

EI已经收录本文 (EI:071910593923)

层状地基中混合桩型复合地基的分析方法

梁发云¹, 陈龙珠², 李镜培¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200030)

摘要: 在均质地基中混合桩型复合地基积分方程求解方法的基础上, 引入弹性层状理论, 推导出层状地基中混合桩型复合地基的积分方程解答, 从而建立层状地基中混合桩型复合地基较为完整的理论分析体系。通过数值计算, 可求得垫层作用下桩身各点处的轴力、剪力和位移等主要工程性状, 并与典型算例进行对比, 验证了本文方法和计算程序的正确性。最后还针对一个工程实例进行具体分析, 说明本文方法能够适用于实际工程问题, 具有工程应用前景。

关键词: 层状地基; 混合桩型; 复合地基; 传递矩阵; 工程性状; 参数分析

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)03-0379-06

作者简介: 梁发云(1976-), 男, 安徽省肥东县人, 博士, 讲师, 主要从事桩基础、地基处理、岩土力学数值分析方法等领域的科研与教学工作。

Study on the behavior of composite foundation with hybrid piles in layered soils

LIANG Fa-yun¹, CHEN Long-zhu², LI Jing-pei¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the analysis of composite foundation with hybrid piles in homogeneous soil, the solutions of composite foundation with hybrid piles in layered soil were deduced by introducing elastic layered medium theory, and then a relatively complete theoretical system to analyze composite foundation with hybrid piles in layered soil was built up. Numerical method was used to solve the integral equations, and the axial forces, shear forces and displacements along piles under the actions of cushion were obtained. Comparison with classical elastic solutions verified the accuracy of the presented method and calculating program. Finally, a practical engineering project was studied to illuminate the applicability of the presented method.

Key words: layered soil; hybrid pile; composite foundation; transfer matrix; working behavior; parametric analysis

0 引言

为充分发挥各种基础形式的特点, 近年来土木工程界根据我国的实际情况, 在工程实践中逐渐发展和形成了由不同类型桩或不同长度桩所组成的混合桩型复合地基^[1]。笔者在文献[1]中基于 Muki & Sternberg^[2]提出的虚拟桩模型, 以 Winkler 分布弹簧来模拟垫层的作用, 采用积分方程理论建立了均质地基中混合桩型复合地基的分析方法。然而实际的地基土在形成过程中往往是成层沉积, 呈层状分布, 在各层内地基土的性质比较均匀, 各层之间差别较大。因此, 有必要考虑地基土的成层性。

层状地基中的群桩分析是非常复杂的问题, 除了有限元法可以进行较为精确的分析外, 一般采用的是基于各种简化模型的近似方法, 典型的方法主要有: 基于剪切位移法的近似方法(宰金珉, 1996^[3]; Guo & Randolph, 1997^[4]); 基于双层地基基本解的简化边界元法(Chow et al, 1990^[5]); 与有限层法相结合的混

合方法(Zhang & Small, 2000^[6])等, 这些方法所基于的分析理论具有明显的近似性或局限性, 层状地基中的群桩分析理论目前还没有能够得到广泛的接受。

弹性层状理论体系建立之前, Mindlin 解(1936)^[7]是桩基础沉降分析的重要理论基础。Burmister (1945)^[8]针对机场跑道设计中遇到的双层地基问题, 首先提出了积分变换法求解轴对称荷载下的双层和多层地基的理论方法。由于弹性层状理论与基础工程关系密切, 弹性层状理论在桩基分析中的应用研究一直引起许多学者的兴趣, 金波等(1997)^[9]采用传递矩阵方法得到层状地基中轴对称荷载的基本解, 并结合 Poulos 方法求解单桩沉降问题; 王建华等(2001)^[10]考虑地基土的固结和流变特性, 采用积分方程方法分析了层状饱和地基中的单桩沉降; 笔者(2006)^[11]则

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478022); 同济大学青年优秀人才培养行动计划项目(2006KJ043)

