DOI：10.11779/CJGE2022S2046

基于离心试验和数值模拟的加翼单桩水平承载性能研究

李 波[1]，李 炜[2]

（1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室，湖北 武汉 430010；2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江 杭州 310014）

摘 要：采用离心模型试验和三维有限元法，探讨海上风机基础的大直径单桩及加翼单桩的水平承载性能。共进行 3 组离心模型试验，得到层状地基中不同翼板长度的水平承载性能随分级加载过程的变化曲线，以及相应的桩身弯矩分布规律。基于离心模型试验的基本参数建立三维有限元模型，采用层状地基模拟离心场中地基的特性。计算结果与离心模型测试结果的对比验证模型建立的合理性，并进一步研究地层特性对加翼单桩的水平承载性能的影响。研究结果表明：大直径单桩基础加装稳定翼后，能充分发挥近地表浅层土的土抗力，可显著提高单桩基础的水平承载性能；增大翼板长度，可有效提高其水平承载力。

关键词：桩基；风机基础；水平承载力；离心模型试验；三维有限元

中图分类号：TU473 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)S2－0211－04

作者简介：李 波(1982—)，男，山东泰安人，博士，正高级工程师，主要从事岩土工程和离心模型试验技术方面的研究。E-mail: libo_auliso@126.com。

Centrifuge model tests and numerical simulations of horizontal bearing behaviors of monopiles with wings

LI Bo[1], LI Wei[2]

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. HYDRO CHINA Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The horizontal bearing behaviors of a large-diameter monopile and that with wings for offslore wind turbines are studied through the centrifuge tests and three-dimensional finite element methods. Three centrifugal model tests are conducted on the purpose of exploring the variation curves of the horizontal bearing capacity of the monopiles with different wings during the stepped horizontal loading process, and the distribution laws of their bending moment. Based on the fundamental parameters of the centrifugal model tests, three-dimensional finite element models are established to carry out the comparison with the results of the centrifuge tests. The layered foundation is adopted to factually simulate the strength features of foundation in the centrifuge field. Comparison of the calculated results with the measured results of the centrifugal model tests identifies the rationality of the established model. Furthermore, the effects of the foundation properties on the horizontal bearing capacity are studied through the numerical method. The results show that the horizontal bearing behaviors of the large-diameter monopile with wings are much more than those without wings because of the full use of the soil resistance of the shallow layer of the foundation. Increasing the length of the wing plate can effectively improve its horizontal bearing capacity.

Key words: pile foundation; wind turbine foundation; horizontal bearing capacity; centrifugal model test; 3D finite element

0 引 言

加翼单桩基础作为一种新型的基础型式已在国内外的海上风电场建设中得到应用[1-2]。加翼单桩基础是在海上风力发电机原有的大直径单桩基础上，在泥面下加装稳定翼钢板，利用近地表浅层土的土抗力增强基础的水平承载性能。海上风机基础所处海洋环境的荷载复杂[3]，在波浪、潮流、海风等多种复杂荷载的耦合作用下，深入开展翼板和桩组成的风机基础与地基相互作用机理和加翼单桩的水平承载性能研究，是推广加翼单桩基础应用的前提条件[4]。

目前，对于海上风机基础大直径加翼单桩的研究相对较少，需要更多的理论分析和试验来验证其有效性。在涉及到岩土工程结构问题的研究中，最为常用的工具是数值分析方法，但由于岩土材料工程特性和结构形式的复杂性，加之数值分析方法本身所固有的

收稿日期：2022－12－06

某些缺陷，例如材料本构模型与实际的差异、计算条件的简化等。单纯依靠数值分析方法尚不足以对工程设计方案进行充分的论证，因此需要采用物理模型试验的方法对结构的应力、变形特征进行深入的研究。离心模型试验采用在高离心场下的小尺寸模型模拟原型应力场，比原型试验更容易控制试验进程、开展平行试验以等优点[5-6]，所以越来越多地采用离心模型试验和数值模拟相结合的方法探究新型基础型式的可行性。

本文首先开展 3 组室内离心模型试验研究不同翼板尺寸的加翼单桩水平承载性能，并通过三维有限元法进行数值模拟，进一步探讨不同地层条件下新型桩基型式的水平承载力及其与翼板尺寸的关系。

1 加翼单桩离心模型试验

1.1 试验方案

以江苏如东某潮间带风电场桩基为原型，为了增强桩基的水平承载力，拟在地面以下桩身加装翼板。本次离心模型试验旨在分析新型加翼单桩与常规大直径单桩在加固机制和控制水平位移方面的差异。原型单桩设计总长 48 m，其中，地上 9 m，自桩顶向下，桩径 4.3 m 逐渐增大至 4.7 m；地下 39 m，桩径为 4.7 m。采用钢管桩，弹性模量 210 GPa，泊松比 0.27。采用层状地基，共设置 3 组离心模型试验，试验方案见表 1 和图 1，地层参数如表 2 所示。

