

DOI: 10.11779/CJGE201406022

基于粒度熵概念的贝壳砂颗粒破碎特性描述

田 海¹, 孔令伟¹, 赵 鸊²

(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. 天津市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘要: 对取自福建莆田湄洲湾海域的贝壳砂进行了不同围压、不同相对密度下的三轴排水剪切试验, 同时考虑了尺寸效应的影响。依据试样试验前后粒径分布资料, 在统计熵概念基础上提出颗粒破碎粒度熵模型对其破碎率进行了度量, 并与 Hardin 颗粒破碎模型进行了比较, 结果表明: 贝壳砂颗粒破碎率与围压、相对密度及试样尺寸均有关, 在相同试验条件下, 贝壳砂颗粒破碎程度随着试样尺寸的增加而增大, 随着围压的增加而增大; 当相对密度较低时, 颗粒破碎率呈增大趋势; 相对密度增加到较高值时, 颗粒破碎程度减弱; 贝壳砂三轴压缩前后的级配曲线均可以通过粒度熵模型参数表征, 其中相对基础熵参数 (NB) 较好地反映了颗粒破碎程度大小, 破碎率愈高, NB 值愈小, NB 与 Hardin 破碎率存在显着的线性关系。贝壳砂颗粒破碎粒度熵参数能较好地描述其颗粒破碎行为, 为岩土介质材料的颗粒破碎分析提供了一个新的量化指标。

关键词: 贝壳砂; 颗粒破碎; 粒度熵; 三轴试验

中图分类号: TU411.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)06-1152-08

作者简介: 田 海(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事特殊土土力学方面的研究工作。E-mail: htianova@gmail.com.

Characterization of particle breakage with grading entropy on shell sand

TIAN Hai¹, KONG Ling-wei¹, ZHAO Chong²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: Laboratory triaxial shear tests on shell sand taken from Meizhou Bay of Putian, Fujian are presented under different confining pressures, relative densities and sample sizes. A grading entropy model is proposed to measure the particle breakage degree after triaxial compression based on the statistical entropy concept with dataset of particle size distributions. This methodology is also compared with Hardin particle breakage model. It is shown that the quantity of particle breakage of shell sand is affected by the confining pressure, relative density and the sample size. With the increase of the confining pressure and sample size, the quantity of particle breakage of shell sand increases under the same experimental conditions. When the relative density is low, the quantity of particle breakage tends to increase. While the relative density reaches a higher value, the particle breakage is weakened. The particle size distributions of shell sand before and after triaxial compression can be characterized by the grading entropy parameters, in which the relative base entropy parameter (NB) reflects the degree of particle breakage. The higher degree of particle breakage, the lower value of NB. There is a significant linear relationship between NB and Hardin's index. The behavior of particle crushing of shell sand can be greatly described by the grading entropy parameters, which may be a useful index for the quantitative analysis of the particle breakage of geotechnical materials.

Key words: shell sand; breakage; grading entropy; triaxial test

0 引言

贝壳砂是近海沉积的重要组成部分, 作为一种特殊的岩土介质, 贝壳砂孔隙比较高, 富含强度低且容易破碎的贝壳, 其工程特性与石英砂有显着差异, 在福建广东沿海分布广泛, 是比较好的填海造地回填料, 不需要进行特殊的地基处理就能达到较高的承载能力和密实度^[1]。随着近年海洋工程的日益发展, 开发利用如此丰富的海域贝壳砂资源作为陆域形成回填材料

对于沿海地区的发展具有重要的价值。

颗粒破碎作为岩土介质的一种特性, 早在 20 世纪 60 年代国外一些学者就对其进行过比较系统的研究, 提出了许多不同度量颗粒破碎程度的方法, 这些破碎度量参数大多是经验性的, 而且大多数以颗粒破碎前后的粒径作为度量基础, 或以单个粒径来度量的, 或

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51109208)

收稿日期: 2013-08-20

以整体颗粒曲线为度量标准。其中由 Marsal^[2]、Lee等^[3]、Miura等^[4]、Hardin^[5]提出的4种度量方法被广泛应用于工程实践中。张季茹等^[6]基于分形模型和粒径分布资料研究了侧限压缩下石英砂砾的颗粒破碎特性及其分形特征。贝壳砂与其它砂性土有显著差异^[7], 其粒径范围较为分散, 最小粒径在0.075 mm以下, 最大粒径达到10 mm以上, 贝壳颗粒在受力后产生明显的颗粒破碎, 进而改变贝壳砂的粒径分布和级配, 以致影响贝壳砂的力学特性及工程特性。贝壳砂颗粒破碎的研究, 无论在理论上还是在工程实践上都具有重大意义。本文以福建莆田湄洲湾海域的贝壳砂为研究对象, 通过大量三轴试验及其试验前后粒径分布资料, 在统计熵概念基础建立粒度熵模型, 研究贝壳砂的破碎特性, 探讨贝壳砂粒度熵作为颗粒破碎量化指标的应用前景, 揭示贝壳砂的围压和破碎量与粒度熵参数之间存在的相关关系。

