DOI: 10.7672/sgjs2024210022

结构健康监测在大跨度空间钢桁架结构施工中的应用*

黄亚男
(上海同磊土木工程技术有限公司,上海 200433)

[摘要] 大跨度空间钢结构施工时通常经历多次荷载传递路径的转换,跨径的增大放大了荷载传递路径变换、安装误差等因素对结构内力和变形的影响,施工过程对结构性能的影响不可忽略。依托昆山奥体中心足球场工程,对大跨度钢屋盖开展施工期间结构健康监测,实时反映结构在不同工况下的真实受力情况,并进行有限元模拟分析,研究施工过程对空间结构内力分布的影响。通过对实际监测数据与有限元分析结果进行对比,得到大跨度空间钢结构施工应力分布差异,验证结构健康监测的重要性。

[关键词] 空间结构;钢桁架;健康监测;吊装;卸载;应力
[中图分类号] TU391 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2024)21-0022-06

Application of Structural Health Monitoring in the Construction of Large-span Spatial Steel Truss Structure

HUANG Yanan
(*Shanghai Tonglei Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai* 200433, *China*)

Abstract: The construction of large-span spatial steel structures usually experiences multiple load transfer paths. The increase of span magnifies the influence of load transfer path change, installation error and other factors on structural internal force and deformation. The influence of construction process on structural performance cannot be ignored. Based on the football field of Kunshan Olympic Sports Center, the structural health monitoring of large-span steel roof during construction was carried out to reflect the real stress of the structure under different working conditions in real time, and the finite element simulation analysis was carried out to study the influence of construction process on the internal force distribution of space structure. By comparing the actual monitoring data with the finite element analysis results, the difference of construction stress distribution of large-span space steel structures is obtained, which can verify the importance of structural health monitoring.

Keywords: spatial structure; steel trusses; health monitoring; hoisting; unloading; stress

0 引言

近年来,随着场馆类大跨度钢结构建设项目的增多,大跨度钢结构在施工过程中表现出的诸多力学问题越来越受到重视。与普通跨度钢结构相比,大跨度钢结构的超大空间尺度导致了由结构自重、安装误差等因素引起的内应力和变形增大[1]。因此,对于此类结构,设计人员不仅要重视结构的最终设计状态,又要关注结构的成型过程[2]。

对于大跨度钢结构,采用不同施工顺序或施工方法对其受力的影响程度不同[3]。工程实践表明,须对大跨度钢结构各施工环节进行准确计算分析,选择合理的施工方案,进行完备的施工验算和控制,以确保施工过程的安全[4]。

已有研究表明,施工顺序对大跨度空间结构最终应力和变形的影响较大,施工过程中应适当减小路径效应对结构性能的影响[5]。因此,需根据实际情况,选择合理的施工方法及施工工序,分别对其进行施工模拟分析,根据分析结果的比较和评价,选择对结构性能影响较小的施工方案。

通过施工方案比选,可合理控制因施工顺序影响导致的结构内力。但施工模拟分析多以理想的结构理论模型为研究对象,无法评估构件安装误

* 上海市科委 2022 年度"科技创新行动计划"社会发展科技攻关项目(22dz1201600)
[作者简介] 黄亚男,博士,E-mail:yananhuang@163.com
[收稿日期] 2024-05-15

差、细长构件轻微挠度等不可避免的实际因素对具有多重传力路径结构构件内力重分布的影响。因此,在大跨度空间结构施工期间对其进行健康监测,实时反映受力情况,弥补数值仿真与模型试验难以精确模拟施工、运维复杂全过程的缺陷,对保障空间结构安全具有重要意义,越来越被工程界广泛接受和认可[6]。张君等[7]对天水体育中心游泳池钢网壳进行了施工模拟分析及结构卸载过程应力监测,有效指导了实际施工;孙学根等[8]对霍丘体育中心体育馆钢屋面卸载过程进行了模拟分析,并实时监测了卸载过程中屋盖位移和关键构件应力;沈雁彬等[9]对杭州亚运会主体育场结构进行了施工期及运营期健康监测,定制了多参数、模块化的无线传感网络系统,研发了智能可拓展的树形组网策略与时间同步采集机制,实现了基于物联网平台的远程系统监控。大量实例表明,在施工过程中对结构关键构件进行健康监测,可更好地指导施工,保证整个施工过程安全、可靠。

本文对昆山奥体中心足球场钢屋盖体系进行了施工过程分析和全施工阶段结构健康监测,并将各施工阶段数值分析结果与对应的健康监测结果进行了对比,指出了实际施工过程与理论分析的差异,展示了施工过程对大跨度空间结构内力分布的影响,证明了健康监测在大跨度钢结构施工中的重要性。

