

多元复合地基桩土应力比分析*

尚新生, 邵生俊

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

[摘 要] 从单桩与桩间土的荷载-沉降曲线出发, 采用荷载-沉降的双曲线模型, 给出了多元复合地基桩土应力比的解析解。分析表明, 桩土应力比随荷载的变化形式有3种, 具体的变化形式与桩、桩间土的初始切向压缩模量和极限承载强度有关。实例计算表明, 所得解析解与实测桩土应力比值基本吻合。

[关键词] 多元复合地基; 双曲线模型; 桩土应力比; 初始切向压缩模量; 极限承载强度

[中图分类号] TU 431

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)10-0131-04

多元复合地基是在复合地基的基础上发展而来的, 它指由2种或2种以上不同材料或桩长的桩与土组成的复合地基。桩土应力比是指桩顶应力与桩间土平均应力之比, 是反映复合地基工作性状、衡量复合地基桩土是否达到良好协同工作状态的重要指标。

对复合地基桩土应力比(n)问题, 龚晓南^[1]通过有限元分析发现, 桩体模量比、桩体长径比、地基置换率等对 n 值有一定的影响。韩杰等^[2]认为, n 与应力水平的关系随桩体刚度的变化而变化, 对于散体桩和柔性桩复合地基, n - p 关系曲线具有峰值; 而对于刚性桩, 则大致呈一直线。陈振建等^[3]通过先求解碎石桩中的垂向和桩侧应力比值来判断破坏形式, 再根据破坏形式选择适用的理论来推导临界状态的应力比公式。陈晓平等^[4]采用邓肯-张非线性模型计算了搅拌桩桩土应力比随荷载的变化特性。赵平等^[5]则采用自调整双曲线模型对碎石桩复合地基桩土应力比结果进行了拟合。秦然等^[6]研究了水泥土桩复合地基桩土应力比随荷载的变化规律。另有学者^[7~10]通过试验研究了复合地基桩土应力比。

而对于多元复合地基桩土应力比问题, 由于问题的复杂性, 现有的研究方法一般采用数值方法^[11, 12]或试验手段^[13]。数值方法只有建立在精确的桩土本构模型和计算参数基础上, 其结果才具意义。而试验方法由于代价较大, 只在重要工程上才采用。作者从单桩与软土的荷载-沉降曲线出发, 采用荷载-沉降双曲线模型, 通过计算得到了多元复合地基桩土应力比随荷载变化的解析表达式, 并据此分

析桩土应力比与荷载的关系及各参数对曲线形状的影响; 同时将解析公式计算结果与工程实例进行了比较, 以验证解析公式的合理性。

1 多元复合地基桩土应力比分析

1.1 单桩与软土的荷载—沉降模型

大量试验^[14]发现, 单桩与天然土的荷载—沉降曲线具有双曲线性质, 为此, 可将单桩及地基土的荷载(p)—沉降(s)关系统一表示为:

$$p_i = b_i s_i / (a_i + s_i) \quad (i = 1, 2, s) \quad (1)$$

式中, p_i 为单桩及地基土承担的轴向荷载; b_i 表示单桩及地基土的极限承载强度; s_i 为单桩及地基土在相应荷载下的沉降量; a_i 为单桩及地基土的极限承载强度与其荷载-沉降曲线初始点切向压缩模量的比值。用 E_{p1} , E_{p2} , E_s 分别表示单桩及地基土荷载-沉降曲线初始点切向压缩模量, 有 $E_{p1} = b_1/a_1$, $E_{p2} = b_2/a_2$, $E_s = b_s/a_s$, 其关系如图1所示。

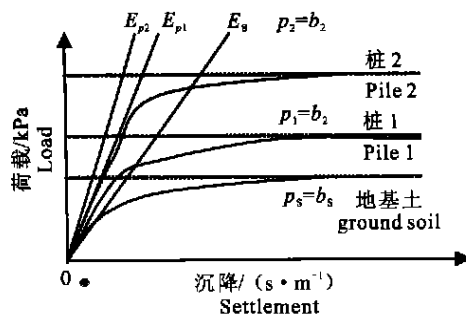


图1 单桩与地基土荷载-沉降模型

Fig 1 Load-settlement model for pile and ground soil

* [收稿日期] 2004-04-19

[基金项目] 国家自然科学基金项目(10172027)

