

卵石地层中 CFG 桩的设计及其施工技术

李开洋¹, 薛倩冰¹, 陈永前², 李 凤³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学实验室), 北京 100085; 3. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要:某工程项目位于北京市门头沟区, 场地内卵石、碎石地层层厚大, 施工困难, 选用 CFG 桩进行地基处理。考虑场地地层条件、施工设备、项目工期以及工程造价, 按变形控制对 CFG 桩进行设计, 同时根据场地条件及 CFG 桩特点制定了施工流程。对 CFG 桩施工中可能出现的问题, 提出了相应的质量控制措施, 如埋设护筒、选用合适的旋挖钻头。

关键词: CFG 桩; 设计; 变形控制; 卵石地层

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)07-0062-03

Design and Construction Technology of CFG Pile in Pebble Stratum/Li Kai-yang¹, XUE Qian-bing¹, CHEN Yong-qian², LI Feng³ (1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China; 3. Hebei Earthquake Administration, Shijiazhuang Hebei 050021, China)

Abstract: The paper introduces an engineer project in Mentougou of Beijing, the construction was difficult because of the thick pebble and crushed stone layer in the site, CFG pile was selected for foundation treatment. In view of the formation conditions, construction equipments, project construction period and cost of the project, CFG pile was designed with deformation control and according to the site conditions and the characteristics of CFG pile, construction process was formulated. For the problems may arise in the CFG pile construction, the corresponding quality control measures are put forward, such as embedment of steel protective pipe and selection of appropriate rotary drilling bit.

Key words: CFG pile; design; deformation control; pebble stratum

0 前言

CFG 桩全称为水泥粉煤灰碎石桩(Cement Fly-ash Gravel Pile), 是一种由碎石和粉煤灰掺适量水泥加水拌和, 用成桩机械在地基中制成的高粘结强度桩。CFG 桩不配用钢筋, 桩体所用的材料部分是工程的边角废料粉煤灰, 大大降低了工程的成本。另外, 经过改进之后, CFG 桩的施工环境也比其他工法要安静和环保。因此, CFG 桩一开发出来就在全国迅速推广并得到广泛应用, 取得良好的经济效益和社会效益^[1,2]。

CFG 桩的组成如图 1 所示, 包括桩体、垫层、桩间土等。CFG 桩承载力主要来自全桩长的侧摩阻力及端阻力, 桩越长则承载力越高。在上部荷载的作用下, 由于桩、土模量相差较大, 土的沉降量要大于桩的沉降量, 使得桩身出现等沉面。等沉面以上的桩间土将相对桩体向下移动, 从而对桩产生负摩阻力, 而在等沉面以下, 桩体相对于桩间土向下移动, 故桩间土对桩体产生正摩阻力。带有垫层的低

强度混凝土桩复合地基中桩侧负摩阻力的大小随荷载加大而变小, 同时中性点位置逐渐上移, 相当一部分上部土层的摩阻力随着荷载的加大由负摩阻力逐渐变为正摩阻力, 使桩下部的摩阻力得到充分发挥。同时, 也使桩周土体的承载力得到了增强。通过垫层土的补偿作用, 充分发挥复合土体的强度^[3]。

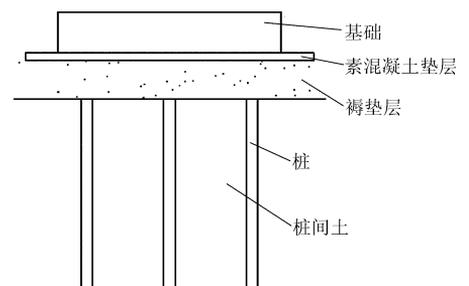


图 1 CFG 桩复合地基示意图

1 CFG 桩设计思想

在 CFG 桩复合地基的设计中, 承载力和变形量是最重要的 2 个指标, 必须都满足设计才能合格。

收稿日期: 2014-02-26; 修回日期: 2014-05-30

作者简介: 李开洋(1990-), 男(汉族), 广西桂平人, 中国地质大学(北京)硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事工程地质方面的研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学(北京)工程 S12 班, likaiyang1990@126.com。

因此产生了 2 种不同的设计思想^[4]。

1.1 承载力控制设计

按承载力控制设计的思路是先满足地基承载力要求,然后验算沉降是否满足要求。如果沉降不能满足要求,则考虑提高地基承载力,再验算沉降是否满足要求。如沉降还不能满足要求,再提高地基承载力,然后验算沉降是否满足要求,直至两者均能满足要求为止。这种思路主要运用于端承桩桩基础、浅基础及复合地基的设计。

