

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.003

京基金融中心施工全过程跟踪研究

王化杰^{1,2}, 钱宏亮^{1,2}, 范 峰¹, 支旭东¹, 陆建新³

(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2.哈尔滨工业大学(威海) 土木工程系, 264209 山东 威海;
3.中建钢构有限公司, 518040 广东 深圳)

摘 要: 为获得典型超高层结构施工过程中的响应规律,以京基金融中心为背景,开发并建立完整的超高层施工监测系统,对结构施工全过程进行跟踪监测,获取结构施工过程的响应数据,验证系统实用性;在此基础上,采用所开发的超高层施工全过程模拟技术对结构施工全过程进行跟踪模拟,综合施工全过程仿真数据与监测数据对京基金融中心施工竖向变形累积及应力发展规律进行全过程跟踪研究.结果表明,施工过程中结构竖向压缩变形及关键竖向构件的应力随着施工进度稳定增长,无较大突变,总体构件应力水平较低,具有较高的应力冗余,证明了京基金融中心施工方案及进度的合理性.最终仿真结果与实测结果的良好吻合证明了全过程仿真和监测技术的准确性及实用性,可用于同类超高层结构的全过程跟踪研究,并指导结构施工过程.

关键词: 超高层;京基金融中心;施工全过程仿真;施工监测

中图分类号: TU393.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)06-0015-06

Tracking investigation of whole construction process of Kingkey Financial Centre

WANG Huajie^{1,2}, QIAN Hongliang^{1,2}, FAN Feng¹, ZHI Xudong¹, LU Jianxin³

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. Dept. of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China;
3. China Construction Steel Structure, 518040 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: To obtain the response rules of typical super high-rise building during the whole construction process, based on Shenzhen Kingkey Financial Center, the construction monitoring system was established and improved to keep tracking the whole process of construction. Response data of the construction process was attained to verify system availability. Furthermore, the tracking simulation of full-process construction was conducted using the developed super high-rise construction simulation technology, and the law of accumulation of vertical deformation and development of stress was studied by integrating simulation data and monitoring data on Shenzhen Kingkey Financial Center during full-process construction. The results indicate that vertical compressive deformation of the structure and stress of critical vertical elements grow steadily with the progress of construction schedule, without large mutation, overall stress of components of structure is small and has much redundancy, which proved that construction plan and schedule of Shenzhen Kingkey Financial Center was reasonable. Final simulation results agreed well with the measured results certified to practicability and accuracy of full-process simulation and monitoring technology, which can be applied in the following of whole process of similar super high-rise structure and guide the construction process.

Keywords: super high-rise building; Shenzhen Kingkey Financial Centre; construction full-process simulation; construction monitoring

收稿日期: 2014-06-15.

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAJ03B01); 中国博士后科学基金面上项目(2014M551253); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HIT.NSRIF.2016099).

作者简介: 王化杰(1982—),男,博士,讲师;
钱宏亮(1977—),男,教授,博士生导师;
范 峰(1971—),男,教授,博士生导师;
支旭东(1976—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 王化杰, huajie_wang@hit.edu.cn.

近年来国内建了大量400 m以上超高层建筑,中国已成为世界上超高层结构数量最多的国家之一.但这种400 m以上超高层结构的施工认识和控制措施很大程度上还停留在经验阶段,未形成系统的理论及技术体系.目前,国内外一些学

者已对超高层结构施工全过程的相关问题展开了研究,文献[1-3]分别对超高层结构施工过程中的竖向压缩变形及补偿量进行了分析,文献[4]对广州珠江新城西塔施工竖向变形及控制进行了模拟研究,文献[5]对超高层结构在竖向荷载及水平荷载作用下的变形规律进行了研究.但由于条件限制,很多研究工作要么偏于理论分析,要么注重现场实测,将二者结合起来的系统性施工全过程跟踪研究相对较少,400 m 以上的大型超高层工程应用则更为少见.因此,有必要以典型工程为对象,将施工仿真与全过程监测技术结合起来,通过仿真技术指导施工监测,通过监测技术校核及修正仿真技术,二者相互指导和完善,实现对典型超高层结构的全过程跟踪研究,进而了解其施工过程中的变形累积及应力发展规律,评估结构施工过程中及结束后的安全性能,并对研究及分析手段的有效性加以验证.

