

文章编号:0559-9350(2019)02-0184-09

密度与应力水平对珊瑚砂颗粒破碎影响试验研究

蔡正银¹, 侯贺营¹, 张晋勋², 张凤林², 关云飞¹, 曹永勇¹

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088)

摘要: 珊瑚砂在剪切过程中容易发生颗粒破碎, 而颗粒破碎与应力水平、初始密度以及应力路径等因素有关。为了研究密度和应力水平对珊瑚砂颗粒破碎的影响, 对珊瑚砂进行了三轴压缩试验和侧限压缩试验。文中建立了三轴压缩条件下颗粒相对破碎与围压和试样初始孔隙比之间的定量关系表达式, 以及相对破碎与试样平均粒径之间的关系表达式。研究表明, 在三轴压缩和侧限压缩条件下, 试样的相对破碎均随着应力水平(围压或竖向应力)和试样密度的增大而增大, 但两种应力路径下的颗粒破碎程度有显著的不同。

关键词: 珊瑚砂; 颗粒破碎; 三轴试验; 单向压缩

中图分类号: TU43

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20181068

1 研究背景

珊瑚砂是分布在珊瑚岛或珊瑚礁周围, 以珊瑚碎屑为主并有石灰藻、孔虫、棘皮动物碎片组成的钙质砂, 钙质含量达90%^[1]。由于碳酸钙颗粒强度低, 所以珊瑚砂易破碎。

近年来, 国内外学者基于三轴压缩和侧限压缩试验对珊瑚砂颗粒破碎进行了大量的研究。一些研究表明, 珊瑚砂的颗粒破碎对其强度和变形特性都会产生影响^[2-3]。刘崇权和汪稔^[4]进行了三轴排水条件下的钙质砂剪切试验, 采用Hardin提出的相对破碎^[5]的概念, 分析了三轴剪切条件下钙质砂相对破碎与塑性应变、塑性功和破碎功之间的关系, 推导出颗粒破碎过程中的能量方程, 建立了颗粒破碎与剪胀耦合的破碎功表达式。张家铭等^[6]开展了不同围压、不同应变下的钙质砂三轴压缩试验, 研究了颗粒破碎与围压及剪切应变之间的关系, 建立了试样破坏时平均有效正应力与相对破碎的关系曲线。Shahnazari和Rezvani^[7]通过三轴压缩试验研究了围压、相对密度、轴向应变、排水条件和粒径分布对钙质砂颗粒破碎的影响, 并分析了土体的输入能对颗粒破碎的影响。张家铭等^[8]通过侧限压缩试验, 研究了钙质砂侧限压缩条件下的颗粒破碎特性, 探讨了相对破碎与压力之间的关系, 但没有考虑初始密度对相对破碎的影响。毛炎炎等^[9]开展了不同含水率条件下的钙质砂侧限压缩试验, 分析了粒径、含水率对颗粒破碎和压缩变形的影响, 得到了含水率与相对破碎和压缩指数之间的关系曲线。王帅等^[10]利用液压万能试验机对不同粒径及其混合粒组的钙质砂进行侧限压缩试验, 研究了终止应力、平均粒径及干密度等对珊瑚砂颗粒破碎的影响。

除了三轴压缩和侧限压缩试验, 也有一些学者通过其它应力路径试验来研究钙质砂的颗粒破碎规律。Coop等^[11]通过一系列的环剪试验研究了钙质砂的颗粒破碎随剪应变的发展情况, 发现当土体的剪应变非常大时其级配不再发生变化, 达到一个稳定级配, 而此最终级配取决于施加的轴向压力

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879167); 中央级非营利性科研院所基金创新团队项目(Y317011); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y318009, Y318010); 马尔代夫维纳拉国际机场改扩建工程现场水文观测等科研专题研究(GJ-YX-2016-046)

作者简介: 蔡正银(1965-), 教授高级工程师, 博士生导师, 主要从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术研究。E-mail: zyc@nhri.cn

通讯作者: 侯贺营(1988-), 博士生, 主要从事土与结构相互作用研究。E-mail: houheyong1206@163.com

和试样的初始级配。Miao 和 Airey^[12]利用环剪和侧限压缩试验研究了钙质砂在大剪应变和大压应力下的颗粒破碎规律，发现在单剪和一维压缩条件下钙质砂的颗粒破碎规律相同，但其极限稳定状态完全不同。

