

方形网箱水平波浪力的迭加计算和实验验证*

宋伟华 梁振林^{†1)} 关长涛^{††} 赵芬芳[†] 黄六一[†] 朱立新[†]

(浙江海洋学院海洋渔业系 舟山 316004; 中国海洋大学水产学院 青岛 266003)

[†](中国海洋大学水产学院 青岛 266003)

^{††}(中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071)

提要 采用小直径圆柱体绕流理论和网渔具理论为基础的经验水动力计算法,分别考虑网箱框架是刚性体、网衣和绳索是柔性体的特征,结合正弦波理论对方形网箱及其构件受到的水平波浪力特性进行了分析研究,理论给出了波浪力迭加计算法,并把计算结果与小尺度的网箱水槽实验进行对比验证。结果表明,计算数值与试验数据较接近,平均误差率在15%以内。网箱水平波浪力呈周期性、不对称变化,在波浪周期小于0.72s时,主要以框架的波浪力为主,反之以网衣的为主。在波长为0.8m、周期为0.72s、水深为0.7m、波高为68.3mm情形下,计算结果显示网箱的框架尺寸和形状及其系泊、布局的选择应根据实际海况而定,网箱高度可适当增加,当设置水层下降深度相对于网箱高度比率为20%—40%时,波浪力峰值下降相对率达68.03%—88.20%,表明可以较大程度地降低其波浪力。

关键词 水平波浪力,方形网箱,迭加计算,试验验证

中图分类号 S97

深水网箱所处的工作状态主要是流场和波浪场的复合作用,由于传统的网箱设计仍以经验方法为主,加之对其进行管理和维护的方案尚不很成熟,当大风浪经过时往往会造成极大的破坏。因此很有必要对网箱水动力学进行研究,这关系到材料、结构、网型、敷设和固泊的正确选择和良好的使用。仅水流作用的网箱力学研究可借鉴已较成熟的渔具力学的研究成果(余显炜, 2001; 周应祺等, 2001; 弗里德曼, 1981; Matsuda, 2001)和理论数值计算(章守宇等, 2002),目前关键问题是网箱的波浪力学研究,国内外迄今尚未见有成功的报道(宋伟华等, 2003; 郑国富等, 2001)。网箱主要由框架、绳索和网衣构成,是刚性体和柔性体的复合体,各构件的波浪力特性也有较大的差异,框架的波浪力属于海洋工程研究领域(孙意卿, 1989; 邱大洪, 1985; 竺艳蓉, 1991; 黄祥鹿等, 1992),网衣和绳索属于柔性网具探讨问题

(Fujita *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 2000; Kimura, 1998)。作者以莫里森的小直径圆柱体波浪力(Morison *et al.*, 1950)和库兹涅佐夫的网衣波浪力(弗里德曼, 1981)计算方法为依据,探讨形状、结构较为特殊的方形网箱在正弦波工况下的水动力学特性,特别是关系到网箱系泊安全的水平波浪力计算,并通过小尺度网箱的波浪试验来验证,由此可以为与水流共同作用的网箱水动力研究打下基础。

1 理论和方法

见图1,方形网箱ABCD-A'B'C'D'工作时处于平衡状态。由于在设计和敷设中易于做到网箱垂向平衡,本文中以水平方向的受力为主要研究对象。

按方形网箱的三个相互垂直的缝合边相平行设直角坐标系 $oxyz$,波形前进方向与沿水底的 ox 轴指向相同,而 oz 轴指向垂直向上, oy 轴与 ox 、

* 国家863高技术发展计划资助项目,2001AA623030号、2001AA623010号。宋伟华,博士研究生,讲师,E-mail:whsong@zjou.net.cn

