

刘广成, 王建伟, 高艳卫, 等. 上部结构—筏板—地基协同作用下复合地基与基础沉降计算分析[J]. 华南地震, 2025, 45(2): 80–89. [LIU Guangcheng, WANG Jianwei, GAO Yanwei, et al. Calculation and Analysis of Composite Foundation and Foundation Settlement Under Synergistic Effect of Upper Structure–Raft–Foundation[J]. South China journal of seismology, 2025, 45(2): 80–89]

上部结构—筏板—地基协同作用下复合地基 与基础沉降计算分析

刘广成¹, 王建伟¹, 高艳卫¹, 赵娜¹, 王天送¹, 刘顺青²

(1. 航天规划设计集团有限公司 北京 102600; 2. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 北京地区高层建筑基底荷载大且筏板基础多为不规则形状, 采用常规计算方法, 不能准确反映设计后的沉降。以“L”型高层建筑为背景, 构建上部结构+筏板+地基土+桩体协同作用的三维数值分析模型, 分析地基土的应力、CFG桩身受力以及筏板和地基土沉降的变化规律, 并将沉降计算结果与实测值进行对比分析, 验证该方法的可行性。研究表明地基土在柱基础部位存在应力集中现象; CFG桩顶部区域存在负摩阻力, 桩侧摩阻力沿桩身长度方向分布不均匀; “L”型建筑核心筒区域的沉降是否最大与其下部群桩的长度及刚度密切相关。研究结果和方法为类似的高层建筑沉降分析提供了参考, 具有实际工程意义。

关键词: 上部结构; 筏板; CFG桩; 沉降; 有限元法

中图分类号: U418.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)02-0080-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.02.11

Calculation and Analysis of Composite Foundation and Foundation Settlement Under Synergistic Effect of Upper Structure–Raft–Foundation

LIU Guangcheng¹, WANG Jianwei¹, GAO Yanwei¹, ZHAO Na¹,
WANG Tiansong¹, LIU Shunqing²

(1. China Aerospace Planning and Design Group Co., Ltd., Beijing 102600, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: The foundation load of high-rise buildings in Beijing is large and the raft foundation is mostly irregular in shape. Conventional calculation methods cannot accurately reflect the settlement after design. Taking an L-shaped high-rise building as a case study, this paper developed a three-dimensional numerical analysis model to analyze the upper structure–raft–foundation soil–pile synergistic effects. The stress of the foundation soil, the force on the CFG pile body, and the variation law of settlement between the raft and foundation soil were analyzed. The settlement calculation results were compared with the measured values to verify the feasibility of this method. The

收稿日期: 2024-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007263)

作者简介: 刘广成(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土设计相关工作。

E-mail: 122314258@qq.com

通信作者: 刘顺青(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土数值分析等方面研究。

E-mail: sqljust@just.edu.cn

results indicate that there is a phenomenon of stress concentration at the column foundation of the foundation soil. There is negative frictional resistance in the top area of CFG piles, and the distribution of lateral frictional resistance along the length of the pile is uneven. The maximum settlement in the core tube area of the L-shaped building is closely related to the length and stiffness of the lower pile group. The research results and methods provide reference for the settlement analysis of similar high-rise buildings, and have practical engineering significance.

Keywords: Upper structure; Raft; CFG pile; Settlement; Finite element analysis

0 引言

随着城市用地的紧张,高层建筑逐渐取代多层建筑成为城市主要的建筑结构形式,以缓解城市人口基数过大的问题。工程场地建高层建筑前,需要通过对场地进行地基处理,北京地区的高层建筑(28层以下)多采用复合地基方案,CFG桩作为一种成熟的地基处理手段,为刚性桩复合地基,在北京地区应用较为广泛^[1]。对于高层建筑而言,其上部结构—基础—地基是一个复杂的协同作用系统,该系统的受力变形受上部结构形式、基础类型、地基处理方式及地基岩土层等众多因素相关,是一个复杂的问题^[2-3]。以往计算沉降时受计算手段的限制,都是将上部结构、基础及地基分开来算,这种分析方法所得结果与实际情况具有较大的偏差,并且高层建筑层数越高,两者的偏差越大^[4-5]。因此,构建上部结构、基础和地基协同作用的分析方法来优化基础及地基处理设计方案具有重要的工程意义。

