

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220405002

文章编号: 1672-9331(2023)04-0011-09

引用格式: 陈杰, 罗元拼, 蒋昌波, 等. 恒定流作用下珊瑚砂输运特性试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 11-19.

Citation: CHEN Jie, LUO Yuanpin, JIANG Changbo, et al. Experimental study on coral sand transport by constant flow[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 11-19.

恒定流作用下珊瑚砂输运特性试验研究

陈杰^{1,2,3}, 罗元拼¹, 蒋昌波^{1,2,3}, 伍志元^{1,2,3}, 李颢¹, 李川楠¹, 蒋超¹

(1.长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3.长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】针对现有对珊瑚砂起动和输运研究的不足,基于室内水槽试验,研究了恒定流作用下珊瑚砂的起动规律和输运特性。【方法】利用电子显微镜对珊瑚砂颗粒进行观测,确定了珊瑚砂中轴长度与筛分粒径之间的关系;利用现代化测量技术测得了珊瑚砂起动流速和输沙率。【结果】与经典的石英砂起动流速及输沙率计算公式进行了比较分析,并修正了经验公式,使其适用于珊瑚砂起动流速的计算。【结论】由于珊瑚砂的形状极不规则,相比筛分粒径相同的石英砂,珊瑚砂的起动流速更小,珊瑚砂单宽推移质输沙率随水深的增加而显著减小。研究成果丰富了泥沙输运理论。

关键词:珊瑚砂;泥沙起动;推移质;输沙率;恒定流

中图分类号:TV148

文献标志码:A

0 引言

珊瑚砂是一种由珊瑚、贝类等的遗骸经过长时间的物理与化学风化作用而形成的特殊泥沙^[1],与石英砂差别较大,因此在水动力作用下珊瑚砂的运动比石英砂的更加复杂。珊瑚砂在礁岛形成方面扮演着重要角色。全球气候变暖引起海平面上升,加强了原有的海岸水动力条件,导致珊瑚砂岛海岸呈现侵蚀状态^[2]。为解决珊瑚砂岛侵蚀和珊瑚砂流失问题,需要对珊瑚砂的运动特性展开进一步研究。

目前的泥沙运动研究多集中在石英砂上^[3]。对珊瑚砂的研究多集中在其工程特性上^[4],对其运动特性,主要研究的是珊瑚砂的起动^[2,5-9]、沉降^[10-11]与扩散^[12]。针对珊瑚砂的起动,PRAGER等^[5]认为在水流作用下,分选良好、粒径较小的珊瑚砂的起动规律与石英砂的相似,分选性差、粒径

较大的珊瑚砂较石英砂更易起动;而苟涛等^[6]则认为珊瑚砂在水流和波浪分别作用下的起动规律与石英砂的基本一致;曾成杰^[2]也认为在波浪作用下,珊瑚砂的起动规律与石英砂的相似;SMITH等^[7]得到了适用于钙质砂起动的Shields曲线。珊瑚砂与石英砂的区别很大,在化学组成上,石英砂的主要成分为二氧化硅,珊瑚砂的主要成分为碳酸钙^[13];在物理特性上,珊瑚砂颗粒比重较大、干密度较小、孔隙率较大、水下休止角相对较小^[4];在形态结构上,珊瑚砂表面空隙较多,扁平特征突出、磨圆度差、棱角分明,通常表现为枝状、棒状、块状、片状等^[14]。珊瑚砂特殊的物质来源和形成过程导致了其特殊的颗粒性质。

综上所述,珊瑚砂与石英砂在物理、化学及运动特性方面都有所不同,现有的泥沙运动理论是否适用于珊瑚砂,还有待进一步研究。因此,本文基于室内水槽试验,探讨恒定流作用下珊瑚砂的输运特性,为珊瑚砂治理和砂岛保护提供一定理

收稿日期:2022-04-05;修回日期:2022-05-14;接受日期:2022-05-14

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2601100);国家自然科学基金重点项目(51839002);国家自然科学基金面上项目(52271257);湖南省杰出青年科学基金项目(2022JJ10047)

通信作者:陈杰(1982—)(ORCID:0000-0002-9930-0323),男,教授,主要从事海岸防灾减灾方面的研究。

E-mail: chenjie166@163.com

论依据。

1 试验概述

据研究^[15],珊瑚礁坪及珊瑚砂岛附近的水深为0.30~1.40 m,水流流速为0.100~0.500 m/s。结合实际情况,本试验采用平底输砂方式,设定试验水深为0.24、0.26、0.28、0.30 m,试验恒定水流流速为0.300~0.500 m/s。试验在长沙理工大学进行,水槽长40.0 m,宽0.5 m,高0.8 m。水槽两侧用钢化玻璃做成,便于试验观测。试验总体布置如图1所示。试验段位于水槽中段,砂面与槽底平齐,试

验砂源充足。在铺砂区域后设置0.50 m(长)×0.40 m(宽)×0.05 m(高)的集砂盒,集砂盒顶端略低于试验砂表面,这样可以保证来砂完全进入集砂盒中。在试验段按顺序布置4个超声波水位计G1、G2、G3、G4,布置1个流速仪S。试验水位测量采用德国General Acoustic公司研发生产的ULS-80D型非接触式超声波水位计,采集频率为100 Hz;流速测量采用挪威Nortek公司生产的三维剖面流速仪(vectrino profiler),分辨率为1.0 mm,采样频率为100 Hz。图2给出了当水流平均流速为0.429 m/s时的断面流速沿水深的分布情况,图中 U_{mean} 为流速平均值, U_{max} 为流速最大值。

