

大型场馆大跨度钢结构施工与监测关键技术研究

吴友佳

(广东汇涛工程科技有限公司, 广东 佛山 528300)

摘 要 本文以一座大型体育场馆施工为例, 对大跨度钢结构施工中的关键技术与监测方法进行系统研究。研究结合理论推导、数值模拟与现场实测, 重点解析大跨度悬挑内环梁的分段安装要点, 梳理主拱肋的精准定位流程, 并评估无线监测系统在施工阶段的实际表现。研究结果表明, “地面拼装—整体提升”方案可显著抑制结构变形; 无线监测网络在整个施工期内持续提供安全预警, 为现场安全提供保障。

关键词 大型体育场馆; 大跨度钢结构; 大跨度悬挑内环梁; 无线监测

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.019

0 引言

大跨度钢结构因自重轻、跨越能力强、造型可塑性好, 已成为这类项目的首选。然而, 其施工阶段遍布高空作业、临时支撑体系与多步卸载, 结构内力随工序推进持续变化, 风险远高于常规结构。统计显示, 近十年国内大跨度钢结构施工事故中, 76% 源于临时支撑失稳或卸载方案缺陷。在此背景下, 施工与监测关键技术研究已成为工程实践的迫切需求。本文选取某大型体育场馆项目, 系统梳理施工全过程的力学响应与监测手段, 构建基于多源数据融合的施工控制技术体系, 为同类工程提供理论参考。

1 工程概况

1.1 项目背景

某大型体育场馆体量庞大, 总建筑面积约 21.7 万 m^2 。主体采用双向张弦梁桁架体系, 最大跨度达 198 m。结

构由 4 榀主拱肋、8 道次拱肋及 24 组张弦梁协同构成, 形成稳定的三维空间受力框架。悬挑段同样引人注目, 最大跨度 65 m, 选用变截面箱型钢梁, 单根构件最重达 120 t。图 1 为某大型体育馆剖面结构示意图。

1.2 结构特点

(1) 主体结构矢高 32 m; 长轴向桁架间距 15 m, 短轴向 12 m。(2) 在材料参数方面, 主体选用 Q345GJ 高强度钢, 局部连接节点则改用 Q420GJ 铸钢件。(3) 在边界条件方面: 基础采用桩筏基础型式, 单桩的承载力特征值为 8 000 kN。

1.3 施工难点

(1) 65 m 悬挑梁需在 28 m 高空拼装, 临时支撑体系必须保证悬挑结构施工阶段的稳定。(2) 主拱肋安装: 198 m 跨主拱肋需分 12 段吊装, 累计误差控制要求 ≤ 5 mm。(3) 全结构同步卸载须在 72 小时内结束, 应力波动幅度不得超出设计值的 15%。

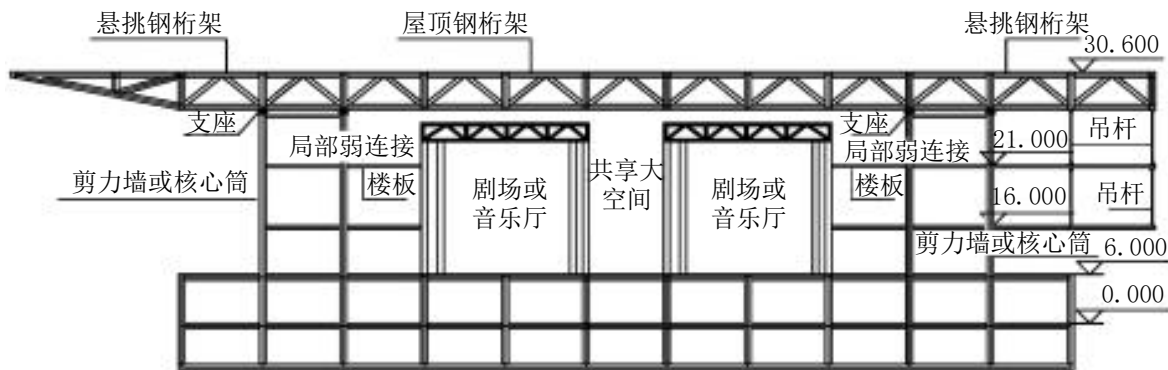


图 1 某大型体育馆剖面结构示意图

2 大跨度钢结构施工关键技术研究

2.1 大跨度钢结构施工总体工艺

1. 施工流程设计。在大跨度钢结构建设中,“分区施工、整体合龙”的总体思路展现出独特优势。工程首先被科学地拆分为若干相对独立的施工单元,各单元随后同步推进。并行作业显著降低了交叉干扰,质量更易受控。待各单元完工后,通过一次精准的整体合龙,将分散构件严丝合缝地连成一体,以保证结构稳定性与功能完整性,这是项目成功的关键^[1]。

