

文章编号: 1000-7598-(2003)01-0113-05

静力压桩数值模拟的位移贯入法

张明义¹, 邓安福², 干腾君²

(1. 青岛建筑工程学院 土木工程系, 青岛 266033; 2. 重庆大学 建筑工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 在通用软件 ANSYS 平台上对静力压桩进行数值分析。提出了位移贯入法, 巧妙地利用边界位移条件使桩体贯入, 可以考虑弹塑性本构关系、大变形和桩-土滑动摩擦等复杂问题, 更符合静力压桩实际情况, 具有仿真效果。

关 键 词: 静力压桩; 数值分析; 位移贯入法

中图分类号: 0241 **文献标识码:** A

Displacement penetration method used for numerical simulation to jacked pile

ZHANG Ming-yi¹, DENG An-fu², GAN Teng-jun²

(1. Qingdao Institute of Architecture and Engineering, Qingdao 266033, China; 2. Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Numerical analysis of static piling based on the commonly used software ANSYS is done. The displacement penetration method is presented, which lets the pile move downward by means of the displacement boundary condition so that to simulate the piling process of jacked pile. The method takes some complex problems into account, such as elastoplastic constitutive law, large deformation and the sliding friction between pile and soil, which is more reality and has the effect of animated simulation.

Key words: jacked pile (static pressed pile); numerical analysis; displacement penetration method

1 引 言

静力压入桩的沉桩过程是一个稳态贯入过程, 它不同于一般的静力问题, 也有别于打桩等动力问题。在采用有限元等进行数值模拟计算时, 应考虑到如下几个方面的问题:

(1) 大变形和非线性。桩的贯入使桩周一定范围内的土体产生较大的挤压位移, 如果按经典的有限元方法计算, 会产生较大的计算误差。所以应该采用连续介质的大变形理论, 即采用能够处理包括几何非线性和材料非线性问题的方法计算;

(2) 桩土界面的模拟。桩土界面的处理是模拟静力压桩沉桩过程的一个关键问题, 许多学者对此进行了探索。Mabsout 和 Tasoulas^[1]采用滑动面算法模拟沉桩过程, 能够较好地反映桩土界面的实际

情况。在沉桩过程中, 桩土之间的接触面积比较大, 属于面-面接触。并且, 由于桩身混凝土具有一定的粗糙度, 对土有粘带作用, 因此, 在桩被压入土体的过程中, 桩与土体的真实边界并不一定处于两者之间。更重要的是, 桩与土之间产生较大的滑动, 处理这一类问题, 最好采用拉格朗日乘子法^[2];

(3) 桩周土体的本构关系。桩的贯入使桩周部分土体产生剧烈的剪切和拉裂, 应力和应变值都相当大。目前使用的本构模型几乎都是在小应变情况下推出的, 严格地说不适用于静压桩这样的大应变情况。如果一定要在大应变情况下使用这些模型, 就应该对模型参数加以修正。这是静力压桩数值计算较难解决的问题, 也是影响计算可信度的关键之处。

综上所述, 静力压桩贯入过程的计算不同于普

通的承受静载桩的数值计算, 应该突出静压桩贯入和挤土的特征。虽然难以用有限元法模拟静压桩连续贯入的整个过程, 但可以借助于非线性大变形、弹塑性、接触面等计算技术, 在不同深度上分段贯入。

2 位移贯入法的引入

114

如图 1 所示, 可以采用以下三种计算方式来模拟桩的贯入:

(1) 在桩顶直接施加压力, 使桩向下贯入 (沉降) 某一距离, 但贯入的距离较小且不易预先确定, 如图 1(a) 所示。此种计算相当于将桩的荷载加至破坏、使桩产生贯入的静荷载试验。因假定土体为弹塑性材料, 加荷过大 (超过破坏值) 会导致计算异常, 而加荷太小又不能产生塑性应变和贯入, 故要通过试算确定合适的桩顶压力 F 。

(2) 孔扩张方式。如图 1(b) 所示。这是大多数静压桩挤土有限元计算所采用的图式。把静压桩的贯入看成圆柱形孔扩张。用有限元计算时, 需分段 (工况) 计算^[3]。

(3) 在不同深度上直接贯入, 如图 1(c) 所示, 桩贯入的深度为 S 。在本计算方式中, 桩顶不需要施加外力, 桩的贯入是依靠对在桩顶施加的位移边界条件实现的。这实质上是使桩产生向下的运动, 该运动对桩周土的作用, 视为与桩顶施加外力时一样, 故可称作“位移贯入法”。桩侧表面与土之间则采用滑动接触摩擦模式, 并采用非线性大变形算法。

