

基于大直径三轴试验的钙质砂相对破碎率公式修正*

王 晓¹, 冯秀丽¹, 王 栋^{2,3**}, 裴会敏^{2,3}

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 中国海洋大学海洋岩土工程研究所, 山东 青岛 266100)

摘 要: 钙质砂因特殊的成因, 具有不规则形状和复杂孔隙等特征, 容易发生颗粒破碎。本文对南海某岛礁天然钙质砂进行等向压缩试验和大直径三轴排水试验, 同时测量颗粒相对破碎率, 结果表明: 钙质砂强度随轴向应变逐渐增大, 达到峰值后明显软化, 且峰值偏应力随围压增大而增大; 颗粒破碎随着剪切逐渐发生, 且围压越大破碎程度越大。采用描述颗粒破碎的 SIMSAND 模型预测排水条件下的三轴剪切试验, 通过试验与预测结果的对比, 揭示了模型对钙质砂预测的局限性。本文改进了 SIMSAND 模型, 提出了围压不超过 1 MPa 时的颗粒相对破碎率公式, 优化后的公式能更合理地预测峰值应力对应的轴向应变和颗粒破碎程度的演化。

关键词: 钙质砂; 三轴试验; 颗粒破碎; 本构模型; 颗粒级配

中图法分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2023)01-107-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20220072

引用格式: 王晓, 冯秀丽, 王栋, 等. 基于大直径三轴试验的钙质砂相对破碎率公式修正[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 107-113.

Wang Xiao, Feng Xiuli, Wang Dong, et al. A modified formula for relative breakage rate of calcareous sand based on large-scale triaxial tests[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(1): 107-113.

1 引言

钙质砂由珊瑚、贝壳、有孔虫等海洋生物残骸通过物理与生物化学作用形成, 富含碳酸钙等难溶碳酸盐类物质, 在中国南海广泛分布。由于特殊的生物成因, 钙质砂颗粒保留了原生生物骨架, 内部孔隙发育^[1], 形状多为纺锤状、片状、棒状和枝状且不规则, 因此颗粒易破碎。不同于普通陆源石英砂, 颗粒破碎的程度可能显著影响钙质砂的强度与变形。

三轴排水剪切试验结果表明当围压达到一定值后, 钙质砂才开始呈现明显的颗粒破碎现象^[2]。对于相对密度大于 50% 的钙质砂, 围压小于 200 kPa 时, 试样整体表现为剪胀; 围压增大, 试样剪缩并表现为应变软化, 此时颗粒破碎对体变的影响成为主导因素, 且影响程度随围压的增大而增大^[3]; 当围压达到一定值后, 颗粒破碎达到极限, 破碎对体变的影响趋于稳定。钙质砂的单向压缩试验也观察到类似的现象: 松砂和密砂的压缩曲线均表现为前段坡度小, 后段坡度大; 当施加的上覆压力超过某一值后, 钙质砂的变形以不可恢复的塑性变形为主, 颗粒破碎占主导作用^[4]。

为定量描述颗粒破碎, Hardin^[5]假设小于 0.074 mm 的颗粒不再破碎, 并提出定量表征颗粒破碎的相对破碎率 B_r 。相对破碎率定义如图 1 所示, 其中 B_i 为初始级配曲线、剪切后级配曲线和粒径 0.074 mm 直线所围面积, B_p 为初始级配曲线和粒径 0.074 mm 直线所围面积, 定义 $B_r = B_i/B_p$ 。

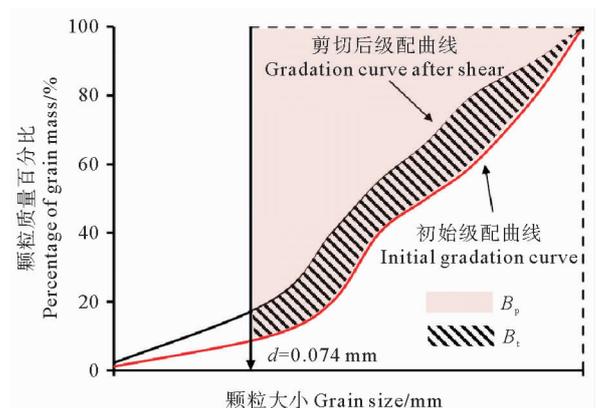


图 1 相对破碎率 B_r 的定义

Fig.1 The definition of relative breakage index B_r

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(42025702, U1806230)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(42025702, U1806230)

