

# 侧限条件下高压对钙质砂颗粒破碎影响研究

王 帅<sup>1</sup>, 雷学文<sup>1</sup>, 孟庆山<sup>2</sup>, 孙 超<sup>1</sup>, 胡思前<sup>3</sup>, 徐亚飞<sup>1</sup> (1. 武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 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; 3. 江汉大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉 430056)

[摘 要] 高应力环境中钙质砂的颗粒破碎会影响其工程稳定性, 利用液压万能试验机在侧限条件下对 0.25mm ~ 0.5mm、1mm ~ 2mm、2mm ~ 5mm 粒径和混合粒组钙质砂进行高压加载, 研究终止压力、平均粒径、干密度等因素对其颗粒破碎影响。试验结果表明: 终止压力  $P$  值对钙质砂颗粒相对破碎率  $B_r$  值影响显著, 用 Slogistic 函数拟合后相关性良好, 根据拟合曲线可将破碎分为渐增和缓增阶段; 同时相对破碎率  $B_r$  与试样平均粒径  $d_{50}$  呈线性负相关; 控制变形速率和终止压力相同, 干密度大的试样加荷速率更快, 相对破碎率  $B_r$  比干密度低的试样略大; 同等终止压力水平下混合粒组钙质砂相对破碎率  $B_r$  远小于单粒组; 高压加载导致级配和粒组百分含量变化十分显著, 工程中应充分考虑其对钙质砂工程性质的影响。试验结论对海相钙质砂区域工程建设具有参考意义。

[关键词] 岩土工程; 侧限; 高压; 钙质砂; 颗粒破碎  
[中图分类号] TU 411 [文献标识码] A

## Influence study of high pressure on particle breakage of calcareous sand under confined compression

Wang Shuai<sup>1</sup>, Lei Xuewen<sup>1</sup>, Meng Qingshan<sup>2</sup>, Sun Chao<sup>1</sup>, Hu Siqian<sup>3</sup>, Xu Yafei<sup>1</sup> (1. Institute of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 3. College of Chemistry and Environmental Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

**Abstract:** Particle breakage of calcareous sand in high stress condition will affect its stability of engineering. Under the confined conditions, the mixed group of calcareous sand grain size of which is within 0.25mm ~ 0.5mm, 1mm ~ 2mm, 2mm ~ 5mm and of different initial density is loaded under high pressure with hydraulic universal testing machine. The influence of factors including termination pressure, average grain size and dry density is studied on its particle breakage. The results show that termination pressure of  $P$  value has a great significance to relative particle breakage of  $B_r$  value and the correlation between  $P$  value and  $B_r$  value fitted with Slogistic function is significant. According to the fitting curves, the breakage process could be divided into two stages: gradually-increasing stage and slowly-increasing stage; and there is a negative linear correlation between relative particle breakage of  $B_r$  value and average grain size of  $d_{50}$  value; the deformation-controlling rate and termination pressure are the same, the loading rate is faster when dry density of samples is larger, the relative breakage of  $B_r$  value is slightly more than that of samples with smaller dry density; under the same termination pressure, the particle breakage of mixed grain group of  $B_r$  value is much smaller than that of single group; the high pressure loading results in a significant change of gradation and percent of calcareous sand. The influence of high pressure on the engineering properties should be fully taken into consideration. The conclusions of the experiment provide reference for engineering construction of calcareous sand districts in marine sedimentary facies.

**Keywords:** geotechnical engineering; confined condition; high pressure; calcareous sand; particle breakage

[收稿日期] 2016-10-11  
[基金项目] 国家重大科学研究计划(2013CB956104) 南海珊瑚礁的演化趋势与可持续利用对策; 国家自然科学基金重点项目(41330642) 珊瑚礁工程地质评价及其工程力学效应的分带性研究; 国家自然科学基金面上项目(41372316) 基于颗粒破碎的珊瑚礁钙质砂土液化机理研究  
[作者简介] 王帅(1989-) 男 博士研究生  
[联系方式] 356797825@qq.com

