

文章编号:1673-9469(2022)03-0007-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.03.002

桩底沉渣性质对成层粘弹性土中大直径 灌注桩动力响应的影响

吴鸿昇¹,刘勇¹,蔡辉敏¹,白钊¹,李斌¹,李方林¹,刘坚^{2*}

(1. 国网江苏省电力工程咨询有限公司,江苏南京 210036;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京 210098)

摘要: 为了研究桩底沉渣性质对成层粘弹性土中大直径灌注桩动力响应的影响。首先,将桩底沉渣看作虚土桩,并引入 Rayleigh-Love 杆模型建立桩及虚土桩纵向振动控制方程,以近似考虑大直径灌注桩的三维效应;然后,基于三维轴对称模型建立桩周土纵向振动控制方程;求解桩-土体系振动控制方程,并结合 Laplace 变换、阻抗函数递推、Fourier 逆变换等方法,得到桩顶频域及时域响应理论解;基于所建立的理论解答,揭示大直径灌注桩三维波动效应的规律,并分析桩底沉渣性质对其动力响应的影响;最后,通过与实测结果的对比验证该解的可靠性。

关键词: 大直径灌注桩;桩底沉渣;虚土桩;动力响应;Rayleigh-Love 杆模型

中图分类号:TU473.1

文献标识码:A

Influence of the Properties of the Sediment on the Dynamic Response of the Large Diameter Bored Pile Embedded in Layered Visco-elastic Soil

WU Hongsheng¹, LIU Yong¹, CAI Huimin¹, BAI Fan¹, LI Bin¹, LI Fanglin¹, LIU Jian^{2*}

(1. State Grid Jiangsu Power Engineering Consulting Limited Company, Nanjing, Jiangsu 210036, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The influence of the properties of the sediment on the dynamic response of the large diameter bored pile embedded in layered visco-elastic soil is analyzed in this study. First, the sediment is considered as a fictitious soil pile and the Rayleigh-Love rod theory is introduced to establish the longitudinal dynamic governing equations for the pile and the fictitious soil pile to approximately consider the three-dimensional effect of the pile. Then, the dynamic governing equation for the surrounding soil is built based on the three-dimensional axisymmetric model. By means of Laplace transform, impedance function recursion and inverse Fourier transform, the dynamic governing equations for the soil-pile system are solved to derive the solutions for the dynamic response of the pile in the frequency and time domain. Based on the established solution, the three-dimensional effect of the large diameter bored pile is portrayed and the influence of the properties of the sediment on the dynamic response of the pile is investigated. Finally, the reliability of the proposed solution is verified by comparing with the measured results.

Key words: large diameter bored pile; sediment; fictitious soil pile; dynamic response; Rayleigh-Love rod model

大直径灌注桩由于施工时无振动、挤土、噪音等问题,且承载力大、沉降量小等优点,在工程中

得到了广泛应用^[1]。受成桩工艺限制,大直径灌注桩桩底一般会产生一定厚度的沉渣。一些学者

收稿日期:2022-03-31

基金项目:国网江苏省电力工程咨询有限公司科技项目(J2021006);国家青年科学基金资助项目(51608152)

作者简介:吴鸿昇(1989-),男,江苏南京人,硕士,工程师,研究方向:岩土工程与结构工程。

* 通讯作者:刘坚(1986-),男,江苏淮安人,博士研究生,副教授,研究方向:基础工程与地基处理。

的研究结果表明^[2-5], 桩底沉渣的存在会显著降低桩端承载力, 并严重影响桩侧阻力的发挥, 从而对桩的承载力造成显著影响。除承受静荷载外, 大直径灌注桩在很多时候会承受动荷载的作用, 因此, 研究桩底沉渣对其动力响应的影响, 对于大直径灌注桩的抗振设计及完整性检测均具有重要意义。

上述问题研究的关键在于建立合适的模型模拟桩底沉渣与桩端之间的动力相互作用。已有的桩基动力特性研究中, 主要采用两种方法考虑桩底土的作用, 即刚性模型^[6-9]和粘弹性模型^[10-13]。在刚性模型中, 假设桩端直接坐落在基岩上, 其位移为零, 因此仅适用于严格意义上的端承桩; 而粘弹性模型则采用弹簧和阻尼器并联的形式模拟桩底土, 该模型是基于半无限空间中刚性基础的振动建立的, 因此不能考虑桩底土的厚度、成层性等问题^[14]。众所周知, 桩底沉渣是在成孔过程中产生, 其性质与底部岩土体差别很大, 且性质很差、厚度有限, 因此, 刚性模型及粘弹性模型都不能恰当地模拟桩底沉渣^[15]。另一方面, 大直径灌注桩的长径比小, 存在明显的三维效应^[16-17]。由于波的弥散性, 桩基振动分析中常采用的一维杆件理论此时并不适用, 理论分析结果会与实际情况存在较大误差^[18]。因此, 在研究桩底沉渣性质的影响时, 桩的三维效应也是一个需要考虑的重要因素。

鉴于此, 本文提出采用虚土桩模型模拟桩底沉渣, 将桩底一定厚度的沉渣看作土桩, 建立类似于实体桩的振动控制方程, 但其参数仍取沉渣的参数, 解决刚性模型和粘弹性模型不能考虑桩底土厚度、成层性等因素的问题; 引入 Rayleigh-Love 杆模型, 通过横向惯性效应来近似模拟大直径灌注桩的三维效应, 克服传统一维杆件模型的不足; 据此建立桩-土体系振动控制方程, 求得桩顶频域及时域响应的理论解。通过参数分析的方法, 揭示大直径灌注桩三维效应的规律, 分析桩底沉渣性质对大直径灌注桩动力响应的影响。

1 数学模型

建立如图 1 所示的数学模型, 其中桩长为 l_p , 桩顶动荷载为 $q(t)$, 桩底沉渣厚度为 l_{cz} , 为考虑桩周土的成层性, 将桩-土体系沿竖向划分为若干段, 其中第 i 层土的厚度为 l_i , 土层顶部与地表的距离为 h_i 。用分布式 Voigt 体模型模拟相邻土层间的相互作用, 对第 i 层桩周土, 其顶部的弹簧刚度和阻尼系数分别用 k_{i+1} 和 c_{i+1} 表示, 而底部的相

