

考虑固结过程的桩-土-筏三维相互作用分析

3D interaction analysis of pile-soil-raft considering the consolidation of substratum

陈云敏¹, 程泽海², 凌道盛¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江科技学院 土木系, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对存在较厚软弱下卧层的桩土筏结构体系, 本文建立了桩端下卧层固结沉降计算的半透水边界模型。应用半透水地基固结解得到任一时刻桩端下卧层的沉降, 进而得到任一时刻群桩中每根单桩的刚度。与筏板有限元分析结合, 构成桩-土-筏共同作用有限元分析模型, 并研制开发了相应的分析软件, 可以分析筏板内力、筏板挠度和桩顶反力随时间的变化规律。工程分析表明, 此方法有一定的实用价值。

关键词: 桩土筏; 固结; 共同作用

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)05-0584-05

作者简介: 陈云敏(1962-), 男, 浙江人, 工学博士, 浙江大学岩土工程研究所教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学及土动力学、桩基工程和环境土工研究。

CHEN Yun-min¹, CHENG Ze-hai², LING Dao-sheng¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310012, China)

Abstract: A new calculating model for the consolidation settlement of piles group was built by approximately simulating the stress and permeability field of vertically loaded piled raft foundation. The effective and total stress in substratum at any time was obtained by applying the consolidation solutions with impeded boundaries. The settlement of pile tip can be evaluated by layerwise summation method. Thus the stiffness of single pile in pile groups can be obtained at any time. Then it is agglomerated to the raft, and the raft was analyzed by finite element method. A software for analyzing the pile-soil-raft interaction was developed. The development of internal force, deformation of raft and reaction on top of pile can be gained. One case study was also carried out to show the application of the present method to practical pile group problems.

Key words: pile-soil-raft; consolidation; interaction

0 前言*

在沿海地区, 上部土层一般为深厚饱和软黏土, 而建立在这种地基上的多层和高层建筑或高耸构筑物普遍采用桩筏或桩箱基础, 但其工程桩未穿透整个软弱土层, 桩端下存在较厚的可压缩饱和土层。饱和地基土是两相体(称为 Biot 介质), 由于水的存在而具有固结特性, 在建筑物的施工和使用期间, 在附加应力作用下土体产生超孔隙水压力, 孔隙水的消散有一个时间过程, 地基变形是一个时间函数, 桩、地基土、基础和上部结构四者之间产生相互影响。施工完成后, 地基的变形仍有发展, 从而引起筏板及上部结构内力的变化。因此, 这种桩筏体系的内力和变形变化规律是一个随时间不断发展变化的过程, Poulos (1989)^[1]认为, 对存在软弱下卧层的桩筏基础进行研究能揭示桩筏体系的工作性状随时间变化规律, 研究桩端下卧层的固结对桩筏体系的工作性状的影响有十分重要的实践意义。

目前对桩土筏共同作用的研究^[2~6]仅限于将土看作一单相介质, 没有考虑地基土的固结过程。本文基于半透水边界固结解^[7,8]考虑了地基土中水的影响, 研

究了桩端下卧层的固结对桩-土-筏体系工作性状的影响, 揭示了基础的沉降、桩顶反力和筏板内力随时间的变化规律。

1 群桩中的单桩刚度

1.1 桩端下卧层固结沉降计算模型

通过桩土筏体系平面应变有限元分析表明^[9], 初始超静孔压主要集中在桩端下卧层, 桩身和桩侧范围内土层的超静孔压均很小, 桩端下卧层的沉降主要表现为下卧层的固结。桩端下卧层土体的孔压消散为非线性分布, 而桩身范围内土层的孔压消散近似为一线性分布。根据上述分析, 对计算模型作如下假定:

(1) 假定桩的存在阻碍水平向渗流, 而对竖向渗流没有影响, 桩身范围内的土体只有一维竖向渗流。

(2) 不考虑桩身范围内土体的固结, 仅考虑桩端平面以下区域土的固结。

(3) 用群桩桩顶外围按 $\varphi/4$ 向下扩散与假想实体

* 基金项目: 中国教育部和荷兰教育部合作资助项目 (OWBA29913023); 浙江省自然科学基金资助项目 (500117)

