

刚性桩复合地基垫层对桩土应力比影响分析

尚琴琴 战永亮

(中国石油大学建筑工程系, 山东东营 257061)

【摘要】 从极限平衡理论角度对刚性桩复合地基中垫层作用机理进行分析, 提出桩顶垫层厚度、垫层材料内摩擦角等参数对桩土应力分担的控制公式, 推导出在已知表面应力情况下考虑桩土共同作用的桩土沉降计算公式, 在此基础上提出一种桩土应力比的迭代计算方法。编制程序实现对算例的计算, 总结分析计算结果并与实测值进行对比验证。

【关键词】 复合地基; 沉降计算; 桩土应力比; 垫层

【中图分类号】 TU 472

Analysis on the Cushion Design for Rigid Pile Composite Ground

Shang Qinqin Zhan Yongliang

(Department of Civil Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061 China)

【Abstract】 Based on limit equilibrium theory, the effect on pile-soil stress ratio made by cushion thickness on pile and internal friction angle of cushion is analyzed. The calculating formulae of the settlement of pile-soil under foregone pressure is proposed, which account the interaction of pile-soil. Depending on the methods deduced above, the iterative calculating method for pile-soil stress ratio is put forward. A program is written and the samples are calculated. The analyses for results and the comparison with experimental data are presented.

【Key Words】 composite ground; calculation of settlement; pile-soil stress ratio; cushion

0 引言

基础下桩体和桩间土直接承受荷载时, 由于刚性桩桩身强度较高、压缩性小, 再兼之桩端下土层强度高、压缩性小的情况下, 桩间土承载能力很难发挥。因此, 通常在桩和桩间土顶设置垫层调整桩土沉降差, 以使桩间土也能发挥其承载能力^[1]。

目前, 对刚性桩复合地基垫层作用和桩土应力比的理论研究主要是利用桩土沉降协调关系建立方程求取桩土应力比值^[2-3], 其中主要关键和区别在于桩顶向垫层刺入量的假设不同。另外有利用小孔扩张理论^[4]、太沙基理论^[5-6]或截取隔离体取平衡的方法^[7]直接计算桩土应力比。但是, 由于桩-土-垫层-基础底板之间作用关系的复杂性, 目前已有的理论还远落后于工程实践的需要。

本文试从垫层散体材料的极限平衡角度出发, 探讨垫层的作用机理及垫层参数对桩土应力比的影响作用, 利用推导出的迭代方法对算例进行桩土应力比计算, 并进行实例验证。

1 垫层对桩土承载性能影响分析

1.1 垫层影响机理分析

复合地基桩及桩间土上设置垫层(见图 1)后,

桩、土的共同作用关系发生了极大的改变。其中垫层性质对桩土应力比起着关键作用。

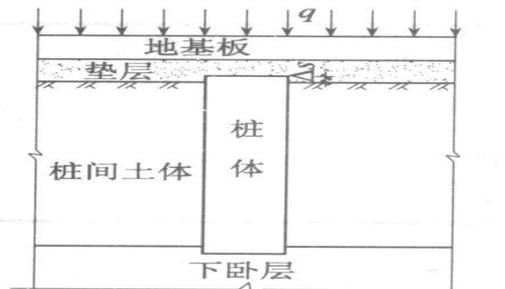


图 1 单桩复合地基平面示意图

在静力平衡状态, 设想再加一微小荷载达到下一个平衡状态。由于应力差和沉降差的存在, 垫层将向桩间土调整补充, 并达到一新的平衡状态, 所以其对应的桩土应力比必小于等于垫层保持极限平衡状态下的应力比。

1.2 垫层极限平衡状态下应力比公式推导

1.2.1 建立力学模型

截取桩顶圆柱体垫层, 忽略垫层对反力的扩散作用, 可得受力体模型(见图 2 和图 3), 因为桩顶垫层厚度 h' 值相比桩径 d 而言较小, 所以需考虑上下

摩擦约束面对圆柱体垫层变形的阻碍作用。在这里参考滑移线理论和经验值,确定摩擦影响角度为 $45^\circ + \varphi/2$ 。将摩擦影响值按影响面积衰减(见图 2),图中水平虚线处为最易发生失衡部位,其摩擦影响系数为:

$$\beta_c = \begin{cases} 1 - \frac{h'}{2r_0\chi} & (h' < 2r_0\chi) \\ 0 & (h' \geq 2r_0\chi) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\chi = \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$ 。

