

•海洋资源可持续开发与利用•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500356



本刊网刊

水平荷载下海上风力机高桩承台基础承载特性离心机试验研究

刘现鹏¹, 陈超^{1*}, 华旭刚¹, 聂智超², 曲树盛²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 交通运输部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要:随着中国大批高桩承台海上风电基础进入中长期服役阶段,其承载性能的长期演化规律已成为亟待研究的问题。在 1:100 比尺下,开展了砂土地基高桩承台基础水平单调和单向多级循环加载土工离心机模型试验,研究了桩基受力特性、高幅值大循环次数基础刚度、累积位移及倾斜规律。开展了高桩承台单调水平加载数值模拟研究,验证了离心机模型试验桩基轴力和弯矩分布规律,揭示了高桩承台基础轴力和弯矩荷载分配机制。试验结果表明:水平单调加载初期,承台所受荷载与位移近似弹性关系,随着荷载逐渐增加,承台基础刚度发生“软化”,基础水平极限承载力 F_u 为 17.88 kN,显著高于同等装机容量单桩基础承载力,表明高桩承台基础仍有较大优化空间。靠近加载位置桩基承受了更大荷载,且不同桩基轴力存在拉、压差异。在较高水平荷载幅值下,远离加载位置桩基承载力发挥愈加充分。在 $0.2F_u$ 和 $0.4F_u$ 循环荷载下,基础刚度起初略微增加,随后保持稳定;在 $0.6F_u$ 循环荷载下,基础刚度显著降低。设计时应重点考虑极端荷载造成的基础刚度和变形,且应重点关注主风、浪方向桩基承载力。当循环荷载幅值由水平极限承载力的 $0.6F_u$ 降低至 $0.2F_u$ 时,基础位移表现出了“自愈”特征,基础累积位移减小且刚度略微增加,基础倾角减小,说明极端工况后小幅值循环荷载对基础承载力恢复是有益的。研究结果可为高桩承台海上风机基础服役期间安全性评价提供理论依据,并对后续海上风机高桩承台基础设计及优化提供参考和借鉴。

关键词:高桩承台基础;离心机模型试验;水平单调及循环加载;荷载传递及分配;累积位移

中图分类号:TK513.5

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)01-0276-13

海上风机高桩承台基础源自于港口工程高桩码头结构,具有承载力高和沉降量小等优点^[1]。与高桩码头结构需要长期承受门机和车辆等大量竖向荷载不同,海上风机频繁受到风、浪和流等水平循环荷载作用,其高桩承台群桩承载机制更为复杂^[2]。一方面,低频、多向荷载组合作用下,高桩承台基础荷载传递机制不明^[3];另一方面,受水平循环荷载,桩-土相互作用使得承台卸载刚度弱化,其承载能力及动力响应特性有待进一步探究^[4]。

目前针对海上风机高桩承台基础的研究较少,主要集中在承台群桩承载特性、水平循环荷载下承载力演化机制、高桩承台结构受力及变形规律等。赖踊卿等^[5]通过有限元软件 ABAQUS 发现桩-平台复合基础的竖向承载力、水平承载力以及抗弯承载力

随着附加平台直径的增大呈指数型增加,证明了桩-平台复合结构比单桩基础承载性能更好。Chen 等^[6]基于 Navier-Stokes 方程和流体体积法计算承台处波浪荷载,结果表明承台尺寸对基础所受波浪力有显著影响。周绪红等^[7]通过 SESAM 软件研究了高桩基础受力及变形特征,指出 2 m 桩径兼具安全性与经济性。Shi 等^[8]基于 ABAQUS 和 Openfast 联合分析了土体对桩基的耗散作用,相比桩端完全嵌固工况,风机固有频率和桩基内力显著降低。利用数值模拟方法便于研究不同工况高桩承台基础动力及承载规律,然而循环荷载下群桩斜桩的承载机制极为复杂,难以实现长期循环荷载高桩承台基础承载特性演化数值模拟。

龚维明等^[9]基于现场实测数据对高桩承台基础开

收稿日期:2025-05-14 修回日期:2025-09-10 网络出版日期:2025-09-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2603000);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(TKS20240306)

作者简介:刘现鹏(1977—),男,博士生,高级工程师。研究方向:海洋构筑物长期服役性能演化。E-mail:tiankesuo@163.com

*通信作者:陈超,副教授, E-mail:steinchen@hnu.edu.cn

展水平及竖向承载力分析,证明了多桩承台基础刚度大于单桩基础。邓伟等^[10]分析了近年高桩承台风机监测数据,发现偏航、台风和船撞导致结构出现强振,长期强振作用将导致基础和塔筒的疲劳损伤。Abadie^[11]在常重力环境下系统研究了循环荷载对大直径单桩基础侧向承载性能的影响,发现加载幅值和频率对承台卸载刚度演化具有显著影响。顾明等^[12]对比了斜桩和直桩群桩基础抵抗水平、偏心和扭转承载能力,得到了斜桩群桩承台卸载刚度更大且承载能力更高的结论。胡铠等^[13]开展了开、闭口桩受单调和循环荷载下承载力特性试验,获得了循环荷载下闭口桩承载力较开口桩更高、密砂土体基础承载力随循环次数降低的结论。Lu等^[14]通过数值模拟和离心机试验研究了多桩承台基础侧向受载机理,提出了附加轴力大小与上部结构刚度、群桩分布和风向有关。上述研究表明,高桩承台基础具有抵抗水平荷载能力强、整体刚度大的优点。然而,现有研究难以充分解释高桩承台基础受力特性和荷载传递机制,水平循环荷载高桩承台基础刚度弱化规律尚不明晰,现有单桩、吸力桶基础离心机模型试验循环次数较少,缺乏高幅值、大循环次数下高桩承台基础承载力演化研究^[15],难以评价和预测服役期高桩承台海上风机基础安全性。

为深入研究高桩承台基础荷载传递及分配特性,揭示循环荷载下砂土-基础刚度演化规律,本研究开展两组土工离心机模型试验,通过测试桩基轴力、弯矩、承台位移等参数,结合有限元模拟分析群桩各桩基荷载传递及分配机制,探究循环荷载作用下砂土变形特征、承台卸载刚度、基础倾角变化等规律。研究结果可为高桩承台基础设计优化、基础服役安全评价提供依据和参考。

1 试验概况

1.1 模型桩制作

本试验在港口水工建筑技术国家重点实验室TK-500土工离心机中开展,具体参数如表1所示。考虑模型箱尺寸限制,为避免产生边界效应,模型几何比尺为1:100。模型桩壁厚基于抗弯刚度等效原则,模型承台选用铝块制成,几何参数如图1所示。采用量纲分析法确定各物理量的相似关系,如表2所示。

量纲分析法以柯西公式为依据,如式(1)所示:

$$S_E/S_\rho S_a S_l = 1 \quad (1)$$

式中, S_E 、 S_ρ 、 S_a 、 S_l 分别为弹性模量、密度、加速度和长度的模型试验相似比。根据原型尺寸、模型箱大小等

综合确定本次离心模型试验的重力加速度比尺为1:100。模型桩材料为铝合金,直径20 mm,壁厚7 mm,密度为2.75 g/cm³,抗拉强度为280 MPa,弹性模量为72 GPa。八根桩沿承台圆周对称布置,倾斜角度为11.3°,承台底面处桩基与承台外侧水平净距为5.4 mm,承台底距桩底距离898.0 mm。为防止水平单调加载过程中桩基与承台连接处脱开,首先将涂抹强力胶的桩基插入承台安装孔,然后在承台底面与桩基连接处进行焊接,增强承台-群桩连接处的强度和刚度。

表1 TK-500土工离心机主要参数

Tab. 1 Main parameters of TK-500 geotechnical centrifuge

有效容重/(g·t)	有效半径/m	加速度	模型箱尺寸/(m×m×m)
500	5.0	10g~250g	1.0×1.2×1.2

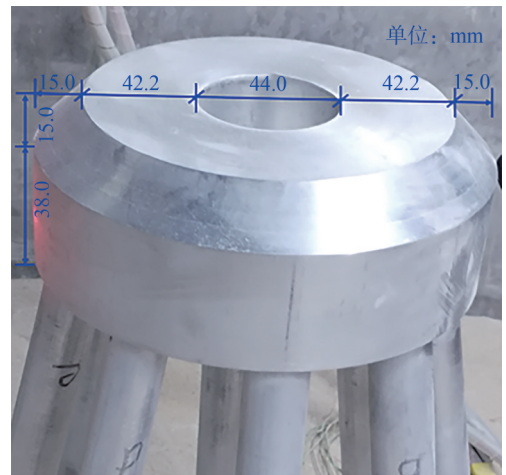


图1 高桩承台模型

Fig. 1 High-rise cap foundation model

表2 离心机试验相似比(模型/原型)

