

赵永森, 陈洪洲, 桂福坤, 等. 桩距和波向对围栏养殖海域波浪场能量变化的影响[J]. 海洋学报, 2024, 46(11): 106–114, doi:10.12284/hyxb2024126

Zhao Yongsen, Chen Hongzhou, Gui Fukun, et al. The impact of pile spacing and wave direction on wave energy variation in pile-net enclosed aquaculture areas[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(11): 106–114, doi:10.12284/hyxb2024126

桩距和波向对围栏养殖海域波浪场能量变化的影响

赵永森^{1,2}, 陈洪洲^{1,2*}, 桂福坤¹, 王振宇², 张顺³

(1. 浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山, 316022; 2. 浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山, 316022; 3. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山, 316022)

摘要: 围栏养殖海域波浪场的能量分布不仅对海域内的营养物质输送起到关键影响, 同时也是内侧结构设施在设计校验时需要重点考虑的水文因素。因此, 对波浪场受围栏结构影响导致的能量变化进行研究具有重要意义。利用 FUNWAVE 2.0 数值模型模拟了不规则波浪在不同结构围栏养殖海域的传播过程, 讨论了桩柱间距及波浪入射方向对波浪能量变化的影响。结果表明, 内部设施如果距离外侧围栏较近, 在保证强度稳定前提下, 桩距选取应小于 10 m, 而如果距离外侧围栏较远, 则应该选取大于 10 m 的桩距。此外, 即使斜向入射波浪场, 也有可能某些特定位置处对围栏设施造成比正向入射波浪场更为剧烈的作用, 在设计时同样也应该予以考虑。

关键词: 桩柱式围栏; FUNWAVE 模型; 能量变化; 斜向传播

中图分类号: TV139.2⁶

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)11-0106-09

1 引言

围栏养殖(或称围网养殖), 是近些年我国水产养殖产业升级过程中兴起的一种养殖模式, 利用网衣、桩柱、绳链等工程设施在浅海水域圈围形成一定的水面, 用于养殖鱼类等水产经济动物(图 1)。与传统水产养殖设施相比, 围栏养殖具有养殖面积大、养殖环境更近自然, 同时养殖品质提升显著等优势, 是一种最为接近海域自然生态的养殖模式, 能够显著增加养殖经济效益^[1-2]。围栏桩柱及其网衣系统是承载养殖品, 进行养殖生产的核心设施, 其荷载安全性一直是施工设计人员关注的重点。同时, 波浪场作为诱发桩柱荷载风险的主要水文因素, 其在围栏桩柱附近的传播变化, 一直受到工程人员的重视。

关于围栏设施在海洋动力环境下的风险特征, 国内外学者已经开展不少针对性的调查研究。林斌等^[3]

基于 FLOW-3D 建立数值波浪水槽, 研究多种波况下, 桩柱间距对波浪荷载的影响。陈天华等^[4-5]定量分析了围栏结构网衣系统在不同固定方式下的水动力特性。桂福坤等^[6]系统研究了流速、波高、水深等水文因素对双排桩柱式围栏结构的水动力影响, 并给出了定量分析结果。赵云鹏等^[7]针对围栏结构所受波浪荷载的非线性特征开展研究, 揭示了不同数值方法计算得到的荷载差异。杨蕙等^[8]通过数值计算分析了桩柱排数对围栏养殖水域流场的影响。辛连鑫等^[9]首次将多孔介质模型应用在 FUNWAVE-TVD 模型中, 计算并揭示了波高、周期等波浪场要素传播经过网衣的衰减过程。最近, 崔勇等^[10]借助有限元分析方法对离岸式围栏结构在波浪作用下的运动响应开展研究, 揭示了结构荷载和桩顶位移与最大波高成正比的结论。

相比各类经典海工结构物, 围栏设施是一种出现较晚、相对较新的结构形式, 相关研究结果也相对较

收稿日期: 2024-06-26; 修订日期: 2024-11-12。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42376205, 32002441); 国家重点研发计划项目(2024YFD2400200)。

作者简介: 赵永森(1999—), 男, 四川省眉山市人, 研究方向为港口海岸及近海工程。E-mail: ZYS1998062024@163.com

* 通信作者: 陈洪洲, 教授, 主要从事深远海养殖装备水动力学、近岸波浪非线性研究。E-mail: 379988848@163.com



图1 围栏养殖工程(连岸式)

Fig. 1 Enclosure aquaculture project (near-shore)

少,目前已发表成果大都集中在结构荷载研究方面,对诱发荷载风险的关键外部因素,如波浪场的研究相对有限。事实上,围栏桩网系统存在而导致的波浪场特征变化,尤其是波浪场能量分布特征的改变,不仅对近岸养殖海域的营养物质输送过程影响深远,也影响着有机物或污染物在近岸的传播分布,进而对海洋环境评估起到复杂的影响效应^[4]。此外,在开展围栏结构设计过程中,经常需要针对一些布置在养殖海域内侧,具有特定功能的结构进行荷载校验,而作用在这些结构上的波浪特征,则是受到外侧围栏影响后形成的(图2),为精确考虑,需要对这些波浪特征重新进行评估。本研究在 FUNWAVE 模型基础上,通过将多孔介质模型耦合进完全非线性 Boussinesq 方程的扩展项中,建立了围栏养殖海域水动力数值模型,借助数值方法模拟随机波浪场传播经过不同结构形式围栏前后的变化特征,对波浪场受围栏结构影响导致的能量变化进行了研究,重点探讨了桩柱结构布设与波浪入射角度的影响。研究结果对构建多跨度围栏养殖平台在三维波浪场作用下的动力响应分析模型具有重要价值,同时还有助于提升围网类海洋设施的设计理论水平。

