

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20211008001

http://www.yykxjz.cn/

辛连鑫, 毕春伟, 赵云鹏, 陈洪洲. 基于 FUNWAVE-TVD 模型的离岸养殖围网内外波浪场数值模拟研究. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 01-10

XIN L X, BI C W, ZHAO Y P, CHEN H Z. Numerical study on wave fields inside and around an offshore pile-net enclosure structure based on FUNWAVE-TVD model. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 01-10

基于 FUNWAVE-TVD 模型的离岸养殖围网内外波浪场数值模拟研究*

辛连鑫¹ 毕春伟^{1①} 赵云鹏¹ 陈洪洲²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室 辽宁 大连 116024;

2. 浙江海洋大学海洋工程装备学院 浙江 舟山 316000)

摘要 本研究利用完全非线性 Boussinesq 数值模型 FUNWAVE-TVD 耦合多孔介质模型, 建立了模拟围网波浪场的数值模型。将计算结果和实验数据进行对比分析, 验证了该模型计算规则波在穿过网箱后传播过程的准确性。进一步研究了波高和周期等因素对围网内外波浪场特性的影响, 探讨了围网波浪场特性与这些水动力因素的内在联系。结果显示, 离岸养殖围网的存在使波浪场背浪侧出现衰减, 波高衰减率受波浪周期影响较大, 最大波高衰减达到 93.3%。同时, 较低频规则波的波高衰减区域呈辐射状趋势扩散, 并随着波浪进一步传播, 最大波高衰减位置开始向两侧扩散, 围网背浪侧的波高衰减程度减小, 波高有恢复趋势, 而高频波浪的波高衰减区域则较为集中。本研究可为实际海域桩网围护的位置和构造提供分析依据。

关键词 围网; 波浪场; FUNWAVE-TVD 模型; 数值模拟

中图分类号 TV13 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)06-0001-10

桩柱式围网(周文博等, 2018)主要由桩柱和网片组成, 是典型的浅海围网养殖形式, 与传统近岸网箱养殖相比具有养殖密度低、养殖水体大、养殖产品品质更近自然生态等特点。近几年该生态养殖模式已经于浙江台州、舟山、温州、山东烟台等沿海地区陆续出现并投入工程应用。由于围网养殖模式处于起步阶段, 仍存在需要解决的实际工程问题, 还有较大的发展空间。由于桩柱式围网设施尺度大, 结构会对海域波浪场产生较大的影响, 从而影响到海水中溶氧、饵料等物质运输; 围网的建设也会对区域的 N、P 及重金属等物质的含量有影响(廖润华等, 2021), 进而影

响鱼类的生长(钱辰颖等, 2021)。同时, 波浪扰动也会对海底沉积物产生影响(丁艳青等, 2011)。因此, 研究桩柱式围网对波浪场的影响, 对整个桩柱式围网的结构设计、环境分析和工程选址均具有较大意义。

目前, 国内外学者对网衣系统的水动力特性进行了较多的研究。王敏法(2011)以有限元理论为基础, 采用集中质量法对金枪鱼围网网具系统建立了三维动力学模型, 并模拟了围网包围、收绞和沉降过程中网具的空间运动和形态, 再通过围网模型实验和海上实测数据验证了数值模拟的有效性。Tsukrov 等(2003)通过有限元法对波浪和水流环境负荷下的网片水动

* 国家重点研发计划课题(2019YFD0900902)和国家自然科学基金面上项目(31972843)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900902), and National Natural Science Foundation of China (31972843)]. 辛连鑫, E-mail: 709961654@qq.com

① 通信作者: 毕春伟, 副教授, E-mail: bicw@dlut.edu.cn

收稿日期: 2021-10-08, 收修改稿日期: 2021-12-28

力学特性进行了数值模拟,其结果在张力腿网箱波浪力计算中具有重要应用。Bi 等(2015a、b)采用物理模型实验对网箱波浪的阻尼作用进行了研究,之后建立了数值模型进行了研究,并与物理模型实验进行对比。董国海等(2014)通过建立非线性波浪场和重力式网箱数学模型,对波浪逆向和波浪同向作用下重力式网箱的受力、运动和网衣变形进行了数值模拟研究,并通过模型实验进行了验证,指出波浪同向对重力式网箱的破坏比波浪逆向严重。崔勇等(2019)根据有限单元法建立了波浪作用下双层网底网箱的受力运动模型,发现双层网底网箱的水动力特性。叶卫富等(2011)使用模型实验的方式对浮绳式围网的水动力特性进行了初步研究。陈天华等(2017、2018)发现了波浪高度对桩柱式围网养殖系统受力有较大的影响,对桩柱式围网养殖系统的网片在不同波浪和固定方式条件下的水动力特性进行了详细研究;桂福坤等(2020)研究了纲绳对桩柱式围网网片波浪力学特性的影响,分析了不同纲绳直径、形状和大小工况下,纲绳和网线的受力和变形以及网片系缚点的受力特性。目前,国内外学者对海洋养殖设施水动力特性的研究主要集中在结构受力及运动变形方面,但对大型生态围网等养殖设施周围波浪场的相关研究尚未见报道。

