

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.014

潮流能水轮机三脚桩基础局部冲刷深度演变特性

张继生, 来嘉豪, 林祥峰, 邓 绪

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于水槽物理模型试验研究了潮流能水轮机三脚桩基础的局部冲刷特性, 探讨了整机工况下基础安装角和水流强度对潮流能水轮机三脚桩基础局部冲刷深度演变特性的影响。试验结果表明: 随着水流强度的增大, 三脚桩基础 3 根桩柱周围冲刷速率和最大冲刷深度均增大, 最大冲刷深度发生在桩柱迎流面; 三脚桩基础的冲刷发展状况随基础安装角的变化而改变, 基础安装角为 30° 时冲刷最为剧烈, 0° 时上游桩柱冲刷较小, 30° 时单独位于一侧的桩柱冲刷速率最快, 60° 时上游桩柱冲刷深度较大。

关键词: 局部冲刷; 三脚桩; 基础安装角; 水流强度; 潮流能水轮机

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)04-0116-08

Local scour depth evolution characteristics of tripod pile foundation for a tidal current energy turbine

ZHANG Jisheng, LAI Jiahao, LIN Xiangfeng, DENG Xu

(College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on physical model tests of the flume, the local scour characteristics of the tripod pile foundation for a tidal current energy turbine were investigated, and the effects of the installation angle of the foundation and flow intensity on the evolution of local scour depth of the tripod pile foundation under full machine operating conditions were explored. The experimental results indicate that as the flow intensity increases, both the scour rate around three piles of the tripod pile foundation and the maximum scour depth increase, with the maximum scour depth occurring at the upstream face of the piles. The scour development around the tripod pile foundation varies with changes in the installation angle, showing the most severe scour when the installation angle is 30° . At a 0° installation angle, the upstream piles experience relatively weak scour. When the installation angle reaches 30° , the pile located alone on one side exhibits the fastest scour rate. At a 60° installation angle, the upstream piles demonstrate greater scour depth.

Key words: local scour; tripod pile; installation angle of foundation; flow intensity; tidal current energy turbine

作为一种海洋可再生能源, 潮流能因可预测性^[1]、高能量密度、低碳排放、对海洋环境影响小且无须占用土地资源等优点^[2-3], 近年来受到世界各国的广泛关注。三脚桩基础具有更好的稳定性和承载力, 加之易于安装^[4], 已广泛应用于现代海洋工程中。由于基础结构对海洋水动力的影响, 原本处于动态平衡的海床外部条件将会被打破, 导致结构物周围发生局部冲刷, 使其基础承载力下降, 横向受力不均匀, 冲刷严重时甚至使工程面临在位失稳破坏的威胁^[5]。

目前对于多桩柱基础的研究, 可追溯到 Mysa 等^[6]对串联圆柱体的相互作用研究, 认为上游圆柱体会显著影响下游圆柱体周围的水动力特性。Dutta 等^[7]通过研究发现桩柱周围的马蹄涡系以及柱后的尾涡脱落可以显著增强床面剪切力, 进而导致桩柱周围冲刷加剧; Ataie-Ashtiani 等^[8-9]通过研究清水冲刷情况下不同排列、间距和流速的桩柱周围的冲刷, 发现当 $G/D < 1.15$ (G 为桩柱中心距, D 为桩柱直径) 时多桩柱冲刷等

基金项目: 中国博士后科学基金第 73 批面上项目(2023m730930)

作者简介: 张继生(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事近海可再生能源工程研究。E-mail: jszhang@hhu.edu.cn

通信作者: 林祥峰(1994—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事近海可再生能源工程研究。E-mail: 20220951@hhu.edu.cn

引用本文: 张继生, 来嘉豪, 林祥峰, 等. 潮流能水轮机三脚桩基础局部冲刷深度演变特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 116-123.

ZHANG Jisheng, LAI Jiahao, LIN Xiangfeng, et al. Local scour depth evolution characteristics of tripod pile foundation for a tidal current energy turbine[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 116-123.

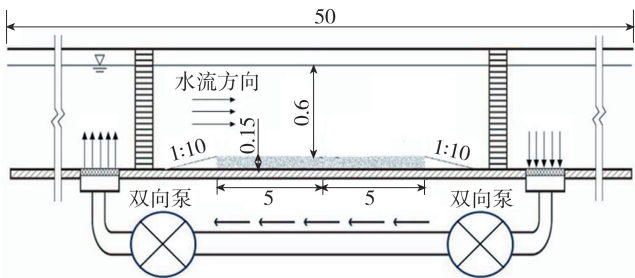
效于单桩冲刷,当 $G/D>4$ 时桩柱间干扰消失;王栋等^[10]对不同水深条件下海上风机群桩基础局部冲刷特性进行了深入研究,试验表明当 $G/D=2,4,5$ 时,随着相对水深的增大,桩柱周围平衡冲刷深度小幅增大, $G/D=4,5$ 时平衡冲刷深度较大,且随间距比的增大而减小,各个桩柱的冲刷坑相对独立。

