

CFG 桩复合地基沉降计算方法研究

董必昌 郑俊杰

(华中科技大学土木工程与力学学院 武汉 430074)

摘要 从 CFG 桩复合地基沉降变形模式出发,推导出一种考虑桩-土-垫层相互作用的沉降计算方法以及桩土应力比公式,并讨论了参数取值问题。

关键词 复合地基, 沉降模式, 桩土应力比

分类号 TU 433

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)07-1084-03

1 前言

复合地基是指天然土层和加固材料相互作用组成持力层而共同分担上部结构荷载的人工地基。作为一种有效手段,它已在地基处理工程中得到广泛应用^[1~3]。CFG 桩,即水泥粉煤灰碎石桩,由中国建筑科学研究院地基研究所研制成功,在工程界得到越来越广泛的应用。实践证明,CFG 桩复合地基基础工程总造价通常比碎石桩、灌注桩、预制桩方案低很多。然而,目前复合地基计算理论,尤其是沉降计算理论远落后于复合地基工程实践。在 CFG 桩复合地基沉降计算理论中,文[4]提出两种算法,目前工程上运用也基本上是这两种方法。事实证明,这两种理论算法由于忽略桩-土-垫层之间的相互作用以及其他一些因素,往往使计算结果偏大。本文试图推导考虑桩-土-垫层相互作用的沉降计算方法。

2 变形模式

图 1 给出 CFG 桩复合地基沉降变形的示意图。图 1(a)代表荷载 $P=0$ 的状态,图 1(b)代表加荷时($P>0$)桩的受力状态。图中:桩顶沉降为 S_p ,桩间土表面沉降为 S_s ,桩端处桩沉降为 S'_p 。由于 CFG 桩体模量较大,在通常荷载下,轴向力引起桩的压缩量很小,可以忽略不计。这样, $S'_p = S_p$ 。

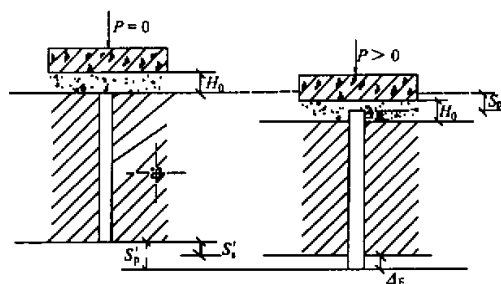


图 1 复合地基变形示意图

Fig.1 Deformation of composite ground

桩端处土的位移用 S'_p 表示,因此

$$\Delta_{\pm} = S_i - S_p \quad (1)$$

$$\Delta_{\mp} = S_p - S'_p \quad (2)$$

设桩长 L 范围内土的压缩量为 S_1 ,则有

$$S_1 = \Delta_{\pm} + \Delta_{\mp} \quad (3)$$

设下卧层变形量为 S_2 ,褥垫层压缩量为 S_3 ,则基础总变形为 $S = S_1 + S_2 + S_3$ 。因工程中褥垫层变形量很小,可以忽略不计,基础总变形为

$$S = S_1 + S_2 \quad (4)$$

3 基本假定

桩-土-垫层的共同作用非常复杂,本文为便于分析作出如下简化假定:

(1) 假定地基土为均匀直线变形体(等沉面上下

2001年9月20日收到初稿,2001年10月24日收到修改稿。

作者 董必昌 简介:男,28岁,1996年毕业于焦作工学院资源与环境工程系水文地质与工程地质专业,现为硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究工作。

土体的变形模量分别取等沉面上下范围内土体压缩模量的加权平均值);

(2) 桩侧摩阻力采用 Berrum 公式计算^[5];

(3) 垫层-桩-桩间土的界面力学性能可用“压力=刚度系数×变形”的公式表示;

(4) 等效单元体侧面剪力和法向位移等于零, 桩体的径向变形忽略不计。

4 公式推导

CFG 桩复合地基在荷载作用下在桩顶以下一定深度 L_0 处会出现桩与基土的等沉面。等沉面以上桩受负摩擦力, 方向向下; 等沉面以下桩侧受正摩擦力, 方向向上。

取等效单元体进行分析, 设桩土所受的应力分别为 P_p , P_s , 等效单元体中桩体与桩侧土体的面积比 $M = A_p / A_s$, 地基上的外荷载为 P_0 , 则有

$$\begin{aligned} P_0 A &= P_p A_p + P_s A_s \\ P_0 &= \frac{1 + Mn}{(1 + M)} P_s \end{aligned} \quad (5)$$