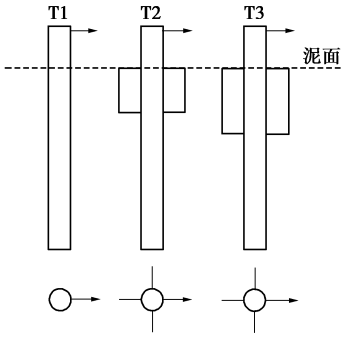

图 1 离心模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of centrifugal model tests

表 1 离心模型试验方案

Table 1 Schemes of centrifugal model tests

编号	试验说明
T1	大直径单桩试验，研究层状地基中大直径单桩的水平承载性能
T2	加翼单桩试验，翼板尺寸为 $2D\times D$（长×宽），研究加翼单桩的水平承载性能
T3	加翼单桩试验，翼板尺寸为 $3D\times D$，研究加翼单桩的水平承载性能

表 2 离心模型土层物理力学性质参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of layered soils

名称	层厚 /cm	含水率 /%	干密度 /(g·cm^{-3})	强度指标	
				c/kPa	φ/(°)
粉砂	10	23	1.55	3	30.7
粉土	9	25	1.55	2	24.7
淤泥质粉质黏土	13	41	1.25	36	12.8
粉质黏土	17	21	1.43	46	19.3
粉砂	11	23	1.55	3	30.7

1.2 试验设备和传感器

本次试验采用长江科学院 CKY-200 现代化多功能岩土离心机，其主要技术指标：有效容量 200 gt，最大加速度 200g，有效半径 3.7 m，模型箱尺寸为 100 cm×40 cm×80 cm（长×宽×高）。试验采用的传感器包括 14 个应变片（对称分布在桩身量测）和 1 个激光位移传感器。传感器布置和应变片位置分别如图 2 所示，传感器型号详细说明见表 3。

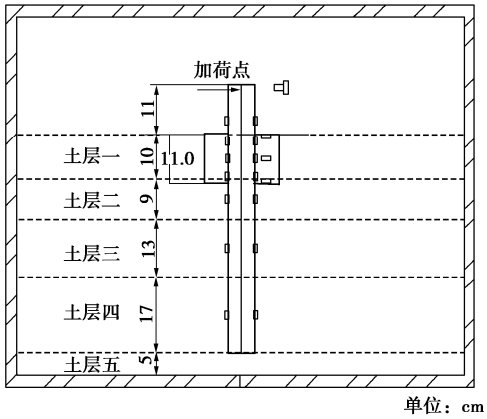

图 2 模型桩尺寸及传感器布置示意图

Fig. 2 Sketch of dimension of pile and arrangement of measuring sensors

表 3 传感器型号说明

Table 3 Specifications of transducers

传感器名称	型号	型号说明
激光位移计 (LDS)	CP24MHT80	量程 120 mm，精度 20 μm
应变片	BX120-2BA	栅长 1 mm，应变系数 2.13±1%，最大变形 2%，电阻 120±0.5Ω

1.3 模型材料和加载过程

（1）模型桩

根据离心模型试验的相似理论，并考虑到模型箱尺寸和边界效应，以及模型制作的可行性和试验过程的可实施性，本次试验离心加速度确定为 80g。根据桩身抗弯刚度相似，模型桩的桩长为 60 cm，桩内径 D 为 50 mm，壁厚 2.65 mm。

（2）加载过程

加速度逐级增大至 80*g*，运行 30 min 待变形稳定后施加水平荷载，每级荷载增加约 0.4～0.8 kN，加载时间控制标准为水平位移变化率小于 0.1 mm/min。水平荷载加载历程如图 3 所示（以 T2 为例）。

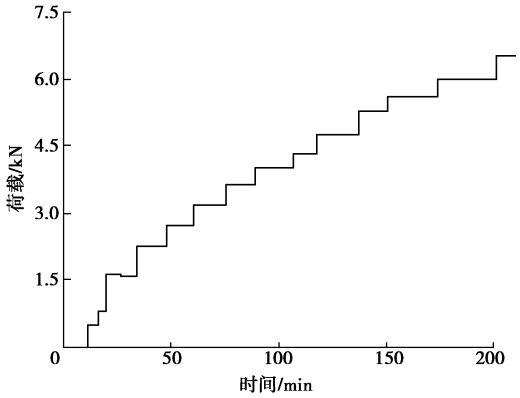

图 3 离心机运行过程中水平荷载施加过程

Fig. 3 Application of horizontal load during operation of centrifuge

1.4 试验结果及分析

（1）荷载－水平位移曲线

图 4 为离心模型试验的荷载－水平位移曲线，T1，T2，T3 的翼板长度分别为 0，2*D*，3*D*。分析表明，随着翼板长度逐渐增大，荷载位移曲线的转折点对应的水平荷载和水平位移逐渐变大，桩基水平承载性能逐渐增大，当水平位移为 5 mm 时，T1 的水平荷载为 1.68 kN，T2 为 2.22 kN，增大 32%，T3 为 2.87 kN，增大 71%。

