

砂质海岸单桩基础的冲刷特征与防护措施试验研究

毕明君^{1,✉}, 刘晋超¹, 苏荣², 王洪庆¹, 刘沙²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;

2. 南方海上风电联合开发有限公司, 珠海 519080)

摘要: [目的] 海上风电开发的一个重要环节是建造合适的海上风电基础支撑结构, 近年来, 单桩结构成为海上风电机组的主要基础形式。单桩基础在海洋环境中的局部冲刷问题对风机结构的稳定性有重要影响。[方法] 通过开展系列物模试验, 对某建于砂质海床并采用大直径单桩基础的风电场工程的桩基局部冲刷特征进行了研究, 分析了不同直径、水深、波浪以及水流等因素对局部冲刷深度和范围的影响, 并研究了砂被和沙袋等措施的防护效果。[结果] 研究表明, 对于直径7.0 m和6.5 m两种桩基, 冲刷最深处均在单桩迎水面, 最大冲刷深度为桩基直径的0.8~0.9倍。[结论] 采用无搭接方式铺设砂被并且采用沙袋填充冲刷坑可对桩基结构周围底床形成很好的防护, 可为同类工程冲刷试验和工程设计提供参考。

关键词: 砂质海床; 单桩基础; 局部冲刷; 模型试验; 冲刷防护

中图分类号: TM614; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0103-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental Study on Scour Characteristics and Protection Measures for Monopile on Sandy Coast

BI Mingjun^{1,✉}, LIU Jinchao¹, SU Rong², WANG Hongqing¹, LIU Sha²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. South Offshore Wind Power Joint Development Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: [Introduction] Constructing the proper wind turbine foundation is important during the construction of offshore wind farm, and the monopile has been one of the main structures for the wind turbine foundation in recent years. However, the local scour problem for the monopile under marine environment has significant influence on the stability of the wind turbine structure. [Method] In this paper, for one actual wind farm project on sandy coast, the physical model tests were conducted for the local scour of the monopile for different water levels and pile diameters to analyze the effect of wave and current on the scour depth, to study the scour area and depth under the action of combined wave and current, and the protection effect of the sand blanket and sandbag. [Result] The result showed that, for the two monopiles (diameters of 7.0 m and 6.5 m), the locations of maximum scour depth are both at the upstream face, and the maximum scour depth is about 0.8~0.9 times of the pile diameter. [Conclusion] The measure of laying sand blankets without overlapping and filling scour pits with sandbags can protect the bottom around the pile foundation very well, which can provide references for similar engineering scour test and engineering design.

Key words: sandy coast; monopile foundation; local scour; physical model test; protection

单桩作为一种最常见的海上风电机组基础, 广泛应用于国内外海上风电场工程中, 截至2018年12月, 采用单桩作为基础的海上风电机组超过已建成的机组的80%, 随着风能开发逐步走向深远海,

这一比例呈现缓慢下降趋势^[1]。单桩基础具有结构形式简单, 传力模式明确等特点, 其设计及施工经验成熟, 建造成本相对较低, 尤其适用于砂质海床。

位于砂质海床的单桩基础, 长期承受波浪、水流的往复作用, 其周围容易出现旋流, 带走附近的泥沙, 形成冲刷。基础局部的冲刷坑不但减少了钢管桩的埋深, 降低了基础的水平承载力, 还可能导

收稿日期: 2019-10-28 修回日期: 2020-02-23

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电吸力桶基础受力机理与变形控制关键技术研究”(EV04631W)

致风机—基础结构的固有频率降低,引起风机结构产生共振等不利影响^[2]。关于单桩基础的冲刷现象及防冲刷技术,国内外已经有不少学者通过现场试验、物模试验、软件模拟以及理论分析等手段,做了大量的研究工作。通过汇总分析大量欧洲海上风电场单桩基础局部冲刷的实测数据,Whitehouse等发现最大的局部冲刷深度接近1.38倍的基础直径^[3]。李亚军等^[4]对某建于砂质海床的海上升压站导管架基础进行了波流联合作用下,桩基局部冲刷情况及防护效果研究,迎水面基础最大冲刷深度为3.12 m,且块石防护效果优于沙袋防护。韩海骞^[5]通过总结桥梁的模型试验结果,建立了适用于海湾地区潮流作用下的大直径墩柱冲刷计算公式。Jones&Sheppard^[6]和王汝凯^[7],分别总结了适用于冲刷计算的公式,被广泛应用。张玮等^[8]验证了上述三种冲刷计算公式,并对改进了波浪的作用方式,推荐了较为适宜的计算公式。周益人等^[9]通过系列物模试验,研究了不规则波作用下圆柱形结构周围基床的变化规律,提出了最大冲刷深度的计算公式,并计算其出现的位置。祁一鸣等^[10]通过物模试验研究了某海域风电基础在波浪、潮流等共同作用下的局部冲刷情况,提出对桩基周边局部冲刷可进行抛石防护。

