

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.02.012

水流强度对淹没式方桩局部冲刷特性的影响

杜升涛^{1,2}, 王超琳¹, 杨博^{2,3}, 王振鲁^{2,3}, 梁丙臣^{2,3}

(1. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211;

2. 中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266101; 3. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266101)

摘要: 为研究不同水流强度作用下淹没式方桩的局部冲刷特性及流场变化, 开展了非均匀沙条件下的桩基局部冲刷试验, 分析了桩周的冲刷地形、冲刷深度变化规律; 利用 OpenFOAM 对不同水流强度下的桩周流场进行了模拟, 讨论了桩前马蹄涡、桩周回流和下降水流的分布特点。结果表明: 在清水冲刷条件下, 桩周的冲刷坑深度、沙丘高度和受冲刷影响区域大小均随水流强度的增大而增大; 在平衡冲刷地形下, 高水流强度冲刷后桩周流动更加复杂, 冲刷坑内的涡流强度大幅度提高; 当水流强度接近 1 时, 粗颗粒泥沙对细颗粒的屏蔽效应会在一定程度上影响桩周最大冲刷深度。

关键词: 方桩; 局部冲刷; 水流强度; 流场特性; 模型试验; OpenFOAM

中图分类号: TV131.6; TV142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)02-0092-09

Influence of flow intensity on local scour characteristics of a submerged square pile

DU Shengtao^{1,2}, WANG Chaolin¹, YANG Bo^{2,3}, WANG Zhenlu^{2,3}, LIANG Bingchen^{2,3}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266101, China;

3. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266101, China)

Abstract: To study the local scour characteristics and flow field features of submerged square piles under the effect of different flow intensity, a series of local scour tests were carried out around the pile foundation with the non-uniform sand, and numerical tests were conducted to analyze the scour topography, change law of scour depth and flow turbulence around the square pile. The flow field around the pile were simulated by OpenFOAM. Thereafter, this study discussed the distribution characteristics of horseshoe vortex at the upstream of pile, backflow and downflow around the pile. The results show that the depth of scouring pits, the height of dunes and their sizes around the piles all increase with the increasing of flow intensity under the clear-water scour condition. In the equilibrium scouring terrain, flow around the pile is very complicated, and the turbulence energy in the scour pit becomes larger with the increasing flow intensity value. When the flow intensity is close to 1.0, the shielding effect of coarse-grained sediment on fine particles affects the maximum scour depth of pile perimeter to some extent; thus, the eddy current intensity in the scour pit in front of pile will be enhanced, resulting in more complicated flow behaviour in the scour pit.

Key words: square pile; local scour; flow intensity; flow field feature; model test; OpenFOAM

水流作用下的桩基局部冲刷导致桩基础暴露、承载力降低, 影响桩基的安全和稳定性^[1]。冲刷过程涉及水流、结构物、海床三者之间的相互作用问题, 其冲刷机理复杂, 影响因素众多。因此, 针对桩周局部冲刷的相关研究受到了广泛关注。

目前, 对桩周局部冲刷的机制^[2-4]、影响因素^[5-8]和冲刷深度的经验公式^[5,9-10]已有大量研究, 其中水流强度是桩周局部冲刷的重要因素。Chabert 等^[11]根据不同水流强度下泥沙的输运形式, 将局部冲刷分为清水冲刷和动床冲刷。王晓光等^[12]研究了水流强度对出水式圆桩(桩柱高度大于水深, 桩柱部分高出水面)桩周局部冲刷特性的影响, 发现在清水冲刷条件下桩周最大冲刷深度随着水流强度的增大呈线性提高。杨熠

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ24E090001); 宁波市自然科学基金项目(2021J096); 中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室开放基金项目(kloe202011)

作者简介: 杜升涛(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事海岸工程研究。E-mail: dushengtao303@163.com

引用本文: 杜升涛, 王超琳, 杨博, 等. 水流强度对淹没式方桩局部冲刷特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 92-100.
DU Shengtao, WANG Chaolin, YANG Bo, et al. Influence of flow intensity on local scour characteristics of a submerged square pile[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 92-100.

琳^[13]通过模型试验建立了出水式圆桩和群桩局部冲刷深度与水流强度的关系。然而,Euler 等^[14]的研究表明,出水式桩柱的冲刷深度预测经验公式无法应用于淹没式桩柱(桩柱高度小于水深,桩柱淹没于水中)的冲刷深度预测。Sarkar^[15]通过对试验数据的拟合分析估计了淹没式桩柱的平衡冲刷深度,但其水流强度仅为0.84~0.89,无法评估水流强度对淹没式桩柱平衡冲刷深度的影响。Zhao 等^[16]研究了两种低水流强度下淹没式圆桩的冲刷特点。此外,Du 等^[17]指出,在水流强度较低时,方形桩柱周围的平衡冲刷深度要远大于圆形桩柱。

虽然桩柱的局部冲刷已有很多研究,但对淹没式桩柱的研究仍较少,特别是对于方形桩柱,其在不同水流强度下的平衡冲刷深度变化还缺乏深入研究。因此,本文对不同水流强度作用下淹没式方桩的局部冲刷地形、冲刷剖面演化、最大冲刷深度与水流强度的关系进行了试验研究,同时基于 OpenFOAM 对平衡冲刷阶段的桩周流场特性进行了数值模拟分析,探究不同平衡冲刷地形下的桩周流动特性差异。

