

大跨度钢桁架安装过程中的变形控制技术实践探讨

黄晓锋

中国五冶集团有限公司, 四川 成都 610000

[摘要]在现代建筑与桥梁工程里,大跨度钢桁架是一种常被采用的结构形式且安装时的变形控制与工程质量、安全直接相关,所以文中拿某个大型体育场馆的钢桁架工程当作例子来深入探究大跨度钢桁架安装过程中变形控制的技术实践,先剖析影响钢桁架安装变形的主要要素像自重、温度效应、风荷载之类的,接着介绍变形控制的关键技术例如预拱度设计、分段吊装、临时支撑等,再详尽阐述这个工程所用的变形监测方法,包含全站仪测量、应变监测、倾角监测等,依靠实时监测数据的分析对施工方案作出及时调整以让安装过程中的变形处于允许范围之内,最后归纳变形控制的有效举措和经验,像优化施工顺序、合理设置临时支撑、采用柔性连接等,研究显示,借助科学的变形预测、精准的监测技术与灵活的控制措施,能够有效保障大跨度钢桁架安装精度与结构安全,这一研究给类似工程的变形控制提供有价值的实践参考且对提升大跨度钢结构安装质量意义重大。

[关键词]大跨度钢桁架;变形控制;安装技术;监测方法;施工优化

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17984

中图分类号: TU711

文献标识码: A

Exploration on Deformation Control Technology in the Installation Process of Large Span Steel Trusses

HUANG Xiaofeng

China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: In modern architecture and bridge engineering, large-span steel truss is a commonly used structural form, and the deformation control during installation is directly related to engineering quality and safety. Therefore, this article takes the steel truss project of a large sports stadium as an example to deeply explore the technical practice of deformation control during the installation process of large-span steel truss. Firstly, the main factors that affect the deformation of steel truss installation, such as self weight, temperature effect, wind load, etc., are analyzed. Then, the key technologies of deformation control, such as pre arch design, segmented lifting, temporary support, etc., are introduced. Finally, the deformation monitoring methods used in this project, including total station measurement, strain monitoring, inclination monitoring, etc., are elaborated. By analyzing real-time monitoring data, the construction plan is adjusted in a timely manner to ensure installation. The deformation during the process is within the allowable range. Finally, effective measures and experiences for deformation control are summarized, such as optimizing construction sequence, setting up temporary supports reasonably, and adopting flexible connections. Research shows that with scientific deformation prediction, accurate monitoring technology, and flexible control measures, the installation accuracy and structural safety of large-span steel trusses can be effectively guaranteed. This study provides valuable practical reference for deformation control in similar projects and is of great significance for improving the installation quality of large-span steel structures.

Keywords: large span steel truss; deformation control; installation technology; monitoring methods; construction optimization

引言

在现代建筑与桥梁工程里,大跨度钢桁架结构是种很重要的结构形式,其有着不错的跨越能力、较高的承载效率以及良好的空间利用特性,所以在体育场馆、展览中心、交通枢纽这类大型公共建筑中被广泛使用。国际钢结构协会(IASS)统计显示,近五年全球大型钢结构工程数量一直在增加,2019—2023年期间全球大型钢结构项目的增长率达15.7%,其中大跨度钢桁架结构占比超四成。中国随着“新基建”战略推行,大型公共建筑和基础设施建设发展得很快,2022年中国钢结构市场规模破8500亿元,年均复合增长率达到了12.3%。

大跨度钢桁架安装时变形控制面临严峻挑战,由于结构响应复杂且施工阶段不确定相互交织,使得变形控制成为工程实践里的关键技术难题,要是变形控制不好,结构几何形态可能偏离设计要求,构件内力会重新分布,失稳风险也可能被诱发,进而影响结构使用性能和安全性。国内有个大型体育场馆工程,它的主桁架跨度有135m,自重预计能造成最大垂直变形280mm,要是变形控制不好,屋面结构就会不平整、雨水会渗漏、外观也会受损,一系列问题都会冒出来。