以往关于多桩柱冲刷的研究往往侧重于基础工况下来流情况、柱间距比、相对水深等对冲刷的影响^[11-12],整机工况下潮流能水轮机叶轮的运行会对桩柱周围床面泥沙输移产生显著影响^[13],而对整机工况下局部冲刷平面涉及范围的研究尚不清晰;此外桩柱之间的相互影响会加剧或减缓冲刷情况^[14],而基础安装角的改变对于冲刷坑形态的影响及局部冲刷精细发展规律尚缺乏论证^[15],且此类研究公开报道较少。本文基于物理模型试验,对恒定流作用下潮流能水轮机三脚桩基础局部冲刷深度演变特性进行了试验研究,以期潮流能水轮机基础冲刷防护设计提供参考。

1 试验方案

1.1 水槽与泥沙参数

试验在长 50 m、宽 1.2 m 的大型波流水槽中开展,水槽两侧壁为厚度 15 mm、高 1.2 m 的透明钢化玻璃,如图 1 所示。



(a) 装置示意图 (单位: m) (b) 装置照片

图 1 水槽模型试验装置

Fig. 1 Experimental setup in flume model test

在水槽中间段设置沙槽试验段,沙槽长 10 m、宽 1.2 m、深 0.15 m,沙槽两侧采用 1 : 10 斜坡,使水流能够均匀平缓地流入沙槽,从而降低不稳定水流对试验的影响。在水槽进出口位置布置蜂窝状过滤箱,用以消除大尺度涡旋,减少水面波动,从而稳定、平缓水流。

采用原型石英砂开展试验以做机理探讨,泥沙密度为 2.65 t/m^3 ,泥沙中值粒径为 0.22 mm ,均匀系数为 1.32。结合试验设备条件,试验考虑不同水动力条件对三脚桩基础局部冲刷发展演变过程的影响,单向流作用时水槽内水流流向和流速保持恒定,在不同工况下平均流速分别保持为 $0.22、0.25、0.28\text{ m/s}$ 。根据 Melville^[17]提出的泥沙临界起动流速计算公式,计算得到试验用沙临界起动流速为 0.312 m/s 。

试验考虑清水冲刷条件,即研究水流强度(水流断面平均流速与泥沙临界起动流速的比值)小于 1 时的冲刷工况,水流强度变化范围为 $0.7\sim0.9$ 。单向流作用下水槽内水流平均流速为 $0.22、0.25、0.28\text{ m/s}$ 时,水流强度分别为 $0.7、0.8、0.9$ 。

1.2 水轮机模型与三脚桩基础模型

试验采用水平轴三叶片式水轮机,基于 Wilson 叶素动量理论^[17],叶片采用 NACA63-815 系列翼形^[18-19]。三维建模后,采用 3D 打印制作实体模型,水轮机叶轮设计参数如下:叶轮半径为 150 mm ,设计流速为 0.3 m/s ,叶片数量为 3 片,轮毂半径为 25 mm ,设计叶尖速比为 5,设计攻角为 9° 。

参考 Yuan 等^[20]的研究,结合试验现场情况,最终得到的三脚桩基础模型整体参数如图 2 所示。三脚桩基础由中心桩和 3 根桩柱组成,模型外直径为 30 cm 。为了使三脚桩基础模型稳定于水槽中,各桩柱底部设有圆形底盘。中心桩上端直径为 5 cm ,下端为 4 cm ;三脚桩基础 3 根桩柱直径为 3 cm ,高 25.5 cm ,中心桩底面距离初始泥沙面 1 cm 。水槽宽度为 1.2 m ,是水轮机半径的 8 倍,是水轮机桩基础直径的 50 倍,尽管如此,不同于单桩基础,三脚桩基础为透水式结构,根据 Ni 等^[21]的研究,三脚桩基础等效直径 D_{pg} 计算公式为

$$D_{pg}=K_{sp}D_{pr} \tag{1}$$

式中: K_{sp} 为相邻桩柱间距的影响参数; D_{pr} 为桩柱的预计宽度。经计算等效直径为 3.24 cm ,远小于水槽宽

度,因此本文试验中的水槽宽度足够消除壁面的干扰,确保试验结果有效。试验模型如图2所示,本文定义基础安装角为三脚桩基础的3根桩柱与水流主流方向的最小夹角,如图2(b)所示,分别考虑基础安装角为0°、30°、60°条件下的冲刷情况。

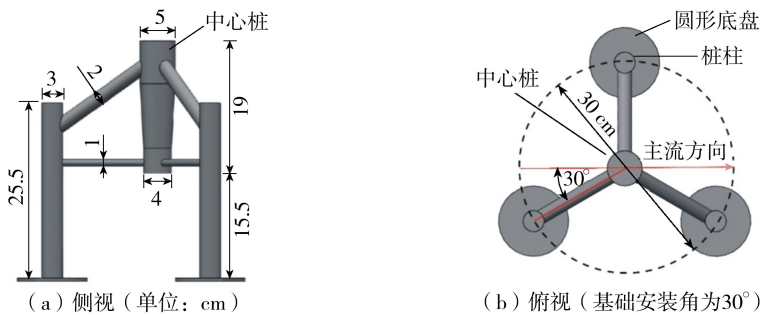


图2 试验模型三维示意图

Fig. 2 Three-dimensional test model

1.3 试验过程

试验采用林祥峰^[22]的方案,将摄像头分别放置于三脚桩基础3根桩柱内,通过摄像头拍摄的图片获取桩柱四周的冲刷深度:在透光度良好的三脚桩基础桩柱外壁进行刻度标定,底部刻度设为0,向上为正刻度,初始时刻床面与桩柱表面交界处刻度为 $S_{初}$,随着试验冲刷的进行,在 t 时刻床面与桩柱表面交界处刻度为 S_t ,则冲刷深度 $S=S_{初}-S_t$ 。

