

组构形态对钙质砂颗粒破碎演化规律的影响

张永康,李永强,刘旭锋,卢星雨,刘文静,周泌

(东华理工大学 土木与建筑工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:以南海某吹填岛礁钙质砂为试验材料,使用大型三轴仪进行了系统的三轴剪切试验,研究了不同组构钙质砂在三轴条件下的颗粒破碎演化规律。试验结果表明,在相同围压下,钙质砂颗粒粒径越大破碎程度越显著,且随着围压的增大,同一粒径颗粒的破碎程度也随之增加。围压是影响钙质砂剪胀特性的重要因素,随着围压增大,砂样的剪胀行为受到约束,颗粒破碎程度加剧。特征粒径值随围压增大而减小,不均匀系数 C_u 随围压增大而增大,总体反映了级配向更好的方向发展。相对破碎指数 B_f 与围压之间存在幂函数关系,随围压增大而增大。

关键词:钙质砂;级配曲线;破碎指数;颗粒破碎;大型三轴仪

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0044-08

Influence of fabric morphology on evolution law of particle fragmentation in calcareous sand

ZHANG Yongkang, LI Yongqiang, LIU Xufeng, LU Xingyu, LIU Wenjing, ZHOU Mi

(School of Civil & Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: A systematic triaxial shear test was conducted using a large-scale triaxial apparatus on calcareous sand from a certain reclaimed island in the South China Sea, so as to study the particle fragmentation evolution of calcareous sand with different compositions under triaxial conditions. Experimental results show that under the same confining pressure, the larger the particle size of calcareous sand, the more significant the degree of fragmentation, and with the increase of confining pressure, the degree of fragmentation of particles with the same particle size also increases. The confining pressure is an important factor affecting the shear dilation characteristics of calcareous sand. As the confining pressure increases, the shear dilation behavior of the sand sample is constrained, and the degree of particle fragmentation intensifies. The characteristic particle size value decreases with increasing confining pressure, and the non-uniformity coefficient C_u increases with increasing confining pressure, which generally reflects the development of gradation towards a better direction. There is a power function relationship between the relative fragmentation index B_f and confining pressure, which increases with the increase of confining pressure.

Keywords: calcareous sand; gradation curve; fragmentation index; particle fragmentation; large triaxial instrument

钙质砂具有内孔隙结构、颗粒形态不规则、易破碎等显著区别于传统颗粒材料的工程特性,钙质砂在较低应力水平下即发生显著颗粒破碎^[1]。

这种独特的力学特性显著区别于常规岩土材料,使得钙质砂的颗粒破碎演化机制及其工程力学性能成为岩土工程领域亟待理清的关键科学问题

收稿日期:2025-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52068002);江西省“双千计划”项目(DHSQT32022006/JXSQ2020101041);东华理工大学博士科研启动基金资助项目(DHBK2019245)

第一作者简介:张永康(2000—),男,云南大理人,硕士研究生,研究方向:海洋土动力学。

通信作者:李永强(1983—),男,河南济源人,副研究员,博士,研究方向:岩土地震工程与波动数值模拟等。

之一。

对于钙质砂,颗粒破碎是最重要的力学特性之一。孙吉主等^[2]利用声发射方法研究了珊瑚砂的颗粒破碎,发现珊瑚砂相对于陆源砂颗粒破碎更明显。Shah Nazar等^[3]通过三轴试验,探究了相对密度、围压、粒径分布对钙质砂颗粒破碎的影响。Hardin^[4]提出相对破碎指数,用于量化不同条件下的颗粒破碎。蔡正银^[5]等对不同级配的钙质砂进行了颗粒破碎试验,并提出了颗粒破碎率 B_r 与级配、围压之间的关系式。Hu等^[6]采用不均匀系数来定义颗粒破碎情况。Coop等^[7]进行了一系列环剪试验,研究了钙质砂在剪切应变下颗粒破碎的演变规律。试验发现在粗粒土试样变形非常大的情况下,试样会达到一个稳定级配。Yu等^[8]为了研究粗粒土的颗粒破碎特性,基于系统三轴试验,对不同轴向应变水平下的破碎演化现象进行了研究。王嘉璐等^[9]通过图像识别技术对染色钙质砂进行侧限压缩实验,探究了钙质砂的级配演化,结果表明大颗粒会导致小颗粒破碎,小颗粒会阻碍大颗粒的破碎。本研究选取的钙质砂粒径分布广,同时存在大颗粒和小颗粒的破碎,将其作为研究对象验证前人研究成果的同时,还能研究颗粒破碎的动态演化。

