

3

10-13.18

沉桩分析研究的现状

雷国辉 赵维炳[✓] 施建勇

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

TU473.13

摘要 本文概述了打入式预制桩沉桩分析的内容和目的,对沉桩机理作了简要分析,并介绍了国内外关于沉桩分析的研究现状,指出了各种分析方法的优缺点。

关键词 沉桩分析 应力波理论 非线性有限元法 准静力 波动有限元法 弹塑性分析

桩基础的设计理论目前仍很不成熟,以经验和现场试验为主,局限于按材料(弹性)力学方法建立桩的变形和内力的微分方程后用不同的方法求解,对桩周土的处理过于简单和粗糙。如 Poulos 的弹性理论法及 Cooke 的剪切变形传递法均假定土为半无限弹性体或为有限厚弹性层^[1];各类荷载传递法将桩周土的作用以弹簧代替。

考虑桩周土的非线性性质,用有限元方法分析桩土体系的共同作用近年来受到重视。众所周知,土是弹塑性材料,考虑土的塑性在分析使用期桩土共同作用时是十分必要的。赵维炳等人的初步研究结果^[2]已论证了这一观点。

由于土的硬(软)化等弹塑性性质,土的应力历史,即沉(打)桩时地基内土的动应力变化尤其是其峰值,以及静置期的固结时效对使用期打入桩的承载力有很大影响,是造成较大荷载下桩沉降量非线性特征的关键。因此,采用计算机正确地模拟沉桩过程,并进行沉桩过程力学分析,是打入桩使用期桩土共同作用弹塑性分析中很重要的前期工作。

研究的目的在于应用。采用有限元方法,可以在沉桩动力分析基础上,考虑土的弹塑性、沉桩动力影响及桩土接触面特性,分析承台-桩-土体系承受荷载作用后的反应,探索承台(或建筑物底板)、桩及土体内内力、

应力和变形的基本变化规律,深入研究打入桩承载力和沉降变化机理。研究成果还可用于对承台、桩及土体内(应)力和变形规律作出合理的简化与假设,建立桩基础设计的简化实用理论。此外,通过实际施工前对沉桩分析的数值模拟,可以预测沉桩能力,使设计者初步掌握桩基础施工的细节,修改不适当的设计参数,预估施工进度和质量。可见,研究成果具有重要的科学意义和良好的应用前景。

1 沉桩机理分析

桩基的贯入过程是在桩锤的多次锤击作用下,桩体不断向地基土中深处运动的连续过程。在这一连续过程中,桩锤-桩-土已不是一个固定的体系,而是一个不断变化的系统,在这个变化的系统中,桩锤、桩与土体始终保持着共同作用。

实践表明,沉桩过程中,桩身主要受轴力作用,各点处于单向应力状态,应力与应变基本成直线关系,处于弹性阶段。因此作沉桩分析时,可将桩体视为弹性体。

打桩振源是锤击能量,主要由桩尖向外扩散而引起振动。打桩振动与地震振动不一样,地震时地面加速度可以看作是一个均匀场,而打桩是一个点振源,是一个不均匀的加速度场。波动在土介质中以不同的波速在不

同的土层中传播由波源向外辐射的波,除了波动本质所具有的几何阻尼衰减外,还存在着土材料因其非弹性性质对波的能量吸收而引起的土材料阻尼衰减。几何阻尼衰减在近源起主导作用;远源则以土介质能量吸收衰减为主,受地下水深度与波动频率的影响。打桩波源随锤击次数加深,为变化深度波源。桩尖入土深振动小,但衰减慢,对远距离影响较大^[3]。

打桩振动使得桩侧和桩端土体挤密,产生挤土效应,导致桩身周围土体的垂直隆起和水平位移(表层和深层),土体结构受到扰动。挤土效应会引起很高的超孔隙水压力,使桩周一定范围内土的强度降低。在饱和粘性土中打桩,由于加荷速率快,土的渗透性低,故可把土体看作是基本上不排水的,这样用总应力分析沉桩过程应该是满足要求的。

沉桩过程中,在桩与土的接触面上存在着较大的剪切相互作用,桩土间的接触、滑移与摩擦效应使得桩土接触面相互作用的性质不能用线性或拟线性方法简便地处理,在理论计算时宜采用非线性的接触面单元^[4]。

2 沉桩分析国内外研究进展

沉桩分析是土木、海洋工程中难度较大的传统课题。沉桩分析,一般可分为预测性沉桩分析(即在实际打桩之前对沉桩过程进行数值模拟)和确定性沉桩分析(即在实际打桩之后根据现场测试结果所进行的桩中应力和桩基承载力分析)^[5]。目前,这两种分析方法都处于不断发展中。本文主要讨论预测性沉桩分析。

由前述沉桩机理分析可知,沉桩过程这一大变形瞬态动力反应问题中,包含着几何大变形、材料非线性及接触面非线性等一系列的复杂问题。严格地说,沉桩过程是一个包括桩锤-桩体-地基系统的复杂的三维冲击动力反应问题。它既要研究桩锤-桩体在撞击状态下的能量交换,也要研究桩体-地基间的动力相互作用。在沉桩分析模型中必须包