1.2 变形控制设计

按沉降变形控制设计就是指一种以控制地基的变形量为原则,主要是让地基实际变形量小于允许变形量,对桩体的承载力没有严格要求,只要单桩荷载小于单桩极限承载力就可以了,校核地基的整体承载力。在沉降满足要求的条件下,地基承载力一般情况下都能满足要求。如承载力不能满足要求,适当增加复合地基置换率或增加桩体长度,使承载力也满足要求即可。

规范^[5]规定 CFG 桩的承载力和变形量计算,应按以下公式进行:

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

式中: f_{spk} ——复合地基承载力特征值,kPa; λ ——单桩承载力发挥系数,宜按当地经验取值,无经验时可取 0.7~0.90; m ——面积置换率; R_a ——单桩竖向承载力特征值,kN; A_p ——桩的截面积, m^2 ; β ——桩间土承载力折减系数,宜按地区经验取值,如无经验时可取 0.75~0.95,天然地基承载力较高时取大值; f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值,kPa,宜按当地经验取值,如无经验时,可取天然地基承载力特征值。

计算地基变形时,地基内的应力分布可采用各向同性均质线性变形体理论,其最终变形量可按式计算:

$$s = \Psi_s s' = \Psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \quad (2)$$

式中: s ——地基最终变形量,mm; s' ——按分层总和法计算出的地基变形量,mm; Ψ_s ——沉降计算经验系数,根据地区沉降观测资料及经验确定; n ——地基变形计算深度范围内所划分的土层数; p_0 ——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_{si} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量,MPa,应取土的自重压力至土的自重压力与附加压力之和的压力段计算; 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; α_i 、 α_{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,可按文献^[5]附录采用。

2 工程实例

2.1 CFG 桩设计

某工程项目位于北京市门头沟区大峪南路北侧,黑山大街西侧,拟建建筑物包括 3 栋高层住宅和地下车库。项目地貌上位于中门寺沟沟口的缓坡地带,东侧紧邻门头沟平原,地形整体北高南低。根据野外钻探、原位测试及室内土工试验成果的综合分析,勘探深度(38.0 m)范围内的地层划分为人工填土层,一般第四系冲洪积、坡洪积成因的粉土、粘性土、砂土和碎石土及二叠纪~三叠系双泉组粉砂岩。本次勘察期间所有钻孔(最大钻探深度 38.0 m)均未见地下水。另有资料,拟建场地历年最高地下水位曾接近自然地面,近 3~5 年潜水最高地下水位埋深 >40.0 m。地层情况如表 1 所示。

表 1 地层综合评述表

层号	土层名称	平均层厚/m	压缩模量 E_{si} /MPa	桩端极限承载力标准 值/kPa	桩侧极限摩阻力标准 值/kPa	综合评述
①	杂填土	2.7			40	以碎石、石块为主,含灰渣和砖屑
②	粉质粘土	4.9	6.55		30	含氧化铁和氧化锰,局部含少量碎石
③	碎石	1.7	25		75	碎石呈次棱角形,一般粒径 2~4 cm,最大粒径 10 cm
④	粘质粉土	8.7	8.14		35	含氧化铁和氧化锰,局部含少量碎石
⑤	碎石	6.9	35	3200	68	粒径 2~5 cm,含量约 65%,母岩成分以砂岩为主

项目基础埋深 4 m,要求承载力 >250 kPa,变形量 <60 mm。

文献^[1]指出,CFG 桩复合地基采用大桩距布桩,能够较好地调动桩间土的承载力,先让土的承载能力充分发挥作用,不够的部分再由 CFG 桩承担,这样可以减少桩的数量。工程场地的土层条件较好,可以考虑选用大桩径疏散布桩。另外桩径越大,所需桩数越少,施工工期越短,对项目的进度有较大的帮助。

综上,项目按照控制变形来对 CFG 桩进行设计,取桩径 $D = 800$ mm。选碎石层⑤作为持力层,则桩长 $L = 15$ m。

桩的周长 $u_p = \pi D = 2.51$ m,截面积 $A_p = 0.503$ m^2 ,单桩承载力:

$$\begin{aligned}
 R_a &= u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p \\
 &= [2.51 \times (30 \times 3.6 + 75 \times 1.7 + 35 \times 8.7 + \\
 &\quad 68 \times 1) + 3200 \times 0.503] / 2 \\
 &= 1568 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

