

大型复杂钢结构施工过程中变形控制与矫正技术

马 可

(菏泽天源水务发展有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘 要 大型复杂钢结构施工过程中容易受到多因素耦合作用而发生显著变形, 对结构的安全和成型精度造成影响。本文以施工阶段变形机理为主线, 系统地分析了结构受力特性、初始缺陷和环境效应共同作用, 并着重研究施工方案优化、高精度监测和临时支撑调控关键控制技术, 将有限元分析和数据驱动方法相结合, 提出了全过程变形预测和动态修正策略, 以期同类项目提供技术路径参考。结果表明, 多技术协同应用能有效地提高施工精度和减小变形风险, 具有较好的推广前景和工程应用价值。

关键词 复杂钢结构; 施工变形; 有限元分析; 施工监测

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.040

0 引言

大型复杂钢结构由于具有空间体系复杂、构件尺度大、施工阶段受力不确定性等特点, 在施工过程中易发生累积变形而成为限制施工精度和结构安全的一个关键问题。施工期结构常处于非稳定受力状态, 并叠加了初始缺陷、施工荷载和温度效应等因素, 使得变形控制的难度明显增加。传统的依靠经验控制方式已经很难适应高精度建造的需要。为了解决这一难题, 需要在机理分析、过程控制和预测方法上进行系统研究, 从而对整个施工过程进行科学调控和精细化管理。

1 大型复杂钢结构施工变形机理分析

1.1 结构受力特性与初始缺陷影响

大型复杂钢结构一般跨度较大、构件细长比大、空间受力复杂, 施工阶段和成型阶段受力状态明显不同。施工期构件常位于非完整受力体系内, 局部受压、偏心受力和不对称荷载较易诱发初始变形放大效应^[1]。由于制造和运输等环节无法避免的构件弯曲、扭曲以及焊接残余应力等初始缺陷也将在安装时逐渐释放和叠加外部荷载, 而引起整体结构的非线性响应。从实际工程经验来看, 对于高层钢结构和大跨度空间结构, 初始缺陷对节点位移的影响可以超过设计允许偏差的30%。因此施工前需要通过构件检测和预拼装来控制初始误差, 以减少后续变形的累积风险。

1.2 施工荷载与温度效应耦合作用

施工阶段结构需要承受自重、施工设备荷载以及临时堆载等各种不确定性载荷, 这些载荷的分布呈现

出显著的阶段性和随机性特征。同时钢材对温度的变化异常敏感, 昼夜温差和季节变化可使构件热胀冷缩, 而产生附加应力和位移。施工荷载和温度效应的叠加作用下, 结构容易发生非均匀变形, 特别是大跨度桁架和屋盖体系的变形较为明显^[2]。实际工程中的监测数据表明, 10℃的温差就能使毫米级的节点位移发生变化, 这在高精度的安装需求中已经不能忽略。为此, 应从合理安排施工时序、控制荷载集中和采取温度补偿措施等方面入手, 使施工荷载和环境效应协同可控, 从而避免耦合作用诱发结构整体偏移。

1.3 连接方式与安装顺序对变形的影响

钢结构主要有高强螺栓和焊接两种连接形式, 其刚度形成和应力传递路径在建造过程中有所不同。焊接连接引入了明显的热输入和收缩变形, 如果控制不到位, 就容易造成节点区域应力集中和构件的局部变形; 而高强螺栓的连接虽然变形不大, 但是初拧和终拧时也会出现局部位移的调整。安装顺序的选择直接决定了结构受力体系形成的轨迹, 而不合理的吊装顺序将导致某些构件预先受到超设计荷载作用, 从而产生不可逆变形。实践证明, 通过优化连接工艺和安装顺序可以有效地把整体结构的变形限制在设计容许的范围之内, 从而提高了结构的施工精度和安全性。另外, 实际项目需要综合考虑施工阶段分段划分和受力重分配等特点, 进行关键节点分级控制和动态校核。借助数字化建设技术, 如BIM与实地监测数据的即时互动, 可以对部件的安装状况进行直观的管理, 并适时地调节施工的相关参数。对于焊接区域要合理安排焊接顺

作者简介: 马可(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

序和分层施焊工艺以降低温度梯度引起的附加应力。在使用高强度螺栓进行连接时,必须严格监控预紧力和施工的准确性,以确保连接的稳定性和可靠性。考虑施工组织、工艺优化及监测反馈机制等因素有利于实现结构变形全过程控制,以进一步提高复杂钢结构施工整体质量和工程效益。

