

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18434

## 波浪作用下箱网式浮鱼礁水动力特性研究

张健, 冯德军, 王萍, 潘昀, 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 316002

**摘要:** 人工鱼礁可分为沉鱼礁和浮鱼礁, 人工鱼礁投放是海洋牧场建设的重要工程基础。浮鱼礁主要用于诱集和保护中上层鱼类, 投放受底质条件限制较小, 尤其在淤泥底质的海域具有良好的适应性。浮鱼礁主体结构处于中上层位置, 受波浪等动力环境影响较大, 鱼礁的结构安全性和稳定性是设计和投放中需要重点关注的问题。本研究集合鱼礁集鱼、护鱼和养殖的功能, 提出了一种多功能箱网式浮鱼礁结构设计, 并建立了水动力数值模型, 分析探讨了波高和入水深度对两种锚定形式(单锚绳和多锚绳)的浮鱼礁安全性和稳定性的影响。研究表明, 相同条件下, 单根锚绳固定形式下的锚绳受力总体约为四根锚绳固定时的锚绳受力总和, 但网衣网线受力较四根锚绳固定时小。波高对单根锚绳固定的浮鱼礁最大偏转角度影响较大, 但四根锚绳固定时, 可以显著地降低浮鱼礁最大偏转角度, 有效地提高浮鱼礁的稳定性, 而且波高越大, 效果越明显。波高不变的情况下, 随着入水深度的增加, 浮鱼礁水平最大偏移迅速减小。当浮鱼礁入水深度为波高的2倍以上时, 两种固定方式下的浮鱼礁运动差别可以忽略。

**关键词:** 浮鱼礁; 锚绳; 网衣; 数值模拟; 水动力特性; 网箱

中图分类号: S95

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)05-1014-07

人工鱼礁是用来诱集捕捞鱼类、增殖渔业资源、改善海洋环境的人工设施, 其复杂的空间能为海洋生物提供繁殖、生长、栖息的场所。人工鱼礁投放之后, 周围海域生态环境发生明显变化, 能够保护和恢复海域的生态环境, 形成良好的渔场或增殖场<sup>[1]</sup>。人工鱼礁按照设置位置分为沉鱼礁和浮鱼礁。沉鱼礁具有低成本、易投放、集鱼效果显著等特点, 其主要作用机理是产生上升流, 将海底丰富的营养盐带到中上层水域, 提升区域初级生产力, 适用于沙质等底质较硬的海域, 应用较为广泛<sup>[2-4]</sup>。然而, 中国江苏、浙江舟山等地区受到长江冲淡水影响, 处于泥沙高速沉积环境中, 沉鱼礁在淤泥质海域发生下沉, 大量淤泥堆积会掩埋附着在礁体上的生物, 影响鱼礁功能<sup>[5-6]</sup>。

浮鱼礁作用范围和机理与沉鱼礁有所不同, 主要诱集中上层鱼类, 并为中上层鱼类提供避

敌、捕食、栖息场所, 可以很好地适用于淤泥质海岸。大多数浮鱼礁主要由锚块、锚绳和浮体组成, 根据设置区域不同, 可分为设置在水深10 m附近海域的表层浮鱼礁和20~50 m附近海域的中层浮鱼礁, 以及设置于大水深海域的深海浮鱼礁<sup>[7]</sup>。日本在20世纪50年代就开始进行人工鱼礁的研究, 在浮鱼礁的发展应用上处于世界领先地位, 且已投入应用, 并取得了很好的效果。美国对浮鱼礁研究较少, 主要以投放沉鱼礁为主, 已经由养殖向休闲垂钓变化<sup>[8]</sup>。中国近几年对浮鱼礁的研究有所增加, 王江涛<sup>[9]</sup>设计了集海藻鱼礁、变流鱼礁和保育鱼礁为一体的新型柔性浮鱼礁并进行流场模拟和力学特性分析, 张健等<sup>[10]</sup>利用数值模拟方法研究了框架式浮鱼礁锚绳受力和浮体运动。

人工鱼礁的建设常具有公益性, 长期运营存在维护和保养问题, 也涉及运营维护费用, 本文

收稿日期: 2018-12-26; 修订日期: 2019-02-23.