收稿日期: 2003-10-09

基础底平面相交的面积作为实体基础的底面积 F , 以考虑群桩外围侧面剪应力的扩散作用。

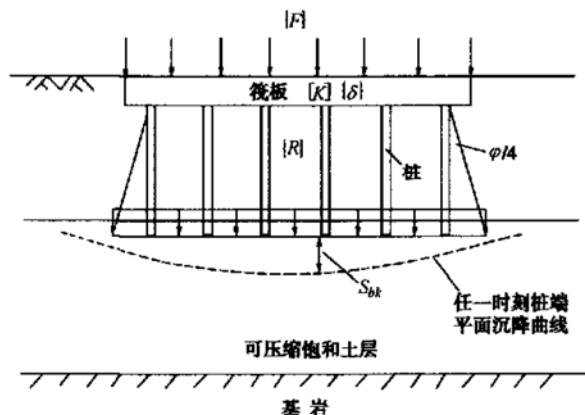


图1 桩端下卧层固结沉降计算模型

Fig. 1 The consolidation settlement of substrata under pile tip

计算模型如图1所示, 利用该模型可以计算桩端下卧层土体中任一时刻的有效应力及其沉降。

由半透水边界平面问题的解与有限元分析比较 (见图2, 3) 可知, 应用半透水边界固结解计算桩端下卧层的固结沉降是可行的, 满足应力场和渗流场相似条件。

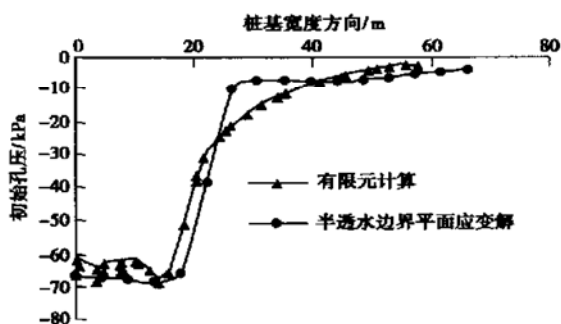


图2 桩端下2 m 水平初始孔压分布

Fig. 2 Initial pore pressure distribution at 2 m under pile tip

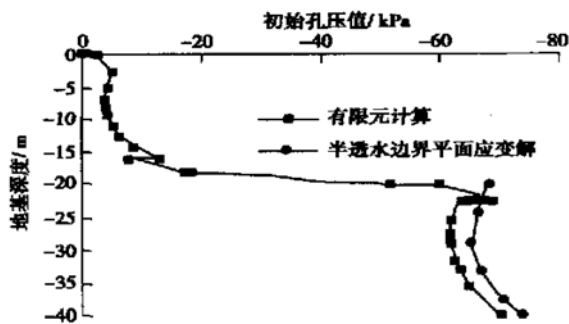


图3 桩间竖向剖面初始孔压分布

Fig. 3 Initial pore pressure distribution between pile

1.2 桩端下卧层的应力与沉降

针对桩端下卧层土层的多样性, 桩端固结沉降的计算方法有: 对于桩端下单一均质土层, 采用半透水边

界半空间或有限层固结位移解公式^[8,9] 直接计算桩端固结沉降; 对于桩端下为多层土, 采用半透水边界半空间固结有效应力公式, 然后按分层总和法计算桩端沉降。

(1) 桩端下卧层的应力计算^[8]

由于桩基础的形状多样, 荷载作用区域可呈圆形、矩形、条形和任意形状的分布, 为了适应荷载作用区域为任意形状的分布, 可采用如下的计算方法。

a) 等代荷载法

如果地基中某点 M 与局部荷载的距离比荷载面尺寸大得多时, 就可以用一个集中力代替局部荷载, 直接利用点解的应力公式。任一时刻桩端下卧层土体中的有效应力公式为

$$\sigma_z' = \int_0^\infty (4abqx(2e^{zx}(k_1 + Hk_2x)(2tx^2 + \eta) + e^{z\sqrt{1/(2t)+x^2}}x(2k_1z\eta + \sqrt{2/t+4x^2}(-2t(k_1 + Hk_2x) + Hk_2z\eta))) \text{Bessel}J(0, rx))/(2e^{z\sqrt{1/(2t)+x^2}}\pi(4tx^2(k_1 + Hk_2x) + 2k_1\eta + \sqrt{2/t+4x^2}(-2tx(k_1 + Hk_2x) + Hk_2z\eta)))dx. \quad (1)$$

b) 等积变换法

当地基中某点与局部荷载的距离较近时, 应对局部荷载作用区域利用点解进行积分, 为了简化积分, 而采用等积变换的方法, 竖向均布荷载 q 作用于半透水层界面矩形域 $\Omega(2a \times 2b)$, 见图4所示, 考查投影外的点 $M(r, z)$ 处的有效应力。对 Ω 作如下等积变换: 先将 Ω 在水平面内转动 α 角, 再代换以具有相同面积的以 $M(r, 0)$ 为圆心的一段环域 Ω' 。由 Ω 与 Ω' 面积相等有 $\beta = b/r$, 极坐标中的微单元面积为 $\rho d\rho d\phi$, 利用点解公式对域 Ω' 积分可近似得到均布荷载 q 作用 Ω 时在点 $M(r, z)$ 处引起的竖向有效应力公式。当 Ω 为半径等于 S 的圆域时, 则只须令 $a = b = S\pi(0.5)/2$ 即可。