1 研究方法

1.1 试验过程及工况

试验在山东交通学院水动力模拟实验室波流水槽中进行。试验水槽长60 m、宽1.2 m、高1.5 m,沙床段位于水槽中部,如图1所示。水流从左向右泵送,通过水槽外的管道循环,并控制每次试验的水深 h 保持在0.5 m。沙床长8.4 m、宽1.2 m、高0.2 m,距1:6边坡坡脚水平距离8.4 m处放置大小为10 cm×10 cm×30 cm的方桩模型(方桩边长 $D=0.1$ m,高度 $h_c=0.1$ m)。方桩模型嵌入沙床并固定在沙床底部,并建立以模型中心为原点的坐标系。试验使用的是不均匀沙,其中值粒径 $d_{50}=0.18$ mm,不均匀系数 $\sigma=1.6$,比重为2.65,孔隙度为0.4。根据 Cheng 等^[18]的泥沙水下静止仰角公式 $\tan\alpha_d=0.74d_{50}^{0.05}$ 计算,水下泥沙休止角 $\alpha_d=36.3^\circ$ 。在 $0.1\text{ mm}<d_{50}<1.0\text{ mm}$ 时,泥沙摩阻流速 u_c^* 由公式 $u_c^*=0.0115+0.0125d_{50}^{1.4}$ 计算得出^[5],根据公式 $u_c/u_c^*=5.75\lg(5.53h/d_{50})$ 计算得到泥沙临界平均起动流速 $u_c=0.304$ m/s。当沙床由不均匀沙构成时,由于细小的泥沙颗粒在冲刷时受到较粗的颗粒屏蔽作用^[19],不均匀沙试验的水流强度 K 计算公式为 $K=[u-(0.8u_{ca}-u_c)]/u_c$,其中 u_{ca} 为非均匀沙临界平均起动流速。在不均匀沙床中,平均流速 u 越接近 u_{ca} ,泥沙颗粒之间屏蔽效应越强烈;当 $u>u_{ca}$ 时,泥沙颗粒之间就不会发生屏蔽效应。根据公式 $u_{ca}/u_c^*=5.75\lg(5.53h/d_{50a})$ 可计算得到 $u_{ca}=0.309$ m/s(其中 $d_{50a}=\sigma^m d_{\max}/1.8$,为不均匀沙沙床的沙粒计算中值粒径。当最大沉积物粒径为 d_{90} 、 d_{95} 、 d_{98} 和 d_{99} 时, m 分别为1.28、1.65、2.06和2.34)。

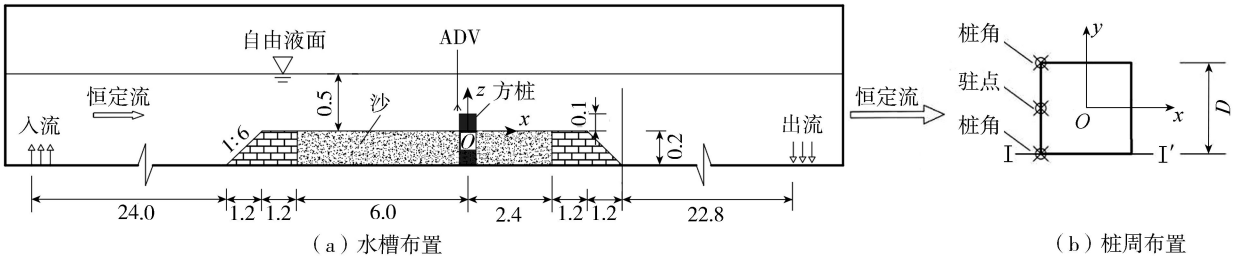


图1 试验布置(单位:m)

Fig.1 Experimental layout(unit:m)

在进行冲刷试验前,采用 Nortek Vectrino II 声学多普勒测速仪(ADV)测定方桩模型所在位置水面以下不同深度的流速分布,流速测量精度为±0.1 mm/s。每次试验前先将沙床表面抹平,然后打开阀门注水至0.5 m深。随后启动造流控制系统,并以 ADV 实时观测,使流速稳步增大到试验流速。试验工况如表1所示,试验的水流强度控制在0.75~1.06范围内,在冲刷试验过程中上游泥沙未发生明显输移,所有工况可视为清水冲刷。试验过程中,每隔1 h进行一次冲刷地形测量,当两次地形相差不大且继续冲刷1 h后高程基本不变时,认为冲刷到达平衡状态。最终测得试验A~D的冲刷持续时间 t_d

表1 试验工况

Table 1 Experimental conditions

试验编号	$u/(cm/s)$	K	t_d/h	d_s/cm	d_c/cm
A	17.0	0.75	4	1.8	0.0
B	20.3	0.85	5	2.7	1.2
C	25.8	1.03	14	5.0	3.5
D	26.7	1.06	12	5.3	3.9

最终测得试验A~D的冲刷持续时间 t_d

分别为4、5、14、12 h。在每次冲刷试验过程中,通过 ADV 的测距功能(精度为 $\pm 0.1\text{ mm}$)分别测定上游桩角($x/D=-0.5, y/D=\pm 0.5$)和驻点($x/D=-0.5, y/D=0$)的冲刷深度,并绘制冲刷深度随冲刷时间变化的曲线,以 d_s 和 d_c 分别表示上游桩角和驻点的最终冲刷深度。以 $0.5\sim 1.0\text{ cm}$ 为间隔,采用相同的方法测定桩侧剖面($y/D=\pm 0.5$)的冲刷深度随时间变化曲线。

1.2 数值模型及模型设置

1.2.1 控制方程

在笛卡尔坐标系下,对于不可压缩黏性流体,其运动规律遵从纳维-斯托克斯方程(N-S 方程)。本次数值模拟采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[20-21]得到的湍流黏度封闭雷诺时均连续性方程和动量方程。利用有限体积法(FVM)离散上述方程,采用 PISO 算法实现速度与压力的耦合求解。对流项采用迎风格式离散,扩散项和压力梯度项采用中心差分格式离散,时间项采用欧拉隐式格式离散。对于非正交网格,引入非正交修正算法来修正扩散通量的影响^[22]。

