

考虑桩土滑移和整体刚度动态调整的群桩分析方法

吴 鹏¹, 龚维明², 梁书亭², 朱建民²

(1. 中南大学土木学院, 湖南 长沙 410075; 2. 东南大学土木学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 在分析了大型群桩研究现状的基础上, 提出了考虑桩土滑移和群桩桩顶整体刚度动态调整的分析计算方法。并将本文方法与一个离心模型试验结果进行了对比, 论证了本文方法的正确性。在此基础上, 分析了刚性承台条件下超大群桩基础的荷载位移曲线变化规律以及桩顶荷载分布规律受桩土刚度比、桩长、桩径、桩距、桩数、土性等因素的影响规律。

关键词: 桩土滑移; 群桩; 刚度动态调整; 桩土相互作用

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)02-0225-06

作者简介: 吴 鹏(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 主要从事桩基和地下工程等方面的研究。E-mail: wupeng008@eyou.com。

Analytic method of pile groups considering slipping between piles and soil and dynamic adjustment of integral stiffness

WU Peng¹, GONG Wei-ming², LIANG Shu-ting², ZHU Jian-ming²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Civil Engineering,

Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the current studies on large pile groups, an analytical method considering slip of piles and soil and dynamic adjustment of integral whole stiffness of pile groups was put forward. The calculated result was verified by use of centrifuge tests. Furthermore, it was shown that load-displacement of pile groups and load distribution on pile top were affected by properties of soil and stiffness ratio of piles to soil, and by length, diameter, spacing, and number of piles.

Key words: slipping between piles and soil; pile group; dynamic adjustment of stiffness; pile-soil-pile interaction

0 引 言

在土木建设中, 群桩基础是一种出现历史长又应用十分广泛的地基基础形式。对于群桩基础的理论研究一直在持续, 也发展了多种分析方法。但至今为止, 也没一种通用而精度较高的方法, 因此对于群桩基础尤其是超大型群桩基础的理论研究的深入非常必要。

目前, 群桩分析方法主要有等代墩基法、弹性理论法、有限单元法、变分法和混合法等。

(1) 等代墩基法是群桩沉降计算的一种简化方法, 在工程实践中用得最多, 也是目前规范方法。但是, 其经验性较强。

(2) Polous^[1]和 Davis^[2]首次系统地提出了根据 Mindlin 位移解计算均质弹性半空间中桩基沉降的弹性理论法。但是纯粹的弹性理论方法的计算结果与实测值相差较大。

(3) 有限单元方法^[3]是迄今为止发展最为迅速的方法。该方法还能考虑土的固结, 能够计算沉降与时间的关系以及由此引起的桩顶荷载重分布, 但由于计

算参数较多且不好选取, 三维计算要求内存大, 计算时间长, 其使用范围受到影响。

(4) W Y Shen^[4-5]提出了群桩变分分析方法, Butterfield^[6]提出了边界单元法, 但是这两种方法应用得较少。

(5) 混合法是用荷载传递函数法模拟群桩中每一单桩的非线性行为, 而用 Mindlin 解、有限层元法等来考虑桩-土-承台的相互弹性作用。这是目前研究者较多采用的办法。O'Neill^[7]提出了一种混合迭代方法, 该方法对单桩与土的作用采用荷载传递函数, 对桩-土-桩作用近似采用经验系数。Chow^[8]对桩-土-桩作用采用了更精确的方法, 建立了全局刚度。Randolph^[9]和 Kraft^[10]采用同样的方法, 且考虑了土的非线性影响。由于前面的这些方法都是建立总体刚度矩阵, 因此需要大量的计算机存储。因此, Chow^[11]

基金项目: 江苏省交通厅科学研究项目(04Y029); 江苏省研究生创新计划项目

收稿日期: 2005-11-23

又提出了一种各桩刚度不耦合的迭代方法。这就大大降低了计算机存储的需要。D C Hong^[12]在文献[11]的基础上进一步提高了收敛速度。

上述提到的混合方法中,其中大多数没有考虑到桩土之间的滑移,也未能考虑到群桩整体刚度随荷载大小不同而变化,这与超长大型群桩基础的实际工作状况是有差别的。因此,本文在前人研究基础上提出了考虑桩土滑移及群桩刚度变化的群桩混合分析方法。同时,本文在计算过程中尝试采用“数乘”避免矩阵乘法带来的大量计算,从而节省计算机时。

