

# 缺损桩的导纳谱判别法及应用

邵广周, 孟昭秦, 刘国华

(长安大学 地质工程与测绘工程学院 陕西 西安 710054)

[摘要] 利用振动工程中的模态分析技术, 对桩基系统的振动特性进行研究。根据桩基系统的集中质量参数振动模型, 对完整桩和各种缺损桩模型的导纳谱进行了大量的正演计算, 按照导纳谱特征与桩基的缺损类型及缺损位置之间的对应关系, 编制了相应的判读软件 DSP1.0 系统, 实现了桩基完整性以及缺损桩缺损位置和缺损性质的计算机自动判读。

[关键词] 桩基; 导纳谱; 振动; 模态分析; 集中质量

[中图分类号] TV32<sup>+</sup>3; P631.5 [文献标志码] A [文章编号] 1672 6561(2006)04 0073 05

## Method of Detecting Integrality of Defective Piles in Terms of Characteristic of Mechanical Admittance Spectrum and Its Engineering Application

SHAO Guang zhou, MENG Zhao qin, LIU Guo hua

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The modal analysis technique in vibration engineering is used to study the vibration characteristic of the pile system. The pile systems are simplified as different vibration systems with different degree of freedom. The mechanical admittance spectrums of the intact pile and all kinds of defective piles are computed largely according to the lumped mass model of the pile system. It is found that the characteristic of mechanical admittance spectrum have some coincidence relations with the style and position of the defective piles. Therefore, the quality of the pile foundation can be detected in terms of this characteristic. This principle is applied to actual engineering, and the actual data is processed with proper data processing and spectrum analysis methods, the corresponding processing software is also developed along with them. The result of actual measurement proves that the method is viable to a certain degree if the model is selected expediently, and the interpretation software has some useful value too.

**Key words:** pile; admittance spectrum; vibration; modal analysis; lumped mass

## 0 引言

对高层建筑、桥梁、海工结构及特殊建筑结构, 都需采用深桩基础, 即使普通建筑结构, 在基础状态比较差的情况下, 亦需使用桩基来提高结构的稳定性。桩基质量好坏将直接影响到建筑结构的安

全<sup>[1-3]</sup>。目前常用的低应变反射波法<sup>[4]</sup>对于截面渐变的桩中传播的纵波, 不产生反射波而显得无能为力<sup>[1]</sup>。另一方面, 桩土系统复杂、以及外界噪声影响, 有用信号难以直观分辨, 采用良好性能的信号分析技术, 提取有用信号是正确判断桩身特性的基础之一。谱分析技术也需进一步改善<sup>[5]</sup>。笔者利用振动工程中的模态分析技术, 从振动理论角度,

[收稿日期] 2006 01 14

[基金项目] 国家 863 项目(2005AA615010)

[作者简介] 邵广周(1977-), 男, 山东单县人, 讲师, 博士研究生, 从事地球物理教学与研究。

对桩基系统的振动特性进行研究。给出了桩基系统的集中质量参数振动模型,并对完整桩和各种缺损桩模型的导纳谱进行了大量的正演计算,发现其导纳谱特征与桩基的缺损类型及缺损位置之间有一定的对应关系。并编制了相应的判读软件 DSP1.0 系统,实现了桩基完整性以及缺损桩缺损位置和缺损性质的计算机自动判读。

## 1 理论模型计算与分析

根据桩基缺损类型,一般可将桩基分为完整桩和缺损桩两大类。根据桩基缺损性质的不同,缺损桩又可分为断桩(包括离析和和夹层)、缩颈桩和扩颈桩等。图 1 为各类桩基的集中参数模型<sup>[6-8]</sup>。

