DOI：10.11779/CJGE20220647

高应力下石英砂三轴剪切颗粒破碎演化规律及影响

陈 榕[1, 2, 3], 武智勇[1, 2, 3], 郝冬雪*[1, 2, 3], 高宇聪[1, 2, 3]

(1. 东北电力大学建筑工程学院，吉林 吉林 132012；2. 东北电力大学岩土工程研究所，吉林 吉林 132012；
3. 东北电力大学吉林省电力基础设施安全评估与灾害防治重点实验室，吉林 吉林 132012)

摘 要：高应力条件下砂土的颗粒破碎情况与一般应力条件下的明显不同，现有关于高应力条件下石英砂颗粒破碎演化模型的研究成果相对有限。通过 2～8 MPa 围压下固结排水（CD）和固结不排水（CU）三轴剪切试验，获取了不同应力水平下石英砂的偏应力-轴向应变-体应变或孔隙水压力关系曲线，以及砂土在剪切过程中的相对破碎率；随后分析了颗粒破碎的演化规律，并分别采用 Hardin、Lade、Wang 颗粒破碎模型描述石英砂破碎规律，探讨了各个模型的适用性；最后基于石英砂相对破碎率与有效破坏内摩擦角间的关系，给出了高压下影响石英砂强度的临界相对破碎率。

关键词：颗粒破碎；石英砂；强度特性；演化；三轴剪切试验

中图分类号：TU432 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-4548(2023)08-1713-10

作者简介：陈 榕(1979—)，男，辽宁沈阳人，博士，教授，主要从事土工合成材料加筋特性及软弱地基加固处理方法等方面的教学和科研工作。E-mail: lg1316cih@126.com。

Evolution rules and effects of particle breakage for quartz sand in triaxial shear tests under high pressures

CHEN Rong[1, 2, 3], WU Zhiyong[1, 2, 3], HAO Dongxue[1, 2, 3], GAO Yucong[1, 2, 3]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3. Key Lab of Electric Power Infrastructure Safety Assessment and Disaster Prevention of Jilin Province, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The particle breakage of sand under high stress is obviously different from that under the normal stress. The existing studies on the evolution rules and models of particle breakage for quartz sand under high stress are relatively limited. A series of consolidation drained (CD) and consolidation undrained (CU) triaxial shear tests are conducted under the confining pressures of 2~8 MPa to investigate the evolution rules of particle breakage for quartz sand and its effects on sand strength. The relationship curves of deviated stress-axial strain under various stress levels are obtained as well as the relative breakage during shear process. Then the evolution rules of particle breakage are analyzed, the Hardin's, Lade's and Wang's particle breakage models are adopted to describe the rules, and the applicability of each model is discussed. Finally, the critical relative breakage of quartz sand that affects sand strength under high pressures is given based on the relationship between the relative breakage and the effective failure internal friction angle.

Key words: particle breakage; quartz sand; strength characteristic; evolution; triaxial shear test

0 引 言

砂土是最常见和最具代表性的颗粒岩土介质，具有承载能力高、压实性能好等优点，作为填筑材料被广泛应用于交通、水利、港口等岩土工程的建设中[1]。然而，高应力作用下砂土的物理及力学性质与一般应力状态时明显不同，在高土石坝底部、高层建筑物桩端地基会产生十分明显的颗粒破碎，致使其变形特性发生显著的变化[2]，最终威胁工程建设的安全。

自 20 世纪 80 年代以来，许多研究关注影响粒状土颗粒破碎的主要因素及其对土体渗透及力学特性产生的影响[3-6]。一些学者[7-8]通过试验结果建立了平均有效应力和颗粒破碎之间的数学表达式，提出了与应力有关的颗粒破碎模型；也有学者[9-10]使用应变描述加载过程中砂土颗粒破碎累积，在临界状态框架内，通过试验结果建立了塑性应变和颗粒破碎之间的数学

基金项目：国家自然科学基金项目（52078108）；吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目（20210509058RQ）；吉林省教育厅科学研究项目（JJKH20210103KJ）

收稿日期：2022-05-18

*通信作者(E-mail: haodongxue2005@126.com)

表达式，提出了可考虑应变路径的颗粒破碎模型。Lade 等[11]对坎布里砂进行了高围压下固结排水、不排水的三轴压缩与拉伸试验，发现了颗粒破碎与单位体积输入能量有良好的对应关系，提出了一种便于计算土体渗透系数的颗粒破碎因子，并用该因子建立了考虑耗能的颗粒破碎模型。由于 Lade 颗粒破碎模型在计算的过程中同时包含了应力和应变，具有不受具体应力路径影响的优点[12-14]，因此被广泛的应用于各类考虑颗粒破碎的本构模型之中[15-16]。随后 Coop 等[17]分别研究了颗粒破碎对土体临界状态线、临界状态内摩擦角、峰值内摩擦角及剪胀性和压缩性的影响。但在上述研究中多数以试样加载至破坏或临界状态时的颗粒破碎量进行分析，较少探讨具体应力路径下颗粒破碎的中间发展过程[18-20]，即无法真正体现颗粒破碎对加载过程中所关注的强度参数（如软化型材料的峰值强度）的影响。因此，有必要研究颗粒破碎过程的演化规律及其与土体力学特性的相关性。

目前，对砂土剪切过程中颗粒破碎的研究相对有限，现有研究者普遍针对钙质砂和堆石料[21-24]在一般应力条件下的颗粒破碎演化过程进行研究。基于上述材料在一般应力条件下建立的破碎理论能否适用于描述高应力条件下石英砂的颗粒破碎演化过程，需要进一步的试验验证。由于高应力三轴试验的条件较为严苛，针对高应力条件下石英砂颗粒破碎演化过程的试验成果较少，从而限制了高应力条件下石英砂颗粒破碎演化模型的理论研究。

因此，本文采用 GDS 高压三轴试验系统开展了高应力下石英砂三轴固结排水及固结不排水条件下的剪切试验，研究应力水平、轴向应变、排水条件对其颗粒破碎程度的影响；分析石英砂在试验剪切过程中的颗粒破碎演化规律；进一步探讨现有 Hardin、Lade 以及 Wang 等颗粒破碎模型的适用性，得到了采用上述颗粒破碎模型用于石英砂分析所需的材料参数。同时，分析了颗粒破碎对砂土强度的影响。

