

文章编号:1672-9331(2021)01-0087-08

桩基动力学模型参数反演识别方法

雷正保^{1,2}, 邢欢¹, 孙汉正¹

(1. 长沙理工大学 大型结构碰撞实验室, 湖南 长沙 410114;
2. 长沙理工大学 公路工程教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对桩基模型参数存在不确定性的问题, 提出一种桩基模型参数反演识别方法。以测点和敲击点作为噪声因素, 综合考虑模型中不同测点和敲击工况下加速度响应反演结果的影响, 利用多信息融合方法将多个评分值融合成唯一的参数反演识别目标响应值。研究表明: 利用本研究方法得到的反演曲线与仿真曲线拟合良好。本研究为桩基模型参数反演识别提供了一定的借鉴。

关键词: 反演识别方法; 桩基模型; 一致性评分法; 稳健性设计; 多元响应

中图分类号: TU473

文献标志码: A

A method of parameter inversion identification for dynamic model of pile foundation

LEI Zheng-bao^{1,2}, XING Huan¹, SUN Han-zheng¹

(1. Large Structural Impact Laboratory, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Key Laboratory for Highway Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In view of the uncertainty of the parameters of the pile foundation model, a method of parameter inversion identification for pile foundation model was proposed. Taking the measuring points and the tapping points as noise factors, comprehensively considering the impact of the acceleration response on the inversion results at different measuring points and tapping conditions in the model, using multiple information fusion, the score values were merged into a unique parameter inversion to identify the target response value. The research results show that the inversion curve obtained by this method has a good fit with the simulation curve. This study provides a reference to parameter inversion identification for the pile foundation model.

Key words: method of inversion identification; pile foundation model; consistency score; robust design; multiple response

目前, 针对桩基的研究方法可分为理论方法和试验方法两类^[1]。前者包括温克尔地基模型法^[2]、有限元法以及 p - y 法^[3]; 后者包括振动台试

验、离心试验^[4]以及现场试验等。在理论研究方法中, 模型参数的确定对研究有很大的影响。叶万灵等^[5]提出一种基于现场试验的桩基模型参数

收稿日期: 2020-04-17

基金项目: 湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2174)

通讯作者: 雷正保(1964—), 男, 教授, 主要从事无损检测方法与虚拟仪器方面的研究。E-mail: doclei@foxmail.com

的确定方法。该方法通过现场测量 39 根桩基的受力特性,并对实测样本数据进行分析获得模型参数。该方法不能实现无损检测。罗仑博等^[6]提出一种改进的双曲线模型来研究桩基的桩身弯矩、桩身位移等特性,同时利用经验公式确定模型参数。该方法具有主观性。李卫超等^[7]基于现场模型试验结果,提出了一种半经验半理论的桩基研究方法,并根据已有的计算公式获得模型参数。但这些参数可能存在计算误差,且稳健性不强。

针对上述参数确定方法存在的不足,本研究提出一种桩基模型参数的反演识别方法。首先,基于有限元法建立了含多个测点的桩基有限元模型和动力学模型;然后,将测点和敲击点作为噪声因素,基于稳健性设计原理,设计了 72 组仿真试验;最后,利用一致性评分法全面分析测点响应的特征差异。本研究采用敲击的方式获取桩基加速度响应,在保证桩基无损的前提下,实现对模型参数的反演识别。

1 模型的建立与求解

图 1 为本研究所建立的动力学模型。模型可近似用如下关系式表示^[8]:

$$p(x, y) = kx^{m_0}y^{n_0} \quad (1)$$

图 1 桩基动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of pile foundation

$$\mathbf{M}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 + \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 + \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 + \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 + \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{(n+m+1) \times (n+m+1)} \quad (2)$$

式中: k 、 m_0 、 n_0 为本研究需要反演识别的参数; $p(x, y)$ 为单位面积的平均地基反力,与深度 x 及横向位移 y 有关。

1.1 理论推导

参考文献[9], 桩基模型可假设成 Euler-Bernoulli 梁进行分析。由于推导过程需占用大量篇幅,本研究直接给出关键矩阵。假定桩基埋深为 m 个单元,地表以上有 n 个单元。

