

不规则大悬挑大切角超高层建筑结构施工与变形控制技术应用

谢崇金 肖宁 沈星雨 李高阳 刘树杰

上海宝冶集团有限公司 上海市 200941

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15765

[摘要] 本文系统梳理了大悬挑与大切角设计中所体现的结构构成特征,并从施工控制与结构响应两个维度提出多项关键控制技术。针对异形节点的定位难题、错层构件的沉降不协、桁架端部的空间偏移与核心筒局部收缩的协同控制问题,依次引入激光投线校核、滑模平台调节、张力补偿装置及后浇带分区四类技术手段。而在施工全周期内,则构建面向实时响应的监测调控系统,提出时变响应节点、刚度反演系统、环境扰动自适应机制等动态策略。

[关键词] 不规则结构; 大悬挑; 大切角

引言:

近年来,城市用地紧张与建筑功能多样性需求推动超高层建筑不断突破传统结构形态限制,出现大量大悬挑与大切角等非标准几何布局的结构形式。这类不规则构造在造型语言上具有显著表现力。但从结构工程角度观察,其内部力学体系明显区别于常规刚架或剪力墙体系,结构力流路径复杂多变,刚度中心与质量中心往往错位严重。尤其在施工期间,临时状态下的受力组织难以稳定成型。在高耸构架与不对称荷载共同作用下,结构稳定性面临更高要求。本文旨在探究不规则大悬挑大切角超高层建筑结构施工与变形控制技术,以期复杂超高层项目提供可操作、可追踪的工程解决方案。

1、大悬挑与大切角设计的结构特征解析

1.1 大悬挑设计的结构特征

大悬挑结构是悬挑跨度不小于 4m 的悬挑结构,相对于普通悬挑结构来说,悬挑跨度更大,结构体系受力更加复杂。大悬挑设计通常出现在裙房挑出、塔楼异形轮廓、建筑边缘造型等构造区域。该类结构的显著特征是结构整体在重力方向上存在较长的无支撑悬出部分。此类布置会导致截面内弯矩显著增加,悬挑端部形成高应力区,进而诱发支座端剪力与负弯矩反应增强。在荷载路径分布上,水平荷载会因传力路径改变而加重核心筒或边缘框架的变形承载压力,形成竖向不均匀沉降趋势。大型悬挑结构常伴有节点连接复杂、力流分散且耦合性强的局部应力集中现象,容易在局部构件

中诱发扭转屈曲或板件翘曲。此外,在结构整体刚度协调性方面,悬挑部分与主结构的刚度差异显著,构件间的协同工作性能明显下降,导致力学响应随时间推移易产生阶段性转变。其空间稳定性严重依赖支座区抗弯构件的刚度配置,若设计不当,结构在施工或使用阶段将面临不可忽视的变形积累问题。悬挑部分与整体结构连接部位通常为关键控制点,其结构形式对构件间应力重分布及连接节点变形控制具有决定性影响。

1.2 大切角设计的结构特征

大切角结构设计广泛分布于建筑立面非正交转折处,尤其在异形塔楼与几何偏转立柱系统中表现突出。该类结构的基本特征是结构平面突变位置出现锐角或钝角连接,切角部位常构成受力路径的转折点。受此影响,水平力在该部位的传递方向发生急剧变化,造成局部构件受力状态突变,截面受力复杂化明显加剧。切角区域常伴随轴力偏心传递,导致构件内力非对称分布,进而引发局部构件变形方向失衡。此外,由于几何形状的不连续性,该类结构在风荷载作用下易形成非均匀负压区域,诱发结构局部振动增强。在连接区域,力流再分布通常集中于有限的节点范围,若节点构造未充分强化,极易成为疲劳破坏隐患点。与此同时,切角部位的几何突变会破坏结构整体刚度连续性,使得刚度分布在空间上呈现非协调态势,进一步加剧局部位移响应的非线性特征。由于切角设计常与视觉造型需求密切关联,其力学性能常处于形式服从功能的次位阶段,这一特征导致其在结构体系中

