

# 静压桩压入过程的数值模拟

毕庆涛<sup>1</sup>, 肖昭然<sup>2</sup>, 丁树云<sup>1</sup>, 蒋敏敏<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院岩土工程教研室, 河南 郑州 450011; 2. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 在静压桩的有限元数值模拟技术中, 会涉及到大变形、接触非线性等典型力学问题, 这些问题是制约数值模拟成功与否的关键。论文采取桩顶施加位移边界条件的方法模拟连续稳步的静压桩贯入过程, 研究了有限元计算的网格重新剖分和数据传递, 通过模拟砂土地基中预制桩的贯入过程, 表明任意拉格朗日-欧拉有限元技术和接触力学技术可以较好地解决岩土工程中的大变形和接触问题。

**关键词:** 大变形; 静压桩; 网格移动; 任意拉格朗日-欧拉描述

**中图分类号:** TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0074-04

**作者简介:** 毕庆涛(1980-), 男, 河南罗山人, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程的研究与教学工作。E-mail: biqingtao@163.com。

## Numerical modelling of penetrating of jacked piles

BI Qing-tao<sup>1</sup>, XIAO Zhao-ran<sup>2</sup>, DING Shu-yun<sup>1</sup>, JIANG Min-min<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2.

School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Deep penetration in displacement piles involves large deformation, nonlinear contact and other mechanical difficult issues. They are key technical problems in numerical modelling. An arbitrary Lagrangian-Eulerian method is used to overcome these problems. The penetration is simulated by the given continual displacement boundary at the top of jacked piles. The grid remesh algorithm and data transmission are studied. The penetration of premoulded piles in sand is analysed, and it is proposed that the arbitrary Lagrangian-Eulerian method is an effective way to solve large deformation in penetration problem.

**Key words:** large deformation; jacked pile; mesh moving; arbitrary Lagrangian-Eulerian description

## 0 引言

静压桩技术具有噪音小、施工清洁等优点, 被广泛用于城市和工程建设中。工程界和学术界对压桩问题及其影响的关注由来已久, 不过由于该问题较复杂, 至今人们对压桩的挤土效应、沉桩机理等, 仍不是十分清楚, 理论落后于应用。有限元数值方法已被证实是一种非常有效的工程计算方法, 许多学者已将其引入静压桩的研究之中。它能够全面计算出桩体压入过程中土体的应力和位移变化情况、孔压消散过程, 以及沉桩阻力, 能够有效模拟沉桩的机理和挤土效应<sup>[1]</sup>。

然而, 压桩过程的数值模拟是较困难的, 其原因主要是由于大变形对有限元网格提出了较高的要求。应该说, 只要将桩端及桩周土体单元划分得足够小, 是可以达到好的求解精度。但是, 大变形问题不可避免出现网格单元扭曲, 甚至单元积分点的 Jacobian 值为负值, 这是基于 Lagrangian 描述的有限元格式的局限所造成。当材料严重变形时, Lagrangian 单元也将

同时发生严重的扭曲, 从而恶化了线性 Newton 方程的条件, 显式稳定时间步长减小, 使得计算中止。

不少学者针对压桩大变形问题进行了研究, van den Berg(1994)<sup>[2]</sup> 较早提出采用 Eulerian 描述的有限格式模拟圆锥静力贯入土体, 它成功避免了网格扭曲问题。在 Eulerian 格式有限元中, 单元在空间上是固定的, 材料在空间流动, 这样有限元不会随着材料的运动而扭曲。但是, 由于材料的流动, 本构方程的处理和更新较为复杂。另外, Eulerian 单元在处理移动边界和相互作用的问题上, 收到较大的限制。

近来, 任意拉格朗日-欧拉方法 (Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE) 被发现是处理大变形网格扭曲问题的有效方法<sup>[3]</sup>。ALE 方法是基于材料和网格分离的思想, 每一个增量步分两个子步: Lagrangian

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50978086)

收稿日期: 2011-08-22

步和 Eulerian 步。在 Lagrangian 步中, 求解控制方程获得材料位移, 此时网格随材料一起扭曲; 在 Eulerian 步中, 变形区域产生新的、较好的网格, 并获得网格的位移。扭曲网格上所有的变量转移到新的网格。所以, ALE 方法的关键是网格更新技术和新旧网格的映射技术。

