

DOI: 10.11779/CJGE20231224

基于 CT-三轴试验的珊瑚砂试样细观孔隙结构演化特性

胡丰慧¹, 方祥位^{*1}, 申春妮², 姚志华³, 陈正汉⁴

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆 401331; 3. 空军工程大学机场建筑工程系, 陕西 西安 710038; 4. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401311)

摘要: 孔隙特征及受荷过程中的演化特性对珊瑚砂的物理力学特性有重要影响。利用自主研发的高压土工 CT-三轴仪, 在保证试样常规尺寸大小的前提下, 对珊瑚砂进行围压为 100~1600 kPa 的三轴固结排水试验, 同时在加载过程中对珊瑚砂试样进行实时 CT 扫描, 根据 CT 图像分析孔隙形状参数球圆度和各向异性, 利用数字体积关联法 (DVC) 分析珊瑚砂的孔隙结构演化特性。结果表明, 在围压和颗粒破碎的影响下, 加载过程中珊瑚砂试样的孔隙结构演化大致可分为 3 段, 即加载端部位 (I 段) 主要受到压力作用, 颗粒发生破碎和滑动引起孔隙率减小, 局部应变主要为负应变即压应变; 试样中部及以下部位 (II 和 III 段), 低围压时颗粒滑移孔隙外扩宏观上表现为剪胀现象, 局部应变呈现正应变即拉应变, 高围压和颗粒破碎会抑制剪胀现象; 较好地解释了低围压时砂样的剪切带常发生在试样中间及偏下部分的原因。试样加载过程中孔隙形状随围压增大越来越接近球形和趋于各向同性; 沿竖直方向, 试样的变形量在围压约束下逐渐减小。试样的孔隙体积和局部应变在加载过程中逐渐稳定, 符合砂土的临界状态理论。研究成果对深入认识珊瑚砂的工程力学特性具有重要意义。

关键词: 珊瑚砂; CT 扫描; 细观孔隙; 演化; 数字体积关联法 DVC

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)05-0936-12

作者简介: 胡丰慧(1997—), 女, 博士研究生, 主要从事土体细观力学特性与数值模拟等方面的科研。E-mail: 17863958556@163.com。

Evolution characteristics of mesoscopic pore structure for coral sand samples based on CT-triaxial tests

HU Fenghui¹, FANG Xiangwei¹, SHEN Chunni², YAO Zhihua³, CHEN Zhenghan⁴

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3. Department of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 4. Department of Military Installation, Army Logistics University, Chongqing 401311, China)

Abstract: The evolution characteristics of pore structure during loading have an important influence on the mechanics of coral sand. Using the self-developed high-pressure geotechnical CT-triaxial apparatus, the triaxial consolidated tests on the coral sand with a confining pressure of 100~1600 kPa are carried out under the premise of ensuring the conventional size of samples. The real-time CT scanning of the coral sand samples is carried out during loading. The shape parameters of pores like sphericity and anisotropy are analyzed according to the CT images, and the evolution characteristics of pore structure for the coral sand are analyzed by the digital volume correlation method. The results show that the evolution of pore structure for coral sand samples during the loading process can be roughly divided into three stages under the influences of confining pressure and particle breakage. That is, the loading end (section I) is mainly affected by compression, the porosity decreases because of the particle breakage and movement, and the local strain is mainly negative. While in the middle and lower parts of the samples (sections II and III), the combination of slipping particles and increasing porosity macroscopically shows dilatation at low confining pressure, and the local strain shows positive strain. However, the high confining pressure and particle breakage inhibit dilatation. It is explained that the shear zone of the sand samples often occurs in the middle and lower parts of the samples at low confining pressure. During loading, the pore shape of the samples becomes closer to spherical and isotropic with the increase of confining pressure, and the deformation of the samples increases with the axial strain and gradually decreases under the constraint of high confining pressure. The pore volume and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51978103); 重庆英才创新创业示范团队项目 (cstc2024ycjh-bgzxm0012)

收稿日期: 2023-12-14

*通信作者 (E-mail: fangxiangwei1975@163.com)

local strain of the samples are gradually stabilized during loading. The research results are of great significance for understanding the engineering mechanical properties of the coral sand.

Key words: coral sand; CT scanning; mesoscopic pore structure; evolution; digital volume correlation

0 引言

随着岛礁建设工程的发展,珊瑚砂工程力学特性及地基处理研究成为热点。珊瑚砂主要由珊瑚碎屑和其它海洋生物碎屑组成,碳酸钙含量大都在90%以上,也称之为钙质砂^[1]。与石英砂相比,珊瑚砂具有颗粒形状不规则、富含内孔隙、易破碎和强度低等特点^[2-4]。孔隙特征及受荷过程中的演化特性对珊瑚砂的物理力学特性有重要影响,研究珊瑚砂三轴加载过程细观孔隙特征演化对深入认识珊瑚砂的工程力学特性具有重要意义。

土体孔隙特征研究可通过土力学试验、光学仪器 and 物理试验等实现。利用压汞试验、核磁共振试验和气体吸附法等可间接获得土体内部孔隙的大小和分布情况。侧限压缩试验和三轴试验等可通过试样体积变化等计算出加载过程中孔隙比的变化。陈海洋^[5]、蒋明镜等^[6]和周博等^[7]分别借助显微镜、扫描电镜(SEM)与uCT技术等直接观测了珊瑚砂的内孔隙特征,但上述试验均无法反映加载过程中孔隙特征的演化。

为了研究岩土体受荷过程中孔隙等内部结构变化特性,学者们利用光学成像技术结合传统的岩土仪器对土的细观结构进行检测,例如激光扫描技术、核磁共振成像技术、数字成像技术和计算机断层扫描成像技术(computed tomography, CT)等,取得了诸多成果^[8]。由于CT技术具有可实现实时原位任意断面的无损检测,分辨率较高等优势,目前广泛应用于土体加载过程中内部细观结构的测试^[8-9]。

学者们针对不同的岩土材料研制出能结合CT扫描技术的试验设备,对常规三轴仪进行改造并与CT机配套的CT-三轴仪是其中的代表。早在1984年,CT技术就被用于三轴试验土体剪切带的密度测试和分析^[10]。Desrues等^[10]利用工业CT扫描系统实时观测砂土在三轴试验过程中的细观结构变化。李晓君等^[11]利用可同步进行CT扫描的三轴仪,对路基填土进行了单轴压缩实验。陈正汉等^[12]为研究非饱和土研发了用于CT系统扫描的非饱和土三轴仪,之后对其进行改进研制出了与CT机配套的多功能土工三轴仪。早期与CT机结合的三轴仪由于压力室材料的限制和传统轴力加载系统压力室外部加载反力架对扫描造成影响等因素,存在压力范围较低和扫描图像清晰度较低等缺点,难以观测土颗粒和孔隙的微观结构。

为研究土颗粒和孔隙的微观力学行为,Oda等^[13]利用显微CT成像技术实现了清晰显示砂颗粒的微观结构,这是早期工业CT无法实现的。许多学者开始将显微CT扫描系统与微型三轴试验仪(试样尺寸多为8 mm×16 mm)结合对砂土的内部结构进行研究。Matsushima等^[14]最先利用X射线显微成像技术实时观测砂颗粒在三轴试验中的位移变化,Hall等^[15]和Karatzas等^[16]借助于显微CT成像技术,根据砂颗粒在三轴试验中的CT图像,分析砂颗粒的移动、旋转、破碎及剪切带的形成过程。对于珊瑚砂,Cheng等^[17]利用微型三轴试验装置,借助显微CT成像及图像处理分析技术,实现了珊瑚砂在三轴剪切条件下微细观特性的无损检测,对珊瑚砂颗粒在加载过程中的颗粒尺寸、颗粒形状和局部应变等进行分析。然而,微型的三轴试验仪虽然能实现对砂样精确的微细观结构观测,由于微型试样没有达到常规三轴试样尺寸的标准,具有应力-应变曲线和内摩擦角与常规试验存在偏差等局限性。