1) 通讯作者:梁振林,博导,教授,E-mail:liang@ouc.edu.cn

收稿日期:2003-11-26,收修改稿日期:2003-12-25

oz 轴相垂直。

水槽波浪试验时,在固定地与网箱之间安装张力仪测试设备可测出网箱的水平波浪力。

1.1 基本假设

对于方形网箱 $ABCD-A'B'C'D'$,假设:网箱作业工况中的波浪为正弦波,不存在散射和折射;以平面 AD' 内构件受到波浪力为参考点,其他平面构件受力以此为迭加,并且此时框架、绳索和网衣变形不计,而网箱在水中正处于漂浮状态;方形网箱的水平波浪力主要由框架、绳索和网衣所构成,前两者均可近似认为是圆柱体构件,表面粗糙度影响不计;所有结构物的水平波浪力彼此独立、不相互干扰。

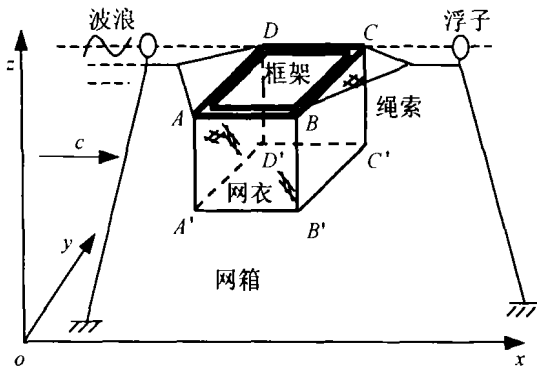


图 1 在波浪作用下的网箱示意图

Fig.1 Sketch map of sea-cage under wave situation

1.2 网箱框架和绳索的水平波浪力

参阅图 2,依据莫里森理论,小尺度的直立圆柱体(柱体直径与波长之比小于 0.2)在高度 dz 上的水平波浪力为:

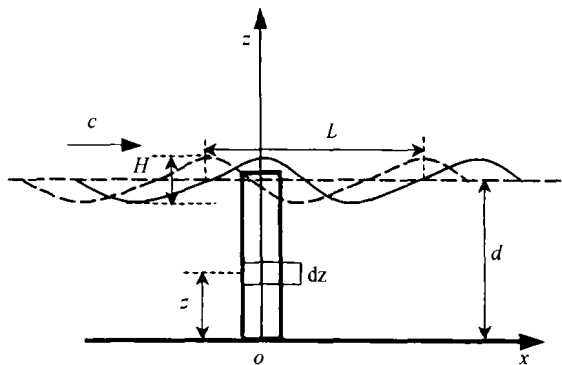


图 2 正弦波中小直径圆柱体

Fig.2 Small-cylinder situation in sine wave

$$dF = dF_D + dF_I$$

$$= d\left[\frac{1}{2} C_D \rho A u_x |u_x| + C_M \rho V \cdot \frac{du_x}{dt}\right] \quad (1)$$

式中: F_D 为水平方向水动阻力, F_I 为水平惯性力, C_D 、 C_M 为水动阻力系数和惯性力系数, A 、 V 为投影面积和排水体积, u_x 、 $\frac{du_x}{dt}$ 分别为 z 处水质点的水平速度和加速度, ρ 为流体密度。

结合正弦波理论,当时间为 t 时,可得到网箱框架和绳索水平波浪力的计算公式:

$$\begin{cases} F_1 = K_{D0} K_1 \cos\theta | \cos\theta | + K_{M0} K_2 \sin\theta \\ F_2 = K_{D0} K_3^2 \cos\theta | \cos\theta | kl + K_{M0} K_3 \sin\theta \cdot kl \\ F_3 = \pm \frac{K_{D0} K_3^2}{4} \frac{\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1}{2} k\pi D + \\ \quad K_{M0} K_3 (kx_2 \sin\theta_2 - kx_1 \sin\theta_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_1 为直立的四根绳索 AA' 、 BB' 、 CC' 、 DD' 的波浪力, F_2 为与水表面平行且与波向垂直的框架管材 AD 、 BC 的波浪力, F_3 为与波向平行的管材 AB 、 CD 的波浪力。参数:

$$K_{D0} = \frac{C_D}{8} \gamma D H^2 \tanh kd, \quad K_{M0} = \frac{C_M}{8} \gamma \pi D^2 H \tanh kd,$$

$$K_1 = \frac{2k(z_2 - z_1) + \sinh 2kz_2 - \sinh 2kz_1}{4 \sinh 2kd},$$

$$K_2 = \frac{\sinh kz_2 - \sinh kz_1}{\sinh kd}, \quad K_3 = \frac{\cosh kz_0}{\sinh kd},$$

