

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230528001

文章编号: 1672-9331(2023)04-0027-10

引用格式: 吴凌云, 赵中伟, 李伟. 珊瑚砂形态对单颗粒沉积物起动特征影响的研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 27-36.

Citation: WU Lingyun, ZHAO Zhongwei, LI Wei. Research on the influence of the shape of coral sands on single particle starting behaviors[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 27-36.

珊瑚砂形态对单颗粒沉积物起动特征影响的研究

吴凌云^{1,2}, 赵中伟¹, 李伟^{1,2}

(1. 中国科学院南海海洋研究所 边缘海与大洋地质重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】研究珊瑚砂形态对单颗粒沉积物起动特征的影响, 为准确描述珊瑚砂沉积物在极端波浪动力作用下的起动特征提供参考。【方法】分析传统基于陆源碎屑颗粒的沉积动力学公式对珊瑚砂颗粒的不适用性, 以9种典型形态的珊瑚砂颗粒为研究对象, 利用数值计算方法, 研究珊瑚砂颗粒粒径、密度对其起动特征的影响, 探讨极端波浪动力条件下珊瑚砂的动力学响应差异。【结果】9种形态珊瑚砂的等容粒径为筛分粒径的0.589~1.696倍, 基于等容粒径计算的波致剪应力、起动剪应力分别为基于筛分粒径计算的0.759~1.316倍、0.603~1.951倍。使用传统沉积公式计算得到的珊瑚砂的沉积动力学比值是实际的0.795~1.428倍。【结论】在应用传统石英砂沉积动力学公式评估珊瑚砂在波浪作用下被扰动的适用性时, 会高估波浪对针状珊瑚砂的扰动能力, 而低估对板状珊瑚砂的扰动能力。因此, 在使用传统陆源碎屑沉积动力学公式研究珊瑚砂水动力学时, 应当充分考虑珊瑚砂颗粒形态的特殊性, 使用更适用于珊瑚砂的粒径描述方法以及更加准确的密度确定方法, 并根据理论分析对计算结果进行修正。

关键词: 珊瑚砂; 波浪; 沉积动力学; 等容粒径; 起动剪应力

中图分类号: P736

文献标志码: A

0 引言

珊瑚砂是一种特殊的海洋沉积物, 由珊瑚及其他生物的骨骼和贝类壳体碎片等构成, 常混有硅质珊瑚藻壳体及少量其他海洋动植物遗骸, 广泛分布于热带珊瑚礁的海滩及近岸礁格架区域, 在我国南海岛屿地区分布尤为显著。

随着我国远洋工程建设的快速发展, 珊瑚钙质砂在实际工程中的应用受到了广泛的重视与研究。由于珊瑚砂特殊的海洋生物成因, 其物理力学性质与陆源石英砂存在显著差异, 因此许多研究着眼于揭示珊瑚砂和陆源石英砂之间物理性质差异对工程建设的影响^[1]。孙宗勋^[2]综述了有关珊瑚砂工程性质的研究, 指出了其显著的土力学特征——高孔隙比、高摩擦角、低强度值等; 李腾

等^[3]强调珊瑚砂间微生物的胶结固化作用应该得到进一步研究与完善; 马林建等^[4]综述了国内外珊瑚砂颗粒形貌的表征方法, 认为珊瑚砂颗粒的形态特征与粗糙度相较于石英砂, 其颗粒形态较为狭长, 圆润度较差, 粗糙的表面可能会使颗粒之间的咬合作用增强; WANG等^[5]通过试验研究了珊瑚沉积物的力学特征与颗粒破碎特性, 表明珊瑚砂的刚度比硅质砂的低, 并强调了初始荷载期间颗粒破碎对珊瑚砂刚度的影响; HUANG等^[6]建立了适用于形状不规则、含孔隙的珊瑚砂的数值模型。以上研究表明, 珊瑚砂与石英砂之间的物理性质差异对珊瑚砂工程应用具有较大的影响, 这些研究为详细刻画珊瑚砂颗粒的物理力学特征提供了较为完善的基础。

随着全球气候变暖和人类活动影响的逐渐增大, 珊瑚礁岸滩遭受的侵蚀与破坏也逐渐受到关

收稿日期: 2023-05-28; 修回日期: 2023-07-03; 接受日期: 2023-07-05

基金项目: 国家重点研发项目(2021YFC3100501); 海南省科技计划三亚崖州湾科技城联合项目(420LH048)

通信作者: 吴凌云(1999—)(ORCID: 0009-0005-7869-1846), 男, 硕士研究生, 主要从事海底地质灾害方面的研究。

E-mail: wulingyun21@mailsucas.ac.cn

注,对珊瑚砂的研究不再仅限于其物理力学性质,而更加重视对其在风暴期间的强水动力条件下流失情况的准确预判,对珊瑚砂质海岸的科学管控,以及波浪对珊瑚砂的起动作用及水流对珊瑚砂的输运作用。目前,针对珊瑚砂海岸保护的大多数研究主要从生态角度出发,尝试通过恢复珊瑚生态来减小波浪对珊瑚海岸的破坏^[7],而从珊瑚砂沉积动力学角度开展的研究则相对较少,主要原因是现有的沉积颗粒水动力学研究仍偏向于陆源沉积物,这使得对珊瑚砂的沉积动力特性还缺乏系统的认识和分析。珊瑚礁在我国南海广泛发育,其所处的南海海洋环境十分恶劣,高能台风几乎每年都会经过南海,珊瑚礁较为狭窄的陆架使得风暴带来的极端波浪极易影响到珊瑚砂沉积物。风暴对珊瑚礁海岸工程设施的服役周期及其海底沉积物的稳定性等会产生极大的破坏性影响。因此,本文关注于珊瑚砂起动特征方面的研究,主要内容包括阐明传统沉积动力学公式应用于珊瑚砂环境时的局限性,进一步基于数值计算方法,分析珊瑚砂复杂的形态如何影响其在波浪作用下的起动特征,讨论在应用传统沉积公式判断波浪对珊瑚砂扰动能力时潜在的问题。

