

应用两种不同的波浪理论计算方形网箱水平波浪力

宋伟华^{1,2}, 梁振林^{1,3}, 关长涛⁴, 赵芬芳¹, 黄六一¹, 朱立新¹

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 浙江海洋学院 海洋渔业系, 浙江 舟山 316004; 3. 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 山东 青岛 266071; 4. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:运用莫里森(Morison)和库兹涅佐夫(Kuznetsov)的计算方法对方形网箱及其构件受到的水平波浪力特性进行分析, 分别依据正弦波和斯托克斯二阶波理论, 导出相应水平波浪力的迭加计算公式, 并把计算结果与两种尺寸的网箱水槽试验进行对比验证。结果显示, 正弦波理论计算值与试验值平均误差分别为11.19%和13.67%, 二阶波计算平均误差分别为11.03%和13.87%, 表明两者计算结论的差异性和计算方法的可行性。在波长、周期、波高和水深分别为150 m, 10.2 s, 10 m, 40 m情况下模拟计算实物网箱水平波浪力, 其二阶波受力峰值范围比正弦波的要窄, 波谷值曲线要平坦, 两者波浪力计算相差达8.70%, 并且相差率与波高、波长成正比例关系, 与水深成反比例关系, 从而说明不同的波浪水域环境下应用不同波浪理论计算具有重要意义。

关键词:方形网箱; 水平波浪力; 正弦波; 斯托克斯二阶波; 水槽试验

中图分类号: S969.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8737-(2005)01-0091-08

网箱是刚性的框架和柔性的网衣与绳索的组合体, 其受到的波浪力既可以借鉴海洋工程的研究结果, 又应考虑柔性体网渔具特性^[1-3]。一方面, 框架受力变化规律与其固有频率有关; 另一方面, 网衣的受力与网材料、网衣的性质(目大、缩结等)相关。本研究通过分析半经验的莫里森^[4]和库兹涅佐夫^[5]计算方法导出方形网箱在两种波浪理论下的水平波浪力迭加计算公式, 并应用两种网箱的水槽波浪试验来验证。同时网箱的作业海域水深选择一般较深, 在某些海域的波浪易破碎, 并且由于有些海域海底主要是细泥沉积而成的, 波浪会使海底的泥沙再悬浮, 这种含泥沙的波浪对网箱的作用要比无泥沙的波浪大得多, 造成的波浪力具有非线性特性, 所以小振幅波算法与实际有差距。考虑到网箱水槽试验时一般是规则波, 因此本研究仅用正弦波和斯托克斯二阶波理论对网箱在波浪工况下受力进行尝试性探讨, 以证实不同情况下应用所适应的波浪理论对网箱设计和使用有一定的指导意义。

1 计算理论

方形网箱 $ABCD-A'B'C'D'$ 作业时正处于平衡状态(图1)。以平面 AD' 内构件受到最大波浪力时为参考点, 对方形网箱的主要构件框架、绳索和网衣波浪力进行迭加计算^[6]。按方形网箱的3个相互垂直的缝合边相平行设笛卡尔坐标系 oxy , 波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 、 oz 轴相垂直。

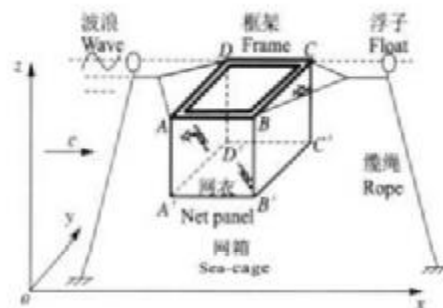


图1 在波浪作用下的网箱示意图

Fig.1 Sketch map of sea-cage under wave

收稿日期: 2004-01-06; 修订日期: 2004-06-11.

基金项目: 国家“863”高技术研究发展项目(2001AA623010, 2001AA623030).

