

高应变单桩承载力动测分析方法的改进

于印章 汪凤泉 韩晓林

(东南大学数学力学系, 南京, 210096)

文 摘 从高应变动测的特点出发, 提出了一种分析桩基承载力的拟合模型。该模型在分析桩单元中的上行波和下行波时, 既考虑单元周边土阻力的影响, 又考虑单元惯性力和单元沉降的影响, 使计算结果更接近实际情况。为验证模型的正确性, 最后给出了一个工程实例。

关键词 高应变, 动测, 桩基础, 承载力, 波动理论。

1 引 言

随着建筑业发展, 各种大直径灌注桩的应用更加广泛。这些桩的设计载荷很高, 用静载试验检测桩的质量和承载力, 不但费用高, 而且周期长。为弥补静载试验的不足, 近 20 年来学者们研究了各种动测方法。史密斯提出的离散单元差分法主要用于对打桩过程进行分析和控制^[1]; 基于一维波动理论的凯斯法主要用于对成型桩的分析, 它可以在打桩现场直接得到关于承载力、锤击能量、桩身应力和桩身质量等分析结果; Capwap C 法则综合了凯斯法和史密斯法的优点, 它可以给出土的摩阻力沿桩身的分布, 还可以模拟静载情况求出单桩的荷载一位移曲线, 其分析结果与静载试验结果的相关程度较好^[2]。但是所有这些方法都存在着数学上不够严格的缺陷。

动测时由于桩头受到幅值很高的冲击力作用, 桩身将产生较大的瞬时加速度和较大的沉降(1cm 以上)。而现有的拟合方法都忽略了桩单元惯性力和沉降对最终结果的影响, 为此本文对拟合方法进行了改进, 使之更符合实际情况。

2 行波理论

为便于分析, 将一维行波理论作一简述。设弹性杆件长为 L 、密度为 ρ 、截面积为 A 、材料的弹性模量为 E , 由达朗伯原理可得杆件的纵向振动微分方程^[3]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中 $C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 为波在杆件中的传播速度; u 为杆件纵向位移; x 为沿杆长的坐标。式(1)的 D'Alembert 解为

$$u(x, t) = f(x - Ct) + g(x + Ct) \quad (2)$$

式中 f 和 g 分别表示沿杆轴向传播的下行波和上行波。对下行波, 质点的运动速度为

$$V_d = \frac{\partial f}{\partial t} = -Cf' \quad (3)$$

它产生的截面力为

$$P_d = AE\varepsilon_d = AE \cdot \frac{\partial f}{\partial x} = -AEf' \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得

$$P_d = ZV_d \quad (5)$$

式中 $Z = AE/C$ 称为声阻抗。同理, 对上行波有

$$P_u = -ZV_u \quad (6)$$

式中 P_u, V_u 分别是上行波产生的截面力和质点运动速度。

杆在任一截面处的力波和速度波都是上行波和下行波的叠加, 即

$$\begin{cases} V = V_u + V_d \\ P = P_u + P_d \end{cases} \quad (7)$$

记实测力波和速度波分别为 P' 和 V' 。由式(5)、式(6)和式(7)将上、下行波分离为

$$\begin{cases} V_d = (V' + \frac{P'}{Z})/2 \\ V_u = (V' - \frac{P'}{Z})/2 \\ P_d = (P' + ZV')/2 \\ P_u = (P' - ZV')/2 \end{cases} \quad (8)$$

当杆端部的约束条件不同时, 求解微分方程式(1)的边界条件亦不同。自由端(桩顶相当于该情况)的边界条件是

$$P = P_d + P_u = 0 \quad (9)$$

将式(5)、式(6)代入式(9)后, 有

$$V_d = V_u \quad (10)$$

固定端(桩底相当于该情况)的边界条件为

$$V = V_d + V_u = 0 \quad (11)$$

将式(5)、式(6)代入式(11)后, 有

$$P_u = P_d \quad (12)$$

3 高应变动测拟合模型

3.1 桩单元分析

建立高应变动测桩的分析模型时, 将桩视为一维弹性杆, 可用上述一维波动理论建立其模型。为便于分析求解, 将桩离散化, 即沿桩长把桩划分为 N 个弹性单元, 每个单元的长度约 1m。当桩截面在某处发生变化时, 将该处取为单元的分界面, 变截面单元长度取值遵循的原则是应力波通过各单元的时间相等。假设单元阻抗仅在单元间的交界面处发生变化, 在单元