单元质量矩阵 \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 \end{bmatrix}$$

式中: ρ 为梁的质量密度; A 为梁的截面面积; l 为梁单元长度。

单元刚度矩阵 \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 & \mathbf{G}_2 \\ \mathbf{G}_3 & \mathbf{G}_4 \end{bmatrix}$$

式中: E 为杨氏模量; I 为截面惯量。

单元阻尼矩阵 \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = \frac{\zeta l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 & \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{c}_3 & \mathbf{c}_4 \end{bmatrix}$$

记第 i 个单元的地基阻尼矩阵为:

$$\mathbf{C}_{i1} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 & \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{c}_3 & \mathbf{c}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{i2} = \cdots = \mathbf{C}_{im}$$

根据矩阵叠加原理得到桩基质量总矩阵 \mathbf{M}_z 、总刚度矩阵 \mathbf{K}_z 、总阻尼矩阵 \mathbf{C}_z :

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 & \mathbf{G}_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{G}_3 & \mathbf{G}_4 + \mathbf{G}_1 & \mathbf{G}_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_3 & \mathbf{G}_4 + \mathbf{G}_1 & \mathbf{G}_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{G}_3 & \mathbf{G}_4 + \mathbf{G}_1 & \mathbf{G}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{G}_3 & \mathbf{G}_4 + \mathbf{G}_1 & \mathbf{G}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \mathbf{G}_3 & \mathbf{G}_4 \end{bmatrix}_{(n+m+1) \times (n+m+1)} \\
\mathbf{K}_z = & \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_{13} & \mathbf{C}_{14} + \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{C}_{(m-1)3} & \mathbf{C}_{(m-1)4} + \mathbf{C}_{m1} & \mathbf{C}_{m2} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{C}_{m3} & \mathbf{C}_{m4} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(m+n+1) \times (m+n+1)} \\
\mathbf{C}_z = & \quad (4)
\end{aligned}$$

激振力 \mathbf{F}_t 与地基反力矩阵 \mathbf{F}_d :

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \\
\mathbf{F}_t = f(t) & \quad , \\
& \begin{bmatrix} \int_0^l [(m-h)l+x]^{m_0} N_1 dx \\ \int_0^l [(m-h)l+x]^{m_0} N_2 dx \\ \int_0^l [(m-h)l+x]^{m_0} N_3 dx \\ \int_0^l [(m-h)l+x]^{m_0} N_4 dx \end{bmatrix} \\
\mathbf{F}_d = Bky^{n_0} & \quad (5)
\end{aligned}$$

式中: $f(t)$ 为敲击力函数; N_i 为形函数; h 为埋深梁单元编号; k 为地基反力系数; n_0 为水平位移指数; m_0 为深度指数; l 为梁单元长度; B 为计算宽度, 根据我国桩基技术规范, 按表 1 进行计算。

表 1 计算宽度

Table 1 Calculative width

桩的直径 d 或边长 b /m	圆桩计算宽度	方桩计算宽度
>1	$0.9(d+1)$	$b+1$
≤ 1	$0.9(1.5d+0.5)$	$1.5b+0.5$

1.2 桩基受迫振动方程与求解

根据激励荷载作用下桩基的振动原理, 桩基在锤击作用下的方程为:

$$\mathbf{M}_z \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_z \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_z \mathbf{u} = \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_d \quad (6)$$

式中: \mathbf{M}_z 、 \mathbf{C}_z 、 \mathbf{K}_z 、 \mathbf{F}_t 、 \mathbf{F}_d 分别为梁单元的总质量矩阵、地基总阻尼矩阵、梁单元总刚度矩阵、激振力矩阵和地基反力矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 、 \mathbf{u} 分别为节点的加速度、速度和位移向量。

运用中心差分法通过 MATLAB 编程求解式 (6), 并将得到的计算结果作为反演理论值。

2 桩基有限元模型的建立

结合文献[10-11]建立桩基有限元模型, 如图 2 所示。桩全长 2 800 mm, 直径 140 mm, 厚度 4.5 mm, 埋深 1 600 mm, 材料模型选用 * MAT_PIECEWISE_LINEAR PLASTICITY (24 号材料)。钢管桩模型参数见表 2^[10]。

