

侧限条件下钙质砂颗粒破碎与蠕变特征*

史天根^{1,2}, 高燕^{1,2}, 李文龙^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 通过侧限条件下的蠕变试验, 基于近景摄影测量技术对试验过程的动态捕捉, 探讨了钙质砂的颗粒破碎与蠕变特征。侧限条件下, 钙质砂的蠕变随着时间的增加而增加, 蠕变变形与时间关系符合 Burgers 模型, 蠕变变形可分为减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 即, 蠕变速率随时间增加先减小, 后稳定。钙质砂的蠕变特性受应力条件和粒径影响。轴向应力越大, 蠕变速率和蠕变量越大; 低应力下, 蠕变量随粒径增大而减小; 高应力下, 受颗粒破碎的影响, 钙质砂的蠕变以及蠕变速率均随粒径增大而增大。与硅质砂相比, 钙质砂的蠕变在较低应力 (≤ 0.1 MPa) 时, 由于钙质砂具有多棱角特性, 颗粒间嵌固力较大, 限制颗粒间位移产生, 蠕变较小; 随着应力增大, 钙质砂开始产生颗粒破碎, 增加了钙质砂试样变形, 蠕变逐渐显著并超过硅质砂的蠕变。钙质砂的颗粒破碎特性随粒径和应力增大而增大, 其中粒径 > 5 mm 的试样在竖向应力 0.7 MPa 附近开始破碎; 蠕变过程中的试样变形由完整颗粒和破碎后的颗粒沿裂隙和内外孔隙移动提供。

关键词: 钙质砂; 颗粒破碎; 蠕变; Burgers 模型; 近景摄影测量技术

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)01-0034-10

Particle breakage and creep characteristics of calcareous sand with lateral confinement

SHI Tiangen^{1,2}, GAO Yan^{1,2}, LI Wenlong^{1,2}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: Based on the creep tests with lateral confinement and the close-range photogrammetry technology, the characteristics of particle breakage and creep of calcareous sand are continually captured and explored in this study. It is found that the creep deformation of calcareous sand increases with time which satisfies the Burgers model. The evolution of creep can be divided into two stages, the primary creep stage with the creep rate decreasing with time and followed by the steady creep stage with a relatively stable creep rate. The creep characteristics of calcareous sand are affected by stress conditions and particle breakage. The greater the axial creep stress, the greater the creep deformation and creep rate. Under low stress, the creep strain decreases with the particle size increasing due to the interlocking between the irregular particles; under relatively high stress, creep deformation and creep rate increase with the particle size increasing on account of the influence of particle crushing. Under the low stress (≤ 0.1 MPa), because of the interparticle locking in calcareous sand with irregular particle shape, the interparticle rearrangement is harder to occur, hence a smaller creep deformation is obtained for calcareous sand.

* 收稿日期: 2022-01-19 录用日期: 2022-03-14 网络首发日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(42072295, 41807244); 广东省创新创业团队项目(2017ZT07Z066)

作者简介: 史天根(1999年生), 男; 研究方向: 钙质砂特性; E-mail: shitg@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 高燕(1984年生), 女; 研究方向: 土的宏微观结构性、智能监测; E-mail: gaoyan25@mail.sysu.edu.cn

ous sand compared with siliceous sand. However, with the increase of stress, particles of calcareous sand begin to crush, and the creep deformation of calcareous sand increases and becomes more significant than that of siliceous sand. The particle crushing of calcareous sand increases with the rising of particle size and stress. The samples with particle sizes larger than 5 mm begin to break around 0.7 MPa of the vertical stress, and the creep deformation is provided by the rearrangement of intact particles and broken particles along cracks and pores.

Key words: calcareous sand; particle breakage; creep; Burgers model; close-range photogrammetry

钙质砂广泛分布于热带与亚热带海域, 是海洋生物遗骸(如珊瑚)与长期饱和碳酸钙海洋环境通过复杂的物理和化学过程相互作用形成的碳酸盐沉积物^[1-5]。许多研究者对钙质砂的渗透特性^[5]、剪切特性^[4, 6-11]、压缩特性^[12]和循环荷载强度^[13]等物理力学性质进行了研究, 表明钙质砂在颗粒形状、颗粒抗压强度、内外孔隙分布和物质组成等方面与硅质砂明显不同^[13], 其具有独特的工程特性。其中, 钙质砂的蠕变和颗粒破碎特性^[6, 14], 是海洋工程建设长期稳定性的重要评估和研究内容^[15]。国内外学者对钙质砂的宏观蠕变特性进行了研究。Wang等^[16]根据钙质砂的三轴蠕变试验根据蠕变速率将蠕变过程分为3个阶段, 即, 初始近线性阶段、阻尼阶段和稳态阶段。通过对比钙质砂和硅质砂的蠕变, Chen等^[17]指出钙质砂的蠕变可分为瞬时变形、加速变形和稳定缓慢变形3个阶段。Liu等^[18]通过室内三轴试验和侧限试验, 初步探讨了钙质砂的蠕变特性, 并从能量的角度分析了颗粒破碎对钙质砂蠕变的显著影响。突尼斯钙质砂在低应力下的 K_0 试验显示出明显的蠕变和颗粒破碎^[19]。Lade等^[20]通过恒定围压下的逐级加载-蠕变实验以及应力下降特定值后的蠕变试验, 探究了钙质砂的逐级加载蠕变特征。国内研究成果表明, 钙质砂的蠕变可分为衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变3个阶段, 其整体属于非线性衰减-稳态型蠕变^[15, 21-22], 且和所受偏应力呈正相关、与有效围压呈负相关^[22]。

针对钙质砂的蠕变曲线, 不同学者提出了不同的蠕变模型。Mesri模型^[15]、Burgers模型^[23]等经典蠕变模型被广泛应用于钙质砂及其他地基土^[23-28]的蠕变-时间关系曲线中。Sun等^[29]根据文献资料建立了钙质砂分段蠕变模型。不同围压和偏应力下的试验表明^[15, 22, 30], 蠕变过程中的应变-时间曲线可用幂函数表达, 并提出了钙质砂蠕变的四参数等多种蠕变模型。

