

人工船礁铺设模式优选方法研究*

虞聪达 俞存根 严世强[†]

(浙江海洋学院 舟山 316004)

[†](浙江海洋学院 舟山 316004; 大连海事大学 大连 116026)

提要 以人工船礁水动力学特征及优化组合方式为主要研究内容,采用数值研究的方法,探讨了人工船礁的不同组合及其规模大小对于形成上升流与背涡流的效果、促进海水的上下混合与交换的影响,并在此基础上建立了人工船礁铺设方式优选模式。结果表明,从船礁的相对效果看,铺设模式以大型单体船礁为最佳;不同类型船礁组合产生的最大上升流流速为来流速度的0.05—0.15倍;随来流速度的增加,产生的上升流及背涡流影响效果显著增强,在不同来流速度下,上升流影响范围与礁宽之比为1.1—5.0,流影高度与礁高之比为1.4—2.0,背涡流流影长度与礁高之比为4.5—13.0;不同礁体及其组合对“冲淤”影响差异较大,船礁因流线型形状,其“冲淤”影响较小。文中建立的人工船礁铺设方式优选模式,可为人工船礁水槽试验和现场铺设提供理论依据。

关键词 人工船礁,模式优选,水动力学,上升流

中图分类号 S953.1

近年来,由于过度捕捞和海洋生态环境的破坏,近岸水产资源日益枯竭。人工鱼礁(以下简称鱼礁)是用于改善海域生态环境、建设渔场和增殖场的人工设施,钢筋混凝土鱼礁、钢制鱼礁、玻璃钢鱼礁、竹制鱼礁、木制鱼礁和废弃物鱼礁等均有广泛应用(陈勇等,2002)。而将废弃渔船作为礁体(即“人工船礁”),可以变废为宝,实现经济效益和生态效益的共同提高。

对鱼礁的系统研究始于20世纪70年代初期的日本(陈勇等,2002)。鱼礁产生的上升流、背涡流,以及由此引起的促进上下层海水交换、加快营养物质循环、提高海域新生产力水平、改善海域生态环境乃至养护渔业资源等等,对海水养殖业都具有极为重要的意义。国内外学者通过水槽试验,测定不同人工鱼礁效果及铺设方式所产生上升流、背涡流的强度和影响范围(黑木敏郎等,1964;中村充,1979;佐久田博司等,1981;影山芳郎等,1980;大岛泰雄,1976;王成海,1989¹⁾;

Chang *et al.*, 1977; Liu, 1986),而人工鱼礁铺设产生的环境效益的试验研究也在不断展开(中村充,1984;Fast *et al.*, 1974; Kimura, 1994, 1995; Nakamura, 1982)。20世纪80年代初,我国在沿海多个地区都曾进行过人工鱼礁投放的试验(刘同渝,2003),部分学者对鱼礁水动力学也进行了一些模型试验(刘同渝等,1981)。近年来,有学者对人工鱼礁受力进行了一些水动力特性计算(吴子岳等,2003),但是尚未见有关人工船礁铺设生态影响的数值研究。

如何对人工船礁铺设方式优化组合、以实现最佳生态效益,是人工鱼礁研究的关键。作者从分析人工船礁铺设对水环境产生的影响入手,通过对不同人工船礁铺设方式对水环境产生的影响进行数值试验,在确定构建人工船礁铺设优选模式评价体系的基础上,采用水环境生态动力数值模拟实验,评价人工船礁铺设优选模式的指标方法,以期为人工船礁项目规划和铺设提供理论依据。

* 浙江省自然科学基金资助项目,394266号,397309号,虞聪达,硕士,副教授, E-mail: yued@mx.zjou.net.cn

1) 王成海,1989. 人工礁部材の後流特性にする基礎の研究. 东京水产大学博士论文

收稿日期:2004-02-10;收修改稿日期:2004-04-05

1 试验基本条件

1.1 人工船礁铺设方式优选原则

人工鱼礁对生态环境起到改善作用,主要是改变了周围水体的流态,带来上升流和背涡流,加速水体混合。一方面增加水体的溶解氧,另一方面把底部营养盐带到上层水体,从而使该海区的浮游生物量增加,同时也为大量固着生物提供附着基质,最终改善了该区域的生态环境。但是,由于鱼礁的介入,也可能给该区域的生态环境带来一定的负面影响,如安排不当,可能会影响航运,或由于“冲淤”对该海区海底地形产生影响。前者可以通过控制布设水域和水深来解决,而后者需综合考虑底质及水体流态的变化。因此,对人工船礁铺设方式优选原则是能带来尽可能大的上升流和背涡流影响范围且尽量减少“冲淤”。