微CT扫描技术由于试样尺寸的限制存在物理局限性,常规大小的试样得到的CT扫描图像虽然精度较低,但现有的后处理软件如Image J, Avizo和VG studio Max与后续计算机编程可以解决这一问题。例如,Zhang等^[18]借助Avizo精确地提取了岩石孔隙结构,Charalampidou^[19]等对多孔砂岩进行三轴压缩试验,借助声波探测、CT扫描、电子显微镜等多种试验技术和计算机编程图像处理,探索了剪切带与压实带变形、颗粒破碎、孔隙率减少等在多尺度上的形成发展规律。

目前对于珊瑚砂受荷过程中的微细观特性研究主要集中在微观颗粒力学特征方面^[17],而珊瑚砂的孔隙特征及加载过程中的演化对其力学特性有重要影响,但加载过程中珊瑚砂的细观孔隙结构变化研究还不够深入。本文利用自主研发的高压CT-三轴仪^[20],在保证试样三轴常规尺寸前提下,对珊瑚砂进行了一系列从低围压(100 kPa)到高围压(1600 kPa)的三轴固结排水试验,同时利用CT机对加载过程中不同应变的珊瑚砂试样进行实时扫描,分析珊瑚砂加载过程中孔隙特征演化特性及与宏观力学特性的关系。

1 试验方法

1.1 珊瑚砂

珊瑚砂取自中国海域某岛礁,对原材料进行水洗及烘干,并将粒径大于 2 mm 的颗粒进行剔除。参考《土工试验方法标准》^[21]进行试验,为便于控制试验条件和结果分析,使用筛孔直径分别为 2, 1.0, 0.5, 0.25, 0.1, 0.075 mm 的特制筛进行筛分,将筛分后的砂样按照筛孔大小进行分筛并隔离保存。图 1 为配制好的试验用珊瑚砂颗粒级配曲线,该级配下不均匀系数 $C_u=5$, 曲率系数 $C_c=1.25$, 属于良好级配砂;表 1 为珊瑚砂物性试验结果。

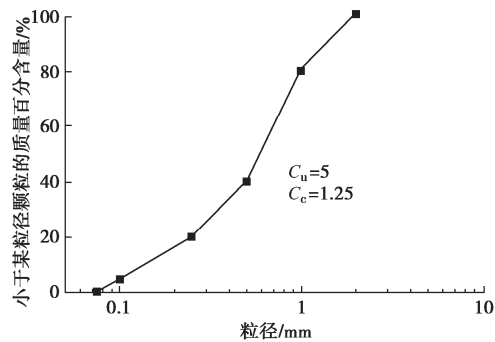


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve

表 1 珊瑚砂物性试验结果

Table 1 Results of physical tests on coral sand

最大孔隙比 e_{\max}	最小孔隙比 e_{\min}	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	颗粒相对密度 G_s	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
1.208	0.815	5	1.25	2.76	31.56

1.2 试验方案

为了研究珊瑚砂加载过程中孔隙特征演化及其对力学特性的影响,设置珊瑚砂的相对密度为 0.5 (中密),围压为 100, 200, 400, 800, 1600 kPa, 进行固结排水三轴试验。加载过程中每隔 4%轴向应变进行一次全断面扫描,直至轴向应变达到 20%。

(1) 试样制备

根据试样相对密度称取所需质量的珊瑚砂,由于珊瑚砂为松散状态,为保证试样均匀性和防止扰动,将珊瑚砂均分成 5 份分别加入等量蒸馏水搅拌均匀,分 5 层倒入制样器,按试样高度分层轻微击实,每层击实至指定高度;制成直径为 3.91 cm、高为 8 cm 的含水率为 20%标准三轴试样,制好的试样放入-20℃冰箱冷冻 24 h 后备用。等冻结后将试样拿出装入护养器中,冻结结束后安装到压力室底座。

(2) 试样加载

压力室充满水后加预压 20 kPa, 然后利用反压进行渗透饱和。当渗透饱和系数 $B>0.95$ 时,认为试样达到饱和。达到要求的饱和度后,开始固结试样至体积变化曲线接近稳定后结束。固结完成后,设置剪切

速率为 0.01 mm/min 进行剪切试验直至轴向应变达到 20%^[25]。

(3) 试样扫描

扫描设备的最大 X 线球管电流为 345 mA, 额定 X 线电压为 130 kV;扫描长度可达 1530 mm,扫描层厚 0.6~19.2 mm,扫描时间最大 100 s;重建层厚 0.6~10 mm,重建视野 5~50 cm。试验系统如图 2 所示。本次扫描图像为整个试样的横断面,扫描间隔 0.6 mm,扫描切片数约 120 张,扫描时轴向应变分别为 0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20%。扫描之前为确保 X 射线光源对准试样,需要移动板床从而调整装置的位置。

各组试验完毕后,利用筛析法对试样进行颗粒粒径分析,以获取颗粒破碎后的粒径分布,然后采用采用 Hardin^[22]提出的相对破碎率 B_r 作为表征颗粒破碎量的指标:

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (1)$$

式中: B_t 为总破碎量,即试样破碎前后的粒径分布曲线与粒径为 0.074 mm 垂直线所围成的面积之差; B_p 为破碎势能,即初始粒径的分布曲线与粒径 0.074 mm 垂直线所围成的区域面积。



图 2 试验装置

Fig. 2 Test equipment

2 CT 图像处理方法

2.1 图像处理流程

扫描的 CT 图像为灰度图像,精度约为 $0.12 \times 0.12 \times 0.7$ (voxel size),灰度分布在 0~255,如图 3 所示。从图 3 中可以明显看出灰度值分布由峰谷的阈值分成两个区域,孔隙和珊瑚砂颗粒,珊瑚砂区域的灰度值高于孔隙区域。图像处理后的像素为 $0.08 \times 0.08 \times 0.08$ (voxel size),如图 4 所示。图 4 中白色 (灰度值>75) 区域为颗粒,黑色部分为孔隙,由于试样质量与全局阈值成正比,获得的图像需要进一步利用中值滤波降噪和阈值分割^[23]。阈值分割时,由于加载过程中的试

样质量不变, 可根据计算的孔隙比将颗粒与孔隙分割出来进行分析。将分割出的孔隙分离后利用 Label 算法, 统计出每一个孔隙的形状系数、孔径、各向异性和空间分布等特征^[18], 分析加载过程中的孔隙演化特性, 具体流程如图 4 所示。

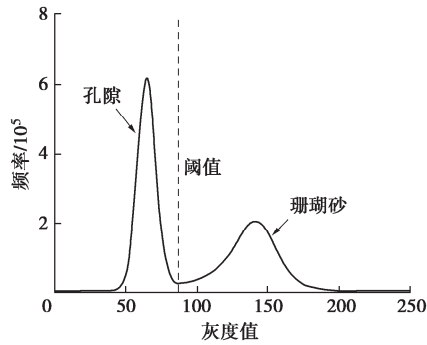


图3 灰度值分布

Fig. 3 Distribution of intensity value

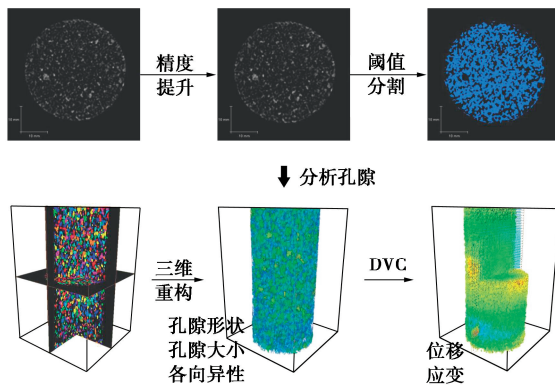


图4 孔隙处理流程

Fig. 4 Process of pores

孔隙形状系数球圆度 S 定义为^[17]

$$S = \frac{(36\pi V^2)^{1/3}}{A} \quad (2)$$

式中: V 为孔隙体积; A 为孔隙表面积。当 $S=1$ 时, 形状为完美球体。

各向异性反映了物质在不同方向的差异性。利用灰度共生矩阵可以获得图像的灰度分布, 利用协方差矩阵, 假设完美的球体是各向同性, 在三维图像中测量一个物体与球形的偏差值即可表示该物体的各向异性^[24]。对某物质 $I(X, Y, Z)$, 先计算其 3 个坐标方向的一阶惯性矩 M_{1x} , M_{1y} 和 M_{1z} , 再由一阶惯性矩推导得到二阶惯性矩。

