

DOI:10.11918/202412031

# 风浪组合循环荷载下四桩导管架基础承载变形特性

贾肖静<sup>1,3</sup>, 梁发云<sup>1,3</sup>, 张浩<sup>2,3</sup>, 郑瀚波<sup>1,3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620;  
3. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

**摘要:** 为准确评估复杂环境荷载作用下海上风机四桩导管架基础的承载变形特性, 本文基于改进非线性滞回圈  $p$  (桩侧土反力)- $y$  (桩横向变形) 曲线构建了基础的三维数值分析模型, 并引入修正  $P$  乘子以考虑群桩效应和基桩轴力对基础水平承载特性的影响。同时, 采用两点组合循环加载方式分别模拟风压与波浪荷载作用, 并考虑其幅值、频率、作用高度等荷载特征差异。研究表明: 当桩间距  $\geq 7D$  时, 四桩导管架基础的群桩效应可以忽略, 且随着加载高度的增加(加载位移控制不变), 基桩轴力对基础水平承载特性的影响逐渐增强; 波浪占比的增加和风电高度的降低会显著增大基础变形及内力, 且其对于风浪占比的变化更为敏感; 小幅值组合循环作用下, 桩顶位移随循环次数(取对数坐标)呈线性变化且累积位移趋于不变, 但当加载幅值为 0.4 时, 桩顶塑性累积位移持续增长。

**关键词:** 四桩导管架; 海上风机; 循环  $p$ - $y$  曲线; 风浪组合循环; 承载变形特性

**中图分类号:** TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)01-0140-11

## Bearing-deformation characteristics of the tetrapod piled jacket foundation under combined wind and wave cyclic loading

JIA Xiaojing<sup>1,3</sup>, LIANG Fayun<sup>1,3</sup>, ZHANG Hao<sup>2,3</sup>, ZHENG Hanbo<sup>1,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To accurately evaluate the bearing and deformation characteristics of a four-pile jacket foundation under complex environmental loads, a three-dimensional numerical model was developed based on the improved nonlinear hysteretic  $p$  (soil resistance) - $y$  (lateral displacement of the pile) curve, with  $P$ -multipliers incorporated to account for pile-group effects and axial forces. Furthermore, a two-point combined cyclic loading approach was adopted to represent wind and wave loads, respectively, taking into consideration differences in load amplitude, frequency, and application height. Results indicate that when the pile spacing is  $\geq 7D$ , the group pile effect can be negligible, and as the loading height increases (constant loading displacement), the influence of axial forces on the foundation's lateral behaviors is strengthened. An increase in the wave load ratio and a decrease in the wind load height significantly amplify the deformation and bending moment of the foundation, and it is more sensitive to variations in the load ratio. Under small-amplitude cyclic loading, the pile head displacement increases linearly with the cycle number (in logarithmic coordinates), and the cumulative displacement tends to stabilize. However, at a loading amplitude of 0.4, the plastic cumulative displacement continues to increase.

**Keywords:** tetrapod piled jacket foundation; offshore wind turbine; cyclic  $p$ - $y$  curves; combined wind and wave cyclic loading; bearing-deformation characteristic

近年来,在全球能源结构重塑及“双碳”战略背景下,中国海上风电行业快速发展。根据 2024 年全球风能理事会统计,截止 2023 年中国风机装机容量累计 37.6 GW, 占比全球总装机容量的 50%, 位居世界第一<sup>[1]</sup>。随着风电场场址水深和风机单机容

量的逐渐增大,由上部导管架和下部基桩组成<sup>[2]</sup>的四桩导管架基础在海上风机中的应用越来越广泛<sup>[3-5]</sup>, 例如近年来成功吊装的全球最大单机容量海上风电机组 GWH252-16MW<sup>[6]</sup>, 2024 年海上风电市场报告显示,该基础形式在风机基础中的占比已

收稿日期: 2024-12-10; 录用日期: 2025-04-21; 网络首发日期: 2025-09-19

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250918.1112.004>

基金项目: 国家自然科学基金(52008246); 上海市自然科学基金(24ZR1403200); 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)开放基金(KLE-TJGE-G2302)

作者简介: 贾肖静(1998—), 女, 博士研究生; 梁发云(1976—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 张浩, zhanghaotumu@163.com

高达 13.4%<sup>[7]</sup>。然而,复杂海域环境给海上风机基础的正常服役带来了严峻的挑战。一方面,台风等极端灾害导致基础需要承受较大的单调荷载,可能会造成风机叶片损毁甚至整体倾覆,2013 年台风“天兔”就造成了“红海湾”风电场 25 台塔架中的 8 台倒塌<sup>[8]</sup>。气象部门研究数据显示,每年可能对风电场造成较大破坏的台风占总量的 29.4%<sup>[9]</sup>。另一方面,海上风机所处海域环境复杂,长期遭受风压及波浪荷载作用<sup>[10]</sup>。文献[11]数据显示,风机基础在 20~30 年服役期内需要承担  $10^7 \sim 10^8$  次不同幅值及频率的风浪循环荷载作用,进而使得基础容易产生较大的累积变形,甚至导致其疲劳失效,风机塔架出现倾斜破坏<sup>[10]</sup>。

目前,多数学者将风浪荷载简化为单点循环及单调荷载施加在基础顶部,通过开展常重力模型试验<sup>[12-13]</sup>、超重力离心机模型试验<sup>[14-15]</sup>以及现场试验<sup>[16]</sup>,研究桩基的水平受荷特征。然而,自然条件下风压荷载和波浪荷载具有明显的幅值、频率、加载高度等特征差异<sup>[17]</sup>。为了更加真实地反映海上风机基础的承载特性,Liang 等<sup>[11]</sup>及 Abdullahi 等<sup>[17]</sup>将风浪荷载简化为两点组合循环荷载,并通过赋予不同频率、幅值反映其特征差异,开展单桩组合循环加载试验。Liu 等<sup>[18]</sup>则针对四桩导管架基础开展了两点组合(上部静力下部循环)加载试验,但仍未关注其两点组合循环承载变形特性。相较于上述试验,基于理论及数值方法的四桩导管架基础承载变形特性研究较为缺乏,且极少采用两点组合循环加载方式。

动力  $p$ - $y$  分析方法通过桩侧水平及竖向弹簧模拟桩土相互作用,不需要建立单元数量庞大的土体模型,可以兼顾计算效率和分析精度,已经成为研究人员普遍采用的数值分析方法<sup>[19-23]</sup>。朱斌等<sup>[24]</sup>基于双曲线型  $p$ - $y$  提出适用于大直径单桩的静力及循环承载特性分析方法,后续祝周杰等<sup>[4]</sup>将其应用于导管架水平静力响应分析中。Xu 等<sup>[19]</sup>则基于 API 规范所提出的  $p$ - $y$ 、 $t$ - $z$ (桩侧摩擦-竖向位移)、 $q$ - $z$ (桩端阻力-端部位移)模型,通过界面模型理论框架,构建考虑循环荷载效应的  $p$ - $y$  模型。然而,上述方法并未考虑到循环加载过程中的桩土分离和土体退化等行为,本文作者团队则基于 Winkler 地基梁模型,提出了一种改进的非线性滞回圈  $p$ - $y$  模型<sup>[25]</sup>,并已将其应用于桥梁群桩基础<sup>[25]</sup>、海上风机单桩基础等<sup>[26]</sup>领域。然而,由于海上风机结构高耸,环境荷载作用使得四桩导管架基础需要承受极大的倾覆力矩,前后排基桩则分别承担较大的下压及上拔轴向荷载<sup>[4]</sup>,进而影响基础的水平抗力,与