上世纪60年代开始,国内学者开始对几种不同结构的协同作用问题开展科学研究,如杨敏等^[6]通过理论及试验手段研究了上部结构与桩筏基础的协同作用;党显敬等^[7]采用文克尔地基模型来分析上部结构协同作用下复合地基的沉降,并结合具体的工程实例来验证其可靠性;刘利平等^[8]采用有限差分程序FLAC3D构建上部结构、桩筏基础和地基的三维数值模型,分析施工过程中桩体变形及沉降的变化规律;周圣斌等^[9]采用有限压缩模型,计算了考虑上部结构和基础协同作用下的沉降,并将计算结果与实测值进行了对比分析;王江龙等^[10]以某大底盘双塔楼的高层建筑结构为研究对象,计算分析了上部结构对地基变形的影响,并与实测值进行了对比,计算结果表明考虑协同作用后的计算值更加合理;裘友强等^[11]基于地基—路基协同作用原理构建路面结构模型,分析了沉降影响下的路面响应规律;吴海亮等^[12]采用三维有限元软件PLAXIS 3D构建上部荷载协同下的数

值分析模型,分析了桩长变化对地基沉降的影响规律;王卫东等^[13]基于Poulos解、Resissner厚板理论及有限元法构建了一种上部结构、底板及桩土协同作用的实用计算方法;郭红梅等^[14]采用界面协调法将某改扩建工程的上部结构、桩筏及地基进行耦合计算,分析该工程基础沉降及差异沉降的变化规律;闫泽升等^[15]以某花卉博览会世纪馆的混凝土薄壳结构工程为例,构建了上部结构及地基基础协同作用的分析方法,结果表明协同作用分析时需合理确定桩的刚度。上述的研究表明上部结构的协同作用对地基沉降有着重要的影响,目前已有的研究通常是针对常规的上部结构,而对异型上部结构协同作用下地基沉降的规律如何缺少系统研究。

本文以北京临空经济区某酒店“L”型高层建筑为背景,构建上部结构+筏板+地基土+桩体协同作用的三维数值分析模型,分析地基土的应力、CFG桩身受力以及筏板和地基土沉降的变化规律,并将沉降计算结果与实测值进行对比分析,验证该方法的可行性。研究结果和方法为类似的高层建筑沉降分析提供了参考,具有实际工程意义。

1 协同作用体系下沉降的计算原理

实际高层建筑中多为框架剪力墙结构或筒体结构等,高层建筑整体分析时采用的数值计算方法可分析基础的反力及沉降。考虑上部结构、基础和地基共同作用时,整体表达式为:

$$[K_b]\{U_b\} = \{S_b\} - \{R\} \quad (1)$$

式(1)中, $[K_b]$ 为整体结构对基底接触面的等效刚度矩阵; $\{U_b\}$ 为边界节点位移向量; $\{S_b\}$ 为等效荷载列向量; $\{R\}$ 为基底反力列向量,其表达式为:

$$\begin{cases} \{S_b\} = [f]\{R\} \\ \{R\} = [K_s]\{S\} \end{cases} \quad (2)$$

$$[K_s] = [f]^{-1} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, $\{S\}$ 为地基变形的列向量; $[K_s]$ 、

[f]分别为地基的刚性和柔度矩阵。

根据式(1)、(2)、(3)可得:

$$[K_b]\{U_b\} + [K_s]\{S\} = \{S_b\} \quad (4)$$

根据基础与地基的变形协调条件可得, $\{U_b\} = \{S\}$, 则式(4)可改写为:

$$([K_b] + [K_s])\{U_b\} = \{S_b\} \quad (5)$$

求解上述方程组(5), 可得到考虑上部结构的地基变形和基底反力。

2 工程概况

本研究依托位于北京临空经济区的某酒店项目, 该项目地上12层(局部地上2层), 地下2层,

建筑高度49.95 m(10.55 m), 框架剪力墙结构, 基础形式为筏板结构, 建筑平面概况如图1所示。沉降要求小于50 mm, 沉降倾斜小于2‰, 主群楼沉降差不大于1‰。

拟建项目地貌单元属于永定河冲洪积扇下缘。本场区的地层划分为人工填土层、新近沉积层及一般第四纪沉积层三大类, 因此项目的酒店主楼区需进行地基处理。地基处理的方案采用等间距变桩长调平方案, 选用该方案的原因是同桩长变间距, 做不到完全按设计间距布桩, 等间距变桩长经济性较好。地基处理CFG桩间距为1.5×1.5 m, 根据基底荷载不同, 400 kPa区域CFG桩长23 m; 350 kPa区域CFG桩长19 m; 250 kPa区域CFG桩长12 m。CFG桩处理区域的地质剖面如图2所示。

