

# 基桩低应变动测的数值模拟及其在质量诊断中的应用

张灿辉<sup>1\*</sup>, 杨少强<sup>1</sup>, 张建霖<sup>1</sup>, 肖能标<sup>2</sup>

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门市宏业工程建设技术有限公司, 福建 厦门 361004)

**摘要:** 采用三维动力有限元方法进行各种缺陷基桩低应变动测的数值模拟, 包括不考虑桩周土的模型桩和考虑桩周土的工程桩, 分析中桩周土阻尼主要由局部单元的结构阻尼系数来实现. 并且采用所模拟的基桩动测结果形成丰富和可靠的参考样本, 进行基桩完整性的神经网络诊断. 数值算例中, 首先模拟了简单完整桩以及典型模型桩和工程桩, 然后完成了各种缺陷类型的 150 余根模型桩和工程桩的数值模拟, 并以此作为参考样本对模型桩和工程桩的完整性进行预测和诊断, 结果验证了诊断方法的有效性.

**关键词:** 数值模拟; 有限元方法; 基桩; 动力检测; 质量诊断

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2010)06-0826-06

桩基础是一种常见的基础形式, 但因埋置于地下而不易准确评判其质量, 为此基桩质量诊断一直是土木工程界十分关注的课题<sup>[1-2]</sup>. 在基桩质量检测与诊断中低应变法以其经济、快捷和无损等优点已成为目前我国工程界基桩检测中最有效的方法, 得到了一定发展<sup>[3-4]</sup>, 但也存在一定的局限性, 数值模拟及其反演方法可以更好地描述低应变动测的响应及其桩身变化情况<sup>[5-6]</sup>, 人工神经网络近年来也在桩基检测中得到了成功的尝试<sup>[7-12]</sup>. 在神经网络训练中需要提供大量的学习样本, 如果利用模型桩的动测采集所得到动测数据, 虽然桩身完整性参数较为可靠, 但成本十分昂贵(混凝土桩每根大约 1 万元). 而如果采用现场工程桩数据, 虽然目前我国各地区每年都要进行大量的桩基检测, 但是大部分现场工程桩由人工判桩, 难以提供可靠的桩身完整性参数. 为此, 高精度的数值模拟成为不可缺少的手段<sup>[13-14]</sup>, 不仅可以获得可靠的动测数据和完整性参数, 而且可以对各种缺陷类型的不同缺陷深度和不同缺陷程度的基桩模型进行大量的分析计算和数值模拟.

本文采用结构动力有限元分析方法对基桩动力检测进行数值模拟, 并以此作为神经网络的丰富和可靠样本素材进行桩身质量诊断.

## 1 基桩动测的数值模拟及其在质量诊断中的应用

### 1.1 动力响应的有限元方法

本文采用有限元方法对基桩动测进行数值模拟. 三维动力学基本方程中的平衡方程包含了惯性力和阻尼力, 由于载荷是时间的函数, 因此位移、应变、应力也是时间的函数, 在有限元分析中一般采用部分离散的方法, 即只对空间域进行离散, 系统的求解方程即运动方程为

$$M\ddot{d}(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) = Q(t). \quad (1)$$

其中,  $\ddot{d}(t)$ ,  $\dot{d}(t)$  和  $d(t)$  分别是系统的节点加速度向量、节点速度向量和节点位移向量,  $M$ 、 $C$ 、 $K$  和  $Q(t)$  分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和结点载荷向量, 分别由各自的单元矩阵和向量集成.

