

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.009

局部冲坑对导管架刚度影响的模型试验

贺 瑞^{1,2}, 宋俞良^{1,2}, 郑金海^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用缩尺 4 桩导管架风机模型试验研究冲坑对导管架刚度的影响。通过控制导管架基桩冲坑出现顺序及不同冲坑深度模拟冲刷过程, 研究静力荷载作用下局部冲坑对导管架基础刚度、内力分配规律的影响以及冲坑分布、冲坑深度、冲坑出现顺序、冲坑坡度对导管架共振频率的影响。结果表明: 荷载较小时, $1.5D$ (D 为桩径) 深度以内的局部冲坑对导管架静刚度的影响较小, 但冲坑对静刚度的影响随荷载增加而逐渐增大; 当冲坑深度大于 $1D$ 时, 导管架共振频率开始出现下降趋势, 此时任意基桩再出现更深冲坑都会引起共振频率的较大下降; 当局部冲坑深度分别为 $1.5D$ 和 $2D$ 时, 风机共振频率分别下降约 3.2% 和 6.3%; 当冲坑形状为圆锥形时, 保持局部冲坑深度不变, 改变冲坑坡度对导管架风机共振频率影响较小。

关键词: 导管架基础; 冲坑; 刚度; 水平荷载; 共振频率

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)05-0066-09

Experimental study on the impact of local scour hole on the stiffness of jacket foundation

HE Rui^{1,2}, SONG Yuliang^{1,2}, ZHENG Jinhai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A scaled 4-pile jacket wind turbine model was used to study the impact of scour holes on the jacket stiffness. The scouring process was simulated by controlling the occurrence sequence of scour holes and different scour depths of jacket foundation and this paper investigated the influence of local scour holes on the distribution of internal forces and stiffness of jacket foundation under static load. The results show that: when the load is small, the influence of local hole within $1.5D$ (D is the pile diameter) on the static stiffness of jacket is small; But the impact of scour hole on the static stiffness increases gradually with the increase of load, because with the increase of load, the axial force of the back-row pile gradually shifts from compression to tension, which leads to the stiffness decrease of the pile. For the resonance frequency of jacket, the study shows that when the depth of the scour hole is greater than $1D$, jacket resonance frequency started to decrease; At this time, any pile with a deeper hole will cause the resonance frequency to drop; When the local scour depth is $1.5D$, the first-order resonance frequency of the wind turbine decreases about 3.2%, while the resonance frequency of the wind turbine decreases by about 6.3% when the scour depth is $2D$. When the shape of scour hole is conical and the depth of local scour is kept unchanged, the change of the scour hole slope will cause a small change in the resonance frequency of jacket wind turbine.

Key words: jacket foundation; scour hole; stiffness; lateral load; resonance frequency

海上风电具有环境噪音污染较小、粉尘零排放、运行稳定及发电量大等优势, 将成为可再生能源开发及利用的主要能源。我国近海 100 m 高度、5~25 m 水深区的风能资源开发量约为 2 亿 kW, 5~50 m 水深区的风能资源开发量约为 5 亿 kW^[1], 显示出深水区有大量未开发风能资源。随着风电场水深和风机装机容量的增大, 具有承载转化提升、施工工期缩短、建设成本可控等优势 的导管架基础形式 的海上风机在我国海

基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合基金(U1906230)

作者简介: 贺瑞(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事海底基础动力特性研究。E-mail: herui@hhu.edu.cn

通信作者: 郑金海(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事海岸动力学与海岸工程研究。E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

引用本文: 贺瑞, 宋俞良, 郑金海, 等. 局部冲坑对导管架刚度影响的模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 66-74.
HE Rui, SONG Yuliang, ZHENG Jinhai. Experimental study on the impact of local scour hole on the stiffness of jacket foundation[J].
Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 66-74.

上风电项目中应用越来越多,在开发实践中具有重要潜力。部分学者已针对导管架基础开展了试验及数值研究,如李涛等^[2-3]通过试验研究了 4 桩导管架在水平静荷载作用下的基桩内力分配规律、桩土相互作用规律和桩基变形特性。文凯^[4]通过有限元计算对水平静荷载下的导管架承载力进行了研究。

欧盟《2015 年海上基础和支撑结构报告》统计数据表明,在近海可再生能源工程建设总费用中,桩基础建设和维护成本可占 25% ~ 30%。桩基础的失稳破坏不仅会导致整体工程功能失效,也会带来巨大的经济损失,因此提高桩基础安全防护能力一直是科学界和工程界的研究热点之一。与陆地风机不同,海上风机时刻受到海洋水体的影响。在波流共同作用下,风机基础附近可能发生剧烈冲刷,导致风机系统在竣工后短短几年内功效急剧减低,甚至导致整体破坏并引发灾难性事故。因此海上风机基础的设计需要考虑基础周围冲刷的影响。目前大部分的冲刷研究重点集中于冲刷的形态和演变过程。当海床为无黏性土时,桩基周围土体在波浪和海流作用下易发生冲刷,桩基周围形成冲坑^[5-7];Yang 等^[8-13]通过试验研究了复杂桩基桩周的冲刷过程和冲坑形态,最大冲坑深度在 1.3D ~ 2D(D 为桩径)之间,冲坑形态近似为圆锥、圆台;最大冲刷深度出现在导管架的上游桩,且桩基布置、水流条件、桩径、结构尺寸都会影响冲刷发展。