1.2.2 计算模型

模拟的计算域如图 2(a)所示,左侧入口采用入流边界,右侧出口采用自由出流边界,顶部和侧面边界采用滑移边界,方桩表面和底部沙床边界采用无滑移边界。在方桩表面和底部沙床的壁面边界上,采用基于 Spalding 定律^[23]的连续壁面函数,近壁处网格应保证 y^+ 在 $[1, 300]$ 之内^[24]。计算域以平整床面下方桩底部的中心为坐标原点,方桩边长 $D=0.1\text{ m}$ 。计算域长度(x 方向,即来流方向)为 $30D$,入口距离方桩中心为 $10D$,出口距离方桩中心为 $20D$;计算域宽度(y 方向,垂直于来流方向)为 $20D$,左右面距离方桩均为 $10D$ ^[25];计算域高度(z 方向)控制在 $5.2D\sim 5.5D$ 之间,其中入口和出口等未发生地形变化的区域高度为 $5D$ 。

湍流边界层的生成与文献[26]一致。计算域网格划分如图 2(b)所示,其中红色方框内的桩周局部网格划分可见右下角的局部放大图。计算域整体沿 x, y, z 方向分别划分为 238 层、168 层和 61 层网格,其中方桩沿 x, y, z 方向均划分为 34 层网格,网格总数为 2 399 720。Wang 等^[27]将展向均质的无限长方柱的时均压力系数、表面摩擦系数、流速等特征量与试验结果、数值模拟结果比对,充分验证了上述模型的有效性。其中,试验 C 与文献[27]中的试验 S3 为同一工况,其模型的有效性文献[27]已充分验证。

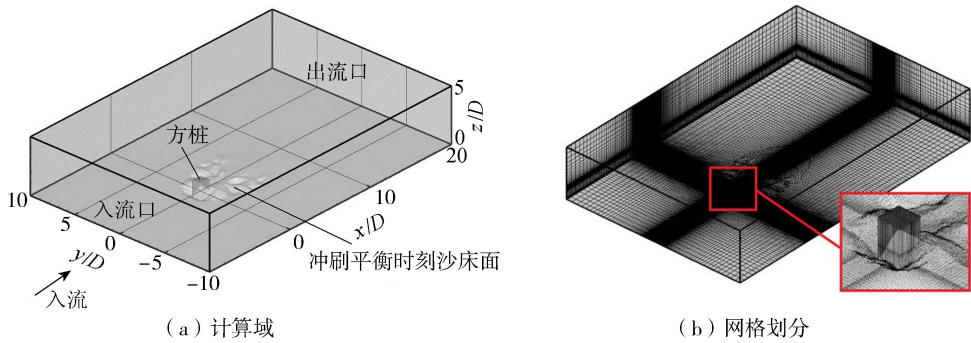


图 2 计算域及其网格划分
Fig. 2 Computational domain and mesh division

2 结果与分析

2.1 试验结果与分析

2.1.1 三维冲刷地形特点

图 3 为不同水流强度作用下试验 A~D 冲刷平衡阶段(方桩周围冲刷坑形态不再随时间变化)桩周的冲刷地形。根据桩周泥沙的冲刷和沉积特征,可将以上试验的冲刷模式分为两种:①模式 I。桩前存在小冲刷坑,桩侧有沙丘堆积,桩后无沙丘堆积(图 3(a)(b))。②模式 II。桩前存在大冲刷坑,桩后近处有沙丘堆积,桩后远处的沙丘堆积区内存在小冲刷坑(图 3(c)(d))。这两种模式分别对应试验 A、B 的低水流强度和试验 C、D 的高水流强度。

如图 3(a)所示,试验 A 的冲刷坑直径约为 $0.45D$,冲刷坑从上游桩角向桩前驻点延伸,但其驻点处还未发生冲刷现象。然而,当水流强度增大至 0.85 时,桩周冲刷坑直径发展到了约 $0.75D$,且桩前驻点出现了冲

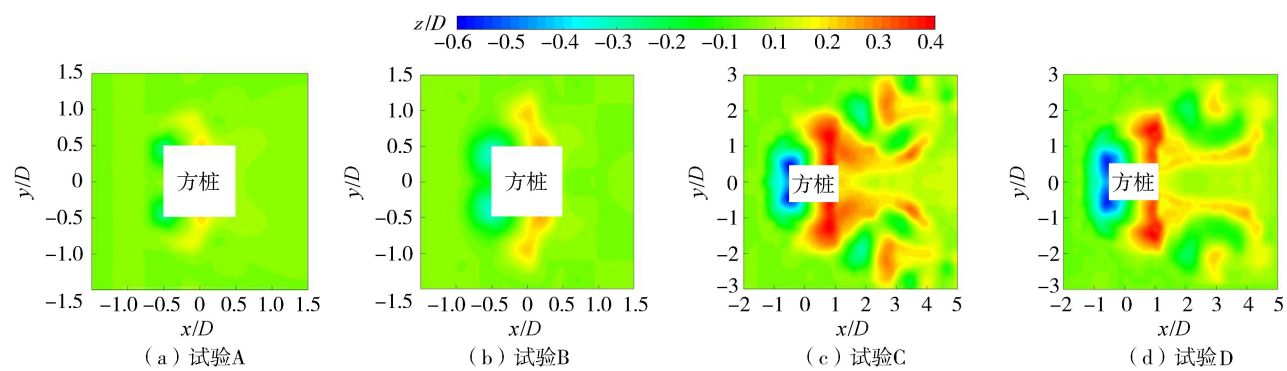


图 3 不同水流强度作用下冲刷平衡阶段桩周的冲刷地形

Fig.3 Scour topography around pile at the equilibrium scouring stage under different flow intensity

刷,上游桩角两侧的冲刷坑开始融合,形成了一个更大的冲刷坑(图 3(b))。当水流强度超过 1 时,其相应的冲刷地形发生了显著变化,沙丘的高度和宽度都显著增大,桩前冲刷坑的直径增大至 $1.5D$,上游桩前驻点的冲刷深度显著增大(图 3(c)(d))。此外,桩后泥沙将受到外马蹄涡作用,在沙丘堆积区的外侧形成了小冲刷坑^[28](图 3(c)(d))。