需以较高的安全储备系数抵消因几何突变所带来的力学不确定性。

2、不规则超高层建筑结构施工关键节点控制技术

2.1 激光投线系统

在大切角结构区域,构件间连接通常不遵循直角逻辑,节点角度偏离常规形态,人工校核易产生误判。在此类节点构造施工过程中,项目团队往往配置激光投线系统进行线形校核。该系统由高功率激光源、精密水平仪和电子控制终端组成,现场布置时需固定于结构基准面上,并调试水平与垂直角度,使投射线覆盖整个节点空间。施工操作员依据设计图纸,在现场选定若干参考点,并标识关键轮廓线与连接边界。系统启动后,投射线在空间中形成连续光轨,辅助技术人员比对已安装构件位置是否符合设计预期。若发现偏离,操作团队将调整构件朝向或更换连接件长度,确保轮廓收口准确。该技术尤其适用于构件交汇复杂、转角变化突出的区域,如塔冠斜梁节点、裙房挑梁转折处等。实施期间,数据记录人员需按周期采集误差值并归档,同时结合温度变化趋势,建立构件热胀冷缩与定位偏差之间的响应关系,从而提前预判后续施工段的线形偏移趋势。此类操作将施工精度控制与视觉反馈相结合,构建出实时响应的空间线形校核系统,提升了结构组装阶段对异形节点的可控性。

2.2 临时滑模平台

不规则结构中,存在高度、荷载差异显著的相邻构件区域,如塔楼转裙房节点或结构高差突变部位。这些区域常出现差异沉降,引发连接部位拉裂或局部变形异常。针对该类问题,工程团队设立临时滑模平台作为中间调节层,平台支设在高刚度钢筋混凝土基础之上,具备纵向滑动与水平微调能力。平台构造需结合现场结构布局提前预制,尺寸应覆盖错层接口完整面域。施工前,结构分析小组需完成区域沉降预估,并结合模型拟定平台初始预调曲线。在使用阶段,平台作为连接部位的工作界面,支撑上层结构的同时,通过可调底座与滑动轴承适应沉降发展趋势。当差异位移累积超过设计值时,平台将自动释放部分应力,避免局部节点因刚性过强而形成拉应力集中。平台撤除前,操作人员需逐点测量结构标高,确保结构沉降进入稳定阶段。该平台并非永久性结构,而是作为沉降控制过程中的动态构造干预手段,在结构错层施工中起到过渡调节功能。实际项目中,该系统常与

钢支撑系统联合部署,形成纵横向同步调节机制,提升结构组装整体的应变适应能力。

2.3 张力补偿装置

大悬挑桁架在施工期间往往处于悬臂状态,其端部因重力与温差共同作用出现明显下挠,为确保端头在最终定位时符合设计坐标,现场需配置张力补偿装置以进行位移控制。该装置由钢索、锚固端、张拉系统及行程限位装置构成。设备在桁架吊装前安装完毕,并预设张拉路径与荷载分配方式。桁架悬挂至设计标高后,技术人员需对端部垂度进行初测,并计算所需补偿力。装置启动时,张拉系统按分级增力模式施加张力,逐步修正构件空间位置。张拉过程中,施工人员同步观察端部位移曲线是否趋于设计曲线包络内,若出现偏差,将结合现场测量数据进行多点校核,再决定是否调整张力方向或增加局部锚固构件。装置本体设有安全卸载装置,确保在桁架与主结构对接完毕后快速解除外加力源,避免后期残余内力对结构产生影响。不同于一般的临时支撑系统,该装置强调可调性与响应性,其张拉行为与结构行为实现同步联动,形成施工力学控制闭环。工程团队通常在每次张拉前后记录初末状态数据,以此评价控制效果并优化后续施工策略。

2.4 后浇带分区设置

核心筒结构普遍承担垂直荷载与水平刚度的双重任务,而在大切角或几何非对称条件下,其不同区域所处温湿环境与荷载工况存在显著差异。在主体施工期间,这类差异极易诱发不均匀体积收缩或时间滞后变形。为应对这一问题,工程技术团队采用分区后浇带技术,以分隔结构初期收缩进程。具体操作中,技术人员首先依据结构构件材质、施工节奏与气候数据,划分关键收缩敏感区,并以此设定后浇带位置。一般而言,后浇带设于核心筒楼层转换处或楼板与剪力墙交界区域。该区域在初期混凝土施工中不做浇筑,而是保持约定时间的空置状态,施工人员在此布设封边模与钢筋锚固体系,并配置止水条与刚性隔断装置。待主体结构达到一定龄期后,再进行后期混凝土浇筑。补浇过程中,混凝土配比需重新设计,以兼顾早强需求与干缩控制,常采用双掺型减缩材料与微膨胀剂,并控制水胶比不超过0.36。施工完成后,项目部还需开展该区域收缩应变测量,并结合温度监测系统建立收缩变形演化曲线,从而验证分区策略是否有效实现构

