DOI：10.16285/j.rsm.2017.0244

大位移剪切下钙质砂破碎演化特性

何建乔[1, 2]，魏厚振[1]，孟庆山[1]，王新志[1]，韦昌富[1]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：为了揭示钙质砂在大位移剪切作用下的破碎及形状演化规律，对南海钙质砂进行了系列不同剪切位移下的环剪试验。首先，利用筛分和激光粒度分析获取试验后的颗粒粒径分布，分析颗粒分布变化情况；其次，通过粒径分布对破碎进行定量分析；最后，运用图像处理技术计算颗粒圆度和扁平度，分析了颗粒形状的变化情况。试验结果表明，在不同的竖向压力下，颗粒会达到不同的稳定级配，但达到稳定所需的剪切位移相同；经历大位移剪切后，出现粒径为 0.01～0.075 mm 钙质砂破碎严重的现象；随剪切位移的增加，颗粒的圆度和扁平度减小。针对细小颗粒破碎严重的现象，修正了相对破碎率；修正后的相对破碎率能考虑粒径为 0.01～0.075 mm 颗粒发生的破碎。剪切后的钙质砂颗粒更为规则，整体轮廓趋于圆形、表面更光滑。

关 键 词：钙质砂；环剪试验；大位移；颗粒破碎；颗粒形状

中图分类号：TU 411 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 01－0165－08

Evolution of particle breakage of calcareous sand under large displacement shearing

HE Jian-qiao[1, 2], WEI Hou-zhen[1], MENG Qing-shan[1], WANG Xin-zhi[1], WEI Chang-fu[1]

（1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract: To reveal breakage behavior and deformation of particle shape for calcareous sand from the South China Sea with large shearing displacement, a series of ring shear tests was performed under controlled shear displacement. After ring shear, the particle size distributions of the samples were obtained by the sieving method and laser grain-size analyzer. The particle breakage was quantitatively examined by analyzing particle size distribution. The roundness and flatness was also analyzed to examine the variation of particle shape using the image processing technology. Experimental results indicate that shearing under different vertical pressures would lead to different stable graduations. However, the stable graduation is observed under the same shearing displacement. Severe breakage occurs in the samples with particle sizes of 0.01−0.075 mm after large displacement shearing. With the increase of the shear displacement, the roundness and the flatness of particles decrease. The relative breakage is modified to account for the severe breakage of fine grains (<0.075 mm) in large displacement shearing. The modified relative breakage ratio can cover the breakage of the particles with sizes of 0.01−0.075 mm. After large displacement shear, the shape of calcareous sand tends to be more regular, more rounded and smoother.

Keywords: calcareous sand; ring shear test; large displacement; particle breakage; particle shape

1 引 言

钙质砂的物理性质与常用陆源砂有很大差异。从成因上看，钙质砂是海洋生物的骨架经物理、化学作用形成，未经长距离沉积搬运，保留了原生生物骨架中的细小孔隙，因此颗粒具有内孔隙发育、形状不规则、颗粒强度低、易破碎等特点[1]。

经典土力学中通常认为土颗粒不存在破碎，因

收稿日期：2016-01-20
基金项目：国家自然科学基金项目(No. 41372316，No. 41572297)；中国科学院战略性先导科技专项（A 类）(No. XDA13010200)；中国科学院青年创新促进会(No. 2015272)。
This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372316, 41572297), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13010200) and the Youth Innovation Promotion Association of CAS (2015272).
第一作者简介：何建乔，男，1991 年生，硕士研究生，主要从事钙质砂工程力学特性方面的研究工作。E-mail: hejianqiao957@163.com
通讯作者：魏厚振，男，1980 年生，博士，副研究员，主要从事含天然气水合物土以及珊瑚钙质砂土工程力学特性方面的研究工作。
E-mail: hzwei@whrsm.ac.cn

为常用的陆源砂单颗粒强度高，一般不会发生破碎，如石英砂。早在 20 世纪初研究人员就注意到，高压力下颗粒会发生破碎。Terzaghi 等[2]通过一维压缩试验发现，当压力达到 96.5 MPa 时颗粒产生大量破碎。随着海洋工程的兴起，钙质砂在工程上的应用越来越广泛，由于钙质砂极易破碎的特点，在工程建设中钙质砂的颗粒破碎不容忽视。针对热带、亚热带岛礁上的钙质砂极易破碎的特点，研究人员对钙质砂的力学和变形特性进行研究。Coop[3]对爱尔兰岛上的钙质砂进行一维压缩试验和三轴试验研究，发现颗粒破碎对钙质砂压缩性起控制作用；Van Impe 等[4]对钙质砂进行模型槽试验，发现应力历史对应力−应变特性有重要影响；张家铭等[5]通过三轴试验对南海钙质砂的破碎进行研究，发现钙质砂的破碎不会无限发展，颗粒级配会达到稳定。三轴试验产生的剪切破坏面不固定甚至没有剪切破坏面，而且剪切位移也极为有限。但环剪试验的剪切位移不受限制，且在剪切过程中剪切面固定不变。为了探索大位移剪切下的颗粒破碎，Luzzani 等[6]对钙质砂进行一系列环剪试验和剪切盒试验，发现只有经过大位移剪切后体积才不发生改变，从而达到临界状态。Coop 等[7]通过对 Dogs Bay 砂进行环剪试验发现，大位移剪切后颗粒级配达到稳定，最终的级配取决于竖向压力大小和初始级配。在研究颗粒破碎中破碎的定量化尤为关键，因此研究人员针对颗粒破碎定量化开展研究。Hardin[8]从能量的角度定量分析破碎，提出了相对破碎率；Marsal[9]通过对比试验前后的颗粒含量分析破碎，定义了颗粒破碎参量 B_g。剪切过程中由于破碎导致颗粒形状发生改变，而颗粒的形状特性对无黏性土的力学特性有很大影响[10]。Sadrekarimi 等[11]运用扫描电镜对大位移剪切后的 Ottawa 砂和 Illinois River 砂的颗粒形态进行观察，发现颗粒经大位移剪切后锐度更大。钙质砂颗粒形状异于陆源砂，因此分析其颗粒形状特性至关重要。陈海洋等[12]运用统计方法和分形理论，借助光学显微镜提取钙质砂的二维投影，分析了其圆度等几何特征；刘清秉等[13]对不同形状的易碎材料进行直剪试验，研究其强度指标与颗粒形状参数关系，得到砂土临界摩擦角随颗粒的磨圆度和规则性的增加呈线性减小。