1　工程概况

昆山奥体中心位于昆山市景王路以北、东城大道以东,占地面积约 600 000m^2,由足球场及其外环裙房、地下车库组成,足球场主赛场可容纳 4.5 万人,是江苏省内首座满足国际足联要求的世界一流专业足球场。

该足球场屋顶采用大跨度钢结构体系,主要由 36 根长约 61m 的径向钢桁架组成。径向钢桁架由设置在看台外侧的成对混凝土斜柱及看台中部的 Y 形钢柱支撑,钢桁架两端分别由钢梁环接,钢桁架与钢梁之间布置 Y 形拉索和屋面膜,如图 1 所示。

图 1　昆山奥体中心足球场

Fig. 1　Kunshan Olympic Sports Center football field

昆山奥体中心足球场大跨度钢屋盖主体结构施工时,首先进行各榀钢桁架地面组装,然后将其吊装至对应的混凝土斜柱、Y 形钢柱及胎架上,最后通过钢梁将钢桁架连为整体。所有钢桁架和钢梁吊装、焊接完成后,对整体屋盖进行分步卸载,最终拆除原本支撑屋盖钢桁架的胎架群。

2　屋盖钢桁架吊装监测

2.1　吊装过程

屋盖钢桁架吊装过程如图 2 所示,共分为 4 个步骤。步骤 1 为现场组装,钢桁架水平放置在支撑梁上,进行各构件组装焊接。步骤 2 为试吊,通过履带式起重机将钢桁架从初始状态略微吊起,使其与水平支撑梁分离,静置 1d。步骤 3 为正式吊装,通过履带式起重机将钢桁架吊起、平移,通过测量定位调整位置后安置在混凝土斜柱、Y 形钢柱和支撑胎架上并固定。步骤 4 为卸载松钩,钢桁架与各支撑点固定完成后,利用履带式起重机卸载、拆除缆绳,完成钢桁架吊装。钢桁架竖向荷载由吊点处的缆索传递过渡为 A,B,C 点处的支撑构件承担。

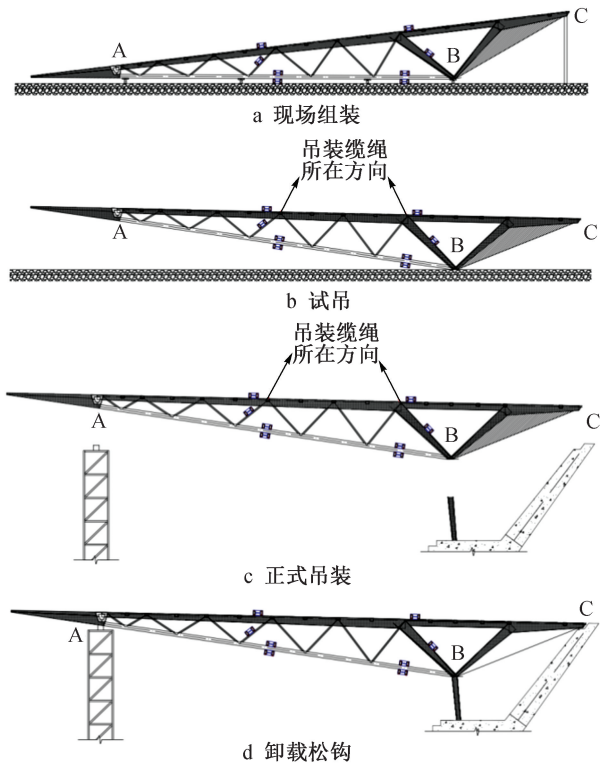


图 2　钢桁架吊装全过程

Fig. 2　The whole process of steel trusses hoisting

2.2　吊装模拟分析

分别选取吊装钢桁架上弦梁、腹杆、下弦杆 2 处关键传力构件作为监测对象,监测构件在整个吊装过程中的应力变化,测点布置如图 3 所示。

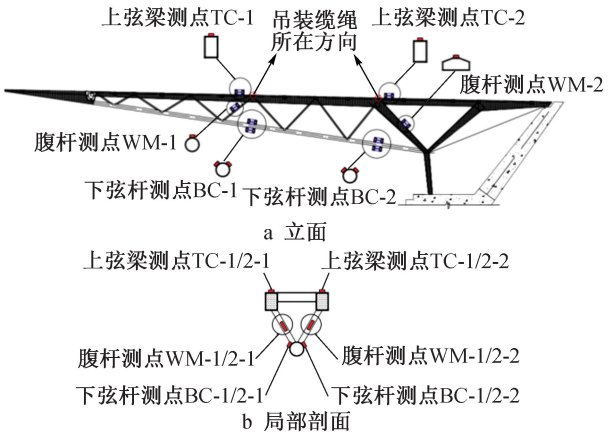


图 3 钢桁架吊装应力监测测点布置

Fig. 3 Layout of stress monitoring points of steel trusses during hoisting process