1 理论基础与数值计算设计

1.1 珊瑚砂沉积动力学研究

珊瑚砂特殊的生物成因会极大地影响其沉积物特性,特别是不同生物分泌碳酸钙的差异会直接影响其颗粒骨架的密度、形状、表面结构等物理性质,使得不同生物珊瑚砂形态存在显著差异。这些差异恰好赋予了珊瑚砂独特的沉积动力学特性,控制着珊瑚砂在水动力作用下的输运与沉降特征。基于石英砂的传统陆源碎屑沉积动力学方程假设所有的沉积物是质地均匀、形状规则的球状颗粒,这使得这些公式显然无法直接应用于形状差异较大的珊瑚砂颗粒。因此,如何科学等效珊瑚砂粒径,揭示其形态差异对珊瑚砂

沉积动力学特征的影响,在珊瑚砂海岸侵蚀灾害防治、珊瑚礁海洋蓝碳通量评估和珊瑚砂资源容量估算等方面都具有极高的工程应用价值。

针对这些问题,早期的一些关键研究表明,由于形状等影响因素的引入,珊瑚砂颗粒的沉积动力学特征相对于石英砂的更加复杂^[8-9]。随后一系列的研究开始关注珊瑚砂的颗粒破碎特性及对珊瑚砂特殊形态进行更加准确的描述等方面^[10],并探讨珊瑚砂颗粒大小、形状和分选等性质对其沉积动力学特征的影响,进而分析珊瑚砂对波浪、洋流等水动力作用的响应^[9]。为了获得适用于珊瑚砂的经验阈值曲线,学界近年来开展了一系列针对性研究以确定珊瑚砂与石英砂在起动阈值方面的差异,如荀涛等^[11]通过水槽试验研究了珊瑚砂在水流、波浪作用下的运动特性,发现珊瑚砂的起动速度比已有的陆源碎屑经验公式计算值小,认为珊瑚砂在水动力条件下更易于起动;周乐序等^[1]对三种不同中值粒径的珊瑚砂进行了起动试验,发现细粒珊瑚砂与Shields曲线拟合较好,粗粒珊瑚砂相对更难起动;BIAN等^[12]进行了更加精细的水槽试验,使用了9组不同粒径的珊瑚砂在5种不同水深下进行试验,获得了不同形状珊瑚砂颗粒的起动阈值计算公式。以上研究在传统泥沙运动理论及研究方法的基础上,开展了大量的水槽试验与模型研究,对珊瑚砂条件下的水动力学研究进行了补充与完善,建立了适用于珊瑚砂的起动阈值曲线与起动阈值计算公式。

1.2 分析方法

1.2.1 波致剪应力与沉积物起动剪应力计算

本文主要目的为探讨在风暴条件下,运用传统陆源碎屑沉积动力学公式判断波浪对海底沉积物——珊瑚砂的扰动作用,并分析传统沉积动力学公式对珊瑚砂的适用性,所用计算方法主要基于文献[13]中的方法。海底波轨道速度计算基于线性波理论模型,计算公式如下:

$$u_m = \frac{\pi H_s}{T \sinh(kz)} \quad (1)$$

$$(kz)^2 = y^2 + \frac{y}{1 + 0.666y + 0.355y^2 + 0.161y^3 + 0.0632y^4 + 0.0218y^5 + 0.00654y^6} \quad (2)$$

式中: u_m 为波浪在海底边界层作用于底面水体的波轨道速度, m/s; H_s 为波浪的有效波高, m; T 为波

浪周期, s; z 为静水深度, m; $k=2\pi/L$ 为波数, L 为波浪波长, m。基于波浪模型输出,能够将 L 的计算

误差控制在0.1%以内。其中, $y = 4.03 \frac{z}{T^2}$ 。

由式(1)获得海底波轨道速度 u_m , 波浪在海底引起的波致剪应力 τ_w , 其计算式如下:

$$\tau_w = 0.5 \rho_w f_w u_m^2 \quad (3)$$

式中: ρ_w 为海水密度, 取值为 1025 kg/m^3 ; f_w 为波浪摩擦系数, 其计算式如下:

$$f_w = 0.237 \left(\frac{A}{k_s} \right)^{-0.52} \quad (4)$$

式中: A 为边界层顶部水粒子半偏移量; k_s 为 Nikuradse 粗糙度, A 、 k_s 的计算式如下:

$$A = \frac{u_m T}{2\pi} \quad (5)$$

$$k_s = 2.5D \quad (6)$$

式中: D 为沉积物平均粒度, 在实际使用中, D 的确定有不同方法。为确定沉积物起动剪应力(起动阈值), 引入无量纲粒度 D_* , 其计算式如下:

$$D_* = \left[\left(\frac{g(R-1)}{v^2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} D \quad (7)$$

式中: R 为沉积物颗粒与海水密度的比值; v 为水体运动黏度, 取其值为 $1.36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

沉积物起动剪应力 τ_{cr} 计算式如下:

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} g (\rho_s - \rho_w) D \quad (8)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055 (1 - \exp(-0.02D_*)) \quad (9)$$

式中: ρ_s 为海洋沉积物密度; θ_{cr} 为临界 Shields 参数; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。孙宗勋^[2]给出的全球不同海区珊瑚砂颗粒密度 ρ_s 的范围为 $2720 \sim 2820 \text{ kg/m}^3$ 。波浪在海底引发的剪应力与沉积物起动剪应力之间的比值即沉积动力学比值表示如下:

$$\tau_{ratio} = \frac{\tau_w}{\tau_{cr}} \quad (10)$$

以此判断珊瑚砂在波浪作用下是否会被扰动, 当 $\tau_{ratio} \geq 1$ 时, 表示沉积物被扰动。

1.2.2 珊瑚砂粒度计算方法

本文选择了在沉积物颗粒粒径计算中最常用的两种粒径计算方法——筛分粒径法和等容粒径法, 分析这两种粒径计算方法对非球形珊瑚砂颗粒的适用性, 进一步探讨珊瑚砂特殊的颗粒形态对其等容粒径的影响。

