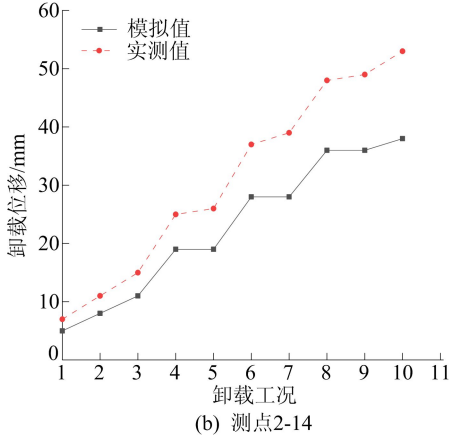
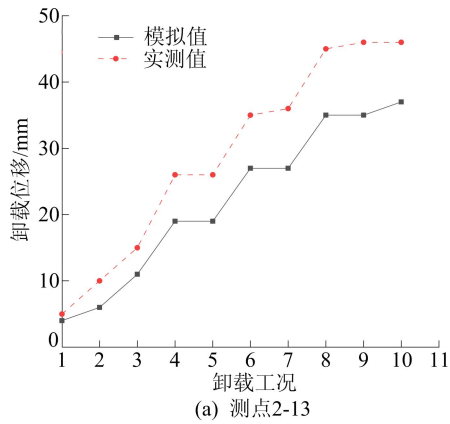


图 8 体育场东侧测点卸载变形变化

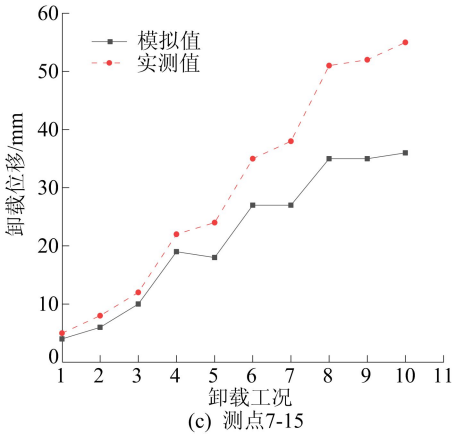
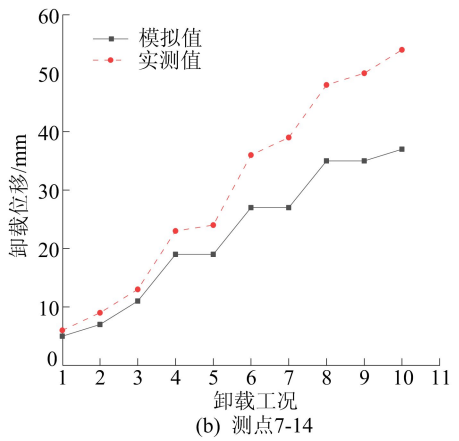
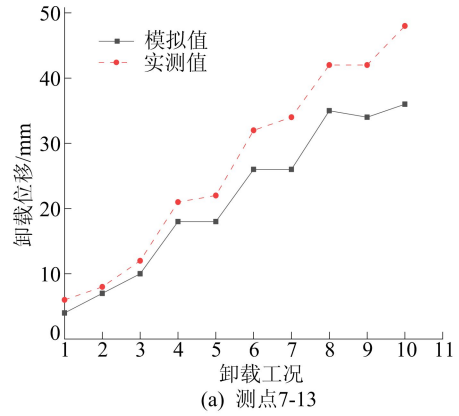


