

文章编号: 1674-599X(2022)01-0108-07

珠海金湾海上风电单桩基础局部冲刷试验研究

卢钦先¹, 王洪庆¹, 刘晓建², 郭辉群²

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

2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州, 510610)

摘 要: 针对珠海金湾局部冲刷深度难以用现有经验公式进行预测的问题, 本研究通过建立正态物理模型, 研究风电场风机基础建设后的海床局部冲刷情况。研究表明: 波流共同作用时的冲刷深度小于纯流作用时的, 在该海况下波浪具有回填作用; 冲刷坑主要围绕在桩基周围, 最大冲刷深度出现在基础迎水面和两侧, 背水面冲刷坑略浅, 尾流区有淤积; 冲刷达到稳定后, 桩基前后冲坑坡度约为1:10~1:1, 且桩前的冲刷坡度大于桩后的; 受尾涡脱落的影响, 桩基侧后方海床冲刷较明显, 冲刷显著区与主流方向的夹角在30°~66°之间。

关键词: 海上风电场; 桩基; 波流共同作用; 局部冲刷

中图分类号: U655.54*4.1

文献标志码: A

Study on local scour of monopile foundation of Zhuhai Jinwan offshore wind farm

LU Qin-xian¹, WANG Hong-qing¹, LIU Xiao-jian², GUO Hui-qun²

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

2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of predicting the local scour characteristics of Jinwan in Zhuhai by using existing empirical formula, a normal physical model was established in this study to study the local scour conditions after the fan infrastructure construction in Jinwan offshore wind farm. The results show that when the scour depth under the combined action of waves and currents is less than that under the action of pure currents, the wave shows the effect of backfill. The scour holes mainly occur around the pile foundation, and the maximum scour depth is found in the seaside and both sides of the monopile. The scour on the leeside is slightly shallow, and there is siltation in the wake area. The slope of scour hole is about 1:10~1:1 under the combined action of waves and currents after reaching stability of scour, and the slope before the pile is greater than that after the pile. The seabed erosion in the posterolateral side of pile foundation is more obvious under the influence of the trailing vortex shedding, the angle between the main scour zone and the flow direction is about 30°~66°.

Key words: offshore wind farm; pile foundation; combined action of waves and currents; local scour

海上风电是新型可再生能源开发的前沿领域, 广泛关注。海上风电桩基础长期处于波浪、水流最具有规模化发展潜力, 受到沿海国家和区域的往复作用的海洋环境下, 常伴有高速绕柱涡动,

收稿日期: 2021-09-17

基金项目: 广东省2021年促进经济高质量发展海洋经济专项(GDNRC[2021]41); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110428); 广州市基础与应用基础研究基金(202102021286)

作者简介: 卢钦先(1981—), 男, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师。

巨大水流挟沙力, 形成局部冲刷坑。海上风电桩基础外形呈细长体, 随着冲刷深度增加, 强风强流作用下桩柱细长体的柔性自振频率会接近周边海洋动力的运动频率, 极有可能形成共振, 影响结构安全性。

许多学者对桩基冲刷进行了研究, 主要集中在单纯水流和单纯波浪的情况^[1-4]。波流作用下的桩基冲刷涉及到波浪、水流、桩柱与邻近底质之间复杂的相互作用, 研究成果较少^[5-6]。实验表明: 波流联合动力并不是简单的叠加, 不同动力组合情况下结构物周围涡流系存在较大的差异^[7]。对于桩周最大冲深, 部分学者们给出了相反观点。Qi 等人^[8]指出水流或波浪单独作用下的桩基周围冲刷坑深度明显小于波流共同作用下的。Sumer 等人^[9]指出联合的冲刷深度小于纯水流的, 但在大于纯波浪的情况下, 该过程受 KC 数 ($KC=U_{wm}T/D$, 其中, U_{wm} 是波浪最大水质点速度, T 是波周期, D 是桩直径) 和速度比 [$U_{cw}(=U_c/(U_c+U_{wm}))$, 其中, U_c 是波流联合动力中的水流流速] 的影响, 并指出当 $U_{cw}>0.7$ 时, 联合的冲刷深度接近单一水流的, 因此, 波流共同作用下单桩基础局部冲刷机理有待进一步研究。作者拟以珠海金湾风电基础受波流共同作用为例, 通过物理模型实验, 研究波浪、海流和波流共同作用下桩基周围的局部冲刷特征, 以期海上风电桩基设计相关冲刷参数的设定提供借鉴。

1 海域状况

金湾风电场位于珠江口万山岛和高栏岛之间, 海洋环境十分复杂, 受波浪、海流、风暴潮等多种动力因素影响, 其局部冲刷特性难以用现有的经验公式进行预测, 潮汐属于不正规半日混合潮型。金湾风电场处潮汐特征选取三灶潮位站作为参证站, 据自 1965 年至今的验潮资料, 历史最高潮位 3.23 m, 平均高潮位 0.39 m, 最低潮位 -1.97 m, 平均低潮位 -0.70 m。在 100 a 一遇高潮位和 SE 向强浪作用下, 有效波高在 7.11~9.44 m 之间达到最大波高, W 向浪相对较弱。由于风电场范围水深差异较大, 各点波况也明显不同。考虑工程区域波浪特征, 5 a 和 50 a 一遇海流设计流速分别为 1.08、1.19 m/s, 典型波浪要素见表 1。