$\gamma = \rho g$, $\theta = kx - \omega t$, D 为构件直径, l 为垂直于波向框架管材的长度, d 为水深, k 为波数, H 为波高, L 为波长, ω 为频率。构件尺寸在计算框架、绳索时取值各异, z_2 、 z_1 、 z_0 分别是构件上下端点在 oz 轴坐标的位置和管材离海底的平均位置, x_1 、 x_2 为管材长度方向在 x 轴的距离, θ_1 、 θ_2 为在 t 时管材两端的波浪位相($\theta = kx - \omega t$), 正负号根据水质点方向来确定,正值表示波浪力与波向相同,负值表示相反。

1.3 网衣水平波浪力

见图 3,在 oxz 平面上,考虑网衣是柔性体,设矩形平面网衣基本张紧无拱度现象,此时网衣波浪周期参数 $KC^{(1)}$ 大于 $30^{(2)}$,依据库兹涅佐夫理论,网衣的惯性力可以忽略不计,微面积平面网衣水平波浪力为:

$$dR = C_n \rho u_x |u_x| dx \cdot dz \quad (3)$$

1) KC 称为 Keulegan-Carpenter number, $KC = u_m T/a'$, a' 为网目脚特征长度, u_m 为水质点的最大速度

2) 高志铭, 2001. 柔性箱网结构设计与分析研究. 台湾: 中山大学海洋环境及工程学硕士论文

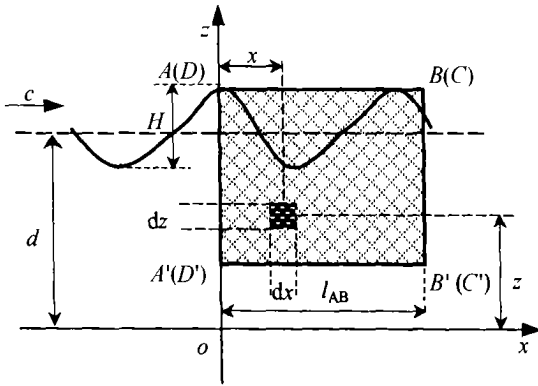


图3 波浪作用下的网衣
Fig.3 Net panel under wave situation

式中 C_n 为这种网衣阻力系数, $C_n = f(a, d', \dots) \cdot \frac{d'}{a}$, d' 和 a 分别为网目的网线直径和目脚长度, $f(a, d', \dots)$ 为不同网衣测试时的系数, 并且与网衣和波向垂直、平行位置有关, 如当网衣材料为棉、缩结系数为 0.707, 与波浪方向垂直时, 其测试值为 1.8, 而当平行时, 则为 0.018 (A. JI. 弗里德曼, 1981)。

同样可得到网衣波浪力:

$$\begin{cases} R_1 = 4K_{N0}K_1 \cos\theta | \cos\theta | l \\ R_2 = \pm K_{N0}K_1 \frac{2k(x_2 - x_1) + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)}{k} \\ R_3 = \pm K_{N0}(K'_3)^2 [2k(x_2 - x_1) + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)] l \end{cases} \quad (4)$$

式中 R_1 为与波向垂直的平面网衣 AD' 、 BC' 波浪力, R_2 为与水表面垂直且与波向平行的网衣 AB' 、 DC' 波浪力, R_3 为与水表面平行的网衣 $A'C'$ 波浪力。参数: $K_{N0} = \frac{C_n}{16} \gamma H^2 \tanh kd$, $K'_3 = \frac{\cosh kz'_0}{\sinh kd}$, z'_0 是底部网衣离海底的距离, 其他参数类同于式 (2), 只不过构件为网衣, 在计算时考虑到网衣是柔性体, R_1 的正负取值依据位相作适当的修正。