Welzel 等^[14]指出复杂几何形状基础的冲坑形态和大小会影响基础静力、动力特性。海上风机受风、浪、流等荷载的联合作用,承受非常大的水平力和力矩荷载^[15]。冲刷使得桩基的入土深度减小、桩基的悬臂长度增加,导致荷载产生的弯矩增大(即相对于桩土界面处的弯矩更大),从而影响桩基变形和桩-土间作用力的分布^[16],降低基础承载力及基础刚度,从而降低系统的自振频率并加大基础的累积位移,严重影响了整体结构的安全性,同时降低了桩基的使用寿命。目前,桩基础局部冲刷对桩-土相互作用影响方面虽然开展了许多研究,但多集中于单桩基础刚度、承载力方面^[17-19]。Lin 等^[20-33]发现砂的应力历史对桩基水平承载力有显著影响,冲刷造成的桩基承载力降低在密实砂土中比在松散砂土中更为显著(约差 10%),并且指出冲刷深度是冲坑形态(宽度、深度、坡度)中对桩影响最大的因素。He 等^[24]采用严格的半解析方法研究了桩-土间隙和桩周冲刷对单桩及海工结构物动力特性的影响,提出了冲坑对高柔风机结构和短粗桥墩支撑的桥梁存在不同影响机制,桥梁一阶模态多为水平平动,对于冲坑敏感性很高,1.5D 深度冲坑减小桥梁 1 阶共振频率达 30% 左右;海上风机前 3 阶自振模态均为悬臂梁的弯曲模态,对于冲坑敏感性不高,1.5D 深度冲坑减小海上风机 1 阶共振频率在 5% 左右;故采用防护桥墩冲刷的传统方法防护海上风机显得偏于保守,提出了减小冲坑影响的新方法。陶文艳等^[25]发现桩周冲坑会降低桩的动刚度与动阻尼,减大幅度随着冲坑深度的增大而增大。van der Tempel 等^[26]发现单桩基础的疲劳特性对冲刷引起的共振频率降低非常敏感。Prendergast 等^[27]通过单桩结构共振频率的变化推测桩基础附近的冲坑深度。

目前冲坑对导管架基础刚度影响的研究较少,冲刷降低导管架基础的刚度,会引起海上风机自振频率下降,可能会导致共振,从而影响导管架风机的疲劳寿命。He 等^[28]通过严谨的半解析理论研究了冲坑对导管架基础静、动力特性的影响,考虑了桩-桩相互影响、冲坑-冲坑相互作用、桩-冲坑相互作用、砂土和黏土应力历史、冲坑真实形状、土体渗透性等多种因素的影响。但试验方面的研究目前仍未见报道,因此采用模型试验研究冲坑对海上风机导管架基础刚度的影响具有重要的工程意义与应用价值。

1 试验布置与有限元参数设置

本文模型试验在 1.1 m×1.1 m×1 m 土槽内进行,通过水平静载试验及振动特性测试研究风机正常运行工况下冲坑对导管架刚度及风机共振频率的影响,并通过有限元模拟验证试验规律。

1.1 模型参数及相似关系

海上风机正常运行状态下砂土几乎完全排水,同时考虑到砂土渗透性较强,因此采用干砂进行试验,砂土颗粒级配曲线见图 1。砂土物理参数:粒径范围为 0.1 ~ 0.4 mm,中值粒径为 0.18 mm,最小干密度为 1.254 g/cm³,最大干密度为 1.653 g/cm³,摩擦角约为 30°,相对密实度约为 70%,孔隙比为 0.77。试验通过砂雨法装置进行土体制备,控制土体密实度在 70% 左右。导管架模型参数见

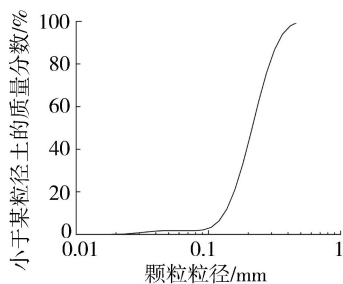


图 1 土体颗粒级配曲线

Fig. 1 Soil particle gradation curve

表1,试验布置如图2所示,图中 S 为冲坑深度, θ 为冲坑坡度约为砂土天然休止角。本文使用无量纲参数 S/D 表示导管架基桩桩周冲坑最大深度与桩径的比值。模型参数与前人研究^[2-3]对照见表2。

表1 导管架模型参数

Table 1 Model dimensions of jacket				
部位	长度/mm	直径/mm	壁厚/mm	质量/kg
顶部质量块				1.9
塔架(钢)	1 200	80	1	2.3
导管架平台	500			8.5
模型桩	650	50	2	1.0

试验设计时,在相似准则上主要保障模型上部结构振动模态、桩-土相对刚度与原型相近,参考 Bhattacharya 等^[29-30]提出的有关海上风机几何质量分布、桩土相对刚度无量纲数的相似关系:①几何质量相似性。海上风机主要由基础、塔架及顶部机舱等3部分组成。为了激发与原型相近的振动模式,需要保证

$$\left(\frac{L}{b}\right)_{\text{模型}} = \left(\frac{L}{b}\right)_{\text{原型}}, \left(\frac{h}{D}\right)_{\text{模型}} = \left(\frac{h}{D}\right)_{\text{原型}}, (m_1 : m_2 : m_3)_{\text{模型}} = (m_1 : m_2 : m_3)_{\text{原型}}。$$

