

## 波浪经过网衣的特性研究\*

宋伟华<sup>1,2</sup> 梁振林<sup>2</sup> 黄六一<sup>2</sup> 吕永林<sup>3</sup> 陈伯海<sup>4</sup>

(1. 浙江海洋学院海洋渔业系 舟山 316004; 2. 中国海洋大学水产学院 青岛 266003; 3. 温州市渔业技术推广站 温州 325003; 4. 中国海洋大学物理海洋教育部重点开放实验室 青岛 266003)

**摘要** 依据波浪理论,分析了波浪经过网衣后的流体特性和边界条件,研究了网衣的波浪水动力、波浪透射系数与网衣尺度、特征参数、波浪参数等的关系。设计预加张力放射系泊法进行网衣构件水槽波浪试验。试验构件由10种PE网衣和HDPE框架装配而成,试验工况是规则波,周期为0.8—2.0s,波高为50—250mm。结果表明,作用在网衣上的水平波浪力变化规律与波浪基本一致,呈现周期性和不对称性变化;波浪力变化曲线呈现斯托克斯二阶波形状,波峰较陡,波谷较平坦,和波面图相似;网衣水平波浪力周期峰值大约与波高的2.6次方、波长的0.8次方成比例,与网衣宽度 $l$ 线性相关;随着特征参数 $d/a$ 增大,网衣波浪力呈线性增加变化,透射系数减少,网衣消浪能力主要集中在网衣水表层。同时设计多层网衣组合的柔性浮式防波堤波浪试验,其消浪能力除了与网衣尺寸、特征参数等相关以外,还与网衣间隔距离有一定的关系。水槽试验时波浪最小透射系数下降到71%左右,从经济、实用角度表明,可用网衣来制作能防护渔业设施的柔性浮式防波堤。

**关键词** 网衣,防波堤,波浪力,透射系数,波浪试验

**中图分类号** S97

网衣是网渔具和养殖网箱的主要构件,在海洋中作业时受水流和波浪的影响,与水域浪流因子相互作用,网衣承受水动力和产生变形,其周围的流态由于网衣作用而相应发生变化,两者紧密响应。水流因子的研究可借鉴已较成熟的渔具力学的研究成果(余显炜等,2004),而与波浪相关的研究主要是网衣的波浪水动力学(詹杰民等,2002; Song *et al.*, 2006; Zhan *et al.*, 2005)和网箱波浪水动力学(宋伟华等, 2004, 2005; Aarsnes *et al.*, 1990; Fredriksson *et al.*, 2003)。当然在最近几十年,网衣及所构成的网渔具和养殖网箱设施的水动力学研究得到了飞速发展,但仅网衣作为设施的单元来进行波浪水动力学研究文献非常少,特别是关于网衣对波浪的影响研究及由网衣构件的柔性防波堤的研究,国内外罕见相关的研究报告。基于这样一个现实:在大风浪中,网箱内

或被网衣包围的养殖区域内部的海水要比外面的平静,因此很有必要了解网衣对波浪的消浪作用,盛祖荫等(2001)对专用的渔用防波堤进行过初步研究。本文中作者在理论分析波浪穿过网衣后的流体特征基础上,进行单片网衣和多层网衣组合结构(防波堤)的网衣构件波浪试验,分析网衣构件的波浪特性,进行理论数值计算与试验对比研究,以期为网衣构件作为柔性浮式防波堤的广泛应用打下理论基础。

## 1 理论分析

以正弦波为例,假定流体无旋、不可压缩,波浪场中无穷远处波浪速度势函数是:

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{\pi H}{Tk} \frac{\cosh k(z+d')}{\sinh(kd')} \sin(kx - \omega t) \\ &= \varphi_0 \sin(kx - \omega t)\end{aligned}\quad (1)$$