本文以深圳京基金融中心为背景,对结构进行了施工全过程跟踪研究.首先以京基金融中心为监测对象,开发并建立一套高效率,高集成度的大型施工监测系统,并运用该系统对京基金融中心施工全过程进行跟踪监测;采用所建立的施工全过程仿真技术,依据实际施工进度对结构进行施工全过程仿真模拟,对仿真结果进行深入分析;并将仿真结果与实测结果进行比较分析,对施工过程中变形累积及应力发展规律进行研究.

1 工程概况

京基金融中心位于深圳罗湖中心区,主楼建筑面积 23 万 m^2 ,用钢量约 5.8 万 t,地下 4 层,地上 100 层,建筑高度 441.8 m,2011 年 4 月京基金融中心主体结构封顶,2011 年 8 月正式投入使用,结构示意图 1.

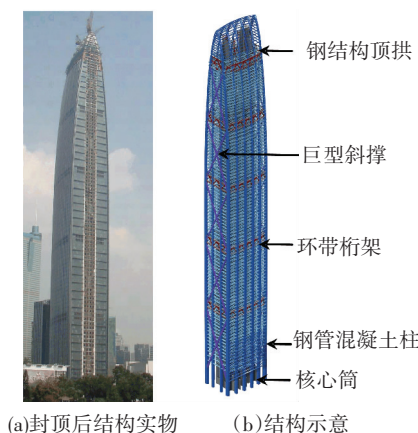


图 1 京基金融中心

该工程主体结构采用外围钢框架与混凝土核

心筒混合结构体系.外围钢框架由巨型钢管混凝土柱、环带桁架、巨型斜撑及顶部钢结构顶拱共同组成,巨型钢管混凝土柱自地下 4 层开始设置,18 层以上每隔一定楼层设置一道环带桁架,环带桁架之间通过巨型斜撑连接,顶部为一个纯钢结构顶拱.中部核心筒为钢筋混凝土剪力墙结构,21 层以下、76 层以上设有劲性钢柱,通过伸臂桁架与外框架之间连接协同工作.

2 施工全过程跟踪监测

为了对结构施工过程中结构竖向压缩变形及应力发展规律进行深入研究,以京基金融中心为对象,开发出一套适用于超高层结构的大型施工监测系统^[6],并采用该系统对京基金融中心施工全过程进行监测.监测系统根据监测模式分为两部分:人工定期监测和在线自动监测.监测系统于 2009 年 6 月随京基金融中心地上工程启动同时进入现场搭建与数据采集阶段,于 2011 年 4 月随主体结构封顶结束长达近两年的监测任务.

2.1 施工监测系统开发

京基金融中心施工变形监测为一级监测,监测设备要满足级一测量要求,现场采用 DS1 水准仪和 GPT-7001 全站仪作为竖向变形监测仪器.选择良好封装后的电阻应变计和振弦钢板计作为钢结构应变监测传感器,选择电阻式混凝土计、振弦钢筋计作为核心筒混凝土及钢筋应力监测传感器.钢管混凝土柱和钢筋混凝土核心筒的应力增量由应变传感器监测,测量中取各传感器安装完毕后稳定测值作为测量初值,结构表面应力由后期应变增量测值乘以监测对象的实时弹性模量得到,混凝土实时弹性模量可计算为^[7]:

$$E_c(t) = E_{c28} \sqrt{\eta_t}, \quad (1)$$

$$\eta(t) = \exp\{s[1 - \sqrt{28/t}]\}. \quad (2)$$

式中 E_{c28} 为龄期 28 d 时混凝土弹性模量, s 为水泥种类常数.

