

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2018.01.010

人工鱼礁最大静摩擦系数影响因素的试验研究

丁玲^{1,2}, 唐振朝², 张钟哲¹

(1. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116032; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 人工鱼礁与海底间的最大静摩擦系数是人工鱼礁安全校核所需的重要参数, 对其影响因素的分析可作为人工鱼礁设计优化的科学依据。该研究共设计了 6 种底面开口比不同的人工鱼礁模型, 对 5 种载荷和 5 种底质粒径条件下礁体模型的最大静摩擦系数进行了 150 组平面拉动试验, 分析了最大静摩擦系数随底质泥沙粒径、底质含水率、加载质量、礁体底面开口比及开口位置的变化规律。研究结果表明: 1) 含水率为饱和条件下, 底质为砾石和砂质时最大静摩擦系数随底质粒径的减小而增大, 底质为粉砂黏土时最大静摩擦系数则明显变小; 2) 底质为粉砂黏土时最大静摩擦系数随含水率的增加先增大后减小, 含水率为 35% 时最大静摩擦系数达到最大值; 3) 各底质条件下最大静摩擦系数均随加载质量的增加而减小, 随礁体底面开口比的增大而增大, 且与底面开口位置无关。

关键词: 人工鱼礁; 最大静摩擦系数; 物理模型试验; 泥沙粒径; 含水率

中图分类号: S 953.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2018)01-0077-08

Study on factors affecting maximum static friction coefficient of artificial reefs

DING Ling^{1,2}, TANG Zhenzhao², ZHANG Zhongzhe¹

(1. School of Marine Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. Key Laboratory of Marine Ranching Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Maximum static friction coefficient between artificial reef and seabed is an important parameter for safety check of artificial reefs. The analysis of the influencing factors can be used as the scientific basis for optimization of artificial reef design. In this study, we designed six kinds of artificial reef models, and measured the maximum static friction coefficient of the reef models with five kinds of additional loading quality and sediment size by 150 groups of experiments, so as to analyze the changes of maximum static friction coefficient caused by given sediment particle size, sediment moisture content, loading quality, reef bottom opening ratio and opening position. The results show that: 1) At water saturation, the maximum static friction coefficient increased with decreasing sediment size except when the sediment was silt. The friction force on silt was smaller obviously due to soft flowing characteristic of ground; 2) When the sediment was silt, the maximum static friction coefficient increased obviously with increasing water

收稿日期: 2017-08-17; 修回日期: 2017-09-28

资助项目: 天津市农业科技成果转化与推广项目 (201304150); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2016TS16); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2016HY-ZD01); 深圳市科技计划项目 (JSGG20141015154342147)

作者简介: 丁玲 (1992—), 女, 硕士研究生, 从事人工鱼礁数值模拟研究。E-mail: 2269915489@qq.com

通信作者: 唐振朝 (1978—), 男, 博士, 副研究员, 从事人工鱼礁数值模拟研究。E-mail: tangzhenzhao@scafsri.ac.cn

content first, but decreased afterwards. When the water content was 35%, the maximum static friction coefficient reached the maximum value; 3) The maximum static friction coefficient in all the sediments declined with increasing loading quality. The ratio of bottom opening was positively correlated with static friction force, while the position of bottom opening did not affect the maximum static friction coefficient.

Key words: artificial reef; maximum static friction coefficient; physical model experiment; sediment particle size; water content

人工鱼礁是人为在海中设置的构造物,为鱼类等生物提供繁殖、觅食和躲避敌害的场所,在渔业资源的增殖和海洋生态环境的修复等方面发挥了很好的作用,取得了良好的效果^[1-6]。在人工鱼礁的建设过程中,礁区的科学选址和礁体的科学设计是保证人工鱼礁发挥修复和调控作用的首要前提,特别是由于人工鱼礁投放后会受到水流和波浪的冲击,如冲击力过大,礁体可能会发生翻滚、倾覆甚至漂移导致其失效,因此鱼礁设计时的安全性评估是必需的。其中人工鱼礁与海底间的最大静摩擦系数是进行人工鱼礁安全性评估所需要的重要参数^[7-11]。

在人工鱼礁稳定性的现有研究中,最大静摩擦系数大多采用的是经验值^[12-15]。但经验值并不适用于所有的工况,大量研究表明摩擦系数并不是固定的材料属性,会随外部负载、接触材料特性等条件而发生显著变化。在一个摩擦系统中,只有当材料和工况都确定时,相接触物体间的摩擦系数才能确定^[16-19]。因此应首先通过物理模型试验来确定常见材料和工况条件下的最大静摩擦系数,并在此基础上综合分析各因素对最大静摩擦系数的影响规律,进而优化人工鱼礁礁体设计以提高其安全性。近年来,研究人员已逐步开始对人工鱼礁的最大静摩擦系数进行相关的物理模型试验,并在试验中引入了底质粒径、礁体质量等不同的影响因子,以更准确地获得人工鱼礁与海底间的最大静摩擦系数。刘同渝等^[20]测量了人工鱼礁在泥质、沙质和石质底质上的最大静摩擦系数,为鱼礁在不同底质上的最大静摩擦系数经验值的选择提供了参考;刘健等^[21]研究了底质粒径、礁体质量和开口比大小对最大静摩擦系数的影响规律,并对钢制四方台型鱼礁和十字型