②桩土相对刚度比相似。为使模型能表现出与原型相似的桩-土相互作用特性,考虑到导管架结构受弯矩荷载控制,且基桩主要受竖向荷载控制,参考水平荷载作用时桩-土刚度比相似^[31],采用 $\left(\frac{E_p A_p}{E_s d_e^2}\right)_{\text{模型}} = \left(\frac{E_p A_p}{E_s d_e^2}\right)_{\text{原型}}$ 表示桩-土竖向相对刚度比相似,其中 E_s 为土体弹性模量。③桩周土体应变相似。为保证模型能表现出与原型相似的桩周土体应变,且由于导管架基桩受竖向荷载控制,故参考水平荷载作用时桩周土体应变简化计算方法^[30],采用 $\left(\frac{N}{G D d_e}\right)_{\text{模型}} = \left(\frac{N}{G D d_e}\right)_{\text{原型}}$ 保证桩侧土体应变相似。 N 为作用于基桩的竖向荷载,简化考虑 $N = \frac{P y}{2 b}$,其中 P 、 y 分别为作用于导管架水平荷载的大小、距泥面高度处距离。本文水平荷载取为100 N,加载高度取为离泥面处12D,按以上相似关系计算得到的模型取值与文献[2-3,30,32]中无量纲数的对比见表3。

表2 本文模型试验与文献[2-3]参数对照

Table 2 Comparison of parameters between model and prototype [2-3]

来源	土体			基桩							导管架				塔架	机舱	
	土质	G/MPa	材料	D/mm	h	d_e	t_w	b	m_p/kg	$E_p A_p/\text{MN}$	材质	h_j	h_w	m_1/kg	L	m_2/kg	m_3/kg
文献[2]	黏土		钢	2.2×10^3		25D	0.015D	6.8D		45.7×10^3	钢	12D		900×10^3			
文献[3]	砂土	12.45	铝	50	21D	16D	0.03D	6D	3.32	15.7	铝	10.6D	15.6D	3.32	26D	4.7	2.4
本文试验	砂土	5.4	铝	50	13D	10D	0.04D	6D	1	20.8	钢	10D	13D	8.5	24D	2.3	1.9

注: G 为土体平均剪切模量; h 、 d_e 、 t_w 、 b 、 m_p 、 $E_p A_p$ 分别为基桩的桩长、埋深、壁厚、桩间距、质量、抗拉刚度; h_j 、 h_w 、 m_1 分别为导管架整体高度、顶端到泥面高度、质量(含上部结构); L 、 m_2 分别为塔架高度、质量; m_3 为转子-机舱的质量。

表3 模型相似关系取值

Table 3 Similarity relationship of models

来源	L/b	h/D	$m_1 : m_2 : m_3$	$\frac{E_p A_p}{E_s d_e^2}$	$\frac{N}{G D d_e}$
本文模型	3	13	1 : 0.27 : 0.23	5.7	7.1×10^{-4}
文献[2-3,30,32]	2~6	10~20	1 : 0.21~0.74 : 0.19~0.43	0.49~8.7	$3.9 \times 10^{-4} \sim 2.4 \times 10^{-3}$

1.2 静载试验布置

静载试验中,使用预先放置桩的方法完成导管架模型的布置:先通过砂雨法将模型槽内砂土制备至距底面40 cm高度处,随后使用固定装置将4根基桩预先放置至指定位置,之后继续采用砂雨法制备土样至预定高度。土样制备完成后,通过刚性法兰盘完成导管架模型与基桩、塔筒与导管架模型的连接。模型安装完成后,考虑不同冲坑深度与坑面半径,在土槽中逐渐取出桩周土形成近圆锥形土坑以模拟实际冲刷过程中真实的

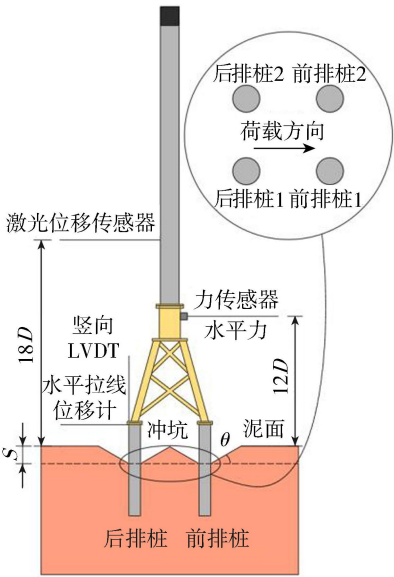


图2 试验布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test layout

局部冲坑。随后安装加载及测量装置进行水平静载试验。试验中通过水平滑轮提供水平静力,通过激光位移传感器测量塔架水平位移(泥面以上 $18D$ 处),在基桩桩顶设置竖向的直线位移传感器(LVDT)和水平向的拉线位移传感器(图 2)。测量装置还包括测量桩身轴力及弯矩的应变片,在前后排 2 根桩各布置了测量弯曲应变的半桥桥路和测量轴向应变的全桥桥路。静载试验中设置了水平单向加载($S/D=0,1.5$)和加卸载($S/D=0,1,1.5$)的试验组次,重点研究了冲坑深度、荷载等级对导管架刚度的影响,具体试验组次参数见表 4。