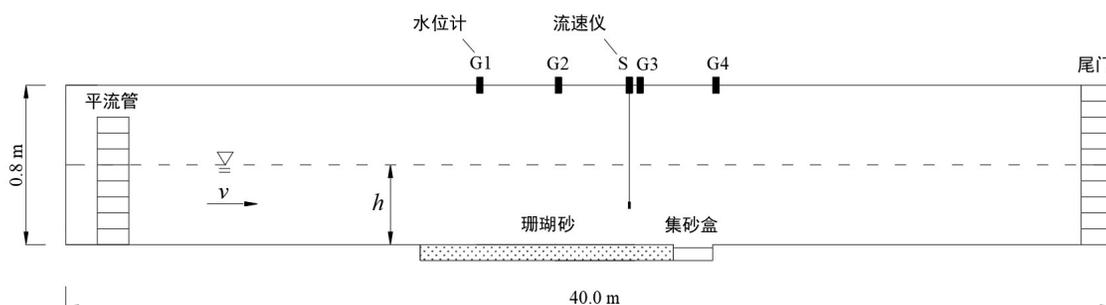


图1 试验布置

Fig. 1 Experimental setup

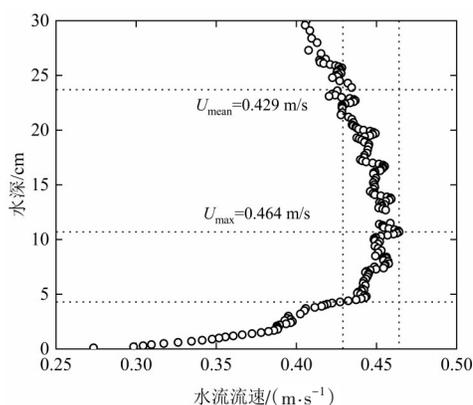


图2 流速沿水深分布情况

Fig. 2 Distribution of flow rate along water depth

试验采用南海天然珊瑚砂岛的珊瑚砂,图3给出了试验珊瑚砂的表观特征。由于珊瑚砂形状的不规则性,珊瑚砂颗粒粒径的确定仍是一个难题。在实际工作中,通常采用筛析法确定泥沙的粒径。根据前人的研究方法,假定珊瑚砂颗粒为椭球体,其中轴为与椭球的长轴、短轴相互正交的线段,椭球体的等容粒径为其长轴 a 、中轴 b 、短轴 c 的几何平均值。有研究表明,泥沙颗粒的中轴长度与其各轴长度的几何平均值接近^[16]。RIEUX等^[17]认为

在采用筛析法确定泥沙粒径的过程中,沙粒中轴长度是决定泥沙颗粒筛分粒径的关键,即中轴长度与筛孔直径的大小关系决定了颗粒是否能通过筛孔。

本文对筛分粒径为1.000 mm的珊瑚砂颗粒进行随机取样后,依照前人的测量方法,利用电子显微镜对其中83组珊瑚砂颗粒进行图片识别,并使用图片处理软件对图片二值化,测量珊瑚砂颗粒的长轴 a 、中轴 b 、短轴 c 的长度(如图3所示),图4给出了测量结果。从图4可以看出,珊瑚砂颗粒中轴长度比筛孔直径稍大,但差距较小,因此颗粒无法通过直径为1.000 mm的筛孔;珊瑚砂中轴长度与其各轴长度的几何平均值接近;珊瑚砂筛分粒径与其中轴长度、等容粒径近似相等。该测量结果与文献[12-13]的结论相符。因此,本试验选取筛分粒径作为珊瑚砂颗粒的等容粒径。

对试验珊瑚砂进行5次随机取样,并利用标准筛进行筛分,求取5次筛分结果的平均值,分析后得到珊瑚砂级配曲线,如图5所示。珊瑚砂平均筛分中值粒径 D_{50} 为0.136 mm,平均不均匀系数 C_u 为

