

# 砂土地基中海上风机桩桶复合基础 水平承载特性模型试验研究

樊 鸽<sup>1</sup>, 范庆来<sup>1</sup>, 尹佳琪<sup>2</sup>, 朱加辉<sup>1</sup>

(1.鲁东大学 水利土木学院,山东 烟台 264039;2.秦能齐源电力工程设计有限公司,济南 250102)

**摘要:**作为一种新型海上风机基础形式,砂土地基中桩桶复合基础的承载机理尚不明确。开展物理模型试验,系统研究了桩桶复合基础在不同荷载条件下的水平承载特性。通过单向静载试验,研究了桶结构直径、桶高以及加载高度等对基础水平承载力的影响。通过双向循环加载试验,考察了循环荷载幅值、不同循环荷载施加次序对桩桶复合基础累积位移变形规律的影响。试验结果表明,桩桶复合基础在单向静力加载下的水平承载力高于单桩基础,并且随桶结构直径的增大而增加,随加载高度的减小而增加。在双向循环加载试验中,桩桶复合基础的桩顶水平位移累积速率明显低于单桩基础,不同循环幅值的加载次序对基础的水平累积位移变形规律具有显著影响,前期较大幅值循环荷载作用下,后期较小幅值荷载引起的累积位移量较小,但总的位移量要大于先施加小幅值、后施加大幅值的循环荷载次序。

**关键词:**桩桶复合基础;海上风机;水平承载特性;物理试验;循环荷载

**中图分类号:**TU476 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2025)01-0001-08

我国海上风能资源丰富,大力发展海上风电是实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和目标的重要保障。海上风电向深远海、大容量发展,这对海上风机传统单桩基础的刚度、承载力以及稳定性提出了严峻的挑战。为此,工程界提出了一种新型的桩桶复合基础,它通过在近地表单桩桩体上设置桶形基础以充分调动浅层土抗力(如图1所示),以求在成本增加较少情况下提高桩基刚度,有效降低桩头位移。



图1 桩桶复合基础

Fig.1 Pile-bucket hybrid foundations

目前,国内外学者对桩桶复合基础的承载特性进行了一系列的研究。在数值计算方面,刘润等<sup>[1]</sup>对复合加载模式下桩桶复合基础破坏包络面进行了研究,分析了桩桶共同承载机制。Chen等<sup>[2]</sup>对于砂土中桩桶复合基础分别在静力和动力加载条件下的力学响应进行了有限元模拟。Zou等<sup>[3]</sup>对桩桶复合基础在水平荷载、弯矩和扭矩组合加载下的力学行为进行了研究,发现扭矩对于基础的水平承载力有显著的弱化效应。孙艳国等<sup>[4-5]</sup>通过数值计算分别探讨了砂土和黏土地基中桩桶复合基础的承载机理,并研究了复合基础的极限承载力和破坏包络面。在模型试验方面,Zhang等<sup>[6]</sup>研究了砂土相对密度和桩桶直径比对于桩桶复合基础水平承载力和周围土压力的影响。文献[7-8]对砂土地基中桩桶复合基础承载力进行了离心试验,证明了其在水平承载特性方面的优势。文献[9-11]开展了软土地基中桩桶复合基础的大比尺模型试验研究,研究结果表明水平荷载主要由桶结构承担,当桩桶复合基础受到循环荷载时,相对于单桩,其周围土体刚度

收稿日期:2024-08-10;修回日期:2024-10-11

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2019MEE010);烟台市科技创新发展计划项目(2021XDHZ071);鲁东大学研究生创新项目(IPGS2024-081)

通信作者简介:范庆来(1977—),男,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为海洋岩土工程。E-mail:7154@ldu.edu.cn

和强度退化速率较低。

这些工作对于理解桩桶复合基础水平承载特性起到了一定推动作用,但是目前针对桩桶复合基础在不同荷载条件下的水平承载特性的研究尚不充分,所施加的循环荷载一般为单一幅值,没有考虑不同幅值循环荷载施加次序的影响。因此本文将通过室内物理模型试验开展砂土地基中海上风机桩桶复合基础的水平承载特性研究,从而为工程应用提供一定参考。

## 1 试验准备与方案

本试验采用 JZG-YZY-50 型海洋桩基模型试验系统进行物理模型试验,该系统主要由底部安装平台、岩土箱、反力架及导向装置、电动伺服控制加载系统、测试数据采集系统等部分组成,如图 2 所示。



