

DOI: 10. 7672 /sgjs2016020053

# 某超高层钢管混凝土框筒结构施工模拟分析及方案优化

毛诗洋<sup>1</sup> 闫维明<sup>1</sup> 贾洪<sup>2</sup> 马玉彬<sup>1</sup> 谢志成<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100131)

[摘要] 利用有限元程序 SAP2000 并考虑材料、边界条件和荷载作用的时变性与桩基础沉降等影响因素, 以单元生死法精确模拟了施工过程, 对某超高层钢管混凝土(CFST)框筒结构在施工阶段的竖向变形差异、构件内力分布变化规律和施工方案的优化进行了研究。分析了不同工况和施工方案对 CFST 框筒混合结构的内力和变形的影响, 得到了最优的施工方案, 并根据竖向变形的分析结果, 对竖向承载构件的施工标高进行了预调值计算分析。

[关键词] 高层建筑; 钢管混凝土; 框筒结构; 施工模拟; 方案优化; 预调值

[中图分类号] TU973. 1<sup>+</sup>4

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8498(2016)02-0053-05

## Construction Simulation Analysis and Scheme Optimization of Super High-rise CFST Frame Tube Structure

Mao Shiyang<sup>1</sup>, Yan Weiming<sup>1</sup>, Jia Hong<sup>2</sup>, Ma Yubin<sup>1</sup>, Xie Zhicheng<sup>1</sup>

(1. Beijing University of Technology, Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing 100124, China; 2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100131, China)

**Abstract:** By considering the time-dependent property of materials and boundary conditions and load and settlement of pile foundation, using the finite element program SAP2000 and element birth and death method precisely simulates the process of construction, the different vertical deformation of concrete filled steel tube and RC core wall and the internal force change of the members during the construction stage are researched. By comparing different conditions and construction schemes of concrete filled steel tube and core wall hybrid structure which have various influence on the deformation and distribution of internal force, the optimized construction scheme is selected, and based on the results of vertical deformation the pre-deformation of vertical members are calculated.

**Key words:** tall buildings; concrete filled steel tube(CFST); frame tube structure; simulation; scheme optimization; pre-deformation

### 0 引言

近年来,我国超高层建筑发展迅速,建筑高度不断增加而且结构体型也越来越复杂,框架与核心筒的混合结构体系得到了广泛的应用,同时超高层混合结构施工阶段的分析也受到学者越来越多的关注。但是,目前针对超高层混合结构施工阶段的分析局限于建筑结构自身,缺少对结构施工中基础沉降的模拟分析和依据施工模拟结果的施工方案优化分析。

因此,本文以某超高层 CFST 框筒结构工程实

际为背景建立了有限元模型,考虑混凝土材料收缩徐变和基础沉降的影响,进行了施工过程的模拟分析,并优化得出了合理的施工方案。

### 1 工程概况

某超高层 CFST 框筒混合结构,地面以上 73 层,裙楼 9 层,建筑结构高度为 317.6m,裙楼 60.9m × 99m,塔楼 46.4m × 46.4m。结构主要抗侧力体系为 CFST 框架-钢筋混凝土核心筒结构,剪力墙厚度沿竖向由 1 000mm 渐变为 350mm,外围采用 CFST 框架,框架柱截面直径沿竖向由 1 500mm 渐变为 900mm。结构平面布置如图 1 所示。

