

CFG 桩复合地基沉降计算方法

张钦喜, 潘旭亮, 陈 鹏, 刘鸿哲
(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 沉降计算是 CFG 桩复合地基的设计关键, 目前大多数工程采用规范建议的沉降计算方法, 但是该方法计算出的沉降量和实测值有很大的差距, 有时候远远大于实测值. 为此, 在现行规范法计算复合地基沉降的基础上, 提出了一种新的实用简化计算方法, 该法可考虑桩侧摩阻力及桩端土的性质. 最后, 利用实际工程对本文提出的方法进行了验证, 证明了其准确性.

关键词: CFG 桩; 复合地基; 沉降计算

中图分类号: TG 501

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)06-0835-05

Settlement Calculation of CFG Composite Foundation

ZHANG Qin-xi, PAN Xu-liang, CHEN Peng, LIU Hong-zhe

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The status and development of settlement calculation methods of CFG pile composite foundation are analyzed. The main questions of CFG pile composite foundation are pointed. This paper optimizes one simple calculating method considering the mutual action of pile and the earth. Compared with engineering sample, the calculation results are well consistent with the practice.

Key words: CFG pile; composite foundation; settlement calculation

CFG 桩是水泥粉煤灰碎石桩的简称, 它和桩间土、褥垫层一起形成复合地基. 由于其良好的社会效益和经济效益, 目前已被广泛应用在高层建筑中. 《建筑地基处理技术规范》^[1] 规定 CFG 桩复合地基沉降计算应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》^[2] 的有关规定执行, 可采用分层总和法进行沉降计算, 复合土层的分层与天然地基相同, 各复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的 ζ 倍, ζ 等于加固后复合地基承载力 $f_{sp,k}$ 与基础底面下天然地基承载力 f_{ak} 的比值. 沉降计算时, 地基内的附加应力采用各向同性均质线性变形体的 Boussinesq 解来计算, 该计算方法即通常所说的规范方法, 是工程设计人员最常用的方法.

CFG 桩复合地基的最终沉降量为

$$S = S_1 + S_2 = \psi \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{\zeta_i E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] \quad (1)$$

式中, 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); E_{si} 为基础底面下第 i 层土的压缩模量 (MPa); n_1 为加固区土分层数; n_2 为沉降计算深度范围内土层总的分层数; z_i 、 z_{i-1} 分别为基础底面至第 i 和 $i-1$ 层土底面的距离 (m); $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ 分别为基础底面至第 i 和 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数; ψ 为沉降计算修正系数.

但是, 目前采用规范法计算出的沉降值与实测值有较大的差距, 本文收集了一些采用 CFG 桩复合地基的高层建筑的沉降实测资料^[3], 这些建筑大多

收稿日期: 2010-04-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50678003).

作者简介: 张钦喜 (1964—), 教授, 主要从事地基基础工程和基坑工程方面的研究, E-mail: zhangqinxi@bjut.edu.cn.

为住宅或公寓,要求承载力提高的幅度很大,它们的 沉降情况见表 1.

表 1 采用 CFG 桩复合地基建筑物的沉降量
Table 1 Settlement of typical projects treated with CFG piles

工程名称	工程概况	沉降实测值/mm			规范法沉降 计算值/mm	沉降观测 时间
		最大	最小	平均		
华亭嘉园 A	35 层、剪力墙、箱基、桩长 18 m	22.6		17.7	32.2	内装修时
华亭嘉园 B	35 层、剪力墙、箱基、桩长 19.5 m	21.2		20.3	40.2	内装修时
华亭嘉园 C	32 层、剪力墙、箱基、桩长 19.5 m	29.5		24.6	38.7	入住时
华亭嘉园 D	35 层、剪力墙、箱基、桩长 20 m	21.7		18.6	45.6	内装修时
华亭嘉园 E	35 层、剪力墙、箱基、桩长 19.8 m	28.8		25.9	45.6	内装修时
望京高校 1 号楼	25 层、剪力墙、筏基、桩长 16 m			21.4	65	结构封顶
望京高校 2 号楼	25 层、剪力墙、筏基、桩长 15 m			21.7	65	结构封顶
望京高校 3 号楼	25 层、剪力墙、筏基、桩长 16 m			≤21	65	结构封顶
嘉和丽园 A	32 层、剪力墙、桩长 18 m	29.5	22.5	25.5	49.2	结构封顶
嘉和丽园 B	28 层、剪力墙、桩长 18 m	32.7	21.1	25.3	52.2	结构封顶
嘉和丽园 C	32 层、剪力墙、桩长 18 m	30.6	24	27.8	53	结构封顶
慧中北里 C-3	27 层、桩长 16~17.5 m	31	25	27		24 层施工完
碧水园	21 层、剪力墙、箱基、桩长 5 m	27.9	33.1	34.2	66.6	装修完

