

文章编号: 1007-2993(2026)03-0336-07

北京地区 CFG 桩复合地基沉降 计算与实测对比研究

许超^{1,2} 任君^{1,2} 杨云轩^{1,2} 宋杰^{1,2} 张良¹

(1. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 2. 北京中兵岩土工程有限公司, 北京 100162)

【摘要】 CFG 桩复合地基常用于解决天然地基承载力不足或变形较大等问题。关于 CFG 桩复合地基沉降计算方法及其可靠性一直存在争议, 有相当一部分学者和岩土工程师认为沉降计算值比实测值大。为此, 搜集整理了北京地区多个典型地层区域 CFG 桩复合地基项目设计与变形监测资料, 研究发现在未考虑回弹再压缩变形的情况下, 沉降计算值普遍小于实测值, 考虑回弹再压缩变形后沉降计算值接近实测值。结合规范提出了同时计算回弹再压缩和附加应力变形的沉降计算公式, 提高了沉降计算精度和效率。研究成果可为 CFG 桩复合地基设计及沉降带设置提供参考。

【关键词】 CFG 桩; 沉降计算值; 沉降实测值; 回弹再压缩

【中图分类号】 TU470

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0173

Comparative study on settlement calculation and measurement of CFG pile composite foundation in Beijing

XU Chao^{1,2} REN Jun^{1,2} YANG Yunxuan^{1,2} SONG Jie^{1,2} ZHANG Liang¹

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 2. Beijing Zhongbing Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100162, China)

【Abstract】 CFG pile composite foundation is commonly used to solve problems such as insufficient bearing capacity or excessive deformation of natural foundations. There have been controversies over the settlement calculation method and its reliability for CFG pile composite foundations. A considerable number of scholars and geotechnical engineers hold that the calculated settlement values are larger than the measured ones. To this end, the design and deformation monitoring data of multiple CFG pile composite foundation projects in typical stratum regions of Beijing were collected and sorted out. The study shows that the calculated settlement values are generally smaller than the measured ones without considering rebound-recompression deformation, while the calculated values are close to the measured ones when rebound-recompression deformation is taken into account. Combined with relevant codes, a settlement calculation formula considering both rebound-recompression deformation and additional stress deformation is proposed, which improves the accuracy and efficiency of settlement calculation. The research results can provide references for the design of CFG pile composite foundations and the arrangement of settlement belts.

【Key words】 CFG pile; calculated settlement value; measured settlement value; rebound-recompression

0 引言

CFG 桩复合地基常用于解决天然地基承载力不足或变形较大等问题, 当前复合地基变形计算规范法仍以解析法为基础, 即以 Boussinesq 解求得弹性半空间任意点附加应力, 采用侧限条件下的压缩模量, 考虑有限深度土层, 采用分层总和法计算复合地基沉降^[1-2]。众多学者^[3-11]从理论计算、数值分析、工程实测反分析等方面开展了复合地基沉降计算研究, 多数研究结论认为规范法沉降计算值大于实测值。董必

昌等^[12]认为复合地基沉降理论算法由于忽略桩-土-垫层间的相互作用及其他因素, 往往使计算结果偏大。张钦喜等^[13]通过对大量的复合地基沉降监测数据进行研究, 得出实际沉降值远小于规范方法计算值的结论, 并通过引入取土扰动系数修正土体压缩模量, 进而使得沉降计算值接近实测值。

当前大量综合体建筑项目通过采用跳仓法施工取消后浇带, 其可行性主要依赖于准确计算地基沉降及差异沉降, 因此, 合理计算 CFG 桩复合地基沉降具

有重要的现实意义和工程实用价值。

1 CFG 桩复合地基沉降计算方法

复合地基沉降计算规范法将复合地基的变形分为两个部分:复合土层的变形量和下卧层的变形量。将 CFG 桩和桩间土视为一个整体,即复合土层,采用复合土层压缩模量来评价其压缩性。规范中各复合土层压缩模量等于该层天然地基压缩模量的 ξ 倍 ($\xi=f_{spk}/f_{ak}$),复合土层的分层与天然地基相同,采用分层总和法计算复合土层的变形;下卧层变形是由通过桩传递的应力和桩间土传递的应力产生,利用 Boussinesq 解计算下卧层顶部的附加应力,采用分层总和法计算下卧层变形。对于基础宽度 $>8\text{ m}$ 的建筑,沉降计算深度需满足最后 1 m 土层变形不大于总变形的 0.025 倍。规范法复合地基变形计算公式如下:

$$s = \psi_s \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{P_0}{\xi E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{P_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] \quad (1)$$