现有研究成果多见于单纯水流或者单纯波浪作用下的桩基局部冲刷研究等,波流共同作用下的研究相对较少,同时由于桩基局部冲刷涉及复杂的海洋动力环境、海床底质、桩径、水深等多种因素,十分复杂,经验公式很难直接应用于具体工程。因此,对于水动力条件恶劣的风电场风机基础的局部冲刷与防护问题需要通过物理模型试验进行专门研究。

本文以某建于砂质海床的单桩基础为研究对象,对不同桩径、不同水深、不同保护措施的基础局部冲刷情况进行物模试验,研究了在波、流联合作用下单桩基础周边冲刷的范围和深度,以及不同防护措施产生的防护效果,可为同类工程防冲刷设计提供参考。

1 工程概况

本风电场风机基础采用大直径单桩基础,研究机位的海床高程分别是-8.6 m和-7.0 m,桩径为

6.5~7.0 m,壁厚65~80 mm。工程海域海床底质以粉细砂为主,其粒径范围是0.1~0.2 mm。本风电场工程的极端高、低水位和设计高、低水位分别为3.88 m、-1.73 m和2.10 m、-0.43 m。本次物模试验中,波浪重现期分别为50年一遇和2年一遇;流速采用观测最大流速叠加50年一遇风海流为2.48 m/s。

2 物理模型试验

2.1 模型设计

物模试验中,模型用砂的相似性最为重要,还要确保水深、模型几何尺寸和水动力条件等的相似性。本次研究采用系列比尺模型延伸法^[11]进行,物模试验选取的系列比尺分别为1:40,1:60和1:80,将试验结果正态延伸来消除模型与原型之间相似不确定性带来的偏差。

在模型相似方面满足水流运动相似、波浪运动相似及泥沙运动相似。

为满足水流运动的相似性,根据水流的二维运动方程:

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

求解可得,流速相似比尺 $\lambda_u = \lambda_h^{1/2}$ 。

为确保波浪运动的相似性,应满足下列关系:波速相似 $\lambda_c = \lambda_h^{1/2} = \lambda_L^{1/2}$,波周期相似 $\lambda_c = \lambda_h^{1/2} = \lambda_L^{1/2}$,水质点运动相似 $\lambda_u = \lambda_v = \lambda_h^{1/2} = \lambda_L^{1/2}$ 。

为确保模型中泥沙运动与实际工程一致,应使波浪产生的速度与泥沙沉降速度成比例,即 $\lambda_w = \lambda_v = \lambda_u = \lambda_L^{1/2}$ 。

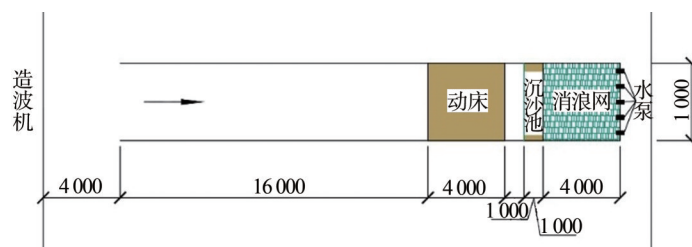
根据系列模型延伸法,按 $\lambda_v = \lambda_h^{1/2}$ 和 $\lambda_{vc} = \lambda_v$ 来计算模型比尺 λ_{h0} 。根据起动流速公式($V_c = (\frac{h}{d})^{0.14} (17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{d^{0.72}})^{1/2}$)计算,模型和原型的起动流速最低时,其泥沙粒径均为0.2 mm,基于此,物模试验采用中值粒径 $d_{50} = 0.2$ mm的天然沙作为试验用沙。

2.2 模型布置

物模试验中,为减少边壁影响,水槽宽/模型宽应大于8。本次试验建造的水槽宽度为4.0 m,长度为30.0 m,满足要求。水槽一端设置L型不规则波造波机,在距离造波机20.0 m位置设置4.0×4.0 m

的动床区, 后续布置 1.0×4.0 m 的沉砂池和 4.0×4.0 m 的消浪网, 详见图 1。试验时, 由计算机自动

控制造波机产生所需的水动力条件, 试验采用的随机波浪谱为 Jonswap 谱。



注: 图中尺寸单位为 mm。

图 1 波流局部冲刷模型布置

Fig. 1 Layout of local scour model under wave current

2.3 组次安排

本次物模试验针对 7.0 m 和 6.5 m 两种不同直径的单桩基础, 分别采用 1:40、1:60 和 1:80 的比尺, 在 50 年一遇波、流条件下, 进行冲刷模拟试验。对不同比尺的试验结果, 采用系列模型延伸法处理, 研究其在实际工程中的最不利冲刷深度。针

