

桂林某高层建筑局部地基的细口径 CFG 桩法设计 Thin Caliber CFG Pile Composite Foundation Design of a Tall Building in Guilin

程亚平^{1,2}

CHENG Ya-ping^{1,2}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西环境工程与保护评价重点实验室, 广西桂林 541004)

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. The Guangxi Key Laboratory of Environmental, Protection and Assessment, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:结合桂林某高层建筑局部地基处理工程实例, 阐述 CFG 桩复合地基的设计步骤、桩体材料的配制、施工工艺、质量检测、工期及工程预算等, 并根据规范及经验公式进行相关计算, 为一定条件下高层建筑局部地基设计提供参考。

关键词:CFG 桩 复合地基 地基处理

中图分类号:TU472.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2011)01-0065-03

Abstract: Based on the local foundation treatment projects of some tall building in Guilin, the design steps of composite foundation of the CFG pile, the preparation of pile material, the construction technology, the quality inspection, the schedule and project budget are discussed. The related calculations were carried out according to the specifications and empirical formula. The projects can provide reference for local foundation design of tall building under certain conditions.

Key words:CFG pile, composite foundation, ground treatment

中国建筑科学研究院地基研究所在 20 世纪 80 年代末期研究开发了水泥粉煤灰碎石桩(简称 CFG 桩), 1988 年进行各项试验研究, 并把该方法开始应用于工程实践。20 多年来, 国内许多学者和工程技术人员对该方法进行了大量的研究。CFG 桩具有施工工艺简单、造价低、施工速度快等特点, 适用于高层建筑的地基处理, 处理的地基土包括杂填土、素填土、新近沉积土、淤泥、淤泥质土及一般承载力较低的粘性土、粉土、砂土、黄土等^[1]。

随着 CFG 桩设计施工技术的成熟和推广, 该项成果在工程实践中得到了广泛的应用。据不完全统计,

该技术已在全国 23 个省、市的数千个工程中推广使用^[2]。和桩基相比, 由于 CFG 桩桩体材料可以掺入工业废料粉煤灰, 不配钢筋以及充分发挥桩间土的承载力, 工程造价一般为桩基础的 1/3~1/2, 经济效益和社会效益都很显著。

本文运用 CFG 桩对桂林某高层建筑局部地基场地进行设计, 介绍 CFG 桩复合地基的设计步骤、桩体材料的配制、施工工艺、质量检测、工期及工程预算等, 并根据规范及经验公式进行了相关计算, 为一定条件下高层建筑局部地基处理设计提供参考。

1 场地工程地质条件

桂林市七星新城位于桂林市高新技术开发区, 桂大路西面、五里店路南面。根据七星新城 G-6~G-9 四栋高层建筑岩土工程勘察报告, G-7 栋住宅楼(12 层)基础类型拟采用筏板基础, 经基坑开挖后在

收稿日期: 2010-04-16

修回日期: 2010-06-08

作者简介: 程亚平(1978-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事水文地质工程地质方面的教学与科研工作。

局部地段发现基底土质较松软,又在软弱土层地段超挖 2.33m。钻探和测试结果表明,超挖部分下部仍有 1.2~3.2m 厚的软塑粘土,该区内地基承载力特征值未能满足设计要求,需对其进行地基加固处理,设计要求加固处理后复合地基承载力特征值不小于 190kPa。故建议 G-7 栋优先考虑天然地基,以含卵砾石粘土层和硬塑粘土层作为基础持力层。当软塑粘土不能满足强度和变形要求时,进行局部地基处理,提高其承载力及压缩模量,然后以复合地基、硬塑粘土及含卵砾石粘土层共同作为基础持力层。

拟建场地原为砂轮厂厂房,现已被拆除,勘察时场地基本平坦。场地地貌属漓江左岸 II 级阶地。由现场调查及钻探揭露可知,拟建场地主要土层有:(1)杂填土(Q^{ml}),场地内分布较普遍,厚度一般在 0.5m;(2)素填土(Q^{nl}),除个别地段外,其它地段均有分布,该层分布极不均匀,厚度为 0~2.40m 不等。(3)粘土(Q^{nl+pl}),局部地段出露,呈可塑~硬塑状态;(4)-1 含卵砾石粘土(Q^{nl+pl}),整个场地均有分布,其厚度随深部基岩起伏而变化。由试验结果可知,该层含卵砾石粘土为中低压缩性土;(5)石灰岩(D_3r)。勘察没有钻入岩石,从邻近资料可知,该石灰岩岩面起伏较大,溶沟、石芽较为发育。各土层物理、力学性能见表 1。

