

DOI: 10.11779/CJGE2019S2036

考虑部分埋入群桩基础阻抗的海上风机结构共振特性

王 月^{1, 2}, 张陈蓉^{*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: 海上风机结构一阶自振频率与风轮转动频率或叶片通过频率重合时, 会产生共振现象, 严重时会造成风机损坏。现有风机结构的共振研究多假设底部刚性固定, 以定性分析为主, 没有对基础的埋置深度和土层参数进行量化分析。以部分埋入群桩基础的海上风机结构为研究对象, 基于风机结构水平-摇摆耦合简化方法, 分析了群桩基础不同埋入比和土层弹性模量对风机结构共振特性的影响, 建立了群桩埋入比与结构共振频率的关系。进一步开展了 4 组不同群桩埋深比的海上风机共振频率室内模型试验, 验证理论分析结果的规律性是否合理。

关键词: 风机; 部分埋入群桩; Winkler 模型; 共振频率; 简化计算

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0141-04

作者简介: 王 月(1995—), 女, 硕士研究生。主要从事岩土工程研究。E-mail: wyue@tongji.edu.cn。

Resonance characteristics of offshore wind turbine structures founded on partially embedded pile groups

WANG Yue^{1, 2}, ZHANG Chen-rong^{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: Resonance occurs when the first natural frequency of wind turbines coincides with frequencies of the rotor rotation and blade passing, which may cause damage to wind turbines in serious conditions. Most existing researches on the resonance of wind turbines are qualitative analysis, assuming a rigid and fixed structure bottom. However, the quantitative analysis is important, especially considering the effect of foundation embedment depth and soil parameters. The resonance of offshore wind turbines supported by partially embedded pile groups is investigated. Based on the simplified method considering the coupled horizontal-rocking properties of wind turbines, the influences of different embedding ratios of pile groups and the elastic modulus of soils on the resonance of wind turbines are analyzed, providing the relationship equation between embedding ratios and resonance frequencies. To investigate the resonance frequencies of offshore wind turbines with different embedding ratios of pile groups, four model tests are carried out, which verify the rationality of the above theoretical analysis.

Key words: wind turbine; partially embedded pile group; Winkler model; resonance frequency; simplified calculation

0 引言

海上风机结构长期受风浪荷载作用, 并带动涡轮机的运转。涡轮机在运转过程中由于叶片转动和空气湍流导致结构产生两种荷载频率, 第一种荷载频率大小与叶片转动频率相等, 为 1P 频率, 第二种荷载频率大小是转动频率的 N_b 倍, 为 $N_b P$ 频率, 其中 N_b 为叶片数目。当风机自振频率与 1P 或 $N_b P$ 频率重合时, 将产生共振现象^[1]。

目前风机结构的动力分析大多集中在大直径单桩基础形式^[2-3], 而采用部分埋入群桩基础的研究相对较少。Gazetas 等^[4]、Makris 等^[5]考虑桩-桩相互作用, 采用完善的动力 Winkler 地基模型, 研究了层状地基中群桩的竖向和水平动力响应。黄茂松等^[6]基于动力

Winkler 地基模型和传递矩阵法, 简化分析层状地基中刚性承台群桩基础竖向及水平振动特性, 未考虑水平-摇摆耦合效应。此后黄茂松等^[7]考虑了基础的水平-摇摆耦合阻抗, 并将风机结构部分埋入群桩的研究延伸到共振频率问题上, 探讨了不同地层条件对风机结构共振特性的影响, 但未涉及群桩基础埋入比与共振频率之间的量化关系。

本文在黄茂松等^[7]工作的基础上, 考虑基础的水平-摇摆耦合阻抗, 建立部分埋入群桩基础动力分析模型, 基于分析方法, 得到了桩基埋入比与共振频率的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779175)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者(E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn)

