

等边三角型人工鱼礁礁体结构设计及其稳定性

郑延璇^{1,2} 梁振林^{2,3} 关长涛^{1*} 宋协法² 李 娇¹
崔 勇¹ 李 强⁴ 郑富强⁴

(¹农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室
中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(² 中国海洋大学海洋生物水环境工程实验室, 青岛 266003)

(³ 山东大学(威海)渔业工程实验室, 威海 264209)

(⁴ 乳山市海洋与渔业局, 威海 264500)

摘 要 在山东威海西港水产公司小石岛造礁工程投放的三角型礁的基础上, 改良设计了等边三角型礁。礁体的尺寸为: 等边三角型的边长 2 m, 宽 3.3 m, 重 8.1 t。根据山东海区的波流状况, 测量计算了礁体在 8 种波况和 5 种流速下所受到的最大作用力、抗漂移安全系数和抗翻滚安全系数。结果表明, 该礁型在实际投放水深为 15 m、波高为 6 m 时, 可能失稳发生漂移, 在其他波况下能较好地保持稳定; 该礁型在投放水深 15 m、流速达到 1 m/s 时, 仍能保持稳定, 无漂移和翻滚现象。此外, 在计算的基础上, 对礁体的稳定性进行了观察试验, 观察结论与计算结果基本相符。

关键词 人工鱼礁; 等边三角型礁体; 结构设计; 稳定性

中图分类号 S969.1 文献标志码 A 文章编号 1000-7075(2014)03-0117-09

Structure design and stability of the equilateral triangle artificial reef

ZHENG Yan-xuan^{1,2} LIANG Zhen-lin^{2,3} GUAN Chang-tao^{1*} SONG Xie-fa²
LI Jiao¹ CUI Yong¹ LI Qiang⁴ ZHENG Fu-qiang⁴

(¹Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,
Qingdao Key Laboratory of Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute,
Chinese Academy of Fishery Sciences, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071)

(²Laboratory for Water Environmental Engineering of Marine Biology, Ocean University of China, Qingdao 266003)

(³Laboratory for Fisheries Engineering, Shandong University, Weihai 264209)

(⁴Rushan City Ocean and Fishery Administration, Weihai 264500)

ABSTRACT Based on the triangle artificial reef that was deployed in the project of reef construction at Xiaoshidao by Weihaixigang Aquatic Products Company, an equilateral triangle artificial reef was designed in the present study. The side length, width, weight of this artificial reef is 3.3 m, 2 m and 8.1 t, respectively. According to the wave and current condition at Shandong Province, 5 current velocities and 8 wave conditions were set. The maximum force, coefficient of maximum static friction,

公益性行业(农业)科研专项(201003068)和中央级公益性科研院所基本科研业务费(20603022011006)共同资助

* 通讯作者。E-mail: guanct@ysfri.ac.cn

收稿日期:2013-07-09;接受日期:2014-01-10

作者简介:郑延璇(1986-),女,博士研究生,主要从事人工鱼礁与海洋牧场工程的研究。E-mail: xuanxuan861220@163.com

coefficient of anti-rolling, and coefficient of anti-slide at different test conditions were calculated. With the increment of wave period and wave height, the maximum forces acting on the reef increased. The maximum forces also increased gradually with the increase of current velocity; and the relationship between maximum force and velocity was expressed as $F_{\max} = 4.146v^2$. The results of stability calibration showed that the reef slid when the water depth reached 15 m and the wave height reached 6 m. The reef kept stable on the sea floor in which the water depth is 15 m and the current velocity is 1 m/s. To validate the calculation results, an observation test of the stability of this reef was carried out. The results of the observation test and those from calculation matched. The stability of the equilateral triangle artificial reef met the requirement and it is suitable to use in Shandong.

KEY WORDS Artificial reef; Equilateral triangle reef; Structure design; Stability

人工鱼礁是一种经过科学选点而设置在水域中的构造物,主要由一个或多个自然或者人造物体组成。人工鱼礁能够改善、修复海域生态环境,为鱼类生物等提供繁殖、生长、索饵和庇敌的场所,达到保护、增殖和提高渔获量的目的。人工鱼礁建设是一项投资巨大的复杂工程,礁体的物理稳定性在很大程度上决定其生态稳定性(刘健等 2011)。因此,在人工鱼礁投放之前,就应该对礁区的选址、礁体材料的耐用性以及礁体的稳定性进行研究。礁区选址和礁体结构设计的不合理会导致礁体在投放到水域后出现滑坡、翻滚、沉陷、掩埋,直接影响礁体的功能和使用年限,甚至造成航道堵塞(唐振朝等 2011)。因此,如何延长鱼礁的生态稳定性,使鱼礁的生物诱集效应最大化,是人工鱼礁工程建设追求的最重要的目标(林军等 2006; Pickering *et al.* 1997)。目前,国内外学者开展了大量关于人工鱼礁结构设计及稳定性分析的研究(吴子岳等 2003; 钟术求等 2006; 许柳雄等 2010; 唐振朝等 2011),为保证人工鱼礁建设能够取得预期效果,在礁体设计方面进行了科学的验算。