表 1 G-7 栋各土层的物理力学参数

土层名称	厚度 (m)	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	压缩模量 E_s (MPa)
杂填土	0.5m	—	—
素填土	0~2.40m	—	—
硬塑粘土	0~7.50m	190	5.0
硬塑含卵砾石粘土	5.50~24.50m 仍未钻穿该层	220	6.0
石灰岩	基岩	4000	—

根据勘察报告,在场地质探时大部分钻孔未遇到地下水,钻探结束后部分钻孔观测到地下水位,稳定水位埋深为 5.00~11.00m。大部分地下水位埋深在 8.00m 以下,最浅水位 5.20m。该区地下水类型为潜水,主要靠大气降水补给。根据附近场地资料,该区地下水变幅约 2~3m,对混凝土无腐蚀性。

2 地基处理方案分析

根据场地工程地质条件、上部建筑物荷载要求综合考虑,应优先利用天然地基。将杂填土层和素填土层挖除,以粘土层和含卵砾石粘土层作为基础持力层。当软塑粘土层不能满足强度与变形要求

时,进行局部地基加固处理。根据场地特点、地基承载力要求以及桂林市施工设备等条件,可初步选用换土垫层法、CFG 桩法、水泥土搅拌法等地基处理方案。

在局部软弱地段已开挖 4.20m,需处理的下卧软弱土层平均深度为 3.0m,如采用换土垫层法则需继续开挖 3m 左右。此时在基坑开挖过程中可能需要进行基坑支护,且基底已非常接近地下水位,如继续开挖则需进行基坑排水处理,此设计在经济上不允许,也可能给后继施工造成困难,因此不宜继续开挖采用换土垫层法。

此局部软弱地层——软塑粘土是在基坑开挖过程中出现的,面积约为 160m²,分布没有规律,较为平整的场地条件已遭受破坏,不适宜大型机械作业,因此亦不宜采用水泥土搅拌法进行地基加固处理。

经过多个方案技术、经济分析比较,确定采用细桩径小桩距 CFG 桩复合地基进行本地地基加固处理。运用 GY50-1 型钻机进行场地施工,此型钻机可方便地进出已开挖场地。工程实践已证明,CFG 桩复合地基对于各种基础形式,无论是软土还是承载力在 200kPa 左右的较好地层,都可大幅度提高地基承载力。比如,山东省德州地区医药管理局 3 栋 17 层的高层住宅群楼,天然地基承载力 110kPa,经桩体标号为 C10 的 CFG 桩处理后,复合地基承载力达到了 370kPa^[3]。因此,本工程要将天然地基承载力在 100~150kPa 左右的软塑粘土经处理后达到 190kPa,采用该技术应该是可行的。而且从原理上看,桩体、桩间土和褥垫层一起组成的 CFG 桩复合地基,通过在桩顶设置褥垫层让桩有向上刺入的可能,使桩、土协调变形,从而保证桩、土共同承担荷载;并通过褥垫层的不同厚度调整桩、土垂直荷载和水平荷载的分担比,减小基础底面的应力集中。对于本工程,考虑到桂林市粉煤灰原料不足,为了满足结构要求,地基处理设计时选择了素混凝土作为桩体材料,桩体混合料强度等级为 C10。

3 CFG 桩复合地基设计及施工工艺

3.1 地基设计

所采用的细桩径小桩距 CFG 桩复合地基设计参数如下:复合地基承载力特征值 $f_{spk} \geq 190kPa$,桩径 $D = 0.22m$,桩间土承载力特征值 $f_{sk} = 100kPa$,桩侧阻力特征值 $q_s = 18kPa$,桩端阻力特征值 $q_p = 220kPa$,需进行地基加固处理面积约为 160m²,平均有效处理深度 3.0m,充盈系数为 1.2。

CFG 桩单桩竖向承载力特征值 R_a 按下式估

$$\text{算}^{[4]}: R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_{pa} A_p$$

CFG 桩桩体混合料抗压强度设计值 f_{ca} 按下式

$$\text{计算}^{[4]}: f_{ca} = 3 \frac{R_a}{A_p}$$

$$\text{面积置换率计算公式}^{[4]}: m = \frac{f_{spk} - \beta f_{sk}}{R_a - \beta f_{sk}}, \text{桩}$$

距: $l = \sqrt{\frac{A_p}{m}}$ 桩数: $N = m \frac{A}{A_p}$, 式中: u_p 是桩的周
长(m); n 是桩长范围内所划分的土层数; q_{si} 是桩
周第 i 层土的侧阻力特征值(kPa); q_{pa} 是桩端端阻
力特征值(kPa); l_i 是第 i 层土的厚度(m); f_{ca} 是
桩体混合料抗压强度设计值(MPa); A_p 是桩的截面积
(m^2); β 是桩间土承载力折减系数, 宜按地区经验
取值; f_{sk} 是处理后桩间土承载力特征值(kPa)。