2 数值模型

2.1 基本方程

本文采用的数值模型基于经典 FUNWAVE 2.0,采



图2 外侧与内侧围栏结构

Fig. 2 Outer and inner enclosure structures

用的是 Chen 等^[12]修正后的二阶完全非线性 Boussinesq 方程。模型采用笛卡尔坐标系, x 轴和 y 轴位于静水面, z 轴以垂直向上为正,控制方程表达式为

$$\eta_t + \nabla \cdot (d\bar{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\bar{u}_t + (\bar{u} \cdot \nabla)\bar{u} + g\nabla\eta + \mathbf{G} = \frac{1}{2}h\nabla[\nabla \cdot (h\bar{u})] - \frac{1}{6}h^2\nabla(\nabla \cdot \bar{u}_t) + B_1 h^2 \nabla[\nabla \cdot (\bar{u}_t + g\nabla\eta)] + B_2 \nabla[\nabla \cdot (h^2\bar{u}_t + gh^2\nabla\eta)] + \mathbf{R}, \quad (2)$$

其中,

$$\mathbf{G} = \nabla \left\{ \frac{d^2}{3} \left[(\nabla \cdot \bar{u})^2 - \bar{u} \cdot \nabla^2 \bar{u} - \frac{1}{10} \nabla^2 (\bar{u} \cdot \bar{u}) \right] \right\} + \nabla \eta d \left[\frac{1}{3} (\nabla \cdot \bar{u})^2 - \frac{1}{3} \bar{u} \cdot \nabla^2 \bar{u} - \nabla \cdot \bar{u}_t \right] - \frac{\eta(2h+\eta)}{3} \nabla(\nabla \cdot \bar{u}_t), \quad (3)$$

式中, \bar{u} 和 η 分别表示水深平均速度和自由波面抬升高度; h 为静水深, $d = h + \eta$ 为当地水深, g 为重力加速度, $B_1 = 29/885$, $B_2 = 2/59$ 为常数, \mathbf{G} 为二阶非线性项。上述方程的色散性为线性 Stokes 波色散关系,变浅作用性能在浅水到中等水深范围内具有较高精度 ($h < 200$ m)。其中, $\mathbf{R} = -\mathbf{R}_r + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_s + \mathbf{S}_{\text{net}}$ 为方程扩展项,分别代表底摩擦项、破碎项、亚网格效应以及网衣阻滞所引起的能量耗散,其中关于 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_b 、 \mathbf{R}_s 的数学公式可以参考 Chen 等^[11]文献,网衣阻滞项 \mathbf{S}_{net} 由下式计算。

$$\mathbf{S}_{\text{net}} = \frac{1}{2} c_{ij} |\bar{u}| \bar{u}. \quad (4)$$

网衣密度 S_n 作为重要的结构参数,对网目周围波流场影响显著,由于围网桩柱的刚度较大,结构在波浪作用下的运动和变形不明显,可以采用入射波浪的最大水质点速度作为特征速度来计算雷诺数, S_n 和 Re 定义为

$$S_n = \frac{2a}{l} - \left(\frac{a}{l} \right)^2, \quad (5)$$

$$Re = \frac{Ua}{\nu}, \quad (6)$$

式中, U 为波浪中水粒子的最大速度,采用线性波浪理论近似为 $U = \pi H / T$, ν 为流体的运动黏度, a 为目脚直径, l 为目脚长度。当水流以一定的流速流过网箱区域时,作用在该区域的阻力值可由下式计算^[13-14]:

$$F_d = C_n \frac{1}{2} \rho \lambda A |\bar{u}| \bar{u}, \quad (7)$$

$$F_l = C_t \frac{1}{2} \rho \lambda A |\bar{u}| \bar{u}, \quad (8)$$

式中, λ 为多孔介质厚度, A 为多孔介质面积, C_n 为法向阻力系数, C_t 为切向阻力系数。另外,阻力值也可以通过莫里森方程进行计算:

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho A \bar{u}^2, \quad (9)$$

$$F_l = C_l \frac{1}{2} \rho A \bar{u}^2. \quad (10)$$

在此基础上,可通过求解平面网衣的阻力系数和升力系数得到多孔介质系数。Tsukrov 等^[15]研究认为, Balash 等^[16]提供的公式在预测网衣阻力系数方面具有优势,与实测数据的相对误差约为 4%。Aarsnes 等^[17]对平面网衣升力系数进行了研究,并建立了网衣密度 S_n 与攻角 α 的函数关系。因此,本研究采用他们提出的公式结合 FUNWAVE 模型计算平面网的阻力和升力:

$$C_d = C_d^{cyl} \times (8.03S_n^2 - 0.74S_n + 0.12), \quad (11)$$

$$C_l = (0.57S_n - 3.54S_n^2 + 10.1S_n^3) \times \sin(2\alpha'), \quad (12)$$

式中, $Re \leq 5 \times 10^3$, $C_d^{cyl} = 1 + 10 Re^{-2/3}$, $\alpha' = 90 - \alpha$, α 为网衣与水流方向在水平面的夹角。