鱼礁最大静摩擦系数取值的合理性进行验证;郑延璇等^[22]测量了三角型人工鱼礁在细砾和中砂底质上的最大静摩擦系数,用于该礁型的稳定性校核计算。

已有研究表明,进行人工鱼礁最大静摩擦系数物理模型试验时,引入的影响因子越全面,所得到的结果越准确。人工鱼礁与海洋底质构成的摩擦体系中的主要可变因子包括底质特性(底质粒径、含水率)和礁体特征(质量、底面开口比、开口位置),由于在以往的研究中尚未见到关于底质含水率和礁体开口位置对人工鱼礁最大静摩擦系数影响的分析,为了更科学地确定人工鱼礁最大静摩擦系数,文章通过平面拉动法测量研究了6种不同礁型在5种不同粒径(砾石、粗砂、中砂、细砂、粉砂黏土)底质上的最大静摩擦系数,分析了礁体与海底间最大静摩擦系数的5种影响因素(底质粒径、含水率、加载质量、底面开口比、开口位置)及变化规律,以期为人鱼礁的设计和人工鱼礁区的选址等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 礁体模型

由于人工鱼礁与海底间的摩擦作用出现在礁体底面与海底泥沙表面间,因此本试验将模型礁体的形状简化为人工鱼礁底面形状。即模型礁体为钢筋混凝土制的长方体结构,底面为正方形^[21]。试验中所采用的6个礁体模型见图1,模型的几何尺寸和参数见表1。

1.2 试验装置

本试验采用平面拉动法测量最大静摩擦系数,试验装置见图2^[23],包括一平面承载台、承载台上

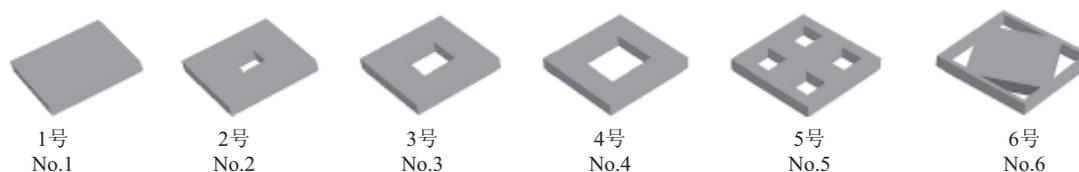


图1 礁体模型

Fig.1 Picture of reef models

表1 礁体类型与规格

Tab.1 Type and size of reef models

礁体模型 reef model	规格/cm size	材质 material	孔边长/cm hole length	质量/kg quality	底面积/m ² bottom area	开口面积/m ² hole area	开口比 opening ratio	开口位置 opening position
1号 No.1	40×40×5	钢筋混凝土	0	21.86	0.16	0	0	无
2号 No.2			10	21.30		0.010 0	0.06	中心
3号 No.3			15	19.67		0.022 5	0.14	中心
4号 No.4	40×40×5	钢筋混凝土	20	17.50	0.16	0.040 0	0.25	中心
5号 No.5			10	17.50		0.040 0	0.25	1/4中心
6号 No.6			20×10	17.50		0.040 0	0.25	角部

放置的为不透水有机玻璃盒(图3)。盒内是泥沙和水的混合物,泥沙面高为18.5 cm,水面高为19 cm。礁体模型放置在泥沙层上,平面承载台的一端设有支架,支架上装有滑轮,负载桶和礁体模型之间通过嵌在滑轮轮轴上的钢丝绳连接,试验过程中向负载桶内缓慢地加入细砂,至礁体模型有滑动倾向时测量负载桶的质量。

1.3 试验方案

本试验共设计了6种礁型,在5种底质和5种配重的条件下,开展了150组试验。试验前首先采用63 μm、200 μm、500 μm和2 000 μm孔径的分隔网筛分选试验底质泥沙,筛选出5种不同粒径的颗粒:砾石(中值粒径 $d > 2$ mm)、粗砂($0.5 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$)、中砂($0.2 \text{ mm} < d < 0.5 \text{ mm}$)、细砂($0.063 \text{ mm} < d < 0.2 \text{ mm}$)、粉砂黏土($d < 0.063 \text{ mm}$),并向有机玻璃盒中注入淡水至水面高出泥沙面0.5 cm,使泥沙空隙间充满水。

