

DOI: 10.11779/CJGE201402003

海上风机部分埋入群桩水平-摇摆振动与结构共振分析

黄茂松^{1, 2}, 钟锐^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对于海上风机部分埋入群桩基础, 风机结构的高度将导致基础承受较大的倾覆力矩, 因而在风机振动分析中需要考虑到基础的摇摆特性。为避免发生共振, 风机结构第一阶自振频率应避开风轮转动频率(1P频率)和叶片通过频率(3P或2P频率)。目前关于风机结构动力特性的研究常常以底部刚性固定为假定, 忽略了地基基础的影响, 因而可能带来误差。结合既有研究成果, 推导简化解析方法研究了部分埋入群桩基础的水平-摇摆耦合振动特性以及基础阻抗对风机结构共振特性的影响。首先, 推导了采用动力 Winkler 地基模型的部分埋入群桩基础水平-摇摆动力阻抗, 与精确解进行对比, 验证了方法的正确性; 其次, 考虑基础阻抗的作用, 推导了风机结构水平-摇摆振动方程; 最后, 通过简化方法和频域有限元方法对不同地基条件下某风机结构的共振特性及基础阻抗进行了计算和对比, 研究了基础阻抗对结构共振特性的影响, 并验证了简化方法的正确性。

关键词: 风机; 部分埋入; 群桩; 水平-摇摆; 阻抗; Winkler 模型

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)02-0286-09

作者简介: 黄茂松(1965-), 男, 浙江玉环人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究与教学工作。

E-mail: mshuang@tongji.edu.cn.

Coupled horizontal-rocking vibration of partially embedded pile groups and its effect on resonance of offshore wind turbine structures

HUANG Mao-song^{1, 2}, ZHONG Rui^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The partially embedded pile groups bear tremendous moments generated by wind loads due to the large height of the offshore wind turbine structures. It is of great importance to consider the rocking vibration of the foundations in the lateral vibration analyses of wind turbine structures. In order to avoid resonance, which is very dangerous to high structures, the first-order natural frequencies of the wind turbine structures are always designed as away from 1P and 3P (2P) ones, so it is very important to calculate the natural frequencies of the wind turbine structures accurately during the design procedures. At present, the methods for calculating the dynamic characteristics of the wind turbine structures, including the natural frequencies, are usually based on the assumption of base fixity. Inaccuracies may occur in these methods for not considering the impedance of foundations. In this work, the coupled horizontal-rocking impedance of the pile group is derived and its impact on the resonance characteristics of the wind turbine structures is studied. First, a simplified method to determine the horizontal-rocking impedance of the pile group with dynamic Winkler model is proposed and verified by comparison against some published accurate solutions. Second, a lateral vibration equation for the wind turbine structures is derived with the consideration of the foundation impedance. Finally, through an example of wind turbine structure, the influence of the foundation impedance on the resonance characteristics of the structure is studied, and the proposed simplified method is verified by use of the finite element method.

Key words: wind turbine; partial embedment; pile group; horizontal-rocking; impedance; Winkler model

0 引言

作为一种可持续发展的清洁能源, 风能受到世界各国新能源开发者的青睐。中国是世界上风力资源最为丰富的国家之一, 2010年底中国风力发电功率达到

4230 kW, 成为世界第一风电大国。

海上风机常采用的基础形式有部分埋入群桩、大

基金项目: 教育部博士点基金项目(20110072110008)

收稿日期: 2012-12-18

直径单桩、吸力式沉井、三角架基础等。上海东海大桥海上风电场风机采用了部分埋入群桩基础。桩基动力性能得到了广泛的研究(如 Kaynia^[1]、Gazetas 等^[2]、Makris 等^[3]、吴志明等^[4]、黄茂松等^[5]、任青等^[6-7]、王小岗^[8])，但以往的研究往往只单独针对竖向、水平或摇摆分量进行分析，忽略了耦合效应。海上风机结构可观的风机高度会将作用在其上的水平风载转化为基础上很大的倾覆力矩，从而使基础发生水平-摇摆耦合振动，而摇摆会使单桩产生竖向振动，因此需要将竖向、水平和摇摆三向结合起来进行分析。

风轮运作周而复始，若引起结构共振，后果将十分严重。最易引起风机结构共振的荷载产生于风轮的转动，转动主要产生两种频率的荷载：①偏心荷载，由于涡轮机和叶片的质心往往与转轴有一定的偏移(叶片变形也会产生质心偏移)，风轮转动会产生偏心力，其频率与转动频率相等，称 1P 频率；②空气湍流荷载，某位置每被叶片通过一次，都将产生一次空气湍流荷载，该荷载的频率为叶片数乘上风轮的转动频率，即 $N_b P$ 频率(N_b 为叶片数目)。为避免共振现象，工程设计中常以风机结构整体的第一阶自振频率避开 1P 频率和 $N_b P$ 频率为目标。具体方法有“软-软”(soft-soft)设计、“软-刚”(soft-stiff)设计、“刚-刚”(stiff-stiff)设计，其目标是使结构的第一阶自振频率低于 1P 频率、位于 1P 和 $N_b P$ 频率之间、高于 $N_b P$ 频率。

基础工程在风机造价中占有较大比例，然而在风机结构动力特性的分析中，常常认为基础特性影响较小而采用底部刚性固定的假定，例如 Van der Tempel 等^[9]、Reinhard 等^[10]以及 Luong 等^[11]。Zaaijer^[12-13]提出用简化模型来模拟基础，但其给出的基础刚度确定方法过于简化且不能考虑阻尼项。Bhattacharya 等^[14]采用 Euler-Bernoulli 梁法对风机结构的自振频率进行分析求解，基础简化为水平和摇摆刚度引入到结构振动方程的边界条件中，并与模型实验和有限元计算进行了对比。虽然考虑了基础影响，但却有 3 点值得改进：①只考虑了独立的水平刚度和摇摆刚度，忽略了水平-摇摆耦合刚度；②只采用静刚度，未考虑基础刚度的频率相关性，且未考虑阻尼项；③未给出基础刚度的理论计算方法，算例中只采用实验测定。

本文采用简化解析方法，在动力 Winkler 地基假定下推导了部分埋入群桩基础的水平-摇摆动力阻抗。对摇摆分量采用本文方法求解，与 Kaynia 精确解^[1]进行对比，验证了本文方法的正确性。然后，将风机塔筒离散化，采用结构力学理论推导了风机结构水平简谐荷载作用下的振动方程，并将基础和结构结合起来；最后，通过不同地基中某风机结构的共振特