沿海底波浪传播方向为 $x$ 轴,沿网衣垂直方

\* 国家863高技术发展计划资助项目,2003AA623030号;国家星火计划项目,2006EA700120号;浙江省科技厅资助项目,2006C32002号;浙江省自然科学基金资助项目,x506309号。宋伟华,博士,副教授,E-mail: whsong@zjou.edu.cn

向为  $z$  轴, 建立直角坐标系,  $h$  为网衣的高度,  $d'$  为水深。假设经过网衣的波浪传播发生了变化, 有一小部分波浪向  $x$  轴负方向反射, 另有极大部分穿过了网衣, 其速度势也发生了变化, 见图 1。图 1 中波浪的传播是从左向右, 两者的速度势分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ , 均符合拉普拉斯方程:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\varphi_i = 0 \quad (2)$$

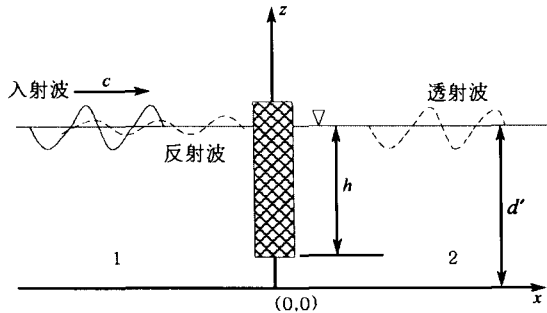


图 1 波浪通过单片网衣示意图

Fig. 1 Schematic map of single net wave passing

式中  $i=1, 2$  分别代表网衣前和后的区域, 同时符合水表面和水底边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} + K\varphi_i = 0 \text{ 当 } z = d' \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} = 0 \text{ 当 } z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $K = \omega^2/g$ , 在水下网衣的边界条件符合 Darcy's 法则 (Chwang *et al*, 1998):

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} = ikG(\varphi_1 - \varphi_2) - i\omega s \quad (4)$$

式中  $G$  为网衣开孔影响系数 (网衣开孔率), 即单位网衣面积上网孔面积率, 与网衣特征参数  $d/a$  ( $d$  为网线的直径和  $a$  为网目大小的一半) 值成反比例,  $s$  为网衣在水动力作用下产生的位移。

当波浪经网衣反射和透射后, 无穷远处波浪的边界条件可写为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = K_{r0}\varphi_0\sin(kx + \omega t) + \varphi_0\sin(kx - \omega t) \\ \text{当 } x \rightarrow -\infty \\ \varphi_2 = K_{t0}\varphi_0\sin(kx - \omega t) \\ \text{当 } x \rightarrow \infty \end{cases} \quad (5)$$

式中  $K_{r0}$ 、 $K_{t0}$  分别为待定的反射系数和透射系数, 如波浪遇到网衣后有多次的反射和透射, 则速度势分别为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_0[\sin(kx - \omega t) + K_{r0}\sin(kx + \omega t)] \\ + \sum_{n=1}^{\infty} K_{rn} \frac{\pi H \cosh k_n(z+d')}{Tk_n \sinh(k_n d')} \sin(k_n x + \omega t) \\ \varphi_2 = K_{t0}\varphi_0\sin(kx - \omega t) \\ + \sum_{n=1}^{\infty} K_{tn} \frac{\pi H \cosh k_n(z+d')}{Tk_n \sinh(k_n d')} \sin(k_n x - \omega t) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $n=1, 2, \dots$ , 相应的反射和透射系数为  $K_{rn}$ 、 $K_{tn}$  符合从区域 1 到区域 2 的波浪经过关系。

根据流体连续性和压力等条件, 则水下网衣 ( $x=0, 0 \leq z \leq d' - h$ ) 存在以下边界条件:

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \quad (7)$$

$$K_{r0} + K_{t0} = 1, \quad K_{rn} + K_{tn} = 0$$

代入式 (6) 得波浪速度势的特征函数:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_0[\sin(kx - \omega t) + (1 - K_{t0})\sin(kx + \omega t)] \\ - \sum_{n=1}^{\infty} K_{tn} \frac{\pi H \cosh k_n(z+d')}{Tk_n \sinh(k_n d')} \sin(k_n x + \omega t) \\ \varphi_2 = K_{t0}\varphi_0\sin(kx - \omega t) \\ + \sum_{n=1}^{\infty} K_{tn} \frac{\pi H \cosh k_n(z+d')}{Tk_n \sinh(k_n d')} \sin(k_n x - \omega t) \end{cases} \quad (8)$$

设网衣区域 1 与区域 2 的速度势差为:

$$\begin{aligned} \varphi_p = \varphi_1 - \varphi_2 = & 2(1 - K_{t0})\varphi_0\sin kx\cos\omega t \\ & - 2\sum_{n=1}^{\infty} K_{tn} \frac{\pi H \cosh k_n(z+d')}{Tk_n \sinh(k_n d')} \sin k_n x \sin\omega t \end{aligned} \quad (9)$$

再根据柔性体防波堤的研究成果, 柔性体的变形与速度势和作用在柔性体上的波浪力相关 (Wei *et al*, 1990):

$$\frac{d^2 s}{dz^2} = -\frac{i\omega}{P}(\varphi_1 - \varphi_2), \quad P = f_0 \cos\phi \quad (10)$$

式中  $P$  为网衣硬度相关的系数,  $f_0$  为网衣的张力,  $\phi$  为网衣变形后与  $z$  轴的夹角, 可进行网衣透射系数的数值求解。

## 2 网衣波浪水槽试验与计算对比

### 2.1 试验设计

考虑到本次网衣试验的研究目的和设施技术要求, 选择预加张力放射系泊法连接方案 (Song *et al*, 2006; Turner, 1997)。

试验构件由网衣和框架装配而成, 依据渔具模型试验要求 (李玉成等, 2002; 余显炜等, 2004), 设计选用 10 种聚乙烯 (PE) 网衣 (单死结), 装配系数均为 0.707。网目大小 ( $2a$ )、网线直径 ( $d$ )

等参数见表 1,网衣主尺度规格、网衣目数依据试验设计而定。

表 1 波浪试验的网衣材料

Tab. 1 The physical properties of the net material

编号	线型号	目大(mm)	$d/a$	编号	线型号	目大(mm)	$d/a$
A	1×3	15	0.067	F	3×3	34	0.053
B	1×3	24	0.042	G	8×3	50	0.062
C	2×3	24	0.063	H	8×3	60	0.052
D	3×3	24	0.075	I	10×3	40	0.088
E	2×3	40	0.038	J	12×3	40	0.098

网衣框架是由高密度聚乙烯(HDPE)空心管材,通过防水的PVC粘合剂粘制成,具有足够的储备浮力。外框架是12#钢筋等细长材料焊接而成的长方体,固定敷设在水槽壁上,前后有两个波高仪测量监控波高,当波浪经过时,外框架对波浪的影响较小,可以忽略不计,见图2。图2中前置波高仪与网衣构件水平距离 $l_1=5.85\text{m}$ ,后置波高仪与构件距离为 $4.15\text{m}$ ;网衣宽度 $l$ 分别为 $0.80、0.61、0.50、0.27\text{m}$ ;网衣高度 $h$ 分别为 $0.83、0.70、0.59、0.44、0.26\text{m}$ ;传感器离水槽底部高度 $h_1=0.50\text{m}$ ;水槽试验水深 $d'=0.70\text{m}$ ; $\alpha、\beta$ 分别为网衣与波浪传播方向的前后夹角和左(或右)夹角,可通过构件的四条张力腿长度来调整,试验时夹角分别间隔 $15^\circ$ 取5档。连接的应变传感器可记录试验构件的水平波浪力信号。