每组试验均采用以下的步骤测量礁体与底质间

的最大静摩擦系数:1)测量礁体模型浸水后的质量 G ;2)将礁体模型轻放在保持水平状态的泥沙层表面,并待其达到静平衡状态;3)用钢丝绳水平连接负载桶和礁体模型;4)通过滴漏装置向负载桶内均匀缓慢地加入细砂,使拉动礁体的力均匀缓慢地增加,待观测到礁体有滑动倾向时,立即停止加载并测量负载桶的质量 F ;5)重复测量5次 F ,取其平均值 \bar{F} ;6)在礁体模型上加载2 kg、4 kg、6 kg和8 kg的配重,重复步骤1~5;7)测量试验中所选用的钢丝绳和滑轮组的机械效率 η 。完成所有试验步骤后,根据最大静摩擦系数的计算公式 $\mu = \bar{F} \cdot \eta / G$,即可求得该礁体与各组不同粒径底质间的最大静摩擦系数 μ 。由于本试验中实心礁体的浮力为7.84 N,仅为礁体自重的3%,因此在结果分析中未考虑浮力的作用。

本文在第一组试验结果的基础上,为进一步研究含水率对粉砂黏土底质上礁体最大静摩擦系数的影响,配制了7种不同含水率的粉砂黏土土样。配

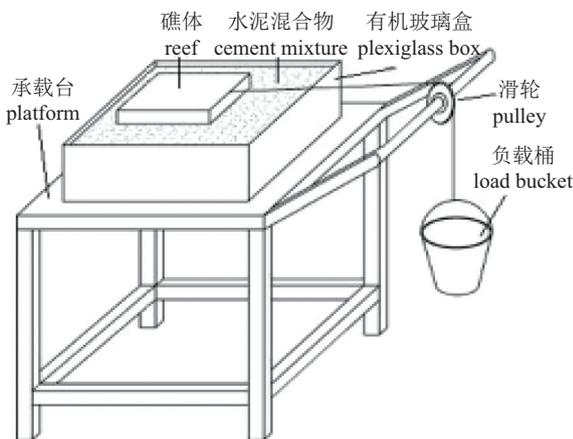


图2 试验装置

Fig.2 Experimental device

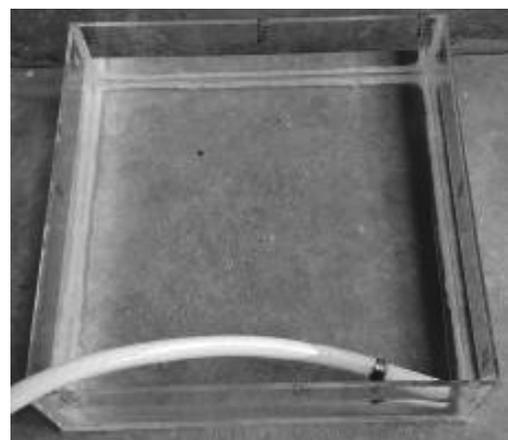


图3 有机玻璃盒实物图

Fig.3 Picture of plexiglass box

制过程中首先称取 8 kg 烘干后的粉砂黏土土样，加入 1.6 kg 的淡水充分搅拌混合，配制含水率为 20% 的粉砂黏土土样用于试验，在每次试验的

基础上分别加入 0.4 kg 的淡水，依次配制成 25%、30%、35%、40%、45% 和 50% 含水率的粉砂黏土土样用于试验 (图 4)。

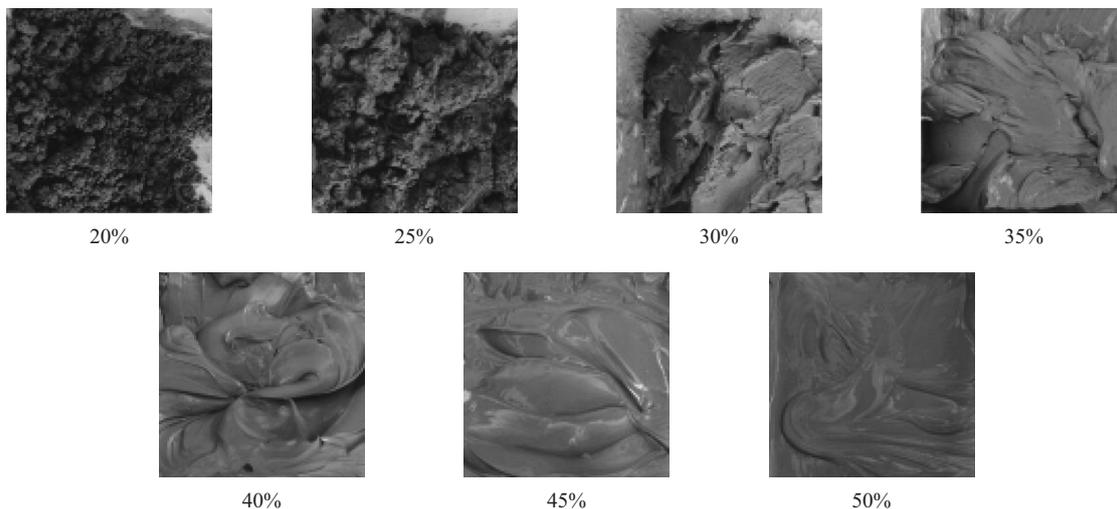


图4 不同含水率的土样

Fig.4 Soil samples with different water contents

由于含水率较大时土样为流塑状态，压缩性大，承载力小，礁体放置于其表面极易沉陷，所以选用质量为 0.4 kg 的圆形实心礁体按照上述的步骤进行试验 (图 5)。

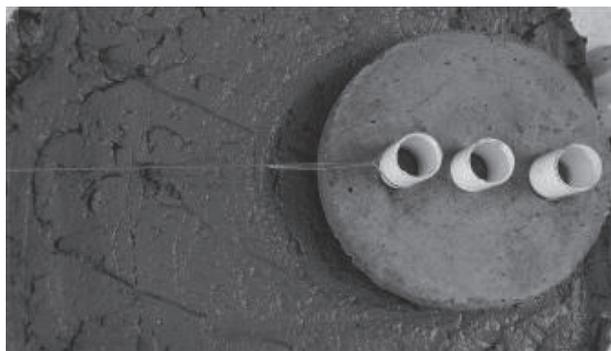


图5 圆形实心礁体模型

Fig.5 Round solid reef model

1.4 数据处理

