

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.017

一种新技术在海上风机基础冲刷防护的应用研究

和庆冬[✉], 戚建功

(国家电投集团江苏海上风力发电有限公司, 盐城 224000)

摘要: [目的] 随着我国海上风电开发的迅速发展, 大直径单桩基础得到广泛应用, 基础冲刷情况也日益严峻, 选择合理适用的防冲刷方案对风电场长周期安全稳定运行、保证经济效益具有重要意义。[方法] 通过某海上风电项目运行一年后大直径单管桩基础出现严重冲刷现象引出问题, 对桩基础冲刷原理、目前国内外常规采取的防冲刷方案进行了概述, 对某海上风电项目采用淤泥固化方案进行桩基础防冲刷试验的原理、参数、方案、工程实施进行了详述。[结果] 通过对试验桩位长达两年的多次扫测、潜水员下水探摸, 基本确定淤泥固化土层与桩身结合紧密、覆盖完整、试验效果良好。[结论] 淤泥固化这种新型材料在海上风电基础的防冲刷应用具有一定的借鉴、推广意义。

关键词: 大直径单桩; 冲刷; 固化土; 施工方案

中图分类号: TK89; TV49

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0112-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A New Technology Research for Scour Protection of Offshore Wind Turbine Foundation

HE Qingdong[✉], QI Jianguo

(State Power Investment Group Jiangsu Offshore Wind Power Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract: [Introduction] With the rapid development of offshore wind power in China, large diameter monopile foundation is widely used. At the same time, the scour of foundation is becoming more and more serious. Therefore, to select a reasonable and suitable scour prevention scheme is of great significance for offshore wind farms' economic benefits and stable operation in the a long-term. [Method] Various scour protection methods for offshore wind farms have been presented in this paper. Scour development and various protection measures have been examined. The principles, parameters, design and construction plans of using chemically solidified sediment on an offshore wind project have been analyzed in this work. [Result] It has been shown that chemically solidified sediment improved the scour protection around tested monopile foundations at the wind farm site after two-year vessel based scanning and diver investigation. [Conclusion] Chemically solidified sediment shows great potential for scour protection at offshore wind farm sites with similar conditions.

Key words: large-diameter monopile; scour; chemically solidified soil; construction plan

0 引言

近年来能源资源匮乏和环境污染问题日益严峻, 我国政府也越来越重视可再生能源的发展^[1-2]。2005年以来, 我国政府发布了一系列支持海上风电的政策^[3], 沿海省份海上风电的发展极其迅速。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, 在工程实际中应予充分考虑^[4-5]。

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础冲刷机理, 预测冲刷深度的研究^[6]; 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^[7]; 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^[8]; 对海上风电单桩基础最大冲刷深度、桩基直

收稿日期: 2019-09-01 修回日期: 2019-10-23

基金项目: 国家电投江苏电力有限公司“海上风电专项技术研究”(SPICJS016HF)

径和海水流速之间的研究^[9];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^[10]。这些研究对冲刷机理进行了详尽的分析,对工程实践应用和方案比选起到了指导性的作用。

本文基于某海上风力发电项目所出现的严重冲刷现象实例,阐述了目前国内外常用的多种防冲刷方案,根据不同的方案选取试验桩进行了工程试验、后期扫测和潜水探摸。通过综合比较发现一种新型的淤泥固化技术具有防冲刷效果优异、施工难度小、综合成本低等优点。并对淤泥固化技术的原理、试验数据进行了深入分析,为海上风力发电桩基的防冲刷设计提供参考。

1 工程实例:某工程海域运行一年后桩基础冲刷坑已形成

某海上风电项目所处海域地层结构上部为全新世浅海相沉积的淤泥质粘土、砂质粉土、粉质粘土等,中下部为晚更新世河口~滨海相沉积的砂质粉土、粉砂、粉质粘土。根据地质勘测结果,设计单位和风机厂经过多轮相互迭代计算后,该风场全部选用直径5.5~7.0 m钢管单桩做为海上风力发电机组基础,工程设计32 m×18 m,400 mm厚度的单层砂被做为桩基础周边防护层。

该项目开工前扫海结果显示,该风场海底高程均在-12 m左右,以机位为中心,500 m×500 m区域沉桩前海底地形平坦,整体存在细微冲刷,局部区域存在深度较小的冲刷坑,最大坑深约0.4 m,扫海结果如图1所示。

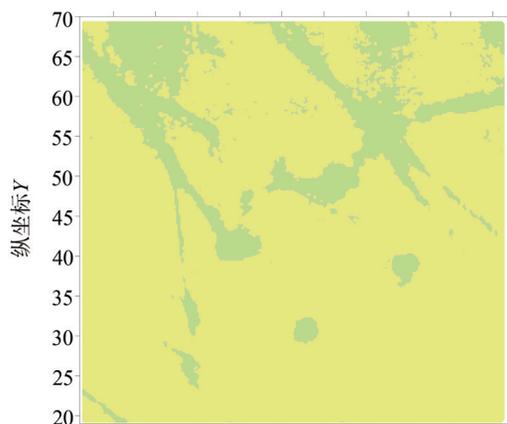


图1 项目开工前海域地形扫测

Fig. 1 Topographic survey of sea area before the project starts

该项目于2015年开始首台风机基础沉桩施工,2016年风场全容量并网。

该项目运行半年后进行了首次桩基冲刷扫测检查,结果显示整体地势平坦,未发现明显冲坑。以某机位为例,钢管桩东西两侧各有约东西宽12 m、南北长15 m、高0.4 m左右凸起,砂被形态明显,该基础周边地形监测3D效果如图2所示。