1 试验材料与方法

1.1 三轴试验设备

本次研究采用英国 GDS 高压环境三轴试验系统（HPETTS），具体如图 1 所示。试验系统主要由 GDSLAB 数据采集软件，通道数据采集板，压力/体积控制器，500 kN VIS 荷载架和三轴压力室组成。其中，围压和反压体积控制器量程均为 0～16 MPa，轴压的体积控制器量程为 0～32 MPa。高压三轴试验系统的传感器及数据转换装置可自动采集偏应力 q，有效轴压 σ_1'，有效围压 σ_3'，孔隙水压力 u，试样的体积变形 Δv 和轴向应变 ε_1 等试验数据。

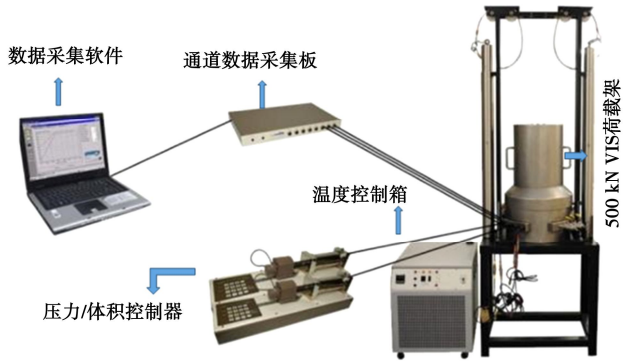


图 1 GDS 高压三轴试验系统

Fig. 1 GDS high-pressure triaxial test system

1.2 土体材料

试验砂样采用 ISO 福建标准砂，将标准砂筛分成 5 种粒组，分别为 d_1（0.5～0.6 mm），d_2（0.6～0.7 mm），d_3（0.7～0.8 mm），d_4（0.8～0.9 mm），d_5（0.9～1 mm），随后按等比例原则配制成石英粗砂，并保证每个试样初始颗粒级配完全相同。土样的细观照片如图 2 所示，砂样具体物理特性指标如表 1 所示。

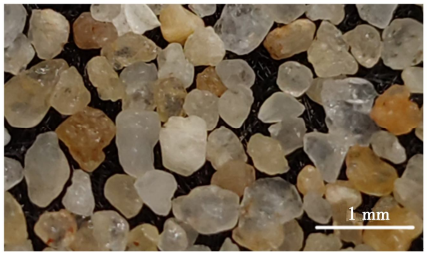


图 2 砂样照片

Fig. 2 Photo of sand sample

表 1 砂样物理特性指标

Table 1 Physical characteristics of sand

砂样	粒组/mm	d_{50}/mm	e_{max}	e_{min}	G_s	D_r/%
石英砂	0.5~1.0	0.75	0.78	0.55	2.65	75

1.3 试验方案

圆柱试样尺寸为 Ø50 mm×100 mm，采用干砂法制备初始相对密实度 D_r=75%的砂样。为使砂样达到完全饱和状态，对试样进行了 3 h 通气饱和，10 h 水头饱和，并以 50 kPa 为增量，逐级施加反压至 500 kPa 进行反压饱和。为防止高压条件下橡皮膜被砂样棱角刺破，采用厚度为 1 mm 橡皮膜，具体制样方法可参考文献[5]。分别进行围压为 2，4，6 和 8 MPa 的三轴固结排水（CD）和固结不排水（CU）试验，试验中应变剪切速率为 0.05%/min。为分析剪切过程中颗粒破碎变化情况，对各围压试验进行轴向应变 ε_1 为 5%，10%，15%，20%的平行试验，试验结束后进行颗粒筛

分。共 32 组三轴试验。

2　三轴试验结果

2.1　CD 试验应力-应变-体变关系

图 3 给出了砂土 CD 试验的偏应力-轴向应变关系曲线。由图 3 可见，随着围压增加，偏应力增加，抗剪强度和初始模量增大。σ_3=2 MPa 时，q-ε_1 曲线表现为软化特征，偏应力在 ε_1 接近 6%时达到峰值，之后缓慢降低，在 ε_1=20%时仍未达到稳定的临界状态。σ_3≥4 MPa 时砂土 q-ε_1 曲线均呈现不同程度的应变硬化现象，即随着轴向应变的增加，偏应力不断增加；围压越大，应力-应变曲线硬化现象越显著。

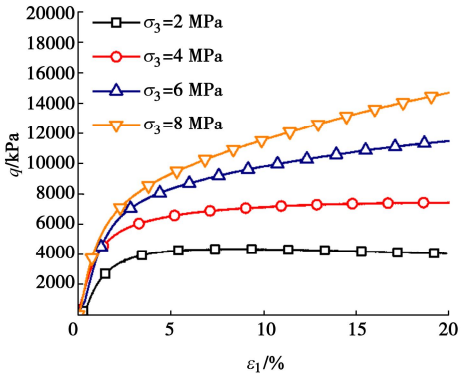


图 3　不同围压下 CD 试验 q-ε_1 关系曲线

Fig. 3 Relationship between q and ε_1 under various confining stresses in CD triaxial tests

图 4 给出了不同围压下的体应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 关系曲线，剪缩为正，剪胀为负。可以看出，砂样在 σ_3=2 MPa 时出现了二次相变，即试样体积先呈剪缩，然后出现剪胀，随着轴向应变继续增加，体积再次出现剪缩。两次相变点对应的轴向应变分别为 2.5%和 15.9%，在图中以小方框表示。当 σ_3>2 MPa 时，砂样均表现为剪缩，即随着轴向应变的增加，试样的体积在不断缩小，且围压越大，剪缩现象越显著。

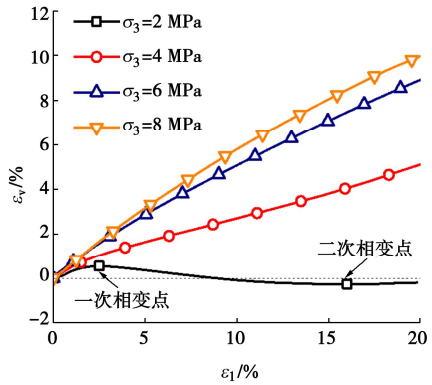


图 4　不同围压下 CD 试验 ε_v-ε_1 关系曲线

Fig. 4 Relationship between ε_v and ε_1 with various confining stresses in CD triaxial tests