论文将采用 ALE 方法模拟静压桩的压入过程, 分析桩周土体位移、应力等状态的变化过程。旨在利用 ALE 有限元模拟静压桩贯入的实现过程。

## 1 任意拉格朗日-欧拉方法

任意拉格朗日-欧拉有限元 (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 简称为 ALE 有限元, 它是基于 ALE 描述建立起来的有限元格式。如闻其名, ALE 描述是 Lagrangian 描述和 Eulerian 描述的任意组合, 这里任意一词的含义实际上指组合是由用户通过对网格运动的选择指定的<sup>[4]</sup>。

ALE 有限元格式集合了 Lagrangian 有限元和 Eulerian 有限元的优越性, 它通过将材料运动和网格运动分别独立描述, 从而有效地控制计算网格的扭曲、畸变, 保证网格的质量和计算质量。在解决大变形问题时, 当材料严重变形, Lagrangian 网格单元也将发生严重的扭曲。如图 1 所示的体积成形模拟过程, 刚性模具往往会导致 Lagrangian 网格单元发生畸变, 从而恶化了这些单元的近似精度, 在积分点上的 Jacobian 行列式可能成为负值, 致使计算中止。ALE 网格则不然, 它对网格的描述建立在 ALE 参考域之上, 与材料域相对独立, 它在计算过程中可以调整网格形态。

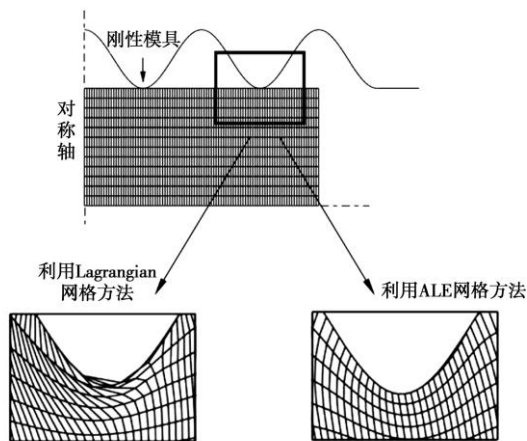


图 1 ALE 方法控制网格扭曲

Fig. 1 ALE method sloving mesh distortion

在参考域内, 连续介质 ALE 格式的控制方程包括系统方程、初始条件和边界条件, 分别为<sup>[4]</sup>:

$$\text{质量守恒方程} \quad \dot{\rho} + \rho v_{k,k} = 0, \quad (1)$$

$$\text{动量守恒方程} \quad \rho \dot{v}_i = \sigma_{ji,j} + \rho b_i, \quad (2)$$

$$\text{初始条件} \quad \sigma(X, 0) = \sigma_0(X), \quad (3)$$

$$\text{位移边界} \quad u_i(\chi, t) = \bar{U}_i(\chi, t). \quad (4)$$

式中  $\rho$  为物质密度,  $\dot{\rho}$  为密度的材料时间导数;  $v$  为速度,  $\dot{v}$  为速度的材料时间导数;  $\sigma$  为应力张量,  $\sigma_0$  为已知应力;  $b$  为体力,  $u$  为位移,  $\bar{U}$  为已知位移;  $X$  代表材料域坐标,  $\chi$  代表参考域坐标。

ALE 有限元实现的过程, 可以利用算子分裂技术将其分为两步来完成, 先计算更新的拉格朗日步 (U. L. Step), 然后计算欧拉步 (Euler Step)。欧拉步中, 在变形的材料域上重新形成新的网格, 并利用材料导数和网格导数的关系式, 将旧网格中的运动和静态变量转换到新的网格。材料导数和网格导数的关系式为:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + (v'_i - v''_i) \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad (5)$$

式中,  $f$  为任意函数,  $df/dt$  为其材料时间导数,  $\partial f/\partial t$  为其空间时间导数,  $v'_i$  为材料速度,  $v''_i$  为网格速度。其中,  $(v'_i - v''_i)$  也被称之为对流速度, 表示材料和网格的速度差。