收稿日期: 2006-05-09

基于较为严格的弹性层状理论,进一步完善了层状地基中单桩的积分方程分析方法。

本文拟在文献[1]对均质地基中混合桩型复合地基求解的基础上,引入弹性层状理论,推导出层状地基中混合桩型复合地基的积分方程解答,通过数值计算,可求得垫层作用下桩身各点处的轴力、剪力和位移等主要工程性状,而计算工作量比有限元法要减少很多,能够适用于实际工程的分析计算。

1 混合桩型复合地基的分析模型

1.1 计算模型描述

层状地基中混合桩型复合地基的构成如图 1 (a) 所示,其中 n 根桩的长度、直径及弹性模量可以各不相同,垫层的厚度为 h ,在弹性半空间中建立三维坐标系,图 1 (a) 中 L_i , d_i 和 N_{0i} 分别为第 i 根桩的长度、直径和桩顶作用的竖向外荷载,图 1 (b) 中斜线阴影表示桩,第 i 根和第 j 根桩的桩间距记为 s_{ij} 。

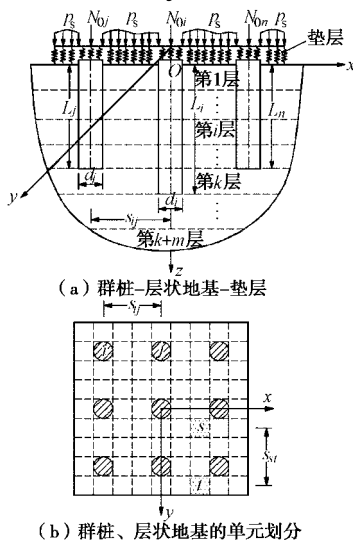


图 1 层状地基中混合桩型复合地基

Fig. 1 Composite foundation with hybrid piles in layered soils

地基土的分层情况如图 1 (a) 所示,其中长桩范围内划分为 k 层,长桩桩底以下范围内划分为 m 层,第 $k+m$ 层为半无限层,在桩长度变化的界面处需要人为的分层,第 i 层地基土的弹性模量、泊松比和厚度分别为 E_{si} , μ_{si} 和 H_i ,第 i 层土的底面至地基土表面的距离为 z_i ,地基土表面所受基底压力为 p_s 。为便于分析,假定各桩的直径相等,并将地基土在平面内离散成与桩直径相等的方形单元,平面内土单元的总数记为 t 。以第 s 个土单元作为研究对象,其表面所受压力的合力记为 Q_{0s} ,分析时将方形土单元按面积等效为圆形单元,第 s 个和第 t 个土单元的间距记为 s_{st0} 。

1.2 垫层作用的模拟

如同文献[1],采用 Winkler 分布弹簧来近似模拟

垫层的作用,可得出垫层压缩量为

$$w_{mp_i} = \frac{N_{0i}}{A_{p_i} E_{m0}}, \quad (1a)$$

$$w_{ms_s} = \frac{Q_{0s}}{A_{s_s} E_{ms}} \circ \quad (1b)$$

式中 w_{mp_i} 为位于第 i 个桩顶位置的垫层压缩量; w_{ms_s} 为位于第 s 个土单元顶面位置的垫层压缩量; E_{m0} 为桩顶垫层的变形模量; E_{ms} 为桩间土顶面垫层的侧限压缩模量; A_{p_i} 为第 i 个桩的截面面积; A_{s_s} 为第 s 个土单元的面积;其它同上。

桩-土-承台的位移协调方程如下

$$w_c = w_{p_i}(0) + w_{mp_i}, \quad (2a)$$

$$w_c = w_{s_s}(0) + w_{ms_s} \circ \quad (2b)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$; $s = n+1, n+2, \dots, n+t$; w_c 为刚性承台的位移; $w_{p_i}(0)$ 为第 i 个桩的桩顶位移; $w_{s_s}(0)$ 为第 s 个土单元的表面位移。