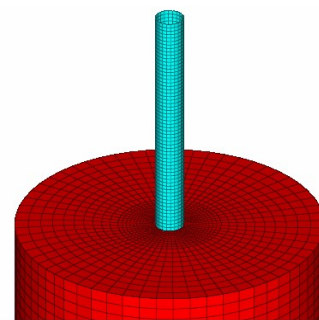


图 2 桩基有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pile foundation

表2 钢管桩模型参数

Table 2 Model parameters of steel pipe piles

密度/ ($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ ($\times 10^5 \text{ MPa}$)	泊松比	屈服应 力/MPa	硬化模 量/MPa	应变率 参数 c	应变率参 数 p	失效应变
7.85	2.07	0.3	235	780	40	5	0.75

用直径 1 500 mm、高 1 800 mm 的圆柱体模拟地基,材料模型选用 * MAT_SOIL_AND_FOAM_FAILURE(14 号材料)。在圆柱体上施加无反射边界条件模拟地基的无限域。地基最小网格为 4 mm \times 4 mm,较小的网格能有效减小沙漏能^[12]。整个桩基模型的沙漏能控制在 5% 以内,保证了模型的准确性。地基模型参数见表 3^[13]。

表3 地基模型参数

Table 3 Foundation model parameters

密度/($\times 10^3$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模 量/MPa	泊松比	体积模 量/MPa	拉伸中止 压力/MPa
1.874	49.5	0.35	134.55	-0.55

在仿真分析中,可用力锤击函数模拟外力。本研究用半正弦波脉冲函数^[14]作为力锤击函数:

$$f(t) = p_0 \sin \frac{\pi}{\tau} t, t < \tau \quad (7)$$

式中: p_0 为脉冲度; τ 为脉冲宽度。

由于力锤击后立即离开锤击点,力锤中弹簧-质量块系统仍处于振动状态,但此信号不能作用于钢管桩。因此,需要增加窗函数来保证力锤击信号与作用在钢管桩上信号的一致性。窗函数见下式:

$$\omega(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1.2\tau \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{5\pi}{3\tau} (t - 1.2\tau) \right], & 1.2\tau < t < 1.8\tau \\ 0, & t \geq 1.8\tau \end{cases} \quad (8)$$

利用 LS-DYNA 中的 define curve 关键字加载窗函数对应的力曲线,如图 3 所示。

根据本研究的试验设计方案,确定出两种不同敲击工况的敲击方案。敲击力加载结果及有限元模型如图 4 所示。

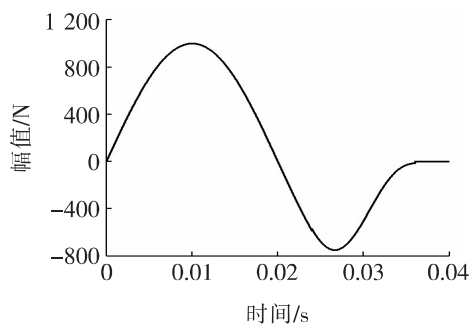
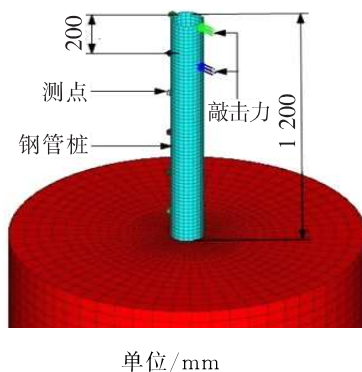


图3 敲击力曲线

Fig. 3 Knocking force curve



单位/mm

图4 桩基试验方案有限元模型

Fig. 4 Finite element model of pile foundation test scheme

3 参数反演识别方法

3.1 误差评分法

误差评分法通过对加速度响应曲线进行相位和幅频评分,可全面分析加速度响应曲线之间的特征差异,从而有效度量响应曲线的相似性。

3.1.1 相位误差的测量

通过平移单个曲线时间步长的方式来最大化互相关系数。此时,移动的时间步长数 e_e 即为相位误差的线性测量。互相关系数的计算式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_i - \bar{\alpha})(\beta_i - \bar{\beta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_i - \bar{\alpha})^2 \sum_{i=1}^N (\beta_i - \bar{\beta})^2}} \quad (9)$$

