

利用应力波曲线拟合识别桩身缺陷的一种反演方法

张建霖 张灿辉

李命成

(厦门大学 建筑系 厦门 361005)

(厦门市建筑安全质量监督站 厦门 361000)

摘要: 通过建立桩-土系统的力学模型,给出了考虑桩土相互作用的应力波动方程的特征线解法,继而应用优化方法对桩身缺陷进行定量识别,在识别中利用完整桩的土参数反演以及对缺陷桩进行等效波阻抗反演和缺陷认定。数值模拟和工程桩实例表明,本方法对缺陷桩不仅能够较好地识别出来,而且对一次缺陷或二次缺陷的判断具有较高的反演精度。

关键词: 桩基完整性检测 曲线拟合 优化方法

AN INVERSE METHOD OF PILE FAULTS IDENTIFICATION VIA FITTING STRESS WAVE CURVES

Zhang Jianlin Zhang Canhui

(Architecture Department, Xiamen University Xiamen 361005)

Li Mingcheng

(Construction Safety and Quality Supervision Station of Xiamen Xiamen 361000)

Abstract: A mathematic model for pile-soil system is established. The method of characteristic lines to solve the stress wave equations is proposed considering the interactions of pile and soil. The optimization method can be used to quantitatively detect the faults in piles, where the soil parameters inversed from a model with complete pile are used to inverse the equivalent stress wave impedance for others with damaged piles and then identify their corresponding faults. Numerical examples of the simulation for experimental piles and of the detection for engineering piles show that the method gives the quite accurate results, especially for those with primary or secondary faults.

Keywords: integrity detection of pile foundation curve fitting optimization method

目前,用于检测桩基完整性的方法很多,低应变瞬态锤击反射波法自提出以来,因其方便、可靠、经济等优点而在世界各地得到了广泛的应用,并且在实际应用过程中得到了不断的发展和完善,可以对桩身明显的缺陷作出较准确的定性判别。但是,该方法自身还存在许多局限,许多方面还有待于进一步完善。例如不能确定缺陷的性质、缺陷的确切方位,对于存在着多重缺陷的桩,深部出现的缺陷难以确定或容易误判、漏判。在实际工程中,仅仅对缺陷作出定性判别是不够的,有关各方还希望知道桩身缺陷的严重程度,以便采取相应的补救措施,从而满足既安全又经济的目的。因此,对桩完整性检测的定量研究,就成为该领域研究的重点。

本文建立了桩-土系统的力学模型,给出了考虑桩土相互作用的应力波动方程的特征线解法,然后应用优化方法,对完整桩的土参数反演和缺陷桩的等效波阻抗反演进行了理论推导,同时对基桩检

测中可能出现的各种缺陷情况进行了数值模拟和工程实例检测,对一次缺陷或同时存在二次缺陷的判断具有较高的反演精度。

1 桩土波动方程及其特征线求解

桩顶时域响应曲线的特征主要由桩土共同作用的特征决定,在考虑桩周土作用时,参照史密斯法中的流变模型,将试桩过程简化为受冲击细杆,桩周土阻力简化为在桩上分布的线力,桩尖的土阻力作用在桩的底部,分为桩底弹性阻力和阻尼阻力(图1),假设桩波动方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} F \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & AE \\ \frac{1}{\rho A} & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} F \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{R}{\rho A} \end{pmatrix} \quad (1)$$

第一作者:张建霖 男 1965年3月出生 硕士 副教授

收稿日期:2004-06-22

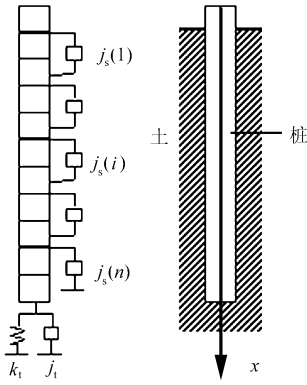


图1 桩-土力学模型

其中, R 为单位长度基桩所受到的侧阻力; A 为桩截面积; ρ 为桩的密度; v 为桩截面速度; E 为桩的弹性模量。式(1)特征线上相容关系的微分方程为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(Zv + F) = -CR, & \text{当 } \frac{dx}{dt} = C \\ \frac{d}{dt}(Zv - F) = -CR, & \text{当 } \frac{dx}{dt} = -C \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Z = \rho AC$ 为波阻抗, $C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 为波速。

