

Research on key construction technologies for cantilever steel structure systems

Jiahui Chen Hui Li Ying Yu

Zhejiang Dadongwu Group Construction Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang, 313000, China

Abstract

This article takes a public building in Shanghai as the research object, elaborating on the key construction technologies for cantilever steel trusses and cantilever beams. By utilizing Midas Gen to establish a model for simulation analysis throughout the entire construction process, the article focuses on simulating key procedures such as the installation and unloading of large cantilever trusses and cantilever beams with temporary supports in place. A multi-parameter displacement and stress monitoring scheme is designed to ensure the safety of the construction process, providing reliable technical support for deformation control during the construction of cantilever structural systems.

Keywords

Cantilever structure; Steel structure; Simulation analysis; Displacement monitoring

双向大悬挑钢结构关键施工技术研究

陈佳辉 李慧 余颖

浙江大东吴建筑科技有限公司，中国·浙江 湖州 313000

摘 要

本文以上海某公共建筑为研究对象，阐述了悬挑钢桁架及悬挑梁钢结构施工关键技术；结合Midas Gen建立模型进行施工全过程仿真分析，重点模拟了大悬挑桁架、悬挑梁设置临时支撑高空散件安装、卸载等关键工序，设计多参数位移监测方案，确保施工过程安全，为悬挑结构体系施工变形控制提供可靠技术支持。

关键词

悬臂结构；钢结构；仿真分析；位移监测

1 引言

本项目位于上海市崇明区，单体总建筑面积 1.2 万 m²，其中地上建筑面积 9303m²；地下 1 层，地上 3 层。建筑功能包含 9 个开放式阅览室（智能馆藏体系，“藏、查、借、阅、参”五位一体一站式服务）、讨论室、多媒体区、学术交流区等，并融入光伏发电、雨水回收等生态可持续设计，构建了集知识获取、学术创新、生态体验于一体的复合型学术空间。

结构层面：设有单层地下室，采用现浇钢筋混凝土结构，地上采用钢结构，箱型钢柱下插至地下室底板，最大截面尺寸达 B900x800x90x90，楼面钢梁分布在二层至出屋面机房层，包含 H 型及箱型钢梁两种类型，最大截面分别为 H1650x600x32x50、B900x300x20x20，钢材材质包含 Q355B 及 Q460GJB，其中 Q460GJB 占比超过 50%。



图 1 整体效果图（西北视角）

项目首层标高 -0.050m，2F 层标高 5.300m，3F 层标高 10.700m，屋面标高 16.100m，出屋面机房层标高 19.6m。

项目以“以书为核，阅空星周”为设计灵魂，采用钢框架-支撑结构体系，结合立面悬挑桁架、各楼面悬挑钢梁，外立面以玻璃幕墙与金属框架为主辅以木质元素组成整体幕墙系统，既保证空间开阔，又增强结构稳定性，通过空间、生态与技术的完美融合，打造出既传承知识传统又拥抱未来的智慧殿堂。