式中: r 为互相关系数; N 为加速度曲线的长度; α_i 、 β_i 分别为加速度响应曲线上 i 点的仿真值和理论值; $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$ 分别为 α_i 、 β_i 的均值。

3.1.2 幅频误差的测量

在进行幅频误差测量时,本研究参考了文献[15]的测量方法。该文献在进行仿真模型验证时,使用动态系统的加速度响应作为目标响应,本研究也将桩基动态系统的加速度响应作为本研究的目标响应。因此,在本质上两者的目标响应是一致的。

加速度响应数据的斜率包含所有幅频误差信息,此时两组斜率数据间的动态时间弯曲距离即为幅频误差的测量值。为使分析结果直观明了,将误差测量值转化为 0~100% 的数值形式。相位误差阈值为 40,幅频阈值为 0.2^[15]。相位评分 R_ϵ 和幅频评分 R_φ 的计算式为:

$$R_\epsilon = \begin{cases} 100\%, & e_\epsilon = 0 \\ 0, & e_\epsilon \geq e_\epsilon^* \\ |(e_\epsilon^* - e_\epsilon) / e_\epsilon^*, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$R_\varphi = \begin{cases} 100\%, & e_\varphi = 0 \\ 0, & e_\varphi \geq e_\varphi^* \\ |(e_\varphi^* - e_\varphi) / e_\varphi^*, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: e_ϵ^* 、 e_φ^* 分别为可接受的相位、幅频误差阈值; e_ϵ 、 e_φ 分别为相位、幅频误差。

本研究对相位误差和幅频误差的权重分配为 1:2^[15]。相似性评分 E_{ij} 的计算公式为:

$$E_{ij} = \frac{1}{3}R_\epsilon + \frac{2}{3}R_\varphi \quad (12)$$

式中: R_ϵ 为相位评分; R_φ 为幅频评分; $i=1,2,3,\dots,9$; $j=1,2,3,\dots,8$ 。

3.2 一致性评分法

进行评分之前需要对数据进行主元分析^[16],以确定降维后每组响应间的权重。一致性评分法流程如图 5 所示。

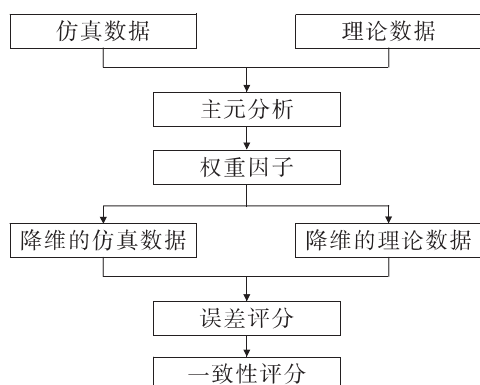


图 5 一致性评分法流程

Fig. 5 Process of consistency score

3.3 多信息融合

将每个组合的一致性评分结果的平均值作为唯一的考核指标,可达到多信息融合的目的。计算公式为:

$$\bar{E}_i = \frac{1}{8} \sum_j E_{ij}, i=1,2,3,\dots,9, j=1,2,3,\dots,8 \quad (13)$$

4 参数的反演

4.1 因素确定

根据单因素分析结果,选取动力学模型中的 4 个待反演参数 ζ 、 k 、 m_0 、 n_0 作为可控因素,构造出正交试验内表 $L_9(3^4)$,如表 4 所示。

表 4 可控因素

Table 4 Controllable factors

水平	阻尼 ζ	系数 k	指数 m_0	指数 n_0
1	0.80E+8	1.75E+8	0.37	0.36
2	1.15E+8	2.50E+8	0.53	0.52
3	1.50E+8	3.25E+8	0.69	0.68

将不同测点 A' 、 B' 、 C' 及敲击点 D' 作为噪声因素(外表)。因噪声因素在操作中不易控制,将噪声因素控制在两个不同水平上,由此构造出正交试验外表 $L_8(2^7)$,如表 5 所示。

表 5 噪声因素

Table 5 Noise factors

水平	测点距桩顶距离/mm			敲击点距桩顶距离 D' /mm
	A'	B'	C'	
1	0	400	800	0(工况 1)
2	200	600	1 000	200(工况 2)

