doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2025.06.010

海上桩基冲刷机理及防护措施研究

王 林，张泽成，张 波，马骁哲

（山东国华时代投资发展有限公司，山东 济南 250002）

摘 要：为深入研究波流作用对桩基冲刷的影响，本文基于经典静水压力理论，采用 Telemac 数值模拟软件，将流场与涡量的数值模拟结果与前人实验成果进行对比，在验证无误后，根据设计工况对桩周流场、涡量与冲刷特征进行模拟分析，同时针对冲刷结果提出仿生水草和底栖生物组合的防护方法，并开展相应的物理模型实验，证明了仿生水草和底栖生物组合具有优良的缓流促淤作用，揭示了桩基在不同波流作用下的冲刷机理。结果表明：随着波浪作用的加入与流速的增大，桩基左右两侧流速显著提高；涡量分布对水流作用强度变化更加敏感；最大冲刷深度均出现在桩基左右两侧及四桩心矩形连线内，且四根桩基冲刷深度差异不大；柔性防护措施具有优良的缓流促淤作用。

关键词：桩基冲刷机理；波流作用；桩基防护

中图分类号：TU473.1；P752 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-2029（2025）06-0098-11

随着全球环境问题日益严峻和化石能源价格的波动，海洋光伏发电作为清洁能源开发的新方向，展现出巨大的应用前景，兼具生态环保优势和显著的经济社会效益。但由于海洋环境复杂、条件恶劣，海上光伏的桩基部位易出现侵蚀或破坏等现象，因此深入探究桩周围局部冲刷机理，并针对此提出有效的防护措施，具有重大意义。

针对恒定流作用下单桩桩周局部冲刷的研究，赵威等[1]通过圆柱绕流实验对桩体后方流场特性进行了系统研究，其结果表明，在平均剪切应力相对较小的尾流区，冲刷过程主要受尾涡动力效应与湍流脉动的协同作用。严建科等[2]通过开展圆柱绕流实验研究，揭示了桩体周围流场紊动特性对局部冲刷过程的重要作用。在单桩局部冲刷深度方面，学者们基于不同理论建立了多种计算公式。HONG J 等[3]基于试验数据回归分析，拟合建立了平衡冲刷深度的计算公式。BAYRAM A 等[4]通过七种典型群桩配置的波浪冲刷试验，系统分析了桩间距变化对局部冲刷深度的影响特征。ATAIE-ASHTIANI B 等[5]重点考察了群桩排列方式、桩基数量及桩间距等关键参数，创新性地引入群桩修正系数来改进冲刷深度预测精度。卢中一等[6]通过水槽试验探究了水流冲击角度对梅花形布桩方式下群桩冲刷特性的作用机制，并创新性地引入夹角修正系数对现有冲刷深度计算公式进行优化。对于冲刷过程中流场的研究，MUZZAMMIL M 等[7]通过系统实验，揭示了桥墩上游马蹄形涡旋的几何特征（空间位置、尺度参数）及动态特性（旋转频率）随冲刷坑演化过程的演变规律。DEY S 等[8]利用声学多普勒测速仪（Acoustic Doppler Velocimeter，ADV）完整记录了圆柱墩体周围流场在冲刷深度达到平衡状态 25%、50%、75%及 100%四个特征阶段时的三维流速分布特征。KUMAR A 等[9-10]采用 ADV 仪器，针对圆柱形变截面复合墩的局部冲刷特性进行了研究，对不同复合墩周围冲刷坑内的三维流场进行了测量与对比分析。DAS S 等[11-12]同样采用 ADV 仪器测量桥墩周边的冲刷坑流场结构，着重分析了马蹄涡的涡度特征及其环量分布规律，以及不同水深条件和雷诺数

收稿日期：2025-06-11

作者简介：王林（1990—），男，本科，工程师，主要从事海岸带调查、遥感应用研究。E-mail：975949697@qq.com

变对马蹄涡动力学特性的影响机制。DAS S 等[13]通过实验发现，偏心双桩结构中后桩的马蹄涡强度和尺度显著大于前桩，且冲刷坑外围的紊动特性明显强于坑内区域。

冲刷坑内大尺度涡结构是影响冲刷过程的主要因素，关于群桩冲刷坑内流场的研究多关注平衡冲刷条件下的冲刷坑内流场动力学特性，但整个冲刷过程中不同时刻各特征值的变化规律，以及这些特征值与水流条件的关系尚未明确，因此，群桩周围冲刷坑内流场结构及各流场特征量随冲刷过程的变化规律有必要深入研究。

1　数值计算理论

Telemac 软件可以模拟水流、波浪、潮汐、河流、湖泊、沿岸等水动力学过程，并对水域中的水流速度、水位、水质等进行预测和分析。其基于物理方程和数学模型，通过有限元方法构建不规则三角形网格来模拟和预测水动力学过程，广泛用于海洋工程、河流治理、水资源管理、环境保护等领域。本文结合实测数据和规范，选取五年一遇的极端高水位和五年一遇的设计高水位下各特征点位的高程、水深、波高、波浪周期、设计流速和中值粒径等指标作为冲刷数值模拟的输入工况条件。

本文研究主要基于基本静水压力假设，该方法包括自由曲面随时间变化的三维 Navier-Stokes 方程、质量守恒方程（不可压缩流体中的密度变化可以忽略不计）、静水压力假设（给定深度的压力是流体表面的气压加上覆盖水体的重量之和）与动量的 Boussinesq 近似（密度变化只作为浮力考虑）。基于以上假设，需要求解的三维方程如下。

$$\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}+\frac{\partial W}{\partial z}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+W\frac{\partial V}{\partial z}=-\mathrm{g}\frac{\partial Z_S}{\partial x}+v\Delta V+Fx \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+W\frac{\partial V}{\partial z}=-\mathrm{g}\frac{\partial Z_S}{\partial x}+v\Delta V+Fy \tag{3}$$

$$P=P_{\mathrm{atm}}+\rho_0\mathrm{g}(Z_S-z)+\rho_0\mathrm{g}\int_z^{Z_S}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\mathrm{d}z' \tag{4}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+U\frac{\partial T}{\partial x}+V\frac{\partial T}{\partial y}+W\frac{\partial T}{\partial z}=\mathrm{Div}(v\mathrm{Grad}(T))+Q \tag{5}$$

