

Research and Application of Closed Timing for Extended Arm Truss in Super High-rise Buildings

Pengchong Zhao

CCCC No.2 Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266073, China

Abstract

With the continuous development of China's social economy, elevation and super high-rise buildings have developed rapidly in China. Due to the simple structural system of outrigger truss + core tube, good seismic performance, high compressive strength and low construction cost, many super high-rise buildings under construction in China also adopt this lateral force system. Through the research of this topic, a mature stress monitoring system is established based on Hubei Financial Holding Building to achieve effective control of the construction process and ensure the safety of construction. At the same time, by monitoring the stress change of the outrigger truss after closure, the stress change of the outrigger truss and the characteristic law of the related settlement monitoring data with time are studied, which provides guidance for the subsequent determination of the sealing timing of the outrigger truss of similar super high-rise structures. After nearly two years of real-time monitoring data, it shows that during the construction of Hubei Financial Holding Building, the strain monitoring parameters of each component are normal to meet the needs of building safety. The outrigger truss closure scheme is safe and feasible, has good generality, and has a good demonstration effect on similar building construction.

Keywords

high-rise buildings; strain monitoring; reach truss; closed timing

超高层伸臂桁架封闭时序研究与应用

赵鹏翀

中交一航局第二工程有限公司, 中国·山东 青岛 266073

摘 要

随着中国社会经济的不断发展, 高层及超高层建筑在中国得到迅速发展。由于伸臂桁架+核心筒结构体系简单、抗震性能好、抗压强度高、建筑成本低, 目前国内在建的多个超高层建筑也均采用该抗侧力体系。通过本课题的研究, 依托湖北金控大厦建立一套成熟的应力监测系统, 实现对施工过程的有效控制, 确保施工的安全性。同时通过监测伸臂桁架在封闭后的应力变化情况, 研究伸臂桁架应力变化与相关沉降监测数据随时间发展的特征规律, 为后续同类超高层结构伸臂桁架封闭时序的确定提供指导。经过近两年的实时监控数据表明, 湖北金控大厦施工期间, 各构件应变监控参数正常, 满足建筑安全需求。该伸臂桁架封闭方案安全可行, 具有良好的推广性, 对同类建筑施工具有良好的示范作用。

关键词

高层建筑; 应变监测; 伸臂桁架; 封闭时序

1 引言

伸臂桁架作为超高层重要的抵抗侧移结构, 对主体结构的整体刚度和建筑的稳定性具有重要影响, 因此超高层项目施工选择合适的伸臂桁架封闭时间节点对于伸臂桁架是否能够长期、安全工作具有重要意义, 湖北金控大厦对伸臂桁架的内力随施工进度发展规律的分析研究, 确认各伸臂桁架的合理封闭时序, 分析其相互影响程度, 总结控制方法, 为后续同类高层结构伸臂桁架封闭时序的确定提供指导。

【作者简介】赵鹏翀(1992-), 男, 中国河北秦皇岛人, 本科, 工程师, 从事建筑工程研究。

2 工程概况

2.1 工程简介

湖北金控大厦为新建商业服务业设施项目, 位于武汉市武昌区中北路青鱼嘴, 地处武汉核心地段, 东北临兴国路, 东南临安邦路, 西南临田汉大剧院, 西北临中北路。

项目建筑高度约 176.95m, 地上 40 层, 地下 3 层, 裙楼 4 层; 总用地面积 13600m², 建筑面积 134545.41m², 其中地上办公面积 87405.34m², 商业面积 4586.62m², 地下室建筑面积 33600m²。根据初步设计, 大厦自上而下划分为总部办公、高区办公、中区办公、低区办公和辅助裙房五大功能区。项目整体结构形式为框架核心筒形式, 设计使用年限 50 年。

2.2 检测依据

根据相关技术的要求,在检测中应遵守现行的国家和行业的规程、规范和标准主要有:中华人民共和国国家发展和改革委员会以及国家建委颁发的所有现行技术规范。

具体检测及参考依据如下(如标准出现更则按新版本执行,包括但不限于以下标准和规范):