从表 1 可看出,沉降计算值远远大于实测值,这说明规范法还有很多地方需要完善,不少学者提出了一些改进的计算方法. 池跃君等^[4]探讨了规范法在应力场的假设和复合模量的取法上存在的问题,在对复合地基的应力分布进行分层假定的基础上,提出沉降计算的双层应力法,但该方法不计桩、土、垫层之间的相互作用. 徐洋等^[5]分别在考虑桩土变形协调和考虑桩、土、垫层相互作用的基础上建立了复合地基沉降计算方法,但该方法局限于单桩复合地基的沉降计算,推导中未考虑桩与桩之间的相互作用及桩间土体的非线性特性. 还有其他的一些方法,要么过于简单,要么过于复杂,大多不适合工程实践.

为此,本文试图提出一种实用简化的沉降计算方法,既考虑沉降主要影响因素,又适合于工程师应用,并和工程实际比较相符.

1 本文提出的沉降计算方法

1.1 基本假定

CFG 桩复合地基土体中附加应力场的分布是十分复杂的,要得到精确的土中附加应力,就必须考虑基础-垫层-桩-土的共同作用,这就使得求解精确的理论解是十分困难的. 为了使复杂的问题得以简化,就必须抓住主要的影响因素. 为此本文的简

化计算方法假定:

- 1) 垫层上部的基础结构是绝对刚性的;
- 2) 上部结构在基础底面产生的应力为均布荷载,经垫层调整后,分别以均布荷载的形式作用于桩顶及桩间土体表面;
- 3) 中心荷载下各桩的几何尺寸及力学性能完全一致,应力-应变关系服从胡克定律;
- 4) 桩、土、垫层三者只发生竖向变形,且仅考虑三者竖向荷载作用下的共同作用;
- 5) 忽略褥垫层的沉降量,基础的沉降量 S 由加固区沉降量 S_1 和桩端下卧层沉降量 S_2 组成.

1.2 加固区沉降量 S_1 的计算

规范法计算桩间土即加固区沉降量时,实质上采用的是天然地基计算沉降的分层总和法,只不过是在土体压缩模量的前面乘上一个模量增大系数 ζ ,以此来考虑桩对土体承载力的提高效果. 但是,考虑到 CFG 桩复合地基的置换率比较低,而且加固区的附加应力小于天然地基下的 Boussinesq 解^[4],所以本文的计算方法忽略桩体对加固区土体的影响,按照桩间土表面作用的应力来计算加固区的沉降,计算方法仍然采用天然地基的规范计算方法,桩间土模量按加固前的土体初始模量计算.

桩间土表面土压力可由下式计算:

$$\sigma_s = \frac{W_k - nR_k}{A - nA_p} \quad (2)$$

式中, σ_s 为桩间土表面土压力 (kPa); W_k 为基础底面以上的总荷载标准值 (kN); n 为基础下的布桩数量; R_k 为 CFG 单桩承载力标准值 (kN); A 为基础面积; A_p 为 CFG 单桩截面面积 (m^2); 式中 R_k 的计算方法为

$$R_k = \left(U_p \sum q_{sik} h_i + q_{pk} A_p \right) / K \quad (3)$$

式中, U_p 为桩的周长; h_i 为第 i 层土厚度; q_{sik} 为第 i 层土的极限侧阻力标准值, q_{pk} 为极限端阻力标准值, q_{sik} 、 q_{pk} 均与土性和施工工艺有关, 可按现行《建筑桩基技术规范》查表取值; K 为安全系数, 取 2.0.