## 0 引言

钙质砂广泛分布于南纬 30° 至北纬 30°, 在我国南海诸岛、红海、澳大利亚西部大陆架、印度西部海

域、中美洲州海域、北美佛罗里达海域、阿拉伯湾南部等地域均有分布。它是一种珊瑚白化死亡后形成的碎屑物,其碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )含量通常在50%以上,并以方解石和文石的形式存在,硬度较石英砂低很多。已有研究表明钙质砂在常规应力水平下会发生颗粒破碎,这是其有别于一般陆源砂的特点,现有工程经验并不完全适用于钙质砂地质环境的工程建设,世界各地例如澳大利亚、印度、巴西等国均发生过因钙质砂特殊工程性质而造成的工程建设事故,对于钙质砂颗粒破碎特性,国内外学者先后对其进行诸多研究,取得诸多研究成果<sup>[1-5]</sup>。钙质砂作为珊瑚岛礁工程中的地基材料,在荷载作用下导致地基发生变形,并伴随不同程度的颗粒破碎,研究其颗粒破碎特性对工程建设十分重要。张家铭等<sup>[6-10]</sup>对钙质砂的基本物理和力学性质进行了相关研究,并在侧限条件下的钙质砂进行了不同终止压力的钙质砂压缩试验,压力达4MPa,试验指出钙质砂在常应力条件下发生了颗粒破碎,钙质砂侧限压缩表现出类似黏土的压缩性质,卸载回弹量很小。秦月等<sup>[11,12]</sup>对不同级配钙质沉积物进行了达3.2MPa的侧限压缩试验,分析了加载方式、含水量等对颗粒破碎的影响,其指出在试验中0.25mm是颗粒破碎时相对稳定的粒径,是重要的界限粒径,其试验结论有工程参考意义。张弼文<sup>[13]</sup>在高压固结仪上对钙质砂进行了终止压力6MPa的侧限加载试验,研究在低应力水平下钙质砂的侧限压缩特性和颗粒破碎机制,指出相对破碎率 $B_r$ 与荷载值 $P$ 存在某种联系。胡波等<sup>[14,15]</sup>对三轴条件下钙质砂的颗粒破碎特性开展相关研究,研究了粒径、级配、剪切速率对钙质砂强度特性的影响,围压达3.2MPa,试验结果表明随围压增大相对破碎增大,但钙质砂的颗粒破碎随压力增大不会一直增大,而是存在一定范围内。孙吉主等<sup>[16-18]</sup>对钙质砂三轴条件下颗粒破碎过程、剪胀效应以及本构关系模型进行了研究,并指出钙质砂颗粒破碎伴随的声发射现象,提出钙质砂剪切变形中的颗粒破碎和滑移两种机制。陈清运等<sup>[19]</sup>在三轴条件下,利用声发射原理对不同孔隙比、级配钙质砂在加载过程中的颗粒破碎进行了研究分析,试验指出随围压增大或试样压密,声发射活动在某一时刻达到最强。王新志<sup>[21]</sup>采用数值计算方法,模拟 $D_r = 68\%$ 钙质砂填筑的飞机跑道土基,在压缩模量 $E = 2.5\text{MPa}$ 、 $5\text{MPa}$ 、 $10\text{MPa}$ 、 $20\text{MPa}$ 、 $25\text{MPa}$ 时的沉降

量,预估钙质砂材料填筑地基进行大型工程建设可行性,但其未对其颗粒破碎的情况进行分析。

上述对钙质砂颗粒破碎特性的试验研究主要基于常规应力水平,高压作用下相关试验比较缺乏,随着我国岛礁大型工程建设种类越来越多,荷载类型越来越复杂,例如岛礁国防军事工程、地下洞室、道路机场、建筑地基填筑碾压加固等过程中,这些大荷重致使作为地基的钙质砂发生颗粒破碎,影响其地基稳定性和工程性质,因此需要充分考虑高压下钙质砂的颗粒破碎问题。鉴于此,本文利用微机液压万能试验机和特制的钢性试样模具,对0.25mm~0.5mm、1mm~2mm、2mm~5mm三个单粒组和混合粒组钙质砂进行高压侧限压缩试验,终止压力高达20MPa,旨在分析研究钙质砂在高压条件下的颗粒破碎规律,并分析终止压力、平均粒径、变形速率、干密度等因素对其颗粒破碎的影响,试验研究钙质砂在高压下的颗粒破碎问题,对海相钙质砂区域的大型工程建设具有参考意义。

## 1 试验概况

### 1.1 试样情况

试验所用钙质砂取自我国南海附近某海域,是一种未胶结的疏松松散颗粒聚集体,试验前进行清洗、烘干、筛分待用。试样包括0.25mm~0.5mm、1mm~2mm、2mm~5mm单粒组钙质砂和混合粒组钙质砂(简称GZS),混合粒组钙质砂级配曲线如图1所示, $C_u = 1.11$ , $C_c = 4.2$ ,为不良级配砂,试样尺寸 $\phi = 150\text{mm}$ ,高度 $h = 75\text{mm}$ ,试验按照《土工试验规程》(SL237—1999)<sup>[22]</sup>中关于相对密实度测定方法,使用振动压实法测定试样最大密度 $\rho_{dmax}$ ,漏斗量筒法测定试样最小密度 $\rho_{dmin}$ ,进行了三次平行测定,取其平均值,基本物理性质如表1所示。

表1 试样基本物理性质

粒组 $D$	$\rho_{dmax}$ /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho_{dmin}$ /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
0.25~0.5mm	1.4493	1.1905
1~2mm	1.2987	1.0526
2~5mm	1.2510	1.0416
GZS	1.6790	1.3030

### 1.2 试验装置

试验加载在微机液压万能试验机上进行,最大

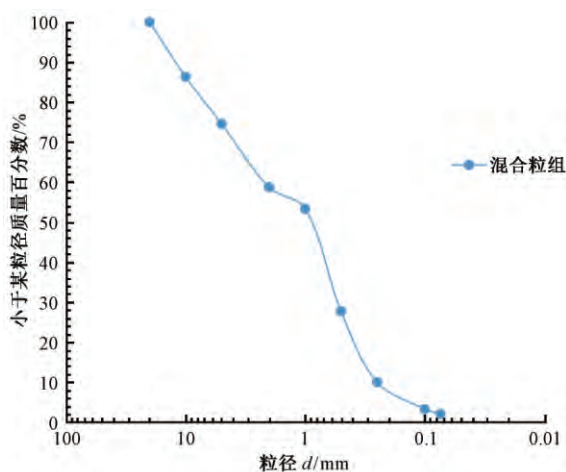


图 1 混合粒组级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of mixed grain group

