

DOI: 10.11779/CJGE20220884

级配对珊瑚砂颗粒破碎与变形特性的影响

蔡正银, 陈元义*, 朱 洵, 唐 译

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 珊瑚砂具有典型的颗粒破碎特征, 而破碎导致的粒径变化对珊瑚砂力学特性有显著的影响。为探究初始级配和围压对珊瑚砂颗粒破碎及变形特性的影响, 选择 4 种不同初始颗粒级配的试样在 4 种不同围压下进行了三轴固结排水剪切试验。研究表明: 在小围压下, 剪切过程中不同级配的珊瑚砂试样的应力应变关系均表现出应变软化现象, 体变曲线呈现出非常明显的剪胀, 而且粒组的颗粒粒径越细, 峰值强度越大, 体积应变也越大。随着围压的增加, 粗颗粒级配砂样表现为应变硬化。研究发现对于某一级配, 随着围压的增加加剧了珊瑚砂颗粒破碎的发生, 两者之间存在显著的幂函数关系。通过引入级配参数 β , 建立了颗粒破碎率 B_r 与级配和围压之间的关系表达式。研究还发现在 $e-(p'/p_a)^\xi$ 平面内, 不同级配的珊瑚砂试样临界状态线为相互平行的直线, 其截距 e_r 与初始孔隙比 e_{ic} 、级配参数 β 之间存在显著的线性关系, 并据此建立了考虑级配影响的珊瑚砂临界状态方程。

关键词: 珊瑚砂; 颗粒级配; 临界状态; 颗粒破碎; 本构模型

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)04-0661-10

作者简介: 蔡正银(1965—), 男, 江苏海安人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术方面的工作。E-mail: zycail@nhri.cn。

Influences of gradation on particle breakage and deformation characteristics of coral sand

CAI Zhengyin, CHEN Yuanyi, ZHU Xun, TANG Yi

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The mechanical properties of coral sand are significantly affected by the change of gradation due to the particle breakage. A series of triaxial consolidated drained shear tests are carried out to investigate the influences of the initial gradation and confining pressure on the particle breakage and deformation properties of the coral sand. The tests result show that the stress-strain curves exhibit a strain-softening behavior for the coral sand with different gradations under low confining pressures. The volumetric strain curves show very obvious dilatancy, while greater peak strength and volumetric strain are obtained for finer particles. With the increase of confining pressure, the stress-strain curves of samples with coarse grain gradation present a strain-hardening behavior. For a particular gradation, the particle breakage of the coral sand is apparent with the increase of confining pressure, and there is a pronounced power function relationship between them. By introducing a gradation parameter β , an expression representing the relationship among the relative breakage B_r , the gradation and the confining pressure is established. Furthermore, the critical state lines for the coral sand with different gradations are parallel on the $e-(p'/p_a)^\xi$ plane, and there is a predominant linear relationship among the intercept of the critical state lines e_r , the initial void ratio e_{ic} , and the gradation parameter β . Based on this study, a critical state equation for the coral sand considering the effects of the gradation is established.

Key words: coral sand; particle gradation; critical state; particle breakage; constitutive model

0 引 言

作为一种以碳酸钙 (CaCO_3) 为主要化学成分的特殊类砂土, 珊瑚砂因其形状不规则、棱角度高和大量内孔隙等原因, 相比于常规石英砂很容易发生破碎, 对其强度和变形造成很大的影响。影响珊瑚砂颗粒破碎的因素大致可分为两类: 一是内部因素, 包括珊瑚

砂的组成成分、碳酸钙含量、粒径大小、颗粒级配、

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600700); 国家自然科学基金项目 (51879167, 51909171); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y321005, Y321008)

收稿日期: 2022-07-18

*通信作者 (E-mail: yuanyichan@qq.com)

颗粒结构^[1-2]（如内/外孔隙）、相对密度^[3]和颗粒形状等^[4-6]。另一个是外部因素，包括固结状态^[7]、应力水平^[8]、加载方式^[9]、应力路径^[10]、剪切速率、排水条件、含水率、温度^[11]等。然而，迄今为止针对颗粒级配影响的珊瑚砂力学特性研究相对较小，颗粒破碎会引起珊瑚砂级配改变，而初始级配对珊瑚砂颗粒破碎的影响同样不容忽视。一些珊瑚工程现场调查结果显示，不同沉积的珊瑚砂级配差异明显，因此对此问题必须高度重视。

目前，关于珊瑚砂级配对其强度和变形特性影响的研究主要集中在粒径、细颗粒含量和粒组含量方面，如王新志等^[12]、闫超萍等^[13]开展了不同粒径和围压下的三轴固结排水剪切试验，提出了珊瑚砂剪切特性的粒径效应。张晨阳等^[14]通过不同细粒含量的粉细珊瑚砂三轴固结排水试验，研究了细颗粒含量对珊瑚砂抗剪强度的影响，但其未分析细粒含量与颗粒破碎之间的关系。沈扬等^[15]通过一维压缩试验分析了不同粒组含量对珊瑚砂压缩特性的影响规律。胡波^[16]和 Shahnazari 等^[17]通过三轴排水试验，研究了珊瑚砂级配对颗粒破碎的影响，发现级配不良的珊瑚砂颗粒破碎现象更加显著，Altuhafi 等^[18]通过侧限压缩试验得出了同样的结论。显然，上述研究主要从单一颗粒粒径角度出发对均质珊瑚砂力学特性进行分析，对于连续级配珊瑚砂的研究仍采用常规的定性描述。

在考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂本构模型研究方面，孙吉主等^[19]通过引入两个参数来描述珊瑚砂由于颗粒破碎产生的附加孔隙比，并基于临界状态的框架建立了考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂弹塑性本构模型。蔡正银等^[20]建立了考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂临界状态和状态相关剪胀方程。Liu 等^[21]引入统一硬化参数和考虑颗粒破碎的状态参量，通过构建形状参数以反映颗粒破碎和密实度对珊瑚砂屈服面的影响。侯贺营等^[22]将考虑颗粒破碎的内摩擦角计算公式引入南水模型。但上述研究均未考虑珊瑚砂颗粒级配对其强度和变形特性的影响。

