

# 高应力作用下不同颗粒特征的钙质砂压缩破碎特性

顾琳琳<sup>1</sup>, 余玮平<sup>2</sup>, 王建平<sup>3</sup>, 王 振<sup>4</sup>, 叶冠林<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 土木工程系, 江苏 南京 210094; 2. 上海交通大学 土木工程系, 上海 200240; 3. 海军研究院, 北京 100070;

4. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 对南海不同岛礁处的钙质砂开展一系列终止压力为 8 MPa 的高压固结试验, 研究不同颗粒形貌及不同粒组的钙质砂的颗粒破碎演化规律。试验结果表明, 两种钙质砂试样  $S_1$  和  $S_2$  的矿物组分基本相同, 但不同的沉积环境造成了颗粒形状具有显著差异; 以片状颗粒为主的钙质砂试样  $S_2$  的压缩性和颗粒破碎程度会显著高于以块状颗粒为主的钙质砂试样  $S_1$ , 且颗粒相对破碎率  $B_r$  均随着颗粒粒径的增大而增大; 对两种不同的钙质砂而言, 相对破碎率  $B_r$  与压缩变形量之间呈良好的幂函数递增关系, 表明颗粒破碎大小与压缩变形量密切相关。

**关键词:** 高压固结; 钙质砂; 颗粒形状; 颗粒破碎; 压缩变形  
**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A

## Compression and Fragmentation Characteristics of Calcareous Sand with Different Grain Characteristics at High Stress

GU Linlin<sup>1</sup>, YU Weiping<sup>2</sup>, WANG Jianping<sup>3</sup>, WANG Zhen<sup>4</sup>, YE Guanlin<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Naval Research Academy, Beijing 100070, China; 4. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A series of high-pressure consolidation tests on two kinds of calcareous sand were conducted at a termination pressure of 8 MPa to study the particle breaking evolution of the calcareous sand with different particle morphologies and different particle groups. The test results show that the mineral components of the two calcareous sand samples ( $S_1$  and  $S_2$ ) are basically the

same, but the different depositional environments have caused significant differences in particle shape. The compressibility and the breakage rate of the calcareous sand (sample  $S_2$ ), which is dominated by flaky particles are both significantly higher than that of the calcareous sand (sample  $S_1$ ), which is dominated by massive particles, and for these two samples, the relative particle breakage rate  $B_r$  increases with the increase of particle size. For the two different calcareous sand, there is a good power function increasing relationship between the relative rate of crushing  $B_r$  and the amount of compression deformation, indicating that the degree of particle breakage is closely related to the amount of compression deformation.

**Key words:** high-pressure consolidation; calcareous sand; particle shape; particle breakage; compression deformation

钙质砂作为南海地区最经济、最易获取的建筑材料, 是吹填岛礁建设中不可或缺的地基填筑材料。由于特殊海洋生物成因和沉积环境的影响, 大多钙质砂粒保留了原生物(珊瑚残枝、贝壳残骸等)骨架内部细小的孔隙结构, 造成颗粒形状多棱角、不规则<sup>[1-5]</sup>。相关研究表明, 钙质砂颗粒在常应力作用下便会发生明显破碎, 显著的颗粒破碎是形成其特殊力学性质的主要原因<sup>[6-7]</sup>。剪切荷载作用下, 显著的颗粒破碎将导致砂样额外的孔隙体积收缩、剪胀性及峰值抗剪强度  $\sigma_1'/\sigma_3'$  的降低<sup>[8]</sup>。在一维压缩试验中, 钙质砂的压缩曲线更类似于正常固结黏土(即高压缩性, 压缩系数  $\lambda$  较大), 但与之不同的是其回弹应变很小(回弹系数  $\kappa$  较小), 这是由于显著的颗粒

收稿日期: 2022-01-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51908288, 42002266)

第一作者: 顾琳琳(1987—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为岩土力学及地下工程防灾减灾。

E-mail: linlin\_gu@njust.edu.cn

通信作者: 王 振(1987—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为防灾减灾与防护工程。

E-mail: wangzhen2012@njust.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

破碎和破碎后的颗粒重排造成了较大的塑性变形<sup>[9-10]</sup>;相较于陆源硅质砂,在相同密实度、应力水平条件下,钙质砂的压缩变形更加显著,且屈服应力更小<sup>[11]</sup>。秦月等<sup>[12]</sup>曾指出压缩荷载作用下,钙质砂颗粒破碎会受试验条件(加载方式、含水率)的影响,且大粒径颗粒的存在会在一定程度上增大钙质砂的压缩性。