颗粒破碎对钙质砂的蠕变有重要影响。为揭

示钙质砂蠕变的细观机制及其与颗粒破碎之间的联系, 前人通过数值模拟、X射线等多种方法间接获取了证据。研究表明, 颗粒滑移重新排列和颗粒破碎共同作用是发生蠕变的主要原因^[22, 30-33], 具体表现为在低应力下以颗粒滑移重新排列为重, 高应力下以颗粒破碎为重。Chen等^[17]研究表明蠕变过程中钙质砂的颗粒破碎符合Weibull分布规律。Liu等^[34]采用离散元方法模拟了可破碎砂土在一维压缩条件下的蠕变问题, 结果表明低应力下的蠕变取决于应力重分布, 而在高应力下则以颗粒重排和颗粒破碎为重。李小梅等^[35]通过固结排水剪切试验认为在一定应力条件下珊瑚砂的颗粒滑移、错动、颗粒破碎、颗粒调整重组是产生蠕变的根本原因。对Virginia海滩砂进行的三轴压缩试验表明, 试样蠕变量随应力增加而增大, 其增大的原因在于颗粒破碎而非完整颗粒间的重排列和摩擦滑动^[36-37]。Edward等^[38]通过X射线扫描一维压缩钙质砂蠕变样品, 获得了蠕变过程中颗粒破裂的间接证据。

然而, 上述研究尚缺乏钙质砂颗粒在蠕变过程中破碎的直观证据和动态变化。本文通过自设计的带可视窗口的模型盒进行一维蠕变试验, 以高分辨率摄像机直接记录钙质砂样品在蠕变过程中的颗粒破碎情况, 探讨不同蠕变应力下不同粒径钙质砂的蠕变特征及颗粒破碎的影响机制。

1 试验设计

1.1 试样

本文采用的钙质砂来自我国南海某岛, 其主要成分为 CaCO_3 。由于钙质砂为海洋环境下的沉积物, 表面附着有大量盐分, 为避免其对试验结果的影响, 减少试验的不确定性, 试验前对试样进行清洗, 烘干后进行试验。根据钙质砂粒径由小到大, 分为C1、C2、C3、C4、C5共5组试验, 粒径依次为 <0.5 、 $0.5\sim 1$ 、 $1\sim 2$ 、 $2\sim 5$ 和 >5 mm。各组钙质砂粒径不同, 砂颗粒的形状也不同。钙质砂

单颗粒形状可分为块状、生物碎屑状和枝状,其中块状颗粒的质量比随粒径增大而减小,生物碎屑状和枝状则相反;粒径越大,试样形状越不规则^[39],钙质砂颗粒的内孔隙越大^[40],并直接影响钙质砂颗粒破碎的程度与变形。本文中C1和C2组砂粒形状为块状、短柱状,C3组砂粒呈块状、片状、长柱状,C4组则为块状、长柱状、纺锤状、不规则状(图1)。同时设置一组硅质砂对照试验(S组),其粒径为2~5 mm,整体呈灰白色,形状以粒状、相对规则球状为主。6组试样均为密砂,其初始相对密实度约为0.7。

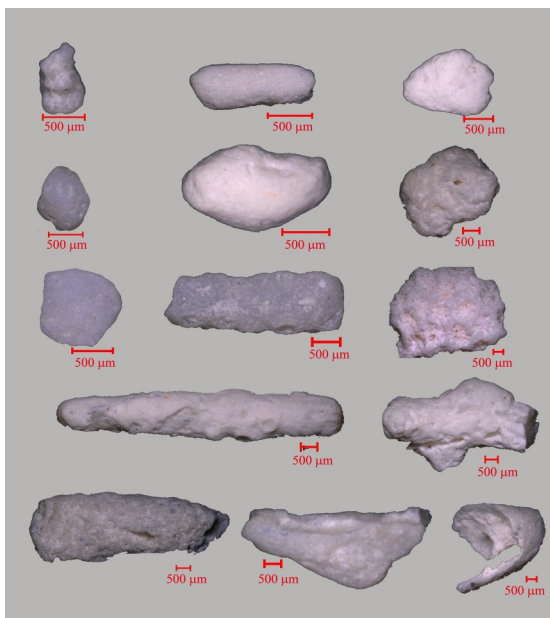


图1 典型钙质砂颗粒形状图片

Fig. 1 Shape characteristics of calcareous sand particles for different grain groups

1.2 试验装置和试验方法

本文采用MTS万能试验机与自设计透明亚克力板模型盒进行侧限蠕变试验(如图2)。自设计模型盒为中部镂空的透明亚克力组合箱,其内部尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,壁厚为40 mm。亚克力板密度为1.2 g/cm³,其杨氏弹性模量=3 GPa,切变模量=1.2 GPa,抗冲击能力强,能够保证试验过程中不变形不破坏。基于亚克力板的高度透明特性,通过前视窗跟踪捕捉试验过程中钙质砂试样的动态变化。

每组试样均采用加压-蠕变的逐级蠕变模式^[20],为探讨不同压力(σ)下钙质砂的蠕变特征,共设置6级压力(侧限条件下竖向应力),依次为0.1、0.25、0.5、1、2和3 MPa,施加压力时采用6 000 N/min的恒定速率增加,每一级蠕变压力维持30 min。本试验配备有计时控制器的数码相机(Canon EOS 6D Mark 2),可以透过可视窗连续捕获高分辨率图像(6 240 像素×4 160 像素)。试验加压阶段,根据达到下一级蠕变所需的时长,依次控制相机每隔1、1、2、5、10和10 s采集一张照片;试验恒压蠕变阶段,控制相机每隔3 s采集一张照片。

2 钙质砂的蠕变特征

2.1 蠕变曲线

6组试验的竖向应变随时间变化曲线如图3所示。由图3可见,由荷载增加引起的变形远大于蠕变变形,不同粒径的钙质砂与对照组硅质砂在施加的6级应力状态下均产生了明显的蠕变,并且蠕