目前 Hardin[8]和 Marsal[9]提出的定量描述颗粒破碎的方法得到广泛应用，但对于大位移剪切过程中的颗粒破碎是否适用尚需进一步研究。此外，大位移剪切过程中颗粒破碎导致的粒径组成与形状的演化过程尚不明确。而在岛礁上沉桩过程中，桩周的钙质砂颗粒经历大位移的剪切，因此本文以南海某岛礁钙质砂为研究对象，开展系列环剪试验，并结合图像处理技术，对比试验前后颗粒形状变化特点，探索适用性更高的颗粒破碎定量参数，揭示不同剪切位移下钙质砂破碎及形状的演变规律。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

试验所用的钙质砂取自南海某岛礁。该岛礁钙质砂的相对密度为 2.79。采用德国布鲁克 AXS 公司生产的 D8 ADVANCE X 射线衍射仪对钙质砂的成分进行定量分析，得到该岛礁钙质砂中 $CaCO_3$、$MgCO_3$ 的含量分别为 81.08%、11.55%，表明其矿物成分主要为文石、白云石和方解石。

2.2 试验装置与方法

本试验采用的 DTA−138 型土工环剪仪是由日本诚研舍（SEIKEN. INC.）研制，通过对空心圆柱试样施加扭矩使试样发生剪切变形与剪切破坏，具有界面大变形、剪切过程中保持剪切面积不变，且应力均匀分布等特点。试样内直径为 100 mm，外直径为 150 mm，高度为 20 mm。

本文进行不同竖向压力、不同剪切位移的固结排水环剪试验。考虑到颗粒的尺寸效应及颗粒破碎统计的便利，本试验采用 0.5～1.0 mm 的单一级配。对原状砂样过筛冲洗后置于 105 ℃的烘箱中烘 24 h，得到粒径为 0.5～1.0 mm 干净的钙质砂。各试验采用的最小的干密度均为 1.03 g/cm^3，即初始孔隙比为 1.71。制样方法采用漏斗法（落雨法）[14]，该方法可以保证土体在试验前处于最小干密度。装试样时，先把环剪仪的上、下剪切盒固定好，然后把试样倒入漏斗，保证砂以零高度落差进入剪切盒，抚平试样，使其高度一致。采用浸水法饱和试样，试样装好后均匀倒入蒸馏水，直至完全浸没。浸泡 4 h 后组装加压系统和剪切系统。饱和结束后开始固结，固结压力分别为 200、300、400 kPa。剪切速率为 40 °/min（43.6 mm/min），剪切位移分别为 0.5、1.0、2.0、6.0、10.0、16.0、20.0 m。由于颗粒破碎导致试样剪切带颜色发生明显变化（图 1），本文用相对剪切带宽度（剪切带宽度与试样高度的比值）描述剪切带变化。因上、下两层非剪切带上的颗粒破碎很小[7]，可以忽略不计。本文主要分析剪切带上的颗粒破碎。取出剪切后的试样，分离出剪切带进行过筛冲洗、烘干，再获取钙质砂颗粒分布，其中大于 0.075 mm 的颗粒采用筛分法，小于 0.075 mm 的颗粒采用激光粒度分析法（仪器为英国马尔文公

司生产的 Mastersizer 3000）。

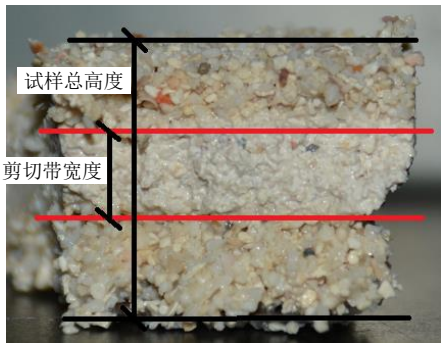


图 1　剪切后形成的剪切带
Fig.1　Shear band after shearing

2.3　颗粒破碎定量化

因为颗粒破碎表现为原颗粒破碎成多个细小的颗粒，直观地反映为颗粒级配的变化，所以对颗粒破碎进行定量分析可以通过对颗粒级配变化描述所代替。本文采用颗粒破碎量[9]和相对破碎率[8]进行分析。