图 5 为不同围压下各终止应变试验的偏应力与平均有效应力之比 q/p' 与轴向应变 ε_1 关系曲线。由图 5 可见，同一围压下，不同终止应变的 q/p' - ε_1 曲线差别较小，σ_3=8 MPa 的 4 条曲线在 ε_1=5%时的 q/p' 值极差最大，为 14.7%，其次为 σ_3=2 MPa，ε_1=5%时的极差，为 13.5%，其它围压和应变时 q/p' 的极差在 3%～9%。整体上各轴向应变点对应的 q/p' 的极差均小于 15%，说明各相同围压下不同轴向应变终止点的 CD 试验重复性较好。对于下文破坏强度的确定，应变软化型曲线，由峰值点确定；应变硬化型曲线，按 ε_1=15%对应的值确定；并且取各重复试验的平均值。有效内摩擦角计算公式如下，其中 $\eta = q/p'$ 。

$$\varphi' = \arcsin\left(\frac{3\eta}{6+\eta}\right) \quad 。 \tag{1}$$

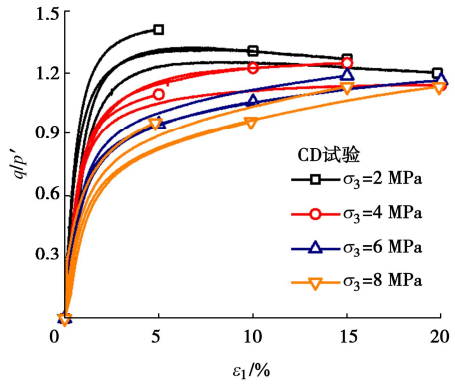


图 5　不同围压下 CD 试验 q/p - ε_1 关系曲线

Fig. 5 Relationship between q/p and ε_1 under various confining stresses in CD triaxial tests

2.2　CU 试验应力-应变-孔压关系

图 6 给出了 CU 试验中偏应力-轴向应变关系曲线。由图 6 可见，随着围压增加，偏应力提高，出现峰值点的应变逐渐提前，且随着轴向应变的增加，不同围压下的偏应力曲线均出现了应变软化现象。

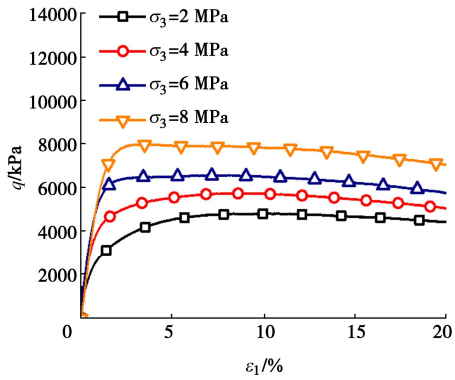


图 6　不同围压下 CU 试验 q-ε_1 关系曲线

Fig. 6 Relationship between q and ε_1 under various confining stresses in CU triaxial tests

图 7 给出了砂土 CU 试验的孔隙水压力-轴向应变关系曲线。由图 7 可见，σ_3=2 MPa 时，剪切初期产

生正孔隙水压力，在 ε_1=1%时达到最大值，之后开始降低，逐渐降为负值，在 ε_1=12.8%时达到负值最小，之后又开始升高。与 CD 试验相同，试验过程中出现两次相变点，图中以小方框表示。σ_3＞2 MPa 时，随着轴向应变的增加，孔隙水压力前期增长较快，剪切过程中始终为正，且围压越大，孔隙水压力值越高。在不同围压下，峰值偏应力后孔压逐渐趋于平缓，但仍呈缓慢增长趋势。

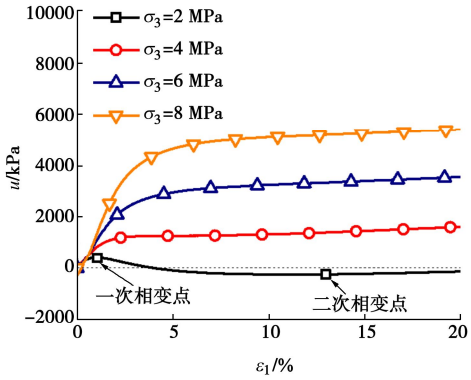


图 7 CU 试验不同围压下的 u-ε_1 关系

Fig. 7 Relationship between u and ε_1 under various confining stresses in CU triaxial tests

图 8 为 CU 试验不同围压下的有效应力路径，图中空心圆表示轴向应变为 5%，10%，15%和 20%的点，可见，不同围压下峰值强度点（q/p' 峰值）均能处于颗粒破碎量测点间，甚至与停止试验的轴向应变接近。

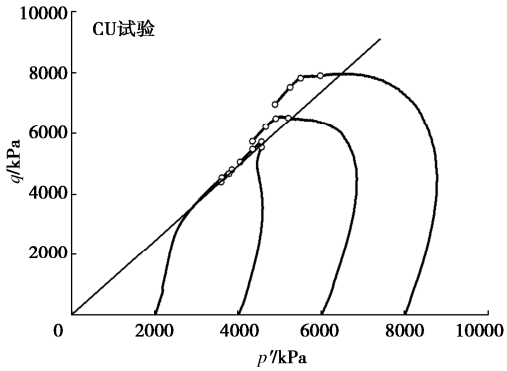


图 8 CU 试验不同围压下的应力路径

Fig. 8 Stress paths of CU tests under various confining stresses

图 9 为不同围压下各终止轴向应变 CU 试验的偏应力比 q/p' - ε_1 关系曲线。σ_3=4 MPa 的 4 条曲线在 ε_1=5%时 q/p' 的极差最大，为 9.2%，其它情况极差为 1.2%～7.2%，表明各同围压下不同轴向应变终止点的 CU 试验的重复性较好。破坏强度按照上述方法由重复试验取平均值确定。

2.3 颗粒破碎率

为了量化砂土在高应力作用下的颗粒破碎程度，本文采用了 Hardin[8]提出的颗粒破碎率理论，如图 10 所示。相对破碎率 B_r 为

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} = \frac{S_A}{S_{A+B}} \quad 。 \tag{2}$$