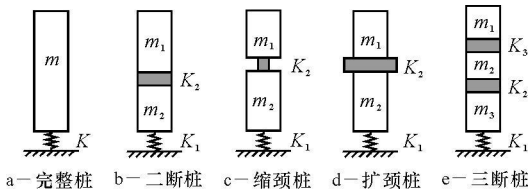


图 1 各类桩基的集中质量参数模型

Fig. 1 Lumped Mass Models of All Kinds of Piles

### 1.1 完整桩单自由度系统的速度导纳谱

图 1a 所示的完整桩桩土系统可等效为一个单自由度振动系统。其中桩周土对桩的作用可简化为线性弹簧  $K$  和粘性阻尼  $C_m$ , 弹簧的弹性常数  $K$  可看作是桩周土的动抗压刚度  $K_D$ ; 桩身质量(包括参振土)集中等效为  $m$ ; 施加在桩头的激振力  $f(t)$  可以是稳态正弦激励,也可以是瞬态激励(锤击力),本文采用后者;令  $x$  是桩头测量处的位移响应。则完整桩桩土系统满足的振动方程为<sup>[6]</sup>

$$m\ddot{x} + C_m\dot{x} + Kx = \tilde{f}(t) \quad (1)$$

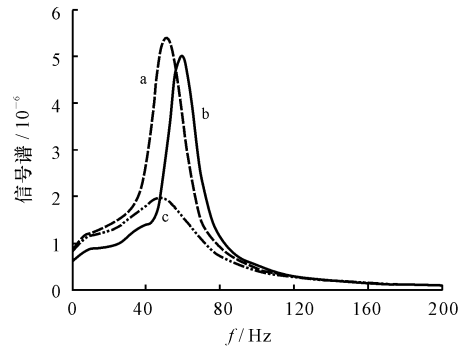
由付氏变换得,系统的速度导纳谱为

$$H_V(\omega) = j\omega X(\omega) = \frac{1}{C_m + j(m\omega - K/\omega)} \quad (2)$$

式中:  $K$  为桩周土的等效弹性常数;  $m$  为桩身等效质量;  $C_m$  为粘性阻尼;  $\omega$  为响应频率。图 2 为 3 组不同参数得到的 3 个完整桩速度导纳振幅谱曲线。

### 1.2 缺损桩二自由度系统的速度导纳谱

图 1 中, b, c, d 分别表示为断桩(包括离析和夹层)、缩颈桩、扩颈桩的振动系统参数模型,可以等效为二自由度振动系统。  $K_1$  仍为桩周土的等效动抗压刚度  $K_D$ ; 粘性阻尼系数仍为  $C_m$ ;  $K_2$  为两等效集中质量块  $m_1$  和  $m_2$  之间的弹性耦合物质的弹性



a -  $m = 3\,577\text{ kg}$ ;  $C_m = 2.0 \times 10^5 (\text{Ns/m})$ ;  $K(K_D) = 4.0 \times 10^8 (\text{N/m})$ ; b -  $m = 3\,577\text{ kg}$ ;  $C_m = 2.0 \times 10^5 (\text{Ns/m})$ ;  $K(K_D) = 5.3 \times 10^8 (\text{N/m})$ ; c -  $m = 3\,577\text{ kg}$ ;  $C_m = 5.0 \times 10^5 (\text{Ns/m})$ ;  $K(K_D) = 4.0 \times 10^8 (\text{N/m})$

图 2 完整桩的速度导纳振幅谱

Fig. 2 Velocity Admittance Spectrum for Intact Piles

常数,由断桩到缩颈再到扩颈,随着两质量块间夹层所含物质强度的增加,由图 1b~图 d 的  $K_2$  值必然依次增加。那么由缩颈到扩颈过渡时,两质量块间夹层所含物质强度必然有等于完整桩强度的时候。设完整桩桩体的弹性系数为  $K_{\text{桩}}$ , 则有,  $K_D < K_2 < K_{\text{桩}}$  时是缩颈桩,  $K_2 > K_{\text{桩}}$  时是扩颈桩。桩头施加的激振力为  $f(t)$ ; 令质量块  $m_1$  的位移响应为  $x_1$ , 质量块  $m_2$  的位移响应为  $x_2$ , 则二自由度桩土系统满足的振动方程为

$$M\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \quad (3)$$

$$\text{式中: } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & C_m \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_1 + K_2 \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} \tilde{f}(t) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

由付氏变换与模态分析法得系统速度导纳谱为

$$H_{V11}(\omega) = j\omega \left\{ \frac{1}{a_1} \frac{\Psi_{11} \Psi_{11}}{j\omega - \lambda_1} + \frac{1}{a_1^*} \frac{\Psi_{11}^* \Psi_{11}^*}{j\omega - \lambda_1^*} + \frac{1}{a_2} \frac{\Psi_{12} \Psi_{12}}{j\omega - \lambda_2} + \frac{1}{a_2^*} \frac{\Psi_{12}^* \Psi_{12}^*}{j\omega - \lambda_2^*} \right\} \quad (4)$$