Marsal[9]提出了颗粒破碎参量 B_g，即试验前后的颗粒级配曲线上某个粒径的百分含量变化值之和：

$$B_g = \sum_{k=1}^{n} \left| \Delta W_k \right| \tag{1}$$

式中：B_g 为颗粒破碎率；$\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf}$，$W_{ki}$ 为试验前级配曲线上某级粒组的含量；W_{kf} 为试验后级配曲线上相同粒组的含量。

Hardin[8]从能量的角度定量分析破碎，定义了相对破碎率 B_r，并假定小于 0.075 mm 的颗粒不可破碎。其计算公式如下：

$$B_r = B_t / B_{p0} \tag{2}$$

式中：B_{p0} 为图 2 中 *ABCD* 区域面积，表示破碎潜能；B_t 为 *ABCE* 区域面积，表示总体消耗的破碎能。

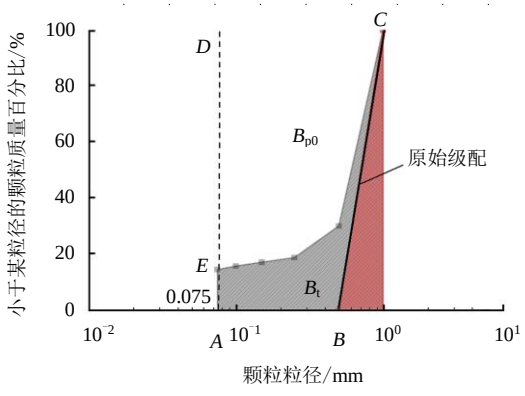


图 2　B_r 定义的示意图
Fig.2　Illustration definition of B_r

2.4　颗粒形状参数

利用显微镜获取颗粒的二维平面投影图像后，提取其基本几何参数，如颗粒轮廓周长、面积、最大费雷特直径、最小费雷特直径等。本文通过提取的几何参数对颗粒的形状特性进行分析。首先将灰度图像进行黑白二值化处理，然后把图像几何数据的像素单位转换成实际的长度单位，最后计算形状参数。本文采用扁平度[15]和圆度[16]评定颗粒形状。

扁平度[15]是描述颗粒整体轮廓的参数，其公式为

$$e = Feret_{max} / Feret_{min} \tag{3}$$

式中：e 为扁平度；$Feret_{max}$ 和 $Feret_{min}$ 分别为最大、最小费雷特直径（图 3）。圆度是 Liu 等[16]提出的概念，相较于扁平度的描述进一步细化，重点描述颗粒表面棱角的突出度或光滑度，即颗粒投影等效面积圆的半径与投影轮廓实际的半径之比的平方：

$$Roundness = P^2 / (4\pi A) \tag{4}$$

式中：*Roundness* 为圆度；*P* 为颗粒投影周长；*A* 为颗粒投影等效面积圆的面积。从物理意义上讲，扁平度参数值等于 1 时描述的颗粒为正方形或者标准圆，数值越大，表示越接近针状；圆度参数值描述标准圆时数值为 1，非圆颗粒的参数值均大于 1，参数值越大，说明颗粒表面越粗糙。由于对单个颗粒的形状变化进行分析没有代表性，因此本文采用统计的方法对颗粒的扁平度和圆度进行分析。

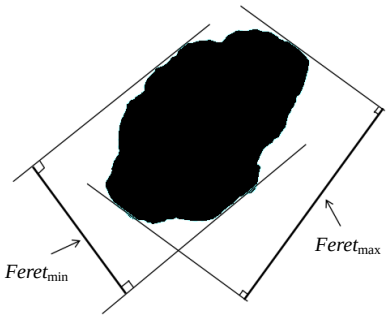


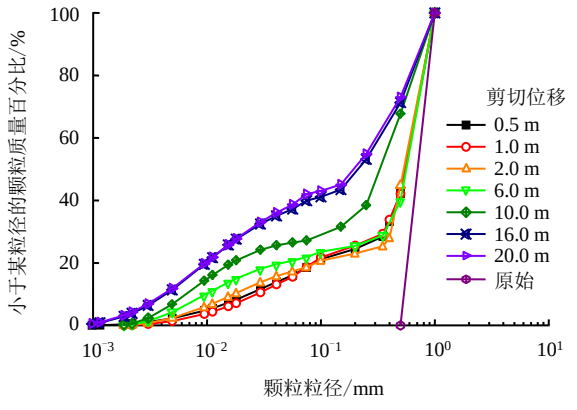
图 3　颗粒形状参数示意图
Fig.3　Illustration of the particle shape parameters

3　试验结果及分析

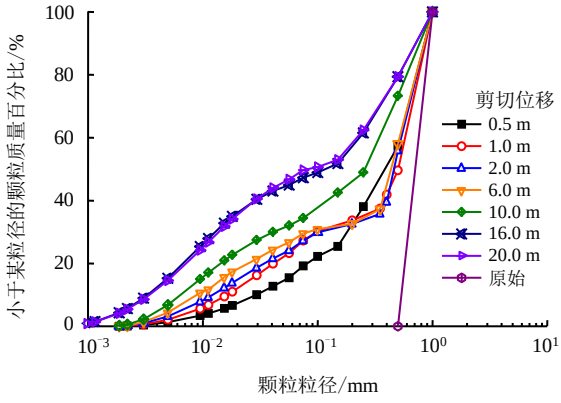
3.1　颗粒级配变化

原始级配为单一粒径 0.5～1.0 mm，据砂土分类得知试样属于中砂。由图 4 和表 1 可知，随着剪切位移的增加，不均匀系数 C_u 持续增大，颗粒分布宽度增加。剪切位移达到 0.5 m 后曲率系数 C_c 都不