本研究采用数值模拟的方法对桩柱式围网的波浪场进行模拟,采用一些典型的算例对模型的合理性和有效性进行验证,并设计部分工况,进一步探讨围网对于波浪场的影响。

1 材料与方法

1.1 控制方程

FUNWAVE-TVD 是开源 Bousinessq 波浪模型 FUNWAVE 的进一步改进的版本,应用较为广泛,其控制方程是基于 Chen 等(2000)提出的完全非线性 Bousinessq 方程,对于网衣这种孔隙率较大的结构,由拖曳力产生的二阶项远大于由粘性作用产生的线性项,则可忽略其线性力,只考虑网衣的拖曳力作用。考虑网衣存在的控制方程表述如下:

$$\eta_t + \nabla M = 0 \quad (1)$$

$$u_{\alpha,t} + (u_\alpha \times \nabla) \times u_\alpha + g \nabla \eta + V_1 + V_2 + V_3 + R + S_{\text{net}} = 0 \quad (2)$$

式中, η 为波面升高, V_1 , V_2 , V_3 为色散项, t 为对时间积分; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$ 为水平梯度算子; u_α 为

$z = \zeta h + \beta \eta$ 处的水质点的水平速度矢量, ζ 和 β 为常数; R 为扩散和耗散项,包括底摩擦项和子网格横向湍流紊动项,其中,低摩擦项为结合曼宁系数的二

次摩擦项;质量通量 M 的表达式为:

$$M = h + \eta \{u_\alpha + \overline{u_2}\} \quad (3)$$

式中, h 为静水深, u_2 为水深相关的垂向速度修正项,而 $\overline{u_2}$ 表示对该项进行求水深平均,其表达式为:

$$u_2(z) = (z_\alpha - z) \times \nabla A + \frac{1}{2}(z_\alpha^2 - z^2) \times \nabla B \quad (4)$$

$$u_2 = \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \times \nabla B + \left(z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \times \nabla A \quad (5)$$

$$A = \nabla \times (hu_\alpha) \quad (6)$$

$$B = \nabla \times u_\alpha \quad (7)$$

S_{net} 为单位网衣阻力项,其表达式为:

$$S_{\text{net}} = \frac{1}{2} c_{ij} |\bar{u}| \bar{u} \quad (8)$$

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(Bi *et al*, 2015a、b):

$$F_d = C_n \frac{1}{2} \rho \lambda A |\bar{u}| \bar{u} \quad (9)$$

$$F_l = C_t \frac{1}{2} \rho \lambda A |\bar{u}| \bar{u} \quad (10)$$

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:

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho A u^2 \quad (11)$$

$$F_l = C_l \frac{1}{2} \rho A u^2 \quad (12)$$

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(2003)研究认为, Balash 等(2009)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(1990)对平面网衣升力系数进行了研究,并建立了网衣密实度 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方程式计算平面网的阻力和升力:

$$C_d = C_d^{cyl} \times (8.03 S_n^2 - 0.74 S_n + 0.12) \quad (13)$$

$$C_l = (0.57 S_n - 3.54 S_n^2 + 10.1 S_n^3) \times \sin(2\alpha') \quad (14)$$

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。

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。因此,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(Bi *et al*, 2015a、b),公式如下:

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (15)$$

式中, U 为波浪中水粒子的最大速度, 在线性波理论中可近似为 $U = \pi H / T$, ν 为流体的运动粘度, d 为网线直径。

1.2 数值求解

数值模型采用有限体积法和有限差分法的空间离散方法, 在对源项采用具有二阶精度的有限差分法, 其他项采用高精度的有限体积法进行构造, 时间积分上使用更为稳定 Runge-Kutta 法确定自适应时间步长。在计算过程中, 采用 HLL 式黎曼问题近似求解器计算数值通量, 高阶 MUSCL-TVD 法求解界面通量。破碎处理根据 Tonelli 等(2009)的方法, 当波面升高同静水深比值达到 0.8 时, 判断波浪开始破碎, 将 Boussinesq 方

程退化为非线性浅水方程, 忽略 Boussinesq 方程中的高阶非线性项和色散项, 将波浪破碎处理为激波。

2 结果

2.1 网衣模型验证

采用 Lader 等(2007)的网衣物理模型实验进行模型验证, 该物理模型实验采用活塞式造波机产生规则波, 实验布置及浪高仪分布见图 1。

数值水槽的造波方式采用域内造波, 入射波浪为规则波, 部分工况的入射波要素见表 1。数值水槽左端和右端均设置了海绵层吸收边界, 海绵层长度取 1.25 倍波长以上。数值水槽在 13.0 m 处布置网衣, 网衣高度为 1.0 m。数值模型采用了与物理模型相同规格的 3 种网衣, 网衣具体规格见表 2。