对 7.0 m 直径的单桩基础, 开展冲刷防护措施研究, 采用 1:40 的大比尺进行模拟实验。设置防冲刷措施前, 基础模型周围的冲刷坑是在 2 年一遇的波、流条件下形成的。之后, 桩基周围分别采用 200 kg 沙袋防护和 200 kg 沙袋填充后覆盖砂被两种方案进行防护, 模型采用 1:40 比尺。试验组次列于表 1。

表 1 试验组次安排

Tab. 1 Groups of test

研究内容	代表底高程/m 85 高程	水位/m 85 高程	重现期/年	流速/(m·s ⁻¹)	H _{1%} /m	H _{13%} /m	Tp/s	模型比尺
风机基础局部冲刷 桩径 7.0 m	-8.60	3.98 -1.83	50	2.59	7.21 2.52	6.07 1.92	12.2 10.0	1:40 1:60
风机基础局部冲刷桩径 6.5 m	-7.00	3.98	50	2.59	7.21	6.07	12.2	1:80
风机基础(直径 7.0 m) 冲刷坑形成	-8.60	3.98	2	1.47	4.55	3.49	8.6	1:40
风机基础(直径 7.0 m) 200 kg 沙袋+砂被防护	-8.60	3.98 2.20 -0.53 -1.83	50	2.59	7.21 4.83 3.30 2.52	6.07 3.72 2.53 1.92	12.2 11.6 10.6 10.0	1:40

2.4 试验方法

本次物模试验的主要步骤如下:

1) 安放结构模型之前, 在动床区域周围布置波高仪, 率定水槽内无结构时的波要素。

2) 放空水槽, 在动床区域的中央位置安放实验模型, 并在其周边填充模型砂, 确保砂面与周边水槽平齐。

3) 向水槽内注水至要求水位, 先调试水流要素, 使平均流速达到要求值时, 再启动造波机迭加波浪条件。

为了确定波流作用下对桩基局部冲刷影响过程, 针对 7.0 m 桩基在 50 年一遇极端高水位及相应

波流条件作用过程中每隔原型 6 h 对冲刷后桩基周围 4 个测点进行测量 (图 2), 直至两次测量地形较为接近时认为冲刷稳定。图 3 为原型第 6、12 h 后各测点冲刷深度测量结果, 可以看出波流作用原型 6 h 后, 冲刷深度基本达到稳定, 原型第 12 h 过后, 各点冲刷深度仅有少量变化, 因此后续试验均可认为波流作用原型 12 h 后冲刷坑即可达到稳定状态。

3 桩基局部冲刷特征结果及分析

3.1 波浪、水流对局部冲刷深度的影响

为了分析波浪、水流以及波流对桩基局部冲刷深度的影响, 对 1:40 模型比尺、直径 7.0 m 桩基

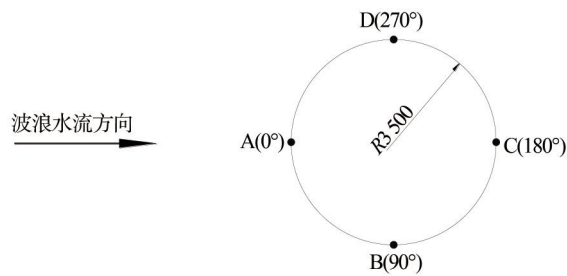


图2 桩周测点示意图

Fig. 2 Sketches of test points around the pile

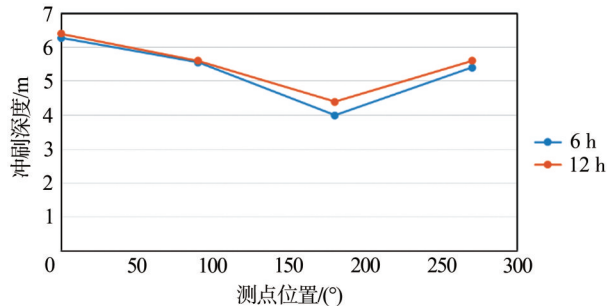


图3 不同测点不同时刻冲刷深度

Fig. 3 Scour depth of different test points at different times

分别在纯波浪、纯水流以及波流联合作用下的冲刷情况进行了试验。各情况的动力条件列于表2。图4为不同动力条件作用后桩基周围冲淤情况，可见

当纯波浪作用时，桩基周围广泛分布宽度较窄的沙纹，在桩基根部没有形成冲刷坑，而且个别位置存在泥沙淤积的情况；当纯水流作用时，桩基周围沙纹较为凌乱，桩基根部有较大冲刷坑形成；当波流联合作用时，桩基周围沙纹较为规律，桩基根部也有较大冲刷坑形成。图5分别为波流联合作用和纯水流作用导致的桩基模型周围不同位置的最大冲刷深度变化情况，可见在纯水流作用时背浪面（图2中C点）处冲刷深度要深于波流联合作用情况，但是在其余3个测点，波流联合作用引起桩基局部冲刷深度较纯水流作用时更深，而且不管是纯水流还是波流联合作用最大冲刷深度均发生在迎浪面（图2中A点），因此波流联合作用为更不利情况，下面重点研究波流联合作用的情况。