Tab. 2 Similarity ratios for centrifuge tests (model/prototype)

参数	相似比	参数	相似比
长度 S_l	1:100	力 S_F	1:10 ⁴
加速度 S_a	100	频率 S_f	100
时间 S_t	1:100	抗弯刚度 S_{EI}	1:10 ⁸

1.2 模型土制备

本试验所用砂土根据渤海某海域地质勘察报告中的颗粒级配,用不同粒径石英砂,经离子水冲洗、烘干后配制而成,根据地层分布特点,选取密砂作为代表性土层开展研究。模型土体整体高度698.0 mm,采用砂雨法制备海床,通过调整砂样落距控制模型砂土干密度,为1.64 g/cm³,其他土体参数如表3所示。制备海床模型到达设计高程后定位高桩承台基础,并利用埋入法固定。当 $D/d_{50}>40$,可以不考虑砂土粒径效应^[16-17],其中, D 为桩基直径, d_{50} 为累积百分比50%对应的粒径大小。本试验砂土 $D/d_{50}=111$,因此,粒径缩放对桩-土接触特性的影响可以忽略。

表3 试验砂土参数
Tab.3 Test sand parameters

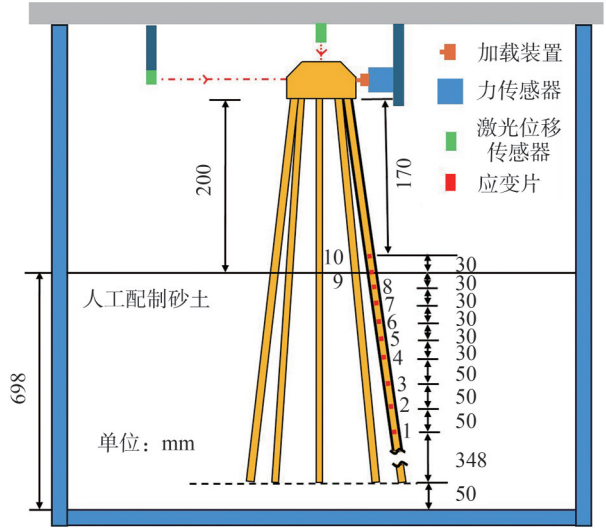
质量中值 粒径 D_{50} mm	不均匀 系数 C_u	曲率系数 C_c	最小 孔隙比 e_{min}	最大 孔隙比 e_{max}	饱和重度 γ ($kN \cdot m^{-3}$)
0.18	3.20	1.22	0.49	0.94	19.4

由于本试验群桩数量较多,需考虑各桩基-土体作用产生的土应力叠加效应。根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),桩的最小中心距要求为 $3D$,即 60 mm,承台底部距离砂土表面垂直距离为 200 mm,土体表面处相邻桩基的中心距为 74.23 mm,大于规范给出的桩基间隔最小值,本试验的群桩间距设计满足要求,相邻桩基对土体的扰动可以忽略。

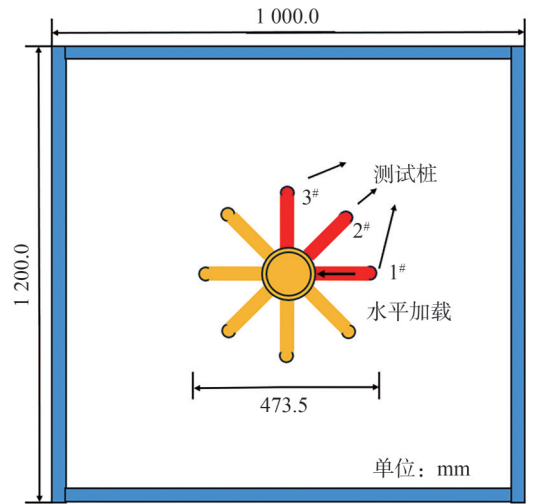
1.3 模型加载及测试

开展海上风机高桩承台基础单调水平极限加载和水平循环加载试验,离心机模型试验现场如图 2 所示。高桩承台基础水平极限承载力试验通过静力加载获得。实际工况下,海上风机受到的外部荷载产生的振动频率较小,孔隙水压力可在砂土中迅速消散,故本试验使用干砂模拟海床,且使用较低的加载速率 0.06 mm/s ^[18-19]。模型的位移采样频率为 10 Hz。承台周围布置了水平加载装置、激光位移传感器、轴力传感器,并在沿桩基长度方向布置应变片,桩身轴力和弯矩提取方式参考文献^[20]。桩基轴力及弯矩测点具体位置见图 3(a),轴力测试位置为 1~9 测点,弯矩测试位置为 4~10 测点。

传感系统包括力传感器和两个激光位移传感器,加载具体方案如表 4 所示。疲劳极限状态(FLS)和正常使用状态(SLS)分别对应极限状态荷载(ULS)的 30% 和 40%,水平循环荷载下基础累积变形和刚度演化主要发生在前 300 个加载周期内^[11,21-22],因此,本试验采用 4 000 次循环荷载有助于充分掌握长期服役基础位移、倾斜及刚度等参数演化规律。



(a) 主视图



(b) 俯视图



图2 高桩承台基础离心机试验现场

Fig. 2 Centrifuge test site for high-rise cap foundation

由于测试系统通道数量限制,选择 1#~3# 桩进行荷载响应分析,共计包括 30 组测点的轴力、弯矩加载时程数据,测试桩位置如图 3(b)所示。单向变幅循环加载通过力传感器控制,采用正弦波施加水平荷载,循环加载频率为 1.00 Hz,对应原型加载频率为 0.01 Hz。由于实际工程中海上风机基础循环荷载频率为 0.10~0.50 Hz,较低循环频率下砂土颗粒能够寻找更稳定的、阻力更小的路径进行重排列,而试验采用 0.01 Hz 相对于实际荷载频率更小,不足以改变基础位移和刚度变化规律。

图3 高桩承台模型布置

Fig. 3 Layout of high-rise cap foundation model

表4 单向变幅加载方案

归一化加载幅值/($F \cdot F_u^{-1}$)	循环次数
0.2	4 000
0.4	4 000
0.6	4 000
0.2	4 000

注: F 为水平循环加载幅值。

2 试验结果分析

2.1 水平静力加载

2.1.1 基础极限承载力

为获得高桩承台海上风电基础水平极限承载力,开展水平静载试验,承台荷载和位移关系如图 4 所示。随着基础水平位移增加,承台位移与所受荷载在加载初期呈弹性关系;随后承台水平位移继续增加,基础的累积位移不断增大;当荷载达到 17.88 kN 时,荷载-位移曲线出现明显下降趋势,此时可认为高桩承台基础达到极限承载力 F_u ,当荷载水平低于 $0.46F_u$,承台位移-荷载变化近似线弹性,高桩承台基础发生可恢复变形。随后荷载-位移曲线趋于平缓,高桩承台基础周围土体产生塑性变形。刘晋超等^[23]研究了砂土海床大直径单桩水平承载特性,试验和数值模拟结果均表明,单桩加载的荷载-位移始终保持线性关系,当水平荷载较大时单桩位移不可恢复。与单桩水平承载机理不同,群桩基础在水平荷载增大过程中能逐步发挥各桩基承载力,故极限荷载所对应的水平位移更大。

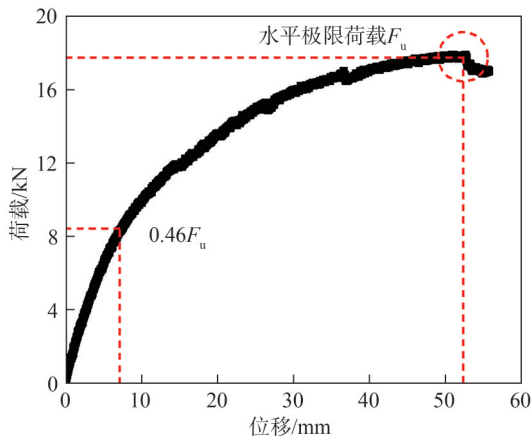


图 4 承台水平荷载-位移曲线

Fig. 4 Lateral load-displacement curve of cap

2.1.2 桩基轴力分布

本试验桩基轴力方向为压正拉负。在各级荷载作用下,1[#]~3[#]桩轴力分布存在显著差异。1[#]、2[#]桩在水平荷载作用下为轴向受拉状态,3[#]桩为受压状态,且轴力随埋深增大逐渐递减,如图 5 所示。其中,2[#]桩在入土深度 250 mm 处测点轴力存在明显异常,故剔除该处应变片数据。整体而言,1[#]~3[#]桩在 0~20 m 入土深度逐渐减小,随着入土深度继续增加,桩身轴力趋近于 0。由于试验采用单一密实砂土层,沿入土深度观察到的桩身轴力衰减速度相对稳定。另一方面,在 $0.2F_u \sim 0.8F_u$ 荷载下,3[#]桩轴力在入土 150 mm 处趋近于 0,说明水平荷载增加能够更充分地发挥深处基桩侧摩阻

