

超高层建筑钢结构施工关键技术及质量控制

钟文球

福建省永益晟建设工程有限公司

DOI:10.12238/btr.v8i4.4729

[摘要] 随着城市化进程的不断加快,超高层建筑如雨后春笋般涌现,钢结构以其强度高、自重轻、抗震性能好等优势,在超高层建筑中得到了广泛应用。然而,超高层建筑钢结构施工面临着安装精度要求高、吊装难度大、焊接质量把控难等诸多挑战。本文旨在深入研究超高层建筑钢结构施工的关键技术及质量控制要点,通过分析钢结构构件的工厂预制与现场吊装协同技术、大跨度钢结构节点的焊接工艺优化、施工过程中结构变形的实时监测与校正技术等,结合实际工程案例,形成一套系统的超高层钢结构施工技术体系,为同类工程的质量安全管理提供参考。

[关键词] 超高层建筑; 钢结构; 施工技术; 质量控制

中图分类号: TU208.3 文献标识码: A

Key technology and quality control of steel structure construction in super high-rise building

Wenqiu Zhong

Fujian Yongyisheng Construction Engineering Co., LTD

[Abstract] With the rapid urbanization, super high-rise buildings are emerging like bamboo shoots after rain. Steel structures, renowned for their high strength, lightweight characteristics, and excellent seismic performance, have become widely adopted in such constructions. However, steel structure construction for super high-rise buildings faces multiple challenges including stringent installation precision requirements, complex hoisting difficulties, and rigorous quality control for welding. This paper conducts an in-depth study on key technologies and quality control measures for steel structure construction in super high-rise buildings. Through analyzing collaborative techniques for factory prefabrication and on-site hoisting of steel components, optimization of welding processes for large-span steel structure joints, and real-time monitoring and correction of structural deformation during construction, combined with practical engineering cases, we establish a systematic technical framework for super high-rise steel structure construction. This provides valuable references for quality and safety management in similar engineering projects.

[Key words] super high-rise building; steel structure; construction technology; quality control

引言

近年来,国内多地超高层项目因焊接工艺缺陷、吊装精度不足等问题,出现结构变形超标、工期延误等情况,甚至引发安全事故。据统计,超高层建筑钢结构施工的质量问题中,焊接缺陷占比达42%,安装偏差占比28%,这些数据凸显了关键技术突破与质量控制体系完善的迫切性。在此背景下,本文聚焦超高层建筑钢结构施工的核心矛盾,以“技术创新-质量管控-安全保障”为主线,系统研究工厂预制与现场吊装的协同机制、大跨度节点焊接的工艺优化路径、结构变形的动态监测与校正方法,并结合实际工程案例验证技术体系的可行性,旨在为超高层建筑钢结构施工提供兼具理论价值与实践指导意义的解决方案,推动行业

施工技术水平与质量安全管理能力的双重提升。

1 超高层建筑钢结构施工现状与特点

1.1 施工现状

近年来,我国超高层建筑发展迅猛,钢结构作为超高层建筑的主要结构形式之一,其应用范围不断扩大。在施工技术方面,我国已经具备了一定的实力,能够完成多项复杂的超高层建筑钢结构施工项目。但同时,在施工过程中也暴露出一些问题,如施工精度控制不足、焊接质量不稳定、施工安全隐患较多等,这些问题严重影响了工程的质量和进度^[1]。

1.2 施工特点

构件体型大、重量重:超高层建筑钢结构构件通常体型较

大,重量较重,这给运输和吊装带来了很大的困难。安装精度要求高:超高层建筑对结构的垂直度、平面度等精度要求极高,一旦出现偏差,可能会影响整个建筑的稳定性和安全性。高空作业多:超高层建筑钢结构施工多在高空进行,作业环境复杂,安全风险较大。施工周期长:超高层建筑工程量大,施工工艺复杂,导致施工周期较长,需要合理安排施工进度,确保工程按时完成。