式中，h 为水深；Z_S 为自由表面高程；U、V、W 为速度的三维分量；T 为示踪剂（温度或盐度）；P 为压力；P_{atm} 为大气压强；g 为重力加速度；v 为示踪剂扩散系数；ρ_0 为参考密度；$\Delta\rho$ 为密度变化；t为时间；F_x、F_y 为代表风、科氏力、底摩擦等作用的源项；Q 为水槽示踪剂源；h、U、V、W、T 为计算变量。基本算法包括三个步骤，第一步是通过求解动量方程中的平流项来求出平流速度分量；第二步从平流速度中计算出考虑了动量方程中扩散项和源项的新速度分量，这两种解可以得到一个中间速度场；第三步从连续性方程和动量方程的垂直积分来计算水深，进而得到二维方程。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(vh)}{\partial x}+\frac{\partial(vh)}{\partial y}=0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}=-\mathrm{g}\frac{\partial Z_S}{\partial x},\quad \frac{\partial v}{\partial t}=-\mathrm{g}\frac{\partial Z_S}{\partial y} \tag{7}$$

利用上述二维方程可求解垂直平均速度和水深，水深可用于重新计算各网格点的高度及自由表面的高度。为尽可能与静水压力假设的方程解共享一个共同的核心，压力被分成一个静水压力和一个“动态”压力项。

$$P=P_{\mathrm{atm}}+\rho_0\mathrm{g}(Z_S-z)+\rho_0\mathrm{g}\int_z^{Z_S}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\mathrm{d}z'+P_d \tag{8}$$

式中，P_d 为非静水压力扰动项。

2　数值方法验证

2.1　流场验证

在流场验证实验中，不需要考虑泥沙的冲刷作用，主要是为了得到与实测工况一致的水流，为了提高计算效率可以不引入单桩模型，提取流速充分发展后的断面流速分布，与实验工况下的实测流速剖面进行对比分析，从对比图（图 1）中可以看出数值模拟获得的流速剖面分布特征与物理模型试验

结果高度吻合，均呈现典型的对数分布规律。

为验证单桩周围流场的准确性，通过对比桩基周围 *x*-*y* 平面流速矢量分布与 Melville 经典实验流线图[14]（图2）结果发现，两者均表现为：①最大流速区集中分布于桩体两侧；②桩后明显形成回流区。

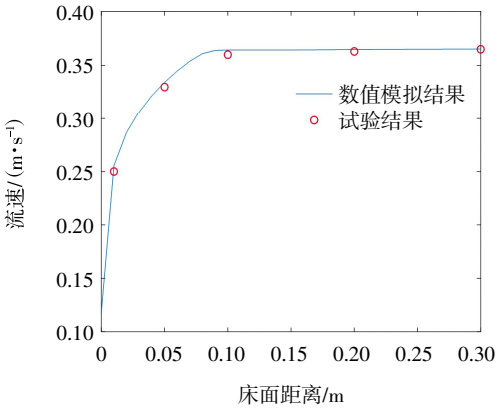
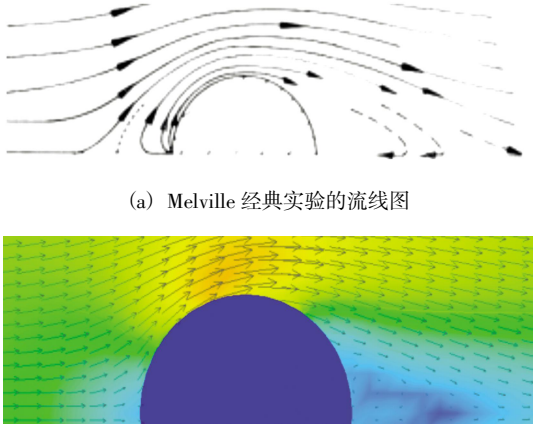


图 1 流速验证图



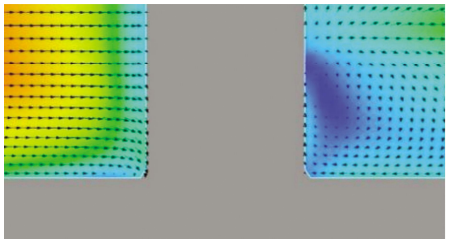
(a) Melville 经典实验的流线图

(b) 数值模型流线图

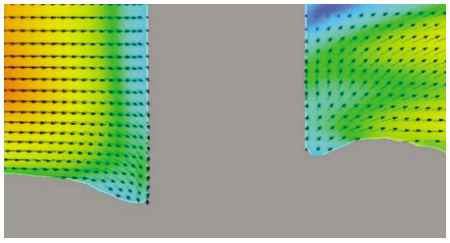
图 2 桩周 *x*-*y* 平面流线图

为验证桩周流场特性，选取 *x*-*z* 剖面单桩中心线流线分布进行分析。研究结果显示，桩前水流受阻导致明显的水位上升和流速衰减；桩前桩后水位差形成显著的压力梯度；压力梯度作用诱发垂直向下的 *z* 向水流。另外从图 3 中还可以清楚地看到桩体上游河床上的边界层，边界层与马蹄涡的产生密切相关。

图 4 为 *x*-*y* 流速分布云图，图 4 中不同颜色代表不同流速，蓝色代表的流速最慢，红色代表的流速最快。从图 4 中可以更加明显地看到桩前存在显著的水流阻滞效应，桩周呈现典型的绕流特征，桩

