

水利泵站及钢柱的创新施工方法研究

马昕玥 王浩 王逸然

南京市江宁区水务局, 中国·江苏 南京 211100

摘要: 针对异形倾斜钢柱在水泵站房建设中存在的定位控制困难、安装稳定性不足以及传统施工过程中屋盖安装需等待下部混凝土强度完全形成所引发的工期延长等问题, 本文系统性地提出并实践了一套融合“可调节锚固系统精确定位”“分段式钢柱吊装”与“主动性临时支承体系”的综合施工技术。该技术将整体钢柱合理划分为三节进行分段施工, 其核心工艺包括: 在第一层混凝土承台内预设带有可调螺杆的锚固支架, 通过特制的调节螺母与曲面承托装置的协同作业, 实现首节柱设计倾斜角度的精确调整与固定; 随后, 在后续节段安装及屋面系统吊装的关键环节, 分别设置临时支承杆和由竖向立柱、平台钢架及可分段切除的垫板组成的主动性临时支承结构。该支承体系在整个施工阶段独立承担屋面的全部荷载, 从而使钢柱安装、屋面系统吊装与下部混凝土强度增长过程能够同步进行。工程应用结果表明, 该施工体系不仅有效解决了复杂倾斜钢柱的高精度安装与施工期间稳定性控制的技术难题, 而且通过巧妙的施工荷载路径临时转换机制, 突破了传统关键路径的工序限制, 使项目总工期缩短约 25%, 同时显著提升了施工过程的安全性及质量控制水平, 为同类大跨度、异形空间钢结构工程的快速建造提供了系统性解决方案。

关键词: 水泵站房; 异形钢柱; 调节锚固; 分段安装; 主动支承; 荷载转换; 工期控制

Research on Innovative Construction Methods of Water Conservancy Pumping Stations and Steel Columns

Ma Xinyue, Wang Hao, Wang Yiran

Water Affairs Bureau of Jiangning District, Nanjing City, China Jiangsu Nanjing 211100

Abstract: In response to the problems existing in the construction of pump station buildings, such as the difficulty in positioning and control, insufficient installation stability, and the extension of the construction period caused by the need to wait for the full formation of the lower concrete strength during the installation of the roof in the traditional construction process, This paper systematically proposes and practices a comprehensive construction technology that integrates "precise positioning of adjustable anchoring system", "segmented steel column hoisting" and "active temporary support system". This technology rationally divides the entire steel column into three sections for segmented construction. Its core processes include: presetting anchor brackets with adjustable screws in the first layer of concrete foundation. Through the coordinated operation of specially designed adjusting nuts and curved surface support devices, the designed inclination Angle of the first section of the column can be precisely adjusted and fixed. Subsequently, in the key stages of the subsequent section installation and the hoisting of the roof system, temporary support rods and active temporary support structures composed of vertical columns, platform steel frames and detachable pads were respectively set up. This support system independently bears all the loads of the roof throughout the entire construction stage, thus enabling the installation of steel columns, the hoisting of the roof system and the strength growth process of the lower concrete to proceed simultaneously. The engineering application results show that this construction system not only effectively solves the technical problems of high-precision installation of complex inclined steel columns and stability control during construction, but also breaks through the process limitations of traditional critical paths through a clever temporary conversion mechanism of construction load paths, shortening the total project duration by approximately 25%, and significantly improving the safety and quality control level of the construction process. It provides a systematic solution for the rapid construction of similar large-span and irregular spatial steel structure projects.

Keywords: Pump station building; Special-shaped steel columns; Adjust the anchoring; Segmented installation; Active support; Load conversion; Project duration control

1 问题背景与研究意义

在现代工业建筑与大型公共基础设施建设中, 水泵站

房等构筑物的建筑形态日益趋向功能性与艺术性的结合。

为提高空间使用效率或实现特定的建筑美学表达, 设计中

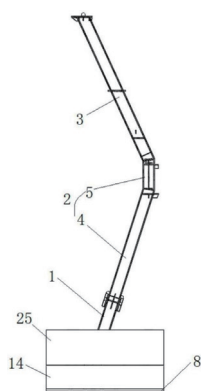
常采用倾斜、弯曲等异形钢柱作为主要竖向支承与空间围护构件。此类钢柱,尤其是底部呈倾斜设置的钢柱,因其重心偏移、受力模式复杂,给现场施工带来了两大突出挑战:一是安装定位精度难以保障,传统的预埋锚栓与刚性连接方式难以适应倾斜底板的三维空间姿态精确调整;二是施工过程中的结构稳定性较差,在柱脚混凝土未获得充分强度或上部结构尚未形成整体受力体系前,钢柱处于不稳定的悬臂或半悬臂状态,易受施工荷载、风荷载等外界作用影响而发生失稳风险^[1]。