- ① JGJ 302—2013《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》。
 - ② GB50010—2010《混凝土结构设计规范》。
 - ③ GB50017—2017《钢结构设计标准》。
 - ④ JGJ 8—2016《建筑变形测量规范》。
 - ⑤ GB/T 12897—2006《国家一、二等水准测量规范》。
 - ⑥ JGJ 8—2016《建筑变形测量规范》。
 - ⑦ GB 50026—2007《工程测量规范》。
- 委托方提供的相关资料及委托检测合同。

2.3 检测范围及内容

根据 JGJ 302—2013《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》要求,对建筑高度不小于 300m 的高层建筑或设计文件有要求的工程应进行施工过程中的结构监测。应监测的内容有基础沉降、应力监测、温度监测。宜进行的监测项目有:结构竖向变形监测、结构平面变形监测及风速监测。

本项目作为超高层项目,总高度为 176.95m,设计文件中并无明确要求。但鉴于在超高层建筑的施工监测和运营监测中,结构的内力是一个重要的参数,是反映结构受力情况最直接的参数,跟踪结构关键构件施工过程及运营过程中的内力变化,是了解施工过程形态和受力情况最直接的途径。拟计划通过对金控大厦在施工过程关键部位构件应变情况及构件温度进行监测,用于把握结构的应力情况,并考虑相

变温度效应,确保结构的安全性。

3 监测点布置方案

查阅及收集结构原始图纸资料,通过相关资料的查阅及相关情况的调查,明确相关技术参数。

同时通过现场调查了解现场环境,对检测方案的现场可操作性进行评估,以便能及时对方案进行调整。

根据本研究课题的目的,现制定监测点布置方案如下:监控周期为施工全周期,监控频率是实时监控^[1]。

建筑主体结构布置监测点的部位为:①地下室负三层剪力墙、柱;②首层、避难层的框架柱、核心筒等主要受力构件;③ 22 层和 33 层的伸臂桁架。

3.1 地下室负三层监测

根据地下室负三层的墙柱布置图(见图 1)以及监测要求:

- ①主楼部分选择在框架柱四角及长边中部选择一个柱作为监测点,每个柱选择两个侧面分别设置表贴式应变计,共计 6 个构件,12 个监测点。
- ②核心筒选择筒体四角及 2 段剪力墙布置测点,核心筒共布置 6 个构件,6 个监测点。
- ③裙楼每边选择 1 个构件作为监测点,共 4 个构件,8 个监测点。

每 4 个应变计接 1 个无线采集终端,避免传感器布线被施工破坏影响监测效果,每个无线采集终端采用 6 节 5 号南孚电池供电,避免缺电困扰,无线采集终端之间相互无线自组网,省去布线困扰,避免施工破坏;每一层安装 1 套智能数据采集仪,采集仪与采集终端之间无线连接,采集仪控制无线采集终端对传感器进行数据采集并将数据上传到云平台。