鉴于以上学者的研究方法及经验,根据山东省威海西港水产公司小石岛造礁工程投放的三角型礁,设计了等边三角型礁,其目的是保证鱼礁在投放后能够保持结构的有效性,最大限度地发挥其生态效应。此外,本研究对等边三角型礁在波浪和水流单独作用下的水动力及其安全性进行了计算和分析,并进行了各工况下的稳定性观察实验,验证了计算的准确性。

1 材料与方 法

1.1 等边三角型礁的礁体结构设计

等边三角型礁的设计是在威海西港水产公司小石岛造礁工程投放的三角型礁的基础上进行改良,使礁体在投放时可以保证结构的有效性,最大限度地发挥该礁型应有的效果。等边三角型礁体的边长为 2000 mm,礁体宽度为 3300 mm,3 个面的结构相同。图 1a 为等边三角型礁体的立体结构示意图,图 1b 为等边三角型礁体正视图及尺寸,图 1c 为等边三角型礁体侧视图的结构及尺寸。

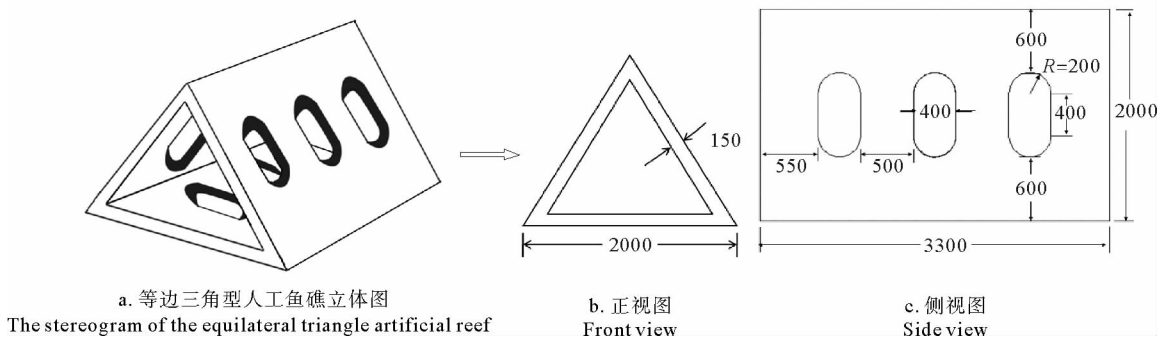


图1 等边三角型礁体的形状及尺寸(mm)

Fig. 1 The shape and dimensions of the equilateral triangle artificial reef

等边三角形型礁的结构比较简单,各面开有3个由正方形和半圆形组成的孔洞,增加礁体的透水性,并且为鱼类提供洄游通道。礁体材料选择钢筋混凝土,参照新《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 4.1.1,确定混凝土强度等级的标准,综合考虑礁体重量和使用年限,将礁体壁厚设计为150 mm,可以保证礁体整体的强度和耐久性。

为了提高礁体整体的承载力和抗弯性,需要在混凝土内部进行适当的配筋,配筋标准参照新《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 中4.2.1之规定,型礁结构为钢筋混凝土结构,其配筋为普通钢筋,钢筋直径为8 mm。配筋尺寸、结构参照三角形型礁(王磊 2007)。

根据等边三角形型礁的体积及配筋比例,该礁型重量约为8.1 t。

1.2 礁体稳定性计算

1.2.1 礁体作用力测定

1.2.1.1 试验模型

礁体模型按照实物礁体的形状进行制作。根据鱼礁投放的实际水深和水槽的最大水深,取比尺 $\lambda_L = 30$ 。实物礁体为钢筋混凝土结构,其糙率为 $n_{实} = 0.014$,按照糙率相似原则,所制作模型的糙率为:

$$n_{模} = n_{实} / \lambda_L^{\frac{1}{6}} = 0.0079 \quad (1)$$

因此采用有机玻璃为模型材料,其糙率为0.007-0.0087,满足要求。

礁体模型重量为:

$$W_{模} = W_{实} / \lambda_L^3 = 0.300 \text{ kg} \quad (2)$$

由于有机玻璃密度较小,因此在保证礁体形状的前提下,不足的重量用铅块补充。礁体原型及模型的设计参数如表1所示。

表1 等边三角形型礁体原型及模型的设计参数

Table 1 The prototype and model design parameters of the equilateral triangle artificial reef

	等边三角形边长 Side length (m)	壁厚 Wall thickness (m)	礁体宽度 Width (m)	礁体重量 Weight (kg)	空方体积 Volume (m ³)
礁体原型 Prototype	2.000	0.150	3.300	8100.000	5.720
礁体模型 Model	0.067	0.005	0.110	0.300	0.212

