

大跨度高落差波形联体屋盖施工关键技术研究

王 辉 盛福衡 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]针对大跨度高落差波形联体屋盖施工中深化设计难度大、高空焊接量大、悬挑安装无支撑、曲面防水排水复杂等难题,以阜阳智谷项目为依托,系统研究了屋面三维设计-建模-施工全流程管控技术、大跨度高落差桁架整体提升施工技术、倒三角悬挑桁架无支撑施工技术及波形联体金属屋面施工技术。采用分区累积提升施工技术,该技术在双曲异形大落差钢屋盖的高精度提升。通过数字化建模与施工协同的误差控制体系,形成了大跨度波形联体屋盖成套施工技术方案,为同类工程提供技术参考。

[关键词]大跨度;高落差;波形联体屋盖;整体提升

DOI: 10.33142/aem.v8i7.20315 中图分类号: TU245 文献标识码: A

Key Technology Research on the Construction of Large-span and High Drop Waveform Joint Roof

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

Abstract: In response to the difficulties of deepening design, large amount of high-altitude welding, unsupported cantilever installation, and complex surface waterproofing and drainage in the construction of large-span and high drop corrugated joint roofs, based on the Fuyang Zhigu project, this study systematically studied the full process control technology of roof 3D design modeling construction, overall lifting construction technology of large-span and high drop trusses, unsupported construction technology of inverted triangular cantilever trusses, and construction technology of corrugated joint metal roofs. The construction technology of zone accumulation lifting is adopted, which has significant characteristics and advantages in the installation process of large drop hyperbolic oblique space trusses, achieving high-precision lifting of hyperbolic irregular large drop steel roofs. A complete set of construction technology solutions for large-span waveform joint roof have been developed through a digital modeling and construction collaborative error control system, providing technical references for similar projects.

Keywords: large span; high drop; wave shaped joint roof; overall improvement

引言

随着大型会展中心、体育场馆、交通枢纽等公共建筑的建设需求越来越大,大跨度钢桁架和波形金属屋面组合的结构形式由于具有空间覆盖能力强、建筑造型适应性好的特点而被广泛使用。阜阳智谷项目屋面为正交斜放管桁架结构体系,桁架最大跨度 81m、最大悬挑 22.5m,屋面为双曲波纹形,波峰波谷高差 9m,坡度 0%~30%连续变化,给结构安装和屋面施工带来很大困难。高落差、大曲面环境下,怎样才能使钢桁架准确安装、金属屋面可靠防水,成了工程建造的主要难题。

1 大跨度高落差波形联体屋盖施工技术特点及难点分析

波形联体屋盖的结构特点和施工环境使得它的技术

难点具有系统性特点。一是深化设计同构造空间存在矛盾。在建筑外立面限高的要求之下,金属屋面构造层预留厚度只有 500mm,其中包括保温层、防水层、装饰面等多层构造,需要压缩主次檩的高度,主檩的跨度过大或者截面高度受限制会形成设计矛盾。二是大跨度桁架高空拼装难度大。展厅最大拼装面为 70m×70m,用传统高空原位焊接方法进行焊接工程量大、变形无法控制,大量高空作业存在较大的安全风险。三是悬挑桁架施工受场地限制。最大悬挑长度为 22.5m,平均高度为 22m,现场没有支撑胎架,悬挑构件在无支撑的情况下安装,需要解决就位后临时固定和焊接变形控制问题。四、波形屋面防水排水组织复杂。屋面坡度 0%~30%,雨水流速差别大,大面积平屋面排水路线长,低檐口处雨水导流困难,双曲波纹造型

