

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.149



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



间断级配吹填珊瑚砂剪切和颗粒破碎特性

徐刚敏, 吴杨, 吴毅航, 黄义正, 曾润, 廖静容, 李能
(广州大学土木工程学院, 广州 510006)

摘要: 岛礁地基通过水力吹填的方式建造而成。吹填地层中常存在大小颗粒共存的间断级配状态, 颗粒级配的间断条件对吹填珊瑚砂的力学特性有显著影响。针对吹填珊瑚砂开展不同有效围压、相对密实度和含砾量的三轴排水剪切试验, 探究静力荷载作用下间断级配珊瑚砂砾混合料的强度与变形特性, 并分析珊瑚砂砾混合料颗粒破碎的演化规律。结果表明: 试样的应力-应变关系曲线受到围压和密实度的显著影响, 珊瑚砂砾混合料的峰值摩擦角和峰值剪胀角均随有效围压的增大而减小, 随密实度的增大而增大; 同一有效围压水平下, 随着含砾量的增加, 密实程度不同的珊瑚砂砾混合料强度表现出不同的增长规律, 这可能与珊瑚砂砾混合料中粗细骨料接触状态和组成比例有关。另外, 还研究了剪切过程中不同含砾量条件下珊瑚砂砾混合料的塑性功与相对破碎指数的关联性, 建立了相对破碎指数 B_r 与塑性功 W_p 的相关函数。

关键词: 珊瑚砂; 间断级配; 剪胀; 颗粒破碎; 塑性功

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)04-0056-09

Shear and particle breakage properties of gap-graded coral sands

XU Gangmin, WU Yang, WU Yihang, HUANG Yizheng, ZENG Run,
LIAO Jingrong, LI Neng

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: The foundations of islands in the South China Sea are constructed by hydraulic filling method. There are widely discontinuous gradation states in which large and small particles coexist in the hydraulic fill formation of island. The discontinuous conditions of particle gradation have a significant influence on the mechanical properties of the foundation material of coral sand. In this study, a series of drained triaxial shear tests under different effective confining pressures, relative densities, and coral gravel contents were carried out on coral

收稿日期: 2021-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(51908153); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515012096、2021A1515110201); 广州市科技计划项目(201904010278、202102010380); 广州大学全日制研究生基础创新项目(2020GDJC-M42)

作者简介: 徐刚敏(1996-), 男, 主要从事岛礁珊瑚砂性质研究, E-mail: 1030206239@qq.com。

吴杨(通信作者), 男, 教授, E-mail: yangwu@gzhu.edu.cn。

Received: 2021-05-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51908153); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2021A1515012096, 2021A1515110201); Guangzhou City Technology and Science Program (No. 201904010278, 202102010380); Innovation Research for the Postgraduates of Guangzhou University Grant (No. 2020GDJC-M42)

Author brief: XU Gangmin (1996-), main research interest: mechanical properties of coral sand, E-mail: 1030206239@qq.com.

WU Yang (corresponding author), professor, E-mail: yangwu@gzhu.edu.cn.

sand-gravel mixtures, to investigate the strength and deformation characteristics of the gap-graded coral sand under static load. Also, the feature of particle breakage in the tested gap-graded soil has been studied. The results show that the stress-strain relationship curve of the coral sand sample is significantly affected by the confining pressure and relative density. The peak friction angle and dilatancy angle of coral sand-gravel mixtures decrease with the increase of the effective confining pressure, and increase with the increase of relative density. Under the same effective confining pressure, the strength of coral sand-gravel mixtures at different relative densities exhibited different growing patterns with increasing gravel content, which may be related to the contact state and composition ratio of the coarse and fine particles in coral sand-gravel mixtures. In addition, this study explored the correlation between the plastic work with relative breakage index for different gravel contents of coral sand-gravel mixtures and established the correlation function between the relative breakage index B_r and the plastic work W_p on this basis.

Keywords: coral sand; gap-graded; dilatancy; particle breakage; plastic work

钙质沉积物广泛分布在热带和亚热带区域并覆盖了约40%的海域^[1]。钙质沉积物有多种生物起源,主要由珊瑚礁或其他壳类生物的骨骼沉积而成,而珊瑚砂就是其最常见的表现形式。19世纪以来,由于缺乏对珊瑚砂工程性质的认识,近海工程中发生了数起与珊瑚砂有关的工程灾害事故,引起了学者们的广泛关注^[2]。生物成因的珊瑚砂表现出单颗粒强度低、形状不规则、内孔隙丰富等与陆源砂显著不同的特征^[3-4],因此,在常规工程应力水平下珊瑚砂容易发生颗粒破碎^[5-7]。研究珊瑚砂力学性质与颗粒破碎特性对岛礁吹填和基础设施建设的影响具有重要意义。