根据试验数据，采用 Origin 9.1 软件做出曲线图并分析各因素之间的关系，采用专业统计软件 SPSS 19.0 对最大静摩擦系数与泥沙粒径、加载质量、开口比及开口位置进行相关性分析^[24]，其中 $P < 0.01$ 为极显著性水平， $P < 0.05$ 为显著性水平， $P > 0.05$ 为无显著性水平。

2 结果与讨论

2.1 底质泥沙粒径与最大静摩擦系数的关系

本组试验中礁体加载质量均为 0，各底质均处于饱和含水率的状态，每种模型进行多次试验后，取平均值为最大静摩擦系数。当底质分别为粉砂黏土、细砂、中砂、粗砂和砾石时，各礁体相对应的最大静摩擦系数为 0.10、0.61、0.60、0.58 和 0.53 (图 6)。底质粒径大于 0.063 mm 时最大静摩擦系数随底质粒径增大而减小。

进一步对细砂、中砂、粗砂和砾石共 4 种底质

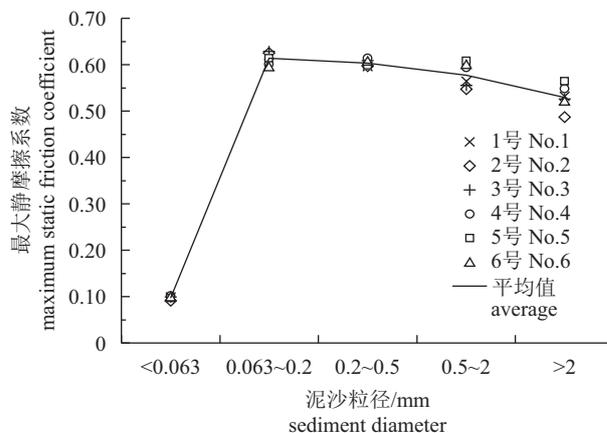


图6 礁体最大静摩擦系数与泥沙粒径的关系曲线

Fig.6 Relationship between maximum static friction coefficient and diameter of sediment

条件下最大静摩擦系数与泥沙粒径的相关性进行分析,得到相关系数为 $R=-0.858^{**}$,表明在0.01水平检验下(双侧)最大静摩擦系数与泥沙粒径显著负相关。本试验结果与已有的研究一致^[20-22],这主要是因为最大静摩擦系数与实际接触面积成正比,随着泥沙粒径的减小,泥沙的密实度增大,进而增加了泥沙与礁体的实际接触面积,最大静摩擦系数也随之增大^[25]。但当底质为粉砂黏土时,最大静摩擦系数大大减小,与刘健等^[21]测量的数值存在差异,其主要原因是粉砂黏土中细粒含量和细粒含水率对最大静摩擦系数的影响很大,当细粒含量大并且含水较多时,细粒处于流塑状态,在挤压过程中起到润滑作用,从而降低最大静摩擦系数^[26-28]。因此在人工鱼礁区选址时,应尽量选择海床表层为细砂或粗砂的海域,避免选择海床表层为厚粉砂黏土层的海域,以确保人工鱼礁达到理想的养护增殖效果。

2.2 含水率与粉砂黏土底质上礁体的最大静摩擦系数的关系

由于第一组试验的结果表明,含水率对粉砂黏土底质条件下的人工鱼礁最大静摩擦系数有明显影响,为进一步研究含水率的影响规律,本组试验在7种不同含水率的粉砂黏土底质上测量得出最大静摩擦系数与含水率的关系见图7。

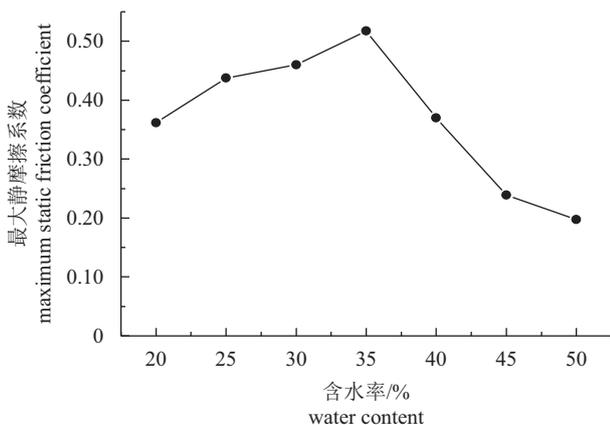


图7 粉砂黏土底质上最大静摩擦系数与含水率的关系曲线

Fig.7 Relationship between maximum static friction coefficient and water content on silty clay

