

# 应力波理论在桩基工程中的应用\*

江礼茂\*\*

中国科学技术大学, 合肥 (邮政编码230026)

寇绍全

北京科技大学 (邮政编码100083)

陆岳屏

中国科学院力学研究所, 北京 (邮政编码100080)

**提要** 本文概要地介绍了一维应力波理论在桩基工程中应用的历史背景, 发展过程和当前进展情况, 提出了将来工作中应着重解决的问题。

**关键词** 应力波; 桩; 承载力; 沉桩能力; 桩身质量检验

## 1 引言

随着土木建筑工程的发展及海洋资源的开发利用, 大尺度的桩用得越来越多。工程技术复杂性的增加及对经济效益重视程度的提高, 对桩的承载能力及沉桩能力预估提出了更高的要求。

在传统的确定承载能力的方法中, 静载试验最为可靠, 但太费时费钱, 尤其是在海洋工程中不易施行; 用静力公式计算则要求有较为完整的地质资料, 还应考虑沉桩对土性状的影响等因素; 而根据锤心的能量等于桩向下运动克服土阻力所做的功来求承载力得到的动力打桩公式, 其理论基础是刚体动力学, 与实际情况差别较大, 因而使用动力打桩公式依赖于经验。近年来, 在提出新的静力公式和将有限元计算引入桩基工程的同时, 应力波理论在桩基工程中的应用更得到深入的发展<sup>[1,2]</sup>。它的应用, 为人们提供了一个在严密的理论上解决打桩问题的手段。

## 2 历史回顾

早在19世纪研究细长弹性杆件的撞击问题时已建立一维波动方程<sup>[3]</sup>, 其后, 本世纪30年代D. V. Isaacs首先指出打桩过程是一个包括打桩系统和桩在内的应力波传播过程, 将反映桩周土阻力的参数 $R$ 引入经典的一维波动方程得到<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \pm R \quad (2.1)$$

\* 国家自然科学基金重大项目资助课题。

\*\* 现在中国科学院力学研究所工作。

式中  $x$  为杆件截面位置坐标,  $D$  为  $x$  处截面上质点位移,  $t$  为时间,  $\rho, E$  分别为材料密度和 Young 氏模量。

1938 年, E.N.Fox 发表了一个波动方程应用于打桩问题的解, 由于没有电子计算机, 他被迫做了许多简化假设, 因而降低了其解的价值。

在认识到动力打桩公式的局限性及波动方程闭合解难于精确描述实际的锤-桩-土系统以后, 随着电子计算机的出现和发展, E. A. L. Smith 在 50 年代提出了基于一维波动理论的打桩问题计算公式<sup>[6]</sup>, 对以后的工作具有重大影响。他将实际的锤-桩-土系统离散化为一系列弹簧-质块单元, 土与桩的相互作用模型中考虑加载速度的影响; 将锤对桩一击的作用历时分成许多时间间隔  $\Delta t$ ,  $\Delta t$  值取得很短。将锤对桩的打击化成一系列弹簧-质块的撞击运动, 其计算模型为:

$$D(m, t) = D(m, t-1) + V(m, t-1) \Delta t \quad (2.2)$$

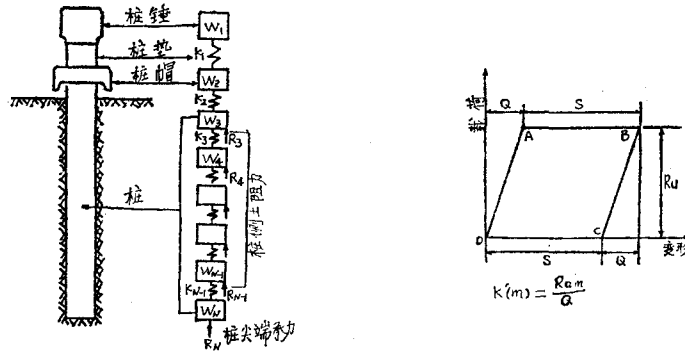
$$C(m, t) = D(m, t) - D(m+1, t) \quad (2.3)$$

$$F(m, t) = C(m, t) K(m) \quad (2.4)$$

$$R(m, t) = [D(m, t) - D'(m, t)] K'(m) [1 + J(m) V(m, t-1)] \quad (2.5)$$

$$V(m, t) = V(m, t-1) + [F(m-1, t) - F(m, t) - R(m, t)] \frac{g \Delta t}{W(m)} \quad (2.6)$$

