DOI:10.12170/20191222001

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 Jianxin, LI Zhi, MENG Xingyu, 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))

对称布置翼板加翼桩的水平承载性能分析

何建新,李 致,孟星宇,苏晓栋,陈灿明

(南京水利科学研究院水利部水科学与水工程重点实验室,江苏南京 210029)

摘要:影响加翼桩水平承载性能的因素众多,其中翼板数量、荷载方向与翼板夹角是主要影响因素。采用 ABAQUS 有限元计算软件研究了软黏土地基中桩径为 5.0 m, 对称布置二、三和四翼板的加翼桩在不同荷载作 用方向时桩身泥面水平位移、桩身倾斜率、桩身内力、桩身应力和极限承载力等的变化。通过与相同条件单桩 的承载特性对比,分析了加翼桩水平承载性能提升幅度,明确了翼板通过同时或交替承担底面端承力、侧面摩 擦阻力、水平土抗力和增加桩身抗弯刚度以提高其水平承载性能的机理, 拟合了对称布置二、三和四翼板加翼 桩水平极限承载力随荷载作用方向变化的计算式, 对加翼桩极限承载力控制条件进行了对比分析。

关键 词:风电桩基础;加翼桩;翼板数量;荷载方向;极限承载力

中图分类号: TU473 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2020)05-0109-07

海上风电机组结构不仅重心高,还需同时承受较大的水平与竖向荷载^[1]。风机基础一般处于复杂海洋 水文气象环境,受风、浪、潮、流等联合作用,其合力和合力矩的大小和方向往往随风速、风向、波浪、潮汐 和海流变化而改变^[2]。加翼桩是海上风机单桩基础的一种新型结构型式,通过翼板增加土抗力来提高水平 承载能力。影响加翼桩水平承载性能的因素众多,如翼板数量和布置方式,翼板面积、刚度、埋深、荷载作 用方向与翼板夹角等^[34]。本文基于 ABAQUS 有限元软件,研究对称布置的二翼板、三翼板和四翼板加翼 桩在不同荷载作用方向与翼板夹角(以下简称荷载方向)时的水平承载性能,通过比较各工况下加翼桩泥面 处位移、桩身倾斜率、桩身内力、桩身应力和极限承载力,分析加翼桩翼板受力机理,提出对称布置二、三和 四翼板加翼桩水平极限承载力随荷载方向变化的规律,为加翼桩的设计和推广应用提供技术支撑。

1 计算模型与参数

1.1 计算模型

作为海上风电加翼桩研究的一部分^[5-6],为便于对比分析,以江苏某 5 MW 级海上风电机组的单桩和以此改进的加翼桩为对象进行有限元建模计算。钢管桩桩长 73 m,入土深度 55 m,桩径 5.0 m,壁厚 80 mm, 翼板对称布置,翼板尺寸 5 m×5 m(1*D*×1*D*,*D* 为桩基直径),厚度 80 mm,翼板与桩身焊接,钢材等级为Q345 级,翼板顶面与泥面平齐,土层为软黏土。

为分析荷载方向对加翼桩水平承载性能的影响,以对称布置的二、三和四翼板加翼桩为对象,二翼板加 翼桩选择 0°、22.50°、45.00°、67.50°和 90.00°, 三翼板加翼桩选择 0°、15.00°、30.00°、45.00°和 60.00°, 四翼

收稿日期: 2019-12-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目 (2018YFF0215005);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费 专项资金资助项目(Y418001)

作者简介:何建新(1995—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事水工港工结构研究。E-mail; jx_he1995@163.com 通信作者:陈灿明(E-mail: ccm9640@126.com)

板加翼桩选择 0°、11.25°、22.50°、33.75°和 45.00°施加水平荷载,荷载距泥面 18.0 m。加翼桩翼板布置与荷载方向如图 1 所示。



Fig. 1 Schematic diagram of load directions

1.2 模型参数及假定

采用 ABAQUS 有限元软件建立加翼桩与土体三维有限元模型,钢管桩和翼板采用线弹性本构模型,地 基土采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,桩-土接触面采用主面-从面接触对算法计算,摩擦系数μ按罚刚 度法计算。桩周土体宽度取 25 倍桩径,土层厚度取 1.3 倍桩基入土深度,单元均采用 C3D8R 单元^[7]。加翼 桩和土体主要参数见表 1。