学者们已采用不同测试方法对珊瑚砂的力学和颗粒破碎特性进行了大量研究,如一维固结试验^[3,8-10]、常规三轴剪切试验^[6,11-14]、直剪试验^[15-16]等。结果表明,珊瑚砂的剪切强度和颗粒破碎特性受颗粒粒径、围压、密实度等条件影响^[17]。Coop^[3]对爱尔兰Dogs Bay珊瑚砂开展一维压缩和三轴剪切试验研究发现,相比陆源石英砂,珊瑚砂具有更高的摩擦角、剪胀性和破碎性等特性。Shahnazari等^[11]通过室内三轴剪切试验对不同围压、密实度的珊瑚砂试样进行了系统研究,结果表明,围压和密实度越高珊瑚砂强度越高,其颗粒破碎程度越大。Tong等^[8]通过一维压缩试验对不同粒径的珊瑚砂进行了研究,结果表明,粒径越大,珊瑚砂颗粒破碎越显著。王刚等^[6]探讨了珊瑚砂在不同排水条件的破碎规律,发现排水状态下珊瑚砂试样剪切破碎明显大于不排水状态。大量的研究成果极大地促进了人们对珊瑚砂材料工程性质的认识,但上述研究大都针对不含珊瑚砾的2.0 mm以下的珊瑚砂。

对于砂砾或砂粉混合料,其力学行为受骨架结构的影响,相较纯砂表现得更为复杂。Thevanayagam等^[12]对渥太华砂粉混合料进行三轴剪切试验发现,在粗细混合物中,细粒在一定条件下参与了骨架结构的力链传递,其参与程度受细粒含量、粒径和孔隙比等的影响。薛亚东等^[15]对陆源间断级配砂砾混合物进行了直剪试验,发现砂砾混合物的剪胀量与抗剪强度随砾石含量的增加而增大。Xiao等^[13]和Rahman等^[14]亦从不同角度探讨了间断级配砂土的力学特性。然而,这些研究主要针对陆源砂土,而关于岛礁地基材料珊瑚砂土的间断级配力学特性却鲜有报道。同时,岛礁吹填区的地基材料颗粒级配分布极为广泛,存在珊瑚砂砾混杂的间断级配状态,而珊瑚砂与珊瑚砾分布的质量比例不同对珊瑚砂砾混合料力学性质会产生不同的影响。笔者针对不同含砾量(不同间断级配条件)的珊瑚砂砾混合料开展不同围压水平和密实度条件下的静三轴排水剪切试验,研究不同含砾量条件下珊瑚砂砾混合料的强度和变形特性,探究珊瑚砂砾混合料颗粒破碎的演化规律。

1 试验条件

1.1 试验材料

珊瑚砂作为岛礁吹填地基的主要组成材料,在岛礁吹填场地过渡区域中常以粗细颗粒混合、粒径缺失的间断级配状态存在^[17]。试验材料取自南海某岛礁,其外观如图1所示,其中,左侧为粒径较小的珊瑚砂(0.5~1.0 mm),右侧为粒径较大的珊瑚砾(5.0~8.0 mm)。

为调查含砾量(gravel content, G_c ,即珊瑚砾质



图1 珊瑚砂砾材料

Fig. 1 Coral sand-gravel materials

量与总质量的比值,对应不同颗粒级配间断条件)对珊瑚砂砾混合料静力学性质的影响,探究珊瑚砂砾混合料的颗粒破碎演化规律,制备了3种含砾量不同的珊瑚砂砾混合料试样,珊瑚砾分别占总质量配制比例的0%、25%、50%。3种珊瑚砂砾混合料的颗粒级配曲线如图2所示。

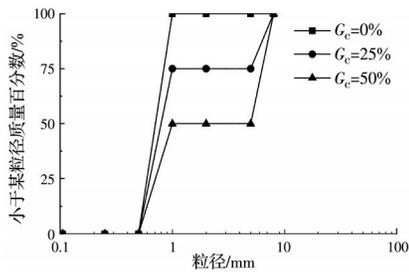


图2 不同含砾量珊瑚砂砾混合料的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle grading curves of coral sand-gravel mixtures with different gravel contents

依照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[18]中关于砂土物性指标的测试方法,对使用的珊瑚砂砾混合料进行测试,结果如表1所示。从表1可以看出,含砾量为0%和25%时,混合料试样的不均匀系数和曲率系数差异较小,含砾量增加至50%时,不均匀系数明显增大,而曲率系数明显减小。

为进一步调查含砾量对珊瑚砂砾混合料最大、最小孔隙比的影响,测定了含砾量分别为30%、

表1 不同含砾量珊瑚砂砾混合料的物性参数

Table 1 Physical parameters of coral sand-gravel mixtures with different gravel contents

含砾量 $G_c/\%$	D_{50}/mm	不均匀 系数 C_u	曲率系 数 C_c	最大孔 隙比 e_{\max}	最小孔隙 比 e_{\min}
0	0.75	1.45	0.96	1.31	0.97
25	0.83	1.58	0.96	1.25	0.91
50	3.00	9.33	0.19	1.41	0.99

40%、75%、100%的珊瑚砂砾混合料的最大、最小孔隙比,结果如图3所示。可以发现,珊瑚砂砾混合料的最大、最小孔隙比均随含砾量的增加而表现出先减小后增大的趋势,减小趋势较为平缓,增大趋势显著。其中,孔隙比曲线最低点对应的粗颗粒含量为阈值粗颗粒含量,此时,粗颗粒组成的孔隙空间被细颗粒完全填充,混合料骨架结构处于由细颗粒主导转为粗颗粒主导的过渡状态; $G_c=0\%$ 和25%小于阈值粗粒含量,粗颗粒被细颗粒包裹,细颗粒主导混合料的骨架结构; $G_c=50\%$ 时,细颗粒部分填充粗颗粒骨架的孔隙空间,粗颗粒主导混合料的骨架结构。这是因为伴随粗颗粒含量的增加,细颗粒和粗颗粒的排列方式和接触状态发生了较大的变化,从而引起孔隙比的改变。

