

桩底沉渣对桩的纵向振动特性影响研究及应用

王奎华^{1,2}, 吴文兵^{1,2}, 马少俊^{1,2}, 许进军^{1,2}

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 在桩底有限土层采用虚土桩模型情况下, 对桩底沉渣对非均质土中桩的动力特性的影响进行了研究。首先, 将桩端正下方土体模拟为与桩端完全接触的虚土桩模型; 然后, 对桩侧土采用多圈层平面应变模型, 并考虑其径向非均匀性, 利用剪切复刚度传递的方法, 递推得到了桩侧土作用在桩身的剪切复刚度, 结合得到的剪切复刚度, 利用阻抗函数递推方法, 递推得到虚土桩顶部纵向振动复刚度, 将其作为实际桩底的支撑刚度, 求解桩顶频域和时域动力响应函数表达式; 分析了桩底沉渣特性对桩的纵向振动特性的影响, 得到了桩底沉渣对桩基纵向振动响应影响的规律性。最后, 利用本文解对工程桩低应变反射波法实测曲线进行了反演拟合分析。

关键词: 桩底沉渣; 非均质土; 虚土桩; 复刚度传递法; 纵向振动

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)08-1227-08

作者简介: 王奎华(1965-), 男, 江苏滨海人, 博士, 现任教授, 博士生导师, 从事桩基动力学理论及土工测试技术、方法等方面研究。E-mail: zdwkh0618@zju.edu.cn。

Influence of sediment on vertical dynamic response of pile embedded in inhomogeneous soil and its application

WANG Kui-hua^{1,2}, WU Wen-bing^{1,2}, MA Shao-jun^{1,2}, XU Jin-jun^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Assuming the soil layers under the piles to be fictitious soil piles, the influence of sediment on the dynamic response of the piles in inhomogeneous soil is presented. Firstly, the finite soil layers under the piles are modelled as the fictitious soil piles whose cross-section area is the same as that of the piles. Using the complex stiffness transfer model of radial multi-zone plane strain, complex stiffness of different soil layers beside the piles is obtained. The complex stiffness of vertical vibration at the top of the fictitious soil piles is derived by means of the impedance function transfer method. Then, the analytical solutions of dynamic response at the pile top in frequency domain and the relevant semi-analytical solution response in time domain are obtained. The influence of sediment is investigated to obtain the nature of the dynamic response at the pile top in frequency domain and time domain. Finally, it is proved that the theoretical curves are in good agreement with those obtained from the field measurements.

Key words: sediment; inhomogeneous soil; fictitious soil pile; complex stiffness transfer method; vertical vibration

0 引言

钻孔灌注桩是桩基工程常用的基础形式, 但常因为施工工艺、施工条件的制约, 不能完全将桩底沉渣全部冲出孔底, 成桩后会在桩底残留一部分沉渣, 由于桩基工程的隐蔽性, 沉渣不易发现和清除。大量工程实践表明, 桩底沉渣的存在对桩的承载性能有着重要影响, 如沉渣是松散的, 它的承载能力远小于桩底没有经过破坏的地基, 使桩的极限承载力降低, 并且使桩端沉降过大, 从而导致基础不均匀沉降, 影响建筑物的正常使用。因此, 如何检测桩底沉渣厚度对钻

孔灌注桩的质量控制至关重要。传统的检测方法采用测绳量测, 这种方法误差大, 且不能确定成桩后的最终结果。钻孔取芯法和超声波透射法均能直观地观察沉渣情况, 但两种方法均耗时长, 费用大, 不可能整个区域控制。但利用低应变检测信号在桩尖处的反射特征可以定性判断桩底沉渣的情况。文献[1~4]分别从试验、数值仿真分析和理论研究3个方向尝试建

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879077); 浙江省重点创新团队支持计划资助项目(2009R50050)

收稿日期: 2010-06-09

立桩底沉渣与桩顶响应曲线的对应关系,并取得了一些有意义的结论,但由于桩底沉渣性质复杂和桩端土的成层性,现有研究成果仍没有完全解决该问题。为此,本文尝试用解析方法进一步研究桩底沉渣对桩顶动力响应的影响,试图建立严格的桩底沉渣特性与桩顶响应曲线对应关系。

此前,在研究桩底土对桩的作用时,基本上有4种处理方式:①把桩端看成刚性支承^[5-9],这种处理方法在研究嵌岩桩时具有足够精度,但对摩擦桩和端承摩擦桩是不适用的;②采用简化的动态 Winkler 模型,即桩底土体对桩的作用采用分布式线性弹簧和阻尼器并联代替^[10-13],这种处理应用比较方便,但是弹簧和阻尼器的参数只能根据经验来取常数值,与常规的土参数缺乏联系;③桩底土对桩尖的作用采用非线性的分布式弹簧和阻尼器并联代替^[14-16],一般表示成复阻抗函数的形式,其实部和虚部取值通过均质弹性半空间表面刚性圆盘振动计算得到,这种方法建立了模型参数与土参数及桩参数的联系,并在基桩高应变分析中得到了广泛的应用,但该模型无法考虑桩端以下土层的成层性因素、持力层厚度以及桩底土体受施工扰动或桩底沉渣等因素的影响;④采用均质弹性半空间土介质叠加虚拟杆处理方法^[17-21],即把桩基看成是在均质弹性半空间中叠加一根虚拟的有限长杆。这些处理方法均无法综合考虑桩底沉渣对桩竖向动力响应的作用机理。同时,桩基施工过程中,由于挤土效应、松弛效应及其他因素的影响,在距离桩中心不同范围内,土的物理和力学性质会发生不同程度的改变,也就是说土体性质存在径向非均匀性,而目前桩的振动理论对这一特殊性的研究仍不够完善。基于这一背景,笔者等提出虚土桩模型来考虑桩底沉渣,求解非均质土中(纵向成层性及径向非均匀性)桩的振动特性,分析桩顶频域和时域动力响应的变化特性,为桩基完整性检测提供理论依据。

