

文章编号: 1007-2993(2021)05-0332-04

# 高承载力 CFG 桩复合地基的应用研究

乌青松 姜大伟 于明波 张家文 李期明

(中国建材集团建材桂林地质工程勘察院有限公司, 广西桂林 541000)

**【摘要】** 广西南宁某住宅小区超高层建筑复合地基承载力特征值达到 620~650 kPa, 基于该项目 CFG 桩复合地基的应用情况, 统计分析四栋高层建筑的单桩增强体  $Q-s$  曲线、复合地基  $P-s$  曲线和建筑物沉降观测数据。分析结果表明, 该地区高层建筑应用高承载力 CFG 桩复合地基是可行的; 该项目 CFG 桩以岩石作桩端持力层, 承载力较高, 设计和施工时应适当调整褥垫层厚度以充分发挥单桩承载力高的优势; 《高层建筑岩土工程勘察标准》采用实测的复合地基变形模量计算沉降的计算结果与实际较为接近, 但仍存在一些不足。

**【关键词】** 复合地基; CFG 桩; 高层建筑; 高承载力

**【中图分类号】** TU 472

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2021.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Application of High Bearing Capacity CFG Pile Composite Foundation

Wu Qingsong Jiang Dawei Yu Mingbo Zhang Jiawen Li Qiming

(CNBM Guilin Institute of Geological & Prospecting Engineering Co., Ltd., Guilin 541000, Guangxi, China)

**【Abstract】** The characteristic value of bearing capacity reaches 620~650 kPa in a super-high-rise building in a residential area in Nanning, Guangxi. Based on the application of CFG pile composite foundation, the single pile reinforcement  $Q-s$  curve, composite foundation  $P-s$  curve and building settlement observation data of the four high-rise buildings in the project are analyzed. The analysis results show that it is feasible to apply high-capacity CFG pile composite foundation for high-rise buildings in this area. The CFG pile of this project uses rock as the bearing layer of the pile end, which has a high bearing capacity. The thickness of the cushion layer should be adjusted appropriately during design and construction to give full play to the advantages of single pile high bearing capacity. The Geotechnical Engineering Investigation Standard for High-Rise Buildings uses the measured composite foundation deformation modulus to calculate the settlement and the results are relatively close to the actual, but there are still some deficiencies.

**【Key words】** composite foundation; CFG pile; high-rise building; high bearing capacity

### 0 引言

水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)复合地基目前已广泛应用于建筑地基处理中, 并列入了国家行业标准<sup>[1]</sup>。CFG 桩复合地基的理论研究比较成熟, 学者们对 CFG 桩复合地基桩土应力比、荷载分担比等工作机理、褥垫层对其影响以及 CFG 桩复合地基沉降计算方法做了大量的研究<sup>[2-8]</sup>。随着我国城市化进程的加剧, 越来越多的高层建筑采用 CFG 桩复合地基, 但大多采用的复合地基承载力特征值在 500 kPa 以下<sup>[9-13]</sup>, 邓日海等<sup>[14]</sup>对高承载力 CFG 桩复合地基进行了大胆应用, 复合地基承载力特征值高达 820 kPa,

技术经济效果明显。鄧 彬等<sup>[15]</sup>对高承载力 CFG 桩复合地基的桩与桩间土受力特性进行了研究, 发现高应力作用下 CFG 桩复合地基与一般情况下略有不同。

本文针对广西南宁某超高层建筑应用高承载力 CFG 桩复合地基的应用情况进行了分析, 对 CFG 桩复合地基在高层建筑的适用性以及高层建筑复合地基沉降的计算方法提出了思考。

### 1 工程概况

广西某住宅小区共建设 11 栋高层建筑, 规划总用地面积 61421.41 m<sup>2</sup>, 总建筑面积约 333233.65 m<sup>2</sup>。

**作者简介:** 乌青松, 男, 1989 年生, 湖南道县人, 硕士研究生, 工程师, 注册土木工程师(岩土), 注册一级结构工程师, 主要从事地基处理和基坑支护方向研究。E-mail: 1540981060@qq.com

地上 19~34 层,地下 2~3 层,其中 9#—12#楼(以下叙述仅针对 9#—12#楼)地上 34 层,地下 3 层,建筑高度 100 m。建筑物采用剪力墙结构,筏板基础,以 CFG 桩复合地基作为筏板基础的持力层。各岩土层物理力学性质见表 1。