汪轶群等^[10]通过三轴剪切试验对钙质砂进行研究结果发现随着围压增大,试样的剪胀趋势减小,级配向着均匀方向发展。张家铭等^[11]对比分析钙质砂与标准砂排水剪试验结果后认为,围压对峰值应力比与剪胀性有显著影响,作用效应均随围压增加而弱化。Lee等^[12]和Lade等^[13]对实验前后特征粒径的变化进行了研究,并对特征粒径含量的不同进行了分析。张家铭等^[14]通过三轴实验,发现颗粒破碎对钙质砂的剪胀特性有较大影响。胡波等^[15]研究发现级配较差的钙质砂在相同情况下破碎程度明显高于级配较好的钙质砂。Wei等^[16]对不同相对密度的珊瑚砂试样进行固结排水三轴试验,发现试验中存在相对颗粒破碎的上限,超过该上限,围压和相对密实度对颗粒破碎的影响很小。综上,当前通过三轴试验对细颗粒(2.000 mm以下)钙质砂的力学特性开展的研究比较多,但对大颗粒钙质砂的相关力学特性研究还比较少。

通过以往的研究发现,前人的三轴试验主要采用小型三轴仪,且研究对象的粒径通常小于

2.000 mm,鉴于钙质砂粒径分布范围较广(2.000~40.000 mm),本研究采用大型三轴仪,对不同组构钙质砂进行了深入探讨。聚焦于钙质砂在三轴应力状态下的颗粒破碎动态演化机制分析,针对全粒径颗粒破碎特征系统性展开探讨。基于全自动大型三轴试验系统,对多级配钙质砂试样进行不同围压条件下的固结不排水剪切试验,探究钙质砂不同组构形态的颗粒破碎级配曲线的演变机制;分析剪切过程中特征粒径演变规律及破碎率动态演化;并对颗粒破碎与宏观力学行为跨尺度关联性进行分析。

1 试验材料及试验方案

1.1 试验材料

试验所用钙质砂取自南海某岛礁,颗粒粒径范围广,形状极不规则,以块状和纺锤状颗粒居多,片状和枝条状相对较少。场发射扫描电镜(NOVA Nano SEM 450)扫描图片如图1所示。根据图1钙质砂不同倍率的表观形态,可以清晰地观察到钙质砂样的颗粒表面粗糙度高、棱角明显、内部孔隙丰富且分布不均。采用EDS能谱仪对试验所用钙质砂进行测定,结果如表1所示,发现O和Ca元素含量极其丰富,相较于普通陆源砂,钙质砂的Al元素含量较少,且主要的化合物组成也不同,故力学性能相差也较大。

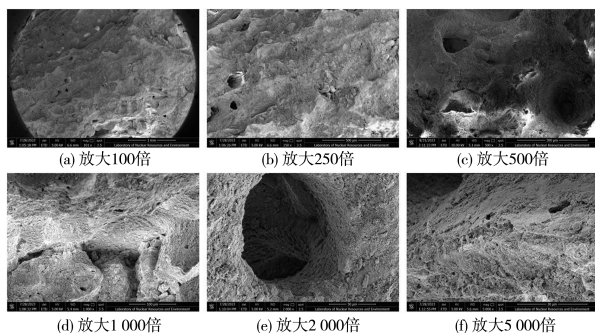


图1 不同放大倍数下电镜扫描图片

Fig.1 Scanning electron microscopy images at different magnifications

钙质砂颗粒间存在显著的粒径与形状差异,并且原钙质砂样是珊瑚礁及大量海洋微生物碎屑的混合物,对钙质砂的颗粒破碎行为及力学性能均有影响,为减小误差提升试验准确性,在试验开展前,对初始砂样进行了预处理,即对原状砂进行清洗并自然阴干,剔除附着异物,接着过筛去除大

于 40 mm 的颗粒,最后放入烘箱在 108 ℃下,热灭菌 24 h。

表 1 钙质砂元素分布表

Tab.1 Calcareous sand element distribution table

元素	信号类型	$W_i/\%$	$A_i/\%$
C	EDS	8.08	13.79
O	EDS	45.75	58.62
Al	EDS	4.62	3.51
Si	EDS	16.18	11.81
S	EDS	0.00	0.00
K	EDS	1.73	0.91
Ca	EDS	20.03	10.25
Fe	EDS	2.74	1.01
Tb	EDS	0.86	0.11
总量		100.00	100.00

