CFG 桩复合地基技术用于地上 30 层超高层建筑的实例

贾　城，司呈庆，何世鸣
（北京建材地质工程公司，北京 100102）

摘　要：介绍了一个 CFG 桩复合地基设计施工的实例，尤其用于地上 30 层的超高层建筑地基处理，比用传统钢筋混凝土灌注桩成本大大降低，且施工质量易于保证，工期短，现场易于实现文明施工。该工程经过精心设计、精心施工，确保了工程质量。

关键词：CFG 桩；复合地基；承载力；沉降量；超高层建筑
中图分类号：TU472.3+5　　文献标识码：B　　文章编号：1000－3746（2003）S1－0031－04

CFG 桩复合地基即水泥粉煤灰碎石桩复合地基，是由 CFG 桩与桩间土共同作用形成的复合地基，该复合地基技术由中国建筑科学研究院地基所研制成功，并于 1996 年被国家列为重点推广项目，近几年来该项技术的应用日益广泛，在很多地方可以取代钻孔灌注桩节省大量钢材，使工程造价大为降低，显示出其旺盛的生命力。CFG 桩复合地基现已扩展延伸，尤其在 CFG 料中加入砂子后形成素混凝土桩复合地基，其应用更为广泛，在国内目前已有北京、天津、河北、河南、山东、山西、浙江、江苏、安徽、湖北、广东、广西、陕西、辽宁、吉林、黑龙江、云南等十几个省市应用。应用的工程类型有工业和民用建筑、高耸结构物、多层和高层建筑物，有的地方已发展到了地上 30 多层的超高层建筑。基础形式有条形基础、独立基础、箱形基础和筏形基础。有滨海一带的软土，也有承载力在 200 kPa 左右的较密实的土。本文介绍的即是用于地上 30 层的超高层建筑的一例。

适用的土层有粘性土、粉土、砂土和已自重固结的素填土，对淤泥质土和轻微湿陷性黄土地层应用也有报道。

1　工程概况

北京国际世贸公寓为 4 幢地上 30 层，地下 3 层的高级公寓，建筑面积 180000 m^2，每座首层建筑面积 1222.02 m^2。±0.00 标高 41.10 m，基础标高 29.65 m，坑深 11.45 m。地处北京市朝阳区光华路 9 号。该工程实例是针对 C、D 座的地基处理。

根据设计要求，建筑物持力层为粉细砂③层，局部为粉质粘土③$_3$层或粘质粉土③$_4$层。承载力特征值综合取值为 195 kPa，不能满足设计承载力特征值 500 kPa 的要求，地基沉降量也不能满足设计 6 cm 的要求，所以必须对地基进行处理。

2　地层及地下水情况

2.1　场地地层条件

根据勘察报告，勘察深度范围内的地层按其沉积年代，成因类型以及岩性划分，本场地地层分为人工堆积层和第四系沉积层共 2 大层。

2.1.1　人工堆积层

分布于拟建建筑场地表层，岩性由房渣土①层和粉质粘土填土①$_1$层组成，厚度 1.00～3.20 m，其层底标高为 36.60～39.05 m。

2.1.2　第四系沉积层

分布于人工堆积层之下，岩性主要为②～⑨层及其亚层：

（1）粉质、重粉质粘土②层，中下密，可塑，局部软塑。

（2）于标高 35.89～34.06 m 以下为粉砂，砂质粉土③$_1$层，其下为粉细砂③层，中上密～密实，稍湿～湿，$N_{63.5}=30$ 击，层中还夹有中下～中密的重粉质、粉质粘土③$_3$层，厚薄不一，分布无规律。

（3）于标高 28.86～26.50 m 以下为卵石④层及其亚层细砂含卵石④$_1$层，卵石④层，中密，稍湿～

收稿日期：2003－04－30
作者简介：贾城（1976－），四川阆中人，北京建材地质工程公司项目部技术负责、助理工程师，岩土工程专业，从事岩土工程设计与施工工作，北京市东直门外南湖渠，（010）64736275；司呈庆（1976－），山东莱芜人，北京建材地质工程公司项目副经理、助理工程师，水文地质工程地质专业，从事岩土工程设计与施工工作；何世鸣（1965－），河北涉县人，北京建材地质工程公司副总工程师、高级工程师，探矿工程专业，硕士，从事岩土工程设计、施工及技术管理工作，he. shi. ming@263. net。
万方数据

饱和，亚圆，级配较差，含砂约为 30% ~40%，$N_{63.5}$ =20 ~75 击，该层土质不均，有圆砾间层，细砂含卵石④$_1$层分布于④层之顶部，密实，$N_{63.5}$ =31 ~45 击，含卵砾石约 5% ~15%。卵砾石④层、细砂含卵石④$_1$层及细砂混卵石④$_2$层，总厚度 5.20 ~7.40 m。