为了研究颗粒级配对珊瑚砂颗粒破碎规律和变形特性的影响，基于大量珊瑚砂工程配曲线统计结果，从细到粗设计了 4 种颗粒级配的珊瑚砂试样，开展了不同围压作用下的三轴固结排水剪切试验，旨在阐明初始级配对珊瑚砂变形特性、颗粒破碎特性以及临界状态的影响，从而建立考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂状态相关本构模型。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用的珊瑚砂土样取自我国南海。通过 X 射线荧光光谱分析（XRF）获得该砂样的矿物成分含量如表 1 所示，其中 CaCO_3 含量高达 93.12%，属于典型的钙质土。

表 1 珊瑚砂主要成分	
Table1 Main components of coral sand	单位：%
名称	百分含量/%
CaCO_3 ($\text{CaO} + \text{CO}_2$)	93.123
SrO	2.774
MgO	1.906
SiO_2	0.743
其他	1.454

参考南海各区域典型珊瑚砂级配曲线统计结果，设计了本次试验中所用的 4 种珊瑚砂初始级配曲线，按颗粒大小由粗到细编号分别为#1，#2，#3 和#4，其中每种级配 2~5 mm 颗粒的含量依次为 50%，35%，20%和 5%。该珊瑚砂各粒组的颗粒形态及粒径分布曲线分别如图 1，2 所示。



图 1 珊瑚砂各粒组的颗粒形态

Fig. 1 Grain shapes of coral sand fraction

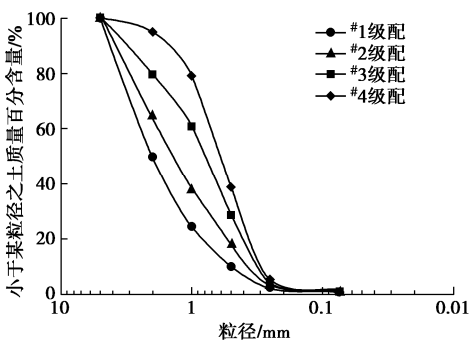


图 2 珊瑚砂粒径分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of particles of coral sand

该珊瑚砂土样主要物理性质指标如表 2 所示，其中#1 砂样级配良好（ $C_u > 5$ 且 $1 < C_c < 3$ ），#2，#3 和#4 砂样级配不良。

表 2 土样物理性质指标					
Table 2 Physical properties of samples					
级配	$\rho_{dmax}/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$\rho_{dmin}/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$d_{50}/$ mm	C_u	C_c
#1	1.380	1.034	2.00	5.26	1.16
#2	1.456	1.132	1.43	4.99	0.95
#3	1.512	1.154	0.83	3.19	0.89
#4	1.540	1.250	0.64	2.67	0.87

1.2 试验方案

为了探讨颗粒级配和围压对珊瑚砂变形特性、颗粒破碎以及临界状态的影响,通过控制初始相对密度 D_r 为 0.85,围压分别为 100, 200, 400 和 600 kPa,选取#1, #2, #3 和#4 共 4 种不同级配珊瑚砂进行三轴排水剪切试验。本文采用落砂法制样,根据试样的相对密度以及体积称取所需的干珊瑚砂,之后采用水头饱和和反压饱和相结合的方式对试样进行饱和。试验采用应变控制方式,剪切速率为 0.1 mm/min,以轴向应变达到 20%作为试验终止标准。具体试验方案如表 3 所示。

表 3 三轴排水试验方案			
Table 3 Schemes of drained triaxial compression tests			
级配	D_r	e_0	围压/kPa
#1	0.85	1.131	100/200/400/600
#2		1.006	100/200/400/600
#3		0.938	100/200/400/600
#4		0.881	100/200/400/600

为了对试验过程中产生的颗粒破碎及其对级配曲线的影响进行量化,每个试验结束后都采用筛析法对土样进行颗粒分析,得到试验后各粒组的含量及新的级配曲线。

2 固结过程中的珊瑚砂颗粒破碎规律

对于三轴排水试验,试样首先在某一围压下等向固结,然后进行剪切。为了探究固结过程中珊瑚砂的颗粒破碎情况,对初始相对密度为 0.85 的#1, #2, #3 和#4 级配珊瑚砂试样分别在 100, 200, 400 和 600 kPa 围压作用下进行等向固结试验,试验后进行颗粒分析,以比较试验前后级配的变化。本文选取破碎较明显的#1 级配试样结果进行分析,试验前后的颗粒级配曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,珊瑚砂颗粒破碎率随围压的增加而变大。为了对其进行量化,采用 Hardin^[23]提出的相对破碎率(B_r)对试验过程中产生的颗粒破碎进行计算,得到 100, 200, 400 和 600 kPa 4 种围压下固结过程中的相对破碎结果分别为 0.013, 0.014, 0.017 和 0.02。三轴排水试验发现, #1 级配在 600 kPa 围压作用下产生的相对破碎率(包括固结与剪切过程)为 0.12,固结过程占比为 16.7%,这说明等向固结过程中也会产生显著的颗粒破碎。

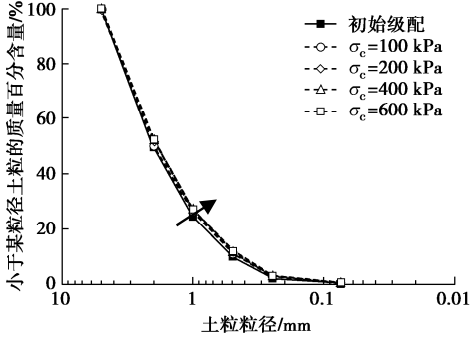


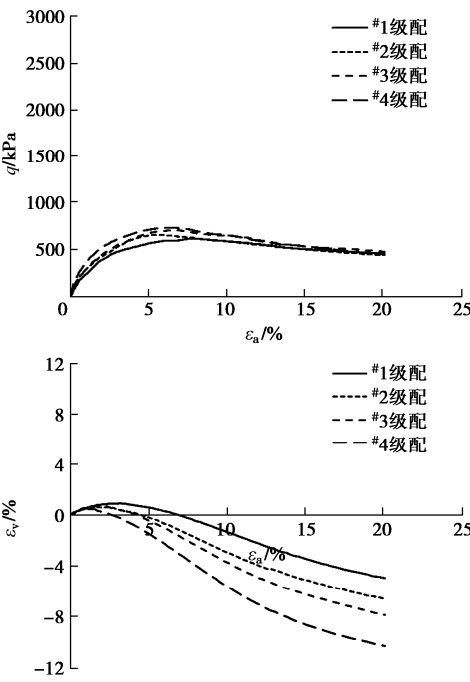
图 3 珊瑚砂固结前后的颗粒粒径分布曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of coral sands before and after consolidation