其中  $m$  为桩单元编号,  $C(m, t)$  为桩单元弹簧压缩量,  $D(m, t)$  为单元位移,  $D'(m, t)$  为桩



(a) 锤-桩-土计算模型

(b) 土阻力模式

图 1 Smith 计算模型

侧土的塑性变形, 它由公式<sup>[6]</sup>

$$D' = \pm D \mp Q \quad (2.7)$$

计算确定, 这里的  $D$  可正可负,  $F(m, t)$  为桩单元内力,  $g$  为重力加速度,  $J(m)$  为土的阻尼系数,  $K(m)$  为桩单元弹簧常数,  $K'(m)$  为土的弹簧常数,  $R(m, t)$  为土的阻力,  $V(m, t)$  为单元速度,  $W(m)$  为单元重量。

以  $t = 0$  时, 取锤心的末速度  $V(1, 0)$  为计算过程初始条件, 经迭代计算即可求得整个锤击过程的解。

Smith 法最初用于打桩应力分析, 随着工程实际的需要, 现也用于沉桩能力分析 及承载力预测等。

Smith 法计算过程涉及参数多, 实践中发现桩顶上部系统参数的不确定性会使计算结果与实际量测值产生较大的出入<sup>[7]</sup>。随着量测技术的提高, 为消除这一影响, 70 年代发展了以桩顶实测力(或速度)为边界条件的波动方程法及以桩顶实测力和速度为输入条件的计算方法——CASE 法和 CAPWAP 法。CASE 法用于计算承载力, CAPWAP 法可用于承载力计算, 求沿桩身土阻力分布, 选择最优的土性参数, 文献[8]对此作了详细的评述。

### 3 波动理论的应用

应力波理论在桩基工程中的应用已深入到几乎桩基工程的各个方面。

3.1 承载力计算 预估桩的承载能力是波动方程应用较为普遍的领域之一, 求解波动方程的计算机程序是其应用的关键。从60年代至今国内外已见报道的程序有十数种之多, 它们从不同的着重面模拟了打桩问题。文献[9—11]对此作了评述。

在锤-桩弹簧-质块单元系统给定以后, 要考虑的土阻力参数是极限静阻力  $R_u$ , 土的最大弹性变形值  $Q$  和粘性系数  $J$ , 如图 1 所示。 $Q$  和  $J$  值一般由经验或实际地质资料预先给定, 则对给定的一个阻力值  $R_u$  用波动方程可算出一个贯入度, 对于不同的  $R_u$  可得到不同的贯入度, 多个计算值可得到一条称为反应曲线的极限静阻力与打入阻力(击数/英尺)的关系曲线(图 2)。由实际打桩过程中测得的贯入度, 即可得到极限静阻力值, 引进恢复系数, 换算后即可求得桩在该条件下的承载力。

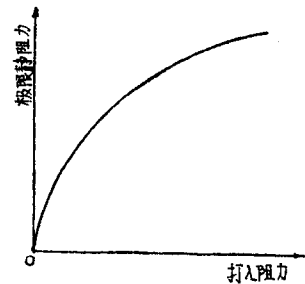


图 2 典型的打桩反应曲线

从实践的角度看, 用波动方程预估单桩的承载力是必要且可行的。然而从现有认识水平来看并不简单, 因为锤击过程中桩身所动员的桩侧土阻力与静载条件下的土阻力有着本质的不同。现仍有不少研究人员对从理论及实践上解决这一问题感兴趣<sup>[10]</sup>。

在桩的承载能力分析中, 在试验和实际工作中发现了一个重要现象——“临界深度”的存在<sup>[12,26]</sup>。超过这一深度后, 桩端土阻力和单位面积桩侧土阻力基本保持为常数。另一个重要问题是残留应力(即在桩顶早已无荷载, 但桩-土界面仍有剪力作用)的影响。文献[11,12]详细讨论了残留应力对承载能力的影响, 一个有意义的结果是在砂土中“临界深度”现象是残留应力存在的表象。