从施工组织角度看,按照常规施工顺序,屋面钢结构系统(包括主、次桁架等)的吊装作业,必须以下方混凝土承台及柱脚外包混凝土已达到设计要求强度,并能提供可靠约束为前提。这一“强度等待期”所形成的工序间隔,尤其在结构体系复杂、混凝土工程量较大的项目中,往往成为制约整体工程进度的关键环节。若前序土建施工出现延误,后续钢结构安装工作将被迫推迟,导致施工资源闲置与工期目标的巨大压力^[2]。

因此,探索一种能够同步实现异形钢柱的精准安装定位、保障施工期结构稳定,并能有效缩短甚至消除混凝土“强度等待期”的创新型施工方法,具有显著的工程实用价值与经济效益。本文基于南京市某大型水泵站房建设工程的实践,详细阐述了一种集成“分段吊装、可调锚固与主动支承”技术的施工方法体系,旨在为类似工程提供可靠的技术参照。

2 工程实例概况与技术挑战

2.1 项目基本情况



该工程为南京市某重要水利枢纽的配套水泵站房,建筑面积约 8500 平方米。站房屋面结构采用 42 米跨度的大空间钢管桁架体系。下部支承结构设计为 12 根双向倾斜的箱形截面钢柱,柱高约 24 米。钢柱底部与混凝土承台连接部位向外倾斜 15 度,柱身中上部逐渐内收并改变方向,形成独特的“S”形外轮廓(如图 1 所示)。设计文件对钢

柱安装精度提出了严格要求:轴线位置偏差不大于柱高的 1/2500 且不超过 10 毫米,标高偏差控制在 ± 3.0 毫米以内,倾斜角度偏差不得超过 0.1 度。

2.2 面临的主要施工难题

(1) 倾斜柱脚的空间精确定位与锚固:柱脚底板呈倾斜状态,常规的水平调节螺母难以有效传递斜向作用力,且多个锚栓需要协同调整至同一空间斜面,操作难度极大。

(2) 多节段高空对接的累积误差控制:钢柱被分为三个节段进行安装,高空对接接口多,必须确保各节段安装的累积误差在允许范围内,以保证最终柱顶空间坐标符合设计要求。

(3) 非完整结构状态下的施工期稳定:在第二节柱安装完成、外包混凝土浇筑之前,以及整个屋面系统吊装期间,整体结构体系尚未完全形成。倾斜钢柱在非对称荷载作用下存在显著的稳定性风险。

(4) 施工工序间的严重制约:按照原有设计方案,必须等待所有钢柱下方三跨深基坑(深度 -8.0 米)结构施工完成、土方回填完毕,且柱脚外包混凝土强度达到 100% 后,才能启动屋面桁架的吊装工作。此过程预计耗时超过 60 天,成为项目总工期控制的关键瓶。

3 综合性施工技术创新方案

为应对上述技术与管理难题,项目团队研发并实施了“分段安装、精确调整、主动支承、荷载过渡”的综合施工方案。

3.1 可调节锚固系统的创新设计与首节柱安装

这是实现倾斜柱脚精准定位的技术基础。传统的一次性整体预埋锚栓群难以进行安装后的倾斜度微调。本方案创造性地设计了“预埋固定支架+可调螺杆组件+曲面承托装置”系统。

3.1.1 锚固支架的预埋施工

首先浇筑第一层混凝土承台的垫层,精确埋设用于固定锚固支架的主预埋件(位于柱脚投影矩形四角)和辅助预埋件(位于矩形外侧用于设置斜向支撑)。在主预埋件上焊接竖向角钢作为支架的立杆。随后,在工厂预制锚固支架单元,该单元由一个具有足够刚度的矩形框架和均匀焊接在其上的多根高强度螺杆(根据柱截面大小通常设置 8-12 根)构成,螺杆底端通过加强型连接板与矩形框架焊接。将预制单元吊装就位,使其连接板与垫层上的角钢立杆焊接牢固。接着,将辅助预埋件上焊接的第一道斜撑与矩形框架进行可靠连接,形成一个在混凝土浇筑过程中能够抵抗浮力、冲击力和振捣影响的空间稳定骨架。最后,

