

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1032

层状地基中海洋大直径管桩水平动力响应分析

林 浩^{1,2}, 郑长杰^{1,2}, 丁选明³

(1. 福建理工大学 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118; 2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 考虑桩-海水-层状土相互作用, 研究了水平动荷载作用下层状地基中海洋大直径管桩的动力响应特性。将海水视为无黏性可压缩流体介质建立桩周、桩芯海水的运动方程, 通过分离变量法并结合海水的边界条件求得桩周、桩芯海水作用在管桩上的动水压力。将海床土体视为黏弹性介质并考虑其成层非均质性, 利用微分变化并结合土体振动边界条件解得桩周、桩芯土体作用在管桩上的水平抗力。进而根据各桩段上水平力的平衡建立管桩控制方程, 利用传递矩阵法并结合桩身的连续条件以及桩顶、桩底的边界条件, 得到层状海床土中海洋大直径管桩的水平动力响应解析解, 给出了桩顶位移解析表达式。将所得解与有限元模拟结果以及退化解与已有文献解进行对比, 验证了本研究计算方法的合理性。并基于所得解分析了管桩-海水-层状土系统水平动力响应对动水压力、水深、土体模量、土层厚度等关键参数的敏感性。

关 键 词: 桩顶位移; 海洋大直径管桩; 水平振动特性; 桩芯海水; 层状海床地基

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 06-1873-11

Behavior of large-diameter pipe piles in offshore layered soils under lateral dynamic loading

LIN Hao^{1,2}, ZHENG Chang-jie^{1,2}, DING Xuan-ming³

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;
3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The study investigates the dynamic response characteristics of offshore large-diameter pipe piles in layered seabed soil under horizontal dynamic loading, considering the interaction between pipe piles, seawater, and layered seabed soil. Seawater is treated as an inviscid compressible medium to establish the motion equations of outer and inner seawater. The hydrodynamic pressure of outer and inner seawater acting on the offshore pipe piles is derived using the separation variable method and combined with the boundary conditions. The seabed soil is considered as a viscoelastic medium, and its layered nonhomogeneity is simultaneously taken into account. The horizontal resistances of outer and inner seabed soil acting on the pipe piles are derived using the differential variation method in conjunction with the vibrational boundary conditions. The governing equation of the pipe pile is established based on the balance of horizontal force on each pile section. The analytical solution of the horizontal dynamic response of offshore large-diameter pipe piles in layered seabed soil is derived using the transfer matrix method and combined with the continuity condition of pile piles and the boundary conditions of pile head and bottom. Analytical expression of pile head displacement is also obtained. The proposed solution's results are validated against FEM numerical results and existing analytical solutions to verify its rationality. Finally, based on the presented solution, the sensitivity of the horizontal dynamic responses of the pipe pile-water-layered soils system to certain key parameters, such as hydrodynamic pressure, water depth, soil modulus, and soil layer thickness, is analyzed.

Keywords: pile head displacement; offshore large-diameter pipe pile; horizontal vibration characteristics; inner seawater; layered seabed foundation

收稿日期: 2023-07-16

录用日期: 2024-01-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52178318, No.52178312); 福建省自然科学基金 (No.2021J011056)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52178318, 52178312) and the Fujian Provincial Natural Science Foundation of China (2021J011056).

第一作者简介: 林浩, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 主要从事桩基动力学与海洋岩土工程方面的研究。E-mail: linhao19981110@163.com

通讯作者: 郑长杰, 男, 1989 年生, 博士, 教授, 主要从事桩基动力学与岩土地震工程方面的研究。E-mail: zcj@fjut.edu.cn

1 引言

随着全球对能源日益膨胀的需求,海洋平台、风力涡轮机、输电塔等海洋资源开发工程正在逐步向产业化方向推进,不可避免地对承载这些海上构筑物的海洋桩基自身的经济和性能提出更加苛刻的要求。海洋大直径管桩由于其高承载力和低经济成本等优点在海上风力涡轮机、跨海桥梁等海洋工程中获得了广泛的应用^[1]。以海上风力涡轮机为例,在众多基础形式中,单桩基础结构形式简单,受力明确,施工速度快,在国内外风电场中所占比例达65%以上。单桩基础多采用承载力高的大直径管桩,沉桩后在桩顶固定过渡连接段再将风机塔筒安装在其上^[2-3]。然而固有频率较低的海上风力涡轮机等海上构筑物对振动频率非常敏感^[4-5],而海洋桩基不可避免地需要承受风荷载、波浪荷载、地震作用等水平动荷载,当桩基的固有频率接近这些水平动荷载的激励频率时会发生共振导致海洋桩基承载失效或水平位移过大,将引起上部结构的严重安全问题。因此,研究海洋大直径管桩在水平动荷载作用下的动力响应和固有频率具有重要的工程实用价值。

在过去几十年中,广大学者对水平动荷载作用下桩-土耦合振动的动力响应问题开展了深入的研究。从早期将桩周土和桩底土对桩的作用简化为弹簧和阻尼器形式的 Winkler 模型^[6-8],到 Novak 等^[9]将桩周土体划分为一系列水平薄层提出的平面应变模型并推导了桩振动产生的土体阻力,以及后来 Novak 等^[10]将土体考虑为一个有限厚度的土层并考虑土体纵向应力梯度变化对该模型进行了改进。而后尚守平等^[11]将 Novak 薄层法应用于饱和土介质的桩-土相互作用,得到了其与单相土层水平振动阻抗系数的关系。马建军等^[12]基于改进 Vlasov 地基模型,研究了层状土场的物理特性对冲刷作用部分埋置单桩动力响应的影响。沈纪苹等^[13]基于传递矩阵法研究了层状土中管桩水平动力阻抗。吴志明等^[14]考虑地基土分层,利用动力 Winkler 地基模型模拟桩-土相互作用,得到了层状地基中的单桩和群桩的阻抗函数。在此基础上,高广运等^[15]考虑地基土的分层特性、桩身剪切变形和转动惯量,对分层地基中单桩和群桩动力阻抗的计算方法进行了改进。

上文提到的都是陆地工况桩基,而海洋桩基部分桩段位于水中,还应考虑桩基与水的动力相互作用。Chen 等^[16]分析了桩-土相互作用和桩-水相互作用对海洋桩基横向动力特性的影响。Huang 等^[17]建立了在黏弹性半空间中的水-桩-土模型,研究了

端承桩在水平动荷载作用下的动力响应。赵密等^[18]研究了考虑水-桩-土相互作用时,混凝土桩和钢管桩在水平动荷载作用下的动力响应问题。这些研究虽然严格考虑了桩-海水相互作用,但都把海床土考虑为均质土层,而把海床土考虑为层状地基更贴近工程实际。