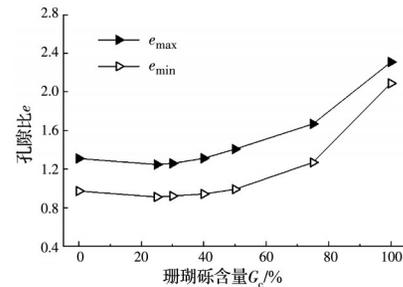


图3 最大、最小孔隙比与含砾量的关系

Fig. 3 Relationship between maximum and minimum void ratios and gravel contents

1.2 试验设备及方案

采用的仪器为广州大学的GDS三轴剪切测试系统(见图4),由基座、压力室、压力控制系统(围、反压)、数据处理系统等4部分组成,其中,轴向加载由基座内含的驱动马达提供,提供的最大轴向力为10.0 kN,围、反压由压力控制系统提供,其量程均为2.0 MPa,试验过程中饱和和试样体积变化可由反压管内部水量的变化测得。

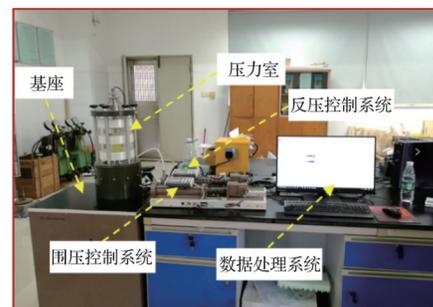


图4 GDS三轴剪切系统

Fig. 4 GDS triaxial shear apparatus

为探究相对密实度 D_r 、围压 σ_3 和含砾量 G_c 对珊瑚砂砾混合料力学性质的影响,采用取自南海某岛礁的珊瑚砂砾材料,分别制备了相对密实度 D_r 为 40% (松散状态) 和 80% (密实状态) 的试样。三轴试验中,圆柱体珊瑚砂砾混合料试样高为 100 mm,直径为 50 mm。每种密实程度下,将珊瑚砂与珊瑚砾以不同比例混合,制备含砾量不同的珊瑚砂砾混合料试样,含砾量 G_c 分别为 0%、25%、50%。试样制备的具体步骤为:根据不同的目标含砾量,用天平分别称出小粒径珊瑚砂和大粒径珊瑚砾的质量,将两种珊瑚砂材料混合并分层制样;为避免发生珊瑚砂砾分离现象,在分层制样过程中,保证每层混合料质量相近且砂砾质量比接近目标值,此外,在质量不均匀的位置适当补充砂或砾。制备密实试样 ($D_r=80%$) 时需采用振动锤轻击对开模外壁和铺压的方式进行。

在开展三轴固结排水剪切试验前,应先对试样进行饱和处理。采用先通入 CO_2 、再通水饱和、最后分级施加反压的饱和方法,从而使 B 值达到 0.96 以上,确保所有试样均近似处于饱和状态。为探究有效围压的影响,将不同密实度和含砾量的珊瑚砂砾混合料试样分别在 100、200、400、800 kPa 的有效压力水平下完成固结,随后开展排水剪切。剪切速率恒定设置为 0.2 mm/min,加载至轴向应变达 20% 时即停止试验。试验条件如表 2 所示。

表 2 珊瑚砂砾混合料三轴固结排水剪切试验方案
Table 2 Drained triaxial shear test scheme for coral sand-gravel mixtures

相对密实度 $D_r/\%$	含砾量 $G_c/\%$	有效围压 σ_3/kPa	剪切速率 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	试验停止条件
40、80	0、25、50	100、200、	0.2	轴向应变达 20%
	0、25、50	400、800		

2 试验结果

2.1 应力-应变曲线

不同含砾量条件下,珊瑚砂砾混合料试样在三轴排水剪切下的应力-应变曲线如图 5 所示。图 5 (a)~(c) 均绘制出了两种相对密实度条件 ($D_r=40\%$ 、 80%) 下,3 种含砾量 ($G_c=0\%$ 、 25% 、 50%) 试样在 4 种有效围压水平 (100、200、400、800 kPa) 下的应力-应变关系曲线。

从图 5 可以看出,3 组含砾量不同的试样在低围

压条件下 (即 100~400 kPa) 均展现出剪胀和应变软化现象,即试样的偏应力在达到峰值后又随着轴向应变的增大而降低;当围压为 800 kPa 时,试样的偏应力-轴向应变曲线转变为轻微的应变硬化。观察图 5 中的体积应变-轴向应变曲线可以发现,低围压条件下试样体积先剪缩后剪胀 (体积应变正值表示剪缩,负值表示剪胀),且剪胀现象显著;随着有效围压的增大及破碎量的增加,试样体积由剪胀状态逐渐过渡到剪缩状态。

