

# 波浪对水下大尺度矩形沉垫的作用力

竺艳蓉  
(天津大学)  
范运林

对于其尺度与入射波波长  $L$  相比为较大的建筑物 (例如各种形状的大尺度沉垫) 的波力计算, 目前采用两种方法。一是考虑包括散射效应和自由表面效应的绕射效应的理论分析, 即绕射理论。此理论假定: 波高  $H$  对建筑物特性尺度  $l_1$  的比值  $H/l_1$  较小, 因而粘滞效应可以忽略不计, 波浪对建筑物的作用可应用势流理论进行分析。这一方法由于数学上的困难, 至今只有在直立圆柱<sup>[1]</sup>和潜没直立圆柱<sup>[2]</sup>等少数几种情况下, 才取得精确解。对于其他形状建筑物的波力, 则常常采用数值计算取得近似解<sup>[3-4]</sup>。二是采用所谓弗劳特-克雷洛夫 (Froude-Krylov) 假定, 即假定波浪原有的压强分布不因建筑物的存在而改变。我们先算出由未扰动的入射波作用在建筑物表面上的力, 称为弗-克力  $F_k$ , 再乘以反映附加

质量效应和绕射效应的一系数  $C$  进行修正。此系数  $C$  称为绕射系数, 需要通过模型试验加以确定。

本文根据有限振幅斯托克斯 (Stokes) 二阶波理论和水槽模型试验资料, 对处在浅水地区的水下大尺度矩形沉垫的水平及垂直波力进行研究分析, 提出了波浪对水下大尺度矩形沉垫的水平及垂直作用力计算公式。同时应用该计算公式得到的波力与模型试验实测波力进行了比较, 确定了水下大尺度矩形沉垫的水平波力绕射系数  $C_h$  和垂直波力绕射系数  $C_v$ 。

## 一、理论分析

### (一) 大尺度沉垫波力计算一般表达式

对于相对特性尺度  $l_1/L > 0.2$  的大尺度沉垫, 具  $H/l_1$  值一般较小, 故粘滞效应可略去不计。采用弗-克 (F-K) 假定, 波浪作用在整个沉垫上的波力  $F$  的表达式为

$$F = CF_k \quad (1)$$

式中  $F_k$  为未扰动入射波对整个沉垫所产生的弗-克力, 它可以直接通过沉垫面任一点未扰动入射波的波压强沿整个沉垫面上的积分而得到;  $C$  为绕射系数, 它反映了由沉垫所引起的附和和质量效应和绕射效应。

对于水平的和垂直的波力分量可分别为

$$F_h = C_h \iint_S p_n ds \quad (2)$$

$$F_v = C_v \iint_S p_v ds \quad (3)$$

式中的  $F_h$ 、 $F_v$  分别为波力的水平分量和垂直分量;  $p_n$ 、 $p_v$  分别为沉垫表面任一点上未扰动的波压强  $p$  在水平方向的分量和在垂直方向的分量;  $ds$  为沉垫的基元表面积;  $S$  为沉垫的总表面积;  $C_h$  为水平波力绕射系数;  $C_v$  为垂直波力绕射系数。

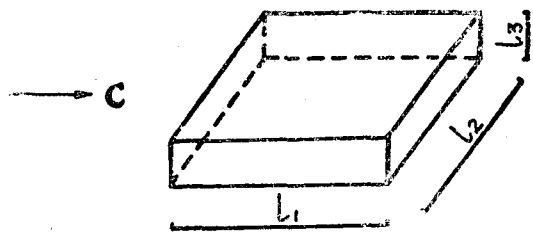


图1 矩形沉垫几何尺度

本文采用有限振幅斯托克斯二阶波理论来描述波浪运动。在采用如图2所示的坐标系统时, 其未扰动波浪中任一点  $(X, Z)$  的波压强  $p$  为:

$$p = \frac{rH}{2} \frac{chkz}{chkd} \cos\theta + \frac{3}{8} \frac{r\pi H^2}{L} \times \frac{thkd}{sh^2kd} \left( \frac{ch2KZ}{sh^2kd} - \frac{1}{3} \right) \cos 2\theta - \frac{1}{8} \frac{r\pi H^2}{L} \frac{thkd}{sh^2kd} ch2KZ \quad (4)$$