上述研究表明，颗粒破碎是钙质砂区别于常规石英砂的显著特征，对钙质砂的强度和变形特性影响很大，值得深入研究和探讨。目前的绝大多数研究只局限于应力水平(围压或竖向应力)对钙质砂颗粒破碎的影响，很少考虑初始密度的影响，更没有系统建立颗粒破碎与应力水平和初始密度之间的关系。珊瑚砂的颗粒破碎主要是珊瑚碎屑等的破碎，这与其他材料的破碎型式不同，已有学者从微观方面对珊瑚砂的颗粒破碎型式进行研究^[15]。本文通过对珊瑚砂进行不同初始密度和围压的三轴固结排水压缩试验和单向压缩试验，研究了密度和应力水平对珊瑚砂颗粒破碎的影响及两种应力路径下的珊瑚砂颗粒破碎规律，提出了相对破碎与应力水平和初始密度的关系式，为后续建立考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂本构模型奠定基础。

2 珊瑚砂颗粒破碎试验方案

试验所用珊瑚砂主要成分为碳酸钙，颗粒比重 G_s 为 2.78。为了便于控制试验条件，对原试样进行筛分，除去粒径大于 2 mm 的颗粒，试样的粒径分布曲线如图 1 所示。

试验采用全自动三轴仪和全自动固结仪，依据《土工试验方法标准》^[13]进行，三轴试验的试样尺寸为 $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ，固结试验的试样尺寸为 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。对于三轴试验，为了探索围压和初始试样密度对颗粒破碎的影响，选择了 0.75、0.85 和 0.95 三种试样初始相对密度，围压分别为 100、200、300 和 400 kPa，共进行了 12 组三轴排水试验，剪切速率为 0.04 mm/min，试验终止应变为 25%；对于侧限压缩试验，为了探索竖向压力和初始试样密度对颗粒破碎的影响，同样选择了 0.75、0.85 和 0.95 三种试样初始相对密度，竖向应力分别为 400、800、1600 和 3200 kPa，共进行了 12 组试验。为了研究试验过程中的颗粒破碎情况，在每组试验结束后，对各试样进行颗粒分析，得到了试验后的粒径分布曲线，这样通过比较试验前后的粒径分布规律，可以得到珊瑚砂的颗粒破碎规律。

为了便于对试验前后试样的粒径分布曲线进行定量描述，一些学者采用了不同的参数。这些参数可以分为两类：第一类是根据试验前后某单一粒组的含量变化来确定试样颗粒破碎的大小，比如 Lee 等^[14]针对试验前后 d_{15} 的变化提出的破碎率 B_{15} 。第二类是根据试验前后颗粒级配的变化确定颗粒破碎的大小，如 Hardin^[5]提出的相对破碎 B_r 。相对破碎 B_r 是把初始粒径分布曲线与粒径 0.074 mm 竖线所围成的面积称为初始破碎势 B_p ，试验前后试样粒径分布曲线与粒径 0.074 mm 竖线所围成的面积为总破碎 B_t ，这样颗粒相对破碎 $B_r = B_t / B_p$ 。本试验选取相对破碎 B_r 作为表征颗粒破碎量的指标。

3 三轴排水剪切条件下珊瑚砂颗粒破碎规律

3.1 密度对珊瑚砂颗粒破碎的影响 围压分别为 100、200、300 和 400 kPa 条件下，相对密度分别为 0.75、0.85、0.95 的试样在三轴剪切试验前后的试样粒径分布曲线如图 2 所示。表 1 列出了 400 kPa 围压下 3 种初始密度的试样试验前后各粒组含量的变化，其它 3 种围压下的粒组含量变化规律基本一致，不再赘述。

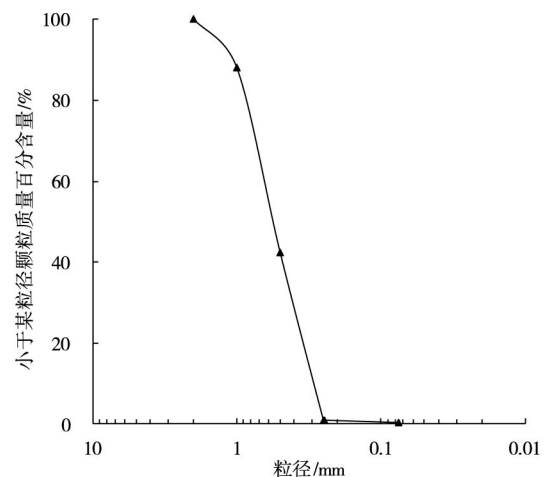


图 1 珊瑚砂的粒径分布曲线

表1 试验前后试样各粒组含量变化($\sigma_c=400\text{kPa}$) (单位: %)

	粒组/mm				
	2.00~1.00	1.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.075	<0.075
原始级配	12.0	45.6	41.5	0.6	0.3
$D_r=0.75$	7.3	48.7	37.5	5.1	1.4
$D_r=0.85$	8.0	42.7	41.1	6.4	1.7
$D_r=0.95$	7.0	39.0	45.5	6.6	1.9