式中:  $a_i = \Psi_i^T (2\lambda_i \mathbf{M} + \mathbf{C}) \Psi_i$ ,  $a_i^* = \Psi_i^H (2\lambda_i^* \mathbf{M} + \mathbf{C}) \Psi_i^*$ ,  $\lambda_i, \lambda_i^*$  为系统的共轭复特征值,  $\Psi_i^T, \Psi_i^H$  共轭复特征矢量,  $\Psi_{11}, \Psi_{12}, \Psi_{11}^*, \Psi_{12}^*$ , 为对应的复特征矢量中的元素。图 3 为断裂位置不同的 4 条二自由度导纳振幅谱曲线。图 4 为缺损位置相同, 缺损性质不同的 5 条二自由度导纳振幅谱曲线。

### 1.3 缺损桩多自由度系统的速度导纳谱

图 1e 为三断桩桩土系统振动参数模型,可等效为三自由度振动系统。其中  $K_1$  仍为桩周土的等效动抗压刚度  $K_D$ ; 粘性阻尼系数仍为  $C_m$ ;  $K_2, K_3$

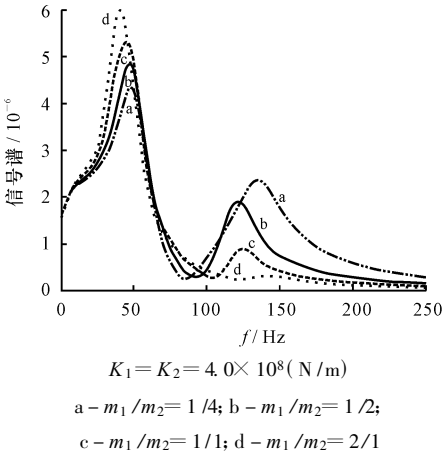


图 3 二自由度断桩的速度导纳振幅谱  
Fig. 3 Velocity Admittance Spectrum for Broken Piles of Two Degree of Freedom

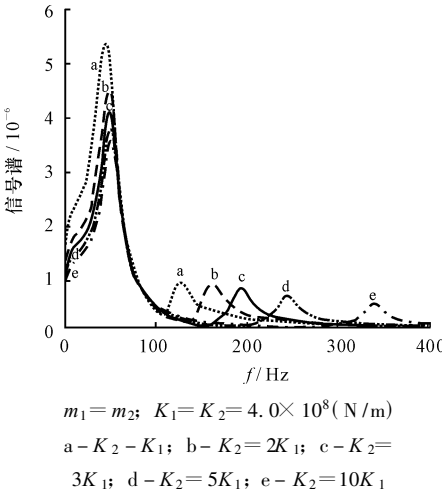


图 4 二自由度各类缺损桩导纳振幅谱  
Fig. 4 Velocity Admittance Spectrum for Defective Piles of Two Degree of Freedom

为三等效集中质量块  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  之间的弹性耦合物质的弹性常数。当任意激振力  $f(t)$  作用在桩头(第一质量块上端)时,  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  的位移响应分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 。则系统满足的振动微分方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \tag{5}$$

式中:  $M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_m & 0 & 0 \\ 0 & C_m & 0 \\ 0 & 0 & C_m \end{bmatrix},$

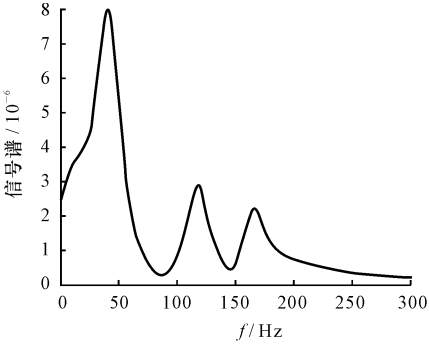
$$K = \begin{bmatrix} K_3 & -K_3 & 0 \\ -K_3 & K_2 + K_3 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_1 + K_2 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix},$$

$$f(t) = \begin{bmatrix} \delta(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