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201505025-2); 国家自然科学基金项目(31602205); 浙江省自然科学基金项目(22246000518).

作者简介: 张健(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为物理海洋. E-mail: 296468006@qq.com

通信作者: 桂福坤(1976-), 男, 教授, 研究方向为海洋养殖工程装备技术. E-mail: gui2237@163.com

提出的箱网式浮鱼礁, 兼顾保护和养殖的双重功能, 其箱体内可小规模放养高品质鱼类, 无需投喂, 可形成附加效益, 用于鱼礁的可持续维护。本研究针对这一箱网式浮鱼礁结构, 利用数值模拟的方法, 探讨波高、入水深度、固定方式等因素对浮鱼礁水力特性及结构安全的影响, 为浮鱼礁结构设计与应用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 浮鱼礁材料及结构参数

箱网式浮鱼礁由箱体、网衣和锚绳三部分组成, 具体尺寸见表 1。箱体尺寸为 1.69 m×1.69 m×4.80 m(长×宽×高), 管道直径 0.3 m, 密度 1350 kg/m<sup>3</sup>; 网片尺寸为: 长×宽=6.76 m×4.80 m, 网线直径  $d=3$  mm, 水平缩结系数 0.66, 垂直缩结系数 0.75; 锚绳采用 PE 材质, 锚绳原长 5 m, 直径 10 mm; 密度 950 kg/m<sup>3</sup>。试验时, 先将网衣与网筋扎紧,

再将网筋与框架相连, 在箱体底端两根管道相交处系缚锚绳, 锚碇点系缚在水底重块上。本文研究两种锚绳系缚方式, 单根锚绳固定时, 锚绳下端系缚在锚碇点, 上端系缚在 P 点(图 1a); 四根锚绳固定时, 锚绳下端系缚在锚碇点, 上端系缚在 C、D、E、F 点(图 1b)。

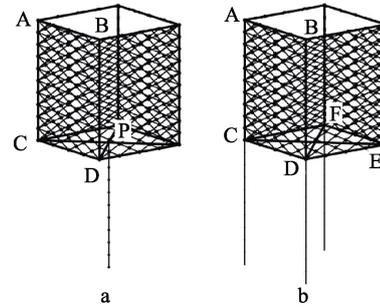


图 1 浮鱼礁固定方式

a. 单根锚绳式; b. 四根锚绳式。

Fig. 1 Anchoring mode of floating reef  
a. Single anchor rope; b. Four anchor ropes.

表 1 浮鱼礁参数

Tab. 1 Parameters of floating reef

项目 item	材料 material	尺寸/m size	直径/m diameter	密度/(kg/m <sup>3</sup> ) density	拖曳力系数 $C_D$ drag force coefficient	惯性力系数 $C_M$ inertia force coefficient	弹性系数 $C_1$ elastic coefficient $C_1$	弹性系数 $C_2$ elastic coefficient $C_2$	水平缩结系数 horizontal shrinkage factor	垂直缩结系数 vertical shrinkage factor
箱体 cage	PVC	1.69×1.69×4.80	0.3	1350	0.8	1.2	—	—	—	—
网衣 net	PE	6.76×4.80	0.003	950	0.6	1.2	345.3×10 <sup>6</sup>	1.0121	0.66	0.75
锚绳 anchor rope	PE	5.0	0.01	950	0.6	1.2	345.3×10 <sup>6</sup>	1.0121	—	—

注: PVC 表示聚氯乙烯, PE 表示聚乙烯。

Note: HDPE represents high-density polyethylene, PE represents polyethylene.

