

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引定位装置, 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 Yongking 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.

收稿日期: 2022-02-28

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: yqytch@163.com。

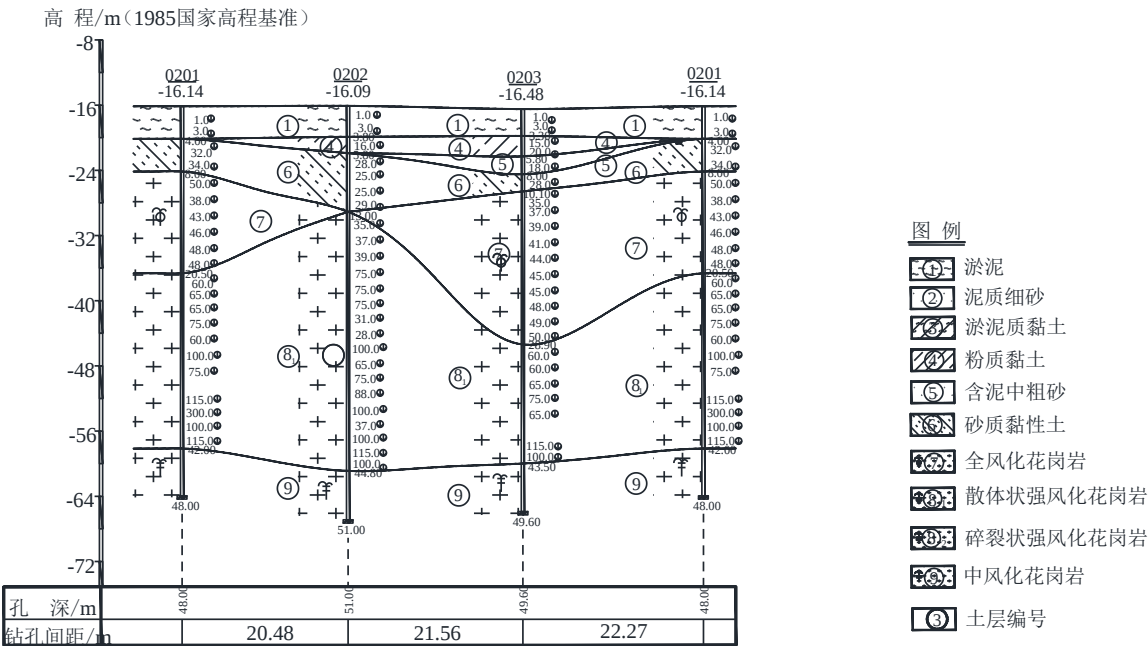


图 2 典型地质剖面图
Fig. 2 Typical geological profile

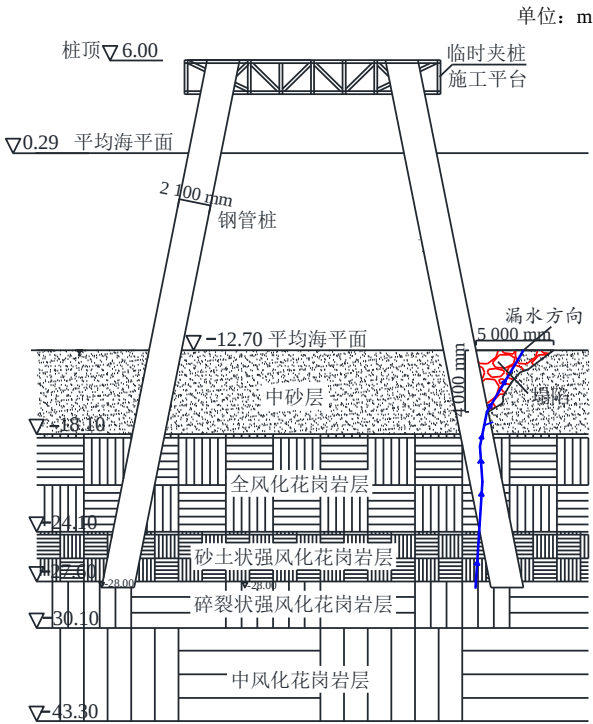


图 3 桩周土塌陷示意图
Fig. 3 Schematic diagram of soil collapse around the pile

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^[11]，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。