ALE 有限元实现的过程可以用图 2 示意说明<sup>[5]</sup>。

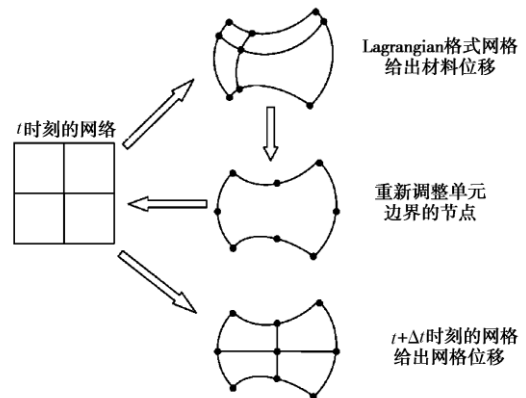


图 2 ALE 有限元实现过程示意图

Fig. 2 Procedure of ALE FEM

## 2 静压桩压入的 ALE 过程模拟

在岩土工程领域内, 当两种材料的模量相差较大时, 有限元模拟通常借助接触单元的思路来解决位移不连续, 例如 Goodman 无厚度接触面单元、有厚度接触面单元等。但这样做只适用于小变形的情况, 当出现大变形时, 接触单元将很难保证计算的顺利进行。

静压桩的压入过程会涉及到桩土接触的大变形问题, 不少学者已经采用接触力学方法和接触非线性算法来解决接触大变形的问題<sup>[6]</sup>。本文模拟静压桩压入过程的接触问题, 也采用接触力学的方法, 其原理不再赘述。

### 2.1 计算模型

桩体为直径 60 cm 的混凝土预制桩, 长 10 m, 模拟为刚体, 忽略其变形; 地基为砂土地层, 模拟为 Drucker-

Prager 模型，参数为摩擦角为  $50^{\circ}$ ，剪胀角为  $25^{\circ}$ 。

三维几何模型如图 3 (a) 所示，其中砂土地基直径 20 m，深 20 m。为了简化计算，可以取轴对称模型来计算分析，如图 3 (b) 所示。

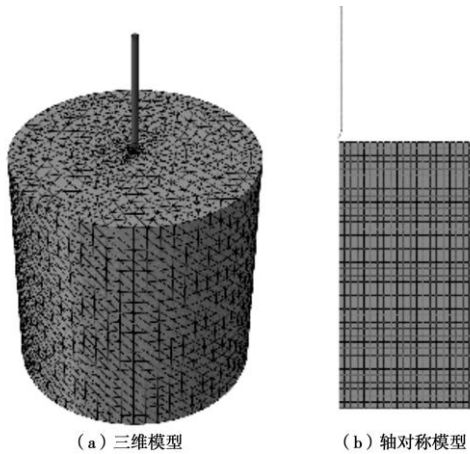


图 3 砂土中静压桩模型  
Fig. 3 Model of jacked pile in sand

2.2 网格更新分析

ALE 有限元解决大变形问题最核心的优势就在于计算过程中，网格形态不断更新，保证网格高质量和精度，不发生严重畸变，从而使计算顺利进行下去。图 4 是静压桩在零时刻、压入 1 m 时、压入 5 m 时、压入 10 m 时的网格。

