

人工鱼礁礁体与不同粒径底质间最大静摩擦系数的试验研究

刘健¹, 张硕^{2,3,4}, 许柳雄^{2,3,4}, 黄洪亮¹

(1. 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 上海 200090; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 大洋生物资源开发与利用上海市高校重点实验室, 上海 201306; 4. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 通过平面拉动法分别测量了 5 种不同开口比人工鱼礁礁体模型对 5 种不同粒径大小底质间的最大静摩擦系数, 分析了不同粒径底质以及礁体不同开口比的最大静摩擦系数变化规律。试验研究表明: 最大静摩擦系数与底质粒径大小呈强负相关($r=-0.964$, $P<0.01$); 控制底质粒径时, 最大静摩擦系数与礁体质量呈弱负相关($r=-0.265$, $P<0.01$), 与礁体开口比呈弱正相关($r=0.245$, $P<0.01$); 礁体本身的设计属性如开口比是最大静摩擦系数的主要影响因子。对于新设计礁型在进行礁体稳定性校核时, 应根据礁体开口比和实际海域底质泥沙的粒径组成, 选取适当的最大静摩擦系数。

关键词: 人工鱼礁; 摩擦系数; 沉积物; 粒径

中图分类号: S953.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)01-0059-06

人工鱼礁的研究和建设在中国已有近 30a 的历史, 对近海生态环境修复和渔业资源增殖发挥了很好的功效^[1-4]。如何延长鱼礁的生态稳定性, 使鱼礁的生物诱集和增殖效应最大化是人工鱼礁工程建设追求的最重要目标^[5-6]。人工鱼礁投放于相应海域受到波流作用力后发生的失稳现象主要有漂移、翻转及沉陷等, 为保证人工鱼礁工程建设能取得预期效果, 必须对礁体的稳定性进行科学的验算^[7-9]。

礁体与海底间的最大静摩擦系数是校核人工鱼礁是否会出现移位现象的一个重要参数。最大静摩擦系数的确定一般由模型实验获得, 对于新设计的人工鱼礁, 则选取相应的经验数值。刘同渝^[10]等通过弹簧秤拉动法测量了 3 种类型礁体对 3 种底质(泥质、沙质、石质)的摩擦系数。王素琴^[11]列举了 3 种形状礁体对不同底质的摩擦系数, 但没有对测量方法进行讨论。吴子岳^[12]等对连云港海区所投放人工鱼礁进行抗漂移安全性校核计算时, 采用的礁体与海底接触面间的静摩擦系数为 0.5。钟术求^[13]等针对台州海域所投放人工鱼礁进行抗漂移安全性校核时, 礁体与海底接触面间的静摩擦系数取为 0.6。日本学者大島泰雄^[14]给出静摩擦系数范围为 0.5~0.6。

采用最大静摩擦系数的经验数值计算礁体的最大静摩擦力, 没有相关实测数据支撑, 会给稳定性校核计算带来一定误差。对于 1 对摩擦副来说, 只有在给定的材料和确定的工况情况下, 摩擦系数才是

确定值^[15]。因此, 有必要通过试验研究不同类型礁体对不同底质的静摩擦系数。本研究通过平面拉动法进行了 5 种不同开口比礁体模型对饱和含水率下的不同粒径底质的最大静摩擦系数的测定试验, 以期找出礁体设计要素及海洋底质粒径对摩擦系数的影响规律, 获得不同形状礁体对不同底质的最大静摩擦系数, 为今后人工鱼礁礁体设计、制作、投放等提供理论依据和技术保证。

1 材料和方法

1.1 礁体模型及试验装置

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间, 因此本实验模型礁体形状均简化成长方体。平面拉动法试验用模型礁体为钢筋混凝土制, 长方体结构, 底面为正方形, 共 5 个模型如图 1 所示, 礁体模型的几何尺寸和相关参数见表 1。

人工鱼礁礁体与海底泥沙间的最大静摩擦系数的测定依据经典物理学测量最大静摩擦系数时采取

收稿日期: 2010-11-02; 修回日期: 2011-12-21

基金项目: 上海市教委优秀青年基金(0701701); 上海市教委科研创新项目(09YZ272); 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(201003068)