在工程实践中,对群桩基础我们最关心的就是桩顶荷载与桩顶位移间的关系及桩顶荷载的分布规律。因此,对这两个问题在文中也进行了较详细的讨论。

1 理论分析

1.1 基本假定

其基本假定为:①桩间土假定为理想均匀土,具有各向同性的弹性模量 E_s 和泊松比 ν_s ,并且,这种特性不受到桩基础的影响;②桩的截面假定为圆形,其材料假定为具有不变弹性参数的材料,弹性模量为 E_p 和泊松比 ν_p ,并且假定桩身具有良好的垂直度;③假定承台绝对刚性,即所有的桩顶位移相等,并假定承台与土脱空即不受土反力;④群桩只受竖向均匀荷载作用,且荷载不存在偏心。

1.2 分析思路

定义 $\mathbf{AB}=\mathbf{C}$ 表示 $a_{ij}b_{ij}=c_{ij}$; $\mathbf{A/B}=\mathbf{C}$ 表示 $a_{ij}/b_{ij}=c_{ij}$ 。对于某 $r \times s$ 的群桩(对不规则排列,也不一定每排桩数相等的群桩也可类似处理)有:

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1s} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{r1} & \delta_{r2} & \dots & \delta_{rs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1s} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{r1} & p_{r2} & \dots & p_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1s} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{r1} & w_{r2} & \dots & w_{rs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

即

$$[\Delta_h] \cdot [p_h] = [w_h] \quad (2)$$

式中 δ_{ij} 为柔度系数,即所有桩顶荷载确定的情况下第 i 排 j 列的桩的桩顶单位荷载引起的桩顶位移; p_{ij} 为第 i 行第 j 列桩的桩顶荷载; w_{ij} 为第 i 行第 j 列桩的桩顶位移; $[\Delta_h]$ 为随荷载动态变化的柔度系数矩阵; $[p_h]$ 为桩顶荷载矩阵; $[w_h]$ 为桩顶位移矩阵。

在式(1)中,对应于每一确定的荷载矩阵 $[p_h]$,柔度系数矩阵 $[\Delta_h]$ 就是确定的。现在的关键问题就是确定给定荷载 $[p_h]$ 下的 $[\Delta_h]$ 。

1.3 单桩分析

1.3.1 确定单桩初始应力和位移

采用荷载传递法进行单桩分析,桩侧荷载传递函数有很多,最好是通过现场静载试验得出,本文采用

的桩侧荷载传递函数为

$$\tau = s/(a + bs) \quad (3)$$

$$a = 1/K_l \quad (4)$$

$$b = R_f/P_f \quad (5)$$

式中 a 为接触面初始剪切模量的倒数; K_l 为该单元所在桩段点与其侧面土体之间的最大剪切刚度,一般根据经验取得; b 为接触面所能承受剪应力极限值的倒数; R_f 为破坏比,即该极限值摩阻力的容许发挥程度; P_f 为该单元所在桩段点受其侧面土体向上作用的最大摩阻力; s 为桩土相对滑移。

桩端荷载传递函数也有很多,宜采用实测结果,也可采用弹性解,本文采用桩端荷载传递函数为

$$\begin{cases} \sigma_b = k_{b1}s_b & (s_b \leq s_0) \\ \sigma_b = k_{b1}s_0 + k_{b2}(s_b - s_0) & (s_b > s_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中 σ_b 为桩端应力; k_{b1}, k_{b2} 为桩端刚度系数; s_0 为桩端界限刺入变形; s_b 为桩端刺入变形。