### 1.2 数值实验方法

研究波高和入水深度对浮鱼礁水力特性的影响, 探讨两种锚定方式下(单根锚绳固定和四根锚绳), 箱体最大水平偏移和最大偏转角度、锚绳最大受力和网衣最大受力特性。数值实验时, 选定波高为 1 m、2 m、3 m、4 m, 根据固定波陡 0.1 计算波浪周期, 分别对应 2.5 s、3.5 s、4.4 s、5.2 s。入水深度选定为 2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、7 m 共 6 种情况。在研究入水深度对浮鱼礁水动力特性影响时, 固定波高  $H=3$  m, 周期  $T=4.4$  s, 锚绳初始长度为 5 m(图 2), 通过增加水深来改变入水深度, 以保证浮鱼礁结构参数的一致性。在研究

波高影响时, 固定入水深度  $D=2$  m 所示。

### 1.3 箱网式浮鱼礁计算模型建立

采用有限单元法和集中质量点法计算波浪作用下箱体、柔性锚绳和网衣的受力和运动<sup>[11]</sup>。浮鱼礁结构计算模型及相关参数定义如图 2 和图 3 所示。浮鱼礁箱体由 4 根 PVC 管组成, 具有刚性物体的特征, 可以通过计算一个点运动情况作为参考。在浮鱼礁不出水的前提下, 越靠近水面, 浮鱼礁受力越大, 运动幅度越大, 因此选取 A 点(图 1A 点), 计算波高和入水深度变化对浮鱼礁水平方向最大偏移和偏转角度(图 3 中角  $\alpha$ )的影响。研究表明, 图 2F 点处的网线受力最大, 因此本研究以

此点为研究对象，提取受力过程数据，分析网线的受力的基本规律。网衣网线受力网衣网线受力

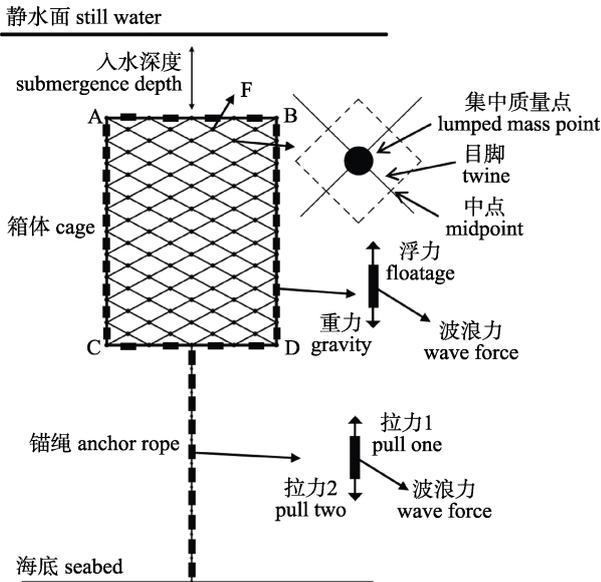


图 2 浮鱼礁受力分析示意图

Fig. 2 Sketch of force analysis of floating reef

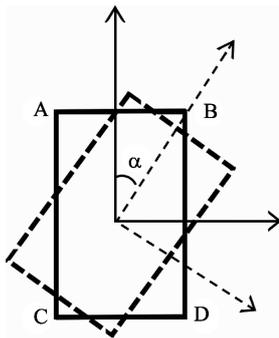


图 3 箱体转角定义示意图

Fig. 3 Sketch of definition of cage rotation

**1.3.1 箱体模型建立** 建立数值模型时，一般将 AB 管道划分为 10 个左右的单元即可获得较好的模拟精度<sup>[12]</sup>。本文箱体框架的四根直管道被划分为 21 个有限单元，箱体 AB 等 10 根水平管道分别被划分为 9 个有限单元。箱体单元受力包括重力、浮力和波浪力。在系缚点(图 1 中 P 点，图 2 中 C、D、E、F 点)处计算锚绳拉力，利用牛顿第二定律建立质量点运动方程，模型简化后的质点运动方程为：

$$Ma = F_{D\text{浮体}} + F_{I\text{浮体}} + G + T + B \quad (1)$$

$M$  表示集中质量点的质量，kg;  $a$  表示集中质

量点的加速度矢量， $m/s^2$ ;  $F_{D\text{浮体}}$  和  $F_{I\text{浮体}}$  为集中质量点受到的速度力和惯性力，N;  $T$  表示集中质量点所受到的张力矢量，N;  $G$  表示集中质量点的重力矢量，N;  $B$  表示集中质量点的浮力矢量，N。