由表1可知,当围压为400 kPa时,与原始级配相比,各密度下2.00 ~ 1.00 mm粒组含量在剪切过程中均有所降低,这说明2.00 ~ 1.00 mm粒组内的颗粒发生了一定的破碎。对于各密度试验后1.00 ~ 0.50 mm粒组的含量小于试验前该粒组含量与2.00 ~ 1.00 mm粒组含量减少量之和,这说明1.00 ~ 0.50 mm粒组的颗粒剪切过程中也发生了破碎。各密度下0.25 ~ 0.075 mm粒组和<0.075 mm粒组含量在试验后均有所增加,这说明2.00 ~ 0.25 mm各粒组内的颗粒剪切过程中一部分破碎成小于0.25 mm的颗粒。

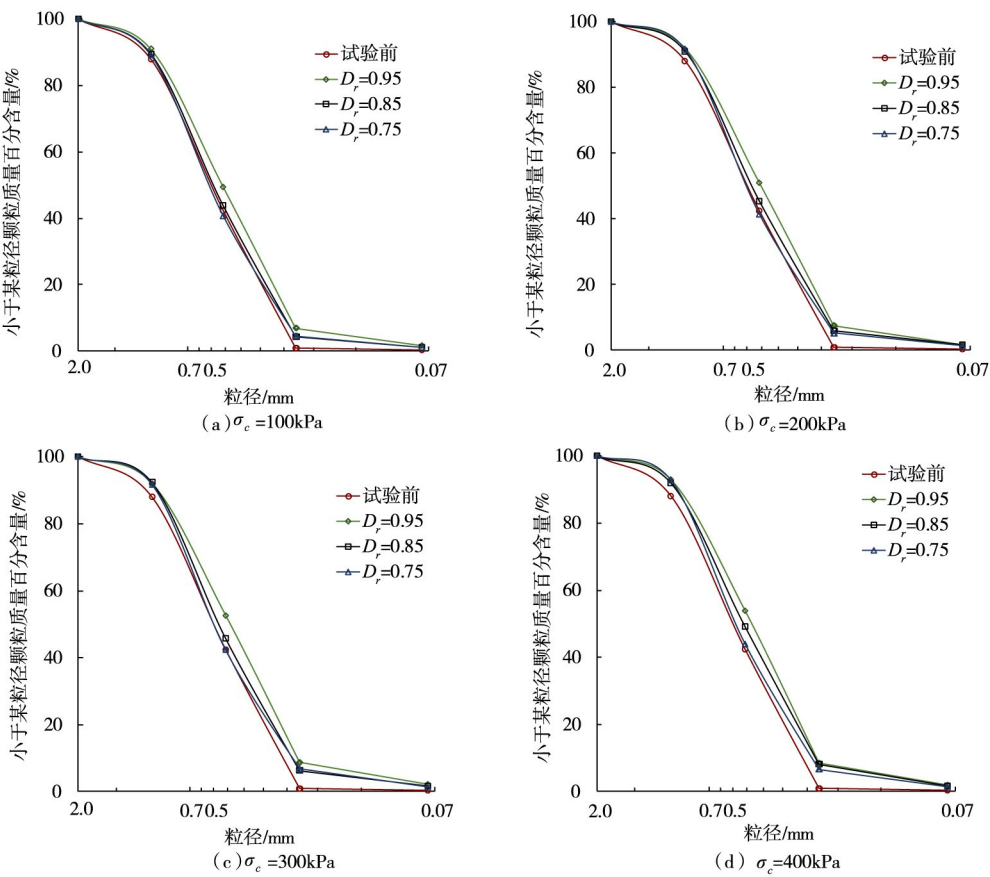


图2 三轴试验前后试样的粒径分布曲线

由图2可知,同样的围压下相对密度为0.75时试验前后试样的粒径分布变化最小,而相对密度为0.95时试验前后试样的粒径分布变化最大,这说明试验过程中的颗粒破碎随着相对密度的增大而增大。这是由于试验过程中,试样相对密度越大,说明试样越紧密。在剪切过程中,随着剪切位移的增大,珊瑚砂颗粒的滑动越来越困难,易造成颗粒的破碎。反之,对于较松状态的试样,剪切过程中颗粒较易移动,因此破碎量较小。

综上所述,对于本文研究的珊瑚砂,当试样的围压一定时,相对密度对珊瑚砂三轴剪切过程中的颗粒破碎影响较大,相对密度越大,颗粒破碎越严重。

3.2 围压对珊瑚砂颗粒破碎的影响 相对密度分别为0.75、0.85和0.95的试样在100、200、300和

400 kPa 四种围压下的三轴剪切试验前后的试样粒径分布曲线如图 3 所示。表 2 列出了相对密度为 0.95 的试样试验前后各粒组含量的变化，其它 2 种密度下的粒组含量变化规律基本一致，不再赘述。

