

固定方式对桩柱式围网网片波浪力学特性影响研究

桂福坤^{*1}, 陈天华¹, 赵云鹏², 董国海²

(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. 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)

摘要: 浅海围网养殖是新兴的一种生态型养殖模式, 其中比较典型的桩柱式围网, 主体由排桩和网片组成. 围网网衣系统安全是决定围网养殖工程安全的关键所在, 因此针对桩柱式围网中的单元网片, 采用数值方法对其在波浪作用下的力学特性进行了研究, 着重分析了不同网片尺度和固定方式下单元网片的网线张力分布、结节偏移和桩柱系缚点受力特性. 结果表明, 波浪条件下桩柱式围网单元网片的网线最大张力主要出现在网片上端两侧位置, 网线最大张力与网片尺寸成正比; 单元网片结节最大偏移主要出现在网片的中上位置, 同样结节最大偏移与网片尺寸成正比. 两者均随系缚点数量的增加先减小后在系缚点多于4个时趋于稳定; 网片与桩柱的系缚点最大受力出现在上端点, 其次是下端点, 且数值上均远远大于桩柱中间的系缚点, 并随网片尺寸的增大而增大, 随系缚点数量的增加而不断减小.

关键词: 桩柱式围网养殖; 单元网片; 数值模拟; 固定方式; 波浪

中图分类号: S955.9

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201703011

0 引言

浅海围网养殖是继陆基工厂化养殖、岸边滩涂养殖和围塘养殖、浅海网箱养殖之后研发的一种新兴的海水生态养殖模式. 桩柱式围网主要由管桩和网片构成. 布置方式是围网养殖工程最为重要的影响因素之一, 围网安全与固定方式紧密相关, 因此, 开展围网网片在不同固定方式下受波浪作用的水力特性研究意义重大. 近年来, 国内外已有许多有关网衣在波浪作用下的水动力特性研究, 宋伟华等^[1]采用4种网箱系泊方法, 进行了单点系泊网衣构件水槽波浪试验研究, 结果表明单点系泊在波浪条件下构件水动力有较大的增加. 李玉成等^[2]利用模型试验对单片网衣在波浪作用下的水动力特性进行了研究, 其结果表明网衣密实度对网衣速度力系数的影响相对较大, 网衣所受惯性力项和速度力相比很小, 可以忽略. 刘莉莉等^[3]应用有限元方法与集中参数法建立了张网在

波流场中的数值模型, 通过数值模拟来研究张网在波流作用下的水动力特性, 并将数值计算结果与水槽模型试验结果进行比较, 符合良好. Chan等^[4]通过数值模拟对穿过柔性渔网的表面波散射进行了研究分析, 清楚地揭示了柔性渗透屏障对波浪传播的影响规律. Tsukrov等^[5]应用有限元法建立了网片在波浪和水流环境负荷下的水动力响应模型, 并将其结果应用到计算张力腿网箱中. 叶卫富^[6]通过模型试验对浮绳式围网的水动力特性进行了初步研究, 但受试验条件限制, 测试内容及结果的应用有一定局限性.

桩柱式围网养殖是一种新兴的海洋养殖模式, 结构上有其特殊性, 对围网网衣系统的水动力研究目前少有报道. 浅海围网工程的网衣系统与深水网箱、捕捞渔具结构上有较多不同, 网衣系统安全是决定围网养殖工程安全的关键所在. 本文采用集中质量点法对桩柱间单元网片建立波浪作用下网片的运动响应数学模型, 并通过计算机数

值模拟研究不同布置方式下围网网片的网线张力分布、结节偏移和系缚点受力,为桩柱式围网设计、制作、海上敷设和围网抗风浪技术的研发等提供理论依据和技术支撑。

1 数值模拟方法

1.1 数学模型

围网网片属于典型的柔性结构物,可采用集中质量法进行模拟。假定网片是由有限的无质量弹簧连接的集中质量点所构成,通过计算集中质量点在波浪和边界条件作用下的位移,来得到网的形状。模型的集中质量点设于每个网目目脚的两端,每个集中质量点包含网目的一个结节和两个目脚,如图 1(a)所示。把结节近似看成圆球,目脚看作圆柱形杆件,所以它具有圆柱的水动力性质。