颗粒级配作为颗粒材料不可忽视的影响因素,对于可破碎的颗粒而言,颗粒破碎其实是颗粒级配发生持续演变的过程,在此过程中颗粒材料力学性质(剪胀性、峰值强度等)也会随之改变<sup>[13-14]</sup>。Shahnazari等<sup>[15]</sup>曾指出钙质砂颗粒破碎程度与应力水平呈正相关关系,且颗粒破碎的程度与输入能量直接相关,这与吴京平等<sup>[16]</sup>的结论类似。针对初始级配的差异,李彦斌等<sup>[17]</sup>指出钙质砂样的颗粒破碎程度会随中值粒径 $d_{50}$ 及碳酸钙含量的增大而增大。彭宇等<sup>[18]</sup>发现,相较于细粒或者粗粒,中间粒径(0.25~1.00 mm)的钙质砂样更易发生破碎。此外,颗粒形状与颗粒级配一样,作为砂土的固有特性,颗粒形状的改变会显著影响颗粒之间的接触关系(点-点、点-面、面-面接触)及几何排布。因此,砂土的宏观力学性能,如压缩特性、抗剪强度、颗粒破碎及临界状态等都会受到颗粒形态特征的显著影响<sup>[19-22]</sup>。田朝阳等<sup>[23]</sup>对比了不同粒径组钙质砂样的圆度 $S$ 和完整度 $C$ ,指出粒径越小的钙质砂,其颗粒的形状越接近于圆形且越完整,但相较于福建砂,钙质砂颗粒的不规则程度明显更高。袁泉等<sup>[24]</sup>对比了不同形状钙质砂颗粒的压缩特性,指出相较于块状与生物碎屑状颗粒,枝状钙质砂颗粒的压缩性明显更高。张小燕等<sup>[25]</sup>通过珊瑚砂的高压一维蠕变试验,研究了颗粒破碎引起颗粒分布曲线和形状因子

的演化规律。张季如等<sup>[26]</sup>通过侧限压缩试验发现钙质砂颗粒破碎后的级配具有分型特性。目前针对钙质砂在压缩条件下颗粒破碎演化规律的研究,常以硅质砂为对照组,开展不同应力水平、密实度和颗粒级配等条件下的压缩试验,很少考虑不同沉积环境下钙质砂的差异,事实上钙质砂的颗粒形状及颗粒强度均会受到自然沉积环境的显著影响。

本文对取自南海不同岛礁处的两种钙质砂样进行了微观形貌分析,通过Image J软件对获取的颗粒图像进行了后处理分析;并对两种钙质砂的不同粒径组颗粒进行了一系列高压固结试验,揭示了一维压缩条件下不同颗粒形状、颗粒粒径的钙质砂颗粒破碎演化规律。本研究可为南海钙质砂区域的工程建设提供重要科学依据。

## 1 试验材料及试验方案

### 1.1 试验材料

本文试验材料为取自我国南海不同岛礁处的两种未胶结的钙质砂,将其编号为 $S_1$ 与 $S_2$ 。将两种天然钙质砂样经蒸馏水洗净、烘干后,将其进行颗粒筛分试验,去除粒径大于3.0 mm的颗粒,得到2.00~3.00 mm,1.00~2.00 mm,0.50~1.00 mm,0.25~0.50 mm,0.10~0.25 mm共5个粒径组,如图1所示。由图1可知,两种钙质砂的颗粒颜色相似,当颗粒粒径大于0.50 mm时,两种钙质砂样的颗粒形貌便表现出显著的差别,对于钙质砂 $S_2$ ,其片状颗粒的占比明显增大,而钙质砂 $S_1$ 则主要以块状颗粒为主。相较于块状颗粒,片状颗粒棱角更加丰富,且强度更低,这种差异会直接影响颗粒排列和颗粒破碎,从而对钙质砂的力学特性造成显著影响。

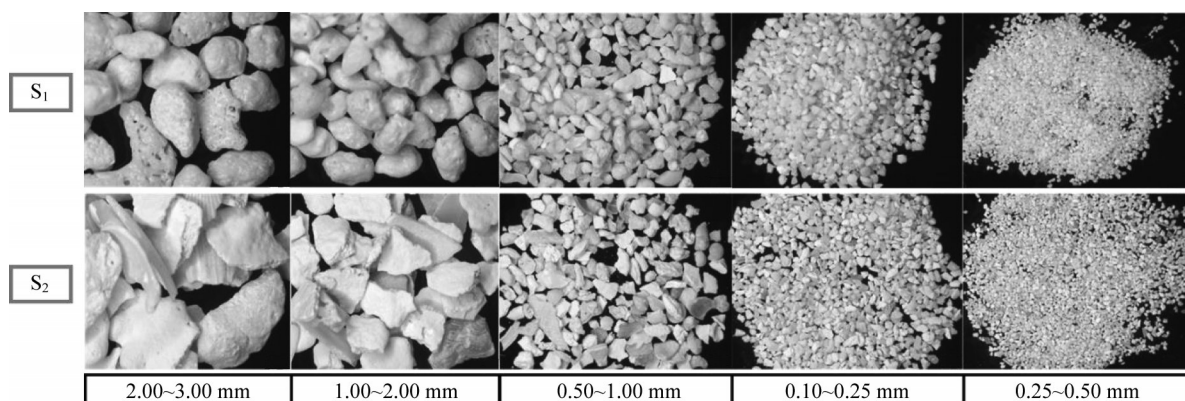


图1 两种钙质砂样

Fig.1 Two types of calcareous sand

通过Mini-X射线衍射试验,对比了两种钙质砂矿物组成,它们的主要矿物成分都为Aragonite(生物文石,成分为 $\text{CaCO}_3$ )和Kutnahorite(镁锰方解石,成分为 $\text{Ca}(\text{Mn},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$ ),换算成等效碳酸钙质量分数分别为96.41%和95.4%,两种钙质砂的矿物组成基本相同,都属于高纯度的钙质砂。由此可见,两种钙质砂形状的差异可能主要与沉积环境有关,并非受其矿物成分的影响。