1) 筛分法是陆源砂中最常用的粒度描述方

法, 基于上下筛孔直径计算沉积物颗粒粒径 D_{sv} ^[8], 其计算式为:

$$D_{sv} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (11)$$

式中: D_1 和 D_2 分别为上筛和下筛的孔隙直径, mm。

2) 等容粒径法按颗粒体积确定等容粒径 D_n , 其计算式为:

$$D_n = (D_s D_i D_l)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

式中: D_s 、 D_i 、 D_l 分别为相互垂直的短轴、中轴、长轴长度, mm。

为讨论珊瑚砂颗粒形状对起动剪应力的影响, 本文采用 KIM 等^[14]对沉积物颗粒形状的定性分类方法(图1), 对9种形状类型对应的珊瑚砂颗粒的三轴粒径进行计算, 分析不同形状珊瑚砂颗粒粒径差异是如何影响其起动剪应力的。考虑到筛分法中得出的是中轴长度, 为控制变量, 将所有形状的中轴长度设置为 1 mm , 在此条件下, 所有形状珊瑚砂颗粒的筛分粒径 D_{sv} 为 1 mm , 等容粒径 D_n 则各不相同(表1)。

本文记 $\tau_{w,sv}$ 为筛分粒径下的波致剪应力, $\tau_{w,n}$ 为等容粒径下的波致剪应力, $\tau_{cr,sv}$ 为筛分粒径下的起动剪应力, $\tau_{cr,n}$ 为等容粒径下的起动剪应力, $\tau_{ratio,sv}$ 为筛分粒径下的沉积动力学比值, $\tau_{ratio,n}$ 为等容粒径下的沉积动力学比值。

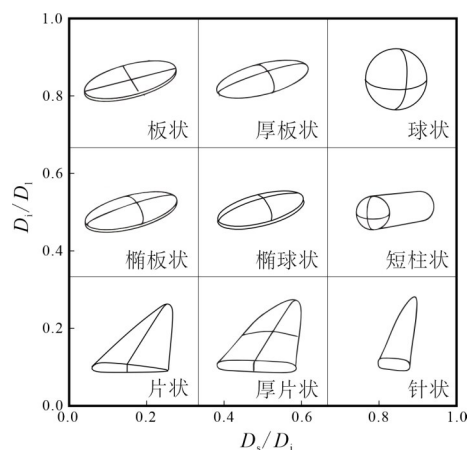


图1 珊瑚砂颗粒形状分类

Fig. 1 Shape classification of coral sands

表1 不同形状珊瑚砂对应的三轴长度

Table 1 Corresponding axial length of different coral sands

珊瑚砂形状	D_l	D_i	D_s	D_n
板状	1.20	1.00	0.17	0.589
椭板状	2.00	1.00	0.17	0.689
厚板状	1.20	1.00	0.50	0.843

表1 (续)
Table 1 (Continued)

珊瑚砂形状	D_i	D_i	D_s	D_n
片状	5.88	1.00	0.17	1.000
椭球状	2.00	1.00	0.50	1.000
球状	1.20	1.00	0.83	1.000
短柱状	2.00	1.00	0.83	1.184
厚片状	5.88	1.00	0.50	1.433
针状	5.88	1.00	0.83	1.696

2 结果与分析

2.1 海底波致剪应力

南海海域冬季受东北季风影响,最大有效波高在 3.0 m 以上,大部分海域的有效波高在 1.5 m 左右,夏季最大有效波高达 2.0 m,通常基本在 1.0 m 左右。海洋环境相对恶劣,热带风暴、台风多发,灾害性波浪的波高通常超过 6.0 m,极值可在 10.0 m 以上^[15],风暴、台风带来的极端风浪极易影响珊瑚礁陆架沉积物,对珊瑚礁沿岸设施具有极大的灾害性影响^[16]。为研究台风期间波浪引发的剪应力对沉积物的扰动作用,对两种粒径对应的波致剪应力进行计算,该计算设置有效波高为 6.0 m,平均波周期为 10 s,水深为 50.0 m。

筛分粒径 $D_{sv}=1.00$ mm 下的 $\tau_{w,sv}$ 为 1.416 N/m^2 ,等容粒径 D_n 下的 $\tau_{w,n}$ 为 $1.075 \sim 1.864 \text{ N/m}^2$ (图 2)。整体来看,珊瑚砂粒径的变化会直接影响波浪在海底引发的剪应力的变化,波致剪应力的增大与减小与等容粒径的变化相对应(表 2)。

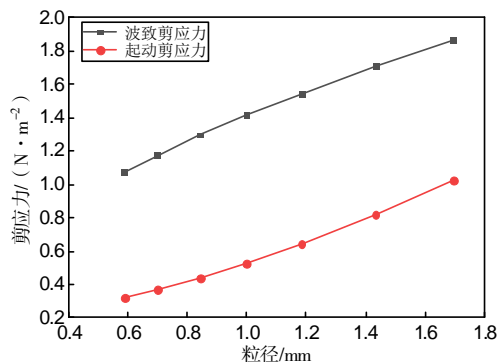


图2 各粒径珊瑚砂的波致剪应力与起动剪应力

Fig. 2 Wave-induced shear stress and shear stress at threshold of motion of different particle sizes of coral sands

在波致剪应力计算过程中,海底波轨道速度的大小主要由风暴期间的波浪场条件决定,而海

底的波致剪应力受海底粗糙度的影响,因此,珊瑚砂颗粒主要通过粒径改变海底粗糙度从而影响波浪在海底引发的剪应力大小。从两种不同粒径的计算结果来看,在使用传统沉积公式计算珊瑚砂的波致剪应力时,针状珊瑚砂的波致剪应力被低估,而板状珊瑚砂的波致剪应力被高估,但粒径差异对波致剪应力的影响相对较小,形状造成的珊瑚砂等容粒径与球形砂筛分粒径差异大于其导致的海底波致剪切应力差异,相比于形状导致的海底波致剪应力差异只有 0.759 ~ 1.316 倍(表 2)。

表2 两种粒径对应的波致剪应力及其比值

Table 2 Wave-induced shear stress of motion of two particle sizes of coral sands and their ratio

珊瑚砂形状	$\tau_{w,sv}$ / (N·m ⁻²)	$\tau_{w,n}$ / (N·m ⁻²)	$\tau_{w,n}/\tau_{w,sv}$
板状	1.416	1.075	0.759
椭板状	1.416	1.174	0.829
厚板状	1.416	1.296	0.915
片状	1.416	1.416	1.000
椭球状	1.416	1.416	1.000
球状	1.416	1.416	1.000
短柱状	1.416	1.546	1.092
厚片状	1.416	1.707	1.206
针状	1.416	1.864	1.316

