

HDPE 圆柱形网箱与圆台形网箱受力变形特性的比较

黄小华, 郭根喜*, 胡昱, 陶启友, 张小明

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要:介绍了一种用于模拟水流作用下网箱受力变形的数值计算模型,并利用海上实测数据对计算模型进行了验证。验证结果表明,网箱锚绳力的计算结果与实测数据十分接近,最大相对误差为7.0%。在此基础上,分别对圆柱形网箱和圆台形网箱在不同配重($GW_1 = 350 \text{ kg}$ 、 $GW_2 = 600 \text{ kg}$)和流速($U = 0.3 \sim 0.9 \text{ m/s}$)条件下所受的水流力以及容积损失率进行了数值计算。结果表明,两种网箱无论在所受的水流力方面还是在变形后保持的网箱容积方面随流速和配重的变化趋势基本一致。圆柱形网箱的容积损失率远大于圆台形网箱的容积损失率,在较小流速($U = 0.3 \text{ m/s}$)研究时,圆柱形网箱的容积损失率达到了28%左右,具有较明显的初始变形。圆台形网箱的初始变形很小,具有较好的耐流特性和抗变形能力。

关键词:圆柱形网箱;圆台形网箱;受力变形;容积损失率

中图分类号:S 972.1

文献标识码:A

自“十五”时期国家对深水网箱立项研究以来,我国已开发出适应不同海域条件的HDPE浮式、HDPE升降式、大型浮绳式、碟形升降式4种类型的深水网箱^[1],其中,HDPE圆形浮式深水网箱因造价相对较低、日常管理和操作便利的优势在我国沿海发达省份得到了大规模的推广应用。截止到2008年底,我国已有HDPE圆形深水网箱2500余个,占全国深水网箱总数量的50%以上^[2],是当前我国抗风浪网箱养殖中应用最广泛的养殖设施,根据所使用的网衣形状不同又可分为圆柱形网箱和圆台形网箱两种^[3]。近年来,国内外有关整体网箱水动力特性方面的研究成果大多数都集中在圆柱形网箱方面^[4-13],而对圆台形深水网箱水动力特性的研究目前未见报道。圆台形网衣因制作成本低、换网操作方便的优势^[14],已在中国南海区深水网箱养殖中得到广泛应用,但因缺少对圆台形网衣耐流特性的了解,使得在选择网箱设置区域以及保证网箱养殖鱼类生长空间方面仅凭实践经验,缺乏理论支撑。因此,针对不同网衣形状,开展深水网箱的受力变形研究,对

于深入了解圆台形网箱的耐流特性以及为网箱养殖的网衣形式选择提供参考具有重要的现实意义。

本研究基于建立的浮架和网衣数学模型^[15-16],采用数值模拟方法,分别对圆柱形网箱和圆台形网箱在不同配重和流速条件下所受的水流力以及容积损失率进行了数值计算,分析比较了圆柱形网箱与圆台形网箱在受力及变形特性方面的异同点。

1 网箱计算模型

1.1 浮架模型

在进行浮架结构受力分析时,采用集中质量法将圆形浮架离散成众多微元,应用刚体运动学原理,将浮架各个微元构件所受到的外力合力累加到浮架的质心处建立6个自由度上的运动方程,然后再根据浮架质心的运动求解出浮架上各质点的位移和速度。浮架在水流作用下所受到的外力有重力、浮力、水流力以及与锚绳相连的微元构件所承受的锚绳张力,其各数学表达式及浮架

收稿日期:2010-09-28 修回日期:2010-11-09

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(2010AA100301);广东省科技计划项目(2008B021000042);广东省海洋渔业科技推广专项项目(A200901G03);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2010YD09)