性分析，研究了基础阻抗对结构共振特性的影响，并采用频域有限元方法验证了本文简化方法的正确性。

1 基本理论及计算方法

1.1 部分埋入群桩的水平-摇摆耦合动力阻抗

吴志明等^[4]和黄茂松等^[5]分别采用动力 Winkler 地基模型对层状地基中群桩基础的竖向和水平振动进行了研究。任青等^[6-7]则将以上方法推广至部分埋入群桩基础。这里结合以上研究成果和方法，推导出部分埋入群桩基础的水平-摇摆耦合动力阻抗。

(1) 部分埋入群桩的竖向振动

部分埋入单桩竖向振动方程为

$$\frac{d^2 w_i(z)}{dz^2} + \left(\frac{\lambda_i^V}{h_i} \right)^2 w_i(z) = 0 \quad , \quad (1)$$

式中， z 为沿桩身竖向坐标， w_i 为桩身竖向位移， h_i 为桩单元长度，对桩身埋入部分 $\lambda_i^V = h_i \sqrt{\frac{m_p \omega^2 - k_{zi} - i\omega c_{zi}}{E_p A_p}}$ 、外伸部分 $\lambda_i^V = h_i \sqrt{\frac{m_p \omega^2}{E_p A_p}}$ ， m_p ， E_p 和 A_p 分别为桩身分布质量、弹性模量和截面积， ω 为振动圆频率， k_{zi} 和 c_{zi} 为桩周土竖向弹簧参数，可根据文献[2]中方法进行取值，即

$$\left. \begin{aligned} k_{zi} &\approx 0.6 E_{si} \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{a_0} \right), \\ c_{zi} &\approx 2 \xi_{si} \frac{k_{zi}}{\omega} + \pi \rho_{si} V_{si} d a_0^{-\frac{1}{4}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中， $a_0 = \omega d / V_{si}$ 为桩身无量纲频率， d 为桩径， E_{si} ， ρ_{si} ， V_{si} 和 ξ_{si} 分别为桩单元 i 所在土层的弹性模量、密度、剪切波速和阻尼比。

根据传递矩阵法，可得到单桩桩顶、桩底位移和轴力的关系，然后根据单桩竖向柔度定义

$$f^V = \frac{w(0)}{V(0)} \quad , \quad (3)$$

结合桩底边界条件可导出其表达式。

考虑桩桩相互作用，被动桩埋入部分竖向振动方程为

$$\frac{d^2 w_{21,i}(z)}{dz^2} + \left(\frac{\lambda_i^V}{h_i} \right)^2 w_{21,i}(z) = - \frac{(k_{zi} + i\omega c_{zi}) \psi_i^V(s) w_{11,i}(z)}{E_p A_p} \quad (4)$$

式中， $w_{11,i}$ 和 $w_{21,i}$ 分别为主动桩和被动桩单元竖向位移， ψ_i^V 为竖向位移衰减因子，为桩距 s 的函数。

结合外伸部分，采用传递矩阵法，可导出主、被动桩桩底、桩顶位移和轴力关系，然后根据竖向桩-桩相互作用因子定义

$$\alpha^V = \frac{w_{21}(0)}{w_{11}(0)} \quad . \quad (5)$$

结合被动桩桩底边界条件, 可导出其表达式。

考虑所有桩的影响, 群桩中某单桩 (k 桩) 桩顶竖向位移为

$$w_k = \sum_{j=1}^N \alpha_{kj}^V f^V V_j \quad (k=1, \dots, N) \quad (6)$$

式中, N 为桩数, V_j 为 j 桩分担的竖向荷载, α_{kj}^V 为 j 桩 - k 桩竖向相互作用因子。

(2) 部分埋入群桩的水平振动

部分埋入单桩水平振动方程为

$$\frac{d^4 u_i(z)}{dz^4} - \left(\frac{\lambda_i^H}{h_i} \right)^4 u_i(z) = 0 \quad (7)$$

式中, u_i 为桩单元水平位移, 对桩身埋入部分 $\lambda_i^H =$

$$h_i \left(\frac{m_p \omega^2 - k_{xi} - i\omega c_{xi}}{E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}}, \text{ 外伸部分 } \lambda_i^H = h_i \left(\frac{m_p \omega^2}{E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}},$$

I_p 桩身截面惯性矩, k_{xi} 和 c_{xi} 为桩周土水平弹簧参数, 可根据文献[3]中方法进行取值, 即

$$\left. \begin{aligned} k_{xi} &\approx 1.2 E_{si} \\ c_{xi} &\approx 2 \xi_{si} \frac{k_{xi}}{\omega} + 6 \rho_{si} V_{si} da_0^{\frac{1}{4}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据传递矩阵法可导出水平振动单桩桩底、桩顶位移和内力的关系, 然后根据单桩水平柔度矩阵定义

$$\begin{Bmatrix} u(0) \\ \theta(0) \end{Bmatrix} = \mathbf{f}^H \begin{Bmatrix} H(0) \\ M(0) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

结合桩底边界条件, 可导出 \mathbf{f}^H 表达式。式中, θ 为桩身转角, H 和 M 为桩身剪力和弯矩。

考虑桩桩相互作用, 被动桩埋入部分水平振动方程为

$$\frac{d^4 u_{21,i}(z)}{dz^4} - \left(\frac{\lambda_i^H}{h_i} \right)^4 u_{21,i}(z) = \frac{(k_{xi} + i\omega c_{xi}) \psi_i^H(s, \varphi) u_{11,i}(z)}{E_p I_p} \quad (10)$$

式中, $u_{11,i}$ 和 $u_{21,i}$ 分别为主、被动桩桩身单元水平位移, ψ_i^H 为水平位移衰减因子, 为桩距 s 和桩位连线与振动方向夹角 φ 的函数。

结合外伸部分, 采用传递矩阵法可导出主、被动桩桩顶、桩底位移和内力的关系, 然后根据水平桩 - 桩相互作用矩阵定义:

$$\begin{Bmatrix} u_{21}(0) \\ \theta_{21}(0) \end{Bmatrix} = \boldsymbol{\alpha}^H \begin{Bmatrix} u_{11}(0) \\ \theta_{11}(0) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