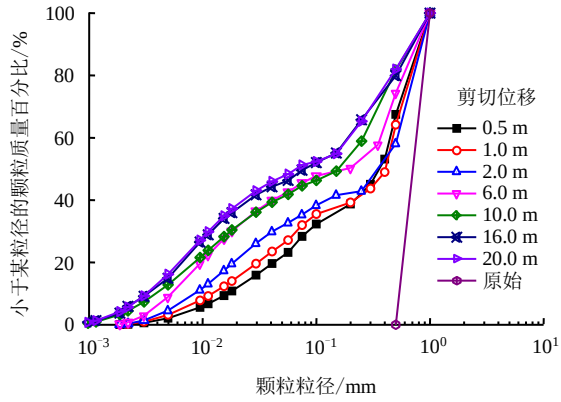
在 1～3 范围内，说明颗粒级配不良，存在某粒径缺少现象，颗粒级配都趋于平缓。



(a) 竖向压力为 200 kPa



(b) 竖向压力为 300 kPa



(c) 竖向压力为 400 kPa

图 4 不同剪切位移的颗粒级配曲线

Fig.4 Particle size distribution for various shear displacement

表 1 竖向压力为 200 kPa 的颗粒级配指标

Table 1 Index of particle size distribution for tests under 200 kPa

剪切位移/m	d_{50}	C_u	C_c	剪切位移/m	d_{50}	C_u	C_c
0.5	0.567	27.25	8.55	10.0	0.349	62.96	5.06
1.0	0.568	23.65	7.06	16.0	0.218	77.65	0.37
2.0	0.547	36.99	15.43	20.0	0.200	75.61	0.39
6.0	0.584	67.68	20.42				

以竖向压力为 200 kPa 的剪切为例，剪切位移为 0.5～2.0 m 区间内的平均粒径 d_{50} 的变化很小(表 1)，在 0.547～0.568 mm 范围内。当剪切位移增加时 C_u 变化不大，说明颗粒级配没有明显变化。但从整体颗粒破碎定量化分析得知，此时的颗粒破碎率持续增长（图 5），这种现象可以认为是“假稳定”阶段。该阶段试样的相对剪切带宽度（下文称剪切带宽度）迅速增加（图 6），导致破碎总量增多。剪切位移达 6.0 m 时，大于 0.1 mm 的颗粒含量与剪切位移为 0.5～2.0 m 区间的相近，而小于 0.1 mm 的细小颗粒差距较大。此时，“假稳定”状态被打破，细粒含量明显增加，与剪切位移为 2.0 m 时的 C_u 比较发现，C_u 增大了 30.69，说明粒径分布更广。剪切带宽度增加的同时，原剪切带上的颗粒再次破碎，而剪切带宽度增长的速度明显放缓（图 6），原剪切带上颗粒的再次破碎是导致细粒增多的主要原因。剪切位移在 6.0～16.0 m 区间时，各个粒径均发生较大变化，平均粒径 d_{50} 由 0.584 mm 减小至 0.218 mm，试样剪切带宽度也略有增加但变化不大，说明该阶段剪切带宽度变化带来的颗粒破碎量所占比例减小，而颗粒破碎量增加主要由原剪切带上的颗粒再破碎贡献。剪切位移为 16.0～20.0 m 区间时，颗粒级配曲线几乎重合，此时可以认为剪切位移达到 16.0 m 后颗粒级配不再发生变化，颗粒不再破碎。证实了 Coop 等[7]提出的剪切达到某一剪切位移后，颗粒级配曲线不会发生变化。经过位移为 0.5 m 的剪切后，大于 0.075 mm 的粒径含量都在 15%～50%区间内，因此经历大位移剪切后，原始的中砂由于颗粒破碎试样变成了粉砂。