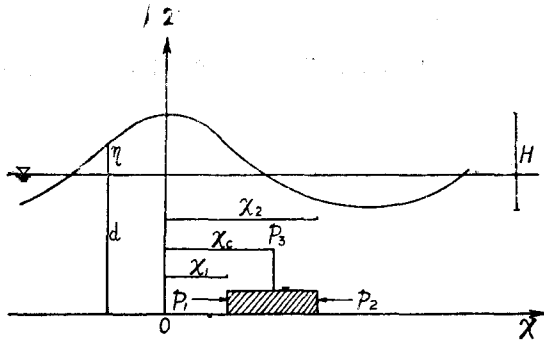


图2 波力计算座标系统

在式中, 波浪相位  $\theta = kx - \sigma t$ ; 波数  $K = \frac{2\pi}{L}$ ;

波浪频率  $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T$  为波浪的周期。

略去 (4) 式中右端最后一项的非周期的波压强后, 把 (4) 式代入 (2)、(3) 式, 即可得到作用在各种形状沉垫波力的水平分量和垂直分量。

## (二) 大尺度矩形沉垫的波力计算

设有一尺度为  $l_1$ 、 $l_2$  和  $l_3$  的水下矩形沉垫。 $l_1$  为沉垫沿波向的长度,  $l_2$  为沉垫的宽度,  $l_3$  为沉垫的高度。静止处在水深为  $d$  的海底上。入射波波高  $H$  向  $X$  方向推进, 其波峰线与  $X$  轴正交, 以临近沉垫的波峰为坐标原点。当  $t=0$ , 设波峰距沉垫中心的距离为  $X_c$ , 此时作用在沉垫上的水平波力为:

$$F_h = C_h \left[ \int_0^{l_3} p_1 l_2 dz - \int_0^{l_3} p_2 l_2 dz \right] = C_h \left[ \frac{rHl_2}{K} \frac{shkl_3}{chkd} \sin \frac{kl_1}{2} \sin kX_c + \frac{1}{4} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \frac{thkd}{sh^2kd} \times \left( \frac{3}{2} \frac{sh2kl_3}{ksh^2kd} - l_3 \right) \cdot \sin kl_1 \cdot \sin 2kX_c \right] \quad (5)$$

令

$$c_1 = \frac{rHl_2}{k} \frac{shkl_3}{chkd} \sin \frac{kl_1}{2}$$

$$c_2 = \frac{1}{4} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \frac{thkd}{sh^2kd} \times \left( \frac{3}{2} \frac{sh2kl_3}{ksh^2kd} - l_3 \right) \sin kl_1$$

则

$$F_h = C_h (c_1 \sin kX_c + c_2 \sin 2kX_c) \quad (6)$$

相应的波力矩为

$$M_h = C_h \left[ \int_0^{l_3} p_1 l_2 Z dZ - \int_0^{l_3} p_2 l_2 Z dZ \right] = C_h \left[ \frac{rHl_2}{k_2 chkd} (kl_3 shkl_3 - chkl_3 + 1) \sin \frac{kl_1}{2} \sin kX_c + \frac{3}{8} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \frac{thkd}{sh^2kd} \left( \frac{2kl_3 sh 2kl_3 - ch2kl_3 + 1}{2k^2 sh^2kd} - \frac{l_3^2}{2} \right) \sin kl_1 \sin 2kX_c \right] \quad (7)$$

