

空间受限条件下大跨度钢结构逆序施工关键技术研究

盛福衡 王 辉 张 建 宋泽明 王亚威

中国建筑第八工程局有限公司, 安徽 合肥 230000

[摘要]对于多层会展类建筑由于场地狭小, 大型起重设备无法进场、大跨度钢构件吊装困难等问题, 提出一种逆序施工技术。该技术采取自上而下的施工程序, 把大跨度钢梁在工厂分段预制, 然后散件运到现场, 搭建格构式临时支撑胎架, 先完成顶部屋盖钢结构的安装合龙, 待其形成完整的受力体系之后, 再从上往下一层层安装下部梁柱。以阜阳智谷项目登录厅为依托, 采用分段吊装高空拼装方案, 根据有限元分析结果确定支撑体系及结构受力安全, 通过施工监测和主动纠偏来保证成型精度。

[关键词]大跨度钢结构; 逆序施工; 受限空间; 临时支撑胎架; 分段吊装

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20213

中图分类号: TU74

文献标识码: A

Research on Key Technologies for Inverse Construction of Large-span Steel Structures under Spatial Constraints

SHENG Fuheng, WANG Hui, ZHANG Jian, SONG Zeming, WANG Yawei

China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract: For multi-story exhibition buildings with limited space, issues such as the inability to deploy large lifting equipment and the difficulty in hoisting large-span steel components, an inverse construction technique is proposed. This method adopts a top-down construction sequence, where large-span steel beams are prefabricated in segments in the factory, then transported to the site in individual pieces. A lattice-type temporary support formwork is erected to complete the installation and closure of the top roof steel structure first. Once a complete load-bearing system is formed, the lower beam-column assembly is installed layer by layer from the top down. Taking the Fuyang Zhigu Project's registration hall as an example, a segmented hoisting and high-altitude assembly solution was implemented. Based on finite element analysis results, the support system and structural load-bearing safety were determined, ensuring forming accuracy through construction monitoring and active deviation correction.

Keywords: long-span steel structure; reverse sequence construction; confined space; temporary support formwork; segmental hoisting

大型公共建筑体育场馆、会展中心等很多使用大跨度钢结构来创造开阔的室内空间和具有标志性的建筑外形。该类建筑大多数是多层结构, 屋面跨度大, 底层为梁柱结构。常规施工使用大型履带吊自下而上逐层吊装, 但是在城市建成区或者园区内部时, 场地狭小, 大型设备无法进场或者站位, 下部楼板也无法承受设备的荷载, 施工十分困难。就这个矛盾而言, 一些工程采取逆序施工的方式, 先搭设好上部结构之后再进行下部楼层的施工, 但是目前的研究大多只是个案分析, 并没有形成系统的总结。

1 空间受限条件下逆序施工工艺原理与总体思路

逆序施工的关键就是改变传统的自下而上的安装顺序。其工艺原理是把大型钢构件在工厂合理分段预制, 以散件的形式运到现场, 在预定的安装位置搭设临时支撑胎

架, 形成高空作业平台, 先吊装并合龙顶部大跨度屋盖钢结构, 使其先行形成稳定的受力体系, 待顶部结构具备独立承载能力后再自上而下逐层安装下部楼层梁柱^[1]。顶部屋盖吊装难度大, 先完成可避免下部结构施工完成后顶部无操作空间的状况。临时支撑胎架承受顶部结构安装阶段的自重和施工荷载, 待顶部结构自身形成完整的体系之后, 胎架分批卸载并拆除周转。下部梁柱截面小、重量轻, 可以采用小型汽车吊在已经成型的顶部结构下方逐层退装, 不需要大型设备。本工法适合跨度 $\leq 36\text{m}$ 的多场馆会展联体屋盖钢结构施工, 对现场没有大型履带吊进场条件、下部空间不能承受设备荷载、工期紧的工况尤为适用。

2 受限空间大跨度钢结构逆序吊装技术

2.1 构件分段与吊装设备选型布置

构件分段是逆序吊装的前提, 分段方案的好坏直接关

系到吊装的安全性和安装精度。分段原则是单段重量不大于现场吊车的额定起重量；分段位置应避开应力集中区，宜选在反弯点或者弯矩较小处；分段接口便于高空焊接；分段数量应考虑运输经济性和拼装效率。