表1	加翼桩和地基土体主要参数
----	--------------

Summary	table	of	main	parameters	of	wing-mono	pile	and	found	lation	soi
				r ··· ··· ··· ···			r ·				

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	剪胀角/°
加翼桩	7 850	206	/	0.3	/	/	/
土体	1 960	/	7.5	0.4	25	14	7

风、浪、流等荷载按 50 年一遇进行组合, 计算时将水平荷载简化为集中力作用在泥面上 18 m 处的桩顶横截面中心。

1.3 加翼桩水平极限承载能力判别标准

Tab. 1

海上风电机组运行时对基础变形要求较高,一般按风机制造商提供的风机控制要求为准,也可参照挪威船级社《Design of offshore wind turbine structures》(DNV-OS-J101)^[8]中相关规定综合考虑。

综合考虑相关规范及文献^[9-11], 以当水平荷载作用下桩身倾斜率超过 4‰, 或最大应力达到材料允许强度 250 MPa, 或桩身泥面处水平位移达到 *L*/500(*L* 为桩体入土深度)时的荷载作为加翼桩的极限承载力的控制标准(取三者中最小值)。

2 桩身泥面处位移与倾斜率

2.1 泥面处水平位移

根据对称布置二、三和四翼板加翼桩在各级荷载、各荷载方向下加翼桩泥面处水平位移计算结果,绘制桩身泥面处位移随荷载变化曲线(图 2)。由图 2 可见:

(1)单桩泥面最大位移出现在荷载方向,而对于加翼桩,受桩身前侧翼板抗力影响,泥面最大位移的位置有小角度偏移,最大偏移不大于10.00°,最大位移与荷载方向位移量值相差不超过2%。

(2)随着荷载逐渐增加,单桩和加翼桩荷载-泥面最大位移曲线斜率随之增大,且单桩位移曲线斜率大于加翼桩。



图 2 加翼桩荷载-桩身泥面最大位移曲线



(3)在同级荷载作用下,与单桩相比,四翼板加翼桩荷载方向 0°时泥面最大位移下降最显著,荷载 12.0 MN 时最大位移 89.06 mm,下降了 21.26%;二翼板加翼桩荷载方向 45.00°时在荷载 12.0 MN 作用下泥面最大位 移 107.11 mm,与单桩相比降低了 5.31%,下降幅度最小。

(4)12.0 MN 荷载级时,二、三和四翼板不同荷载方向加翼桩泥面处最大位移分别为 95.36~107.11 mm、
91.86~102.33 mm 和 89.06~102.23 mm,分别比单桩降低 5.31%~15.69%、9.53%~18.79% 和 9.62%~21.26%,
说明随着翼板数量增加,加翼桩泥面最大位移下降趋势明显。

2.2 桩身倾斜率

为反映加翼桩上部整体倾斜状况,以位移零点至泥面的桩身段平均倾斜度作为桩身倾斜率。图 3 为各 荷载级加翼桩桩身倾斜率随加载方向的变化。



图 3 各荷载级加翼桩桩身倾斜率随加载方向变化曲线



由图3可见:

(1)同级水平荷载作用下,二翼板和四翼板加翼桩桩身倾斜率随着荷载方向增加(二翼板 0°~90.00°,四 翼板 0°~45.00°)而逐渐增加,三翼板加翼桩桩身倾斜率随荷载方向增加(0°~60.00°)而逐渐下降。

(2)加翼桩受载后桩身倾斜率比单桩明显下降,其中四翼板加翼桩在荷载方向 0°时桩身倾斜率下降最为显著,二翼板加翼桩荷载方向 45.00°时桩身倾斜率下降幅度最小。

(3)接近水平极限承载力,荷载为12.0 MN时,二翼板、三翼板和四翼板加翼桩桩身倾斜率分别为

 45.00°

 2_{-0}°

4.15‰~4.66‰, 4.06‰~4.53‰和 3.96‰~4.52‰, 与单桩相比分别降低了 3.25%~13.86%, 5.93%~15.55% 和 6.02%~17.76%。

3 桩身内力

3.1 桩身弯矩

图 4 为单桩及四翼板加翼桩在 12.0 MN 荷载作用下的桩身弯矩,图 5 为 12.0 MN 荷载作用下翼板附近 桩身弯矩。



monopile (H=12.0 MN)

由图4和5可见:

(1)受翼板影响,加翼桩桩身弯矩在翼板底面位置处存在明显突变,其突变程度与受压侧翼板底部土体性质和翼板尺度有关。

(2)单桩和加翼桩桩身最大弯矩位置均随荷载增加而逐渐下移,相同受载状况下加翼桩桩身最大弯矩 位置高于单桩。

(3)荷载方向对加翼桩桩身最大弯矩的影响相对较小,相同荷载级时二翼板加翼桩荷载方向对最大弯 矩的影响不大于 3.11%, 三翼板加翼桩不大于 0.39%, 四翼板加翼桩不大于 0.81%。

(4)与单桩相比,四翼板加翼桩荷载方向 0°时弯矩降幅最大,二翼板加翼桩荷载方向 90.00°时弯矩降幅 最小。

(5)12.0 MN 荷载作用下, 二、三和四翼板加翼 桩弯矩比单桩分别下降 2.45%~4.81%, 4.26%~4.59% 和 5.51%~5.71%。

3.2 桩身剪力

图 6 为四翼板加翼桩在水平荷载作用下剪力沿 桩身分布曲线,计算结果表明:

(1)水平荷载作用下泥面及其上部具有最大正 剪力,随着入土深度增加,剪力值逐渐减小至最大负 剪力后再逐渐趋向零。

(2)由于翼板加大了上部土抗力,因此加翼桩入 土后上部桩身剪力比单桩大,桩身负剪力峰值比单



the wings (H=12.0 MN)

图 6 对称布置四翼板加翼桩剪力分布(H=12.0 MN)

Fig. 6 Shear force distribution of four wing plates wingmonopile (*H*=12.0 MN) 桩有所提高,12.0 MN时单桩和二、三、四翼板加翼桩负剪力约为水平荷载的 91.27%、85.07%~87.60%、 83.13%~84.07% 和 82.67%~82.73%,说明加翼桩随着翼板数量增加,其桩身最大负剪力有下降趋势,荷载方向对桩身最大负剪力的影响相对较小。

(3)加翼桩负剪力峰值点位置要略高于单桩, 12.0 MN 荷载时单桩最大负剪力出现在-19.53 m 处, 加翼 桩最大负剪力位于-18.96~-19.12 m 处。

4 桩身应力与翼板应力

计算分析各荷载级单桩和二翼板、三翼板、四翼板加翼桩桩身最大 Mises 应力,由应力计算结果可知:

(1)同级荷载作用下加翼桩最大应力比单桩有不同程度提高,12.0 MN 荷载时二、三和四翼板加翼桩最大应力分别为 184.01~228.72 MPa、196.73~230.29 MPa 和 182.06~226.86 MPa,分别比单桩增加了 1.74%~ 26.46%、8.78%~27.33% 和 0.66%~25.43%。

(2)荷载方向对加翼桩最大应力的影响相对较大,12.0 MN 荷载时二、三和四翼板加翼桩最大应力受荷载方向影响的变幅分别为 19.55%、14.57% 和 19.75%。

(3)当翼板位于桩前时,桩身最大应力出现在桩身与翼板连接处上部。当荷载方向的桩前无翼板或荷载与翼板夹角较大时,桩身应力分布与单桩弯矩分布规律相似,最大应力位置随荷载增加逐渐下移。

(4)加翼桩翼板最大应力受荷载方向的影响随着翼板数量增加而下降。12.0 MN 荷载时,二、三和四翼 板加翼桩的翼板最大应力分别为 26.81~184.15 MPa、163.16~193.35 MPa 和 136.35~182.77 MPa,翼板最大 应力均位于翼板与桩身连接处。

(5)水平荷载作用下桩身倾斜率到达 4‰时,单桩桩身最大应力为 154.60 MPa,二、三和四翼板加翼桩 的最大应力分别为 161.90~222.68 MPa、175.92~227.47 MPa 和 164.17~228.58 MPa。最大应力分别为材料 允许强度(250 MPa)的 61.84%、64.76%~89.07%、70.37%~90.99% 和 65.67%~91.43%,因此加翼桩比单桩更 有效发挥材料强度。

