

CFG 桩复合地基沉降计算探讨

潘 星

(合肥工业大学 土木建筑工程学院, 合肥 230009)

摘 要: CFG 桩 (水泥粉煤灰碎石桩) 复合地基是新近发展起来的一项地基处理技术, 具有承载力提高幅度大, 地基沉降小, 适用范围广, 造价低, 施工方便等特点。阐述了 CFG 桩复合地基加固机理及沉降模式, 详细讨论了其沉降计算, 包括它的计算厚度、影响因素、压缩模量选取及附加压力计算等。提出按变形控制理论进行变形计算有其优点, 但仍有很多工作要做。

关 键 词: CFG 桩; 复合地基; 地基处理; 沉降

中图分类号: TU 473 **文献标识码:** A

Study of settlement analysis of composite foundation of CFG piles

PAN Xing

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Composite foundation of CFG piles is a lately developing technique in ground treatment and characterized by great bearing capacity, little settlement in ground treatment, wide scope of application, low cost, convenient construction, etc. The consolidation mechanism and settlement form of composite foundation of CFG piles, are elaborated. Analysis of settlement was discussed in detail including computing thickness, influential factors, modulus of compressibility choice and computation of additional pressure, etc. Although some merits were put forward based on the theory of settlement control while computation of settlement, there are a lot of works to be done.

Key words: CFG pile; composite foundation; ground treatment; settlement

1 引 言

随着工程建设的迅速发展, 复合地基以其特有的优势得到了越来越广泛的应用^[1]。复合地基^[2]是在天然地基中设置一定比例的增强体, 并由原土和增强体共同承担由基础传来的建筑物荷载的一种人工地基。增强体是由强度和模量相对原土高的材料组成, 习惯上将纵向增强体称作桩。水泥粉煤灰碎石桩^[3] (简称 CFG 桩) 是由碎石、石屑、砂石和粉煤灰掺适量水泥加水拌和, 用各种成桩机械在地基中制成的强度等级为 C5~C25 的桩。CFG 桩复合地基是高粘结强度桩复合地基的代表, 20 世纪 80 年代多用于多层建筑地基处理, 目前大量用于多层和 30 层以下高层建筑地基加固。

2 CFG 桩复合地基加固机理

CFG 桩复合地基加固地基主要有 3 种作用^[4]: 桩体作用、挤密作用和褥垫层作用。当基础承受竖向荷载作用时, 桩与桩间土都要发生沉降变形, 由于桩的模量大于桩间土的模量, 桩比土的变形小, 则会产生荷载逐渐向桩顶集中现象。基础下设置了褥垫层, 可以将上部基础传来的基底压力 (或水平力) 通过适当的变形以一定的比例分配给桩及桩间土, 使二者共同受力。同时, 土由于桩的挤密作用 (指用沉管方法成桩时) 提高了承载力, 而桩由于其周围土的侧应力的增加而改善了受力性能, 二者共同工作, 形成了一个复合地基的受力整体, 共同承担上部基础传来的荷载。

3 CFG 桩复合地基沉降模式^[2, 3]

图 1 描述了复合地基变形性状。图 1 (a) 为荷载 $P=0$ 时的状态。加荷后 ($P>0$), 桩顶发生沉降

为 S_p , 桩间土表面发生沉降为 S_s , 桩端处桩的沉降为 S'_{po} 。由于桩体的模量很大, 在通常荷载水平下, 轴向力引起桩的压缩变形可忽略。这样, 桩任一断面处的位移可认为与桩顶位移相等, 便有 $S'_p = S_{po}$ 。桩端处土的位移用 S'_s (注: S_3 一般很小, 可忽略不计) 表示。这样由图可得:

上刺入变形 $\Delta_{\pm}$: $\Delta_{\pm} = S_s - S_p$

下刺入变形 $\Delta_{\mp}$: $\Delta_{\mp} = S'_s - S'_p$

桩长 Z_a 范围内土的压缩变形量:

$$S_1 = \Delta_{\pm} + \Delta_{\mp}$$

下卧层的压缩变形量 $S_2: S_2 = S_s - S_1$, 褥垫层的压缩变形量 $S_3: S_3 = H_o - H_s$ 。则基础总的沉降量为

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \approx S_1 + S_2 \quad (1)$$