1 贝壳砂粒度熵模型

Clausius^[8]首次提出熵的概念, 以孤立系统熵增量加定律的形式表述热力学第二定律, 用来描述体系混乱的程度。Shannon等^[9]将统计熵作为基本组成部分推广用于信息理论中, 给熵以新的意义, 以用来描述系统信息的不确定性; Jaynes^[10]提出最大信息熵原理, 用以确定各种系统的随机态变量的概率分布函数, 极大丰富了熵的本质内涵, 使其在信息论、控制论、经济学、化学、生物学、社会学等众多学科领域得到广泛应用。

颗粒级配曲线是描述颗粒破碎特性的重要途径, 但由于其包含众多数据而缺乏单一量化比较而难于比较。Lörincz在其博士论文中提出了一种量化颗粒级配曲线的新方法——粒度熵^[11], 岩土颗粒级配曲线特征的紊乱程度, 可以用2个熵的参数进行量化: 基础熵和熵增量。经过归一化后, 所得熵参数可以被绘制在用一张熵映像图中, 以便更容易理解它们的区别。本文将粒度熵模型应用到一系列的贝壳砂颗粒破碎试验, 研究颗粒破碎熵参数特性。

1.1 统计熵的概念

统计熵(熵的分布函数)已有大量研究基础^[12], 对于离散系统, 基本描述如下: M 个单元存放于 N 个盒子, 则相对应第*i*个盒子中有 M_i 个单元, 此时统计熵 S_s 为

$$S_s = Ms \quad , \quad (1)$$

其中单元熵 s 被定义为

$$s = -\sum_{i=1}^N \omega_i \lg_b(\omega_i) \quad (\omega_i \neq 0, \quad N \geq 1) \quad , \quad (2)$$

式中, ω_i 为第*i*个盒子相对频度,

$$\omega_i = \frac{M_i}{M} \quad . \quad (3)$$

式(2)中对数底 b 的选择有一个最简便的方法, 即假设只有2个统计盒的情形, 此时系统最大熵值为1(当各单元相对频度 $\omega_1=\omega_2=0.5$), 待定对数底 $b=2$, 代入式(2)则有单元熵 s :

$$s = -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N \omega_i \ln(\omega_i) \quad (\omega_i \neq 0, \quad N \geq 1) \quad , \quad (4)$$

对于这个单元熵函数, 可以用图1来描述, 图中曲线近似半椭圆型, 而统计盒规模 N 决定曲线边界线的形状。

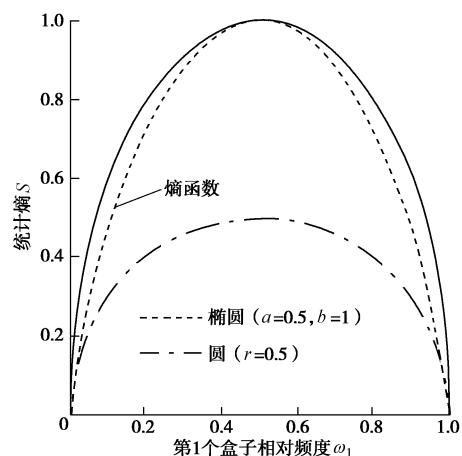


图1 基于2个统计盒的统计熵曲线

Fig. 1 Statistical entropy function for two statistical cells

1.2 粒度熵及其归一化

在前述统计熵基础上, Lörincz定义了“截断”的功能, 将统计盒比作一些截断, 包含有指定尺寸的颗粒, 而这些尺寸是通过规范目数的筛子实现的, 定义筛孔直径为以2为乘子的等比数列, 如0.5, 1, 2, 4 mm等等。为了应用统计熵概念, 使基底直径 d_0 的选择不影响盒单元, 选定 $[\text{SiO}_4]^{1/4}$ 四面体高度 2^{-22} mm作为最小筛孔直径 d_0 。截段数为等比数列递增数, 由此可以计算出一系列规范截断内颗粒粒径 d 的值范围:

$$2^{i+1}d_0 \geq d > 2^i d_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad . \quad (5)$$

对于一定级配的岩土介质, 各粒径段的百分含量为 p_i , 则对整个级配区间有

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad , \quad (6)$$

式中, N 为从细颗粒到粗颗粒之间包括的截段数目。

根据统计熵概念, 截段嵌入各个基本单元系统, 第*i*个截段所包含的基本单元数量 C_i 为

$$C_i = \frac{2^{F_i} d_0 - 2^{F_{i-1}} d_0}{d_0} = 2^{F_i} - 2^{F_{i-1}} \quad , \quad (7)$$

式中, F_i 为第*i*个截段序数。对于某特定颗粒粒径系列 D_i , 式(7)可以化成

$$C_i = 2^{F_i} - 2^{F_{i-1}} = 2^{22}(D_i - D_{i-1}) = 2^{22} \cdot \Delta D_i。 \quad (8)$$

