

三亚湾海洋牧场人工鱼礁结构设计及稳定性分析

陈小艳, 谢琳, 王发云

(海南省海洋与渔业科学院, 海南 海口 570125)

摘要: 作者基于海南三亚湾海洋牧场海域的海况条件、渔业资源状况, 根据波流动力学理论设计一种箱形鱼礁礁体以聚集鱼类, 并对该礁体进行了稳定性计算。结果表明, 该礁体在实际投放水深为-25 m、波高为 8.45 m、流速为 0.8 m/s 时, 礁体最大受力为 27 422 N, 滑动安全系数为 1.55, 滚动安全系数为 2.49, 满足礁体稳定条件, 在研究海域不会发生漂移及倾覆, 能为今后海南省人工鱼礁建设提供重要的理论依据。

关键词: 人工鱼礁; 箱形; 稳定性

中图分类号: S953.1 文献标识码: A

DOI: 10.11759/hyxx 20170419003

文章编号: 1000-3096(2017)10-0019-05

人工鱼礁是指人们为改善海域生态环境, 为鱼类等水生生物的聚集、索饵、繁殖、生长和避敌提供安全的栖息场所, 达到保护、增殖渔业资源和提高渔获量的目的而在水中经过科学选点而设置的构造物^[1]。20 世纪 70 年代以来, 世界上大多数沿海国家陆续建造人工鱼礁, 取得了一定的生态效益和经济效益, 特别是美国、日本等经济发达国家已投入大量财力, 广泛利用人工鱼礁建成了许多诱集鱼类、增殖渔业资源的渔场^[1-2]。在中国, 虽然人工鱼礁建设起步较晚, 但经过了 20 多年的实践和思考, 近年来对人工鱼礁的作用及人工鱼礁建设的重要性有了更进一步的深刻认识和体会, 走耕海牧渔的道路已成为当前和今后相当长的一个时期内振兴沿岸近海渔业的重点方向之一^[2]。当前, 中国渔业资源衰退和海洋环境污染等问题逐渐严峻, 而人工鱼礁建设是一项改善和修复被破坏的海洋生态环境、恢复和保护海洋渔业资源的有力举措之一。2010 年, 三亚市编制了《三亚近海海洋牧场规划》, 提出将于未来 10 年内在近海建设 8 个“海洋牧场”, 旨在通过海洋牧场开展热带海洋生态观光和海上垂钓等活动, 促进三亚市海洋渔业经济的可持续发展。目前三亚已建设 4 个海洋牧场, 分别在蜈支洲、红塘湾和三亚湾海域, 其中三亚湾海洋牧场刚起步, 已投放船礁, 现投放礁型比较单一, 需进一步丰富投放礁型以发挥各类礁体的优势。

人工鱼礁设计是一项复杂的系统工程, 应考虑选址的合理性、礁体的耐久性及稳定性等问题^[3-4]。其中礁体的稳定性直接影响礁体的功能和使用年限,

如果设计不合理, 将导致鱼礁投放后发生滑移、翻滚、碰撞等, 造成经济损失, 甚至危及航道安全。因此, 对设计的礁体进行稳定性计算, 分析该礁体在投放后是否能够保持结构的有效性, 从而保证其生态稳定性是相当重要且必要的。作者响应三亚发展规划要求, 针对三亚湾海洋牧场的水深、波流特点、渔业资源状况, 设计一种人工鱼礁用以诱集鱼类, 供鱼类繁殖生长和提供避敌场所, 并且对该鱼礁进行稳定性分析, 确保鱼礁在波、流作用下保持稳定, 不滑动, 不倾覆, 从而为三亚人工鱼礁的建设及生态保护与恢复提供基础数据及理论研究。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

三亚位于海南岛的最南端, 属热带海洋性季风气候, 全年盛行东风、东北风和东北偏东风。海域常为南向浪, 波浪主要集中在东南至西南向范围内。三亚湾口及西侧开敞区域以往复性潮流为主, 潮流强度相对较大, 但最大流速均不超过 0.8 m/s; 东侧受鹿回头岬角掩护的海域最大流速分别不大于 0.4 m/s 和 0.6 m/s, 并表现出一定的旋转流特征。从流速分

收稿日期: 2017-04-19; 修回日期: 2017-05-12

基金项目: 海南省自然科学基金项目(20154175)

[Foundation: Provincial Natural Science Foundation of Hainan, No. 20154175]