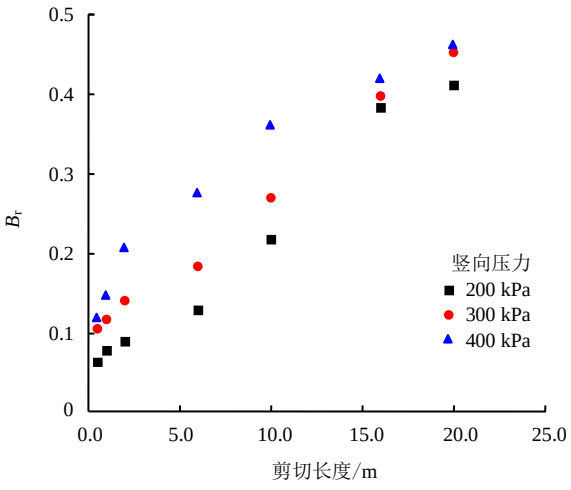


图 5 不同剪切位移整个断面上的 B_r

Fig.5 B_r in whole cross-section with various shear displacements

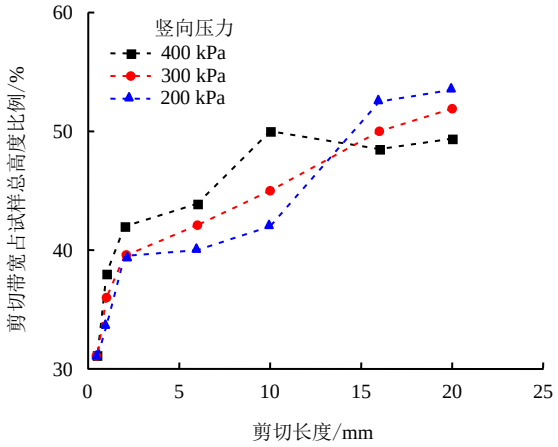


图 6　不同剪切位移下的剪切带宽度

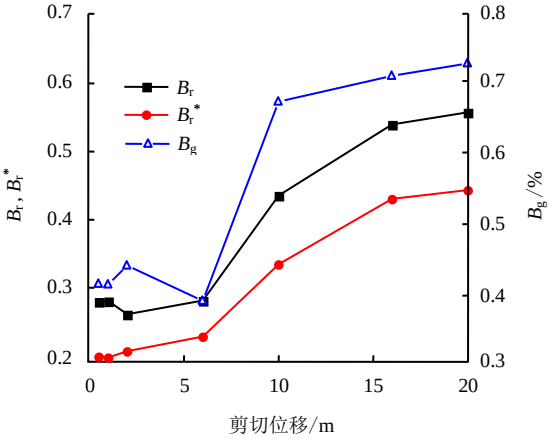
Fig.6　Breadth of shear band for various shear displacements

300 kPa 和 400 kPa 竖向压力下，剪切位移在 0.5～2.0 m 阶段时，大于 0.2 mm 颗粒的含量基本相同，但小于 0.2 mm 颗粒的含量存在差别，且随剪切位移的增加，级配曲线趋于平缓。说明在高竖向压力作用下的“假稳定”状态阶段，原剪切带上发生少量磨碎，这样的破碎形式对大颗粒的颗粒尺寸影响不大，但会产生大量细粒[17]。比较 200～400 kPa 竖向压力下的剪切时发现，虽然剪切位移为 16.0～20.0 m 区间颗粒级配都不发生变化，但最终的颗粒级配不同，而且高竖向压力作用下的级配曲线更为平缓，说明最终的颗粒级配与竖向压力有密切关系[7]。

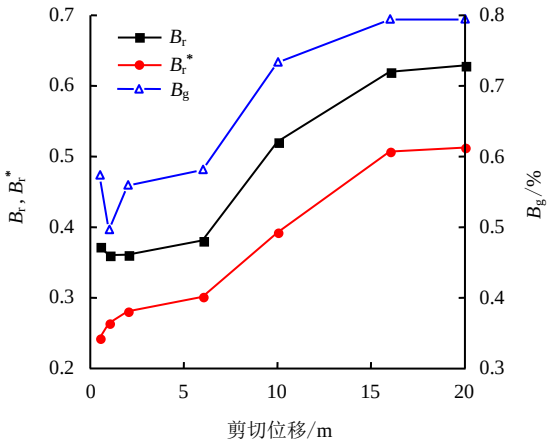
经历大位移剪切后，由于颗粒破碎，剪切带上的细颗粒不断增多，砂的状态发生改变，由中砂变为粉砂。在整个剪切过程中存在一个“假稳定”现象，即颗粒达到不再破碎状态前，颗粒破碎随剪切位移增加持续增加，而剪切带上的颗粒级配不变化的现象，出现该现象是因为颗粒破碎由原剪切带上破碎颗粒再次破碎和未经破碎颗粒发生破碎共同承担。剪切位移到达 16.0 m 后，剪切带上的颗粒级配不再发生变化，最终稳定的颗粒级配与竖向压力有关，与剪切位移无关。

3.2　颗粒破碎

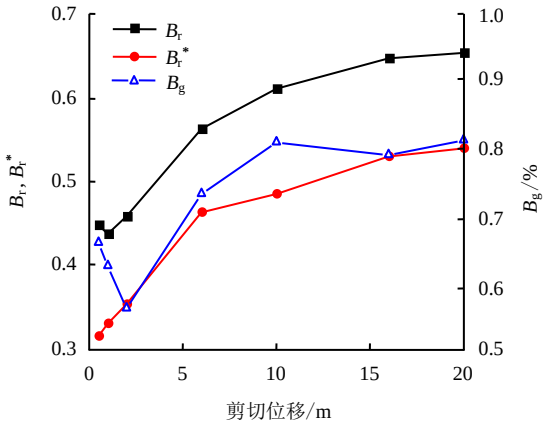
为定量研究不同剪切位移的颗粒破碎，本文采用颗粒破碎率 B_g[9]和相对颗粒破碎率 B_r[8]进行分析。而注意到钙质砂自身强度低、易破碎的特点，小于 0.075 mm 的颗粒随剪切位移的增加变化较大（图 4）。以竖向压力为 200 kPa 的剪切为例，由剪切开始到剪切位移为 0.5 m 期间，粒径为 0.010～0.075 mm 的颗粒含量增加 13.81%，由 0.5 m 的剪切位移到 20.0 m 的剪切位移期间，粒径为 0.010～0.075 mm 的颗粒含量增加 8.44%，说明粒径为 0.010～0.075 mm 的颗粒在剪切过程中发生了大量的破碎。因此本文考虑对相对颗粒破碎率 B_r 进行修正，定义为 B_r^*，假定大于 0.01 mm 的颗粒均发生破碎，而小于 0.01 mm 颗粒不发生破碎或发生的破碎所需能量很小，可以忽略不计。不同剪切位移下剪切带中的颗粒破碎各参量如图 7 所示。