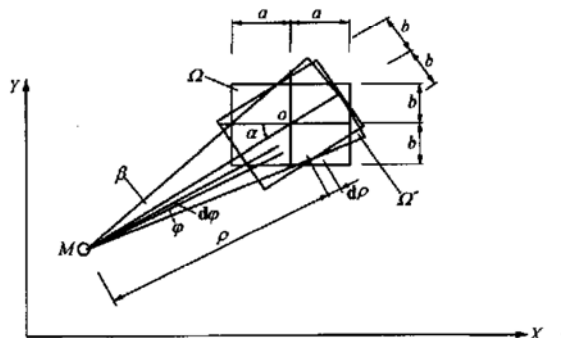


图4 等积变换法

Fig. 4 Transformation with constant area

任一时刻桩端下卧层土体中的有效应力公式为

$$\alpha_z' = \int_0^\infty (bq(-2e^{-\alpha}(k_1 + Hk_2x)(2tx^2 + \eta) + e^{\sqrt{1/(2t)+x^2}}x(-2k_1z\eta + \sqrt{2/t+4x^2}(2t(k_1 + Hk_2x) - Hk_2z\eta)))((a-r)\text{Bessel}J(1, (r-a)x) + (a+r)\text{Bessel}J(1, (a+r)x)))/e^{\sqrt{1/(2t)+x^2}}\pi r(-4tx^2(k_1 + Hk_2x) - 2k_1\eta + \sqrt{2/t+4x^2}(2tx(k_1 + Hk_2x) - Hk_2\eta)))dx, \quad (2)$$

式中 k_1 为半透水土层的渗透系数; k_2 为计算土层中的渗透系数; H 为半透水层的厚度; q 为荷载作用集度; a, b 为荷载分布区域长度与宽度的一半; r 为计算点的离荷载分布区域中心的距离; z 为计算点的深度; t 为固结时间; e 为自然对数的底: 2.71828; $\eta = (1-v)/(1-2v)$ 为泊松比有关的变量; x 为径向 Hankel 变换量。

(2) 桩端下卧层的沉降计算如图 1 所示, 按上述方法计算出桩端下卧层地基中任一时刻的有效附加应力, 用分层总和法计算出任一时刻的桩端固结沉降量 s

$$s = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} \frac{q_{j,i} \Delta h_{j,i}}{E_{j,i}}, \quad (3)$$

式中 s 为按分层总和法计算出的某一时刻的桩端下卧层固结沉降(mm); m 为桩端平面以下压缩层范围内土层总数; n_j 为桩端平面下第 j 层土的计算分层数; $q_{j,i}$ 为对应于桩端平面下土层中某一时刻的有效附加应力(kPa); $E_{j,i}$ 为桩端平面下第 j 层土第 i 个分层在自重应力到自重应力加附加有效应力作用段的压缩模量(MPa); $\Delta h_{j,i}$ 为桩端平面下第 j 层土的第 i 个分层厚度(m)。

1.3 群桩中的单桩刚度

群桩中第 k 根桩的刚度 K_k 可以定义为

$$K_k = P_k/S_k = \bar{P}/(S_{sk} + S_{pk}), \quad (4)$$

式中 P_k 为第 k 根桩桩顶荷载, 实测资料表明, 桩的分布反力比较均匀, 一般都在桩的设计荷载左右, 因此, 近似地取桩平均荷载 $\bar{P}$; S_{pk} 为第 k 根桩的桩身压缩, 近似地根据单桩的 $P-S$ 曲线或根据经验估算得到; S_{sk} 为第 k 根桩在任一时刻的固结沉降, 采用 1.2 节中的方法确定。

2 桩土筏体系时间效应整体分析

2.1 筏板有限元分析

本文采用 16 节点实体退化等参元^[10] 对任意形状变厚度板进行分析, 该单元考虑了板的横向剪切效应, 是厚薄板通用的等参单元。与目前各种板的有限元分析方法相比, 该单元适用各种变厚度、不规则平面形状