用波动方程法预估单桩承载能力的关键是锤-桩-土相互作用模型及相应参数的选取, 只有模型和参数的选取与实际情况吻合, 才能得到令人满意的结果。

CASE 法以桩顶实测力和速度来求承载力, 避免了桩顶以上部分系统参数的不确定性带来的误差。最初人们把桩的运动看成刚体, 应用牛顿定律

$$R_0 = F(t_0) - Ma(t_0) \quad (3.1)$$

来确定桩周土阻力。这里的  $t_0$  是桩顶速度为零的时刻,  $F(t_0)$  和  $a(t_0)$  是相应时刻桩顶实测力和加速度,  $M$  为桩身质量。

70 年代前后, 在应力波理论的基础上, 将桩看成弹性杆件, 导出了公式

$$R = \frac{1}{2} \{F(t_1) + F(t_2)\} + \frac{Mc}{2L} \{v(t_1) - v(t_2)\} \quad (3.2)$$

其中  $t_2 = t_1 + 2L/c$ ,  $t_1$  是锤击过程中的某一时刻, 通常与力的第一峰值对应,  $L$  为桩长,

$v$  为桩顶实测速度,  $c$  为桩中应力波传播速度。

$R$  被假设为动阻力  $R_d$  和静阻力  $R_s$  之和, 即

$$R_s = R - R_d \quad (3.3)$$

并假定  $R_d$  与桩尖速度  $v_{t_0}$  有关系

$$R_d = J v_{t_0} c \quad (3.4)$$

$J$  为粘性系数。经过分析推导, 最后得到

$$R_s = R - J[2v(t_1) - (L/Mc)R] \quad (3.5)$$

由 (3.2) 和 (3.5) 可得  $R_s$ , 即桩的承载力。这里的  $J$  是唯一代表土的性质参数, 文献 [8,9] 给出了一些推荐值。

CASE 法计算单桩承载力具有计算简单, 可实时分析的优点, 也便于考虑土的固结或松弛对承载力的影响。实践证明此法一般是成功的 [8]。但在最近的应用中发现其计算结果与静载试验有时差别较大 [10], 可能的原因是计算模型过于简单及土性参数选择不当。

CAPWAP 法以桩顶实测力和速度曲线为已知条件, 计算模型仍用弹簧-质块模型 (但不考虑桩顶上部系统), 在假定一组参数  $R_s, Q, J$  的情况下, 用波动方程根据实测桩顶力 (或速度) 可算出桩的运动、内力及沿桩土阻力分布, 同时得到桩顶速度 (或力)。但通常所得桩顶速度 (或力) 与实测值有差异, 其根源在于土阻力模型参数选择不当, 给出一组新的参数值, 重复上述步骤, 直到计算结果与实测值吻合为止, 从而求得桩的承载力, 同时也给出了一组描述土性参数的最佳值 [25]、打桩应力等, 文献 [8,13] 对该方法的思想及发展过程作了介绍。

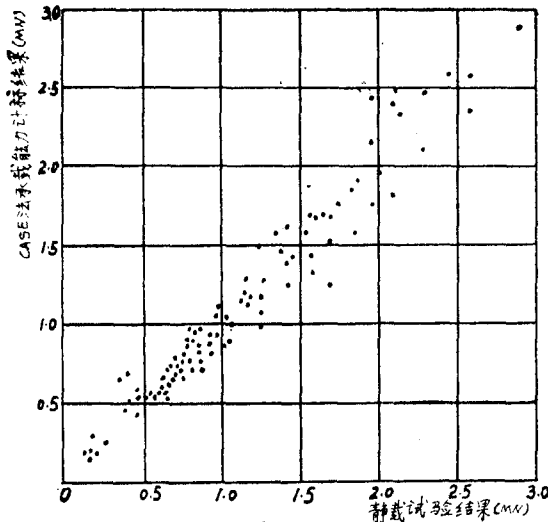


图3 CASE法与静载试验承载力结果比较 [8]

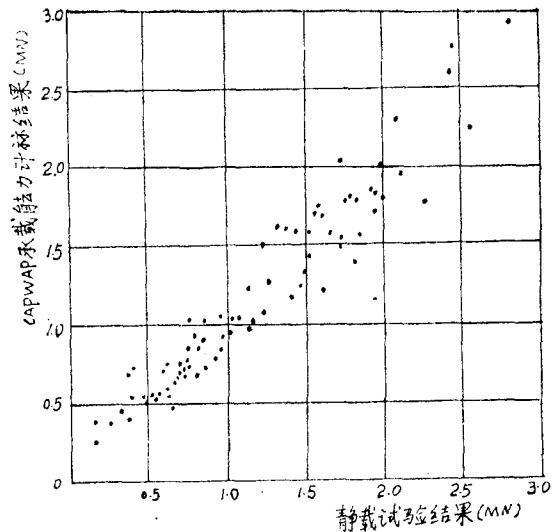


图4 CAPWAP法计算结果与静载试验承载力结果比较 [8]

