

# 海上风电单桩基础地基加固技术研究

校建东<sup>✉</sup>

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

**摘要:** [目的]在以“双碳”为目标的能源政策导向下,海上风力发电作为一种新型的能源技术,得到了广泛的应用,并且在中国迅速发展。单桩基础是海上风电中最经济、应用最广泛的基础。为解决单桩基础的变形及冲刷保护问题,提出了一种地基加固技术,并对该加固技术进行研究分析,给出加固方法的依据。[方法]针对桩基地基加固技术进行方法研究论证,通过针对加固技术路线及工艺研究,选取一种适合于海上施工的地基加固技术,并采用数值分析方法针对加固效果及加固影响范围进行详细分析。[结果]结果表明:在1.15倍荷载下,采用地基加固的单桩基础的水平承载力提升15%以上,通过地基加固可以适用于更大容量的机型。本分析案例中,当地基加固深度、水平范围都达到8m时,加固深度方向范围的土体比加固平面方向范围的土体获得的收益更大。[结论]利用水泥土加固的技术方案经数值分析验证可靠,对单桩承载能力提升显著,且加固范围合理经济,可为后续海上风电实际工程单桩地基加固技术的应用提供借鉴。

**关键词:** 海上风电; 单桩; 地基加固; 数值分析; 工程应用

中图分类号: TK89; TM614; TU476 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0184-09

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Ground Reinforcement Technology of Offshore Wind Power Monopile Foundation

XIAO Jiandong<sup>✉</sup>

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

**Abstract:** [Introduction] Under the guidance of energy policy with the goal of "double carbon", offshore wind power generation, as a new energy technology, has been widely applied and rapidly developed in China. Monopile foundation is the most economical and widely used foundation in offshore wind power. In order to solve the problem of deformation and erosion protection of monopile foundation, a foundation reinforcement technology is proposed, and the reinforcement technology is studied and analyzed, and the basis of reinforcement method is given. [Method] Researched and demonstrated the method of pile foundation reinforcement technology, selected a foundation reinforcement technology suitable for offshore construction through research on the technology roadmap and process of reinforcement, and used numerical analysis method to conduct a detailed analysis of the reinforcement effect and reinforcement influence range. [Result] The results show that under 1.15 times of load, the horizontal bearing capacity of monopile foundation strengthened by foundation can be increased by more than 15%, and it can be applied to larger capacity models through foundation reinforcement. In this analysis case, when the depth and horizontal range of foundation reinforcement reach 8 m, the benefits obtained from the soil in the direction of reinforcement depth are greater than those in the direction of reinforcement plane. [Conclusion] The technical scheme of using cement soil reinforcement has been verified to be reliable through numerical analysis, significantly improving the bearing capacity of monopile, and the reinforcement range is reasonable and economical. It can provide reference for the application of monopile foundation reinforcement technology in subsequent offshore wind power engineering.

**Key words:** offshore wind power; monopile; ground reinforcement; numerical analysis; engineering application

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-06-09 修回日期: 2023-06-28

基金项目: 上海勘测设计研究院科技项目“智能三维设计平台(一期)单桩风机基础设计模块”(2022XX(50)-022)

## 0 引言

以化石能源为主的能源结构是导致当今世界上雾霾等环境问题的主要原因<sup>[1]</sup>。中国作为世界最大的能源消费国及二氧化碳排放国,亟须探索以“双碳”目标为导向的能源安全和结构优化的新路径<sup>[2]</sup>。风力发电作为一种新型发电技术,得到了广泛运用,尤其是近些年随着新技术与新设备的运用,风力发电得到很大发展<sup>[3]</sup>。除了在陆地上布置风机外,海上风机由于近海地区风力条件更强、更稳定而发展迅速。

根据目前的数据,欧洲海岸已经建造大约1000多个海上风机。按照目前的发展趋势,到2030年,全球海上风电总容量将达到66.5 GW<sup>[4]</sup>。开发和利用海上风能资源,对于治理大气雾霾、调整能源结构具有重要意义,是实现经济低碳、绿色、可持续发展的有效途径<sup>[5-6]</sup>。2005年以来,我国政府发布了一系列支持海上风电的政策<sup>[7]</sup>,沿海省份海上风电的发展极其迅速<sup>[8]</sup>。

风机机组价格昂贵,对于基础的水平位移和不均匀沉降具有严格控制标准。目前,海上风力发电机组的基础形式有单桩、三脚架、导管架式基础、重力式基础、吸力筒基础和浮动平台结构等型式。在近海海上风电项目中,单桩基础因具有占地较小、传力明确、施工快捷、造价较低等优点,被广泛采用。随着大量海上风电工程项目投运,风机桩基础的冲刷问题日益突出,在工程实际应用中应予充分考虑<sup>[9-10]</sup>。

关于海上风电桩基的防冲刷技术,国内外已经有不少学者做了大量的理论研究工作:例如针对复杂动力环境下的海上风电桩基冲刷机理,预测冲刷深度的研究<sup>[11]</sup>;通过水工模型实验,针对单桩和多桩基础在潮流作用下冲刷坑的平面形状和最大冲刷深度的研究<sup>[12]</sup>;利用图像测速仪分析不同物体附近的冲刷情况以及在恒定入射水流影响下变化的研究<sup>[13]</sup>;对海上风电单桩基础最大冲刷深度、桩基直径和海水流速之间的研究<sup>[14]</sup>;对复合筒基础附近的水流特性和切应力分布规律的研究等等<sup>[15]</sup>。这些研究对冲刷机理进行了详尽的分析,为广泛深入地研究单桩基础地基加固技术提供了重要的依据,对推动我国海上风力技术的发展将起到至关重要的作用。

