

文章编号: 1000-7598-(2006)06-0973-04

基于 ANSYS 软件模拟桩的挤入过程

唐世栋, 李 阳

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 基于 ANSYS 软件分析了桩土之间的相互作用, 模拟了桩打入时土中的应力、应变情况。通过结合 ANSYS 中的接触分析和生死单元, 以 DP 材料来模拟土体, 采用循环命令的方式来分析桩土接触时复杂的应力状态。模拟结果得到了圆孔扩张理论和极限平衡法的验证。

关 键 词: ANSYS; 桩; 桩土作用; Drucker-Prager 屈服准则

中图分类号: O 245 TU 473.1⁺2

文献标识码: A

Analysis of a driven pile by ANSYS

TANG Shi-dong, LI Yang

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The interaction of soil and pile is analyzed by ANSYS; and the state of stress and strain in the soil after the pile was driven in is simulated. By combining the contact analysis with birth - death element of ANSYS, and proposed the soil material comply with the Drucker-Prager criterion, the circulation command is used to analyze complicated soil stress state. These results are verified by limit equilibrium method and theory of expansion of a cavity.

Key words: ANSYS; pile; interaction of soil and pile; Drucker-Prager criterion

1 概 述

挤土桩在打入的过程中, 对周围土体的挤密会使地表隆起、桩侧产生位移应力分区、桩尖下形成应力泡等现象^[1]。由于打桩和压桩过程的复杂性, 对于这些现象的分析不但理论计算无能为力, 现场试验也很难全面地反映出来, 往往只能依靠工程经验进行判断。本文试图通过有限元计算的方法模拟和分析桩的打入过程及其周围土体中的应力、应变状态。

2 Drucker-Prager 屈服准则

本文用 ANSYS 中 Drucker-Prager 准则来建立土体模型, 主要通过黏聚力 c 、摩擦角 φ 和膨胀角 β 这 3 个物理参数来描述 DP 材料。Drucker-Prager 屈服准则是对 Mohr-Coulomb 准则的修订。其屈服准则的等效应力表达式为^[2]:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{1/2} \quad (1)$$

其中 $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_c)$ 为平均应力或静水压力;

$\{S\}$ 为偏差应力; β 为材料常数, 由受压屈服应力 σ_c 和受拉屈服应力 σ_r 计算而来, 也可由内摩擦角 φ 来决定, 其表达式为

$$\beta = \frac{\sigma_c - \sigma_r}{\sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_r)} = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2)$$

屈服准则的表达式如下:

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right] - \sigma_c = 0 \quad (3)$$

3 ANSYS 中建立模型

3.1 模型的假设和建立过程

假定桩的挤土过程是轴对称问题: 桩单元体按弹性材料考虑; 土单元体为弹塑性材料, 服从 Drucker-Prager 屈服准则。模型中桩的尺寸为桩径 $d=0.5$ m, 桩长 $h=6$ m, 弹性模量 $E=2.1 \times 10^9$ pa;

土体划分为 3 层, 由于桩对 20 倍桩半径以外土体的影响可以忽略不计^[3], 将土体模型的厚度设为桩长的 2 倍, 宽度为桩长的 1 倍。模型的土工参数见表。

表 1 土层参数表

Table 1 Property of clay in model

土层	弹性模量 /Pa	泊松比	重度 /kN·m ⁻³	黏聚力 c / kPa	摩擦角 φ	膨胀角 β
粉质黏土	3.4×10^7	0.29	18.5	12.	18	10
淤泥质黏土	2.9×10^7	0.46	17	13	12	12
黏土	3.2×10^7	0.42	17.5	15	14.5	10

网格划分采用实体单元 Solid45。土单元体采用映射网格划分, 桩体采用自由网格划分。由于模型的对称性, 实际分析过程中只需选取 1/4 对称结构即可。

3.2 桩土接触问题的处理

由于打桩或压桩时桩土间的错动位移非常大, 远远超过一般的大变形问题, 这就使得桩和土的接触问题十分复杂: 对于桩端来说, 随着自身的向下移动, 原有的土层被挤开, 接触的对象不断地发生改变; 而桩侧的接触面积则随着入土深度的增加而不断增大, 最终整个桩身与土体产生接触, 这个过程中发生接触的对象也都是不同的。