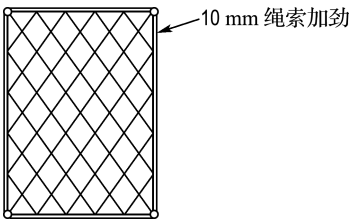
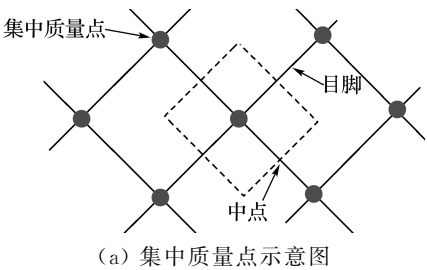


图 1 单元网片计算模型示意图

Fig. 1 The schematic diagram of calculation model for unit net panel

网衣集中质量点受力主要包括重力、浮力、网线张力、波浪力等,网衣受到的波浪力可根据莫里森方程^[7]来计算。在计算目脚的波浪力时需考虑波浪入射方向与网线夹角关系,本文在目脚上建立局部坐标系 (ξ, η, τ) , τ 方向为沿目脚方向, ξ 轴为在 τ 和水质点相对速度 $\mathbf{v}_r$ 组成的平面内与 τ 垂直^[8-10]。在整体坐标系下,局部坐标系的 ξ, η, τ 轴单位矢量可以通过已知的水质点相对速度 $\mathbf{v}_r =$

$\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_0$ 和目脚方向 $\boldsymbol{\tau} = (x_1 - x_0 \quad y_1 - y_0 \quad z_1 - z_0)$ 向量叉乘得到,为

$$\mathbf{e}_\xi = \frac{\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{v}_r \times \boldsymbol{\tau}}{|\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{v}_r \times \boldsymbol{\tau}|} = (x_\xi \quad y_\xi \quad z_\xi)$$

$$\mathbf{e}_\eta = \frac{\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{v}_r}{|\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{v}_r|} = (x_\eta \quad y_\eta \quad z_\eta)$$

$$\mathbf{e}_\tau = \frac{\boldsymbol{\tau}}{|\boldsymbol{\tau}|} = (x_\tau \quad y_\tau \quad z_\tau)$$

所以直接通过向量运算建立网线目脚的受力公式:

$$\mathbf{F}_{D \text{ bar}} = \mathbf{F}_{D\xi} + \mathbf{F}_{D\eta} + \mathbf{F}_{D\tau}$$

$$\mathbf{F}_{I \text{ bar}} = \mathbf{F}_{I\xi} + \mathbf{F}_{I\eta} + \mathbf{F}_{I\tau}$$

其中

$$\mathbf{F}_{D\xi} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D\xi} A_\xi \frac{\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{e}_\xi |\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{e}_\xi|}{2}$$

$$\mathbf{F}_{D\eta} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D\eta} A_\eta \frac{\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{e}_\eta |\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{e}_\eta|}{2}$$

$$\mathbf{F}_{D\tau} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D\tau} A_\tau \frac{\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{e}_\tau |\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{e}_\tau|}{2}$$

$$\mathbf{F}_{I\xi} = \rho_w \forall C_{M\xi} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \mathbf{e}_\xi$$

$$\mathbf{F}_{I\eta} = \rho_w \forall C_{M\eta} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \mathbf{e}_\eta$$

$$\mathbf{F}_{I\tau} = \rho_w \forall C_{M\tau} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \mathbf{e}_\tau$$

在整体坐标系下将集中质量点所包含的结节和目脚的受力进行累加:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + \mathbf{T}_3 + \mathbf{T}_4$$

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_{D \text{ node}} + \mathbf{F}_{D \text{ bar}}$$

$$\mathbf{F}_I = \mathbf{F}_{I \text{ node}} + \mathbf{F}_{I \text{ bar}}$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_{\text{node}} + \mathbf{W}_{\text{bar}}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\text{node}} + \mathbf{B}_{\text{bar}}$$

然后利用牛顿第二定律建立质点运动方程。网衣模型简化后的质点运动方程^[11-13]为

$$(M + \Delta M) \mathbf{a} = \mathbf{T} + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_I + \mathbf{W} + \mathbf{B}$$

其中

$$\Delta M = \rho_w \forall C_m$$

$$\mathbf{T} = d^2 C_1 \epsilon^{C_2} \boldsymbol{\tau}, \quad \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D A \frac{\mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r|}{2}$$

$$\mathbf{F}_I = \rho_w \forall C_M \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$$

式中: $\Delta M, M$ 分别表示各集中质量点的附加质量和质量, $\mathbf{a}$ 表示各集中质量点的加速度矢量, $\mathbf{T}$ 表示集