作者简介: 宋伟华(1968-), 男, 博士研究生, 主要从事海洋渔具计算研究. E-mail: whsong@ouc.edu.cn

通讯作者: 梁振林. E-mail: Liang@ouc.edu.cn

波浪水槽试验时,在固定地与网箱之间安装张力测试设备可测出网箱的水平波浪力。

作用在框架(ABCD)和绳索(AA'、BB'、CC'、DD')的受力可应用半经验公式莫里森方法进行计算,而网衣受力一般应用库兹涅佐夫渔具计算理论处理,两者波浪力可认为是不相互干扰的,从中可推导出计算解析公式。

1.1 波浪理论

正弦波水质点运动的水平方向速度和加速度分别为^[7-10]:

$$\begin{cases} u_x = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\cosh kz}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \\ \frac{du_x}{dt} = 2 \left(\frac{\pi^2 H}{T^2} \right) \frac{\cosh kz}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \end{cases} \quad (1)$$

司托克斯二阶波水质点运动的水平方向速度和加速度是^[7-10]:

$$\begin{cases} u_x = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\cosh kz}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \\ \quad + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{T} \right) \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2kz}{\sinh^4 kd} \cos z(kx - \omega t) \\ \frac{du_x}{dt} = 2 \left(\frac{\pi^2 H}{T^2} \right) \frac{\cosh kz}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \\ \quad + 3 \left(\frac{\pi^2 H}{T^2} \right) \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2kz}{\sinh^4 kd} \sin 2(kx - \omega t) \end{cases} \quad (2)$$

上两式中, u_x 和 $\frac{du_x}{dt}$ 分别为深度 z 处水质点的水平速度和加速度, k 是波数, H 是波高, L 是波长, T 是周期, ω 是频率, d 是水深,且 $L = \frac{gT^2 \tanh(kd)}{2\pi}$ 。

1.2 莫里森(Morison)^[4]方法和库兹涅佐夫(Kuznetsov)^[8]方法

应用半经验的莫里森方法计算小尺度直立圆柱体的水平波浪力:

$$\begin{aligned} dF &= dF_D + dF_I \\ &= d \left[\frac{1}{2} C_D \rho A u_x |u_x| + C_M \rho V \cdot \frac{du_x}{dt} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

当 $KC^{[11]} > 30$ 时,应用库兹涅佐夫方法计算网衣水平波浪力(KC称为Keulegan-Carpenter number, $KC = u_m T / a'$, a' 为网目目脚特征长度, u_m 为水质点的最大速度):

$$dR = C_{R0} \rho u_x |u_x| ds \quad (4)$$

式中, F_D 、 F_I 分别为圆柱体水平方向水动力阻力和惯性力, C_D 、 C_M 为圆柱体水动力阻系数和惯性力系数, A 、 V 、 S 分别为圆柱体面积、体积和网衣的受浪面积, ρ 为流体密度, C_R 为所试验网衣的波浪阻力系数。

1.3 计算公式

设圆柱体直立时水平波浪力为 F_1 、与水平面平行且与波浪传播方向垂直的圆柱体波浪力为 F_2 、与波浪传播方向平行的圆柱体波浪力为 F_3 (图1)。4根绳索AA'、BB'、CC'、DD'的波浪力为 F_1 ,框架管材AD、BC的波浪力为 F_2 ,框架管材AB、CD的波浪力为 F_3 。类似这3种情况,设 R_1 为与波向垂直的平面网衣AD'、BC'波浪力, R_2 为与波向平行且与水表面垂直的网衣AB'、DC'波浪力, R_3 为与水表面平行的网衣A'C'波浪力,当取某 t 时,则由式(1)至式(4),推导得出正弦波理论的计算公式:

$$\begin{cases} F_1 = K_{D0} K_1 \cos \theta |\cos \theta| + K_{M0} K_2 \sin \theta \\ F_2 = K_{D0} K_3^2 \cos \theta |\cos \theta| kl + K_{M0} K_3 \sin \theta \cdot kl \\ F_3 = \pm \frac{K_{D0}}{4} K_3^2 \frac{\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1}{2} k\pi D \\ \quad + K_{M0} K_3 (kx_2 \sin \theta_2 - kx_1 \sin \theta_1) \\ R_1 = 4K_{N0} K_1 \cos \theta |\cos \theta| l \\ R_2 = \pm K_{N0} K_1 \frac{2k(x_2 - x_1) + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)}{k} \\ R_3 = \pm K_{N0} (K_3')^2 [2k(x_2 - x_1) \\ \quad + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)] l \end{cases} \quad (5)$$

