

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.02.009

【工程应用】

高层建筑核心筒外扩 CFG 桩变刚度 调平设计实例分析

闫建^{1,2,3}, 张武²

(1. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013; 2. 中国建筑科学研究院有限公司地基基础研究所, 北京 100013;
3. 北京市地基基础与地下空间开发利用工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要: 采用传统均匀布桩方法进行大底盘基础的复合地基设计, 将造成蝶形沉降和马鞍形反力分布, 并导致筏板整体弯矩、冲切力和剪力增大, 地基差异沉降也会引发上部结构的次应力增加。以某高层建筑框架-核心筒结构大底盘基础的地基处理为例, 该高层建筑核心筒占楼面面积的 20%, 其荷载却占总荷载的 50%, 厚筏基础厚跨比大于 1/6, 具备扩散主楼荷载的作用, 应考虑核心筒外扩下的应力减少。根据荷载、地层条件及结构布局调整地基的刚度分布, 使反力同荷载分布相协调, 实施变刚度调平设计, 实测结果显示, 核心筒与外框柱的变形趋向均匀, 取得了较好的设计效果, 对类似的工程具有借鉴意义。

关键词: 变刚度调平设计; 高层建筑; CFG 桩; 复合地基; 优化

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)02-0150-06

Analysis on stiffness leveling design method of CFG piles under expansion of core tube foundation of a high building

YAN Jian^{1,2,3}, ZHANG Wu²

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China;

2. China academy of building research foundation institute, Beijing 100013, China;

3. Beijing Engineering Technology Research Center of Foundation and City Underground Space Development and Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: The composite foundation of large basal foundation using traditional uniform pile distribution method will result in butterfly settlement and saddle distribution of reaction force, and lead to the increase of the overall bending moment, thrust force and shear force of the raft. The differential settlement of foundation will also lead to the increase of secondary stress of superstructure. Foundation treatment of a large basal foundation of a high building frame-core tube structure is presented as an example. The core tube of the high-rise building accounts for 20% of the floor area, and its load accounts for 50% of the total load. The thick-span ratio of the thick raft foundation is greater than 1/6, which affects the spreading load of the main building. Thus, the stress reduction under the expansion of the core tube can be considered. According to the load, stratum condition and structure layout, the stiffness distribution of foundation is adjusted, so that the reaction force is coordinated with the load distribution, and the stiffness leveling design is implemented. The measured results showed that the deformation of the core tube and the outer frame column tended to be uniform. The foundation design method of the high building can be used as a reference for similar projects.

Key words: stiffness leveling design; high-rise building; CFG pile; composite foundation; optimization

收稿日期: 2021-03-03

作者简介: 闫建 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 国家注册土木工程师 (岩土), 国家注册一级建造师, 主要从事岩土工程勘察、设计、施工与科研工作。E-mail: 1yan2jian@163.com。

0 引言

对于高层建筑主楼、多层裙楼及纯地下车库连接在一起的大底盘基础,其荷载差异较大,沉降在主楼区域大、裙楼区域小,基底反力分布复杂,当上部结构为荷载与刚度内大外小的框架-核心筒时,蝶形沉降和马鞍形反力分布会更加明显。调平设计概念源于桩筏基础中对沉降差的控制,通过控制沉降差来降低筏板内力和上部结构次应力,进而减小筏板厚度、配筋等^[1-3]。由于实际工程中多是通过调整基桩平面布置或改变基桩长度、直径等桩筏刚度的因素来减少沉降差,故称之为变刚度调平设计^[4-5]。

框架-核心筒结构以前多采用桩基础,随着地基处理技术的发展,选用施工便捷、费用低廉的刚性桩复合地基来解决框架-核心筒结构的地基问题成为可能^[6]。当前高层建筑 CFG 桩复合地基设计时,多数应用均匀布桩模式,尽管桩数不少,但碟形沉降仍不可避免。针对框架-核心筒结构特点,通过调整 CFG 桩的刚度分布,使反力同荷载分布相协调,从而减小差异沉降,降低筏板基础内力。本文结合厚筏基础的厚跨比大于 1/6,考虑核心筒外扩对基底应力的影响,采用核心筒局部 CFG 桩平面位置调整的变刚度调平设计,取得了较好的处

