

天长全民健身中心体育场钢结构屋盖施工过程分析

钱 刚, 计康生, 谢 坚, 王明花, 李运军, 杨世昱

(安徽中亚钢结构工程有限公司, 安徽 合肥 230051)

摘要: 天长全民健身中心体育场钢屋盖造型呈钻石状, 主结构由径向片桁架、外环环向立体桁架和折线形平面桁架组成, 弦杆交错布置, 具有传力途径复杂、安装难度大的特点。将钢屋盖施工区域按建筑平面逆时针分为 1~8 区, 从 1 区和 8 区分别按顺时针和逆时针逐步安装, 施工顺序为: 1 区 8 区→2 区 7 区→3 区 6 区→4 区 5 区。利用 3D3S 软件对管桁架拼装胎架、管桁架吊装单元、管桁架临时支撑方案、管桁架合拢、管桁架卸载方案等关键施工要点进行了施工分析。分析结果表明: 管桁架吊装吊点布置、临时支撑的位置与数量设置、支撑卸载的先后顺序对钢结构屋盖的受力具有较大影响, 本项目所选的施工技术, 施工过程中结构挠度较小, 构件应力比处于低应力状态, 施工方法安全可靠。

关键词: 大跨度钢结构; 钢结构安装; 模块化施工; 钢结构合拢; 钢结构卸载

中图分类号: TU758.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0617-08

Analysis on construction process of steel structure roof of Tianchang national fitness center stadium

QIAN Gang, JI Kangsheng, XIE Jian, WANG Minghua, LI Yunjun, YANG Shiyu

(Anhui Zhongya Steel Structural Engineering Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: The steel structure roof of Tianchang National Fitness center Stadium is diamond-shaped. The main structure is composed of the radial plate truss, the outer annular three-dimensional truss and the folded plane truss. The chords are staggered, which has the characteristics of complex force transmission and difficult installation. The construction area of steel roof is divided into 1~8 zones counterclockwise according to the construction plane, and the installation is done clockwise and counterclockwise respectively from Area 1 and 8. The construction sequence is as follows: Zone 1, Zone 8 → Zone 2, Zone 7 → Zone 3, Zone 6 → Zone 4, zone 5. 3D3S software is used to analyze the key construction points such as tube truss assembling frame, tube truss hoisting unit, tube truss temporary support scheme, tube truss closing and tube truss unloading scheme. The analysis results show that the hoisting point arrangement of pipe truss hoisting, the location and quantity setting of temporary supports, and the sequence of supporting and unloading have great influence on the stress of steel structure roof. All the construction technologies selected in this project are safe and reliable because the structural deflection is small and the component stress ratio is in a state of low stress during construction.

Key words: long span steel structure; steel structure installation; modular construction; steel structure closed; steel structure unloading

我国空间结构发展 30 a, 创新了螺栓球网架、焊接球网架、单层网壳、张弦梁、索网、穹顶等空间结构体系。空间钢结构以其整体刚度好、自重小、含钢量低、跨度大的优势, 在大型体育场馆项目中被广泛应用。近年来, 由于我国举办冬奥会和亚运会, 一大批大型体育场馆项目竣工,

我国空间结构设计、加工、施工水平达到前所未有的高度。其中, 近年来新建的有代表性的有国家速滑馆、杭州奥体中心、西安奥体中心^[1-16]。

国家速滑馆作为冬奥会最典型的大跨度空间钢结构项目, 从建筑设计、结构设计、施工技术、场馆运营等方面均进行了大量研究。其马鞍形造

收稿日期: 2022-06-13

修改稿日期: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(52178161); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2022-YF106); 合肥水泥研究设计院有限公司开发项目(GG02-2021)

第一作者: 钱 刚(1900—), 男, 高级工程师, 从事钢结构项目管理。E-mail: 425510334@qq.com

通信作者: 谢 坚(1900—), 男, 硕士, 工程师, 从事钢结构设计与研发。E-mail: jianxie1994@163.com

型、巨型索网结构、索网幕墙等体系代表了空间结构领域的先进技术。BIM技术、声学设计技术、智慧场馆运营技术为先进体育场馆建造与运营做出了示范作用^[9-14]。

大跨度空间钢结构通常采用模块化施工技术进行施工,将整体空间结构划分为若干个区块,逐步进行施工。空间结构的施工过程中结构的边界条件、结构体系与竣工后的结构体系有较大差异,每一个施工步均是一个独立的结构,其边界条件由临时支撑胎架、吊点、支座等约束。因此,空间钢结构的施工过程分析对结构的施工质量、施工合理性、结构安装可靠性等方面具有重要影响。

本文以天长全民健身中心体育场钢结构屋盖项目为研究对象,对施工过程中拼装、吊装、合拢、卸载等主要施工过程进行了分析,以保障钢结构施工的安全可靠。

1 工程概况

项目位于安徽省天长市,南至兴业大道,北至天宁大道,东至二凤南路,西至园林路。体育场结构东西纵向长度约213 m,南北横向长度约243 m,屋盖最高点完成面标高约为32.945 m。钢屋盖建筑造型呈钻石形状,如图1所示。