群桩受力模式存在较大差异,并不能直接将该改进  $p$ - $y$  模型应用于四桩导管架承载变形特性分析中,还需同时考虑群桩效应与基桩桩身轴力的影响。

针对上述研究问题,本文采用改进非线性滞回圈  $p$ - $y$  曲线模拟桩土相互作用,并通过引入修正  $P$  乘子来考虑四桩导管架群桩效应及基桩轴力的影响。同时,考虑海上风机自然条件下环境荷载特征,采用单调加载与两点组合循环加载方式分别模拟风机基础极端水平受荷与风浪组合受荷工况,并基于 OpenSees 平台搭建四桩导管架三维简化分析数值模型,针对其水平承载变形特性开展参数敏感性分析,以期海上风机四桩导管架基础设计优化及安全控制提供依据。

## 1 基于改进 $p$ - $y$ 模型的简化动力分析方法

目前,传统  $p$ - $y$  骨干曲线考虑了循环次数对土体极限抗力的折减,但这些研究结果大多是基于特定桩身刚度、截面形状和边界条件的现场试验得到的<sup>[27]</sup>,且难以分析桩土分离和土体退化等因素,在准确模拟实际桩土相互作用方面具有一定的局限性。本文作者团队提出了一种改进的非线性滞回圈  $p$ - $y$  模型<sup>[25]</sup>,可以很好地反映土体非线性、桩土界面分离及土体刚度随桩周土体平均剪应变退化等现象,并通过单边及双边循环加载数值试验,验证了该模型在模拟实际桩土相互作用方面的可靠性<sup>[28]</sup>。本文在该改进  $p$ - $y$  模型基础上,结合四桩导管架基础受荷特征,并考虑群桩效应及基桩轴力的影响引入修正  $P$  乘子,提出适用于四桩导管架基础的  $p$ - $y$  动力简化分析方法。

### 1.1 动力特性分析

#### 1.1.1 双曲线模型

改进非线性滞回圈  $p$ - $y$  模型的骨干曲线基于双曲线方程,与桩侧土体的初始刚度  $K_{in}$  和土体抗力  $p_{ult}$  两个参数有关,其表达式可以写成

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K_{in}} + \frac{y}{p_{ult}}} \quad (1)$$

砂土的初始刚度为

$$K_{in} = \frac{\eta K^* z}{5 \operatorname{atanh}(0.2)} \quad (2)$$

式中: $\eta = 3$ ,  $z$  为计算深度,  $K^* = K \sqrt{50/\sigma'_v}$ ,  $\sigma'_v$  为土层竖向有效应力,  $K$  参考 API(2000) 推荐的  $K$  关于内摩擦角  $\phi$  函数得到。

砂土中桩极限承载力  $p_{ult}$ , 根据桩周砂土体平

衡得到,  $y_{50}$  由土体  $1/2p_{ult}$  时的桩身水平变形得到:

$$p_{ult} = A_s \cdot \min(p_{us}, p_{ud}) \quad (3)$$

$$p_{us} = \gamma z \left[ \frac{K_o z \text{tg} \beta \text{tg} \alpha}{\text{tg}(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\text{tg} \beta}{\text{tg}(\beta - \phi)} (d + z \text{tg} \beta \text{tg} \alpha) + K_o z \text{tg} \beta (\text{tg} \phi \sin \beta - \text{tg} \alpha) - K_o d \right] \quad (4)$$

$$p_{ud} = \gamma z d [K_a (\text{tg}^8 \beta - 1) + K_o \text{tg} \phi' \text{tg}^4 \beta] \quad (5)$$

$$y_{50} = \text{atanh} \frac{P_{ult}}{2K^* z} \quad (6)$$

式中:  $\alpha = \phi/2, \beta = 45 + \phi/2, K_o = 1 - \sin \phi, K_a = \text{tg}^2(45 - \phi/2), A_s$  为修正系数, 参考文献[28]取值,  $\gamma$  为土体重度,  $\phi$  为土体内摩擦角,  $d$  为桩的宽度。

### 1.1.2 桩土动力非线性单元

如图 1 所示, 弹性和塑性弹簧模拟桩周土的非线性特性, 间隙和拖曳元件用于考虑桩土界面的往复分离和闭合效应, 桩周土体退化区域限定在内部弹塑性元件上。

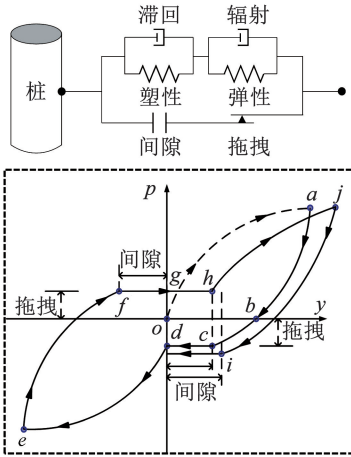


图 1 桩土动力非线性单元及加卸载滞回环<sup>[25]</sup>

Fig. 1 Components of  $p$ - $y$  element and the hysteresis loop<sup>[25]</sup>

桩周土抗力与桩身变形组成滞回圈, 每一周都包含了桩周土体抗力  $p$ , 桩身变形  $y$ :

$$p = \begin{cases} p^{ep} + p^g, p^d = 0 \\ p^{ep} + p^d, p^g = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$y = y^{ep} = y^g + y^d \quad (8)$$

式中:  $p^{ep}, p^g$  及  $p^d$  分别为弹塑性, 间隙以及拖拽力,  $y^{ep}, y^g$  及  $y^d$  分别为弹塑性, 间隙以及拖拽变形。

结合式(1)可以得到  $p_{load}^{ep} - y^{ep}$  曲线, 即在加卸载和再加载阶段的桩侧土反力与桩横向变形的关系曲线, 以及  $p_{unload}^{ep} - y^{ep}$  曲线, 即在卸载阶段的桩侧土反力与桩横向变形的关系曲线:

$$p_{load}^{ep} = p_o + \frac{y^{ep} - (1 - \alpha)y_o}{\frac{1}{K_o} + \frac{y^{ep} - (1 - \alpha)y_o}{p_{ult}}} \quad (9)$$

$$p_{unload}^{ep} = p_r + \frac{y^{ep} - y_r}{\frac{1}{(1 + C_d)K_{in}} - \frac{y^{ep} - y_r}{(1 + C_d)p_{ult}}} \quad (10)$$

式中:  $p_o$  和  $y_o$  是加载阶段初始土体抗力和桩身位移,  $\alpha$  为桩土间隙参数 ( $0 < \alpha < 1$ );  $p_r$  和  $y_r$  是当前加载阶段发生反转时的土体抗力和桩身位移;  $C_d$  是桩土拖拽参数,  $C_d = p^d/p_{ult}$ ;  $K_o$  是初始切线刚度, 与土体退化有关, 由刚度退化指数  $\delta_k$  和初始刚度  $K_{in}$  得到。

$$K_o = \delta_k K_{in} \quad (11)$$

$$\delta_k = \frac{1}{1 + \zeta y_o / \varepsilon_r} \quad (12)$$

式中:  $\delta_k$  与土体应变有关,  $\zeta$  为退化修正系数,  $\varepsilon_r$  可参考剪应变, 使用  $y_{50}$  进行代替。

