

不同粒径钙质砂的侧限变形及内部应力演化*

袁泉¹, 施旭², 高燕^{2,3}, 江雨潮², 孙乐²

1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010
2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 510982
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 510982

摘要: 本文通过自设计的亚克力模型盒进行了不同粒径钙质砂侧限压缩与多级蠕变试验, 探究了各级应力下不同粒径钙质砂的压缩变形、颗粒破碎特征及内部应力演化规律。研究表明: 当竖向应力较低时, 钙质砂压缩变形量、蠕变量及蠕变速率随颗粒粒径的增大而减小; 当竖向应力较大时, 钙质砂压缩变形量、蠕变量及蠕变速率随颗粒粒径的增大而增大。其原因为钙质砂的变形受钙质砂颗粒位置重排列与颗粒破碎共同控制。当竖向应力较小时, 颗粒破碎不明显, 可忽略不计, 钙质砂粒径越大, 颗粒形状越不规则, 使得颗粒间的咬合力增加, 抑制了变形的产生; 随着竖向应力的增大, 钙质砂发生显著的颗粒破碎, 并且粒径越大, 颗粒破碎越明显, 加剧了变形的产生, 并且引起颗粒间接触发生变化, 加剧了应力重分布, 钙质砂内部竖向及侧向应力大小的分布由Weibull转变到正态分布。蠕变过程中, 钙质砂内部应力分布有均匀化趋势。

关键词: 钙质砂; 颗粒破碎; 蠕变; 颗粒粒径; 应力分布

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)02-0001-11

Lateral deformation and internal stress evolution of calcareous sand with different particle sizes

YUAN Quan¹, SHI Xu², GAO Yan^{2,3}, JIANG Yuchao², SUN Le²

1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China
2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: In the study, lateral compression and creep tests were performed on calcareous sands of varying particle sizes using a self-designed acrylic model box. The research focused on investigating the compression deformation, characteristics of particle breakage, and the evolution of internal stress in calcareous sand under various stress levels. The results indicate that when vertical stress is relatively low, the compression deformation, creep strain, and creep rate of calcareous sand decrease as particle size increases. Conversely, under higher vertical stress, these variables increase with particle size. This behavior is attributed to the fact that the deformation of calcareous sand is controlled by the rearrangement of particle positions and the extent of particle breakage. At low vertical stress, particle breakage is minimal and can be overlooked; as the particle size of calcareous sand increases, the

* 收稿日期: 2024-07-15 录用日期: 2024-07-30 网络首发日期: 2025-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(42072295); 国家重点研发计划(2022YFC3005203)

作者简介: 袁泉(1984年生), 男; 研究方向: 岩土工程、地下工程; E-mail: yuanquan@gmdi.cn;

施旭(2000年生), 男; 研究方向: 地质工程、岩土工程; E-mail: shix29@mail2.sysu.edu.cn

(袁泉、施旭并列第一作者)

通信作者: 高燕(1984年生), 女; 研究方向: 地质灾害等; E-mail: gaoyan25@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240232

irregularity of particle shapes also increases, which enhances inter-particle locking and thus suppresses deformation. However, as vertical stress increases, considerable particle breakage occurs in calcareous sand; moreover, larger particle sizes lead to more significant particle breakage. This exacerbates deformation, alters the particle contacts, and intensifies stress redistribution. Consequently, the distribution of vertical and lateral stresses within the calcareous sand shifts from a Weibull distribution to a normal distribution. During the creep process, the internal stress distribution of calcareous sand tends to become uniform.

Key words: calcareous sand; particle breakage; creep; particle size; distribution of stresses

钙质砂主要由珊瑚碎屑及软体动物碎片构成, 碳酸钙含量超过 90%, 具有多孔隙、颗粒形状不规则、脆性高且易破碎等特点, 使得其与一般陆源砂在工程力学性质上存在显著差异(刘崇权等, 1995, 1999; Hassanlourad et al., 2014; Wang et al., 2020; Xiao et al., 2020)。钙质砂作为南海岛礁工程建设的基础填料和主要建筑材料, 其长期稳定性对确保南海岛礁工程安全稳定具有重要意义。

钙质砂通常在沉积过程中没有经历长途搬运因而保留了原始的生物形态, 较粗的钙质砂颗粒通常呈不规则形状并具有明显的棱角, 而细颗粒钙质砂则通常是珊瑚碎屑, 在长时间海浪冲刷下, 颗粒的磨圆度会增加。已有研究表明, 不同粒径钙质砂的工程力学性质具有显著差异。研究表明钙质砂的平均粒径越大, 颗粒破碎越显著, 压缩变形也越大(Chen et al., 2023; 孙刘留等, 2022; 顾琳琳等, 2023)。钙质砂的相对破碎率(B_r)与压缩变形量呈良好的幂函数递增关系(孙刘留等, 2022)。陈莎莎(2022)进行了不同粒径钙质砂的冲击试验, 提出了评价颗粒材料破碎敏感性指数(B_s)。此外, 钙质砂的强度也会随粒径的改变而改变。徐东升等(2020)研究表明不同粒径的钙质砂水泥胶结体的单轴抗压性能存在差异, 含有粗颗粒钙质砂的胶结体具有更高的抗压能力, 颗粒平均粒径越大其胶结能力也越强。王新志等(2018)认为大粒径钙质砂颗粒间的咬合作用提高了其抗剪强度。甘怡东等(2023)认为钙质砂的峰值偏应力随着中值粒径(D_{50})的减小呈线性增加趋势, 有效内摩擦角随 D_{50} 的增大而线性增大。熊雪梅等(2023)认为钙质砂平均粒径越大其屈服强度越低且两者呈幂指数关系, 钙质砂粒径越大, 颗粒破碎的起始应力越低越容易压缩变形。闫超萍等(2020)通过三轴固结排水剪切试验研究了不同粒径钙质砂的剪切特征, 结果表明对密实度较大试样而言, 围压对

