

# CFG 桩复合地基处理技术 在北京澳洲康都住宅小区中的应用

崔承武,熊宗喜,郑小体,胡凌志,习铁宏

(北京市地质工程设计研究院,北京 101500)

**摘要:**针对天然地基承载力较低而设计要求的承载力较高、沉降变形要求又比较严格的地质条件,采用 CFG 桩复合地基可以达到良好的效果。结合具体工程实践,对 CFG 桩复合地基设计计算、施工技术、处理效果等方面作了较全面的介绍。

**关键词:**CFG 桩;褥垫层;复合地基;地基承载力;压灌超流态混凝土

**中图分类号:**TU472.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2007)12-0042-04

水泥粉煤灰碎石桩(简称 CFG 桩)是在碎石桩的基础上加入一些石屑或砂、粉煤灰和少量水泥,加水拌和制成的一种具有一定粘结强度的桩,桩体强度一般在 C5~C25 之间。CFG 桩和桩间土一起通过褥垫层共同承担荷载,形成 CFG 桩复合地基。这种复合地基承载力提高幅度可调性很强,桩长可以从几米到 20 余米。当天然地基承载力较高、复合地基承载力提高幅度要求不高时,可将桩长设计得短一些;反之,则桩长可设计得长一些。特别是沉降变形要求比较严格时,增加桩长可有效地减少变形,总的变形量小,采用 CFG 桩复合地基既经济又合理可靠。因而,近年来,CFG 桩复合地基在北京地区高层建筑中得到了广泛的应用。

## 1 工程概况

澳洲康都住宅小区位于北京市望京地区北部,该项目由 8 栋地上 17~28 层、地下 2 层的连体塔楼组成;一期工程包括 1、2、3、5 号楼,结构型式为剪力墙结构,基础采用筏板基础。拟建建筑物基本情况见表 1。

根据勘察报告,基础持力层为砂质粉土及粘质粉土②层,其承载力标准值为 160 kPa,基底以下土层描述如下:

砂质粉土、粘质粉土②:湿~饱和,中密,低~中低压缩性,含有机质,厚度为 0.50~6.60m,该层为基础持力层,地基承载力标准值为 160kPa;

表 1 澳洲康都住宅小区一期建筑物基本情况一览表

栋号	层数	室内地坪标高 (±0.000)/m	基础埋置标高/m		地基承载力/kPa
			普遍	局部	
1	22~24	38.450	-7.380	-8.980 -7.78	400
2	17	38.450	-8.460		320
3-I段	28	37.80	-6.580	-8.180 -6.980	460
3-II段	28	37.80	BG 轴南: -8.560 BG 轴北: -7.580		460
5	28	37.950	-7.510	-7.960 -9.360	450

注:沉降变形要求:建筑物最终沉降值≤60 mm,倾斜值≤1.5‰。

粉质粘土③:饱和,可塑,中~中高压缩性,含有机质,厚度为 1.50~6.50 m;

粉质粘土④:饱和,可塑~硬塑,中低~中压缩性,含有机质及姜石,厚度为 0.40~6.10 m;

细砂、中砂⑤:饱和,中密~密实,含少量卵石,厚度为 0.50~9.00 m;

粉质粘土⑥:饱和,可塑~硬塑,低~中低压缩性,厚度为 0.60~4.40 m;

细砂、中砂⑦:饱和,密实,厚度为 2.50~5.50 m;

粉质粘土⑧:饱和,可塑~硬塑,低压缩性,厚度为 1.50~5.50 m。

## 2 CFG 桩复合地基设计

### 2.1 桩长

CFG 桩设计要求桩端落在强度较高、压缩性小的土层上。本工程选择桩端持力层及桩长见表 2。

收稿日期:2007-05-23

**作者简介:**崔承武(1965-),男(汉族),辽宁丹东人,北京市地质工程设计研究院工程师,水文地质工程地质专业,从事地下工程技术与施工管理工作,北京市密云县滨河路 28 号;熊宗喜(1964-),男(汉族),湖南双峰人,北京市地质工程设计研究院副总工程师、高级工程师,探矿工程专业,从事岩土工程技术管理工作。

表 2 桩长、桩端持力层、单桩承载力一览表

栋号	复合地基承载力特征值/kPa	修正后复合地基承载力特征值/kPa	有效桩长/m	桩端持力层	单桩承载力/kN
1	340	400	14.5	⑤	650
2	250	320	10.0		420
3-I 段	400	460	16.0	⑦	700
3-II 段 BG 轴北	390	460	18.50		750
3-II 段 BG 轴南	380	460	15.50		700
5	450	450	18.5		720