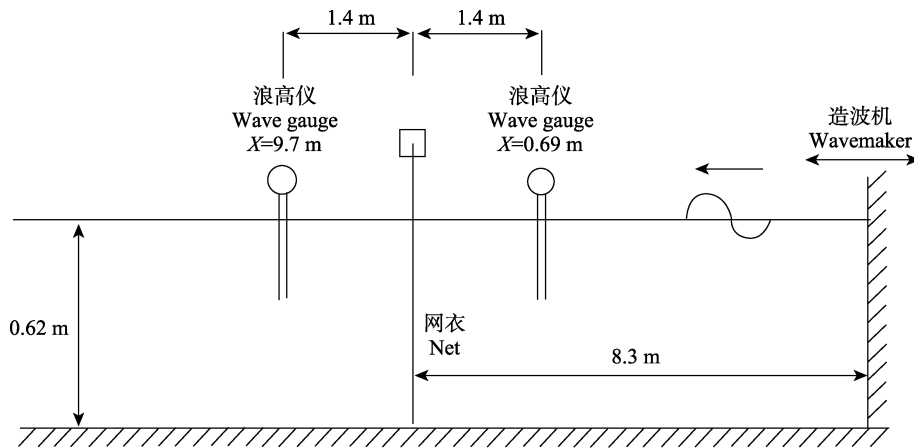


图 1 波浪穿过网衣传播变形的实验布置

Fig.1 Layout of model experiment for wave through the net (Lader et al, 2007)

表 1 入射规则波的波浪要素

Tab.1 Wave parameters of incident regular waves

工况 Condition	周期 Period /s	波高 Wave height /cm	波长 Wave length /m	波陡 Steepness
1	0.8	10.4	1.00	0.10
2	1.0	16.5	1.54	0.11
3	0.7	8.2	0.77	0.11

表 2 网衣模型规格

Tab.2 Net model specification

项目 Items	目脚长度 Mesh bar length /mm	网线直径 Twine diameter /mm	密实度 Net solidity
网衣模型 A Net A	21	1.0	0.095
网衣模型 B Net B	16	2.6	0.220
网衣模型 C Net C	25	3.6	0.288

本研究使用波高平方系数 C_{EH} 作为动力响应指标, 描述了由于网衣的存在而对波浪能造成的变化, 具体公式如下:

$$C_{EH} = \frac{H_i^2}{H_o^2} \quad (16)$$

式中, H_i 为网衣下游的透射波高, H_o 为网衣上游的入射波高。

从图 2 可以看出, 当波浪在经过不同规格的网衣区域时, 会发生不同程度的衰减。在高频规则波条件下, 波高平方系数随着网衣密实度的增大呈先增大后减小的趋势; 在低频规则波条件下, 波高平方系数呈现一直减小的趋势。整体而言, 本模型的计算结果与

对应的实验数据吻合良好, 结果趋势相同, 误差均 <3%, 表明本模型可以有效地模拟波浪在经过网衣区域的传播过程。

2.2 网箱模型验证

采用 Bi 等(2015a, b)研究的波浪穿过圆形网箱的物理模型实验对本研究数学模型进一步进行验证。该物理模型实验水槽长为 22 m、宽为 0.45 m、深为 0.6 m, 实验水深为 0.4 m。该实验的模型比尺为 1 : 50, 而网衣则是依据桂福坤等(2002)提出的变尺度模型相似准则进行设计。实验设计工况见表 3。从表 3 可以看出, 实验采用单体网箱测定网箱前后波浪变化, 网箱的密实度为 0.2。测定网箱前后波浪变化实验装置布置见图 3。

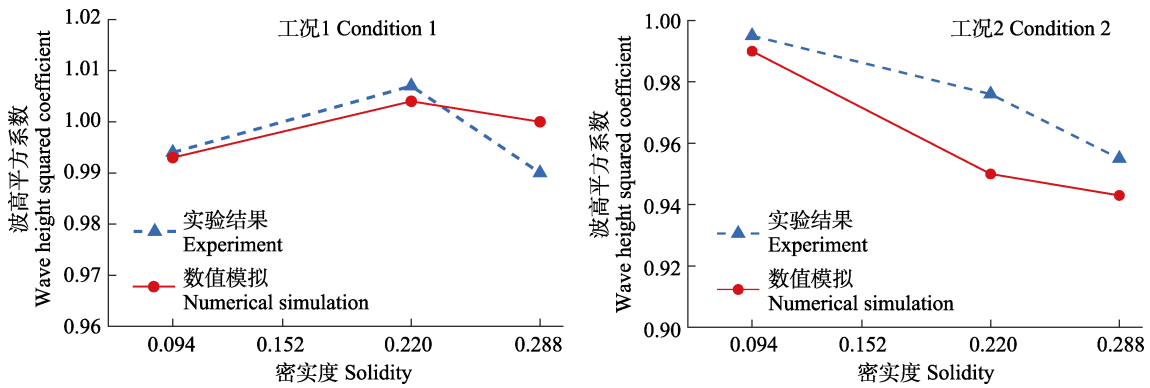


图 2 规则波在经过网衣后的波能变化

Fig.2 Change of wave energy of regular wave after passing through the net

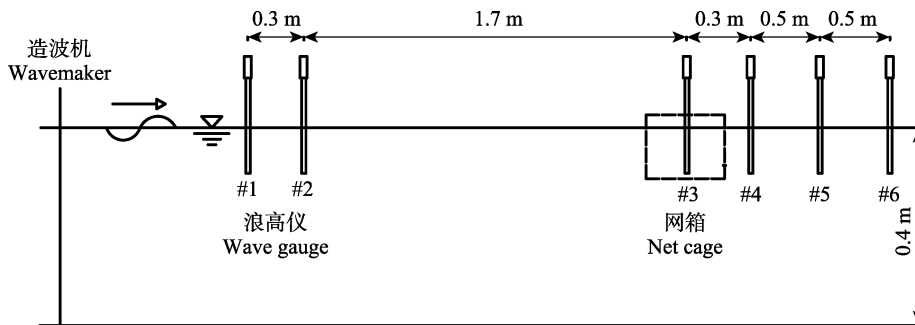


图 3 网箱内外波高变化实验装置布置

Fig.3 Experimental setup for wave elevation around the net cage (Bi et al, 2015a、b)