加固区沉降量的计算公式为

$$S_1 = \psi_1 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\sigma_s}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (4)$$

式中 ψ_1 为沉降计算修正系数.

1.3 桩端下卧层沉降量 S_2 的计算

从对 CFG 桩复合地基土中附加应力场的分析可看出, CFG 桩复合地基桩端下卧层顶面处存在着应力突增的现象^[4], 造成这种现象的原因是桩将桩体下部的侧阻扩散到桩端以及桩端处存在着端阻力的缘故, 故桩端下卧层沉降量 S_2 可由 3 个部分应力引起, 即作用于桩间土上的压力引起的附加应力、桩身下部侧摩阻力引起的附加应力及桩端阻力引起的附加应力.

1.3.1 桩间土压力引起的桩端下卧层沉降

桩间土压力引起的附加应力仍按 Boussinesq 解计算, 基准点仍位于基础底面, 引起的沉降量 S_s 的计算公式为

$$S_s = \psi_1 \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{\sigma_s}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (5)$$

式中, S_s 为桩间土压力引起的桩端下卧层沉降量; n_2 为从基础底面算起的沉降计算深度范围内土层总的分层数. 桩间土压力引起的沉降计算深度应符合规范规定的沉降计算深度, 基准点位于基础底面处.

1.3.2 桩侧摩阻力及端阻力引起的桩端下卧层沉降

摩阻力引起的附加应力场非常复杂, 考虑到任一小桩段上摩阻力引起的附加应力都有一个扩散深度, 通常为 3 ~ 5 m. 这样桩端处土样由摩阻力引起的附加应力 σ_t 只是桩端上 3 ~ 5 m 范围内摩阻力作用的结果^[5], 并非所有桩长范围内摩阻力均对桩端处土附加应力有影响. 基于这一分析, 桩侧摩阻力引起的桩端处附加应力为

$$\sigma_t = \frac{n U_p \sum_{i=l-d}^l q_{sik} h_i}{A - n A_p} \quad (6)$$

式中, l 为桩长; $d = 3 \sim 5$ m.

以 σ_t 及极限端阻力 q_{pk} 作为桩端处假想基础的压力来求桩侧阻力及端阻力引起的桩端处的附加应力 σ_d , 假想基础的面积仍然等于上部基础的面积, σ_d 的计算公式为

$$\sigma_d = \frac{\sigma_t A + n A_p q_{pk}}{A} \quad (7)$$

则桩侧阻力及端阻力引起的桩端下卧层沉降量 S_d 可按式计算:

$$S_d = \psi_2 \sum_{j=1}^{n_3} \frac{\sigma_d}{E_{sj}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) \quad (8)$$

式中, z_j 、 z_{j-1} 为桩端平面至第 j 层和 $j-1$ 层土底面的距离 (m); $\bar{\alpha}_j$ 、 $\bar{\alpha}_{j-1}$ 为桩端平面至第 j 层和 $j-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数; ψ_2 为沉降计算修正系数; n_3 为从桩端下卧层顶面算起的沉降计算深度范围内土层总的分层数.

由以上分析可得出, 桩端下卧层沉降量 $S_2 = S_s + S_d$.

