

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0238

# 南海钙质砂宏观细观破碎力学特性

汪轶群<sup>1,2</sup>, 洪 义<sup>1,2</sup>, 国 振<sup>1,2</sup>, 王立忠<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 浙江省海洋岩土工程与材料重点实验室, 浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 针对取自我国南部某海域的钙质砂样本, 做了以下两方面工作: 一是通过电子显微镜获取了钙质砂颗粒的几何投影图像, 利用图像处理技术对图形进行黑白二值化处理, 获取单元颗粒形状轮廓边界, 使用圆度和粗糙度 2 个参数对钙质砂的颗粒形状进行定义和量化。二是通过不同围压下的三轴固结排水剪切试验及试验前后的颗分测量对比, 研究了颗粒破碎对钙质砂的变形、强度、能量耗散等特性的影响。研究表明, 大粒径钙质砂(粒径大于 2.0 mm)和小粒径钙质砂(粒径小于 0.5 mm)形态比较接近圆形、颗粒表面相对光滑; 相比而言, 中间粒径(粒径介于 0.5~2.0 mm 之间)钙质砂形状较不规则, 表面棱角较多。钙质砂在三轴排水剪切过程中发生颗粒破碎, 试样向着级配均匀的方向发展。随着初始围压的增大, 颗粒破碎程度加大, 土样整体剪胀趋势减小, 而破碎引起的能量耗散增加。而在高围压(初始围压为 600 kPa)剪切过程中, 仅考虑摩擦耗散, 以及同时考虑摩擦、体积耗散两种情况下, 计算得到的最大颗粒破碎耗散分别可达土样总输入塑性功的 25% 和 18%。

**关 键 词:** 钙质砂; 三轴试验; 颗粒破碎; 剪胀; 能量耗散

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0199-09

## Micro-and macro-mechanical behavior of crushable calcareous sand in South China Sea

WANG Yi-qun<sup>1,2</sup>, HONG Yi<sup>1,2</sup>, GUO Zhen<sup>1,2</sup>, WANG Li-zhong<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Key Laboratory of Offshore Geotechnics and Material of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** To develop offshore facilities in South China Sea, it is vital to understand the characteristics of particle shape and breakage properties of the calcareous sand. As a result, micro- and macro-mechanical behaviors of crushable calcareous sand sampled from South China Sea are addressed in this study. Firstly, calcareous sand particles are scanned by electron microscope and analyzed by an image processing software (i.e., ImageJ). Based on the processed image, two shape parameters, namely circularity and solidity, are defined and quantified. Secondly, drained triaxial tests on calcareous sand at various confining stresses are carried out, so as to investigate the effects of particle breakage on deformation, shear strength and energy dissipation of the calcareous sand. Results show that the shape of the calcareous sand with relatively large particle size (diameter greater than 2 mm) and relatively small particle size (diameter less than 0.5 mm) tend to be circular and the particle surface is relatively smooth. Comparatively, shape of calcareous sand with moderate-size diameter (grain diameter ranged between 0.5 and 2 mm) is more irregular, and sand particles have more surface edges. Particle breakage is identified to occur in triaxial tests, leading to a better graded sand packing. With the increasing initial confining pressure, the degree of particle breakage and the energy dissipation due to the breakage both increase. In the meantime, dilation of the sand is partially suppressed by the breakage. Under two conditions only considering friction dissipation and considering both friction and volume dissipation, the dissipated energy resulting from breakage in the triaxial tests with relatively high (600 kPa) initial confining stresses could account for 25% and 18% of the total plastic energy input, respectively.

**Keywords:** calcareous sand; triaxial tests; particle crushing; dilatancy; energy dissipation

收稿日期: 2016-01-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 51325901); 国际科技合作计划(No. 2015DFE72830); 高技术船舶工信部项目(No. [2012]533); 国家自然科学基金(No.51408540); 国家自然科学基金重点项目(No. 51338009)。

This work was supported by the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (51325901), the International S. & T. Cooperation Program of China (2015DFE72830), the High Tech. Naval Architecture Research Project of Ministry of Industry and Technology ([2012]533), the National Natural Science Foundation of China (51408540) and the State Key Program of National Natural Science of China (51338009).

第一作者简介: 汪轶群, 女, 1990 年生, 硕士, 主要从事南海钙质砂力学特性方面的研究。E-mail: wangyiqun15@126.com

通讯作者: 洪义, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 主要从事海洋岩土工程和土与结构相互作用方面的研究工作。E-mail: yi\_hong@zju.edu.cn

## 1 引言

钙质砂是我国南海海域岛礁地区广泛分布的一种特殊的海洋沉积物,富含碳酸钙和其他难溶碳酸盐类物质,多存在于北纬 30°和南纬 30°之间热带或亚热带气候的大陆架和海岸线一带。生物成因的海洋沉积物在长期饱和的碳酸钙溶液中,经物理、生物化学及化学作用过程形成碳酸盐沉积物<sup>[1-3]</sup>。