表1 试验原型波浪要素

Table 1 Wave parameters of test prototype

水深/m	5 a		50 a	
	有效波高/m	峰值周期/s	有效波高/m	峰值周期/s
25.0	6.33	13.9	8.59	15.8
14.7	5.48	13.0	5.79	13.3
14.0	5.30	12.8	5.56	13.1
13.0	4.96	12.5	5.17	12.7

2 物理模型试验

根据工程结构和动力条件, 采用大比尺物理模型试验, 同时满足水流运动相似、波浪运动相似和泥沙运动相似。比尺相似要求为: 重力相似 (流速比尺) $\lambda_v = \lambda_h^{1/2}$, 阻力相似 (糙率比尺) $\lambda_n = \lambda_i^{1/2} \lambda_h^{2/3}$, 时间比尺 $\lambda_t = \lambda_i / \lambda_h^{1/2}$, 流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_i \lambda_h^{3/2}$, 其中, λ_i 为水平比尺, λ_h 为垂直比尺。

模型中的波浪采用正态, 根据模型和水槽造波能力, 几何比尺确定为 1:50, 水流动力比尺 (流速比尺 λ_v 、时间比尺 λ_t) 采用 1:7.07, 波要素比尺 (波长比尺 λ_L 、波高比尺 λ_H) 采用 1:50, (波速比尺 λ_c 、波周期比尺 λ_T) 采用 1:7.07。

模型沙的选择以水流泥沙起动相似为主, 根据风电场所处海域土层采样资料分析, 区域主要以淤泥质土等软土层为主, 中值粒径介于 0.01~0.03 mm, 淤泥层塑性指数 (I_p) 为 18.9。通过泥沙起动流速计算公式为式 (1) 或式 (2), 求得底质起动流速情况。

$$V_c = \left(\frac{h}{d}\right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{d^{0.72}}\right)^{1/2} \quad (1)$$

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

式中: h 为水深, m; d 为泥沙中值粒径, 取 $d=0.01\sim0.02$ mm; Δ 为糙率, $d<0.5$ mm 时, 取 $\Delta=0.5$ mm; ε_k 为泥沙黏结力参数, 原型沙取 $\varepsilon_k=2.56$ cm³/s²; δ 为薄膜水厚度, 取 0.21×10^{-4} cm; γ 为泥沙, 约 2.65 t/m³; γ_s 为水容重, 约 1 t/m³。

对于黏性土, 临界起动切应力与土的塑性指数有关, 可采用 Smerdon 公式计算:

$$\tau_c = 0.163 I_p^{0.84} \quad (3)$$

式中: I_p 为土的塑性指数; τ_c 为临界起动切应力, N/m²。

起动摩阻流速可由式 (4) 进行计算:

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (4)$$

式中: ρ 为水的密度。

原型表层底质起动摩阻流速计算结果 ($u_{*c}=0.0438\text{ m/s}$) 可换算到平均流速为:

$$\frac{u}{u_{*c}} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (5)$$

式中: u 为垂线平均流速; u_{*c} 为摩阻流速; C 为谢才系数, $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, 其中, $R \approx h$ (水深), n 为糙率, g 为重力加速度。

学者们将波浪条件和纯流 Shields 泥沙起动标准曲线相结合, 指出振荡流作用下床面切应力可利用波浪摩擦系数计算^[10-11], 床面剪应力 τ_{cm} 的最大瞬时值, 定义为:

$$\tau_{cm} = \rho u_{*c}^2 = \frac{1}{2} f_w \rho u_{mc}^2 \quad (6)$$

式中: u_{mc} 为近底波浪水质点最大水平速度; f_w 为波浪摩擦系数, 由 Jonsson 图表确定。

对于本研究选定的淤泥土层, 由于粒径较细 ($d_{50}=0.01\sim0.03\text{ mm}$), 而起动切应力又较大 ($u_{*c}=0.0438\text{ m/s}$), 处于光滑紊流区, f_w 可由式 (7) 计算。

$$f_w = 0.09 RE^{-0.2} \quad (7)$$

式中: RE 为波浪雷诺数, $RE = \frac{u_m a_m}{\nu}$; ν 为黏滞系数; a_m 为波浪水质点近底水平振幅最大值。

由式 (1) ~ (7) 计算, 底质的起动流速介于 $1.03\sim1.81\text{ m/s}$ 之间, 其中, 最小为 1.03 m/s (换算到模型中约为 14.5 cm/s)。经过多次测试, 本研究模型沙采用处理过的精煤屑, 容重 $\gamma_s = 1.35\text{ t/m}^3$, d_{50} 为 0.4 mm , 模型沙铺设简便, 长期浸水不会板结, 水下扰动不会密实, 能够达到泥沙重复性试验的要求。该模型沙在试验水深时, 起动流速为 $12\sim16\text{ cm/s}$, 满足原型沙起动准则, 可用于后续冲刷试验研究。