在场区内遍布深厚软弱土层的风电场工程,常

规单桩基础可能存在桩基水平承载性能无法满足规范要求的问题。通常的解决方案是改用高桩承台、三脚架、导管架等基础型式,这些基础型式将导致基础材料量、工序、工期增加。对于单桩基础这种基础型式,为实现或提高水平承载性能,如果增大桩径、壁厚和入土深度,单桩工程量将显著增加,另需注意起重能力、打桩能力的限制;如果采用变截面局部扩径单桩,需注意变径段前后桩身制造的误差控制和质量控制。单桩基础作为海上风电机组的支撑结构之一,具有结构形式简单、施工工艺成熟、建造成本较低等优势,广泛应用于国内外的海上风电工程<sup>[16]</sup>。基于工程实践,国内设计单位、研究机构对单桩基础的选型方法<sup>[17-19]</sup>、承载力等进行了相关研究<sup>[20]</sup>。

本文开展对海上风电钢管桩基础地基加固技术的研究,提出单桩基础地基加固区域及深度,探讨单桩基础地基加固技术及工艺,增强地基对单桩基础的水平约束,提高单桩基础水平承载性能。

在此研究成果基础上,探讨扩大海上风电单桩基础的适用范围,从风机基础选型这个基本层面,有效降低工程造价、节省工期。

## 1 单桩基础的发展及存在问题

与海上油气平台主要承受竖向荷载不同,海上风电基础在服役期间承受来自上部结构的自重( $V$ )、叶片和塔架传递的风、浪、流等水平荷载( $H$ ),以及水平荷载作用产生的巨大倾覆弯矩作用( $M$ ),因此,风机基础在多向荷载作用下的承载力是设计中的重要问题。对于单桩基础,承载力设计主要需考虑风浪作用引起的倾覆弯矩,此时单桩基础处于“ $V-H-M$ ”三向复合受力状态。

单桩基础周围海床在水平荷载作用方向上的塑性应变首先出现在海床表面,随着水平荷载的增加,塑性破坏区逐渐从表层向深层扩展,直至单桩基础底部。在极限水平荷载作用下,软土海床地基中单桩基础周围海床存在两个明显的破坏区,即楔形破坏区和圆形旋转破坏区。楔形破坏区主要分布在桩前浅层海床区域(约小于 $3.5D$ ),海床表面附近桩前水平荷载的影响范围约主要在 $2D$ 以内;此外,桩后(与水平荷载方向相反)海床表面有明显的沉降。深部海床出现环形旋转破坏区,深层土体绕桩旋转形成环形剪切破坏区。

风机组的大型化趋势导致了单桩基础的大型化,进而导致轮毂高度及风机扫掠面积的增加,进一步显著影响单桩基础受到的水平力、倾覆力矩。在海床表层土质较软弱的情况下,单桩基础在水平外力作用下将更容易产生侧向塑性变形,对安全运行造成威胁。

## 2 桩周地基加固技术研究

增加单桩桩基础浅表层地基的强度和刚度是减小单桩基础侧向变形的可行技术路线之一。在单桩周围实施地基加固措施,可以将上部荷载传递到桩周土体的路径改变为先传递到加固的地基再传到加固地基周围土体,传力路径的延长意味着提供水平约束的土体范围更大,水平向的土压力、桩周切向摩阻力更大。相应地,地基加固高程范围内的竖向摩阻力也有所增加。此外,对于实施地基加固后的地基,其密度比原始海床土体密度提高,同时会增加下层土体所受到的上覆压力,相应地提升下层土体对桩体的水平土压力。基于上述传力路径改变及海床约束增强,单桩结构的变形也会相应地降低,从而可以实现单桩结构的优化。

地基处理方法应考虑土质条件及加载方式、建筑物类型及适应变形能力、施工条件、材料来源、地下水条件和处理费用等因素经多方案比较选定,必要时可联合应用多种地基处理方法。

常用水下软土地基加固有多种工艺可以选择,如换填法、爆破排淤填石、砂桩法、碎石桩法、压密灌浆法、水下水泥搅拌桩法、高压旋喷桩法等。

常规提高基桩承载力的方法有采用扩底桩、根式桩、挤扩支盘桩、后注浆工艺等方式。对于已施工的钢管桩,提高其承载力的方法一般仅有后注浆工艺,可以考虑在桩底或桩侧注浆。

根据海上风电工程特点,首先排除爆破排淤填法;换填法存在碰钢管桩风险及存在冲刷问题,且需要外部石料,也不予考虑;砂桩法和碎石桩法的砂桩或碎石桩竖向连续水平向不连续,承载性能主要在竖向,且对水平向粘土挤密效果有限,缺乏压载或夯实条件下,在水下排水效果较差,另抗冲刷性能甚至不如原粘性土。