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。主体受力系统为朝向体育场中心的径向片桁架和外环环向立体桁架以及墙面弯折下去的平面桁架组成。通过支座杆件支撑在下部7~14.805标高的砼柱顶。同时悬挑端部设置一圈内环三角桁架增强整体性,并于屋盖中部设置了环向片桁架,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。



图1 天长全民健身中心效果图(体育馆 左/体育场 右)

Fig. 1 Renderings of Tianchang national fitness center
(Gymnasium left; stadium right)

2 模块化施工工序

采用模块化施工方法,将体育场钢屋盖共分

为8个区,每个区又分为单榀吊装单元、3榀径向桁架联立吊装单元和散装构件。总体施工工序分为整体施工和单区域施工两个方面,涵盖了构件拼装、构件吊装、桁架合拢、桁架卸载等工序。

2.1 整体施工工序

2.1.1 安装顺序

将钢屋盖施工区域按建筑平面逆时针分为1~8区,自北向南从1区和8区分别按顺时针和逆时针逐步安装,施工顺序为:1区8区→2区7区→3区6区→4区5区,最终合拢位置在4区5区交界处主桁架附件,如图2和图3所示。安装总体施工工序采用现场拼装、分块吊装、逐步延伸、最终合拢的思路,如图4所示。首先将支座单元进行吊装,采用临时支撑架固定,再以三榀径向桁架为联立吊装单元吊装至支座附近,再用散拼单元进行连接,杆件位置通过倒链及全站仪进行调整和定位。合拢预留跨和最后一吊合拢位置如图3所示。

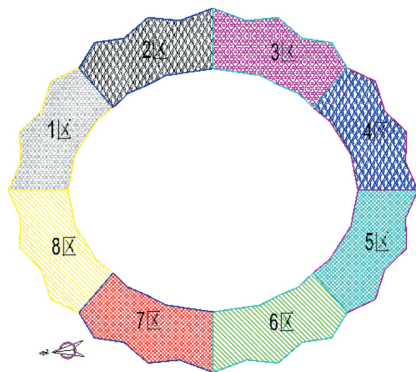


图2 钢屋盖施工模块划分示意图

Fig. 2 Division diagram of the construction module

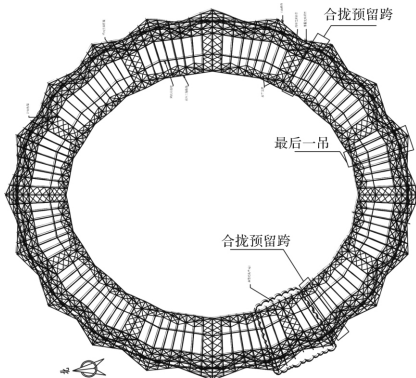


图3 钢屋盖合拢预留位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the closed and reserved position

2.1.2 卸载顺序

钢屋盖安装时在靠近支座外圈和悬臂远端内环均设置了临时支撑架,内外环各80个,如图5

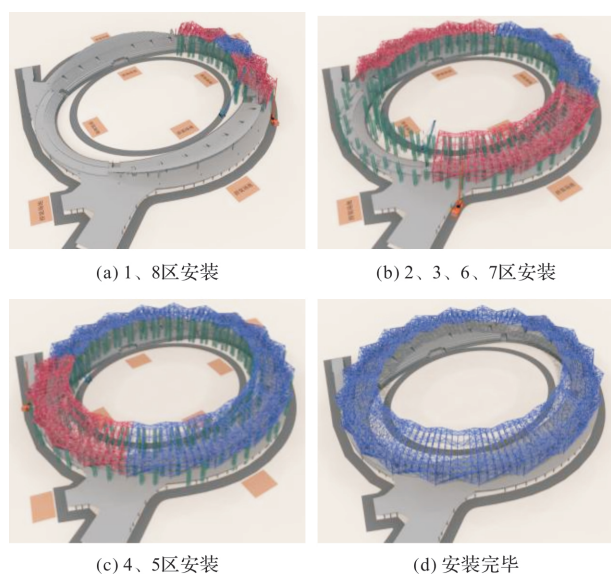


图4 钢屋盖施安装工序图

Fig. 4 Steel roof installation process drawing

所示。卸载采用由外而内,由北向南,隔一拆一,逐步拆除的施工顺序。第一步由北向南,间隔拆除靠近支座外圈全部临时支撑;第二步从看台开始由东西向南北,隔一拆一拆除靠近V形柱附近的20个临时支撑,剩下60个;第三步从看台开始由东西向南北,隔一拆一拆除无V形柱附近的20个临时支撑,剩下40个;第四步开始循环同步卸载,每隔临时支撑每次卸载10 mm,从看台开始由东西向南北,隔一卸一,直至卸载结束后拆除剩下40个临时支撑。