结合被动桩桩底边界条件, 可导出 $\boldsymbol{\alpha}^H$ 表达式。

考虑所有桩的影响, 群桩中某单桩 (k 桩) 桩顶水平位移和转角为

$$\begin{Bmatrix} u_k \\ \theta_k \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^N \left(\boldsymbol{\alpha}_{kj}^H \mathbf{f}^H \begin{Bmatrix} H_j \\ M_j \end{Bmatrix} \right) \quad (12)$$

式中, H_j 和 M_j 为 j 桩分担的水平力和力矩, $\boldsymbol{\alpha}_{kj}^H$ 为 j

桩 - k 桩水平相互作用矩阵。

(3) 部分埋入群桩的水平 - 摇摆阻抗

前面分别给出了考虑桩桩相互作用的部分埋入群桩中某单桩竖向和水平振动方程。式 (12) 显示单桩水平振动和摇摆振动自然耦合, 式 (6) 显示竖向振动独立。但是对于群桩, 摇摆振动不仅跟水平振动耦合, 而且还与竖向振动耦合, 因为当承台摇摆时, 各单桩的竖向阻抗将会提供摇摆抗力, 成为群桩摇摆阻抗的重要组成部分。

如图 1 所示, 当承台中心作用有水平力 H^G 、力矩 M^G 及竖向力 V^G 时, 承台将同时发生水平位移 u^G 、转角 θ^G 及竖向位移 w^G 。假定 k 桩桩位沿振动方向的坐标为 x_k 。根据以下耦合关系:

$$u_k = u^G - x_k (\theta^G)^2 \approx u^G \quad (\text{向右为正}) \quad (13)$$

$$\theta_k = \theta^G \quad (\text{顺时针为正}) \quad (14)$$

$$w_k = w^G + x_k \theta^G \quad (\text{向下为正}) \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^N H_k = H^G \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^N (M_k + V_k x_k) = M^G \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^N V_k = V^G \quad (18)$$

可将竖向、水平和摇摆振动耦合起来, 得到刚性承台部分埋入群桩基础三向耦合振动方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} & \mathbf{O} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} & \mathbf{B}_{23} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B}_{32} & \mathbf{B}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{t}_H \\ \mathbf{t}_M \\ \mathbf{t}_V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_H \\ \mathbf{F}_M \\ \mathbf{F}_V \end{Bmatrix} \quad (19)$$

式 (19) 推导与文献[15]中复合基础群桩部分类似, 各子矩阵和向量详细表达式参看文献[15]附录 1。

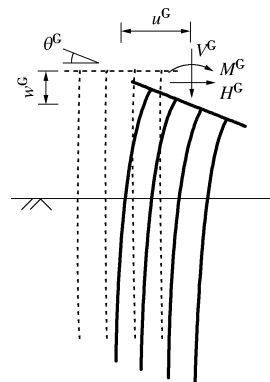


图 1 部分埋入群桩三向耦合振动示意图

Fig. 1 Coupled V - H - R vibration of partially embedded pile group

通过式 (19) 可以求得部分埋入群桩在三向荷载 V^G , H^G 和 M^G 作用下的三向位移 w^G , u^G 和 θ^G 。并由下式确定三向阻抗矩阵:

$$\begin{Bmatrix} R_V & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_{\text{HR}}(1,1) & \mathbf{R}_{\text{HR}}(1,2) \\ 0 & \mathbf{R}_{\text{HR}}(2,1) & \mathbf{R}_{\text{HR}}(2,2) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} w^G \\ u^G \\ \theta^G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} V^G \\ H^G \\ M^G \end{Bmatrix}. \quad (20)$$

式中 R_V 为竖向阻抗; R_{HR} 为水平 - 摇摆阻抗矩阵, $R_{HR}(1,1)$ 为水平阻抗, $R_{HR}(2,2)$ 为摇摆阻抗, $R_{HR}(1,2)$ 和 $R_{HR}(2,1)$ 分别为水平 - 摇摆、摇摆 - 水平耦合阻抗分量。

1.2 风机塔筒结构水平-摇摆振动分析模型

由于风机塔筒常为变截面,因而需要将塔筒离散为若干段,如图 2 所示,采用水平-摇摆阻矩矩阵考虑底部基础影响,建立稳态方程求解水平简谐荷载作用下的风机振动响应。

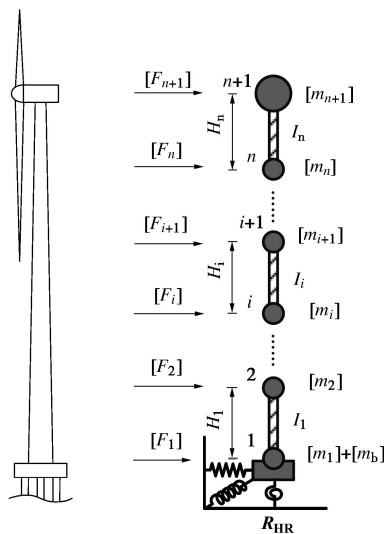


图 2 风机结构水平-摇摆振动计算简图

Fig. 2 Horizontal-rocking vibration of wind turbine structure

假定塔筒离散为 n 段, 从下至上依次编号为 $1 \sim n$ 。对于第 i 段 ($i=1, \dots, n$), 下节点编号为 i , 上节点编号为 $i+1$ 。将塔段视为等截面弹性梁, H_i 和 I_i 分别为第 i 段的长度和截面惯性矩。将分布质量向塔段下节点集聚, 形成 2×2 的质量矩阵 \mathbf{m}_i , 包含质量、转动惯量及非对角元素, 涡轮机和叶片质量矩阵为 \mathbf{m}_{n+1} , 基础质量矩阵为 \mathbf{m}_b 。同样, 将塔段所受的水平分布荷载向其下节点集聚而形成 2 维荷载向量 \mathbf{F}_i , 包含水平集中力和力矩。

此自由度为 $2(n+1)$ 体系的水平-摇摆振动方程为

$$\begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & \tilde{K}_{12} & & & & \\ & \tilde{K}_{22} & \tilde{K}_{23} & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \\ & & & \tilde{K}_{i,i-1} & \tilde{K}_{i,i} & \tilde{K}_{i,i+1} \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \tilde{K}_{n,n-1} & \tilde{K}_{n,n} & \tilde{K}_{n,n+1} \\ & & & & & & \tilde{K}_{n+1,n} & \tilde{K}_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \\ u_{n+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_n \\ F_{n+1} \end{Bmatrix}, \quad (21)$$