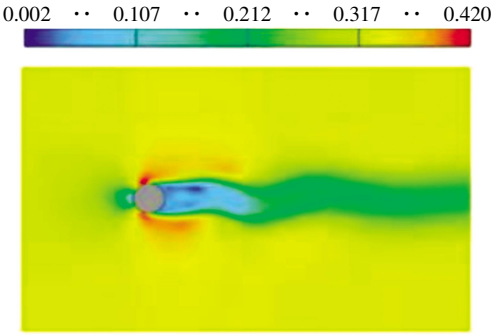


(a) 未冲刷

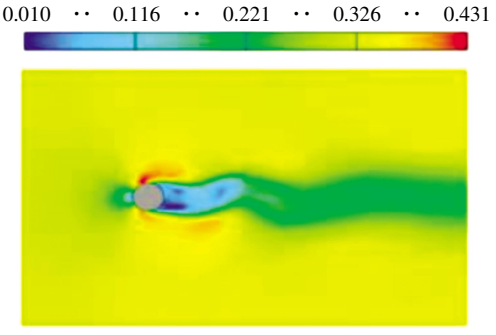


(b) 冲刷开始一段时间后

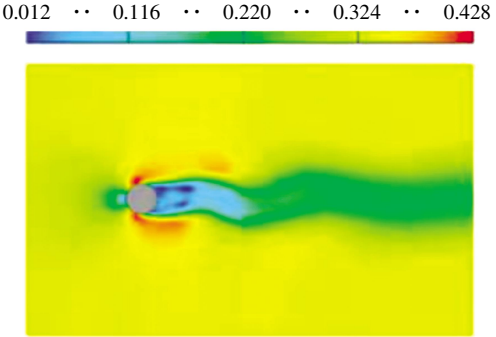
图 3 桩周 *x*-*z* 平面流线图



(a) *t*=10 s



(b) *t*=90 s



(c) *t*=180 s

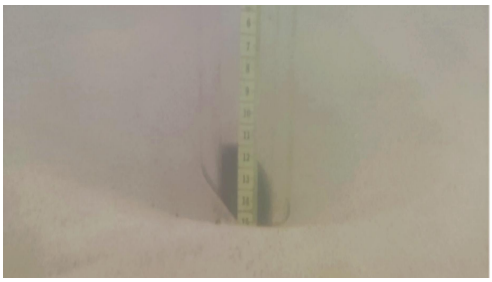
图 4 不同时刻桩周 *x*-*y* 流速分布云图（单位：m/s）

后形成明显的尾流区，这些流场特征与冲刷形成的机理高度一致，证实了数值模拟结果与物理试验数据具有良好的一致性。

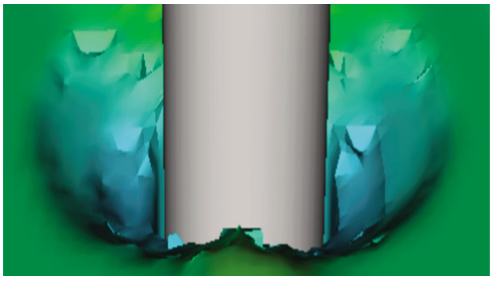
2.2　冲刷验证

为了准确设置模型的开边界条件，提取网格开边界点位坐标位置，根据所得潮汐数据，对海岸线部分设置 Boundary Code 边界条件为 Open boundary with presceibed Q，对外海开放边界海域设置 Boundary Code 边界条件为 Open boundary with prescribed UV 和 H，以得到模型开边界潮位条件。

在冲刷验证实验中，当实验进行到 1 200 s 后，虽然桩侧泥沙仍受到水流冲刷作用，但冲刷坑形态基本稳定，局部冲刷趋于平衡，冲刷深度趋向稳定。由图 5 可知，冲刷试验结果与数值模拟所得的冲刷坑形态特征表现出良好的一致性。为验证数值模拟结果的可靠性，对物理模型试验与数值模拟获得的冲刷深度数据进行了对比分析。根据冲刷深度对比图（图 6）我们能够发现数值模拟的最大冲刷深度在第 600 s 和 1 800 s 与物理模型试验的结果基本一致，仅在 1 200 s 时刻存在微小偏差，但是误差值在合理的可接受范围之内，因此结果表明，本文建立的数值模型能够准确可靠地模拟单桩基础冲刷过程。

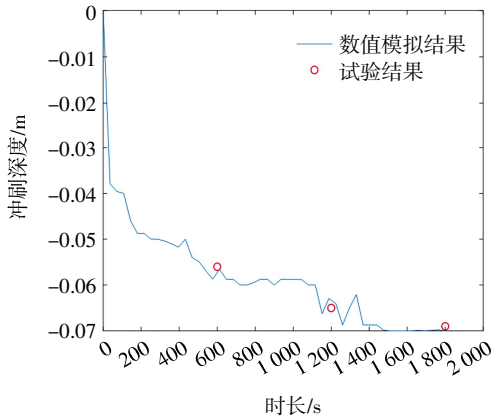


(a) 物理模型冲刷坑

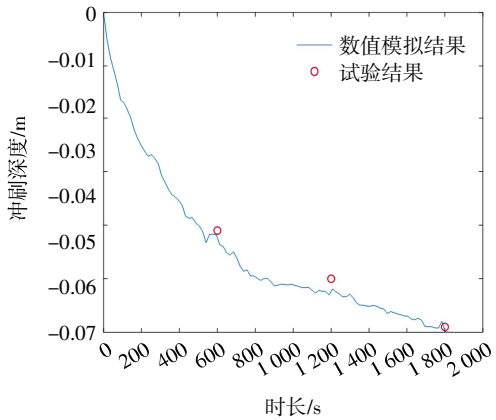


(b) 数值模型冲刷坑

图 5　冲刷坑形态对比



(a) 本文工况



(b) 文献工况

图 6　冲刷深度验证

3　桩基冲刷机理数值研究

3.1　工况设计

基于前人研究成果，分别考虑水流作用和波流共同作用两种条件，依据现实海况条件和试验波浪、水深、流速等因素，兼具考察相邻桩基础之间的流场干扰对于冲刷的影响的目的，设计间距为 19.4 m 的四根连续桩基（桩基直径 1.3 m），根据以下三种波流条件进行数值模拟（表 1）。

3.2　经验公式冲刷深度估算

目前，国内外学者针对局部冲刷问题已建立出多种经验公式。韩海骞等[15]利用物理模型试验数据，结合量纲分析，推导出潮流导致的局部冲刷计算公式。在波浪水流槽实验中，王汝凯[16]进行了 19 组波流共同作用下的普遍冲刷试验，以及 39 组孤立桩周边沙基冲刷试验，推算出了王汝凯公式。根据两