动力系统的阻尼一般包括粘性阻尼和结构阻尼两种类型, 其中, 粘性阻尼和速度成正比, 它是假定阻尼力正比于质点运动速度的结果, 介质阻尼通常均简化为这种情况, 这时单元阻尼矩阵比例于单元质量矩阵; 而由材料内摩擦引起阻尼属于结构阻尼, 结构阻尼与应变率成正比, 对于基桩低应变动测的动力分析, 与桩周土粘性有关的结构阻尼是主要的阻尼形式. 由于瞬态分析不允许出现复系数, 所以结构阻尼通过等效的粘性阻尼来施加, 对于常幅值正弦位移响应粘性阻尼力与外载频率成正比而结构阻尼力为常数(如图 1 所示), 此时在  $\omega = \omega_0$  或  $\omega = \omega_1$  处粘性阻尼与结构阻尼等

收稿日期: 2010-03-01

基金项目: 福建省科技项目(2007F3096)

\* 通讯作者: [zhzhang@xmu.edu.cn](mailto:zhzhang@xmu.edu.cn)

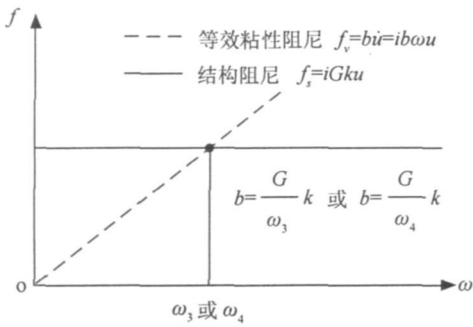


图 1 常幅值正弦位移下结构阻尼力与粘性阻尼力

Fig. 1 Damping force of structure and viscosity under displacement of constant amplitude

效, 等效阻尼系数为  $b = Gk/\omega_3$  或  $b = Gk/\omega_4$ , 其中,  $\omega_3, \omega_4$  分别为感兴趣的结构频率和单元频率. 但在一般情况下比例系数是依赖于频率的, 因此实际分析中要精确地决定阻尼矩阵是相当困难的. 在动力有限元分析中采用以下方法确定阻尼矩阵

$$C = \frac{1}{\omega_3} G K + \frac{1}{\omega_4} \sum G^e K^e \quad (2)$$

其中,  $G, G^e$  分别为整体结构的结构阻尼系数和局部单元的结构阻尼系数,  $\omega_3$  或  $\omega_4$  的选取为阻尼激活处的重要频率,  $\omega_3 = 0$  或  $\omega_4 = 0$  将使分析中忽略与此相关的阻尼项. 在低应变基桩动测中应力波沿着轴线传播, 当应力波没有到达之前并不引起介质的振动, 因此瞬态分析中需要采用局部单元的结构阻尼系数即  $\omega_4 \neq 0$  而  $\omega_3 = 0$ .

式(1)原则上可利用 Runge-Kutta 等常用方法求解, 但是在有限元动力分析中因为矩阵阶数很高, 一般是不经济的, 所以通常采用直接积分法求解. 在本文的基桩动测直接瞬态响应分析中, 采用直接数值积分方法求解耦合方程来计算结构响应, 积分计算中用固定时间步长  $\Delta t$ , 通过中心差分法计算离散点处的速度  $\dot{d}_n$  及加速度  $\ddot{d}_n$ :

$$\dot{d}_n = \frac{1}{2\Delta t} (d_{n+1} - d_{n-1}), \quad (3)$$

$$\ddot{d}_n = \frac{1}{2\Delta t^2} (d_{n+1} - 2d_n + d_{n-1}). \quad (4)$$

外力取 3 个邻近时间点的平均值, 得到运动方程如下:

$$A^1 \dot{d}_{n+1} = A^2 + A^3 \dot{d}_n + A^4 \dot{d}_{n-1}, \quad (5)$$

其中

$$A^1 = \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t} + \frac{K}{3},$$

$$A^2 = \frac{1}{3} (Q_{n+1} + Q_n + Q_{n-1}),$$

$$A^3 = \frac{2M}{\Delta t^2} - \frac{K}{3},$$

$$A^4 = -\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t} - \frac{K}{3}.$$

### 1.2 桩身质量的 BP 神经网络诊断方法

本文采用 BP 神经网络模型建立了一种有效的基桩完整性质量诊断方法, 首先采用常规神经网络分类功能定性识别基桩完整性特征, 然后再针对不同缺陷类型利用本文模拟的基桩动测数据进行基桩缺陷深度和程度的定量诊断. 由于定量诊断中只需要考虑单种缺陷类型的输出, 大大减小了网络模型输出层的神经元个数, 提高了神经网络计算的效率和精度(图 2). 而在网络训练中, 因为采用数值模拟结果形成了包含准确完整性参数的基桩动测数据库, 有效解决了可靠学习样本不足的困难.