层状地基的物理力学性质沿深度的较大差异性与均质土层存在明显差异^[19]。分析层状地基中海洋桩基的水平动力响应及其耦合效应更为复杂,但更能反映工程实际。付鹏等^[20]建立了层状地基中海洋高桩水平振动模型,研究了桩-流体动力相互作用对海洋高桩基础桩顶水平动刚度的影响。Wu 等^[21]考虑次生波效应的桩-桩相互作用,推导了潮汐波作用下层状地基中排桩丁坝动力响应理论解。上文提到的将海床土考虑为层状地基的研究仅限于实心桩,对于广泛应用的海洋大直径管桩在更贴近工程实际的层状地基中研究较少,而大直径管桩由于其桩芯内部存在不可忽略的大横截面的桩芯水土,其动力响应特性较实心桩存在较大差异^[22-24]。故本文严格考虑海洋大直径管桩与桩周和桩芯海水、土体的耦合振动及海床土的分层性,求解得到了水平动荷载作用下层状地基中海洋大直径管桩基础桩顶位移响应解析解,进而基于该解对其桩顶位移幅值以及桩-水-土系统的固有频率进行了参数化分析。本文研究成果可丰富海洋管桩水平振动响应理论研究,为层状地基中海洋工程设计与施工提供理论参考。

2 模型描述及控制方程

本文计算模型如图 1 所示,海洋大直径管桩部分桩段埋入海水和层状海床土,底部嵌入刚性基岩。管桩总长度为 H ,外半径为 r_1 ,内半径为 r_2 。海面之上和埋入海水段的桩长分别为 H_0 、 H_1 ;将埋入土中的桩段离散为 m 段,桩周和桩芯土体也对应分为 m 层,自上而下分别编号为 $1, 2, \dots, k, \dots, m$,相应的各层长度分别为 $l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_m$,对应的各土层弹性模量分别为 $E_{s1}, E_{s2}, \dots, E_{sk}, \dots, E_{sm}$,各土层长度之和即为埋入土体段的桩长 H_2 ;管桩桩顶受到水平动荷载 $Q_0 e^{i\omega t}$ 或动弯矩 $M_0 e^{i\omega t}$,其中 $i = \sqrt{-1}$, ω 为激振圆频率, t 为时间。

2.1 海水运动控制方程

将海水假定为无黏性可压缩流体,动水压力在柱坐标系下可表示为 $p_j(r, \theta, z) e^{i\omega t}$,为了简洁起见,下面的推导中将省略时间因素 $e^{i\omega t}$ 。海水动水压力的控制方程^[25]可表示为

式中: $g_n = \frac{(2n-1)\pi}{2H_1}$, $n=1, 2, 3, \dots$; $h_n = \sqrt{g_n^2 - k_w^2}$;

A_{w1n} 为待定系数。

作用于单位长度桩身的桩周海水动水压力为

$$f_{w1} = \int_0^{2\pi} p_1 \Big|_{r=r_1} r_1 \cos \theta d\theta = \pi r_1 \sum_{n=1}^{\infty} A_{w1n} K_1(h_n r_1) \cos(g_n z) \quad (11)$$

3.1.2 桩芯海水运动方程求解

利用分离变量法对桩芯海水运动方程进行求解, 求解过程与对桩周海水运动方程类似, 桩芯海水动水压力的通解为

$$p_2 = [A_{w2} I_1(hr) + B_{w2} K_1(hr)](C_{w2} \sin \theta + D_{w2} \cos \theta) \cdot [E_{w2} \cos(gz) + F_{w2} \sin(gz)] \quad (12)$$

式中: A_{w2} 、 B_{w2} 、 C_{w2} 、 D_{w2} 、 E_{w2} 和 F_{w2} 均为待定系数。

桩芯海水边界条件假定为

$$p_2 \Big|_{z=-H_1} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (14)$$

$$p_2 \Big|_{r=0} < \infty \quad (15)$$

将式 (12) 代入以上边界条件, 可得

$$p_2 = \sum_{n=1}^{\infty} A_{w2n} I_1(h_n r) \cos(g_n z) \cos \theta \quad (16)$$

式中: A_{w2n} 为待定系数。

作用于单位长度桩身的桩芯海水动水压力为

$$f_{w2} = \int_0^{2\pi} -p_2 \Big|_{r=r_2} r_2 \cos \theta d\theta = -\pi r_2 \sum_{n=1}^{\infty} A_{w2n} I_1(h_n r_2) \cos(g_n z) \quad (17)$$

3.2 土体运动方程求解

3.2.1 第 k 层桩周土体运动方程求解

将式 (2)、(3) 进行微分变换 $\frac{\partial(2)}{\partial r} + \frac{(2)}{r} + \frac{\partial(3)}{r\partial\theta}$,

可得

$$(\lambda_k^* + 2G_k^*) \nabla^2 e_{1k} + \rho_{sk} \omega^2 e_{1k} = 0 \quad (18)$$

通过分离变量法容易得到方程 (18) 的通解为

$$e_{1k} = [A_{s11} K_1(q_{1k} r) + B_{s11} I_1(q_{1k} r)](C_{s11} \sin \theta + D_{s11} \cos \theta) \quad (19)$$

式中: $q_{1k} = \sqrt{\frac{-\rho_{sk} \omega^2}{\lambda_k^* + 2G_k^*}}$; A_{s11} 、 B_{s11} 、 C_{s11} 和 D_{s11} 均为待定系数。

无穷远处的桩周土边界条件假定为

$$u_{r1k} \Big|_{r \rightarrow \infty} = u_{\theta 1k} \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0 \quad (20)$$

将式 (19) 代入以上边界条件可得 $B_{s11} = 0$, 由于体应变为 θ 的偶函数可得 $C_{s11} = 0$ 。故 e_{1k} 可写为

$$e_{1k} = A_{s11} K_1(q_{1k} r) \cos \theta \quad (21)$$

u_{r1k} 、 $u_{\theta 1k}$ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_{r1k}(r, \theta) &= \bar{u}_{r1k}(r) \cos \theta \\ u_{\theta 1k}(r, \theta) &= \bar{u}_{\theta 1k}(r) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

将式 (21)、(22) 代入式 (2)、(3) 并分别相加和相减, 容易得到:

$$G_k^* \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} - \frac{4}{r^2} \right) U_1 + \rho_{sk} \omega^2 U_1 = (\lambda_k^* + G_k^*) A_{s11} q_{1k} K_2(q_{1k} r) \quad (23)$$

$$G_k^* \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} \right) V_1 + \rho_{sk} \omega^2 V_1 = (\lambda_k^* + G_k^*) A_{s11} q_{1k} K_0(q_{1k} r) \quad (24)$$

式中: $K_2()$ 、 $K_0()$ 分别为第一类二阶和零阶修正贝塞尔函数; $U_1 = \bar{u}_{r1k} + \bar{u}_{\theta 1k}$; $V_1 = \bar{u}_{r1k} - \bar{u}_{\theta 1k}$ 。