### 1.1.3 导管架基桩修正 $P$ 乘子

四桩导管架基础作为一种特殊的群桩基础, 首先区别于单桩基础, 该基础形式的群桩效应不可忽视, 即桩桩相互影响作用。另外, 由于海上风机结构高耸, 风浪作用下使得海上风机四桩导管架基础承受极大的倾覆力矩, 进而使得前后排基桩也需要承受较大的上拔及下压轴向荷载。为此, 基于祝周杰<sup>[4]</sup>等的研究, 同时考虑群桩效应和基桩轴力的影响, 引入  $P$  乘子来修正上述改进非线性滞回圈  $p$ - $y$  曲线。其中, 群桩效应与导管架基础前排桩与后排桩之间的间距  $L$  密切相关, 随着桩间距的增加, 基桩-土体-基桩之间的动力相互作用影响逐渐减弱。另外, 随着水平加载高度  $H$  的减少, 作用在前后排基桩桩顶位置处的弯矩将会减小, 进而使得前后排桩身轴力也逐渐减小。具体公式如下:

$$f_{af} = \left( 1 + 0.6 \frac{H}{nL} \right) \quad (13)$$

$$f_{ab} = \left( 1 - 0.06 \frac{H}{nL} \right) \quad (14)$$

式中:  $f_{af}$  为前排桩轴力影响系数;  $H$  为加载高度;  $n$  为各排桩中基桩的数量, 当沿长边加载时  $n = 2$ ;  $f_{ab}$  则为后排桩的轴力影响系数。

$$f_{mf} = \left( 0.1 \frac{L}{D} + 0.5 \right) f_{af} \quad (15)$$

$$f_{mb} = \left( \frac{3}{16} \frac{L}{D} - \frac{1}{8} \right) f_{ab} \quad (16)$$

式中:  $D$  为桩径;  $f_{mf}, f_{mb}$  分别表示前排桩及后排桩的  $P$  乘子。

## 1.2 四桩导管架基础有限元模型

如图 2 所示, 基于开源有限元软件 OpenSees 3.3.0 平台<sup>[29]</sup>, 针对某 3 MW 海上风机四桩导管架基础<sup>[13]</sup>, 建立三维有限元数值分析模型, 基础与土体相关物理力学参数详见表 1 及表 2。具体建模过程如下: 1) 采用 Displacement-based-beam-column 单元模拟导管架基桩, 单元尺寸取为 1.0 m, 同时对基桩

单元赋予弹性截面属性;2)采用上述改进非线性滞回圈 $p$ - $y$ 模型模拟水平桩土相互作用,且通过引入修正  $P$  乘子探究四桩导管架基础群桩效应及基桩轴力的影响,同时基于传统  $t$ - $z$  及  $q$ - $z$  模型考察竖向桩土相互作用(OpenSees 平台内嵌的 TzSimple1 及 QzSimple1 弹簧);3)由于本研究的研究重点为导管架基桩的承载及变形机理,为提高有限元的计算效率及收敛性,基于 Zhou 等<sup>[30]</sup>的研究成果,采用如图 2 所示的简化方法建立导管架结构模型,搭建流程如图 3 所示。其中,刚性杆刚度设置为基桩刚度的  $10^8$  倍,以模拟导管架结构与基桩桩顶近似刚性的连接,同时,在导管架中部建立质量块,总质量为 947 t(工程原型)。

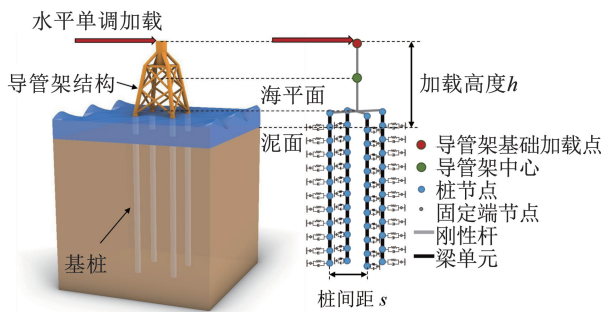


图 2 基于改进  $p$ - $y$  曲线的四桩导管架有限元模型

Fig. 2 Finite element model of four-piled-jacket foundation based on the improved  $p$ - $y$  curve

表 1 导管架基桩物理力学参数<sup>[13]</sup>

Tab. 1 Properties of the pile<sup>[13]</sup>

直径/m	壁厚/m	埋深/m	桩长/m	弹性模量/kPa
2.2	0.032	55	61	$2.1 \times 10^8$

表 2 土体物理力学参数<sup>[13]</sup>

Tab. 2 Properties of the soil<sup>[13]</sup>

饱和重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦 角/( $^\circ$ )	有效重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	相对密度 $D_r/\%$	最大/小孔 隙比
19.36	35	9.56	60	0.943/0.603

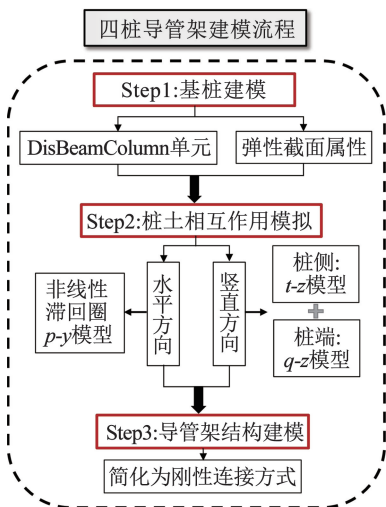


图 3 模型搭建流程

Fig. 3 Model construction flowchart

## 2 算例验证

### 2.1 超重力离心机模型试验概况

相比于 1 g 常重力场,超重力离心机能够更好地反映原型场地的应力场,是目前用于模拟基础与地基相互作用关系的主要手段之一<sup>—[13-14]</sup>。Zhu 等<sup>[13]</sup>基于 ZJU-400 型离心试验机,在超重力 100 g 条件下开展四桩导管架承载变形特性研究。土体采用福建标准砂,中值粒径 0.17 mm,不均匀系数  $C_u$  为 1.542,比重  $G_s$  为 2.643。单桩与导管架结构采用铝合金制作,基于相似比设计对原型进行缩尺加工模型,模型缩尺比为 1:100。离心试验过程中采用液压控制加载装置进行加载,该装置加载频率为 0~5 Hz,可同时实现位移控制单调加载及循环加载,加载高度为泥面以上 2.7D,其他试验细节请详见文献[13-14]。

在开展四桩导管架基础单调与组合循环承载变形特性研究前,本文基于该离心模型试验的单调加载工况<sup>[13]</sup>及循环加载工况<sup>[14]</sup>试验结果,对比验证了基于改进动力  $p$ - $y$  数值简化分析方法的可靠性。其中,单调加载工况中模型布置方向为正交方向,即横向加载角为  $0^\circ$ ,试验采用伺服电机加载装置进行位移控制加载,加载速率为 0.000 1 m/min;循环加载工况中模型布置仍为正交方向,采用单向循环加载方式,加载频率为 0.2 Hz,加载幅值  $\zeta_b$  分别为 0.2 及 0.4,加载幅值定义详见 2.2 节。