试样软化特征的影响随粒径的减小而增强, 而对试样剪胀特征的影响则随粒径的减小而减弱。孟敏强等(2022)进行不同颗粒粒径钙质砂的单颗粒破碎试验, 研究了钙质砂的颗粒破碎-尺寸效应, 结果表明钙质砂单颗粒峰值力及破碎能量随颗粒粒径的增大而增大, 破碎强度随颗粒粒径的增大而减小。增大钙质砂的平均粒径有利于提高钙质砂的动强度(赵胜华等, 2021)。梁珂等(2023)对不同级配钙质砂的共振柱试验表明, 钙质砂的剪切模量随中值粒径 D_{50} 的增大而升高。

可见, 现有研究表明颗粒粒径对钙质砂的性质有显著影响, 但尚缺乏内在机制的深入研究。本文旨在探究侧限条件下钙质砂颗粒粒径对其变形与颗粒破碎以及内部应力分布的影响。利用 MTS 加载系统, 采用自设计亚克力试验盒对不同粒径钙质砂进行了侧限压缩与多级蠕变试验, 同时采用粒子图像测速法(PIV)直观探究钙质砂粒径变化对于试样沉降变形的影响, 借助于薄膜压力传感器系统探究压缩与蠕变过程中内部的应力变化, 分析颗粒破碎及变形的内在因素。

1 试验设计

1.1 钙质砂试样

本文钙质砂来自中国南海某岛屿, 为避免其表面附着盐分的影响, 首先对钙质砂进行清洗、烘干; 然后根据粒径(D), 将钙质砂试样分为 3 组: 1.0~2.0、0.5~1.0 和 0.25~0.5 mm; 最后, 为方便图像分析, 对各组试样中的部分砂粒进行染色(如图 1)。所有试样均为密实状态, 初始相对密实度均为 0.7, 比重均为 2.76, 基本物理参数如表 1, ρ_{dmax} 和 ρ_{dmin} 分别为最大干密度及最小干密度。

1.2 试验方案

采用 MTS 万能试验机(美特斯电子万能试验机)进行加压, 可以实现恒压加载、逐级加载、循

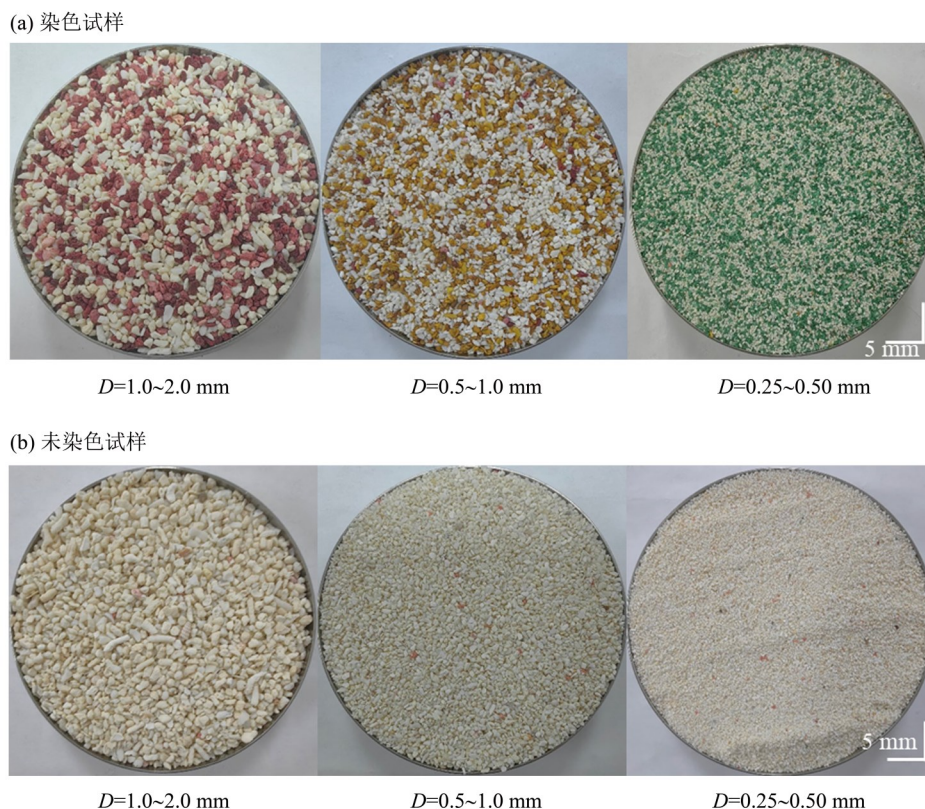


图1 钙质砂染色试样和原始试样

Fig. 1 Calcareous sand samples: (a) stained sample, and (b) the original sample

表1 钙质砂试样的基本物理参数¹⁾

Table 1 Basic physical parameters of calcareous sands

D/mm	$\rho_{d\max}$	$\rho_{d\min}$	初始孔隙比	D_{50}/mm
0.25~0.5	1.41	1.13	0.986	0.375
0.5~1.0	1.40	1.33	1.005	0.75
1.0~2.0	1.39	1.23	1.064	1.50