CAPWAP 法避免了所有土性参数的预先给定, 而由实测桩顶力和速度直接求承载力, 工程应用表明这种方法是成功的。近年来, 出现了 CAPWAP/C, 两者原理相同, 区别是 CAPWAP/C 法用特征线法求解波动方程, 并在土阻力模型上作了修正 [10]。CAPWAP 法

被认为代表当今世界在这一领域的最先进水平，国内甘肃省建筑科学研究所等单位均已编制了类似 CAPWAP 的程序<sup>[10]</sup>。在研究 CAPWAP 思想的基础上，笔者也完成了应用特征线法求解波动方程、根据打桩过程实测桩顶力和速度，求单桩承载力及沿桩土阻力分布的理论研究及程序，由于得到了根据桩顶力差值修正土性参数的误差传递公式，笔者所编程序具有节省机时，能由计算机自动调节参数，应用方便，对应用人员知识水平要求不高的优点，可方便地为工程界应用<sup>[29]</sup>。

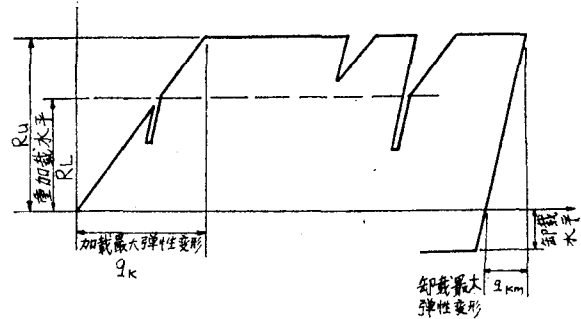


图5 CAPWAP/C法所用土阻力模型

3.2 沉桩能力分析 海洋石油钻井平台中大直径的长桩用得越来越多，且工程环境条件恶劣，出于技术要求及经济考虑，沉桩能力预估受到越来越多的重视。

沉桩能力分析是在给定的锤-桩-土系统的情况下用波动方程计算打入阻力，旨在合理地选择锤，研究打桩系统对沉桩能力的影响，是检验锤-垫-桩-土系统是否匹配良好的重要手段。

沉桩能力分析是一个复杂的课题，其结果受到锤-桩-土系统模型及参数、土塞作用、桩周及桩底土的塑性挤出、孔隙水及土中有效应力变化、土的固结与松弛、残留应力等因素的影响，如何更精确地描述这一过程，一直是近十几年来人们研究的课题之一。

我国在1980年前后即开始了这项工作<sup>[14]</sup>，近年随着海洋石油工程的发展，沉桩能力分析在实际工程中应用更为普遍。

在沉桩能力分析中，土性参数的合理与否对预测结果产生极大的影响。文献[15]在实验室和实际工程资料的基础上修正了以前的阻力模型，建立了动阻力与土的性质参数及桩侧有效应力相联系的关系。文献[16]以CAPWAP法给出最佳的土性参数，而后将这些参数用于沉桩能力分析，得到了很好的预测结果，这一方法对准确预估沉桩能力是有意义的。

土塞对大直径钢管桩的沉桩能力的影响一直是复杂而重要的问题，到目前为止还未见能精确描述土塞影响的计算程序的报道。Hecrema<sup>[17]</sup>引入内、外土阻力模型的办法来描述钢管桩打入过程中土塞对沉桩能力的影响。Vijayvergiya<sup>[18]</sup>分析了桩周土孔隙水压力及有效应力在打桩过程中及静载试验两种情况下的变化，在这两种情况下差别较大。因此认为用动态分析的方法确定单桩承载力并不可靠，但可用于沉桩能力分析，文中给出了考虑土塞运动和闭塞情况下的土阻力计算公式，而后用波动方程分析沉桩能力，其结果是令人鼓舞的。

Aurora<sup>[19]</sup>研究了桩周土的固结对沉桩能力的影响，通过引入 $F$ 因子

$$F_d = \frac{Q_s}{Q_d}, \quad F_r = \frac{Q_s}{Q_r}, \quad F_s = \frac{Q_r}{Q_d} \quad (3.6)$$