测得两种钙质砂样的基本物理参数,如表1所示。由表1可知,相同粒径组条件下,相较于钙质砂 $S_1$ ,钙质砂 $S_2$ 的最大密实度 $\rho_{\max}$ 和最小密实度 $\rho_{\min}$ 均偏小,这可能是由于钙质砂 $S_2$ 颗粒更加不规则且棱角丰富,颗粒接触之间易形成较大的孔隙结构,在相同密实度的条件下,其孔隙比 $e$ 明显较大。

## 1.2 颗粒形貌分析

为获取两种钙质砂样的形状参数,将不同粒径的钙质砂颗粒平铺放置在以黑色为背景的透明载玻片上,利用体视镜进行平面颗粒图像采集,如图2所示。为保证颗粒轮廓的清晰性,需注意颗粒之间不能相互堆叠,拍摄前可对颗粒位置进行微调,确保显

表1 两种钙质砂的物理特性参数

Tab. 1 Physical characteristic parameters of two calcareous sand

类别	粒径/mm	$\rho_{\min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_r/\%$	$e$
$S_1$	2.00~3.00	1.13	1.26	80	1.22
	1.00~2.00	1.19	1.35		1.08
	0.50~1.00	1.18	1.34		1.10
	0.25~0.50	1.30	1.50		0.88
$S_2$	0.10~0.25	1.27	1.45	80	0.94
	2.00~3.00	0.90	1.00		1.70
	1.00~2.00	0.86	0.98		1.84
	0.50~1.00	0.87	1.01		1.76
	0.25~0.50	0.91	1.08		1.55
	0.10~0.25	0.97	1.13	1.43	

注: $D_r$ 为相对密实度。

显微镜视野内颗粒形状的完整性。使用Image J软件对采集的两种钙质砂不同粒径组颗粒图片进行图像二值化处理,确定好比例尺后,可获取投影颗粒的面积、轴向及最大、最小费雷特(Feret)直径等参数。如图2所示,钙质砂 $S_1$ 颗粒多以块状颗粒为主,而钙质砂 $S_2$ 的颗粒多以片状颗粒为主。虽然片状颗粒的面孔隙较少,但颗粒强度显著低于块状颗粒,且颗粒接触之间易产生应力集中。

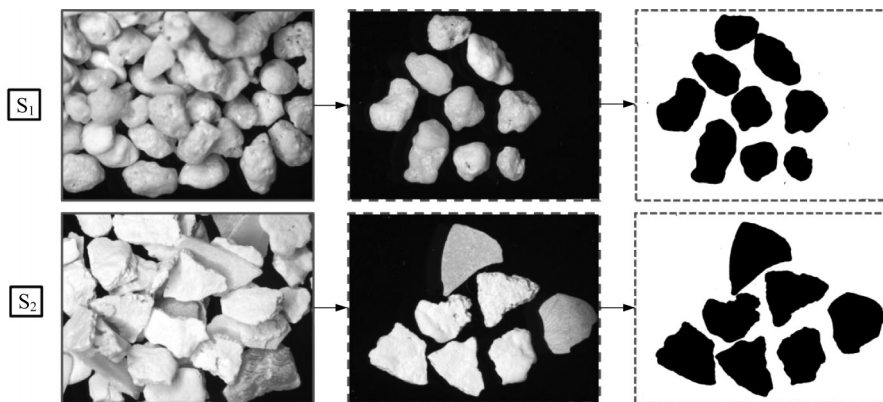


图2 两种钙质砂的颗粒形貌及二值化图像

Fig.2 Particle morphology and binary image of two kinds of calcareous sand

分形维数 $D_p$ 可用于定量描述颗粒材料形状的复杂性,因此用其定量表征两种钙质砂的颗粒形状差异。分形维数计算选用面积-周长法,即根据两种颗粒不同粒径组颗粒的投影周长 $L$ 和投影面积 $A$ 进行计算。由于两种钙质砂颗粒投影的形状边界并不规则,当图形边界线不规整时,其形状分维满足 $L^{1/D_p} \propto A^{1/2}$ 的关系,将其比例系数设为 $\alpha$ ,颗粒的边长为 $\epsilon$ ,对其两端取对数后将满足以下关系式:

$$\lg L = \frac{D_p}{2} \lg A(\epsilon) + \alpha \quad (1)$$

两种钙质砂各粒径组均随机选取了80个以上

的砂粒进行统计,得到其颗粒投影对应的分形维数,如图3、图4所示。

由图3可知,对于钙质砂 $S_1$ 而言,其各粒径组的颗粒投影面积与周长之间均呈良好的线性关系,说明钙质砂 $S_1$ 表现出良好的分形特征,且其粒径组的分形维数相差不大,表明各粒径组颗粒的形状不规则程度相近。由图4可知,对于钙质砂 $S_2$ 而言,小于2.00 mm的颗粒投影面积与周长之间均表现出良好的线性关系,且其分形维数大于钙质砂 $S_1$ 相同粒径组的颗粒,这也直观说明了相较于钙质砂 $S_1$ ,钙质砂 $S_2$ 颗粒会更加不规则;对于钙质砂 $S_2$ 大于2.00 mm