卸载过程既是拆除支撑胎架的过程,又是结构体系逐步转换过程,在卸载过程中,结构杆件内力发生重分布,逐步趋向于设计计算模型,由内外环多点支撑体系变成外环支撑悬臂环桁架。卸载时,严格对各控制点进行位移监控,以理论计算结果为参考,现场检测数据进行衡量,准确保持卸载时结构的安全稳定。

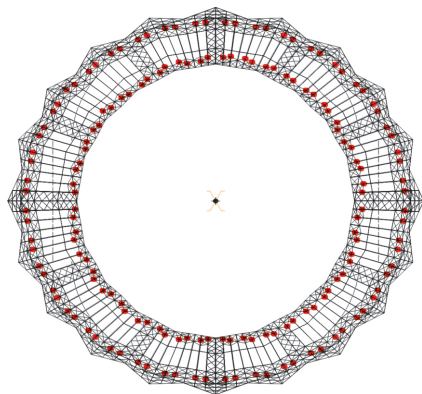


图5 钢屋盖临时支撑布置图

Fig. 5 Temporary support distribution of the steel roof

2.2 单区施工工序

单区施工主要分为管桁架拼装、吊装、临时支撑安拆、分块桁架间合拢、卸载等工序。主要施工工序有联立吊装单元拼装、典型分块单元安装和临时支撑安装。

2.2.1 联立吊装单元拼装

单区联立吊装单元由三榀径向桁架和三榀径向桁架之间的上弦、下弦杆组成。全部杆件均在拼装胎架上进行,分为单榀小拼单元拼装、双榀单元拼装、联立吊装单元拼装。单榀小拼单元采用25 t吊车将散件进行卧拼,双榀单元采用两台25 t吊车将两榀单榀小拼单元进行吊装,在联立吊装单元支撑胎架上进行拼装,最后再将第三榀径向桁架进行拼装。拼装全过程通过倒链、全站仪进行位置复核,联立吊装单元拼装全过程如图6所示。

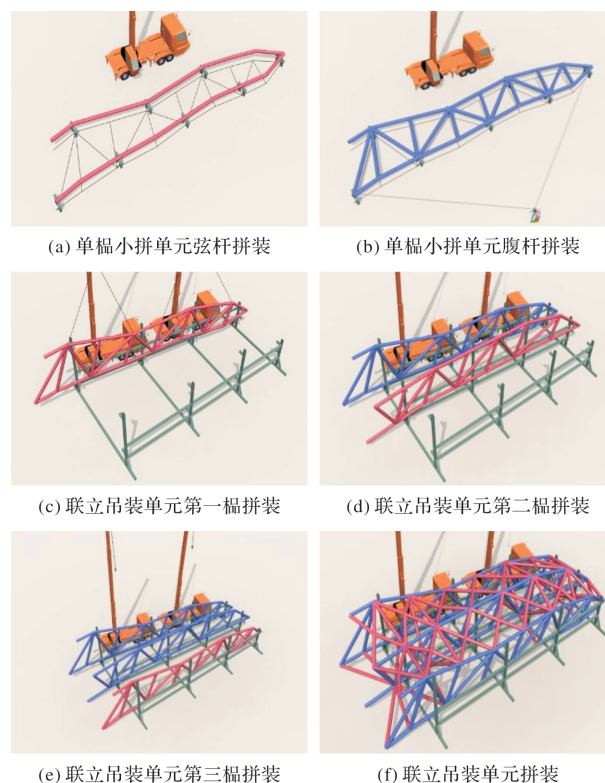


图6 联立吊装单元拼装顺序图

Fig. 6 Assembly sequence diagram of simultaneous lifting units

2.2.2 典型安装单元安装

典型安装单元由三榀径向桁架组成,包括单榀吊装单元、联立吊装单元、散拼单元,如图7所示,图中红色为联立吊装单元,灰色为散拼单元,黄色为单榀吊装单元。单榀吊装单元为桁架支座附近的支撑杆件组成,通过临时支撑固定。联立吊装单元由三榀悬挑桁架及其腹杆组成,散拼单元为连接吊装单元与悬挑桁架的杆件,拼装好后形成三榀独立的径向桁架,在靠近支座和内环桁

架处设置临时支撑固定。

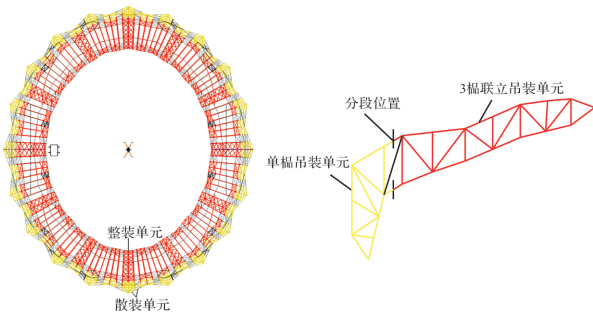


图7 典型安装单元示意图

Fig. 7 Schematic diagram of typical installation unit

钢屋盖共计联立吊装单元 40 个, 最重单元约 45 t, 单幅吊装单元共 120 个, 最重单元约 8 t, 散装单元为单根弦杆或腹杆, 单重小于 1t. 结合场地条件和吊装单元的重量, 联立吊装单元、单幅吊装单元和散拼单元分别采用 350 t 履带吊、70 t 汽车吊和 50 t 汽车吊进行吊装。