种局部冲刷计算方法，结合设计泥沙特征及桩基尺寸，均匀选取 6 个代表点，代表点位置处的环境参数及计算成果如表 2 所示，公式计算局部冲刷结果如表 3 所示。

表 1 数值模拟工况设计

工况	水深/m	水流/(m·s⁻¹)	波高/m	周期/s	断面位置/m	底质泥沙中值粒径/mm	泥沙水下休止角/(°)
1	5.71	1.1	—	—	距离床面 0.2	0.032	32
2	5.71	1.1	2.62	4.4	距离床面 0.2	0.032	32
3	5.71	2	2.62	4.4	距离床面 0.2	0.032	32

表 2 代表点位置环境参数

环境参数		数值					
代表位置		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
设计高水位下水深/m		3.01	4.11	5.71	5.11	4.51	4.91
工程场区实测最大流速/(m·s⁻¹)		1.10					
设计波要素	有效波高/m	1.24	2.07	2.62	2.52	2.33	2.38
	波浪周期/s	3.0	3.8	4.4	4.3	4.1	4.2
	波长/m	12.47	19.55	26.58	25.09	22.40	23.33
底质泥沙中值粒径/mm		0.032					
桩基直径/m		1.3					
泥沙水下休止角/(°)		32					

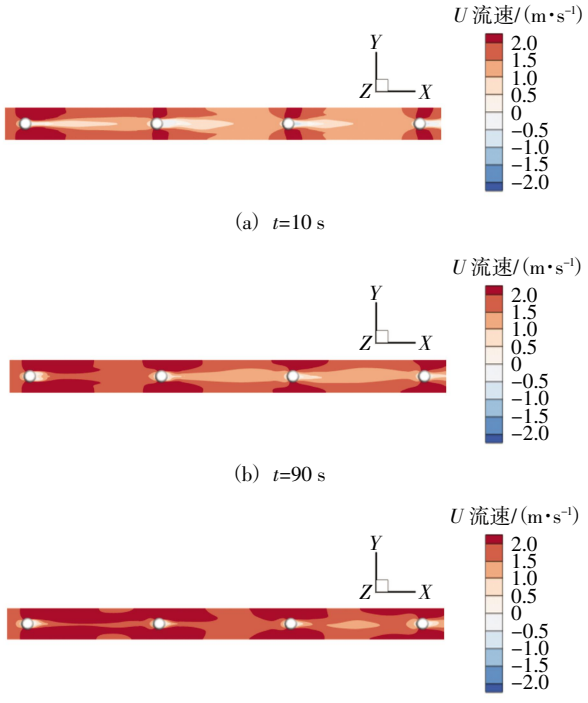
表 3 局部冲刷计算结果

局部冲刷代表点	王汝凯公式	韩海骞公式
	冲刷坑最大深度/m	冲刷坑最大深度/m
Ⅰ	0.49	2.15
Ⅱ	0.75	2.29
Ⅲ	0.96	2.44
Ⅳ	0.92	2.39
Ⅴ	0.84	2.33
Ⅵ	0.86	2.37

3.3 工况一数值计算结果

如图 7 所示，在模拟初始时刻，桩群的桩前流速减小，两侧流速增大，上游桩形成的剪切层附着在下游桩表面上，可观察到两桩间出现显著分界的流速带，在两桩之间为流速趋于 0 的区域，且产生的剪切层影响范围较大。随后流速呈增大趋势，但仍显著低于同一断面两侧区域的流速值。瞬态马蹄涡系包含多个不同尺度和强度的涡结构，要深入研究其动态特征，需识别出最能代表系统特性的主涡。如图 8 所示，蹄涡上游床面附近出现不稳定的波动，随着模拟时间的增长，涡流逐渐向下游移动，下游的主马蹄涡的强度得到明显增强，涡流面积也逐渐增大。

同时观察不同时刻桩周局部冲刷深度分布图可知，冲刷主要发生在桩体左右两侧及四圆柱桩中心区域，而桩体结构对后方区域产生保护效应，导致该处出现显著的泥沙沉积现象。如图 9 所示，随着流量增加导致水流流速提升，冲刷作用逐渐向整个平面扩展，而桩体对后方区域的防护效应依然显著，具体表现为：受上游桩对下游桩的保护影响，该区域冲刷深度显著低于桩体两侧。最大冲刷深度出现在桩基左右两侧及四桩心矩形连线内，在水流方向，从前向后四根桩基的冲刷深度依次为