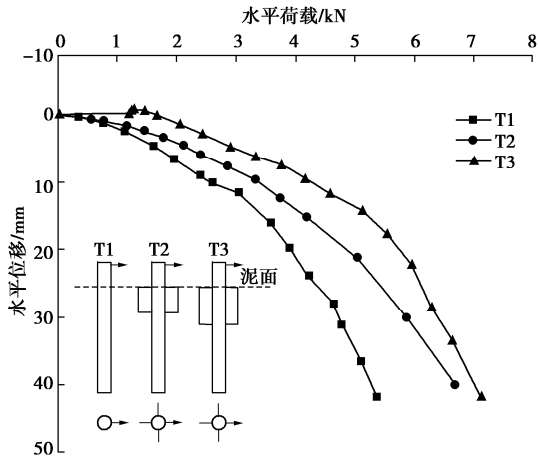

图 4 荷载－水平位移曲线

Fig. 4 Load-lateral displacement curves

（2）桩身弯矩

图5为离心模型试验两种不同水平荷载作用下（水平荷载约1.1，3.7 kN）的桩身弯矩。桩身弯矩由试验测量得到的应变通过材料力学相关公式计算得到。假定深度方向以桩顶为起点，桩顶0 cm，桩底端60 cm。分析表明，沿桩身自上而下，弯矩先增大后减小，当深度为25.5 cm时，弯矩达到最大值；当荷载约1.1 kN时，T1，T2弯矩值基本一致，而T3明显桩身中部的翼板附件的弯矩值偏大；当水平荷载约3.7 kN时，T3弯矩值明显大于T1和T2值，增大幅度约为80%。

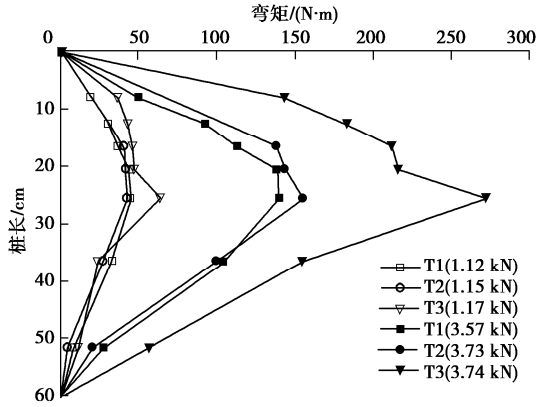

图 5 桩身弯矩曲线

Fig. 5 Curves of of bending moment of piles

2 加翼单桩的三维有限元模拟

基于离心模型试验的基本参数，采用离心模型尺寸建立三维有限元模型。有限元模型和网格划分如图6所示。数值计算中首先通过逐级增大重力模拟离心试验中离心场的增大过程，进行固结计算；然后再开展加翼单桩的水平承载性能计算。有限元模型中材料参数和单元属性的选择至关重要。桩和翼板材料强度相对较高，均假设为线弹性材料；填土为弹塑性材料，且满足Mohr-Coulomb 破坏准则。

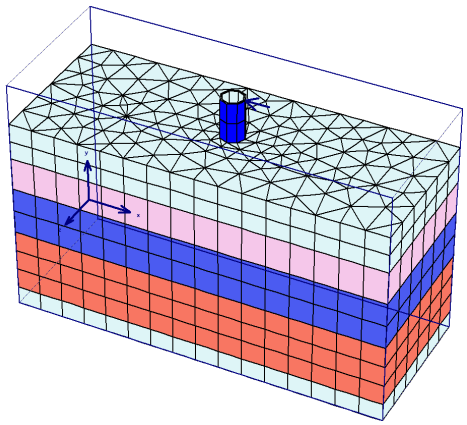

图 6 3D 有限元模型和网格划分

Fig. 6 Three-dimensional finite element model and meshes

三维有限元模拟与离心模型试验得到的荷载-水平位移和桩身弯矩如图7所示。分析表明，依据离心模型尺寸建立三维有限元模型，通过增大数值模型重力场模拟离心模型试验过程，采用三维有限元法得到的荷载-水平位移关系曲线与离心模型试验测试结果规律非常一致。