3 三轴排水条件下的珊瑚砂变形及颗粒破碎特性

3.1 珊瑚砂的变形特性

图 4 为试验得到的珊瑚砂试样在不同级配和围压条件下偏应力-轴向应变和体积应变-轴向应变关系曲线。由图 4 (a) 可知,在围压为 100 kPa 时,对于具有相同初始相对密度的 4 种不同颗粒级配的珊瑚砂应力应变曲线均表现为应变软化,随着应力水平的增加,偏应力刚开始不断增加,达到峰值后不断减小最后趋于稳定。此外,粒组颗粒粒径越细,峰值强度越大。在体积应变-轴向应变关系曲线中,4 种级配珊瑚砂试样均表现出先剪缩后剪胀的特性,随着轴向应变的增加,#4 级配砂样最先达到相变状态,然后依次是#3, #2 和#1 级配砂样,而#1 砂样在达到相变状态时的最大体积应变相较于其他 3 种级配砂样最大。此外,粒组颗粒粒径越细,体积应变越大。



(a) $\sigma_c=100\text{ kPa}$

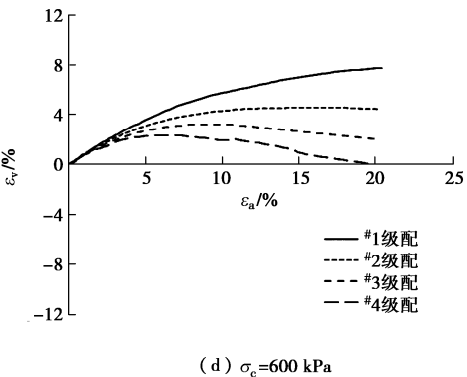
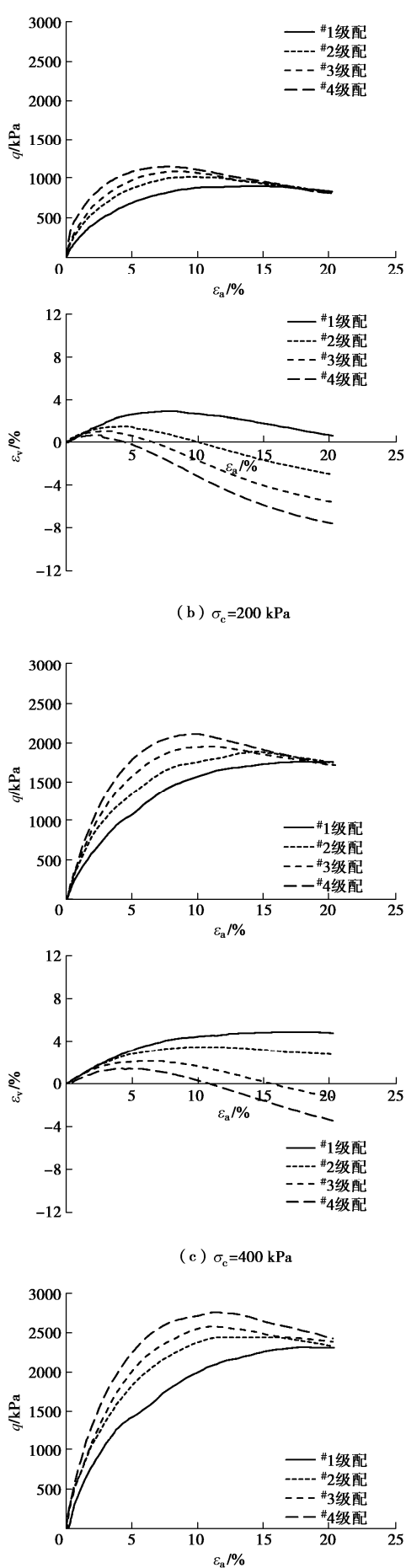
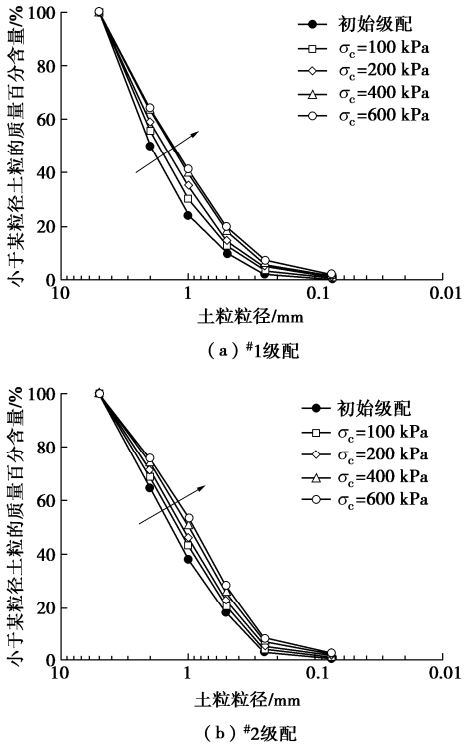


图 4 偏应力及体积应变与轴向应变的关系曲线
Fig. 4 Relationship between deviatoric stress, volumetric strain and axial strain