理效果,可供类似工程设计时参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

该高层建筑由北塔、南塔、附属用房及纯地下车库组成。其中北塔为地上 20 层的框架-核心筒结构,建筑高度 99.90 m,南塔为地上 15 层的框架-核心筒结构,建筑高度 76.25 m,附属用房为地上 2 层,建筑高度 18.55 m 的框架结构。北塔、南塔和附属用房地下室与纯地下车库连通,地下 4 层,基础埋深约 21.6~22.6 m。北塔和南塔均采用 CFG 桩复合地基,处理后北塔核心筒复合地基承载力特征值达到 650 kPa,北塔外框柱复合地基承载力特征值达到 450 kPa;处理后南塔核心筒复合地基承载力特征值达到 570 kPa,南塔外框柱复合地基承载力特征值达到 400 kPa。总沉降量不大于 50 mm,差异沉降不大于 0.002 L。

1.2 工程地质条件

根据本工程的地勘报告,该场地自然地面绝对标高 33.96~36.05 m,地层按成因类型、沉积年代划分为人工堆积层和第四纪沉积层两大类,按其岩性及工程特性,基底以下土层的分布及基本物理力学参数如表 1。

表 1 地层分布及物理力学参数
Table 1 Strata distribution and physico-mechanical parameters

土层编号	土层名称	厚度/m	物理状态	重度 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	侧阻力特征值/kPa	端阻力特征值/kPa
⑤	粉质黏土-黏质粉土	1.70	可塑	20.2	16.2	30.0	—
⑤ ₁	黏土-重粉质黏土	1.50	可塑	19.1	12.3	30.0	—
⑤	粉质黏土-黏质粉土	1.60	可塑	20.2	16.2	30.0	—
⑥ ₁	中砂-细砂	2.90	中密-密实	21.0	50.0	35.0	700.0
⑥ ₂	粉质黏土-黏质粉土	0.80	可塑-硬塑	20.2	15.3	32.5	300.0
⑥ ₁	中砂-细砂	1.80	中密-密实	21.0	50.0	35.0	700.0
⑥	卵石-圆砾	3.60	密实	22.0	100.0	60.0	1 200.0
⑦ ₁	黏土-重粉质黏土	0.80	可塑-硬塑	19.1	14.0	30.0	300.0
⑦	粉质黏土-黏质粉土	1.50	可塑	20.1	16.8	32.5	350.0
⑦ ₁	黏土-重粉质黏土	3.00	可塑-硬塑	19.1	14.0	30.0	300.0
⑦	粉质黏土-黏质粉土	1.30	可塑	20.1	16.8	30.0	350.0
⑧	中砂-细砂	3.70	密实	21.0	65.0	37.5	800.0
⑧ ₁	圆砾-卵石	3.35	密实	22.0	110.0	70.0	1 500.0
⑧	中砂-细砂	2.85	密实	21.0	65.0	37.5	800.0

2 工程特点分析

该高层建筑为大底盘框架-核心筒结构,由双塔、裙楼及纯地下车库组成,双塔之间、双塔与裙楼之间以沉降后浇带连接。由于框架-核心筒结构的力学特性与一般住宅剪力墙结构有很大差异,剪力墙结构整体刚度大,荷载与刚度分布较均匀,上部结构对基础的贡献大;而框架-核心筒结构整体刚度较差,荷载与刚度分布不均是其显著特点。北塔核心筒冲切范围内的基底平均压力约为 874.0 kPa,外框柱区域的基底平均压力约为 400.0 kPa,二者相差 2.2 倍。北塔核心筒约占楼面面积的 18.4%,荷载却占总荷载的 46.2%;南塔核心筒约占楼面面积的 23.1%,荷载却占总荷载的 46.8%,核心筒荷载占比高。

