

圆形网衣在水流作用下的运动变形特性

黄小华, 郭根喜, 胡昱, 陶启友

(中国水产科学研究院 南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 研究网衣在水流作用下的运动变形是深入了解网箱耐流特性的关键。本研究基于集中质量点法,建立了圆形网衣在水流作用下的数值计算模型,并利用前人的试验结果对数值模型进行了验证。验证结果表明,无论是网衣的变形还是受力情况,模拟结果都与试验结果吻合良好。在此基础上,针对实际应用中的圆形网衣,在不同配重($GW_1=400\text{ kg}$ 、 $GW_2=800\text{ kg}$)和流速($U=0.3 \sim 0.9\text{ m/s}$)条件下,对网衣变形、网衣底端前后点位移、网衣底端倾角进行了数值模拟,探讨了流速、配重大小对网衣运动变形特性的影响。结果表明,水流速度的增大会加剧网衣的变形,在配重 GW_1 、流速 $U=0.75\text{ m/s}$ 时,网衣容积损失率达到 50% 以上。网衣底端前点的水平位移大于后点的水平位移,前点的垂直位移则小于后点的垂直位移,随着流速的增大,网衣底端前后点的位移差异将更为明显。当配重增加时,网衣底端位移、倾角以及网衣容积损失率可相应减小,网衣变形得到一定改善。数值模拟证明,本研究所建立的数值计算模式具有较好的稳定性和解的收敛性,可为下一步波浪、流联合作用下的整体网箱模拟奠定良好的理论基础。[中国水产科学, 2010, 17(2): 312-319]

关键词: 圆形网衣; 水流; 运动变形; 集中质量法; 数值模拟

中图分类号: S91

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2010)02-0312-08

深水网箱主要是以高密度聚乙烯材料(HDPE)制成,可以在相对较深海域使用的养殖网箱,是一种高投入、高产出、高风险的养殖设施。深水网箱养殖具有拓展养殖海域、扩大养殖容量、提高生产效率、改进鱼类品质等方面的优越性。然而深水区浪高、流急的复杂海况,使得网箱系统必须有抵抗大浪、强流的能力,来进一步保障网箱养殖的正常生产。作为深水养殖网箱的重要组成部分,网衣是整个网箱系统中最为关键的部件之一,不仅可以为养殖鱼类提供生长空间,还可以防止鱼类逃逸和敌害侵袭。但网衣柔软的特点使得网衣在外荷载作用下极易发生运动变形,在流速较大时会加大网箱的容积损失,从而影响到养殖鱼类的正常生长。因此,研究网衣在水流作用下的运动变形,对于深入了解网箱的耐流特性以及为网箱设置区域的选择作为参考具有重

要的现实意义。

近年来,有关网衣的研究在国内外得到了较多的关注,众多学者对水流作用下网衣水动力特性已进行了不少的相关研究^[1-12],其研究成果多数都集中在平面网衣方面或圆形网衣模型试验方面,而对于圆形网衣水动力特性的数值模拟研究目前国内还相对较少,所见文献报道中, Li 等^[13]和 Zhao 等^[14]考虑配重方式、网箱径高比和网目类型的影响,对圆形网衣的受力变形进行了数值模拟研究。

在此之前的研究中,已采用集中质量法建立了水流作用下平面网衣的数值计算模型,且数值模拟结果与试验结果比较接近^[15]。本研究正是在平面网衣研究成果的基础上,采用集中质量法^[16]建立圆形网衣的数值计算模型,并利用 Lader 和 Enerhaug^[5]的试验结果对本数值模型的正确性和有效性进行了

收稿日期: 2009-05-06; 修订日期: 2009-10-13.