试验过程如下:

- a. 按照所需基础安装角将试验用的三脚桩基础模型放置于沙槽正中央,之后缓慢铺平沙床。
- b. 水槽缓慢上水至预定水深,防止上水过程中底床面发生泥沙输移。
- c. 调整水槽造流泵至预定运行功率,启动水槽造流系统,桩柱内布置的摄像头每隔2.5 min自动记录三脚桩基础桩柱冲刷深度。
- d. 待试验进行至24 h,关闭水槽造流系统,打开出水阀门。
- e. 调整物理模型摆放位置,开始下一组次试验。

2 结果与分析

2.1 整机工况下冲刷深度发展过程

2.1.1 0°基础安装角

图3为水流强度0.9、0°基础安装角条件下三脚桩基础3根桩柱周围冲刷深度发展过程。由图3可知,在0°基础安装角下,随着时间增长3根桩柱冲刷深度逐渐加大。1号桩柱最大冲刷深度以90°为中心上下浮动,2号和3号桩柱最大冲刷深度以120°为中心上下浮动。对比分析图3(b)(c)(d)色域部分,其差异性体现在2号桩柱深色域在冲刷历时上较早,表明相同冲刷情况下,由于1号桩柱的存在,整个基础形成导流效应^[20],从而增加了正向自由来流,进而加速了2号桩柱的冲刷,使其冲刷速率更快,同时由于潮流能水轮机运行时导致的流场不对称性,使得3根桩柱冲刷情况不尽相同。

2.1.2 30°基础安装角

图4为水流强度0.9、30°基础安装角条件下三脚桩基础3根桩柱周围冲刷深度发展过程,可见在单向流作用下1号桩柱最大冲刷深度以135°为中心上下浮动,2号和3号桩柱以120°为中心上下浮动。对其冲刷色域分析可知,1号桩柱冲刷速率最快,冲刷深度最大,2号桩柱冲刷速率最慢。在30°基础安装角下,上游冲刷相对较大,每个桩柱上游迅速发生冲刷,泥沙被水流携带至下游,依靠桩后尾涡带出冲刷坑,呈现上游冲刷深度大、下游冲刷深度小的特点。

2.1.3 60°基础安装角

图5为水流强度0.9、60°基础安装角条件下三脚桩基础3根桩柱周围冲刷深度发展过程,可见在单向流作用下1号桩柱最大冲刷深度以90°为中心上下浮动,2号桩柱以100°为中心上下浮动,3号桩柱以90°为中心上下浮动。1号桩柱前期冲刷速率较为缓慢,后期冲刷速率加快,2号和3号桩柱冲刷深度发展在时间上