作者简介: 刘健(1985-), 男, 黑龙江泰来人, 硕士, 主要从事人工鱼礁稳定性研究, E-mail: jliu@vip.qq.com; 张硕, 通信作者, 电话: 021-61900314, E-mail: s-zhang@shou.edu.cn

的平面拉动法。平面拉动法实验装置如图 2 所示, 包括一平面承载台、设于平面承载台下底的方形平台座^[16]。平面承载台上台面为海底泥沙层, 即由泥沙构成的承载台面, 厚度为 15 cm。泥沙层上放置待测的鱼礁模型, 平面承载台的一端侧壁设有支架, 支架

上装有滑轮杆组件; 滑轮杆组件包括连接支架的滑轮杆和设于滑轮杆下端的滑轮; 滑轮轮周上嵌有一钢丝线, 钢丝线的一端连接人工鱼礁模型块, 另一端吊挂有一负载桶, 可由实验者将负载称料(细砂或水)缓慢加入到负载桶。

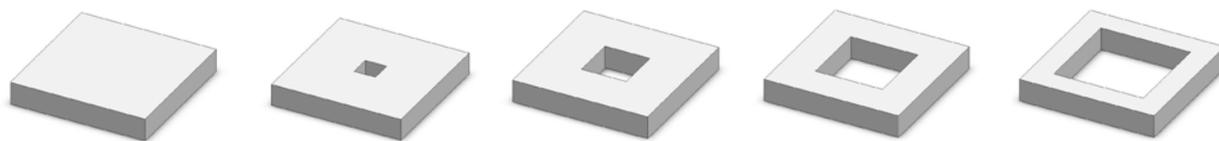


图 1 礁体模型

Fig. 1 The pictures of reef models

表 1 礁体类型与规格

Tab. 1 Type and size of reef models

礁体模型	规格 (cm)	材质	结构 (cm)	质量 (kg)	底面积 (m ²)	底开口面积 (m ²)	开口比
1号			实心	10.7		0	0.00
2号			孔边长: 5.0	9.6		0.0025	0.03
3号	30×30×5	钢筋混凝土	孔边长: 10.0	8.9	0.09	0.0100	0.11
4号			孔边长: 15.0	7.8		0.0225	0.25
5号			孔边长: 20.0	5.9		0.0400	0.44

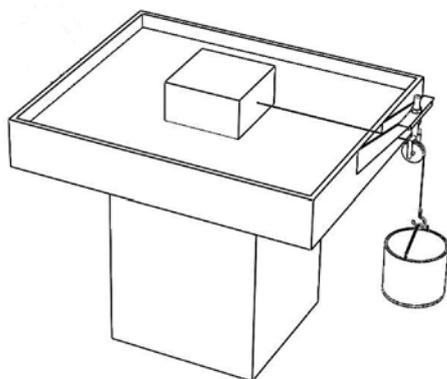


图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental device

1.2 底质样本

试验用底质泥沙取自建筑用砂土, 参照国标 GB/T 12763.8-2007 等比值粒级分类表的规范, 分别用 63、200、500、2 000 μm 孔径的分隔网筛分选样品, 筛选出 5 种粒径等级的泥沙颗粒: 砾石(中值粒径>2 mm)、粗砂(0.5~2 mm)、中砂(0.2~0.5 mm)、细砂(0.063~0.2 mm)、粉砂黏土(<0.063 mm)。在对某种粒径泥沙进行试验前, 将其浸没在水中, 使其具有

最大含水率。

1.3 试验步骤

(1)测量试验中所选用的钢丝线对滑轮的机械效率 η ; (2)通过水平尺检测泥沙层表面的水平度, 将待测的礁体模型轻放在泥沙层表面; (3)通过滴漏装置向负载桶中均匀缓慢地注入清水(或细砂), 使得负载桶中质量均匀缓慢地增加, 均匀地改变人工鱼礁礁体所受的拉力, 待观测到人工鱼礁礁体有滑动倾向时, 立即停止加载, 测量此时负载桶的质量 F 的数值; (4)5 次测量取平均值, 求得负载桶的重量 F 的平均值 \bar{F} ; (5)在礁体模型上分别额外加载 2、3、5、7、9 kg 重物后, 重复步骤 2~4; (6)根据最大静摩擦系数 μ 与负载桶重量的平均值 \bar{F} 及人工鱼礁礁体自重 G 之间的公式 $\mu = \bar{F} \cdot \eta / G$, 即可以求得该型号礁体对一种粒径大小的底质泥沙间的最大静摩擦系数 μ_s 。