收稿日期: 2022-01-31; 修订日期: 2022-03-22

作者简介: 王 晓(1997—), 女, 硕士生。E-mail: xiaow@stu.ouc.edu.cn

** 通讯作者: E-mail: dongwang@ouc.edu.cn

基于 Hardin 提出的相对破碎率 B_r , 国内外提出了多种考虑颗粒破碎的本构模型, 其中比较有代表性的一个模型是 Yin 等^[6]和 Wu 等^[7]在临界状态土力学框架内构建的 SIMSAND 模型。他们建议了 B_r 随塑性功 W_p 的变化^[8]:

$$W_p = \int (p d\epsilon_v^p + q d\epsilon_d^p) \quad (1)$$

$$B_r = \frac{W_p}{\alpha + W_p} \quad (2)$$

式中: ϵ_v^p 和 ϵ_d^p 分别为塑性体应变和剪应变; p 为平均有效应力; q 为偏应力; α 为常数, 控制颗粒破碎随塑形功的变化速率。该模型能描述临界状态线随 B_r 的改变, 提出临界状态线方程^[9]:

$$e_c = -\lambda \ln\left(\frac{p}{p_{at}}\right) + e_{ref0} \quad (3)$$

式中: p_{at} 为参考大气压, 取为 101 kPa; e_{ref0} 是参考临界孔隙比, 由 B_r 影响和决定。该模型还通过控制屈服面尺寸的硬化参量 p_m 和峰值应力比 M_p , 将 B_r 引入压缩和剪切屈服面方程中。 p_m 和 M_p 的表达式分别为^[10]:

$$p_m = p_{m0} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \epsilon_v^p\right) \exp(-bB_r) \quad (4)$$

$$M_p = (6\sin\phi_p) / (3 - \sin\phi_p) \quad (5)$$

式中: p_{m0} 为 $\epsilon_v^p = 0$ 和 $B_r = 0$ 时的压缩屈服应力值; b 为控制临界状态线漂移的常数; λ 和 κ 分别为 $e - \ln p$ 空间的压缩和回弹系数; ϕ_p 为峰值有效内摩擦角, 与 B_r 相关。SIMSAND 模型适用于评价各种粒状材料的剪切刚度、强度及剪胀剪缩性。但该模型主要针对高压条件下的石英砂破碎, 在构建模型和标定参数时, 进行的三轴排水试验围压范围为 2.1~52 MPa^[7]。目前尚不清楚该模型是否适用于描述围压相对较低时钙质砂的力学行为, 也不清楚式(2)能否合理预测剪切过程中钙质砂的颗粒破碎演化规律。

本文针对钙质砂的颗粒破碎现象, 对南海钙质砂开展围压为 100~1 000 kPa 的三轴排水试验, 研究颗粒破碎发展演化及其对土体强度和变形的影响。同时采用 SIMSAND 模型对三轴试验结果进行预测和分析, 提出一套能够预测南海钙质砂力学性质的参数, 并修正预测 B_r 的公式, 优化该模型对南海钙质砂力学行为预测的准确度。

2 试验材料与方案

2.1 试验材料与仪器

试验所用钙质砂取自中国南海某岛礁, 胶结不显著, 颗粒具有条状、纺锤状和枝状等不规则形状, 表面粗糙, 存在孔隙, 如图 2 试样的扫描电镜(SEM)结果所示。利用比重瓶法测得颗粒比重为 2.74, 大于石英砂的常规比重 2.65。根据《土工试验方法标准(GB/T

50123—2019)》^[11], 采用漏斗法和振动锤击法分别测得最大孔隙比 $e_{max} = 1.24$ 、最小孔隙比 $e_{min} = 0.61$ 。采用标准筛及激光粒度分析仪分别获得粒径大于和小于 0.075 mm 的颗粒分布, 级配曲线如图 3 所示, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为 0.051、0.132 和 0.306 mm。计算得到不均匀系数 $C_u = 6$, 曲率系数 $C_c = 1.12$ 。