1.2 流态变化的数值试验方法

1.2.1 流态变化控制方程及求解条件 影响人工船礁的因素很多,如内波、风海流等影响,由于本文中只研究上升流和背涡流的影响,故假设不受内波和风海流的影响,故对于人工船礁带来的流态变化的模拟,从本质上说应该是钝体绕流问题。对于海水可假设不可压缩,故满足式(1)~(4):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \gamma \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

其中, u, v, w 分别为 x, y, z 向流速, γ 为海水黏度, p 为压力, ρ 为海水密度, g 为重力加速度。

假设入流均匀,为常速度,侧向和垂向速度为0,壁边界采用黏滞边界条件,出流边界采用对流出流边界条件[如式(5)]:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{U}}{\partial l} = 0 \quad (5)$$

其中 \vec{U} 为速度矢量, l 为速度方向。

用时间分裂控制法(Split Operator)求解,其中平流项用迎风格式求解,压力方程用SOD法叠代求解,分别计算船礁前端上升流影响区域和流影区域。设定图1所示礁体数值试验区域,视不同的模型选取合适的时间和空间步长,取5s以后的计算结果进行统计计算。

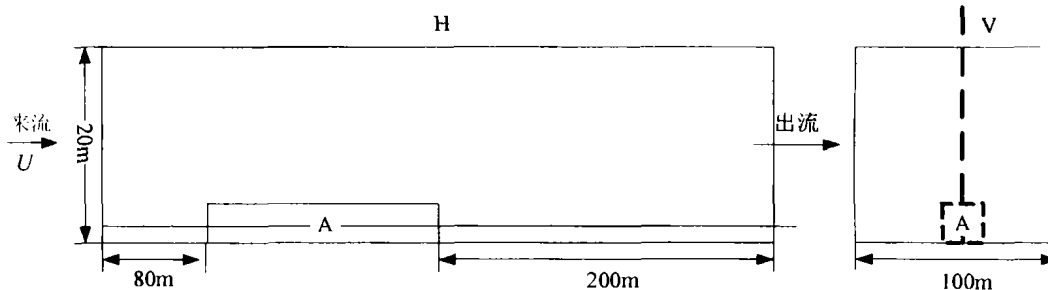


图1 数值试验区域

Fig.1 Numerical testing area

A 表示礁体放置区域; U 表示来流速度; H 表示水平剖面; V 表示垂直剖面

1.2.2 试验条件 为了考察人工船礁单体和不同组合的铺设方式对生态环境的影响,结合浙江朱家尖人工船礁投放的实际情况,假设船体纵向投放与水流方向一致。

该海区水深10m以上,设计水深20m,海水密度 1027.19kg/m^3 。20m等深线以内大部分水域为往复流,小潮汛最大涨落潮流速分别为 0.48m/s 和 1.50m/s ,大潮汛最大涨落潮流速分别为 0.9m/s 和

1.58m/s ,最大表面浪高5m。海水黏度用Bowden公式计算: $\gamma = 0.0025|U|H$,其中 H 为水深, U 为深度平均流速。

1.2.3 船礁尺寸选择 人工船礁投放使海水产生紊流状态。流态从层流过渡到紊流的界限可以由雷诺数 ($Re = \frac{LU}{\gamma}$) 来确定,其中 L 为鱼礁长度, U 为海水流速。一般情况下,雷诺数大于 10^4