（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 5 m 安装钢管环抱接扣, 每个接扣上有 16 个导向孔 (孔径 200 mm, 孔中心距离钢管桩边 0.5 m, 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, 偏差不得超过 30 mm, 再下放导向钢套管 (内径 130 mm) 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^[12]。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。

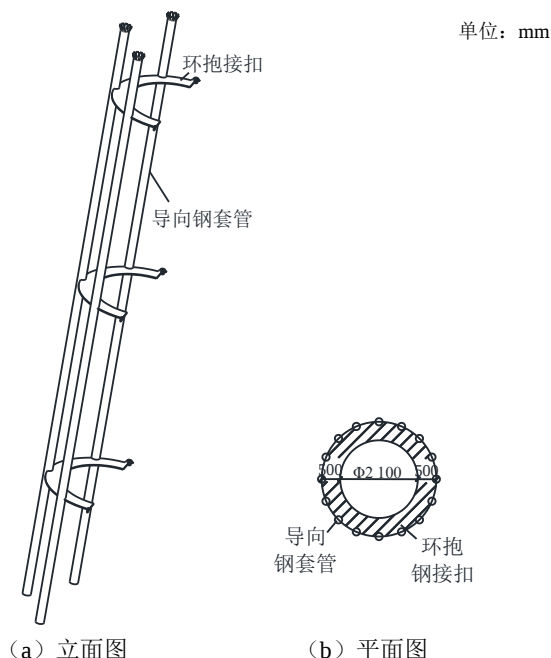


图 7 桩外斜向导向装置示意图

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



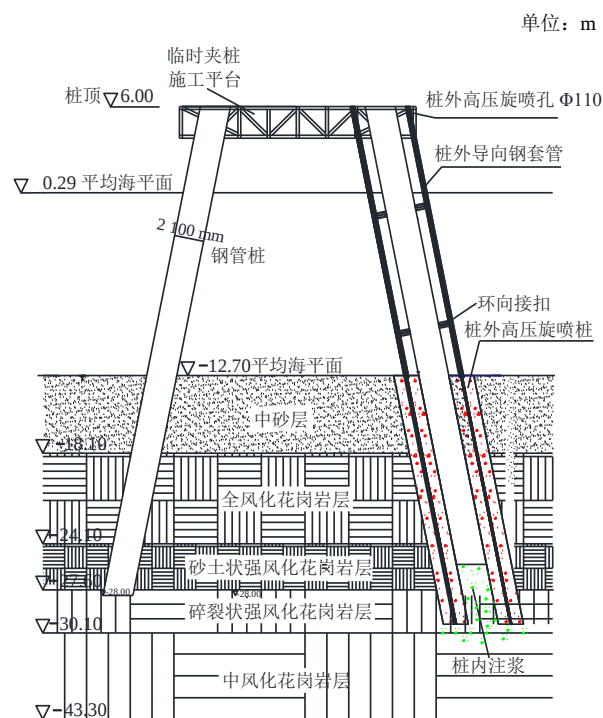
图 8 导向装置制作及安装图

Fig. 8 Guide device and installation

导向定位管就位固定后, 施工平台上调整好

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 $\Phi 110$ 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。



(a) 桩外引斜孔高压旋喷注浆示意图



(b) 桩外钻机引斜孔 (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

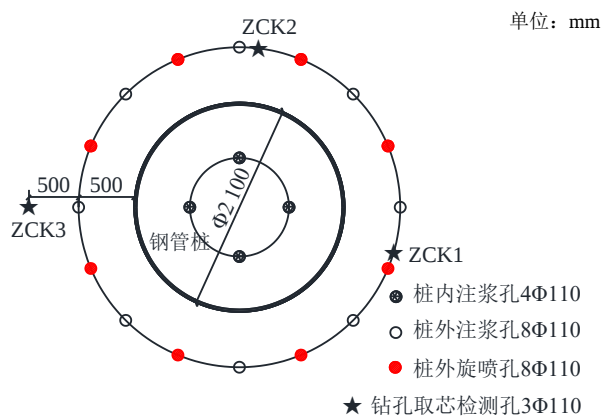


图 12 钻孔取芯检测孔平面位置图

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,但需要注意的是,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

- [1] 黄海龙, 胡志良, 代万宝, 等. 海上风电发展现状及发展趋势[J]. 能源与节能, 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.
- [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): 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.
- [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.
- [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.
- [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.