

文章编号: 1005-9865(2004)04-0019-07

# 碟形网箱水动力特性的研究

李玉成<sup>1</sup>, 宋 芳<sup>2</sup>, 董国海<sup>1</sup>, 张怀慧<sup>3</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. 中科院 力学所, 北京 100080; 3. 大连水产学院, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 根据物模实验得到碟形网箱在不同海况条件下的受力并给出了其估算方法和公式及其相关系数的取值, 同时总结了碟形网箱的运动特性。

**关键词:** 深水网箱; 碟形网箱; 水动力特性

**中图分类号:** S955.9 **文献标识码:** A

## Research of the hydrodynamic characteristics of ocean spar sea station

LI Yu-cheng<sup>1</sup>, SONG Fang<sup>2</sup>, DONG Guo-hai<sup>1</sup>, ZHANG Huai-hui<sup>3</sup>

(1. State Key Lab. of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Mechanics, Academy of Science, Beijing 100080, China; 3. Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Based on physical model tests, the forces acting on the Ocean Spar Sea Station under different conditions are analogized. The method for the estimation of forces acting on the Ocean Spar Sea Station and the general rule of its movement are proposed in this paper.

**Key words:** deep sea cage; ocean spar sea station; hydrodynamic characteristics

目前,在养殖需求日益增长的情况下,浅水网箱养殖迅速发展,但它有很多弊端,主要是水环境差,鱼类品质不高。深水网箱养殖可避免这些缺点,但深水网箱应有很高的抗浪流的性能。深水网箱的种类很多,碟形网箱具有较大的抗风浪能力,并具有在水流作用下网衣基本不变形的优点,因此在国外受到青睐。目前国内也已开始应用此类网箱,产品多系引进,国内对其的研究尚为空白,且国外的相关技术资料基本上没有系统完整地报道过<sup>[1]</sup>。因此有必要对碟形网箱的水动力特性进行研究,以填补我国这一空白,满足国内开发和生产的需要。作者对拟碟形网箱水动力特性的研究可参见文献[2]。

## 1 实验方案及模拟相似

### 1.1 相似原则

实验采用  $L = 20$  的比尺。主要依据重力相似准则,在锚绳的模拟上除满足几何及重量相似外还应考虑其弹性相似,即原模型锚绳的受力伸长变形曲线在受力范围内应保持相似。网衣采用重力相似准则<sup>[3]</sup>。

### 1.2 模型尺寸

图 1 给出了实验中的模型尺寸。网箱的浮圈为正八边形,对角线长 1 m,浮圈的杆直径为 0.02 m,立管长(即网箱高)0.5 m,直径为 0.05 m。

收稿日期:2003-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50279002);海洋 863 计划资助项目(2001AA623010,2003AA623010);辽宁省教育厅高教科研项目基金资助项目(20102138)