基于分离变量法并考虑桩周土体边界条件式 (20), 可得

$$U_1 = \gamma A_{s11} K_2(q_{1k} r) + A_{s12} K_2(q_{2k} r) \quad (25)$$

$$V_1 = \gamma A_{s11} K_0(q_{1k} r) + A_{s13} K_0(q_{2k} r) \quad (26)$$

式中: $q_{2k} = \sqrt{\frac{-\rho_{sk} \omega^2}{G_k^*}}$; $\gamma = \frac{(\lambda_k^* + G_k^*) q_{1k}}{G_k^* q_{1k}^2 + \rho_{sk} \omega^2}$; A_{s12} 、 A_{s13} 均为待定系数。

考虑土体体应变定义, 可得

$$A_{s13} = -A_{s12} \quad (27)$$

因此, 第 k 层桩周土位移 u_{r1k} 、 $u_{\theta 1k}$ 可表示为

$$u_{r1k} = \left[\gamma A_{s11} \frac{K_2(q_{1k} r) + K_0(q_{1k} r)}{2} + A_{s12} \frac{K_2(q_{2k} r) - K_0(q_{2k} r)}{2} \right] \cos \theta \quad (28)$$

$$u_{\theta 1k} = \left[\gamma A_{s11} \frac{K_2(q_{1k} r) - K_0(q_{1k} r)}{2} + A_{s12} \frac{K_2(q_{2k} r) + K_0(q_{2k} r)}{2} \right] \sin \theta \quad (29)$$

管桩与土体交界面处的连续条件可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_{r1k} \Big|_{r=r_1} &= u_{r2k} \Big|_{r=r_2} = u_{psk} \cos \theta \\ u_{\theta 1k} \Big|_{r=r_1} &= u_{\theta 2k} \Big|_{r=r_2} = -u_{psk} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

将式 (28)、(29) 代入式 (30), 可得

$$A_{s12} = S_1 A_{s11} \quad (31)$$

$$A_{s11} = S_2 u_{psk} \quad (32)$$

$$\text{式中: } S_1 = -\frac{\gamma K_2(q_{1k}r_1)}{K_2(q_{2k}r_1)}; S_2 = \frac{2}{\gamma K_0(q_{1k}r_1) - S_1 K_0(q_{2k}r_1)}。$$

可以得到第 k 层桩周土对单位长度桩身的水平抗力为

$$f_{s1k} = -\int_0^{2\pi} (\sigma_{r1k} \cos \theta - \tau_{r\theta 1k} \sin \theta) \Big|_{r=r_1} r_1 d\theta = v_1 u_{psk} \quad (33)$$

式中:

$$v_1 = -\pi r_1 S_2 [(\lambda_k^* + 2G_k^*) K_1(q_{1k}r_1) + G_k^* S_1 q_{2k} K_1(q_{2k}r_1)]。$$

3.2.2 第 k 层桩芯土体运动方程求解

桩芯土满足以下边界条件假定:

$$u_{r2k} \Big|_{r=0} < \infty, u_{\theta 2k} \Big|_{r=0} < \infty \quad (34)$$

采用与桩周土类似的求解过程, 可得到第 k 层桩芯土位移 u_{r2k} 、 $u_{\theta 2k}$ 为

$$u_{r2k} = \left[-\gamma A_{s21} \frac{I_2(q_{1k}r) + I_0(q_{1k}r)}{2} + A_{s22} \frac{I_2(q_{2k}r) - I_0(q_{2k}r)}{2} \right] \cos \theta \quad (35)$$

$$u_{\theta 2k} = \left[-\gamma A_{s21} \frac{I_2(q_{1k}r) - I_0(q_{1k}r)}{2} + A_{s22} \frac{I_2(q_{2k}r) + I_0(q_{2k}r)}{2} \right] \sin \theta \quad (36)$$

式中: $I_2()$ 、 $I_0()$ 分别为第二类二阶和零阶修正贝塞尔函数; A_{s21} 和 A_{s22} 为待定系数。

类似地, 基于桩芯土与管桩交界面处的连续条件式 (30) 可求得

$$A_{s22} = S_3 A_{s21} \quad (37)$$

$$[T_a(z)] = \begin{bmatrix} \sin(\delta z) & \cos(\delta z) & \sinh(\delta z) & \cosh(\delta z) \\ \delta \cos(\delta z) & -\delta \sin(\delta z) & \delta \cosh(\delta z) & \delta \sinh(\delta z) \\ -E_p^* I_p \delta^2 \sin(\delta z) & -E_p^* I_p \delta^2 \cos(\delta z) & E_p^* I_p \delta^2 \sinh(\delta z) & E_p^* I_p \delta^2 \cosh(\delta z) \\ -E_p^* I_p \delta^3 \cos(\delta z) & E_p^* I_p \delta^3 \sin(\delta z) & E_p^* I_p \delta^3 \cosh(\delta z) & E_p^* I_p \delta^3 \sinh(\delta z) \end{bmatrix} \quad (42)$$

式中: $[Y_a(z)] = [u_{pa}(z) \ \phi_{pa}(z) \ M_{pa}(z) \ Q_{pa}(z)]^T$, $u_{pa}(z)$ 、 $\phi_{pa}(z)$ 、 $M_{pa}(z)$ 、 $Q_{pa}(z)$ 分别为海面之上桩段的水平位移、转角、弯矩和剪力;

$[N_a] = [N_{a1} \ N_{a2} \ N_{a3} \ N_{a4}]^T$ 为待定系数。

(2) 当 $-H_1 < z \leq 0$ 时

海水与管桩交界面处的连续条件为^[21]

$$A_{s21} = S_4 u_{psk} \quad (38)$$

$$\text{式中: } S_3 = \frac{\gamma I_2(q_{1k}r_2)}{I_2(q_{2k}r_2)}; S_4 = \frac{-2}{\gamma I_0(q_{1k}r_2) + S_3 I_0(q_{2k}r_2)}。$$

可以得到第 k 层桩芯土对单位长度桩身的水平抗力为

$$f_{s2k} = \int_0^{2\pi} (\sigma_{r2k} \cos \theta - \tau_{r\theta 2k} \sin \theta) \Big|_{r=r_2} r_2 d\theta = v_2 u_{psk} \quad (39)$$

式中:

$$v_2 = \pi r_2 S_4 [(\lambda_k^* + 2G_k^*) I_1(q_{1k}r_2) - G_k^* S_3 q_{2k} I_1(q_{2k}r_2)]。$$

3.3 管桩水平振动方程求解

将式 (11)、(17) 求得的桩周和桩芯海水动水压力及式 (33)、(39) 求得的第 k 层土体的水平抗力代入管桩控制方程 (4) 中, 易得到各段桩身控制方程解的形式为

$$\left. \begin{aligned} u_{pa} &= N_{a1} \sin(\delta z) + N_{a2} \cos(\delta z) + N_{a3} \sinh(\delta z) + N_{a4} \cosh(\delta z), & -H_0 - H_1 \leq z \leq -H_1 \\ u_{pw} &= N_{w1} \sin(\delta z) + N_{w2} \cos(\delta z) + N_{w3} \sinh(\delta z) + N_{w4} \cosh(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_{w1n} A_{w1n} \cos(g_n z) - \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_{w2n} A_{w2n} \cos(g_n z), & -H_1 < z \leq 0 \\ u_{psk} &= N_{s1k} \sin(\delta_k z) + N_{s2k} \cos(\delta_k z) + N_{s3k} \sinh(\delta_k z) + N_{s4k} \cosh(\delta_k z), & 0 < z \leq H_2 \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