假设认为在第 i 截断内颗粒粒径分布是均匀的，则该截断基本单元相对频度 ω_i 为

$$\omega_i = \frac{p_i}{C_i}。 \quad (9)$$

将基本单元相对频度式 (9) 代入式 (4) 中可得粒度熵 S 的表达式：

$$\begin{aligned} S &= -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{C_i} \omega_j \ln(\omega_j) \\ &= -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N C_i \frac{p_i}{C_i} \ln\left(\frac{p_i}{C_i}\right) \\ &= \sum_{i=1}^N p_i \frac{\ln C_i}{\ln 2} + \left(-\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i \right)。 \end{aligned} \quad (10)$$

根据式 (10) 可将粒度熵分为基础熵和熵增量 2 个部分，定义如下：

$$S_{bi} \stackrel{\Delta}{=} \frac{\ln(C_i)}{\ln 2} \Rightarrow [\text{基础熵}] \quad S_b = \sum_{i=1}^N p_i S_{bi}， \quad (11)$$

$$[\text{熵增量}] \quad \Delta S \stackrel{\Delta}{=} -\frac{1}{\ln 2} \sum_{i=1}^N p_i \ln(p_i)。 \quad (12)$$

于是粒度熵 S 可以写成 $S = S_b + \Delta S$ 。当岩土体颗粒粒径只包含一个截断 ($N=1$) 时的特殊情况，粒度熵简化为该截断内的单元基础熵值 S_{bi} ，亦被称为该截断“特征熵”。

为了在相对水平下研究粒度熵性质，将粒度熵的 2 个组成项分别进行归一化，相应表示为相对基础熵 (NB)、归一化熵增量 (NI)。定义式如下：

$$NB = \frac{S_b - S_{bmin}}{S_{bmax} - S_{bmin}}， \quad (13)$$

$$NI = \frac{\Delta S}{\ln N}， \quad (14)$$

式中， S_{bmin} 和 S_{bmax} 分别表示最细及最粗颗粒单一截断特征熵值。将式 (8)、(11) 代入到式 (13) 即可得相对基础熵的展开式：

$$NB = \frac{\sum_{i=1}^N p_i \ln C_i - \ln C_1}{\ln C_N - \ln C_1} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i \ln\left(\frac{\Delta D_i}{\Delta D_1}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta D_N}{\Delta D_1}\right)}。 \quad (15)$$

从式 (15) 可以看出相对基础熵的值与最小筛孔直径 d_0 无关，特别地经过规范目数筛子颗粒分析的颗粒介质相对基础熵简化为

$$NB = \frac{\sum_{i=1}^N p_i(i-1)}{N-1}。 \quad (16)$$

以上导出的粒度熵包括基础熵和熵增量。对于常規岩土介质，粒径分布通常跨越不均匀数量级统计盒，

不同间隔宽度差异上的变化正是颗粒破碎引起的，可以利用基础熵进行描述；而熵增量体现了颗粒不同截断之间的混合程度，是判断散粒体材料结构稳定性的重要参数^[13]。对于一个确定的截断数规模 N ，熵映像关系 $f: \Delta \rightarrow [S_b, \Delta S]$ 或归一化熵映像关系 $f_n: \Delta \rightarrow [NB, NI]$ 通过 2 维熵参数可以反映颗粒级配曲线特征。

2 试验材料及试验方法

试验所用贝壳砂取自福建省湄洲湾北岸的莆田市秀屿港区内秀屿山东侧海域，砂样中含有大量的贝壳及少量珊瑚碎屑，如图 2 所示。贝壳砂粒呈现出分散状态，未见明显黏聚在一起的颗粒，分散程度较好。试样颗分曲线如图 3 所示。试样基本物理参数为：比重 G_s 为 2.72，最大孔隙比 e_{max} 为 1.19，最小孔隙比 e_{min} 为 0.87，不均匀系数 C_u 为 3.8，曲率系数 C_c 为 0.5。



图 2 贝壳砂典型颗粒形状

Fig. 2 Typical particle shape of shell sand

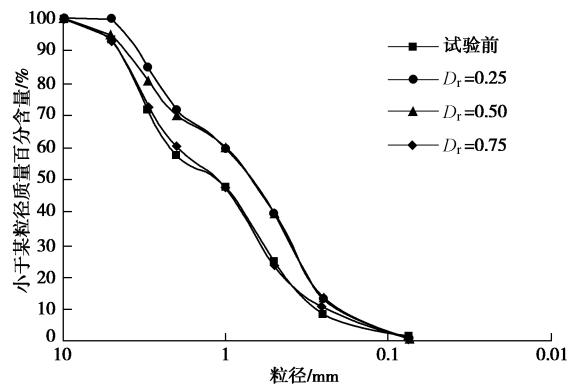


图 3 贝壳砂颗分试验曲线

Fig. 3 Particle size distribution of shell sand

影响颗粒破碎的因素很多，如颗粒矿物成份、应力水平、试样级配、相对密度以及颗粒形状等。为了研究尺寸效应、相对密度及围压对贝壳砂颗粒破碎的影响及剪切作用下的颗粒破碎情况，对贝壳砂进行了不同围压下的三轴剪切试验，所有试验制样均取自同