4.61,平均曲率系数 C_c 为0.87,孔隙率和比重分别为0.55和2.76,筛分粒径小于0.075 mm的珊瑚砂

的质量在整体珊瑚砂质量中的占比达到了28.0%,珊瑚砂颗粒间的黏性较强。

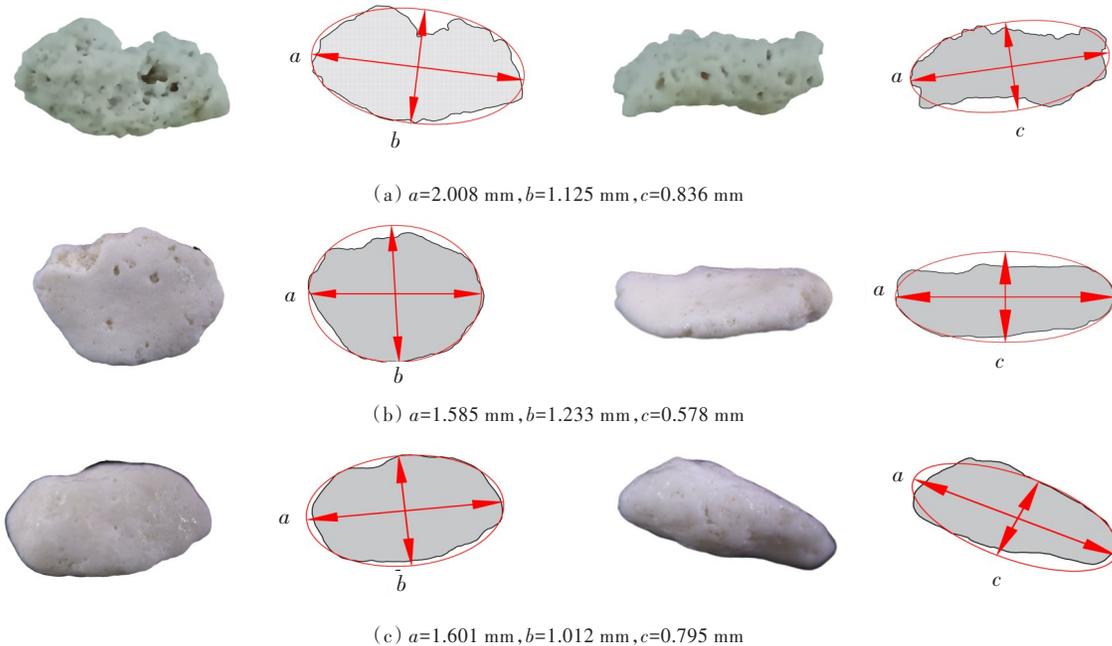


图3 珊瑚砂特征及各轴长度测量方法

Fig. 3 Coral sand characteristics and its axis length measurement

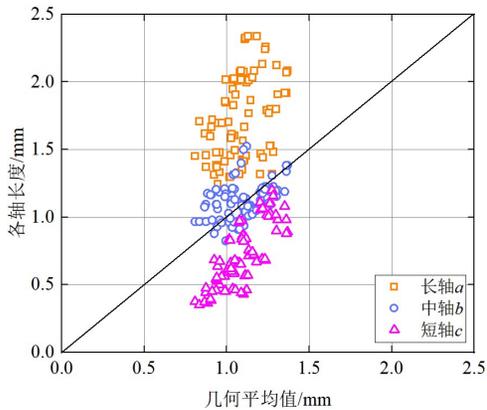


图4 珊瑚砂各轴长度与其几何平均值的比较

Fig. 4 Comparison between the axial lengths of coral sand and their geometric mean values

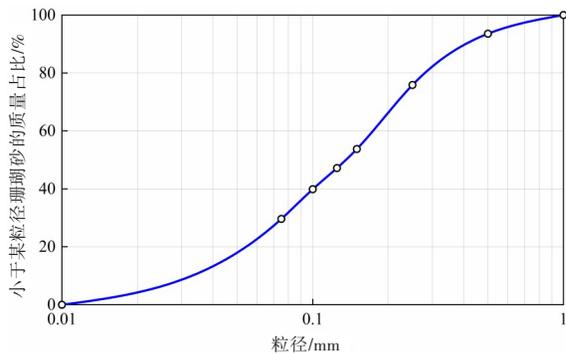


图5 试验珊瑚砂级配曲线

Fig. 5 Graduation curve of the tested coral sands

试验工况见表1。共进行32组试验,每个组次分别进行5次重复试验。试验采集时间的可靠性验证如图6所示。从图6可以看出,试验采集时间 $t=60\text{ s}$ 和 $t=120\text{ s}$ 的平均单宽推移质输沙率 g_b 分别为0.455、0.457 $\text{g}/(\text{m}\cdot\text{s})$,平均单宽输沙率不随时间的变化而变化,说明试验可靠。结合试验条件,设计试验的采集时间为120 s。

试验前将珊瑚砂在清水中浸泡12 h后平铺于试验段。首先进行泥沙起动试验,水流初始流速为0.128 m/s,每10 s流速增加0.001 m/s,直到泥沙起动。本试验以弱动(少量运动)状态作为泥沙的

表1 试验工况

| Table 1 | | Experimental conditions |
|---------|--------|--|
| 水流条件 | 试验水深/m | 水流流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
| 恒定流 | 0.24 | 0.300, 0.325, 0.350, 0.375, 0.400, 0.425, 0.450, 0.475 |
| | 0.26 | 0.300, 0.325, 0.350, 0.375, 0.400, 0.425, 0.450, 0.475 |
| | 0.28 | 0.300, 0.325, 0.350, 0.375, 0.400, 0.425, 0.450, 0.475 |
| | 0.30 | 0.300, 0.325, 0.350, 0.375, 0.400, 0.425, 0.450, 0.475 |

起动标准,其判别依据为:肉眼观测到床面上单位面积内移动的颗粒是可数的。

在进行每一组次泥沙输移试验时,需保证珊瑚砂的浸泡时间、铺平程度等条件一致,也需保证水流稳定。在每组试验结束并等水流稳定后,取出珊瑚砂推移质充分烘干并测量。

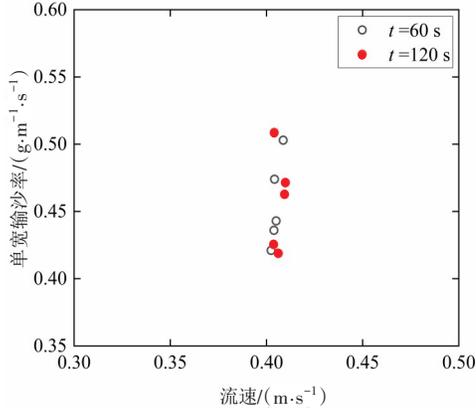


图6 试验采集时间可靠性验证

Fig. 6 The reliability verification of experimental collection time

2 结果分析

2.1 珊瑚砂的起动流速分析

水流作用下的非均匀沙起动流速公式较多,主要有以下几种^[18-20]:

岗恰洛夫公式:

$$\frac{U_c}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)gD}} = 1.06 \lg \frac{8.8h}{D_{95}} \quad (1)$$