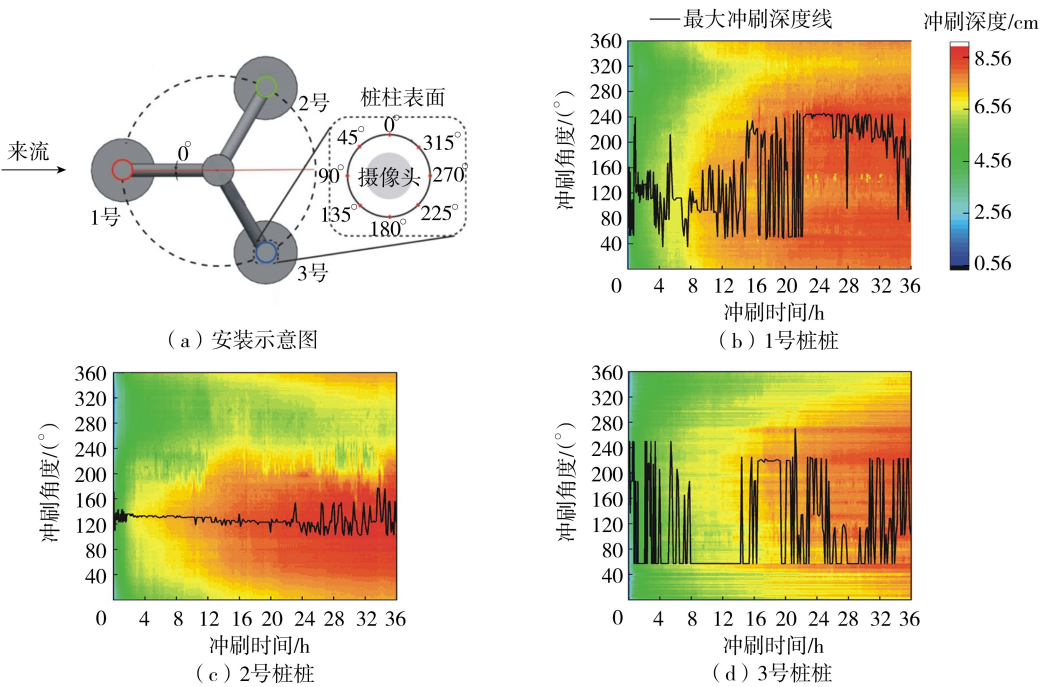


图 3 0°基础安装角下桩柱周围冲刷深度发展过程

Fig. 3 Scour depth development around piles at an installation angle of 0°

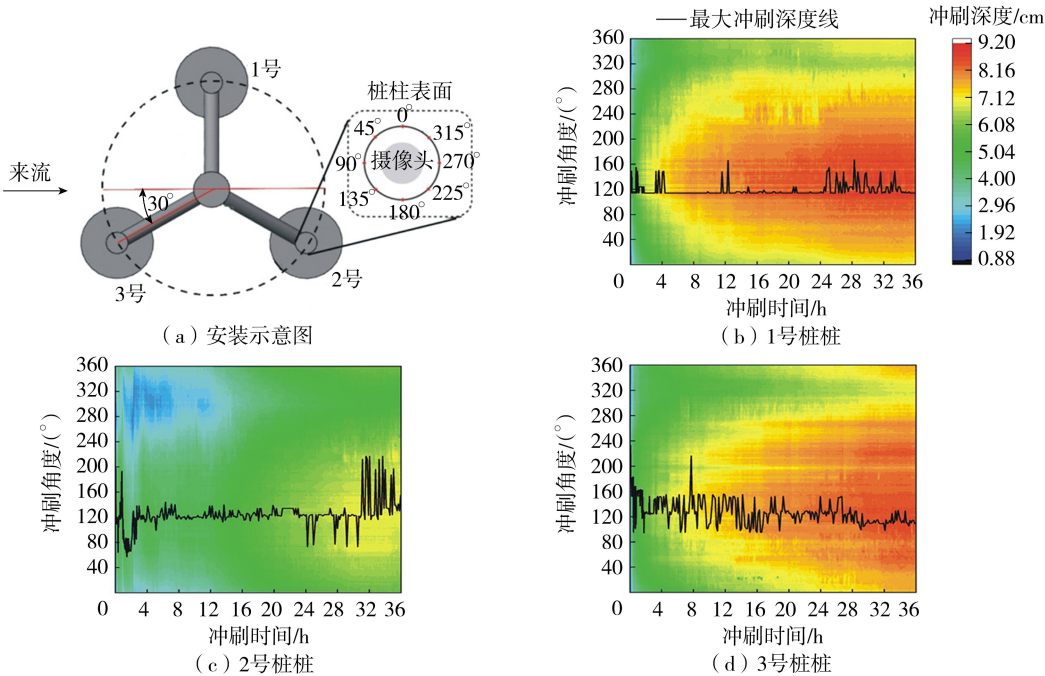


图 4 30°基础安装角下桩柱周围冲刷深度发展过程

Fig. 4 Scour depth development around piles at an installation angle of 30°

具有相似性,冲刷角度上具有对称性。

2.2 水流强度对冲刷的影响

图 6 显示了 0°基础安装角条件下水流强度为 0.7、0.8、0.9 时 3 根桩柱周围最大冲刷深度,不同水流强度下,冲刷速率不尽相同。随着水流强度的增大,3 根桩柱最大冲刷深度加深,更大的水流强度使得桩柱周围需要更长的冲刷时间以达到动态平衡。冲刷初期,由于马蹄涡的形成,使得桩柱周围水流强度迅速增大,冲刷速率急速加快;随着冲刷的发展,冲刷坑的形成使得马蹄涡的能量更多作用于床底,桩柱周围冲刷速率减缓,并逐渐趋于平衡^[23]。