1.2.1.2 礁体作用力的测定

由于礁体模型在不同迎流方式下所受的阻力不同,而本研究旨在分析该礁型的稳定性,因此,试验中礁体模型迎流方式的选择只需考虑礁体最大受力。本研究中,鱼礁模型与来流方向垂直,采用90°迎流。

由于试验条件限制,测定等边三角形型礁体作用力时,仅考虑波浪或水流对鱼礁模型的单独影响。试验中,用一根长60 cm、半径为4 mm的钢杆将鱼礁模型与测力计连接。礁体模型垂直悬挂在水中,使得模型的底部和动力水槽的底面相接近但不接触。测力计所测得的数据为礁体模型受力在X轴方向上的分量,其测量范围为 $\pm 9.8 \text{ N}$,测力值的误差小于1%。测量的数据通过信号调节器和A/D转换器传输至数据采集和处理系统。每个测量值测量5次,取平均值。在试验过程中,钢杆同样受到波浪或者水流的作用力,所以在分析礁体的受力结果时,需要把钢杆的受力计算出来并从测量值中减去。因此礁体模型的受力为:

$$F = F_{总} - F_{杆} \quad (3)$$

礁体波浪作用力的测定:礁体波浪力的测定试验在大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室溢油水槽中进行。该水槽具有自制的不规则波造波系统,波浪周期范围为0.5-3.0 s,长22.00 m,宽0.80 m,高0.80 m,水槽侧壁由透明玻璃构成。试验水深0.5 m,对应实际海区水深15 m。试验共测定了8种波况下的鱼礁模型受力,波况及对应波要素如表2所示。

表2 波况及对应波要素

Table 2 Wave conditions and the corresponding wave parameters

波要素 Wave parameters	H10T10		H10T12		H10T14		H15T10		H15T12		H15T14		H20T12		H20T14	
	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(m)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)
试验波况 Experimental wave conditions	0.10	1.00	0.10	1.20	0.10	1.40	0.15	1.00	0.15	1.20	0.15	1.40	0.20	1.20	0.20	1.40
实际波况 Actual wave conditions	3.00	5.48	3.00	6.57	3.00	7.67	4.50	5.48	4.50	6.57	4.50	7.67	6.00	6.57	6.00	7.67

礁体水流作用力的测定:礁体水流作用力的测定在大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室 PIV 波流水槽中进行,长 22.00 m,宽 0.45 m,高 0.60 m,试验段水槽底部和侧壁均由透明玻璃构成。试验水深 0.5 m。试验时采用 SonTex/YSI 10-MHz ADV 三维流速仪测量来流速度。试验设定了 5 个流速梯度,分别为 0.037、0.073、0.110、0.146 和 0.183 m/s,对应实际海区流速 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 m/s。

1.2.2 礁体稳定性校核计算

1.2.2.1 最大静摩擦系数的测定

由于鱼礁投放至海底,摩擦作用出现在礁体底面与海底泥沙之间,因此本研究将模型礁体的形状简化为长方体(底面积、底形和重量均相似而简化模型的上部分结构)。由于模拟底质非常困难,因此将模型的线性尺度比放大至 $\lambda_L = 10$,根据重量相似原则,礁体重量为 8.1 kg,模型采用钢筋混凝土制作,不足的重量用铅块补充,礁体结构及尺寸如图 2a 所示。试验用的底质泥沙取自建筑用沙土,参照国标 GB/T 12763.8-2007 等比制粒级分类表的规范,分别用 200、500、2000、5000 μm 孔径的分隔网筛,分别筛选出两种粒径等级的泥沙颗粒:细砾(2-5 mm)、中砂(0.2-0.5 mm)。在对某种粒径的泥沙进行试验前,将其浸没在水中,使其具有最大含水率。

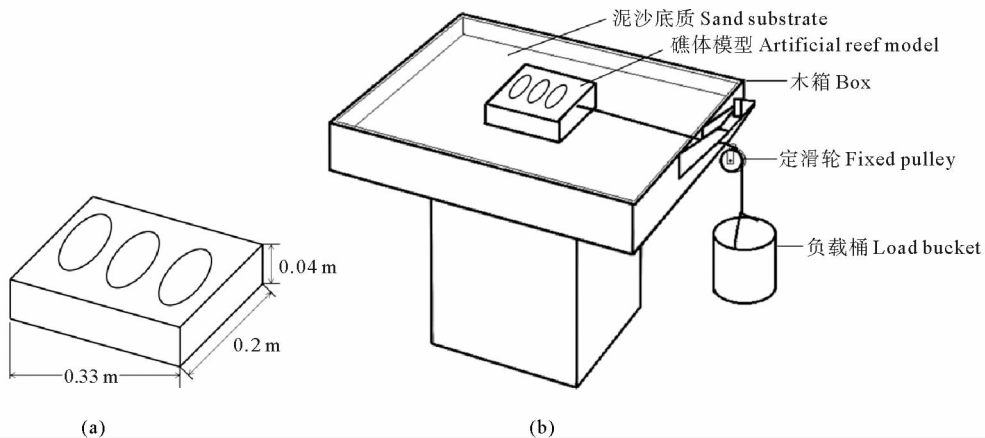


图2 礁体混凝土模型(a)及平面拉动法试验装置(b)