(4) 于标高 22.42 ~20.70 m 以下为粘质粉土，粉质粘土⑤层，密实，可塑 ~硬塑，夹中 ~中上密的粘土、重粉质粘土⑤$_1$层透镜体。

(5) 于标高 15.82 ~14.16 m 以下为粉细砂含卵石⑥$_1$层，厚 1.3 ~2.8 m，$N_{63.5}$ =51 击。其下为卵石⑥层，中 ~密实，饱和，亚圆，级配较好，$N_{63.5}$ =78 击，厚度约为 7.40 m。

(6) 于标高 5.67 ~4.80 m 以下为粘土，重粉质粘土⑦层，中上 ~密实，饱和，可塑 ~硬塑，夹密实的粉质粘土、粘质粉土⑦$_2$层和细砂含卵石⑦$_3$层。粘土、重粉质粘土⑦层，粉质粘土、粘质粉土⑦$_2$层和细砂含卵石⑦$_3$层，总厚度约 4.50 ~4.60 m。

(7) 于标高 1.17 ~0.20 m 以下为卵石⑧层，密实，饱和，亚圆，级配较好，$N_{63.5}$ =76 ~90 击，层厚约为 4.0 ~6.0 m。

(8) 于标高 -3.80 ~ -4.83 m 以下为细中砂含卵石⑨层，密实，饱和，含卵砾石约 10% ~20%，$N_{63.5}$ =60 击，勘察至标高 -10.33 m (深 50 m) 仍为该层。

2.2 场地地下水情况

拟建场区有 2 层地下水，第一层为上层滞水，水有异味，水量小，初见水位标高 38.82 m，埋深 0.80 m。第二层地下水为潜水，分布范围广，水位较深，其静止水位标高为 23.90 ~24.20 m (埋深 15.50 ~16.10 m) 含水层为卵石层，属松散岩层孔隙水。地下水对混凝土无腐蚀性。

2.3 地层地震液化情况

本地区地震设防烈度为 8 度，设计基本地震加速度为 0.2g，依据勘察报告，拟建场地地层不存在液化问题。

3 地基处理方案比较选择

依据该工程荷载要求等特点及地层条件、地下水条件，可选择预制桩、钻孔灌注桩，也可选择 CFG 桩复合地基，预制桩因其成本高 (造价约 600 万元)，振动、噪声大以及施工周期长等原因，不宜选用；钻孔灌注桩也因其成本高 (造价约 550 万元)，泥浆污染及施工工期长等原因，不宜选用。经过比较，本着安全、经济、合理原则，选择 CFG 桩复合地基方案，既可降低造价 (造价为 218 万元)，工期大为缩短，施工难度小，易于实现文明施工。

4 地基处理方案设计

4.1 CFG 桩设计原则

(1) 满足设计要求，处理后地基承载力特征值达到 500 kPa，建筑物最大沉降 ≯60 mm，最大倾斜值 ≯2‰；

(2) 满足北京市和国家及行业有关规范对建筑物地基沉降及倾斜要求；

(3) 满足桩土变形协调一致的原则。

4.2 CFG 桩设计计算

4.2.1 桩径桩长的确定

考虑地基处理的均匀性，并依据目前市场上定型产品，采用 Ø400 mm 的 CFG 桩，桩尖持力层为卵石⑥层，卵石⑥层较厚且较为均匀，是理想的桩端持力层。桩长 18.0 m，保护桩长 0.5 m，有效桩长 17.5 m，且进入卵石⑥层至少 0.3 m。

4.2.2 单桩承载力特征值计算

依据规范公式计算：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^{n} q_{si} l_i + q_p A_p$$

式中：R_a——单桩承载力特征值，kN；q_{si}——桩周第 i 层土侧阻力特征值，kPa；q_p——桩端端阻力特征值；A_p——单桩截面积，取 0.1256 m^2；u_p——桩周长，取 1.256 m；l_i——第 i 层土厚度，m。

根据勘察报告中的物理力学指标、相关规范及有关经验确定各层土的侧阻力特征值 q_{si} 和桩的端阻力特征值 q_p。

单桩承载力特征值为：

$$R_a = 1.256(2.0 \times 22.5 + 0.5 \times 17.5 + 4.0 \times 40 + 1.5 \times 35 + 7.0 \times 20 + 2.0 \times 30 + 0.5 \times 40) + 0.1256 \times 1500 = 799.13 \text{ kN}$$

取 R_a =780 kN。

4.2.3 初选桩间距

初选桩间距为 1.5 m×1.5 m，呈正方形排布。

4.2.4 置换率计算

由规范公式 $m = d^2/d_e^2 = 0.4^2/(1.13 \times 1.5)^2 = 0.0557$

4.2.5 复合地基承载力特征值计算

由规范公式：

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

万方数据

式中：f_{spk}——复合地基承载力特征值，kPa；A_p——单桩截面积，m^2；β——桩间土承载力折减系数，取 $\beta=0.9$；f_{sk}——桩间土承载力特征值，综合取值为 195 kPa；m——面积置换率。

