

固定方式对水流作用下桩柱式围网网片力学特性的影响

陈天华, 潘 昀, 冯德军, 孟 昂, 桂福坤*

(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)

摘要: 采用集中质量点法和网目群化法, 结合数值模拟技术探讨了桩柱式围网网片单元在水流作用下的力学特性, 着重分析了不同网片宽度和固定方式下网片单元的网线张力分布、节点偏移和网片系缚点受力特性。结果显示, 水流作用下, 桩柱式围网网片的最大张力主要分布于网片顶部和底部力纲的两侧, 最大张力值与网片宽度成正比; 网片的最大偏移部位主要分布于网片的上下端, 最大偏移量与网片宽度成正比; 系缚点最大受力出现在网片的顶端和底部, 且其受力在数值上均远远大于中间系缚点; 研究发现, 随着系缚点数的增加, 各系缚点的受力不断下降, 网线张力和偏移量也迅速减小; 当系缚点超过一定数量时, 网线张力和偏移量将不再显著下降, 表明存在一个临界系缚点数。本研究可为桩柱式围网工程的设计与安装提供参考。

关键词: 围网网片; 力学特性; 数值模拟; 固定方式; 水流

中图分类号: S 972.21

文献标志码: A

浅海围网养殖是一种新兴的生态养殖模式, 由于其具有养殖面积广、鱼类活动空间大、养殖环境更接近自然和养殖对象品质更接近生态等优点而备受关注。桩柱式围网是浅海生态围网养殖系统的典型模式之一, 系统主体由排桩和网片组成。以我国某海区的一种桩柱式围网工程为例, 该系统由64根桩柱等间距围成一个正八边形, 桩柱间的围网网片高15 m, 宽5 m, 网片底部深入淤泥层中, 网片两侧在桩柱上的系缚点间距为0.5 m(图1)。目前该种模式尚处于起步阶段, 仍有许多关键技术问题有待解决, 其中, 网片的固定方式是影响围网养殖系统安全的重要因素之一。在水流作用下, 不同固定方式的网片呈现不同的力学特性。因此, 探究水流作用下不同固定方式对围网网片水动力特性的影响具有实际意义。

近年来, 众多国内外学者已对水流作用下的网衣水动力特性进行了很多相关研究。Tsukrov等^[1]应用有限元法建立了网片在水流环境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。Suzuki等^[2]和Takagi等^[3-4]采用集中质量点法建立了渔网的数值模型, 模拟了矩形网衣在水流作用下的三维动态响应, 并进行了相应的物理验证性试验, 验证了模型的有效性。Lader等^[5-6]分别对柔性网片和柔性圆形网衣进行了水动力特性的数值模拟研究和模型试验研究, 分析了不同配置参数对网衣系统受力和变形的影响。詹杰民等^[7-8]通过模型试验, 讨论了影响网衣阻力特性的主要要素, 对比分析了平面和圆形网的阻力特性, 获得了网衣阻力系数的经验公式。Wan等^[9-10]基于非线性有限元法建立了网衣的数值计算模型, 对平面网的平衡状态和张力分布进行了数值模拟。李玉成等^[11]通过物理模型试验得到了平面无结节网衣的水阻力系数的变化规律和系数计算的经验公式。叶卫富^[12]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。

综上分析, 在网箱、渔具等养殖设施领域的网衣水动力特性研究已较为广泛, 而桩柱式

收稿日期: 2016-10-20 修回日期: 2017-04-22

资助项目: 国家自然科学基金(31602205); 国家海洋局公益专项(201505025-2); 浙江省自然科学基金(LQ18E090005); 舟山市海洋专项(2017C11048)

通信作者: 桂福坤, E-mail: gui2237@163.com

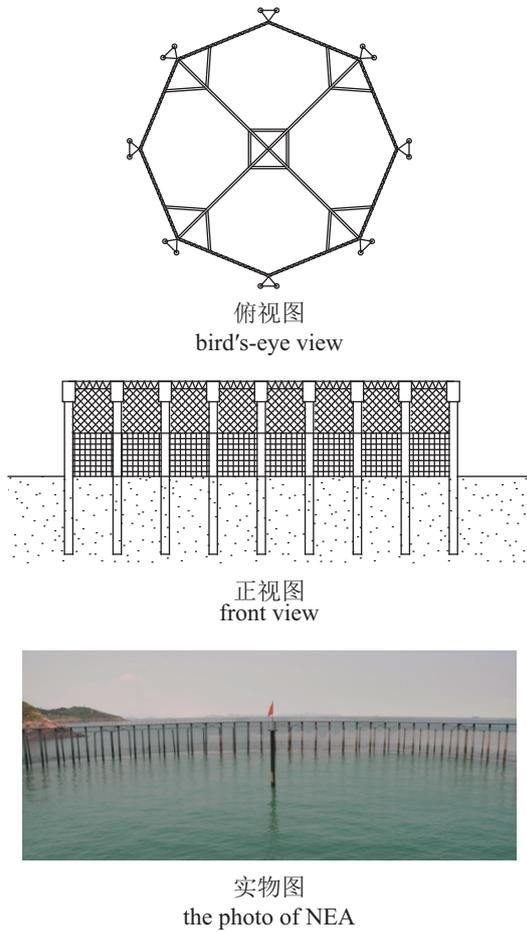


图 1 桩柱式围网养殖系统

Fig. 1 A pile-column type net enclosure aquaculture system (NEA)