【作者简介】陈佳辉（1996-），男，中国浙江绍兴人，本科，工程师，从事钢结构施工研究。

针对项目 25.2m 跨度的悬挑桁架构件重量大、运输及吊装难度高，高强厚板焊接难度大等施工过程变形与焊接控制难点，开展如下关键施工技术研究。

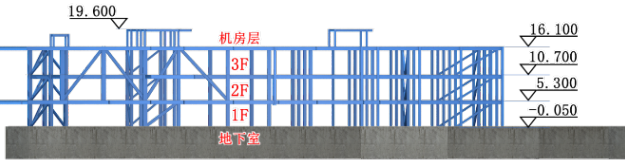


图 2 结构南立面图

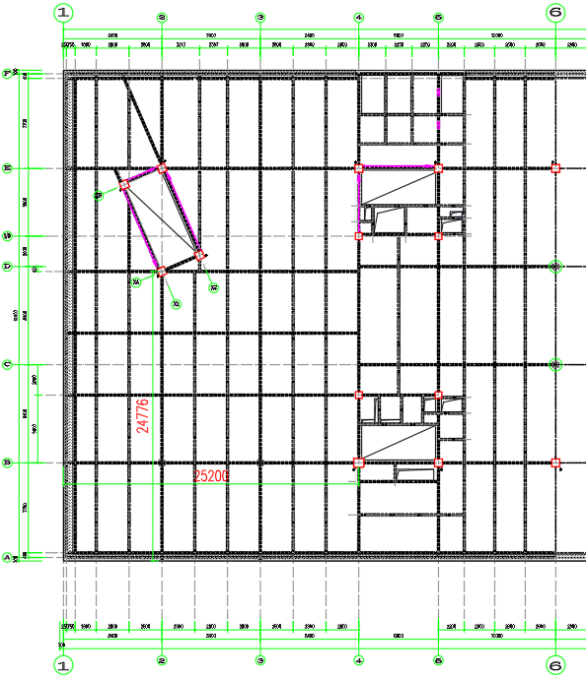


图 3 1-6 轴 2F 层平面图

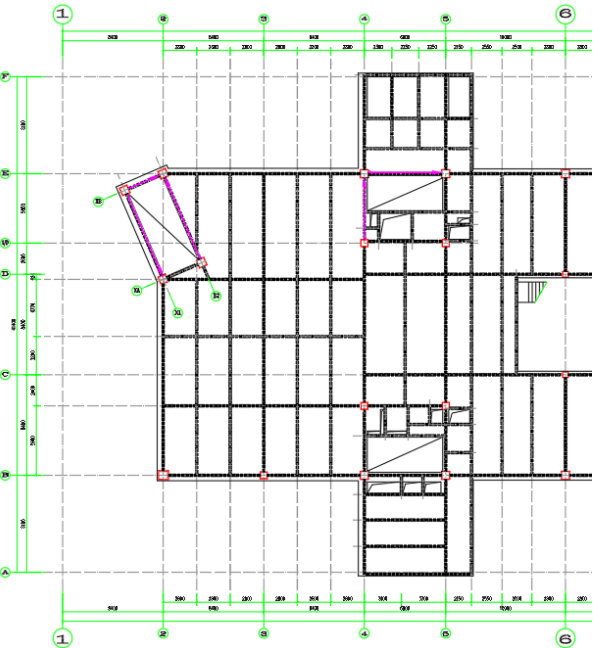


图 4 1-6 轴 3F 层平面图

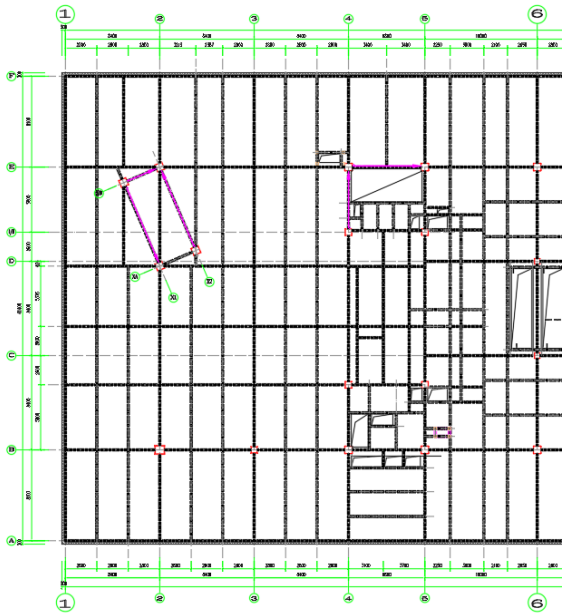


图 5 1-6 轴屋面层平面图

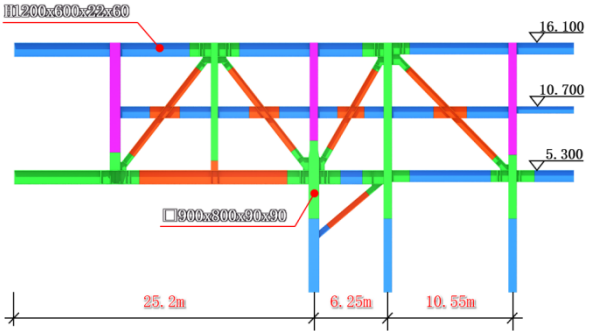


图 6 悬臂桁架典型剖面图

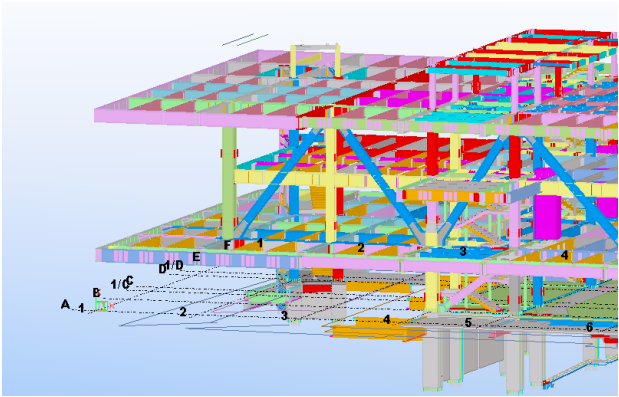


图 7 三维视图

2 重难点分析及关键控制技术

2.1 大悬挑桁架施工变形控制

B 轴处 25.2m 悬挑桁架构件重量大，远超现场塔吊性能，整体加工长度同样超过最大运输限制，须工厂分段加工运输至现场进行高空散件吊装，构件多段焊接易产生累积误差并

出现自重下挠变形^[1]。

提前通过有限元分析模拟施工全过程。安装阶段设计悬挑端部支撑,通过“深化模型起拱”结合“现场拼装起拱”,精确调整构件安装形态;卸载阶段,应用多参数化健康监测,严格控制杆件应力及变形分区分级同步卸载,确保结构最终形态符合设计要求。

2.2 高强厚板焊接质量控制