图 2 JZG-YZY-50 型海洋桩基模型试验系统

Fig.2 The JZG-YZY-50 model test system of offshore wind turbines

岩土箱内部尺寸为  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 。试验所用砂样为中国 ISO 标准砂,其主要物理指标见表 1。制备试验用砂土地基时,采用砂雨法,试验砂从固定高度均匀落下并分层夯实。试验通过控制土体的相对密实度来保证每次试验的砂土性质一致,每次试验确保控制相对密实度  $D_r$  的误差在 3% 以内。为避免模型箱底部边界效应影响,确定最低填砂高度为 90 cm。

表 1 砂土性质

Tab.1 Sandy soil properties

土质	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最小干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	实际干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	相对密实度 $D_r/\%$
砂土	1.958 6	1.548 3	1.737 0	51.86

模型试验采用相似比为 1 : 50。桩桶复合基础材料选用 304 不锈钢,桩底不封口,壁厚 2 mm,桩径 8 cm,桩长 150 cm,埋深 40 cm。模型桶由桶盖、桶壁、肋板和桶箍构成,桶壁与桶盖厚度均为 2 mm,桶盖上预留小孔用于安装过程中排气;肋板高 6 cm,厚 2 mm,成直角三角形;桶箍高 6 cm,厚 2 mm,外径 8.5 cm,在桶箍中间均匀布置 4 个螺栓。模型桩与模型桶通过桶箍上的螺栓顶丝固定连接,螺杆旋转直至接触并传递压力至桩模型<sup>[9]</sup>,这种连接方式与直接刚性连接相比更好地模拟了实际工程中桩桶之间的混凝土连接。细部结构如图 3 所示,其中  $D$  为桶径, $L$  为桶埋深, $d$  为桩径, $l$  为桩埋深。本试验桩、桶细部图如图 4 所示,以图 4(b) 为标准组,对比研究桶径、桶高等变量对桩桶复合基础承载能力的影响。



图 3 模型桶结构与模型符号说明

Fig.3 Description of model bucket and the model bucket

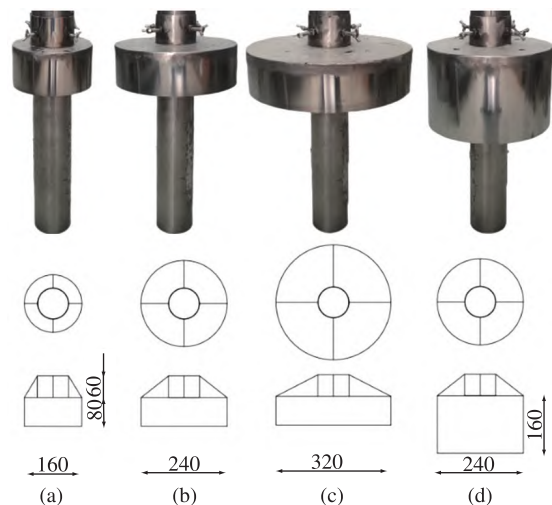


图 4 桩桶复合基础模型(单位:mm)

Fig.4 The model of pile-bucket hybrid foundation(Unit:mm)

试验加载示意图如图 5,桩桶复合基础通过电动伺服控制加载系统进行水平加载,试验过程采用 S 型力传感器监测水平荷载,采用拉线位移传感器监测加载点处桩桶复合基础的水平位移,并采用倾角传感器监测基础倾斜角度,各传感器输出电压信号后,由数据采集系统记录并转换处理传感器信号。水平荷载由水平电动缸通过力传感器和传力杆传递至加载点,其中为了避免在传递荷载的过程中出现弯矩的传递,传力杆采用关节轴承与套在模型桩上的连接套管连接(图 6),关节轴承与垂直传力杆的空心滑动槽通过连接栓相接。试验过程中,在空心滑动槽与关节轴承中适当涂抹润滑油以减少摩擦误差。

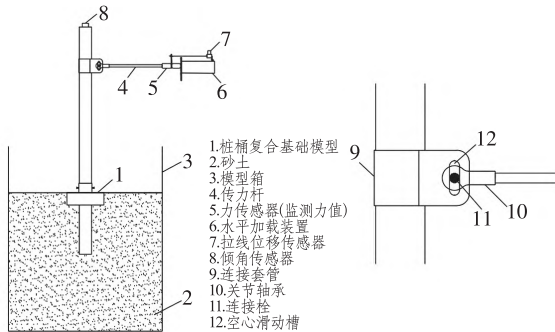


图 5 试验加载整体示意图

Fig.5 Overall diagram of test loading



图 6 模型与加载装置的连接细部图

Fig.6 Detailed drawings of the connection between the model and the loading device