2 层状地基中的积分方程解法

按 Muki & Sternberg^[2]方法,分析时可将真实桩分解为虚拟土和虚拟桩,也即将图 1 的问题分解为扩展的层状半空间土和 n 根虚拟桩的叠加来分析。第 i 根虚拟桩按地基土分层情况相应的被分为 k_i 截,其中第 j 截桩所处地层的地基土弹性模量记为 E_{sj} ,则位于第 j 层土中的第 i 根虚拟桩的弹性模量 $E_{p_{*i}}^j$ 为

$$E_{p_{*i}}^j = E_{p_i} - E_{sj}, \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k_i) \circ \quad (3)$$

由虚拟桩与半空间扩展土在桩身处的竖向应变协调条件,按照文献[1]的方法,可建立求解层状地基中混合桩型复合地基第二类 Fredholm 积分方程式如下:

$$\sum_{j=1}^{k_i} N_{*i}(z) \left[\hat{\varepsilon}_{ii}(z) - \frac{1}{E_{p_{*i}}^j A_{p_i}} \right] + \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{k_j} \left[\int_{z_{m-1}}^{z_m} N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)}{\partial \xi} d\xi \right] \\ = \sum_{j=1}^n \left[N_{0j} \hat{\varepsilon}_{ij}(z, 0) \right] + \sum_{s=n+1}^{n+t} Q_{0s} \hat{\varepsilon}_{is}(z, 0) \circ \quad (4)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$; $z_{m-1}^+ \leq z < z_m^-$; z_m 为第 m 层土的层底坐标; $N_{*i}(z)$ 为第 i 根虚拟桩在 z 处的轴力;桩在 $z = \xi$ 处的截面可记为 Π_ξ 截面, $\hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)$ 为第 j 根桩 Π_ξ 截面轴线处受单位力作用时引起第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应变; $\hat{\varepsilon}_{is}(z, 0)$ 为第 s 个土单元表面受合力为单位力的均布荷载作用时引起层状扩展土在第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应变; $\hat{\varepsilon}_{ii}(z) = \hat{\varepsilon}_{ii}(z, z^+) - \hat{\varepsilon}_{ii}(z, z^-) = -\frac{(1-2\mu_s)(1+\mu_s)}{E_s A_{p_i}(1-\mu_s)}$, 此处的 E_s 和 μ_s 分别为坐标 z 所处土层的地基土弹性模量和泊松比;其它符号含义同上。

式 (4) 就是求解层状地基中混合桩型复合地基所

需的第二类 Fredholm 积分方程组, 其中的待求未知量为各虚拟桩的轴力 $N_{*j}(z)$ 。由于各桩桩顶和地基土单元表面上所受荷载均为未知, 还需补充桩顶和地基土单元表面的位移协调条件和荷载平衡条件才能求解出该超静定方程组。

与文献[1]相类似, 可求得桩顶位移和地基土单元的表面位移分别为

$$w_{pi}(0) = \sum_{j=1}^n \left\{ N_{0j} \hat{w}_{ij}(0,0) - \sum_{m=1}^{k_j} \int_{z_{m-1}^+}^{z_m^-} N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{w}_{ij}(0,\xi)}{\partial \xi} d\xi \right\} + \sum_{s=n+1}^{n+t} Q_{0s} \hat{w}_{is}(0,0), (i=1,2,\dots,n), \quad (5)$$

$$w_{ss}(0) = \sum_{j=1}^n \left\{ N_{0j} \hat{w}_{sj}(0,0) - \sum_{m=1}^{k_j} \int_{z_{m-1}^+}^{z_m^-} N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{w}_{sj}(0,\xi)}{\partial \xi} d\xi \right\} + \sum_{s=n+1}^{n+t} Q_{0s} \hat{w}_{si}(0,0), (s=n+1, n+2, \dots, n+t) \quad (6)$$