2. 临时支撑体系设计。项目采用格构式钢支撑体系,单点承载力设计值定为 1 500 kN。借助 SAP2000 有限元软件反复计算,支撑点常规间距最终取 12 m,局部区域加密至 8 m。实测表明,支撑最大沉降仅 3.2 mm,低于 5 mm 限值,满足设计要求。

2.2 大跨度悬挑大开口钢结构内环梁分段安装关键技术

1. 分段方案优化。在大跨度建筑施工中,65 m 悬挑梁的安装被视为关键难点。为兼顾安全与效率,项目采用“地面拼装—整体提升”方案,并将梁体划分为五段作业。拼装阶段,作业人员先在开阔平整的场地将五段梁体精确对接,全过程依靠高精度测量仪器实时校正各部件的空间位置与角度,确保几何误差受控。拼装完成后,转入整体提升:通过大型液压提升装置及布设合理的钢绞线—锚具系统,将重达数百吨的梁体缓慢、平稳地抬升至设计标高^[2]。

2. 拼装精度控制。三维激光扫描技术完成拼装检测后,实测数据随即被完整采集。结果显示:平面位置的最大偏移为 2.1 mm,均值 1.3 mm;垂直度偏差峰值达 1/450,平均为 1/620;接口间隙最大 0.8 mm,平均 0.5 mm。

3. 提升过程仿真。在 ANSYS 中建立提升模型并完成仿真后,结果如下:提升点实测最大反力 1 420 kN,低于该处 1 500 kN 的设计限值;结构最大应力 185 MPa,低于规范给出的 210 MPa 许用应力;模型最大位移 12.3 mm,亦未超过 15 mm 的允许位移。

2.3 钢结构主拱肋安装关键技术

1. 吊装方案设计。两台 600 t 履带吊协同抬吊时,优化后的吊点布置为:吊点间距 45 m,吊索与水平面夹角 65°,钢丝绳直径 $\phi 56$ mm,结构 6×37+FC。

2. 合龙工艺。采用“温度合龙法”时,先通过有限元分析锁定 18±2℃ 为最佳合龙温度;现场实测环境温度 17.8℃,随后将接口间隙严格保持在 0.5~1.2 mm 范围内,完成合龙。

3. 焊接质量控制。CO₂ 气体保护焊成本低廉、效率突出且焊缝性能稳定,但现场风速必须低于 1 m/s,否则保护气流被扰乱,极易产生气孔。施焊前,母材与焊丝须彻底清理,坡口形状、根部间隙及错边量应全部达标。焊接时,实时监测电流、电压和焊丝干伸长,并通过层间温度控制防止过热。焊后立刻实施无损检测,发现超标缺陷立即返修,以保障大跨度钢结构的整体质量。无损检测结果显示,焊缝一次合格率达 98.7%。

3 大跨度钢结构施工监测研究

3.1 大跨度钢结构施工无线监测系统

1. 系统架构设计。系统采用分层分布式架构,共三层。感知层布置量程 ±1 500 $\mu\epsilon$ 的振弦式应变计,并辅以精度 ±0.1 mm 的静力水准仪,保证数据完整、准确。传输层选用通信距离 1.5 km 的 LoRa 无线模块,维持链路稳定高效。应用层依托云端分析平台,对采集结果进行深度处理与解读^[3]。

2. 传感器布置方案。主拱肋是主要承力构件,监测点布设必须精准。轴力、弯矩及变形是关注核心。纵向沿拱脚、1/4 跨、1/2 跨、3/4 跨等控制截面安装应变传感器,捕捉轴力与弯矩波动,为受力评估提供数据;同断面配套位移传感器,记录施工阶段竖向与横向位移,以便及早发现异常变形。现场环境复杂,传感器须具备抗干扰、防水防尘能力,安装时与拱肋表面紧密贴合并固定牢靠,防止施工振动引起信号漂移。合理布设后,无线系统可实时回传主拱肋状态,为安全与质量管控提供依据,保障大跨度钢结构施工顺利推进。

3. 温度效应分析。建立温度—应力关系模型: $\sigma_T = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$ 。式中: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ (线膨胀系数), $E = 2.06 \times 10^5$ MPa(弹性模量)。实测温度应力最大值达 42 MPa,占设计应力的 20%。

4. 数据处理算法。采用小波变换滤除噪声后,实测结果的变化一目了然:应变信号的信噪比由 12 dB 跃升至 38 dB,位移误差则从 ±2.5 mm 降至 ±0.8 mm,两项指标均显著改善。

3.2 大跨度钢结构施工结构内力分析

图 2 显示,主拱肋应力随时间呈现明显阶段性:先升高,再回落,随后趋于平稳。0~500 min 为安装与焊接期,荷载按既定次序叠加,应力一路升至峰值 5.3 MPa,仍远低于钢材屈服值,满足规范要求。500 min 后,合龙缝焊接结束,整体卸载启动,应力随之逐步下降。