5 加翼桩水平极限承载力

依据海上风电基础的变形和结构应力控制标准,计算单桩及二、三、四翼板加翼桩的极限承载力(表 2), 根据计算结果绘制的加翼桩荷载方向与极限承载力的关系曲线见图 7。

rab. 2 Offinate bearing capacity of wing-monophe								
单桩		二翼板		三翼板	四翼板			
极限承载力/MN	荷载方向/°	极限承载力/MN	荷载方向/°	极限承载力/MN	荷载方向/°	极限承载力/MN		
	0	11.67	0	11.06	0	12.10		
	22.50	10.85	15.00	10.87	11.25	11.49		
10.36	45.00	10.62	30.00	10.96	22.50	11.19		
	67.50	10.67	45.00	11.34	33.75	10.96		
	90.00	10.70	60.00	11.85	45.00	10.87		

表 2 加翼桩极限承载力

海上风电基础变形和结构应力的三大控制标准中,主要控制标准是桩身倾斜率不超过 4‰,较少情况由 桩身应力是否达到材料强度控制。而对于大直径钢管桩,桩身泥面处的水平位移不超过 L/500 的标准较为 宽松,一般不作为极限承载力的判断标准。

由表 2 可见, 翼板明显提高了钢管桩基础的极限承载能力, 二、三、四翼板加翼桩的水平极限承载能力 比单桩提高了 12.67%~16.80%。对于二、三、四翼板加翼桩, 当荷载方向与翼板分别呈 0°、60.00°和 0°时极 限承载力最大, 最大承载力分别为 11.67、11.85 和 12.10 MN。 根据计算结果分析二翼板加翼桩的承载机理, 当荷载方向为0°时,通过翼板对桩身抗弯刚度和翼 板底面端承力、翼板侧面摩擦阻力的增加,提升了加 翼桩的水平承载性能;当翼板与荷载方向90.00°时, 翼板通过增加水平向土体抗力达到提升加翼桩水平 承载性能。

二翼板加翼桩荷载方向 0°时比 90.00°时翼板的 影响作用更大, 三翼板和四翼板加翼桩随着荷载方 向的变化各翼板同时或交替承受部分的土抗力、端 承力与摩阻力, 以达到降低桩身倾斜率、提高加翼桩 极限承载力的目的。



图 7 荷载方向与加翼桩极限承载力比值关系曲线

承载力的目的。 Fig. 7 Curve of load direction and ultimate bearing capacity R据计算结果拟合了荷载方向与二翼板、三翼 ratio of wing-monopile

板、四翼板加翼桩水平极限承载力的关系式(θ以角度计),其周期分别为180°、120°和90°。

二翼板: $H(\theta) = 0.01H_0[92.8 + 2.6\cos(0.035\theta) + 2.4\cos(2 \times 0.035\theta) + 1.6\cos(3 \times 0.035\theta)]$

三翼板: $H(\theta) = 0.01H_0[100.9 - 3.3\cos(0.052\theta) + 2.2\cos(2 \times 0.052\theta) - 0.3\cos(3 \times 0.052\theta)]$

四翼板: $H(\theta) = 0.01H_0[93.3 + 4.1\cos(0.070\theta) + 1.2\cos(2 \times 0.070\theta) + 1.0\cos(3 \times 0.070\theta)]$

其中: H(θ) 为荷载方向 θ 时加翼桩水平极限承载力; H₀ 为荷载方向 0°时加翼桩水平极限承载力。

6 结 语

基于 ABAQUS 有限元软件建立了海上风电单桩及对称布置二、三和四翼板加翼桩基础模型,计算了软 黏土地基下单桩和加翼桩在不同荷载方向下的泥面处位移、桩身倾斜率、桩身内力、桩身应力及极限承载 力,对比分析了翼板数量和荷载方向对加翼桩极限承载力的提升效果,得到以下结论:

(1)加翼桩在承受不同方向水平荷载时,翼板通过同时或交替承担水平土抗力、底面端承力、侧面摩擦 阻力和增加桩身抗弯刚度,以提高其水平承载性能。

(2)与单桩相比,相同荷载时加翼桩泥面处位移和倾斜率下降明显,但桩身应力有不同程度增加。 12.0 MN 荷载时,加翼桩泥面处位移、倾斜率和弯矩最大下降了 21.26%、17.76% 和 5.71%,桩身应力增加 27.33%。

(3)加翼桩有效降低了桩身泥面处位移和倾斜率,在桩身倾斜率达到4‰时桩身应力虽然比单桩有所增加,但仍远小于材料允许强度,因此加翼桩比单桩受力更合理。

参考文献:

- [1] 陈灿明,苏晓栋,何建新,等.海上风电大直径加翼桩水平承载性能研究[J].海洋工程,2018,36(4):97-104,146. (CHEN Canming, SU Xiaodong, HE Jianxin, et al. Study on horizontal bearing capacity of large diameter wing-monopile of offshore wind turbine[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(4): 97-104, 146. (in Chinese))
- [2] ACHMUS M,KUO Y S, ABDEL-RAHMAN K. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 725-735.
- [3] 陈灿明,何建新,苏晓栋,等. 加翼桩水平承载力计算方法研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 1-8. (CHEN Canming, HE Jianxin, SU Xiaodong, et al. Analysis of calculating method for horizontal bearing capacity of wing-monopile[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 1-8. (in Chinese))

- [4] 李炜, 黄旭, 赵生校, 等. 海上风机基础大直径加翼单桩常重力模型试验数值仿真[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 6-11.
 (LI Wei, HUANG Xu, ZHAO Shengxiao, et al. Numerical simulation for 1g-model test of large diameter wing-monopile for offshore wind turbine[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(4): 6-11. (in Chinese))
- [5] 陈灿明, 王曦鹏, 苏晓栋, 等. 翼板长宽比和夹角对加翼桩水平承载性能影响分析[J]. 水道港口, 2018, 39(5): 596-602.
 (CHEN Canming, WANG Xipeng, SU Xiaodong, et al. Analysis of the impact of length-to-width ratios and angles of the wing plate on the lateral bearing capacity of wing-monopile[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(5): 596-602. (in Chinese))
- [6] 陈灿明,何建新,王曦鹏,等. 翼板刚度与埋深对加翼桩水平承载性能影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 7-12. (CHEN Canming, HE Jianxin, WANG Xipeng, et al. Impacts analysis of wing plate stiffness and buried depth on horizontal bearing capacity of wing-monopile[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(1): 7-12. (in Chinese))
- [7] 蒋建平, 陈文杰, 杨栓. 局部冲刷对部分埋入单桩水平承载性状的影响[J]. 水利水运工程学报, 2017(3): 64-70. (JIANG Jianping, CHEN Wenjie, YANG Shuan. Impacts of local scour on lateral bearing behavior of partially embedded single piles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 64-70. (in Chinese))
- [8] Det Norske Veritas AS. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101[S]. Oslo: Det Norske Veritas AS, 2013.
- [9] 蒋建平,杨栓. 基于改进*p-y*曲线法的单桩水平受荷计算[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 80-87. (JIANG Jianping, YANG Shuan. A calculation of horizontal loaded single pile based on improved *p-y* curve method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 80-87. (in Chinese))
- [10] MURPHY G, DOTERTY P, CADOGAN D, et al. Field experiments on instrumented winged monopiles [J]. Geotechnical Engineering, 2016, 169(GE3): 227-239.
- [11] 芦直跃,马宏旺,李玉韬,等. 台风对海上风电单桩基础累积变形影响试验研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(6): 75-82.
 (LU Zhiyue, MA Hongwang, LI Yutao, et al. Experimental research on the effect of typhoon on cumulative deformation of offshore wind power single pile foundation[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(6): 75-82. (in Chinese))

Analysis of lateral bearing capacity of wing-monopile with symmetrical wing plates

HE Jianxin, LI Zhi, MENG Xingyu, SU Xiaodong, CHEN Canming

(Key Laboratory of Water Science and Engineering of Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: There are many factors that affect the lateral bearing capacity of wing-monopile, among which the number of wing plates, the angle between load direction and wing plates are the main influencing factors. The ABAQUS finite element calculation software was used to calculate the horizontal displacement of the pile at mud surface, tilt rate, internal force, stress and ultimate bearing capacity of 5 m diameter wing-monopile in the soft clay foundation with two, three and four symmetrical wing plates under different load directions. By comparing with the bearing characteristics of monopile under the same conditions, the extent of improvement of the lateral bearing capacity of the wing-monopile was analyzed, the mechanism for the wing plates to improve the lateral load-bearing performance by simultaneously or alternately bearing the end force, side frictional resistance, lateral earth pressure, and increasing the bending stiffness of the pile was clarified, the calculation formula of the lateral ultimate bearing capacity of wing-monopile with two, three and four symmetrical wing plates under load was proposed, and the control conditions of the ultimate bearing capacity of the wing-monopile were compared and analyzed.

Key words: wind turbine pile foundation; wing-monopile; number of wing plates; load direction; ultimate bearing capacity