浇筑第一层混凝土承台,严格控制浇筑顶面标高,确保所有螺杆上部有足够长度(通常为 300-400 毫米)露出混凝土表面。

3.1.2 首节柱空间姿态的精确调整

首节柱吊装前,在其底板的相应位置开设比螺杆直径大 2-3 毫米的孔洞。吊装就位后,使螺杆穿过这些孔洞。本方案的关键创新在于特制调节组件的应用:每根螺杆上自下而上依次安装下固定螺母、柱脚底板、上调节螺母和曲面承托座。曲面承托座是核心部件,由底座和活动调节块两部分组成。底座中心设有光孔供螺杆穿过,其顶部加工有特定曲率半径的弧形导向槽。活动调节块的下表面是与导向槽精确配合的第一曲面,上表面则是用于承托柱脚底板的第一平面。活动调节块可在弧形导向槽内沿既定轨迹滑动,从而连续改变其顶部承托平面的空间倾角。

3.2 钢柱分段安装与施工过程稳定性控制

3.2.1 第二层混凝土承台浇筑与首节柱最终固定

首节柱精确调整并完成临时固定后,立即绑扎钢筋,浇筑第二层混凝土承台。此次浇筑将首节柱的下部完全包裹,仅留出上部约 1.5 米的节段用于与后续第二节柱连接。此层承台起到对首节柱的永久性嵌固作用,显著提高了其根部的抗弯与抗扭刚度。

3.2.2 第二节柱吊装与临时牛腿支承

第二节柱吊装前,在其下端与首节柱上端的对接部位分别焊接带高强螺栓孔的第一定位板和第二定位板,并配备相应的连接板。吊装就位后,先用锥形冲钉进行初步定位,然后使用高强螺栓将两片定位板与中间的连接板紧固连接。在第二节柱中部设计的对称施工牛腿位置,安装长度可调的临时支承杆(采用 $\phi 219 \times 10$ 毫米规格的钢管),支承杆下端与第二层混凝土承台上预埋的铰接耳板连接。此支承杆主要承担施工期间可能出现的水平荷载(如风荷载)以及部分竖向偏心荷载,将第二节柱由不稳定的悬臂状态转化为近似两端约束的受压杆件,其稳定性得到显著改善。

3.2.3 外包混凝土的施工选择与第三节柱安装

根据项目总体工期安排,可选择在此阶段为露出承台的首节柱段及第二节柱的倾斜段浇筑外包混凝土。若选择浇筑,则需待混凝土强度增长至设计值的 75% 以上方可拆除牛腿处的临时支承杆;若因工期压力暂不浇筑,则可保留临时支承杆。随后吊装第三节柱,其与第二节柱的对接方式与前序相同。安装完成后,立即在第三节柱顶部(即未来屋面桁架支座位置)的下方设置主动性临时支架。

3.3 主动性临时支承体系构建与屋面系统安装

这是实现“屋面安装”与“下部混凝土强度发展”两项关键工序并行作业的核心技术。

3.3.1 支承体系的构成

该体系为独立于永久结构的施工期临时结构,自下而上包括:

(1) 基础连接:通过预埋在第二层混凝土承台上的专用预埋件实现与结构的可靠连接。

(2) 支承主体结构:由 4 根主立杆(采用 HW400 $\times$ 400 型钢)通过多道斜向杆件连接构成稳定的空间格构式柱体。顶部设置型钢平台梁组成的承载平台。

(3) 定位与卸载装置:核心部分是焊接在平台梁上的定位立柱,以及竖向固定于其上的可切除式支承垫板(通常采用 20-30 毫米厚的 Q235 钢板)。垫板顶部标高经过精确计算,略低于屋面主桁架支座的设计标高,为后续使用薄钢垫片进行微调预留空间。

3.3.2 屋面系统安装与施工荷载传递路径

在所有钢柱顶部的主动性临时支架安装完毕并通过验收后,开始屋面系统的吊装作业。

(1) 主桁架吊装:将主桁架吊装至设计位置,其支座底板落于对应支架的垫板上,通过插入不同厚度的垫片将其精确调整至设计标高。随后,在垫板上、主桁架支座底板的两侧焊接限位挡板,限制其水平方向的位移,但允许其在竖向有微小的变形空间(为后续卸载过程预留)。