注: W_i 表示元素在钙质砂中的质量分数; A_i 表示元素在钙质砂中的原子分数。

结合室内试验条件和实际工况,试验选用了粒径范围在 0.075~40.000 mm 的 5 组单一粒径组颗粒和 3 组混合级配颗粒砂样,分别是 S1 样(20.000~40.000 mm 颗粒含量 100%), S2 样(10.000~20.000 mm 颗粒含量 100%), S3 样(5.000~10.000 mm 颗粒含量 100%), S4 样(2.000~5.000 mm 颗粒含量 100%), S5 样(0.0750~2.000 mm 颗粒含量 100%), 级配#1 样(10.000~20.000 mm 含量 50%), 级配#2 样(10.000~20.000 mm 含量 25%) 和级配#3 样(10.000~20.000 mm 含量 10%)。不同粒径颗粒砂样和级配砂样如图 2 所示。3 种级配初始曲线如图 3 所示,具体粒径配比如表 2 所示,从表 3 可知, #1 级配砂样级配良好, #2 级配、#3 级配砂样级配不良。不同粒径与级配钙质砂物理性质如表 4 所示。

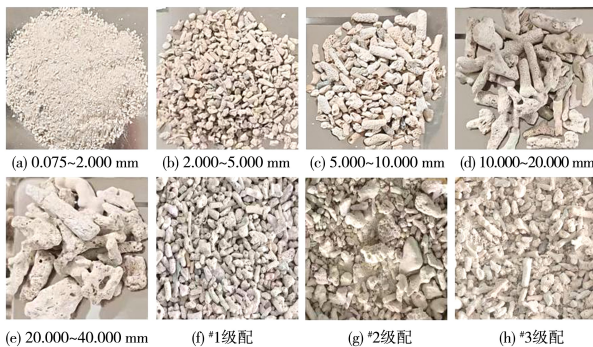


图 2 不同粒径钙质砂颗粒

Fig.2 Calcareous sand particles with different particle sizes

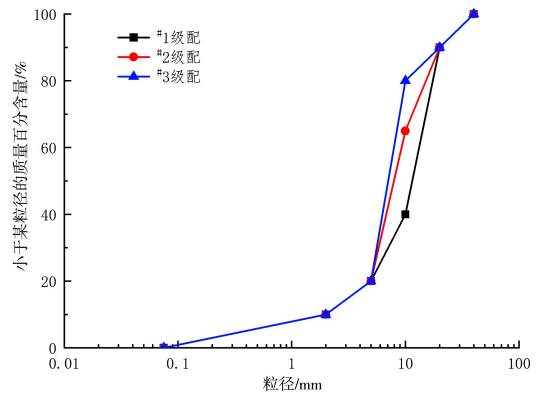


图 3 初始级配曲线

Fig.3 Initial gradation curve

表 2 3 种级配钙质砂的粒径分布

Tab.2 Particle size distribution of three graded calcareous sands

编号	不同粒径(mm)所占百分比/%				
	20.000~40.000	10.000~20.000	5.000~10.000	2.000~5.000	0~2.000
#1 级配	10	50	20	10	10
#2 级配	10	25	45	10	10
#3 级配	10	10	60	10	10

表 3 3 种级配钙质砂的不均匀系数和曲率系数

Tab.3 Non-uniformity coefficient and curvature coefficient of three graded calcareous sands

试样编号	$d_{60}/$ mm	$d_{30}/$ mm	$d_{10}/$ mm	C_u	C_c	级配情况
#1 级配	14.00	7.00	2.00	7.00	1.75	良好
#2 级配	9.20	5.80	2.00	4.60	1.83	不良
#3 级配	79.00	5.80	2.00	3.95	2.13	不良

注: d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} 分别表示颗粒累计分布的 60%、30%、10% 处的直径, C_u 表示颗粒的不均匀系数, C_c 表示颗粒的曲率系数。 $C_u \geq 5$ 且 $3 > C_c > 1$ 时, 级配良好。

表 4 不同粒径与级配钙质砂的物理性质指标

Tab.4 Physical property indicators of calcareous sand with different particle sizes and gradations

试样编号	$G_s/g \cdot cm^{-3}$	$\rho_{d_{min}}/g \cdot cm^{-3}$	$\rho_{d_{max}}/g \cdot cm^{-3}$
S1	2.775	0.786	0.876
S2	2.765	0.848	1.052

表 4(续)