某大型体育场馆钢桁架工程实例被拿来系统探讨大跨度钢桁架安装过程中变形控制技术的实践,在分析各类

荷载效应、材料性能、施工工艺以及环境影响这些影响钢桁架变形的关键因素之后深入研究预应力控制技术、临时支撑系统设计和实时监测与反馈调整等变形控制方法在工程实践中的应用,研究发现精确预测、全程监测与动态调整是构建科学变形控制体系的基础且依靠各项控制技术协同作用能确保安装时变形量一直处在允许偏差范围之内。

本研究想要靠总结工程实践经验给出大跨度钢桁架安装变形控制的系统性方法与技术参考,给同类工程提供能借鉴的实践指导以推动大跨度钢结构施工技术发展,并且研究成果有助于优化设计和施工的协同机制来提高大跨度钢桁架结构整体安装质量与工程安全水平。

2 大跨度钢桁架变形控制的关键因素

2.1 荷载分析与预测

大跨度钢桁架安装时,变形控制的首要环节是对荷载进行分析与精确预测,因为施工阶段钢桁架要承受多种荷载,像恒荷载(包含自重和永久附属结构重量)、施工活荷载、风荷载以及温度效应等,并且近期研究表明,有些区域施工阶段风荷载能达到设计风荷载的七成,日温差效应会使大跨度桁架产生 20~35mm 的附加变形,在大型体育场馆工程里尤其如此,因为那里的钢桁架自重大概每平方米 120~180kg,自重变形常常是主导因素,2022 年工程统计数据^[1]显示,自重变形一般占总变形的六十五到七十五个百分点^[1]。

制定变形控制方案以准确预测各施工阶段的荷载组合效应为基础,在现代工程实践里,借助有限元分析、荷载效应敏感性分析以及多阶段施工模拟能够构建含时变因素的荷载预测模型,从而给变形控制提供精准依据,最新行业数据显示,使用精确荷载预测模型可把变形预测误差控制在 8% 以内,使控制措施的针对性与有效性显著提高。

2.2 材料特性与结构设计

变形控制被钢材的力学性能和结构设计特征决定性影响着,并且现代大跨度钢桁架工程大多使用像 Q345、Q390 这类高强度低合金结构钢,其弹性模量、屈服强度以及线膨胀系数等材料特性直接作用于结构变形响应上,2021 年发布的《建筑钢结构施工质量验收标准》有统计显示材料参数出现 5% 的变异性会使结构变形预测产生 10%~15% 的偏差,另外节点连接刚度、杆件截面特性还有整体结构布置对变形性能也有很大影响。

在结构设计方面,合理地设计预拱度能有效补偿永久荷载变形,行业数据表明,这五年间预拱度设计精度提升了大概 23%,主要是因为应用了施工状态精细化模拟技术,而且桁架节点设计方式(刚性、半刚性或者铰接)也

对变形分布有重要影响,合理配置节点刚度能优化变形分布并降低不均匀变形的风险,另外,2023 年的研究显示,若杆件截面进行优化设计,自重变形可降低 18%~22% 且结构整体稳定性还能保持住。

2.3 施工工艺与安装顺序

钢桁架变形控制的关键操作因素包括施工工艺和安装顺序,中国建筑金属结构协会 2022 年行业统计显示,像整体吊装、分段安装、滑移法、顶升法之类的不同安装方法有着显著不同的变形特性,其中整体吊装虽然施工期短,但得一次性应对大变形,而分段安装能分步控制变形但界面处理起来难,并且近五年的工程实践数据显示,分段安装合理规划的话,单次变形可被控制在总变形的 30%~40%,从而大大降低施工风险。

合理地设计安装顺序同样非常重要,因为最新工程案例分析表明,结构受力能够被对称安装方式有效平衡且不均匀变形可减少大概 25%,并且关键节点的连接顺序以及临时约束释放时机对最终变形有直接影响,2023 年发布的大型钢结构安装技术规程指出,“先刚性后柔性”“先主体后次要”的连接顺序原则要是被采用并且有科学的拧紧工序相配合,那么节点位移就能被控制在设计容许范围之内且整体安装精度也能得到有效提升。