2.2 桩径

桩径取决于所选的施工设备,本工程采用长螺旋钻机压灌成桩施工工艺,目前采用的螺旋钻具的直径以 400 mm 居多,设计桩径取 400 mm。

2.3 桩间距

先按下式计算单桩承载力,然后根据单桩承载力和天然地基承载力计算置换率和桩间距,桩间距一般在 3~5 倍桩径范围内,如果桩距太大或太小可调整桩长,使桩距在合理范围内。

单桩承载力计算公式为:

$$R_k = (1/\gamma_{sp}) (u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p)$$

式中: $u_p$ ——桩的周长,m; $q_{si}$ ——桩侧第  $i$  层土的极限侧阻力标准值,kPa,参照岩土工程勘察报告取值; $q_p$ ——桩的极限端阻力标准值,kPa,参照岩土工程勘察报告取值; $l_i$ ——第  $i$  层土的厚度,m; $\gamma_{sp}$ ——土的密度,取  $2 \text{ g/cm}^3$ 。

单桩承载力计算结果见表 2。

置换率计算公式为:

$$m = (f_{spk} - \beta f_{sk}) / [(R_a/A_p) - \beta f_{sk}]$$

式中: $m$ ——桩土面积置换率; $f_{spk}$ ——复合地基承载力特征值,kPa; $\beta$ ——桩间土强度发挥系数,本工程取 0.9; $f_{sk}$ ——桩间土承载力特征值,kPa,取天然地基承载力  $f_{sk} = 160 \text{ kPa}$ 。

本工程按正方形布桩,桩间距计算公式为:

$$s = (d/1.13) \sqrt{l/m}$$

经计算本工程布桩桩距见表 3。

表 3 CFG 桩主要设计参数

栋号	桩径/mm	正方形布置桩间距/m	桩长/m	有效桩长/m	置换率	砼强度	单桩承载力/kN	褥垫层厚度/cm
1	400	1.80	15.0	14.5	0.0374	C20	650	20
2	400	2.00	10.5	10.0	0.0313	C20	420	20
3-I 段	400	1.65	16.5	16.0	0.0454	C20	700	20
3-II 段 BG 轴北	400	1.70	19.0	18.50	0.0426	C20	750	20
3-II 段 BG 轴南	400	1.65	16.0	15.50	0.0458	C20	700	20
5	400	1.50	19.0	18.5	0.0548	C20	720	20

桩长、桩径、桩间距初步确定后,即在满足复合地基承载力要求后,需按下式验算这 3 个参数是否满足复合地基变形要求。

任意点的最终沉降可采用角点法按下式计算:

$$S = \psi_s S' = \psi_s \left[ \sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{\zeta E_{si}} (Z_i \bar{a}_i - Z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (Z_i \bar{a}_i - Z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) \right]$$

式中: $S$ ——分层总和法求得 CFG 桩复合地基最终沉降量,mm; $n_1$ ——加固区范围内土层分层数; $n$ ——沉降计算深度范围内土层总的分层数; $p_0$ ——对应于荷载效应永久组合时的基础底面处的附加应力,kPa; $E_{si}$ ——基础底面下第  $i$  层土的压缩模量,采用实际应力范围取值,MPa; $Z_i, Z_{i-1}$ ——基础底面至第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面的距离,m; $\bar{a}_i, \bar{a}_{i-1}$ ——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; $\psi_s$ ——修正系数; $\zeta$ ——加固区土的模量提高系数, $\zeta = f_{spk}/f_k$ 。

地基沉降计算深度必须大于复合土层的厚度,

并满足《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)中地基变形计算深度的有关规定。

经计算,各栋楼基础最终沉降量均满足设计要求,最终沉降量计算结果见表 4。

表 4 各栋楼最终沉降量计算结果一览表

栋号	估算最终沉降量/mm	栋号	估算最终沉降量/mm
1	58.88	3-II 段-1	50.91
2	47.68	3-II 段-2	48.13
3-I 段	53.46	5	57.41

2.4 桩体强度

桩顶应力为  $\sigma_p = R_k/A_p$ ,桩体标号为  $f_{cu} \geq 3\sigma_p = 17.9 \text{ MPa}$ ,取 CFG 桩桩体强度等级为 C20。

2.5 褥垫层厚度

CFG 桩复合地基的褥垫层是确保桩土共同承担荷载,充分发挥桩间土承载力,调整桩、土荷载分担比,减少基底应力集中,减少桩顶水平应力集中的关键设置。褥垫层厚度过小,桩对基础将产生显著的应力集中,而且桩间土承载力不能充分发挥;褥垫