即可产生紊流现象,可根据该值确定船礁组合体的尺寸。

为考察不同船礁及组合形式对流态的影响,采用表 1 所示的船礁模型开展数值试验。

表 1 船礁模型规格表

Tab.1 Specifications of the ship-reef model

单船礁体	长×宽×高(m)	备注	组合船礁	组合方式	备注
A ₁	30×5.5×3.0	单船	D ₁	两艘 B 船	并列
A ₂	25×5.0×2.5	单船	D ₂	四艘 B 船	上下各两艘
B	30×5.5×3.0	甲板设置三角架	D ₃	两层 20 艘 B 船	上层 8 艘,下层 12 艘
C ₁	30×5.5×3.0	方形礁体			
C ₂	30×5.5×3.0	三角柱型礁体			

1.3 船礁铺设区域泥沙运动分析

为了确保不改变船礁铺设区域的透光性,减少由于泥沙“冲淤”带来的不利影响,需对船礁铺设区域的泥沙运动进行分析。目前,在鱼礁铺设区域评价泥沙运动的临界流速仍是采用日本荒木方法(张怀慧等, 2001),但是该方法只能针对波浪影响,可用于布设地点的筛选,而对船礁结果影响分析的能力不足。

引起泥沙运动形式变化主要是由于船礁迎流部分产生滞留区而引起,可以通过最大纵向速度和入流速度的比来评价可能对泥沙“冲淤”带来的影响,显然,该值越小则船礁对流态的影响就越小,从而造成对泥沙“冲淤”的影响也越小。

1.4 船礁铺设优选定量化模式

对于评价给定的船礁及其组合方式的“优劣”需考虑涉及生态影响的一系列因子,根据一定的模式进行定量化排序。假定 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n\}$ 为船礁对生态影响的各个因子集,而对于某海区而言,铺设方式的“优劣”是相对模糊的概念,故只需要确定“相对好”的标准的隶属度即可。

将指标集中各个指标的最佳值组成“虚拟最佳”铺设方式作为标准,对于 m 个铺设方式的 n 个因子组成指标特征矩阵,计算各个铺设方式对该样本的广义 Hamming 距离,构建如下定量化模式:

$$A_i = \frac{\left[\sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - g_j)^2 \right]^{-1/2}}{\sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - g_j)^2 \right]^{-1/2}} \quad (6)$$

式中, A_i 为标记不同铺设模式优劣程度的量, w

为权重,满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, x 为归一化以后的指标矩阵。由于该指标矩阵表征的是铺设方式的“优”和“劣”,所以可用最大最小规格化方法进行处理。 g_j 为各个铺设方式中各个指标的最优量,则可以根据此式计算各铺设方式的相对优劣程度。

2 结果与分析

2.1 船礁铺设导致流态变化

船礁铺设能带来上升流,在雷诺数比较大的时候产生紊流和涡旋,图 2 是 D₃ 模型在 1.6m/s 入流速度、水深 20m 时产生的流态变化和压力分布。

由此可以看出,铺设人工船礁以后易形成上升流,同时存在较大范围的流影区,流影高度约为船礁高度的 1.5 倍,流影长度约为船礁高度的 6 倍,在船礁尾部附近区域有涡旋存在,船礁前端存在滞流区,这与中村充(1979)的试验结果基本符合,但流影区的范围偏大,说明该方法可以用于分析人工船礁带来的流态变化和压力分布。

为了评价人工船礁铺设带来的流态变化,采用最大上升流速度/入流速度 (F_1)、最大纵向速度/入流速度 (F_2)、上升流影响范围/礁宽 (F_3)、流影高度/礁高 (F_4)、流影长度/礁高 (F_5) 5 个指标来确定流态的变化。

2.2 水深影响

不同水深环境下,铺设船礁带来的流态变化是不同的,为了描述其影响,分别计算鱼礁模型 B、D₁ 在海区最大流速 1.6m/s 下,水深为 10m、15m 和 20m 流态变化的差异,结果见表 2。由表 2 可以看出,水越深,引起的湍流强度越小,船礁的集鱼效果越低。