式中: ψ_s 为复合地基沉降计算经验系数; p_0 为荷载效应准永久组合基底附加应力; E_{si} 为基底第 i 层土的压缩模量; ξ 为加固区土的压缩模量提高系数;

z_i, z_{i-1} 分别为基底至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底的距离; $\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{i-1}$ 分别为基底计算点到第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内的平均附加应力系数。

2 规范计算值与工程实测值对比

为研究规范计算方法的合理性,本文搜集了北京地区多个典型地层区域 CFG 桩复合地基项目沉降实测数据,所有数据均自基础底板完成后开始监测。

2.1 大兴瀛海二府项目

项目位于北京市大兴区瀛海镇,主楼地上 18 层、地下 3 层,设计复合地基承载力 350 kPa ,采用 CFG 桩复合地基,CFG 桩径 400 mm ,基底持力层为④粉质黏土层,桩端持力层为⑥粉、细砂、⑦卵石层,地下水位最大标高 10.56 m ,主要赋存于⑥粉、细砂、⑦卵石层。主楼 CFG 桩复合地基主要设计参数见表 1,典型工程地质剖面见图 1,相关地层参数见表 2。

表 1 瀛海二府项目 CFG 桩复合地基设计参数
Tab. 1 Design parameters of CFG pile composite foundation for Yinghai Erfu project

楼号	基底标高/m	桩长/m	桩间距/m	基础尺寸/m	基底平均压力/kPa
1 [#]	20.39	13.5	1.5×1.5	37.95×12.80	330
2 [#]	20.39	13.0	1.5×1.5	62.50×14.90	330
3 [#]	20.39	13.5	1.5×1.5	56.40×12.80	330