力且由于本试验高桩承台基础基桩较长,所受水平荷载主要由桩-土摩擦作用提供,尚未发挥桩端抗力。

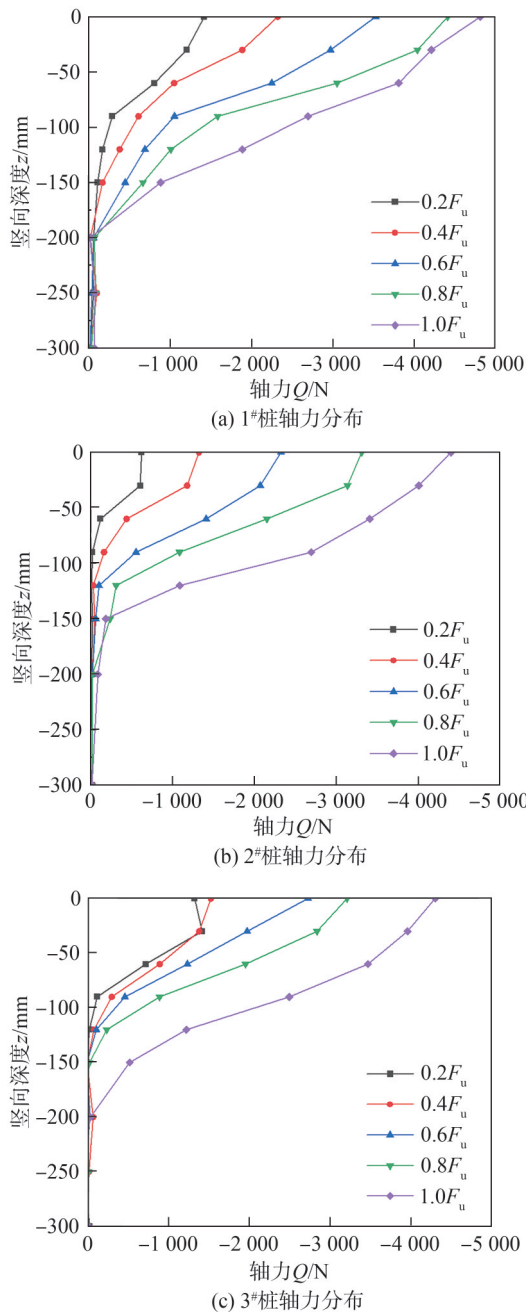


图 5 不同加载幅值下桩基轴力分布

Fig. 5 Distribution of axial force on pile with different loading amplitudes

2.1.3 桩基轴力对比

提取 1[#]~3[#]桩在 $0.2F_u$ 、 $0.6F_u$ 和 $1.0F_u$ 水平荷载下桩身轴力,对群桩各桩基轴力进行对比,结果如图 6 所示。从图 6 可看出,1[#]和 3[#]桩所受轴力较大,2[#]桩所受轴力最小。群桩各桩基所受轴力方向不完全一致,1[#]、2[#]桩受到拉应力作用,3[#]受到压应力作用。选取桩身轴力最大位置(泥面处高程),计算各桩基所受轴向荷载比例系数,以 3[#]桩轴力为基准,表征不同位置桩基轴力荷

载分配差异,如表 5 所示。结果表明,靠近水平加载点的 1[#]桩身轴力最大,随着加载幅值提高,2[#]和 3[#]桩基轴力显著增加。Brown 等^[24]研究了砂土中群桩受侧向荷载规律,对 3 行 3 列群桩开展水平加载,加载前排、中排和后排桩荷载分配为 20.2、15.6 和 11.6 kPa,证明了靠近加载位置桩基承受较大水平荷载。对于本试验研究的斜桩群桩基础,靠近加载位置桩基承受外部水平荷载比例相对更小,且不同位置桩基的轴力分配差异相对较小,故本试验研究的高桩承台基础型式整体性更强,水平荷载作用下更容易发挥群桩的整体性能。因此,高桩承台海上风机基础桩身轴力与水平加载幅值及方向密切相关,可根据风场历年波浪及风能规律选取主要作用方向加固桩基,以提高高桩承台基础建设的经济性。

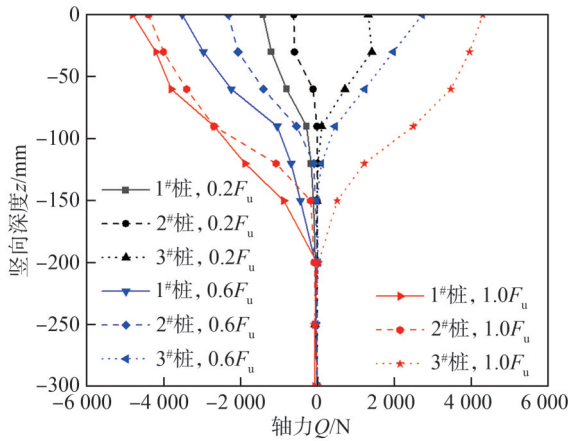


图 6 桩基轴力对比

Fig. 6 Comparison of axial forces on pile

表 5 1[#]~3[#]桩所受轴力对比

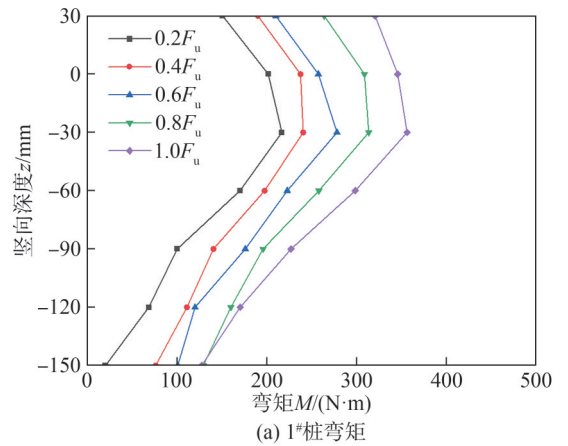
Tab. 5 Comparison of axial forces on piles 1[#]~3[#]

归一化加载幅值/($F_u F_u^{-1}$)	C_1	C_2
0.2	1.74	1.57
0.6	1.58	1.24
1.0	1.01	0.99
平均值 \bar{C}	1.44	1.27

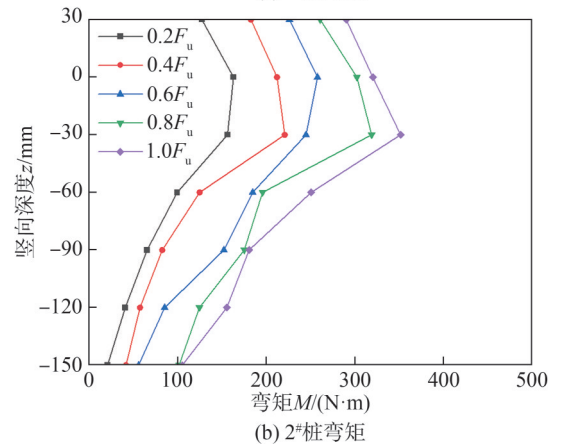
注: C_1 、 C_2 分别表示 1[#]桩与 3[#]桩、2[#]桩与 3[#]桩轴力比值。

2.1.4 桩基弯矩分布

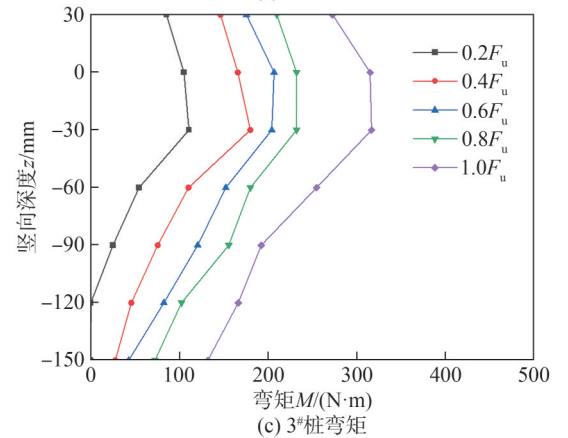
海上风机属于典型的高耸结构,其基础往往受到显著的倾覆力矩作用,因此研究高桩承台群桩各桩基弯矩作用具有重要意义。不同加载幅值下桩基弯矩分布如图 7 所示。由图 7 所示,水平荷载作用下,1[#]~3[#]桩弯矩在土层上部增大,随后逐渐减小。随着水平荷载增大,1[#]~3[#]桩桩身弯矩显著增加,该规律与已有研究吻合^[25],验证了本文试验方法的正确性。另一方面,水平极限加载过程中 1[#]~3[#]桩基所受弯矩方向一致,且弯矩方向不随荷载大小变化。