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA100302, 2006AA100301); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD09A14); 广东省科技计划项目(2008B021000042); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目(2007YD042010YD09)。

作者简介: 黄小华(1982-),男,助理研究员,从事渔业设施工程技术研究. E-mail: huangx-hua@163.com

通讯作者: 郭根喜,研究员. E-mail: scsggx@21cn.com

验证。然后针对实际应用中的圆形网衣,采用该数学模型,通过数值模拟方法对不同条件下网衣变形、网衣底端前后点位移、网衣底端倾角进行了数值计算,旨在进一步探讨流速、配重大小对圆形网衣运动变形特性的影响。

1 数值计算模型

图1为网衣模型示意图,集中质量点是设于每个网目目脚的两端,将每个目脚看作为一个构件,并且假定构件之间的单元结点为无摩擦可自由旋转的铰接。因此,柔软的网衣便可通过众多质点和构件组成的离散模型来模拟。

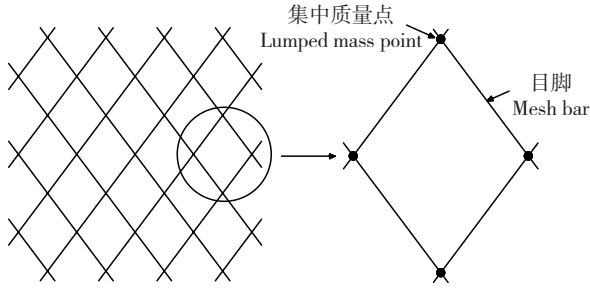


图1 网衣模型示意图
Fig. 1 Modeling for the mesh

1.1 网衣结构受力分析

网衣结构在水流作用下的受力由重力、浮力、网线张力和水流力组成。

(1) 重力和浮力

$$P = (\rho - \rho_w) \frac{\pi d^2}{4} l g \quad (1)$$

式中: P 为重力和浮力的合力, ρ 为网衣材料密度, ρ_w 为水的密度, d 为构件直径(m), l 为构件长度(m)。

(2) 网线张力

$$T_{ij} = \begin{cases} AC_1 \left(\frac{l_{ij} - l_0}{l_0} \right)^{C_2} & l_{ij} < l_0 \\ 0 & l_{ij} \leq l_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (j=1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中: l_0 为构件原始长度, l_{ij} 为变形后长度, A 为构件截面积, C_1 、 C_2 为构件弹性系数。对于弹性系数 C_1 、 C_2 的选取,可根据网线的材质不同,参照 Gerhard^[17] 编著的《纤维绳索》中的数据拟合而得。

(3) 水流力

网衣构件上的水流力包括速度力和惯性力两部分,可利用 Morison 公式计算。图2为水质点与构件相对速度示意图, j 构件中点处水质点速度 $\vec{U}$, 构件速度 $\vec{U}_s$, 两者相对速度为 $\vec{U}_R$, 则 j 构件水流速度力可表示为:

$$F_{Dj\tau} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D\tau} S |\vec{U}_R \cdot \vec{e}_\tau|^2 \vec{e}_\tau \quad (4a)$$

$$F_{Djn} = \frac{1}{2} \rho_w C_{Dn} S |\vec{U}_R \cdot \vec{e}_n|^2 \vec{e}_n \quad (4b)$$

其中: S 为构件投影面积, $C_{D\tau}$ 、 C_{Dn} 是速度力系数,为了简化计算,本实验参照 Bessonneau 和 Marichal^[18] 的研究成果将速度力系数取为: $C_{D\tau}=0.1$, $C_{Dn}=1.3$ 。 $\vec{e}_\tau$ 和 $\vec{e}_n$ 为构件切向和法向的单位向量,可根据下式计算求得:

$$\vec{e}_\tau = \vec{e}_j \quad (5a)$$

$$\vec{e}_n = (\vec{e}_\tau \times \vec{e}_{UR}) \times \vec{e}_\tau \quad (5b)$$

其中 $\vec{e}_{UR} = \frac{\vec{U}_R}{|\vec{U}_R|}$ 为相对速度的单位向量。

惯性力计算表达式可写为:

$$F_I = \rho_w \nabla C_M \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} - \rho_w \nabla k_m \frac{\partial \vec{U}_s}{\partial t} \quad (6)$$