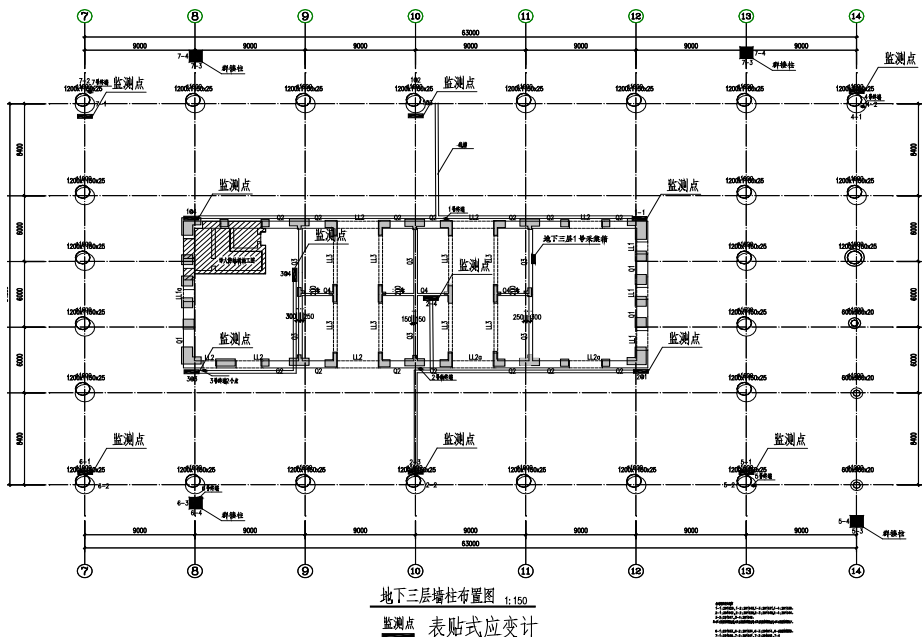


图 1 地下室负三层应变计布置图

地下室负三层共布置 22 个构件，共 26 个监测点；布置 7 台无线采集终端。

3.2 首层、避难层（22、33 层）的框架柱、核心筒等受力构件监测

①首层的框架柱、核心筒、裙楼等受力构件。

A. 主楼部分选择在框架柱四角及长边中部选择一个柱作为监测点，每个柱选择两个侧面分别设置表贴式应变计，共计 6 个构件，12 个监测点；

B. 核心筒选择筒体四角及 2 段剪力墙布置测点，核心筒共布置 6 个构件，6 个监测点。

首层监测点共布置 12 个构件，共 18 个监测点；布置 5 台无线采集终端（见图 2）。

②避难层的框架柱、核心筒等受力构件。

该楼避难层为 22 层、33 层，选择在框架柱四角选择一

个柱作为监测点，每个柱选择两个侧面分别设置表贴式应变计，同时对伸臂桁架处的柱布置测点进行监测，核心筒选择四角及每边中部布置监测点，同时选择 1 处剪力墙布置监测点^[2]。

22 层共布置框架柱测点 6 个，核心筒构件 4 个；共 16 个监测点（见图 3）。

33 层共布置框架柱测点 4 个，核心筒构件 4 个；共 12 个监测点。

3.3 22 层、33 层的伸臂桁架监测

① 22 层伸臂桁架共 3 榀桁架，其中 SBHJ1 一榀，SBHJ2 两榀，监测时选取 SBHJ1、SBHJ2 各一榀，每榀布置 3 个监测点，分别布置在上弦杆、下弦杆及腹杆位置，共 6 个监测点。