式中: A 为等效单元体面积, n 为桩顶上桩、土应力比。

仅考虑土中附加应力的作用, 由图 2 的静力平衡条件得

$$A_s \sigma_s - A_s (\sigma_s + d\sigma_s) \pm \pi d \tau(z) dz = 0 \quad (6)$$

式中: $\pm \tau(z)$ 分别为正负桩侧摩擦力, σ_s 为土层所受应力。将 $\tau(z) = \mu K_0 \sigma_s$ 代入并整理得

$$\frac{d\sigma_s}{dz} + \beta \sigma_s = 0 \quad (7)$$

式中: μ 以及下面公式中的 μ_1 , μ_2 均为桩、土摩擦系数, K_0 以及下面公式中的 K_{01} , K_{02} 均为桩间土侧压力系数。

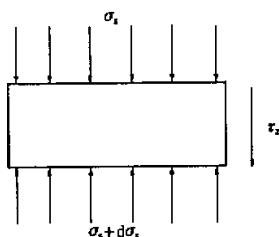


图 2 土体单元受力示意图

Fig.2 Stresses of soil element

在等沉面以上, 当 $z=0$, $\sigma_s = P_s$, 有

$$\sigma_s = P_s e^{-\beta_1 z} \quad (8)$$

式中: $\beta_1 = \frac{4}{d} \mu_1 M$, $\mu_1 = K_{01} \tan \varphi_{a1}$, K_{01} 为等沉面以上桩间土侧压力系数, φ_{a1} 为等沉面以上桩、土之间的摩擦角。

同理, 对等沉面以下地基土, 有

$$\sigma_s = P_s e^{-\beta_1 L_0} e^{\beta_2 (z - L_0)} \quad (9)$$

式中: $\beta_2 = (4/d) \mu_2 M$; $\mu_2 = K_{02} \tan \varphi_{a2}$; K_{02} , φ_{a2} 分别为等沉面以下桩间土的侧压力系数和桩、土之间的摩擦角。

对于等沉面以上加固区, 设土变形模量为 E_{01} (取等沉面以上、桩顶以下范围内土压缩模量的加权平均值), 则桩侧土压缩变形量为

$$S_{11} = \int_0^{L_0} \frac{\sigma_s}{E_{01}} dz = \frac{P_s}{E_{01} \beta_1} (1 - e^{-\beta_1 L_0}) \quad (10)$$

桩顶刺入变形量为

$$\Delta_{\pm} = C_0 (P_p - P_s) \quad (11)$$

式中: C_0 为桩顶作用于垫层单位压力时的竖向刺入变形量 (m/kPa)。

同理, 在等沉面以下加固区, 设土的变形模量为 E_{02} (取等沉面以下、桩底以上范围内土压缩模量的加权平均值), 则土的压缩变形量为

$$S_{12} = \frac{P_s}{E_{02} \beta_2} (e^{-\beta_1 L_0} [e^{\beta_2 (L - L_0)} - 1]) \quad (12)$$

桩底竖向刺入变形量为

$$\Delta_{\mp} = C_1 (P_p - P_s') =$$

$$C_1 \left[P_p + \frac{P_s}{M} - P_s' \left(1 + \frac{1}{M} \right) \right] (e^{-\beta_1 L_0} [e^{\beta_2 (L - L_0)}]) \quad (13)$$

式中: C_1 为桩体作用于下卧层土体单位压力时的竖向刺入量 (m/kPa), P_s' 为当 $z=L$ 时土体中的应力。

令 $A = e^{-\beta_1 L_0}$, $B = e^{-\beta_1 L_0 + \beta_2 (L - L_0)}$, 由等沉面上、下土体压缩量分别与桩体的上、下刺入变形量相等的原则, 可得到

$$\frac{1 - A}{E_{01} \beta_1 C_0} + 1 = \frac{B - A}{C_1 E_{02} \beta_2} - \frac{1}{M} + B \left(1 + \frac{1}{M} \right) \quad (14)$$

