

基桩反射波法检测的应力波能量分配理论探讨*

陈 京, 何卫红

(广东省水利电力勘测设计研究院, 广州 510170)

摘 要: 从能流密度、能通量的角度对基桩反射波法检测过程中应力波能量在桩身变阻抗界面上的入射、反射及透射的分配理论进行了假设理想条件下的探讨, 为今后的进一步研究打下初步的基础。

关键词: 基桩; 反射波法; 应力波; 能流密度; 能通量

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) S2-0069-03

1 前 言

目前, 反射波法是较为有效和广泛应用的基桩检测方法。其判别基桩完整性的主要根据是质点振动速度(或加速度)在变阻抗界面上的反射和透射公式。这是检测人员目前分析和判别基桩完整性所用的基本公式, 至于利用应力波能量分配理论来进一步分析和判别基桩完整性尚处探索阶段, 所以本文将从能流密度、能通量的角度初步探讨应力波能量在桩体变阻抗界面上的传输和分配理论, 为今后的进一步研究打下初步基础。

另外, 本文在探讨中对基桩作了如下假设以满足理想条件:

- (1) 基桩为一维线弹性杆;
- (2) 应力波在传播过程中没有能量衰减。

2 应力波能量在变阻抗界面上的反射和透射

2.1 反射系数和透射系数

Z 称为波阻抗(一般称 ρCA 为广义波阻抗, 其中 ρ 、 C 、 A 分别为桩身的质量密度、弹性波速及横截面积), 当桩身的几何尺寸或材料的物理性质发生变化时, 则相应的 ρ 、 C 、 A 也会发生变化, 其变化发生处称为波阻抗界面。其比值表示为

$$\beta = Z_2 A_2 / Z_1 A_1 \quad (1)$$

β 称为波阻抗比。

当在桩顶施加一瞬时锤击力, 使桩顶产生压缩变形, 并以一维应力波形式沿桩体向下传播, 当遇到一与传播方向垂直的波阻抗界面时(如图

1所示), 便产生反射与透射。根据应力波理论, 由连续性条件和牛顿第三定律有:

$$V_I + V_R = V_T \quad (2)$$

$$A_1(\sigma_I + \sigma_R) = A_2 \sigma_T \quad (3)$$

式中, V 、 σ 分别表示界面质点的振动速度和正应力, 下标 I 、 R 、 T 分别表示入射波、反射波和透射波。

另外, 根据一维应力波理论有:

$$\sigma_I = \rho_1 C_1 V_I$$

$$\sigma_R = -\rho_1 C_1 V_R$$

$$\sigma_T = \rho_2 C_2 V_T$$

将上述3式代入式(3)可得:

$$\rho_1 C_1 A_1 (V_I - V_R) = \rho_2 C_2 A_2 V_T \quad (4)$$

联立(2)、(4)式, 求解可得:

$$V_R = F V_I \quad (5a)$$

$$V_T = \beta T V_I \quad (5b)$$

$$\text{其中: } F = (1 - \beta) / (1 + \beta) \quad (6a)$$

$$T = 2 / (1 + \beta) \quad (6b)$$

(6a)、(6b)就是我们常用的质点振动速度的反射系数公式和透射系数公式。

2.2 桩体中应力波的能流密度

如图1所示, 桩体的弹性模量为 E , 设想在桩体上切割下长为 Δx 的一段柱体元 ($\Delta x \ll \lambda$, λ 为桩体内应力波的波长), 当纵波通过时, 桩体的质量中心将移动一量 u , 因此柱体元将具有动能 $A \cdot \Delta x \cdot \rho (\partial u / \partial t)^2 / 2$, 式中 $A \cdot \Delta x \cdot \rho$ 为柱体元的质量。此外当应力波通过时, 柱体受到压缩或拉伸, 因此柱体中将蓄积弹性位能, 单位体积内的弹性位能为 $\sigma \cdot \epsilon / 2$, 其中 ϵ 和 σ 分别为正应变和正应力, 由 $\sigma = E \cdot \epsilon$ 及 $\epsilon = \partial u / \partial x$, 可以

* 收稿日期: 2001-07-30; 作者简介: 陈 京 (1966-), 男, 工程师。

得出柱体元的弹性位能为

$$A \cdot \Delta x \cdot E \cdot (\partial u / \partial x)^2 / 2$$

因此柱体元的总能量为:

$$\Delta e = A \Delta x [\rho (\partial u / \partial t)^2 + E (\partial u / \partial x)^2] / 2 \quad (7)$$

由于应力波满足

$$E (\partial u / \partial x) = \pm \rho C (\partial u / \partial t), \text{ 又 } C = (E / \rho)^{1/2}$$