括能解决上述各种复杂问题的功能,这样才能与工程实际接近,实现沉桩全过程的模拟、分析和仿真研究。

最早的所谓沉桩分析,是通过打桩公式来进行的,如 Hiley 公式和 Герсеванов 公式等^[1]。它们都是在刚体动力学的能量守恒定理的基础上,利用牛顿撞击定律,根据打桩所测参数推算桩基承载力。但是,打桩时桩的贯入性状是一个复杂的应力波在桩内及土体内的传播过程,不能用简单的牛顿式撞击来描述。

早在 30 年代,应力波理论就被用以沉桩分析。1931 年 Isaacs^[6]首先指出,桩顶受到桩锤冲击后,冲击能量以波动形式传至桩底,因此可用一维波动方程来描述,此时将古典的波动方程引入反应桩周土阻力的参数项 R , 可得:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial T^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \pm R$$

式中 U 为杆件截面的位移; X 为截面位置的座标; E, ρ 分别为杆件的弹性模量与质量密度; T 为时间。

上式的解析通解相当复杂,只能用于极简单的边界条件,因而难以进入实用阶段。

1960 年, Smith^[7]对桩锤-桩-土体系提出了用一系列质块、弹簧和阻尼器组成的离散化单元计算模型,将桩锤对桩的一次锤击历时在空间和时间两方面加以离散化,用差分法将整个系统按结构动力学问题来分析,求得较精确的数值解。同时,他还对打桩的贯入性状进行了分析,讨论了桩锤、桩垫、桩帽、锤垫以及土的模拟问题,并定义了模拟中所涉及的全部参数,从不同的应用波动方程的打桩实例中,提供了这些参数的建议值。从而第一次为人们提供了在严密的基础上分析受到许多复杂因素影响的打桩问题的手段,使应力波理论在桩基工程多个领域中进入实用阶段。

一维波动方程的数值求解,主要有差分法、特征线法和有限元法。特征线法,其解是

以打桩时实测数据为依据得到的,主要用于确定性沉桩分析。作为差分法,上述 Smith 法最早被提出,其后的学者们所提出的差分方法都是在 Smith 法的基础上改进的。有限单元法方面,Smith^[8]、Simons 和 Randolph^[9]等人作了大量的工作,取得了一些进展。

但是,一维波动方法的最大难点和弱点在于确定土阻力模型的非标准土力学参数,这些参数是通过打桩记录或桩基载荷试验的反分析而得到。虽然继 Smith 后许多学者提出了各种各样的土阻力模型^[9,10],但它们各自都局限于某种打桩环境。这种基于非标准土力学参数的模型其本质决定了我们不可能找到一种能适应各种打桩环境的标准模型。更为重要的是,一维波动方法只能用于桩体分析(桩基承载力及桩基质量分析),不能对桩周土进行分析。值得一提的是,还有一种只能对桩周土体进行分析而不能对桩体进行分析的方法,即“扩孔理论”法。它是将低渗透性饱和软土中的沉桩挤土效应当作半无限土体中的小孔扩张课题,应用弹塑性理论求解得到其瞬时的应力变形的解析解。它只能得到桩体贯入到不同土层时的应力和孔压值。运用的实践表明其结果与实际的应力和孔压分配相似但存在一定偏差,它只能是一种粗略的计算方法^[11,12]。总之,一维波动方法和“扩孔理论”法都只是片面地进行所谓沉桩分析,顾此失彼。

从最新的文献看来,Chan 等人已将人工神经网络应用于打桩工程分析^[13]。神经网络是 80 年代后期迅速发展起来的人工智能的又一支,它具有自组织、自学习、非线性动态处理等特性,具有联想推理和自适应识别能力。与神经网络在其他工程中的应用相似,Chan 等人也只是通过反向传播(back-propagation)学习算法训练网络,使其从打桩公式分析结果与沉桩实测结果的对比中学习命题的确定性真值,进行沉桩分析。这种分析,只是一种表象上的处理,类似于数理统计分析。从应用角度来说,它能够达到沉桩分

析的目的。但在理论上,它研究的是如何建立人工神经网络的算法,而不是研究如何来模拟沉桩过程。

作为严格意义上的预测性沉桩分析,必须对整个打桩系统、整个打桩过程进行数值模拟。要满足这个要求,目前也只有采用有限单元法了。采用有限单元法进行沉桩分析是直到 70 年代才开始的,并且按下面两个方向发展着。

2.1 波动有限元法

采用波动有限元法进行沉桩分析,就是依据应力波理论,将桩锤、桩、土整个系统作为波动问题进行有限元数值求解。

Smith 和 Chow^[14,15]曾试图用三维轴对称有限元来进行此问题的分析。他们采用 Wilson- θ ($\theta = 1.4$) 隐式积分法来求解三维波动方程。在他们的分析中,采用 Goodman 接触面单元考虑桩土间的相对滑移和剪切作用,假定桩周土体满足 Von-Mises 屈服准则,并在土体边界上设置粘滞边界,使应力波在边界上不发生反射,得到了较满意的结果。