从而, 表示物质 $I(X, Y, Z)$ 在各个方向缩放程度的协方差矩阵可由其二阶惯性矩表示为

$$M = \begin{bmatrix} M_{2xx} & M_{2xy} & M_{2xz} \\ M_{2xy} & M_{2yy} & M_{2yz} \\ M_{2xz} & M_{2yz} & M_{2zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

物质 I 的主方向为主惯性轴方向, 表示为上述协方差矩阵最大特征值 λ_{\max} 的特征向量。物质 I 的次方向为次惯性轴方向, 表示为上述协方差矩阵最小特征值 λ_{\min} 的特征向量。本文中的各向异性可表示为

$$F = \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \quad (4)$$

当 $0 < F < 1$, 物质 I 为各向异性; 当 $F=1$, 物质 I 为各向同性。

2.2 数字体积关联法 DVC

数字体积关联法 DVC 通过跟踪变形前后体图像中的相同点来计算 3D 位移矢量, 对位移矢量进行差分获得 3D 应变场, 从而可以得到物体内部的 3D 变形信息^[25]。利用该方法对滤波处理后的图像进行计算得到相位点的位移矢量, 对中值滤波处理后的图像利用 DVC 计算相位点的位移矢量, 之后关联到分割出的孔隙就可以获得每个孔隙的位移矢量变化。DVC 的原理主要是精确跟踪参考体像素 $f(x, y, z)$ 内各离散点在变形后体像素中的位置来计算各点的 3D 位移矢量, 需要以某体素点 $p(x, y, z)$ 为中心取一立方体小方块通过跟踪参考图像中选定的参考子体块在变形后像素中的精确位置来确定该子体块中心点的位移分量 u, v, w ^[16]。对某一 $n=(2M+1)(2M+1)(2M+1)$ 体素的参考体块, 可通过在变形后体像素中体素移动的位置, 寻找与其灰度相似程度最大的目标字体块来确定其整体素位移。变形前后子体块的相似程度可以用归一化互相关系数 (NCCC)^[25]表示:

$$C(g) = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i, z_i) - f_m][g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0) - g_m] \right\} / \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i, z_i) - f_m]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n [g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0) - g_m]^2} \right\} \quad (5)$$

式中: $f(x_i, y_i, z_i)$ 和 $g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0)$ 分别为变形前后参考子体块中的第 i 点的灰度, f_m 和 g_m 分别为参考和目标子体块的平均灰度值, u_0, v_0, w_0 为参考子体块中心点的位移。当 $C(g)=0$ 时, 两者线性相关; 当 $C(g)=1$ 时, 两者不相关。

3 结果与分析

3.1 应力-应变关系和颗粒破碎

珊瑚砂的偏应力-轴向应变-体应变关系曲线如图 5 所示。当围压较低 (100 kPa) 时, 中等密实的珊瑚砂试样偏应力-轴向应变曲线表现为应变弱软化型, 偏应力随轴向应变先增大, 达到峰值后轻微减小, 体积也随轴向应变先减小后轻微增大, 砂样先出现剪缩

后发生轻微剪胀。当围压在 200~800 kPa 时呈理想塑性, 偏应力随轴向应变增大后趋于稳定, 随围压增大, 达到理想状态时的轴向应变增大, 围压为 200, 400, 800 kPa 时试样进入理想塑性的轴向应变分别为 4%, 8%, 14%。当围压较高(1600 kPa)时表现为应变硬化型, 偏应力随轴向应变持续增大, 砂样体积随轴向应变一直减小, 表现为持续剪缩。珊瑚砂的偏应力-应变关系主要由颗粒滑动摩擦和颗粒破碎决定。在低围压情况下, 主要由颗粒的滑动摩擦控制, 中等密实的珊瑚砂颗粒在加载过程中滑动变得逐渐密实, 出现轻微剪缩现象, 应力曲线达到峰值, 即应力达到极限状态, 随后颗粒发生重新排列变得逐渐松散, 出现轻微剪胀现象, 应力曲线趋近软化; 在高围压情况下, 主要由颗粒破碎控制, 高压抑制了土体的剪胀导致应变-软化趋势减弱, 颗粒破碎导致承受应力颗粒间接触点的数目增多, 从而增强土体的剪缩, 颗粒破碎使应力曲线达不到极限峰值状态, 使曲线趋近硬化^[2-3]。

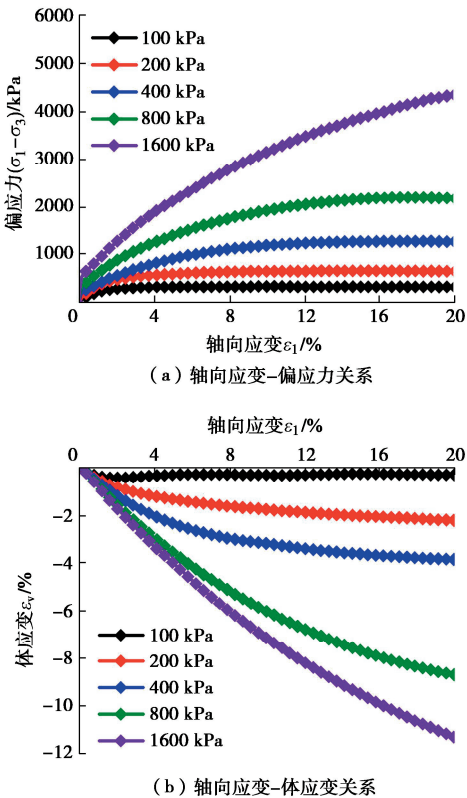
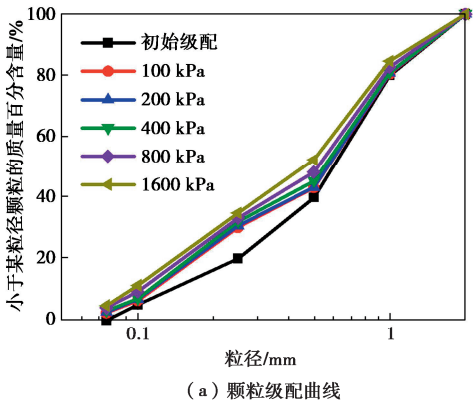


图5 应力-应变关系

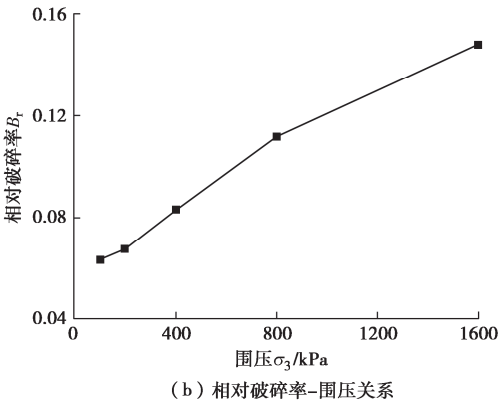
Fig. 5 Stress-strain relationship

珊瑚砂的颗粒破碎情况曲线如图 6 所示。围压的增大使颗粒级配曲线整体向左偏移, 粒径小于 0.5 mm 的颗粒含量随围压增大而明显增多。根据式 (1) 计算可得相对破碎率与围压的关系, 相对破碎率随围压增大而增大, 但其增大趋势即斜率逐渐平缓。围压越高导致的颗粒破碎越多进一步表明了珊瑚砂受颗粒破碎影响, 砂颗粒逐渐剪缩, 应力-应变曲线从应变软化向