的粒径组颗粒,其颗粒投影面积与周长之间的线性关系拟合结果较差,这可能是由于该粒径组颗粒之间颗粒形状差异过大,宏观上观察,片状颗粒大多为

原生物骨架(贝壳)破碎形成,所以形态各异且多棱角,但由于颗粒棱角处易发生断裂,所以破碎后的片状颗粒易于呈现出更好的分形特性。

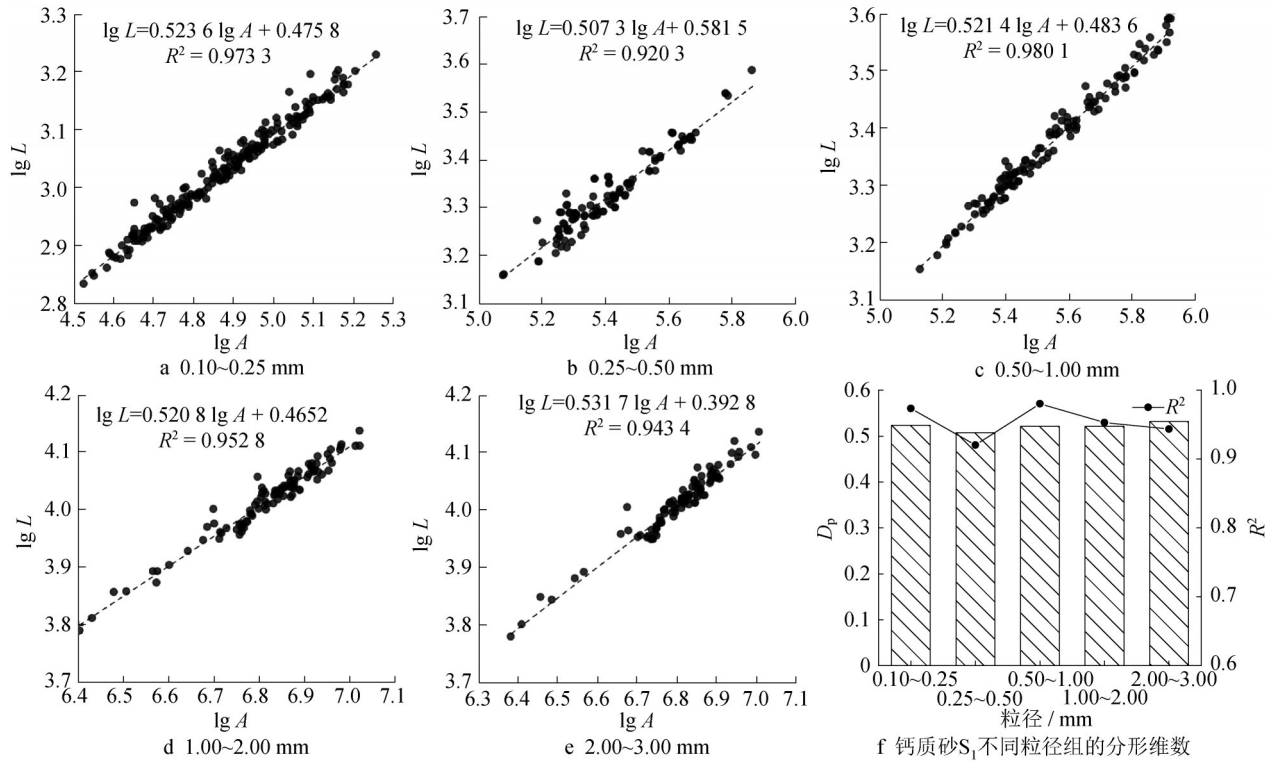


图3 钙质砂 $S_1$ 的分形维数

Fig. 3 Fractal dimensions of calcareous sand ( $S_1$ )