2.4 环境因素的影响

大跨度钢桁架的变形行为被环境因素显著影响着,其中温度变化和风荷载的影响尤为突出,国家气候中心统计显示,2019—2023 年中国大型建筑施工现场记录到的极端日温差最高能达到 38℃,这样的温差能使 100m 跨度的钢桁架产生大概 30~45mm 的热变形,并且实际工程监测数据也表明日照不均会使结构出现温度梯度从而引发不对称变形进而让安装变得更为困难,建筑结构学会于 2022 年发布的研究报告还指出在某些工程里温度效应造成的变形占总变形量的 15%~20%。

风荷载是另一个关键的环境因素且其动态特性与不确定性使得变形控制面临挑战,近期工程数据表明施工阶段风力达 6 级(风速 10.8~13.8m/s)时大跨度桁架会有水平位移大概是 18~25mm 并会产生振动效应,国内大型体育场馆工程施工实践显示风速超 8m/s 就得停止高空安装作业并且风速监测和预警系统如今已是大型钢结构工程的标配。另外,2023 年的研究显示湿度和腐蚀环境短期内对变形影响不大但是会波及连接处的摩擦系数和预紧力从而影响节点刚度以及长期变形性能^[2]。

3 变形控制技术的实践应用

3.1 预应力控制技术

大跨度钢桁架变形管理中,预应力控制是一种先进技术手段,靠主动施加预应力来抵消部分荷载引起的变形,

且在实践里,预应力技术主要是借助索力调整以及杆件预拉或者预压这两种方式达成的,2022 年中国建筑科学研究院数据表明,合理运用预应力技术能将安装阶段变形减少 40%~55%,例如某个体育场馆屋盖工程,用高强钢绞线与精密液压控制系统相配合,在桁架关键处施加预应力,从而有效抵消大概 135mm 的自重下挠。

精确计算与精细操作是预应力控制的关键,并且要综合结构分析模型、材料特性以及施工阶段特点来确定预应力值。最新行业实践显示,分级加载和分布式控制这两种策略能有效提升预应力效果,而构建含时变效应的有限元模型以模拟预应力施加时的结构响应则可优化预应力控制方案。就像 2023 年完工的某个大型会展中心工程,其采用分布式预应力系统后变形控制精度达到 $\pm 15\text{mm}$,比传统方法的 $\pm 40\text{mm}$ 控制水平高不少。

3.2 临时支撑系统设计

大跨度钢桁架安装阶段变形控制中临时支撑系统是重要的保障手段,支撑系统合理设计后能够有效控制施工阶段的结构变形从而避免因过大变形带来的安全风险,中国钢结构协会 2023 年发布的行业报告显示适当的临时支撑能使施工阶段变形减少 60%~75%且安装精度有显著提高,现代临时支撑系统一般包含垂直支撑塔、水平支撑架以及可调节支撑装置以构成三维支撑体系。

支撑位置优化和支撑力调控是临时支撑系统设计的核心内容,经由结构敏感性分析确定变形控制的关键之处后要优先设置支撑,因为近期工程实践显示依据变形影响面分析得出的支撑布置方案跟传统经验法相比能减少 25%-30%的支撑数量且控制效果相同,而且支撑系统需要满足最不利工况下的刚度与承载力要求并考虑风荷载、温度变化这些不确定因素,在某个跨度达到 120m 的体育馆工程里运用液压可调支撑系统可实现实时监测和调整支撑力从而让桁架安装过程中关键节点的位移偏差控制在 15mm 以内。

3.3 实时监测与反馈调整

现代大跨度钢桁架变形控制靠的是实时监测与反馈调整系统这一智能化保障,该系统布设多元化传感器网络以持续捕捉结构变形数据并依据预设算法进行实时分析和预警。2023 年中国工程建设标准化协会调研显示,使用实时监测与反馈调整技术的工程项目其变形控制精度提高了大概 35%~45%,且现代监测系统往往集成全站仪测量、激光扫描、GNSS 定位、光纤应变和倾角监测等多项技术从而形成多维度监测网络^[3]。