单桩的控制微分方程为

$$-E_p A_p \frac{d^2 w}{dz^2} + K_h(w - w_0) = 0 \quad (7)$$

式中 A_p 为桩身截面积; w 为该处桩的竖向位移; z 为该处土的深度; K_h 为桩土界面剪切刚度, $K_h = \frac{2\pi r_0 L}{n} k_h$; r_0 为桩半径; L 为桩长; n 为桩身划分单元数; k_h 为桩土相对滑移刚度; w_0 为该处土的竖向位移。

假如给定某一桩 m 桩顶竖向荷载 P_0 ,此时不考虑其它桩对该桩的影响,将式(7)离散后有:

$$\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & k_b A_p \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} w_{p0}^m \\ w_{pb0}^m \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} w_{s0}^m \\ w_{sb0}^m \end{Bmatrix} \right) = \begin{Bmatrix} P_{s0}^m \\ P_{b0}^m \end{Bmatrix} \quad (8)$$

对桩侧土有:

$$[K_s] \begin{Bmatrix} w_{s0}^m \\ w_{sb0}^m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{s0}^m \\ P_{b0}^m \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中 K 为单桩桩侧的剪切刚度矩阵; k_b 为单桩桩端刚度系数,即上文的 k_{b1} 或 k_{b2} ; w_{s0}^m 为桩 m 桩侧土单元的位移向量; w_{sb0}^m 为桩 m 桩端土单元的位移; w_{p0}^m 为桩 m 桩身单元的位移向量; w_{pb0}^m 为桩 m 桩端单元的位移; P_{s0}^m 为桩 m 桩侧每单元的侧阻力向量; P_{b0}^m 为桩 m 桩端阻力; $[K_s]$ 为桩侧土刚度矩阵。

值得注意的是, K 和 k_b 都不是常量,因此需要编程迭代,故将式(8)、(9)进一步离散化如式(10)~(13),参考图1。

$$w_{pi} = w_{pm} + \sum_{j=i+1}^n \frac{P_j L}{E_p A_p n} \quad (10)$$

式中, w_{pi} 为桩第 i 单元位移; P_j 为桩第 j 单元轴力。

$$P_i = P_n + \sum_{j=i+1}^n \frac{2\pi r_0 L \tau_j}{n} \quad (11)$$

式中, τ_j 为桩第 j 单元桩侧剪力。

$$\tau_i = (w_{pi} - w_{si}) / [a + b(w_{pi} - w_{si})] \quad (12)$$

式中, w_{si} 为桩周土第 i 单元位移。

$$\tau_i = k_s w_{si} \quad (13)$$

式中, k_s 为桩侧土剪切刚度。

由式 (10) ~ (13) 编程计算可以得到单桩的应力、位移状态。

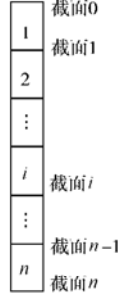


图1 单桩单元示意图

Fig. 1 Sketch map of single pile

1.3.2 确定单桩的桩单元刚度以及周边土单元刚度

(1) 土刚度计算

根据剪切位移法知桩侧处土的位移^[13]为

$$w_{si} = \frac{\tau_i r_0}{G_s} \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (14)$$

式中, G_s 为土的剪切模量, r_m 为影响半径, $r_m = 2.5L(1 - \nu_s)$ ^[14]。

则桩侧土的刚度为

$$k_s = G_s / (r_0 \ln(r_m / r_0)) \quad (15)$$

这里需要说明的是, 剪切位移法的基本假定是桩土不滑移。但单独考虑土体, 是否考虑桩土滑移是不影响土的计算结果的, 而事实上也有学者做过将荷载传递法和剪切位移法结合使用的尝试。

(2) 桩刚度计算

为方便计算说明, 定义桩土相对滑移刚度为

$$k_h = \tau / s = 1 / (a + bs) \quad (16)$$

由式 (15) 可看出桩的侧阻力刚度是动态变化的。

1.4 单桩对其它桩的影响

一旦桩 m 的应力和位移状态确定, 桩 m 的 j 单元对土的作用引起群桩中其它桩处土的位移为

$$w_{0ij}^{(1)} = \alpha_{ij} P_j^{(1)} \quad (17)$$

式中 $w_{0ij}^{(1)}$ 为桩 m 的 j 单元在其它桩的 i 节点引起土的位移, 其中右上标表示考虑相互作用的计算次数; α_{ij} 为影响系数, 即 j 点单位力在 i 点引起土的位移, 根据 Mindlin 解得出; $P_j^{(1)}$ 为桩 m 的 j 节点的桩土作用力。