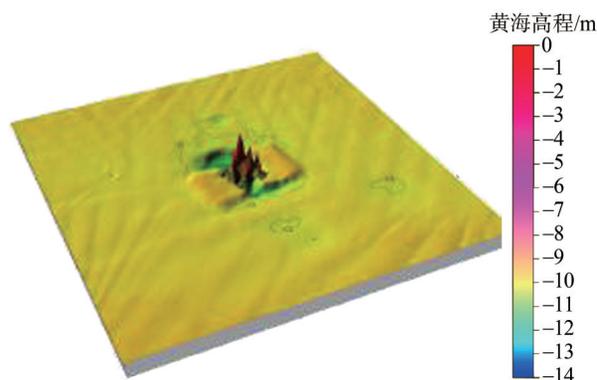


图2 运行半年后某基础周边50 m范围3D效果图

Fig. 2 The three-dimensional effect diagram around the foundation in the range of 50 meters which has operated for half a year

2017年,该项目对桩基础进行了运行一年后冲刷扫测检查,25根基础桩周围均已无砂被留存痕迹,桩周均存在不同程度的冲刷坑,平均冲坑深度4.5 m,平均冲刷量达到1 050 m³;其中最大冲刷坑深度约7.33 m,冲坑范围近50 m,冲刷量达到2 517 m³,该冲坑扫测如图3所示。

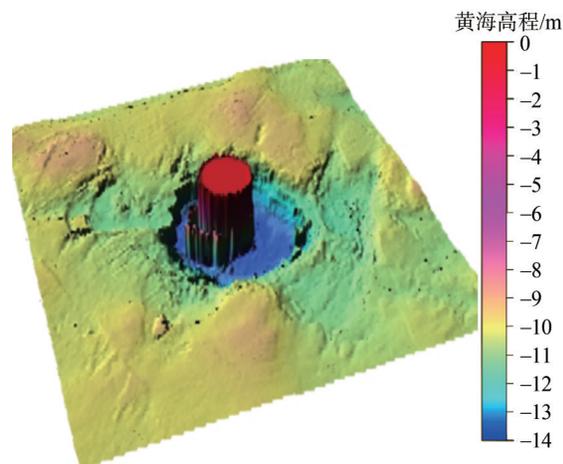


图3 运行一年后某基础周边形成冲坑

Fig. 3 A pit formed around the foundation which has operated for half a year

鉴于该项目桩基础安全风险较大, 该公司组织对较大的冲坑进行了抛砂袋回填紧急修复方案。为确保风机运行稳定, 指导后续工程项目, 该公司对风机基础的防冲刷保护做了砂袋、砂被、抛石、仿生草、固化土等多种方案的比选试验和观测, 以求冲刷问题得到较好解决, 保障风机安全稳定运行。

2 桩基础冲刷原理

海上风力发电机大直径钢管桩基础在海流和波浪作用下, 会在桩周局部海域引发强劲的水流或高速旋转的旋涡, 这些水流或旋涡具有较高的冲刷(携带泥沙)能力, 从而在局部范围内形成冲刷坑, 减弱桩基础承载力, 危及桩基础及上部风机安全。具体说来, 有以下几种型式的影响:

2.1 海底涌流单独作用下桩周的流场冲刷

海底涌流作用下, 桩柱周围会形成马蹄涡, 桩柱后侧形成交替的尾涡涡街, 桩侧流线收紧, 同时桩体前侧还会形成向下的回流, 这些流场的变化使得桩体附近的泥沙输移量增加, 引发冲刷, 海流作用下的桩周流场结构如图4所示。

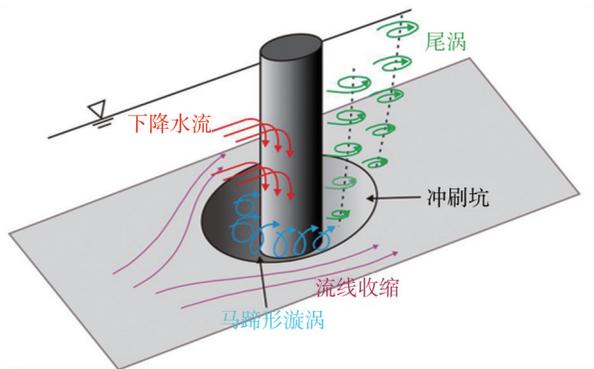


图4 海流作用下桩周流场结构

Fig. 4 Around the pile structure which under the action of the ocean currents

2.2 波浪单独作用下桩柱周围的流场冲刷

波浪作用下桩基周围冲刷的动力因素主要是周期性产生的马蹄涡和尾涡。

2.3 波流共同作用冲刷

海上风机一般位于离岸较近水深较浅的海域, 海流和波浪往往同时作用, 由于波浪边界层和海流边界层的相互作用, 床面剪应力分布发生较大变化, 桩柱周围的流场结构更为复杂, 同时波浪诱导