式中 $\hat{w}_{ij}(0,\xi)$ 为第 j 根桩 Π_ξ 截面轴线处受单位力作用时引起第 i 根虚拟桩桩顶截面轴线处所对应的 z 向位移; $\hat{w}_{is}(0,0)$ 为第 s 个土单元表面受合力为单位力的均布荷载作用时引起层状扩展土在第 i 根虚拟桩桩顶截面轴线处所对应的 z 向应变; 其余符号类同。

由荷载平衡条件, 即各桩顶分担荷载 N_{0i} 以及地基土单元表面的压力 Q_{0s} 之和应等于刚性筏板上作用的总荷载 N_0 , 可再补充了 1 个约束条件

$$N_0 = \sum_{i=1}^n N_{0i} + \sum_{s=n+1}^{n+t} Q_{0s} \quad (7)$$

在引入式 (2) 和式 (7) 的位移约束和荷载平衡条件后, 就可求解出式 (4) 构成的第二类 Fredholm 积分方程组, 从而得到 N_{0i} , Q_{0s} 以及各虚拟桩的桩身轴力 $N_{*j}(z)$ 和位移 $w_{pi}(z)$ 。

经过进一步推导, 还可得到第 i 根真实桩的桩身轴力 $N_i(z)$ 为

$$N_i(z) = - \sum_{j=1}^n N_{0j} \hat{f}_{ij}(z,0) + \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{k_j} \int_{z_{m-1}^+}^{z_m^-} N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{f}_{ij}(z,\xi)}{\partial \xi} d\xi - \sum_{s=n+1}^{n+t} Q_{0s} \hat{f}_{is}(z,0), (i=1,2,\dots,n; z_{m-1}^+ < z \leq z_m^+) \quad (8)$$

式中 $\hat{f}_{ij}(z,\xi)$ 为第 j 根桩 Π_ξ 截面轴线处受单位力作用时引起第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应力, $\hat{f}_{is}(z,0)$ 为第 s 个土单元表面受合力为单位力的均布荷载作用时引起层状扩展土在第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应力。

上述各式求解中所要用到的 $\hat{\varepsilon}_{ij}(z,\xi)$, $\hat{w}_{ij}(z,\xi)$ 和 $\hat{f}_{ij}(z,\xi)$ 等基本解答可参见文献[9]或文献[11]所采用的求解方法, 也即利用积分变换和矩阵传递方法求解层状地基在圆形轴对称荷载作用下的应力、应变和位移等各种基本解, 本文不再冗述。

3 数值计算方法和算例验证

3.1 数值计算方法

层状地基中混合桩型复合地基的求解过程与文献[1]类似, 所不同的是求解中所要用到的各基本解均应按弹性层状理论进行求解, 在土层分界面处需设置间断节点。根据上面推导的方法, 用 Fortran90 语言编写了层状地基中复合桩基的计算程序 CPRLS (Analysis Program for Composite Piled Raft in Layered Soil), 当不考虑承台下地基土参与共同作用时, 该程序也可用于分析层状地基中的一般群桩基础。为验证本文分析方法和计算程序的正确性, 将本程序的计算结果与典型算例进行对比。

3.2 与均质地基中桩筏基础解答的对比

图 2 是本文方法与 Kuwabara 的边界元解答^[12]的对比, 该算例是均质地基中由 3×3 的 9 桩所组成的桩筏基础, 其中角桩、边中桩和内桩的编号分别为桩 1、桩 2 和桩 3, 计算参数为: 方形刚性筏板边长 $B=13D$, 桩间距 $s/D=5$, $K_p=1000$, $\mu_s=0.5$, $L/D=25$ 。桩身轴力 $N(z)$ 以无量纲参数 $N(z)/N_{av}$ 表示, N_{av} 为桩顶平均荷载名义值, $N_{av}=N_0/n$ (n 为桩数); K_p 为以土的弹性模量为基准的相对刚度, $K_p=E_p/E_s$; 基础沉降特性以无量纲参数 $N_0/(E_s w_c D)$ 表示, 地基土在平面内划分为 64 个单元。计算时将地基土人为的划分为五层, 图 2 给出了按五层地基解答与按均质地基解答 (Kuwabara 的边界元解答^[12]) 的结果对比, 可见按两种地基模型计算所得的沉降特性和桩身轴力分布可较好的吻合, 从而验证了本文方法的精度。