本物理模型试验在珠江水利科学研究院里水科学试验基地的咸潮风浪流水槽中进行, 水槽的长 $76\text{ m} \times$ 宽 $1.2\text{ m} \times$ 高 1.5 m , 实验布置如图 1 所示。造波机位于水槽右端, 水槽左端设有 $1:8$ 的消浪斜坡, 斜坡上覆盖多孔材料减少波浪反射。同时, 为了尽量避免反射波对试验区波浪的影响, 试验中每造 100 个波后, 造波机停止运行, 待水面稳定后再重新造波, 如此循环往复。水槽底的内部装有潜水泵, 实验中通过控制潜水泵转机频率控制流量, 水流稳定后使用流速仪测量水槽底部流速, 不断调整转机频率, 直到达到目标流速。

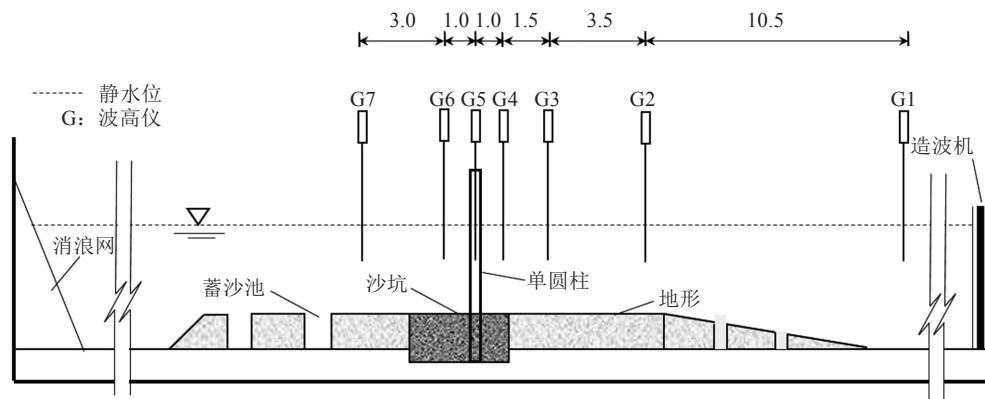


图1 物理模型试验布置 (单位: m)

Fig. 1 Layout of physical model test(unit:m)

3 桩基局部冲刷试验结果

3.1 冲刷稳定分析

金湾风电场工程单桩基础柱径拟为 7.5 、 8.0 、 8.5 m , 因海洋环境中结构物的存在, 改变了其周围的波浪和水流条件, 桩基周围的海床常常出现淘刷现象。为了确定波流作用下桩周局部冲刷过程, 首先针对原型 7.5 m 桩基, 在 50 a 一遇波流条件下开展实验研究。根据现场经验, 1 次台风过程约为 3 h , 则根据比尺缩放关系换算到试验中约为

25 min , 以此作为 1 次冲刷过程标准。此后, 每隔一段时间对桩前、后、两侧等 4 个测点高程进行量测, 原型 $1\sim15\text{ h}$ 后, 桩周测点和桩基前后冲刷深度测量结果如图 2~3 所示, 图中 x 为沿水槽方向, z 为沿水深方向, θ 为沿桩表面角度, 其中, $\theta=0$ 为迎水侧点。从图 2~3 中可以看出, 波流作用原型 6 h 后, 冲刷深度基本达到稳定, 原型第 12 h 和 15 h 各点冲刷深度仅有少量变化。因此, 后续试验认为波流作用原型 15 h 后冲刷坑达到稳定状态, 其中, 原型 15 h 换算到模型试验约为 2 h , 以此作为海床稳定冲刷标准。