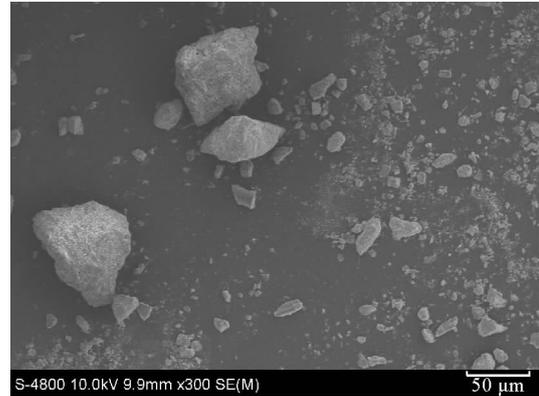


图 2 南海钙质砂扫描电镜照片

Fig.2 SEM photo of calcareous sand from the South China Sea

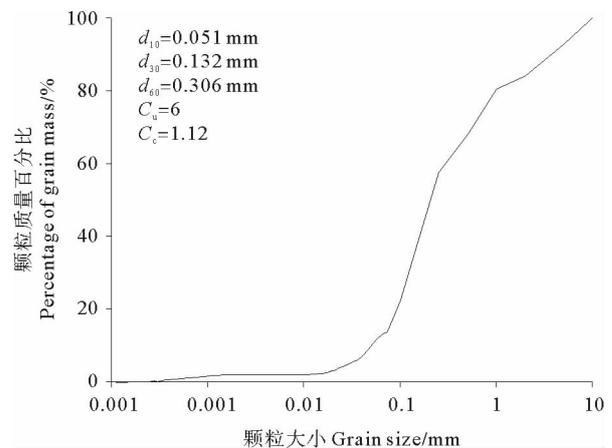


图 3 南海钙质砂初始级配曲线

Fig.3 Initial gradation curve of calcareous sand from the South China Sea

常规三轴试样的直径为 38 或 50 mm, 为防尺寸效应, 以往钙质砂试验中^[12]往往需要筛除直径大于 2 mm 的颗粒。但直径大于 2 mm 的钙质砂颗粒更易在剪切过程中发生破碎^[13]。为准确获取颗粒破碎程度, 本文采用英国 GDS 大直径三轴仪进行钙质砂试验, 该三轴仪容许试样直径 100 mm、高 200 mm, 可进行粒径 10 mm 以内砂土的三轴试验^[11], 围压量程为 4 MPa。准备试样时, 筛除粒径超过 10 mm 的颗粒。该南海钙质砂中直径大于 2 mm 的颗粒约占试样总质量的 15.5%。

2.2 试验方案

量测相对破碎率 B_r 需要拆卸并筛分试样, 以获取

级配曲线,拆样后不能再重复使用。为获得整个剪切过程中 B_r 的变化,对于某一围压下的三轴剪切过程,我们进行一组四个不同终止应变的平行试验:制备相同初始孔隙比的试样并施加相同的围压,在轴向应变 ϵ_a 分别为 3%、7%、15% 和 25% 时停止试验,筛分并绘制相应的级配曲线,根据 Hardin 的定义计算不同轴向应变对应的 B_r ,以动态监测颗粒破碎情况。根据 Hardin 对 B_r 的定义,认为粒径小于 0.074 mm 的颗粒不再继续破碎(见图 1),因此在量测试样相对破碎率时,采用的最小筛网孔径为 0.075 mm,即默认该层筛网下的颗粒在破碎过程中不发生变化,不做考虑。

钙质砂颗粒孔隙较多,为避免试验前的颗粒破碎,制样过程中不进行夯实,而是通过轻敲振动使试样初始相对密实度达到 60% 左右。随后用 CO_2 饱和试样,排出试样中的空气,再利用无气水进行水头饱和,当 B 值大于 0.95,认为试样达到饱和,随后固结和排水剪切。剪切速率取为 0.08 mm/min。试验围压分别为 100、200、500、700 和 1 000 kPa。所有试样固结前的孔隙比为 0.866。试验条件、试样固结后的孔隙比与相对密实度如表 1 所示。

表 1 试验条件及颗粒破碎结果

Table 1 Test conditions and results of particle breakage

围压 ^① /kPa	终止应 变 ^② /%	固结后 孔隙比 ^③	固结 后 ^④ D_r	相对破碎 率 ^⑤ B_r /%	塑形功 ^⑥ W_p /kPa
100	3	0.81	68.9	0.59	8.8
	7	0.81	68.9	1.60	34.0
	15	0.81	68.9	3.00	76.2
	25	0.81	68.9	4.39	128.0
200	3	0.80	70.5	0.83	11.4
	7	0.80	70.5	2.70	48.2
	15	0.79	72.1	4.70	126.3
	25	0.79	72.1	6.97	216.2
500	3	0.77	75.3	2.28	29.0
	7	0.77	75.3	4.17	107.0
	15	0.76	76.9	6.34	311.0
	25	0.77	75.3	9.47	519.0
700	7	0.77	75.3	5.40	136.0
	15	0.76	76.9	6.90	391.0
	25	0.77	75.3	10.13	634.0
	1 000	3	0.74	80.1	2.90
7		0.74	80.1	7.36	186.0
15		0.74	80.1	11.60	505.0
25		0.74	80.1	14.70	849.0

Note: ① Confining stress; ② Axial strain; ③ Void ratio after consolidation; ④ Relative compaction after consolidation; ⑤ Relative breakage; ⑥ Particle energy.