### 1.1 单向静力加载

如表 2 所示,单向静力加载试验共设置 9 组工况来比较不同桶径、桶高、加载高度对桩桶复合基础水平承载力的影响。由于参考单桩试验加载过程中的位移荷载曲线,并无明显拐点,定义桩桶复合基础旋转 2°时对应的荷载值为基础承载能力极限状态,旋转 0.5°时对应荷载值为正常使用极限状态<sup>[7]</sup>。为更好地模拟静力加载模式,试验采用位移控制加载,设置加载行程 40 mm,加载时间 5 min,采样频率 2 Hz。

表 2 单向静力加载试验工况设置

Tab.2 Summary of unidirectional static loading tests

静载工况	加载位移 y/mm	模型桩直径 d/cm	模型桩埋深 l/cm	模型桶	加载高度 h/cm
工况 1	40	8	40		82.5
工况 2	40	8	40	①D=16,L=8	82.5
工况 3	40	8	40	②D=24,L=8	82.5
工况 4	40	8	40	③D=32,L=8	82.5
工况 5	40	8	40	④D=24,L=16	82.5
工况 6	40	8	40		72.5
工况 7	40	8	40		62.5
工况 8	40	8	40	②D=24,L=8	72.5
工况 9	40	8	40	②D=24,L=8	62.5

### 1.2 双向循环加载

为了模拟基础承受长期风浪等循环荷载影响的环境,共设置 4 组试验工况(如表 3),开展双向力控制循环加载试验,对桩桶复合基础在高周循环加载作用下的承载特性与累计变形规律进行研究;并改变不同幅值的加载顺序以探究其桩土相互作用与受力机理,探索海上风机桩桶复合基础的长期抗疲劳能力。其中工况 3、4 模拟了风暴潮初期到中期幅值变大的情况和风暴潮中期到后期幅值变小情况,通过改变不同循环幅值分级加载的顺序来进行对比分析。

考虑到试验循环加载的时间成本以及实际环境中风、波浪等循环荷载的作用频率(0.05~0.2 Hz),选取循环加载频率为 0.1 Hz,循环幅值为±50 N,确定采样频率为 2 Hz,循环周期 10 000 次。

表 3 双向力控制循环加载试验工况情况

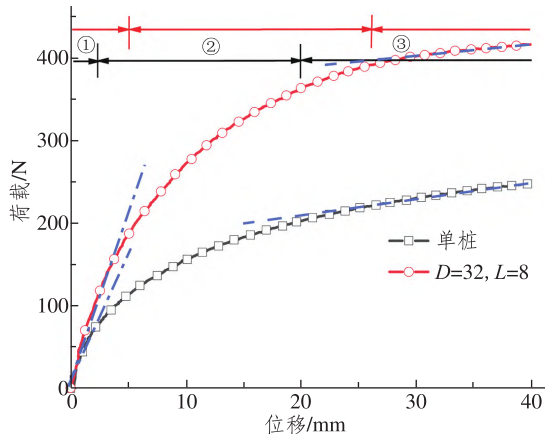
Tab.3 Summary of bidirectional cyclic loading tests under force control

力控制循环	力幅值	周期	频率 /Hz	采样频率/Hz	模型桶
工况 1	50 N	10000 次	0.1	2	单桩
工况 2	50 N	10000 次	0.1	2	②D=24,L=8
工况 3	A:100 N 1500 次+ B:50 N 7000 次		0.1	2	②D=24,L=8
工况 4	A:50 N 7000 次+ B:100 N 1500 次		0.1	2	②D=24,L=8

## 2 单向静力加载分析

图 7 为单桩与 D=32,L=8 的桩桶复合基础的荷载-位移曲线对比,随着加载位移的增大,桩桶复合基础与单桩基础的荷载均增大。加载全程可分为三个阶段:在曲线的第一阶段,基础与地体系呈现相对稳定状态,荷载-位移曲线呈线性增长,基础的变形属于弹性变形;在第二阶段,荷