试样编号	$G_s/g \cdot cm^{-3}$	$\rho_{d_{min}}/g \cdot cm^{-3}$	$\rho_{d_{max}}/g \cdot cm^{-3}$
S3	2.793	0.915	1.046
S4	2.769	0.872	1.190
S5	2.751	1.241	1.379
#1 级配	2.493	0.928	1.100
#2 级配	2.554	0.951	1.268
#3 级配	2.576	0.960	1.139

注: G_s 表示钙质砂样比重, $\rho_{d_{min}}$ 表示最小干密度, $\rho_{d_{max}}$ 表示最大干密度。

1.2 试验方案

本研究以南海某岛礁钙质砂为实验材料,开展一系列三轴固结不排水剪切试验。

试验采用的仪器系统为西安康拓力公司生产的伺服电机控制全自动大型三轴系统。试验过程中可通过智能试验平台命令伺服电机,以压力室底座的抬升来施加轴向力和轴向变形,实验过程中可以实时记录并保存数据;压力室最大直径 700 mm,最大高度 1300 mm;加载杆直径 50 mm,加载架最高承受压力 128 kN;无限体积压力控制器,压力量程为 2 MPa;荷载传感器的量程为 100 kPa。该设备适用于粗粒土大尺寸试样饱和条件下的三轴试验。

试样尺寸为 300 mm(直径)×600 mm(高度)。试验采用应变控制方式,控制试样初始密实度 30%。

设计有效围压分别为 50、100、200 kPa,以 0.6 mm/min 的剪切速率进行三轴固结不排水剪切试验,以轴向应变达到 20% 作为试验终止标准。试验一共 8 种试样,3 种有效围压,试验共进行 8×3=24 组。

2 分析与讨论

2.1 应力应变曲线与孔压应变曲线

不同围压下的应力-应变曲线选取了粒径 10.000~20.000 mm 分析,如图 4 所示,从图 4 可以看出围压能够显著影响峰值偏应力,峰值偏应力随围压的增大而增大。10.000~20.000 mm 钙质砂在不同围压下均表现为应变强化,且随着围压增大应变强化越显著。

选取了围压为 200 kPa 的应力应变曲线(图 5)和孔压应变曲线(图 6)进行分析。

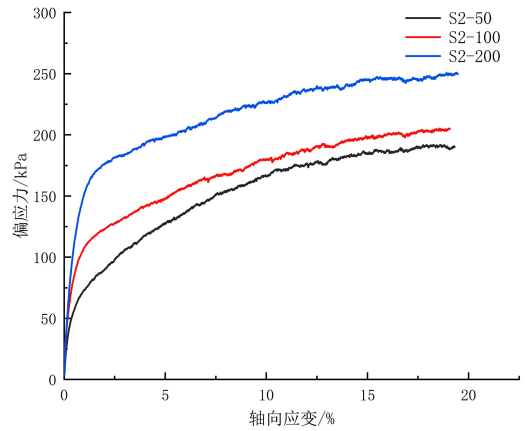


图 4 不同围压下应力~应变曲线

Fig.4 Stress strain curves under different confining pressures

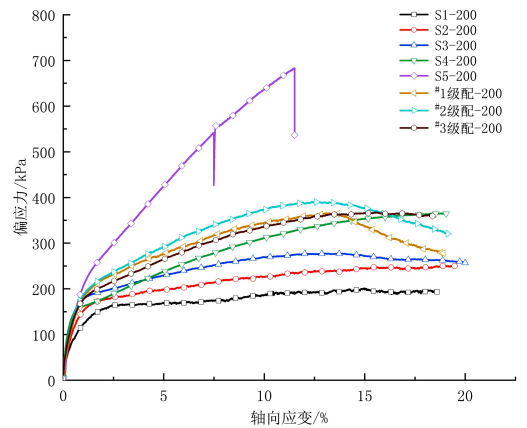


图 5 200 kPa 不同粒径组试样应力~应变曲线

Fig.5 Stress strain curves of samples with different particle sizes at 200 kPa

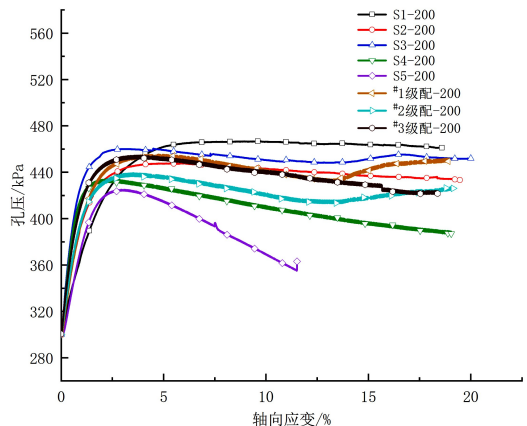


图 6 200 kPa 不同粒径组试样孔压~应变曲线

Fig.6 Pore pressure strain curves of samples with different particle sizes at 200 kPa

