

大面积带垫层刚性桩复合地基的荷载传递分析方法

楼晓明, 孙晓锋

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 提出了用迭代法分析带垫层刚性桩复合地基荷载传递特性计算方法。将大规模群桩复合地基中的任意一根桩及其周围的桩间土看作一个存在相互作用力的柱杆系统, 单个柱杆用荷载传递法分析, 柱杆之间的相互影响用迭代法分析。该方法可方便地考虑桩、土、承台和垫层的相互作用, 地基土的分层特性和桩身荷载传递函数的非线性。通过实例验证了本文方法的正确性, 讨论了桩土应力比随垫层厚度、垫层模量、桩间距和桩间土模量等因素的变化规律。

关键词: 刚性桩复合地基; 垫层; 荷载传递; 桩土应力比; 负摩阻力

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2006)11-2027-04

作者简介: 楼晓明(1965-)男, 浙江义乌人, 博士, 副教授, 主要从事桩基工程、地基处理、上部结构与地基基础共同作用的研究工作, 发表论文约40篇。

Analysis on load transfer for large area composite foundation with rigid piles and cushions

LOU Xiao-ming, SUN Xiao-feng

(Geotechnical Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A method to analyze load transfer was presented for composite-foundation with rigid pile and cushion by means of iterative process. A single pile with surrounding soil in large scale pile group was taken as a column system with interaction force. A single pile was analyzed by load transfer method, while interaction was analyzed by iterative process. The pile-soil-cushion-cap interaction and the nonlinearity of load transfer for layered soil could be considered conveniently in this method. The correctness of this method was validated by a practical example. Factors influencing the stress ratio of the pile and soil were studied including the cushion thickness, cushion modulus, pile spacing, soil modulus, etc.

Key words: rigid pile composite ground; cushion; load transfer; stress ratio; negative skin friction

0 前言

刚性桩复合地基是在低强度桩(CFG桩)的基础上发展起来的地基处理新技术, 特点是在桩、土与承台之间设置砂石垫层, 以调整桩、土应力比, 使得桩顶不因过于应力集中而破坏, 桩间承载力得以充分发挥。目前在刚性桩复合地基沉降计算方法中, 通常把沉降量分成加固区压缩量和下卧层压缩量。其中加固区压缩量的计算方法主要有复合模量法、应力修正法、桩身压缩量法^[1]。复合模量法没有考虑刚性桩复合地基垫层的压缩和桩的上下刺入等因素; 应力修正法和桩身压缩量法需要在计算前知道桩土应力比, 而影响桩土应力比的因素很多, 很难选用合理值; 桩身压缩量法中桩体刺入量也很难人为确定, 使得结果有较大随意性。刚性桩、土与承台之间设置的垫层, 使它有别于常规复合地基和复合桩基, 增加了这种复合地基受力变形机理的复杂性, 因此探求刚性桩复合地基更合理、准确的计算方法, 具有重要工程意义。

文献[2]应用有限单元法对3×3桩数的刚性桩复合地基进行了分析, 但桩数很多时计算量太大, 加上参数取值困难, 其工程应用有很大局限性; 文献[3, 4]根据桩、土、垫层的协同作用, 推导了大面积群桩中桩、土的荷载传递基本微分方程, 并给出解析解, 较方便地得到刚性桩复合地基的沉降、桩顶对垫层的刺入变形、桩土应力比、桩身摩阻力分布的计算结果。但其解析解有一些理想化假定, 如土层是均质土、桩侧摩阻力与桩土相对位移为理想弹塑性关系等, 限制了其在工程中的应用。

本文借鉴文献[3, 4], 针对大面积群桩复合地基中任意一根单桩及其周围的桩间土进行分析, 采用矩阵位移法分析桩、土的荷载传递基本微分方程, 计算单元的选取如图1。矩阵位移法实质上是柱杆系统荷载传递特性分析的杆系有限单元法, 本文将单桩看作