颗粒的几何形状是描述颗粒特征的基本参数,对于非黏性土,颗粒的形状及级配与其压缩性、填充性等力学性能有着密切的关系,同时颗粒形状参数是离散元分析的基本参数。国内外土力学界对于颗粒形状的描述历来比较笼统,通常采用球状、针状、片状、多角状等一些定性术语,并使用颗粒的长宽比 $\alpha$ <sup>[4]</sup>来表示不规则颗粒的形状特征,也有使用分形几何学<sup>[5]</sup>来描述颗粒不规则以及杂乱无章的现象和行为。

通过形状分维来表示颗粒形状目前在工程界尚未普遍接受,但钙质砂这种生物成因、形状非常不规则的颗粒,其颗粒形状对力学性质确有着重要的影响。在使用离散元模拟对颗粒单元进行仿真的过程中,需要多维度对颗粒的形状进行描述和定义。国内外对于这个课题做过很多研究工作,但颗粒形状量化技术目前仍不成熟,其难点在于<sup>[6]</sup>:①颗粒个体形态描述,②群体形状分布特征描述,③群体形态描述。

钙质砂由于具有高孔隙比,且颗粒质地疏松,在较低围压下就会产生较陆源砂更明显的颗粒破碎。由于颗粒破碎使钙质砂在力学特性上,如应力-应变关系<sup>[7]</sup>、强度特征、剪胀性等方面与普通陆源砂有显著的不同<sup>[8-9]</sup>,并且随着围压的不断增大,颗粒破碎不断发展,以上差异也会不断加剧<sup>[10]</sup>。

本文针对取自我国南部某海域的钙质砂,开展电镜扫描试验并对扫描结果进行图像分析,获取该海域钙质砂的颗粒形状特征(圆度和粗糙度)。同时,也对该土样开展了不同围压下的三轴固结排水剪切试验,并基于试验结果揭示了颗粒破碎对钙质砂的变形、强度、能量耗散等特性的影响。本研究揭示的南海钙质砂宏观物理力学特性将为南海岛礁开发岩土工程建设提供必要的科学依据。

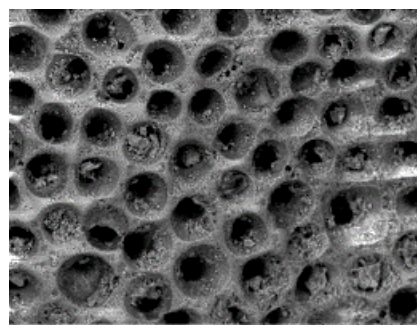
## 2 试样介绍

本文试验中所使用的钙质砂砂样均为未胶结的松散体。对原始试样随机取样进行了电镜扫描试验,颗粒图像如图 1 所示。钙质砂颗粒表面能观察

到大量颗粒孔隙(图 1(b)),这是与陆源砂颗粒在微观下的图形截然不同的。



(a) 60 倍全局扫描结果



(b) 800 倍电镜局部颗粒表面

图 1 典型的颗粒生物骨架电镜扫描图形  
Fig.1 A typical particle scanning under electrical microscope

原始钙质砂试样颗粒分曲线如图 2 所示,其基本物理参数如表 1 所示。

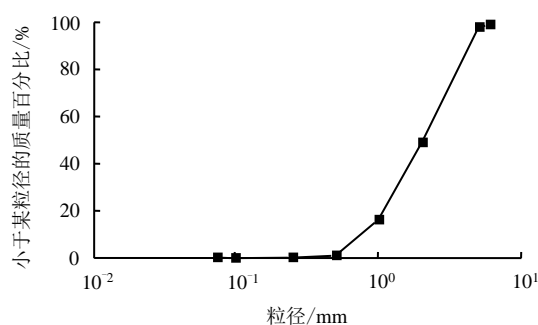


图 2 试验的颗粒级配曲线  
Fig.2 Particle size distribution of the calcareous sand

表 1 试样基本物理参数  
Table 1 Basic physical parameters of calcareous sand

取样地点	$G_s$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$d_{60}$ /mm	$d_{50}$ /mm	$d_{10}$ /mm	$C_u$
南海某小岛	2.86	1.45	0.98	2.65	2.05	0.79	3.35

注:  $G_s$  表示砂样相对密度;  $e_{\max}$  和  $e_{\min}$  分别代表了土样最大和最小的孔隙比;  $d_{60}$ 、 $d_{50}$  和  $d_{10}$  分别表示颗粒累计分布的 60%、50% 和 10% 处的直径;  $C_u$  表示土颗粒不均匀系数。

### 3 钙质砂微观几何特性表征

#### 3.1 获取颗粒图像

将样品洗净、烘干。对于粒径小于 2.0 mm 的样本，使用电子显微镜采集图像。而对于粒径在 2.0 mm 以上颗粒，由于颗粒较大，放大最小倍数 20 倍之后，往往一个画面里面只有一个颗粒，或者一个颗粒都不能显示完整。因此，大于 2.0 mm 粒径的样本置于扫描仪进行扫描。扫描仪对颗粒图像的采集是全局原状（不放大）的颗粒扫描，即将样本颗粒不重叠地排列在扫描仪扫描面板上，扫描输出图像。由于两种方法均为使用相同的方法对颗粒图形进行成像分析，两者的差异仅在放大倍数，故两种扫描方式不会对结果差异造成影响。