式中: U_c 为起动流速, m/s; h 为水深, m; γ_s 为泥沙容重, N/m^3 ; γ 为水的容重, N/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为泥沙粒径, m; D_{95} 为质量占比小于95%的床沙粒径, m; h 为水深, m。

列维公式:

$$\frac{U_c}{\sqrt{gD}} = 1.4 \lg \frac{12R}{D_{90}} \quad (2)$$

式中: R 为水力半径; D_{90} 为质量占比小于90%的床沙粒径, m。

秦荣昱公式:

$$U_{ci} = 0.786 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D_i (2.5M \frac{D_m}{D_i} + 1)} \left(\frac{h}{D_{90}}\right)^{1/6} \quad (3)$$

式中: U_{ci} 为分组起动流速, m/s; ρ_s 为泥沙的密度,

kg/m^3 ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; M 为混合物颗粒间的密实因子,对于非均匀泥沙, M 可近似取为0.7; D_m 为泥沙平均粒径, m; D_i 为泥沙分组粒径, m。

张启卫公式:

$$U_{ci} = 4.6h^{1/6} D_i^{1/3} \sqrt{1 + 0.07 \frac{D_m}{D_i} \ln \frac{D_m}{D_i}} \quad (4)$$

在计算非均匀沙的起动流速时,先计算每一分组粒径 D_i 的起动流速 U_{ci} ,然后根据每一分组粒径泥沙的质量占整体泥沙质量的百分比 p_i ,计算整体泥沙的起动流速期望值:

$$E(U_c) = \sum_{i=1}^n U_{ci} p_i \quad (5)$$

本文实测的起动流速与上述泥沙起动流速公式的计算结果的对比如图7所示。从图7可以看出,试验测量值均小于公式计算值,测量值随水深的变化趋势与式(3)~(4)的计算结果一致,但在数值大小上,与式(1)~(2)的计算结果更为接近。当水深较小时($h < 0.20$ m),测量值与式(1)的计算结果较为接近;当水深较大时($h > 0.20$ m),测量值与式(2)的计算结果更为接近。由此可知,珊瑚砂的起动规律与石英砂的相似,但其起动流速较石英砂的小,试验结果与文献[5]和文献[7]的结论一致,但与文献[6]的结论不同,这可能是试验珊瑚砂不同造成的,文献[6]中试验采用的是岛礁湖潮涌道内的珊瑚砂,其分选良好,与本试验的珊瑚砂存在差异。

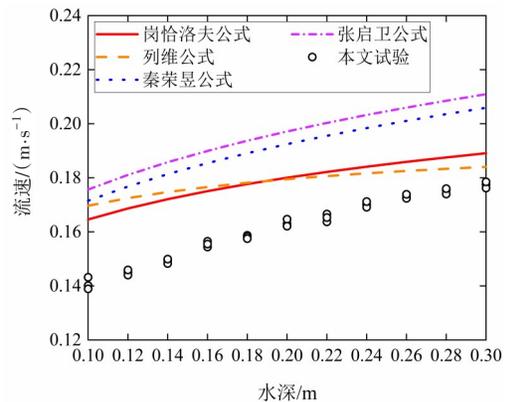


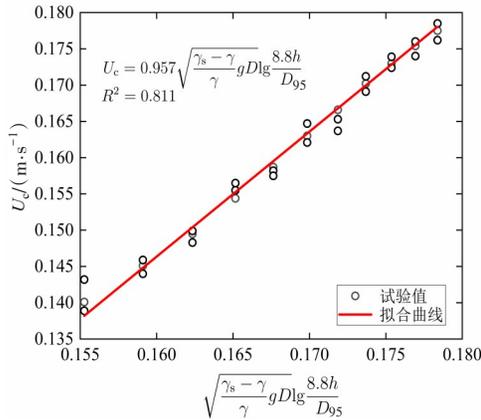
图7 非均匀沙起动公式计算结果与本文实测结果对比

Fig. 7 Comparison between the measured starting velocity and the calculated velocity derived from the starting velocity formula of non-uniform sand

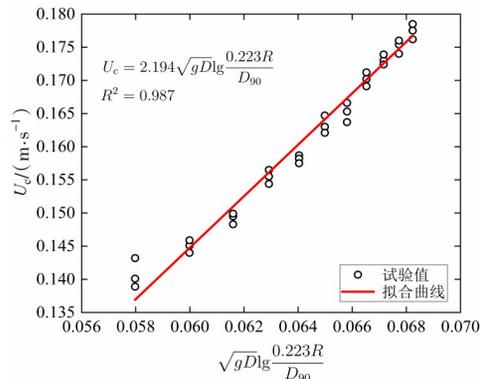
与石英砂相比,珊瑚砂具有不规则的形状以及更高的孔隙率。珊瑚砂丰富的孔隙结构,致使珊瑚砂比筛分粒径相同的石英砂具有更小的水下

重力;而珊瑚砂不规则的形状特征,致使珊瑚砂比筛分粒径相同的石英砂具有更大的表面积,其与水流相互作用面积更大。文献[11]提出了动力形状因子的概念,其物理意义为水流流经砂粒表面所遇到的阻力与水流流经相同粒径的球体表面所遇到的阻力之比,并指出珊瑚砂比粒径相同的石英砂具有更高的阻力系数。根据泥沙滚动力学方程以及牛顿阻力公式可以推断,在水流流速相同的情况下珊瑚砂比筛分粒径相同的石英砂受到的水流推移力和上举力更大。因此,珊瑚砂比筛分粒径相同的石英砂更容易起动。

