

文章编号: 1007-2993(2022)01-0064-06

# CFG 桩复合地基变刚度调平设计与分析

卢萍珍 齐 微 孙宏伟 方云飞  
(北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045)

**【摘要】** 北京国际文化硅谷园位于北京朝阳区, 工程场区以粉质黏土、粉土与砂土交互沉积为主, 且地下水水位较高。该工程纯地下车库区域因自重不满足抗浮要求, 采取了抗浮桩措施, 同时主楼地基承载力不足, 采用了复合地基, 形成主楼复合地基+纯地下抗浮桩的型式。需要考虑主楼与纯地下车库, 以及主楼的核心筒与外框架柱之间的差异沉降。通过基于地基与结构相互作用的差异沉降变形计算分析, 验证控制与协调不均匀沉降的工程措施, 设计选择合理的 CFG 桩持力层, 调整主楼 CFG 桩桩间距、褥垫层厚度而调整地基刚度, 并依据差异沉降计算分析优化调整抗浮桩的布置范围, 实现了变刚度调平设计。工程检验与沉降实测, 验证了本工程地基变刚度调平差异沉降的地基设计方案的合理性。

**【关键词】** 地基基础设计; CFG 桩复合地基; 抗浮桩; 变刚度调平设计; 协同分析

**【中图分类号】** TU 433

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.01.012

## Variable Stiffness Leveling Foundation Design and Analysis of CFG Composite Foundation

Lu Pingzhen Qi Wei Sun Hongwei Fang Yunfei

(Beijing Institute of Architecture Design Co., Ltd., Beijing 100045, China)

**【Abstract】** Beijing International Culture Silicon Valley Park is located in Chaoyang District, Beijing. The project area is mainly composed of silty clay, silty soil and sandy soil with high groundwater level. In this project the only-underground-building needs anti-floating piles. At the same time, due to large load of the main towers and insufficient foundation bearing capacity, the CFG composite foundation is adopted under the main towers. Thus, CFG composite foundation under the main towers and anti-floating piles under the only-underground-building are used in this project. The differential settlement between towers and only-underground-building and also the core tube and the outer frame column of the tower building is difficult to control. Through the calculation and analysis of differential settlement deformation based on the interaction between geotechnical foundation and structure, the engineering measures for controlling and coordinating differential settlement are verified. The measures include selecting reasonable bearing layer of CFG pile, adjusting the foundation stiffness by using different spacing of CFG piles and cushion thickness, and optimizing the anti-floating piles according to the geotechnical settlement deformation analysis. The variable stiffness between the towers and their skirt buildings as well as the core tube of the tower and the columns of the outer frame is realized. The design is verified by the engineering inspection and settlement measurement.

**【Key words】** geotechnical foundation design; CFG composite foundation; anti-floating piles; optimized design of foundation stiffness to reduce differential settlement; interaction analysis

### 0 引言

因建筑功能上的需要, 在高层主楼周边往往配置有低层裙楼或纯地下车库。由于两者层数、荷载相差大, 基础差异沉降量的控制<sup>[1]</sup>成为设计的重点和难点; 当地下水水位高, 同时裙房或纯地下埋深较大, 需要增设抗浮构件时, 以上问题更为突出<sup>[2-3]</sup>。

CFG 桩复合地基<sup>[4]</sup>技术具有施工速度快、工期

短、质量容易控制、工程造价相对低廉的特点, 因此亦被较多地应用于高层建筑中, 是北京及周边地区应用最普遍的地基处理技术之一<sup>[5]</sup>。周 宸等通过现场足尺试验, 研究了 CFG 桩的受力特征<sup>[6]</sup>; 化建新等系统综述了 2015 年以前 CFG 桩复合地基在建筑工程中的研究及应用进展<sup>[7]</sup>; 吴民利分析了褥垫层厚度对 CFG 桩桩土应力分担比的影响<sup>[8]</sup>; 郭密文等<sup>[9]</sup>、王

作者简介: 卢萍珍, 女, 1982 年生, 汉族, 山西霍州人, 硕士研究生, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 主要从事地基基础设计与咨询分析相关工作。E-mail: lupingzhen@biad.com.cn

杨等<sup>[10]</sup>分析了采用 CFG 桩进行变刚度调平设计,采用变桩径、桩长或桩间距,解决核心筒承载力要求高、周边承载力要求低的问题。本文侧重介绍大面积地下室连成一体多塔结构,主楼采用 CFG 桩复合地基,裙房采用抗浮桩构件条件下,基于差异变形控制的协同设计与分析。