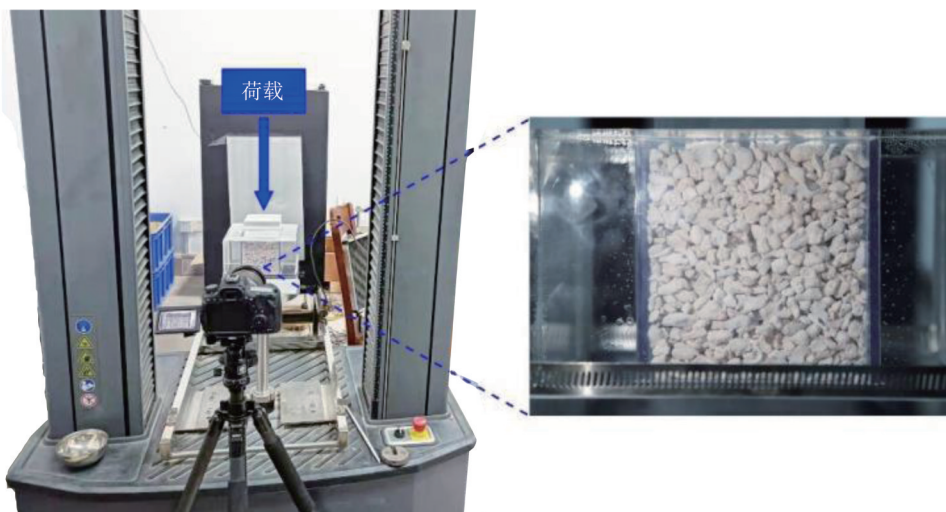


图2 试验装置

Fig. 2 Test apparatus

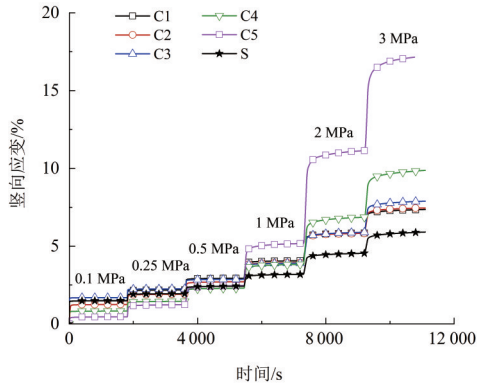


图 3 竖向应变随时间变化曲线

Fig. 3 The variation of vertical strain with time

变变形很快趋于稳定。C1~C5 组钙质砂与 S 组硅质砂在不同蠕变压力下的蠕变曲线见图 4。在侧限条件下, 对于同一粒径钙质砂, 随着蠕变应力的增加, 蠕变量增加, 蠕变速率增大; 同一蠕变应力下, 蠕变速率随时间表现为非线性衰减蠕变, 蠕变速率随时间先减小, 后稳定不变, 即蠕变可分为减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段。一般典型材料的蠕变包括减速蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段 [41-44], 由于侧限条件下, 试样未发生整体破坏, 因此, 本文钙质砂与硅质砂的蠕变与一般典型材料的蠕变特征不同, 仅包含减速蠕变、稳态蠕变两个阶段, 未出现试样破坏的加速蠕变。统计分析发现钙质砂与硅质砂的蠕变均符合 Burgers 模型。

通过对对照组硅质砂与钙质砂蠕变曲线和蠕变速率曲线对比, 可以发现钙质砂蠕变的特殊性。在低应力(0.1 MPa)下, 硅质砂的蠕变略大于钙质砂。随着蠕变应力的增加, 在 0.25 MPa 时, 钙质砂的蠕变量和蠕变速率整体上升并超过硅质砂的蠕变速率, 最终在高应力下钙质砂的蠕变量和蠕变速率显著大于硅质砂, 这与 Lv 等 [12] 研究结果一致。其主要原因是, 较硅质砂相比, 钙质砂颗粒具有多棱角性和可破碎性, 低应力下, 由于钙质砂具有多棱角性, 其颗粒间的嵌固咬合作用更强, 较硅质砂不易产生位移, 因此, 蠕变不明显,

使得同一蠕变应力下硅质砂的蠕变大于钙质砂; 当应力增大时, 钙质砂的颗粒破碎特性发挥作用, 颗粒破碎导致钙质砂更容易压缩, 因此, 其蠕变特性得到显著增强。

2.2 粒径对蠕变与蠕变速率的影响

不同粒径钙质砂在不同应力下的蠕变规律如图 5 所示。可见, 低应力下, 粒径越大蠕变量越小, 起始蠕变速率越小且蠕变速率下降越慢; 高应力下, 粒径越大蠕变量越大, 蠕变速率越大。其主要原因为钙质砂颗粒破碎的影响。如表 1 所示, 不同应力下钙质砂的蠕变机制可以概括为: 低应力下, 颗粒破碎忽略不计, 钙质砂粒径越大, 颗粒形状越不规则, 颗粒间嵌固力增加, 抑制了蠕变的进行, 因此, 粒径越大蠕变量越小, 起始蠕变速率越小且蠕变速率下降越慢。高应力下, 钙质砂粒径越大, 颗粒破碎越严重, 增加了蠕变变形量与蠕变速率。可见, 钙质砂蠕变特性由颗粒间的嵌固作用和颗粒破碎特性共同耦合决定, 而嵌固作用和颗粒破碎特性受颗粒粒径与蠕变应力的影响, 如图 6 所示。

为定量表征钙质砂的颗粒破碎程度, 蠕变试验结束后对试样进行筛分, 采用由 Hardin 提出的相对破碎率(B_r) [45] 定量描述, 遵循粒径(D) < 0.074 mm 的颗粒不能进一步产生颗粒破碎的原则, 并把由粒径 $D=0.074$ mm 竖直线、颗粒级配曲线、质量百分比为 100% 的横线以及横轴所围面积称为初始破碎势 (B_{p0}), 受力破碎后试样颗粒级配曲线与初始曲线和 $D=0.074$ mm 竖直线所围面积为总破碎势(B_t), $B_r = B_t/B_{p0}$ 。试验结束后不同粒径试样的相对破碎率 B_r 值如图 7 所示。由图 7 可知, 钙质砂粒径较小时, $B_r < 0.1$, 颗粒破碎程度很小, 可忽略不计; 随着粒径增大, B_r 值增大, 表明颗粒破碎程度增大; $D > 5$ mm 试样的颗粒破碎程度最大。该颗粒破碎规律与宏观蠕变变形及蠕变速率的变化具有很好的一致性。