作者简介:李玉成(1932-),男,浙江宁波人,教授,主要从事海洋工程研究。

## 2 实验设备及工况

实验在波流水槽中进行。水槽长 69 m,宽 2 m,高 1.8 m。实验设备包括造流和造波系统,测试设备有浪高仪、流速仪、CCD 摄像机、测力传感器和电脑。

### 2.1 实验的布置

碟形网箱实验布置如图 1 所示。

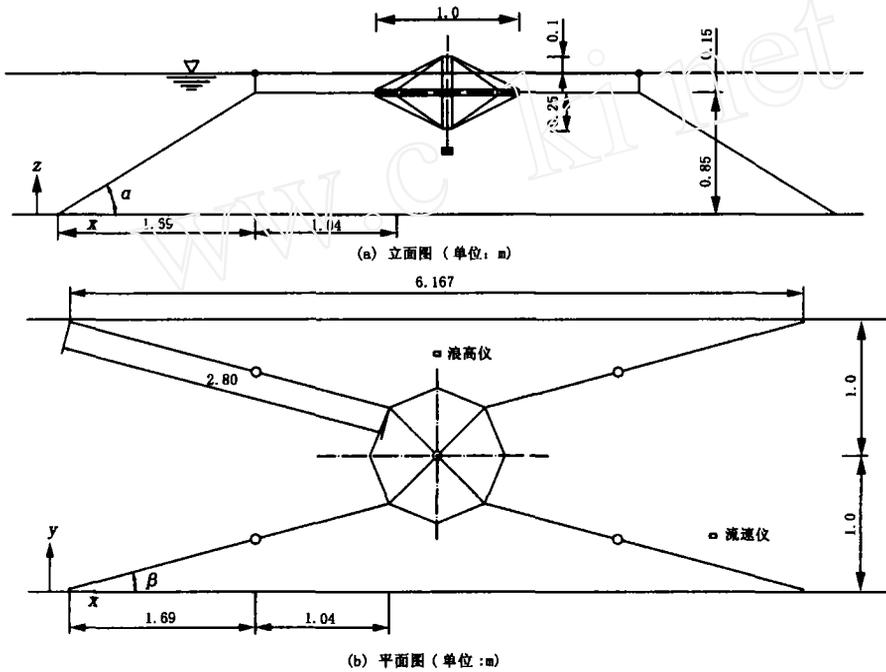


图 1 碟形网箱实验布置图

Fig. 1 Configuration of the ocean spar sea station model

### 2.2 实验工况

实验水深 1 m。网箱有漂浮和下潜两种状态,漂浮状态时浮圈位于水下 15 cm,下潜状态时浮圈位于水下 55 cm。流速分别为:11.2,17.8 和 27 cm/s。波况见表 1。

表 1 实验的波浪组合

Tab. 1 Experimental condition of waves

序号	a	b	c	d	e	f	g	h	i
波高 $H/cm$	20	20	20	27.5	27.5	27.5	35	35	35
周期 $T/s$	1.2	1.4	1.6	1.4	1.6	1.8	1.6	1.8	2.0

实验分为纯流、纯波和波流组合三种情况。波流组合是 3 种流速分别和 9 种波浪组合,其中:11.2 cm/s, 17.8 cm/s 与波浪同向组合,17.8 cm/s,27 cm/s 与波浪反向组合。

## 3 锚绳受力分析

### 3.1 纯流结果

顺流作用时前缆的受力为正,后缆的受力为零或很小的负值,因此在处理数据时最大锚绳受力取前缆力值,逆流时取后缆力值,见表 2。

表 2 纯流作用下网箱所受最大力

N

Tab. 2 Forces on the model in currents

N

设计流速/ $(cm\ s^{-1})$		顺流		逆流	
		11.2( )	17.8( )	- 17.8( )	- 27.0( )
实测力	漂浮	1.45	3.11	3.36	6.94
范围	下潜	0.46	1.62	2.38	5.66

根据莫里森方程,稳定流条件下,结构的受力计算公式为:

$$F_d = f_d l = C_d \frac{\rho}{2} D u^2 l \tag{1}$$

式中:  $C_d$  为速度力系数;  $D$  为受力构件的直径;  $\rho$  为流体的密度,取  $1.0 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ ;  $u$  为水流流速;  $l$  为构件的受力长度。按照网箱结构中各部分均基本由圆柱体构成,则有理由设它们的速度力系数相等,由此可给出如下经验公式:

$$F = \frac{\rho}{2} u_c^2 C S \tag{2}$$

式中:  $F$  为两根锚绳受力合力的水平分量,  $u_c$  为水流流速,  $C$  为等效速度力系数,  $S$  为网箱各个部分在与流向垂直平面上的投影面积。