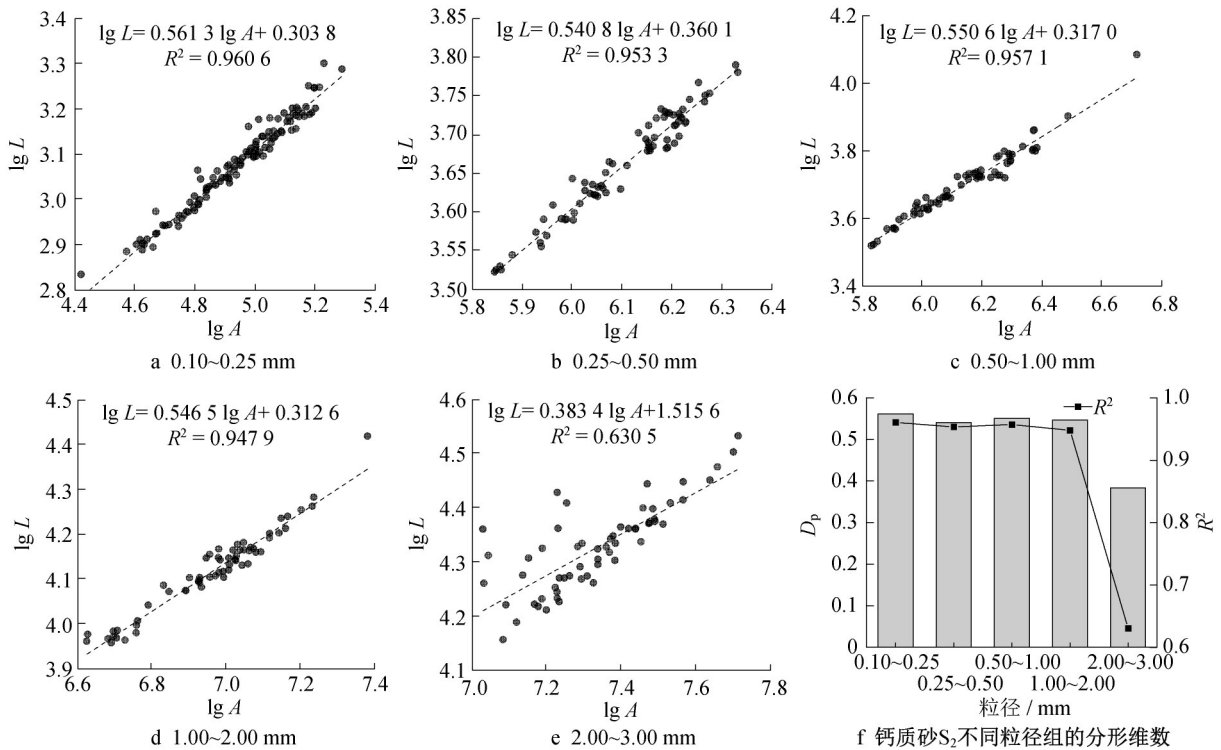


图4 钙质砂 $S_2$ 的分形维数

Fig. 4 Fractal dimensions of calcareous sand ( $S_2$ )

### 1.3 高压固结试验方案

为分析两种形状差异显著的钙质砂样的压缩特性,对其各粒径组的砂粒开展了高压固结试验。试验仪器为自主改装的气动式高压固结仪,竖向传力杆上方的气缸可对土样施加稳定的竖向压力,其压力数值可通过读取电子压力阀上显示的数值或换算量力环的变形量得到,如图5所示,最大轴向应力可达8 MPa,试样尺寸为 $\Phi 61.8 \times 20$  mm。按相对密度 $D_r=80\%$ 称取砂样后,分4次倒入固结盒内,每层经击实器击实后,需用游标卡尺测量其是否达到目标高度,当最后一层填装完毕时,砂样表面应与环刀最高面相平。竖向荷载的加载路径为62.5、125.0、250.0、500.0、1 000.0、2 000.0、4 000.0、8 000.0 kPa。每级荷载作用下,将试样压缩量小于 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 视为压缩稳定的判断标准,达到压缩稳定后才可施加下级荷载;待最后一级荷载施加稳定后,对试样进行卸载,卸载路径为8 000.0、4 000.0、2 000.0、1 000.0、500.0 kPa,变形稳定的判断标准与加载时相同。

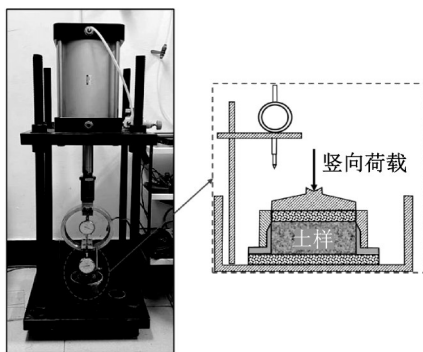


图5 SJTU-高压固结仪

Fig.5 SJTU(Shanghai Jiao Tong University)-High pressure consolidation apparatus

## 2 试验结果分析

### 2.1 两种钙质砂的压缩特征对比

图6为两种钙质砂不同粒径组颗粒归一化的压缩曲线,由于不同粒径组颗粒的初始孔隙比 $e_0$ 差异较大,为更直观对比其压缩性差异,将各级压力下记录的孔隙比 $e$ 进行了归一化处理。由图6可知,钙质砂 $S_1$ 与 $S_2$ 各粒径组砂样的压缩曲线均呈平缓到急剧的变化趋势,即竖向应力较小时,由于试样的初始密度较高,颗粒之间的相对移动十分有限,但达到屈服点之后,将开始产生显著的压缩变形;对于两种钙质砂而言,相同竖向应力水平下,其压缩量会随着颗

粒粒径的增大而增大;在卸载回弹阶段,钙质砂 $S_1$ 及 $S_2$ 各粒径组砂样的回弹曲线均接近于一条水平直线,表明两种钙质砂样的压缩变形都是以不可恢复的塑性变形为主;对比两种钙质砂样的压缩曲线,易发现各粒径组条件下,钙质砂 $S_2$ 产生的压缩变形均会显著大于钙质砂 $S_1$ 。