表 3 入射规则波的波浪要素

Tab.3 Wave parameters of incident regular waves

工况 Condition	周期 Period /s	波高 Wave height /cm	波长 Wave length /cm	波陡 Steepness
1	0.6	4	0.56	0.05
2	0.8	4	0.99	0.04
3	1.0	4	1.46	0.03
4	0.8	2	0.99	0.02
5	0.8	6	0.99	0.06

数值水槽长为 30 m、宽为 12 m, 网箱布置在水槽 19.3 m 处。与物理模型实验采用相同的浪高布置方式, 取测点 1 为网前波高, 测点 5 为网后波高进行计算, 水槽前后各布置 4 m 的消浪区以保证不会发生波浪反射。网箱的布置方式及规格与物理模型实验一致。

使用波浪透射系数进行分析和验证, 当波浪传播经过网箱结构时, 假定网箱前的波高为 H_i , 网箱后的波高为 H_t , 则根据规则波的能量计算公式, 定义波浪透射系数公式如下:

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (17)$$

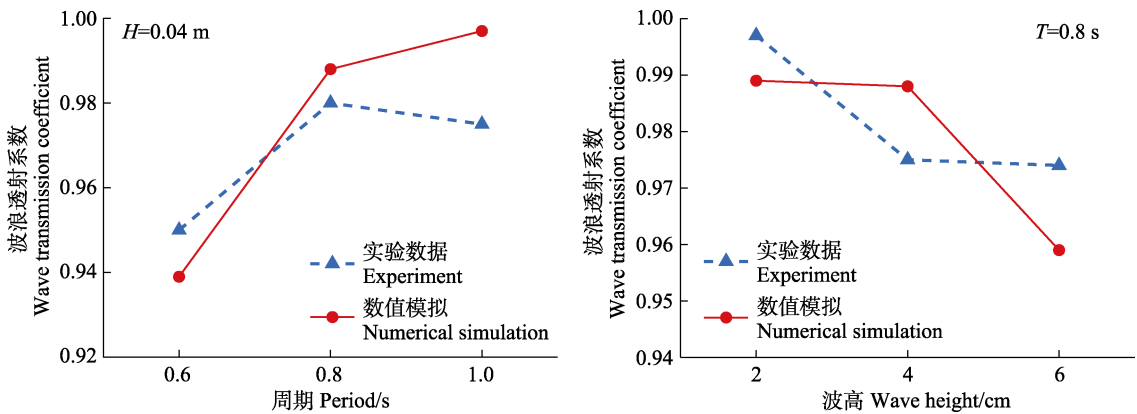


图 4 规则波在经过网箱结构后的波高变化

Fig.4 Variation of wave height of regular wave after passing through the net cage

3 分析与讨论

采用上述模型对本研究的内容进行数值模拟。模型比尺为 1 : 50, 数值波浪水槽的有效长度为 50 m, 宽度为 20 m, 水槽前后端均设置 4 m 的海绵层以吸收反射波, 根据表 4 参数设置围网数值模型以及模拟水深。本研究中, 围网为双层网结构, 网衣模型厚度为 0.025 m, 根据 Bi 等(2015a、b)的研究结果, 每层网衣对应的多孔介质系数按照公式(13)和公式(14)进行计算, 桩柱的堵塞率为 0.1, 因此, 将上述网衣多孔介质系数均乘以 1.37, 作为单层围网整体模型的多孔介质系数结果见表 6。从表 6 可以看出, 采用结构化网格进行划分, x 方向网格和 y 方向网格一致。从图 5 可以看出, 随着网格数的增加, 波高趋于收敛, 造出的波浪更加稳定。在网格尺寸定义为波长的 1/50 时, 表明波浪趋于稳定。数值求解空间步长 x 方向和 y 方向均为 0.025 m。根据表 5 设置了 4 种不同工况的规则波, 用来探究围网对不同周期规则波波场的影响。

从图 4 可以看出, 当波浪传播经过网箱时, 由于网箱对波浪的耗散作用, 波高出现了不同程度的衰减, 波高最大衰减可以达到 6%左右。从图 4 还可以看出, 波高衰减率随着波高的增加而呈减小的趋势, 数值模拟和实验结果的趋势一致。同时, 本模型的计算结果与网箱实验数据吻合良好, 误差均 < 3.5%, 误差相较于单片网的误差有所增加, 造成误差增大的原因可能是网箱形状为圆形, 相较于单片网更难以精细地模拟出其边界情况。表明本模型可以有效地模拟波浪在经过网箱结构区域的传播过程。