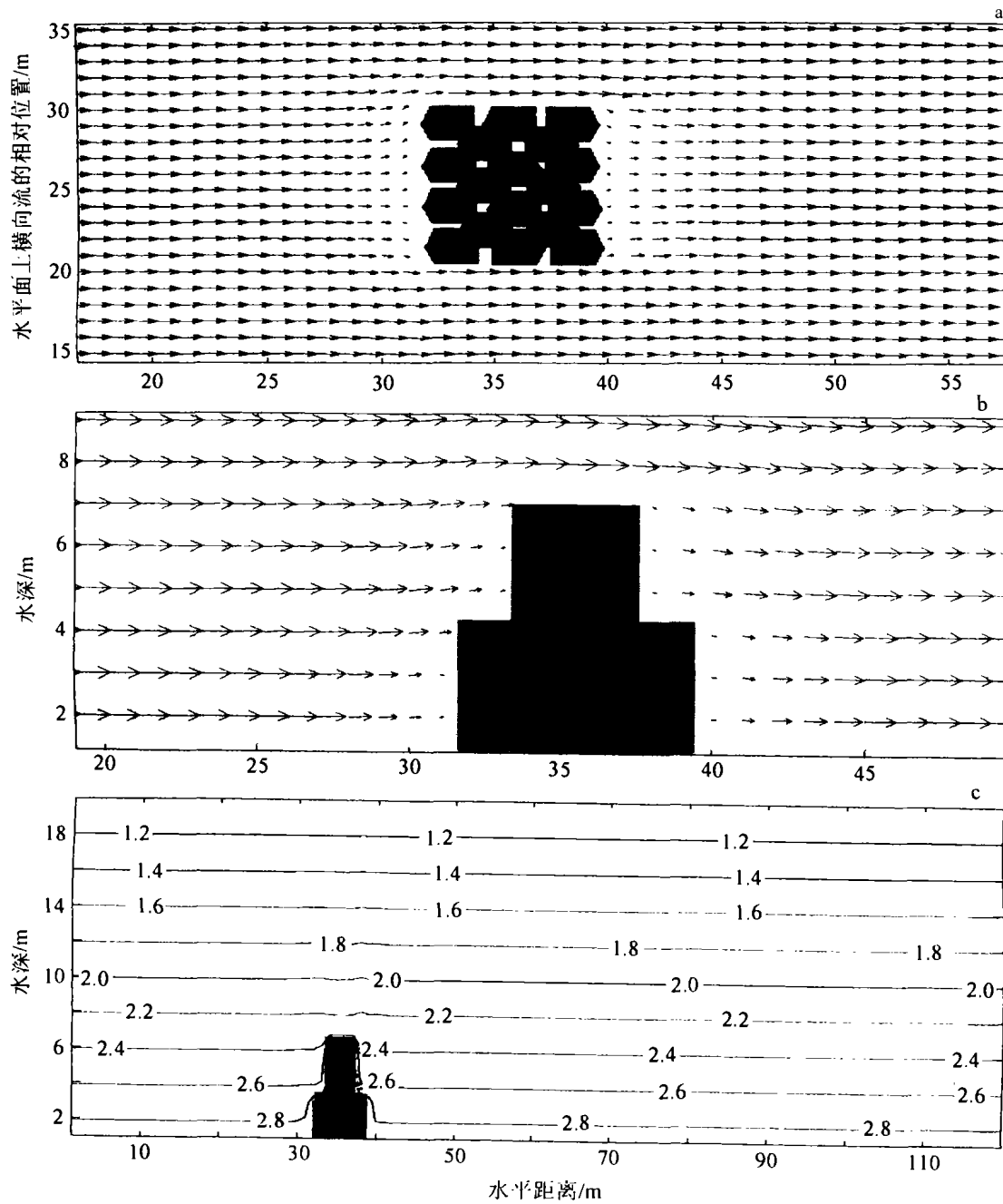


图2 人工船礁组合产生流态变化和压力分布图

Fig.2 The flowing state and the pressure distribution of water produced by the combination of artificial ship-reef
 注:入流速度为 1.6m/s,水深为 20m。a 为水平剖面流速分布,b 为垂直剖面流速分布,c 为垂直剖面压力分布。图中坐标均为相对距离