2.2.3 临时支撑安装

临时支撑主要分为支座斜柱和钢屋盖的临时支撑, 支座斜柱临时支撑主要为固定支座, 保证联立吊装单元安装精度用, 钢屋盖临时支撑为钢屋盖合拢前的支撑点, 维持钢桁架的稳定。典型临时支撑设置如图 8 所示。

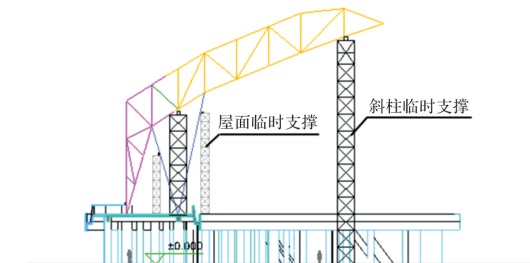


图8 临时支撑设置剖面图

Fig. 8 Section of temporary support setting

支座斜柱临时支撑支撑在体育场看台台阶之上, 通过钢梁、加劲肋、预埋件将临时支撑胎架进行固定, 钢梁下翼缘与预埋件焊接, 纵向加劲板和钢梁的高度根据临时支撑实际需要进行调节, 如图 9 所示。

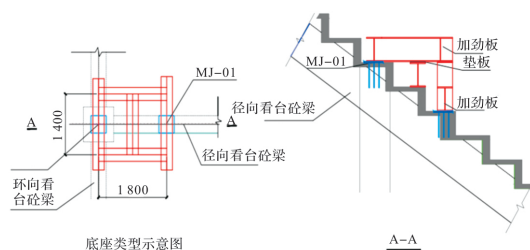


图9 支座斜柱临时支撑底座示意图

Fig. 9 Schematic diagram of temporary support base for oblique column

屋盖临时支撑支撑在体育场跑道处, 浇筑混凝

土基础, 在基础表面设置埋件, 将支撑胎架与埋件固定。临时支撑胎架顶部设置桁架固定装置和液压千斤顶, 用于监测支座反力和限位, 如图 10 所示。

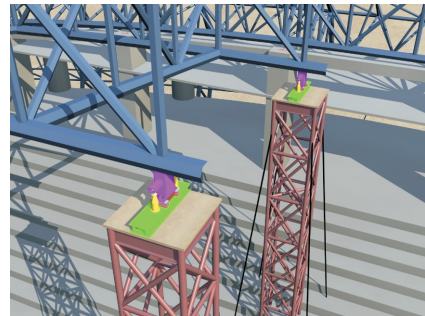


图10 临时支撑顶部固定装置

Fig. 10 Temporary support top fixtures

3 施工过程分析

在大跨度大悬挑空间桁架结构领域, 施工工况与设计工况、正常使用工况有较大差异。通常结构设计师设计施工图时不考虑施工工况, 因此施工分析是钢结构工程安装必不可少的部分。本项目主要的施工工况有管桁架拼装、管桁架吊装、临时支撑设置、管桁架合拢、管桁架卸载共五个工况。施工分析时, 主要考虑结构自重、活荷载、风荷载、温度作用。

3.1 管桁架拼装分析

拼装分析主要考虑拼装支撑胎架的刚度、强度、稳定性能否满足管桁架拼装要求。胎架分析以联立吊装单元为最不利工况进行分析, 联立吊装单元是本项目拼装过程中在地面拼装尺寸最大、重量最重的单元。胎架采用 Q235B 钢材焊接连接制作而成, 立杆和底部连杆采用 $H300 \times 200 \times 12 \times 10$, 横向连杆和斜撑截面为 $20b$, 如图 11 所示。



图11 胎架示意图

Fig. 11 Diagram of tire frame

胎架的支架间距和宽度均为 3 m, 长度根据实际各构件的长度进行组装确定。联立吊装单元在胎架上进行拼装时, 根据联立吊装单元的自重, 在每个悬臂支撑点施加 10 kN 荷载进行验算, 胎架的整体位移如图 12 所示, 可知胎架的变形较小,

位移几乎为零. 刚度足够满足联立吊装单元及其他拼装单元的拼装.

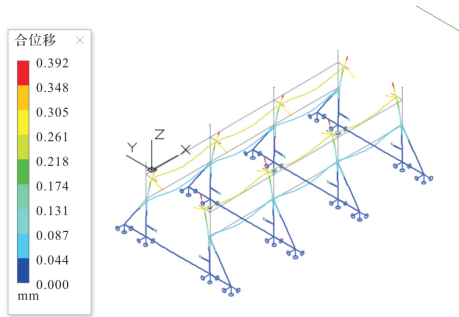


图 12 胎架验算位移图/mm

Fig. 12 Calculation displacement diagram of tire frame /mm

3.2 吊装分析

本项目安装以三榀径向桁架为单元进行, 包括单榀吊装单元和联立吊装单元, 如图 7 所示. 单榀吊装单元约重 8 t, 采用 70 t 汽车吊在体育场外

进行吊装, 吊装半径为 14 m, 起重性能为 10 t; 联立吊装单元约重 45 t, 采用 QUY350 型 350 t 履带吊进行吊装, 履带吊主臂长 42 m, 副臂长度 42 m, 吊装半径为 30 m, 起重性能为 47 t, 均能满足吊装要求.

