

## 波流入射方向对网格式锚碇网箱水动力特性的影响

陈昌平<sup>1,2</sup>, 李玉成<sup>1</sup>, 赵云鹏<sup>1</sup>, 董国海<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 大连水产学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 运用集中质量方法和刚体运动学原理, 建立了单体网格式网箱在波流联合作用下浮架、网衣和锚碇系统受力和运动的数学模型。利用物理模型试验对本数学模型的正确性进行了验证。在此基础上计算了2种波流作用方向、各工况下单体网格式网箱3类锚绳(锚碇锚绳、连接锚绳、网格锚绳)受力、浮架运动及网衣变形的结果, 并分析了波流作用方向对网格式锚碇网箱水动力特性的影响。结果表明, 当波流作用方向由正向变为斜向(45°)时, 锚碇锚绳与连接锚绳受力有较大程度的增加, 网格锚绳受力有较小程度的增加; 浮架水平方向、竖直方向运动幅度有一定程度减小, 浮架倾角及网衣变形变化不明显。[中国水产科学, 2010, 17(4): 828-838]

**关键词:** 网格式锚碇; 波流作用; 数值模拟; 水动力特性

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2010)04-0828-11

浅水网箱养殖作为一种传统的养殖方式, 主要集中于半封闭的海湾内。受经济利益影响, 中国部分沿海地区浅水网箱养殖密度相对较大, 致使水流不畅, 养殖水体局部严重缺氧, 加之残饵及鱼类排泄物不能迅速随水体输送出去, 导致海区环境容量超负荷现象严重。这种养殖方式既污染海域水质, 又影响养殖鱼类品质, 同时也成为诱发沿海赤潮的主要因素之一。因此, 使网箱养殖从内湾、近海逐渐向外海或深海转移是网箱养殖可持续发展的必由之路。

由于深水区域浪高流急, 开展深水网箱的水动力特性研究是深水网箱养殖业发展的技术支撑。抗风浪网箱水动力特性研究在中国近几年才发展起来, 在国外也处在发展之中。与模型试验和现场观测方法相比数值模拟方法成本低、省时、易于操作。目前很多学者开始致力于网箱数值模拟技术的研究, 并且提出了很多解决网箱数值计算问题的可行性方法, 法国学者 Marichal<sup>[10]</sup> 采用有限差分法

对拖网在水流作用下的形状特性进行了数值研究; Bessoneau 和 Marichal<sup>[11]</sup> 将网衣看作刚性的杆件进行受力分析, 得到网衣的力学平衡方程, 求解了水流中渔网的变形和受力情况; Lader 等<sup>[12-13]</sup> 通过将网衣假定为由非线性弹簧连接的微元网片组成的柔性体, 采用数值方法对圆形网衣在水流作用下和平面网衣在单纯波浪作用下的受力及变形作了研究; 万荣等<sup>[14]</sup> 采用计算机模拟的方法对网衣在水流作用下的变形作了研究; 李玉成等<sup>[15-16]</sup> 及赵云鹏等<sup>[17-18]</sup> 利用集中质量方法建立数学模型, 对平面网衣和四点锚碇重力式网箱在波浪和水流作用下的水动力特性进行了数值模拟研究。

通过上述分析发现, 目前在网箱数值模拟方面的研究成果大都集中在网箱处于单独波浪或单独水流条件下, 而实际海域波浪和水流通常是共存的, 并且其对网箱的作用方向是多变的。网格式锚碇网箱是目前深水网箱养殖中运用较为广泛的一种形式。

收稿日期: 2009-09-16; 修订日期: 2009-12-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50809014); 国家863计划资助项目(2006AA100301); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(200801411094).

作者简介: 陈昌平(1971-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事波浪与结构物相互作用研究. E-mail: ccp@dlfu.edu.cn

通讯作者: 赵云鹏(1980-), 博士, 讲师, 主要从事波浪与结构物作用研究. E-mail: ypzhaod@dlut.edu.cn

本实验主要针对波流共同作用下,重力式网箱在网格式锚碇情况下的水动力特性进行数值模拟,并对波流入射角度变化对网箱水动力特性的影响进行分析,旨在为深水网箱的抗风浪设计提供理论依据。

### 1 数值模拟方法

网格式锚碇网箱主要由网衣系统、锚碇系统和浮架系统组成,结构示意图如图1所示。关于数值模拟方法的详细介绍,参照本课题组曾获得的研究结果<sup>[19,20]</sup>,这里只对网箱各组成部分模拟方法作一简述。

#### 1.1 网衣系统及锚碇系统

假定网衣结构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流作用下的位移,可得到网衣变形后的形状。图2为网衣模型示意图。网衣所受波浪、水流的作用力可根据Morison方程来计算。

根据牛顿第二定律,集中质量点的运动方程可以表示为:

$$M_i \bar{a} = \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} + \bar{F}_D + \bar{F}_I + \bar{B} + \bar{W} \quad (1)$$

式中:  $M_i$ 为第*i*个集中质量点的质量;  $\bar{a}$ 为集中质量点的加速度;  $\bar{T}_{ij}$ 为与*i*点相邻的*j*点之间的张力;  $\bar{F}_D$ 为集中质量所受波流作用的速度力;  $\bar{F}_I$ 为集中质量所受波流作用的惯性力;  $\bar{B}$ 为集中质量点所受的浮力;  $\bar{W}$ 为集中质量点所受的重力。