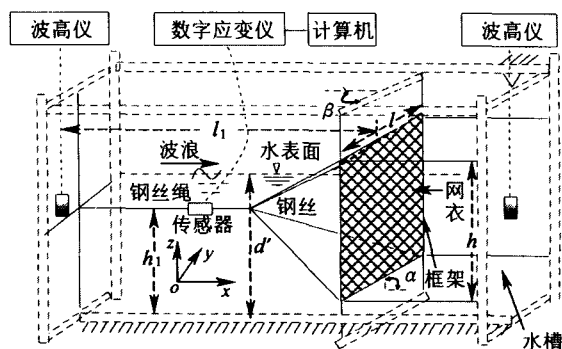


图 2 网衣构件试验装置

Fig. 2 Experiment installation

在中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室“风-浪-流实验水槽”进行网衣构件的波浪试验,水槽尺寸 $65\text{m}\times 1.2\text{m}\times 1.5\text{m}$ ,波浪周期为 $0.8\text{—}2.0\text{s}$ (间隔 $0.2\text{s}$ ),波高为 $50\text{—}250\text{mm}$ (间

隔 $20\text{mm}$ ),以波高计实际测定的波浪参数为准。试验水槽段为:造波机+ $20\text{m}$ 处,符合水槽波浪试验的测试要求,波浪是恒定波向的规则波。

## 2.2 网衣波浪力和波浪变化特性

应用“三因次”插值法对10种网衣构件和框架波浪试验的结果进行分析计算(Song *et al.*, 2006),得到网衣水平波浪力与网衣参数、波浪参数的关系。应用多元回归分析可知,当网衣垂直于波浪时,水平波浪力最大值为:

$$F = 2669.4 (H/2)^{2.62} L^{0.79} a^{-1.48} d^{1.06} l^{1.05} \quad (11)$$

式中 $H、L、a、d、l$ 分别为波高、波长、网衣目大一半、网线直径、网衣宽度。图3为网衣A构件在周期 $1.6\text{s}$ 、波高 $170\text{mm}$ 时网前与网后波面图和所受的水平波浪力。一般来说网前波高是大于网后的,并且周期也有略微的变化,从而说明网衣有一定的消浪能力。网衣波浪力变化规律与波浪周期相同、波面相似、不对称变化,呈现斯托克斯二阶波形状,波峰较陡,波谷较平坦,作用在网衣上的波浪力从水面到水下逐步减少分布;从式(11)可知,网衣波浪力大约与波高的2.6次方、波长的0.8次方成比例,与网衣的宽度 $l$ 、特征参数 $d/a$ 近似线性相关。

表2为网衣A在周期 $1.6\text{s}$ 、波高 $171.4\text{mm}$ 试验时,连续一段采集时间及若干个波高峰值时间的网衣前后水面高度(正弦波中为波高的一半)情况。表2中假设反射系数 $K_{r,0} = \frac{H_r}{H} \times 100\%$ ,

透射系数 $K_{t,0} = \frac{H_t}{H} \times 100\%$ , $H$ 为波浪原始平均波高, $H_r$ 为反射平均波高, $H_t$ 为透射平均波高,近似认为框架试验平均波高等于原始平均波高。可以得出这样的试验结论,网衣宽度越大,消浪能力