2 实验与计算

2.1 网箱水池试验

在中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室的“大型风-流-浪水槽”进行小尺度方形网箱的波浪试验。

设备技术: 水槽尺寸为 $40\text{m} \times 1.2\text{m} \times 1.5\text{m}$, 试验时水深为 0.70m; 测力仪型号为 DJ-800, 并作了

一定的技术改进, 主要测试方形网箱在每一种波浪条件下的水平受力和波浪要素的关系。

网箱尺寸: 主尺度(长 × 宽 × 高)为 $0.533\text{m} \times 0.533\text{m} \times 0.267\text{m}$, 框架直径为 16mm, 绳索 (PA) 直径为 5mm, 网衣目数规格为 $45.5^\diamond \times 45.5^\diamond \times 23^\diamond$, 网线 (PA) 直径为 1.55mm, 目大 16.6mm, 双死结, 缩结系数为 0.707, 如图 1 中垂直平面 AD' 和 BC' 、水平平面 AB' 和 DC' 四块网衣均为 $45.5^\diamond \times 23^\diamond$, 平面 $A'C'$ 一块网衣为 $45.5^\diamond \times 45.5^\diamond$ 。

测试结果: 根据实测, 波浪周期范围为 0.65—1.5s, 波长为 0.67—3.51m, 波高为 3.5—31.1cm, 在不同波浪条件下网箱的水平波浪力有较大的差异, 随机取周期 0.72s、0.80s、0.90s、1.0s 等四档测试任意数据与理论计算结果进行比较分析。

2.2 理论计算和实验对比

框架和绳索波浪力系数按我国海洋工程有关要求给定 (竺艳蓉, 1991), 网衣波浪力系数依据库兹涅佐夫所提供的数据 (弗里德曼, 1981), 构件规格按水槽波浪试验网箱尺寸, 计算结果见表 1。

计算平均误差小于 15%, 最小误差为 2.18%, 因此运用正弦波理论来求解方形网箱波浪力在理论上是可能的, 但在波高较小试验时会有较大的误差。当 H/L (波高/波长) 小于 0.05 时, 计算值与实验值相差达 20% 以上, 此时的 KC 值分别为 22.62、26.11、25.02、24.43, 均小于 30, 因此在这种情况下应考虑网衣惯性力的影响。

取 4 组波浪工况, 按两个周期来说明方形网箱水平波浪力的迭加计算, 见图 4, 4 组试验工况的波长和波高分别为 0.8m、68.3mm; 1.0m、96.9mm; 1.26m、125.6mm; 1.56m、131.8mm。图中波浪力正值表示与波向相同, 负值表示相反。

网箱的波浪力是由框架、网衣和绳索通过迭加方法计算得出, 框架的波浪力波峰值与波谷值基本等同, 这主要是由于公式 (2)、(4) 中近似认为其在水中位置取其轴中心平均深度的缘故, 而网衣波浪力有双峰值主要是由两部分网衣 (即垂直方向和水平方向) 迭加形成的。

由图 4 不难发现, 网箱的波浪力变化规律与波浪周期同步, 而每一构件的变化周期也一致, 只是变化趋势不同步; 同时网箱波浪力在一个周期内出现了两次波峰值, 这也说明了其主要是由框架及网衣两个不同步的波浪力构成。从迭加的过

表 1 网箱最大水平波浪力理论计算与试验对比

Tab.1 Comparism of calculated to experimented result of the maximum horizontal wave force value

平均波高(mm)		平均周期 0.72s; 平均波长 0.8m				平均周期 0.80s; 平均波长 1.0m				
		51.9	57.8	68.3	77.8	58.4	79.6	96.9	97.5	120.0
理论值(N)	框架	1.6568	1.9114	2.4005	2.8838	0.9554	1.4064	1.8258	1.8412	2.4616
	绳索	0.0384	0.0473	0.0666	0.0884	0.0099	0.0188	0.0293	0.0298	0.0494
	网衣	0.9423	1.0593	1.2646	1.3923	1.4195	2.7675	3.9898	4.2451	6.9664
	网箱	2.4166	2.7631	3.4128	3.9927	1.7962	3.2739	4.6257	4.8746	7.7378
试验值(N)		3.0765	3.2661	3.3030	3.4945	2.2924	3.7338	4.7980	5.1110	8.2227
误差(%)		21.45	15.40	3.32	14.26	21.65	12.32	3.59	4.63	5.90