[作者简介] 尚新生(1966-), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 在读博士, 主要从事岩土工程及地基基础处理研究。

1.2 桩土应力比解析算式

多元复合地基计算模型见图 2。

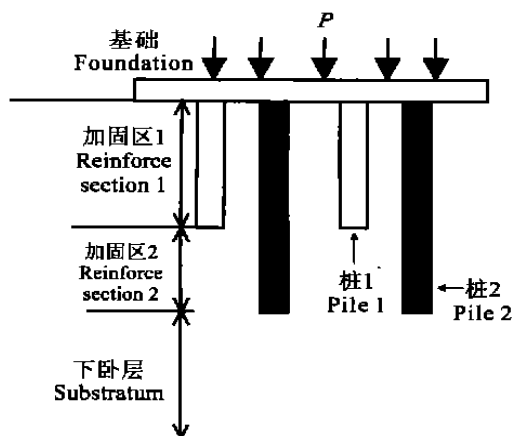


图 2 多元复合地基模型

Fig 2 Model of multielement composite foundation

在上部荷载 p 作用下, 桩土承担的荷载满足:

$$p = m_1 p_1 + m_2 p_2 + (1 - m_1 - m_2) p_s \quad (2)$$

式中, p 为多元复合地基受到的总荷载; p_1, p_2, p_s 分别为桩 1, 桩 2 和地基土承担的荷载; m_1, m_2 分别为桩 1 和桩 2 的面积置换率。

设桩 1 和桩 2 的桩土应力比分别为:

$$n_1 = \frac{p_1}{p_s}, \quad n_2 = \frac{p_2}{p_s}$$

代入(2)式, 有:

$$p_1 = \frac{n_1 p}{m_1 n_1 + m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)}$$

$$p_2 = \frac{n_2 p}{m_1 n_1 + m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)}$$

用 s_1, s_2, s 分别表示多元复合地基中桩 1 和桩 2 沉降量及复合地基沉降量, 假定桩 1, 桩 2 和桩间土变形协调, 即 $s_1 = s_2 = s$, 则有:

$$n_1 = \frac{p_1}{p_s} = (p_1/s_1)/(p_s/s) = \frac{a_s}{a_1} \cdot \frac{[m_1 n_1 + m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)] b_1 - n_1 p}{[m_1 n_1 + m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)] b_s - p} \quad (3)$$

$$n_2 = \frac{p_2}{p_s} = (p_2/s_2)/(p_s/s) = \frac{a_s}{a_2} \cdot \frac{[m_1 n_1 + m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)] b_2 - n_2 p}{[m_1 n_1 + m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)] b_s - p} \quad (4)$$

(3), (4) 式即为本文给出的桩土应力比与荷载关系的解析表达式。其中 a_i, b_i 可从荷载-沉降曲线拟合得到, m_1 和 m_2 为已知, 则任意荷载下的桩土应力比均可求出。

下面通过数学变换研究桩土应力比与荷载的曲线关系以及各参数对曲线形状的影响。

(3) 式可写为:

$$m_1 b_s n_1^2 + \{[m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)] b_s - \frac{a_s}{a_1} m_1 b_1\} n_1 +$$

$$(\frac{a_s}{a_1} - 1) p n_1 - \frac{a_s}{a_1} [m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)] b_1 = 0$$

$$\text{设 } A_{22} = m_1 b_s, 2A_{23} = [m_2 n_2 + (1 - m_1 - m_2)] b_s -$$

$$\frac{a_s}{a_1} m_1 b_1, 2A_{12} = \frac{a_s}{a_1} - 1, A_{33} = -\frac{a_s}{a_1} [m_2 n_2 + (1 - m_1 -$$