1.4 数据处理与分析

数据统计分析和图表制作分别采用 SPSS 17.0 和 Excel 2003 软件处理。对试验组数据的相关性检验采用主成分分析及偏相关分析的方法, $P < 0.05$ 为显著性水平, $P < 0.01$ 为极显著水平。

2 结果与分析

2.1 不同底质粒径下礁体的最大静摩擦系数

将同种底质粒径下各型号礁体(取相同加载质量)的最大摩擦系数取平均值,如图3所示。粒径范围为小于0.063 mm(粉砂黏土)时,各礁体最大摩擦系数平均值为0.89;粒径范围在0.063~0.2 mm之间(细砂)时,各礁体最大摩擦系数平均值为0.69;粒径范围在0.2~0.5 mm(中砂)时,各礁体最大摩擦系数平均值为0.64;粒径范围在0.5~2 mm(粗砂)时,各礁体最大摩擦系数平均值为0.60;粒径范围为大于0.2 mm(砾石)时,各礁体最大摩擦系数平均值为0.50。

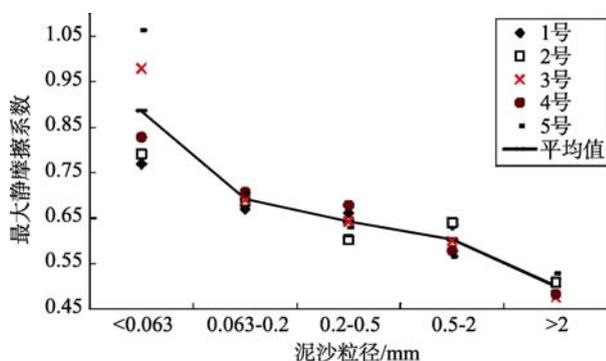


图3 不同粒径下礁体最大静摩擦系数

Fig. 3 The maximum static friction coefficient of the reefs with different diameter of sediment

不同底质粒径下礁体最大静摩擦系数范围在0.45~0.85。线性相关分析结果最大静摩擦系数与粒径大小呈强负相关(秩相关系数 $r=-0.964$, $P<0.01$)

2.2 不同加载时礁体的最大静摩擦系数

对于同型号礁体,加载不同的质量时,礁体的最大静摩擦系数如图4所示。

不同粒径下,1号~5号礁体在加载质量变化时,最大静摩擦系数变化趋于平缓,波动范围较小。一般在5%以内。仅对于底质粒径为粉砂黏土(<0.063 mm)时的3号、5号礁体,底质粒径为中砂(0.2~0.5 mm)时的4号礁体和底质粒径为砾石(中值粒径>2 mm)时的5号礁体,随加载质量的增加,最大静摩擦系数变化幅度较大(约8%)且呈现下降趋势。

控制粒径大小时的偏相关分析结果显示,最大静摩擦系数与加载重量呈弱负相关($r=-0.265$, $P<0.01$),与开口比呈弱正相关($r=0.245$, $P<0.01$)。

