

(11)

桩基

计算机

图像显示

检测

高加波

第16卷第1期

水利水电科技进步

1996年2月

51-54

计算机图像显示在桩身质量检测中的应用

贾学敏 陈明关

邱劭平

TU 473.16

(河海大学港口航道及海岸工程学院 南京 210098) (海军第八工程建筑处 湛江 524005)

摘要 本文根据应力波理论在桩身质量检测中的应用,分析了波在桩身各杆单元界面处反射和透射的传播原理。据桩顶进行瞬时激振的速度响应和界面反射系数及其与桩形之间的关系,用计算机模拟图形显示,使之有效、快速地显示桩的形状。

关键词 图像显示 桩身检测 应力波 桩的形状 计算机应用

桩基础在土木工程中的广泛应用使桩的质量检测显得越来越重要,因此无损检测已成为桩基检测工作中亟待解决的问题。应用应力波理论在桩基检测中大多会得到很多数据,往往不能快速地对检测结果作出准确判断。目前工程中所用的桩基质量检测设备所测出的图像除工程技术专家外,很少有人能轻易看懂^[1]。因此,将计算机图像显示技术应用用于桩身质量检测显得十分必要。

1 应力波理论基础^[2,3]

桩基波动分析中,由于桩身细长,可以简化为一维杆分析。取等截面杆单元,截面积、质量密度、弹性模量分别为 A 、 ρ 、 E ,则一维波动方程为^[2]

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

式中 c 为波速, $c^2 = E/\rho$; u 为轴向位移; x 为轴向坐标; t 为时间。

波动方程的一般解:

$$u(x, t) = u_0 + \varepsilon_0 x + c_0 t + f(x - ct) + g(x + ct) \quad (2)$$

式中 u_0 、 ε_0 、 c_0 分别为初始位移、初始应变、初始速度。由于 $u_0 = \varepsilon_0 = c_0 = 0$, 则式(2)简化为

$$u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (3)$$

其中, $f(x - ct)$ 、 $g(x + ct)$ 分别对应下行波和上行波。

现不考虑桩周土和桩身材料阻尼的影响,近似认为桩顶脉冲入射波为平面波。将桩底反射波到达桩顶的时间等分为 N , 同时将桩身等分为 N 个等长单元。单元号从桩头到桩身分别为 $1, 2, \dots, N$ 。单元长度为 $\Delta l = l/N$ 。设各单元的阻抗为 Z_i ($i = 1, 2, \dots, N$), Z_i 是单元截面面积 A_i 、材料密度 ρ_i 、杨氏弹性模量 E_i 和波速 c_i 的函数。

当第 i 和第 $i+1$ 单元的桩的性质有变时,则这两单元在交界面处位移满足连续条件和力的平衡条件:

$$u_{i+1} = u_i \quad (4)$$

$$E_{i+1} A_{i+1} \frac{\partial u_{i+1}}{\partial x_i} = E_i A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

由式(4),两单元的位移可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_i(x, t) &= u_l \left(t - \frac{x}{c_i} \right) + u_R \left(t + \frac{x}{c_i} \right) \\ u_{i+1}(x, t) &\approx u_T \left(t - \frac{x}{c_{i+1}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 u_l 、 u_R 、 u_T 分别表示相邻两单元交界面处的入射、反射、透射位移波。

将式(6)代入式(1)得

$$u_R\left(t + \frac{x_i}{c_i}\right) = \frac{Z_i - Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}} u_I\left(t - \frac{x_i}{c_i}\right) \quad (7)$$

$$\text{或写为 } u_R\left(t + \frac{x_i}{c_i}\right) = r_i u_I\left(t - \frac{x_i}{c_i}\right) \quad (8)$$

$$\text{其中 } r_i = \frac{Z_i - Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