3 变刚度调平设计

3.1 变刚度调平设计理念

传统设计为了满足承载力和荷载的总体平衡,多采用满堂红、均匀布桩,而缺少优化基础本身的受力状态、减小差异沉降的思维,马鞍形反力分布并非外围桩的承载力不足所引起,而是由于内、外竖向支撑刚度不均造成的。为了增大基础的整体刚度,若采用增加筏板厚度、布桩的数量和加大桩的几何尺度,通过降低沉降的绝对值而满足对沉降差的设计标准,将造成工程量增加,刚度冗余。对于大底盘框架-核心筒结构的复合地基设计,采用变刚度调平设计理念,其优化模式见图 1,通过调整 CFG 桩复合地基强度和刚度,使之与上部结构荷载分布相协调,减小差异沉降,基底反力分布模式得到改变,基础内力和上部结构次应力降低,在满足承载力和沉降设计要求的同,工程量优化效果明显。

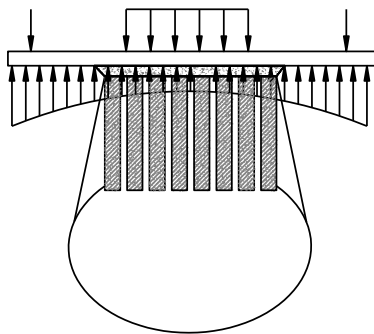


图 1 框架-核心筒结构变刚度优化模式

Fig. 1 Stiffness optimization model of frame-core tube structure

工程应用中,时常遇到筏板较厚,而无法减薄的情况。对于厚跨比大于 1/6 的厚筏基础,变刚度调平设计时,应充分考虑扩散主楼荷载的作用,在保证安全的前提下,可大大节约工程造价。

3.2 设计参数

根据荷载、地质条件和上部结构布局,该高层建筑 CFG 桩复合地基采用强化与弱化结合的变刚度调平设计,实现差异沉降、基础内力最小化目标。通过计算分析,在充分考虑核心筒外扩作用,调整桩距来改变 CFG 桩的平面布置,对于荷载集中的核心筒区域予以强化,对于核心筒外框柱予以弱化,从而使基础沉降趋于一致。北塔核心筒采用桩径 400 mm,有效桩长 12.0 m,以⑥卵石、圆砾层为桩端持力层,桩间距 1.5 m;北塔外框柱采用桩径 400 mm,有效桩长 12.0 m,以⑥卵石、圆砾层为桩端持力层,桩间距 2.0 m;南塔核心筒采用桩径 400 mm,有效桩长 12.0 m,以⑥卵石、圆砾层为桩端持力层,桩间距 1.8 m;南塔外框柱采用桩径 400 mm,有效桩长 12.0 m,以⑥卵石、圆砾层为桩端持力层,桩间距 2.0 m。

3.3 承载力计算

(1) 单桩承载力计算

单桩承载力特征值由式 (1) 计算,即:

$$R_a = u_p \sum q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_p A_p \quad (1)$$

式中: u_p 为桩的周长, m; q_{si} 、 q_p 分别为桩周第 i 层土的侧阻力、桩端端阻力特征值, kPa; l_{pi} 为第 i 层土的厚度, m; α_p 为桩端端阻力发挥系数; A_p 为桩的截面积, m^2 。

依据勘察钻孔所揭露的土层参数指标进行计算,单桩承载力特征值为 714.6~737.1 kN,由于北塔、南塔及外框柱 CFG 桩的设计参数相同,桩端持力层均为⑥卵石、圆砾层,综合分析可知:单桩承载力特征值取值 700 kN,设计桩身混凝土强度等级为 C25,经验算桩身强度满足设计要求。

(2) 复合地基承载力计算

复合地基承载力特征值由式 (2) 计算,即:

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (2)$$

式中: λ 为单桩承载力发挥系数; m 为面积置换率; β 为桩间土承载力折减系数; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值, kPa。

规范中对于主体结构地基承载力的深度修正,

可将基础底面以上范围内的荷载按基础两侧的超载考虑,并将超载折算成土层厚度作为基础埋深,基础两侧不等时取小值^[7]。由于 CFG 桩复合地基处理范围有限,而增强体的设置改变了基底压力的传递路径,其破坏模式与天然地基不同,对 CFG 桩复合地基承载力修正的研究成果不多,为了安全起见,行业标准要求基础宽度的地基承载力修正系数取 0,基础埋深的地基承载力修正系数取 1.0^[8]。实际工程中由于裙楼和纯地下室结构刚度的存在,对地基差异变形起到调整作用,并有利于主楼地基承载力的发挥,修正时把裙楼或地下室结构自重折算成土的厚度,对承载力进行深度修正,是一种偏安全的方法。