(a) 1[#]桩弯矩



(b) 2[#]桩弯矩



(c) 3[#]桩弯矩

图 7 不同加载幅值桩身弯矩分布

Fig. 7 Distribution of bending moment on pile body with different loading amplitudes

2.1.5 桩身弯矩对比

与轴力分布类似,承台作用水平荷载所产生的弯矩更多由 1[#]桩承担,如图 8 所示。Jones 等^[26]通过理论计算和数值模拟方法研究了群桩承台基础各桩基受力规律,结果表明,靠近加载方向桩基所受弯矩大于侧向桩基,为进一步研究高桩承台基础弯矩传递及分配规律,选取不同水平荷载下 1[#]~3[#]桩桩身弯矩曲线最大值,计算桩基所受弯矩比例系数,如表 6 所示。整体而言,靠近加载位置桩基承担了更大的弯矩荷载,但不同位置引起的桩基弯矩及轴力的差异性

较小,由此可知本试验使用的高桩承台基础整体性良好且协同受力能力强。

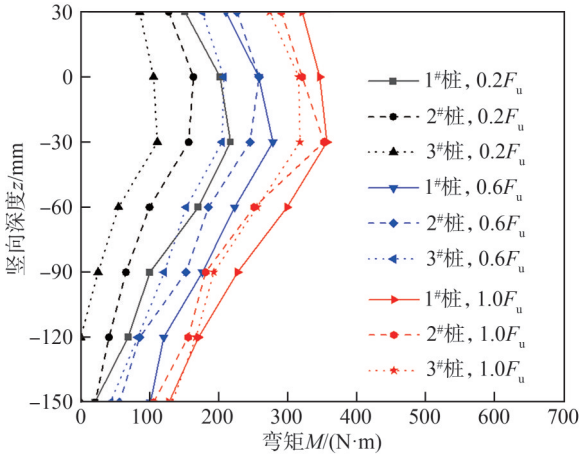


图 8 桩身弯矩对比

Fig. 8 Comparison of pile bending moments

表 6 1#~3#桩所受弯矩对比

Tab. 6 Comparison of bending moments on Piles 1#~3#

归一化加载幅值/($F \cdot F_u^{-1}$)	D_1	D_2
0.2	1.56	1.49
0.6	1.35	1.29
1.0	1.27	1.06
平均值 \bar{D}	1.39	1.28

注: D_1 、 D_2 分别表示 1#桩与 3#桩、2#桩与 3#桩弯矩比值。

2.1.6 数值模拟验证

通过有限元软件 Abaqus 建立了高桩承台基础数值计算模型,如图 9 所示,高桩承台基础尺寸和重力加速度值与离心机试验保持一致。为便于网格划分,将试验使用的立方土体调整为棱柱体,并采用 3 维应力单元 C3D8R 进行有限元计算。群桩、承台设置绑定接触,不同构件连接处无多余转动。砂土受力与变形采用 Mohr-Coulomb 本构模型模拟,承台、桩基的荷载响应通过线弹性准则模拟,材料物理特性参数如表 7 所示。

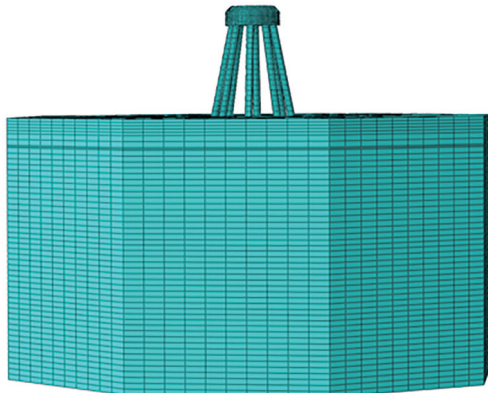


图 9 高桩基础网格划分示意图

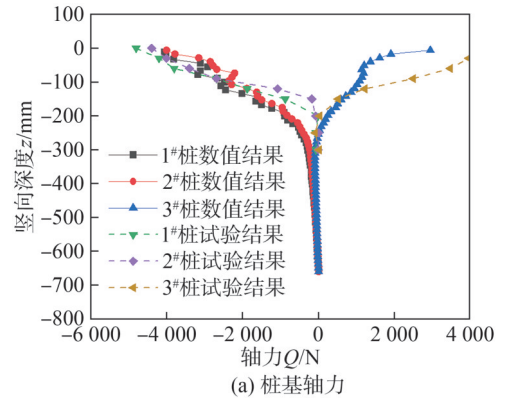
Fig. 9 Schematic diagram of mesh generation for high-pile cap foundation

表 7 材料物理特性参数

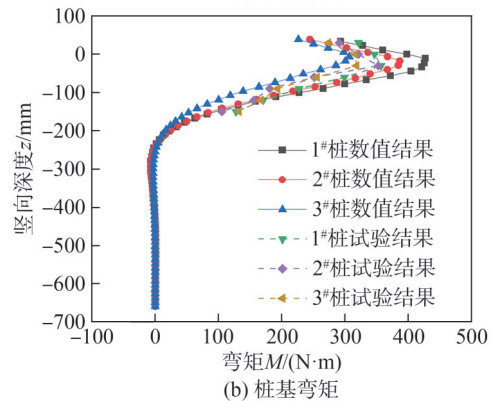
Tab. 7 Material physical property parameters

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ Pa	剪胀角/ (°)
铝合金	2 750	72 000	0.33	—	—	—
砂土	1 640	40	0.30	35	0	10

在 $1.0F_u$ 水平荷载作用下,1#~3#桩桩基轴力和弯矩数值模拟与试验结果对比如图 10 所示。整体而言,数值模拟与试验结果较为吻合。1#、2#桩以受拉为主,3#桩以受压为主,越靠近加载位置桩基轴力幅值越大,即 1#桩轴力>2#桩轴力>3#桩轴力。相较于离心机模型试验,由数值模拟得到 1#~3#桩基弯矩差异更为明显,靠近加载位置桩基弯矩明显更大。数值模拟和试验结果均表明,桩身最大弯矩位置出现在入土深度 30 mm 附近。主要原因在于,本试验所用的密砂具有较高的密实度和内摩擦角,桩身弯曲变形时受挤压侧砂土能提供较高的被动土压力,故弯矩随入土深度增加迅速达到峰值随后衰减至 0。



(a) 桩基轴力



(b) 桩基弯矩

图 10 1#~3#桩桩基轴力和弯矩试验结果和数值模拟对比

Fig. 10 Comparison of measured and simulated axial force and bending moment in Piles 1# to 3#

2.2 单向水平循环加载

2.2.1 加载模式

现有海上风机基础的循环加载试验多针对单桩、吸力桶等基础型式,循环加载次数相对较少,为进一步探究服役期间和极端荷载高桩基础承载特性演化规律,

本试验设计了高幅值、大循环次数的加载历程,高桩承台基础循环加载历程为 $0.2F_u \rightarrow 0.4F_u \rightarrow 0.6F_u \rightarrow 0.2F'_u$ ($0.2F'_u$ 的加载幅值和 $0.2F_u$ 的一样)。

刘晋超^[23]、Zhou^[27]等研究了欧洲 12 个海上风电场中的 15 台大直径单桩基础海上风机循环荷载下的受荷特征,在正常服役期间,海上风机受到多向荷载,此时单向循环加载将高估基础累积位移和刚度,使设计更为保守,本试验利用 $0.2F_u$ 和 $0.4F_u$ 模拟正常服役海上风机所受循环荷载;而在极端荷载工况下,风机大多为单向循环受荷模式,参考 DNV-OS-J101,环境荷载最大应为 $ULS/1.35(0.74ULS)$,故本试验利用 $0.6F_u$ 循环荷载幅值模拟极端工况下风机基础响应是合理的。

2.2.2 循环荷载桩周土体变化

循环加载完成后高桩基础如图 11 所示,此时高桩承台基础已发生明显倾斜,且靠近加载位置桩基被部分拔出。在大循环次数、高幅值循环荷载作用下,8 根桩基泥面处均发生较大位移,土体向外侧明显隆起,土体颗粒向周边及下部运动,桩周出现了锥形的沉陷区,引起桩基水平承载力降低。由于卸载后桩基未发生弯曲、开裂等塑性损伤,桩基本身完整性较好,因此,本试验循环荷载下高桩承台基础刚度改变主要因为土体扰动,而在工程实际中,通常需要同时考虑土体与基础强度。