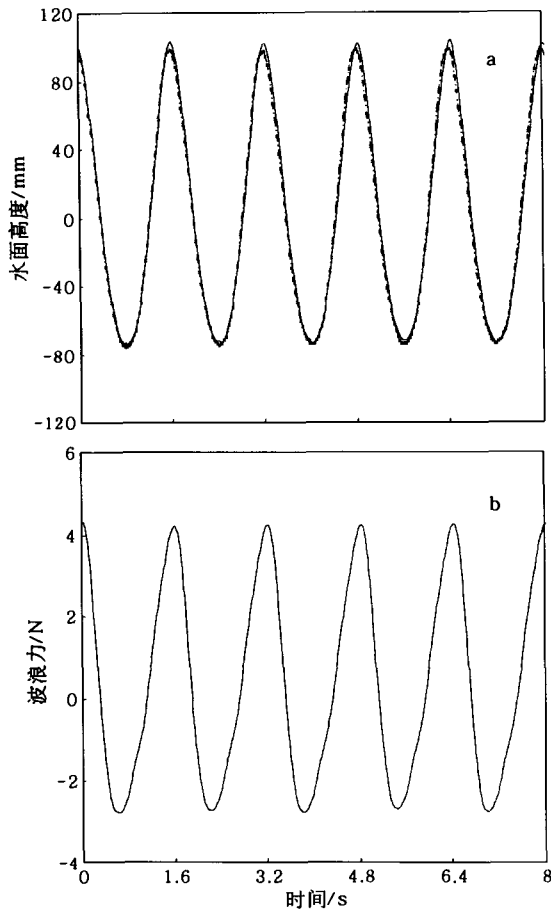


图3 网衣A构件波浪试验的网衣前后波面图和波浪力

Fig. 3 Elevations fore-and-aft and wave forces on net A structure

- a. 网衣A构件在周期1.6s、波高170mm时网前(实线)与网后(虚线)波面图; b. 网衣A构件在周期1.6s、波高170mm时所受的水平波浪力

越强;网衣越柔软,网衣阻力越小,波浪透射系数就越大;网衣特征参数  $d/a$  越小,越多的水随着波浪穿透过去,透射系数就越大,反射系数、网衣消浪能力、产生的水动力随之也减少,并且反射系数和消浪能力与波长紧密相关,波长越大,上述因素变化则越小,消浪能力越低。表2中  $K_{r0} + K_{t0}$  有时超过1.0,这主要原因是池壁干扰和回波现象造成,这些现象与波高计的测量和处理方法有关。另外,随着网后波高的减小,波长(周期)也相应略微发生增大变化,即网后单位水体积内的波浪能量是在衰减,被网衣所消耗,从而起到了一定的消浪作用。

通过对网衣前后波浪水表面形状和所测定波浪参数分布的研究,网衣前后的波高发生了变化,这与渔业生产中,网箱(网渔具)内部的水要比外部的平静现象相符合,而体现网衣这种消浪能力的指标参数为波浪经过网衣作用后波高的反射系数和透射系数,它们主要与网衣的宽度和高度、特征参数( $d/a$ )、夹角、网衣材料(硬度)及波浪参数有关。从网衣波浪试验得知,网后波高比网前的要小,并且随着网衣高度、网衣特征参数  $d/a$  的增大,网后的波面高度减少程度更大,网衣的波浪透射系数减少,从而可把网衣看成是一种孔状的障碍物敷设在波浪场中,起到消浪作用,是一种柔性的防波堤。

### 2.3 波浪透射系数的数值计算与试验对比

根据单片网衣波浪试验设计,对于波浪传播的边界条件式(4)和式(10)两个参数可设为:网衣位移  $S=0$ ,变形  $\phi=0$ ,同时作者又考察水面与

表2 网衣A试验时网衣前后的水面高度与反射系数和透射系数

Tab. 2 Reflection and transmission coefficients on a net cage under different wave heights

采集时间 (s)	网前水面高 (mm)	网后水面高 (mm)	框架水面高 (mm)	反射系数 $K_{r0}$ (%)	透射系数 $K_{t0}$ (%)	$K_{r0} + K_{t0}$ (%)
0.03	99.38	96.01	97.29	2.14	98.69	100.83
0.09	91.38	86.01	89.29	2.33	96.33	98.66
0.15	78.38	70.01	75.29	4.10	92.99	97.09
0.21	60.38	52.01	57.29	5.38	90.79	96.17
1.94	97.38	91.44	97.01	6.49	94.25	100.75
3.56	96.38	90.44	96.01	6.57	94.19	100.76
5.14	97.38	92.44	97.01	5.34	95.28	100.62
6.76	99.38	97.44	99.01	1.99	98.41	100.40
8.35	98.38	96.44	99.01	2.01	97.40	99.41