在 ANSYS 中, 接触问题是通过接触对 (点点接触、面面接触或点面接触) 来实现的。在求解问题之前, 先将所有可能发生接触的单元设置好接触对。为了实现对桩打入过程的模拟, 需要结合 ANSYS 中提供的生死单元和循环命令: 将桩打入的过程分成 n 段, 只在桩端打入的位置激活摩擦单元, 而将其余位置上的接触单元暂时冻结。这样处理后的接触问题就可以用 ANSYS 分析了。

3.3 求解过程

先对土体模型施加自重应力, 在 ANSYS 中的自重应力是通过设置材料的密度和重力加速度完成的。并且当材料设置泊松比 μ 后, ANSYS 会自动得到静止土压力系数 k_0 。在经过一个周期的运算后, 得到模型的初始应力, 计算结果显示 10 m 深附近的上覆应力约为 176 kPa。

施加完初始应力后, 开始循环求解。循环求解的流程如下:

对于打入桩, 循环段开始时, 在桩顶施加瞬间荷载, 这样每个循环段可以认为是一个锤击过程; 在本文中, 桩身经过 20 次循环进入了指定的位置。对于锤击次数不同的打入桩, 通过改变循环的次数即可模拟; 而对于静压桩, 循环段内的桩顶荷载则保持不变。

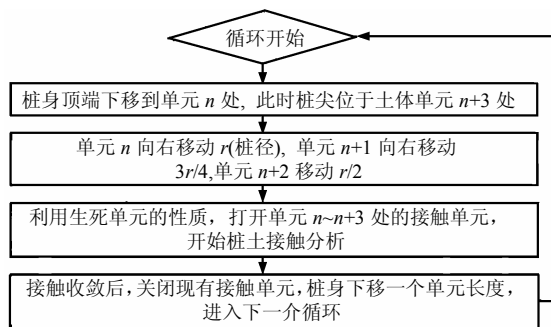


图 1 打入桩循环求解流程图

Fig.1 Flow chart of circulation solution of driven pile

4 计算结果分析

根据 ANSYS 的计算结果, 分别绘制出单元变形图与位移和应力的等值线图, 并与小孔扩张理论和极限平衡理论得出的结论进行了对比。

4.1 土体单元的位移与应变

对模型完成计算后, 应首先观测其单元变形图。从图 2 中可以看出: 靠近地表的土体受到桩的挤土作用发生隆起; 紧靠桩身的土体受到桩身的拖拽作用向下移动, 单元体的形状发生了很大改变; 离桩轴较远处的单元体以水平变形为主, 竖向变形很小。这与实际情况是一致的。

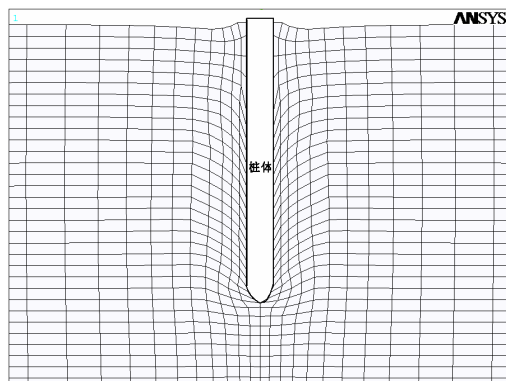


图 2 土体单元变形图

Fig.2 Deformation of soil elements

根据小孔扩张理论, 水平和竖向应力增量在塑性区内的分布应为^[4]:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_r = 2c_u \ln(R_p/r) + c_u \\ \Delta\sigma_z = 2c_u \ln(R_p/r) \end{cases} \quad (4)$$

在弹性区的应力增量为

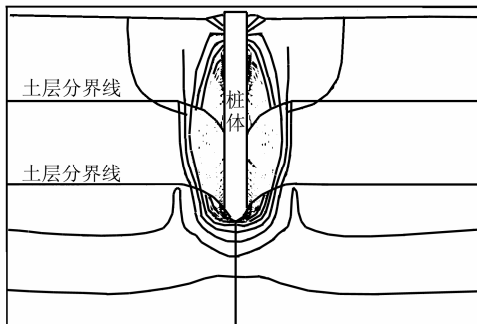
$$\begin{cases} \Delta\sigma_r = c_u (R_p/r)^2 \\ \Delta\sigma_z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

塑性区半径为

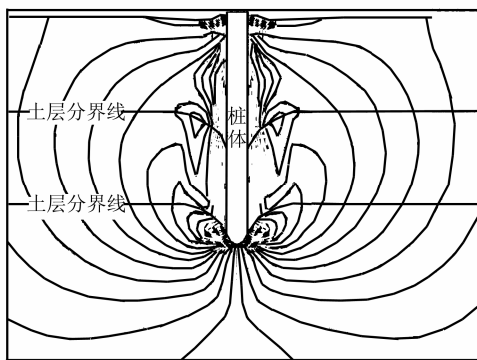
$$\frac{R_p}{r_0} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)c_u}} \quad (6)$$