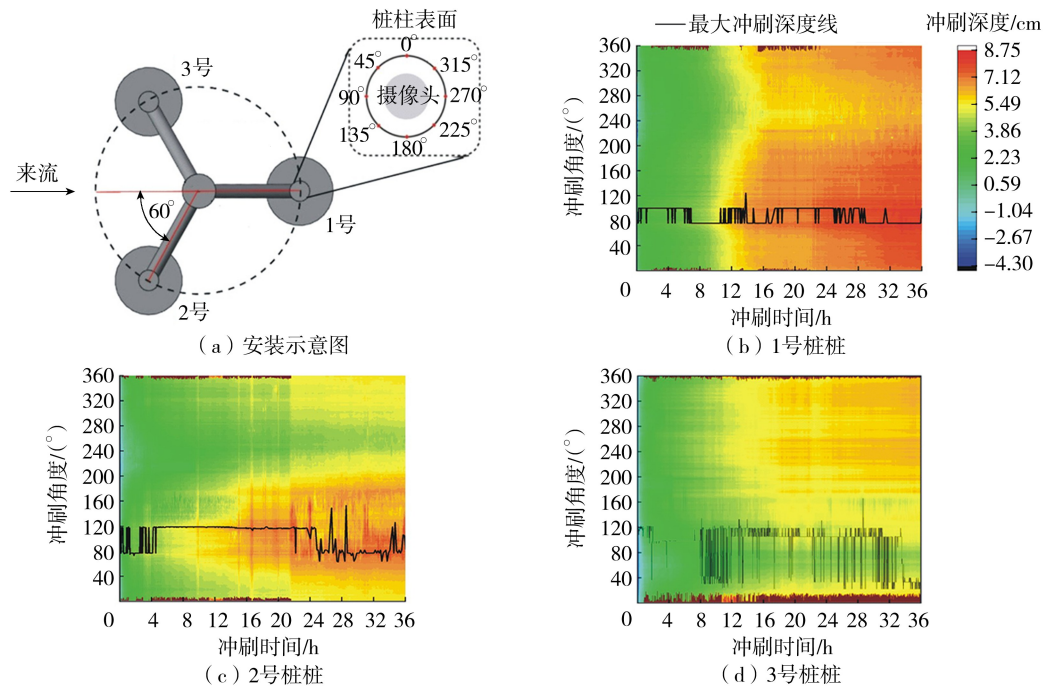


图 5 60°基础安装角下桩柱周围冲刷深度发展过程

Fig. 5 Scour depth development around piles at an installation angle of 60°

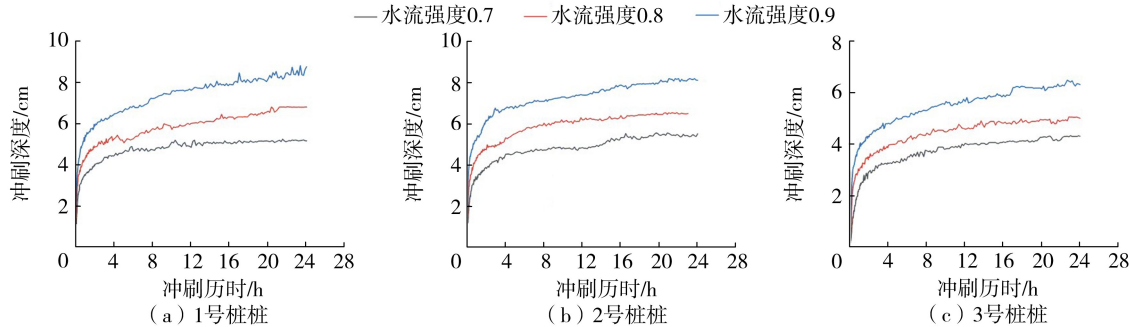


图 6 0°基础安装角下不同水流强度对桩柱冲刷的影响

Fig. 6 Effect of different flow intensities on pile scour at an installation angle of 0°

在 30°基础安装角下(图 7), 3 根桩柱最终平衡冲刷深度与水流强度呈正相关关系, 但冲刷过程不尽相同。1 号和 3 号桩柱由于仅受单向来流的影响, 冲刷深度与冲刷历时和水流强度有着明显的线性关系; 2 号桩柱由于位于 3 号桩柱下游, 其冲刷同时受到单向流以及 3 号桩柱的柱后尾流影响, 因而相较于 1 号和 3 号桩柱出现明显差异。在低水流强度(0.7, 0.8)情况下, 桩柱周围水流受上游 3 号桩柱的作用, 柱后泥沙输移加快, 致使泥沙于下游 2 号桩柱处堆积; 随着上游冲刷的不断加剧, 当 2 号桩柱最大冲刷深度在前期达

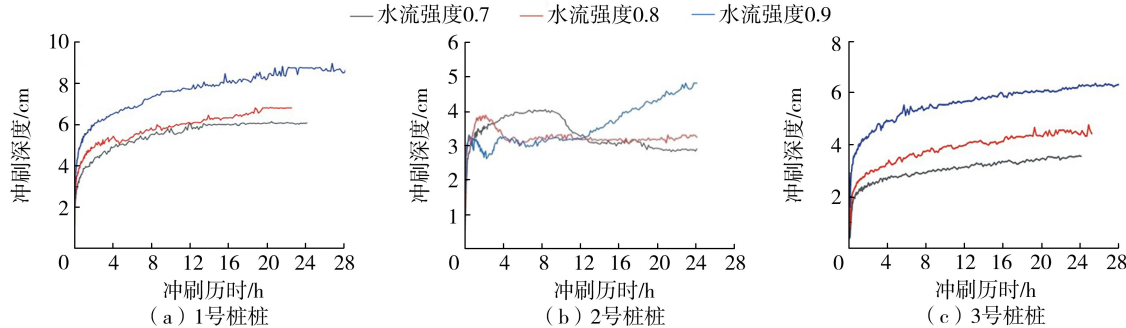


图 7 30°基础安装角下不同水流强度对桩柱冲刷的影响

Fig. 7 Effect of different flow intensities on pile scour at an installation angle of 30°

到峰值后,便会持续下降。而更高的水流强度(0.9)下,下游桩柱会更早地受到上游泥沙输移的影响,由于来流的水流强度较大,短暂下降后,下游 2 号桩柱的冲刷速率会缓慢加快,直至趋于平衡。