关参数则分别用 k_i 和 c_i 表示。

分析过程中, 作出如下基本假设: (1) 桩(虚土桩)为弹性杆件, 在相邻桩段的接触面上, 力和位移连续; (2) 桩周土在径向延伸至无穷远, 在这一过程中位移逐渐减小为零, 其顶部为自由边界, 底部则直接坐落在基岩上, 振动过程中仅考虑竖向位移; (3) 桩(虚土桩)-土接触面上满足力平衡及位移连续条件; (4) 线弹性及小变形条件在整个过程中始终满足。

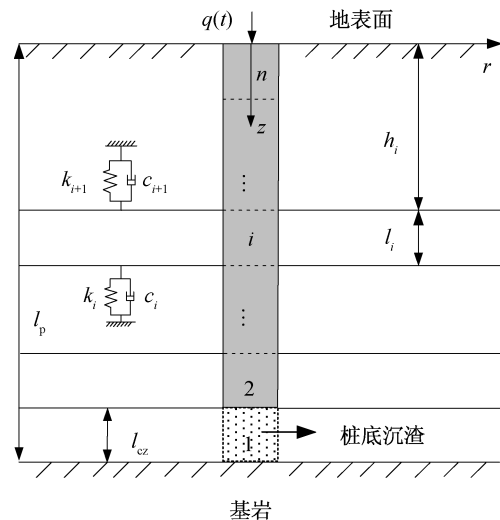


图 1 桩-土相互作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil-pile interaction

2 方程的建立

基于轴对称条件的粘弹性土体纵向振动方程可表示为

$$\begin{aligned} & [(\lambda_i + 2G_i) + i(\lambda'_i + 2G'_i)] \frac{\partial u_i}{\partial z^2} + \\ & (G_i + iG'_i) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} \right) = \rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $u_i = u_i(r, z, t)$ 为第 i 层桩周土的竖向位移; λ_i 和 G_i 分别为桩周土的拉梅常数和剪切模量; λ'_i 和 G'_i 为相关的粘性系数。

竖向荷载作用下, 考虑横向惯性时大直径灌注桩(虚土桩)的振动控制方程为

$$\begin{aligned} & E_{pi} A_{pi} \frac{\partial^2 u_{pi}}{\partial z^2} - \rho_{pi} A_{pi} \left[\frac{\partial^2 u_{pi}}{\partial t^2} - \right. \\ & \left. (\mu_{pi} r_{pi})^2 \frac{\partial^4 u_{pi}}{\partial z^2 \partial t^2} \right] - 2\pi r_{pi} f_i = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

式中: $u_{pi} = u_{pi}(z, t)$ 为第 i 段桩的竖向位移, 由图 1 可知, $i=1$ 代表虚土桩, 即桩底沉渣, $i=2, 3, \dots, n$

代表实体桩; E_{pi} 、 A_{pi} 、 ρ_{pi} 、 μ_{pi} 和 r_{pi} 分别表示桩的弹性模量、横截面积、密度、泊松比和半径; $f_i = f_i(r_{pi}, z, t)$ 表示桩-土界面摩擦力。

3 方程求解

3.1 土体方程求解

引入局部坐标系的概念,令 $z' = z - h_i$ 。在此基础上,求解方程(1)并根据桩周土径向无穷远处位移为零的边界条件,可得

$$U_i = \sum_{k=1}^{\infty} A_{ik} K_0(q_{ik} r) \cos(h_{ik} z' - \varphi_{ik}) \quad (3)$$

式中: U_i 为 u_i 的 Laplace 变换形式; A_{ik} 为待定系数; $K_0(q_{ik} r)$ 为零阶修正 Bessel 函数; q_{ik} 与 h_{ik} 之间满足 $q_{ik}^2 = \frac{\{\eta_i^2 + i[D_{vi}(\eta_i^2 - 2) + 2D_{si}]\} h_{ik}^2 - (\omega/v_i)^2}{1 + iD_{si}}$,

η_i 为土体纵波速与剪切波速的比值, D_{si} 和 D_{vi} 为滞回阻尼比; $\varphi_{ik} = \arctan\left(\frac{\overline{K'_i}}{h_{ik} l_i}\right)$, 特征值 h_{ik} 由关系

式 $\tan(h_i l_i) = (\overline{K_i} + \overline{K'_i}) h_i l_i / [(h_i l_i)^2 - \overline{K_i} \overline{K'_i}]$ 确定,其中 $\overline{K_i} = (k_i + i\omega c_i) l_i / E_i$; $\overline{K'_i} = (k_{i+1} + i\omega c_{i+1}) l_i / E_i$ 。

于是,桩-土界面剪应力可表示为

$$\tau_i = -G_i(1 + iD_{si}) \sum_{k=1}^{\infty} A_{ik} q_{ik} K_1(q_{ik} r_{pi}) \cos(h_{ik} z' - \varphi_{ik}) \quad (4)$$

式中: $K_1(q_{ik} r_{pi})$ 为一阶修正 Bessel 函数。

3.2 桩的振动方程求解

对方程(2)两边同时进行 Laplace 变换,并结合方程(4),可得式(5)。

$$(v_{pi})^2 \left[1 - \frac{(\mu_{pi} r_{pi})^2 \omega^2}{v_{pi}^2} \right] \frac{d^2 U_{pi}}{dz'^2} + \omega^2 U_{pi} - \frac{2\pi r_{pi} G_i (1 + iD_{si})}{\rho_{pi} A_{pi}} \times$$

$$Z_{pn} = - \frac{E_{pn} A_{pn} - \rho_{pn} A_{pn} (\mu_{pn} r_{pn})^2 \omega^2}{l_n} \frac{M_n \sum_{k=1}^{\infty} \gamma'_{nk} \overline{h_{nk}} \sin \varphi_{nk} + \overline{\lambda}_n - \sum_{k=1}^{\infty} \gamma''_{nk} \overline{h_{nk}} \sin \varphi_{nk}}{M_n \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma'_{nk} \cos \varphi_{nk} \right) - \sum_{k=1}^{\infty} \gamma''_{nk} \cos \varphi_{nk}} \quad (7)$$