经计算,北塔核心筒复合地基承载力特征值为 516.1 kPa,未修正复合地基承载力特征值取值为 500.0 kPa;北塔外框柱复合地基承载力特征值为 359.3 kPa,未修正复合地基承载力特征值取值为 350 kPa。北塔基础底面以上天然土层的加权平均重度为 17.1 kN/m³,基础底面以上范围内的荷载按超载 187.6 kPa 考虑,北塔核心筒经深度修正后的复合地基承载力特征值为 677.8 kPa,北塔外框柱经深度修正后的复合地基承载力特征值为 527.8 kPa。南塔核心筒复合地基承载力特征值为 449.1 kPa,未修正复合地基承载力特征值取值为 430 kPa,南塔外框柱复合地基承载力特征值为 432.9 kPa,未修正复合地基承载力特征值取值为 400 kPa。南塔基础底面以上天然土层的加权平均重度为 15.3 kN/m³,基础底面以上范围内的荷载按超载考虑为 187.6 kPa,南塔核心筒经深度修正后的复合地基承载力特征值为 610.5 kPa。北塔、南塔核心筒及外框柱的复合地基承载力均满足设计要求。

3.4 变形计算

框架-核心筒结构大底盘基础复合地基变形计算研究较少,仍以经验为主,在进行变形计算时,地基内的应力分布,按照各向同性均质线性变形体理论,近似采用线性理论分层总和法计算模式。在加固区模量取桩土复合模量,核心筒范围和外框柱采取不同的桩土复合模量,应用荷载叠加原理对不同区域变形进行计算。由式(3)计算,即:

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (3)$$

式中: s 为地基最终变形量, mm; s' 为按分层总和法计算出的地基变形量; ψ_s 为沉降计算经验系

数; p_0 为对应于荷载效应准永久组合时的基础底面处的附加压力, kPa; z_i 、 z_{i-1} 为基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离, m; $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ 为基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数; E_{si} 为基础底面下第 i 层土的压缩模量, MPa。

对北塔、南塔进行变形计算,在附加应力作用下北塔基础中心点最大沉降量计算结果为 41.0 mm,南塔基础中心点最大沉降量计算结果为 34.5 mm,北塔和南塔的理论计算结果均小于控制值(50 mm),沉降差小于 0.002 L,变形计算结果满足设计要求。

4 设计效果及评价

4.1 复合地基检测结果

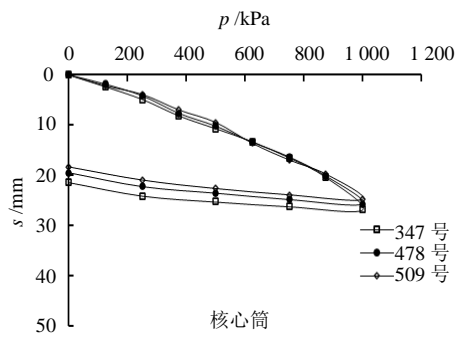
CFG 桩施工完成后,分别在核心筒及外框柱进行了单桩和单桩复合地基静载荷试验^[9],检测结果见图 2~4。根据静载荷试验曲线判定,南塔、北塔核心筒和外框柱的单桩复合地基和单桩承载力均满足设计要求。同时也进行了南塔、北塔 CFG 桩的桩身低应变检测,检测结果表明桩身完整。

