

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0165-04

# 非荷载因素对超高层结构变形的影响研究

董志君<sup>1,2,3</sup>, 李筱毅<sup>4</sup>, 阎培渝<sup>1</sup>, 欧阳蓉<sup>5</sup>

(1. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 深圳 518060;  
3. 深圳地铁集团有限公司, 深圳 518024; 4. 深圳市轨道交通建设指挥部办公室, 深圳 518024; 5. 深圳市市政设计院有限公司, 深圳 518024)

**摘 要:** 影响超高层结构变形的非直接荷载因素主要是混凝土的收缩和徐变、结构向阳面和背阳面的温度差异。而影响结构变形的直接荷载因素有自重、活荷载、风荷载等。针对地处中国深圳地区的某高度为 441.8m 的超高层结构进行了精细的施工过程模拟分析, 研究了非荷载因素对超高层结构变形的影响程度。分析结果表明: 施工过程中考虑逐层找平时, 结构竖向位移发生在结构中部, 最大位移为 58.4mm, 不考虑逐层找平; 竣工时最大位移发生在结构顶层, 最大位移为 103mm; 结构竣工 600 天后, 最大位移为 122mm; 各施工阶段由收缩徐变引起的结构变形占总徐变变形的 30%左右。风荷载引起的结构侧向变形为剪切型变形, 而温差引起的侧向变形为弯曲性变形, 因此温差引起变形与风荷载引起变形的比例, 随着高度的增加而增大。50 年一遇的风荷载作用下, 结构顶部位移达到 1752mm, 温差为 30℃时, 结构顶部侧向位移达到 701mm, 占风荷载引起变形的 40%。

**关键词:** 超高层结构; 施工过程模拟; 风荷载; 收缩徐变; 温差

**中图分类号:** TU391; TU392.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.S034

## STUDY OF THE INFLUENCE OF SHRINKAGE, CREEP AND TEMPERATURE DIFFERENCE ON SUPER HIGH-RISE STRUCTURAL DEFORMATION

DONG Zhi-jun<sup>1,2,3</sup>, LI Xiao-yi<sup>4</sup>, YAN Pei-yu<sup>1</sup>, OUYANG Rong<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen 518060, China;

3. Shenzhen Metro Group Company Limited, Shenzhen 518026, China; 4. Shenzhen Orbit Transit Construction Office, Shenzhen 518026, China;

5. Shenzhen Municipal Design and Research Institute Company Limited, Shenzhen 518026, China)

**Abstract:** The indirect load factors that influence super high-rise structural deformation mainly include the shrinkage, creep of concrete, as well as the temperature difference between the sunny side and sunless side of a structure. And the direct load factors influencing the deformation of a structure include its dead weight, live load, wind load, etc. The analysis was carried out for the refined construction process simulation of a super high-rise structure in China Shenzhen with a height of 441.8m, and the research was done on the influence degree of non direct load factors on super high-rise structural deformation. Analysis result shows that: when level finding storey by storey is considered during construction stage simulation, the vertical displacement of the structure occurs in the middle storey of the structure, with max displacement of 58.4mm. Without considering the layer-by-layer leveling, the final max displacement occurs in the top storey of the structure, with max displacement of 103mm.

收稿日期: 2012-06-21; 修改日期: 2013-04-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB013604); 国家杰出青年科学基金项目(50925829)

通讯作者: 董志君(1980—), 男, 山东人, 博士, 主要从事结构抗震性能分析和结构耐久性研究(E-mail: dongzhijun122@aliyun.com).

作者简介: 李筱毅(1953—), 男, 湖南人, 副教授, 硕士, 主要从事地铁工程建设和管理研究;

阎培渝(1955—), 男, 重庆人, 教授, 博士, 主要从事结构耐久性研究;

欧阳蓉(1968—), 女, 江西人, 高工, 学士, 主要从事结构抗震性能研究.

After 600 days since structure completion, the max displacement is 122mm, and the structural deformation of each construction stage caused by shrinkage creep takes up about 30% of the total deformation. The structural lateral deformation caused by wind load is of shearing type, while the lateral deformation caused by temperature difference is bending deformation. Thusly, the proportions of deformation caused by temperature difference and wind load are becoming greater and greater with the increase of height. Under the influence of wind load which might occur once in 50 years, the displacement at the top of structure can reach 1752mm, and lateral displacement at the top of structure can reach 701mm when temperature difference is 30℃, accounting for 40% of the deformation caused by wind load.