通讯作者:郭根喜,E-mail:scsggx@21cn.com

运动方程的建立过程具体可参考文献[16]的方法,以下仅列出浮架的6个运动方程组。

浮架刚体在整体坐标系下的3个平动运动方程:

$$\ddot{X}_G = \frac{1}{M_G} \sum_{i=1}^N F_{xi} \quad (1a)$$

$$\ddot{Y}_G = \frac{1}{M_G} \sum_{i=1}^N F_{yi} \quad (1b)$$

$$\ddot{Z}_G = \frac{1}{M_G} \sum_{i=1}^N F_{zi} \quad (1c)$$

式中, M_G 为刚体总质量, N 为浮架微元个数, \ddot{X}_G 、 \ddot{Y}_G 、 \ddot{Z}_G 为浮架刚体质心加速度。

浮架在物体坐标系下的3个转动方程为:

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 = \sum_{i=1}^N M_{1i} \quad (2a)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_3 \omega_1 = \sum_{i=1}^N M_{2i} \quad (2b)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 = \sum_{i=1}^N M_{3i} \quad (2c)$$

式中,下标(1,2,3)代表物体坐标系; M_{1i} 、 M_{2i} 、 M_{3i} 分别为对坐标系123主轴的外力矩, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为物体坐标系的角速度, I_1 、 I_2 、 I_3 为浮架对123主轴的惯性矩。

在求解出刚体质心加速度 a_G 以及角速度 ω 之后,根据图1所示,整体坐标系下浮架上各质点的位移和速度即可根据下式求出:

$$\vec{r}_p = \vec{r}_G + \vec{r} \quad (3)$$

$$\vec{v}_p = \vec{v}_G + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (4)$$

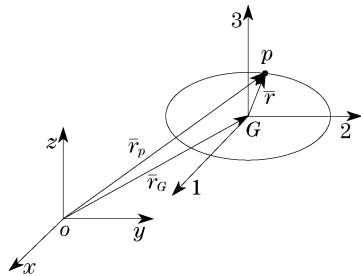


图1 浮架刚体坐标系

Fig.1 Schematic diagram of coordinates system for the rigid floating collar

1.2 网衣模型

利用集中质量法将柔软的网衣分解成众多质点和构件组成的离散模型,集中质量点设于每个网目目脚的两端(图2)。在计算作用在目脚上的

外力时,可以将单个目脚看作为一个构件,其在水流作用下的受力由重力、浮力、网线张力和水流量组成,具体数学表达式参考文献[15]的方法。

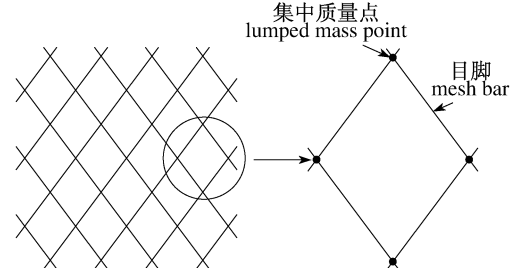


图2 网衣模型示意图

Fig.2 Modeling for the mesh

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),利用牛顿第二定律可建立如下的网衣各集中质量点的运动方程。图3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。

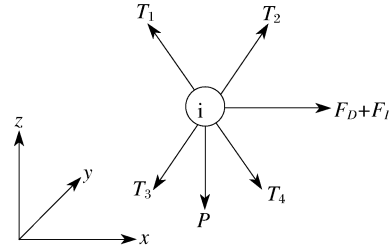


图3 网衣集中质量点计算示意图

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

$$m_i \ddot{X}_i = \sum_{j=1}^N (F_{DXj} + F_{IXj} + T_{Xj}) \quad (5a)$$

$$m_i \ddot{Y}_i = \sum_{j=1}^N (F_{DYj} + F_{IYj} + T_{Yj}) \quad (5b)$$

$$m_i \ddot{Z}_i = \sum_{j=1}^N (F_{DZj} + F_{IZj} + P_j + T_{Zj}) \quad (5c)$$

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, P_j 为重力与浮力的合力。

2 数值计算与实测试验的比较

2009年在广东湛江特呈岛深水网箱养殖基地对实际海流条件下网箱锚绳的受力进行了实测,实测结果参考文献[17]。试验网箱为HDPE圆台形网箱,其由浮架、网衣、配重及锚泊系统组成,各部