式中: $N_{a1} \sim N_{a4}$ 、 $N_{w1} \sim N_{w4}$ 、 $N_{s1k} \sim N_{s4k}$ 均为待

定系数; $\delta = \sqrt[4]{\frac{\rho_p A_p \omega^2}{E_p^* I_p}}$; $\delta_k = \sqrt[4]{\frac{\rho_p A_p \omega^2 - (v_1 + v_2)}{E_p^* I_p}}$;

$$\zeta_{w1n} = \frac{\pi r_1 K_1(h_n r_1)}{E_p^* I_p (h_n^4 - \delta^4)}; \zeta_{w2n} = -\frac{\pi r_2 I_1(h_n r_2)}{E_p^* I_p (h_n^4 - \delta^4)}。$$

(1) 当 $-H_0 - H_1 \leq z \leq -H_1$ 时

对于海面之上桩段, 有

$$[Y_a(z)] = [T_a(z)][N_a] \quad (41)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \frac{\partial p_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \rho_w \omega^2 u_{pw} \cos \theta \quad (43)$$

将式 (10)、(16) 求得的桩周、桩芯海水动水压力和式 (40) 中的海水层管桩位移表达式代入上述连续条件式 (43), 可得

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_{w1n} \eta_{w1n} \cos(g_n z) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{w2n} \eta_{w2n} \cos(g_n z) =$$

$$N_{w1} \sin(\delta z) + N_{w2} \cos(\delta z) + N_{w3} \sinh(\delta z) +$$

$$N_{w4} \cosh(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_{w1n} A_{w1n} \cos(g_n z) -$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \zeta_{w2n} A_{w2n} \cos(g_n z) \quad (44)$$

$$\text{式中: } \eta_{w1n} = -\frac{h_n}{2\rho_w \omega^2} [K_0(h_n r_1) + K_2(h_n r_1)] ;$$

$$\eta_{w2n} = \frac{h_n}{2\rho_w \omega^2} [I_0(h_n r_2) + I_2(h_n r_2)] .$$

由式 (44) 容易得到

$$A_{w2n} = \frac{\eta_{w1n}}{\eta_{w2n}} A_{w1n} \quad (45)$$

将式 (45) 代入式 (44), 可得

$$N_{w1} \sin(\delta z) + N_{w2} \cos(\delta z) + N_{w3} \sinh(\delta z) +$$

$$N_{w4} \cosh(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n}}{\eta_{w2n}} A_{w1n} \cos(g_n z) =$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \eta_{w1n} A_{w1n} \cos(g_n z) \quad (46)$$

将式 (46) 两边同时乘以 $\cos(g_n z)$ 并在区间 $[-H_1, 0]$ 上积分, 可得

$$A_{w1n} = \eta_{w2n} (\chi_{w1n} N_{w1} + \chi_{w2n} N_{w2} + \chi_{w3n} N_{w3} + \chi_{w4n} N_{w4}) \quad (47)$$

$$\text{式中: } \chi_{w1n} = \frac{2 \int_{-H_1}^0 \sin(\delta z) \cos(g_n z) dz}{H_1 (\eta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n})} ;$$

$$\chi_{w2n} = \frac{2 \int_{-H_1}^0 \cos(\delta z) \cos(g_n z) dz}{H_1 (\eta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n})} ;$$

$$\chi_{w3n} = \frac{2 \int_{-H_1}^0 \sinh(\delta z) \cos(g_n z) dz}{H_1 (\eta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n})} ;$$

$$\chi_{w4n} = \frac{2 \int_{-H_1}^0 \cosh(\delta z) \cos(g_n z) dz}{H_1 (\eta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n})} .$$

继而可得到

$$A_{w2n} = \eta_{w1n} (\chi_{w1n} N_{w1} + \chi_{w2n} N_{w2} + \chi_{w3n} N_{w3} + \chi_{w4n} N_{w4}) \quad (48)$$

则对于海水层桩段, 有

$$[Y_w(z)] = [T_w(z)][N_w] \quad (49)$$

$$[T_w(z)] = [t_{w1}(z) \ t_{w2}(z) \ t_{w3}(z) \ t_{w4}(z)] \quad (50)$$

$$[t_{sk}(z)] = \begin{bmatrix} \sin(\delta_k z) & \cos(\delta_k z) & \sinh(\delta_k z) & \cosh(\delta_k z) \\ \delta_k \cos(\delta_k z) & -\delta_k \sin(\delta_k z) & \delta_k \cosh(\delta_k z) & \delta_k \sinh(\delta_k z) \\ -E_p^* I_p \delta_k^2 \sin(\delta_k z) & -E_p^* I_p \delta_k^2 \cos(\delta_k z) & E_p^* I_p \delta_k^2 \sinh(\delta_k z) & E_p^* I_p \delta_k^2 \cosh(\delta_k z) \\ -E_p^* I_p \delta_k^3 \cos(\delta_k z) & E_p^* I_p \delta_k^3 \sin(\delta_k z) & E_p^* I_p \delta_k^3 \cosh(\delta_k z) & E_p^* I_p \delta_k^3 \sinh(\delta_k z) \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\text{式中: } [Y_{sk}(z)] = [u_{psk}(z) \ \phi_{psk}(z) \ M_{psk}(z) \ Q_{psk}(z)]^T ,$$

式中: $[Y_w(z)] = [u_{pw}(z) \ \phi_{pw}(z) \ M_{pw}(z) \ Q_{pw}(z)]^T$, $u_{pw}(z)$ 、 $\phi_{pw}(z)$ 、 $M_{pw}(z)$ 、 $Q_{pw}(z)$ 分别为海水层桩段的水平位移、转角、弯矩和剪力;