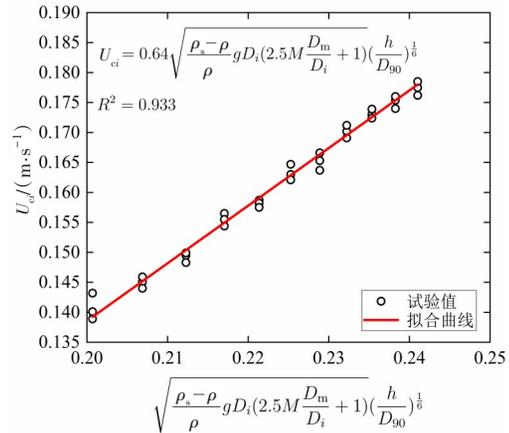
理论上,珊瑚砂的起动原理与石英砂的相似,不同之处在于,珊瑚砂富含孔隙,其形状极不规则,这致使珊瑚砂比筛分粒径相同的石英砂受到的水下重力更小,水流推移力和上举力更大。因此,如果能推导出珊瑚砂与石英砂的重力、阻力系数之间的关系并加以修正,那么石英砂的起动流速公式也可以应用于珊瑚砂。如图 8 所示,基于本文试验数据,修正了上述非均匀沙起动流速公式,该修正公式仅适用于本试验所采用的珊瑚砂(筛分粒径 D :0.010~1.000 mm,水深 h :0.24~0.30 m)。



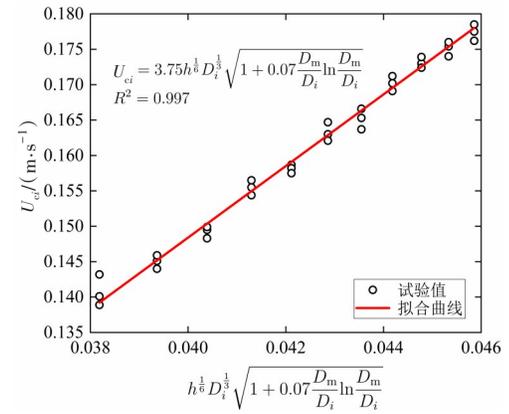
(a) 岗恰洛夫公式的修正结果



(b) 列维公式的修正结果



(c) 秦荣昱公式的修正结果



(d) 张启卫公式的修正结果

图 8 非均匀沙起动流速公式的修正

Fig. 8 Modification of the starting velocity formula of non-uniform sand

其中,岗恰洛夫公式修正结果的相关系数(R^2)为 0.811,列维公式修正结果的相关系数为 0.987,秦荣昱公式修正结果的相关系数为 0.933,张启卫公式修正结果的相关系数为 0.997,说明这几个修正公式均具有较高的准确性。

因此,可将岗恰洛夫公式修正为:

$$U_{ci} = 0.957 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g D \lg \frac{8.8h}{D_{95}} \quad (6)$$

可将列维公式修正为:

$$U_{ci} = 2.194 \sqrt{g D \lg \frac{0.223R}{D_{90}}} \quad (7)$$

可将秦荣昱公式修正为:

$$U_{ci} = 0.64 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g D_i \left(2.5M \frac{D_m}{D_i} + 1 \right) \left(\frac{h}{D_{90}} \right)^{1/6} \quad (8)$$

可将张启卫公式修正为:

$$U_{ci} = 3.75h^{1/6} D_i^{1/3} \sqrt{1 + 0.07 \frac{D_m}{D_i} \ln \frac{D_m}{D_i}} \quad (9)$$

2.2 珊瑚砂的输运规律分析

恒定流不同水深情况下流速 U 与单宽推移质输沙率 g_b 的变化如图9所示。从图9可以看出,不同水深情况下推移质的输沙规律大致相同。从拟合曲线来看,当流速 U 为 0.40 m/s 时,珊瑚砂在水深 h 为 0.24 m 时的输沙率最大,在水深 h 为 0.30 m 时的输沙率最小,呈现出输沙率随水深的增大而减小的规律;水深 h 为 0.24 m 时的输沙率约比水深 h 为 0.26、0.28、0.30 m 时的大 30.0%、8.0% 和 52.0%。当流速 U 为 0.45 m/s 时,珊瑚砂在水深 h 为 0.28 m 时的输沙率最大,在水深 h 为 0.30 m 时的输沙率最小;在水深 h 为 0.24、0.26、0.28 m 时,单宽推移质输沙率随水深的增加而增大,依次增大了 5.0% 和 9.0%,而水深 h 为 0.30 m 时的单宽推移质输沙率约为 0.28 m 时的 40.0%。因此,0.40~0.45 m/s 为流速 U 的敏感区间,也是珊瑚砂单宽推移质输沙率与水深之间关系的转折点。珊瑚砂在水深 h 为 0.30 m 的水流中的输沙率明显比其他水深情况下的小,但输沙率更稳定。

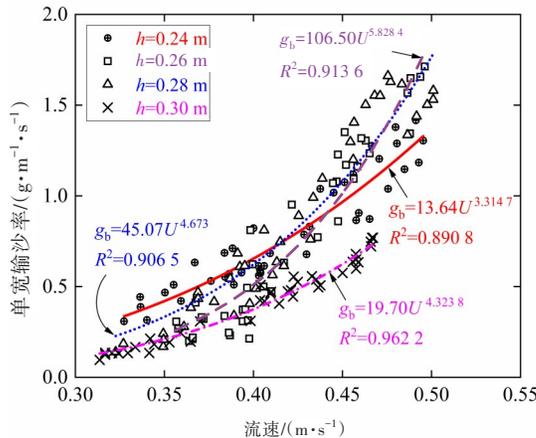


图9 珊瑚砂单宽推移质输沙率与流速的关系

Fig. 9 Relationship between bed load transport rate and flow rate of coral sand

珊瑚砂输沙率受水深的影响十分显著,在相同水深情况下的输沙规律十分稳定,相关系数几乎达到了 0.90。随着水深的增加,相关系数也在

$$\Phi_i = 1.5863 \times 10^{-5} \times \left(\frac{U}{U_{ci}}\right)^{11.2051} \left(\frac{D_i}{D_m}\right)^{3.6179} \left(\frac{U - U_{ci}}{U_{ci}}\right)^{0.4902} \left(\frac{h}{D_i}\right)^{-0.4282} \quad (12)$$