1.4 总沉降量计算

总沉降量计算公式为

$$S = S_1 + S_2 = \psi_1 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\sigma_s}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \psi_1 \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{\sigma_s}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \psi_2 \sum_{j=1}^{n_3} \frac{\sigma_d}{E_{sj}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) \quad (9)$$

将 S_1 和 S_s 合并起来可得

$$S = \psi_1 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{\sigma_s}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \psi_2 \sum_{j=1}^{n_3} \frac{\sigma_d}{E_{sj}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) \quad (10)$$

为方便计算, 令

$$S'_1 = \psi_1 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{\sigma_s}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})$$

$$S_2 = \psi_2 \sum_{j=1}^{n_3} \frac{\sigma_d}{E_{sj}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1})$$

2 工程实例计算分析

北京慧中北里 3 区 3 ~ 5 号塔楼为 3 栋剪力墙结构住宅, 地下 2 层, 地上 25 层, 3 栋塔楼之间夹有 2 栋商业楼, 箱型基础, 埋深 5.85 m, 基底压力为 442 kPa. 基底尺寸 $l \times b = 30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$. 地下水位浅, 约 -1.4 m. 根据地勘报告, 箱基底板板底以下的土层物理力学指标见表 2.

表 2 地基土的物理力学指标

Table 2 Parameters of the sub-soils of each layers

土层 编号	土层 名称	层厚/m	地基承载力 标准值/kPa	压缩模量 E_s /MPa	桩周土摩擦力 特征值/kPa	桩端土承载力 特征值/kPa
④	粉质黏土	2.0	180	14.41	30	
④ ₋₁	细中砂	4.0	210	32.00	40	
⑤	粉质黏土	2.0	210	15.57	40	
⑤ ₋₁	细中砂	0.7	220	35.00	45	
⑥	粉质黏土	7.0	210	16.53	35	1 800
⑥ ₋₁	细中砂	0.7	220	35.50	30	2 200
⑦	粉质黏土	5.5	230	15.78		3 200
⑧	细中砂	3.0	240	26.82		
⑧ ₋₁	细中砂	3.0	240	26.82		
⑧ ₋₂	中粗砂	2.1	230	44.70		
⑨	卵石	4.4	400	100.00		

最终的设计参数为桩长 16.4 m、桩径 400 mm、桩间距 1.5 m、桩数 412 根、单桩承载力标准值为 678 kN。按 S'_1 和 S'_2 两部分分别进行沉降计算,计算过程如表 3 和 4 所示。

表 3 S'_1 计算过程Table 3 Settlement calculating progress of S'_1

z_i /m	z_i/b	$\bar{\alpha}_i$	$z_i \bar{\alpha}_i$	$z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}$	Δs_i /mm
0.0	0.00	1.000 0	0.000 0		
2.0	0.07	0.997 9	1.995 8	1.995 8	4.941 7
6.0	0.20	0.987 0	5.922 0	3.926 2	4.377 7
8.0	0.27	0.973 0	7.784 0	1.862 0	4.266 9
8.7	0.29	0.969 0	8.430 3	0.640 3	0.652 7
15.7	0.52	0.891 6	13.998 1	5.567 8	12.018 1
16.4	0.55	0.879 0	14.415 6	0.417 5	0.419 6
21.9	0.73	0.803 7	17.601 0	3.185 4	7.202 5
24.9	0.83	0.763 0	18.998 7	1.397 7	1.859 4

$$\bar{E}_{s1} = \frac{\sum A_i}{\sum \bar{E}_{si}} = \frac{22.716 7}{1.200 3} \text{ MPa} = 18.93 \text{ MPa}, \text{ 沉降修正系数}$$

$$\psi_1 = 0.24, S'_1 = \psi_1 \sum \Delta s_i = 8.58 \text{ mm}$$

注: $l/b = 1.0, \sigma_d = 35.68 \text{ kPa}$ 。

采用本文沉降计算方法得到的总沉降量 $S = S'_1 + S'_2 = 43.19 \text{ mm}$, 该工程结构封顶时的最大沉降为 31 mm, 该沉降量约为最终沉降量的 60% ~ 70%, 预估最终沉降量为 44 ~ 51 mm, 证明本文方法与实测结果比较相符。

