

# 宁波中银大厦超高层施工竖向变形分析研究

吴桂龙, 蒋峰, 李沛

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2023年12月4日; 录用日期: 2023年12月25日; 发布日期: 2024年1月23日

## 摘要

以宁波中银大厦为工程背景, 采用midas/gen有限元软件, 对超高层建筑进行了考虑混凝土收缩徐变的施工模拟分析。计算采用CEB-FIP (1990)规范中的混凝土收缩徐变模型, 得出收缩徐变对结构构件竖向位移及位移差的影响。结果表明: 收缩徐变使高层建筑结构产生较大的竖向变形和竖向变形差, 必须对结构进行考虑收缩徐变的施工过程分析。

## 关键词

超高层, 竖向变形, 收缩, 徐变, 施工仿真分析

# Analysis and Research on Vertical Deformation of Super High-Rise Construction of Ningbo Bank of China Tower

Guilong Wu, Feng Jiang, Pei Li

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 4<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 25<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2024

## Abstract

The construction simulation analysis of super high-rise buildings considering the shrinkage creep of concrete was carried out by using midas/gen finite element software with Bank of China Tower in Ningbo as the engineering background. The model of concrete shrinkage creep in CEB-FIP (1990) specification was used to calculate the effects of shrinkage creep on vertical displacement and displacement difference of structural members. The results show that shrinkage creep causes large vertical deformations and differential vertical deformations in high-rise structures, and it is necessary to analyze the structure for the construction process considering shrinkage creep.

## Keywords

Ultra-High Rise, Vertical Deformation, Shrinkage, Creep, Construction Simulation Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在建筑高度快速发展的大背景下,国内已有百余座 300 m 以上的超高层建筑建成或正在施工[1]。超高层建筑的竖向位移一直是工程师重点关注的问题[2],该位移会使得同一水平面上的竖向构件产生较大的竖向位移差[3],从而使得梁产生较大的附加弯矩[4],电梯井损坏,甚至结构发生破坏,影响结构的安全性能。对于框架核心筒体系而言,由于框架部分与核心筒部分竖向构件的材料组合形式、截面形式以及所承担的荷载均有差异,加之混凝土的收缩和徐变、施工安装的时间差等影响,将导致竖向构件之间的竖向变形存在差异。竖向变形严重影响着结构的竖向标高、预埋件的位置及其他装配式构件的安装,如果不能进行有效控制和调整,会给结构施工带来很大的不便,并在结构中产生很大的次应力,进而可能影响结构的使用寿命[5]。根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010)规定:要求对高 50 m 以上或高宽比大于 4 的高层结构考虑竖向变形差异影响。梁富华[6]等建筑高度 180 m 的超高层建筑进行了长期监测,发现竣工 2 年时结构的最大竖向位移差可达 1.6 mm 左右。赵建[7]等对结构高度 540 m 的超高层建筑进行了考虑混凝土收缩徐变的施工过程分析,研究了竖向位移差对关键构件内力的影响。李焯[8]等采用不同收缩徐变预测模型对超高层结构进行了施工模拟分析,并对比了不同收缩徐变模拟计算的差异。文中对宁波中银大厦进行了考虑混凝土时变特性的施工模拟分析,并采用采用 CEB-FP (1990)模型进行计算。最后将分析结果与弹性工况的分析结果进行对比,得出了混凝土收缩徐变对框架柱与核心筒竖向位移及位移差的影响。

## 2. 工程概况

宁波中银大厦项目位于浙江省宁波市,为综合性办公建筑。项目由 49 层办公塔楼、4 层商业裙楼、连接塔楼与裙房的钢结构雨篷及 3 层地下停车库组成。塔楼结构顶标高为 246.000 m;裙房大屋面标高约为 24.000 m。总建筑面积约 14.5 万  $m^2$ ,其中塔楼地上建筑面积约 10.7 万  $m^2$ ,地下建筑面积约 3.8 万  $m^2$ 。塔楼采用钢管混凝土柱 + 楼面钢梁框架钢筋混凝土筒体的混合结构体系。塔楼核心筒 19 层以下外核心筒为圆形;19 层以上经过转换部分外围圆形墙体收掉,变为带切角的正方形小筒体;外围框架柱为钢管混凝土柱。整个塔楼平面从下到上逐渐绕中心扭转,形成一个扭转型的建筑外形。塔楼上部结构均采用钢管混凝土柱 + 钢梁框架混凝土核心筒的混合结构体系。为使核心筒具有足够的承载力和延性,在核心筒角部设置上下贯通的型钢。框架柱采用圆形钢管混凝土柱,框架梁采用焊接 H 型钢,与框架柱均采用刚接,以满足外围框架作为第 2 道抗震防线的要求。