一批福建湄洲湾海域贝壳砂土样, 试验前颗粒分析筛孔直径采用 10, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.75 mm 筛分称重, 得到同一种级配, 试验结束后, 烘干试样并称重, 同样进行颗粒试验, 分析颗粒破碎情况。

试样的尺寸分别为 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, $\phi 61.8 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 和 $\phi 101 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 相对密度系列为 0.25, 0.50, 0.75。试验分组情况如表 1 所示。试验仪器采用中国科学院岩土力学研究所三轴剪力仪 (SJ-IA.G 型)。按试验要求的试样尺寸、相对密度和级配曲线, 计算并称取试验所需的贝壳砂样, 将备好的试样混合均匀, 采用各向等压固结排水剪切的试验方法, 以应变控制式轴向变形速率为 0.166 mm/min 进行剪切。

表 1 贝壳砂三轴固结排水剪切试验方案

Table 1 Triaxial compression test programs of shell sand

试样尺寸 /(mm×mm)	相对密度 D_r	围压 /kPa
39.1×80	0.25, 0.50, 0.75	50, 100, 200
50.0×100	0.25, 0.50, 0.75	50, 100, 200
61.8×120	0.25, 0.50, 0.75	50, 100, 200
101.0×200	0.25, 0.50, 0.75	50, 100, 200

3 试验结果与分析

颗粒破碎最明显的表现是试验前后级配曲线的变化, 针对不同相对密度的贝壳砂进行单轴压缩试验, 如图 4 所示。对比试验前曲线, 粒径在 0.25~0.5 mm 之间的含量增加了 9.7%, 而在大于 3 mm 的范围内减少了约 4.4%, 0.5~1 mm 之间减少了 4.9%, 破碎后的曲线向级配良好的方向发展; 当相对密度增大到 0.75 时, 破碎后的颗粒曲线和试验前曲线基本相似, 表明当相对密度增大到一定值时, 贝壳砂颗粒破碎程度很低。

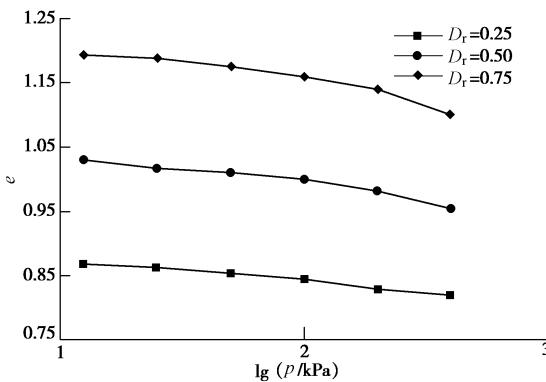


图 4 贝壳砂单轴压缩 e - $\lg p$ 曲线

Fig. 4 e - $\lg p$ curves of shell sand under uniaxial compression

由图 5 可知, 随着相对密度的增加, 孔隙比的增量也逐渐减小, 破碎程度有所减弱; 贝壳砂在应力小于 100 kPa 时, 孔隙比的变化相对较小, 主要来自压力作用下颗粒的重新排列以及土中气体、水的压缩, 而在应力大于 100 kPa 时, 孔隙比的变化相对较大,