从图 5 可见,各试样的应力-应变曲线均表现出明显的非线性特征,且在较高应变范围内出现一定程度的离散性。其中,S2~S5 这 4 种试样的偏应力随着轴向应变的增加逐渐增大,且增长趋势逐渐趋于平缓。S1 出现不同是由于在有效围压 200 kPa 下,砂样过于密实,饱和过程中无限体积压力控制器长时间过载运行,最终崩溃停止。通过不同级配试样的比较发现,级配对材料的力学响应也存在一定影响,尤其是在高应变区域,不同级配的差异更为明显。总体来看,各试样在较低应变范围内表现出相似的应力增长规律,而在高应变下则展现出一定的变异性,这可能与钙质砂的微观结构和内部组成有关。结合分析孔压~应变关系曲线,砂样在剪切初期孔压迅速增长,在累积达到峰值后逐渐下降,说明砂样剪切过程先发生剪切然后剪胀,同时发现剪胀效应随粒径减小而显著增强;试验后期各粒径砂样孔压增量较大,总应力大部分由孔隙水压力承担,颗粒间的应力较小,且随着粒径减小,在同围压条件下孔压增量也呈增大趋势,而 2.000~0.075mm 砂样孔压增量反而比大一级粒径组砂样小是因为剪切过程中砂样过于密实,有效应力较大。

2.2 级配曲线

本研究通过一系列不排水三轴剪切试验对试样进行了测试,并在试验后进行了筛分试验,得到了试验后颗粒破碎的级配曲线,如图 7 所示。图 7 (a)~图 7 (h) 描述的是松散状态下 ($D_r=30\%$) 不同粒径钙质砂试样试验前后的颗粒级配曲线。从图 7 可以看出钙质砂颗粒在剪切过程中较大颗粒破碎后会形成粒径略小颗粒及细粉状颗粒,其中破碎成下一粒径组颗粒质量百分比最高。在有效围压 100 kPa 下各粒径组钙质砂均发生了不同程度的颗粒破碎,如粒径为 10~20 mm 的钙质砂颗粒破碎至 10 mm 以下颗粒的总质量达到 25.53%;单一粒径组颗粒破碎程度与粒径大小呈正相关,同一围压下,钙质砂颗粒粒径越大,颗粒破碎程度越大,较单一粒径组颗粒而言,3 种级配砂样在颗粒破碎后,其级配曲线与其初始级配曲线变化不大,但会让级配向着整体更连续的方向发展。

5 种单一粒径组和 3 种级配砂样在不同围压

下破碎后的级配曲线变化趋势基本一致,试验后的级配曲线整体呈现向左偏移的趋势,随着围压的增大,同一粒径的颗粒的破碎程度也随之增大,但颗粒破碎并不会无限发生,当破碎达到一定程度时便不会继续发生。3 种级配砂样颗粒的颗粒级配曲线在不同的围压下几乎重合