水下水泥搅拌法适用于淤泥质粘土,拌和体承载性能高,对原土体置换和增强,可以通过搭接在水

平向形成连续体,且国产水下水泥搅拌船(DCM 船)自主研发并已成功应用,具有高精度、高效、可靠、环保等优点,具备潜在推广价值。

压密注浆法适用于淤泥质粘土,在上海地区应用较多,已经纳入上海地方规范中。压密注浆泡对地基有置换作用,结合塑料排水板,对原地基土有较好的挤密和排水作用,排水板和钻孔位置比较灵活,以上是压密注浆法的优点。但是,压密注浆法需要插塑料排水板设备和压浆设备和排水板位置、钻孔位置数量多、定位精度不佳,压浆压力需要较精准控制,单孔位施工时间较长,实际施工会遇到困难。压密注浆法加固效果存在不均匀的问题,距离浆泡近的位置压密效果好,稍远位置压密效果差,加固效果不易评估。在循环荷载作用下,原先被压密的地基土可能发生破坏、被挤出海床面,长期加固效果存在较大不确定性。从检验检测的角度,压密注浆法存在船舶定位及加固效果不均匀的问题。

后注浆工艺在本工程中主要是桩侧注浆,桩侧注浆工艺可以增强与钢管桩接触的地基土,增加桩土间摩阻力,并形成局部扩大截面。后注浆工艺提高基桩竖向承载力是比较成熟的方案,已经进入建筑及水运规范。但是,桩侧注浆对桩周地基土加固的范围限于桩表面附近较小范围,注浆影响区域不确定性高,检测难实施。

高压旋喷桩的优点在于加固的深度可以很大,可以用于狭小空间,无侧限抗压强度一般较水泥搅拌桩高。一般认为高压旋喷桩造价高于水泥搅拌桩,且存在污染环境的风险。考虑将来推广的前景,高压旋喷桩在早期方案中仅局部用于配合水下水泥搅拌法,数量很少,直径也较小。

由于确认由船舶搭载设备来施工高压旋喷桩,为避免船舶机械碰撞钢管桩,降低船舶定位难度,减少船舶调整定位时间,参考技术调研的结果,根据场址地质条件,将高压旋喷桩的直径调整为 1.2 m。由于高压旋喷桩设备比水下水泥搅拌桩的设备小,内圈高压旋喷桩由 1 层变为 3 层,减小水下水泥搅拌桩的施工难度。

大直径单桩在单向水平荷载和弯矩作用下,主要存在两种不同的土体流动机制,即地表附近的楔形破坏和桩尖附近的旋转土体流动。

在单桩周围实施地基加固措施以增加单桩桩基础浅表层地基的强度是减小单桩基础侧向变形的可行技术路线,基于上述传力路径改变及海床约束增强,单桩结构的变形也会相应地降低,从而可以实现单桩结构的优化。分析常用水下地基处理方法后,选取水下水泥搅拌法和高压旋喷法为潜在可行方案进行进一步研究。

### 3 桩周地基加固范围数值分析

#### 3.1 数值模型建立

为进行钢管桩基础地基加固技术的研究,对典型机位进行地基加固处理前后的数值模拟及地基加固范围的敏感性分析,分析钢管桩地基加固对钢管桩水平承载性能的效用,获取地基加固范围与降低结构变形的规律。桩周的加固范围分别按照水平方向直径 6~12 m 与深度方向 6~12 m 进行分析,加固布置如图 1 所示。

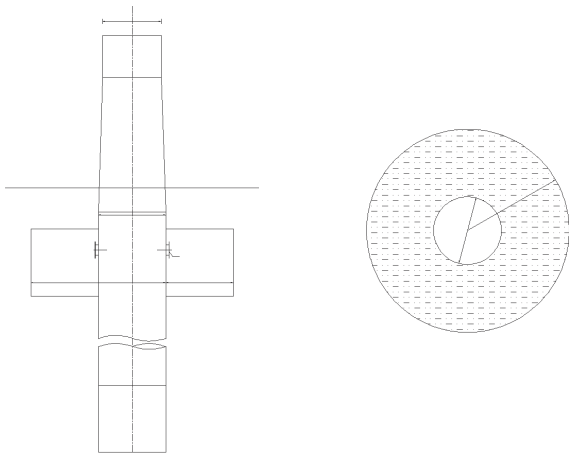


图 1 桩周加固布置图

Fig. 1 Layout Plan for Reinforcement around Piles

采用大型岩土有限元软件 Z-Soil 进行整体结构-土体建模。单桩直径为 7 m, 桩长 75 m, 桩顶标高 +11 m, 泥面标高 -4.85 m, 桩身入泥深度为 59.15 m。土体采用实体单元, 摩尔库伦本构模型; 单桩采用 SHELL 单元, 弹性模型; 桩-土之间设置接触。土体边界范围平面方向为 10 倍桩径, 竖向边界范围土层离桩底 5 倍桩径; 整体模型共 11 593 个节点, 整体建模信息见图 2。