表2 不同动力条件对比试验组次

Tab. 2 Groups of contrast tests under different dynamic conditions

工况	代表底高程/ m 85 高程	水位/m 85 高程	重现 期/年	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$H_{1\%}/$ m	$H_{13\%}/$ m	T_p/s
纯波浪	-8.5	3.98	50	0	7.21	6.07	12.2
纯水流	-8.5	3.98	50	2.59	—	—	—
波流耦合	-8.5	3.98	50	2.59	7.21	6.07	12.2



(a) 纯波浪



(b) 纯水流



(c) 波流联合作用

图4 不同动力条件作用后桩周冲刷形态

Fig. 4 Scouring patterns under different dynamic conditions

3.2 不同水位及其波流条件对局部冲刷深度的影响

为了比较不同水位及其相应波流对局部冲刷深度影响，对1:40模型比尺、直径7.0 m桩基分别在极端高水位、设计高水位、极端低水位及其相应波流条件作用下的冲刷情况进行了试验。图6为不同水位及其相应波流条件下桩基各测点冲刷深度变化情况，可以看出，对于本桩基及波流动力条件，水位对冲刷深度影响并不十分显著，但是在极端高水位及其对应的波、流条件下，局部冲刷值稍大。

因此，后续不同比尺的物模试验研究，主要针对极端高水位下及相应的波流联合作用情况。

3.3 直径7.0 m桩基局部冲刷特征

在极端高水位及50年一遇波流联合作用下，针对7.0 m直径的单桩，开展了基础周围局部冲刷的系列比尺试验研究。根据采用各种桩基不同比尺的模型冲刷深度进行延伸，可分别得出直径7.0 m桩基原型最大冲刷深度，见图7。由图7可知在极端高水位及其50年一遇波流作用后，桩基最大冲

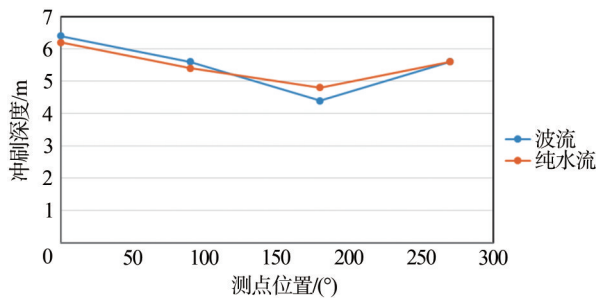


图 5 不同动力条件作用后桩基周围不同位置冲刷深度
Fig. 5 Scour depth of different test points under different dynamic conditions

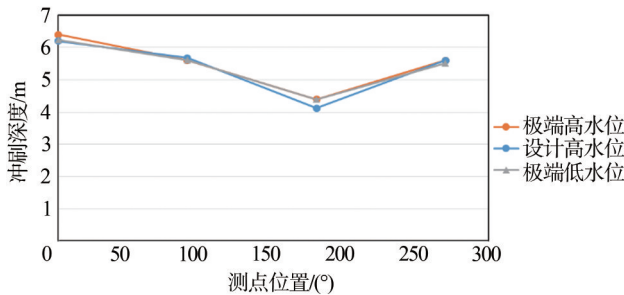


图 6 不同水位及其相应波流作用后桩周不同位置冲刷深度

Fig. 6 Scour depth of different points under several water levels with corresponding dynamic conditions

刷深度为 5.91 m。图 8 为直径 7.0 m 桩基极端高水位及波流作用后周围不同位置冲淤变化云图。从图 8 中可见, 冲刷坑主要围绕在单桩周围, 冲刷最深处在

在单桩迎水面及单桩结构两侧, 单桩背流侧冲坑略浅, 尾流区有淤积, 迎水面最大冲深 0.85 倍桩径, 为 5.91 m。在水位 3.98 m, 桩直径 7.0 m 条件下, 冲刷深度 -2.00 m 以上范围最远在单桩中心约 1.65 倍桩径范围, 冲刷深度 -4.00 m 以上范围最远在单桩中心约 1.10 倍桩径范围。垂直流方向冲刷深度 -2.00 m 以上范围最远在单桩中心约 1.70 倍桩径范围, 冲刷深度 -4.00 m 以上范围最远在单桩中心约 0.86 倍桩径范围。

