

# 人工挖孔扩底灌注 CFG 桩复合地基的设计与应用

曹 亮 刘焕存 王 妍

(中航勘察设计研究院有限公司,北京 100098)

**【摘 要】** 在一些特殊的地层结构上建造建筑物,如何选择基础型式或地基处理方法,是工程顺利实施的关键。通过人工挖孔扩底灌注 CFG 桩复合地基在北京某地基处理的工程实践,介绍了人工挖孔扩底灌注 CFG 桩设计计算、施工工艺、加固机理及适用范围,为北京地区同类地基处理工程设计和施工提供了有益的借鉴。

**【关键词】** 人工挖孔;扩底;CFG 桩;复合地基

**【中图分类号】** TU 472

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2014.03.001

## Design and Application of Artificial Drilled and Expanding Bottom Perfusion CFG Piles in Composite Foundation

Cao Liang Liu Huancun Wang Yan

(AVIC Institute Geotechnical Engineering Co., Ltd, Beijing 100098, China)

**【Abstract】** To construct a building in some special geological structure conditions, the key point of finishing the project successfully is how to choose the foundation type or the method of the foundation treatment. In this article, through a foundation treatment in Beijing which adopted artificial dig-hole and expanded bottom perfusion CFG pile in engineering practice, introduced design calculations, construction technology, reinforcement mechanism and scope of application of this kind of pile, to provide a useful reference for similar engineering design and construction of foundation treatment in Beijing.

**【Key words】** artificial drilled; expanding bottom; CFG pile; composite foundation

### 0 引 言

CFG 桩是水泥粉煤灰碎石桩的简称(即 cement flying-ash gravel pile)。它是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌和形成的高粘结强度桩,和桩间土、褥垫层一起形成复合地基。由于 CFG 桩体的强度和刚度比桩间土大,在基础荷载作用下,桩顶应力比桩间土应力大,桩体分担了较大的基底压力,桩顶荷载通过桩体向深部的土层传递,相应减少了桩间土承担的荷载。这样,由于桩的作用使复合地基承载力提高,变形减小,再加上 CFG 桩不配筋,桩体利用工业废料粉煤灰作为掺和料,大大降低了工程造价。凭借质量安全可靠、低成本、施工简单等优点,CFG 桩复合地基已广泛用于高层和超高层建筑中<sup>[1-4]</sup>。

人工挖孔扩底灌注 CFG 桩采用人工逐段开挖并浇筑混凝土护壁,直到设计桩端承载地层后进行桩端扩大头施工,以增大单桩承载力,扩底完成后再次浇筑 CFG 桩混合料成桩。人工挖孔扩底灌注 CFG

桩是一种新型人工加固地基方案,它克服了长螺旋钻孔无法成孔进入岩石的弱点,具有单桩承载力高、沉降变形小、施工简单、造价低等优点,适用于山地丘陵地区,尤其对碎石土层、砂卵石层、风化岩层非常适用,经济和社会效益非常明显。

### 1 人工挖孔扩底灌注 CFG 桩的提出

在北京一些山地丘陵或地层条件变化大的地区,地层结构通常是粘性土层和卵石或碎石层相互交替,且卵石或碎石粒径较大,第四纪地层厚度一般小于 20.0 m,以下是风化基岩层。在这种地层上建造高层建筑,天然地基的承载力和沉降往往不能满足上部结构设计要求,此时如何选择基础型式或地基处理方法,是工程顺利实施的关键。建筑物的地基基础方案通常有两种:桩基础或 CFG 桩复合地基。

桩基础方案的经济合理性,通常取决于建筑物的布桩数量,为了降低布桩数量,就必须充分发挥桩

基单桩承载力大的优势,因此当建筑物基底下第四纪地层较薄、基底距离基岩较近时,通常需要采用端承桩或端承摩擦桩,将桩端持力层放在稳定的中等风化的岩层中。这样不仅加大了桩基方案的施工难度,而且工程造价也比复合地基要高得多。

CFG桩复合地基方案因造价低、工艺简单而被广泛应用,但是在粘性土层和卵石或碎石层相互交替,且卵石或碎石粒径较大的地层,长螺旋钻机成孔困难,且不能充分发挥桩端承载力大的优势,另外由于拟建建筑物基底距下覆基岩较近,桩长较短,即使采用3倍的桩间距布桩,复合地基承载力也很难满足上部结构设计要求,因此本文提出了人工挖孔扩底灌注CFG桩复合地基的设计计算思路。

## 2 人工挖孔扩底灌注CFG桩的设计

### 2.1 人工挖孔扩底灌注CFG桩单桩承载力的计算

由于《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)<sup>[5]</sup>中没有人工挖孔扩底灌注CFG桩的计算方法,因此单桩承载力根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[6]</sup>和《北京地区大直径灌注桩技术规程》(DBJ 01—502—99)<sup>[7]</sup>计算。