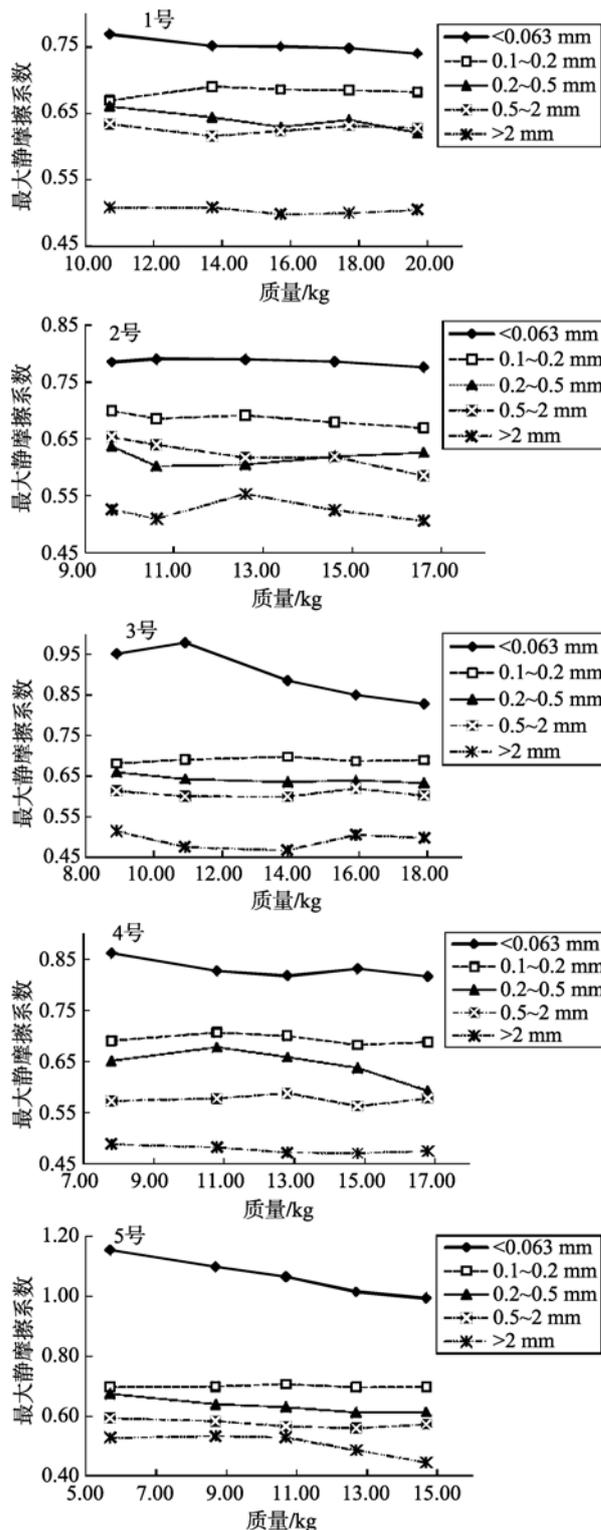


图4 不同加载时礁体最大静摩擦系数

Fig. 4 The maximum static friction coefficient of the reefs with different load

2.3 礁体开口比对最大静摩擦系数的影响

对于不同粒径下,当礁体开口比不同时,礁体

的最大静摩擦系数如图 5 所示。底质粒径大小为细砂、中砂、粗砂、砾石时，礁体在开口比变化时，最大静摩擦系数变化趋于平缓，波动范围较小，一般在 5%以内。当底质粒径为粉砂黏土时，礁体随开口比的增大，最大静摩擦系数变化幅度较大(约 15%)且呈波动上升趋势。

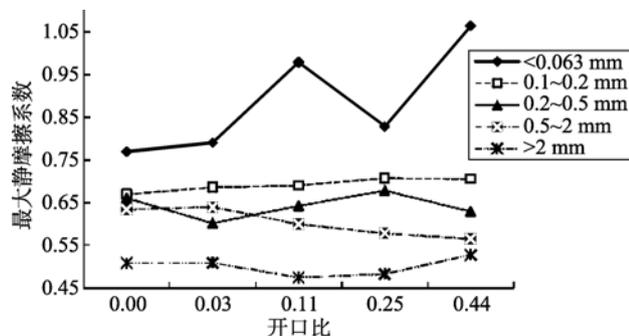


图 5 不同开口比礁体最大静摩擦系数

Fig. 5 The maximum static friction coefficient of the reefs with different opening rate

3 讨论

3.1 礁体最大静摩擦系数的影响因子

以礁体自重、开口比、开口边长、开口周长、接触面积、压强、粒径大小为变量，运用主成分分析法对礁体最大静摩擦系数进行评价。基于 SPSS 软件包生成的总方差解释，从初始解中提取 3 个综合因子，总贡献率达到 98.5%。第一主因子贡献率为 60.4%，占主要载荷的是礁体开口比、开口边长、开口周长及接触面积。第二主因子贡献率为 23.8%，占有较大载荷的是加载质量、压强。第三主因子贡献率为 14.3%，占有较大载荷的是粒径大小。第一、第二主因子累计贡献率达到 84.2%，描述的是礁体自身的特征信息，即礁体设计完成时就已经固定的属性。第三主因子描述的是投放海域底质的特征信息。