式中：B_t 为初始级配曲线和剪切后级配曲线围成的面积，B_p 为初始级配曲线和粒径为 0.074 mm 的直线围成的面积。

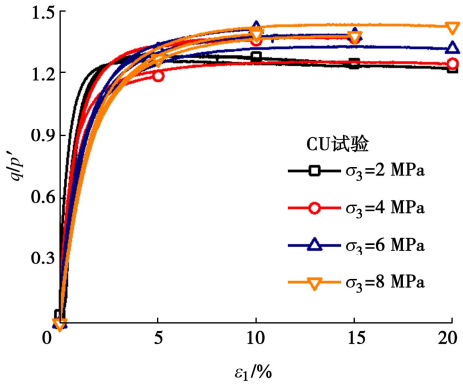


图 9 不同围压下 CU 试验 q/p'-ε_1 关系曲线

Fig. 9 Relationship between q/p' and ε_1 under various confining stresses in CD triaxial tests

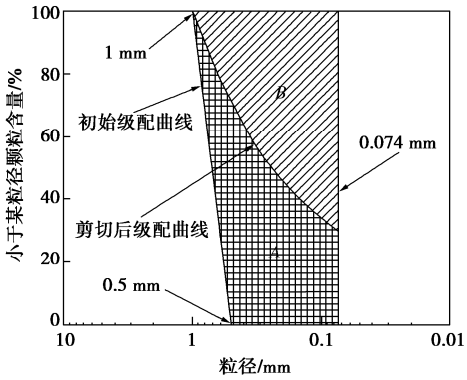
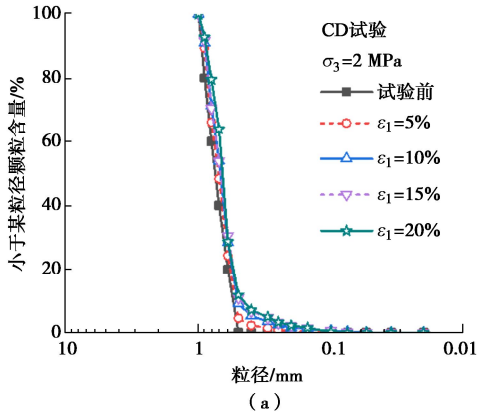


图 10 Hardin[8]颗粒破碎率定义示意图

Fig. 10 Definition of breakage index by Hardin[8]

通过筛分法分析得到三轴试验前后的石英砂颗粒粒径分布曲线。由于篇幅所限，此处仅列举了 CD 条件下围压水平分别为 2，8 MPa 以及 CU 条件下围压水平为 8 MPa 的数据曲线进行对比，具体如图 11 所示。可以看出，不同的围压水平和排水条件等因素均会对石英砂的颗粒破碎规律产生一定的影响。



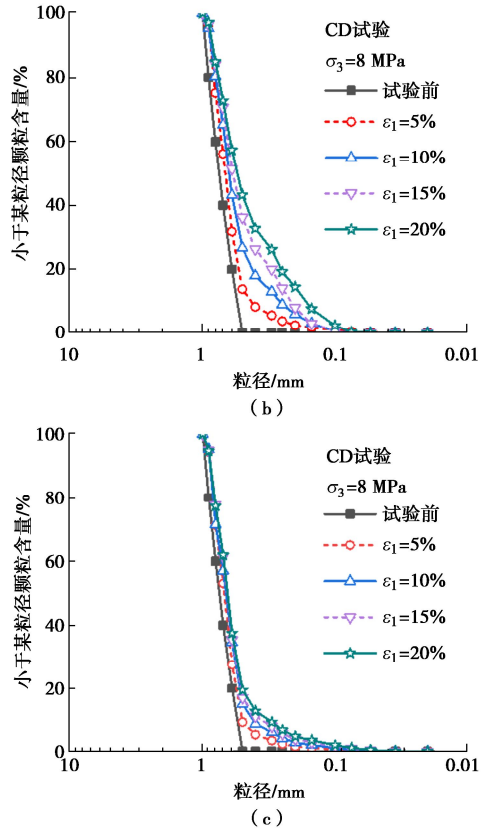


图 11　三轴试验前后的颗粒级配曲线

Fig. 11 Grain-size distribution curves before and after triaxial tests

基于上述这些颗粒级配曲线，采用 Hardin 提出的相对破碎率定义，即式（2），对砂土颗粒破碎程度进行相对破碎量化，进一步绘制了砂土在 CD 和 CU 试验中颗粒破碎率与轴向应变的关系曲线，如图 12 所示，实心表示 CD 试验结果，空心表示 CU 试验结果。由图 12 可见，随着轴向应变增加，颗粒破碎率增大。各围压下 CU 试验的颗粒破碎率介于 CD 试验 σ_3=2～4 MPa 的破碎率之间。围压 σ_3=2 MPa 时，CD 与 CU 试验剪切过程中的颗粒破碎率相差较小；σ_3>2 MPa 后，随着轴向应变和围压的增大，CD 与 CU 试验颗粒破碎率差别增加，CD 试验的颗粒破碎率较 CU 试验明显提高。这主要是由于在 CU 试验中产生的正孔隙水压力降低了有效应力，从而抑制了颗粒破碎的产生；围压越高，正孔压越大，排水条件不同产生的颗粒破碎差异越大。

3　颗粒破碎模型适用性验证

当前常见模型主要有 Hardin 基于破碎应力提出的颗粒破碎模型[8]、Lade 基于能量耗散提出的颗粒破碎模型[11]，以及 Wang 基于轴向应变关系提出的经验型颗粒破碎模型[25]。这些模型被广泛应用于堆石料和钙质砂的分析中，但对于能否适用于石英砂，相关模型参数如何选取，是否可以合理描述石英砂在高应力下的破碎演化过程却有待验证。

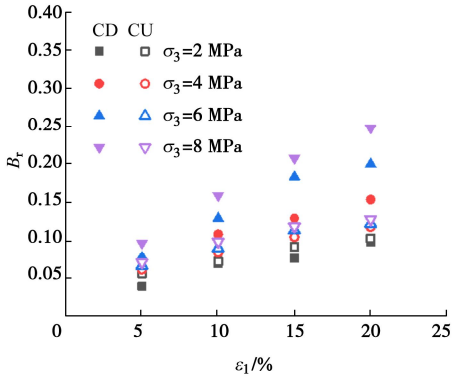


图 12　CD 和 CU 试验不同围压下的 B_r-ε_1 关系

Fig. 12 Relationship between B_r and ε_1 with various confining stresses in CD and CU triaxial tests

