

大直径单桩基础冲刷防护范围及防护效果试验研究

周德棕¹, 毕明君^{2,✉}, 章海东¹, 张伟¹, 张桂志¹

(1. 南方海上风电联合开发有限公司, 广东 珠海 519080;
2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 海上风机服役期间受到长期波流联合作用, 极易发生局部冲刷, 从而威胁到风机的整体稳定性和安全性。[方法] 针对直径 8.0 m 风电基础开展了比尺 1:30 的正态物理模型试验, 对冲刷深度和砂被、固化土防护范围和防护效果进行了研究。[结果] 结果表明, 考虑水动力条件较好情况下, 模型最大冲深为 0.133 m, 采用厚度 1 cm 拼合尺寸 1.0 m×1.0 m 砂被可以满足稳定性要求, 采用固化土防护时需要防护范围不小于 5 倍桩直径, 并需要在固化土边缘铺设块石避免固化土下部发生淘刷。[结论] 试验结论可为同类工程冲刷试验和工程设计提供参考。

关键词: 海上风电; 单桩基础; 局部冲刷; 砂被防护; 固化土防护

中图分类号: TK89; P75; TU476

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0072-09

开放科学(资源服务)二维码:



Experimental Research on Scour Protection Range and Protection Effect of Large Diameter Monopile Foundation

ZHOU Dezong¹, BI Mingjun^{2,✉}, ZHANG Haidong¹, ZHANG Wei¹, ZHANG Guizhi¹

(1. Southern Offshore Wind Power Joint Development Co., Ltd., Zhuhai 519080, Guangdong, China;
2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Under the wave-current combinations during the service period of offshore wind turbine, local scour inevitably occurs around pile foundation, which threatens the overall stability and safety of offshore wind turbine. [Method] In this paper, the normal physical model test at a scale of 1:30 was carried out for the wind power foundation with a diameter of 8.0 m to study the scour depth, sand cover, solidified soil protection range, and protection effect. [Result] The results show that due to the good hydrodynamic conditions considered in this test, the maximum scour depth is 0.133 cm. In this case, the 1 cm-thick sand cover with a splicing size of 1.0 m×1.0 m can meet the stability requirements. When solidified soil is adopted for protection, the protection range shall not be less than 5 times the pile diameter, and block stones shall be laid at the edge of solidified soil to avoid scouring at the lower part of solidified soil. [Conclusion] The test results can provide reference for scouring test and engineering design of similar projects.

Key words: offshore wind power; monopile foundation; local scour; sand cover protection; solidified soil protection

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/>).

随着环境问题日益突出, 优先发展新能源已引起各国的重点关注。综合分析国家能源转型要求、清洁能源消纳目标以及新能源成本快速下降等因素, 预计“十四五”期间, 我国年度新增风电装机有望达到 25 GW, 到 2025 年, 全国新能源总装机规模在 750 GW ~ 800 GW, 占全国电源总装机的 26% ~ 28%,

发电量占比约为 12%。根据江苏、广东、浙江、福建、上海等国家或地方政府已批复的海上风电发展规划进行测算, 预计到 2025 年中国海上风电累计装机容量将达到 30 GW 左右, 80% 的装机集中在江苏、广东、福建等省份, 江苏、广东有望建成千万千瓦级海上风电基地^[1]。

收稿日期: 2021-09-26 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电桩基础及海缆稳定性动态监测一体化设备研发”(ER06681W)

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。原本处于动态平衡的海床,由于单桩基础的安装,将会改变局部的水动力条件,使得维持动态平衡的外部条件被打破,其直接后果是导致结构物附近的泥沙发生局部冲刷。

桩基周围的局部冲刷,可能会致使基础结构频率改变而影响风电机组正常发电,甚至导致整体基础结构丧失稳定性而引发灾难。国内外已经对桩基周围的局部冲刷问题进行了广泛研究,研究方向主要集中在波浪作用或波流联合作用对桩基础周围海床的冲刷侵蚀^[2-3]、冲刷深度和冲刷范围^[2,4]开展物理模型试验或者数值计算等研究。高徐昌等^[5]基于能量守恒原理,提出了1种潮流作用下的局部冲刷深度预测公式;Liang等^[6]根据796个现场实测数据,分析了中美规范的计算方法,发现两者的冲刷深度预测均偏于不安全;韩海骞^[7]通过总结杭州湾桥梁试验结果,建立了潮流作用下的大直径墩柱冲刷计算公式。Wang等^[8]基于水槽试验,总结了适用于波浪引起冲刷计算的公式。张玮等^[9]对比了几种不同的基础冲刷计算公式,改进了波浪作用的方式并且选择了一种推荐公式。杜硕等^[10]结合江苏如东海上风电场的冲刷监测数据,应用4种统计学评价指标,提出适用于波流作用下的单桩基础局部冲刷深度预测公式,预测值与现场监测数据吻合较好。