式中:

$$\frac{M_n}{N_n} = \frac{\frac{Z_{p(n-1)} l_n}{E_{pn} A_{pn}} \left[\sin(\overline{\lambda}_n) - \sum_{k=1}^{\infty} \gamma''_{nk} \cos(\overline{h_{nk}} - \varphi_{nk}) \right] + [1 - (\mu_{pn} r_{pn})^2 \theta_n^2] \left[\sum_{k=1}^{\infty} \gamma''_{nk} \overline{h_{nk}} \sin(\overline{h_{nk}} - \varphi_{nk}) + \overline{\lambda}_n \cos(\overline{\lambda}_n) \right]}{- \frac{Z_{p(n-1)} l_n}{E_{pn} A_{pn}} \left[\cos(\overline{\lambda}_n) + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma'_{nk} \cos(\overline{h_{nk}} - \varphi_{nk}) \right] + [1 - (\mu_{pn} r_{pn})^2 \theta_n^2] \left[\sum_{k=1}^{\infty} \gamma'_{nk} \overline{h_{nk}} \sin(\overline{h_{nk}} - \varphi_{nk}) + \overline{\lambda}_n \sin(\overline{\lambda}_n) \right]}$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} A_{ik} q_{ik} K_1(q_{ik} r_{pi}) \cos(h_{ik} z' - \varphi_{ik}) = 0 \quad (5)$$

式中: U_{pi} 为 u_{pi} 的 Laplace 变换形式。

求解方程(5),并根据桩-土界面位移连续条件以及固有函数系 $\cos(h_{ik} z' - \varphi_{ik})$ 在 $[0, l_i]$ 上的正交性,可得

$$U_{pi} = M_i \left[\cos\left(\frac{\overline{\lambda}_i}{l_i} z'\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma'_{ik} \cos(h_{ik} z' - \varphi_{ik}) \right] + N_i \left[\sin\left(\frac{\overline{\lambda}_i}{l_i} z'\right) - \sum_{k=1}^{\infty} \gamma''_{ik} \cos(h_{ik} z' - \varphi_{ik}) \right] \quad (6)$$

式中: $\gamma'_{ik} = \gamma_{ik} \left[\frac{\sin[(\overline{\lambda}_i - \overline{h_{ik}}) + \varphi_{ik}] - \sin(\varphi_{ik})}{\overline{\lambda}_i - \overline{h_{ik}}} + \frac{\sin[(\overline{\lambda}_i + \overline{h_{ik}}) - \varphi_{ik}] + \sin(\varphi_{ik})}{\overline{\lambda}_i + \overline{h_{ik}}} \right]$;

$$\gamma''_{ik} = \gamma_{ik} \left[\frac{\cos[(\overline{\lambda}_i + \overline{h_{ik}}) - \varphi_{ik}] - \cos(\varphi_{ik})}{\overline{\lambda}_i + \overline{h_{ik}}} + \frac{\cos[(\overline{\lambda}_i - \overline{h_{ik}}) + \varphi_{ik}] - \cos(\varphi_{ik})}{\overline{\lambda}_i - \overline{h_{ik}}} \right];$$

$$\gamma_{ik} = \frac{\overline{\rho_i} v_i^2 (1 + iD_{si}) \overline{q_{ik}} l_i K_1(q_{ik} r_{pi})}{r_{pi} [\theta_i^2 - \overline{h_{ik}}^2 \omega^2 t_i^2 / \overline{\lambda}_i^2]} \phi_{ik} L_{ik};$$

$$L_{ik} = \int_0^{l_i} \cos^2(h_{ik} z' - \varphi_{ik}) dz';$$

$$\phi_{ik} = K_0(q_{ik} r_{pi}) - \frac{2\overline{\rho_i} v_i^2 (1 + iD_{si}) \overline{q_{ik}} K_1(q_{ik} r_{pi})}{r_{pi} [\theta_i^2 - \overline{h_{ik}}^2 \omega^2 t_i^2 / \overline{\lambda}_i^2]};$$

$$\overline{\lambda}_i = \sqrt{\frac{\omega^2 t_i^2}{1 - (\mu_{pi} r_{pi})^2 \omega^2 / v_{pi}^2}};$$

其中 $\theta_i = \omega t_i$, $\overline{h_{ik}} = h_{ik} l_i$, $\overline{q_{ik}} = q_{ik} l_i$, $\overline{v_i} = v_i / v_{pi}$, $\overline{\rho_i} = \rho_i / \rho_{pi}$, $\overline{r_{pi}} = r_{pi} / l_i$, 均为无量纲量。

由相邻桩段之间的连续条件,并借助阻抗函数递推技术,可得桩顶位移阻抗为式(7)。

Z_{pn} 可进一步写成如下形式:

$$Z_{pn} = K_p + i \cdot C_p \quad (8)$$

式中: K_p 和 C_p 分别表示动刚度和动阻尼。

桩顶速度导纳可表示为

$$H_v(\omega) = -\frac{i\theta_n}{\rho_{pn}A_{pn}v_{pn}} H'_v \quad (9)$$

$$\text{式中: } H'_v = -\frac{i\theta_n}{1 - (\mu_{pn}r_{pn})^2\theta_n^2} \times \frac{\frac{M_n}{N_n} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma'_{nk} \cos\varphi_{nk}\right) - \sum_{k=1}^{\infty} \gamma''_{nk} \cos\varphi_{nk}}{\frac{M_n}{N_n} \sum_{k=1}^{\infty} \gamma'_{nk} \overline{h_{nk}} \sin\varphi_{nk} + \lambda_n - \sum_{k=1}^{\infty} \gamma''_{nk} \overline{h_{nk}} \sin\varphi_{nk}},$$

为无量纲速度导纳。

当桩顶承受竖向半正弦激振力 $q(t)$ 作用时, 桩顶速度时域响应可表示为

$$v(t) = -\frac{Q_{\max}}{\rho_{pn}A_{pn}v_{pn}} v_0(t) \quad (10)$$

式中: $v'(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H'_v T}{\pi^2 - T^2 \omega^2} (1 + e^{-i\omega T}) e^{i\omega t} d\omega$, 为速度响应的无量纲形式; T 和 Q_{\max} 分别表示半正弦激振力的脉冲宽度和幅值。

4 参数分析

基于以上所建立的解析解和半解析解, 通过参数分析的方式研究桩底沉渣性质对大直径灌注桩动力响应的影响。分析中如无特别说明, 桩的长度、半径、密度、纵波速和泊松比分别为 10 m、0.5 m、2 500 kg/m³、3 600 m/s 和 0.2, 桩周土密度和剪切波速分别为 1 800 kg/m³ 和 150 m/s, 桩底沉渣密度和纵波速分别为 1 700 kg/m³ 和 1 000 m/s。