2.3 流速影响

为了考察不同流速对礁体铺设的影响,考虑实际情况,对以上单船和组合礁体分别模拟 20m 水深,分别计算 0.1m/s、0.5m/s、1m/s、1.6m/s 来流速度对鱼礁投放流态变化的影响,结果见表 3。

由表 3 可以看出,单体船礁相对与方形礁体

或三角型礁体上升流有所增加,而最大纵向速度差距不大或更小,这主要是由于船体流线所导致的,上升流区偏小,但是流影区相差不大,说明船礁单体更能产生上升流和背涡流;A₁ 和 A₂ 比较体现出同形状大小礁体,大礁体更能产生湍流;而船礁组合 D₁、D₂ 产生的上升流强于单体,而且影

表 2 不同水深下船礁铺设导致流态变化比较

Tab.2 Comparative effect on flowing states by ship-reef laying at different depths

船礁	水深(m)	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
B	10	0.1008	0.2991	4.90	2.7	10.0
	15	0.0971	0.2992	4.80	2.7	10.0
	20	0.0963	0.3067	4.70	2.7	9.5
D_1	10	0.1376	0.4837	3.00	2.0	11.0
	15	0.1329	0.4929	3.27	2.0	11.0
	20	0.1315	0.4929	3.27	2.0	11.0

表 3 不同流速下船礁铺设导致流态变化

Tab.3 Effect on flowing states of ship-reef laying at different flow velocities

指标	流速(m/s)	船 礁							
		A_1	A_2	B	C_1	C_2	D_1	D_2	D_3
F_1	0.1	0.1529	0.1430	0.1530	0.1004	0.0879	0.1622	0.2091	0.0994
	0.5	0.1234	0.1221	0.1235	0.0932	0.0831	0.1470	0.1853	0.0705
	1.0	0.0979	0.0931	0.0975	0.0931	0.0853	0.1318	0.1763	0.0887
	1.6	0.0961	0.0927	0.0963	0.0931	0.0848	0.1315	0.1766	0.0659
F_2	0.1	0.6184	0.6212	0.6122	0.3014	0.6735	0.5272	0.5604	0.7354
	0.5	0.4841	0.4882	0.4809	0.2881	0.4829	0.4620	0.5829	0.3796
	1.0	0.2970	0.2987	0.2966	0.2982	0.2877	0.5097	0.6197	0.4520
	1.6	0.3073	0.3073	0.3067	0.3059	0.2713	0.4929	0.6047	0.2803
F_3	0.1	1.11	2.00	1.11	3.27	3.27	2.18	3.00	1.82
	0.5	2.70	2.58	2.58	3.27	2.73	2.05	2.73	1.82
	1.0	4.37	4.45	4.20	4.64	4.36	3.27	3.81	3.18
	1.6	4.90	4.80	4.70	5.18	4.91	3.27	4.23	4.09
F_4	0.1	1.67	1.67	1.67	1.60	1.40	1.67	1.80	1.67
	0.5	1.67	1.60	1.70	1.40	1.60	1.67	1.50	1.50
	1.0	2.00	2.00	2.30	1.60	2.00	2.33	1.67	1.80
	1.6	2.67	2.67	2.70	2.40	2.20	2.00	2.40	1.83
F_5	0.1	6.5	6.5	6.0	6.0	6.0	7.0	5.5	6.7
	0.5	6.5	6.5	6.5	6.0	6.0	6.5	4.5	7.5
	1.0	9.0	9.0	8.5	9.0	8.0	9.0	5.25	11.7
	1.6	10.0	10.0	9.5	10.0	9.5	11.0	6.5	13.3

响范围比较大,且累计船越多,产生的上升流也越强,最大纵向速度基本相同,这主要是一方面礁体体积增大,另一方面和水深的比值增大导致的,且随着流速的变化,同型号礁体对流场的影响也有所变化。