3.1　Hardin 颗粒破碎模型

Hardin[8]将相对颗粒破碎率和应力联系起来，先用平均有效应力和剪应力计算出破碎应力，再由破碎应力计算出颗粒破碎率，形成了一个可以描述应力与颗粒破碎之间关系的双曲线颗粒破碎模型，

$$B_r=\frac{(\sigma_b'/\sigma_r')^{n_b}}{1+(\sigma_b'/\sigma_r')^{n_b}}\quad, \tag{3}$$

$$\sigma_b'=p'\left[1+\frac{2\sqrt{2}}{3}(q/p')^3\right]=p'\left(1+\frac{2\sqrt{2}}{3}\eta^3\right)。\tag{4}$$

式中：σ_b' 为破碎有效应力；n_b 和 σ_r' 为材料常数；q 为剪应力；p' 为平均有效应力；$\eta=q/p'$ 为剪应力比。

式（3），（4）表明，在相同初始密实度的情况下，破碎有效应力越大，颗粒破碎率越高；在相同平均有效应力的条件下，η 越大，砂土的颗粒破碎率越大。

为了方便获得材料参数 n_b 和 σ_r'，可将式（3）进一步转换为如下形式：

$$[1/B_r-1]=[\sigma_r'/\sigma_b']^{n_b}\quad。\tag{5}$$

由式（5）可知，在双对数坐标下 $[(1/B_r)-1]$ 与 $(1/\sigma_b')$ 呈直线性关系。基于该模型转换形式，对本文试验数据进行拟合，如图 13 所示，得材料参数 n_b=1.03，σ_r'=1204p_a，p_a 为标准大气压，列于表 2。

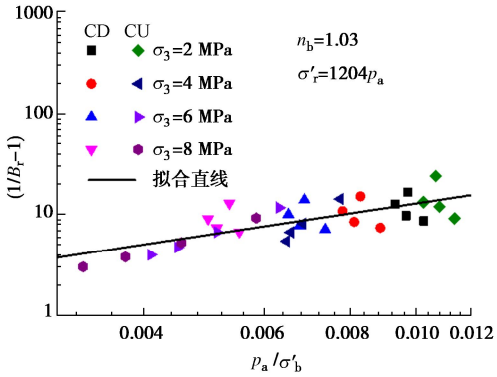


图 13　模型参数 n_b 和 σ_r' 的拟合

Fig. 13 Fitting of model parameters n_b and σ_r'

表 2 颗粒破碎模型拟合参数

Table 2 Model parameters for particle breakage model

Hardin 模型		Lade 模型		Wang 模型	
n_b	1.03	χ_W	5.19	c_1	0.43
σ'_r	1024 p_a	ζ_W	2.73	c_2	0.38
—	—	$k_{B_{r0}}$	0.193	A	96.8
—	—	$k_{B_{ru}}$	0.366	$\overline{\overline{B_r}}$	1
R^2	0.551	R^2	0.961	R^2	0.997

基于上述所得模型参数，采用 Hardin 应力颗粒破碎模型对本文试验条件下的砂样颗粒破碎率进行预测，如图 14 所示。可以看出，对于 CD 试验，模型值在 ε_1<10%情况下普遍高于试验值，随着轴向应变进一步增大，模型值又逐渐呈偏小趋势，两者吻合度较差；对于 CU 试验，模型值在 ε_1<10%情况下显著高于试验值，而随着轴向应变进一步增大，相对破碎率 B_r 在达到峰值后不再增加，这也与试验值的持续增长明显不符。这说明 Hardin 颗粒破碎模型并不适用于描述石英砂的颗粒破碎演化过程。

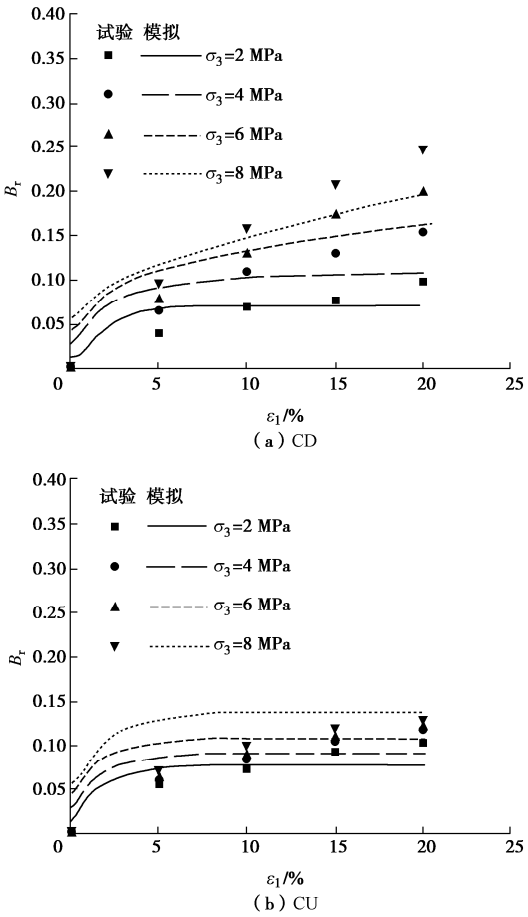


图 14 Hardin 破碎模型模拟结果

Fig. 14 Performance of Hardin's breakage model

3.2 Lade 颗粒破碎模型

颗粒状材料在剪切过程中产生的颗粒破碎是由外力对材料不断做功产生的，因此颗粒破碎与输入功存在着良好的对应关系。Lade[11]采用单位体积输入功来表征剪切过程中颗粒破碎消耗能量的情况，颗粒破碎与单位体积输入功的关系如下：

$$B_r = \frac{W}{\chi_W + \zeta_W W} \quad 。 \tag{6}$$

式中：W 为单位体积输入功；χ_W 和 ζ_W 为材料参数。其输入功计算方法为

$$\Delta W = (\sigma'_1 - \sigma'_3)\Delta\varepsilon_1 + \sigma'_3 \Delta\varepsilon_v \quad 。 \tag{7}$$

式中：σ'_1 和 σ'_3 分别为有效轴压和有效围压；$\Delta\varepsilon_1$ 为轴向应变增量；$\Delta\varepsilon_v$ 为体应变增量。