1 数学模型

1.1 计算简图

虚土桩模型的基本思路:把桩身正下方桩底至基岩之间的土体看成为“土桩”(即所谓虚土桩,其参数取实际土层的参数,而其变形按类似于桩的平面变形假定),根据桩端实际土层成层性情况及桩底是否有沉渣或是否受到挤密作用而把虚土桩、桩分为 m 段,自虚土桩桩身底部开始依次编号为 $1, 2, \dots, i, \dots, m$ 段,各段厚度分别为 $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_m$,各段顶部深度分别为 $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_m$,每一段桩或者虚土桩材料为均质,截面尺寸相同, r_{i1} 为第 i 段

桩(虚土桩)的半径。桩周围的土体为纵向成层、径向非均匀介质,每一层桩侧或者虚土桩侧土体的复刚度按照文献[22]介绍的复刚度传递法求解。模型简图如图1(图中的厚度为 l_i)所示。

1.2 各有关耦合条件

(1)土层上表面为自由边界,无正应力和剪应力,虚土桩底部为刚性支承。

(2)任意段桩-土接触面上,土体动应力通过复刚度传递给桩。

(3)任意段虚土桩-土接触面上,土体动应力通过复刚度传递给虚土桩。

(4)桩底端与虚土桩交界面以及虚土桩、桩各段交界面之间完全连续接触。

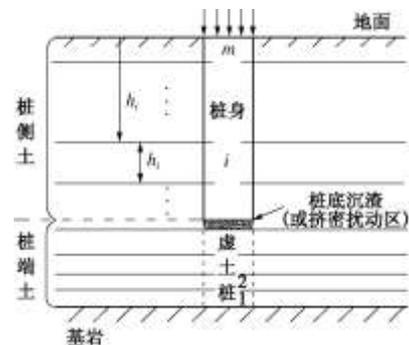


图1 虚土桩模型示意图

Fig. 1 Model of fictitious soil pile

2 虚土桩模型动力方程建立及求解

2.1 土体振动模型

将桩周土体分为两大区域:①远离桩身区域(下文称作外部区域),该区域不受桩的施工效应影响,土体性质呈径向均匀性;②靠近桩身区域(下文称作内部区域),该区域厚度用 b 表示,受桩的施工效应影响,土体性质随距离桩中心远近而发生变化,将内部区域划分为多个土体切变模量和密实度渐变的同心圆层,来描述土体的径向不均匀性,在每个小圈层内土体为均质。当处于圈层中心的桩受到竖向激励时,土体也会随桩一起产生竖向振动。桩侧土对桩产生剪力,用土体剪切复刚度来描述。每一层土体剪切复刚度采用文献[22]的复刚度传递多圈层平面应变模型计算,本文不作赘述。利用复刚度传递平面应变模型,可以得到第 i 段桩身侧壁处土体复刚度 KK_{i1} 。

2.2 桩动力模型

在求得桩、土接触面上单位长度方向的土竖向剪切复刚度 KK_{i1} 后,则容易得到考虑材料阻尼时桩(或虚土桩,对于虚土桩的桩身参数值取土体的参数值)顶受竖向激振力作用下第 i 段桩(或虚土桩)的纵向

振动控制方程:

$$E_{pi} A_{pi} \frac{\partial^2 u_i(z,t)}{\partial z^2} + A_{pi} \delta_{pi} \frac{\partial^3 u_i(z,t)}{\partial z^2 \partial t} - m_{pi} \frac{\partial^2 u_i(z,t)}{\partial t^2} - f_i(z,t) = 0, \quad (1)$$

式中, $u_i(z,t)$, E_{pi} , A_{pi} , m_{pi} , δ_{pi} , $f_i(z,t)$ 分别为第 i 段桩身的位移, 弹性模量, 横截面积, 单位长度桩身质量, 桩材料粘性阻尼系数以及土体对第 i 段桩身的作用力, $f_i(z,t) = KK_{i1}u_i(z,t)$ 。需要说明的是, 桩土系统振动频率通常处在低频范围, 且桩的长径比通常大于 10, 因此采用一维杆件模型的式 (1) 是具有足够精度的。

相邻桩段分界面两侧的桩身位移和截面力满足连续条件, 即

$$u_i(z,t)|_{z=h_i} = u_{i+1}(z,t)|_{z=h_i}, \quad (2)$$

$$[E_{pi} A_{pi} \frac{\partial u_i(z,t)}{\partial z} + A_{pi} \delta_{pi} \frac{\partial^2 u_i(z,t)}{\partial z \partial t}]|_{z=h_i} = [E_{p(i+1)} A_{p(i+1)} \frac{\partial u_{i+1}(z,t)}{\partial z} + A_{p(i+1)} \delta_{p(i+1)} \frac{\partial^2 u_{i+1}(z,t)}{\partial z \partial t}]|_{z=h_i} \quad (3)$$

