

场地受限条件下空间三角环带桁架分片安装技术研究

张 建 王 辉 盛福衡 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]多场馆联合体建筑中庭区域的空间三角环带桁架施工经常被场地所限。文中以阜阳智谷项目和阜阳市科技文化中心工程为依托,提出了分段制作、散件进场、地面分片、高空拼装的分片安装技术。使用 Tekla 软件三维建模对构件进行深化和分片划分,用 H 型钢拼装胎架控制拼接精度,用 6 组格构式安装胎架完成 3 片环桁架分片吊装和高空原位安装,最后分级对称卸载实现体系转换。

[关键词]空间三角环带桁架; 场地受限; 胎架; 施工技术

DOI: 10.33142/ect.v4i8.20341

中图分类号: TU311.2

文献标识码: A

Research on the Installation Technology of Segmented Space Triangular Ring Truss under Limited Site Conditions

ZHANG Jian, WANG Hui, SHENG Fuheng, SONG Zeming, WANG Yawei
China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract: The construction of the spatial triangular ring truss in the atrium area of multi venue complex buildings is often limited by the site. Based on the Fuyang Zhigu project and the Fuyang Science and Technology Cultural Center project, the article proposes a segmented installation technology that includes segmented production, loose parts entry, ground segmentation, and high-altitude assembly. Using Tekla software for 3D modeling, the components are deepened and divided into sections. H-beam assembly frames are used to control the splicing accuracy, and 6 sets of lattice installation frames are used to complete the lifting and high-altitude in-situ installation of 3 ring trusses. Finally, the system conversion is achieved through graded symmetrical unloading.

Keywords: spatial triangular ring truss; restricted venue; tire frame; construction technology

空间三角环带桁架在多场馆联体屋盖的中庭区域使用较多,空间几何关系复杂、构件数量多,现场安装难度大。当施工场地受到周边既有建筑或者地下管线的限制时,大型起重机械的站位比较困难,传统的整榀吊装工艺不能进行。分段安装法已经在超高层环带桁架和大跨度平面桁架中得到应用,但是空间三角环带桁架剖面为三角、平面为环状闭合,受力特点和支撑条件与上述两类结构不同,相关研究还比较欠缺。

1 结构形式与现场条件分析

空间三角环带桁架为闭合环形空间结构,剖面为三角形,由外侧环桁架、上表面结构、斜面支撑三部分组成。外侧环桁架是三角形截面的主要受力骨架;上表面结构由悬挑梁、平面撑、内圈梁组成;斜面支撑把外侧环桁架和上表面结构连接起来,形成稳定的三维空间受力体系。该结构可以实现中庭区域无柱大空间,但是构件的空间定位比较复杂,节点数量较多,施工精度要求较高。

阜阳智谷项目环带桁架即用上述空间三角结构。工程总建筑面积约为 77239m^2 ,环带桁架在多场馆联体屋盖中庭连接处。施工场地有两个方面的限制,第一是中庭周边场馆主体结构已经先期施工完毕,桁架安装作业面被限制在狭窄的环形区域里;第二是场地内地下管线较多,大型起重机械的行走和停放受到限制。阜阳市科技文化中心工程公共大厅上部环带也为空间三角环带桁架,施工场地条件类似。

现场条件分析可知环带桁架安装存在三个主要矛盾。第一,结构自重和起重能力受限的矛盾,整榀吊装超过可用起重设备的额定能力。高空作业量大、作业面狭小,中庭区域不能搭设满堂脚手架。第三,安装精度高和变形控制难的矛盾,环形闭合结构合拢精度受温度、焊接变形和临时支撑刚度等各方面的影响。

2 安装方案选择与分片原则

根据结构特点和场地情况,确定出“分段制作、散件

进场、地面分片、高空拼装”的技术路线。钢桁架构件在工厂分段制作，经过检验后散件运到现场；在有限的地面范围内完成分片拼装；拼装合格后逐片吊装就位；通过高空对接和嵌补杆件安装形成整体^[1]。这条路线把大部分的拼装工作从高空搬到了地面，缩减了高空作业的次数，而且降低了单次吊装的重量，使得小型起重设备就可以完成作业。

2.1 吊装设备选型与站位布置

吊装设备的选型要根据构件重量、吊装半径、场地条件和经济性等各方面因素来确定。本工程环桁架分片单元最大重量约 25t，吊装半径约 30m。经过比选，选用 2 台 50t 汽车吊为主吊设备，2 台 25t 汽车吊配合构件倒运和辅助吊装^[2]。50t 汽车吊在该工况下额定起重量满足要求，车身尺寸小，在受限场地内可以灵活移动和站位。