载-位移曲线不再呈线性增长,基础变形转为弹塑性变形;在第三阶段,荷载-位移曲线转变为斜率远小于第一阶段曲线的线性增长,表现出明显的刚度软化,基础与地基体系发生塑性破坏,承载能力到达极限。整个破坏过程荷载-位移曲线未出现明显拐点,属渐变型破坏模式。



注:①②③分别代表加载全程的三个阶段。

图 7 单桩与桩桶复合基础的荷载-位移曲线对比

Fig.7 Comparison of load-displacement curves for monopile foundation and pile-bucket foundation

如图 7 所示,随着水平位移的增加,单桩基础对比桩桶复合基础更早进入第二阶段,且桩桶复合基础尺寸越大(即桶径与桶高越大),第一阶段中的线性斜率越大,第二阶段中的非线性发展越缓慢,即基础的初始刚度越大。

图 8 为不同工况下基础的荷载-位移曲线,由图中可以看出桩桶复合基础的承载能力均强于单桩基础。因此,桶结构的加入增加了基础与地基的接触面积,使基础与地基体系更为稳定,相同荷载作用下桩桶复合基础相比单桩基础的变形更小,承载能力更高,基础受力状态更优。

在相关研究<sup>[12-14]</sup>中将基础旋转倾角视为评价海上风机承载能力的最关键因素,单桩基础和桩桶复合基础的破坏机理均为过度旋转。试验设定 4 组工况研究其极限承载力并进行对比分析,结果见表 4。试验发现,1~4 号桩桶复合基础极限承载力较单桩基础分别提高了 21.1%、38.6%、68.9%和 76%。1~3 号模型基础与单桩相比较发现,桶结构的加入对基础承载能力提升的同时,随着桶径的不断增大,基础极限承载力也呈增长趋势且增长率近似线性增长,旋转中心位置不断上移,这同样说明桩桶复合基础中桶结构的加入能够有效提高基础刚度。

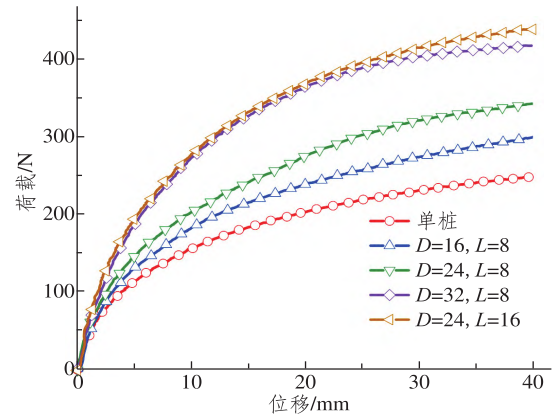


图 8 不同工况下基础的荷载-位移曲线

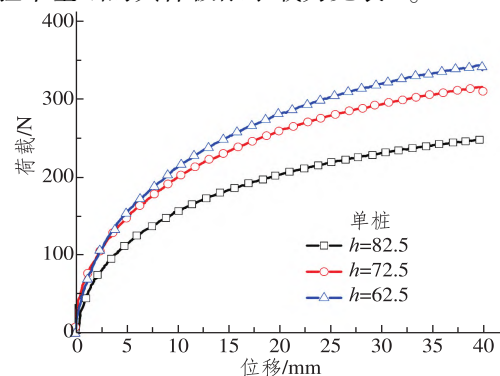
Fig.8 The load-displacement curves of foundations under different conditions

表 4 单桩与桩桶复合基础极限承载力分析

Tab.4 Ultimate bearing capacity analysis of monopile foundation and pile-bucket foundation

模型	位移/mm (0.5°)	荷载/N (0.5°)	位移/mm (2°)	荷载/N (2°)	旋转中心/cm (砂面以下)
单桩	9.855	154.22	39.42	246.54	30.35
1号 D=16,L=8	9.962	182.11	39.85	298.37	31.47
2号 D=24,L=8	9.755	200.36	39.02	341.39	29.25
3号 D=32,L=8	9.615	266.02	38.46	415.76	27.64
4号 D=24,L=16	9.720	271.01	38.88	434.94	28.17