图 9 体育场西侧测点卸载变形变化

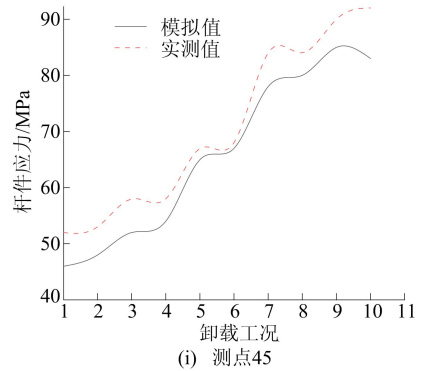
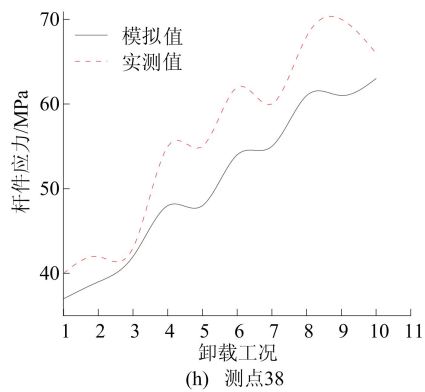
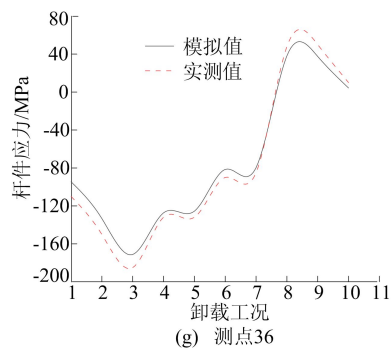
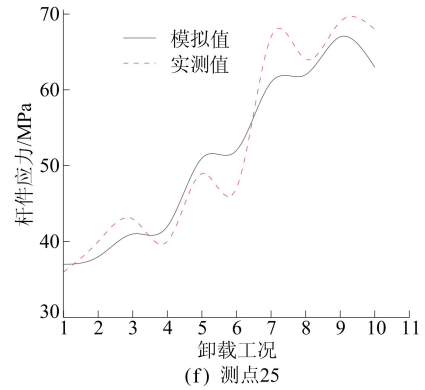
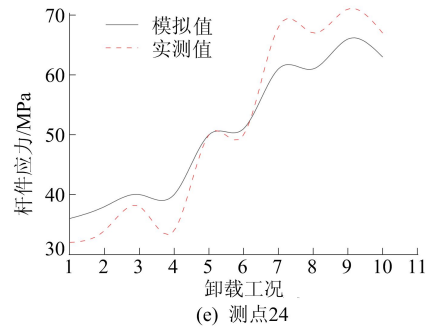
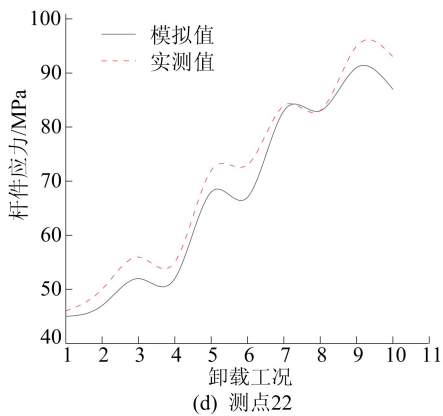
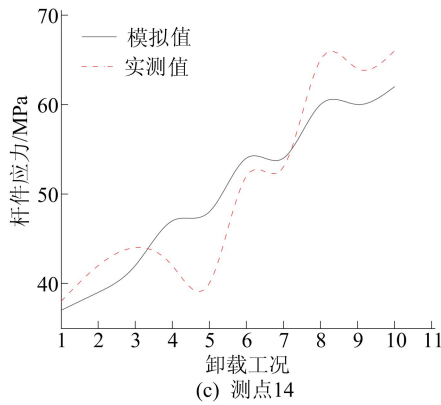
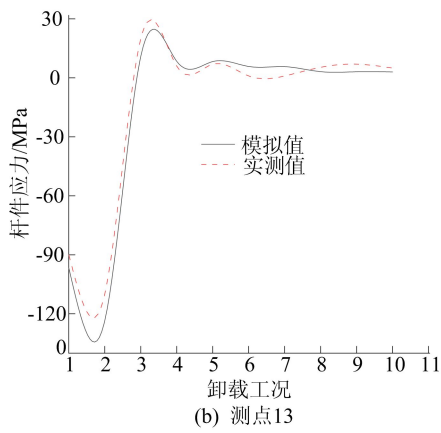
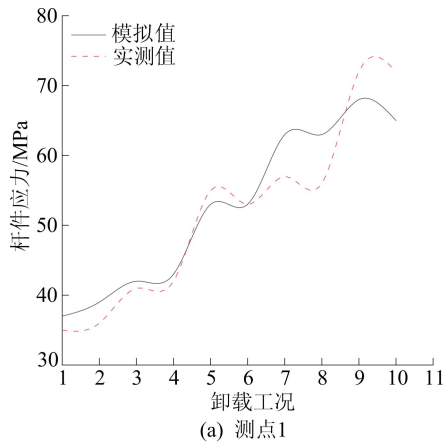
3.3 应力监测结果

基于智慧云平台对结构卸载过程中的应力、应变进行了实时监测,限于篇幅,本文主要对应力变化明显且最危险的测点进行分析。

根据东西方向对称选取的原则,短轴向对称选取 6 个,分别为测点 45、38、36、22、14、13,长轴向对称选取 4 个,为测点 1、48、24、25,其中测点 13、36 监测杆件为下弦杆,其余皆为斜腹杆。各测点应力随卸载工况的变化关系如图 10 所示。