#### 3.2 图像处理

采用 ImageJ 图像处理软件对图像进行处理。该软件是一个基于 Java 语言的公共图像处理软件，广泛应用于显微图像处理领域。作为一个开放结构的软件，通过内置的编辑器和编译器，ImageJ 能很好地支持用户自定义插件和宏，并输出粒径的参数值。

钙质砂样本颗粒图形的处理过程，目的是将显微图像高质量地转化为黑白二值轮廓图，方便计算机程序高效地识别颗粒形貌。首先选取原始颗粒扫描图像，如图 3(a)所示，使用 ImageJ 对图像的明亮度和对比度进行调整，然后对图片进行数字过滤，并修正背景颜色为全白，从而使得颗粒轮廓更加突出。显微镜图像转换后的黑白图像中，颗粒内局部区域往往会呈现白色模糊带，需要将该区域修正为黑色，以防计算机误将其识别成背景的一部分，基于黑白二值图生成颗粒轮廓图，见图 3(b)。最后剔除图片中不完整的颗粒。对于颗粒粒径很小的样本，可以使用 ImageJ 的分割功能自动分割。

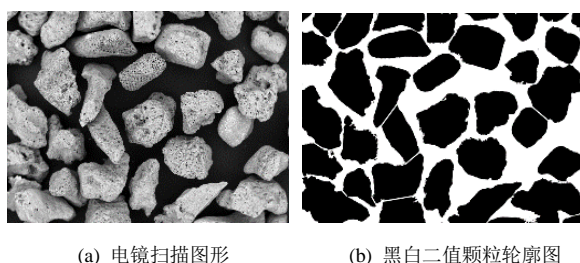


图 3 钙质砂颗粒图像处理  
Fig.3 Particle image processing of calcareous sand particles

#### 3.3 颗粒基本参数和形状参数

使用 ImageJ 对颗粒轮廓图进行分析处理，可以直接得到颗粒单元体的基本参数，如颗粒数量、面

积、周长等不规则单元体的尺寸参数，也可以得到外接椭圆、内接矩形的位置坐标、长短轴、角度等参数。相关参数的描述见表 2，图 4 根据 ImageJ 的参数定义给出了部分参数示意。

表 2 颗粒基本尺寸参数

ImageJ 参数名称	含义	备注
A	面积	/
SL	内接圆周长	/
PL	颗粒边界周长	/
BX、BY	外接矩形左上角坐标	沿颗粒边界的最小外接矩形
W	外接矩形宽度	沿颗粒边界的最小外接矩形
H	外接矩形长度	沿颗粒边界的最小外接矩形
FE_Maj	包络椭圆长径	沿颗粒边界的包络椭圆
FE_Min	包络椭圆短径	沿颗粒边界的包络椭圆
FE_Ang	长径与 X 轴的夹角	沿颗粒边界的包络椭圆
Feret's diameter	最大费雷特直径	费雷特直径是颗粒边界上外接平行线间距
MinFeret	最小费雷特直径	费雷特直径是颗粒边界上外接平行线间距
Con_A	外凸多边形面积	颗粒外轮廓最外层的点连接起来构成的凸多边形

注：颗粒单元体的基本参数中的面积计算（实际面积、外凸多边形面积）均由黑白二值颗粒轮廓图中相应像素叠加累积计算得到的。

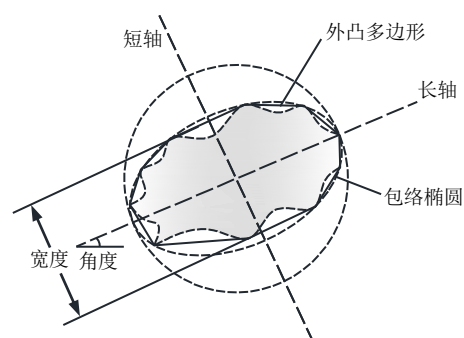


图 4 颗粒基本参数示意图  
Fig.4 A schematic diagram defining dimensions of a sand particle

颗粒的形状、磨圆度、棱角角度不同，在颗粒移动的定向排列中，会有很大的差别，对于以上的几个因素，结合图像处理软件 ImageJ 中定义的参数，并参考相关研究结果（陈海洋<sup>[11]</sup>），选定 2 个颗粒形状参数。

形状参数包括：圆度  $C$  和粗糙度  $R$ ，计算公式为

$$C = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (1)$$

式中： $A$  为面积， $L$  为颗粒边界周长。

圆度  $C$  表明颗粒与圆的接近程度。整体形状越接近圆形，越规则，则圆度越接近于 1；整体形状

越不规则偏离圆形,则比值越远离 1。

粗糙度  $R$  表明颗粒的表面光滑程度,是实际面积与颗粒外凸多面形的面积之比,即颗粒表面棱角数目及突出程度的参数。计算公式为

$$R = \frac{A}{A_{\text{out}}} \quad (2)$$

式中:  $A_{\text{out}}$  为外凸多边形面积。

### 3.4 试验结果分析

运用上述方法对 8 组不同粒径的试验样本图像,使用 ImageJ 进行数据处理。为了保持变量一致,在数据统计过程中,每组试样均随机选取 170 个颗粒为样本容量。颗粒形状参数的平均值和方差如表 3 所示。