理想塑性最终向应变硬化过渡。



(a) 颗粒级配曲线



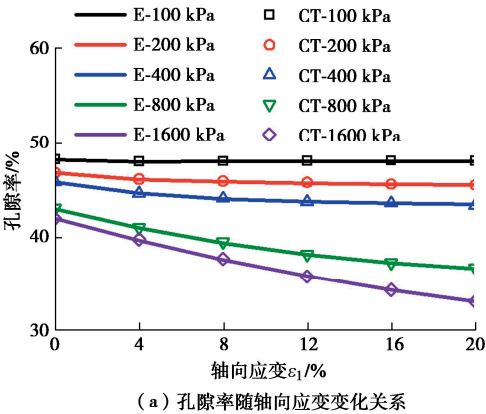
(b) 相对破碎率-围压关系

图6 颗粒破碎情况

Fig. 6 Particle breakage

3.2 孔隙分布和形状演化

根据体应变、孔隙体积以及孔隙率对应关系以及初始孔隙体积可以得到各试样剪切过程中的孔隙率。将由 CT 图像分析得出的整体孔隙率与试验计算的整体孔隙率进行对比, 如图 7 所示, 两者结果基本一致, 验证了图像分析的准确性。孔隙率随轴向应变变化如图 7 (a) 所示, 在排水剪切过程中, 当围压较低(100 kPa)时, 试样整体孔隙率随轴向应变增大先轻微减小后轻微增大; 随围压增大, 试样整体孔隙率随轴向应变增大逐渐减小, 且随围压增大这种减小趋势越来越明显。孔隙率随围压变化如图 7 (b) 所示, 当轴向应变相同时, 随围压增大孔隙率减小的趋势变缓; 但轴向应变越大, 孔隙率减小的斜率逐渐增大。



(a) 孔隙率随轴向应变变化关系

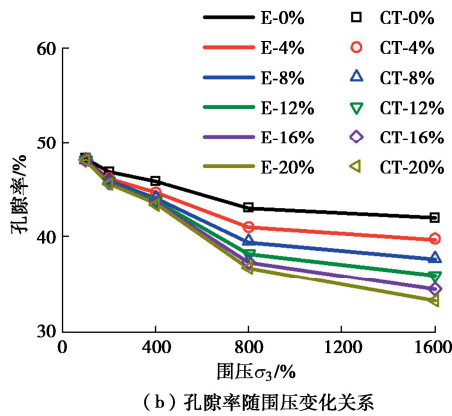


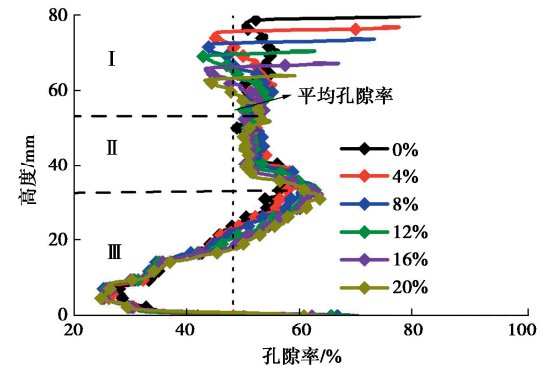
图7 整体孔隙率变化关系

Fig. 7 Variation of overall porosity

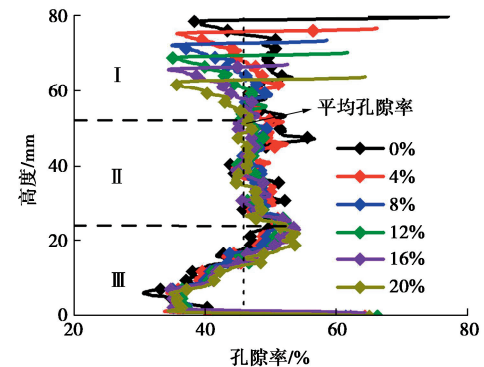
为分析试样孔隙率在不同位置的分布情况,在试样扫描的CT图像利用阈值分割出孔隙后,对试样的孔隙率沿高度方向分布情况进行统计如图8(a)~(e)所示,高度为40 mm时孔隙率随围压变化如图8(f)所示。由图8(a)~(e)可知,由于砂土成样的不均匀性,同一试样不同高度处的孔隙率差异较大,试样在剪切过程中孔隙率随高度变化可大致分为I, II, III3段。第I段是靠近上部加载端的部分;当围压相同时,此段孔隙率随轴向应变增大逐渐减小;随着围压增大,此段区域逐渐增大。第II段是中间部位,孔隙率变化不明显,但当围压增大到800 kPa时,此段区域孔隙率开始随轴向应变增大而减小。第III段位于试样底部,孔隙率随轴向应变增大逐渐增大;随着围压增大,这一区域逐渐减小。孔隙率随高度呈现上述变化规律主要原因是试样在加载过程中,加载端(第I段)主要受到压力作用,颗粒发生滑动和破碎,重新排列变得紧密表现出剪缩现象,孔隙率随轴向应变增大逐渐减小。但是发展到中间部位及以下(第II,第III段)时,围压较低时(100 kPa),随轴向应变增大,孔隙率的增大趋势逐渐增加,试样颗粒向外围滑动和扩散表现剪胀现象。但是随着围压增大,颗粒破碎增多抑制颗粒向外滑移,孔隙率随轴向应变增大而增大的区域越来越小,剪胀现象逐渐消失。由图8(f)可知,孔隙率随围压在高度40 mm时变化情况与整体孔隙率随围压变化基本一致,当轴向应变相同时,随围压增大孔隙率减小的趋势变缓;但轴向应变越大,孔隙率减小的斜率逐渐增大。

试样的孔隙形状参数主要用各向异性 F 和球圆度 S 描述能够较准确表达孔隙形状的差异性变化,其计算公式上文已给出。对试样的孔隙形状参数球圆度 S 和各向异性 F 沿高度分布以及其均值随整体孔隙率的变化情况进行统计如图9,10所示。同样,由于砂土成样的不均匀性,同一试样不同高度处的孔隙形状差

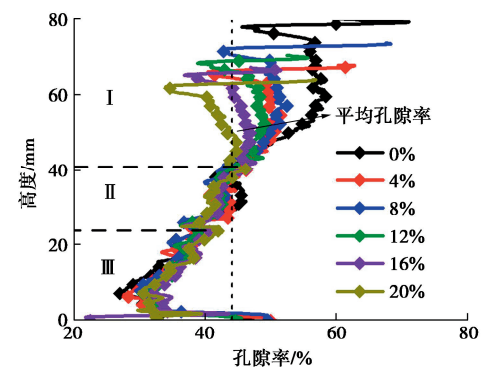
异较大。在加载过程中,围压(100 kPa)较低时,沿试样高度方向孔隙的各向异性和球圆度变化不明显。结合图6,8随围压增大,沿试样高度方向孔隙的各向异性和球圆度随孔隙率的减少逐渐增大,主要表现为曲线随轴向应变增大不断整体向右平移,说明高压下珊瑚砂试样颗粒破碎增多引起的剪缩现象会导致孔隙形状越来越趋于球形和各向同性。