Fig. 2 The concrete reef model (a) and experimental device of plan-pulling method (b)

最大静摩擦系数的测定采用平面拉动法,试验装置如图 2b 所示。采用木材制作一个尺寸为 50 cm × 50 cm × 15 cm,有底无盖的木箱,木头的接缝处用防水胶黏合。木箱内放入厚度为 10 cm 的泥沙层。泥沙层上放置待测的鱼礁模型,木箱一侧设有支架,支架上装有滑轮组件。利用钢丝绳将礁体模型与负载桶相连接,铅块、砝码等作为负载称料缓慢加入到负载桶中。

测试时,分别把鱼礁模型放在泥沙层表面,然后缓慢往木箱中加入水,直至没过鱼礁底面。缓慢向负载桶中加入铅块、砝码,使得负载桶中的重量均匀缓慢地增加,均匀地改变鱼礁所受的拉力,待观测到鱼礁模型有滑动倾向时,立即停止加载,测量此时负载桶的重量,测量 5 次取平均值。

最大静摩擦系数 μ 与负载桶重量平均值 \bar{F} 及人工鱼礁的自重 G 之间的公式为:

$$\mu = \bar{F}/G \quad (4)$$

采用这样的方法来测量鱼礁模型在两种底质上的摩擦力,虽然简陋,但与前人所测得值相差不多。日本出版的《水产土木工程》一书中记载,摩擦系数 $\mu = 0.5 - 0.6$ 。

1.2.2.2 礁体抗滑移安全性校核

礁体在海底不发生滑移,即不产生移动,则需要满足海底面和礁体之间的摩擦力大于作用在礁体上面的波浪力或者流体力。静摩擦力与最大作用力 F_{\max} 的比值称为抗漂移系数 S_1 ,该数值必须大于1,才能保证礁体不发生滑动或者漂移(中村充 1991;钟术求等 2006;许柳雄等 2010;高潮等 2012)。

抗漂移系数 S_1 的计算公式为:

$$S_1 = \frac{w\mu(1-\rho/\sigma)}{F_{\max}} > 1 \quad (5)$$

式中, w 为礁体模型重量, 2.94N; μ 为鱼礁与底盘间的最大静摩擦系数, 分别为 0.501 和 0.614; ρ 为海水单位体积的重量, 1025 kg/m³, σ 为礁体材料单位体积重量, 3130 kg/m³。

1.2.2.3 礁体抗倾覆安全性校核

礁体在波流作用下不翻滚,这就要求礁体的重力和浮力的合力矩 M_1 大于波流最大作用力矩 M_2 (图3)。 M_1 与 M_2 的比值称为抗倾覆系数 S_2 ,该数值必须大于1,才能保证礁体不发生倾覆(钟术求等 2006;许柳雄等 2010;高潮等 2012)。 S_2 的计算公式为(高潮等 2012):

$$S_2 = \frac{M_1}{M_2} = \frac{W(1-\rho/\sigma)t_w}{F_{\max}h_0} > 1 \quad (6)$$

式中, l_w 为翻倒的回转中心到重心的水平距离,单位为 m; h_0 为流体作用力的高度,单位为 m。王素琴(1987)、吴子岳等(2003)和钟术求等(2006)的研究表明,对于对称结构的鱼礁而言, l_w 为礁体底面边长的一半, h_0 约为礁体高度的一半,因此在本研究中, $l_w = 0.0333$ m; $h_0 = 0.0289$ m。

1.2.3 礁体稳定性观察研究

为了验证计算的准确性,在水槽中进行了鱼礁模型在水流(5个流速)和波浪(8种波况)中的稳定性观察研究。礁体模型使用之前制作的有机玻璃模型,根据相似准则,满足礁体外形、重量均相似。水槽水深 0.5 m,在水槽底面铺上厚度为 0.05 m 底质(中砂和细砾)。在水槽壁上贴一个

米尺,用来测量礁体的滑移距离;另外利用摄像机记录礁体的运动状态。在波浪水槽的观察试验中,为防止发射波影响试验结果,选择记录 1 min 内礁体的滑移和翻滚状况。

2 结果与分析

2.1 礁体受力的核算

2.1.1 礁体波浪力的核算

图4a为等边三角形礁体模型在8种波况下的受力情况。从图4a可以看出,当波高一定时,随着波浪周期的增加,鱼礁模型所受的波浪力增大;当波浪周期一定时,随着波高的增加,鱼礁所受的波浪力也逐渐增大。