本项目钢材强度等级高且占比较大,其中 Q460GJB 占总量的 58%,远超常规项目,且最大焊接板厚达 90mm,高碳当量、淬硬倾向大均易产生冷裂纹,焊接后往往存在较大的成型应力难以释放,存在层状撕裂的风险。

从原材料端开始严控构件质量,板材型材进场复验,斜向探伤确保 Z 向性能,开展焊接工艺评定并优化,落实工艺指导及加工过程监督验收。

优选现场焊工,提供有利施焊环境,利用电加热技术提前预热,控制焊层间接温度,厚板采用多层多道错位焊接,焊后百分百探伤,及时返修,确保焊接成型质量。

3 施工仿真模型构建与变形预判

3.1 仿真模型搭建

3.1.1 计算模型:

采用 Midas Gen 软件建立三维仿真模型, B 轴 2F~屋

面层为 25.2m 长悬臂桁架层,二层及屋面层弦杆(梁) H1200×600×22×60、三层弦杆(梁) H1000×500×20×40、斜腹杆 H600×500×50×60、竖腹杆 B900×800×90×90,材质均为 Q460GJB,其余楼面钢梁材质主要为 Q355B,弹性模量 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$,泊松比 0.3,密度 7850kg/m^3 。

3.1.2 边界条件:

根据设计图,与地下室连接的钢柱,其根部设置为刚接边界;钢梁与钢柱、钢梁与钢梁均简化设置,按刚接处理;临时支撑设置底部固定约束,顶部与钢梁或桁架节点按铰接考虑;

3.1.3 计算工况:

DL 为 1.1 倍结构自重,由软件自算;其中 1.1 为节点重量系数。

承载力极限状态验算工况组合为: 1.3DL

正常使用极限状态验算工况组合为: 1.0DL^[9]