根据弹性理论中的叠加原理有

$$w_{0i}^{(1)} = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} P_j^{(1)} \quad (18)$$

式中, $w_{0i}^{(1)}$ 为桩 m 在 i 节点引起土的位移。

1.5 所有桩对某桩的影响

同样根据弹性理论中的叠加原理, 对某 $r \times s$ 的群

桩中第 p 排 q 列的桩的 i 单元, 将其它桩的所有作用力全部叠加即可, 如下所示:

$$w_{0i}^{(1)} = \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^s \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} P_j^{(1)} \quad (k \neq p, l \neq q) \quad (19)$$

1.6 受影响的桩处桩土平衡

受影响后的桩处土与桩会进行一次平衡, 同样, 将式 (7) 离散化可得

$$\frac{2\pi r_0 L}{n} \{\tau\} + [K_s] \{w_s\} = [K_s] \{w_0\} \quad (20)$$

式中 $\{\tau\}$ 为单桩侧阻力向量; $\{w_s\}$ 为单桩周围的土单元协调后竖向位移向量; $\{w_0\}$ 为单桩周围的土单元初始竖向位移向量。

式 (20) 为桩土体系的平衡方程, 对应于土单元和桩单元分别有位协调方程如式 (21)、(22):

$$\{w_s\} = \{w_0\} + \frac{1}{k_s} \{\tau\} \quad (21)$$

$$\{w_p\} = \{w_{pn}\} + \frac{L}{nE_p A_p} [M] \{P\} \quad (22)$$

$$\{P\} = \frac{2\pi r_0 L}{n} [M] \{\tau\} + \sigma_b A_p \{1 \ 1 \ \dots \ 1\}_{n \times 1}^{-1} \quad (23)$$

$$\text{式中, } [M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n}^T$$

由于 $\{\tau\}$ 为一非线性向量, 因此需要将式 (21) ~ (23) 进一步离散化得到式 (24) ~ (27)。

$$w_{si} = w_{0i} + \tau_i / k_s \quad (24)$$

$$w_{pi} = w_{pn} + \frac{L}{nE_p A_p} \sum_{j=i+1}^n P_j \quad (25)$$

$$P_i = P_n + \frac{2\pi r_0 L}{n} \sum_{j=i+1}^n \tau_j \quad (26)$$

$$\tau_i = \frac{w_{pi} - w_{si}}{a + b(w_{pi} - w_{si})} \quad (27)$$

经过程序计算可以得到受影响的所有桩的应力状态 $\{\tau\}$ 和位移状态 $\{w_p^{(1)}\}$ 。

1.7 其它桩的附加影响

桩 m 对其它桩产生影响后的初始应力和位移状态已得出, 但除桩 m 外的某桩 l 由桩 m 引起的初始应力状态也会对包括桩 m 在内的其它桩引起应力和位移,

$$w_{0i}^{(2)} = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} P_j^{(2)} + w_{0i}^{(1)} \quad (28)$$

式中, $w_{0i}^{(2)}$ 为桩 l 在 i 节点引起的位移, $P_j^{(2)}$ 为桩 l 的 j 节点的桩土作用力增量。

再解式 (20) 可以得出 $\{w_p^{(2)}\}$ 。

1.8 得出影响系数

如上所分析, 相互作用引起的附加沉降又会对其

它桩产生相互作用力,再引起附加沉降,如此一直迭代直到满足:

$$\frac{w_p^{(k)} - w_p^{(k-1)}}{w_p^{(k)}} < \delta, \quad (29)$$

式中, δ 为给定的相对精度。

此时,给定荷载下的各桩桩顶位移即可得出,即得出式(1)的柔度系数矩阵。

1.9 动态调整影响系数

根据荷载传递法,桩单元的桩侧阻力和桩端阻力均不是与桩顶荷载成线性关系,因此必然导致柔度矩阵的变化。即不同的桩顶荷载矩阵 $\{p_h\}$ 对应于不同的柔度矩阵 $[\Delta_h]$,因此对于每一个确定的荷载矩阵 $\{p_h\}$,都有确定的柔度系数矩阵 $[\Delta_h]$ 。