来建立静阻力 $Q_s$ ，连续锤击下的土阻力 $Q_d$ 和经过一段时间休息后复打时阻力 $Q_r$ 之间的关系。对具体的工程问题，一经确定了 $F$ 值，则由(3.6)可预估 $Q_d$ 和 $Q_r$ 。文中提出了根据工程地质条件和施工技术要求可能的停打时间间隔以经济地选择打桩系统的具体步骤；文[20]建议了 $F_d$ 与土的性质参数相联系的关系。

残留应力对沉桩能力的影响在桩难打时是很重要的,文献[21]的动(锤击作用历时)、静(两次锤击时间间隔)结合的多锤分析方法对研究这一问题具有较大的实际意义,作者建议了需要考虑残留应力进行多锤分析的桩的每击贯入度范围。

此外,也有人研究锤击系统对沉桩能力的影响等问题。

**3.3 桩身质量检验** 灌注桩造价低廉,特别是就地钻孔灌注桩对周围环境噪声污染小,因而在国内外得到广泛应用。但混凝土灌注桩易于发生诸如离析、断裂、夹泥等质量事故,对桩身的质量检验就显得十分重要。

桩身灌注质量的评价,缺陷存在的位置及对桩身损伤程度的确定是工程中最为关心的问题。文献[22]是应力波理论用于桩身质量检验的典型工作之一,根据实验室实验和野外试验证明了以桩顶实测应力波信号检验桩身缺陷及确定桩身截面突变位置的可行性:桩身缺陷及桩身截面突变对应力波的反射信号将在桩顶实测曲线中反映出来,同时使应力波传播速度降低。其具体过程是先以实测 Rayleigh 波速得到纵波波速

$$v_L = cv_R \quad (3.7)$$

而后由缺陷处反射波到达桩顶时间来确定缺陷存在位置

$$d = v_L \Delta t \quad (3.8)$$

这里的  $v_R, v_L$  分别为 Rayleigh 波和纵波波速,  $c$  为与桩身材料有关的常数, 其值在 1.8—2.0 之间,  $\Delta t$  为应力波传播时间,  $d$  描述缺陷位置。

该文所用检测信号系统为“地表式”传感器,当桩顶表面波信号检测困难时,不能精确得到  $v_L$  值,用埋入式传感器即可解决这一问题<sup>[23]</sup>。

根据两个埋入桩身的传感器检测到信号的时间差  $\Delta t_1$ , 由公式

$$v_L = l / \Delta t_1 \quad (3.9)$$

可得到纵波波速,即可用来确定缺陷存在位置。对于整个桩身,由

$$E = (\gamma/g)v_L^2 \quad (3.10)$$

得到给定材料混合比的平均 Young 氏模量,是评价灌注质量优劣的参数,[23]给出了相应于不同灌注质量的  $v_L$  值,这里的  $l$  是两个传感器间间距,  $\gamma$  是混凝土容重,  $g$  为重力加速度。

文献[23]评价了地表式传感器与埋入式传感器的各自特点,应用波的反射信号来推算桩的长度得到了很精确的结果,误差一般在 2% 以内。

前面介绍的方法只能确定桩身质量缺陷存在的位置,不能鉴别其损伤程度,文献[24]根据锤击过程实测桩顶力和速度曲线,对于解决这一问题提出了具有实用意义的方法。

众所周知,当一自由支承杆的一端受撞击,在无反射应力波到达时,有

$$F = \left(\frac{EA}{c}\right)v = I_1 v \quad (3.11)$$

在阻抗分别为  $I_1$  和  $I_2$  的界面上,其入射波与反射波有如下关系

$$F_r = F_i \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}, \quad v_r = \frac{F_r}{I_1} \quad (3.12)$$

则在桩顶自由时可得到桩顶速度变化为

$$\Delta v = 2v_i \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (3.13)$$

而力为零，对固定桩顶端力的变化为

$$\Delta F = -2F_i \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (3.14)$$

而速度为零。两种情况下在桩顶实测力与速度（乘以阻抗  $I$ ）之间由于阻抗变化引起的差值

$$\Delta u = 2F_i \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (3.15)$$

对桩顶力不为零及桩底端反射应力波未到达桩顶时成立。

考虑上部土阻力的影响，则在界面处的入射波  $F_i$  应代之以  $F_i - \Delta R$ ， $\Delta R$  为界面上部土阻力之和，则有

$$\Delta u = 2(F_i - \Delta R) \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (3.16)$$