此式即为线弹性条件下 CFG 桩复合地基的竖向变形协调方程。

由上式解出等沉面位置参数 L_0 , 然后解出桩顶桩、土应力比, 再根据式(5)解出桩顶土应力。

已知 L_0 , P_s , 由式(10), (12)或式(11), (13)求 S_1 , 由分层总和法求出 S_2 , 即可求地基土总变形量 S , 即

$$S = \frac{P_1(1-A)}{(E_{01}\beta_1)} + \frac{P_1(B-A)}{E_{02}\beta_2} + \sum_{i=1}^n \frac{P'_i}{E_u} (Z_i\alpha_i - Z_{i-1}\alpha_{i-1}) \quad (15)$$

式中: n_1 为下卧层土的分层数; E_{0i} 为加固区下卧层土的压缩模量; Z_i , Z_{i-1} 为下卧层第 i 和 $i-1$ 层土层底的深度(从桩底底面算起); α_i , α_{i-1} 为加固层底面至下卧层第 i , $i-1$ 层土底面范围内的平均附加应力系数。

当 CFG 桩桩底土层较硬、下卧层变形很小时, 可令 $C_1 = 0$, 则有 $\Delta_F = 0$, 即 $L = L_0$ 。CFG 桩表现为上刺入变形, 则有

$$S = S_1 = \frac{P_1(1-e^{-\beta_1 L})}{E_{01}\beta_1} \quad (16)$$

$$n = \frac{P_p}{P_s} = \frac{1-e^{-\beta_1 L}}{E_{01}\beta_1 C_0} + 1 \quad (17)$$

5 参数值的确定

桩土摩擦力系数 μ 可由表 1 确定。

表 1 桩土摩擦力系数 μ 值
Table 1 Friction coefficient between pile and soil

| 土的类别 | | 摩擦系数 μ |
|-----------|-----------|------------|
| 粘性土 | 可塑 | 0.25~0.30 |
| | 硬塑 | 0.30~0.35 |
| | 坚硬 | 0.35~0.45 |
| 粉土 | 密实、中密(稍湿) | 0.30~0.40 |
| 中砂、粗砂、砾砂 | | 0.40~0.50 |
| 碎石土 | | 0.40~0.60 |
| 软质岩土 | | 0.40~0.60 |
| 表面粗糙的硬质岩石 | | 0.65~0.75 |

上节中的 C_0 , C_1 实际上是基床系数(也称地基刚度系数)的倒数。关于基床系数 k 值, 国内外学者和工程技术人员根据试验资料和工程实践都积累了不少经验, 可查有关文献和表格得到。

6 结 论

本文从 CFG 桩复合地基沉降变形模式出发, 推导出一种考虑桩-土-垫层相互作用的沉降计算方法以及桩、土应力比公式, 进一步推导出当 CFG 桩复合地基下卧层力学性质好、变形量较小情况下的沉降计算式。在桩、土应力比公式中, 首次综合地考虑了包括桩长、桩径、面积置换率等沉面位置以及桩土摩擦系数和变形模量在内的多种因素, 这对于目前 CFG 桩复合地基沉降计算模式和桩、土应力比的计算是一个有益的补充, 也为相应的理论研究提供了一个新的思路。对于具体工程, 本文虽然提供了参数的范围值, 但考虑到地基土的空间性和不确定性, 因此如果在计算前能事先得到上述参数的真实值, 那么无疑会对计算结果的准确性产生积极的影响。

参 考 文 献

- 1 张凤文, 周洪彬. 强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 522~525
- 2 陈晓平, 阎平一. 复合桩基竖向承载力分项系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 655~658
- 3 郑俊杰, 袁内镇, 张小敏. 多元复合地基的承载力计算及检测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 391~393
- 4 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- 5 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996

STUDY ON THE SETTLEMENT CALCULATION OF CFG PILE COMPOSITE GROUND

Dong Bichang, Zheng Junjie

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)

Abstract The calculation method and the formulas of pile-soil stress ratio considering the interaction of pile-soil-cushion are deduced. They are based on the settlement model of CFG-pile composite ground. The problems of calculation parameters are also discussed.

Key words composite foundation, settlement model, stress ratio of pile-soil