图 4 (b) ~ (d) 依次为围压 200, 400, 600 kPa 下的珊瑚砂变形曲线, 可以看出, 在偏应力-轴向应变关系曲线中, 4 种级配下珊瑚砂的峰值强度变化规律与 100 kPa 情况类似, 但随着围压的增加, 4 种级配对应的峰值强度差异性逐渐凸显, 且 #1 级配砂样表现出应变硬化现象。在体积应变-轴向应变关系曲线中, 当围压大于 400 kPa 时, #1 和 #2 级配砂样未表现出明显的剪胀现象, 达到相变时的体积应变与 100 kPa 时所得结论一致。综上, 对于同样的围压, 平均粒径越小, 应变软化越明显, 剪胀也越明显。

3.2 颗粒破碎对珊瑚砂级配曲线的影响

图 5 为不同围压下 4 种初始颗粒级配珊瑚砂试样剪切试验前后的粒径分布曲线, 图中的初始级配为试样剪切前的级配 (已考虑固结过程中的颗粒破碎)。由图 5 可知, 对于 4 种不同级配的试样, 剪切过程中都会发生颗粒破碎, 其破碎程度随围压的增大而增大。相对而言, 对于粒组较大的 #1 级配试样, 颗粒破碎最为明显, 说明珊瑚砂的颗粒粒径越大越容易产生颗粒破碎。



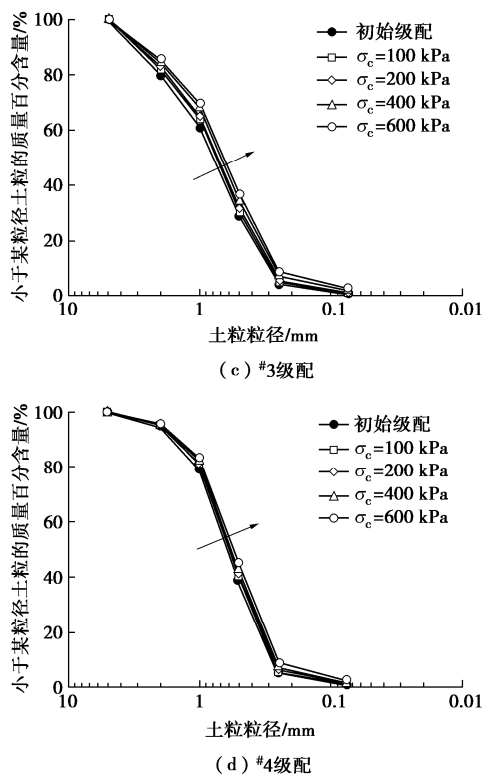


图5 试验前后珊瑚砂颗粒粒径分布曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curve of coral sands before and after tests

3.3 三轴剪切过程中的珊瑚砂颗粒破碎规律

为了进一步分析围压和初始级配对珊瑚砂颗粒破碎的影响, 同样采用 Hardin 提出的相对破碎率 (B_r) 对剪切过程中的颗粒破碎进行量化。通过计算得到 4 种级配珊瑚砂试样在不同围压作用下的 B_r , B_r 与归一化的围压 (σ_c/p_a , $p_a=101$ kPa) 之间的关系曲线如图 6 所示, 其中, 相关系数 $R^2>0.97$ 。

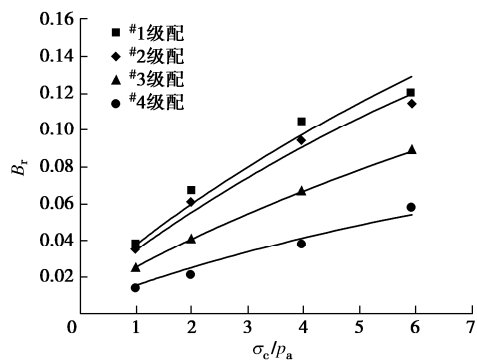


图6 相对破碎率与围压之间的关系

Fig. 6 Relationship between relative breakage and confining pressure

由图 6 可知, 对于每一种颗粒级配, 随着围压的增加剪切过程中相对破碎率逐渐增大, 但两者之间并非非线性关系, 而是呈现出显著的幂函数关系。

为了定量表征上述 4 种珊瑚砂的颗粒级配曲线,

采用 Wu 等^[24]在分形维数的基础上提出的单级配方程, 如下式所示:

$$P = \frac{1}{(1-\beta)(d_{\max}/d)^{\sqrt{\beta}} + \beta} \times 100\% \quad (1)$$

式中: d 为颗粒粒径; P 为粒径小于 d 的颗粒所占的百分含量 (%); d_{\max} 为最大粒径; β 为级配参数, 取值范围为 $0<\beta<1$ 。通过计算得到 #1, #2, #3 和 #4 这 4 种珊瑚砂初始级配曲线对应的级配参数 β 分别为 0.48, 0.51, 0.68 和 0.82。

图 7 为剪切过程中的相对破碎率与级配参数的关系曲线。由图 7 可知, 对于每一种围压, 相对破碎率都随着级配参数 β 的增加而减小, 两者之间存在良好的线性关系, $R^2>0.99$ 。

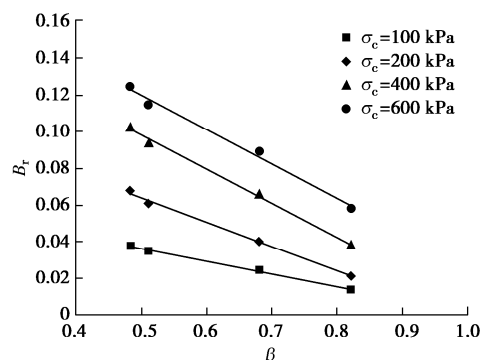


图7 相对破碎率与级配参数之间的关系

Fig. 7 Relationship between relative breakage and gradation parameters

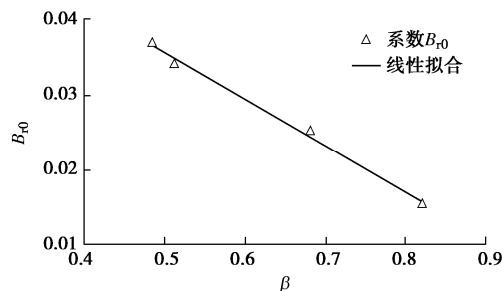
前述图 6 中发现相对破碎率与围压之间呈现出幂函数关系, 可用下式表示:

$$B_r = B_{r0} \left(\frac{\sigma_c}{p_a} \right)^\chi \quad (2)$$

式中: B_{r0} , χ 为材料参数。通过进一步分析, 发现不同初始级配下当 χ 取值为 0.7 时, 系数 B_{r0} 与级配参数 β 之间存在良好的线性关系, $R^2=0.996$, 如图 8 所示, 可用如下公式表示:

$$B_{r0} = A - E\beta \quad (3)$$

式中: A 和 E 为材料常数。对于本文, 参数 $A=0.067$, $E=0.062$ 和 $\chi=0.7$ 。

图8 相对破碎系数 B_{r0} 与级配参数 β 的关系Fig. 8 Relationship between B_{r0} and β

4 考虑颗粒破碎的珊瑚砂临界状态

4.1 珊瑚砂的临界应力比

试验得到的 4 种不同级配砂样在 4 种围压作用下的临界状态点（本试验过程中轴向应变控制为 20%，将该点作为临界状态点）绘制在 q - p' 平面内，如图 9 所示。图 9 可以发现，所有试验点基本落在一条通过坐标原点的直线上，该线一般称为临界应力比线，其临界应力比 $M_c=1.709$ 。

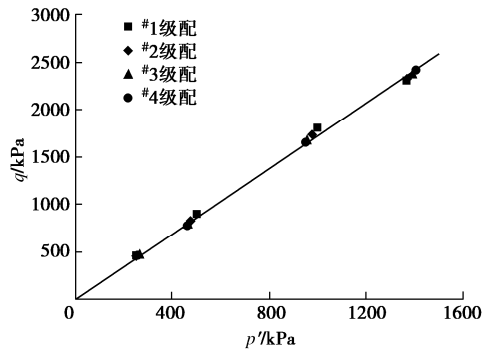


图 9 q - p' 平面内的临界状态线

Fig. 9 Critical state lines in q - p' plane

4.2 珊瑚砂的临界状态线

将 4 种不同级配珊瑚砂试样在临界状态时所得到的孔隙比 e_c 和平均正应力 p' 绘制在 e - $\lg p'$ 平面内，如图 10 所示。从图 10 可以发现每种级配下的临界状态线都呈现非线性关系，这与黏土的临界状态线是完全不同的。

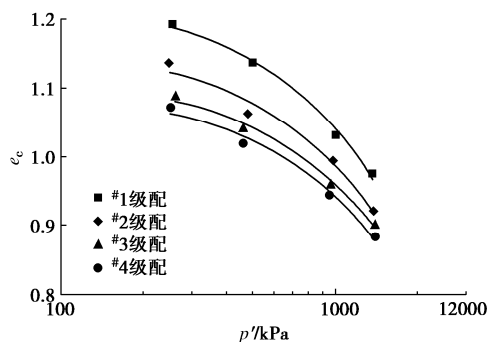


图 10 不同级配下 e - $\lg p'$ 平面上临界状态

Fig. 10 Critical state lines in e - $\lg p'$ plane under different gradations

由于常规石英砂在 e - $\lg p'$ 平面内临界状态线为一条曲线，本文采用 Li 等^[26]的建议，用如下公式来拟合珊瑚砂临界状态线：

$$e_c = e_r - \lambda_c \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi \quad (4)$$

式中： e_r 为当 $p'=0$ 时对应的孔隙比； λ_c 为临界状态线的斜率； ξ 为材料参数，对于颗粒材料一般取 0.6~0.8，

结合前人研究，本文取 0.7。

根据式 (4)，将本文试验得到的不同级配下临界状态孔隙比 e_c 和平均正应力 p' 点绘在 e - $(p'/p_a)^\xi$ 平面内，如图 11 所示， $R^2>0.96$ 。从图 11 可以发现，不同级配下的珊瑚砂临界状态线为相互平行的直线，其斜 λ_c 约为 0.49，截距 e_r 随级配的变化而变化。在考虑颗粒破碎的情况下，王刚等^[25]通过离散元对不同级配的珊瑚砂试样进行三轴剪切试验模拟，得到考虑级配影响的临界状态规律，结果表明不同级配下珊瑚砂样所得临界线亦为相互平行的直线，与本文所得结论一致。

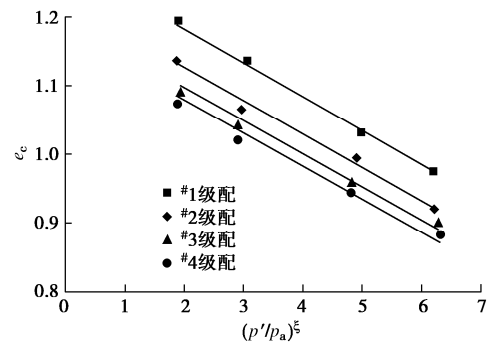


图 11 不同级配下 e - $(p'/p_a)^\xi$ 平面内的临界状态

Fig. 11 Critical state lines in e - $(p'/p_a)^\xi$ plane under different gradations

蔡正银等^[20]在研究不同相对密度条件下珊瑚砂临界状态线时，发现因为颗粒破碎导致珊瑚砂的临界状态线在 e - $(p'/p_a)^\xi$ 平面内并不唯一，而是相互平行的直线，本文在考虑不同初始级配条件下所得临界状态线出现类似的规律。

通过对上文的分析可知珊瑚砂临界状态线的截距受围压、初始级配、孔隙比和颗粒破碎共同作用的影响，而相对破碎率 B_r 可通过围压和级配参数 β 进行表达，因此可通过公式 $e_c + \lambda_c (p'/p_a)^\xi$ 计算珊瑚砂各临界状态点的截距，并将其分别与相对破碎率 B_r 和初始孔隙比 e_{ic} （固结后的孔隙比）进行拟合，以探讨初始状态和颗粒破碎对临界孔隙比的影响。当 λ_c 取值为 0.49 时，绘制 $e_c + \lambda_c (p'/p_a)^\xi - B_r$ 的关系，如图 12 所示。同理，绘制 $e_c + \lambda_c (p'/p_a)^\xi - e_{ic}$ 的关系，如图 13 所示， $R^2>0.90$ 。