## 3. 有限元建模及分析方法

### 3.1. 有限元建模

采用 midas/gen 对该结构进行建模分析,有限元模型如图 1 所示。钢管和混凝土采用梁单元模拟,核

心筒和楼板采用板单元模拟，其他构件均采用梁单元。施工步骤划分为 2 层一个施工阶段，一个施工阶段 14 d，分别计算结构竣工后的竖向位移。取图 2 位置处框架柱与核心筒的分析结果。

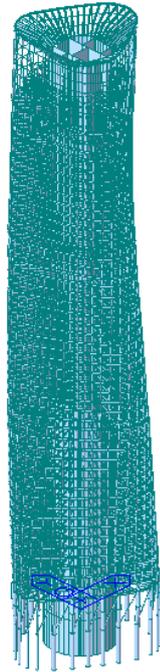


Figure 1. Finite element model  
图 1. 有限元模型

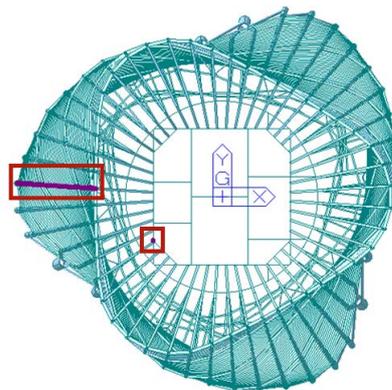


Figure 2. Vertical deformation selection location  
图 2. 竖向变形选取位置

### 3.2. 分析方法

国内外学者为了计算混凝土收缩徐变对结构的影响，通过大量的构件试验数据，拟合得到了一些预测模型，如 ACI 模型，CEB-FIP (1990)模型、B3 模型。目前，国内常用的模型为 CEB-FIP (1990)模型。

CEB-FIP (1990)徐变计算模型表达式：

$$\phi(t, t_0) = \phi(\infty, t_0) \beta_c(t - t_0)$$

式中： $\phi(\infty, t_0)$  为名义徐变系数； $\beta_c(t - t_0)$  为徐变随时间的发展系数。

CEB-FIP (1990)收缩计算模型表达式如下:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s (t - t_s)$$

式中:  $\varepsilon_{cso}$  为混凝土名义收缩系数;  $\beta_s$  为时间相关的收缩变化发展系数,  $t_s$  为混凝土收缩开始龄期。

## 4. 分析结果

### 4.1. 竖向位移

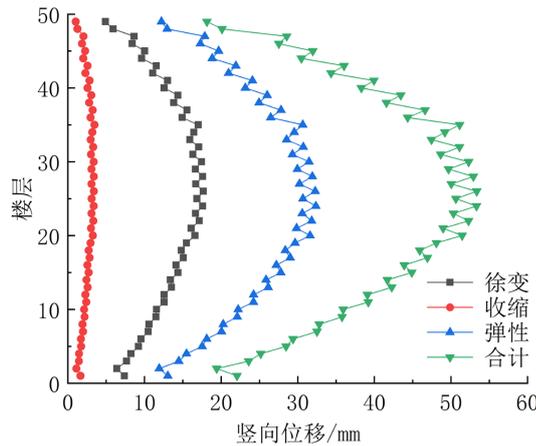


Figure 3. Vertical deformation of frame column

图 3. 框架柱竖向变形

如图 3 所示, 框架柱竖向位移值呈现中间大两头小的趋势, 竖向位移曲线呈鱼腹状, 且弹性变形 > 徐变变形 > 收缩变形。结构竣工时, 框架柱的最大竖向位移发生在 26 层, 数值为 53.36 mm, 结构在弹性工况下产生的竖向位移为 32.28 mm, 占总位移的 60.5%; 在徐变工况下产生的竖向位移为 17.69 mm, 占总位移的 33.15%; 在收缩工况下产生的竖向位移为 3.38 mm, 占总位移的 6.4%。

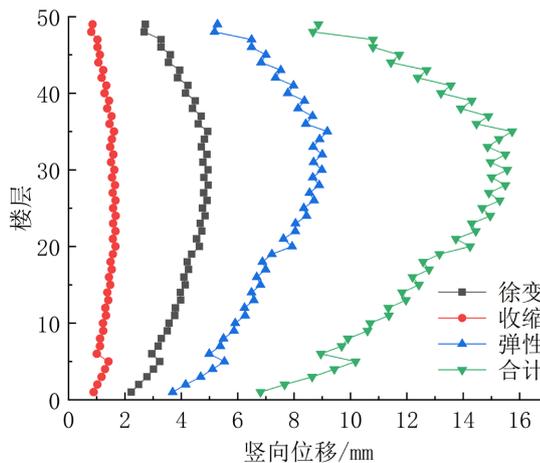


Figure 4. Vertical deformation of the core

图 4. 核心筒竖向变形

如图 4 所示, 核心筒竖向位移值呈现中间大两头小的趋势, 竖向位移曲线呈鱼腹状, 且弹性变形 > 徐变变形 > 收缩变形。结构竣工时, 核心筒的最大竖向位移发生在 35 层, 数值为 15.73 mm, 结构在弹性