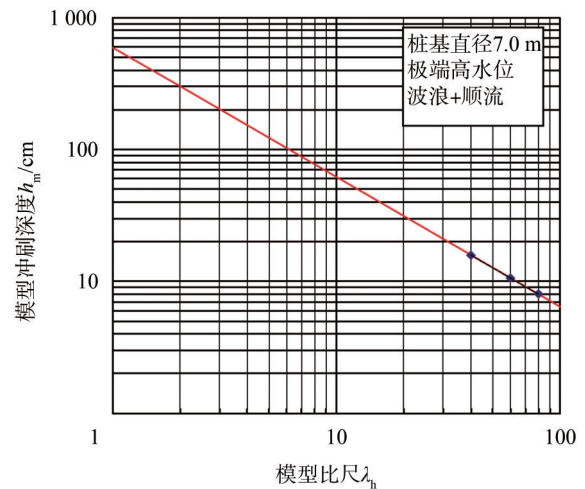


图 7 7.0 m 桩基系列模型延伸
Fig. 7 Extension of series model for pile of 7.0 m

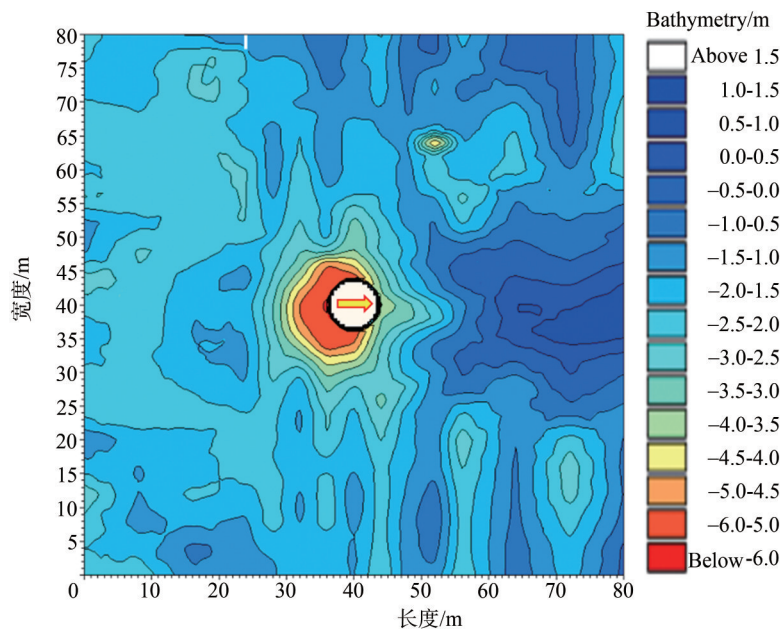


图 8 7.0 m 桩基冲淤变化云图

Fig. 8 Cloud diagram of scour and deposition for monopole of 7.0 m

3.4 直径6.5 m桩基局部冲刷特征

在极端高水位及50年一遇波流联合作用下,针对6.5 m直径的单桩,也开展了基础周围局部冲刷的系列比尺试验研究。

根据采用各种桩基不同比尺的模型冲刷深度进行延伸,可分别得出直径6.5 m桩基原型最大冲刷深度,见图9。由图9可知在极端高水位下经过50年一遇波流联合作用后,桩基周围出现的最大冲刷深度为5.53 m。