3 排水三轴试验结果分析

3.1 量测的偏应力与体变

图 4 展示了不同围压下的应力-应变关系及体变-应变关系。由图 4 可知,对于相同围压的每组四个试验,不同终止应变对应的曲线接近,说明试验结果具备可重复性,因此能用于定量讨论颗粒破碎。图 4(a)中所有试样都表现出应变软化。在图 4(b)中,围压为 100 和 200 kPa 的试样先剪缩后剪胀,与密实石英砂性质相似;当围压增加到 500~1 000 kPa 时,钙质砂始终表现为剪缩,主要原因是高围压限制了试样剪胀,同时钙质砂颗粒发生了破碎。

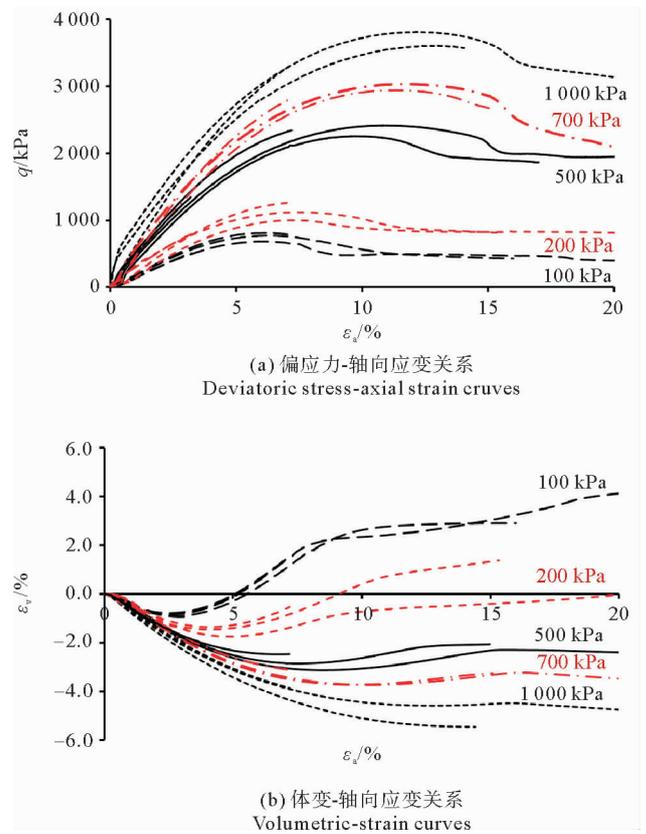


图 4 排水三轴试验结果
Fig.4 Results of drained triaxial tests

3.2 颗粒破碎分析

根据量测的粒径分析结果,分别绘制试验前和不同终止轴向应变对应的级配曲线。以围压为 100 和 1 000 kPa 试验为例,图 5 展示了剪切前后的颗粒级配曲线。随着轴向应变的增加,试样级配曲线发生上移,即出现了颗粒破碎,且颗粒破碎程度随轴向应变的增加逐渐增强,即使是偏应力达到峰值后的下降过程中(终止应变为 15% 和 25% 时),颗粒仍在继续破碎。围压越大,级配曲线上移程度越大,表明颗粒破碎程度随围压的增大而越来越显著。