试验结果显示,礁体与粉砂黏土底质间的最大静摩擦系数随含水率的增加而增加,当含水率增至35%时最大静摩擦系数达到最大值,此后,随着含水率的继续增大,最大静摩擦系数又迅速减

小(图7)。出现这种变化特征的主要原因是,在含水率由小变大的过程中,黏土中越来越多的弱结合水逐渐吸附在强结合水外围,增加了土粒外围结合水的分子数量,加大了土粒间的黏聚力,增加了礁体与泥沙间的外摩擦系数。但当含水率超过一定值时,黏土中的弱结合水形成较厚的结合水膜,增大了土粒间的距离,导致黏聚力减弱。同时,过量的水还起到润滑作用,使外摩擦系数减小^[29-30]。本组试验表明,当建礁海域底质表层为粉砂黏土时,底质含水率是影响人工鱼礁最大静摩擦系数的重要因素,因此在开展人工鱼礁区选址调查时,不仅应对底质粒径进行采样分析,还需分析底质含水率,并结合含水率对人工鱼礁的稳定性进行校核。

2.3 加载质量与最大静摩擦系数的关系

本组试验设计了5组加载质量条件,对各底质条件下礁体受到不同载荷时的最大静摩擦系数进行了测量。当底质为砂质、砾石和粉砂黏土时,摩擦系数均随垂直载荷的增加而逐渐减小(图8)。其中1号~3号礁体在各底质上的最大静摩擦系数随加载质量增加而下降的趋势较明显,变化幅度为4%~7%;4号~6号礁体在细砂和粉砂黏土底质上随加载质量变化时,最大静摩擦系数变化趋势平缓,变化幅度小于3%;5号和6号礁体在粗砂底质上最大静摩擦系数随加载质量增加而下降的幅度达到8%。

试验发现最大静摩擦系数随着法向载荷质量的增加而逐渐减小,本结果与以往研究结果一致^[31-33]。主要原因是当载荷增加时,泥沙密实度增大进而导致真实接触面积增大,但真实接触面积的增幅小于载荷的增幅,且润滑条件得到改善,多种因素最终导致摩擦系数减小。此外,较大的压力也会限制前文所提到的黏聚力,减小了摩擦力^[29]。尽管研究表明最大静摩擦系数与加载质量呈负相关关系,且自重过大容易造成礁体沉降,但设计中根据投放礁体的海域底质特点,可通过力学分析确定礁体的最优设计质量,既避免严重沉降,又增加礁体与底质间的最大静摩擦力,使礁体投放在海底后更加稳定。

2.4 礁体开口比与最大静摩擦系数的关系

礁体开口比是礁体底面开口面积与底面积之比,是一个礁体底面与海床接触面积的表征参数。通常来说,开口比越大的礁体越容易下陷,礁体所受的摩擦阻力就越大。本组试验测量比较了开口比分别为0.00(1号礁)、0.06(2号礁)、0.14(3号礁)、0.25(4号礁)的4种礁型在5种粒径底质上的最大

静摩擦系数(图9),以加载质量为0 kg和2 kg为例,当底质为中砂、粗砂、砾石时,随着开口比的增大,最大静摩擦系数有相对明显的增加趋势;而当底质为细砂和粉砂黏土时,最大静摩擦系数的变化趋势不明显。

不同开口比的礁体其质量也不同,因此试验所得最大静摩擦系数的变化趋势是受到加载质量和开口比2种因素的影响。为进一步分析开口比的变化对最大静摩擦系数的影响,需控制加载质量,对开

口比进行偏相关性分析(表2)。最大静摩擦系数与加载质量是显著负相关关系,与开口比是显著正相关关系,且加载质量对最大静摩擦系数的影响程度比开口比要大,其主要原因是当礁体质量一定时,开口比越大,礁体底部单位面积上的受力越大,底部泥沙密实度随之增大最后导致摩擦系数增大。目前对人工鱼礁底面开口比的设计通常以防止礁体沉降为主,本试验结果揭示了开口比的优化可提升人工鱼礁的防滑移能力,因此在控制礁体沉降之外适