式中, 等号左边刚度矩阵第 1 行:

$$\tilde{K}_{11} = K_{11} + R_{HR} - \omega^2 (m_1 + m_b) \quad , \quad (22)$$

$$\tilde{K}_{12} = K_{12} \quad , \quad (23)$$

第 2 至 n 行:

$$\tilde{K}_{i,i-1} = K_{i,i-1} \quad , \quad (24)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{i,i} = \mathbf{K}_{i,i} - \omega^2 \mathbf{m}_i \quad , \quad (25)$$

$$\tilde{K}_{i,i+1} = K_{i,i+1} \quad , \quad (26)$$

第 $n+1$ 行:

$$\tilde{K}_{n+1,n} = K_{n+1,n} \quad , \quad (27)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{n+1,n+1} = \mathbf{K}_{n+1,n+1} - \omega^2 \mathbf{m}_{n+1} \quad \circ \quad (28)$$

以上各式中, ω 为振动圆频率, $\mathbf{u}_i (i=1, \cdots, n+1)$ 为节点位移向量, 包含水平位移和转角, $\mathbf{K}_{ij} (i=1, \cdots, n+1; j=i-1, \cdots, i+1)$ 为结构单元刚度矩阵,

$$K_{i,i-1} = \begin{bmatrix} -12EI_{i-1}/H_{i-1}^3 & -6EI_{i-1}/H_{i-1}^2 \\ 6EI_{i-1}/H_{i-1}^2 & 2EI_{i-1}/H_{i-1} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$K_{i,i} = \begin{bmatrix} \frac{12EI_i}{H_i^3} & \frac{6EI_i}{H_i^2} \\ \frac{6EI_i}{H_i^2} & \frac{4EI_i}{H_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{12EI_{i-1}}{H_{i-1}^3} & -\frac{6EI_{i-1}}{H_{i-1}^2} \\ -\frac{6EI_{i-1}}{H_{i-1}^2} & \frac{4EI_{i-1}}{H_{i-1}} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$K_{i,i+1} = \begin{bmatrix} -12EI_i/H_i^3 & 6EI_i/H_i^2 \\ -6EI_i/H_i^2 & 2EI_i/H_i \end{bmatrix}, \quad (31)$$

其中, E 为结构弹性模量。当节点号 $i=1$ 时, 式 (29) 不适用, 式 (30) 应去除第二项; 当 $i=2\sim n$ 时, 三式皆适用; 当 $i=n+1$ 时, 式 (31) 不适用, 式 (30) 应去除第一项。

将基础阻抗 R_{HR} 代入式 (21) 中, 即可对考虑基础阻抗的风机水平 - 摇摆振动问题进行求解。如果要采用底部刚性固定的模型, 可引入风机结构底部位移和转角为 0 的边界条件, 即将式 (21) 中矩阵和向量的第 $n+1$ 行、列去除而求解。

2 群桩阻抗方法验证

Kaynia^[1]采用边界积分方法对群桩动力问题进行的计算一般被认为是精确解,本节将本文方法结果与其对比从而对本文方法进行验证。由于文献[4, 5]已分别对竖向和水平阻抗进行了对比验证,本文只对摇摆阻抗项进行与精确解的对比。令

$$\mathbf{R}_{\text{HR}}(2,2) = K_{\theta\theta} + \mathrm{i}a_0 C_{\theta\theta} \quad , \quad (32)$$

式中, $K_{\theta\theta}$ 和 $C_{\theta\theta}$ 分别为摇摆刚度和阻尼, $a_0 = \omega d / V_s$ 为无量纲频率, 其中 ω , d 和 V_s 分别为振动圆频率、桩径和土体剪切波速。

对长径比 $L/d=15$ ，土桩模量比为 $E_s/E_p=10^3$ 、密度比为 $\rho_s/\rho_p=0.7$ 、桩身泊松比 ν_p 为 0.25、土体泊松比 ν_s 和阻尼比 ξ_s 分别为 0.40 和 0.05 的 2×2 、 3×3 和 4×4 群桩摇摆阻抗进行计算，与 Kaynia 解^[1]进行对比，见图如 3~5 所示。图中对阻抗进行归一化处理， x_i 为 i