首先给定一个适当的荷载矩阵 $\{p_h^{(1)}\}$,则分析有

$$[\Delta_h^{(1)}] \cdot [p_h^{(1)}] = [w_h^{(1)}] \quad (30)$$

根据前文的刚性承台假定,可以得出桩顶位移矩阵 $[w_h]$ 中的每一个值均相等。因此可以给定某一各元素都相等的位移矩阵 $\{w_h^{(0)}\}$,得桩顶荷载矩阵 $\{p_h^{(2)}\}$,

$$[p_h^{(2)}] = [w_h^{(0)}] / [\Delta_h^{(1)}], \quad (31)$$

再以 $[p_h^{(2)}]$ 为初值,计算柔度系数 $[\Delta_h^{(2)}]$,得出 $\{w_h^{(2)}\}$,再根据

$$[p_h^{(3)}] = [w_h^{(0)}] / [\Delta_h^{(2)}], \quad (32)$$

得出桩顶荷载列向量 $[p_h^{(3)}]$,如此迭代,直到满足,

$$\frac{w_{hi}^{(k)} - w_{hi}^{(0)}}{w_{hi}^{(0)}} < \varepsilon, \quad (33)$$

式中, ε 为设定的容许误差。

当然,在计算荷载位移的程序具体实现过程中,采用了牛顿-拉普森法以提高收敛速度,即在前一个计算点收敛的基础上采用切线刚度迭代下一个增量步,具体见式(34)~(37):

$$[\Delta_{h,i+1}^{(1)}] = ([w_{h,i}^{(k_i)}] - [w_{h,i-1}^{(k_i)}]) / ([p_{h,i}^{(k_i)}] - [p_{h,i-1}^{(k_i)}]), \quad (34)$$

$$[p_{h,i+1}^{(1)}] = [p_{h,i}^{(k_i)}] + ([w_{h,i+1}^{(0)}] - [w_{h,i}^{(k_i)}]) / [\Delta_{h,i+1}^{(1)}], \quad (35)$$

$$[\Delta_{h,i+1}^{(k_{i+1})}] = ([w_{h,i+1}^{(k_{i+1})}] - [w_{h,i}^{(k_i)}]) / ([p_{h,i+1}^{(k_{i+1})}] - [p_{h,i}^{(k_i)}]), \quad (36)$$

$$[p_{h,i+1}^{(k_{i+1})}] = [p_{h,i}^{(k_i)}] + ([w_{h,i+1}^{(0)}] - [w_{h,i}^{(k_i)}]) / [\Delta_{h,i+1}^{(k_{i+1})}], \quad (37)$$

以上各式中,下标 i 表示荷载位移曲线的第 i 点,上标 k_i 表示第 i 点的迭代次数。

1.10 程序流程图

根据本文的理论分析,编写计算程序进行计算,具体流程框图见图2。本文方法在算法上相对常规的混合法更具有优越性,因为计算过程中没有形成全部单元的整体刚度矩阵,而且对于桩顶整体刚度矩阵迭代过程中是采用数乘的办法,大大节省了计算内存。采用了牛顿-拉普森迭代方法,大大提高了收敛速度。