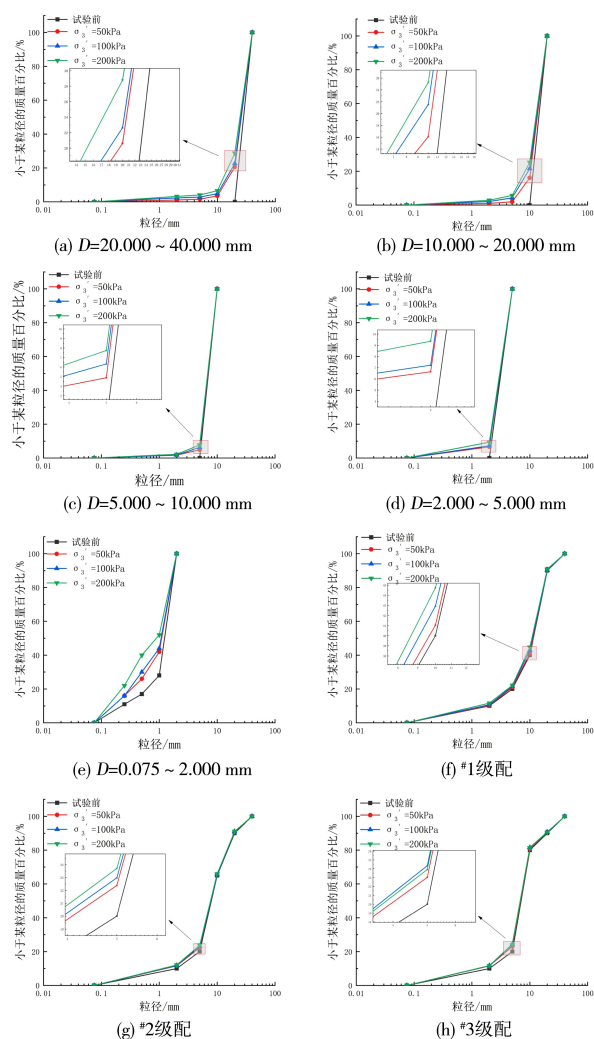


图 7 不同围压下试验前后颗粒级配曲线

Fig.7 Particle size distribution curve before and after testing under different confining pressures

2.3 特征粒径值和相关系数

尽管颗粒级配曲线可以展示钙质砂样在试验前后的粒径分布变化,但它无法精确量化这种级配的演变。因此,在多数级配演变的研究中,研究者们常采用特征粒径(如 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60})来计算不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。参考土工规范中关于土体级配的评价方法,本研究利用不均匀系数 C_u

和曲率系数 C_c 来判断级配的好坏,具体计算如式(1)式(2)。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (2)$$

式中, d_{60} 表示小于某粒径土颗粒质量占总质量 60% 的粒径, 又称限定粒径; d_{30} 表示小于某粒径土颗粒质量总质量 30% 的粒径, 又称中值粒径;

d_{10} 表示小于某粒径土颗粒质量总质量 10% 的粒径, 又称有效粒径。

图 8~图 10 给出了试验后不同粒径砂样的 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 等特征粒径和不均匀系数 C_u , 曲率系数 C_c 与围压的关系。从图 8 可以看出, 各粒径组钙质砂样特征粒径随围压增大而逐渐减小, 这说明在围压增大时, 试样内部颗粒破碎程度加剧, 试样中的细粒含量越来越多, 侧面反映了颗粒破碎过程是持续发生的过程。

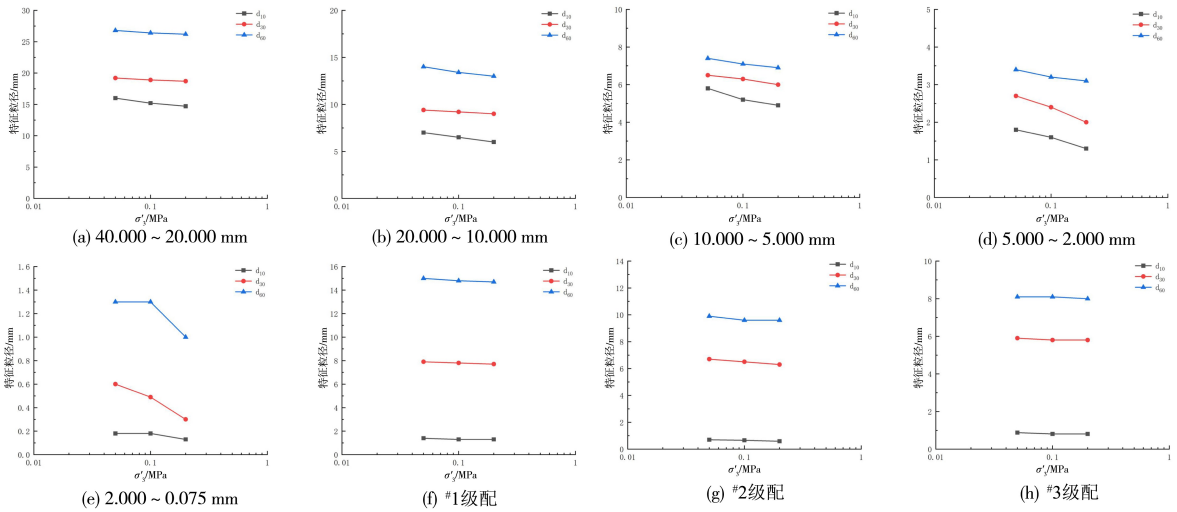


图 8 不同粒径钙质砂样试验后特征粒径值与围压关系

Fig.8 Relationship between characteristic particle size values and confining pressure of calcareous sand samples with different particle sizes after testing