有限元模型计算结果的典型位移云图和典型变形如图 3~图 4 所示。

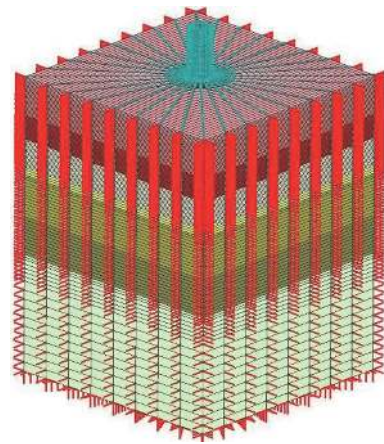


图 2 Z-Soil 有限元模型

Fig. 2 Z-Soil finite element model

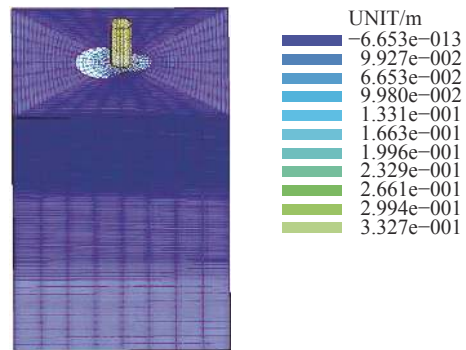


图 3 位移云图

Fig. 3 Displacement nephogram

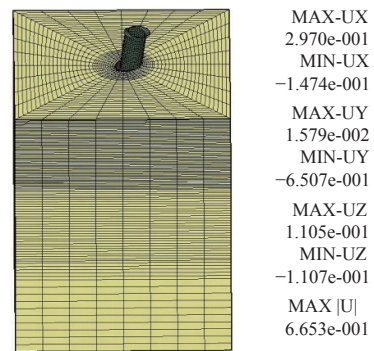


图 4 变形图

Fig. 4 Deformation diagram

原型观测机位的土层分布取自工程场区中的钻孔数据。土层分布及物理力学性能如表 1 所示, 单桩的材料属性如表 2 所示。

水泥石材料模型数值模拟所采用的土层工程力学参数如表 3 所示, 风机荷载如表 4 所示。

表 1 典型土层分布

Tab. 1 Typical soil layer distribution

| 土层号    | 土层名称  | 土层深度/m | 土层标高/m | 浮重度/kN/m <sup>3</sup> | 弹性模量/Mpa | 泊松比  | 粘聚力/kPa | 摩擦角/° |
|--------|-------|--------|--------|-----------------------|----------|------|---------|-------|
| III 1t | 砂质粉土  | 2.3    | -7.15  | 19.4                  | 53.7     | 0.32 | 5       | 37.5  |
| III 1  | 淤泥质粘土 | 12.4   | -17.25 | 16.4                  | 6.33     | 0.42 | 11      | 2     |
| III 2  | 粉砂    | 20.2   | -25.05 | 18.5                  | 16.02    | 0.38 | 16      | 10.5  |
| III 3  | 粉质粘土  | 29.3   | -34.15 | 19.3                  | 34.35    | 0.32 | 6       | 35.5  |
| IV 2   | 粉细砂   | 31.7   | -36.55 | 18.6                  | 46.05    | 0.30 | 4       | 35    |
| IV 2t  | 粉质粘土  | 45.2   | -50.05 | 18.6                  | 19.74    | 0.32 | 20      | 16    |
| V      | 粉质粘土  | 57.5   | -62.35 | 19.0                  | 20.31    | 0.32 | 30      | 14    |
| VII    | 粉细砂   | 66     | -70.85 | 19.7                  | 41.37    | 0.30 | 2       | 33.5  |
| VII t  | 粉质粘土  | 67.7   | -72.55 | 19.0                  | 20.31    | 0.32 | 30      | 14    |
| VII    | 粉细砂   | 73.5   | -78.35 | 19.7                  | 41.37    | 0.30 | 2       | 33.5  |
| VIII   | 粉质粘土  | 76.9   | -81.75 | 20.0                  | 40.05    | 0.30 | 3       | 37.5  |
| VIII t | 粉细砂   | 79     | -83.85 | 19.5                  | 28.20    | 0.32 | 45      | 15    |
| VIII   | 粉质粘土  | 80.05  | -84.9  | 19.7                  | 36.54    | 0.32 | 84      | 14    |

表 2 单桩材料属性

Tab. 2 Material properties of monopile

| 属性 | 重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量 $E$ /MPa | 泊松比 $\nu$ |
|----|------------------------------------|---------------|-----------|
| 钢管 | 78.5                               | 2.06e5        | 0.3       |

表 3 水泥土材料属性

Tab. 3 Material properties of cement soil

| 土层名称 | 重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量 $E$ /Mpa | 泊松比 $\nu$ | 有效粘聚力 $c'$ /kPa | 有效内摩擦角 $\phi'$ /° |
|------|------------------------------------|---------------|-----------|-----------------|-------------------|
| 水泥土  | 22.0                               | 80.0          | 0.20      | 50              | 40                |

表 4 风机荷载

Tab. 4 Load of wind turbine

| $F_x$ /kN | $M_y$ /kN·m | $F_z$ /kN | $M_z$ /kN·m |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 1 656     | 143 960     | 8 179     | -797        |

### 3.2 加固对单桩变形的影响分析

为评估地基加固技术对单桩基础水平承载力提升效果,在加固后的有限元模型中扩大风机荷载和波流荷载 15%,比较增大荷载后有限元模型中单桩基础在顶法兰位置和钢管桩泥面位置变形量(水平位移均值和截面转角),与加固前模型比较,结果如表 5 所示。