表 3 不同粒径颗粒形状参数的平均值和标准差  
Table 3 Mean values and standard deviations of shape parameters for calcareous sand with different grain sizes

粒径/mm	圆度		粗糙度	
	平均值	方差	平均值	方差
<0.075	0.703	0.124	0.872	0.056
0.075~0.100	0.684	0.116	0.872	0.050
0.100~0.250	0.648	0.120	0.883	0.068

## 4 钙质砂破碎力学特性研究

为了研究围压对钙质砂的剪切特性和颗粒破碎的情况,对钙质砂进行了 7 种不同围压下(50、75、200、300、400、500、600 kPa)的三轴固结排水试验。试验采用伺服电机控制的动三轴仪(GDS, DYNTEST)。

### 4.1 试样

本研究参考前人的普遍做法<sup>[7,12]</sup>,将粒径大于 2.0 mm 的珊瑚枝和贝壳等筛去,重点研究小于 2.0 mm 粒径的钙质砂。对原始试样进行初筛,随后将保留试样经过清水洗净后烘干备用。

### 4.2 试样制备

#### 4.2.1 试样装样

由于钙质砂颗粒棱角较多、部分颗粒比较尖锐,故试验采用厚度为 1 mm 的橡皮膜。

根据试验控制相对密度为 50%,用电子天平(精度 0.01 g)称取该质量的试样,分 4 层装样。为了防止钙质砂在装样过程中出现颗粒破碎,根据刘崇权等的做法<sup>[13]</sup>,把钙质砂小心装入橡皮膜中,用击实器轻按砂面,同时敲击振动橡皮膜外层的三瓣膜,直至达到要求的密度。

#### 4.2.2 试样饱和

由于钙质砂中有 0.25 mm 以下的粉粒,在装样

过程中,极易造成扬尘,改变颗粒级配。故需要在装样前将砂样湿润。为了避免少量水分的影响,故将湿润后的砂土进行饱和,排除干扰。但由于钙质砂是一种疏松、多孔、易碎的介质,饱和技术是制样过程中比较关键的步骤。目前常规的试验方法很难达到 95% 的饱和度。根据钙质砂的特点,经过反复试验,并结合前人的经验<sup>[13]</sup>,通过抽真空、通二氧化碳、充无气水以及分级反压饱和等步骤完成饱和过程。饱和过程结束,制样完毕,可准备固结。

#### 4.2.3 试验过程

在有效围压分别为 50、75、200、300、400、500、600 kPa 下进行固结排水剪切试验。剪切过程中采用应变控制,剪切速率为 0.045 mm/min,以实现排水剪切。当轴向应变达到 20% 以上时,试验结束。卸掉围压,将钙质砂试样小心去除洗净并烘干,进行颗粒筛分试验。

### 4.3 试验结果

#### 4.3.1 应力-应变关系以及剪胀特性

图 5(a)显示了钙质砂在不同围压下剪切过程中的应力-应变关系。由图可见,在试验所施加的压力范围内,各围压下的应力-应变关系曲线总体趋势一致,均表现为试验初期偏应力迅速增加,达到明显的应力峰值后缓慢下降,即应变软化现象。总的来说,围压越高,达到峰值强度所需的轴向应变越大。需要说明的是,在应力-应变曲线中,围压为 300 kPa 作用下钙质砂样的峰值强度甚至和 400 kPa 围压下的相当,且前者应变软化特性比后者明显得多。这可能与以下两个原因有关:①围压增大(从 300~400 kPa)加剧了颗粒破碎程度,因而降低了材料峰值强度;②围压增大一定程度上抑制了剪胀,导致峰值强度减小、应变-软化趋势减弱。

图 5(b)显示了钙质砂在不同围压剪切过程中体应变和剪应变之间的关系。正的体应变代表体积压缩(剪缩),而负的体应变表示体积膨胀(剪胀)。如图所示,钙质砂在围压较小(如 50、75 kPa)时,剪切过程中首先出现体积收缩,然后会发生明显的体积膨胀。最大的剪胀体变(约-7%)是最大剪缩体应变(1%)的 7 倍。而在高围压下(如 500、600 kPa),整个剪切的过程几乎都伴随着体积缩小,土体剪缩应变达到峰值之后便平稳维持。这与前人在研究钙质砂剪切特性时得到的规律是一致的<sup>[14-15]</sup>。钙质砂在高围压下的持续剪缩性很可能与两种机制有关:一是高围压抑制了土体的剪胀(这种现象常见于非破碎的砂质材料);二是高围压下诱发的颗粒破碎增强土体的剪缩。颗粒破碎的量测和能量耗散在接下