2.2 数值求解

采用有限差分格式对控制方程进行求解。对方程中关于空间的一阶和二阶导数分别采用 5 点和 3 点中心差分格式,边界附近的点分别采用相应的偏心差分格式。时间离散采用的是混合 4 阶 ABM 格式,模型求解过程采用了预报-校正-迭代的处理过程,重复迭代修正直到连续两次迭代结果的误差在容许范围内,再进行下一时间步运算。边界处理采用源造波与海绵层结合的方法,源造波即在计算域内设置一线源,在源两边同时产生传播方向相反的波浪。海绵层即在固壁边界前设置 1~2 倍波长厚度的阻尼区使波浪快速衰减。

3 模型验证

开展数值试验前,首先针对计算模型中涉及到的两个重要模块,波浪场模拟和网衣系统模拟进行验证,通过与模型试验结果进行比较来验证模型的准确性。

3.1 波浪场模型验证

采用美国陆军工程兵团(The U.S. Army Corps of Engineers, USACE)开展的波浪与海岛模型研究项目(Surge and Wave Island Modeling Study Project, SWIMS)试验资料对波浪模型进行验证。该试验是在美国佛罗里达大学的二维试验水槽内进行的^[18],水槽长 45.7 m,宽 0.91 m,有效水深 0.91 m,实验采用的坡前静水深为 0.439 m。为了研究波浪在近岸的传播规律,试验中采用了斜率为 1:5 和 1:2.5 的两组底坡模型(这里采用 1/5 的底坡开展验证),试验的详细布置及测点位置设置可参见图 3 所示。这里选取了试验中采用的 4 组随机波况进行验证,其中入射波采用 JONSWAP 谱(谱峰因子 $\gamma = 3.3$),表 1 列出了物理试

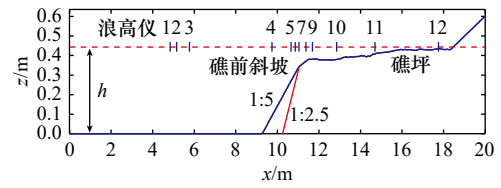


图 3 SWIMS 项目实验地形及测点位置

Fig. 3 The topography and gauge locations of the experiment for SWIMS project

表 1 物理试验部分组次的试验参数

Table 1 The experimental parameters for the groups in the physical tests

工况	有效波高/cm	水深/cm	谱峰周期/s	礁坡斜率
1	7.92	43.9	0.99	1/5
2	7.68	43.9	1.26	1/5
3	7.32	43.9	1.41	1/5
4	9.14	43.9	1.84	1/5

验中的波浪要素,为了与试验结果进行比较,数值模型中的工况布置与试验保持一致(造波区间后侧设置了 10 m 厚度的海绵层用以吸收反射)。

图 4 给出的是针对这 4 组工况进行模拟得到的波高变化与试验结果间的对比,可以看到,模拟结果准确地再现了波浪在复杂海岸地形条件下传播时的波高变化,礁前斜坡引起的变浅效应导致波浪在礁缘附近出现波高增大现象,接下来发生的破碎导致波高急剧衰减。进入礁坪后,受坪底摩擦和水深变浅导致非线性加剧的影响,出现了波高增长和衰减现象,揭示了波场能量在这一区域内的复杂变化规律。模拟结果与试验结果的吻合程度较高,揭示了该模型在描述大范围波浪传播变形方面具有较高的精度。

3.2 网衣模型验证

为研究网衣对波浪的阻滞效应, Lader 等^[19]针对网衣与波浪的相互作用开展模型试验,这里沿用类似的实验假设对网衣模型进行验证。详细的试验布置和测点位置如图 5 所示,入射波浪要素由前置浪高仪 a 所采集,经过网衣阻滞后的波浪要素由网衣后置的浪高仪 b 所采集,为了与试验结果进行比较,数值模型中除了工况布置与试验完全一致外,在数值水槽前后各设置 5 m 厚度的海绵层用以消除反射影响。物理试验所采用的详细工况参数如表 2 和表 3 所示。

图 6 给出的是不同工况下的比较结果,为了便于与文献结果进行比较,这里采用与文献结论一致的数据处理方法,将波能参数进行无量纲化,无量纲化后的参数 C_{EH} 为