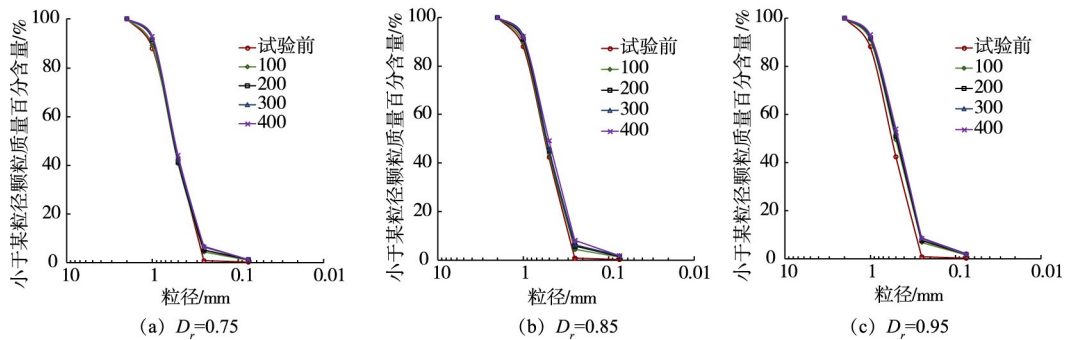


图 3 三轴试验前后试样粒径分布曲线

表 2 三轴剪切试验前后试样各粒组含量变化(D_r=0.95) (单位：%)

	粒组/mm				
	2.00~1.00	1.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.075	<0.075
原始级配	12.0	45.6	41.5	0.6	0.3
$\sigma_c=100\text{kPa}$	8.1	40.9	43.4	5.8	1.8
$\sigma_c=200\text{kPa}$	7.9	39.5	43.9	6.6	2.1
$\sigma_c=300\text{kPa}$	7.0	39.0	45.5	6.6	1.9
$\sigma_c=400\text{kPa}$	9.0	41.5	42.6	5.2	1.7

由表 2 可知，对于相对密度为 0.95 的试样，与原始级配相比，各围压下 2.00 ~ 1.00 mm 粒组含量均有所降低，这说明 2.00 ~ 1.00 mm 粒组内的颗粒剪切过程中发生了一定的颗粒破碎，围压越大，颗粒的破碎量越大。各围压下试验后 1.00 ~ 0.50 mm 粒组的含量小于试验前该粒组含量，这说明 1.00 ~ 0.50 mm 粒组的颗粒剪切过程中也发生了颗粒破碎。各围压下 0.25 ~ 0.075 mm 粒组和 <0.075 mm 粒组含量均有所增加，这说明 2.00 ~ 0.25 mm 各粒组内的剪切过程中颗粒发生了颗粒破碎，有一部分破碎成小于 0.25 mm 的颗粒。

由图 3 可知，同样的相对密度下，围压为 400 kPa 时试验前后试样的粒径分布变化最大，围压为 100 kPa 时试验前后试样的粒径分布变化最小，这说明试验过程中的颗粒破碎程度随着围压的增大而增大。试样前后粒径变化主要集中在 0.5 ~ 2 mm 范围内。

3.3 三轴剪切条件下珊瑚砂颗粒破碎规律 试样的相对破碎 B_r 不仅可以表征试验前后试样粒径的大小，而且能较为全面地反映颗粒破碎后的粒径分布情况。根据定义， B_r 可以通过剪切前后试样的粒径分布曲线求得。表 3 是三轴剪切条件下围压 σ_c 和初始孔隙比 e_0 与通过试验计算得到的相对破碎 B_r 及平均粒径 d_{50} 的对应关系。由于 B_r 是无量纲量，为便于分析将围压 σ_c 除以标准大气压强 p_a 转化为无量纲量。

图 4 是试验得到的三轴剪切条件下试样的相对破碎 B_r 与 σ_c/p_a 之间关系曲线。从图中可以发现，对于具有相同初始密度 e_0 的试样，随着围压的增大相对破碎逐渐增大， B_r 与 σ_c/p_a 之间有很好的线性关系，3 种不同密度试验的 $B_r \sim \sigma_c/p_a$ 直线基本平行。

图 5 是试验得到的三轴剪切条件下试样的相对破碎 B_r 与初始密度 e_0 之间关系曲线。从图中可以发现，当围压保持不变时，颗粒破碎的发生随着密度的增大而增大， B_r 与 e_0 之间有很好的线性关系，4 种不同围压下的 $B_r \sim e_0$ 直线基本平行。