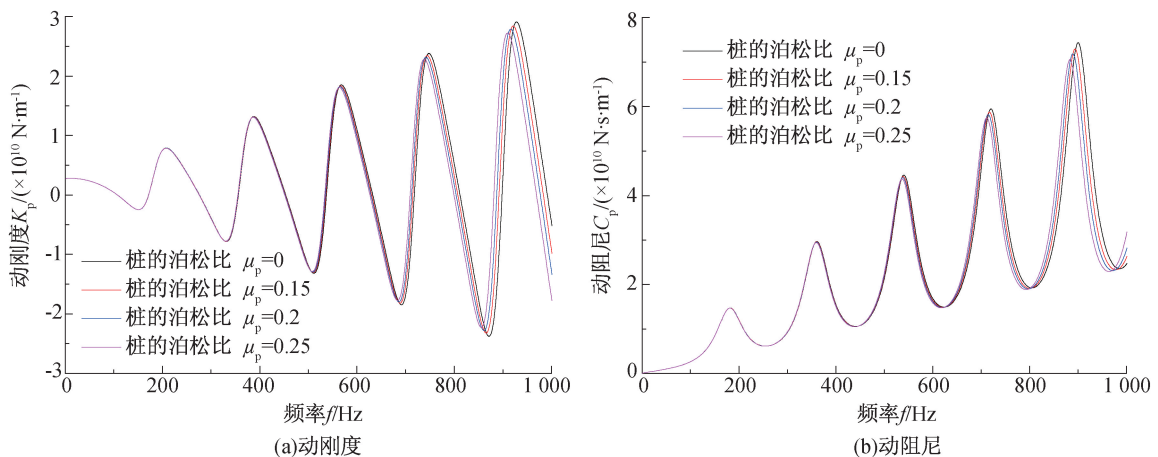


图2 桩的泊松比对大直径灌注桩复阻抗的影响

Fig. 2 Influence of Poisson's ratio of the pile on the complex impedance of the large diameter bored pile

4.1 桩的横向惯性的影响

本文采用考虑横向惯性效应的方式近似模拟大直径灌注桩的三维效应, 即在桩基振动方程建立时考虑了桩的泊松比。为此, 在分析桩底沉渣的影响之前, 本文首先分析桩的横向惯性对桩基动力响应的影响以揭示三维波动效应的规律, 结果如图2、图3所示。

桩的泊松比对大直径灌注桩复阻抗的影响如图2所示, $\mu_p = 0$ 表示未考虑横向惯性的影响。由图2可知, 考虑横向惯性时, 高频段内动刚度和动阻尼的共振频率会有所减小, 且共振频率所对应的曲线幅值亦有所减小。上述现象随着泊松比的增大会变得更加明显。

桩的泊松比对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的影响如图3所示。由图3(a)可知, 桩的泊松比对低频范围内的速度导纳几乎无影响, 而在高频范围内, 泊松比的增大会导致速度导纳曲线共振频率的减小, 且随着频率的增大这一现象更为明显。由图3(b)可知, 桩底反射信号会随着泊松比的增大而逐渐后移, 且在这一过程中信号幅值有所减小, 如按照传统一维波动理论进行桩长的判断则可能导致误差, 另外, 反射信号之后会出现震荡, 且随着泊松比的增大, 震荡程度逐渐加强。

4.2 桩底沉渣性质的影响

本节分析桩底沉渣厚度、密度及纵波速对大直径灌注桩动力响应的影响, 结果如图4—图9所示。

4.2.1 沉渣厚度

分析过程中, 桩底沉渣厚度分别取为 $l_{cz} = 0$ 、50、100 和 150 mm, 桩的泊松比取为 0.2, 其他参数取值不变。

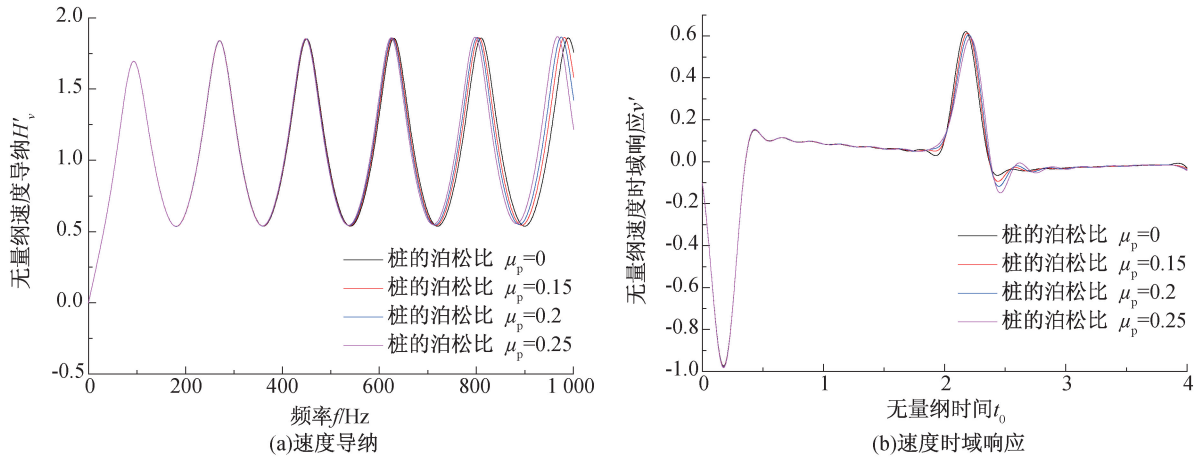


图 3 桩的泊松比对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的影响

Fig. 3 Influence of Poisson's ratio of the pile on the velocity admittance and reflected signal of the large diameter bored pile

沉渣厚度对大直径灌注桩复阻抗的影响如图 4 所示。由图 4 可知,相对于完全端承的情况($l_{cz} = 0 \text{ mm}$),当桩底出现沉渣时,桩底支承刚度减小,从而导致桩顶动刚度和动阻尼振幅均有所减小,同时共振频率也有所减小。而随着桩底沉渣厚度的逐渐增大,动刚度及动阻尼的共振频率和振幅均逐渐减小,但减小趋势逐渐趋缓。

沉渣厚度对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的影响如图 5 所示。图 5(a)中,速度导纳的共振频率随着沉渣厚度的增大而逐渐减小,且减小程度逐渐趋缓;而随着频率的增大,桩底沉渣厚度的影响则逐渐增强。由图 5(b)可知,桩底沉渣厚度的逐渐增大主要导致三方面影响:其一,桩底反射信号逐渐后移,这会导致根据低应变反射波法判断桩长的误差;其二,桩底反射信号幅值逐渐减小,这是因为随着桩底沉渣厚度的增