表 1 各岩土层物理力学性质表

岩土名称及代号	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	压缩 模量/ MPa	承载力 特征值/ kPa	侧阻力 特征值/ kPa	端阻力 特征值/ kPa
素填土①	1.93	2.5	50	10	
粉质黏土②	1.98	9	210	35	
泥质粉砂岩③	2.03	15	400	40	
泥质粉砂岩④	2.05	25	550	70	800
泥质粉砂岩⑤	2.1	45	1000	90	1200
硅质岩⑥	2.25	30	600	80	700
硅质灰岩⑦	2.45		6000	130	1500

## 2 CFG 桩复合地基设计和施工

### 2.1 CFG 桩复合地基设计计算

本次设计计算按照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)<sup>[1]</sup>相关规定进行。

先根据地层情况按式(1)进行单桩承载力  $R_a$  估算得到  $R_{a1}$ 。

$$R_{a1} = \mu_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{si} + a_p q_p A_p \quad (1)$$

式中: $\mu_p$  为 CFG 桩周长, m;  $q_{si}$  为第  $i$  层土的桩侧阻力特征值, kPa;  $l_{si}$  为桩在第  $i$  层土的长度, m;  $q_p$  为桩端阻力特征值, kPa;  $A_p$  为桩端截面积,  $\text{m}^2$ ;  $a_p$  为桩端阻力发挥系数。

再根据桩身材料强度按式(2)和式(3)进行单桩承载力  $R_a$  估算,得到  $R_{a2}$  和  $R_{a3}$ 。

$$f_{cu} \geq 4 \frac{\lambda R_{a2}}{A_p} \quad (2)$$

$$f_{cu} \geq 4 \frac{\lambda R_{a3}}{A_p} \left[ 1 + \frac{r_m(d-0.5)}{f_{spa}} \right] \quad (3)$$

式中: $f_{cu}$  为桩身混凝土强度标准值, kPa;  $\lambda$  为单桩承载力发挥系数;  $f_{spa}$  为深度修正后的复合地基承载力特征值, kPa;  $\gamma_m$  为基底以上土层的加权平均重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $d$  为基础埋深, m。

通过取最小值算得单桩承载力的计算值  $R_a$

$$R_a = \min(R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}) \quad (4)$$

再根据式(5)反算置换率  $m$ 。

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (5)$$

式中: $f_{spk}$  为深度修正前的复合地基承载力特征值, kPa;  $\beta$  为桩间土承载力发挥系数;  $f_{sk}$  为处理后桩间土承载力特征值, kPa。

最终根据布桩形式及已算得的置换率布置 CFG 桩。

高层建筑对地基沉降要求严格,还需要对地基沉降进验算。本次设计采用《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)<sup>[1]</sup>推荐的分层总和法,其中各复合土层的压缩模量为原压缩模量的  $f_{spk}/f_{sk}$  倍。算得地基沉降约 42~63 mm,沉降量和整体倾斜均能满足规范要求。

最终设计 CFG 桩桩径 600 mm,桩身混凝土强度为 C20,单桩承载力 700~1000 kN,以强风化泥质粉砂岩④、中等风化泥质粉砂岩⑤或硅质灰岩⑦作为桩端持力层,桩间距按照 1.3 m×1.3 m~1.6 m×1.6 m 布置,满足复合地基承载力特征值 620~650 kPa 的要求。

### 2.2 CFG 桩复合地基的施工

CFG 桩施工采用大功率长螺旋钻机,运用长螺旋成孔压灌混凝土工艺施工,先钻孔至桩底,在桩底不提升钻杆压灌混凝土一定时间,确保桩端与持力层接触良好后,一边提升钻杆一边压灌混凝土,最终成桩,有效避免了 CFG 桩穿过风化岩层时塌孔的现象。检测合格后铺设 300 mm 厚级配砂石褥垫层。