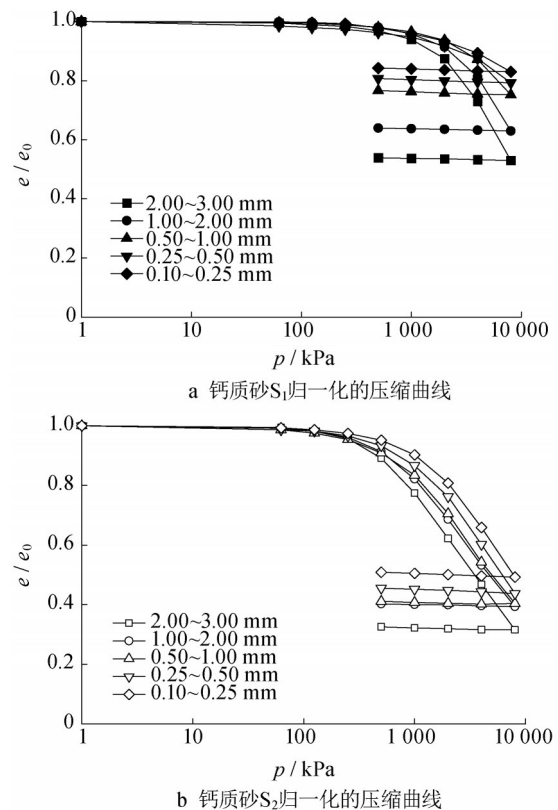


图6 不同粒径组钙质砂归一化的压缩曲线

Fig.6 Compression of calcareous sand with different particle sizes

图7给出了不同粒径组的钙质砂试样压缩模量 $E_s$ 随轴向应力的发展曲线。由图7可知,对于钙质砂 $S_1$ 而言,其压缩模量会随着颗粒粒径的减小而显著增大,表明当颗粒粒径越小时,其压缩性越小;对于钙质砂 $S_2$ 而言,虽然其压缩模量也呈随颗粒粒径减小而增大的趋势,但其各粒径组的压缩模量大小差距较小,且其压缩模量远小于对应钙质砂 $S_1$ 的粒径组,表明钙质砂 $S_2$ 各粒径组均表现出较高的压缩性。随着轴向应力的增大,两种钙质砂的压缩模量均呈先增大又减小再增大的变化趋势,这可能是由于竖向压力较小时,即颗粒破碎不明显时,压缩模量随着压力增大而增大,但当发生显著颗粒破碎后,压缩模量又开始减小,待破碎稳定,压缩模量又随竖向压力的增大而增大;对于钙质砂 $S_1$ ,在其颗粒破碎较为明显时(粒径大于0.50 mm的粒径组),其压缩模

量会在轴向压力大于4 000.0 kPa时开始增大,且当钙质砂颗粒越大时,其压缩模量减小的转折竖向应力越小,说明粒径越大的颗粒越容易发生破碎,钙质砂 $S_2$ 也表现出类似的规律。

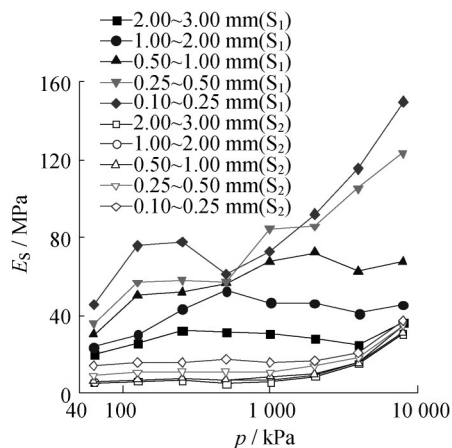


图7 压缩模量随轴向应力的发展

Fig.7 Development of compressive modulus with axial stress

图8给出了不同粒径组的砂样总应变 $\epsilon$ 的变化( $\epsilon = \Delta e / (1 + e_0)$ )。由图8可知, $S_1$ 和 $S_2$ 钙质砂样的轴向应变均呈随颗粒粒径增大而减小的趋势;以片状颗粒为主的钙质砂 $S_2$ 的总应变会显著高于以块状颗粒为主的钙质砂 $S_1$ ,表明片状颗粒的压缩性更大,由于片状颗粒多棱角、不规则及强度低,导致颗粒接触间易形成复杂的孔隙结构,在竖向荷载作用下,在颗粒接触处易产生应力集中,从而产生明显的颗粒破碎,显著的破碎及破碎后的颗粒重排导致了较大的压缩变形。

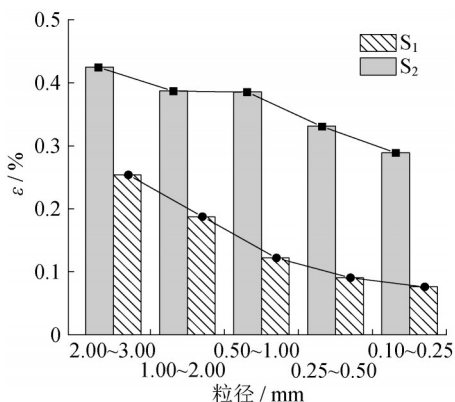


图8 不同粒径组钙质砂样的轴向应变

Fig.8 Total strain of calcareous sand with different particle size groups

## 2.2 两种钙质砂样的颗粒破碎特征

颗粒破碎程度的量化参数选用Hardin<sup>[27]</sup>提出的相对破碎势 $B_r$ ,如图9所示。相对破碎势 $B_r$ 定义为试验前后颗粒产生的总破碎 $B_t$ (破碎前后颗粒级配曲线与粉土最大粒径0.074 mm竖直线所围成的面积)与初始破碎势 $B_p$ (颗粒初始级配曲线与粉土最大粒径0.074 mm竖直线之间围成的面积)的比值。计算公式如下:

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (2)$$

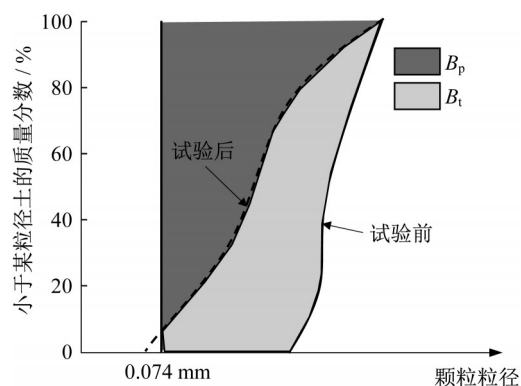


图9 相对破碎率 $B_r$

Fig.9 Relative breakage rate  $B_r$

图10给出了两种钙质砂各粒径组砂样在压缩试验前后的颗粒级配演化曲线,依此计算两种钙质砂样的相对破碎率 $B_r$ 。图11给出了破碎率与中值粒径 $d_{50}$ 的关系曲线。由图11可知,钙质砂 $S_2$ 各粒径组的颗粒破碎程度均大于钙质砂 $S_1$ ,但当颗粒的粒径大于2.00 mm时,其破碎程度相似;总的来说,压缩荷载作用下,钙质砂 $S_2$ 的各粒径组颗粒均会产生较明显的颗粒破碎,而钙质砂 $S_1$ 的颗粒破碎程度会随着粒径的减小而发生显著下降。

图12给出了两种钙质砂样相对破碎率 $B_r$ 与塑性应变 $\epsilon_p$ 之间的关系曲线。由图12可知,两种钙质砂的塑性应变 $\epsilon_p$ 与相对破碎率 $B_r$ 之间呈现出良好的幂函数增长关系,即

$$B_r = a(\epsilon_p)^b \quad (2)$$

式中:不同钙质砂按曲线拟合得到参数 $a$ 和 $b$ 的值见图12。

钙质砂样的颗粒破碎程度随着压缩变形量的增大而显著增大,这也表明了钙质砂颗粒破碎与高应力下的压缩变形密切相关,即一维压缩过程中,无论是片状还是块状钙质砂颗粒,其产生的塑性变形均是由于显著的颗粒破碎所造成的。

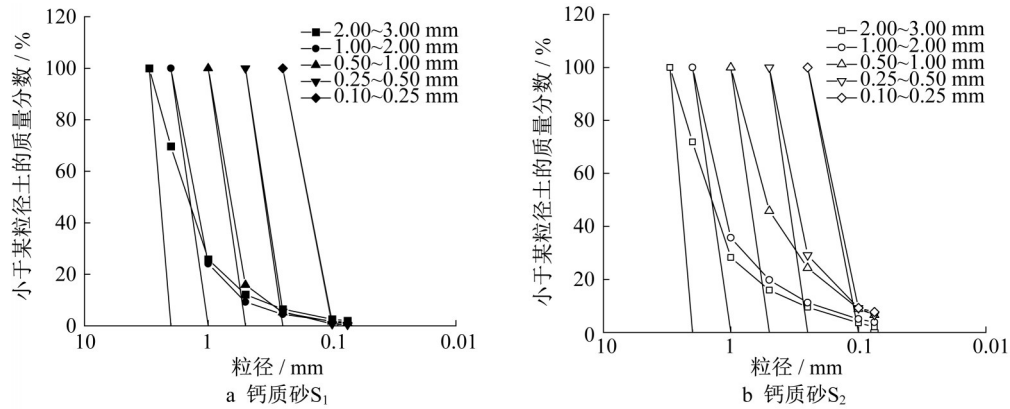


图 10 颗粒级配演化曲线

Fig.10 Evolution of particle gradation

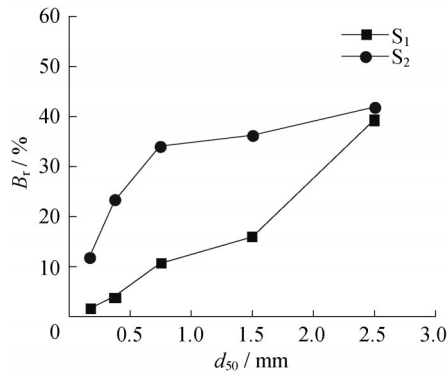


图 11 颗粒破碎率  $B_r$  与中值粒径  $d_{50}$  的关系

Fig.11  $B_r$  versus  $d_{50}$

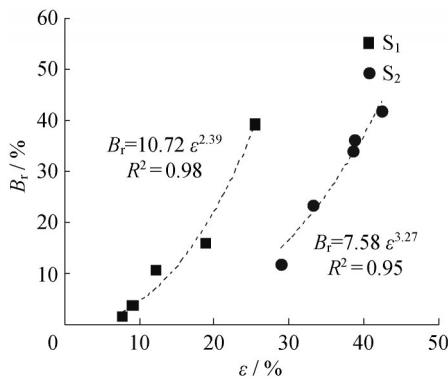


图 12 相对破碎率  $B_r$  与总应变  $\epsilon$  的关系

Fig.12 Particle crushing rate versus total strain

### 3 结论

(1)两种钙质砂颗粒的矿物组成类似,但颗粒形状差异显著,表明沉积环境差异可能是造成钙质砂形状差异的主要原因;颗粒形状越不规则,颗粒接触之间越易形成孔隙结构,造成密实度相同的情况下,其孔隙比  $e$  越大。

(2)以片状颗粒为主的钙质砂  $S_2$  的分形维数会

大于以块状颗粒为主的钙质砂  $S_1$ ,且当颗粒粒径大于 2.00 mm 时,由于颗粒形状的差异性较大,会不具有良好的分形特性。

(3)同一荷载条件下,钙质砂颗粒形状的差异会显著影响其压缩变形量及颗粒破碎。以片状颗粒为主的钙质砂  $S_2$  的压缩变形量和颗粒破碎程度均大于以块状颗粒为主的钙质砂  $S_1$ ,且两种钙质砂的总应变变量  $\epsilon$  与相对破碎率  $B_r$  之间均呈现良好的幂函数关系,表明钙质砂的高压缩性与颗粒破碎密切相关。