图 9 为单桩基础与桩桶复合基础标准组模型在不同加载高度下的水平位移荷载曲线。单桩基础结果如图 9(a) 所示,对比单桩基础在加载高度为 82.5 cm 的承载状态,加载高度为 72.5 和 62.5 cm 时的极限承载能力分别提高了 25.1% 和 32.9%。桩桶复合基础结果如图 9(b) 所示,相比桩桶复合基础在加载高度为 82.5 cm 的承载状态,加载高度 72.5 和 62.5 cm 时的极限承载能力提高了 20.8% 和 29.9%。基础极限承载力随加载高度的减小而增大,桩桶复合基础在面对加载高度的变化时表现得更为稳定,因此桩桶复合基础在长期承受来自不同高度的荷载时表现更优。试验中基础的具体极限承载力见表 5。



(a) 单桩基础

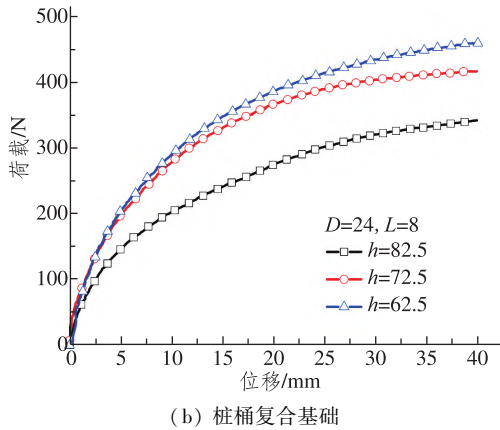


图 9 单桩与复合基础模型不同加载高度下的水平荷载位移曲线

Fig.9 Horizontal load-displacement curves of monopile foundation models and pile-bucket foundation models under different loading heights

表 5 不同加载高度的模型极限承载力分析  
Tab.5 Ultimate bearing capacity analysis of test models under different loading heights

模型	加载高度 h/cm	位移/mm (2°)	荷载/N (2°)	旋转中心/cm (砂面以下)
单桩	82.5	39.42	246.54	30.35
	72.5	36.69	309.64	32.58
	62.5	32.78	327.99	31.37
2号 D=24, L=8	82.5	39.02	341.39	29.25
	72.5	35.89	411.30	30.27
	62.5	32.92	443.81	31.77

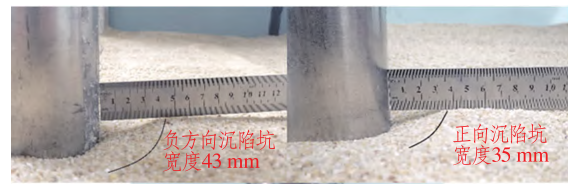
### 3 力控制循环加载分析

#### 3.1 力控制循环加载对比分析

力控制循环加载试验共设计 4 组工况,前两组对单桩和桩桶复合基础 2 号模型进行了万次双向力控制循环加载,循环幅值±50 N,频率 0.1 Hz,采样频率 2 Hz。图 10 展示了试验加载后基础-地基的变形情况。单桩基础沉陷坑宽度正负方向分别为 43 和 35 mm,而桩桶复合基础变形较小且两侧沉陷坑尺寸差异显著减小,这表明桶的加入确实能有效减小基础-地基体系的变形。

图 11 为单桩与桩桶复合基础 2 号模型在力控制循环试验中的位移时程曲线,两者均显示出在正方向上的位移累积现象。图 12 则进一步展示了基础的桩顶平均累积位移随周期的变化情况。从图 12 中可以明显看出,单桩基础的平均累积位移整体上高于桩桶复合基础,并且两种基础

在初始阶段都表现出较后期更快的塑性应变累积速度。这一现象与砂土在循环作用下的变形响应密切相关。张宏博<sup>[15]</sup>在循环作用下砂土的三轴排水剪切试验也体现了这一现象。通过对比两组试验发现,桩桶复合基础在控制塑性应变方面表现得更为出色,特别是在试验的初期阶段。具体来说,在循环的初始阶段,桩桶复合基础的桩顶水平位移累积增速显著低于单桩基础,这表明桩桶复合基础在初期阶段就能更有效地减小桩头的位移累积。因此,它为后期承受的高周循环荷载提供了更大的可变形空间,从而增强了基础的结构耐久性。