由图 10 可知,随着卸载步数的进行,测点 13、36 所监测弦杆在卸载过程中应力值波动较

大;测点 1、14、24、25、22、38、45、48 所监测腹杆杆件内部应力在稳步上升,其中在外圈支撑架隔一拆一阶段应力增长较为缓慢。



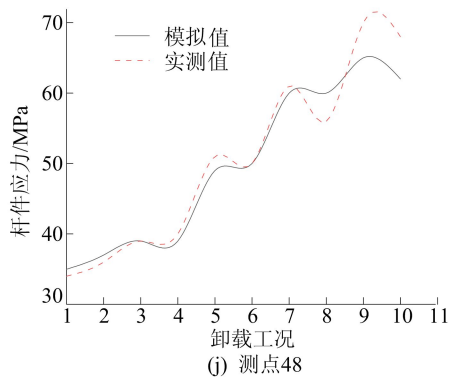


图10 部分测点卸载应力变化图

在最后40个内圈支撑架的卸载过程中,由于采用对称分区、同步卸载,导致靠近卸载区的杆件应力增大较为明显,沉降变形也是如此。

远离卸载区的杆件,应力变化不明显,总体呈现出阶梯状变化。监测结果同时显示,结构卸载完成后腹杆与弦杆均处于受拉状态,且最大拉应力为93 MPa,出现在测点22(西南角区域腹杆)处与45号测点(东北角区域腹杆)处,西南角区域腹杆和东北角区域腹杆是管桁架结构施工过程中的薄弱杆件,在施工时应予以重点关注。

下弦杆与部分腹杆应力变化幅度大于其他杆件,其中应力变化幅度较大值分别为133、102 MPa,分别出现在测点13和测点36处。其中测点13在卸载工况3时,由于支撑架拆除导致应力变化陡增,随着卸载过程进行,应力逐步趋于稳定^[13]。下弦杆测点36所处支撑架由于最后才进行拆除,故其压应力在卸载过程中逐渐释放,最终趋于稳定。这说明在整个施工过程中,下弦杆和腹杆的内力重分布现象较明显。在卸载的各个阶段中,所监测到的下弦杆和斜腹杆应力较小,大部分均在100 MPa以内,个别超过100 MPa的杆件,其应力仍然远小于材料的屈服强度,体育场屋盖结构整体处于安全可靠状态。

对比分析杆件应力实测值与仿真模拟值可知,大部分测点监测的应力随卸载工况的变化曲线与模拟结果吻合较好,这验证了仿真模拟结果的准确性。同时,存在部分测点的应力实测值与模拟值尽管在变化趋势上相同,但在数值上略有差别。如腹杆应力控制测点14在卸载过程中,实测值与模拟值波动幅度较大,在卸载工况5中实测值较模拟值有明显下降趋势,差值为8 MPa。这主要由于结构在实际的卸载过程与模拟的施工状态之间存在差异性,从而造成实测值与模拟值的偏差,但分析结果表明,这类测点应力实测值与

模拟值差值幅度在10 MPa以内,且随着卸载过程的开展、结构受力的增大,监测值与理论值之间的误差越来越小^[14]。

综上所述,由于整个卸载过程属于多人联动高空施工,难以保证现场施工精度,模拟值并不能完全准确反映结构的实际应力大小,而实时监测结果通过智慧云平台系统的反馈能将结构实际应力变化情况相对准确地反映出来。因此,将现场实时动态监测并结合仿真模拟可以更加准确有效地指导施工,为施工质量及安全提供良好的保障。

4 结 论

本文对天长市某体育场钢结构屋盖卸载过程进行了分析,具体包括对分区、同步卸载方案的确定,屋盖卸载全过程的仿真模拟,并对施工过程中结构的位移、应力进行全方面的动态实时监控,将监测数据与有限元模拟分析结果进行对比分析^[15],得到以下结论。

1) 大跨空间管桁架钢结构屋盖卸载施工方案采取分区、同步卸载的施工方法将卸载过程的高空施工人工降至最少,有效地解决了空间结构跨度大、体系复杂,卸载过程不易控制、难以保证结构位移和内力状态平稳转换的难点,做到了经济合理,施工效率高,质量、进度容易控制,及有效的降低工程成本,具有较高的推广价值。

2) 钢结构屋盖各杆件位移与应力的实测值与模拟值吻合较好,卸载过程的顺利完成,符合卸载方案与设计要求,表明此次大跨钢屋盖结构卸载施工所采用的有限元模型模拟分析和现场实测方法是正确有效的。本文所采用的有限元法分析和现场实测方法可供其他类似工程卸载施工提供参考。

3) 大跨度空间钢结构屋盖施工卸载是一个极其重要的施工过程,在整个施工过程中,保障其安全稳定是最为重要的一个环节,因此采用全面的施工过程监测系统指导合理的卸载施工是必不可缺的。本文采用的应变传感器精确、可靠、稳定,卸载过程中云平台监测系统在实时地跟踪整个过程的安全状态,保证卸载过程在安全允许范围内,为本次卸载圆满完成提供了重要保障。