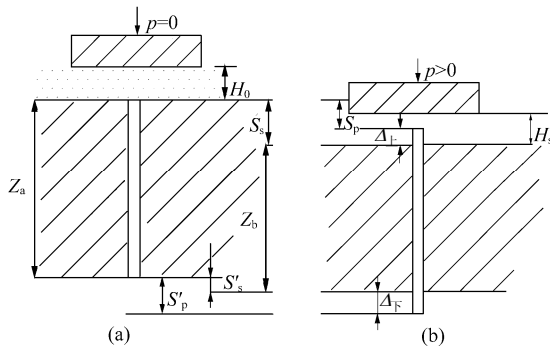


图 1 复合地基沉降示意图

Fig. 1 Settlement of composite foundation

4 CFG 桩复合地基沉降计算

CFG 桩复合地基的变形计算按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)^[5]的规定: 地基内的应力分布, 可采用各向同性均质线性变形体理论即分层总和法, 其最终变形量可按下式计算:

$$S = S_1 + S_2 = \Psi_s S' = \Psi_s \sum_{i=1}^n P_o (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) / E_{si} \quad (2)$$

式中 S 为地基最终变形量 (mm); S' 为分层总和法计算的地基变形量; Ψ_s 为沉降计算经验系数, 根据地区沉降观测资料及经验确定, 无地区经验时可采用文献[5]表 5.3.5 的数值; n 为地基变形计算深度范围内所划分的土层数; P_o 为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} 为基础底面下第 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} 为基础底面至第 i 层和第 $i-1$ 层土底面的距离 (m); $\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{i-1}$ 为基础底面计算点至第 i 层和第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数, 按文献[5]附录 K 采用。

变形计算时应注意以下 2 点^[6]:

(1) 复合土层的分层方法与天然土层的分层方法相同, 但各复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的 ξ 倍, 即采用复合模量; ξ 值可按式^[7]确定:

$$\xi = f_{spk} / f_{ak} \quad (3)$$

式中 f_{spk} 为复合地基承载力特征值 (kPa); f_{ak} 为基础底面下天然地基承载力特征值 (kPa)。

(2) 复合地基变形计算深度除满足文献[5]中地基变形计算深度的有关要求外, 还必须大于复合土层的厚度。

5 影响 CFG 桩复合地基沉降的因素

5.1 桩长对沉降的影响

桩长不同, 同一荷载水平桩、土荷载分担比不同, 桩越短, 桩间土荷载分担比越高。桩间土受的荷载越大, 桩间土的压缩变形越大, 桩长范围内土的压缩变形也越大; 反之, 桩越长, 土的荷载分担比越小, 土的压缩变形越小, S_1 也越小。

不同桩长对 $\Delta_{\pm}$, $\Delta_{\mp}$ 也有影响, 如地质条件相同, 当荷载一定时, 桩越长, $\Delta_{\pm}$ 和 $\Delta_{\mp}$ 越小, 桩长范围内土的压缩变形 S_1 也越小; 桩越短, $\Delta_{\pm}$, $\Delta_{\mp}$, S_1 也越大。

当然, 影响 $\Delta_{\pm}$, $\Delta_{\mp}$ 大小的因素很多, 不仅是桩长, 其他如褥垫层厚度, 下卧层土性等对 $\Delta_{\pm}$, $\Delta_{\mp}$ 均有很大影响。褥垫层越薄, 桩承担的荷载越多, $\Delta_{\pm}$ 也就越小。下卧层土越硬, 桩向下刺入越困难, $\Delta_{\mp}$ 也就越小, 桩长范围内土的压缩量 S_1 也就越小。同样, 桩越长, 总的沉降 S 也越小, 下卧层压缩变形 S_2 也越小。