加载幅值 1000kN, 试验机横梁上升速率范围为 0.08 ~ 10mm/min, 该试验机主要通过控制应变速率施加压力, 可设定终止压力值并采集实时压力值。试样盒为高强刚性圆筒, 内径 150mm, 壁厚 25mm, 高度 100mm, 经计算加载过程中其变形量可忽略, 模具上下端与万能试验机活动铰支座接触, 确保加载时荷载方向始终与试样垂直, 加载过程中采用精密电位计实时采集试样压缩变形量, 试验加载如图 2 所示。

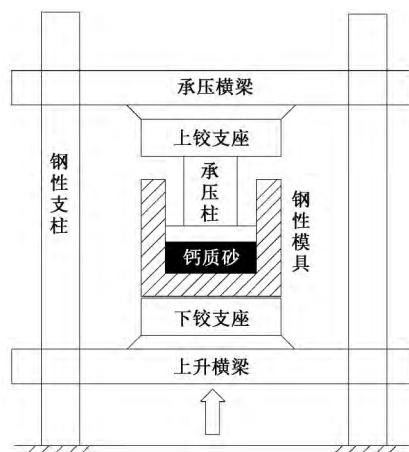


图 2 试验加载示意

Fig. 2 Loading of test

### 1.3 试验方案

试验主要从终止压力、平均粒径、干密度大小等因素对其颗粒破碎的影响, 设定单粒组相对密实度  $D_r = 0.38$ , 混合粒组相对密实度为  $D_r = 0.38$  (简称

GZS-1) 和  $D_r = 0.75$  (简称 GZS-2), 由式 (1) 分别计算相应干密度  $\rho_d$ , 进一步根据试样尺寸, 计算得到加入试样质量  $m$ 。

$$D_r = \frac{\rho_{\max}(\rho_d - \rho_{\min})}{\rho_d(\rho_{\max} - \rho_{\min})} \quad (1)$$

试样质量分三次加入, 控制每层高度为 25mm, 试样加入后, 先用振动叉敲击模具盒侧壁, 使试样振密后, 小毛刷抹平表面, 后用木板压实, 填筑至试样高度为 75mm。考虑到钙质砂制样过程中可能引起的轻微破碎, 对初装填完毕后的试样进行了筛分, 发现其装样前后级配差异十分微小, 可忽略不计。试样中控制试样变形速率 0.5mm/min, 终止压力  $P$  分别为 1.25MPa、2.5MPa、5MPa、10MPa、20MPa, 试验加载完毕后, 在高压后试样会较为密实, 取样时将模具盒小心侧放, 用小木槌轻轻敲击外壁和底部, 使试样松散, 再将试样从模具盒中小心取出, 在振筛机上进行颗粒筛分, 为减少筛分过程中钙质砂的颗粒破碎, 严格控制筛分时间为 15min。

## 2 试验结果

### 2.1 颗粒级配变化

图 3 为单粒组加载后级配变化。由图中可看出,  $P = 1.25\text{MPa}$  时, 各粒组级配变化均不明显, 随着  $P$  值增大, 粒组间级配变化差异逐渐显现, 0.25mm ~ 0.5mm 粒组在  $P = 1.25\text{MPa}$ 、2.5MPa、5MPa 的级配变化差异很小, 当  $P = 10\text{MPa}$ 、20MPa 的级配变化差异却很明显; 1mm ~ 2mm 粒组在  $P = 1.25\text{MPa}$ 、2.5MPa 时变化并不明显, 差异很小, 而  $P = 5\text{MPa}$ 、10MPa、20MPa 的级配变化差异比较明显; 2mm ~ 5mm 粒组在  $P = 5\text{MPa}$  时变化已经比较明显, 当  $P = 20\text{MPa}$  时级配变化十分显著。

图 4 为混合粒组加载后级配变化。由图中可以看出, 相对单粒组而言, 高压下混合粒组颗粒级配变化量十分有限,  $P = 1.25\text{MPa}$ 、2.5MPa、5MPa 时颗粒级配变化均较小,  $P = 10\text{MPa}$ 、20MPa 时, 混合粒组颗粒级配变化才逐渐明显。

### 2.2 颗粒破碎影响

采用 Hardin 相对破碎率  $B_r$  对试样颗粒破碎情况进行度量。该模型将粒径  $D = 0.074\text{mm}$  竖线与颗粒破碎前后的筛分曲线的竖线所围面积为总破碎势  $B_t$ , 与初始筛分曲线所围面积为初始破碎势  $B_p$ , 二者之比定义为相对破碎率  $B_r$  (见式 2)。