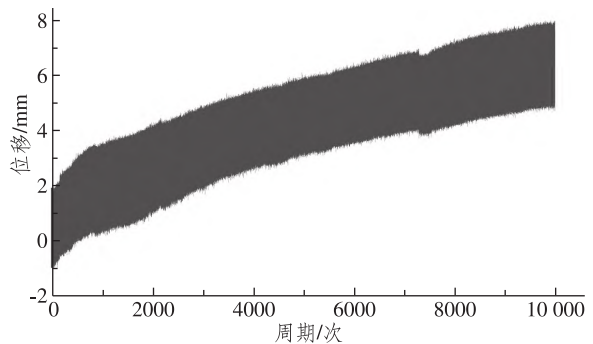
(a) 单桩基础



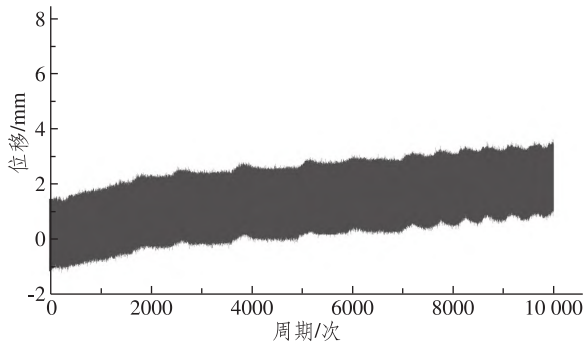
(b) 桩桶复合基础 2 号模型

图 10 循环加载后基础-地基变形情况

Fig.10 Deformation of foundation-sand system after cyclic loading



(a) 单桩基础



(b) 桩桶复合基础 2 号模型

图 11 力控制循环加载位移时程曲线

Fig.11 Displacement-time history curves of cyclic loading tests under force control

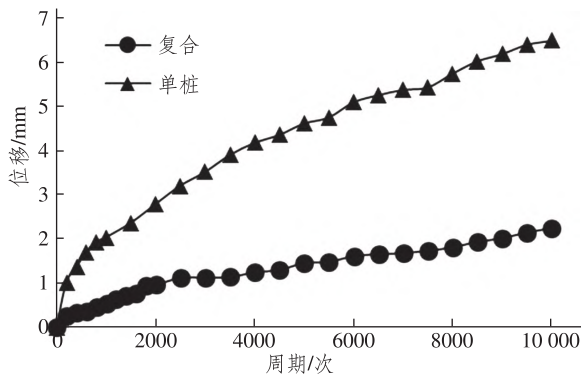


图 12 平均累积位移对比

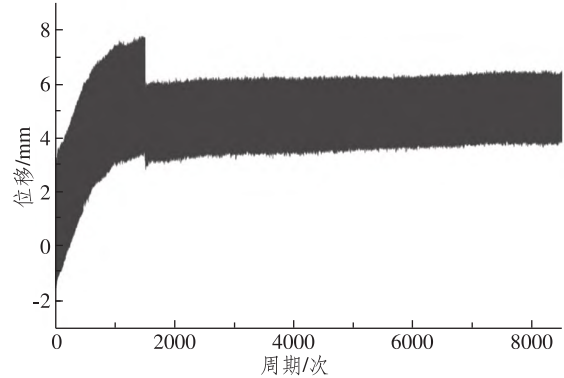
Fig.12 Comparison of mean cumulative displacement

### 3.2 不同循环幅值改变加载顺序的影响分析

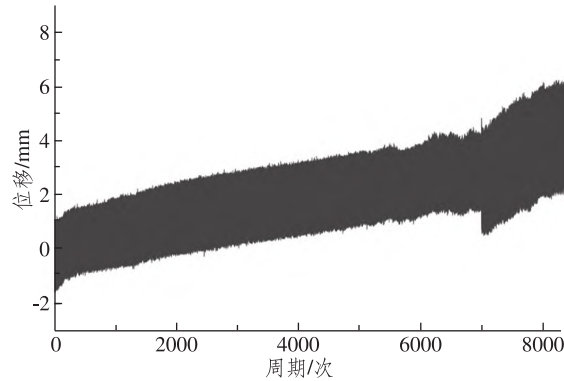
为了探究桩桶复合基础在不同循环幅值加载顺序下的影响,实验设计了第 3、4 组工况,用以模拟风暴潮、台风等恶劣环境。试验实施了两个阶段的循环荷载:A 阶段(100 N-1500 次)和 B 阶段(50 N-7000 次),并改变加载顺序进行连续加载,以研究海上风机桩桶复合基础在此类恶劣环境下的承载特性。