假定箱体管道为刚性物体，不考虑弯曲变形，不计算拉力；管道均为圆柱形杆件，具有圆柱的水动力性质，采用 Morison 方程计算各水深处波浪力。初始状态时动坐标系( $x, y, z$ )和局部坐标系( $\delta, \eta, \tau$ )重合，当有限单元发生运动后，局部坐标系( $\delta, \eta, \tau$ )变为( $\delta', \eta', \tau'$ )， $\tau$  方向为单元方向， $\delta$  轴在  $\tau$  方向和水质点相对速度组成的平面内与  $\tau$  轴垂直， $\eta$  轴与  $\tau$  和  $\delta$  轴方向组成的平面相垂直<sup>[13-15]</sup>(图 5)。通过向量运算建立浮体的受力公式，如式(2)所示。

$$\begin{cases} F_{D\text{浮体}} = F_{D\eta} + F_{D\tau} \\ F_{I\text{浮体}} = F_{I\eta} + F_{I\tau} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $F_{D\eta}$  和  $F_{D\tau}$  为速度力  $F_{D\text{浮体}}$  在局部坐标系上的分量； $F_{I\eta}$  和  $F_{I\tau}$  为惯性力  $F_{I\text{浮体}}$  在局部坐标系上的分量。

**1.3.2 网衣和锚绳模型建立** 网衣和锚绳都属于典型柔性结构物，计算质量点之间的拉力。网衣由有限个集中质量点构成(图 1)，假定箱体由 1 片网衣围绕覆盖，网衣 4 个顶点处集中质量点包括 1.5 个目脚和 1 个节点，其他集中质量点包括 2 个目脚和 1 个节点，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，将相邻 64 个网目合并为 1 个等效大网目，通过计算集中质量点在动力边界条件作用下的偏移来获得网衣的形状<sup>[16]</sup>；锚绳集中质量点与网衣相似，但每个集中质量点只包含上下 2 个锚绳。网衣和锚绳集中质量点受力、波浪力计算方法与箱体计算方法相同。

## 2 结果与分析

浮鱼礁的投放时，一般要考虑浮鱼礁之间相互影响，计算浮鱼礁水平方向最大偏移和最大偏转角度保证浮鱼礁之间没有相互影响，计算网衣网线受力和锚绳受力保证浮鱼礁结构安全。

### 2.1 箱体最大水平偏移和偏转角度随波高变化

由图 4 和图 5 可见, 当入水深度一定( $D=2\text{ m}$ ) 时, 两种锚系方式下, 浮鱼礁水平方向最大偏移、最大偏转角度均随着波高增加而增加。总体上, 单根锚绳固定的浮鱼礁水平最大偏移和倾角均大于四根锚绳固定的情况, 且随着波高增加差异越来越明显, 当波高达到  $4\text{ m}$  时, 四根锚绳固定箱体水平最大偏移是单根锚绳固定箱体水平最大偏移的  $74.4\%$ ; 单根锚绳固定浮鱼礁的箱体最大水平偏转角度随波高增加迅速发生变化, 而由四根锚绳固定浮鱼礁的箱体几乎没有偏转。

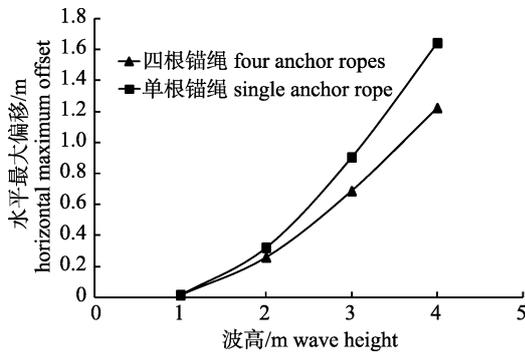


图 4 水平最大偏移随波高变化  
Fig. 4 Relationship between horizontal maximum offset and wave height