4.2 参数反演

总共需要做 72 组试验,试验方案如表 6 所示。其中, E_{ij} 为内表、外表组合的一致性评分。本研究的目标响应值具有望大特性,因此评分均值最高的参数组合即为本研究的最优参数组合。

首先对理论数据和仿真数据进行标准化处理,然后利用主元分析法提取主成分。根据本研究反演设计方案,确定 72 个组合仿真数据和理论数据的主成分,针对主成分的提取结果进行一致性评分,具体结果见表 7。

表 6 试验方案

Table 6 Test scheme

正交试验类型	内表				外表					评分均值 \bar{E}
试验因素	可控因素试验设计				噪声因素					
					试验次序				噪声因素试验设计	
列号 试验次数	1 ζ	2 k	3 m_0	4 n_0	1	2	3	...	A'	
					1	1	2	...	B'	
					1	1	2	...	C'	
					1	2	1	...	D'	
1	1	1	1	1	E_{11}	E_{12}	E_{13}	...	E_1	
2	1	2	2	2	E_{21}	E_{22}	E_{23}	...	E_2	
3	1	3	3	3	E_{31}	E_{32}	E_{33}	...	E_3	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

表 7 一致性评分表

Table 7 Consistency score table

内表组合	E_{ij}	外表组合								均值 \bar{E}
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	E_{1j}	31.47	31.80	27.40	30.58	25.80	28.60	20.40	20.20	27.03
2	E_{2j}	63.60	63.67	74.27	67.67	73.80	67.33	62.20	63.33	66.98
3	E_{3j}	60.70	63.00	58.90	61.10	58.44	60.84	59.84	62.47	60.66
4	E_{4j}	59.20	58.90	62.13	64.37	61.73	64.30	57.46	58.44	60.82
5	E_{5j}	30.10	30.17	26.18	27.29	23.85	25.63	18.00	19.87	25.14
6	E_{6j}	63.26	64.59	60.70	63.46	60.23	63.26	61.51	64.12	62.64
7	E_{7j}	18.35	21.96	15.72	23.56	14.10	21.43	0.67	6.49	15.29
8	E_{8j}	64.99	66.96	62.17	64.59	62.53	64.46	64.03	66.49	64.53
9	E_{9j}	25.87	28.53	24.12	22.90	23.70	22.11	12.53	17.13	22.11

按照一致性评分策略,一致性评分均值越大,说明两条曲线的相似程度越高。从表 7 可以看出,内表组合 2 的一致性评分最高,为 66.98%。由此可以判断, ζ_1 、 k_2 、 m_{02} 、 n_{02} 为最优参数组合,其中 $\zeta=0.80E+8$, $k=2.50E+8$, $m_0=0.53$, $n_0=0.52$ 。

图 6(a)为桩顶位置的测点响应,图 6(b)为距桩顶 800 mm 位置处测点的响应。其中,反演曲线是在上述最优参数组合下的响应曲线,仿真曲线则是仿真模型计算得到的结果。

从图 6 可以看出:① 从第 2 个波峰开始,反演曲线和仿真曲线拟合度较高,峰值也很接近。计

算图 6(a)、6(b)的相关系数,分别为 0.80、0.78,说明两条曲线的拟合度较高,验证了本研究方法的正确性。② 图 6(a)中的响应幅值大于图 6(b)中的响应幅值。根据本研究安装的测点位置可知,各测点对敲击力的敏感程度不同。

为证实上述得到的结论,本研究对第 2 种作用工况(敲击点距桩顶 200 mm 处)下的响应曲线进行分析,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出:从第 2 个波峰开始,仿真曲线与反演曲线拟合度较高。测点对于敲击作用的敏感程度从上至下不断减小,与工况 1 得到的结果一致。