同样推导得出司托克斯二阶波理论计算公式:

$$\begin{cases}
 F_1 = \pm K_{D0} \left[K_1 \cos^2 \theta + \frac{L_0}{8} K_4 \cos \theta \cos 2\theta + \frac{9L_0^2}{128} K_5 \cos^2 2\theta \right] + K_{M0} \left[K_2 \sin \theta + \frac{3L_0}{4} K_6 \sin 2\theta \right] \\
 F_2 = \pm K_{D0} k \left[K_3^2 \cos^2 \theta + \frac{3L_0}{4} K_7 \cos \theta \cos 2\theta + \frac{9L_0^2}{16} K_8^2 \cos^2 2\theta \right] + K_{M0} \left[K_3 \sin \theta + \frac{3L_0}{2} K_8 \sin 2\theta \right] kl \\
 F_3 = \pm K_{D0} \frac{\pi k D}{4} \left[K_5^2 \frac{\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1}{2} + \frac{L_0}{4} K_7 [2(\cos 3\theta_2 - \cos 3\theta_1) + (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)] \right. \\
 \left. + \frac{9L_0^2}{16} K_8^2 \frac{\cos 4\theta_2 - \cos 4\theta_1}{2} \right] + K_{M0} \left[K_3 (kx_2 \sin \theta_2 - kx_1 \sin \theta_1) + \frac{3L_0}{2} K_8 (kx_2 \sin 2\theta_2 - kx_1 \sin 2\theta_1) \right] \\
 R_1 = \pm K_{N0} \left[4K_1 \cos^2 \theta + \frac{L_0}{4} K_4 \cos \theta \cos 2\theta + \frac{9L_0^2}{64} K_5 \cos^2 2\theta \right] l \\
 R_2 = \pm \frac{K_{N0}}{k} \left\{ K_1 [2k(x_2 - x_1) + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)] + \frac{L_0}{3} K_4 [3(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - 2(\sin^3 \theta_2 - \sin^3 \theta_1)] \right. \\
 \left. + \frac{9L_0^2}{256} K_5 [4k(x_2 - x_1) + (\sin 4\theta_2 - \sin 4\theta_1)] \right\} \\
 R_3 = \pm K_{N0} \left\{ (K_3')^2 [2k(x_2 - x_1) + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)] + L_0 K_7' [3(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - 2(\sin^3 \theta_2 - \sin^3 \theta_1)] \right. \\
 \left. + \frac{9L_0^2}{32} (K_8')^2 [4k(x_2 - x_1) + (\sin 4\theta_2 - \sin 4\theta_1)] \right\} l
 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中各参数为:

$$K_{D0} = \frac{C_D}{8} \gamma D H^2 \tanh kd$$

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

$$K_{N0} = \frac{C_n}{16} \gamma H^2 \tanh kd$$

$$L_0 = \frac{\pi H}{L}$$

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

$$K_2 = \frac{\sinh kz_2 - \sinh kz_1}{\sinh kd}$$

$$K_3 = \frac{\cosh kz_0}{\sinh kd}, K_3' = \frac{\cosh kz_0'}{\sinh kd}$$

$$K_4 = \frac{(\sinh 3kz_2 - \sinh 3kz_1) + 3(\sinh kz_2 - \sinh kz_1)}{\sinh^5 kd}$$

$$K_5 = \frac{(\sinh 4kz_2 - \sinh 4kz_1) + 4k(z_2 - z_1)}{\sinh^8 kd}$$

$$K_6 = \frac{\sinh 2kz_2 - \sinh 2kz_1}{\sinh^4 kd}$$

$$K_7 = \frac{\cosh 3kz_0 + \cosh kz_0'}{\sinh^5 kd},$$

$$K_7' = \frac{\cosh 3kz_0' + \cosh kz_0}{\sinh^5 kd}$$

$$K_8 = \frac{\cosh 2kz_0}{\sinh^4 kd}, K_8' = \frac{\cosh 2kz_0'}{\sinh^4 kd}$$

$$\gamma = \rho g, \theta = kx - \omega t$$

上式中, d 是水深, D 为圆柱体直径, l 为圆柱体长度, z_2, z_1, z_0 和 z_0' 分别是圆柱体上下端点在 α 轴坐标的位置、离海底的平均距离和底部网衣离海底的距离, x_1, x_2 为构件长度方向在 x 轴的距离, θ_1, θ_2 为在 t 时构件两端的波浪位相 ($\theta = kx - \omega t$), 正负号根据水质点运动速度方向来确定, 正值表示波浪力与波浪传播方向相同, 负值刚好相反。当然以上的坐标位置 (x, z) 和相应的构件尺寸在计算框架、绳索和网衣时取值各异。