## 1 工程概况

北京国际文化硅谷园位于北京市朝阳区将台乡,东北五环路与机场高速公路交汇处的南侧,东侧为酒仙桥东路,南侧临近万红路,西侧为 798 艺术区,北侧为酒仙桥北路。根据相对于电子城一号街的地理位置,本工程分为北区和南区。南、北两区均主要由 2 栋高层办公楼及地下车库组成。其中高层办公楼地下 2 层,地上 13 层,高 60 m,钢筋混凝土框架-剪力墙结构;地下车库为框架结构,地下 2 层。基础形式均为梁板式筏形基础。

本工程±0.00 为绝对标高 35.00 m,基底标高主楼-12.47 m、纯地下车库-11.87 m,地基土为细砂-粉砂③层,局部为黏质粉土④层、重粉质黏土-黏土④<sub>3</sub>层,地基承载力标准值 $f_{ka}$ 综合取值 130 kPa。地基基础设计等级为甲级。建筑平面内既分布有较高的集中荷载,同时有大面积的超补偿建筑,使得置于同一基础结构单元的各高层建筑与周边部位之间的差异沉降问题十分突出,因此,如何协调与控制各建筑的基础差异沉降是结构设计面临的严峻问题。本文着重介绍北区地块的地基基础设计与分析。图 1 所示为北区三维结构模型,图 2 为北区主楼标准层结构分布图示。

## 2 场区条件

### 2.1 岩土工程条件

拟建场地位于永定河冲洪积扇中下部,其第四纪沉积物主要为永定河冲洪积物。以粉质黏土、粉土与砂土交互沉积为主。在地勘钻探揭露的最大勘探深度 45.0 m 范围内,可分为 10 个大层,其中场区

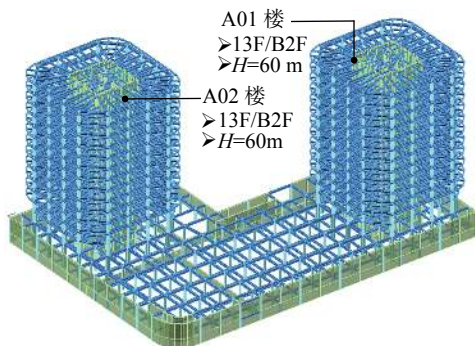


图 1 北区三维结构模型

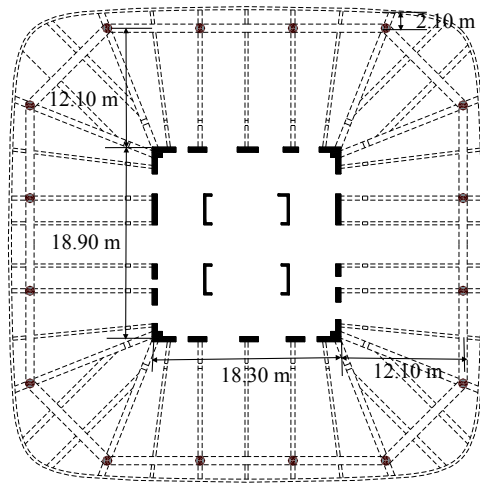


图 2 北区主楼标准层图示

表层为厚度 0.5~3.3 m 的人工堆积层,自标高 31.57~33.99 m 以下为一般第四纪沉积层。根据该项目详勘报告,基底以下各层土的物理力学性质指标如表 1 所示。典型地层剖面见图 3。

### 2.2 水文地质条件

勘察期间(2015 年 9 月中上旬)场地 33 m 深度范围内共揭露 5 层地下水,自上到下依次为台地潜水、潜水(3 层)和承压水(见表 2)。近 3~5 年最高水位标高为 32.50 m 左右(不包括上层滞水)。本工程的建筑抗浮设计水位标高按 32.50 m 考虑。