基于上述分析可知，试样的相对密度、围压对颗粒破碎程度有一定的影响，故可设相对破碎是围压、初始孔隙比的函数，即：

$$B_r=f\left(e_0,\sigma_c\right) \tag{1}$$

表3 三轴剪切条件下 σ_c 和 e_0 与 B_r 及 d_{50} 对应关系

D_r	e_0	σ_c/kPa	B_p	B_r	$B_r=B_r/B_p$	d_{50}
0.95	0.931	100	60.4819	6.3137	0.10439	0.503
		200	60.4819	7.7091	0.127461	0.494
		300	60.4819	8.7198	0.144172	0.486
		400	60.4819	9.8596	0.163017	0.480
0.85	0.972	100	60.4819	2.5872	0.042776	0.539
		200	60.4819	4.6294	0.076542	0.530
		300	60.4819	5.93325	0.0981	0.523
		400	60.4819	7.2884	0.120506	0.493
0.75	1	100	60.4819	1.13868	0.018827	0.543
		200	60.4819	3.31383	0.05479	0.538
		300	60.4819	4.17793	0.069077	0.531
		400	60.4819	5.46139	0.090298	0.525

由图4和图5可知，珊瑚砂颗粒相对破碎与围压和初始孔隙比均呈线性关系，可以用下式来表示：

$$B_r = \alpha - \beta e_0 + \lambda (\sigma_c / p_a) \quad (2)$$

式中， α 、 β 、 λ 为材料参数，对于本文研究的珊瑚砂， $\alpha=1.22$ ， $\beta=1.23$ ， $\lambda=0.023$ 。

图6是试样初始平均粒径 d_{50} 与相对破碎 B_r 的关系。由图可知，二者基本呈现线性关系，相对破碎 B_r 随 d_{50} 增大而减小。可以表示为：

$$B_r = b - a d_{50} \quad (3)$$

式中， a 、 b 为材料参数，对于本文研究的珊瑚砂， $a=1.80$ ， $b=1.02$ 。

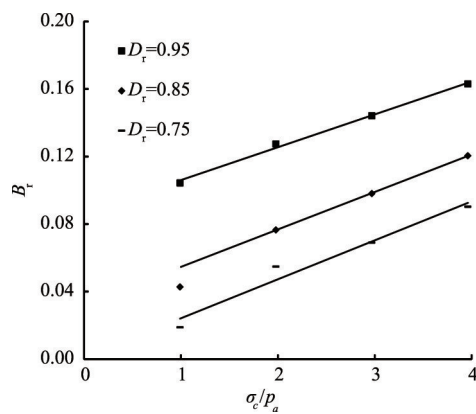


图4 三轴剪切条件下 B_r 与 σ_c/p_a 之间的关系曲线

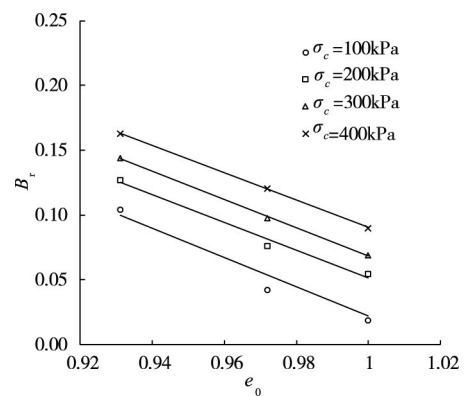


图5 三轴剪切条件下 B_r 与 e_0 之间的关系曲线

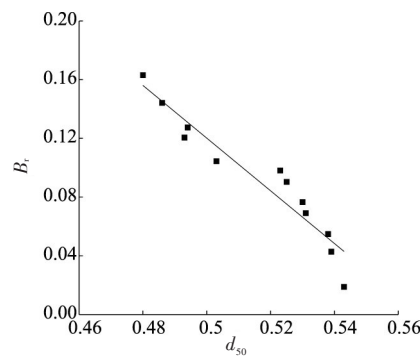


图6 三轴剪切条件下 d_{50} 与 B_r 的关系

4 侧限压缩条件下颗粒破碎规律

4.1 密度对珊瑚砂颗粒破碎的影响 竖向压力分别为 400、800、1600 和 3200 kPa 条件下，相对密度分别为 0.75、0.85、0.95 的试样在侧限压缩试验前后的试样粒径分布曲线如图 7 所示。表 4 列出了 400 kPa 竖向压力下 3 种初始密度的试样试验前后各粒组含量的变化。