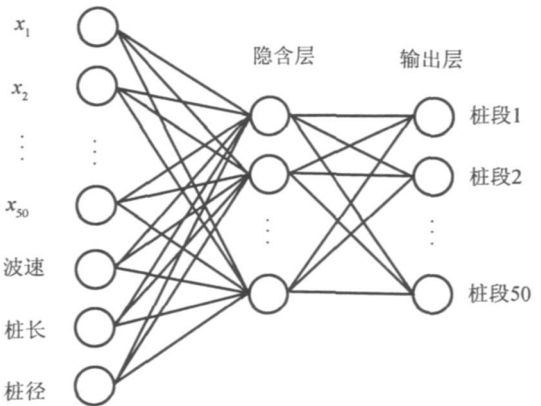


图 2 桩身质量诊断的神经网络结构

Fig. 2 Architecture of neural network for the quality diagnosis of foundation pile

## 2 数值算例

### 2.1 基桩中应力波的传播过程

为了考察数值方法的准确性和有效性, 对应力波在基桩体内传播过程进行数值模拟. 考虑一正方形等截面完整桩, 桩长 30.5 m, 面积 2.58 m<sup>2</sup>, 材料密度 2 405 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量 2.068 × 10<sup>10</sup> N/m<sup>2</sup>, 桩底为刚性支撑. 打桩锤在桩头产生一个脉冲力

$$Q(t) = (2.6688 \times 10^6 \text{ N}) \sin \frac{\pi t}{0.005}, \quad (6)$$

则桩体内沿轴线产生应力波<sup>[15]</sup>. 利用对称性建立横截面 1/4 的 8 节点实体有限元模型, 包含 2 196 个节点,

1 500 单元. 在数值模拟过程中采用 0.000 1 s 时间步长, 共积分 300 步, 历时 0.03 s.

在脉冲力结束时刻( $t_1 = 0.005$  s)和波的前沿到达桩底时刻( $t_2 = 0.010$  4 s), 桩内的应力分布如图 3 所示. 由于桩底为刚性支撑, 波阻抗增大, 在桩底总应力等于入射波分量和反射波分量之和, 图 3 中同时给出应力波行进 39 m( $t_3 = 0.013$  3 s)的应力分布. 从图 3 解析解和有限元解对比可见本文所采用有限元建模方法能够真实地反映脉冲波在桩身的传播过程.

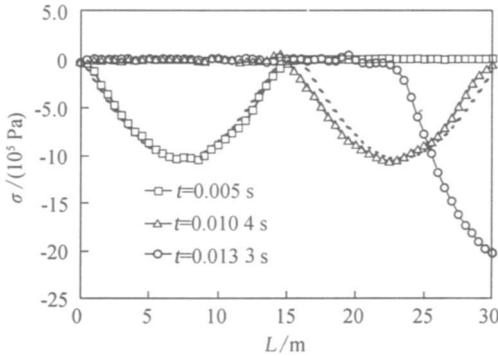


图 3 基桩中应力波的数值模拟结果

Fig. 3 Simulation for stress wave propagation in pile

### 2.2 模型桩的数值模拟及其应用

考虑水平放置在地面之上而桩底自由没有任何约束的模型桩, 桩长 10 m, 截面 28 cm × 25.5 cm, 波速  $3.6 \times 10^3$  m/s, 包含完整桩、缩颈桩和扩颈桩 3 种类型, 缺陷参数如表 1 所示. 在桩头用锤子施加一脉冲力

$$Q(t) = (10 \text{ N}) \sin \frac{\pi t}{0.001} \quad (7)$$

表 1 模型桩缺陷参数

Tab.1 Defect parameter for model pile

类别	缺陷参数	
	深度/m	截面/cm <sup>2</sup>
完整		
缩颈	3.2	28 × 10
扩颈	3.2	36 × 52

对 3 种缺陷类型桩进行了数值模拟, 有限元模型分别包含 2 500, 2 476 和 2 586 个单元以及 3 600, 3 600和3 708个节点. 模拟过程中时间步长为0.000 04 s, 共积分 200 步, 历时 0.008 s, 其中扩颈模型桩的有限元模型、PIT 桩基完整性检测仪所测得的速度波形以及数值模拟结果如图4所示, 其中“v”为桩顶测试点