## 3 设计方案

本工程主楼因地基承载力不足采用 CFG 桩复合地基,裙房因抗浮需要布置抗浮桩。主楼结构体系与常见框架剪力墙结构不同之处在于,标准层层层有外悬挑(2.10 m),且外框柱与核心筒距离较大(12.10 m),同时局部外框柱邻近地下室外墙,基础底板没有外扩条件(见图 1、图 2),导致局部框架下荷载集度明显增大。通过不断调整地基与基础刚度,完成的计算分析工作包括:岩土工程指标到工程所需参数的转化;考虑地基与结构相互作用的差异沉降变形计算分析;变刚度调平差异变形的地基设计方案分析;控制与协调不均匀沉降的工程措施分析与计算验证等,最终目标为使沉降分析结果满足变形设计要求,即地基处理后建筑物最终最大沉降不大于 50 mm,差异沉降不大于 0.1‰。

基于变形协调,考虑主楼基底应力的扩散,主楼厚板延伸到第一跨纯地下车库柱,同时在距离主楼框架柱一跨外起,根据纯地下车库各区域抗浮荷载及单桩抗拔承载力,进行纯地下区域抗浮桩布置。

最终地基基础方案中,裙房抗浮桩采用桩径 600 mm,桩长 17.50 m,桩身混凝土强度 C35,单桩竖

表1 地层岩性物理力学指标表

| 地层编号及岩性              | 天然快剪     |               | 压缩模量 $E_s$ /MPa | 极限侧阻力标准值 $q_{sk}$ /kPa | 极限端阻力标准值 $q_{pk}$ /kPa |
|----------------------|----------|---------------|-----------------|------------------------|------------------------|
|                      | $c$ /kPa | $\varphi$ (°) |                 |                        |                        |
| ③细砂-粉砂               | (0)      | (30)          | 23.00           | 60                     |                        |
| ③ <sub>1</sub> 黏质粉土  | 16       | 28            |                 | 55                     |                        |
| ③ <sub>2</sub> 重粉质黏土 | 31       | 15.2          | 5.37            | 45                     |                        |
| ③ <sub>3</sub> 粉砂-细砂 | 15.0     | 25.0          | 15              | 50                     |                        |
| ④粉质黏土                | 27.86    | 18.64         | 7.5             | 55                     |                        |
| ④ <sub>1</sub> 砂质粉土  | 19.85    | 28.12         | 12.04           | 60                     |                        |
| ④ <sub>2</sub> 粉砂-细砂 | 0        | 30            | 25              | 60                     |                        |
| ④ <sub>3</sub> 重粉质黏土 | 32.17    | 11.5          | 5.87            | 50                     |                        |
| ⑤粉质黏土                | 32       | 17.81         | 9.72            | 60                     | 450                    |
| ⑤ <sub>1</sub> 黏质粉土  | 20       | 29.13         | 12.68           | 60                     | 550                    |
| ⑤ <sub>2</sub> 粉砂-细砂 |          |               | 28.00           | 65                     | 650                    |
| ⑤ <sub>3</sub> 重粉质黏土 | 36       | 10            | 6.88            | 55                     | 400                    |
| ⑥粉质黏土                | 32       | 21.5          | 12.58           | 60                     | 600                    |
| ⑥ <sub>1</sub> 重粉质黏土 |          |               | 9.1             | 55                     | 500                    |
| ⑥ <sub>2</sub> 砂质粉土  |          |               |                 | 65                     | 700                    |
| ⑥ <sub>3</sub> 粉砂    |          |               | 30              | 65                     | 750                    |
| ⑦细砂-粉砂               |          |               | (32)            | 70                     | 1000                   |
| ⑦ <sub>1</sub> 粉质黏土  |          |               | 11.19           | 60                     | 650                    |
| ⑦ <sub>2</sub> 黏质粉土  |          |               | 18.15           | 65                     | 750                    |
| ⑧细砂                  |          |               | (35)            | 75                     | 1200                   |
| ⑧ <sub>1</sub> 黏质粉土  |          |               | (13)            | 60                     | 800                    |
| ⑨粉质黏土                |          |               | 14.3            |                        |                        |
| ⑨ <sub>1</sub> 黏质粉土  |          |               | 19.9            |                        |                        |
| ⑨ <sub>2</sub> 黏土    |          |               | 13.6            |                        |                        |