大,弹性波在沉渣中传播时能量被更大程度地耗散;其三,桩底反向反射信号之前会出现一个同向反射,且其幅值逐渐增大,一定程度上可能干扰桩底反射信号的判断。另外,反射信号之后的震荡会随着沉渣厚度的增大而逐渐减弱直至消失。综合图 4 和图 5 可知,桩底沉渣对大直径灌注桩动力响应的影响显著,工程中应尽量将沉渣清理干净。

4.2.2 沉渣密度

为分析桩底沉渣密度的影响,将沉渣密度分别取为 $\rho_{cz} = 1\ 300, 1\ 500, 1\ 700$ 和 $1\ 900 \text{ kg/m}^3$,沉渣厚度取为 50 mm ,其它参数不变,结果如图 6、图 7 所示。由图 6 可知,随着沉渣密度的增大,桩顶复阻抗的共振频率及幅值均略有增大,与桩底沉渣厚度这一因素不同,桩底沉渣密度的影响与对应频率的高低几乎没有关系。

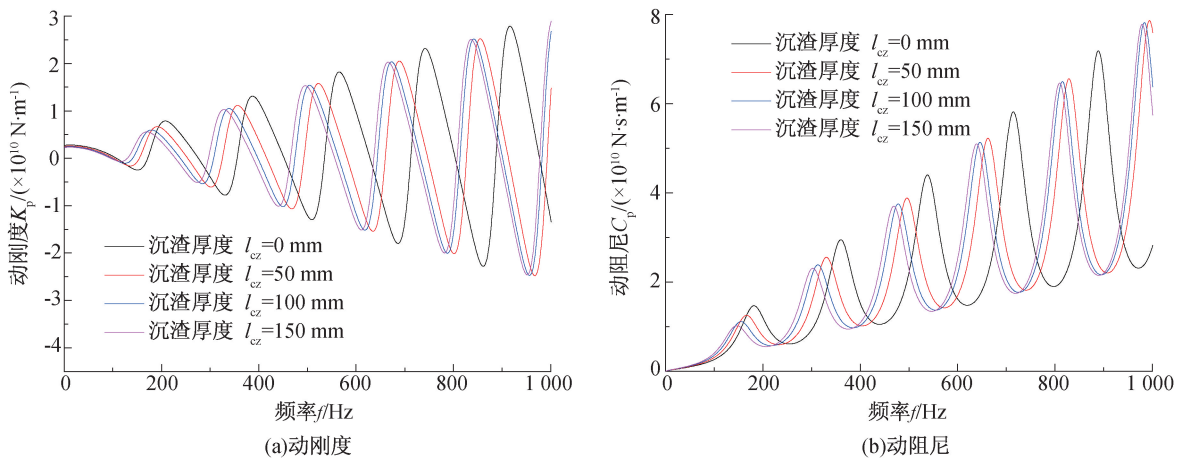


图 4 沉渣厚度对大直径灌注桩复阻抗的影响

Fig. 4 Influence of the thickness of the sediment on the complex impedance of the large diameter bored pile

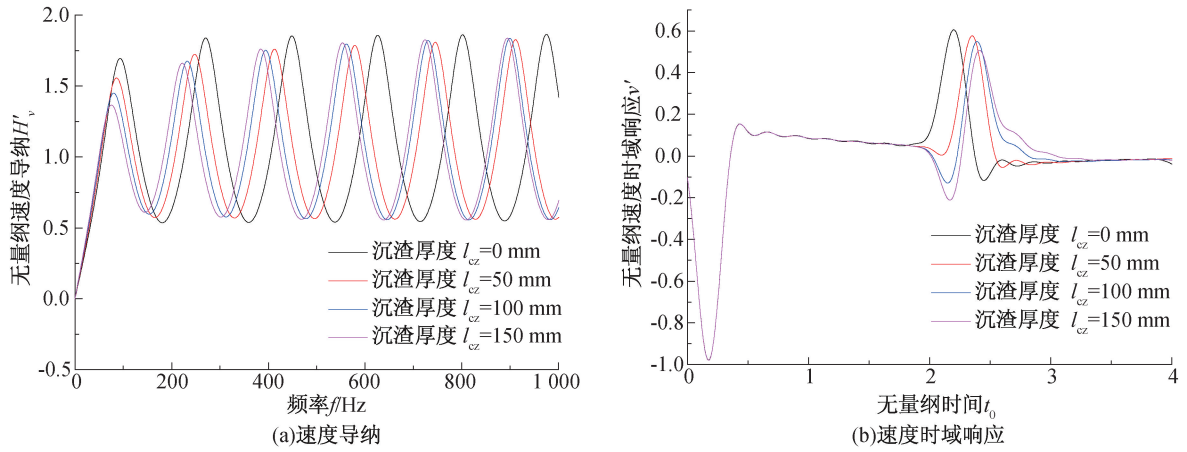


图5 沉渣厚度对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的影响

Fig. 5 Influence of the thickness of the sediment on the velocity admittance and reflected signal of the large diameter bored pile

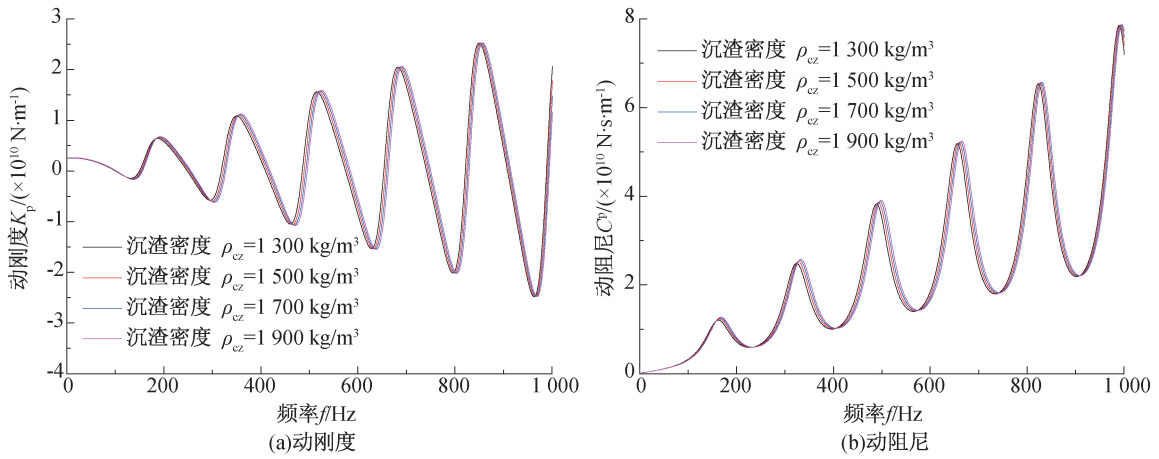


图6 沉渣密度对大直径灌注桩复阻抗的影响

Fig. 6 Influence of the density of the sediment on the complex impedance of the large diameter bored pile