汽车吊站位布置遵循两个原则，吊车站位点不能靠近地下管线密集区，必须铺设路基箱分散荷载；吊装作业半径内清除障碍物，设置警戒区，保证吊臂回转空间。施工前用三维模拟技术对吊车站位、吊臂角度、回转路径进行复核，无碰撞风险后实施。

2.2 桁架分片划分与安装顺序

分片划分属于关键部分，它同吊装是否可行、结构安全以及安装精度存在直接联系。分片划分原则为分片重量不大于吊装设备额定起重量的 80%，分片具有足够的自身刚度，吊装时不产生明显的变形，接口位置避开应力集中区，便于高空对接操作，各分片重量尽量均匀。按照以上原则，将外侧环桁架沿环向分成 3 个吊装分片，每个分片 120° 夹角。每个吊装分片在厂内又分为 3 段制作，由于工厂运输尺寸的限制，分段运到现场后在拼装胎架上重新组拼成完整的吊装分片单元。单次吊装最大重量不大于 25t，50t 汽车吊可以满足要求。环桁架分片按顺时针方向依次吊装，各分片就位后立即与相邻分片进行接口螺栓连接和定位焊接，形成初步的环向受力体系，保证后续分片吊装时已安装部分的结构稳定。环桁架全部合拢、环向贯通焊缝完成后，开始上表面悬挑梁、内圈梁的安装。悬挑梁、内圈梁分 9 个分片单元，按照编号顺序依次吊装。平面撑、斜面支撑的安装不单独占用工期，在每片悬挑梁、内圈梁就位之后立即进行安装，使支撑体系与主受力结构同步形成。该顺序可以保证结构在各个施工阶段都有足够的稳定性，防止由于支撑不够造成变形或者失稳。

3 分片安装关键施工技术

3.1 临时支撑体系设计与地基处理

临时支撑体系是由拼装胎架和安装胎架组成的，分别

用在地面拼装和高空安装上。

拼装胎架是地面分片拼装时用来定位和支撑构件的。每片环桁架分为 3 段组装，在每段首尾及中间两个拼接点处设 4 个拼装胎架，三片共 12 个。拼装胎架采用 H 型钢制作，规格为 H350×350、H250×250 和 H100×100，根据支撑高度和受力选用。胎架顶部装有可调顶托，用以微调构件标高，保证拼接节点的空间坐标与设计值相符。拼装胎架搭设前对地面进行硬化或者铺设钢板，保证基础坚实不下沉。安装胎架用作高空分片吊装时的临时支撑。经过有限元受力分析得知，选用 6 个标准规格式安装胎架，平面尺寸为 2m×2m，用角钢或者钢管焊接而成，承载力大、自重轻、搬运方便。胎架安装在环桁架分片接口处，每个分片用两个胎架支撑，顶部装可调顶托以调节就位标高、姿态。安装胎架的形式如图 1 所示。

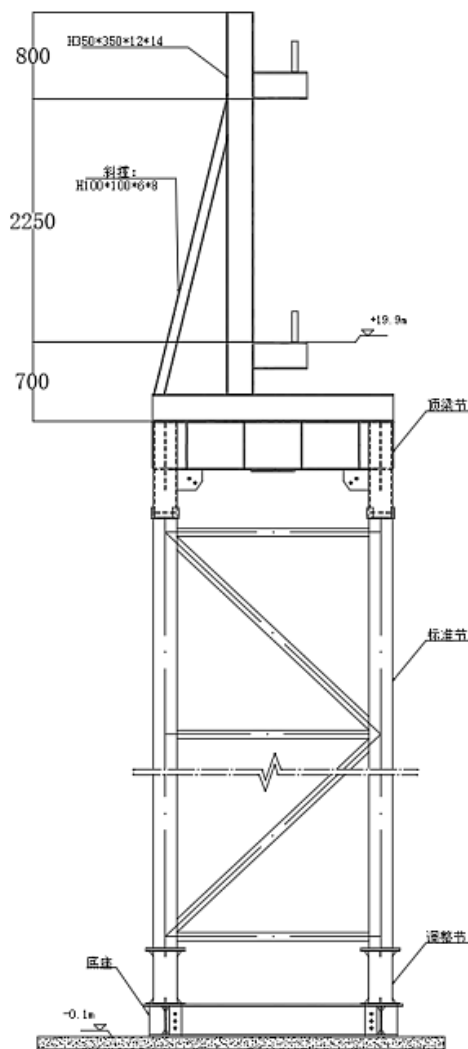


图 1 安装胎架示意图

安装胎架地基处理根据受力分析结果来确定。本工程单个安装胎架最大反力经过计算之后,采用在底部铺设路基箱或者浇筑混凝土基础的方式来分散荷载,防止地基承载力不够造成沉降。