1)按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中公式计算:

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \quad (1)$$

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \cdot \sum \psi_{si} q_{sik} l_i + \psi_p q_{pk} A_p \quad (2)$$

式中: $Q_{uk}$ 为单桩竖向极限承载力标准值; $K$ 为安全系数,取 $K=2$ ; $q_{sik}$ 为桩侧第 $i$ 土层的极限侧阻力标准值,kPa,对于扩底桩变截面以上 $2d$ 长度范围不计侧阻力; $q_{pk}$ 为桩径为800mm的极限端阻力标准值,kPa; $\psi_{si}$ 、 $\psi_p$ 分别为大直径桩侧阻力、端阻力尺寸效应系数; $l_i$ 为第 $i$ 土层中桩长,m; $u$ 为桩截面周长,m; $A_p$ 为桩端面积,m<sup>2</sup>。

2)按《北京地区大直径灌注桩技术规程》(DBJ 01—502—99)中公式计算:

$$R_{vk} = \lambda_s \pi d l_0 q_{sk} + \eta A_p q_{pk} \quad (3)$$

式中: $R_{vk}$ 为单桩竖向承载力标准值,kN; $q_{sk}$ 为桩周土平均摩擦力标准值,kPa; $q_{pk}$ 为桩端土承载力标准值,kPa; $d$ 为桩身直径,m; $l_0$ 为桩身入土长度,扩大头部分不计入,m; $u$ 为桩截面周长,m; $A_p$ 为桩端面积,m<sup>2</sup>; $\lambda_s$ 为桩周土摩擦力修正系数; $\eta$ 为桩端土承载力的面积修正系数。

### 2.2 复合地基承载力的计算

由公式:

$$f_{spk} = m \cdot R_a / A_p + \beta \cdot (1 - m) \cdot f_{sk} \quad (4)$$

式中: $f_{spk}$ 为复合地基承载力特征值,kPa; $R_a$ 为单桩竖向承载力特征值,kN; $A_p$ 为桩身截面面积,m<sup>2</sup>; $\beta$ 为桩间土承载力折减系数,取1.0; $f_{sk}$ 为处理后桩间土承载力特征值,kPa。

### 2.3 CFG桩身强度的计算

桩体强度应由桩顶应力确定,桩体强度 $f_{cu}$ 按下式计算:

$$f_{cu} \geq 3R_a / A_p \quad (5)$$

式中: $f_{cu}$ 为桩体混合料试块(边长150mm立方体)标准养护28d立方体抗压强度平均值,kPa; $A_p$ 为桩身截面面积,m<sup>2</sup>; $R_a$ 为单桩承载力特征值,kN。

### 2.4 基础底板反向抗冲切验算

基础底板受CFG桩的反向冲切按下式进行验算:

$$N_1 \leq 2.8(b_p + h_0)\beta_{hp}f_t h_0 \quad (6)$$

式中: $N_1$ 为不计承台和其上土重,在荷载效应基本组合下,基桩的净反力设计值,kN; $b_p$ 为圆桩换算成方桩的截面边长 $b_p=0.8d$ ; $h_0$ 为冲切破坏锥体的有效高度; $\beta_{hp}$ 为受冲切承载力截面高度影响系数; $f_t$ 为混凝土抗拉强度设计值,kN。

### 2.5 复合地基变形计算

复合地基变形计算通常采用复合模量法,根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002),对于刚性桩复合地基的复合模量采用下式计算:

$$E_{sp} = \zeta E_s \quad (7)$$

$$\zeta = f_{spk} / f_{ak} \quad (8)$$

式中: $\zeta$ 为加固后的复合地基压缩模量提高系数。

计算出复合模量后再根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)提供的公式,利用分层总和法计算地基最终沉降量 $s$ :

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) \quad (9)$$

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; $\psi_s$ 为沉降计算经验系数; $n$ 为地基变形计算深度范围内所划分的土层数; $p_0$ 为基础底面处的附加压力,kPa; $E_{si}$ 为基底下第 $i$ 层土的压缩模量,复合土层取复合模量进行计算; $z_i$ 、 $z_{i-1}$ 分别为基础底面至第 $i$ 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离,m; $\bar{a}_i$ 、 $\bar{a}_{i-1}$ 分别为基础底面至第 $i$ 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

北京市石景山区某工程平面布置不规则,呈“Z”字形布局,体形复杂,且高度较高,属于大底盘多塔楼

建筑,地上 17 层、地下 3 层,结构类型框架-剪力墙,采用钢筋混凝土筏板基础。 $\pm 0.00$  标高为 66.00 m,基础底板底面标高为  $-12.50 \sim -13.00$  m,基础埋深  $10.50 \sim 11.00$  m。要求核心筒部分复合地基承载力为 440 kPa,非核心筒部分复合地基承载力为 350 kPa。