分析式(4)、(5)可知, 竖向应力增量仅在塑性区内分布, 侧向力增量则分布在整个影响区的范围以内。将表1中的土层参数代入式(6)后可得到塑性区的半径约为 $5r_0$ 。

在 ANSYS 中计算塑性区范围的方法如下: 在材料属性中定义一个状态的最大值(位移, 应力, 应变等), 只要超过这个值, 就认为材料进入塑性(或破坏)。由图3可知, 竖向应变的等值线(图3(a))基本分布在 $5r_0$ 的范围以内, 水平应变的等值线(图3(b))则分布在整个模型的范围以内, 这表明 ANSYS 的计算结果与式(4)和式(6)的结论基本符合。



(a) 竖向应变



(b) 水平应变

图3 应变等值线图

Fig.3 Contour map of strains

4.2 桩周土的空间应力状态

图4~图6反映了沉桩后土体中的总应力状态。观察发现, 3种应力分量的最大值和应力梯度的最大值都位于桩端附近, 因此, 等值线形成类似于“应力泡”的层状结构。“应力泡”的形状接近于椭圆, 这也显示出了桩端附近土体的球形扩张形式。在 ANSYS 的计算中还发现, 水平和竖向应力的最大值也是随着沉桩过程不断下移的, 这反映了沉桩过程中桩端周围土体受到的巨大挤压力。

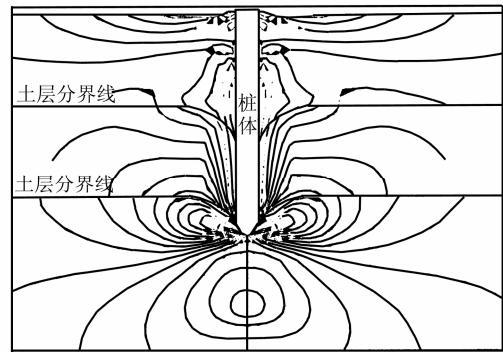


图4 侧向应力等值线

Fig.4 Contour map of lateral stresses

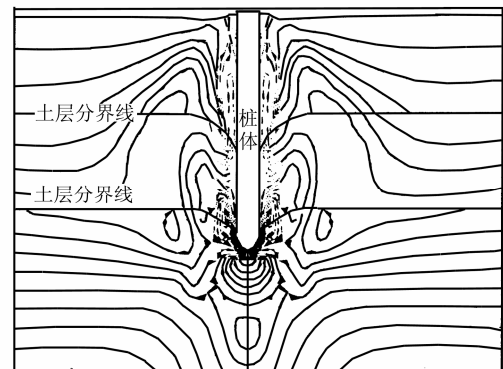


图5 竖向应力等值线

Fig.5 Contour map of vertical stresses

式(4)表明, 只有在塑性区的范围内才会产生竖向应力增量。因此, 沉桩产生的剪应力也分布在塑性区内。根据剪应力的分布情况, 也可以得到沉桩后破坏区($1r_0$ 左右)和塑性区($5r_0$ 左右)的边界(参见图6)。

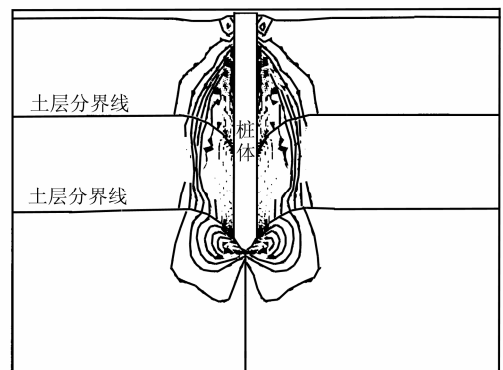


图6 剪应力等值线

Fig.6 Contour map of shear stresses

4.3 侧向力的空间应力分布

沉桩过程中, 对桩周土影响最大的是桩身的侧向挤压力。这使得侧向力在沉桩后一直作为主应力存在, 其中又以桩端对土体的挤压作用最大。根据

式(4), 水平方向上侧压力分布是以对数形式衰减的。图 7 反映了沉桩后桩端处的侧压力沿水平方向的变化, 桩端处侧压力的最大值(230 kPa)为沉桩前土体内初始侧压力的 3 倍左右; 桩端深度处水平侧压力衰减的形式则与将表 1 中的土工参数代入式(4)中的第一式后计算出的结果类似(参见图 7)。