工况下产生的竖向位移为 9.18 mm，占总位移的 58.4%；在徐变工况下产生的竖向位移为 4.94 mm，占总位移的 31.4%；在收缩工况下产生的竖向位移为 1.6 mm，占总位移的 10.1%。

由上可知，框架柱和核心筒的最大竖向位移发生结构的中上部，结构总竖向变形虽以弹性变形为主，但在结构封顶时，在收缩徐变效应影响最大的楼层中，由收缩徐变导致的变形比例高达 41.5%，由此可知，为准确分析结构的竖向变形，消除结构的附加应力，在计算分析时不能忽略收缩徐变效应引起的竖向变形。

## 4.2. 竖向位移差

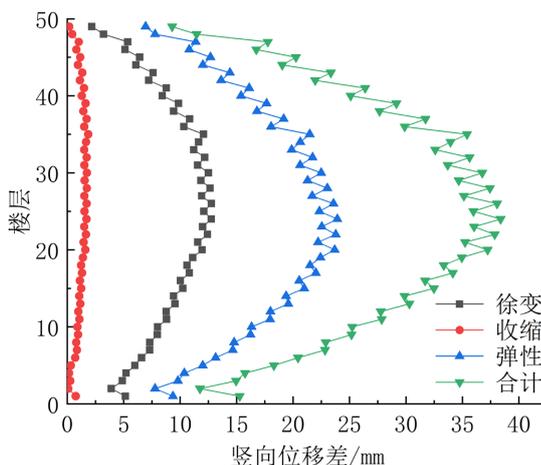


Figure 5. Difference in vertical deformation of frame columns and cores

图 5. 框架柱与核心筒的竖向变形差

如图 5 所示，框架柱与核心筒的竖向位移差值呈现中间大两头小的趋势，竖向位移差曲线呈鱼腹状，且弹性变形 > 徐变变形 > 收缩变形。结构竣工时，框架柱与核心筒的最大竖向位移差发生在 26 层，数值为 38.06 mm，结构在弹性工况下产生的竖向位移为 23.57 mm，占总位移的 61.9%；在徐变工况下产生的竖向位移为 12.77 mm，占总位移的 33.6%；在收缩工况下产生的竖向位移为 1.72 mm，占总位移的 4.5%。

由上可知，框架柱和核心筒的最大竖向位移差发生结构的中上部，竖向变形差虽以弹性变形为主，但在结构封顶时，在收缩徐变效应影响最大的楼层中，由收缩徐变导致的变形比例高达 37.2%，且随着收缩徐变的发展，结构的竖向位移差逐渐增加，最终可能会使同一水平面上的框架梁弯矩增加，严重时导致破坏。

## 5. 结论

1) 框架柱和核心筒的竖向位移以及二者的竖向位移差呈现中间大两头小的趋势，竖向位移以及竖向位移差曲线呈鱼腹状，且弹性变形 > 徐变变形 > 收缩变形。

2) 结构的竖向位移以及竖向位移差的最大值出现在结构的中上部，在进行结构与施工时，应重点关注。

3) 在收缩徐变效应影响最大的楼层中，由收缩徐变导致的变形占总竖向变形比例高达 41.5%，因此，超高层结构在进行施工分析时，应进行考虑混凝土收缩徐变的影响。

4) 数值计算结果表明框架柱和核心筒的竖向位移差很大。该差值会引起较大的附加弯矩和附加剪力，在实际工程设计中应尽量考虑该影响。

## 参考文献

- [1] 汪大绥, 包联进. 我国超高层建筑结构发展与展望[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 11-24.
- [2] 吴杰, 刘俊杰. 某超高层框架-核心筒结构时变效应分析与实测[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 559-565.
- [3] 吴玖荣, 吴立友, 梁强武. 竖向布置沿高度内编的某超高层建筑施工模拟分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(5): 71-76, 49.
- [4] 谢栋明, 王浩伟. 基于 Midas/gen 的高层建筑结构徐变与收缩分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 351-356.
- [5] 王晓蓓, 高振锋, 伍小平, 等. 上海中心大厦结构长期竖向变形分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 108-116.
- [6] 梁富华, 韩建强, 甘海峰, 等. 超高层框架-核心筒结构竖向变形差的实测与分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 82-89.
- [7] 赵建, 周定松, 周佳, 等. 混凝土收缩徐变对超高层巨型混合结构竖向变形和关键构件内力的影响与控制[J]. 建筑结构, 2020, 50(1): 44-51.
- [8] 刘枫, 刘军进. 混凝土收缩徐变对天津塔施工模拟及预变形的影响分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(9): 142-145.