以三榀径向桁架为例, 对单块钢桁架安装时支座斜柱安装、单榀吊装单元安装、联立吊装单元安装三个施工过程进行了施工过程分析. 施工步 1 为支座斜柱安装, 并在斜柱各肢采用临时支撑固定; 施工步 2 为单榀吊装单元与支座斜柱拼装; 施工步 3 为联立吊装单元拼装及临时支撑安装, 如图 13 所示. 施工步验算结果如图 14 和图 15 所示, 结果表明各施工步最大位移约为 29 mm, 最大轴拉力为 137 kN, 最大轴压力为一 140 kN. 均属于正常施工安装水平, 远小于构件承载力, 说明本项目施工工序安全可靠, 能够保证体育场钢屋盖的安装.

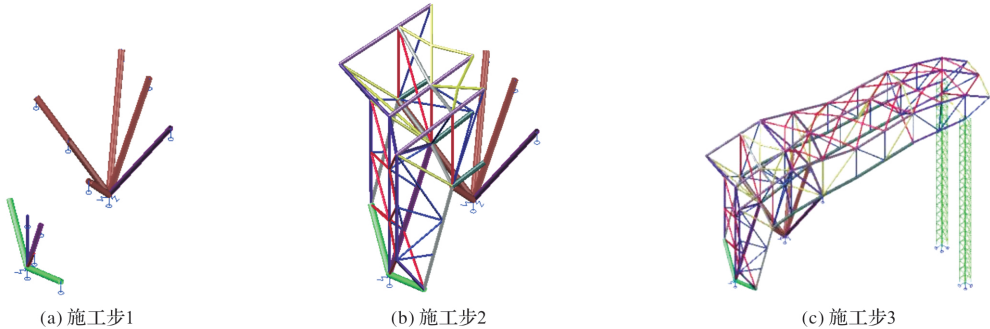


图 13 三榀径向桁架施工步

Fig. 13 Construction steps for three trusses of radial truss

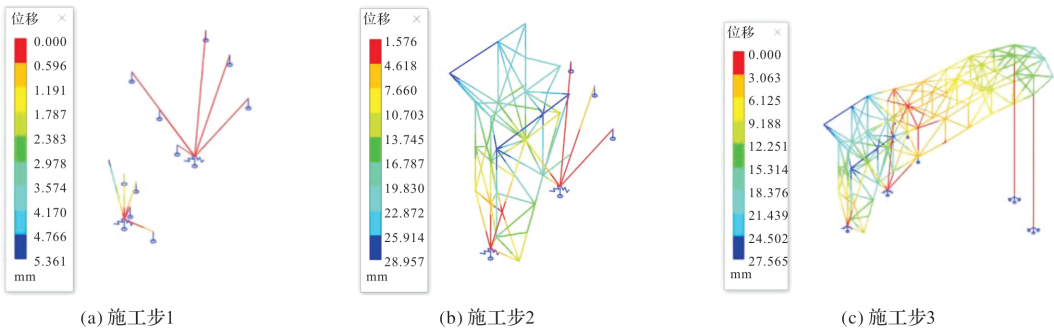


图 14 三榀径向桁架施工步位移验算结果/mm

Fig. 14 Calculation results of displacement of three trusses radial truss construction steps/mm

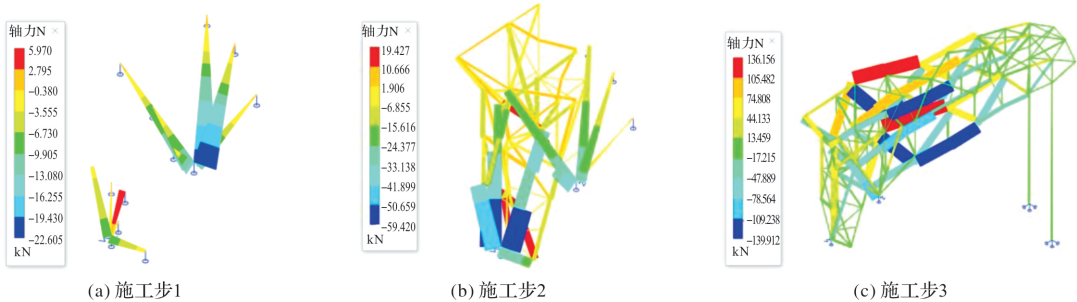


图 15 三榀径向桁架施工步验算结果(轴力/kN)

Fig. 15 Checking results of construction steps for three trusses of radial trusses (axial force /kN)

3.3 临时支撑方案优选

交叉环形钢桁架跨度大、悬挑长度大、杆件交错复杂,施工安装时,临时支撑的合理布置对结构杆件内力、结构位移具有重要影响.结合本项目结构方案特点,临时支撑按照内环和外环对称布置,内外环临时支撑布置点选在同一榀径向桁架之上.对三种临时支撑方案均进行了施工分析,并对每个方案的结构最大挠度、杆件内力进行了对比分析,如表 1 和表 2 所示.