3.2 分片地面拼装与倒运

分片地面拼装是安装在拼装胎架上的。拼装前利用全站仪在胎架顶部放出处各个拼接节点的三维坐标,做为定位依据。构件按照设计位置吊到胎架上,初步就位后用千斤顶和顶托精确调整,直到节点坐标满足精度要求为止。拼装时控制焊接收缩变形,对厚板对接焊缝采用预留收缩余量、对称焊接等方法。拼装完成后做几何尺寸检验、焊缝质量检查。几何尺寸检验有分片总长、宽度、高度、对角线差和节点坐标等,偏差要符合规范。焊缝检查分为外观检查和无损检测,一级焊缝应全部进行超声波探伤。合格后才能吊装。分片拼装场地和吊装就位点之间一般存在一定的距离,需要倒运运送。用 25t 汽车吊配合平板拖车进行吊装。倒运前勘察运输路线,保证道路宽度、转弯半径和净空符合要求。分片在运输车上用可靠的绑扎固定,防止滑动或者倾覆。

3.3 分片高空吊装与临时固定

分片吊装使用 50t 汽车吊。吊装前检查吊索具规格型号和分片重量是否匹配,钢丝绳磨损不大于 10%,断丝不大于 6 根每捻距;吊索与分片夹角控制在 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间;清理吊装半径内障碍物,设警戒区;检查对讲机通讯正常。吊装操作按试吊、起吊、就位、固定四个步骤进行。试吊分片吊离地面 20cm~30cm,检查吊装设备的稳定性、吊索受力和分片水平度,确认无误后正式起吊。起吊过程中分片下方严禁站人,分片不能长时间悬停。分片吊装至安装胎架上部,由专人指挥缓慢降至顶托上。就位后立即临时固定,固定点不少于 3 个且对称布置。临时固定完毕后经检查合格才能拆除吊索具。三片环桁架依次吊装就位。每片就位后同相邻分片进行接口对接,完成部分高强螺栓连接及定位焊接。全部三片完成后进行环向贯通焊缝的焊接,完成外侧环桁架的闭合。

3.4 合拢段安装与分级卸载

合拢段安装为重要环节。合拢段选在受力小、变形易调节的地方,本工程设在环桁架最后安装的分片接口处。合拢前对已安装的结构标高、轴线进行复测,根据实测数据确定合拢段构件的实际下料长度,必要时现场修整。合拢段安装选择在温度比较稳定的时段进行,减小温度变形对合拢精度的影响。卸载属于环带桁架由临时支撑向设计

受力状态转变的重要工序^[3]。卸载前对结构做预验收工作,核对安装、焊接、防腐涂装质量。确定沉降观测点的位置,并且记录卸载前标高点的初始值。卸载采用对称分级的方式。两名操作人员分别在对称位置上进行工作,将火焰切割的支撑 H 型钢逐层降低支撑高度,每次切割 1cm。每一级卸载之后都要暂停观测结构的变形和应力的变化,确认正常之后再继续。操作人员站在高空作业车的桁架下面,桁架下面设置警戒区,无关人员不得进入。全部卸载后进行胎架拆除,拆除过程中专人观测桁架稳定情况,有异常立即停止并加固。

4 施工控制与质量安全保障

4.1 施工过程仿真分析

施工过程仿真分析用来检验施工方案的合理性以及预测施工风险。用 Tekla 软件建立空间三角环带桁架三维模型,对构件进行深化、分片方案细化。模型包含全部杆件、节点、连接板的信息,可以准确地输出各个构件的空间坐标、重量、重心位置等数据,给分片划分、吊装计算提供数据。三维模型如图 2 所示。

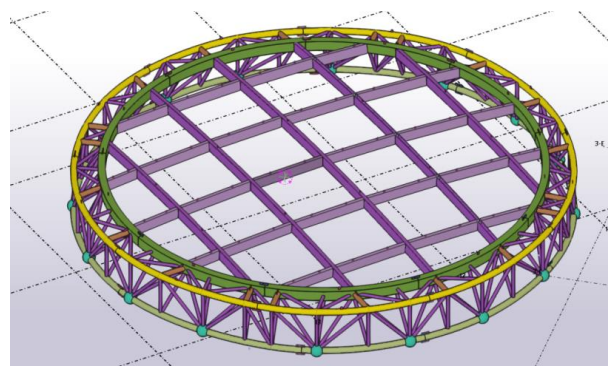


图 2 空间三角环带桁架钢结构模型

在 Tekla 模型的基础上,用有限元软件对吊装和卸载的过程进行受力分析。吊装分析计算分片在吊装状态下所受的应力、变形,保证安全可控。卸载分析计算临时支撑拆除过程中内力的重新分布和变形的发展情况,得到合适的卸载顺序和分级量值。分析结果用来指导安装胎架设计、吊点布置和卸载方案的制定。