式中: $C_M=1+k_m$ 为惯性力系数, k_m 为附加质量系数, ∇ 为构件体积, U 为流场速度, $\vec{U}_s$ 为构件自身速度。

1.2 建立运动方程

在整体坐标系下将各质点相关构件的受力进行累加并将其分配到质点上(图3),再利用牛顿第二定律即可求出网衣各集中质量点的运动方程式,图中的 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为质点 i 与相邻4个集中质量点之间的网线张力, F_D 、 F_I 分别为水流力中的速度力和惯性力。

$$m_i \ddot{\vec{X}}_i = \sum_{j=1}^N (F_{Dij} + F_{Iij} + T_{ij}) \quad (7a)$$

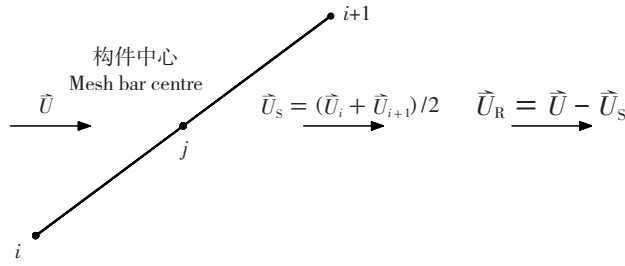


图2 水质点与构件相对速度示意图

Fig. 2 Relative velocity of the water particle and the net segment

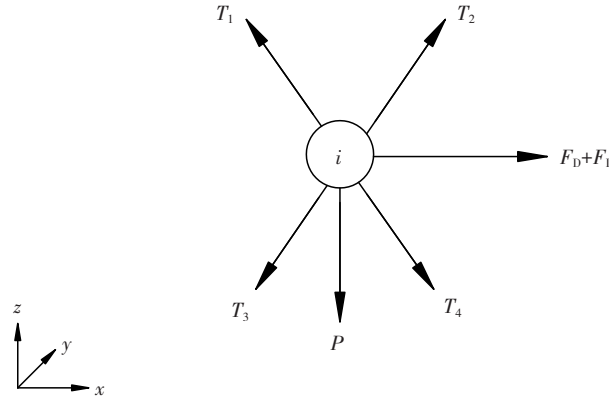


图3 网衣集中质量点计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the lumped mass point for the calculations for mesh model

$$m_i \ddot{Y}_i = \sum_{j=1}^N (F_{Dij} + F_{Iij} + T_{ij}) \quad (7b)$$

$$m_i \ddot{Z}_i = \sum_{j=1}^N (F_{DZj} + F_{IZj} + P_j + T_{Zj}) \quad (7c)$$

上式中: N 为质点相关构件的数量, $\ddot{X}_i$ 、 $\ddot{Y}_i$ 、 $\ddot{Z}_i$ 为质点的加速度。

2 模型验证

为了验证计算模型的正确性和有效性,针对 Lader 和 Enerhaug^[5] 的试验情况进行数值模拟,并将模拟结果与试验结果进行比较。

Lader 和 Enerhaug^[5] 的试验网衣是由 2 块长 125 目、宽 81 目的矩形网片对接拼成,材质为尼龙,正方形网目,目脚长度 16 mm,网线直径 1.8 mm。圆柱体网衣直径为 1.435 m,高度为 1.44 m。采用的试验流速为 0.13 m/s、0.21 m/s、0.26 m/s、0.33 m/s、0.52 m/s,配重为 16 个由混凝土制作的沉子,每个沉

子质量 400 g,沿圆周方向均匀布置在网衣的底端。

图 4 为流速 $U=0.21$ m/s、0.33 m/s 和 0.52 m/s 时网衣达到稳定状态后变形的模拟结果和试验结果,表 1 中的容积损失率定义为 $1-V_p/V_{p0}$,其中 V_p 为网衣变形后的容积, V_{p0} 为无水流作用时的初始容积。从中可以看出,在各种不同的流速条件下,无论是网衣的变形还是受力情况,数值模拟结果与试验结果都是十分接近的,误差值基本上都在 10% 以内,说明了本研究所建立的数学模型和应用的计算方法是合理的。