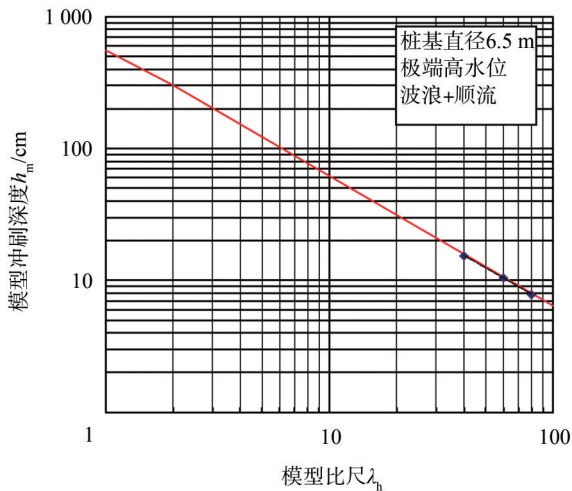


图9 6.5 m桩基系列模型延伸

Fig. 9 Extension of series model for pile of 6.5 m

图10为直径6.5 m桩基极端高水位及波流作用

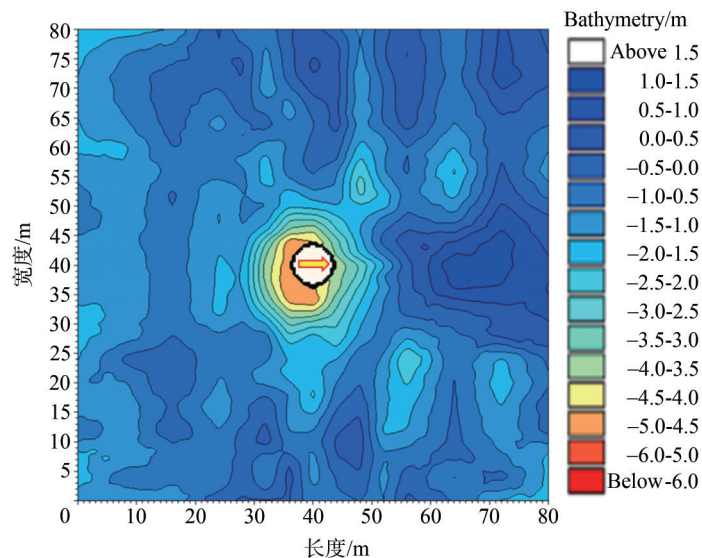


图10 6.5 m桩基冲淤变化云图

Fig. 10 Cloud diagram of scour and deposition for monopile of 6.5 m

后周围不同位置冲淤变化云图。从图10中可见,冲刷坑主要围绕在单桩周围,冲刷最深处在单桩迎水面及单桩结构两侧,单桩背流侧冲坑略浅,尾流区有淤积。在水位3.98 m,桩直径6.5 m条件下,迎水面冲刷深度-2.00 m以上范围最远在单桩中心约1.4倍桩径范围,冲刷深度-4.00 m以上范围最远在单桩中心约0.90倍桩径范围。垂直流方向冲刷深度-2.00 m以上范围最远在单桩中心约1.55倍桩径范围,冲刷深度-4.00 m以上范围最远在单桩中心约0.80倍桩径范围。

4 桩基防护措施研究

根据设计方案和施工工艺,风电基础全部桩基施工完毕后开展防护工作,先将防护施工时冲刷坑进行200 kg沙袋回填、整平,然后覆盖砂被。在极端高水位采用2012年观测期间最大流速叠加2年一遇波浪形成冲刷坑,然后采用上述防护措施防护并研究其在极端高水位、设计高水位、设计低水位、极端低水位及其相应50年一遇波浪、水流条件作用下稳定性情况。本次研究的砂被铺设方式包括有搭接铺设(逆流搭接和顺流搭接)和无搭接铺设。

4.1 砂被有搭接铺设

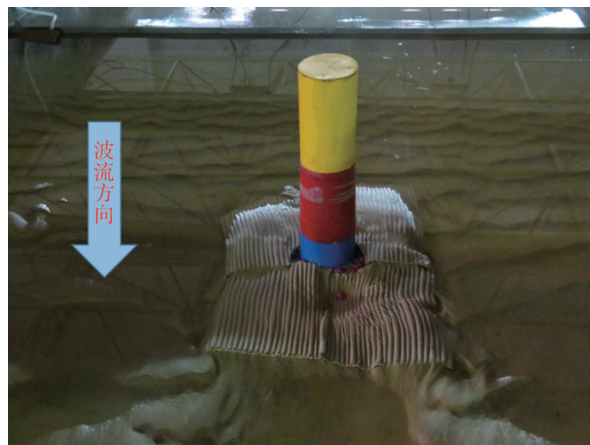
对于砂被有搭接铺设,搭接宽度为2 m,包括逆流搭接和顺流搭接,冲刷坑内均回填200 kg沙袋。

图11为各水位及相应50年一遇波浪要素+水流

作用后逆流搭接和顺流搭接砂被的状态。由试验结果可见:



(a) 砂被沿逆流方向搭接



(b) 砂被沿顺流方向搭接

图 11 铺设沙袋和搭接砂被后的冲刷情况

Fig. 11 Scour condition after laying sandbags and sand quilts with overlap joints

1) 对于逆流搭接, 在砂被迎流边缘处均被掀起, 但是砂被大部分区域仍可保持稳定。分析其原因, 一方面在水流叠加波浪作用后底床形成沙纹, 导致砂被铺设时不能很好的与床面贴合, 使得砂被在波浪、水流作用下容易被掀起; 另一方面由于砂被之间有 2 m 搭接, 在搭接处引起局部抬高, 但此处波浪、水流作用较底部作用更强, 因此容易将砂被搭接处被掀起。