2 超高层建筑钢结构施工关键技术

2.1 钢结构构件的工厂预制与现场吊装协同技术

2.1.1 工厂预制技术

工厂预制是超高层建筑钢结构施工的重要环节,其质量直接影响到现场安装的精度和效率。在工厂预制过程中,需以毫米级精度为标准严格遵循设计图纸加工,针对箱型柱、H型钢梁等核心构件,采用数控切割下料、数控钻床打孔等精密加工工艺,确保腹板与翼缘板的垂直度误差控制在1mm/m以内,构件长度偏差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。为提升预制效率,可引入机器人焊接生产线,通过多机械臂协同作业实现角焊缝的全自动焊接,不仅将焊接效率提升40%,还能使焊缝余高稳定控制在1-3mm范围,大幅减少人为操作导致的质量波动。质量检验环节实施“三检制”:首件检验需进行100%无损检测(UT探伤覆盖率100%、MT探伤覆盖率30%);批量生产时每50件随机抽取3件进行力学性能试验(包括拉伸、冲击、弯曲试验);出厂前逐件进行激光三维扫描,生成数字化检测报告,确保构件尺寸偏差、形位公差等指标全部符合《钢结构工程施工质量验收标准》GB50205的一级要求,杜绝不合格构件流入施工现场。

2.1.2 现场吊装技术

现场吊装需基于BIM模型进行工况仿真,制定“分区段、分批次、对称吊装”的专项方案。根据构件参数选型:起吊重量50t以下的梁构件采用QTZ800塔式起重机(最大幅度起重量8t),100t以上的巨型柱则选用250t汽车吊配合超起装置。吊装索具采用高强度合金钢丝绳(安全系数 ≥ 6),针对异形构件定制专用吊具,如箱型柱采用四点平衡吊具,通过液压同步装置控制起吊角度偏差 $\leq 1^\circ$ 。吊装过程中运用“双机抬吊+全站仪实时监测”技术:主吊机负责垂直起升,辅助吊机控制构件姿态,两台LeicaTS60全站仪分别监测构件顶部和底部的三维坐标,数据实时传输至吊装指挥系统,当垂直度偏差超过1/1000柱高时自动报警,指挥人员通过调整吊机幅度进行动态校正,确保构件安装就位精度控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。每完成一个吊装单元后,立即进行临时固定,采用M30高强度螺栓(终拧扭矩值480-520N·m)连接,经扭矩扳手复检合格后方可松钩^[2]。

2.1.3 协同技术

构建“预制-运输-吊装”全流程协同体系,依托BIM平台实现信息闭环管理。工厂端在构件加工完成后,将包含材质证明、检测报告、二维码标识的信息录入BIM模型;运输阶段通过GPS定位系统实时追踪构件运输状态,结合气象数据优化运输路线,避免极端天气对构件造成损伤;施工现场利用移动终端扫描构件二维码,自动关联BIM模型中的预制信息与安装要求,实现数

据实时校验。针对超高层施工中常见的“构件错位”问题,通过BIM模型预演吊装顺序,提前规划临时堆放区域与吊装通道,确保每日进场构件数量与吊装计划匹配度 $\geq 95\%$ 。建立跨组织协同机制,每周召开工厂与现场视频例会,基于BIM模型共享进度数据,对偏差超过3天的工序及时调整资源配置,实现预制产能与吊装需求的动态平衡。

2.2 大跨度钢结构节点的焊接工艺优化

2.2.1 焊接材料的选择

需遵循“等强度匹配”原则,针对Q355B母材选用E5015-G低氢型焊条(抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$),对于Q460C高强度钢则匹配E6015-D1低合金钢焊条,确保焊缝金属屈服强度与母材差值控制在 $\pm 30\text{MPa}$ 以内。焊接材料进场前需进行扩散氢含量检测($\leq 5\text{mL}/100\text{g}$)及力学性能复验,低温环境($\leq 0^\circ\text{C}$)施工时焊条需经 $350^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 烘干后存入80-100 $^\circ\text{C}$ 保温筒,领用后4小时内未使用需重新烘干(累计烘干不超过2次)。

2.2.2 焊接工艺参数的优化

采用正交试验法确定最优参数组合:对于板厚20-30mm的节点焊缝,埋弧焊选用焊接电流600-650A、电压32-36V、焊接速度30-35cm/min,保护气体采用80%Ar+20%CO₂混合气体(流量20-25L/min)。现场施焊时配备数字化焊接参数记录仪,实时监控电流电压波动(偏差 $\leq 5\%$),每道焊缝设置工艺卡记录焊工编号、施焊时间及参数曲线,确保可追溯性。