3 计算结果及分析

3.1 计算参数

圆形网衣初始形状如图 5 所示,图中的 A、B 点为网衣底端的前后点,其初始坐标为 $(-6.37, 0, -9.6)$ 和 $(6.37, 0, -9.6)$ 。网衣顶端固定,网衣底端处设有一根长为 40 m 的金属钢圈作为配重。圆形网衣

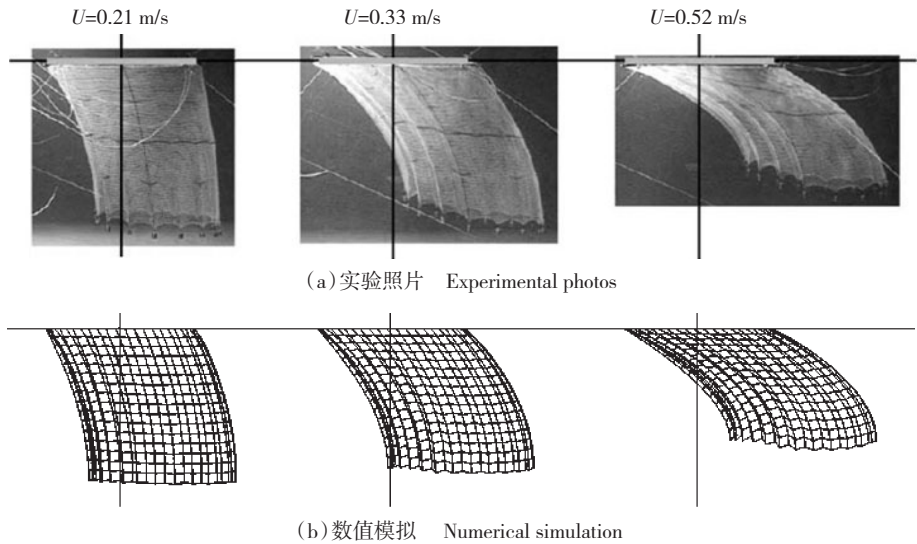


图4 网衣变形的模拟结果和试验结果

Fig. 4 Net deformation between experimental and simulated results

表1 不同流速条件下的计算和试验结果比较

Tab. 1 Comparison of volume reduction rate and drag force on the net between calculated and experimental results

流速 / (m · s ⁻¹) Velocity	容积损失率 Volume reduction rate			水阻力 / N Drag force		
	试验值 / % Experiment	计算值 / % Calculation	绝对误差 / % Absolute error	试验值 Experiment	计算值 Calculation	相对误差 / % Relative error
0.13	1	1	0	12.02	12.14	1
0.21	5	4	1	21.97	23.97	9
0.26	11	8	3	34.96	35.37	1
0.33	24	19	5	49.79	44.39	11
0.52	36	34	2	88.01	82.03	7

的实际尺寸参数为：网衣周长 40 m，网高 9.6 m，网目大小 $2a=75\text{ mm}$ ，网线直径 $d=3\text{ mm}$ ，网衣材质为 PE，横向网目数为 896 目，缩结系数 0.6；纵向网目数为 160 目，缩结系数 0.8。在数值计算中，水流方向为 x 方向，海水的密度 $\rho_w=1\,030\text{ kg/m}^3$ ，重力加速度 $g=9.81\text{ m/s}^2$ ，附加质量系数 $k_m=1.0$ 。配重大小为 $GW_1=400\text{ kg}$ 与 $GW_2=800\text{ kg}$ 两种，水流速度取 $U=0.3\text{ m/s}$ 、 0.45 m/s 、 0.6 m/s 、 0.75 m/s 、 0.9 m/s 。