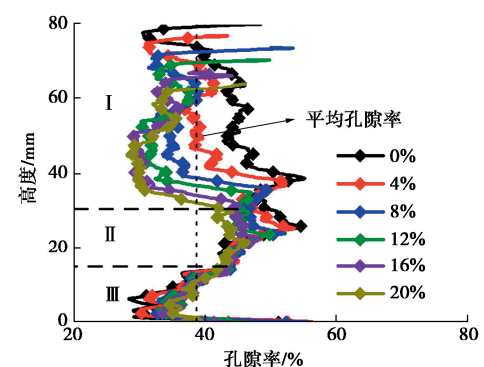
(a) 100 kPa孔隙率沿高度分布



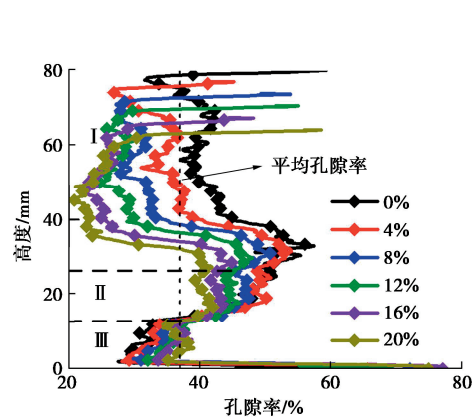
(b) 200 kPa孔隙率沿高度分布



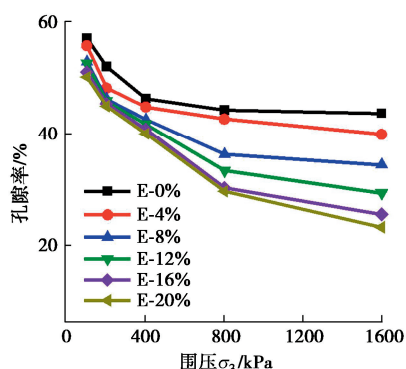
(c) 400 kPa孔隙率沿高度分布



(d) 800 kPa孔隙率沿高度分布



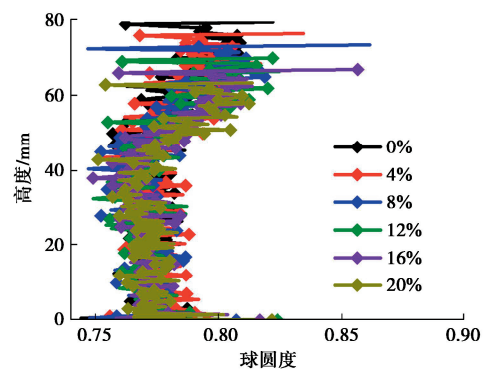
(e) 1600 kPa孔隙率沿高度分布



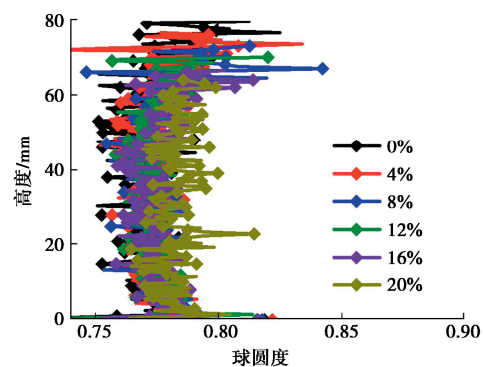
(f) 高度为40 mm时孔隙率-围压关系

图8 孔隙率变化

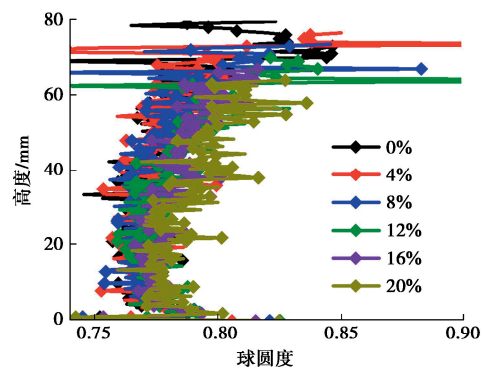
Fig. 8 Variation of porosity



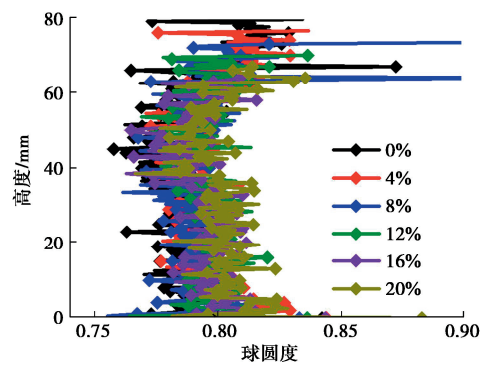
(a) 100 kPa球圆度沿高度分布



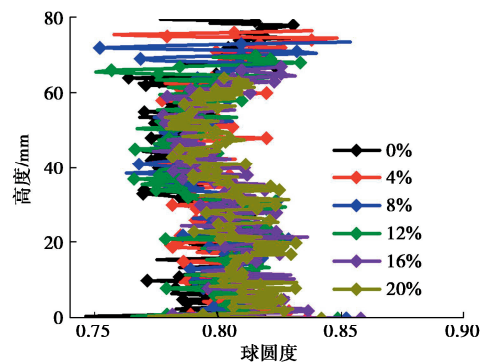
(b) 200 kPa球圆度沿高度分布



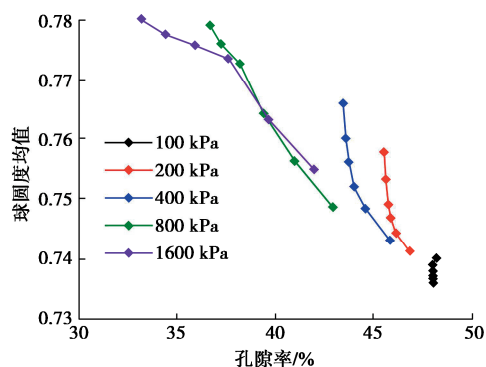
(c) 400 kPa球圆度沿高度分布



(d) 800 kPa球圆度沿高度分布



(e) 1600 kPa球圆度沿高度分布

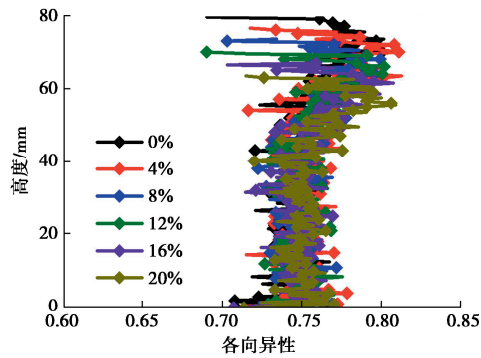


(f) 整体孔隙率-球圆度均值关系

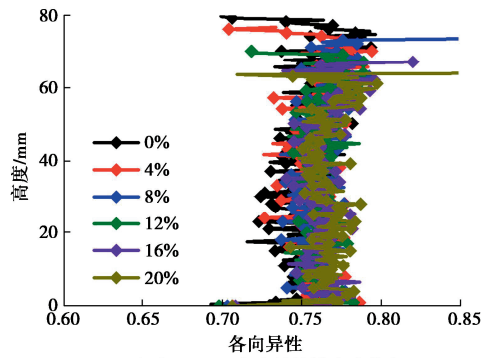
图9 球圆度变化

Fig. 9 Variation of sphericity

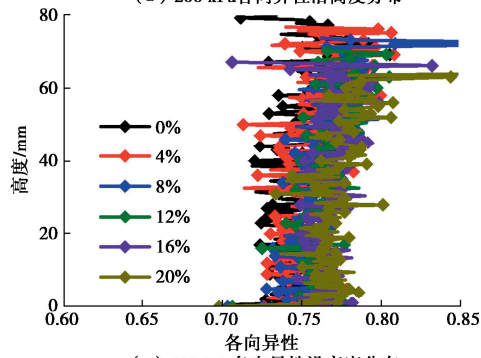
为了反映试样孔隙形状整体差异的变化,对试样的孔隙形状球圆度 S 的均值和各向异性 F 的均值进行统计如图 11 所示,对围压为 100 kPa 时的试样孔隙各向异性、球圆度和孔径进行分析如图 12 所示。当围压