进一步，将颗粒破碎率 B_r 对单位体积输入功求导，可得 W=0 时的初始切线模量 $k_{B_{r0}}$：

$$\frac{1}{\chi_W} = \frac{dB_r}{dW} = \lim_{W\to 0} \frac{1}{\chi_W + \zeta_W W} \triangleq k_{B_{r0}} \quad 。 \tag{8}$$

当 W 趋于无穷的时候，通过对 B_r 求极限，可得到该围压下最大的颗粒破碎率 $k_{B_{ru}}$：

$$\frac{1}{\zeta_W} = \lim_{W\to\infty} \frac{W}{\chi_W + \zeta_W W} \triangleq k_{B_{ru}} \quad 。 \tag{9}$$

式中：$k_{B_{r0}}$ 与 χ_W 互为倒数；$k_{B_{ru}}$ 与 ζ_W 互为倒数。

基于上述 Lade 颗粒破碎模型对本文试验数据进行拟合，可获得相对破碎率 B_r 与输入能量 W 的关系曲线，如图 15 所示。其中，材料参数 χ_W 和 ζ_W 分别为 5.19 和 2.73，列于表 2。

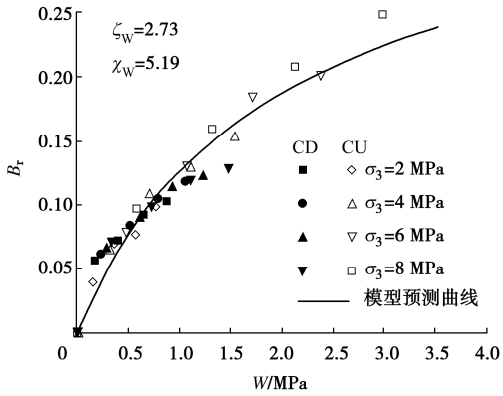


图 15 相对破碎率与输入能量的关系

Fig. 15 Relationship between relative breakage and input energy

将 Lade 颗粒破碎模型与本文试验数据进行对比，如图 16 所示。可以看出，对于 CD 试验，模型值与试验值发展趋势相一致，且在数值上吻合较好。这说明 Lade 颗粒破碎模型对于排水条件下的石英砂颗粒破碎过程描述较为适用；而对于 CU 试验，模型值在 ε_1<10%情况下稍低于试验值，随着轴向应变进一步增大，模型值逐渐又呈偏高趋势。可见该模型对于不排水条件存在一定的误差，这主要与不排水条件下三轴试验通常假设体应变 ε_v=0 有关，即在不排水条件下忽

略了体应变做功所致。

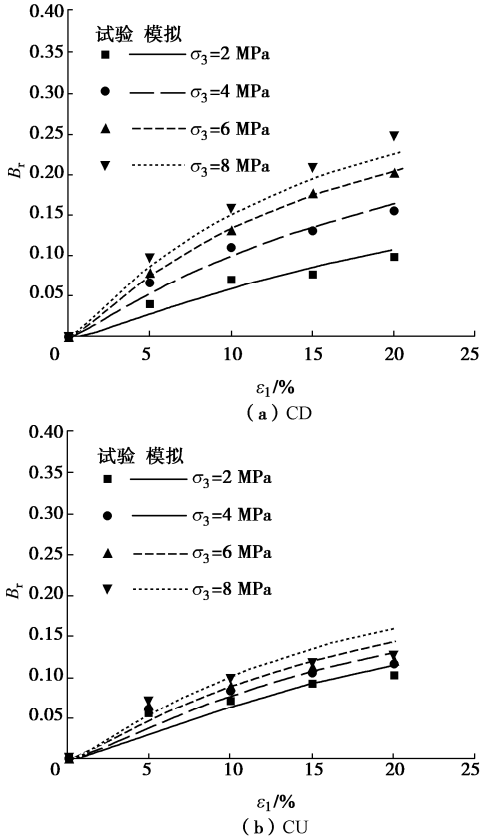


图 16 Lade 破碎模型模拟结果

Fig. 16 Performance of Lade's breakage model

3.3　Wang 颗粒破碎模型

Wang 等[25]在针对钙质砂的研究中发现，对于围压不变的情况下，颗粒破碎与轴向应变间存在较好的双曲线特征，进而提出了一个经验型双曲线颗粒破碎模型：

$$B_r=\frac{\varepsilon_1}{1/R_{B0}+\varepsilon_1/\overline{B_r}}\quad 。\tag{9}$$

式中：ε_1 为轴向应变；$\overline{B_r}$ 为当前围压下产生的最大破碎率；R_{B0} 为 ε_1=0 时颗粒破碎的初始增长速率。这两个物理量的表达式分别如下：

$$R_{B0}=c_1(\sigma_3'/p_a)^{c_2}\quad ,\tag{10}$$

$$\overline{B_r}=\frac{\sigma_3'}{Ap_a+\sigma_3'}\overline{\overline{B_r}}\quad 。\tag{11}$$

式中：c_1，c_2 为材料参数；p_a 为标准大气压；A 为无量纲参数；$\overline{\overline{B_r}}$ 为最终破碎率，表示在极高应力和极大应变加载共同作用后能产生颗粒破碎的最大值。对于 Hardin 颗粒破碎率，其认为砂土受到足够大的压力后，任何粒径的颗粒最终都会破碎成 0.075 mm 以下的粒径，即意味着 $\overline{\overline{B_r}}$=1。

基于试验数据，采用 Wang 颗粒破碎模型进行拟合，模型参数 c_1、c_2 和 A 分别为 0.43，0.38，96.8，列于表 2。进一步采用 Wang 颗粒破碎模型对本文试验条件下的砂样颗粒破碎演化规律进行预测，如图 17 所示。可以看出，无论是 CD 试验和 CU 试验，Wang 提出的颗粒破碎模型值与试验值均吻合良好，该模型可准确描述高应力条件下石英砂在固结排水和固结不排水时的颗粒破碎变化过程。