令

$$c_3 = \frac{rHl_2}{k^2 \operatorname{ch}kd} (kl_3 \operatorname{sh}kl_3 - \operatorname{ch}kl_3 + 1) \sin \frac{kl_1}{2}$$

$$c_4 = \frac{3}{8} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \cdot \frac{\operatorname{th}kd}{\operatorname{sh}^2kd} \times \left( \frac{2kl_3 \operatorname{sh}2kl_3 - \operatorname{ch}2kl_3 + 1}{2k^2 \operatorname{sh}^2kd} - \frac{l_3^2}{3} \right) \operatorname{sink}l_1$$

则

$$M_h = C_h (c_3 \sin KX_c + c_4 \sin 2kX_c) \quad (8)$$

通常以波峰距沉垫中心的相位  $\theta = KX_c$  为衡量发生最大水平波力  $F_{h(\max)}$  的相位, 由 (6) 式对  $X_c$  微分:

$$\frac{dF_h}{dx} = C_h k (4C_2 \cos^2 kX_c + C_1 \cos kX_c - 2C_1)$$

令

$$\frac{dF_h}{dx} = 0$$

得到最大水平波力  $F_{h(\max)}$  发生的相位  $kX_c'$  为

$$\cos kX_c' = \frac{-C_1 \pm \sqrt{C_1^2 + 32C_2^3}}{8C_2} \quad (9)$$

最大水平波力为

$$F_{h(\max)} = C_h \left[ \frac{rHl_2}{k} \frac{\operatorname{sh}kl_3}{\operatorname{ch}kd} \sin \frac{kl_1}{2} \operatorname{sink}X_c' + \frac{1}{4} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \frac{\operatorname{th}kd}{\operatorname{sh}^2kd} \left( \frac{3}{2} \frac{\operatorname{sh}2kl_3}{k \operatorname{sh}^2kd} - l_3 \right) \times \operatorname{sink}l_1 \sin 2kX_c' \right] \quad (10)$$

最大水平波力矩为

$$M_{h(\max)} = C_h \left[ \frac{rHl_2}{k^2 \operatorname{ch}kd} (kl_3 \operatorname{sh}kl_3 - \operatorname{ch}kl_3 + 1) \times \sin \frac{kl_1}{2} kX_c' + \frac{3}{8} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \frac{\operatorname{th}kd}{\operatorname{sh}^2kd} \left( \frac{2kl_3 \operatorname{sh}2kl_3 - \operatorname{ch}2kl_3 + 1}{2k^2 \operatorname{sh}^2kd} - \frac{l_3^2}{3} \right) \times \operatorname{sink}l_1 \sin 2kX_c' \right] \quad (11)$$

作用在沉垫上的垂直波力为

$$F_v = C_v \int_{x_c - \frac{l_1}{2}}^{x_c + \frac{l_1}{2}} p_3 l_2 dX \\ = C_v \left[ \frac{rHl_2}{k} \frac{\operatorname{ch}kl_3}{\operatorname{ch}kd} \sin \frac{kl_1}{2} \cos kX_c + \frac{3}{8} \frac{r\pi H^2 l_2}{kL} \frac{\operatorname{th}kd}{\operatorname{sh}^2kd} \right]$$

$$\times \left( \frac{\operatorname{ch}2kl_3}{\operatorname{sh}^2kd} - \frac{1}{3} \right) \sin kl_1 \cdot \cos 2kX_c \quad (12)$$

同样以波峰距沉垫中心的相位 $\theta = kX_c$ 为衡量发生最大垂直波力 $F_{v(\max)}$ 的相位, 由(12)式对 $X_c$ 微分:

$$\begin{aligned} \frac{dF_v}{dX_c} = & -C_v r H l_2 \frac{\operatorname{ch}kl_3}{\operatorname{ch}kd} \sin \frac{kl_1}{2} \sin kX_c \\ & - C_v \frac{3}{4} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \frac{\operatorname{th}kd}{\operatorname{sh}^2kd} \\ & \times \left( \frac{\operatorname{ch}2kl_3}{\operatorname{sh}^2kd} - \frac{1}{3} \right) \sin kl_1 \cdot \sin 2kX_c \end{aligned}$$