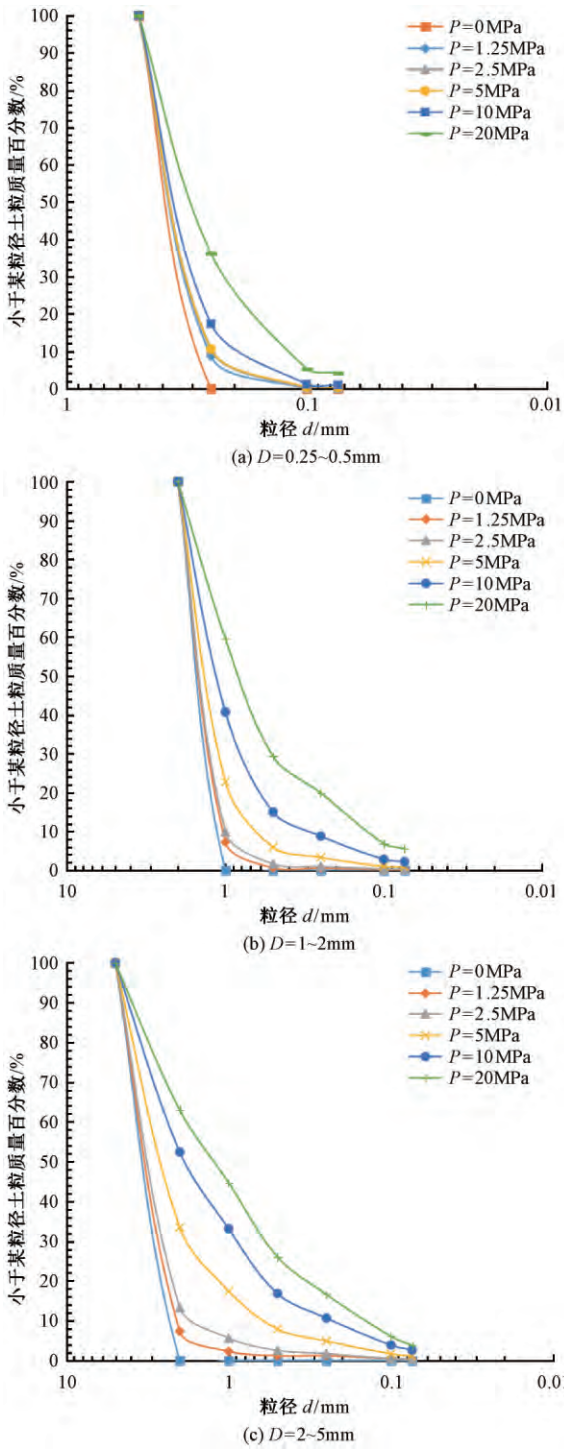


图3 单粒组加载后颗粒级配变化  
Fig.3 Gradation change of single grain group after loading

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

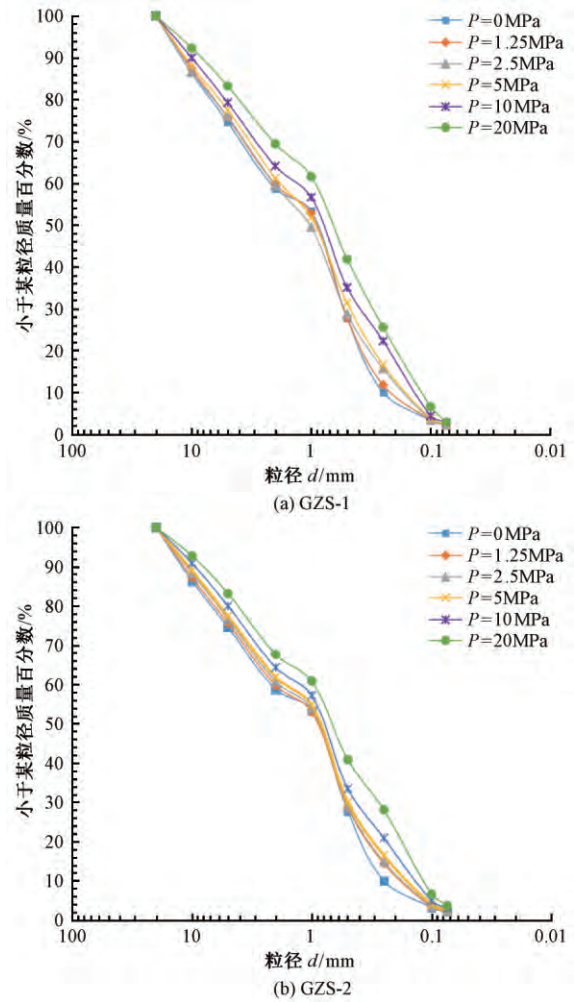


图4 混合粒组加载后颗粒级配变化  
Fig.4 Gradation change of mixed grain group after loading

2.2.1 终止压力  $P$  与相对破碎率  $B_r$  关系

图5(a)、(b)为试样相对破碎率  $B_r$  与终止压力  $P$  关系曲线。从图中可以看出,终止压力  $P$  对相对破碎率  $B_r$  值有显著影响,  $B_r$  值基本随终止压力增大而呈现增大趋势,但后期  $B_r$  增幅有减缓趋势。本文尝试使用 Slogistic 函数对其进行曲线拟合相关性良好 ( $R^2 = 0.9724 \sim 0.9888$ ),该函数目前已应用于物理、化学、生物等领域,得到拟合关系式(3),方程参数如表2所示。