3.2 施工阶段划分

根据悬挂结构体系的受力特点,结合施工仿真分析及设计单位要求,整体施工顺序为:临时支撑搭设、钢结构安装及楼承板铺设(不浇筑混凝土)逐层施工(2F 层→3F 层→屋面层→出屋面机房层)、→屋面层、3F 层临时支撑拆除→混凝土自下而上逐层依次浇筑→2F 层临时支撑拆除,如图 8 所示:

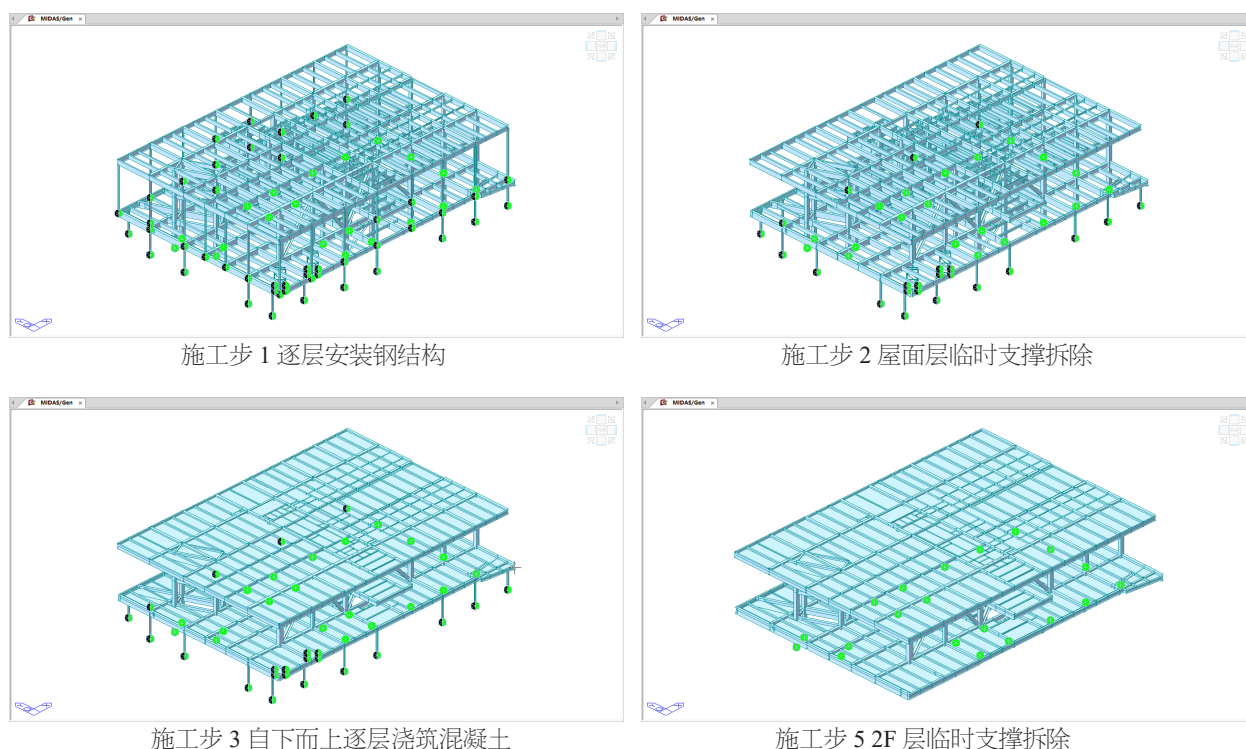
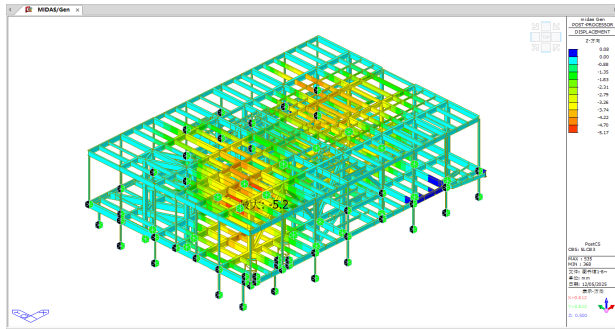