因而

$$\partial u / \partial x = \pm (1 / C) \cdot \partial u / \partial t,$$

$$E (\partial u / \partial x)^2 = \rho (\partial u / \partial t)^2$$

$$\text{所以, } \Delta e = \rho \cdot A \cdot \Delta x (\partial u / \partial t)^2,$$

$$\text{则 } P = \rho \cdot C \cdot V^2 \quad (8)$$

其中 Z 为桩体的阻抗 ($Z = \rho C$), V 是质点的

震动速度。

——上式定义了单位时间内沿波的传播方向通过单位面积的能量, 即应力波的能流密度 P 。

单位时间内通过截面 A 的能量, 称为该截面的能通量:

$$\Phi = P \cdot A$$

由上式可知,

$$\Phi = P \cdot A = Z \cdot V^2 \cdot A = (E \rho)^{1/2} \cdot V^2 \cdot A$$

因此在已知桩体某处的阻抗和质点振动速度的情况下, 即可确定应力波能量在该处流动的强度, 其大小不仅与质点振动的速度有关, 还与桩体材料有关。

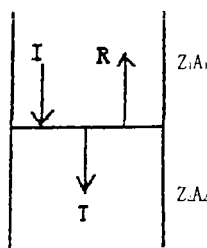


图1 反射和透射示意图

2.3 应力波的能量在桩体界面上的反射和透射

如图2, 桩体中存在一界面。当应力波沿桩体由上段向下段传播时, 将在界面上发生反射和透射。由式(6)速度反射、透射系数公式可得:

$$V_R = [(Z_1 A_1 - Z_2 A_2) / (Z_1 A_1 + Z_2 A_2)] V_I \quad (9a)$$

$$V_T = [2 Z_1 A_1 / (Z_1 A_1 + Z_2 A_2)] V_I \quad (9b)$$

$$\text{满足 } V_T = V_R + V_I \quad (10)$$

则入射波的能流密度为 $P_I = Z_1 \cdot V_I^2$,

能通量为 $\Phi_I = A_1 \cdot Z_1 \cdot V_I^2$;

反射波的能流密度为 $P_R = Z_1 \cdot V_R^2$,

能通量为 $\Phi_R = A_1 \cdot Z_1 \cdot V_R^2$;

透射波的能流密度为 $P_T = Z_2 \cdot V_T^2$,

能通量为 $\Phi_T = A_2 \cdot Z_2 \cdot V_T^2$;

因而能通量的反射、透射公式为:

$$\Phi_R = [(Z_1 A_1 - Z_2 A_2) / (Z_1 A_1 + Z_2 A_2)]^2 \Phi_I$$

$$\Phi_T = [4 Z_1 A_1 Z_2 A_2 / (Z_1 A_1 + Z_2 A_2)^2] \Phi_I$$

满足 $\Phi_I = \Phi_R + \Phi_T$

由以上的推导我们可以得到以下结论:

(1) 当桩径及桩体阻抗 Z 发生变化时, 入射的应力波的质点振动速度及能量将发生反射和透射, 反射能量和入射能量之比为

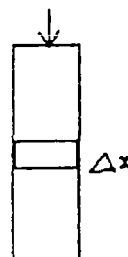


图2 应力波传播示意图

$$\Phi_R / \Phi_I = [(Z_1 A_1 - Z_2 A_2) / (Z_1 A_1 + Z_2 A_2)]^2;$$

$$\text{透射能量和入射能量之比为 } \Phi_T / \Phi_I = 4 Z_1 A_1 Z_2 A_2 / (Z_1 A_1 + Z_2 A_2)^2;$$

(2) 入射波的能通量恒等于反射波和透射波的能通量之和。

2.4 数据模型

为了对质点振动速度和能量在桩体界面上的变化有一直观的了解, 建立了如图3的桩体结构模型, 并根据该模型绘制了四条曲线, 分别是速度反射系数序列、能量反射系数序列、速度透射系数序列和能量透射系数序列。

3 结束语

通过对基桩反射波法检测过程中应力波能量分配理论的探讨, 对假设理想条件下的应力波能量在桩身变阻抗界面上的分配理论有了初步认识, 但在实际工程中基桩并非均质材料, 其本身对应力波的传播有衰减, 桩周土阻力对应力波衰减的影响并且非常大, 所以在探讨假设理想条件下的应力波能量在桩身变阻抗界面上的分配理论的基础上, 必须进一步研究非假设理想条件下的应力波能量分配理论, 才能做到完善和发展基桩反

射波法检测技术.

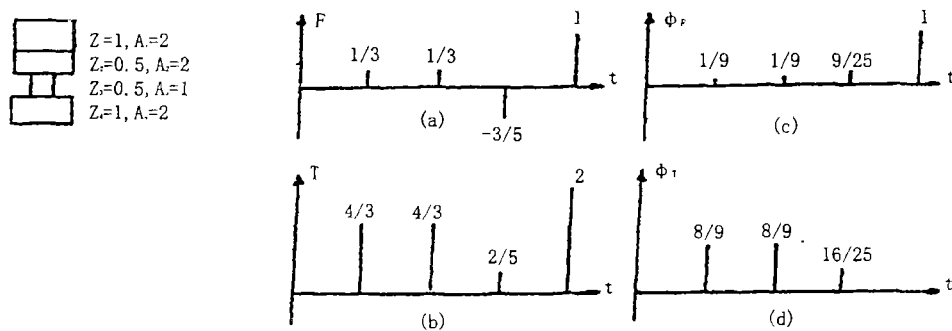


图3 桩体模型及计算曲线

参考文献:

- [1] 桩基动测技术. 国家建筑工程质量检测中心.
- [2] 徐天平编. 低应变动力试桩理论及基本分析方法. 广东省建筑科学研究院, 1995年11月.
- [3] 徐攸在等编. 桩的动测新技术. 中国建筑工业出版社, 1995.