r_i 为第 i 单元和第 $i+1$ 单元截面处的反射系数; Z_i 为第 i 单元的波阻抗

$$Z_i = \rho_i c_i A_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

其中 $Z_0 = 0$ 。

令 $t' = t + \frac{x_i}{c_i}$, 则式(8)变为

$$u_R(t') = r_i u_I\left(t' - 2 \frac{x_i}{c_i}\right) \quad (11)$$

式(11)中, 习惯以 t 代 t' , 则有

$$u_R(t) = r_i u_I\left(t - 2 \frac{x_i}{c_i}\right) \quad (12)$$

由式(12)知, 第 i 单元和第 $i+1$ 单元界面 i 处的反射波到达桩顶所需时间正好是入射波在桩顶与此界面间来回传播一次所需的时间 τ_i , 即

$$\tau_i = 2 \frac{x_i}{c_i} \quad (13)$$

对于速度波和应力波都有式(11)的关系, 例如速度反射波可表示为

$$u_R(t) = r_i u_I(t - \tau_i) \quad (14)$$

在同一根桩中, c_i, ρ_i 变化很微小, 可假设 c_i, ρ_i 近似不变, 由式(9)和(10)知:

$$r_i = \frac{A_i - A_{i+1}}{A_i + A_{i+1}} \quad (15)$$

入射波 V_i 是一定的, 这时反射波 u_R 的波形变化决定于 $r_i(A)$ 的变化, 只要知道 r_i , 可计算出桩单元截面积。

当用激振器在桩顶产生激励时, 测得实测桩顶速度响应为 $v(t)$, 对 $v(t)$ 解线性卷积得到单位脉冲速度响应 $V_d(t)$ (取桩底反射波第一次到达桩顶的时间内 $V_d(t)$ 的信息)^[4]。显然, τ 是每个单元内波来回传

播一次所需的时间。 $V_d(t)$ 写作如下形式:

$$V_d(t) = I(t) + \sum_{i=1}^N R(i) I(t - i\tau) \quad (16)$$

其中 $I(t)$ 是入射单位脉冲的速度波, $t=0, I(0)=1; t \neq 0, I(t)=0$ 。 $\sum_{i=1}^N$ 定义为所有单元在 $t=i\tau$ 时到达桩顶的波的总反射系数。

对式(16)进行间隔为 τ 的离散

$$V_d(n) = I(n) + \sum_{i=1}^N R(i) I(n-i) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

引进近似关系式:

$$\begin{cases} R(1) = r_1 \\ R(n) = r_n \prod_{i=1}^{n-1} (1 - r_i^2) \\ \quad + \sum_{m=1}^{n-1} \prod_{i=1}^{m-1} (1 - r_i^2) R(n-m) \\ \text{令 } \prod_{i=1}^0 (1 - r_i^2) = 1 \quad (n \geq 2) \end{cases} \quad (18)$$

由式(17)得:

$$R(i) = V_d(i) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)得:

$$\begin{cases} r_1 = V_d(1) \\ r_n = \left[V_d(n) - \sum_{m=1}^{n-1} r_m \prod_{i=1}^{m-1} (1 - r_i^2) (n-m) \right] \\ \quad / \prod_{i=1}^{n-1} (1 - r_i^2) \quad (n = 2, 3, \dots, N) \end{cases} \quad (20)$$

至此, r_i 可确定, 由式(15)可确定 A_i (A_1 已知), 由 A_i 可绘出桩的形状, 见图 1。



图 1 桩身单元

2 桩的形状显示^[4-6]

现有的桩身质量检测系统中, 数据、信号采集系统已可以按要求在桩顶产生 $v(t)$ 的速度响应。只要知道 $v(t)$, 通过计算机计算, 就可以显示出桩身的形状来, 检测简图和计算程序框图分别如图 2 和图 3 所示。