1) $\rho_{d\max}$ 和 $\rho_{d\min}$ 单位均为 g/cm^3 。

环加载等操作。采用自设计透明亚克力板模型盒(见图2), 盒内尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。试验所用亚克力板密度大, 抗剪强度高, 抗冲击能力强, 能够承受加载的压力而不变形, 试样处于侧限状态。通过薄膜压力传感器(Tekscan Inc, MA, USA)测量钙质砂压缩与蠕变过程中侧向及竖向的内部应力。薄膜压力传感器系统, 由测量软件、薄膜压力采集器(手柄)和薄膜压力传感器组成(图2)。本研究使用的5027型薄膜压力传感器, 感测范围为 $0\sim 345\text{ kPa}$, 感测区尺寸为 $27.9\text{ mm} \times 27.9\text{ mm}$, 测点呈行 \times 列为 44×44 的矩阵分布, 共1936个测点, 单个测点面积为 1.48 mm^2 。采用高清数码相机(Canon EOS 6D Mark 2), 透过亚克力

透明视窗连续拍摄高分辨率图像($6240\text{ 像素} \times 4160\text{ 像素}$), 记录钙质砂试样压缩与蠕变全过程, 控制相机采集频率为 1 min 采集一张照片。进而通过PIV (particle image velocimetry) 分析技术, 获得钙质砂内部的位移情况。

不同颗粒粒径钙质砂均采用逐级加载方式。为探讨不同竖向应力下钙质砂的压缩与蠕变特征, 共设置6级竖向应力, 依次为 100 、 200 、 400 、 800 、 1200 和 1600 kPa , 采用 4 kPa/s 的恒定速率加压, 每一级应力维持 90 min 蠕变时间。为了揭示颗粒粒径对钙质砂颗粒破碎特征的影响, 通过多次平行试验, 加压后对每组试样进行筛分, 获得不同竖向应力下的颗粒破碎率。

2 钙质砂侧限压缩特征

2.1 压缩曲线

由孔隙比与竖向应力关系图(图3)可以看出, 不同粒径的钙质砂压缩特性相似, 随竖向应力的增加, 孔隙比降低。随着粒径的增加, 颗粒形状越不规则, 初始孔隙比越大; $0.5\sim 1.0$ 和 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 较小粒径钙质砂, 颗粒形状相对较规则, 其在较

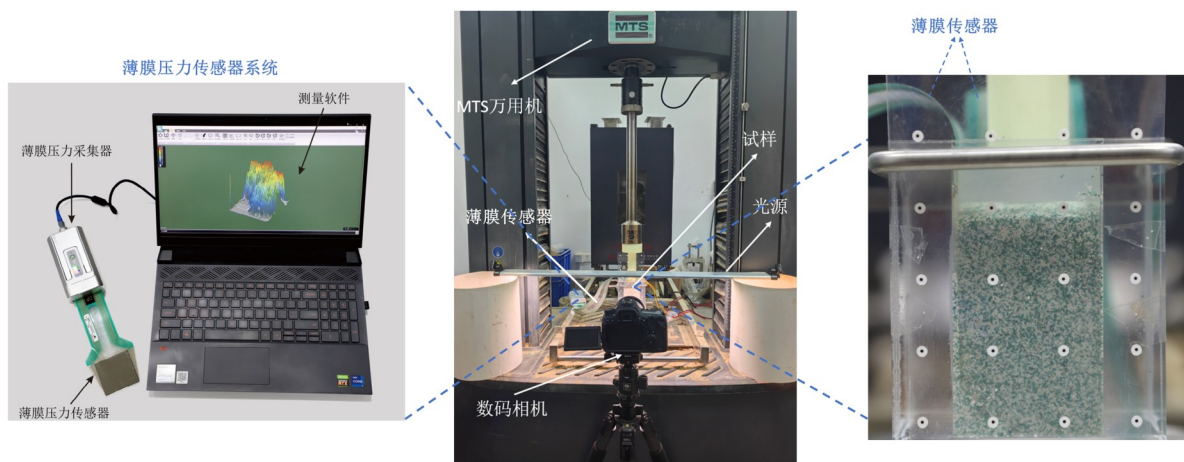
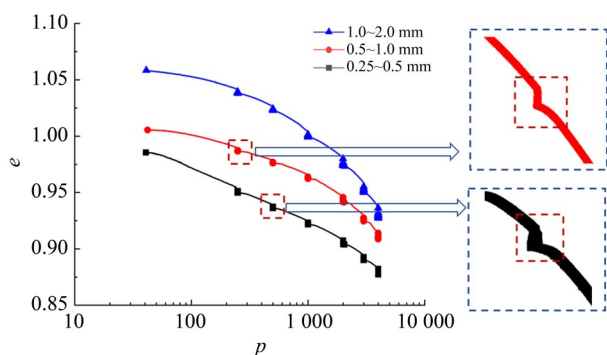


图2 试验装置图

Fig. 2 Experimental setup

图3 不同粒径钙质砂的压缩试验结果: $e-p$ 曲线Fig. 3 Compression test results of calcareous sand with different particle sizes: $e-p$ curve

小竖向应力下初始阶段的压缩与孔隙比的下降, 主要由于颗粒间位置的调整与颗粒间孔隙的压缩; 但随着竖向应力的增大, 颗粒破碎增加, 破碎产生的小颗粒充填了大颗粒周围的孔隙, 孔隙比下降趋势增大($e-p$ 曲线斜率增大), 达到更加密实状态; 对于 1.0~2.0 mm 较大粒径钙质砂, 颗粒形状较不规则, 在压缩初期由于颗粒位置的重新调整而引起的孔隙比变化较大, 且在位置调整过程中部分发生部分颗粒破碎, 随着竖向应力的增加, 钙质砂颗粒破碎增加随之产生更大变形。1.0~2.0 mm 粒径试样孔隙比变化趋势较大, 说明试样粒径大小直接影响颗粒破碎与压缩变量。