#### 作者贡献声明:

- 顾琳琳:项目构思及负责人,论文修改及定稿。
- 余玮平:试验操作,数据分析,论文初稿写作。
- 王建平:指导数据分析。
- 王 振:参与试验设计和试验结果分析。
- 叶冠林:指导论文修改。

#### 参考文献:

- [1] 王新志.南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D].武汉:武汉中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.
- WANG Xinzhi. Study on engineering geological properties of coral reefs and feasibility of large project construction on Nansha Islands [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2008.
- [2] BOLITON M D, NAKATA Y, CHEN Y P. Micro-macro-mechanical behavior of DEM crushable materials [J]. Géotechnique, 2008, 58(6): 471.
- [3] 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.
- CHEN Haiyang, WANG Ren, LI Jianguo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1389.
- [4] 刘崇权,汪稔.钙质砂物理力学性质初探[J].岩土力学,

- 1998, 19(1): 32.  
LIU Congquan, WANG Ren. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(1): 32.
- [5] 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.  
ZHANG Jiaming, ZHANG Ling, JIANG Guosheng, *et al.* Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2789.
- [6] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 661.  
ZHANG Jiaming, WANG Ren, ZHANG Yangming, *et al.* Research progress of soil particle breaking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 661.
- [7] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials [J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1967, 94:1042.
- [8] ISHIHARA K, ENGINEER F T, STUDENT S Y. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses - science direct[J]. Soils and Foundations, 1975, 15(1): 29.
- [9] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands [J]. Géotechnique, 1990, 40(4): 607.
- [10] 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.  
ZHANG Jiaming. Study on the basic mechanical characteristics of calcareous sand and the influence of particle breaking [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2004.
- [11] 吕亚茹, 李治中, 李浪. 高应力状态下钙质砂的一维压缩特性及试验影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3142.  
Lǚ Yaru, LI Zhizhong, LI Lang. One-dimensional compression behavior of calcareous sand and its experimental technology under high stress conditions [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3142.
- [12] 秦月, 姚婷, 汪稔, 等. 基于颗粒破碎的钙质沉积物高压固结变形分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3123.  
QIN Yue, YAO Ting, WANG Ren, *et al.* Particle breakage-based analysis of deformation law of calcareous sediments under high-pressure consolidation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3123.
- [13] 尹振宇, 许强, 胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究:进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2170.  
YIN Zhenyu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: review and development [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2170.
- [14] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1237.  
GAO Yufeng, ZHANG Bing, LIU Wei, *et al.* Experimental study on particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1237.
- [15] SHAHNAZARI H, REZVANI R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: an experimental study [J]. Engineering Geology, 2013, 159:98.
- [16] 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): 51.  
WU Jingping, CHU Yao, LOU Zhigang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5): 51.
- [17] 李彦彬, 李飒, 刘小龙, 等. 颗粒破碎对钙质砂压缩特性影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 352.  
LI Yanbin, LI Sa, LIU Xiaolong, *et al.* Effect of particle breakage on compression properties of calcareous sands with oedometer tests[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 352.
- [18] 彭宇, 丁选明, 肖杨, 等. 基于染色标定与图像颗粒分割的钙质砂颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2663.  
PENG Yu, DING Xuanming, XIAO Yang, *et al.* Study of particle breakage behaviour of calcareous sand by dyeing tracking and particle image segmentation method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2663.
- [19] COOP M. The mechanics of uncemented carbonate sands [J]. Géotechnique, 1990, 40(4): 607.
- [20] GUO Peijun, SU Xubin. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(5):579.
- [21] ROUSE P, FANNIN R J, SHUTTLE D A. Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand [J]. Géotechnique, 2008, 58(3): 227.
- [22] TSOMOKOS A, GEORGIANNOU V N. Effect of grain shape and angularity on the undrained response of fine sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(5): 539.
- [23] 田朝阳, 兰恒星, 刘鑫. 考虑形貌特征和级配影响的钙质砂压缩破碎力学特性研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6):11.  
TIAN Chaoyang, LAN Hengxing, LIU Xin. Study on compression and crushing mechanical properties of calcareous sand considering the influence of morphology and grading [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6):11.
- [24] 袁泉, 李文龙, 高燕, 等. 钙质砂颗粒特征及其对压缩性影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(2): 32.  
YUAN Quan, LI Wenlong, GAO Yan, *et al.* Experimental research on the particle characteristics of calcareous sand and effect on compressibility [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(2): 32.
- [25] 张小燕, 蔡燕燕, 王振波, 等. 珊瑚砂高压下一维蠕变分形破碎及颗粒形状分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1573.  
ZHANG Xiaoyan, CAI Yanyan, WANG Zhenbo, *et al.* Fractal breakage and particle shape analysis for coral sand under high-pressure and one-dimensional creep conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1573.
- [26] 张季如, 祝杰, 黄文竞. 侧限压缩下石英砂砾的颗粒破碎特性及其分形描述[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 783.  
ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Wenjing. Crushing and fractal behaviors of quartz sand-gravel particles under confined compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 783.
- [27] HARDIN B O. Crushing of soil particles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177.