来的两节中详细阐释。

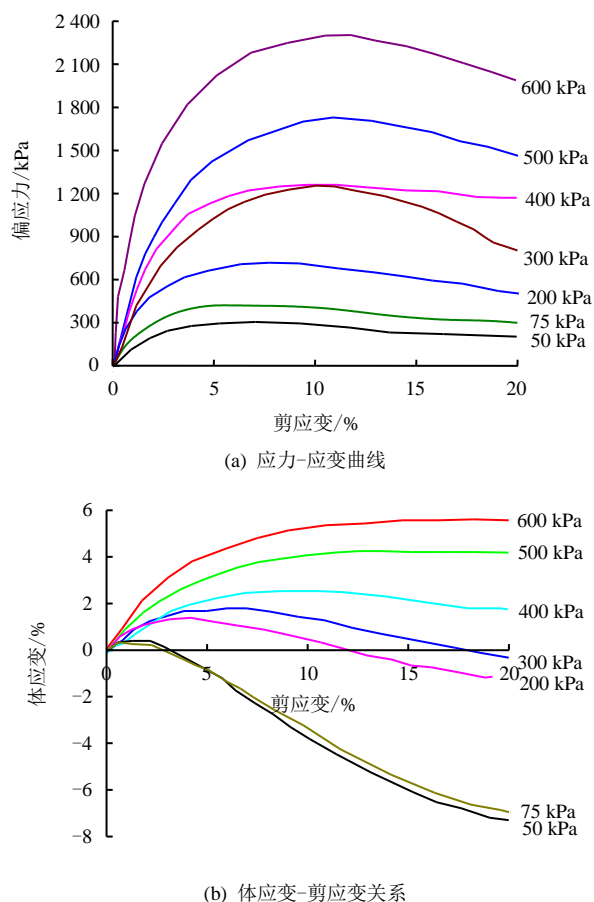


图 5 钙质砂三轴固结排水试验结果  
Fig.5 Triaxial testing results of calcareous sand

#### 4.3.2 颗粒破碎导致的颗分演化规律

为了研究破碎规律，在各三轴试验前、后分别进行了颗分量测。图 6 显示了不同围压下钙质砂剪切后颗分曲线分布。由于有效围压 200 kPa 以下试验剪切之后颗粒破碎不明显（试验前后颗分曲线几乎重叠），图 6 只显示了有效围压不小于 200 kPa 钙质砂样本破碎后的颗分曲线。

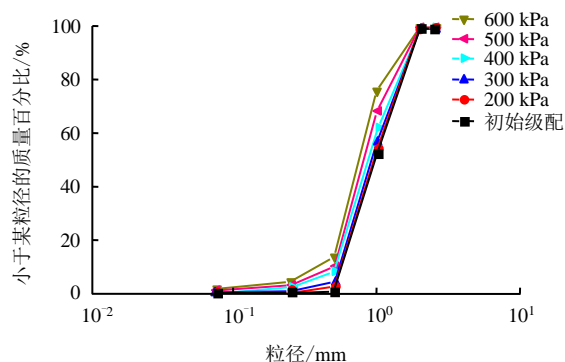


图 6 不同围压下钙质砂剪切后颗分曲线  
Fig.6 Particle size distributions of sand sample after triaxial shearing at different confining stresses

由图可知，钙质砂在三轴压缩、剪切作用下产生了颗粒破碎，剪切之后钙质砂的颗粒级配曲线发生了变化。随着有效围压的增大，颗粒破碎程度加大，表现在 1.0 mm 以上的大颗粒比例减小，0.5~1.0 mm、0.25~0.50 mm 以及 <0.075 mm 几个粒径范围内的颗粒比例增加。

颗粒破碎导致的级配变化常用不均匀系数来表征，公式如下：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3)$$

不均匀系数  $C_u$  反映大小不同粒组的分布情况。 $C_u$  越大表示土粒大小的分布范围越大，其级配越良好。由此可以得到不同围压下三轴剪切试验后钙质砂的不均匀系数  $C_u$  的变化情况，如表 4 所示。

表 4 不同围压下三轴剪切试验后土粒的级配指标  
Table 4 Grading indexes under different confining pressures

级配指标	初始颗分	围压				
		200 kPa	300 kPa	400 kPa	500 kPa	600 kPa
$C_u$	3.189	2.410	2.177	1.862	1.701	1.541

从表 4 中可以看出，由于颗粒破碎作用，随有效围压的增大， $C_u$  值不断减小，这一变化表明钙质砂颗粒级配不断趋向均匀。

为了量化颗粒破碎程度，Hardin<sup>[16]</sup>定义了相对破碎指标  $B_r$ 。相对破碎  $B_r$  的下限值为 0，表示没有破碎发生，理论上限值为 1，表示所有的颗粒都将破碎为 0.074 mm 以下的粉粒，大于这一粒径的所有粒组的颗粒都存在不同程度破碎的可能性。Hardin<sup>[16]</sup>通过以下步骤获得破碎指标  $B_r$ 。首先定义：