由于计算中的网衣结点数太多(287 616 个)，如果采用直接模拟，以现有的计算机条件将很难做到。为了解决这一问题，本研究采用网目群化方法^[18-19]将相邻 16×16 个网目合并为 1 个等效大网目(结点数减少到 1 176 个)，以便减少计算时间提高计算效率。

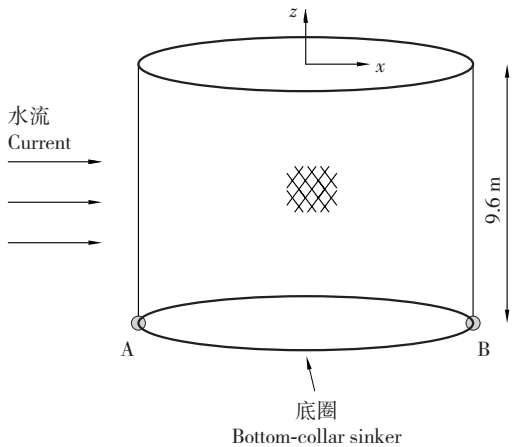


图5 圆形网衣初始形状示意图

Fig.5 Sketch of the cylinder net with diamond mesh

3.2 网衣变形特性

不同配重和流速条件下网衣达到稳定状态后的变形模拟结果见图 6 和表 2。可以直观的看出,水流速度的增大会加剧网衣的变形,尤其以流速大于 0.6 m/s 时表现较为明显。以配重方案 GW_1 为例,网衣容积损失率从流速 $U=0.3$ m/s 时的 14% 递增到流速 $U=0.9$ m/s 时的 61%,后者约为前者的 4.4 倍。

而在流速 $U=0.75$ m/s 时,网衣容积损失率就达到了 50% 以上,网衣变形较为严重。

当网衣底端配重增加时,网衣容积损失率可相应减小,网衣变形得到明显改善。以流速 $U=0.6$ m/s 为例,网衣容积损失率从 $GW_1=400$ kg 时的 41% 降低为 $GW_2=800$ kg 时的 25%,减小值为 16%。表明了流速及配重大小对网衣变形具有显著影响。

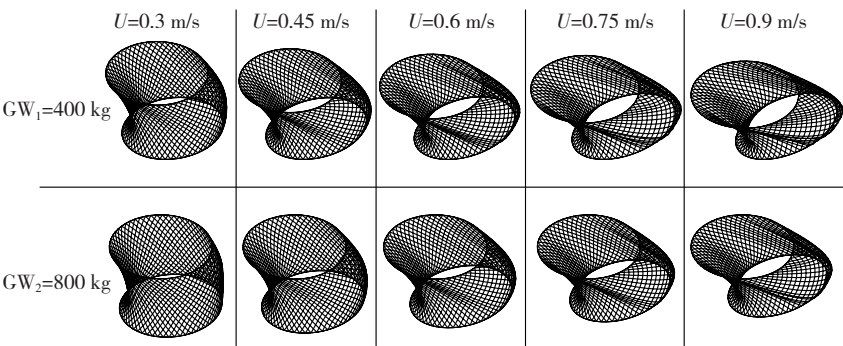


图 6 不同配重和流速条件下网衣变形模拟结果
Fig. 6 Simulated results of the net deformation for different weight modes and current velocities

表 2 网衣容积损失率计算值
Tab. 2 Calculated results of the volume reduction rate

流速 / (m · s ⁻¹) Velocity	GW ₁ =400 kg	GW ₂ =800 kg	%
0.3	14	8	
0.45	28	16	
0.6	41	25	
0.75	52	35	
0.9	61	45	