为进一步分析土层特性对水平受荷加翼单桩承载

性能的影响，基于T2加翼单桩三维有限元模型，改变翼板所在土层特性，T2-1将第①层粉砂层分别换成淤泥质粉质黏土，T2-2碎石层（爆破法碎石地基密度1.95 g/cm^3，强度指标c = 2.0 kPa，φ=39°），分别开展三维有限元分析，计算结果如图8所示。弹性模量取80 MPa。分析表明，改变翼板所在土层特性显著影响加翼单桩的水平承载性能，土层强度越高，加翼单桩水平承载力提升越大。如果近海风电场表层地基为淤泥层，可先采用爆破置换法进行表层地基处理，然后采用加翼单桩基础。

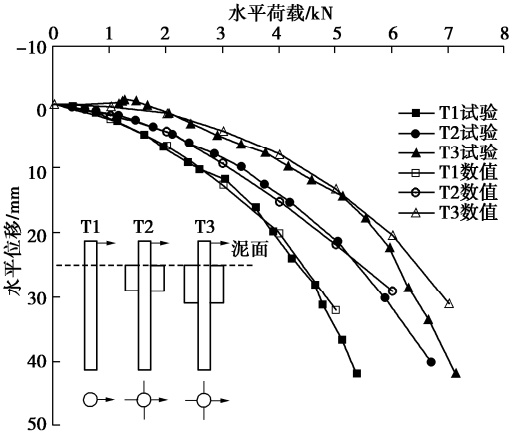

图 7 试验与计算对比荷载－水平位移曲线

Fig. 7 Load-lateral displacement curves between tests and numerical analyses

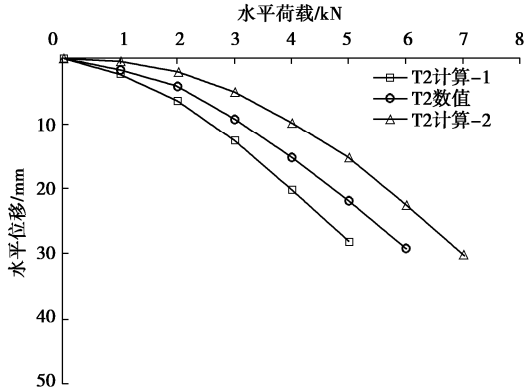

图 8 不同地层时荷载－水平位移曲线

Fig. 8 Load-lateral displacement curves of different soil layers

3 结 论

针对海上风机大直径加翼单桩基础，采用离心模型试验和三维有限元方法研究了海上风机基础的大直径单桩及加翼单桩的水平荷载－水平位移关系，分析了加翼单桩的变形及承载机理。

（1）基于大直径单桩基础，加装稳定翼后能充分发挥近地表浅层土的土抗力，可显著提高单桩基础的水平承载性能，且翼板长度越大，其水平承载力越大。

（2）三维有限元拓展研究表明翼板所在土层特性显著影响加翼单桩的水平承载性能，土层强度越高，加翼单桩水平承载力提升越大。

参考文献：

[1] WANG H, FU D W, YAN T T, et al. Bearing characteristics of multi-wing pile foundations under lateral loads in Dapeng Bay silty clay[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, **10**(10): 1391.

[2] 李 炜, 赵生校, 周 永, 等. 海上风机基础大直径加翼单桩常重力模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(4): 124－132. (LI Wei, ZHAO Sheng-xiao, ZHOU Yong, et al. 1*g*-model test of large diameter monopile with wings for offshore wind turbine[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(4): 124－132. (in Chinese))

[3] 何建新, 李 致, 孟星宇, 等. 对称布置翼板加翼桩的水平承载性能分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(5): 109－115. (HE Jian-xin, LI Zhi, MENG Xing-yu, et al. Analysis of lateral bearing capacity of wing-monopile with symmetrical wing plates[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(5): 109－115. (in Chinese))

[4] 胡烨之, 鲁子爱, 张雅琪, 等. 加载方向对加翼桩极限横向承载力的影响[J]. 水电能源科学, 2019, **37**(1): 106－110, 90. (HU Ye-zhi, LU Zi-ai, ZHANG Ya-qi, et al. Effects of load direction on ultimate bearing lateral capacity of winged pile[J]. Water Resources and Power, 2019, **37**(1): 106－110, 90. (in Chinese))

[5] SHARMA J. Centrifugal and numerical modelling of reinforced embankments on soft clay installed with wick drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, **19**(1): 23－44.

[6] 荣 冰, 张 嘎, 张建民. 水平荷载作用下风电机桩基础的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 428－432. (RONG Bing, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge model tests for pile foundation of wind power generation under horizontal loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 428－432. (in Chinese))

（编校：胡海霞）