围网是一种新兴的海洋养殖模式, 与深水网箱、捕捞渔具相比, 浅海围网工程的网衣系统在结构上有其特殊性, 目前针对围网网衣系统的水动力特性研究报道较少。网衣系统安全是

决定围网养殖工程安全的关键所在, 网片的网线张力、节点偏移和网衣系缚点受力是围网设计者最为关心的核心指标。本研究采用集中质量点法, 对桩柱间的围网网片建立水流作用下的网片数学模型, 分析不同尺寸和固定方式下网片的网线张力分布、节点偏移和网片系缚点受力特性, 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 材料与方 法

1.1 数值模拟方法

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水流和边界条件作用下的位移, 得到网的形状。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节点和两个目脚(图2-a)。作用于网目目脚上的重力、浮力、水阻力等, 分别集中到两端节点上, 网目目脚受到的水阻力可采用莫里森方程计算^[13-15]。

在计算水阻力时需考虑水流方向与网线夹角关系, 本文直接在整体坐标下通过向量运算建立网目目脚的受力公式^[16-18]:

$$F_{D目脚} = F_{D\xi} + F_{D\eta} + F_{D\tau} \tag{1}$$

$$\begin{cases} F_{D\xi} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D\xi} A_\xi \frac{V_R \vec{e}_\xi |V_R \vec{e}_\xi|}{2} \\ F_{D\eta} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D\eta} A_\eta \frac{V_R \vec{e}_\eta |V_R \vec{e}_\eta|}{2} \\ F_{D\tau} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D\tau} A_\tau \frac{V_R \vec{e}_\tau |V_R \vec{e}_\tau|}{2} \end{cases} \tag{2}$$

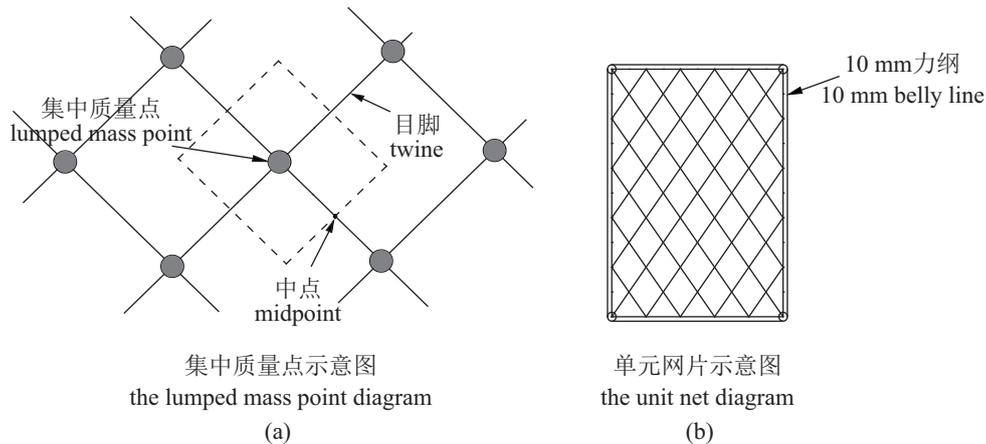


图 2 单元网片计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation model for unit net panel

式中, $F_{D_{目脚}}$ 为网线目脚受到的水阻力矢量; $F_{D_{\xi}}$, $F_{D_{\eta}}$ 和 $F_{D_{\tau}}$ 为水阻力 F_D 在局部坐标系上的3个分量; ρ_w 表示水体的密度; V_R 表示水质点的相对速度矢量; A_{ξ} , A_{η} 和 A_{τ} 为目脚在局部坐标系3个方向上的投影面积; $C_{D_{\xi}}$, $C_{D_{\eta}}$ 和 $C_{D_{\tau}}$ 为局部坐标系3个方向上的水阻力系数; \vec{e}_{ξ} , \vec{e}_{η} , \vec{e}_{τ} 为局部坐标系上3个轴的单位向量。