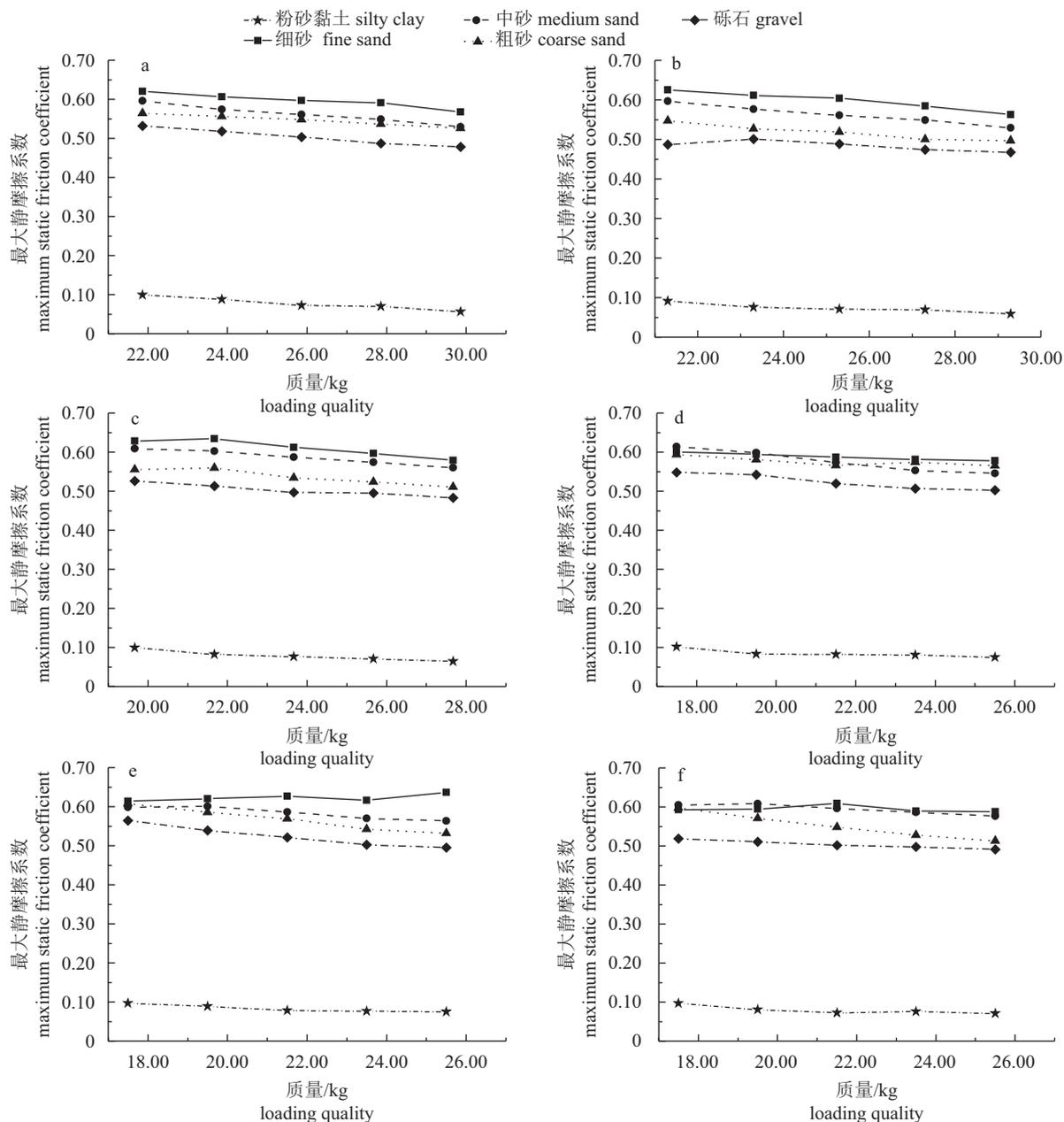


图8 礁体最大静摩擦系数与加载质量的关系曲线

a. 1号礁体; b. 2号礁体; c. 3号礁体; d. 4号礁体; e. 5号礁体; f. 6号礁体

Fig.8 Relationship between maximum static friction coefficient and loading quality

a. No.1 reef; b. No.2 reef; c. No.3 reef; d. No.4 reef; e. No.5 reef; f. No.6 reef