2.2 钙质砂的颗粒破碎

本文采用 Hardin (1985) 提出的相对破碎率 (B_r), 定量表征钙质砂的颗粒破碎程度。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), 颗粒的相对破碎率 $B_r = B_t / B_{p0}$ 。对每级竖向应力下试验结束后的试样进行筛分, 计算得到对应的 B_r 值。图 4 为不同粒径钙质砂的颗粒相对破碎率 B_r 与竖向应力、竖向应变的关系。可见, 颗粒相对破碎率 B_r 随竖向应力、应变的增加而增加, 均呈现显著的幂函数关系。相同竖向应力或竖向应变条件下, 钙质砂颗粒粒径越大, 其 B_r 越大, 更容易发生颗粒破碎, 颗粒破碎能够显著增加钙质砂的压缩量。

2.3 PIV 位移分析

对相机拍摄的试验过程图片进行 PIV 分析, 通过对比试样加载前后的图片, 获得钙质砂在整个加载过程中位移发展的空间分布规律。通过预试验中已知位移与 PIV 分析位移结果的一致性证实了 PIV 技术运用于本文位移分析的有效性和准确性。试验结果表明, 颗粒粒径越大, 颗粒破碎越明显, 为突出颗粒破碎的作用, 本文以 1.0~2.0 mm 粒径钙质砂为代表进行分析, 图 5 和图 6 分别为 1.0~2.0 mm 钙质砂在逐级加载时代表性荷载下的位移增量云图和位移增量矢量图。可见, 随着竖向应力的增加, 钙质砂颗粒位移增加, 左右两侧沉降呈均匀对称分布。地表变形最大, 向钙质砂试样深部, 变形逐渐减小。

各粒径钙质砂压缩变形随竖向应力的增大而增大, 取 1 600 kPa 荷载下各粒径钙质砂试样图像进行 PIV 对比分析(图 5c、6c, 图 7)。小粒径钙质

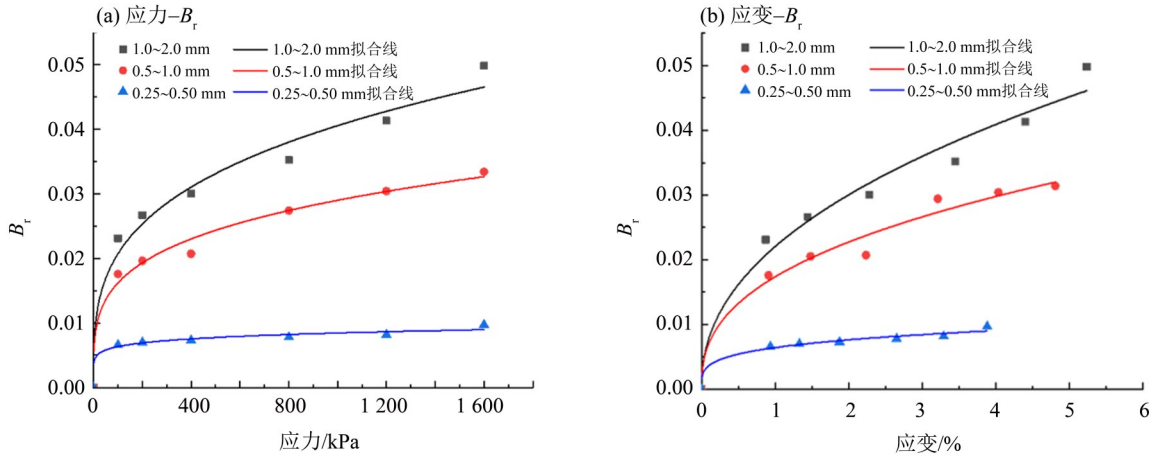


图 4 颗粒破碎率与竖向应力、竖向应变的关系

Fig. 4 Relationship between particle breakage rate and vertical stress & vertical strain