如果定义

$$\beta = \frac{I_1}{I_2} \quad \left( = \frac{A_1}{A_2}, \text{对相同材料} \right) \quad (3.17)$$

来表示损伤程度，则有

$$\beta = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (3.18)$$

其中  $\alpha = \Delta u / [2(F_i - \Delta R)]$ ， $\Delta R, \Delta u$  可直接由实测信号得出，[24] 的作者给出了以  $\beta$  值定义的损伤程度（表 1）。

表 1

| $\beta$ | 损伤程度 |
|---------|------|
| 1.0     | 无损伤  |
| 0.8—1.0 | 轻微损伤 |
| 0.6—0.8 | 损伤   |
| <0.6    | 断裂   |

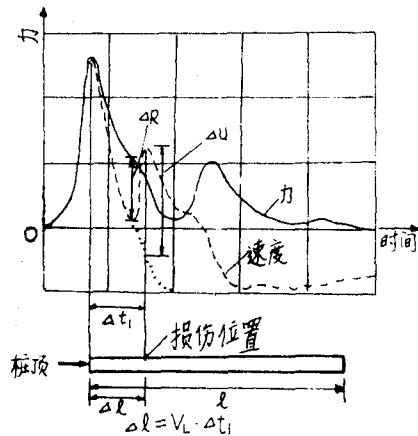


图 6  $\Delta R, \Delta u$  在实测曲线上确定示例

近10年来，各种“低应变”法检测桩身质量得到了极大的发展，国内在这方面也积累了丰富的经验<sup>[30-32]</sup>，由于具有应用灵活，操作简便的优点，该法近年应用非常普遍。但对于大尺度桩，用该法来确定单桩承载力还有待积累更多的经验并进行深入的理论研究。

应力波传播方法检测桩身质量是一种简单易行、经济可靠的方法，文献[10]对此作了概要性的评述，指出了其未来发展的大致趋势。

3.4 打桩应力计算 为确保桩身和机具在打桩过程中不致破坏，根据材料特性对打桩应力进行限制是必要的。对于混凝土桩，打桩过程中的拉应力对桩身安全具有更大的危害性。波动理论是目前分析打桩应力最有效的工具，

用波动方程法分析打桩过程时可直接得到桩单元内力,由某一截面各时刻所求得内力可得到该截面应力随时间的变化曲线,由某一时刻求得的各截面应力可得到该时刻桩身应力分布。

应力分布对打桩系统参数及桩周土阻力参数是敏感的,不同的计算程序对给定的问题分析结果也会不一致,文献[8]认为 WEAP 程序能得到最可靠的打桩应力预测结果,同时给出了根据桩顶实测力和速度计算拉应力的式子

$$T(x) = \frac{1}{2} \{ I v(t_2) - F(t_2) - I v(t_3) - F(t_3) \} \quad (3.19)$$

其中  $t_1$  和  $t_2$  与式 (3.2) 相同,  $t_3 = t_1 + 2(L-x)/c$ ,  $x$  为坐标参数。

此外,应力波理论还可用于分析打桩系统效率,推算垫层参数等<sup>[8-10]</sup>。

基于应力波理论,集量测技术和计算技术为一体的设备是打桩分析仪,该类仪器在国内外正日趋普及和完善,有关介绍可参阅文献[9,10]。

#### 4 存在的问题

应力波理论在桩基工程中的应用自 Smith 的开创性工作以来已经取得了丰硕的成果,无论在理论上还是在量测技术、计算方法上都达到了较高水平,工程实际也积累了丰富的经验,但仍存在一些问题有待进一步研究。

4.1 动测法预估承载力的可靠性问题 打桩过程中桩-土相互作用与静载情况下土对桩的阻力有着本质的不同,桩对土的性质参数,诸如强度、孔隙水压力及有效应力也会产生影响,因而一直有人对用波动理论预估桩的承载力的可靠性表示怀疑,在理论上和实际技术上解决这一问题是有必要的。

4.2 砂土中的沉桩能力预估 在砂土中预估沉桩能力的效果较差,尤其在桩难打的情况下更是如此。文献[28]认为在砂土和粉土中沉桩能力是不可预估的,这一论点虽然过于片面,但作者所列影响因素对人们的工作有一定参考意义。一个值得重视的因素可能是打桩过程桩底土孔隙水压力及有效应力变化导致孔隙水流动,引起砂的性质变化形成“闭塞”,再者是 Smith 土阻力模型在此时已不能很好地反映打桩过程实质。