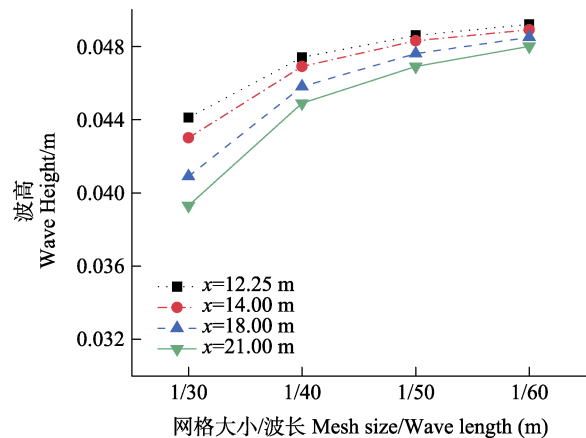


图 5 数值波浪水槽参数收敛性验证

Fig.5 Parameter convergence verification of numerical wave tank

3.1 波浪周期对波浪透射系数的影响

为研究不同波浪周期对波浪透射系数的影响, 在水深和波高不变情况下, 周期从 0.9 s 增加到 1.5 s 的波浪透射系数。不同波浪周期情况下, 围网背浪侧的波浪透射系数变化趋势见图 6。本研究对有无围网

表4 围网参数

Tab.4 Pile-net enclosure parameter

参数 Parameter	围网直径 Pile-net diameter /m	水深 Water depth /m	目脚长度 Mesh bar length /mm	网线直径 Twine diameter /mm	密实度 Net solidity
原型值 Prototype value	96.00	22.00	50.00	5.00	0.21
模型值 Model value	2.40	0.55	10.00	1.00	0.21

表5 波浪参数

Tab.5 Wave parameters

项目 Items	工况 Condition	周期 Period /s	波高 Wave height /m	波长 Wave length /m	波陡 Steepness
原型值 Prototype value	1	5.7	2.00	50.29	0.04
	2	7.0	2.00	73.06	0.03
	3	8.2	2.00	94.29	0.02
	4	9.5	2.00	116.71	0.02
模型值 Model value	1	0.9	0.05	1.25	0.04
	2	1.1	0.05	1.81	0.03
	3	1.3	0.05	2.37	0.02
	4	1.5	0.05	2.91	0.02

表6 多孔介质系数

Tab.6 Porous coefficients

工况 Condition	波高 H Wave height /m	周期 T Period /s	C_n	C_t
1	0.05	0.9	73.17	10.37
2	0.05	1.1	75.71	10.37
3	0.05	1.3	78.12	10.37
4	0.05	1.5	80.38	10.37

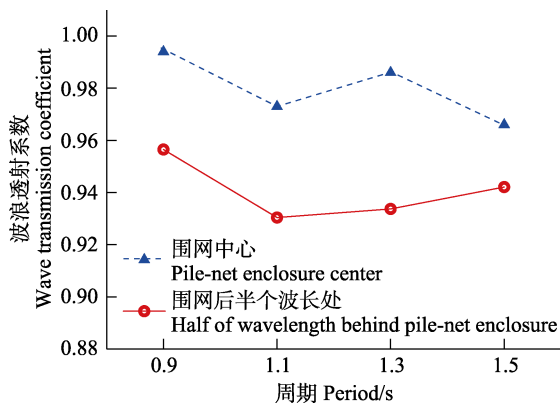


图6 不同位置的波浪透射系数

Fig.6 Wave transmission coefficient at different positions

存在时的2种数学模型的波浪传播演化结果进行了对比分析。结果表明,随着波浪周期的不断增大,围网背浪侧波浪衰减系数呈先减小后增大的趋势,最大波高衰减达93.3%。围网中心处的波浪衰减系数同样呈先减小后增大的趋势。同时,围网中心处的波浪透

射系数均大于围网后半个波长处的波浪透射系数,说明围网后的衰减更为明显。

3.2 波浪周期对最大波高衰减位置的影响

规则波浪经过围网后波浪场的变化见图7。从图7可以看出,通过减小波高的展示范围可以更好地体现出围网对于波浪传播的影响。从低频规则波的波浪传播云图可以看出,围网对波浪场的影响呈锥形扩散趋势,在远离围网区域距离时,最大波高衰减位置开始向两边扩散,同时,在围网的正后方开始出现波高恢复的情况,整体的波高衰减程度越来越小。高频规则波的主要波高衰减区域集中在围网正后区域,也呈锥形区域并展开,但未出现最大衰减位置扩散情况。

为进一步研究低频规则波在受到围网的影响,选取工况为 $H=0.05$ m、 $T=1.5$ s时,围网后垂直波浪传播方向的波高分布见图8。从图8可以看出,在围网背浪侧距围网中心1.75 m处,波高主要衰减区域还是集中在围网的正后方,而到了5.75 m处,波高衰减区域开始向两侧扩散,到了8.75 m处,波高衰减的区域扩散更大,可以看出波高最大衰减部分呈对称状分布在两侧,相较于5.75 m处其最大衰减部位之间的距离更大,同时,围网正后方区域已经开始出现波高恢复的情况。说明低频波浪的波高衰减的最大位置从开始分布在中间,后逐步向两侧扩散。同时,中间部位开始逐步有恢复的趋势,而整体波高的衰减开