在 60°基础安装角下(图 8),其冲刷趋势与 0°和 30°基础安装角相同,3 根桩柱最终平衡冲刷深度与水流强度呈正相关关系,但其冲刷过程也存在一些差异。2 号和 3 号桩柱由于对称分布在上游两侧,具有极其相似的冲刷条件,故而存在着较为相似的冲刷情况,且随着水流强度的增大,水流强度对最大冲刷深度的影响逐渐降低。对于 1 号桩柱,在低水流强度下(0.7),冲刷过程中冲刷深度出现了负增长,这是由于 1 号桩柱位于冲刷下游,受 2 号和 3 号桩柱的影响,导致上游泥沙输移加剧,加上 1 号桩柱位于中心桩之后,受到中心桩阻挡,1 号桩柱周围未能及时将桩后淤积泥沙带出冲刷坑,导致冲刷深度下降。随着水流强度的增大,中心桩尾流强度随之增大,冲刷加剧,随着冲刷的进行冲刷坑不断变大变深,中心桩与底床面间距更大,更大的床面剪切力作用于床面,导致通过中心桩和底床面之间的水流流速加速效果减弱,冲刷减缓并趋于平衡。

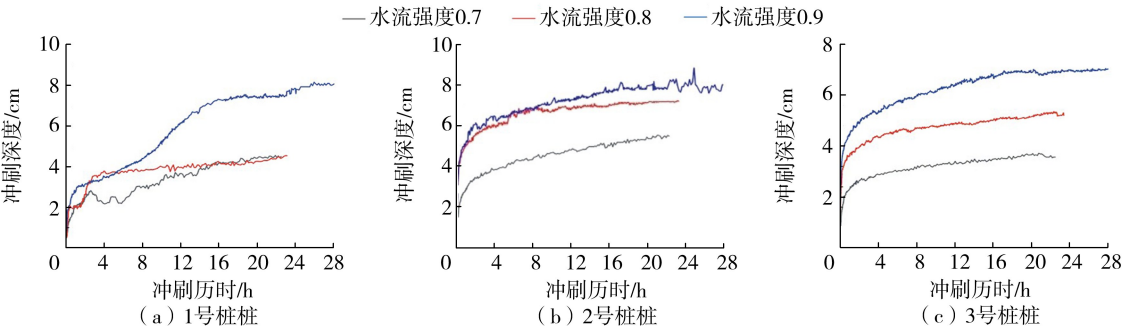


图 8 60°安基础装角下不同水流强度对桩柱冲刷的影响

Fig. 8 Effect of different flow intensities on pile scour at an installation angle of 60°

2.3 基础安装角的影响

表 1 为不同基础安装角下的最大冲刷深度,可见整机工况下三脚桩基础安装角的改变使得 3 根桩柱之间的冲刷作用发生了较为明显的变化;随着水流强度的增大,三脚桩基础桩柱周围形成的马蹄涡系强度提高,导致基础冲刷深度显著增大。当基础安装角为 0°时,2 号和 3 号桩柱周围最大冲刷深度相近,占三脚桩基础总冲刷深度的 35%~38%。当基础安装角为 30°时,1 号桩柱冲刷速率最快,1 号桩柱最大冲刷深度占三脚桩基础总冲刷深度的百分比达 42%~45%;当基础安装角为 60°时,不同水流强度下 2 号桩柱冲刷均最为迅速,占比为 35%~40%。

如图 9 所示,不同的基础安装角改变了三脚桩基础桩柱间的相互作用,进而引起基础冲刷深度的变化。在 0°基础安装角下 1 号桩柱仅受到正向来流的影响,而 1 号桩柱柱后尾涡轮的脱落以及导流效应使得 2 号和 3 号桩柱冲刷加剧;在 30°基础安装角下,1 号桩柱由于单独位于冲刷的一侧,不会受到其他桩柱的遮蔽作用,加之 3 号桩柱的导流作用,冲刷深度最大,2 号桩柱位于 3 号桩柱正后方,正向来流流速显著减小,因而冲刷深度最小;60°基础安装角下,2 号和 3 号桩柱沿冲刷方向对称分布,因而具有相似的冲刷发展状况,而 1 号桩柱位于中心桩后,受中心桩影响,冲刷速率最慢。

3 结 论

a. 三脚桩基础 3 根桩柱的冲刷深度随冲刷历时的增加持续增长,直至趋于动态平衡,考虑基础安装角变化导致的桩柱之间的遮蔽作用,当基础安装角为 0°时,3 根桩柱的冲刷深度随着时间发展呈持续增大的规

表 1 不同基础安装角下最大冲刷深度

Table 1 Maximum scour depth at different installation angles

基础安 装角/(°)	桩柱	最大冲刷深度/cm		
		水流强度 0.7	水流强度 0.8	水流强度 0.9
0	1 号桩	5.253	6.826	8.965
	2 号桩	5.551	6.538	8.469
	3 号桩	4.337	5.064	7.100
	总冲刷	15.731	17.828	24.334
30	1 号桩	6.148	6.477	9.192
	2 号桩	4.051	3.886	5.730
	3 号桩	4.466	5.951	6.888
	总冲刷	13.665	14.814	21.710
60	1 号桩	4.536	4.528	8.720
	2 号桩	5.513	7.209	8.827
	3 号桩	4.647	6.693	7.509
	总冲刷	14.296	18.206	24.957