根据变形控制理论, 只要将复合地基的沉降控制在设定的容许沉降之内, 即可达到使经济效益的最优化及各种参数的合理组合。这样在变形计算时, 必须合理选取桩长的上、下限值, 并结合地质报告、地基承载力、附加应力等因素合理选取桩长。

5.2 基础宽度对变形的影响

对于天然地基, 当荷载强度相同时基础宽度越大, 沉降量也越大。这主要是因为基础下某一深度的附加应力系数随基础宽度的增大而增大, 同时压

缩层厚度也相应加大。

复合地基也一样,当置换率、桩长、土情相同时,给定荷载下加固区压缩变形 S_1 、下卧层压缩变形 S_2 以及总压缩量 S 都随基础宽度增加而增大。

5.3 桩径、桩数对变形的影响

根据文献[7],CFG 桩桩径宜取 350~600 mm。桩数 n 实质上与置换率 m 有关,它们之间有如下关系:

$$n = m A_c / A_p \quad (4)$$

式中 A_c 为加固区面积; A_p 为桩截面。

当置换率 m 确定后,根据桩径,便可进行布桩设计及桩数调整。

m 应满足复合地基的承载力标准值计算式:

$$m R_k^d / A_p + \beta(1-m)f_{ak} \geq f_{spk} \quad (5)$$

式中 R_k^d 为单桩竖向承载力特征值(kPa); β 为桩间土承载力折减系数; f_{ak} 为桩间天然地基土承载力; f_{spk} 为地基承载力设计值(kPa)。

由于桩数及布桩型式不同,往往会产生复合地基群桩效应。由于褥垫层的设置而始终存在的土对桩的负摩擦作用导致桩沉降加大。因此,复合地基中桩数越少,群桩效应越小。从而对变形影响越小。

5.4 褥垫层对沉降的影响

由于褥垫层的厚度不同,可以影响桩土荷载的分担。根据这一结果,在 CFG 桩复合地基的应用中,可以通过调整褥垫层厚度,消除地基的不均匀性,得到复合地基的协调变形。当褥垫层厚度增大时,使得桩间土分担的荷载增加,从而增大地基的沉降变形。因此,褥垫层的合理设置是 CFG 桩复合地基的一项关键技术,应引起足够的重视。

5.5 桩对桩间土变形的影响

复合地基中桩的存在使桩间土的变形受到桩的约束,侧向变形受到限制,从而使土的垂直变形减小。桩对桩间土的约束作用与基础下桩的数量有关。单桩复合地基,桩对桩间土变形的约束作用小,群桩复合地基,桩数多,约束作用就大。

由于褥垫层的设置,复合地基中在荷载作用下,桩体将刺入垫层中,从而在桩体一定深度范围内会出现负摩擦力,即在桩体一定深度范围内会出现桩与桩间土的等沉面。等沉面以上的桩间土将相对桩体向下移动,从而对桩产生负摩擦阻力,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擦阻力[8]。由于存在负摩擦区。在该

区,其作用是阻止桩间土的变形。当荷载 P_0 较小时,桩侧阻力是主要的,而桩端阻力发挥较少,总体效应是使桩间土变形减小。当荷载 P_0 较大时,桩的端阻力有较大地发挥,桩对桩间土产生的总体效应是使桩间土变形增大[2]。

6 计算应注意的几个问题

6.1 模量选取

复合地基加固土层用复合模量计算变形,下卧层用天然地基压缩模量计算变形。不论是加固区,还是下卧区都要用到勘察报告提供的不同土层天然地基模量,其数值用标准固结试验测定,试验结果用 $e-p$ 曲线来表示。

某一压力范围内的压缩系数为

$$a_v = (e_i - e_{i-1}) / (p_{i-1} - p_i) \quad (6)$$

式中 a_v 为压缩系数(MPa^{-1}); p_i 为某级压力值(MPa); e_i 为对应于 p_i 时的孔隙比。

某一压力范围内的压缩模量为

$$E_s = (1 + e_0) / a_v \quad (7)$$

式中 E_s 为某压力范围内的压缩模量(MPa); e_0 为土的天然孔隙比。

在勘察报告中提供的压缩模量有 2 种:①整数压力区间的压缩模量。②自重压力和附加压力为 100, 200, 300, 400, ...kPa 压力范围的压缩模量。