表 1 不同应力下钙质砂的蠕变机制分析

Table 1 Creep mechanism of calcareous sand under different stresses

项目	低应力($\sigma \leq 0.1$ MPa)	中应力($\sigma = 0.25 \sim 1$ MPa)	高应力($\sigma = 2$ 和 3 MPa)
特征	随着粒径的增加, 蠕变量减小, 初始蠕变速率与蠕变下降率减小	颗粒破碎开始起作用, 影响蠕变量	随着粒径的增加, 蠕变量增加, 蠕变速率增加
机制	蠕变变形主要由颗粒间位置的调整提供。粒径越大, 钙质砂颗粒形状越不规则, 颗粒间嵌固力增加, 抑制蠕变变形	蠕变变形由颗粒间嵌固力与颗粒破碎共同决定	蠕变变形主要受颗粒破碎控制。粒径越大, 钙质砂颗粒形状越不规则, 颗粒破碎越严重, 增加蠕变变形

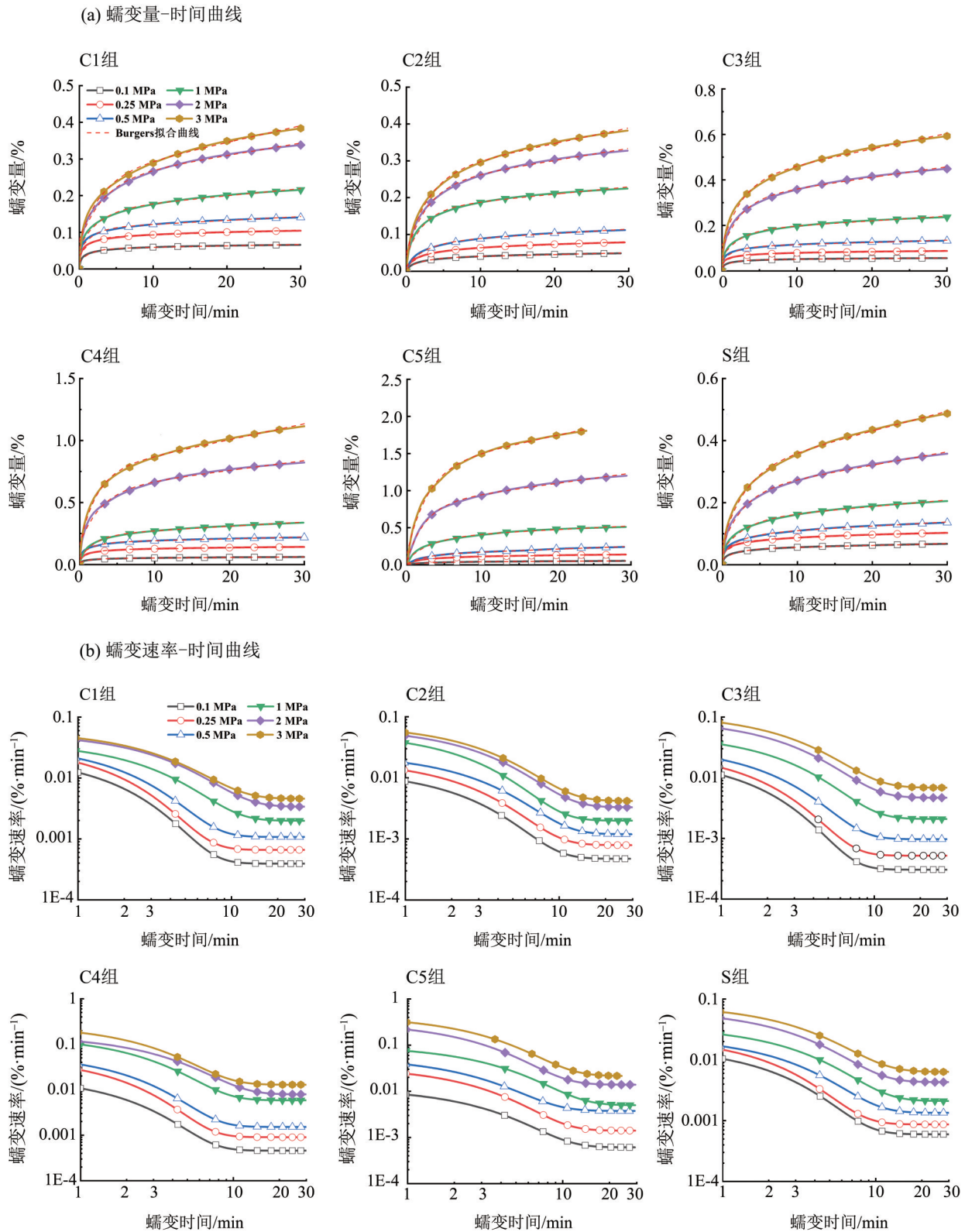


图 4 不同蠕变应力下 6 组试样的轴向应变和应变率随时间变化的曲线
 Fig. 4 The creep strains and creep strain rates of six groups of tests under different creep stresses

3 钙质砂蠕变的颗粒破碎细观分析

根据相对破碎率 B_r ，压缩与蠕变后， $D < 0.5$ 、 $0.5 \sim 1$ 、 $1 \sim 2$ mm 的钙质砂 B_r 值均小于 0.05，图像分

析亦未明显观察到颗粒破碎，因而， $D < 2$ mm 的钙质砂颗粒破碎均可忽略不计。对照组硅质砂亦未产生颗粒破碎， $B_r \approx 0.005$ ，其蠕变变形以颗粒间的位置调整为主。相较于 $D = 2 \sim 5$ mm