计算得：

$$f_{spk}=0.0557\times780/0.1256+1\times0.9\times(1-0.0557)\times195$$
$$=511.6\ \text{kPa}>500\ \text{kPa}$$，满足设计承载力要求。

4.2.6　桩体强度设计

桩体试块抗压强度平均值应满足下式要求：

$$f_{cu}\geqslant3(R_a/A_p)=3\times780/0.1256$$
$$=18630.6\ \text{kPa}$$

考虑施工因素故应选择桩体混凝土强度为 C25。

4.2.7　复合地基最终沉降量计算

按规范公式进行分层计算，采用公式：

$$S=\psi_S S'=\psi_S\sum_{i=1}^{n}P_0(Z_i\bar{\alpha}_i-Z_{i-1}\bar{\alpha}_{i-1})/E_{si}$$

式中：S——地基最终沉降量；ψ_S——沉降计算经验系数；S'——按分层总和法计算出的地基沉降量；n——地基沉降计算深度范围内所划分的土层数；P_0——对应于荷载标准值时的基础底面处的附加应力；Z_i、Z_{i-1}——基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离；$\bar{\alpha}_i$、$\bar{\alpha}_{i-1}$——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；E_{si}——基础底面下第 i 层土的压缩模量。

具体计算采用笔者与中科院秦四清教授合作开发的复合地基设计与地基基础沉降集成分析系统软件进行计算。

原始数据
基础类型：矩形基础
荷载类型：竖直均布荷载
基础底面埋深：1.45 m
基础长度：54.00 m
基础宽度：18.60 m
地下水位：1.95 m
土层数：11
基底应力标准值：500.00 kPa
桩长：17.50 m

土层编号	土层厚度/m	压缩模量/MPa	天然容重/(kN·m^{-3})
1	2.20	1.00	18.00
2	3.60	2.00	20.00
3	7.50	16.00	20.00
4	5.80	21.00	20.00
5	6.60	20.00	20.00
6	2.80	20.00	20.00
7	6.50	25.00	20.00
8	3.40	14.60	20.00
9	1.20	25.10	20.00
10	6.00	80.00	20.00
11	5.50	50.00	20.00

目标计算点坐标：$x=32.00$ m　　$y=9.30$ m
沉降计算深度：40.042 m

计算结果

土层编号	沉降计算深度/m	修正前的沉降量/mm	修正后的沉降量/mm
1	2.20	—	—
2	5.80	—	—
褥垫层	11.65	5.00	5.00
3	13.30	20.09	4.02
4	19.10	77.77	15.55
5	25.70	122.87	24.57
6	28.50	139.96	27.99
复合地层底界	29.15	144.03	28.81
7	35.00	201.90	40.38
8	38.40	248.73	49.75
9	39.60	257.49	51.50
10	40.04	258.47	51.69

褥垫层的沉降量：5.00 mm
复合土层的沉降量：28.81 mm
下卧层的沉降量：22.89 mm
沉降计算范围内的内侧限变形模量的加权平均值：37.34 MPa
沉降计算经验系数：0.20
修正前的最终沉降量：263.47 mm
修正后的最终沉降量：51.69 mm
最终沉降量经计算小于 60 mm，完全满足设计要求。
经验算最大倾斜值为 1‰，完全满足小于 2‰的要求。

4.2.8　CFG 桩布置及褥垫层设置

根据以上计算结果，CFG 桩桩径为 400 mm，桩长 18.0 m，桩尖进入卵石⑥层至少 0.3 m。呈正方形布置，间距为 1.5 m×1.5 m，每栋楼为 574 根，总桩数为 1148 根。桩身强度均为 C25。基槽开挖至标高 29.80 m 时开始进行 CFG 桩施工。桩顶混凝土灌注到 29.80 m。施工完毕后截桩头至标高 29.30 m；然后虚铺厚 22 cm 碎石垫层压密至 20 cm 厚，即槽底设计标高 29.50 m。

4.3　CFG 桩复合地基检测设计

采用静载荷试验对地基加固效果进行检测，同时用小应变动测方法检测桩身质量。

4.3.1　载荷试验

CFG 桩施工完 21 天，方可进行静载荷试验，以检测复合地基的承载力，要求单桩承载力特征值 780 kN，复合地基承载力特征值 500 kPa。

进行静载荷试验由甲方委托第三方负责完成，试验桩位及桩数由甲方及监理确定，要求静载试验每栋楼不少于 3 组，试验前，应将桩头 29.80 m 标高

万方数据

下凿 1.0 m,用内径 400 mm、长 1.0 m 钢护筒套住,再用 C30 早强混凝土接至 29.30 m 标高,避免桩头压裂,试验过程由试验单位编写方案。