作者简介: 陈小艳(1989-), 女, 海南省万宁人, 助理工程师, 学士, 主要从事海洋工程规划与设计研究, 电话: 0898-66702361, E-mail: 451889226@qq.com; 王发云, 通信作者, 电话: 0898-66702361, E-mail: 95309728@qq.com

布情况看, 计算区域表层流速最大, 随着深度增加, 潮流流速逐渐减少, 落潮流速大于涨潮流速。三亚湾中西部海域海底表层以细砂为主, 海底平滑。投放人工鱼礁区域水深在-17.5~-25.7 m(1985 国家高程基准面)。三亚海域海洋水产资源十分丰富, 可作为增养殖对象的种类主要有 53 种, 其中重要海水鱼类有 27 种, 包括: 军曹鱼(*Rachycentron canadum*)、卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)、石斑鱼(*Epinephelus*)、鲷(*Pagrosomus major*)、尖吻鲈(*Lates calcarifer*)、鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)、鲻鱼(*Mugil cephalus*)、海马(*Hippocampus*)等。该海域主要增殖对象为沿岸性、岛礁性鱼类。

作者计算水深取-25 m, 潮流流速取 0.8 m/s, 以三亚外海-25 m 水深处 25 年一遇的强浪向波浪作为设计波要素, 根据相关波浪资料, 有效波高为 8.45 m, 周期为 9.78 s, 波长为 100 m。

1.2 礁体设计原则

鱼礁的结构设计取决于鱼类的趋性。对于以鱼礁

$$F_0 = \frac{1}{2} \rho C_D A U^2 \left\{ \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{V_m}{U} \right)^2 \right] + 2 \left(\frac{V_m}{U} \right) \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} \left(\frac{V_m}{U} \right)^2 \cos 2\omega_0 t \right\} - \rho C_M V V_m \omega_0 \sin \omega_0 t \quad (1)$$

式中, ρ 为海水密度(kg/m^3); A 为对于水流方向鱼礁的投影面积(m^2); C_D 为阻力系数, 正方体形状取 2; U 为稳定流速(m/s); V_m 为波产生的流速(m/s), $V_m = a' \omega \frac{\cosh K(h-Z)}{\sinh Kh}$; a' 为波的振幅(m); ω 为波的圆频率($1/\text{s}$), $\omega = \frac{2\pi}{T}$; T 为波的周期(s); ω_0 为名义圆频率($1/\text{s}$), $\omega_0 = KU - \omega$, $K = 2\pi/L$; L 为波长(m); h 为水深(m); Z 为鱼礁中心距静水面高度(m); C_M 为名义质量系数, $C_M = C_{MA} + 1$; C_{MA} 为附加质量系数, 正方体形状取 1.0; V 为礁体的实体体积(m^3)^[5-6]。

1.3.2 滑动安全性计算公式

礁体在水中的稳定性主要涉及滑动安全性和滚动安全性两个方面。要求礁体不被水流冲击而发生滑动, 此时需满足礁体与海底间的静摩擦力大于流体作用力。可得理想滑动安全系数的计算式如下:

$$S_F = \frac{F}{F_0} = \frac{\sigma g V \mu (1 - \rho / \sigma)}{F_0} \quad (2)$$

$$S_F = \frac{\sigma g V \mu (1 - \rho / \sigma) + \mu F_P}{F_0} \quad (3)$$

式(2)中, F 为礁体与海底间的最大静摩擦力(N); σ 为礁体材料的密度(kg/m^3); V 为礁体的实体体积

作为栖息场所的鱼类来说, 鱼礁的空隙是非常重要的条件。鱼礁礁体设计时通常要遵循以下基本原则^[1]:

1.2.1 良好的透空性

礁体内空隙的数量、大小和形状将影响礁体周围生物的种类和数量的多寡。应尽量将礁体设计成多空洞、缝隙、隔壁、悬垂物结构, 使礁体结构有很好的透空性。

1.2.2 增大礁体的表面积

礁体表面积的大小直接关系到礁体上附着生物的数量, 着生在礁体表面的海洋生物是鱼类的重要饵料之一, 这对于高度较小的深水鱼礁尤其重要, 在礁体的设计中应尽量增大礁体的表面积。