2.2 摩擦角与剪胀角

滑动摩擦角 φ 是描述土体强度的一个重要指标,其数值可通过式 (1) 计算得到。

$$\sin \varphi = \frac{3\eta}{6 + \eta} \quad (1)$$

式中: η 为广义剪应力比,其值可由 $\eta = q/p'$ 计算得到, q 为偏应力, p' 为有效平均应力。

在三轴剪切试验中,通常将峰值剪应力对应的摩擦角定义为峰值摩擦角 φ_{peak} 。图 6(a)、(b) 分别为松散和密实状态下不同含砾量珊瑚砂砾混合料的峰值摩擦角与有效围压的关系。从图 6 可以看出,不管是松散状态 ($D_r=40\%$) 还是密实状态 ($D_r=80\%$) 的珊瑚砂砾混合料,在同一含砾量条件下,其峰值摩擦角均随着有效围压的增大而减小。在图 6 (b) 中观察到,同一有效围压水平下,密实状态的珊瑚砂砾混合料峰值摩擦角随着含砾量的增加而增大;但在图 6(a) 中却观察到同一有效围压水平下,松散状态的珊瑚砂砾混合料峰值摩擦角随着含砾量的增加呈先增大后减小的趋势。说明含砾量对不同密实度的珊瑚砂砾混合料的强度和变形行为会产生不同的影响。

由图 3 中孔隙比曲线可知,含砾量存在一个阈值,且该阈值与 $G_c=25\%$ 较为接近,珊瑚砾组成的骨架结构中孔隙被砂颗粒完全填充。 $G_c=0\%$ 、 25% 时,试样的含砾量处于阈值之下,此时珊瑚砂直接接触,珊瑚砾悬浮于珊瑚砂中,小粒径的珊瑚砂组成珊瑚砂砾混合料的受力骨架,混合料的强度主要由珊瑚砂提供。含砾量增加至 25% 时,与阈值较为接近,绝大部分孔隙被珊瑚砂填充,因此混合料的强度得到提高; $G_c=50\%$ 时,试样的含砾量大于阈值,此时珊瑚砾直接接触,珊瑚砂充填孔隙,珊瑚砾组成混合料的骨架,混合料的强度主要取决于珊瑚砾的组构。

由图 6(a) 可以看出,当试样处于松散状态时, $G_c=50\%$ 的珊瑚砂砾混合料的峰值摩擦角小于 $G_c=$

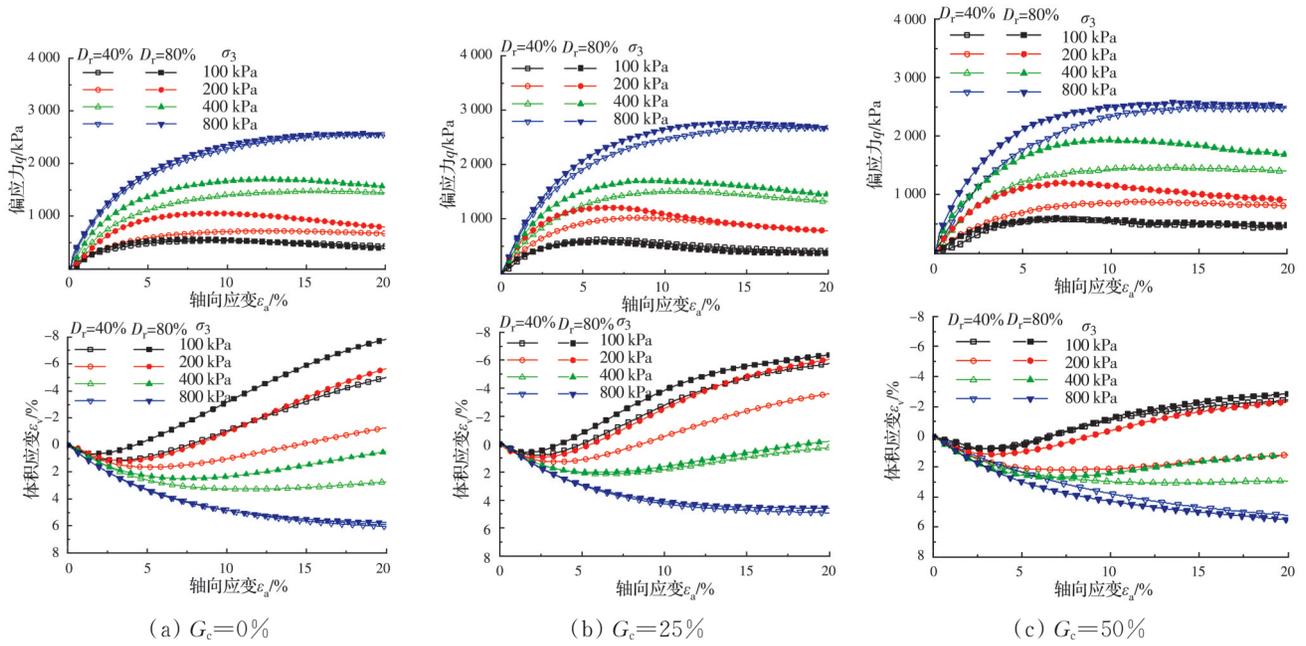


图 5 珊瑚砂砾混合料的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of coral sand-gravel mixtures