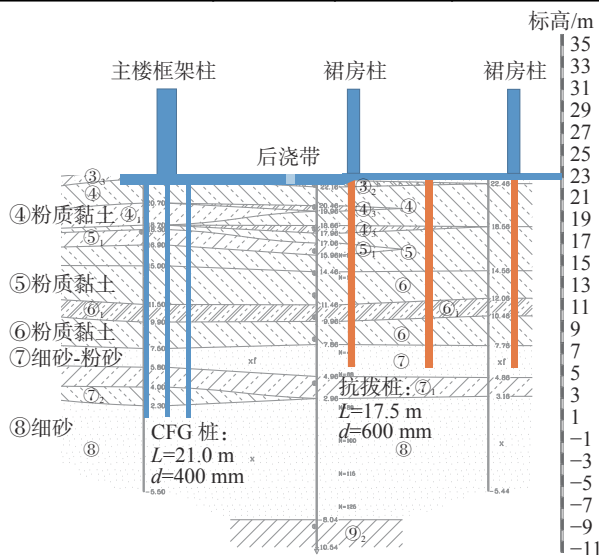


图3 上部结构与地基基础相对位置关系图

向抗拔承载力标准值  $R_w=700$  kN, 按裂缝控制计算<sup>[11]</sup>, 桩身配筋 12 $\Phi$ 22。

各建筑部位 CFG 桩复合地基设计参数见表 3。为了提高桩土应力比, 有效控制差异沉降, 本工程褥垫层整体厚度为 150 mm, 局部框架柱下为 100 mm (如图 4 中斜线填充区域所示)<sup>[7-8, 11]</sup>。

CFG 桩及抗浮桩与地层相对位置关系见图 3, 平面布置见图 4。

#### 4 沉降变形分析

基于 CFG 桩及抗浮桩设计成果, 进行沉降变形分析复核。

本工程沉降变形计算采用国际岩土有限元软件 PLAXIS 3D 进行模拟。其中抗拔桩采用程序自带 Embedded Pile 单元, 基础底板采用 Plate 单元, 梁采用 Beam 单元。各土层岩土物理力学参数基于表 1。

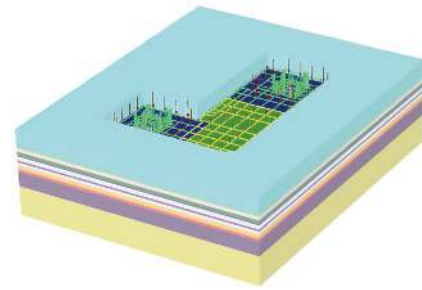
目前关于 CFG 桩复合地基变形计算的数值方法大致有两种, 一种为基于规范<sup>[4]</sup>传统的复合土层法, 一种为桩体置换法。前者将桩间土和增强体综合考

表 2 场地地下水情况一览表

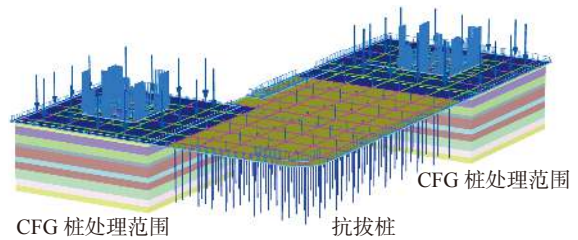
| 序号 | 地下水类型         | 地下水稳定水位(承压水测压水头) |               | 主要含水层                                       |
|----|---------------|------------------|---------------|---|
|    |               | 埋深/m             | 标高/m          |   |
| 1  | 上层滞水(一)       | 1.10 ~ 3.20      | 31.02 ~ 32.82 |   |
| 2  | 潜水(二)         | 4.60 ~ 6.60      | 28.02 ~ 29.99 | 细砂-粉砂③层                                     |
| 3  | 层间潜水(三)(具承压性) | 12.00 ~ 18.60    | 15.70 ~ 22.52 | 粉砂-细砂④ <sub>2</sub> 层、粉砂-细砂⑤ <sub>2</sub> 层 |
| 4  | 层间潜水(四)(具承压性) | 23.10 ~ 26.30    | 7.77 ~ 11.55  | 粉砂⑥ <sub>3</sub> 层、细砂-粉砂⑦ <sub>3</sub> 层    |
| 5  | 承压水(五)        | 28.50            | 5.97          | 细砂⑧ <sub>3</sub> 层                          |

