

# 桩土体系相互作用的计算机仿真分析

潘冬子<sup>1</sup>, 李 颖<sup>2</sup>, 黄正华<sup>3</sup>

(1. 浙江大学建工学院, 江苏 杭州 310027; 2. 武汉大学土建学院, 湖北 武汉 430072;  
3. 江苏省电力建设第一工程公司, 江苏 南京 210028)

**摘要:**以一维应力波理论为基础,应用桩土体系相互作用的数值模拟方法,得到了反映桩中应力波的传播过程及反射特性的桩身各点振动速度空间曲面;模拟分析了各类桩身缺陷对桩的振动特性的影响,并将理论曲线与实测曲线进行拟合对比。结果表明:两者基本一致。

**关键词:**桩土相互作用;计算机仿真;完整性;混凝土桩

中图分类号:P473 文献标识码:A

## 1 引言

桩的纵向振动理论是桩各种动态测试方法的理论基础。开展桩纵向振动理论的研究对于进一步弄清桩土相互作用的机理,以及分析基桩动测曲线是非常重要的。本文将混凝土桩模拟为土介质中的粘弹性纵向振动杆件,以一维应力波理论为基础进行桩土体系相互作用的计算机仿真分析,对脉冲荷载作用下应力波在缺陷桩体中的传播过程及反射特性进行了研究,对提高动测结果的准确性有所裨益。

## 2 计算模型

### 2.1 桩土系统模型及基本假定

将桩身和地基系统分成等分的一系列小单元,建立桩身在瞬态纵向激振力作用下的动力有限元分析模型,如图1所示。

本文的数值计算模型采用以下的基本假定:

a. 桩为有限长,在有限单元内的等截面均质杆,杆的材料为粘弹性材料并为Voigt体<sup>[1]</sup>,弹模、密度分别为,其粘性常数为  $E$ 、 $\rho$ ,粘性常数为  $c_i$ 。

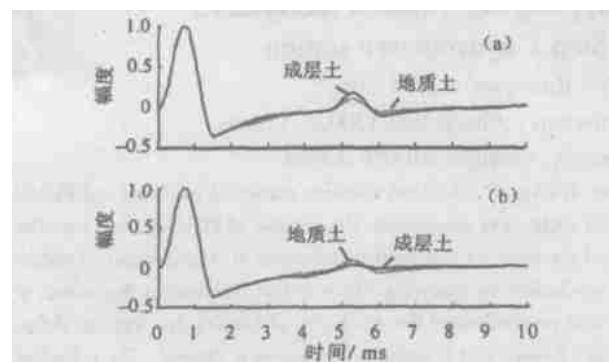


图1 桩土模拟

收稿日期:2003-09-03

作者简介:潘冬子(1978—),男,湖北松滋人,浙江大学土木工程系博士研究生,主要从事基础工程方面的研究。

b. 桩侧土在有限单元内均质,桩侧土对桩的作用用一个线性弹簧和线性阻尼器以平行的方式耦合,其分布式弹簧系数为  $k_{si}$ ,阻尼系数为  $c_{si}$ 。

c. 桩底土对桩的作用简化为线性弹簧  $k_{sb}$  和线性阻尼  $c_{sb}$  来耦合的方式。

d. 激振力沿桩轴线方向,且均布于桩顶。

e. 桩土体系的振动为小变形。

### 2.2 桩土相互作用方程

图1所示的桩土模型属于多自由度系统的强迫振动问题,其振动方程如下表示:

$$\begin{cases} \mathbf{M} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{P} \\ \mathbf{X}_{(0)} = 0, \mathbf{X}_{(0)} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{M}$  是桩身单元质量  $m_i$  组成的质量矩阵;  $\mathbf{X}$  是位移矩阵,  $\mathbf{X}$  是速度矩阵,  $\mathbf{X}$  是加速度矩阵;  $\mathbf{C}$  是桩土体系的阻尼矩阵;  $\mathbf{K}$  是桩土体系的弹簧矩阵;  $\mathbf{P}$  是激振力的列向量矩阵。

$\mathbf{M}, \mathbf{K}, \mathbf{C}, \mathbf{P}$  矩阵的构造:

a. 将各桩身单元视为一集中质点,其质量  $m_i$  及对应的桩身弹簧刚度  $k_i$  由下式计算:

$$\begin{cases} m_i = A \cdot \Delta L \cdot \gamma \\ k_i = E \cdot A / \Delta L \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