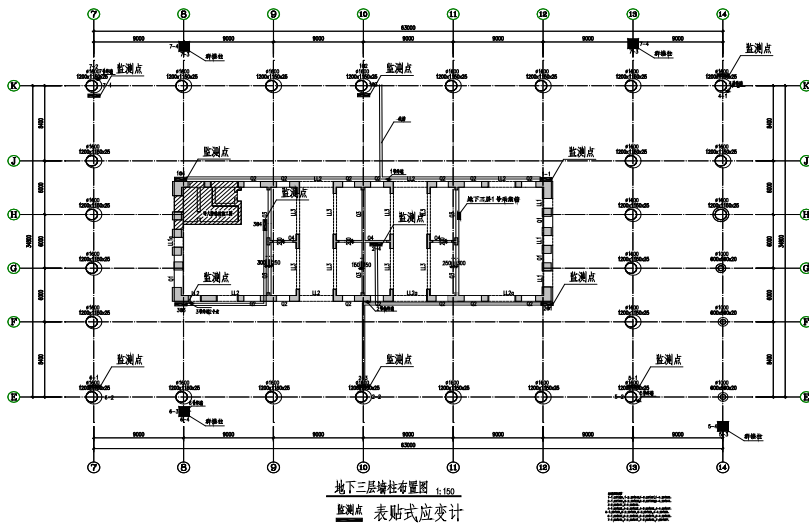


图 2 首层应变计布置图

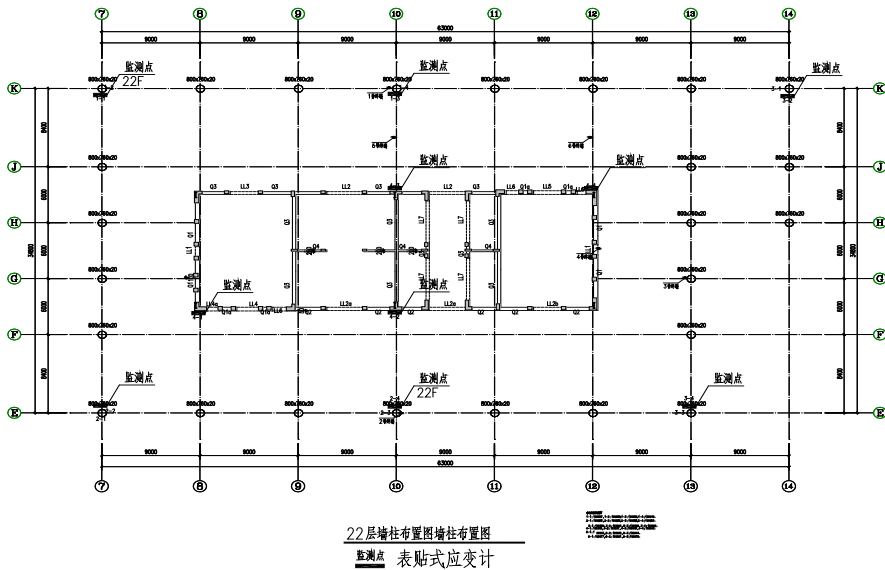


图 3 22 层应变计布置图

② 33 层伸臂桁架共 3 榀桁架，其中 SBHJ3 一榀，每榀布置 3 个监测点，共 6 个监测点，监测点布置见图 4，图 5。

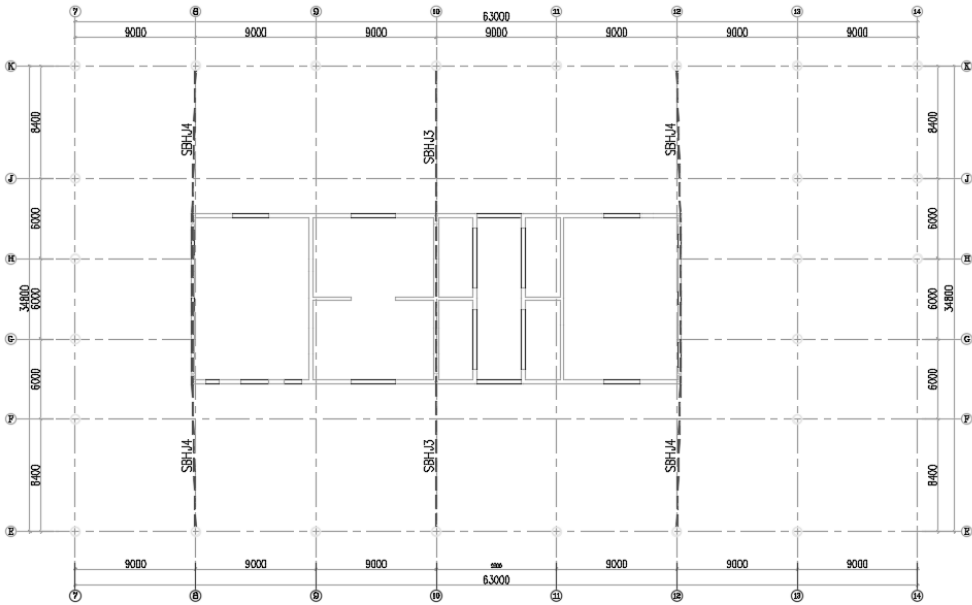


图 4 33 层伸臂桁架平面布置图（SBHJ3 一榀、SBHJ4 两榀）

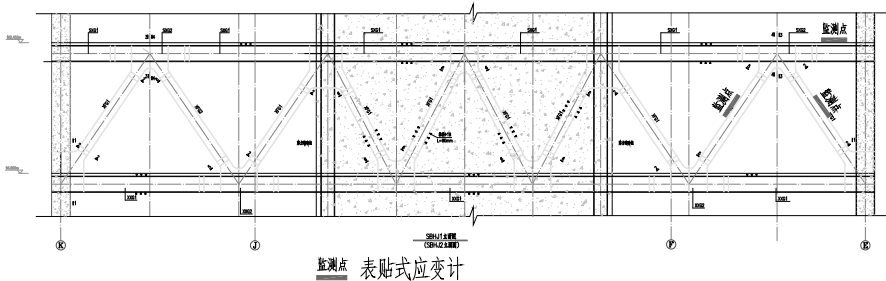


图 5 33 层伸臂桁架应力应变监测点

4 监测设备及系统

4.1 拟在建筑主体上投入的监测设备

根据监测内容，拟在建筑主体上投入的监测设备见表 1。

4.2 采集终端

每个监测点 4 个应变计接 1 个无线采集终端，避免传感器布线被施工破坏影响监测效果，每个无线采集终端采用 6 节 5 号南孚电池供电，避免去电困扰，无线采集终端之间相互无线自组网，省去布线困扰，避免施工破坏；每一层安装 1 套智能数据采集仪，采集仪与采集终端之间无线连接，采集仪控制无线采集终端对传感器进行数据采集并将数据上传到云平台。

智能采集仪主要用于采集记录多道振弦式传感器的实时数据，并后续对现场采集的数据进行分析预测，及时报警。而且采集可扩展 GPS 无线上传，可配套使用监控平台，可以连续长期实时数据上传。

表 1 拟投入的监测设备表