在小应变检测中, 可以认为侧摩擦阻力与速度成线性关系, 桩底阻力由弹簧与阻尼共同产生:

其中

$$A = \begin{bmatrix} Z(i-1) + j_s(i-1) \mathcal{H}(i-1) x(i-1)/2 & 1 \\ Z(i) + j_s(i) \mathcal{H}(i) x(i)/2 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} F(i-1, j) - j_s(i-1) \mathcal{H}(i-1) v(i-1, j) x(i-1)/2 + Z(i-1) v(i-1, j) \\ -F(i+1, j-1) - j_s(i) \mathcal{H}(i) v(i+1, j-1) x(i)/2 + Z(i) v(i+1, j-1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $F(i, j)$ 为节点 (i, j) 处的作用力; $v(i, j)$ 为节点 (i, j) 处的速度; $Z(i)$ 为第 i 单元的阻抗; $j_s(i)$ 为第 i 单元的土阻尼系数, $d(i)$ 为第 i 单元的桩直径; $x(i)$ 为第 i 单元的长度。

2 优化方法与参数反演

由式(4)可知, 桩顶速度响应包含了桩身参数和土参数信息。实测波形的变化和桩身的波阻抗变化有关, 而波阻抗与混凝土密度、纵波波速及截面积有关。在实际工程中, 除桩身形状(截面)发生改变外, 往往还存在离析现象, 在离析处混凝土密度和纵波波速发生变化即材料发生变化, 由于桩基属于隐蔽工程, 从波形特征上难以区分出是截面的变化还是密度、波速的变化, 且桩身波阻抗变化有同时包含截面变化和密度、波速变化, 故区分的意义不大, 基于桩体承载力主要受波阻抗的影响, 因此把密度、波速的变化采用截面变化来模拟, 称为等效截面。这样, 桩顶速度曲线所包含的信息可以简化为只包含

利用应力波曲线拟合识别桩身缺陷的一种反演方法——张建霖, 等。

$$\begin{cases} R_s = j_s v \mathcal{H} \\ R_d = j_b v \pi \frac{d^2}{4} + k_b s_b \pi \frac{d^2}{4} \end{cases} \quad (3)$$

其中, d 为截面等效直径, j_s 为桩侧土对桩侧表面的阻尼系数, j_b 及 k_b 为桩底土对桩底表面的阻尼系数与刚度系数, s_b 为桩底位移。

把桩按差分要求分成 n 个单元, 单元长度按等时原则划分(图2), 由离散后的特征线方程可得:

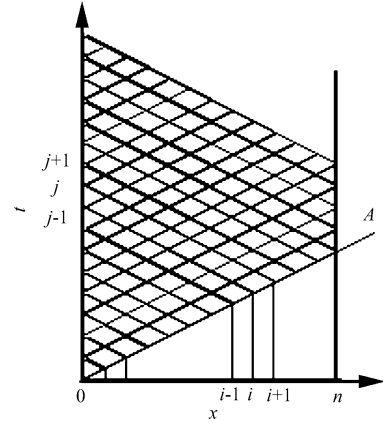


图2 特征线网络

$$\begin{bmatrix} v(i, j) \\ F(i, j) \end{bmatrix} = A^{-1} C \quad (4)$$

土参数和桩阻抗参数, 可以构造目标函数:

$$y = \int_0^T \omega(t) (v_m - v_c)^2 dt \quad (7)$$

式中, v_m 和 v_c 分别为桩顶实测和计算的速度信号; ω 为权函数; T 为考虑的时段。

因而, 求物性常数可以化为求目标函数的极小值:

$$y_{\min} = \min_{x \in D} (y) \quad (8)$$

式中, D 为土的阻尼、刚度系数与桩的阻抗等非负参数组成的定义域。

如果把这些参数全部进行拟合计算, 那么由于可调节的参数太多, 将难以找到最优解, 达不到定量分析的目的, 故需分开确定这些参数。

2.1 土参数的确定

确定土阻尼参数是考虑土体作用下应力波在桩中传播的关键, 只有在土参数确定之后才可能实现对桩基检测的定量分析。假定桩阻抗不发生变化, 则式(8)中的 D 只是土参数的定义域, 在同一片试