关系。并进一步考虑土层参数的影响。最后进行四组不同群桩埋入比的海上风机共振频率室内模型试验, 对理论分析结果的规律性进行了验证。

1 风机结构水平-摇摆简化分析方法

风机塔筒通常为变截面圆台。考虑水平风力和波浪力, 结构在水平-摇摆耦合作用下的简化分析模型如图 1。将塔筒结构离散为 n 小段, 每段长 h_i 。针对单元 i , 质量向下端集中, 形成包括质量、转动惯量和非对角元素的质量矩阵 m_i 。塔段所受力 F_i 亦集中到质量块上, 由水平合力和弯矩组成。塔顶风机和叶片质量为 m_{n+1} 。基础质量 m_b 集中在塔筒底部。

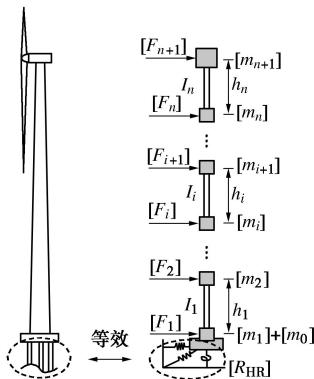


图 1 风机塔筒计算简图

Fig. 1 Calculation of wind turbine tower

参考黄茂松等^[7]的做法, 基于动力 Winkler 地基模型计算部分埋入群桩水平-摇摆耦合阻抗, 将其作用于等效基础质量块, 如图 1 所示, 建立风机塔筒水平-摇摆耦合振动方程:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_{11} & \tilde{\mathbf{K}}_{12} \\ \tilde{\mathbf{K}}_{21} & \tilde{\mathbf{K}}_{22} & \tilde{\mathbf{K}}_{23} \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ \tilde{\mathbf{K}}_{i-1} & \tilde{\mathbf{K}}_i & \tilde{\mathbf{K}}_{i+1} \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ \tilde{\mathbf{K}}_{n+1} & \tilde{\mathbf{K}}_{n+1} & \tilde{\mathbf{K}}_{n+1} \\ \tilde{\mathbf{K}}_{n+1,n} & \tilde{\mathbf{K}}_{n+1,n} & \tilde{\mathbf{K}}_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_i \\ \vdots \\ \mathbf{u}_n \\ \mathbf{u}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_i \\ \vdots \\ \mathbf{F}_n \\ \mathbf{F}_{n+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

矩阵中 $\tilde{\mathbf{K}}_{ii}$ 为塔筒底部刚度矩阵, 表示为

$$\tilde{\mathbf{K}}_{ii} = \mathbf{K}_{ii} + \mathbf{R}_{HR} - \omega^2(\mathbf{m}_i + \mathbf{m}_b), \quad (2)$$

其中, ω 为振动圆频率, \mathbf{R}_{HR} 为部分埋入群桩基础的水平-摇摆耦合阻抗。如上文所述, 该阻抗是基于部分埋入群桩的动力 Winkler 地基模型并考虑桩桩相互作用, 采用传递矩阵法计算得到的, 具体见文献[8]。

式(1)剩余各项刚度矩阵 $\tilde{\mathbf{K}}_{ij}$ 表示如下:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{i,i-1} = \mathbf{K}_{i,i-1} \quad (2 \leq i \leq n+1), \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{i,i} = \mathbf{K}_{i,i} - \omega^2 \mathbf{m}_i \quad (1 \leq i \leq n+1), \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{i,i+1} = \mathbf{K}_{i,i+1} \quad (1 \leq i \leq n). \quad (5)$$

其中, \mathbf{K}_{ij} 为结构单元刚度矩阵。将其代入式(1)并

求解计算, 可得到风机塔筒结构的动力水平位移响应。

2 共振影响的参数分析

下面针对桩基埋入比及土体软硬程度对风机共振频率的影响进行参数分析。

2.1 埋入比

风机塔筒结构由 3 节钢管桩组成, 材料及尺寸参数见文献[7]。塔筒顶部作用有幅值为 10 kN 的水平简谐荷载。群桩桩径 1.7 m, 壁厚 30 mm, 均质土层弹性模量和泊松比分别为 15 MPa, 0.33, 密度为 1800 kg/m³。