桩摇摆方向坐标, k^V 为单桩静刚度, s/d 为桩距与桩径之比。

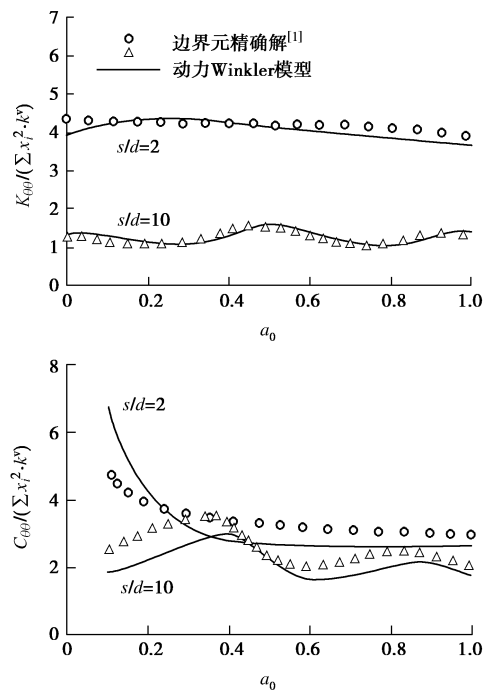


图 3 2×2 群桩摇摆振动阻抗对比

Fig. 3 Comparison of rocking impedance of 2×2 pile group

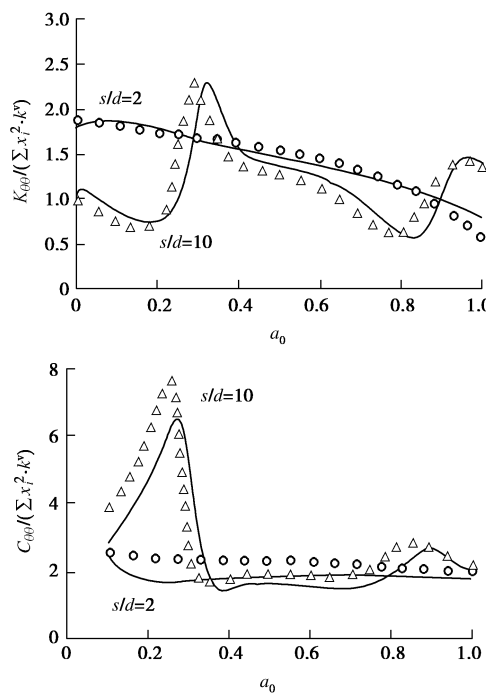


图 4 3×3 群桩摇摆振动阻抗对比

Fig. 4 Comparison of rocking impedance of 3×3 pile group

3 风机结构共振算例及有限元对比

3.1 计算参数

图 6 为某三叶片风机结构示意图。涡轮机和叶片总质量为 177.1 t。风机塔筒由 3 节钢管柱构成, 尺寸

参数如表 1。基础为 7 根钢管桩构成的群桩基础, 桩位按中心对称布置, 桩径为 1.7 m, 壁厚为 30 mm。钢材弹性模量和密度分别为 206000 MPa 和 7850 kg/m³, 塔筒结构阻尼比取 2%。

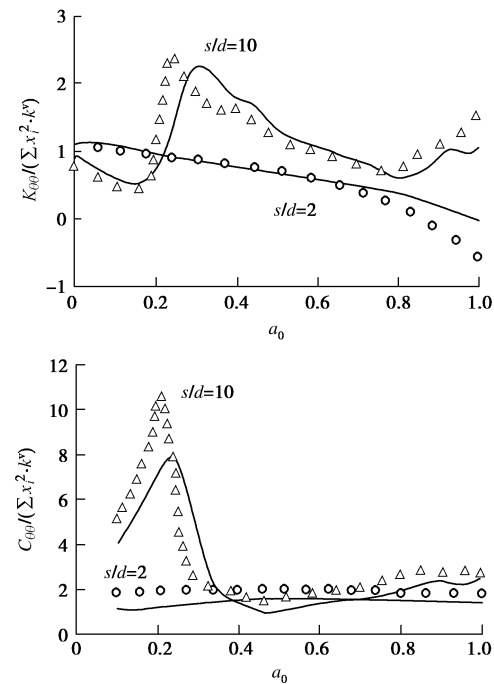


图 5 4×4 群桩摇摆振动阻抗对比

Fig. 5 Comparison of rocking impedance of 4×4 pile group

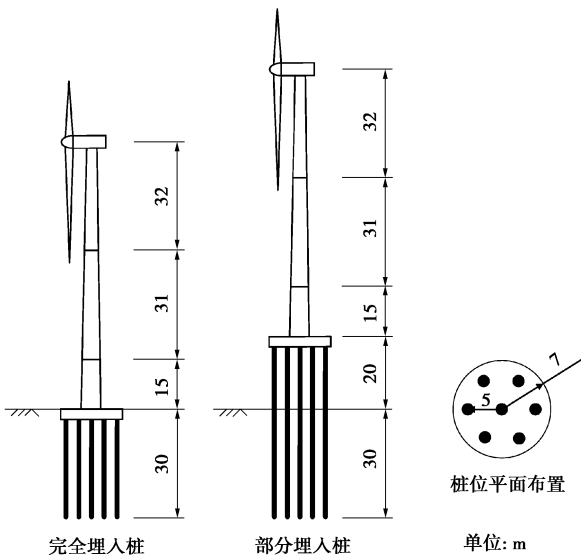


图 6 风机结构尺寸示意图

Fig. 6 Dimensions of wind turbine structure

表 1 风机结构参数

Table 1 Parameters of wind turbine structure

项目	长度/m	底部直径/m	顶部直径/m	壁厚/mm
上节	32	3.9	3.1	50
中节	31	4.5	3.9	50
下节	15	4.5	4.5	50

对两种基础类型进行对比分析, 一种为完全埋入群桩, 桩长为 30 m; 另一种为部分埋入群桩, 埋入部

分为 30 m, 外伸部分为 20 m。为研究基础阻抗大小对风机结构共振特性的影响, 选择两种不同的均质土层作为地基: 一种相对为软土, 另一种相对为硬土, 二者弹性模量 E_s 分别取 10 MPa 和 40 MPa; 两种土体密度和泊松比均为 1800 kg/m^3 和 0.33。

风轮转速范围为 7.5~17.6 rpm, 额定转速为 15.7 rpm。因而计算得 1P、3P 频率范围分别为 0.125~0.293 Hz、0.375~0.880 Hz, 额定 1P、3P 频率分别为 0.262 Hz、0.785 Hz。由于 1P 和 3P 频率范围常常很大, 工程设计中实际很难使风机第一阶自振频率完全避开这个范围, 因而一般只需使其避开额定 1P、3P 频率即可。

3.2 频域有限元模型

采用大型有限元软件对上述风机模型进行建模, 土体水平和深度范围分别取 30 m 和 120 m, 并采用人工黏弹性边界消除边界反射。土体采用 8 节点六面体单元, 钢管桩和刚性承台采用 4 节点四边形壳单元模拟, 上部结构采用 2 节点梁单元模拟, 涡轮机和叶片采用集中质量模拟。图 7 为采用部分埋入群桩的有限元网格; 采用完全埋入桩的网格与图 7 类似, 只是桩基外伸部分单元被删除; 采用底部固定模型的有限元网格则只含上部结构梁单元和集中质量。

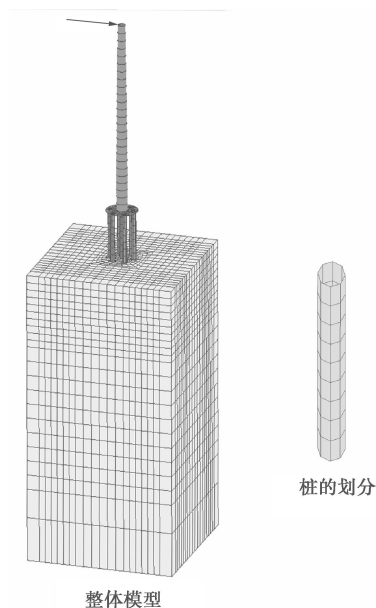


图 7 有限元分析网格

Fig. 7 Finite element mesh

3.3 计算结果

(1) 基础阻抗计算

首先通过本文简化方法和有限元方法计算基础的阻抗大小。软土 ($E_s=10 \text{ MPa}$) 计算结果见图 8~10, 硬土 ($E_s=40 \text{ MPa}$) 计算结果见图 11~13。由图可见: ①从相对软土到相对硬土, 土体模量增长了 4 倍, 完全埋入桩的各向刚度分量 (频率为 0 时的阻抗大小) 有将