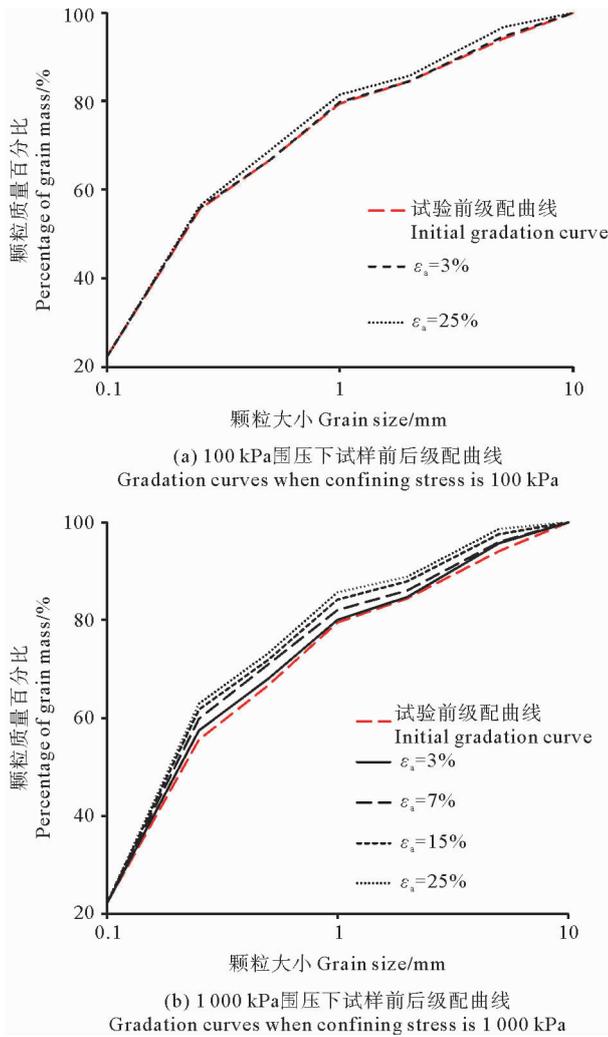


图5 试样剪切前后级配曲线

Fig.5 Grain size distributions before and after shearing

Guyon 等^[14]认为钙质砂破碎的主要形式为破裂、尖角破碎和表面研磨等,如图 6 所示。颗粒破裂造成细颗粒含量的增多和粗颗粒的减少;如果剪切后试样的粒径级配中细颗粒数量增多、粗颗粒数量基本不变,则说明破碎以尖角破碎和表面磨损为主,因为这二者仅造成粗颗粒粒径的轻微减小及细颗粒的增加^[14]。分析图 5 的级配曲线,与围压和终止应变无关,剪切后试样中 5~10 mm 的粗颗粒质量总是减小,而 0.5~0.1 mm 的细颗粒质量增多,表明剪切中颗粒破碎形式以破裂为主,尖角破碎和表面研磨相对次要。这是因为所用试样的粗颗粒形状不规则、表面粗糙且孔隙丰富(见图 2 所示的试样 SEM 照片)。此外,颗粒的形状特征也会对破碎产生影响,不规则形状的颗粒(如棒状、枝状)更易发生破裂。

基于 Hardin 提出的相对破碎率 B_r 及试验前后的级配曲线,计算每个终止轴向应变下的 B_r ,并根据式(1)计算相应的塑性功 W_p ,见表 1。结果表明:相同围压下, B_r 随轴向应变的增加而增加,当 ϵ_a 达到 15%后

颗粒破碎现象更显著。当围压小于等于 200 kPa 及 ϵ_a 小于 15%时,颗粒破碎几乎可以忽略,但随着围压的增大,即使应变较小,颗粒破碎也变得显著,当围压为 1 000 kPa、轴向应变为 25%时, B_r 达到 14.7%。 W_p 的计算结果表明,当 ϵ_a 小于 15%时, W_p 的发展较缓慢,随着剪切的持续进行, W_p 迅速增加,且 W_p 的变化趋势随围压的增加而增大,证明围压越大,剪切时产生的塑性功越大。

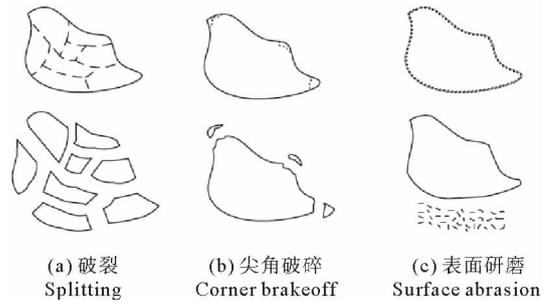


图6 几种典型颗粒破碎类型

Fig.6 Typical types of particle breakage

依据计算得到的不同围压和终止轴向应变对应的 W_p 和 B_r ,按照式(2)的形式进行拟合,确定式(2)中的参数 $\alpha=1\ 488.7$,见图 7。

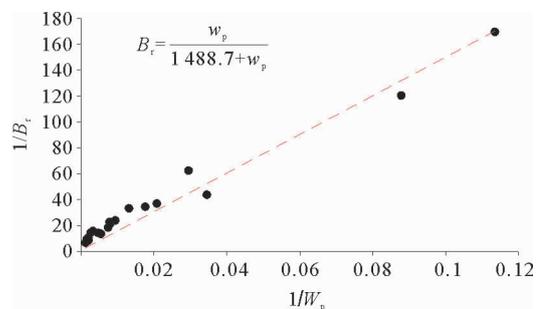


图7 相对破碎率与塑性功的关系

Fig.7 The relationship between relative breakage index and plastic work

4 SIMSAND 模型模拟精度分析

采用通用有限元软件 Abaqus 模拟三轴试验,通过用户子程序 VUMAT 定义 SIMSAND 模型。SIMSAND 模型共包含 24 个参数,依据参数确定方式,可分为三类:

(1) G_0 、 K_0 和 n 为弹性参数, p_{∞} 和 λ 为压缩参数,均通过等向压缩试验获得。图 8 比较了等向压缩试验与数值模拟结果,二者基本吻合。