桩顶及桩底处的边界条件为

$$[E_{pm} A_{pm} \frac{\partial u_m(z,t)}{\partial z} + A_{pm} \delta_{pm} \frac{\partial^2 u_m(z,t)}{\partial z \partial t}]|_{z=0} = -Q(t), \quad (4)$$

$$u_1(z,t) = 0, \quad (5)$$

式中, $Q(t)$ 为桩顶激振力。

桩顶动力作用开始时满足的初始条件为

$$\left. \begin{aligned} u_i(z,t)|_{t=0} &= 0, \\ \frac{\partial u_i(z,t)}{\partial t}|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.3 虚土桩法模型纵向振动方程求解

结合初始条件 (6), 对桩 (虚土桩) 动力平衡方程 (1) 进行拉普拉斯变换并简化, 可得

$$V_{pi}^2 (1 + \frac{\delta_{pi}}{E_{pi}} s) \frac{\partial^2 U_i(z,s)}{\partial z^2} - (s^2 + \frac{1}{\rho_{pi} A_{pi}} KK_{i1}) U_i(z,s) = 0, \quad (7)$$

式中, $U_i(z,s) = \mathcal{L}[u_i(z,t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} u_i(z,t) e^{-st} dt$, 为 $u_i(z,t)$ 的拉普拉斯变换形式。 V_{pi} , ρ_{pi} 分别为第 i 段桩 (或虚土桩) 的一维弹性纵波波速、材料密度, 且满足 $E_{pi} = \rho_{pi} V_{pi}^2$ 。不难求得式 (7) 的解为

$$U_i(z,s) = D_{1i} \cos(\bar{\lambda}_i z / l_i) + D_{2i} \sin(\bar{\lambda}_i z / l_i), \quad (8)$$

式中, $\bar{\lambda}_i = \sqrt{-(s^2 + \frac{KK_{i1}}{\rho_{pi} A_{pi}}) t_i^2 / (1 + \frac{\delta_{pi}}{E_{pi}} s)}$ 为无量纲特征值, D_{1i} , D_{2i} 为由边界条件确定的待定系数。 $t_i = l_i / V_{pi}$ 为弹性纵波在第 i 段桩身 (或虚土桩) 内传播所需的时间, 弹性纵波在整个桩中传播所需的时间为 T_c 。

根据阻抗函数的定义 (力除以位移) 可得第 m 段

桩顶部 ($z = h_m$) 截面处的位移阻抗函数的表达式:

$$Z_{pm} |_{z=h_m=0} = \frac{-[E_{pm} A_{pm} \frac{\partial U_m(z,s)}{\partial z} + A_{pm} \delta_{pm} s \frac{\partial U_m(z,s)}{\partial z}]|_{z=0}}{U_m(z,s)|_{z=0}} = -\frac{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm} (1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}} s) \bar{\lambda}_m \tan(\bar{\lambda}_m - \phi_m)}{t_m}, \quad (9)$$

式中, $\phi_m = \arctan \frac{Z_{p(m-1)} t_m}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm} \bar{\lambda}_m (1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}} s)}$, $Z_{p(m-1)}$ 为第

$m-1$ 微元段桩顶部的位移阻抗函数, 可结合阻抗函数的传递性由边界条件得到。

通过桩顶位移阻抗函数, 可得桩顶速度传递函数为

$$H_v = \frac{s}{Z_{pm}} = -\frac{st_m}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm} (1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}} s) \bar{\lambda}_m \tan(\bar{\lambda}_m - \phi_m)}. \quad (10)$$

在式 (10) 中令 $s = j\omega$, 则桩顶速度频率响应函数为

$$H_v = -\frac{1}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm} (1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} j\bar{\omega}) \bar{\lambda}_m \tan(\bar{\lambda}_m - \phi_m)} j\bar{\omega} \bar{t}_m, \quad (11)$$

式中, $\bar{\omega} = T_c \omega$, $\bar{t}_m = t_m / T_c$ 为无量纲频率和第 m 段桩身传递无量纲时间。

对式 (11) 进行无量纲化后得到桩顶无量纲速度导纳 (见式 (12)), 以其作为纵坐标, 以 ω 作为横坐标, 即可得到桩顶速度导纳曲线:

$$|H'_v| = \frac{j\bar{\omega} \bar{t}_m}{(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} j\bar{\omega}) \bar{\lambda}_m \tan(\bar{\lambda}_m - \phi_m)}. \quad (12)$$

当桩顶受到半正弦脉冲激励力 $f(t) = Q_{max} \sin \frac{\pi t}{T}$,

其中 $t \in (0, T)$, T 为脉冲延续时间作用时, 桩顶时域响应半解析表达式为

$$V(t) = -\frac{1}{2} \frac{Q_{max}}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j\bar{\omega} \bar{t}_m}{(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} j\bar{\omega}) \bar{\lambda}_m \tan(\bar{\lambda}_m - \phi_m)} \frac{\bar{T}}{\pi^2 - \bar{T}^2 \bar{\omega}^2} (1 + e^{-j\bar{\omega} \bar{T}}) e^{j\bar{\omega} \bar{t}} d\bar{\omega}. \quad (13)$$