实际计算时会发现,采用上述 2 种形式的压缩模量计算变形均存在一定误差。例如:按第 1 种形式,当自重压力至自重压力与附加压力之和在一个压力区间时,可近似地取这一整数压力区间的模量,而当自重压力至自重压力与附加压力之和不在同一压力区间,选取模量时就会存在一定的误差;第 2 种形式也存在相同的问题。另外,自重压力计算的准确性对试验结果也有影响。

由以上讨论建议勘察单位最好能提供 $e-p$ 曲线或不同固结压力下的孔隙比。由设计人员精确计算相应压力区间的压缩模量,进行变形计算。

6.2 附加压力计算

无论天然地基还是复合地基,变形计算时都要确定附加压力 P_0 。

6.2.1 基底荷载的选取

按文献[5]计算地基变形时,传到基础底面上的荷载应按长期效应组合,不应计入风荷载和地震荷

载。

在实际计算时，部分设计人员用复合地基承载力设计值或标准值代替基底荷载，显然与规定要求不一致。这样处理会给复合地基变形的计算带来一定的误差。

6.2.2 地下水对附加压力的影响

由于地下水位的不同，地下水既对地基土产生浮力，也对建筑物产生浮力。当计算的基底压力已扣除地下水对建筑物产生的浮力，计算附加压力地基土也要考虑地下水位的影响。反之，则不考虑地下水位的影响。

6.2.3 加固区附加压力的选取

在加固区的变形计算中，仍使用分层总和法变形计算理论，只是考虑到 CFG 桩的改良作用，用加固土层的桩土复合变形模量来代替天然地基土变形模量。这种方法不仅理论基础充分，而且可以计算出加固区各土层的分层变形以及中心和边缘处变形，且不存在通过假设来推求下卧层顶面应力的难题。但是，在加固区的附加应力仍取天然地基中的值，这点与事实有点不符。地基中的附加应力是将地基视为半空间无限体、弹性体和均质体而得出的。CFG 桩复合地基符合半空间无限体，近似弹性体，但不符合均质体条件，故复合地基中的附加应力已不同于天然均质地基。关于复合地基加固区的应力分布性状，一般有桩间土应力 σ_s 和桩荷载 P_p ， P_p 用桩侧阻力 P_{pr} 和桩端阻力 P_{pd} 替代。这样土体受到 σ_s ， P_{pr} ， P_{pd} 三项荷载作用，由它们产生的附加应力分布计算地基土的沉降，但还需进一步做工作。

7 结 语

在 CFG 桩复合地基设计中，沉降计算理论和实

践正处在不断发展之中。按沉降变形控制设计思想

比通常采用的强度控制设计理论在实践上具有更大的经济效益，在理论上也是合理的。强度和变形是统一的。一般情况下强度破坏即意味着持续的沉降变形，而能够达到稳定的沉降变形则不一定是破坏。在实际工程中不同功能要求的建筑物对沉降变形有着不同的控制标准和适应能力，在保证安全约束条件的前提下应该允许有不同的沉降变形，但由于沉降计算理论尚不成熟，在实际工作中用的还较少。

参 考 文 献

- [1] 韩煊, 王玉娥. 对复合地基设计方法的几点探讨[J]. 工程勘察, 2002, (4): 10 - 13.
- [2] 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. 21 - 21, 93 - 128.
- [3] 牛志荣, 李宏, 穆建春, 等. 复合地基处理及其工程实例[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000. 363 - 394.
- [4] 俞竞伟, 张鲲. CFG 桩复合地基技术原理及其在地基处理中的应用[J]. 安徽建筑, 2003, (2): 75 - 76.
- [5] GB 50007 - 2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [6] 唐维国, 张兴武. CFG 桩复合地基的原理设计及经济比较[J]. 岩土工程界, 2001, 4(1): 24 - 27.
- [7] JGJ 79 - 2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [8] 刘杰, 张可能. 复合地基中垫层作用机理[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(6): 568 - 572.