用于冲击动力反应的显式有限元的数值积分法是由 Hallquist 等人完成的^[16],他们模仿流体动力学程序的处理方法建立了分析计算一般连续冲击问题的有限元程序 DYNA-3D 程序,该程序已公开发表。

赵振东等人开发利用了 DYNA-3D 程序,提出了分析沉桩过程的显式有限元数值方法^[17]。该方法采用摩擦接触单元来模拟桩-土接触面,利用节点约束法对桩锤和桩的头部撞击时相互作用的接触面及桩体侧面与周围地基间的滑移接触面进行模拟。用中心差分法对运动方程进行数值积分。这种显式有限元法能较好地再现桩锤的能量在撞击瞬间的传递过程,较好地实现桩体内撞击波能的传播及通过桩土界面向周围土介质的传播过程。

采用波动有限元法进行沉桩分析,能够模拟沉桩过程整个系统的波动本质,理论依据较强。但在应用上还存在一些困难。用有

限域单元模拟无限域地基,必须设置合理的人工边界,以吸收传递到有限元边界处的应力波,并且,计算时输入荷载的频谱特性及系统网格尺寸的划分所引起的波形畸变与高频振荡会严重影响计算精度^[18]。目前,地基波动问题的理论和数值计算方法正在不断发展中,对于沉桩波动问题的求解更是一个相当复杂的过程,难度较大。但是,运用地基波动问题数值模拟的最新成果进行沉桩分析,是打桩动力分析中很有意义的研究思路。

2.2 非线性有限元法

采用非线性有限元法进行沉桩分析,即考虑土体材料的非线性,桩土界面的非线性性质以及沉桩过程中的几何变化和大应变的发展,对沉桩进行数值模拟。

最早运用这种方法来模拟沉桩过程的,可能是 Banerjee 和 Fathallah^[12]。他们提出了按准静力求解沉桩时桩周土体应力和孔压的二维欧拉方法。在他们的分析中,假定桩体为一光滑杆,土体本构关系满足 Von-Mises 模型或修正剑桥模型,运用非线性有限元方法求解。很显然,分析中所作的假定忽略了桩土间的相互作用,所采用的本构模型对几何非线性的模拟相当粗糙。但他们的工作开创了非线性有限元法分析沉桩过程的历史。

后来, Cividini 和 Gioda 发展了这种方法^[11,19]。在他们的分析中采用了修正的 Lagrangian 法(即 UL 法),用 Goodman 接触面单元模拟桩土间的剪切相互作用,以 Drucker-Prager 屈服准则考虑土的弹塑性,按准静力三维轴对称问题进行求解分析^[19]。

从现有的文献看来,这种方法只是对沉桩过程按准静力状态下的双重非线性(几何及材料非线性)问题进行处理,这种准静力的处理方式使得对桩体的分析过于简单化,并且忽视了系统的动力效应。现有的分析中所采用的各种模型只能从现象上去模拟沉桩过程,而没有遵循沉桩时各种反应的瞬态(波动)本质。但是,这种处理使得分析比较简

单,计算开销少,且易于为工程人员所接受。因此如何更好、更完整地考虑沉桩时桩锤、桩体的作用效果,运用能反映土体瞬态大变形及接触面瞬态非线性的本构关系进行沉桩的非线性有限元法的模拟,不失为一条值得探索的路子。

3 结 语

综上所述,沉桩分析是一个难度很大的课题,目前这方面的研究仅限于单桩情况,对于群桩的沉桩分析研究还需继续探索。

作为预测性沉桩分析,不仅要桩体进行分析,推求打桩时桩身应力,分析沉桩能力;同时也要对桩周土体进行分析,推求沉桩时土体应力、应变和孔压历史。只有这样,才能进一步进行承台-桩-土体系共同作用的弹塑性分析。

参考文献

- 1 徐攸在,刘兴满.桩的动测新技术.北京:中国建筑工业出版社,1989
- 2 Cheung Y K, Lee P K K, Zhao W B. Elastoplastic analysis of soil-pile interaction. *Computers and Geotechnics*, 1991; 115~132
- 3 杨先健.打桩引起的环境振动与对策.见:组委会编.城市改造中的岩土工程问题学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1990.34~39
- 4 陈国兴,谢君斐,张克绪.土与结构材料界面性状的研究概况.世界地震工程,1994(4):1~9
- 5 傅铁铭,赵振东.关于桩基连续贯入过程分析的建议.见:朱向荣编.首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集.杭州:浙江大学出版社,1990.449~452
- 6 Isaacs D V. Reinforced concrete pile formulae. *Transaction of Institute of Engineers, Australia*, 1931, 12:312~323
- 7 Smith E A L. Pile driving analysis by the wave equation. *J Soil Mech Found Div, ASCE*, 1960, 86(4):35~61
- 8 Smith I M. Programming the finite element method. London: John Wiley and Sons, 1981

(下转第18页)