2.1.2 礁体水流力的核算

图4b为礁体模型在5个来流速度下所受的最大水流作用力。从图4b可以看出,随着来流速度的增加,模

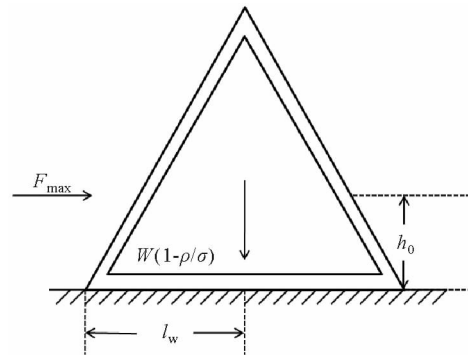


图3 抗倾覆系数计算示意

Fig. 3 Sketch of calculated coefficient of anti-slide

型所受的水流力不断增大。通过回归分析发现,模型所受水流力与来流速度呈多项式关系,多项式方程为 $F_{max} = 4.146v^2$, 回归分析的 R^2 达到 0.998。因此,礁体所受的水流作用力与来流速度具有很强的相关性。

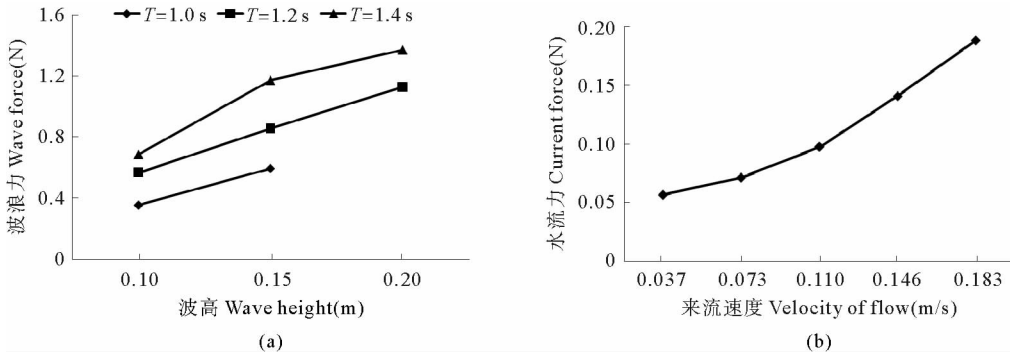


图 4 不同波况(a)和流速下(b)礁体所受的最大作用力

Fig. 4 Maximum force of artificial reef at different wave conditions (a) and velocities (b)

2.2 礁体最大静摩擦系数的计算

将同底质粒径下礁体模型的最大静摩擦系数取平均值,得到:当粒径范围在 0.2 - 0.5 mm 之间(中砂)时,礁体的最大静摩擦系数为 0.614;当粒径范围在 2 - 5 mm 之间(细砾)时,礁体的最大静摩擦系数为 0.501。

2.3 礁体抗漂移安全性校核

鱼礁不发生漂移的条件是鱼礁与海底的摩擦阻力应大于鱼礁所受的作用力,因此,抗漂移系数 S_1 应大于 1 才能保证礁体不发生漂移。由式(5)计算得出如图 4、图 5 所示的结果。

图 5a 为礁体在 8 种波况下,在细砾(2 - 5 mm)底质上的抗漂移安全系数 S_1 。从图 5a 可以看出,在波高一定的情况下,抗漂移安全系数 S_1 随着波浪周期的增大而减小;在波浪周期一定的情况下,抗漂移安全系数 S_1 随着波高的增大也逐渐减小。当波况为 H10T10、H10T12、H10T14、H15T10 和 H15T12 时,礁体的抗漂移安全系数 S_1 最低为 1.15,均大于 1,说明在这 5 种工况下,礁体能够承受波浪的冲击而不发生漂移;当波况为 H15T14、H20T12 和 H20T14 时,礁体的抗漂移安全系数 S_1 均小于 1,分别为 0.84、0.88 和 0.72。这说明,在这 3 种工况下,礁体承受不住波浪的冲击而发生漂移。图 5b 为礁体中砂(0.2 - 0.5 mm)底质上的抗漂移安全系数 S_1 。从图 5b 可以看出,只有在波况为 H20T14 时,礁体的抗漂移安全系数 S_1 为 0.88,小于 1;而在其他 7 种工况下,礁体的抗漂移安全系数 S_1 最低为 1.03,均大于 1。说明,只有在波况为 H20T14 时,礁体可能承受不住波浪的冲击而发生漂移。