件详细参数为(1) 浮架:HDPE 双浮管,周长 40 m,浮管截面直径 250 mm,壁厚 15 mm,浮架总重量 12.7 kN;(2) 网衣:PE 材质,圆台形,上底周长 39 m,下底周长 29 m,高 5.8 m,缩结系数 0.707,网目大小 40 mm;(3) 配重:混凝土制作,圆柱形,悬挂在网衣底端,每个网箱配重 10×35 kg;(4) 锚绳:PE 绳,单根长度 50 m,直径 30 mm。

网箱布置图及试验所需测试设备分别见图 4、图 5 所示。网箱基地所处海域潮水为半日潮,涨潮慢历时 7 h,退潮快历时 5 h,退潮最大流速要大于涨潮。图 4 中的水流方向即为退潮流速方向,最大流速为 0.6 m/s。网箱区在高水位时水深为 16 m,低水位时为 11 m。

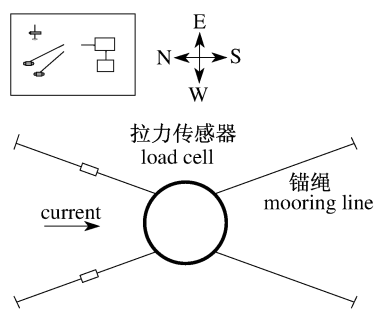


图 4 网箱布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of net-cage

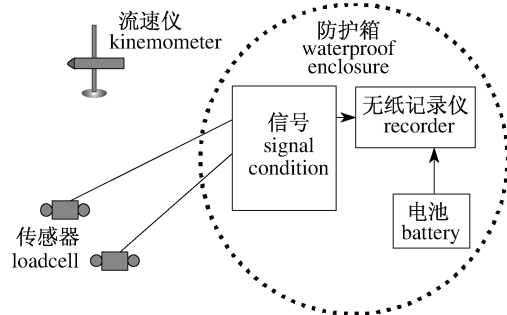


图 5 测试设备和数据读取示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the transmission equipment and data acquisition

考虑到网箱断面上的流速分布不均匀、斜向流的存在以及不可避免的风浪影响等方面的因素,都会使得网箱同侧两根锚绳的受力会有一定的差异,为此,我们采用迎流面两根锚绳的受力合力作为分析依据。表 1 为流速 $U = 0.22$ 、 0.32 、 0.38 、 0.5 和 0.6 m/s 时网箱在水流作用下达到稳定状态后锚绳力的计算结果和实测结果。两者比较发现,锚绳力的计算结果与实测结果都十分

接近,最大相对误差值为 7.0%,平均相对误差值仅为 4.6%,说明了本文所采用的网箱计算模型和计算方法可以满足实际研究的计算精度要求。

表 1 锚绳力计算值与实测值比较

Tab. 1 Comparison of mooring line force on the net cage between calculated and tested results

流速 (m/s) velocity	实测值 (N) test	计算值 (N) calculation	相对误差 (%) relative error
0.22	1 226.25	1 149.12	6.3
0.32	2 069.91	2 140.10	3.4
0.38	2 786.04	2 783.18	0.1
0.50	4 375.26	4 094.48	6.4
0.60	5 012.91	5 364.42	7.0

3 结果与分析

3.1 计算参数的选取

以国内广泛应用的 HDPE 圆柱形网箱和圆台形网箱为研究对象,比较分析两种网箱之间的受力变形特性。除网衣底端周长不同外(圆柱形网衣下底周长为 39 m,圆台形网衣下底周长为 29 m),两种网箱的其它各部件参数均相同。在数值计算中,水流方向为 x 方向,水深 $h = 15$ m,海水的密度 $\rho_w = 1 030$ kg/m³,重力加速度 $g = 9.81$ m/s²。图 6 为两种网箱在流速 $U = 0.45$ m/s 时的网箱空间形状模拟结果示意图。

