DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.06.008

## 海上风电斜桩基础复杂地基加固技术及应用

罗承浩

(福建省岩土与环境企业工程技术研究中心/福建永强岩土股份有限公司,福建龙岩 364000)

**摘** 要: 桩基础是目前海上风电广泛使用的一种基础型式。在砂层、残积土、砂土状强风化花岗岩等复杂地 层条件下,海上风电桩基础施工易导致土层塌陷涌堵钻孔,从而阻碍桩基后续成桩施工,并降低桩基侧摩阻 力。目前针对海洋地基处理技术方面的研究很少,应用案例更鲜有报道。本文结合海上风电工程实例,根据 斜桩基础情况,开发桩内及桩外斜向导向定位装置,并在此基础上研发海上斜孔静压注浆及高压斜向旋喷注 浆相结合的新型复合注浆加固技术,充分发挥静压注浆扩散范围大、高压旋喷注浆范围可控且强度高的优点, 各技术手段时序有机结合运用,优化设计出最有效合理的加固方案,确保斜桩基础周围的松散塌陷地基区域 无空白加固并达到最佳的加固效果。通过现场钻孔取芯及室内抗压强度试验等多种手段检测,说明海上斜向 复合注浆加固技术工艺先进、效果良好,具有重要的社会效益及推广应用价值,对其它类似工程具有很好的 参考借鉴意义。

**关键词:**海上风电,斜桩基础,复杂地基,斜孔静压注浆,高压斜向旋喷注浆,海上斜向复合注浆 中图分类号:TU472 **文献标识码:**A **文章编号:**2096–7195(2022)06–0507–07

# Reinforcement technology and application of complex foundation for offshore wind power inclined pile foundation

LUO Cheng-hao

(Geotechnical and Environmental Enterprise Engineering Technology Research Center of Fujian Province / Fujian Yonking Geotechnical Co., Ltd., Longyan 364000, Fujian, China)

Abstract: At present, pile foundation is a type of foundation widely used in offshore wind power. Under complex ground conditions such as sand layer, residual soil, and sandy soil-like strongly weathered granite, the construction of offshore wind power pile foundation may easily lead to soil collapse and surge blocking of drilling holes, thus hindering the subsequent pile forming construction of pile foundation and reducing the side friction of pile foundation. There are few studies on marine foundation treatment technology, and fewer application cases are reported. Combining with the example of offshore wind power engineering, the oblique guiding and positioning device inside and outside the pile was developed in inclined pile foundation. On this basis, a new composite grouting reinforcement technology including offshore inclined hole static pressure grouting and inclined high-pressure rotary jet grouting was proposed to take the advantages of large diffusion range of static pressure grouting and controllable range and high strength of high-pressure rotary jet grouting. Various technical means were integrated in sequence. And the most effective and reasonable reinforcement scheme was optimized to ensure that there was no blank area in the loose sand around the inclined pile foundation and achieves the best reinforcement effect. Through on-site drilling and coring, indoor compressive test and other detection methods, it shows that the offshore oblique composite grouting reinforcement technology is an advanced technology, and has important social benefits and application value. It provides a good reference for other similar projects.

基金项目:福建省科技计划项目(2021H4024);福建省科技计划项目(2020I1011)。

作者简介:罗承浩(1990—),男,福建龙岩人,硕士,工程师,主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: yqytlch@163.com。

**key words**: offshore wind power; inclined pile foundation; complex foundation; inclined hole static pressure grouting; high pressure oblique rotary jet grouting; offshore oblique composite grouting

## 0 引 言

随着国家提出"海洋强国"战略及"碳达峰、 碳中和"的战略目标,海上风电作为绿色可再生清 洁能源,近年来发展迅猛,属海洋热点工程<sup>[1]</sup>。海 上风机为高耸结构物,其基础在承受复杂的海洋环 境作用下,支撑整个风机的稳定和安全性<sup>[2]</sup>。桩基 础是海上风电广泛使用的一种基础型式<sup>[3]</sup>,但在砂 层、残积土、砂土状强风化花岗岩等特殊复杂地层 中,桩基础施工易引发桩周土体发生松动塌陷进而 涌堵钻孔,阻碍桩基后续施工成桩,桩基承载力也 下降,影响风机运行安全,须对桩周塌陷地基进行 加固处理。

海洋风、浪、涌、流等特殊的环境相比陆地更 为复杂恶劣,地基处理施工难度大大增加。此外, 海上风电多桩承台基础均为斜桩,给桩基础周围塌 陷地层的加固施工带来更大挑战。目前陆地环境地 基加固技术已有较为深入的研究与应用<sup>[4]</sup>,而针对 海上风电等海洋工程的地基加固多停留在桩-土相 互作用的理论及试验研究阶段<sup>[5-10]</sup>,海洋地基加固 应用案例鲜有报道,缺乏成熟可行的工艺技术及施 工应用经验参考。