(a) 竖向压力为 200 kPa



(b) 竖向压力为 300 kPa



(c) 竖向压力为 400 kPa

图 7　颗粒破碎评定指标

Fig.7　Index for evaluating particle breakage

以 200 kPa 竖向压力的剪切为例，从整体上看，B_g、B_r^* 和 B_r 均随剪切位移的增加而增加，最终趋于平稳（图 7），但细节的变化规律则有差别。从计算上分析，B_g 仅考虑大于 0.5 mm 粒径范围内的变化，B_r^* 则考虑大于 0.01 mm 的所有粒径的变化，B_r 只计算了大于 0.075 mm 的粒径。对于试样为单一粒径的试验，B_g 仅考虑试验前试样粒径范围内的影响，B_r^* 则考虑测试粒径及其区间粒径的影响。通过上述讨论，认为相对破碎率更适用于描述颗粒破碎。B_r 和 B_r^* 在计算上仅有 0.010～0.075 mm 粒径区间的差异，但变化规律不一致，说明 0.010～0.075 mm 的颗粒破碎严重，在计算中是不能忽略不计。因此对于易破碎材料及大位移剪切，运用 Hardin[8]提出的相对破碎率 B_r 作为颗粒破碎定量评定参数是不适用的，而应对 B_r 进行修正，本文修正的相对破碎率 B_r^* 能较好地反映颗粒破碎。

竖向压力为 200 kPa 时，不同剪切位移下的相对破碎率 B_r^* 在 0.195 4～0.441 2 范围内，而竖向压力为 400 kPa 时，不同剪切位移下 B_r^* 则在 0.310 7～0.537 4 范围内。Sadrekarimi 等[11]在对 Ottawa 砂和 Illinois River 砂进行环剪试验时，颗粒的 B_r^* 在 0.011～0.284 范围内，明显小于本试验钙质砂的破碎，说明材料颗粒强度影响颗粒破碎。B_r^* 随剪切位移的增加而增大，最终趋于平稳。总体趋势上看，剪切开始时 B_r^* =0，直至剪切位移达到 16.0 m，B_r^* 有不同程度增加，说明在该阶段颗粒发生了不同程度的破碎。在 200～400 kPa 竖向压力作用下剪切位移达 16.0 m 后，B_r^* 均不再增加或增加极小，说明剪切位移达到 16.0 m 后颗粒不再发生破碎或破碎的量可以忽略不计。

在低竖向压力作用下，随剪切位移增加，剪切带上的颗粒破碎不会单调增加。竖向压力为 200 kPa 作用下（图 7），剪切开始后 B_r^* 持续上升，剪切位移为 0.5 m 时达到极值；随着剪切位移增加到 1.0 m，剪切带上的 B_r^* 不再增加甚至减小；剪切位移继续增加至 16.0 m，B_r^* 缓慢增加；剪切达到 16.0 m 后，B_r^* 不再增加达到最终的平衡。首先，剪切开始到剪切位移为 0.5 m，颗粒排布错乱、不紧密，导致剪切时颗粒大量破碎；剪切位移在 0.5～6.0 m 阶段，由于前一阶段破碎产生的细粒的润滑作用和低竖向压力作用下颗粒相互作用下的原因，剪切带上的颗粒发生翻滚和滑动代替了部分颗粒破碎，致使 B_r^* 增加很小甚至没有增加；当颗粒排布紧密后，即剪切位移到 6.0～16.0 m 阶段，颗粒破碎产生的细小颗粒填充了原有孔隙，颗粒没有空间发生翻滚和滑动时，颗粒继续破碎，B_r^* 增大；剪切位移达到 16.0 m 后，颗粒排布稳定合理，不再发生破碎。在剪切位移为 0.5～2.0 m 的阶段剪切带增大迅速（图 6），此时破碎量的增加主要由剪切带宽度增加带来，原剪切带上的颗粒很少再破碎，可以忽略不计。因此，这阶段剪切带上的 B_r^* 没有增加。在较大竖向压力下，如竖向压力为 400 kPa 作用下剪切位移为 0.5～2.0 m 阶段，剪切带宽度仍然增加（图 6），但由于竖向压力大，使得试样压缩紧密，颗粒间的孔隙小，颗粒没有空间发生翻滚和滑动，而且钙质砂自身强度低，导致原剪切带上的颗粒再破碎剧烈，因此颗粒被剪碎而不断破碎。