4.3.2 小应变动测

由监理或甲方选定不少于总桩数的 10% 进行桩身质量检测,桩身质量检测桩位由甲方及监理确定,要求应均匀抽测,代表性好,检测过程由试验单位编写方案。

4.3.3 混合料试块强度检测

每天(不超过 100 m^3)做二组试块,检验其强度能否满足设计要求的 C25。

5 CFG 桩复合地基施工

本工程于 2000 年 11 月 20 日进场,2001 年 1 月 6 日检测完毕全部撤场,包括春节假期在内,共历时 58 天,其中主要施工期为 2000 年 12 月 12 日至 2001 年 1 月 2 日。

施工现场基坑的坑壁为直立式,保护桩的位置距坑壁的距离太近,加之地面上局部有暖气管道,长螺旋钻机无法就位,结合保护桩的作用、地下水位的高度及施工工期等因素,在保证工程安全与质量的前提下,部分保护桩采用了人工大直径挖孔施工;同时在施工的局部区域,由于考虑承载力、沉降均匀及地下水位的影响,采用了冲击成孔的方式,在场地受限制的条件下,保证了施工质量及工期。

本次施工为 C、D 两座,先施工 C 座,后施工 D 座,由于场地的限制及其它原因,采用了 3 种不同的成桩方式,共完成 CFG 压灌桩 1363 根,人工成桩 72 根,冲击钻成桩 7 根,共计成桩 1442 根,完成总进尺 24984 m,完成总方量 3281.9 m^3。

CFG 桩施工过程中分工明确,责任到人。有关控制轴线由甲方测至槽底,桩位由我公司测量及有关技术人员测放,桩孔垂直度、深度由司钻及质检员测量控制,混凝土质量由搅拌站当班班长及我公司技术员测量控制,混凝土灌注由司钻、信号工、地泵工及技术员测量控制。每道工序都经甲方监理验收合格,满足了设计及规范的要求。

6 CFG 桩复合地基检测情况

施工结束后,经委托第三方进行了检测,由北京市建设工程质量检测中心第三检测所对 CFG 桩复合地基进行了静载试验检测,由中国地震局地壳应力研究所工程测试研究中心对 CFG 桩进行了低应变动力检测。

该试验均未达到极限值,采用 $S/B \leqslant 0.01$ 所对应的荷载作为复合地基承载力基本值。据此,确定出以上 8 组单桩复合地基承载力特征值均大于 500 kPa。静载试验结果见表 1。

表 1 静载试验结果汇总

楼号	桩号	加荷载/kPa	历时/min	沉降量/mm
C 座	248	1400	1080	9.88
	265	1400	1080	10.30
	526	1400	1080	10.28
	588	1400	1080	4.08
D 座	207	1400	1170	8.63
	219	1400	1080	8.27
	441	1400	1200	8.93
	482	1400	1140	9.33

低应变动测,C、D 座楼各抽测 110 根。C 座楼桩身平均纵波波速为 2530 m/s,标准偏差为 150 m/s,离散系数 5%。测试结果表明 104 根桩身完整,占所检测桩数的 94.5%,5 根桩身基本完整,1 根桩桩头附近存在缺陷,计算桩长在 17.0 ~ 17.6 m。D 座楼桩身平均纵波波速为 2610 m/s,标准偏差为 196 m/s,离散系数 7%。测试结果表明 106 根桩桩身完整,计算桩长在 17.0 ~ 17.7 m。C、D 座楼场地工程桩未发现严重缺陷桩,综合评定 CFG 桩施工质量为优。

7 进一步的改进建议

由上述工程实例可以看到,在该地层中采用普通 CFG 桩复合地基方法,还有潜力可挖,结合地层情况,可进一步考虑采用长、短结合桩方法,既可保证承载力又能满足最终沉降量要求,还可进一步降低造价,取得更好的经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] JGJ 79 - 2002,建筑地基处理技术规范[S].
[2] GB 50007 - 2002,建筑地基基础设计规范[S].
[3] GB 50011 - 2001,建筑抗震设计规范[S].
[4] 阎明礼,张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 中国水利水电出版社,2001.
[5] 曹凤学,王之军,何世鸣. CFG 桩复合地基在中央电视台摄影棚的应用[J]. 探矿工程,2002,(增刊).
[6] 王志勇,何世鸣. 超流态混凝土压灌工艺在 CFG 桩复合地基施工中的应用[J]. 水利水电钻探,2000,(1).
[7] 何世鸣. CFG 短桩复合地基技术用于高层建筑地基处理的探讨[J]. 探矿工程,1999,(4).

万方数据