可得实验条件下的平均等效速度力系数  $C$  为 1.35,标准差  $\sigma$  为 0.16。

### 3.2 纯波结果

#### 1) 实验数据

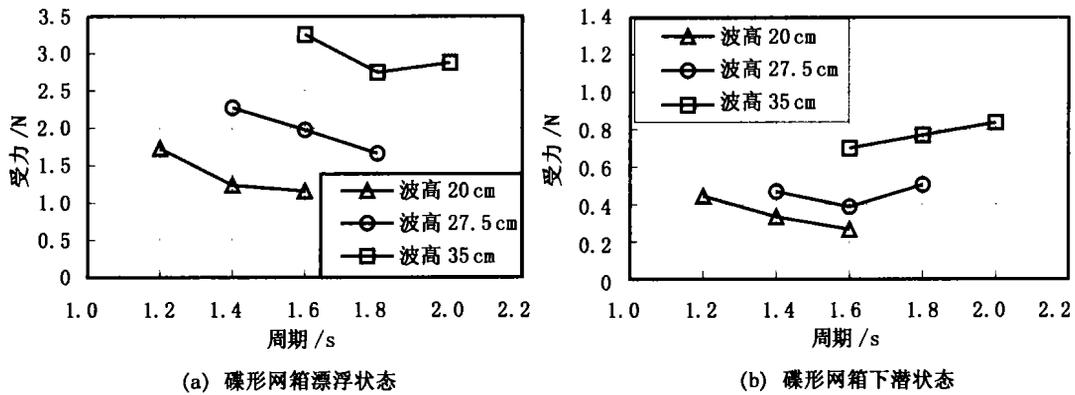


图 2 网箱在纯波作用下受力与波高及周期的关系

Fig. 2 Forces acting on the cage model related to wave height and period

由上图可以看出,锚绳受力与波高成正比。在漂浮状态下,受力与周期基本成反比;在下潜状态下,受力与周期没有明显的比例关系。

#### 2) 下潜后的受力变化

对于 9 种不同的波浪,下潜后受力与漂浮时受力的比值变幅为 0.2~0.3,其均值为 0.25。也就是说,下潜后碟形网箱的受力变为原来的 25%,这说明下潜对于减小小波浪对碟形网箱的作用力有明显效果。

#### 3) 经验公式

根据莫里森方程,在波浪作用下固定结构的受力计算公式为:

$$F = f_d l + f_i l = C_d \frac{\rho}{2} D u^2 l + C_m \frac{D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} l \tag{3}$$

其中:  $u = \frac{H \cosh kz}{T \sinh kd} \cos(kx + t)$ ,  $\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{2^2 H \cosh kz}{T^2 \sinh kd} \sin(kx + t)$ ,  $C_d$ 、 $C_m$  分别为速度力系数和惯性力系数,坐标原点在水槽底,  $x$  轴平行于波浪的传播方向,  $z$  轴竖直指向上,  $l$  为结构物的受力长度。

当  $f_{dmax} > 2f_{imax}$ , 且  $\left(\frac{f_{imax}}{f_{dmax}}\right)^2 < \frac{1}{4}$  时,略去此平方项,所产生的误差小于 6%,则这种情况下可略去惯性力项,而只计速度力。将网箱的速度力和惯性力进行比较,求出速度力和惯性力的比值变化范围为 2.67~4.9。因此网箱的受力关系满足  $f_{dmax} > 2f_{imax}$ , 可只计速度力。

考虑到网箱在波浪中的运动,此时网架构件微元上的速度力应改写为<sup>[3]</sup>:

$$\vec{f}(x, t) = \frac{D}{2} C_d (u(x, t) - \dot{\eta}(x, t))_n / (u(x, t) - \dot{\eta}(x, t))_n \tag{4}$$

式中:  $D$  为框架直径,  $u$  为水质点的速度,  $n$  为表示框架单元横截面内分量,  $\eta$  为网架在该点的位移,  $\dot{\eta}$  表示对时间的导数。公式中水质点和网架的运动速度  $u(x, t)$  和  $\dot{\eta}(x, t)$  的表达式比较复杂。另外网箱的立管和

浮圈被网衣包围着,受网衣的阻力,水质点进入网箱后速度函数的表达式发生复杂变化,很难给出简单和确切的数学描述。同时从实验角度考虑也很难精确地测定水质点和网箱在各部位运动速度,所以很难给出实际意义上的速度力系数。即使得到这一系数,在实际设计中也很难具体应用。为了便于工程上进行估算,在不考虑网架运动速度并假设立管、浮圈和网衣的速度力系数相等的意义上可给出其等效速度力系数。此时相关公式可表述为:

$$\frac{F}{\rho a \times c} \left( \frac{T}{H} \right)^2 = \frac{\rho}{2} C \left( \frac{D_1}{c} + \frac{D_2}{a} + \frac{S}{ac} \right) \quad (5)$$