锚碇系统主要由锚绳组成,和网衣类似采用集中质量的方法将锚绳离散为若干个构件与集中质量点进行分析。集中质量点位于构件的两端,通过将构件所受外力均分到质量点上来获得各质点的受力。图3为某一锚绳第*i*个集中质量点受力示意图,图中  $T_j$ 、 $T_{j-1}$ 、 $W_j$ 、 $W_{j-1}$ 、 $F_{Bj}$ 、 $F_{Bj-1}$ 、 $F_{Dj}$ 、 $F_{Dj-1}$ 、 $F_{Ij}$ 、 $F_{Ij-1}$  分别代表与*i*节点左右相连的第*j*、*j-1*构件所受的锚绳张力、重力、浮力、速度力及惯性力。

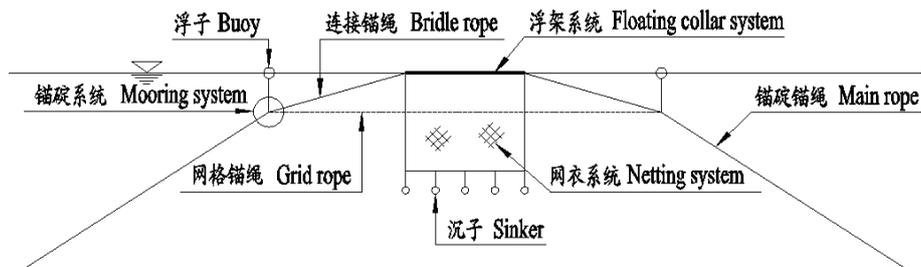


图1 网格式网箱结构示意图  
Fig. 1 Sketch of grid mooring net cage structure

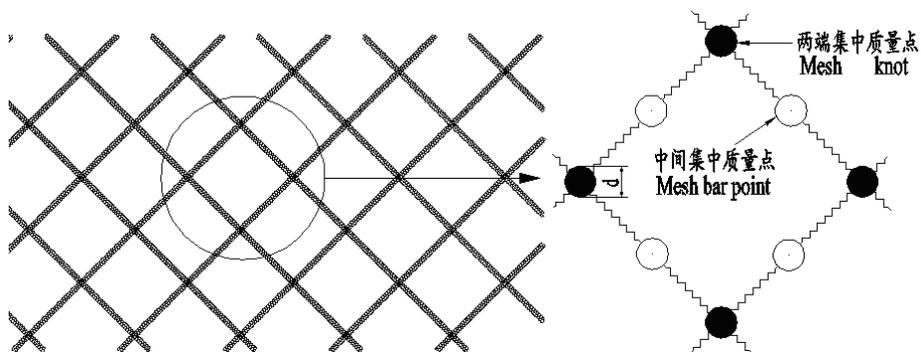


图2 网衣模型示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of mass-spring model

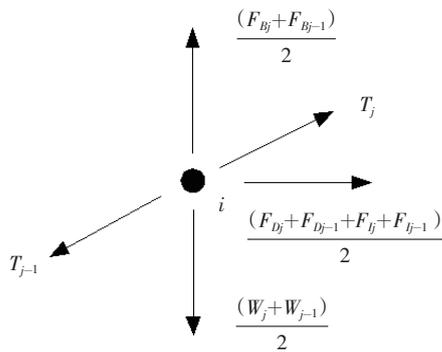


图3 集中质量点*i*受力示意图

Fig. 3 Associated resultant forces on *i*th node

集中质量点*i*运动方程的建立方法与网衣部分相同。

1.2 浮架系统

本研究对常用的双排浮管进行计算,假定浮架是刚性的。模拟中忽略扶手和立柱等附属构件,将其质量均分到两根浮管。在计算浮架的受力过程中,采用取微段的方法来进行计算,如图4所示。在分析受力时定义两套坐标系,分别为整体坐标*xyz*和微段上的局部坐标*nτν*。在整体*xyz*坐标系中,波浪沿*x*轴正方向传播,*z*轴垂直于静水面,原点*O*位于静水面上。在局部坐标系*nτν*中,*n*为沿浮架径向的法线方向,*τ*为微元平面对应浮管微元的切线方向,*ν*为垂直于平面微元方向。

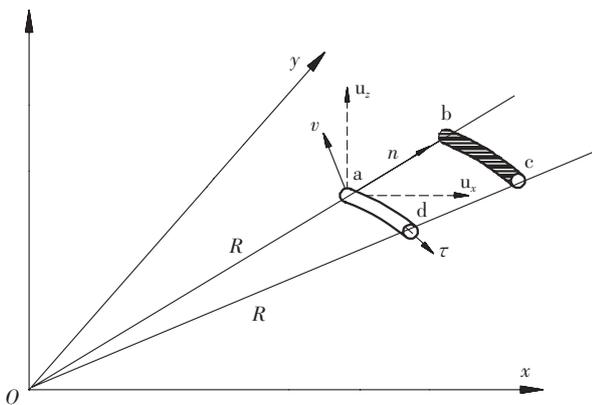


图4 浮架微元示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mini-segment

作用在浮架微元上的水流力可以通过Morison

方程来计算。波流条件下,当构件与水流同时发生运动时,依Brebba和Walker的建议<sup>[21]</sup>将静态的Morison经验公式改写如下:

$$\bar{F} = \frac{1}{2} C_D \rho_w A |\bar{u} - \bar{U}| \cdot (\bar{u} - \bar{U}) + \rho_w V_0 \bar{a} + C_m \rho_w V_0 (\bar{a} - \bar{U}) \tag{2}$$