计算中, 将桩预置在一定深度上, 然后令其贯入, 向下贯入的距离 $S=15 \sim 20$ cm。这样大的距离完成后, 桩端周围土的受力状况与桩连续贯入到该深度时相似。

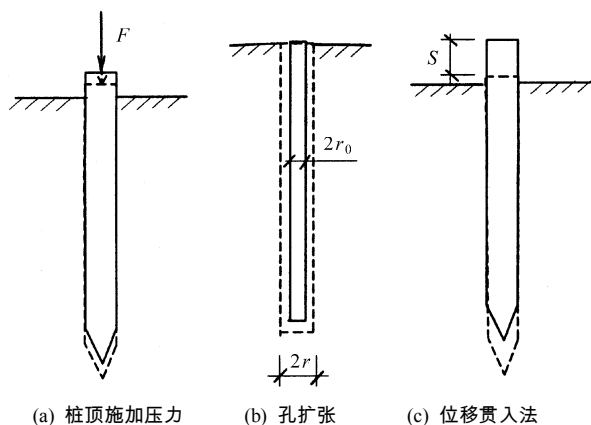


图 1 模拟桩贯入的三种方式

Fig.1 Three methods simulating pile penetration

3 利用有限元通用软件 ANSYS 计算

采用 ANSYS5.6 版本计算, 与其他分析步骤相比, 建立有限元的 ANSYS 模型需要花费更多的时间。首先要创建几何模型, 其次要定义材料属性, 最后是划分单元网格。

静力压桩受力问题是空间轴对称的, 可化为平面问题, 并可进一步利用对称性取半根桩及桩周土体创建 ANSYS 计算所需要的实体几何模型。为了使模拟显示更具有仿真效果, 文中的计算仍采用整根桩平面。创建几何模型后, 选用 ANSYS 高效的智能网格划分, 并在桩周围应力集中的区域进行自动网格细分。

加载包括加力或加约束。加载操作非常容易, 可以在实体模型图形上直接拾取。对于静力压桩问题, 在本步中规定位移边界条件, 从而实现桩的贯入。

对非线性大变形问题, 求解前要定义求解选项。包括定义分析类型、选择求解器、指定荷载步和平衡迭代的次数、定义用户收敛准则等。本文选择大变形静力分析, 使用非线性的牛顿-拉普森方法, 选择波前法求解器, 并根据题目的大小和解题时间适当调整了收敛准则。

ANSYS 程序的后处理器功能强大, 可以读取数据结果或绘制图形结果, 图形结果还可以动画显示, 非常适合静压桩贯入模拟仿真的要求。

在计算及分析结果的内容方面, 包括变形后的形状显示, 应力、应变等值线图 (云图) 和矢量图显示, 沿路径绘图, 也可以列表显示支座反力等。

4 计算实例

选择某层状土地基作为试验场地, 在该场地上全面进行了土性指标的试验 (主要结果见表 1), 并实测记录了多根静力压入桩的压桩力。

按“位移贯入法”的计算步骤和结果如下:

表 1 试验场地地基土的计算指标

Table 1 Soil calculation parameters of test field

层序 编号	土层名称	深度范围 / m	弹性模量 E_s / MPa	泊松比 μ	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	剪胀角 $\varphi_r / (^\circ)$	滑动摩擦系数
①	粉 土	0~7.7	5	0.4	36	24.0	2	0.52
②	粉质粘土	7.7~10.8	6	0.38	86	14.4	0	0.34
③	粉 土	10.8~15.2	8	0.36	45	28.9	8	0.63
④	粉 土	15.2~19.6	10	0.35	52	30.1	9	0.66
⑤	粉质粘土	19.6~27.8			95	13.0		

4.1 计算简图

先将桩预置在某一初始位置，再利用位移边界条件使桩体向下贯入一定深度(0.15~0.2 m)。图 2 为各桩的初始位置示意图，图中各桩的贯入深度见表 2。图 3 是其中初始位置为 16 m 时的网格划分、变形及边界约束等情况。本计算设置了桩-土边界滑动接触面，接触面的滑动摩擦系数见表 1，该滑动摩擦系数的室内试验另文详述^[4]。