3.3 颗粒形状参数

颗粒经过不同位移剪切后形状发生变化（图 8），整体轮廓及棱角的突出度有明显差异。本文在每个粒径范围任意取 100 个颗粒作为样本，对试验前后的颗粒形状进行统计。

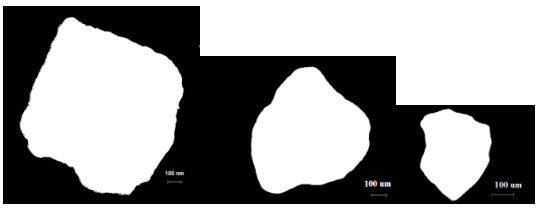


图 8 颗粒的二值化图像

Fig.8 Binary image of the particle

以竖向压力为 400 kPa 的剪切为例，统计试验前后的颗粒形状参数（表 2）。整体及各粒径圆度和扁平度变化如图 9、10 所示。从整体上看，随剪切位移增加，圆度和扁平度减小，最后趋于平稳。剪切前圆度平均值为 1.605，扁平度平均值为 1.496，剪切开始至剪切位移为 0.5 m 阶段，整体的圆度和扁平度都减小，而且各粒径颗粒的圆度和扁平度均小于原始值，说明剪切位移达到 0.5 m 后，由于破碎使颗粒表面更光滑，轮廓更趋于圆形（或正方形），此时统计的标准方差较大，说明破碎后颗粒的形状离散。剪切位移在 0.5～1.0 m 阶段时，整体的圆度与扁平度减小，其中粒径为 0.5～1.0 mm 的颗粒圆度增加且达到极大值，其余粒径的颗粒圆度均减小，粒径为 0.5～1.0 mm 的颗粒扁平度增大至极大值，其余粒径颗粒扁平度均减小，说明随着剪切位移增加，颗粒大量破碎导致粒径为 0.5～1.0 mm 的颗粒棱角更分明，突出度更大，同时轮廓更扁平；而细小的颗粒由于颗粒间的磨碎作用使棱角被磨平，颗粒更圆润且光滑。剪切位移达到 2.0 m 后，所有粒径的颗粒圆度和扁平度都减小，说明这一阶段颗粒

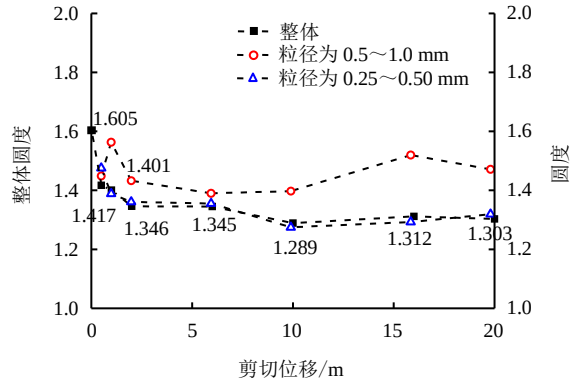
更圆润且光滑。剪切位移在 2.0～6.0 m 阶段时，颗粒整体的圆度变化不大，除粒径为 0.10～0.15 mm 的颗粒圆度增加外，其余粒径的颗粒圆度都减小，而除了粒径为 0.075～0.100 mm 的颗粒扁平度增加外，其余粒径颗粒扁平度均减小。剪切位移在 6.0～10.0 m 阶段时，各粒径颗粒的圆度值都在减小，粒径为 0.5～1.0 mm 和 0.15～0.25 mm 的颗粒扁平度有所增大，其余粒径颗粒扁平度都减小，这阶段整体形状参数值虽然变化不大，但是各粒径形状参数值变化较大，其中，各粒径颗粒的圆度变化不大，但扁平度变化幅度大，说明颗粒的光滑度、突出度基本没有变化，但是整体轮廓还发生变化，说明剪切过程中还存在大量颗粒破碎。剪切位移达 16.0 m 之后，颗粒的圆度和扁平度仍有变化，但是变化很小，统计的标准方差较小，说明颗粒棱角基本稳定，整体轮廓基本成型。

表 2　各颗粒形状参数统计表

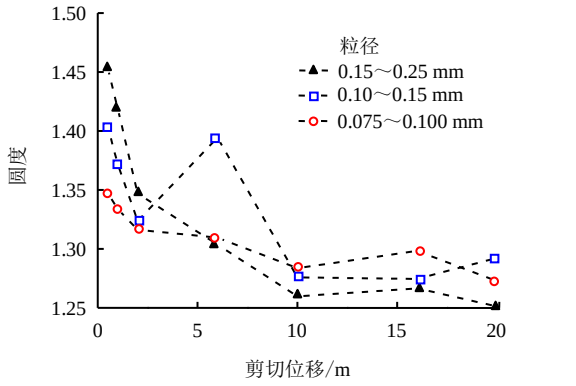
Table 2　Statistics of particle shape parameters

剪切位移/m	圆度			扁平度		
	平均值	标准方差	集中中间	平均值	标准方差	集中中间
原始	1.605	0.304	1.517～1.693	1.496	0.374	1.437～1.683
0.5	1.417	0.350	1.383～1.451	1.456	0.362	1.420～1.491
1.0	1.401	0.201	1.381～1.421	1.450	0.264	1.424～1.475
2.0	1.346	0.172	1.329～1.363	1.416	0.244	1.392～1.439
6.0	1.345	0.169	1.329～1.362	1.416	0.261	1.390～1.441
10.0	1.289	0.146	1.275～1.303	1.410	0.275	1.383～1.437
16.0	1.312	0.174	1.295～1.329	1.413	0.243	1.390～1.437
20.0	1.303	0.161	1.285～1.322	1.396	0.209	1.364～1.405