令

$$A = C_v r H l_2 \frac{\operatorname{ch}kl_3}{\operatorname{ch}kd} \sin \frac{kl_1}{2}$$

$$B = C_v \frac{3}{4} \frac{r\pi H^2 l_2}{L} \frac{\operatorname{th}kd}{\operatorname{sh}^2kd}$$

$$\times \left( \frac{\operatorname{ch}2kl_3}{\operatorname{sh}^2kd} - \frac{1}{3} \right) \sin kl_1$$

则

$$\frac{dF_v}{dX_c} = (-A - 2B \cos kX_c) \sin kX_c$$

令

$$\frac{dF_v}{dX_c} = 0$$

$$\text{即 } \sin kX_c = 0$$

相应的 $X_c = 0, \frac{L}{2}, L, \dots$ ; 当 $X_c = 0, L, \dots$ 时, 即波峰经过沉垫中心位置时, 产生最大向下垂直波力 $F_v = +F_{v(\max)}$ 。当 $X_c = \frac{L}{2}, \dots$ , 即波谷经过沉垫中心位置时, 产生最大向上垂直波力 $F_v = -F_{v(\max)}$ 。沉垫所受的最大垂直波力为

$$\begin{aligned} F_{v(\max)} = & \pm C_v \left[ \frac{r H l_2}{k} \frac{\operatorname{Ch}kl_3}{\operatorname{Ch}kd} \cdot \right. \\ & \left. \sin \frac{kl_1}{2} + \frac{3}{8} \frac{r\pi H^2 l_2}{kL} \frac{\operatorname{th}kd}{\operatorname{sh}^2kd} \cdot \right. \\ & \left. \left( \frac{\operatorname{ch}2kl_3}{\operatorname{sh}^2kd} - \frac{1}{3} \right) \sin kl_1 \right] \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 为确定沉垫任何相位时的水平波力 $F_h$ 、水平波力矩 $M_h$ 以及垂直波力 $F_v$ , 便可用上述的(5)式、(7)式、(12)式进行计算。至于其中

的系数 $C_h$ 和 $C_v$ 值, 可通过下述模型试验加以确定。

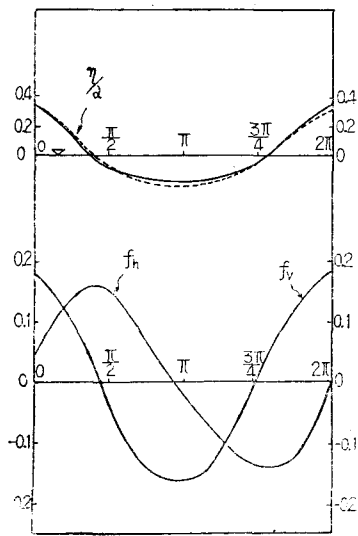
## 二、试验研究

模型试验是在长25米、宽1.5米、高1.0米的波浪水槽进行。模型的比尺选定为150, 矩形沉垫长、宽、高的尺度分别为:  $l_1 = 33.8$ 公分,  $l_2 = 33.8$ 公分,  $l_3 = 7.5$ 公分。模型用有机玻璃制作, 在模型各个面上分别安装点压强传感器(点压力盒), 通过Y6D-2型动态应变仪进行波力量测。在沉垫模型中心位置的左侧, 安放可控硅浪高仪的传感器进行波高量测。波力和波高的量测均用SC16型示波仪记录。我们在海底坡度1/20、水深为26.7公分、波高为7—15公分的范围内, 分别对三种不同波浪周期进行了矩形沉垫的水平垂直波力试验研究, 测得的水平波力、垂直波力均以无量纲形式表示。