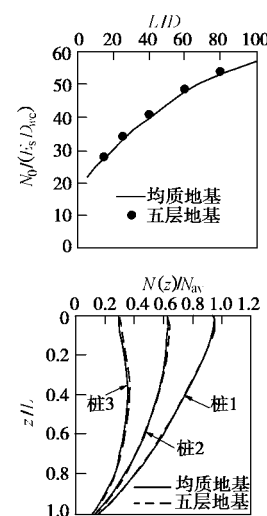


图 2 均质地基中桩筏基础解答的对比

Fig. 2 Comparison of the solution of piled raft foundations in homogeneous and layered soil

3.3 双层地基中群桩基础解答的对比

由于层状地基中群桩计算的复杂性, 尽管已有一些文献对此进行研究, 但真正能够应用于实例分析的却不多。例如 Chow et al (1990)^[5]给出了一个双层地基中群桩分析的算例, 但没有考虑承台下地基土参与共同作用; Zhang & Small (2000)^[6]虽提出了群桩的有限层算法, 但仅针对双层地基问题给出了几个简单的算例, 其算例中的下卧层设置离桩端很远, 地基土成层性的影响较小; Poulos & Davis (1980)^[13]则基于 Mindlin 解答给出了双层地基中群桩基础的近似分析方法。

本文以 Chow et al (1990)^[5]给出的 3×3 群桩基础为例进行对比分析, 验证本文方法的正确性。该算例中 3×3 群桩的平面布置和各桩编号同图 2 的算例, 不考虑承台下地基土参与共同作用, 主要分析参数为: $L/D = 25$, $s/D = 4$, $E_p/E_{s1} = 1000$, $H_1 = 25D$, $\mu_{s1} = \mu_{s2} = 0.5$ 。图 3 中给出了群桩刚度的折减系数 $K_G/(nK_1)$ 以及各桩的荷载分担比 N_{0i}/N_{av} 随着 E_{s2}/E_{s1} 不同而变化的情况, 并与 Chow et al^[5]和 Poulos & Davis^[13]的解答进行对比, 其中 K_G 为群桩刚度, K_1 为单桩刚度, n 为桩数, $N_{av} = N_0/n$ 。

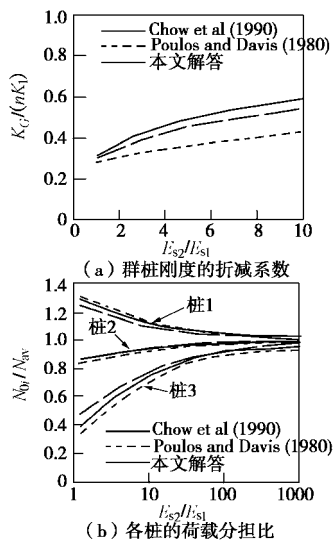


图 3 双层地基中群桩基础解答的对比

Fig. 3 Comparison of the solution of group piles in soils with two layer

从图 3 中可看出: 本文方法所求得的群桩刚度折减系数与 Chow et al^[5]较为接近, 各桩的荷载分担比与 Chow et al^[5]也较为接近, 而与 Poulos & Davis^[13]解答有较为明显的误差。Chow et al^[5]和本文方法均采用了较精确的计算模型, 两者计算结果差别的原因可能与 Chow et al^[5]在计算中桩单元划分较粗有关。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

笔者在文献[14]中介绍了杭州一幢采用混合桩型复合地基的 7 层住宅楼的观测数据, 该楼的桩位及压力盒埋设的平面位置如图 4 所示, 文献[14]选择实测数据较完整的 ⑤-①轴测区(图 4 中左上角)作为分析对象, 运用弹性有限元对实测结果进行分析。分析时所采用的参数如下:

(1) 筏板: ⑤-①轴测区的基础主要是柱下承台, 承台间由地梁、地下墙砌体及地圈梁组成的组合地梁相连, 刚度较大, 假定为刚性基础。有限元分析时, 为模拟实际情况, 取承台的弹性模量 $E_r = 3.0 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\mu_r = 0.20$, 厚度为 0.5 m。

(2) 垫层: 由碎石层和素混凝土垫层组成, 弹性模量 $E_m = 25$ MPa, 泊松比 $\mu_m = 0.30$, 厚度为 0.3 m。

(3) 沉管灌注桩: C20 混凝土, 弹性模量 $E_{p1} = 2.8 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\mu_{p1} = 0.20$, 桩长 23 m, 直径为 426 mm。

(4) 水泥搅拌桩: 水泥掺合比为 15%, 弹性模量 $E_{p2} = 200$ MPa, 泊松比 $\mu_{p2} = 0.25$, 桩长 12 m, 直径为 500 mm。

(5) 地基土: 将地基土分为 6 层, 第 1 层: 粉质粘土, 厚度 1.7 m, 弹性模量 5.88 MPa; 第 2 层: 粉土, 厚度 4.0 m, 弹性模量 7.08 MPa; 第 3 层: 淤泥质粘土, 厚度 11.9 m, 弹性模量 2.38 MPa; 第 4 层: 粉质粘土, 厚度 3.1 m, 弹性模量 5.87 MPa; 第 5 层: 粘土, 厚度 22.7 m, 弹性模量 9.66 MPa; 第 6 层: 全风化基岩, 未穿透(假定为半无限层), 弹性模量 9.87 MPa。各层土的泊松比统一取 $\mu_s = 0.35$ 。此处所采用的弹性模量是以计算桩间土应力与实测值一致为基准通过弹性有限元反算得到的参数。

(6) 其它参数: 基础承台的有效面积为 372 m^2 , 沉管灌注桩面积为 10.5 m^2 , 水泥搅拌桩面积为 43.4 m^2 , 扣除两类桩的面积后, 承台下的地基土净面积为 318.1 m^2 ; 作用在承台上的平均荷载为 116 kPa。

4.2 与试验结果的对比

分析时首先根据 ⑤-①轴测区实测的桩土应力, 推算出各阶段作用在 ⑤-①轴测区承台的总荷载, 然后按照层状地基中混合桩型复合地基的积分方程解法, 建立相应的分析模型, 求解各阶段的桩土应力分担和沉降情况, 求解时 ⑤-①轴的地基土在平面上被划分为 48 个单元。按上述模型计算出的刚性长桩、柔性短桩的桩顶应力随着筏板上作用荷载的变化关系如图 5 所示, 图 5 中还给出了本文方法与试验实测以及弹性有限元结果^[14]的对比。从图 5 中可以看出: 本文方法与弹性有限元法的结果相对更为接近, 而与实测结果相比较, 刚性长桩和桩间土的应力分担较为接近, 只是对柔性短桩的偏差要稍大一些, 这可能与柔性桩的计