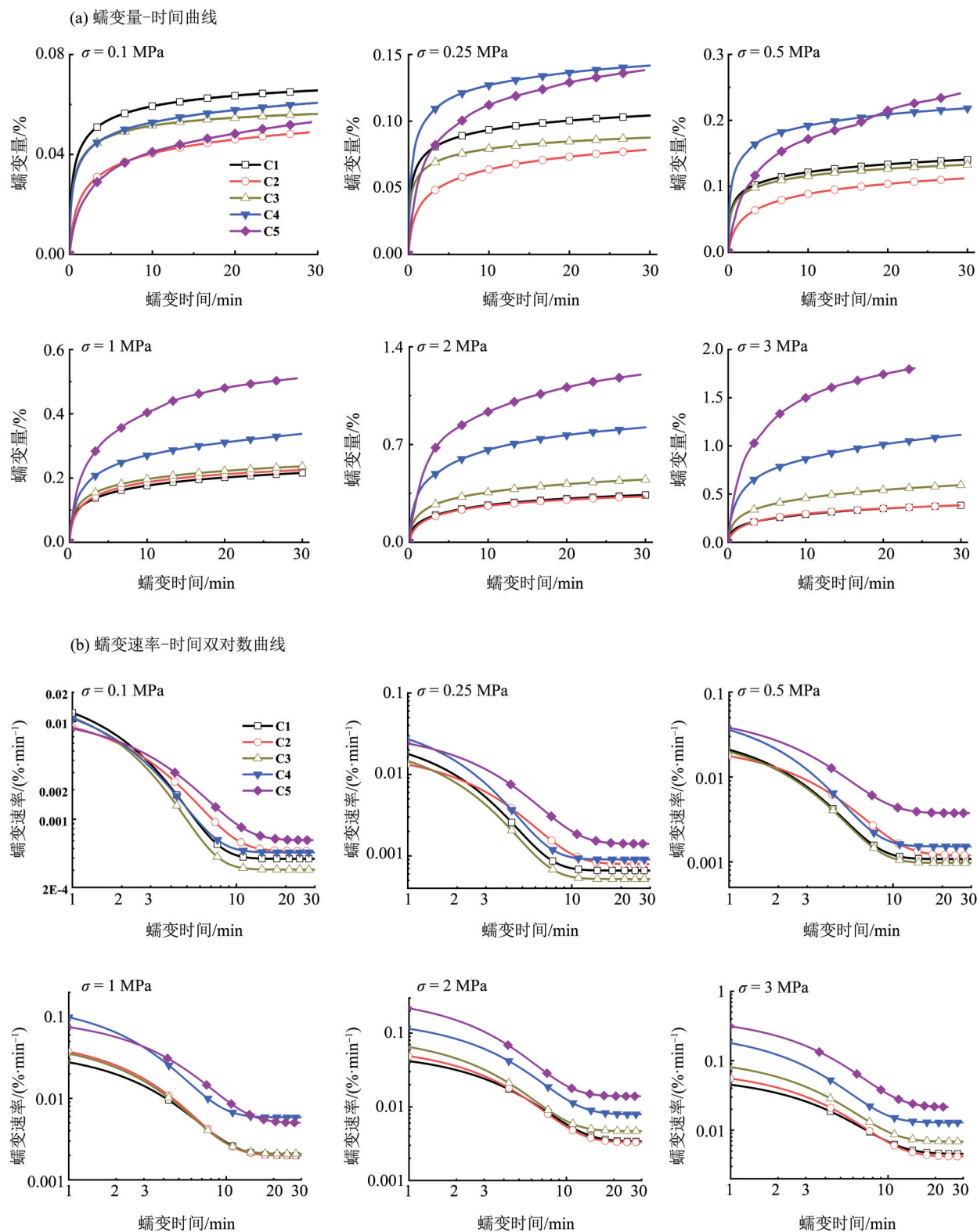


图 5 不同应力下不同粒径钙质砂的蠕变量和蠕变速率随时间变化关系曲线

Fig. 5 The creep strains and creep strain rates of calcareous sand with different particle sizes under different stresses

的钙质砂, $D > 5$ mm 的钙质砂破碎更为明显。因此, 本文主要以颗粒发生明显破碎的 $D > 5$ mm 的试样为代表, 分析蠕变过程中的颗粒破碎动态变化。

3.1 加压阶段

加压阶段试样的变形以颗粒运移和破碎为主。结合单颗粒破碎模式^[11, 46-48]和动态监测结果, 可以直观地看到试验过程中钙质砂颗粒依次产生了

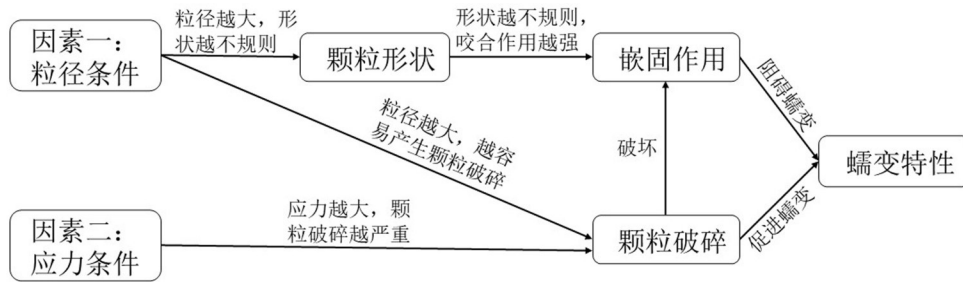


图 6 应力与颗粒粒径对钙质砂蠕变的影响示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the influence of stress and particle size on creep of calcareous sand