上述结果表明,随着水流强度的增大,桩前冲刷坑的深度和大小及沙丘的高度都随之增大。上游桩前驻点的冲刷深度也随之增大,开始接近上游桩角的冲刷深度,这使得桩周冲刷区进一步扩大和加深,进而使桩的稳定性下降。同时,由于水流强度的增大,桩基所受升力和阻力随之增大^[9],沙丘堆积区更高更宽,并从桩基上游向桩基下游移动。此外,通过对桩前驻点和桩角的冲刷深度比较可以发现,4 个试验中桩角的冲刷深度均大于桩前驻点的冲刷深度,这说明在上游桩角处的流线集中效应对局部冲刷的影响均比桩前马蹄涡更大^[16]。

2.1.2 桩周断面冲刷过程

为研究清水冲刷条件下水流强度对方桩周围泥沙冲刷与堆积的特征影响,如图 1(b)所示,选取 I—I' 特征剖面($y/D=-0.5$)测定了不同工况下泥沙冲刷发展历程。直角坐标系的原点设置在平整沙床面方桩的中心,图 4 为试验 A~D 桩侧 I—I' 剖面冲刷深度随水流强度变化情况。在不同水流强度作用下,随着冲刷的进行,桩基上游出现了冲刷坑,而桩基下游出现了因泥沙堆积而形成的沙丘。通过对比不同工况下 I—I' 剖面冲刷深度的时间历程曲线,可以发现冲刷坑深度在冲刷初期线性增大,而冲刷持续一定时间后,冲刷坑深度和沙丘高度不再发生显著变化,这表明局部冲刷已达到平衡状态。由图 4 可见,试验 C、D 的桩前冲

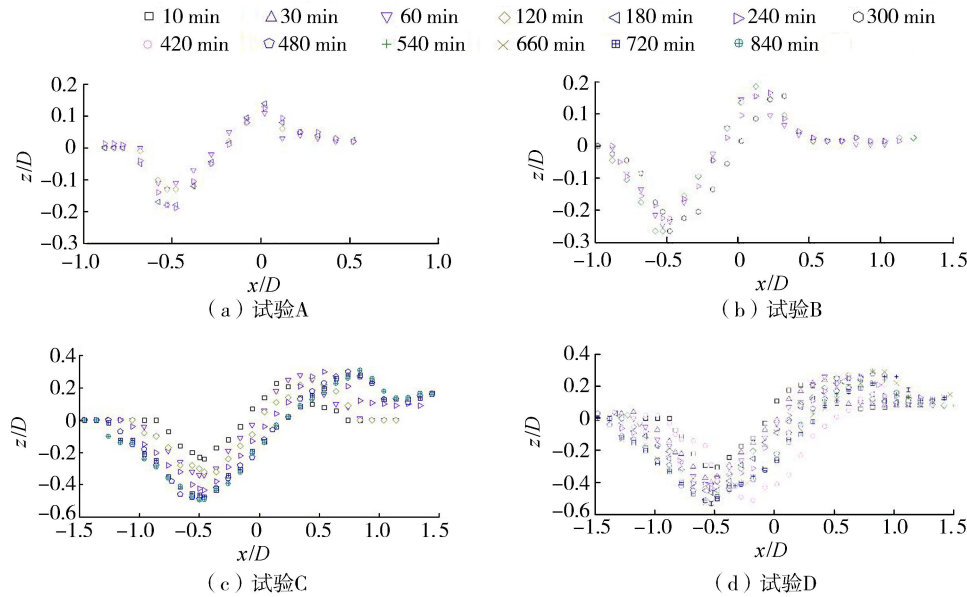


图 4 不同水流强度作用下 I—I' 剖面冲刷深度演变过程

Fig.4 Variation process of scour depth of I—I' profile under different flow intensity

刷坑最大直径分别为 $0.9D$ 和 $0.95D$,最大深度分别为 $0.5D$ 和 $0.53D$,而试验 A、B 的桩前冲刷坑最大直径分别为 $0.33D$ 和 $0.47D$,最大深度分别为 $0.18D$ 和 $0.27D$ 。上述结果表明,在较高水流强度作用下,由于床面剪应力随着水流强度的增大而增大^[3,5],泥沙输运明显增强。

如图 4 所示,不同工况下 x 方向上冲刷坑直径随水流强度变化较大,但泥沙冲刷与桩周局部冲刷引起的沉积形式相似,其冲刷坑坡角均保持在 $28^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间。所有试验在冲刷平衡后,其冲刷坑坡角均小于泥沙休止角 (36.3°),这是由于冲刷坑内的马蹄形涡流卷起冲刷坑坡面底部的泥沙所致。根据 Zhao 等^[16] 和 Zeng 等^[29] 的研究可知,桩周的局部冲刷主要是由桩前马蹄涡和流线集中效应引起的,并由尾流涡流将泥沙携带输运至桩后。如图 4(a)(b) 所示,试验 A、B 的 I—I' 剖面分别在 $x/D \geq 0.2$ 和 $x/D \geq 0.5$ 区域未观察到明显的冲刷现象,这说明在低水流强度下从桩基顶部和两侧脱落的尾涡对冲刷几乎没有影响。当水流强度增大至 1 左右时,试验 C、D 的 I—I' 剖面在冲刷初期阶段 $0 \leq x/D \leq 0.5$ 区域内存在明显的泥沙堆积。而随着冲刷时间的延长,在尾流涡旋的作用下,将 $0 \leq x/D \leq 0.5$ 区域内的泥沙向下游输运,并在 $0.5 \leq x/D \leq 1.5$ 区域内沉积形成新的堆积沙丘(图 4(c)(d))。此外,水流强度也会影响泥沙的冲刷效率,Du 等^[30] 的研究表明,在高水流强度作用下,桩周的泥沙冲刷效率也将大幅提升。在水流冲刷持续 4 h 后各组试验 I—I' 剖面处的冲刷形态如图 5 所示,试验 A~D 桩前冲刷坑最大直径分别为 $0.3D$ 、 $0.5D$ 、 $0.7D$ 和 $0.9D$,最大深度分别为 $0.18D$ 、 $0.27D$ 、 $0.42D$ 和 $0.43D$ 。以上结果表明,桩周的泥沙冲刷效率与水流强度呈正相关关系。