在满足采样频率、与传感器信号兼容等因素的基础上,由于监测对象在不断变化发展,要求采集硬件系统具有良好的可扩展性和易维护性,选择 CR1000 采集仪作为量测主机,通过 CEM416 扩展模组对测量通道根据需要进行阶段扩展,通过 AVW200 弹动转换模组将频率信号转换为电信号,实现振弦应变计和电阻应变片的集成采集,选用 7188E 扩展控制器及 D-LINK 无线路由器作为数据无线传输主硬件.

为了提高系统的在线监测工作效率,运用 LABVIEW 平台开发适用于现场工作人员操作的

超高层施工监测软件 SCMS 系统, 该软件系统具有数据的实时显示、分析及预警功能。

2.2 系统搭建

2009 年 6 月, 京基金融中心地上工程启动, 施工监测系统正式进入现场搭建与数据采集阶段, 最终采用焊接、粘接、绑接、直接埋入等传感器布设工艺, 通道编码等系统维护识别工艺, PVC 线管保护、外焊金属保护盒、ABS 防水防潮箱保护等系统防水防潮保护工艺以及数据无线传输等关键技术成功对京基金融中心施工监测系统进行现场搭建, 图 3 为现场布设的传感器及采集系统。最终布设 48 个温度测点、90 个竖向变形测点、12 个混凝土应力测点、12 个钢筋应力测点以及 260 个钢结构构件应力测点, 共计 422 个监测点^[6], 同时, 为了避免环境温度对结果造成影响, 压缩变形测量均选择在每天相同时刻、温度较接近时进行; 所有应力测点均设置温度补偿, 剔除环境温度对应力监测结果的影响。

3 施工全过程仿真分析

3.1 施工仿真模型建立

京基金融中心施工仿真模型, 采用 ANSYS 平台建立, 按照材料类型及构件特点将模型分为两部分: 钢结构部分和钢筋混凝土部分。其中钢结构主要为外框架结构, 受力形式与梁单元相同, 以拉、压、弯、扭为主, 考虑施工模拟及计算效率的需要, 选用 beam4 单元模拟。钢筋混凝土结构主要是核心筒剪力墙和楼板等墙板构件, 考虑受力特点, 选用 shell181 单元模拟, 以混凝土材料定义单元。同时根据配筋率进行截面等效, 调整剪力墙和楼板厚度, 考虑组合梁效应, 将梁的抗弯刚度及质量折算成与之具有相同抗弯刚度和质量的一定厚度楼板, 进行刚度和质量等效。施工分析中认为结构处于弹性阶段, 材料为弹性材料, 各构件材料属性见表 1。核心筒剪力墙、楼板和钢框架之间协同工作通过节点耦合的方式实现, 模型各节点均为刚接节点, 考虑深基础效应, 底部设为固端约束。

表 1 材料属性

构件名称	材料类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($10^{11} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)
1~42 层核心筒	C80	2 551	0.380
43~顶层核心筒	C60	2 551	0.360
内楼板及混凝土梁	C40	2 551	0.325
外楼板	C30	2 551	0.300
钢柱及钢梁	Q345	7 850	2.060
斜撑及伸臂桁架	Q420	7 850	2.060

3.2 施工模拟方法

结构施工过程属于慢速时变结构力学问题^[8], 以此为基础, 采用生死单元技术^[9], 分步加荷、单元分组、等效温度收缩变形、龄期调整有效模量法^[10-12]等关键技术和方法对结构施工过程中的时变效应进行计算模拟, 将结构施工过程划分为一系列施工平衡阶段, 通过对各阶段进行连续求解, 形成超高层结构施工全过程模拟技术^[13], 分析中可考虑核心筒、外框架、楼板、玻璃幕墙、伸臂桁架等结构构件的先后施工顺序、施工变形找平、施工荷载分阶段施加、混凝土收缩、徐变效应^[13]等一系列关键因素的影响。