这很大程度上是由于贝壳砂的颗粒破碎造成的。因此, 贝壳砂破碎应力较低, 为易颗粒破碎材料。

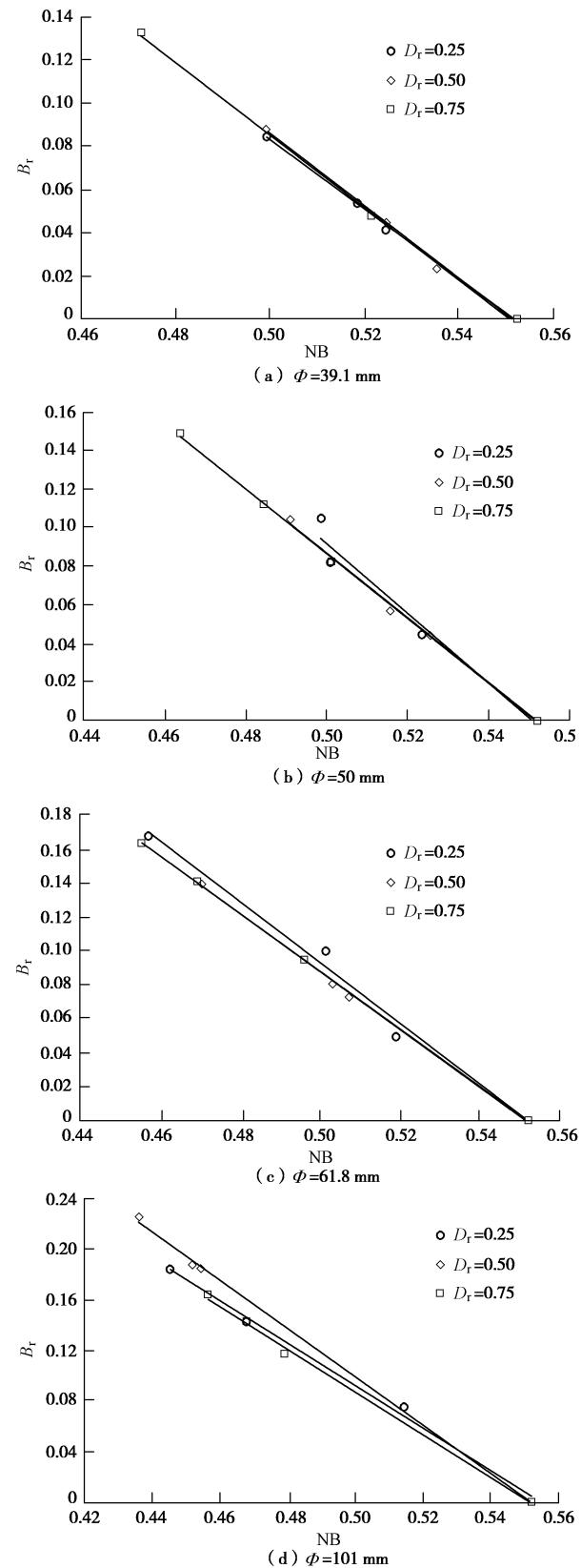


图 5 贝壳砂颗粒破碎相对基础熵 NB 与 Hardin 颗粒破碎率 B_r 的关系

Fig. 5 Relationship between relative base entropy and Hardin's breakage index of shell sand

贝壳砂在剪切过程中影响颗粒破碎的主要因素有:①剪胀作用的影响;②颗粒破碎发展所需的空间;③峰值应力的影响;④颗粒间的咬合程度,亦即相对密度。

3.1 粒度熵与破碎率间的关系

Hardin^[5]认为颗粒破碎的可能性是随着颗粒粒径的增加而增大的,在高应力作用下大颗粒将破碎成粉粒,而粉粒则认为是不可破碎的。他引入破碎势的概念,

定义相对破碎率 B_r : 将颗粒级配曲线与 0.074 mm 粒径竖线所围成的面积定义为破碎势 B_p , 颗粒破碎前后 B_p 的差值为总破碎量 B_t , 相对破碎率 B_r 为 B_t 与破碎前 B_p 的比值。

根据 Hardin 破碎率的定义分别计算不同试验条件下贝壳砂三轴固结排水剪切后的颗粒曲线,结果见表 2。与此同时,利用本文建立的粒度熵模型对试验数据进行计算分析,结果如表 2 所示。

表 2 贝壳砂三轴实验前后颗粒分析结果

Table 2 Particle size distribution results of shell sand before and after triaxial tests

相对 密度	试样 尺寸 (mm×mm)	围 压 /kPa	颗粒含量/%							破碎率 B_r	粒度熵	
			10~ 5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~ 0.5 mm	0.5~0 .25 mm	0.25~ 0.075 mm		NB	NI
	试验前	0	7.3	21.3	13.9	9.7	23.2	16.2	7.8	0.6	0.55207	1.30748
0.25	39.1×80	50	5.7	17.9	10.0	10.4	26.3	24.7	3.0	2.0	0.05404	0.51843
		100	5.4	18.7	10.7	11.2	24.1	26.0	2.8	1.1	0.04125	0.52433
		200	4.6	17.3	9.3	8.2	27.1	28.5	3.0	2.0	0.08498	0.49937
		50	6.2	17.1	10.3	11.1	25.5	26.3	2.6	0.9	0.04441	0.52351
	50×100	100	4.7	15.8	11.5	9.7	25.2	27.2	3.8	2.1	0.08204	0.50076
		200	5.6	15.6	11.3	9.3	24.9	18.9	13.4	1.0	0.10485	0.49872
	61.8× 120	50	5.0	18.6	10.0	9.4	27.5	26.3	2.2	1.0	0.04921	0.51913
		100	5.8	14.9	11.0	9.4	26.7	19.2	12.6	0.4	0.09972	0.50139
		200	4.8	12.5	5.5	9.2	25.8	33.6	3.8	4.8	0.16748	0.45693
		50	5.6	17.7	11.0	9.7	26.6	16.8	11.9	0.7	0.07576	0.51438
0.50	101×200	100	4.3	13.6	7.9	7.7	25.1	35.2	3.9	2.3	0.14219	0.46771
		200	3.8	10.9	7.7	7.7	24.4	36.9	5.4	3.2	0.18422	0.44510
	39.1×80	50	5.9	19.5	10.8	11.5	25.3	23.3	2.5	1.2	0.02329	0.53512
		100	5.9	19.9	10.5	10.7	23.4	23.0	3.7	2.9	0.04433	0.52444
0.75	50×100	200	4.4	15.5	9.7	10.4	26.9	27.8	4.2	1.1	0.08844	0.49884
		50	5.6	16.4	10.5	10.6	26.4	26.8	2.6	1.1	0.05691	0.51569
		100	6.6	18.9	9.6	11.2	24.3	23.6	3.1	2.7	0.04375	0.52573
		200	4.3	13.6	9.5	11.7	27.7	27.0	4.1	2.1	0.10409	0.49089
	61.8× 120	50	4.3	15.2	10.3	12.2	28.6	25.0	2.9	1.5	0.07248	0.50733
		100	4.0	16.0	9.9	11.5	27.9	25.4	3.6	1.7	0.08037	0.50319
	101×200	200	3.3	12.7	9.1	10.4	26.2	31.1	5.1	2.1	0.13912	0.47036
		50	2.3	11.7	9.6	8.6	27.7	24.0	15.4	0.7	0.18768	0.45173
	39.1×80	100	2.9	12.2	9.4	8.6	26.4	23.5	16.1	0.9	0.18504	0.45451
		200	2.7	11.4	8.8	7.7	25.0	22.2	20.7	1.5	0.22539	0.43623
1.00	50×100	50	5.5	18.0	10.5	10.5	26.1	25.0	3.2	1.2	0.04804	0.52128
		100	5.0	18.3	10.2	11.1	26.3	25.4	2.5	1.2	0.04705	0.52111
		200	3.6	14.0	8.8	8.5	27.4	31.0	3.9	2.8	0.13308	0.47267
		50	3.9	13.7	9.3	10.4	26.8	30.9	3.6	1.4	0.11205	0.48452
	61.8× 120	100	4.3	16.8	10.1	10.3	25.6	27.1	3.8	2.0	0.08294	0.50117
		200	3.2	12.3	8.6	9.8	26.1	33.3	4.4	2.3	0.14912	0.46389
	101×200	50	5.2	14.8	9.7	10.1	25.9	28.3	4.0	2.0	0.09421	0.49603
		100	3.7	13.2	8.8	9.5	25.7	31.5	4.9	2.7	0.14101	0.46935
	39.1×80	200	2.6	10.3	9.1	9.6	27.1	35.3	4.8	1.2	0.16306	0.45516
		50	3.1	12.3	10.9	10.2	26.8	32.7	3.4	0.6	0.11743	0.47897
	39.1×80	100	4.3	10.7	9.3	9.4	26.5	33.8	4.6	1.4	0.14279	0.46788
		200	4.0	11.2	8.3	8.7	25.7	34.3	4.7	3.1	0.16408	0.45632