(2) e_{ref0} 、 λ 、 ξ 和 φ 为临界状态参数,通过高终止应变(此处取 25%)的三轴试验对应的临界状态结果获

得。

(3) k_p 、 A_d 、 n_p 和 n_d 为剪切-滑动参数, a 、 e_{cuf} 和 ρ 为颗粒破碎参数, 通过拟合三轴试验数据获得^[6]。

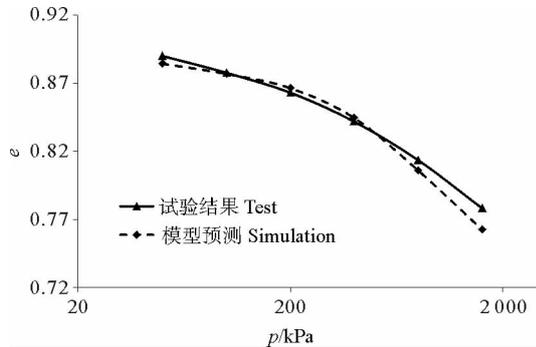


图 8 等向压缩试验结果与模拟对比

Fig.8 Comparison between isotropic compression test and numerical simulation

表 2 SIMSAND 模型参数

Table 2 Parameters of SIMSAND model

	本构参数 Parameters	本文取值 Value
弹性参数 Elastic parameters	G_0	90
	K_0	150
	n	0.667
压缩参数 Compression parameters	p_{c0}	10 000
	λ'	0.25
临界状态参数 CSL parameters	e_{ref0}	1.01
	λ	0.08
	ξ	1
剪切-滑动参数 Shear-sliding parameters	φ	39
	k_p	0.003
	A_d	0.5
颗粒破碎参数 Grain breakage parameters	n_p	3
	n_d	3.1
	a/kPa	1 488.7
	e_{cuf}	0.5
	ρ	0.8

最终标定的本构模型参数见表 2, 图 9 对比了试验结果与有限元预测。在图 9(a)中, 偏应力随轴向应变的变化趋势基本一致, 预测与试验结果相差较小。围压为 100 和 200 kPa 时, 模型能够较好地预测峰值偏应力大小及其对应的轴向应变。围压为 500~1 000 kPa 时, 虽然预测的偏应力峰值与试验结果很接近, 但预

测其对应的轴向应变明显小于试验值。以 1 000 kPa 围压为例, 预测和试验的峰值应变分别为 7.7% 和 12.1%。

由图 10(b)可得, SIMSAND 模型对于体应变的预测精度较低。即使不考虑颗粒破碎的砂土本构模型, 很多时候也是对强度的模拟精度高、对体变的模拟精度差^[15]。

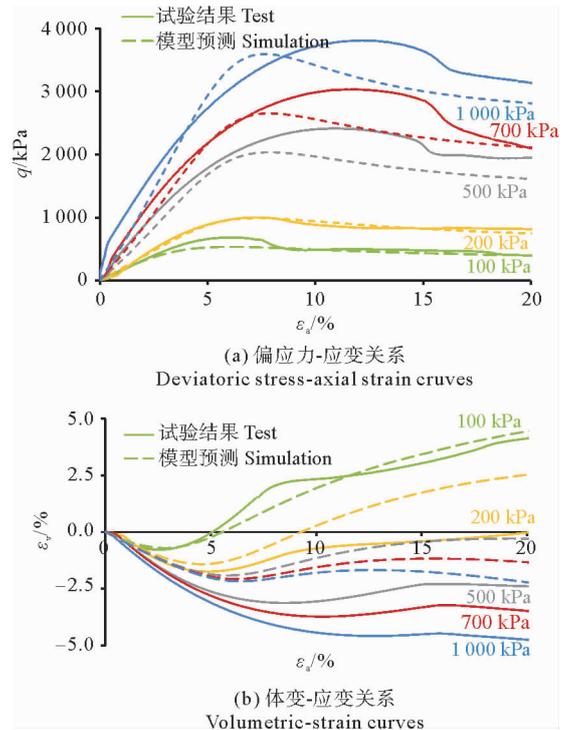


图 9 排水条件下模型预测结果与试验结果的对比

Fig.9 Comparison between simulations and experimental results for drained tests

图 10 为部分围压下相对破碎率 B_r 的试验与预测值, 可以看出按照式(2)拟合得到的破碎参数 a 并不能准确预测 B_r 。当轴向应变 ϵ_a 大于等于 15% 时, B_r 被高估, 且围压越大, 高估越明显。当围压为 1 000 kPa, ϵ_a 为 25% 时, 高估约 105%。当 ϵ_a 不超过 7% 时, 预测的 B_r 低于试验值; 以 1 000 kPa 为例, 试验中 ϵ_a 为 7% 时产生的 B_r 比 3% 的高 4.46%, 但式(2)预测 B_r 的变化仅有 3.8%。这说明式(2)并不能合理描述 B_r 发展的全过程。而 B_r 又是量化颗粒破碎程度的关键参数, 因此以下将提出新的 B_r 表达式, 以优化强度和变形预测。