### 2.2 水平承载变形特性验证

#### 2.2.1 单调承载变形特性

图 4 所示为四桩导管架基础加载点、前桩与后桩桩顶荷载( $F$ )-位移( $u_h$ )曲线,其中,  $E_{\text{RMSE}}$  为均方根误差,可以看出,加载前期曲线斜率不变,变形基本处于弹性阶段,随着水平荷载的增加,曲线的斜率减小,变形逐渐发展至弹塑性阶段。

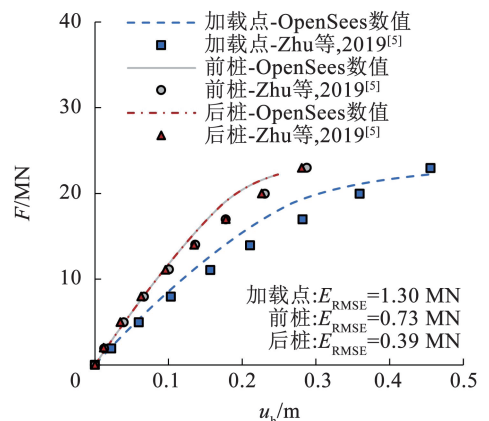


图 4 荷载位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of lateral load-displacement curves at loading position and pile heads

由于导管架结构在水平加载过程中会出现倾斜现象,故而相较于前后桩顶处位移响应,加载点处位移响应会更小。总体而言,OpenSees 数值计算结果与离心机试验结果吻合较好。表明改进的非线性滞回圈  $p-y$  模型能够较好地反映海上风机四桩导管架基础的单调承载变形特性。

### 2.2.2 循环承载变形特性

根据相关学者的研究,循环加载幅值通常由参数  $\zeta_b$  及  $\zeta_c$  进行定义<sup>[14]</sup>,通过式 (17) 和式 (18) 可知,  $\zeta_b$  表示循环加载最大值与基础倾覆弯矩的比值,而  $\zeta_c$  则表示循环荷载最小值与荷载最大值的比值。图 5 为四桩导管架基础前桩与后桩桩顶位移随循环次数的变化曲线,其中,  $N$  为循环次数,离心模型试验工况 C2-1 及 C2-2 的循环加载幅值  $\zeta_b$  分别为 0.2 和 0.4,加载方向均为正交方向,由于是单向循环加载,故而  $\zeta_c$  均为 0<sup>[14]</sup>。整体来看,桩顶水平位移与循环次数(取对数坐标)基本呈线性关系,且随着加载幅值由 0.2 增加至 0.4,桩顶位移响应也基本呈线性增加。这也进一步证明了本文所采用的改进非线性滞回圈  $p-y$  模型通过引入刚度退化指数  $\delta_k$ ,可以很好地反映循环加卸载过程中的土体滞回变形。同时,通过合理的弹簧元件模拟基桩-土体接触面的桩土相互作用,再现海上风机四桩导管架基础的循环承载变形特性,进一步验证了该数值方法的可靠性。

$$\zeta_b = M_{\max} / M_R \quad (17)$$

$$\zeta_c = M_{\min} / M_{\max} \quad (18)$$

式中:  $M_{\max}$  及  $M_{\min}$  分别为循环加载最大值及最小值,  $M_R$  为基础倾覆弯矩。

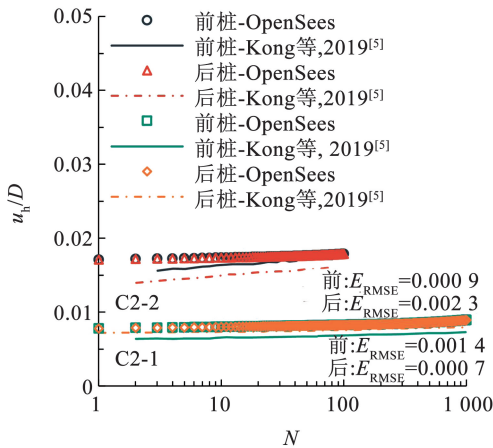


图 5 桩顶水平位移对比

Fig. 5 Comparison of lateral displacement at pile heads

## 3 四桩导管架承载变形特性研究

### 3.1 加载工况设计

#### 3.1.1 单调加载工况

由于海上风机通常体型巨大、结构高耸,在极端

海洋环境荷载作用下,海上风机四桩导管架基础常需要承受巨大的单调荷载。研究表明<sup>[5]</sup>,桩间距会显著影响多桩导管架基础的上部结构尺寸及群桩效应,从而对基础横向承载响应产生较大影响。此外,除了基础本身特性,水平荷载施加的高度对其承载变形特性也有显著影响<sup>[4]</sup>。为此,如图 2 所示,本文开展了在不同桩间距( $s$ )及加载高度( $h$ )条件下的单调加载试验(具体参数详见表 3),旨在探究其对导管架基础单调承载变形特性的影响,进而为海上风机四桩导管架基础设计优化及安全控制提供参考依据。

表 3 单调加载工况汇总

Tab. 3 Summary of monotonic loading conditions

基桩参数	编号	$s/D$	$h/D$	
基本工况	M0	7	14	
	S1	5	14	
	S2	6	14	
	S3	8	14	
桩间距	S4	9	14	
	H1	7	10	
	加载高度	H2	7	12
		H3	7	18

#### 3.1.2 组合循环加载工况

除了概率较小的极端单调荷载外,海上风机主要承受长期风压及波浪等海洋环境荷载,多数学者将这种随机风浪荷载简化为均匀循环荷载<sup>[11,16]</sup>,忽略两种荷载的特征差异。为更加真实地反映自然条件下基础的受荷特征,分别针对风浪占比、组合循环加载幅值及加载高度进行组合循环加载工况设计(表 4),其中,风浪占比是指风压及波浪荷载分别在基础顶部贡献的弯矩荷载占比。如图 6 所示,本文探究了不同工况条件对基础组合循环承载与变形特性的影响,尤其是基础的累积变形规律。设计依据阐述如下:1)根据基础荷载位移曲线确定四桩导管架基础倾覆弯矩  $M_R = 589.43 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ;2)依据自然条件下的环境荷载幅值统计规律<sup>[11]</sup>,确定加载幅值关键参数  $\zeta_b$  及  $\zeta_c$ ,由于本节仅考虑单向循环加卸载,故  $\zeta_c = 0$ ;3)依据自然条件下风浪作用在实际海上风机上的荷载弯矩确定风浪占比<sup>[16]</sup>;4)根据风浪随机波的功率谱密度函数,确定风浪循环荷载频率分别为 0.04 及 0.2 Hz<sup>[11]</sup>;5)风荷载加载点为海上风机机舱位置处(原型为泥面以上 100 m),波浪荷载加载点为海平面位置处(原型为泥面以上 10 m)。

表 4 组合循环加载工况汇总

Tab. 4 Summary of combined cyclic loading conditions

影响因素	编号	加载幅值 $\zeta_b$	风占比/%	波浪占比/%	风荷载/风荷载高 (MN·m) 度/m	波浪荷载/ (MN·m)
基本工况	T0	0.20	88	12	103.7	14.2
	P1	0.20	80	20	94.3	23.6
	P2	0.20	70	30	82.5	35.4
风浪占比	P3	0.20	50	50	58.9	58.9
	H1	0.20	88	12	103.7	78
	H2	0.20	88	12	103.7	91
加载高度	H3	0.20	88	12	103.7	117
	A1	0.10	88	12	51.9	7.1
	A2	0.30	88	12	155.6	21.2
加载幅值	A3	0.40	88	12	207.5	28.3