网衣交叉点。因此在  $x=0, z=d'-h$  及  $z=d'$  时边界条件为:

$$S[d'] = s[d' - z_1] = 0, \quad \phi = 0 \quad (12)$$

再考虑网衣波浪力公式(11), 近似换算为单位面积网衣的张力, 联立方程(3)~(12), 便可求得波浪穿过单片网衣后反射系数和透射系数与网衣参数、波浪参数等的关系。基于网衣前后波高仪所测定的水面高度, 能正确反映出网衣垂直于波向且网衣宽度为最大值时的波高变化情况, 因而计算时以垂直于波向的网衣试验情况为模型, 分别与试验进行对比。通过“三因次”插值法计算拟合得到相同波浪试验条件下的实验数据 (Song *et al.*, 2006), 图 4 和图 5 分别为在不同条件下网衣波浪透射系数与参数  $d/a$ 、 $h/d'$  的变化情况。

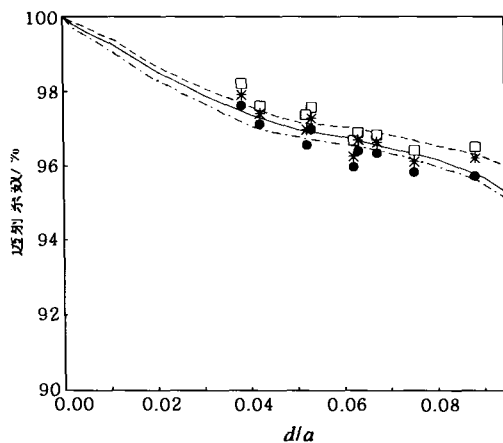


图 4 在不同参数条件下网衣波浪透射系数随着网衣特征参数  $d/a$  的变化情况

Fig. 4 Variation of transmission coefficient against the parameter  $d/a$  for various values of the net

注:  $\bullet$ 、 $\ast$ 、 $\square$  分别表示周期 1.2s、1.6s、2.0s 试验测试值;  $\bullet$ —、 $\ast$ —、 $\square$ — 分别表示周期 1.2s、1.6s、2.0s 计算值。网衣宽度  $l=0.9\text{m}$ , 高度  $h=0.8\text{m}$ , 波高为 250mm。  $d$  为网线的直径,  $a$  为网目大小的一半

从图 4 可看出, 网衣波浪透射系数的计算值与试验值比较接近, 一般前者要大于后者, 主要原因是由于试验时网衣构件由网衣和框架组合装配的。透射系数随着网衣特征参数  $d/a$  增加而减少,  $d/a$  越大, 波浪中更多的流体和能量被反射, 而穿过网衣的更少, 透射系数减少; 随着波浪周期的增大, 网衣的变形相对而减少, 因而波浪透射系数增大, 消浪能力降低。

图 5 反映出网衣对波浪的消浪作用, 主要是

集中在水表面处高度的网衣, 当网衣高度增大到水深的 1/10 时, 网衣透射系数明显下降趋势, 而后随着网衣高度的增加, 透射系数基本上保持不变, 直到当网衣高度增加到水深的 9/10 左右时, 透射系数才出现了明显的减少, 降低到 96% 以下, 表明单片网衣消浪 4% 以上。从中也可以看出, 利用较大高度的网衣作为防波堤是不经济的, 因为波浪的能量主要集中在水表面, 只有水面附近很短高度的网衣对波浪产生真正的反射消浪作用。