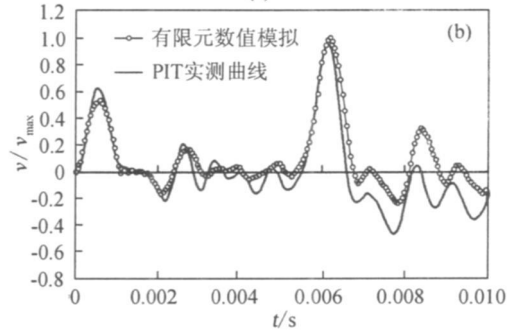
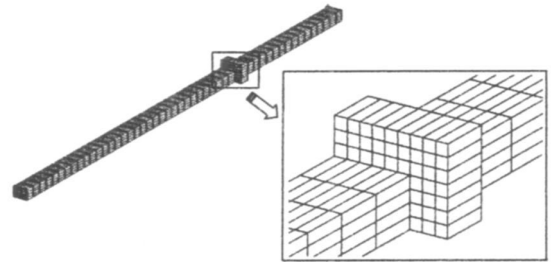


图 4 扩颈模型桩的数值模拟

(a) 有限元模型; (b) PIT 实测曲线与数值模拟结果对比

Fig. 4 Numerical simulation for bulge model pile

振动速度, 从图中可以看出, 有限元数值模拟的结果与 PIT 实测曲线基本一致.

在此基础上, 对 100 多根模型桩的动力检测进行高保真的有限元数值模拟和仿真分析, 并以此作为神经网络的学习样本对实测模型桩进行桩身质量诊断, 其中, 模型桩的桩长 20.0 m, 波速  $2.932 \times 10^3$  m/s, 桩径 2.00 m, 缺陷深度 9.0 m, 缺陷程度 0.20. 诊断结果如图 5 所示, 可见缺陷深度和缺陷程度的预测结果和实际情况基本一致.

### 2.3 工程桩的数值模拟及其应用

现场工程桩由于存在桩土相互作用, 特别对于缺陷桩, 动测响应和动力分析都比较复杂. 但在现场所检测的工程桩中大部分属于完整桩, 其动测曲线主要反映的是该地区土层的信息, 首先选择完整桩进行数值

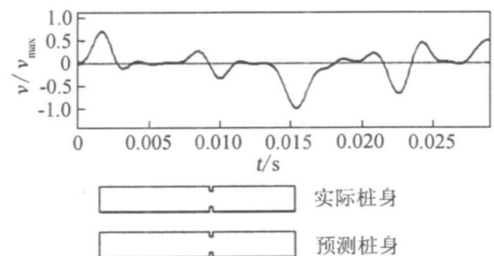


图 5 模型桩完整性的神经网络诊断结果

Fig. 5 Prediction for model pile by artificial neural net

模拟, 通过与其实测数据进行对比确定该地区模拟时的求解参数和计算方案, 然后再进行缺陷类型的大量工程桩数值模拟。

表 2 桩周土参数

Tab.2 Parameter of soil surrounding pile

类别	弹性模量/ 10 <sup>5</sup> Pa	泊松比	密度/ (10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	结构阻尼 系数 G <sup>e</sup>
Soil_1	75	0.3	1.90	0.16
Soil_2	54	0.3	1.60	0.40
Soil_3	300	0.3	2.00	0.40
Soil_4	135	0.3	1.86	0.40
Soil_5	90	0.3	1.75	0.40
Soil_6	150	0.3	1.88	0.40
Soil_7	300	0.3	2.28	0.20
Soil_8	300	0.3	1.93	0.50
Soil_9	350	0.3	2.33	0.30