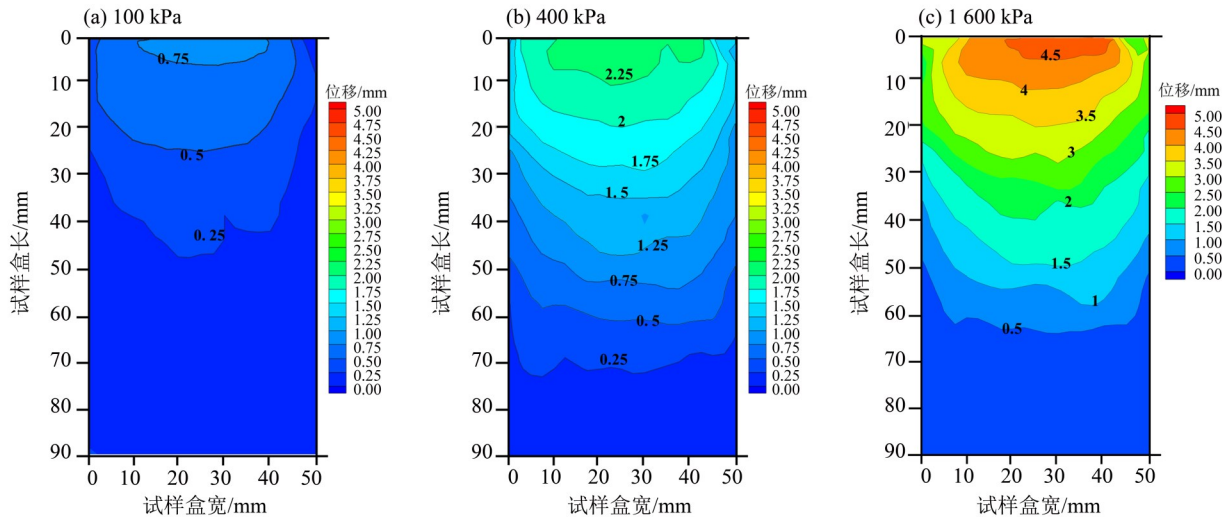


图 5 1.0~2.0 mm 钙质砂在逐级加载时代表性荷载下钙质砂内部位移云图

Fig. 5 Internal displacement cloud map of 1.0~2.0 mm calcareous sands under various loads during step-by-step loading

砂试样破碎不明显, 试样沉降多为颗粒间孔隙压密及颗粒重排列。随着钙质砂粒径增大, 颗粒破碎更明显, 使得试样变形量变大。各粒径钙质砂的沉降相对均匀基本呈现左右对称分布。

2.4 钙质砂的蠕变特征

由不同竖向应力条件下各粒径钙质砂的蠕变量-时间曲线(图 8)可知, 随着蠕变应力的增加, 蠕变量增加, 并且蠕变开始 10 min 内的蠕变量变化较大。因此, 以蠕变时间 0~10 min 的蠕变速率-时间曲线为代表进行分析(图 9), 蠕变速率随蠕变时间的增加逐渐减小并表现为非线性衰减, 在双对数坐标系下呈现线性减小趋势。随着蠕变应力的增加, 蠕变速率也随之增大。当竖向应力较低时, 钙质砂粒径越大, 对应的蠕变量越小, 且蠕变速率越小。当竖向应力增大到一定值后, 钙质

砂的蠕变量随钙质砂粒径增大而增大, 蠕变速率也随之增大。这是因为在竖向应力较小时, 各粒径钙质砂颗粒破碎均不明显, 且对于大粒径钙质砂而言因其颗粒形状更不规则, 颗粒间的咬合嵌固力更大, 在一定程度上会抑制蠕变。随着竖向应力的增大, 钙质砂颗粒破碎更加明显, 且钙质砂粒径越大, 颗粒破碎越显著, 增加了蠕变变形量与蠕变速率。可见, 钙质砂颗粒间的嵌固作用及颗粒破碎特性共同决定了钙质砂的蠕变特性。

3 钙质砂的内部应力演化

3.1 钙质砂内部应力分布随外部竖向应力变化

随着侧限压缩的进行, 钙质砂颗粒发生位置调整及颗粒破碎, 进而使其内部应力大小及分布与宏观行为发生变化。通过薄膜压力传感器获取

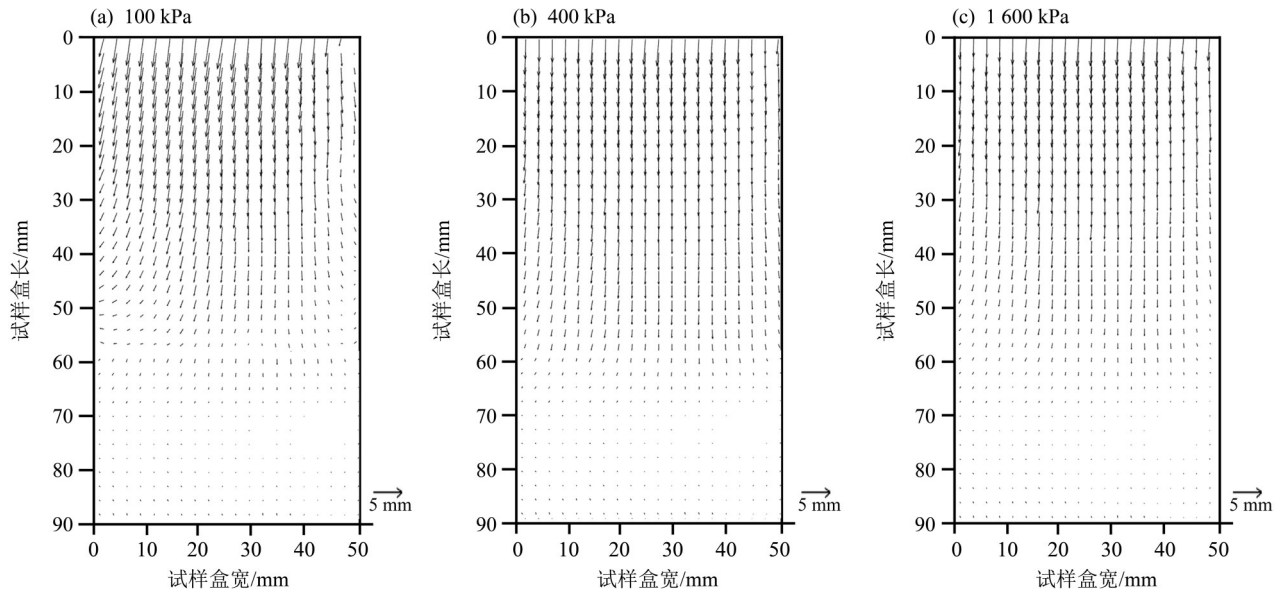


图 6 1.0~2.0 mm 钙质砂在逐级加载时代表性荷载下钙质砂内部位移矢量图

Fig. 6 Displacement vector diagram of 1.0~2.0 mm calcareous sands under various loads during step-by-step loading