沉降最后要求小于 60 mm, 沉降经验修正系数 $\Psi = 0.68$, 则由变形计算公式计算的最大允许沉降量:

$$S_{\max} = 60 \div 0.68 = 88.24 \text{ mm}$$

在 CFG 桩设计当中, 所使用的压缩模量 E_{si} 应当是桩与土的复合之后的压缩模量 E_{si}' , 它们之间关系为 $E_{si}' = \xi E_{si}$ (其中 ξ 为压缩模量比)。对于某个已知工程场地来说, 地层已经确定, 所以, 压缩模量 E_{si} 都是一个定值。因此由公式(2)可知, 地基变形量 s 与压缩模量比 ξ 成反比, 比例系数为:

$$\Psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (\bar{z}_i \alpha_i - \bar{z}_{i-1} \alpha_{i-1})$$

计算基地附加压力:

$$p_0 = 250 - \gamma h = 250 - 19.5 \times 4 = 172 \text{ kPa}$$

计算比例系数如表 2 所示。

表 2 比例系数计算表

Z/m	Z/B	$\bar{\alpha}_i$	$\bar{\alpha}_i z_i$	$\bar{\alpha}_i z_i - \bar{\alpha}_{i-1} z_{i-1}$	E_{si}/kPa
0	0	1	0		
1.5	0.1	0.998	1.497	1.497	6550
3	0.2	0.993	2.979	1.436	6550
4.5	0.3	0.981	4.415	1.436	25000
6	0.4	0.963	5.778	1.364	8140
7.5	0.5	0.940	7.050	1.272	8140
9	0.6	0.914	8.226	1.176	8140
10.5	0.7	0.887	8.870	1.088	8140
12	0.8	0.859	10.050	0.995	8140
13.5	0.9	0.831	11.219	0.911	8140
15	1.0	0.804	12.060	0.842	35000
16	1.07	0.779	12.464	0.404	35000

注: Z——埋深, m; B——基础宽度, 本项目中 $B = 15 \text{ m}$ 。

可计算得比例系数:

$$\Psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (\bar{z}_i \alpha_i - \bar{z}_{i-1} \alpha_{i-1}) = 0.161 \text{ m}$$

根据最大允许变形量计算压缩模量比:

$$\xi = [\Psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (\bar{z}_i \alpha_i - \bar{z}_{i-1} \alpha_{i-1})] / S_{\max} = 1.83$$

根据文献[5], CFG 桩复合地基的承载力特征值为:

$$f_{\text{spk}} = \xi f_{\text{ak}} = 256.2 \text{ kPa} > 250 \text{ kPa}$$

满足承载力要求。

此时, 根据公式(1), 考虑到场地地质条件较好, 取 $\lambda = 0.9$, 可得面积置换率:

$$m = \frac{f_{\text{spk}} - \beta f_{\text{ak}}}{\lambda (R_a / A_p - \beta f_{\text{ak}})} = 0.049$$

然后, 根据桩间距计算公式, 可得桩间距:

$$S_a = D / (1.13 \sqrt{m}) = 3.2 \text{ m}$$

所以, $S_a = 3.2 \text{ m}$ 是 $D = 800 \text{ mm}$ 、 $L = 15 \text{ m}$ 时所能取的最大桩间距。考虑到工程质量及施工等因素, 最终确定桩间距为 3 m, 此时 CFG 桩复合地基承载力和变形均满足设计要求。

2.2 CFG 桩施工质量控制

旋挖钻机在砂卵石地层中的成孔流程大致是: 桩位放样、埋设护筒、旋挖钻机就位、调整钻机垂直度、护筒内补充优质泥浆、钻头钻进、清理堆放^[6]。

2.2.1 埋设护筒

在本工程的场地中, 上部是碎石层和角砾层, 而且结构都比较松散。在施工中, 最开始的几个钻孔因为没有埋设护筒, 孔口在成孔过程中受到起下钻头的扰动, 上部松散的碎石和土就会掉落钻孔中, 导致桩孔孔口扩大了许多(见图 2), 对后续施工及桩的质量都有一定影响。因此在施工前要埋设护筒。



图 2 桩孔坍塌情况

2.2.2 旋挖钻头的选用

耐磨硬质合金钢铲式斗齿旋挖钻头主要用于较浅的地层, 因为浅层的土层中基本为砂层及粒径较小的卵石层, 所以使用钢铲式斗齿能够获得较快的施工进尺。当钻进至大粒径卵石层时, 则需要更换耐磨硬质合金子弹头截齿旋挖钻头继续钻进, 因为耐磨硬质合金子弹头截齿可将大粒径卵石切割、碾碎成可进入钻头的小块。本工程项目中, 主要是在浅层中钻进, 故选用钢铲式斗齿旋挖钻头。