3.3 网衣运动特性

图 7 为不同配重条件下网衣底端前、后点位移随流速的变化曲线图,其中 A 代表网衣底端前点, B 代表网衣底端后点(图 5)。可以很直观的看出,网衣底端前点的水平位移要大于后点的水平位移,而前点的垂直位移则要小于后点的垂直位移。在流速小于 0.45 m/s 时,前后点水平位移差异较小,但随着流速的增大,前后点的水平位移差异和垂直位移差异都将更为明显。以配重方案 GW_1 为例,前后点水平位移差值从流速 $U=0.3$ m/s 时的 0.08 m 递增为流速 $U=0.9$ m/s 时的 0.79 m,增加值为 0.71 m; 前后点

垂直位移差值从流速 $U=0.3$ m/s 时的 1.73 m 递增为流速 $U=0.9$ m/s 时的 4.73 m,增加值为 3 m。对于不同水流速度,当配重增大时,前后点的水平位移和垂直位移都显著减小。将图 7 (a) 与图 7 (b) 进行对比可以发现,前点的水平位移要大于垂直位移,后点的水平位移则要普遍小于垂直位移。

不同配重条件下网衣底端倾角随流速的变化关系见图 8 所示。从图中可以看出,网衣底端倾角随流速的增大而增大,且与流速具有一定的正比关系。配重方案 GW_1 下,倾角从 6.38° 递增到 20.18°,增加值为 13.8° ; 配重方案 GW_2 时,倾角

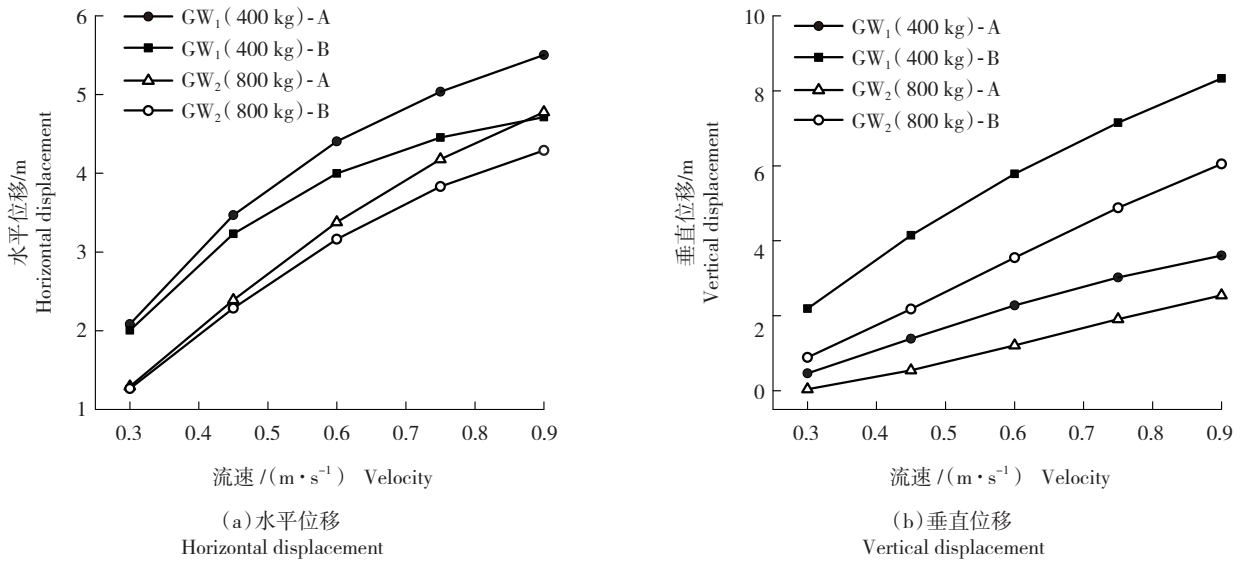


图7 不同配重条件下网衣底端前、后点位移随流速的变化

Fig.7 Displacement for point A and B of the net with different weight modes as a function of current velocity