根据岩土工程勘察资料,基底下各土层的土性指标见表 1,典型地质剖面见图 1。局部勘探钻孔发育小型岩溶洞穴,白云岩顶面差异化溶蚀较发育,风化壳充填红色粘土。

基底持力层主要为第四纪坡洪积层碎石混粘性土③层及粉质粘土、重粉质粘土③<sub>1</sub>层,局部为二叠纪全风化砂质页岩⑥层及全风化泥质页岩⑥<sub>1</sub>层,综合考虑地基承载力标准值为 230 kPa。

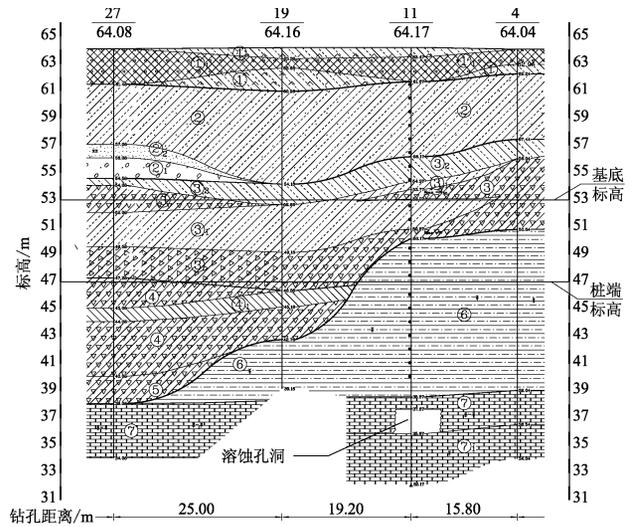


图 1 典型地质剖面图

表 1 基底下各层土物理力学性质指标统计表

土层名称	$w$ /%	$\rho$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	$e$	$I_p$ /%	$I_L$	$E_s$ /MPa	$q_{sik}$ /kPa	$q_{pk}$ /kPa	$f_{ak}$ /kPa
③碎石混粘性土	24.9	1.94	0.74			12.8	65		240
③ <sub>1</sub> 粉质粘土	23.5	1.98	0.70	11.6	0.48	12.0	55		220
③ <sub>2</sub> 粉质粘土	24.1	1.97	0.71	12.4	0.46	10.4	50		200
④粘土混碎石	40.7	1.78				25.0	65	800	250
④ <sub>1</sub> 粘土、重粉质粘土	34.9	1.79	1.11	21.7	0.39	18.1	40	400	200
⑤粘土混碎石	46.1	1.77				35.0	65	1000	280
⑥全风化砂质页岩	24.9	1.98	0.65			17.2	70	800	230
⑦强风化白云岩						70.0			500

### 3.2 复合地基的设计

本工程采用人工挖孔灌注 CFG 桩方案,在核心筒外两倍基础底板厚度范围内均匀布桩,以抵抗基础传递下来的巨大的集中的上部荷载,且保证基础的抗冲切承载力。同时核心筒与裙房之间采用变刚度调平设计概念,裙房范围内布桩间距适当增大,减小该部分地基的刚度,以此来满足建筑物的差异沉降要求。

由地质条件和土的物理力学指标可以看出,深部发育有溶蚀孔洞,因此桩端应该尽量远离溶洞,考虑到施工的可行性。选择④层或⑥层作为持力层,确定有效桩长为 6.0 m。人工挖孔桩桩身直径为 800 mm,混凝土护壁厚度为 100 mm,桩端扩底直径为 1200 mm,扩大头高度为 800 mm。

1)按式(1)、式(2)两式计算单桩承载力  $R_a = 1630$  kN;按式(3)计算单桩承载力,  $R_a = 1665$  kN。综合两种计算方法取单桩承载力特征值  $R_a =$

1550 kN。计算中根据类似地质条件下的经验,适当调整勘察报告中提供的桩侧摩阻力标准值和桩端阻力标准值。

2)按式(4)、式(5)计算面积置换率  $m = 0.077$ ,布桩间距为 2.50 m,桩身混凝土强度等级 C25。

3)按式(6)计算,基础底板抗冲切满足要求。为了进一步减少基础底板的反向应力集中,避免基础底板的反向冲切破坏,采取在桩顶上铺设 50 cm 褥垫层的做法。

4)复合地基的复合模量及变形采用式(7)、式(8)、式(9)计算,1#、2#、3#核心筒区域最大计算沉降量分别为 24.5 mm、25.1 mm、23.7 mm,非核心筒区域最大计算沉降量为 21.4 mm。