$m_2)] b_1 < 0$, 则(3)式为:

$$2A_{12} p n_1 + A_{22} n_1^2 + 2A_{23} n_1 + A_{33} = 0 \quad (5)$$

在(5)式中, 令 $p + \frac{A_{23}}{A_{12}} = p' \cos \theta, n_1 \sin \theta, n_1 =$

$p' \sin \theta + n_1' \cos \theta$, 则(5)式变为:

$$(A_{22} \sin^2 \theta + A_{12} \sin 2\theta) p'^2 + (A_{22} \cos^2 \theta - A_{12} \sin 2\theta) n_1'^2 + A_{33} = 0 \quad (6)$$

该方程表示双曲线, 其中 θ 角满足: $\tan 2\theta = -\frac{2A_{12}}{A_{22}}$, 新坐标系 $(p'; n')$ 为原坐标系向右平移至点 $(-\frac{2A_{23}}{A_{12}}, 0)$, 再绕该点逆时针旋转 θ 角而成。

同理, (4) 式为:

$$2A_{12} p n_2 + A_{22} n_2^2 + 2A_{23} n_2 + A_{33} = 0 \quad (7)$$

其中 $A_{22} = m_2 b_s, 2A_{23} = [m_1 n_1 + (1 - m_1 - m_2)] b_s -$

$$\frac{a_s}{a_2} m_2 b_2, 2A_{12} = \frac{a_s}{a_2} - 1, A_{33} = -\frac{a_s}{a_2} [m_1 n_1 + (1 - m_1 -$$

$m_2)] b_2$, 最终(7)式可化为:

$$(A_{22} \sin^2 \theta + A_{12} \sin 2\theta) p'^2 + (A_{22} \cos^2 \theta - A_{12} \sin 2\theta) n_2'^2 + A_{33} = 0 \quad (8)$$

下面对式(6)分 3 种情况讨论:

$$a_2 < a_s, a_1 < a_s$$

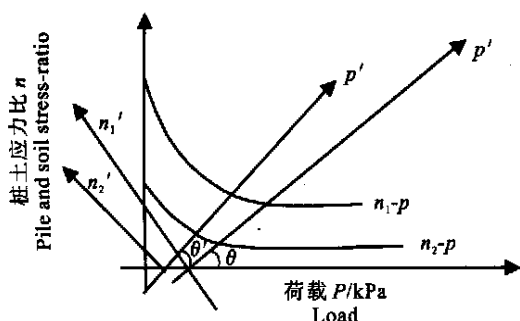
此时 $\tan 2\theta < 0, \frac{\pi}{4} < \theta < \frac{\pi}{2}, A_{22} \cos^2 \theta - A_{12} \sin 2\theta < 0$, 式(6)为满足下列双曲线方程的一支:

$$\frac{p'^2}{-A_{33}/(A_{22} \sin^2 \theta + A_{12} \sin 2\theta)} - \frac{n_1'^2}{A_{33}/(A_{22} \cos^2 \theta - A_{12} \sin 2\theta)} = 1$$

同理, 式(8)为:

$$\frac{p'^2}{-A_{33}/(A_{22} \sin^2 \theta + A_{12} \sin 2\theta)} - \frac{n_2'^2}{A_{33}/(A_{22} \cos^2 \theta - A_{12} \sin 2\theta)} = 1$$

此时, n_1, n_2 均随 p 的增加而递减(图 3)。

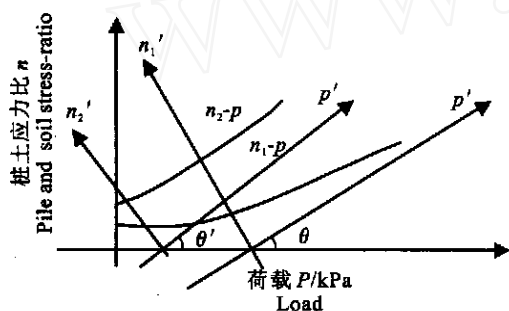
图 3 n_1, n_2 随 p 增加而递减曲线Fig 3 Decrease of n_1 and n_2 with increase of p

$$a_2 > a_s, a_1 > a_s$$

此时 $\tan 2\theta > 0, A_{22} \sin^2 \theta - A_{12} \sin 2\theta < 0$, 则式(6)为满足下列双曲线方程的一支:

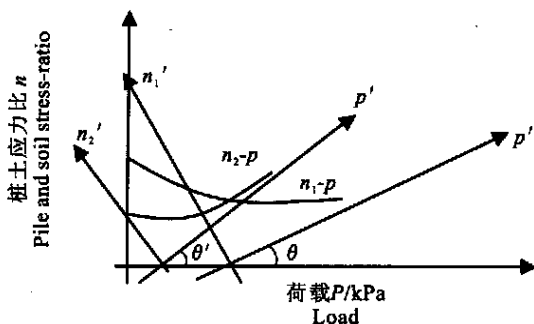
$$\frac{\frac{p^2}{A_{33}/(A_{22} \sin^2 \theta + A_{12} \sin 2\theta)} - \frac{n_1^2}{A_{33}/(A_{22} \cos^2 \theta + A_{12} \sin 2\theta)}}{1} = 1$$

此时, n_1, n_2 均随 p 的增加而递增(图 4)。

图 4 n_1 和 n_2 随 p 增加而递增曲线Fig 4 Increase of n_1 and n_2 with increase of p

$$a_1 > a_s, a_2 < a_s; \text{ 或 } a_1 < a_s, a_2 > a_s$$

此时, n_1 和 n_2 随 p 的增加一个递增, 另一个递减(图 5)。

图 5 $n_1(n_2)$ 随 p 增加而递减或递增曲线Fig 5 Decrease of $n_1(n_2)$ and increase of $n_2(n_1)$ with increase of p

由上述分析可见, $n-p$ 曲线形状由 a_1/a_s 和

a_2/a_s 值决定。由 $\frac{a_1}{a_s} = \frac{b_1 E_s}{b_s E_{p1}}, \frac{a_2}{a_s} = \frac{b_2 E_s}{b_s E_{p2}}$ 可知, 曲线形

状实际上由桩土的初始切向压缩模量比与极限承载强度共同决定。

2 实例验证

某大学试验楼工程场地^[13], 地层为湿陷性黄土地基, 为消除湿陷性, 提高承载力, 采用了刚性的素砼桩与半刚性的夯实水泥土挤密桩, 组成多元复合地基。复合地基中水泥土桩和素砼桩交叉布置, 同类桩的中心距为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 水泥土桩成孔直径 0.4 m , 桩长 $7.0 \sim 7.5 \text{ m}$; 素砼桩桩径为 0.5 m , 桩长 $12.0 \sim 14.5 \text{ m}$ 。为了解多元复合地基 2 种桩体及桩间土的应力分布及应力比, 进行了静载试验, 实测了桩土应力比, 荷载曲线见图 6。而由单桩、桩间土载荷试验数据经拟合得: 对素砼桩 $b_2 = 3995 \text{ kPa}$, 水泥土桩 $b_1 = 4642 \text{ kPa}$, $a_1/a_2 = 2.18$ 。由解析式计算得到的 n_1 和 n_2 见图 6。由图 6 可见, 计算值与实测值基本吻合。

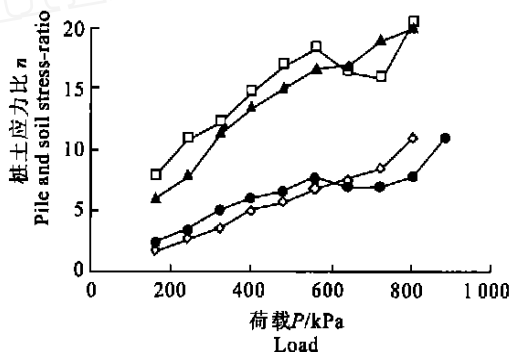


图 6 解析解计算值与实测桩土应力比值结果

- □ - . 素砼桩(实测); - ● - . 水泥土桩(实测);
-- ▲ -- . 素砼桩(解析解); -- ○ -- . 水泥土桩(解析解)