采用地基加固的单桩基础,在 1.15 倍荷载条件下,顶法兰位置和钢管桩近泥面位置及水泥土顶面的变形数据均小于未加固单桩基础对应的数据,由此可以说明,采用地基加固的单桩基础的水平承载

表 5 加固前后变形

Tab. 5 Deformation before and after reinforcement

|       | 加固前水平位移 | 加固前转角   | 加固后水平位移 | 加固后转角   |
|-------|---------|---------|---------|---------|
|       | /m      | /rad    | /m      | /rad    |
| 桩顶法兰面 | 0.1376  | 0.00487 | 0.13010 | 0.00435 |
| 海床面   | 0.0571  | 0.00293 | 0.05500 | 0.00282 |

力提升幅度超过 15%。

### 3.3 桩周地基加固范围分析

为获取地基加固范围与降低结构变形的规律,结合典型机位结构和地质条件,进行了加固范围和加固深度的敏感性分析。

假设地基加固区域的顶面高程为-12.00 m,地基加固的平面范围为环状,其内半径为钢管桩半径,外半径分别为钢管桩半径加上 6 m、8 m、10 m、12 m,地基加固的深度分别为 6 m、8 m、10 m、12 m,分析组合如表 6 所示,分别计算钢管桩泥面处的转角,各分析组合下的单桩变形结果如表 7 所示,各分析组合下的单桩变形减少比例如表 8 所示。

由以上计算分析结果得出以下结论:

1) 在近海床表面,竖向加固深度和平面加固区域内外半径差约为钢管桩直径时,可以有效降低泥面处钢管桩水平位移和泥面处钢管桩桩身转角。

2) 当竖向加固范围不变时,随着平面加固范围增加,泥面处钢管桩水平位移明显降低,泥面处钢管桩桩身转角降低百分比明显增加,但增加幅度趋缓。

表 6 地基加固范围分析组合

Tab. 6 Analysis combination of ground reinforcement scope

| 加固范围/m   | $R'=R+$ | $R'=R+$ | $R'=R+$ | $R'=R+$ |
|----------|---------|---------|---------|---------|
|          | 6 m     | 8 m     | 10 m    | 12 m    |
| 加固深度Z=6  | —       | √       | —       | —       |
| 加固深度Z=8  | √       | √       | √       | √       |
| 加固深度Z=10 | —       | √       | √       | —       |
| 加固深度Z=12 | —       | √       | —       | —       |

表 7 各分析组合下的单桩变形

Tab. 7 Monopile deformation under various analysis combinations

| 单桩泥面变形<br>转角/rad | $R'=R$   | $R'=R+$  | $R'=R+$  | $R'=R+$  | $R'=R+$  |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  |          | 6 m      | 8 m      | 10 m     | 12 m     |
| 加固深度Z=0 m        | 5.54E-03 | —        | —        | —        | —        |
| 加固深度Z=6 m        | —        | —        | 3.67E-03 | —        | —        |
| 加固深度Z=8 m        | —        | 3.70E-03 | 3.52E-03 | 3.40E-03 | 3.32E-03 |
| 加固深度Z=10 m       | —        | —        | 3.46E-03 | 3.34E-03 | —        |
| 加固深度Z=12 m       | —        | —        | 3.29E-03 | —        | —        |

表 8 各分析组合下的单桩变形减少比例

Tab. 8 Reduction ratio of monopile deformation under various analysis combinations

| 单桩泥面变形<br>减少比例/% | $R'=R$ | $R'=R+$ | $R'=R+$ | $R'=R+$ | $R'=R+$ |
|------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                  |        | 6 m     | 8 m     | 10 m    | 12 m    |
| 加固深度Z=0 m        | 0      | —       | —       | —       | —       |
| 加固深度Z=6 m        | —      | —       | 33.74   | —       | —       |
| 加固深度Z=8 m        | —      | 33.19   | 36.36   | 38.61   | 40.08   |
| 加固深度Z=10 m       | —      | —       | 37.61   | 39.78   | —       |
| 加固深度Z=12 m       | —      | —       | 40.59   | —       | —       |

在达到预期的泥面处钢管桩水平位移和桩身转角降低目标的情况下，增加平面加固范围意义不明显。

3) 当水平加固范围不变时，随着竖向加固范围增加，泥面处钢管桩水平位移明显降低，泥面处钢管桩桩身转角降低百分比明显增加。就典型机位的钻孔资料来分析，稍深的加固效果较好的高程范围与较好的土层部分重合，即地基加固区域嵌入软土层之下的较好土层。结合施工船机的处理深度限制(如水泥搅拌桩机/船)、在较好土质地基加固施工难易程度，不推荐竖向加固范围达到下卧的较好土层。