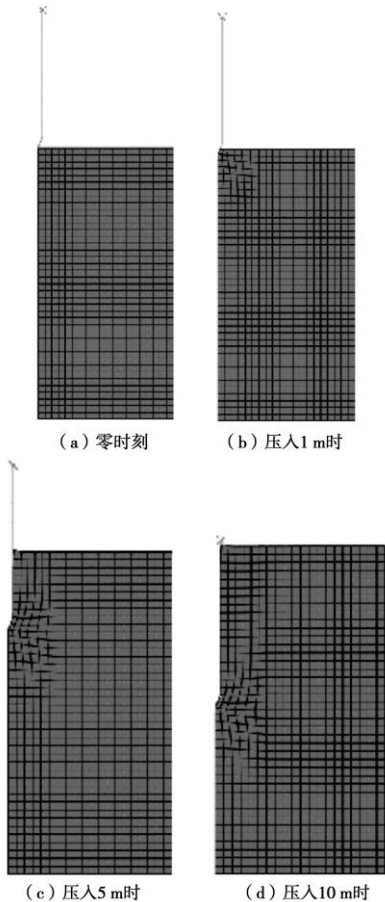


图 4 ALE 网格更新  
Fig. 4 Remesh of ALE grid

从图 4 可以看出，随着桩的压入，桩端附近的网格形态向下移动，桩身附近的网格恢复原来的形态。

2.3 压桩过程的应力变形

地基砂土的重度取  $16 \text{ kN/m}^3$ ，天然应力场如图 5 (a) 和图 6 (a) 所示，其中图 5 为大主应力场，图 6 为小主应力场。随着预制桩的压入，桩体附近的地基应力场发生变化，从图 5 (b)、(c) 可以明显看出，压入桩影响地基应力的范围为 10 倍左右桩径，即 3 m 的区域，并出现应力拱现象。

对比图 6 (b) 和图 6 (c)，当压桩至 5 m (1/2 桩长) 的时候，桩周地基的水平应力有明显增大，但进一步压桩，直至压桩完毕，桩周地基层部的水平应力有所减小。

应该指出的是，应用 ALE 方法计算出的位移，仅表示网格点的位移。正如前面提到的，ALE 有限元的

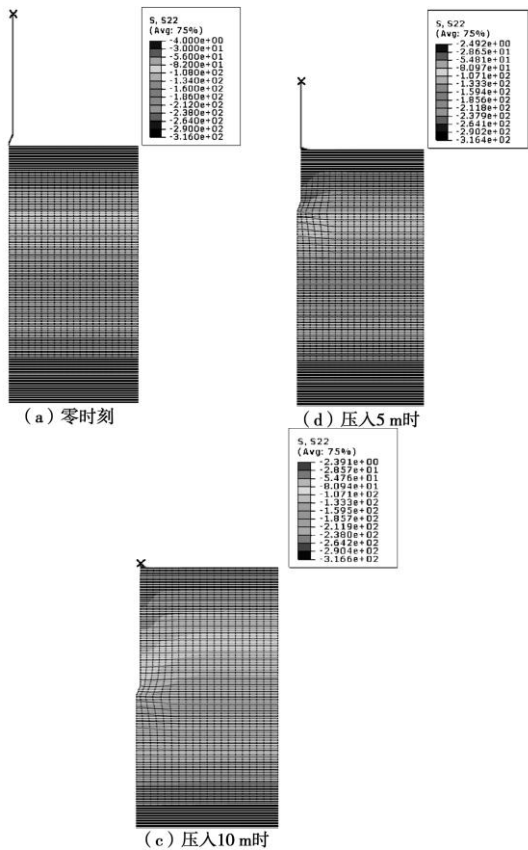


图 5 静压桩压入过程大主应力图  
Fig. 5 Major principal stress in penetrating

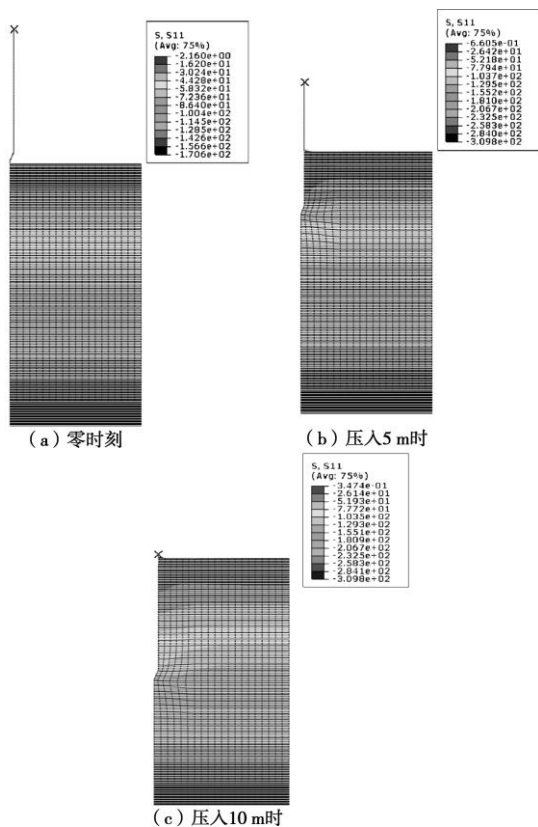


图 6 静压桩压入过程小主应力图

Fig. 6 Minor principal stress in penetrating

计算域是 ALE 参考域, 它与网格始终保持一致。在 ALE 计算中, 网格节点与材料节点是分离的, 网格节点并不对应于某一固定的材料点, 要得出材料物质点的位移, 需要经过变换整理计算结果。