层厚度过大,会导致桩、土应力比接近1,此时桩承担的荷载太少,失去了复合地基中设置桩的意义,复合地基承载力不会比天然地基有较大提高,而且建筑物的变形也较大。根据大量工程的实践,褥垫层厚度取10~30 cm为宜。

本工程褥垫层厚20 cm,褥垫层材料为级配砂石,最大粒径 $\geq 30$  mm。褥垫层应宽出基础垫层轮廓线外缘100 mm,夯填度 $\geq 0.9$ 。

## 2.6 CFG桩复合地基设计参数

经过上述计算,确定CFG桩复合地基设计参数如表3。其中5号楼紧邻车库,不考虑深度修正。本工程采用长螺旋钻机压灌成桩法施工,桩体坍落度为 $200 \pm 20$  mm。

## 3 CFG桩施工工艺

目前,CFG桩的成桩方法主要有2种:振动沉管法和长螺旋钻机压灌成桩法,前者系不排土成桩,对桩间土的挤密作用尤为显著,但由于振动对环境影响较大,难以穿透厚的硬土层如砂层、卵石层等,其应用受到很大限制;后者是近十几年发展起来的CFG桩施工方法,系采用长螺旋钻机成孔,通过钻杆中心压灌超流态混凝土成桩,该工艺具有不受地下水位影响,低噪声,无泥浆污染,成孔制桩时不产生振动,避免了新打桩对已打桩产生的不良影响,成孔穿透力强,可穿透硬土层,诸如砂层、圆砾层和砾径 $\geq 60$  mm的卵石层,施工效率高的优点,很大程度上克服前者的缺点而被广泛采用。

本工程采用长螺旋钻机压灌成桩法,为避免因机械设备行走造成对地基土的扰动,基坑开挖到基础垫层底以上50 cm左右开始进行CFG桩施工。钻机就位后,应用钻机塔身的前后和左右的垂直标杆检查塔身导杆,校正位置,使钻杆垂直对准桩位中心,确保CFG桩垂直度容许偏差 $\geq 1\%$ 。钻孔开始时,关闭钻头阀门,下放钻具使钻头触及地面,启动马达钻进,一般应先慢后快,这样既能减小钻杆摇晃,又容易检查钻孔的偏差,以便及时纠正。桩体配制材料:P. O32.5水泥;粒径0.5~0.35 mm中粗砂;砾径5~20 mm石子;II级粉煤灰。所有原材料都需有出厂合格证,使用前进行复检,应符合标准要求。配合比由实验室确定,混和料坍落度控制在 $200 \pm 20$  mm,每盘料搅拌时间 $< 1.5$  min,保证混合料的和易性和可泵性。

CFG桩成孔到达设计标高后,停止钻进,开始泵送砼,当钻杆心管充满混合料后开始提钻,严禁先

提钻后泵送,提拔速度控制在1.2~1.5 m/min,混合料泵送量与拔管速度相配合。成桩过程宜连续进行,应避免供料慢而导致停机待料。若施工中因其他原因不能连续灌注,必须避开饱和砂土、粉土层,不得在这些土层中停机。施工中每根桩的投料量不得少于设计灌注量。当前根桩施工完毕后,移机就位,进行下根桩的施工。下一根桩施工时,还应根据轴线和周围桩位置对需施工的桩进行复核,保证桩位准确。

清土包括CFG桩钻孔弃土和保护土层清运量部分,钻孔弃土在CFG桩混合料初凝后进行,首先人工将桩身保护桩长大部分挖除,或使其与桩身断开,一般留下30 cm的保护桩长,然后采用挖掘机清运弃土,挖掘机进入处理范围内行走时用打桩弃土在打桩工作面再铺行走垫层,其垫层面到桩顶不得少于1 m,严禁在打桩工作面行走。掘机工作时,用水准仪控制标高,防止挖断工程桩和扰动打桩工作面以下的保护土层。运土车不能进入处理范围内,由挖掘机将场地弃土倒至基坑边后,再装入运土车运走。打桩弃土清运完毕后,其下的50 cm厚的保护土层采用人工开挖,清除保护土层时不得扰动基底土,防止形成橡皮土。槽底标高用水准仪随时控制,避免超挖和扰动基底土。

保护土层清除后即进入下一道工序,将桩顶设计标高以上桩头截断,截桩的具体方法如下。

(1)找出桩顶标高位置,在同一水平面对称放置2个钢钎,用大锤同时击打,将桩头截断,严禁用钢钎向斜下方击打或用一个钢钎单向击打桩身或双向击打但不同时,以致桩头承受一定的弯矩,造成桩身断裂。