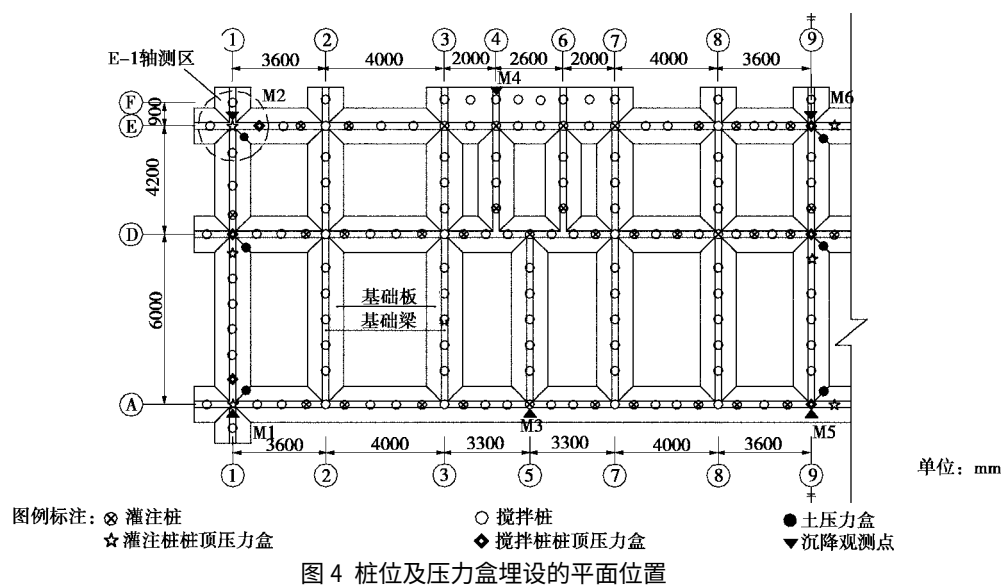


图 4 桩位及压力盒埋设的平面位置

Fig. 4 Layout of piles and measuring instruments

算模型有关，水泥搅拌桩在实际工程中特性仅用弹性参数是难以准确描述的，同时用本文方法计算得到的沉降-时间曲线与实测曲线变化趋势也基本一致，如图 6 所示。此外，用本文方法还可得出沿桩身的应力、剪力和位移分布以及垫层的压缩量等工程特性，图 7 给出了用本文方法推算出的第 11 次观测时(也即交付使用阶段)沿桩身的应力、剪力和位移分布曲线，并且反映出了垫层作用下桩在上部出现负摩阻力的特点。

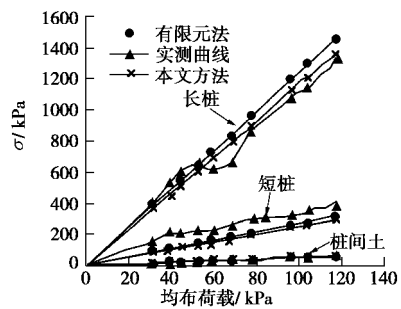


图 5 桩土荷载分担对比

Fig. 5 Comparison of load ratios of piles to soil

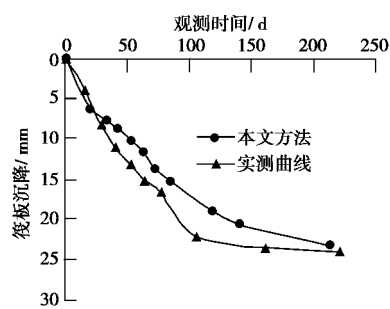


图 6 基础筏板的沉降对比

Fig. 6 Comparison of settlement of piled raft

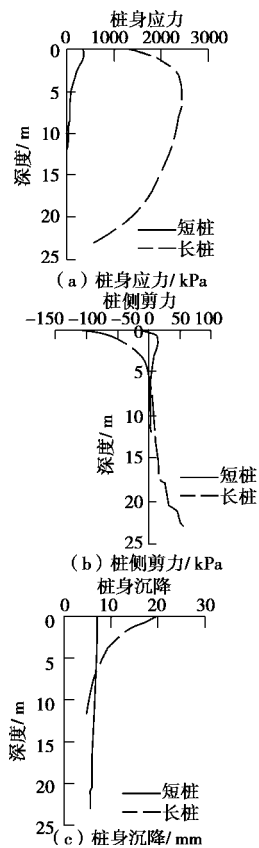


图 7 桩身应力、剪力和沉降

Fig. 7 Normal stress, shear stress and settlement along piled shaft

5 结 语

本文将均质地基中群桩的积分方程解法与弹性层状理论相结合，引入了地基土和垫层的共同作用，推导出层状地基中混合桩型复合地基的积分方程解法。通过对层状地基中混合桩型复合地基的积分方程数值解法进行研究，编制了计算分析程序 CPRLS，并与典