从表 1~表 2 和图 16 可知,三个方案的最大位移均发生在内环东西位置处,方案一最为不利,有 18 根构件单元应力比 ≥ 0.7 ,处于高应力水平,

竖向挠度达到 31 mm,方案三竖向挠度为 9 mm 左右全部构件应力比 ≤ 4 ,结构处于低应力状态.因此最终优选出内外环均设置 80 个临时支撑为最终方案.

表 1 临时支撑方案最大挠度表/mm

Tab. 1 Table of maximum deflection of temporary support scheme /mm

项目	内环支撑数	外环支撑数	最大挠度
方案一	20	20	31
方案二	40	40	14
方案三	80	80	9

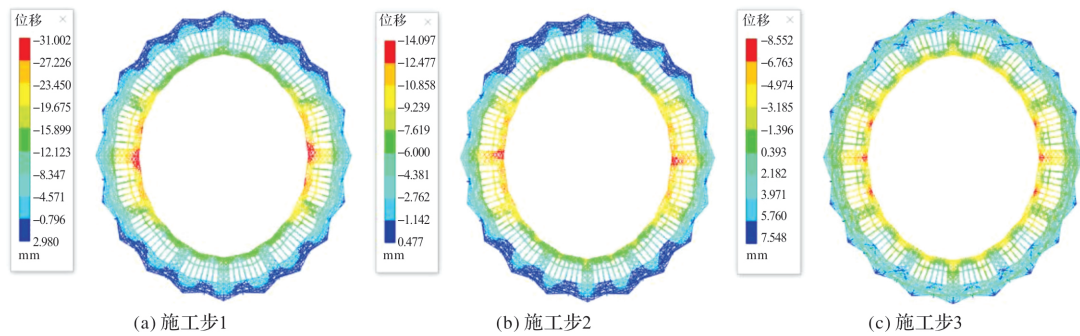


图 16 临时支撑方案挠度计算结果/mm

Fig. 16 Deflection calculation results of temporary support scheme /mm

表 2 临时支撑方案各构件应力比统计表

Tab. 2 Statistical table of stress ratio of each member of temporary support scheme

项目	应力比范围构件数									
	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
方案一	8 560	514	44	16	14	6	8	9	5	4
方案二	8 769	290	71	18	20	8	4	0	0	0
方案三	8 376	706	92	6	0	0	0	0	0	0

3.4 空间管桁架合拢分析

钢屋盖为大跨度空间管桁架结构,施工时昼夜温差大,因温差而引起的变形和应力较大,加大了合拢的难度.采用分块安装、逐步合拢的施工工序,等最后一段环形桁架安装时,结构的累计施工变形达到最大值,合拢时施工误差的消除和合拢的焊接质量是合拢的关键.

合拢焊接时,选择温度较为稳定的天气进行,合拢当天为阴天,合拢温度为 15℃.合拢时,现将合拢口的卡马焊接固定,然后在进行合拢口构件对接焊缝的焊接,所有卡马焊接保持在 1 h 内完成.在进行合拢计算时,选择了升温 25℃和降温 25℃两个工况作为验算,各工况标准组合为:1.0 恒载+1.0 活载+0.6 风载+0.6 温差.图 17 和图 18 为合拢时结构升温工况与降温工况的标准组合

位移计算结果,从结果可知,最大位移发生在结构南北端部外圈处,升温 and 降温最大位移分别约为 38.5 mm 和 31.6 mm,处于较小水平,说明本项目合拢位置和工况较为合理.

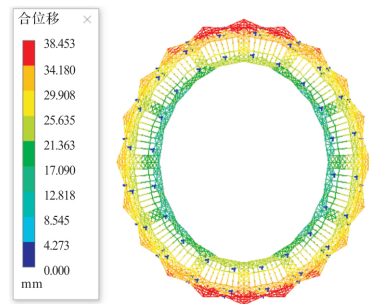


图 17 升温标准组合结构位移图

Fig. 17 Displacement diagram of standard combination structure for temperature rise

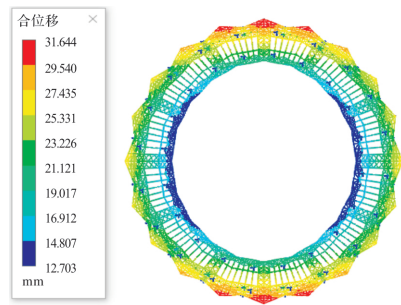


图 18 降温标准组合结构位移图

Fig. 18 Displacement diagram of cooling standard combination structure

3.5 空间管桁架卸载施工分析

如 2.1.2 节所述, 本项目卸载方案采取先外后内, 逐步拆除的工序, 考虑结构自重及温度工况的卸载施工步计算结果如表 3 所示. 卸载分级分批进行, 第一批卸载控制在 1 cm 之内, 第二批卸载控制在 2 m 之内, 第三批卸载可控制在 3 cm 之内, 由高向低二边对称间隔进行; 以此类推, 直至支架与钢结构完全脱离, 即可拆除支架. 根据计算支架拆除后, 支承点处的竖向挠度值, 一般都在 45 mm 以下, 因此通过三次卸载, 大多数支架可完全卸载.