2.3 施工效果

根据规范要求, 施工完成之后, 随机抽取场地内 20 根 CFG 桩进行低应变反射波法检验, 结果显示 19 根桩身完整, 1 根在桩顶下 2 m 处有轻微缺陷, 满足工程要求。说明设计方法可行, 施工质量控制措施合理有效。

(下转第 69 页)

4 施工中管涌的处理

在苏州地区含地下水的砂层和软土中钻孔施工,套管的摇动会使周围地基土松软,而且套管内外压力差的存在会引起地下水和砂土的流动,特别是孔底极易发生管涌,造成孔底隆起而发生超挖,管涌严重时可将套管卡住,使套管既压不进去又拔不出来,最后只能将套管废弃。受管涌影响范围内的土体可能会产生较大沉降,并有可能引起邻近运营隧道土体的沉降与变形。

为防止管涌的出现,随着开挖深度的增加,套管内土体所需的预留厚度也要增大。特别是遇到含水砂层时,如果钻机的钻进能力许可,可先将套管一次性穿过砂层后再用抓斗抓取管内砂土^[4]。套管内土体的预留厚度可以近似采用基坑抗隆起公式计算,对于一般的冲洪或冲湖沉积地层,不同开挖深度时套管内土体的预留厚度理论值见表3所示^[5]。在实际施工中,预留土厚度一般只能控制在2~3 m,若钻机钻进能力高,预留土厚度还可更大,CGJ1500型搓管机在遇到砂层时,套管超前钻进8 m之多,也即套管内预留土的厚度达到了8 m,成功克服了砂层管涌难题,显示了其强大的钻进能力。

表3 不同深度的预留土厚度

开挖深度/m	预留厚度/m
4	0.02
8	1.9
16	6

5 结语

(1)对于地形条件限制较大的基坑或施工场地周边建筑密集特别是紧邻地铁的基坑,采取全套管钻孔咬合桩支护结构,可以很好地解决基坑施工中遇到的难题。在类似地质条件以及有特殊要求的基坑支护工程中,可以借鉴采用。

(2)全套管钻孔咬合桩在苏州地区高水位条件下饱和粉细砂层中施工,总体上难度较大,管涌问题比较突出,施工控制较难,超灌和拔桩事故多数与管涌有关,解决好管涌问题是关键,要提前做好预案。

(3)全套管钻孔咬合桩垂直度高,防水效果好,成孔无泥浆作业,并可保证无塌孔、振动小,易于文明施工,可减少周边环境的影响。但在该支护结构施工中,需要控制的关键技术很多,对施工人员的要求较高,需要较高的施工技术和管理水平。

参考文献:

- [1] 宋志彬,冯起赠,和国磊,等. CG型全套管搓管成孔设备的研究和应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):69-70.
- [2] 宋志彬,冯起赠,王年友,等. CG型全套管冲抓设备及施工工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):48-50.
- [3] 宋志彬,冯起赠,许本冲,等. 全套管钻进机理和全回转套管钻机的研究[J]. 建筑机械,2013,(23):87-91.
- [4] 张治纯,程森德,何建明,等. 咬合桩在含承压水地层施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(9):45-47.
- [5] 周顺华,郑剑升,何泽刚,等. 冲淤沉积层中新型咬合桩工法及应用[J]. 中国铁道科学,2006,(4):58-59.

(上接第64页)

3 结语

本文是按变形控制思想对CFG桩进行设计,实质就是先计算未处理前地基的变形量,然后计算需要增大多少倍压缩模量才能满足设计要求,CFG桩的作用就是提高地基的压缩模量。设计步骤是首先确定允许的变形量,接着确定比例系数,然后就可以推出CFG桩加固前后的压缩模量比,从而得到承载力特征值,最后计算所需桩数。在设计时,若变形量满足要求,一般承载力也能满足要求;若不满足要求,则对桩径、桩间距等参数进行调整。

CFG桩以其优越的性能在诸多环境中都取得了良好的应用。本工程的实践表明,在卵石地层中,通过埋设钢护筒及使用合适的旋挖钻头,能够较好

地完成CFG桩的成孔施工,进而保证CFG桩的质量。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 地基处理技术与展望[M]. 北京:中国水利水电出版社,知识产权出版社,2004. 247-273.
- [2] Yoshit Maeda, Kiyoshi Omine. Ground Foundation Method In Soft Ground[A]. 22nd US-Japan Bridge Engineering Workshop[C]. Washington US:2006.
- [3] 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.
- [4] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002. 173-182.
- [5] GB 50007-2011, 建筑地基基础设计规范[S].
- [6] 吕军斗,田文杰. 旋挖钻机在无水砂卵石地层围护桩施工中的应用[J]. 建筑技术,2009,40(11):1010-1012.