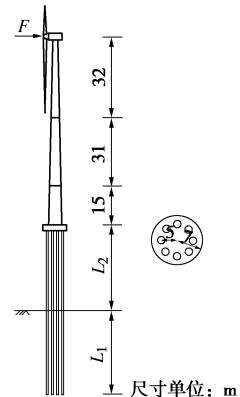


图 2 风机结构尺寸示意图

Fig. 2 Schematic of wind turbine structure

如图 2 所示, 桩的埋深为 L_1 , 露出土面长为 L_2 , 桩的埋入比为 L_2/L_1 。当完全埋入时, 埋入比为 0。桩的埋入比变化对应两种条件, 一是桩的实际埋深不变, 改变泥面上自由段长度。本文算例取 $L_1=30$ m, 泥面上自由段长度为 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 m; 二是桩的总长 L_1+L_2 不变, 改变埋深。本文算例取总长 50 m, 埋深分别为 25, 30, 35, 40, 45, 50 m。

采用上述简化方法对两种埋入比条件下的风机结构共振频率进行计算, 计算结果见表 1。将计算得到的共振频率进行归一化处理, 令完全埋入时的归一化共振频率 f_0 为 1, 得到风机共振频率 f/f_0 与埋入比的关系曲线, 如图 3 所示。由图可知, 风机共振频率与埋入比近似为反比关系, 两种埋入比条件下的曲线接近, 拟合得到

$$f/f_0 = -0.1764L_2/L_1 + 1. \quad (6)$$

由图可知, 在常规埋深条件 (埋入比 ≤ 1), 部分埋入桩的风机共振频率不会少于完全埋入桩的 80%。埋入比 $\leq 2/3$ 时, 两种埋入比条件下共振频率变化不大, 可认为该埋入比范围内, 控制埋深和控制总长两种方式对结构的归一化共振频率影响可忽略不计。当埋入比 $> 2/3$ 时, 两种埋入比条件下共振频率差距较明显。

2.2 土层软硬程度

为探究土的软硬程度对风机结构共振的影响, 选取均质土层弹性模量 E_s 为 10, 20, 30, 40, 50 MPa,

表 1 不同埋入比下结构共振频率

Table 1 Resonance frequencies under different embedment ratios

埋入比 L_2/L_1	0	0.11	0.17	0.25	0.33	0.43	0.5	0.67	0.83	1
L_1 不变($L_1=30$ m)	0.377	—	0.364	—	0.355	—	0.344	0.333	0.320	0.307
L_1+L_2 不变($L_1+L_2=50$ m)	0.390	0.377	—	0.364	—	0.349	—	0.333	—	0.314

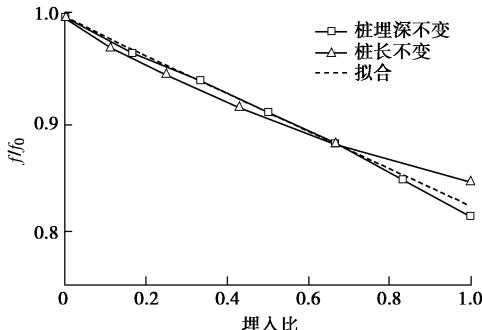


图 3 不同埋入比风机结构归一化共振频率

Fig. 3 Normalized resonance frequencies of wind turbine structures 计算风机结构的位移响应与输入频率的关系。风机结构尺寸与 2.1 节一样, 桩基埋深 $L_1=30$ m, 群桩埋入条件对应完全埋入和埋入比为 1 两种情况。具体结果见图 4。由图可知, 土体弹性模量从 10 MPa 增加至 50 MPa, 埋入比为 0 和 1 两种情况下, 风机结构共振频率分别增大了 0.057 Hz 和 0.066 Hz, 增长幅度接近。随着土层模量的增加, 共振频率的增加幅度减缓。埋入比为 1 时, 桩顶的共振位移对土体弹性模量更敏感, 增长了 2 倍, 显著高于完全埋入的情况, 这和桩身外伸的柔度有关。