平均波高(mm)		平均周期 0.90s; 平均波长 1.26m				平均周期 1.0s; 平均波长 1.56m					
		56.4	89.0	114.3	123.4	125.6	55.3	107.9	131.8	159.8	171.2
理论值(N)	框架	0.6894	1.2308	1.7449	1.9493	2.0003	0.5426	1.3763	1.8714	2.5566	2.8694
	绳索	0.0190	0.0480	0.0843	0.1011	0.1055	0.0314	0.1180	0.1848	0.2917	0.3460
	网衣	1.2016	3.5452	4.5239	5.1414	5.4027	0.9862	3.2024	4.3131	6.2841	7.8896
	网箱	1.3641	3.7845	4.9438	5.6211	5.8903	1.1748	3.7338	5.1030	7.4051	9.0991
试验值(N)		2.0243	4.2935	4.8385	5.3136	5.3559	1.7911	4.1168	4.8533	6.2157	7.2652
误差(%)		32.61	11.86	2.18	5.79	11.61	34.41	9.30	5.15	19.14	25.24

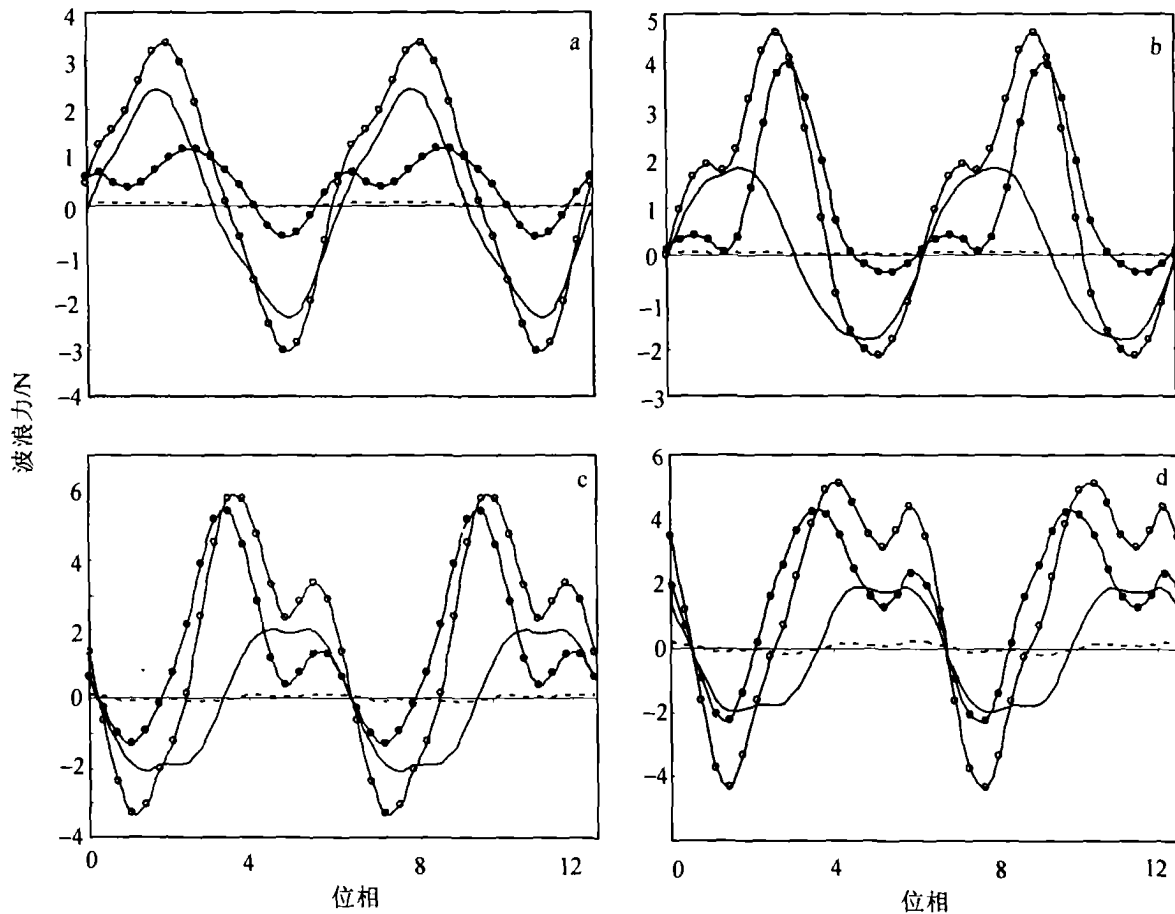


图 4 四组波浪工况下的网箱水平波浪力迭加计算

Fig.4 Iterative calculation of the wave force for sea-cage under four groups of wave situation

a. 波长为 0.8m、波高为 68.3mm; b. 波长为 1.0m、波高为 96.9mm;
 c. 波长为 1.26m、波高为 125.6mm; d. 波长为 1.56m、波高为 131.8mm
 ——框架; - - - - 绳索; —●—网衣; —○—网箱