3.3 施工模拟结果分析

按实际施工进度及施工找平工艺(核心筒按设计标高找平, 外框架安装按同层核心筒标高找平)对京基金融中心进行施工全过程模拟, 以各个构件及楼层的施工节点为划分依据, 将整个施工过程划分为 126 个施工阶段进行模拟, 重点考察结构竖向压缩变形(结构楼层或构件实际标高与其设计标高的偏离量)和构件极值应力的发展规律。

3.3.1 竖向压缩变形

施工结束阶段各楼层竖向压缩变形模拟值见图 2。可以看出, 由于施工找平作用, 外框架和核心筒最大竖向压缩变形均发生在楼层中部, 外框架最大竖向压缩变形为 74.9 mm, 发生在 64 层, 核心筒最大竖向压缩变形量为 81.1 mm, 发生在 52 层, 整个结构竖向压缩变形呈现上下小中间大的规律, 即中部楼层施工结束后的实际标高与设计标高差别最大, 施工找平应重点对中部楼层进行找平处理, 必要时需进行预变形控制。总体上核心筒的竖向压缩变形发展要大于外框架的变形量, 这主要是由于核心筒混凝土材料的收缩徐变所引起的附加变形所造成的, 因此超高层结构施工中应采取有效措施对混凝土的收缩徐变变形进行控制, 如采用高强混凝土、降低水灰比等措施, 或者采用核心筒先于外框架施工、使混凝土收缩徐变得到充分发展后进行合理找平。

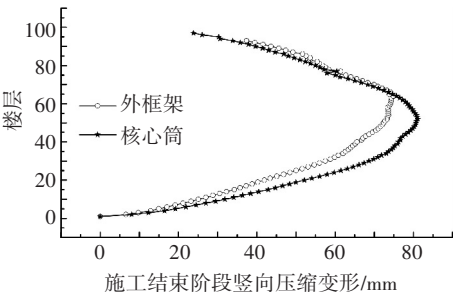


图 2 施工结束阶段各楼层竖向压缩变形模拟值

3.3.2 施工应力分析

施工过程中,由于各阶段结构的受力状态发生变化,每一阶段结构的力学响应也不相同,图 3~5 分别为结构施工全过程中各阶段对应的核心筒、外框架柱和外框架梁的极值应力。可以看出,核心筒最大等效应力为 12.45 MPa,外框架柱最大压应力为 79.3 MPa,均发生在施工结束阶段;而外框架梁的最大拉应力和最大压应力分别为 193.5 MPa 和 196.0 MPa,发生在施工的 83 和 85 阶段,各阶段构件极值应力均小于构件的设计应力,可以满足安全要求,但结构各构件的最大应力并未都发生在施工结束阶段,这是由于在施工过程中结构未形成一个完整体系,不断有新的构件变化和变形发生,对于核心筒和框架柱而言,主要承受竖向荷载,随着施工的进展竖向荷载在稳定增加,整体上应力发展趋势稳定,基本随着施工进度而增加,极值应力主要发生在施工结束阶段,而横向联系构件则容易受到附加变形及内力重分配等因素的影响,发生应力波动,极值应力往往出现在施工过程中,而非施工结束时刻,即结构最不利状态有可能出现在施工过程中,而非使用阶段,因此,传统以施工成形后结构为分析对象的一次性加载设计方法无法考虑施工过程的影响,进而有可能错过结构部分构件的最不利状态,给结构安全带来隐患,结构设计中尤其是横向联系构件的设计应考虑施工过程附加内力的影响。