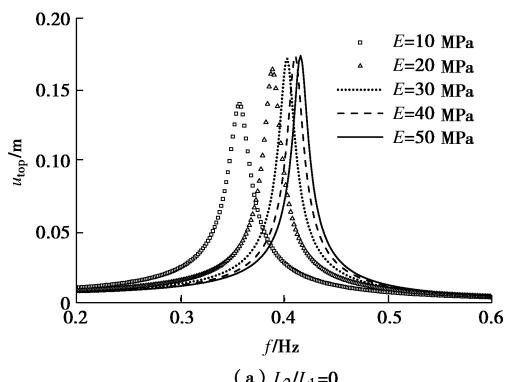
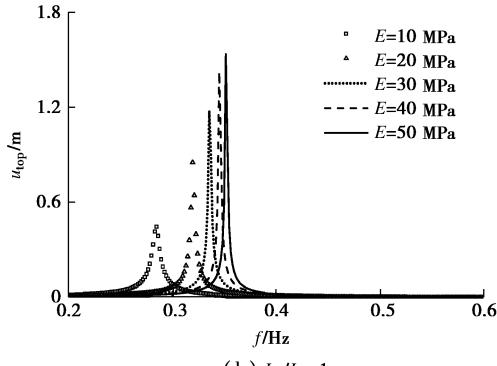
(a) $L_2/L_1=0$ (b) $L_2/L_1=1$

图 4 风机结构顶部水平位移 - 频率曲线

Fig. 4 Horizontal displacement-frequency curves of wind turbine structures

3 试验对比验证

为验证理论分析的合理性, 开展了 4 组不同埋入比的风机机组共振频率动力模型试验。具体为控制桩长不变, 改变输入水平动载的加载频率, 测量对应的桩顶位移幅值, 以得到风机结构的共振频率。

3.1 土体剪切波速

模型箱长宽高分别为 60 cm×40 cm×50 cm, 土样为丰浦砂, 制备时每 5 cm 碾压一次, 控制砂土密度 $\rho=1.566 \text{ g/cm}^3$, 相对密实度为 83.9%。弯曲元测得不同发射波频率下接收波信号如图 5 所示。采用初达波法, 弯曲元校准用时 10 μs , 测得土体剪切波传播用时 2480 μs , 两弯曲元相距 $L=28.5 \text{ cm}$, 计算得土体的剪切波速 V_s 为

$$V_s = L/t = 112.9 \text{ m/s} \quad (7)$$

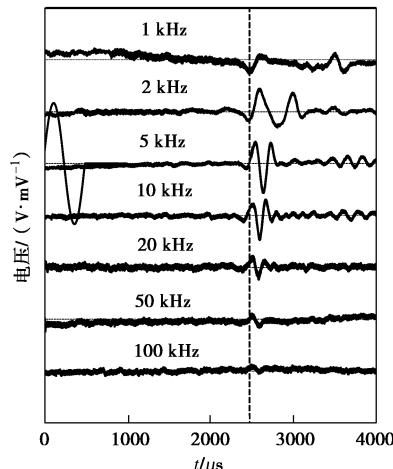


图 5 弯曲元剪切波信号

Fig. 5 Bender element signals of shear waves

3.2 风机共振频率

风机结构稳态激振试验的试验装置和风机结构尺寸如图 6 所示。为避免边界效应, 在模型箱的四周和底面布置 2 cm 厚海绵层。4 组试验群桩基础埋深分别为 30, 25, 20, 15 cm。稳态激振器输出正弦波。控制加载幅值为 1 N, 加载频率为 0~50 Hz。风机塔筒顶部布置加速度传感器测量实际结构的加速度响应。通过公式 $s=a/(2\pi f)^2$ 得到风机顶部位移 s 大小。试验得到的桩顶位移幅值随输入频率 f 的变化见图 7 所示。