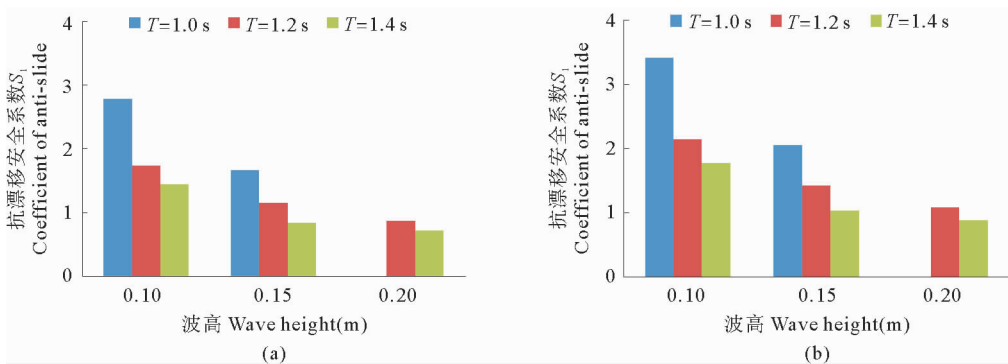


图 5 不同波况下礁体在细砾(a)和中砂(b)两种底质上的抗漂移安全系数

Fig. 5 The calculated coefficient of anti-slide of artificial reef on fine gravel (a) and medium sand (b) under different wave conditions

图 6a 为礁体在 5 个流速下,在细砾(2-5 mm)底质上抗漂移安全系数 S_1 的变化。从图 6a 可以看出,随着来流速度的增加,礁体的抗漂移安全系数逐渐减小,但最低为 5.25,远远大于 1。图 6b 为礁体在 5 个流速下,在中砂(0.2-0.5 mm)底质上抗漂移安全系数 S_1 的变化。从图 6b 可以看出,随着来流速度的增加,礁体的抗漂移安全系数也逐渐减小,但最低为 6.44。综合以上两点可以看出,在纯流作用下,礁体的抗漂移能力很强,基本不会发生漂移。

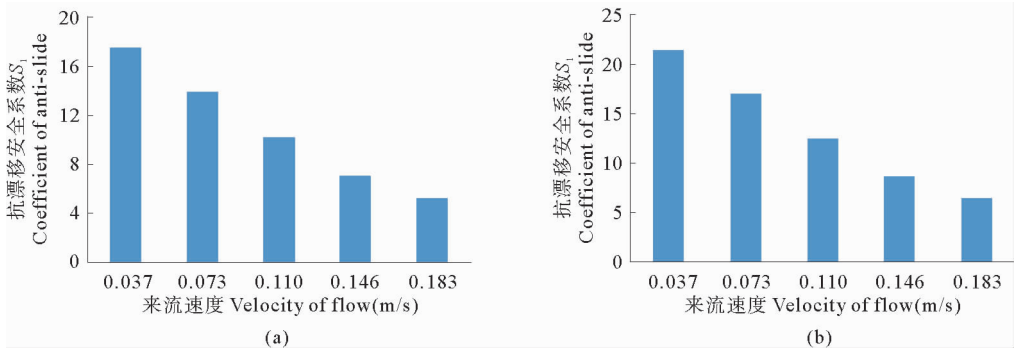


图 6 不同流速下礁体在细砾(a)和中砂(b)两种底质上的抗漂移安全系数

Fig. 6 The calculated coefficient of anti-slide of artificial reef on fine gravel (a) and medium sand (b) at different velocities

2.4 礁体抗倾覆安全性校核

人工鱼礁投放到海域后,不发生倾覆的条件是礁体的重力和浮力的合力矩 M_1 大于波流最大作用力矩 M_2 ,即礁体的抗倾覆安全系数 S_2 大于 1。通过式(6)计算得出如图 6、图 7 的结果。

图 7a 为在不同波况下,三角型礁体在两种底质上抗倾覆安全系数 S_2 的变化。从图 7a 可以看出,同鱼礁抗漂移安全系数变化趋势相似,其抗倾覆安全系数也呈现以下变化规律:当波高一定时,随着波浪周期的增加,其抗倾覆安全系数逐渐减小;当波浪周期一定时,其抗倾覆安全系数随着波高的增加亦逐渐减小。在 8 种工况下,鱼礁的抗倾覆安全系数 S_2 最低为 1.66,均大于 1。因此,该礁型在这 8 种波况的冲击下能够保持稳定,在海底不会发生翻滚。

图 7b 为三角型礁在 5 个来流速度下抗倾覆安全系数 S_2 的变化。从图 7b 可以看出,随着来流速度的增加,其抗倾覆安全系数逐渐减小,但均大于 12.10。因此,在纯流作用下,礁体能够保持稳定,不发生翻滚。