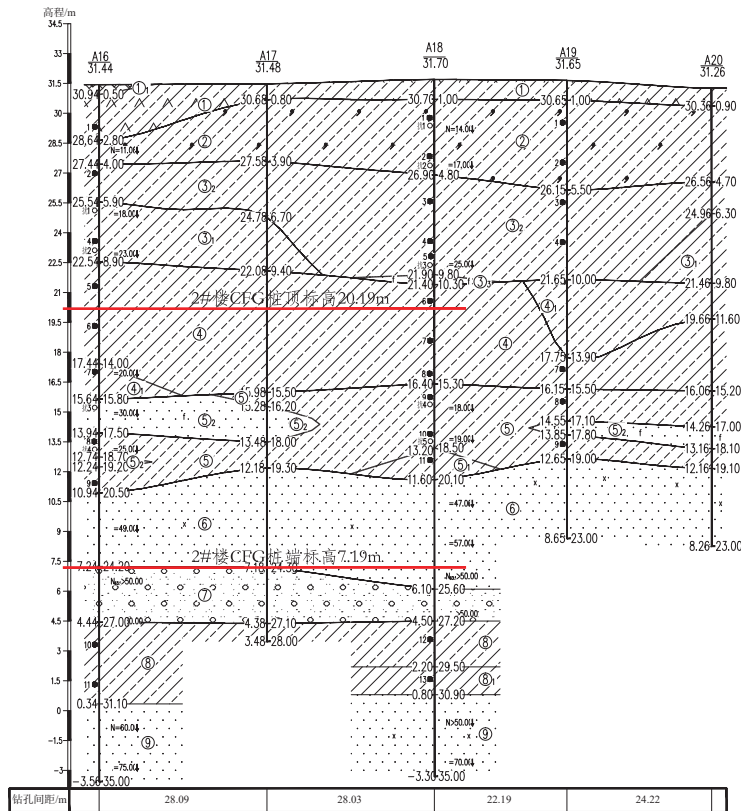


图 1 瀛海二府项目典型工程地质剖面图

Fig. 1 Typical engineering geological profile of Yinghai Erfu project

表2 瀛海二府项目主要地层参数
Tab.2 Main stratum parameters of Yinghai Erfu project

地层名称	层厚/m	质量密度/(g·cm ⁻³)	压缩模量 $E_s(p_0 \sim p_{0+0.1})$ /MPa	天然地基承载力/kPa
①素填土	0.8	1.95		
②黏质粉土、砂质粉土	3.1	1.99	5.5	110
③ ₂ 粉质黏土	2.8	2.04	5.0	130
③ ₁ 黏质粉土、砂质粉土	2.7	2.03	6.5	160
④粉质黏土	6.1	1.99	7.0	170
⑤砂质粉土、黏质粉土	2.0	1.99	10.0	210
⑤ ₂ 粉砂	1.8	2.05	28.0	220
⑥粉、细砂	5.0	2.10	35.0	250
⑦圆砾、卵石	2.8	2.15	45.0	380
⑧粉质黏土	4.1	2.10	10.5	210
⑨细砂	3.9	2.10	38.0	270

项目沉降监测自基础底板完成后开始,持续至结构封顶后6个月,最后100d变形速率小于0.01mm/d,1#—3#楼实测沉降值如表3所示。为对比沉降计算值与实测值,采用规范法计算1#—3#楼沉降值。因监测点布置在主楼四周,故计算主楼角点沉降值,现场实测是在底板完成后开始,实测沉降包含回弹再压缩变形,所以本文在计算沉降时考虑了回弹再压缩变形。《北京地区建筑地基基础勘察设计规范(2016年版)》(DBJ 11—501—2009)^[14]整理了北京地区数百组各类土回弹再压缩试验数据,线性拟合得出各类土回弹再压缩模量 E_{rs} 与压缩模量 E_s 的关系式为 $E_{rs}=2.8545E_s$ 。由于勘察报告未提供地层回弹再压缩模量,依据文献[14],沉降计算时各地层回弹再压缩模量均按压缩模量2.8545倍考虑。沉降计算值与实测值对比见表3。

表3 瀛海二府项目主楼角点沉降计算值与实测值对比
Tab.3 Comparison between calculated and measured settlements at corner points of the main building in Yinghai Erfu project

楼号	附加应力沉降计算值/mm	回弹再压缩变形计算值/mm	沉降计算值/mm	沉降实测值/mm
1#	-9.32	-4.35	-13.67	-15.12
2#	-10.70	-5.07	-15.77	-17.60
3#	-10.21	-4.49	-14.70	-17.57

注:表中沉降实测值为4个角点实测沉降值的平均值。

对比表3数据发现,仅考虑附加应力时沉降计算值远小于实测值,考虑回弹再压缩变形后,沉降计算值接近实测值。

2.2 海淀上庄东小营村项目

前述瀛海二府项目基底黏土、粉土、细砂互层分布,下部为砂层或卵石层,具有北京南部、东部地区地层分布的典型特征。而北京北部地区多以深厚黏土地层为主,为此本文搜集整理了北部地区多个项目的数据。

东小营村项目位于北京海淀区上庄镇东小营村,项目分B01、B02两个地块,本文计算了B02地块1#—3#、5#、G1#楼沉降值,各楼座CFG桩复合地基设计参数见表4,基底持力层为③粉质黏土—重粉质黏土,桩端持力层为⑤粉质黏土—重粉质黏土,稳定水位最大标高43.10m,详细地层情况见图2,主要地层参数见表5。

表4 东小营村项目CFG桩复合地基设计参数
Tab.4 Design parameters of CFG pile composite foundation for Dongxiaoying Village project

楼号	基底标高/m	桩长/m	桩间距/m	基础尺寸/m	基底平均压力/kPa
1#	34.6	21.0	1.45×1.45	62.95×15.3	320
2#	33.2	17.0	1.6×1.6	62.9×14.3	270
3#	33.1	19.5	1.45×1.45	49.5×14.35	320
5#	34.7	18.0	1.5×1.5	62.95×14.3	300
G1#	33.3	21.0	1.4×1.4	82.6×24.9	320

采用规范法分别计算附加应力变形和回弹再压缩变形并叠加,计算结果如表6所示。本项目各楼座结构封顶时实测沉降量介于6.2~8.0mm,因黏土地层具有长期蠕变特性,至本文投稿时沉降仍未稳定,根据文献[14],中的时间下沉系数 λ_t (即主体结构完工时的沉降量占最终沉降量的比值, $\lambda_t = ap_0^{-0.3}$,与基底砂、卵石层厚度及基底附加应力有关),结合结构封顶实测沉降数据反推出各楼座最终总沉降(见表6)。