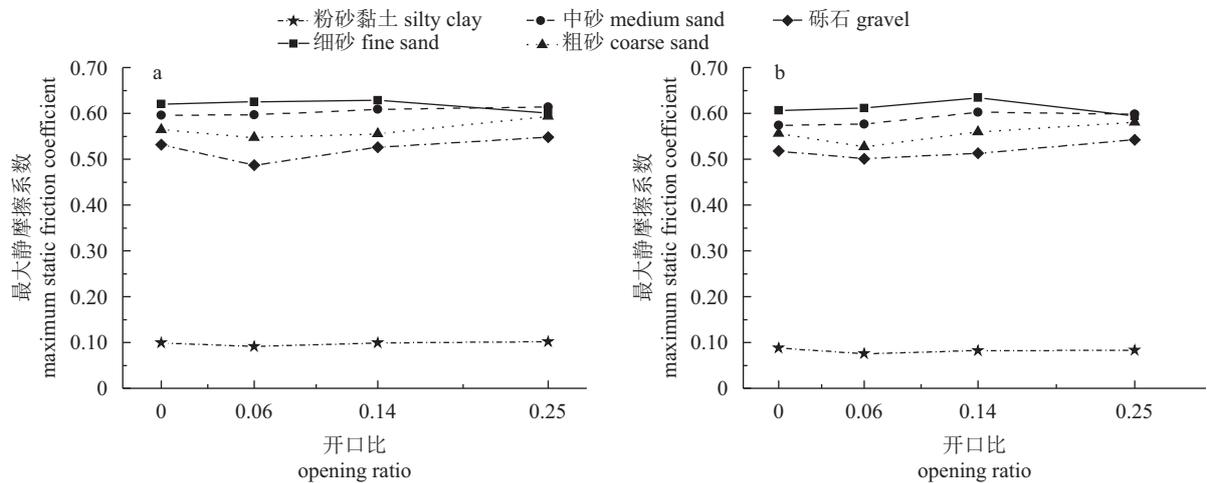


图9 礁体最大静摩擦系数与开口比的关系曲线

a. 加载 0 kg; b. 加载 2 kg

Fig.9 Relationship between maximum static friction coefficient and opening rate

a. loading 0 kg; b. loading 2 kg

表2 偏相关分析系数

Tab.2 Coefficients of partial correlation analysis

	粉砂黏土 silty clay	细砂 fine sand	中砂 medium sand	粗砂 coarse sand	砾石 gravel
加载质量 loading quality	$R=-0.919$ $P=0$	$R=-0.858$ $P=0$	$R=-0.937$ $P=0$	$R=-0.664$ $P=0.002$	$R=-0.798$ $P=0$
开口比 opening ratio	$R=0.573$ $P=0.01$	$R=-0.204$ $P=0.402$	$R=0.653$ $P=0.002$	$R=0.651$ $P=0.003$	$R=0.656$ $P=0.002$

注: R . 相关系数; P . 不相关概率

Note: R . correlation coefficient; P . uncorrelated probability

当增加人工鱼礁的底部开口比, 既能增强人工鱼礁的稳定性, 又能减少其制作成本。

2.5 礁体开口位置与最大静摩擦系数的关系

由于礁体底面的设计各有不同, 因此有必要对开口面积相同, 但开口位置不同的礁体进行不同底质条件下的静摩擦试验。以 2 kg 加载质量为例, 当开口面积一定时, 最大静摩擦系数几乎不随开口位置的变化而变化 (图 10)。通过控制底质泥沙粒径, 对开口位置进行单因素方差分析, 得到结果为 $P=0.996>0.05$, 说明人工鱼礁底面的开口位置对最大静摩擦系数的变化无显著性影响。因此, 在开口比的设计上应遵循以下原则: 1) 开口比例适中, 既具有一定的防沉降能力, 又可适当增大最大静摩擦力; 2) 采用相对简单的制作工艺, 利于施工又可降低人工鱼礁建设成本。

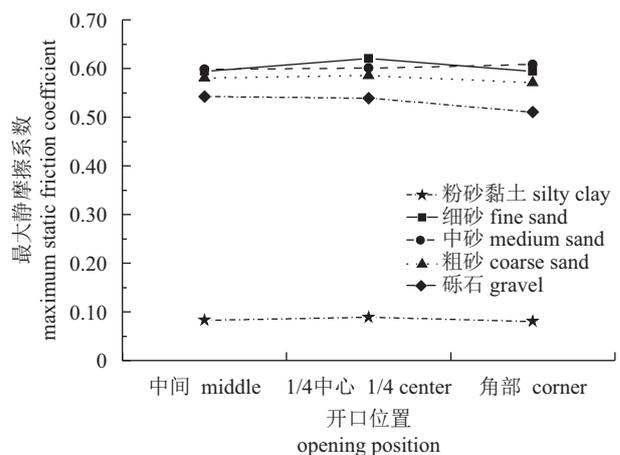


图10 礁体最大静摩擦系数与开口位置的关系曲线

Fig.10 Relationship between maximum static friction coefficient and opening position

3 结语

本文通过物理模型试验, 系统研究了底质粒

径、底质含水率、加载质量、人工鱼礁底面开口比特征等因素对人工鱼礁静摩擦系数的影响, 得到了以下主要结论: 1) 海床表层底质主成分为砂质的海域总体上会更利于人工鱼礁投放后的稳定性, 而

从海床表层为粉砂黏土时的试验结果看,粉砂黏土底质含水率对人工鱼礁静摩擦系数有很大影响,结合以往的相关研究^[34-36],其厚度及含水率垂直方向上的变化特征应作为人工鱼礁设计中考虑的重要因素,在进行人工鱼礁区选址时,不仅应调查底质特征,还应掌握底质含水率随深度的变化,进而根据投礁区底质的承载力和礁体的自重算出礁体的下陷深度,结合该深度对应的含水率,通过模型试验确定最大静摩擦系数,在此基础上再对人工鱼礁进行安全校核,以保证人工鱼礁建设效果;2)礁体自重和底面开口比均对最大静摩擦系数产生了影响,开口位置造成的影响可忽略不计,因此在工程实践中应结合相关试验结果对礁体结构进行优化,在确保工程质量的前提下有效降低建设成本。

由于受到条件的限制,本试验仍有一定局限性,如未能考虑海水的冲刷、礁体投放后的初始姿态及不同海床坡度等因素,此外在对各影响因素的权重分析方面也存在不足,在后续的研究工作中应进一步完善试验设计和数据分析,为人工鱼礁设计的最优化和建设效果的最大化提供科学依据。