表 3 卸载施工步施工计算结果

Tab. 3 Calculation results of unloading construction step

施工步	内环支撑数	外环支撑数	挠度 max/mm	0≤应力比≤0.5 构件数及百分比	0.5<应力比≤1.0 构件数及百分比
1	80	60	6.72	9 142(99.48%)	48(0.52%)
2	80	40	6.73	9 144(99.50%)	46(0.50%)
3	80	20	6.72	9 149(99.55%)	41(0.45%)
4	80	0	6.71	9 151(99.68%)	29(0.32%)
5	60	0	7.62	9 163(99.81%)	17(0.19%)
6	40	0	44.92	9 180(100.00%)	0(0.00%)
7	30	0	41.61	9 180(100.00%)	0(0.00%)
8	20	0	43.45	9 180(100.00%)	0(0.00%)
9	0	0	44.92	9 180(100.00%)	0(0.00%)

从表 3 可知, 外环临时支撑卸载对结构挠度影响较小, 此时结构主要由支座承担荷载, 外圈结构与实际使用工况相似. 内环临时支撑卸载时, 每次卸载的结构最大挠度均差不多, 约为 45 mm 左右, 与全部临时支撑卸载后, 接近于结构最大挠度. 环向管桁架伸臂悬挑长度约为 27.5 m, 其最大挠度限制为 110 mm, 卸载过程及完全卸载后的挠度均远小于挠度限制, 满足规范要求. 内外环临时支撑卸载过程中, 构件应力比几乎全部小于 0.5, 处于低应力水平. 综上所述, 本项目卸载方案安全可靠, 所有施工步过程中, 结构挠度较小, 构件处于低应力状态, 保证了本项目大跨度大悬挑钢屋架的顺利施工安装.

4 施工关键技术

本项目为大跨度大悬挑交叉环形管桁架结构体系, 其造型呈钻石形状. 杆件交错连接, 铸钢节点最多连接肢数达到 11 肢, 构件安装定位精度要求高, 高空需同时焊接多根构件, 焊接质量要求较高. 施工关键技术主要有: 采用模块化施工方法, 将钢屋盖划分为 8 个区进行施工, 各区又细分联立安装单元, 简化施工方法; 经过多个方案优选, 确定临时支撑胎架的布置方案, 以内外环两条技术路线进行布置, 布置方案安全可靠且施工便捷; 结合施工过程分析, 确定合理的卸载方案, 优化施工工序, 提高施工组织设计水平, 达

到人、材、机最有效利用.

5 结论与建议

以天长全民健身中心体育场钢屋盖为研究背景, 从钢结构模块化施工技术、钢结构拼装、吊装、合拢、卸载等方面进行了施工过程分析, 得出了以下结论:

(1)大跨度空间结构中, 结合施工场地条件和结构特点, 采用模块化施工技术可以提高钢结构安装效率、精准度和质量, 能有效提高项目管理和效率;

(2)单块联立安装单元安装时, 支座斜柱、单榀吊装单元和联立吊装单元安装时, 结构竖向位移和构件内力较小, 单块施工工序安全可靠;

(3)临时支撑的数量对钢结构安装的竖向挠度以及构件的应力比影响较大, 当采用内环外各 80 各支撑时, 结构竖向挠度约为 9 mm, 所有构件应力比均小于 0.4, 处于低应力状态;

(4)钢屋盖合拢时升温 and 降温工况下, 结构最大位均发生在结构南北端, 即为结构长度方向最远端, 合拢时通过卡马进行临时位置固定, 保证了合拢时散装钢构件的焊接质量;

(5)钢屋盖卸载时, 当拆除外环临时支撑时, 结构竖向挠度约为 7 mm, 仅少量构件应力比超 0.5, 绝大部分构件应力比小于 0.5; 当逐步拆除内环临时支撑时, 结构竖向挠度约为 45 mm, 所