程看,当周期为 0.72s 时,主要以框架波浪力为主;而当周期为 0.80s、0.90s、1.0s 时,则以网衣为主。通过进一步计算发现,随着周期的增加,网衣波浪力与整体网箱波浪力非常接近,这就要求在设计网箱时一定要考虑网衣的强度。本文中在计算所应用的网衣波浪力经验公式时,水动力系数的取值来源于棉麻一类的网衣试验结果,对于合成材料来说显然偏大,这尚须通过网衣波浪试验来修正水动力系数。绳索的波浪力相当小,基本可以忽略不计。

另外,网衣波浪力在不同的同期情况下,其最大值所处的波浪位相变化不一致,这反过来说明了网衣的波浪力应由水动力和惯性力两部分组成,且随着波浪周期的剧烈变化,其作用越来越明显。

3 结果与讨论

3.1 垂直于波形方向的方形网箱水平波浪力,可以通过垂直、平行波向的框架、绳索和网衣所受力的迭加来得到,理论计算值与试验值比较接近,从而为理论和实验研究找到了支撑点。

3.2 根据波浪因子在波浪力中的作用程度,通过试验和理论分析,得出影响水动阻力和惯性力的主要波浪因子是波高。若是水动阻力起主要作用,则在波浪力研究中主要以波高二次方来解决,而惯性力则以波高的一次方来处理。这对于进行模拟波浪试验、找出模型试验的相似准则起积极作用,但这有待于实验室进一步的验证。

3.3 通过以上分析,可找出网箱水平波浪力与波

浪因子的关系,同时也可预测不同尺寸的网箱波浪力变化。以本次水槽试验的小网箱尺寸为例,选择工况 $L = 0.8\text{m}$ 和 $H = 68.3\text{mm}$,而只改变某一相关物理参数时,网箱水平波浪力变化率见表 2。当然这也与材料、网衣技术参数(网目大小、网线直径、缩结系数等)、敷设方式和波、流共同作用等条件相关联的(Colbourne *et al.*, 2001)。

由表 2 可知,波高能引起波浪力较大的变化,当波高增大 1、2、3 倍时,波浪力分别增大 3.5、13、40 倍左右,因此网箱敷设地址要选择波高较小的海域。而波长对波浪力的影响需根据实际情况才能确定,一般来说长波能减少波浪力,但网箱的起伏摆动性较大,因此适宜敷设组合网箱,对于短波则选择尺寸合适的单个网箱较好。