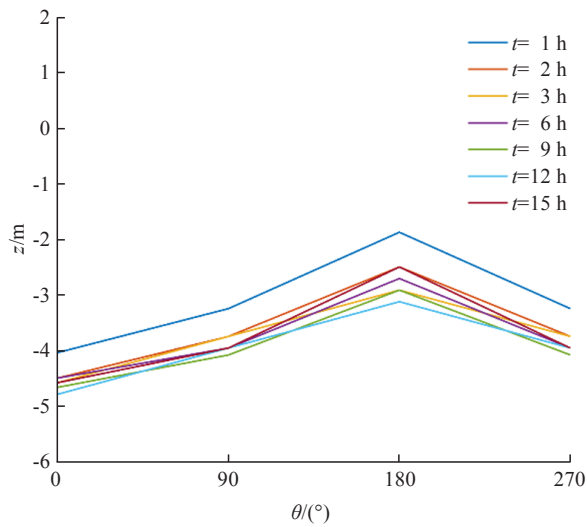


图2 桩周测点不同时刻冲刷深度

Fig. 2 Scour depth of measuring points around piles at different times

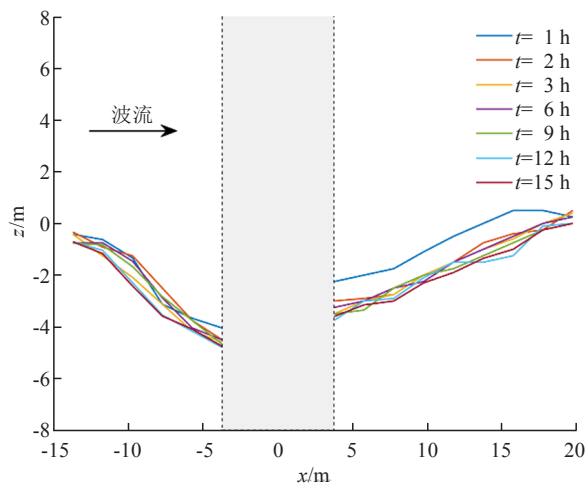


图3 桩基前后不同时刻剖面冲刷深度

Fig. 3 Scour depth of profile at different time before and after pile foundation

3.2 桩基冲刷过程

波浪、水流和波流耦合等多种动力下, 桩基冲刷过程明显不同, 为了掌握不同动力下水沙运动差异, 首先采用高速相机对其进行捕捉 (以 7.5 m 桩径为例)。

3.2.1 纯水流作用

在恒定流作用下, 水流对桩基周围沙床的切应力受马蹄涡和两侧束水的影响显著增大。切应力大于泥沙的临界起动切应力时, 发生冲刷, 随着冲坑深度的增大, 冲刷坑的深度不再变化, 达到冲刷平衡, 此时形成的桩基冲刷为清水冲刷, 冲刷过程如图4所示。

从图4中可以看出, 桩基的上游迎水面和两侧先发生冲刷, 在纯流作用下, 冲刷逐渐向下游发展, 直至冲刷深度不再发生变化, 冲刷坑的上游沙坑坡面较陡, 下游沙坑坡面较缓, 呈现不对称的“勺型”。桩周冲刷达到平衡后, 测得桩前最大冲刷深度达到 11 cm (即现场为 5.5 m), 约为 $0.73D$; 桩侧最大冲刷深度为 10.5 cm (即现场为 5.25 m), 约为 $0.7D$ 。

3.2.2 纯波浪作用

波浪作用下桩基周围的泥沙起悬过程如图5所示。波浪作用时, 桩柱前产生反射, 同时, 在柱后掩护区形成衍射。从图5中可以看出, 漩涡运动对大直径桩的冲刷过程影响较小, 当波浪反射后, 近底层流速增加, 泥沙逐渐起动, 反射和绕射导致水质点运动不对称性, 引起泥沙的净输移, 冲刷坑并没有发展至环绕全部基础, 桩基周围形成明显沙纹, 整个过程中冲刷坑并不显著。