2.1.3 冲刷深度变化规律

Hong 等^[31] 的研究表明,在桩周泥沙冲刷初始阶段,最大冲刷深度随着冲刷时间的增加而急剧增大,至冲刷平衡阶段后,最大冲刷深度保持恒定。由图 6 可以发现,试验 A~D 在冲刷早期的 60 min 内冲刷深度迅速增大,至冲刷平衡阶段后,最大冲刷深度不再发生变化。Briaud 等^[32] 和 Sumer 等^[9] 分别提出了双曲函数(式(1))和指数函数(式(2))来预测出水式圆桩的最大冲刷深度。根据 Zhao 等^[16] 和 Yao 等^[33] 的研究,尽管方桩的最大冲刷深度分布在上游角落而不是在桩前驻点,但上述函数依旧适用于淹没式方桩桩周最大冲刷深度的预测。因此可以通过式(1)(2)来预测试验 A~D 的最大冲刷深度。

$$d_c = d_{ce}t/(t + T_0)$$

(1)

$$d_c = d_{ce}[1 - \exp(-t/T_0)]$$

(2)

式中: d_{ce} 为桩前驻点的平衡冲刷深度; t 为时间; T_0 为时间常数,定义了冲刷过程的时间尺度。

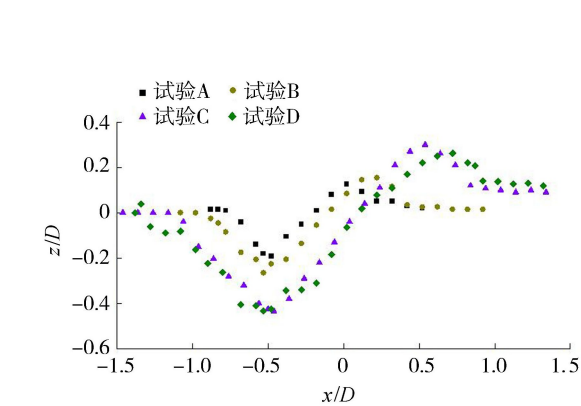


图5 冲刷4 h后不同水流强度作用下
I—I'剖面冲刷深度

Fig.5 Scour depth of I—I' profile under different flow intensity after 4 h of scouring

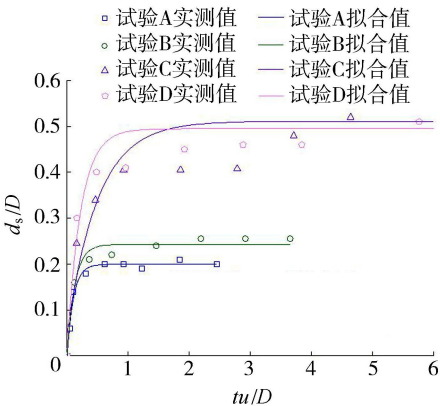


图6 不同水流强度作用下上游桩角位置
冲刷深度时程曲线

Fig.6 Time series of scour depth at corners of upstream pile under different flow intensity

由于最大冲刷深度位于上游桩角位置,故本文针对该位置的冲刷深度变化进行了分析。图 6 为上游桩角位置冲刷深度时程曲线和基于指数函数(式(2))的拟合曲线,试验 A~D 的拟合曲线相关系数分别为 0.98、0.97、0.88 和 0.92,拟合效果较好。桩周最大冲刷深度随水流强度的增大而增大,但当水流强度增大至 1 左右时,由于流速开始接近 u_{ca} ,不均匀泥沙之间的屏蔽效应将会抑制泥沙的运动,使试验流速更低的试验 C 的桩周最大冲刷深度反而略微大于试验 D 的桩周最大冲刷深度。由此也说明,不均匀沙床在清水冲刷与动床冲刷临界区内的局部冲刷深度预测还需要更深入的研究。

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 冲刷坑内流动特征分析

由于桩前逆压梯度的作用,边界层与床面分离形成分离区,分离区内的流线发生了卷曲,形成了马蹄涡。根据 Guan 等^[34]的研究,桩周的局部冲刷形态与马蹄涡结构存在紧密的联系,图 7 中试验 A ~ D 冲刷平衡阶段中轴线断面($y/D=0$)桩基上游冲刷坑形态与马蹄涡结构的拟序性也证实了上述结论。根据不同试验的桩前马蹄涡及二次涡结构特征,可将试验 A ~ D 分为 3 种模式:①模式 I。如图 7(a)所示,桩基上游存在明显的主马蹄涡(HV1),主涡流更上游区($x/D \approx -1.45$)存在微小的二次涡(HV2)。②模式 II。如图 7(b)所示,桩基上游仅存在明显的主马蹄涡,但其主马蹄涡形状较模型 I 变得不明显。③模式 III。如图 7(c) (d) 所示,桩基上游存在十分明显的主马蹄涡,冲刷坑底部($x/D \approx -0.55$)存在与主马蹄涡反方向旋转的二次涡(LV2)。在 3 种模式中,可以发现主马蹄涡涡心均位于 $-1.1 \leq x/D \leq -1.0$ 区域内。