1.3 静载有限元模拟验证

本文主要以试验研究为主,有限元模拟仅用于验证试验规律。在有限元模型中,为简化计算,将土体视为均匀介质,土体本构模型采用摩尔-库伦理想弹塑性模

型,土体内摩擦角使用低围压三轴试验结果设置为 30° 。由于试验中的桩基埋深较小,故通过共振柱试验研究极低围压时的砂土剪切模量随应变衰减曲线,利用共振柱试验(试验用土的相对密实度 $D_r=77\%$,试验围压为 1 kPa)得到土样的剪切应变与剪切模量关系,利用 Hardin-Drnevich 模型^[33-34](模型拟合参数 $\gamma_r=7.9\times 10^{-5}$ 、 $G_{\max}=5.4\text{ MPa}$)拟合得到动剪切模量衰减曲线如图 3 所示,其中 γ 为土体应变。有限元模型尺寸和试验一致,基桩按照试验空心管桩尺寸使用实体单元进行建模,导管架与塔筒使用梁单元建模,连接板使用壳单元建模。基桩和导管架之间刚接,导管架和上部结构刚接。基桩弹性模量 $E_p=71\text{ GPa}$,密度 $\rho_p=2\,700\text{ kg/cm}^3$,泊松比 $\nu_p=0.3$,导管架和塔筒弹性模量 $E_{\text{steel}}=210\text{ GPa}$,密度 $\rho_{\text{steel}}=7\,800\text{ kg/cm}^3$,泊松比 $\nu_{\text{steel}}=0.3$ 。基桩和土体采用六面体八节点线性缩减积分单元。桩土接触面采用主-从面的面面接触算法,接触面属性采用摩尔-库伦罚函数,边界条件与试验条件一致,地基土的四周对平动自由度进行约束,土底面采用固定约束。在进行刚度分析前使用预应力场和自动平衡法进行地应力平衡。数值模型计算得到 $S/D=0$ 时的塔架位移与单向加载试验与加卸载试验数据对比如图 4 所示,有限元计算与试验数据较为一致。

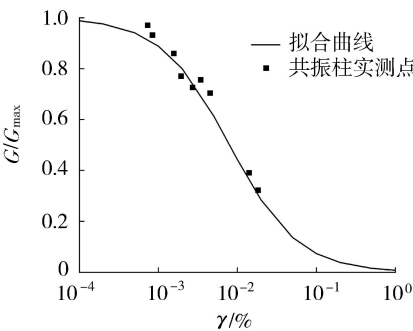


图 3 土体剪切模量衰减曲线
Fig.3 Decay curve of soil shear modulus

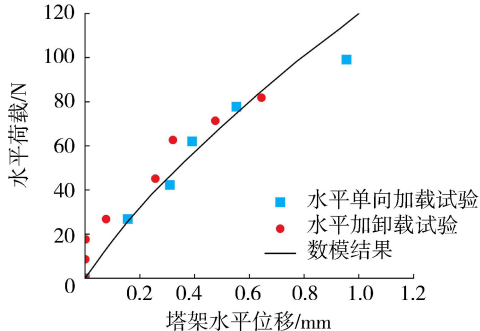


图 4 有限元结果验证
Fig.4 Validation of finite element result

1.4 导管架自振频率试验布置

力锤试验是获得频响函数的一种非常流行的方法^[35],通过安装在力传感器的锤头提供一定频率范围的激励,根据力传感器测得的锤击力和结构不同位置处的加速度传感器测得的加速度得到结构的频响函数,进而可以得到结构的共振频率等振动特性参数。本文在砂雨法制备好土体之后,通过调整冲坑的深度和冲坑半径,实现了不同冲坑坡度、不同冲坑深度的变化,通过力锤试验研究了冲坑深度($S/D=0,0.5,1,1.5,2$)、

冲坑坡度($\theta=22^\circ, 29^\circ$)对导管架共振频率的影响。由于实际冲刷过程后排桩先产生冲刷,前排桩后出现冲刷,前后排桩桩周冲坑出现时间顺序不同,因此考虑导管架由 $S/D=1$ 到 $S/D=2$ 的冲刷过程中模拟按图2中后排桩1、后排桩2、前排桩2、前排桩1逐渐增加冲坑深度的顺序进行自振频率试验,研究冲刷顺序对导管架共振频率的影响,具体试验组次参数设置见表4。

2 结果分析

2.1 静载结果分析

图5为无冲刷时水平单向荷载增大时的基桩水平和竖向位移,可以看出,后排桩和前排桩水平位移基本一致;随荷载增大,后排桩竖向位移比前排桩更大。

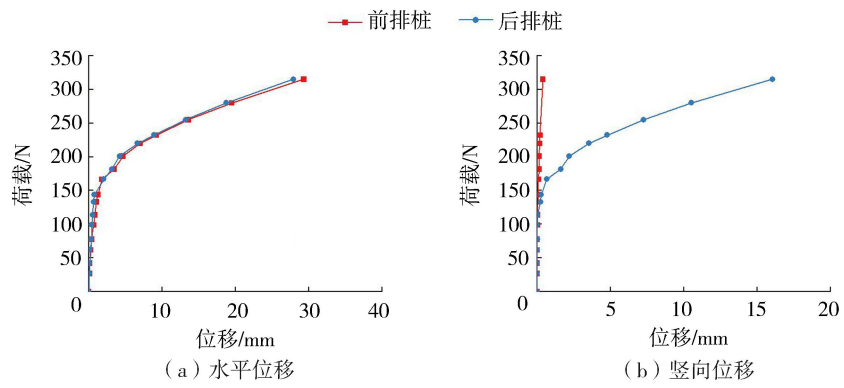


图5 无冲刷时荷载-基桩位移
Fig.5 Load-pile displacement without scour

图6对比了冲刷前后的的荷载-结构位移(前后排桩水平位移一致,故选取前排桩水平位移代表基桩水平位移),可以看出,当局部冲坑深度为 $1.5D$ 时,荷载较小时有冲坑情况与无冲坑情况位移差异不明显,基桩水平、竖向位移变化较小,冲刷对水平、竖向初始刚度影响不明显;当荷载较大时,冲坑对导管架水平静刚度的影响不容忽视,冲刷对基桩的竖向刚度影响较大。