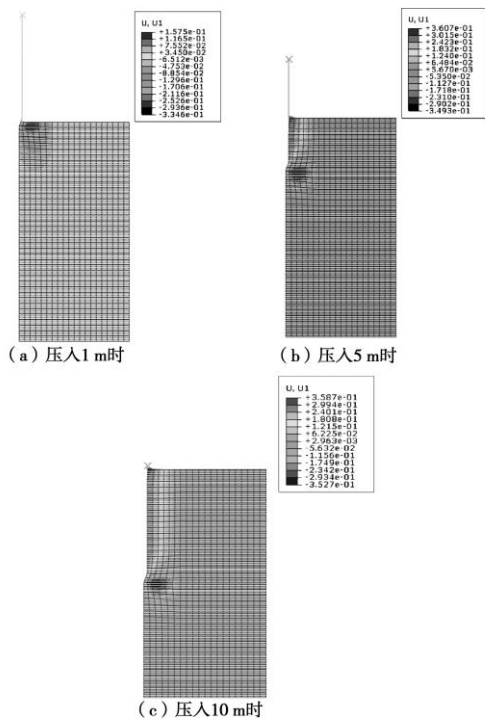


图 7 静压桩压入过程网格位移等值线图

Fig.7 Displacement of mesh joint in penetrating

在静压桩压入过程的 ALE 模拟中, 网格在不断移

动, 其水平位移等值线图如图 7 所示。对计算结果进

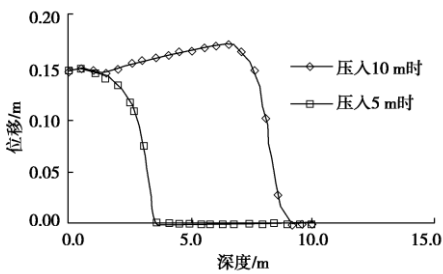


图 8 静压桩压入过程挤土效应

Fig. 8 Soil squeezing effect in penetrating

行整理, 可以得到距离对称轴线 1.5 m 位置地基土物质点的水平位移, 如图 8 所示。图 8 显示出了静压桩压入过程中的挤土效应。

3 结 语

有限元数值模拟在研究静压桩的成桩机理及挤土效应等方面, 是一种有效的方法。然而, 模拟技术中涉及到的大变形、非线性接触等等典型力学问题, 目前还没有很好地解决。论文采取桩顶施加位移边界条件的方法模拟连续稳步的静压桩贯入过程, 研究了有限元计算的网格重新剖分和数据传递, 通过模拟砂土地基中预制桩的贯入过程, 表明任意拉格朗日-欧拉有限元 (ALE) 技术和接触力学方法可以较好地解决静压桩贯入的大变形和接触问题。

应该指出的是, 论文仅仅探讨了 ALE 有限元在模拟静压桩贯入的实现过程, 旨在说明这一技术在静压桩模拟方面的优势, 如何进一步精细模拟静压桩压入过程中土的物理状态变化、桩基承载力、摩阻力等一系列问题, 还需要研究。

参考文献:

[1] 张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (ZHANG Min-yi. Study and application of jack-in pile[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004. (in Chinese))

[2] Van den Berg P. Analysis of soil penetration[D]. Technische Universiteit Delft, 1994.

[3] SHENG Dai-chao, NAZEM Majidreza, CARTER John P. Some computational aspects for solving deep penetration problems in geomechanics[J]. Comput Mech, 2009, 44: 549 - 561.

[4] Ted Belytschko.连续体和结构的非线性有限元[M]. 庄 茁, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002. (Ted Belytschko. Nonlinear finite elements for continua and structures[M]. ZHUANG Zhuo, tran. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese))

- [5] SHENG Dai-chao. Frictional contact for pile installation[C]// IUTAM Symposium on Computational Contact Mechanics. WRIGGERS Peter, NACKENHORST Udo, eds: 239 – 255. 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of Abaqus in geotechnical engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010. (in Chinese))
- [6] 费 康, 张建伟. Abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京:

(本文责编 明经平)