有构件应力比小于 0.5。

参考文献 References

- [1] 高颖,傅学怡,杨想兵,等.杭州奥体博览城网球中心结构设计研究综述[J].建筑结构学报,2017,38(1):1-11.
GAO Ying, FU Xueyi, YANG Xiangbing, et al. Research on structural design of the Hangzhou Olympic Tennis Center[J]. Journal of Building Structures, 2020, 50(S2):168-173.
- [2] 傅学怡,杨想兵,高颖,等.杭州奥体博览城网球中心钢结构移动屋盖设计关键技术[J].建筑结构学报,2017,38(1):12-20.
FU Xueyi, YANG Xiangbing, GAO Ying, et al. Key design points on movable steel structure roof of the Hangzhou Olympic Tennis Center[J]. Journal of Building Structures, 2017,38(1):12-20.
- [3] 王雷,董全利,张月月,等.杭州奥体中心室内网球馆结构设计[J].建筑结构,2020,50(S2):168-173.
WANG Lei, DONG Quanli, ZHANG Yueyue, et al. Structural design of indoor tennis hall of Hangzhou Olympic Sports Center[J]. Building Structures, 2020, 50(S2):168-173.
- [4] 游桂模,谢董恩,周观根,等.杭州奥体中心亚运三馆体育游泳馆施工过程分析[J].钢结构(中英文),2020,35(10):9-14.
YOU Guimo, XIE Dongen, ZHOU Guangen, et al. Analysis of Construction Process for Gymnasium and Natatorium of Hangzhou Olympic Sports Center[J]. Steel Construction, 2020,35(10):9-14.
- [5] 何伟,谢董恩,郭振华,等.杭州奥体中心综合训练馆钢结构施工关键技术[J].钢结构(中英文),2020,35(10):15-21.
HE Wei, XIE Dongen, GUO Zhenhua, et al. Key technology of steel structure construction of comprehensive training hall of Hangzhou Olympic Sports Center[J]. Steel Construction, 2020,35(10):15-21.
- [6] 周观根,张珈铭,刘坚,等.杭州奥体博览中心主体育场钢结构施工模拟分析[J].施工技术,2014,43(8):1-5.
ZHOU Guangen, ZHANG Jiaming, LIU Jian, et al. Construction simulation analysis on steel structure for main stadium of Hangzhou Olympic and International Expo Center[J]. Construction Technology, 2014, 43(8):1-5.
- [7] 周观根,游桂模,沈晓飞,等.杭州奥体网球中心开合屋盖施工关键技术[J].空间结构,2021,27(2):65-69.
ZHOU Guangen, YOU Guimo, SHEN Xiaofei, et al. Key construction technology of retractable roof structure of Hangzhou Olympic Tennis Center[J]. Spatial Structures, 2021,27(2):65-69.
- [8] 周观根,万敬新,游桂模,等.杭州奥体网球中心开合屋盖施工过程分析[J].空间结构,2021,27(2):70-76.
ZHOU Guangen, WAN Jinxin, YOU Guimo, et al. Analysis of construction process of retractable roof structure of Hangzhou Olympic Tennis Center[J]. Spatial Structures, 2021,27(2):70-76.
- [9] 王哲,白光波,陈彬磊,等.国家速滑馆钢结构设计[J].建筑结构,2018,48(20):5-11.
WANG Zhe, BAI Guangbo, CHEN Binlei, et al. Steel structural design of National Speed Skating Oval[J]. Building Structures, 2020, 50(S2): 168-173.
- [10] 奚琦.国家速滑馆屋盖结构选型和施工方案模拟分析研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
QI Xi Roof structure selection and simulation analysis of construction scheme for the National Speed Skating Oval[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [11] 白光波,王哲,陈彬磊,等.国家速滑馆索网结构形态分析关键问题研究[J].钢结构(中英文),2020,35(7):54-61.
BAI Guangbo, WANG Zhe, CHEN Binlei, et al. Key issues in cable net form-finding of the National Speed Skating Oval[J]. Steel Construction, 2020, 35(7): 54-61.
- [12] 王哲,朱忠义,王伟,等.国家速滑馆施工误差对索结构预应力偏差的影响研究[J].建筑结构,2021,51(19):111-115.
WANG Zhe, ZHU Zhongyi, WANG Wei, et al. Research on the influence of construction error for pre-stress deviation in cable structure of National Speed Skating Oval[J]. Building Structures, 2021,51(19): 111-115.
- [13] 闫国军,刘青云,赵启元,等.国家速滑馆比赛大厅建筑声学设计与实测分析[J].建筑科学,2022,38(4):259-264.
YAN Guojun, LIU Qingyun, ZHAO Qiyuan, et al. Architectural acoustic design and measurement of the competition hall of the National Speed Skating Oval[J]. Building Science, 2022,38(4):259-264.
- [14] 刘洁.国家速滑馆智慧场馆设计探讨[J].建筑电气,2022,41(2):3-10.
LIU Jie. Discussion on intelligent venue design of National Speed Skating Oval[J]. Building Electricity, 2022, 41(2): 3-10.
- [15] 张英坤.基于WSN的西安奥体中心体育场健康监测系统研究及应用[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
ZHANG Yingkun. Research and Application of health monitoring system of Xi'an Olympic Sports Center Stadium based on WSN[D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2020.
- [16] 隋庆海,张亚伟.西安奥体中心体育馆结构设计及若干技术介绍[J].建筑钢结构进展,2020,22(6):136-142.
SUI Qinghai, ZHANG Yawei. Structural design and technology introduction of the stadium of Xi'an Olympic Sports Center[J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(6):136-142.

(编辑 沈波)