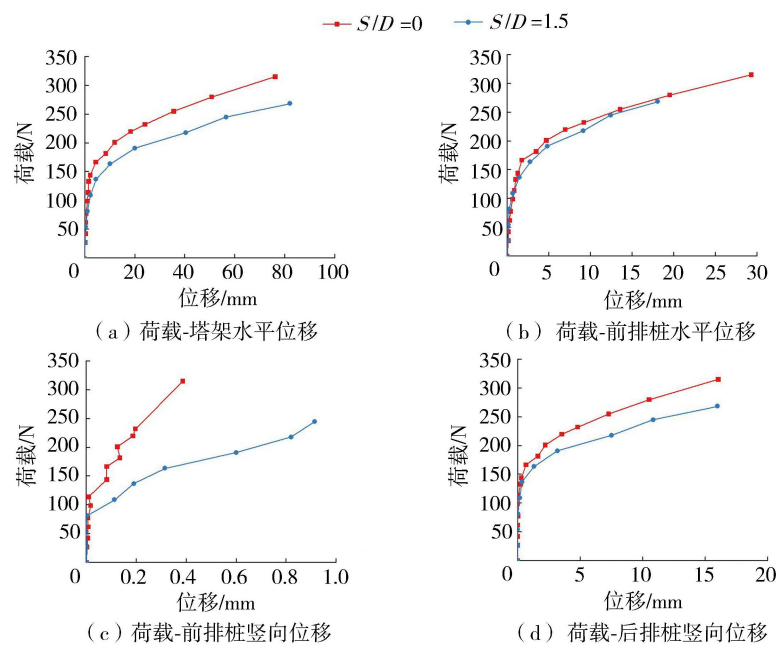


图6 冲刷前后荷载-结构位移
Fig.6 Load-structural displacement before and after scour

加卸载试验塔架水平位移如图7所示。加卸载下导管架刚度受冲坑深度影响变化规律与单调加载情况类似:当荷载较小时,冲坑影响很小;但冲坑的影响随着荷载增加而变大;卸载刚度值大于相同位移处的加载刚度;此外,卸载后塔架有部分不能恢复的残余位移,残余位移随冲坑深度的增加而增加。

图 8 给出了无冲刷时不同荷载下前排桩桩身弯矩,图 9 给出了 54 N 水平荷载下不同冲坑深度时的前排桩桩身弯矩。整体来看,桩身弯矩都非常小,并非桩基承受的主要荷载。图 10 给出了无冲刷时前后排桩弯矩随荷载变化的比值,可以看出水平荷载较小时,前排桩所承担弯矩略大于后排桩,当荷载增大时,前后排桩弯矩比值趋近于 1。由图 8 可看出当荷载增大时,前排桩桩身弯矩增大,荷载从 27 N 增大至 54 N,桩身最大弯矩约增大为原来的 2 倍;当荷载值从 54 N 增大至 71 N,荷载值增加 31%,弯矩最大值增大 20%,此时桩身弯矩随荷载增大出现非线性变化。由图 9 可看出,桩身弯矩随冲坑深度增加而增大。图 11 为冲坑对桩基弯矩影响的数值模拟结果,能够看出桩身弯矩随冲坑变化的规律与试验一致;但由于数值模型对土体真实剪切模量进行了简化,导致试验和数值模型计算结果稍有差异。由图 9、图 11 可看出,当荷载相同时,冲坑深度增加,前后排桩桩身最大弯矩点下移。

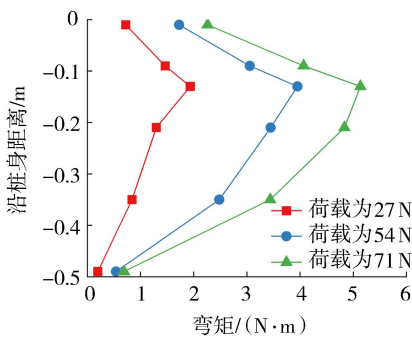


图 8 无冲刷时不同荷载下前排桩桩身弯矩
Fig. 8 Bending moment of front pile under different loads when scour depth is 0D

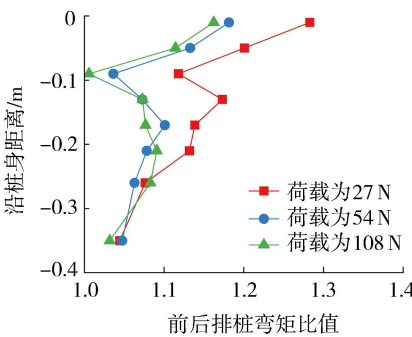


图 10 无冲刷时前后排桩弯矩比值
Fig. 10 Bending moment ratio of front and back piles when the depth of scour is 0D

在试验中通过桩身布置应变片测得轴向应变,由于应变片在水平荷载加载前进行了清零,该应变实际反映导管架基桩受水平荷载时的轴力增量。通过数值模型计算得到仅受自重时的基桩初始轴力(图 12),与水平加载过程中桩身轴力增量(图 13)叠加,得到桩基最终的轴力分布(图 14(a)、图 14(b))。由图 14(a)可知,随荷载增大,前排桩受下压力,从而轴力增大;后排桩受上拔力,从而轴力减小。沿桩身从泥面到桩底由最大轴力逐渐变为 0;当荷载一定时,前排桩在自重压力加上上部水平荷载产生的下压力,导致整体轴力增加;而对于后排桩,自重压力逐渐被水平荷载产生的上拔力抵消,整体轴力逐渐减小,并逐渐从压力转变为拉力。由图 14(b)看出,当水平荷载较小时,冲坑对轴力分布影响并不明显。图 14(c)为冲坑对桩基轴力影响的数值模拟结果,整体规律与试验类似。