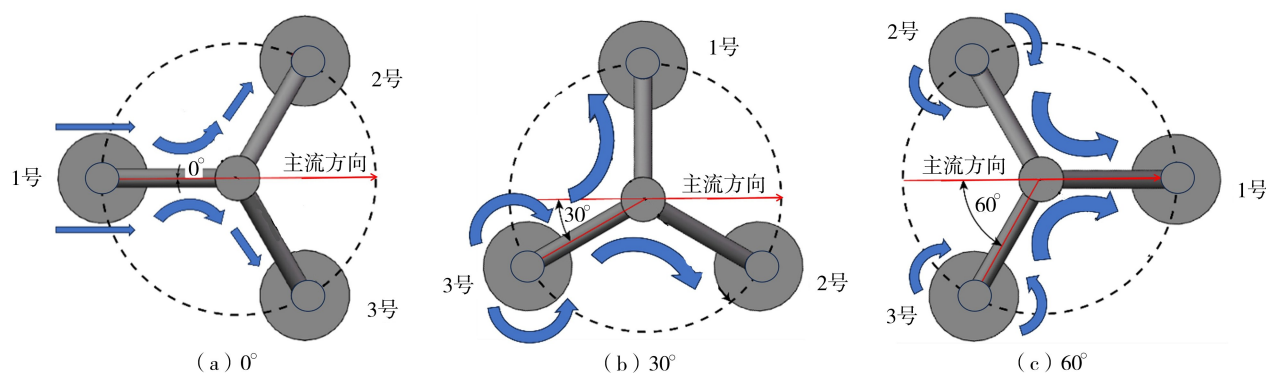


图9 不同基础安装角下的流线

Fig.9 Streamline under different installation angles

律,桩柱最大冲刷位置始终位于桩柱上游;当基础安装角为 30°和 60°时,下游桩柱由于处于上游桩柱后方,上游桩柱冲刷导致的泥沙输移增加,加上中心柱的阻碍作用,导致下游桩柱周围泥沙堆积加剧,引起下游桩柱的冲刷速率增大变缓甚至短暂下降。

b. 在清水冲刷条件下,随着水流强度提高,潮流能水轮机三脚桩基础 3 根桩柱冲刷深度与水流强度呈正相关关系,三脚桩基础 3 根桩柱最大冲刷深度与总冲刷深度均和水流强度保持显著的线性关系,但 3 根桩柱之间存在一定的差异性。

c. 当基础安装角为 0°时,三脚桩基础 1 号桩柱最大冲刷深度较小,2 号和 3 号桩柱最大冲刷深度占比相近,占基础总冲刷深度的 35%~38%;当基础安装角为 30°时,单独位于一侧的 1 号桩柱冲刷速率最快,1 号桩柱最大冲刷深度占基础总冲刷深度的百分比达 42%~45%;当基础安装角为 60°时,上游桩柱冲刷深度较大,不同水流强度下 2 号桩柱冲刷均最为迅速,占比为 35%~40%。

d. 在不同水流强度下,基础安装角为 30°时 1 号桩柱最大冲刷深度均较大,这是由于 30°基础安装角时三脚桩基础其中一根桩柱单独位于一侧,基础整体形成导流效应,显著加剧了该桩柱冲刷深度。0°和 60°基础安装角下,三脚桩基础 3 根桩柱最大冲刷深度相近。对于基础总冲刷深度,基础安装角为 30°时其值最小,这是因为此时有一根桩柱位于另一根桩柱正下游,其冲刷受上游桩柱尾流和上游桩柱形成的淤积沙丘向下游输移的显著影响;基础安装角为 0°时,基础总冲刷深度最大,因为此时 3 根桩柱主要在自由来流作用下产生局部冲刷。

参考文献:

[1] ADCOCK T A A, DRAPER S, WILLREN R H J, et al. The fluid mechanics of tidal stream energy conversion[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2021, 53: 287-310.

[2] YUCE M I, MURATOGLU A. Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 72-82.

[3] LO BRUTTO O A, THIÉBOT J, GUILLOU S S, et al. A semi-analytic method to optimize tidal farm layouts: application to the Alderney Race (Raz Blanchard), France[J]. Applied Energy, 2016, 183: 1168-1180.

[4] WANG Xuefei, ZENG Xiangwu, LI Jiale, et al. A review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 158: 103-119.

[5] 李健华,周川,王俊,等. 水下垂直桩柱结构局部冲刷研究与进展[J]. 水道港口, 2022, 43(5): 587-595. (LI Jianhua, ZHOU Chuan, WANG Jun, et al. Research progress of local scour around slender piles[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2022, 43(5): 587-595. (in Chinese))

[6] MYSA R C, LAW Y Z, JAIMAN R K. Interaction dynamics of upstream vortex with vibrating tandem circular cylinder at subcritical Reynolds number[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 75: 27-44.

[7] DUTTA D, AFZAL M S. Scour around twin-piles under combined wave-current flows [J]. Coastal Engineering, 2024, 189: 104477.