$$B_r = \frac{a}{1 + e^{-k(P-x_c)}} \quad (3)$$



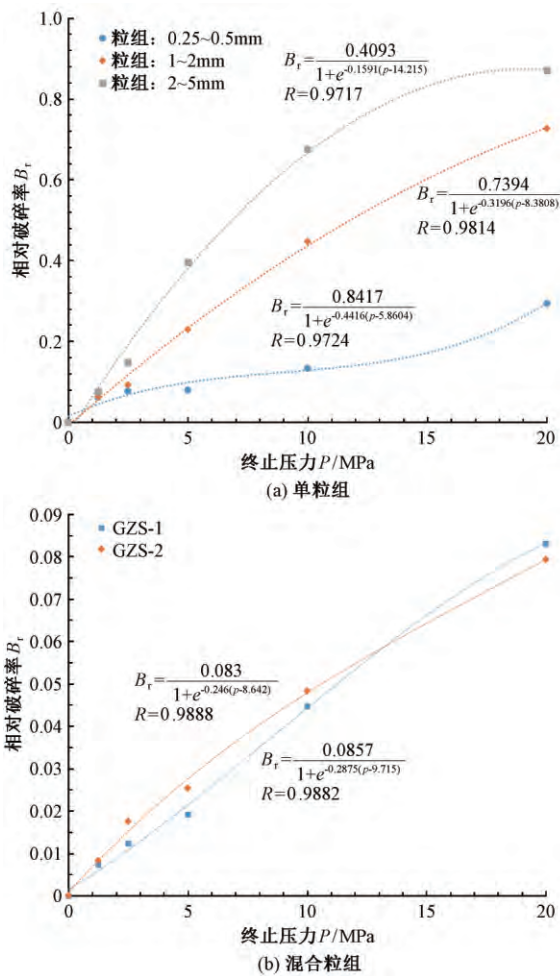


图 5 相对破碎  $B_r$  与终止压力  $P$  关系曲线

Fig. 5 The relation curves of  $B_r$  value of relative breakage and  $P$  value of load amplitude

表 2 函数拟合关系式

Table 2 Functional fitting relation equation

粒组 $D$	$B_r = \frac{a}{1 + e^{-k(p-x_c)}}$			相关系数 $R^2$
	$a$	$k$	$x_c$	
2 ~ 5mm	0.4093	0.1591	14.215	0.9717
1 ~ 2mm	0.7394	0.3196	8.3808	0.9814
0.25 ~ 0.5mm	0.8417	0.4441	5.8604	0.9724
GZS-1	0.083	0.246	8.642	0.9888
GZS-2	0.0857	0.2875	9.715	0.9882

式 (3) 中:  $a$  表示极限相对破碎率;  $x_c$  表示临界破碎应力;  $k$  为相应比例系数。

在加载过程中钙质砂颗粒破碎主要分为渐增阶段和缓增阶段。在渐增阶段,未达到钙质砂破碎应力平均水平,试样整体颗粒破碎程度较低,但相对破碎率  $B_r$  增长较快;进一步增大压力,当终止压力达

到钙质砂破碎应力水平时,其颗粒破碎增幅处于巅峰水平,相对破碎率  $B_r$  变化较快,进入缓增阶段。随后压力的增大依然导致相对破碎率  $B_r$  增大,但是其增幅减缓,同时最终其颗粒破碎率不会随压力的增大而一直增大,而存在一极限相对破碎率。

由图 5(b) 还可看出干密度大小对颗粒相对破碎率  $B_r$  影响,相同变形速率下, GZS-1 颗粒相对破碎率  $B_r$  略大于 GZS-2。分析其原因,终止压力相同,以同等变形速率加载时,由于 GZS-1 试样干密度更大,颗粒间更密实,其压缩模量  $E$  更大,其加荷速率(加载比)增长较快,对颗粒破碎产生影响,导致颗粒相对破碎率  $B_r$  更大,故本试验中 GZS-1 试样相对破碎率略大于 GZS-2 试样。

### 2.2.2 平均粒径 $d_{50}$ 与颗粒破碎关系

图 6 为试样相对破碎率  $B_r$  与平均粒径  $d_{50}$  关系曲线。由图中可以看出,随着相对破碎率  $B_r$  值增大,试样平均粒径  $d_{50}$  逐渐减小。本文尝试对各终止压力  $P$  下试样的相对破碎率  $B_r$  和平均粒径  $d_{50}$  进行曲线拟合,发现相对破碎率  $B_r$  与平均粒径  $d$  线性负相关性良好 ( $R^2 = 0.9873 \sim 0.9962$ ),得到拟合式 (4),方程参数如表 3。

$$B_r = Ad + B \quad (4)$$

表 3 函数拟合关系式

Table 3 Functional fitting relation equation

粒组 $D$	$B_r = Ad + B$		相关系数 $R^2$
	$A$	$B$	
0.25 ~ 0.5mm	-3.8625	1.4710	0.9962
1 ~ 2mm	-1.0674	1.6489	0.9904
2 ~ 5mm	-0.3731	1.3707	0.9916
GZS-1	-0.3145	0.3088	0.9941
GZS-2	-0.3197	0.3158	0.9873

### 2.3 粒组百分含量变化

图 7(a) 为 0.25mm ~ 0.5mm 粒组百分含量变化情况。由图中可看出在  $P = 5\text{MPa}$  时,粒组百分含量变化在 10% 左右,相对较小。当  $P = 10\text{MPa}$  时,其百分含量变化达 20%,当  $P = 20\text{MPa}$ ,增至 38%,变化已经相对明显;但试样其余粒组含量变化分布较窄,除 0.1mm ~ 0.25mm 粒组变化明显,其他粒组含量变化微小,这表明高压对其百分含量影响有限。

图 7(b) 为 1mm ~ 2mm 粒组百分含量变化情况。由图中可看出在  $P = 2.5\text{MPa}$  之前,粒组百分含量变化维持在 10%,前两级荷载导致百分含量差异

不大,在  $P = 5\text{MPa}$  时,其百分含量变化迅速增至 30%,后续随着压力增大,百分含量变化达 50% 以上,变化相当明显,其余粒组百分含量变化分布较广,0.5mm ~ 1mm,0.25mm ~ 0.5mm,0.1mm ~ 0.25mm 增量均有不同程度影响,这表明高压对其粒组百分含量变化影响明显。