通过沉降计算值与实测值对比(见表6),除3#楼外,其余主楼在考虑回弹再压缩变形后,沉降计算值接近或略小于推测的最终沉降值。

2.3 其他项目

海淀幸福里项目位于北京市海淀区永丰产业基地,项目采用CFG桩复合地基,基底及CFG桩端持力层均为粉质黏土,中间分布细砂层(见图3),结构封顶时主楼角点沉降较小,考虑黏性土地层蠕变特性,通过时间下沉系数推测最终总沉降,其值接近考虑回弹再压缩变形的沉降计算值。

此外,通过对文献[15]中的两个CFG桩复合地

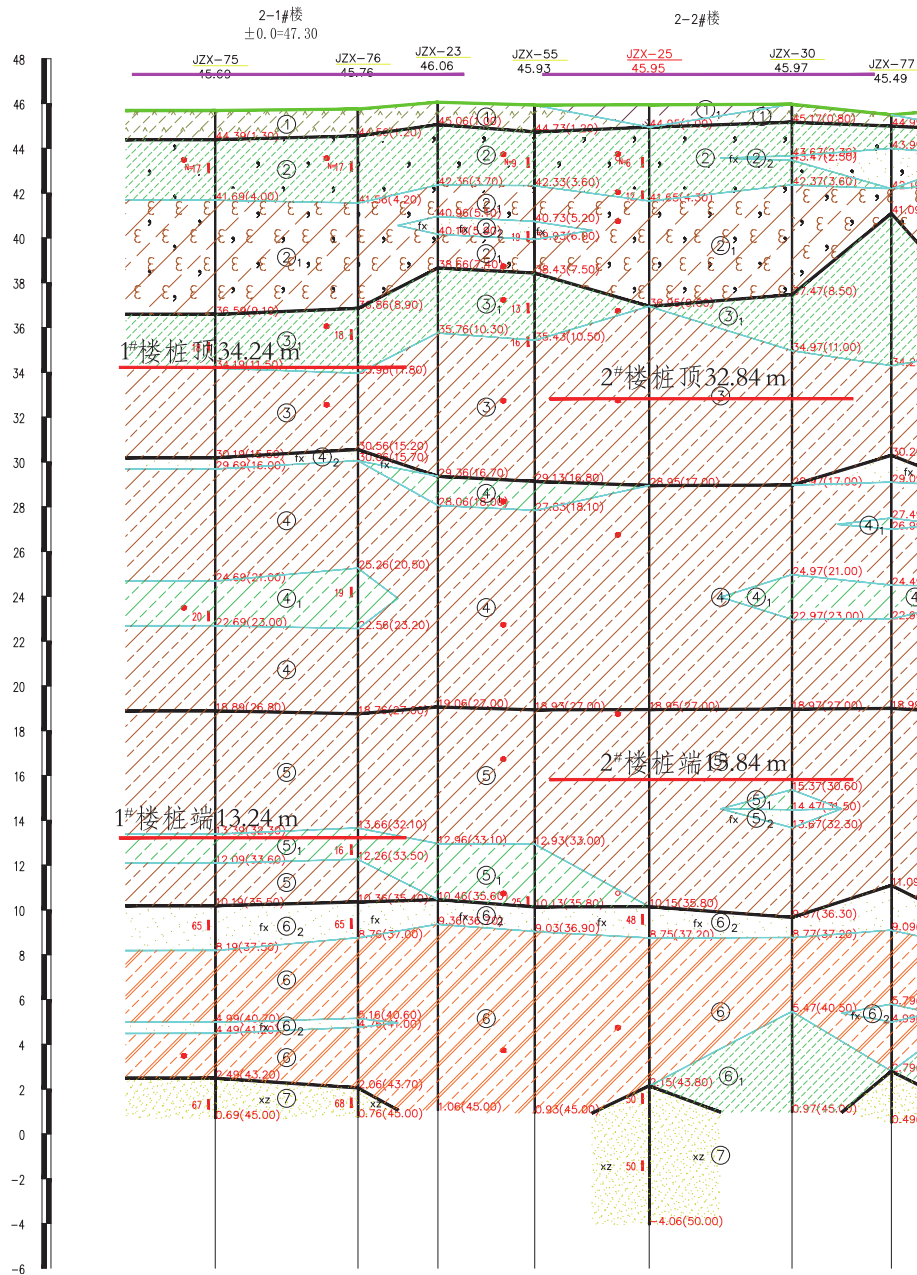


图 2 东小营村项目典型工程地质剖面图
Fig. 2 Typical engineering geological profile of Dongxiaoying Village project