图 13 为桩桶复合基础的位移时程曲线,图 14 为不同循环幅值顺序平均累积位移对比。对比 100 N 和 50 N 的循环幅值,发现 50 N 时位移振幅和位移累积均较小。具体来说,如图 13、14,在荷载组合 A+B 中,A 荷载时位移振幅为 4 mm,产生的平均累积位移为 5.814 mm,B 荷载时位移振幅 2 mm,产生的平均累积位移为 0.593 mm;在荷载组合 B+A 中,B 荷载时位移振幅为 2.5 mm,产生的平均累积位移为 2.631 mm,A 荷载时位移振幅为 3.5 mm,产生的平均累积位移为 1.812 mm。第二阶段加载产生的位移振幅相较于原始状态有

所减小,这归因于第一阶段循环使砂土地基致密。因此,第二阶段位移振幅减小,验证了中密砂地基的循环致密现象。由于砂土特性,基础在第一阶段位移累积增长较快,第二阶段则增速放缓。



(a) A:100 N-1500 次+B:50 N-7000 次



(b) B:50 N-1500 次+A:100 N-7000 次

图 13 位移时程曲线

Fig.13 Displacement-time history curve

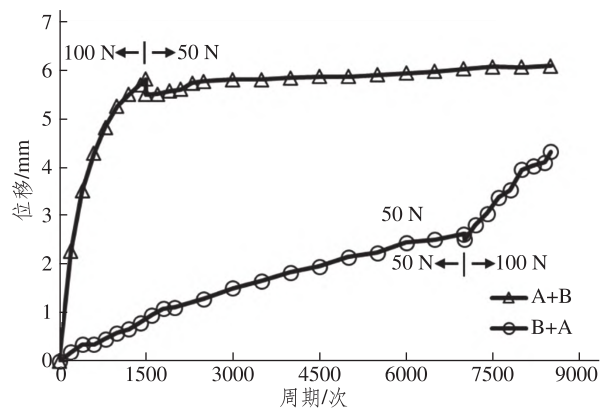


图 14 不同循环幅值顺序平均累积位移对比

Fig.14 Comparison of mean cumulative displacement for different cyclic amplitude sequences

如图 14 所示,无论循环顺序如何,幅值变化时平均累积位移均呈现负增长,这与 Barari 等<sup>[16]</sup>对单桩基础的数值模拟结果类似。这一现象可归

由于前一阶段循环作用导致基础在正方向产生塑性应变和循环致密现象。由于正方向砂土更密实,力控制下基础只需微小位移即可达到循环幅值,随后向负方向移动,导致平均累积位移相较于前期有所下降。通过对比不同循环幅值加载顺序发现,组合 B+A 产生的平均累积位移明显小于组合 A+B,仅为后者的 71%。这表明:在实际工程中,若前期循环荷载小于后期,基础变形较小;反之,则变形较大。因此,循环幅值的加载顺序对桩桶复合基础的水平承载能力和变形特性具有显著影响。

## 4 结论

本文通过开展单向静载和双向循环加载模型试验,系统研究了桩桶复合基础在不同荷载条件下的水平承载特性。主要结论如下。

1) 桩桶复合基础在单向静力加载下的荷载-位移曲线与单桩基础相似,均可划分为初始线性阶段、非线性发展阶段以及塑性破坏阶段。桶结构的加入增大了基础与地基的接触面积,从而增强了基础的刚度,因此在相同的荷载作用下,桩桶复合基础相对于单桩基础具有更小的变形量。

2) 桩桶复合基础在单向静力加载下的水平承载力高于单桩基础,并且随着桶结构直径的增大而增加,随加载高度的减小而增大。

3) 在双向循环加载试验中,桩桶复合基础的桩顶水平位移累积速率明显低于单桩基础,不同循环幅值的加载次序对基础的水平累积位移变形规律具有显著影响,前期较大幅值循环荷载作用下,后期较小幅值荷载引起的累积位移量较小,但总的位移量要大于先施加小幅值、后施加大幅值的循环荷载次序。

### 参考文献:

- [1] 刘润,李宝仁,练继建,等.海上风电单桩复合筒型基础桩筒共同承载机制研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(5):429-437.
- [2] CHEN D,GAO P,HUANG S S,et al.Static and dynamic loading behavior of a hybrid foundation for offshore wind turbines[J].Marine Structures,2020,71:102727.
- [3] ZOU X J,CHANG H,YANG Z J.Lateral bearing behavior and failure mechanism of monopile-bucket hybrid foundations on sand deposit[J].Ocean Engi-

neering,2023,280:114749.