2.2 珊瑚砂起动剪应力

珊瑚砂起动剪应力受沉积物颗粒密度、粒径的共同影响。为与上一节中计算获得的波致剪应力进行对比,本节对颗粒密度为 2800 kg/m^3 的各形状珊瑚砂的起动剪应力进行初步分析。在这一条件下,基于 $D_{sv}=1.00$ mm 计算得出的相应起动剪应力 $\tau_{cr,sv}$ 为 0.527 N/m^2 ,基于 D_n 计算得出的相应的起动剪应力 $\tau_{cr,n}$ 为 $0.318 \sim 1.028 \text{ N/m}^2$ (图 2、表 3)。

表3 两种粒径对应的起动剪应力及其比值

Table 3 Shear stress at threshold of motion of two particle sizes of coral sands and their ratio

珊瑚砂形状	$\tau_{cr,sv}$ / (N·m ⁻²)	$\tau_{cr,n}$ / (N·m ⁻²)	$\tau_{cr,n}/\tau_{cr,sv}$
板状	0.527	0.318	0.603
椭板状	0.527	0.366	0.694
厚板状	0.527	0.438	0.831
片状	0.527	0.527	1.000
椭球状	0.527	0.527	1.000
球状	0.527	0.527	1.000
短柱状	0.527	0.644	1.222
厚片状	0.527	0.821	1.558
针状	0.527	1.028	1.951

由表3可知,与波致剪应力类似,不同形状珊瑚砂筛分粒径与等容粒径的差异会直接影响珊瑚砂起动剪应力的大小,但粒径差异对起动剪应力差异的影响较大,最大差异出现在针状珊瑚砂条件下,在等容粒径为筛分粒径1.696倍的条件下, $\tau_{cr,n}$ 为 $\tau_{cr,sv}$ 的1.951倍。

为进一步研究密度对珊瑚砂起动剪应力的影响,在密度为2 720~2 820 kg/m³时以每20 kg/m³为间隔,对珊瑚砂所有形状条件下的 D_n 进行起动剪应力计算,结果如图3及表4所示。结果表明,由于本研究选取的珊瑚砂密度变化范围较小,故密度对珊瑚砂颗粒起动剪应力的影响较小,在最大密度为最小密度的1.037倍的条件下,各形态的珊瑚砂在最大密度条件下的起动剪应力为在最小密度条件下的1.054~1.066倍,且密度对针状珊瑚砂的起动剪应力的影响更为显著,而对板状珊瑚砂的影响相对较小。在相同密度条件下,由于形状差异极大,在最大等容粒径为最小等容粒径的

2.879倍条件下,最大粒径的起动剪应力可达最小粒径的3.206~3.242倍,且珊瑚砂形态对起动剪应力的影响在其密度越大时作用越明显(表4)。

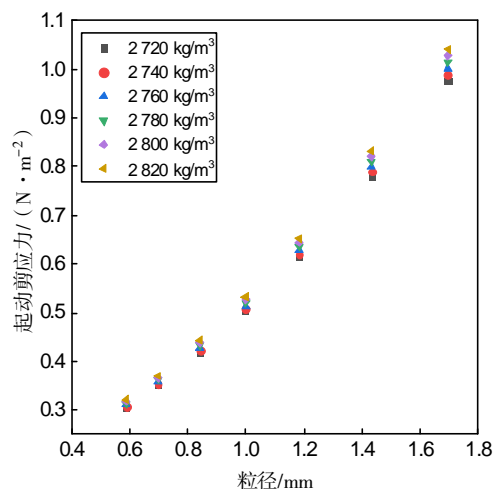


图3 不同粒径珊瑚砂在不同密度下的起动剪应力

Fig. 3 Shear stress at threshold of motion of different particle size coral sand under different density

表4 不同形状珊瑚砂在不同密度下的起动剪应力

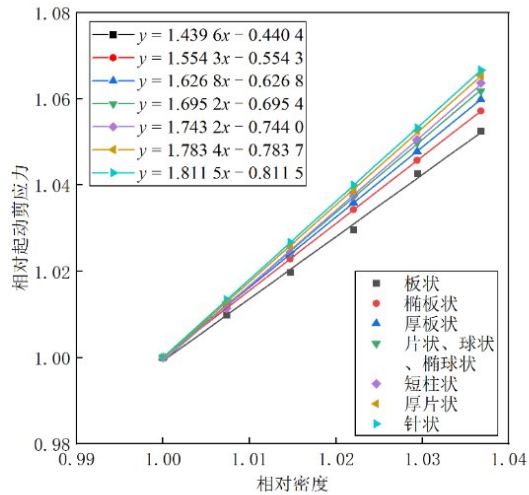
Table 4 Shear stress at threshold of motion of different coral sands under different density

珊瑚砂形状	不同密度下的起动剪应力/(N·m ⁻²)						$\tau_{D_{max}}/\tau_{D_{min}}$
	2 720 kg/m ³	2 740 kg/m ³	2 760 kg/m ³	2 780 kg/m ³	2 800 kg/m ³	2 820 kg/m ³	
板状	0.305	0.308	0.311	0.314	0.318	0.321	1.052
椭板状	0.350	0.354	0.358	0.362	0.366	0.370	1.057
厚板状	0.418	0.423	0.428	0.433	0.438	0.443	1.060
片状、球状、椭球状	0.502	0.508	0.514	0.521	0.527	0.533	1.062
短柱状	0.613	0.620	0.628	0.636	0.644	0.652	1.064
厚片状	0.780	0.790	0.800	0.810	0.821	0.831	1.065
针状	0.976	0.989	1.002	1.015	1.028	1.041	1.067
$\tau_{D_{max}}/\tau_{D_{min}}$	3.200	3.211	3.222	3.232	3.233	3.243	

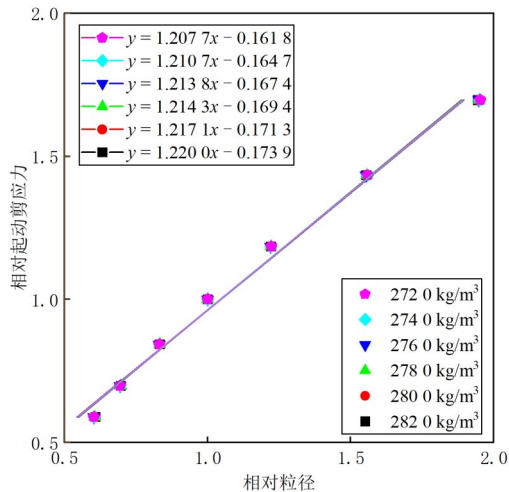
注: $\tau_{D_{max}}/\tau_{D_{min}}$ 为各密度条件下计算得出的最大粒径与最小粒径珊瑚砂的起动剪应力比值; $\tau_{\rho_{max}}/\tau_{\rho_{min}}$ 为各粒径条件下计算得出的最大密度与最小密度珊瑚砂的起动剪应力比值。