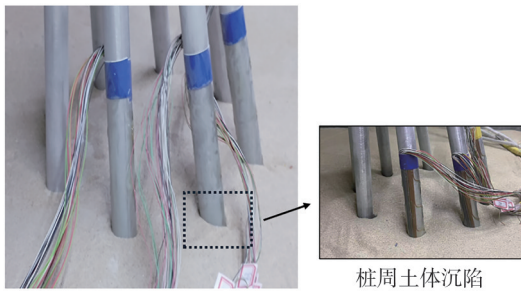


图 11 水平循环加载后桩周表面土体形态

Fig. 11 Surface soil morphology around the pile after horizontal cyclic loading

2.2.3 基础位移

开展不同加载次数和加载幅值下的高桩承台基础位移规律研究,获得承台基础荷载-位移响应曲线如图 12 所示。从图 12 可看出,在 $0.4F_u$ 、 $0.6F_u$ 循环荷载幅值作用下,基础位移表现出明显滞回性,对于 $0.2F_u$ 和 $0.2F'_u$,基础滞回性相对较小。随着循环次数增加,基础累积变形不断增长,说明随着循环荷载幅值的增加,基础累积变形逐渐增大。对于 $0.2F_u$ 、 $0.4F_u$ 和 $0.6F_u$ 循环荷载,加载初期累积变形增大明显,随后趋于稳定。当循环荷载由 $0.6F_u$ 降低至 $0.2F_u$,该幅值下基础位移变化量为 0.38 mm ,小于初次作用 $0.2F_u$ 循环荷载产生的 0.87 mm 位移。

$0.2F_u$ 、 $0.4F_u$ 和 $0.6F_u$ 循环荷载下基础累积位移逐渐增大,而 $0.2F'_u$ 荷载基础累积位移减小,原因在于密实砂土受到 $0.6F_u$ 荷载大量循环作用,周围土体密实程度下降,基础累积位移增大,当循环荷载幅值减小,桩周砂土逐渐被振密,基础累积位移减小。此外,循环加载下基础位移-荷载曲线表现出明显滞回和棘轮效应^[28-29],在相同循环加载幅值下,桩周土体塑性变形能力随循环次数降低,且基础累积位移随循环次数和循环荷载幅值增加而变大。

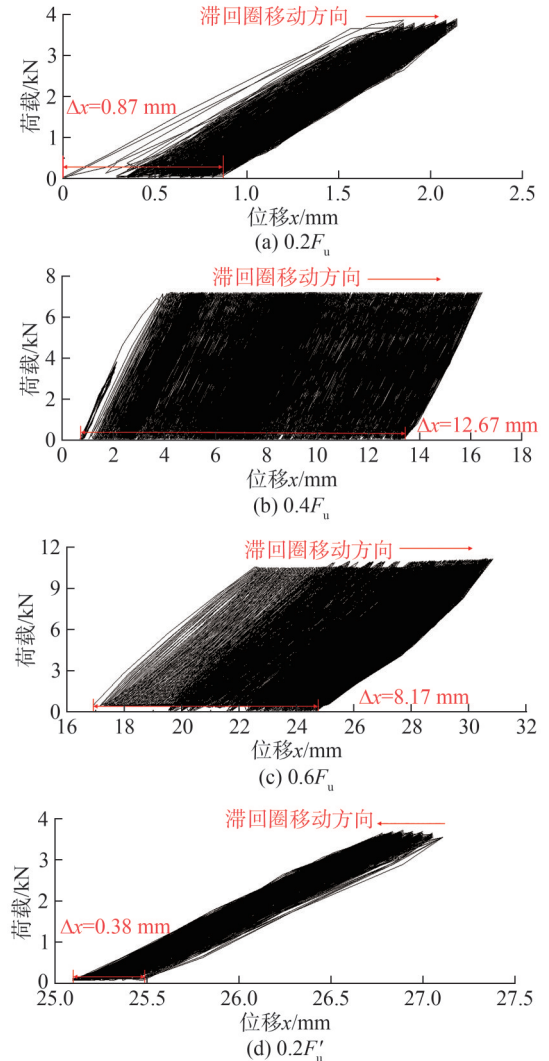


图 12 不同幅值循环次数下承台荷载-位移响应曲线

Fig. 12 Load-displacement response curves of the pile cap after various numbers of cycles at different load amplitudes

2.2.4 循环次数对承台卸载刚度的影响

通过承台卸载刚度反映当前循环次数下基础抵抗水平变形的能力,对于 $0.2F_u$ 循环荷载,承台卸载刚度略微增大,如图 13 所示。已有研究表明,对于相同幅值循环荷载,密实砂土刚度随循环次数增加几乎不变^[30],这与本试验 $0 \sim 1\ 500$ 次循环所得结论相符,此

后由于剪缩效应砂土颗粒空隙减小,承台卸载刚度缓慢增加。

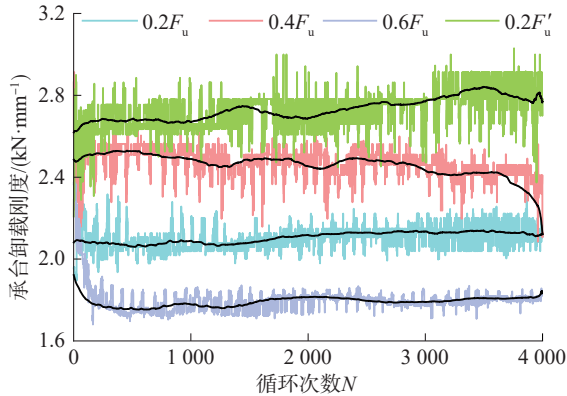


图13 循环荷载下承台卸载刚度演化

Fig. 13 Unloading stiffness evolution of cap under cyclic loading

$0.4F_u$ 循环荷载幅值下的承台卸载刚度有所减小,此时桩周土体扰动较大,土体颗粒向远端挤密并隆起,而邻近土体密度降低。在 $0.6F_u$ 循环加载初期,由于桩基剧烈作用导致周围土体颗粒原有位置和排列发生变化,桩周土体在大约 $0\sim 200$ 个循环作用下发生塑性破坏,桩周土体密实度减小,承台卸载刚度在初始阶段显著减小,随着循环次数增加,砂土颗粒排列逐渐稳定,因此后续土体刚度几乎不变。当循环荷载幅值由 $0.6F_u$ 降低至 $0.2F_u$,桩周附近土体局部密实度迅速恢复,高桩承台基础的卸载刚度变大;随着基础循环次数增加,桩身位移幅值和基础刚度均趋于稳定^[31]。

2.2.5 循环荷载幅值对承台卸载刚度的影响

不同循环荷载幅值下承台卸载刚度存在显著差异,当循环荷载幅值由 $0.2F_u$ 增加至 $0.4F_u$,承台卸载刚度明显增大,如图14所示。随后荷载增大至 $0.6F_u$,土体对桩身的嵌固作用减弱。当循环荷载幅值由 $0.4F_u$ 增加至 $0.6F_u$,较大的循环荷载导致原有土体结构发生破坏,引起基础承载力显著降低。在 $0.6F_u$ 循环荷载下承台的平均卸载刚度显著降低,说明该阶段循环荷载导致土体密实度下降,土体的强度与刚度随之降低^[5],因此,极端工况下的循环荷载会导致基础的水平极限承载力下降。在循环荷载恢复为 $0.2F_u$ 时,土体密实度有所提升,承台卸载刚度相较于第一阶段作用 $0.2F_u$ 循环荷载更高。

已有研究表明,不同循环次数、加载幅值、密实度均会影响砂土中的桩基础水平承载能力^[13]。对于本试验使用的密实砂土,相对于循环次数,循环荷载幅值变化引起的土体刚度改变更为显著。当土体所受循环荷载幅值相同,土体刚度与循环次数的变化规律与其所受的应力相关。因此,高桩承台海上风机服役期间