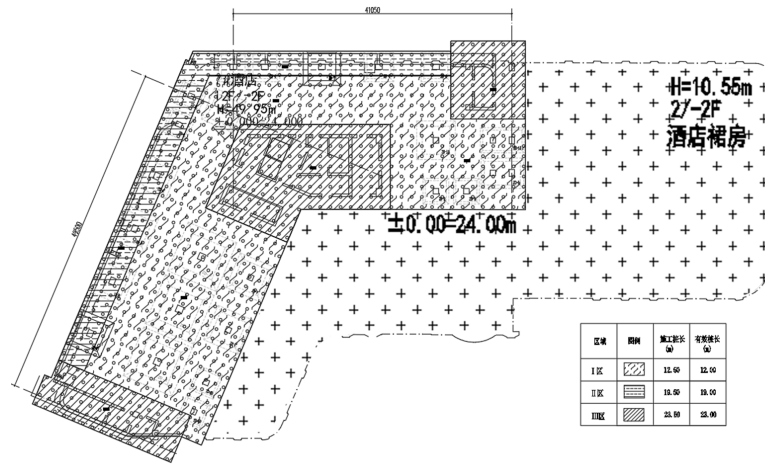


图1 建筑平面概况图

Fig.1 Overview of architectural plan

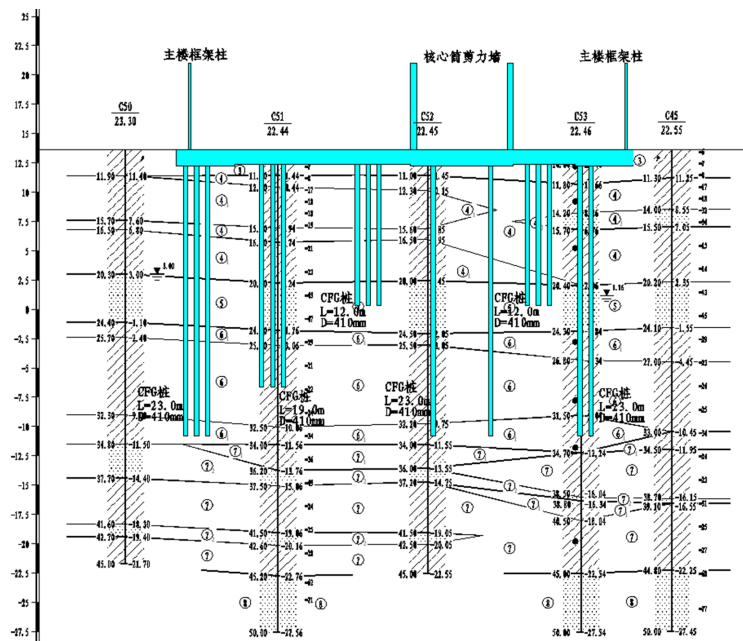


图2 CFG桩处理区域的地质剖面图

Fig.2 Geological profile of CFG pile treatment area

3 协同作用下三维计算模型的建立及计算参数

规范法求解地基沉降时需折算成规则形状,该方法存在局限性,并且未考虑筏板上部刚度的影响,本研究采用三维有限元软件 Midas GTS NX 构建上部结构+筏板+地基土+CFG 桩体的协同分析模型,建立的三维模型尺寸为 140 m(长)×140 m(宽)×53 m(高)。

为研究上部结构协同作用对沉降的影响规律,以便指导后期的实际工程,经综合考虑后确定各实体模拟情况如下:

各层地基土采用实体单元模拟,本构模型均采用修正莫尔—库伦模型,CFG 桩、梁、柱均采用梁单元模拟,筏板、楼板、剪力墙均采用板单元模拟,上述结构的本构模型均采用弹性模型。上部结构+筏板+地基土+CFG 桩体的协同分析模型如图 3 所示,上部结构计算模型、CFG 桩计算模型分别如图 4、5 所示。

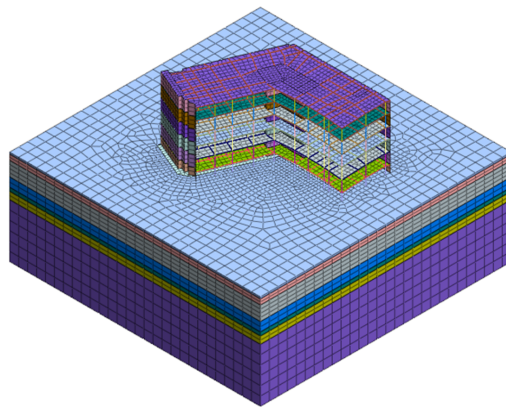


图3 上部结构+筏板+地基土+CFG 桩的协同分析整体计算模型
Fig.3 Integrated calculation model for synergistic analysis of upper structure-raft-foundation soil-CFG piles