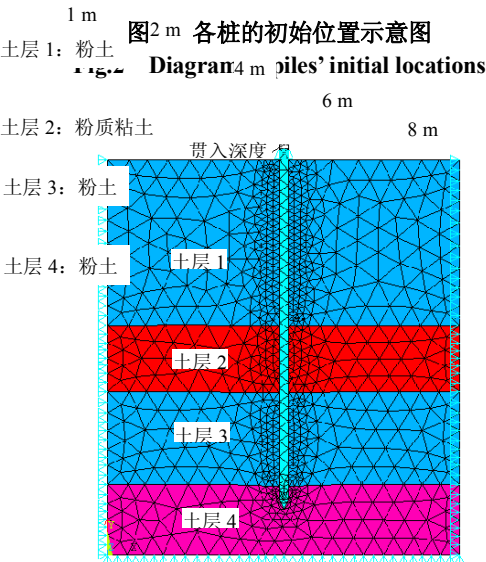
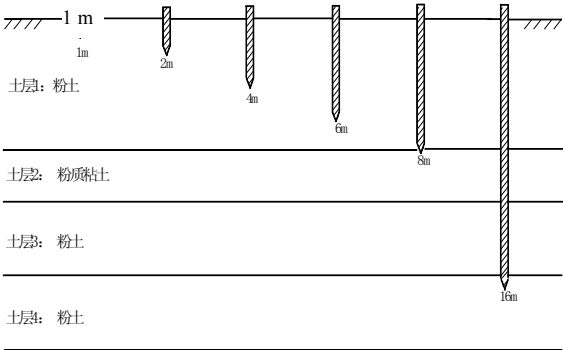


图 3 网格划分及支座位移边界图 (桩入土 16m)
Fig. 3 Mesh dividing and boundary displacement

4.2 应力场计算结果

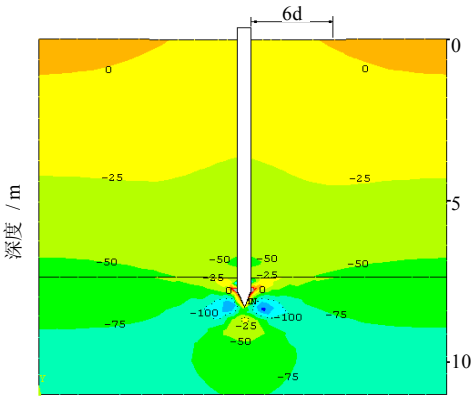
图 4 是桩的入土深度为 8 m 时按位移贯入法计算的水平和竖直方向应力结果(应力云图)。应

力场的分布规律可归纳如下：

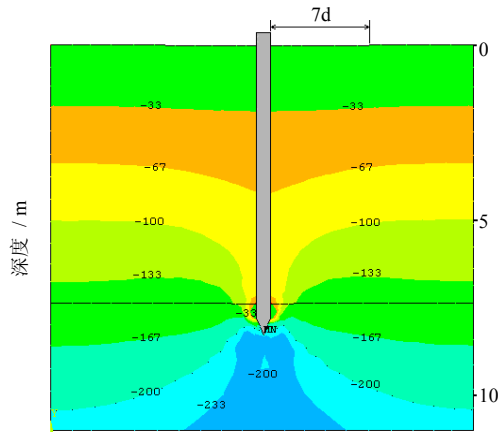
(1) 水平应力：沉桩使桩上部周围的土体内的水平应力增大，出现挤土现象；在桩的尖锥体稍上的局部土体内出现水平拉应力；在桩的尖锥体的两侧水平应力增大；再向下则出现了灯泡状的水平应力减小区域，该水平应力的减小使进一步贯入成为可能^[5]。本法计算的水平应力的挤土的影响范围约为 6d (d 为桩径)，与孔扩张法计算的挤土范围相差不多^[3]。

桩尖锥体上部两侧土体内拉应力的出现主要是因为桩尖斜锥体造成的，斜锥体使得其下的土体连带下沉，与平头桩贯入时产生拉应力的机理相似。桩的入土深度比较大时，桩尖处土的水平自重应力变大，这种效应就不明显了。

(2) 竖向应力：沉桩使桩尖以下的伞形区域土体内的竖向应力增大；而在桩尖以上的部分桩侧土体内的竖向应力减小；在桩侧的上部土体内，桩的入土深度小时，竖向应力略有增大(应力等值线上翘)，入土深度大时，竖向应力基本保持不变(应力等值线水平)。