### 3.3 复合地基的检测

工程结束后对复合地基进行了检测。由于单桩分担面积太大,达到  $6.25 m^2$ ,且复合地基承载力也较高,进行复合地基静载荷试验比较困难,因此只进行

单桩静载荷试验,共计检测3根,单桩静载荷试验  $p-s$  曲线见图2。由图2可知,达到最大加载值时各单桩的累计最大沉降量仅为 9.72~17.68 mm,沉降量很小。此外,对抽取总桩数的 10% 的桩进行低应变动力试验成果表明,检测桩均为 I 类桩,表明桩身完整性良好,也进一步证明了该施工工艺的可行性。

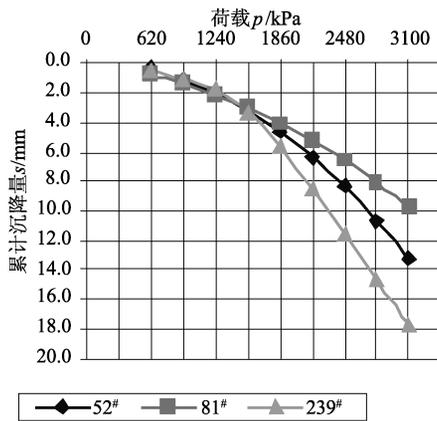


图2 单桩静载荷试验  $p-s$  曲线

### 3.4 沉降观测成果分析

北京某公司对该项目从开工、竣工及使用进行了全过程的沉降观测,项目共布置沉降观测点 44 个,各沉降观测点布置见图3。

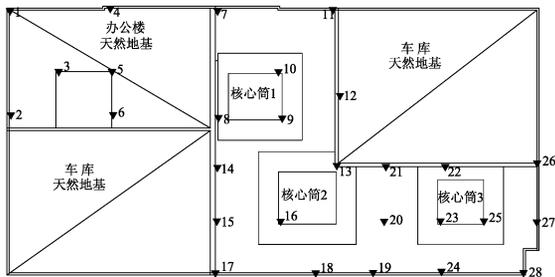


图3 沉降观测点布置图

沉降观测时间从基础底板完成(2009-04-01)、结构封顶(2009-12-06)、工程竣工(2010-12-14)至工程使用阶段(2011-07-18)共进行 14 次沉降观测。最后一次沉降观测成果(累计沉降量)见表2,表明工程的沉降已经稳定。从实际沉降与计算沉降对比来看,如果沉降计算中考虑 500 mm 褥垫层的压缩量,计算沉降与实际观测沉降是非常接近的,说明本复合地基设计计算是科学的。该建筑使用多年以来未发生因地基处理产生的质量问题,也表明本文提出的人工挖孔扩底灌注 CFG 桩复合地基是合理可行的。

表2 观测点总沉降量表 mm

观测点号	总沉降量	观测点号	总沉降量	观测点号	总沉降量
1	-7.3	11	-20.0	21	-31.9
2	-9.5	12	-27.0	22	-30.3
3	-12.3	13	-30.8	23	-22.8
4	-12.1	14	-23.0	24	-33.2
5	-13.7	15	-23.0	25	-31.7
6	-17.6	16	-30.4	26	-24.5
7	-17.3	17	-23.2	27	-28.7
8	-31.8	18	-37.1	28	-28.6
9	-46.4	19	-38.9		
10	-29.8	20	-36.3		

## 4 结论

1)在人工挖孔扩底灌注 CFG 桩复合地基的设计计算中按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)与《北京地区大直径灌注桩技术规范》(DBJ 01-502-99)计算单桩承载力是合理可行的。

2)在北京一些山地丘陵或地层条件变化大的地区,尤其是粘性土层和卵石或碎石层相互交替,且卵石或碎石粒径较大的地层中,当地下水不影响施工时,采用人工挖孔扩底灌注 CFG 桩复合地基不仅可以充分发挥桩端承载力大的优势,而且克服了长螺旋钻机成孔困难的缺点,为类似条件下的复合地基设计提供了范例。

## 参考文献

- [1] 阎明礼,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.
- [2] 范崇民,王浩,邴宇峰. CFG 桩复合地基的数值模拟分析[J]. 岩土工程技术,2013,27(1):13-16.
- [3] 李建光,刘焕存,王祖平. 非均匀 CFG 桩复合地基基床系数计算方法[J]. 岩土工程技术,2013,27(3):126-130.
- [4] 孔令剑. 灰土换填与 CFG 桩在高层住宅地基处理中的应用[J]. 岩土工程技术,2013,27(5):267-270.
- [5] JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [6] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [7] DBJ 01-502-99 北京地区大直径灌注桩技术规范[S]. 北京:北京市勘察设计协会,1999.

收稿日期:2014-02-24