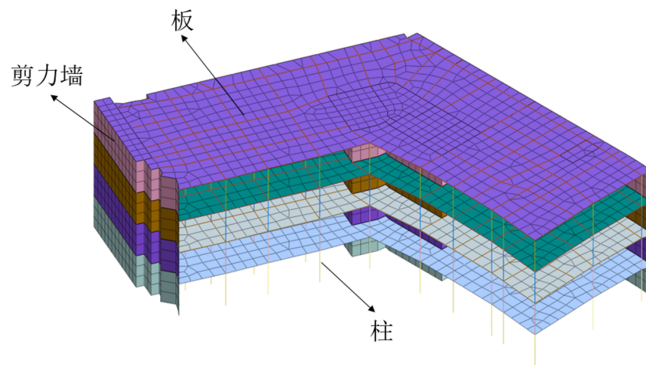


图4 上部结构计算模型图
Fig.4 Calculation model of upper structure

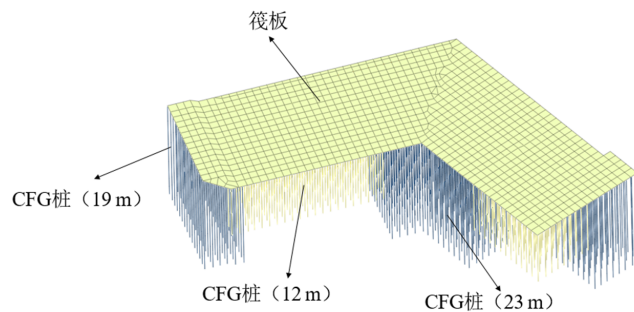


图5 CFG 桩计算模型图
Fig.5 Calculation model of CFG piles

根据该酒店项目的勘察报告，三维协同计算模型中土体的计算参数如表1所示，协同模型中结构的计算参数如表2所示。

表1 三维协同有限元模型中土体的计算参数

Table 1 Calculation parameters in three-dimensional collaborative finite element model

地层	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	三轴试验割线刚度 E_{50} /MPa	主压密加载试验的切线刚度 E_{oc1} /MPa	卸载弹性模量 E_{ur} /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ / (°)
第③层黏性土	18.1	0.35	9	9	18	30	10
第④层黏性土	18.4	0.35	12	12	24	30	15
第④ ₁ 层黏性土	18.5	0.35	11	11	22	28	13
第⑤层黏性土	18.6	0.35	12	12	24	30	16
第⑥层黏性土	18.7	0.35	15	15	30	30	18
第⑥ ₁ 层黏性土	18.8	0.35	20	20	40	28	25
第⑦ ₁ 粉细砂	18.9	0.35	19	19	38	32	14
第⑦ ₂ 粉细砂	18.9	0.35	19	19	38	34	16
第⑦层黏性土	18.8	0.35	18	18	36	33	15

表2 结构的计算参数

Table 2 Calculation parameters of the structure

结构名称	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/MPa
剪力墙	25	0.2	30 000
楼板	25	0.2	34 500
梁	25	0.2	34 500
柱	25	0.2	34 500
筏板	25	0.2	30 000
CFG桩	25	0.2	30 000

4 协同作用下的计算结果分析

4.1 地基土竖向应力分析

考虑上部结构协同作用下地基土竖向应力的计算结果如图6、7所示。根据图6可知，由于地基中CFG桩的存在，桩身轴力向地基深处传递，深层CFG桩端部位地基土的竖向应力相较其他部位土体的竖向应力大，主要原因是筏板基底荷载通过CFG桩向地基土深处传递，因此将桩端设置在压缩模量低的地层，有利于控制基础的沉降。

根据图7可知筏板下持力层地基土，由于考虑了上部结构的协同影响，地基土在柱基础部位存在应力集中，在剪力墙部位则不明显。利用本文

的计算模型，不断调整下反柱墩的高度，比较下反柱墩下地基土竖向应力变化，研究结果可知加大下反柱墩的刚度有利于减小应力集中影响。

实际施工时随着上部结构刚度逐步形成，荷载便按板→梁→柱→基础的方式传递，传递过程中遵循刚度越大受力越大的规律。本次构建的三维协同分析模型能反应构件刚度分布的差异性，对模型中应力集中的部位能准确模拟。若计算时将上部结构等效为均布荷载作用于模型上，分析结果则不能反映应力集中对该工程的影响，如图8所示。根据研究结果，在柱下及墙下应设置下反柱墩或条基，以有效地减小应力集中的影响。

4.2 CFG桩身受力的变化规律分析

考虑上部结构协同作用下中心处的CFG桩(23 m)的受力结果如图9所示。从图中可知，CFG桩顶部区域存在负摩阻力，桩身轴力最大点出现在筏板下一定深度处。计算结果显示桩侧摩阻力沿桩身长度方向分布不均匀，桩身上部及端部桩侧摩阻力相对较大，并且桩侧摩阻力也并不是和规范计算桩承载力时那样全部发挥作用。研究结果与文献^[16-17]中的桩侧摩阻力结果一致。在CFG群桩情况下，随着地层软硬分布规律不同，桩身存在多个中性点的情况。