由图可知, 输入荷载频率 0~50 Hz 范围内, 群桩基础的风机结构只有一阶自振频率, 对应位移幅值的峰值。当群桩基础完全埋入时, 风机结构共振频率最

大, 为 15 Hz。随着部分埋入桩基的埋深逐渐减小, 风机结构的共振频率逐渐减小, 桩露出土面 5, 10, 15 cm 时的共振频率分别为 14, 12, 10.5 Hz。共振频率随部分群桩基础埋深的变化规律与上节参数分析结论一致。

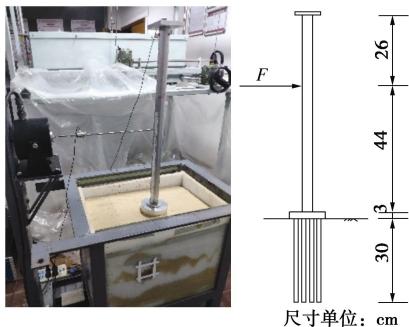


图 6 试验照片和风机尺寸示意图

Fig. 6 Test setup and schematic of wind turbine

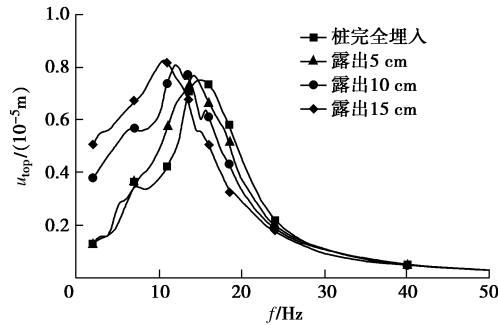


图 7 4 种埋深下桩顶位移随频率变化

Fig. 7 Relation between displacement and frequency under four embedment depths

4 结 论

本文对部分埋入群桩基础的海上风机结构共振频率进行了理论分析和试验研究。首先介绍了风机结构水平-摇摆耦合分析简化方法。其次计算了群桩基础在不同埋入比和土层弹性模量下的动力响应, 研究了埋入比和土层参数对风机共振频率的影响, 得到埋入比与共振频率的归一化曲线; 最后开展了 4 组不同埋深比条件下风机结构共振频率的室内模型试验, 验证理论分析规律的合理性。具体结论如下:

(1) 部分埋入桩基的埋入比与风机共振频率负相关。随着埋入比的增大, 风机结构共振频率线性减小。埋入比为 0~2/3 时, 桩的埋深不变和总长不变对其影响可忽略不计; 埋入比大于 2/3 时, 不同埋入比条件对共振频率影响较大。埋入比在 0~1 范围内变化时, 风机共振频率为完全埋入时的 80%~100%。

(2) 随着土层模量增大, 风机共振频率增大, 且增速逐渐减缓。变化程度与群桩埋入比关系不大。计算表明, 当模量由 10 MPa 增长为 50 MPa 时, 风机共振频率分别改变了 0.057 Hz(埋入比为 0) 和 0.066 Hz(埋入比为 1)。

参 考 文 献:

- [1] REINHARD H, GIDEON PAG VAN Z. Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2007, **95**(9): 1079~1096.
- [2] SHIRZADEH R, DEVRIENDT C, AHAMADI B M. Experimental and computational damping estimation of an offshore wind turbine on a monopile foundation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013(120): 96~106.
- [3] LOMBARDI, DOMENICO, BHATTACHARYA. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, **49**(18): 165~180.
- [4] GAZETAS G, MAKRIS N. Dynamic pile-soil-pile interaction part 1: analysis of axial vibration[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, **20**(2): 115~132.
- [5] MAKRIS N, GAZETAS G. Dynamic pile-soil-pile interaction part II: lateral and seismic response[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, **21**(2): 145~162.
- [6] 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))
- [7] 黄茂松, 钟锐. 海上风机部分埋入群桩水平-摇摆振动与结构共振分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 286~294. (HUANG Mao-song, ZHONG Rui. Horizontal-rocking coupled vibration of partially embedded pile groups and its effect on resonance of offshore wind turbine structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 286~294. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)