为预测钢桁架在吊装过程中的受力情况,对钢桁架提升进行了有限元分析,建立的有限元模型如图 4 所示。钢桁架构件采用梁单元模拟,钢桁架右侧的装饰钢板采用壳单元模拟,缆绳采用只拉单元模拟,分析时仅考虑钢桁架构件自重,施工活荷载忽略不计[10]。有限元分析得到的应力分布如图 5 所示,图中给出了传感器安装位置处的应力范围。

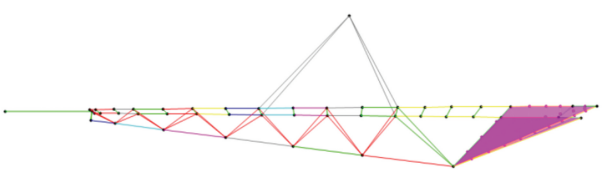


图 4 钢桁架提升有限元分析模型

Fig. 4 Finite element model of steel trusses during lifting process

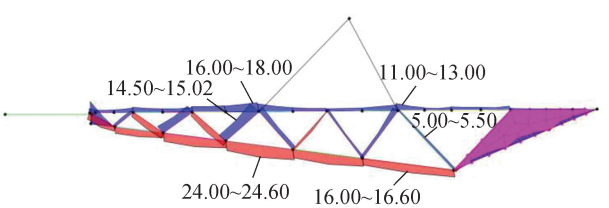


图 5 钢桁架提升应力分布(单位:MPa)

Fig. 5 Stress distribution of steel trusses during lifting process (unit: MPa)

由图 5 可知,吊装过程中上弦梁受拉,长悬臂侧吊点左侧上弦杆节点附近应力为 16~18MPa,短悬臂侧吊点右侧上弦杆节点附近应力为 11~13MPa;吊装过程中腹杆受拉,长悬臂侧吊点左侧腹杆跨中附近应力为 14.50~15.02MPa,短悬臂侧吊点右侧腹杆跨中附近应力为 5~5.5MPa;吊装过程中下弦杆受压,长悬臂侧吊点下方下弦杆跨中附近应力为 24~24.6MPa,短悬臂侧吊点下方下弦杆跨中附近应力为 16~16.6MPa。

2.3 吊装监测

钢桁架于 2021-11-17 晚间开始试吊,维持试吊形态直至 11-19 10:00,随后开始正式吊装,于 11-19 12:00 吊装就位后开始焊接施工,于 11-20 00:00 左右卸载松钩,完成整个吊装过程。

将现场组装完成准备试吊前的钢桁架构件应力作为初始状态(各传感器中的应力值设为零),此后所有监测应力均为相对于该状态的应力增量。由监测结果可知,当钢桁架处于提升(正式吊装)阶段时,各构件应力监测结果与有限元分析结果较吻合。钢桁架由 4 根缆绳吊起,缆绳张紧程度不同导致同一测点处的 2 根构件受力存在明显差异,上弦梁测点 TC-1 处 2 根构件应力差异约为 7MPa,即使卸载松钩后该差异仍存在。钢桁架下落就位后,根据测量定位确定的形态导致长悬臂侧部分自重由胎架承担,使该侧缆绳发生了部分卸载,表现为上弦梁测点 TC-1、下弦杆测点 BC-1 和腹杆测点 WM-1 应力水平明显降低;同时,右侧缆绳拉力增大,表现为上弦梁测点 TC-2、下弦杆测点 BC-2 和腹杆测点 WM-2 应力水平明显提高。吊车卸载后,竖向荷载传力路径发生显著变化,上弦梁测点 TC-2 拉应力略有下降,上弦梁测点 TC-1 和 2 个腹杆测点拉应力变为压应力,而下弦杆测点 BC-2 压应力变为拉应力。

3 屋盖钢桁架就位监测

3.1 测点布置

由钢桁架吊装过程监测数据可知,钢桁架受力情况受吊装过程影响,吊装过程监测在钢桁架就位且受力稳定后终止。另外选择 6 根钢桁架布置就位至施工结束期间应力传感器,如图 6 所示。