在整体坐标系下将集中质量点所包含的节点和目脚的受力进行累加, 并利用牛顿第二定律建立质点运动方程:

$$\begin{cases} (M + \Delta M) a = T + F_D + W + B \\ \Delta M = \rho_w \nabla C_m \\ T = d^2 C_1 e^{C_2}, \quad e = \frac{l - l_0}{l} \\ F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D A \frac{V_R |V_R|}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, ΔM 、 M 分别表示集中质量点的附加质量和质量, a 表示集中质量点的加速度矢量, T 表示集中质量点所受到的张力矢量, F_D 表示集中质量点受到的水阻力矢量, W 表示质点受到的重力矢量, B 表示质点受到的浮力矢量, C_D 表示水阻力系数, A 表示构件沿水流方向的投影面积; ∇ 表示构件的体积, 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。

运动方程为典型的二阶偏微分方程, 可采用四阶龙格库塔法进行求解。计算时, 首先根据网片的当前状态, 计算网线上的水阻力以及网线变形所产生的张力, 然后基于二阶偏微分方程求出质点的加速度, 再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

验证性试验在浙江海洋大学拖曳水槽中进行。水槽底面平坦, 全长130 m, 宽6 m, 水深3.44 m。水槽轨道上配置拖车, 拖车最大速度可达6.5 m/s(图3)。试验采用PE无结节网片, 网片宽64 cm、高20 cm, 网线直径 $d=1.5$ mm, 网目大小 $2a=9$ mm, 缩结系数0.707, 网目数6912, 网线填充率为0.174。试验网片布置于专用受力采集装置上(图4), 该装置为全钢制结构, 浸水部分为流线型支架, 刚度高, 可避免结构共振。总力传感器安装于装置顶部, 用于采集网衣的水阻力, 网片四边用细线固定于位于装置底部的不锈钢框架上, 网衣框架的顶部位于水面以下0.2 m处。整个采集装置架设于水槽拖车上, 通过控制拖车速度产生稳定的水流。

本研究中的物理试验为1:1模型, 即试验中的网片尺寸和水流条件未进行模型缩放, 数值模拟分析时的计算条件也保持一致。图5为各流速下网片所受水阻力的试验值与模拟值比较。结果显示, 在不同流速下, 网片水阻力的模拟值与试验值吻合较好, 说明本研究所建立的数学模型和采用的计算方法是合理的。

1.3 计算参数

围网所用网衣有多种材质, 大多采用PE网和超高分子量纤维网, 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。本研究取桩柱式围网中两根排桩之间的单元网片, 重点研究水流对网片不同部位受力分布特性的影