2.2.3 焊接变形的控制

实施“三维反变形预控+分层对称焊接”工艺:根据有限元模拟结果,在节点组装时预设1-2 $^\circ$ 反变形量,采用双人对称分段退步焊(每段长度300-500mm)。焊接前对坡口两侧150mm范围进行电加热预热(温度80-120 $^\circ\text{C}$),层间温度保持在150-250 $^\circ\text{C}$;焊后立即用陶瓷保温棉覆盖缓冷($\geq 250^\circ\text{C} \times 4\text{h}$),并采用振动时效设备消除残余应力(振动频率20-50Hz,持续30min),最终使节点焊接变形量控制在L/1000(L为节点最长边)以内。

2.3 施工过程中结构变形的实时监测与校正技术

2.3.1 实时监测技术

构建“天地一体”监测网络:在核心筒钢柱顶部布设8个GPS监测点(采样频率1Hz,平面精度 $\pm 2\text{mm}$),外围框架每3层设置1个全站仪监测断面(采用LeicaTS60全站仪,测角精度0.5"),关键节点植入光纤光栅传感器(应变测量精度 $\pm 2\mu\epsilon$)。数据通过5G模块传输至BIM平台,建立变形预警模型:当垂直度偏差超1/1500柱高、平面位移超30mm时自动触发三级预警,同步推送至管理人员移动端。每日生成变形趋势曲线,结合温度、风力等环境参数进行相关性分析,提前预判结构变形规律。

2.3.2 校正技术

针对不同变形类型采取分级处理:垂直度偏差10-20mm时,通过调整临时支撑顶推力(每级顶推5mm,间隔30min)进行微调;偏差20-50mm采用“双机复吊”校正法,主吊机提升100mm后辅助吊机横向顶推,配合全站仪动态监测直至偏差 $\leq 5\text{mm}$ 。对于焊接残余应力导致的变形,采用局部火焰矫正(加热温度600-800 $^\circ\text{C}$,

加热范围 \leq 构件截面 $1/3$), 矫正后24h内禁止施加荷载, 确保校正精度控制在设计允许值的 $1/2$ 以内^[3]。

3 超高层建筑钢结构施工质量控制要点

3.1 原材料质量控制

实行“双验证”准入制度: 钢材进场时需核出厂材质证明书(含力学性能、化学成分、探伤报告), 并按炉批号抽样送检(每60t为一检验批), 重点检测屈服强度、抗拉强度及伸长率(Q355B钢材屈服强度 $\geq 355\text{MPa}$)。高强度螺栓需进行扭矩系数试验(每批8套), 摩擦面抗滑移系数测试(每2000t钢构件为一批), 检测不合格的批次立即启动退场程序并追溯来源。焊接材料按型号分区存放, 焊条库保持相对湿度 $\leq 60\%$, 建立材料追踪台账, 实现从进场到使用的全程可追溯。

3.2 施工过程质量控制

3.2.1 构件安装质量控制

采用“三线控制法”: 以轴线控制网为基准, 每层设置20个高程控制点(精度 $\pm 2\text{mm}$), 利用全站仪进行三维定位, 确保柱垂直度偏差 $\leq H/1000$ (H为柱高)且不超过 15mm 。节点连接时, 高强度螺栓初拧扭矩为终拧值的50%, 终拧后48h内完成扭矩复拧(允许偏差 $\pm 10\%$), 连接板间隙超 3mm 时采用楔形钢板填实, 严禁强行拉拢构件。

3.2.2 焊接质量控制

实施“焊工持证+焊材匹配”双管控: 焊工需持特种设备作业人员证(限相应焊接方法), 每月进行实操考核(合格率低于90%暂停施焊)。焊接接头按5%比例进行射线探伤(一级焊缝100%探伤), 发现气孔、夹渣等缺陷时, 采用碳弧气刨清除后重新焊接, 同一部位返修不超过2次。焊后24h内完成外观检查, 要求焊缝余高 $0\sim 3\text{mm}$, 咬边深度 $\leq 0.5\text{mm}$ 。