式中: $\bar{u}$ 和 $\bar{F}$ 分别为水质点速度和浮架微元运动速度矢量; $\rho_w$ 为水的密度; $A$ 为浮架微元垂直于流向的投影面积; $C_D$ 、 $C_m$ 为速度力和惯性力系数。

浮架除受水流力外,还受到重力,浮力及锚绳力的作用。浮架在外力作用下发生平动和转动,其计算可参见文献[18]。

1.3 波流场的模拟

波流相互作用的数学模型较复杂,难以在工程实际中应用。本实验只考虑稳定均匀流和规则波浪同向相互作用形成的波流场情况。波浪与稳定均匀流的相互作用过程可视为:第一阶段波与水流独立存在,在第二阶段二者经相互作用后形成一个稳定的波浪—水流组合。在这一过程中,单纯水流的能量通量在波流相互作用前后视为不变,对波能变化采用波浪作用通量守恒原理。在线性波条件下,在波浪和水流相互共存时,综合波流场中的流速为水流速度(均匀分布)和波浪水质点速度之和。在固定坐标系下,对于点*P*(*t*; *x*, *y*, *z*),其波面 $\eta$ ,水质点水平和垂直速度可由下式表示:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \tag{3}$$

$$u_x = U + \frac{H}{2} (\omega - kU) \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \tag{4}$$

$$u_z = \frac{H}{2} (\omega - kU) \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \tag{5}$$

式中: $U$ 为水流流速; $H$ 为波高; $k$ 为波数; $\omega$ 为角频率; $d$ 为水深。固定坐标系*Oxyz*,坐标轴原点*O*位于静水面上, $z$ 轴垂直水面向上,波浪沿*x*轴方向入射。式(3)–(5)的*H*、*k*、 $\omega$ 为受水流影响后的波高、波数及角频率,具体可参考文献[22]。

## 2 计算模型的验证

利用物理模型试验对本研究中数学模型对于结算波流作用下重力式网箱水动力特性结果的正确性进行验证。该物理模型试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室多功能水池(长56 m, 宽

34 m, 深1 m)中进行, 试验网箱模型根据重力相似准则<sup>[23]</sup>, 按照1:40的模型比尺设计。图5为物理模型试验中网箱模型的布置情况。水流方向与波传播方向一致。模型验证时考虑正向入射情况, 即图5(a)中所示的波流方向1。

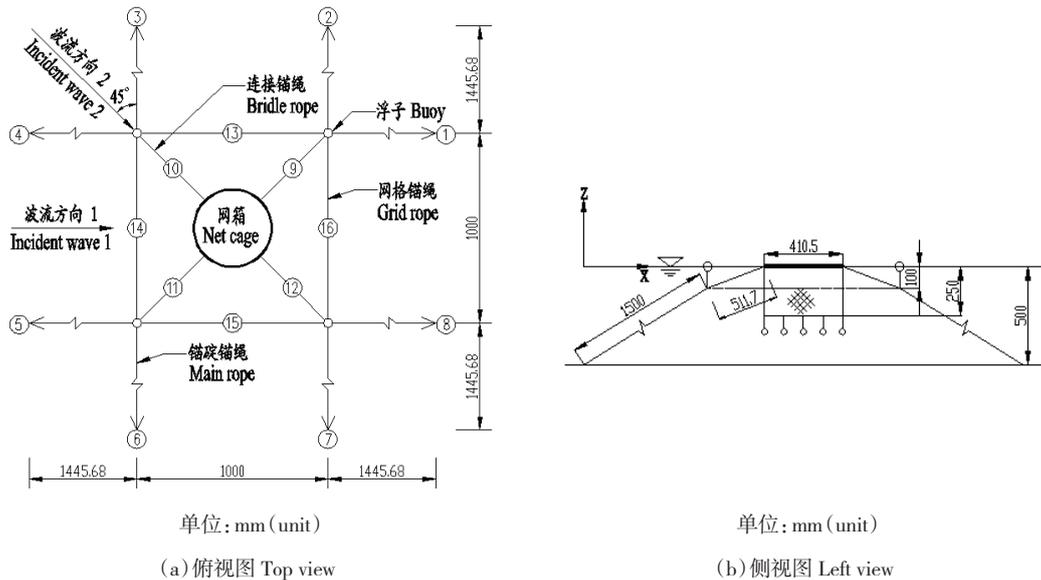


图5 网格式网箱模型示意图  
Fig. 5 Sketch of grid mooring net cage model

模型试验中, 网衣材质为聚乙烯, 密度为 $0.953 \text{ kg/m}^3$ , 目脚大小为 $11.7 \text{ mm}$ , 网线直径为 $0.72 \text{ mm}$ , 围成的圆形网衣直径为 $0.398 \text{ m}$ , 高度为 $0.25 \text{ m}$ 。网衣下端挂有沉子, 沉子为直径 $7.5 \text{ mm}$ 的球体结构, 共10个, 单个沉子水中质量为 $3.1 \text{ g}$ , 对应原型质量为 $198.4 \text{ kg}$ 。浮子的模拟采用质量 $2.5 \text{ g}$ 、直径为 $38 \text{ mm}$ 的乒乓球, 对应原型质量为 $160 \text{ kg}$ 。浮架由两根浮管构成, 采用高密度聚乙烯(HDPE)材质, 总质量为 $18.54 \text{ g}$ , 对应原型质量为 $1\ 186.56 \text{ kg}$ , 内外浮管的直径分别为 $0.398 \text{ m}$ 、 $0.423 \text{ m}$ 。锚碇系统网格深度为 $0.1 \text{ m}$ 。试验水深为 $0.5 \text{ m}$ 。在迎浪侧主锚绳与地面接触处布有拉力传感器以测量缆绳受力。同时, 采用CCD图像采集系统对网箱浮架中心点的运动进行测量(浮架中心处布有发光二极管)。