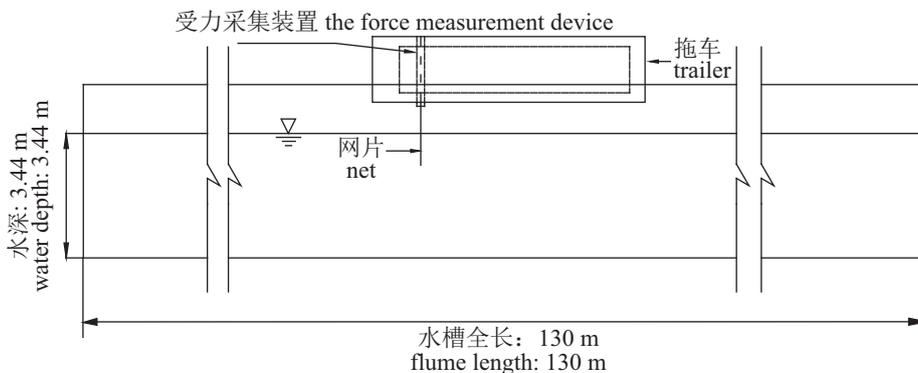


图3 试验布置图

Fig. 3 Sketch of the experimental set-up

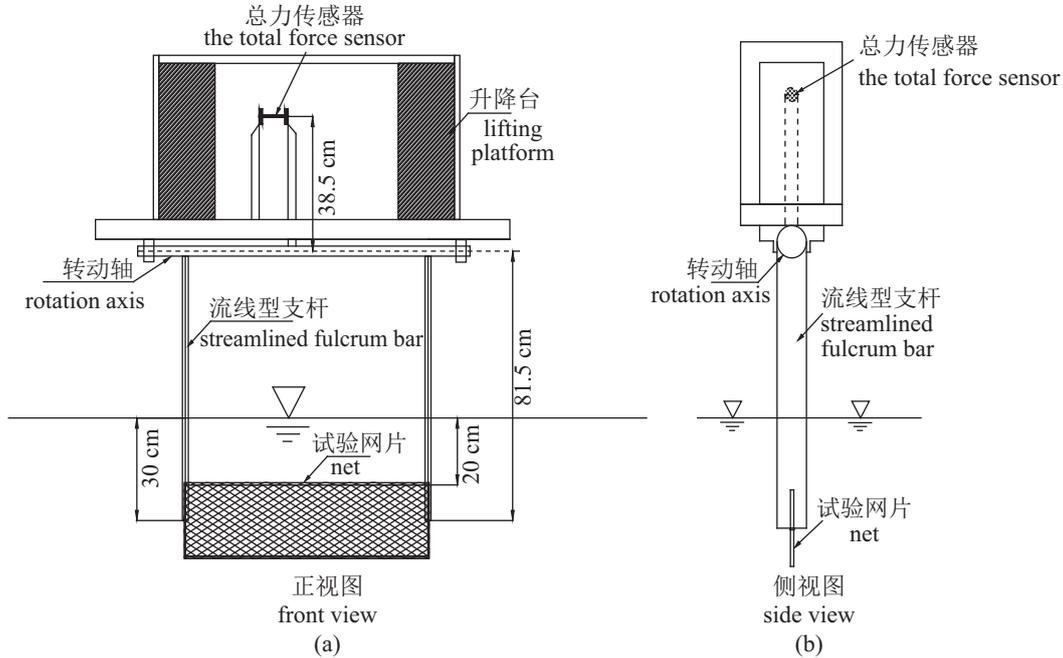


图4 受力采集装置示意图

Fig. 4 Sketch of the force measurement device

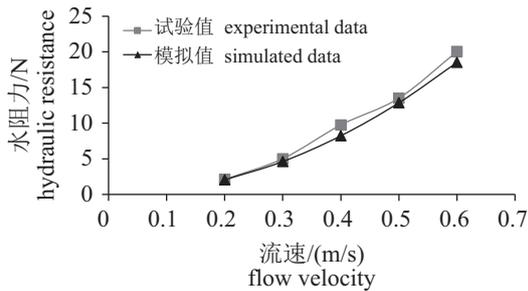


图5 网片水阻力模拟值与试验值对比

Fig. 5 Comparison of the resistance on the net between experimental and simulated data

响, 采用的网片具体参数见表1。研究时, 网片完全浸没于水面以下, 网片顶部距离水面1 m。计算时水动力系数的取值参照Bessonneau^[19]的研究成果(表2)。研究主要关注网片尺寸和系缚方式(固定方式)对围网网片受力和形状的影响, 因此水流要素仅给定一种情况, 各模拟试验组设计具体见表3。网片尺寸指网片的宽×高; 系缚方式主要指单元网片在围网桩柱上的系缚点数量(图6)。网片四边加直径10 mm力纲(图2-b)。由于计算中网片节点数较多, 为减少计算时间提高计算效率, 采用网目群化方法^[19-20]将相邻64个网目合并为一个等效大网目。网目群化后, 13点系缚成为完全系缚状态, 即计算模型中, 每个

表1 网片参数

Tab. 1 Net parameters

材质 material	网目大 小 (2a)/mm mesh size	网线直径/mm twine diameter	缩结系数 shrinkage coefficient		材料弹性系数 elastic coefficient	
			水平 horizontal	垂直 vertical	C ₁	C ₂
PE	80	3	0.66	0.75	345.37×10 ⁶	1.0121

表2 水动力系数

Tab. 2 Hydrodynamic coefficient

水动力系数 hydrodynamic coefficient	节点 node	目脚 twine		
		ζ	η	τ
C _D	1.6	1.8	1.8	0.1
C _m	1.5	2	2	1

边侧节点均被约束。

2 结果

2.1 网片尺寸对围网网片水动力特性的影响

取图6中5点系缚方式为研究对象, 重点关注5种不同宽度的网片单元在水流作用下的网线最大张力、节点最大偏移和网片系缚点最大受力特性。节点最大偏移指的是网衣变形后, 节点到网片初始平面的最大垂向偏移距离。

表3 数值模拟试验组设计

Tab. 3 Numerical simulation case design

流速/(m/s) flow velocity	冲角/(°) attack angle	网片尺寸/m net size	系缚点数/个 number of fixing points	系缚间距/m spacing of fixing points	网目数/个 number of mesh
0.75	90	1×6	5	1.5	3073
0.75	90	2×6	5	1.5	7680
0.75	90	4×6	5	1.5	13 824
0.75	90	5×6	5	1.5	18 432
0.75	90	3×6	5	1.5	10 752
0.75	90	3×6	2	6	10 752
0.75	90	3×6	3	3	10 752
0.75	90	3×6	4	2	10 752
0.75	90	3×6	7	1	10 752
0.75	90	3×6	13	0	10 752