[8] ATAIE-ASHTIANI B, BEHESHTI A A. Experimental investigation of clear water local scour at pile groups [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(10): 1100-1104.

[9] NI Xuan, XUE Leiping, AN Chao. Experimental investigation of scour around circular arrangement pile groups [J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108096.

[10] 王栋,杜波,宋木清,等. 不同水深条件下海上风机群桩基础局部冲刷特性[J]. 港口航道与近海工程 2023, 60(4): 1-7. (WANG Dong, DU Bo, SONG Muqing, et al. Characteristics of local scour surrounding a multi-pile foundation of offshore wind turbine at different water depths[J]. Port, Waterway and Offshore Engineering, 2023, 60(4): 1-7. (in Chinese))

[11] ASUMADU R, ZHANG Jisheng, OSEI-WUSUANS A H. 3-D numerical study of offshore tripod wind turbine pile foundation on wave-induced seabed response[J]. Ocean Engineering, 2022, 255: 111421.

[12] WANG Shunyi, QI Wengang, LI Biao, et al. Extrapolating time development curves of clear-water scour around piles: from empirical fitting to physics-based approach[J]. Ocean Engineering, 2024, 305: 117963.

[13] LIN Xiangfeng, ZHANG Jisheng, GUAN Dawei, et al. Scour processes around a horizontal axial tidal stream turbine supported by the tripod foundation[J]. Ocean Engineering, 2024, 296: 116891.

[14] 宋木清,及春宁,许栋. 单向流作用下多桩承台式基础局部冲刷数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2023, 38(1): 1-9. (SONG Muqing, JI Chunng, XU Dong. Numerical investigation on local scour of offshore multi-pile foundation under unidirectional flow[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(1): 1-9. (in Chinese))

[15] LIU Mingming, ZHAO Ming. Study of local scour around rectangular and square subsea caissons under steady current condition [J]. Coastal Engineering, 2024, 190: 104513.

[16] BAHAJ A S, MOLLAND A F, CHAPLIN J R, et al. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank[J]. Renewable Energy, 2007, 32(3): 407-426.

[17] MELVILLE B W. Pier and abutment scour: integrated approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 125-136.

[18] VOGEL C R, WILLDEN R H J, HOULSBY G T. Blade element momentum theory for a tidal turbine[J]. Ocean Engineering, 2018, 169: 215-226.

[19] 陈存福. 潮流能水平轴水轮机叶片优化及水动力性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

[20] YUAN Chunguang, MELVILLE B W, ADAMS K N. Scour at wind turbine tripod foundation under steady flow [J]. Ocean Engineering, 2017, 141: 277-282.

[21] NI Xuan, XUE Leiping. Experimental investigation of scour prediction methods for offshore tripod and hexapod foundations[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 856.

[22] 林祥峰. 潮流能水轮机三脚桩基础局部冲刷特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2021.

[23] HILL C, MUSA M, CHAMORRO L P, et al. Local scour around a model hydrokinetic turbine in an erodible channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(8): 04014037.

(收稿日期: 2024 - 06 - 24 编辑: 熊水斌)

(上接第 9 页)

[20] 王娜. 抽水蓄能电站的洪水调节计算[J]. 东北水利水电, 2020, 38(2): 10-11. (WANG Na. Flood regulation calculation of pumped storage power station[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2020, 38(2): 10-11. (in Chinese))

[21] 陈颖杰. 仙游木兰抽水蓄能电站下水库洪水调节分析[J]. 水利科技, 2023(4): 14-17. (CHEN Yingjie. Analysis of flood regulation in the lower reservoir of Xianyou Mulan Pumped Storage Power Station[J]. Hydraulic Science and Technology, 2023(4): 14-17. (in Chinese))

[22] 鄢军军, 罗茜, 周铁柱. 五岳抽水蓄能电站下水库洪水调度规则研究[J]. 水力发电, 2020, 46(3): 91-93. (YAN Junjun, LUO Xi, ZHOU Tiezhu. Study on flood regulation rules for the lower reservoir of Wuyue Pumped-Storage Power Station[J]. Water Power, 2020, 46(3): 91-93. (in Chinese))

[23] 赵江艳, 周清平, 李思宇, 等. 抽水蓄能电站洪水调节探索[J]. 红水河, 2022, 41(2): 15-20. (ZHAO Jiangyan, ZHOU Qingping, LI Siyu, et al. Exploration on flood regulation of pumped storage power station[J]. Hongshui River, 2022, 41(2): 15-20. (in Chinese))

[24] 李大成, 朱天生, 吴迪, 等. 基于滑动叠加组合的抽水蓄能电站洪水调节计算模型及应用[J]. 中国农村水利水电, 2024(1): 244-250. (LI Dacheng, ZHU Tiansheng, WU Di, et al. Application of flood regulation model for pumped storage power station based on sliding superposition combination[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(1): 244-250. (in Chinese))

[25] 王宏飏. 抽水蓄能电站上、下库联合调洪计算[J]. 水力发电, 1997(4): 5-9. (WANG Hongbiao. Combined storage routing for the upper and the lower reservoirs of pumped storage power plant [J]. Water Power, 1997(4): 5-9. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 23 编辑: 熊水斌)