对上述桩顶速度响应也进行无量纲化, 无量纲速度响应为 (后续分析均用此式)

$$V' = -\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j\bar{\omega} \bar{t}_m}{(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} j\bar{\omega}) \bar{\lambda}_m \tan(\bar{\lambda}_m - \phi_m)} \frac{\bar{T}}{\pi^2 - \bar{T}^2 \bar{\omega}^2} (1 + e^{-j\bar{\omega} \bar{T}}) e^{j\bar{\omega} \bar{t}} d\bar{\omega}, \quad (14)$$

式中, $\bar{T} = T / T_c$, $\bar{t} = t / T_c$ 分别为无量纲脉冲宽度因

子和无量纲时间因子。第 i 段桩的无量纲粘性系数为 $\bar{\delta}_{pi} = \delta_{pi} / (E_{pi} T_c)$ 。

3 数值分析

根据桩尖是否嵌入基岩可把桩分为嵌岩桩与非嵌岩桩，大量工程经验表明，两类桩的承载性能极不相同，它们的动力特性差别很大。下面根据本文理论对考虑桩底沉渣时嵌岩桩与非嵌岩桩的振动特性进行分析研究。

3.1 考虑桩底沉渣时嵌岩桩振动特性分析

(1) 沉渣厚度对嵌岩桩振动特性影响分析

嵌岩桩大多为端承桩，规范^[23]对端承桩桩底沉渣厚度验收要求为 ≤ 50 mm。在此，将沉渣厚度 l_s 分为满足规范要求与不满足规范要求进行分析。

满足规范要求时，沉渣厚度 l_s 分别为 0, 0.005, 0.01, 0.05 m，沉渣湿密度 1700 kg/m^3 ，纵波波速 1200 m/s 。桩周土从外部区域到内部区域，剪切波速从 200 m/s 线性减小到 150 m/s ，桩周土密度为 2000 kg/m^3 ，内部区域厚度 $b = 2.5r$ 。根据文献^[22]，内部区域圈层数划分到 20 层时即可满足精度要求，因此，本文在分析时，内部区域统一划分为 20 层。桩长 $H = 10 \text{ m}$ ，桩半径 $r = 0.5 \text{ m}$ ，桩密度 $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$ ，桩的一维弹性纵波波速 $V_p = 4000 \text{ m/s}$ ，桩材料阻尼 $\delta_p = 0$ 。

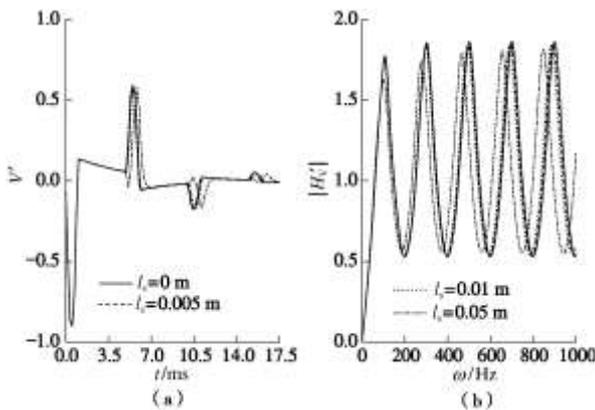


图2 沉渣厚度对桩顶响应曲线的影响

Fig. 2 Influence of sediment depth on dynamic response at pile top

图2反映了满足规范要求时沉渣厚度对嵌岩桩桩顶响应曲线的影响。从图可以看出，随着沉渣厚度逐渐变大，桩顶时域速度响应曲线（即反射波法测试曲线）上桩尖渐渐出现同向反射信号，并且同向反射信号幅值越来越大，反向反射信号出现滞后现象，并且幅值越来越小。这是因为应力波先遇到桩端与沉渣的交界面时反射同向信号，穿过沉渣到基岩面并反射反向信号，这种情况表明沉渣较薄，应力波还没有被沉

渣阻隔而继续下传到基岩并反射回桩顶。而从速度导纳曲线上可以看出，随着沉渣厚度的增大，共振峰峰值基本不变，共振频率逐渐变小。

由于施工条件和施工水平的限制，往往导致沉渣过厚。沉渣厚度不满足规范^[23]要求时， l_s 分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3 m。其它参数不变。

图3反映了不满足规范要求时沉渣厚度对嵌岩桩桩顶响应曲线的影响。从图可以看出，随着沉渣厚度进一步变大，桩顶时域速度响应曲线上桩尖同向反射信号幅值明显增大，反向反射信号幅值进一步减小。试算表明，当进一步增大沉渣厚度时，桩顶时域速度响应曲线上只出现同向反射信号，并且反射信号幅值渐渐趋于稳定。这说明，沉渣厚度过厚，应力波在到达桩底后被沉渣阻隔而到不了桩底基岩。同时，桩顶频域速度导纳曲线反映的规律与沉渣厚度满足规范要求时一致，共振频率随着沉渣厚度的增加而逐渐减小，共振峰值基本不变。