式中: Φ_i 为分级无因次推移质输沙率。

本文试验结果与上述输沙率公式计算结果的对比如图 10 所示,图中 Φ 为无因次单宽推移质输沙率, θ 为表征水流强度的无因次参数。从图 10

逐步增大,这表明输沙率与流速的相关性增强。这是由于珊瑚砂在输移过程中受到的主要阻力除床面阻力外,还有颗粒间的黏结力。本试验采用的珊瑚砂筛分粒径较小,级配较宽,平均筛分中值粒径为 0.136 mm,筛分粒径小于 0.075 mm 的珊瑚砂的质量占床沙总质量的 28.0%,颗粒间黏结力较强。黏结力不仅与泥沙的粒径、非均匀性、密度等因素有关,还与水压力等因素有关,而水深又是影响水压力的直接因素。黏结力与水压力成正比,且与泥沙的固结程度有关,随着沉积时间的增长,泥沙逐渐密实,颗粒间距减小,黏结力增大^[21]。在水压力的影响下,珊瑚砂颗粒被压密固结,黏结力增大,变得难以起动。因此,水压力在影响珊瑚砂输沙率的因素中占据了重要地位。

从图 9 还可以看出,在水深 h 为 0.24~0.30 m 时,珊瑚砂输沙率随水深的增大而减小。在自然条件下,珊瑚砂所处水深最大可达 1.40 m,由于试验条件的限制,本试验的最大水深为 0.30 m。水深进一步增加时的珊瑚砂输运规律有待进一步研究。

水流作用下的非均匀沙输沙率公式众多,常用的有以下几种^[19,22-23]:

王兴奎公式:

$$G_b = 2.96Q_i^{2.56} \times 10^{-10} \quad (10)$$

式中: G_b 为断面推移质输沙率, kg/s; Q_i 为分级流量, m^3/h 。

秦荣昱公式:

$$g_b = KPU_b h_b \left(\frac{U_b}{U}\right) \left(\frac{D}{h_b}\right)^{1/6} \quad (11)$$

式中: g_b 为单宽推移质输沙率, $kg/(m \cdot s)$; K 为系数,取 $K=0.3$; P 为输沙补给系数,取 $P=0.5$; U_b 为输沙平均流速, m/s ; U 为水流流速, m/s ; h_b 为输沙平均水深,取 $h_b=h$ 。

段志科公式:

可以看出,本试验测量结果介于式(10)和式(12)的计算结果之间,与式(10)的计算结果基本吻合。式(10)是从工程应用角度出发,在对实测输沙率资料进行统计分析后得到的经验公式,在一定的

水流强度条件下($0.10 < \theta < 0.30$),可适用于本试验细颗粒珊瑚砂输沙率的计算。式(11)考虑了床沙组成、泥沙的粗化和细化、流量、断面形态对输沙率的影响,及天然河道中输沙水深、输沙流速、输沙补给等问题,与本试验条件存在差异,因此其计算结果与本试验的测量结果差距较大。式(12)考虑了非均匀沙的起动流速和荫蔽作用(荫蔽作用描述的是床面细颗粒泥沙与粗颗粒泥沙之间的相互作用,主要表现为粗颗粒对其后方细颗粒的荫蔽作用,这减小了后方颗粒受到的水流作用,而细颗粒的运动改变了粗颗粒暴露在水流中的面积),当水流强度 θ 小于0.22时,其计算结果小于本试验的测量结果;当水流强度 θ 大于0.25时,其计算结果大于本试验的测量结果。PRAGER等^[5]和SMITH等^[7]认为在恒定流条件下珊瑚砂的输沙率与石英砂的基本相同,本试验的测量结果与文献[5]和文献[7]中的试验结果基本一致。从图10还可以看出,细颗粒珊瑚砂的输运规律与石英砂的相似,由此可见,部分非均匀沙输沙率公式可适用于本试验非均匀细颗粒珊瑚砂输沙率的计算。

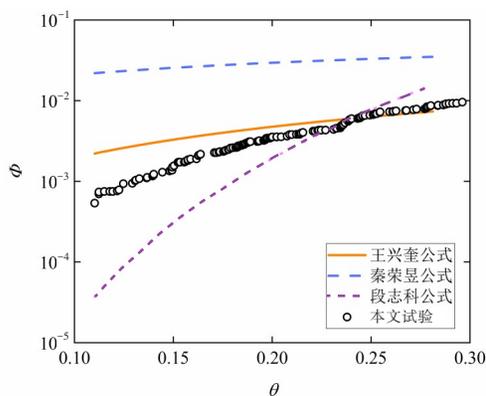


图10 非均匀沙输沙率公式计算结果与本文试验结果的比较

Fig. 10 Comparison between the results calculated by the formula of non-uniform sand transport rate and the results observed in this study