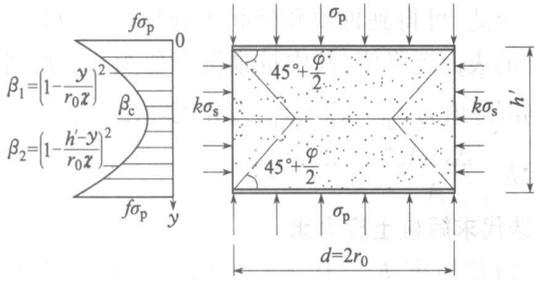


图 2 桩顶垫层受力图

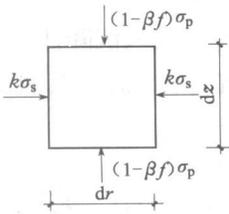


图 3 桩顶垫层微单元体受力图

1.2.2 公式推导

根据 Mohr-Coulomb 极限平衡条件(垫层材料 $c=0$):

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \sin \varphi \quad (2)$$

将 $\sigma_1 = \sigma_p$, $\sigma_3 = k\sigma_s$ 代入(2)式并考虑上下表面摩擦约束影响,可得:

$$\sigma_p - f\sigma_p \beta_c = \chi^2 k\sigma_s \quad (3)$$

整理后得桩土应力比上限公式:

$$\begin{cases} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_s}\right)' = \frac{\chi^2 k}{1 - f\beta_c} & (h' < 2r_0x) \\ \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_s}\right)' = \chi^2 k & (h' \geq 2r_0x) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为桩间土垫层侧压力系数, $k = \alpha k_0$; k_0 为静止侧压力系数, $k_0 = \frac{\nu_c}{1 - \nu_c}$; ν_c 为垫层材料泊松比; φ 为垫层材料内摩擦角; α 为与垫层厚度、桩间土压缩模量等因素有关的影响系数; f 为桩顶垫层与基础板及桩顶的接触摩擦系数。

以上推出的是在垫层极限平衡状态下的桩土应力比,如果无垫层情况下的桩土应力比小于此计算值,则取无垫层情况下桩土应力比。

2 桩-土沉降计算

2.1 桩顶沉降计算公式推导

在此假定:

- 1) 桩身为线弹性,压缩变形符合虎克定律。
- 2) 桩侧摩阻力采用佐藤悟函数^[8],即:

$$\begin{cases} \tau(z) = c_s s & s < s_u \\ \tau(z) = \tau_u & s \geq s_u \end{cases} \quad (5)$$

- 3) 桩端阻力与桩端刺入量关系为依据小孔扩张理论所得,考虑桩端土塑性状态。

2.1.1 桩土无相对滑移,桩侧摩阻力处于弹性状态

桩身位移传递函数:(令 $\frac{U}{E_p A_p} c_s = \lambda^2$)

$$\frac{d^2 s(z)}{dz^2} = \frac{\lambda^2}{c_s} \tau(z) \quad (6)$$

解微分方程: $s(z) = c_1 e^{\lambda z} + c_2 e^{-\lambda z} \quad (7)$

由条件: $\begin{cases} s(l) = s_b = c_1 e^{\lambda l} + c_2 e^{-\lambda l} \\ s_0 = c_1 + c_2 \end{cases} \quad (8)$

解得: $\begin{cases} c_1 = \frac{s_b - s_0 e^{-\lambda l}}{2sh(\lambda l)} \\ c_2 = \frac{s_0 e^{\lambda l} - s_b}{2sh(\lambda l)} \end{cases} \quad (9)$

则可得桩顶反力及桩顶位移方程:

$$p_0 = p_b + \frac{Uc_s}{\lambda} \left[c_1 e^{\lambda l} - c_2 e^{-\lambda l} - c_1 + c_2 \right] \quad (10)$$

$$s_0 = s_b + \frac{p_b l}{E_p A_p} + \frac{Uc_s}{\lambda^2 E_p A_p} \left[c_1 \left(\lambda l e^{\lambda l} - e^{\lambda l} + 1 \right) - c_2 \left(\lambda l e^{-\lambda l} + e^{-\lambda l} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

2.1.2 桩侧摩阻力部分处于塑性状态

桩顶承担载荷较大时,上部桩身位移可能已超过 s_u ,所以对桩身位移传递函数采取分段积分的形式求解:(设位移超过 s_u 桩段长度为 l_A ,未超过的下部桩段长度为 $l_B = l - l_A$)