将各参数代入以上各式计算, 计算结果见表 2,
CFG 桩设计参数示意图如图 1 所示。

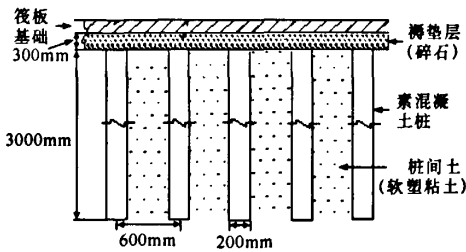


图 1 CFG 桩设计参数

表 2 CFG 桩复合地基设计参数

桩径 (mm)	桩长 (m)	桩距 (m)	桩数 (根)	单桩承 载力特 征值(kN)	面积置 换率	桩体 强度 (MPa)	褥垫层 厚度(cm)	成分
220	3.00~3.50	0.60	446	45	0.106	10	30	级配碎石

CFG 桩复合地基基础总沉降量 S 由 3 部分组
成, 其一为桩长范围土层的压缩量 S_1 ; 其二为下卧
层的压缩量 S_2 ; 其三为褥垫层的压缩量 S_3 。由于褥
垫层的厚度不大, 压缩变形量很小, 通常可以忽略不
计, 这样, 总的沉降量为加固区和下卧层压缩变形量
之和, 即 $S = S_1 + S_2$ 。复合地基最终变形量可按

表 3 复合地基沉降变形量计算结果

分层号	z_i (m)	l/b	z/b	$\bar{\alpha}_i$	$z_i \bar{\alpha}_i$ (mm)	$z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}$ (mm)	$\frac{p_0}{E_n}$	Δs_i (mm)	$\sum \Delta s_i$ (mm)	$\frac{\Delta S_n}{\sum \Delta S_i}$
1	0	1.455	0	1	—	—	—	—	—	—
2	1.40		0.364	0.9928	1389.92	1389.92	0.029	40.31	—	—
3	2.30		0.597	0.9784	2250.32	860.40	0.022	18.93	—	—
4	3.00		0.779	0.9564	2869.20	618.88	0.017	10.52	—	—
5	13.00		3.377	0.5670	7371.00	4501.80	0.032	144.06	—	—
6	13.80		3.584	0.5462	7537.56	166.56	0.032	5.33	219.15	0.024

式计算^[4]:

$$S = \Psi \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{\xi E_n} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p_0}{E_n} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right],$$

式中: n_1 是加固区范围内土层分层数; n_2 是沉降计
算深度范围内土层总的分层数; P_0 是对应于荷载效
应准永久组合时的基础底面处的附加压力(kPa); E_n
是基础底面下第 i 层土的压缩模量(MPa); z_i ,
 z_{i-1} 是基础底面至第 i 层土, 第 $i-1$ 层土底面的距离
(m); $\bar{\alpha}_i$, $\bar{\alpha}_{i-1}$ 是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; ξ 是加固区土
的模量提高系数; Ψ 是沉降计算修正系数;

根据复合地基最终变形量计算公式, 可得本场
地复合地基沉降量为 219.15mm, 计算结果见表 3。
查表可得沉降计算修正系数 $\Psi = 0.8$, 故最终复合
地基沉降量为 175.32mm, 符合《建筑地基基础设计
规范》(GB50007-2001) 中关于“体型简单的高层建
筑基础的平均沉降量允许值”为 200mm 的有关规
定。另外, 在场地其它 3 个地方进行了天然地基沉
降量监测, 其沉降量分别为 169.73mm, 172.45mm,
173.67mm, 基本与复合地基沉降量一致, 符合设计
要求。

3.2 施工工艺

本场地投入 4 台 GY50-1 型钻机施工, 施工时
先用 GY50-1 型钻机以 $\Phi 220$ 钻具成孔至设计要
求的深度, 按 C10 配合比搅拌混凝土料, 灌入孔内捣
实, 充盈系数为 1.2, 施工工期为 20d, CFG 桩总桩
数为 446 根, 桩身素混凝土单价为 478 元/ m^3 , 褥垫
层所铺设的碎石单价为 50 元/ m^3 , 人工费为 50 元/
天, 工程总造价为 31845.8 元。

施工结束后由桂林矿产地质研究院工程勘察院
负责质量检测, 根据检测中心的静荷载检测结果, 经
甲方、监理共同随机抽取试验点, 3 个点位复合地基
承载力特征值平均值(196.5kPa), 该工程复合地基