中质量点所受到的张力矢量, F_D 、 F_I 分别表示集中质量点的速度力矢量和惯性力矢量, W 表示质点的重力矢量, B 表示质点的浮力矢量, ρ_w 表示水体的密度, C_D 表示速度力项系数, A 表示网线沿波浪方向的投影面积, v 、 v_r 分别表示波浪水质点的速度矢量和相对速度矢量, C_M 表示惯性力项系数, V 表示网线构件的体积, C_m 表示附加的质量力项系数, d 为网线直径, l_0 为网线原始长度, l 为变形后的长度, C_1 、 C_2 为构件材料弹性系数。

建立的质点运动方程为典型的二阶偏微分方程, 可采用欧拉法、龙格库塔法等多种方法求解。本文利用 Fortran 软件编程计算求解, 采用欧拉法即可获得良好的收敛性。计算中首先根据网片的初始状态, 计算网线上的波浪力以及网线变形所产生的拉力, 基于质点运动方程求解出质点的加速度, 然后根据向前欧拉公式^[14]: $y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_i, y_i)$, 求出下一时间步长的质点位移和速度, 从而确定网片形状, 最后以求出的质点位置和速度作为网片新的状态参数, 重复上述步骤直至结束。

1.2 模型验证

本文引用文献[15]中的预加张力放射法系泊网衣波浪试验情况, 对实际渔用网衣 J, 在波浪周期 1.6 s 试验条件下进行了数值模拟。网衣 J 尺寸为 90.5 cm×80.6 cm(宽×高), 材料为 PE, 缩结系数为 0.707, 网目大小为 4 cm, 网线直径为 1.95 mm, 网目数为 32×28.5。网衣框架为 HDPE 空心管材, 管材外径 14 mm, 框架底部距离池底 100 mm, 水深 0.7 m。图 2 给出了各种波高下网衣水平波浪力最大值的模拟结果。由图可

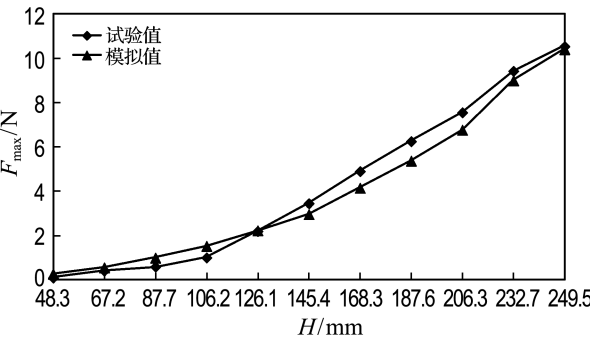


图 2 网衣水平波浪力模拟值和试验值对比
Fig. 2 Comparison of the horizontal wave force on the net between the experiment and simulation

见, 在各种不同的波高条件下, 网衣水平波浪力最大值的模拟值和试验值吻合较好。

1.3 计算参数选取

围网所用网衣有多种材质, 大多采用 PE 网和超高相对分子质量纤维网, 有些围网也采用金属网(如铜网)。网衣的尺寸也有所不同, 单元网片宽度一般为 3~5 m, 高度一般为 6~10 m。本文重点研究波浪对网片不同部位受力分布特性的影响, 简单起见, 网片全部采用 PE 材质, 网目大小 $2a=8$ cm, 网线直径 $d=3$ mm, 水平缩结系数 0.66, 垂直缩结系数 0.75。采用线性波浪理论, 水深 10 m。为避免波浪条件下, 网片露出水面而导致受力差异, 研究时, 网片上边缆水下布置深度为二分之一波高。本文主要关注网片尺寸和系缚方式对围网网片的影响, 因此波浪要素仅给定一种情况, 即取波高 $H=3$ m, 波向 $\theta=90^\circ$, 波周期 $T=7$ s。网片尺寸取宽×高=1 m×6 m, 2 m×6 m, 3 m×6 m, 4 m×6 m 和 5 m×6 m; 系缚方式主要指单元网片在围网桩柱上的系缚点数量, 共设置 6 种情况, 即单边系缚点数量分别为 2、3、4、5、7、13 个, 如图 3 所示。网片四边用 10 mm 绳索加劲, 如图 1(b)所示。由于计算中网片结节数较多, 为减少计算时间、提高计算效率, 采用网目群化方法^[16-17]将相邻 64 个网目合并为一个等效大网目。