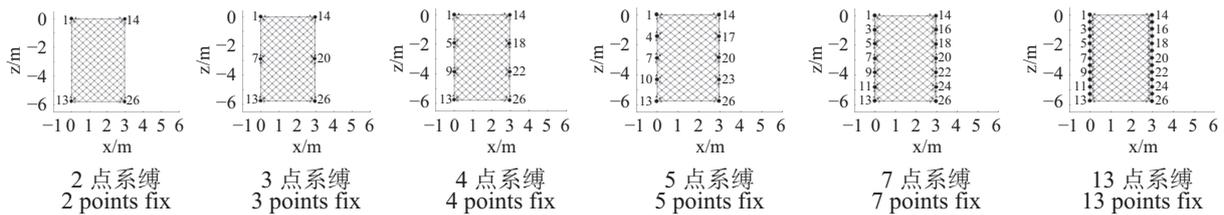


图6 网片系缚方式示意图

Fig. 6 Sketch of net panel with different fixing modes

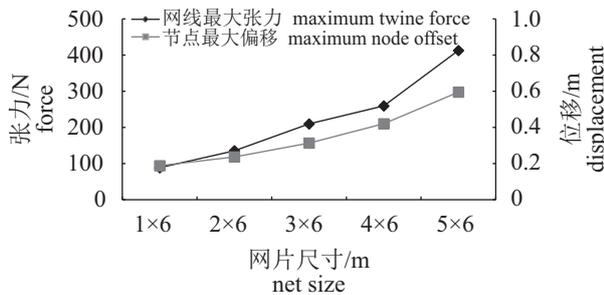


图7 网线最大张力值和节点最大偏移量随网片尺寸的变化

Fig. 7 Relationship between the maximum twine force/node offset and net size

2.2 系缚方式对围网网片水动力特性的影响

在给定网片尺寸(宽×高=3 m×6 m)条件下,研究了系缚方式(系缚点数量)对围网网片的网线最大张力、节点最大偏移和网片系缚点最大受力的影响。

最大网线张力与节点偏移 当网片尺寸一定时,增加网片两侧的系缚点数量有助于减

最大网线张力与节点偏移 网线最大张力和节点最大偏移均随网片宽度的增大而增大(图7)。图8中的加粗线为网线最大张力在网片上的分布位置,随着网片宽度的增加,网线最大张力由网片两侧过渡转移到网片上下端两侧位置。图8中星号指出了网片发生偏移最大的部位出现在网片的中线位置。

系缚点最大受力特性 图9为网片在围网桩柱上的5个系缚点(系缚点编号1、4、7、10、13,图6)的最大受力值与网片尺寸的关系。网片首尾两端系缚点(1号和13号)的受力远大于中间系缚点的受力,且首尾两端系缚点最大受力值随网片宽度的增大迅速增大,而中间系缚点(4、7、10号)的最大受力随网片宽度的变化相对较小(图9)。

小网线的最大张力,使得网片更牢固;系缚点越多,网片被约束的程度越大,从而有助于减小节点的最大偏移量(图10)。但是当系缚点超过一定数量(本研究为4点)后,网片的约束程度达到饱和,网线最大张力和节点最大偏移将不再出现显著的降低。图11中的加粗线为网线最大张力在网片的分布位置。2点系缚时网线最大张力在网片两侧首尾端,4点系缚时网线最大张力在网片的四个外框角上,其他系缚方式网线最大张力在网片上下端两侧位置(图11)。图11中星号指出了网片偏移最大的部位,随着系缚点数的增加,最大偏移位置从网片中间开始发生上下分离,当系缚点达到一定数量(本研究为4点)后,最大偏移位置不再发生显著的变化。

系缚点最大受力特性 网片顶部和底部的系缚点最大受力在数值上均远远大于中间系缚点。随着系缚点数的增加,整体系缚点最大受力逐渐减小(图12)。

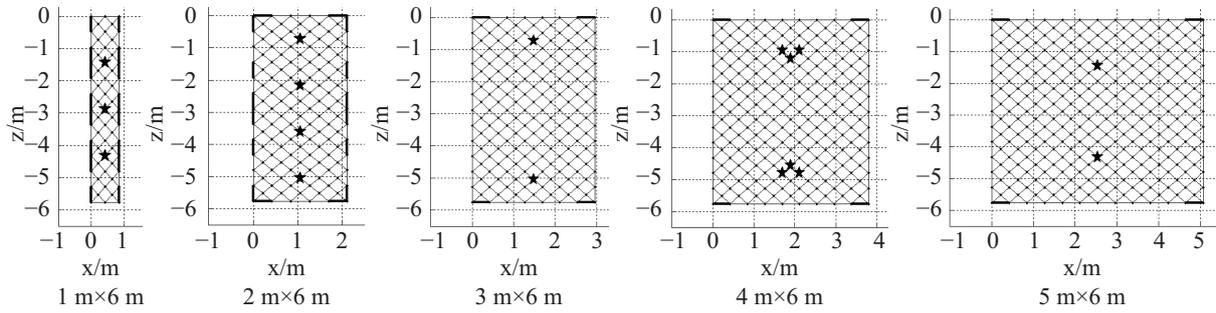


图 8 网线张力最大的部位(加粗线)和节点偏移最大的部位(五角星)

Fig. 8 The positions of the maximum twine force (bold line) and the maximum node offset (pentagram)