1.2.3 良好的透水性

只有保证礁体内有充分的水体交换, 才能使礁体的表面积得到有效利用, 确保礁体表面固着生物的养料供给。

1.3 稳定性计算方法

1.3.1 流体力计算公式

(m^3); ρ 为海水密度(kg/m^3); μ 为礁体与海底间的静摩擦系数, 取 0.5~0.6; F_0 为礁体所受的流体作用力(N)。若校验结果 $S_F > 1.2$, 则满足稳定条件。以上计算并未考虑礁体陷入海底泥沙中的情况, 若礁体陷入沙中, 则礁体底面必受到泥沙的压力作用, 此压力值须添加到理想安全系数计算式的分子中去^[1, 6]。式(3)中, F_P 为泥沙对礁体的压力的相当值(N), 其值为 $F_P = 0.5 \gamma h^2 K_P$; K_P 为受动土压系数, 其值为

$$K_P = \frac{\cos^2 \theta}{\cos \delta \left\{ 1 - \left[\frac{\sin(\theta + \delta) \sin \theta}{\cos \delta} \right]^2 \right\}}; \quad \gamma \text{ 为泥沙的密度}(\text{kg/m}^3);$$

h 为礁体陷入泥沙中的高度(m); θ 为泥沙内部的摩擦角; δ 为受压礁体(板)与泥沙的摩擦角。同理, 若校验结果 $S_F > 1.2$, 则满足稳定条件^[1, 5]。

1.3.3 滚动安全性计算公式

要求礁体不被水流冲至翻滚, 在理想状态下(假设礁体未陷入泥沙)需满足礁体的阻抗转矩大于流体作用力对礁体产生的动转矩。理想滚动安全系数的计算式如下:

$$S_F = \frac{\sigma g V (1 - \rho / \sigma) l_w}{F_0 h_0} \quad (4)$$

式(4)中, h_0 为流体作用力 F_0 的作用高度(m); l_w 为礁体重心至可能回转中心的水平距离(m)。若校验结果 $S_F > 1.2$, 则满足稳定条件^[1, 6]。

2 结果与分析

2.1 礁体结构

鱼礁单体是用于建造鱼礁场的单个构造物, 是构成单位鱼礁的最基本的单元。鱼礁单体形状多种多样, 大小和材质也不同, 其构造必须具备良好的流场效应、生物效应, 能够有效地增殖资源、诱集鱼类的功能, 设计时虽没有统一的标准, 但需要综合考虑经济实惠、安全耐用、多空间与表面积、制造与投放方便等因素^[1]。

鱼礁的外形尺寸取决于水深、流速及鱼种。一般在水深 20 ~ 40 m、海域礁体高度为水深的 1/10 ~ 1/5 为宜, 而礁宽可根据雷诺数 R_e 来确定 ($R_e = Bu/v$, 其中 B 为鱼礁宽度、 u 为海水流速、 v 为海水黏滞系数), 而流体由层流过渡为紊流时的界限可由雷诺数判定, 通常 R_e 大于 10^4 时便有层流向紊流过渡的现象发生。所以当海水流速已知时, 可由 Bu/v 大于 10^4 求出鱼礁宽度^[1]。因此, 针对三亚湾海洋牧场海域的海况、渔业资源状况, 设计了箱形鱼礁, 礁体采用钢筋砼箱形结构, 外框尺寸 3 m×3 m×3 m, 壁厚为 15 cm, 顶面设有一圆形孔洞、直径为 0.8 m, 四周设有方形和圆形孔洞, 方形孔洞为 1.1 m×0.55 m, 圆形孔洞直径为 0.5 m(图 1)。

2.2 结构设计分析

目前, 人工鱼礁的常用礁型有箱形、框架形、三角形、梯形、异体形等, 作者在优化选型时要考虑一些技术指标要求^[3]。如: 礁体表面积与礁体体积之比

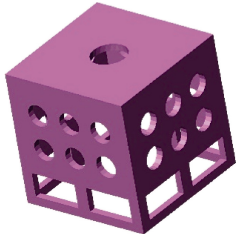


图 1 箱形鱼礁结构

Fig. 1 The sketch of structure of the reef of box style

(即 η =礁体表面积/礁体体积), 在相同礁体体积情况下, 增大表面积, 则 η 值(η 表示表面积比系数)就增大。由于附着生物量增多, 所以对增殖类海洋生物鱼礁有利; 礁体空方体积与礁体体积之比(ε =礁体空方体积/礁体体积), 在相同礁体体积情况下, 增大空方体积, 则 ε 值(ε 表示空方比系数)就增大, 由于有较大流态效应, 所以对诱集鱼类型的鱼礁有利; 礁体结构, 它涉及礁体大小和形状, 对于有多种类型结构的礁体来说, 会使礁体上多种生物受益。等等。

相较于其他礁型, 箱形礁体的优点是各项技术指标相对均衡(表 1), 尺寸较大, 结构强度较大, 整个礁体可为鱼类提供庇护空间, 适宜多种鱼类和底栖类, 可投放于较深海域, 不足之处为耗费混凝土材料较多、制作相对复杂。