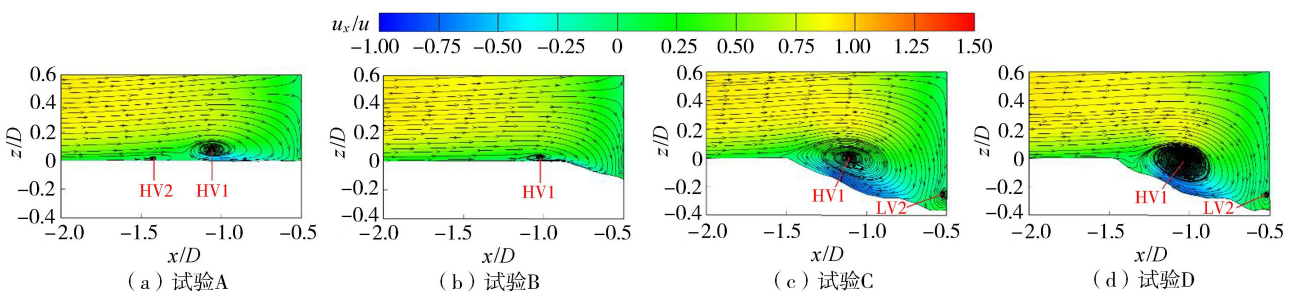


图 7 冲刷平衡阶段中轴线断面桩基上游时均流线和沿程时均水平流速分布云图

Fig. 7 Cloud diagrams of time-averaged streamlines and longitudinal time-averaged horizontal flow velocity for upstream of pile on the symmetry plane at the equilibrium scouring stage

桩基上游的下降流区和沿程回流区是桩基上游马蹄形涡流形成的关键因素^[2,35-36]。图 7 和图 8 分别为试验 A ~ D 冲刷平衡阶段中轴线断面桩基上游归一化后的沿程时均水平流速(u_x)和时均垂直流速(u_z)。由图 8 可以观察到,随着冲刷坑的直径和深度不断增大,桩前的下降流强度随之增大,下降流区域不断向冲刷坑内移动。试验 A ~ D 中下降流和沿程回流的强度和分布解释了在不同冲刷坑形态中马蹄形涡流的强度和形态存在显著差异的原因。模式 I 中桩基上游流动特征较平整床面的桩基上游未发生显著变化,所以其马蹄涡结构与平整床面的马蹄涡结构类似。而当水流强度增大至 0.85 时,试验 B 的桩前出现了较小的冲刷坑,其下降流区向冲刷坑内移动,但由于较小的冲刷坑抑制了沿程回流的产生,导致试验 B 桩前的马蹄涡无法充分发展。对于试验 C、D,在高水流强度的作用下,桩前的冲刷坑直径和深度显著增大,使桩基上游冲刷坑内的下降流和沿程回流得到了充分的发展,因此其冲刷坑内的马蹄涡较试验 A(或平整床面试验)明显增强。当冲刷坑深度加深时,由于水平压力梯度的作用,在冲刷坑底部形成了逆时针方向旋转的二次涡(LV2),这解释了冲刷坑底部出现了较平整区域的原因。通过对上述涡流的分析可以发现,随着水流强度的增大,桩基在冲刷平衡阶段后,桩前冲刷坑内的涡流强度将增大,冲刷坑内的流动行为将更加复杂,这将进一步影响桩基的稳定性。

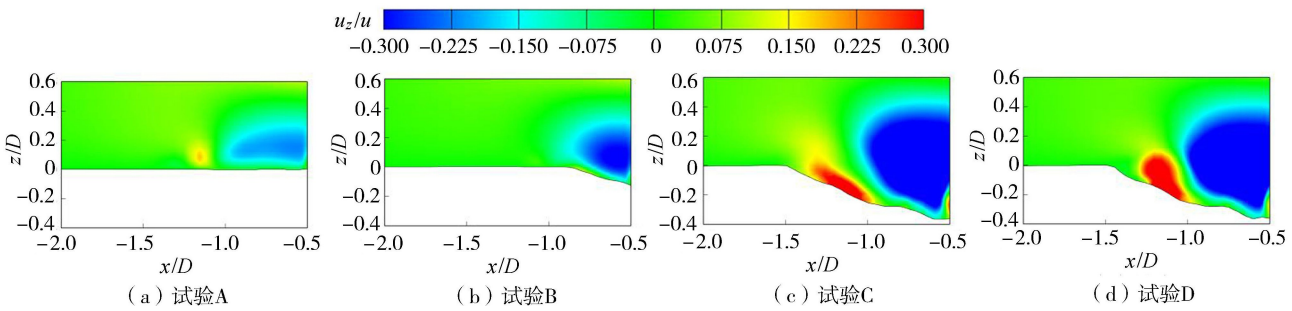


图 8 冲刷平衡阶段中轴线断面桩基上游时均垂直流速分布云图

Fig. 8 Cloud diagram of time-averaged vertical flow velocity distributions for upstream of pile on the symmetry plane at the equilibrium scouring stage

2.2.2 桩周流场特征对比

图9和图10分别为试验A~D冲刷平衡阶段中轴线断面4个高度处归一化后的沿程时均水平流速和时均垂直流速的分布曲线。由图9可以观察到,水流强度从0.75增大至1.06时,桩前沿程时均水平流速分布趋于一致,仅在 $z/D=0.25$ 高度处试验C、D受到较强的下降流影响,在桩前 $-1.0 \leq x/D \leq -0.5$ 区域内出现了可以明显观察到的波动。而桩后由于回流区的存在,其水平流速分布呈现出较大差异。由图9可知,试验A~D桩后的回流区范围不断减小,回流区回流强度不断减弱,且试验C、D远离桩基的尾流区内的沿程水平流强度也出现了明显的减弱。在 $z/D=0.25$ 时,对于试验A(图9(a)),其回流区集中在 $0 \leq x/D \leq 2.5$ 区域内,相对最大回流强度约为0.3,而对于试验C、D,其回流区缩小至 $0 \leq x/D \leq 2.1$ 区域内,相对最大回流