(a) 水平方向应力 / kPa

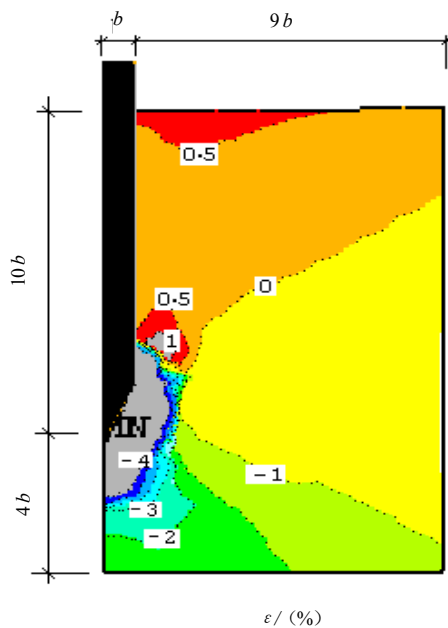


(b) 竖直方向应力 / kPa

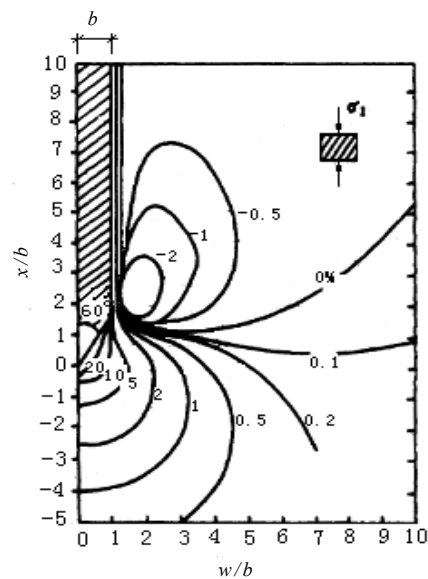
图 4 应力计算结果(桩入土深度 8m)

Fig.4 Result of stress calculation (pile sinking depth is 8m)

4.3 应变场计算结果及比较



(a) 本文计算 (压应变为负) (%)



(b) 文献[6]计算 (压应变为正) (%)

图 5 竖直方向应变计算比较(半桩平面)

Fig.5 Calculation comparison of vertical strain

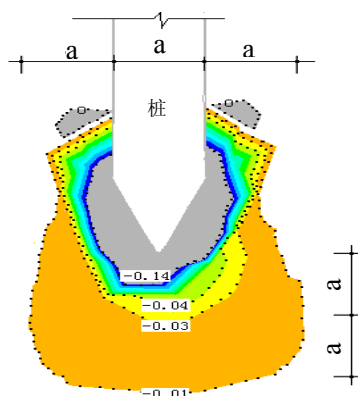


图 6 桩端周围土的竖向塑性应变 / (%)

Fig.6 Vertical plastic strain around pile tip

4.4 利用位移贯入法求解压桩力

对桩的位移贯入算法, 可以利用 ANSYS 程序的数据结果文件, 求得对桩身向下施加位移边界条件而产生的支座反力, 该力的数值即等于压桩力, 可称为“等效压桩力”。静压桩压桩力的预测对于判

应变路径法^[6]被认为能比较真实地考虑并模拟饱和软粘土中桩的垂直稳定贯入的特性。图 5 将本文位移贯入法计算的竖向应变与应变路径法计算的结果 (引自文献[6]) 作了比较。为了便于比较, 图 5(a)(b) 两图的尺寸设置基本一致。由图可见, 两者竖向应变的分布规律相似, 即在桩下端以压缩为主, 桩侧出现拉应变。

由图 6 知, 按位移贯入法计算, 塑性应变均产生在桩尖周围, 除去桩尖附近的桩侧土中并没有塑性应变。实质上, 在历时较短的连续贯入情形下, 桩端的塑性区一旦发生, 便在压桩过程中一直存在下去, 连续不断地形成围绕整个桩身的塑性区。所以, 可以用桩在不同深度上的塑性区迭加求得沉桩产生的整体塑性区。

断沉桩可能性有重要意义。

按此方法对图 2 中所示深度的部分桩求出等效压桩力, 列于表 2 中。表中同时给出了该试验场地两根桩的平均实测压桩力。经比较可知, 计算值与实测值有着一致性。两者的差别在于, 随着深度增加, 计算值从大于实测平均值转为小于实测值。

表 2 用位移贯入法求出的等效压桩力计算值
与实测值比较表

Table 2 Comparison between calculated piling
press and measured

贯入深度 / m	等效压桩力 计算值 / kN	平均实测值 / kN	压桩力计算值 与实测值比值
2	108	84	1.29
4	158	140	1.13
6	172	165	1.04
8	246	220	1.12
10	507	590	0.86

5 结 论

本文在分析静力压桩沉桩特点的基础上, 利用位移贯入法进行了数值计算模拟, 并对计算结果进行了分析, 主要结论如下:

(1) 静力压桩的特点是连续贯入, 数值计算分析时需要考虑非线性、大变形、桩土接触面、本

界位移条件使桩贯入,计算中采用弹塑性本构关系、考虑大变形和桩-土接触面,力学概念清晰,比较接近静力压桩实际。

(3) 利用位移贯入法的算例表明,用该种算法模拟计算沉桩是可行性的。位移贯入法不但能确定沉桩时的应力场和位移场,还能求出贯入总阻力,即压桩力。结合 ANSYS 的强大动画功能,可以在某种程度上实现沉桩过程的动画仿真。

参 考 文 献

- [1] Mabsout M E, T asoulas J L. A finite element model for the simulation of pile driving[J], **Int. J. Numeer. Meth. Engng**, 1994, 37: 257 - 278.
- [2] 龚晓南, 李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题 [J]. **工程力学**, 2000, 17(4): 7 - 12.
- [3] 周建平, 周健, 许朝阳等. 沉桩挤土效应的数值模拟[J], **工业建筑**, 2000, 30(7): 1 - 6.
- [4] 张明义, 邓安福. 桩-土滑动摩擦的试验研究[J], **岩土力学**, 2002, 23(3): 246 - 249.
- [5] 邱延峻. 静力触探机理研究[J], **西南交通大学学报**, 1993(3): 46 - 51.
- [6] Tumay M T, Acar Y B, Cekirge M H. Flow field around cones in steady penetration[J]. **J Geotech Engrg, ASCE**, 1985, 111(2): 193 - 203.

构模型等一系列问题。

(2) 本文提出的位移贯入法的特点是利用边

地下工程高级技术论坛在杭州召开

由浙江省建筑业协会、同济大学土木工程学院和浙江大学建筑工程学院三个单位共同主办,浙江省建筑业协会地下工程分会承办,集我国南北各地(含台湾)在地铁建设领域具有丰富工程经验和学术造诣的众多名家于一堂,共论地铁建设的全国性首次专业盛会——地下工程高级技术论坛于 2002 年 12 月 18 日至 20 日在浙江杭州召开。出席本次论坛的有我国 15 个省市(含台湾),20 余座大中城市(含台北)及日本东京等地的代表共 180 余人。

国内一些知名专家应邀出席了论坛并作了特邀报告。(按报告次序):

中国工程院院士施仲衡先生——国内外城市轨道交通发展现状与展望;

台湾资深专家莫若楫博士——台北市捷运工程之回顾;

中国工程院钱七虎院士——俄罗斯地铁建设考察报告;

台湾资深专家陈半生博士——软弱土层深开挖问题探讨;

台湾资深专家胡邵敏博士——捷运开挖邻产保护技术之探讨;

中科院孙钧院士——城市地铁工程活动的环境土工问题及其施工变形预测与控制的智能方法;

上海市隧道工程公司周文波副总经理——上海地铁二号线盾构法隧道施工技术综述;

中国工程院院士刘建航先生——上海地铁车站深基坑时空效应理论研究与工程实践;

广州地铁总公司金锋(教授级高工)——城市轨道交通的工程经济意义与路网规划。

这些特邀报告总结交流了我国自上世纪 60 年代初在北京开始修建第一条地铁,和在 70 年代、80 年代、90 年代和世纪

之交相继在天津、上海、广州、南京、深圳等城市修建地铁，连续 40 余年来在地铁在规划、设计、施工、运营与管理诸方面所积累的宝贵经验和理论与技术成果，国外相关的建设经验和最新动态；分析了某些重大工程事故；介绍了发生的原因提出了一系列有待进一步探讨的课题。

此外，高大钊、陈云敏、刘汉龙、陈龙、胡向东等十余位知名专家和青年学者分别就地下结构侧土压力、地铁施工及运营过程中的土力学问题、地铁建设中的风险分析等专题作了重要论述。

杭州市地铁集团公司章云泉、沈林冲介绍了杭州地铁一号线前期进展、建设规划及有关技术问题。

日本东京地铁总局的专家大月喜雄介绍了东京地铁在规划、设计与施工方面的经验。

本次论坛受到浙江省建设厅和杭州市建委的高度重视和支持。

地下工程高级技术论坛的特邀报告和专题论文及工程测试实录《城市地铁建设与环境岩土工程》已经汇集编印出版。该书由史佩栋主编，孙钧、刘建航主审。有 33 篇，约 45 万字。它是我国地铁建设发展史上一部不可多得的重要文献，为应对当前我国十余座大中城市在筹建、新建或扩建地铁、轻轨和磁浮交通工程所面临的各种技术难题提供了良好的资料。需要该书者可与杭州市莫干山路 470 号二楼——浙江省建筑业协会地下工程分会秘书处姚紫萍联系。

联系电话：0571-88847750。

(浙江省建筑业协会地下工程分会 姚紫萍供稿)