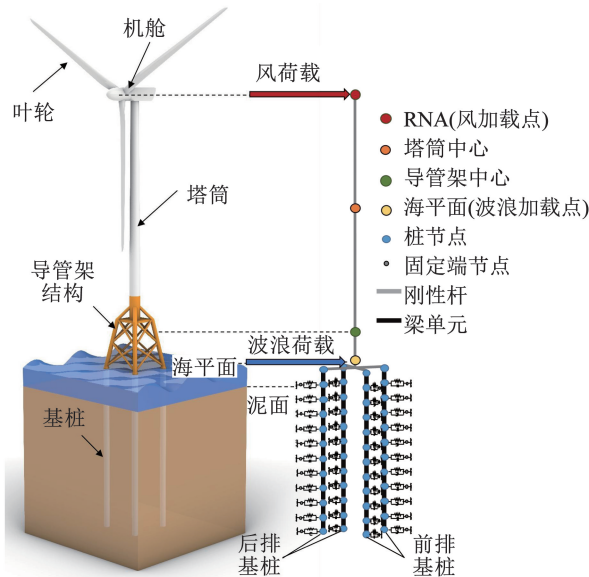


图 6 四桩导管架基础组合循环加载示意

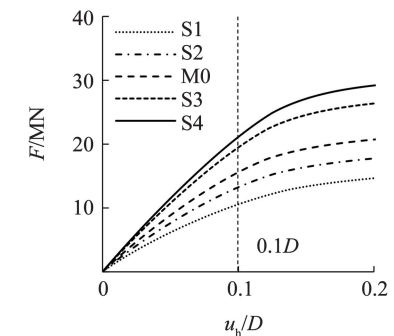
Fig. 6 Diagram of combined cyclic loading for four-piled jacket foundation

### 3.2 单调加载参数敏感性分析

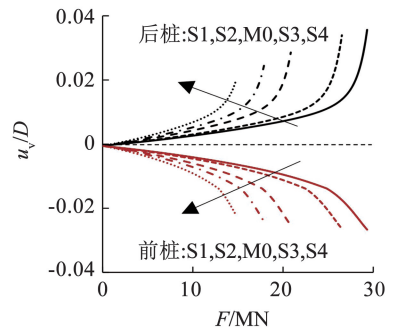
#### 3.2.1 桩间距的影响

根据 3 MW 海上风机四桩导管架基础原型尺寸 (桩间距为  $7D$ ), 分别建立桩间距为  $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$  的基础三维数值模型, 加载高度均为  $14D$ 。如图 7(a) 所示, 加载开始时, 荷载位移曲线的斜率最大, 随着水平荷载的施加, 更多桩侧土体开始发挥作用并进入弹塑性状态, 导致曲线的斜率逐渐减小。桩间距为  $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$  条件下, 导管架基础水平承载力分别为  $10.5$ 、 $13.2$ 、 $15.6$ 、 $19.5$  和  $21.1$  MN (位移达到  $0.1D$  时的水平荷载)。桩间距的增大导

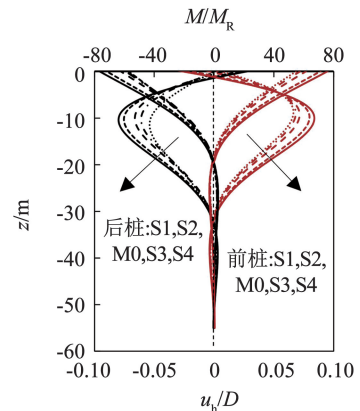
致导管架结构尺寸增加, 从而带来更大的结构自重, 且群桩效应也会有所减弱, 进而一定程度提高基础整体的横向承载力。另外, 图 7(b) 展示了四桩导管架前后排桩的竖向承载特性, 其中,  $u_v$  为竖向位移, 可以看出, 前排桩表现出明显的下压趋势, 后排桩则表现出明显的上拔趋势, 且随着水平荷载增大至一定程度时, 基础的变形会迅速发展出现陡增现象, 表现出失稳破坏的趋势, 这与其他学者的研究发现一致<sup>[5]</sup>。另外, 随着桩间距的增加, 相同弯矩荷载作用下, 由于前后排桩力臂减小, 故而桩身轴力减小, 桩身竖向位移也逐渐减小, 结构更稳定。



(a) 荷载-水平位移



(b) 荷载-竖向位移



(c) 位移及弯矩沿桩身分布曲线

图 7 不同桩间距条件下导管架基桩承载变形特性

Fig. 7 Bearing-deformation characteristics of piles under different pile spacing

图 7(c)绘制了不同桩间距条件下的桩身水平位移及弯矩沿深度分布曲线,其中, $M/M_R$  表示弯矩与倾覆弯矩之比,可以看出,前后排桩的水平变形主要发生在泥面以下深度  $8D$  的范围内,深部土体内桩身变形较小。另外,相较于上拔后桩,下压前桩的桩身水平变形更小,这可能与下压桩的受力特性有关,桩身受压会一定程度提高土体水平抗力。随着桩间距的增大,桩身水平位移峰值逐渐增大,群桩效应逐渐减弱,当桩间距  $\geq 7D$  时,前后桩挠度基本一致。而基桩弯矩最大值出现在泥面以下  $5D$  处,且对比前后排基桩弯矩曲线,也可以明显看出,由于下压桩周围土体抗力较高,导致前排基桩桩身弯矩更大。随着桩间距的增大,桩身弯矩峰值逐渐增大,当桩间距  $\geq 7D$  时,前后桩弯矩变化差别很小,群桩效应基本可以忽略。

### 3.2.2 加载高度的影响

基于 3 MW 海上风机四桩导管架基础数值模型(加载高度为  $14D$ ),分别开展加载高度为  $10D$ 、 $12D$ 、 $14D$ 、 $18D$  的单调加载试验,桩间距均为  $7D$ 。如图 8(a)所示,加载高度为  $10D$ 、 $12D$ 、 $14D$ 、 $18D$  (增加 80%)条件下,导管架基础水平承载力分别为 20.4、18.0、15.6、12.8 和 10.5 MN(减少 48%)。随着加载高度的增大,相同水平位移加载条件下,结构转动的增加导致基础顶部的转动相应会减小,显然基础顶部的反力也会降低,因此,四桩导管架基础的水平承载力逐渐降低。图 8(b)则绘制了不同加载高度条件下的桩身挠度及弯矩沿深度分布曲线,随着加载高度的增大,作用在基础顶部的反力降低,四桩导管架承受的弯矩减小,使得桩身水平位移和弯矩逐渐减小。另外,当加载高度为  $10D$ 、 $12D$ 、 $14D$  及  $18D$  时,前后桩峰值弯矩差距分别为 11%、13%、18% 及 31%。原因在于,随着加载高度的增加,作用在导管架底部的弯矩逐渐增大(桩顶),从而使得各基桩桩身轴力增加。此时,基桩所承受的水平向和竖向荷载的共同作用变得愈加显著,导致桩体的变形特性不再仅受水平荷载影响,基桩的抗弯刚度及水平承载力也会发生较大变化。研究表明,下压力的存在会明显影响基础的水平承载力<sup>[31-33]</sup>,而上拔力对桩身刚度的影响相对较小<sup>[34-35]</sup>,值得注意的是,这种影响与轴力大小、基础形式、土体性质等因素均相关。因此,在多桩导管架基础水平承载变形特性的分析中,基桩轴力的影响是不可忽视的。