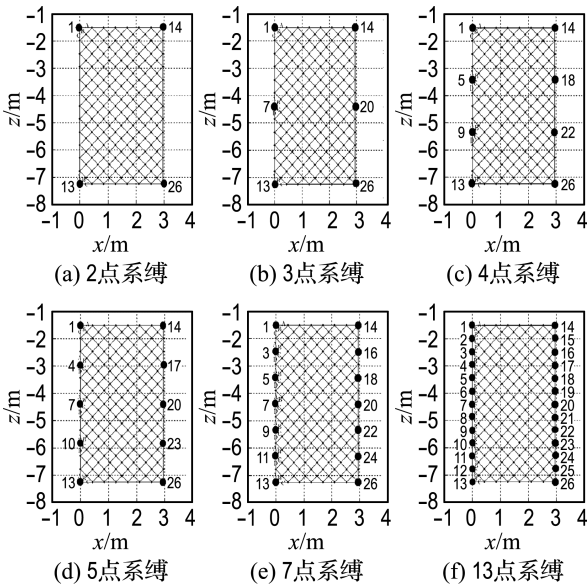


图 3 网片系缚方式示意图
Fig. 3 Sketch of net panel with different fixations

网目群化后,13 点系缚为完全系缚,即计算模型中,每个边侧节点均被约束。

2 计算结果与分析

2.1 网片尺寸对围网网片波浪力学特性的影响

研究时,给定一种网片系缚方式,即 5 点系缚,此时系缚点间距与网片横宽比按网片尺寸的增加依次为 1.500、0.750、0.500、0.375、0.300。重点关注 5 种不同尺寸的单元网片,在波浪作用下的网线最大张力和结节最大偏移,以及网片与桩柱系缚点的受力特性。结节最大偏移指的是网衣变形后,结节到网片初始平面的最大偏移距离。

2.1.1 网线张力与结节偏移 图 4 和图 5 给出了网线最大张力、结节最大偏移与网片尺寸的关系。由图可见,两者均随网片尺寸增大而增大。网线最大张力出现在网片上端两侧位置(如图 6 实粗线所示),但尺寸为 $w_0 \times l_0$ (宽) $\times$ l_0 (长) = 1 m $\times$ 6 m 的网片网线最大张力出现位置有所不同。网片中结节最大偏移位置出现在网片中上部(如图 6 星号所示)。

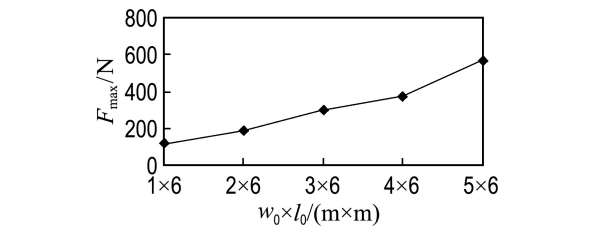


图 4 网线最大张力随网片尺寸的变化
Fig. 4 The maximum twine force vs. the net panel's size

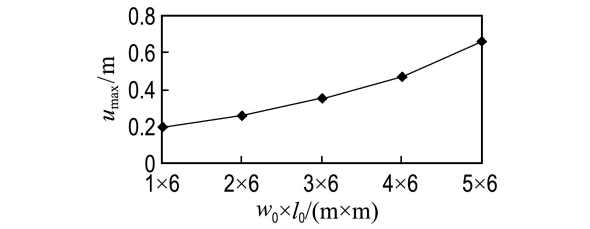


图 5 结节最大偏移随网片尺寸的变化
Fig. 5 The maximum offset of nodes vs. the net panel's size

2.1.2 围网网片与桩柱系缚点之间的受力特性 图 7 给出了网片在围网桩柱上的 5 个系缚点(系缚点编号 No. 为 1、4、7、10、13,见图 3)的最大受力值与网片尺寸的关系。由图可见,首尾两端系缚

点(No. 1 和 13)的受力远大于中间系缚点的受力,且最大受力值随网片尺寸的增大而迅速增大;中间系缚点(No. 4、7、10)的最大受力随网片尺寸的增大变化相对较小。