3.2.3 吊装质量控制

建立吊装设备“健康档案”: 塔式起重机每月检测起重力矩限制器、高度限位器(误差 $\leq 5\%$), 钢丝绳每捻距断丝数超10%立即更换。吊装前进行试吊(离地 300mm 悬停 10min), 检查吊具受力状态及构件平衡度。就位后立即测量偏差, 柱顶位移超 10mm 时重新调整, 每天作业前复核吊机基础沉降(允许偏差 $\leq 15\text{mm}$), 遇6级以上大风停止吊装作业。

3.3 施工安全控制

实行“三级安全教育+专项交底”制度: 新工人进场需完成公司、项目、班组三级培训(累计不少于24学时), 高空作业人员额外进行吊篮操作、安全带使用等专项考核(合格率100%方可上岗)。现场设置全封闭安全防护网(网眼密度 ≥ 2000 目/ 100cm^2), 临边作业区安装 1.2m 高防护栏杆(立杆间距 $\leq 2\text{m}$), 电梯井口采用可开启式防护门(高度 1.8m)。每周开展“全覆盖”安全巡查, 重点检查吊装设备制动系统、高空作业平台锚固点、临时用电接地电阻($\leq 4\Omega$), 发现隐患立即下达整改单(限期24h闭环), 每月组织应急演练(模拟高空坠落、物体打击事故), 提升现场处置能力。

4 工程案例

以某超高层建筑钢结构施工项目为例, 该建筑高度为 300m , 采用钢结构框架-核心筒结构体系。在施工过程中, 采用了本文所研究的关键技术和质量控制要点, 取得了良好的效果。

在钢结构构件的工厂预制与现场吊装协同方面, 采用BIM技术建立了三维模型, 对构件的预制、运输和吊装过程进行了模拟, 提前发现了多个问题, 并及时进行了调整, 确保了工厂预制与现场吊装的顺利进行。在大跨度钢结构节点的焊接工艺优化方面, 通过试验确定了最佳的焊接工艺参数, 并采用对称焊接和分段焊接等方法控制焊接变形, 焊接质量得到了有效保证。在施工过程中结构变形的实时监测与校正方面, 采用全站仪和传感器进行实时监测, 及时发现了结构的异常变形, 并采取了有效的校正措施, 确保了结构的稳定性和安全性。

通过对该项目的施工实践表明, 本文所研究的超高层建筑钢结构施工关键技术及质量控制要点是可行的, 能够有效提高工程的施工质量和安全性, 为同类工程的施工提供了参考。

5 结论与展望

5.1 结论

钢结构构件的工厂预制与现场吊装协同技术是确保施工顺利进行的关键, 采用BIM技术和信息共享平台可以实现两者的无缝对接。大跨度钢结构节点的焊接工艺优化是保证焊接质量的重要措施, 合理选择焊接材料、优化焊接工艺参数和控制焊接变形可以提高焊接接头的强度和韧性。施工过程中结构变形的实时监测与校正技术可以及时发现结构的异常变形, 并采取有效的校正措施, 确保结构的稳定性和安全性。加强原材料质量控制、施工过程质量控制和施工安全控制可以有效提高工程的施工质量和安全性。

5.2 展望

随着科技的不断进步, 超高层建筑钢结构施工技术也将不断发展。未来, 应进一步加强对智能化施工技术的研究, 如智能吊装、智能焊接、智能监测等, 提高施工效率和质量。同时, 应加强对绿色施工技术的研究, 减少施工过程对环境的影响。此外, 还应加强对新型钢结构材料的研究和应用, 提高结构的性能和安全性。相信在不久的将来, 我国超高层建筑钢结构施工技术将达到一个新的水平。

[参考文献]

- [1]岳忠翔, 苏志华, 杨春荣. 复杂环境下超高层钢结构项目施工组织策略研究[J]. 工程质量, 2024, 42(08): 74-76+86.
- [2]徐涛, 周岳峰, 成桃园. 超高层钢结构环带桁架施工技术[J]. 广州建筑, 2023, 51(5): 49-52.
- [3]钟宗瑞, 张晋, 张兴国. 钢结构膨胀型防火涂装施工技术应用及质量控制[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(08): 50-52.

作者简介:

钟文球(1972--), 男, 畲族, 福建省厦门市人, 大专, 中级工程师, 研究方向: 建筑工程技术。