近 3 倍的增加, 但部分埋入桩阻抗仅摇摆分量有较大的增加, 水平分量及水平-摇摆分量无明显增加, 这是由桩身外伸部分的柔性所导致; ②不论软土还是硬土, 部分埋入群桩由于外伸部分的存在, 阻抗与完全埋入桩相比都有很大程度的降低, 尤其在水平阻抗分量的比较上该现象更明显; ③虽然频域有限元计算结果有一定起伏波动, 但与简化方法结果总体上符合较好。

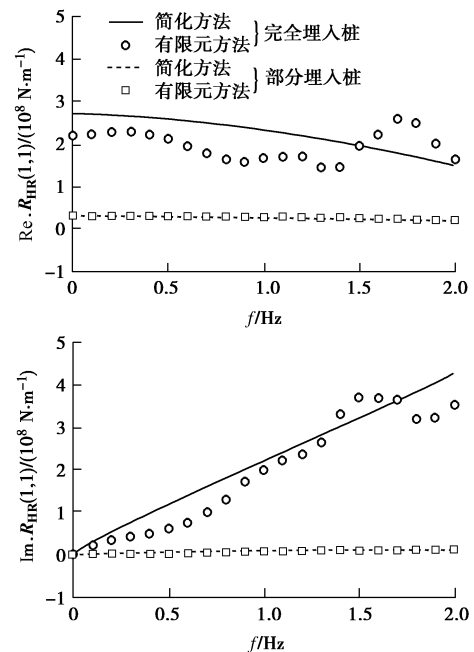


图 8 软土中群桩基础水平阻抗

Fig. 8 Horizontal impedance of pile group in soft soil

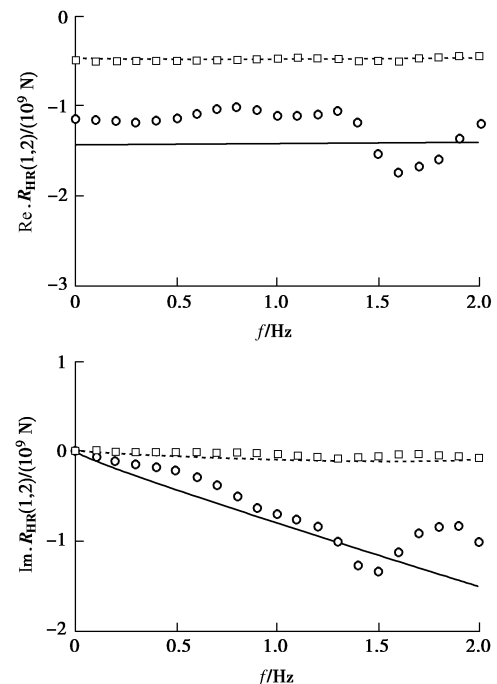


图 9 软土中群桩基础水平-摇摆耦合阻抗 ($R_{HR}(1,2)=R_{HR}(2,1)$)

Fig. 9 Coupled horizontal-rocking impedance of pile group in soft soils ($R_{HR}(1,2)=R_{HR}(2,1)$)

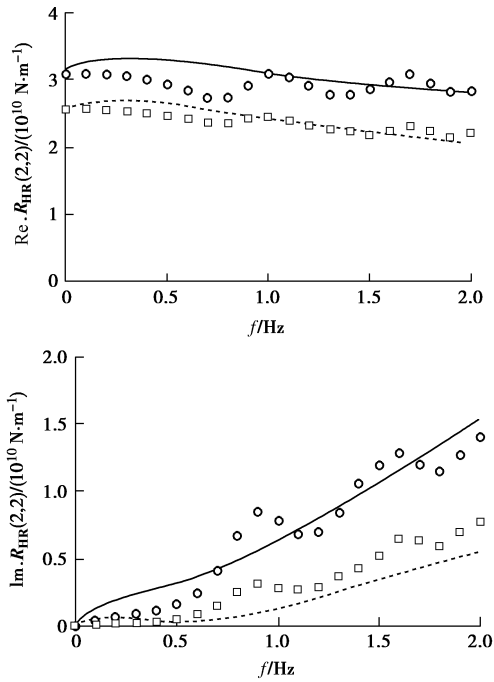


图 10 软土中群桩基础摇摆阻抗

Fig. 10 Rocking impedance of pile group in soft soils

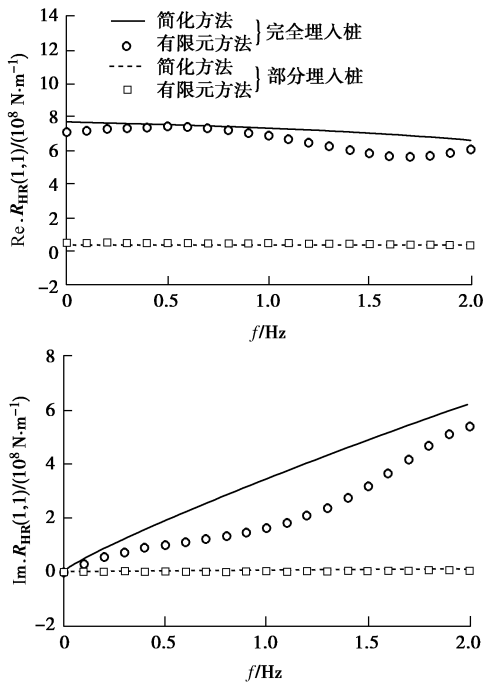


图 11 硬土中群桩基础水平阻抗

Fig. 11 Horizontal impedance of pile group in stiff soils

(2) 风机结构共振计算

在风轮处作用幅值为 10 kN 的水平简谐荷载，研究其水平位移 u_{top} 与荷载频率的变化规律，如图 14 所示。图 14 中上图为软土中计算结果、下图为硬土中计算结果，而底部固定模型的计算结果也绘制于图中以作比较。图 15 为采用 5 种基础类型时风机结构的共振频率。通过图 14, 15 可知：①当土体模量较大时，基础阻抗大，采用本文考虑基础的模型与底部固定模型计算较为接近；②当土体模量变小时，基础阻抗变小，