[作者简介] 毛诗洋,硕士研究生, E-mail: maoshiyang89@126.com

[收稿日期] 2015-01-15; [修订日期] 2015-08-10

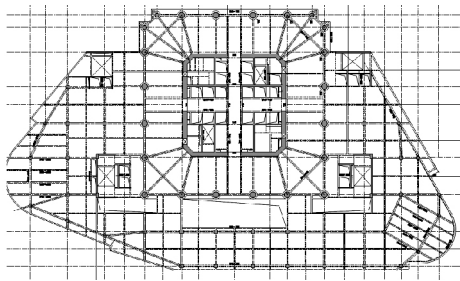


图 1 结构平面布置

Fig. 1 Structural plan arrangement

## 2 施工阶段分析方法及计算模型

本文采用精确法对该超高层 CFST 框筒混合结构的施工过程进行模拟。精确法基本假定结构的竖向刚度是逐步形成的,结构荷载逐步施加,如图 2 所示。此种方法可以更接近实际的模拟施工过程对结构性能的影响。而且在进行施工模拟时,每一施工段完成后都进行施工找平补偿,使施工段的初始高度与设计高度一致。混凝土材料所组成的构件的竖向变形主要来源于荷载作用和材料的时变特性,其中材料的时变特性主要是指混凝土的收缩和徐变。混凝土的徐变是指混凝土在持续荷载作用下变形随时间不断增加的现象。针对混凝土材料的收缩徐变计算,本文采用的是欧洲规范 CEB-FIP MC90 推荐的计算公式,如公式(1)所示。该规范能较好地预测泵送混凝土的徐变应变,并且考虑了混凝土弹性模量的时变性。

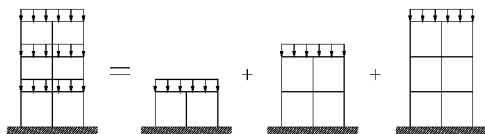


图 2 精确法计算示意

Fig. 2 Schematic diagram of the accurate calculation method

$$\varphi(t, t_0) = \phi_{RH} \beta(f_c) \beta(t_0) \beta(t - t_0) \quad (1)$$

式中:  $\phi_{RH}$  是湿度影响系数;  $\beta(f_c)$  是混凝土强度影响系数;  $\beta(t_0)$  是加载时间影响系数。

参照该工程的设计图纸,建立了有限元计算模型。预定施工参数:施工速度为 7d/层,混凝土的初始龄期为 3d,相对湿度为 70%,自重荷载根据构件的实际尺寸和材料密度进行计算。基础弹性变形模拟采用文克尔模型,根据地勘报告和规范中分层总和法算出核心筒、框架和裙房基础的基床系数  $k$  为 13.2, 13.2 4.0 MPa/m。

建立有限元模型时,梁柱构件均采用梁单元,楼板和核心筒剪力墙采用壳单元,结构共划分为 16 465 个单元,其中梁单元 10 606 个,壳单元 5 859

个,结构有限元模型如图 3 所示。

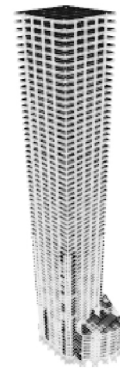


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

## 3 计算结果及其分析

采用设计图纸对超高层框筒混合结构进行精确有限元建模后,分层施加结构的竖向荷载,可以得到外框架柱与混凝土核心筒各个楼层施工段的竖向变形结果。为了对比考虑施工过程和非荷载因素对结构变形和内力的影响,本文设置 3 个工况和 3 个施工方案进行了对比分析。3 个工况:①工况 1 考虑施工过程,但不考虑徐变收缩;②工况 2 考虑施工过程和徐变收缩;③工况 3 考虑施工过程、徐变收缩和基础沉降。3 个施工方案:①施工方案 1 核心筒与外框架同时施工;②施工方案 2 核心筒领先外框架 8 层施工;③施工方案 3 核心筒领先外框架 16 层施工。

### 3.1 框架柱与混凝土筒体的竖向变形差异分析

由图 4 可以看出,在工况 1 中,框架柱在第 42 层变形达到最大,为 35.5mm;核心筒在第 46 层变形达到最大,为 30.8mm。在工况 2 中,框架柱在第 43 层变形最大,为 49.26mm;核心筒在第 53 层变形最大,为 49.13mm。其中框架柱在工况 2 中的竖向变形平均增量是工况 1 中的 16.3%,核心筒在工况 2 中的竖向变形平均增量是工况 1 中的 52.4%。可见,在对超高层结构进行施工阶段竖向分析时,不可忽略混凝土材料收缩徐变的影响。但在工况 3 中,框架柱与核心筒均是在底层变形达到最大值,分别为 127.2mm 和 208.6mm,而且工况 3 中构件的变形趋势与工况 1 和工况 2 的有很大差异,由此可以看出基础沉降对于结构竖向变形有很大影响。图 5 是不同施工阶段下核心筒桩基础与框架柱桩基础沉降值曲线。