式中  $A$  为桩截面积;  $\gamma$  为桩身混凝土容重;  $E$  为桩身材料的杨氏弹性模量;  $\Delta L$  为单元长度。

b. 桩身混凝土材料的阻尼  $c_i$  由经验决定,一般取为 100 MPa·s 左右<sup>[2]</sup>。

c. 桩侧土及桩底土的动力参数如表1所示。

d. 锤击桩顶的瞬态纵向激振力  $p(t)$  采用升余弦脉冲来模拟<sup>[4]</sup>:

表 1 土的动力参数<sup>[3]</sup>

	弹簧刚度 $k_s$	阻尼系数 $c_s$
桩侧土阻尼	$2.75 G_{si}$	$2\pi r_0 \sqrt{\rho_{si} G_{si}}$
桩底土阻尼	$4 G_b r_0 / (1 - v_b)$	$3.4 r_0^2 \sqrt{\rho_b G_b}$

注: 表中  $G_{si}$ ,  $\rho_{si}$ ,  $G_b$ ,  $\rho_b$  分别为桩周土和桩底土的剪切模量和质量密度;  $r_0$  为桩的半径;  $v_b$  桩底土的泊松比。

$$p(t) = \begin{cases} \frac{I}{T} \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right) & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0 & |t| > \frac{T}{2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $I$ 、 $T$  分别为激振力的初始冲量和作用时间。

### 2.3 求解振动方程

结构动力学中求解此类动力平衡方程的方法很多。从稳定性和求解精度方面来考虑, 本文采用 Newmark 算法 ( $\delta=0.5$ ,  $\alpha=0.25$ )。数值模拟结果表明, 该方法稳定性好, 计算精度满足要求。

## 3 数值计算结果的分析

为了研究应力波传播过程中桩身各质点的速度随时间的变化规律, 通过上述数值模型得到了桩身质点纵向振动速度时程空间曲面, 该曲面全面的反映了桩身各质点的运动状态, 以便于研究应力波在桩体中的传播过程及反射特性。

### 3.1 完整桩

完整桩桩身质点纵向振动速度时程空间曲面如图 2 所示, 本文仅以摩擦桩为例。对应桩身质点振速曲面图, 可对应力波在完整桩中的传播特性作出如下解释: 桩顶受锤击之后向下传播一个压缩应力波, 如图中呈线状隆起部分, 由于地基土的阻尼作用使该压缩波的能量耗散越来越大, 其对应的速度值逐渐降低。对于摩擦桩而言, 桩底的持力层较弱, 在到达桩底附近时应力波速加快, 峰值又有所提高; 第二个次级线性隆起是桩底的反射波, 该反射波为一从桩底向桩顶传播的拉伸波, 同样由于能量的耗散, 桩底反射向上逐渐减弱, 当桩底反射波到达自由端的桩顶, 运动加快, 致使峰值增加, 然后又形成向下传播的压缩波, 它的幅度更小, 该波传播到桩底再次反射变成上行的拉伸波。

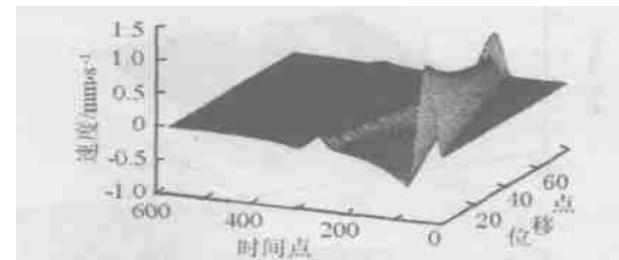


图 2 完整桩桩身质点振动速度时程空间曲面

表 2 桩身完整性设计

桩号	桩长 /m	桩径 /m	桩身结构完整性	
			缺陷性质	缺陷位置
a	8	0.35	缩颈	2.0~2.2 m
b	8	0.35	扩颈	2.0~2.2 m
c	8	0.35	断桩	6.0 m 处
d	8	0.35	缩颈 扩颈	2.0~2.2 m 6.0~6.2 m