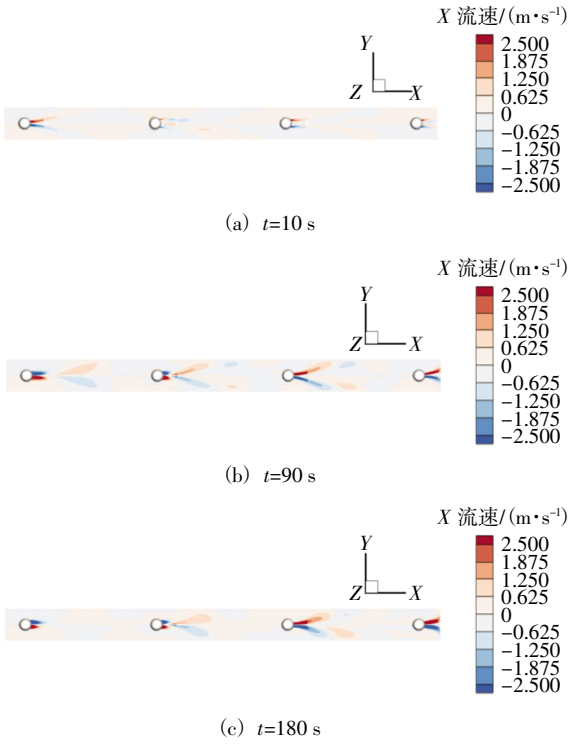


(a) t=10 s

(b) t=90 s

(c) t=180 s

图 7 不同时刻桩周 *x-y* 断面流速

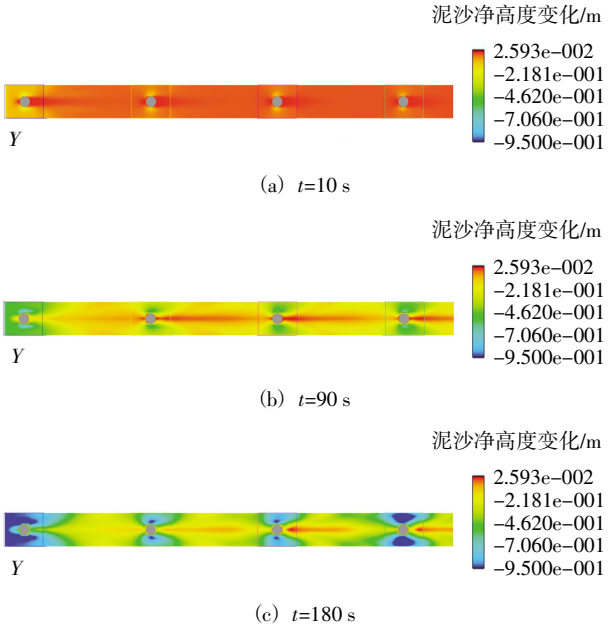


(a) t=10 s

(b) t=90 s

(c) t=180 s

图 8　不同时刻桩周 *x-y* 断面涡量分布



(a) t=10 s

(b) t=90 s

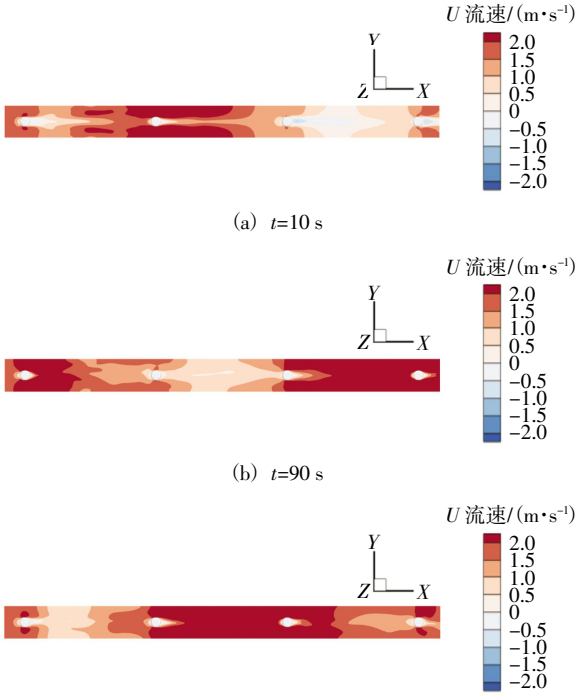
(c) t=180 s

图 9　不同时刻桩周局部冲刷深度分布

−0.95 m、−0.948 m、−0.939 m、−0.95 m，各桩冲刷深度之间差异不大。

3.4　工况二数值计算结果

如图 10 所示，在加入波浪作用条件后，与仅有水流作用下相比，流场分布明显不同。桩群的桩前流速减小，两侧流速增大，可看到上游柱至下游桩之间，产生了大小分明的流速带，在两桩之间为流速趋于 0 的区域。随后流速逐渐增大，但其明显小于同一断面上左右两侧流速。



(a) t=10 s

(b) t=90 s

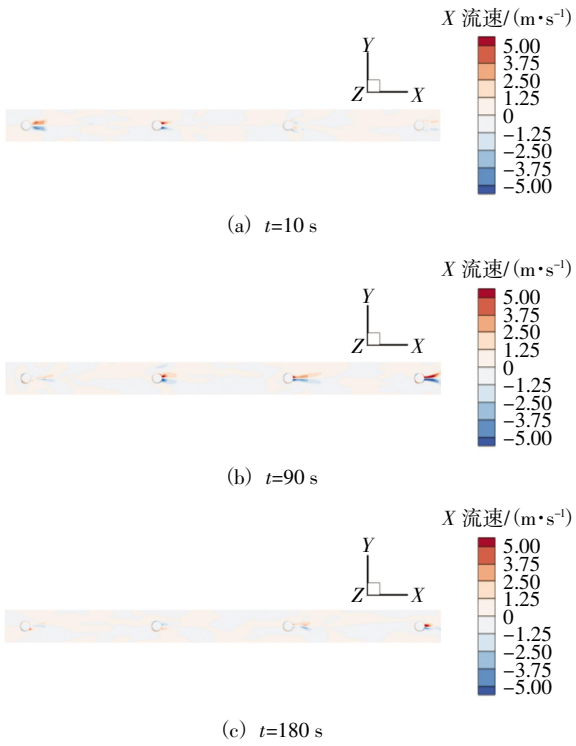
(c) t=180 s

图 10　不同时刻桩周 *x-y* 断面流速

当加入波浪作用后，涡量分布与只有水流作用下有所差异，桩前周围形成一个明显的涡结构蹄涡，随着时间的推移，涡量场呈现衰减特征，其强度显著降低，此时柱体前缘新生成一个涡结构，且不断向下游迁移（图 11）。在加入波浪作用条件后，与只有水流作用下相比，冲刷深度有所差异。随着水流流量增大，水流流速增大，冲刷过程开始在整个平面上发展，由于上游桩对下游桩之前的保护作用，此区域冲刷深度明显小于桩左右区域（图 12）。最大冲刷深度出现在桩基左右两侧及四桩心矩形连线内。在水流方向上，从前向后四根桩基的冲刷深度依次为−0.977 m、−0.977 m、−0.997 m、−1.011 m，可以看出四根桩基的冲刷深度差异均在 3%以内，差异不大。

3.5　工况三数值计算结果

在加入波浪作用并增大流速后，流场分布与工况二出现明显差异。如图 13 所示，桩前流速减小，桩周两侧流速明显增大，桩与桩之间产生了大小分明的流速带，在两桩之间为流速趋于 0 的区域，随后流速逐渐增大，但其明显小于同一断面上左右两侧流速。