参考文献:

- [1] 杨齐, 刘同渝, 黄汝堪. 人工鱼礁的起源和历史[J]. 现代渔业信息, 2005, 20(12): 5-8.
- [2] 廖秀丽, 陈丕茂, 马胜伟, 等. 大亚湾杨梅坑海域投礁前后浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 南方水产科学, 2013, 9(5): 109-119.
- [3] 陈丕茂, 袁华荣, 贾晓平, 等. 大亚湾杨梅坑人工鱼礁区渔业资源变动初步研究[J]. 南方水产科学, 2013, 9(5): 100-108.
- [4] 李勇, 洪洁漳, 李辉权. 珠江口竹洲人工鱼礁与相邻天然礁附着生物群落结构研究[J]. 南方水产科学, 2013, 9(2): 20-26.
- [5] MARSDEN J E, BINDER T R, JOHNSON J, et al. Five-year evaluation of habitat remediation in Thunder Bay, Lake Huron: comparison of constructed reef characteristics that attract spawning lake trout[J]. *Fish Res*, 2016, 183: 275-286.
- [6] MERCADER M, MERCIERE A, SARAGONI G A, et al. Small artificial habitats to enhance the nursery function for juvenile fish in a large commercial port of the Mediterranean[J]. *Ecol Eng*, 2017, 105: 78-86.
- [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] BARBER J S, CHOSID D M, GLENN R P, et al. A systematic model for artificial reef site selection[J]. *NZ J Mar Freshw Res*, 2009, 43(1): 283-297.
- [9] BAEK S H, SHIN B S, KIM K H. Hydraulic model test for corrugated artificial reef stability[J]. *J Korea Acad-Ind Coop Soc*, 2014, 15(8): 5327-5332.
- [10] 佟飞, 秦传新, 余景, 等. 粤东柘林湾溜牛人工鱼礁建设选址生态基础评价[J]. 南方水产科学, 2016, 12(6): 25-32.
- [11] 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.
- [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] 陶峰, 唐振朝, 陈丕茂, 等. 方型对角中连式礁体与方型对角板隔式礁体的稳定性[J]. 中国水产科学, 2009, 16(5): 773-780.
- [15] 王鑫. 基于流场分析的人工鱼礁设计及其相关机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 53-54.
- [16] BHUSHAN B. 摩擦学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 114-118.
- [17] BEN-DAVID O, FINEBERG J. Static friction coefficient is not a material constant[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 106(25): 254-301.
- [18] ETSION I, LEVINSON O, HALPERIN G, et al. Experimental investigation of the elastic-plastic contact area and static friction of a sphere on flat[J]. *J Tribol-T Asme*, 2005, 127(1): 47-50.
- [19] PATIL D B, ERITEN M. Effects of interfacial strength and roughness on the static friction coefficient[J]. *Tribol Lett*, 2014, 56(2): 355-374.
- [20] 刘同渝, 陈勤儿, 黄汝堪, 等. 鱼礁模型波浪水槽试验[J]. 海洋渔业, 1987(1): 9-12.
- [21] 刘健, 张硕, 许柳雄, 等. 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[J]. 海洋科学, 2012, 36(1): 59-64.
- [22] 郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 等边三角形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.
- [23] 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: 2009200749382[P]. 2010-05-12.
- [24] 邓维斌, 唐兴艳, 胡大权, 等. SPSS 19 (中文版) 统计分析实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 154-172.
- [25] BOWDEN F P, TABOR D. Mechanism of metallic friction[J]. *Nature*, 1942, 150(3798): 197-199.
- [26] 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.
- [27] GÉMINARD J C, LOSERT W, GOLLUB J P. Frictional mechanics of wet granular material[J]. *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, 1999, 59(5 Pt B): 5881-5890.
- [28] BOCQUET L, CHARLAIX E, CILIBERTO S, et al. Moisture-induced ageing in granular media and the kinetics of capillary condensation[J]. *Nature*, 1998, 396(6713): 735-737.
- [29] 张存根, 张怀静. 粉质粘土含水量与抗剪强度参数关系的试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(2): 27-29.
- [30] 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.
- [31] 尤晋闽, 陈天宁. 结合面静摩擦系数的统计模型[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 26-29.
- [32] 雷帆, 温彤, 吴诗仁. 泥沙颗粒表面力学及摩擦性能测试分析[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(2): 426-430.
- [33] KATANO Y, NAKANO K, OTSUKI M, et al. Novel friction law for the static friction force based on local precursor slipping[J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 6324.
- [34] 郑志昌, 陈俊仁, 朱照宇. 南海海底土体物理力学特征及其地质环境初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 50-53, 65.
- [35] 曹成效, 李培英, 刘乐军, 等. 东海油气资源区海底沉积物的工程地质特征[J]. 海岸工程, 2005, 24(1): 39-47.
- [36] 王振红, 潘永坚, 潘国富, 等. 舟山—岱山间西部海域第四纪海底沉积物物理力学指标统计分析[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 557-561.