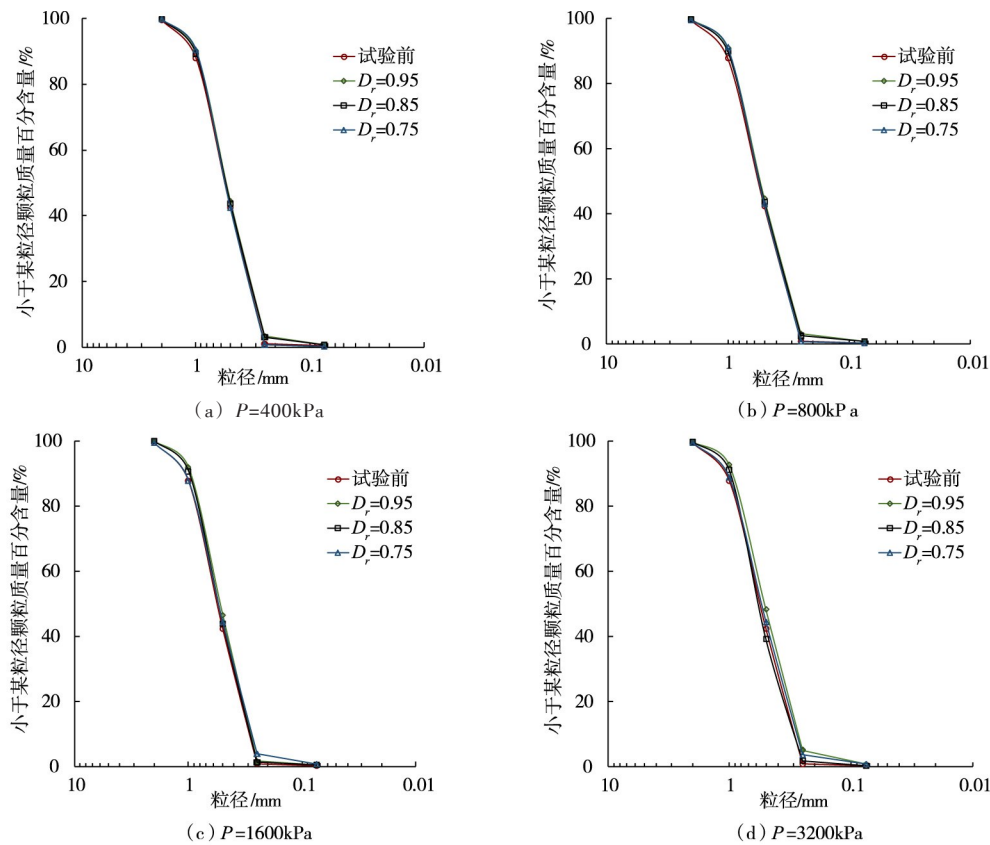


图 7 侧限压缩试验前后试样的粒径分布曲线

表 4 侧限压缩试验前后试样各粒组含量变化 ($P=400\text{kPa}$) (单位: %)

	粒组/mm				
	2.00~1.00	1.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.075	<0.075
原始级配	12.0	45.6	41.5	0.6	0.3
$D_r=0.75$	9.5	48.1	41.5	0.7	0.3
$D_r=0.85$	10.7	45.5	40.8	2.3	0.7
$D_r=0.95$	9.8	45.8	41.1	2.7	0.6

由表 4 可以发现，竖向应力为 400 kPa 时，与原始级配相比，各相对密度下 2.00 ~ 1.00 mm 粒组含量均有所降低，1.00 ~ 0.50 mm 粒组的含量与试验前该粒组含量相近，而 0.25 ~ 0.075 mm 粒组和 < 0.075 mm 粒组含量均有所增加，这说明各粒组内的颗粒在剪切过程中均发生了颗粒破碎。其他竖向应力下的珊瑚砂颗粒变化规律与 400 kPa 下的颗粒变化规律基本一致。

由图 7 和表 4 可知，竖向应力为 400 kPa 时试验前后试样的粒径分布变化最小，竖向应力为 3200 kPa 时，试验前后试样的粒径分布变化最大，这说明试验过程中的颗粒破碎随着竖向应力的增大而增大。

4.2 竖向应力对珊瑚砂颗粒破碎的影响 相对密度分别为 0.75、0.85 和 0.95 的试样在 400、800、1600 和 3200 kPa 四种竖向压力下的侧限压缩试验前后的粒径分布曲线如图 8 所示。表 5 列出了相对密

度为0.95的试样试验前后各粒组含量的变化。

由表5可知，对于相对密度为0.95的试样，与原始级配相比，各竖向应力下2.00~1.00 mm粒组含量均有所降低，1.00~0.50 mm粒组的含量与试验前该粒组含量相近，0.25~0.075 mm粒组和<0.075 mm粒组含量均有所增加，这说明各粒组内的颗粒在剪切过程中均发生了颗粒破碎。其他相对密度的珊瑚砂颗粒变化规律与相对密度为0.95的颗粒变化规律基本一致。