本文考虑厦门某地区, 桩周土地质资料如表 2 所示, 选取编号 229 的实际工程完整管桩作为研究对象, 根据该地区的实测 PIT 曲线取桩头脉冲为

$$Q(t) = (10 \text{ N}) \sin \frac{\pi t}{0.002} \quad (8)$$

模拟过程中时间步长为 0.000 1 s, 共积分 400 步, 历时 0.04 s。为了反映桩周土的阻尼影响, 根据典型单元的特征分析, 取局部单元激活处的结构频率

$$\omega_4 = 2\pi f = 251.2, \quad (9)$$

而整体结构激活处的结构频率

$$\omega_3 = 0. \quad (10)$$

工程完整桩的有限元模型和现场 PIT 动测曲线以及数值模拟结果如图 6 所示, 从图中可以看出, 有限元数值模拟的结果与 PIT 实测曲线基本一致。

为了进一步分析桩周土对基桩动测曲线的影响, 对不同结构阻尼 G、不同桩周土分层等情况进行了数值模拟如图 7 所示。由数值结果发现, 当只考虑整体结构的结构阻尼而不考虑局部单元的结构阻尼即  $\omega_3 \neq 0$  而  $\omega_4 = 0$  时, 响应曲线在比较长的时间之后仍有比较大的幅值, 这和实际情况不太吻合; 而当同时考虑整体结构的结构阻尼和局部单元的结构阻尼即  $\omega_3 \neq 0$  且  $\omega_4 \neq 0$  时, 动力响应表现出明显的过阻尼现象即没有振动特征。由此进一步验证了低应变基桩动测响应的数值模拟中桩周土的影响应该主要由桩周土局部单元

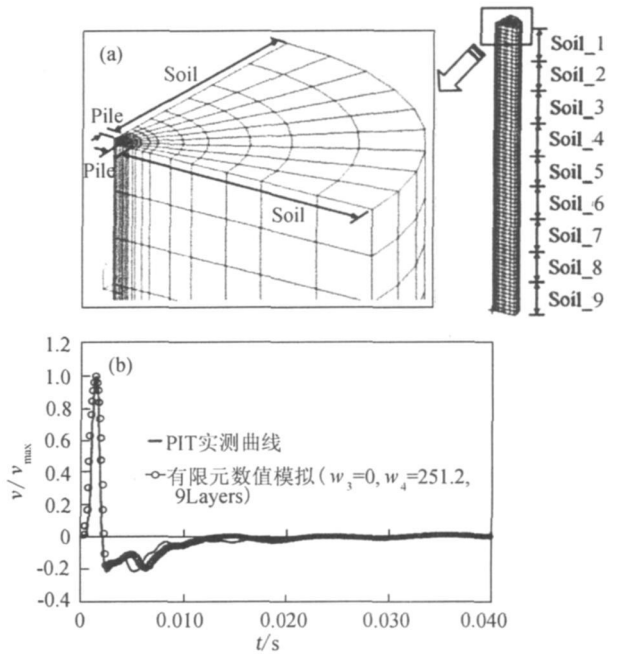


图 6 工程完整桩的有限元数值模拟 (a) 有限元模型; (b) PIT 实测曲线与数值模拟结果对比

Fig. 6 Numerical simulation for good engineering pile

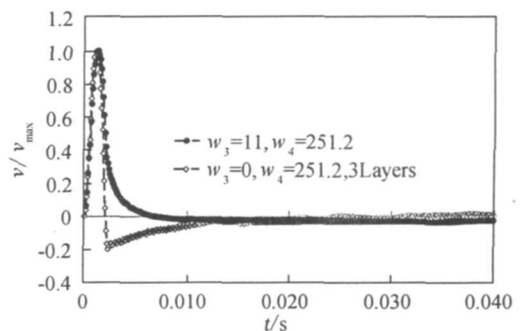


图 7 桩周土分层和阻尼对数值模拟的影响

Fig. 7 Numerical simulation effect by number of layer and damping of soil surrounding pile