又加大了构造层次间密合的难度。

2 大跨度高落差波形联体屋盖施工关键技术

2.1 三维设计建模与施工全过程精度控制技术

就屋面双曲大高差和 500mm 薄构造层的矛盾而言,创建起设计、建模、施工三者相配合的精度控制体系。深化设计阶段在桁架上下弦系杆交叉处设檩托,减小主次檩高 200mm,满足构造、承载力要求。与常规把主檩布置在主次桁架交点上不同的是,本方案利用了系杆交叉点的结构优势,在保证承载力的基础上实现了薄构造层的匹配。多曲屋面依靠犀牛蒙皮模型,从表面扣除构造层厚度反推主檩条表面弧度,用线性拟合将公差控制在 5mm 以内^[1]。对桁架上下弦杆所用的弧线圆管截面,采用三维激光扫描逆成像技术和 BIM 技术,把现场构件实际扫描模型与理论模型进行拟合比较,在虚拟环境中模拟预拼装,准确找出偏差部位及数值并指导校正。

针对多坡度波浪形金属屋面曲率变化大、坡度变化大、形变不规则、穿透式固定渗漏隐患大的施工难题,用 BIM 技术对金属屋面进行深化排布,把长度、角度、高度各不相同的屋面檩条模块化拆分,单独编码,显示安装位置。找平底板深化时次檩条间距为 1200mm,找平钢板为 1200mm 幅宽沿檩条中线铺设,兼顾后期中心线返划和施工方便。现场钢结构拼装精度控制在 10mm 以内,施工模拟计算出桁架提升卸载后的变形量,在深化阶段二次修正檩托高度主动消化误差,保证屋面最终曲面平滑过渡。该技术把设计、加工、施工各个环节都包含进来,并形成了一个从理论模型到实体建筑的全过程精度控制体系。

2.2 大跨度高落差桁架整体提升施工技术

展厅桁架最大拼装面是 70m×70m,传统的高空原位拼装方式效率低、风险高。本工程采用整体预拼装、整体提升的施工方案,先完成钢柱和封边桁架的施工,待框架成型后再在地面分区进行桁架拼装,主次檩条全部安装就位形成完整的受力单元后进行整体提升。地面拼装阶段,根据桁架形式分别采用立拼法和卧拼法,拼装胎架间距为 6~18m,下弦高度大于 4m 时采用标准格构式支撑,最高约 8.5m。由于大落差双曲斜交空间桁架的安装特点,分区累积提升技术具有明显的优势,可以实现双曲异形大落差钢屋盖的高精度提升。按照结构柱位布置、钢结构下弦等高线分布、楼层土建结构分布、屋盖钢结构受力单元划分和传力体系分布、支撑架整体措施用量、工人及起重机械操作方便等多种因素进行深入分析和模拟,利用 SAP2000 建立精细化计算模型,对提升过程变形轨迹和应力分布进行仿真模拟。

提升系统采用 TLJ-2000 型液压提升器、TL-HPS60 型液压泵源系统,用原结构钢柱做提升吊点,依靠计算机同步控制系统达成多吊点同步动作、负载均衡以及姿态修正。经过施工模拟分析,对于不符合应力比限值的 57 根杆件进行截面加强,保证施工过程中应力比不大于 1.0。就位后安装嵌补杆件,按计算荷载基准分等级卸载,各吊点位移偏差不大于 10mm。相比于传统的高空原位拼装,本技术大大减少了高空焊接的工作量,保证了现场施工变形可控、结构稳定,利用原结构钢柱作为提升支架,减少临时措施投入,具有较好的经济性。

3 波形联体屋盖施工关键技术应用分析

3.1 倒三角悬挑桁架无支撑施工技术

悬挑桁架为正交倒三角桁架,最大悬挑长度为 22.5m,平均高度为 22m,由于场地限制不能搭设支撑胎架。采用分区、分片“人”字型逐步安装方案,每片悬挑桁架吊装就位后需要上下弦杆焊接完成才能松钩^[2]。施工顺序为先施工次悬挑桁架,再吊装对应位置的主悬挑桁架和次悬挑桁架拉结成整体受力框架,主次交错施工,每完成一榀就形成一个稳定的结构单元,然后依次扩展。深化设计阶段根据计算结果确定悬挑变形值,设置起拱高度并深入到模型中,吊装时用倒链配合调整构件角度就位,全过程做好变形观测。研发的圆管桁架连接组件用作高空焊接前临时固定,可以避免焊接过程中构件移位变形的风险,连接板和螺栓可以周转使用,减少临时措施的用量。