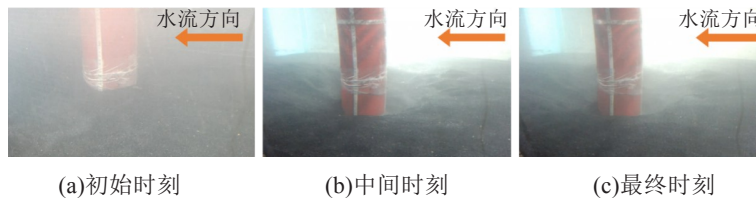


图4 流作用下桩周泥沙起悬过程

Fig. 4 Sediment suspension process around pile under current

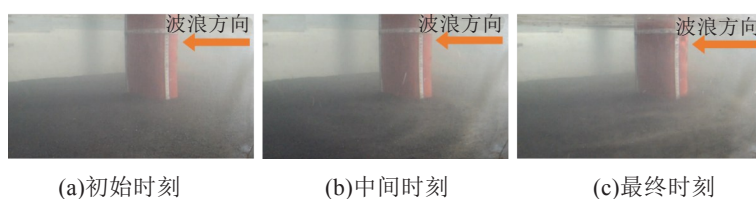


图5 波作用下桩周泥沙起悬过程

Fig. 5 Sediment suspension process around pile under wave

3.2.3 波浪水流共同作用

风机基础结构在波浪、水流共同影响下,桩周海床瞬时冲刷过程如图6所示。由于桩基的阻水

作用,流体的行进速度变为零,转化为驻点压力。驻点压力导致水流向下流动,并且还导致桩两侧绕流的侧向流速明显增大,引起泥沙起悬。

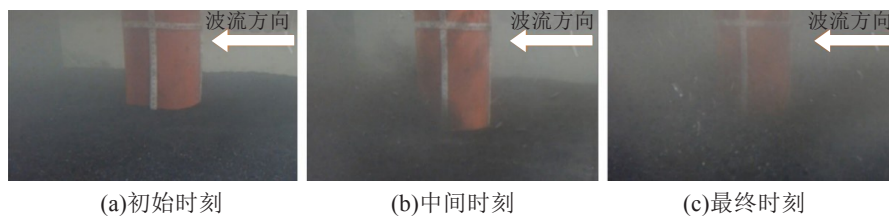


图6 波流作用下桩周泥沙起悬过程

Fig. 6 Sediment suspension process around pile under wave and current

长时间的波流联合动力作用后,桩基根部出现明显的冲刷坑,如图7所示。桩前及两侧的冲刷程度大于背流/浪面的,冲刷形状呈现“勺”状,并伴有广泛分布宽度较窄的沙纹,桩背水面的中轴线附近为淤积区。桩基局部冲刷特征和水流、波浪动力特征相对应,兼具单一波/流两者引起的冲刷特性。桩周冲刷达到平衡后,测得柱前最大冲刷深度为9.50 cm(即现场为4.75 m),约为0.63D;桩侧最大冲刷深度为9.20 cm(即现场为4.60 m),约为0.61D。从图7中可以看出,波流作用下的冲刷值小于纯流作用下的,表明:波浪起到了一定回填作用。实际情况中,桩基所处的海洋环境波流一般共存,因此,后续研究中以波流动力为基础开展相关研究工作。

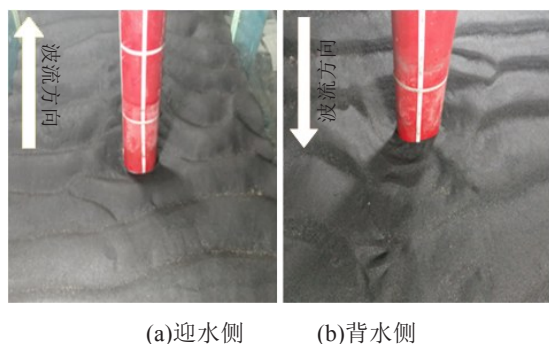


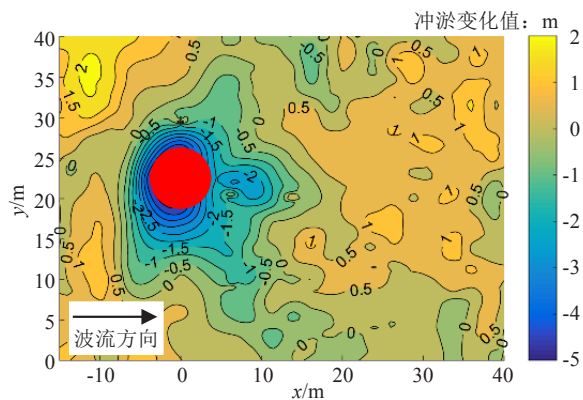
图7 波流作用下桩基近区冲刷形态

Fig. 7 Scour pattern around pile foundation under wave and current

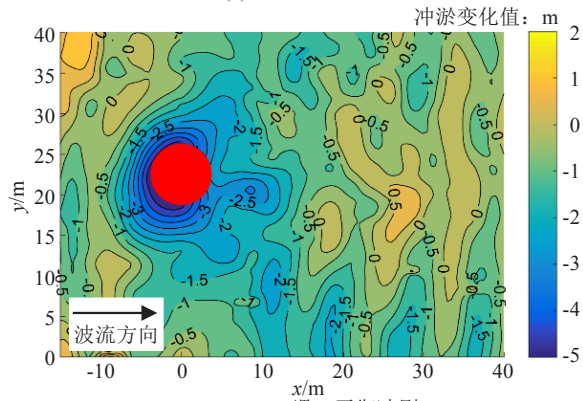
3.3 近区冲刷形态

基于超声波地形测量仪,对桩周海床冲淤形态进行测量,部分结果如图8所示(已换算成原型, $D=7.5\text{m}$, $h=14.0\text{m}$)。从图8中可以看出,5a一遇波流情况下的冲刷深度和冲刷范围均小于50a一遇波流情况下的。其中,一次冲刷,仅桩周出现了较大冲刷,经过多次冲刷海床稳定后,桩周

冲刷深度进一步增加,同时桩后两侧冲刷深度也明显增大。冲刷坑主要围绕在桩基周围,冲刷最深处在单桩迎水面和单桩结构后两侧,单桩背流侧冲坑略浅,尾流区有淤积。其他实验工况下波流引起的冲刷地形形态变化与该情况没有本质差异,仅冲刷幅度略有不同。表明:波浪在桩基局部冲刷过程中主要起掀沙作用,当冲刷深度较大时,波浪对冲刷坑的下切作用明显减弱。结合水体产生的周期性波动力,底部速度增大,迫使泥沙起动。引起局部冲刷的主要原因为:①桩柱阻水在柱前形成局部壅水,产生垂向水流下切床面;②波动力掀起泥沙输移;③桩柱两侧和后部地形的冲刷主要受马蹄形漩涡和尾流漩涡的影响。