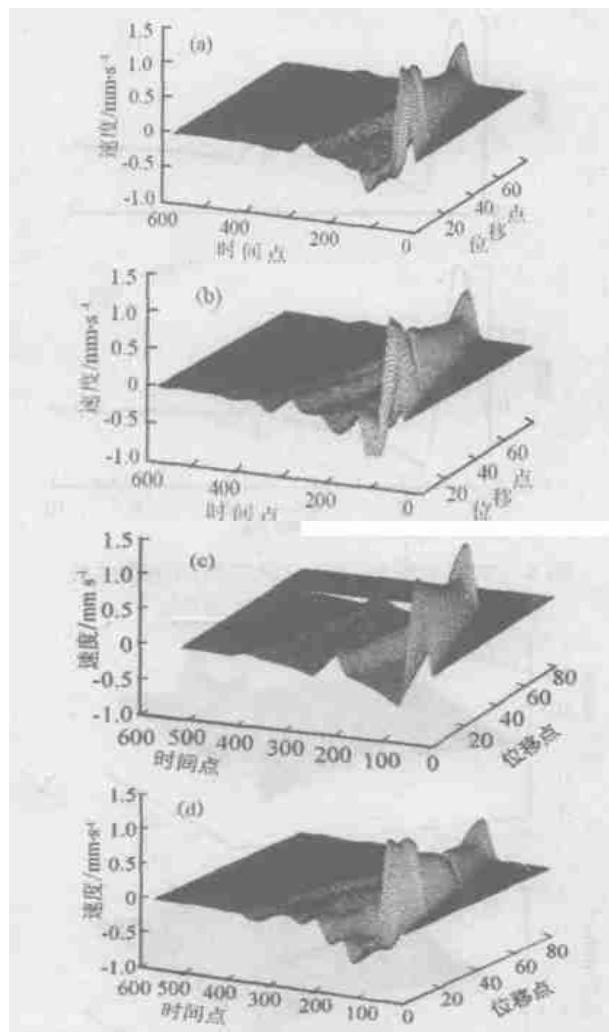


图 3 典型缺陷桩桩身质点振动速度空间曲面

a—缩颈; b—扩颈; c—断桩; d—多重缺陷

### 3.2 缺陷桩

典型缺陷桩桩身质点纵向振动速度时程空间曲面如图 3 所示, 图中所有的算例均为摩擦桩; 对其传播特性的解释与完整桩类似, 所不同的是由于缺陷的存在所引起的应力波速度和相位的改变, 图中各桩的缺陷的设置如表 2 所示。

根据应力波理论, 桩顶受锤击后向下传播的是一个压缩应力波。当桩在某一截面阻抗值减小时, 压缩波在此将反射回一个拉伸波, 该拉伸波到达桩顶时将产生和锤击入射波同相的速度波信号; 当桩

表 3 成层土参数

地基	土类	湿密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	剪切波速 $V/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	深度 $h/\text{m}$
I	上层土	稍密粘土	1835	138
	下层土	淤泥质粘土	1695	100
II	上层土	稍密粘土	1835	138
	下层土	密实中细砂	2100	220