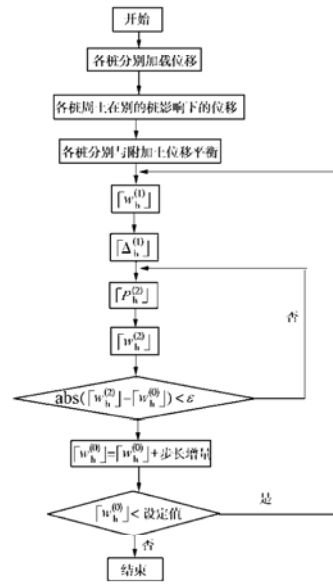


图2 程序实现流程图

Fig. 2 Flow chart of the program

2 理论与试验的对比

本文参考的离心试验是基于苏通大桥的一个18桩桩端压浆离心试验模型^[15],模型比例尺为160,模型平面见图3所示。

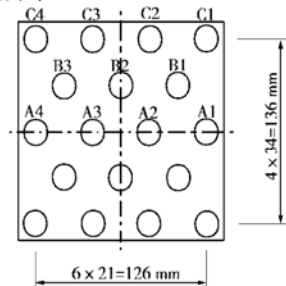


图3 离心试验模型平面图

Fig. 3 Centrifuge test model

群桩荷载位移曲线对比见图4,桩顶荷载分配比例对比见图5。计算参数采用单桩试验结果反分析得到,其中单桩对比曲线见图6。

图4~6可看出,用单桩反分析的计算参数计算群桩,导致群桩沉降的理论计算值比离心试验值要偏小一些,但基本接近。误差可能来源于离心试验的误差以及理论计算模型未能考虑土的成层性等因素有关。

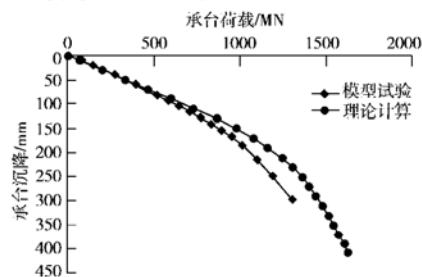


图4 群桩理论计算与离心模型试验荷载位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-displacement curves of pile groups between theoretical and centrifuge test results

表 1 计算参数

Table 1 Calculating parameters

E_p/E_s	桩距	桩长/m	桩径/m	桩数	a	b	s_0/mm	$k_{b1}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$k_{b2}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$
500	$3d$	60	1.5	3×3	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	100	6×10^6	0
1000	$4d$	90	2.0	4×4	2.5×10^{-7}	1.89×10^{-5}	200	9×10^6	1×10^6
2000	$6d$	120	2.5	5×5	5.0×10^{-7}	3.0×10^{-5}	300	12×10^6	2×10^6

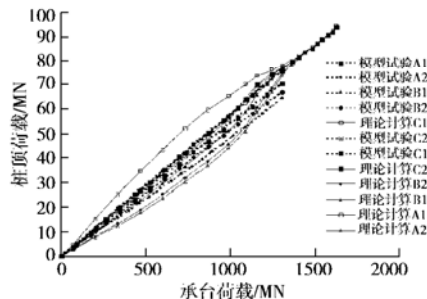


图 5 群桩理论计算与离心模型试验桩顶荷载分配关系对比
Fig. 5 Comparison of load distribution on pile top of pile groups between theoretical and centrifuge test results

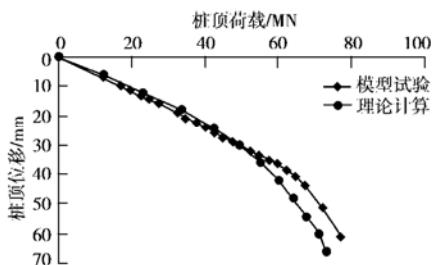


图 6 单桩理论计算与离心模型试验桩顶荷载位移曲线对比
Fig. 6 Comparison of load-displacement curves of single group between theoretical and centrifuge test results

值得说明的是, 现有文献结论都是基于短桩、小桩得出的, 其沉降一般不到 30 mm, 而本文研究的对象是超大群桩基础, 群桩整体沉降达到几百毫米。这在现有理论还未见分析过, 现场试验也不可能。因此, 理论的正确性验证更有待于实际工程监测, 以及更多的工程实践经验。

3 影响因素分析

影响群桩荷载位移特性以及桩顶荷载分布规律的因素主要有桩土刚度比、桩距、桩长、桩数和土性等, 下面就分别针对几个因素具体分析其影响。在研究某个因素时, 其它因素均采用中间值。因素取值见表 1。在这里需要说明的是, 常规群桩研究很多都是考虑长径比、距径比等无量纲量的影响, 但对于超长大直径钻孔灌注桩, 笔者还是倾向于考虑桩长、桩径等的绝对数值的影响。