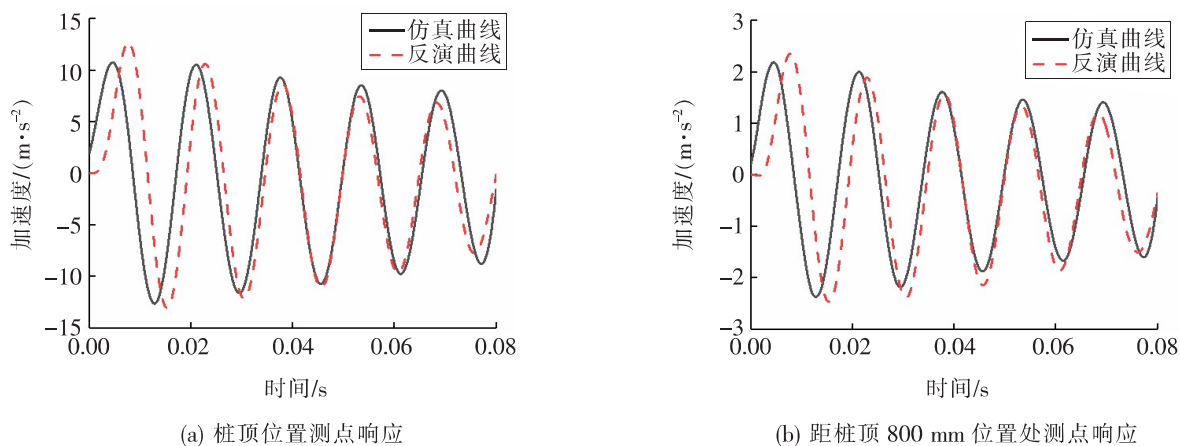


图 6 工况 1 结果曲线

Fig. 6 Result curve of condition 1

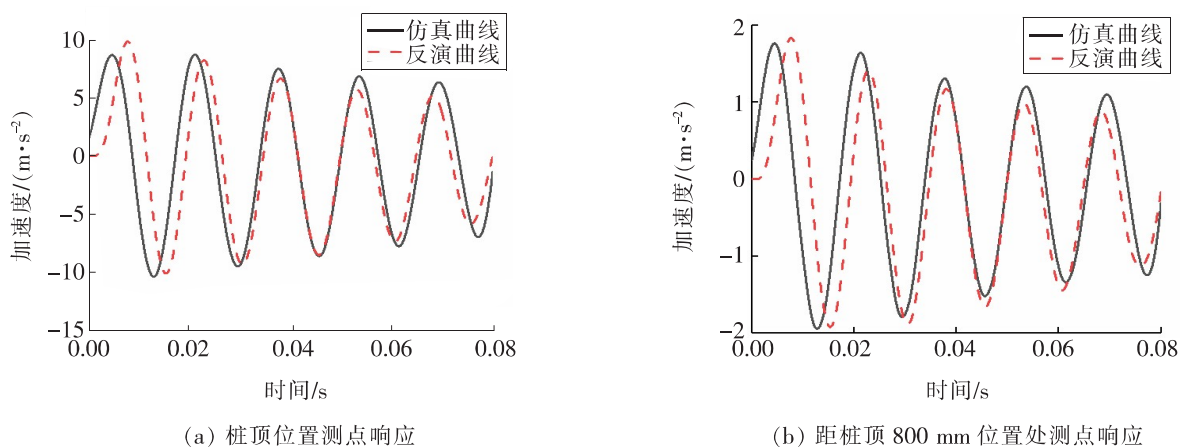


图 7 工况 2 结果曲线

Fig. 7 Result curve of condition 2

5 结论

本研究以钢管桩为研究对象,提出一种桩基动力学模型参数的反演识别方法。通过本研究可以得到以下结论:

1) 根据反演识别结果,确定模型参数为: $\zeta=0.80\text{E}+8$, $k=2.50\text{E}+8$, $m_0=0.53$, $n_0=0.52$,反演曲线与仿真曲线拟合程度良好。

2) 在同一敲击工况下,越靠近地基的测点对敲击敏感程度越低。

3) 在不同敲击工况下,桩基顶部测点对敲击的敏感程度最高。

本研究的创新性主要体现在:① 利用敲击的方式获取了桩基模型的加速度响应,对桩基没有破坏,同时也保证了在试验过程中桩基的无损检测;② 将测点和敲击点作为噪声因素,分析各组合响应曲线的特征差异,并确定参数反演的目标响