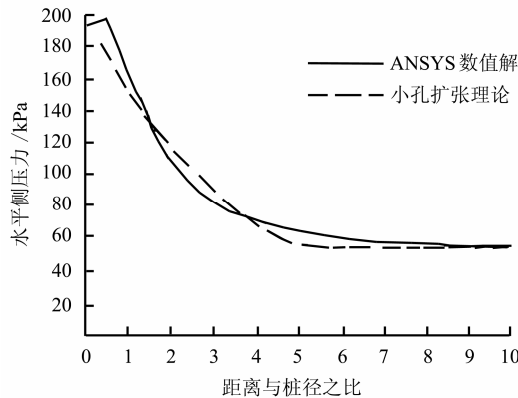


图 7 侧压力沿水平方向的变化

Fig.7 Distribution of lateral stresses with the rate of pile spacing

小孔扩张理论可以很好地反映出桩距比对侧压力的影响, 但由于该理论是基于无限长小孔这一假定, 无法反映出上覆应力即深度因素对侧压力的影响。因此, 在求解深度问题时, 对于桩侧塑性区内的侧压力可以根据极限平衡理论进行计算^[5]:

$$\Delta\sigma_r = \gamma' h \cdot [tg^2(\pi/4 + \varphi/2) - K_0] + 2c \cdot tg(\pi/4 + \varphi/2) \quad (7)$$

式(7)表明, 塑性区内侧压力沿深度方向是线性增大的。图 8 为距离桩身 2 倍桩半径处侧压力在深度上的变化, 可以看出, ANSYS 的计算结果与用极限平衡理论得出的结论类似。

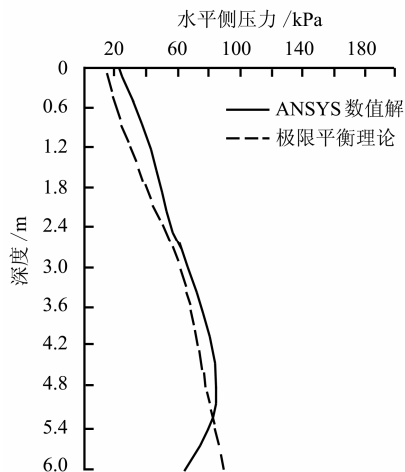


图 8 侧压力随深度变化

Fig.8 Distribution of lateral stresses with depth

5 结 语

综上所述, 据所建的模型计算表明后, ANSYS 是可以模拟沉桩这一复杂的应力-应变过程的。其计算结果反映了沉桩产生的地表隆起、桩侧土体的拖带下沉与桩端处的应力集中现象, 验证了小孔扩张理论中沉桩后土体在桩侧与桩端的扩张形式。关于侧向力的计算结果还表明, 小孔扩张理论适于分析水平方向上的侧压力分布(对数衰减), 极限平衡理论适于分析沿深度方向上侧压力的变化(线性增大)。

此外, ANSYS 具有强大的后处理能力, 可以通过多媒体的形式, 展现出各种应力、应变状态在空间上的分布与随时间的变化过程。

参 考 文 献

- [1] 卞立民, 徐海波, 徐建平. 沉桩挤土效应研究综述[J]. 华中科技大学学报, 2002, 19(3): 68—71.
BIAN Li-ming, XU Hai-bo, XU jian-ping. Summarization on soil-displacement effect caused by driven pile[J]. *Journal of Huazhong University of Sci.&Tech*, 2002, 19(3): 68—71.
- [2] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [3] 唐世栋. 用有效应力原理分析桩基承载力的变化全过程[D]. 上海: 同济大学, 1990.
- [4] Vesic A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers*, 1972, 98(3): 265—290.
- [5] 唐世栋, 何连生, 叶真华. 软土地基中桩基施工引起的侧向土压力增量[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 752—755.
TANG Shi-dong, HE Lian-sheng, YE Zhen-hua. Increment of lateral pressure caused by an installing pile in soft foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(6): 752—755.
- [6] 刘毓氟, 朱长歧, 刘祖德. 单桩承载性能的三维有限元无限元耦合分析[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 275—277.
LIU Yu-chuan, et al, 3D FEM-UEM coupling numerical analysis of single pile bearing capability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(3): 275—277.