$$b_p = \lg \left[ \frac{d}{0.074} \right] \quad (4)$$

式中： $d$  为颗粒粒径，当  $d < 0.074$  mm 时， $b_p = 0$ 。

对于每一条颗分曲线，破碎势  $B_p$  可表示为

$$B_p = \int_0^1 b_p df \quad (5)$$

式中： $df$  为  $b_p$  相应粒径的颗粒通过百分率，以微分表示。

试验前后的整体破碎势之差为总破碎  $B_t$ ，即

$$B_t = \int_0^1 (b_{p0} - b_{pl}) df \quad (6)$$

式中： $b_{p0}$  为试验前的  $b_p$ ； $b_{pl}$  为试验后的  $b_p$ 。

总破碎  $B_t$  与初始破碎势  $B_{p0}$  之比即为相对破碎指标  $B_r$ ：

$$B_r = \frac{B_t}{B_{p0}} \quad (7)$$

图 7 是在三轴压缩、剪切作用下, 不同有效围压与相对破碎  $B_r$  的关系曲线。由于围压在 200 kPa 以下, 相对破碎并不明显, 故取 200 kPa 以上绘制图形。为了比较, 图中也添加了胡波<sup>[17]</sup>基于对南海美济礁钙质砂 (粒径介于 1~2 mm 之间) 三轴排水剪切试验得出的相对破碎指标  $B_r$ 。如图所示, 本文研究与胡波<sup>[17]</sup>报道的结果均显示, 颗粒破碎程度 (用  $B_r$  表征) 随着围压的增大而线性增长。在同一围压作用下, 胡波<sup>[17]</sup>报道的颗粒破碎指标  $B_r$  远大于 (差别不小于 200%) 本文测量结果。这很可能与钙质砂的颗粒级配有关, 与胡波<sup>[17]</sup>采用的钙质砂 (粒径范围为 1~2 mm) 相比, 本文研究采用的砂样颗粒级配更好 (粒径范围: 0~2 mm), 级配良好的颗粒由于互相填充和咬合, 相对不容易发生破碎。

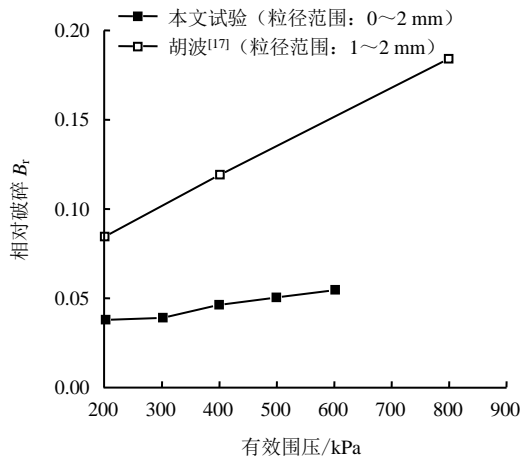


图 7 不同围压下钙质砂相对破碎  $B_r$   
Fig.7 Relative breakage ( $B_r$ ) deduced from calcareous sand tests at different confining stresses

#### 4.3.3 颗粒破碎能量耗散特性

颗粒破碎除了改变砂的应力-应变关系、剪胀特性以外, 还带来了额外的能量耗散, 即破碎耗散。本节旨在探索定量评价钙质砂颗粒破碎诱发的能量耗散。

在钙质砂三轴试验中, 外部荷载对土样单位体积输入的塑性功  $dW^p$  被用来产生塑性体应变  $d\varepsilon_v^p$  和塑性剪应变  $d\varepsilon_d^p$ , 与这两种应变相关的输入能分别为  $p d\varepsilon_v^p$  和  $q d\varepsilon_d^p$  ( $p$  为总应力,  $q$  为剪应力)。因而, 输入塑性功的增量表达式可建立如下:

$$dW^p = p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p \quad (8)$$

对于非颗粒破碎材料的能量耗散, 一般有两种

考虑方式: ①假设输入土样的能量全都以摩擦的形式耗散, 这也是原始剑桥模型的做法; ②假设能量耗散总量由摩擦耗散和体积耗散两部分组成, 这也是修正剑桥模型的做法。以上 2 种方式耗散能公式<sup>[18]</sup>分别为

$$dD = M p d\varepsilon_d^p \quad (9)$$

$$dD = p \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (M d\varepsilon_d^p)^2} \quad (10)$$

式中:  $D$  表示剪切耗散能,  $M$  表示  $q$ - $p$  应力空间里临界状态线的斜率。除了上述摩擦耗散、体积耗散, 对于颗粒破碎材料 (如钙质砂), 显然还需要考虑颗粒破碎耗散的能量  $B$ 。基于能量守恒原理, 综合上述公式 (9)、(10), 钙质砂输入塑性功与耗散能的平衡表达式分别为

$$p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p = M p d\varepsilon_d^p + dB \quad (11)$$

$$p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p = p \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (M d\varepsilon_d^p)^2} + dB \quad (12)$$

式 (11)、(12) 又可以分别表示为

$$dB = p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p - M p d\varepsilon_d^p \quad (13)$$

$$dB = p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p - p \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (M d\varepsilon_d^p)^2} \quad (14)$$

对式 (13)、(14) 两边同除以单位体积塑性输入功增量 ( $p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p$ ), 可得

$$\frac{dB}{p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p} = 1 - \frac{M p d\varepsilon_d^p}{p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p} \quad (15)$$

$$\frac{dB}{p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p} = 1 - \frac{p \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (M d\varepsilon_d^p)^2}}{p d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p} \quad (16)$$