$[N_w] = [N_{w1} \ N_{w2} \ N_{w3} \ N_{w4}]^T$ 为待定系数;

$$[t_{w1}(z)] = \begin{bmatrix} \sin(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w1n} \cos(g_n z) \\ \delta \cos(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w1n} g_n \sin(g_n z) \\ -E_p^* I_p [\delta^2 \sin(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w1n} g_n^2 \cos(g_n z)] \\ -E_p^* I_p [\delta^3 \cos(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w1n} g_n^3 \sin(g_n z)] \end{bmatrix} ;$$

$$[t_{w2}(z)] = \begin{bmatrix} \cos(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w2n} \cos(g_n z) \\ -\delta \sin(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w2n} g_n \sin(g_n z) \\ -E_p^* I_p [\delta^2 \cos(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w2n} g_n^2 \cos(g_n z)] \\ E_p^* I_p [\delta^3 \sin(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w2n} g_n^3 \sin(g_n z)] \end{bmatrix} ;$$

$$[t_{w3}(z)] = \begin{bmatrix} \sinh(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w3n} \cos(g_n z) \\ \delta \cosh(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w3n} g_n \sin(g_n z) \\ E_p^* I_p [\delta^2 \sinh(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w3n} g_n^2 \cos(g_n z)] \\ E_p^* I_p [\delta^3 \cosh(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w3n} g_n^3 \sin(g_n z)] \end{bmatrix} ;$$

$$[t_{w4}(z)] = \begin{bmatrix} \cosh(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w4n} \cos(g_n z) \\ \delta \sinh(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w4n} g_n \sin(g_n z) \\ E_p^* I_p [\delta^2 \cosh(\delta z) + \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w4n} g_n^2 \cos(g_n z)] \\ E_p^* I_p [\delta^3 \sinh(\delta z) - \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_{w4n} g_n^3 \sin(g_n z)] \end{bmatrix} ;$$

$$\kappa_{w1n} = (\zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n}) \chi_{w1n} ;$$

$$\kappa_{w2n} = (\zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n}) \chi_{w2n} ;$$

$$\kappa_{w3n} = (\zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n}) \chi_{w3n} ;$$

$$\kappa_{w4n} = (\zeta_{w1n} \eta_{w2n} + \zeta_{w2n} \eta_{w1n}) \chi_{w4n} .$$

(3) 当 $0 < z \leq H_2$ 时

对于土中第 k 层桩段, 有

$$[Y_{sk}(z)] = [t_{sk}(z)][N_{sk}] \quad (51)$$

$u_{psk}(z)$ 、 $\phi_{psk}(z)$ 、 $M_{psk}(z)$ 、 $Q_{psk}(z)$ 分别为第 k 层

桩段的水平位移、转角、弯矩和剪力;

$[N_{sk}] = [N_{s1k} \ N_{s2k} \ N_{s3k} \ N_{s4k}]^T$ 为待定系数。

第 k 层桩段上、下两端的水平位移、转角、弯矩、剪力的关系为

$$\left. \begin{aligned} [Y_{sk}(l_1)] &= [t_{sk}(l_1)][Y_{sk}(0)]^{-1}[Y_{sk}(0)], \quad k=1 \\ [Y_{sk}(\sum_{x=1}^k l_x)] &= [T_{sk}][Y_{sk}(\sum_{x=1}^{k-1} l_x)], \quad 1 < k \leq m \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

式中: $[T_{sk}] = [t_{sk}(\sum_{x=1}^k l_x)][t_{sk}(\sum_{x=1}^{k-1} l_x)]^{-1}$ 。

管桩满足如下桩身连续条件:

$$[Y_a(-H_1)] = [Y_w(-H_1)], \quad [Y_w(0)] = [Y_s(0)] \quad (54)$$

根据桩身连续条件, 利用传递矩阵法可得桩底和桩顶的水平位移、转角、弯矩、剪力的关系为

$$[Y_s(H_2)] = [T][Y_a(-H_0 - H_1)] \quad (55)$$

式中: $[T] = [T_{sm}] \cdots [T_{sk}] \cdots [T_{s2}] [T_{s1}] [T_w(0)] [T_w(-H_1)]^{-1} \cdot [T_a(-H_1)] [T_a(-H_0 - H_1)]^{-1}$ 。

桩底边界条件为

$$u_{ps}(H_2) = 0, \quad \phi_{ps}(H_2) = 0 \quad (56)$$

将式 (56) 代入式 (55), 可得

$$\begin{bmatrix} M_{pa}(-H_0 - H_1) \\ Q_{pa}(-H_0 - H_1) \end{bmatrix} = [K_p] \begin{bmatrix} u_{pa}(-H_0 - H_1) \\ \phi_{pa}(-H_0 - H_1) \end{bmatrix} \quad (57)$$

式中: $[K_p] = - \begin{bmatrix} T(1,3) & T(1,4) \\ T(2,3) & T(2,4) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T(1,1) & T(1,2) \\ T(2,1) & T(2,2) \end{bmatrix}$ 。

将桩顶受到的水平力 $Q_{pa}(-H_0 - H_1)$ 和弯矩 $M_{pa}(-H_0 - H_1)$ 代入式 (57) 即可求得桩顶水平位移 $u_{pa}(-H_0 - H_1)$ 。

4 对比验证与参数分析

4.1 对比验证

将本文理论解得到的桩顶位移响应与有限元模拟结果进行对比, 以验证本文方案的合理性。图 2 为在 ABAQUS 软件中建立的管桩-海水-层状土系统数值分析模型, 模型中大直径管桩的外半径为 2 m, 内半径为 1.6 m, 桩长为 62 m, 管桩露出海水部分桩长为 2 m, 海水深度为 30 m, 海床土体厚度为 30 m, 分为上、下两层各 15 m。桩弹性模量为 30 GPa, 桩身阻尼为 0.025, 海水密度为 1 000 kg/m³, 表层海床土弹性模量为 30 MPa, 下层海床土弹性模量为 60 MPa, 海床土密度均为 1 600 kg/m³, 泊松比为 0.3, 阻尼比为 0.05^[18, 22]。通过对结构进行模态分析, 选取前两阶振型频率作为指定频率, 根据瑞利阻尼模型求得该二阶振型阻尼比与事先假定的阻尼比相等的原则确定瑞利阻尼系数^[26]。在有限元模型中分别采用 B31 梁单元、AC3D8 声单元和 C3D8R

单元模拟桩、海水和海床土。将桩周海水和海床土的径向距离均设置为管桩直径的 10 倍, 并将桩周海床土体最外层设置为无限元边界以及桩周海水外侧设置非反射边界来避免边界反射效应的影响^[3, 27]。考虑管桩-海水-土壤之间的接触特性, 桩-土和桩-海水界面设置 Embedded 接触, 海水-土和各土层之间的界面设置 Tie 接触, 同时令下层土体和管桩的下端固定。为保证桩-土和桩-海水相互作用分析的计算精度, 采用沿径向辐射状的六面体网格划分, 距离桩越远处土体网格越大, 对桩芯和桩周靠近桩身的海水、土体网格加密处理, 并调整网格保证桩体网格与其接触海水、土体的网格节点共点。最后在桩顶处施加 100 kN 的水平荷载, 对沿荷载方向的位移设定随频率的历程输出, 建立稳态动力分析步对其频域响应特性进行分析。

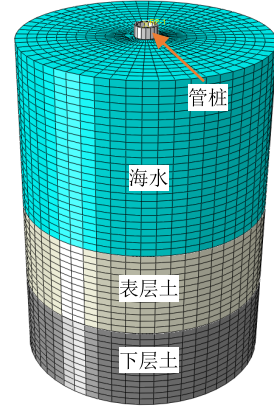


图2 管桩-海水-层状海床土系统数值分析模型

Fig.2 Numerical analysis model for the pipe pile-seawater-layered seabed soils system