为了比较形状和密度对珊瑚砂起动剪应力的影响程度,本研究对以上计算结果进行了进一步分析,图4(a)、4(b)分别展示了密度变化引起的各形状珊瑚砂剪应力变化以及粒径变化引起的各密度珊瑚砂剪应力变化。图4中相对密度为各密度相比于密度2 720 kg/m³的倍数;相对粒径为各粒径相比于粒径1 mm的倍数;相对起动剪应力为不同密度或不同粒径条件下的起动剪应力与2 720 kg/m³密度或粒径1 mm条件下的起动剪应力

的比值。计算结果表明,密度对珊瑚砂起动剪应力的影响显著大于形态造成的粒径差异对起动剪应力的影响,两者斜率分别为1.439 6~1.811 5和1.207 7~1.220 0。这意味着虽然本研究选取的密度范围变化较小,使得密度对起动剪应力的影响不显著,但其实际影响程度明显大于形态的影响程度,珊瑚砂起动剪应力对珊瑚砂密度的变化更敏感,且针状珊瑚砂对密度变化最为敏感,板状珊瑚砂对密度变化相对不敏感。



(a) 密度变化引起的各形态珊瑚砂起动剪应力的变化



(b) 形态变化引起的各密度珊瑚砂起动剪应力的变化

图4 珊瑚砂起动剪应力对密度、形态变化的敏感度分析
Fig. 4 Analysis of the sensitivity of shear stress at threshold of motion of coral sands to density and shapes

2.3 波浪作用下的珊瑚砂运动趋势

在前两节中,我们计算了波浪在海底产生的波致剪应力 τ_w 及珊瑚砂的起动剪应力 τ_{cr} ,将两者作比,我们就能够判断风暴期间波浪场是否能对珊瑚砂颗粒造成扰动,当两者比值大于1时,代表波浪能够扰动海底珊瑚砂。为了比较基于筛分法获得的传统球形石英砂粒径及计算获得的等容粒径的判断结果之间的差异,对这两种粒径条件下得出的波致剪应力和起动剪应力结果分别作比,将得到的珊瑚砂沉积动力学比值($\tau_{ratio,sv} = \tau_{w,sv} / \tau_{cr,sv}$ 和 $\tau_{ratio,n} = \tau_{w,n} / \tau_{cr,n}$)作为判断依据,用于判断在这两种粒径条件下波浪对沉积物的扰动能力。结果表明,在典型极端风浪条件下,珊瑚砂极易受到扰动

并发生搬运,波浪对细粒珊瑚砂的扰动极为明显,能够对50 m水深条件下的细粒珊瑚砂造成扰动,引发的海底剪应力是最细珊瑚砂颗粒起动剪应力的3倍以上(表5)。

为进一步研究两种粒径计算方法(考虑珊瑚砂形态影响与否)在判断波浪对珊瑚砂颗粒扰动作用时的影响,本文将基于 D_{sv} 的判断结果 $\tau_{ratio,sv}$ 与基于 D_n 的判断结果 $\tau_{ratio,n}$ 作比,得到不同粒径条件下判断结果的比值 R (表5),并结合粒径比值 $R_d = D_n / D_{sv}$,波致剪应力比值 $R_w = \tau_{w,n} / \tau_{w,sv}$ (表2)、沉积物起动剪应力比值 $R_{cr} = \tau_{cr,n} / \tau_{cr,sv}$ (表3),分析珊瑚砂形状对最终判断结果的影响(图5)。

表5 两种粒径条件下的判断结果及其比值

Table 5 The judgment results under two particle size conditions and their ratio

珊瑚砂形状	$\tau_{ratio,sv}$	$\tau_{ratio,n}$	R
板状	2.687	3.381	0.795
椭圆板状	2.687	3.208	0.838
厚板状	2.687	2.959	0.908
片状、球状、椭球状	2.687	2.687	1.000
短柱状	2.687	2.401	1.119
厚片状	2.687	2.079	1.292
针状	2.687	1.813	1.482

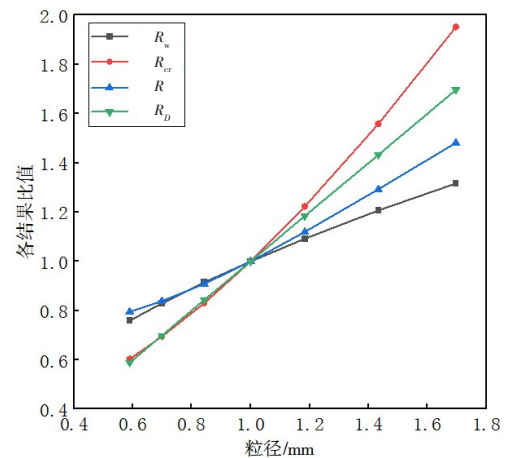


图5 基于两种粒径计算方法得出的各结果比值

Fig. 5 Incipient motion criteria results based on bed shear stress under two particle size conditions and their ratio

从判断结果来看,基于 D_n 对珊瑚砂水动力特征进行的判断结果与珊瑚砂形态密切相关,在珊瑚砂形态为片状、球状、椭球状时,使用传统沉积公式进行判断较为准确,因为这些形态的珊瑚砂的等容粒径与筛分粒径差异较小;珊瑚砂形态为