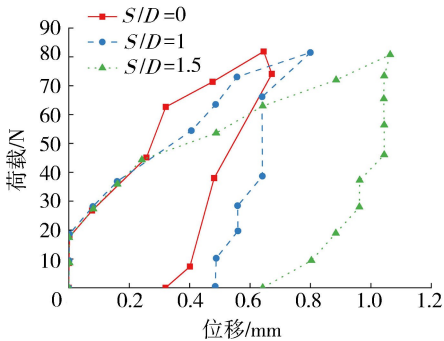


图 7 加卸载试验塔架水平位移
Fig. 7 Horizontal displacement of tower in loading and unloading test

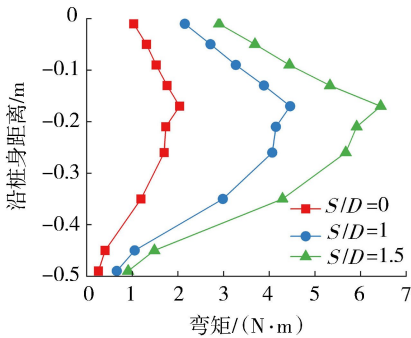


图 9 54 N 水平荷载下不同冲坑深度前排桩桩身弯矩
Fig. 9 Bending moment of front pile under different scour depths when the lateral load is 54 N

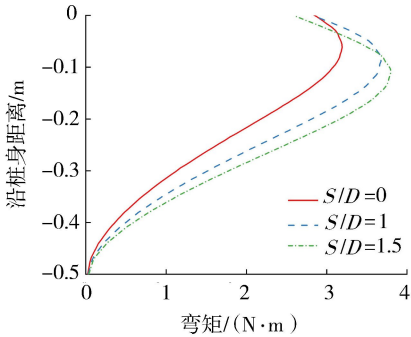


图 11 54 N 水平荷载下前排桩弯矩数值模拟结果
Fig. 11 Bending moment of the front pile in FEM when the lateral load is 54 N

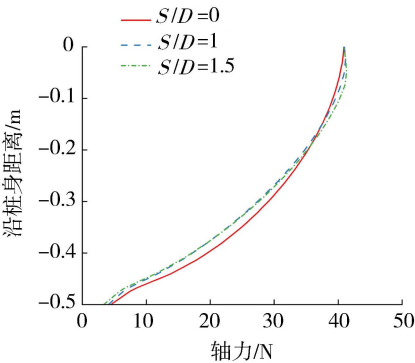


图 12 桩身初始轴力
Fig. 12 Initial axial force of the pile

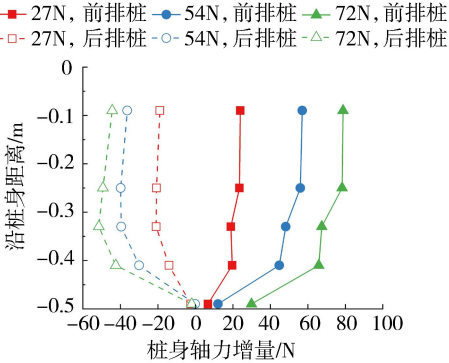


图 13 桩身轴力增量
Fig. 13 Historical axial force increment

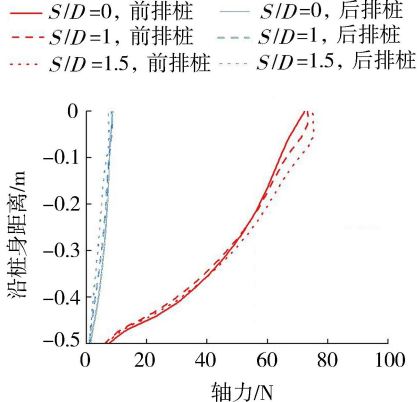
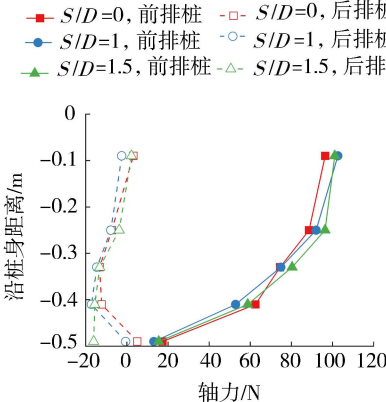
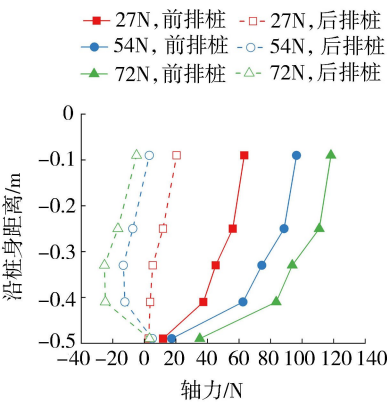