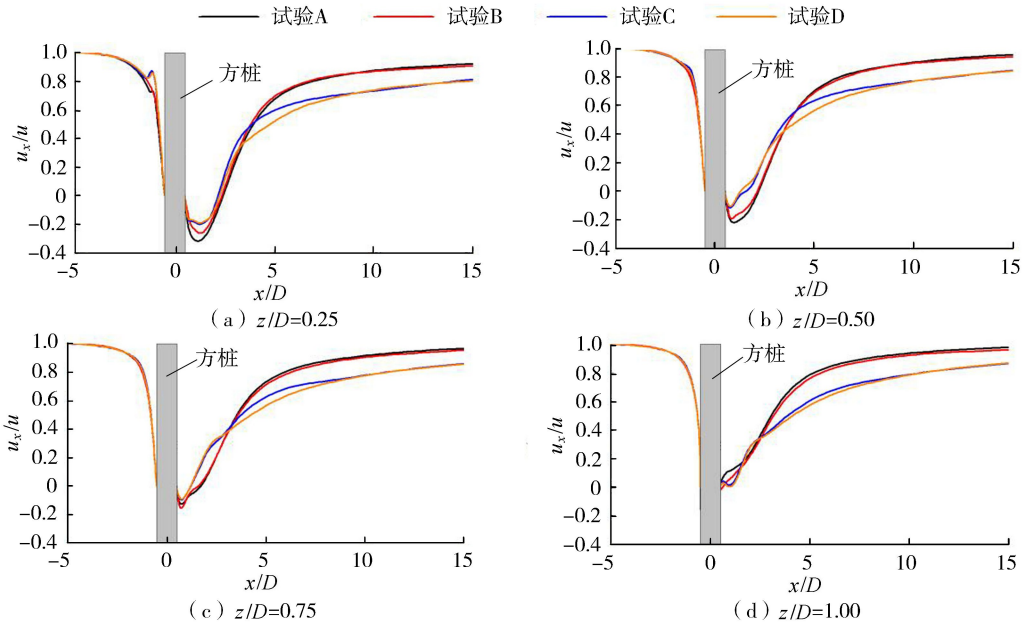


图9 冲刷平衡阶段中轴线断面桩周沿程时均水平流速分布曲线

Fig. 9 Distribution of longitudinal time-averaged horizontal flow velocity around pile on the symmetry plane at the equilibrium scouring stage

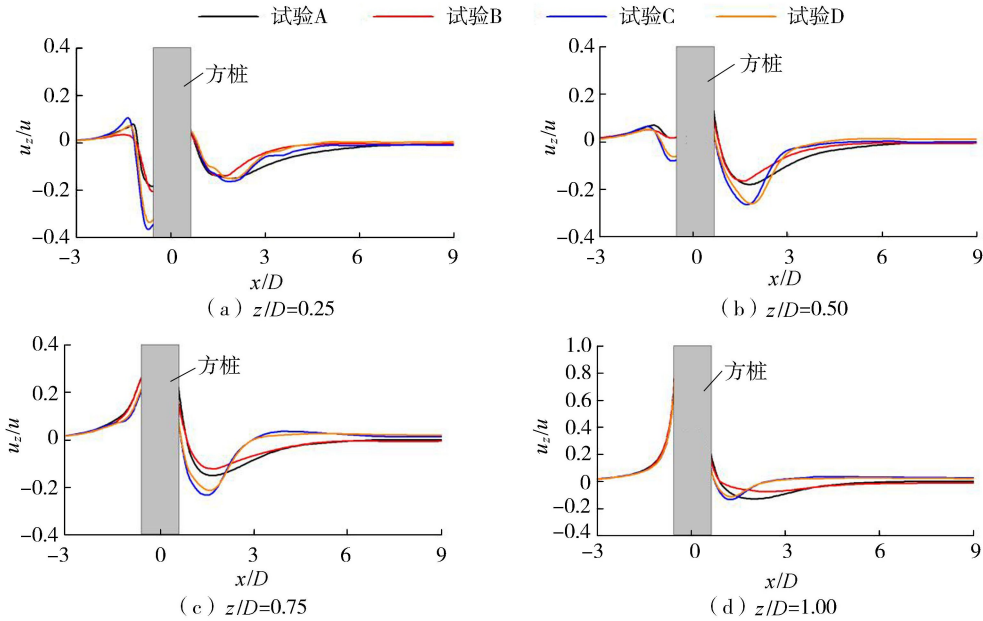


图10 冲刷平衡阶段中轴线断面桩周时均垂直流速分布曲线

Fig. 10 Distribution of time-averaged vertical flow velocity around pile on the symmetry plane at the equilibrium scouring stage

强度减小为 0.2。上述发现表明,随着水流强度的增大,桩基在冲刷平衡后,受冲刷坑大小与形态影响,其桩后回流区大小和强度都大大减弱。

如图 10 所示,试验 A ~ D 在 $z/D=0.25$ 和 $z/D=0.50$ 两个高度处均可以发现桩前的下降流,其分布范围和强度与图 8 中一致,由于试验 C、D 桩前冲刷坑更深,其垂直压力梯度更大,所以其桩前的下降流强度较试验 A、B 有明显的增大。同时,由图 10 可以发现,试验 A ~ D 桩后的下降流存在一定的差异:试验 A、B 桩基下游受下降流影响的区域更大,但相对下降流强度较小,垂直方向流速梯度较小;而试验 C、D 中下降流区主要集中在桩后较近范围内,相对下降流强度较大,垂直方向流速梯度较大。

3 结 论

- a. 在不同水流强度作用下,桩周冲刷坑和沙丘将随着水流强度的增大而扩大,桩后泥沙堆积区将不断向下游移动。桩前冲刷坑集中分布在桩基上游的桩角两侧,并随水流强度的增大不断向桩前驻点区域延伸。
- b. 在低水流强度作用下,桩基两侧脱落的尾涡不会影响泥沙的输运,而在高水流强度作用下泥沙的输运将明显受到尾涡的影响,这种差异将导致桩后沙丘堆积位置的不同。而在高水流强度作用下,桩周局部冲刷持续时间较低水流强度下大大延长,但在相同时间内的冲刷效率较低水流强度有明显提高。
- c. 在高水流强度作用下,桩前冲刷坑充分发展,桩前冲刷坑内的下降流强度将增大,冲刷坑内的马蹄涡强度将随之显著增大,冲刷坑内的流动行为更加复杂,流场的紊动更剧烈。
- d. 在较低水流强度作用下,桩周冲刷坑和沙丘较小,桩周流场无明显变化,而在较高水流强度作用下冲刷坑充分发展,桩周的下降流和沿程回流均发生了明显变化。

参考文献:

[1] 唐汉枫,陈旭光,刘金忠. 局部冲刷作用后海上风电桶型基础破坏包络面特性研究[J]. 太阳能学报,2022,43(12):289-299. (TANG Hanfeng, CHEN Xuguang, LIU Jinzhong. Study on failure envelopes of bucket foundations for offshore wind turbines after local scour[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(12):289-299. (in Chinese))

[2] DARGAHI B. Controlling mechanism of local scouring[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(10):1197-1214.