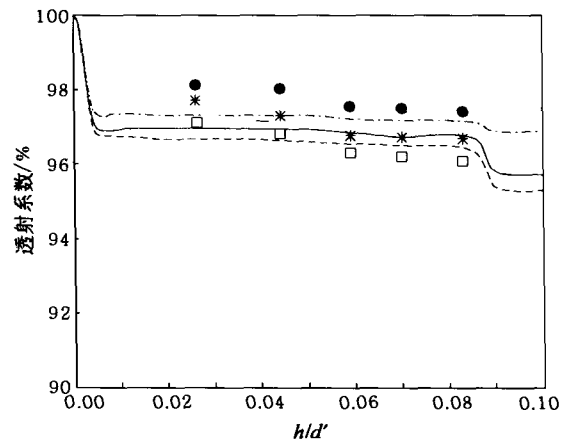


图 5 在不同参数条件下网衣波浪透射系数随着参数  $h/d'$  的变化情况

Fig. 5 Variation of transmission coefficient against the parameter  $h/d'$  for various values of the net

注:  $\bullet$ 、 $\ast$ 、 $\square$  分别表示  $d/a$  值为 0.43、0.63、0.75 时的试验值;  $\bullet$ —、 $\ast$ —、 $\square$ — 分别表示  $d/a$  值为 0.43、0.63、0.75 时的计算值。网衣宽度  $l=0.9\text{m}$ , 周期 1.6s, 波高为 250mm,  $a=24\text{mm}$ 。  $h$  为网衣的高度,  $d'$  为试验水深

### 3 小结

波浪对网衣产生的水平波浪力与网衣宽度、网目大小、网线直径、波高和波长等因子相关, 也与网衣和波向的夹角相关, 其变化规律与波浪周期同步、波面相似、呈不对称变化。

波浪经过网衣后, 网衣前后的波浪分布发生了变化, 一般来说网前的波高要大于网后的、波长也略微增大, 反射系数和透射系数的变化与网衣的相对高度  $h/d'$ 、特征系数  $d/a$  (孔状性)、网衣的宽度相关, 与试验的条件相关, 也与所受的波浪力明显有关系。当  $d/a$  增大时, 网衣波浪力和反射系数也增大, 透射系数减少, 网衣的消浪能力提高; 而当  $h/d'$  在一定范围内发生变化时,

透射系数的变化很缓慢,网衣的消浪能力与网衣高度的关系不是很密切,充分说明防波堤的消浪能力主要集中在水表面的区域。

通过对微分方程的数值计算研究和试验情况的对比分析,单块网衣在波浪中有一定的消浪能力,如使用多层网衣来装配网衣构件,这与目前在渔业中刚刚使用的柔性防波堤(盛祖荫等,2001)相似。设计网衣柔性浮式防波堤,由7块垂直网衣和1块平面网衣及属具组成,网衣材料为PA,型号为3×3,目大4cm,垂直网衣尺寸为 $32^{\circ} \times 14.5^{\circ}$ ,用PA线装配,网衣间距为0.5m。属具主要是浮子泡沫块和配重沉石,有足够的浮力使防波堤在波浪中浮于水面。试验的防波堤装配方法有3种,在不同的波浪试验条件下,防波堤波浪透射系数最小值分别为74.24%、71.31%、72.05%,平均按每块网衣波浪衰减4%计算,计算值与试验值接近。

本研究中作者把网衣当作多孔防波堤作初步研究,因而使用网衣来代替刚性的防波堤在经济上和有效性上是可行的,至于如何提高消浪性能是作者下一步的研究方向。另外本文中假设波浪中的网衣不变形,这是一种近似处理方法。