### 2.1 锚碇锚绳受力比较

由物理模型试验和数值模拟计算结果可知, 波流作用时迎波面锚碇锚绳受力较大, 在验证时取图5(a)中4#、5#锚绳受力峰值均值的算术平均值作为特征值进行比较。图6为波流作用下计算与试验迎波面锚碇锚绳受力特征值的比较。

由图6可知, 试验值与计算值吻合较好。锚绳受力特征值试验值与计算值相对误差在 $0.22\% \sim 6.48\%$ 范围内。12种工况相对误差均值为 $3.3\%$ 。

### 2.2 浮架运动幅度比较

在运动验证方面, 主要针对网箱浮架中心点的水平和垂直运动幅度(即中心点沿波流和垂直波流传播方向位移幅度的最大值), 以及浮架倾角(即浮架绕惯性主轴旋转角度的最大值)进行了比较。波流作用下网箱浮架中心点水平、竖直方向运动幅度

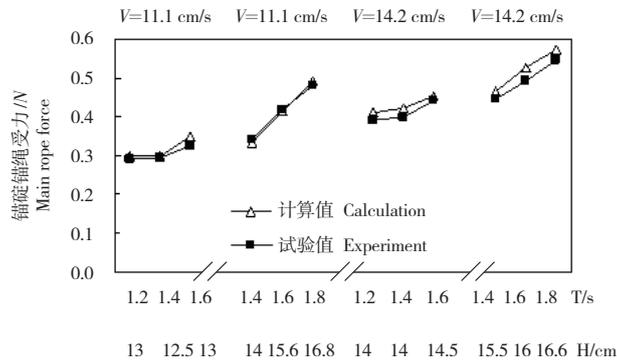


图6 波流作用下锚绳力计算结果与试验结果比较

Fig. 6 Comparisons of the main rope forces of numerical results vs. experimental data in wave side

的计算值与试验值比较见图7。各工况下浮架中心点水平方向运动幅度计算值与试验值相对误差在0.73% ~ 8.62%, 相对误差均值为3.75%; 浮架中心

点竖直方向运动幅度计算值与试验值相对误差在0.84% ~ 6.24% 范围内, 相对误差均值为3.43%。

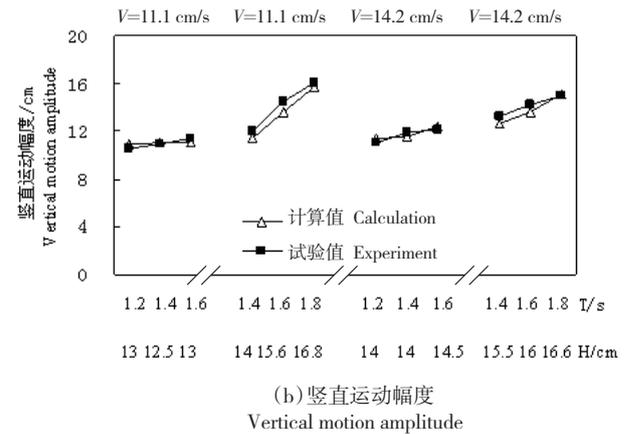
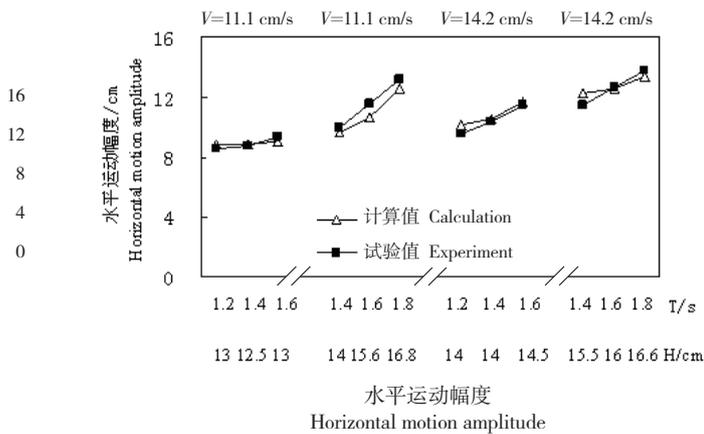


图7 波流作用下浮架中心点运动计算值与试验值比较

Fig. 7 Comparisons on the motion amplitudes of float collar of numerical results vs. experimental data

由此可见,各工况下,浮架中心点水平、竖直方向运动幅度的计算值与试验值吻合较好。

各工况下浮架倾角计算值与试验值的比较见图8。

波流作用条件下,浮架倾角较小。各种工况下试验值与计算值绝对误差在0.02° ~ 1.24°。

通过网格格式锚碇网箱迎波面锚碇锚绳受力特征值、浮架中心点水平、竖直方向运动幅度及浮架倾角的计算与试验结果比较,可判断本实验数学模型对于计算波流作用下网箱受力和运动相应情况具有较

好的准确性。

### 3 波流作用方向对网箱水动力特性的影响

利用本研究建立的数学模型,模拟两种不同波流入射方向情况下重力式网箱的锚绳受力和运动响应情况,从而分析波流作用方向变化对网箱水动力特性的影响。网箱模型计算参数如第2节所述,2种波流作用方向如图5。波流方向1为波流正向入射,波流方向2为波流沿45度方向入射。计算模型中采用的工况条件如表1所示。

