

文章编号:0253-9993(2007)02-0127-04

# 饱和土中单桩的数值计算及实测分析

苗永红<sup>1</sup>, 陆建飞<sup>2</sup>, 赵翔<sup>2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 210096; 2. 江苏大学土木系, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 利用黏弹性饱和土中的桩基计算的积分方程模型, 对黏弹性饱和土中的单桩进行了计算. 对桩土共同作用模型的一些参数与桩土共同作用的影响进行了分析. 对基于积分方程模型的数值结果和实测数据进行了比较. 结果表明, 饱和土中的积分方程模型能较好地模拟饱和软土地基中的桩基沉降过程, 因而验证了积分方程模型在饱和土中的适用性.

**关键词:** 饱和土; 单桩; 固结; 流变; 沉降

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A

## Numerical calculations for a single pile embedded in saturated soil and in situ measurement

MIAO Yong-hong<sup>1</sup>, LU Jian-fei<sup>2</sup>, ZHAO Xiang<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Civil Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Based on the integral equation model for pile-soil interaction in saturated soil, numerical calculations were conducted for single pile embedded in saturated soil. The influences of some parameters on the response of the pile were analyzed. Moreover, the numerical results due to the integral equation model were compared with some in situ data, which suggest that the integral equation model can simulate the settlement history of the single pile reasonably. The applicability of the integral equation model in saturated soil was confirmed by the investigation.

**Key words:** saturated soil; single pile; consolidation; rheology; settlement

在土的固结和流变过程中, 土骨架的应力及孔隙水压力都发生缓慢变化. 这些变化对桩基的设计、计算及建筑物的安全使用等都具有重要意义. 桩基础的沉降计算关键在土体模型及参数的选取. 本文利用陆建飞<sup>[1]</sup>所提出的计算模型对饱和土的桩基进行了计算. 对固结、流变参数对桩基的影响进行了分析计算. 结合原位实测载荷试验数据, 对理论模型中的固结流变参数的取值进行了分析, 并把基于理论模型的计算结果与原位实测数据进行了比较. 结果表明, 建立在饱和土中的积分方程模型能较好地模拟饱和软土中的桩基沉降过程, 因而验证了积分方程模型的适用性.

### 1 土体模型及基本解

在轴对称情形下, Biot 固结方程<sup>[1]</sup>为

收稿日期: 2006-04-28 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50578071)

作者简介: 苗永红 (1973-), 男, 山西阳泉人, 博士, 讲师. Tel: 025-83795776, E-mail: yhmiao1998@163.com

$$\begin{cases} \nabla^2 u_r + (2\eta - 1) \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial p}{G \partial r} = 0, \\ \nabla^2 u_z + (2\eta - 1) \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial p}{G \partial z} = 0, \\ \nabla^2 e = -\frac{\partial e}{c \partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\nabla^2$  为 Laplace 算子;  $u_r$ ,  $u_z$  分别为径向和轴向的位移;  $\eta$  为土的动力黏质系数;  $p$  为超静水压 (压为正);  $e$  为体积应变;  $t$  为时间变量;  $G$  为介质剪切弹性模量;  $c$  为固结系数.

在桩基积分方程模型中要用到黏弹性半空间饱和土中作用垂直圆形均布荷载的基本解. 文献 [1] 利用 Biot 固结方程 (1), 详细推导了圆形均布荷载的基本解, 限于篇幅, 这里不再赘述.

在本文的计算模型中, 利用黏弹性模型来考虑土的流变, 选用 merchant 模型, 该模型为目前较常用且简单的标准线性体, 可用来描述土体的瞬时弹性及延迟弹性等性质. 图 1 所示的黏弹性模型, 由线性弹簧和 Kelvin 模型串联组成. 其中包括 2 个线性弹簧和 1 个牛顿黏壶, 共 3 个元件, 能很好地反映土骨架的蠕变和松弛以及瞬时弹性变形的特性.