(a)5a一遇,一次冲刷



(b)5a一遇,平衡冲刷

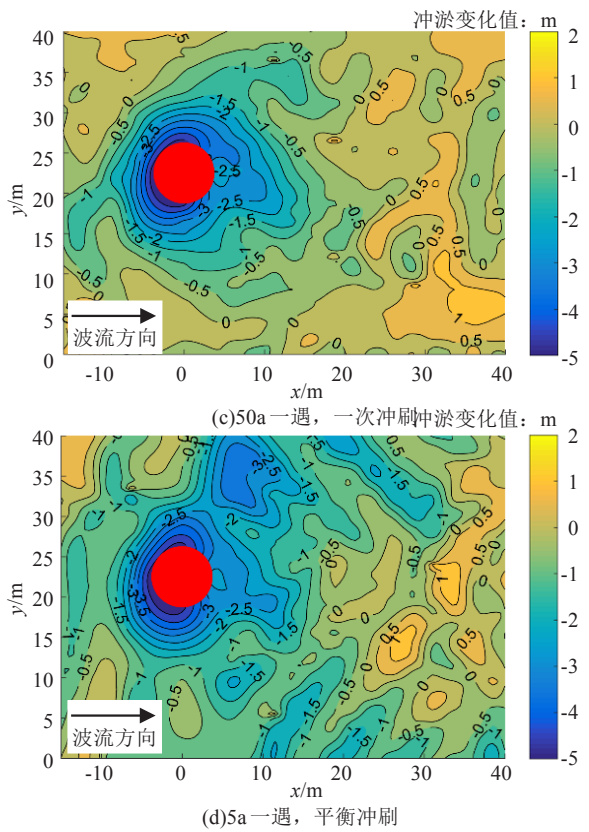


图8 桩基近区冲刷形态

Fig. 8 Scour pattern around pile foundation

3.4 桩周最大冲刷深度

本试验结果表明: 波流共同作用下桩基近区冲刷范围主要位于单桩迎水面和单桩结构后两侧, 其中, 迎水面冲刷最为显著。柱径为 7.5 m、水深为 13 m 的桩前、桩后床面地形剖面特征如图 9 所示。基于比尺缩放模型试验成果, 已换算到原型。从图 9 中可以看出, 随着波流过程桩基冲深逐渐增大, 而冲坑坡度未明显改变, 桩基前后冲刷坡度约 1:10~1:1, 且桩前的冲刷坡度远大于桩后的。

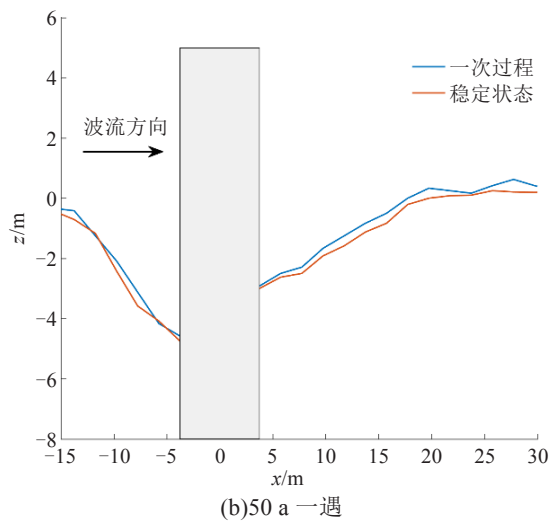
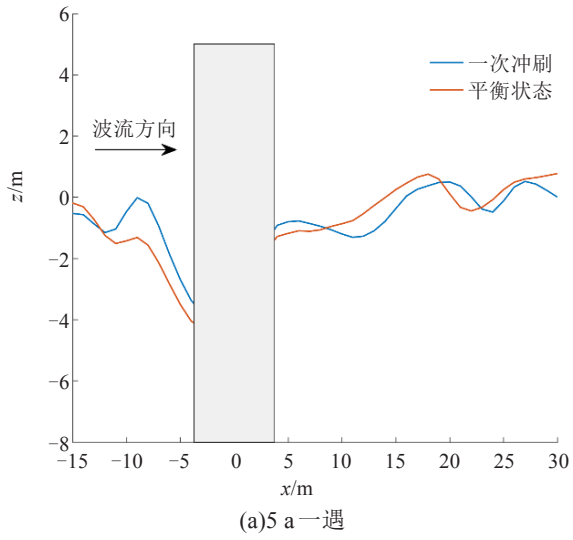