海床土体产生超静孔隙水压, 使砂颗粒的临界启动流速随波浪相位发生变化, 影响砂颗粒的起动条件, 最终影响冲刷的发展, 波流共同作用下的流场结构如图5所示。

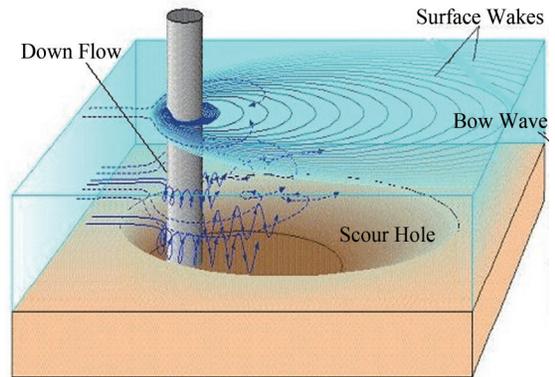


图5 波流共同作用下的流场结构

Fig. 5 Around the pile structure which under the action of the wave currents

2.4 海床侵蚀引起的大面积冲刷

部分近海海域由于特殊的海洋及海底地质条件, 处于不稳定的冲淤交互状态, 形成对海床的整体侵蚀, 在海上风机25年寿命期内, 有些海域的海床年整体冲刷深度可达数米。

2.5 海底不稳定引起的冲刷

部分海域海底表层土壤在台风巨浪的作用下会发生滑移坍塌, 当表层土为粉砂时, 在暴风浪作用下, 土壤发生液化而使土壤抗剪强度降低, 从而可能造成海床在一定范围内的下降。

2.6 潮流冲刷影响

一些海域存在较强的潮流作用, 冲刷坑存在反复冲刷和回填的过程, 冲刷的影响分析更为复杂。

2.7 冲淤平衡

根据实验结果和海况分析, 桩周的波流冲刷在初始阶段冲深发展很快, 之后会逐渐变缓并趋于恒定, 达到平衡状态。不同海域的水流情况对冲深的发展速度和极限平衡冲深影响非常显著, 如何准确的分析判断工程建设海域的最终冲坑深度和范围, 需要做更长的时间的观察和调查分析才能得出最终结论。

3 几种常见的治理方法

根据冲刷原理可知, 波流冲刷和海床侵蚀共同作用形成了基础桩周围的冲刷坑, 桩径越大, 冲刷

越严重。目前工程中常用以下措施来预防或减缓冲刷对桩基础安全的影响。

- 1) 抛填(包括抛砂袋、抛石、预制砼构件等)。
- 2) 土工布压实(砂被,土工布压实、连锁块等)。
- 3) 仿生水草治理。
- 4) 预留冲刷长度等。

这些方法有着不同的特点,在不同海域,不同海况下各有优劣,工程中也经常根据实际情况组合使用,达到综合治理的目的。下面对这些治理方法进行简述。

3.1 抛填法

抛填法是目前采用最广泛的方法,主要有抛填砂袋、抛填石块等。施工中准备好砂包或级配碎石,按照设计的范围和厚度抛填至基础桩周围。抛填法具有取材范围广、船舶机械要求不高、施工时间短、施工方便的特点,但其施工精度差,流失量大,防护层成型效果差,维护量大。适合于东海、南海水质较清澈的海域,可以在工程过程中明显看到抛填效果及时采取维护补救措施。抛填施工如图6和图7所示。

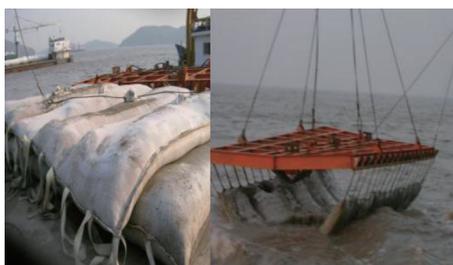


图6 砂袋充填和条形砂袋抛投施工

Fig. 6 Rectangular sandbag and its typical construction method



图7 网兜抛石和开口驳抛石施工

Fig. 7 Rockfill construction by tuck net and bottom-dump barge

3.2 土工布法

土工布法主要有砂被覆盖或连锁排覆盖,尤其

是砂被法在国内早期的海上风电场应用实例较多,砂被或连锁排整体加工制作,通过吊架或敷设船整体安装铺设,海上施工周期相对较短,铺设位置及均匀性的控制相对较好;但砂被在波流的反复冲刷下存在流失风险,目前无长期可靠使用的实例验证,砂被和连锁排施工如图8所示。



图8 砂被施工和连锁排施工

Fig. 8 The protection method by sand quilt and concrete mattress

3.3 仿生水草治理

仿生水草技术是基于海洋仿生学开发研制的海底防冲刷技术,其作用机理是:仿生水草锚固在海底需要防止冲刷的预定位置,海底水流流经这一片仿生水草时,由于水草的柔性粘滞阻尼作用,流速降低,使得水流中携带的泥沙在重力作用下不断沉积到仿生水草安装基垫上,长期作用下该区域逐渐形成海底沙洲,达到避免冲刷的目的,仿生水草作用机理如图9所示。

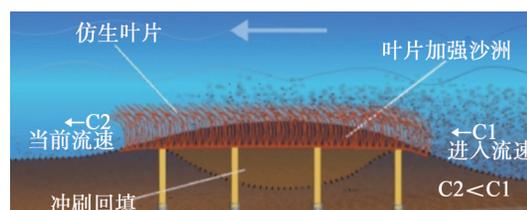


图9 仿生水草作用机理图

Fig. 9 The principle of artificial seaweeds protection

仿生水草技术尤其适合渤海、黄海等含泥沙量较大,水质浑浊、无法有效观测效果的海域,在国外部分海上风电场和国内某油田海上石油平台冲刷防护中有成功应用经验。国内某些海域由于海底流速较快,沙粒粒径较小,无法形成有效沉积覆盖的仿生草区域。