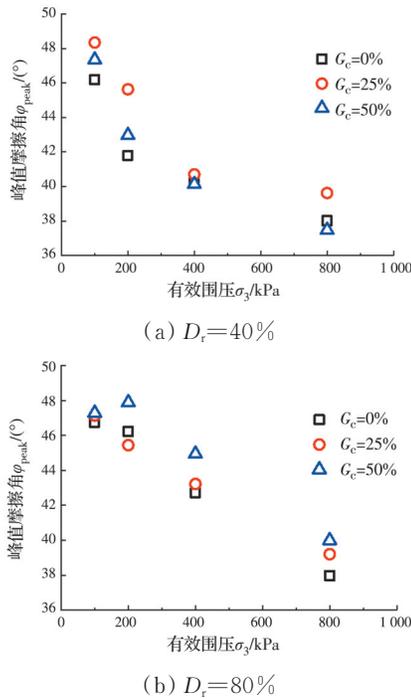


图 6 珊瑚砂砾混合料峰值摩擦角与有效围压的关系

Fig. 6 Relationship between the friction angle at peak shear stress state for coral sand-gravel mixtures and effective confining pressure

25% 混合料的峰值摩擦角,这是因为含砾量超过阈值时,珊瑚砂充填孔隙不充分,且此时珊瑚砾骨架结构力链传递不完整,导致骨架结构受力易发生变形;由图 6(b)可以看出,当试样处于密实状态时, \$G_c =

50% 混合料的峰值摩擦角大于 \$G_c = 25\%\$ 混合料的峰值摩擦角,这是因为珊瑚砂充填孔隙较充分,珊瑚砾组构力链传递较完整。

为定量描述不同条件下珊瑚砂砾混合料的体积变形特征,采用文献[19]定义的剪胀角对珊瑚砂砾混合料试样的变形特性进行分析,剪胀角 \$\psi\$ 可由式(2)确定。

$$\sin \psi = \frac{2}{1 - 3/D} \tag{2}$$

式中: \$D\$ 为剪胀率,可由式(3)计算得到。

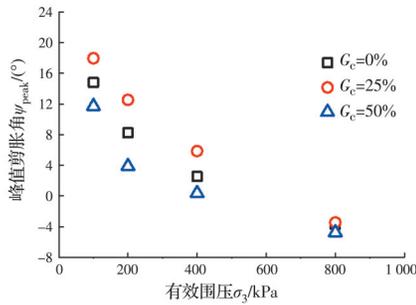
$$D = d\epsilon_v / d\epsilon_a \tag{3}$$

式中: \$d\epsilon_v\$ 为体积应变增量; \$d\epsilon_a\$ 为轴向应变增量。

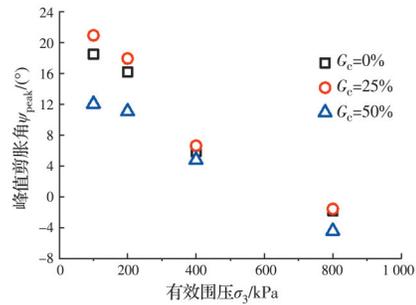
根据不同含砾量条件下珊瑚砂砾混合料达到峰值偏应力时所对应的剪胀率计算得到峰值剪胀角 \$\psi_{peak}\$,整理绘制于图 7。

图 7(a)、(b)分别表示 \$D_r\$ 为 40%、80% 的珊瑚砂砾混合料峰值剪胀角与有效围压的关系。

从图 7 中可以看出: 1) 随着有效围压的增大,峰值剪胀角呈逐渐减小的趋势,试样的应变软化程度也随之降低。这主要是因为,在高围压条件下试样约束压力增大,珊瑚砂颗粒承受应力过大而发生颗粒破碎,抑制了试样的剪胀行为; 2) 与松散试样 (\$D_r = 40\%\$) 相比,密实试样 (\$D_r = 80\%\$) 的峰值剪胀角显著增大,表明同等条件下试样密实程度越高,试样内可供颗粒在压缩条件下重排列的空间就越



(a) $D_r=40\%$



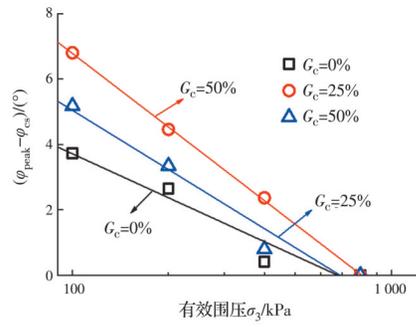
(b) $D_r=80\%$

图 7 珊瑚砂砾混合料峰值剪胀角与有效围压的关系

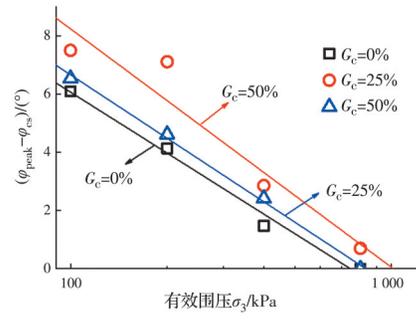
Fig. 7 Relationship between the dilatancy angle at peak state for coral sand-gravel mixtures and effective confining pressure