类别	产品名称	监测项目	单位	地下 3 层	首层	22 层	33 层	拟定数量
传感器	表面式应变计（带温度）	应变 / 温度	个	26	18	24	20	88
	无线采集终端	/	台	7	4	6	5	22
自动化采集	智能采集仪	/	台	1	1	1	1	4
安装工具耗材	二芯屏蔽电缆	/	m	300	300	200	200	1000
	保护线槽	/	m					1000

4.3 表面式应变计

表贴式应变计广泛适用于长期安装在水工建筑物或其他混凝土结构物（如梁、柱、桩基、挡土墙、衬砌、墩以及基岩等）表面，测量埋设点的线性变形（应变）与应力，同

时可兼测埋设点的温度。加装配附件可组成钢板计、无应力计等多种测量应变的仪器。

当结构物受力或因温度变化发生线性伸缩变形时,与结构物刚性固连的应变计产生同步变形,通过前、后端座传递给振弦使其产生应力变化,从而改变振弦的固有振动频率。激励与信号拾取装置激励振弦使其发生谐振,同时拾取其振动频率信号,此信号经电缆传输至读数装置,即可测出被测结构物的线性改变量,此改变量与仪器标称长度的比值即为应变值。应变计附设温度计可同步测出埋设点的温度值^[3]。

4.4 在线监测管理系统

引入智博联在线监测系统全程对数据进行采集监控。通过自动化采集系统采集数据,然后将数据自动化上传至智能数据云平台,智能数据云平台可以将收到的监测数据进行汇总,分析,以及展示,并且平台有自动上传和手动上传两种方式,可以兼容上传人工观测的数据。同时可在监测数据发生超限变化时对监测人员以及业主进行预警。不仅如此,业主也可在需要的时候登陆平台自行查阅本项目的相关资料,实时数据(见图6)。