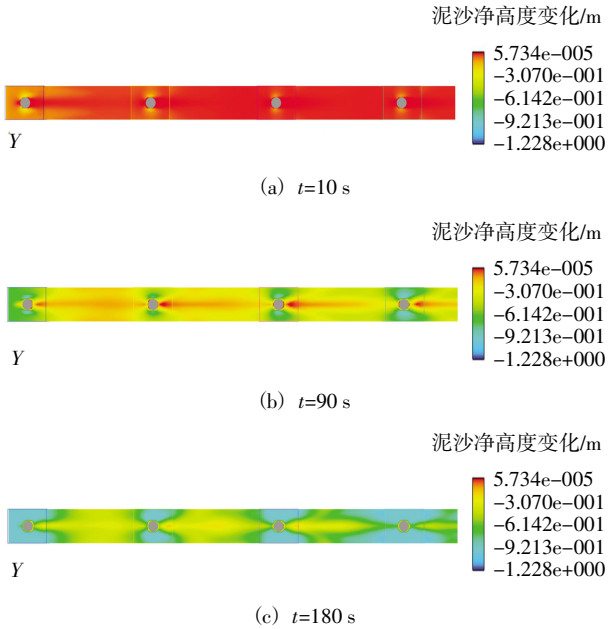


(a) t=10 s

(b) t=90 s

(c) t=180 s

图 11 桩周 *x-y* 断面涡量分布图



(a) t=10 s

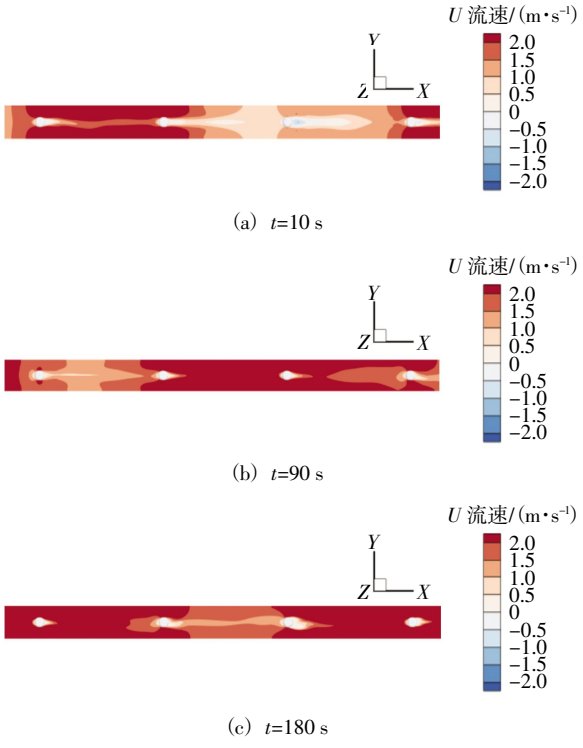
(b) t=90 s

(c) t=180 s

图 12 不同时刻桩周局部冲刷深度分布

在加入波浪作用并增大流速后，涡量分布有所差异。如图 14 所示，蹄涡上游床面附近出现不稳定的波动，随着模拟时间的增长，涡流逐渐向下游移动，下游的主马蹄涡的强度得到明显增强，涡流面积也逐渐增大。

随着水流流量增大，水流流速增大，冲刷过程开始在整个平面上发展，由于上游桩对下游桩之前

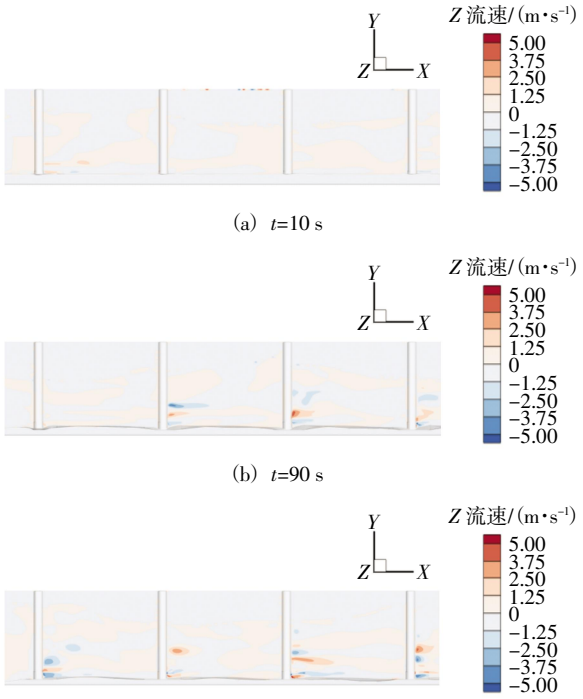


(a) t=10 s

(b) t=90 s

(c) t=180 s

图 13 桩周 *x-y* 断面流速



(a) t=10 s

(b) t=90 s

(c) t=180 s

图 14 桩周 *x-y* 断面流速

的保护作用，此区域冲刷深度明显小于桩左右区域。最大冲刷深度出现在桩基左右两侧及四桩心矩形连线内。在水流方向，从前往后四根桩基的冲刷深度依次为−0.999 m、−0.993 m、−0.999 m、−1.000 m，同样差异不大。

3.6　冲刷深度对比

将以上数值模型计算的冲刷深度结果与经验公式计算结果进行对比（表 4），规范中推荐使用的王汝凯公式与韩海骞公式计算结果有较大差异，王汝凯公式考虑了波流共同作用，韩海骞公式只考虑了潮流作用，导致韩海骞公式计算的最大冲刷深度几乎为王汝凯公式计算结果的 2.5 倍，而数值模型计算的冲刷深度结果比王汝凯公式计算的结果略大，两者差距不大。

表 4　经验公式与数值模型冲刷深度计算结果对比

局部冲刷代表点	王汝凯公式	韩海骞公式	数值模型
	冲刷坑最大深度/m	冲刷坑最大深度/m	冲刷坑最大深度/m
Ⅲ	0.96	2.44	1.01
Ⅳ	0.92	2.39	1.00

4　桩基冲刷防护措施研究

传统的桩基冲刷防护为了提高桩周床面抗冲刷能力，通常在桩基周围铺设抛石防护或扩大桩基基础。这些措施在一定程度上能降低最大冲刷深度，但若布置不当，反而会引起床面的二次冲刷，产生尺度更大的冲刷坑。而仿生水草则利用水草冠层的阻滞作用降低流速达到抑制冲刷的目的。基于前人的研究工作，本文提出了仿生水草和底栖生物组合防护方法，探究单桩基础在仿生水草和底栖生物组合防护方法下的冲刷特征，进而评估仿生水草和底栖生物组合防护的方法对保护单桩的防护效果。

4.1　防冲措施设计

仿生水草可以减少桩前下潜流和桩周床面的直接接触。底栖生物可增强海床的抗冲刷能力。除此之外，由于底栖生物重力的作用仿生水草垫能够快速弯曲以贴合床面，防止出现二次冲刷。