网箱的尺寸选择要根据海域的波浪情况而定,如波浪运动常年有往复方向时,其在波向上的长度尺寸可放大,垂直波向的宽度尺寸可适当缩小,框架形状可选为长方形;而当波浪运动为旋转方式时,网箱的框架形状最好选择方形或圆形,以免造成网箱波浪力过于在一个方向的集中。总之,网箱的形状和尺寸选择可视实际海域而定,如仅是波浪工况时网箱高度可增加,因为网箱高度变化对水平波浪力影响较小。

敷设海域的水深变化对网箱的波浪力基本上无影响,但水深不能太浅;另外更为重要的是,当网箱下降水深相对网箱高度为 20%—40% 时,波浪力峰值下降率为 68.03%—88.20%,可以较大幅度减少网箱的波浪力,因此网箱的沉降是避免风浪的最佳方法之一。

表 2 不同条件下网箱最大水平波浪力相对变化率(%)

Tab.2 The relative change rate (%) on the maximum cage force under different conditions

物理及其他条件	条件变化情况相对百分率(%)							
	25	50	75	100	150	200	300	400
波长	636.28	19.64	56.30	0	-68.69	-71.57	-69.62	-72.26
波高	-87.08	-67.75	-39.69	0	129.10	359.76	1407.07	4128.26
网箱长度	-25.64	-48.30	-47.63	0	19.85	-37.78	64.89	113.88
网箱宽度	-44.50	-29.93	-15.33	0	31.13	62.26	124.51	186.77
网箱高度	-10.03	-3.48	-0.93	0	0.47	0.54	0.57	0.69
框架面积	-73.54	-67.56	-30.41	0	34.90	59.92	48.21	3.00
作业水深(m)	0.35	0.525	0.7	0.875	1.05	2.1	3.5	7.0
波浪力相对变化率(%)	0.79	0.05	0	0	0	0	0	0
设置水层相对于网箱高度比率(%)	0	5	10	15	20	25	30	40
波浪力相对变化率(%)	0	-26.00	-44.66	-58.19	-68.03	-75.34	-80.84	-88.20

注:正数表示波浪力相对上升率,负数表示波浪力相对下降率

以上分析仅是考虑波浪工况的情况。当考虑波浪与水流共同作用时,尚需分析水流与波浪的相互影响,通过矢量迭加,按有限元方法(Finite Element Method,简称 FEM)进行网箱受力和形状的计算,进而合理选择网型、敷设地址和固泊系统,减少水动力的负面影响,确保网箱系泊的安全性。同时,由于网衣是柔性体,在水动力的作用下会发生变形甚至扭曲,造成网箱水容体积的减少,因此下一步的研究工作重点是如何降低这些负面因素的影响。

参 考 文 献

- 孙意卿, 1989. 海洋工程环境条件及其载荷. 上海: 上海交通大学出版社, 141—192
- 邱大洪, 1985. 波浪理论及其在工程上的应用. 北京: 高等教育出版社, 140—146, 274—290
- 余显炜, 2001. 计算渔具力学导论. 上海: 上海科学技术文献出版社, 218—247
- 宋伟华, 梁振林, 赵芬芳等, 2003. 方形网箱波浪水动力学的近似计算. 浙江海洋学院学报, 23(2): 211—220
- 周应祺, 许柳雄, 何其渝, 2001. 渔具力学. 北京: 中国农业出版社, 51—68, 119—133
- 竺艳蓉, 1991. 海洋工程波浪力学. 天津: 天津大学出版社, 9—19, 63—92
- 郑国富, 黄桂芳, 戴天元, 2001. 柔性结构养殖网箱的抗风浪性能试验报告. 海洋湖沼通报, (1): 26—30
- 黄祥鹿, 陆鑫森, 1992. 海洋工程流体力学及结构动力响应. 上海: 上海交通大学出版社, 39—41, 54—55
- 章守宇, 刘洪生, 2002. 飞碟型网箱的水动力学数值计算方法. 水产学报, 26(6): 519—527
- 弗里德曼 A JT, 1981. 渔具理论与设计. 见: 侯恩准, 高清廉译, 1988. 北京: 海洋出版社, 36—47, 57—63
- Colbourne D B, Allen J H, 2001. Observation on motions and loads in aquaculture cages from full scale and model scale measurements. Aquacultural Engineering, 24(2): 129—148
- Fujita S, Fukahori K, Nishinokubi H, 1991. Tension of the mooring ropes on the net cage model of raft type in regular waves. Nippon Suisan Gakkaishi, 57(12): 2229—2235
- Lee Hsien Hua, Wang Pei-Wen, 2000. Dynamic behavior of tension-leg platform with net-cage system subjected to wave force. Ocean Engineering, 28(2): 179—200
- Kimura H, 1998. Numerical calculation of horizontally fully immersed and two points moored cylindrical buoy in wave. Fisheries Engineering, 35(2): 167—176
- Matsuda K, 2001. Fishing Gear Physics. Tokyo: Seizando Press, 29—49
- Morison J R, Brien M P O, Johnson J W *et al*, 1950. The Forces Exerted by Surface Wave on Piles. Petrol, Trans, Am Inst of Mining Engineering, 189—196