一个杆件系统，桩间土也看作一个杆件系统，2个杆件之间用弹簧连接，模拟它们之间与相对位移有关的相互作用力。这是一个数值分析方法，可以不作文献[3, 4]的理想化假定，对分层地基和不同的荷载传递函数模型均可使用，增大了工程应用价值。

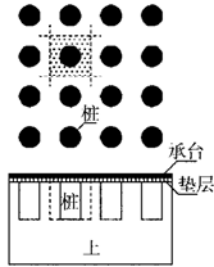


图1 计算单元的选取
Fig. 1 Calculation element

1 计算方法

1.1 基本假定

(1) 大规模群桩等间距布置，复合地基上受均布力作用，平均附加应力沿深度不衰减。桩和桩周土受力假定如图2所示，桩间土外侧不向外传递荷载。

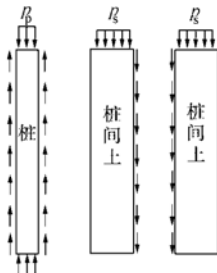


图2 桩和桩周土受力假定
Fig. 2 Assumption of pile-soil stress

(2) 土体为弹性体，垫层符合 Winkler 地基模型。
(3) 同一水平面上的桩间土沉降相同，桩土间错动为桩沉降与土沉降之差。

(4) 桩身与土之间的侧摩阻力和桩端阻力采用弹簧模拟，桩身单元划分和弹簧设置如图3所示，土单元划分长度和桩一样。

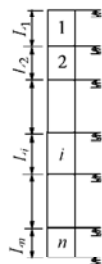


图3 桩单元划分和弹簧设置
Fig. 3 Pile element and spring

(5) 假定垫层的压缩和沉降如图4。设基础受均布

荷载 p ，垫层变形模量为 E_c ，厚度 h_c 。经压缩后，桩侧土上垫层厚度变为 h'_c ， $h'_c = h_c - \frac{p_s}{E_c} h_c$ ；桩顶处由于桩的刺入垫层厚度变为 h''_c ， $h''_c = h_c - \frac{p_p}{E_c} h_c$ 。其中， p_p 为桩顶平均压力， p_s 为桩侧土上平均压力。A 点的沉降为 $s_a = s_p(0) + \frac{p_p}{E_c} h_c$ ，B 点沉降为 $s_b = s_s(0) + \frac{p_s}{E_c} h_c$ ，其中， $s_p(0)$ 、 $s_s(0)$ 为桩顶平面处桩和土的沉降。

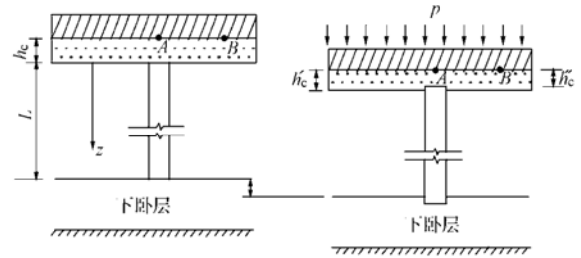


图4 垫层压缩与沉降示意图
Fig. 4 Compression and settlement of cushion

1.2 基本方程

p 、 p_p 、 p_s 间存在如下关系

$$p = m p_p + (1 - m) p_s \quad (1)$$

式中， m 为一根桩相对其所对应承台的置换率。

假定承台为刚性，则有

$$s_A = s_B \quad (2)$$

对于离散了的桩，可以写出力和位移方程组

$$[K_p] \{s_p\} = \{Q_p\} - \{R\} \quad (3)$$

式中 $[K_p]$ 为桩的总刚度矩阵； $\{s_p\}$ 表示桩身各结点位移列向量； $\{Q_p\}$ 为桩承受的受外荷载列向量； $\{R\}$ 代表土作用在桩结点上的集中摩阻力列向量。