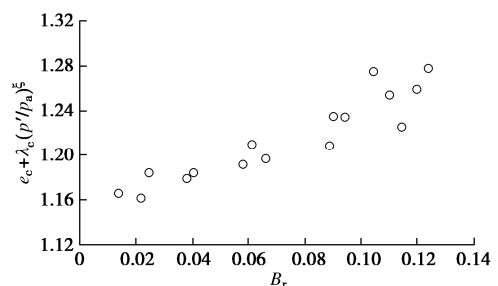


图 12 截距与相对破碎率之间的关系

Fig. 12 Relationship between e_r and B_r

由图 12, 13 可知, 截距 e_r 与相对破碎率和初始孔隙比之间均存在显著的线性关系, 说明截距受到两者共同作用的影响。将其绘制在同一曲面内, 如图 14 所示, $R^2=0.97$ 。

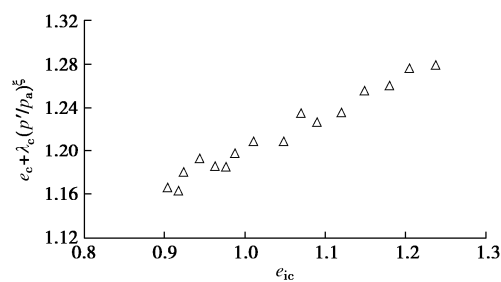


图 13 截距与初始孔隙比的关系
Fig. 13 Relationship between e_r and e_{ic}

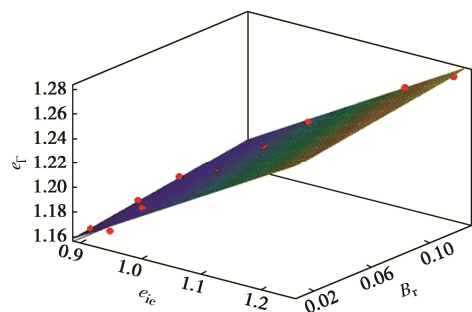


图 14 截距与相对破碎率和初始孔隙比之间的关系
Fig. 14 Relationship between e_r and B_r , e_{ic}

通过上述拟合可知, 截距 e_r 与相对破碎率 B_r 、初始孔隙比 e_{ic} 之间可以用下式进行表达:

$$e_r = l_0 + l_1 e_{ic} + l_2 B_r \quad (5)$$

$$B_r = (A - E\beta) \left(\frac{\sigma_c}{p_a} \right)^\chi \quad (6)$$

式中: l_0 , l_1 和 l_2 为拟合参数, 对于本文的珊瑚砂可取值为 0.902, 0.288 和 0.179。

5 珊瑚砂状态相关本构模型验证

5.1 珊瑚砂状态相关本构模型参数

通过对砂土剪胀特性的研究, Li 等^[26]提出了状态相关剪胀方程和塑形模量, 基于此, 在三轴空间推导了一个适用于三轴压缩试验的砂土状态相关本构模型。

$$\begin{Bmatrix} dq \\ dp' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 3G & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} - \frac{h(L)}{3G - \eta Kd + K_p} \begin{bmatrix} 9G^2 & -3\eta KG \\ 3KGd & -\eta K^2 d \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d\varepsilon_q \\ d\varepsilon_v \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中: $h(L)$ 为 Heavside 方程; G 和 K 分别为弹性剪切模量和弹性体积模量; η 为应力比; K_p 为塑形模量; d 为剪胀比。

$$d = d_0 \left(e^{m\psi} - \frac{\eta}{M} \right) \quad (8)$$

$$\psi = e - e_c \quad (9)$$

$$K_p = hG \left(\frac{M}{\eta} - e^{m\psi} \right) \quad (10)$$

$$h = h_1 - h_2 e \quad (11)$$

式中: d_0 , m , h_1 , h_2 和 n 为模型常数, 均为正值; ψ 为状态参数。

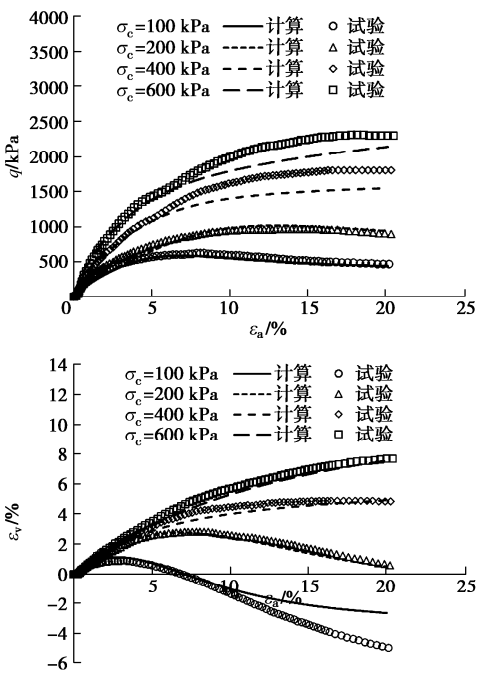
本文在此基础上, 将颗粒破碎因子 (B_r) 引入临界状态方程, 并对试验结果进行模拟。其中, 模型主要包括 4 组参数: 弹性参数、颗粒破碎参数、临界状态参数和状态相关参数, 总共 16 个参数。所有模型参数都是根据三轴试验和颗粒分析试验结果进行计算和率定, 如表 4 所示。

表 4 珊瑚砂本构模型相关参数

Table 4 Model parameters of coral sand			
弹性参数	颗粒破碎参数	临界状态参数	状态相关参数
$G_0=75$	$A=0.067$	$M_c=1.709$	$d_0=2.2$
$\nu=0.3$	$E=0.062$	$l_0=0.902$	$m=0.14$
	$\chi=0.7$	$l_1=0.288$	$n=3$
		$l_2=0.179$	$h_1=1.71$
		$\lambda_c=0.049$	$h_2=0.96$
		$\xi=0.7$	