4.2 应力与变形监测

施工时对关键部位做应力、变形监测。应力监测选择受力大的杆件和节点布置的应变计,用静态应变测试系统采集数据。监测工况为分片吊装就位、临时固定、焊接和分级卸载等。实测应力和仿真结果对比,偏差大的时候分析原因并采取措施。变形监测有胎架沉降和结构变形两种。胎架沉降在拼装、安装过程中一直存在,用水准仪观测胎

架顶部标高变化,沉降超过预警值时及时调整。卸载时对结构变形进行加密观测,每级卸载后都要采集数据,保证变形控制。

4.3 安装精度控制措施

精度控制在制作、拼装、安装的全过程都起着作用。工厂制作阶段使用智能焊接机器人完成主要的焊接工作,保证异形构件加工精度。构件出厂前做预拼装检查,保证接口尺寸、连接板位置的准确性。地面拼装阶段用拼装胎架空间坐标放样来控制各个节点的位置。拼装时用全站仪实时复测,每完成一个拼接节点就进行坐标校核,超限时调整。拼装完成后进行整体尺寸检验,保证分片的几何尺寸符合要求。高空安装阶段用安装胎架顶托标高和平面位置控制分片就位精度。分片就位后用全站仪复核关键节点坐标,与设计值比较后调整。合拢段安装前对已安装结构整体进行测量,根据实测数据确定合拢段实际尺寸,实现精准合拢。

焊接精度控制上对首次使用的钢材、焊接工艺做工艺评定。厚板焊接时用预热、层间温度控制、后热来防止层状撕裂。焊接顺序按对称焊原则进行,收缩量大处先焊,减小焊接变形及残余应力。

4.4 有限空间安全防护要点

场地受限时的安全防护要重视有限空间作业、高空作业以及吊装作业。中庭区域作业面狭小,构件堆放、拼装、吊装要有序进行。施工现场划分出作业区、材料堆放区、拼装区和吊装区,并设置隔离措施。高空作业时所有人员必须佩戴安全带并系在生命线上。生命线用 $\Phi 9\text{mm}$ 钢丝绳沿桁架通长设置。高空作业车为主要操作平台,使用前检查臂架、回转机构、支腿。吊装作业严格实行试吊、专人指挥、警戒区管理等制度^[4]。风速超 6 级或遇暴雨、大雾时严禁吊装。吊装设备每天班前检查,主要对钢丝绳磨损、吊钩裂纹、制动灵敏度进行检查。焊接用登高车作业,设接火斗防火星坠落。焊接设备电缆线架空或者穿管保护,

防止碾压损坏造成漏电。

5 结束语

场地受限时空间三角环带桁架安装属于钢结构施工技术难题。本文以阜阳智谷项目、阜阳市科技文化中心工程为依托,提出分片安装施工技术方案。核心思想就是分段制作、散件进场、地面分片、高空拼装,利用合理的分片方式将大型环带桁架拆解成可以独立吊装的分片单元,用地面拼装代替高空散装,用小型起重设备代替大型机械,有效地解决了场地受限和结构大型化之间的矛盾。

工程实践证明该技术有如下优点,减小单次吊装重量和起重设备规格要求,使受限场地吊装得以实现,将大量的拼装工作移到地面,减少高空作业量和安全风险,通过胎架准确控制各个节点的空间坐标,保证安装精度,缩短施工工期,降低措施费用。该项技术在阜阳智谷项目上取得经济效益 102.25 万元,在阜阳市科技文化中心项目上取得经济效益 88.32 万元。

空间三角环带桁架分片安装效果受分片划分方案、胎架刚度、焊接顺序和环境温度等因素的影响,实际施工要根据具体情况做出相应的调整。合拢段安装时机、分级卸载量值等还要积累工程数据,形成更量化的控制标准。

[参考文献]

- [1]徐涛,周岳峰,成桃园.超高层钢结构环带桁架施工关键技术[J].广州建筑,2023,51(5):49-52.
- [2]丁建,高海,贾玉龙,等.超高层大跨超重带状桁架双机抬吊施工[J].建筑技术,2024,55(6):700-704.
- [3]许明泽,李昂,李明航.北京新国展二期项目无柱展厅桁架施工技术[J].建筑机械化,2024,45(4):7-11.
- [4]柳俊俊.游泳馆受限空间下大跨度钢结构施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(16):16-18.

作者简介:张建(1983—),男,安徽合肥人,高级工程师,河北工程大学土木工程专业毕业,现就职于中国建筑第八工程局有限公司,从事建筑工程工作。