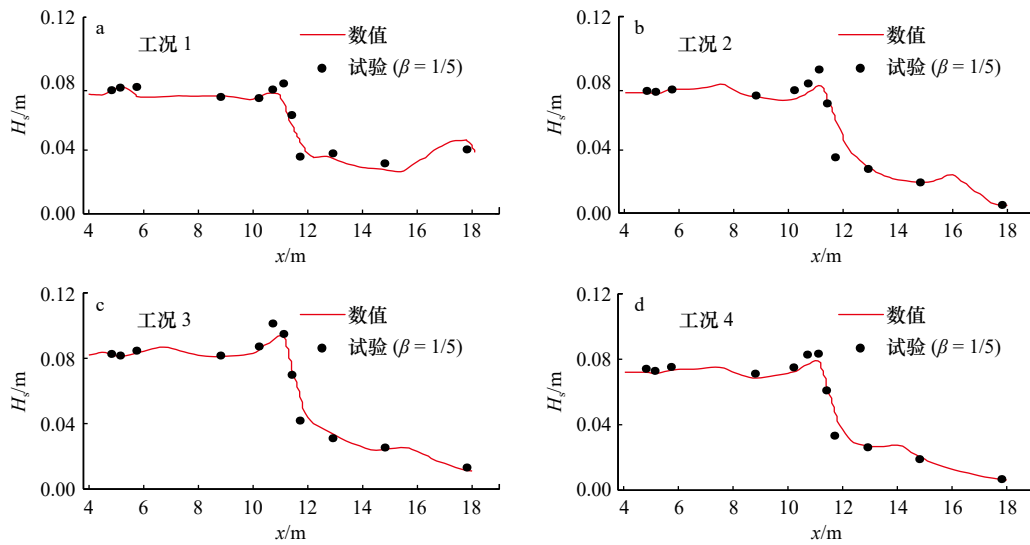


图 4 模拟计算所得的特征波高值与试验数据间的比较

Fig. 4 Comparison between the characteristic wave heights obtained from simulation and the experimental data

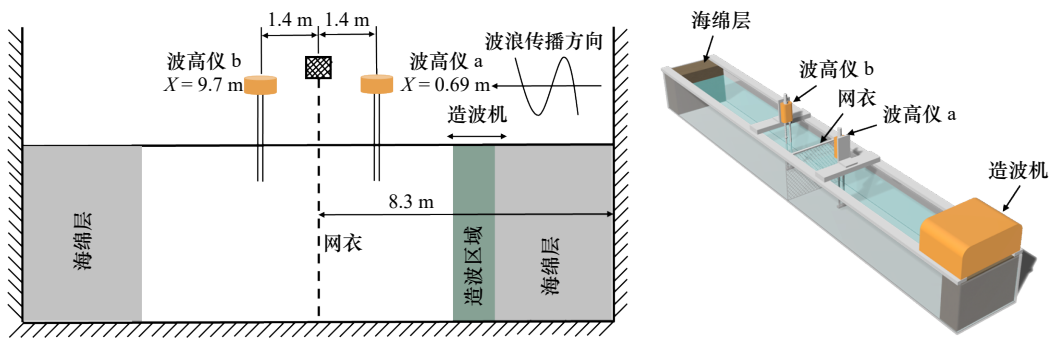


图 5 波浪与网衣相互作用试验布置示意图

Fig. 5 Sketch of the experimental setup for wave and net interaction

表 2 入射波浪要素

Table 2 Incident wave parameters

入射波工况	波高/cm	周期/s	波长/m	波陡
1	10.41	0.80	1.00	0.10
2	16.53	1.00	1.54	0.11

表 3 网衣模型规格

Table 3 Specifications of the net

网衣工况	目脚长度/mm	网线直径/mm	网衣密度
A	21	1.0	0.10
B	16	2.6	0.22
C	25	3.6	0.29

$$C_{EH} = \frac{H_i^2}{H_t^2}, \quad (13)$$

式中, H_i 为入射波高, H_t 为投射衰减后的波高。对比结果显示, 数值模型能够完整的还原多种规格网衣在

波浪透射过程中的影响特征, 与试验结果之间误差小于 5%, 具有足够的计算精度。

4 模型应用

利用上述模型对本文要研究的内容开展模拟计算, 为了尽可能降低模型比尺效应, 这里采用大比尺开展模拟(模型对应的原型值见表 4)。数值波浪水池的有效长度为 120 m, 宽度为 100 m, 为了避免造波初始产生的波浪场由于成长不充分带来的影响, 同时避免由于数值造波域过窄引起的波场不稳定, 模型中围栏的位置设置在距离水槽左侧海绵边界 60 m 处。为了完全还原波浪场的演化过程, 同时兼顾计算效率考虑, 模型水槽内设 1 : 10 的底坡用来模拟波浪场在近岸的传播。底坡起始位置距离造波边界 20 m 处, 以确保波浪场在进入底坡前能够充分成长。为了揭示围栏桩网对能量分布的影响, 模型共设置了 4 组不同桩距搭配厚度为 0.05 m 的多孔介质模拟围栏系统,

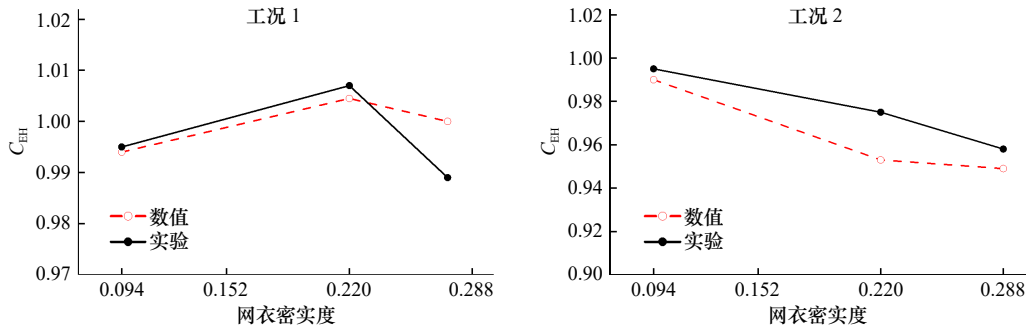


图 6 不同网衣对波浪能量变化的影响

Fig. 6 The effect of different nets on wave energy variation

表 4 模拟采用的波况及多孔介质参数

Table 4 The wave conditions and porous media parameters employed in the simulation