桩区域, 桩基础所穿过的土层基本相同, 因此通过完整桩试验的反分析就可以确定。由于桩穿过的土层不会太多, 通常就只有几层, 因此利用一般的优化方法便可, 本文采用改进的 Powell 法, 即 Sargent 方法。Sargent 方法是一种改进的共轭方向法, 这种方法不需要目标函数的导数, 在目标函数一阶导数不连续的情况下, 也可以得到较好的结果。

根据上述方法即可求出桩周土阻尼系数、桩底土阻尼系数和刚度系数, 为了加快迭代保证其收敛到满意结果, 初值的选取非常重要, 建议初值按下式计算:

$$\begin{aligned} j_s(i) &= \rho(i) c(i) \\ j_i &= \rho c_i \\ k_i &= 2DG/(1-\mu) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $j_s(i)$ 为第 i 层土对桩侧表面的阻尼系数 (Ns/m^3); j_i 为桩底土对桩端面的阻尼系数; $c(i)$ 、 c_i 分别为第 i 层土剪切波波速与桩底土的纵波波速 (m/s); G 、 μ 分别为桩底土的层的剪切模量 (N/m^2) 和泊松比。

2.2 桩阻抗的确定

通过完整桩试验确定土参数之后, 就可以对有缺陷的桩进行定量分析。在实际工作中, 对桩身缺陷的判断, 只要能够识别其主要的缺陷, 对于那些桩身阻抗没有发生变化或变化很小的部分, 在拟合过程中没有必要参与计算, 故本文采用局部优化方法来实现。局部优化方法首先以桩单元为自变量对式 (8) 进行一维搜索, 确定使目标函数达到极小值的桩单元位置, 然后在此单元附近以桩缺陷开始单元、结束单元和缺陷单元的平均阻抗为自变量, 应用 Sargent 方法即可得到桩身缺陷参数。对于多缺陷, 将已优化出来的结果作为已知值, 重复上面的步骤

可求得桩身多缺陷参数。可见, 利用局部优化方法能将求 n 个参数的 n 维优化问题减少到 3 维, 从而可以大大减少优化计算量, 实现实时处理。

3 数值模拟及工程实例

3.1 数值模拟

在数值模拟中, 先构造各种缺陷情况不同的理论模型桩, 假定冲击激励、桩身参数和土参数, 利用特征线方法求出该模型的桩头响应, 然后将该响应作为原始数据利用拟合法进行反演计算。在以下的数值模拟算例中, 取 $C = 3900\text{m/s}$, $A = 0.04\text{m}^2$, 桩身离散单元数 $n = 84$ 。

以完整桩作土参数拟合, 拟合曲线见图 3, 实线为理论曲线, 虚线为拟合曲线, 拟合结果见表 1。同样对缩颈、扩颈、扩底、扩颈-缩颈、缩颈-断桩和缩颈-扩底桩进行数值模拟, 基本参数设置与上面相同, 拟合结果见表 2。图 4 及图 5 分别为缩颈、缩颈-断桩的数值模拟曲线。

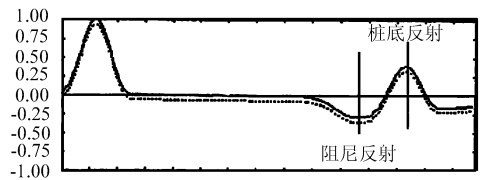


图 3 完整桩拟合曲线

表 1 完整桩土参数反演结果

项目	桩侧阻尼 ($\times 10^4$) / ($\text{Ns} \cdot \text{m}^{-3}$)				桩底阻尼 ($\times 10^6$) / ($\text{Ns} \cdot \text{m}^{-3}$)	桩底刚度 ($\times 10^6$) / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
	1~ 27 单元	28~ 44 单元	45~ 64 单元	65~ 84 单元		
实际	0.000	2.000	5.000	8.800	4.000	8.000
拟合	0.000	2.009	5.025	8.804	3.845	7.654
误差/%	0.00	0.45	0.50	0.05	-3.88	-4.33