**Key words:** super high-rise structure; construction stage simulation; wind load; shrinkage and creep; temperature difference

结构设计时通常考虑的设计因素有：恒荷载、活荷载、地震作用、风荷载。这些荷载因素通过各种组合的形式取最不利状况作为设计依据，而混凝土结构的收缩、徐变和温差引起的结构变形则通常忽略不计。这些非荷载因素在超高层结构设计时能否忽略当结构较高时，这些因素能否忽略则需要深入探讨，本文将在地处深圳地区高度为 441.8m 的某建筑为例，研究非荷载因素对结构变形的影响。该建筑地下 4 层，地上 100 层，总高度为 441.8m，采用框架核心筒加斜撑加伸臂桁架的抗侧力体系，外筒由巨型钢管混凝土柱，钢斜撑组成，核心筒为型钢混凝土剪力墙，型钢通过设置抗剪部件保证和钢筋混凝土剪力墙的粘结，型钢设置至 21 层。内外筒之间采用钢伸臂桁架连接，共设 5 道伸臂桁架以保证内外筒的协同工作。结构钢材采用 Q345 号钢，楼板混凝土采用 C30，外框架钢管混凝土内混凝土为 C60，核心筒混凝土标号沿高度变化，30 层以下为 C80，30~60 层为 C70，60 层以上为 C60<sup>[1]</sup>。

结构计算时计算两种工况，一种工况只考虑结构自重荷载和结构施工活载作用下的结构变形，另一种工况考虑收缩、徐变和温差等非荷载因素对变形的影响。竖向荷载分布不均匀，结构核心筒抗压能力要比外框架大，在竖向荷载作用下会引起结构内外筒的不均匀变形，同时在超高层建筑结构中，由于结构超高，荷载较大，构件体积庞大，混凝土用量很大，所以混凝土的收缩徐变对结构的竖向变形有很大影响。深圳地处亚热带地区，炎热夏日时，结构阳面最高温度可达 50℃，阴面温度约为 20℃，由于温差差异既可以引起次应力，也会引起侧向变形。因此精细分析超高层结构在非荷载作用下的变形对于指导结构设计和施工具有重要的工程价值<sup>[2-4]</sup>。

## 1 各荷载计算原理及取值

结构计算式主要考虑下面几种荷载包括自重、施工活荷载、风荷载。其中自重按照材料的真实密度考虑；施工均布活荷载按照 2.5kN/m<sup>2</sup>，施工集中活荷载按照实际工程情况取用；风荷载按照深圳地区 50 年一遇的工况取用。对于混凝土的收缩徐变按照欧盟规范 CEB-FIP 取用<sup>[5-6]</sup>。

温度差差异按照历史统计资料简化取用，深圳位于亚热带地区，夏季高温季节结构阳面表面温度可达到 50℃，阴面则基本与室温持平，温度约为 20℃，当室内空调系统停止工作时，阳面和阴面的温差达到 30℃，在温差作用下竖向构件发生不均匀变形，结构整体弯曲造成结构的水平变形。当变形过大时会影响电梯的正常运行，需要在设计时提出相应的技术措施。考虑温度梯度在阳面和阴面之间是均匀的，按照最不利温差可得到构件温度在平面上分布。见图 1。

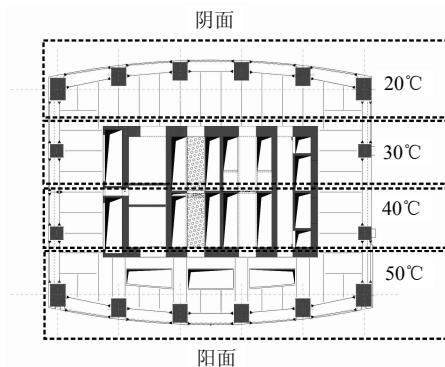


图 1 楼层平面温度分布

Fig.1 Floor plan temperature distribution

## 2 结构变形分析

### 2.1 收缩和徐变的分析方法

收缩和徐变变形从混凝土浇筑完成那一刻起，已

经开始进行,而且混凝土硬化后3个月内的收缩徐变变形的量占总量的75%左右<sup>[7-8]</sup>,为精确地考虑收缩徐变对混凝土变形的影响,需要考虑混凝土在施工过程中的收缩和徐变变形,因此将结构建造过程分为不同的施工步来模拟,按照结构施工组织流程,每层的施工周期约为5天,整个施工周期可以划分为22个施工步。恒荷载、活荷载、塔吊和爬模荷载以及收缩与徐变荷载按照实际情况按照施工顺序逐渐激活。施工过程模拟常见采用标准施工模拟方法<sup>[9-10]</sup>。这种方法以每5层为一施工段反映了建筑整个施工过程,并且考虑了每个施工阶段完毕后的找平工作,与建筑实际形成过程比较相符。