3.2 受力分析

由于钢桁架吊装过程的不确定性,钢桁架就位后的内应力分布存在多种可能性,具有代表性的竖向荷载传递路径主要有 3 种。路径 1 为将混凝土斜柱、Y 形钢柱和胎架视为铰接支座,共同承担钢桁架竖向荷载,钢桁架竖向荷载按照连续梁受力情况分配在各支座上。当钢桁架下落就位后未接触胎架、混凝土斜柱顶部、Y 形钢柱顶部,所有竖向荷载均在卸载松钩时全部转由支座承担时,传力情况如路径 1 所示。路径 2 为钢桁架竖向荷载全部由胎架和混凝土斜柱承担,Y 形钢柱不受竖向荷载作用。当钢桁架下落就位后与混凝土斜柱顶部和胎架顶部完全接触,竖向荷载已完全由胎架及混凝土斜柱承担时,传力情况如路径 2 所示。路径 3 为钢桁架竖向

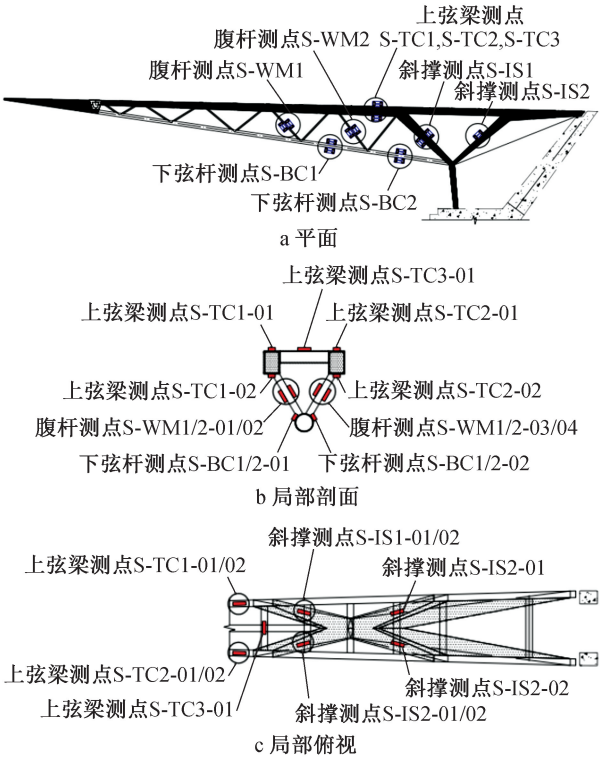


图 6　钢桁架就位应力监测测点布置

Fig. 6　Layout of stress monitoring points of steel trusses in place

荷载全部由混凝土斜柱和 Y 形钢柱承担，胎架不受竖向荷载作用。进行分析模型简化时，将细长的胎架视为钢桁架弹性支座，传力情况如路径 3 所示。

看台、钢桁架和脚手架有限元分析模型如图 7 所示，分别计算了 3 种竖向荷载传递路径下的钢桁架应力分布，如图 8 所示。由图 8 可知，传力路径 2，3 可视为钢桁架就位时施工导致的内力包络工况。