的薄板和厚板。

根据虚功原理可得单元刚度矩阵为

$$[K] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (5)$$

式中 $|J|$ 为 Jacobi 行列式, $[D]$ 为弹性系数矩阵。对于各向同性材料, $[D]$ 可表示为,

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & & & \\ d_{12} & d_{11} & d_{13} & & & \\ d_{13} & d_{13} & d_{33} & & & \\ & & & d_{44} & & \\ & & & & d_{44} & \\ & & & & & d_{44} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于三维弹性理论, $d_{11} = d_{33} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}$, $d_{12} =$

$\frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$, $d_{44} = \frac{E}{2(1+\mu)}$, E 为杨氏模量,

μ 泊松比。在应力应变关系中引入板的假定, 可得板

单元的 $[D]$ 矩阵, 其中 $d_{11} = \frac{E}{1-\mu^2}$, $d_{12} = -\mu d_{11}$, $d_{33} =$

$\frac{E}{1-\mu^2}$, $d_{13} = 0$, $d_{44} = \frac{E}{2(1+\mu^2)}$ 。上述单元具有 48 个

自由度, 如果假定板的上下表面节点位移相等(忽略板厚方向的压缩), 并且板的面内没有荷载作用, 那么单元的实际自由度降为 24 个。该单元即为三维退化实体等参元。

2.2 基本方程

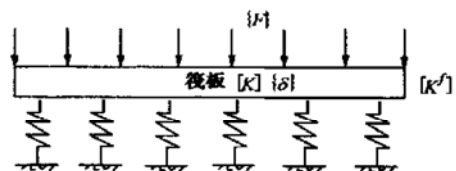


图 5 桩土筏共同作用简化分析模式

Fig. 5 Simplified model for pile soil raft interaction

将筏板进行有限元离散后写出筏板的平衡方程

$$([K] + [K^f])\{\delta\} = \{F\}, \quad (7)$$

式中 $[K]$ 为筏板节点的刚度矩阵, 包括水平和竖向刚度; $[K^f]$ 为是桩的刚度矩阵, 由于桩端下存在软弱下卧层, 因此, $[K^f]$ 是一个跟时间有关的刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为是筏板节点位移向量; $\{F\}$ 为是筏板的荷载向量。 $[K^f]$ 是一个对角线矩阵, 对角线上的元素即为每根桩的刚度, 即具有如下形式

$$[K^f] = \begin{bmatrix} K_1 & & & & \\ & K_2 & & & \\ & & \vdots & & \\ & & & K_i & \\ & & & & K_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 K_i 为群桩中第 i 根单桩的刚度。

确定了筏板和桩的刚度后, 求解方程(7) 获得筏板节点的位移, 已知节点位移后即可方便地计算筏板内力、挠度和桩顶反力等一系列结果。

3 工程实例分析

3.1 工程概况^[11]

上海某工程为点式高层建筑, 20 层, 总高 57 m, 上部结构为剪力墙结构, 基础为半地下室箱基加短桩, 箱基高 2.9 m, 埋深 1.7 m, 箱基底板为梁板结构, 梁宽 0.6 m, 板厚 0.3 m, 平面面积为 489.3 m², 建筑物梁轴线下布置 183 根 0.4 m×0.4 m 桩长 7.5 m 的钢筋混凝土预制桩, 桩位布置见图 6, 建筑物总重为 95220 kN。筏板的等效厚度取 1.5 m, 混凝土强度等级为 C30。土层的主要参数见表 1 所示。

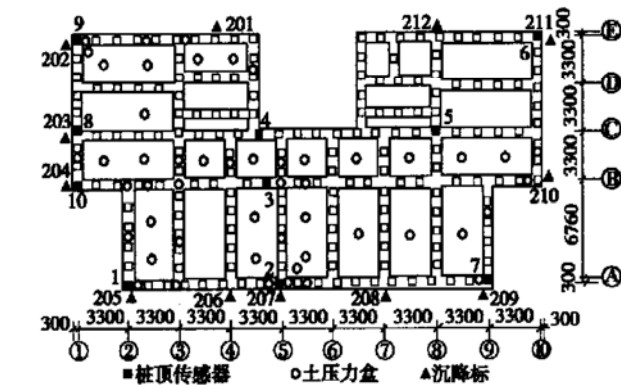


图 6 桩位布置图

Fig. 6 Arrangement of piles

表 1 土层主要参数

Table 1 soil parameters

层名	层厚 /m	压缩模量 E_s /MPa	渗透系数 /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
填土	2.0		
灰色粉砂	10.0	10.0	1×10^{-3}
黏土	16.0	2.3	1×10^{-7}