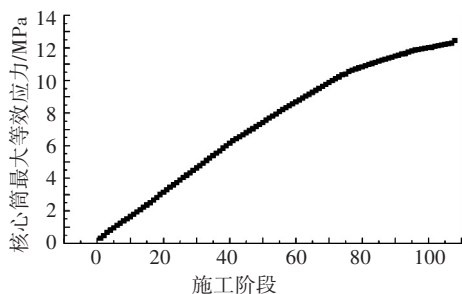


图 3 核心筒施工各阶段极值等效应力

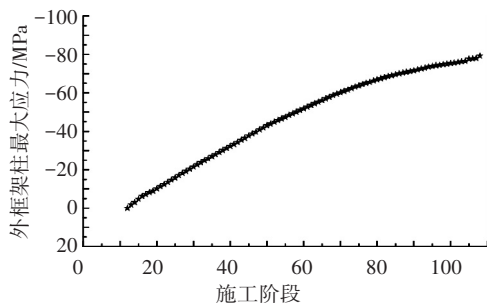


图 4 外框架柱施工各阶段极值压应力

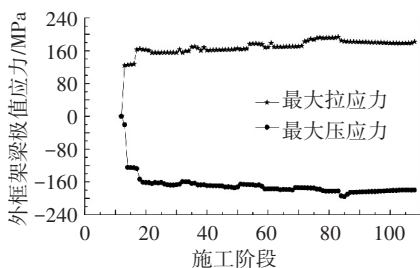
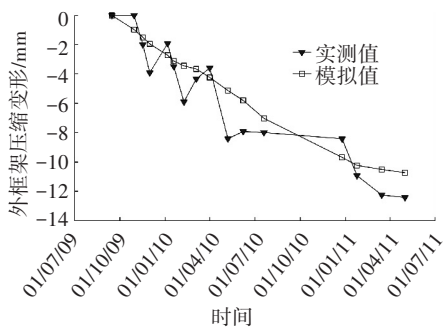


图 5 外框架梁施工各阶段极值应力

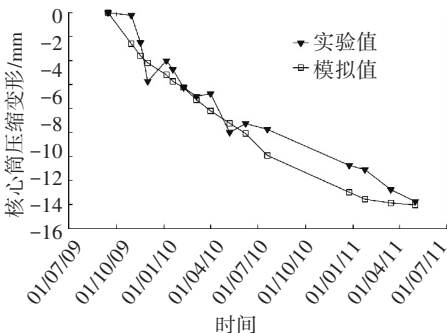
4 仿真结果与实测结果比较分析

4.1 竖向压缩变形比较

图 6 为 5 层以下外框架和核心筒总的竖向压缩量实测值与模拟值的比较曲线,可以看出,自 2009 年 11 月至 2011 年 4 月(楼层施工约 74 层),5 层外框架竖向压缩变形量模拟值为 10.7 mm,比实测值 12.4 mm 小 13.7%,核心筒压缩量模拟值为 16.0 mm,比实测值 15.8 mm 大 1.2%,5 层以下竖向压缩变形量模拟值与实测值整体吻合较好,证明了施工仿真的合理性,同时也可看出结构的压缩变形基本随着施工进度与楼层的增加而稳定增长。



(a) 外框架



(b) 核心筒

图 6 5 层以下竖向总压缩量

4.2 关键构件应力比较

4.2.1 柱子应力

外框柱是超高层结构的主要受力构件,其应力水平的发展情况直接关系到结构在施工过程中的安全和将来的正常使用,而底层柱则是整个超

高层结构中柱子受力最大的部位,因此对其进行应力分析,应力测点布置见图 7。

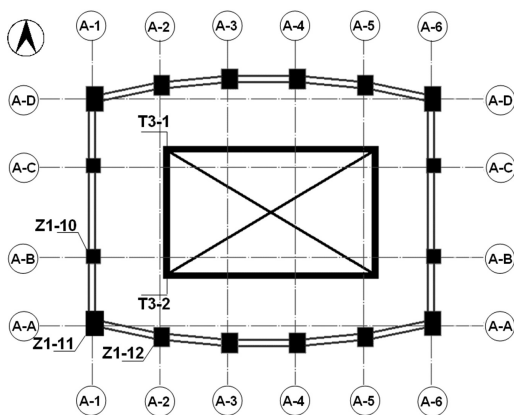
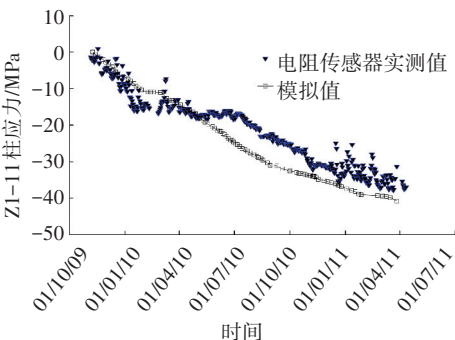
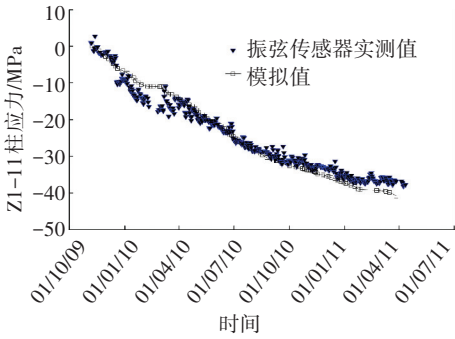