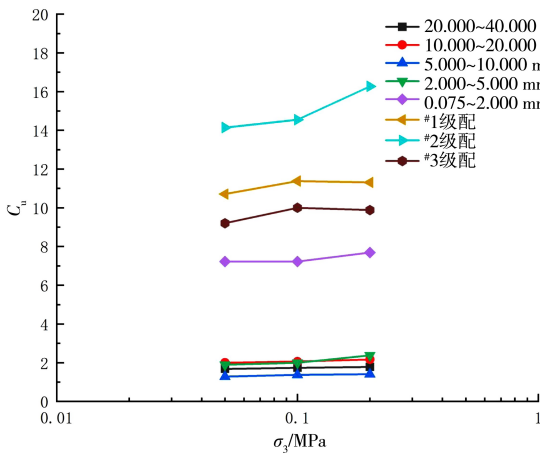


图 9 不均匀系数 C_u 与围压关系

Fig.9 Relationship between non-uniformity coefficient C_u and confining pressure

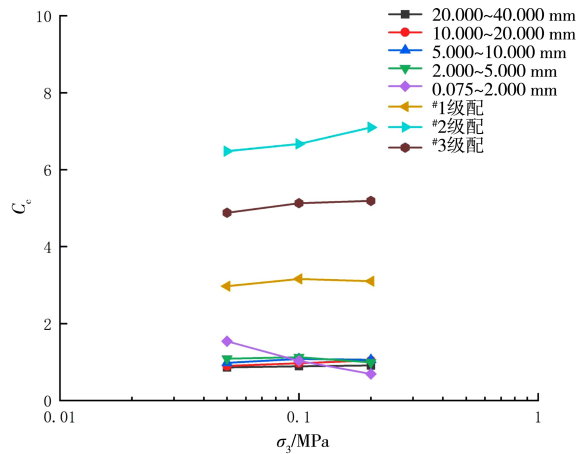


图 10 曲率系数 C_c 与围压关系

Fig.10 Relationship between curvature coefficient C_c and confining pressure

从图 9 和图 10 可知, 钙质砂样的不均匀系数 C_u 均随着围压的增大呈现出增大趋势, 5.000 mm 以下粒径组钙质砂样的曲率系数 C_c 则随着围压增大而减小, 而 3 种级配砂样的曲率系数均随着围压增大而增大, 表明了破碎过程中, 大粒径钙质砂颗粒破碎成若干小颗粒, 进一步使得级配不良向级配良好转化。#2 级配和 #3 级配砂样在不同围压下的曲率系数 C_c 始终大于 3, 几种单一粒径组的钙质砂样不均匀系数 C_u 始终小于 5, 说明即便初始砂样的级配不良, 但随着颗粒破碎的不断发生, 各粒径组的颗粒比重会逐渐增加, 从而使初始不连续的级配向着级配更好的方向发展, 凸显了颗粒破碎在级配演化过程中的关键作用。

2.4 相对破碎率

本研究采用 Hardin 提出的破碎模型, 这一模型把颗分曲线与粒径 $D=0.074$ mm 竖线所围面积称为初始破碎势 B_{p0} , 受力破碎后试样颗分曲线与初始曲线和 $D=0.074$ mm 竖线所围面积为总破碎 B_t , 从而定义了相对破碎率 B_r 为:

$$B_r = \frac{B_t}{B_{p0}} \quad (3)$$

图 11 展示了不同粒径组下相对破碎指数 B_r 与归一化围压 σ_c/Pa ($Pa=101$ kPa) 的关系。

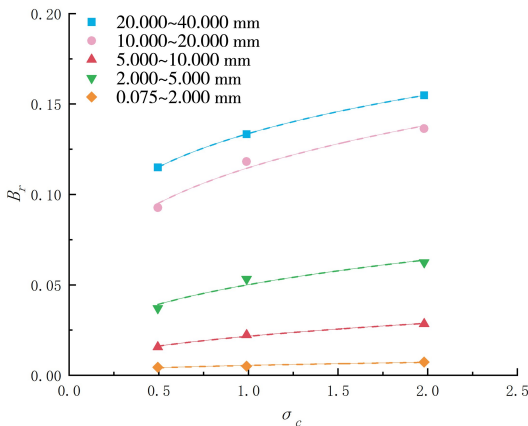


图 11 相对破碎率 B_r 与归一化围压的关系

Fig.11 Relationship between relative fragmentation rate B_r and normalized confining pressure

由图 9 可知, 同一粒径组, 随着围压的增加, 相对破碎率也相应增大, 但这一增长趋势并非匀速, 而是在初始阶段迅速上升, 随后增速逐渐减缓。这表明在低应力水平下, 颗粒破碎已经发生, 且随着应力的增加颗粒破碎最终会停止。同一围压下粒径越大相对破碎率越大, 有效围压为