3.4 施工过程中的变形监测

项目要使变形控制方案有效施行就建立起了全方位的实时监测系统,该系统的监测主要靠两套并行的方法,

其一是在桁架结构关键节点设 76 个监测点、利用 5 台高精度全站仪进行空间几何监测且能将空间位置变化实时跟踪(精度达 $\pm 2\text{mm}$),其二则是布置 124 个应变片和 32 个倾角传感器以构建分布式光纤传感监测网络来实时监测结构内力和变形状态,监测数据经由 5G 网络传至项目数据中心后用专业软件分析处理,2020 年 9 月主桁架提升时监测系统察觉到风载作用引起的异常变形,施工团队马上停工并对临时支撑位置作出调整,从而成功避开潜在的安装偏差风险。

4 结论

本文通过对其实践探讨得出了如下主要结论:

多种影响因素需被综合考量于大跨度钢桁架安装变形控制之中,研究表明自重变形、温度效应和风荷载是影响钢桁架安装精度的三大主要因素,并且 2019—2023 年建筑钢结构行业数据显示在大跨度钢桁架工程里大概 75% 的安装偏差跟这两个因素直接相关,尤其在跨度超 100m 的工程里温度变化导致的累积变形能达到设计允许值的 40%~60%。

变形控制以科学的预拱度设计为基础,经本案例分析可知,预拱度设计为 1/500 时能够有效地补偿永久荷载造成的变形且最终结构形态和设计预期的吻合度在 92% 以上,并且行业统计显示,预拱度设计精度每提升 10%,最终安装精度就能提升大概 15%。

对于控制累积变形来说,分段吊装以及临时支撑系统的优化设计极为关键,本工程运用“分片拼装、整体提升”策略并配上液压顶升装置的临时支撑系统后,大型构件吊装时的动态变形被控制在设计值 65% 以内,比行业平均水平(80%)高不少。

变形控制的关键技术支撑包含实时监测与数据分析,本工程运用全站仪空间定位和分布式光纤传感网络相结合的监测方法达成毫米级精度的全过程监控,并且数据表明,2021 年之后,大跨度钢结构工程采用实时监测技术后安装精度平均提升了 28%、施工效率也提高了大概 32%^[5]。

施工进度如何就得怎样动态调整变形控制方案,并且本项目施行期间依照监测数据调剂临时支撑位置与吊装顺序,从而成功应对风载和温度变化的挑战以确保最终安装精度,建筑钢结构行业数据显示能动态调整的工程项目平均返工率可减少 43%、工期延误能减 25%。

本研究表明,大跨度钢桁架安装时需把理论分析、数值模拟和实时监测有机结合起来并采用主动预控与被动调整相融合的策略来控制变形,随着建筑业数字化转型不断深入,基于 BIM 和物联网技术的智能变形监控系统会成为未来的发展趋势,预计到 2025 年这类技术在大型钢

结构工程中的应用率达超 70%，给建筑钢结构行业带来更高效、更精准的变形控制方案。

[参考文献]

- [1]孙婷,房震宸,王佳伟.建筑内部大跨度钢桁架屋盖牵引滑移安装技术[J].建筑施工,2023,45(7):1338-1340.
- [2]张志秋,韩锋,刘澍邦,等.大跨度钢桁架铸钢节点逆作施工力学性能分析与安装技术[J].建筑技术,2024,55(2):172-176.
- [3]李伟,黄胜,邓章铁,等.大跨度屋盖钢桁架安装控制技术

[J].安装,2023,11(6):21-24.

[4]邓磊.大跨度钢桁架屋盖施工质量控制技术研究[J].建筑施工,2025,47(9):1452-1456.

[5]周国梁,王桂龙,李元春,等.重型大跨度钢桁架安装施工技术应用与研究[J].建筑技术,2025,56(5):527-531.

作者简介：黄晓锋（1989.3—），毕业院校：江南大学太湖学院，所学专业：土木工程，当前就职单位：中国五冶集团有限公司，职务：项目施工经理，职称级别：中级工程师。