应值,提高了参数的稳健性;③ 利用多信息融合的方法,解决了参数反演目标响应值的唯一性问题。

本研究主要针对钢管桩展开了分析,效果良好。但不足之处是,由于条件所限用有限元模型代替了真实的桩基模型。为进一步验证方法的正确性,下一步需要开展实例研究。

〔参考文献〕

- [1] 郭朋鑫,肖岩. 大变形水平受荷桩静力分析方法综述[J]. 自然灾害学报,2015,24(3):132-142.
GUO Peng-xin, XIAO Yan. Review of analysis methods for laterally loaded pile subjected to large displacement[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(3):132-142.
- [2] 熊辉,杨丰. 文克尔地基模型下液化土基桩水平振动响应分析[J]. 岩土力学,2020(1):1-9.
XIONG Hui, YANG Feng. Horizontal vibration response analysis of pile foundation in liquefied soil under Winkler foundation model[J]. Rock and Soil Me-

- chanics, 2020(1):1-9.
- [3] Thicken K, Achmus M, Terceros M, et al. Evaluation of p - y approaches for large-diameter piles in layered sand[J]. International Journal of Offshore & Polar Engineering, 2018, 28(3): 318-327.
- [4] 冯忠居, 王富春. 钢管混凝土复合桩横轴向承载特性离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 114-123, 128.
- FENG Zhong-ju, WANG Fu-chun. Centrifuge model tests of horizontal bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(1): 114-123, 128.
- [5] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法: NL法[J]. 岩土力学, 2000(2): 97-101.
- YE Wan-ling, SHI Bei-ling. A practical non-linear calculation method of piles lateral bearing capacity: NL method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000(2): 97-101.
- [6] 罗仑博, 王媛. 基于现场试验的钢管桩分层土 p - y 曲线研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3 258-3 264.
- LUO Lun-bo, WANG Yuan. Research on p - y curve of layered soil of steel pipe piles based on field test[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(11): 3 258-3 264.
- [7] 李卫超, 杨敏, 朱碧堂. 砂土中刚性短桩的 p - y 模型案例研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2 989-2 995.
- LI Wei-chao, YANG Min, ZHU Bi-tang. Case study of p - y model for short rigid pile in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2 989-2 995.
- [8] 崔新壮. 横向载荷作用下桩土相互作用机理及护栏立柱承载力研究[D]. 北京: 中国科学院, 2004.
- CUI Xin-zhuang. Study on pile-soil interaction mechanism and bearing capacity of guardrail posts under lateral loads[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [9] 徐斌, 高跃飞, 余龙. MATLAB有限元结构动力学分析与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- XU Bing, GAO Yue-fei, YU Long. MATLAB finite element structural dynamic analysis and engineering application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [10] 刘美刚. 抗撞结构桩基非线性地基模型参数的原位无损检测方法 & 工具开发[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- LIU Mei-gang. Study on in-situ nondestructive testing method of nonlinear foundation model parameters of anti-collision structural pile foundation and tool development[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [11] 苟明兴. 道路抗撞结构桩基关系室内模拟试验规划及装备研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- GOU Ming-xing. Laboratory simulation test planning and equipment research on post-foundation relationship of road anti-collision structure[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [12] 刘加富, 孟剑锋, 任怀伟, 等. 切削仿真中的沙漏控制[J]. 现代制造工程, 2006(3): 42-44.
- LIU Jia-fu, MENG Jian-feng, REN Huai-wei, et al. Hourglass control in numerical simulation of machining[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006(3): 42-44.
- [13] 张维刚, 胡高贤. 土基中波形梁护栏立柱的有限元模型研究[J]. 公路交通科技, 2007(7): 143-146.
- ZHANG Wei-gang, HU Gao-xian. Finite element model of a W-beam guardrail post mounted in soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007(7): 143-146.
- [14] 甘轶. 基桩动测锤击效果的仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- GAN Yi. Simulating analysis of hitting effect on piles dynamic test[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [15] 陈小勇. 动态系统仿真模型验证方法及工具研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- CHEN Xiao-yong. Research on validation method and tool for simulation models of dynamic system[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [16] 张玉峰, 詹振飞, 李君明. 基于多分辨分析的MEARTH方法及其在汽车安全仿真模型确认中的应用[J]. 汽车技术, 2016(9): 13-17.
- ZHANG Yu-feng, ZHAN Zhen-fei, LI Jun-ming. Multiresolution analysis based MEARTH method and its application in automotive safety simulation model validation[J]. Automobile Technology, 2016(9): 13-17.