在 l_B 段桩侧位移和桩身轴力分布:

$$s_B(z) = c_1 e^{\lambda z} + c_2 e^{-\lambda z} \quad (12)$$

$$p_{pB}(z) = p_b + \left[\frac{c_1}{\lambda} (e^{\lambda l} - e^{\lambda z}) - \frac{c_2}{\lambda} (e^{-\lambda l} - e^{-\lambda z}) \right] Uc_s \quad (13)$$

在 l_A 段桩侧位移和桩身轴力分布:

$$p_{pA}(z) = p_p(l_A) + U\tau_u(l_A - z) \quad (14)$$

$$s_A(z) = s_u + \frac{1}{E_p A_p} \left[p_p(l_A)(l_A - z) + \dots \right]$$

$$U\tau_u \left[\frac{z^2}{2} - l_A z + \frac{l_A^2}{2} \right] \quad (15)$$

利用式假定③和桩身连续条件,可得到只含有 l_A 和 s_b 两个未知数的方程:

$$p_0 = p_b + \left[\frac{c_1}{\lambda} (e^{\lambda} - e^{-\lambda_A}) - \frac{c_2}{\lambda} (e^{-\lambda} - e^{-\lambda_A}) \right] U c_s + U \tau_u l_A \quad (16)$$

$$s_0 = s_u + \frac{l_A}{E_p A_p} \left[p_p(l_A) + U \tau_u \frac{l_A}{2} \right] \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{s_b e^{-\lambda_A} - s_u e^{-\lambda}}{2sh[\lambda(1-l_A)]} \\ c_2 &= \frac{s_u e^{\lambda} - s_b e^{\lambda_A}}{2sh[\lambda(1-l_A)]} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

上式中:

2.1.3 桩侧摩阻力完全处于塑性状态

$$p_0 = p_b + U \tau_u l \quad (19)$$

$$s_0 = s_b + \frac{l}{E_p A_p} \left[p_b + U \tau_u \frac{l}{2} \right] \quad (20)$$

式中: p_0 为桩顶反力; s_0 为桩顶沉降; s_b 为桩端刺入量; p_b 为桩端阻力; l 为桩长; τ_u 为桩侧极限摩阻力; s_u 为桩侧极限位移; c_s 为桩侧摩阻系数; $s(z)$ 为桩身沉降; $\tau(z)$ 为沿深度变化的桩侧摩阻值; U 为桩身周长; $p_p(z)$ 为桩身轴力; E_p 为桩身压缩模量; A_p 为桩截面积。

已知桩顶反力,用数值方法分情况计算(10)、(11)或(16)、(17)或(19)、(20)式,即可得到桩顶沉降、桩侧摩阻力分布、桩端刺入量及桩端阻力值。

2.2 桩间土沉降计算

在桩间土表面载荷 σ_s 单独作用下,可利用 boussinesq 解求出桩间土表面不同位置沿深度的附加应力。然后按分层总和法计算桩间土沿深度的沉降值 $s_j^B(z_i)$ 及桩间土平均沉降 $\bar{s}^B(z_i)$ 。

2.3 桩土相互作用沉降影响的计算

1) 桩间土沉降造成的桩端和桩侧摩阻力分布变化

首先汇总由于桩间土沉降所造成桩土相对位移减少,而降低的桩顶反力 Δp , 将 Δp 作为桩顶作用力,用传递函数法重新计算,求出在其作用下的桩端力 $p_b^{(\Delta p)}$ 和桩侧摩阻力 $\tau^{(\Delta p)}(z_k)$ 及表面沉降值 $s_p^{(\Delta p)}$ 。(将桩身沿深度划分为 n 段,每段长为 $l_i (i=1, 2, \dots, n)$, 深度为 $z_i - z_{i-1} (i=1, 2, \dots, n)$)

此时桩体的桩侧摩阻力为:

$$\tau(z_i) = \tau^{(p_0)}(z_i) - \tau^{(\Delta s)}(z_i) + \tau^{(\Delta p)}(z_i) \quad (21)$$