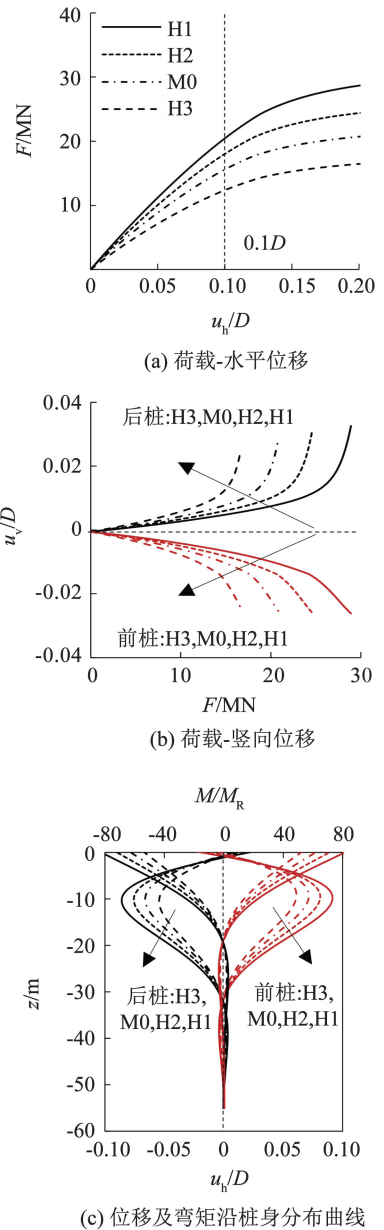


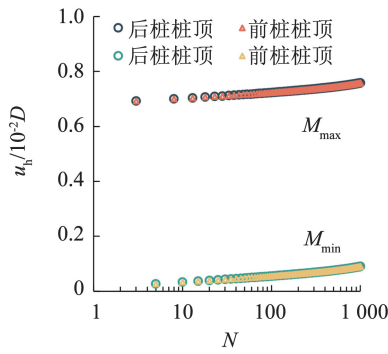
图 8 不同加载高度条件下导管架基桩承载变形特性  
Fig. 8 Bearing-deformation characteristics of piles under different loading heights

### 3.3 组合循环加载参数敏感性分析

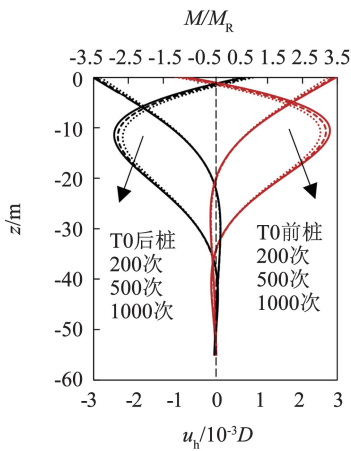
#### 3.3.1 组合循环响应分析

图 9(a)绘制了组合循环荷载作用下导管架基础桩顶处水平位移随循环次数变化曲线(T0 工况),横坐标表示波浪荷载循环次数,根据风浪加载频率比可知,当波浪荷载循环 1 000 次时风荷载循环了 200 次,可以看出组合循环作用下桩顶水平位移随循环次数(取对数坐标)也基本呈线性关系,这与单调循环加载离心机试验结果一致<sup>[14]</sup>,导管架基桩水平位移累积主要发生在前几次循环内。图 9(b)则绘制了导管架基桩受力变形分布曲线,可以看出,最大水平位移出现在泥面位置(竖向坐标零点),深部桩身基本没有变形,而弯矩最大值出现在泥面以下

5D 左右,且竖向埋深在 16D 以下,桩身弯矩也较小,整体来看,由于前排基桩是下压桩,相较于上拔桩,将一定程度提高桩周土体抗力,故而具有更大的桩身弯矩响应。另外,随着循环次数的增加,桩身水平位移及弯矩峰值均略有增加。这是因为循环加卸载过程会带来土体的累积变形,而本文所采用的改进  $p-y$  模型可以很好地反映加卸载过程中的土体滞回变形。随着塑性累积变形的增加,起始阶段的桩身变形  $y_0$  增加,导致退化指数  $\delta_k$  逐渐减小,即土体刚度退化行为增强,使得前后排基桩桩身水平位移及弯矩响应增加。



(a) 桩顶水平位移



(b) 位移及弯矩沿桩身分布曲线

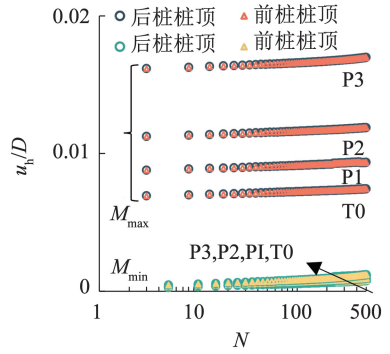
图 9 不同循环次数下导管架基桩承载变形特性

Fig. 9 Bearing-deformation characteristics of piles under different cycles

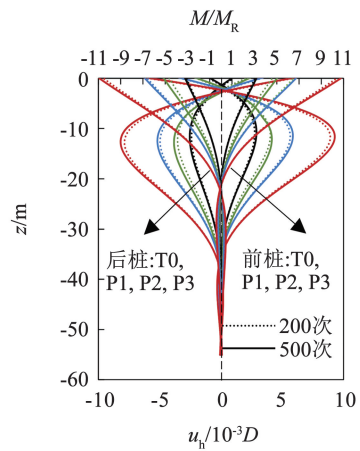
### 3.3.2 风浪占比的影响

在作用于四桩导管架基础顶部的弯矩保持不变的前提下,本文开展了不同风浪占比组合循环加载对导管架基桩累积位移及循环承载特性的影响研究(详见表 4 工况 T0、P1、P2、P3)。图 10(a)绘制了桩顶水平位移随循环次数变化曲线,可以看出,不同风浪占比组合循环作用下,桩顶水平位移随循环次数(取对数坐标)仍呈线性变化,趋势基本一致。然而,随着风荷载占比的减小与波浪荷载占比的增加,桩顶水平累积位移逐渐增加,更确切地说当波浪

荷载占比增加 38%,桩顶水平累积位移增加了 128%。当作用在基础顶部弯矩保持不变时,波浪荷载占比增加势必会使得作用在基础顶部的水平力大大增加,从而使基础顶部水平变形增大。如图 10(b)所示,不同风浪占比条件下,水平位移与弯矩随桩身分布曲线发展趋势一致,但随着波浪荷载占比的增加,水平位移与弯矩峰值显著增加。与前述分析一致,波浪荷载占比的增加会大大增加作用在基础顶部的水平力,进而使得导管架基础产生更大的水平位移,这也意味着基桩会产生较大的累积变形,桩身水平位移及弯矩响应也显著增大。



(a) 桩顶水平位移



(b) 位移及弯矩沿桩身分布曲线

图 10 不同风浪占比下组合循环作用导管架基桩承载变形特性

Fig. 10 Bearing-deformation characteristics of piles under different wind-wave ratios

### 3.3.3 组合循环加载高度的影响

在作用于四桩导管架基础顶部的弯矩保持不变的前提下,本文开展了不同组合循环加载高度对导管架基桩累积位移及循环承载特性的影响研究(详见表 4 工况 H1、H2、T0、H3)。图 11(a)绘制了桩顶水平位移随循环次数变化曲线,可以看出随着风荷载加载高度的增加,桩顶水平累积位移逐渐减小,更确切地说,当风荷载加载高度增加 50%,桩顶水平累积位移减少了 12%。由于作用在基础顶部的弯矩保持不变,当增加加载高度时则会相应的减