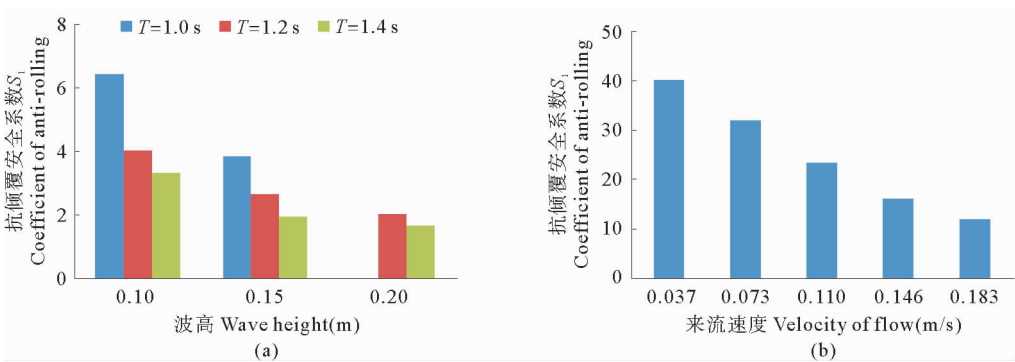


图 7 不同波况(a)与流速(b)下礁体的抗倾覆安全系数

Fig. 7 The calculated coefficient of anti-rolling of artificial reef under different wave conditions (a) and velocities (b)

2.5 礁体稳定性观察

在波浪稳定性观察研究中,当底质为细砾(2-5 mm)时,当波况为 H10T10、H10T12、H10T14、H15T10 和 H15T12 时,礁体模型静止不动,没有滑动和翻滚的迹象,1 min 时礁体被掩埋深度最大,可以达到 0.5 cm;当波况为 H15T14 时,礁体只有微小的左右摇摆;当波况为 H20T12 时,礁体随波浪做往复运动,砂进入礁体内部,在礁体被掩埋一定深度后停止晃动,1 min 内礁体被掩埋 0.5 cm;当波况为 H20T14 时,礁体随着波浪剧烈晃动,1 min 顺着波浪方向前移了 2 cm,泥沙掩埋礁体深度达 0.7 cm。当底质为中砂(0.2-0.5 mm)时,当波况为 H10T10、H10T12、H10T14、H15T10、H15T12 和 H15T14 时,礁体模型静止不动,但随着波高和波浪周期的增加,砂表面形成明显的沙纹,砂往礁体边缘堆积,1 min 内堆积 0.2-0.6 cm。当波况为 H20T12 时,礁体轻微晃动,砂子堆积在礁体周围,一段时间后停止晃动;当波况为 H20T14 时,礁体随着波浪剧烈晃动,52 s 时停止晃动,1 min 顺着波浪方向前移了 1.33 cm,泥沙掩埋礁体侧壁达 0.8 cm。

在水流稳定性观察中,两种底质,礁体在 5 个流速下均保持稳定,没有发生任何的滑移、翻滚,这与计算结果一致。

通过比较观察现象与计算结果发现,实际的观测结果与计算结果基本相符。在中砂底质上,当波况为 H20T12 时略有不符。在波况为 H20T12 时,计算值显示礁体的抗漂移系数为 1.07,略大于 1,应保持稳定,但观测结果显示,礁体在此波况下轻微晃动。产生这种偏差可能有三个原因:一是在礁体受力测量中产生误差;二是在稳定性观测实验中,实际波高受电压的影响,与测力时的波高有一定的偏差;三是在这两种工况下,礁体的抗漂移系数与 1 相比,略大,因此在推测礁体的漂移状态时容易产生偏差。

3 讨论

等边三角型人工鱼礁具有体积大、重心低、稳定性好、制作简单且结构坚固耐用的特点,与之前投放的三角型礁体相比,投放到海底时,无论三角型的三个面如何着地,都能保持其结构的有效性,因此值得在山东推广使用。

等边三角型礁体的抗漂移和抗倾覆性能较强,在纯波作用下,最大作用力平均值为 22633 N,其抗漂移系数平均值为 1.51,抗倾覆系数平均值为 3.16;在纯流作用下,最大作用力平均值为 2985 N,其抗漂移系数平均值为 11.56,抗倾覆系数平均值为 24.22。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 2940 N,其抗漂移安全系数为 1.58,抗倾覆安全系数为 1.63(吴子岳等 2003);投放于浙江台州大陈海域的钢制四方台型鱼礁,在波流共同作用下的最大受力为 24559 N,抗漂移系数平均值为 1.44,抗倾覆系数平均值为 2.23(钟术求等 2006);投放于浙江嵊泗海域的回字型鱼礁,最大受力为 43178 N,抗漂移系数为 1.78,抗倾覆系数为 2.36(许柳雄等 2010)。等边三角型鱼礁在稳定性方面有一定的提高。