配重大小取 $GW_1 = 350$ kg 与 $GW_2 = 600$ kg 两种,水流速度取 $U = 0.3$ 、 0.45 、 0.6 、 0.75 、 0.9 m/s。由于计算中的网衣结点数太多,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,在模拟网衣过程中,采用网目群化方法^[18]将 28×28 个网目合并为 1 个等效大网目,以减少计算时间提高计算效率。

3.2 圆柱形网箱与圆台形网箱的变形特性比较

表 2 和表 3 为不同配重和流速条件下网箱达到稳定状态后的变形计算结果,表中的容积损失率定义为 $1 - V_p/V_{p0}$,其中 V_p 为网箱变形后的容积, V_{p0} 为无水流和无配重作用时的网箱初始容积,这里给出圆柱形网箱和圆台形网箱的初始容积分别为 702 m³、 537 m³。

从表中可以直观的看出,在不同配重和流速条件下,两种网箱变形后的容积相差很小,但圆柱形网箱的容积损失率却远大于圆台形网箱的容积损失率,二者之间的差别随流速的增大而有所减

小。以配重大小 $GW_1 = 350 \text{ kg}$ 为例,在流速 $U \leq 0.45 \text{ m/s}$ 时,圆柱形网箱的容积损失率就达到了 28%,而圆台形网箱的容积损失率仅为 5%,前者是后者的 5.6 倍;当流速增大至 0.9 m/s 时,圆柱形网箱的容积损失率为 43.8%,约为圆台形网箱容积损失率的 1.74 倍。将表 2 与表 3 进行对比

可以发现,当配重增大时,两种网箱的容积损失率都相应减小,网箱容积增大,网箱变形得到改善,但圆柱形网箱与圆台形网箱在容积大小方面仍然保持很小的差异,显示出配重对两种网箱的变形改善效果具有较明显的相似性。

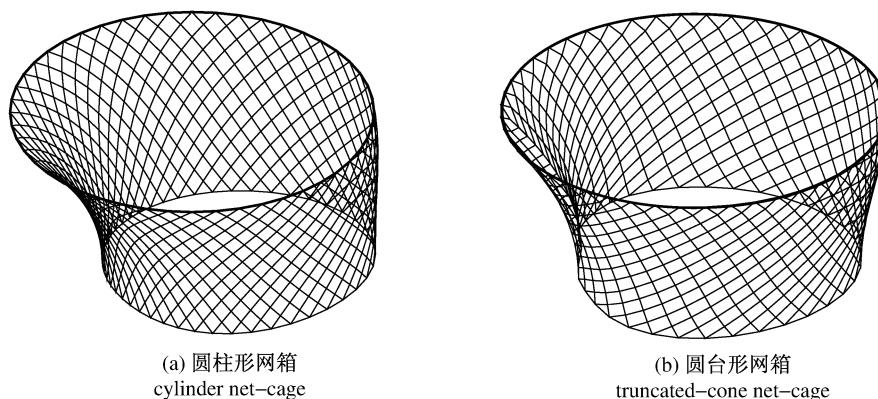


图 6 网箱模拟结果示意图

Fig. 6 Examples of 3D graphics of the net-cages in current

表 2 配重 $GW_1 = 350 \text{ kg}$ 时的网箱变形计算结果

Tab. 2 Calculated results of the net deformation for the net-cages at $GW_1 = 350 \text{ kg}$