图9 桩周冲刷剖面

Fig. 9 Scour profile around pile

对试验工况进行统计, 可得不同工况下的桩周海床最大冲刷深度, 见表 2。

表2 50a一遇波况各工况最大冲刷深度

Table 2 Maximum scour depth under each case in a once-in-50-year wave					
水深/m	柱径/m	一次冲刷		稳定冲刷	
		冲深/m	S/D	冲深/m	S/D
25.0	8.5	4.03	0.47	5.36	0.63
25.0	8.5	3.12	0.37	4.62	0.54
14.7	8.0	4.40	0.55	5.08	0.64
14.7	8.0	4.30	0.54	4.70	0.59
14.0	7.5	4.34	0.58	4.73	0.63
14.0	7.5	4.21	0.56	4.67	0.62
13.0	7.5	4.58	0.61	4.75	0.63
13.0	7.5	3.38	0.45	4.05	0.54

注: S 为冲淤变化值

由表 2 可知, 在现场柱径 8.5 m 和水深 25.0 m 组合时, 50 a 一遇波流情况下桩基近区海床冲刷最为严重, 在柱径 8.5 m、水深 25.0 m 组合的 50 a 一遇波流情况下平面和三维冲刷形态如图 10~11 所示。从图 10~11 中可以看出, 受尾涡脱落影响, 桩基侧后方海床冲刷较明显, 侧后方冲刷显著区与主流方向的夹角在 30°~66°。沿波流方向上, 冲刷深度达到 -1.0 m 以上的范围最远距桩基中心约为 35 m, 冲刷深度达到 -2.0 m 以上范围的约 15 m, 冲刷深度达到 -3.0 m 以上范围的约 9.0 m。垂直于波流方向上, 冲刷深度达到 -1.0 m 以上范围最远距桩基中心约为 25 m, 冲刷深度达到 -2.0 m 以上范围的约 22.5 m, 冲刷深度达到 -3.0 m 以上范围的约 7.5 m。

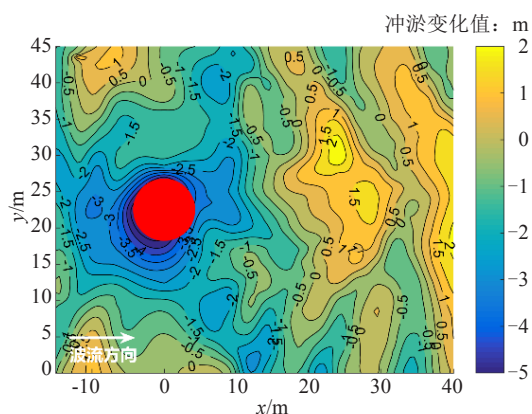


图10 桩周平面冲刷形态

Fig. 10 Plane scour pattern around pile foundation

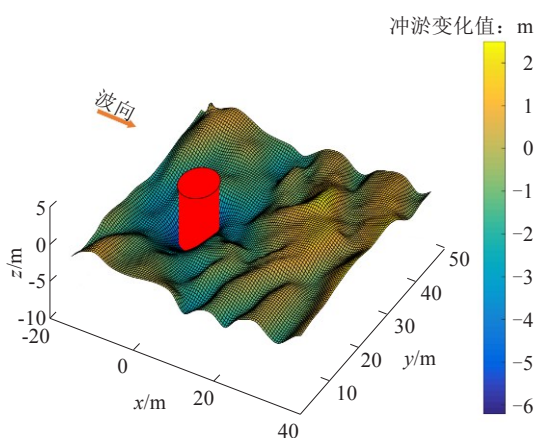


图11 桩周三维冲刷形态

Fig. 11 Three-dimensional scour pattern around pile foundation

4 结论

根据工程地质和动力条件,通过物理模型试验对珠海金湾风电场风机基础建设后的局部冲刷进行研究,得到结论为:

1) 纯流作用下,受马蹄涡和两侧束水的影响,桩周出现明显冲坑,形成不对称的“勺型”。纯波作用下,桩基周围的冲刷坑不能发展至环绕全部基础,桩基周围出现明显沙纹,冲刷坑较为不明显。波流共同作用下,冲刷形态兼具这2种特征,冲刷坑形状似“勺”,并伴有广泛分布宽度较窄的沙纹,但本海域波流作用下的冲刷深度小于纯流的,表明波浪起到了回填作用。

2) 冲刷坑主要围绕在桩基周围,冲刷最深处在单桩迎水面和结构后两侧,单桩背流侧冲坑略浅,尾流区有淤积,柱基前后冲刷坡度约为1:10~1:1,且桩前的冲刷坡度远大于桩后的。受尾涡脱

落的影响,桩基侧后方海床冲刷较明显,侧后方冲刷显著区与主流方向的夹角在 $30^{\circ} \sim 66^{\circ}$ 。

3) 考虑最不利情况,在沿波流方向上,冲刷深度-1.0、-2.0、-3.0 m以上范围最远距单桩桩基中心约为35、15、9.0 m,即 $4.12D$ 、 $1.76D$ 、 $1.06D$ 。在垂直于波流方向上,冲刷深度-1.0、-2.0、-3.0 m以上范围最远距单桩桩基中心约为25、22.5、7.5 m,即 $2.94D$ 、 $2.65D$ 、 $0.88D$ 。