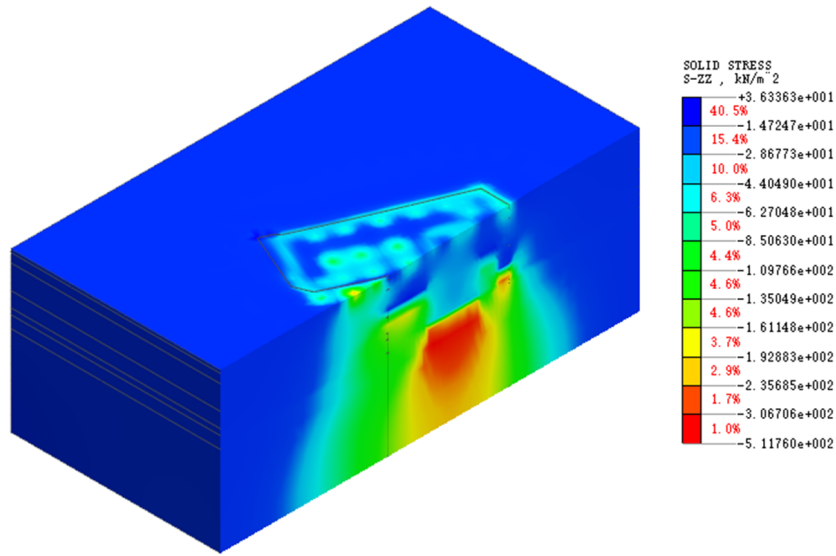


图6 全部地基土的应力分布图
Fig.6 Stress distribution of all foundation soils

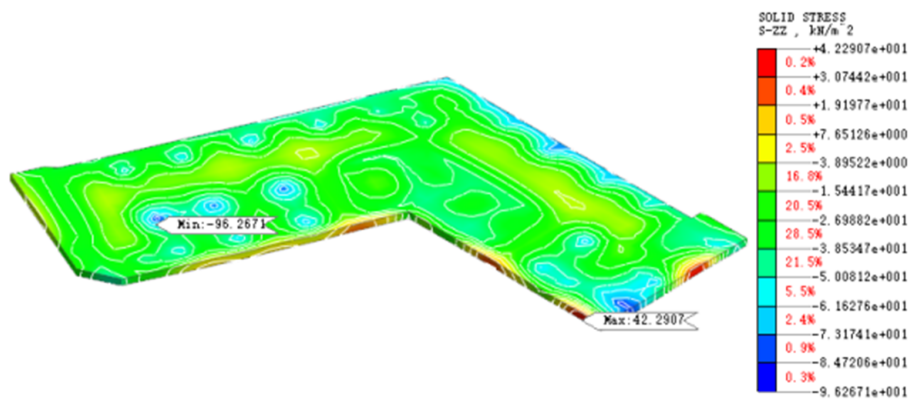


图7 筏板下地基土的应力分布图
Fig.7 Stress distribution of foundation soil under raft

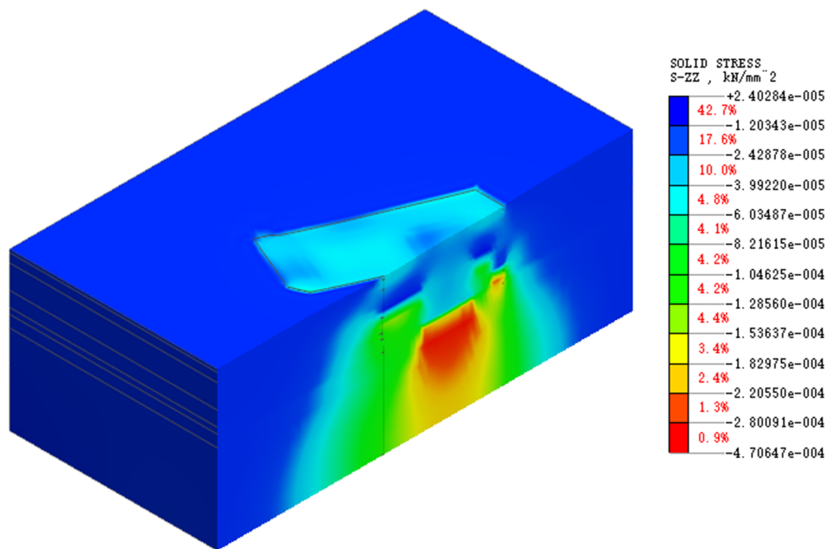


图8 不考虑上部结构协同作用时全部地基土的应力分布图
Fig.8 Stress distribution of all foundation soils without considering the synergistic effect of upper structure