## 3 应用效果分析

### 3.1 承载力检测结果分析

CFG 桩施工完毕后进行了单桩增强体和复合地基的承载力检测。单桩增强体承载力检测的  $Q$ - $s$  曲线如图 1 所示。

由图 1 可知,在 2 倍单桩承载力特征值压力下,桩顶沉降在 3.07~14.00 mm 范围内,满足设计及规范要求。桩顶沉降较小且曲线无明显向下拐点,说明单桩增强体还有一定的承载潜力。另外,桩 9-1、9-3、10-2、10-3、11-2、11-3、12-3 在最大压力下桩顶沉降小于 5 mm,卸载后残余变形量小于 3 mm,已经具有嵌岩桩的一些变形特性,推测桩端已经位于硅质灰岩⑦上,而其余受检桩虽然桩顶沉降不大,但残余变形相对较大,表现为端承摩擦桩,推测其桩端持力层为强风化泥质粉砂岩④和中等风化泥质粉砂岩⑤。

复合地基承载力检测的  $P$ - $s$  曲线如图 2 所示。各受检复合地基试验点最大沉降均在规范允许范围之内, $P$ - $s$  曲线绝大多数平缓光滑,形态正常,复合地基承载力能达到设计要求。根据复合地基  $P$ - $s$  曲线,在 2 倍复合地基承载力特征值压力下,沉降为 10.82~44.14 mm,差异较大,但大部分明显大于单桩