3.2 波形联体金属屋面施工技术

屋面系统采用直立锁边铝镁锰屋面板,为了满足双曲波纹造型防水排水要求,建立了多层防水体系。根据面标高和屋面做法逆推檩条、檩托板标高,改善檩托板与檩条连接孔构造层次的密合度。综合考虑功能需求和限额设计要求,室内外构造层采取不同的设计方式,室内具有防水、保温、吸声的功能,室外只注重防水的功能,达到功能与成本的平衡。镀铝锌压型钢底板从屋面低跨到高跨、从檐口到屋脊方向铺设,每块板安装后及时调整平整度,固定点间距沿檩条方向不大于 300mm,搭接处增设固定点防止波浪形翘曲。TPO 防水卷材搭接缝用热风焊机焊接,温度 200~250℃,焊接速度 2~3m/min,焊缝宽度不小于 20mm 形成双焊缝;直立锁边用专用机械匀速锁边,咬合紧密。玻璃纤维吸音棉和憎水保温岩棉从低跨到高跨、从檐口到屋脊方向铺设,轻贴基层不拉伸不挤压,保证厚度均匀。

面层六边形装饰铝板分为单曲型、双曲型和平板型,

用钢圆管夹和铝制转接件做三维空间的微调 and 准确定位。施工前利用 BIM 建模对分格进行优化, 根据实际测量放线数据放样出图, 保证交接部位的准确吻合, 采用高精度数控机床加工以保证材料加工精度^[3]。铝板安装时用转接件调节角度, 可调范围为 0~30mm, 可以满足设计的弧度要求。该技术利用钢圆管夹和铝转接件构成的三维可调连接结构, 很好地解决了双曲面复杂造型下装饰板准确定位的问题, 使建筑造型和施工效率达到了统一。

3.3 屋盖结构变形控制与安装精度保障技术

大跨度高落差屋盖变形控制, 设计、加工和施工全过程中都要考虑。深化阶段用直代曲的方式改进杆件的选用, 削减规格种类, 减小装配难度, 异型构件加工采用智能埋弧焊、总成焊接机器人等自动化设备保证焊接质量稳定。构件加工完毕后, 用三维激光扫描逆成像技术和 BIM 技术对现场构件进行逆向成形, 将实际扫描模型与理论模型进行拟合比较, 在虚拟环境中模拟预拼装, 准确找到偏差部位和数值并据此校正, 从源头上消除加工累积误差。利用 BIM 技术做施工模拟分析, 设置边界条件和目标应力模拟施工步骤, 找到变形区域, 对管桁架进行预起拱和加固处理, 使屋盖钢结构达到设计曲面要求。现场拼装依靠全站仪精确放样, 可调节式钢结构胎架适合不同标高构件的拼装需求, 胎架支撑下部设斜撑和底座或者主体结构焊接固定以保证稳定。整体提升过程中利用计算机同步控制系统对各个吊点的载荷、位移进行实时监测, 保证结构在动态施工中安全、最终安装精度高。

3.4 屋面防水排水及节点优化技术

波形联体屋面坡度变化范围大, 排水组织和防水密封是保证使用功能的重要环节。利用等高线地形分析和百年一遇雨量计算, 将主排水方向由环向改为径向, 增加 4 道径向全贯通天沟实现大屋面雨水分流, 缩短排水距离, 虹吸口设在径向天沟与环向天沟交汇处。天沟处采用波纹不锈钢柔性变形缝代替风琴式伸缩缝, 满足温度变化、地震、风荷载等引起结构变形的要求, 克服了采购难、容易损坏等缺点。提出了一种可以滑动固定的支座配合直立锁边系统来解决多坡度波浪形金属屋面的多曲率线型、伸缩变形、防水性等问题。阴阳角、天沟根部、卷材收头处等易渗漏部位预先铺贴 TPO 专用附加层, 卷材收头处用压条压实并涂刷密封胶封堵。