2.3 稳定性分析

由公式(1)可知, 鱼礁礁体所受的流体作用力 F_0 随波向角 $\theta = \omega_0 t$ 的变化而变化, ω_0 为不变量, 即 F_0 随着 t 变化而呈现周期性变化, 通过 Excel 规划求解工具, 可以求出 t 值和 F_{0max} 值。根据设计礁体、投放海域的实际情况, 利用公式(1)、(2)、(4)对礁体进行稳定性验算(表 2)。由计算结果可知, 滑动 S_F 和滚动 S_F 均大于 1.2, 礁体稳定。

表 1 箱形鱼礁单体技术指标表

Tab. 1 Technical index of the box reef monomer

礁体类型	表面积(m ²)	空方体积(m ³)	混凝土体积(m ³)	重量(t)	ε	η
箱形鱼礁	74.66	27.00	4.72	11.55	5.73	15.83

表 2 箱形鱼礁稳定性计算表

Tab. 2 Calculation of the stability of the box reef

已知	g	ρ	σ	A	C_D	C_M	U	a'	T	L
	9.8	1025	2700	6.61	2	2	0.8	4.22	9.78	100
	h	Z	V	K	μ	h_0	l_w	ω	ω_0	t
	25	23.3	4.72	0.06	0.55	1.7	1.5	0.64	-0.59	10.26
求得	v_m	F_0	滑动 S_F		滚动 S_F					
	1.19	27422	1.55		2.49					

注: 表中 F_0 为利用 Excel 规划求解工具求得的最大值, t 为相应的值; 滑动 S_F 和滚动 S_F 均为理想安全系数; 表中各字母的含义及单位见上文各公式

因此,作者所设计箱形鱼礁尺寸符合稳定性要求,即该礁体能够满足三亚湾海洋牧场海域的海况条件,适宜投放,不会发生漂移、倾覆等失稳现象。

3 讨论

作者设计的箱形鱼礁清洁环保、坚固耐用;体积大、符合岛礁性鱼类特性;在侧面及顶端开孔,一方面可增加平台面,在空方体积一定的情况下减小礁体体积,有效提高 η 、 ε , 形成更好的流态效应;另一方面可促进海水流通,达到良好的透空性和充分的透水性,有利于聚集鱼类,为海洋生物创造良好的栖息地。根据投放海域的不同水文特点,可灵活增大或减小侧面及顶端开孔的尺寸,在保证稳定性的同时,空方体积不会被削减,礁体性能比较稳定,有利于推广使用及成本控制。

相对于已投放于江苏连云港海州湾的十字型鱼礁,在波流共同作用下的最大受力为 2 940 N, 其滑动安全系数为 1.58, 滚动安全系数为 1.63^[7]; 投放于浙江台州大陈海域的钢制四方台型鱼礁,最大受力

为 24 559 N, 滑动安全系数平均值为 1.44, 滚动安全系数平均值为 2.23^[8]; 投放于浙江嵊泗海域的回字型鱼礁,最大受力为 43 178 N, 滑动安全系数为 1.78, 滚动安全系数为 2.36^[9]; 箱形礁体在波流共同作用下,最大受力为 27 422 N, 滑动安全系数为 1.55, 滚动安全系数为 2.49(表 3)。通过比较,箱形礁体的抗滑移性能基本与前 3 种鱼礁持平,而抗倾覆性能高于前 3 种鱼礁,在稳定性方面有了一定提高。

影响礁体抗滑移性能的主要因素是其迎流面积,影响礁体抗倾覆性能的主要因素是其自重,箱形鱼礁的稳定性能较好的原因就在于其迎流面积和自重比较均衡。与回字形鱼礁相比,在空方体积相等、稳定性能持平的情况下,体重较轻,混凝土用料较少,因此更加经济。

在对礁体进行抗滑移验算时,采用的是理想安全系数计算式,没有考虑礁体的沉陷,虽然礁体的沉陷通常会增加礁体的稳定性,但是如果沉陷深度过大,礁体将被大部分掩埋,从而丧失鱼礁应有的作用^[7-10],因此有必要在鱼礁投放后观测礁体的沉陷深度,研究该礁型的沉陷现象。

表 3 与其他投入应用鱼礁性能比较

Tab. 3 Comparison of the performance of artificial reefs with various applications