上式右端第一项为桩顶荷载 $p_0 = \sigma_p A_p$ 作用下的侧摩阻值,第二项为桩间土沉降所产生的桩侧摩

阻力减小值,第三项为第二项桩顶反力减小值用传递函数法重新分配后的桩侧摩阻力。

$$\text{桩端阻力为: } p_b = p_b^{(p_0)} + p_b^{(\Delta p)} \quad (22)$$

$$\text{桩顶沉降为: } s_p = s_p^{(p_0)} + s_p^{(\Delta p)} \quad (23)$$

2) 桩体作用所引起的桩间土表面沉降

对上一步所求出的桩端阻力和每一桩段的侧阻力,利用 Mindlin 解求得桩间土沿深度的附加应力值;然后利用分层总和法得到桩间土表面沉降值 $s_j^M(0)$ 和平均沉降值 $\bar{s}^M(0)$ 。

至此,可得到桩顶和桩间土分别在 σ_p 和 σ_s 作用下的表面沉降值,其中桩顶沉降值为 s_{p0} , 桩间土平均沉降值为 $\bar{s}_{s0} = \bar{s}_{s0}^M + \bar{s}_{s0}^B$, 差异沉降, $\Delta s = s_{p0} - \bar{s}_{s0}$,

$$h' = h - \frac{\Delta s \cdot A_s}{A}$$

3 迭代求解桩土应力比

1) 将厚度 $h^{(m)}$ 代入(4)式,求出桩土应力比 $n^{(m)}$, 然后由式: $q = (nm + 1 - m) \cdot \sigma_s$ (m 为复合地基置换率),可得到 $\sigma_p^{(m)}$ 、 $\sigma_s^{(m)}$;

2) 将 $\sigma_p^{(m)}$ 、 $\sigma_s^{(m)}$ 代入沉降计算过程,求得桩顶、桩间土沉降及沉降差 $\Delta s'^{(m)}$, 桩顶垫层厚度为:

$$h'^{(m)} = h - \frac{\Delta s'^{(m)} \cdot A_s}{A}$$

3) 考虑垫层压缩: $\Delta s^{(m)} = \frac{\sigma_p^{(m)}}{E_c} h'$ (E_c 为垫层压缩模量),则此时桩顶垫层厚度为: $h^{(m)} = h'^{(m)} - \Delta s^{(m)}$ 。

4) 设桩顶垫层厚度为: $h^{(m+1)} = \frac{h^{(m-1)} + h^{(m)}}{2}$,

重复以上步骤直到 $h^{(m+1)} - h^{(m)} < \delta$, 满足所需精度即可结束,此时桩土应力比 $n^{(m+1)}$ 即为所求值。

4 算例分析及实例验证

将以上计算过程编制成计算机程序,并以某带垫层 CFG 桩单桩复合地基为例进行计算。

基本参数: 桩径 $d=0.4$ m; 桩身弹性模量 $E_p = 2.2 \times 10^{10}$ Pa; 桩身材料泊松比 $\nu_p = 0.25$; 桩间土体主要以粉质粘土为主,通过加权计算将压缩模量统一为 $E_{s1} = 3.62 \times 10^6$ Pa; 桩端下地基土体为粉土,压缩模量 $E_{s2} = 12.1 \times 10^6$ Pa; 土体泊松比 $\nu_s = 0.4$; 桩侧最大摩阻力 $\tau_u = 10 \times 10^3$ Pa; 桩侧临界相对位移 $\Delta s_u = 0.006$ m; 桩端临界相对位移 $\Delta s_b = 0.011$ m; 置换率为 4.9%; 取 $\alpha = 1.1, f = 1.0$ 。

计算结果与文献[9]中的试验结果趋势较为吻合,具体参数对桩土应力比的影响为:

1) 垫层厚度对桩土应力比的影响见表 1 和表 2。

可知,在其它参数不变的情况下,随着垫层厚度的增加,桩土应力比逐渐减小,桩间土承担荷载比例加大。厚度达到一定程度后,桩土应力比趋于一定值。

2)对垫层材料内摩擦角 35° 和 42° 下两组结果数据进行对比(见表1、表2),可知内摩擦角大小对桩土应力比有着比较大的影响,内摩擦角大则桩土应力比亦大。

表1 垫层材料内摩擦角 35° 时桩土应力比变化

荷载 /kPa	垫层厚度/cm							
	2	5	10	20	30	50	70	90
130	55.92	22.54	11.27	5.90	4.20	2.97	2.61	1.98
130	78.42	31.39	14.29	6.71	4.55	3.07	2.63	1.99
230	86.69	42.81	18.27	7.77	4.98	3.19	2.67	2.01
330	96.57	52.01	23.38	9.09	5.52	3.34	2.71	2.04