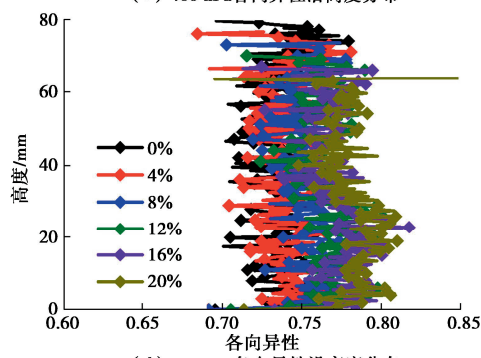
(a) 100 kPa各向异性沿高度分布



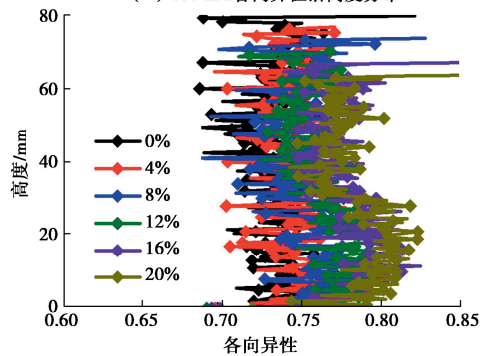
(b) 200 kPa各向异性沿高度分布



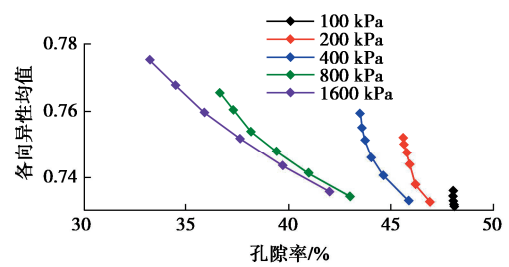
(c) 400 kPa各向异性沿高度分布



(d) 800 kPa各向异性沿高度分布



(e) 1600 kPa各向异性沿高度分布

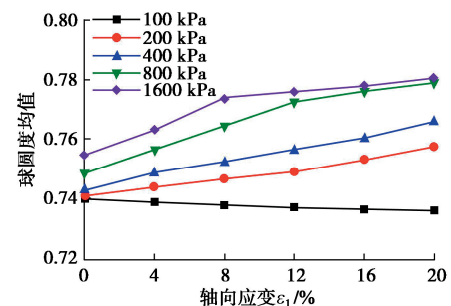


(f) 整体孔隙率-各向异性均值关系

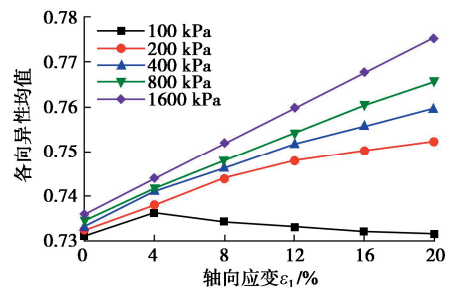
图10 各向异性变化

Fig. 10 Variation of anisotropy

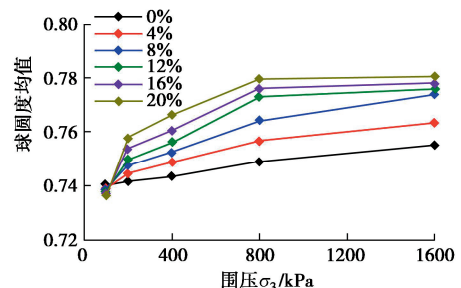
较低 (100 kPa) 时, 试样孔隙的各向异性均值随轴向应变增大先增大后减小, 试样的球圆度均值随轴向应变增大逐渐减小。随着围压增大 (200~1600 kPa), 试样孔隙的各向异性均值和球圆度均值随轴向应变增大逐渐增大, 但两者增大的趋势不同, 各向异性均值的增大趋势逐渐增加, 球圆度均值增大的趋势则逐渐区域稳定, 但均说明试样孔隙形状越来越接近球形和趋于各向同性。同一轴向应变时, 试样孔隙的各向异性和球圆度随围压增大逐渐增大的趋势则恰好与之相反, 说明加载时间和围压对孔隙形状影响的效果具有差异性。围压的增大导致孔隙体积减小和颗粒破碎增多, 间接诱使孔径的减小意味着孔隙形状越来越趋于球形和各向同性。



(a) 球圆度均值-轴向应变关系



(b) 各向异性均值-轴向应变关系



(c) 球圆度均值-围压关系

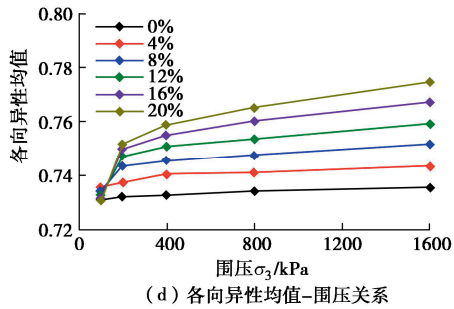


图 11 孔隙形状变化统计图

Fig. 11 Statistical diagram of pore shapes

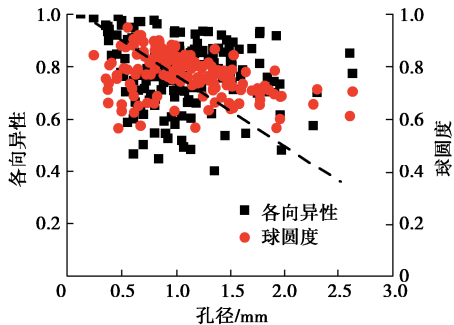


图 12 球圆度、各向异性和孔径的关系

Fig. 12 Relationship among sphericity, anisotropy and pore size

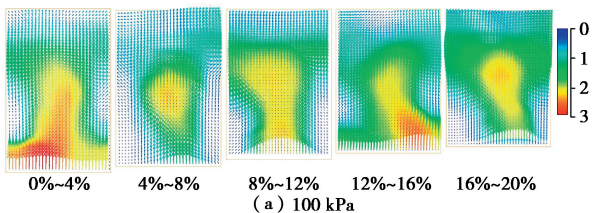
3.3 孔隙局部应变演化

利用数字体积关联法 DVC 对试样的体素位移进行分析, 各参考子体块中心像素点的位移为

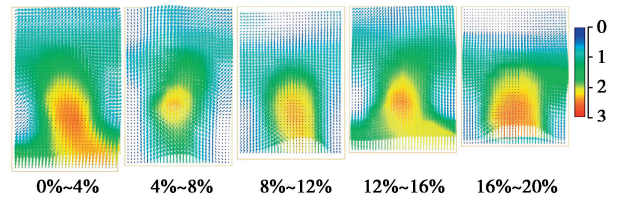
$$d = (u_0, v_0, w_0) \left(|d| = \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + w_0^2} \right) \quad (6)$$

式中: u_0, v_0, w_0 为参考子体块中心点的位移。

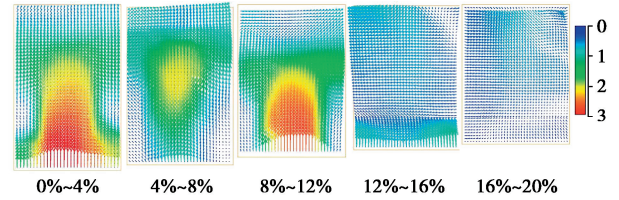
三轴试样的尺寸和受力方式均具有对称性, 但由于其内部结构的差异性, 试样的不同位置的位移变化在加载过程中具有明显的差异性。为研究试样内部位移变化的差异性, 对不同围压时每个轴向应变的加载区间, 试样沿高度方向中心位置切片的位移矢量变化如图 13 所示。试样中心轴两边的位移量不对称, 在加载过程中沿竖直方向, 位移量从加载端至底部, 中心轴至四周逐渐表现为递减的规律。位移量在轴向应变 0%~4% 时最大, 当围压相同时, 随着轴向应变增大图中红色部分逐渐减小, 试样的整体位移量减小, 说明试样的体积和孔隙在加载过程中有趋于稳定的规律, 符合砂土的临界状态理论^[26]。随着围压增大, 试样的整体位移量在周围压力的约束下逐渐减小。当围压为 400 kPa 时, 轴向应变为 12%~16% 和 16%~20% 的位移矢量图出现误差, 主要原因可能是中心切片位置选取的问题, 在该位置会出现上述轴向应变时位移量较小。