### 参 考 文 献

- 余显炜,虞聪达,2004. 渔具力学. 杭州:浙江科学技术出版社,130—187
- 宋伟华,梁振林,关长涛等,2004. 方形网箱水平波浪力的迭加计算和实验验证. 海洋与湖沼,35(3):202—208
- 宋伟华,梁振林,关长涛等,2005. 应用两种不同的波浪理论计算方形网箱水平波浪力. 中国水产科学,12(1):91—98
- 李玉成,滕 斌,2002. 波浪对海上建筑物的作用. 北京:海洋出版社,9—20
- 盛祖荫,孙 龙,2001. 掩护海水养殖网箱的浮式防波堤的消浪特性. 中国水产科学,8(4):61,70—72
- 詹杰民,胡由展,赵 陶等,2002. 渔网水动力试验研究及分析. 海洋工程,20(2):49—53
- Aarsnes J V, Rudi H, Loland G, 1990. Current Forces on Cage, Net Deflection. Engineering for Offshore Fish Farming. Thomas Telford, London, 137—152
- Chwang A T, Chan A T, 1998. Interaction between porous media and wave motion. Annual Review of Fluid Mechanics, 30:53—84
- Fredriksson D W, Swift M R, Irish J D *et al*, 2003. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. Aquacultural Engineering, 27:117—146
- Song W H, Liang Z L, Chi H F *et al*, 2006. Experimental study on the effect of horizontal waves on the netting panels. Fisheries Science, 72(5):967—976
- Turner R, 1997. Offshore Mariculture: Mooring System Design. Scotland: CIHEAM-Options Mediterranennes, 168—169
- Wei G, Panchang V G, Pearce B R, 1990. Some Numerical Models for Predicting Wave Conditions Around Aquaculture Sites. Engineering for Offshore Fish Farming. Thomas Telford, London, 119—133
- Zhan J M, Jia X P, Li Y S *et al*, 2005. Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages. Aquacultural Engineering, 35:91—101

## HYDRODYNAMIC FEATURE OF FISHING NET UNDER WAVE ACTION IN FLUME EXPERIMENT

SONG Wei-Hua<sup>1, 2</sup>, LIANG Zhen-Lin<sup>2</sup>, HUANG Liu-Yi<sup>2</sup>, Lü Yong-Lin<sup>3</sup>, CHEN Bo-Hai<sup>4</sup>

(1. Department of Marine Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, 316004; 2. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao, 266003; 3. Wenzhou Fisheries Technique Popularizing Center, Wenzhou, 325003;

4. Physical Ocean Key Open Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, 266003)

**Abstract** In the present study, the scattering of surface waves through a flexible net is studied in hydrodynamics. The net was modeled as a flexible hollow barrier in deferent tensions and looseness, for understanding how waves pass the net in transmission and reflection, as it was observed that the water inside a net is always much quiet than that outside. The experiment was designed using radial moorings to fix the net frames onto a flume with changeable tensions, under different hydraulic conditions to mimic regular wave action. The artificial wave periods and height were 0.8—2.0s and 50—250mm respectively, and the wave force on the cage and other parameters were recorded simultaneously. The boundary value problem were solved by defining the transmission coefficient in terms of velocity potential to establish a full solution applying proper eigenfunction expansion, least square approximation, and cubic spline methods. The variations of the transmission coefficient, hydrodynamic pressure and surface wave elevation were determined with respect to the net length and other geometric parameters.

The results showed that the horizontal wave force on the net changed periodically and asymmetrically in physics. The period of the force coincided with that of the wave phase, while the asymmetrical nature of the wave force was resulted from wave elevations in the shape of Stokes second-order wave with sharp peak and flat trough. The calculation shows that the net-undergoing force is correlated positively in the powers of 2.6 and 0.8 to wave height and length respectively. Moreover, as the net become more flexible, its transmission coefficient increased, more water can pass through, and the reflection coefficient and the hydrodynamic force were reduced. The net behaves like a hollow device allowing more wave energy to act on its surface and hence reduce the reflection and wave forces. At last, a multi-layered flexible floating-breakwater with was designed for flume-test, by which net transmission coefficient could be reduced to 71%. It implied that a feasible net cage could be applied in wavy environment to replace rigid breakwaters.

**Key words** Fishing net, Breakwater, Wave mechanics, Transmission coefficient, Flume experiment