图 3 为本文理论解与有限元模拟得到的桩顶位移响应对比情况, 其中横坐标为激振频率 $f = \omega/2\pi$ 。由图可以看出, 所提出的解与数值模拟结果吻合较好。

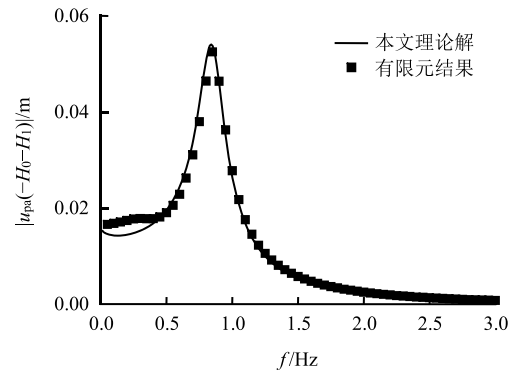


图3 本文解得到的桩顶位移与有限元模拟结果对比
Fig.3 Comparison of the present solution for pile head displacement with those of FEM simulation results

令 $r_2 = 0$ 和 $H_0 = 0$, 将本文解退化为海洋实心桩水平振动解, 并将退化解得到的桩顶水平动力阻抗与文献[20]进行对比验证。此处计算所取参数与文献[20]一致: $H_2 = 20$ m, $H_1/H_2 = 0.1$, $r_1 = 0.5$ m, $E_p = 25$ GPa, $E_{s1} = 25$ MPa, $E_{s2} = 30$ MPa, $\nu_s = 0.3$, $\beta_s = 0.05$, $\rho_w = 1\ 000$ kg/m³, $\rho_s = 2\ 020$ kg/m³, $\rho_p = 2\ 500$ kg/m³。图 4 给出了本文退化解与文献[20]得到的海洋实心桩水平动力阻抗计算结果, 可以看出两者完全一致, 从而进一步验证了本文解的正确性。水平动力复阻抗 K_h 的实部和虚部分别表示桩-水-土系统的刚度和阻尼。复阻抗 K_h 的定义由文献[20]给出:

$$K_h = \frac{Q_{pa}(-H_0 - H_1)}{u_{pa}(-H_0 - H_1)} = K_p(2, 1) \quad (58)$$

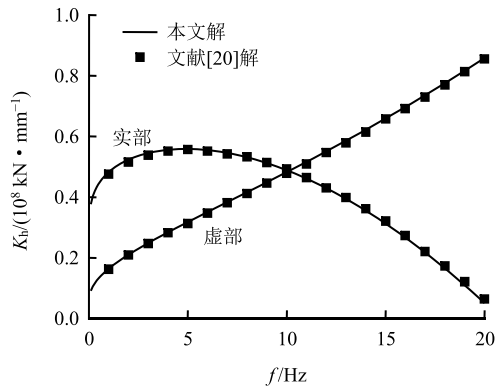


图 4 本文解与文献[20]解对比

Fig.4 Comparison of the horizontal impedance with Ref. [20] solution

4.2 桩顶水平位移响应特性分析

本文以双层地基为例, 对层状地基中海洋大直径管桩的桩顶水平位移响应特性进行分析。如无其他特殊说明, 所采用的计算参数与 4.1 节有限元模拟中保持一致。

图 5 为不同水深时, 考虑海水动水压力及不考虑动水压力的海洋管桩桩顶水平位移响应随频率的变化情况。从图中可看出, 在较低的频率范围内即可观察到不同情况下的桩顶最大位移。桩顶发生最大水平位移时所对应的频率即为桩-海水-土系统的固有频率。随着海水深度增加, 桩顶最大水平位移增大, 桩-海水-土系统的固有频率降低。对比两种不同海水深度的曲线可以看出, 当海水深度为 30 m 时考虑动水压力使固有频率从 1.32 降低到 0.84, 而当海水深度只有 20 m 时考虑动水压力使固有频率从 2.22 显著降低到 1.45。即忽略海水动水压力作用会高估桩-海水-土系统的固有频率。此外, 忽略动

水压力也会略微低估桩顶最大水平位移, 这在海水深度高时更明显。高估固有频率和低估最大水平位移均会造成桩基设计偏于不安全, 因此在海洋大直径管桩动力设计中需考虑海水动水压力的作用。

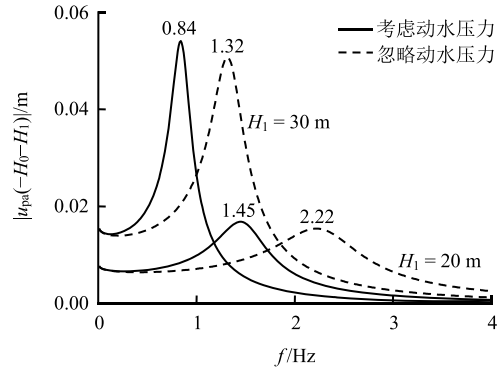


图 5 动水压力对桩顶水平位移的影响

Fig.5 Effect of hydrodynamic pressure on the pile head displacement

为了进一步探讨桩周、桩芯海水对海洋大直径管桩水平动力特性的影响, 图 6 给出了同时考虑桩周和桩芯海水、仅考虑桩周或桩芯海水以及不考虑桩周和桩芯海水几种工况下的海洋管桩桩顶水平位移响应随频率的变化情况。可以发现, 桩周海水和桩芯海水均对海洋大直径管桩水平动力特性有较大影响, 它们的存在均会使桩-海水-土系统的固有频率降低, 同时使桩顶最大水平位移略微增大, 忽略桩周或桩芯海水的作用均会高估固有频率。

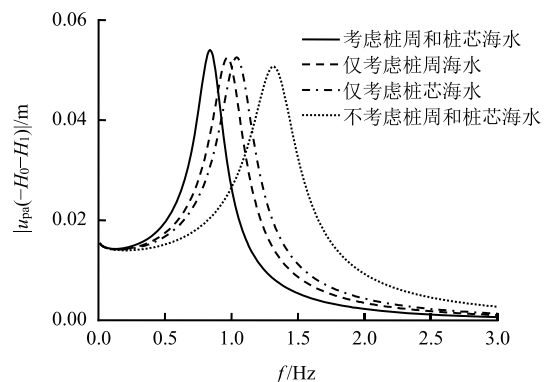


图 6 桩周、桩芯海水对桩顶水平位移的影响

Fig.6 Effect of the outer and inner seawater on the pile head displacement

图 7 反映了表层土体弹性模量对桩顶位移响应的影响, 图中下层土体弹性模量 E_{s2} 为 60 MPa。从图中可以看出, 随着表层土体弹性模量增大, 桩-海水-土系统的固有频率增大, 固有频率以下的桩