4.3 土模型及垫层参数的选择问题 Smith 土阻力模型自出现以来,一直得到广泛应用,然而作者本人在给出这一模型时就认识到其局限性<sup>[5]</sup>。别的研究者虽然提出过新的模型但改进效果不大,它的最大缺陷在于不能与实验室资料及现有土的本构关系建立直接联系,近年来人们已着手解决这一问题<sup>[33]</sup>。

垫层材料对锤与桩的作用历时,打桩应力和沉桩效率具有很大影响,研制新的垫层材料,确定精确的垫层动态参数是一项必要的工作。

4.4 CAPWAP 及其类似程序在选择不同土性参数拟合桩顶曲线时,在  $t > 2L/c$  时,结果较差,这和桩的分离单元模型及土的计算模型有关,要得到更符合实际的结果,考虑循环载荷对土的性质影响是必要的。另一方面,在曲线拟合中,土性参数调整过程具有一定的随机性和盲目性,有待进一步改进,文[29]是一个有益的尝试。

4.5 土受桩打入的扰动,其性质随时间和空间的变化情况已有不少研究成果<sup>[27]</sup>,将这些结果用于沉桩能力预估和承载力分析无疑会得到更好的结果,但笔者尚未见到有关报道。

本文的部分文献是根据章根德同志的计算机检索目录查到的,笔者在此表示衷心感谢!



## 参 考 文 献

- 1 Smith I M, Chow Y K, Three-dimensional analysis of pile drivability. 2nd Int. Conf. on Numer. Methods in Offshore Piling (Apr. 1982)
- 2 Vijayvergiya V N, Focht John A Jr. A new approach to predict capacity of piles in clay. OTC 1718 (1972): II 865—II 874
- 3 王礼立编著, 应力波基础. 国防工业出版社 (1985)
- 4 华东水利学院土力学教研室主编, 土工原理与计算 (下册). 水利电力出版社 (1982)
- 5 Smith E A L. *J. Soil Mech. and Foundations, ASCE*, **86** (Aug. 1960): 35—61
- 6 鲍尔斯 J E. 基础工程结构分析及程序. 中国铁道出版社 (1982): 244—269
- 7 Tavenas F, Audibert J. *Canada Geotechnical J.*, **14**, 1 (1977): 34—51
- 8 Goble G G, Rausche F, Linkins G E Jr. The analysis of pile driving—A state-of-the art. Int. Seminar on the Applications of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm (June 1980)
- 9 甘肃省建筑科学研究所. 波动理论在桩基工程中的应用技术研究. 科研报告 85—8 (1985年11月)
- 10 唐念慈, 梁守信. 应力波理论与桩基工程 (出国参加会议访问小结). 甘肃省建筑科学研究所, 南京工学院土木工程系 (1984年9月)
- 11 Holloway D M, Audibert J M E, Dover A R. Recent advances in predicting pile drivability. OTC 3273 (1978)
- 12 Holloway D M, Clough G W, Vesic A S. The effects of residual driving stress on pile performance under axial loads. OTC 3306 (1978): 2225—2236
- 13 Rausche F, Moses F, Goble G G. *J. Soil Mech. and Foundations Division, ASCE*, **98**, SM9 (1972)
- 14 唐念慈, 刘楚凡, 沈慧容. 渤海石油平台沉桩能力分析. 第4届全国土力学及基础工程学术讨论会, 武汉 (1983)
- 15 Van Zandwijk Cees, Van Dijk B P, Voeten J A J, Heerema E P., An improved pile drivability theory for Gulf of Mexico. OTC 4503 (1983)
- 16 Goble G G, Rausche F. Pile drivability predictions by CAPWAP. Proc. Conf. on Numer. Methods in Offshore Piling, ICE London (June 1979)
- 17 Heerema E P, Jong A de. An advanced wave equation computer program which simulates dynamic plugging through a coupled mass-spring system. *ibid*
- 18 Vijayvergiya V N. Soil response during pile driving. *ibid*
- 19 Aurora R P. Case studies of pile set-up in the Gulf of Mexico. OTC 3824 (1980)
- 20 Semple R M, Gemeinhardt J P. Stress history approach to analysis of soil resistance to pile driving. OTC 3969 (1981)
- 21 Goble G G. Influence of residual forces on pile drivability. 2nd Int. Seminar on the Applications of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm (June 1984)
- 22 Steinbach L, Vey E. *J. Geotechnical Eng. Division, ASCE*, **GT4a** (Apr. 1975)
- 23 Hearne T M Jr, Stoko K H, Reese L C. *J. Geotechnical Eng. Division, ASCE*, **GT10** (1981)
- 24 Rausche F, Goble G G. Determinations of pile damage by top measurement. Behaviour Deep Foundations ASTM STP 670, Raymond Lundgren, Editor, ASTM (1979): 500—506.
- 25 Rausche F, Goble G G, Linkins G E Jr. *J. Geotechnical Eng. Division, ASCE*, **111**, 3 (1985)
- 26 Banerjee P K, Butterfield R. Developments in soil mechanics and foundation engineering-1. Applied Science Publishers (1983): 69—83
- 27 Wroth C P, Carter J P, Randolph M F. Stress change around a pile driven into cohesive soil. PB82—174848 (1978).
- 28 Marius J M. 海洋石油, 4 (1978): 246—251
- 29 江礼茂, 寇绍全, 陆岳屏. 沉桩能力的波动方程法及其计算参数的研究. 中国科学院力学研究所科研报告 (1988年11月)
- 30 应力波理论在桩基工程中的应用论文集. 甘肃省建筑科学研究所, 应力波理论在桩基工程中应用科技情报网编译 (1986年6月)
- 31 Starke W F, Matthew C J. Accuracy and reliability of low strain integrity testing. 3rd Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory on Piles. Ottawa, Canada, May 25—27, 1988
- 33 Rausche F, Linkins G E, Hussein Mohamad. Piles integrity by low and high strain impacts. *ibid*
- 33 Nguyen T T, Berggren B, Hansbo S. A new soil model for pile driving and driveability analysis. *ibid*