5.2 本构模型验证

模拟结果与试验结果对比如图 15 所示。由图 15 可知, 本文考虑级配和颗粒破碎影响的本构模型能够较好地描述珊瑚砂的变形特性。该模型采用一套参数, 能反映珊瑚砂在不同级配、不同围压下的应力应变特性, 也能反映珊瑚砂的应变硬化和应变软化现象。



(a) #1级配

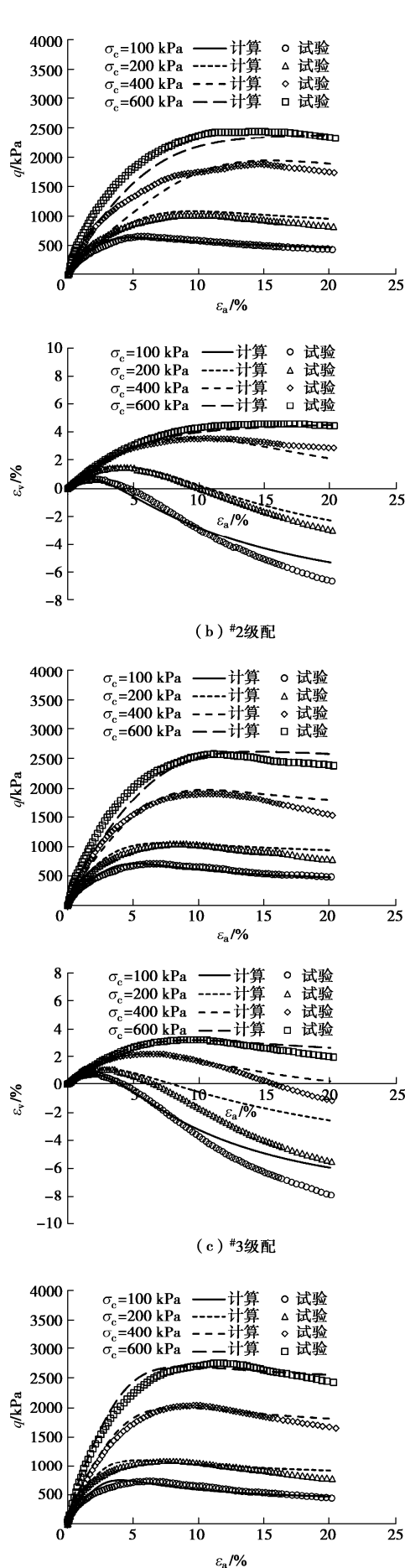


图 15 试验结果与计算结果对比图

Fig.15 Comparison between test and calculated results

6 结 论

为了探究颗粒级配对珊瑚砂颗粒破碎与变形特性的影响,针对4种不同颗粒级配、不同围压条件下的珊瑚砂开展了三轴固结排水剪切试验研究,主要得到以下3点结论。

(1)在低围压作用下,不同级配的珊瑚砂试样应力-应变关系曲线均表现出应变软化现象,体变-应变关系表现为先剪缩后剪胀,随着围压的增加,应力-应变曲线表现出硬化现象,而体变曲线表现为完全减缩。相同的围压下,平均粒径越小,应变软化越明显,剪胀也越明显。

(2)对于相同的级配,珊瑚砂颗粒破碎随围压的增大而增大,两者之间可以用幂函数进行表达,通过引入级配参数 β ,建立了颗粒破碎率 B_r 与级配和围压之间的关系表达式。

(3)在 q - p' 平面内,不同级配下珊瑚砂存在唯一的临界状态应力比。在 e - $(p'/p_a)^\xi$ 平面内,不同级配的珊瑚砂试样临界状态线为相互平行的直线,其截距 e_r 与初始孔隙比 e_{ic} 、级配参数 β 之间存在显著的线性关系,并据此建立了考虑级配影响的珊瑚砂临界状态方程。

参考文献:

- [1] 周 博, 库 泉, 吕珂臻, 等. 钙质砂颗粒内孔隙三维表征[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增刊 1): 41-48. (ZHOU Bo, KU Quan, LÜ Kezhen, et al. Three-dimensional characterization of inner pores in calcareous sand particles[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(S1): 41-48. (in Chinese))
- [2] 蒋明镜, 吴 迪, 曹 培, 等. 基于 SEM 图片的钙质砂连通孔隙分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 1-5. (JIANG Mingjing, WU Di, CAO Pei, et al. Connected inner pore analysis of calcareous sands using SEM[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 1-5. (in Chinese))
- [3] 蔡正银, 侯贺营, 张晋勋, 等. 密度与应力水平对珊瑚砂颗粒破碎影响试验研究[J]. 水利学报, 2019, **50**(2): 184-192. (CAI Zhengyin, HOU Heying, ZHANG Jinxun, et al. Experimental study on the influence of density and stress level on particle breakage of coral sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(2): 184-192. (in Chinese))
- [4] 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): 1389-1392. (CHEN Haiyang, WANG Ren, LI Jianguo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(9): 1389-1392. (in Chinese))
- [5] SHEN Y, ZHU Y H, LIU H L, et al. Macro-meso effects of gradation and particle morphology on the compressibility characteristics of calcareous sand[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, **77**(3): 1047-1055.
- [6] WEI H Z, ZHAO T, MENG Q S, et al. Quantifying the morphology of calcareous sands by dynamic image analysis[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(4): 04020020.
- [7] SHAHNAZARI H, REZVANI R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: an experimental study[J]. Engineering Geology, 2013, **159**: 98-105.
- [8] YU F W. Particle breakage in triaxial shear of a coral sand[J]. Soils and Foundations, 2018, **58**(4): 866-880.
- [9] 纪文栋, 张宇亭, 裴文斌, 等. 加载方式和应力水平对珊瑚砂颗粒破碎影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(8): 1953-1961. (JI Wendong, ZHANG Yuting, PEI Wenbin, et al. Influence of loading method and stress level on the particle crushing of coral calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(8): 1953-1961. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 何绍衡, 夏唐代, 李玲玲, 等. 温度效应对珊瑚礁砂抗剪强度和颗粒破碎演化特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(12): 2535-2549. (HE Shaoheng, XIA Tangdai, LI Lingling, et al. Influence of temperature effect on shear strength and particle breaking evolution characteristics of coral reef sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(12): 2535-2549. (in Chinese))
- [12] 王新志, 翁贻令, 王 星, 等. 钙质土颗粒咬合作用机制[J]. 岩土力学, 2018, **39**(9): 3113-3120. (WANG Xinzhi, WENG Yiling, WANG Xing, et al. Interlocking mechanism of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(9): 3113-3120. (in Chinese))
- [13] 闫超萍, 龙志林, 周益春, 等. 钙质砂剪切特性的围压效应和粒径效应研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 581-591, 634. (YAN Chaoping, LONG Zhilin, ZHOU Yichun, et al. Investigation on the effects of confining pressure and particle size of shear characteristics of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 581-591, 634. (in Chinese))
- [14] 张晨阳, 谌 民, 胡明鉴, 等. 细颗粒组分含量对钙质砂抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2019, **40**(增刊 1): 195-202. (ZHANG Chenyang, CHEN Min, HU Mingjian, et al. Effect of fine particles content on shear strength of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 195-202. (in Chinese))
- [15] 沈 扬, 沈 雪, 俞演名, 等. 粒组含量对钙质砂压缩变形特性影响的宏细观研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3733-3740. (SHEN Yang, SHEN Xue, YU Yanming, et al. Macro-micro study of compressive deformation properties of calcareous sand with different particle fraction contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(10): 3733-3740. (in Chinese))
- [16] 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: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008. (HU Bo. Research on the Particle Breakage Mechanical Characteristics and Constitutive Model of Calcareous Sand under Triaxial Conditions[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese))
- [17] SHAHNAZARI H, REZVANI R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: an experimental study[J]. Engineering Geology, 2013, **159**: 98-105.
- [18] ALTUHAFAI F N, COOP M R. Changes to particle characteristics associated with the compression of sands[J]. Géotechnique, 2011, **61**(6): 459-471.
- [19] 孙吉主, 罗新文. 考虑剪胀性与状态相关的钙质砂双屈服面模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(10): 2145-2149. (SUN Jizhu, LUO Xinwen. Study on a two-yield surface model with consideration of state-dependent dilatancy for calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2145-2149. (in Chinese))
- [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] LIU R M, HOU H Y, CHEN Y Y, et al. Elastoplastic constitutive model of coral sand considering particle breakage based on unified hardening parameter[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2022, **40**(6): 655-667.

[22] 侯贺营, 潘卓杰, 姜朋明. 考虑颗粒破碎的钙质砂双屈服面模型[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(6): 132-141. (HOU Heying, PAN Zhuojie, JIANG Pengming. Double yield surface model of calcareous sand considering particle breakage[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, **53**(6): 132-141. (in Chinese))

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

[24] WU E L, ZHU J G, CHEN G, et al. Gradation equation of coarse-grained soil and its applicability[J]. Journal of Central South University, 2020, **27**(3): 911-919.

[25] 王 刚, 杨俊杰, 王兆南. 钙质砂临界状态随颗粒破碎演化规律分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(8): 1-8. (WANG Gang, YANG Jun-jie, WANG Zhao-nan. The critical state evolution of calcareous sand during particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(8): 1-8. (in Chinese))

[26] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils [J]. Géotechnique, 2000, **50**(4): 449-460.

2023 年黄文熙讲座（第 26 讲）学术报告会二号通知

2023 年黄文熙讲座（第 26 讲）学术报告会将于 2023 年 4 月 15 日（星期六）在南京举行，由南京水利科学研究院承办。2023 年黄文熙讲座主讲人为上海大学孙德安教授，讲座题目为“非饱和土力学特性及本构模型”，讲座文稿已刊登在《岩土工程学报》2023 年第 1 期黄文熙讲座栏目。黄文熙讲座学术报告会期间，还将邀请有关学者专家做学术报告，并召开《岩土工程学报》第十三届编委会第二次全体会议。热烈欢迎全国岩土工程界的专家学者及各有关单位的代表参会。2023 年黄文熙讲座（第 26 讲）学术报告会日程安排如下。

时 间	会议内容	地 点
2023 年 4 月 14 日下午		
14:00—20:00	《岩土工程学报》编委代表和外地代表报到	瑞迪大酒店一楼大厅
20:00—22:00	《岩土工程学报》编委会议	瑞迪大酒店三楼会议室
2023 年 4 月 15 日上午		
8:00—9:00	参会人员报到	南京水利科学研究院水 资源楼 12 楼会议厅
9:00—9:20	开幕式	
9:20—10:40	主讲人：孙德安 教授（上海大学） 报告题目：非饱和土力学特性及本构模型	
10:40—11:00	茶歇	
11:00—12:20	报告人：王明洋 院士（陆军工程大学） 报告题目：深地工程抗爆安全与长期稳定问题	
12:20—13:30	工作午餐	
2023 年 4 月 15 日下午		
13:30—14:00	报告人：标准主编 报告题目：非饱和土试验方法标准	南京水利科学研究院水 资源楼 12 楼会议厅
14:00—14:30	报告人：唐朝生 教授（南京大学） 报告题目：土体龟裂研究	
14:30—15:00	报告人：叶剑红 研究员（中科院武汉岩土所） 报告题目：国产自主 FssiCAS 耦合一体化软件在海洋风机动力分析中的 应用	
15:00—15:20	休 息	
15:20—15:50	报告人：蔡国庆 教授（北京交通大学） 报告题目：非饱和土热-水-力耦合特性及本构模型	
15:50—16:20	报告人：张升 教授（中南大学） 报告题目：非饱和冻土中的水气迁移与相变	
16:20—16:50	报告人：魏国民 高工（南京水利科学研究院） 报告题目：静动统一的土石料弹塑性本构模型	
16:50—17:00	闭幕式	

备注：瑞迪大酒店位于南京市广州路 223 号；南京水利科学研究院水资源楼位于南京市广州路 225 号。