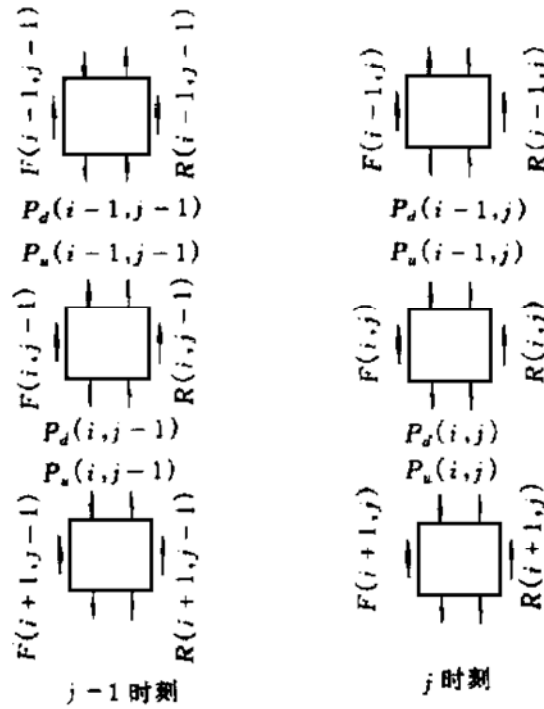


图1 单元受力图

内部行波不产生畸变。上行波 $P_u(i, j-1)$ 经过 Δt 从 i 单元的底部传播到其顶部记为 $P_u(i-1, j)$, 下行波 $P_d(i-1, j-1)$ 则从单元的顶部传播到底部记为 $P_d(i, j)$ 。

在用高应变动测法检测单桩承载力时, 桩头受到冲击力的作用, 桩身的瞬间弹性变形量和沉降量都比较大, 各分析单元的瞬时加速度值较高。由此产生的惯性荷载不容忽视, 并且桩身的沉降也影响了行波的传播速度。现有的各种拟合分析模型都未考虑这两种因素。在以下分析中将惯性荷载记为 F 。

图1所示分别为 $i-1, i, i+1$ 单元在 $j-1, j$ 时刻的受力图。设 $i, i-1$ 单元间界面处上、下行波在 $j-1$ 时刻的值为 $P_u(i-1, j-1), P_d(i-1, j-1)$; $i, i+1$ 单元间界面处相应的值为 $P_u(i, j-1), P_d(i, j-1)$, 两界面的位移分别为 $S(i-1, j-1), S(i, j-1)$, i 单元的惯性力和桩周摩阻力分别为 $F(i, j-1), k(i, j-1)$ 。在 j 时刻它们的值分别为 $k(i, j-1), P_u(i-1, j), P_d(i-1, j), P_u(i, j), P_d(i, j), S(i-1, j), S(i, j), F(i, j), k(i, j)$ 。在 j 时刻 i 单元力的平衡条件为

$$P(i-1, j) - P(i, j) = k(i, j) + F(i, j) \quad (13)$$

变形的连续条件为

$$V(i, j) = V(i-1, j) + \frac{S(i, j) - S(i-1, j) - S(i, j-1) + S(i-1, j-1)}{2\Delta t} \quad (14)$$

式中 Δt 为分析的时间步长。惯性力 $F(i, j)$ 为

$$F(i, j) = m_i a(i, j) = \rho A_i L_i a(i, j) \quad (15)$$

式中 $\rho, A_i, L_i, a(i, j)$ 分别为 i 单元的密度、截面积、单元长度和单元质心的加速度。加速度 $a(i, j)$ 为

$$a(i, j) = \frac{V(i, j) - V(i, j-1)}{\Delta t} \quad (16)$$

式中 $V(i, j)$ 为质心在 j 时刻的速度, 可表示为

$$V(i, j) = V(i, j-1)$$

$$+ \frac{S(i, j) - S(i, j-1) + S(i-1, j) - S(i-1, j-1)}{2\Delta t} \quad (17)$$

j 时刻 i 单元与 $i+1$ 单元间界面的位移 $S(i, j)$ 可由下式求出:

$$S(i, j) = S(i-1, j) - \frac{L_i [P(i, j) - P(i, j-1) + P(i-1, j) - P(i-1, j-1)]}{2A_i E_i} \quad (18)$$

由式(7)可得

$$V(i, j) = V_d(i, j) + V_u(i, j) \quad (19)$$

$$P(i, j) = P_d(i, j) + P_u(i, j) \quad (20)$$

由式(5), 式(6), 式(7)可得

$$P_d(i, j) = Z_i V_d(i, j) \quad (21)$$

$$P_u(i, j) = Z_i V_u(i, j) \quad (22)$$

解线性方程组(式(13)~式(22))可求出该计算时刻的各个未知量, 按时间步长拟合行波, 即可求出桩的承载力。

3.2 桩周土阻力模型

选择合理的桩周土阻力计算模型是准确拟合桩承载力的关键。动测时桩周土阻力模型如图2所示, 它可分为静阻力和动阻力, 其中静阻力模型如图3所示。 j 时刻 i 单元的土阻力可表示为