$$\text{水平力系数 } f_h = \frac{F_{h(\max)}}{r l_1 l_2 l_3}$$

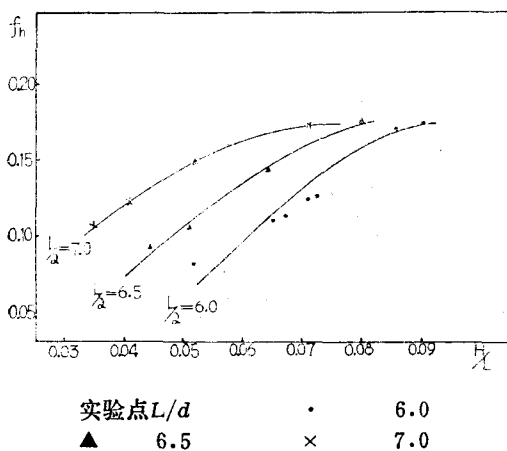
$$\text{垂直力系数 } f_v = \pm \frac{F_{v(\max)}}{l_1 l_2 (d - l_3)}$$

从试验得知：波浪对沉垫的最大水平力  $F_{h(\max)}$  发生在静水面经过沉垫中心时刻。在波陡  $H/L = 0.0833$  时，此静水面距入射波峰的相位  $\theta = \frac{5}{12}\pi$  ( $75^\circ$ ) 左右；而且沿着波浪推进方向的水平力经常稍大于逆着波浪方向的水平力。对沉垫的最大垂直波力  $F_{v(\max)}$  则



$H/L = 0.0833$   $l_1/L = 0.211$   $l_3/L = 0.046$   
— 实测      - - - 理论

图3 相对波面高度  $\eta/a$ 、水平力系数  $f_h$ 、垂直力系数  $f_v$  的过程线



实验点  $L/d$       ·      6.0  
▲      6.5      ×      7.0

图4 矩形沉垫水平力系数  $f_h$

发生在波峰或波谷经过沉垫中心时刻。发生最大水平波力和最大垂直波力的相位其实测的结果与按有限振幅斯托克斯二阶波理论的推证完全是一致的（见图3）。对于矩形沉垫的水平力系数  $f_h$  与相对水深  $\frac{d}{L}$  和波陡  $H/L$  的关系见图4。

图4显示：对一定的相对水深  $d/L$ ， $f_h$  随波陡  $H/L$  增大而增大；对一定的波陡  $H/L$ ， $f_h$  随相对水深  $d/L$  的减小而增大。当  $H/L$  达到破碎极限波陡时，对应不同的相对水深  $d/L$  的水平力系数  $f_h$  趋近于一个常量。也就是说，当波浪发生破碎时，作用在沉垫上的最大水平波力达到极限值。

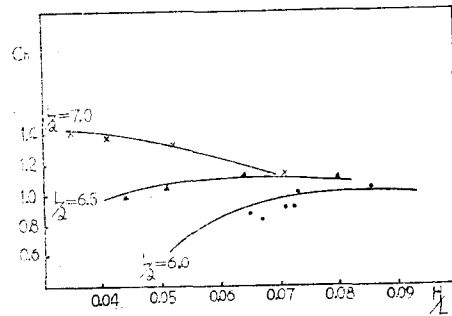


图5 矩形沉垫水平波力绕射系数  $C_h$

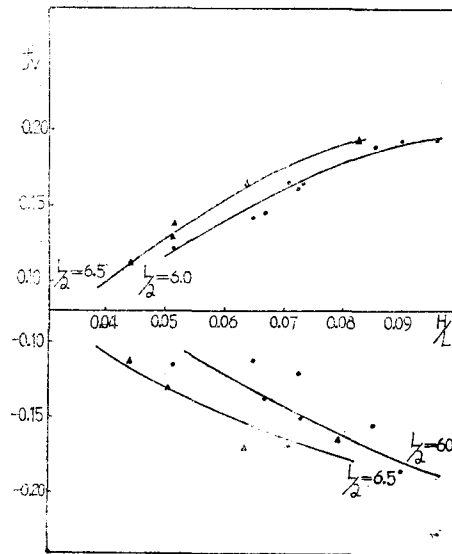


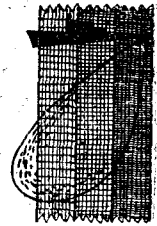
图6 矩形沉垫垂直力系数  $f_v$

# 用系统聚类方法划分烟威渔场

## 春季水温类型\*

张瑞安

(山东省海洋水产研究所)