注：集中区间是指参数在这一区间的颗粒占总颗粒数目的比例为 95%。



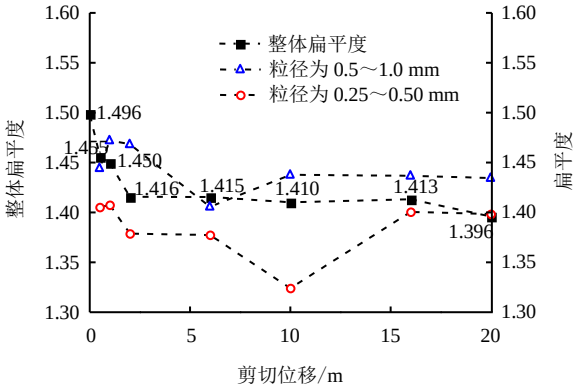
(a) 粒径为 0.25～1.00 mm



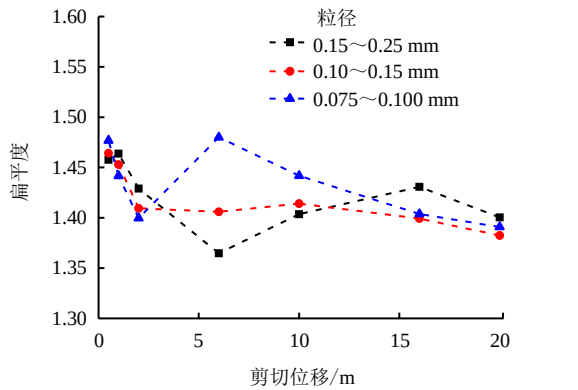
(b) 粒径为 0.075～0.250 mm

图 9　不同剪切位移下的圆度

Fig.9　Evolution of roundness in various shear displacement



(a) 粒径为 0.25～1.00 mm



(b) 粒径为 0.075～0.250 mm

图 10　不同剪切位移的扁平度

Fig.10　Evolution of flatness in various shear displacement

本文所采用的钙质砂原始圆度为 1.6 左右、扁平度为 1.5 左右，400 kPa 竖向压力作用下，颗粒的圆度和扁平度随剪切位移的增加而减小，颗粒表面趋于光滑，棱角减少，同时整体轮廓趋于圆形（或正方形）。剪切位移达到 16.0 m 后颗粒破碎基本结束，此时颗粒圆度值和扁平度变化不大，颗粒形状基本稳定，最终圆度值在 1.3 左右，扁平度在 1.4 左右。

4 结 论

通过环剪试验，研究了颗粒大小分布变化，对颗粒破碎定量参数进行讨论，并利用图像处理技术，分析破碎后颗粒形状的变化，得到以下结论：

（1）大位移剪切后，由于破碎，剪切带上的细颗粒不断增多，砂的状态由中砂变为粉砂。不同竖向压力下，剪切位移到达 16.0 m 后剪切带上的颗粒级配不再发生变化。

（3）针对粒径为 0.01～0.075 mm 的颗粒存在大量破碎的现象，将 Hardin[8]提出的相对破碎率进行修正，提出不再破碎的界限定为 0.01 mm，修正后的相对破碎率能更真实地反映易破碎材料及经大位移剪切的破碎量。

（3） B_r^* 随着剪切位移增加而增大， B_r^* 受剪切带宽度增长和颗粒再破碎的影响，剪切位移达到 16.0 m 后 B_r^* 不再增加，达到平衡。

（4）随剪切位移的增加，颗粒的圆度和扁平度减小，颗粒表面趋于光滑，整体轮廓趋于圆形（或正方形）。

参 考 文 献

[1] 刘崇权, 杨志强, 汪稔. 钙质土力学性质研究现状与进展[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 75－83.
LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. The present condition and development in studies of mechanical properties of calcareous soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(4): 75－83.

[2] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948: 215－219.

[3] COOP M R. Mechanics of uncemented carbonate sand[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(4): 607－626.

[4] VAN IMPE P O, VAN IMPE W F, MANZOTTI A. Compaction control and related stress-strain behaviour of off-shore land reclamations with calcareous sands[J]. **Soils and Foundations**, 2015, 55(6): 1474－1486.

[5] 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, 27(增刊 1): 3010－3015.
ZHANG Jia-ming, ZHNAG Ling, LIU Hui, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 3010－3015.

[6] LUZZANI L, COOP M R. On the relationship between particle breakage and the critical state of sands[J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(2): 71－82.

[7] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS FREITAS T. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. **Geotechnique**, 2004, 54(3): 157－163.

[8] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1985, 111(10): 1177－1192.

[9] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill in embankment dam engineering, casagrand volume[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1973: 109－200.

[10] GUO P J, SU X B. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(5): 579－591.

[11] SADREKARIMI A, OLSON S M. Particle damage observed in ring shear tests on sands[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(5): 497－515.

[12] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389－1392.
CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1389－1392.

[13] 刘清秉, 项伟, LEHANE B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 400－410.
LIU Qing-bing, XIANG Wei, LEHANE B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 400－410.

[14] LADE P A, LIGGIO C D, YAMAMURO J. A effect of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1998, 21(4): 336－347.

[15] MARK L H, NEIL W P. Selection of descriptors for particle shape characterization[J]. **Particle & Particle System Characterization**, 2003, 20(1): 25－38.

[16] LIU S, MATSUOKA H. Microscopic interpretation on a stress—dilatancy relationship of granular materials[J]. **Soils and Foundations**, 2003, 43(3): 73－84.

[17] RAMAMURTHY T. Crushing phenomena in granular soils[J]. **Journal of the Indian National Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 1969, 8: 67－86.