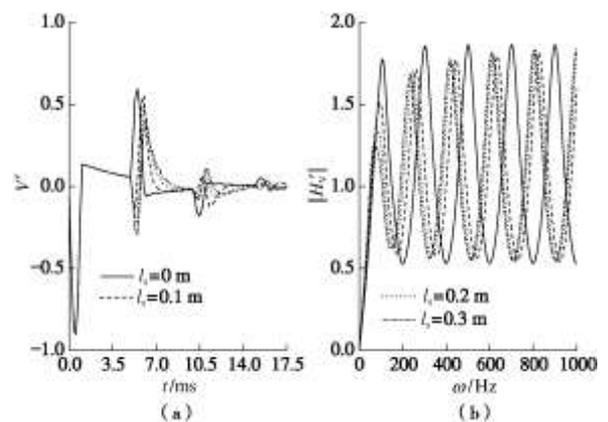


图3 沉渣厚度对桩顶响应曲线的影响

Fig. 3 Influence of sediment depth on dynamic response at pile top

(2) 沉渣纵波波速对嵌岩桩振动特性影响分析

桩周土与桩参数同(1)，沉渣厚度为 50 mm，沉渣湿密度 1700 kg/m^3 ，纵波波速 V_{ps} 分别为 1500, 1400, 1300, 1200 m/s。

图4反映了沉渣纵波波速 (V_{ps}) 对嵌岩桩桩顶响应曲线的影响。由图可以看出，沉渣纵波波速越小（桩身质量越差），桩顶时域速度响应曲线上桩尖渐渐出现同向反射信号，且同向反射信号幅值越来越大，这是因为沉渣纵波波速越小，应力波穿过沉渣的时间就越长，这就等同于沉渣厚度越厚，从而呈现出与桩顶响应曲线随沉渣厚度变化相类似的规律。试算表明，当进一步减小沉渣纵波波速时，桩顶时域速度响应曲线上桩尖同向反射信号幅值会进一步增大。同时，桩顶频域速度导纳曲线上容易看出，随着沉渣厚度的增大，共振峰峰值基本不变，共振频率逐渐变小。

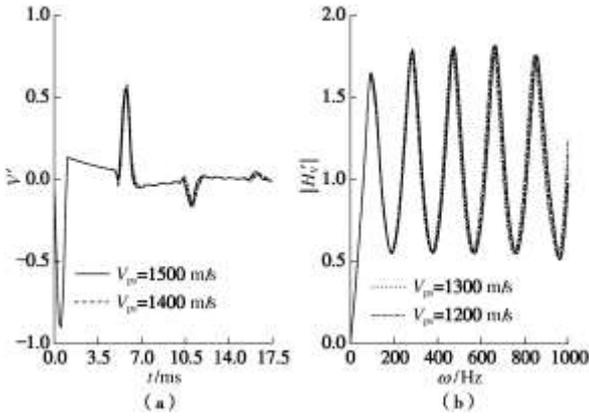


图 4 沉渣纵波波速对桩顶响应曲线的影响

Fig. 4 Influence of longitudinal wave velocity of sediment on dynamic response at pile top

3.2 考虑桩底沉渣时非嵌岩桩振动特性分析

(1) 持力层厚度对非嵌岩桩振动特性影响分析

桩周土与桩参数同前, 沉渣厚度为 50 mm, 沉渣湿密度 1700 kg/m³, 纵波波速为 1200 m/s; 持力层湿密度为 2000 kg/m³, 纵波波速为 1000 m/s, 持力层厚度 l_b 分别为 1, 3, 5, 10 m。

图 5 反映了持力层厚度 l_b 对非嵌岩桩桩顶响应曲线的影响。由图可以看出, 在持力层厚度较小时 (本例 $l_b < 1$ m), 桩顶时域速度响应曲线衰减比较缓慢, 而且在桩尖二次反射的过程中出现不规则信号, 这是由于信号在沉渣与持力层之间来回反射所致。随着持力层厚度的增加 (本例 $l_b > 5$ m), 桩顶时域速度响应曲线基本趋于一致, 桩顶频域速度导纳曲线也基本趋于一致, 这说明当持力层厚度达到一定值时, 沉渣对桩基振动特性基本没有影响。

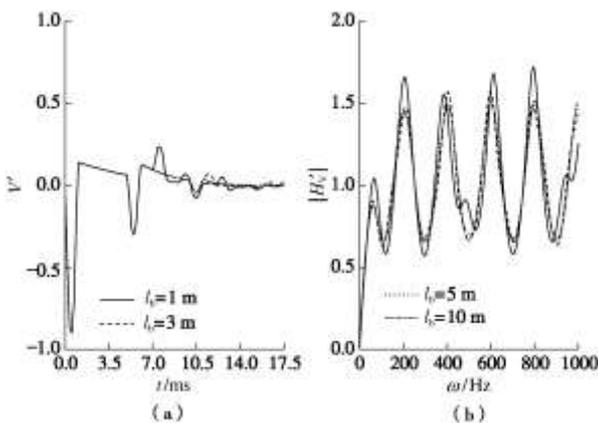


图 5 持力层厚度对桩顶响应曲线的影响

Fig. 5 Influence of supporting course depth on dynamic response at pile top

(2) 沉渣厚度对非嵌岩桩振动特性影响分析

非嵌岩桩大多为摩擦桩, 规范^[23]对摩擦桩桩底沉渣厚度验收要求为 ≤ 150 mm, 在此沉渣厚度分别取为

0, 5, 50, 150 mm 进行分析, 沉渣湿密度 1700 kg/m³, 纵波波速为 1200 m/s。桩周土与桩参数同前。持力层厚度为 $l_b = 5$ m, 湿密度为 2000 kg/m³, 纵波波速为 1000 m/s。