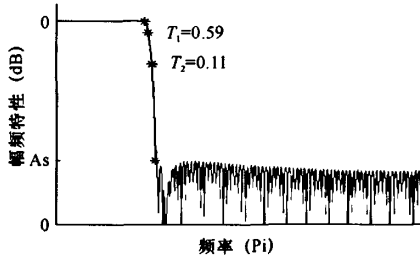


图1 $T_1 = 0.59, T_2 = 0.11, \alpha_s = 68.53\text{dB}$ 时的幅频特性

由表3计算结果可见,在 α_p 相近的情况下,采用不同的过渡带频率采样值,都能达到60dB以上的阻带最小衰减,而在 $T_1 = 0.59, T_2 = 0.11$ 时阻带最小衰减达到最大绝对值 $\alpha_s = 68.53\text{dB}$,与文献[1]中叙述的频率采样法过渡带采样参数 T_1, T_2 对所设计滤波器的幅频特性的影响表现一致,即适当选取 T_1, T_2 值,则能在频率采样点个数 N 、过渡带频率采样点个数 M 一定的情况下得到阻带最小衰减 α_s 的最大值。

而对于设计过程第三步中对滤波器冲激响应的计算,即计算 $h(n)$,除采用IDFT外,也可采用fir2函数进行计算,其程序语句为:

$$hn = \text{fir2}(N-1, F, H)$$

矢量 F 指定范围在0和1之间的归一化频率点,矢量 H 具体指定了由 F 指定的频率点的期望的幅度响应。该函数的具体使用方式可以参照文献[6]。

3 结束语

频率采样法是一种有效的FIR滤波器设计方

法,利用频率采样法可以设计任意频率响应特性的数字滤波器。我们针对该方法的设计特性,对其设计过程进行了总结并论述了特定参数的设计范围,并在MATLAB环境下,完成了一个FIR滤波器设计与仿真过程。仿真结果表明适当选取过渡带采样点的采样值,能在频率采样点个数 N 、过渡带频率采样点个数 M 一定的情况下得到阻带最小衰减 α_s 的最大值。

参考文献:

- [1] Rabiner L R, Gold B, McGonegal C A. An approach to the approximation problem for nonrecursive digital filters[J]. Audio Electroacoustics, 1970, 18: 83-106.
- [2] 丁玉美, 陶永红. 数字信号处理: 原理、实现及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [3] Martin M A. Digital filters for data processing[M]. Missile and Space Div General Electric Co Tech Information Series Rept, 1962: 62-SD484.
- [4] Harris S P, Ifeachor E C. Automatic design of frequency sampling filters by hybrid Genetic Algorithm Techniques[J]. Signal Processing, 1998, 46(12): 3304-14.
- [5] 陈怀琛. 数字信号处理教程: MATLAB 释义与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [6] Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W Jervis. 数字信号处理实践方法[M]. 第2版. 罗鹏飞, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] Crochiere R E, Rabiner L R. Interpolation and decimation of digital signals—a tutorial review[J]. Proc IEEE, 1981, 69(3): 300-31.

(责任编辑: 邓大玉)

(上接第67页)

承载力特征值设计要求为190kPa。根据试验结果可知, CFG桩复合地基承载力达到了设计要求^[5]。

4 结束语

在岩溶地区, 基岩面起伏, 局部地段软弱土层发育(主要在溶沟、溶槽等部位), 利用细桩径CFG桩处理地基, 能充分利用桩间土天然地基承载力组成复合地基, 在桩体无钢筋的情况下, 复合地基承受垂直和水平荷载的能力大大加强^[6]。桂林某高层建筑局部软弱地层地基处理的设计、施工和检测成果表明, 细桩径CFG桩适用于高层建筑复合地基加固处理, 采用高粘结强度复合地基是一种有效的地基处理方法, 它具有强度高、造价低、工艺简单、适用性强、工期短等特点, 在场地狭小, 不宜大面积开挖以

及地下水埋深较浅时具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 李掠京, 化建新. CFG桩复合地基问题[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(6): 271-274.
- [2] 郑俊杰. 地基处理技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [3] 徐至钧, 王曙光. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] JGJ 79-2002, J 220-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [5] 张玉池. 桂林市某高楼复合地基静载荷试验检测报告[P]. 桂林: 桂林矿产地质研究院工程勘察院, 2006.
- [6] 莫健, 杨秋华. CFG桩在岩溶地区的应用[J]. 山西建筑, 2005(19): 91-92.

(责任编辑: 尹 闯)