泥沙粒径小时，增加了泥沙的密实度，进而增加了实表面接触面积，导致摩擦系数偏大；当泥沙粒径大时，正好相反，泥沙间密实度降低，接触面积减小，导致摩擦系数偏小。这与王玉锁等^[17]进行砂土质隧道围岩内摩擦系数的试验研究得出的结论相近，即总体上相对密实度越大，砂土内摩擦系数越大。汤连生^[18]等也认为土体的颗粒组成会影响土体的外摩擦，这是由于土中粒间吸力(尤其是可变结构吸力)发挥了重要作用。

当底质粒径为粉砂黏土时，3 号、4 号、5 号礁体随加载质量的增加，最大静摩擦系数有下降趋势。与许多金属摩擦副在重载条件下的摩擦系数随载荷增加反而增加的原因不同^[15]，汤连生^[18]等在进行土体内摩擦及摩擦强度试验研究中，也发现无论是淤泥质黏土，还是粉砂，其外摩擦系数随垂直荷载的增加而逐渐减小，认为这是由于在压力较大的情况下，水膜黏结力大小有限，所能提供的摩擦力也相当有限，不占主导地位所致。

当底质粒径为粉砂黏土时，礁体随开口比的增大，最大静摩擦系数有上升趋势。当底质粒径为粉砂黏土时，底质密实度低，较“松软”，礁体更容易“陷入”底质中，下陷后随着开口比的增大不仅各侧面接触面积增大会产生摩擦作用，下陷部前端接触面积也会相应增大对礁体产生阻力，这些都直接导致了最大静摩擦系数的增加。另外，本实验中泥沙层厚度为 15 cm，而观测到的礁体模型下陷幅度最大值仅为 0.5 cm 不影响礁体与泥沙间的接触，因此在本实验中认为泥沙层厚度对摩擦系数没有影响。

同时还应注意，改变开口形状如将方形孔设置在中间和 4 个相应小方形孔设置于四周，虽然开口比相同，但对最大静摩擦系数的影响还没有定性研究。因此有必要进一步进行开口方式对礁体最大静摩擦系数影响的试验，以期定量的给出不同开口比时，礁体的最大静摩擦系数变化情况。

3.2 礁体最大静摩擦系数的确定

在实际人工鱼礁礁体设计过程中，应根据实际海域底质泥沙的粒径组成，选取适当的最大静摩擦系数，如表 2 所示。其中校核安全系数为实验推荐值与原经验取值的比值，表征原经验取值的可靠性。

表 2 礁体最大静摩擦系数的选取

Tab. 2 The determination of maximum static friction coefficient

礁体类型	原经验取值	实验推荐值	安全系数
钢制四方台型	0.6	0.8	1.3
十字型	0.5	1	2
新设计礁型	0.4	0.45	1.1

针对实际投放于浙江台州海域的钢制四方台型人工鱼礁^[13]，其底板规格及开口比近似于本试验中 4 号礁体，底质类型为粉砂质黏土。由于底质粒径为粉砂黏土时 4 号礁体的最大静摩擦系数最低值为 0.8，进行稳定性校核时选取最大静摩擦系数为 0.6，因此

校核安全系数为 1.3, 表明取值合理。针对实际投放于连云港海州湾海域的十字型人工鱼礁^[12], 其规格近似于本试验中 5 号, 但其开口比约为 0.58, 略大于 5 号礁体, 底质表层为黏土层。由于底质粒径为粉砂黏土时 5 号礁体的最大静摩擦系数为 1.0, 进行稳定性校核时选取最大静摩擦系数为 0.5, 考虑到开口比增大时, 最大静摩擦系数呈上升趋势, 因此校核安全系数近似为 2, 表明取值合理。而且根据试验中最大静摩擦系数的最小结果为 0.45, 在进行稳定性校核时最大静摩擦系数取 0.4 是合理的, 校核安全系数为 1.1。