5 相对破碎率 B_r 公式的修正

为更好地预测 B_r 的发展规律, 根据三轴试验结果, 将式(2)修正为:

$$B_r = \frac{W_p}{0.526\beta + 4.21W_p} \quad (7)$$

参数 β 拟合为 3 800,模型预测与试验结果对比如图 11所示。图 11(a)显示修正 B_r 对围压为 100 ~ 700 kPa 时的应力-应变关系影响不大,但围压为 1 000 kPa 时,数值模拟获得的偏应力更接近试验结果,且土体的应变软化与峰值的提前现象有所改善,以 1 000 kPa 为例,预测的峰值应变为 8.5%,与试验结果的差值由修正前的 4.4%变为 3.6%。图 11(b)显示修正 B_r 对体变的趋势基本无影响。

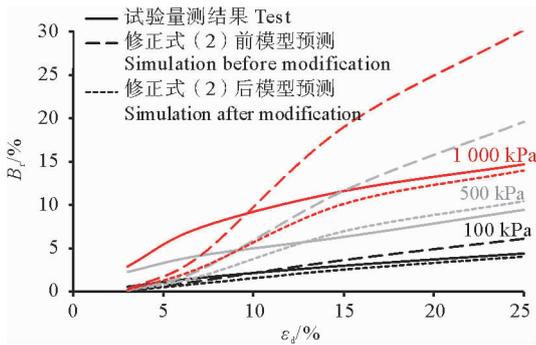


图 10 试验、预测与修正后 B_r

Fig.10 Measured and predicted relative breakage indexes

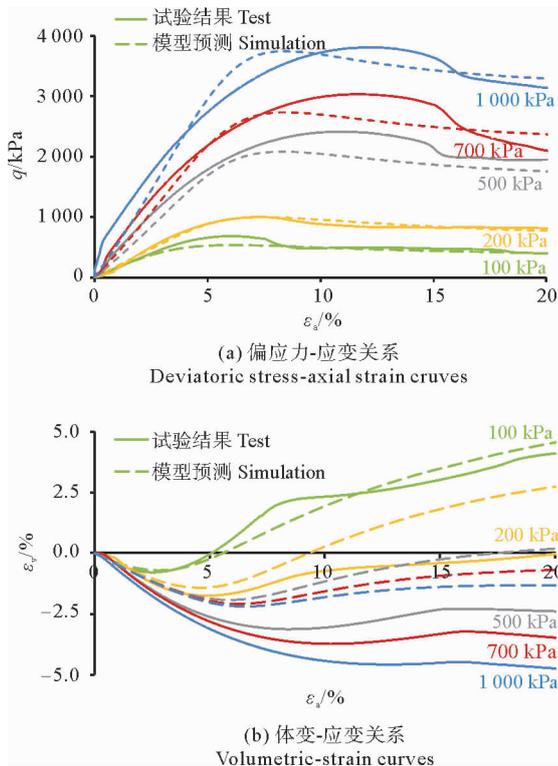


图 11 修正后模型预测结果与试验结果对比

Fig.11 Comparison between experimental results and simulations by modified model

参数 A_d 可以改变峰值应力和软化出现时的轴向应变,增大 A_d 的取值,当偏应力达到峰值时,对应的轴向应变会增大,但是 A_d 同时影响体变的趋势,如果企

图进一步缩小预测和试验的峰值应变差距,体变预测将出现定性错误。总体来说,上述参数取值已是相对最优选择。

利用式(7)预测的 B_r 见图 10,以 100,500 和 1 000 kPa 为例:轴向应变不超过 7%时,式(7)略低估 B_r 的值,但轴向应变大于 15%后,预测与试验结果接近,说明式(7)能更好地预测 B_r 的发展规律。式(2)的物理意义为:当 W_p 趋近于无穷大时, B_r 接近 1,这符合颗粒破碎的定义,当围压和轴向应变足够大时,剪切过程中产生的塑性功趋近无限大,颗粒会完全破碎。但 Yin 等构造的式(2)针对石英砂,且三轴试验围压在 2.1 ~ 42 MPa 的宽广范围内^[6],难以准确捕捉围压较小时的破碎情况。式(7)更适合低围压下就发生颗粒破碎的钙质砂。

6 结论

通过三轴排水试验和有限元模拟,探索了南海钙质砂颗粒破碎对土体强度和变形的影响,得到如下结论:

(1)初始相对密度约为 60%的钙质砂,在围压为 100~1 000 kPa 的三轴排水剪切中总是表现为应变软化,峰值偏应力随围压增大;当围压为 100 和 200 kPa 时,试样先剪缩后剪胀,当围压不小于 500 kPa 时,试样始终表现为剪缩。

(2)相同围压下,颗粒破碎程度随轴向应变增加,且围压越大颗粒破碎越明显。当轴向应变小于 7%时,颗粒破碎不明显,且颗粒破碎随轴向应变增长较慢;当轴向应变大于等于 15%后,颗粒破碎逐渐显著,且颗粒破碎随轴向应变增长的速度增加。

(3)提出了南海钙质砂相对破碎率表达式,适用范围为围压 100~1 000 kPa。提出的表达式能更好地预测偏应力峰值出现时的应变,随着围压越高,预测效果越好。

参考文献:

[1] 吕海波,汪稔. 钙质土破碎原因的细观分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 890-892.
Lv H B, Wang R. Preliminary mesoscopic analysis on factors of breakage in calcareous soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 890-892.

[2] Coop M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Géotechnique, 1990, 40(4): 607-626.

[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.
Liu C Q, Wang R. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. Rock And Soil Mechanics, 1998, 19(1): 32-37.

[4] 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.
- Zhang J M, Jiang G S, Wang R. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 2043-2048.
- [5] Hardin B O. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [6] Yin Z Y, Hicher P Y, Dano C, et al. Modeling mechanical behavior of very coarse granular materials[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, 143(1): C4016006.
- [7] Wu Z X, Yin Z Y, Jin Y F, et al. A straightforward procedure of parameters determination for sand: A bridge from critical state based constitutive modelling to finite element analysis[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23(12): 1444-1466.
- [8] Hu W, Yin Z Y, Dano C, et al. A constitutive model for granular materials considering grain breakage[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(8): 2188-2196.
- [9] Jin Y F, Wu Z X, Yin Z Y, et al. Estimation of critical state-related formula in advanced constitutive modeling of granular material[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(6): 1329-1351.
- [10] Yin Z Y, Xu Q, Hicher P Y. A simple critical-state-based double-yield-surface model for clay behavior under complex loading[J]. *Acta Geotechnica*, 2013, 8(5): 509-523.
- [11] GB/T 50123-2019. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2019.
- GB/T 50123-2019. Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: Ministry of Water Resources of the PRC, 2019.
- [12] 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 J R, Hua C, Luo M X, et al. Behavior of particle breakage in calcareous sand during drained triaxial shearing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9): 1593-1602.
- [13] 王晓丽, 裴会敏, 王栋. 未胶结钙质砂静力和循环强度的单剪试验研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(6): 124-129.
- Wang X L, Pei H M, Wang D. Static and dynamic strengths of uncemented calcareous sand from simple shear tests[J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(6): 124-129.
- [14] Wang G, Wang Z, Ye Q, et al. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(2): 321-334.
- [15] 袁庆盟, 孔亮, 赵亚鹏. 考虑水合物填充和胶结效应的深海能源土弹塑性本构模型[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2304-2312.
- Yuan Q M, Kong L, Zhao Y P. An elastoplastic model for energy soils considering filling and bonding effects[J]. *Rock And Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2304-2312.

A Modified Formula for Relative Breakage Rate of Calcareous Sand Based on Large-Scale Triaxial Tests

Wang Xiao¹, Feng Xiuli¹, Wang Dong^{2,3}, Pei Huimin^{2,3}

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Institute of Marine Geotechnical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Due to the biological origin and its irregular shape and inner pore, particle breakage generally occurs in calcareous sand. The isotropic compression test and drained triaxial test for natural calcareous sand from an island in the South China Sea were carried out, and the relative breakage index was measured. Results show that the strength of calcareous sand increases gradually with the increase of shear strain and then strain-softening was appeared obviously after reaching the peak deviator stress, which was increased gradually with the increase of confining pressure. Particle breakage occurs gradually during shearing, and the greater the confining pressure, the greater the degree of breakage. The SIMSAND model which can consider particle breakage was used to simulate drained triaxial test, and the evolution of relative breakage index is modified. By comparing the experimental results with the simulations, the limitations of SIMSAND model in describing calcareous sand are verified. Therefore, based on the experimental results, the SIMSAND model is optimized, and a formula suitable for predicting the relative breakage of particles under the confining pressure of 100~1 000 kPa is proposed, and the optimization shows that the optimized formula can predict the development trend of axial strain of peak stress and relative breakage better.

Key words: calcareous sand; large-scale triaxial test; particle breakage; constitutive model; grain gradation