式(12)的计算结果与本试验的测量结果存在一定差距,这说明珊瑚砂颗粒间的荫蔽作用可能与石英砂颗粒间的有所不同。本试验中,当流速较小时,床面尚未粗化,片状或细颗粒的珊瑚砂易于起动并发生输移,所测输沙率较式(12)计算的大;当流速较大时,片状或细颗粒珊瑚砂容易以悬移质的方式输移,此时床面粗化,粗颗粒珊瑚砂的暴露度增大,但由于粗颗粒极不规则的形状,部分

推移质颗粒易被床面颗粒阻挡而形成稳定的床沙结构,成为其他颗粒输移的障碍^[24],所测输沙率较式(12)计算的小。由于珊瑚砂的特殊性,珊瑚砂颗粒间的荫蔽作用有待进一步研究。

3 结论

本文通过水槽试验,探究了恒定流作用下珊瑚砂的运动特性,揭示了不同水深下珊瑚砂的起动规律以及不同水深、流速下珊瑚砂的输运规律,得到以下主要结论:

1) 珊瑚砂是生物残骸破碎后形成的钙质砂,具有孔隙率大、磨圆度差、形状极不规则的特征。确定珊瑚砂颗粒粒径存在一定难度,通常通过测量其长、中、短轴长度,并将其几何平均值作为等容粒径,其中轴长度与筛分粒径接近。在实际工程应用中,可通过筛析法确定珊瑚砂颗粒的粒径。

2) 珊瑚砂的起动规律与石英砂的基本相似,但由于珊瑚砂具有孔隙率大、磨圆度差、形状不规则等特征,其起动流速比石英砂的小。

3) 珊瑚砂推移质输沙率受水深的影响较明显,相同水深下的输沙规律十分稳定。同时,珊瑚砂单宽推移质输沙率随水深的增加而显著减小。细颗粒珊瑚砂的输运规律与石英砂的相似,部分非均匀沙输沙率的计算公式可用于非均匀细颗粒珊瑚砂输沙率的计算。

4) 将珊瑚砂起动流速和输沙率的实测结果与经典的石英砂起动流速及输沙率计算公式进行了比较分析,修正了非均匀沙起动流速计算公式,使其适用于本试验细颗粒珊瑚砂。

本文的研究将有助于丰富珊瑚砂运动理论,为岸滩保护和珊瑚砂治理提供一定的理论依据。

[参考文献]

- [1] 汪稔,宋朝景,赵焕庭,等.南沙群岛珊瑚礁工程地质[M].北京:科学出版社,1997.
WANG Ren, SONG Chaojing, ZHAO Huanting, et al. Engineering geology of coral reefs in Nansha Islands [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] 曾成杰.珊瑚砂运动特性及珊瑚砂岛泥沙流失防治研究[D].南京:南京水利科学研究所,2009.
ZENG Chengjie. The study on movement characteristics of coral sand and the protection of the loss of sediment

- on coral island [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009.
- [3] 陈杰, 刘静, 蒋昌波, 等. 波浪作用下泥沙运动研究综述 [J]. 泥沙研究, 2014 (4): 74-80. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2014.04.008.
CHEN Jie, LIU Jing, JIANG Changbo, et al. Review of sediment transport under waves [J]. Journal of Sediment Research, 2014(4): 74-80. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2014.04.008.
- [4] 旷杜敏, 龙志林, 周益春, 等. 珊瑚礁岩土材料的物理力学性能研究综述 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40 (5): 108-126. DOI: 10.13715/j.cnki.nsjxu.2018.05.017.
KUANG Dumin, LONG Zhilin, ZHOU Yichun, et al. A review of the physical and mechanical properties of coral reef [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2018, 40(5): 108-126. DOI: 10.13715/j.cnki.nsjxu.2018.05.017.
- [5] PRAGER E J, SOUTHARD J B, VIVONI-GALLART E R. Experiments on the entrainment threshold of well-sorted and poorly sorted carbonate sands [J]. Sedimentology, 1996, 43 (1): 33-40. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1996.tb01457.x.
- [6] 荀涛, 胡鹏, 梅弢, 等. 西沙群岛珊瑚砂运动特性试验研究 [J]. 水道港口, 2009, 30(4): 277-281. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2009.04.010.
XUN Tao, HU Peng, MEI Tao, et al. Study on movement characteristics of coral sands in Xisha Islands [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009, 30(4): 277-281. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2009.04.010.
- [7] SMITH D A, CHEUNG K F. Initiation of motion of calcareous sand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(2): 467-472. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:5(467).
- [8] BIAN C, CHEN J, JIANG C B, et al. Threshold of motion of coral reef sediment under currents in flume experiments [J]. Sedimentology. (2023-01-27) [2023-07-24]. <https://doi.org/10.1111/sed.13082>.
- [9] BIAN C, CHEN J, JIANG C B, et al. Experimental study of the incipient motion threshold of coral sediment for oscillatory flow [J]. Ocean Engineering, 2023, 278: 114375. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114375.
- [10] 蒋超, 陈杰, 蒋昌波, 等. 柱状珊瑚砂静水沉降试验研究 [J]. 海洋学报, 2023, 45 (4): 58-68. DOI: 10.12284/hyxb2023043.
JIANG Chao, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental study on settlement of rod coral sand in stagnant water [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023, 45 (4): 58-68. DOI: 10.12284/hyxb2023043.
- [11] 金智涛, 郑建国, 张君, 等. 颗粒形状对珊瑚砂和石英砂沉降影响的试验研究 [J]. 海洋通报, 2021, 40(4): 447-454. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.04.011.
JIN Zhitao, ZHENG Jianguo, ZHANG Jun, et al. Experimental study on the influence of particle shape on the settlement of coral sand and quartz sand [J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40 (4): 447-454. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.04.011.
- [12] CHEN J, YAO Z, JIANG C, et al. Experiment study of the evolution of coral sand particle clouds in water [J]. China Ocean Engineering, 2022, 36 (5): 720-733. DOI: 10.1007/s13344-022-0064-1.
- [13] 朱长歧, 崔翔, 胡明鉴, 等. 钙质土电导率和渗透性的相关研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊2): 142-148. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1072.
ZHU Changqi, CUI Xiang, HU Mingjian, et al. Study of electric conductivity and permeability of calcareous soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(sup 2): 142-148. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1072.
- [14] 王步雪岩, 孟庆山, 韦昌富, 等. 多投影面下珊瑚砂砾颗粒形貌量化试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (10): 3871-3878. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1317.
WANG Buxueyan, MENG Qingshan, WEI Changfu, et al. Quantitative experimental study of the morphology of coral sand and gravel particles under multiple projection surfaces [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (10): 3871-3878. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1317.
- [15] 刘小龙, 蔡志文, 陈文炜, 等. 南海沙质地和珊瑚礁地质浅水区域波浪衰减实测研究 [J]. 中国造船, 2018, 59 (4): 178-187. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2018.04.020.
LIU Xiaolong, CAI Zhiwen, CHEN Wenwei, et al. On-site measurement investigation of wave attenuation in shallow water with sea bed composed of sand and coral reefs [J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(4): 178-187. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2018.04.020.
- [16] 张玮. 河流动力学 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
ZHANG Wei. River dynamics [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [17] RIEUX A, WEILL P, MOUAZE D, et al. Threshold of motion and settling velocities of mollusc shell debris: influence of faunal composition [J]. Sedimentology, 2019, 66(3): 895-916. DOI: 10.1111/sed.12521.
- [18] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
QIAN Ning, WAN Zhaohui. Dynamics of sediment movement [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [19] 秦荣昱. 不均匀沙的推移质输移规律的研究 [J]. 泥沙研究, 1993 (1): 29-38. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1993.01.004.
QIN Rongyu. Bed load transport of non-uniform sand mixture [J]. Journal of Sediment Research, 1993 (1): 29-38. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1993.01.004.
- [20] 张启卫. 推移质级配的计算方法 [J]. 泥沙研究, 1990 (4): 41-48. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1990.04.07.
ZHANG Qiwei. Calculation method of bed load