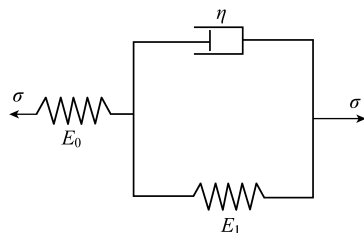


图 1 土骨架模型 (Merchant 模型)

Fig. 1 The model of soil frame (Merchant model)

$\sigma$ ——骨架应力

黏弹性饱和土的固结与流变基本解, 可由半空间饱和土的圆形载荷固结基本解, 根据对应原理得出.

## 2 饱和土中桩土共同作用理论模型

半空间饱和土中有一根直径为  $d$  ( $d = 2R$ ), 长度为  $L$ , 截面积为  $A$ , 受轴向载荷  $Q(t)$  的桩 (图 2). 假设半空间为各相同性的黏弹性饱和土体, 且半空间表面透水. 为简化分析, 假定桩的透水性和土一样<sup>[2~4]</sup>, 且采用 Muki<sup>[5]</sup>的方法来建立如图 2 所示的单桩计算模型. 根据 Muki 的方法, 对图 2 所示的单桩问题可得出如下积分方程, 即

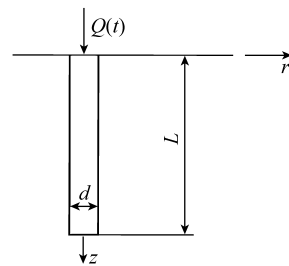


图 2 饱和土中的单桩

Fig. 2 A single pile in saturated soil

$$\begin{aligned} Q(0)\varepsilon(t, 0, z) + \int_0^t \frac{\partial Q(\tau)}{\partial \tau} \varepsilon(t - \tau, 0, z) d\tau + N_*(0, 0)\varepsilon(t, 0, z) + \int_0^t \frac{\partial N_*(\tau, 0)}{\partial \tau} \varepsilon(t - \tau, 0, z) d\tau - \\ N_*(0, L)\varepsilon(t, L, z) - \int_0^t \frac{\partial N_*(\tau, L)}{\partial \tau} \varepsilon(t - \tau, L, z) d\tau - \int_0^L q(0, \xi)\varepsilon(t, \xi, z) d\xi - \\ \int_0^L \int_0^t \frac{\partial q(\tau, \xi)}{\partial \tau} \varepsilon(t - \tau, \xi, z) d\tau d\xi = -\frac{N_*(t, z)}{E_{p*} A} \quad (0 \leq z \leq L), \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $N_*(t, z)$  为虚拟桩的轴力, 符号根据材料力学的规定, 以拉为正;  $\varepsilon(t, \xi, z)$  为 0 时刻在半空间任意圆形截面  $II_\xi$  处作用均布单位力时在圆形截面  $II_z$  处的圆心处所产生的  $z$  向  $t$  时刻的应变;  $q(t, z)$  为沿桩轴线的分布载;  $E_{p*}$  为虚拟桩的弹性模量.

求解上述积分方程以后, 可得未知函数  $N_*(t, z)$ , 然后, 根据黏弹性饱和土中的基本解可得半空间饱和土和桩体系所有变量<sup>[6~8]</sup>: 桩的轴力、沉降、桩侧孔压及土体的位移、应力等.

## 3 桩土共同作用模型中的参数影响分析

土体初始参数: 土的渗透系数  $k = 10^{-7}$  m/s, 桩的弹性模量  $E_p = 10$  GPa, 土流变模型中的  $E_0 = 0.1$  GPa,  $E_1 = 1$  MPa, 阻尼系数为  $1 \text{ TN} \cdot \text{s/m}$ , 土的泊松比取 0.45, 桩顶施加的荷载为 1 MN, 桩的长度

为 20 m, 桩的直径为 0.5 m. 注意在考察一个参数的影响时, 其它参数取初始参数.

### 3.1 渗透系数 $k$ 的影响

从图 3 可以看出, 渗透系数的改变对桩的沉降的影响不大, 因为渗透系数越大, 土的固结越快, 所以在相同时间内的沉降也越大. 比较 3 个时刻的沉降量可看出, 当荷载作用时间较长时, 时间变化对单桩沉降有显著的影响, 说明饱和土的次固结是引起单桩沉降的重要因素.