表2 垫层材料内摩擦角 42° 时桩土应力比变化

荷载 /kPa	垫层厚度/cm							
	2	5	10	20	30	50	70	90
130	183.61	34.68	17.67	9.19	6.48	4.44	3.53	2.71
130	102.81	44.25	21.39	10.35	6.99	4.61	3.58	2.72
230	112.40	54.69	25.77	11.70	7.62	4.81	3.65	2.75
330	149.99	61.14	30.33	13.37	8.34	5.04	3.73	2.81

3)荷载水平:从计算结果和实测结果(见图4)均可知,随着荷载水平的增加,桩土应力比相应加大。

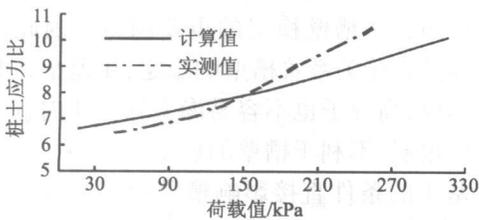


图4 荷载水平影响曲线

4)桩长:随着桩长的增加,桩土应力比有着幅度不同地增大(见图5)。

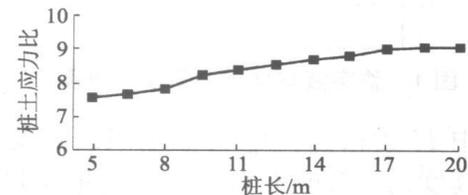


图5 桩长对桩土应力比的影响

5 与实测值对比分析

1)桩土应力比随荷载水平变化影响

实际工程中桩长 $l=15$ m,垫层厚度20 cm,内摩擦角 39° ,其它参数同上。根据最小二乘试算,取 $\alpha=1.16$ 。计算值与实测值在荷载逐渐增加时应力比曲线见图4。

对比可知,在较低荷载水平时,计算值与实测值

较相符,而在较高荷载水平时,计算值低于实测值,是因为 α 系数为与垫层厚度,即桩土反力扩散相关的变量,为方便起见,设为一定值;另外,在计算中未考虑垫层受荷后的硬化效应、压缩模量的提高。

2)沉降计算对比

计算值大于实测值(见图6),是因为没考虑土体压缩模量的变化,扩大了桩土相互作用影响,也有桩间土模量进行加权计算后所产生的误差。

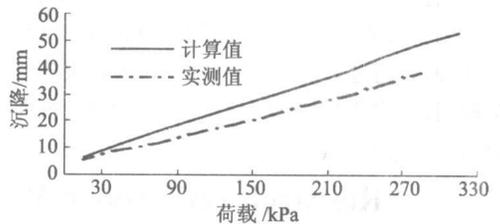


图6 荷载-沉降曲线

6 结论

1)从垫层的极限平衡角度出发所推导的桩土应力比迭代计算方法,能够从一个侧面反映垫层厚度、垫层材料内摩擦角(压缩模量)、荷载水平、桩长等参数对桩土应力比的影响,具有工程实用价值。

2)从计算结果可以看出,本文方法在一定程度上吻合了实际工程经验和现场试验的定性和定量的结果,说明此种计算方法具有可行性,为带垫层桩体复合地基作用机理的进一步研究开拓了思路。

参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 李宁,韩. 复合地基中褥垫作用机理研究[J]. 岩土力学,2000,21(1):10-15.
- [3] 朱世哲,徐日庆,杨晓军,等. 带垫层刚性桩复合地基桩土应力比的计算与分析[J]. 岩土力学,2004,5(5):814-817.
- [4] 毛前,龚晓南. 桩体复合地基柔性垫层的效用研究[J]. 岩土力学,1998,19(2):67-73.
- [5] 王年云. 复合地基上褥垫层设计的理论分析[J]. 建筑结构,1999,12(12):24-26.
- [6] 张羽,林才奎,洪宝宁. CFG桩复合地基的垫层作用机理和设计研究[J]. 广东公路交通,2005,88(1):55-57.
- [7] 周龙翔,童华炜,王梦恕,等. 复合地基褥垫层的作用及其最小厚度的确定[J]. 岩土工程学报,2005,27(7):841-843.
- [8] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [9] 化建新,董长和,孙东晖. CFG桩垫层效应研究[J]. 岩土工程技术,1998(1):48-50.