小作用在结构上的水平力,进而使得基桩水平位移产生一定程度的降低。如图 11(b)所示,不同风荷载加载高度下,水平位移与弯矩随桩身分布曲线发展趋势一致,但随着加载高度的增加,水平力逐渐增加(作用在基础顶部的弯矩保持不变),使得桩身变形增加,进而导致桩周土体抗力减小,桩身弯矩响应也呈现逐渐减小的趋势。

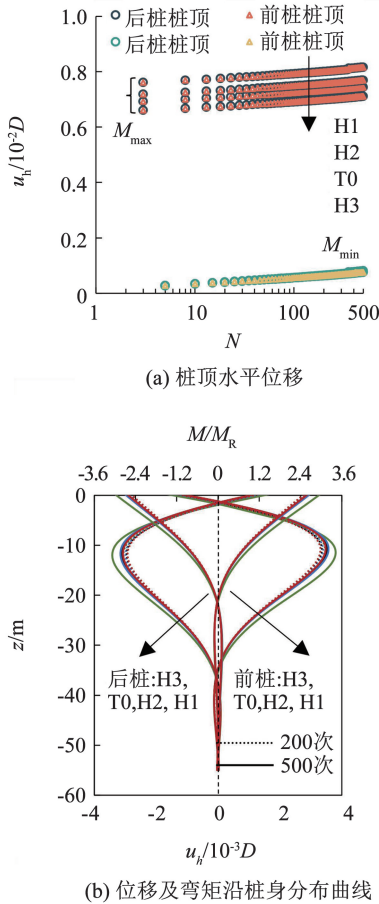


图 11 不同组合循环加载高度作用下导管架基桩承载变形特性

Fig. 11 Bearing-deformation characteristics of piles under different cyclic loading heights

### 3.3.4 组合循环加载幅值的影响

本节开展不同组合循环加载幅值对导管架基桩累积位移及循环承载特性的影响研究(详见表 4 工况 A1、T0、A2、A3)。图 12(a)绘制了桩顶水平位移随循环次数变化曲线,可以看出随着组合循环加载幅值的增加,桩顶水平累积位移显著增加。当加载幅值小于 0.4 时,桩顶水平位移随循环次数(取对数坐标)仍呈线性变化,且在后期出现累积位移不变的趋势,即逐渐恢复到弹性变形,塑性变形不再继续增加,Levy 等<sup>[36]</sup>将该状态定义为“安定(shakedown)”。然而,当加载幅值达到 0.4 时,可以明显看出后期循环过程中,桩顶水平位移随循环次数(取对数坐标)呈非线性变化,累积位移不断增

加,即进入了“塑性安定(plastic shakedown)”阶段,该阶段主要特征为塑性变形持续累积。这一现象说明桩体在反复循环荷载作用下,材料的屈服区域会逐渐扩大,刚度持续退化,进而使得基础产生了较大程度的塑性变形且不断发展。随着塑性变形的持续增长,桩体最终可能会进入加速破坏阶段<sup>[36]</sup>。图 12(b)展示了导管架基桩受力变形分布曲线,可以看出,不同组合循环加载幅值作用下,水平位移与弯矩随桩身分布曲线发展趋势一致,但随着加载幅值的增加,水平位移与弯矩峰值显著增加。

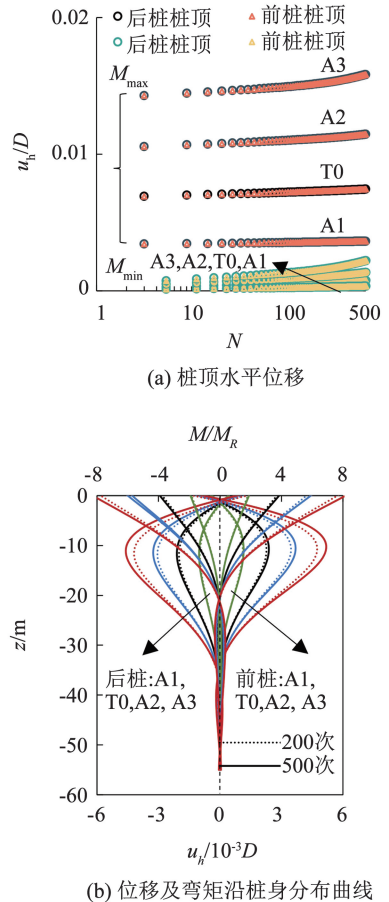


图 12 不同组合循环加载幅值作用下导管架基桩承载变形特性

Fig. 12 Bearing-deformation characteristics of pile under combined cyclic loading with different loading amplitudes

## 4 结 语

基于改进非线性滞回圈  $p-y$  曲线模拟基桩-土体动力相互作用,构建了海上风机四桩导管架基础三维数值模型,并通过引入  $P$  乘子反映基础群桩效应及基桩桩身轴力的影响。根据海上风机自然条件下的实际受荷特征,研究单调加载与风浪组合循环作用下基础的承载变形特性。

1) 随着加载高度的增加(加载位移控制不变),基桩轴力对于前后桩水平承载特性的影响增强。此

外,当桩间距 $\geq 7D$ 时,四桩导管架基础的群桩效应基本可以忽略,可将其作为临界阈值以优化设计流程。

2)波浪占比增加及风载高度减小均会导致作用在基础上的水平力增加,从而使得基础变形及内力增大,且四桩导管架对风浪占比的变化更敏感,建议完善风电场周边风浪环境参数监测体系。

3)小幅值组合循环作用下,桩顶水平位移随循环次数(取对数坐标)呈线性变化,且累积位移趋于不变,而当加载幅值为0.4时,塑性累积变形仍在不断增加,建议在风机关键部位布设传感器定期监测结构的塑性变形发展情况。

本文所采用的两点组合循环加载简化方法仍有待引入实际风浪的频谱特性,而后续进一步考虑实际风浪荷载的随机性特征,且探究多灾害联合作用下的多桩导管架基础动力特性及响应规律,亦有望为复杂海洋环境下的海上风机基础设计提供参考依据。