基工程案例(北京市朝阳区望京小区项目和嘉和丽园项目进行计算分析,结果表明两个项目沉降计算值均小于实测值。

以上 CFG 桩复合地基沉降计算与实测对比分析表明,附加应力导致的复合地基沉降计算值均小于沉降实测值,叠加回弹再压缩变形后,沉降计算值基本接近于实测值,均未出现沉降计算值大于实测值或最终预估沉降值的情况。因此“沉降计算值大于实测值,应修正沉降计算经验系数”的观点是值得商榷的,导致这种观点的原因是多方面的,其中一方面是沉降监测点设置于楼座四周,而实际最大沉降点位于建筑

物基础形心或中心附近,将中心点沉降计算值与四周沉降实测值对比,易造成计算值大于实测值的假象;另一方面是第三方沉降监测结束不代表沉降变形终止,特别是黏土地层,后期沉降不容忽视。

3 考虑回弹再压缩的复合地基沉降计算公式

以上项目研究中,在计算沉降值时,均考虑了回弹再压缩变形,考虑回弹再压缩变形后,沉降计算值接近实测值,随着基础埋深越来越大,回弹再压缩变形更加不容忽视,为此本文基于规范中附加应力变形计算公式,提出了一种考虑回弹再压缩的复合地基沉降计算公式:

表5 东小营村项目主要地层参数

Tab. 5 Main stratum parameters of Dongxiaoying Village project

地层名称	质量密度 /(g·cm ⁻³)	压缩模量 E _s (p ₀ -p _{0+0.1})/MPa	天然地基 承载力/kPa
①素填土	1.80		
②黏质粉土、砂质粉土	1.94	6.6	100
② ₁ 重粉质黏土	1.91	3.3	90
③粉质黏土	1.98	6.3	140
③ ₁ 砂质粉土、黏质粉土	2.03	11.2	160
④粉质黏土	2.01	9.7	150
④ ₁ 黏质粉土、砂质粉土	2.03	13.2	180
⑤粉质黏土	1.99	12.1	180
⑤ ₁ 黏质粉土、砂质粉土	2.03	16.7	200
⑥粉质黏土	2.01	14.1	190
⑦细砂	2.02	22.0	280

表6 东小营村项目主楼角点沉降计算值与实测值对比

Tab. 6 Comparison of calculated and measured settlements at corner points of the main building in Dongxiaoying Village project

楼号	附加应力 沉降计算值 /mm	回弹再压缩 变形计算值 /mm	沉降 计算值 /mm	结构封顶 实测沉降 /mm	λ _i	推测 最终 沉降/mm
1#	-10.94	-3.9	-14.84	-7.0	0.426	-16.44
2#	-8.63	-4.62	-13.25	-7.0	0.483	-14.50
3#	-9.14	-3.85	-12.99	-7.8	0.432	-18.04
5#	-13.03	-4.94	-17.97	-8.0	0.444	-18.03
G1#	-9.91	-4.91	-14.82	-6.2	0.446	-13.90

条取值;其他参数符号意义与规范^[1-2]相同。式(2)前半部分为附加应力和上覆土自重应力在 CFG 桩加固范围复合土层引起的变形,后半部分为附加应力和上覆土自重应力在复合土层下卧层引起的变形,对式(2)进行通分得到式(3):

$$s = \psi_s \left\{ \sum_{i=1}^{n_1} \left[\frac{p_0}{\xi E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \frac{p_c}{\xi \eta E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \left[\frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \frac{p_c}{\eta E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] \right\} \quad (2)$$

$$s = \psi_s \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p}{\xi \eta E_{si}} \left(\frac{p}{\eta p_0 + p_c} \right) (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p}{\eta E_{si}} \left(\frac{p}{\eta p_0 + p_c} \right) (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] \quad (3)$$