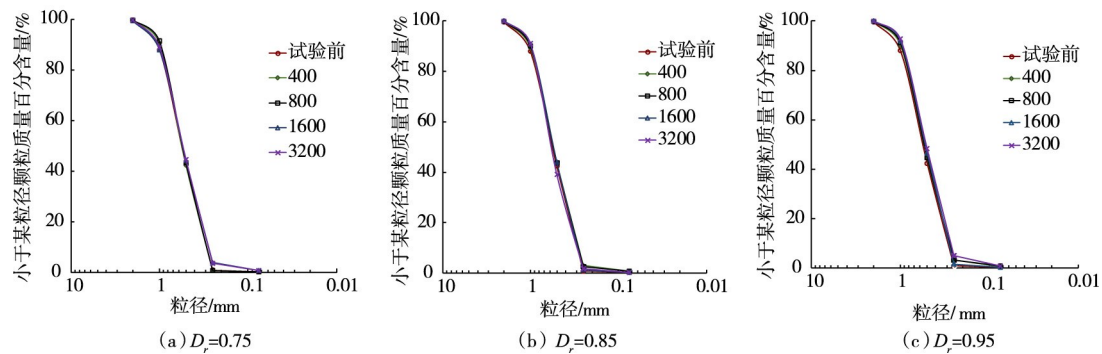


图8 试样前后的粒径分布曲线

表5 侧限压缩试验前后试样各粒组含量变化($D_r=0.95$) (单位: %)

	粒组/mm				
	2.00~1.00	1.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.075	<0.075
原始级配	12.0	45.6	41.5	0.6	0.3
$P=400\text{kPa}$	9.8	45.8	41.1	2.7	0.6
$P=800\text{kPa}$	8.9	46.3	41.7	2.4	0.7
$P=1600\text{kPa}$	8.0	45.4	45.0	1.2	0.3
$P=3200\text{kPa}$	7.3	44.4	43.2	4.2	0.9

由图8和表5可知，相对密度为0.95时试验前后试样的粒径分布变化最大，相对密度为0.75时试验前后试样的粒径分布变化最小，这说明试验过程中的颗粒破碎随着相对密度的增大而增大。

4.3 侧限压缩条件下颗粒破碎规律 表6是侧限压缩条件下竖向应力 P 、初始密度 e_0 、相对破碎 B_r 及平均粒径 d_{50} 的对应关系，图9是相对破碎 B_r 与竖向压力 P 的关系曲线。由于 B_r 是无量纲量，所以将竖向压力 P 除以标准大气压强 p_a 转化为无量纲量。

图10是相对破碎 B_r 与初始孔隙比 e_0 的关系曲线。从图中可以发现侧限压缩条件下，如果施加同样的竖向压力，随着初始孔隙比的增大，相对破碎逐渐减小，相对破碎 B_r 与 e_0 具有较好地线性关系。但

表6 侧限压缩条件下 P 、 B_r 及平均粒径对应关系

D_r	e_0	P/kPa	B_p	B_r	$B_r=B_r/B_p$	d_{50}
0.95	0.931	3200	60.4819	6.6819	0.110478	0.509
		1600	60.4819	4.68761	0.077504	0.521
		800	60.4819	3.7269	0.06162	0.530
		400	60.4819	2.93565	0.048538	0.533
0.85	0.972	3200	60.4819	3.6519	0.06038	0.530
		1600	60.4819	2.79703	0.046246	0.535
		800	60.4819	2.3994	0.039671	0.536
		400	60.4819	1.98065	0.032748	0.537
0.75	1	3200	60.4819	2.18315	0.036096	0.533
		1600	60.4819	1.3919	0.023013	0.535
		800	60.4819	1.13893	0.018831	0.537
		400	60.4819	1.2194	0.020161	0.543

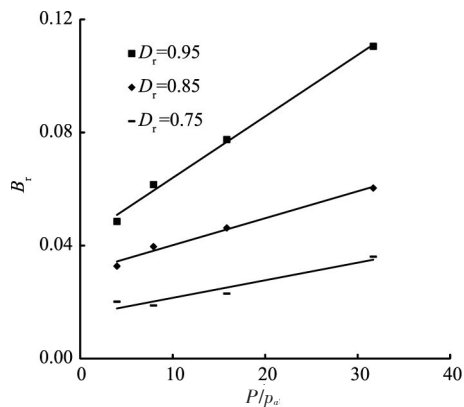


图9 侧限压缩条件下 B_r 与 P/p_o 之间的关系曲线

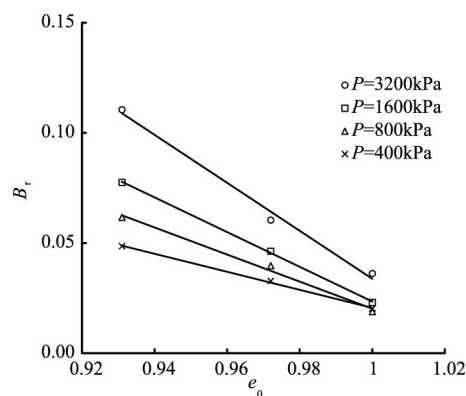


图10 侧限压缩条件下 B_r 与 e_o 之间的关系曲线

表7 不同试验条件下相对破碎 B_r 对比

相对密度	三轴剪切试验			单向压缩试验	
	围压/kPa	偏应力最大值/kPa	B_r	竖向应力/kPa	B_r
0.95	100	440.33	0.10439	400	0.048538
	200	905.14	0.127461	800	0.06162
	300	1361.92	0.144172	1600	0.077504
	400	1647.9	0.163017	3200	0.110478