同样对离散后的桩侧土，可得各节点的力和位移方程组

$$[K_s] \{s_s\} = \{Q_s\} + \{R\} \quad (4)$$

式中 $[K_s]$ 为桩侧土柱的总刚度矩阵； $\{s_s\}$ 表示桩侧土各结点位移列向量； $\{Q_s\}$ 为桩侧土受外荷载列向量。

桩土间作用力为

$$\{R\} = [K_w] \{w\} \quad (5)$$

式中， $[K_w]$ 为由传递函数计算出的桩土相互作用刚度矩阵； $\{w\}$ 为桩土间相对位移，

$$\{w\} = \{s_p\} - \{s_s\} \quad (6)$$

将式 (5)、(6) 代入式 (3) 得

$$([K_p] + [K_w]) \{s_p\} = \{Q_p\} + [K_w] \{s_s\} \quad (7)$$

同样将式 (5)、(6) 代入式 (4) 可得

$$([K_s] + [K_w]) \{s_s\} = \{Q_s\} + [K_w] \{s_p\} \quad (8)$$

1.3 传递函数

常用的传递函数有以下几种：线弹性全塑性模型、

线弹性硬化的双折线模型、三折线模型、指数曲线模型、双曲线模型等等。由于采用矩阵位移法, 可以选用不同的荷载传递函数进行计算。

1.4 方程求解

方程求解过程如下:

(1) 假定桩顶均布力为 p_p , 根据公式 (1) 得桩侧土上均布力 p_s , 可算得 $\{Q_p\}$ 和 $\{Q_s\}$ 。不考虑土的位移, 根据公式 (7) 计算得到桩的初始位移 $\{s_p\}^0$, 然后根据公式 (8) 计算土柱的位移 $\{s_s\}^0$ 。

(2) 由式 (6) 得 $\{w\}^0 = \{s_p\}^0 - \{s_s\}^0$, 根据传递函数计算 $[K_w]^0$, 由 $\{s_s\}^0$ 和 $[K_w]^0$ 根据公式 (7) 计算得到 $\{s_p\}^1$, 再由公式 (8) 计算得 $\{s_s\}^1$ 。

(3) 由 $\{s_p\}^1$ 、 $\{s_s\}^1$ 计算 $\{w\}^1$ 和 $[K_w]^1$, 由公式 (7) 和公式 (8) 计算得 $\{s_p\}^2$ 和 $\{s_s\}^2$ 。

(4) 若 $\{s_s\}^2$ 与 $\{s_s\}^1$ 的差值超过容许值, 则赋值 $\{s_s\}^2 = \{s_s\}^1$ 。

(5) 重复步骤 (3)、(4), 直到计算的 $\{s_s\}^2$ 与 $\{s_s\}^1$ 的差值小于容许误差。

(6) 利用迭代后得到的桩顶平面处 $s_p(0)$ 、 $s_s(0)$,

计算图 4 中 A、B 两点沉降, $s_A = s_p(0) + \frac{p_p}{E_c} h_c$,

$s_B = s_s(0) + \frac{p_s}{E_c} h_c$, 两点沉降差 $\Delta s_{AB} = s_A - s_B$ 。

(7) 若 Δs_{AB} 超过容许误差, 则改变假定的 p_p 和 p_s 值, 重复步骤 (1) ~ (6), 直到 Δs_{AB} 小于容许误差, 即接近于 0。

(8) 根据最后出来的沉降 $\{s_p\}$ 、 $\{s_s\}$ 和沉降差 $\{w\}$ 计算各结点处的轴力、桩侧摩阻力分布以及中性点位置等。

(9) 根据下卧层顶部平均附加压力 p , 采用分层总和法计算下卧层沉降 s_2 , 将 $s_p(0)$ 、 $s_s(0)$ 加上 s_2 就可以算得桩顶平面处的最终沉降。

(10) 对于基础上不同的荷载 p 可以重复步骤

(1) ~ (9), 便可求出模拟的荷载 - 沉降曲线。

2 算例比较

取文献[3, 4]中一群桩复合地基试验的中间桩及其桩周土作为计算对象。为便于比较, 计算时与文献

[3, 4]采用相同的传递函数模型, 桩侧摩阻力与桩土相对位移采用线弹性全塑性模型。参数取值与文献[4]完全一样, 桩身模量 $E_p = 2 \times 10^4$ MPa, 桩直径 $d = 0.15$ m, 桩间距 $s = 0.525$ m, 桩长 $L = 2.5$ m, 垫层厚度 $h_c = 0.15$ m, 垫层模量 $E_c = 16.1$ MPa, 桩侧土模量 $E_s = 8.5$ MPa, 桩侧摩阻力传递函数刚度系数 $k = 5 \times 10^4$ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 极限位移 1.5 mm, 桩端 $k_p = 1.489 \times 10^5$ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。各级荷载下 p_p 、 p_s 的计算值和实测值见表 1。