# THE APPLICATIONS OF STRESS-WAVE THEORY TO PILE ENGINEERING

Jiang Li-mao

University of Science and Technology of China

Kou Shao-quan

Beijing University of Science and Technology

Lu Yue-ping

Institute of Mechanics, Academia Sinica

**Abstract** This paper presents an historical overview of the stress wave theory applied to piles and gives its state-of-the-art and problems to be solved.

**Keywords** *stress wave, pile, capacity, driveability, integrity*

---

(上接第 113 页)

图 2 中示出的 16 个结点的空间位置是不规则的,但是在单调 Lagrange 网格中,在网格指标与位置之间采用单调映射,这些结点的指标号却是规则的。在每一空间方向上每一网格的横行(和竖行)强制性地用单调指标加以映射。根据这一规定在数据存储中存储的结点,最多有两个或三个与其邻近的结点能影响它们。因而,对梯度、导数或力的计算,只需考虑一部分可能的结点-结点相互作用。没有必要进行搜索以判明紧邻结点位置,而且对于应用这种数据结构并行方法或多处理方法来说,必要的逻辑运算和计算是空想的。仅仅要计算位于计算机存储器的很小一个邻接部分中结点之间的相互作用。即使这个方法导致计算几个远距离结点的相互作用,它提供的也是计算费用显著减少。因为互相靠近的结点是通过邻接的存储器标出指标的,所以这种计算可以高效率地矢量化。

根据无规定位的结点,以  $N \log N$  为尺度构造的算法可用以建立一个单调 Lagrange 网格。对于任意的数据组,总可以找到一个单调 Lagrange 网格,不过它不一定是唯一的。进而,当真实空间中结点的运动破坏某些单调条件时,存在另外一个更快的  $N \log N$  算法将恢复单调 Lagrange 网格次序。应用这些单调 Lagrange 网格算法已减少了分子动力学计算的时间。在 CRAY 计算机上,当结点已显著地移动时,重建单调 Lagrange 网格典型地用了每一时间步长的 3—5%。另外,单调 Lagrange 网格是可以完全矢量化的并可作并行计算机的最佳应用。因此,它也是研究流体连续介质动力学的快速自由 Lagrange 模型的基础,如象第 3.5 节所描述的那样。 (未完待续)

张德华译自: *Ann. Rev. Fluid Mech.*,  
21 (1989): 345—361. (董务民校)