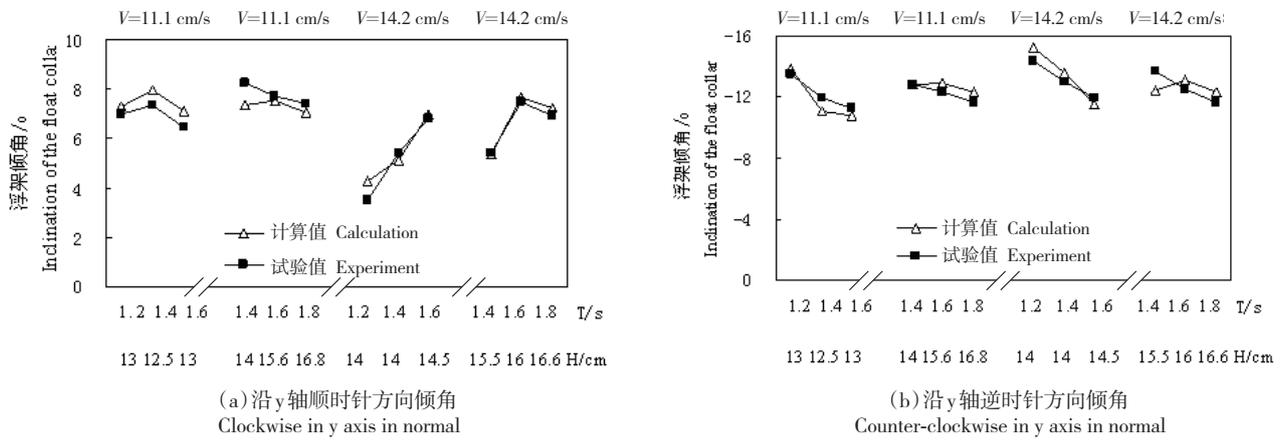


图8 浮架沿y轴倾角计算值与试验值比较

Fig. 8 Comparisons on the inclination of the float collar of numerical results vs. experimental data

表1 网箱模型计算工况表  
Tab. 1 Wave-current conditions of calculation

波高/cm Wave height	周期/s Period	流速/(cm · s <sup>-1</sup> ) Velocity	波高/cm Wave height	周期/s Period	流速/(cm · s <sup>-1</sup> ) Velocity
14	1.2	11.1	14	1.2	14.2
	1.4			1.4	
	1.6			1.6	
18	1.4		18	1.4	
	1.6			1.6	
	1.8			1.8	

### 3.1 锚绳受力比较

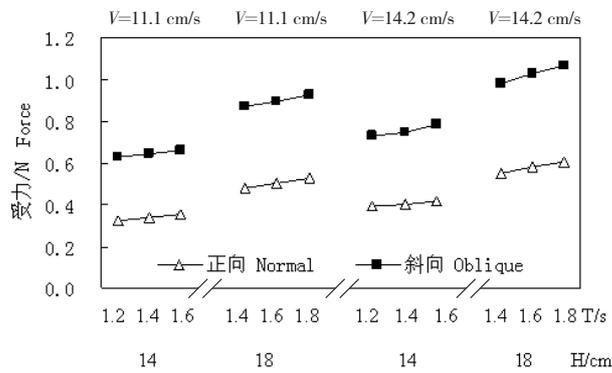
网格式锚碇网箱锚绳可分为锚碇锚绳、连接锚绳和网格锚绳(图1)。分析时考虑各类锚绳受力最大值。波流正向作用时,上述三类锚绳受力特征值分别取图5-(a)中4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>锚绳受力峰值均值的算术平均值、10<sup>#</sup>、11<sup>#</sup>锚绳受力峰值均值的算术平均值、16<sup>#</sup>锚绳受力峰值均值。波流斜向45°作用时,上述三类锚绳受力特征值分别取图5-(a)中3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>锚绳受力峰值均值的算术平均值、10<sup>#</sup>锚绳受力峰值均值、15<sup>#</sup>、16<sup>#</sup>锚绳受力峰值均值的算术平均值。考虑实际养殖工程中,一般采用2根或3根连接锚绳与浮架直接相连,在分析时取连接锚绳受力特征值的一半作为受力特征值进行分析。

波流作用2种方向条件下,3种类型锚绳受力特征值比较见图9。由图可知,各工况下,均表现为锚碇锚绳受力特征值最大,连接锚绳受力特征值次之,

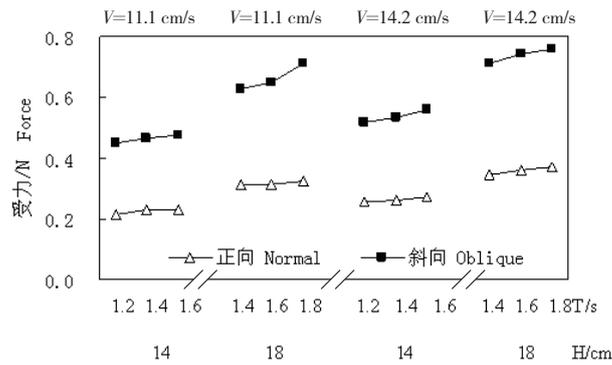
网格锚绳受力特征值最小。当波流作用方向由0°由正向变为斜向45°时,三类锚绳受力特征值均表现出有不同程度的增加,其中连接锚绳受力特征值增加幅度最大,锚碇锚绳受力特征值增加幅度其次,网格锚绳受力特征值增加幅度较小。