结构共振频率降低，本文模型与底部固定模型计算差别变大；③对于部分埋入桩，由于外伸部分的存在降低了基础阻抗，也会使本文模型与底部固定模型计算差别变大；④有限元结果与简化方法结果符合较好，验证了简化方法的正确性。

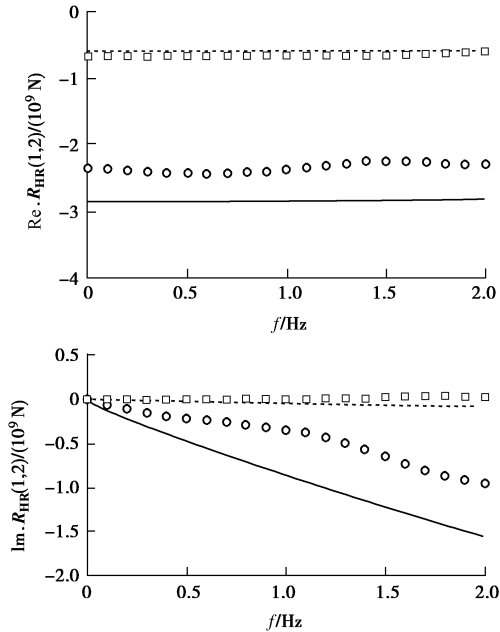


图 12 硬土中群桩基础水平 - 摇摆耦合阻抗 ($R_{HR}(1,2)=R_{HR}(2,1)$)

Fig. 12 Coupled horizontal-rocking impedance of pile group in stiff soils ($R_{HR}(1,2)=R_{HR}(2,1)$)

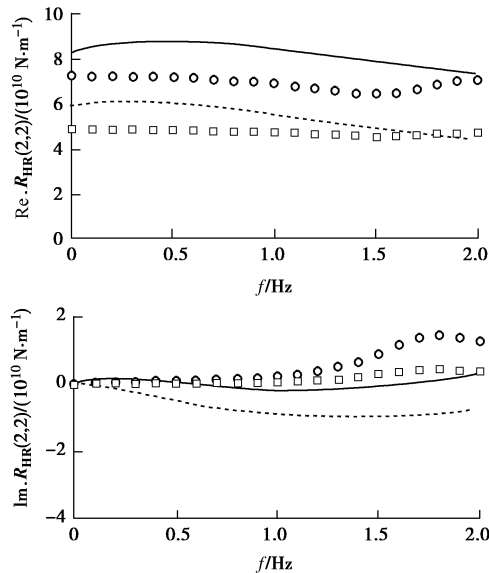


图 13 硬土中群桩基础摇摆阻抗

Fig. 13 Rocking impedance of pile group in stiff soils

综合可判定：在风机结构共振特性分析中，只有当基础阻抗较大时，采用底部固定模型才能得到较为精确结果。任何导致基础阻抗低的因素，例如土质较软、部分埋入桩外伸部分较长等，都将使采用固定模型计算误差增大。特别是当采用“软 - 刚”或“刚 -

刚”设计时, 底部固定模型会使共振频率计算结果远离额定 1P 或 3P 频率, 从而使设计偏危险。

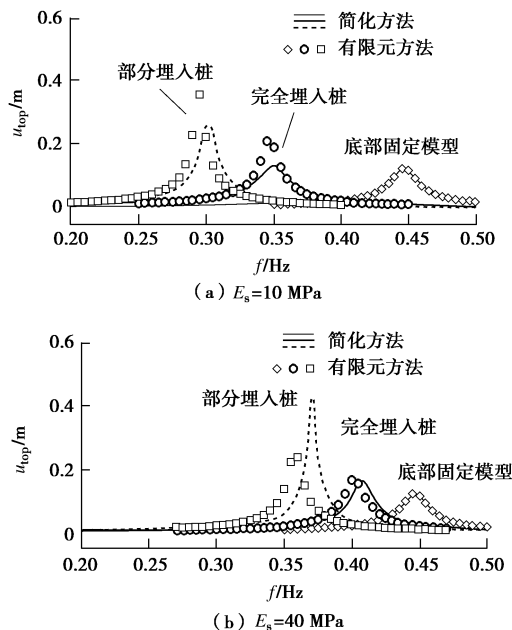


图 14 风机结构顶部水平位移-频率曲线

Fig. 14 Horizontal displacement-frequency curves of wind turbine structure

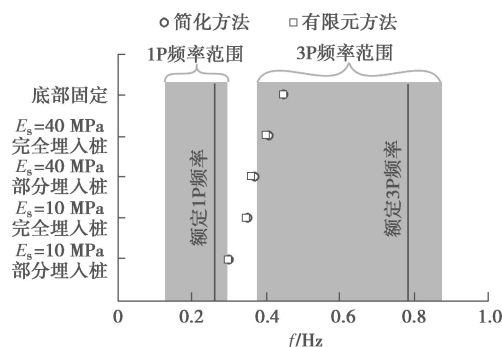


图 15 不同基础类型的风机共振频率

Fig. 15 Resonance frequency of wind turbine structure with different kinds of foundations

4 结 论

本文对海上风机部分埋入桩基础的水平-摇摆耦合振动特性以及基础阻抗对风机结构共振特性的影响进行了研究。首先, 结合桩基既有研究成果推导了部分埋入群桩基础的水平-摇摆动力阻抗, 并通过与精确解的对比验证了本文方法正确性; 然后, 对风机结构进行简化, 结合基础阻抗的影响, 推导了其水平-摇摆振动方程, 研究了风机共振频率特性; 最后, 通过计算采用部分埋入群桩基础的某风机在软、硬地基中不同的共振特性研究了基础阻抗对结构共振特性的影响, 并采用有限元方法对本文简化方法进行了验证。

本文计算表明, 对于较好的土质条件, 由于基础

阻抗较大, 采用底部固定的模型对风机振动问题及自振频率进行计算不会带来较大的误差。任何导致基础阻抗降低的原因(例如土质过软、桩基外伸部分过长等)都将造成底部固定模型计算的不准确, 在风机共振“软-刚”或“刚-刚”设计时带来潜在的危险。对于海洋风机, 由于基础常为部分埋入群桩, 且海洋土常为软弱土体, 因而更应注意基础的影响。