Fig 6 The pile soil stress-ratio of analytical and tested values

- □ - . Concrete pile (tested); - ● - . Cement pile (tested);
-- ▲ -- . Concrete pile (Analytical method);
-- ○ -- . Cement pile (Analytical method)

3 结 论

1) 多元复合地基的桩土应力比随荷载的变化而变化, 并不是常数。

2) 多元复合地基中 2 种桩体的桩土应力比随荷载的变化情况有 3 种形式: n_1, n_2 均随 p 增加而递增; n_1, n_2 均随 p 增加而减少; 当 n_1 随 p 增加而递减时, n_2 随 p 增加而递增; 当 n_2 随 p 增加而递减时, n_1 随 p 增加而递增。上述 3 种形式主要由桩土的切向压缩模量比与极限承载强度决定。而就目前实测桩土应力比来看, 基本上是上述 3 种形式, 这也

从侧面说明本解析公式的合理性。

3) 研究多元复合地基的桩土应力比对于工程设计具有特别重要的意义。本文从单桩与桩间土的 $p-s$ 曲线出发, 给出了桩土应力比与荷载的关系解析式, 计算简便, 具有应用上的优越性。

4) 实例计算表明, 本文解析解计算值基本与实测桩土应力比值吻合, 说明本方法合理可行。

5) 本文假定了桩土变形协调, 未考虑桩土界面滑动情况, 因此对非变形协调下桩土应力比的问题还需进行深入研究。

[参考文献]

- [1] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- [2] 韩杰, 叶书麟. 碎石桩复合地基的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(增刊): 13- 19
- [3] 陈振建, 盛崇文. 满堂加固碎石桩地基承载力[J]. 水利水运科学研究, 1987, (3): 51- 56
- [4] 陈晓平, 邢仲星. 复合地基中桩土应力数值分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(11): 5- 8
- [5] 赵平, 赵明华, 赵明, 等. 确定碎石桩复合地基桩土应力比的新方法[J]. 公路, 2003, (3): 38- 41
- [6] 秦然, 陈征宙, 董平. 水泥土桩复合地基桩土应力比的一种解析算法[J]. 岩土工程学报, 2001, 22(1): 96- 98
- [7] 包华, 崔开太, 徐汉涛, 等. 小直径刚性桩复合地基桩土应力比初步研究[J]. 南通工学院学报(自然科学版), 2003, 2(4): 50- 53
- [8] 闫明礼, 吴东刚. 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
- [9] 吴慧明. 不同刚度基础下复合地基性状研究[D]. 浙江杭州: 浙江大学建筑工程学院岩土工程研究所, 2000
- [10] 刘三仓, 韩思珍. 灰土桩挤密地基的桩土应力比及承载力探讨[J]. 岩土工程学报, 1996, 19(1): 34- 37
- [11] 唐朝文. 刚性桩与柔性桩复合桩基的受力与变形性状研究[D]. 浙江杭州: 浙江大学建筑工程学院岩土工程研究所, 2002
- [12] 杨秀红. CFG 桩联合碎石桩组合型复合地基的有限元分析[D]. 辽宁沈阳: 辽宁工程技术大学土木建筑工程学院, 2001
- [13] 刘奋勇, 杨晓斌, 刘学. 混合桩型复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 71- 75
- [14] 秦建庆, 叶观宝, 费涵昌. 水泥土桩复合地基桩土分担荷载的试验研究成果[J]. 工程勘察, 2000, 18(1): 35- 37

Stress ratio between piles and soils of multi-element composite foundation

SHANG Xin-sheng, SHAO Sheng-jun

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The analytical solving of stress ratio between piles and soils for multi-element composite foundation is given by using the hyperbola model of load-settlement based on the curve of load-settlement of the single pile and soil. The paper discusses the effect of applied load upon the stress ratio between piles and soils. There are three types of $n-p$ which are mainly concerned with the limited bearing capacity and initial tangential modulus. The results from the analytical calculation are found to be in agreement with that by actual solution.

Key words: multi-element composite foundation; hyperbola model; stress ratio between piles and soils; initial tangential compact modulus; limited bearing capacity