表 3 CFG 桩复合地基设计参数

| 设计参数                        | 框架柱                             |           | 主楼其他区域    |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|
|                             | A01#楼东西侧及A02#楼南侧                | 其他区域      |           |
| 桩间土承载力特征值 $f_{sk}$ /kPa     | 130                             | 130       | 130       |
| 设计复合地基承载力标准值 $f_{spk}$ /kPa | 430                             | 620       | 430       |
| 单桩竖向承载力标准值 $R_s$ /kN        | 850                             | 850       | 850       |
| 桩径/mm                       | 400                             | 400       | 400       |
| 有效桩长/m                      | 21.0(桩端持力层: 细砂⑧ <sub>3</sub> 层) |           |           |
| 桩身混凝土强度                     | C30                             |           |           |
| 桩距/m                        | 1.50×1.50                       | 1.20×1.20 | 1.50×1.50 |
| 实际面积置换率/%                   | 5.5                             | 8.7       | 5.5       |



(a) 整体模型



(b) 部分模型

图 5 有限元计算模型

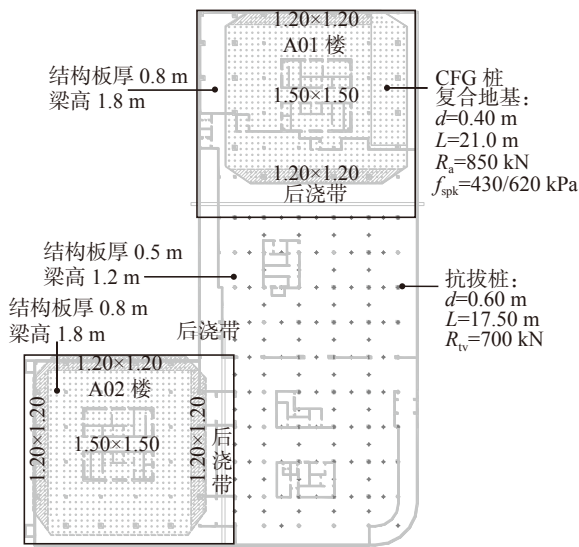


图 4 CFG 桩及抗浮桩平面布置示意图

虑为复合土层单元,用复合土层的参数进行模拟计算;后者在模型中考虑了褥垫层,建模过程中采用特定的结构单元模拟复合地基中的增强体<sup>[12-14]</sup>。本项目中 CFG 桩复合地基的数值模拟采用复合土层法。

最终方案的计算模型见图 5。计算结果见图 6。根据沉降计算结果,建筑物最大沉降量为 40 mm,

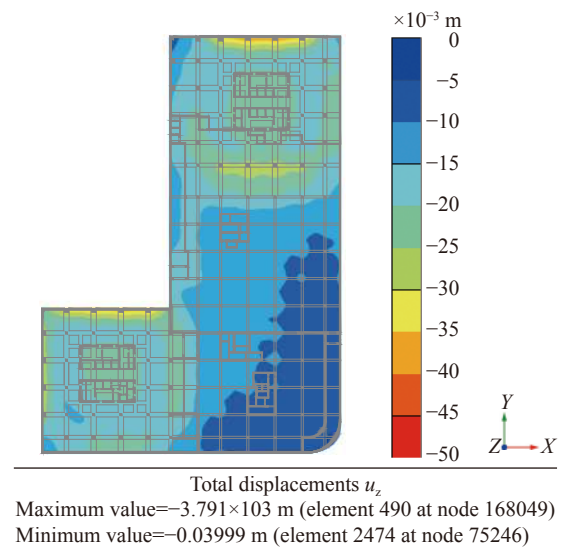


图 6 沉降变形云图

发生在北侧框架柱下;核心筒下整体沉降变形较均匀,平均沉降量 24.8 mm。主楼框架柱与纯地下柱之间差异沉降量计算值最大约为 0.092%;核心筒与外框柱之间的差异沉降最大约为 0.050%。最大沉降量



小于结构设计允许值(50 mm),差异沉降满足设计及规范不大于 0.1%  $l$  的相关要求。

## 5 工程检验

### 5.1 复合地基

已有工程案例表明,当桩端持力层赋存地下水且具承压性时,易导致桩端部混凝土浇筑不密实或因扰动形成桩底虚土<sup>[2]</sup>。

在各方密切配合下,本工程所检测的 CFG 桩单桩完整性检测满足设计要求;CFG 桩复合地基工程桩单桩  $Q-s$  曲线见图 7。加载至单桩承载力极限值时,各 CFG 单桩桩顶累计沉降量为 9.73 ~ 15.16 mm,加载至单桩承载力特征值时桩顶沉降为 2.44 ~ 4.28 mm,达到设计要求。