少,其剪胀变形越明显;3)峰值剪胀角没有随着含砾量的增大而增大或减小,而是 $G_c=25\%$ 时峰值剪胀角最大, $G_c=0\%$ 次之, $G_c=50\%$ 时峰值剪胀角最小。这是因为含砾量为 25% 时混合料的最大、最小孔隙比均位于曲线的最低点(如图 3 所示),即在相同的相对密实度条件下, $G_c=25\%$ 试样具有更低的天然孔隙比,导致其峰值剪胀角明显高于其他含砾量的混合料试样。同理,在天然孔隙比的影响下,不含珊瑚砾的纯砂表现出比 $G_c=50\%$ 混合料更显著的剪胀行为,表明天然孔隙比是影响试样剪胀行为的重要因素。

图 8 绘出了珊瑚砂砾混合料峰值摩擦角 φ_{peak} 与临界状态摩擦角 φ_{cs} 的差值与有效围压 σ_3 的关系。从图 8 中可以看出,不同含砾量的珊瑚砂砾混合料的峰值和临界状态摩擦角差值随有效围压的增大而减小,说明有效围压越大,峰值摩擦角越接近临界摩擦角。随着围压的增大珊瑚砂砾混合料的应力-应变曲线关系,由应变软化逐渐转化为应变硬化,直至峰值和临界状态摩擦角差值为 0 时,峰值状态和临界状态达到统一。通过对比发现,在有效围压相同的情况下,含砾量为 25% 的混合料峰值和临界状态摩擦角差值明显大于含砾量为 0% 和 50% 的混合料,50% 次之,0% 最小。



(a) $D_r=40\%$



(b) $D_r=80\%$

图 8 $\varphi_{peak} - \varphi_{cs}$ 与有效围压的关系

Fig. 8 Relationship between $(\varphi_{peak} - \varphi_{cs})$ with effective confining pressure

从图 8 中峰值和临界状态摩擦角差值与有效围压的线性拟合曲线与横轴的截距可以看出,峰值摩擦角与临界摩擦角为 0 时的有效围压 p_{cr} 随含砾量 G_c 的增长规律与峰值和临界状态摩擦角差值增长规律一致,都是 $G_c=25\%$ 时最大,表明使含砾量为 25% 的珊瑚砂砾混合料试样剪胀行为完全消失时所需的有效围压最大。

3 分析与讨论

3.1 颗粒破碎

珊瑚砂是一种易破碎的颗粒材料。为探究珊瑚砂砾混合料的颗粒破碎演化规律,并建立描述颗粒破碎程度指标和力学参数间的联系,对前述经一系列排水三轴剪切试验后的试样开展筛分试验,筛分后得到的颗粒破碎级配曲线如图 9 所示。

图 9(a)~(c) 分别描述的是松散状态 ($D_r=40\%$) 下含砾量为 0%、25%、50% 的混合料试样的颗粒级配曲线;图 9(d)~(f) 分别表示的是密实状态 ($D_r=80\%$) 下含砾量为 0%、25%、50% 的混合料试样级配曲线。由图 9(a) 可知,0.5~1 mm 粒组含量减少,0.075~0.5 mm 各粒组含量增加,其中,0.355~0.5 mm 粒组含量增加最显著,由图 9(b)、

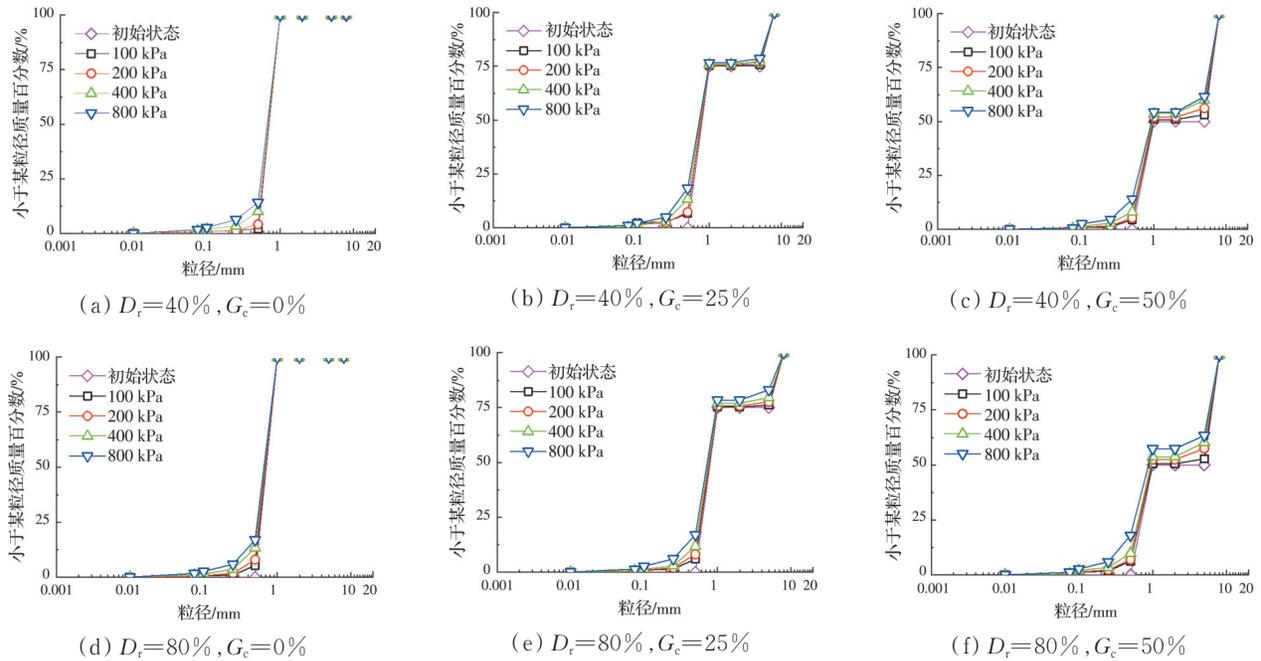


图 9 试验前后珊瑚砂砾混合料颗粒级配曲线

Fig. 9 Grain size distribution curves for coral sand-gravel mixtures before and after testing