式中:  $F$  为缆力的水平分量,  $F = F \times \cos \alpha \times \cos \beta$ ;  $\alpha$ 、 $\beta$  为在  $xOz$  平面锚缆与底面所成夹角和与水槽壁所成夹角,见图 1。对于本实验的碟形网箱,  $\cos \alpha = 0.89$ ,  $\cos \beta = 0.921$ ;  $a$  为立管的有效受力长度,即垂直于水质点运动方向的长度;  $c$  为浮圈的有效受力长度,即垂直于水质点运动方向的长度;  $S$  为网衣的有效作用面积,即垂直于水质点运动方向的面积;  $D_1$ ,  $D_2$  为立管及浮圈的管径;  $C$  为等效速度力系数。

4) 等效速度力系数

根据实验资料的分析可得,碟形网箱漂浮状态下  $C = 0.125$ , 标准差  $\sigma = 0.012$ ; 下潜状态下  $C = 0.029$ , 标准差  $\sigma = 0.005$ 。标准差  $\sigma$  采用较差法<sup>[4]</sup>确定,其表达式如下:

$$\sigma = \left[ \frac{(x_1 - x_2)^2 + (x_2 - x_3)^2 + \dots + (x_{n-1} - x_n)^2}{2n - 2} \right]^{\frac{1}{2}}, n \text{ 为统计量的个数。}$$

3.3 波流联合时结果

1) 实验结果分析

受力与波高成正比,和周期的关系不明显。图 3 和图 4 给出了实验测得的锚绳力。图中的  $\square$  代表波高 20 cm,  $\circ$  代表波高 27.5 cm,  $\triangle$  代表波高 35 cm。字母对应的波况如下:

- (a) :设计流速为 11.2 cm/s 的水流与波浪组合,流向与波浪传播方向相同。
- (b) :设计流速为 17.8 cm/s 的水流与波浪组合,流向与波浪传播方向相同。
- (c) :设计流速为 17.8 cm/s 的水流与波浪组合,流向与波浪传播方向相反。
- (d) :设计流速为 27.0 cm/s 的水流与波浪组合,流向与波浪传播方向相反。