表 2 反演结果与真值比较

名称	缺陷 1 位置	缺陷 1 截面			缺陷 2 位置	缺陷 2 截面		
		实际	反演	误差/%		实际	反演	误差/%
缩颈	30~ 36 单元	0.02	0.020 3	1.5				
扩颈	50~ 54 单元	0.06	0.060 6	2				
扩底	68~ 84 单元	0.08	0.081 2	3.1				
扩-缩颈	27~ 29 单元	0.08	0.081 3	1.67	56~ 58 单元	0.03	0.030 91	-3.1
缩-断	28~ 30 单元	0.03	0.029 8	0.67	44 单元	0.01	0.009 97	3
缩-扩底	35~ 36 单元	0.02	0.020 4	2	75~ 84 单元	0.08	0.083 2	4

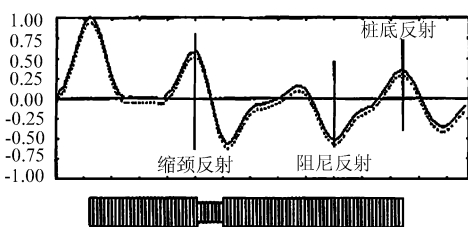


图 4 缩颈桩拟合波形及桩形

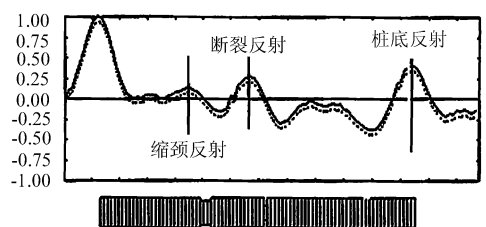


图 5 缩颈-断桩拟合波形及桩形

从图3可以看出,小阻尼对桩的影响较小,但当土阻尼比较大时,对桩顶实测曲线的影响非常大,相当于扩颈反应,因此,在小应变反射法中,必须充分考虑是桩身问题还是土层变化所引起的波形变化,以免造成误判,同时还可以看出阻尼影响到桩底反射波的大小。

从图5的多缺陷桩的拟合图可以看出,第二个缺陷没有明显的反射波,靠人工观察曲线难以正确识别该缺陷的存在,但通过计算机拟合,可以得到较好的结果。

3.2 室外试桩

室外试桩包括五根足尺试桩,各桩的桩身长5000mm,截面积为200mm×200mm,桩周为砂土。图6是对完整桩(1号)进行拟合的计算,由于这一

根桩所穿过的土层只有砂土,因此,拟合过程比较简单可靠,拟合得到的土参数为砂土阻尼系数: $2.009 \times 10^5 \text{Ns/m}^3$, 桩底土阻尼和刚度系数分别: $4.038 \times 10^5 \text{Ns/m}^3$, $1.924 \times 10^7 \text{N/m}$ 。根据完整桩(1号)反演出来的土参数对2~5号桩进行了波形拟合与定量分析,拟合结果见表3。图7和图8分别为3号桩和5号桩拟合结果及桩形。

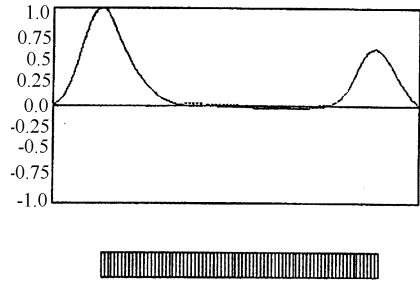


图6 工程完整桩拟合结果及桩形

表3 拟合结果与实际情况对照

缺陷位置			等效截面积			缺陷情况
实际	拟合	误差/%	实际	拟合	误差/%	
3.5~3.6	3.486~3.602	2.34	0.02	0.0188	6	3.5m 一面缩进宽100mm 高100mm
3.5~3.6	3.5~3.65	7.53	0.02	0.0176	13	3.5m 用150号砂浆做成200mm高的离析
3.5	3.468	2.05	/	0.0065	-	3.5m 处断桩
3.5~3.6	3.486~3.602	1.024	0.02	0.1381	15.09	3.5m 处三面凸出100mm 高100mm 的扩颈