$$R(i, j) = R_s(i, j) + R_d(i, j) \quad (23)$$

式中 $R_s(i, j)$ 为静阻力; $R_d(i, j)$ 为动阻力。动阻力可表示为

$$R_d(i, j) = C_i V(i, j) \quad (24)$$

式中 C_i 为桩 i 单元土的阻尼系数; $V(i, j)$ 为质心运动速度。

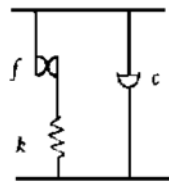


图2 土阻力模型

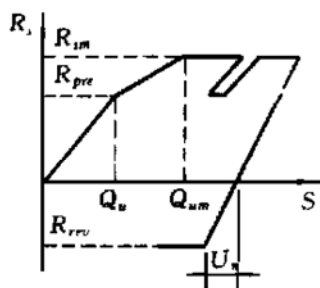


图3 静阻力模型

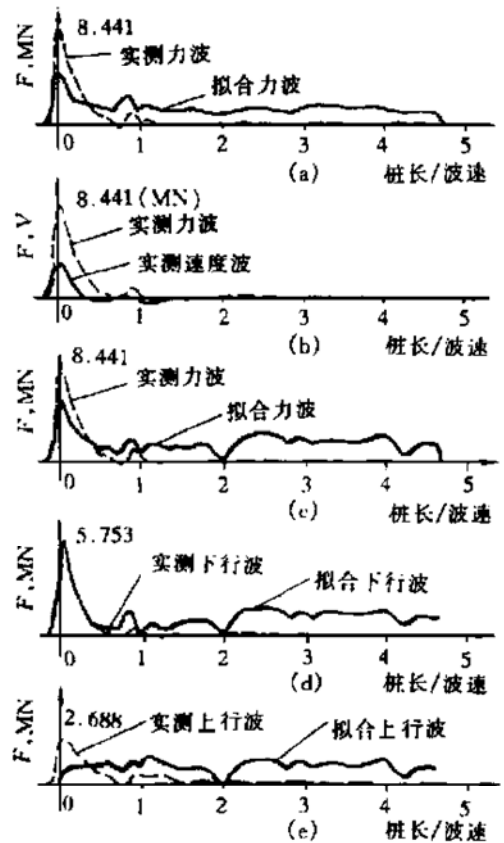


图4 高应变桩基动测曲线及分析结果

4 实例分析

笔者曾对温州市皇家大厦基础中的一根混凝土灌注桩进行了动测分析。该桩桩长 60m, 桩径 1m, 混凝土龄期 28d。根据地质勘察报告, 地下土质比较复杂, 土层自上而下分为 16 个工程地质层, 包括人工土填土、淤泥、软粘土、粘土和风化基岩等。图 4(b) 是用高应变动测的力波曲线和速度波曲线; 图 4(a)、4(c) 分别是用本文的方法和 Capwap C 法拟合的力波曲线与实测曲线的比较。图 4(d)、4(e) 分别是实测的下行波、上行波与拟合出的下行波、上行波的比较, 其中 cpt 为拟合值。

5 结 论

如何提高高应变动测桩承载力的准确性一直是科技工作者研究的课题。本文在 Case 法和 Capwap C 法的基础上提出了一种改进的拟合模型。如果以 Capwap C 法给出的拟合质量数 $E^{[3]}$ 作为拟合的质量标准(拟合质量数表示拟合曲线与实测曲线的差异程度, E 值大差异大), 则用本文方法拟合的拟合质量数为 0.06541, 而用 Capwap C 法拟合的拟合质量数为 0.07729, 说明用本文方法拟合结果的准确性高于 Capwap C 法。

参 考 文 献

- 1 Smith E A L. Pile Bearing Analysis by the Wave Equation. Proceeing ASCE, 1960(8), 850~ 861.
- 2 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. 258~ 316.
- 3 汪凤泉. 基础结构动态诊断. 江苏科学技术出版社, 1992. 228~ 270.
- 4 袁代国. 高应变动力试桩信号质量影响因素分析. 见: 江苏省桩基检测技术研究联络网学术年会论文集, 1994. 134~ 142.

An Improvement of the Method of Determination of Bearing Capacity for Piles by High Strain Dynamic Test

Yu Yin-zhang Wang Feng-quan Han Xiao-lin

(Southeast University, Nanjing)

Abstract As a new method of determination of bearing capacity of pile, high strain dynamic test technology has been used widely in our country and abroad. In this paper, an improvement is given in which the inertial force of pile is taken into count in calculation of shaft resistance of soil by using pile-soil element analysis based on one-dimensional stress wave propagation theory. To prove its reliability, a field high strain dynamic test is presented and the bearing capacity of pile is calculated with the data from the test by using the method presented in the paper.

Key words pile, high strain, dynamic test, bearing capacity, stress wave theory of one dimension.