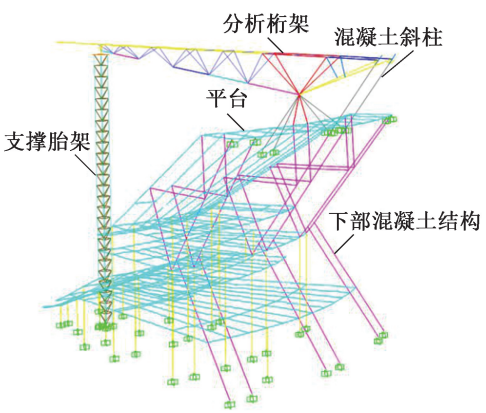


图 7　钢桁架就位有限元分析模型

Fig. 7　Finite element model of steel trusses in place

3.3　监测结果分析

钢桁架就位监测到的应力如图 9 所示，由于数据采集设备采用电池供电，电池电量耗尽时数据采集会出现短暂中断。

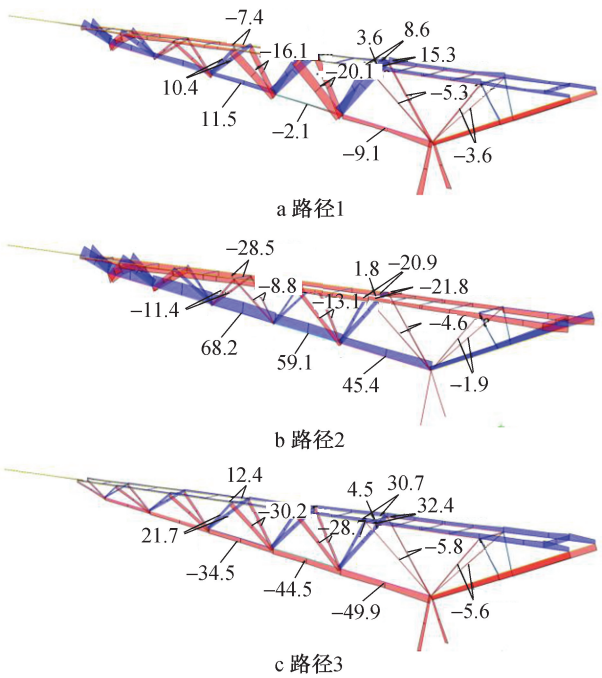


图 8　钢桁架就位应力分布（单位：MPa）

Fig. 8　Stress distribution of steel trusses in place（unit：MPa）

在有限元分析中，钢桁架沿长度方向同一位置处的 2 根构件应力计算结果相同，然而在实际施工过程中，不同施工因素导致 2 根构件应力存在一定差异。构件应力监测结果多在有限元分析结果包络内。钢桁架构件应力受温度、日照等因素影响，分析应力最大值和最小值可知，温度和日照对上弦梁和腹杆应力的影响更显著，对斜撑和下弦杆应力的影响较小。

4　屋盖钢桁架整体卸载监测

4.1　卸载流程

在所有屋盖钢桁架和环梁吊装就位并焊接完成后，卸载胎架处的支撑荷载，钢桁架支撑情况变化如图 10 所示。为保证结构中力传递路径变化的平稳进行，屋盖整体卸载采用沙箱控制，分 6 个阶段依次卸载至胎架不再受力，卸载于 2022-01-11 10：00 开始，持续时段分别为 10：00—10：50，13：05—13：30，13：40—14：00，14：15—14：40，14：55—15：25，15：30—16：00。

4.2　监测结果分析

为初步估计卸载过程中钢桁架构件应力变化情况，建立整体分析模型，如图 11 所示，图中粉色钢桁架布置了振弦式应变传感器，以㉞轴钢桁架为例，卸载过程应力变化如图 12 所示。对比卸载过程构件应力监测结果与有限元分析结果可知，由于钢