以波流正向作用时各工况下各类锚绳受力特征值为基准,统计波流45°斜向作用时,对应各工况锚绳受力特征值变化幅度。各工况下,锚碇锚绳受力特征值的增加幅度最大值为92.69%,最小值为76.34%,平均值为83.88%。网箱系统在2种入射波向的波流作用下呈周期性运动,在相同波流条件某一时刻,圆形网箱整体(浮架与网衣)受力相同,波流斜向作用时,锚碇锚绳变形产生的张力沿波流方向的投影大小与网箱受力相平衡,因此表现为受力值要大于正向作用时对应情况。

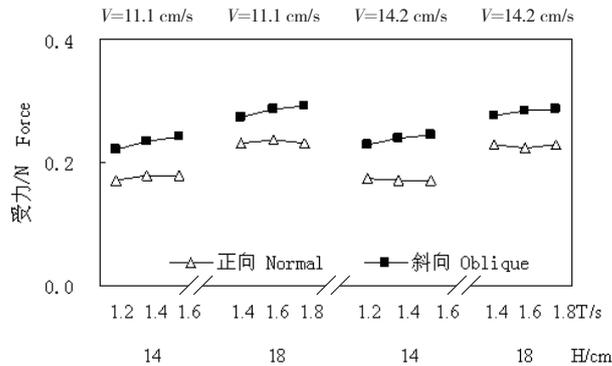
由图5-(a)可知,波流斜向作用时,沿波流向只



(a) 锚碇锚绳受力特征值  
Characteristic value of the main forces



(b) 连接锚绳受力特征值  
Characteristic value of the bridle forces



(c) 网格锚绳受力特征值  
Characteristic value of the grid forces

图9 两种波流作用方向锚绳受力特征值比较

Fig. 9 Comparisons of the characteristic value of the rope forces in two propagation directions of incident wave-current

有一根连接锚绳直接与浮架相连,正向作用时有两根连接锚绳与浮架相连,虽有夹角,但总体上仍表现为斜向作用时,连接锚绳受力特征值大于正向作用时对应情况。各工况下,连接锚绳受力特征值的增加幅度最大值为118.13%,最小值为100.00%,平均

值为105.78%。

网格锚绳受力特征值相比,表现为波流斜向作用时网格锚绳受力特征值大于正向作用时对应情况。各工况下,网格锚绳受力特征值的增加幅度最大值为42.44%,最小值为18.18%,平均值为28.77%。这主要

是由于网格锚绳与入射波向的夹角不同引起的。

### 3.2 浮架中心点运动幅度比较

两种波流作用方向情况下,浮架中心点水平、竖

直方向运动幅度比较见图10。由图可知:当波流作用方向由正向变为斜向时,浮架中心点的水平、竖直方向运动幅度均有不同程度的减小。

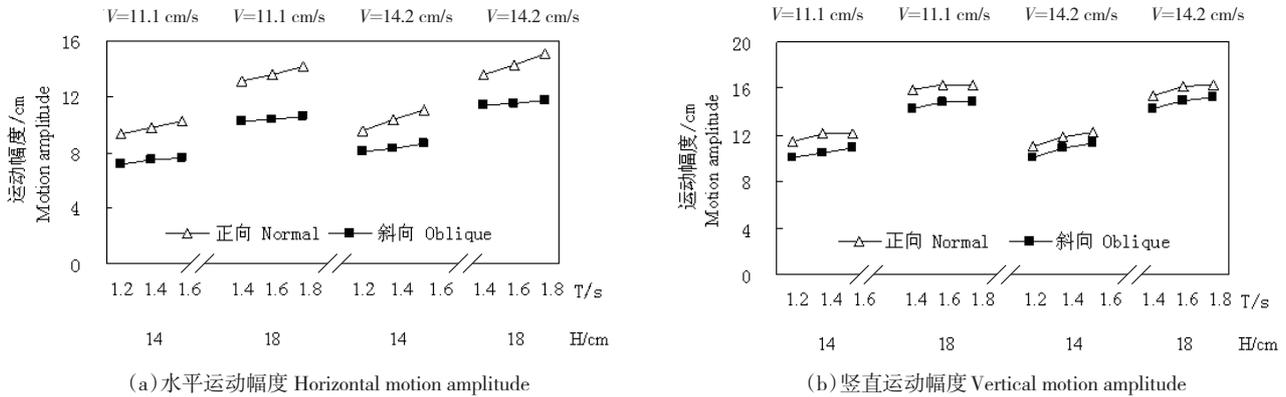


图10 两种波流作用方向浮架中心点运动幅度比较

Fig. 10 Comparisons of the float collar motion amplitudes in two propagation directions of incident wave-current

以波流正向作用时各工况下浮架中心点水平、竖直方向运动幅度为基准,统计波流斜向45°作用时对应工况下浮架中心点运动幅度的变化幅度。当波流作用方向由正向变为斜向时,各工况下浮架中心点水平方向运动幅度减小幅度最大值为26.06%,最小值为16.15%,平均值为21.82%。竖直方向运动幅度有较小程度的变化,各工况下,减小幅度最大值为12.94%,最小值为6.76%,平均值为9.06%。