应考虑极端环境荷载对土体刚度的影响,较大循环荷载下承台基础整体刚度显著减小,循环荷载幅值恢复至较低水平后,土体刚度有所恢复甚至增大。

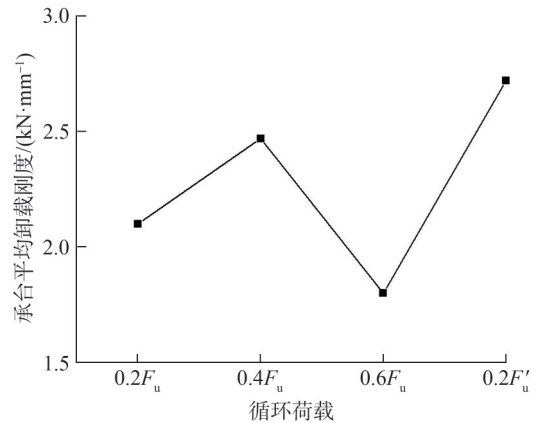


图14 不同循环荷载幅值下承台平均卸载刚度

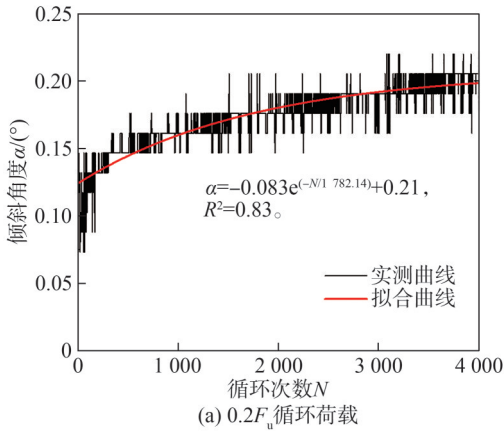
Fig. 14 Average unloading stiffness of cap under different cyclic loading amplitude

2.2.6 循环次数对基础倾斜的影响

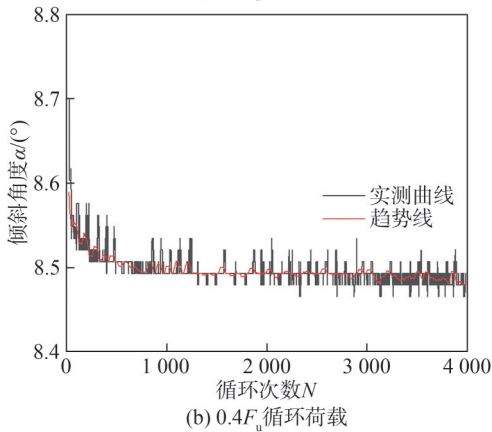
利用激光位移计得到承台位移变化量,进而计算循环荷载下承台倾斜角度,如图15所示。为了更好地反映承台倾角的变化规律,对其进行了移动平均数据处理,获得倾角变化趋势。当循环荷载幅值为 $0.2F_u$,承台倾斜角度随循环次数增加且逐渐趋于稳定,该阶段倾角最大变化量为 0.22° 。

当循环荷载达到 $0.4F_u$,承台倾角明显增加,随后趋于稳定;当循环次数达到840次倾角显著增长,随后再次趋于稳定;在循环荷载2741次以上,基础倾角增长速率变大。在 $0.4F_u$ 循环荷载幅值下,基础倾角似阶梯状增长,对于较大幅值循环荷载,桩基对砂土循环剪切作用引起土体结构重分布,导致基础倾角显著增加。试验中在长期循环加载作用下,土体反复出现塑性破坏和达到稳定两种状态。因此承台倾斜角度会逐渐累积,在高荷载幅值下尤其明显。由于风机基础安装误差与服役期间累积变形的总体允许倾斜角度为 0.5° ,故本模型在 $0.4F_u$ 循环荷载水平下第86次加载后超出规范要求。

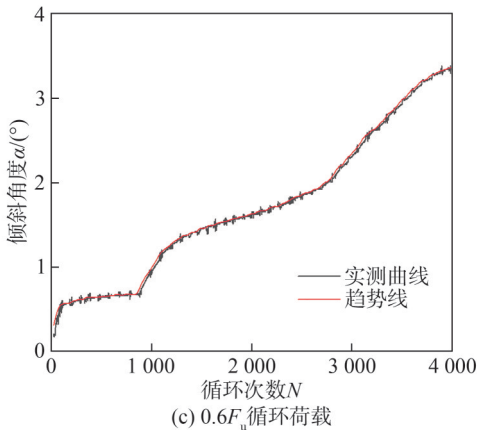
对于 $0.6F_u$ 循环荷载,循环初期桩周土体发生明显破坏,基础倾角显著增大,土体密实度进一步下降,随后基础倾角保持相对稳定,但仍能观测到缓慢的增长趋势^[32]。当循环荷载由 $0.6F_u$ 减小至 $0.2F'_u$,桩在土体中位移减小,承台倾角在该阶段呈“先减小后稳定”趋势,在 $0.6F_u$ 循环荷载下桩周较远处砂土更为密实,而在较低的循环荷载下,原本更为密实的砂土颗粒受到扰动,向更邻近桩周位置运动,提升了该区域砂土密实度和刚度,表现出一定的“自愈”能力。



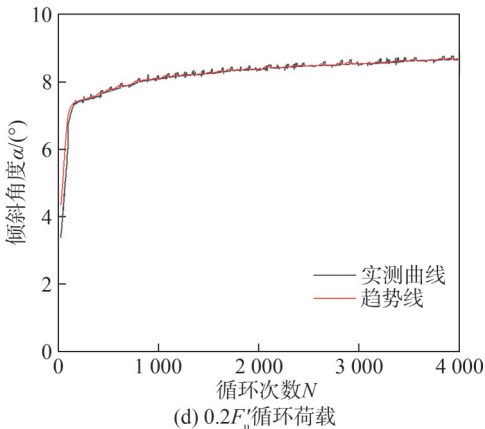
(a) $0.2F_u$ 循环荷载



(b) $0.4F_u$ 循环荷载



(c) $0.6F_u$ 循环荷载



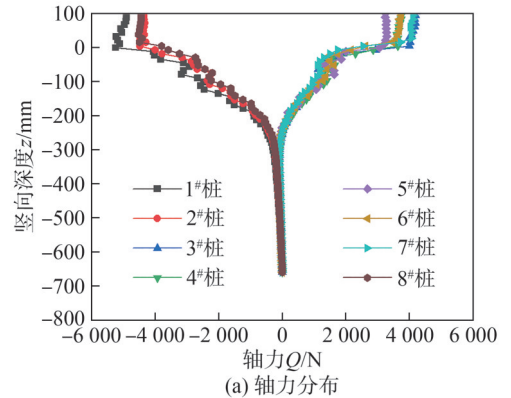
(d) $0.2F_u$ 循环荷载

图 15 不同循环荷载下高桩承台倾斜角度

Fig. 15 Tilt angles of the elevated pile cap under various cyclic loading conditions

3 讨论

由于离心机试验仅分析 3 根桩基的轴力和弯矩分布,难以全面揭示高桩承台基础受力分布特性。提取 $1.0F_u$ 水平荷载下 $1^\# \sim 8^\#$ 桩基轴力和弯矩数值模拟分布结果,如图 16 所示。从图 16 中可看出, $1^\#$ 桩轴力最大, $5^\#$ 桩轴力最小, $2^\#$ 和 $8^\#$ 桩、 $3^\#$ 和 $7^\#$ 桩、 $4^\#$ 和 $6^\#$ 桩轴力大小接近,群桩桩基弯矩也呈现类似规律,说明当水平荷载沿高层承台基础对称面施加,群桩轴力和弯矩呈对称分布。靠近加载位置 $1^\#$ 、 $2^\#$ 和 $8^\#$ 桩受到拉应力,其余桩基受到压应力。



(a) 轴力分布



(b) 弯矩分布

图 16 $1^\# \sim 8^\#$ 桩基轴力和弯矩数值模拟分布结果

Fig. 16 Numerical simulation results of axial force and bending moment distribution in Piles $1^\#$ to $8^\#$

为分析 8 根群桩水平荷载分配规律,提取各桩基最大弯矩和轴力并计算比值,如表 8 所示,其中, C_n 表示 $n^\#$ 桩轴力与 $5^\#$ 桩轴力比, D_n 表示 $n^\#$ 桩弯矩与 $5^\#$ 桩弯矩比, n 为 $1 \sim 8$ 。不同桩基所受最大和最小轴力比为 1.49,最大和最小弯矩比为 1.47,说明水平荷载更多由靠近加载位置桩基承担,距离加载位置越远桩基所受荷载越小。由于极端工况下,风机大多为单向受荷模式,设计中应适当提高主风、浪方向桩基承载力,如增大桩径或入土深度等。另一方面,高桩承台基础水平承载力为 17.88 kN (原型承载力 178.8 MN),该数值为密砂、干燥条件下测得,理论上饱和、交互地层基础承载力更小,然而对比相

近容量5 MW单桩基础极限承载力 $55\text{ MN}^{[33]}$,高桩承台基础仍存在较大承载力富裕度,在设计中通过减少桩基数量、改变倾斜角度等方式减少工程费用是可行的。

在正常服役期间,海上风机基础刚度在水平循环荷载下保持稳定;对于极端荷载工况,循环荷载引起土体刚度迅速降低。因此,在极端波浪、大风等事件发生后,应尽快对海上风机基础承载能力、倾斜等情况进行检测和评估。当环境荷载再次恢复正常,基础刚度将有所提高。