- gradation[J]. *Journal of Sediment Research*, 1990(4): 41-48. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1990.04.007.
- [21] 孙志林,黄赛花,祝丽丽,等.黏性非均匀沙的起动概率[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2007, 41(1): 18-22. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2007.01.004.
- SUN Zhilin, HUANG Saihua, ZHU Lili, et al. Incipient probability of cohesive nonuniform sediment [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, 41(1): 18-22. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2007.01.004.
- [22] 王兴奎,陈稚聪,张仁.长江寸滩站卵石推移质的运动规律[J]. *水利学报*, 1992, 23(4): 32-38.
- WANG Xingkui, CHEN Zhicong, ZHANG Ren. Movement law of pebble bed load at Cuntan Station of the Yangtze River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 23(4): 32-38.
- [23] 段志科,彭润泽,许德风,等.非均匀卵石推移质分组输沙率水槽试验资料初步分析[J]. *泥沙研究*, 1990(3): 56-64. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1990.03.008.
- DUAN Zhike, PENG Runze, XU Defeng, et al. Preliminary analysis of flume test data of grouped sediment transport rate of non-uniform pebble bed load [J]. *Journal of Sediment Research*, 1990(3): 56-64. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1990.03.008.
- [24] BRIGUGLIO A, SEDDIGHI M, PAPAZZONI C A, et al. Shear versus settling velocity of recent and fossil larger foraminifera: new insights on nummulite banks [J]. *PALAIOS*, 2017, 32(5): 321-329. DOI: 10.2110/palo.2016.083.

Experimental study on coral sand transport by constant flow

CHEN Jie^{1,2,3}, LUO Yuanpin¹, JIANG Changbo^{1,2,3}, WU Zhiyuan^{1,2,3}, LI Xie¹,
LI Chuannan¹, JIANG Chao¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] Due to insufficient research on the incipient velocity and sediment transport of coral sands, interior flume experiment was carried out to study the laws of incipient motion and transport properties of coral sands under the constant flow. [Methods] The relationship between the shaft length and the sieving particle size of the coral sand was determined by using electron microscopy, and the starting flow rate and sand transport rate of coral sand were measured by modern measurement technology. [Findings] The classic quartz sand incipient velocity formula and sediment transport rate formula are compared and analyzed, and the empirical formula is revised, which makes it suitable for calculating coral sand incipient velocity. [Conclusions] The coral sand is characterized by high porosity and poor psephicity. Compared with quartz sand of the same sieving particle size, the incipient velocity of coral sand is slower. As the water depth increases, the sediment transport rate of coral sand with a single wide bed load decreases significantly. The results of this study further enrich the sediment transport theory.

Key words: coral sand; sediment incipient motion; bed load; sediment transport rate; constant flow

Manuscript received: 2022-04-05; **revised:** 2022-05-14; **accepted:** 2022-05-14

Foundation item: Project (2021YFB2601100) supported by the National Key R&D Program of China; Project (51839002) supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China; Project (52271257) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022JJ10047) supported by Outstanding Youth Science Foundation of Hunan Province

Corresponding author: CHEN Jie (1982—) (ORCID: 0000-0002-9930-0323), male, professor, research interest: coastal disaster prevention and mitigation. E-mail: chenjie166@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:江静怡)