(2) 次桁架及联系构件安装:依次安装次桁架和屋面各联系杆件,逐步形成完整的空间屋面结构体系。

在整个屋面系统吊装过程中,所有结构自重、施工机具及人员荷载,均通过支承垫板传递至临时支架,再经由其主立杆传递至第二层混凝土承台。钢柱本身(尤其是第一、二节柱)在此阶段主要起几何定位与空间约束作用,基本不承担竖向荷载。这从根本上解除了屋面结构施工对钢柱下部深基坑等混凝土结构强度的依赖性。

3.4 支承体系卸载与永久荷载路径转换

待项目后期,下部所有混凝土结构(包括深基坑区域)均达到 100% 设计强度后,进行临时支承体系的卸载工作,实现荷载由临时体系向永久结构体系的平稳、安全过渡。

4 工程应用效果分析与综合评价

在本泵站房项目中,全面应用上述创新施工方法,取得了显著的技术、经济与管理综合效益。

4.1 工程质量控制成效

(1) 安装精度:12 根异形倾斜钢柱安装完成后,经专

业检测机构复核,所有柱脚轴线最大偏差值为 7 毫米,标高最大偏差为 +2.5 毫米,倾斜角度最大偏差为 0.08 度,各项指标均优于国家规范及设计要求。这充分验证了可调节锚固系统与曲面承托装置的有效性与可靠性。

(2) 施工期结构稳定性:在整个建设周期内,包括经历多次大风天气,钢柱及屋面结构未出现任何可观测的异常变形或振动现象,主动性临时支承体系工作状态始终良好。

4.2 项目工期优化成果

通过采用主动性临时支承技术,屋面钢结构系统的吊装工序与深基坑混凝土结构的施工、养护工序实现了完全同步进行。原施工计划中关键的“60 天混凝土强度等待期”被成功消除。项目实际总工期相比采用传统顺序施工法的预估工期缩短了约 25%,有力保障了项目在预定汛期前投入使用的总体目标。

4.3 安全效益与经济效益分析

(1) 安全保障:分段式安装降低了单次吊装作业的重量和操作难度;施工全过程中设置的多层次临时支承(包括斜撑、牛腿支承杆、主动性支承架)构成了立体化的稳定性防护体系,极大降低了结构倾覆风险。

(2) 经济性:尽管增加了临时支承体系的钢材用量,但所节约的工期大幅减少了大型吊装设备的租赁周期和现场管理成本。更重要的是,项目的提前竣工与投入运行产生了显著的社会效益和间接经济效益。经综合测算,项目最终总成本较原预算实现了小幅节约。

5 研究结论与展望

(1) 本文提出的基于可调节锚固与曲面承托装置的异形钢柱精确定位技术,通过机械式分离调节机制,实现了

复杂空间结构姿态的一次性精确成型,攻克了异形柱脚高精度安装的传统技术瓶颈,具有操作性强、精度高等特点。

(2) 创新的“分段吊装配合过程稳定性控制”工艺,通过设置临时牛腿支承杆、柱间稳定性斜撑等措施,有效保障了钢柱在形成整体受力体系前的施工期稳定,安全冗余度高。

(3) 核心的“主动性临时支承体系”及其配套的“分级同步切割卸载技术”,创造性地实现了施工期荷载传递路径与永久结构荷载路径的分离与平稳转换。这使得屋面工程能够与下部土建工程并行施工,从根本上打破了传统关键路径的制约,是缩短大型复杂工程项目总工期的关键性技术措施。

(4) 本研究所提出的施工方法是一个系统性的综合解决方案,深度融合了结构深化设计、精密工程测量、机械调节技术、临时结构设计与信息化施工监测等多学科知识,具有良好的工程可靠性、广泛的适用性和重要的推广价值。该技术体系可为未来类似的大型空间钢结构工程,如体育场馆、交通枢纽、文化中心等项目的快速、安全、高质量建造提供重要的技术借鉴与实践参考。

参考文献:

- [1] 刘志鹏,王磊.大跨度空间钢结构施工临时支承体系设计理论与应用[J].建筑结构学报,2019,40(增刊1):324-330.
- [2] 陈建国,张辉,李明等.复杂造型倾斜钢柱施工关键技术研究与应用[J].施工技术,2020,49(16):58-62.
- [3] 黄明,周涛,赵雪峰等.钢结构施工中临时支承卸载的受力转换与控制研究[J].工程力学,2021,38(7):188-196.