式 (15)、(16) 分别表征了只考虑摩擦耗散, 和同时考虑摩擦、体积耗散两种情况下, 能量耗散增量占塑性输入功增量的比例。理论上, 两者的计算的结果都介于 0 和 1 之间, 计算值越大, 代表输入能被以颗粒破碎形式耗散的比例越高。

为了计算本研究开展的各三轴试验中颗粒破碎能增量占总塑性输入功增量的比例, 对式 (15)、(16) 作如下假设:

(1) 在应变量较大的情况下, 塑性体应变、塑性剪应变可分别用总体应变、总剪应变近似。

(2)  $M$  值用剪应变为 20% 时的应力比  $q/p$  近似。在本研究中, 每组三轴试验的最大剪应变为 20%, 此时土样很可能还未达到临界状态, 但已较接近。

对式 (15)、(16) 计算出的每一个增量值求和,

就可以得到在任一剪应变时, 颗粒破碎累积耗散能占塑性输入总功的比例 ( $\frac{B}{p\varepsilon_v^p + q\varepsilon_d^p}$ , 定义为破碎耗散比), 计算结果如图 8 所示。

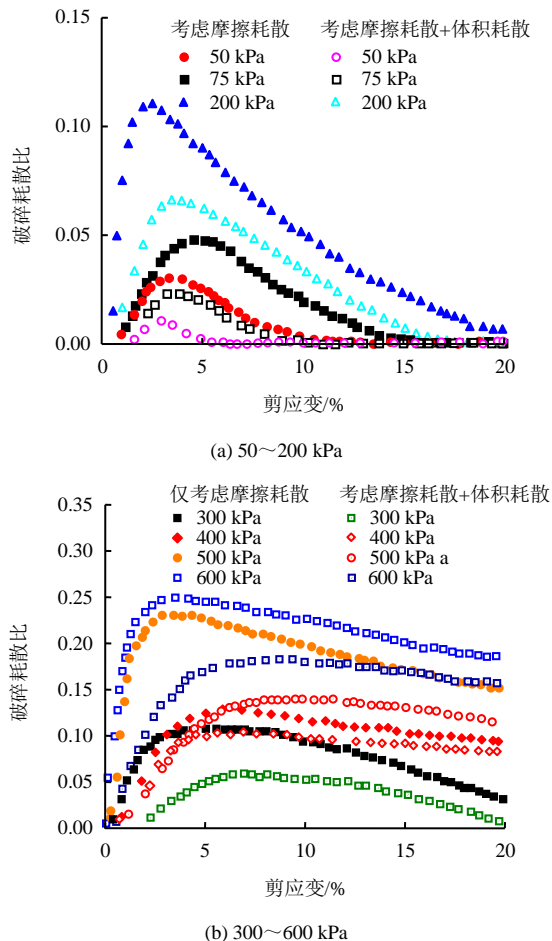


图 8 破碎能占塑性功比例在不同围压下的变化

Fig.8 Ratios of dissipated energy resulting from breakage to total plastic work input at different confining pressures

从图 8 可以看出, 在只考虑摩擦耗散时, 得到的最大破碎消耗比为 0.25; 而同时考虑摩擦、体积耗散时, 得到的最大破碎消耗比为 0.18。前者计算的能量耗散大于后者, 这符合预期。

在低围压作用下 (50 kPa) 剪应变较小 (小于 3%) 时, 破碎耗散比先随着剪应变增大而增大。当剪应变继续增大时 (大于 3%), 破碎耗散占塑性输入功的比值减小, 这说明摩擦耗散的比例开始增大。在低围压剪切全过程中, 无论是在仅考虑摩擦耗散, 还是同时考虑摩擦、体积耗散, 破碎耗散均不超过总输入塑性功的 4%, 颗粒破碎作用不明显。

随着围压的增大, 破碎能占总塑性功的比例越来越大。在 600 kPa 围压作用下, 基于只考虑摩擦耗散, 或是同时考虑摩擦、体积耗散的假设, 计算

得到的最大破碎耗散比分别达 0.25 和 0.18 左右。从趋势上看, 不同围压条件下破碎耗散比随剪应变的变化规律基本一致, 即破碎耗散比在试验初期剪应变 6% 范围以内能够迅速到达峰值; 随着剪切作用加剧, 破碎能所占的比例开始下降。这意味着钙质砂海床中, 桩周土体在外荷载 (如作用在桩上的海洋风浪流荷载<sup>[19-20]</sup>) 作用下, 破碎能占总塑性功的比例沿深度增大。

值得一提的是, 本文中计算采用的  $M$  值 (剪应变 20% 时的应力比  $q/p'$  近似, 约为 1.47。  $p'$  为有效应力) 高于真实值, 而使得计算所得的破碎耗散比较实际情况偏低。同时, 对于本文研究的正常固结砂土, 在小应变范围内 (剪应变 < 1%) 可能存在一定的弹性应变, 而图 8 显示的结果是基于弹性应变可以忽略 (一般认为弹性应变远小于总应变) 这一假设而计算得到的。这意味着, 本文计算的破碎耗散比在小应变范围 (剪应变 < 1%) 内可能比实际值略低。