超高层 CFST 框筒混合结构在竖向荷载的作用下,由于不同承重体系的竖向刚度、受力情况等差异会造成不同体系之间的竖向变形差异。从图 6 可以看出,工况 1 与工况 2 中的竖向变形差从底部楼层开始逐渐增大,然后随着楼层继续增加后又减

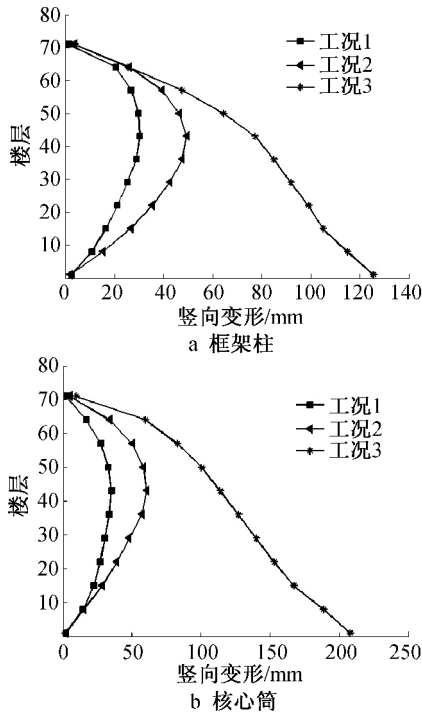


图4 不同工况下结构竖向变形结果  
Fig. 4 The vertical deformation results under different work condition

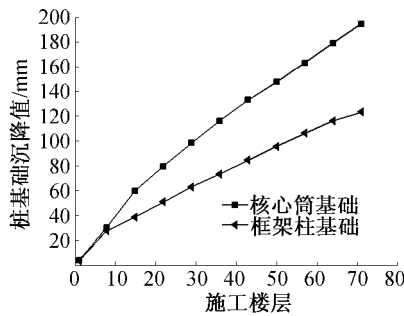


图5 不同施工阶段桩基础沉降值  
Fig. 5 Pile foundation settlements under different construction stage

小,最后核心筒的变形值超过了框架柱变形值,使2种竖向构件的变形差异继续增大。而工况3则是外框架柱与核心筒的竖向变形差异值随着楼层的升高不断减小。其中,工况1下的变形差最大值在第15层为5.93mm,工况2中的最大变形差在第16层为4.46mm。在考虑收缩徐变后,结构的竖向变形差峰值减小了,主要是因为荷载作用下框架柱的变形大于核心筒,而由于混凝土收缩徐变使核心筒的竖向变形增大,因此在一定程度上缩小了框架柱与核心筒的竖向变形差异。

### 3.2 框架柱轴力分析

选取外框架体系的角柱为主要分析对象。从图7a可以看出,混凝土材料的收缩徐变和柱筒基础

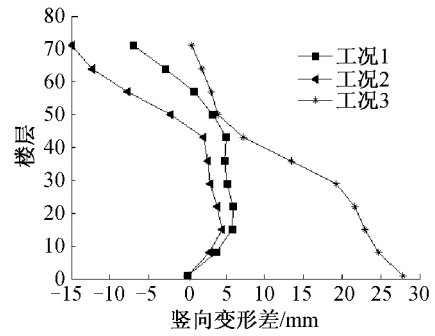


图6 不同工况下框架柱与核心筒  
竖向变形差计算结果  
Fig. 6 Vertical displacement difference calculation results of core tube and frame column under different work condition

的不均匀沉降的作用使框架柱承担了更多的竖向荷载。其中,工况2相比于工况1的框架柱轴力平均增量为12.2%;工况3相比于工况2框架柱轴力增量为15.1%。此时3个工况的轴力都是在楼层底部达到最大值,而且考虑基础沉降因素后框架柱轴力有较大增幅,可见基础沉降对施工过程中竖向荷载分配的影响不可忽略。