与波浪的作用力相比,水流对礁体的作用力比较小,可以忽略。山东渤海海区的风浪,秋、冬两季最大,浪高常有 2.0-6.0 m,而春、夏季的风浪稍小,一般为 0.4-1.2 m(张海青 2008)。乔淑卿等(2010)指出,渤海海域大部分区域泥沙的平均粒径大于 6ϕ ,主要为砂质泥、粉砂和砂质粉砂,因此鱼礁与海底底质之间的摩擦力系数大于试验所得的摩擦力系数。通过研究发现,等边三角型礁体在纯波作用下,在水深 0.5 m、波高为 0.2 m(对应实际水深 15 m,实际波高 6 m)时才会产生明显的晃动;随着鱼礁投放时间的延长,在潮流的作用下,鱼礁的掩埋深度会逐渐增加,因而在一定程度上增加了鱼礁的稳定性。综合各方面因素,该鱼礁能够满足该海域的海况条件,适宜在该海区投放。

本研究在计算和试验中,未能考虑鱼礁在投放后的沉陷,虽然观测了 1 min 内礁体被泥沙掩埋的深度,但并不能与实际海域投放后的礁体掩埋相对应,这是本研究的不足之处。在实际环境中,礁体投放过程中,会遭到沉陷或者掩埋,这将增加礁体的稳定性,但是如果礁体的沉陷深度或掩埋深度过大,将会丧失礁体应有的效应,因此有必要在以后工作中,研究该礁型的沉陷过程,进行礁体下陷过程的模拟试验。

参 考 文 献

王素琴. 1987. 人工鱼礁的受力分析与设计要点. 大连水产学院学报, (1):55-62

王磊. 2007. 人工鱼礁的优化设计和礁区布局的初步研究. 青岛:中国海洋大学硕士研究生学位论文

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2007. 海洋调查规范. 中华人民共和国国家标准 GB/T12763. 8-2007

中村充. 1991. 水产土木学. 东京:工业时事出版社, 462-469

乔淑卿, 石学法, 王国庆, 杨刚, 胡宁静, 刘升发, 刘焱光, 朱爱美, 李朝新. 2010. 渤海地质沉积物粒度特征及输运趋势探讨. 海洋学报, 32(4):139-147

刘健, 许柳雄, 张硕, 黄洪亮. 2011. 人工鱼礁礁体模型阻力系数的实验研究. 中国海洋大学学报, 41(10):35-39

许柳雄, 刘健, 张硕, 章守宇. 2010. 回字型人工鱼礁礁体设计及其稳定性计算. 武汉理工大学学报, 32(12):79-83

吴子岳, 孙满昌, 汤威. 2003. 十字形人工鱼礁礁体的水动力学计算. 海洋水产研究, 24(4):32-35

张海青. 2008. 浅谈山东海区气象海况的特点及海事部门着重加强的对策. 天津航海, (2):60-62

林军, 章守宇. 2006. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究. 海洋渔业, 28(3):257-262

钟术求, 孙满昌, 章守宇, 张硕. 2006. 钢制四方台型人工鱼礁礁体设计及稳定性研究. 海洋渔业, 28(3):234-240

高潮, 毛鸿飞, 余报楚. 2012. 基于 Fluent 对人工鱼礁稳定性的研究. 山西建筑, 38(10):257-259

唐振朝, 陈丕茂, 贾晓平. 2011. 大亚湾不同波浪、水深与坡度条件下车叶型人工鱼礁的安全重量. 水产学报, 35(11):1650-1656

Pickering H, Whitmarsh D. 1997. Artificial reefs and fisheries exploitation; a review of the 'attraction *versus* production' debate, the influence of design and its significance for policy. Fish Res 31(1):39-59



关于 DOI

DOI, 即 Digital Object Identifier(数字对象标识符)的缩写,是全球唯一的数字对象标识名称,一个 DOI 名称一旦赋予给一条电子资源就不会再更改,而成为该资源的永久性的一部分。无论在什么地方,用户都可以链接到 DOI 的相应内容。

DOI 解析示例:

已知 DOI 为:10. 11758/yykxjz. 20140101,可以通过多种解析方式链接到论文:在浏览器中直接解析:[http://dx. doi. org/10. 11758/yykxjz. 20140101](http://dx.doi.org/10.11758/yykxjz.20140101);在中文 DOI 网站([http://www. chinadoi. cn/](http://www.chinadoi.cn/))或国际 DOI 基金会网站([http://www. doi. org/](http://www.doi.org/))解析。

DOI 的作用:

DOI 指向到原始文献 DOI 具有唯一性,保证了在网络环境下对数字化对象的准确提取。通过 DOI 检索,可以快速定位到原始的目标文献。

实现文献数据库的对接 许多二次文献数据库都通过 DOI 技术建立了引文与全文的链接,使用者即可直接点击链接到目标文献的全文。

追踪“参考文献”的全文资源 中文 DOI 系统帮助用户实现了从相关文献或参考文献向全文数据库的链接,简单快捷的追踪到文章的相应内容。