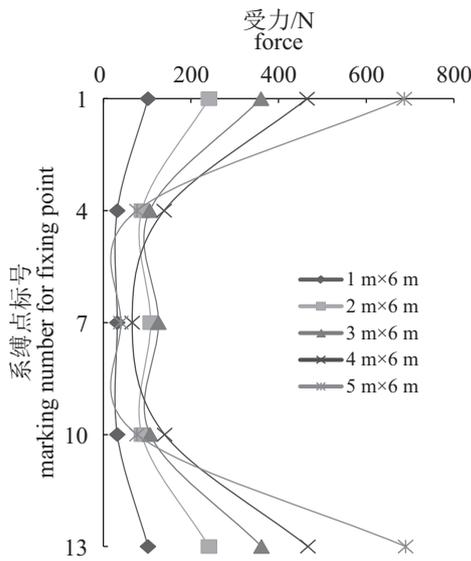


图 9 系缚点受力与网片尺寸的关系

Fig. 9 Relationship between force on fixing points and net size

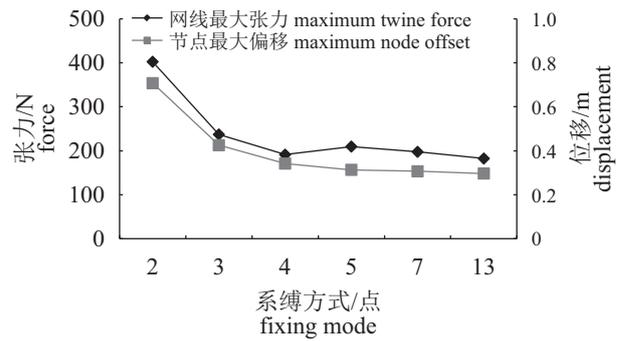


图 10 网线最大张力值和节点最大偏移量随系缚方式的变化

Fig. 10 Relationship between the maximum twine force/node offset and fixing mode

3 讨论

3.1 网片尺寸对围网网片水动力特性的影响

桩柱式围网主要由排桩和网片组成, 采用的网片宽度一般为3~5 m。在水流作用下, 不同

尺寸的网片受力分布特性各异。本研究发现, 同一固定方式下, 网片尺寸越大其承受的水阻力越大, 相应的网片形变也越大。直观分析, 网线最大张力和节点最大偏移均与网片宽度成正比的计算结果是合理的。尺寸为1 m×6 m的网片因宽度较小, 其受到的水阻力主要由网片两侧力纲来承担, 导致网线最大张力分布在网片两侧力纲上与系缚点相连的位置(图6)。随着网片宽度的增加, 网片顶部和底部力纲承受的水

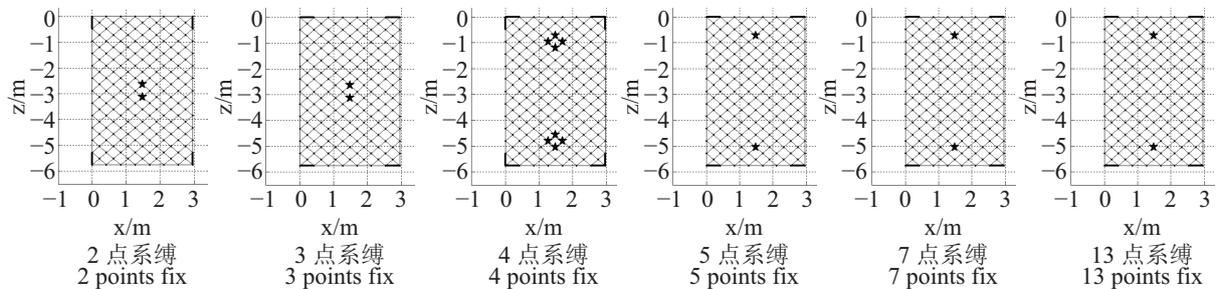


图 11 网线张力最大的部位(加粗线)和节点偏移最大的部位(五角星)

Fig. 11 The positions of the maximum twine force (bold lines) and the maximum node offset (pentagrams)