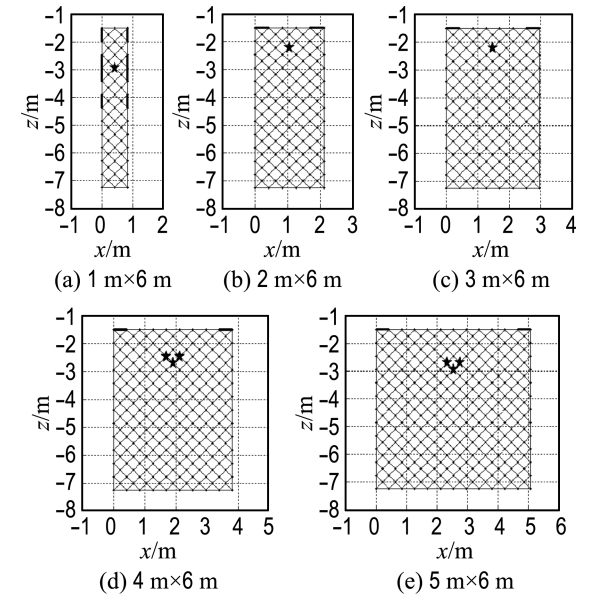


图 6 不同网片尺寸下网线张力最大的部位(实粗线)和结节偏移最大的部位(星号)
Fig. 6 The position of the maximum twine force (heavy lines) and the maximum offset of the nodes (pentagram) under different net panel's sizes

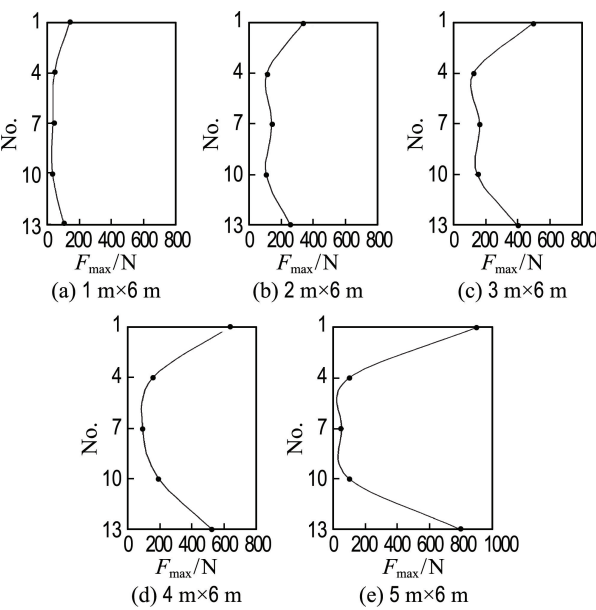


图 7 不同尺寸网片各系缚点的最大受力情况
Fig. 7 The maximum force at each fixing point with different net panel's sizes

2.2 系缚方式对围网网片波浪受力特性的影响

在给定网片尺寸(宽×高=3 m×6 m)条件下,本文研究了系缚方式对围网网片的网线最大张力和结节最大偏移以及网片与桩柱系缚点受力的影响.此时系缚点间距与网片横宽比按系缚点数的增加依次为 2.000、1.000、0.667、0.500、0.333、0.020.

2.2.1 最大网线张力与结节偏移 图 8 和 9 给出了网线最大张力及结节最大偏移与系缚方式的关系.由图可见,增加系缚点的数量 N ,有助于减小网线的最大张力和结节的最大偏移,但当系缚点超过一定数量(本文为 4 点)后,网线最大张力和结节最大偏移不再出现显著的降低.图 10 中,实粗线给出了网线最大张力出现在网片上的位置.由图可见,两点系缚时网线最大张力出现在网片上下两侧位置,其他系缚方式网线最大张力出现在网片上端两侧位置.系缚点数量同样对结节最大偏移位置有影响,随着系缚点数量增加,最大偏移位置发生上移,并当系缚点达到一定数量(本文为 4 点)后,位置不再有大的变化,如图 10 所示.

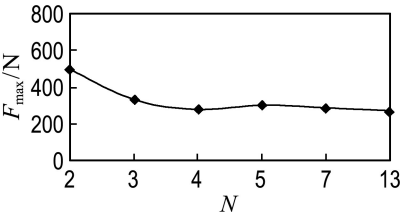


图 8 网线最大张力随系缚方式的变化
Fig.8 The maximum twine force vs. fixations

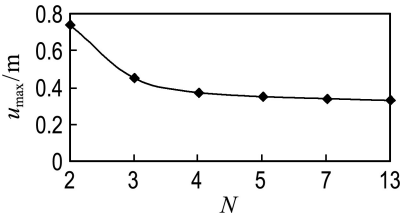


图 9 结节最大偏移随系缚方式的变化
Fig.9 The maximum offset of nodes vs. fixations

2.2.2 围网网片与桩柱系缚点之间的最大受力 图 11 给出了网片在不同系缚方式下系缚点的受力情况.由图可见,网片上端系缚点最大受力均略

大于下端系缚点最大受力,且均远远大于中间系缚点受力.随着系缚点数的增加,系缚点最大受力整体上是逐渐减小.