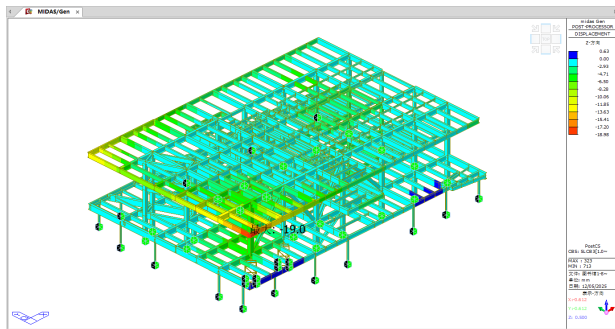
图 8 施工阶段模型示意图

3.3 仿真分析结果

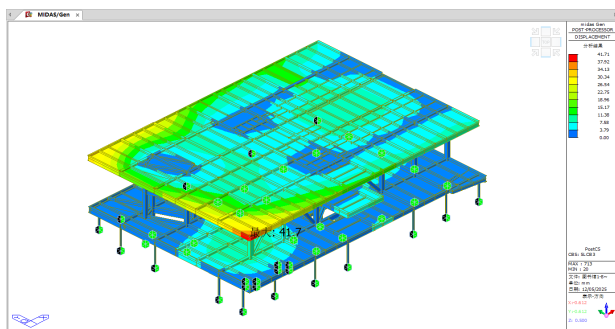
施工过程的 Z 向位移云图见图 9，施工过程的构件的应力云图见图 10。



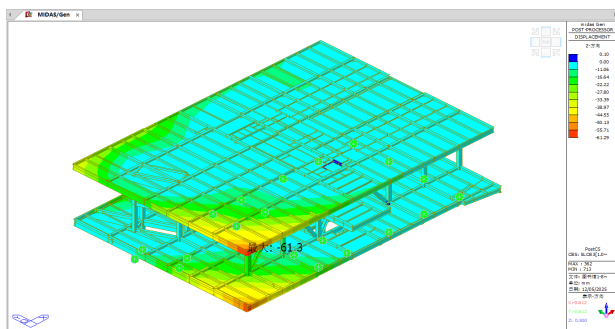
施工步 1 (最大 Z 向位移 -5.2mm)



施工步 2 (最大 Z 向位移 -19.0mm)

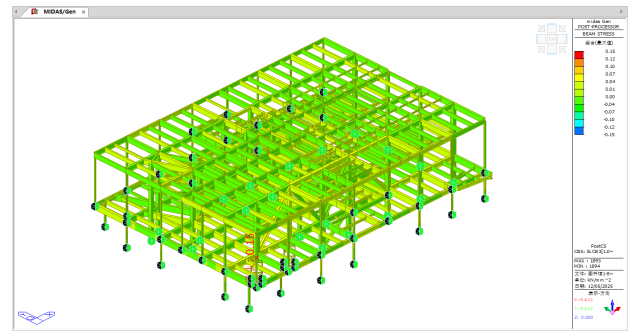


施工步 3 (最大 Z 向位移 41.7mm)

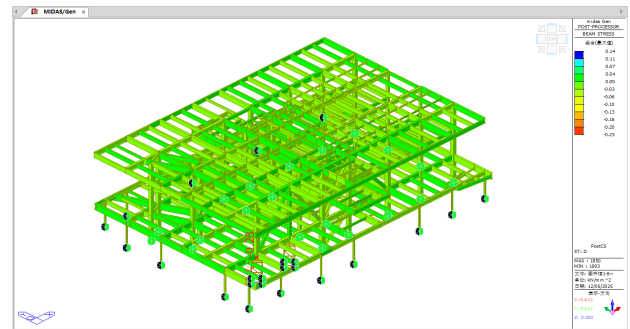


施工步 4 (最大 Z 向位移 61.3mm)