3.2 基础沉降和桩顶反力分析

由于工程中荷载是逐步增加的, 实际计算时将逐步加荷的过程简化为在加荷起始时间中点一次瞬时加载。然后利用本文的桩土筏共同作用分析程序计算了不同时刻基础沉降和桩顶反力变化规律。

(1) 基础沉降分析

图 7 和图 8 分别为加载时间 20 个月和 600 个月时的基础沉降计算等值线图, 沉降分布表现为基础中心大边缘较小的特征, 当加载时间较短时, 平均沉降较小, 差异沉降也小。基础平均沉降随时间的变化关系曲线如图 9 所示, 竣工时基础的平均沉降为 125 mm, 竣工后平均沉降为 254 mm, 约为竣工时沉降 2 倍, 最

终平均沉降为 397 mm, 施工期的沉降主要为瞬时沉降, 而竣工后沉降是由桩端下软弱下卧层的固结压缩引起。本文的计算结果与实测值较为接近, 并根据实测资料^[11] 可知, 桩基础的沉降主要是桩尖下的软弱下卧层的压缩变形引起, 桩的刺入变形量很小, 本文不考虑桩端刺入变形是合适的。

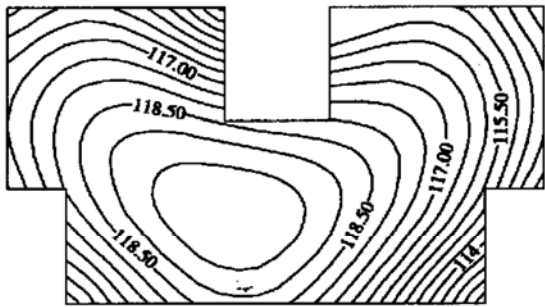


图 7 基础沉降等值线图(加载 20 个月)

Fig. 7 Foundation settlement contour

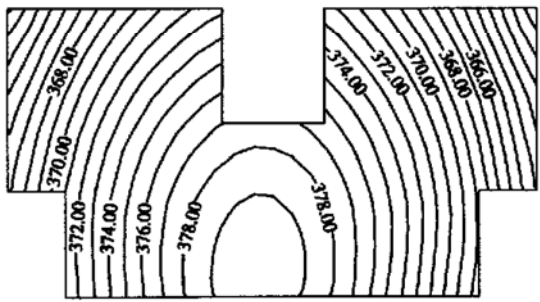


图 8 基础沉降等值线图(加载 600 个月)

Fig. 8 Contour lines of settlement

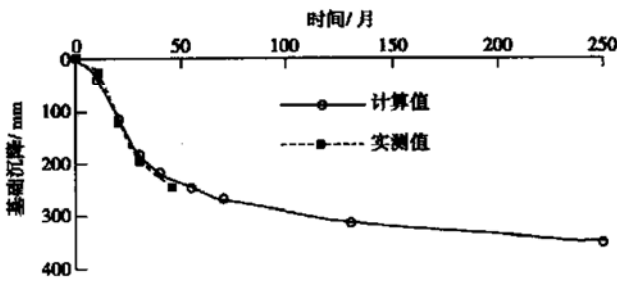


图 9 建筑物基础平均沉降计算与实测比较

Fig. 9 Comparison between calculated and measured settlement

(2) 桩顶反力分析

图 10 和图 11 分别为加载时间 20 个月和 600 个月时的桩顶反力等值线图, 角桩的桩顶反力最大, 边桩次之, 内部桩最小。桩顶反力的分布性状类似于弹性地基刚性基础下地基反力的分布规律。根据实测结果, 当建筑物结构到顶后, 桩承担总荷载的 92%, 基底下地基土只承担 8%, 因此, 本文不考虑桩间土承担荷载在工程上是可以接受的。图 12 为不同时刻轴线 C 剖面上桩顶反力分布, 桩顶反力分布为山字形, 这是由于轴线 C 上中间部分的桩位于结构的边缘, 当加载时间

为 10 个月时, 桩顶反力处于较低水平, 当结构结顶后, 随着时间的延长, 中间桩的桩顶反力有所减小, 两端桩的桩顶反力有所增大。桩顶反力的变化与桩端下卧层的固结有密切的关系, 与实测桩顶反力平均值比较一致。因此, 利用本文的方法基本上能预测桩顶反力的变化。