同样由付氏变换与模态分析法得, 系统的速度导纳谱为

$$H_{v11}(\omega) = j\omega \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1}{a_i} \frac{\Psi_{1i} \Psi_{1i}}{j\omega - \lambda_i} + \frac{1}{a_i^*} \frac{\Psi_{1i}^* \Psi_{1i}^*}{j\omega - \lambda_i^*} \right) \tag{6}$$

更多自由度情况也可同样按照上述算法进行计算。图 5 为三自由度断桩的导纳振幅谱。



$m_2 = m_3 = 2m_1 = 1430 \text{ kg}; K_1 = K_2 = K_3 = 4.0 \times 10^8 (\text{N/m}); C_m = 1.0 \times 10^5 (\text{N} \cdot \text{s/m})$

图 5 三自由度断桩的导纳振幅谱  
Fig. 5 Velocity Admittance Spectrum for Broken Piles of Three Degree of Freedom

通过对各类桩基系统导纳谱的正演计算和分析可得如下结论:

(1) 桩基系统的导纳函数与系统本身的质量、刚度和阻尼有关。在系统阻尼不变的情况下, 由于系统自由度数即质量块的数目和大小不同(就测桩而言, 质量块数表现为桩基的缺损处数目, 各质量块的大小表现为桩基缺损的位置)以及刚度的不同(测桩中表现为缺损性质的不同), 对应的导纳函数的形式就不同。反映在导纳谱上, 则为峰值的个数不同, 多峰值时, 各峰值的大小和间距也不同。因此, 可以利用导纳谱的特征来判断桩基的完整性。

(2) 导纳谱表现为单峰值的桩为完整桩, 而多峰值的桩可能是缺损桩。

(3) 缺损桩的缺损位置和导纳谱各峰值比值的大小有关, 具体的对应关系可按照事先假定的各个缺损位置进行模型正演计算, 得到缺损位置和峰值比对应关系解释卡, 以备解释之用。

(4) 缺损桩的缺损性质和各峰值对应的固有频率差有关, 具体判断时, 应在缺损位置已确定的情况下, 按这一缺损位置进行各种假定缺损性质的桩基模型正演计算, 得到缺损性质和固有频差对应关系曲线, 最后将每一位置对应的曲线都求出, 得到缺损性质解释卡以备解释。

2 数据处理及软件实现

根据桩基导纳谱特征和桩基质量的关系, 编制了 DSP1.0 处理和判读软件, 主要由 3 个模块组成。

2.1 采集数据预处理模块

如图 6 所示, 主要完成采集信号读取和显示。消除信号的趋势项, 并对其进行预滤波。将预处理后的数据以文件形式保存。模块特点是界面友好, 输入、输出数据均以 Windows 窗口形式打开和保存文件, 处理方式灵活。处理结果均以图形的形式给出, 便于判断处理效果的好坏。滤波器的截止频率等参数可以进行设置, 提高了程序的适用性。

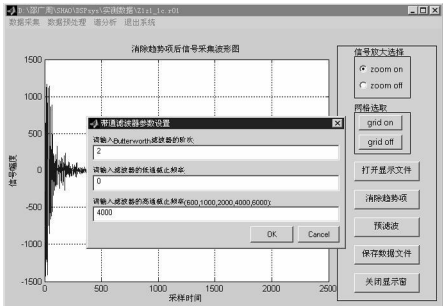


图 6 预处理模块程序界面

Fig. 6 Program Interface of Preprocessing Module

2.2 谱分析模块

如图 7 所示, 模块对预处理后的数据做 FFT 处理。根据需要进行选带滤波。给出信号的 AR 谱, 并予以保存。特点是信号、FFT 谱和 AR 谱均在同一窗口内显示, 便于对比分析。还可以通过多带滤波对感兴趣的频带进行选带分析。多带滤波器的频率点向量、频带增益向量、所加窗函数的类型和宽度等参数都可以进行设置也可以使用默认值。