板状、椭板状、厚板状时,使用传统沉积公式会低估波浪对珊瑚砂的扰动能力;珊瑚砂形态为短柱状、厚片状、针状时,会显著高估波浪对珊瑚砂的扰动能力。这种对波浪扰动能力判断的误差主要取决于珊瑚砂不同形状导致的粒径差异。从图5还可以看出,大约以 $D_n=0.67\text{ mm}$ 为界,形状对珊瑚砂起动剪应力的影响程度存在差异,当等容粒径 $D_n>0.67\text{ mm}$ 时,起动剪切应力的差异大于粒径的差异,当 $D_n>D_{sv}$ 时, $R_{cr}>R_D$;当 $D_n<D_{sv}$ 时, $R_{cr}<R_D$ 。而当 $D_n<0.67\text{ mm}$ 时,起动剪应力的差异小于粒径的差异,如 D_n 为 0.589 mm 时, D_n 为 D_{sv} 的 0.589 倍,而 $\tau_{cr,n}$ 仅为 $\tau_{cr,sv}$ 的 0.603 倍,且粒径越小, D_n 与 D_{sv} 的差异对剪应力差异的影响越小。因此,粒径对起动剪应力的影响显著大于对波致剪应力的影响,这使得较大粒径的珊瑚砂难以被波浪扰动。对等容粒径大于 0.67 mm 的珊瑚砂颗粒而言,粒径差异越大,判断结果差异越明显,这主要是因为相比于粒径差异导致的波致剪应力的增大程度,其导致的起动剪应力的增大程度更大,这使得珊瑚砂颗粒更加难以受到扰动。对等容粒径小于 0.67 mm 的珊瑚砂颗粒而言,由于其形状差异对起动剪应力的影响相对较小,所以细粒条件下的珊瑚砂颗粒与陆源砂颗粒的判断结果的差异较小。

3 讨论

3.1 传统沉积公式对珊瑚砂的适用性

陆源砂颗粒因其形态大多接近球形,各方位受流体作用力都一样,因此其直径可以被直接用于沉积动力学的分析计算中。但对非球形颗粒的珊瑚砂而言,其在组成、形状和密度方面的不规则性使得其三轴长度差异可能较大,简单地用中轴直径进行计算,得到的结果可能存在较大的误差,进而会导致基于筛分法得出的粒度分布出现极大的偏差^[8]。此外,颗粒物性参数的变化也会极大影响其等效直径,使得在形态上具有较大差异的珊瑚砂在粒径的确定上存在较大困难。

在实际研究中,研究人员也发现了传统沉积公式应用于珊瑚砂环境时存在的问题,如ZHAO等^[13]通过对在海岛陆架区获得的地球物理、海底地貌和海洋沉积学数据进行分析,发现当将基于

陆源碎屑岩经验公式获得的相对关系值缩小到原来的 $1/3\sim 1/2$ 时,沉积动力数值计算结果才能与野外实际观测数据呈现出良好的耦合对应关系。BIAN等^[12]通过对9组不同粒径的珊瑚砂进行测试,发现采用筛分粒径法和等容粒径法两种计算方法得出的结果存在一定差异,珊瑚砂的 D_n 普遍大于 D_{sv} ,当 $D_{sv}<1.00\text{ mm}$ 时, D_n 约为 D_{sv} 的 1.2 倍,当 $D_{sv}>1.00\text{ mm}$ 时, D_n 约为 D_{sv} 的 1.4 倍,认为当珊瑚砂颗粒粒径增大时,其形状的差异变得更加显著,使用筛分法获得的颗粒粒径也变得更加不准确。SLOOTMAN等^[17]采用与本文相同的形态分类方法,使用高分辨率显微CT研究了碳酸盐颗粒形态对沉降速率的影响,发现在相同 D_n 及密度条件下,当颗粒由球状向板状、片状和针状转变时,会降低沉降速度,且针状形态对沉降的阻碍极为明显,板状形态的阻碍作用相对较小,且形状差异的影响在粒度越大的条件下越显著,该结果与本文的相符。这表明形状是造成碳酸盐颗粒沉降速度差异的主要因素,使得沉降后的分选相比于硅质碎屑更差。因此,本文讨论的珊瑚砂形态对珊瑚砂起动剪应力的影响对于分析传统沉积公式对珊瑚砂的适用性具有重要意义。根据本文的计算结果,在使用传统沉积公式计算波浪对珊瑚砂的扰动能力时,应该根据珊瑚砂颗粒的形状对计算结果进行修正。当珊瑚砂形态偏向于针状、厚片状和短柱状时,应当将基于陆源碎屑岩经验公式获得的沉积动力学比值缩小到原来的 $1\sim 2/3$,而对于板状、椭板状和厚板状珊瑚砂则应该将该值增大一定倍数(增大 1.26 倍以内)。修正后其沉积动力数值计算结果更接近于实际情况。

3.2 珊瑚种群对珊瑚砂形态的影响

相比于陆源砂,珊瑚砂搬运距离较短、磨圆程度相对较低、形态较不规则,另外,珊瑚砂形态与其对应的珊瑚科属及群落发育情况密切相关。从珊瑚科属角度而言,鹿角珊瑚科的形态以不同粗细的枝状为主,滨珊瑚科的少部分属种呈细分枝状,在经历破碎后这些珊瑚砂通常形成针状、短柱状;而木珊瑚科及蔷薇珊瑚属对应的珊瑚砂偏向于片状、板状;滨珊瑚科、蜂巢珊瑚科、褶叶珊瑚科的大多数属种以形成半球状群落为主,破碎后易形成块状珊瑚砂;褶叶珊瑚科中的棘星珊瑚属、菌

珊瑚科中的牡丹珊瑚属及柱状珊瑚属以柱状、厚片状为主;粒径小于1.00 mm的小颗粒珊瑚、珊瑚藻、软体动物等碎屑以球状为主^[18]。此外,珊瑚群落的发育受光照、水深、地形等因素的共同控制,珊瑚的生存状态不尽相同,菌珊瑚科的厚丝珊瑚属及蜂巢珊瑚科的耳纹珊瑚属通常发育在水深较深(大于20 m)的区域,形成层状-圆顶状珊瑚群落;板状鹿角珊瑚属及蜂巢珊瑚科常发育在中等水深区域,形成板状、块状群落;鹿角珊瑚及菌珊瑚科的牡丹珊瑚属则发育在水深小于6 m的浅水条件下,形成粗壮的枝状珊瑚群落,牡丹珊瑚属在浅水环境中形成片状珊瑚群落。石芝珊瑚属倾向于独立生长,而蜂巢珊瑚科通常形成半圆形群落,部分珊瑚表面还会覆盖珊瑚藻壳体,影响珊瑚的破碎过程。