### 3.2 土流变模型中 $E_0$ , $E_1$ 的影响

土流变模型中的参数可利用流变参数与土的弹性模量  $E_s$  两者之间的如下关系对流变参数进行研究, 即

$$E_s = E_0 E_1 / (E_0 + E_1). \quad (3)$$

初始参数取值同上.  $E_0$  对桩基沉降的影响如图 4 所示. 由图 4 (a) 可知, 由于  $E_1 = 0.1$  GPa, 取值较大, 故 3 个时刻的曲线比较接近, 且随着  $E_0$  的增大, 单桩沉降量显著减小. 因此,  $E_0$  主要控制单桩的初始沉降量: 当  $E_0$  增大时, 初始沉降量减小.

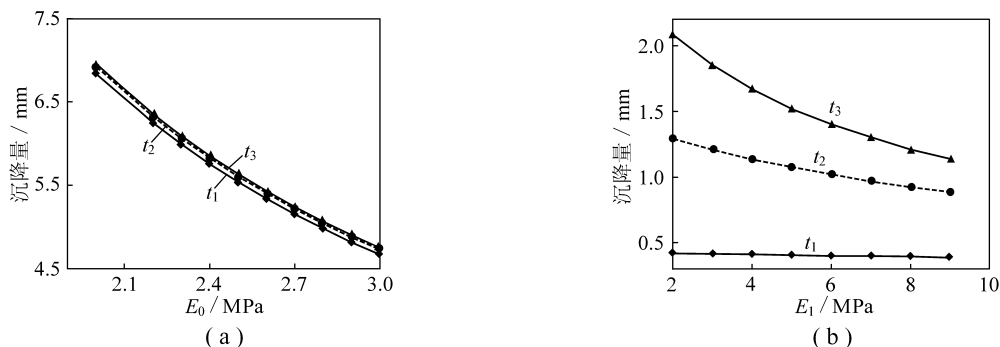


图 4 流变模型中的  $E_0$ ,  $E_1$  对单桩沉降的影响

Fig. 4 The influence of  $E_0$ ,  $E_1$  on the settlement of the single pile

取  $E_0 = 0.1$  GPa, 变化  $E_1$ , 按式 (3) 计算出  $E_s$ . 由图 4 (b) 可知, 由于  $E_1$  增大时, 土的压缩模量  $E_s$  也增大, 因而, 桩的沉降量减小; 反之, 当  $E_1$  减小时土的压缩模量  $E_s$  减小, 桩的沉降量增大. 当时间参数大时单桩的沉降量随  $E_1$  减小的幅度大, 而当时间参数较小时,  $E_1$  的变化对单桩的沉降量影响小. 比较 3 个相等时刻不同  $E_1$  所确定的单桩沉降可知,  $E_1$  越小沉降量的变化幅度越大, 而  $E_1$  越大沉降量的变化幅度则越小.

## 4 理论模型的结果和实测数据的比较

某公司办公楼地质情况地质条件基本为饱和黏性土. 共对 2 根桩进行了静载试验. 2 根桩桩长均为 20 m, 桩径 0.5 m, 采用慢速维持荷载法, 最大加载量为 1.3 MN, 对应的最大沉降量分别为 9.82, 9.49 mm. 对 2 根桩 (1, 2 号桩) 的实测试验数据和理论计算结果进行了比较.

现场的土层条件基本符合半空间均质饱和土的假设. 根据各土层的渗透系数及压缩模量可计算出和成层土相等价的均匀土层的渗透系数、压缩模量等. 均匀土层的渗透系数  $k$  取  $5.76 \times 10^{-7}$  m/s, 土的压缩模量  $E_s$  取 3.0 MPa, 桩的弹性模量  $E_p$  取 20.4 GPa, 土的泊松比取 0.45, 桩的长度为 20 m, 直径为 0.5 m.

对于流变模型参数的取值, 采用反分析法进行确定. 取不同的流变参数进行计算, 根据流变参数对计算结果的影响对参数进行调节, 使理论计算结果与实测结果符合. 利用 1 号桩来进行反分析, 以确定桩土体参数. 根据反分析法选取如下土体流变参数:  $E_0 = 0.1$  GPa,  $E_1 = 3.0$  MPa,  $\eta = 0.7$  TN  $\cdot$  s/m.