本文的研究成果指导工程施工,顺利地实现天长市某体育场钢结构屋盖卸载,通过该卸载施工技术的创新应用,达到较好的经济效益,可作为类似工程实践的示范。

[参 考 文 献]

- [1] 段学科,张毅刚.大跨钢结构施工力学研究发展现状[C]//全国索结构技术交流会.北京:工业建筑出版社,2012:603-610.
- [2] 袁波,曹平周,杨文侠,等.哈尔滨万达滑雪场钢屋盖卸载方案研究[J].建筑科学,2015,31(11):114-119.
- [3] 郭彦林,郭宇飞,高巍,等.国家体育场钢结构屋盖落架过程模拟分析[J].施工技术,2006,35(12):36-40.
- [4] 郭小农,邱丽秋,罗永峰,等.盐城体育场钢结构屋盖卸载过程分析和监测[J].结构工程师,2013,29(5):166-171.
- [5] 周观根,陈湘,王永梅,等.南昌国际体育中心体育场大悬挑钢桁架施工关键技术[J].施工技术,2010,39(8):78-81.
- [6] 周海锋.体育馆椭圆曲面网架综合模拟卸载分析方法[J].建筑施工,2021,43(9):1768-1770.
- [7] 董开发,万霆,李天福,等.某大跨钢桁架屋盖施工过程模拟分析[J].江苏建筑,2021(3):60-62.
- [8] 中华人民共和国建设部.钢结构设计规范:GB 50017—2003[S].北京:中国计划出版社,2013:1-158.
- [9] 完海鹰,钟文龙,陈克军,等.大跨度高空连体钢结构整体提升施工控制技术[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(8):971-975.
- [10] 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.
- [11] 苏杭,王静峰,曹晗,等.大跨度非对称空间异形曲面钢桁架结构施工新技术与智慧云监测研究[J].结构工程师,2021,37(2):213-221.
- [12] 王小波.钢结构施工过程健康监测技术研究与应用[D].杭州:浙江大学,2010.
- [13] 杨付增,贾子光,任亮,等.郑州奥体中心体育馆网架结构施工监测[J].施工技术,2020,49(2):25-29.
- [14] 苏杭,王静峰,丁仕洪,等.基于云监测的大跨度空间异形曲面钢桁架结构多点不对称整体提升技术研究[J].工业建筑,2020,50(8):105-115.
- [15] 孙学根.大跨度空间钢结构施工过程力学分析与监控[D].合肥:合肥工业大学,2017.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 834 页)

- [8] 王峰,王佳盈,王子健,等.大长宽比平单轴光伏板风荷载试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(7):130-139.
- [9] 马文勇,马成成,王彩玉,等.光伏阵列风荷载干扰效应风洞试验研究[J].实验流体力学,2021,35(4):19-25.
- [10] YEMENICI O, AKSOY M O. An experimental and numerical study of wind effects on a ground-mounted solar panel at different panel tilt angles and wind directions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 213: 104630.
- [11] 李寿科,张雪,方湘璐,等.双坡光伏车棚屋面风荷载特性[J].太阳能学报,2019,40(2):530-537.
- [12] 尹旭,吉柏锋,柳广义,等.支撑结构对定日镜绕流风场特性的影响分析[J].可再生能源,2019,37(1):40-45.
- [13] 颜卫亨,王成江,吴东红,等.野营折叠帐篷群体风致干扰效应研究[J].工程力学,2016,33(4):166-175.
- [14] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI 7—10 [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2010: 267-269.
- [15] Japanese Industrial Standards Committee. Load design guide on structures for photovoltaic array: JIS C8955—2017 [S]. Tokyo: Japanese Standards Association, 2017: 10.

(责任编辑 吴 亮)

· 信息与动态 ·

《合肥工业大学学报(自然科学版)》欢迎投稿

《合肥工业大学学报(自然科学版)》是以基础理论、应用科学和工程技术为主的综合性学术刊物,主要刊登机械与汽车工程、仪器科学与光电工程、材料科学与工程、电气与自动化工程、计算机与信息工程、电子科学与工程、土木与水利工程、资源与环境工程、交通工程、化学工程、生物与食品工程、医药工程、管理科学与工程、数理科学以及新兴科学技术等领域的研究论文、科研成果、学术讨论、专题综述及动态报道,将优先刊发基金资助项目的论文。本刊自 2020 年 1 期改为彩色印刷,欢迎高等院校师生、科研院所和企事业单位的广大科技工作者向本刊投稿,在线投稿网址: <http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。