浮架中心点的运动幅度受连接锚绳的约束,当

波流以45°斜向作用时,浮架水平方向运动受投影方向与之平行的连接锚绳约束作用要强于波流正向作用时与浮架斜向相连的连接锚绳约束作用。两种作用方向,连接锚绳对浮架竖直方向的约束作用相近,故两者竖直方向运动幅度变化较小。

### 3.3 浮架运动倾角比较

两种波流作用方向情况下,浮架沿y轴方向的倾角比较见图11。

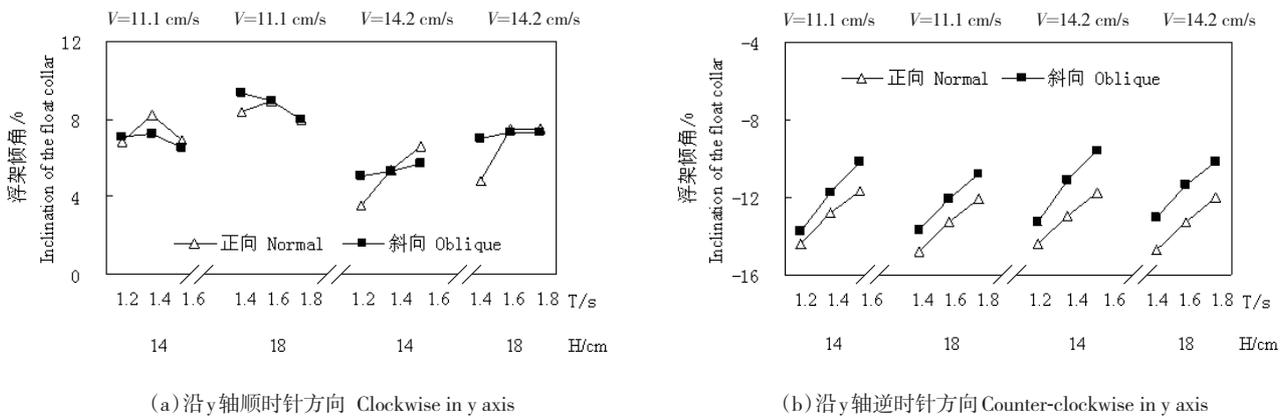


图11 两种波流作用方向浮架沿y轴倾角

Fig. 11 Comparisons of the inclination of the float collar in two propagation directions of incident wave-current

由图可知各工况相比,沿y轴顺时针方向倾角互有大小,总体变化不明显,两者绝对误差值在 $0.03^\circ \sim 2.12^\circ$ ,绝对误差值平均为 $0.63^\circ$ ;沿y轴逆时针方向倾角总体表现为波流 $45^\circ$ 斜向作用时稍大于正向作用时对应情况,两者绝对误差值在 $0.63^\circ \sim 2.16^\circ$ ,绝对误差值平均为 $1.44^\circ$ 。

浮架倾角产生主要是因为波面倾角引起的,在相同波流条件下,波面倾角相同,所以浮架倾角变化不大。

### 3.4 网箱容积损失率比较

根据网衣在波流作用下网线的运动方程,可得到在波流作用下各时刻网衣集中质量点坐标,从而

可得各时刻到网衣的空间体积。网箱容积的计算采用切割方法,参见本研究室以前的报道<sup>[17]</sup>。定义网箱容积损失率为:

$$\lambda_v = (V_{c0} - V) / V_{c0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\lambda_v$ 为网箱容积损失率; $V_{c0}$ 为网箱未变形时所围成的空间体积; $V_c$ 为网箱在波流作用下变形后的所围成的空间体积。考虑波的周期性,在各种波流条件作用一段时间后,网衣体积大小也呈周期性变化,图12为在本计算条件下,两种波流作用方向条件,各种工况下网箱容积最大损失率的比较。由图可知,各工况下两者绝对误差值在 $0.07\% \sim 0.82\%$ ,绝对误差值平均为 $0.47\%$ 。

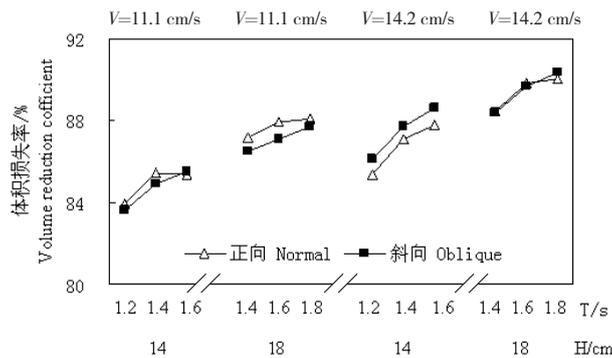


图12 两种波流作用方向网箱最大容积损失率比较

Fig. 12 Comparisons of maximum values of volume reduction coefficient in two propagation directions of incident wave-current

## 4 结论

通过对网格式锚碇网箱数值计算模型的验证表明,采用本研究计算模型可得较好的模拟精度。同时,利用数学模型对2种不同波流入射角度下网箱的受力和运动进行了数值模拟。通过对计算结果的分析,可以得到如下主要结论:

(1) 2种波流作用方向情况下,网格式网箱3类锚绳中,锚碇锚绳受力特征值最大,连接锚绳受力特征值次之,网格锚绳受力特征值最小。

(2) 波流作用方向由正向变为斜向 $45^\circ$ 时,3类锚绳受力特征值均表现出有不同程度的增加。其中

连接锚绳受力特征值增加幅度最大,锚碇锚绳受力特征值增加幅度其次,网格锚绳受力特征值增加幅度较小。各工况下,连接锚绳、锚碇锚绳、网格锚绳受力特征值增加幅度最大值分为 $118.13\%$ 、 $92.69\%$ 、 $42.44\%$ 。