用上述方法对 5 个有实测资料的工程进行了计算值与实测值的对比, 都得到较为满意的结果, 因篇幅所限, 再此不一一列出。

表 4 S'_2 计算过程Table 4 Settlement calculating progress of S'_2

z_j /m	z_j/b	$\bar{\alpha}_j$	$z_j \bar{\alpha}_j$	$z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}$	Δs_j /mm
0.0	0.00	1.000 0	0.000 0		
5.5	0.18	0.989 0	5.439 5	5.439 5	97.414 6
8.5	0.28	0.971 0	8.253 5	2.814 0	29.650 9
11.5	0.38	0.942 2	10.835 3	2.581 8	27.204 2
13.6	0.45	0.918 0	12.484 8	1.649 5	10.428 4
18.0	0.6	0.858 0	15.444 0	2.959 2	8.362 7

$$\bar{E}_{s2} = \frac{\sum A_i}{\sum \bar{E}_{si}} = \frac{17.14}{0.646} \text{ MPa} = 26.53 \text{ MPa}, \text{ 沉降修正系数}$$

$$\psi_2 = 0.2, S'_2 = \psi_2 \sum \Delta s_j = 34.61 \text{ mm}$$

注: $l/b = 1.0, \sigma_d = 282.6 \text{ kPa}, d = 5 \text{ m}$ 。

3 结论

1) 指出了规范法计算沉降量的不准确性, 并基于此提出了一种新的沉降计算方法;

2) 本方法可以考虑桩与桩间土的相互作用以及不同的桩端土性质, 还能体现桩端附加应力的突增现象;

3) 通过与 5 个有沉降实测资料的工程计算对比, 验证了本方法的准确性。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S], 2002.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S], 2002.
- [3] 闫明礼, 张东刚. CFG桩复合地基技术及实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [4] 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 Yao-jun, SONG Er-xiang, CHEN Zhao-yuan. Discussion and application of settlement calculation method about rigid-pile composite sub-soil[J]. Journal of Civil Engineering, 2003, 36(11): 19-23. (in Chinese)
- [5] 徐洋, 谢康和, 胡茂刚. 考虑变形协调的刚性基础复合地基沉降计算[J]. 浙江大学学报, 2003, 37(5): 551-555.
XU Yang, XIE Kang-he, HU Mao-gang. Calculation of settlement on rigid-pile sub-soil considering deformation consistent[J]. Journal of Zhejiang University, 2003, 36(11): 19-23. (in Chinese)
- [6] 中国建筑科学研究院. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [7] 王伟, 王世杰. 刚性桩复合地基沉降计算方法研究[J]. 土工基础, 2008, 22(1): 34-38.
WANG Wei, WANG Shi-jie. Research of settlement calculation on rigid-pile composite sub-soil [J]. Geotechnical Foundation, 2008, 22(1): 34-38. (in Chinese)
- [8] 赵明华, 张玲. 基于剪切位移法的刚性桩复合地基沉降计算[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 17-21.
ZHAO Ming-hua, ZHANG Ling. Calculation of settlement on rigid-pile composite sub-soil based on shearing deformation method [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(6): 17-21. (in Chinese)
- (责任编辑 吕小红)
-
- (上接第827页)
- [3] 钟一谔, 何衍宗, 王正, 等. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [4] ZHOU S Y, SHI J J. Active balancing and vibration control of rotating machinery: a survey[J]. The Shock and Vibration Digest, 2001, 33(4): 361-371.
- [5] FOILES W C, ALLAIRE P E, GUNTER E J. Min-max optimum flexible rotor balancing compared to weighted least squares [C] // The 7th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, University of Nottingham, U K, September 12-14, 2000.
- [6] 张正松, 傅尚新, 冯冠平, 等. 旋转机械振动监测及故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [7] ZHANG Shi-hai, WU Liang-sheng, TENG Xian-bin. Research on double-face online dynamic balance technology of machine tool spindle[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44-47: 112-116.
- [8] 张仕海, 伍良生, 周大帅. 机床主轴双面在线动态平衡系统的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009, 10: 79-81.
ZHANG Shi-hai, WU Liang-sheng, ZHOU Da-shuai. Design for double-face online dynamic balance system of machine tool spindle [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009, 10: 79-81. (in Chinese)
- (责任编辑 杨开英)