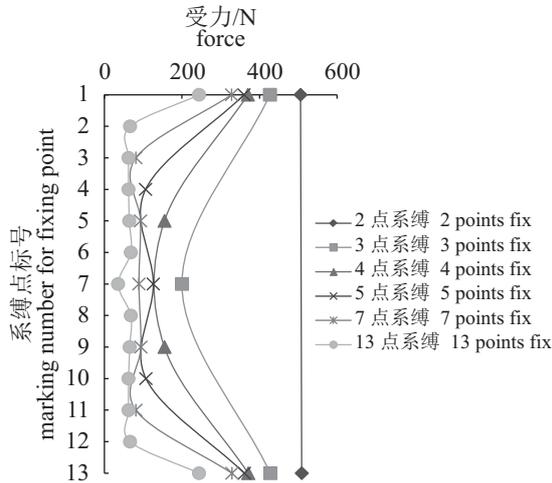


图 12 系缚点受力随系缚方式的变化

Fig. 12 Relationship between force on fixing points and fixing modes

阻力以及内部网线传递到顶部和底部力纲的张力也不断增加, 网线最大张力的分布从两侧力纲逐渐过渡到网片上下端两侧位置, 其共同特征为网线最大张力都分布在与系缚点相连处。网片四边装配有加强纲绳, 在水流作用下, 网片受力将主要由这四边纲绳来支撑, 而所有网片的网线最大张力都分布在力纲上, 表明对网片四边进行加强处理是非常必要的。节点最大偏移位置位于网片的中线处, 由于网片尺寸不同导致网片内部结构张力分布各异, 因此节点最大偏移在网片上的具体位置不同。实际围网工程施工中, 在网片的最大偏移量以内尽量不要出现其他结构物, 避免网线因磨损而断裂。研究发现, 网片顶部和底部系缚点对中间系缚点存在一种保护作用, 网片系缚点受力整体呈现首尾两端大中间小的现象, 而且随着网片宽度的增加, 网片首尾系缚点受力的影响较大, 而对中间系缚点的影响较小。因此, 在围网工程施工中, 为了确保围网系统的安全, 对网片系缚点进行加固时, 应特别对网片顶部和底部两端的系缚点进行强化处理。此外, 网片尺寸的选择还关系到桩柱的数量, 根据以上研究结果, 网片宽度越大, 网片首尾系缚点的最大受力越大, 即对桩柱的拉力也会越大, 桩柱数量过少容易导致因网片对桩柱拉力过大而发生桩柱断裂, 桩柱数量过多又会增加施工量和施工成本, 所以具体需视实际情况而定。

3.2 系缚方式对围网网片水动力特性的影响

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对称现象, 再次证明了对网片顶部和底部两端的系缚点进行特殊加强的必要性。网线最大张力和节点最大偏移均随网片系缚点数的增加先迅速减小后趋于稳定, 表明增加一定数量的系缚点能有效降低整个网片的网线最大张力和节点最大偏移, 从而降低网线断裂的风险。同时, 随着系缚点数的增加, 网片首尾系缚点的最大受力也不断下降, 表明系缚点数的增加能够分担首尾两端系缚点的受力。但是, 当系缚点达到一定数量后, 网线最大张力和节点最大偏移不再显著下降, 此时进一步增加系缚点数反而徒增了围网工程的施工量。因此, 围网网片存在一个临界系缚点数量, 本研究中的临界系缚点数量为4~5个, 对于不同网片尺度, 需要具体分析。研究同时发现, 对于同一尺寸的网片(本研究为3 m×6 m), 网线最大张力分布的位置不会随系缚点数的增加而发生显著地改变, 始终都在网片的4个外框角上, 再次证明对网片四边做加强处理的重要性。受固定方式的影响, 网片出现最大偏移的位置并非固定, 但一般位于网片中线的中心点或上下部位(图11)。随系缚点数的增加, 网片内部张力分布趋于稳定, 网片顶部和底部力纲未受约束, 而两侧力纲则有系缚点约束, 导致在水流作用下网片偏移最大的位置稳定位于网片的上下部。实际围网工程施工中, 在网片四周的最大偏移量以内尽量不要出现其他结构物, 避免网线因磨损而断裂。

4 结论

以桩柱式围网单元网片(两根桩柱之间的网片单元)为对象, 研究了一种典型水流条件下, 网片尺寸和网片系缚方式对网片单元水动力特性的影响, 研究得到以下基本结论:

①网片尺寸对网片结构单元的受力和变形特性有着显著的影响。网片单元中的网线最大张力和节点最大偏移均随网片宽度的增大而增大, 网线最大张力一般分布于网片顶端和底端两侧, 节点最大偏移分布于网片单元的中线位置。实际应用时, 建议强化网片顶部和底部力纲的设计考虑。

②水流条件下,网片系缚点最大受力位于网片顶部和底端系缚点处,中间系缚点受力均远小于首尾两端系缚点受力。网片首尾两端系缚点受力受网片尺寸影响较大,中间系缚点受影响相对较小。实际应用时,建议强化网片顶部和底部系缚点的设计考虑。

③增加网片单元两侧的系缚点数量,有利于降低系缚点的受力。但对网片单元中的网线受力和节点偏移而言,当系缚点数量增至4个以上时,网线最大张力和节点最大偏移不再显著下降。因此从这一角度分析,应存在某一临界系缚点数量,本研究条件下,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。