顶水平位移减小,而固有频率处桩顶水平位移峰值反而增大。固有频率以下的桩顶水平位移随表层土体模量增大而减小的原因是在固有频率以下表层土体对桩身水平运动产生的抗力增大。而固有频率处桩顶位移峰值增大的原因是随着表层土体模量增大,桩土系统更加趋于刚性,其在共振频率处的共振幅值自然增大。

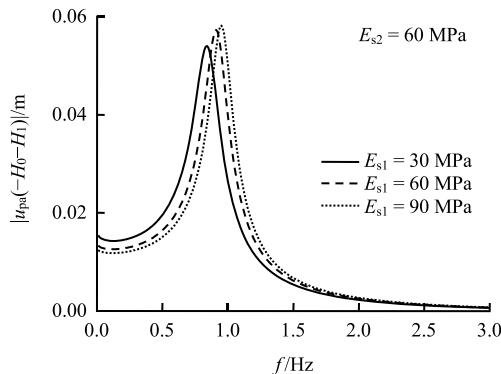


图7 表层土体弹性模量对桩顶水平位移的影响
Fig.7 Effect of the elastic modulus of surface soil on the pile head displacement

图8给出了下层土体弹性模量对桩顶位移响应的影响,图中表层土体弹性模量 E_{s1} 为 60 MPa。由图可以看出,3种不同下层土体弹性模量工况下的位移响应曲线基本吻合,说明当表层土体弹性模量保持不变,下层土体弹性模量变化对桩顶最大位移和桩-海水-土系统的固有频率几乎没有影响。这主要是位于下层土体中的桩端已经超出了有效桩长范围,下层土的桩-土相互作用几乎可以忽略^[28]。

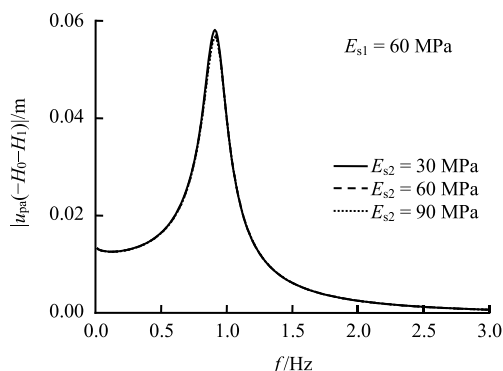


图8 下层土体弹性模量对桩顶水平位移的影响
Fig.8 Effect of the elastic modulus of subsoil on the pile head displacement

图9给出了海床土上硬下软分布时,表层土体厚度的变化对桩顶位移响应的影响。由图可以看出,在不同厚度下的曲线在达到固有频率之前的桩顶位

移变化较小,这归结于海洋桩在水平受力时,阻抗会集中在接近水-土交界面处,而当表层土的弹性模量处于 90 MPa 时桩-海水-土系统已经有了较大的刚性,所以其厚度的变化对固有频率之前的桩顶位移影响较小。而随着表层土体厚度的增大,桩顶最大位移和桩-海水-土系统固有频率都随之增大。这归结于此时海床土处于上硬下软分布,随着表层土体厚度的增大,桩-海水-土系统的刚性增大使得其共振幅值和固有频率增大。而当表层土体厚度增大至一定值后,桩顶最大位移和固有频率的变化不再明显。即对于在一定厚度的范围内,表层土体对桩顶位移响应有影响。而当表层土体到一定厚度即接近有效桩长后,其对桩顶位移响应的影响不再明显。

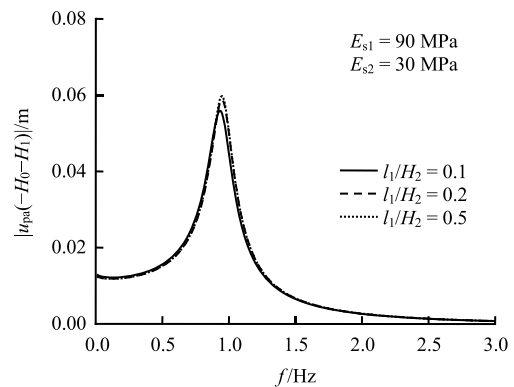


图9 海床土上硬下软分布时表层土体厚度对桩顶水平位移的影响
Fig.9 Effect of thickness of surface soil on the pile head displacement for the case of stiffer upper and softer lower soil

图10给出了海床土上软下硬分布时,下层土体厚度的变化对桩顶位移响应的影响。可以发现,下层土体厚度变化对桩顶最大位移和桩-海水-土系统的固有频率的影响很小。特别是当下层土体厚度

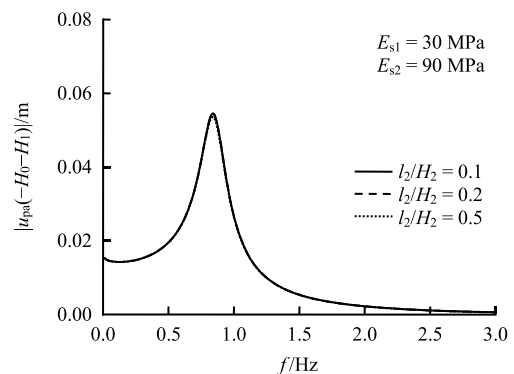


图10 海床土上软下硬分布时下层土体厚度对桩顶水平位移的影响
Fig.10 Effect of thickness of subsoil on the pile head displacement for the case of softer upper and stiffer lower soil

较小时, 如图中 $l_2/H_2 = 0.1$ 和 $l_2/H_2 = 0.2$ 两种不同下层土厚情况下的位移响应曲线基本吻合, 说明当下层土体厚度较小即表层土体厚度已超过有效桩长时, 下层土体的厚度和弹性模量的变化对桩顶最大位移和桩-海水-土系统的固有频率几乎没有影响。

5 结 论

本文考虑海水动水压力作用和桩-流体-土耦合振动, 求解得到了层状地基中海洋大直径管桩水平动力响应解析解, 基于所得解探讨了关键参数对桩顶水平动位移响应特性的影响, 得出以下结论:

(1) 海水段桩身长度增大, 桩顶最大位移显著增大, 同时桩-海水-土系统的固有频率显著提前。

(2) 桩周海水和桩芯海水都会使得桩-海水-土系统的固有频率降低, 这在分析风电基础的共振频率时影响很大, 大直径管桩的桩芯海水对海洋大直径管桩动力响应的影响不可忽略。

(3) 与下层土体相比, 桩顶位移响应特性对上层土体的性质更为敏感。随着表层土体弹性模量增大, 桩-海水-土系统刚性增大, 桩顶的最大位移和固有频率都随之增大。

(4) 海床土上硬下软分布时, 表层土体厚度的增大使得桩-海水-土系统刚性增大, 桩顶最大位移和系统的固有频率也随之增大。表层土体厚度仅在有效桩长内的变化对桩顶位移响应有影响。