图 6 反映了沉渣厚度对非嵌岩桩桩顶响应曲线的影响。由图可以看出, 当持力层取 5 m 时, 沉渣厚度的变化基本不会对桩顶响应曲线产生影响。

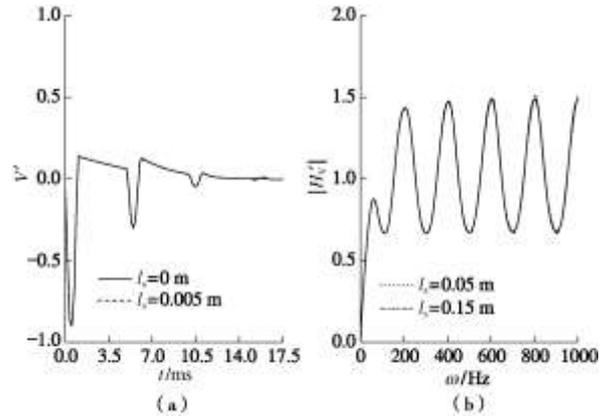


图 6 沉渣厚度对桩顶响应曲线的影响

Fig. 6 Influence of sediment depth on dynamic response at pile top

(3) 沉渣纵波波速对非嵌岩桩振动特性影响分析

桩周土与桩参数同前, 沉渣厚度为 50 mm, 沉渣湿密度 1700 kg/m³, 纵波波速分别为 1200, 900, 600, 300 m/s。持力层厚度为 $l_b = 5$ m, 湿密度为 2000 kg/m³, 纵波波速为 1000 m/s。

图 7 反映了沉渣纵波波速 V_{ps} 对非嵌岩桩桩顶响应曲线的影响。由图可以看出, 沉渣纵波波速越小, 桩顶时域速度响应曲线上桩尖同向反射信号幅值越大, 并且衰减越慢。同时在桩顶速度导纳曲线上容易看出, 随着沉渣纵波波速的减少, 导纳曲线各阶共振峰值出现不同程度的增大, 共振峰位置不变。

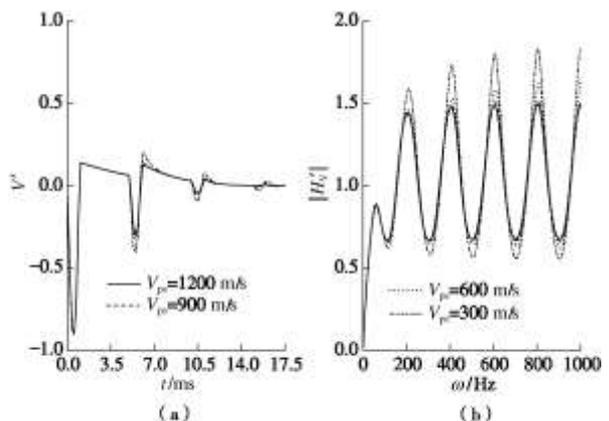


图 7 沉渣纵波波速对桩顶响应曲线的影响

Fig. 7 Influence of longitudinal wave velocity of sediment on dynamic response at pile top

4 工程应用

为了进一步验证虚土桩模型及本文解的合理性，利用本文解对工程桩现场低应变反射波法实测曲线作了反演拟合分析。图 8~10 是温福铁路某特大桥^[24]3 根钻孔灌注桩的低应变反射波法实测曲线与理论曲线的反演拟合结果。3 根桩均设计为嵌岩桩，设计参数及拟合数据见表 1。由图 8~10 可以看出，由于钻孔灌注桩不是理想等截面均匀直杆，同时由于桩径较大，导致实测曲线存在一定的频散效应，出现了一定程度的振荡现象。黎正根等^[25]、陈凡等^[26]的工作对由于频散效应引起的这种振荡现象进行了深入细致的研究。虽然本文对桩采用了一维杆件模型，但从 3 根桩反演拟合结果可以看出，3 根桩的实测曲线和拟合曲线是比较接近的。因此，本文的研究至少可以说明两方

表 1 三根工程桩设计参数及桩底沉渣厚度值

Table 1 Design parameters and values of sediment depth of three piles

桩号	桩长 /m	桩径 /mm	桩身混凝土编号	实测桩底沉渣厚度 /m	拟合桩底沉渣厚度 /m
4-1-2	26.0	1000	C25	0	0
26-9	32.8	1000	C30	0.3	0.32
55-10	26.5	1000	C30	2	2.05

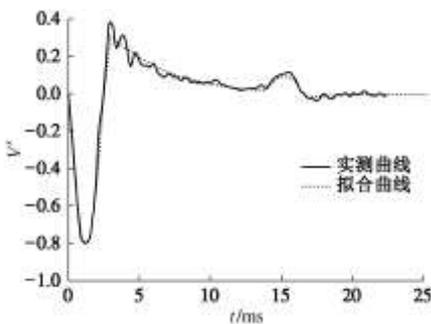


图 8 桩 4-1-2 桩顶时域响应曲线的实测和反演拟合结果

Fig. 8 Fitting results of computed and measured response curves in time domain of pile 4-1-2