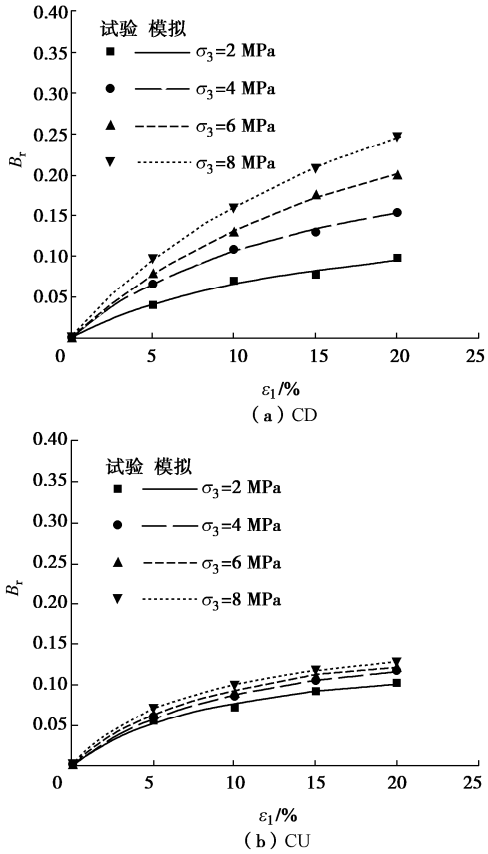


图 17 Wang 破碎模型模拟结果

Fig. 17 Performance of Wang's breakage model

4　颗粒破碎对强度的影响

CD 和 CU 试验在 σ_3=2 MPa 时出现两次相变点。相变点处的强度与临界状态内摩擦角相当[26-27]，第一次相变点出现时的轴向应变较小，颗粒破碎量较小，因此可由该点的内摩擦角确定原始土样（颗粒未破碎）的临界状态内摩擦角 φ_{cv}'。根据式（1），CD 和 CU 试验第一次相变点对应的有效内摩擦角分别为 28.1° 和 28.3°，表明两种应力路径获得的 φ_{cv}' 非常接近。随着轴向应变的增加，颗粒破碎率增加，颗粒破碎的逐步累积使得局部的剪缩超过剪胀，出现了二次相变点[28]。二次相变点处 CD 和 CU 试验的有效内摩擦角分别为 30.6° 和 31°，由图 11 颗粒破碎演化过程可见，CD 和 CU 试验二次相变点处的相对颗粒破碎率 B_r 分别为

0.082 和 0.084，表明当颗粒破碎率相近时，CD 和 CU 试验的有效内摩擦角亦接近。

图 18 为不同围压下的有效破坏内摩擦 φ_f' 及对应的相对颗粒破碎率 B_r 的关系。由图 18 可见，CD 试验的破坏内摩擦角随着围压增加而减小，围压从 2 MPa 至 8 MPa，φ_f' 降低了 4.4°；而 CU 试验，围压从 2 MPa 至 8 MPa，φ_f' 升高了 2.9°，这可能与颗粒破碎有关。σ_3= 2 MPa 时 CU 与 CD 试验的颗粒破碎率接近，两者的 φ_f' 基本相同；随着围压增加，两种应力路径下的颗粒破碎率差别明显，并且围压越大，B_r 的差别越大，CD 和 CU 试验的有效破坏内摩擦角呈现出截然不同的变化规律。

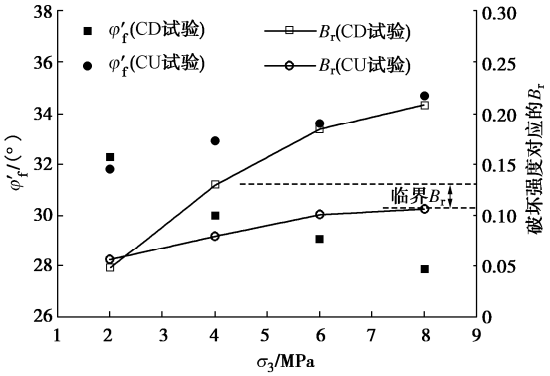


图 18 围压与有效破坏内摩擦角及对应的相对破碎率的关系

Fig. 18 Relationship among confining pressure, effective failure friction angle and corresponding relative breakage

颗粒破碎对土体的强度有双重作用，一方面，颗粒破碎降低土体的剪胀性，对砂土强度起负作用；另一方面，颗粒破碎使得粒径范围更广、颗粒棱角更多，颗粒排列更紧密，自锁作用增加。由相对破碎率 B_r 与 φ_f' 的关系可见，一定量的颗粒破碎会增加砂土的强度，但当颗粒破碎率较大时，强度会降低。基于上述分析，颗粒破碎量很小或相同颗粒破碎量时，CU 和 CD 试验的有效内摩擦角基本相同，假设 CU、CD 试验应力路径对土体强度无影响，则可由颗粒破碎率 B_r 与 φ_f' 变化的关系分析颗粒破碎率对强度的影响。当 B_r≤0.107 时（CU 试验 σ_3≤8 MPa）颗粒破碎对强度起提高作用，当 B_r≥0.13 时（CD 试验 σ_3≥4 MPa），颗粒破碎对土体强度起降低作用。因此，可初步判断高应力下颗粒破碎对强度起正向和负向作用的临界相对破碎率 B_r 介于 0.1～0.13。

5 结 论

本文对石英砂进行高应力三轴剪切试验，研究不同排水条件下剪切过程中颗粒破碎的演化规律及其对强度的影响，并探讨常用的 3 种颗粒破碎模型对高应力石英砂颗粒破碎描述的适用性，得到以下 4 点结论。

（1）基于高应力三轴剪切试验，获得了石英砂在剪切过程中的 q-ε_1 曲线。对于 CD 试验，偏应力曲线在 σ_3=2 MPa 时呈轻微软化趋势，随着围压逐步提高（σ_3≥4 MPa），曲线逐渐向硬化趋势转变，且围压越高，硬化趋势越明显；对于 CU 试验，偏应力曲线均呈软化趋势，且围压越高，偏应力峰值所对应的轴向应变越小。

（2）对于 CD 和 CU 试验，砂土颗粒破碎率 B_r 随着围压和轴向应变增大而增大；但 CD 试验颗粒破碎率受围压和剪切过程的影响更明显，而 CU 试验的颗粒破碎率的变化相对较小，且普遍小于 CD 试验的颗粒破碎率，这主要是由于 CU 试验产生的孔隙水压力降低了有效应力，从而显著抑制了围压对颗粒破碎的影响。

（3）对于石英砂在高应力剪切过程中的颗粒破碎变化规律，Hardin 颗粒破碎模型并不适用；Lade 颗粒破碎模型对排水条件下破碎率变化描述较准确，但对于不排水条件存在一定误差；Wang 颗粒破碎模型可很好地描述固结排水和固结不排水条件下的石英砂颗粒破碎率变化过程。本文在上述颗粒破碎模型适用性验证工作中所得模型参数可为其他学者开展石英砂颗粒破碎相关研究工作提供一定的借鉴和参考。

（4）颗粒破碎量很小及颗粒破碎率相同时，CD 和 CU 试验两种应力路径下的有效内摩擦角基本相同；颗粒破碎对土体强度的影响有双重作用，一定量的颗粒破碎率会提高砂土强度，而颗粒破碎率继续增大则会降低土体强度，初步判定对强度起正向和负向作用的临界相对破碎率介于 0.1～0.13。

参考文献：

[1] XIAO Y, WANG C G, ZHANG Z C, et al. Constitutive modeling for two sands under high pressure[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, **21**(5): 04021042.