增加礁体的自重虽然会导致礁体与海底间的最大静摩擦系数下降, 却可以有效增加礁体与海底间的最大静摩擦力。但礁体的自重由于受到材料价格、人工制作、投放设备等因素影响, 在礁体设计完成时已经确定, 不能任意额外加载。

因此, 在设计礁体形状时, 希望通过合理的礁体设计, 有效地增大礁体与海底间的最大静摩擦系数。根据投放海域的不同底质粒径大小, 从而通过调整礁体自重及开口比来增加礁体的最大静摩擦系数。底质泥沙密实度及软硬程度(含水率)不同时对人工鱼礁礁体最大静摩擦系数的影响是今后研究的工作重点。

致谢: 孙习武、杨柳同学参与了试验器材制备, 并协助进行试验, 谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 李文涛, 张秀梅. 关于人工鱼礁礁址选择的探讨[J]. 现代渔业信息, 2003, 18(5): 22-25.
- [2] 张剑诚, 于金海, 王吉桥. 人工鱼礁建设研究现状[J]. 水产科学, 2004, 23(11): 28-30.
- [3] 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.
- [4] 张硕. 人工鱼礁生态效应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2006. 5-16.
- [5] 刘同渝. 国内外人工鱼礁建设状况[J]. 渔业现代化, 2003, 2: 36-37.
- [6] Pickering H, Whitmarsh D. Artificial reefs and fisheries exploitation: a review of the 'attraction versus production' debate, the influence of design and its significance for policy[J]. Fisheries Research, 1997, 31:39-59.
- [7] 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): 257-262.
- [8] 李冠成. 人工鱼礁工程中几个技术问题探讨[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 107-111.
- [9] 陶峰, 贾晓平, 陈丕茂, 等. 人工鱼礁礁体设计的研究进展[J]. 南方水产, 2008, 4(3): 64-69.
- [10] 刘同渝, 陈勤儿, 黄汝堪, 等. 人工鱼礁论文报告集[C]// 广州: 全国人工鱼礁技术协作组, 1987: 16-35.
- [11] 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, 7: 55-62.
- [12] 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, 24(4): 32-35.
- [13] 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.
- [14] 大島泰雄, 田村德一郎. 水産土木[M]. 东京: 日本農業土木学会水産土木研究部, 1980.
- [15] Bhushan B. 摩擦学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 114-118.
- [16] 刘健, 张硕, 章守宇, 等. 人工鱼礁礁体与海底泥沙间最大静摩擦系数的测量装置[P]. 中国专利: 200920074938.2, 2010-05-12.
- [17] 王玉锁, 王明年, 陈炜韬, 等. 砂土质隧道围岩内摩擦系数的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 741-746.
- [18] 汤连生, 张鹏程, 王洋, 等. 土体内外摩擦及摩擦强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 974-979.

Analysis of the maximum static friction coefficient of artificial reefs in different diameter of sediment

LIU Jian¹, ZHANG Shuo^{2,3,4}, XU Liu-xiong^{2,3,4}, HUANG Hong-liang¹

(1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. The Key Laboratory of Oceanic Fisheries Resources Exploitation of Shanghai Education Commission, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Received: Nov., 2, 2010

Key words: artificial reef; friction coefficient; sediments; grain-size

Abstract: In the examination of the artificial reefs' stability the coefficient of maximum static friction between the reef and the sediment in seabed is a basic and important parameter, the value of which is commonly fixed from previous experience. Based on the method of horizontal drag, the max static friction coefficient between 5 types of artificial model reefs with different opening rate and 5 different sediments are examined. Through a series of experiment, the relationship between different grain-size of sediments and different opening rate is analyzed in this paper. The results show that (1) the max static friction coefficient and the grain-size of sediments are in a strong negative correlation ($r=-0.964$, $P<0.01$); (2) when controlling the grain-size of sediments, the max static friction coefficient is negatively correlated with the weight ($r=-0.265$, $P<0.01$) and positively correlated with the opening rate of reefs ($r=0.245$, $P<0.01$); (3) the primary factors influencing the max static friction coefficient are the property of reef itself, such as the opening rate of reefs. During the stability estimation of the new designed artificial reefs, the designer can select a proper max static friction coefficient based on both the opening rate and the survey of actual ocean area's composition of sediments.

(本文编辑:谭雪静)