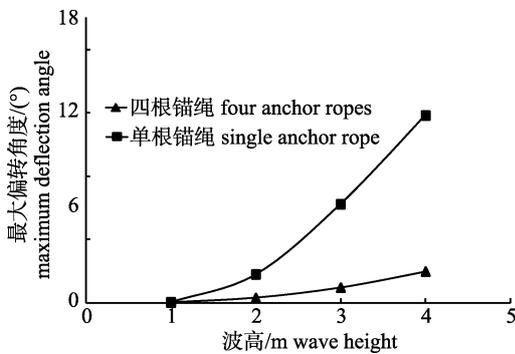


图 5 最大偏转角度随波高变化  
Fig. 5 Relationship between maximum deflection angle and wave height

### 2.2 箱体最大水平偏移和偏转角度随入水深度变化

由图 6 可见, 当波高一定 ( $H=3\text{ m}$ ), 入水深度变化时, 单根锚绳和四根锚绳固定浮鱼礁的水平最大偏移均随着入水深度增加而减小。当入水深度达到  $3\text{ m}$ , 即 1 倍波高时, 两种固定方式浮鱼礁水平的最大偏移相差  $0.22\text{ m}$  (波高的  $7.3\%$ ); 当

入水深度达到  $6\text{ m}$ , 即 2 倍波高时, 两种固定方式浮鱼礁的水平最大偏移相差  $0.07\text{ m}$  (仅为波高的  $2.3\%$ ), 相比 1 倍波高, 衰减了  $91\%$ ; 此时可人为两种固定方式下的鱼礁水平最大偏移差异可以忽略。

图 7 表明, 随着入水深度的增加, 单根锚绳固定的浮鱼礁最大偏转角度显著减小, 但四根锚绳固定时, 浮鱼礁偏转角度随水深变化基本可以忽略, 说明四根锚绳的固定方式下的浮鱼礁具有良好的稳定性。

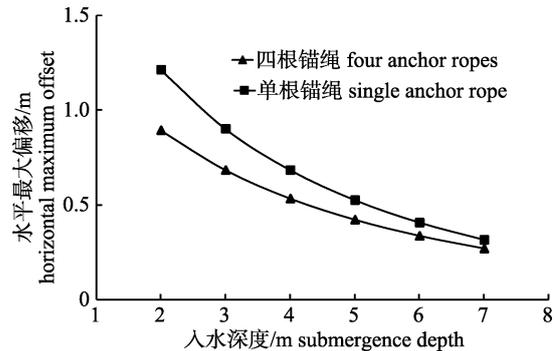


图 6 水平最大偏移随入水深度变化  
Fig. 6 Relationship between horizontal maximum offset and submergence depth

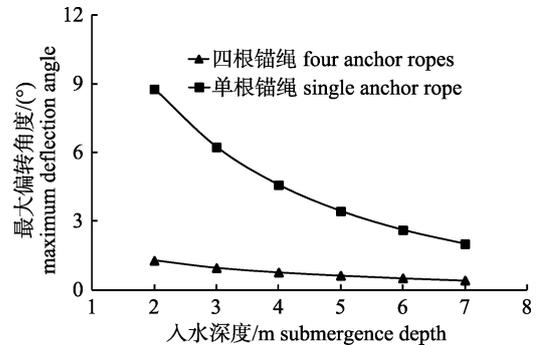


图 7 最大偏转角度随入水深度变化  
Fig. 7 Relationship between maximum deflection angle and submergence depth

### 2.3 锚绳最大受力随波高和入水深度变化

由图 8 和图 9 可见, 两种固定方式锚绳的最大拉力均随着波高增加而增加, 随着入水深度增加而减小。单根锚绳固定时浮鱼礁锚绳受最大拉力大于四根锚绳固定时四根锚绳受力总和。另由图可见, 四根锚绳锚固形式下, 无论波高还是入水深度变化, 对锚绳的受力影响都相对较小, 从受力来看, 四根锚绳同样具有较好的稳定性。