2 大型复杂钢结构施工过程变形控制关键技术

2.1 施工方案优化与分阶段控制策略

在大型复杂钢结构施工过程中,对方案进行优选是控制变形的首要环节。通过施工前的全过程仿真与分析,明确各阶段结构受力转换路径,可以有效降低施工期间非设计状态引起的附加变形。当前工程实践普遍采用“分区安装,分步成型,分期分批封闭”的控制策略,将整体结构划分为若干受力相对独立的单元,并通过合理的吊装顺序及节点锁定时机使结构逐步形成稳定的系统。尤其在大跨度屋盖及超高层钢结构施工中,分阶段控制可以显著降低悬臂状态下挠度累积。结合 BIM 与施工仿真技术对关键节点进行预布置设计,使构件在最终受力状态下趋于设计位置,从而有效提高施工精度及结构稳定性。并在此基础上,根据现场实时监控结果,对施工方案进行动态优化与反馈修正。通过设置位移、应变、温度传感器等获取关键构件的响应数据,并与仿真结果进行比较分析,能够及时识别偏差来源并采取针对性措施加以调整。

2.2 高精度测量与实时监测技术应用

伴随工程精度需求持续增加,高精度测量以及实时监测技术在变形控制中的作用越发重要。全站仪、激光扫描和 GNSS 已完成核心节点毫米级监控,同自动化数据采集系统配合,能即时反馈结构变形发展趋势,为施工修改创造条件^[3]。在工程实际应用中,监测数据不仅用于结果验证,也用于动态修改施工参数,如吊装位置、预拱度及连接节点顺序,物联网智能监测系统逐步推广,实现多点同步监测及远程预警等功能,明显提高施工安全性以及响应能力。表 1 数据基于最近几年大型公共建筑及桥梁钢结构施工监测实例统计,

表 1 典型钢结构施工监测技术精度与适用范围对比表

监测技术类型	测量精度 (mm)	适用范围	单次监测周期 (min)	自动化程度
全站仪测量	±1.5	常规节点定位	10 ~ 20	中
激光扫描	±1.0	大范围空间结构	15 ~ 30	高
GNSS 监测	±5.0	超高层结构整体位移	5 ~ 10	高
光纤传感	±0.5	局部应变监测	实时连续	高

体现不同技术在精度、能力及适用场景的区别,为施工监测方案选择提供参照依据。

2.3 临时支撑与预应力调控方法

施工期合理布置临时支撑体系对控制结构变形具有十分重要的意义。临时支撑在施工阶段既要承受一部分荷载,又要通过支撑刚度和布置位置的调整来优化结构受力状态和减小构件变形累积^[4]。对大跨度结构往往采用可调支撑或者千斤顶系统来达到对施工期标高和位移进行精细调控的目的。预应力调控技术也被逐步应用于复杂钢结构的施工过程中,它通过给关键构件以预拉力或者预压应力的作用,使得施工阶段的结构形成一种有利的内力分布,来抵消一部分的施工变形。

3 大型复杂钢结构施工变形预测与数值模拟方法

3.1 有限元分析在施工模拟中的应用

有限元分析已经成为预测大尺寸复杂钢结构建造变形的核心手段,关键是要把建造过程变成一个可以计算出来的阶段力学问题^[5]。一是建立精细化的三维有限元模型,来考虑构件的几何非线性和材料非线性,从而提高计算精度;二是对分阶段的施工工况进行模拟,采用逐步加载和结构体系转换的方法,真实地反映了施工期内力和位移的演变情况。多引入施工误差和初始缺陷参数,以提高模型在实际工况下的适应性。以济南奥体中心体育场项目为例,采用有限元模拟的方法分析悬挑桁架的整个施工过程,并对吊装顺序和支撑布置进行优化,从而有效地控制关键节点的变形情况。

3.2 施工全过程仿真与误差修正机制

施工全过程仿真技术的实际应用说明,该技术借助设计模型以及施工动态过程相结合,可以持续地预测并纠正结构变形。一是搭建按时间顺序排列的施工模拟模型,把每个施工阶段当作单独的计算单元实行重复分析;二是利用现场监测数据不停修正模型参数,增强预测结果以及实际状况的吻合度;三是该模型设置误差反馈机制,反向输入测量偏差,实时地调整施工控制参数。