阜阳智谷项目登录厅大跨度钢梁位于5层设备层，梁顶标高为17.28m，跨度为36m，共17件。其中13件为H型钢梁，截面H1700×400×24×38，单根最重20.2t；4件为箱型梁，截面1700×350×30×38，单根最重33.7t。由于场地所限，80t汽车吊是可用的最大吨位，整根钢梁超过额定起重量，必须分段。确定H型钢梁分两段、箱型钢梁分三段，分段位置经有限元分析验证，拼接节点应力满足要求。登录厅钢结构BIM模型如图1所示。

吊装设备选择2台80t汽车吊为主吊，从两侧向中间退装；4层及以下用50t和25t汽车吊配合。设备布置原

则为吊车站位避开胎架基础，回转半径内无障碍物，支腿地基承载力满足要求。施工前对吊车行走路线及站位区域进行硬化处理，必要时铺路基箱。

2.2 逆序吊装顺序与临时固定措施

吊装总体顺序是先顶部后下部、先主梁后次梁、先中间后两侧。5层大跨度钢梁先吊装，用2台80t汽车吊分别从两边向中间退装。每段钢梁吊到胎架顶部后，用千斤顶和倒链精确就位，调整标高和轴线，然后临时固定。临时固定措施为每段钢梁端部与胎架顶托之间设置不少于3个对称的固定点，用高强螺栓加焊接连接板锁固；相邻段之间设临时连接耳板，螺栓初步连接后正式焊接。临时固定经过质检确认合格后才能摘除吊索具。待整根钢梁所有分段全部吊装并焊接完毕后，该梁进入永久受力状态，解除该处临时固定。立面吊装示意图为图2。

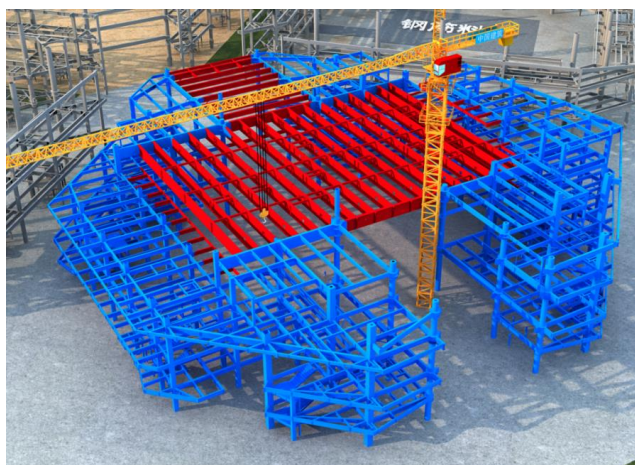


图1 登录厅钢结构BIM建模

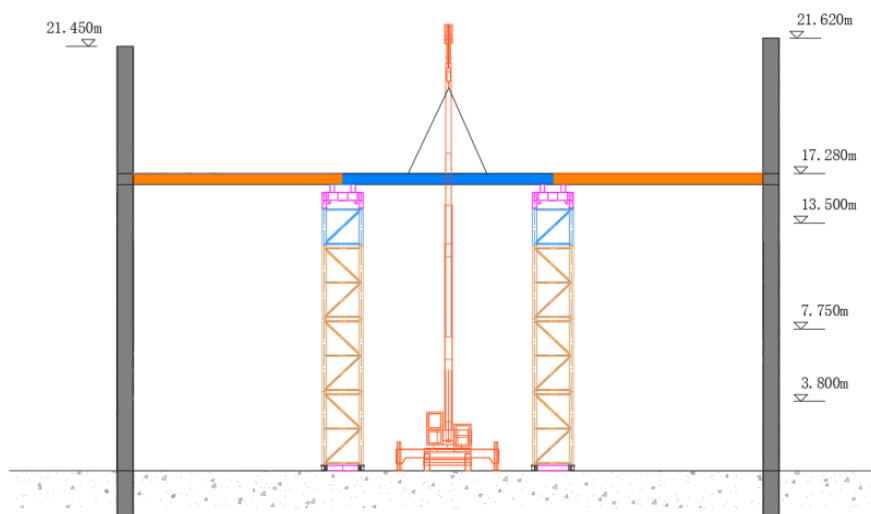


图2 立面吊装示意图

其他结构层施工顺序为 5 层钢梁全部安装焊接成整体受力后,依次进行 4 层夹层梁、3 层梁柱、2 层夹层梁施工,每层均用汽车吊退装从两侧向中间推进,保证各层互相不影响。