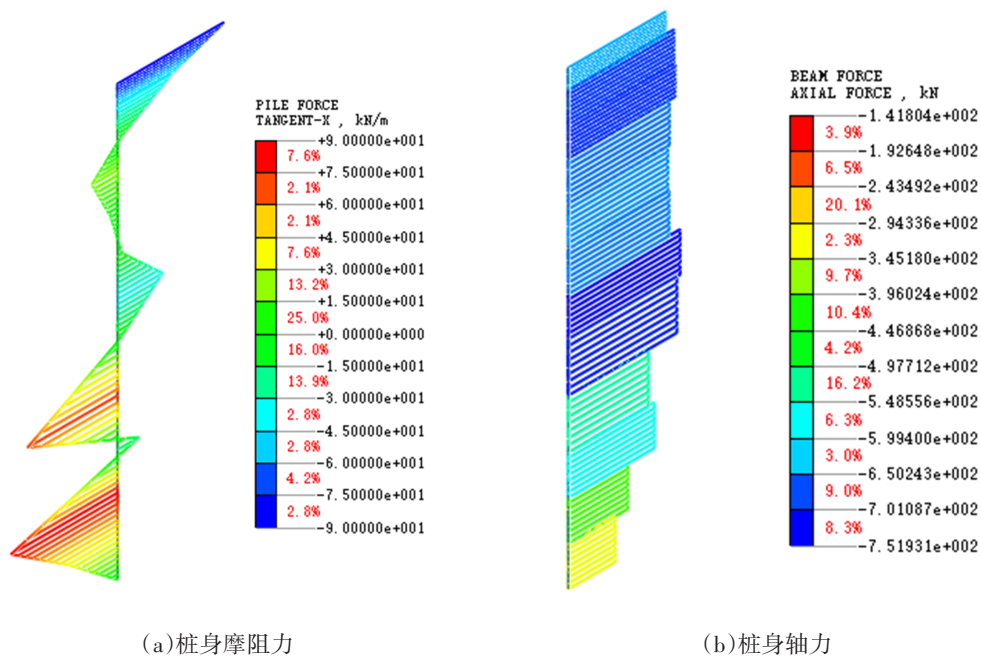


图9 CFG桩的受力图

Fig.9 Forces diagram of CFG piles

4.3 计算沉降分析

考虑上部结构协同作用下地基土、筏板及地下室处的沉降计算结果如图10~12所示。从图10~12中的分析结果可知，建筑核心筒周边区域两侧的沉降最大，而不是核心筒区域的沉降最大，与文献^[8]中结果略有不同，主要原因是本研究中的筏板为“L”形，核心筒下CFG桩长较长(23 m)，群桩的刚度较大，而核心筒周边区域的两侧因CFG桩长较短(12 m)，群桩的刚度较小，并且上部单柱的荷载较大，所以在上部结构作用下沉降最大。

地基处理设计计算时，根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)，需要把“L”形筏板，简

化为两种矩形筏板，采用《建筑基础设计规范》(GB50007-2011)中最终变形量的计算公式分别计算角点及中心点沉降结果，根据地基处理设计计算书结果，中心点变形为25.1 mm，角点变形为6~7 mm。本研究中筏板的最大沉降约为40.8 mm，最小沉降约为4.9 mm，研究结果与规范中的计算结果差别较大，主要原因是规范法中无法考虑异型上部结构的协同作用，计算过程简化，不能反映筏板整体变形情况，因此，对于异型上部结构，应建立三维协同作用计算模型并结合工程实际监测值对比分析后才能获得较为准确的沉降结果。