2.4 礁体铺设方式优选

对于鱼礁铺设方式的优选,从水动力学角度

出发,最佳状况应该是产生尽可能大的上升流和背涡流,且纵向速度不大,则设定指标集(F_1, F_2, F_3, F_4, F_5),各向量按重要性作如下排列: $F_1 = F_3 > F_4 = F_5 > F_2$,可以得到各因子的权重向量为(0.2727, 0.0909, 0.2727, 0.1818, 0.1818)。由此,对于设计水深 20m、最大流速 1.6m/s 的水环境,各种类型礁体归一化向量矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} 0.2728 & 0.2421 & 0.2746 & 0.2457 & 0.1707 & 0.5926 & 1.0000 & 0.0000 \\ 0.8920 & 0.8920 & 0.8938 & 0.8962 & 1.0000 & 0.3553 & 0.0000 & 0.9730 \\ 0.8534 & 0.8010 & 0.7487 & 1.0000 & 0.8586 & 0.0000 & 0.5026 & 0.4293 \\ 0.9655 & 0.9655 & 1.0000 & 0.6552 & 0.4253 & 0.1954 & 0.6552 & 0.0000 \\ 0.5147 & 0.5147 & 0.4412 & 0.5147 & 0.4412 & 0.6618 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

由公式(6)可以计算得各个鱼礁铺设方式的优劣程度系数为: A_1 0.151833, A_2 0.145465, B 0.143122, C_1 0.142454, C_2 0.120199, D_1 0.094937, D_2 0.11123, D_3 0.09076。因此,在不考虑鱼礁铺设面积的情况下,各个鱼礁组合中以单体大船礁为最优。

3 结语

用数值模拟与分析的方法对鱼礁铺设方式优选进行模拟计算,将其结果用于指导试验和实际铺设,可以节省大量的时间和试验费用,具有一定的理论和实际意义。

本文中用不可压缩黏性流体绕流的方法对鱼礁模型导致流态的变化采用时间分裂控制法进行了模拟,对平流项采用迎风格式可以避免数值弥散,用 SOD 法求解压力能较快获得叠代结果,网格控制上外层网格步长大于鱼礁附近网格增快速度,使模拟结果合理可靠。

通过数值模拟,结合对鱼礁铺设区域生态的定性研究,确定评价鱼礁铺设方式的影响因子,用模糊综合评判法建立评价模式,可以综合考虑多指标的影响;由优选模式计算出大船礁的性能比较优越,则在铺设的时候应该尽量使礁体组合的形状接近船形。

水深对船礁铺设方式的影响不但体现在能够生成湍流上,同时,在水深较浅的时候,也容易使底部泥沙悬浮,且不同水深与集群的鱼类有关,其影响因素是多种多样的。本文中只研究特定水环境下的鱼礁及其组合的优选及其变化趋势,至于鱼礁之间的相互作用、相互干扰使鱼礁铺设区的流态发生复杂的变化,尚待今后进一步深入研究。

参 考 文 献

- 刘同渝, 2003. 国内外人工鱼礁建设状况. 渔业现代化, 1: 36—37
- 刘同渝, 陈勤儿, 黄汝堪等, 1981. 鱼礁模型波浪水槽试验. 海洋渔业, 1: 9—12
- 吴子岳, 孙满昌, 汤 威, 2003. 十字型人工鱼礁礁体的水动力计算. 海洋水产研究, 24(4): 32—35
- 陈 勇, 于长清, 张国胜等, 2002. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果. 大连水产学院学报, 17(1): 64—69
- 张怀慧, 孙 龙, 2001. 利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究. 资源科学, 23(5): 6—10
- 大岛泰雄, 1976. 鱼礁の水理构造人工鱼礁の理论和实际. (1) 基础篇. 日本水产保护协会, 71—84
- 中村充, 1979. 流环境から見る人工礁渔场. 水产土木, 15(2): 5—12
- 中村充, 1984. 人工鱼礁の設計、施工技术、造成適地判定. 東京: 恒星社厚生閣, 51: 46—52
- 佐久田博司, 佐久田昌昭, 渡边浩一郎等, 1981. 人工沉设鱼礁模型に門关する基础研究. 水产土木, 18(1): 7—19
- 黑木敏郎, 佐藤修, 尾崎晃, 1964. 鱼礁构造の物理学的研究. 北海道水产部研究报告书, 1—19
- 影山芳郎, 大阪英雄, 山田英已等, 1980. 水槽实验による多孔立方体鱼礁モデル周りの可視化. 水产土木, 17(1): 1—10
- Chang K S, Chen C P, Hsoen H L *et al*, 1977. An experiment on the evaluation of artificial reefs with invertebrate community. Bull Inst Zool, Academia Sinica, 16(1): 37—48
- Fast D E, Pagen F A, 1974. Comparative Observation of an Artificialtire Reef and Natural Patch Reefs Off Southwestern Puerto Rico. In: Colunga L, Stone R ed. Proceedings: Artificial Reef Conference. Texas A & M Univ, 49—50
- Kimura H, 1994. A study on local scour of cylindrical artificial fish reef. Fisheries Engineering, 31(1): 6—12
- Kimura H, 1995. Comparative study on the sinking of artificial reefs by local scour between laboratory and field experiments. Fisheries Engineering, 32(2): 14—18
- Liu C C, 1986. Liner-regression analysis on the oceanographic and fishing condition for set-net fishery. J Fish Soc Taiwan, 13(2): 32—42
- Nakamra M, 1982. Hydraulic Structure of Reefs. In: Vik S F ed. Japanese Artificial Reef Technol. Aquabio Inc F L, Tech Rep, 604: 165—179