[2] YU F W. Characteristics of particle breakage of sand in triaxial shear[J]. Powder Technology, 2017, **320**: 656-667.

[3] 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): 2170-2180. (YIN Zhenyu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: review and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2170-2180. (in Chinese))

[4] KIKUMOTO M, WOOD D M, RUSSELL A. Particle crushing

and deformation behaviour[J]. Soils and Foundations, 2010, **50**(4): 547-563.

[5] 郝冬雪, 岳　冲, 陈　榕, 等. 常压至高压下中砂剪切特性及应力－剪胀关系[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 765-772. (HAO Dongxue, YUE Chong, CHEN Rong, et al. Shear characteristics and stress-dilation relation of medium sand under normal to high pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 765-772. (in Chinese))

[6] 黄茂松, 姚仰平, 尹振宇, 等. 土的基本特性及本构关系与强度理论[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(7): 9-35. (HUANG Maosong, YAO Yangping, YIN Zhenyu, et al. An overview on elementary mechanical behaviors, constitutive modeling and failure criterion of soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(7): 9-35. (in Chinese))

[7] HYODO M, WU Y, ARAMAKI N, et al. Undrained monotonic and cyclic shear response and particle crushing of silica sand at low and high pressures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(2): 207-218.

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

[9] 张季如, 华　晨, 罗明星, 等. 三轴排水剪切下钙质砂的颗粒破碎特性[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(9): 1593-1602. (ZHANG Jiru, HUA Chen, LUO Mingxing, et al. Behavior of particle breakage in calcareous sand during drained triaxial shearing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(9): 1593-1602. (in Chinese))

[10] INDRARATNA B, SUN Q D, NIMBALKAR S. Observed and predicted behaviour of rail ballast under monotonic loading capturing particle breakage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(1): 73-86.

[11] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(4): 309-316.

[12] 吴二鲁, 朱俊高, 陆阳洋, 等. 基于颗粒破碎耗能的粗粒料剪胀方程研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(5): 898-906. (WU Erlu, ZHU Jungao, LU Yangyang, et al. Dilatancy equation for coarse-grained soils incorporating particle breakage energy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(5): 898-906. (in Chinese))

[13] XIAO Y, YUAN Z X, LV Y, et al. Fractal crushing of carbonate and quartz sands along the specimen height under impact loading[J]. Construction and Building Materials, 2018, **182**: 188-199.

[14] 郭万里, 蔡正银, 武颖利, 等. 粗粒土的颗粒破碎耗能及剪胀方程研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(12): 4703-4710. (GUO Wanli, CAI Zhengyin, WU Yingli, et al. Study on the particle breakage energy and dilatancy of coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(12): 4703-4710. (in Chinese))

[15] TENGATTINI A, DAS A, EINAV I. A constitutive modelling framework predicting critical state in sand undergoing crushing and dilation[J]. Géotechnique, 2016, **66**(9): 695-710.

[16] 王兆南, 王　刚, 叶沁果, 等. 考虑颗粒破碎的钙质砂边界面循环本构模型[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(5): 886-892. (WANG Zhaonan, WANG Gang, YE Qinguo, et al. Cyclic bounding surface model for carbonate sand incorporating particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(5): 886-892. (in Chinese))

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

[18] NANDA S, SIVAKUMAR V, DONOHUE S, et al. Small-strain behaviour and crushability of Ballyconnelly carbonate sand under monotonic and cyclic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, **55**(7): 979-987.

[19] UENG T S, CHEN T J. Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands[J]. Géotechnique, 2000, **50**(1): 65-72.

[20] 蔡正银, 侯贺营, 张晋勋, 等. 考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂临界状态与本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 989-995. (CAI Zhengyin, HOU Heying, ZHANG Jinxun, et al. Critical state and constitutive model for coral sand considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 989-995. (in Chinese))

[21] 张季如, 罗明星, 彭伟珂, 等. 不同应力路径下钙质砂力学特性的排水三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(4): 593-602. (ZHANG Jiru, LUO Mingxing, PENG Weike, et al. Drained triaxial tests on mechanical properties of calcareous sand under various stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 593-602. (in Chinese))

[22] 王兆南, 王　刚, 叶沁果, 等. 三轴应力路径下珊瑚砂的颗粒破碎模型[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(3): 540-546.

(WANG Zhaonan, WANG Gang, YE Qinguo, et al. Particle breakage model for coral sand under triaxial compression stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(3): 540-546. (in Chinese))

[23] JIA Y, XU B, CHI S, et al. Particle breakage of rockfill material during triaxial tests under complex stress paths[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, **19**(12): 04019124.

[24] 蔡正银, 李小梅, 关云飞, 等. 堆石料的颗粒破碎规律研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 923-929. (CAI Zhengyin, LI Xiaomei, GUAN Yunfei, et al. Particle breakage rules of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(5): 923-929. (in Chinese))

[25] WANG G, WANG Z N, YE Q G, et al. Particle breakage and deformation behavior of carbonate sand under drained and undrained triaxial compression[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(3): 04020012.

[26] NEGUSSEY D, WIJEWICKREME W K D, VAID Y P. Constant-volume friction angle of granular materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, **25**(1): 50-55.

[27] SADREKARIMI A, OLSON S M. Critical state friction angle of sands[J]. Géotechnique, 2011, **61**(9): 771-783.

[28] SADREKARIMI A. Development of A New Ring Shear Apparatus for Investigating the Critical State of Sands[D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.

《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，并优先刊用这些稿件。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、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊，A4 开本，双栏排版，222 页，每月中旬出版，每期定价 40 元，全年定价 480 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）