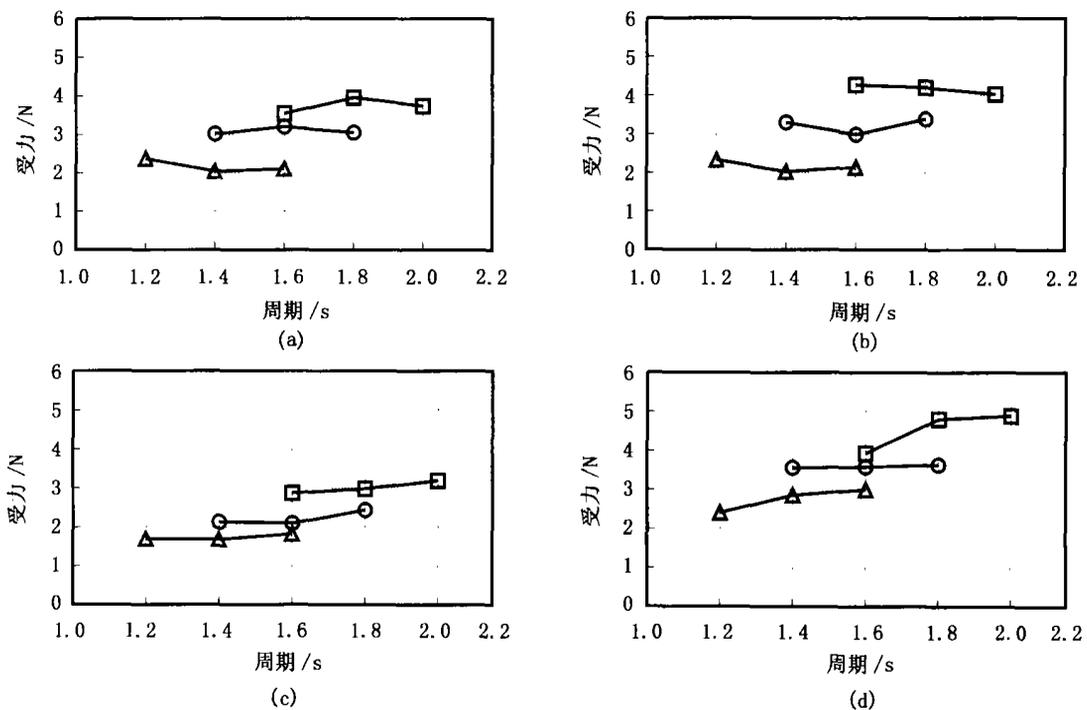


图 3 碟形网箱漂浮状态下波流组合作用受力

Fig. 3 Forces acting on the floating cage model in waves combined with currents

图 3 和图 4 中(a)、(b)情况下给出的是前缆的合力值,(c)、(d)情况下给出的是后缆的合力值。

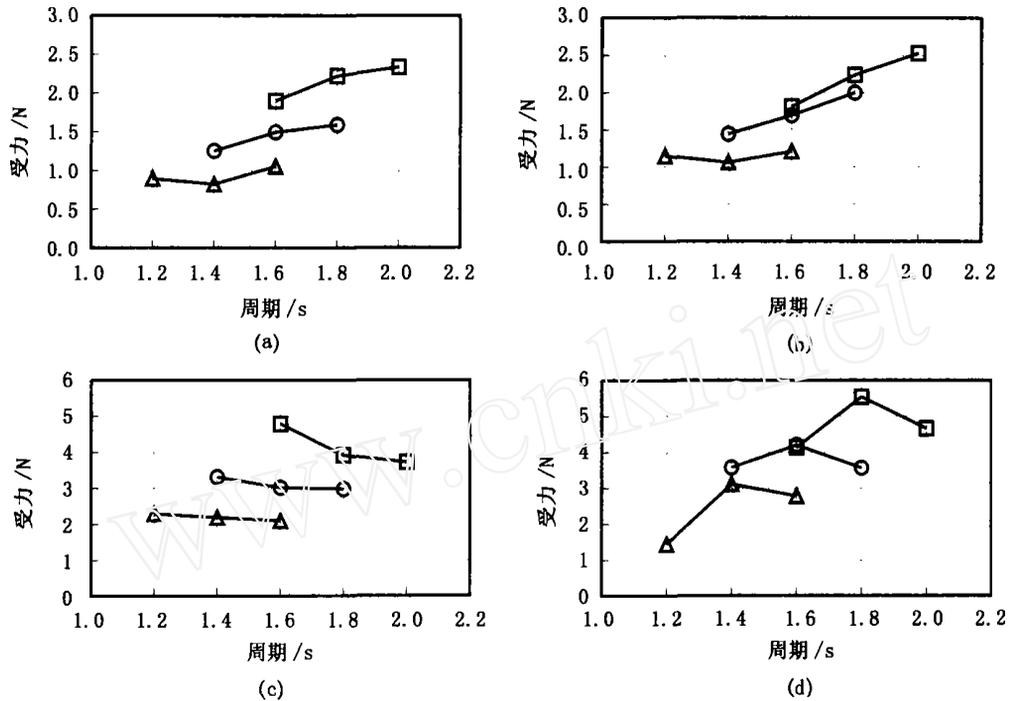


图 4 碟形网箱下沉状态下波流组合作用受力

Fig. 4 Forces acting on the submerged cage model in waves combined with currents

2) 下潜后的受力变化

从表 3 中可见,顺流时,下潜后受力明显减小;逆流时,下潜后缆力有时不仅没有减小,甚至反而变大。

3) 经验公式

根据莫里森方程,当只计速度力时,波流联合作用下单位长度杆件受力的表达式为:

$$f = C_d \frac{\rho}{2} D (u + u_c) | u + u_c | \tag{6}$$

式中:  $u = \frac{H \cosh kz}{T \sinh kd} \cos(kx + t)$ ,  $u_c$  是水流速。坐标原点在水槽

底,  $x$  轴平行于波浪的传播方向,  $z$  轴竖直指向上。莫里森方程中的水质点运动速度是指水质点相对于结构物的运动速度。除了前述在纯波条件下的原因外,在波流联合场中,计算水质点运动速度时还要考虑流和波浪的相互作用导致速度场的变化,因此流场变得更加复杂。假设立管、浮圈、网衣的速度力系数相等,即  $C_{d1} = C_{d2} = C_{d3}$ ,并在不计网箱的运动速度条件下给出等效速度力系数。此时,网箱在波流联合作用下所受最大力可计算如下:

$$F = C \frac{\rho}{2} \left( \frac{H}{T} + u_c \right)^2 (D_1 a + D_2 c + S) \tag{7}$$