注:剪切模量  $G = \rho V^2$ , 图 4 中均质土的计算参数按成层土的上层土参数确定。

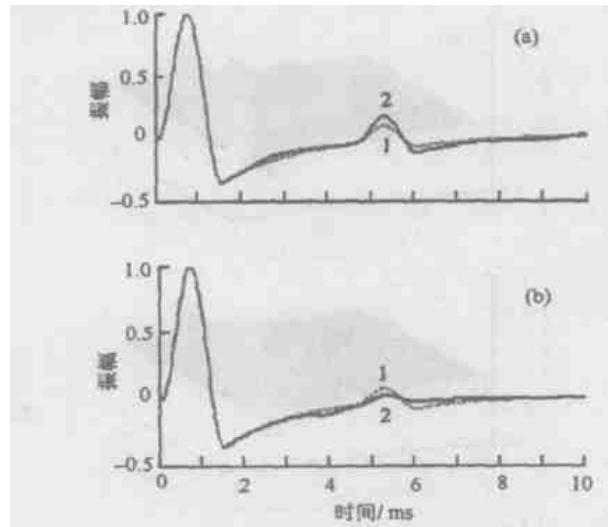


图 4 成层土中桩顶质点纵向振动速度曲线  
1—拟合曲线; 2—实测曲线

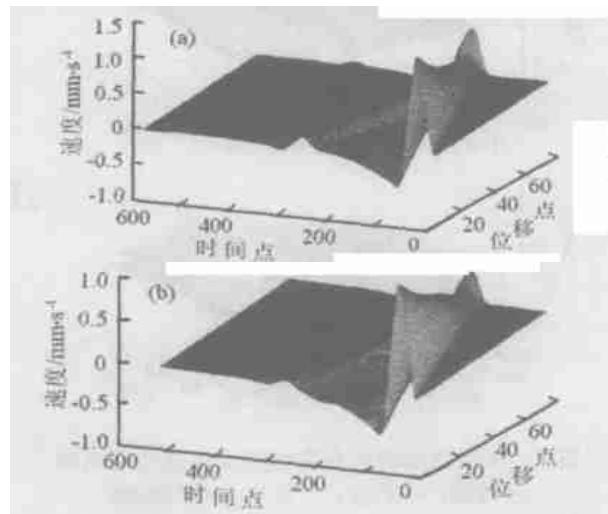


图 5 成层土中完整桩桩身质点振动速度空间曲面

a—地基 I; b—地基 II

在某一截面阻抗值增大时,压缩波在此将反射回一个压缩的反射波,当传到桩顶时将产生和锤击入射波反相的速度波信号。同时,根据缺陷桩桩身质点纵向振动速度时程空间曲面,可以发现应力波在缺陷桩中的传播具有如下特征:缺陷处波阻抗变小时,如缩颈、软弱夹层,反射一个上行的拉伸波,且波速增大;缺陷处波阻抗增大时,如扩颈,反射一个上行的压缩波,且波速减小;缺陷的程度越大,反射波的

能量越大,透射波的能量越小,反之亦然,这与应力波理论的描述是一致的。

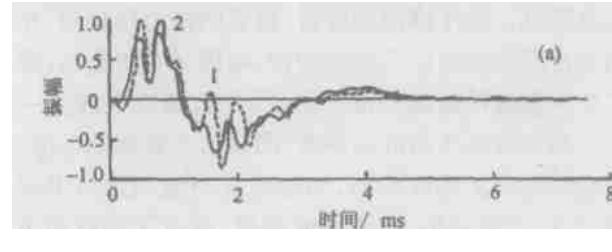
### 3.3 成层土

在桩基低应变检测过程,有时会遇到地基土成层的情况,下面通过算例来考察土层变化对桩顶质点纵向振动速度时程曲线的影响,两种地基的土层参数如表 3 所示。

图 4 是成层土中桩顶质点纵向速度时程曲线,其中图 4(a)代表地基 I,表示应力波从土刚度大的土层进入土刚度小的土层,反射波的初始脉冲值上移,桩底反射同时增大;图 4(b)代表地基 II,表示应力波从土刚度小的土层进入土刚度大的土层,应力波在土中的透射随着土刚度的增大而增大,其曲线在界面处呈现与入射波反向的特征,桩底反射的幅值有所降低。两种情况下桩身质点纵向振动速度时程空间曲面如图 5 所示。

### 4 实验研究

为了验证计算模型的合理性及分析结果的正确性,将郑州某基地模型桩的实测曲线与数值模拟曲线进行了比较。1—1—1 号桩为洛阳铲人工挖孔灌注桩,桩长 12 m,桩径 400 mm,6 m 处断裂,桩头附近设置有一条斜裂缝,位于 1.1~1.3 m 处,混凝土标号,桩侧土为粉土;桩内弹性波速  $C = 3400 \text{ m/s}$ ,桩侧土的剪切波速  $V = 140 \text{ m/s}$ 。图 6 是 1—1—1 号桩的实测与拟合曲线及谱图。由图 6(a)可见,由数值模拟计算得到的拟合曲线与实测曲线比较一致;图 6(b)是模拟的桩身质点纵向振动速度时程空间曲面,它较好反映了桩中应力波的传播特性。



1—拟合曲线; 2—实测曲线

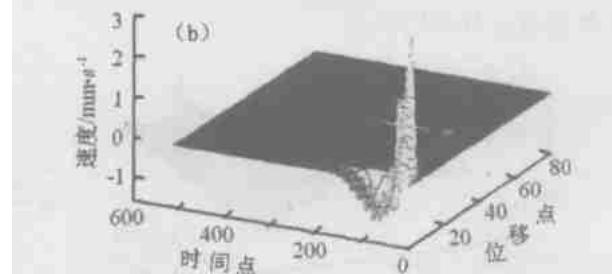


图 6 1—1—1 号桩实测与拟合曲线

a—实测曲线与拟合曲线的对比;  
b—桩身质点振动速度空间曲面

## 断层显微分辨率及其地震解释方法

赵士华<sup>1</sup>, 胡朝元<sup>2</sup>, 程增庆<sup>3</sup>

(1. 东北大学, 辽宁 沈阳 110101; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083;