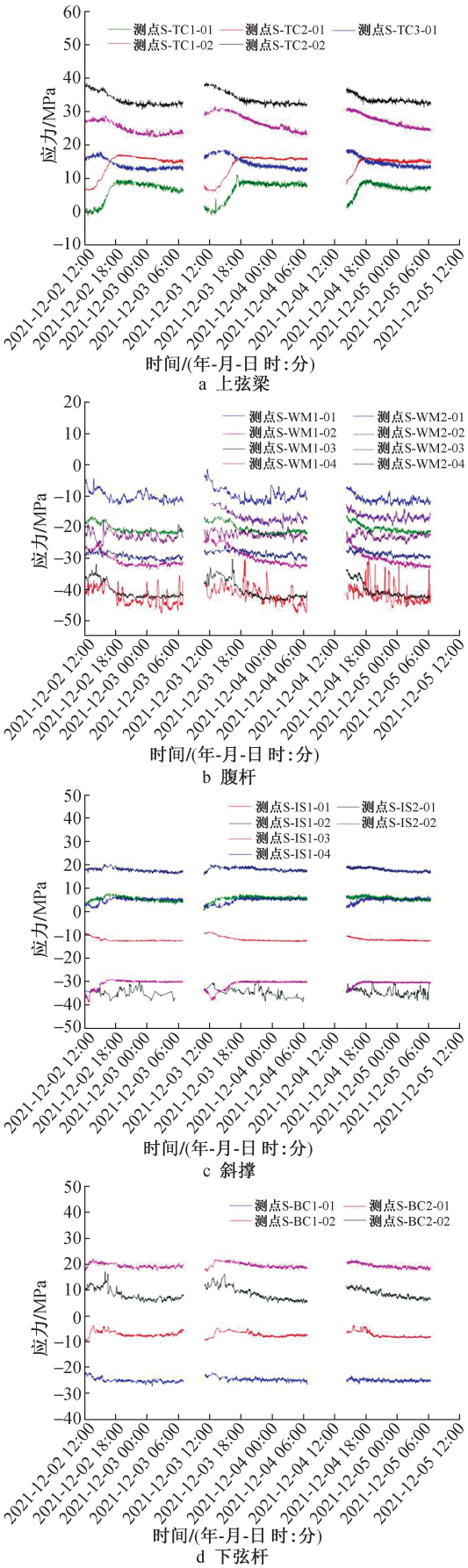


图 9 钢桁架就位应力监测结果

Fig. 9 Stress monitoring results of steel trusses in place

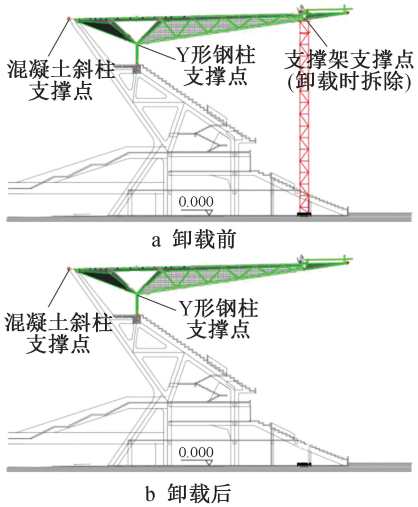


图 10 钢桁架支撑情况变化

Fig. 10 Support change of steel trusses

桁架不同构件卸载前的实际受力情况各异,卸载导致的应力变化略有不同,监测结果符合实际受力情况。上弦梁横梁测点 S-TC3 应力和应力变化水平均较低,纵梁为主要受力传力构件,截面较大,且卸载前钢桁架受多点支撑,因此纵梁应力水平较低。卸载后悬臂钢桁架传力路径形成,上弦梁纵梁主要承担拉应力,受屋盖传力面积的影响,各纵梁在卸载过程中的应力变化存在差异,其中㉘轴钢桁架上弦梁纵梁最大应力监测值较计算值大 37%,其余上弦梁纵梁应力变化监测值均较计算值小。卸载前后下弦杆应力发生明显变化,卸载前钢桁架受多点支撑,部分下弦杆受拉,卸载后钢桁架悬臂,下弦杆受压,其中⑩,㉘轴钢桁架下弦杆应力变化监测值略大于计算值,其余下弦杆应力变化监测值均小于计算值。由于截面较大,斜撑处的应力变化计算值和监测值均较小,受施工影响,部分斜撑实际应力变化趋势与计算结果不一致。

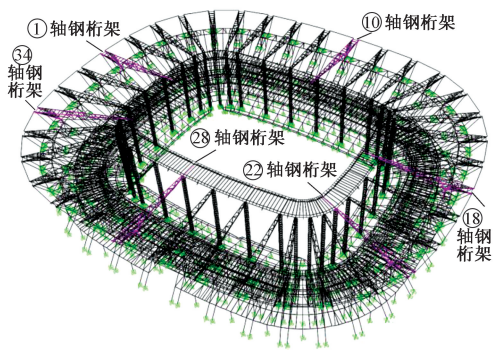
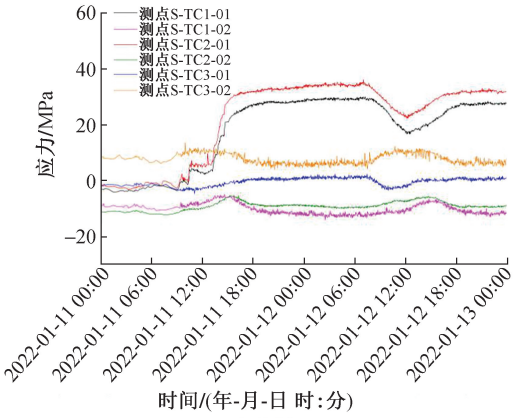
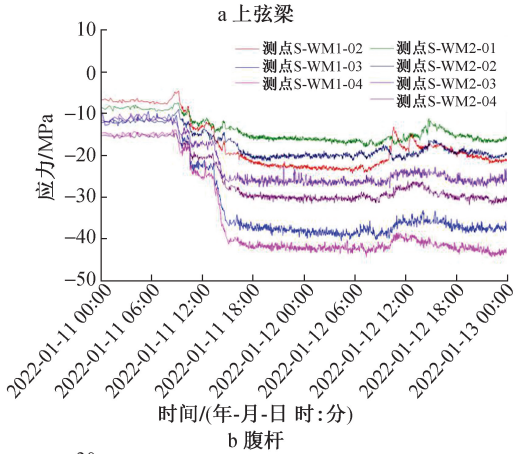


图 11 卸载过程屋盖有限元分析模型

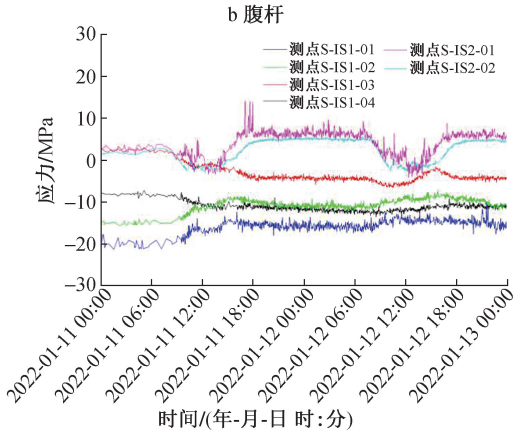
Fig. 11 Finite element model of roof during unloading process