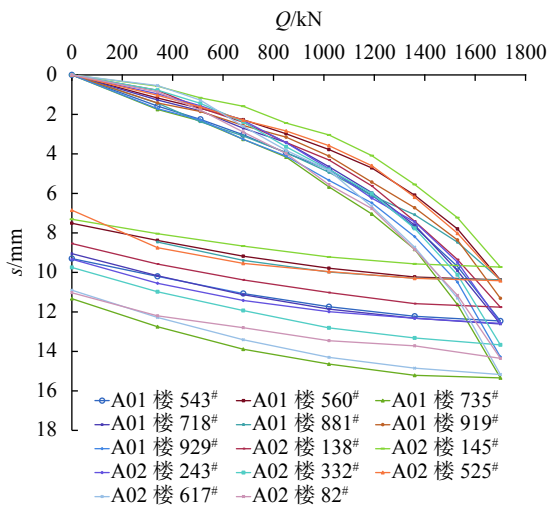


图 7 单桩静载试验  $Q-s$  曲线图

CFG 桩复合地基单桩复合检测  $p-s$  曲线见图 8。最大加载量 860 kPa 时,沉降量 16.49 ~ 20.14 mm;最大加载量 1240 kPa 时,沉降量 15.83 ~ 19.62 mm;加载至复合地基承载力特征值 430 kPa 时,沉降量 4.36 ~ 6.07 mm;加载至 620 kPa 时相应的复合地基沉降量 3.31 ~ 6.53 mm,均达到设计要求。

### 5.2 抗浮桩

根据检测报告,所检测的抗浮桩均为 I 类桩,检测所得  $U-\delta$  曲线见图 9。最大加载量 1400 kN 时对应的上拔量 4.07 ~ 6.23 mm。加载至单桩抗拔承载力特征值 700 kN 时,桩顶上拔量为 1.38 ~ 1.49 mm,满足设计要求。

### 5.3 沉降观测

本工程沉降观测因故从主楼地上 2 层开始。根据沉降观测数据,结构封顶后约 300 d(第 15 期)测量到沉降等值线图见图 10,其中最大沉降量在 A1 楼核心筒东南角,为 15.0 mm;从地上 2 层开始到封

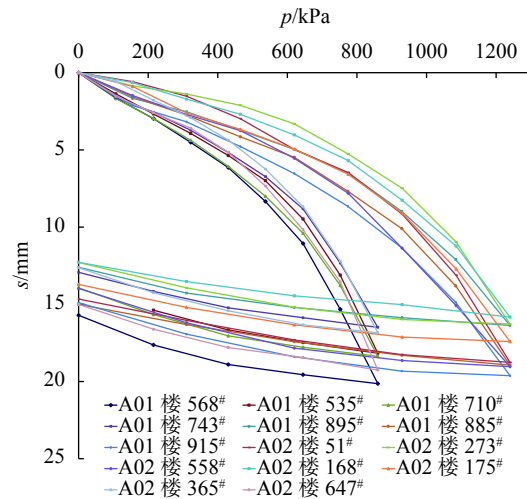


图 8 单桩复合静载试验  $p-s$  曲线图

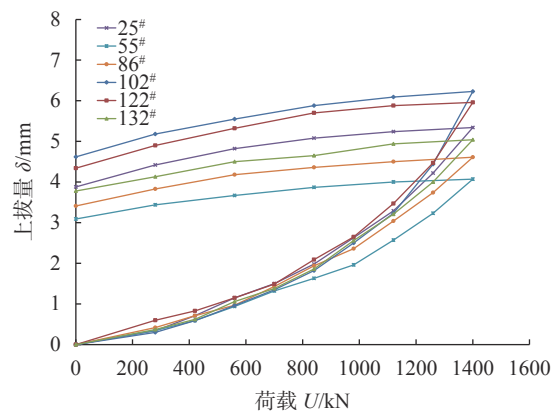


图 9 抗浮桩  $U-\delta$  曲线图

顶后约 500 d(第 16 期),未破坏的观测点沉降曲线见图 11,最大实测变形量 15.4 mm,沉降速率  $\leq 0.83$  mm/100 d(J10 观测点),满足规范<sup>[11]</sup> 1 mm/100 d 的稳定要求。

假定基础底板到地上 2 层产生的变形与地上 2 层到沉降稳定呈线性发展关系,推测出基础底板到地上 2 层施工期间的变形约为 5.6 mm,则总最大变形量约 21.0 mm,小于核心筒处预测平均沉降量 24.8 mm。