礁体类型	十字型鱼礁 ^[7]	四方台型鱼礁 ^[8]	回字型鱼礁 ^[9]	箱形礁体(本研究)
空方体积(m ³)	8	32	27	27
迎流面积(m ²)	2.31	2.50	8.00	6.61
自重(t)	1.92	7.19	18.07	11.55
最大受力(N)	2 940	24 559	43 178	27 422
滑动安全系数	1.58	1.44	1.78	1.55
滚动安全系数	1.63	2.23	2.36	2.49

4 结论

箱形鱼礁体积大、稳定性较好,更趋于为鱼类提供避敌栖息的场所,箱体礁体对投放海域环境具有广泛的适应性,目前大量应用于中国沿海的许多鱼礁工程。

作者对箱形礁体进行了流体力、抗滑移及抗倾覆计算,结果表明,箱形鱼礁礁体能够满足投放海域的海况条件,适宜在该海区投放。

对礁体进行抗滑移验算时,没有考虑礁体的沉陷,有必要在今后工作中加以观测、研究,为海南省今后的人工鱼礁建设提供参考。

参考文献:

[1] 夏章英. 人工鱼礁工程学[M]. 北京: 海洋出版社,

2011: 1-58.

Xia Zhangying. Artificial reef engineering[M]. Beijing: Ocean Press, 2011: 1-58.

[2] 于沛民, 张秀梅. 日本美国人工鱼礁建设对我国的启示[J]. 渔业现代化, 2006, 2: 6-7.

Yu Peimin, Zhang Xiumei. The enlightenment of Japanese and American artificial reef construction to our country[J]. Fishery Modernization, 2006, 2: 6-7.

[3] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. 海洋学研究, 2006, 24(4): 69-76.

Zhao Haitao, Zhang Yifei, Hao Chunling, et al. Sitting and designing of artificial reefs[J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(4): 69-76.

[4] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 257-267.

Lin Jun, Zhang Shouyu. Research advances on physical

- stability and ecological effects of artificial reef[J]. Marine Fishery, 2006, 28(3): 257-267.
- [5] 中村充. 水产土木学[M]. 东京: 工业时事出版社, 1991: 462-469.
Nakamura Mitsuo. Fisheries and civil engineering[M]. Tokyo: Industrial Affairs Press, 1991: 462-469.
- [6] 王素琴. 人工鱼礁的受力分析与设计要点[J]. 大连水产学院学报, 1987, 1: 55-62.
Wang Suqin. Stress analysis and designing features of artificial fish reefs[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1987, 1: 55-62.
- [7] 吴子岳, 孙满昌, 汤威. 十字型人工鱼礁礁体的水动力计算[J]. 海洋水产研究, 2003, 12(4): 32-35.
Wu Ziyue, Sun Manchang, Tang Wei. The calculation of the hydrodynamic force of the artificial cross-reefs[J]. Marine Fisheries Research, 2003, 12(4): 32-35.
- [8] 钟术求, 孙满昌, 章守宇, 等. 钢制四方台型人工鱼礁礁体设计及稳定性研究[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 234-240.
Zhong Shuqiu, Sun Manchang, Zhang Shouyu, et al. Study on the design and stability of the artificial steel prism reef[J]. Marine Fishery, 2006, 28(3): 234-240.
- [9] 许柳雄, 刘健, 张硕, 等. 回字型人工鱼礁礁体设计及其稳定性计算[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(12): 79-83.
Xu Liuxiong, Liu Jian, Zhang Shuo, et al. Research on the design and stability calculation of the artificial hui style reef[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(12): 79-83.
- [10] 郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 等边三角型人工鱼礁礁体结构设计及其稳定性[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(3): 117-125.
Zheng Yanxuan, Liang Zhenlin, Guan Changtao, et al. Structure design and stability of the equilateral triangle artificial reef[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(3): 117-125.

Structure design and stability analysis of the artificial reef in marine ranching of Sanya Bay

CHEN Xiao-yan, XIE Lin, WANG Fa-yun

(Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 570125, China)

Received: Apr. 19, 2017

Key words: artificial reef; box style; stability

Abstract: For the marine ranching of Hainan Sanya Bay, a box-style reef for gathering fish has been designed, based on the states of the sea area and fishery resources. In this paper, we calculate the stability of the reef based on the hydrodynamics of the waves and currents. We determined the maximum force to be 27 422 N and the anti-slide and anti-rolling coefficients to be 1.55 and 2.49, respectively. When the water depth reaches 25 m, the wave height reaches 8.45 m and the velocity of flow reaches 0.8 m/s. These calculation results indicate the effective stability of the reef, which will not slide or roll in this sea area.

(本文编辑: 谭雪静)