3 施工过程仿真分析与支撑体系设计

3.1 施工全过程有限元仿真分析

施工全过程仿真分析的目的在于施工前预测结构各个阶段的受力情况和变形特点,检验施工方案是否可行,为支撑体系的设计提供依据^[2]。分析应使用可以模拟施工时序的有限元软件,把施工过程分成若干典型的工况,每一个工况对应一个具体的施工阶段。

本工程用 MIDAS Gen 软件创建了登录厅钢结构的精有限元模型。模型包括所有的钢梁、钢柱和临时支撑胎架,杆件用梁单元模拟,节点为刚接。荷载分为结构自重、施工活荷载、风荷载和温度荷载。分析工况按实际施工顺序设置,工况一为胎架安装完成后空载状态,工况二至工况四为各分段钢梁吊装就位阶段,工况五为顶部钢梁全部合龙并完成焊接阶段,工况六至工况八为 4 层、3 层、2 层结构施工阶段,工况九为胎架分级卸载阶段。登录厅钢结构支撑体系受力分析图 3。

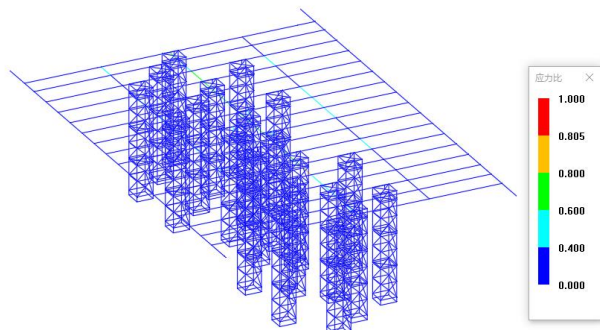


图 3 登录厅钢结构支撑体系受力分析

从分析结果可知,顶部钢梁分段吊装时最大竖向位移出现在跨中还没有合龙的悬臂端,位移为 12mm,胎架顶部水平位移最大为 5mm,在允许范围之内。顶部钢梁全部合龙之后,结构最大的应力处在跨中下翼缘上,应力比是 0.52,满足设计强度的要求。下部楼层逐层施工时,顶部结构的应力和位移增量都比较小,说明顶部结构先形成整体受力体系之后,可以承受后面施工荷载。

3.2 临时支撑结构设计与验算

临时支撑胎架是逆序施工过程中最核心的临时设施,在顶部结构达到自身承载能力之前,它要担负起所有钢构

件的自重和施工荷载,而且还要给高空拼装留出作业平台。胎架设计要达到强度、刚度和稳定性的要求,还要考虑装拆方便以及周转使用。本工程采用标准化格构式胎架,由底座、标准节、调节段、顶梁节组成。标准节规格为 4m×2m×2m,调节段尺寸为 2m×2m×2m,可根据支撑高度灵活组合,胎架最高为 15m。胎架立柱用 $\Phi 219 \times 10$ 圆管,直腹杆用 $\Phi 76 \times 5$ 圆管,斜腹杆用 $\Phi 89 \times 5$ 圆管,杆件间用 8.8 级高强螺栓连接。胎架底部和地面预埋板焊接固定,施工完毕后割除。胎架顶部设顶托,用以支撑钢梁下翼缘,顶托高度可调节以满足标高精度的要求。胎架结构示意图及平面分布如图 4、图 5 所示。