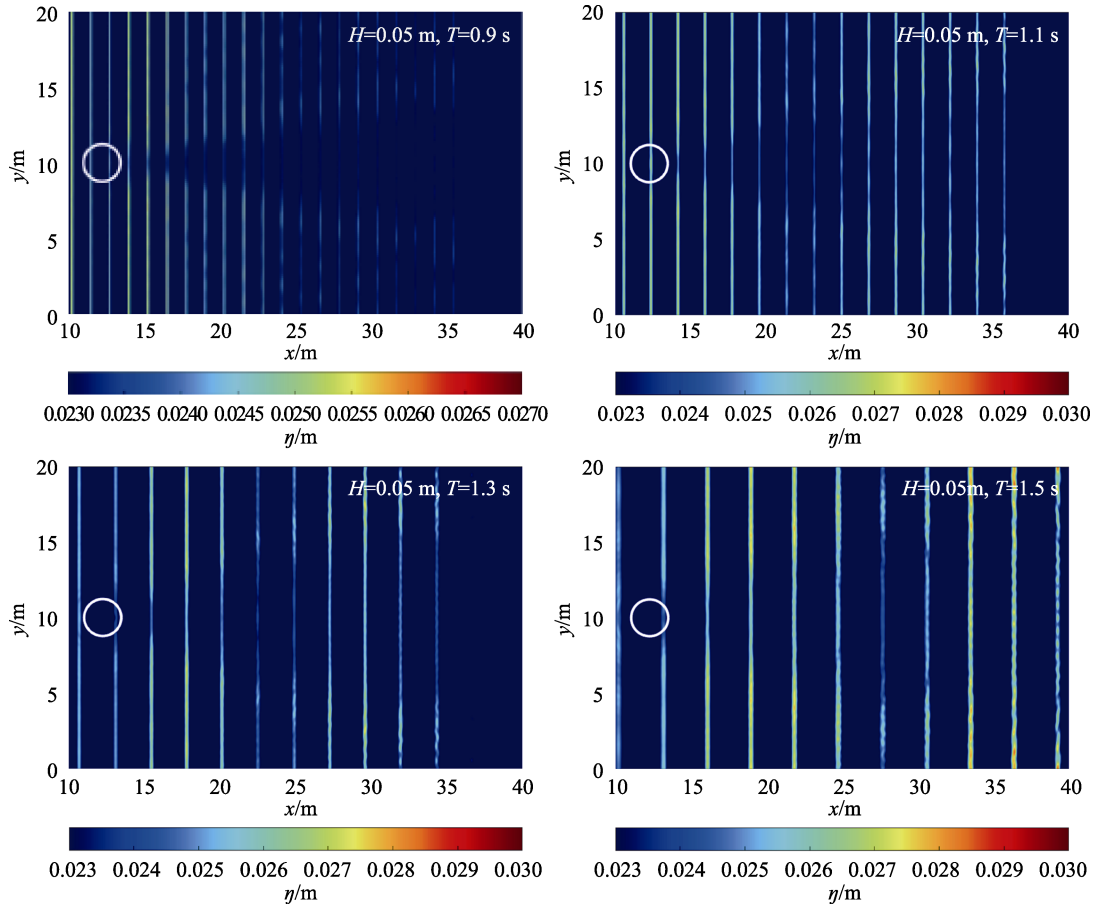


图 7 规则波在经过围网结构后的同一时刻波浪场变化云

Fig.7 Nephogram of wave field changes of regular waves after passing through the cage structure at the same time

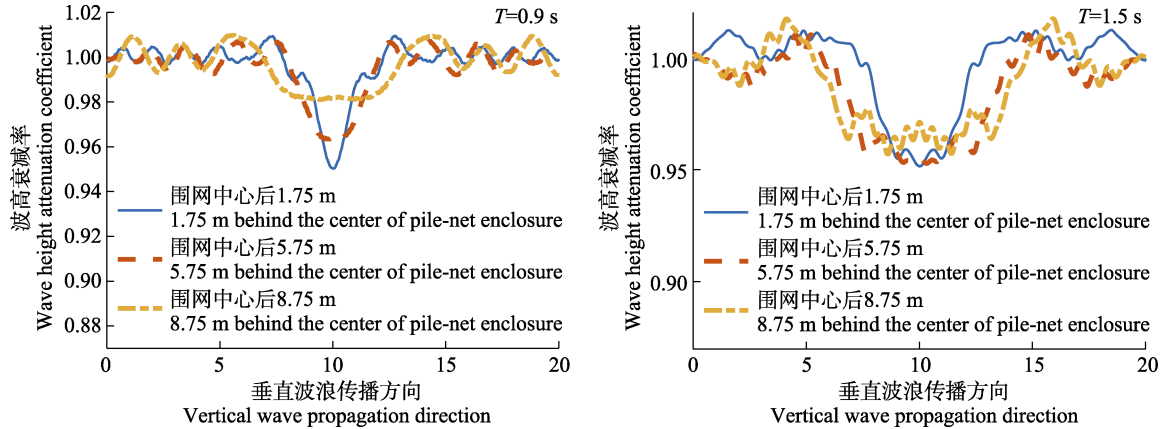


图 8 不同位置的垂直波浪传播方向波浪透射系数分布

Fig.8 Cross sectional wave height distribution at different locations

始逐步的减小。但对于高频波浪而言，衰减主要集中在围网中心后的部位，远离围网处衰减逐步的减小。导致这一现象的原因可能是高频波浪相较于低频而言会更易透过围网使得衰减部位较为集中，而低频波浪则会发生波浪绕射的情况，因而出现扩散情况。