3.4 预留冲刷长度

根据冲刷机理可知,桩周冲刷在初始阶段冲深

发展很快,之后会趋于恒定,不同海域的水流和地质情况对冲深的发展速度和极限平衡冲深影响非常显著。工程实践中也有充分考虑冲刷余量,不进行基础防护的做法。以本文所介绍的大直径单管钢管桩基础为例,直径6 m左右的钢管桩,制造成本约为10万元/m,增加8 m桩长的防冲刷余量,钢桩成本增加80万左右,成本较高;同时这种设计造成钢管桩周围形成一个较大的冲坑,随钢管桩引入风机的海缆无法固定,需另行设计固定桩锚固。预留冲刷长度在海上风电工程实际中应用较少,在桥墩、海洋平台支柱工程有较多应用。

4 淤泥固化技术简介

淤泥固化是目前国内外新推出的一种新型实用的复合型材料固化技术,它的工作机理是通过固化剂与淤泥中水分接触,产生一系列的水化、水解反应,生成水化产物和胶凝物质。这些胶凝物质凝结、包裹淤泥中的细小颗粒,使之团粒化,形成一个由水化胶凝物为主的骨架结构。并通过激发剂激发淤泥中次生矿物的活性,促进、稳定反应进程,从而在淤泥中形成硅酸盐类高强度架构,具备一定的结构强度。固化胶凝的成分生长,理论上历百年而不衰,在固化土形成后相当长的一段时间内控制强度稳定持续增长,寿命预测可达50~100年。

淤泥固化后是替代砂石的优良材料,可以广泛应用于各类建设工程中,目前在国内外河道疏浚工程、堤岸工程、滩涂治理工程、基础工程均有应用,淤泥固化土在某港口的工程效果如图10所示。

淤泥固化土性能指标(以本文中某海上风电项目为例,取样为距该项目15 km港池疏浚的淤泥):



图10 某港口工程淤泥固化工程实例(工程实施前、固化中、固化后实际效果)

Fig. 10 An example of silt stabilized soil construction in a port (actual-effect pictures with the stage of before, in and after)

根据不同的固化剂配比,可以调节淤泥的含水比例,使得固化后的土壤压缩系数明显降低,抗剪强度、压缩模量显著提高。淤泥固化前后的性能指标对比、重金属含量指标对比如表1~表2所示。

表1 淤泥固化前和固化后的性能对比

Tab. 1 Comparison of performance before and after silt curing

项目	淤泥固化前	淤泥固化后	
		低含水率	高含水率
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.5~1.7	>1.60	1.35~1.50
含水率/%	45~80	35~45	80~200
孔隙比 e_0	1.5~1.71	0.9~1.3	1.7~2.8
液性指数 I_L	1.58~1.82	<0.25	—
塑性指数 I_p	22.9~25.6	14~21	—
压缩系数 0.1~0.2/(MPa ⁻¹)	1.01~1.68	≤0.25	—
压缩模量 0.1~0.2/MPa	1.51~2.57	4~18	3~9
粘聚力 C/kPa	7~11	30~100	25~90
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	3.5~6.5	15~30	12~35
渗透系数,数量级/(cm·s ⁻¹)	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁸	≤10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁸
无侧限抗压强度 q_u/kPa	—	100~2 500	100~2 000

表2 淤泥固化后重金属离子含量表

Tab. 2 Ion content table of heavy metal

项目	after silt curing					mg/kg
	铜	锌	铅	镉	铬	
原泥	36.2	82.5	27.8	3.8	37.2	86.9
固化土	22.6	70.4	23.0	3.4	27.6	70.4
下降率/%	37.6	14.7	17.3	10.5	25.8	19

从表1和表2可以看出,淤泥固化后,其密度并无显著变化,粘聚力和无侧限抗压强度显著提高,对重金属离子具有稳定固化的作用,不存在对环境二次污染,可以作为优良的工程材料使用。

5 淤泥固化土技术在某风场的施工案例和实施效果

为彻底消除钢管桩基础被冲刷后形成冲坑的安全隐患,某项目自2017年开始,分别选择不同机位,选用多种防冲刷方案进行试验。由于该项目场址位于古黄河入海口,海水含泥沙量大,水质浑浊,水下无法目视或通过水下摄像头检测。各方案施工完成后经过多次多波束扫测检查(期间经过了2018/2019年7~8月完整的台风季),综合各方案成果比较,淤泥固化土效果较好,现将其施工方案及效果简介如下:

5.1 固化土设计参数

根据水文观测数据,该项目海上风电场海底地

势平坦, 水深 11~15 m, 年平均最大涨落潮流速分别为 1.87 m/s 和 1.67 m/s, 全潮表、中、底层的平均流速比为 1.94 : 1.85 : 1.00。根据潮流理论, 圆形构造物(桩柱、桥墩等)设置后的流速可达到未设置前流速的 1.5 倍。

该项目单管桩基础设计直径为 5.5~7.0 m。根据计算, 采用淤泥含水率、坍落度符合一定标准的固化剂, 按照一定掺量比例混合, 固化土覆盖后有效半径 ≥ 14 m, 且固化土强度 ≥ 400 kPa, 即可以抵抗海底流速约 4.0 m/s 的长久冲刷, 该实验桩位的固化土设计指标如表 3 所示。