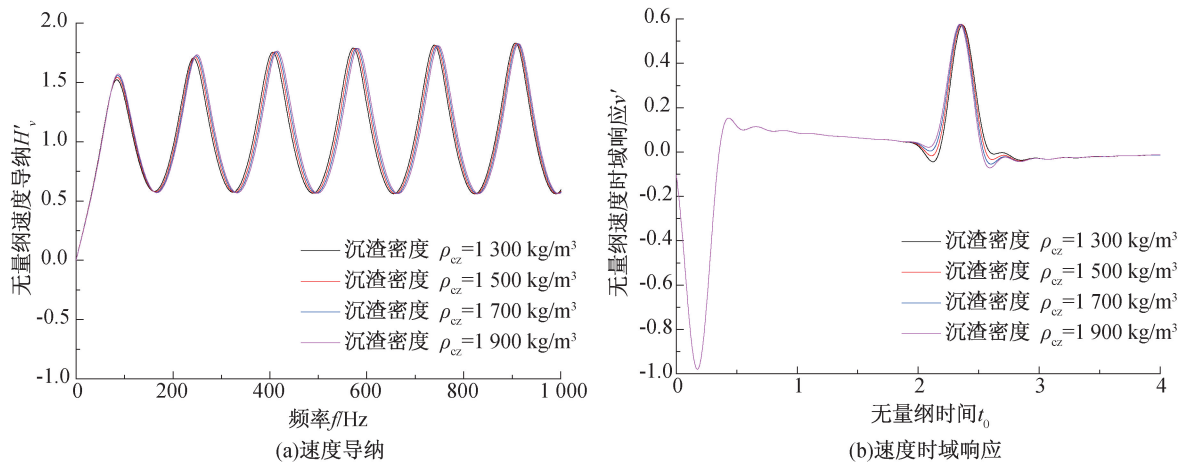


图7 沉渣密度对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的影响

Fig. 7 Influence of the density of the sediment on the velocity admittance and reflected signal of the large diameter bored pile

图7(a)中,沉渣密度的增大导致速度导纳曲线共振频率的增大,但曲线幅值几乎不变。图7(b)则表明,随着沉渣密度的增大,桩底反向反射信号之前的同向反射信号逐渐减弱,而由桩的横

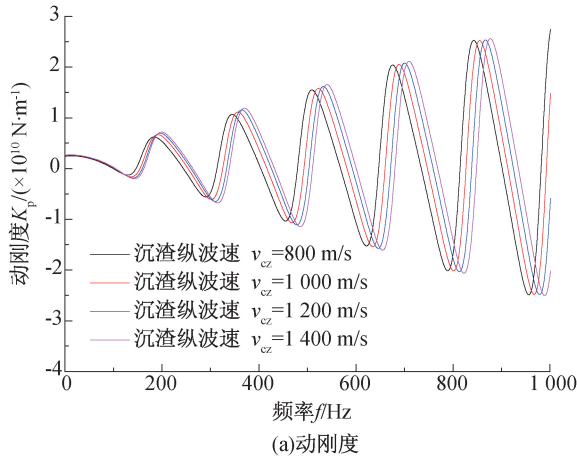
向惯性导致的桩底反向反射之后的震荡则有所增强。对比图6、图7与图4、图5可知,桩底沉渣密度的影响小于沉渣厚度。

4.2.3 沉渣纵波速

桩底沉渣纵波速也是反映桩底沉渣性质的一项关键指标,本节分析沉渣纵波速对大直径灌注桩动力响应的影响。分析过程中,桩底沉渣纵波速分别取为 $v_{cz} = 800, 1\ 000, 1\ 200$ 和 $1\ 400$ m/s,沉渣厚度取为 50 mm,其他参数保持不变,结果如图 8、图 9 所示。由图 8 可知,随着沉渣纵波速的增大,桩顶复阻抗的共振频率逐渐增大,且这一现象在频率增大时变得更为明显。在桩底沉渣纵波速逐渐增大的过程中,图 9(a)所示的桩顶速度导纳的共振频率逐渐增大,但对应的曲线幅值几乎不变;图 9(b)所示的低应变反射波曲线中桩底反射信号逐渐前移,反向反射信号前的同向反射信号逐渐减弱,而反向反射信号后的震荡则有所增强。

4.3 桩底沉渣的影响与桩周土剪切波速的关系

本节分析桩底沉渣的影响与桩周土剪切波速



的关系,结果如图 10—图 11 所示。

为分析桩底沉渣对大直径灌注桩复阻抗的影响与桩周土剪切波速的关系,取桩周土剪切波速 $v = 120, 150$ 和 180 m/s,结果如图 10 所示。随着桩周土剪切波速的增大,桩顶动刚度及动阻尼的幅值均逐渐减小,且减小程度逐渐趋缓,表示桩周土对弹性波能量的耗散作用逐渐增强;在这一过程中,桩底沉渣的存在导致的动刚度及动阻尼幅值的减小程度逐渐减弱,即桩底沉渣的影响逐渐减弱,但曲线共振频率的减小程度则未发生变化。

桩底沉渣对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的关系如图 11 所示。由图 11(a)可知,随着桩周土剪切波速的增大,速度导纳曲线的幅值逐渐减小,且减小程度逐渐趋缓,由桩底沉渣导致的曲线幅值的减小程度逐渐减弱,但曲线共振频率的减小程度几乎不受影响。由图 11(b)可知,随着桩周土剪切波速的增大,桩