图 14 不同情况下的桩身轴力

Fig. 14 Axial force of pile under different conditions

2.2 导管架自振频率试验结果分析

图 15 给出了塔顶测得共振频率随冲坑深度增加的示意图,图中 α 为傅里叶变化后桩基加速度的频率分布与共振频率的比值,能够更好地反映冲坑深度对共振频率的影响。可以看出当冲坑深度小于 $1D$ 时,塔顶测得共振频率变化较小,当冲坑深度到 $1D$ 时,导管架共振频率变化有轻微减小,直至导管架基桩出现 $1.5D$ 深度冲坑,即后排桩冲坑深度到 $1.5D$,导管架自振频率减小较为明显,塔顶处所得的共振频率在基桩冲坑深度达到 $1.5D$ 时变化较为明显且下降较大,当冲坑深度为 $1.5D$ 时,共振频率下降约 3.2%;冲坑深度为 $2D$ 时,共振频率下降约 6.3%,这可以为海上风机运行过程中对基础冲刷深度监测提供帮助。

海上风机运行期间波流荷载的作用导致导管架上游桩先出现较深冲坑,下游桩冲坑深度的增加滞后,这可能会影响导管架动力特性。因此通过试验模拟冲坑出现顺序对导管架共振频率的影响,由于冲坑深度大于 $1D$ 时导管架共振频率有较大变化,故选定冲坑从 $1D$ 发展到 $2D$ 的过程作为研究范围。由图 16 可知(图中 $[a b c d]$ 表示后排桩 1、后排桩 2、前排桩 2、前排桩 1 的冲坑深度与桩径的比值),当冲坑深度为 $1D$ 时,只要任一根基桩冲坑深度再增加,导管架共振频率即会出现较为明显的变化。

在实际冲刷过程中的桩基附近的冲坑形态较为复杂,但多近似为圆锥形,因此试验中针对 $S/D=1$ 和 $S/D=1.5$ 的 2 种冲坑深度选取 2 种不同坡度(29° 和 22°)的冲坑进行研究,图 17 给出了 2 种冲坑深度下不同冲坑坡度的结构共振频率,可以看出局部冲坑坡度对共振频率的影响并不明显。

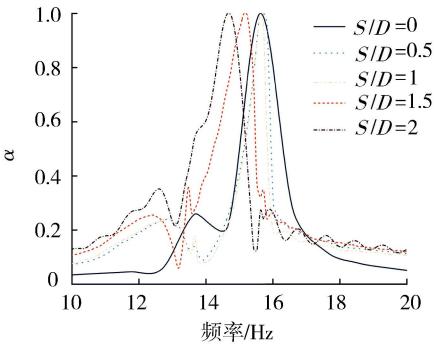


图 15 冲坑深度对共振频率的影响
Fig. 15 Effect of scour depth on resonant frequency

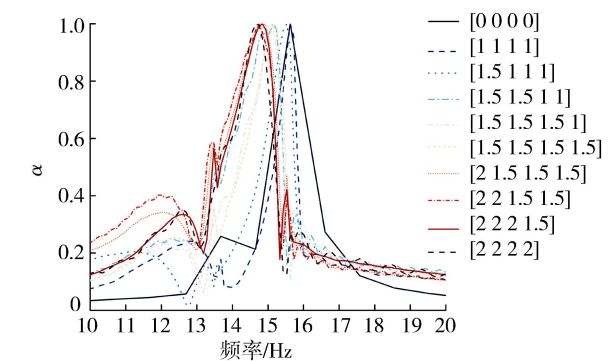


图 16 冲坑出现顺序对共振频率的影响
Fig. 16 Effect of scour-hole occurrence order on resonance frequency

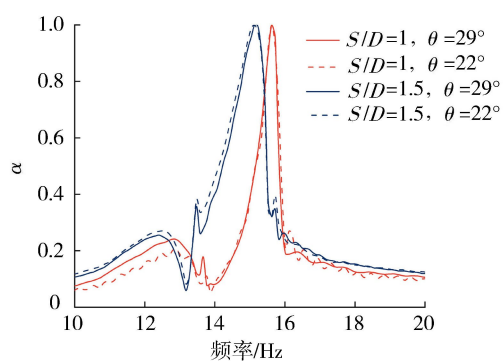


图 17 冲坑坡度对共振频率的影响
Fig. 17 Influence of slope angle of scour holes on resonance frequency

3 结 论

- a. 局部冲坑会降低导管架基础水平静刚度,当荷载水平较低时,1.5D 深度以内冲坑对导管架基础整体刚度降低不明显;但冲坑的影响随荷载水平的增加而不断加大。
- b. 局部冲坑对导管架轴力的影响与对刚度的影响类似;1.5D 深度以内冲坑在荷载水平较低时影响不明显,但影响随着荷载的增加而更加显著。
- c. 当冲坑深度达到 1D 时,导管架风机共振频率才发生可监测的下降;此时,只要任一基桩中再出现更深的冲坑,风机共振频率就会出现较明显下降;当局部冲坑深度为 1.5D 时,风机共振频率下降约 3.2%;冲坑深度增加为 2D 时,风机共振频率下降约 6.3%。
- d. 当局部冲坑为圆锥形时,保持冲坑深度不变,冲坑坡度对导管架风机共振频率的影响较小。

参考文献:

[1] 叶军,仲雅娟. 海上风能利用及其成本分析综述[J]. 太阳能,2018(6):19-25. (YE Jun,ZHONG Yajuan. Overview of utilization and cost analysis of offshore wind energy[J]. Solar Energy,2018(6):19-25. (in Chinese))

[2] 李涛. 近海风机导管架基础水平受荷特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.

[3] 黄孝义. 砂土中海上导管架式风机群桩基础承载特性研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2019.