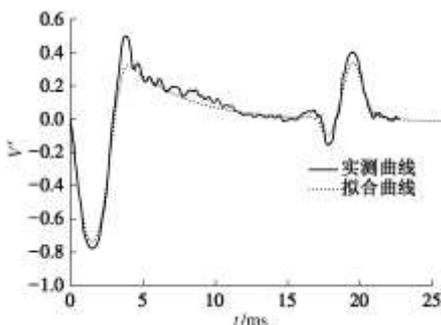


图 9 桩 26-9 桩顶时域响应曲线的实测和反演拟合结果

Fig. 9 Fitting results of computed and measured response curves on the time domain of pile 26-9

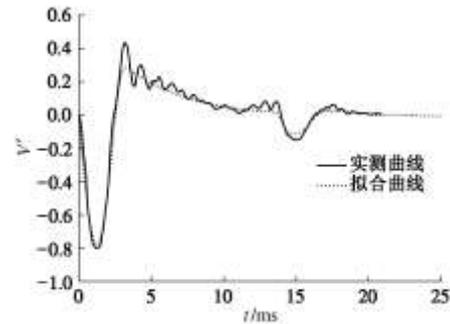


图 10 桩 55-10 桩顶时域响应曲线的实测和反演拟合结果

Fig. 10 Fitting results of computed and measured response curves in time domain of pile 55-10

面的问题：①采用虚土桩模型来模拟桩底土对桩的作用是可的；②采用本文的研究成果可以定性拟合出桩底沉渣的厚度。在后续研究中，笔者将进一步研究考虑大直径桩的横向惯性效应时，桩底沉渣对桩顶动力响应的影响，以期得到一个更加精确的解，从而为利用低应变反射波法测试判断桩底沉渣的特性提供理论依据。

5 结 论

将桩端正下方土体模拟为与桩端完全接触的虚土桩模型，对桩侧土采用基于复刚度传递的多圈层平面应变模型，求解得到了虚土桩顶部纵向振动复刚度，将其作为实际桩底的支撑刚度，进而得到桩顶动力响应频域解析解和时域半解析解。通过参数研究方法，分别讨论了桩底沉渣对嵌岩桩与非嵌岩桩纵向振动特性的影响，并与工程实测数据进行了反演拟合对比分析。主要结论如下：

(1) 对于嵌岩桩，桩顶时域速度响应曲线上同向反射峰值会随着沉渣厚度的增大逐渐增大，而反向发射峰值随沉渣厚度的增加逐渐减小，减小幅度较小。当沉渣厚度达到一定值时，桩顶时域速度响应曲线上只有桩尖同向反射信号。因此，在利用反射波法进行嵌岩桩桩身质量检测时，如果出现明显的桩尖同向反射信号，则桩端极有可能存在一定厚度的沉渣，应当加以重视。

(2) 对于嵌岩桩，桩顶时域速度响应曲线上同向反射曲线峰值会随着沉渣质量的变差而不断变大，反向反射峰值呈现减小趋势，减小幅度较小。桩顶频域速度导纳曲线上共振峰峰值随沉渣质量的变化基本保持不变，共振频率随着沉渣厚度的增加出现提前现象。

(3) 对于非嵌岩桩，沉渣厚度变化对桩顶响应曲线基本没有影响，但沉渣质量越差，桩顶时域速度响应曲线上桩尖反射信号幅值越大，桩顶速度导纳曲线上共振峰峰值出现不同程度的增大，共振峰位置基本

不变。

(4)工程桩低应变反射波法曲线的反演拟合分析表明,采用虚土桩法来分析桩底沉渣是可靠的。研究表明,在获取工程桩现场低应变反射波法实测曲线后,结合本文解,利用反演拟合的方法可以定性地得到桩底沉渣的特性。

参考文献:

- [1] 蔡邦国, 陈德银. 嵌岩桩桩底沉渣在桩基检测信号中的反应[J]. 土工基础, 2005, **19**(5): 89 - 90. (CAI Bang-guo, CHEN De-yin. Reflection of residence around inserted pile bottom in pile foundation checking signals[J]. Soil Engineering And Foundation, 2005, **19**(5): 89 - 90.(in Chinese))
- [2] 旺 昕, 刘 誉, 徐 辉. 沉渣对低应变曲线影响的仿真分析[J]. 土工基础, 2009, **23**(3): 74 - 76. (WANG Xin, LIU Yu, XU Hui. Numeral analysis of low strain curves influenced by dregginess[J]. Soil Engineering And Foundation, 2009, **23**(3): 74 - 76. (in Chinese))
- [3] 吴继敏, 董志高, 董 平. 钻孔灌注桩桩底沉渣对桩承载性状影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, **9**(5): 546 - 551. (WU Ji-min, DONG Zhi-gao, DONG Ping. Influence of bottom sediment on the bearing capacity of pedrilled cast-in-place pile[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2008, **9**(5): 546 - 551. (in Chinese))
- [4] 刘煜洲, 刘东甲, 王英杰. 嵌岩桩与含沉渣桩低应变动力检测曲线理论计算方法与特征研究[J]. 物探化探计算技术, 2003, **25**(2): 97 - 104. (LIU Yu-zhou, LIU Dong-jia, WANG Ying-jie. The theoretical calculation and characteristic study in low strain dynamic testing of pile embeded in rock and pile with dregs[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, **25**(2): 97 - 104. (in Chinese))
- [5] EL NAGGAR M H, NOVAK M. Nonlinear axial interaction in pile dynamics[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(4): 678 - 696.
- [6] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 有限长桩受迫振动问题解析解及其应用[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(6): 27 - 35. (WANG Kui-hua, XIE Kang-he, ZENG Guo-xi. Analytical solution to vibration of finite length pile under exciting force and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(6): 27 - 35. (in Chinese))
- [7] 胡昌斌, 王奎华, 谢康和. 基于平面应变假定基桩振动理论适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(5): 595 - 601. (HU Chang-bin, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Study on theories of axial response of dynamically loaded single piles based on plane strain assumption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(5): 595 - 601. (in Chinese))
- [8] 李 强, 王奎华, 谢康和. 饱和土中端承桩纵向振动特性研究[J]. 力学学报, 2004, **36**(4): 435 - 442. (LI Qiang, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Vertical vibration of an end bearing pile embedded in saturated soil[J]. Acta Mechnica Sinica, 2004, **36**(4): 435 - 442. (in Chinese))
- [9] 王海东, 尚守平. 瑞利波作用下径向非匀质地基中的单桩竖向响应研究[J]. 振动工程学报, 2006, **19**(2): 258 - 264. (WANG Hai-dong, SHANG Shou-ping. Research on vertical dynamic response of single-pile in radically inhomogeneous soil during the passage of Rayleigh waves[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, **19**(2): 258 - 264. (in Chinese))
- [10] NOGAMI T, KONGAI K. Time domain axial response of dynamically loaded single piles[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1986(112): 1241 - 1252.
- [11] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 变截面阻抗桩受迫振动问题解析解及应用[J]. 土木工程学报, 1998, **31**(6): 56 - 67. (WANG Kui-hua, XIE Kang-he, ZENG Guo-xi. An analytical solution to forced vibration of foundation pile with variable section impedance and its application[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, **31**(6): 56 - 67. (in Chinese))
- [12] 刘东甲. 不均匀土中多缺陷桩的轴向动力响应[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(4): 391 - 395. (LIU Dong-jia. Dynamic axial response of multi-defective piles in nonhomogeneous soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(4): 391 - 395. (in Chinese))
- [13] 孔德森, 栾茂田, 杨 庆. 桩土相互作用分析中的动态 Winkler 模型研究评述[J]. 世界地震工程, 2005, **21**(1): 12 - 17. (KONG De-sen, LUAN Mao-tian. YANG Qing. Review of dynamic Winkler model appfied in pile-soil interaction analyses[J]. World Earthquake Engineering, 2005, **21**(1): 12 - 17. (in Chinese))
- [14] LYSMER J, RICHARD F E. Dynamic response of footings to vertical loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1966(92): 65 - 91.
- [15] RANDOLPH M F, DEEKS A J. Dynamic and static soil models for axial response[C]// Proc 4th Int Conf on the Application of Stress Wave Theory to Piles, The Hague, 1992: 3 - 14.
- [16] GAZETAS G, MAKRIS N. Dynamic pile-soil-pile interaction. Part I :analysis of axial vibration[J]. Earthquake Engineering

- and Structure Dynamic, 1991, **20**(1): 115 - 132.
- [17] ZENG X, RAJAPAKSE R K N D. Dynamic axial load transfer from elastic bar to poroelastic medium[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1999, **125**(9): 1048 - 1055.
- [18] MUKI R, STERNBERG E. Electrostatic load transfer to a half space from a partially embedded axially loaded rod[J]. International Journal of Solids and Structures, 1970(6): 69 - 90.
- [19] MILITANO G, RAJAPAKSE R K N D. Dynamic response of a pile in a multi-layered soil to transient torsional and axial loading[J]. Geotechnique, 1999, **49**(1): 91 - 109.
- [20] CAI Y Q, CHEN G, XU C J, WU D Z. Torsional response of pile embedded in a poroelastic medium [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006(26): 1143 - 1148.
- [21] WANG G C, GE W, PAN X D, et al. Torsional vibrations of single piles embedded in saturated medium[J]. Computers and Geotechnics, 2008(35): 11 - 21.
- [22] 杨冬英. 复杂非均质土中桩土竖向振动理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. (YANG Dong-ying. Study on pile vertical vibration in inhomogeneous soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese))
- [23] GB50202—2002 建筑地基基础工程施工质量验收规范[S]. 2002. (GB50202—2002 Code for acceptance of construction quality of building foundation[S]. 2002. (in Chinese))
- [24] 景 胜. 嵌岩桩桩底低应变反射波曲线特征及实例分析[J]. 岩土工程界, 2008, **11**(2): 65 - 66. (JING Sheng. Low strain reflective wave curves of Inserted Pile Bottom in Pile foundation checking signals[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, **11**(2): 65 - 66. (in Chinese))
- [25] 黎正根, 龚育龄. 波在大直径桩中传播的三维效应现象[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(4): 434 - 439. (LI Zheng-gen, GONG Yu-ling. Discussion on three mensional effect of wave propagating in the pile with large diameter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(4): 434 - 439. (in Chinese))
- [26] 陈 凡, 王仁军. 尺寸效应对基桩低应变完整性检测的影响[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(5): 92 - 96. (CHEN Fan, WANG Ren-jun. Dimension effect on low strain integrity testing of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 92 - 96. (in Chinese))

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》以及本刊网站全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 2009 年起每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)