3.3 数据驱动的变形预警与评估模型

在智能建造持续发展的背景下,依据数据驱动模型的应用观点,该技术逐渐应用于钢结构变形预测与预警领域。详细来说:一是依据历史监测数据,建立机器学习模型实现结构变形趋势预测;二是借助多源数据融合,融合应变、位移等数据改良模型,加强了预测的稳定性与准确性,依赖风险评估体系;三是设置概率分析机制实现变形风险分级预警。研究结果表明,使用多任务学习方法更新结构参数,可以有效减少预测的不确定性,同时增强局部损伤以及异常变形的识别能力。

表2数据根据典型大跨度钢结构工程的模拟及实测资料被系统地整合,用来折射数值模拟和实际变形在各种跨度下的偏离程度,给施工预测模型的精度判定以及算法改良等提供基础数据的保障。

表2 典型钢结构施工仿真与预测参数统计表

项目 编号	结构跨 度 (m)	最大节点 位移 (mm)	仿真预测 值 (mm)	监测实测 值 (mm)	误差 (mm)
1	120	32.6	31.8	33.1	1.3
2	180	45.2	44.5	46	1.5
3	220	58.7	57.9	59.6	1.7
4	260	73.4	72.6	74.5	1.9
5	300	89.1	88	90.3	2.3

4 大型复杂钢结构施工变形矫正技术与质量保障措施

4.1 机械矫正与热矫正技术选择

大型复杂钢结构施工实行变形矫正,需依据变形类型、材料性能和构件尺寸融合地挑选合理的技术。机械矫正技术常用于弹性或者小塑性变形区间,使用液压矫正机和压力机分级地加载达到了恢复外形的目的。为了防止新的损害产生,这种校正技术的载荷一般都被限定在材料屈服强度的80%之内。热矫正技术利用钢材的热胀冷缩特性,借助局部加热产生收缩应力,然后抵消原有的变形。该方法适用于焊接残余变形以及较繁复构件的矫正,一般会控制加热温度在600~900℃范围内,以避免过烧。

4.2 分区分步调整与精细化校正方法

根据大型结构良好的整体性及变形传递的复杂性,分区分步调节变成目前主流的矫正方案。该方法把结构划分为若干控制单元、逐次实行调节,有效避免局部矫正产生新的整体偏差。实行时首先校正主要受力

构件的整体线形,再将节点区域及局部构件实行精细化校正,保证变形逐步收敛。实践经验说明,合理控制各项矫正量并改良顺序可避免重复矫正造成的材料性能劣化。

4.3 质量控制体系与验收标准完善

钢结构变形矫正最终结果取决于健全的质量控制体系和严格的验收标准。在目前的工程操作中,必须严格按照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205-2020)等相关标准来操作,确保对构件的直线度、平面度和节点偏差进行持续的监控。建设过程中要建立闭环管理机制,以保证各阶段矫正结果达到设计要求。加强焊接区域、加热区域及其他关键部位质量检测,以避免由于矫正而出现裂纹或者性能退化。信息化质量管理平台推出,可以实现对施工数据的全程追溯,增强了验收工作的科学性和透明度。通过标准化流程和数字化手段的结合,可以有效提高大型复杂钢结构施工整体的质量水平和安全保障能力。

5 结束语

大型复杂钢结构的施工变形存在多因素耦合和阶段性演化的特点,需要采用系统化的技术手段综合控制。研究表明,根据施工阶段的力学特征进行方案优化和分阶段控制是减少初始变形积累的关键;高精度的监测和数据反馈机制可以达到动态调控的目的;有限元和数据驱动模型对变形的预测提供了可靠的支持。同时,合理地选择矫正工艺和健全的质量控制体系可以有效地确保结构成型的精度。总体上看,多技术融合和全过程控制,是提高复杂钢结构建设质量和安全的核心途径路径。

参考文献:

- [1] 齐宏拓,刘界鹏,程国忠,等.基于点云数据的大型复杂钢结构智能化施工方法[J].土木工程学报,2024,57(01):65-75.
- [2] 马晓波.施工荷载耦合作用下超大直径盾构隧道结构力学响应[J].城市轨道交通研究,2025,28(09):63-71.
- [3] 高芳芳.基于高精度测量技术的管道架工程沉降变形分析与控制方法研究[J].科技资讯,2025,23(08):139-141.
- [4] 唐海峰.城市高架体系临时支撑的选型与布设分析[J].科技创新与应用,2023,13(08):118-121.
- [5] 郭娜,宋浩,杨建伟,等.城市轨道交通车辆制动盘散热筋设计及有限元分析[J].城市轨道交通研究,2025,28(05):283-287.