式中: p_c 为基底上覆土自重压力; ηE_{si} 为各层土的回弹再压缩模量 E_{rs} , 当勘察报告提供 E_{rs} 时, 可直接采用, 未提供时, E_{rs} 可取压缩模量 E_s 的 2.8545 倍^[4], 即 $\eta=2.8545$; ψ_s 为沉降计算经验系数, 参考规范^[2] 7.1.8

式(3)将考虑回弹再压缩变形的复合地基沉降计算简化为求 CFG 桩加固范围、CFG 桩以下两部分变形, 与规范中沉降计算公式形式一致, 式中 p 表示基底压力, 压缩模量与回弹再压缩模量按照附加应力、土自重压力占基底压力比值进行了综合, 将求附加应力、回弹再压缩两次变形简化为一次, 特别是采用有限元软件分析沉降时, 提高了计算效率。

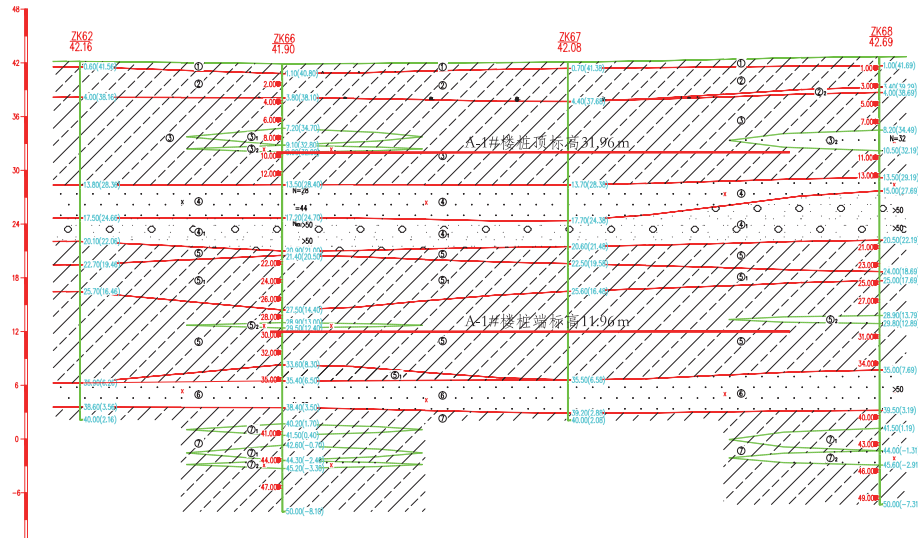


图3 海淀幸福里项目 A1#楼工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological profile of building A1# in Haidian Xingfuli project

当前大量综合体建筑项目通过采用跳仓法施工取消后浇带,其可行性主要依赖于准确计算地基沉降及差异沉降,一般认为“当主楼与裙房或地下车库相邻跨的柱或墙基础差异沉降小于 $L/500$,或绝对差异沉降小于 30 mm 时,可不设置沉降后浇带”^[16]。上述研究成果已应用于多个取消沉降后浇带论证项目,相关计算成果与后期实测数据基本一致,保证了取消沉降后浇带的结构安全性。

4 结论

通过对北京地区多个典型地层区域 CFG 桩复合地基沉降计算值与实测值进行对比分析,得出以下主要结论:

(1)在未考虑回弹再压缩变形的情况下,沉降计算值普遍小于实测值,考虑回弹再压缩变形后沉降计算值接近实测值。

(2)导致“沉降计算值比实测值大”这种观点的原因是多方面的,其中一方面是沉降监测点设置于楼座四周,而实际最大沉降点位于建筑物基础形心或中心附近,将中心点沉降计算值与四周沉降实测值对比,易给人一种计算值大于实测值的假象;另一方面是第三方沉降监测结束不代表沉降变形终止,特别是黏土地层,后期沉降不容忽视。