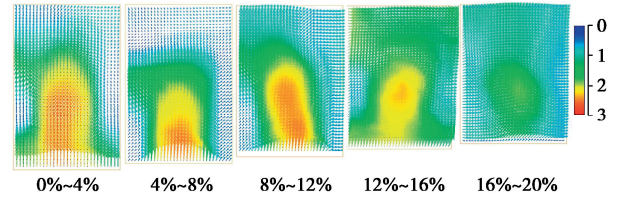
(a) 100 kPa



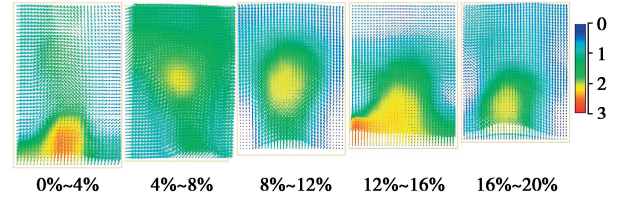
(b) 200 kPa



(c) 400 kPa



(d) 800 kPa



(e) 1600 kPa

图 13 试样中心位置沿高度方向的位移变化

Fig. 13 Displacements of samples at center position along height direction

各像素点的局部应变公式如下:

$$\varepsilon = d / l \quad (7)$$

式中: d 为参考子体块中心点的位移张量; l 为参考子体块各方向的长度张量。

宏观试验只能得出试样整体的体应变, 结合 CT 图像进一步分析试样的局部应变如图 14 所示。在试样加载端主要受到压力作用, 该部位的局部应变主要表现为负(压)应变, 孔隙率逐渐减小出现剪缩; 在试样中间部位和底部区域, 局部应变出现正(拉)应变, 孔隙向外扩张出现剪胀, 所以对对应的孔隙率变化不明显且有逐渐增大的现象。这解释了在低围压高密实度情况下, 砂样在三轴剪切过程中剪切带常常出现在中部及以下位置, 主要是该区域剪胀效应明显容易导致剪切带出现。从图中可以看出, 试样在不同加载时间段出现正应变(拉应变)的位置并不完全相同, 说明了试样在加载过程中受力方式会逐渐变化, 孔隙结构变化存在差异性。随着围压增大, 同一轴向应变区间, 试样的出现正应变的区间逐渐缩小直至完全消失, 进一步说明高围压和颗粒破碎增多会抑制孔隙结构差异性扩大导致的剪胀现象。

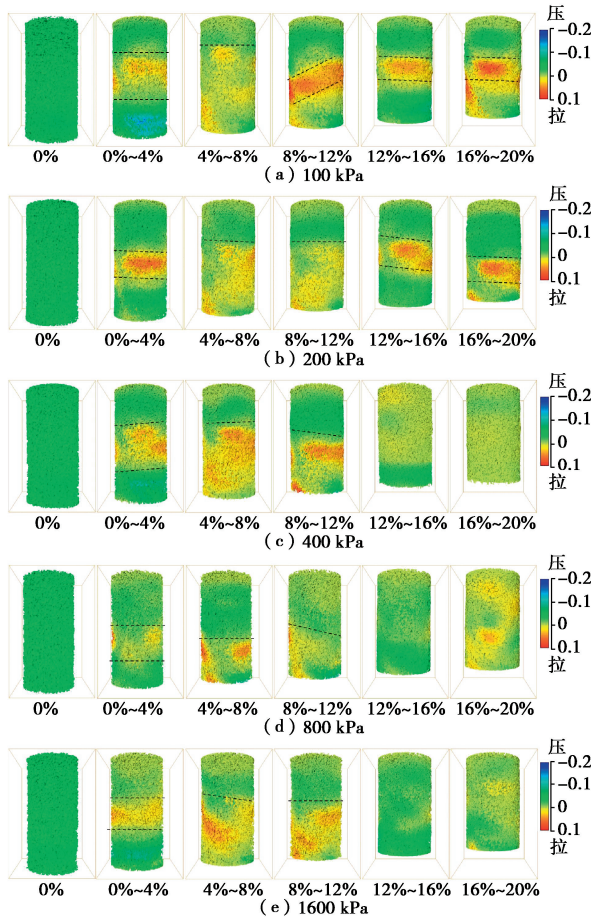
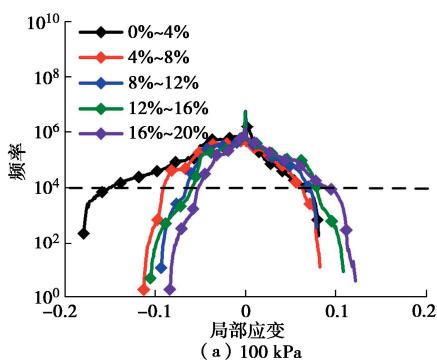


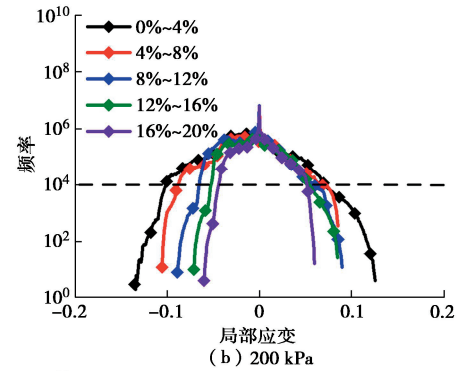
图 14 三维局部应变图

Fig. 14 Diagram of three-dimensional local strain

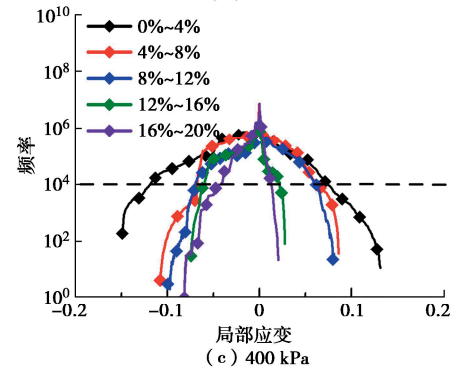
为定量分析试样的局部应变, 对不同围压情况下各轴向应变区间试样的局部应变分布进行统计如图 15 所示。由图 15 (a) 可知, 当围压较低 (100 kPa) 时, 随着轴向应变增大, 局部负 (压) 应变区间减小, 正 (拉) 应变区间增大; 当围压较高 (200~1600 kPa) 时 (图 15 (b)~(e)), 随着轴向应变增大, 局部正负应变区间均减小。由图 15 (f) 可知, 试样随着围压增大, 在同一轴向应变区间, 频率峰值时的局部应变随围压增大逐渐由正变负后逐渐趋于稳定, 局部应变区间在周围压力的约束下逐渐减小, 试样整体孔隙率缩小。分析试样出现上述局部应变主要原因, 一方面是颗粒在高应力下发生更多破碎, 试样内部颗粒重新排列, 剪缩越来越明显; 另一方面是高围压抑制了颗粒滑移产生的剪胀效应。



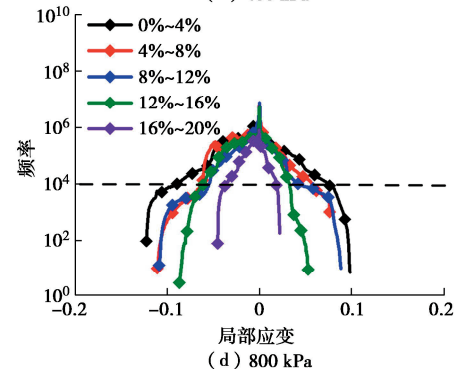
(a) 100 kPa



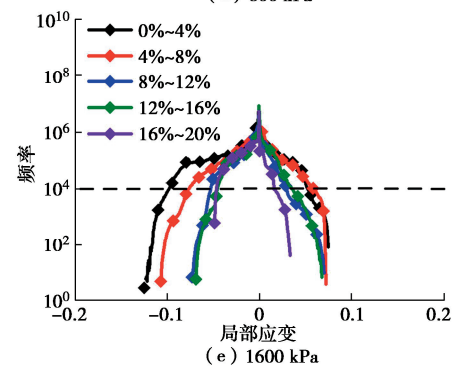
(b) 200 kPa



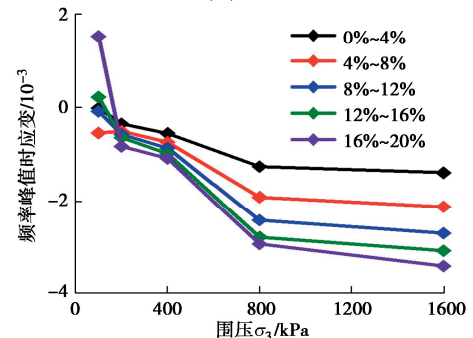
(c) 400 kPa



(d) 800 kPa



(e) 1600 kPa



(f) 频率峰值时局部应变随围压变化

图 15 局部应变分布图

Fig. 15 Distribution of local strain

4 讨 论

上述试验结果表现了珊瑚砂试样孔隙在细观层面的演化特性。随着围压增大,珊瑚砂试样整体从剪胀逐渐变为剪缩,试样的应力-应变关系逐渐趋于硬化型,这与之前的试验研究一致。珊瑚砂在低围压时剪胀现象明显,但由于文中所用的砂密实度为中等密实,剪切带未能形成,只能观测到中间位置出现剪胀现象。砂土的剪切带中会出现极大的孔隙,剪切带的形成原因一直是岩土力学研究的重要问题^[10, 13, 19]。