局部冲刷会使得桩基基础的承载力下降,横向受力不均匀,最终会导致桩基基础发生在位失稳,严重威胁风机的安全运营。Mostafa^[11]分别基于Plaxis软件和Lpile软件,分析了黏性土和砂土地基中单桩基础水平承载力的变化特点,并对比分析了两种结

果;马殿滨等^[12]考虑了冲刷前后土体物理特性的变化特点;杨少磊和马宏旺^[13]建立了考虑冲刷情况下海上风电单桩基础的优化设计模型,结果表明,考虑冲刷的工况下适当增加单桩基础的径厚比值比增加单桩长度经济性更好。

减少桩基局部冲刷对桩基影响另一方面可以从加强对床面防护入手,和庆冬和戚建功^[14]通过某海上风电项目运行1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。本文从风机基础砂被和固化土防护方案开展了物理模型试验,分析了不同防护方案的防护效果及存在不足,对未来桩基础防护方案给出建议。

1 工程概况

本工程项目场址位于珠江口外的伶仃洋海域,场址属于广东省海上风电工程规划中场址,本工程规划容量为198 MW,一期总容量为120 MW,二期工程位于一期工程南侧,规模78 MW。一期建设34台3 MW及3台6 MW风机,完成了34台3 MW风机基础的土建及31台3 MW风机的安装调试工作。相应配套的集电海缆、三角岛升压站、集控中心、两回110 kV送出海缆中的首回均已建设完成。

本工程采用大直径单桩基础,考虑到工程所在区域的水文、地质条件及单桩基础周围土易冲刷的特点,本次针对直径8.0 m桩基础开展了波流局部冲刷试验研究,并对砂被等防护效果进行验证。主要研究内容和水动力条件见表1。

表1 试验内容及和水动力条件

Tab. 1 Test contents and hydrodynamic conditions

研究内容	海床高程/m	水位/m	波浪重现期/a	流速/(m·s ⁻¹)	H _{19%} /m	H _{13%} /m	T/s
风机基础冲刷(直径8.0 m)	-10.45	极端高水位3.87	50	1.10	7.8	5.9	9.0
	-10.45	极端低水位-1.39	50	1.10	5.4	4.1	7.6
	-10.45	设计高水位1.80	1	0.86	2.5	1.7	5.1
	-10.45	设计低水位-0.63	1	0.86	2.4	1.7	5.0
防护效果	-10.45	极端高水位3.87	50	1.10	7.8	5.9	9.0
	-10.45	极端低水位-1.39	50	1.10	5.4	4.1	7.6

2 物理模型试验

2.1 模型设计

本次物理试验在水槽中进行,水槽规格为:长×宽×深=44.0 m×3.0 m×1.2 m,水槽一端配有造波

机系统,可根据拟定的波浪要素,自动产生所需的不规则波浪。造波机后侧和水槽的另一端设置消浪斜坡。水槽内安置了 4 台大流量潜水泵。在距离造波板 20.0 m 处布置 3.0 m×3.0 m 动床,具体布置见图 1。

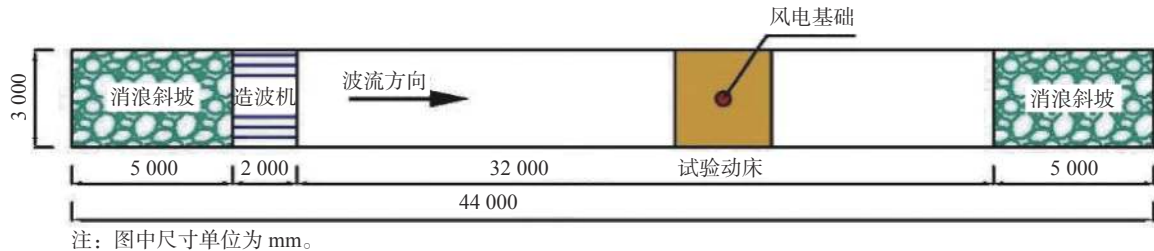


图 1 模型试验布置图

Fig. 1 Layout of model test

波高测量采用电容式波高仪,采用 DS30 多功能自动采集系统采集,由计算机控制并进行数据处理。流速采用旋桨流速仪进行测量。地形测量为在水槽量测安装滑道及滑块,采用激光测距仪进行测量,见图 2。