参考文献:

- [1] KAYNIA A M. Dynamic stiffness and seismic response of pile groups[R]. Cambridge: Department of Civil Engineering, MIT, 1982.
- [2] GAZETAS G, MAKRIS N. Dynamic pile-soil-pile interaction. Part I: Analysis of axial vibration[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, **20**: 115 - 132.
- [3] MAKRIS N, GAZETAS G. Dynamic pile-soil-pile interaction. Part II: Lateral and seismic response[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, **21**: 145 - 162.
- [4] 吴志明, 黄茂松, 任青. 层状地基中群桩竖向振动及动内力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, **35**(1): 21 - 26. (WU Zhi-ming, HUANG Mao-song, REN Qing. Vertical vibration and internal forces of pile groups in layered soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, **35**(1): 21 - 26. (in Chinese))
- [5] 黄茂松, 吴志明, 任青. 层状地基中群桩的水平振动特性[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 32 - 38. (HUANG Mao-song, WU Zhi-ming, REN Qing. Lateral vibration of pile groups in layered soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 32 - 38. (in Chinese))
- [6] 任青, 黄茂松, 钟锐, 等. 部分埋入群桩的竖向振动特性[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(9): 1384 - 1390. (REN Qing, HUANG Mao-song, ZHONG Rui, et al. Vertical vibration of partially embedded pile groups[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(9): 1384 - 1390. (in Chinese))
- [7] 任青, 黄茂松, 韩东晓. 考虑轴力的部分埋入群桩基础水平振动特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(9): 1932 - 1944. (REN Qing, HUANG Mao-song, HAN Dong-xiao. Lateral vibration properties of partially embedded pile groups foundation considering axial forces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(9): 1932 - 1944. (in Chinese))
- [8] 王小岗. 横观各向同性饱和层状土中垂直受荷群桩的动力阻抗[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1759 - 1766. (WANG

- Xiao-gang. Dynamic impedance of pile groups subjected to vertical load in layered transversely isotropic saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1759 - 1766. (in Chinese))
- [9] VAN DER TEMPEL J, MOLENAAR D. Wind turbine structural dynamics-a review of the principles for modern power generation, onshore and offshore[J]. Wind Engineering, 2002, 26(4): 211 - 222.
- [10] REINHARD H, GIDEON P V Z. Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action[J]. Journal of Wind Engineering, 2007, 95: 1079 - 1096.
- [11] LUONG V B, TAKESHI I, PHAM V P, et al. A peak factor for non-Gaussian response analysis of wind turbine tower[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 2217 - 2227.
- [12] ZAAIJER M B. Foundation models for the dynamic response of offshore wind turbines[C]// Marine Renewable Energy Conference (MAREC). Newcastle, 2002.
- [13] ZAAIJER M B. Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28: 45 - 57.
- [14] BHATTACHARYA S, ADHIKARI S. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31: 805 - 816.
- [15] 黄茂松, 钟锐, 任青. 层状地基中沉箱加桩复合基础的水平-摇摆振动[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 790 - 797. (HUANG Mao-song, ZHONG Rui, REN Qing. Lateral vibration of composite foundation made up of caisson and piles in layered soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 790 - 797. (in Chinese))

勘 误

发表于本刊 2013 年第 11 期讨论栏目的“考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数”一文中(作者:王洪新):式(4a)

$$\alpha_x = -\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left\{ 2\mu \arctan \frac{1}{z-H} + (4-6\mu) \arctan \frac{L}{z+H} - \frac{(z-H)L}{L^2+(z-H)^2} - \frac{[(3-4\mu)(z-H)-4\mu H]L}{L^2+(z+H)^2} - \frac{4Hz(z+H)L}{[L^2+(z+H)^2]^2} \right\},$$

有误,更正为

$$\alpha_x = -\frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left\{ 2\mu \arctan \frac{L}{z-H} + (4-6\mu) \arctan \frac{L}{z+H} - \frac{(z-H)L}{L^2+(z-H)^2} - \frac{[(3-4\mu)(z-H)-4\mu H]L}{L^2+(z+H)^2} - \frac{4Hz(z+H)L}{[L^2+(z+H)^2]^2} \right\};$$

式(13b)中第5行

$$\frac{2aHz(z+H)[3ba^2+3b(z+H)^2+2b^3]}{[a^2+(z+H)^2][a^2+(z+H)^2+b^2]^{\frac{3}{2}}} +$$

有误,更正为

$$\frac{2aHz(z+H)[3ba^2+3b(z+H)^2+2b^3]}{[a^2+(z+H)^2]^2[a^2+(z+H)^2+b^2]^{\frac{3}{2}}} +。$$

发表于本刊 2013 年第 12 期短文栏目的“基于土拱效应的刚性挡墙墙后主动土压力”一文中(作者:俞 缙,等),图 4, 5 有误,更正为

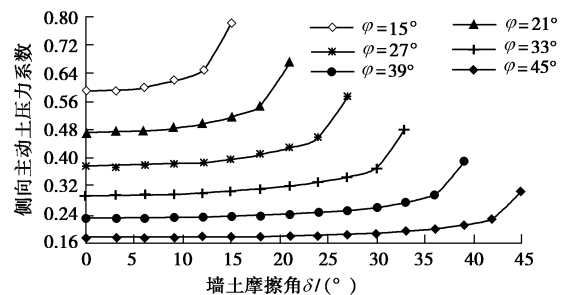


图 4 主动土压力系数随 φ , δ 的变化

Fig. 4 Change of coefficient of active earth pressure with angle of wall friction and internal friction

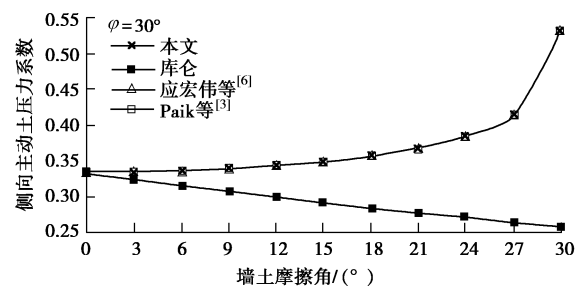


图 5 主动土压力系数计算方法对比

Fig. 5 Comparison among methods of coefficient of active earth pressure

对我们工作疏忽造成的错误,向广大读者和原文作者致歉。特此更正。

(本刊编辑部)