CALCULATION AND EXPERIMENT OF HORIZONTAL WAVE FORCE AND PROVED BY EXPERIMENT IN WAVE POOL FOR A SQUARE SEA-CAGE

SONG Wei-Hua, LIANG Zhen-Lin[†], GUAN Chang-Tao^{††}, ZHAO Fen-Fang[†], HUANG Liu-Yi[†], ZHU Li-Xin[†]

(*Department of Marine Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, 316004; Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

[†](*Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

^{††}(*Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, 266071*)

Abstract Sea-cages are mechanically influenced by both waves and currents. An effective operation requires hydrodynamic research in the perspective of durability, security and productiveness of the cage. Current research is hindered by insufficient knowledge of wave force. Intrinsic factors of the cage, such as framework pattern (shape and size), and materials (rigid or flexible net and rope), must be considered in any simulation of the sort. Using sinusoidal wave theory and iterative calculation method, the authors simulated the scenario of a rectangular cage under lateral wave force and analyzed the characters of horizontal wave force for the sea-cage. The simulated result was then compared with that of lab flume test. Two results were found to be similar to each other, and the average error ratio was < 15% and occasionally was 20% when ratio of wave height to wavelength was < 0.05 and the Keulegan-Carpenter number was < 30. This is because the cage inertia force is ignored in this case and the calculated hydrodynamic coefficient was based on the result of different material experiments that was conducted by early researchers more than 50 years ago. The horizontal wave force on the cage changed periodically and asymmetrically with two peaks per period. When wave period was < 0.72s, the frame wave force was in effect, otherwise net wave force took over. In flume test, a constant condition was applied which was wavelength 0.8m, period 0.72s, depth 0.7m and height 68.3mm. The simulated results showed that under the condition, the magnitude of wave force have positive relationship to the wave height, the frame size, cage shape, anchor attachment and other specifications should be designed according to the actual condition. The simulated results showed that: first, when wave height increased by 1, 2, 3 times, the wave force increased about 3.5, 13, 40 times respectively, which suggested that the sea-cage should be placed in lower-height wave area. However, increase of wavelength would result in instability of the sea-cages, thus placement of combined-cage in the longer-length wave and individual cage in shorter-length wave area is suggested. Secondly, when wave motion direction does not change, we could lengthen the cage size parallel to the wave direction; when wave whirls and swirls, squared or circled cage should be used. Thirdly, when sunken depth to cage height was between 20% to 40%, the relative ratio of peak force decreased from 68.03% to 88.20%, indicating that the impact of wave force can be reduced with placing depth. Therefore, the sea-cage height can be adjusted accordingly to some extent with the wave data. But this paper dealt with only the situation mentioned above, in the future, study on mutual interaction of wave and current must be considered using vector iterative calculation method. The cage's cubage must be calculated through net figuration change by the Finite Element Method (FEM).

Key words Horizontal wave force, Square cage, Iterative calculation method, Lab flume testing proved