3.1 土刚度 (桩土刚度比)

(1) 桩顶荷载位移曲线对比

从不同桩土刚度比承台荷载位移曲线对比图 7 可以看出, 桩土刚度比越小 (桩刚度不变, 土刚度越大), 相同的荷载下, 沉降较小。

(2) 桩顶荷载分布规律

从不同桩土刚度比桩顶荷载分配对比图 8 可以看出, 桩土刚度比越小 (桩刚度不变, 土刚度越大), 相同的荷载下, 各单桩沉降较小, 即相应的单桩承载力提高。并且, 桩土刚度比越小, 各桩之间的荷载分配越均匀。

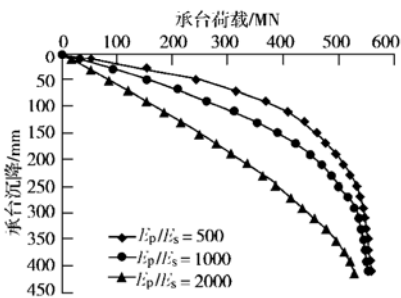


图 7 不同桩土刚度比承台荷载位移曲线对比
Fig. 7 Comparison of load-displacement curves of pile cap for different stiffness ratios of piles to soil

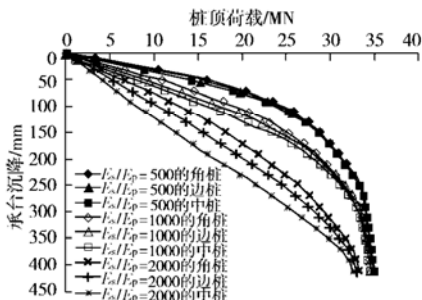


图 8 不同桩土刚度比桩顶荷载分配对比
Fig. 8 Comparison of load distribution on pile top for different stiffness ratios of piles to soil

3.2 其它因素的影响

限于篇幅, 本文对其它因素的影响不给出曲线, 只给出结论。桩距越小 (桩径不变, 距径比越小), 相同的荷载下, 沉降较大, 各单桩沉降较大, 即相应的单桩承载力降低; 桩距越小, 各桩之间的荷载分配趋于均匀。桩长越长 (桩径不变, 长径比越大), 相同的荷载下, 沉降小很多, 各单桩沉降小很多, 即相应的单桩承载力变大; 桩长越长, 各桩之间的荷载分配趋于均匀, 但影响不明显。桩径越大, 相同的荷载下, 沉降较小, 即桩径越大, 承载力越大, 各单桩沉降较小, 即相应的单桩承载力变大; 桩径越大, 各桩之间的荷载分配趋于不均匀。

很显然, 在一般情况下, 桩数越多, 承载力越高, 计算结果也是如此, 相等荷载下, 沉降越小, 各单桩

沉降较大,即相应的单桩承载力变小;桩数越多,各桩之间的荷载分配趋于不均匀。

参数 a 越小,即桩侧初始滑移刚度越大,相同的荷载下,沉降较小,即参数 a 越小,承载力越大,各单桩沉降较小,即相应的单桩承载力较大;参数 a 越小,各桩间的荷载分配趋于不均匀。参数 b 越小,即极限桩侧摩阻力越大,相同的荷载下,沉降较小,即参数 b 越小,承载力越大,桩侧极限摩阻力越大;相同的荷载下,各单桩沉降较小,即相应的单桩承载力较大;参数 b 越小,各桩之间的荷载分配趋于不均匀。

桩端界限刺入变形 s_0 对承台荷载位移曲线只在后段有影响, s_0 越大,相同荷载条件下,承台沉降稍小; s_0 对桩顶荷载分布影响较小。桩端前期刚度 k_{b1} 越大,相同的荷载下,沉降较小,各单桩沉降也较小; k_{b1} 对桩顶荷载分布影响较小。桩端后期刚度 k_{b2} 越大,相同的荷载下,沉降稍小,各单桩沉降也稍小; k_{b2} 对桩顶荷载分布影响也很小。