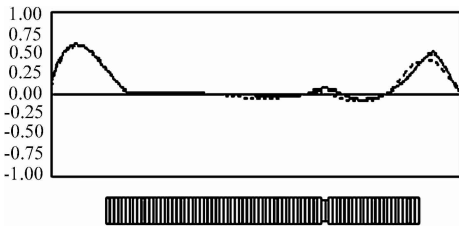


图7 离析桩(3号)拟合结果及桩形

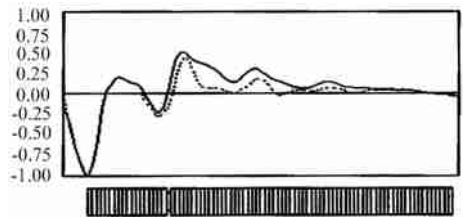


图9 工程断桩拟合结果及桩形

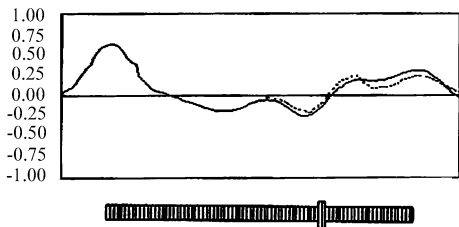


图8 扩颈桩(5号)拟合结果及桩形

3.3 工程实例

图9为某工程钻孔灌注桩拟合图及识别结果,该桩长37m,桩径为2.0m,以亚粘土为持力层。拟合时桩身分85个单元,每个单元长度为0.4353m。拟合结果表明,该桩在18个单元处其等效截面突然变小,即在7.8354m处截面积由3.142m²突然变小为1.3676m²,判断为在7.8m处断桩。根据施工记录,该桩在7.5m处施工出现问题,二次灌注,造成断桩。由此可以看出,拟合结果与实际情况大体一致。

图10为另外一钻孔灌注桩拟合图及识别结果,该桩长17m,桩径为1.2m,持力层为粘土。拟合时把桩身分78个单元,每个单元长度为0.219m。拟合结果表明,该桩在23~26个单元处等效截面变小,其值变为1.028m²,缺陷长度为0.8716m,判断为该桩在5.087m处缩颈,缩颈长度为0.8716m。其实际施工情况是,灌注离桩顶5m左右混凝土塌陷下去1m左右,为混凝土坍孔。可见拟合结果与实际情况基本相同。

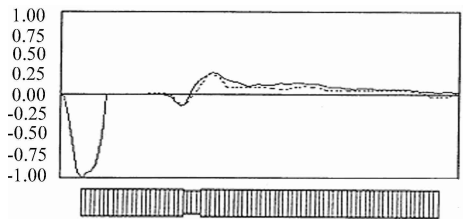


图10 工程缩颈桩拟合结果及桩形

(下转第53页)

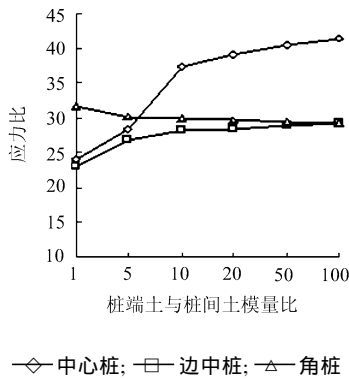


图 16 荷载 150kPa 时, 应力比- $E_{\text{桩端土}}/E_{\text{桩间土}}$

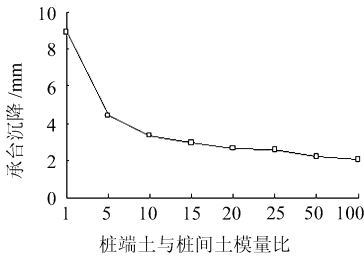


图 17 桩间土 4m, 桩端土 4m 时, 沉降- $E_{\text{桩端土}}/E_{\text{桩间土}}$

3 结论

1) 各桩桩顶反力分布一般呈角桩大、边中桩次之、中心桩最小的“倒盆底”形分布, 且桩顶反力差异随褥垫层厚度增大而减小, 随垫层模量、 E_p/E_s 、 L/d 、 $E_{\text{桩端土}}/E_{\text{桩间土}}$ 增大而增大。