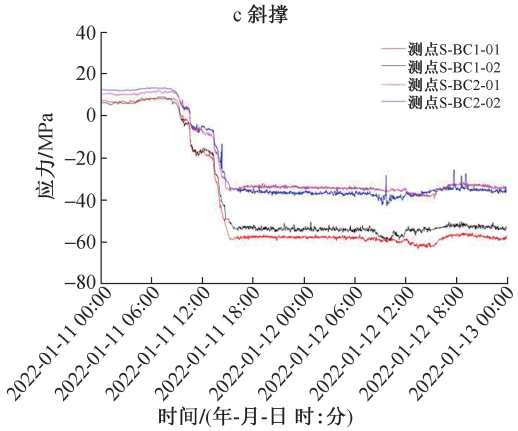
a 上弦梁



b 腹杆



c 斜撑



d 下弦杆

图 12　钢桁架卸载应力监测结果

Fig. 12　Stress monitoring results of steel trusses during unloading process

5　结语

以昆山奥体中心足球场为依托,对大跨度钢屋盖施工过程中的受力进行有限元分析与实际监测。吊装、卸载等施工过程会使结构产生内应力,其无法通过计算模拟得到,可通过概念分析,对施工包络工况进行计算,给出结构构件因施工产生的实际应力范围。日照和温度对结构构件应力的影响是显著的,应引起重视。通过结构施工期间的全过程健康监测,可获得结构构件实际受力状态,可全面评估结构在建造过程中的受力情况,为结构后续使用和改造提供依据。

参考文献:

[1] ZHANG Q, HUANG Y. Application of health monitoring in the construction of large-span steel spatial structures [C]//The Structural Engineers World Congress, 2023.

[2] 郭彦林, 崔晓强. 大跨度复杂钢结构施工过程中的若干技术问题及探讨[J]. 工业建筑, 2004, 34(12): 1-5.
GUO Y L, CUI X Q. Key technical problems and discussion on construction process of larger span steel structures[J]. Industrial construction, 2004, 34(12): 1-5.

[3] 王毅飞,罗晓群,李建全,等. 基于结构健康监测的大直径球体高层支撑钢结构施工全过程性能评估[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26 (3): 80-88.
WANG Y F, LUO X Q, LI J Q, et al. Construction performance control for large-diameter sphere steel structure based on structural health monitoring [J]. Progress in steel building structures, 2024,26(3):80-88.

[4] 崔晓强, 郭彦林, 叶可明. 大跨度钢结构施工过程的结构分析方法研究[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 83-88.
CUI X Q, GUO Y L, YE K M. Research on construction mechanic method of long-span steel structures[J]. Engineering mechanics, 2006, 23(5): 83-88.

[5] 朱磊,常永波,崔晓龙,等. 体育场大跨空间钢桁架结构施工力学性能研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(10): 120-124.
ZHU L, CHANG Y B, CUI X L, et al. Study on construction mechanical properties of large-span space steel truss structure for stadium[J]. Construction technology, 2023, 52(10): 120-124.

[6] 罗尧治, 赵靖宇. 空间结构健康监测研究现状与展望[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 16-28.
LUO Y Z, ZHAO J Y. Research status and future prospects of space structure health monitoring [J]. Journal of building structures, 2022, 43(10): 16-28.

[7] 张君, 王秀丽, 毕贵权, 等. 天水体育中心游泳馆钢网壳结构施工模拟分析与监测[J]. 建筑结构, 2020, 50(17): 34-39.
ZHANG J, WANG X L, BI G Q, et al. Construction simulation analysis and monitoring of steel reticulated shell structure of natatorium for Tianshui Sports Center[J]. Building structure, 2020,50(17): 34-39.