图 2 试验动床及风电桩基础模型照片

Fig. 2 Picture of erodible beds and pile foundation model of wind turbine

2.2 模型相似及模型沙选取

1) 模型相似

竖向圆柱形状的结构是海洋工程中的重要构筑物,其周围的局部冲刷直接关系到建筑物的安全与稳定。在圆柱周围冲刷坑形成过程中,其周围的水流、波浪运动使泥沙起动并输移,因此,在确定物理试验模型的相似比尺时,不但要考虑结构尺寸按比例缩尺,更应该考虑水流、波浪以及泥沙运动的相似比尺和冲淤形态的整体相似。本次试验将根据工程结构特点和工程海域的水动力条件,采用大比尺模

型试验。模型设计比尺相似要求如下:

由水流平面二维运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u^2}{C^2 H} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v^2}{C^2 H}$$

主要比尺关系:

重力相似(流速比尺):

$$\lambda_u = \sqrt{\lambda_h} \quad (2)$$

阻力相似(糙率比尺):

$$\lambda_C = \sqrt{\lambda_l / \lambda_u}$$

$$\text{或: } \lambda_n = \lambda_h^{2/3} \lambda_l^{-1/2} \quad (3)$$

水流运动相似:

$$\lambda_t = \lambda_l / \lambda_u \quad (4)$$

式中:

λ_h, λ_l —— 模型几何比尺;

λ_C, λ_n —— 速度比尺;

λ_t —— 时间比尺。

2) 模型沙选取

由于本模型的主要任务是研究风机基础附近冲刷坑深度及范围,因此模型沙选择主要考虑泥沙起动相似 $\lambda_{vc} = \lambda_v$ 。

由风电基础现场土层采样资料,海床表层 1~7 m 为淤泥,塑性指数(I_p) 在 11.8~23.8; 其下 2~8 m 皆为淤泥质粉质黏土,塑性指数(I_p) 在 8.2~29.2。

工程区土层泥沙起动摩阻流速(u_{*c})可按下式计算:

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (5)$$

$$\tau_c = 0.163I_p^{0.84} \quad (6)$$

式中:

I_p ——土的塑性指数(考虑到本次试次风电基础的可能冲刷深度, 取为 8.2 进行计算);

τ_c ——临界起动切应力(N/m²);

ρ ——水的密度。

结合以往的研究经验, 根据比尺相似的原则, 经过比较选择, 本次物理模型试验的模型砂采用中值粒径 d_{50} 为 0.30 mm, 密度 γ_s 为 1.33 t/m³ 的煤粉, 原来模拟工程海域淤泥土层的海床。

本次物理模型试验选用窦国仁公式计算纯水流作用下泥沙的起动流速:

$$V_c = 0.408 \ln \left(11 \frac{h}{\Delta} \right) \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + 0.19 \frac{\varepsilon_k + g h \delta}{d} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中:

d ——泥沙中值粒径;

Δ ——糙率, 当 $d < 0.50$ mm 时, 取 $\Delta = 0.50$ mm;

ε_k ——泥沙粘结力参数, 原型沙取 $\varepsilon_k = 2.56$ cm³/s², 煤粉取 $\varepsilon_k = 0$;

δ ——薄膜水厚度, 取 0.21×10^{-4} cm;

g ——重力加速度, 取 9.81 m/s²。

对于波浪作用下泥沙起动计算, 原型沙起动条件仍然采用起动摩阻流速 (u_{*c})。

Madsen 和 Grant^[15] 将泥沙起动标准曲线引入到波浪作用下。提出采用 Jonsson^[16] 推荐的波浪摩擦系数 f_w 来计算振荡流作用下动床床面的切应力, 其中床面剪应力的瞬时最大值 τ_{cm} 为:

$$\tau_{cm} = \rho u_{*c}^2 = \frac{1}{2} f_w \rho u_{mc}^2 \quad (8)$$

式中:

u_{mc} ——微幅波理论确定的波浪水质点近底水平速度的最大值;

f_w ——波浪摩擦系数, 可由下式计算:

$$f_w = 0.09RE^{-0.2} \quad (9)$$

式中:

RE——波浪雷诺数, $RE = \frac{u_{mc} a_m}{\nu}$;

ν ——粘滞系数;

a_m ——波浪水质点近底水平振幅最大值, 由微幅波理论确定。

本次物理模型试验采用 Zhou 等^[17] 提出的公式, 进行波浪作用下的模型沙起动计算, 即:

当 $d < 0.05$ cm 时, 为层流区:

$$\psi_m = 0.094 S_*^{-0.26} \quad (10)$$

当 $d \geq 0.05$ cm 时, 为紊流区:

$$\psi_m = 0.05 \quad (11)$$

$$S_* = \frac{d}{4\nu} \sqrt{(s-1)gd} \quad (12)$$

式中:

s ——泥沙的比重;

d ——泥沙中值粒径;

ν ——粘滞系数。

计算得到的水流、波浪作用下泥沙起动相似条件分别见表 2 和表 3。

由表可见, 水流、波浪作用下原型沙和模型沙起动流速相似比尺基本接近流速比尺值, 本次试验模型比尺取为 1:30, 模型试验动力条件见表 4。

表 2 水流作用下泥沙起动流速及其比尺

Tab. 2 Incipient velocity of sediment and model scale under the action of current

原型: $I_p=8.2, u_{*c}=0.031$ m/s		模型: 煤粉 $d_{50}=0.30$ mm, $\gamma_s=1.33$ t/m ³		相似比尺	
水深/m	起动流速/(m·s ⁻¹)	水深/m	起动流速/(m·s ⁻¹)	流速比尺	起动流速比尺
13.4	0.76	0.45	0.147	5.48	5.17
9.2	0.71	0.31	0.133	5.48	5.34

表 3 波浪作用下泥沙起动流速及其比尺

Tab. 3 Incipient velocity of sediment and model scale under the action of wave

原型: $I_p=8.2, u_{*c}=0.031$ m/s		模型: 煤粉 $d_{50}=0.30$ mm, $\gamma_s=1.33$ t/m ³		相似比尺	
周期/s	近底起动流速 $u_{mc}/(m·s^{-1})$	周期/s	近底起动流速 $u_{mc}/(m·s^{-1})$	流速比尺	起动流速比尺
5.3	0.49	0.96	0.087	5.48	5.63

表 4 局部冲刷模型试验内容和动力条件

Tab. 4 Contents and hydrodynamic conditions of model test for local scour

研究内容	水位/m	水深/m	波浪重现期/a	流速/(m·s ⁻¹)	H _{1%} /m	H _{13%} /m	T/s
不带防护措施	极端高水位3.87	0.48	50	0.20	0.26	0.20	1.64
	极端低水位-1.39	0.30	50	0.20	0.18	0.14	1.39
	设计高水位1.80	0.41	1	0.16	0.08	0.06	0.93
	设计低水位-0.63	0.33	1	0.16	0.08	0.06	0.91
带防护措施	极端高水位3.87	0.48	50	0.20	0.26	0.20	1.64
	极端低水位-1.39	0.30	50	0.20	0.18	0.14	1.39

2.3 试验过程

本次试验开始前,先在动床段周围布置波高测量仪,率定水槽内试验时的设计波浪要素,将率定系数记录到造波系统的计算机里,供冲刷试验时使用。

进行冲刷试验之前,先在动床段的中心位置安装缩尺后的桩基模型,然后将模型砂铺满动床段,最后开始放水至试验设计水深。

进行模拟波浪共同作用冲刷试验过程中,首先,调试水槽内水流的流速,当实测的平均流速达到试验设计流速时;然后,启动造波机,按前述设定的率定系数,施加波浪条件;最后,连续监测单桩基础周围局部地形变化情况,当连续 2 次监测到地形数据(包括冲刷深度和冲刷范围)基本一致时,则认为本次试验的局部冲刷达到了冲淤平衡状态,停止试验,测量模型周围冲刷坑的范围和深度。