## 4 地基加固工程应用

### 4.1 机位加固方案介绍

针对某海上风电项目选择 F34、F41、F46 这 3

个机位的单桩进行地基加固试验，对 F34、F46 两个机位进行地基加固处理，对中间的 F41 机位不作处理，形成对比机位，机位布置位置如图 5 所示。

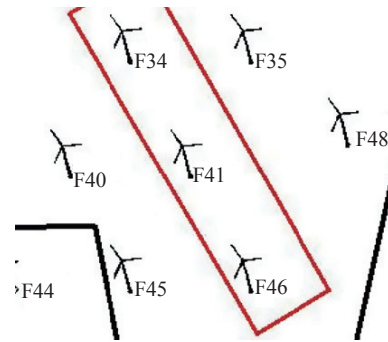


图 5 试验桩位布置

Fig. 5 Layout of testing pile positions

F34 机位桩周地基加固采用水下水泥搅拌桩结合高压旋喷桩技术方案。高压旋喷桩布置在内圈，共 3 层，除吊耳处局部调整外，沿圆周均匀布置，数量分别为 30、36、42。水泥搅拌桩布置在外围，形成外圈及内外圈之间肋状连接墙。肋状连接墙将桩周分为 10 个扇区，每面肋状连接墙为 4 组水泥搅拌桩组成，每个扇区布置 6 组水泥搅拌桩与其中肋状连接墙连成整体。水下水泥搅拌桩直径取 1.3 m，桩长 9.0 m，桩长按高程控制，设计顶高程为-10.50 m，设计底高程为-19.50 m。水下水泥搅拌桩形成连续体，相邻桩搭接不小于 250 mm。水下水泥搅拌桩 28 d 龄期无侧限抗压强度达到 1.0 Mpa。高压喷射注浆法采用旋喷工艺，桩径 1.2 m，桩长 9.0 m，桩长按高程控制，设计顶高程为-10.50 m，设计底高程为-19.50 m。水下水泥搅拌桩与高压旋喷桩形成整体，搭接宽度 300 mm，总体布置如图 6 所示。

F34 机位加固工程量如表 9 所示。

F46 机位桩周地基加固采用高压旋喷桩技术方案。桩径 1.2 m，桩长 9.0 m，桩长按高程控制，设计顶高程为-10.50m，设计底高程为-19.50m。内圈高压旋喷桩布置与 F34 机位的相同，共 3 层，除吊耳处局部调整外，沿圆周均匀布置，数量分别为 30、36、42。桩周由 12 面肋状连接墙分为 12 个扇区，每面肋状连接墙为 12 根高压旋喷桩组成，每个扇区布置 5 根高压旋喷桩与其中肋状连接墙连成整体，搭接宽度 300 mm，总体布置如图 7 所示。

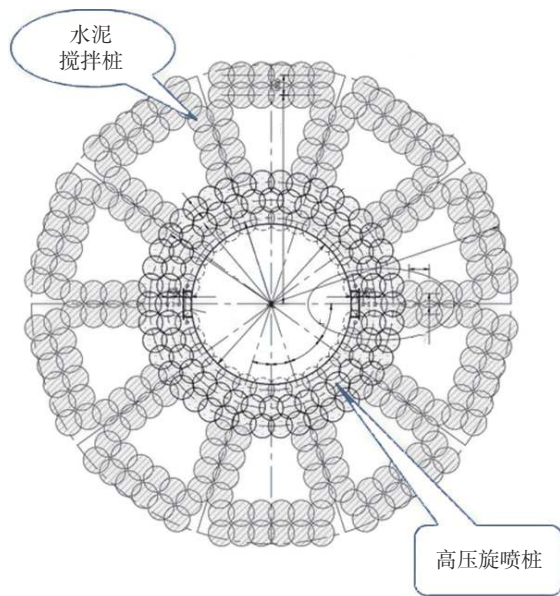


图 6 F34 机位高压旋喷桩+水泥搅拌桩组合加固布置方案  
Fig. 6 F34 position high-pressure rotary jet grouting pile+cement mixing pile combination reinforcement layout plan

表 9 F34 加固工程量

Tab. 9 F34 reinforcement quantity

|       | 直径/m | 单根长度/m | 数量  | 加固体积/m <sup>3</sup> |
|-------|------|--------|-----|---------------------|
| 水泥搅拌桩 | 1.3  | 9      | 200 | 2389                |
| 高压旋喷桩 | 1.2  | 9      | 108 | 1099                |

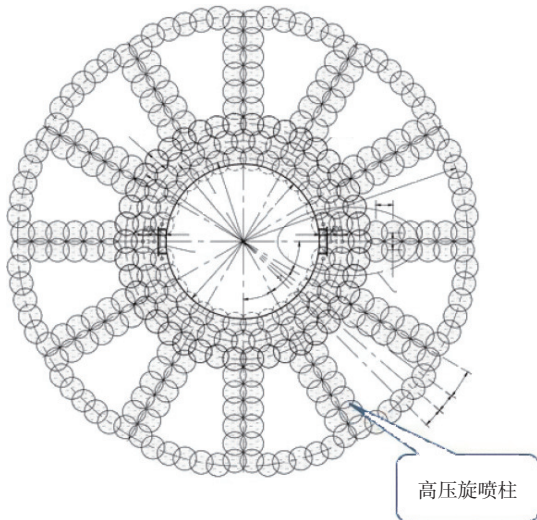


图 7 F46 机位高压旋喷桩加固布置方案

Fig. 7 F46 position reinforcement layout plan for high-pressure rotary jet grouting piles