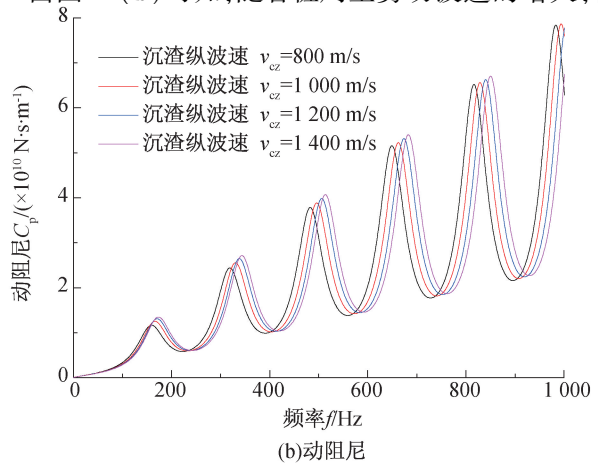


图 8 桩底沉渣纵波速对大直径灌注桩复阻抗的影响

Fig. 8 Influence of the longitudinal wave velocity of the sediment on the complex impedance of the large diameter bored pile

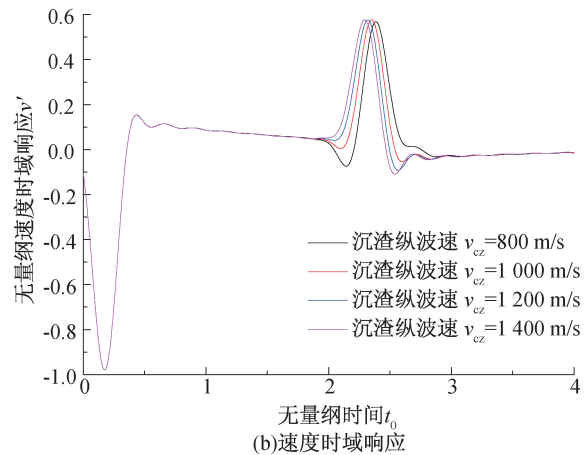
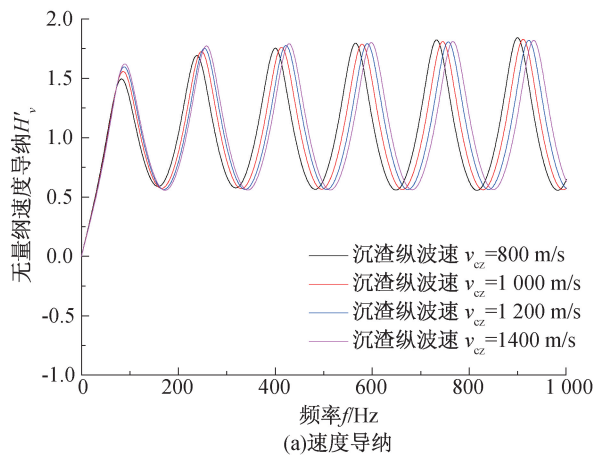


图 9 桩底沉渣纵波速对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的影响

Fig. 9 Influence of the longitudinal wave velocity of the sediment on the velocity admittance and reflected signal of the large diameter bored pile

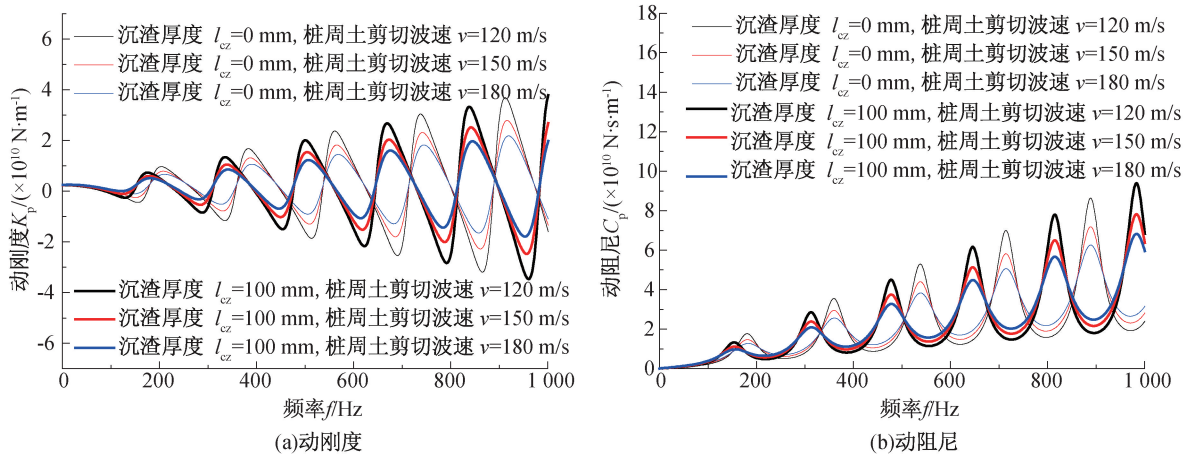


图 10 桩底沉渣对大直径灌注桩复阻抗的影响与桩周土剪切波速的关系

Fig. 10 Influence of the sediment on the complex impedance of the large diameter bored pile and its relationship with the shear wave velocity of the surrounding soil

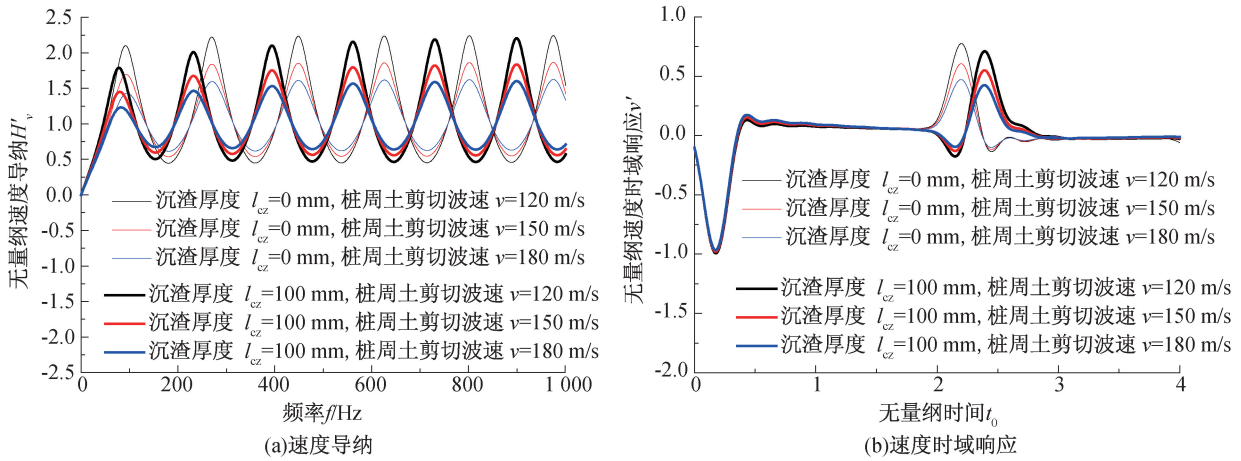


图 11 桩底沉渣对大直径灌注桩速度导纳和时域响应的影响与桩周土剪切波速的关系

Fig. 11 Influence of the sediment on the velocity admittance and reflected signal of the large diameter bored pile and its relationship with the shear wave velocity of the surrounding soil