的结构阻尼来模拟。

在上述分析的基础上, 对考虑桩周土的 50 余根工程桩的动力检测进行高保真的有限元数值模拟和仿真分析, 包括了 5 根完整桩和不同缺陷类型、不同缺陷程度和不同缺陷深度的 48 根缺陷桩(如表 3 所示), 采用表 2 所示的相同桩周土参数。数值模拟过程中采用 8 节点实体有限元模型(由对称性只建立横截面 1/4 的部分), 由于采用类似形状单元, 所以激活处频率仍然采用式(9)和(10)。

以此作为神经网络的学习样本对实测工程桩进行桩身质量诊断, 实际桩长 34.0 m, 波速  $2.857 \times 10^3$

表3 数值模拟的工程桩参数

Tab. 3 Engineering pile data for numerical simulation

序号	桩长	截面半径	缺陷深度	缺陷截面半径	备注	序号	桩长	截面半径	缺陷深度	缺陷截面半径	备注
1	24	0.5			完整	28	24	0.5	7	0.40	缩颈
2	30	0.5			完整	29	24	0.5	10	0.40	缩颈
3	32	0.5			完整	30	24	0.5	13	0.40	缩颈
4	34	0.5			完整	31	28	0.5	6	0.40	缩颈
5	37	0.5			完整	32	28	0.5	9	0.40	缩颈
6	24	0.5	7	0.60	扩颈	33	28	0.5	12	0.40	缩颈
7	24	0.5	10	0.60	扩颈	34	28	0.5	15	0.40	缩颈
8	24	0.5	13	0.60	扩颈	35	30	0.5	8	0.40	缩颈
9	28	0.5	6	0.60	扩颈	36	30	0.5	8	0.45	缩颈
10	28	0.5	9	0.60	扩颈	37	30	0.5	10	0.40	缩颈
11	28	0.5	12	0.60	扩颈	38	30	0.5	10	0.45	缩颈
12	28	0.5	15	0.60	扩颈	39	32	0.5	8	0.40	缩颈
13	30	0.5	8	0.60	扩颈	40	32	0.5	11	0.40	缩颈
14	30	0.5	10	0.60	扩颈	41	32	0.5	14	0.40	缩颈
15	32	0.5	8	0.60	扩颈	42	32	0.5	17	0.40	缩颈
16	32	0.5	11	0.60	扩颈	43	34	0.5	9	0.40	缩颈
17	32	0.5	14	0.60	扩颈	44	34	0.5	9	0.45	缩颈
18	32	0.5	17	0.60	扩颈	45	34	0.5	11	0.40	缩颈
19	34	0.5	9	0.60	扩颈	46	34	0.5	11	0.45	缩颈
20	34	0.5	11	0.60	扩颈	47	34	0.5	13	0.40	缩颈
21	34	0.5	13	0.60	扩颈	48	34	0.5	13	0.45	缩颈
22	34	0.5	15	0.60	扩颈	49	34	0.5	15	0.40	缩颈
23	37	0.5	7	0.60	扩颈	50	34	0.5	15	0.45	缩颈
24	37	0.5	10	0.60	扩颈	51	37	0.5	10	0.40	缩颈
25	37	0.5	13	0.60	扩颈	52	37	0.5	13	0.40	缩颈
26	37	0.5	16	0.60	扩颈	53	37	0.5	19	0.40	缩颈
27	37	0.5	19	0.60	扩颈						

m/s, 桩径 0.5 m, 缺陷深度 10.6 m, 缺陷程度 0.18. 诊断结果如图 8 所示, 可见缺陷深度和缺陷程度的预测结果和实际情况比较一致.