(c)可知,5~8 mm 粒组向 5 mm 以下粒组迁移^[20],级配演化规律总体向小粒径方向转移,大粒径颗粒含量减小。图 9 给出了不同有效围压条件下的颗粒级配曲线,随着有效围压的增大,粒组迁移越明显,颗粒破碎量越大。

为了进一步调查含砾量、有效围压和相对密实度对颗粒破碎程度的影响,采用 Hardin^[21]提出的相对破碎指数 B_r 定量分析颗粒级配曲线的变化规律。图 10 描述的是不同密实度和含砾量条件下相对破碎指数与有效围压的关系。由图 10 可知,相对破碎指数随有效围压的增大而增大,说明有效围压越大,颗粒破碎越明显;对比图 10 中松散和密实状态下的相对破碎指数可知,相对密实度越大,相对破碎指数就越大,颗粒破碎越明显,试样处于密实状态比松散状态更容易发生颗粒破碎。当相对密实度和有效围压一定时,含砾量 G_c 越大,相对破碎指数 B_r 越大。

3.2 塑性功

研究结果表明,剪切过程中的颗粒破碎是一个能量不断耗散的过程。颗粒破碎过程中耗散的总能量等于塑性功 W_p 与弹性功 W_e 之和。Lade 等^[22]基于一系列 Cambria 砂试验,建立了颗粒破碎与总能量耗散之间的关系;Zhang 等^[23]则证实了相对破碎指数与塑性功^[24]存在着密切的联系。塑性功可由式(4)计算得到。

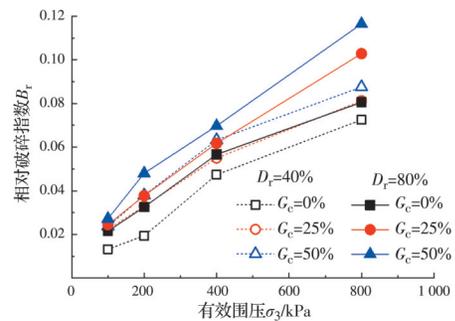


图 10 相对破碎指数与有效围压的关系

Fig. 10 Relationship between the relative breakage index and effective confining pressure

$$W_p = \int p' d\epsilon_v + \int q d\epsilon_d - \int p' d\epsilon_v^e \quad (4)$$

式中: $d\epsilon_v$ 为总体积应变增量; $d\epsilon_d$ 为剪切应变增量, $d\epsilon_v^e$ 为弹性体积应变增量。

弹性功相较总能量耗散较小,可忽略不计,因此,总能量耗散与塑性功近似相同。塑性功可采用式(5)简化计算得到。

$$W_p = \int p' d\epsilon_v + \int q d\epsilon_d \quad (5)$$

对比平均有效应力 p' 和偏应力 q 的应力-应变曲线面积可知,塑性功的大小主要取决于偏应力和剪切应变的大小,这与 Miura 等^[25]的发现一致。

图 11 描述的是珊瑚砂砾混合料相对破碎指数和塑性功之间的关系。由图 11 可以发现,随着塑性功的不断增长,相对破碎指数的增长速度加快。此

外,图11中给出了3组不同含砾量条件下相对破碎指数和塑性功的拟合曲线。可以发现,含砾量越大,相对破碎指数随塑性功的增长速度越快。含砾量 $G_c=50\%$ 时,对试样施加相同的塑性功,颗粒破碎程度最大,随着含砾量的减小,颗粒破碎程度也最小。因此,在建立合理的珊瑚砂砾混合料本构模型过程中,引入相对破碎指数和塑性功的经验方程时,应该充分考虑含砾量的影响。

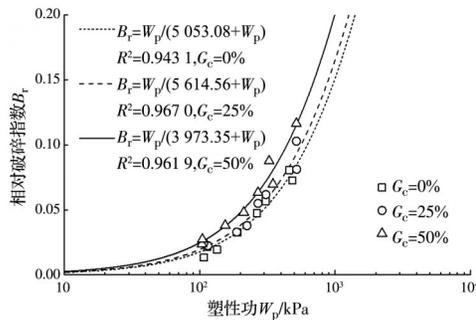


图11 相对破碎指数与塑性功的关系

Fig.11 Relationship between the relative breakage index and plastic work

4 结论

为深入研究间断级配珊瑚砂砾混合料在静力荷载下的强度与变形特性,随着围压和含砾量的增长研究珊瑚砂砾混合料颗粒破碎的演化规律,针对不同含砾量条件下的珊瑚砂砾混合料进行一系列三轴固结排水剪切试验,得到的主要结论如下:

1)不同含砾量条件下珊瑚砂砾混合料试验结果均表明,围压和密实度显著影响混合料试样的应力-应变关系。围压增大会抑制试样的剪胀趋势,随着围压的增大,珊瑚砂砾混合料应力-应变关系的应变软化行为最终转变为应变硬化行为。

2)珊瑚砂砾混合料的峰值摩擦角和峰值剪胀角均随有效围压的增大而减小,随密实度的增大而增大。在同一围压和密实度条件下,不同含砾量条件下珊瑚砂砾混合料峰值摩擦角的变化规律受珊瑚砂砾混合料骨架结构和传力途径的影响,孔隙比是影响试样剪胀行为的重要因素。

3)珊瑚砂砾混合料发生颗粒破碎时,会发生粒组迁移,级配演化规律总体向小粒径方向转移。珊瑚砂砾混合料颗粒破碎随着有效围压、密实度和含砾量的增大而增大。

4)珊瑚砂砾混合料的相对破碎指数与塑性功成反比例函数关系,并随塑性功的增大而增大,此

关系不依赖于密实度和围压,但是会受到含砾量的影响。

参考文献

- [1] HOLMES A. Principles of physical geology [M]. Sunbury-on-Thames, Nelson, London 730, 1978.
- [2] WANG X Z, JIAO Y Y, WANG R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea [J]. Engineering Geology, 2011, 120: 40-47.
- [3] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands [J]. Géotechnique, 1990, 40(4): 607-626.
- [4] 刘汉龙, 马国梁, 赵常, 等. 微生物加固钙质砂的宏观力学机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 205-206.
LIU H L, MA G L, ZHAO C, et al. Macro- and micro-mechanical regime of biotreated calcareous sand [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 205-206. (in Chinese)
- [5] XIAO Y, YUAN Z X, CHU J, et al. Particle breakage and energy dissipation of carbonate sands under quasi-static and dynamic compression [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(6): 1741-1755.
- [6] 王刚, 叶沁果, 查京京. 珊瑚礁砂砾料力学行为与颗粒破碎的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 802-810.
WANG G, YE Q G, ZHA J J. Experimental study on mechanical behavior and particle crushing of coral sand-gravel fill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 802-810. (in Chinese)
- [7] 董博文, 刘士雨, 高歆雨, 等. 海水环境下微生物诱导磷酸盐沉淀加固钙质砂效果评价[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 205-206.
DONG B W, LIU S Y, GAO X Y, et al. Evaluation of effect of microbial induced struvite precipitation strengthening calcareous sand in seawater environment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 205-206. (in Chinese)
- [8] TONG C X, BURTON G J, ZHANG S, et al. Particle breakage of uniformly graded carbonate sands in dry/wet condition subjected to compression/shear tests [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(9): 2379-2394.
- [9] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3327-3331.
ZHANG J M, WANG R, SHI X F, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2005, 24(18): 3327-3331. (in Chinese)
- [10] WU Y H, WU Y, LIU J X, et al. The evolution and influence of particle breakage on the compression behavior of calcareous sand [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021: 1-16.
- [11] SHAHNAZARI H, REZVANI R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study [J]. Engineering Geology, 2013, 159: 98-105.
- [12] THEVANAYAGAM S, SHENTHAN T, MOHAN S, et al. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(10): 849-859.
- [13] XIAO Y, LIU H L, CHEN Y M, et al. Strength and dilatancy of silty sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(7): 06014007.
- [14] RAHMAN M M, LO S R, BAKI M A L. Equivalent granular state parameter and undrained behaviour of sand-fines mixtures [J]. Acta Geotechnica, 2011, 6(4): 183-194.
- [15] 薛亚东, 刘忠强, 黄宏伟. 砂砾石混合物抗剪强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 75-79.
- XUE Y D, LIU Z Q, HUANG H W. Experimental analysis on shear strength characteristics of sand-gravel mixtures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(6): 75-79. (in Chinese)
- [16] BRANDES H G. Simple shear behavior of calcareous and quartz sands [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(1): 113-126.
- [17] 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 R, SONG C J, ZHAO H T, et al. Nansha Islands coral reef engineering geology [M]. Beijing: Science Press, 1997
- [18] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- [19] VAID Y P, SASITHARAN S. The strength and dilatancy of sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(3): 522-526.
- [20] 张季如, 华晨, 罗明星, 等. 三轴排水剪切下钙质砂的颗粒破碎特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1593-1602.
- ZHANG J R, HUA C, LUO M X, et al. Behavior of particle breakage in calcareous sand during drained triaxial shearing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1593-1602. (in Chinese)
- [21] HARDIN B O. Crushing of soil particles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [22] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(4): 309-316.
- [23] ZHANG B Y, JIE Y X, KONG D Z. Particle size distribution and relative breakage for a cement ellipsoid aggregate [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 53: 31-39.
- [24] 吴杨, 崔杰, 李能, 等. 岛礁吹填珊瑚砂力学行为与颗粒破碎特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3181-3191.
- WU Y, CUI J, LI N, et al. Experimental study on the mechanical behavior and particle breakage characteristics of hydraulic filled coral sand on a coral reef island in the South China Sea [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3181-3191. (in Chinese)
- [25] MIURA N, O-HARA S. Particle-crushing of a decomposed granite soil under shear stresses [J]. Soils and Foundations, 1979, 19(3): 1-14.

(编辑 胡玲)