200 kPa 时, 20.000 ~ 40.000 mm 钙质颗粒相对破碎率最高可达 15.48%, 10.000 mm 以下粒径组颗粒在 3 种有效围压条件下相对破碎率均小于 5%, 此外, 0.075 ~ 2.000 mm 钙质砂剪切后破碎较少, 在不同围压条件下破碎率均不足 1%。这是因为大颗粒的形状更不规则, 棱角度更高, 同时大颗粒内部含有更丰富的孔隙和裂缝, 故较大粒径颗粒更易发生破碎。

由图可知相对破碎指数 B_r 与归一化的围压 (σ_c/Pa) 之间呈现出显著的幂函数关系, 可表示为:

$$B_r = a \left(\frac{\sigma_c}{Pa} \right)^b \quad (4)$$

式中, a 、 b 为拟合参数, 表征相对破碎指数 B_r 随归一化的围压的增大而增大的程度, a 、 b 的具体数值如表 5 所示, 每一组粒径拟合曲线都有较强相关性。

表 5 关系式数值表

Tab.5 Numerical table of relationship equations			
粒径/mm	a	b	R^2
0.075~2.000	0.134	0.215	0.999
2.000~5.000	0.115	0.269	0.978
5.000~10.000	0.022	0.416	0.988
10.000~20.000	0.050	0.350	0.950
20.000~40.000	0.005	0.391	0.955

3 结论

本研究对取自南海某吹填岛礁的钙质砂进行了系统的大型三轴不排水剪切试验, 分析了不同组构形态钙质砂在不同围压条件下的力学特性和颗粒破碎演化规律。研究结果表明:

1) 围压是影响钙质砂剪胀特性的重要因素之一, 随着围压增大, 砂样的剪胀行为受到约束, 颗粒破碎程度加剧。钙质砂的剪切力学特性受颗粒破碎的影响较小, 受围压的影响较大。

2) 相对于单一粒径组颗粒, 级配砂样在颗粒破碎后, 其级配曲线变化不大, 曲率系数 C_c 表现出不同的变化趋势, 不均匀系数 C_u 随围压增大而增大, 说明级配向更好的方向发展。

3) 在相同的围压条件下, 钙质砂颗粒粒径对破碎程度影响较大, 20.000 ~ 40.000 mm 钙质颗粒相

对破碎率最高可达 15.48%,10.000 mm 以下粒径组颗粒在 3 种有效围压条件下相对破碎率均小于 5%,而 0.075~2.000 mm 钙质砂剪切后破碎较少,

在不同围压条件下破碎率均不足 1%。围压增大,同一粒径的颗粒破碎程度也随之增大,且相对破碎指数 B_r 与围压之间存在显著的幂函数关系。

参考文献:

- [1] 胡杰铭. 基于分形理论的单一粒径组钙质砂蠕变试验研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2021.
- [2] 孙吉主,汪稔. 三轴压缩条件下钙质砂的颗粒破裂过程研究[J]. 岩土力学,2003,24(5):822-825.
- [3] SHAHNAZARI H, REZVANI R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands; an experimental study [J]. Engineering Geology, 2013, 159:98-105.
- [4] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10):1177-1192.
- [5] 蔡正银,陈元义,朱洵,等. 级配对珊瑚砂颗粒破碎与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报,2023,45(4):661-670.
- [6] HU W, YIN Z Y, SCARINGI G, et al. Relating fragmentation, plastic work and critical state in crushable rock clasts[J]. Engineering Geology, 2018, 246:326-336.
- [7] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand [J]. Géotechnique, 2004, 54(3):157-163.
- [8] YU F W. Characteristics of particle breakage of sand in triaxial shear[J]. Powder Technology, 2017, 320:656-667.
- [9] 王嘉璐,张升,童晨曦,等. 基于染色标定的钙质砂颗粒破碎级配转移矩阵试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(8):2222-2232.
- [10] 汪轶群,洪义,国振,等. 南海钙质砂宏观破碎力学特性[J]. 岩土力学,2018,39(1):199-206,215.
- [11] 张家铭,张凌,刘慧,等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(S1):3010-3015.
- [12] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4(1):68-86.
- [13] 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.
- [14] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2004.
- [15] 胡波. 三轴条件下钙质砂颗粒破碎力学性质与本构模型研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.
- [16] WEI H Z, LI X X, ZHANG S D, et al. Influence of particle breakage on drained shear strength of calcareous sands[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(7):04021118.

(责任编辑:方素华)