2) 对于顺流搭接, 砂被整体稳定性较好, 未发生卷边情况, 但是局部有冲刷坑存在, 分析其原因, 在水流叠加波浪作用后, 所形成冲刷坑较浅,

因此可回填的 200 kg 沙袋厚度较薄, 从而使得 200 kg 沙袋下方泥沙在波流作用下仍被冲走而形成冲刷坑。

4.2 砂被无搭接铺设

从上述试验结果可知, 砂被搭接处容易在波流条件作用下被掀起, 因此将砂被进行调整, 使四块砂被互不搭接。对砂被下部采用泥沙回填和 200 kg 沙袋回填的稳定性分别进行了试验。

图 12 为各水位及相应 50 年一遇波浪要素+水流作用后无搭接砂被 (泥沙回填和 200 kg 沙袋回填) 的状态。由试验结果可见:



(a) 砂被下方回填泥沙



(b) 砂被下方回填沙袋

图 12 铺设无搭接砂被和沙袋后的冲刷情况

Fig. 12 Scour condition after laying sandbags and sand quilts without overlap joints

(1) 对于无搭接砂被下方采用泥沙回填的情况,在各级水位下,经过50年一遇波流联合作用后,砂被整体稳定性较好,但是桩基周围被冲出较大冲刷坑,最大深度4~5 m,从而使得砂被的防护作用被大大削弱,原因是由于渗入砂被下部的水流仍可使得泥沙从砂被之间的缝隙流出。

(2) 对于无搭接砂被下部采用200 kg沙袋回填的情况,在各级水位下,经过50年一遇波流联合作用后,由于砂被和200 kg沙袋的共同保护,使得桩基周围只有少量泥沙能被冲走,因此只有0.5~1.0 m左右冲刷坑,其余部分均具有很好的稳定性。

5 结论

本文通过开展系列物模试验,对某建于砂质海床并采用大直径单桩基础的风电场工程的桩基局部冲刷特征和冲刷防护措施进行了研究,研究表明:

1) 对于确定的基础模型以及水动力条件,水位对桩基周围局部冲刷深度影响并不十分显著;波流联合作用相对于纯波浪或纯水流作用时,对桩基周围局部冲刷更为不利。

2) 在极端高水位下波流联合作用时,桩基周围的局部冲刷情况最为不利,冲刷深度和冲刷范围均最大。

3) 对于7.0 m和6.5 m两种直径的桩基,冲刷深度最大处均出现在单桩迎水面,且最大冲刷深度为桩基直径的0.8~0.9倍。

4) 当采用砂被搭接方式进行结构冲刷防护时,采用顺流搭接方式优于逆流搭接;对于逆流搭接,搭接位置处的局部加高会导致砂被在波流作用下引起边缘卷起,保护效果欠佳;对于顺流搭接,砂被整体稳定性较好,未发生卷边情况,保护效果较好。

5) 当采用砂被无搭接方式进行结构冲刷防护且采用沙袋填充冲刷坑时,可对桩基结构周围底床形成很好的防护。

参考文献:

- [1] 王森,吴云青,苏萌,等.单桩式基础应用于我国海上风电的可行性探讨[J].电力建设,2013,34(4):63-66.
WANG M, WU Y Q, SU M, et al. Application of single pile foundation in offshore wind power in China [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(4): 63-66.
- [2] MORGAN C A, HODGETTS P F, SCHLEZ W W, et al. Review of offshore wind farm project features [R]. Bristol: Garrard Hassan and Partners Limited, 2003.
- [3] WHITEHOUSE R J S, HARRIS J M, SUTHERLAND J, et al. The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(1): 72-88.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] JONES J S, SHEPPARD D M. Scour at wide bridge piers [C]// ASCE. Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management 2000, Minneapolis, Minnesota, United States, July 30-August 2, 2000. Minneapolis: ASCE, 2000.
- [7] WANG R K, HERBICH J B. Combined current and wave produced scour around a single pile [R]. Texas Engineering Experiment Station, 1983.
- [8] 张玮,濮勋,廖迎娣,等.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.
ZHANG W, PU X, LIAO Y D, et al. Calculation of local scour around piles of offshore wind power on muddy coast [J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 105-109.
- [9] 周益人,陈国平.不规则波作用下墩柱周围局部冲刷研究[J].泥沙研究,2007(5):17-23.
ZHOU Y R, CHEN G P. Study on local scour around a large circular cylinder under irregular wave action [J]. Journal of Sediment Research, 2007(5): 17-23.
- [10] 祁一鸣,陆培东,曾成杰,等.海上风电桩基局部冲刷试验研究[J].水利水运工程学报,2015(6):60-67.
QI Y M, LU P D, ZENG C J, et al. Experimental studies on local scour of offshore wind turbine pile [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 60-67.
- [11] 沙玉清.系列模型延伸法[J].水利学报,1963,10(5):13-21.
SHA Y Q. Extension method of series models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963, 10(5): 13-21.
- [12] 周益人.波浪作用下的泥沙起动[J].水利水运工程学报,1998(4):338-346.