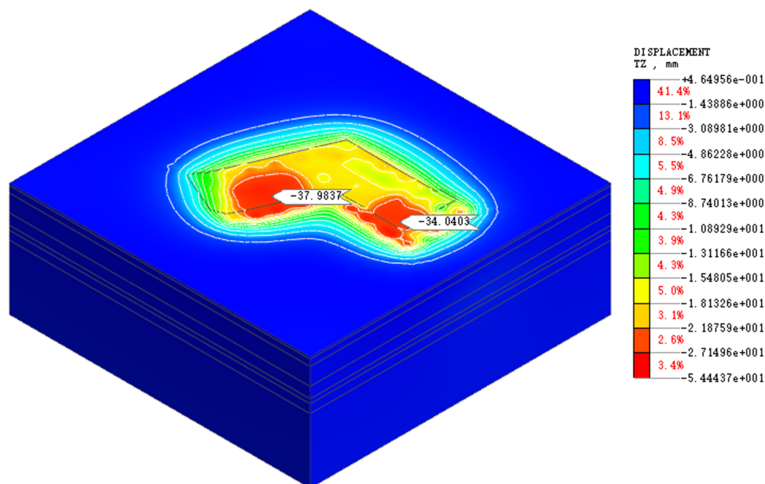


图10 地基土沉降的等值线图

Fig.10 Contour of foundation soil settlement

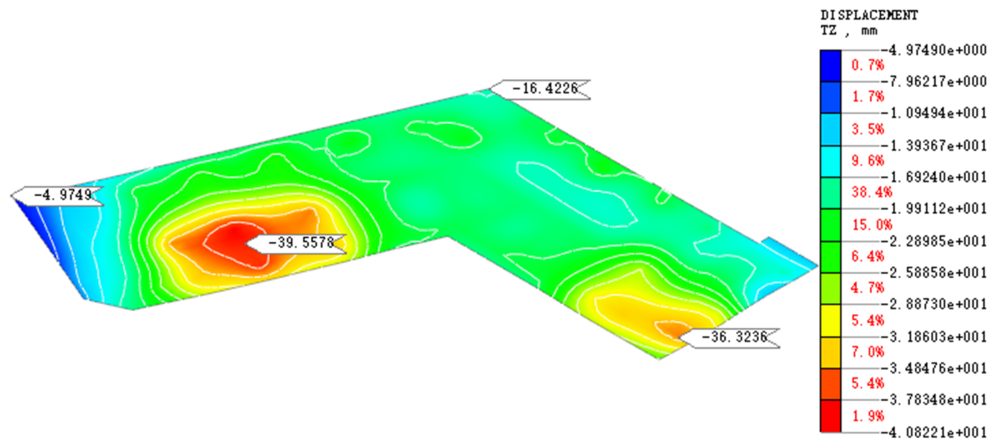


图11 筏板沉降的等值线图

Fig.11 Contour of raft settlement

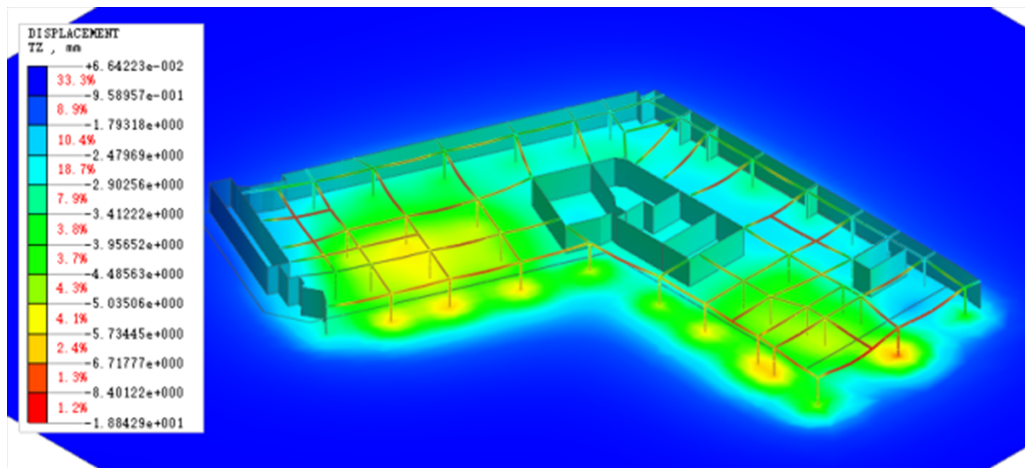


图12 临近地下室处的沉降图

Fig.12 Settlement near the basement

5 协同计算模型的可行性验证分析

为验证构建的上部结构+筏板+地基土+桩体协同作用三维数值分析模型的可行性，在建筑物筏板沉降观测点中选取3个监测点(如图13所示)，将这3个监测点的沉降计算值与实测值进行对比分析以验证计算模型的可行性，对比结果如图14及表2所示。从图及表中可以看出，监测点的计算值都略大于实测值，最大沉降计算值与实测值之间

误差在10.0%左右，但总体的相关性较好，两者的沉降分布规律较为一致。出现上述结果的主要原因是有限元模拟时荷载是全部施加的，而此时工程现场未完全施工完，部分荷载未完全施加，故总体上有限元模拟值较实测值大。从上述的分析可知，采用文中构建的协同作用下的三维数值模型进行该酒店项目沉降分析是可行的，研究结果可指导该工程的结构设计与施工，具有实际工程意义。