(2)桩头截断后,用钢钎、手锤将桩头从四周向中间修平至设计桩顶标高。

(3)如果在清土和剔除桩头时造成桩体断至设计桩顶标高以下,必须采取补救措施,方法如图1所示。注意在接桩头过程中保护好桩间土。

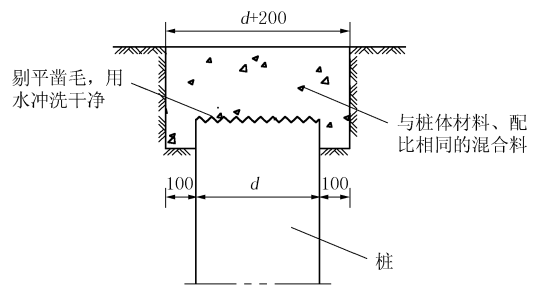


图1 断桩桩头接法示意图

复合地基施工、检测合格后,进行褥垫层施工。褥垫层材料采用砾径 5 ~ 30 mm 碎石或级配砂石。褥垫层需虚铺 23 cm 左右,采用平板振动器振密,平板振动仪功率 > 1.5 kW,往复压振 3 遍,控制振速,振实后的厚度与虚铺厚度之比(即夯填度)小于 0.9,即达到 20 cm。

#### 4 CFG 桩复合地基检测

施工结束后,试桩养护 15 天,由检测单位进行了静载荷试验检测。根据规范要求,静载荷试验数量宜为总桩数的 0.5% ~ 1%,且每个单体工程的试验数量不应少于 3 点;1、2、5 号楼各 3 点,3 号楼 7 点,试桩由检测单位随机抽取,检测结果见表 5。

表 5 静载荷试验成果表

栋号	序号	桩号	最大加荷量 /kN	最大沉降量 /mm	单桩复合地基承载力特征值 /kPa	复合地基承载力特征值 /kPa	修正后复合地基承载力特征值/kPa
1	1	54	2200	10.93	340	340	400
	2	93	2200	9.53			
	3	226	2200	16.03			
2	4	148	2000	27.94	250	250	320
	5	45	2000	30.20			
	6	166	2000	17.98			
3 - I 段	7	95	2180	10.18	400	400	460
	8	356	2180	12.90			
	9	171	2180	13.33			
3 - II 段 BG 轴北	12	115	2250	10.79	390	390	460
	13	86	2250	10.64			
3 - II 段 BG 轴南	10	228	2070	14.22	380	380	460
	11	278	2070	13.20			
5	14	120	2030	6.76	450	450	450
	15	220	2030	21.65			
	16	264	2030	10.51			

从试验结果来看,处理后的 CFG 桩复合地基承载力均满足设计要求。

在结构施工过程中,业主委托有关单位对 1、2、3、5 号楼进行了沉降观测,监测点布置在地上一层建筑物的角点和沉降缝两侧,监测周期一般为建筑

物每增高 2 层测定一次。各楼封顶沉降量见表 6。从以往类似工程监测结果来看,结构封顶时复合地基沉降一般完成最终沉降值的 60%,由此推断 1、2、3、5 号楼 CFG 桩复合地基满足最终沉降 60 mm 的设计要求。

表 6 1、2、3、5 号楼封顶沉降量

栋号	观测时间	沉 降 观 测 点 /mm													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2004.9.15	14	15.8	23.6	14.1	13.2	27.2	13.3	20.5	24	12.3				
2	2004.8.25	8.6	12.6	10	13	10	11.6	6.8	9						
3	2004.10.22	18.1	11.1	14	18.3	18.4	20.3	21.8	18.6	10.8	12.7	18.6	19.4	11.3	16
5	2005.5.10	12.5	29.5	14.5	26.6	25.5	27.8	29.0	29.3	25.3	26.3				

从沉降数据可以看出,5 号楼和 3 号楼均为 28 层,基础埋深和基底压力接近,但封顶时沉降量相差较大,说明 5 号楼与地下车库相邻,地下车库埋深大于 5 号楼 8.0 m 左右,而且地下车库后开挖,对建筑物沉降影响较大。

施工基础埋深大的建筑物后施工基础埋深浅的建筑物,以避免相邻建筑深基坑开挖引起已有建筑沉降加大。

#### 5 结论与建议

(1) 澳洲康都住宅小区采用 CFG 桩复合地基技术进行处理,地基承载力最大提高了 3 倍,沉降也得到了有效控制,达到了预定效果。

(2) 相邻建筑物基础埋深相差较大时,建议先

#### 参考文献:

[1] 刘景政,等.地基处理与实例分析[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.  
 [2] 阎明礼.地基处理技术[M].北京:中国环境科学出版社,1995.  
 [3] JGJ 79 - 2002,建筑地基处理技术规范[S].  
 [4] GB 50007 - 2002,建筑地基基础设计规范[S].