3.3 粒径描述方法对珊瑚砂水动力学计算的意义

本文通过理论分析,探讨了珊瑚砂复杂的形态是如何通过影响粒径进一步影响珊瑚砂沉积动力学分析结果的。在本文的分析中,等容粒径 D_n 相比于筛分粒径 D_{sv} ,能够更加准确地描述珊瑚砂形态,是更适用于珊瑚砂沉积动力学分析的粒径描述方式,由此得出了使用传统沉积公式分析珊瑚砂水动力学时根据珊瑚砂形状进行修正的方法。根据本文的理论分析,当珊瑚砂形态为丘状、椭球状、片状时,其水动力特征计算结果与球形石英砂颗粒的接近,但这一结论与实际情况可能并不相符。这是因为在使用等容粒径进行计算时,其等效球体的体积与原本的不规则珊瑚砂颗粒并不一定相同,这使得等容粒径在珊瑚砂沉积动力学分析中也存在一定的局限性。最近的研究发现, D_n 约高估了实际粒径的30%^[17],因此,在一些研究中还引入了等效球形体积直径、等效沉降速率直径等,以对珊瑚砂颗粒粒径进行更加准确的描述^[19]。近年来,随着图像处理技术的发展,珊瑚砂颗粒形态的表征方法也从原始的筛分测量向二维、三维数字图像处理和识别发展,这能够更为准确地重建珊瑚砂颗粒的三维体积,引入的三维显微CT扫描、电子显微镜扫描等技术能够实现对珊瑚砂颗粒大小、形态进行快速、精确地表征^[4]。也有许多研究探讨了激光衍射、透射电镜、图像分析等技术在测试颗粒粒径时的可靠性以及不同测试

方法结果之间的差异^[20]。这些技术的不断发展与完善使我们能够更精确地约束粒径、表面积、体积等参数,阐明珊瑚砂颗粒的形状、圆度及表面粗糙度。因此,在使用传统沉积公式进行珊瑚砂水动力学计算时,应当在条件允许的范围内对不同形态珊瑚砂颗粒的粒径进行最准确的描述,在此基础上基于理论分析对计算结果进行修正。

3.4 珊瑚砂密度差异对其水动力计算结果的重要性

在珊瑚砂水动力学计算中,其起动剪应力受珊瑚砂密度、形态的影响。根据本文的分析结果,相比于珊瑚砂颗粒形态带来的粒径变化,密度变化对起动剪应力的影响更为显著。而对实际珊瑚砂颗粒来说,由于不同珊瑚砂种群本身生物结构的不同以及受水动力改造程度的不同,其密度差异可能比陆源沉积物更为显著,珊瑚砂的破碎机制也比硅质颗粒的更为复杂。生物成因的珊瑚砂具有的管道结构和孔隙结构在有机质腐烂后被水填充,导致珊瑚砂密度显著降低。此外,蚀变也会对密度产生影响,例如胶结物可能会充填孔隙或取代方解石,从而改变珊瑚砂的密度。由于珊瑚砂骨骼的某些部分可能更耐侵蚀,在机械磨损和溶解的共同作用下,还可能导致单个颗粒内的密度差异^[19]。因此,在水动力学研究中,珊瑚砂密度的准确确定也是获得精确计算结果的重要前提。

4 结论

1) 9种形态的珊瑚砂的等容粒径与筛分粒径存在差异,理论分析表明,在珊瑚砂形态造成的0.589~1.696倍粒径差异的影响下,基于等容粒径计算的波致剪应力是基于筛分粒径计算结果的0.759~1.316倍,而其对应的沉积物起动剪应力为基于筛分粒径计算值的0.603~1.951倍,最终导致使用传统沉积公式计算的这些珊瑚砂的沉积动力学比值是实际珊瑚砂的0.795~1.428倍。在使用传统沉积公式对珊瑚砂水动力学计算研究时,应当根据珊瑚砂形态特征对计算结果进行修正,使沉积动力数值计算结果更接近于实际情况。

2) 当 $D_n < 0.67$ mm时,珊瑚砂颗粒粒径差异对

其起动剪应力的影响较小,因此使用传统沉积公式计算细粒珊瑚砂颗粒的起动剪应力相对准确;而对于较粗的珊瑚砂颗粒,因其密度与粒径变化对起动剪应力的影响较大,故使用传统沉积公式计算粗粒、高密度珊瑚砂颗粒的起动剪应力误差较大。

3) 珊瑚砂粒径、密度对其水动力学计算结果具有重要影响,在使用传统沉积公式进行计算时,应当特别注意对珊瑚砂粒径与密度的精确描述,并在此基础上根据理论分析对最终计算结果进行修正。

[参考文献]