表 3 试验桩位固化土填充的设计指标

Tab. 3 Design indicators for testing pile-cured soil filling

土工指标	标准固化土
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.35~1.50
渗透系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	10~5
无侧限抗压强度 q_u/kPa	>400
最大抗冲刷流量 $/(m\cdot s^{-1})$	4.0
粘聚力 c/kPa	>40
内摩擦角 Φ	>13

5.2 固化土试验机位 A 施工及检测情况

5.2.1 钢管桩 A 基础施工前

钢管桩基础 A 施工前扫测风机周边 50 m 范围内海底高程地势平坦, 范围为 $-15.90 \sim -15.70$ m, 平均高程为 -15.80 m, 地形扫测如图 11 所示。

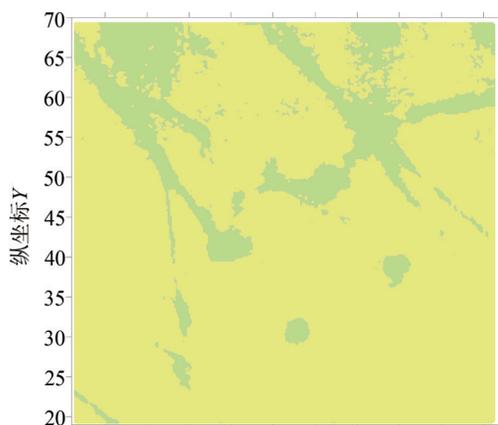


图 11 钢管桩 A 施工前扫测图

Fig. 11 Sweeping map before steel pipe pile A construction

5.2.2 钢管桩基础施工后、固化土施工前

钢管桩基础 A 沉桩施工后扫测图形显示: 距中心位置半径 17 m 范围内(含桩基), 未见明显冲坑, 冲刷程度不明显; 风机基础周边有 4 个明显冲

坑直径约 2 m, 为施工船舶作业留下的坑痕。最大冲刷坑深度约 1.24 m, 相对设计平均冲淤量为 35 m^3 , 该阶段地形扫测如图 12 所示。

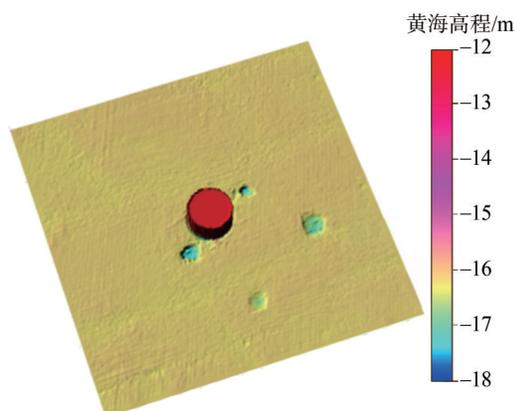


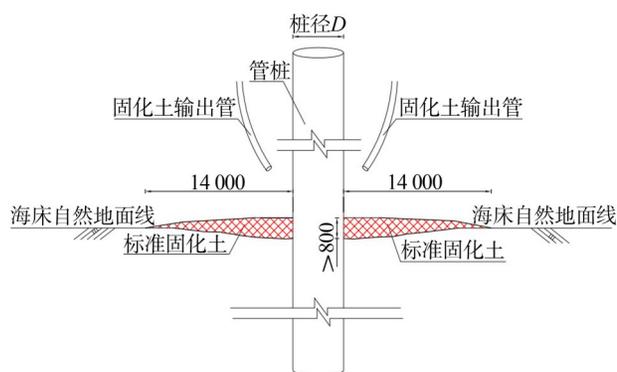
图 12 钢管桩 A 沉桩后扫测图

Fig. 12 Sweeping map after sinking steel pipe pile A

5.2.3 固化土施工

钢管桩基础 A 固化土试验方案为: 填充一个有效宽度 14 m, 高度约 0.8 m 的固化土圆环覆盖层, 压覆在桩周淤泥层上方。

为保证固化土与钢管桩之间紧密连接, 利用调配好的固化土初期具有较高的流动性, 通过泵送的方式直接打入管桩根部, 慢慢流散至指定位置并逐渐硬化成型, 形成填充层边缘的缓坡, 避免形成直立的陡壁, 产生 2 次冲刷。本次试验固化土方量约为 700 m^3 , 固化土施工示意图如图 13~图 14 所示。



注: 图中尺寸单位为 mm。

图 13 直接吹填固化施工示意图

Fig. 13 Construction diagram of direct blow-fill solidification

5.2.4 固化土施工后第一次检测情况

固化土施工完成后第二天即进行了第一次检测, 检测 3D 图形如图 15 所示。

可以看到桩基础中心半径 17 m 范围内(含桩

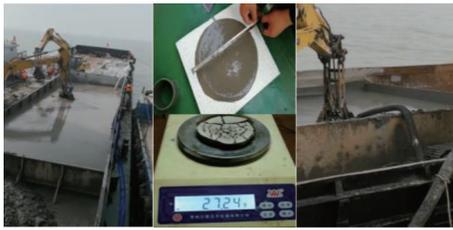


图14 调制-取样检测-吹填

Fig. 14 Mixing-sample examination-hydraulic filling

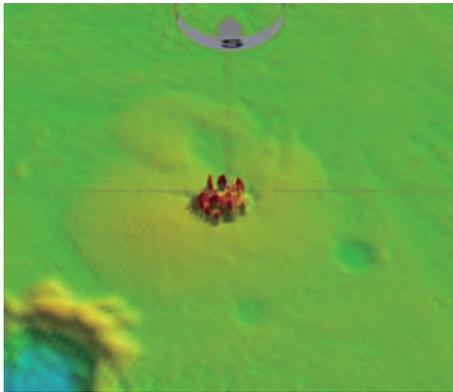


图15 试验桩A固化土施工后第1次检测图形

Fig. 15 First detection graphics after test pile A curing soil construction

基), 形成了一层边缘不规则的圆形覆盖, 左上方有一浅坑, 应为固化土填充施工遗留坑痕后, 该处填方量略微欠缺所致。该处海底高程范围为 $-11.90 \sim -10.20$ m, 平均高程为 -10.90 m, 冲刷现象不明显。