参 考 文 献

- [1] 刘俊伟, 吕伟, 于秀霞. 台风环境中海上风电管桩基础动响应特性研究述评[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(1): 1-7.
LIU Jun-wei, LÜ Wei, YU Xiu-xia. Review on dynamic response characteristics of offshore wind turbine pipe pile foundation in typhoon environment[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2022, 20(1): 1-7.
- [2] 王国粹, 王伟, 杨敏. 3.6 MW 海上风机单桩基础设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 95-100.
WANG Guo-cui, WANG Wei, YANG Min. Design and analysis of monopile foundation for 3.6 MW offshore wind turbine[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(Suppl.2): 95-100.
- [3] 梅毕祥, 杨敏. 海上风机单桩基础设计要点及有限元分析实例[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(1): 89-94.
MEI Bi-xiang, YANG Min. Design points and finite element analysis of monopile foundation for offshore wind turbine[J]. *Journal of Marine Technology*, 2014, 33(1): 89-94.
- [4] 赵密, 常逸夫, 王丕光, 等. 考虑水-桩-土相互作用的单桩式海上风机结构系统自振频率解析解[J]. 震灾防御技术, 2020, 15(4): 659-669.
ZHAO Mi, CHANG Yi-fu, WANG Pi-guang, et al. Analytical solution for natural frequency of monopiles in offshore wind turbine system considering water-pile-soil interaction[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2020, 15(4): 659-669.
- [5] ZHENG C, LIN H, CAO G, et al. Horizontal dynamic response of offshore large-diameter pipe piles[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 272: 113797.
- [6] NOVAK M. Dynamic stiffness and damping of piles[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1974, 11(4): 574-598.
- [7] EL NAGGAR M H, NOVAK M. Nonlinear lateral interaction in pile dynamics[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1995, 14(2): 141-157.
- [8] NOGAMI T, NOVAK M. Resistance of soil to a horizontally vibrating pile[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1977, 5(3): 249-261.
- [9] NOVAK M, ABOUL-ELLA F, NOGAMI T. Dynamic soil reactions for plane strain case[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1978, 104(4): 953-959.
- [10] NOVAK M, NOGAMI T. Soil-pile interaction in horizontal vibration[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1977, 5(3): 263-281.
- [11] 尚守平, 余俊, 王海东, 等. 饱和土中桩水平振动分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1696-1702.
SHANG Shou-ping, YU Jun, WANG Hai-dong, et al. Horizontal vibration of piles in saturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(11): 1696-1702.
- [12] 马建军, 韩书娟, 高笑娟, 等. 层状土场中冲刷作用下部分埋置单桩动力响应分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1705-1716.
MA Jian-jun, HAN Shu-juan, GAO Xiao-juan, et al. Dynamic response analysis of the partially-embedded single pile affected by scour in layered soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(6): 1705-1716.
- [13] 沈纪苹, 陈蕾. 基于传递矩阵法的层状土中管桩水平动力阻抗分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2810-2816.
SHEN Ji-ping, CHEN Lei. Analysis of horizontal dynamic

- impedance of pipe pile in layered soils based on transfer-matrix formulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2810-2816.
- [14] 吴志明, 黄茂松. 层状地基中群桩水平振动[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 418-422.
- WU Zhi-ming, HUANG Mao-song. Lateral vibration of pile groups in layered soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Suppl.2): 418-422.
- [15] 高广运, 赵元一, 高盟, 等. 分层土中群桩水平动力阻抗的改进计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 509-515.
- GAO Guang-yun, ZHAO Yuan-yi, GAO Meng, et al. Improved calculation for lateral dynamic impedance of pile groups in layered soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 509-515.
- [16] CHEN L, WU W, LIU H, et al. Influence of defects on the lateral dynamic characteristics of offshore piles considering hydrodynamic pressure[J]. **Ocean Engineering**, 2022, 260: 111894.
- [17] HUANG Y, ZHAO M, WANG P, et al. An analytical solution of a horizontally vibrating pile considering water-pile-soil interaction on viscoelastic half-space[J]. **Ocean Engineering**, 2022, 260: 111959.
- [18] 赵密, 黄义铭, 王丕光, 等. 桩顶水平动荷载作用下水-桩-土相互作用的解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 907-915.
- ZHAO Mi, HUANG Yi-ming, WANG Pi-guang, et al. Analytical solution for water-pile-soil interaction under horizontal dynamic loads on pile head[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(5): 907-915.
- [19] 袁炳祥, 樊立韬, 李志杰, 等. 层状地基中水平受荷桩-土相互作用试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 62-72.
- YUAN Bing-xiang, FAN Li-tao, LI Zhi-jie, et al. Experimental study on pile-soil interaction under horizontal load in layered foundation[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2022, 35(11): 62-72.
- [20] 付鹏, 胡安峰, 李龙, 等. 成层地基中海洋高桩基础水平动力阻抗分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3790-3798.
- FU Peng, HU An-feng, LI Long, et al. Lateral dynamic impedance of offshore elevated piles in layered soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.2): 3790-3798.
- [21] WU T, ZHANG Y, SUN H, et al. Dynamic response of sheet-pile groin under tidal bore considering pile-pile mutual interaction and hydrodynamic pressure[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2023, 164: 107568.
- [22] 郑长杰, 林浩, 曹光伟, 等. 水平动荷载作用下海洋大直径管桩动力响应解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 810-819.
- ZHENG Chang-jie, LIN Hao, CAO Guang-wei, et al. Analytical solution for dynamic response of offshore large-diameter pipe piles subjected to horizontal dynamic loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(5): 810-819.
- [23] DING X, ZHENG C, LIU H, et al. Resistance of inner soil to the horizontal vibration of pipe piles[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2017, 143(11): 06017015.
- [24] ZHENG C, LIU H, DING X, et al. Resistance of inner soil to the vertical vibration of pipe piles[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 94: 83-87.
- [25] HUANG Y, WANG P, ZHAO M, et al. Dynamic responses of an end-bearing pile subjected to horizontal earthquakes considering water-pile-soil interactions[J]. **Ocean Engineering**, 2021, 238: 109726.
- [26] 徐汉勇, 何泽, 余志武, 等. 多维地震作用下结构的瑞利阻尼系数实用计算方法[J]. 华北水利水电大学学报, 2023, 44(5): 101-108.
- XU Han-yong, HE Ze, YU Zhi-wu, et al. Practical calculation method for Rayleigh damping coefficient of structures under multi-dimensional seismic excitation[J]. **Journal of North China University of Water Resources and Electric Power**, 2023, 44(5): 101-108.
- [27] 胡钺波, 梅岭, 梅国雄, 等. 桩土模型中土体边界选取的有限元分析[J]. 建筑科学, 2009, 25(9): 18-20, 29.
- HU Cheng-bo, MEI Ling, MEI Guo-xiong, et al. Finite element method for selecting the soil boundary in the model of pile-soil[J]. **Building Science**, 2009, 25(9): 18-20, 29.
- [28] DI LAORA R, ROVITHIS E. Kinematic bending of fixed-head piles in nonhomogeneous soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(4): 04014126.