- [4] 孙艳国,许成顺,杜修力,等.海上风电桩-筒复合基础承载性能研究[J].工程科学学报,2023,45(3):489-498.
- [5] 孙艳国,许成顺,杜修力,等.海上风电复合基础承载性能对比研究[J].工程科学学报,2022,44(6):1098-1107.
- [6] ZHANG X,YU D M,ZHU K F,et al.The horizontal bearing characteristics and microscopic soil deformation mechanism of pile-bucket composite[J].Applied Sciences,2024,14:907.
- [7] WANG J Y,SUN G D,CHEN G S,et al.Finite element analyses of improved lateral performance of monopile when combined with bucket foundation for offshore wind turbines[J].Applied Ocean Research,2021,111:102647.
- [8] LI X Y,ZENG X W,WANG X F.Feasibility study of monopile-friction wheel-bucket hybrid foundation for offshore wind turbine[J].Ocean Engineering,2020,204:107276.
- [9] 倪定宇.软土中大直径桩-筒基础水平承载的大比尺模型试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2020.
- [10] SHI L,YUAN Z Y,YUAN Z H,et al.On load-bearing and soil-reacting characteristics of hybrid pile-bucket foundations subjected to static horizontal loading[J].Marine Structures,2022,84:103222.
- [11] FU Z N,WANG G S,YU Y M,et al.Model test study on bearing capacity and deformation characteristics of symmetric pile-bucket foundation subjected to cyclic horizontal load[J].Symmetry,2021,13:1647.
- [12] PAN X D,HE B,XU S W,et al.Effect of reinforced bucket on bearing capacity and natural frequency of offshore wind turbines using pile-bucket foundation[J].Advances in Civil Engineering,2022,1:9569102.
- [13] 邹新军,胡建锋,杨紫健.上砂下黏地层中桩-筒复合基础 V-H 承载特性[J].防灾减灾工程学报,2024,44(2):415-425.
- [14] 刘润,祁越,李宝仁,等.复合加载模式下单桩复合筒形基础地基承载力包络线研究[J].岩土力学,2016,37(5):1486-1496.
- [15] 张宏博.长期往复荷载作用下无黏性材料累积变形研究[D].上海:同济大学,2006.
- [16] BARARI A,BAGHERI M,ROUAINIA M,et al.Deformation mechanisms for offshore monopile foundations accounting for cyclic mobility effects[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2017,97(6):439-453.

## Model Test on Horizontal Bearing Characteristics of Pile-Bucket Hybrid Foundation for Offshore Wind Turbine in Sandy Soil

FAN Ge<sup>1</sup>, FAN Qinglai<sup>1</sup>, YIN Jiaqi<sup>2</sup>, ZHU Jiahui<sup>1</sup>

(1.School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China;

2.Qinneng Qiyuan Electric Power Engineering Design Co., Ltd., Jinan 250102, China)

**Abstract:** As a new offshore wind turbine foundation, the bearing mechanism of the pile-bucket hybrid foundation in sandy soil is still unclear. Physical model tests were carried out to systematically study the horizontal bearing characteristics of the pile-bucket hybrid foundation under different loading conditions. Through the unidirectional static loading tests, the effects of bucket diameter, bucket height and loading height on the horizontal bearing capacity of the foundation were investigated. Through the bidirectional cyclic loading tests, the effects of cyclic load amplitude and different cyclic load application sequences on the cumulative displacement and deformation patterns of the pile-bucket hybrid foundation were investigated. The test results show that the horizontal bearing capacity of the pile-bucket hybrid foundation under unidirectional static loading is higher than that of the monopile foundation, and it increases with the increase of the diameter of the bucket, and increases with the decrease of the loading height. In the bidirectional cyclic loading test, the accumulation rate of horizontal displacement of top of the pile-bucket hybrid foundation is obviously lower than that of monopile foundation, and the loading sequence of different cyclic amplitude has a significant effect on the horizontal cumulative displacement and deformation law of the foundation. In the case of larger amplitude cyclic loads in the earlier stages, the cumulative displacements due to smaller amplitude loads in the later stages are smaller, but the total displacement is larger than the cyclic loading sequence with small magnitude applied first and large magnitude applied later.

**Keywords:** pile-bucket hybrid foundation; offshore wind turbines; load-bearing characteristics; physical tests; cyclic loading