由表 1 可见, 本方法的计算结果是可以满足工程要求的。桩土应力比随荷载变化的规律见图 5, 随着荷载水平得增加, 桩土应力比逐步增大。

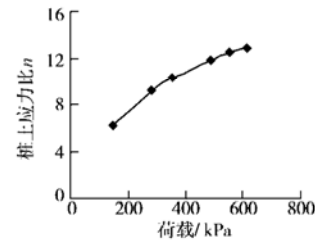


图 5 不同荷载下的应力比

Fig. 5 Stress ratio under different loads

桩身轴力图见图 6, 可以看出桩身轴力最大值位于 0.5 倍桩长处, 这与该点上部承受负摩阻力有关, 该位置也是中性点的位置, 这可能比一般实测的中性点位置要深一些, 究其原因, 与本文假定大面积基础条件下, 土中平均竖向附加应力沿深度不衰减有关。

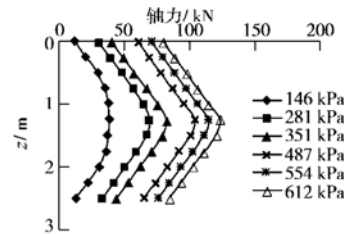


图 6 桩身轴力图

Fig. 6 Axial force in pile body

图 7 为桩土相对位移沿深度的分布, 由此可以看到在中性点上下相对位移方向不同, 随着荷载的不断加大, 桩土相对位移也不断地加大。

相应的桩侧摩阻力分布见图 8, 从中看到桩侧部分区段的桩土相对位移已经超过了最大弹性位移, 摩

表 1 桩、土应力结果对比

Table 1 Comparison of stresses on pile and soil

方法	荷载 146 kPa		荷载 281 kPa		荷载 351 kPa		荷载 487 kPa		荷载 554 kPa		荷载 612 kPa	
	p_p	p_s	p_p	p_s	p_p	p_s	p_p	p_s	p_p	p_s	p_p	p_s
试验值	552	118	1463	200	2062	234	3448	284	4154	307	4782	326
文献[3]	818	100	1880	171	2467	206	3635	271	4215	302	4722	303
文献[4]	708	107	1722	182	2302	217	3457	283	4031	315	4529	343
本文结果	679	100	1691	184	2262	220	3417	286	3997	318	4503	345
误差/%	23	-7	16	-8	10	-6	-1	1	-4	4	-6	6

阻力达到了极限值, 桩侧摩阻力的分布呈三段式分布, 这与 Chow^[5]和池跃军^[3]等的研究是一致的。而且随着荷载的不断加大, 进入塑性区的范围不断变大。

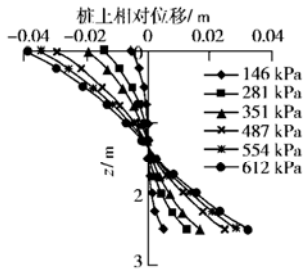


图7 桩土相对位移图

Fig. 7 Relative displacement between pile and soil

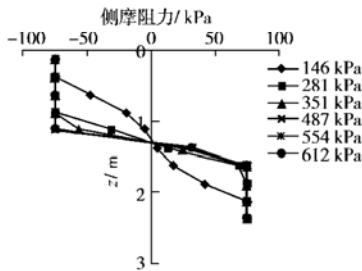


图8 侧摩阻力分布图

Fig. 8 Distribution of skin friction

3 桩土应力比的影响因素分析

在上述算例基础上, 取基础上荷载 $p = 487 \text{ kPa}$ 进行分析。只改变其中一个参数, 其他基本计算参数与前述算例相同, 图9给出了桩土应力比随垫层厚度、垫层模量、桩距和桩间土模量的变化情况。