同日, 安排潜水员下水探摸固化土施工效果, 描述如下: 由于水体浑浊, 仅能依靠触探固化土泥浆成型情况, 在试验桩底部形成 $0.6 \sim 0.8$ m厚度的固化土层, 吹填覆盖范围约 13 m左右, 顺着桩体向外触摸, 固化土泥浆表面较为平整, 无明显高差, 用脚踩踏, 脚会出现“下陷”现象。

5.2.5 固化土施工后第二次检测情况

2018年, 固化土施工完成半年后进行了第二次检测, 3D图形如图16所示。

可以看到桩基础中心半径 17 m范围内(含桩基), 圆形覆盖完好, 轮廓未发生变化, 与第一次扫测结果基本一致, 冲刷现象不明显。

5.2.6 第二次水下探摸

第二次潜水员下潜探摸报告结论如下:

- 1) 固化土和钢桩结合紧密。
- 2) 沿钢桩向四周爬行约 16 m左右, 无冲刷情况出现。

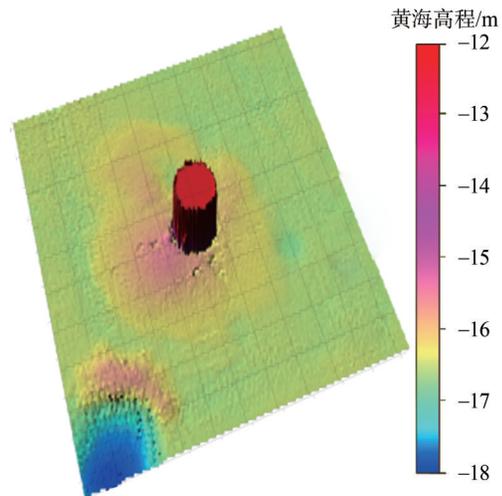


图16 试验桩A固化土施工后第2次检测图形

Fig. 16 Second detection graphic after test pile A curing soil construction

3) 在固化土区域无裂纹出现。

4) 固化土防护区域无断崖状现象出现。

5) 固化土和原泥面形成一整体, 无冲刷掏空现象存在。

5.2.7 钢管桩A固化土施工后第三次检测情况: 2019年, 固化土施工一年6个月后进行第三次多波束扫测, 3D效果如图17所示, 可以看到经过18个月的海底冲刷(包含两个完整的台风季), 桩基础中心半径 17 m范围内圆形覆盖轮廓未发生变化, 与半年前扫测结果一致, 无冲刷现象, 第三次检测图形如图17所示。

5.3 固化土试验机位B施工及检测情况

5.3.1 机位B沉桩施工1年后扫测结果

2017年, 机位B沉桩施工1年后经扫测发现形

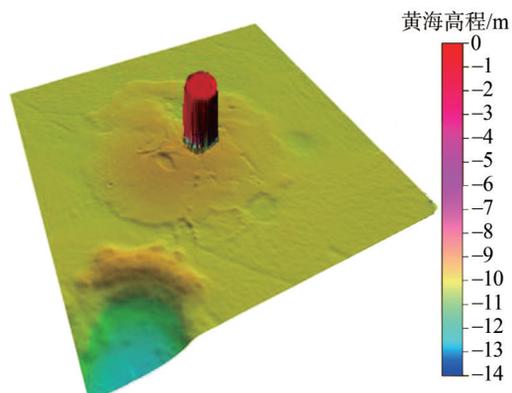


图17 试验桩A固化土施工后第3次检测图形

Fig. 17 Third detection graphic after test pile A curing soil construction

成巨大冲坑,机位中心半径15 m范围内周边最大冲刷坑深度约7.33 m,机位中心半径15 m外到周边50 m范围内,冲刷后海底地势起伏变化较大,地形最大高差约3.99 m,冲刷方量达2 517 m³,试验桩位冲坑图形如图18所示。

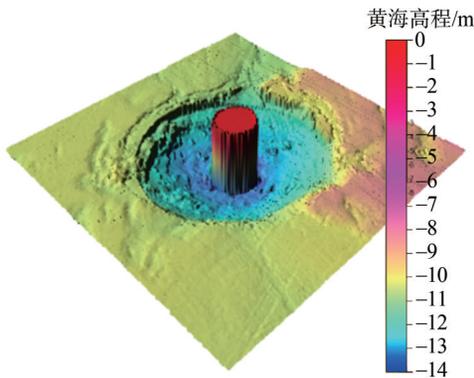


图18 试验桩B沉桩一年后形成巨大冲坑

Fig. 18 A huge punch formed a year after the Test Pile B sinking

5.3.2 机位B采用砂袋抛填紧急修复后扫测结果

鉴于风机B已存在较大安全风险,2018年,该项目对形成较大冲坑进行了砂袋抛填紧急修复,机位B抛填砂袋1 500 m³。水上抛填方量达到设计方量后,采用多波束扫测的方式检测修复结果,试验桩B扫测3D图如图19所示。