本文结合海上风电桩周土加固处理工程实例, 重点介绍了海洋塌陷地层的加固方案、桩内及桩外 斜向导向装置、斜孔钻进技术、静压斜孔注浆及高 压旋喷斜桩的复合地基处理技术工艺,并通过检测 说明海上新型斜向复合注浆加固技术可行、效果较 好,为其它海洋工程的地基处理项目施工提供一定 的指导与借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

福建沿海某海上风电场项目,规划场址总面积约20 km<sup>2</sup>,海域水深一般为10~25 m,离岸距离约5 km,总装机容量200 MW,共布置29台风机(单机容量7 MW),采用的基础形式为高桩(斜桩)承台基础(见图1),六桩承台或八桩承台基础(主要为钻孔嵌岩钢管桩基础,采用先振动沉桩-后钻孔嵌岩-再振动沉桩-灌注混凝土工艺),桩基倾角

5:1,风机基础设计级别为 I级,基础设计使用年限为 25年。



#### 1.2 地质条件

如图2所示,根据地勘资料揭示,在钻进深度 控制范围内,地层主要有淤泥层、含泥细砂、粉细 砂、粉质黏土、中粗砂层、全风化花岗岩、散体状 强风化花岗岩、砂土状强风化花岗岩、碎裂状强风 化花岗岩、中风化花岗岩等。

#### 1.3 问题及原因

桩基施工过程中,先振动钢管桩下沉,到地层 一定深度无法继续下沉后,采用嵌岩钻机桩内钻 孔,发现钻孔施工过程中桩内水位下降,从桩外自 底部往上漏水,且桩内涌砂造成钻机钻头掩埋卡 钻,阻碍钻孔施工,水下探摸发现桩周土层塌陷, 桩一侧有明显塌陷区,塌陷区域较大,呈漏斗型状, 通过钻探进一步查明,在桩的四周泥面以下 4~ 12 m 深度范围存在较多孔洞,且有一条明显的漏水 通道至桩底(见图 3)。主要是由于砂层、残积土 和砂土状强风化花岗岩等复杂地层的存在,因受到 打桩及钻孔施工等外力影响加上遇水容易发生软 化水解,引发桩周地层塌陷造成桩内涌砂封堵,桩 周土松动,桩侧摩阻力会因此降低,须对桩周土体 进行加固处理。





图 2 典型地质剖面图 Fig. 2 Typical geological profile





## 2 加固方案

## 2.1 方案设计

桩周塌陷土加固处理的目的是加固土层、充填 桩周土裂隙、使桩外侧与周围的土胶结成密实的整 体,确保桩基后续成桩施工,也提高桩侧摩阻力, 进而提高桩基承载力。 根据斜桩基础情况,研发同等倾斜度的斜向导 向装置,并基于此装置,采用斜孔静压注浆及高压 旋喷斜桩的复合地基处理手段,充分发挥静压注浆 扩散范围大和高压旋喷桩加固范围可控及强度高 的各自优势,先桩内引斜孔静压注浆密封钢管桩桩 底,随后在桩外采用高压旋喷注浆对桩周土进行加 固形成强度高的水泥土桩柱体,以堵住桩周的漏水 通道,再进行桩外斜向静压注浆补强加固,将桩周 土的底部和侧部一定范围充分固化,使斜桩基础和 周围塌陷地层充分联结成整体(见图 4),确保桩 基后续钻孔及沉桩施工,也大大提高桩基摩阻力。 参考相关经验,加固后的地层取芯芯样室内抗压强 度值设计要求达 1 MPa 以上。

## 2.2 施工工艺

海上风电桩周塌陷土体加固处理施工流程 如下:

(1) 桩内制作安装斜向导向装置、引斜孔注浆

如图 5 所示,设计制作圆形木质导向板,板外 径略小于钢管桩内径,导向板内离板边缘 500 mm 的圆周上等间距开好 4 个孔洞,孔洞直径 150 mm (大于套管外径),4 根 PVC 导向套管(外径 140 mm, 内径 130 mm)穿过孔洞后从桩内下放,每隔 5 m 设 一块导向板<sup>[11]</sup>,下放至桩底位置后 XY-300 钻机调 整倾斜角度,沿着导向套管内下放钻杆钻头,开钻 引孔至桩底以下 2 m,钻孔直径 110 mm,钻孔过程 中要详细记录好钻杆节数,保证钻孔深度的准确。



制备水泥浆首先将水加入桶中,再将水泥倒入,开动搅拌机搅拌10~20 min,而后拧开搅拌桶 底部阀门,放入第一道筛网(孔径为0.8 mm),过 滤后流入浆液池,然后通过泥浆泵抽进第二道过滤 网(孔径为0.8 mm),第二次过滤后流入浆液桶中, 待压浆时备用,水灰比1:1。