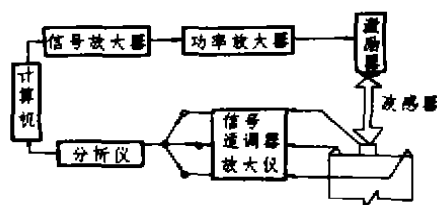


图2 桩身检测简图

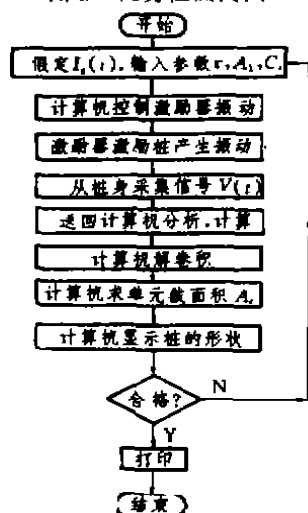


图3 程序框图

为了使显示图像清晰准确,计算机仅显示了桩的外形及缺陷形状。源程序采用橡皮筋圆弧、参数圆弧、公切圆弧、椭圆、抛物线等二次拟合。如已知相邻的三个坐标,计算机自动将已知的三点 P_1 、 P_2 、 P_3 拟合,使桩的显示形状尽可能接近实际。

如图4曲线上一段 P , PP_1 弦长为 t , PP_2 弦长为 t_1 ,则可设这曲线段的参数矢量方程为

$$P(t) = B_0 + B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3 \quad (0 \leq t \leq t_1) \quad (21)$$

其中

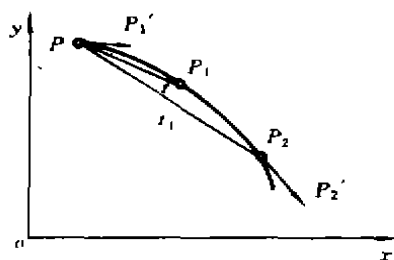


图4 $P_1 P_2$ 间二次曲线拟合

$$\begin{cases} B_0 = P_1 \\ B_1 = P_1' \\ B_2 = \frac{3}{t_1^2}(P_2 - P_1) - \frac{1}{t_1}(P_2' + 2P_1') \\ B_3 = -\frac{2}{t_1^3}(P_2 - P_1) + \frac{1}{t_1^2}(P_2' + 2P_1') \end{cases} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21),化简得:

$$P(t) = f_1(t)P_1 + f_2(t)P_2 + g_1(t)P_1' + g_2(t)P_2' \quad (23)$$

式中 $f_1(t)$, $f_2(t)$, $g_1(t)$, $g_2(t)$ 为权函数,

$$\begin{cases} f_1(t) = 1 - 3\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 + 2\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 \\ f_2(t) = 3\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 \\ g_1(t) = \left(\frac{t}{t_1}\right) - 2\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{t}{t_1}\right)^3 \\ g_2(t) = -\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{t}{t_1}\right)^3 \end{cases} \quad (24)$$

点列 $P_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 则可写成矩阵形式为

$$P_i(t) = \left[\left(\frac{t}{t_i}\right)^3, \left(\frac{t}{t_i}\right)^2, \left(\frac{t}{t_i}\right), 1 \right] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ t_i P_i' \\ t_i P_{i+1}' \end{bmatrix} \quad (25)$$

图5中第一段曲线与第二段曲线的连接,两方程都要用到 P_2' ,故两段曲线在 P_2 点处连续,满足 $P_2'' = P_2''^+$,即

$$P_1''(t) = P_2''(0) \quad (26)$$

由式(22)知:

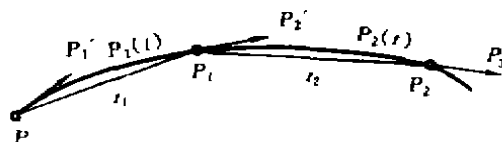


图5 P_1 、 P_2 两段曲线的连线

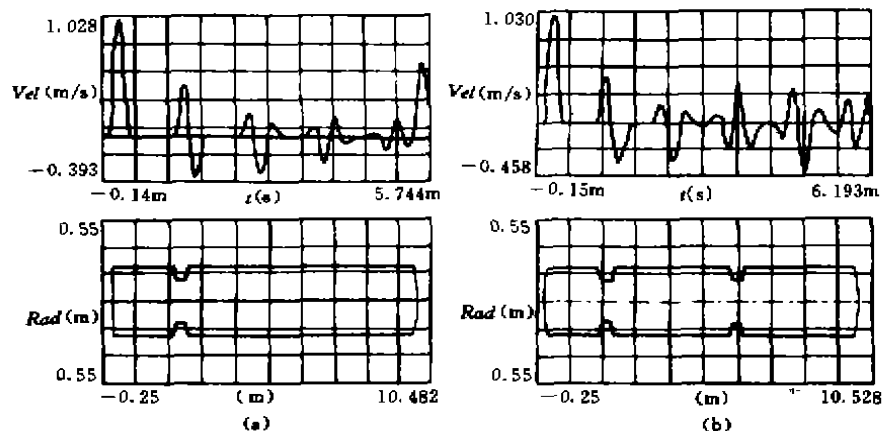


图6 桩的波形形状显示

(a) 一个缺陷的波形与桩的形状; (b) 两个缺陷的波形与桩的形状

$$P_2^*(t) = 2B_2 + 6B_3t \quad (27)$$

第一段曲线终端处,

$$P_1^*(t) = 2B_2 + 6B_3t_1 \quad (28)$$

第二段曲线终端处,

$$P_2^*(0) = 2B_2 \quad (29)$$

由式(26)知:

$$\begin{aligned} & t_2 P_1' + 2(t_1 + t_2)P_2' + t_1 P_3' \\ &= \frac{3t_2}{t_1}(P_2 - P_1) + \frac{3t_1}{t_2}(P_3 - P_2) \end{aligned} \quad (30)$$

一般第 $i-1$ 段与第 i 段相连, 得:

$$\begin{aligned} & t_i P_{i-1}' + 2(t_{i-1} - t_i)P_i' + t_{i-1} P_{i+1}' \\ &= \frac{3t_i}{t_{i-1}}(P_i - P_{i-1}) + \frac{3t_{i-1}}{t_i}(P_{i+1} - P_i) \\ &(i = 2, 3, \dots, N-1; t_{i-1} = |P_i - P_{i-1}|; \\ &t_i = |P_{i+1} - P_i|) \end{aligned} \quad (31)$$

为确保图形显示更直观, 在桩的垂直和水平方向内沿两个截面显示图形, 帮助工程技术人员判别桩的缺陷位置和类型。但对于有多个缺陷的桩, 由于波在桩内多次反射和叠加, 很难识别, 计算机画出的图形仍是定性形状, 仅供参考^[7]。

3 试验验证

为确保绘图软件的可靠性, 在室内进行了试验, 结果与实际吻合。显示图形见图6。

4 结论及问题

本文试图将计算机图形显示应用于桩

身质量检测, 以使工程技术人员在显示屏上看到桩的形状, 减轻从大量数据和曲线中判断桩质量的繁重劳动。

a. 本文所显示的仅是二维图像, 且桩的缺陷最好是两个, 没有考虑三维问题和多个缺陷。

b. 文中假定桩身材料均一, 对于非均质材料仍待进一步研究。当桩身裂缝很小时, 模拟的速度响应曲线中, 波幅正负叠加, 使裂纹很难从图像显示中看到。

c. 本文在数据处理时, 简化为一维波, 对此尚需提出更符合实际的假设。

参考文献

- 1 徐攸在等. 桩的动测新技术. 北京: 地震出版社, 1989
- 2 李为杜. 混凝土无损检测技术. 上海: 同济大学出版社, 1991
- 3 克拉夫. 结构动力学. 北京: 科学出版社, 1983
- 4 Ewins D J. Theory and practice of modal testing. Imperial College of Science & Technology Press, 1985
- 5 孙家广等. 计算机辅助设计技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 6 (日)横山幸满. 桩结构的计算方法和计算实例. 北京: 中国铁道出版社, 1990
- 7 杨克己. 桩基工程. 北京: 人民交通出版社, 1992

(收稿日期: 1994-11-14)