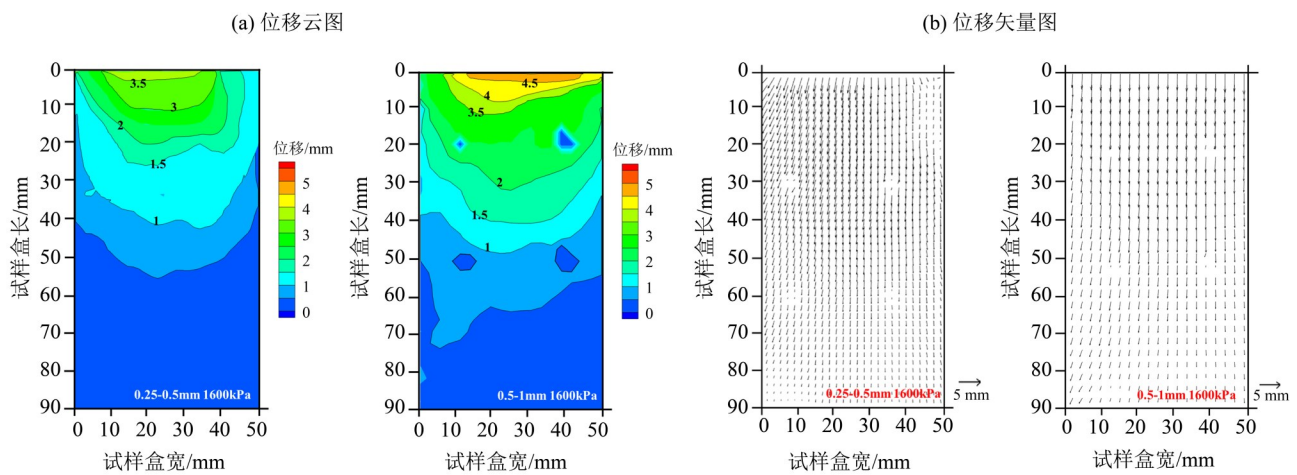


图 7 1600 kPa 竖向应力下的 0.25~0.5 和 0.5~1.0 mm 粒径钙质砂的变形位移云图和位移矢量图

Fig. 7 Deformation of calcareous sand with 0.25~0.5 and 0.5~1.0 mm particle size under 1600 kPa vertical stress

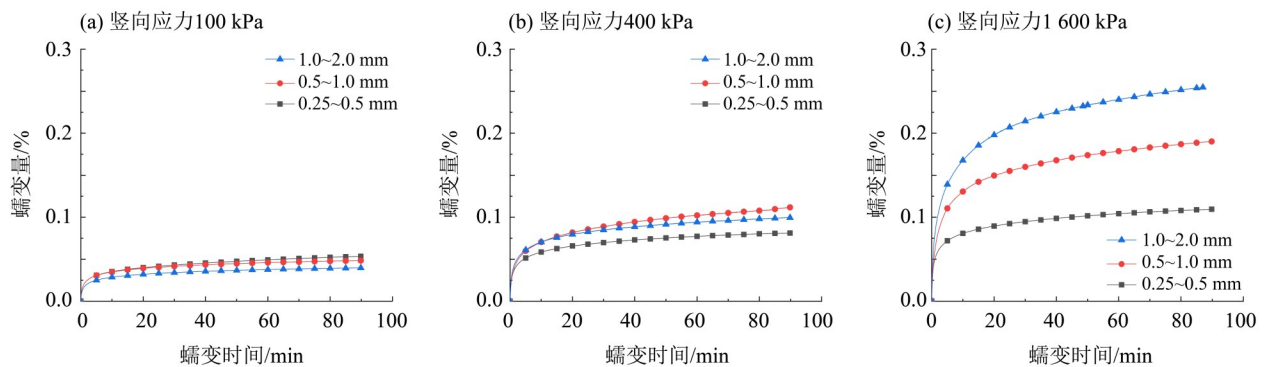


图 8 不同竖向应力条件下各粒径钙质砂的蠕变量-时间曲线

Fig. 8 Creep-time curves of calcareous sands with different particle sizes under different vertical stress

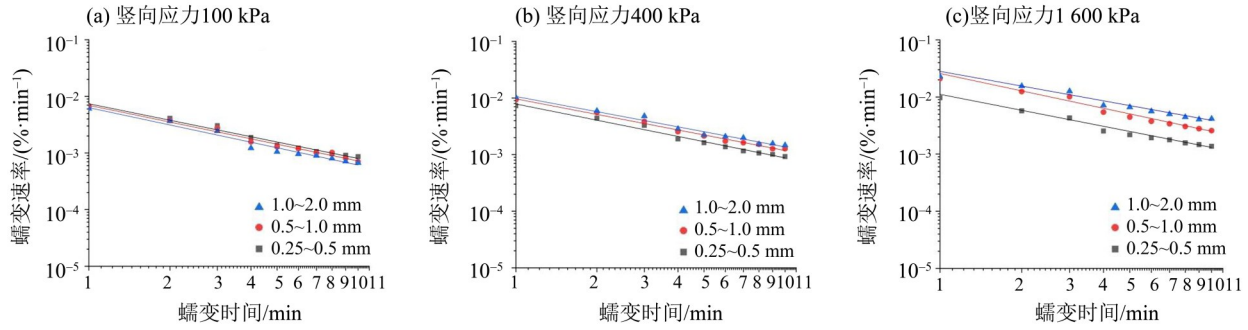


图 9 不同竖向应力条件下各粒径钙质砂的蠕变速率-时间曲线

Fig. 9 Creep rate-time curves of calcareous sands with different particle sizes under different vertical stress conditions