图 7 应力测点布置示意

图 8 为底层西南角柱应力实测值与模拟值的比较曲线,可以看出,自 2009 年 11 月至 2011 年 4 月(楼层施工约 74 层),Z1-11 柱子施工模拟压应力增量 41 MPa,与电阻应变计所测压应力增量 37 MPa 相差 10.8%,与振弦钢板计所测压应力增量 38 MPa 相差 7.9%,柱应力施工模拟结果与实测结果增长趋势基本一致、吻合良好,再次证明了施工仿真模拟的准确性,同时从模拟及监测跟踪结果均可看出底层柱子应力的发展基本跟施工进度成比例增长,无较大突变,施工流程较为合理,依据施工模拟结果可知底层各柱最终应力水平在 50~60 MPa,满足设计强度要求,结构应力冗余较大,安全系数较高。



(a) 电阻应变计监测数据

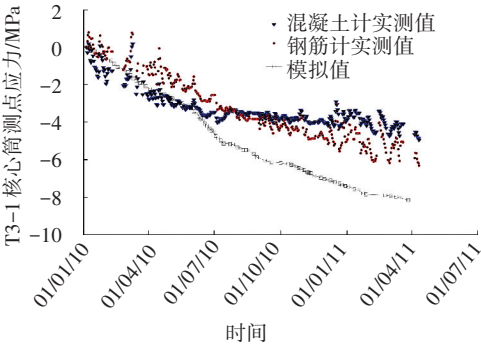


(b) 振弦传感器监测数据

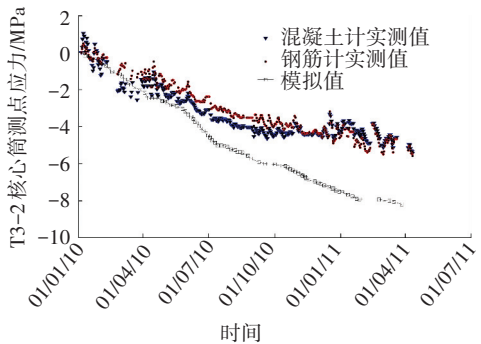
图 8 Z1-11 柱子应力数据

4.2.2 核心筒应力比较分析

图 9 为 21 层核心筒应力实测值与模拟值的比较曲线,可以看出,自 2010 年 4 月至 2011 年 4 月(楼层施工约 48 层),T3-1 测点核心筒施工模拟压应力增量 8 MPa,比混凝土计实测压应力增量 5 MPa 大 60%,比钢筋计(依据变形协调条件换算为混凝土应力)实测压应力增量 6 MPa 大 33%,T3-2 测点核心筒施工模拟压应力增量 8 MPa,比混凝土计实测压应力增量 5.4 MPa 大 48.1%,比钢筋计(依据变形协调条件换算为混凝土应力)实测压应力增量 5.5 MPa 大 45.5%,但结构应力绝对差值较小,均不大于 3 MPa,模拟数据与实测数据趋势吻合良好,应力水平基本随着施工进度成比例增加,证明了施工仿真的合理性。且由图中监测数据可看出,依据变形协调条件换算后的钢筋计实测应力与混凝土计实测应力基本一致,一定程度上说明了钢筋与混凝土结合紧密,变形同步,分析时可以根据变形协调条件、刚度等效等原则将钢筋等效为混凝土材料进行仿真分析。最终施工仿真结果表明 21 层核心筒角部竖向压应为 10 MPa 左右,满足设计强度要求。