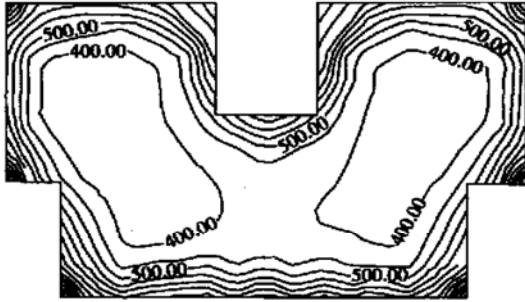


图 10 桩顶反力等值线图(加载 20 个月)

Fig. 10 Contour lines of reaction on top of pile

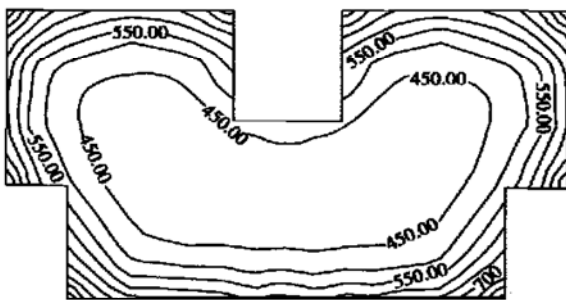


图 11 桩顶反力等值线图(加载 600 个月)

Fig. 11 Contour line reaction on top of pile

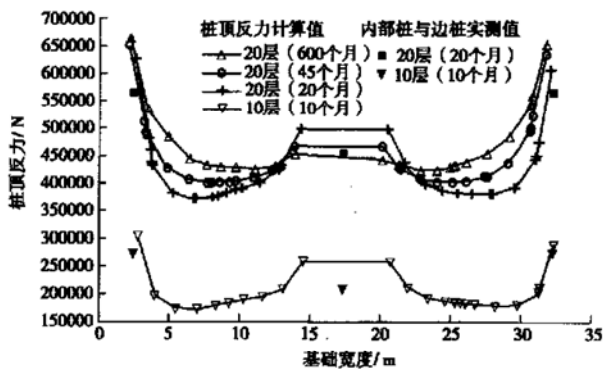


图 12 不同时刻轴线 C 剖面上桩顶反力分布图

Fig. 12 Load distribution on top of pile on C axis line in different time

4 结 论

(1) 对于桩端下存在较厚软弱下卧层的桩土筏体系共同作用, 建立了桩土筏体系共同作用的简化分析模式, 群桩中单桩的刚度计算考虑了桩端下卧层的固结, 并研制与开发了相应的分析软件, 可以预测建筑物施工和施工完成后任一时刻筏板内力、筏板挠度和桩顶反力的变化规律;

(2) 筏板模型采用 16 结点退化单元, 并应用分区积分技术, 以适应变厚度筏板的分析;

(3) 用本文的方法分析了上海一高层住宅基础沉降和桩顶反力的变化规律。本文的分析结果与实测值较为接近, 表明本文的方法有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] Poulos H G. Pile behavior—Theory and application[J]. Geotechnique, 1989, 39(3): 365–415.
- [2] 董建国, 赵锡宏. 高层建筑地基基础——共同作用理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [3] 辛金珉, 辛金璋. 高层地基基础——共同作用研究和分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [4] 刘金砺, 黄强, 李华, 高文生. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 1–3.
- [5] 杨敏, 王树娟. 桩筏基础相互作用下土中应力场的变化规律[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 26–30.
- [6] 陈云敏, 陈仁朋, 凌道盛. 考虑考虑相互作用的桩筏基础简化分析法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 686–691.
- [7] Cheng Ze-hai, Chen Yun-min, Ling Dao-sheng, Tang Xiao-wu. Axisymmetric fundamental solutions for a finite layer with impeded boundaries[J]. Journal of Zhejiang University (SCIENCE), 2003, (4): .
- [8] 程泽海, 陈云敏, 凌道盛, 吕凡任. 竖向荷载作用下半透水边界固结问题的解[J]. 固体力学学报, 2004, (1).
- [9] 程泽海, 凌道盛, 陈云敏. 桩筏基础在竖向荷载作用下的时间效应[J]. 土木工程学报, 2004, (2).
- [10] 凌道盛, 陈云敏, 丁皓江. 任意基础板的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 450–455.
- [11] 洪毓康, 陈强华, 陈冠发. 高层建筑下短桩基础的原位测度研究[R]. 高大钊. 软土地基理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992. 106–116.