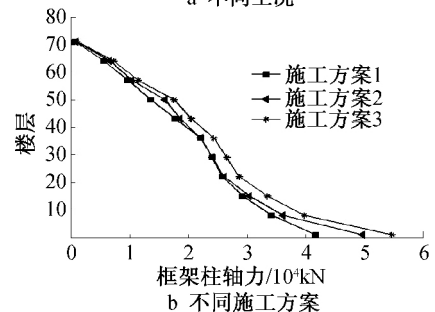
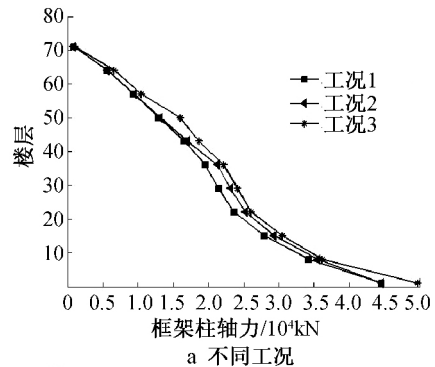


图7 框架柱轴力结果  
Fig. 7 The frame column axial force calculation results

在考虑施工过程和收缩徐变作用下,角柱采用不同施工方案的轴力计算结果如图7b所示。从图7b可以看出随着核心筒领先施工层数的增加,由于核心筒的竖向刚度大于框架柱,使结构的竖向荷载会更多地由框架柱来承担,并且底部框架柱轴力值随着核心筒领先施工层数的增加逐渐增大。

### 3.3 连系梁梁端弯矩分析

现浇混凝土框架梁是超静定结构,而竖向变形差异的存在使连接核心筒和框架柱的端部产生相对位移导致了梁端弯矩发生变化,因此需要针对不同的工况和施工方案对其进行比较分析。从图 8a 可以看出,在不同工况下连系梁的弯矩值呈现出不同的变化趋势,其中工况 1 和工况 2 由于考虑了施工过程的影响,连系梁梁端弯矩沿楼层高度呈两头小、中间大的分布趋势,其中分别在 35、36 层处弯矩达到最大值,最大值分别为 411.5kN·m 和 109.2kN·m,而工况 3 由于基础沉降的作用使底部楼层的竖向变形差增大同时导致了底部连系梁梁端弯矩值的增大,最大弯矩值发生在底层为 562.3kN·m。

如图 8b 所示是在考虑施工过程和收缩徐变的工况 2 下,不同施工方案的连系梁的弯矩值计算结果。其中,施工方案 2 中连系梁的弯矩值平均值为施工方案 3 中弯矩值的 23.3%。由此可见,不同施工方案对连系梁的弯矩值影响较大。

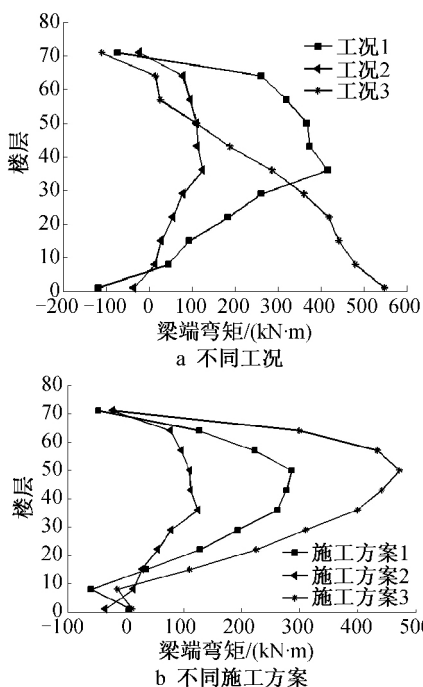


图 8 连系梁梁端弯矩值结果

Fig. 8 The tie beam end moment calculation results

## 4 施工方案优化及预调值计算

### 4.1 施工方案优化

对于超高层混合结构,不同施工方案的主要差异是核心筒领先框架施工层数的确定和连系构件节点的施工方法。不同施工方案的对比均是在考虑施工过程和混凝土收缩徐变的基础上进行的。在外框架与核心筒的混合结构体系中,连系梁与混凝土核心筒一般先按铰接处理,等施工到一定阶段再固接。但是