引孔过程下放 PVC 保护套管,引孔完毕拔起钻杆,在保护套管内插入单根注浆花管,再拔起 PVC 保护套管,随后将配置的水泥浆进行桩底静压注浆,水 泥浆压入填充桩端空隙,也填充桩内到一定高度为止,使得桩内密封(见图 6),避免后续桩外注浆时从 桩内跑浆泄压,影响后续桩外旋喷和注浆的效果。



图 5 桩内斜向导向装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the inclined guide device inside the pile



(a) 桩内引斜孔注浆示意图



(b) 桩内注浆现场施工
 图 6 桩内注浆图
 Fig. 6 Grouting in pile

(2) 桩外制作安装斜向导向装置、引斜孔高 压旋喷注浆

高压旋喷注浆具有浆液扩散范围可控、加固强 度高的特点,桩内注浆初凝后即可开始桩外高压旋 喷注浆。

在钢管桩上每5m安装钢管环抱接扣,每个接 扣上有16个导向孔(孔径200mm,孔中心距离钢 管桩边0.5m,8个孔用于桩外高压旋喷注浆,8个 孔用于桩外静压注浆,见图7和图8),导向孔数 量根据设计方案可调,安装时注意各个导向孔的位 置要一致,偏差不超过30mm,再下放导向钢套管 (内径130mm)穿过导向孔,保证导向管与钢管 桩的倾斜度要一致,导向管的内壁必须光滑<sup>[12]</sup>。导 向管下放穿过海床面插入泥面以下一定深度稳固 为止,必要时应有潜水员配合安装。 XY-300 钻机的倾斜度(误差小于 1.0%),钻孔前 应调试钻机、空压机、泥浆泵,使设备运转正常。 运转正常后,沿着导向定位管开始下钻杆引孔钻 进,引 8 个 Φ110 mm 平行于桩身方向的斜孔,根 据地层情况注意调整钻进速度,引孔过程下放 PVC 保护套管,防止塌孔。

引孔完毕拔起钻杆,马上插入旋喷管到指定深 度后,再拔起 PVC 保护套管,而后进行试喷调整喷 射压力,先静喷 1~3 min,接着按预定的提升、旋 转速度(见表 1),自下而上边旋转边提升直到设 计高程,停止旋喷,提出喷射管。每个孔旋喷范围 约直径 1.5 m,按顺序依次旋喷 8 个孔,桩外形成 一圈 8 根强度较高且相互咬合的旋喷水泥土桩体 (见图 9),有效避免桩外地层继续塌陷。



图 7 桩外斜向导向装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the inclined guide device outside the pile



图 8 导向装置制作及安装图 Fig. 8 Guide device and installation

导向定位管就位固定后,施工平台上调整好



(a) 桩外引斜孔高压旋喷注浆示意图





(b) 桩外钻机引斜孔 (d

机引斜孔 (c) 桩外斜向高压旋喷注浆 图 9 桩外高压旋喷注浆图

Fig. 9 High pressure jet grouting outside the pile

	表 1 高压旋喷注浆施工工艺参数	
Table 1	Construction process parameters of high pressur	re

	rotary jet grouting	
项目	参数	取值
	压力/MPa	$0.6{\sim}0.8$
气	流量/(m <sup>3</sup> /min)	1.2~1.8
	喷嘴个数/个	2
	压力/MPa	20~35
岁	流量/(m <sup>3</sup> /min)	80~150
氷	喷嘴孔径/mm 及个数	1.8~3.2 (2 个)
	水灰比	1.2:1.0~0.8:1.0
达再	提升速度/(cm/min)	15~25
爬喷	转速/(r/min)	$10{\sim}20$

(3) 桩外安装斜向导向装置,引斜孔静压 注浆

桩外斜孔注浆的导向装置与桩外高压旋喷的 同为一体,如图7所示。

静压注浆具有浆液扩散范围大且深入空隙的 优点,因此在桩外高压旋喷注浆初凝后进行引孔静 压注浆,进一步加固补强桩周的塌陷地基,扩散浆 液,消除旋喷注浆的盲区,增强旋喷效果。

XY-300 钻机钻杆沿着桩外导向定位管下钻引 孔,引孔过程同样下放 PVC 保护套管,防止塌孔, 引到指定深度后拔起钻杆,下放多根注浆花管(见 图 10),再提起保护套管。随后采用分阶段多次间 歇反复注浆工艺,开始时采用浓度较稀的水泥浆液 和较低的注浆压力(0.5~1.0 MPa),进浆量较大, 加固旋喷桩体与桩基之间的塌陷地层,随后增加水 泥浆液浓度和加大注浆压力(1.5~3.0 MPa),浆 液逐渐劈裂挤密进地层空隙,如图 11 所示。