2 试验设计与计算

2.1 网箱水槽试验

(1) 在中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室“大型风-流-浪水槽”进行小尺度方形网箱的波浪试验^[7-10, 12-14]。

设备技术: 水槽尺寸 $40 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 试验水深 0.70 m , 造波系统能造二维规则波; 测力仪型号 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。

(2) 两种试验网箱尺寸

A网箱:主尺度(长×宽×高)0.67 m×0.67 m×0.34 m,框架直径32 mm;绳索(PA)直径5 mm;网衣目数 $56.5^{\diamond} \times 56.5^{\diamond} \times 28.5^{\diamond}$,共5块,网线(PA)直径1.55 mm,目大16.8 mm,缩结系数0.707。

B网箱:主尺度0.53 m×0.53 m×0.27 m,框架直径16 mm;绳索(PA)直径5 mm;网衣目数 $45.5^{\diamond} \times 45.5^{\diamond} \times 23^{\diamond}$,共5块,网线(PA)直径1.55 mm,目大16.6 mm,缩结系数0.707。

(3) 测试结果

根据实测,波浪周期范围0.65~1.5 s,波长0.67~3.51 m,波高35~311 mm。在不同波浪条件

下网箱的水平波浪力有一定的差异,随机取周期0.71 s,0.80 s,0.90 s,1.0 s等4档测试数据与理论计算结果进行比较分析。

2.2 理论计算

考虑到波浪力是变化的,假设在同一个垂直波向平面内的绳索、框架、网衣波浪力的位相是相同的,因而可以分别由这个平面波浪位相为基准对这3种构件的波浪力进行迭加。

框架和绳索波浪力系数按我国海洋工程有关要求给定(C_D 、 C_M 与KC有关),网衣波浪力系数依据库兹涅佐夫理论提供的数据,其与网衣的网线直径、目脚长度、缩结、材料和测试等有关,并作一定的修正,构件规格按水槽波浪试验网箱尺寸,计算结果见表1。