	工况	水深 h/m	周期 T_p/s	波高 H_{s0}/m	桩距 L/m	入射角度/ $^\circ$	桩径 D/m	C_n	C_t
模型参数	1	1.2	3.5	0.3	0.4 / 0.6 / 0.8 / 1.0	45 / 75 / 90	0.1	76.3	10.4
	2	1.0	3.0	0.2	0.4 / 0.6 / 0.8 / 1.0	45 / 75 / 90	0.1	81.9	10.7
	3	1.0	3.0	0.2	/	/	/	/	/
对应原型值	1	12	12	3.0	4 / 6 / 8 / 10	45 / 75 / 90	1.0		
	2	10	10	2.0	4 / 6 / 8 / 10	45 / 75 / 90	1.0		
	3	10	10	2.0	/	/	/		

注: 工况3中的“/”表示未考虑结构影响的纯波浪工况。

同时为了研究波浪场入射角度对能量分布的影响, 共设置 3 组具有不同入射角度的模拟工况。此外, 造波区域宽度设定为 6 m, 距离左侧边界 20 m。为了还原波浪场在实际海域中的传播特征, 降低壁面反射引起的共振干扰, 在数值水池的 4 个边界均设置 10 m 厚度的数值海绵层用以吸收波浪反射的能量。根据 $\Delta x \leq L_{\min} / 7$ 的数值收敛要求 (L_{\min} 为最小波长), 同时综合计算精度和计算效率考量, 数值求解空间步长最终定为 $\Delta x = \Delta y = 0.1$ m, 关于计算域设置的详细情况见图 7。为了确保上节中模型验证的有效性, 模拟同样

采用基于 JONSWAP 谱的不规则波浪作为入射波, 同时按照验证波况的非线性参数范围 (波高/水深 < 0.25 m), 选取了 2 组常规波况作为入射波浪进行模拟试验, 详细的模拟工况设置见表 4 所示。其中 H_{s0} 表示对应深水有效波高, 是基于对坡前第一个测点采集到的波浪数据通过线性变浅公式换算得到。波面时间序列的采样间隔为 0.2 s, 每组波况的模拟时间为 30 min, 取最后 10 min 时段内的数据进行统计, 在此阶段内的波群均达到稳定。

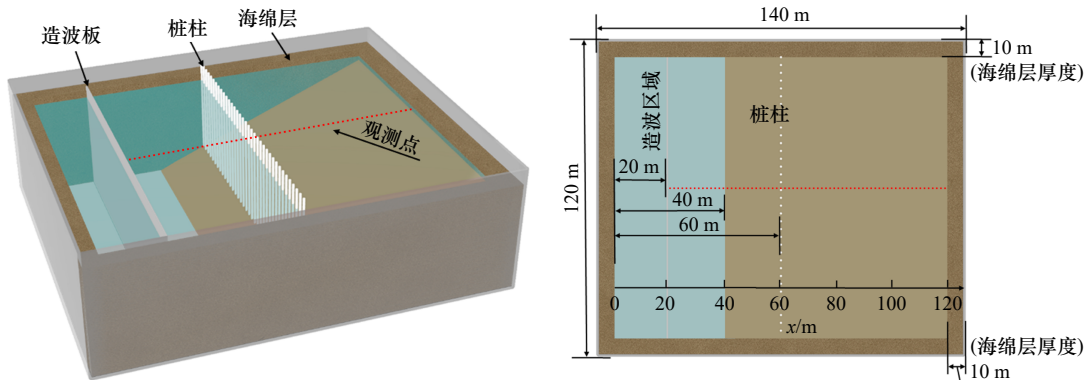


图 7 数值模拟试验布置概图(红点为测点位置)

Fig. 7 Sketch of the numerical experimental setup (the red dots are the measurement locations)

5 分析与讨论

采用上述模型计算结果对研究内容展开分析,重点对桩柱间距和波浪场入射方向进行研究,通过揭示不同工况下波浪能量的传播特征,对围栏工程设计选址进行讨论,同时通过不同工况下的能量传播过程之间的差异,揭示桩间距和波浪入射方向对波浪能量变化的影响。

5.1 桩柱间距对波浪能量变化的影响

桩柱间距是围栏整体布局在规划时确立的重要设计参数,也是影响养殖海域波浪场演变的重要结构特征,因此其首先被考虑。这里计算固定位置处的不规则波群能量采用的是 Thornton 和 Guza 建议的公式^[20]:

$$E = \frac{1}{8} \rho g^3 H_{\text{rms}}^2 h^{1/2}, \quad (14)$$

式中, H_{rms} 为均方根波高, $H_{\text{rms}} = H_s / \sqrt{2}$, $H_s = 4 \sqrt{m_0}$, $m_0 = \sqrt{\sigma_\eta}$, σ_η 是波面标准差, h 为当地水深。图 8 给出了 4 组不同桩柱间距条件下,受围网影响的波浪工况 1、2 和纯波浪工况 3 在传播过程中的能量演变过程,其中蓝色虚线表示排桩所在位置,橙色点划线表示底坡初始位置。相比纯波浪工况 3,工况 1、2 在经过围网前后的区域内,能量发生了显著的增长。可以发现,桩距为 0.4~0.8 m 的工况下,波浪工况 1、2 在近岸传播过程中的能量变化规律大致相同,在进入底坡区域后(图 8 橙色虚线所在位置附近),浅水变形导致波浪势能首先出现增长,接下来发生的破碎则使得能量急