(3) 波流作用方向由正向变为斜向 $45^\circ$ 时,浮架中心点的水平、竖直方向运动幅度均有不同程度的减小。各工况下,水平、竖直方向运动幅度减小幅度最大值分别为 $26.06\%$ 、 $12.94\%$ 。

(4) 波流作用方向由正向变为斜向 $45^\circ$ 时,浮架倾角及网箱容积损失率变化较小。

## 参考文献:

- [1] Linfoot B T, Hall M S. Analysis of the motions of scale-model sea-cage systems [C]. IFAC Symposium: aquaculture' 86. Norway, Trondheim, 1986.
- [2] Linfoot B T, Cairns J, Poxton M G. Hydrodynamic and biological factors in the design of sea-cages for fish culture [C]. Engineering for Offshore Fish Farming. Thomas Telford, 1990: 197-209.
- [3] Reville K M, Hall E I, Ronning B. The design and modeling of a flatfish sea cage [R]. Design Project Dept of Civil and Offshore Engineering. Edinburgh: Heriot-Watt University, 1995.
- [4] Slaattelid O. Model tests with flexible, circular floats for fish farming [R]. Engineering for Offshore Fish Farming. Thomas Telford, 1990: 93-106.
- [5] Fredriksson D W, Muller E, et al. Physical model tests of a Gravity-type fish cage with a single point, High tension mooring [C]. Proceeding of the 18th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, Newfoundland Canada, AMSE, 1999.
- [6] Fredriksson, Swift M R, D W, et al. Open ocean aquaculture engineering: system design and physical modeling [J]. Mar Tech Soc J Washington D C, 2000, 34(1): 41-52.
- [7] 李玉成, 宋芳, 董国海, 等. 碟形网箱水动力特性的研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(4): 19-25.
- [8] 李玉成, 宋芳, 张怀慧, 等. 拟碟形网箱水动力特性的研究[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(1): 1-7.
- [9] 李玉成, 董国海, 关长涛, 等. 深水重力式网箱水动力特性的研究[C]. 海洋生物高技术论坛论文集, 厦门, 2005: 277-295.
- [10] Marichal D. Cod-end numerical study [C]. Proceeding of hydroelasticity in Marine Technology, Oxford, UK, 2003: 11-18.
- [11] Bessonau J S, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls) [J]. Oce Engin, 1998, 25(1): 563-583.
- [12] Lader P F, Fredheim A, Lien E. Modeling of 3D net structures exposed to waves and current [C]. Hydroelasticity in Marine Technology, 2003: 19-26.
- [13] Lader P F, Fredheim A, Lien E. Dynamic behavior of 3D nets exposed to waves and current [C]. Proceedings of the 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, OMAE, 2001.
- [14] 万荣, 宋协法, 唐衍力. 养殖网箱耐流特性的计算机数值模拟 [C]. 第一届海洋生物高技术论坛论文集, 舟山, 2001: 361-365.
- [15] Li Y C, Zhao Y P, Gui F K, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic behavior of submerged plane nets in current [J]. Ocean Engin, 2006, 33(17-18): 2352-2368.
- [16] 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.
- [17] 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]. Aqu Engin, 2007, 36(3): 285-301.
- [18] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, et al. Numerical simulation of hydrodynamic behaviors of gravity cage in waves [J]. Chin Oce Engin, 2007, 21(2): 225-238.
- [19] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, et al. A numerical study on dynamic properties of the gravity cage in combined wave-current flow. [J]. Oce Engin, 2007(34): 2350-2363.
- [20] Chen C P, Li Y C, Zhao Y P, et al. Numerical Analysis on the Effects of Submerged Depth of the Grid and Direction of Incident Wave on Gravity Cage [J]. Chin Oce Engin, 2009, 23(2): 233-250.
- [21] Brebbia C A, Walker S. Dynamic analysis offshore structures [M]. Newnes-Butterworths, 1979: 109-143.
- [22] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用: 第2版 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 124-132.
- [23] 李玉成, 桂福坤, 张怀慧, 等. 深水养殖网箱试验中的网衣相似准则的应用[J]. 中国水产科学, 2005, 12(2): 179-187.

## Effects of direction of incident wave-current on single grid mooring net cage under combined wave-current action

CHEN Changping<sup>1,2</sup>, LI Yucheng<sup>1</sup>, ZHAO Yunpeng<sup>1</sup>, DONG Guohai<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Based on lumped mass method and rigid body kinematics theory, a mathematical model of the gravity cage has been developed. In order to verify the mathematical model, a series of physical model tests have been carried out. According to the comparisons between simulated and experimental results, it can be found that our simulated and experimental results agree well in each condition. Then, the effects of direction of incident wave-current propagation on hydrodynamic behaviors of gravity cage are analyzed. According to the simulated results, it can be found that when the wave-current propagation direction varied from normal to oblique, the mooring line forces in main ropes and bridle ropes increased obviously, and the mooring line forces in grid ropes increased little. With the propagation direction of incident wave-current increasing, the horizontal and vertical motion amplitude of the floating collar decreased, while the variation of the floating collar inclination and the net deformations were small. [Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 828–838]

**Key words:** grid mooring; wave-current action; numerical simulation; hydrodynamic behaviors

**Corresponding author:** ZHAO Yunpeng. E-mail: ypzhaodlut.edu.cn