表1 网箱最大水平波浪力理论计算与试验对比

Tab.1 Comparison of calculation and experiment for the maximum horizontal wave force value of sea-cage										
平均周期/s Average periods		0.71					0.80			
平均波长/m Average wavelength		0.8					1.0			
平均波高/mm Average wave height		51.9	57.8	68.3	77.8	58.4	79.6	96.9	97.5	120.0
A网箱试验值/N Experiment value for cage A		5.553	6.2112	6.9857	7.9593	5.0848	7.1252	9.5734	9.6542	14.4752
计算值	正弦波/N Sine wave	4.4281	5.6575	7.2255	9.3014	4.2620	6.6765	9.2529	9.3542	13.7535
	误差/% Error	20.26	8.91	3.43	16.86	16.18	6.30	3.35	3.11	4.99
	斯托克斯二阶波/N Second-order wave	4.4284	5.6579	7.2261	9.3022	4.2631	6.6787	9.2563	9.3577	3.7602
	误差/% Error	20.25	8.91	3.44	16.87	16.16	6.27	3.31	3.071	4.94
B网箱试验值/N Experiment value for cage B		3.0765	3.2661	3.3030	3.4945	2.2924	3.7338	4.7980	5.1110	8.2227
计算值	正弦波/N Sine wave	2.4166	2.7631	3.4128	3.9927	1.7962	3.2739	4.6257	4.8746	7.7378
	误差/% Error	21.45	15.40	3.32	14.26	21.65	12.32	3.59	4.63	5.90
	斯托克斯二阶波/N Second-order wave	2.4168	2.7634	3.4132	3.9933	1.7981	3.2759	4.6260	4.8749	7.7393
	误差/% Error	21.44	15.39	3.34	14.27	21.56	12.26	3.58	4.62	5.88
平均周期/s Average periods		0.90					1.0			
平均波长/m Average wavelength		1.26					1.56			
平均波高/mm Average wave height		56.4	89.0	114.3	123.4	125.6	55.3	107.9	131.8	159.8
A网箱试验值/N Experiment value for cage A		4.6087	7.2741	9.6861	10.0452	12.6879	4.2822	7.3809	9.6697	12.2105
计算值	正弦波/N Sine wave	3.5011	6.0224	8.3425	9.2635	9.4932	3.0893	7.2508	9.7075	13.1357
	误差/% Error	24.03	17.21	13.87	7.78	25.18	27.86	1.76	0.39	7.58
	斯托克斯二阶波/N Second-order wave	3.5021	6.0249	8.3430	9.2633	9.4928	3.0708	7.1369	9.5192	2.8229
	误差/% Error	24.01	17.17	13.87	7.78	25.18	28.29	3.31	1.561	5.02
B网箱试验值/N Experiment value for cage B		2.0243	4.2935	4.8385	5.3136	5.3559	1.7911	4.1168	4.8533	6.2157
计算值	正弦波/N Sine wave	1.3641	3.7845	4.9438	5.8211	5.8903	1.1748	3.7338	5.1030	7.4051
	误差/% Error	32.61	11.86	2.18	9.55	9.98	34.41	9.30	5.15	19.14
	斯托克斯二阶波/N Second-order wave	1.3548	3.7665	4.9294	5.8049	5.8690	1.1909	3.8058	5.1834	7.4998
	误差/% Error	33.07	12.27	1.88	9.25	9.58	33.51	7.55	6.80	20.66

正弦波理论与斯托克斯二阶波理论在计算时比较接近,差异较小,主要原因是试验时水质点的水平速度和加速度比较小,两者很接近(两者均是规则波),并且水槽试验时所造的波主要是正弦波。两者平均误差A网箱分别为11.19%、11.03%;B网箱为13.67%、13.87%。最小误差分别为A网箱0.39%和1.56%;B网箱2.18%和1.88%。

因此运用正弦波理论和斯托克斯二阶波理论来求解方形网箱波浪力在理论上是可行的,但在波高较小时两者理论计算与试验均会有较大的误差。即当 H/L (波高/波长)小于0.05时,计算值与试验值相差达20%以上,此时的 KC 值均小于30,因此在

这种情况下不能忽略网衣惯性力的影响,当然这些也与各构件的波浪力系数有关^[15]。

以试验网箱A为参考,模拟实物方形网箱波浪受力情况,实物网箱尺寸为 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 4\text{ m}$ (试验网箱放大12倍),框架直径为384 mm,设置的波浪条件分别为:波长50 m,周期5.66 s,水深30 m(设为第1种工况);波长150 m,周期10.2 s,水深40 m(设为第2种工况),水动力系数按实际情况作合理的修正,应用式(5)和式(6)进行迭加计算,分别得到两种理论计算的网箱波浪力与波高关系,及在波高5 m和8 m时波浪力与波浪相位的关系(图2和图3)。

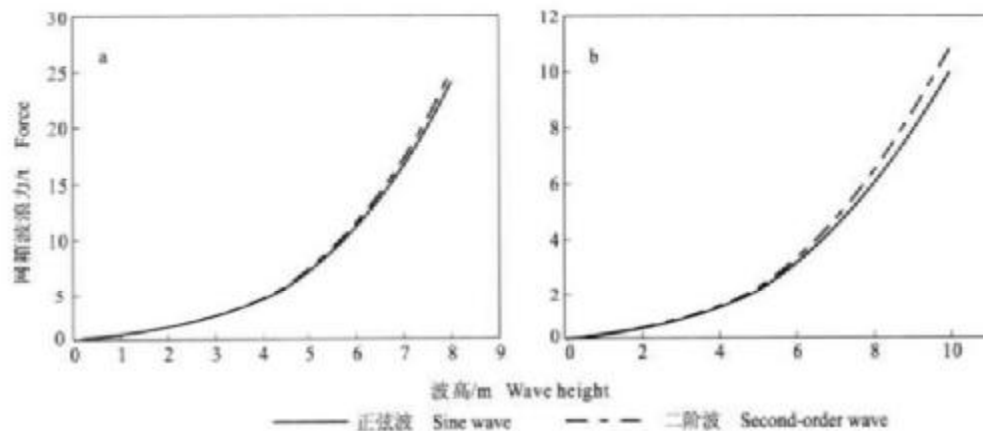


图2 网箱波浪力和波高的关系

a: 第1种工况(波长、周期、水深分别为50 m、5.66 s、30 m); b: 第2种工况(波长、周期、水深分别为150 m、10.2 s、40 m)