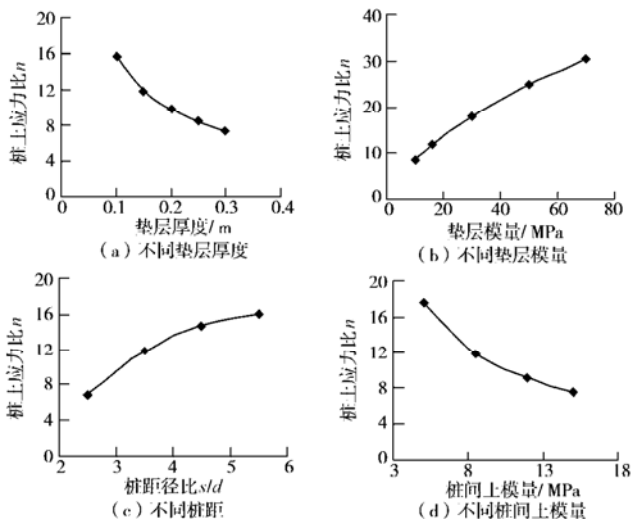


图9 不同条件下的桩土应力比

Fig. 9 Stress ratio for different conditions

从图9(a)可见, 随着垫层厚度的增加, 桩土应力比减小, 并逐渐趋向于稳定, 说明垫层使应力分布比较均匀; 图9(b)表明随着垫层模量的增加, 桩身

应力集中更显著, 荷载更多的向桩体转移; 这些规律与文献[2]的数值模拟结果一致。图9(c)中当桩距增加, 置换率减小, 荷载更多的由土体承担, 桩顶的应力集中会增加, 桩土应力比逐渐增大。图9(d)表示随着桩侧土模量的增加, 即随桩土模量比的减小, 桩土应力比逐渐减小。

4 结 语

(1) 本文得到的桩土应力比随垫层厚度、垫层模量、桩距和桩间土模量变化的规律表明了合理选择这些设计参数的重要性。

(2) 本文方法采用数值计算, 可以方便地考虑桩顶刺入垫层后的应力与刺入变形的关系; 桩顶应力与刺入变形的关系需要通过试验基础上建立。

(3) 本文方法是建立在大面积群桩复合地基的一维压缩变形基础上, 说明桩侧土只受 K_0 固结, 不存在强度问题; 同时说明, 对于一般的群桩复合地基, 本文计算结果只适合于中央部位的桩。对于既能充分反应刚性桩复合地基的受力特点, 又能反映不同部位刚性桩复合地基差异的计算方法有待进一步研究。

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, 2003:28 - 34.(GONG Xiao-nan. Design and construction guide of composite foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003:28 - 34.)

[2] 李 宁, 韩 焯. 复合地基中褥垫作用机理研究[J]. 岩土力学, 2000,21(1):10 - 15.(LI Ning, HAN Xuan. Numerical tests on the mechanism of the cushion in composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000,21(1):10 - 15.)

[3] 池跃君, 沈 伟, 宋二祥. 桩体复合地基桩、土相互作用的解析法[J]. 岩土力学, 2002,23(5):546 - 550.(CHI Yue-jun, SHEN Wei, SONG Er-xiang. Analytical method for calculating pile-soil-cushion interaction of composite grounds with piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(5):245 - 550.)

[4] 沈 伟, 池跃君, 宋二祥. 考虑桩、土、垫层协同作用的刚性桩复合地基沉降计算方法[J]. 工程力学, 2003,20(2):36 - 42.(SHEN Wei, CHI Yue-jun, SONG Er-xiang. Settlement calculation of composite group with rigid piles including pile-soil-cushion interaction[J]. Engineering Mechanics, 2003,20(2):36 - 42.)

[5] CHOW Y K, CHIN J T, LEE S L. Negative skin friction on pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geotechnics, 1990,14:75 - 91.