无因次化的网箱最大受力公式为:

$$\frac{F}{\rho a \times c} \left( \frac{1}{\frac{H}{T} + u_c} \right)^2 = \frac{1}{2} C \left( \frac{D_1}{c} + \frac{D_2}{a} + \frac{S}{ac} \right) \tag{8}$$

式中:  $F$  为缆力的水平分量,  $F = F \times \cos \alpha \times \cos \beta$ ;  $\alpha$  为在  $xOz$  平面锚缆与底面所成夹角和与水槽壁所成夹角,见图 1。对于本实验的碟形网箱,  $\cos \alpha = 0.89$ ,  $\cos \beta = 0.921$ ;  $a$  为立管的有效受力长度,即垂直于水质点运动方向的长度;  $c$  为浮圈的有效受力长度,即垂直于水质点运动方向的长度;  $S$  为网衣的有效作用面积,即垂直于水质点

表 3 波流联合条件下下潜后受力与漂浮时受力的比值

Tab. 3 Forces ratio of submerged cage to floating cage in waves combined with currents

流向	平均比值	变化幅度	
顺流	a	0.49	0.38 ~ 0.62
	b	0.53	0.42 ~ 0.63
逆流	c	1.35	1.15 ~ 1.67
	d	0.99	0.60 ~ 1.17

表 4 碟形网箱在波流联合作用下的等效速度力系数

Tab. 4 Equivalent drag force coefficient C in waves combined with currents

试验条件		a	b	c	d
漂浮	系数	0.125	0.112	0.081	0.100
	标准差	0.007	0.008	0.006	0.009
下潜	系数	0.056	0.054	0.101	0.088
	标准差	0.007	0.005	0.008	0.012

运动方向的面积;  $D_1, D_2$  为立管及浮圈的管径;  $u_c$  为水流流速;  $C$  为等效速度力系数。

### 4 网箱的运动

#### 4.1 纯流时

表 5 给出碟形网箱在纯流作用下偏离静止位置的位移  $S$ ,  $S = (X^2 + Z^2)^{0.5}$ ,  $X$  为水平偏离位移,  $Z$  为竖直偏离位移。

表 5 碟形网箱在纯流作用下的位移 cm

Tab. 5 Displacement of the cage in currents cm

流速	11.2( )	17.8( )	- 17.8( )	- 27.0( )
漂浮	17.0	58.5	56.3	107.2
下潜	12.0	60.1	71.8	142.6

#### 4.2 纯波时

表 6 给出了碟形网箱在纯波作用下的振幅。其中  $A_x$  为水平方向的振幅,  $A_z$  为竖直方向的振幅。由表 6 可见,  $A_x$  与  $A_z$  均与波高和周期成正比。

表 6 碟形网箱在纯波作用下的振幅

cm

Tab. 6 Amplitude of cage movement in waves

cm

试验组次	a	b	c	d	e	f	g	h	i	
$A_x$	漂浮	12	20	23	19	27	34	31	38	43
	下潜	7	9	11	11	14	18	18	22	25
$A_z$	漂浮	14	17	19	2	24	27	29	31	34
	下潜	6	6	7	7	9	11	13	15	15

#### 4.3 波流联合时

表 7 给出了碟形网箱在波流联合作用下的振幅。其中  $A_x$  为水平方向的振幅,  $A_z$  为竖直方向的振幅。由表 7 可见,  $A_x$  与波高和周期基本成正比,  $A_z$  与波高和周期基本成正比。下潜后振幅都有明显的减小。

表 7 碟形网箱在波流联合作用下的振幅

cm

Tab. 7 Amplitude of cage movement in waves combined with currents

cm

试验组次	a	b	c	d	e	f	g	h	i		
$A_x$	漂浮	1	10	16	20	16	24	30	22	42	40
		2	13	23	29	18	29	31	—	44	47
	下潜	1	5	8	12	12	14	19	19	25	30
		2	6	9	11	12	16	21	20	25	30
$A_z$	漂浮	1	10	14	17	16	22	24	18	30	30
		2	13	18	20	23	23	26	—	34	39
	下潜	1	4	5	6	8	9	11	12	12	16
		2	4	5	4	8	6	9	11	14	16