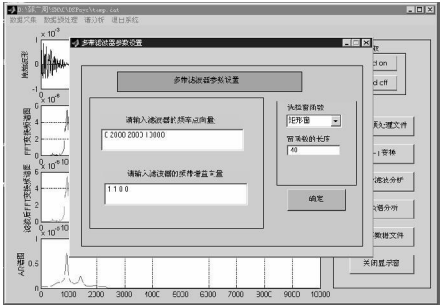


图 7 谱分析模块程序界面

Fig. 7 Program Interface of Spectrum Analysis Module

2.3 评价判读模块

如图 8 所示, 主要功能是提取 AR 谱的主频和峰值, 根据峰值个数初步判断桩基的完整性。对缺

损桩结合缺损位置解释卡和缺损性质解释卡判断缺损的大致位置和缺损程度。特点是峰值和主频的提取通过程序直接在 AR 谱上标出, 避免了人工读取所带来的误差。对缺损位置, 程序自动将所得到的缺损桩导纳谱的峰值向量换算成峰值比, 然后在缺损位置解释卡上标出对应的一系列位置并给出它们的平均值。对于缺损性质也只需输入导纳谱的主频向量既可。

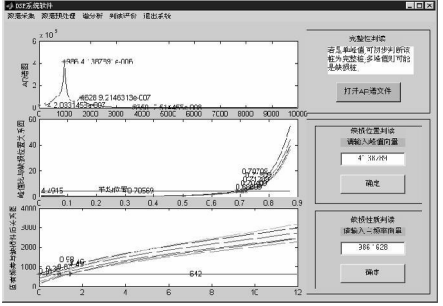


图 8 判断评价模块程序界面

Fig. 8 Program Interface of Reading and Interpretation Module

3 应用实例

根据各种类型桩的导纳谱特征, 利用本文提出的处理方法和程序, 对某工区部分锤击动测桩数据进行了处理, 结果如图 9、图 10。根据图 9, 图 10 中 AR 谱峰值的个数可初步判断图 9 为完整桩 (单峰值), 而图 10 有两个峰值, 则为二自由度缺损桩。为了判断它的缺损位置和缺损性质, 利用完整桩谱的峰值和主频以及其他参数, 对各种假设缺损位置和缺损性质的桩基导纳谱进行正演计算得的缺损位置解释卡与缺损性质解释卡 (图 11, 图 12)。对图 10 利用判读评价模块中的程序进行主频和峰值