3. 中国煤炭地质总局物探研究院, 河北涿州 072750)

**摘要:** 探讨了地震资料断层解释技术, 提出了断层可视分辨率和显微分辨率的新概念, 这有助于统一地质、物探和采矿专家的意见。文中指出: 在现有分辨率的地震资料基础上, 经过解释处理及显示新技术, 可以解释部分 2~5 m 断距的断层。

**关键词:** 地震解释; 断层; 显微分辨率; 方差体

中图分类号: P631.4<sup>+</sup> 43 文献标识码: A

### 1 引言

采区地震勘探为煤矿采区设计及安全生产做出了重大贡献, 断层的解释精度逐步提高, 其中, 二维地震勘探可以查明(垂直断距) 10 m 以上的断层, 三维地震可以查明 5 m 以上的断层。5 m 以下断层反映不太清楚, 肉眼难以辨别, 而用新的解释技术却可以解释出在剖面上肉眼分辨不出断距的小断层。对于这些小断层, 矿方地质专家甚至部分物探人员也

常认为, 在地震时间剖面上划出这些断层“证据不足”, 但是经井下巷道验证, 又确实存在, 为此, 本文提出断层显微分辨率并探讨其解释方法, 以便使地质、物探和采矿专家认识地震地质成果的精确度及局限性。

### 2 断层显微分辨率

地震分辨率通常指垂直分辨率、水平分辨率以及振幅分辨率, 这些分辨率的提高有助于在地震剖

收稿日期: 2003-08-08

作者简介: 赵士华(1965—), 男, 辽宁铁岭人, 高级工程师, 东北大学博士研究生, 从事资源环境和信息技术工作.

### 5 结语

a. 得到的桩身质点纵向振动速度时程的空间曲面全面显示了桩身各质点的运动状态, 逼真而又形象的反映桩中应力波的传播过程及反射特性, 能指导桩基动测人员如何获取真正反映桩纵向振动特征的信号, 并对其作出正确的解释。

b. 在桩基低应变检测过程中, 应适当考虑地基土的成层性, 并注意成层土影响结果与桩身缺陷的区别。一般来说, 应力波向土中的透射随着土刚度的减少而减少, 而在界面处产生子波同向迭加, 具有缩颈特征; 反之, 土刚度增大时, 在土层界面处产

生子波反向削弱, 具有扩颈特征。

c. 理论曲线与模型桩动测曲线的反演拟合分析表明, 采用本文模型的理论分析结果能较好的反映实际桩土瞬态纵向动力作用特征; 激振力函数、桩周土等效参数对桩纵向振动特征的模拟是有效的, 对提高动测结果的准确性有所裨益。

### 参考文献

- [1] 王奎华. 桩材料阻尼对动测曲线的影响研究[J]. 岩土力学, 1998, 19(4): 57—62.
- [2] 王雪峰, 吴世明. 材料阻尼对基桩动测曲线的影响[A]. 环境岩土工程理论与实践[C], 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [3] Novak M, Nogami T, Aboul-Ella F. Dynamic soil reactions for plane strain case[J]. J. E. M. D., ASCE, 1978, 104(4): 953—959.
- [4] 王雪峰, 吴世明. 基桩动测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

### Analysis of pile-soil interaction by computer simulation

PAN Dong-zhi<sup>1</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, HUANG Zheng-hua<sup>3</sup>

- (1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
- 2. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
- 3. The First Power Construction Company of Jiangsu Province, Nanjing 210028, China)

**Abstract:** In this paper, a method of numerical simulation to study interaction of pile-soil based on the one-dimension stress wave theory is applied. The propagating process and reflection characteristics of stress wave under impulsive load in concrete piles are studied. The influence of pile defects to the oscillating properties is also simulated. The validity of this approach is verified through comparison of the measured curve and the simulated curve.

**Key words:** pile-soil interaction; computer simulation; integrity; concrete pile