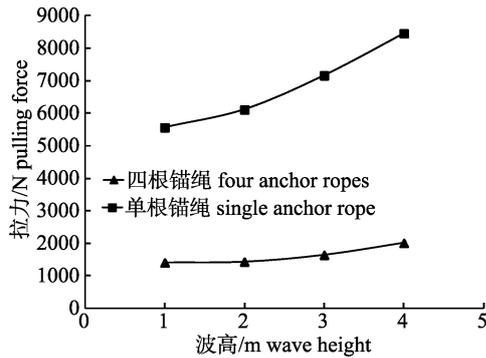


图 8 锚绳最大拉力随波高变化

Fig. 8 Relationship between maximum force of the anchor rope and wave height

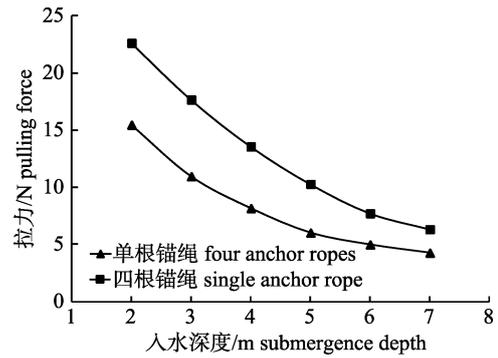


图 11 网衣最大受力随入水深度变化

Fig. 11 Relationship between maximum force of the net and submergence depth

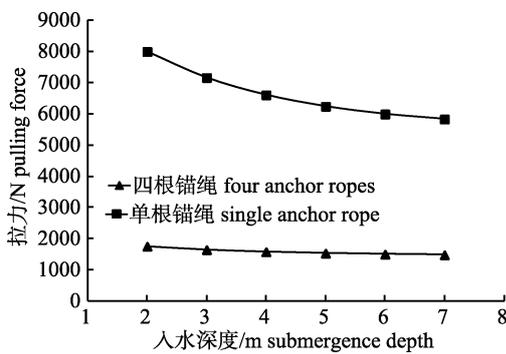


图 9 锚绳最大拉力随入水深度变化

Fig. 9 Relationship between maximum force of the anchor rope and submergence depth

## 2.4 网衣最大受力随波高和入水深度变化

由图 10 和图 11 可见,网衣网线的最大受力随波高增加而增加,随入水深度增加而减小,但四根锚绳固定条件下的受力均大于单根锚绳的受力,此规律与 2.1~2.3 的锚绳受力情况刚好相反。

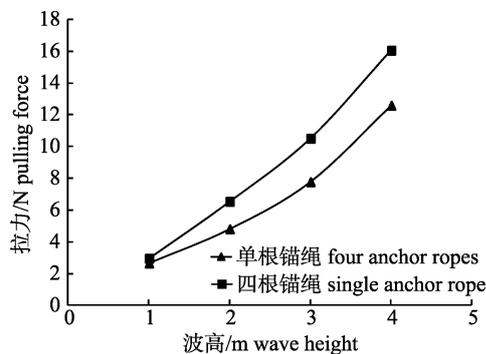


图 10 网衣最大受力随波高变化

Fig. 10 Relationship between maximum force of the net and wave height

## 3 讨论

本文研究了一种新型箱网式浮鱼礁的水力特性,探讨了波高变化、入水深度、锚绳固定(单根、四根)方式下,箱体最大水平偏移和偏转角度、锚绳受力以及网衣网线受力。研究表明,波高对浮鱼礁的运动和受力有较大影响,随着波高增加,两种固定方式下箱体的最大水平偏移、网衣网线受力、锚绳受力均迅速增加;单根锚绳固定时,箱体的最大偏转角度随波高增加迅速增加,而四根锚绳固定浮鱼礁的最大偏转角度几乎没有变化。推测原因是,由于四根锚绳之间的相互牵拉作用,形成旋转恢复力矩,有助于显著减小浮鱼礁的偏转角度,对稳定浮鱼礁起到重要作用。研究发现,入水深度同样会对浮鱼礁的力学特性产生较大影响,两种固定方式下的箱体最大水平偏移、网衣网线受力、锚绳受力和最大偏转角度均随着入水深度的增加而减小。其中四根锚绳固定箱体最大水平偏移和最大偏转角度以及锚绳受力小于单根锚绳固定时的情形,表现出良好的水动力稳定性。