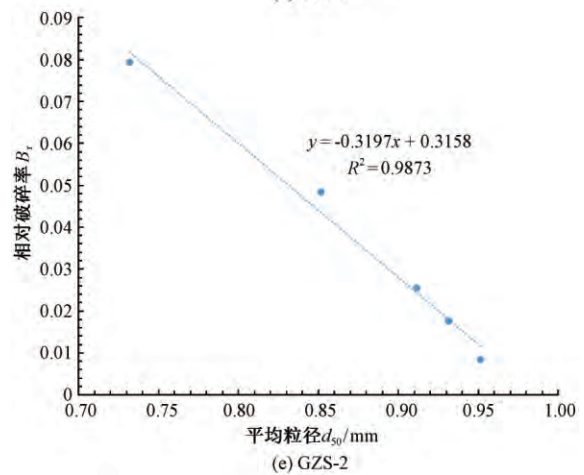
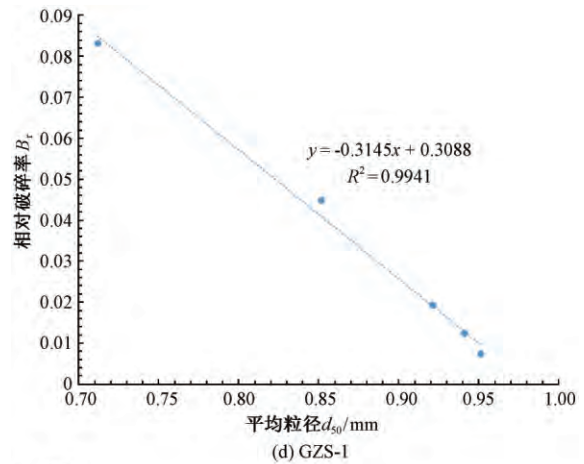
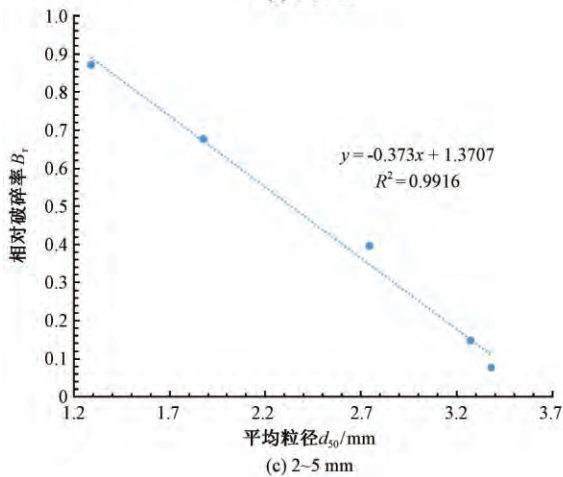
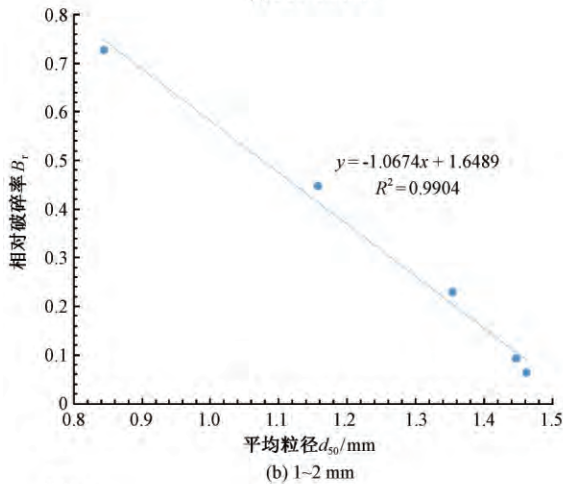
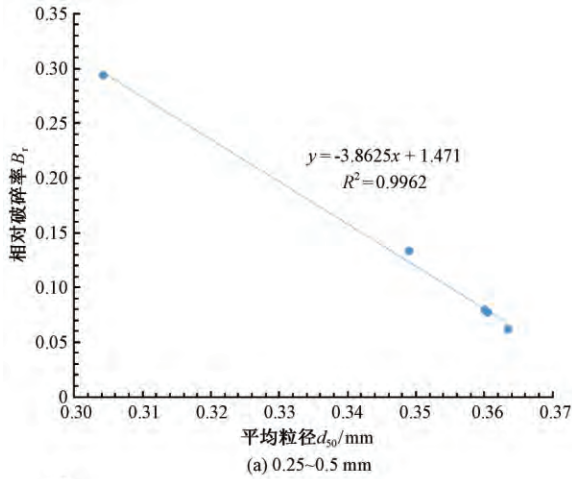


图6 相对破碎率  $B_r$  与平均粒径关系曲线

Fig.6 The relation curve of  $B_r$  value of relative breakage and average particle size

图7(c)为 2mm ~ 5mm 粒组百分含量变化情况。由图中可以看出在  $P = 2.5\text{MPa}$  之前,原始粒径区间百分含量变化维持在 15%,超过  $P = 5\text{MPa}$  后,颗粒百分含量变化增至 35%,当荷载  $P = 20\text{MPa}$  时,其百分含量变化达到 70%,且其颗粒含量变化分布较广,且变化均非常明显,这表明 2mm ~ 5mm 粒组颗粒破碎能力较强,高压后对其粒组百分含量变化非常显著。