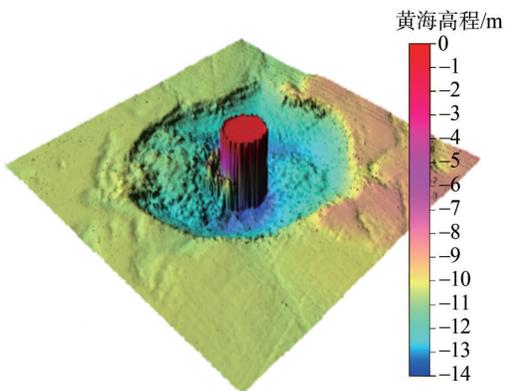


图19 试验桩B沉桩首次用砂袋抛填扫测效果

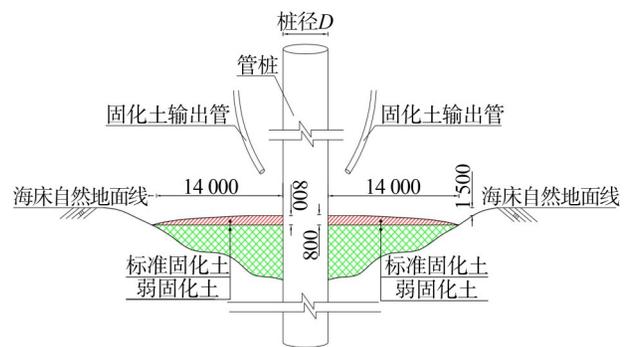
Fig. 19 Sweep effect of test pile B sinking with sandbag tossing first time

可以看到,由于海洋涌流影响,砂袋抛投未达到设计的均匀铺排效果,该机位大量砂袋呈点状散落在钢桩两侧,未形成有效堆集。砂袋存留在冲坑内的总方量约700方,在机位中心半径15 m范围内周边最大冲刷坑深度约5.7 m,机位中心半径15 m外到周边50 m范围内,冲坑外延基本稳定,未继

续扩大,冲刷方量约1 800 m³。

5.3.3 固化土施工

鉴于砂袋抛填效果不明显,针对钢管桩基础B,已在桩周形成了巨大冲坑,设计固化土填充方案为:在底部深坑采用弱固化土进行回填,泥面高程以下1~2 m范围内采用抗冲刷性能较高的标准固化土回填。此方案根据扫测的填充方量调配固化土使用量,利用固化土的高流动性,填充边缘与冲坑形成良好的接合,无需再超出泥面高程向上填充,将冲刷坑填平即可,填充示意如图20所示。



注:图中尺寸单位为mm。

图20 试验桩B采用的较大冲坑固化土填充示意图

Fig. 20 Filling diagram of test pile B with larger pit-cured soil

根据扫测结果,钢管桩B设计填充方量为弱固化土1 200 m³,标准固化土600 m³。通过泵送的方式沿钢管桩根部从桩周3个方向同时打入,慢慢流散至指定位置。弱固化土方量打完后,继续进行标准固化土充填。钢管桩B本次试验固化土方量总计为1 800 m³,施工时间为2018年10月。

5.3.4 固化土施工检测情况

2019年初,该抢修工程固化土施工全部完成后进行了检测,试验桩位B扫测3D效果图如图21所示。

可以看到距桩基础中心位置半径50 m范围内,冲坑已被基本填平,固化土顶部标高距坑周边泥面标高尚有一定的不足,风机基础周边已无冲坑,该机位核算相对周边平均冲淤量为-300 m³。未回填到泥面标高的原因经分析认为是在施工前,由于冲刷,海床表面会形成悬浮泥浆层,而多波束测量不出来,抛沙袋或吹填固化土后,会将这部分泥浆层压实或挤走,且因重力会部分沉降,致使多波束测量结果与实际情况相比偏小。

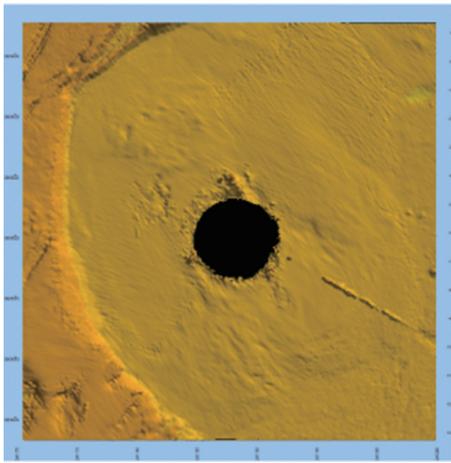


图21 试验桩B固化图施工完成后扫测效果图

Fig. 21 Sweep effect of test pile B curing soil after construction

鉴于固化土施工完成后, 桩周已形成一层较为坚固的固化土壳层, 能有效抵抗海底波流冲刷, 起到了桩基础保护作用, 因此不再对此基础所欠的方量进行填充。

5.4 环境保护指标

固化土项目准备、实施、验收全过程中, 该项目请某海洋监测中心站按照《疏浚物海洋倾倒分类和评价程序》、《海洋监测规范》、《海洋调查规范》进行了类别评价。对淤泥固化土进行了疏浚填充物指标监测, 共采取样品5个, 检测铜、铅、锌、铬、镉、砷、汞、油、666、DDT、PSBs、硫化物、有机碳共13项指标, 测试分析及分类评价结果如表4所示。