图 10 注浆花管群 Fig. 10 Grouting flower tube group



(a) 桩外引斜孔注浆示意图





(b)引斜孔(c)花管注浆图 11 桩外注浆补强固化Fig. 11 Grouting outside the pile reinforce the soil

## 2.3 质量检测

注浆及旋喷效果质量检测在施工完成 28 d 后进行。检测采用钻探取芯来判定塌陷地层的充实情况,检测数量为总孔数的 1%,且不少于 3 个孔。

本次钻孔取芯检测共选 3 个代表性的位置孔 (见图 12),分别位于靠近旋喷孔位置、靠近注浆 孔位置、离钢管桩边缘约 1 m 距离位置,每个孔在 加固深度的中部位置附近取部分芯样作多个(5 个 以上)室内抗压强度试验。结果表明,处理后的芯 样灰色坚硬,胶结较好较密实,无松散,芯样基本 成柱状,完整性较好(见图 13)。每个孔代表性芯 样群的室内抗压强度值去掉最大值和最小值后的 剩余平均值分别达到 8.82 MPa、8.27 MPa、7.67 MPa, 均达到设计方案要求。桩基后续钻孔沉桩施工也不 再发生塌孔埋钻问题,顺利成桩,加固效果达到预 期目标。

59-61.



#### 图 12 钻孔取芯检测孔平面位置图

Fig. 12 Location of drilling and coring inspection hole



(a)现场检测
 (b)检测芯样
 图 13 钻孔取芯样
 Fig. 13 Borehole coring

## 3 结论和展望

塌陷地基稳定性差,给海上风电工程桩基施工 带来很大挑战,给风场后期运营带来安全隐患,目 前关于海洋地基处理加固技术的研究及应用案例 鲜有报道。本文结合海上风电工程实例,开发了桩 内及桩外斜向导向定位装置,并在此基础上研发海 上斜孔注浆及高压旋喷斜桩的复合地基处理方法, 充分发挥各技术的优点,可充分确保海上风电斜桩 基础周围塌陷地基区域无空白加固。经现场钻孔取 芯及室内抗压强度试验等多种手段检测,地基加固 质量效果较好,为其它海洋工程的地基处理项目提 供一定的经验参考和借鉴,具有重要的社会效益及 推广应用价值。新型复合注浆加固技术方法理念可 以借鉴,但需注意的是,具体方案设计及实际应用 效果受众多客观因素的影响,海洋工程具有多样性 和特殊性,应结合不同海洋工程的性质特点、基础 结构、水文气象及地质条件等因素开展更为针对性 的研究。

参考文献

展趋势[J]. 能源与节能, 2020(6): 51-53.

HUANG Hai-long, HU Zhi-liang, DAI Wan-bao, et al. Development status and trend of offshore wind power[J]. Energy and Energy Conservation, 2020(6): 51–53.

 [2] 章刘洋. 地基对大直径桩的水平静力和循环抗力数值 分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
 ZHANG Liu-yang. Numerical analysis of horizontal static and cyclic resistance of foundation to large

diameter pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
[3] 袁汝华,黄海龙,孙道青,等.海上风电风机基础结构 形式及安装技术研究[J]. 能源与节能, 2018(12):

YUAN Ru-hua, HUANG Hai-long, SUN Dao-qing, et al. Research on basic structure and installation technology of offshore wind turbine[J]. Energy and Energy Conservation , 2018(12): 59–61.

[4] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in Chine III. Chine Civil Engineering Learnel 2012, 45(2):

China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.

[5] 孙希.海上风电基础结构桩土相互作用研究[D].山东 青岛:中国海洋大学,2014.

SUN Xi. Research on pile-soil interaction of offshore wind power foundation structure[D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2014.

[6] 蔡升华,任亚群,刘益平.岩土参数对海上风电大直 径钢管桩水平承载特性影响分析[J].勘察科学技术, 2016(增刊1):5-10.

CAI Sheng-hua, REN Ya-qun, LIU Yi-ping. Influence of geotechnical parameters on horizontal bearing characteristics of large diameter steel pipe piles for offshore wind power[J]. Site Investigation Science and Technology, 2016(S1): 5–10.

- [7] BANERJEE A, CHAKRABORTY T, MATSAGAR V. Stochastic dynamic analysis of an offshore wind turbine considering frequency dependent soil-structure interaction parameters[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2017, 18(6): 673–687.
- [8] MARKOU A A, KAYNIA A M. Non linerar soil-pile interaction for offshore wind turbines[J]. Wind Energy, 2018, 21(7): 558–574.

[1] 黄海龙, 胡志良, 代万宝, 等. 海上风电发展现状及发

(下转第536页)