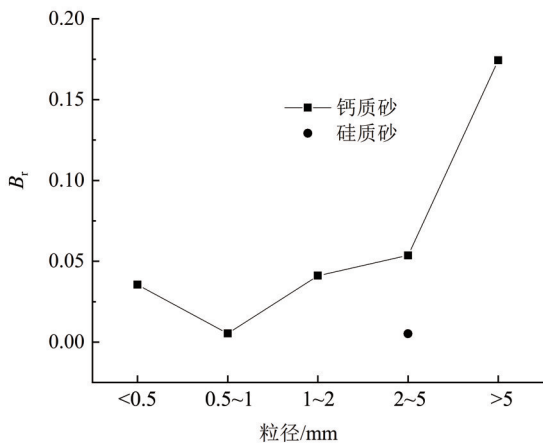


图 7 试验结束后相对破碎率 B_r 值随粒径变化的曲线

Fig. 7 B_r values for different particle sizes after the tests

颗粒研磨、颗粒棱角破裂和颗粒整体破碎 3 种破碎模式。对于 $D>5$ mm 的试样, 当 $\sigma<0.5$ MPa 时, 颗粒的压缩变形以颗粒位置调整引起的颗粒间孔隙的压缩为主; 当 $\sigma = 0.5\sim 1$ MPa 加载阶段时, 明

显可见颗粒产生研磨和棱角破裂破碎, 且初始破碎时竖向应力 σ 为 ~ 0.7 MPa ($\epsilon_a = 5.2\%$) (图 8); 随着应力的增加, 颗粒破碎的比例增加; 当 $\sigma>1$ MPa 时, 试样逐渐致密, 并伴随着颗粒整体破碎以及颗粒棱角破裂产生的裂隙的闭合(图 9)。

3.2 蠕变阶段

在低蠕变应力下 ($\sigma \leq 0.5$ MPa) 时, 钙质砂未产生颗粒破碎, 蠕变变形主要由颗粒间位置的调整提供。在蠕变应力 $\sigma = 1、2$ 和 3 MPa 时, 可见明显的颗粒破裂与颗粒整体破碎区域, 如图 10 所示。对比同一应力下蠕变前后的图像, 可以发现, 棱角破裂的颗粒数量并没有明显的增加, 但是颗粒整体破碎的区域在明显增大, 特别是应力为 3 MPa 时, 在试样底部出现许多明显的颗粒碎屑。本文认为, 颗粒在压缩试验中, 由于应力变化较快, 整体破碎产生的细小颗粒来不及运移便产生新的破裂、裂隙闭合, 因此使得在刚结束加载阶段进入蠕变

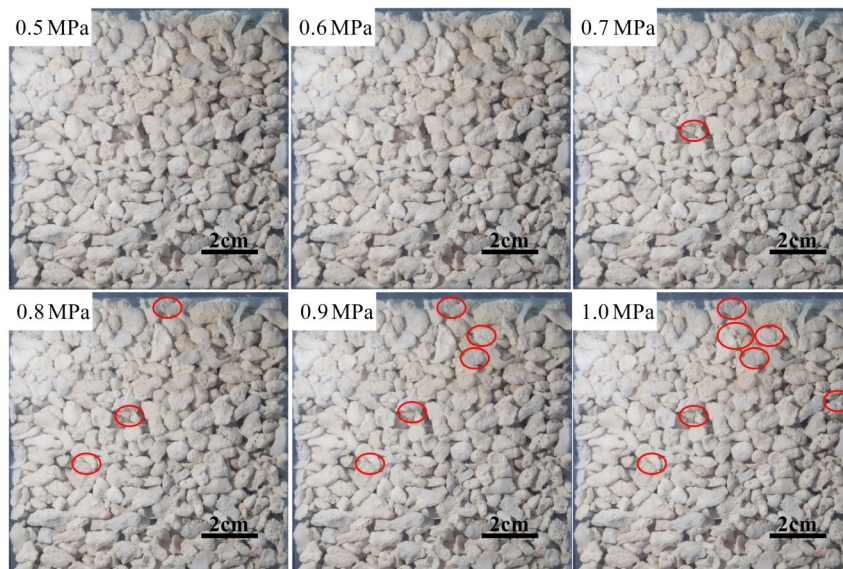
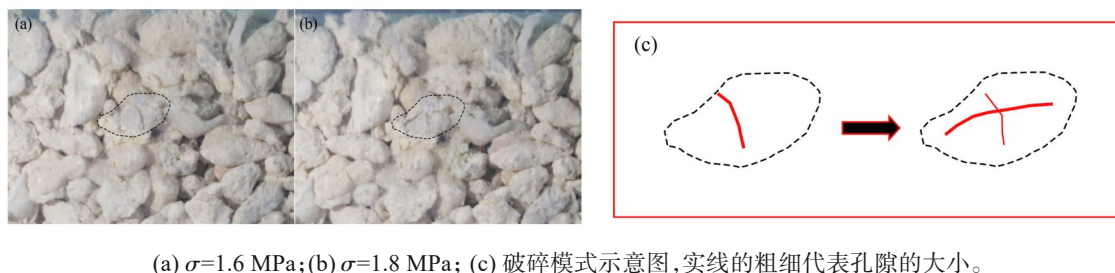


图 8 $D>5$ mm 试样破碎演化情况(椭圆代表颗粒产生棱角破裂 (0.5~1 MPa))