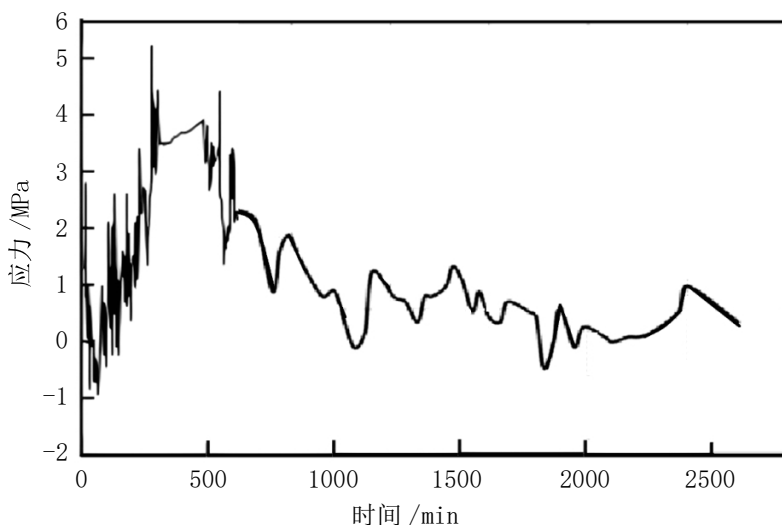


图 2 主拱肋施工过程的应力变化时程曲线

3.3 大跨度钢结构施工结构变形分析

1. 变形监测结果。施工全过程的变形监测显示：提升阶段测得的最大竖向位移为 18.7 mm，低于该阶段 25 mm 的限值；卸载阶段最大水平位移为 12.3 mm，仍低于 15 mm 的允许值；合龙后的残余变形为 6.2 mm，未超出 10 mm 的控制标准^[4]。

2. 变形控制措施。变形控制依赖三条路径实现精细调节。预调值法居首：先由有限元算出 -8.5 mm 预拱度，再据此提前设定，为后续调整奠定基础。同步控制次之，借助液压同步提升系统，把位移差锁定在 ± 3 mm 内，保证变形步调一致且平稳。临时加固后，于关键节点布设临时支撑，可将结构刚度提高 35%，从而增强抗变形能力。

3. 变形预测模型。构建基于 BP 神经网络的变形预测模型时，输入参数被系统梳理为四类与变形直接相关的变量。首先区分施工阶段：提升、卸载与合龙各自引发不同的变形增量，阶段信息必须单独编码；其次引入环境温度，其波动通过改变材料弹性模量与构件膨胀幅度而放大位移；随后计入累计荷载，它随工序推进逐步叠加，与变形曲线高度耦合；最后纳入支撑刚度，刚度差异会立即改变力流路径，使位移响应呈现明显变化。工程实测显示，模型输出与实测值吻合率达到 92%，这一精度足以作为现场调整索力、预拱或临时支撑的定量依据^[5]。

4 结论

本文结合理论推导、数值模拟与工程案例，系统梳理了大跨度钢结构施工与监测的核心技术，并得出四点结论：第一，施工安全的前提是精细化的结构力

学分析与截面优化，设计时必须同步满足规范条文与现场真实工况。第二，焊接工艺与吊装方案决定质量上限，应通过参数调优与设备匹配实现高效建造。第三，全过程监测需覆盖多参数、多工况，将实测数据与有限元结果实时比对，才能准确评估结构状态。第四，温度变化与索力偏差对安全性影响显著，须构建温度—应力映射模型并引入索力耦合算法加以控制。

后续研究可沿以下三条路径展开：

第一，智能监测：融合物联网、大数据与人工智能，对监测数据完成自动采集、实时分析与即时预警。

第二，绿色施工：开发低能耗、低污染的焊接与防腐工艺，助力钢结构建造向可持续方向发展。

第三，数字化交付：借助 BIM+GIS，将施工监测数据与运维管理无缝衔接。

参考文献：

- [1] 杨志杰. 桥梁护栏与基础桥面板的匹配性防撞设计[J]. 城市道桥与防洪, 2022(06):93-99.
- [2] 李欣, 贾成亮, 韦娴. 大型博物馆钢结构施工过程变形控制与实现技术研究[J]. 建筑技术, 2023, 54(17):2067-2069.
- [3] 齐翰. 环形大跨钢结构施工临时支撑设计与荷载优化[J]. 建筑技术, 2023, 54(05):588-591.
- [4] 王金荣, 王秀丽, 苟宝龙, 等. 大型复杂体育馆钢结构吊装过程温度影响分析与现场监测研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(08):96-101.
- [5] 王猛, 李欣, 鞠竹, 等. 北京工人体育场大跨度开口单层拱壳钢结构施工关键技术[J]. 建筑结构, 2023, 53(06):18-25.