是,对于施加不同竖向应力的试验,得到的 $B_r \sim e_o$ 直线彼此不平行,这也与三轴剪切试验的结果完全不同。说明侧限压缩条件下珊瑚砂的颗粒破碎规律与三轴压缩条件下的颗粒破碎规律有较大差别。

5 不同加载条件下颗粒破碎规律对比分析

由表7可知,对比分析围压为100 kPa的三轴剪切试验和竖向应力为400 kPa单向压缩试验,三轴试验下的主应力差最大值为440.33 kPa,这与单向压缩试验下的竖向应力(为400 kPa)相差不大,但二者的相对破碎 B_r 相差很大(三轴剪切条件下的 B_r 约为单向压缩下的2.2倍)。总体来看,三轴剪切条件下的 B_r 基本上都要比单向压缩条件下的大。其他相对密度的试样呈现的变化规律与相对密度为0.95的相同。这说明与单向压缩条件相比,三轴剪切条件下颗粒更易于破碎。这是由于两种加载条件下试样的受力状态不同,三轴剪切条件下试样受到的是剪切作用,其剪切力很大,而单向压缩条件下试样受到的是压缩作用,所以两种试验条件下颗粒破碎差别较大。

6 结论

本文利用全自动三轴仪和全自动固结仪,开展了一系列不同密度、不同应力水平下的三轴固结排水剪切试验和单向压缩试验,并对试验前后的试样进行颗粒分析,研究了密度、应力水平对试验前后珊瑚砂试样粒径分布的影响,探讨了珊瑚砂的颗粒破碎规律,主要结论如下:

- (1)当试样围压或竖向应力一定时,珊瑚砂颗粒破碎随着相对密度的增大而增大。
- (2)当试样密度一定时,试验过程中的颗粒破碎随着围压或竖向压力的增大而增大。相对破碎与围压或竖向压力呈线性增长关系。
- (3)建立了三轴剪切条件下珊瑚砂相对破碎随初始孔隙比、应力的变化规律公式,可较好地描述颗粒破碎程度与各影响因素之间的关系。
- (4)在三轴剪切条件下,试样的相对破碎与平均粒径均可以用线性关系来表示。
- (5)与单向压缩条件相比,三轴剪切条件下珊瑚砂颗粒更易破碎。

参 考 文 献:

- [1] GB/T 50279-2014, 岩土工程基本术语标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 吴京平, 褚瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 49-55.
- [3] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043-2048.
- [4] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂在三轴剪切中颗粒破碎评价及其能量公式[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 366-371.
- [5] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [6] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2789-2793.
- [7] SHAHNAZARI H, REZVANI R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study [J]. Engineering Geology, 2013, 159(9): 98-105.
- [8] 张家铭, 汪稔, 石祥峰, 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.
- [9] 毛炎炎, 雷学文, 孟庆山, 等. 考虑颗粒破碎的钙质砂压缩特性试验研究[J]. 人民长江, 2017, 48(9): 75-78.
- [10] 王帅, 雷学文, 孟庆山, 等. 侧限条件下高压对钙质砂颗粒破碎影响研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 80-87.
- [11] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Geotechnique, 2004, 54(3): 157-163.
- [12] MIAO G, AIREY D. Breakage and ultimate states for a carbonate sand[J]. Geotechnique, 2013, 63(14): 1221-1229.
- [13] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [14] LEE K L, FARHOO MAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression [J]. Can. Geotech. J., 1967, 4(1): 68-86.
- [15] 汪轶群, 洪义, 国振, 等. 南海钙质砂宏观细观破碎力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 199-206, 215.

Experimental study on the influence of density and stress level on particle breakage of coral sand

CAI Zhengyin¹, HOU Heying¹, ZHANG Jinxun²,
ZHANG Fenglin², GUAN Yunfei¹, CAO Yongyong¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. Beijing Urban Construction Group Company Limited, Beijing 100088, China)

Abstract: During the shearing process, coral sand is prone to particle breakage, which is related to stress level, initial density and stress path. In order to study the effect of density and stress level on the particles breakage of coral sand, triaxial compression tests and one-dimensional compression tests were carried out. In this paper, the quantitative relationship between the relative breakage of particles and the confining pressure and the initial void ratio of the specimen under triaxial compression is established, as well as the relationship between the relative breakage and the average particle size of the sample. The results show that, under triaxial compression and one-dimensional compression, the relative breakage increases with the increase of stress level (confining pressure or vertical stress) and sample density, but the degree of particle breakage under the two stress paths is significantly different.

Keywords: coral sand; particle breakage; triaxial test; one-dimensional compression

(责任编辑: 耿庆斋)