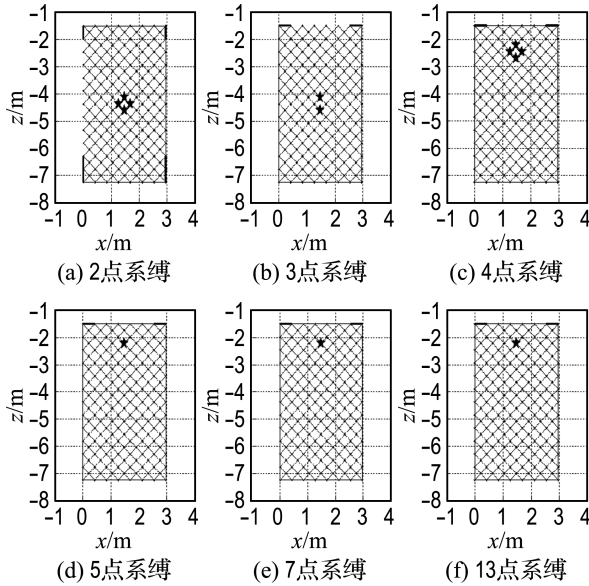


图 10 不同系缚方式下网线张力最大的部位(粗线)和结节偏移最大的部位(星号)
Fig.10 The location of the maximum twine force (heavy lines) and the maximum node offset (pentagram) with different fixations

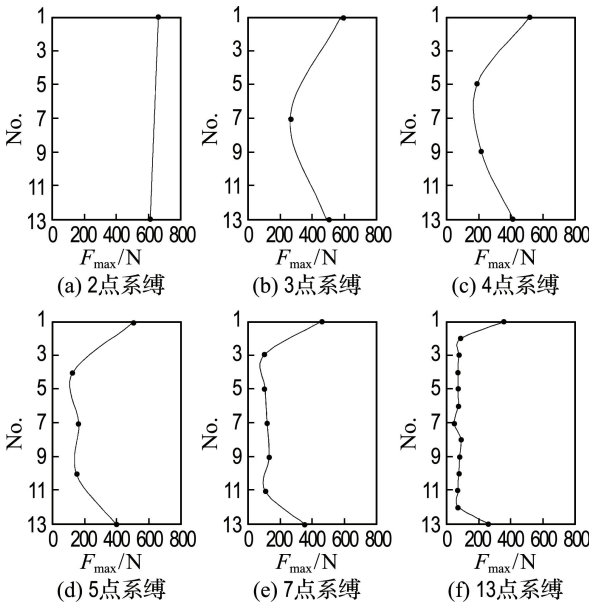


图 11 6 种系缚方式下网片各系缚点的最大受力情况
Fig.11 The maximum force at each fixing point with 6 types of fixations

3 讨 论

3.1 网片尺寸的影响

桩柱式围网主体由网片和排桩组成,其中围网网片起到防止鱼类逃脱和敌类侵害等作用,由此可见,保证围网网衣系统安全十分重要.对围网网片采用不同的固定方式在波浪中会产生不一样的效果,其在波浪作用下的网线最大张力、结节最大偏移和桩柱系缚点最大受力是围网规划设计者最为关心的指标,也是保证恶劣海况下围网养殖安全的首要条件.因此,围网网片的网线最大张力、结节最大偏移和桩柱系缚点最大受力这 3 个指标在桩柱式围网养殖工程的风险评估中都具有十分重要的作用.

本文研究发现,网线最大张力和结节最大偏移都与网片尺寸成正比.尺寸为 $1\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的网片因为宽度小于系缚点间距,同时波浪能量随水深衰减^[18],导致最大张力发生在网片两侧上部与系缚点相连的位置,如图 6 所示.而其他网片的宽度都大于系缚点间距,同时伴随波浪的影响导致最大张力发生在网片上端两侧位置.但所有的网线最大张力都发生在加劲绳上,这也表明对网片四边进行加劲处理是非常必要的.结节最大偏移位置位于网片中上部,跟波浪能量随水深的变化有关,在网片此部位的最大偏移以内尽量避免有障碍物,否则易发生网线因磨损而断裂.研究结果表明,围网网片上系缚点的整体受力呈现首尾两端大中间小的现象,而且随着网片尺寸的增加,首尾系缚点的受力会不断增大,表明改变网片尺寸对首尾系缚点产生的影响大,而对中间系缚点的影响不明显.因此,对网片首尾两端的系缚点进行加固是非常必要的.