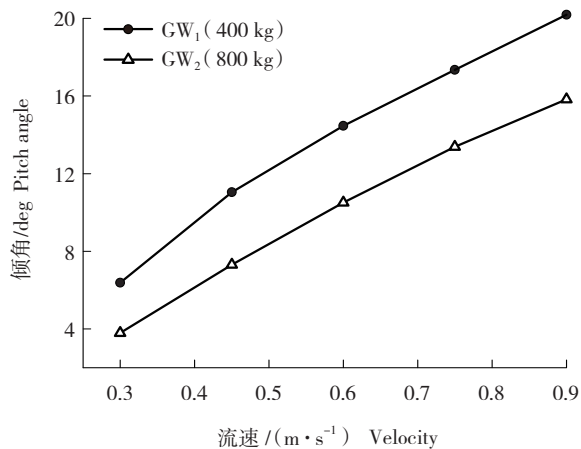


图8 不同配重条件下网衣底端倾角随流速的变化

Fig. 8 Pitch angle of the net bottom with different weight modes as a function of current velocity

从 3.79° 递增至 15.83° , 增加值为 12.04° 。同样也可以看出, 在各种流速条件下, 当增大配重时, 倾角都有所减小。

4 讨论

目前, 国内外关于网衣数值模拟研究所采用的方法, 主要有有限单元法^[1,10]和集中质量法^[2,13,16]两种, 两者的区别主要在于网衣构件的质量分布上, 前者假设质量均匀分布于构件长度上, 后者则假设

构件质量集中于端点上。如, Tsukrov 等^[1]采用有限单元法构造等效网单元来模拟网衣在海洋环境载荷作用下的响应。唐宏结^[16]采用集中质量法建立了浮架、网衣和锚泊系统的计算模型, 采用数值模拟方法结合物模试验对网箱容积变形进行了研究。相比较于有限单元法, 集中质量法的优势在于可以将网衣结构划分为众多质点和构件组成的离散模型来模拟, 数学建模过程相对简单。本研究正是基于此点, 选用集中质量法来建立圆形网衣的数值计算模型, 并利用 Lader 等^[5]的试验结果对计算模型的正确性及有效性进行了检验, 效果良好, 说明了本研究所建立的数学模型和应用的计算方法是合理的, 可以用来模拟圆形网衣在水流作用下的受力、变形及运动情况。集中质量法不仅可以用于网衣的建模, 在作者以前的研究中^[20], 也通过集中质量法将网箱浮架离散成众多微元, 建立了波浪作用下网箱浮架系统的运动响应数学模型, 探讨了波浪要素对浮架系统运动特性的影响。

本研究通过数值模拟方法给出了不同配重和流速大小条件下网衣变形、网衣底端特定点位移以及网衣底端倾角的计算结果。可以发现, 水流速度的增大会加剧网衣的运动变形, 在配重 $GW_1=400\text{ kg}$ 、流速 $U=0.75\text{ m/s}$ 时, 网衣容积损失率就达到了 50%

以上,网衣变形较为严重。当配重增加时,网衣变形、网衣底端位移和倾角都有所减小,网衣容积损失率降低,表明了流速和配重大小对网衣的运动变形具有显著影响。通常情况下,海区海流流速大于 1.0 m/s 时,基本不适宜安置深水网箱。原因之一就是海流对网衣的作用力过大,致网衣飘移,网箱有效养殖容积大为减小。若以相应的重力平衡海流对网衣的作用力,却又大大地增加了网箱日常管理操作的难度。因此,在实际生产中,为减少养殖容积的损失,根据本研究的计算结果,网箱养殖区域应选择流速小于 0.75 m/s 的海区较为适宜。

在网箱养殖过程中,因网衣运动变形严重致使网衣与浮管之间产生磨损的现象时有发生,结果会导致网衣破损,造成箱内的鱼类大量逃逸,给养殖户造成巨大损失。中国现有 HDPE 圆形深水网箱约 2 000 余个,所使用的网衣型式有圆柱形和圆台形 2 种。在国内外,大部分关于网衣的研究工作都是针对圆柱形网衣开展的,而对圆台形网衣水动力特性的研究目前未见报道。实际上,圆台形网衣因制作成本低、换网操作方便^[21],已在中国南海区深水网箱养殖中得到全面应用。因此,在网衣水动力特性的研究方面,考虑配重大小,研究水流与圆台形网衣的相互作用机理是下一步工作的重点。