表4 淤泥固化后离子含量表

Tab. 4 Table of ion content after silt curing mg/kg

检测项目	检测标准	试样测试值	结论
铜(10^{-6})	≤ 50	33.6	合格
铅(10^{-6})	≤ 75	15.7	合格
锌(10^{-6})	≤ 200	78.6	合格
镉(10^{-6})	≤ 0.8	0.051 2	合格
铬(10^{-6})	≤ 80	33.7	合格
汞(10^{-6})	≤ 0.3	0.034 6	合格
砷(10^{-6})	≤ 20	13.5	合格
油类(10^{-6})	≤ 500	22.2	合格
666(10^{-6})	≤ 500	未检出	合格
DDT(10^{-6})	≤ 20	未检出	合格
PSBs(10^{-6})	≤ 20	未检出	合格
硫化物(10^{-6})	≤ 300	6.19	合格
有机碳(10^{-2})	≤ 2	0.69	合格

根据检测结果可知, 本次疏浚填充物检测, 铜、铅、锌、铬、镉、砷、汞、油、666、DDT、PSBs、硫化物、有机碳含量均符合清洁疏浚物标准, 为清洁疏浚填充物。

6 结论

通过2017年10月~2019年7月某海上风电项目采用淤泥固化土方案进行海上风力发电机大直径单管桩基础防冲刷试验, 根据目前的检测结果基本有如下结论:

6.1 施工便捷、高效

淤泥固化土方案利用固化土具有较高流动性的特点, 采用船上调配直接泵送的工艺, 可将固化土泵送至指定部位, 全面覆盖, 且可规模化作业, 大大缩短了海上作业时间。

6.2 施工安全、可靠

采用管道泵送工艺, 施工作业时无需靠近桩基, 可大大减少施工中对桩基、海缆碰撞所产生的意外损伤, 安全防护可靠有保障, 施工作业时不影响风电场正常运行。

6.3 经济性好

由于固化土成分为航道疏浚废弃的淤泥和固化剂调配而成, 材料成本与石块、中粗砂+土工布袋基本相当, 低于仿生草、连锁块。施工工艺简便, 海上作业周期短, 约2天完成一根桩基础防护施工, 整体综合成本较低。

6.4 抗冲刷能力强

材料整体匀质性好, 粘聚力指标高, 抗冲刷能力强(可抵抗4 m/s以上流速的水流冲刷)。

6.5 与桩基贴合性好

自流性可控, 施工中的液态状与桩基贴合紧密, 没有缝隙, 不易产生冲刷点, 边界可形成缓坡, 不易产生冲刷启动。

6.6 结构整体性好

底部贴合且融合于海床形成紧密的整板结构, 潜在的抵御涌浪破坏作用效果显现。

6.7 水稳定性及耐久性

从试验效果看, 固化土性能稳定, 修复效果明显, 有效解决了风电桩基础防护及修复中的难题, 大大减少工程后期的维护费用。固化土理论寿命可达50年以上, 但工程实践应用时间较短, 仍需进

一步验证。

6.8 环保价值高

固化土材料符合国家的各项环保要求,同时减少了对砂石料等不可再生资源的消耗,具有一定的环境保护优势。

固化土在海洋工程的应用目前只是小范围的试验,效果较好,今后要继续加强观察,继续监测长期冲刷对其是否造成持续的影响;继续优化固化土配比和施工工艺,降低成本使其得到大范围的应用;扩大试验范围,在其他海域、风场继续进行推广应用,观测其在其它海域环境的适用性;相信随着技术的不断成熟,这种新技术在海上风电基础的防冲刷应用中一定会大放异彩!

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 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.
HUANG S M. Application research of ecosystem theory in offshore wind farm project management [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 143-148.
- [3] 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, 115(5): 42-49.
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), 2018, 115(5): 42-49.
- [4] 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.
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.
- [5] 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.
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.
- [6] 林城,韩杰,CAROLINE B, et al. 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.
LIN C, HAN J, CAROLINE B, et al. Analysis of laterally loaded piles in sand considering scour hole dimensions [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 24-36.
- [7] ZHAO X, WANG X. Simulation of piles in hydraulic model and experiment study on local scour at pile foundation in offshore wind farm [J]. Computer, 2009, 21(4): 1-4.
- [8] MENZEL P, RÜCKBORN T, LEDER A. Flow and scour around cylindrical objects in laboratory experiments [C]//Marine Technology Society, IEEE. MTS/IEEE OCEANS - Bergen, 2013. Bergen: Marine Technology Society, IEEE, 2013: 1-8.
- [9] 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.
LI Y J, BI M J. Study on scour test of jacket foundation for offshore substation [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5 (Supp. 1): 123-128.
- [10] 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.
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.

作者简介:



和庆冬

和庆冬(通信作者)

1973-, 男, 河南焦作人, 国家电投集团江苏海上风力发电有限公司工程部主任, 高级工程师, 国家一级建造师, 国家注册安全工程师, 主要从事火电、海上风力发电工程技术管理工作 (e-mail) he2006126@126.com。

戚建功

1986-, 男, 江苏淮安人, 学士, 国家电投集团江苏海上风力发电有限公司工程部海洋工程主管, 工程师, 国家一级建造师, 国家注册安全工程师, 主要从事海上风电、港口航道与海岸工程技术管理工作 (e-mail) 304302581@qq.com。

(责任编辑 李辉)