侧限压缩过程中试样内部的竖向与侧向应力发现, 不同粒径钙质砂在各级应力荷载下, 内部竖向及侧向应力分布均表现出显著的不均匀性, 以粒径 1.0~2.0 mm 钙质砂为例, 其内部应力分布直方图如图 10 所示。引入变异系数(COV)定量描述蠕变过程中力的离散性, 其为标准差与平均值之比, 数值范围在 0~1 之间。COV 越小, 则数据的离散程度越小、越集中于较小范围内。由图 10 可知, 随着外部竖向应力的增加, 内部应力分布发生改变, 侧向应力的均值及 COV 均随外部竖向应力的增加而增加, 竖向应力的均值与外部竖向应力一致, COV 随竖向应力的增加而增加。当竖向应力较小时, 颗粒破碎不明显, 较小的颗粒间应力数量较多, 钙质砂竖向及侧向应力的分布均呈

Weibull 分布, 随着竖向应力的增加, 试样内部的应力分布形式无明显改变; 随着竖向应力继续增加, 钙质砂颗粒破碎作用更加显著, 颗粒间接触随之发生变化, 原本作用于大颗粒骨架上的应力开始由破碎后的较小颗粒分担, 应力重分布加剧, 且较小应力的数量明显减少, 应力分布形式由 Weibull 分布逐渐向正态分布过渡, 最终表现为正态分布, 竖向应力相较于侧向应力更早过渡到正态分布。

由图 11~12 可见, 不同粒径钙质砂的竖向与侧向应力分布趋势大致相同, 同时受外部竖向应力影响。随外部竖向应力的增加, 不同粒径钙质砂的竖向与侧向应力均由 Weibull 分布转变为正态分布。小粒径钙质砂应力分布状态在较小竖向应力

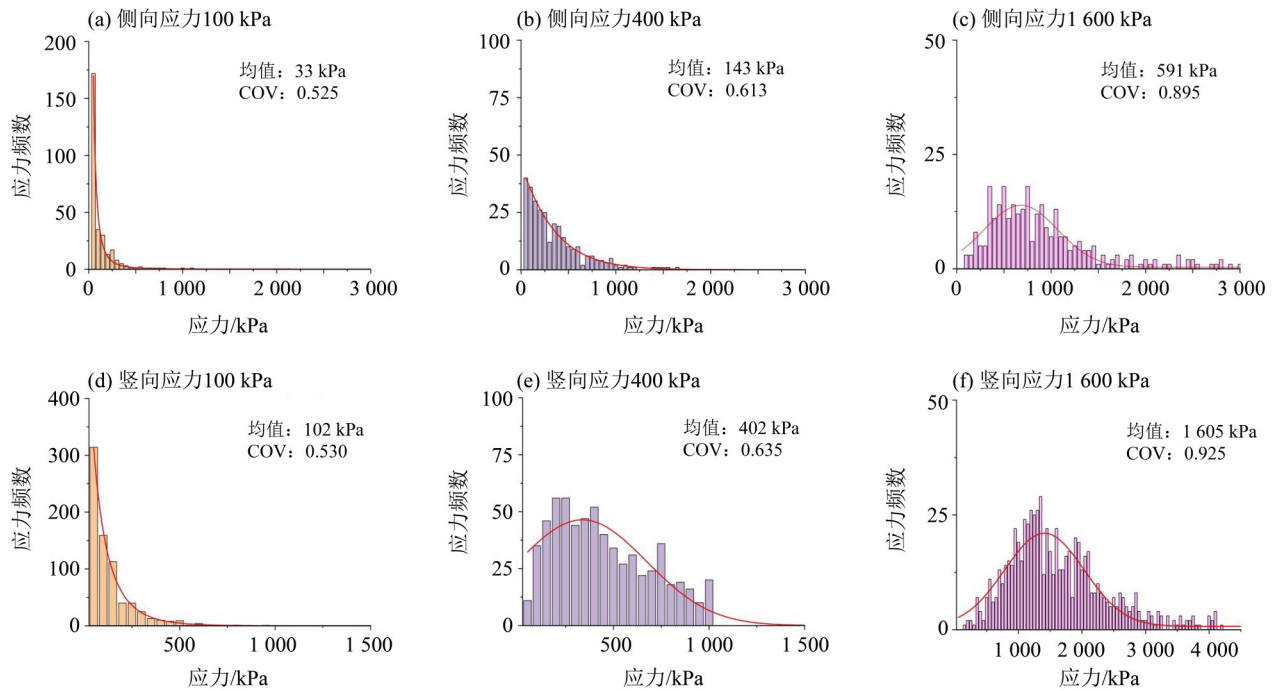


图 10 侧限条件下 1.0~2.0 mm 粒径钙质砂内部应力分布

Fig. 10 Stress distributions of calcareous sand with a particle size of 1.0~2.0 mm under lateral confinement