剧衰减,由于初始破碎位置在坡上,因此随着传播继续发生浅水变形,导致波浪能量再次发生增长。当波浪传播至围栏设施附近时,受围栏结构影响,能量出现了一次快速的衰减,并在此后的一段区域内保持低能量传播,这说明近岸波浪在传播过程中的浅水变形在围栏设施的影响下被阻滞了。随着水深不断变浅,浅水效应导致的非线性不断增强,波浪能量在海岸附近达到极限,并最终随着破碎被耗散。值得注意的是,工况 2 虽然具有较强的网衣阻力系数,但是在 0.4~0.8 m 的桩距条件下,却并未表现出与工况 1 有明显的能量变化差距。

对比可以发现,桩距为 1.0 m 的工况表现出的波浪能量变化明显不同,波浪场的浅水变形似乎并未受到结构的影响,在围栏设施所在位置处的波浪能量甚至出现了显著的增长,这应该是由于该工况下围栏结构的桩距较大,对波浪能量的非线性变化影响有限导致的。这说明,当围栏桩距过大,无法有效阻滞浅水变形时,波浪场是有可能在设施附近发展为大幅波的,需要重新进行评估。此外,在 1.0 m 桩距条件下,工况 2 的能量增长明显弱于工况 1,呈现出更加显著的网衣阻滞效应,说明多孔介质在桩距大于 0.8 m 条件下作用更加明显。

另一个值得关注的现象是,尽管桩距为 1.0 m 的工况下,设施附近波浪能量较大 ($50 < x/L < 70$),不利于迎浪结构稳定,然而当波浪透过设施传播较长一段距离后 ($80 < x/L < 110$),能量却能够保持较低的水

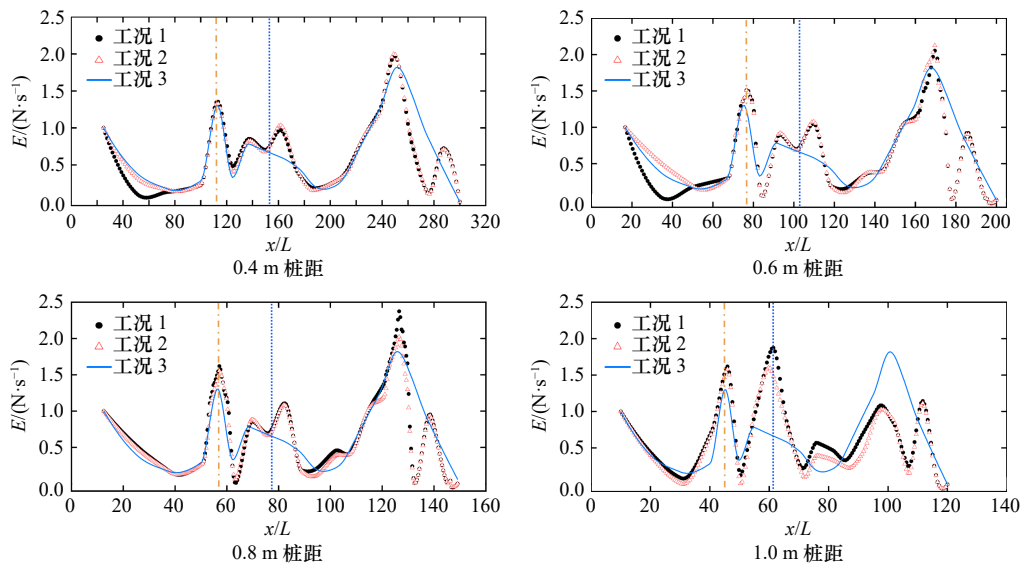


图 8 波浪能量在不同桩距工况下的变化过程

Fig. 8 The evolution of wave energy with respect to different pile spacing condition

x 表示波浪传播距离, L 为桩距; 蓝色虚线表示排桩所在位置; 橙色点划线表示底坡初始位置

x denotes the wave propagation distance, and L is the pile spacing; the blue dashed line indicates the location of the pile row, and the orange dotted line marks

the initial position of the bottom slope

平,相比另外两组工况更有利于海域内部设施的安全稳定。因此,在实际围栏结构设计中,内部设施如果距离外侧围栏较近,在保证强度稳定前提下,桩距选取应小于10 m,而如果距离外侧围栏较远,则应该选取大于10 m的桩距。

5.2 波浪入射角度对能量变化的影响

现实中的波浪场传播方向与围栏结构布设方向往往并非垂直关系,而是存在不同夹角,即相对于围栏布设方向,波浪场更多的是表现为斜向入射。近些年,大量研究揭示了入射角度对近岸波浪场的能量分布影响显著^[2],因此针对围栏结构与入射波浪场之间的斜向作用过程开展研究同样重要意义。

图9给出的是2组波况在3个入射角度条件下穿过桩距为0.8 m结构工况时的能量变化过程,其中90°代表正向入射,即波浪传播方向与结构布设方向垂直。对比可以看出,波浪在不同角度入射条件下的