增强体的沉降,由此推断,桩间土相对软弱,造成了复合地基沉降大于单桩增强体的沉降。少部分试验点

沉降较小,是由于岩面埋深浅,施工桩长短,压缩层厚度小。

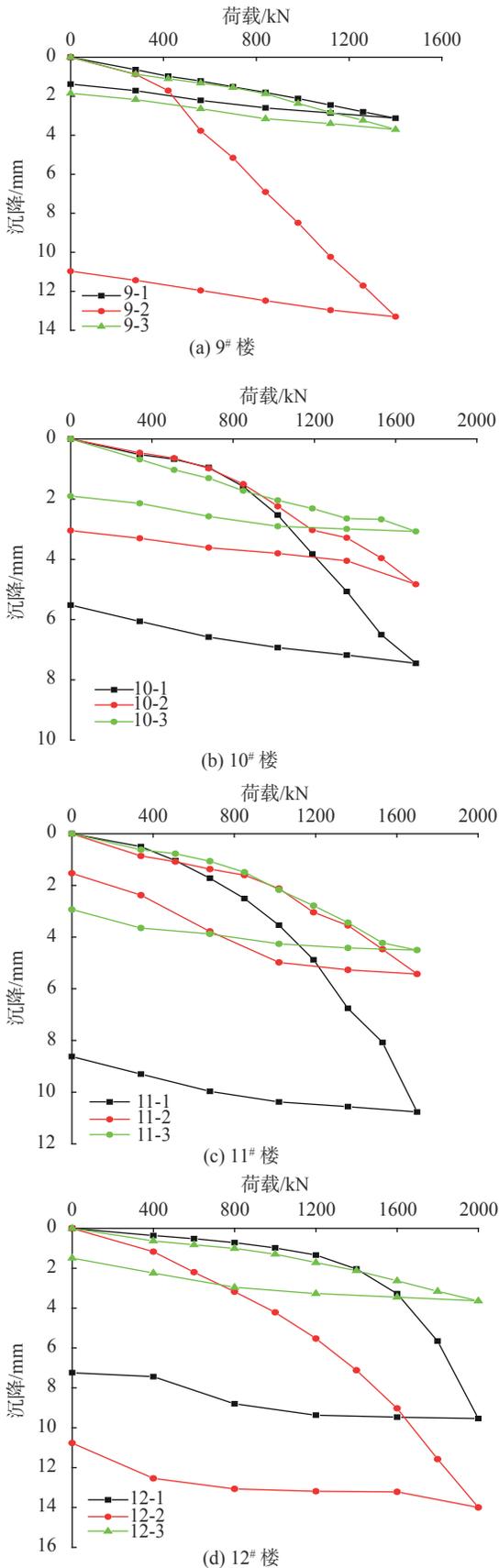


图1 单桩增强体 Q-s 曲线

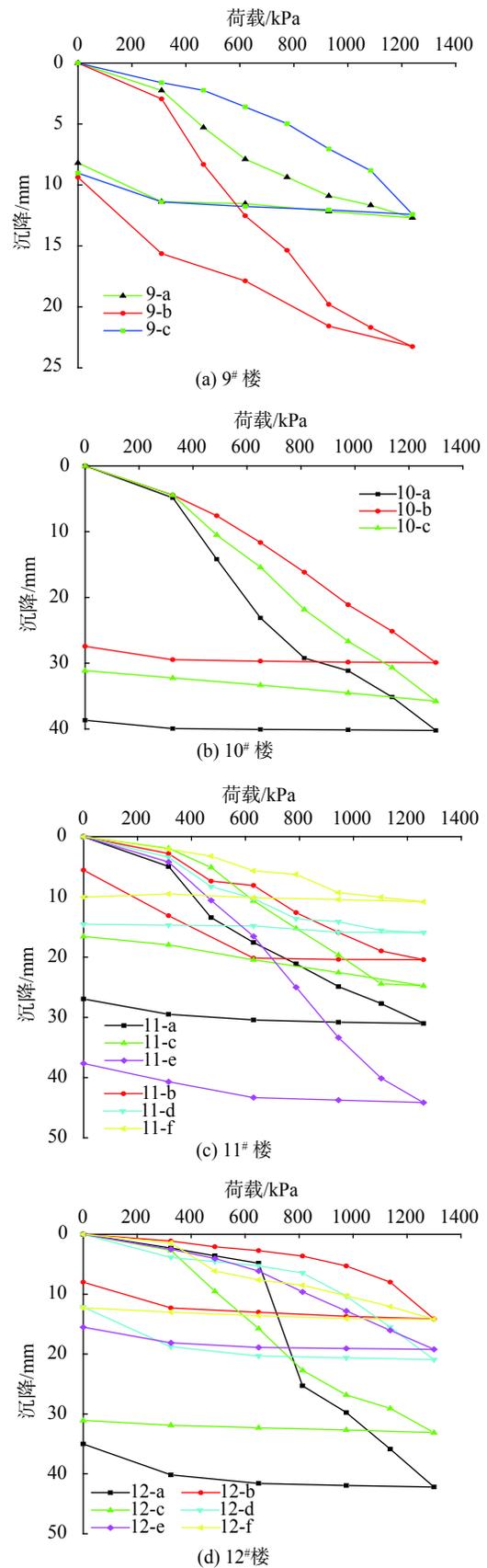


图2 复合地基 P-s 曲线

### 3.2 建筑物沉降监测结果分析

复合地基施工完毕后,对施工和使用阶段进行了沉降观测。以 12#楼为例,12#楼沉降观测结果如图 3 所示,图中 P1—P7 表示各沉降观测点符号。

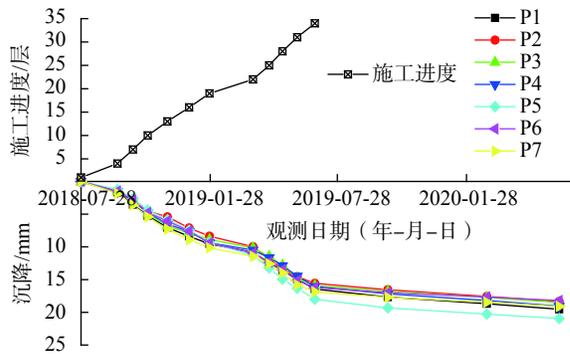


图 3 建筑物沉降观测曲线

由图 3 可知,随着建筑物施工层数的增加,建筑物的沉降逐渐增大,但各沉降观测点的沉降差异不大,在封顶(34 层)时沉降为 15.57~18.01 mm,建筑物沉降较为均匀。建筑物封顶后,继续了为期一年的观测,沉降曲线已趋于平缓,数据显示沉降速率已经小于 0.01 mm/d,达到稳定标准,观测到最终沉降为 18.20~20.95 mm,平均 19.10 mm。