对于防护试验,铺平模型沙后铺设砂被或采用水泥砂浆构建固化土模型,以研究防护效果。

3 桩基局部冲刷特征结果

当流体流经圆柱结构时,由于结构的存在,导致其周围的流动结构发生深刻变化,具体包括圆柱前方的下降水流、前缘马蹄涡结构、后方尾涡脱落以及圆柱两侧的流线收缩,相关的流动结构如图 3 所示,流动结构的改变对圆柱的局部冲刷有着重要的影响作用。马蹄涡是诱发水下垂直圆柱发生局部冲刷的关键因素,众多学者对其开展大量的研究工作。由于圆柱的存在,其上游会产生负压梯度,从而使来流边界层发生流动分离,分离的边界层会在圆柱的前缘形成马蹄涡系结构^[18]。图 4 分别为极端高水位

叠加 50 a 一遇波浪和 0.20 m/s 水流条件变截面桩基受波浪作用后海床照片和极端低水位叠加 50 a 一遇波浪和 0.20 m/水流条件变截面桩基受波浪作用后海床照片。

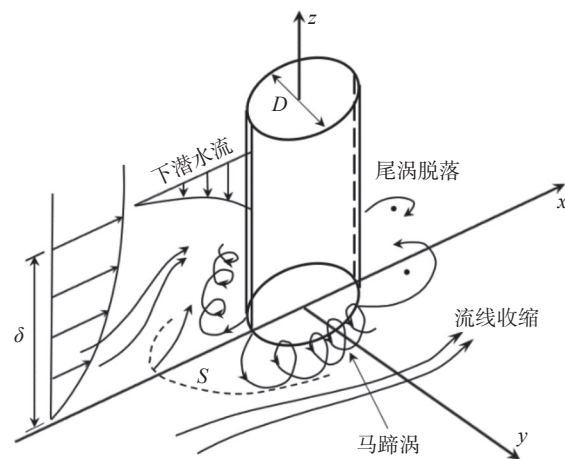


图 3 单桩基础周围流动结构

Fig. 3 Fluxion structure around monopile foundation

表 5 为本次试验所考虑组次最大冲刷深度,从结果可见,最大冲刷深度发生于极端高水位叠加 50 年一遇波流情况,最大冲刷深度为 0.13 m,冲刷坑沿波流方向范围约 1.0 m,垂直波流方向范围约 1.34 m;对于设计高水位,由于叠加波浪和水流条件较好,因此最大冲刷深度只有 0.06 m,冲刷坑沿波流方向范围 1.0 m,垂直波流方向范围约 1.0 m。试验结果表明,对于本次所考虑水位和波流条件,最大冲刷深度不超过桩径 0.5 倍,总体来讲冲刷深度较小。

4 不同防护措施试验结果对比分析

毕明君^[2]等针对砂质海岸单桩基础的冲刷特征



(a) 极端高水位时波流作用后底床情况



(b) 极端高水位时波流作用后底床情况

图 4 极端高、低水位时波流作用后底床情况

Fig. 4 Erodeable beds after wave and current action at extreme high and low water levels

表 5 变截面桩基模型冲刷深度结果

Tab. 5 Scour depth results of variable section monopile model

水位	波浪重 现期/a	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	$H_{1\%}/$ m	$H_{13\%}/$ m	$T/$ s	最大冲刷 深度/m
极端高	50	0.20	0.26	0.20	1.64	0.133
极端低	50	0.20	0.18	0.14	1.39	0.129
设计高	1	0.16	0.08	0.06	0.93	0.062
设计低	1	0.16	0.08	0.06	0.91	0.059

与防护措施开展了试验研究, 结果表明砂被间的缝隙仍然会使得泥砂被淘出, 本次试验中首先将冲刷坑采用 3.7~7.4 g 石子回填、整平, 施工期间桩基冲刷坑深度取为 5 cm, 冲刷坑范围为直径 0.5 m, 在其上覆盖拼合后尺寸 1.0 m×1.0 m 厚度为 1 cm 砂被, 单块砂被尺寸为 0.5 m×0.5 m, 图 5 为砂被防护铺设过程照片。在极端高水位和极端低水位及相应波浪作用 3 h 后, 砂被具有较好的稳定性, 在砂被边缘处存在一定的冲刷, 但是由于砂被为柔性结构, 因此砂被边缘可以自由弯曲并与海床贴合, 见图 6。