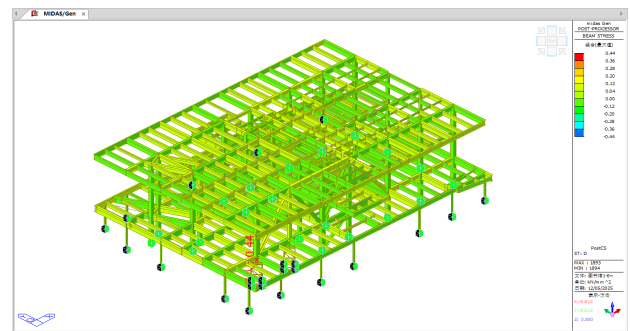
图 9 施工过程的 Z 向位移云图 (单位 :mm)



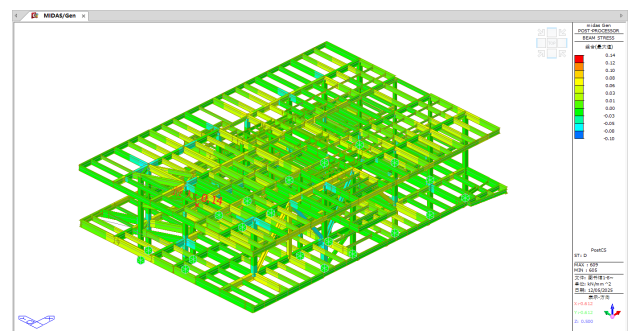
施工步 1 (最大应力比 0.15)



施工步 2 (最大应力比 0.23)



施工步 3 (最大应力比 0.44)



施工步 4 (最大应力比 0.14)

图 10 施工过程的构件的应力云图 (单位 :mm)

根据上述仿真分析，施工全过程最大竖向变形出现在悬挑端，阶段 2 卸载完成后变形量达 19.0mm，阶段 3 浇筑完成后最终变形量 41.3mm (占悬挑跨度 $L=25.2\text{m}$ 的

1/610, 满足规范要求), 变形趋势呈“累积增长”特征; 施工过程中结构处于弹性应力状态, 包络应力比最大值为 $0.44 \leq 1.0$, 结构安全且预留较大。

4 多参数健康监测及数据处理

4.1 多参数健康监测技术应用

针对本工程悬挑桁架结构受力复杂, 施工过程中涉及临时支撑搭设、钢结构吊装、混凝土浇筑、卸载成型等关键环节, 主要受力构件及关键部位的内力、位移等参数的变化情况不明, 为确保成型状态与初始设计达呈一致, 结构安全处于容许范围内, 设计采用了一套多参数化健康监测技术, 对结构应力应变及位移变化等关键参数进行实时采集、智能分析与可视化呈现, 为施工决策提供精准数据支撑^[2]。

4.2 竖向位移监测

本项目 1-9 轴二层至屋面层楼面钢梁均为悬挑钢梁, 最小悬挑长度 7.7m, 最大悬挑长度 8.4m, 施工及卸载过程中在悬挑钢梁端部设置全站仪测量点结合液体静力水准仪, 重点监测悬挑钢梁端部在施工及卸载过程中的竖向位移变化, 满足钢结构及后续幕墙专业的技术指标要求。二层至屋面层分别设置 21 处、4 处、19 处监测点, 位移监测结果如下图所示。