通过对表2中的NB与 B_r 数据进行分析,二者之间存在显著的线性关系, NB值随颗粒破碎程度的增大而减小,结果如图5,表3所示。

表3 NB与 B_r 的拟合系数及相关系数Table 3 Fitting parameters of curves between NB and B_r

试样尺寸 Φ/mm	类别 相对密度 D_r	$B_r = a \cdot NB + b$		相关系数 R^2
		a	b	
39.1	0.25	-1.6138	0.8900	0.9976
	0.50	-1.6827	0.9268	0.9964
	0.75	-1.6876	0.9292	0.9980
50	0.25	-1.8132	0.9984	0.9660
	0.50	-1.6900	0.9319	0.9970
	0.75	-1.6836	0.9285	0.9994
61.8	0.25	-1.7956	0.9902	0.9883
	0.50	-1.6974	0.9357	0.9989
	0.75	-1.6906	0.9333	0.9999
101	0.25	-1.6791	0.9314	0.9949
	0.50	-1.9152	1.0566	0.9989
	0.75	-1.6943	0.9343	0.9975

与颗粒相对破碎率 B_r 比较,颗粒破碎相对基础熵NB亦可以衡量贝壳砂颗粒破碎的程度,反映颗粒破碎后的粒度分布状况,为颗粒破碎提供了一个新的量化指标。

同时,根据表2中的粒径组百分含量、相对破碎率与粒度熵指数进行对比分析,发现:

(1) 试验后2~10 mm的粗颗粒显着减少而0.075~0.50 mm之间细颗粒显着增加,0.50~1 mm之间的颗粒也有所增加。当相对密度一定时,颗粒破碎随围压增长而增大,相对基础熵NB值降低

(2) 从尺寸效应的影响来看,随着试样直径 Φ 的增大,颗粒破碎程度随之增大,NB值减小。这是由于贝壳砂的剪胀作用随着 Φ 的增加而降低,导致贝壳砂颗粒翻滚、错动发展的空间受到一定的限制,最终使得颗粒间的接触几率以及应力增大。

(3) 贝壳砂试样相对密度对颗粒破碎的影响较为复杂。总体上,在相对密度处于较小水平时,颗粒破碎随着相对密度的增加而增大。当相对密度较大(如达到0.75)时,由于相对密度的提高,允许颗粒间破碎的空间较小,此时剪胀作用抑制了颗粒间的滑动破碎,颗粒破碎程度呈减小的趋势。