## 2.2 风荷载和温差分析计算

温度变化时,结构变形与温度呈比例关系,材料的线膨胀系数不同,构件变形量按下式计算。

$$\Delta L = L(T_2 - T_1)\alpha \quad (1)$$

式中:  $\Delta L$ 、 $L$  分别为构件的变形差和构件长度;  $T_2 - T_1$  为构件的温差;  $\alpha$  为材料的线膨胀系数,混凝土取  $1.0 \times 10^{-5}$ ,钢材取  $1.2 \times 10^{-6}$ 。结构计算时按照楼层平面温度分布假设,将各部分区域温度赋予各构件。

## 3 结构变形分析

### 3.1 收缩徐变引起的变形

为了充分考虑混凝土的收缩徐变效应,在施工完成后设置一个计算步,该步时间长度设为600天,用于计算混凝土收缩徐变的后期效应。结构外筒竖向变形考虑四个角柱竖向变形的平均值,核心筒的竖向变形考虑核心筒四个角点竖向变形的平均值。施工过程各施工步时结构最大应力见图2,结构施工完毕时是结构的荷载最大的时刻,此时的结构变形和应力水平处于最不利状态。

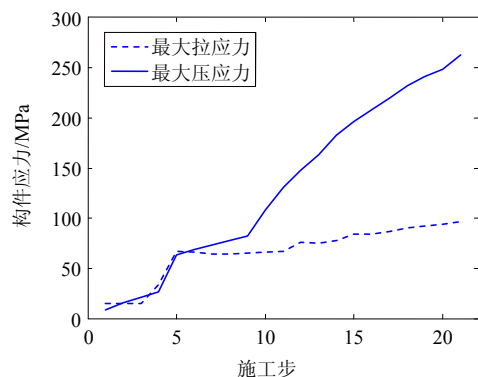
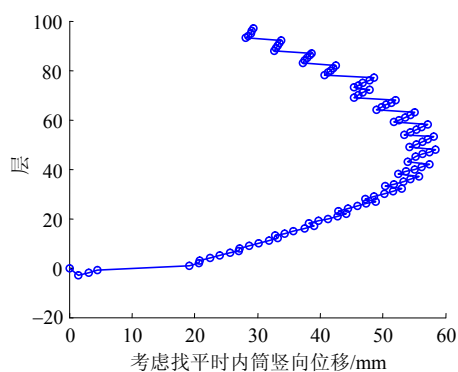


图2 施工过程中结构应力的变化

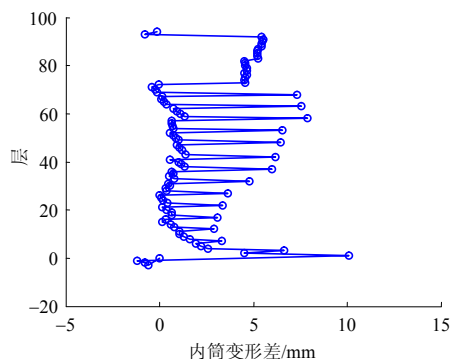
Fig.2 Structure stress changes during construction process

由图2可知,在自重、施工活荷载和收缩徐变作用下,结构最大压应力达到250MPa,施工过程中各结构构件均处于弹性状态。

结构外筒竖向变形取四个角部节点竖向变形的平均值,外筒竖向变形见图3(a)。内筒竖向变形也取内筒四个角节点竖向变形的平均值,内外筒变形差见图3(b)。结构封顶时和竣工后600天时结构各层最终竖向变形见图4(a),竣工后600天时收缩徐变引起的竖向变形与总变形的比值见图4(b)。考虑逐层找平时,结构竖向最大变形发生在结构中部



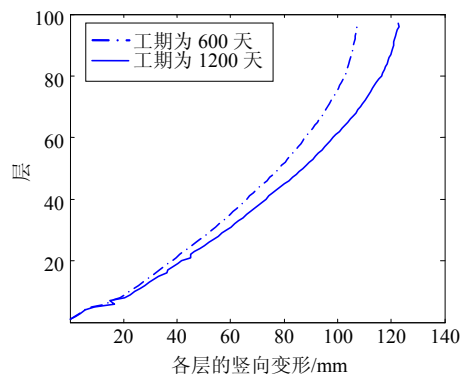
(a) 竣工时内筒竖向位移(考虑逐层找平)