以上研究结果可为桩柱式围网养殖工程的设计和施工提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Suzuki K, Takagi T, Shimizu T, *et al.* Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets[J]. *Fisheries Science*, 2003, 69(4): 695-705.
- [3] Takagi T, Suzuki K, Hiraishi T. Development of the numerical simulation method of dynamic fishing net shape[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2002, 68(3): 320-326.
- [4] Takagi T, Suzuki K, Hiraishi T. Modeling of net for calculation method of dynamic fishing net shape[J]. *Fisheries Science*, 2002, 68(S2): 1857-1860.
- [5] Lader P F, Enerhaug B. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(1): 79-84.
- [6] Lader P F, Fredheim A. Dynamic properties of a flexible net sheet in waves and current—a numerical approach[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(3): 228-238.
- [7] 詹杰民, 胡由展, 赵陶, 等. 渔网水动力试验研究及分析[J]. *海洋工程*, 2002, 20(2): 49-53, 59.
- Zhan J M, Hu Y Z, Zhao T, *et al.* Hydrodynamic experiment and analysis of fishing net[J]. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(2): 49-53, 59(in Chinese).
- [8] Zhan J M, Jia X P, Li Y S, *et al.* Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(1): 91-101.
- [9] Wan R, Hu F X, Tokai T. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets[J]. *Fisheries Science*, 2002, 68(4): 815-823.
- [10] Wan R, Huang W Q, Song X F, *et al.* Statics of a gillnet placed in a uniform current[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(14-15): 1725-1740.
- [11] 李玉成, 桂福坤. 平面无结节网衣水阻力系数的试验研究[J]. *海洋学报*, 2006, 28(5): 145-151.
- Li Y C, Gui F K. Study on the drag coefficient of nodeless plane fishing net[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(5): 145-151(in Chinese).
- [12] 叶卫富. 浅海养殖围网设施水动力性能的初步研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2012.
- Ye W F. Preliminary study on the characteristics of hydrodynamics on the aquaculture seine[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2012 (in Chinese).
- [13] 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 Y P. Numerical investigation on hydrodynamic behavior of deep-water gravity cage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007 (in Chinese).
- [14] 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 Y P, Li Y C, Dong G H, *et al.* Tension distribution of gravity cage net in steady current[J]. *Fishery Modernization*, 2008, 35(6): 5-8, 63(in Chinese).
- [15] 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 X F. Numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of the square net cage for flatfish[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [16] 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 X H, Guo G X, Hu Y, *et al.* Numerical simulation of dynamic process of cylinder nets in current[J]. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(3): 56-61(in Chinese).
- [17] 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 X H, Guo G X, Tao Q Y, *et al.* Numerical simu-

- lation of the force and deformation of submerged plane nets in current[J]. *South China Fisheries Science*, 2009, 5(3): 23-29(in Chinese).
- [18] 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 X H, Guo G X, Hu Y, *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).
- [19] Bessonneau J S, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls)[J]. *Ocean Engineering*, 1998, 25(7): 563-583.
- [20] 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*, 2007, 22(3): 267-272. Su W, Zhan J M. Application of an equivalent method to model dynamic properties of fish net[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 22(3): 267-272(in Chinese).

Effect on hydrodynamics of unit net of a column-type net enclosure aquaculture engineering in current by fixations

CHEN Tianhua , PAN Yun , FENG Dejun , MENG Ang , GUI Fukun *

(National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The column-type net enclosure aquaculture (NEA) is a new ecological ocean aquaculture mode. It is mainly composed of piles and net panels. More and more attention has been paid to NEA, because it is a new aquaculture mode which has big aquaculture area, large space for fishes, more natural environment, and more ecological high quality of food. NEA is still in its developing stage, many kinds of technical problems still need to be solved. The net system is regarded as the key component which controls the safety of the whole NEA system. In this paper, based on lumped mass point and clustering mesh method, the mechanical properties of unit net of a column-type NEA engineering in current were studied using computer numerical simulation. The distribution characters of tension force in twines, the offset characters of net nodes and the load characters at fixing points were investigated. The effect of net width and fixing mode on the net hydrodynamics was discussed as well. The results showed that the maximum tension force of unit net of the pile-column type net enclosure in current mainly occurred at the both sides of the top and bottom belly lines of net panel, and was proportional to the net width. The maximum offset of the net panel mainly appeared at the upper and lower positions, and was proportional to the net width as well. Regarding the force on fixing points, the largest forces on the top and bottom fixing points of net panel were observed in this study and they were much higher than that of the middle fixing points. The research found that the forces at the fixing points decreased with the increasing of the number of fixing points, and the maximum tension force in twine and the maximum offset of net nodes declined rapidly too. When the number of fixing points exceeds a certain number, the maximum tension force and offset will no longer drop significantly. Thus, there was a critical number of fixing points, which was found to be 4 or 5 in this paper. The results achieved in this paper pointed out the potential dangerous positions of the net panel and showed the rules of influence on the force and deformation of net panel. The results may give guidance to the design and installation of the column-type NEA engineering.

Key words: net panel enclosure; mechanical properties; numerical simulation; fixing mode; current

Corresponding author: GUI Fukun. E-mail: gui2237@163.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31602205); Public Special Subject of State Oceanic Administration (201505025-2); Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (LQ18E090005); Marine Special Subject of Zhoushan (2017C11048)