经过计算一个共同点就是不管采用怎样的计算参数都有角桩桩顶荷载最大,中桩的桩顶荷载最小,边桩处于中间,这与传统理论以及试验结论都是一致的。

4 结 论

(1) 利用单桩的荷载传递函数,提出了更加符合实际情况的考虑桩土相对滑移以及桩顶整体刚度随荷载动态调整的群桩分析方法,将该方法计算结果与离心模型试验结果进行对比,验证了本文方法的正确性。这对于无法进行现场试验的大型群桩基础,用单桩静载试验得出单桩荷载传递函数对群桩进行分析计算,无疑是一种非常好的办法。

(2) 以本文理论为基础,编写计算程序,针对超长直径群桩基础进行了参数分析。

(3) 详细分析了桩土刚度比、桩距、桩长、桩径、桩数、桩侧初始滑移刚度、桩侧极限摩阻力、桩端界限刺入变形、桩端前期刚度和桩端后期刚度等因素对群桩的沉降、平均单桩承载力(对应于相同桩顶沉降)和桩顶荷载分布规律的影响。

(4) 实际计算表明,计算机时较短,能较快的得到收敛解。

综上,本文以苏通大桥为工程背景,以其离心试验和静载试验为基础,在现有群桩分析基础方法上,提出了一种考虑桩土滑移,桩身压缩,由静载试验提供计算参数的适合大型群桩基础的复杂计算要求的崭新的群桩分析计算方法,该方法丰富了群桩分析计算理论,并能为工程实践提供参考。

参考文献:

- [1] POULOS H G. Analysis of settlement of pile groups[J]. Geotechnique, 1968, **18**(3): 449 - 471.
- [2] POULOS H G. DAVIS E H. Piles foundation analysis and design[M]. New York: Wiley, 1980.
- [3] OTTAVIANI M, DSC D M E. Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups[J]. Geotechnique, 1975, **25**(2): 159 - 174.
- [4] SHEN W Y, CHOW Y K, YONG K Y. Practical method for settlement analysis of pile groups[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **8**: 890 - 897.
- [5] SHEN W Y, TEH C I. Practical solution for group stiffness analysis of pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **8**: 692 - 698.
- [6] BUTTERFIELD R, et al. The elastic analysis of compressible piles and pile groups[J]. Geotechnique, 1971, **21**(1): 43 - 60.
- [7] O'NEILL M W, HAWKINS R A, MAHAR L J. Loaded transfer mechanisms in piles and pile groups[J]. Journal of Geotechnical Engineering, Div Am Soc Civ Engrs, 1982, **108**: (GT12): 1605 - 1623.
- [8] CHOW Y K. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1986, **10**(1): 59 - 72.
- [9] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of the deformation of vertically loaded piles[J]. Journal of Geotechnical Engineering Div Proc ASCE, 1978, **104**(GT12): 1465 - 1488.
- [10] KRAFT L M, et al. Theoretical t-z curves[J]. J Geotech Engng Div Proc ASCE, 1981, **107**(GT 11): 1543 - 1561.
- [11] CHOW Y K. Iterative analysis of pile-soil-pile interaction[J]. Geotechnique, 1987, **37**(3): 321 - 333.
- [12] HONG D C, CHOW Y K, YONG K Y. A method for the analysis of large vertically loaded pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, **23**: 243 - 262.
- [13] COOKE R W. Jacked piles in London clay, a study of load transfer and settlement under working condition[J]. Geotechnique, 1979, **29**(2): 113 - 147.
- [14] RANDOLPH M F, et al. An analysis of vertical deformation of pile groups[J]. Geotechnique, 1979, **29**(4): 423 - 439.
- [15] 章为民, 等. 苏通长江公路大桥主桥索塔群桩基础与土体共同作用离心模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004. (ZHANG Wei-min, et al. Centrifuge test study report of combined action of pile group and soil in main pier of Sutong Bridge[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004. (in Chinese))