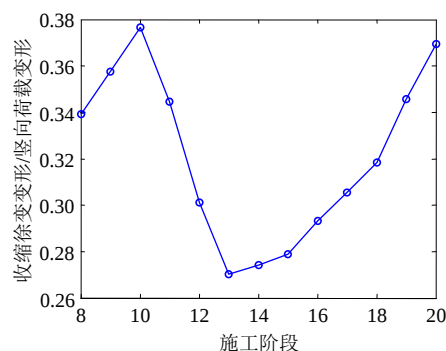
(b) 竣工时内外筒变形差

图3 竣工时结构竖向变形及内外筒变形差

Fig.3 Structure vertical deformation and internal and external deformation difference when completion



(a) 竣工时及竣工后600天结构竖向变形(找平折算后)



(b) 各施工阶段收缩徐变变形与总变形比值

图4 施工过程中及竣工后 600 天结构变形发展过程

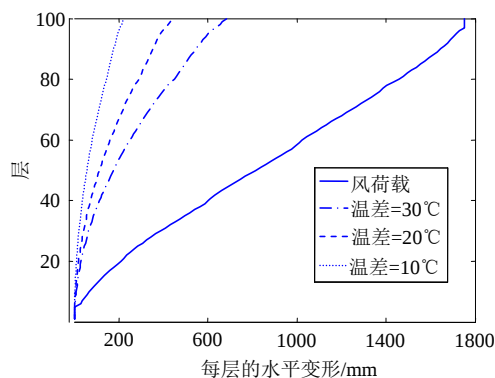
Fig.4 Structure deformation development process during construction process and at 600 days after completion

的 50 层, 总位移为 58.4mm, 收缩徐变位移为 23.1mm。不考虑逐层找平时, 结构竣工时结构顶部总竖向变形为 103mm, 内外筒之间的变形差最高达到 11mm。竣工后 600 天左右时, 结构总竖向变形约为 122mm, 大部分层数外筒变形大于内筒。各施工阶段, 收缩和徐变变形占总竖向变形的 30% 左右。

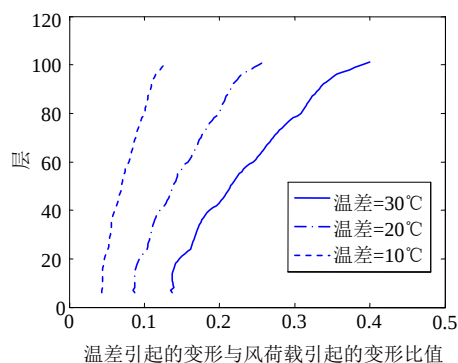
### 3.2 风荷载及温差引起的变形

按照深圳地区风荷载统计资料, 取 50 年一遇风压标准值  $0.75\text{kN/m}^2$ , 作为静力作用施加在结构迎风面积最大的投影上, 结构对称, 质心和刚心基本重合, 因此在风荷载作用下结构侧向变形比较一致, 风荷载作用下结构每层的结构变形见图 9(a)。阳面和阴面的温差考虑  $30^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$  和  $10^\circ\text{C}$  三种工况, 温差作用下的结构各层侧向变形见图 5(a), 温差引起的结构侧向变形与风荷载引起的侧向变形的比值见图 5(b)。

由图 5(a)可知, 风荷载引起的结构变形属于剪切变形, 温差引起的变形为弯曲型变形。 $0.75\text{kN/m}^2$  风荷载作用下, 结构顶部位移达到 1752mm。温差  $30^\circ\text{C}$  时最大侧向变形为 701mm, 温差  $20^\circ\text{C}$  时最大



(a) 风荷载和温差引起的结构侧向变形



(b) 温差变形与风荷载变形比值

图5 风荷载及温差引起的结构侧向变形

Fig.5 The lateral deformation induced by wind load and temperature difference

侧向变形为 452mm, 温差  $10^\circ\text{C}$  时最大侧向位移为 227mm。由图 5(b)可知, 温差引起的侧向变形与风荷载引起侧向变形的比例随着高度增加而增加, 温差为  $30^\circ\text{C}$  时, 结构顶部温差引起的结构侧向变形占风荷载引起侧向变形 40%。