表8 1[#]~8[#]桩弯矩、轴力对比

Tab. 8 Comparison of bending moments and axial forces for Piles 1[#] to 8[#]

桩号	轴力比 C_n	弯矩比 D_n	桩号	轴力比 C_n	弯矩比 D_n
1 [#]	-1.49	1.47	5 [#]	1.00	1.00
2 [#]	-1.32	1.32	6 [#]	1.15	1.01
3 [#]	1.28	1.31	7 [#]	1.26	1.06
4 [#]	1.15	0.91	8 [#]	-1.35	1.31

4 结论

通过开展海上风机高桩承台基础水平单调和循环加载离心机模型试验和有限元模拟,探究了高桩承台结构桩基荷载传递及分配规律,研究了不同循环次数、荷载幅值对基础水平位移、土体刚度、变形累积及倾斜的影响规律,得到主要结论如下:

1)随着承台水平荷载单调增加,基础位移与荷载起初呈线性关系,当荷载增加至 $0.46F_u$,基础位移-荷载曲线出现了明显的非线性特征,桩周土体发生塑性变形。与单桩海上风机基础不同,当水平荷载逐渐增加,多桩承台基础各桩基承载能力逐步发挥,水平极限承载力达 17.88 kN 。可通过减小桩长、桩基数量等方式适当降低承载力以提高工程建设经济性。

2)高桩承台桩基轴力随入土深度减小,轴力沿桩身衰减明显并在深度 200 mm 趋于0。桩身弯矩随入土深度增加,在深度 30 mm 达到最大随后减小。水平荷载作用下,根据各桩基轴力比和弯矩比,邻近加载点桩基轴力与弯矩更大,故设计时应重点关注主风、浪方向桩基承载力。1[#]、2[#]和8[#]桩基整体受拉,其余桩基受压,群桩所受弯矩方向一致。当水平荷载关于承台基础对称施加,群桩轴力和弯矩呈对称分布。

3)在 $0.2F_u$ 、 $0.4F_u$ 和 $0.6F_u$ 循环荷载下,基础累积位移随循环次数增加,当循环荷载降低至 $0.2F_u$,基础累积位移略微减小。对于循环荷载 $0.2F_u$ 、 $0.4F_u$,承台卸载刚度基本保持稳定, $0.6F_u$ 循环荷载导致桩周砂土

颗粒排列剧烈变化,土体密实度和刚度均发生降低,当循环荷载幅值降低至 $0.2F_u$,基础刚度表现出“自愈”特征。由循环次数引起的承台卸载刚度变化相对于循环荷载幅值更小,需要重点关注极端工况造成的基础刚度变化。

4)与基础累积位移变化规律类似,高桩承台倾角在 $0.2F_u$ 、 $0.4F_u$ 和 $0.6F_u$ 循环荷载下逐渐增加。其中,基础倾角在循环荷载提升初期显著增加,在单向等幅值循环荷载作用下,基础倾角随循环次数逐渐增大。随着循环荷载降低至 $0.2F_u$,桩周砂土在持续、小幅荷载作用颗粒发生振密,引起土体刚度提高,高桩承台倾角略微下降 0.28° 。

参考文献:

- [1] Zhang Lei, Shen Jianhao, Chen Cheng, et al. Lateral bearing characteristics of inclined pile-cap system installed in sandy ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 120-130. [张磊, 沈健豪, 陈成, 等. 砂土中斜桩-承台基础的水平承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 120-130.]
- [2] Wang Zhaowei, Chen Chao, Yang Jigang, et al. Study on modal parameter identification of wind turbines based on steady-state harmonic excitations[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(12): 331-341. [王朝伟, 陈超, 杨计刚, 等. 基于稳态简谐激励的风力机模态参数识别研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 331-341.]
- [3] Lin Yifan, Yang Zihao, Liu Yufei, et al. Detailedly comparative study of offshore wind power construction weather window and efficacy in Guangdong sea area[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(4): 106-114. [林逸凡, 杨梓豪, 刘玉飞, 等. 广东海域风电施工窗口期及工效精细化对比研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 106-114.]
- [4] Zhang Qiyi, Zhang Yuan, Lin Haodi, et al. Numerical investigation on bearing capacity of OWT foundation with large diameter monopile under Seismic load[J]. Applied Ocean Research, 2021, 108: 102518.
- [5] Lai Yongqing, Sun Yilong, Li Wei, et al. Effect analysis of long-term cyclic loading on lateral bearing characteristics for large diameter monopile[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(3): 116-121. [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): 116-121.]
- [6] Chen Ling, Zhou Jifu, Wang Xu, et al. Nonlinear wave loads on high-rise pile cap structures in the Donghai bridge wind farm[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2018, 28(3): 263-271.
- [7] Zhou Xuhong, Luo Yintao, Wang Wenling, et al. Optimizational analysis on structural parameters and study on practi-

- cal deformation analysis methods for high-rise pile cap foundations of offshore wind turbines[J]. *Industrial Construction*, 2023,53(6):1–12.[周绪红,罗崧滔,王文玲,等.海上风电机组高桩承台基础结构参数优化分析及实用变形分析方法研究[J]. *工业建筑*,2023,53(6):1–12.]
- [8] Shi Shigang, Zhai Endi, Xu Chengshun, et al. Influence of pile-soil interaction on dynamic properties and response of offshore wind turbine with monopile foundation in sand site[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 126:103279.
- [9] Gong Weiming, Huang Ting, Dai Guoliang. Experimental study of key parameters of high piled foundation for offshore wind turbine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S2): 115–121.[龚维明,黄挺,戴国亮.海上风电机组高桩基础关键参数试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(S2): 115–121.]
- [10] Deng Wei, Jin Bo, Zheng Tao, et al. Analysis of vibration characteristics of high-pile at sea-concrete offshore wind turbine tower[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(1): 233–241.[邓伟,金波,郑涛,等.高桩-混凝土承台式海上风电塔强振分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(1): 233–241.]
- [11] Abadie C N. Cyclic lateral loading of monopile foundations in cohesionless soils[D]. Oxford: University of Oxford, 2015.
- [12] Gu Ming, Chen Renpeng, Kong Linggang, et al. Centrifugal model tests on batter pile groups under eccentric lateral loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2018–2024.[顾明,陈仁朋,孔令刚,等.水平偏心荷载下斜桩群桩受力性状的离心机模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 2018–2024.]
- [13] Hu Kai, Su Dong, Yu Zhongliang, et al. Effect of compacting effect on bearing characteristics of horizontal load piles in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S2): 213–216.[胡铠,苏栋,余中良,等.挤密效应对砂土中水平受荷桩承载特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(S2): 213–216.]
- [14] Lu Wenjun, Zhang Ga, Wang Aixia. Bearing behavior of multiple piles for offshore wind driven generator[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 129: 538–548.
- [15] Feng Lingyun, Li Dayong. Analysis of influence factors on cyclic bearing behaviors of skirted suction caissons[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(6): 156–164.[冯凌云,李大勇.砂土中裙式吸力基础水平循环承载特性的影响因素分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 156–164.]
- [16] Zhu Bin, Li Tao, Bi Mingjun. Centrifuge modelling on tripod jacket foundation subjected to lateral loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1822–1830.[朱斌,李涛,毕明君.海上四桩导管架基础水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1822–1830.]
- [17] Zhu Zhoujie. Model tests on pile group effect and cyclic effect of jacket foundation of offshore wind turbines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.[祝周杰.海上风机四桩导管架基础群桩效应与循环效应试验研究[D].杭州:浙江大学, 2017.]
- [18] Wang L Z, Wang H, Zhu B, et al. Comparison of monotonic and cyclic lateral response between monopod and tripod bucket foundations in medium dense sand[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 155: 88–105.
- [19] He Ben, Luo Jinping, Li Wei, et al. Investigation on cyclic response of suction bucket foundation supporting offshore wind turbine[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(9): 332–337.[何奔,罗金平,李炜,等.海上风力机吸力桶基础循环特性离心机试验研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(9): 332–337.]
- [20] Cao Weiping, Xia Bing, Zhao Min, et al. P–y curves of laterally loaded batter piles in sand and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 743–753.[曹卫平,夏冰,赵敏,等.砂土中水平受荷斜桩的 p–y 曲线及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 743–753.]
- [21] Gao Luchao, Dai Guoliang, Zhang Jisheng, et al. Centrifugal model tests on lateral cyclic loading behavior of large-diameter monopiles in soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(8): 2411–2420.[高鲁超,戴国亮,张继生,等.软黏土大直径单桩水平循环加载离心机模型试验[J]. *岩土力学*, 2024, 45(8): 2411–2420.]
- [22] Li Dayong, Huang Lingxia, Wu Yuqi, et al. Bearing behaviors of modified suction caisson under horizontal variable amplitude and asymmetrical cyclic loads for offshore wind turbines[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(10): 391–399.[李大勇,黄凌霞,吴宇琦,等.海上风电裙式吸力基础水平变幅非对称循环承载特性[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(10): 391–399.]
- [23] Liu Jinchao, Xiong Gen, Zhu Bin, et al. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 591–599.[刘晋超,熊根,朱斌,等.砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 591–599.]
- [24] Brown D A, Morrison C, Reese L C. Lateral load behavior of pile group in sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(11): 1261–1276.
- [25] Chen Cheng, Liang Jiajun, Liu Shuidong. An analysis of the pile force of multi-pile cap foundation for offshore wind turbines[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(S1): 127–130.[陈成,梁佳俊,刘帅栋.海上风