近年来, 砂被、块石等原材料价格上涨较快, 同



图 5 砂被铺设后的单桩模型照片

Fig. 5 Picture of monopile model with sand blanket



图 6 试验后的砂被防护单桩模型照片

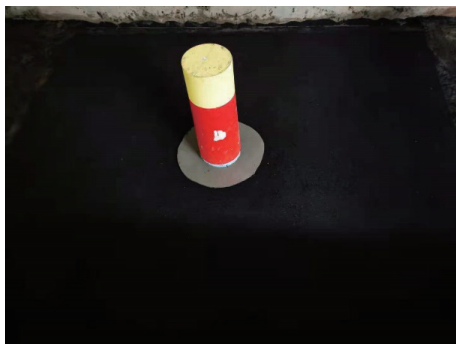
Fig. 6 Picture of monopile model with sand blanket after test

时砂被铺设工艺复杂、施工难度较大, 风电基础防护也逐渐尝试新的防护方法。固化土防护是国内外新推出的一种新型胶凝材料固化技术, 将淤泥固化后产生防护层, 其强度将稳定持续增长, 是替代砂被、抛石防护的优良材料, 可以用于基础防护工程^[14]。

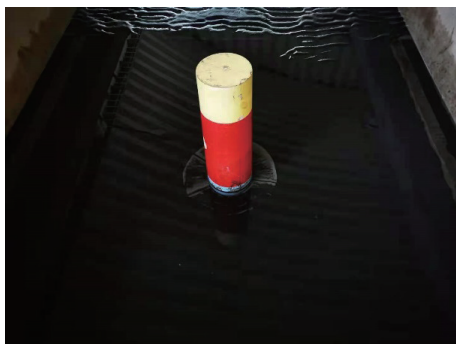
由于本次模型试验为缩尺试验, 比尺的存在导致无法实现对固化土浇筑过程和凝固过程的模拟, 本次试验中采用水泥砂浆对固化土进行模拟, 主要关注防护范围对防护效果的影响。试验中面固化土厚度为 1.0 cm, 防护范围直径分别为 5.3 cm、8.0 cm 和 13.3 cm。

与圆柱结构存在会导致其周围的流动结构发生深刻变化的机理类似, 固化土防护结构也会对水流产生影响, 因此在固化土防护边缘处会形成一定冲刷。图 7 和图 8 分别为防护范围直径为 5.3 cm 和 8.0 cm 时固化土在波流作用前后情况。固化土防护后在其边缘处引起的冲刷和淘刷, 导致固化土断裂和塌陷, 从而降低对桩基周围底床的防护效果。针对该情况, 对于防护范围直径 13.3 cm 情况, 在固化

土边缘铺设宽度为 16.76 cm 的 1.7~3.4 g 块石。由于块石较重,局部水流流速增加或者马蹄涡并不能使块石发生失稳,在波流作用下,边缘处块石可以形成稳定缓坡对固化土形成防护,图 9 为该防护方案的尺寸图及波流作用后情况。可见当固化土防护范围较大,桩基所引起的水流变化对固化土以外区域影响较小,同时由于块石的防护,杜绝了固化土下部形成淘刷,从而整个防护结构较为稳定。因此建议采用固化土进行防护时,防护范围不小于 5.0 倍桩基直径,在固化土边缘应铺设一定量块石以抑制固化土下部淘刷。



(a) 固化土防护在波流作用前的照片



(b) 固化土防护在波流作用后的照片

图 7 固化土防护在波流作用前后的照片(防护直径 0.53 m)

Fig. 7 Pictures of solidified soil protection before (a) and after (b) wave and flow action (the protection diameter is 0.53 m)

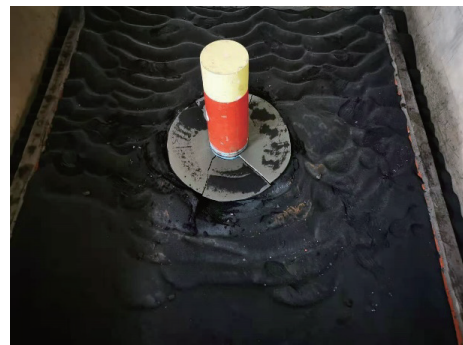
5 结论

本文针对单桩风机基础开展了冲刷及防护研究工作,主要关注砂被和固化土防护的防护范围和防护效果,研究主要结论如下:

1)对于本次试验所考虑直径 23.3 cm 桩基基础结构,最大冲刷深度为 13.3 cm,桩前冲刷坑沿波流方向范围约 0.5 m,冲刷情况整体较好。



(a) 固化土防护在波流作用前的照片



(b) 固化土防护在波流作用后的照片

图 8 固化土防护在波流作用前后照片(防护直径 0.80 m)

Fig. 8 Pictures of solidified soil protection before (a) and after (b) wave and flow action (the protection diameter is 0.80 m)



图 9 固化土防护在波流作用后照片(防护直径 1.33 m)

Fig. 9 Picture of solidified soil protection after wave and flow action (the protection diameter is 1.33 m)

2)基于砂被防护开展了试验研究,结果表明拼合后尺寸 1.0 m × 1.0 m 厚度 0.01 m 砂被可以对本工程特定的海床底质条件形成较好的防护,可为具体工程提供借鉴。

3)基于原材料上涨和施工较为复杂的情况,本次也对固化土防护措施开展了试验研究,试验结果表明固化土为硬防护,防护后边缘处仍然存在冲刷

和淘刷, 可以导致固化土断裂从而大大降低防护效果, 因此建议防护范围不应小于 5.0 倍桩直径, 并应在固化土防护边缘铺设块石以抑制固化土边缘处发生淘刷而影响固化土结构稳定。

参考文献:

- [1] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题 [J]. *中国电力*, 2020, 53(1): 1-9. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201911140](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201911140).
HUANG B B, ZHANG Y Z, WANG C X. New energy development and issues in China during the 14th Five-Year Plan [J]. *Electric Power*, 2020, 53(1): 1-9. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201911140](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201911140).
- [2] 毕明君, 刘晋超, 苏荣, 等. 砂质海岸单桩基础的冲刷特征与防护措施试验研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 103-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.016](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.016).
BI M J, LIU J C, SU R, et al. Experimental study on scour characteristics and protection measures for monopile on sandy coast [J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(2): 103-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.016](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.016).
- [3] AVENT R R, ALAWADY M. Bridge scour and substructure deterioration: case study [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(3): 247-254. DOI: [10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2005\)10:3\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2005)10:3(247)).
- [4] SUMER B M, FREDSE J, CHRISTIANSEN N. Scour around vertical pile in waves [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1992, 118(1): 15-31. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1992\)118:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:1(15)).
- [5] 高徐昌, 姚炎明. 潮流作用下桥墩局部冲刷深度公式研究 [J]. *科技通报*, 2019, 35(1): 232-235. DOI: [10.13774/j.cnki.kjtb.2019.01.045](https://doi.org/10.13774/j.cnki.kjtb.2019.01.045).
GAO X C, YAO Y M. Research of the formula of local scour depth at bridge piers under tidal flow [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(1): 232-235. DOI: [10.13774/j.cnki.kjtb.2019.01.045](https://doi.org/10.13774/j.cnki.kjtb.2019.01.045).
- [6] LIANG F Y, WANG C, YU X. Performance of existing methods for estimation and mitigation of local scour around bridges: case studies [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2019, 33(6): 04019060. DOI: [10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001329](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001329).
- [7] 韩海骞. 潮流作用下桥墩局部冲刷研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
HAN H Q. Research on local scour at bridge piers under tidal current action [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [8] WANG R K, HERBICH J B. Combined current and wave produced scour around a single pile [R]. Texas: Texas Engineering Experiment Station, 1983.
- [9] 张玮, 濮勋, 廖迎娣. 淤泥质海岸近海风电塔基局部冲刷计算研究 [J]. *海洋工程*, 2010, 28(2): 105-109. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2010.02.020](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2010.02.020).
ZHANG W, PU X, LIAO Y D. Calculation of local scour around piles of offshore wind power on muddy coast [J]. *The Ocean Engineering*, 2010, 28(2): 105-109. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2010.02.020](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2010.02.020).
- [10] 杜硕, 戴国亮, 高鲁超, 等. 波浪作用近海风机单桩基础局部冲刷深度预测 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(4): 616-622. DOI: [10.3969/j.issn.1001-0505.2020.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2020.04.003).
DU S, DAI G L, GAO L C, et al. Prediction of local scour depth at offshore wind turbine monopile foundation in combined waves and current [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(4): 616-622. DOI: [10.3969/j.issn.1001-0505.2020.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2020.04.003).
- [11] MOSTAFA Y E. Effect of local and global scour on lateral response of single piles in different soil conditions [J]. *Engineering*, 2012, 4(6): 297-306. DOI: [10.4236/eng.2012.46039](https://doi.org/10.4236/eng.2012.46039).
- [12] 马殿滨, 李志刚, 段梦兰, 等. 冲刷后地基土体特性及平台桩基承载力研究 [J]. *石油机械*, 2012, 40(6): 54-58. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2012.06.002](https://doi.org/10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2012.06.002).
MA D B, LI Z G, DUAN M L, et al. Research on foundation soil mass property after erosion and bearing capacity of platform pile foundation [J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(6): 54-58. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2012.06.002](https://doi.org/10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2012.06.002).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] MADSEN O S, GRANT W D. Quantitative description of