本文研究发现,网衣存在最大受力节点,这与陈天华等<sup>[17]</sup>研究结果一致。但对于网衣网线的受力而言,四根锚绳固定时的浮鱼礁网衣网线受力大于单根锚绳固定时的浮鱼礁网衣网线受力,表现出与锚绳受力、框架偏移、框架倾角相反的规律,分析原因可能有两点:一是四根锚绳固定时浮鱼礁的最大偏转角度小于单根锚绳固定浮鱼礁的最大偏转角度,网衣形成更大的迎流面

积;二是四根锚绳固定浮鱼礁的水平最大偏移小于单根锚绳固定的情形,四根锚绳固定时浮鱼礁水平方向运动速度小于单根锚绳固定时的运动速度,导致四根锚绳固定时的浮鱼礁与波浪水质点间的相对速度更大,从而网衣受波浪力更大。

本文围绕锚定形式、波高、浮鱼礁入水深度等因素对箱网式浮鱼礁进行了研究,浮鱼礁的结构尺度、形式,网衣的材料、形式、规格,以及水流条件等诸多因素均会对浮鱼礁的结构安全性和稳定性产生影响,有待进一步系统深入地进行研究。基于本文的初步研究结果,建议在投放浮鱼礁时应重点考虑以下要素:(1)查找详细的水文资料,获得投放海域的最大波高,并基于此波高确定浮鱼礁的有效入水深度;(2)优先考虑多根锚绳固定方式,具有较好的水动力稳定性,浮鱼礁的最大水平偏移和偏转角度以及锚绳和网网线受力变化平稳,浮鱼礁的安全能有更好的保障。