2) 群桩复合地基沉降随垫层厚度、 s/d 、荷载 p 的增大而增大, 随垫层模量、 E_p/E_s 、 L/d 、 $E_{\text{桩端土}}/E_{\text{桩间土}}$ 的增大而减小。

3) 复合地基在工程中的应用越来越广泛, 目前对上部结构-基础-地基共同作用理解的差异, 使复合地基上箱基、筏基的设计无论在理论上还是实践上存在一些混乱现象。随着高层建筑越来越高, 桩越来越长, 基础底板越来越厚, 使基础造价增大,

因此, 应力求经济、安全、合理的复合地基设计方法。

4) 垫层可有效降低架越作用, 使基础弯矩减小, 改善基础的受力状况。对筏基等基础形式, 设计时要考虑桩体对筏板的冲切作用, 通常是角桩。按角桩设计的筏板厚度, 对中心桩、边桩则过大; 而垫层的设置(一般取 100~300mm 左右), 使复合地基各桩桩顶应力更均匀, 设计出的基础厚度更经济、合理。

5) 增大垫层模量、 L/d 、 $E_{\text{桩端土}}/E_{\text{桩间土}}$, 减小可复合地基的变形。但当垫层模量达到 100MPa 时, 基础沉降减小的幅度很小。

6) 当桩长增大到一定程度后, 减沉效果不明显, 说明存在有效桩长 L_e 。当 $L \leq L_e$, 随着桩长加大, 基础沉降减小显著; 但当 $L > L_e$ 时, 增大桩长减小基础的沉降就不经济了。

7) 当桩体模量为一定值时, 随着 E_p/E_s 的增大, 说明土越软, 基础沉降就越大; 但当土体模量为一定值时, 增大桩体模量, 则可减小基础的沉降。但当桩体模量很大时, 基础的沉降几乎不减小。

8) 当桩端土模量增大时, 可使基础沉降减小, 因而, 复合地基桩端可落在相对较好的土层或岩层上面, 这样, 可减少基础的沉降。

参考文献

- 1 阎明礼. 地基处理技术. 北京: 中国环境科学出版社, 1996
- 2 金振奋, 等. 群桩地基中应力及变形规律数值分析. 工业建筑, 2001, 31(10): 37~42
- 3 陈晓平, 邢仲星. 复合地基中桩土应力比数值分析. 工业建筑, 2001, 31(10): 5~8
- 4 阎雪峰. 复合地基设计和沉降计算若干问题: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 1996
- 5 王瑞芳. CFG 桩与筏板基础在某综合楼中的应用. 建筑教育改革理论与实践, 2002(6)

(上接第 57 页)

4 结论

1) 应用特征线方法解波动方程是一种较好的选择, 能很好地看出应力波在桩中的传播情况, 应力波的反射与透射在特征线网格中一目了然;

2) 土阻尼对应力波在桩中的衰减作用, 桩越长消弱作用越强, 只有全面、准确地确定了土阻力的影响, 才能对桩的质量作出正确的判断; 应用优化方法对完整桩反演能够较好地确定土参数;

3) 利用优化方法与计算机技术能够实现桩基

检测定量分析自动化, 减少了人为因素的干扰和误差;

4) 从数值算例和实际工程实例结果来看, 本方法对缺陷桩能够较好地识别出来, 对一次缺陷或二次缺陷的判断具有较高的反演精度。

参考文献

- 1 徐攸在. 桩的动测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- 2 刘利民, 苏翔, 熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践. 北京: 中国建材工业出版社, 2002
- 3 罗骥先. 桩基工程检测手册. 北京: 人民交通出版社, 2002
- 4 陈宝林. 最优化理论与算法. 北京: 清华大学出版社, 1989