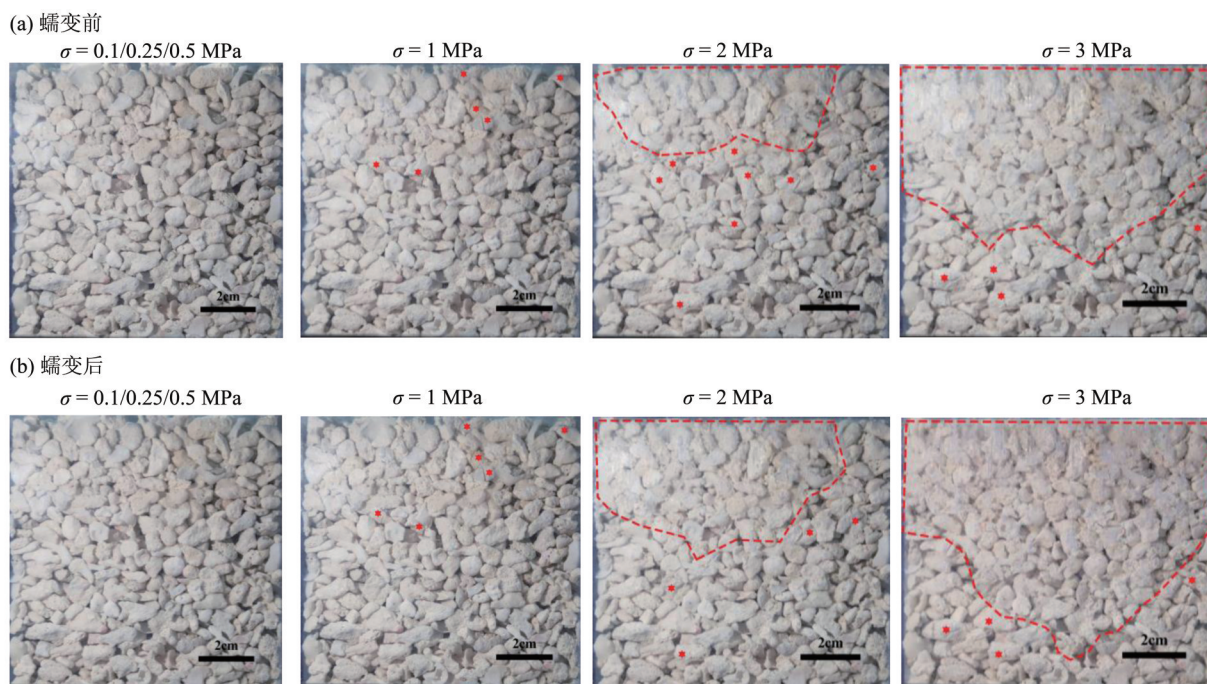
Fig. 8 The particle breakage evolution for the sample with particle size $D>5$ mm



(a) $\sigma=1.6$ MPa; (b) $\sigma=1.8$ MPa; (c) 破碎模式示意图, 实线的粗细代表孔隙的大小。

图 9 $D>5$ mm 试样中典型的颗粒整体破碎与裂隙的闭合示意图

Fig. 9 Schematic diagram of typical overall particle breakage and crack closure for the sample with $D>5$ mm



六角星指示发生破碎的颗粒, 虚线框内为颗粒整体破碎明显的区域。

图 10 蠕变下的颗粒破碎细观分析

Fig. 10 Meso analysis of particle breakage during creep

阶段时, 颗粒破碎而不散。但是在蠕变阶段, 应力恒定, 细小颗粒有较为充分的运移时间, 随着时间的增加, 破碎的细小颗粒沿裂隙和内外孔隙扩散, 直观表现为整体破碎的范围在蠕变阶段有明显的扩张而几乎没有新的颗粒破裂产生。

因而, 蠕变过程中, 低应力下颗粒的位置调整控制着钙质砂的蠕变, 而在中高应力下, 试样已经致密, 钙质砂整体破碎导致内孔隙大量释放, 并且颗粒碎而不散。颗粒破碎产生的细小颗粒在释放的内孔隙和剩余的外孔隙之间滑动填充, 同时颗粒破碎产生的裂隙部分闭合, 二者共同控制着钙质砂的蠕变, 这与文献[17]研究结果一致。

4 结 论

本文通过对不同粒径钙质砂的侧限蠕变试验, 基于近景摄影测量技术, 直观捕捉到了钙质砂试样压缩变形过程中的破碎模式, 阐释了颗粒粒径与蠕变应力对蠕变变形的影响, 对探究钙质砂地基的长期稳定性具有一定的理论意义, 主要结论如下:

1) 侧限条件下, 钙质砂的蠕变可分为减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 蠕变符合 Burgers 模型。

2) 同一粒径钙质砂, 蠕变应力越大, 蠕变速率和蠕变量越大; 低应力下, 蠕变量与蠕变速率受颗粒间嵌固作用和颗粒破碎作用影响, 不同应力两种作用的耦合结果不同, 蠕变变形主要由颗

粒位置的调整产生;高应力下,颗粒破碎的影响占主导作用,颗粒破碎产生的细小颗粒在释放的内孔隙和剩余的外孔隙之间滑动填充,随粒径的增大,颗粒破碎越显著,蠕变量及蠕变速率增大。

3) 钙质砂的颗粒破碎特性随粒径和应力增大而增大,本研究中粒径 >5 mm的试样初始破碎应力约为 0.7 MPa,蠕变过程中没有新的颗粒破碎产

生,试样变形由完整颗粒和破碎后的颗粒沿裂隙和内外孔隙运移提供。

4) 与对照组硅质砂相比,钙质砂由于颗粒形状不规则,低应力下颗粒间的咬合作用抑制了蠕变,其蠕变量与蠕变速率小于硅质砂;中高应力下,钙质砂的颗粒破碎使得其蠕变量与蠕变速率明显增加且大于硅质砂。

参考文献:

- [1] SALEM M, ELMAMLOUK H, AGAIBY S. Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 55:83–91.
- [2] KARGAR S, SALEHZADEH H, SHAHNAZARI H. Post-cyclic behavior of carbonate sand of the northern coast of the Persian Gulf [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2016, 34(2):169–180.
- [3] SHAHNAZARI H, SALEHZADEH H, REZVANI R, et al. The effect of shape and stiffness of originally different marine soil grains on their contractive and dilative behavior [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(4):975–983.
- [4] WANG X, WANG X Z, ZHU C Q, et al. Shear tests of interfaces between calcareous sand and steel [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(9): 1095–1104.
- [5] WANG Y, REN Y, YANG Q. Experimental study on the hydraulic conductivity of calcareous sand in South China Sea [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(7): 1037–1047.
- [6] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand [J]. *Geotechnique*, 2004, 54(3):157–163.
- [7] GIANG P HHA, IMPE P OVAN, IMPE W FVAN, et al. Small-strain shear modulus of calcareous sand and its dependence on particle characteristics and gradation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 100: 371–379.
- [8] HE S H, SHAN H F, XIA T D, et al. The effect of temperature on the drained shear behavior of calcareous sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(2): 613–633.
- [9] CHOO H, KWON M, TOUITI L, et al. Maximum shear modulus of calcareous sand in Dejebel Dahar, Tunisia and its dependency on applied stress[C/OL]. *E3S Web of Conferences*, 2019, 92: 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/20199204007.
- [10] RASOULI M, MORADI M, GHALANDARZADEH A. Effects of initial static shear stress orientation on cyclic behavior of calcareous sand [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(5): 554–568.
- [11] WANG G, ZHA J J. Particle breakage evolution during cyclic triaxial shearing of a carbonate sand [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 138:106326.
- [12] LV Y R, LIU J G, XIONG Z M. One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(1): 192–201.
- [13] DING Z, HE S H, SUN Y F, et al. Comparative study on cyclic behavior of marine calcareous sand and terrigenous siliceous sand for transportation infrastructure applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 283(1):122740.
- [14] KUANG D M, LONG Z L, GUO R Q, et al. Experimental and numerical investigation on size effect on crushing behaviors of single calcareous sand particles [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(5): 543–553.
- [15] 叶剑红, 曹梦, 李刚. 中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(6): 1242–1251.
- [16] WANG Y S, MA L J, WANG M Y, et al. A creep constitutive model incorporating deformation mechanisms for crushable calcareous sand [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(20): 623.
- [17] CHEN B, CHAO D J, WU W J, et al. Study on creep mechanism of coral sand based on particle breakage evolution law [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2019, 21(4): 1201–1214.
- [18] LIU H B, ZENG K F, ZOU Y. Particle breakage of calcareous sand and its correlation with input energy [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(2): 04019151.
- [19] CHOO H, KWON M, TOUITI L, et al. Creep of calcareous sand in Tunisia: Effect of particle breakage at low

- stress level [J]. *International Journal of Geo-Engineering*, 2020, 11(1): 16.
- [20] LADE P V, LIGGIO C D, NAM J. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(7):941-953.
- [21] 廖仁国. 饱和珊瑚砂蠕变及渗透性演化规律三轴试验研究 [D]. 泉州:华侨大学, 2020.
- [22] 曹梦, 叶剑红. 中国南海钙质砂蠕变-应力-时间四参数数学模型 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(5): 1771-1777.
- [23] 杨珂, 韩超, 刘校麟. 分级加卸载下砂岩蠕变试验及模型研究 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(3): 97-102+109.
- [24] 李良权, 王伟. 基于 Burgers 模型的流变损伤本构模型 [J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(5): 26-28+41.
- [25] 钱玉林, 糜长林, 王桦, 等. 基于 Burgers 模型的软黏土流变特性分析 [J]. *路基工程*, 2016(2): 14-17+49.
- [26] 王威, 杨文豪, 杨成忠, 等. 基于 Burgers 模型铁路路基长期沉降的预测分析 [J]. *铁道学报*, 2020, 42(12): 142-149.
- [27] 张庆建, 王鹏程, 赵永, 等. 基于 Burgers 模型下泥岩三轴蠕变参数的辨识 [J]. *水利水电工程设计*, 2020, 39(1): 50-52.
- [28] 杨超, 戴国亮, 龚维明, 等. 望江淤泥质粉质黏土蠕变特性及模型研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(增刊2): 558-563.
- [29] SUN Y F, CHEN C. Fractional order creep model for coral sand [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2019, 23(4): 465-476.
- [30] 晁代杰. 基于颗粒破碎演化规律的钙质砂蠕变特性试验研究 [D]. 湘潭:湘潭大学, 2019.
- [31] 陈佳敏. 考虑颗粒破碎的钙质砂一维蠕变特性及方程 [D]. 湘潭:湘潭大学, 2020.
- [32] 张小燕, 蔡燕燕, 王振波, 等. 珊瑚砂高压下一维蠕变变形破碎及颗粒形状分析 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(5): 1573-1580.
- [33] LV Y, LI F, LIU Y, et al. Comparative study of coral sand and silica sand in creep under general stress states [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1601-1611.
- [34] LIU S, WANG J, KWOK C Y. DEM simulation of creep in one-dimensional compression of crushable sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(10): 04019060.
- [35] 李小梅, 王芳, 韩林, 等. 珊瑚砂蠕变特性的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(11): 2124-2130.
- [36] KARIMPOUR H, LADE P V. Time effects relate to crushing in sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(9): 1209-1219.
- [37] KARIMPOUR H, LADE P V. Creep behavior in Virginia Beach sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(11): 1159-1178.
- [38] EDWARD A, DIJKSTRA J, ROUBIN E, et al. A peek into the origin of creep in sand [J]. *Granular Matter*, 2019, 21(1): 1-8.
- [39] 袁泉, 李文龙, 高燕, 等. 钙质砂颗粒特征及其对压缩性影响的试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2020, 39(2): 32-43.
- [40] YU J Y, GAO Y, LI W L, et al. The characteristics of internal and accumulated pores of calcareous sand [C]// *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 787(1): 012126. DOI:10.1088/1755-1315/787/1/012126.
- [41] COLLIAT-DANGUS J L, DESRUES J, FORAY P. Triaxial testing of granular soil under elevated cell pressure [M]// DONAGHE R T, et al, eds. *Advanced triaxial testing of soil and rock*. Philadelphia: America Standard for Testing and Materials, 1988.
- [42] AUGUSTESEN A, LIINGAARD M, LADE P V. Evaluation of time-dependent behavior of soils [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, 4(3): 137-156.
- [43] LADE P V, LIU C T. Experimental study of drained creep behavior of sand [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8):912-920.
- [44] MURAYAMA S, MICHIIHIRO K, SAKAGAMI T. Creep characteristics of sands [J]. *Soils and Foundations*, 1984, 24(2):1-15.
- [45] HARDIN B O. Crushing of soil particles [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [46] LEES G, KENNEDY C K. Quality, shape and degradation of aggregates [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 1975, 8(3):193-209.
- [47] DAOUADJI A, HICHER P Y. An enhanced constitutive model for crushable granular materials [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 34(6): 555-580.
- [48] MAYORAZ F, VULLIET L, LALOU L. Attrition and particle breakage under monotonic and cyclic loading [J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2006, 334(1): 1-7.