#### 参考文献:

- [1] Yang L, Liu T Y, Huang R K, et al. Chinese Artificial Reef Theory and Practice[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2005. [杨齐, 刘同渝, 黄汝堪, 等. 中国人工鱼礁理论与实践[M]. 广州: 广东科技出版社, 2005.]
- [2] Gatts P, Franco M, dos Santos L, et al. Impact of artificial patchy reef design on the ichthyofauna community of seasonally influenced shores at Southeastern Brazil[J]. Aquatic Ecology, 2015, 49(3): 343-355.
- [3] Gao D K, Zhao J, Zhang X M, et al. Species composition and distribution patterns of ichthyoplankton within and outside artificial reefs in Laizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(2): 369-381. [高东奎, 赵静, 张秀梅, 等. 莱州湾人工鱼礁区及附近海域鱼卵和仔稚鱼的种类组成与数量分布[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 369-381.]
- [4] Bohnsack J A, Harper D E, McClellan D B, et al. Effects of reef size on colonization and assemblage structure of fishes at artificial reefs off southeastern Florida, USA[J]. Bulletin of Marine Science, 1994, 55(2-3): 796-823.
- [5] Zhao H T, Zhang Y F, Hao C L, et al. Siting and designing of artificial reefs[J]. Journal of marine sciences, 2006, 24(4): 69-76. [赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. 海洋学研究, 2006, 24(4): 69-76.]
- [6] Liu G S, Tong F, Cai X Y, et al. Variation in the macroalgae community structure during summer in the artificial reef zones of Shuangdao Bay, Weihai, Shandong Province, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(5): 1010-1019. [刘国山, 佟飞, 蔡星媛, 等. 威海双岛海域人工鱼礁区大型海藻夏季群落结构变化[J]. 中国水产科学, 2014, 21(5): 1010-1019.]
- [7] Xia Z Y, Lu H S, Feng B, et al. Artificial Reef Engineering[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011. [夏章英, 卢伙胜, 冯波, 等. 人工鱼礁工程学[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.]
- [8] Yu P M, Zhang X M. The enlightenment of the construction of artificial reefs in Japan and the United States to China[J]. Fishery Modernization, 2006(2): 6-7, 20. [于沛民, 张秀梅. 日本美国人工鱼礁建设对我国的启示[J]. 渔业现代化, 2006(2): 6-7, 20.]
- [9] Wang J T. The design of flexible floating reef and its hydrodynamic characteristics analysis[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [王江涛. 柔性浮鱼礁设计及水动力学特性分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [10] Zhang J, Pan Y, Feng D J, et al. Study on numerical simulation of hydrodynamic property of frame-type floating reefs under wave action[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(2): 42-49. [张健, 潘昀, 冯德军, 等. 框架式浮鱼礁波浪水动力特性数值模拟研究[J]. 渔业现代化, 2018, 45(2): 42-49.]
- [11] Gui F K. Hydrodynamic behaviors of deep-water gravity cage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. [桂福坤. 深水重力式网箱水动力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.]
- [12] Gui F K, Zuo X, Pan Y, et al. The effect on numerical precision for simulating frame floating structure tethered by a mooring cable in waves[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(4): 1-10. [桂福坤, 左孝, 潘昀, 等. 波浪作用下刚性框架浮体及其锚绳运动数值模拟精度分析[J]. 海洋工程, 2018, 36(4): 1-10.]
- [13] Ren H L, Wang X L, Hu Y J, et al. Dynamic response analysis of a moored crane-ship with a flexible boom[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2008, 9(1): 26-31.
- [14] Huang Y A, Deng Z C, Yao L X. Dynamic analysis of a rotating rigid-flexible coupled smart structure with large deformations[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2007, 28(10): 1349-1360.
- [15] Zhu X Q, Yoo W S. Numerical modeling of a spherical buoy moored by a cable in three dimensions[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(3): 588-597.
- [16] 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. [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(中文版), 2006, 28(5): 145-151.]
- [17] 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[J]. 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[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 245-251.]

## Hydrodynamic characteristics of a cage-net floating reef in waves

ZHANG Jian, FENG Dejun, WANG Ping, PAN Yun, GUI Fukun

National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316002, China

**Abstract:** Sinking and floating reefs are the main types of artificial reefs, and have been widely used in the development of marine ranching. The floating reef is usually used to trap and protect fishes distributed in the middle and upper water layers. Compared with a sinking reef, the floating reef is less restricted by seabed conditions and demonstrates better performance in the seabed with silt substrate. However, the floating reef can be greatly affected by the dynamic ocean environment, such as waves and current, as its main body is set in the middle and upper water layers. Thus, the structural safety and stability of floating reefs are key points for their design and deployment. This study proposes a newly designed multi-functional cage-net floating reef characterized by its function in both fish protection and culture. Moreover, a numerical model has been established to analyze the effects of wave height and water depth on the structural safety and stability of a floating reef anchored by two modes (single anchor rope and multiple anchor ropes). The results showed that under the same hydrodynamic conditions, in the case of a single anchor rope, the total anchor rope force was almost the sum of the forces for the four anchor ropes; however, the total netting force was less than that in the case of four anchor ropes. Wave height had a great influence on the maximum deflection angle of the floating reef. However, anchoring with four anchor ropes can significantly reduce the maximum deflection angle; the reduction becomes more obvious with increasing wave height, effectively improving the stability of the floating reef. Under conditions of constant wave height, the maximum offset of the floating reef decreased rapidly with increasing deploying water depth. Furthermore, there was minimal difference in the movement of the floating reef between the two anchoring modes when the submergence depth of the main body was twice that of the wave height.

**Key words:** floating reef; anchor rope; net; numerical simulation; hydrodynamic characteristics; cage

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