连系梁与框架柱的连接则有不同方式,我国一般采用刚性连接而国外通常将连系梁与框架柱按照铰接处理。本文通过连系梁与框架柱连接的方式不同,比较分析了梁柱刚接和梁柱铰接 2 种施工方案。

如图 9 所示,对比了在连系梁与框架柱刚性连接情况下,核心筒领先框架不同层数的施工方案下核心筒与外框架柱变形差。从表 1 结果可以看出,施工方案 2 下的核心筒与外框架变形差的最大值、平均值和标准差均为最小。同时综合不同施工方案下框架柱内力值和连系梁梁端弯矩值,也可以看出当采用施工方案 2 时主要结构构件的内力值也是较小的。由此可见,当连系梁与框架柱刚性连接时,核心筒领先外框架 8 层即施工方案 2 是最优的施工方案。

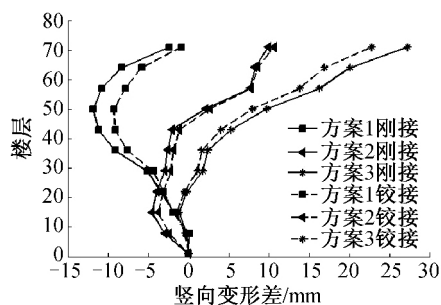


图 9 不同施工方案柱筒变形差结果

Fig. 9 The deformation difference results of column under different construction schemes

表 1 梁柱刚性连接竖向变形差结果

Table 1 The vertical deformation difference results on rigid connection of beam and column mm

	施工方案 1	施工方案 2	施工方案 3
最大值	11.81	9.92	27.25
平均值	6.21	5.00	7.42
标准差	1.55	1.07	1.49

注:最大值是将所有变形差都取绝对值后统计得出的,下同

当连系梁与框架柱采用铰接施工时,表 2 统计出了 3 种施工方案的变形差的最大值、平均值和标准差。虽然施工方案 1 的竖向变形差的最大值小于其他 2 个施工方案,但是从整体变形差分布来看施工方案 2 仍然较优于其他 2 个。

表 2 梁柱铰接竖向变形差结果

Table 2 The vertical deformation different on hinged connection of beam and column mm

	施工方案 1	施工方案 2	施工方案 3
最大值	9.23	10.66	22.79
平均值	4.53	4.01	6.44
标准差	1.56	1.44	1.94

### 4.2 施工标高预调值计算

通过对施工模拟结果的分析可以看出,虽然考

虑了施工找平补偿,但是由于在进行施工找平之后,上部楼层的自重仍会加载到每一楼层,所以在施工结束时楼层的标高与设计标高会有偏差,并且不同类型的竖向承载构件变形也有差异。为了减小和消除标高上的偏差与差异,有必要对超高层建筑的施工标高进行预调值处理,使其在竣工时满足设计要求。

对于超高层结构竖向变形的特点,采用迭代法对施工标高的预调值进行计算。首先,计算没有预调前结构构件的竖向变形值 $\Delta\delta_0$ ;再将计算得出的 $\Delta\delta_0$ 反号叠加到初始标高,即 $H_1 = H_0 - \Delta\delta_0$ ;然后对预调后的结构再进行施工全过程模拟,得到竖向变形值 $\Delta\delta_i$ ;经过数次迭代后,最终使竣工时的标高 $H_n$ 达到设计标高 $H_0$ ,计算终止。

图10为应用本文预调值迭代计算方法得到的RC核心筒与框架柱进行施工预调后的变形情况。从图10a中可以看出,经过一次迭代后,核心筒竣工时标高已经与设计标高一致;在图10b中,框架柱也只经过2次迭代后即得到了满足设计要求的预调值。这说明通过迭代法计算得到的施工标高预调值具有较高的计算效率。