试验模型比尺的设计综合考虑实际海况、设备条件和必须满足的相似准则，按照重力相似准则，选择了 $\lambda_l = 1:25$ 的比尺。在控制单一变量的前提下，按照不同的底栖生物铺设厚度和仿生水草密度选取三组较优布置的试验工况进行试验。

据前人所做的一系列冲刷防护试验，最大冲刷深度的位置往往出现在单桩及防护模型附近，因此在模型周围选取了 6 个特征监测点，监测点紧贴防护模型外侧选取，距离单桩模型外壁 15.6 cm，监测点 5 和监测点 4 距离为 20 mm，每个特征监测点的具体布置位置如图 15 所示，试验的波流水槽及泥沙和桩基模型的布设如图 16 所示。试验区前端距造波端 20 m，可使波流充分发展。铺沙范围长 3 m、宽 0.8 m，厚 0.25 m，设置过渡海床，过渡海床斜坡坡比取 1∶6，可以减少波浪变形，用于保证波浪传播到试验区时为规则波，同时可以使得试验区水流稳定，过渡段用土工布覆盖。根据理论基础和数值模拟，选取三种较优配置和布置方式的复合冲刷防护方法进行冲刷防护试验。

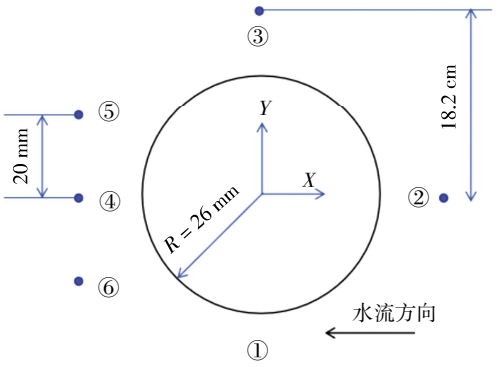


图 15　特征监测点布置图

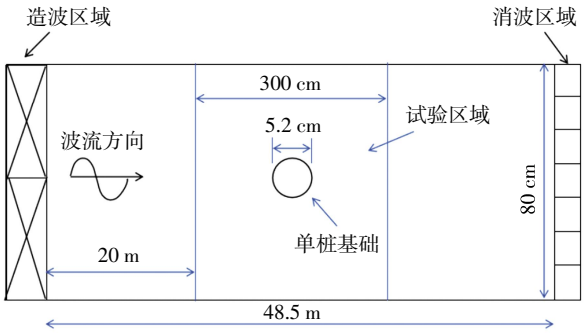


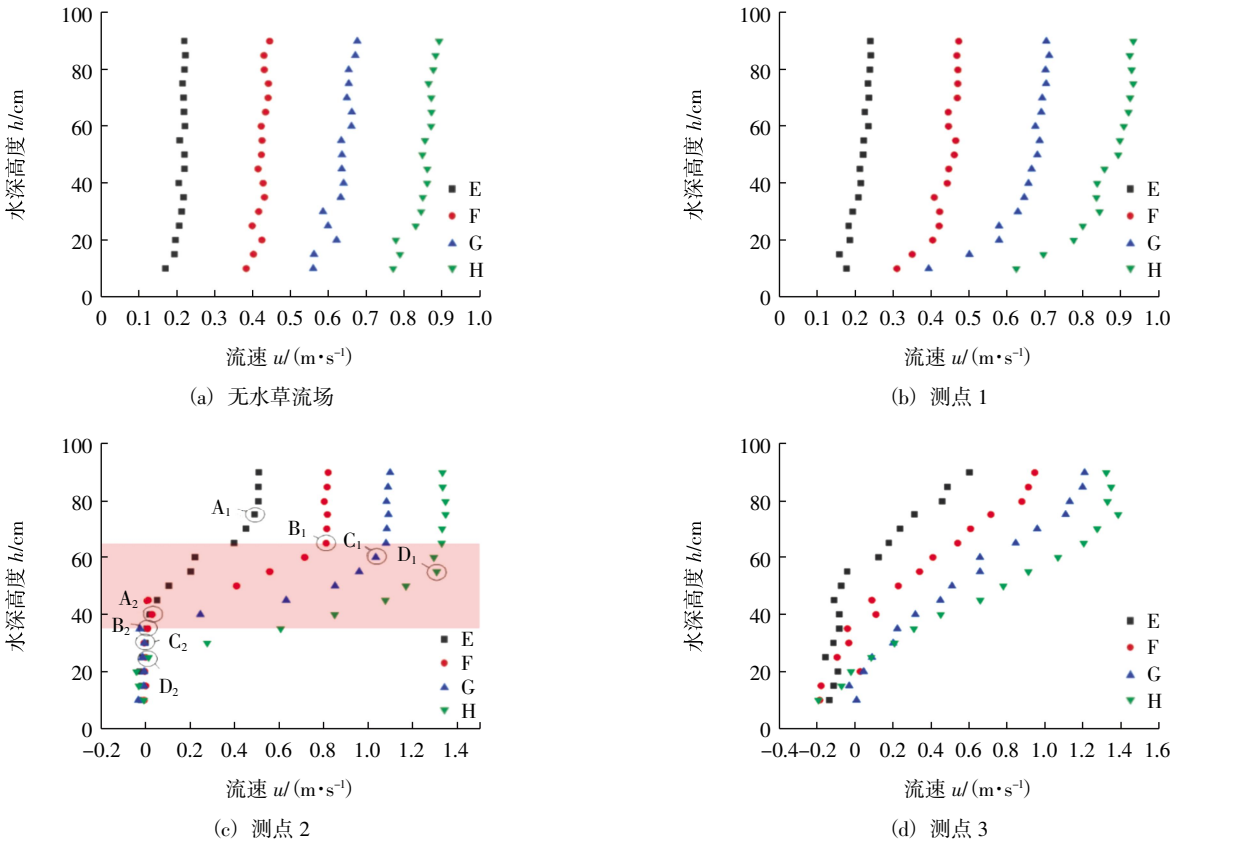
图 16　波流水槽示意

表 5　物模试验工况设计

防护工况	底栖生物铺设范围/cm	厚度/cm	仿生水草密度/(株/平方厘米$^{-1}$)	布置范围/cm
1	15.6	1	1∶3×6	15.6
2	15.6	2	1∶3×6	15.6
3	15.6	1	2∶3×3	15.6