F46 机位加固工程量如表 10 所示。

#### 4.2 实测监测结果

经一段时间的倾斜监测结果显示,在同等环境

条件作用下,F34、F46 机位与 F41 机位比较,基础泥面处倾角有显著降低,对比结果如表 11 所示。

表 10 F46 加固工程量

Tab. 10 F46 reinforcement quantity

|       | 直径/m | 单根长度/m | 数量  | 加固体积/m <sup>3</sup> |
|-------|------|--------|-----|---------------------|
| 高压旋喷桩 | 1.2  | 9      | 312 | 3175                |

表 11 监测桩泥面处倾角结果对比

Tab. 11 Comparison of inclination angle results at monitoring pile mudline

|     | 加固方式        | 泥面倾角/° | 降低幅度/% |
|-----|-------------|--------|--------|
| F41 | —           | 0.379  | —      |
| F34 | 高压旋喷桩+水泥搅拌桩 | 0.293  | 22.7   |
| F46 | 高压旋喷桩       | 0.159  | 58.0   |

由实测对比结果显示,F34 机位与 F46 机位经加固后,泥面倾角显著降低,且使用纯高压旋喷桩加固方案的 F46 机位显著比使用高压旋喷桩+水泥搅拌桩组合加固方案的 F34 机位,其加固效果更好,总体倾角降低一半以上,加固性能较原先提升一倍。

经一段时间的加速度监测结果显示,在同等环境条件作用下,F34 机位和 F46 机位与 F41 比较,基础泥面处加速度有显著降低,对比结果如表 12 所示。

表 12 监测桩泥面处加速度结果对比

Tab. 12 Comparison of acceleration results at the mudline of monitoring piles

|     | 加固方式        | 加速度/g | 降低幅度/% |
|-----|-------------|-------|--------|
| F41 | —           | 0.03  | —      |
| F34 | 高压旋喷桩+水泥搅拌桩 | 0.019 | 36.7   |
| F46 | 高压旋喷桩       | 0.015 | 50.0   |

由实测对比结果显示,F34 机位与 F46 机位经加固后,泥面加速度值显著降低,且使用纯高压旋喷桩加固方案的 F46 机位比使用高压旋喷桩+水泥搅拌桩组合加固方案的 F34 机位加固效果更好,总体倾角降低一半以上,加固性能较原先提升 1 倍。

## 5 结论

本文针对大直径单桩基础开展了地基加固技术研究及加固范围研究,主要关注加固的技术路线以及加固的范围最优化选择,研究主要结论如下:

1) 在单桩周围实施地基加固措施以增加单桩基础浅表层地基的强度是减小单桩基础侧向变形的可行技术路线, 水下水泥搅拌法和高压旋喷法为潜在可行的方案。

2) 采用地基加固的单桩基础, 在 1.15 倍荷载条件下, 顶法兰位置和钢管桩近泥面位置及水泥土顶面的变形数据均小于未加固单桩基础对应的数据, 由此可以说明, 采用地基加固的单桩基础的水平承载力提升幅度超过 15%。由此推断, 在不增加单桩基础直径或壁厚的条件下, 采用地基加固的单桩基础可以用于荷载更大发电功率更大的风机。

3) 对于单桩基础, 当地基加固范围增加到一定程度时, 增加竖向加固范围比增加平面加固范围效果提升来得更加显著。以本文案例为例, 当范围和深度均为 8 m 时, 加固经济性最优。