- 电机组多桩承台基础桩基受力分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(S1):127–130.]
- [26] Jones K, Sun Min, Lin Cheng. Numerical analysis of group effects of a large pile group under lateral loading[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 144: 104660.
- [27] Zhou Wenjie. Behavior of offshore wind turbine jacket foundation under cyclic loadings and calculation methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [28] Tasiopoulou P, Chaloulos Y, Gerolymos N, et al. Cyclic lateral response of OWT bucket foundations in sand: 3D coupled effective stress analysis with Ta-Ger model[J]. Soils and Foundations, 2021, 61(2): 371–385.
- [29] Liu Hao yuan, Abell J A, Diambra A, et al. Modelling the cyclic ratcheting of sands through memory-enhanced bounding surface plasticity[J]. Géotechnique, 2019, 69(9): 783–800.
- [30] Lai Yongqing, Li Wei, Qi Haifeng, et al. Centrifuge tests on effects of episodic cycling and reconsolidation on large-diameter monopile foundations for offshore wind turbines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(10): 2994–3002.
- [赖踊卿, 李炜, 戚海峰, 等. 海上风电大直径单桩基础循环重固结效应离心机试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(10): 2994–3002.]
- [31] Zheng Jinhai, Ding Xingyu, Guan Dawei, et al. Characteristics of soil subsidence and convective motion around offshore windfarm monopile foundations subjected to long-term cyclic loading[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6): 552–561. [郑金海, 丁星宇, 管大为, 等. 循环荷载作用下海上风机单桩基础周围砂土沉降与对流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 552–561.]
- [32] Wang Xuefei, Li Shuxin, Li Jiale. Effect of pile arrangement on lateral response of group-pile foundation for offshore wind turbines in sand[J]. Applied Ocean Research, 2022, 124: 103194.
- [33] Liu Haoyuan, Kaynia A M. Monopile responses to monotonic and cyclic loading in undrained sand using 3D FE with SANISAND-MSu[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(1): 69–77.

Centrifuge Tests on Load Bearing Characteristics of High-rise Cap Foundation of Offshore Wind Turbines Under Lateral Loads

LIU Xianpeng¹, CHEN Chao^{1*}, HUA Xugang¹, NIE Zhichao², QU Shusheng²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport of the People's Republic of China, Tianjin 300456, China)

Abstract:

Objective This study aims to conduct an in-depth investigation into the load transfer mechanisms and distribution behavior of high-pile cap foundations under cyclic loading conditions. A systematic analysis is conducted to clarify the evolution of stiffness in the sand–foundation interaction system, with particular emphasis on the response to repeated external loads. The findings provide a theoretical foundation for assessing the operational safety of offshore wind turbine foundations supported by high-pile caps during their service life. In addition, this study provides practical insights and technical references for the design, optimization, and risk mitigation of such foundation systems in future offshore wind energy projects.

Methods Geotechnical centrifuge modeling was employed to simulate the performance of high pile cap foundations under both monotonic and unidirectional multi-stage cyclic horizontal loading. The tests were conducted at a scaling ratio of 1:100 using dry sand to replicate the seabed substrate. A strictly controlled loading rate of 0.06 mm/s was applied to maintain quasi-static conditions. Displacement responses were recorded at a sampling frequency of 10 Hz to capture detailed deformation behavior. The experimental setup incorporated a horizontal loading mechanism, laser displacement sensors, and axial force transducers installed around the pile cap. In addition, strain gauges were mounted along the lengths of the piles to measure internal force variations. This instrumentation allowed for a comprehensive assessment of the foundation's mechanical performance, including stiffness degradation under high-amplitude cyclic loading, accumulation of permanent displacements, and development of tilt. Complementing the physical experiments, a finite element model was developed to numerically simulate the tests. The model was calibrated using experimental data to ensure accuracy. Key parameters such as axial force and bending moment distributions along the pile shafts were extracted from the simulation results. The numerical analysis served to validate trends observed in the centrifuge tests and provided additional insight into the underlying load distribution mechanisms that governed axial and flexural behavior in the pile group.

Results and Discussions 1) Under monotonically increasing horizontal load applied to the cap, the foundation displacement initially exhibited a linear relationship with the applied load. Beyond a load level of $0.46F_{0}$, the load displacement curve demonstrated pronounced nonlinearity, indicating the onset of plastic deformation within the surrounding soil mass. The bearing capacity of each individual pile within the group was progressively mobilized, culminating in an ultimate horizontal load capacity of 17.88 kN for the entire foundation system. 2) The axial force mea-

sured in the piles decreased significantly with increasing embedment depth. This attenuation was particularly evident along the upper portion of the piles, with axial forces approaching zero at a depth of approximately 200 mm. In contrast, the bending moment increased initially with depth, reached a maximum value at around 30 mm below the mudline, and then decreased gradually. Among the instrumented piles, Piles 1[#], 2[#], and 8[#] were subjected to net tension forces, while the remaining piles experienced compression. All piles exhibited bending moments in the same direction, indicating consistent group behavior. When symmetric horizontal loading was applied with respect to the cap central axis, both axial forces and bending moments displayed symmetric distribution patterns across the pile group. 3) Under cyclic loading amplitudes of $0.2F_u$, $0.4F_u$, and $0.6F_u$, the cumulative displacement of the foundation increased steadily with the number of loading cycles. However, when the cyclic load amplitude was subsequently reduced to $0.2F_u$, a slight recovery in cumulative displacement was observed. The unloading stiffness of the pile cap remained largely stable throughout the tests at $0.2F_u$ and $0.4F_u$. In contrast, under $0.6F_u$ loading, significant particle rearrangement occurred in the sand surrounding the piles, which led to a reduction in soil density and stiffness. Subsequent reduction of the load amplitude to $0.2F_u$ resulted in a self-healing effect, where the foundation stiffness showed partial recovery. 4) Similar to the accumulation of displacement, the tilt angle of the high pile cap increased gradually under cyclic loading at all three amplitude levels. The largest increase in tilt occurred during the initial cycles following an increase in load amplitude. Under constant-amplitude unidirectional cyclic loading, the tilt angle exhibited a steady increase with cycle count. When the load amplitude was reduced to $0.2F_u$, the sand surrounding the piles underwent additional compaction under sustained low-amplitude cyclic loading, resulting in a slight increase in overall soil stiffness and a corresponding reduction in cap tilt by approximately 0.28° .

Conclusions This study integrates centrifuge physical modeling and finite element numerical simulations to examine the behavior of high-pile cap foundations subjected to horizontal monotonic and cyclic loading conditions. The research clarifies the load transfer trajectories and distribution mechanisms among piles within the group. In addition, the study quantitatively evaluates the influence of cycle number and load amplitude on horizontal displacement, soil stiffness, cumulative deformation, and tilt. Based on the results, the following engineering recommendations are proposed: 1) Project construction efficiency can be improved by optimizing the bearing capacity through rational reduction in pile length or pile number without compromising overall safety. 2) The design phase should give particular attention to the bearing capacity of piles oriented in the predominant wind and wave directions. 3) Although the number of loading cycles affects the unloading stiffness of the pile cap, the influence of load amplitude is more significant; therefore, foundation stiffness variations under extreme environmental conditions require careful consideration.

Key words: high-rise cap foundation; centrifugal model tests; lateral monotonic and cyclic loading; load transfer and distribution; cumulative displacement

(编辑 张 琼)

引用格式: Liu Xianpeng, Chen Chao, Hua Xugang, et al. Centrifuge tests on load bearing characteristics of high-rise cap foundation of offshore wind turbines under lateral loads[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 276–288. [刘现鹏, 陈超, 华旭刚, 等. 水平荷载下海上风力机高桩承台基础承载特性离心机试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 276–288.]