4 大跨度高落差波形联体屋盖施工技术优化策略

4.1 加强数字化技术在施工深化中的应用

将 BIM、三维激光扫描、有限元分析等数字化技术

深入到施工的各个环节中去。深化阶段用 BIM 做构造层次碰撞检测、构件编码管理, 用有限元软件对施工全过程进行仿真模拟, 提前预测出变形和应力集中区, 为预起拱、杆件加强提供依据。施工时用三维激光扫描对拼装构件逆向成型并和理论模型进行拟合对比, 从而达到偏差准确识别和及时修正的目的, 形成一个模拟、实测、修正的闭环管控链条。

4.2 完善大型钢结构吊装与提升过程控制

整体提升施工过程中要重视从方案设计到现场实施的全过程控制。提升前做系统试提升, 悬停观察结构受力情况, 无异常后才能正式提升。在提升过程中对计算机控制系统中的压力、位移进行实时监测, 保证各吊点的同步偏差在允许范围内。就位后尽快完成嵌补杆件安装和对口焊接, 缩短悬停时间, 降低安全风险。对提高过程中应力比超限的杆件, 在深化设计阶段根据计算结果进行截面加强或者增加临时加固杆件等措施。

4.3 优化复杂曲面屋面施工质量管理

波形金属屋面施工要创建从底板铺设到面板安装的分层质量控制标准。底板铺设要严格控制平整度, 固定点间距沿檩条方向不大于 300mm, 搭接处增加固定点防止波浪形翘曲。保温岩棉铺设要符合曲面形态, 轻贴基层不拉伸不挤压, 保证厚度一致。防水卷材搭接缝焊接温度、速度要严格控制, 焊缝宽度不小于 20mm 形成双焊缝。直立锁边施工时锁边机要匀速移动, 锁边后用手扳检查不能轻易掰开。面板排版时第一块板起始方向与天沟平行, 利于现场定位。

4.4 建立全过程施工安全与协同管理机制

大跨度高落差屋盖施工包含高空作业、大型设备吊装、液压提升等诸多高危环节, 必须创建专项安全管理体系。加强作业区的警戒, 不得有无关人员进入。高空焊接作业面应设置可靠的平台, 装设防坠器和安全网。液压提升设备使用前要对各个系统进行检查和调试, 保证所有系统工作正常。土建、钢结构、屋面各专业要形成协同作业的机制, 科学安排交叉施工顺序, 防止互相影响造成质量隐患和安全事故。

5 结语

阜阳智谷项目大跨度高落差波形联体屋盖施工实践证明, 采用三维设计-建模-施工全流程精度控制、大跨度桁架整体提升、倒三角悬挑桁架无支撑安装和波形金属屋面多层次防水体系的综合使用, 可以很好地解决薄构造层曲面屋面设计、大跨度高落差桁架安装、无支撑悬挑施工

和波形屋面防水排水的技术问题。研究成果在阜阳智谷项目上得到成功应用,形成具有推广价值的成套施工技术方

案,可以给同类大跨度异形屋盖工程提供技术参考。

[参考文献]

- [1]赵中军,李亭怡,周锴,等.大落差双曲斜交钢桁架屋盖施工技术研究[J].建筑技术,2025,56(17):2072-2074.
- [2]贾德路,魏来,常子政,等.多坡度波浪形金属屋面综合施

工技术研究[J].建筑施工,2025,47(1):129-132.

- [3]梅宇,谢熠,刘渝琳,等.大跨度多曲面异形钢桁架整体提升与吊装相结合施工技术[J].建筑技术,2025,56(19):2327-2330.

作者简介:王辉(1996—),男,安徽阜阳人,工程师,安徽建筑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,从事房建工程施工工作。