4) 经实际工程试验和后期验证, 地基加固对单桩承载力提升效果显著, 且纯高压旋喷桩加固方案比高压旋喷桩+水泥搅拌桩组合加固方案的加固效果更好。

#### 参考文献:

- [1] 曾雨欣, 施伟, 张礼贤, 等. 10 MW大型单桩式海上风机桩土作用研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 1-12. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.001).  
ZENG Y X, SHI W, ZHANG L X, et al. Research on pile-soil interaction of 10 MW large monopile offshore wind turbine [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 1-12. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.001).
- [2] 黄晟, 王静宇, 郭沛, 等. 碳中和目标下能源结构优化的近期策略与远期展望 [J]. *化工进展*, 2022, 41(11): 5695-5708. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209).  
HUANG S, WANG J Y, GUO P, et al. Short-term strategy and long-term prospect of energy structure optimization under carbon neutrality target [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2022, 41(11): 5695-5708. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209).
- [3] 覃盛琼, 程朗, 何占启, 等. 风力发电系统研究与应用前景综述 [J]. *机械设计*, 2021, 38(8): 1-8. DOI: [10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001](https://doi.org/10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001).  
QIN S Q, CHENG L, HE Z Q, et al. Review of research and application on the wind power-generation system [J]. *Journal of machine design*, 2021, 38(8): 1-8. DOI: [10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001](https://doi.org/10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001).
- [4] SÁNCHEZ S, LÓPEZ-GUTIÉRREZ J S, NEGRO V, et al. Foundations in offshore wind farms: evolution, characteristics and range of use. Analysis of main dimensional parameters in monopile foundations [J]. *Journal of marine science and engineering*, 2019, 7(12): 441. DOI: [10.3390/jmse7120441](https://doi.org/10.3390/jmse7120441).
- [5] 刘佰琼, 徐敏, 刘晴. 我国海上风电发展的主要问题及对策建议 [J]. *海洋开发与管理*, 2015, 32(3): 7-12. DOI: [10.3969/j.issn.1005-9857.2015.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9857.2015.03.002).  
LIU B Q, XU M, LIU Q. The main problems and countermeasures of offshore wind power development in China [J]. *Ocean development and management*, 2015, 32(3): 7-12. DOI: [10.3969/j.issn.1005-9857.2015.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9857.2015.03.002).
- [6] 黄松苗. 生态系统理念在海上风电项目管理中的应用研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 143-148. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.021](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.021).  
HUANG S M. Application research of ecosystem theory in offshore wind farm project management [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(2): 143-148. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.021](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.021).
- [7] 李晓宇, 王伟. 基于SWOT分析我国海上风力发电的发展现状 [J]. *华北电力大学学报(社会科学版)*, 2018(5): 42-49. DOI: [10.3969/j.issn.1008-2603.2018.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-2603.2018.05.006).  
LI X Y, WANG W. The status quo of China's offshore wind power generation development based on SWOT analysis method [J]. *Journal of north China electric power university (social sciences edition)*, 2018(5): 42-49. DOI: [10.3969/j.issn.1008-2603.2018.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-2603.2018.05.006).
- [8] 和庆冬, 戚建功. 一种新技术在海上风机基础冲刷防护的应用研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 112-121. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.017).  
HE Q D, QI J G. A new technology research for scour protection of offshore wind turbine foundation [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 112-121. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.017).
- [9] 翟恩地, 张新刚, 李荣富. 海上风电机组塔架基础一体化设计 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 1-7. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.001).  
ZHAI E D, ZHANG X G, LI R F. Integrated design of offshore wind tower and foundation [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(2): 1-7. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.001).
- [10] 杨少磊, 马宏旺. 考虑冲刷情况下海上风电单桩基础优化设计研究 [J]. *海洋技术学报*, 2018, 37(1): 74-80. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2029.2018.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2029.2018.01.013).  
YANG S L, MA H W. Study on the optimum geometry of offshore wind turbine monopiles unprotected against scour [J]. *Journal of ocean technology*, 2018, 37(1): 74-80. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2029.2018.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2029.2018.01.013).



- [11] 林城, 韩杰, BENNETT C, 等. 冲刷作用下砂土地层中桩的侧向力学性质分析 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 24-36. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.004).  
LIN C, HAN J, BENNETT C, et al. Analysis of laterally loaded piles in sand considering scour hole dimensions [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(2): 24-36. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.004).
- [12] ZHAO X D, WANG X M. Simulation of piles in hydraulic model and experiment study on local scour at pile foundation in offshore wind farm [C]//Anon. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2009), Nanjing, January 1, 2009. [S. l.]: IEEE, 2009: 1203-1206.
- [13] MENZEL P, RÜCKBORN T, LEDER A. Flow and scour around cylindrical objects in laboratory experiments [C]//Anon. 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen, Bergen, Norway, June 10-14, 2013. Bergen: IEEE, 2013: 1-8. DOI: [10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607970](https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607970).
- [14] 李亚军, 毕明君. 海上升压站导管架基础的冲刷试验研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(增刊1): 123-128. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.022](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.022).  
LI Y J, BI M J. Study on scour test of jacket foundation for offshore substation [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(Suppl. 1): 123-128. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.022](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.022).
- [15] 张浦阳, 黄宣旭. 海上风电吸力式筒型基础应用研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(4): 1-11. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.001).  
ZHANG P Y, HUANG X X. Application research on suction bucket foundation for offshore wind power [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(4): 1-11. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.001).
- [16] 周德棕, 毕明君, 章海东, 等. 大直径单桩基础冲刷防护范围及防护效果试验研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 72-80. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.009](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.009).  
ZHOU D Z, BI M J, ZHANG H D, et al. Experimental research on scour protection range and protection effect of large diameter monopile foundation [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 72-80. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.009](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.009).
- [17] 毕明君. 海上风机单桩基础选型设计方法 [J]. *南方能源建设*, 2017, 4(增刊1): 56-61, 72. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011).  
BI M J. Design flow of monopile foundation for offshore wind turbine [J]. *Southern energy construction*, 2017, 4(Suppl. 1): 56-61, 72. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011).
- [18] 王洪庆, 刘旭东, 毕明君, 等. 海上风机单桩基础疲劳影响因素分析 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(4): 92-97. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.014).  
WANG H Q, LIU X D, BI M J, et al. Analysis of influencing factors on fatigue of offshore wind turbine monopile foundation [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(4): 92-97. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.014).
- [19] 李聪, 刘东华, 王洪庆. 海上风机单桩基础桩形影响因素分析 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(4): 93-100. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.015).  
LI C, LIU D H, WANG H Q. Configurational influence factor analysis of offshore wind turbine monopile foundation [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(4): 93-100. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.015).
- [20] 孙永鑫. 近海风机超大直径单桩水平承载特性试验与数值分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
SUN Y X. Experimental and numerical studies on a laterally loaded monopile foundation of offshore wind turbine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

## 作者简介:



校建东

校建东 (通信作者)

1993-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事海上风电基础结构设计工作 (e-mail) xjd@sidri.com。

(编辑 孙舒)