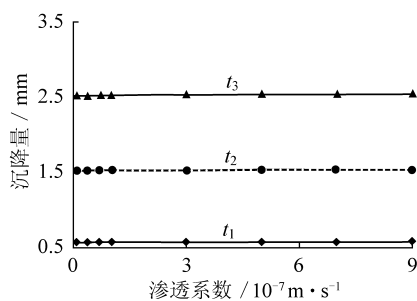


图 3 渗透系数对单桩沉降的影响

Fig. 3 The influence of the permeability on the settlement of the single pile

桩顶荷载随时间变化如图5(a)所示,结合已知参数,根据所建立的理论模型,可求出任一时刻桩顶的沉降.具体计算结果及实测结果如图5(b)所示.由图5(b)可知,理论计算结果和1号桩的实测结果吻合得很好.此外,根据1号桩所确定的土体参数,对2号桩进行了计算(图5(c)).由图5(c)可知,本文的理论结果和2号桩的实测沉降符合得较好.验证了该积分方程模型的工程适用性.

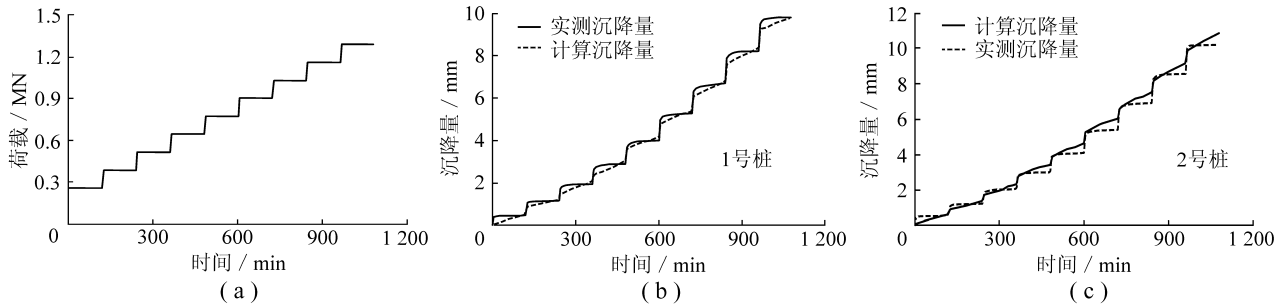


图5 桩顶荷载时程曲线及实测沉降量与计算沉降量的比较

Fig.5 The curves for the load history of the pile and comparison between in situ data and the calculated results for the settlement

## 5 结 语

对于考虑土骨架流变的 Biot 固结问题,采用对应原理方便地得到考虑固结与流变问题的基本解.利用反分析法求得土的黏弹性参数,用于桩的沉降计算的方法,其计算结果有较高的可靠性.对影响单桩沉降的各个参数进行了定量分析,明确其对单桩沉降结果的影响方式及影响程度.提出的计算模型经验证符合工程实际,能够结合具体的桩土参数,对桩基的沉降进行定量分析.

## 参考文献:

- [1] 陆建飞. 饱和土中的桩土共同作用问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2000. 27 ~ 43.
- [2] Apirathvorakij V, Karasudhi P. Quasi-static bending of a cylindrical elastic bar partially embedded in a saturated elastic half-space [J]. *Int. J. Solids Structures*, 1980, 16: 625 ~ 644.
- [3] Lee E H. Stress analysis in visco-elastic bodies [J]. *Quart. of Applied Math*, 1955, 11 (5): 183 ~ 190.
- [4] Boonsrang Niumpradit, Pisidhi Karasudhi. Load transfer from an elastic pile to a saturated porous elastic soil [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1981, 5: 115 ~ 138.
- [5] Muki R, Sternberg E. Elastostatic load-transfer to a half-space from a partially embedded axially loaded rod [J]. *Int. J. Solids Structures*, 1970, 6: 69 ~ 90.
- [6] Davies B, Martin B. Numerical inversion of Laplace transform: survey and comparison of methods [J]. *J. Comp. Phys.*, 1979, 33: 1 ~ 32.
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 213 ~ 257.
- [8] 钱家欢. 黏弹性理论在土力学方面的应用 [J]. *高等学校自然科学学报 (土木建筑水利版)*, 1966, 2 (1): 68 ~ 73.