4.2 建筑沉降观测结果

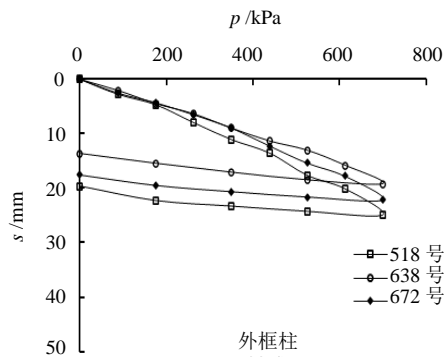
施工过程中,对北塔和南塔分别进行了沉降观测,北塔观测点布设在地下 4 层基础底板上,基础底板施工完成后开始初始值观测,北塔观测点沉降-时间曲线见图 5;南塔首次观测点布设在首层基础底板上,南塔观测点沉降-时间曲线见图 6。

结构封顶时,北塔观测点的沉降量在 27.6~37.3 mm,平均沉降量为 32.6 mm,南塔观测点的沉降量在 24.1~28.3 mm,平均沉降量为 25.6 mm。根据沉降-时间曲线分析,建筑的沉降还未完全稳定,从图 5~6 可以看出,北塔核心筒(J19、J21、J23)和南塔核心筒(J10、J11、J13)沉降量略大于外框柱,各观测点的沉降值基本趋于均匀,建筑物最终总沉降量小于设计控制值(50.0 mm),考虑南塔观测点是布设在地下室 1 层,所以北塔、南塔核心筒和外框柱之间的沉降差较小,远小于设计控制值(0.002 L)。北塔、南塔沉降等值线见图 7~8。

变刚度调平在框架-核心筒结构大底盘基础复合地基设计中的应用,其技术合理性在于通过调整 CFG 桩的布置,实施核心筒增强,使核心筒 CFG 桩复合地基的强度达到较高的荷载水平。而经济合理性在于减少或消除多余 CFG 桩,从而使造价降



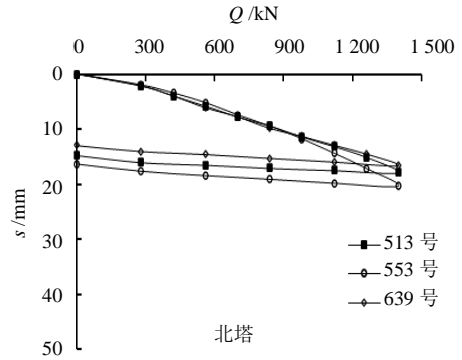
(a)



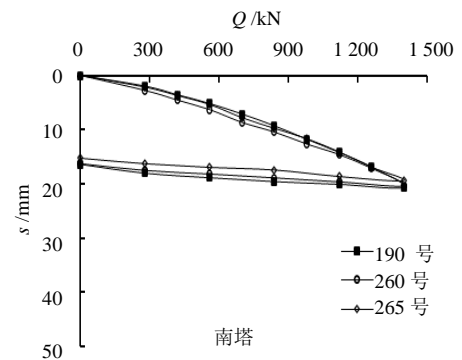
(b)

图2 北塔单桩复合地基 p-s 曲线

Fig. 2 p-s curves of single pile composite foundation of north tower



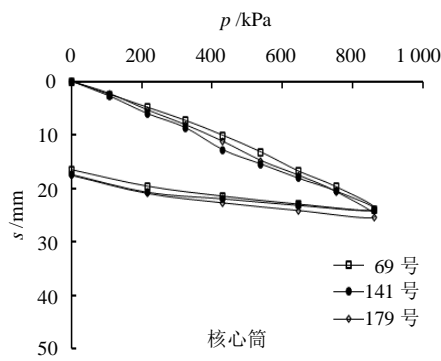
(a)



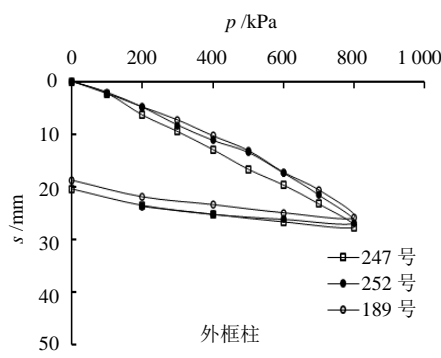
(b)

图4 单桩 Q-s 曲线

Fig. 4 Q-s curves of single pile



(a)



(b)