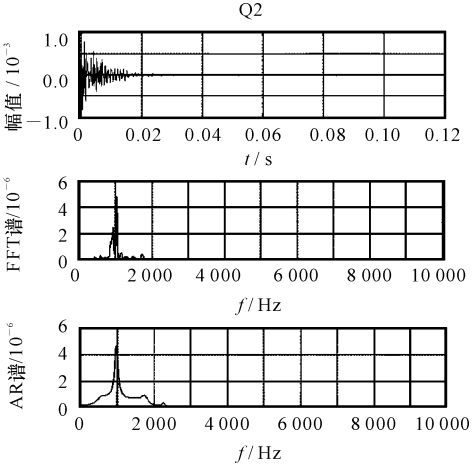


图 9 Q2.r01 的 FFT 谱和 AR 谱

Fig. 9 FFT Spectrum and AR Spectrum for Data of Q2.r01

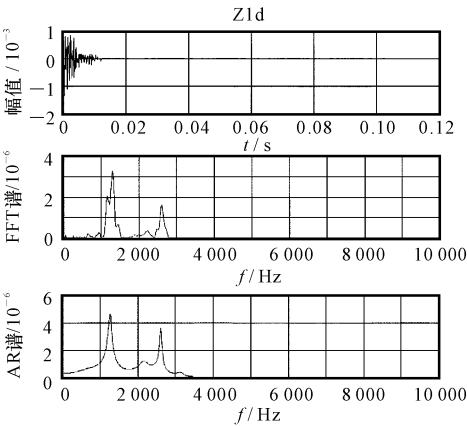


图 10 Z1d. r01 的 FFT 谱和 AR 谱

Fig. 10 FFT Spectrum and AR Spectrum for Data of Z1d. r01

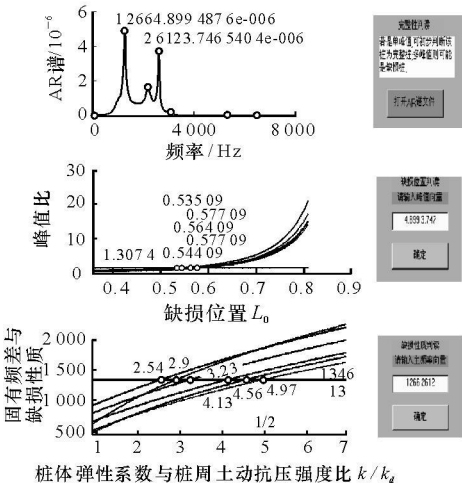


图 13 Z1d. r01 的解释

Fig. 13 Interpretation and Evaluation for Data of Z1d. r01

4 结语

根据桩基的导纳谱特征可以判断桩基的完整性以及缺损桩的缺损位置和缺损性质。并将这一原理应用于工程实际,采用适当的数据处理和谱分析方法对实测数据进行处理,编制了相应的处理软件。理论和实测结果均证明,该方法是切实可行的,所得缺损桩检测判读软件具有较强的工程实用价值。

导纳谱法对模型进行正演得到桩基缺损的各种解释卡,不失为一种有效的桩基完整性检测方法,但对不同地区的桩需做不同的解释卡。能否找到一种统一的解释卡,还需进一步研究。

[ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 邱 畅,高广运. 桩基动测技术存在的问题和发展趋势[ J ]. 住宅科技, 2002( 2 ): 25 - 34.

[ 2 ] 吴 琳,李天文. 基于 GIS 的沉降监测数据分析及其三维模拟[ J ]. 地球科学与环境学报, 2004, 26( 2 ): 67 - 70.

[ 3 ] Fritzen C P, Bohle K. Application of Model Based Damage Identification to a Seismically Loaded Structures[ J ]. Smart Materials and Structures, 2001, 10( 3 ): 452 - 458.

[ 4 ] 何 剑,方仁宝,张晓伟,等. 田湾核电站某工程偏移桩性状分析[ J ]. 地球科学与环境学报, 2004, 26( 2 ): 63 - 66.

[ 5 ] 王德兴,玉 岩,杨志华. 桩基质量无损检测中谱分析方法的讨论[ J ]. 黑龙江交通科技, 2001, 91( 3 ): 42 - 45.

[ 6 ] 孟昭秦. 锤击桩基动测的导纳谱研究[ J ]. 西安地质学院学报, 1997, 19( 1 ): 98 - 105.

[ 7 ] 孟昭秦,李 貅,何 林. 结构振动数据数学模型的线性与非线性刻画[ J ]. 西安工程学院学报, 1999, 21( 2 ): 34 - 38.

[ 8 ] 孟昭秦,何 林,刘士军. 结构损伤线性与非线性特征谱模式识别与应用[ J ]. 西安工程学院学报, 1999, 21( 3 ): 36 - 4.

提取,见图 13 得两主频向量为 1 266 和 2 612,对应的峰值为  $4.899 \times 10^{-6}$  和  $3.747 \times 10^{-6}$ ,求得峰值比为 1.307,频差为 1346。在缺损位置解释卡上得到大致缺损位置为  $0.56L_0$  处。在缺损性质解释卡中接近该位置 ( $1/2L_0$ ) 的曲线上找到频差 1346 对应的刚度比值约为 4.97,比完整桩桩体的弹性刚度与桩周土动抗压刚度之略小。因此,该桩在约  $0.56L_0$  处出现轻微缩颈现象。经验证,所得结果与实际情况一致,证明了利用导纳谱法检测桩基完整性,是切实可行的。

图 12 实测桩缺损性质解释卡

Fig. 12 Interpretation Card of Defective Property for Piles of Actual Measurement

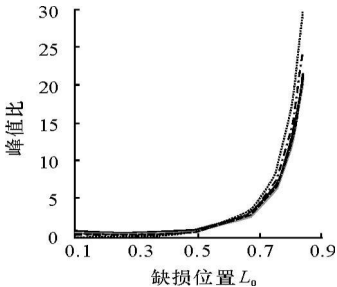


图 11 实测桩缺损位置解释卡

Fig. 11 Interpretation Card of Defective Position for Piles of Actual Measurement