[3] ROULUND A, SUMER B M, FREDSOE J, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 534:351-401.

[4] 王玲玲,俞佳亮,朱海,等. 桥墩局部冲刷研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3):223-229. (WANG Lingling, YU Jialiang, ZHU Hai, et al. A review of the process, influencing factors and numerical modelling of local scour[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3):223-229. (in Chinese))

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

[6] LIANG Bingchen, DU Shengtao, PAN Xinying, et al. Local scour for vertical piles in steady currents: review of mechanism, influencing factors and empirical equations[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(1):e8010004.

[7] LU Youxiang, LIANG Bingchen, YIN Zegao, et al. Experimental study on time factor of scour around pile groups[J]. Ocean Engineering, 2022, 261:112125.

[8] 程永舟,吕行,王文森,等. 波流作用下淹没圆柱局部冲深影响因素分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(6):69-76. (CHENG Yongzhou, LYU Xing, WANG Wensen, et al. Research on the influencing factors of scour depth around submerged cylinder under combined action of wave and current[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6):69-76. (in Chinese))

[9] SUMER B M, FREDSOE J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. London: World Scientific, 2002.

[10] 黄君宝,肖厅厅,孙志林,等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5):441-446. (HUANG Junbao, XIAO Tingting, SUN Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5):441-446. (in Chinese))

[11] CHABERT J, ENGELDINGER P. Etude des affouillements autour des piles des ponts[M]. Chatou, France: Laboratoire d'Hydraulique, 1956.

[12] 王晓光,程永舟,罗巍,等. 水流作用下斜桩局部冲刷及流场变化试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(3):131-138. (WANG Xiaoguang, CHENG Yongzhou, LUO Wei, et al. Experimental study of local scour and flow field alteration around an inclined pile in steady currents[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(3):131-138. (in Chinese))

- [13] 杨熠琳. 桥梁群桩基础局部冲刷机理研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [14] EULER T, HERGET J. Obstacle-Reynolds-number based analysis of local scour at submerged cylinders[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2011, 49(2):267-271.
- [15] SARKAR A. Scour and flow around submerged structures[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 2014, 167(2):65-78.
- [16] ZHAO Ming, ZHU Xiaosong, CHENG Liang, et al. Experimental study of local scour around subsea caissons in steady currents[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 60:30-40.
- [17] DU Shengtao, LIANG Bingchen. Comparisons of local scouring for submerged square and circular cross-section piles in steady currents[J]. *Water*, 2019, 11(9):1820.
- [18] CHENG Niansheng, ZHAO Kuifeng. Difference between static and dynamic angle of repose of uniform sediment grains[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(2):149-154.
- [19] MELVILLE B W, SUTHERLAND A J. Design method for local scour at bridge piers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, 114(10):1210-1226.
- [20] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8):1598-1605.
- [21] MENTER F, ESCH T. Elements of industrial heat transfer predictions[C]//*Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. Uberlândia. Minas Gerais: The Federal University of Uberlândia, 2001:117-127.
- [22] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows[D]. London: Imperial College London, 1996.
- [23] SPALDING D B. A single formula for the "law of the wall"[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1961, 28(3):455-458.
- [24] DEVOLDER B, RAUWOENS P, TROCH P. Application of a buoyancy-modified $k-\omega$ SST turbulence model to simulate wave run-up around a monopile subjected to regular waves using OpenFOAM®[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 125:81-94.
- [25] BEHR M, HASTREITER D, MITTAL S, et al. Incompressible flow past a circular cylinder; dependence of the computed flow field on the location of the lateral boundaries[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, 123(1/4):309-316.
- [26] YANG Bo, LIANG Bingchen, ZHANG Qin, et al. Numerical investigation of flow around two cylinders in tandem above a scoured bed[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(8):087102.
- [27] WANG C, DU S, ZHANG Z, et al. Numerical study of flow features around submerged circular and square piles at flat and scoured beds using OpenFOAM[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2024, 23(4):S11802.
- [28] SHAMLOO H, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Hydraulics of simple habitat structures[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, 39(4):351-366.
- [29] ZENG Jie, CONSTANTINESCU G. Flow and coherent structures around circular cylinders in shallow water[J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(6):066601.
- [30] DU Shengtao, WANG Zhenlu, WANG Risheng, et al. Effects of flow intensity on local scour around a submerged square pile in a steady current[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(8):085126.
- [31] HONG Jianhao, GOYAL M K, CHIEW Y M, et al. Predicting time-dependent pier scour depth with support vector regression[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 468-469:241-248.
- [32] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. SRICOS: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 1999, 125(4):237-246.
- [33] YAO Weidong, AN Hongwei, DRAPER S, et al. Experimental investigation of local scour around submerged piles in steady current[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 142:27-41.
- [34] GUAN Dawei, CHIEW Y M, WEI Maoxing, et al. Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34(2):118-124.
- [35] TSENG M H, YEN C L, SONG C C S. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2000, 34(3):207-227.
- [36] 陈汨梨, 林祥峰, 张明宗, 等. 往复流作用下潮流能水轮机单桩基础冲刷试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(2):17-22. (CHEN Mili, LIN Xiangfeng, ZHANG Mingzong, et al. Experimental study on scour process around mono-pile foundation of a tidal stream turbine under bidirectional flow[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(2):17-22. (in Chinese))