图3 南塔单桩复合地基 p-s 曲线

Fig. 3 p-s curves of single pile composite foundation of south tower

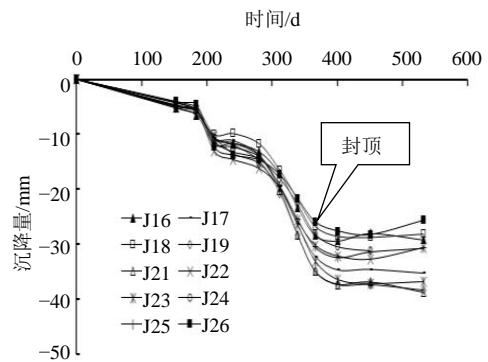


图5 北塔观测点沉降-时间曲线

Fig. 5 Settlement-time curves of observation point of north tower

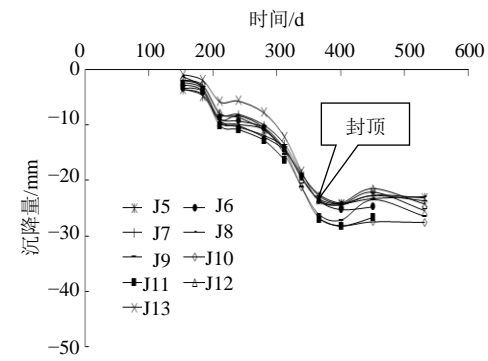


图6 南塔观测点沉降-时间曲线

Fig. 6 Settlement-time curves of observation point of south tower

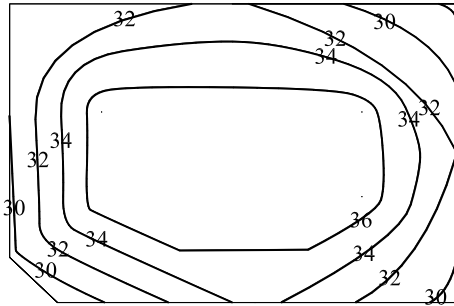


图7 北塔沉降等值线

Fig. 7 Subsidence contours of the north tower

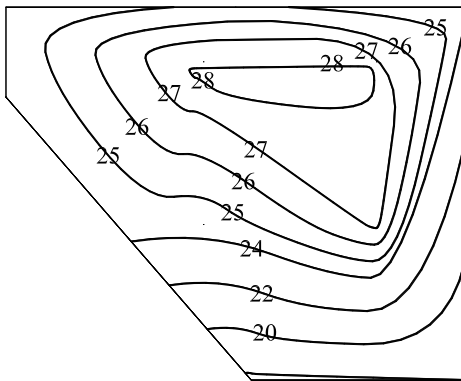


图8 南塔沉降等值线

Fig. 8 Subsidence contours of the south tower

低。依据检测和沉降观测结果,该框架-核心筒结构大底盘基础厚跨比大于 $1/6$,具备扩散主楼荷载的作用,在充分考虑核心筒外扩下的应力减少,采用荷载集度高的核心区局部增强措施,其调平效果十分显著,取得了较好的设计效果。

5 结 论

(1) 框架-核心筒结构大底盘基础复合地基设计应根据荷载、地层条件及结构布局,通过调整刚度分布,使反力同荷载分布相协调,实施核心筒增强变刚度调平,减小差异沉降,降低筏板基础内力。

(2) 框架-核心筒结构荷载悬殊大,该高层建筑核心筒占楼面面积的 20%,其荷载却占总荷载的 50%,控制其沉降差是复合地基设计和布桩的核心

环节。

(3) 采用变刚度调平设计的框架-核心筒结构,当其基础厚跨比具备扩散主楼荷载的作用时,应充分考虑核心筒外扩的应力减少,进行优化设计。

参考文献

- [1] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. Optimum design of piled rafts[J]. *Geotechnique*, 1998, 48(3): 301-317.
- [2] OLIVER R, RANDOLPH M F. Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(1): 1-13.
- [3] RANDOLPH M F. Science and empiricism in pile foundation design[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(10): 847-875.
- [4] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国行业标准. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 刘金砺, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(2): 151-157.
LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(2): 151-157.
- [6] 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, 2006.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国行业标准. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国行业标准. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.