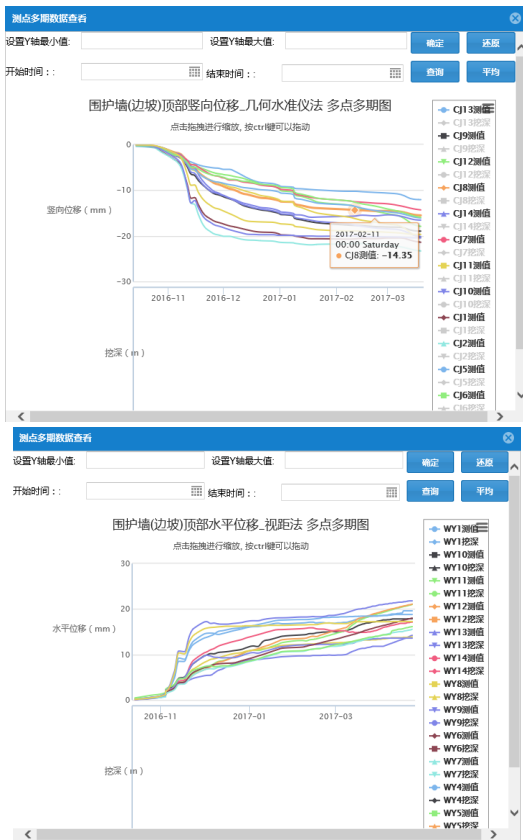


图6 智能数据云平台数据

5 超高层构件应力应变发展规律及伸臂桁架封闭时序研究

高层和超高层建筑工程量大,结构形式复杂,施工周

期长。在施工期间,混凝土构件发生收缩、徐变,上部荷载的不断增加,混凝土浇筑前后钢构件的构件内力也会产生变化,建筑结构的构件应力处于相对复杂状态,仅通过结构理论计算无法精确控制。因此,需要在施工过程中,对应力变化显著、结构重要性突出、需要严格控制变形或内力的构件进行选择牲监控。

根据施工进度及研究,2020年8月10日完成金控大厦负三层及首层的应力监测点、2021年4月30日安装完成22层的应力监测点、2021年6月16日安装完成33层的应力监测点。

5.1 应变数据采集及计算方法

本研究采用带测温功能的振弦式应变计,其应变计算公式:

$$\varepsilon = k(f_i^2 - f_0^2) + K_T(T_i - T_0) \quad (1)$$

式中: ε ——当前时刻相对初始时刻的应变值, $\mu\varepsilon$;

k ——振弦式应变计标定系数, $\mu\varepsilon / (\text{Hz}^2)$;

f_i^2 ——振弦式应变计当前时刻的输出频率模数, Hz^2 ;

f_0^2 ——振弦式应变计初始时刻的输出频率模数, Hz^2 ;

K_T ——振弦式应变计温度修正系数, $\mu\varepsilon / ^\circ\text{C}$;

T_i ——振弦式应变计当前时刻的温度值, $^\circ\text{C}$;

T_0 ——振弦式应变计初始时的刻温度值, $^\circ\text{C}$ 。

通过数据采集系统,可实时监控各监控点的温度情况及应变参数,通过应变及应力公式,可以计算构件的附加应力^[4]:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$

式中: ε ——材料的应变值, $\mu\varepsilon$;

E ——材料的弹性模量;

σ ——材料的应力。

5.2 湖北金控大厦内外筒应力应变特征

基于监控方案,湖北金控大厦各结构层内筒及外筒各监测点应变监测时程见图7。



图7 伸臂桁架布置及应变计安装

通过对比分析可知:

①湖北金控大厦负三层及首层外筒(巨型柱)测点累积应变值均为负值,应力状态为受压,符合典型受压构件受力特征。初始相对应力记为零,随结构施工,压应力逐渐增大,内力稳定呈线性增长。在监测进行约18周后,各测点累积应变值约达到最大值的90%左右,并随安装工程进行

出现周期性的变化。至30周左右,应变达到最大值。至施工结束后半年拆除检测设备,各构件应力基本稳定。

②负三层外筒各测点最大累计应变值控制在 $-100\sim-200\mu\epsilon$ 。负三层内筒各测点最大应变值控制在 $-50\sim-100\mu\epsilon$ 。首层外筒各测点最大应变值控制在 $-150\sim-250\mu\epsilon$ 。负三层内筒各测点最大应变值控制在 $-140\sim-180\mu\epsilon$ 。内筒C60混凝土最大附加应力约6.6MPa,外筒钢结构部分最大附加应力约40.3MPa。整体看,外筒应变值大于内筒。柱体应力状态相对稳定,远低于结构设计值,满足施工阶段安全要求。

③22层内外筒各测点最大累计应变值控制在 $-100\sim-150\mu\epsilon$ 。33层内外筒各测点最大累计应变值控制在 $-130\sim-160\mu\epsilon$ 。内外筒最大附加应力相近。内筒C50混凝土最大附加应力约5.8MPa,外筒钢结构部分最大附加应力约30.2MPa。满足施工阶段安全要求。