流速(m/s) velocity	网箱容积(m^3) volume		容积损失率(%) volume reduction rate	
	圆柱形网箱 cylinder net-cage	圆台形网箱 truncated-cone net-cage	圆柱形网箱 cylinder net-cage	圆台形网箱 truncated-cone net-cage
静水	501.93	512.3	28.5	4.6
0.3	504.04	514.45	28.2	4.2
0.45	499.12	504.78	28.9	6.0
0.6	477.36	473.63	32.0	11.8
0.75	437.35	438.73	37.7	18.3
0.9	394.52	401.68	43.8	25.2

表 3 配重 $GW_2 = 600 \text{ kg}$ 时的网箱变形计算结果

Tab. 3 Calculated results of the net deformation for the net-cages at $GW_2 = 600 \text{ kg}$

流速(m/s) velocity	网箱容积(m^3) volume		容积损失率(%) volume reduction rate	
	圆柱形网箱 cylinder net-cage	圆台形网箱 truncated-cone net-cage	圆柱形网箱 cylinder net-cage	圆台形网箱 truncated-cone net-cage
静水	500.53	508.54	28.7	5.3
0.3	503.33	510.15	28.3	5.0
0.45	507.55	516.06	27.7	3.9
0.6	502.63	504.24	28.4	6.1
0.75	487.19	480.62	30.6	10.5
0.9	458.41	454.54	34.7	15.3

3.3 圆柱形网箱与圆台形网箱的受力特性比较

水流作用下网箱的受力与变形密切相关,对网箱变形起作用的水流是随网箱几何形状的改变而改变。图 7、图 8 为圆柱形网箱和圆台形网箱分别在两种配重条件下所受的水流随流

速的变化曲线图。这里所指的水流为网箱达到稳定状态后所受沿水流方向的总水流力,等于浮架和网衣所受的水流力和。从图中可以看出,不同配重条件下,两种网箱所受的水流随流速的增大而增大的变化趋势基本一致,二

者之间的差别很小,产生这一结果的原因可能与各种流速条件下圆柱形网箱和圆台形网箱变形后的容积大小保持大致相等(表2、表3)有一定的联系。

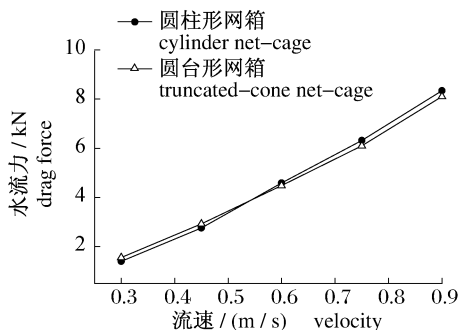


图7 $GW_1 = 350$ kg 时网箱所受水流力随流速的变化
Fig. 7 Drag force for the net-cages with $GW_1 = 350$ kg as a function of current velocity

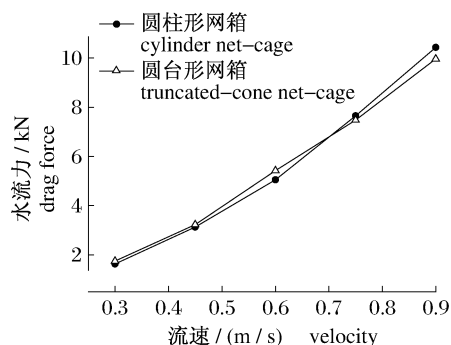


图8 $GW_2 = 600$ kg 时网箱所受水流力随流速的变化
Fig. 8 Drag force for the net-cages with $GW_2 = 600$ kg as a function of current velocity

4 讨论

海上实测是检验数值计算最好的方法。一方面,随着电子计算机技术的迅速发展以及计算方法的不断进步,数学模型已经逐渐成为一种解决实际工程问题的重要研究手段,体现出计算方案多、周期短、费用少的明显优势。另一方面,由于数学模型是在研究对象的简化及假设基础上建立的,其能否真实有效的反映出实际问题,还需要对数学模型的合理性和适用性进行检验。目前,在网箱水动力特性的相关研究中,国内外普遍采用物理模型试验来检验数学模型的正确性。Lee 等^[13]通过数值模拟方法研究了波浪作用下网箱系统的锚绳受力、网衣变形及浮架运动情况,