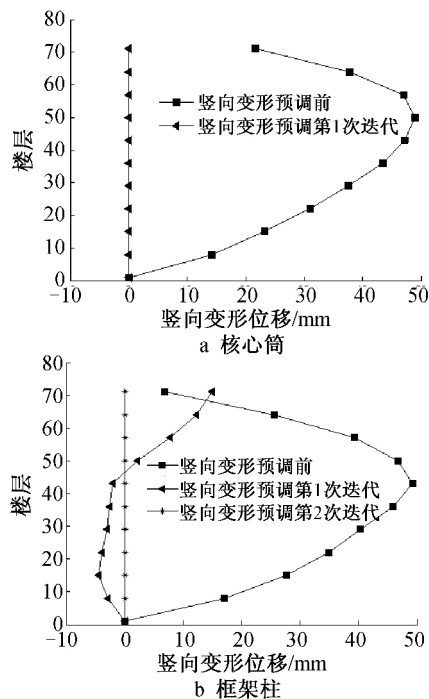


图10 结构竖向变形预调值

Fig. 10 The vertical pre-deformation

## 5 结语

本文研究了某超高层CFST框筒混合结构体系在施工阶段主要构件的变形和内力变化规律。在分析过程中考虑了荷载、边界条件、材料的时变性和基础沉降因素的影响,采用施工过程的精确模拟

方法,利用有限元程序计算得出以下结论。

1) 由于超高层结构的自重大、施工工期较长,必须考虑混凝土材料的收缩徐变和基础沉降等非荷载因素的影响。从计算结果中可以看出,收缩徐变变形占结构总变形的25%以上,是结构总变形的重要组成部分。在考虑施工找平补偿后,基础的沉降对底部楼层变形影响很大但随着结构高度增加逐渐减小。

2) 在构件内力分析方面,考虑基础沉降和收缩徐变等非荷载因素影响的框架柱,其轴力和连系梁梁端弯矩峰值大于其他2种工况。其中轴力平均增量为12.7%,而考虑收缩徐变后连系梁梁端弯矩平均减小46.2%。同时不同施工方案也会影响构件的内力分布,因此在制定施工方案时需考虑其对构件内力分布的影响。

3) 基于核心筒领先框架施工层数的不同,以及连系梁与框架柱连接方式对施工阶段结构变形和构件内力的影响,可以进行施工方案的优化设计。通过对比不同施工方案下结构柱筒的变形差值、框架柱轴力和框架梁端弯矩值的变化,确定核心筒领先框架8层施工为本工程实例的施工最优方案。

4) 利用迭代法对竖向标高预调值进行了计算,得出了施工过程中竖向受力构件的预变形调整值。通过对调整标高后的计算结果分析,该方法能高效地解决施工过程中超高层结构的竖向变形累积的问题,为超高层结构施工变形控制提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报, 2001(3): 41-46.
- [2] 刘鑫, 刘伟庆, 王曙光, 等. 高层混合结构基于模型分析的施工模拟方法[J]. 建筑结构, 2013, 43(5): 18-22.
- [3] Elnimeiri, Joglekar. Influence of column shortening in reinforced concrete and composite high-rise structures [J]. American Concrete Institute, 1989(117): 55-86.
- [4] Commit Euro-International Du Beton. CEB-FIP Model code 1990 [S]. Thomas Telford, 1993.
- [5] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基础技术规范: JGJ94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [6] 周绪红, 黄湘湘, 王毅红, 等. 钢框架-钢筋混凝土核心筒体系竖向变形差异的计算[J]. 建筑结构学报, 2005(2): 66-73.
- [7] 范重, 孔相立, 刘学林, 等. 超高层建筑结构施工模拟技术最新进展与实践[J]. 施工技术, 2012, 41(14): 1-12, 76.
- [8] 沈蒲生, 方辉, 夏心红. 混凝土收缩徐变对高层混合结构的影响及对策[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008(1): 1-5.
- [9] 孟顺祥, 吴增辉, 陈云娟. 某高层建筑群沉降观测与变形计算[J]. 施工技术, 2009, 38(S1): 463-466.
- [10] 马建峡, 胡建琴. 高层建筑施工过程中湿混凝土荷载对方钢管混凝土柱性能影响研究[J]. 施工技术, 2015, 44(3): 44-48.
- [11] 傅学怡, 孙璨, 吴兵. 高层及超高层钢筋混凝土结构的徐变影响分析[J]. 深圳大学学报, 2006(4): 283-290.