型算例进行对比,验证了本文方法和计算程序的正确性。针对一个工程实例进行具体分析,说明本文方法能够适用于由非等长和非等径桩所构成的混合桩型复合地基,可以应用于解决实际工程问题。

参考文献:

- [1] 梁发云, 陈龙珠, 李镜培. 混合桩型复合地基工程性状的近似解析方法[J]. 岩土工程学报, 2005,27(4):459 - 463.(LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu, LI Jing-pei. An approximate approach for the analysis of composite foundation with hybrid piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(4):459 - 463.(in Chinese))
- [2] MUKI R, STERNBERG E. Elastostatic load-transfer to a half-space from a partially embedded axially loaded rod[J]. International Journal of Solids and Structures, 1970,6(7):69 - 90.
- [3] 宰金珉. 群桩与土和承台非线性共同作用分析的半解析半数值方法[J]. 建筑结构学报, 1996,17(1):63 - 74.(ZAI Jin-min. Semi-analytical and semi-numerical method for analyzing nonlinear interaction of pile group-soil-pile cap system[J]. Journal of Building Structures, 1996,17(1):63 - 74.(in Chinese))
- [4] GUO W D, RANDOLPH M F. Vertically loaded piles in non-homogeneous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21:507 - 532.
- [5] CHOW Y K, CHIN J T, KOG Y C, et al. Settlement analysis of socketed pile groups[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1990,116(8):1171 - 1185.
- [6] ZHANG J J, SMALL J C. Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical load [J]. Computers and Geotechnics, 2000,26:1 - 21.
- [7] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of semi-infinite solid[J]. Physics, 1936,7:195 - 202.
- [8] BURMISTER D M. The general theory of stresses and displacements in layered systems[J]. Journal of Applied Physics, 1945,16:89 - 94,126 - 127,296 - 302.
- [9] 金波, 李志彪, 顾尧章. 层状地基中的单桩沉降分析[J]. 岩土工程学报, 1997,19(5):35 - 42.(JIN Bo, LI Zhi-biao, GU Xiao-zhang. Settlement analysis of single pile in layered soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997,19(5):35 - 42.(in Chinese))
- [10] 王建华, 陆建飞, 沈为平. 层状地基中考虑固结和流变的垂直单桩的理论计算[J]. 水利学报, 2001,32(4):57 - 61.(WANG Jian-hua, LU Jian-fei, SHEN Wei-ping. Theoretical study on single pile in layered saturated soil considering the consolidation and rheology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,32(4):57 - 61.(in Chinese))
- [11] 梁发云, 李镜培, 陈龙珠. 层状地基中单桩性状的积分方程解法及其参数研究[J]. 同济大学学报, 2006,34(9):1159 - 1165.(LIANG Fa-yun, LI Jing-pei, CHEN Long-zhu. An integral equation approach and parametric analysis for single pile in layered soil[J]. Journal of Tongji University, 2006,34(9):1159 - 1165.(in Chinese))
- [12] KUWABARA F. An elastic analysis of piled raft foundations in a homogeneous soil[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(1):82 - 92.
- [13] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [14] LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu, SHI Xu-guang. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load[J]. Computers and Geotechnics, 2003,30(6):443 - 453.

《CIMS 论文的天地》声明

本站免费向大家提供论文全文,本站论文除了特别说明的以外都是从作者手中征集得到的。
目前网上论文网站较多,有人非法转载本站论文,在此提出警告,本站保留对这类行为进行追究的权利。

本站镜像:

- 1、上海电信镜像: <http://www.cimspaper.com> <主站, 付费空间, 推荐访问>
- 2、虚拟域名: <http://xcchen.yeah.net>
- 3、北京虎翼网镜像: <http://cimspaper.51.net>

欢迎您参加我站提供的邮件列表

希网提供的列表 分类首页/科学技术/另类科学

<http://www.cn99.com/cgi-bin/catalog?viewcat=58>

为您提供《CIMS 论文的天地》更新通知,以及有关的论文和学术信息,每月至少发送一次。