能量变化过程显著不同。当进入底坡所在区域时,正向入射波浪场的非线性能量变化明显比斜向条件下剧烈,可以明显看出能量增长最为显著,同时随着入射夹角增大,波浪能量增长程度逐渐变缓,这个现象与Wang等^[2]揭示的现象一致,即波浪场的浅水变形随着入射角度增大反而减弱。然而,当波浪传播至围栏设施附近位置时,可以发现,正向入射波浪场的能量反而较弱,并且随着入射夹角变大,能量反而出现增长更快的趋势。这是因为正向入射波浪场由于能量增长较为剧烈,破碎能量损失较大,因此在随后的浅水变形过程中,能量增长也相对较缓。该现象说明,即使斜向入射波浪场也有可能在某些特定位置处对围栏设施造成比正向入射波浪场更为剧烈的作用,在设计时应该予以考虑。当波浪传播进入围栏养殖海域时,正向入射波浪场的能量增长又恢复了较为剧烈的趋势,可以看出能量峰值明显大于斜向入射工况。

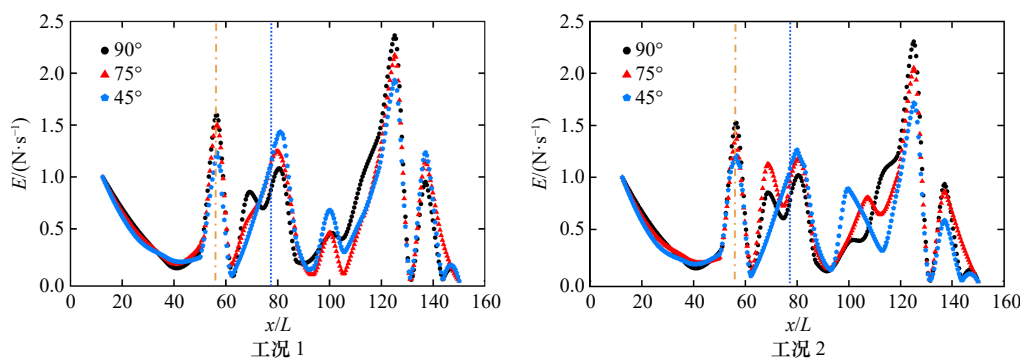


图9 波浪沿不同角度入射时的能量变化过程($L = 0.8\text{ m}$)

Fig. 9 The process of energy variation when waves are incident at different angles ($L = 0.8\text{ m}$)

蓝色虚线表示排桩所在位置,橙色点划线表示底坡初始位置

The blue dashed line indicates the location of the pile row, and the orange dotted line marks the initial position of the bottom slope

通过对不同角度入射波浪场的能量变化进行比较可以发现,当波浪在远离围栏设施海域传播时($40 < x/L < 60$; $110 < x/L < 130$),基本还是遵循了经典的斜向波浪场传播规律,即浅水变形导致的波浪势能增长程度随着倾斜程度增大而减弱。然而,当波浪传播至围栏设施附近海域($60 < x/L < 90$)时,能量变化规律正好相反,随着波浪入射倾斜角度变大,波浪能量反而能够以较高的水平出现在结构附近。这揭示了围网结构本身对波浪场传播过程中的浅水变形、折射、反射、绕射等水动力特征的综合影响,并最终体现在能量变化特征上。

值得注意的是,影响围网海域波浪场能量变化的因素诸多,例如桩柱间距、桩径、底坡、波况(包括方向谱集中度、主向角、能量谱宽等),甚至岸底粗糙度

等,都会导致波浪场能量发生强烈的非线性变化,如何统一上述影响因素,在兼顾结构和地形影响条件下,揭示不同波况的普遍能量变化规律仍然需要更进一步细致的研究。

6 结论

本文基于FUNWAVE 2.0数值模型对不规则波浪传播经过不同结构围栏时的能量变化进行了模拟试验研究,重点讨论结构桩柱间距及波浪入射角度对能量变化的影响。结果表明:

(1)当围栏桩距过大,无法有效阻滞波浪场浅水变形时,波浪场是有可能在结构设施附近发展为大幅波的,需要对围栏设施所在位置处的波况重新进行评估,同时,也需要根据整体规划选取合理的桩距,最终

达到优化波浪场分布,保障各个局部结构安全的目的。置处对围栏设施造成比正向入射波浪场更为剧烈的作用,在设计时同样也应该予以考虑。

(2)即使斜向入射波浪场也有可能某些特定位置

参考文献:

- [1] 韩昕辰, 宋炜, 桂福坤, 等. 大黄鱼仿生态连岸式大型围栏养殖技术 [J]. *中国水产*, 2022(11): 79–81.
Han Xinchun, Song Wei, Gui Fukun, et al. Bionic aquaculture technology of the shore large-scale fence in *larimichthys crocea*[J]. *China Fisheries*, 2022(11): 79–81.
- [2] Yang Hui, Zhao Yunpeng, Bi Chunwei, et al. Experimental study on the interaction between focused waves and pipe pile enclosure structure[C]/ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu, USA: ISOPE, 2019: ISOPE-I-19-223.
- [3] 林斌, 董志勇, 王品. 桩柱间距对桩柱上波浪荷载的影响 [J]. *水运工程*, 2016(5): 52–58.
Lin Bin, Dong Zhiyong, Wang Pin. Influence of spacing between piles on on-coming wave force[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2016(5): 52–58.
- [4] 陈天华, 孟昂, 桂福坤. 波浪高度及方向对桩柱式围网养殖系统网片水力特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 245–251.
Chen Tianhua, Meng Ang, Gui Fukun. Effect of wave height and direction on hydraulic characteristics of net of pile-column type net enclosure aquaculture system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 245–251.
- [5] 陈天华, 潘昀, 冯德军, 等. 固定方式对水流作用下桩柱式围网网片力学特性的影响 [J]. *水产学报*, 2018, 42(3): 452–460.
Chen Tianhua, Pan Yun, Feng Dejun, et al. Effect on hydrodynamics of unit net of a column-type net enclosure aquaculture engineering in current by fixations[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(3): 452–460.
- [6] 桂福坤, 张斌斌, 曲晓玉, 等. 波浪作用下围网养殖工程的桩柱结构受力分析 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 31–38.
Gui Fukun, Zhang Binbin, Qu Xiaoyu, et al. Force analysis of piles in net enclosure aquaculture engineering subjected to waves and current[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 31–38.
- [7] Zhao Yunpeng, Chen Qiupan, Bi Chunwei. Numerical investigation of nonlinear wave loads on a trestle-netting enclosure aquaculture facility[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111610.
- [8] Yang Hui, Xu Zhijing, Bi Chunwei, et al. Numerical modeling of interaction between steady flow and pile-net structures using a one-way coupling model[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 254: 111362.
- [9] 辛连鑫, 毕春伟, 赵云鹏, 等. 基于 FUNWAVE-TVD 模型的离岸养殖围网内外波浪场数值模拟研究 [J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(6): 1–10.
Xin Lianxin, Bi Chunwei, Zhao Yunpeng, et al. Numerical study on wave fields inside and around an offshore pile-net enclosure structure based on FUNWAVE-TVD model[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 1–10.
- [10] Cui Yong, Wang Gang, Guan Changtao. Numerical and experimental investigations of hydrodynamics of a fully-enclosed pile-net aquaculture pen in regular waves[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1175852.
- [11] Chen Hongzhou, Zhao Yongsun, Mei Lili, et al. Laboratory observation of nonlinear wave shapes due to spatial varying opposing currents[J]. *Coastal Engineering*, 2024, 190: 104500.
- [12] Chen Qin, Kirby J T, Dalrymple R A, et al. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2000, 126(1): 48–56.
- [13] Bi Chunwei, Zhao Yunpeng, Dong Guohai. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of biofouled full-scale net cage[J]. *China Ocean Engineering*, 2015, 29(3): 401–414.
- [14] Bi Chunwei, Zhao Yunpeng, Dong Guohai, et al. Experimental and numerical investigation on the damping effect of net cages in waves[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 55: 122–138.
- [15] Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson D, et al. Finite element modeling of net panels using a consistent net element[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(2): 251–270.
- [16] Balash C, Colbourne B, Bose N, et al. Aquaculture net drag force and added mass[J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 41(1): 14–21.
- [17] Aarsnes J V, Rudi H, Løland G. Current forces on cage, net deflection[C]/Institution of Civil Engineers. Engineering for Offshore Fish Farming. Glasgow: Thomas Telford Publishing, 1990: 137–152.
- [18] Smith E R, Hesser T J, Smith J M. Two-and three-dimensional laboratory studies of wave breaking, dissipation, setup, and runup on reefs: ERDC/CHL TR-12-21[R]. Vicksburg: US Army Engineer Research and Development Center, 2012.
- [19] Lader P F, Olsen A, Jensen A, et al. Experimental investigation of the interaction between waves and net structures—Damping mechanism[J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 37(2): 100–114.
- [20] Thornton E B, Guza R T. Transformation of wave height distribution[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C10): 5925–5938.
- [21] Ma Yuxiang, Chen Hongzhou, Ma Xiaozhou, et al. A numerical investigation on nonlinear transformation of obliquely incident random waves on plane sloping bottoms[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 130: 65–84.
- [22] Wang S K, Hsu T W, Weng W K, et al. A three-point method for estimating wave reflection of obliquely incident waves over a sloping bottom[J]. *Coastal Engineering*, 2008, 55(2): 125–138.

The impact of pile spacing and wave direction on wave energy variation in pile-net enclosed aquaculture areas

Zhao Yongsen^{1,2}, Chen Hongzhou^{1,2}, Gui Fukun¹, Wang Zhenyu², Zhang Shun³

(1. National Engineering Research Center For Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. School of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 3. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The distribution of wave energy in enclosure aquaculture areas not only significantly influences nutrient transport but also constitutes a critical hydrological factor in validating the design of structures in inner aquaculture area. Investigating the changes in wave field energy influenced by these structures is crucial. The FUNWAVE 2.0 numerical model was employed to simulate irregular wave propagation in aquaculture areas with varying pile-net enclosure structures. The effects of pile spacing and incident wave angles in the evolution of wave energy was examined. The results indicate that if the internal facilities are positioned close to the outer pile-net enclosure structure, the pile spacing should be less than 10 m, provided that structural stability is ensured. Conversely, if the internal facilities are located farther from the outer pile-net enclosure, a pile spacing greater than 10 m should be selected. Additionally, oblique wave incidents may pose greater structural challenges at certain locations compared to normally incident waves, which should also be considered during design.

Key words: pile-net enclosure structure; FUNWAVE model; energy variation; oblique propagation