底反射信号幅值逐渐减小,由桩底沉渣导致的桩底反射信号幅值的减小程度逐渐减弱。

5 与实测结果的对比

为验证本文所建立的理论解答的可靠性,进行计算曲线与实测低应变反射波曲线的对比。实测结果对应的桩长为 24 m,半径 0.9 m,混凝土强度等级为 C30,实测桩底沉渣厚度为 50 mm。对比结果如图 12 所示,由图可知,计算曲线与实测曲线吻合较好,实测曲线桩底反射信号幅值为 0.318 6,计算曲线幅值为 0.308 99,误差仅为 3%。一方面,证明了本文解的可靠性,另一方面说明可结合实测低应变反射波曲线,采用本文建立的方法反演桩底沉渣的情况。

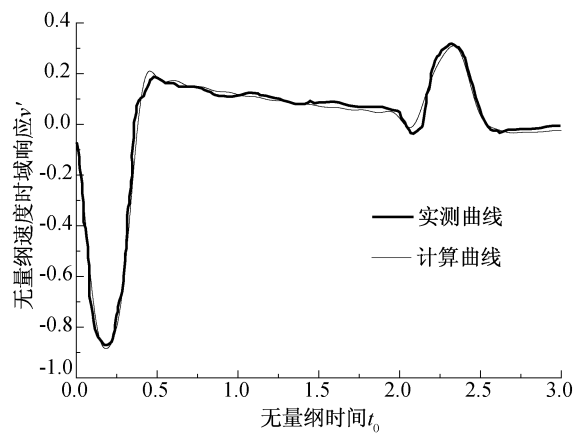


图 12 计算曲线与实测曲线的对比

Fig. 12 Comparison between the calculated curve and the measured curve

6 结论

1)考虑大直径灌注桩横向惯性时,桩顶复阻抗及速度导纳曲线的共振频率均减小,桩底反射信号后移,按照传统一维波动理论进行桩长的判断可能导致误差,上述现象均随着桩的泊松比的增大而更加明显。

2)桩底沉渣的存在会导致桩顶复阻抗共振频率及幅值的减小、桩顶速度导纳曲线共振频率的减小、桩底反射信号的后移以及反向反射信号前同向反射信号的出现,上述现象随着桩底沉渣厚度的增大以及沉渣密度和纵波速的减小而更加明显,综合而言,沉渣密度的影响弱于沉渣厚度及纵波速。

3)随着桩周土剪切波速的增大,由桩底沉渣导致的桩顶复阻抗幅值、速度导纳幅值及桩底反射信号幅值的减小程度逐渐减弱,意味着桩底沉渣的影响随之减弱,但复阻抗及速度导纳曲线共振频率的减小程度则不受影响。

4)与实测结果的误差仅为3%,说明可采用本文所建立的解答,结合实测低应变反射波曲线,来反演桩底沉渣的情况。

参考文献:

- [1]王贵森,洪宝宁,刘鑫,等. 桩径和扩径比大直径扩底灌注桩工程特性影响分析[J]. 科学技术与工程, 2019,19(34):308-314.
- [2]梅国雄,胡铖波,梅岭. 利用桩底沉渣的桩基室内模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(S1):3252-3259.
- [3]高坛,周传波,周小勇,等. 沉渣对软岩嵌岩桩承载力影响的模型试验研究[J]. 安全与环境工程, 2019,26(1):198-202.
- [4]邓荣贵,孙怡,孟仁帆,等. 现浇混凝土桩冲击成孔孔底沉渣机理研究[J]. 铁道标准设计, 2022,66(3):105-112.
- [5]张瑞坤,石名磊,倪富健,等. 无锡大直径超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2012,42(6):1194-1200.
- [6]郑长杰,丁选明,黄旭,等. 滞回阻尼土中大直径管桩纵向振动响应解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(S1):3284-3290.
- [7]ZHENG C, GAN S, LUAN L, et al. Vertical Dynamic

Response of a Pile Embedded in a Poroelastic Soil Layer Overlying Rigid Base [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(3):977-983.

- [8]官文杰,吴文兵,蒋国盛,等. 饱和土中非完全黏结管桩纵向振动特性研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2021,48(1):46-58.
- [9]ZHAO M, HUANG Y, WANG P, et al. An Analytical Solution for the Dynamic Response of an End-bearing Pile Subjected to Vertical P-waves Considering Water-Pile-Soil Interactions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 153:107126.
- [10]刘浩,吴文兵,蒋国盛,等. 土塞效应对管桩低应变测试视波速的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2019,41(2):383-389.
- [11]王奎华,童魏烽,肖德,等. 楔形桩的动力响应与试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2019,46(5):94-102.
- [12]何梦泽,杨冬英,汤范杨. 饱和土中变截面大直径桩纵向振动理论解和数值解对比分析[J]. 科学技术与工程, 2019,19(34):315-322.
- [13]LI Z, GAO Y. Effects of Inner Soil on the Vertical Dynamics Response of a Pipe Pile Embedded in Inhomogeneous Soil [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 439:129-143.
- [14]LIU H, JIANG G, EL NAGGAR M H, et al. Influence of Soil Plug Effect on the Torsional Dynamic Response of a Pipe Pile [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 410:231-248.
- [15]WU W, WANG K, MA S, et al. Longitudinal Dynamic Response of Pile in Layered Soil Based on Virtual Soil Pile Model [J]. Journal of Central South University, 2012,19(7):1999-2007.
- [16]LÜ S, WANG K, WU W, et al. Longitudinal Vibration of a Pile Embedded in Layered Soil Considering the Transverse Inertia Effect of Pile [J]. Computers and Geotechnics, 2014,62:90-99.
- [17]XIAO S, WANG K, GAO L, et al. Dynamic Characteristics of a Large-diameter Pile in Saturated Soil and Its Application [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics, 2018,42:1255-1269.
- [18]CHAI H Y, PHOON K K, ZHANG D J. Effects of the Source on Wave Propagation in Pile Integrity Testing [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010,136(9):1200-1208.

(责任编辑 王利君)