3.2 粒度熵参数与围压、试样尺寸间的关系

张家铭等^[14]对钙质砂进行的剪切压缩试验反映了其颗粒破碎率 B_r 随平均压力 p 的关系曲线 $B_r - p$ 呈

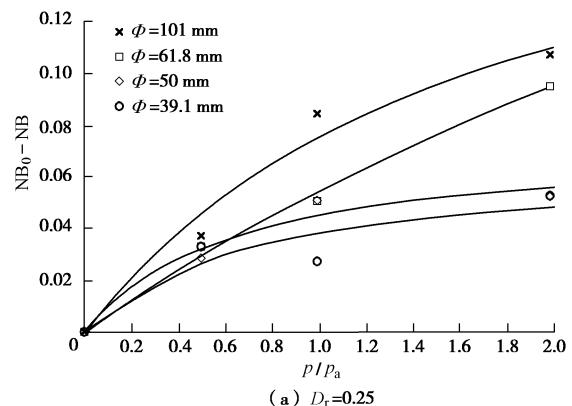
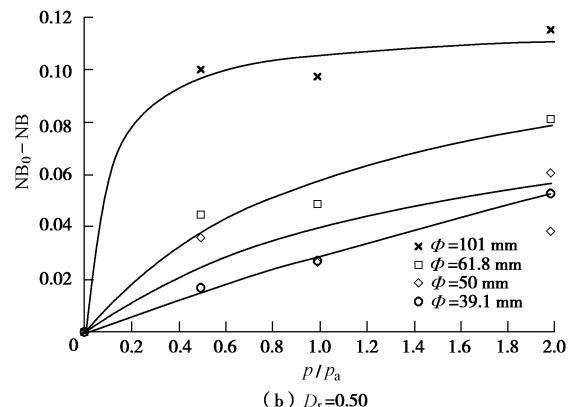
半对数关系。与其不同的是,本文的试验结果发现贝壳砂的颗粒破碎粒度熵指数NB与围压 p 之间存在着较明显的双曲线关系:

$$NB_0 - NB = \frac{(p/p_a)}{c + k \cdot (p/p_a)}, \quad (17)$$

式中, NB_0 为未压缩时贝壳砂相对基础熵, p_a 为标准大气压, 模型中用以消除量纲影响, k , c 为与模型参数, 见表4。鉴于曲线经过零点,采用非线性拟合方法对数据进行处理,结果如图6所示。

表4 NB₀-NB与 p/p_a 的拟合系数及相关系数Table 4 Fitting parameters of curves between NB₀-NB and p/p_a

相对密度 D_r	试样尺寸 Φ/mm	k	c	相关系数 R^2
0.25	39.1	14.99	11.15	0.88
	50.0	13.55	8.49	0.97
	61.8	2.67	15.64	0.99
	101.0	4.88	8.33	0.98
0.50	39.1	3.33	30.73	0.99
	50.0	10.11	14.82	0.83
	61.8	8.17	9.02	0.96
	101.0	8.59	0.84	0.99
0.75	39.1	0.21	24.91	0.94
	50.0	14.41	2.82	0.87
	61.8	7.82	4.66	0.99
	101.0	9.45	2.16	0.99

(a) $D_r=0.25$ (b) $D_r=0.50$

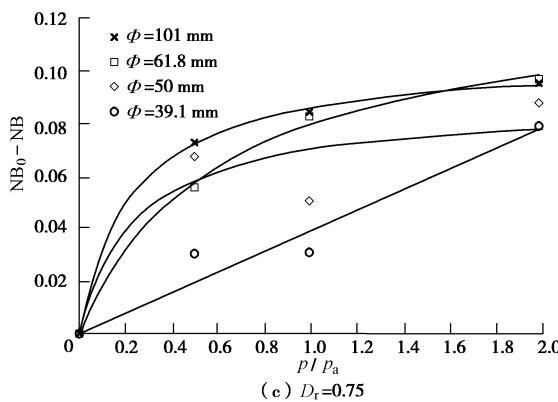
图 6 颗粒破碎相对基础熵 NB 与试验围压 p 的关系

Fig. 6 Relationship between relative base entropy and pressure of shell sand

Lade 等^[15]指出, 同一类型的试验在试验后的颗粒曲线都趋向于最大密度的颗粒曲线发展, 当颗粒破碎使得颗粒曲线发展到这条极限曲线时, 孔隙比急剧下降, 各个颗粒被紧紧挤压在一起, 周围有足够的颗粒接触点数, 从而使其接触应力小于破碎应力, 颗粒破碎将不再继续。

考察表 2 中不同制样尺寸下贝壳砂颗粒破碎粒度熵指数变化规律, 发现其相对基础熵 NB 与试样尺寸 Φ 之间存在线性关系, 在围压和相对密度不变的情况下, 相对基础熵 NB 随 Φ 值线性递减, 如图 7 所示。