- [1] 周乐序,赵利平.波浪作用下珊瑚砂起动特性研究[J].中国水运(下半月),2015,15(3):170-171,175. DOI:1006-7973(2015)03-0170-02.
ZHOU Lexu, ZHAO Liping. Study on starting characteristics of coral sand under wave action [J]. China Water Transport, 2015, 15(3): 170-171, 175. DOI:1006-7973(2015)03-0170-02.
- [2] 孙宗勋.南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J].热带海洋,2000(2):1-8. DOI:1000-3053(2000)02-0001-08.
SUN Zongxun. Engineering properties of coral sands in Nansha Islands[J]. Tropic Oceanology, 2000(2): 1-8. DOI:1000-3053(2000)02-0001-08.
- [3] 李腾,方祥位,申春妮,等.珊瑚砂动力特性研究进展[J].海洋湖沼通报,2019(5):90-95. DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2019.05.011.
LI Teng, FANG Xiangwei, SHEN Chunni, et al. Progress of research on dynamic characteristics of coral sand [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(5): 90-95. DOI: 10.13984/j. cnki. cn37-1141.2019.05.011.
- [4] 马林建,张欣,柯结伟,等.珊瑚砂颗粒形貌特征研究现状与展望[J].防护工程,2022,44(6):70-78. DOI:10.3969/j.issn.1674-1854.2022.06.011.
MA Linjian, ZHANG Xin, KE Jiewei, et al. Outlook for research on the characteristics of coral sand particle shapes[J]. Protective Engineering, 2022, 44(6): 70-78. DOI:10.3969/j.issn.1674-1854.2022.06.011.
- [5] WANG C, DING X, YIN Z Y, et al. Mechanical characteristics and particle breakage of coral sand under one-dimensional repeated loading [J]. Acta Geotechnica, 2021, 17(7): 3117-3130. DOI: 10.1007/s11440-021-01381-9.
- [6] HUANG S, HUANG L, LAI Z, et al. Morphology characterization and discrete element modeling of coral sand with intraparticle voids[J]. Engineering Geology, 2023, 315: 107023. DOI: 10.1016/j. enggeo.2023.107023.
- [7] 黄晖,俞晓磊,雷新明,等.环境变化对造礁石珊瑚营养方式的影响及其适应性[J].海洋科学进展,2020,38(2):189-198. DOI:10.3969/j.issn.1671-6647.2020.02.001.
- HUANG Hui, YU Xiaolei, LEI Xinming, et al. Research progress in the effects of environmental changes on the nutritional patterns and adaptability of the scleractinian corals [J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(2): 189-198. DOI:10.3969/j.issn.1671-6647.2020.02.001.
- [8] BRAITHWAITE C J R. Settling behaviour related to sieve analysis of skeletal sands [J]. Sedimentology, 1973, 20(2): 251-262. DOI: 10.1111/j. 1365-3091.1973.tb02048.x.
- [9] PAPHITIS D, COLLINS M B, NASH L A, et al. Settling velocities and entrainment thresholds of biogenic sands (shell fragments) under unidirectional flow [J]. Sedimentology, 2002, 49(1): 211-225. DOI:10.1046/j.1365-3091.2002.00446.x.
- [10] BLOTT S J, PYE K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification [J]. Sedimentology, 2008, 55(1): 31-63. DOI:10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x.
- [11] 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.
- [12] BIAN C, CHEN J, JIANG C, et al. Threshold of motion of coral sediment under currents in flume experiments [J]. Sedimentology, 2023. DOI:10.1111/sed.13082.
- [13] ZHAO Z, MITCHELL N C, QUARTAU R, et al. Wave-influenced deposition of carbonate-rich sediment on the insular shelf of Santa Maria Island, Azores [J]. Sedimentology, 2022, 69(4): 1547-1572. DOI: 10.1111/sed.12963.
- [14] KIM D, SON Y, PARK J. Prediction of settling velocity of nonspherical soil particles using digital image processing [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 4647675. DOI:10.1155/2018/4647675.
- [15] 韩树宗,董杨杨,张水平,等.南海波浪时空变化特征研究[J].海洋湖沼通报,2020,(2):1-9. DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2020.02.001.
HAN Shuzong, DONG Yangyang, ZHANG Shuiping, et al. Study of the temporal and spatial variations of wave in South China Sea [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(2): 1-9. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2020.02.001.
- [16] 姚宇,钟翔.岛礁水沙动力学研究综述[J/OL].长沙理工大学学报(自然科学版),2023:1-10.(2023-06-07)[2023-07-03]. DOI: 10.19951/j. cnki. 1672-9331.20230427002.

- YAO Yu, ZHONG Xiang. A review of water-sediment dynamics around the reef islands [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023; 1–10. (2023-06-07) [2023-07-03]. DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20230427002.
- [17] SLOOTMAN A, DE KRUIJF M, GLATZ G, et al. Shape-dependent settling velocity of skeletal carbonate grains: implications for calciturbidites [J]. Sedimentology, 2023. DOI:10.1111/sed.13103.
- [18] 黄林韬, 黄晖, 江雷. 中国造礁石珊瑚分类厘定[J]. 生物多样性, 2020, 28(4): 515–523. DOI:10.17520/biods.2019384.
- HUANG Lintao, HUANG Hui, JIANG lei. A revised taxonomy for Chinese hermatypic corals [J]. Biodiversity Science, 2020, 28(4): 515–523. DOI:10.17520/biods.2019384.
- [19] DE KRUIJF M, SLOOTMAN A, DE BOER R A, et al. On the settling of marine carbonate grains: review and challenges [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 217: 103532. DOI:10.1016/j.earscirev.2021.103532.
- [20] PIERI L, BITTELLI M, PISA P R. Laser diffraction, transmission electron microscopy and image analysis to evaluate a bimodal Gaussian model for particle size distribution in soils [J]. Geoderma, 2006, 135: 118–132. DOI:10.1016/j.geoderma.2005.11.009.

Research on the influence of the shape of coral sands on single particle starting behaviors

WU Lingyun^{1,2}, ZHAO Zhongwei¹, LI Wei^{1,2}

(1.Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to analyze the effect of coral sand morphology on the starting behaviors of single-grained sediments, and to provide a reference for accurately describing the initiation of motion behaviors of coral sands under hydrodynamic action of extreme waves. [Methods] We briefly analyse the difficulties in directly applying traditional equations to coral sands. Furthermore, we investigate the effect of particle size and density on initiation of motion behaviors and how nine differently shaped coral sand particles respond to extreme wave conditions through numerical calculation approaches. [Findings] The nominal diameter of these nine differently shaped coral sands is 0.589 ~ 1.696 times of their sieving diameters, followed by their corresponding wave-induced shear stress being 0.759 ~ 1.316 times, and the critical shear stress being 0.603 ~ 1.951 times of those predicted with their sieving diameters. This results in the ratio of wave-imposed shear stress to stress of sediment threshold of motion being 0.795 ~ 1.428 times of the original estimations using traditional formulae. [Conclusions] When applying quartz-based formulae to assess the possibility of coral sands being mobilized by waves, the effect of wave action may be overestimated for acicular-shaped coral sands, and underestimated for plate-shaped coral sands. Therefore, the shape of coral sand particles should be fully considered when characterizing their sediment dynamic behaviors, and therefore numerical modeling results should be adjusted accordingly with respect to particle shapes. Moreover, a more suitable description of grain size and a more accurate method measuring particle density is urgently desired for coral sand when performing hydrodynamics analysis of them.

Key words: coral sand; wave; sediment dynamics; nominal diameter; shear stress at threshold of motion

Manuscript received: 2023-05-28; **revised:** 2023-07-03; **accepted:** 2023-07-05

Foundation item: Project (2021YFC3100501) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (420LH048) supported by Hainan Provincial Joint Project of Sanya Yazhou Bay Science and Technology City

Corresponding author: WU Lingyun (1999—) (ORCID: 0009-0005-7869-1846), male, master candidate, research interest: marine geohazards. E-mail: wulingyun21@mails.ucas.ac.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:许从昊)