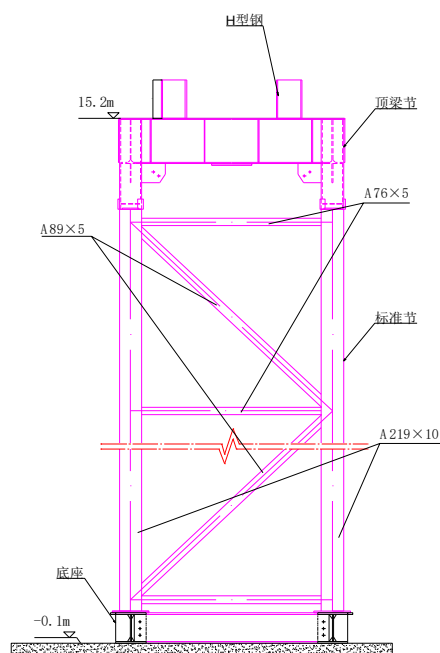


图 4 胎架结构示意图



图 5 胎架平面分布图

胎架验算包含以下几方面内容,单根胎架承载力验算,保证在最不利荷载组合下杆件应力不大于屈服强度;整体稳定性验算,包括胎架自身整体稳定和胎架与已安装钢结构之间相互稳定;地基承载力验算,保证胎架基础不出现不均匀沉降。验算结果可知,在最不利情况下胎架最大杆件的应力比为 0.68,整体稳定系数满足规范要求。胎架基础用 C30 混凝土硬化层,厚度 200mm,承载力满足要求。

3.3 支撑分级卸载与体系转换控制

支撑分级卸载属于逆序施工中风险较大的一部分,它实际上就是把结构荷载由临时支撑体系平滑地转移到永久结构体系的过程。卸载时操作不正确会造成结构出现过大的附加内力或者永久变形。本工程采用千斤顶分级卸载法。具体操作是在每一个胎架顶托处设一台 10t 千斤顶,千斤顶在钢梁下翼缘正下方。卸载前先同步顶升千斤顶,使钢梁和胎架顶托之间产生约 2mm 的间隙,再抽除垫板;然后同步回落千斤顶,使钢梁缓慢下降到胎架顶托的下一级支承面上。每级卸载行程为一块垫板的厚度,约 5mm。卸载采用对称、分级、等量的原则,即从跨中向两端逐级卸载,每级卸载量相同,防止结构产生不均匀变形。卸载时应有专人观测钢梁挠度变化和胎架受力情况。发现某处挠度变化速率异常或者胎架杆件有异响时,应立即停止卸载并采取加固措施。全部卸载后,结构荷载全部转移到永久结构上,此时才可以拆除胎架。胎架拆除采用自上而下顺序,按安装分段逆序拆除,拆除后标准节运到下一跨周转使用。

3.4 环境因素影响分析与应对

环境因素对钢结构施工的影响不能小视,主要包含温度变化、日照辐射以及风荷载这三个方面。大跨度钢结构对温度很敏感,温差造成的伸缩变形会影响安装精度以及合龙口对接的质量。本工程在深化设计阶段就考虑到了温度的影响,确定了合龙温度区间为 10℃~25℃,现场安装时应在该温度范围内完成关键合龙口的焊接。由于日照辐射造成的钢结构不均匀温度场,会引起构件产生弯曲变形,从而影响到测量定位的准确性。为了减小日照的影响,在测量时选择清晨或者阴天进行,同一个测量作业尽量缩短完成时间。对重要的标高、轴线控制点用多点测量取平均值法来消除偶然误差。风荷载对高空拼装作业安全影响很大。本工程规定风速大于 6 级或者遇有暴雨、大雾等恶劣天气时,不得进行吊装作业。对已经就位但还没有完成焊接的钢梁分段进行临时拉结,以提高其抗风稳定性。

4 施工过程监测与精度控制

4.1 关键部位应力与变形监测

施工过程监测就是对结构、胎架在施工过程中所受的

力以及变形情况进行实时的监控,发现问题及时处理。监测方案应在施工前编制完成,确定监测项目、测点布置、监测频率和预警阈值^[3]。本工程在钢梁跨中下翼缘、钢梁分段拼接节点附近、胎架立柱中部和底部、胎架顶部与钢梁接触处等关键部位设置了监测点。应力监测使用振弦式应变计,变形监测使用全站仪、精密水准仪。监测频率为每段钢梁吊装就位后测量一次,每层结构施工完成后测量一次,胎架卸载过程中每级卸载后测量一次,恶劣天气过后补充测量一次。预警阈值通过有限元分析得到,应力预警值取设计强度的 85%,位移预警值取计算最大位移的 1.2 倍。当监测数据接近预警值的时候,应该增加监测频率来分析原因;当监测数据超过预警值的时候,应当立即停止施工并启动应急预案。