参考文献(References):

- [1] Guney M S, Bombar G, Aksoy A O. Experimental investigation of time-dependent clear water scour around bridge pier due to a trapezoidal hydrograph[C]//World environmental and water resources congress 2012. Albuquerque, New Mexico, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012:2538-2545.
- [2] Zhao M, Cheng L, Zang Z P. Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents[J]. Coastal Engineering, 2010,57(8):709-721.
- [3] 胡旭跃,孟庆峰,莫静琳,等.桥墩局部冲刷深度模糊神经网络解的初步探讨[J].交通科学与工程,2009,25(1):58-62. (HU Xu-yue, MENG Qing-feng, MO Jing-lin, et al. Fuzzy neural network solution for bridge local scouring depth in the alluvial river bed[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009,25(1):58-62.(in Chinese))
- [4] Ahmad N, Bihs H, Myrhaug D, et al. Three-dimensional numerical modelling of wave-induced scour around piles in a side-by-side arrangement[J]. Coastal Engineering, 2018,138:132-151.
- [5] Qi W G, Li Y X, Xu K, et al. Physical modelling of local scour at twin piles under combined waves and current[J]. Coastal Engineering, 2019,143:63-75.
- [6] Olabarrieta M, Medina R, Castanedo S. Effects of wave-current interaction on the current profile[J]. Coastal Engineering, 2010,57(7):643-655.
- [7] Sumer B M, Christiansen N, Fredsøe J. The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997,332:41-70.
- [8] Qi W G, Gao F P. Physical modeling of local scour development around a large-diameter monopile in combined

(下转第122页)

- [16] 句庆玲,龙科军.面向地铁接驳需求的公交服务能力评估[J].公路与汽运,2020(4):17-20,26. (GOU Qing-ling, LONG Ke-jun. Evaluation of public transport service capability for metro connection demand [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(4):17-20,26.(in Chinese))
- [17] 聂红梅,杨联安,杨煜岑,等.基于熵权TOPSIS的城市公交线路发展水平综合评价[J].西北大学学报(自然科学版),2017,47(5):776-782. (NIE Hong-mei, YANG Lian-an, YANG Yu-cen, et al. Comprehensive evaluation of the development level of urban bus lines based on entropy Weight-Topsis[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2017, 47(5): 776-782.(in Chinese))
- [18] 卢小林,张娴,俞洁,等.灵活型定制公交系统综合评价方法研究[J].公路交通科技,2015,32(5):135-140. (LU Xiao-lin, ZHANG Xian, YU Jie, et al. Research of a comprehensive evaluation method for customized flexible transit system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(5): 135-140.(in Chinese))
- [19] 许茂兴.深圳定制公交运营模式优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017. (XU Mao-xing. Optimal research on operation mode of customized shuttle bus in Shenzheng[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [20] 崔庆安,肖甜丽.基于DANP和IPA的网约车服务质量评价研究[J].工业工程与管理,2017,22(6):48-56. (CUI Qing'an, XIAO Tian-li. Evaluating car-hailing service quality based on the DANP and IPA method[J]. Industrial Engineering and Management, 2017, 22(6): 48-56. (in Chinese))
- [21] 郝成,殷勇.基于D-S证据理论的城市轨道交通与常规公交协调综合评价[J].综合运输,2019,41(5):57-62. (HAO Cheng, YIN Yong. Comprehensive coordination evaluation of urban rail transit and conventional transit based on D-S evidence theory[J]. China Transportation Review, 2019,41(5):57-62.(in Chinese))
- [22] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000. (ZHAO Ke-qin. Set pair analysis and its preliminary application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [23] 王正武,谭笑,高愿,等.多分区响应型接驳公交路径与发车时间的协调优化[J].铁道科学与工程学报,2021,18(5):1316-1324. (WANG Zheng-wu, TAN Xiao, GAO Yuan, et al. Coordinated optimization of route and departure time for multi-partition responsive feeder transit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021,18(5):1316-1324.(in Chinese))

(上接第114页)

- waves and current[J]. Coastal Engineering, 2014,83:72-81.
- [9] Sumer B M, Fredsøe J. Scour around pile in combined waves and current[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,127(5):403-411.
- [10] 李寿千,陆永军,左利钦,等.波浪及波流边界层泥沙起动规律[J].水科学进展,2014,25(1):106-114. (LI Shou-qian, LU Yong-jun, ZUO Li-qin, et al. Incipient motion of sediment in wave and combined wave-current boundary layers[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 106-114.(in Chinese))
- [11] 程永舟,杨桥梁,黄筱云,等.斜坡海床上管道位置对其周围冲刷影响试验[J].长沙理工大学(自然科学版),2015,12(1):55-62. (CHENG Yong-zhou, YANG Qiao-liang, HUANG Xiao-yun, et al. Experimental study on scour around submarine pipelines placed at different positions of a sloped seabed[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2015, 12(1): 55-62. (In Chinese))