对比之前基于微型 CT 三轴仪研究珊瑚砂在加载过程中的颗粒尺寸、颗粒形状和局部应变变化^[17],本文主要侧重研究了不同围压情况下珊瑚砂常规试样孔隙在加载过程中的孔隙的一些参数变化特性。图 8~11 反映了在不同位置孔隙的分布情况不一致,表明试样内部的孔隙的不均匀性和各向异性,但随着试样的加载,在围压较高的情况下,颗粒破碎增多,其内部的不均匀性减少,逐渐趋于各向同性,孔隙收缩且形状变得规则,从而孔径减小。与此同时,图 13 中试样的位移和图 14 中局部正负(拉压)应变减小进一步表明了这种现象。反之,围压较低的情况下,试样内部的孔隙不均匀性和各向异性增大,颗粒滑移,孔隙向外扩张,试样位移和局部负(拉)应变增大,当孔隙扩展到一定程度就会形成剪切带。后续研究中观测剪切带需要进一步加大珊瑚砂试样的密实度。

本研究进一步通过不同围压情况下珊瑚砂加载过程中细观层面的孔隙结构演化特性说明了砂土的剪切特性,试样的围压增大能有效抑制砂土中间部位的剪胀效应,但围压增大会带来更多的颗粒破碎,本结果进一步表明平衡围压和颗粒破碎的关系并减小剪胀效应具有重要的实际工程意义。

5 结 论

利用研发的高压 CT-三轴仪对珊瑚砂试样进行了从低围压到高围压的三轴固结排水试验,同时对加载过程中试样进行实时 CT 扫描,分析了珊瑚砂加载过程中孔隙特征演化特性。得到 3 点结论。

(1) 当围压较低(100 kPa)时,珊瑚砂试样应力-应变关系表现为应变软化型,砂样先剪缩后剪胀;当围压为 200~800 kPa 时呈理想塑性;当围压较高(1600 kPa)时表现为应变硬化型,砂样持续剪缩。CT 图像及数据分析表明围压增大会使颗粒破碎增多,孔隙率降低,孔隙形状越来越趋于球形和各向同性,局部应变负(压)应变增多。

(2) 珊瑚砂试样加载端部位(I 段)主要受到压

力作用,颗粒发生破碎和滑动宏观上表现为剪缩现象,局部应变为负(压)应变。试样中间及以下部位(II 和 III 段)时,低围压时颗粒不断滑移,孔隙率局部出现增大现象,局部应变呈现为正(拉)应变,高围压和颗粒破碎会抑制剪胀现象。较好地解释了砂样的剪切带常发生在低围压试样中间及偏下部分的原因。

(3) 珊瑚砂试样在加载过程中试样内部孔隙结构变化具有不对称性,沿竖直方向,试样的位移量从加载端至底部,中心轴至四周逐渐减小,试样的位移量随着轴向应变增大在围压增大的情况下逐渐减小。试样的孔隙结构受到颗粒破碎和围压的影响,在加载过程中逐渐稳定,符合砂土的临界状态理论。

参考文献:

- [1] 吴 杨, 崔 杰, 李 能, 等. 岛礁吹填珊瑚砂力学行为与颗粒破碎特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3181-3191. (WU Yang, CUI Jie, LI Neng, et al. Experimental study on the mechanical behavior and particle breakage characteristics of hydraulic filled coral sand on a coral reef island in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3181-3191. (in Chinese))
- [2] 蔡正银, 陈元义, 朱 洵, 等. 级配对珊瑚砂颗粒破碎与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 661-670. (CAI Zhengyin, CHEN Yuanyi, ZHU Xun, et al. Influences of gradation on particle breakage and deformation characteristics of coral sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 661-670. (in Chinese))
- [3] FANG X W, YANG Y, CHEN Z, et al. Influence of fiber content and length on engineering properties of MICP-treated coral sand[J]. Geomicrobiology Journal, 2020, 37(6): 582-594.
- [4] HU F H, FANG X W, YAO Z H, et al. Experiment and discrete element modeling of particle breakage in coral sand under triaxial compression conditions[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 41(2): 142-151.
- [5] 陈海洋. 钙质砂的内孔隙研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2005. (CHEN Haiyang. Study on Internal Porosity of Calcareous Sand[D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics), 2005. (in Chinese))
- [6] 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 pore analysis of calcareous sand based on SEM images[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 1-5. (in Chinese))
- [7] 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 pores in calcareous sand particles[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science And Engineering Technology Edition), 2019, **52**(S1): 41-48. (in Chinese))
- [8] 程 壮, 王剑锋. 用于颗粒土微观力学行为试验的微型三轴试验仪[J]. 岩土力学, 2018, **39**(3): 1123-1129. (CHENG Zhuang, WANG Jianfeng. A mini-triaxial apparatus for testing of micro-scale mechanical behavior of granular soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(3): 1123-1129. (in Chinese))
- [9] 蒋明镜, 李光帅, 曹 培, 等. 用于土体宏微观力学特性测试的微型三轴仪研制[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 1): 6-10. (JIANG Mingjing, LI Guangshuai, CAO Pei, et al. Development of micro triaxial instrument for macro and micro mechanical properties testing of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 6-10. (in Chinese))
- [10] DESRUES J, CHAMBON R, MOKNI M, et al. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography[J]. Géotechnique, 1996, **46**(3): 529-546.
- [11] 李晓军, 张登良. 路基填土单轴受压细观结构 CT 监测分析[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 205-209. (LI Xiaojun, ZHANG Dengliang. Monitoring change of structure of road foundation soil in uniaxial compression test with CT[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 205-209. (in Chinese))
- [12] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 387-392. (CHEN Zhenghan, LU Zaihua, PU Yibin. The matching of computerized tomograph with triaxial test apparatus for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 387-392. (in Chinese))
- [13] ODA M, KAZAMA H. Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils[J]. Géotechnique, 1998, **48**(4): 465-481.
- [14] MATSUSHIMA T, KATAGIRI J, UESUGI K, et al. Micro X-ray CT at spring-8 for granular mechanics[M]// Solid Mechanics and its Applications. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003: 225-234.
- [15] HALL S A, BORNERT M, DESRUES J, et al. Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation[J]. Géotechnique, 2010, **60**(5): 315-322.
- [16] KARATZA Z, ANDÒ E, PAPANICOLOPULOS S A, et al. Evolution of deformation and breakage in sand studied using X-ray tomography[J]. Géotechnique, 2018, **68**(2): 107-117.
- [17] CHENG Z, WANG J F. An investigation of the breakage behaviour of a pre-crushed carbonate sand under shear using X-ray micro-tomography[J]. Engineering Geology, 2021, **293**: 106286.
- [18] ZHANG S M, SAXENA N, BARTHELEMY P, et al. Poromechanics investigation at pore-scale using digital rock physics laboratory[C]// The Proceedings of 2011 COMSOL Conference in Stuttgart, Stuttgart, 2011.
- [19] CHARALAMPIDOU E-M, HALL S A, STANCHITS S, et al. Characterization of shear and compaction bands in a porous sandstone deformed under triaxial compression[J]. Tectonophysics, 2011, **503**(1/2): 8-17.
- [20] FANG X W, HU F H, YAO Z H, et al. Development and application of triaxial apparatus for soil with high bearing pressure by computed tomography[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2023, **51**(6): 20220584.
- [21] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [22] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177-1192.
- [23] WILDENSCHILD D, SHEPPARD A P. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems[J]. Advances in Water Resources, 2013, **51**: 217-246.
- [24] VASILE G, OVARLEZ J P, PASCAL F, et al. Coherency matrix estimation of heterogeneous clutter in high-resolution polarimetric SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, **48**(4): 1809-1826.
- [25] BAY B K, SMITH T S, FYHRIE D P, et al. Digital volume correlation: Three-dimensional strain mapping using X-ray tomography[J]. Experimental Mechanics, 1999, **39**(3): 217-226.
- [26] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. Géotechnique, 2000, **50**(4): 449-460.