地处黄海暖流和山东沿岸流交汇区的黄海北部的烟威渔场, 饵料生物丰富, 是我国北方春汛渔业生产的重要作业区。由于这一渔场位于半封闭的浅海, 海水温度受气象条件和水系消长的影响较大, 因而存在显著的年际差异。这种差异直接影响着每年春汛渔期的早晚、渔汛期的长短、渔场远近和鱼群集散的变化程度。如果能根据水温的冷暖程度将各年水温划分为不同类型, 并对水温类型提前作出预报, 即可对下一个春汛的渔期、渔场位置和鱼群集散情况进行估计, 以指导海上捕捞作业。为此, 笔者试用系统聚类方法<sup>[1]</sup>, 对烟威渔场历年春季(4—5月)水温的类型作了初步划分。

从图5可以看出: 矩形沉垫的 $C_h$ 随相对水深 $d/L$ 和波陡 $H/L$ 而变化。当波陡 $H/L \geq 0.07$ , 也就是波浪接近于破碎时, 不同的相对水深 $d/L$ 所对应的 $C_h$ 互相趋向接近于1.05。

同样矩形沉垫的垂直力系数 $f_v$ 也是随相对水深 $d/L$ 和波陡 $H/L$ 而变化, 其变化关系如图6所示。

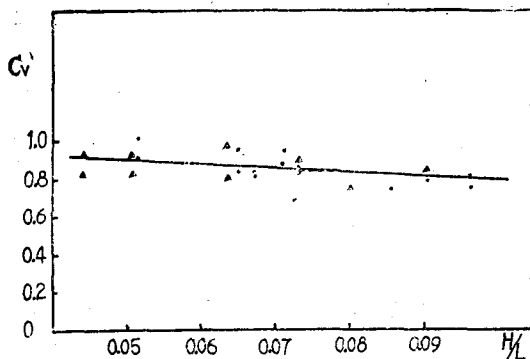


图7 矩形沉垫垂直波力绕射系数 $C_v$ 。

### 一、用系统聚类划分水温类型

所谓系统聚类分析方法就是利用某些事物(或样品)的特定指标 $y_{ik}$ 将事物进行分类( $y$ 为样品的指标值;  $k=1, 2, \dots, n$ , 为指标的个数;  $i=1, 2, \dots, m$ , 为样品的个数)。

系统聚类分析方法的运算步骤如下:

(一) 计算样品之间的距离 $d_{ij}$ 。把每一个样品看作 $n$ 维空间的一个点, 并据以定义距离。本文选用明考斯基(Minkowski)距离

\* 本所耿孝同同志参与本文部分工作, 特此致谢。

从图7可以看出: 相对水深 $d/L$ 对 $C_v$ 的影响不大,  $C_v$ 随波陡的变化也较小, 垂直波力绕射系数的平均值 $\bar{C}_v=0.86$ 。

### 主要参考文献

- [1] Mac Camy, R. C. and R. A. Fuchs, 1954. Wave forces on Piles, a diffraction theory, U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Mem. №69.
- [2] Sverre Gran, Det Norske Veritas, 1973. Wave forces on Submerged Cylinders. OTC. Paper №1817.
- [3] Garrison, C. J. and P. Y. Chow, 1972. Wave Forces on Submerged Bodies, Journal of the waterways Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE. 98 (3): 352—392.
- [4] Garrison, C. J., 1974. Wave forces on large Volume structure—A Comparison Between theory and Model Tests, OTC. Paper №2137.