并采用波浪水槽试验对模拟结果进行了验证。郑艳娜等^[19]对圆形重力式网箱两种锚碇系统(折线形与直线形)的受力进行了数值计算及相应的物理模型试验,结果显示计算数值与试验数据吻合较好。从定性分析看,不同工况下的网箱物模试验结果基本上能够反映出网箱水动力特性的变化态势。但从定量角度分析,由于模型比尺效应的影响,通过模型试验得到的试验数据其准确性不如海上实测,不能最真实的反映实际情况,还有待于海上实测数据的进一步验证。本研究正是基于此考虑,通过开展实际海洋工况下的网箱锚绳受力实测试验检验了本文数学模型及数值模拟方法的正确性和有效性。同时,通过实测网箱在海洋工况作用下的锚绳受力,在确保网箱锚固安全性的同时,可以优化锚泊系统和锚绳规格,减小锚绳强度过大余量所造成的浪费。

本研究通过数值模拟方法给出了不同配重大小和流速条件下圆柱形网箱和圆台形网箱受力变形的计算比较结果。可以发现,两种网箱无论在所受的水流力方面还是在变形后保持的网箱容积方面差别都很小,但圆柱形网箱的容积损失率却远大于圆台形网箱的容积损失率,在较小流速 $U=0.3$ m/s 时,圆柱形网箱的容积损失率就达到了 28%,要远大于同样流速条件下底圈配重模式时网箱容积损失率约为 10% 的情况^[15]。产生这一结果的原因主要是由于菱形网目的圆柱形网衣在无水流作用只受沉子配重的重力作用下会有非常明显的初始变形,网衣底端逐步向内收缩引起的。赵云鹏^[20]研究表明,当网箱直径与网箱高度之比减小到 1 时,在不受水流作用的情况下,采用单独沉子模式的网箱,容积损失可高达 50% 左右。可见,圆柱形网箱在水流作用下产生的容积损失中,因初始变形导致的容积损失占有很大比例。相比较于圆柱形网箱,圆台形网箱的初始变形却很小(容积损失率约 5%),具有较好的耐流特性和抗变形能力。尽管圆台形网箱的初始容积要小于圆柱形网箱,但在维持网箱容积保证鱼类生长空间方面,两种网箱之间的比较并没有明显差异,且从网衣材料用量角度分析,圆台形网衣的材料总用量可比圆柱形网衣节省 20% 左右^[14]。因此,为减少养殖容积的损失以及网衣制作成本,在单独沉子的配重模式下,选择圆台形网箱进行养殖相比较于圆柱形网箱更具有优势,但对于底

圈配重模式情况,两种网箱是否存在上述同样结论,还有待于今后进一步研究。

在实际水流与圆形网衣的相互作用过程中,流速的衰减是影响网箱受力变形的一个重要因素。因水流受网衣的阻滞作用,网衣背流面所受的水流力往往要比迎流面小,因此,为了考虑网衣对流速的衰减作用,在本文的水动力数值计算过程中,参考了 AARSNES 等^[21]的研究成果将流速衰减率取值为 15%,即网衣背流面的流速相当于迎流面的 85%。

参考文献:

- [1] 刘永利,黄洪亮,张国胜,等.我国离岸深水网箱结构工艺的基础性研究现状[J].海洋渔业,2007,29(3):271-276.
- [2] 农业部渔业局.2009 中国渔业年鉴[M].北京:中国农业出版社,2009:230-236.
- [3] 郭根喜,陶启友.深水网箱圆台形囊网的设计与制作[J].南方水产,2005,1(1):49-53.
- [4] 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
- [5] LADER P F, FREDHEIM A. Dynamic properties of a flexible net sheet in waves and current—A numerical approach [J]. Aquacultural Eng,2006,35(3):228-238.
- [6] 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.
- [7] 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]. Aquacultural Eng,2007,36(3):285-301.
- [8] 苏伟,詹杰民.水流作用下渔网养殖空间变化的计算方法[J].海洋工程,2007,25(1):93-100.
- [9] 郑国富,黄桂芳,魏观渊,等.波流作用下圆柱形近海抗风浪网箱缆绳的张力特性[J].水产学报,2007,31(1):84-89.
- [10] 唐宏结.网箱容积变形改善研究[D].台湾:国立中山大学,2002.
- [11] HUANG C C, TANG H J, LIU J Y. Modeling volume deformation in gravity-type cages that have distributed bottom weights or a rigid tube-sinker [J]. Aquacultural Eng,2007,37(2):144-157.
- [12] HUANG C C, TANG H J, LIU J Y. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea [J]. Aquacultural Eng,2008,38(2):105-116.
- [13] LEE C W, KIM Y B, LEE G H, *et al.* Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves [J]. Ocean Eng, 2008, 35 (14 - 15): 1521 - 1532.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 郭根喜,黄小华,胡昱,等.高密度聚乙烯圆形网箱锚绳受力实测研究[J].中国水产科学,2010,17(4):847-852.
- [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] 郑艳娜,董国海,桂福坤,等.圆形重力式网箱锚碇系统的受力研究[J].应用力学学报,2007,24(2):180-185.
- [20] 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.
- [21] AARSNES J V, RUDI H, LOLANG G. Current forces on cage, net deflection [C] // Engineering for Offshore Fish Farming. London: Tomas Telford, 1990:137-152.

Comparison on the forces and deformation between HDPE cylinder net-cage and truncated-cone net-cage in current

HUANG Xiao-hua, GUO Gen-xi*, HU Yu, TAO Qi-you, ZHANG Xiao-ming

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

Abstract: Deep-water net-cages made from HDPE, are the most widely used aquaculture facility among all kinds of anti-wave net-cages. They can be divided into cylinder net-cage and truncated-cone net-cage according to different net shapes. Comparing and analyzing the similarities and differences in the aspects of the forces and deformation between cylinder net-cage and truncated-cone net-cage, could help to provide a strong reference for the selection of cage style. Using lumped mass method and the rigid body kinematics principle, this paper described a numerical model including floating circular model as well as net model for simulating the force and deformation of net-cages in current, and the accuracy of simulation was validated by the data of marine in-situ measurements. By comparing, the numerical results of the mooring line forces on the cage were in good agreement with the *in-situ* test data, only 7% of maximum relative error and 4.6% of average relative error between them. The results indicated the numerical model and computational method adopted could meet the need of calculation accuracy for practical study. On the basis of that, under the conditions of two weight sizes ($GW_1 = 350$ kg, $GW_2 = 600$ kg) and five kinds of current velocities ($U = 0.3 - 0.9$ m/s), the drag forces and the volume reduction rate for cylinder net-cage and truncated-cone net-cage were calculated. In the process of simulating net, the mesh grouping method that 28×28 meshes have been combined into an equivalent large mesh, was applied to decrease computational time and improve efficiency. The results showed that after cages getting equilibrium in current, the two different cages in both drag force and cage volume kept the similar varying tendency with weight size or current velocity, only had little difference between them. The volume reduction rate of cylinder net-cage was much greater than that of truncated-cone net-cage. The cylinder net-cage had an obvious initial deformation when cage was only impacted by sinkers, the volume reduction rate of which was about 28% in relatively small velocity $U = 0.3$ m/s, but the truncated-cone net-cage had better anti-current and anti-deformation performances, with about 5% of volume reduction rate. Therefore, to decrease the loss of net volume in current as well as manufacturing cost, selecting truncated-cone net-cages with sinkers weight mode has more advantages than cylinder net-cages with that for aquaculture.

Key words: cylinder net-cage; truncated-cone net-cage; force and deformation; volume reduction rate

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