Fig.2 Relation between force and wave height

a: Under the first condition(Wave length 50 m,period 5.66 s,water depth 30 m); b: Under the second condition(Wave length 150 m,period 10.2 s,water depth 40 m)

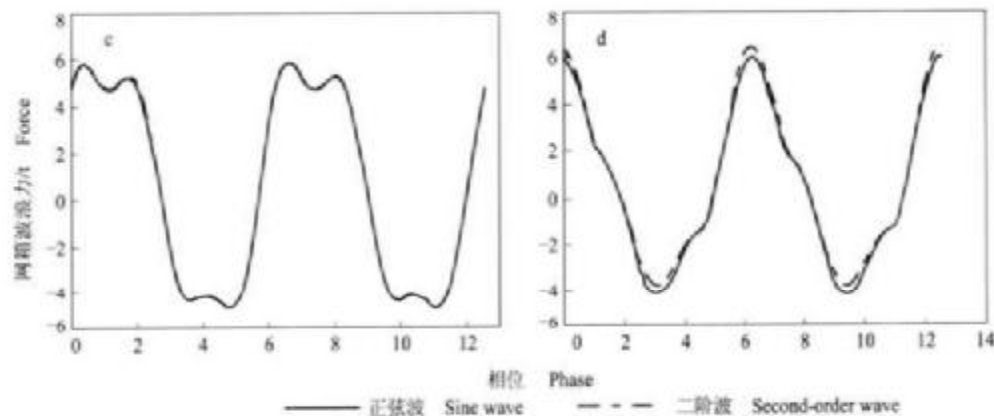


图3 网箱波浪力和相位的关系

c: 第1种工况,波高5 m; d: 第2种工况,波高8 m

Fig.3 Relation between force and wave phase

c: Under the first condition and wave height 5 m; d: Under the second condition and wave height 8 m

从图2不难发现,当波浪工况为较长周期时,二阶波的受力计算峰值稍陡些,波谷值略平坦些,这与两种波浪的波形图相似。在第2种工况且波高为10 m的情况下,两者波浪力计算值相差达8.70%,并随着波高的增大,两者差异更明显。而对较短波长第1种工况且波高为10 m情形下,两者相差则为2.66%。同时也可从图3看出,网箱的波浪力变化规律与波浪周期同步,而在每个周期内网箱受力呈

双高峰值和低谷值变化,这主要是有其两部分结构即网衣和框架受力迭加形成的,当波浪周期较短时,如图3-c所示双峰值现象特别明显,这也说明了其是由于框架的固有频率和波浪频率较强的相互作用的结果。

通过进一步计算还可发现,两者的计算差异与波浪波长、周期和水深相关。表2是在第1种工况下相对只改变1个物理条件时两者理论计算的相差率。

表2 不同波浪条件下应用两种理论计算网箱水平波浪力最大值的相差率

Tab.2 Calculated difference ratio of the maximum value of cage horizontal wave force under different wave conditions by two calculated methods

波高/m	Wave height	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0
相差率/%	Difference ratio	0.41	2.22	4.17	6.31	8.70	11.48	14.65	22.19
作业水深/m	Water depth	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
相差率/%	Difference ratio	228.80	86.17	42.30	23.44	14.02	8.70	5.52	3.54
波长/m	Wave length	25.0	50.0	75.0	100.0	125.0	150.0	175.0	200.0
相差率/%	Difference ratio	0	0.03	0.62	2.43	5.26	8.70	12.55	16.61