5.3 湖北金控大厦伸臂桁架应变变化特征

基于BIM软件模拟建模方案,湖北金控大厦项目建筑高度约176.95m,地上40层,地下3层,裙楼4层。其中,在22层及33层设置两道伸臂桁架。

从结构的整体性和施工便捷角度而言,伸臂桁架越早连接越合理。因此在设计初期可适当考虑变形差异引起的附加应力,在设计允许的范围内为变形差异引起的伸臂桁架附加应力预留一定应力富余空间,在满足应力要求的前提下,尽早连接。基于此,可以以附加应力水平为控制目标给出其合理安装时序的确定方法。

经有限元建模计算,当核心筒浇筑至29层时,开始封闭第一道伸臂桁架,当核心筒浇筑至39层时,开始封闭第二道伸臂桁架。伸臂桁架预留施工过程设计富余附加应力在40MPa^[5]。

由监测结果可知:

①伸臂桁架间的相互影响作用很小。两道伸臂桁架在封闭后,快速进入受拉状态,应力变化曲线与内外筒变形差成正比。

②伸臂桁架在封闭前一个月内,应力应变变化较为明显。一个月左右随施工过程继续线性发展。在工程施工末期,结构未封顶前,两桁架附加应力变化放缓。22层桁架应变控制在 $-150\sim-180\mu\epsilon$,33层桁架应变控制在 $-120\sim-150\mu\epsilon$ 。控制附加应力均小于设计富余附加应力40MPa。

6 结语

本研究内容依托于湖北金控大厦项目,开展的超高层

伸臂桁架封闭时序研究与应用,取得以下研究成果:

①针对湖北金控大厦内力监测工作要求,组建了完整的监测系统。介绍了监测系统的工作原理和组建方法、测点布置原则和各构件测点位置及数量,实现运用监测系统进行大面积远程监测,提高工作效率,满足随施工过程进行持续性监测的要求。

②负三层和首层外筒及内筒各构件监测数据表明,各监测构件符合典型受压构件受力特征。随结构施工,压应力逐渐增大,内力稳定呈线性增长。在监测进行约18周后,各测点累积应变值约达到最大值的90%左右,并随安装工程进行出现周期性的变化。至30周左右,应变达到最大值。至施工结束后半年拆除检测设备,各构件应力基本稳定。22层及33层内外筒应变特征呈现线性成长规律。各结构柱及剪力墙附加应力在施工及竣工后满足施工阶段安全要求。

③伸臂桁架间的相互影响作用很小。两道伸臂桁架在封闭后,快速进入受拉状态。应力变化曲线与内外筒变形差成正比。伸臂桁架在封闭后前一个月内,应力应变变化较为明显。一个月左右随施工过程继续线性发展。在工程施工末期,结构未封顶前,两桁架附加应力变化放缓。伸臂桁架最大附加应力均小于设计富余附加应力。

本课题进行了“超高层伸臂桁架封闭时序研究与应用”,针对湖北金控大厦组建了完整的监测系统,通过对湖北金控大厦各关键层构件应力检测,满足随施工过程进行持续性监测的要求。针对负三层及首层内外筒个构件的应力应变监测,研究了各构件在施工过程中的应力应变发展特征。针对避难层伸臂桁架的应力监测,证实了该封闭方案的经济安全,课题结果对于超高层伸臂桁架施工技术具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 范峰,王化杰,金晓飞,等.超高层施工监测系统的研发与应用[J].建筑结构学报,2011,32(7):50-59.
- [2] 王化杰,钱宏亮,范峰,等.超高层结构伸臂桁架安装时序分析与控制方法[J].土木工程学报,2014,47(7):1-8.
- [3] 韩龙,田稳苓,荣恰,等.高层钢结构施工阶段实时监测及模拟分析[J].空间结构,2016,22(02):72-80.
- [4] 韩龙.基于BIM技术的超高层建筑施工阶段内力监测与模拟研究[D].石家庄:河北工业大学,2017.
- [5] 张凤亮,朱武卫,韩大富,等.超高层伸臂桁架不同延迟连接位置终拧方案对比分析[J].施工技术,2017,46(18):74-77+118.