#### 4.4 振幅的计算公式

网箱的相对振幅  $A_x/H, A_z/H$  与波高及波周期相关。另外波流组合时相对振幅与流速也相关。因此设  $A_x/H (H/L, d/L, u/C)$ , 进行公式的拟合。其中  $H$  为波高,  $d$  为水深,  $L$  为波长,  $u$  为水流速,  $C$  为波形的传播速度, 即  $C = L/T$ 。拟合按照最小二乘法的原则进行。碟形网箱在漂浮状态下纯波(即流速为 0)和顺流统一起来的公式是:

$$A_x/H = 0.86 - 1.96(H/L) + 0.60(d/L) + 0.42(u/C) \tag{9}$$

相关系数  $r = 0.88$ ,

$$A_z/H = 0.80 - 0.97(H/L) - 0.11(d/L) + 0.2(u/C) \tag{10}$$

相关系数  $r = 0.78$ 。

图 5 为式(9)、(10)计算值与试验值的比较。

#### 4.5 倾角

倾角的最大值基本上都出现在竖向振幅最大点处, 详见表 8。

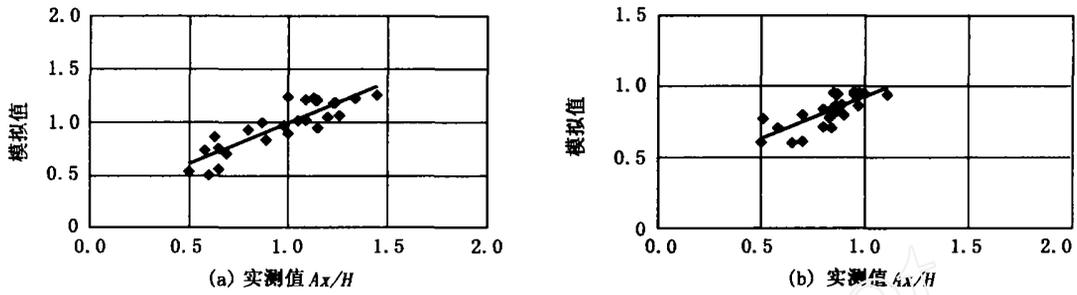


图 5 式(9)、(10)计算值与试验值的比较

Fig. 5 Comparison of tested data with calculated results by Eqs. (9) and (10)

表 8 碟形网箱的最大倾角度变化范围 (9)  
Tab. 8 Maximum angle of cage motion (9)

试验条件	纯波	波流组合	
		a	b
漂浮	9	14	19
下潜	6	11	11

### 5 结 语

- 1) 纯流作用下流速越大,受力越大。下潜对于减小碟形网箱所受流力有较好的效果。
- 2) 纯波作用下,网箱受力大小和波高成正比,漂浮时其受力与周期基本成反比。下潜对于减小碟形网箱所受波浪力有较好的效果。
- 3) 波流联合作用下,无论漂浮状态还是下潜状态,有流后网箱的受力均大于纯波时同等波况下的受力。漂浮时波浪与顺流组合时的锚绳受力大于波浪与逆流组合。下潜后波浪与逆流组合时的缆力有可能反而比漂浮时大。因而为了增大网箱抗风暴能力在波流联合作用下,碟形网箱是否下潜应慎重对待。
- 4) 纯流作用下,最大偏移随着流速的增大而增大;纯波和波流联合作用下,振幅与波高、周期成正比。下潜对于减小振幅有明显的效果。

### 参考文献:

[1] 桂福坤,张怀慧.网箱工程发展现状及展望[J].大连水产学院学报,2002,17(1):70-78.  
 [2] 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.  
 [3] 桂福坤,李玉成,张怀慧.网衣受力实验的模型相似条件[J].中国海洋平台,2002,17(5):22-25.  
 [4] 滕斌,郝春玲,郑艳娜.波流作用下深水网箱水动力响应数值模拟的初析[A].国家863项目专题研讨会论文集[C].2003.  
 [5] 肖明耀.实验误差估计与数据处理[M].北京:科学出版社,1980.  
 [6] JT213-98.海港水文规范[J].  
 [7] Det Norske Veritas. Environmental Conditions and Environmental Loads[M]. DNV,2002.  
 [8] 李玉成,滕斌.波浪对海上建筑物的作用(第二版)[M].北京:海洋出版社,2002.