3.2 系缚方式的影响

研究发现,网片两侧系缚点受力整体呈现出首尾两端大中间小的现象,其中首端的系缚点受力最大.因此,对网片首尾两端的系缚点进行加固是非常必要的.同时,网线最大张力和结节最大偏移与系缚点数量有关,随系缚点数量的增加先减小后趋于稳定,表明增加一定数量的系缚点可以有效降低整个网片中的网线最大张力和结节最大

偏移,从而降低网线断裂的风险.同时,随着系缚点数量的增加,网片首尾系缚点的最大受力也不断下降,表明系缚点数量的增加同样可以分担首尾两端系缚点的受力.从整体受力看,系缚点达到一定数量后,网线最大张力趋于稳定,此时进一步增加系缚点数量反而增加了围网工程的施工难度.因此,围网网片应存在一个临界系缚点数量,本文研究该临界系缚点数量为 4~5 个,对于不同围网网片尺度,需要具体分析.研究同时发现,当采用 2 点系缚时,由于竖向系缚点之间的间距大于网片的横向宽度,整个网片的最大受力位置出现在了左右侧缆上.随着两侧系缚点数量的增加,当系缚点的间距小于网片的横向宽度,出现网线张力最大的部位转移至上边缆两端,再次证明了对网片四边做加劲处理的重要性.

4 结 论

(1)网片尺寸和系缚方式均对网片结构单元的受力和变形特性有着显著的影响.单元网片中的网线最大张力和结节最大偏移均随着网片尺寸的增大而增大,网线最大张力一般出现于网片顶端两侧系缚点处,结节最大偏移出现于单元网片的中上部.实际应用时,建议强化顶部纲绳的设计考虑.

(2)波浪条件下,网片系缚点最大受力出现于顶部第一个系缚点处,其次为底端系缚点,中间系缚点受力均远小于上下两端系缚点受力.实际应用时,建议强化顶部和底部系缚点的设计考虑.

(3)增加单元网片两侧系缚点的数量,有利于降低所有系缚点的受力.但对单元网片中的网线受力而言,当系缚点数量增至 4 个以上时,网线的最大受力不再显著下降.因此从这一角度分析,应存在一临界系缚点数量,本文研究条件下,临界系缚点数量为 4~5 个.实际应用应保证达到临界数量以上,并保留一定的富余,具体数量需视具体工程而定.

本文研究结果可为桩柱式围网养殖工程设计和施工提供重要的参考依据.本文仅针对一种波浪条件进行了研究,有关波浪要素等其他因素对单元网片波浪力学特性的影响将于后期进一步研究.

参考文献:

- [1] 宋伟华,梁振林,赵芬芳,等. 单点系泊网衣构件波浪试验研究[J]. 海洋与湖沼, 2005, **36**(3):199-206.
SONG Weihua, LIANG Zhenlin, ZHAO Fenfang, *et al.* Wave experiment on netting structure with single point moorings [J]. **Oceanologia et Limnologia Sinica**, 2005, **36**(3): 199-206. (in Chinese)
- [2] 李玉成,赵云鹏,桂福坤,等. 波浪条件下渔网水动力特性研究[J]. 中国造船, 2006, **47**(s1):265-273.
LI Yucheng, ZHAO Yunpeng, GUI Fukun, *et al.* Hydrodynamic study on a submerged plane nets in wave [J]. **Shipbuilding of China**, 2006, **47**(s1): 265-273. (in Chinese)
- [3] 刘莉莉,万 荣,黄六一,等. 波流场中张网渔具水动力学特性的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, **43**(5):24-29.
LIU Lili, WAN Rong, HUANG Liuyi, *et al.* Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of stow net in wave and current [J]. **Periodical of Ocean University of China**, 2013, **43**(5):24-29. (in Chinese)
- [4] CHAN A T, LEE S W C. Wave characteristics past a flexible fishnet [J]. **Ocean Engineering**, 2001, **28**(11):1517-1529.
- [5] 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.
- [6] 叶卫富. 浅海养殖围网设施水动力性能的初步研究[D]. 杭州:浙江海洋学院, 2012.
YE Weifu. Preliminary study on the characteristics of hydrodynamics on the aquaculture seine [D]. Hangzhou: Zhejiang Ocean University, 2012. (in Chinese)
- [7] 王树青,梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2013.
WANG Shuqing, LIANG Bingchen. **Wave Mechanics for Ocean Engineering** [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013. (in Chinese)
- [8] 黄小华,郭根喜,胡 昱,等. 水流作用网衣过程的数值模拟[J]. 南方水产科学, 2011, **7**(3):56-61.
HUANG Xiaohua, GUO Genxi, HU Yu, *et al.* Numerical simulation of dynamic process of cylinder nets in current [J]. **South China Fisheries Science**, 2011, **7**(3):56-61. (in Chinese)
- [9] 黄小华,郭根喜,陶启友,等. 平面网衣在水流作用下的受力和变形特性数值模拟研究[J]. 南方水产, 2009, **5**(3):23-29.
HUANG Xiaohua, GUO Genxi, TAO Qiyu, *et al.* Numerical simulation of the force and deformation of submerged plane nets in current [J]. **South China Fisheries Science**, 2009, **5**(3):23-29. (in Chinese)
- [10] 黄小华,郭根喜,胡 昱,等. 圆形网衣在水流作用下的运动变形特性[J]. 中国水产科学, 2010, **17**(2):312-319.
HUANG Xiaohua, GUO Genxi, HU Yu, *et al.* Movement and deformation characteristics of cylinder nets in current [J]. **Journal of Fishery Sciences of China**, 2010, **17**(2): 312-319. (in Chinese)
- [11] 赵云鹏. 深水重力式网箱水动力特性数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
ZHAO Yunpeng. Numerical investigation on hydrodynamic behavior of deep-water gravity cage [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 赵云鹏,李玉成,董国海,等. 水流作用下重力式网箱网衣张力分布[J]. 渔业现代化, 2008, **35**(6):5-8, 63.
ZHAO Yunpeng, LI Yucheng, DONG Guohai, *et al.* Tension distribution of gravity cage net in steady current [J]. **Fishery Modernization**, 2008, **35**(6):5-8, 63. (in Chinese)
- [13] 陈小芳. 鲆鲽类方形网箱水动力特性数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
CHEN Xiaofang. Numerical simulation of the hydrodynamic behavior of the square net cage for flatfish [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 刘师少. 计算方法[M]. 北京:科学出版社, 2005: 151-172.
LIU Shishao. **Computing Method** [M]. Beijing: Science Press, 2005:151-172. (in Chinese)
- [15] 宋伟华. 网衣波浪水动力学研究[D]. 青岛:中国海

- 洋大学, 2006.
- SONG Weihua. Study on the mechanics of wave forces on the netting panel [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. (in Chinese)
- [16] BESSONNEAU J S, MARICHAL D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls) [J]. **Ocean Engineering**, 1998, **25**(7):563-583.
- [17] 苏 炜,詹杰民. 等效网面法在模拟网的水动力特性中的应用[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2007, **22**(3):267-272.
- SU Wei, ZHAN Jiemin. Application of an equivalent method to model dynamic properties of fish net [J]. **Journal of Hydrodynamics, Ser. A**, 2007, **22**(3):267-272. (in Chinese)
- [18] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津:天津大学出版社, 1991.
- ZHU Yanrong. **Wave Mechanics for Ocean Engineering** [M]. Tianjin:Tianjin University Press, 1991. (in Chinese)

Study of effect on wave mechanical properties for net panel of pile-column type net enclosure by fixations

GUI Fukun^{*1}, CHEN Tianhua¹, ZHAO Yunpeng², DONG Guohai²

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The net enclosure aquaculture (NEA) in shallow water is a new developing ecological aquaculture mode. The pile-column type net enclosure is one of the most typical structures, which is mainly composed of piles and net panels. The net system is the most important part which affects the security of the whole NEA system, therefore the mechanical performance of unit net panels under different wave conditions is investigated using numerical method. The effects of net panel size and fixations on the tension force in twines, offset of nodes and loads at fixing points are studied. The experimental results show that the maximum twine force occurs mainly at the upper two sides of the unit net panel and increases as the size of net panel increases. The maximum node offset appears at the mid-upper part of net panel and also increases with the increase of the size of net panel. Both of the maximum twine force and the maximum node offset decrease as the fixing points number increases. However, they show little change when the number of the fixing points is over four. Regarding of the force at the fixing points, the largest force appears at the upper, then the bottom fixing points, and they are much higher than those at the other fixing points. The force increases with the increase of the size of net panel, and decreases with the increase of the fixing points number.

Key words: pile-column type net enclosure aquaculture; unit net panel; numerical simulation; fixations; wave