### 3 结论

本文利用三维有限元方法对基桩低应变动测响应进行了动力学模拟, 包括各种缺陷类型的模型桩和工程桩, 并以此数值模拟结果形成丰富和可靠的学习样本进行基桩完整性的神经网络诊断. 在工程桩动测响

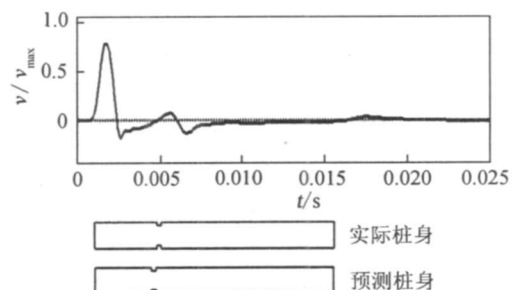


图8 工程桩完整性的神经网络诊断结果

Fig. 8 Prediction for engineering pile by artificial neural net

应的数值模拟中, 讨论了桩周土阻尼系数的处理方法, 指出应该主要由局部单元的结构阻尼系数来实现. 通过桩基中应力波传播过程以及模型桩和工程桩动测的数值模拟及其质量诊断中的应用, 说明了本文方法是确实有效的.

### 参考文献:

- [1] 徐俊在. 桩的动测新技术[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 刘利民, 苏翔, 雄巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002.
- [3] 张灿辉, 张建霖, 谢建华, 等. 桩基低应变完整性测试的多次波分析[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(2): 214-216.
- [4] 张灿辉, 张建霖, 谢建华. 桩基完整性测试的非线性最小二乘优化方法[J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 142-144.
- [5] 赵刚, 雷一峰, 王雪峰. 四桩承台沉降的有限元分析[J]. 华中建筑, 2004, 22(5): 89-90.
- [6] 史付生, 秦庚仁, 宁书年. 大口径桩检测的三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2003, 28(3): 275-279.
- [7] Tam C M, Tong T K L, Lau T C T, et al. Diagnosis of prestressed concrete pile defects using probabilistic neural networks [J]. Engineering Structures, 2004, 26: 1155-1162.
- [8] Hornik K. Approximation capabilities of multilayer feed-forward networks[J]. Neural Networks, 1991, 4(2): 251-257.
- [9] 王成华, 张薇. 基于反射波法的桩身完整性判别的神经网络模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 952-956.
- [10] 蔡棋瑛, 林建华. 基于小波分析和神经网络的桩身缺陷诊断[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 11-14.
- [11] Zhang C H, Zhang J L. Application of artificial neural network for diagnosing pile integrity based on low strain dynamic testing [C]//Computational Structural Engineering. London: Springer, 2009: 857-862.
- [12] Zhang C H, Xiao N B, Xie J H, et al. A novel method for diagnosing pile integrity using back-propagation artificial neural networks [C]//Innovation & Sustainability of Structures. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2009: 998-1003.
- [13] 张灿辉, 王东东, 张建霖. 三维杂交应力元性能分析的基本变形模式方法[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 44-49.
- [14] 张灿辉, 冯伟, 黄黔. 杂交元假设应力模式的变形刚度分析[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(7): 757-763.
- [15] Clough R, Penzien J. Dynamics of structures[M]. 2nd ed. California: Computers and Structures Inc, 1995.

## The Numerical Simulation for the Low Strain Dynamic Integrity Testing and Its Application in Quality Diagnosis of Foundation Pile

ZHANG Canhui<sup>1</sup>, YANG Shaoliang<sup>1</sup>, ZHANG Jiarlin<sup>1</sup>, XIAO Nengbiao<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Hongye Engineering Construction Technology Company Limited, Xiamen 361004, China)

**Abstract:** The 3-D finite element method (FEM) of structural dynamic mechanics is employed to simulate the low strain dynamic response by pile integrity tester (PIT) for piles of several defect types. The numerical results are obtained for the model piles free of soil and engineering piles surrounded with soil. The soil damping is modeled by the structural damping coefficients of local elements and the resulting numerical database is used to produce the learning samples for the artificial neural net (ANN) to diagnose the pile quality. In the numerical examples, the approach are examined by the simple good pile and the typical model and engineering piles. Then the responses of more than 150 model piles and engineering piles of several defects types are computed. In addition, they are used as the ANN learning samples to predict the integrity of actual model pile and engineering pile. The satisfactory results indicate the approach is effective.

**Key words:** numerical simulation; finite element method; foundation pile; dynamic integrity testing; quality diagnosis