件变形的空间协调性。该项技术在不规则结构中兼顾施工组织弹性与结构力学控制,是结构施工中不可或缺的应变调节手段。

3、超高层建筑结构变形全过程监测与施工调控策略

3.1 设置时变控制区段分级响应节点

在超高层建筑结构的施工过程中,结构响应并非静态不变,而是随着施工高度、温度变化和加载过程发生阶段性演化。针对这一动态特性,项目技术团队需要预先划定控制区段,并依据结构变形的时间敏感性设置分级响应节点。这些节点并不等距布设,而是根据变形发展趋势和关键构件受力历史分布规律决定。操作层面上,结构设计团队应联合施工方在BIM平台中划定每一时段需观测与响应的构造范围,并同步建立区段与时间的对应关系。随着施工节奏推进,监控系统需自动切换监测重点,使各阶段监测资源集中于当前最易发生变形的部位。每个响应节点内部应布设独立的数据采集装置和即时反馈系统,形成具备局部判断能力的小单元结构控制网。当局部构件的形变量接近预设临界值时,节点控制终端即刻激活,指令施工系统调整当前作业计划或停止相关荷载施加。各节点的数据还需定期汇总至中心数据库,供结构安全评估人员开展趋势分析与控制策略优化。

3.2 建立施工阶段结构刚度实时反演系统

超高层结构在逐层施工中,其整体刚度呈非线性增长,设计图纸所提供的理论刚度值无法准确反映结构当前阶段的真实力学特性。因此在施工过程中,项目方必须构建基于实测响应的刚度反演系统,动态识别结构刚度变化状态。该系统以结构受力响应数据为基础输入,结合既定有限元分析模型进行反向计算,实时还原当前结构各主要受力路径的刚度参数分布。实施路径上,监测小组需布设位移计、应变片及风荷载感应装置,并将采集数据输入分析模块。系统需采用不定参数反演算法,对观测数据与模型预估值进行误差分析,自动修正计算中各构件的刚度估值。在每一施工层完成后,模型必须更新一次,使结构行为预测始终保持与真实状态一致。一旦发现关键部位刚度下降或增长速度异常,结构团队将依据反演结果调整下一步施工重心或支撑策略。该方法所需的计算与监测密度远高于常规安全监测,但其提供的“结构实时状态图谱”是判断变形趋势、协调

施工顺序的关键参考。

3.3 采用气象荷载参数自动调整机制

高耸建筑在施工期间极易受风力、温度、湿度等外部气象条件影响,尤其在未封闭阶段,结构裸露区域对风压及热应变反应敏感。为避免施工期形变超限或结构响应剧烈波动,现场管理系统应构建气象荷载参数自动调整机制。技术团队需在塔楼外框布设多组风速仪、温湿传感器和表面温度扫描设备,并与气象预测数据接口联通,构建实时气象数据库。系统在运行时将感知数据与历史形变响应建立多变量回归模型,自动计算当前气象条件下可能引发的结构微观位移趋势。一旦预测值进入预警阈值,控制系统将提前调整施工工序,例如暂停大跨度构件吊装、临时卸载部分荷载或重新配置临时支撑设备。整个响应流程依赖全自动逻辑链路完成,不需现场人工干预。各工序负责人需在系统提示后审阅变更建议,并按流程实施操作。并且,气象参数模型需定期更新,引入新的观测因子,确保数据预测与实际响应保持一致性。

结语:

不规则大悬挑与大切角结构已逐步成为当代超高层建筑形态发展的关键设计趋势,而相应结构体系在施工与控制维度上的不确定性与非线性特征,使工程管理与结构安全保障面临新的挑战。在未来复杂高层建筑实践中,构造策略有望向智能化、模块化方向拓展,通过引入数字孪生、数据驱动建模等方式,进一步提高不规则结构施工与控制效率。

[参考文献]

- [1]顾晓.浅谈特厚基础底板大体积混凝土结构施工关键技术——以某超高层建筑工程为例[J].散装水泥,2025,(01):103-105.
- [2]刘春贵,胡欢.超高层建筑双向斜交钢管混凝土柱框架-核心筒结构施工技术探析[J].江西建材,2024,(10):355-358.
- [3]杨宗勉.某超高层建筑钢结构工程施工技术重点难点分析[J].建设科技,2024,(10):86-88.
- [4]田朋飞.超高层建筑大悬挑钢桁架结构施工与模拟分析[J].安徽建筑,2025,32(06):61-63.
- [5]田伟,马俊杰,张旭乔,等.超高层建筑施工过程竖向变形差控制技术研究[J].建筑结构,2024,54(02):41-46.