## 参考文献

- [1] HUTCHINSON M, ZHAO F. Global wind report 2023 [R]. Belgium: Global Wind Energy Council, 2024
- [2] ZHU B, WEN K, KONG D, et al. A numerical study on the lateral loading behaviour of offshore tetrapod piled jacket foundations in clay[J]. Applied Ocean Research, 2018, 75: 165. DOI: 10.1016/j.apor.2018.04.001
- [3] WANG X, ZENG X, LI J, et al. A review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 158: 103. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.12.061
- [4] 祝周杰,朱斌,李涛,等.砂土中海上风机四桩导管架基础水平受荷分析方法[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(11):2150  
ZHU Zhoujie, ZHU Bin, LI Tao, et al. Analysis approach of piled jacket foundation in sand for offshore wind turbines subjected to lateral loads [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(11): 2150. DOI: 10.3785/i.issn.1008-973X.2017.11.008
- [5] ZHAO Z, LI D, ZHANG F, et al. Ultimate lateral bearing capacity of tetrapod jacket foundation in clay[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 84: 164. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.12.005
- [6] 金风科技.国之重器金风科技GWH252-16MW海上风电机组成功吊装[EB/OL].(2023-06-23)[2025-03-01].<https://www.goldwind.com/cn/news/focus-922120801745027072>  
Goldwind. National heavy equipment: Successful installation of goldwind GWH252-16MW offshore wind turbine[EB/OL].(2023-06-23)[2025-03-01].<https://www.goldwind.com/cn/news/focus-922120801745027072>
- [7] Offshore wind market report: 2024 Edition [R]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024
- [8] 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  
LIU Junwei, LV Wei, YU Xiuxia. Review on dynamic response characteristics of offshore wind turbine pipepile foundation in typhoon environment [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(1): 1. DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.01.001
- [9] 谭茂强,杨源,贾斌,等.海上风电机组抗台风技术研究[J].中国电力,2018,51(2):112  
TAN Maoqiang, YANG Yuan, JIA Bin, et al. Anti-typhoon technology research of offshore wind turbine [J]. Electric Power, 2018, 51(2): 112. DOI:10.11930/j.issn.1004-9649.20150043
- [10] CARSWELL W, ARWADE S R, DEGROOT D J, et al. Natural frequency degradation and permanent accumulated rotation for offshore windturbine monopiles in clay [J]. Renewable Energy, 2016, 97: 319. DOI: 10.1016/j.renene.2016.05.080
- [11] LIANG R, YUAN Y, FU D, et al. Cyclic response of monopile-supported offshore wind turbines under wind and wave loading in sand[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(10): 1230. DOI: 10.1080/1064119X.2020.1821848
- [12] ZHANG H, ZHENG H, WANG C, et al. Coupled effects of long-term cyclic loading and scour on the mechanical responses of monopile-supported offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2022,265: 112556. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112556
- [13] ZHENG H, LIANG F, ZHANG H, et al. Combined effects of long-term cyclic loading and unidirectional flow induced scour on the mechanical responses of tetrapod jacket foundation supported offshore wind turbines [J]. Engineering Structures, 2025, 324: 119378. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119378
- [14] ZHU B, WEN K, LI T, et al. Experimental study on lateral pile-soil interaction of offshore tetrapod piled jacket foundations in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(11): 1680. DOI: 10.1139/cgj-2018-0292
- [15] KONG D, WEN K, ZHU B, et al. Centrifuge modeling of cyclic lateral behaviors of a tetrapod piled jacket foundation for offshore wind turbines in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 04019099. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002160
- [16] 刘俊伟,吕伟,陈水月,等.嵌岩单桩水平静力加载现场试验及p-y曲线研究[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(10):1941  
LIU Junwei, LV Wei, CHEN Shuiyue, et al. Field test of lateral static loading of rock-socketed monopiles and study of p-y curve[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(10): 1941. DOI: 10.11990/jheu.202208011
- [17] ABDULLAHI A, BHATTACHARYA S, LI C, et al. Long term effect of operating loads on large monopile-supported offshore wind turbines in sand [J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110404. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110404
- [18] LIU J W, CHEN J W, HUANG X Y, et al. Model tests on jacking installation and lateral loading performance of jacket foundation in sand[J]. Ocean Engineering, 2022, 259: 1. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111738
- [19] XU M, WANG L, WANG L, et al. Influence of bounding surface plasticity-based soil-structure interaction model on integrated dynamic behavior of jacket offshore wind turbines [J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117204. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117204
- [20] 苏静波,邵国建,刘宁.基于P-Y曲线法的水平受荷桩非线性有限元分析[J].岩土力学,2006(10):1781  
SU Jingbo, SHAO Guojian, LIU Ning. Nonlinear finite element

- analysis of piles under lateral load based on  $P$ - $Y$  curves[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006 (10): 1781. DOI: 10.16285/j.rsm.2006.10.028
- [21] 赖踊卿, 孙毅龙, 李炜, 等. 长期循环荷载作用对大直径单桩水平承载特性的影响分析[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(3): 116  
LAI Yongqing, SUN Yilong, LI Wei, et al. Analysis of the effect of long-term cyclic loading on the horizontal bearing characteristics of large-diameter monopiles[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(3): 116. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-0163
- [22] 唐亮. 液化场地桩-土动力相互作用  $p$ - $y$  曲线模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010  
TANG Liang.  $p$ - $y$  model of dynamic pile-soil interaction in liquefying ground[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
- [23] 章荣军, 郑俊杰, 蒲河夫, 等. 基于  $p$ - $y$  曲线分析隧道开挖对邻近单桩的影响[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(12): 1837  
ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, PU Hefu, et al. Response of adjacent single pile due to tunnelling based on  $p$ - $y$  curve [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(12): 1837
- [24] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807  
ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1807
- [25] LIANG F, CHEN H, JIA Y. Quasi-static  $p$ - $y$  hysteresis loop for cyclic lateral response of pile foundations in offshore platforms[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 148: 62. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.024
- [26] LIANG F, YUAN Z, LIANG X, et al. Seismic response of monopile-supported offshore wind turbines under combined wind, wave and hydrodynamic loads at scoured sites[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 144: 104640. DOI: 10.1016/j.comgeo.2022.104640
- [27] MATLOCK H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay[C]//Offshore technology conference. Houston, Texas, 1970: 577. DOI: 10.4043/1204-MS
- [28] 陈海兵. 强震下桥梁群桩基础非线性动力分析及拟静力方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2017  
CHEN Haibing. Nonlinear dynamic analysis and pseudostatic approach for bridge pile group foundation during strong earthquakes [D]. Shanghai: Tongji University, 2017
- [29] MCKENNA F. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation [J]. *Computing in Science & Engineering*, 2011, 13(4): 58. DOI: 10.1109/MCSE.2011.66
- [30] ZHOU L, BARBATO M, YE A. Pile group effect modeling and parametric sensitivity analysis of scoured pile group bridge foundations in sandy soils under lateral loads[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2023, 28(8): 04023046. DOI: 10.1061/JBENF2.BEENG-5861
- [31] LIANG F, ZHANG H, WANG J. Variational solution for the effect of vertical load on the lateral response of offshore piles[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 99: 23. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.03.004
- [32] 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. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.070
- [33] 邹新军, 王奕康, 周密. 上硬下软地层中桩盘复合基础 V-H 承载特性[J]. *岩土工程学报*, 2022, 54(2): 145  
ZOU Xinjun, WANG Yikang, ZHOU Mi. V-H bearing characteristics of pile-cap composite foundation in upper-hard and lower-soft strata [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 54(2): 145. DOI: 10.11918/202012048
- [34] 孔令刚, 姜丽红, 陈仁朋, 等. 倾斜上拔荷载下挤扩支盘桩响应分析[J]. *应用力学学报*, 2013, 30(2): 228  
KONG Linggang, JIANG Lihong, CHEN Renpeng, et al. Response of squeezed branch piles under inclined uplift loads [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2013, 30(2): 228. DOI: 10.11776/cjam.30.02.B040
- [35] AYOTHIRAMAN R, VIJAYAN C, REDDY K M. Effects of relative density on the measured response of piles under combined uplift and lateral loading [J]. *Journal of Structural Design and Construction Practice*, 2025, 30(1): 04024093. DOI: 10.1061/JSDCCC.SCENG-1367
- [36] LEVY N H, EINAV I, HULL T. Cyclic shakedown of piles subjected to two-dimensional lateral loading [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2009, 33(10): 1339. DOI: 10.1002/nag.775.5

(编辑 吕雪梅)