## 5 结 论

本文基于取自我国南部某海域的钙质砂样本, 开展了电镜扫描和图像分析以及三轴排水试验, 研究了颗粒破碎对钙质砂的变形、强度、能量耗散等特性的影响, 得到以下主要结论:

(1) 通过比对大粒径 (粒径大于 2 mm)、中间粒径 (粒径介于 0.5~2.0 mm 之间) 和小粒径 (粒径小于 0.5 mm) 钙质砂形状微观图像分析结果, 发现大、小粒径钙质砂形态更接近圆形、颗粒表面相对光滑, 而中间粒径钙质砂形状较不规则, 表面棱角较多。这可能是由于中间粒径砂被镶嵌于大、小粒径钙质砂之间, 在搬运、侵蚀以及移动过程中发生较少磨损和破碎, 而保持了较好的原状性。

(2) 钙质砂在排水三轴剪切过程中发生破碎, 而改变了土样的颗粒级配。随着有效围压的增大, 颗粒破碎程度加大; 具体表现在 1.0 mm 以上的大颗粒比例减小, 1.0 mm 以下的颗粒比例增加, 剪切后试样向着级配更好的方向发展。本研究中颗粒级配良好的钙质砂 (粒径范围: 0~2.0 mm) 的颗粒破碎程度远小于文献[17]中的颗粒级配较差 (粒径范围为 0~2.0 mm) 的钙质砂。这一发现间接表明级配良好的颗粒由于互相填充和咬合, 相对不容易发生破碎。

(3) 排水三轴试验中钙质砂的剪胀性与初始围压密切相关。初始围压小于 400 kPa 时, 钙质砂表现为先剪缩后剪胀, 这与常规的陆源砂的响应是一

致的;当初始围压大于 400 kPa 时,钙质砂在整个剪切的过程中表现出持续剪缩现象,而与陆源砂土的典型响应不同。这是因为高围压诱发的颗粒破碎引起了局部的压缩应变,从而抑制了钙质砂整体的剪胀性。

(4) 颗粒破碎除了改变钙质砂的颗粒分布及剪胀特性外,还引入了额外的能量耗散,即破碎耗散。基于对三轴试验结果和能量守恒的分析,可以推算得在低围压(初始围压分别为 50、75 kPa)剪切过程中,颗粒破碎耗散的能量不超过对三轴土样总输入塑性功的 5%;而在高围压(初始围压为 600 kPa)剪切过程中,对于仅考虑摩擦耗散,与同时考虑摩擦、体积耗散这两种情况,计算得到的最大颗粒破碎耗散能分别可达土样总输入塑性功的 25% 和 18%。随着剪切作用加剧,破碎能所占的比例下降。

### 参考文献

- [1] COOP M. R. The mechanics of uncemented carbonate sand[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(40): 607—626.
- [2] FOOKES P G. The geology of carbonate soils and rocks and their engineering characterization and description[C]// *Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments*. [S. l.]: [s. n.], 1988: 787—806.
- [3] 吴京平, 楼志刚. 钙质砂的基本特性[C]//第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 267—271.  
WU Jing-ping, LOU Zhi-gang. Basic characteristics of calcareous sand[C]//*Proceedings of the Seventh National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Beijing: China Building Industry Press, 1994: 267—271.
- [4] 高国端. 近代土质学[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990.  
GAO Guo-duan. Modern soil science[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1990.
- [5] MANDELBORT B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: [s. n.], 1982.
- [6] 刘清秉, 项伟, BUDHU M. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 190—197.  
LIU Qing-bing, XIANG Wei, BUDHU M. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 190—197.
- [7] 张家铭, 张凌, 刘慧. 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, ZHANG Ling, LIU Hui. Experimental research on shear behavior of calcareous sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.1): 3010—3015.
- [8] REBECCA DESROSIERS, ARMAND J SILVA. Strength behavior of marine sands at elevated confining stresses[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2007, 20(1): 1—19.
- [9] 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.  
WU Jing-ping, CHU Yao, LOU Zhi-gang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(5): 49—55.
- [10] BOLTON M D, NAKATA Y, CHEN Y P. Micro-and macro-mechanical behavior of DEM crushable materials[J]. *Geotechnique*, 2008, 58(6): 471—480.
- [11] 陈海洋. 钙质砂的内孔隙研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.  
CHEN Hai-yang. Study of the inner pore in calcareous sand[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2005.
- [12] 虞海珍. 循环荷载作用下钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1999.  
YU Hai-zhen. Experimental study of dynamic characteristics of calcareous sands under cyclic loading[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999.
- [13] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(2): 209—212.  
LIU Chong-quan, WANG Ren, WU Xin-sheng. Some problems for the tests of physico-mechanical properties of calcareous sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(2): 209—212.
- [14] SHAMBHU S, MOSTAFA I. Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(12): 1581.
- [15] ISLAM M K, CARTER J P. Comparison of the yield Locus and stress-dilatancy function of some critical state constitutive models with experimental data for carbonate sand[J]. *Institution of Engineers Civil Engineering*, 2004, 84(4): 267—274.