sediment transport by waves [C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu, USA, July 11-17, 1976. Honolulu: American Society of Civil Engineers, 1976: 1092-1112.

- [16] JONSSON I G. Wave boundary layers and friction factors [C]//Coastal Engineering Research Council of ASCE. Proceedings of the Tenth International Conference on Coastal Engineering, Tokyo, Japan, September, 1966. Tokyo: ASCE, 1967: 127-148.
- [17] ZHOU Y R, CHEN Y P, MA Q N. Threshold of sediment movement in different wave boundary layers [J]. *China Ocean Engineering*, 2001, 15(4): 509-520. DOI: [10.3321/j.issn:0890-5487.2001.04.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:0890-5487.2001.04.006).
- [18] SUMER B M, FREDSE J. The mechanics of scour in the marine environment [M]. New Jersey: World Scientific, 2002.

作者简介:



周德棕 (第一作者)

1984-, 男, 广东汕头人, 工程师, 华南理工大学电力学院电气工程及其自动化专业, 学士, 主要从事风力发电项目项目管理工作(e-mail)zhoudz@csg.cn。

毕明君 (通信作者)

1986-, 男, 山东荣成人, 高级工程师, 大连理工大学水利水电工程专业, 工学硕士, 主要从事海上风电场风机基础结构设计与建造研究工作(e-mail)bimingjun@gedi.com.cn。

章海东

1976-, 男, 安徽庐江人, 经济师, 中山大学行政管理专业, 长期从事电力建设方面工作(e-mail)314392481@qq.com。

张伟

1986-, 男, 广东珠海人, 工程师, 北京理工大学电气工程及其自动化专业, 学士, 长期从事海岛智能微电网运营及管理工作(e-mail)zhangwei3@csg.cn。

张桂志

1989-, 男, 广东茂名, 助理工程师, 武汉理工大学电气工程及其自动化专业, 学士, 长期从事电力行业和新能源风力发电行业生产维护管理工作(e-mail)zhangzLove@163.com。

项目简介:

项目名称 海上风电桩基础及海缆稳定性动态监测一体化设备研发(ER06681W)

承担单位 珠江水利委员会珠江水利科学研究所、中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司、安徽陶博士环保科技有限公司

项目概述 项目自主研发一套海上风电桩基础及海缆稳定性动态监测一体化设备, 破解风电基础监测精度低、实时性差和设备稳定运行难的技术瓶颈, 实现风电场基础动态监测与智慧管理。

主要创新点 (1)研发海上风电桩基础地形冲刷长期监测设备, 解决海上风电桩基础地形监测精度低、无法长期监测等问题; (2)研发海上风电场海底电缆稳定性高精度监测设备, 解决弱光纤振动信号捕捉难、精度低等问题; (3)开发海上风电桩基础及海缆稳定性动态监测数据管理系统, 实现监测数据的实时传输、数据管理及动态展示, 促进我省海上风电场运维产业的智能化与信息化; (4)实现一体化设备现场安装和运行, 解决高盐、高压、高腐蚀、高生物附着环境现场设备难以正常运行的难题, 提高设备使用寿命。

(编辑 李辉)