## 4 结论

利用通用设计软件 MIDAS 对高度为 441.8m 的某超高层结构进行了结构性能分析, 主要考虑了风荷载、自重、施工活荷载、塔吊荷载、爬模荷载、混凝土的收缩徐变效应、风荷载以及温差效应, 对结构收缩徐变计算时考虑施工过程的影响, 风荷载以静力形式施加, 假定温差在结构平面均匀分布, 分析结果表明:

(1) 施工过程中模拟考虑逐层找平时, 结构竖向位移发生在结构中部, 最大位移为 58.4mm, 不考虑逐层找平, 竣工时最大位移发生在结构顶层, 最大位移为 103mm, 结构竣工 600 天后, 最大位移为 122mm, 各施工阶段由收缩徐变引起的结构变形占总徐变变形的 30% 左右。

(2) 风荷载引起的结构侧向变形为剪切型变形, 而温差引起的侧向变形为弯曲型变形, 因此温差引起变形与风荷载引起变形的比例, 随着高度的增加而增大。 $0.75\text{kN/m}^2$  风荷载作用下, 结构顶部位移达到 1752mm, 温差为  $30^\circ\text{C}$  时, 结构顶部侧向位移达到 701mm, 占风荷载引起变形的 40%。因此在高温地区, 由温差引起的结构侧向变形也不容忽视。

(参考文献转第 190 页)

- [13] 常在, 杨军, 程晓辉. 砂土强度和剪胀性的颗粒力学分析[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 95—104.  
Chang Zai, Yang Jun, Cheng Xiaohui. Granular mechanical analysis of the strength and dilatancy of sands [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4): 95—104. (in Chinese)
- [14] Cundall P A. Numerical experiments on localization in frictional materials [J]. Ingenieur Archivum, 1989, 59(2): 148—159.
- [15] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47—65.
- [16] Itasca Consulting Group. PFC2D (particle flow code in 2 dimensions) version 3.1, User's manual [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 1998.
- [17] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 172—194.  
Xie Dingyi. Soil dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 172—194. (in Chinese)
- [18] 廖红建, 李涛, 马宗源, 等. 黄土骨干曲线模型比较分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 17—21.  
Liao Hongjian, Li Tao, Ma Zongyuan, et al. Comparative analysis of backbone curve models for loess soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Suppl 2): 17—21. (in Chinese)

(上接第 168 页)

#### 参考文献:

- [1] 董志君, 滕军, 郭伟亮. 深圳京基金融中心的施工过程力学性能分析[J]. 建筑结构学报, 2009, S(1): 409—412.  
Dong Zhijun, Teng Jun, Guo Weiliang. Staged construction analysis and application of mechanical performance on Jingji Commercial Centre [J]. Journal of Building Structures, 2009, S(1): 409—412. (in Chinese)
- [2] 汪大绥, 姜文伟, 包联进, 王建. CCTV 新台址主楼施工模拟分析及应用研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(3): 104—110.  
Wang Dasui, Jiang Wenwei, Bao Lianjin, Wang Jian. Staged construction analysis and application research on New CCTV Building [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(3): 104—110. (in Chinese)
- [3] 唐兴国, 钟铁毅. 北京电视中心高层钢结构施工模拟分析[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(1): 59—62.  
Tang Xingguo, Zhong Tieyi. Construction simulation analysis for high rise of Beijing television tower [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, 30(1): 59—62. (in Chinese)
- [4] 傅学怡. 高层建筑结构垂直荷载下的施工模拟计算[J]. 深圳大学学报, 1992, 9(1/2): 23—29.  
Fu Xueyi. The simulated calculation of high-rise building structure under vertical construction loads [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 1992, 9(1/2): 23—29. (in Chinese)
- [5] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures [S]. ACI209R-92, Reapproved 1997.
- [6] Bazant Z P. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3 [J]. Materials and Structures, 1995, 28: 357—365.
- [7] Bazant Z P. Prediction of concrete and shrinkage-past, present and future [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 203: 27—38.
- [8] Bazant Z P, Hauggaard A B, Baweja S, et al. Microprestress-solidification theory for concrete creep I: Aging and drying effects [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(11): 1188—1194.
- [9] 邓志恒, 秦荣. 考虑施工过程收缩徐变对高层建筑结构影响理论分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(5): 28—31.  
Deng Zhiheng, Qin Rong. Influence of shrinkage and creep on high-rise building in construction process [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(5): 28—31. (in Chinese)
- [10] 李浩, 唐圣业, 陈璞. 两种高层建筑施工模拟快速计算方案[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 87—92.  
Li Hao, Tang Shengye, Chen Pu. Two fast strategies for high-rise building construction simulation [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 87—92. (in Chinese)