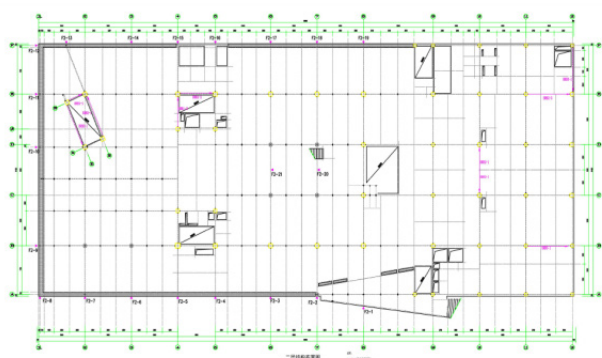


图 11 二层悬挑钢梁位移监测布置图

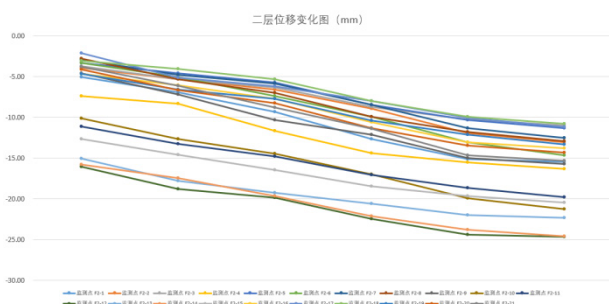


图 12 二层悬挑钢梁位移变化图

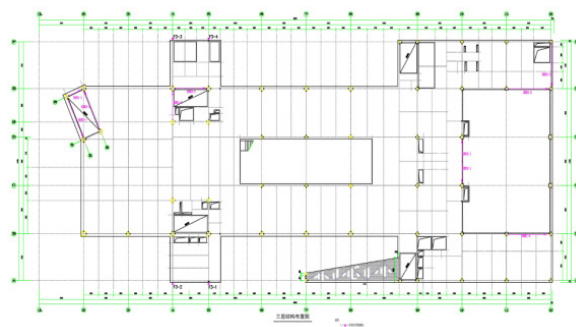


图 13 三层悬挑钢梁位移监测布置图

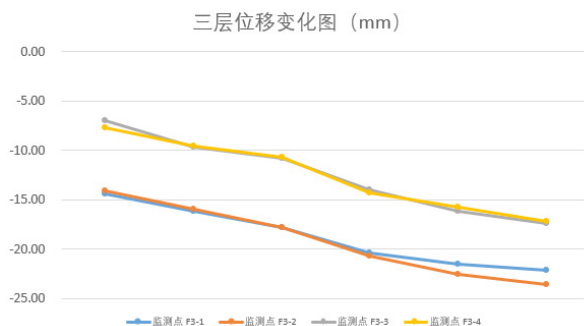


图 14 三层悬挑钢梁位移变化图

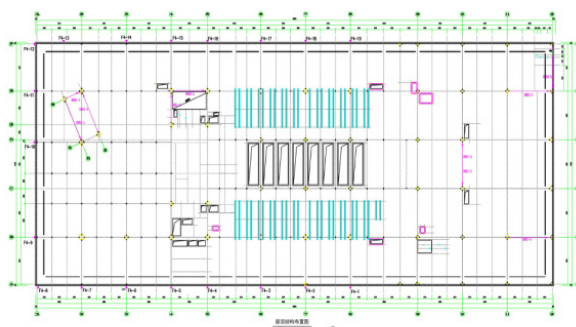


图 15 屋面悬挑钢梁位移监测布置图

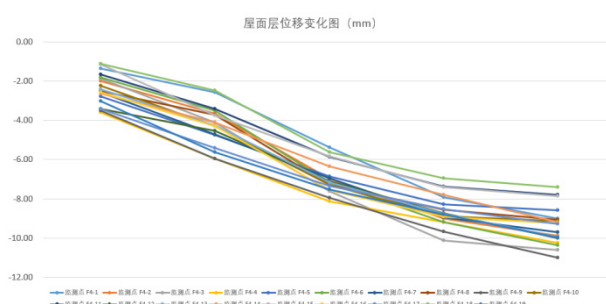


图 16 屋面悬挑钢梁位移变化图

4.3 应力应变监测

本项目主要受力结构为 B 轴处的悬挑桁架，在 B 轴桁架上下弦杆、斜腹杆、竖腹杆(钢柱)上设置 28 处应力监测点，应力监测结果如下图所示。

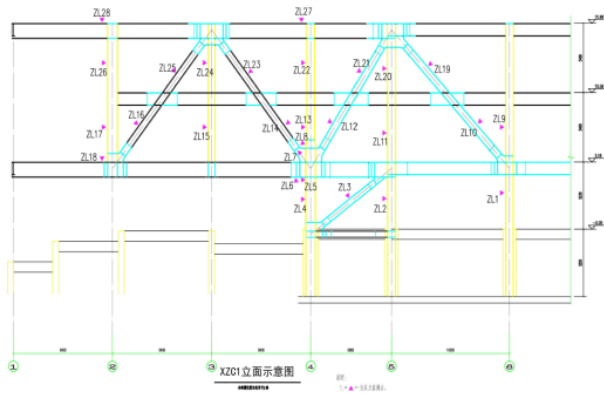


图 17 悬挑桁架应力监测布置图

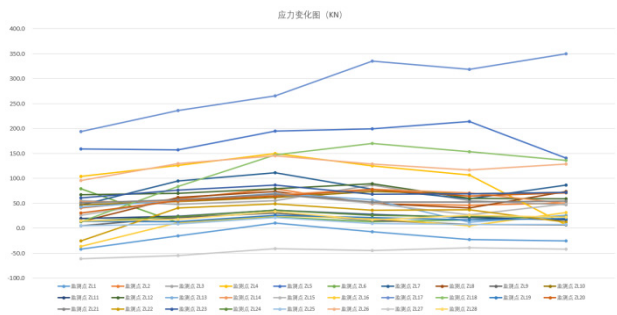


图 18 悬挑桁架应力变化图

4.4 数据对比分析

从上述整体数据来看，所有悬挑钢梁的位移变化趋势正常，与有限元模拟分析结果吻合，应力及位移变形数据均在允许范围内，证明大悬挑桁架施工技术安全可行^[3]。

5 结语