本研究给出了水流作用下网衣数值建模的详细过程及计算方法,并采用 Fortran 语言编写了计算模拟程序,具有较好的稳定性和解的收敛性,可为下一步波浪、流联合作用下的整体网箱模拟奠定一个良好的理论基础和方法。

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 Eng, 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]. Fish Sci, 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]. Fish Sci (Supplement): 2002, 68: 1857–1860.
- [5] Lader P F, Enerhaug B. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow [J]. IEEE J Ocean Eng, 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]. Aqu Eng, 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): 49–54.
- [8] Zhan J M, Jia X P, Li Y S, et al. Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages [J]. Aqu Eng, 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]. Fish Sci, 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 Eng, 2004, 31 (14–15): 1 725–1 740.
- [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.
- [12] 桂福坤. 深水重力式网箱水动力学特征研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [13] Li Y C, Zhao Y P, Gui F K, et al. Numerical simulation of the influences of sinker weight on the deformation and load of net of gravity sea cage in uniform flow [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 25 (3): 125–137.
- [14] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, et al. Numerical simulation of the effects of structure size ratio and mesh type on three-dimensional deformation of the fishing-net gravity cage in current [J]. Aqua Eng, 2007, 36 (3): 285–301.
- [15] 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.
- [16] 唐宏结. 网箱容积变形改善研究 [D]. 台北: 国立中山大学, 2002.
- [17] Gerhard K. Fibre ropes for fishing gear [M]. FAO Fishing Manuals, 1983: 81–124.
- [18] Bessonneau J S, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls) [J]. Ocean Eng, 1998, 25 (7): 563–583.
- [19] 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.
- [20] 黄小华, 郭根喜, 胡昱, 等. 波浪作用下圆形网箱浮架系统的运动特性分析 [J]. 水产学报, 2009, 33 (5): 878–884.
- [21] 郭根喜, 陶启友. 深水网箱圆柱形囊网与圆台形囊网的性能浅析 [J]. 南方水产, 2005, 1 (4): 24–29.

Movement and deformation characteristics of cylinder nets in current

HUANG Xiaohua, GUO Genxi, HU Yu, TAO Qiyu

(South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Flexible net, an important component of deep-water net cage, is the most complex loading part of cage system. Studying the movement characteristics of cylinder net exposed to current is a key to deeply understand the properties of withstanding strong current about net cage. In this paper, based on the lumped mass method, a numerical model for 3-D nets in steady current was set up. To verify the validity of the numerical model, model test results made by other authors were cited and compared with the numerical results. The numerical results for the drag force on the net and the net deformation agreed well with experimental ones. On the basis of that, according to practical cylinder net, under the conditions of two weight modes ($GW_1=400$ kg, $GW_2=800$ kg) and five kinds of current velocities ($U=0.3-0.9$ m/s), the net deformation, the displacement and the pitch angles of the net bottom were calculated, and the influences of current velocity and weight size on the movement and deformation characteristics of the net were discussed. The calculated results indicated that the increasing of current velocity could intensify the net deformation. The volume reduction rate of the net with weight mode GW_1 when $U=0.75$ m/s reached more than 50%. For different weight modes and current velocities, the horizontal displacement of the fore point at the bottom of the net was great than that of the rear one, while the vertical displacement of the fore point was less than that of the rear one. With current velocity increasing, the displacement difference between the two points had become more obvious. When the weight increases, the displacement, the pitch angles of the net bottom and the volume reduction rate of the net could all decrease accordingly. [Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17 (2) : 312-319]

Key words: cylinder net; current; movement and deformation; lumped mass method; numerical simulation

Corresponding author: GUO Genxi. E-mail: scsggx@21cn.com