4 结论

本研究将 FUNWAVE-TVD 模型与多孔介质模型相结合，建立了模拟离岸养殖围网内外波浪场分布特性的数学模型，并开展了模型实验验证和模拟分析研究，取得的主要研究结论如下：

(1)该模型可以较好地模拟网衣及围网结构对其周围波浪场的影响,误差均 $<3.5\%$ 。

(2)在围网影响下,较低频规则波的波高衰减区域呈辐射状趋势扩散,并随着波浪进一步传播,最大波高衰减位置开始向两侧扩散,同时,围网背浪侧的波高衰减程度减小,波高有恢复趋势,而高频波浪的波高衰减区域则较为集中。

(3)低频波浪受围网的影响较大,其背浪侧的波浪透射系数影响范围较大。

参 考 文 献

- AARSNES J V, RUDI H, LØLAND G. Current forces on cage, net deflection: Engineering for offshore fish farming. Proceedings of a conference organised by the Institution of Civil Engineers, Glasgow, UK, 17–18 October 1990
- BALASH C, COLBOURNE B, BOSE N, *et al.* Aquaculture net drag force and added mass. *Aquacultural Engineering*, 2009, 41(1): 14–21
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of biofouled full-scale net cage. *China Ocean Engineering*, 2015a, 29(3): 401–414
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, *et al.* Experimental and numerical investigation on the damping effect of net cages in waves. *Journal of Fluids and Structures*, 2015b, 55: 122–138
- CUI Y, GUAN C T, HUANG B, *et al.* Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of double-bottom cage for flounder fish under waves. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(6): 18–24 [崔勇, 关长涛, 黄滨, 等. 波浪作用下双层网底鲆网箱水动力特性的数值模拟. *渔业科学进展*, 2019, 40(6): 18–24]
- CHEN Q, KIRBY J T. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2000, 126(1): 48–56
- CHEN T H, MENG A, GUI F K. Effect of wave height and direction on hydraulic characteristics of net of pile-column type net enclosure aquaculture system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 245–251 [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. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 245–251]
- CHEN T H, PAN D, FENG D J, *et al.* Effect on hydrodynamics of unit net of a column-type net enclosure aquaculture engineering in current by fixations. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(3): 452–460 [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. *水产学报*, 2018, 42(3): 452–460]
- DONG G H, MENG F B, ZHAO Y P, *et al.* A numerical study on dynamic properties of the gravity cage under parallel and counter wave-current conditions. *Fishery Modernization*, 2014, 41(2): 49–56 [董国海, 孟范兵, 赵云鹏, 等. 波流逆向和同向作用下重力式网箱水动力特性研究. *渔业现代化*, 2014, 41(2): 49–56]
- DING Y Q, ZHU G W, QIN B Q, *et al.* Experimental study on the effect of wave disturbances on the phosphorus dynamics in shallow lakes. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 273–278 [丁艳青, 朱广伟, 秦伯强, 等. 波浪扰动对太湖水底泥磷释放影响模拟. *水科学进展*, 2011, 22(2): 273–278]
- GUI F K, LI Y C, ZHANG H H. The proportion; criteria for model testing of force acting on fishing cage net. *China Offshore Platform*, 2002(5): 23–26 [桂福坤, 李玉成, 张怀慧. 网衣受力试验的模型相似条件. *中国海洋平台*, 2002(5): 23–26]
- GUI F K, SHAO Z Y, CHEN T H, *et al.* Study on effect of rope on wave mechanical properties for net panel of pile-column type net enclosure. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(4): 505–514 [桂福坤, 邵振宇, 陈天华, 等. 纲绳对桩柱式围网网片波浪力学特性影响研究. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2020, 35(4): 505–514]
- LADER P F, OKSEN A, JENSEN A, *et al.* Experimental investigation of the interaction between waves and net structures—Damping mechanism. *Aquacultural Engineering*, 2007, 37(2): 100–114
- LIAO R H, WU X G, WANG Z D, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment on the main nutrients and heavy metals in sediments of Lake Gehu, Taihu Basin after removing the aquaculture net. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(5): 1436–1447 [廖润华, 吴晓刚, 王兆德, 等. 太湖流域漏湖围网拆除后沉积物营养盐和重金属空间分布特征及评价. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1436–1447]
- QIAN C Y, ZHENG G D, CHEN J, *et al.* Effects of oxygen on the gill tissue and enzyme activities of each tissue in a hypoxia-tolerant new strain F₅ of *Megalobrama amblycephala*. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(4): 73–81 [钱辰颖, 郑国栋, 陈杰, 等. 溶解氧对团头鲂耐低氧新品系 F₅ 代的鳃组织形态及各组织酶活性的影响. *渔业科学进展*, 2021, 42(4): 73–81]
- TONELLI M, PETTI M. Hybrid finite volume-finite difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations. *Coastal Engineering*, 2009, 56(5/6): 609–620
- TSUKOV I, EROSHKIN O, FREDRIKSSON D, *et al.* Finite element modeling of net panels using a consistent net element. *Ocean Engineering*, 2003, 30(2): 251–270
- WANG M F. Development of the 3D numerical model tuna purse seine gear. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2021, 63 [王敏法. 金枪鱼围网网具数值模拟初步研究, 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2011, 63]
- YE W F, WU J X, MA J Z, *et al.* Application and research on floating flexible seine aquaculture facility in offshore. *Fishery Modernization*, 2011, 38(5): 7–11 [叶卫富, 吴佳兴, 马家志, 等. 浅海浮绳式围网设施应用研究. *渔业现代化*,