## 6 结论

通过地基基础设计、计算和协同分析,最终采用了科学合理的结构刚度和地基刚度,在兼顾抗浮的前提下控制了差异沉降,减小了结构底板次内力,确保了工程安全,并提高了经济效益。主要结论包括:

(1) 在主楼与纯地下荷载集度差异较大、且纯地下结构存在抗浮需求时,进行地基基础的整体考虑、协同分析,有利于合理发挥有利要素,消除或规避不利因素,从而制定出科学、经济、合理的地基基础方案。

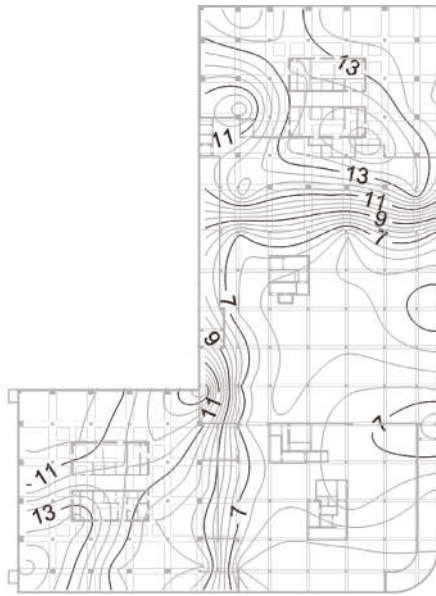


图 10 沉降观测等值线图(单位:mm)

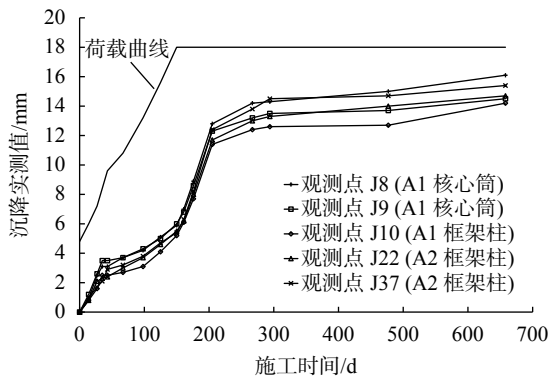


图 11 施工过程中沉降观测曲线图(单位:mm)

(2) 可以通过对 CFG 桩复合地基采用变桩间距、变褥垫层厚度等措施达到变刚度调平设计的目标。

(3) 工程检验及沉降观测成果资料表明,本工程设计安全、合理。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [ 2 ] 孙宏伟. 岩土工程进展与实践案例汇编 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [ 3 ] 方云飞, 孙宏伟, 杨 洁, 等. 北京银河搜候(SOHO)中心地基与基础设计分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(17): 140-143.
- [ 4 ] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [ 5 ] 闫明礼, 张东刚. CFG桩复合地基技术及工程实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [ 6 ] 周 宸, 化建新, 王 健. CFG桩的承载力特性试验研究[J]. 岩土工程技术, 2016, (10): 217-248.
- [ 7 ] 化建新, 闫德刚, 赵杰伟, 等. 第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告——地基处理综述及新进展[J]. 岩土工程技术, 2015, (5): 285-300.
- [ 8 ] 吴民利. 超薄褥垫层CFG桩复合地基设计与实践[J]. 勘察科学技术, 2018, (2): 23-27.
- [ 9 ] 郭密文, 魏国堂, 沈伊晔. 高层建筑大底盘基础下CFG桩复合地基变刚度设计[J]. 工程勘察, 2010, (7): 22-26.
- [ 10 ] 王 杨, 詹永勤. 北京达美中心广场基础变刚度调平设计[J]. 建筑结构, 2017, (7): 62-66.
- [ 11 ] DBJ 11—501—2009 北京地区建筑地基基础勘察设计规范(2016年版)[S]. 2017.
- [ 12 ] 卢萍珍, 于东晖, 方云飞, 等. CFG桩复合地基增强体偏位影响分析[J]. 建筑结构, 2014, (10): 126-129.
- [ 13 ] 范崇民, 王 超, 邴宇峰. CFG桩复合地基的数值模拟分析[J]. 岩土工程技术, 2013, (3): 13-16.
- [ 14 ] 周 宸, 李宝强, 王 健. CFG桩复合地基沉降三维数值模拟研究[J]. 岩土工程技术, 2015, (6): 118-121.

收稿日期: 2021-05-24