图8为单粒组在高压加载下自身百分含量变化。由图中可以看出在  $P = 1.25\text{MPa}$ 、 $2.5\text{MPa}$  时试样百分含量变化在 10% 左右,且三个粒组百分含量变化差异较小,随着压力增大,各粒组百分含量变化出现明显差异,平均粒径  $d_{50}$  越大,相同压力下其百分含量变化越大,但差异随压力增大而减弱。

图9(a)为 GZS-1 在高压作用下粒组百分含量

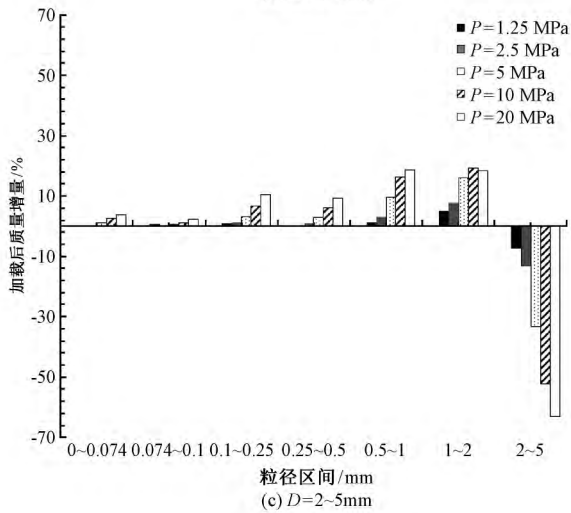
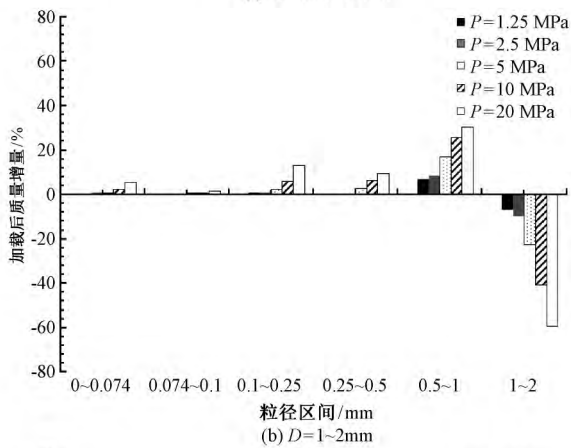
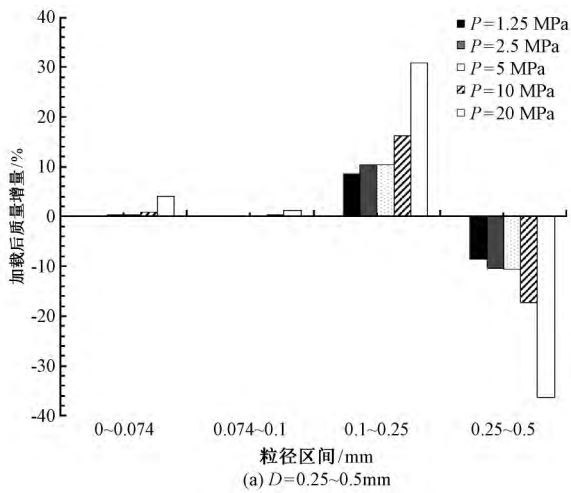