[4] 文凯. 海上风机四桩导管架基础水平单调与循环受荷数值分析研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.

[5] SUMER B M,FREDSØE J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. River Edge,NJ:World Scientific,2002.

[6] 薛九天,王伟,杨敏. 海水冲刷效应对海上风机桩基承载性能的影响分析[J]. 建筑科学,2012,28(增刊1):84-88. (XUE Jiutian,WANG Wei,YANG Min. Analysis of scour effect on bearing performance of offshore wind turbine pile foundation[J]. Building Science,2012,28(Sup1):84-88. (in Chinese))

[7] 陈汨梨,林祥峰,张明宗,等. 往复流作用下潮流能水轮机单桩基础冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):17-22. (CHEN Mili,LIN Xiangfeng,ZHANG Mingzong,et al. Experimental study on scour process around mono-pile foundation of a tidal stream turbine under bidirectional flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(2):17-22. (in Chinese))

[8] YANG R Y,CHEN H H,HWUNG H H,et al. Experimental study on the loading and scour of the jacket type offshore wind turbine foundation [C]//Coastal Engineering Proceedings. Shanghai:OAI,2011:1-25.

[9] CHEN H H,YANG R Y,HSIAO S C,et al. Experimental study of scour around monopile and jacket-type offshore wind turbine foundations[J]. Journal of Marine Science and Technology,2019,27(2):91-100.

[10] YUAN C,MELVILLE B W,ADAMS K N. Scour at wind turbine tripod foundation under steady flow[J]. Ocean Engineering,2017,141:277-282.

[11] HU R,WANG X,LIU H,et al. Experimental study of local scour around tripod foundation in combined collinear waves-current conditions[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(12):1373.

[12] WELZEL M. Wave-current-induced scouring processes around complex offshore structures [D]. Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover,2021.

- [13] AHMADN, KAMATH A, BIHS H. 3D numerical modelling of scour around a jacket structure with dynamic free surface capturing [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 200:107104.
- [14] WELZEL M, SCHENDEL A, HILDEBRANDT A, et al. Scour development around a jacket structure in combined waves and current conditions compared to monopile foundations [J]. *Coastal Engineering*, 2019, 152:103515.
- [15] LESNY K. Foundations for offshore wind turbines: tools for planning and design [M]. Essen: VGE Verlag GmbH, 2010.
- [16] QI W G, GAO F P. Physical modeling of local scour development around a large-diameter monopile in combined waves and current [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 83:72-81.
- [17] ZHANG H, CHEN S, LIANG F. Effects of scour-hole dimensions and soil stress history on the behavior of laterally loaded piles in soft clay under scour conditions [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 84:198-209.
- [18] LIANG F, ZHANG H, CHEN S. Effect of vertical load on the lateral response of offshore piles considering scour-hole geometry and stress history in marine clay [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 158:64-77.
- [19] SØRENSEN S P H, IBSEN L B. Assessment of foundation design for offshore monopiles unprotected against scour [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 63:17-25.
- [20] LIN C, BENNETT C, HAN J, et al. Scour effects on the response of laterally loaded piles considering stress history of sand [J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(7):1008-1014.
- [21] LIN C, HAN J, BENNETT C, et al. Analysis of laterally loaded piles in sand considering scour hole dimensions [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(6):04014024.
- [22] LIN C, WU R. Evaluation of vertical effective stress and pile lateral capacities considering scour-hole dimensions [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(1):135-143.
- [23] LIN Y, LIN C. Effects of scour-hole dimensions on lateral behavior of piles in sands [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111:30-41.
- [24] HE R, KAYNIA A M, ZHENG J, et al. Effect of gap and scour on dynamic behavior of monopiles and offshore wind structures [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 243:110336.
- [25] 陶文艳, 贺瑞, 郑金海. 海上风机大直径单桩水平-摇摆耦合振动特性 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3):260-267. (TAO Wenyan, HE Rui, ZHENG Jinhai. Analysis on horizontal-rocking vibrations of monopile supporting wind turbine [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(3):260-267. (in Chinese))
- [26] VAN DER TEMPEL J, ZAAVER M, SUBROTO H. The effects of scour on the design of offshore wind turbines [C]//Proceedings of the 3rd International conference on marine renewable energy Marec 2004. London: IMarEST, 2004:27-35.
- [27] PRENDERGAST L J, REALE C, GAVIN K. Probabilistic examination of the change in eigenfrequencies of an offshore wind turbine under progressive scour incorporating soil spatial variability [J]. *Marine Structures*, 2018, 57:87-104.
- [28] HE R, ZHANG J, ZHENG J. Vertical dynamic interaction factors for offshore thin-walled pipe piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145:104656.
- [29] BHATTACHARYA S, NIKITASN, GARNSEY J, et al. Observed dynamic soil-structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 54:47-60.
- [30] BHATTACHARYA S, LOMBARDI D, MUIR WOOD D. Similitude relationships for physical modelling of monopile-supported offshore wind turbines [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2011, 11(2):58-68.
- [31] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: Wiley, 1980.
- [32] HENSEL J, RAVI SHARMA M S, BAXTER C D P, et al. Development of a technology type factor for jacket structures for offshore wind turbines in Rhode Island [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2012, 4(6):063120.
- [33] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves [J]. *Journal of the Soil mechanics and foundations division*, 1972, 98(7):667-692.
- [34] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects (terzaghi lecture) [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, 98(6):603-624.
- [35] 谭祥军. 从这里学 NVH: 噪声, 振动, 模态分析的入门与进阶 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.