本文以上海某公共建筑双向大悬挑钢桁架结构为研究载体，针对大悬挑结构施工变形控制及高强厚板焊接质量控制两大核心难点，开展了系统的施工技术研究，主要结论与成果如下：

构建了基于 Midas Gen 的施工全过程仿真分析方法，精准预判了 25.2m 大悬挑桁架在各施工阶段的变形与应力分布规律，为施工方案优化、起拱值确定及分级卸载策略制定提供了科学依据，有效规避了施工盲目性。

提出了“双级起拱 + 分级卸载”的大悬挑桁架变形控制技术，及全流程高强厚板焊接质量管控体系，通过工厂分段加工、现场高空精准拼装、焊接参数优化及焊后全检等措施，成功将悬挑结构最终变形量控制在 41.3mm（1/610 跨度），焊接接头一次合格率达 100%，确保了结构施工质量与安全。

应用多参数健康监测系统，实现了施工过程位移、应力应变的实时动态监测，监测数据与仿真结果高度吻合，形成了“仿真预判 - 施工控制 - 实时监测”的一体化技术体系，为施工过程动态管控提供了可靠数据支撑。

本研究形成的双向大悬挑钢桁架结构施工技术体系，成功解决了项目施工中的核心技术难题，保障了工程顺利实施。该技术体系具有较强的针对性与可操作性，可为同类大悬挑钢结构工程的施工提供重要的工程借鉴与技术参考。

参考文献

[1] 王欣鹏 大悬挑钢桁架悬挂结构体系顺作法施工技术 2021年全国土木工程施工技术交流会论文集（中册），2021，412-416

[2] 吴水根 高层建筑悬挂钢结构施工过程监测分析 施工技术，2015，44（14），39-41

[3] 张微 高层悬挂结构建造全过程数值模拟分析 施工技术（中英文），2025，54（08），53-60