根据罗云海<sup>[16]</sup>的研究成果,高层建筑复合地基采用《高层建筑岩土工程勘察标准》<sup>[17]</sup>推荐的沉降计算方法与实际最相符,采用实测的复合地基变形模量计算沉降。本文以 12#楼为例采用该标准推荐方法计算复合地基沉降。根据  $P-s$  曲线计算各试验点的压缩模量及沉降如表 2 所示。

表 2 各试验点复合地基沉降计算值

试验结果	试验点编号						平均
	12-a	12-b	12-c	12-d	12-e	12-f	
变形模量/MPa	100.0	137.2	90.3	93.7	78.8	70.9	95.1
沉降量/mm	18.5	16.9	11.4	24.4	26.7	47.7	24.3

由表 2 可知,《高层建筑岩土工程勘察标准》方法计算的复合地基沉降比实际观测的沉降结果略大,但较为接近,误差比传统的分层总和法小。但该方法有两个缺陷:①通过  $P-s$  曲线计算得到的变形模量离散型较大,造成计算的沉降差异较大;②沉降经验系数是根据各地经验取值,地区差异较大。

### 4 结论

(1)本项目 CFG 桩以岩石作为桩端持力层,已表现出了嵌岩桩的承载特性,承载力较高,按设计采用的单桩承载力而论,尚具有一定的承载潜力,因此,设计时可以适当降低褥垫层厚度,提高桩土应力比,在

同等荷载作用下可减少地基沉降。

(2)《高层建筑岩土工程勘察标准》采用实测的复合地基变形模量计算沉降,计算结果与实际的沉降观测结果最为接近,但存在实测的变形模量离散大和沉降经验系数各地区经验存在较大差异等不足。

(3)本项目的成功实施表明,超高层建筑采用 CFG 桩复合地基方案是可行的,本项目可为本地区类似工程项目提供参考。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 陶景晖,梁书亭,樊有维,等.高承载力素混凝土桩复合地基现场试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(4):693-700.
- [3] 王士杰,何满潮,朱常志,等.GC与CFG桩组合桩型复合地基承载特性研究[J].岩土力学,2008,(10):2632-2636.
- [4] 潘星.CFG桩复合地基沉降计算探讨[J].岩土力学,2005,(S1):248-251.
- [5] 韩云山,白晓红,梁仁旺.垫层对CFG桩复合地基承载力评价的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2004,(20):3498-3503.
- [6] 秦鹏飞.CFG桩复合地基技术及工程应用研究[J].岩土工程技术,2018,32(4):205-208.
- [7] 黄生根.柔性荷载下带帽CFG桩复合地基承载性状的试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(S2):564-568.
- [8] 李耀琨.岩溶地区高层建筑刚性桩复合地基—筏板基础体系的受力性能研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [9] 卫思思.高层建筑中CFG桩复合地基的施工技术[J].四川建材,2020,46(2):97-98,100.
- [10] 朱晓翠,王鸿,田玉中.高承载力复合地基探讨[J].科技创新导报,2017,14(11):50-51.
- [11] 杜云晶,王坤,王益超,等.CFG复合地基在高层建筑中的应用[J].建筑结构,2016,46(2):71-75.
- [12] 梁秋生,董彪.CFG桩在高层建筑中的应用[J].化工矿产地质,2019,41(1):56-59.
- [13] 黄佳铭,张庆华,陈凌伟.CFG复合地基在岩溶地区某高层建筑中的应用[J].城市勘测,2019,(2):204-208.
- [14] 邓日海,罗铁生.CFG桩复合地基在某超高层建筑中的应用[J].建筑结构,2013,43(8):92-96.
- [15] 郅彬,武李和乐,王番,等.高应力作用下CFG桩复合地基承载变形机制[J].建筑科学与工程学报,2018,35(4):81-88.
- [16] 罗云海.高层建筑CFG桩复合地基变形研究[J].岩土工程技术,2019,33(2):97-100.
- [17] JGJ/T 72—2017 高层建筑岩土工程勘察标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.