4.2 结构位形实时测量与数据采集

位移测量正确是保证钢结构安装精度的基础。本工程用全站仪三维坐标测量法,在登录厅周围设置 4 个稳定的基准点,形成闭合控制网。每个钢构件吊装就位后,用全站仪测出其关键节点的三维坐标,与设计坐标进行比较,求得偏差值。测量工作核心就是控制网的精度和稳定性。基准点应设在不受施工影响的地方,用强制对中装置定期复核。测量时要考虑仪器误差、大气折光、温度修正等。数据采集用电子手簿自动记录,防止人工读数造成的误差。每次测量结束后立即把数据输入到计算机中进行分析处理,得到偏差报告。

4.3 安装偏差分析与主动纠偏

安装偏差是由构件加工误差、吊装变形、温度变形、测量误差等造成的。偏差分析的目的就是区分系统性偏差和偶然性偏差,对不同类型的偏差采取不同的纠偏措施。本工程采取如下纠偏措施,标高偏差用胎架顶托调节螺栓微调,调节范围 $\pm 20\text{mm}$,轴线偏差用千斤顶侧向顶推校正,校正过程中监测相邻构件受力情况,防止出现大附加应力,温度变化引起的整体伸缩偏差,在温度稳定时段进行合龙口焊接,焊接前测量实际合龙口宽度,必要时对最后一段构件进行现场修整^[4]。偏差控制总体原则为预防为主、过程控制、逐级消除。即在构件加工阶段控制制作精度,在吊装就位阶段控制安装精度,在焊接阶段控制变形,把偏差消灭在每一个工序环节中,防止偏差累积到最终验收阶段才被发现。

4.4 质量控制标准与验收方法

本工程施工质量执行以下标准:《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205-2020、《钢结构焊接规范》GB 50661-2011、《钢结构工程施工规范》GB 50755-2012、《钢结构用高强度大六角头螺栓连接副》GB/T 1231-2024、《钢

结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 82-2011、《建筑变形测量规范》JGJ 8-2016。验收工作分段进行，每段钢梁安装完后进行工序验收，检查标高、轴线、垂直度等指标；每层结构全部安装完后进行层间验收，检查整体位形和层间关系；全部钢结构安装及焊接完成后进行最终验收，检查结构整体位形、焊缝质量、涂装质量。验收数据要同有限元分析结果相比较，若实测值同理论值的差别超出允许范围，则须查找缘由并加以处理。

5 结束语

空间受限情况下大跨度钢结构逆序施工技术改变施工顺序，先安装顶部屋盖后逐层施工下部，解决了多层会展建筑场地受限时大型设备不能进场、构件吊装困难的问题。阜阳智谷项目实践证明，该技术减少了大型履带吊的使用，改用小型汽车吊，降低了机械费用；顶部先行形成整体受力体系之后，下部施工可以与上部收尾并行进行，缩短工期；标准化胎架可以周转使用，绿色环保。该技术适合跨度小于等于 36m、层数小于等于 5 层的同类结构，

在场地狭小的情况下使用更方便。后续还可以将 BIM 同实时监测数据融合起来，达成施工状况的可视化以及智能预警，促使大跨度钢结构施工数字化发展。

[参考文献]

- [1]黄文华,陈辉,黄强.封闭空间下多体系组合结构施工协同控制技术[J].山西建筑,2025,51(21):103-108.
- [2]党文杰.大跨度钢结构屋盖施工中的累积变形监测方法[J].工程技术研究,2025,10(20):167-169.
- [3]董传艺,高腾,张剑锋,等.高空多层吊挂钢结构逆向累积提升施工技术研究及应用[J].建筑施工,2025,47(4):590-595.
- [4]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.

作者简介：盛福衡（1981—），男，山东青岛人，高级工程师，长春工程学院土木工程专业毕业，现就职于中国建筑第八工程局有限公司，从事房建工程施工工作。