(下转第 32 页)

展的举措之一,且有利于推进新型城镇化建设、促进建筑业转型升级。

徐州德基广场 C 地块项目改造内容具有范围广、加固方式多样等特点,超高层东塔楼改造施工时,通过进行大型构件模拟吊装分析,解决了单块构件质量超过塔式起重机吊重的问题;采用帮条焊进行新旧结构竖向钢筋连接,解决了原结构拆除后留置竖向钢筋无法采用常规钢筋连接工艺的问题;通过将钢板剪力墙调整为劲性柱剪力墙,满足了现场斜向施工要求;斜墙段通过采用 HRB500 高强度螺纹钢进行等强度替代劲性梁锚入周圈环梁内,解决了劲性梁与外围剪力墙的锚固问题。商业裙楼及地下室改造施工时,为避免相邻楼层钢板遇梁板时受力不连续,增加包钢措施,混凝土柱包钢过结构梁板时采用等强度钢筋进行代替;为保证新增梁板与钢管混凝土柱连接质量,增加柱帽作为新增梁板连接点,并在柱外包裹钢衬板,衬板与柱满焊连接;为适应建筑外围的变动,并承受因边线调整增加的结构荷载,设置钢骨梁与梁抬柱;为保证小扩截面部位混凝土浇筑质量,研发高效附模振动装置进行混凝土振捣。

参考文献:

[1] 蓝健. 城市综合体——南京德基广场建筑设计[J]. 建筑与文化,2020(9):12-19.
LAN J. City complex:Architecture design of Nanjing Deji Plaza [J]. Architecture & culture,2020(9):12-19.

[2] 孙孝宇,刘星,易咸辉,等. BIM 技术在城市综合体改造项目中的创新应用[J]. 安装,2022(8):39-41.
SUN X Y, LIU X, YI X H, et al. Innovative application of BIM in urban complex renovation project [J]. Installation, 2022 (8): 39-41.

[3] 施雯琦. 工业建筑民用化改造及功能提升技术研究——以上海油罐艺术中心为例[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(6): 155-157.
SHI W Q. Research on civil transformation and function improvement technology of industrial buildings: Taking Tank Shanghai as an example [J]. China water transport, 2022, 22(6): 155-157.

[4] 王军,丁玲,常艺. 既有商业建筑功能提升与改造关键技术研究——以沈阳大悦城改造项目为例[J]. 建筑与文化, 2020(6): 160-163.
WANG J, DING L, CHANG Y. Research on functional enhancement and key technologies for transformation of existing commercial buildings: Take Shenyang Joy City reconstruction project as an example[J]. Architecture & culture, 2020(6): 160-163.

[5] 杨靖,张蕊. 商业建筑综合改造功能提升实践与效果分析[J]. 住宅科技, 2017, 37(10): 46-50.
YANG J, ZHANG R. Practice and performance analysis of comprehensive transformation and function enhancement for commercial building [J]. Housing science, 2017, 37(10): 46-50.

[6] 李湛,李钦锐. 新建内嵌式地下结构的既有建筑地下空间拓展技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(3): 74-79.
LI Z, LI Q R. Expansion technology of underground space for existing building with new built-in underground structure [J]. Construction technology, 2022, 51(3): 74-79.

[7] 刘宏,熊海明,程燕妮. 某超高层建筑剪力墙及柱子的加固与改造设计[J]. 工程抗震与加固改造,2010,32(4):86-89.
LIU H, XIONG H M, CHENG Y N. Retrofit of shear walls and columns of a super high-rise building[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2010,32(4):86-89.

[8] 邹忠华. 徐州德基广场超高层续建项目结构改造方案设计[J]. 建筑技术开发,2022,49(21):10-12.
ZOU Z H. Structural renovation scheme design of Xuzhou Deji Plaza super high-rise extension project[J]. Building technology development,2022,49(21):10-12.

[9] 傅彦青, 张菁, 李洁, 等. 单面帮条焊焊接 HRB500a 和 HRB500c 耐蚀钢筋的力学性能[J]. 工业建筑,2021,51(3): 180-183, 141.
FU Y Q, ZHANG J, LI J, et al. Mechanical properties of HRB500a and HRB500c corrosion resistant rebars with indirect butt splices in single and welding [J]. Industrial construction, 2021,51(3): 180-183, 141.

(上接第 27 页)

[8] 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.
SUN X G, NIU Z R, LI Z F, et al. Simulating analysis and monitoring of unloading process of large-span spatial structure [J]. Building structure, 2018, 48(11): 70-77.

[9] 沈雁彬, 罗尧治, 傅文炜, 等. 杭州亚运会主体育场结构健康监测与分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(3): 81-91.
SHEN Y B, LUO Y Z, FU W W, et al. Structural health monitoring and analysis of main stadium of the Hangzhou Asian Games [J]. Journal of building structures, 2024, 45(3): 81-91.

[10] 彭玉丰, 罗永峰. 大跨度钢桁架吊装过程分析[J]. 结构工程师, 2011, 27(4): 45-49.
PENG Y F, LUO Y F. Hoisting analysis of a large-span spatial truss[J]. Structural engineers, 2011, 27(4): 45-49.