4.2　物模实验结果

如图 17 所示，水草区垂向流速分布大致呈 S 形，存在上、下两个拐点，拐点位置随流速增大、水草倾伏高度减小而降低。水草外部的流速较高，但内部流速几乎为零，证明了仿生水草具有优良的缓流促淤作用。



(a) 无水草流场　(b) 测点 1　(c) 测点 2　(d) 测点 3

图 17　不同流场流速下各测点流速分布

5　结　论

本文以海上光伏桩基础为研究对象，依据现实海洋环境，开展了圆形截面桩在不同波流条件下的数值模型试验，分析了不同工况下桩周的流场特征、涡量特征与冲刷特征；同时，针对冲刷情况设计了仿生水草和底栖生物组合的防护方法并开展相关物理模型试验，主要结论如下。

(1) 流场特征：只有水流作用下，桩群的桩前流速减小 28.6%，两侧流速增加 25.7%，在两桩之间流速趋于 0 的区域，产生了大小分明的流速带。随着波浪作用的加入与流速的增大，桩前流速分别减小 25.3%和 21.1%，桩左右两侧流速分别增大 19.2%和 31.5%。

(2) 涡量特征：在桩体上游拐角区域（即桩体迎水流一侧与河床表面形成的直角区域）可观察到显著的流动分离现象，这一现象主要表现为近床面边界层剥离和马蹄涡系统的形成。上下游桩体迎流面均出现明显的下冲水流，桩基底部形成典型的马蹄形涡旋结构，而桩体背流侧则产生上升的尾流涡旋，且涡量分布与只有水流作用下强度有所差异。

(3) 冲刷特征：不同波流条件下，上游桩对下游桩之前均有保护作用，在此区域内冲刷深度明显小于桩左右区域，最大冲刷深度均出现在桩基左右两侧及四桩心矩形连线内，且四根桩基冲刷深度差异不大。

(4) 冲刷防护：仿生水草和底栖生物组合的防护方法通过降低近底流速，可以达到缓流促淤的目的，与无防护条件桩基相比冲刷深度降低 72.8%，说明柔性防护措施具有优良的缓流促淤作用，未来或可在桩基和海缆冲刷防护方面得到运用。

参考文献：

[1] 赵威，呼和敖德. 圆柱绕流局部冲刷机制的实验研究[J]. 力学学报，2006，5：577–585.

[2] 严建科，焦臣，龙涛，等. 单圆柱桥墩绕流流场试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报（自然科学版），2012，44(6)：

779–785.

[3] HONG J，GOYAL K M，CHIEW Y，et al. Predicting time-dependent pier scour depth with support vector regression[J]. Journal of Hydrology，2012，468–469：241–248.

[4] BAYRAM A，LARSON M. Analysis of scour around a group of vertical piles in the field[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering，2000，126(4)：215–220.

[5] 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.

[6] 卢中一，高正荣. 大型涉水群桩桥基局部冲刷特性试验研究[J]. 海洋工程，2009，27(1)：70–76.

[7] MUZZAMMIL M，GANGADHARAIAH T，GUPTA K A. An experimental investigation of a horse shoe vortex induced by a bridge pier[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management，2004，157(2)：109–119.

[8] DEY S，RAIKAR V R. Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2007，133(4)：399–413.

[9] KUMAR A，KOTHYARI C U. Three-dimensional flow characteristics within the scour hole around circular uniform and compound piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2012，138(5)：420–429.

[10] KUMAR A，KOTHYARI C U，RAJU R G K. Flow structure and scour around circular compound bridge piers: A review[J]. Journal of Hydro-environment Research，2012，6(4)：251–265.

[11] DAS S，DAS R，MAZUMDAR A. Circulation characteristics of horseshoe vortex in scour region around circular piers[J]. Water Science and Engineering，2013，6(1)：59–77.

[12] DAS S，DAS R，MAZUMDAR A. Vorticity and circulation of horseshoe vortex in equilibrium scour holes at different piers[J]. Journal of The Institution of Engineers (India)：Series A，2014，95(2)：109–115.

[13] DAS S，MAZUMDAR A. Turbulence flow field around two eccentric circular piers in scour hole[J]. International Journal of River Basin Management，2015，13(3)：343–361.

[14] SIMARRO G，FAEL S M C，CARDOSO H A. Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2011，137(9)：1089–1093.

[15] 韩海骞，熊绍隆，孙志林. 潮流作用下桥墩局部冲刷深度计算公式的建立与验证[J]. 泥沙研究，2016，1：9–13.

[16] 王汝凯. 神仙沟（桩 11）建油港的冲淤问题[J]. 海岸工程，1985，2：32–38.

Research on Scour Mechanism and Protective Measures for Offshore Pile Foundations

WANG Lin, ZHANG Zecheng, ZHANG Bo, MA Xiaozhe
(Shandong Guohua Times Investment Development Co., Ltd., Jinan 250002, China)

Abstract: To deeply investigate the impact of wave-current interactions on the scour around pile foundations, this study is based on the classical hydrostatic pressure theory and employs the Telemac numerical simulation software. The numerical simulation results of the flow field and vorticity are compared with previous experimental results for validation. After validation, the study simulates and analyzes the flow field, vorticity, and scour characteristics around the piles under different design conditions. Additionally, a protective method combining bionic seaweed and benthic organisms is proposed based on the scour results, and corresponding physical model experiments were carried out to prove that the combination of bionic aquatic plants and benthic organisms has excellent flow retardation and sedimentation promotion effect. The research elucidates the scour mechanisms of pile foundations under various wave-current interactions. The results indicate that: The flow velocity on both sides of the pile foundation significantly increases with the addition of wave action and the increase in current velocity; The distribution of vorticity is more sensitive to changes in the intensity of water flow; The maximum scour depth occurs on both sides of the pile foundation and within the rectangular area connecting the centers of the four piles, with minimal differences in scour depth among the four piles; Flexible protective measures exhibit excellent flow-reducing and sediment-promoting effects.

Keywords: pile foundation scouring mechanism; wave-flow action; pile foundation protection