HYDRODYNAMIC SIMULATION TO THE BEST LAYOUT OF ARTIFICIAL SHIP-REEFS

YU Cong-Da, YU Cun-Gen, YAN Shi-Qiang[†]

(*Zhejiang Ocean University, Zhoushan, 316004*)

[†](*Zhejiang Ocean University, Zhoushan, 316004; Dalian Maritime University, Dalian, 116026*)

Abstract In recent years, offshore aquatic resources have declined due to over-fishing and deterioration of the marine environment. Artificial reefs are an effective measure for not only improving the marine ecological environment but also constructing fishing grounds. Since the 1980s, artificial reefs have been built in many Chinese offshore areas, and tests on the hydrodynamics of artificial reefs have been carried out in tanks. Recently, with stricter controls of marine fishing in Chinese waters, a greater number of discarded ships have been utilized to build artificial reefs, dubbed, accordingly "ship-reefs". To date, few reports have emerged on maximizing the effectiveness of ship-reefs through appropriate arrangement of these discarded boats. This paper considers hundreds of discarded wooden fishing boats that have been laid on the sea-floor of the Zhoushan Fishing Ground where our study to get best layout of the ships was carried out.

In order to discover the optimal layout pattern, and provide theoretical basis, flume test and numerical methods were used to simulate the hydrodynamics in the case of the artificial ship-reefs, to work out how various patterns and scales would affect the formation of upward flows, back eddy flows, and mixture and exchange between shallow and deep water layers.

Optimization occurs under the condition that the ship-reef layout could increase the dissolved oxygen in the water and carry nutritive salt from the bottom to the shallow layers. Ideally, the condition must be able to promote as large as possible an area of upward and back eddy flow and reduce as much as possible the sedimentation that would clog the area for marine transportation route. The sedimentation effect can be assessed by calculating the ratio of the maximum vertical current speed to that of the flow-in current.

Equations were established to calculate the hydrodynamic states of the upward flow and back eddy flow around the ship-reefs, and a quantitative model was made to get the best layout. The best condition is where depth is 10—20 meters with reciprocating current, and the maximum current speed is 1.58m/s. Eight types of ship-reef layout pattern were selected for research.

Results show the best layout fashion is a single large ship. The maximum speed of upward flow caused by the various combination models of the ship-reef was 0.05—0.15 times to the flowing-in speed. With the increase of flowing-in speed, the effect caused by upward flow and back eddy flow was greatly strengthened. With various flowing-in speeds, the ratio of affective width of upward flow to that of the ship-reef was 1.1—5.0, affective height of upward flow to that of ship-reef was 1.4—2.0 while affective length of back eddy flow to the height of ship-reef was 4.5—13.0. Different layout pattern of the ship-reef produced significantly different sediment clogging. The ship itself had a minor contribution to the clogging because of the streamlined shape.

Key words Artificial ship-reef, Model optimization, Hydrodynamics, Upward flow