图 7 试样加载后粒组百分含量变化

Fig. 7 Percentage change in each group after loading

变化。由图中可以看出,试样整体百分含量变化不大,各粒组变化不超过 12%,远低于单粒组钙质砂。高压作用下,随着压力增大,2mm~20mm 粒组百分

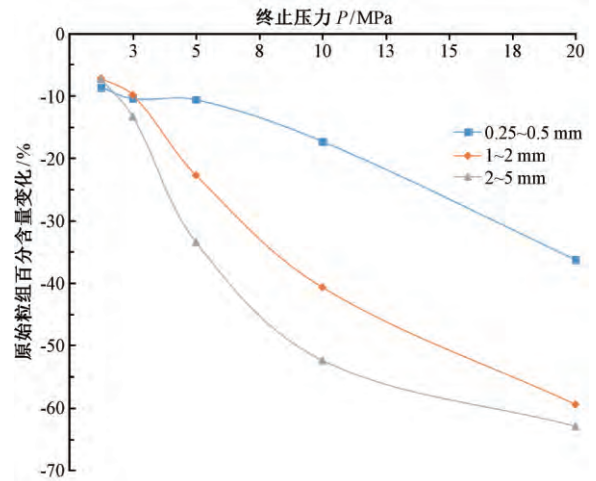


图 8 各粒组百分含量变化

Fig. 8 Percentage change in each grain group

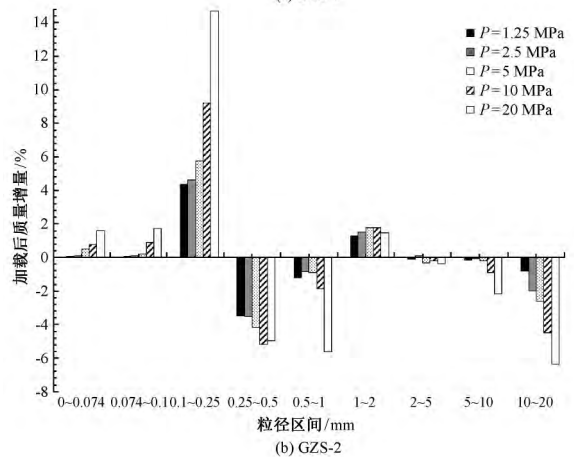
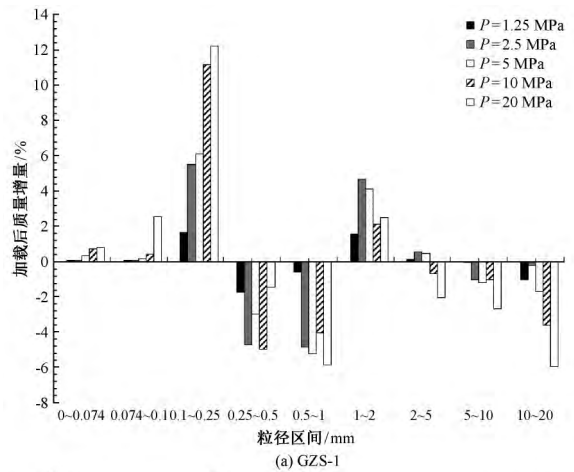


图 9 加载后混合粒组百分含量变化

Fig. 9 Percentage change of mixed group before and after loading

含量减小,其百分含量始终减小,中间 1mm~2mm

百分含量总体增大,但随着压力的增大,其百分含量增量先增大后减小,对于 0.25mm ~ 1mm 粒组百分含量减小,0.25mm 以下粒径百分含量又增大。这主要原因是高压下粗砾骨架先破碎形成新钙质砂颗粒,使细颗粒钙质砂粒组百分含量增加,但随着压力的增大,细颗粒再发生颗粒破碎,这种趋势越来越弱,新形成的粒组破碎加剧,进而又导致其百分含量增量减小。

图 9(b) 为 GZS-2 在高压作用下粒组百分含量变化。由图中可以看出,其整体破碎趋势与 GZS-1 试样相似,各粒组变化不超过 14%,但相对而言,其 1mm ~ 2mm 粒组百分含量增量较为均匀,且 0.1mm ~ 0.25mm 粒组百分含量增幅较大。这主要是由于 GZS-1 干密度更小,试样较为松散,孔隙比大,存在压密空间,变形速率相同时加荷速率更慢,前期加载时,颗粒破碎造成 1mm ~ 2mm 百分含量增大,其破碎程度低,随着后期试样被压密继续破碎,因此其百分含量增量先大后小,而 GZS-2 试样干密度大,压密空间低,钙质砾破碎后,1mm ~ 2mm 粒组试样破碎较快且充分而导致百分含量增量较为均匀。

### 3 结论

1) 高压下终止压力对钙质砂颗粒破碎影响显著,是导致级配和粒组百分含量变化的主要原因,终止压力  $P$  与相对破碎率  $B_r$  用 Slogistic 函数拟合后相关性良好,根据拟合曲线可将颗粒破碎分为渐增阶段和缓增阶段。

2) 高压加载后钙质砂平均粒径  $d_{50}$  与相对破碎率  $B_r$  二者线性相关性良好,随着相对破碎率  $B_r$  值增大,其平均粒径  $d_{50}$  逐渐减小。

3) 控制变形速率、终止压力相同时,干密度越大,其压密空间越小,加荷速率更快,对钙质砂颗粒破碎产生影响,导致其相对破碎率  $B_r$  比干密度低的试样略大。

4) 同等终止压力水平下钙质砂混合粒组相对破碎率  $B_r$  远小于单粒组,利用钙质砂作为地基填筑应充分考虑其级配,增强其工程稳定性。同时高压下其钙质砂粒组百分含量十分显著,对其渗透性、压缩性等工程性质的影响有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] 孙宗勋,赵焕庭.珊瑚礁工程地质学——新学科的提出[J].水文地质工程地质,1998,25(1):1-4
- [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] 刘崇权,汪稔.钙质砂物理力学性质初探[J].岩土力学,1998,19(1):32-37
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 张家铭.钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2004
- [7] 张家铭,刘俊,路为.一种测试土体颗粒强度的试验装置[J].岩土力学,2007,28(5):114-117
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 张家铭,汪稔,石祥锋,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
- [11] 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):3123-3128
- [12] 秦月,孟庆山,汪稔,等.土体颗粒破碎度量方法及其进展[A].第九届全国工程地质大会论文集[C].北京:科学出版社,2012
- [13] 张弼文.侧限条件下钙质砂的颗粒破碎特性研究[D].武汉:武汉理工大学,2014
- [14] 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:中国科学院武汉岩土力学研究所,2008
- [15] 胡波,汪稔,孟庆山,等.三轴条件下钙质砂颗粒破碎的试验研究[A].第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下册)[C].2009
- [16] 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
- [17] 孙吉主,汪稔.钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J].岩石力学与工程学报,2004,23(4):641-644
- [18] 孙吉主,王勇.钙质砂与结构接触面的本构模型研究[J].力学季刊,2006,27(3):476-480
- [19] 陈清运,孙吉主,汪稔.钙质砂声发射特征的三轴试验研究[J].岩土力学,2009,30(7):2027-2030
- [20] 刘崇权,汪稔.颗粒破碎对钙质土力学特性的影响[J].岩土力学,2002(S1):13-16
- [21] 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:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008
- [22] SL 237—1999,土工试验规程[S]