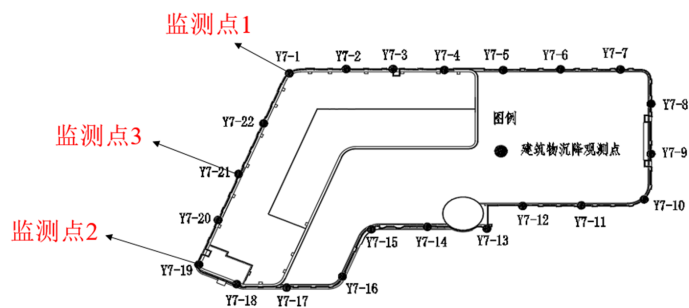


图13 选取的监测点示意图

Fig.13 Selected monitoring points

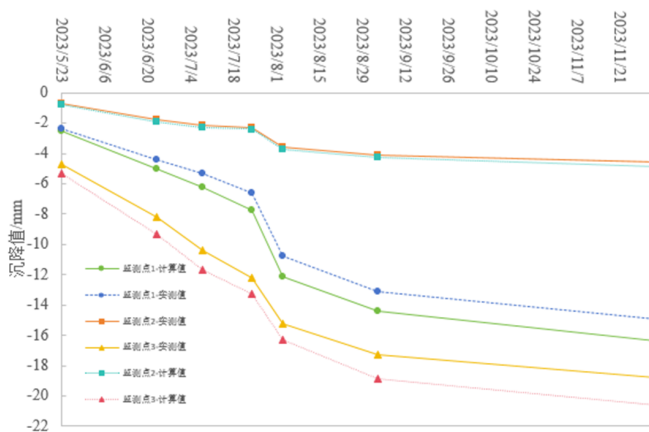


图14 沉降计算与实测值的对比图

Fig.14 Comparison chart between calculated settlement and measured values

表3 沉降计算值与实测值的对比

Table 3 Comparison between calculated settlement and measured values

测点	最大沉降实测值/mm	最大沉降计算值/mm	误差/%
监测点1	14.9	16.4	10.1
监测点2	4.6	4.9	6.5
监测点3	18.8	20.6	9.6

6 结论

以北京某酒店异型高层建筑为背景,构建上部结构+筏板+地基土+桩体协同作用的三维数值分析模型,分析地基土的应力、CFG桩身受力以及筏板和地基土沉降的变化规律,主要结果如下:

(1)由于地基中CFG桩的存在,桩身轴力向地基深处传递,深层CFG桩端部位地基土的竖向应力大于其他部位土体;由于考虑了上部结构的协同影响,地基土在桩基础部位存在应力集中现象,在剪力墙部位则不明显。

(2)CFG桩顶部区域存在负摩阻力,桩侧摩阻

力沿桩身长度方向分布不均匀,桩身上部及端部摩阻力相对较大,桩身轴力最大点出现在筏板下一定深度处。

(3)“L”型建筑核心筒区域的沉降是否最大与下部群桩的长度及刚度密切相关;通过筏板处计算沉降与实测值的对比分析,表明采用构建的协同作用下的三维数值模型分析沉降是可行的。

参考文献

- [1] 张在明. 北京地区高层和大型公用建筑的地基基础问题[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 11-23.
- [2] 赵昕, 袁聚云, 刘射洪. 软黏土地区超高层建筑共同作用体系时变沉降分析及监测[J]. 结构工程师, 2015, 31(6):

- 144-151.
- [3] 王卫东,常林越,吴江斌,等. 软土地区600 m级超高层建筑基础沉降的计算与分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(1): 151-158.
- [4] 王浩然,郑浩琴,李杰. 考虑地基与基础协同作用的复合地基沉降计算方法研究[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(3): 190-195.
- [5] 沈伟,池跃君,宋二祥. 考虑桩、土、垫层协同作用的刚性桩复合地基沉降计算方法[J]. 工程力学, 2003, 20(2): 36-42.
- [6] 杨敏,王树娟,王伯钧,等. 考虑极限承载力下的桩筏基础相互作用分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 82-86.
- [7] 党昱敬,柳建国. 上部结构、基础和地基协同工作时刚性桩复合地基沉降计算分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 65-68.
- [8] 刘利平,王伟,殷青芳,等. 基于上部结构—桩筏基础—地基共同作用的地基与基础变形分析[J]. 建筑科学, 2014, 30(7): 38-43.
- [9] 周圣斌,孙训海. 某超高层建筑采用CFG桩复合地基协同作用分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(S1): 196-199.
- [10] 王江龙,高扬,赵冬,等. 某大底盘双塔楼结构考虑地基—基础—上部结构共同作用变形分析[J]. 特种结构, 2022, 39(5): 89-94.
- [11] 裘友强,宫玉明,刘军勇. 地基路基路面协同沉降变形一体化设计方法研究[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 57-61.
- [12] 吴海亮,邢琳,张戊晨. 非均匀地基变桩长沉降控制三维有限元协同分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(8): 124-130.
- [13] 王卫东,申兆武,吴江斌. 桩土—基础底板—上部结构协同的实用分析方法与应用[J]. 建筑结构, 2007, 37(5): 111-113.
- [14] 郭红梅,孙健超,迟铃泉. 协同作用分析在大体量改扩建工程中的应用[J]. 工程勘察, 2012, 40(6): 22-26.
- [15] 闫泽升,黄永强. 考虑地基基础协同变形的超长自由曲面预应力混凝土薄壳结构一体化分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(21): 7-12.
- [16] 李强. 路堤荷载下桩筏复合地基受力及沉降特性研究[J]. 兰州交通大学学报, 2016, 35(6): 29-34.
- [17] 蒋鹏程. 粉土地基CFG桩与螺杆桩复合地基承载特性对比分析[J]. 铁道学报, 2019, 41(4): 125-132.