2011, 38(5): 7–11]
ZHOU W B, SHI J G, YU W W, *et al.* Current situation and development trend of marine seine culture in China. *Fishery*

Information and Strategy, 2018, 33(4): 259–266 [周文博, 石建高, 余雯雯, 等. 中国海水围网养殖的现状与发展趋势探析. *渔业信息与战略*, 2018, 33(4): 259–266]

(编辑 陈 严)

Numerical Study on Wave Fields Inside and Around an Offshore Pile-Net Enclosure Structure Based on FUNWAVE-TVD Model

XIN Lianxin¹, BI Chunwei¹①, ZHAO Yunpeng¹, CHEN Hongzhou²

(1. *Dalian University of Technology, State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian, Liaoning 116024, China*; 2. *Zhejiang Ocean University, School of Marine Engineering Equipment, Zhoushan, Zhejiang 316000, China*)

Abstract Aquaculture in offshore structures is an effective method for developing ocean ranching and meeting the increasing demand for marine produce and is one of the most promising ecological breeding structures. The offshore pile-net enclosure structure has wide application prospects owing to its large aquaculture volume, and its aquaculture environment is very similar to that of the natural environment. However, the existence of the pile and net structure will have a certain impact on the wave fields inside and around the pile net enclosure. Owing to the large scale of the pile-net enclosure structure, the structure significantly changes the original wave field in passing waves. Because of the complexity of the wave field at sea, construction site selection will have a significant impact on the safety of the purse seine structure. The pile-net enclosure structure also has an effect on the contents of nitrogen, phosphorus, heavy metals, and other substances in the area. Study of the impact of the pile-net enclosure structure on the original wave field is also of great significance for addressing environmental problems. Previous studies on pile-net enclosure structures have focused on the stress of the structure, and few studies have examined the impact of the structure on the original wave field in passing waves. Therefore, the propagation tendency of the pile net enclosure structure on the wave field in the original area under the action of waves and the hydrodynamic characteristics of the pile net enclosure were studied. This is of great significance for the structural design and site selection of the entire pile net enclosure. Based on the fully nonlinear Boussinesq equation and the numerical model FUNWAVE-TVD with shock capture ability, the propagation tendency of regular waves through a pile-net enclosure structure was studied. First, the wave was simulated based on the fully nonlinear Boussinesq equation. For a structure with large porosity, the pile-net enclosure structure was simplified as a porous medium model, ignoring its linear force, considering only the drag force of the netting, and using a reasonable calculation formula to calculate the flow-blocking effect of the netting. The influence of the pile-net enclosure on the wave field was simulated by combining the two. The finite volume and finite difference methods were used in the numerical calculation. First, a physical model experiment based on the lander verified whether the model was accurate for the calculation of the wave field of the netting. The physical model experiment designed different wave conditions and three netting models with large differences in compactness. The square coefficient of the wave height was used to describe the change in wave

① Corresponding author: BI Chunwei, E-mail: bicw@dlut.edu.cn

energy after the wave passed through the pile-net enclosure structure. Compared to the results of the physical model experiments, the error was small. Subsequently, the numerical model was verified from the perspective of the cage using Bi's physical model test data. The model used a net cage model to simulate the influence of the net cage on the wave field. A numerical flume similar to that of the physical model experiment was designed, and the wave-dissipation area was set before and after. The cage size was the same as that used in the physical model experiment. The results showed that the model could better simulate the influence of the cage structure on the wave field. Different working conditions were then designed, the effects of the wave period on the wave field characteristics of the pile-net enclosure were further studied, and the internal relationship between the wave field characteristics of the pile-net enclosure structure and these hydrodynamic factors were discussed. In this study, a numerical flume similar to the physical model experiment was designed. Then, different designed wave conditions were used to determine the effects of the wave period on the wave field characteristics of the pile-net enclosure. The results showed that the influence of the pile-net enclosure on the larger periodic wave field had a radial trend and a fan-shaped radiation area behind the pile-net enclosure structure, which increased with an increase in the wave period, indicating that the wave period increased and its influence area expanded. Within a certain range on the lee side of the pile-net enclosure, the wave height showed a recovery trend, and the attenuation gradually decreased, while the attenuation area of small periodic waves was more concentrated. The wave with a small period was significantly affected by the pile net enclosure, and its wave transmission coefficient was the smallest in this study. The results show that the numerical model can effectively simulate the wave field characteristics around a pile net enclosure, which has a reference value for the location and construction of a pile net enclosure in an ocean ranching environment.

Key words Pile-net enclosure structure; Wave field; FUNWAVE-TVD; Numerical simulation