(a) T3-1



(b) T3-2

图 9 核心筒应力比较

5 结 论

1) 开发并建立的京基金融中心大型施工监测系统具有良好的稳定性、耐久性、可扩展性,所采用保护工艺解决了复杂施工现场系统保护问

题,无线传输技术和所开发的施工监测软件系统提高了系统工作效率,实现了在线实时监测,最终运用该系统对京基金融中心进行完整的施工期变形及应力监测,积累了宝贵的实测资料,验证了系统的实用性,所采用的相关工艺可推广到类似大型结构的施工监测当中。

2)施工模拟结果与现场实测结果吻合良好,证明基于慢速时变力学方法及有限元技术所开发的施工仿真技术准确有效,可用于类似超高层结构的设计与施工分析。

3)京基金融中心施工全过程分析表明,由于施工找平作用,整个结构竖向压缩变形呈现上下小中间大的规律,外框架最大竖向压缩变形为 74.9 mm,发生在 64 层,核心筒最大竖向压缩变形量为 81.1 mm,发生在 52 层,中间层为变形敏感部位,变形控制应重点对中部楼层进行处理;应力分析结果表明,施工过程中外框架及核心筒极值应力均满足设计要求,但外框架梁的极值应力并未发生在结构成型的施工结束阶段,而是发生在施工过程当中,这与传统的一次性加载设计方法有所出入,设计中应对施工过程的影响加以考虑。

4)施工模拟和实测结果综合分析表明,京基金融中心结构竖向压缩变形及关键构件的应力水平基本随着施工进度稳定增长,无较大变形及应力突变,证明了京基金融中心施工方案及流程的合理性;关键构件的极值应力均不大于设计要求,结构应力冗余较大,安全系数较高;钢筋计与混凝土计监测结果表明,钢筋与混凝土结合紧密,满足变形协调条件,仿真分析计算假设合理.通过施工仿真和施工监测相结合可以有效的获得结构施工过程中和结束时刻的结果受力状态,为结构在施工过程中的安全评估和将来的合理使用提供理论和实测参考。

参考文献

- [1] FINTEL M, GHOSH S K, IYENGAR H. Column shortening in tall buildings-prediction and compensation [C]//Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA:[s.n.],1987.
- [2] PARK H S. Optimal compensation of differential column shortening in high-rise buildings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2003,12(1):49-66.
- [3] KIM H S, JEONG S H, SHIN S H. Column shortening analysis of tall buildings with lumped construction sequences[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2012,21(10):764-776.
- [4] 郭彦林,江磊鑫,刘学武.广州珠江新城西塔施工过程中内外筒竖向变形差值研究[J].施工技术报,2008,37(5):5-8.
- [5] 陈灿. 高层钢框架-混凝土核心筒混合结构体系施工期间变形及其控制研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [6] 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.
- [7] 王化杰. 大型复杂结构施工时变特性分析与控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [8] 王光远. 论时变结构力学[J]. 土木工程报,2000,33(6):105-108.
- [9] 博弈创作室. ANSYS9.0 经典产品高级分析技术与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [10] 孙宝君.混凝土徐变理论的有效模量法[J]. 土木工程报,1993,26(3):66-68.
- [11] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep effect using age-adjusted effective modulus method[J]. ACI Journal, 1972,69(4):212-217.
- [12] 王勋文,潘家英. 按龄期调整有效模量法中老化系数 x 的取值问题[J]. 中国铁道科学,1996,17(3):12-23.
- [13] 范峰,王化杰,支旭东,等. 上海环球金融中心竖向变形分析[J]. 建筑结构学报,2010,37(7):118-124.
- [14] 惠荣炎,黄国兴,易冰若.混凝土的徐变[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.

(编辑 赵丽莹)