(3)本文提出了同时计算回弹再压缩、附加应力变形的公式,将压缩模量与回弹再压缩模量按照附加应力、土自重压力占基底总压力比值进行综合,将附加应力变形、回弹再压缩变形两次计算简化为一次,提高了计算效率,为采用有限元软件分析主楼-裙楼(或车库)差异沉降提供了新的方法。实践应用表明,采用本文提出的公式对主楼-车库差异沉降进行数值分析,相关计算成果与后期实测数据基本一致,保证了取消沉降后浇带的结构安全,也为跳仓技术的推广提供了重要支撑。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [3] 池跃君, 宋二祥, 陈肇元. 刚性桩复合地基沉降计算方法的探讨及应用 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 19-23. (CHI Y J, SONG E X, CHEN Z Y. An simplified method for settlement of rigid-pile composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 19-23. (in Chinese))
- [4] 张钦喜, 刘鸿哲, 樊邵峰. 地基沉降计算方法的研究与改进 [J] 北京工业大学学报, 2009, 35(1): 78-83. (ZHANG Q X, LIU H Z, FAN S F. Study and improvement on method of foundation settlement calculation[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(1): 78-83. (in Chinese))
- [5] 王迪, 张进忠. 采用反分析法进行 CFG 桩复合地基沉降量计算 [J]. 矿产勘查, 2010, 1(4): 412-414. (WANG D, ZHANG J Z. Use of anti-analysis method to calculate the amount of CFG pile composite foundation settlement[J]. Mineral Exploration, 2010, 1(4): 412-414. (in Chinese))
- [6] 王凤池, 朱浮声, 康玉梅, 等. 复合地基沉降的模型预测 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(10): 1010-1012. (WANG F C, ZHU F S, KANG Y M, et al. Modeling prediction of composite foundation settlement[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2004, 25(10): 1010-1012. (in Chinese))
- [7] 杨素春. CFG 桩桩土应力比及褥垫层厚度研究 [J]. 工业建筑, 2004(6): 44-47. (YANG S C. Research on thickness of cushion and pile-soil stress ratio of CFG pile[J]. Industrial Construction, 2004(6): 44-47. (in Chinese))
- [8] 万林海, 郭平业, 金海元. CFG 桩复合地基沉降影响因素分析 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 547-552. (WAN L H, GUO P Y, JIN H Y. Finite difference analysis of relations between design parameters and settlement of CFG pile composite foundation[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(4): 547-552. (in Chinese))
- [9] 关云飞, 赵维炳, 唐彤芝, 等. 路堤荷载下 CFG 桩复合地基沉降影响因素分析 [C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 威海: 中国电力出版社, 2008: 486-490. (GUAN Y F, ZHAO W B, TANG T Z, et al. Finite difference analysis of factors influencing CFG pile composite foundation settlement under embankment[C]//

- Proceedings of the 10th National Conference on Rock Mechanics and Engineering. Weihai: China Electric Power Press, 2008: 486-490. (in Chinese))
- [10] 孙燕, 朱钢, 管昌生. CFG桩复合地基的性状[J]. 广西工学院学报, 1997, 8(4): 28-32. (SUN Y, ZHU G, GUANG C S. Behaviors of CFG pile composite foundation[J]. Journal of Guangxi Institute of Technology, 1997, 8(4): 28-32. (in Chinese))
- [11] 何世鸣, 赵振国, 吴盛斌, 等. CFG短桩复合地基沉降规律的研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2010, 11(3): 11-13, 72. (HE S M, ZHAO Z G, WU S B, et al. Research of sedimentation law of CFG-short pile-multiplex foundation[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(3): 11-13, 72. (in Chinese))
- [12] 董必昌, 郑俊杰. CFG桩复合地基沉降计算方法研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2002, 21(7): 1084-1086. (DONG B C, ZHENG J J. Study on the settlement calculation of CFG pile composite ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1084-1086. (in Chinese))
- [13] 张钦喜, 郑玉苹, 陈鹏. CFG桩复合地基沉降计算方法的修正[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(2): 100-104. (ZHANG Q X, ZHENG Y P, CHEN P. Correction about settlement calculation method of CFG pile composite foundation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2015, 29(2): 100-104. (in Chinese))
- [14] 北京市规划委员会. 北京地区建筑地基基础勘察设计规范: DBJ 11—501—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (Beijing Municipal Commission of Urban Planning. Code for geotechnical investigation and design of building foundations in Beijing area: DBJ 11—501—2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese))
- [15] 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. (YANG M L, ZHANG D G. CFG pile composite foundation technology and engineering practice[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 北京市住房和城乡建设委员会, 北京市市场监督管理局. 超大体积混凝土结构跳仓法技术规程: DB11/T 1200—2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023. (Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Technical specification for mass and super-length concrete structure with alternative bay construction method: DB11/T 1200—2023[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-15