总之,这两种理论计算波浪力的差异随着波高的增大而变大,当波高由10 m增大到20 m时,其相差率由8.70%增大到22.19%,增大幅度为2.5倍左右。同时随着作业水深的增大两种理论计算相差反而减小,减小的幅度在浅水区间更快,当水深由15 m增大到25 m时,其相差率将减小4.4倍。在不考虑网箱尺寸与较长波长的迭加影响时,对于一定尺寸的网箱,两种理论计算相差率也与波长成正比关系,表2中的计算相差率随着波长的增大而增大。当然如网箱尺寸与波长大小数量级相近时,或由水槽试验推算到实物时,由于网箱固有频率与波浪频率的迭加影响,两者计算相差率将更加复杂,因此在不同的敷设作业水域选择应用不同的波浪理论计算是非常重要的。

3 小结

(1)垂直于波形方向的方形网箱水平波浪力可以分解为垂直、平行波形方向的构件波浪力,通过由这些框架、绳索和网衣所受力的迭加可得到网箱的波浪力,两种波浪理论计算值与试验值相比较接近,与水槽试验结论较吻合,但在波高较小时与试验均有较大的误差。这与水槽试验时波浪参数有关,也与测试的波浪力数量级较小有关。

(2)根据波浪的特点,两种波浪理论的水平波浪

力计算值变化规律与波浪都有相同的变化周期,在一个周期内出现双峰值和双谷值现象;但两者也存在着一一定的差异,斯托克斯二阶波理论波浪力计算值与正弦波相比,峰值要稍陡、窄些,波谷值要平坦、宽些。

本研究在理论计算过程中近似认为波浪要素没有发生变化,这与实际的波浪条件和试验测定到的网箱前后波高、周期等发生一定变化的事实有所差异。并且也必须考虑到网箱前后、左右其各部位构件所处的流态是不一致的,因此这种处理方法是近似的。

(3)应用两种波浪理论进行实物网箱波浪力计算,其相差率在不同波浪工况下存在着一定的差异,两者的计算相差率随着波高的增大而增大,随着作业水深的增大而减小,如不考虑网箱尺寸与波长的迭加影响,则两者的计算相差率也将随着波长的增大而增大。因此在网箱设计、选材和敷设诸多实际应用时,应根据历年来波浪的实际情况分析找出波谱,选择合适的波浪理论计算网箱波浪力学,这也说明了选择不同的波浪理论计算对于网箱的设计和系泊有着非常重要的现实意义。

(4)通过以上分析,应用两种不同波浪理论可得到网箱水平波浪力与波浪因子的关系,同时也可计算不同尺寸网箱的波浪力。当然这也是与材料、网

衣技术参数(网目大小、网线直径、缩结系数等)、网箱敷设方式和不同的波浪工况等条件相关联的。限于篇幅,在此不再赘述。

以上分析仅是波浪工况,当考虑波浪与水流共同作用时,尚需分析水流方向与波浪传播方向的相互影响,通过选择合适的波浪理论按矢量迭加法进行计算,进而合理选择网箱的形状与结构、敷设地址和固泊系统^[16-17],减少水动力的负面影响,确保网箱系泊的安全性和网箱的水容体积,这正是本研究下一步的工作重点。

参考文献:

- [1] 周应祺,许柳雄,何其渝.渔具力学[M].北京:中国农业出版社,2001.51-68,119-133.
- [2] 余显伟.计算渔具力学导论[M].上海:上海科学技术文献出版社,2001.218-247.
- [3] 章守宇,刘洪生.飞碟型网箱的水动力学数值计算法[J].水产学报,2002,26(6):519-527.
- [4] Morison J R. The Force Exerted by Surface Wave on Piles[M]. AIME: Petrol Trans, 1950. 189-199.
- [5] 弗里德曼 A JI. 侯恩准,高洁康译.渔具理论与设计[M].北京:海洋出版社,1988.36-47,57-63.
- [6] 宋伟华,梁振林,赵芬芳,等.方形网箱波浪水动力学的近似计算[J].浙江海洋学院学报,2003,23(2):211-220.
- [7] 孙意卿.海洋工程环境条件及其载荷[M].上海:上海交通大学出版社,1989.141-192.
- [8] 竺艳蓉.海洋工程波浪力学[M].天津:天津大学出版社,1991.9-19,63-92.
- [9] 邱大洪.波浪理论及其在工程上的应用[M].北京:高等教育出版社,1985.140-146,274-290.
- [10] 黄祥鹿,陆鑫森.海洋工程流体力学及结构动力响应[M].上海:上海交通大学出版社,1992.39-41,54-55.
- [11] 谢荣华.波浪作用下垂直与水平柱体受力行为及减力设施之试验研究[D].台北:中山大学,2001.12-21.
- [12] Matsuda K. Fishing Gear Physics[M]. Tokyo: Seizendo Press, 2001.29-49.
- [13] Fujita S, Fukuhori K, Nishirokubi H. Tension of the mooring ropes on the net cage model of raft type in regular waves[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1991, 57(12): 2 229-2 235.
- [14] Colbourne D B, Allen J H. Observation on motions and loads in aquaculture cages from full scale and model scale measurements[J]. Aquacultural Engineering, 2001, 24: 129-148.
- [15] Jothi Shankar N, Hin-Fatt Cheong, Subbian. Root mean square force coefficients for submarine pipelines[J]. Ocean Engineering, 1988, 15(1): 55-69.
- [16] Kimura H. Numerical calculation of horizontally fully immersed and two points moored cylindrical buoy in wave[J]. Fisheries Engineering, 1998, 35(2): 167-176.
- [17] Hsien Hui Lee, Wang Pei-Wen. Dynamic behavior of tension-leg platform with net-cage system subjected to wave force[J]. Ocean Engineering, 2000, 28(2): 179-200.

Calculation on horizontal wave force using two wave theories for a square sea-cage

SONG Wei-hua^{1,2}, LIANG Zhen-lin^{1,3}, GUAN Chang-tao⁴, ZHAO Fen-fang¹, HUANG Liu-yi¹, ZHU Li-xin¹

(1. Marine Fishery College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Department of Marine Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China; 3. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fishery Resource, Qingdao 266071, China; 4. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

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. It must be considered the intrinsic factors that the cage frame was rigid body but the nets and ropes were flexible system, of which the former dynamic behavior is used as reference of ocean engineering research and the later hydrodynamics is in view of fishing gear characteristic. 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. Generally speaking, water depth in the zones of cages moored is very deep, and the waves in some zones tend to fragmentate. In the other hand, the bottom in some zones is made of mud and sand by sediment which is easy to float by waves. The waves containing mud and sand have much greater effect on cages than those clear. Furthermore the wave force caused by the former had nonlinear character. Therefore the calculation method of sine wave had some difference from reality, and other wave theory should be used to calculate the wave force for a square cage.

By means of calculation methods of Morison's and Kuznetsov's, the characters of horizontal wave force for a square sea-cage and its components were analyzed, and two iterative calculation methods of horizontal wave force among frame, rope and net were put forward based on sine wave theory and Stokes second-order wave theory. Compared the two wave theories calculated values with the lab flume test results of the two kinds of cages respectively, cage A's dimension was 0.67 m long, 0.67 m wide and 0.34 m high; the frame and rope diameter was 32 mm and 5 mm; the net mesh was 16.8 mm; the net cutting coefficient was 0.707 etc. Cage B's dimension as the above was 0.53 m, 0.53 m and 0.27 m, and 16 mm, 5 mm, 16.6 mm, and 0.707, respectively. The results showed that the horizontal wave forces on the cage changed periodically with two peaks per period. On the other hand, the results also showed the two average error ratios between calculation and experiment for cage A were 11.19% and 13.67%, but for cage B were 11.03% and 13.87%. It also indicated that the calculated results by using the above wave theories had a little difference; the calculation accuracy is positive; the methods of calculation and analysis were effective. The horizontal wave force of the actual cage which cage A was simulated was discussed. It is concluded that the calculated force had some great difference between the second-order and the sine wave to some extent, and the difference ratio of the two wave theories calculated was 8.70% under the applied condition of wavelength 150 m, period 10.2 s, wave height 10 m and water depth 40 m, and the difference ratio has positive relation with wave height and wavelength, and negative with water depth. Thereby the way to select the correct wave theory to make the calculation under different wave situations was presented.

Key words: square sea-cage; horizontal wave force; sine wave; second-order wave; lab flume testing