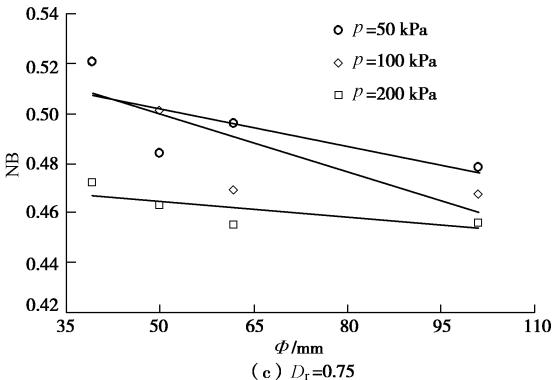
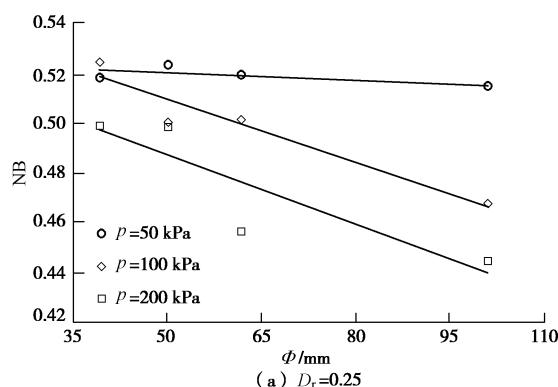
图 7 颗粒破碎相对基础熵 NB 与试样尺寸 Φ 的关系

Fig. 7 Relationship between relative base entropy and sample size of shell sand

4 结 论

(1) 贝壳砂颗粒破碎应力较低, 为易破碎材料; 剪切作用下围压、相对密度及试样尺寸对颗粒的破碎都有影响。

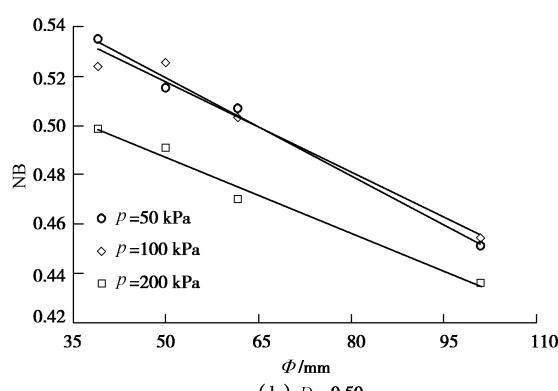
(2) 三轴排水剪切试验前后颗粒数据分析表明: 随着试样直径增大, 贝壳砂的颗粒破碎程度随之增大; 当相对密度一定时, 颗粒破碎率随围压增长而增大; 随着相对密度的增加, 在小的相对密度区间颗粒破碎有增大趋势, 随着相对密度增大到较高值, 颗粒破碎程度减弱。

(3) 贝壳砂颗粒破碎后的粒径分布能被粒度熵参数较好地描述, 其中相对基础熵参数反映了颗粒破碎率大, 颗粒破碎率越大, 相对基础熵值越小; 相对基础熵 NB 与 Hardin 破碎率存在着显着的线性回归关系。

(4) 相同试验条件下, 贝壳砂颗粒破碎相对基础熵指数 NB 与三轴试验围压的关系可以用双曲线形式描述, 而且与试样直径呈线性关系。

参考文献:

- [1] 张勇. 高含量贝壳砂在陆域形成中的应用[J]. 水运工程, 2010(4): 46–50. (ZHANG Yong. Application of sand with high shell content in land formation[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(4): 46–50. (in Chinese))
- [2] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill[M]. New York: Wiley (John) and Sons, Incorporated, 1973: 109–200.
- [3] LEE K L, FARHOOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4(1): 68–86.
- [4] NORIHI O M, SUKEO O H. Particle-crushing of a decomposed granite soil under shear stresses[J]. Soils and Foundations, 1979, 19(3): 1–14.
- [5] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of



- Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 – 1192.
- [6] 张季如, 祝杰, 黄文竟. 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 – 789. (ZHANG Ji-ru, ZHU Jie, HUANG Wen-jing. Crushing and fractal behaviors of quartz sand-gravel particles under confined compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 783 – 789. (in Chinese))
- [7] 赵翀, 孔令伟, 王敏. 贝壳砂物理力学性质研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, **34**(2): 75 – 79. (ZHAO Chong, KONG Ling-wei, WANG Min. Study on physical and mechanical properties of sand with shell[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, **34**(2): 75 – 79. (in Chinese))
- [8] CLAUSIUS R. On the second fundamental theorem of the mechanical theory of heat[J]. Philosophical Magazine and Journal of Science, 1867, **35**(239): 405 – 419.
- [9] SHANNON C E, WEAVER W. A mathematical theory of communication [J]. The Bell System Technical Journal, 1948, **27**: 379 – 423, 623 – 656.
- [10] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics [J]. Physical Review, 1957, **106**(4): 620 – 629.
- [11] LŐRINCZ J. Grading entropy of soils [D]. Budapest: University of Budapest, 1986.
- [12] RENYI A. On measures of entropy and information[C]// Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley: University of California Press, 1961: 547 – 561.
- [13] LŐRINCZ J, KÁRPÁTI L, TRANG P, et al. Some comments on the grading entropy variation and crushing of various sands[C]// Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering-Geotechnics of Hard Soils-Weak Rocks. Athens: IOS Press, 2011: 215 – 222.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)