ZHOU Y R. Sediment threshold under wave action [J]. Hydro-Science and Engineering, 1998(4):338-346.

作者简介:



毕明君

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及建造研究工作 (e-mail) bimingjun@gedi.com.cn。

刘晋超

1984-, 男, 宁夏吴忠人, 高级工程师, 大连理工大学水利水电工程专业工学硕士, 主要从事火力发电、海上风力发电项目水工结构设计和项目管理工作 (e-mail) liujinchao@gedi.com.cn。

苏荣

1983-, 男, 广东汕头人, 广东工业大学电气工程及其自动化专业学士, 工程师, 主要从事新能源风力发电工程、智能微电网工程、项目管理等工作 (e-mail) surong@csg.cn。

王洪庆

1986-, 男, 吉林公主岭人, 工程师, 哈尔滨工程大学船舶与海洋工程专业工学硕士, 主要从事海上风力发电项目水工结构设计工作 (e-mail) wanghongqing@gedi.com.cn。

刘沙

1985-, 女, 辽宁辽阳人, 中山大学交通信息工程及控制专业工学硕士, 工程师, 主要从事电力工程项目管理工作 (e-mail) 250695926@qq.com。

(责任编辑 李辉)

对研究推荐的冲刷防护方案的实施情况进行跟踪调查

根据研究成果, 风电机组单桩基础的防冲刷设计采用无搭接方式铺设砂被并且采用沙袋填充冲刷坑的方案。

工后1年, 对风电机组基础的冲刷防护情况, 进行了跟踪抽样调查。采用Echoscope C500实时三维成像声呐, 对基础周围海床进行扫测, 并对扫测数据融合拼接处理, 得到基础周围海床的水深云图, 分析得出冲刷深度、冲刷范围等参数。

根据风电机组基础周围海床三维声呐扫测云图 (见图1), 电缆从基础北侧入泥, 结果分析如下: (1) 基础周边能够看到明显的砂被防护措施, 砂被外边缘轮廓清晰; (2) 砂被边缘未出现卷边现象, 整体稳定性较好; (3) 相邻砂被交接处, 未出现明显冲沟; (4) 靠近基础的砂被纹理模糊, 形成冲刷坑, 呈漏斗状; (5) 防护区域的东侧冲刷情况比南北侧严重, 东西方向为场区的潮流方向; (6) 冲刷深度约为1.5 m, 冲刷半径约为6.2 m, 符合设计预期。

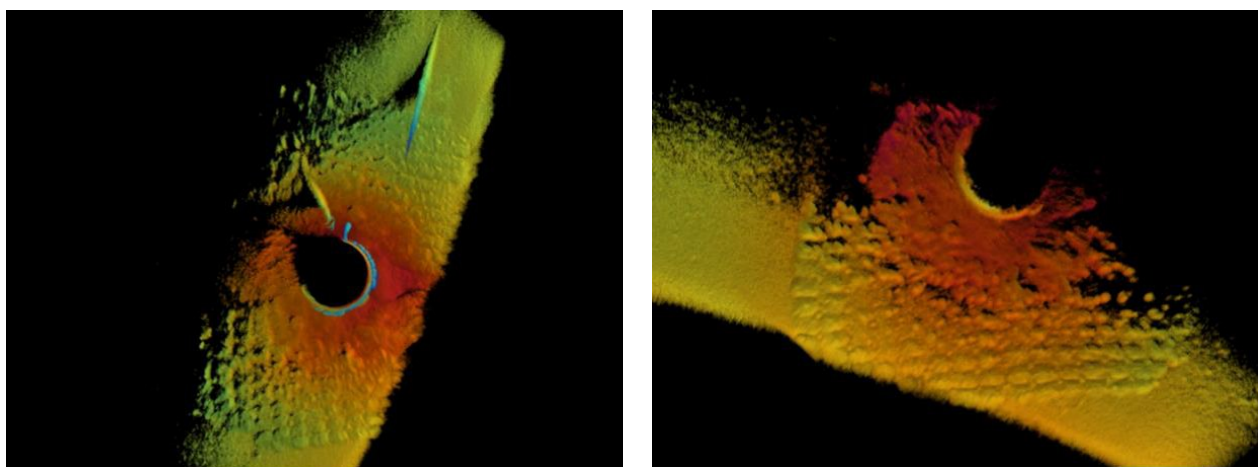


图1 风电机组基础周围海床三维声呐扫测云图

(中国能建广东院 毕明君)