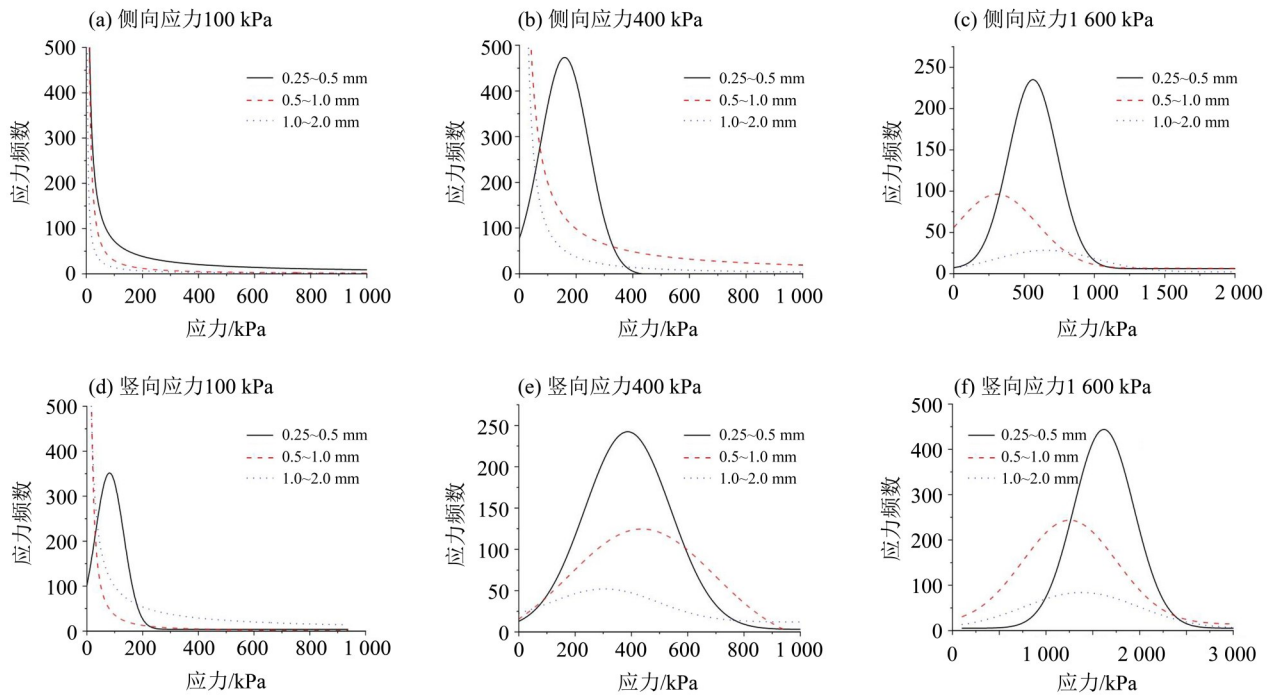


图 11 侧限条件下各粒径钙质砂内部应力分布特征曲线

Fig. 11 The internal stress distribution characteristic curves of calcareous sands with different particle sizes under lateral confinement

作用下便发生了改变, 其原因为小颗粒表面相对规则, 在小应力作用下便可产生较大位移, 试样孔隙减少, 颗粒间接触增加较大, 颗粒破碎现象不明显, 内部应力趋于稳定, 更快完成应力重新分布, 向正态分布过渡。

对于较大粒径钙质砂而言, 压缩变形及应力变化受颗粒破碎与颗粒间位置调整共同影响。所受竖向应力较小时以颗粒位置调整为主, 大颗粒形状较为不规则, 颗粒之间存在嵌固效应, 从而抑制颗粒间的位置调整, 使得内部应力分布趋势变化并不明显。当竖向应力增大至颗粒发生颗粒破碎时, 内部应力分布状态迅速呈现 Weibull 分布向正态分布过渡趋势。

钙质砂内部竖向应力比侧向应力分布变化更迅速, 在较低外部应力下更早呈现分布趋势从 Weibull 分布到正态分布的转变, 其原因可能为钙质砂内部竖向应力大于侧向应力, 且分布较不均匀使得垂直方向的颗粒破碎明显, 加速了竖向应力的重分布。钙质砂内部竖向应力均值 COV 要大于侧向应力均值 COV, 这也证明, 钙质砂内部竖向应力分布较侧向应力而言更加不均匀。且随着竖向应力的不断增加, 且对应的 COV 随之增大, 内部应力分布的不均匀性逐渐升高。

3.2 钙质砂内部应力随时间变化

以 1.0~2.0 mm 粒径钙质砂在较小外部竖向应力(100 kPa)及较大外部竖向应力(1600 kPa)的情况为例, 分析每级应力下一定蠕变时间前后的应力分布情况, 相应的内部侧向与竖向应力分布随时间变化的柱状图如图 12~13 所示, 图中 B 代表蠕变前应力分布情况, A 代表蠕变后应力分布情况, A-B 代表蠕变前后的应力分布情况变化; TM、SM 和 WM 分别表示蠕变起始点试样内部所有接触力平均值、强接触力平均值和弱接触力平均值。强弱力的分类遵循 Radjai et al.(1998)的定义, 即大于平均接触力为强接触力, 小于平均接触力为弱接触力。土内部颗粒间应力划分的目的是进一步进行微观力学机制分析, 土内部强弱力链对宏观强度与变形的贡献不同。

由图 12~13 可知, 蠕变是力的重分布和均匀化的过程。随着时间的不断增加, 颗粒发生位置调整, 颗粒间配位数及颗粒接触发生变化, 试样内颗粒间接触的竖向应力呈现弱力增加、强力减少的趋势, 且在蠕变初期(蠕变时间 0~10 min), 应力的变化幅度较大; 在蠕变中后期(蠕变时间 10~

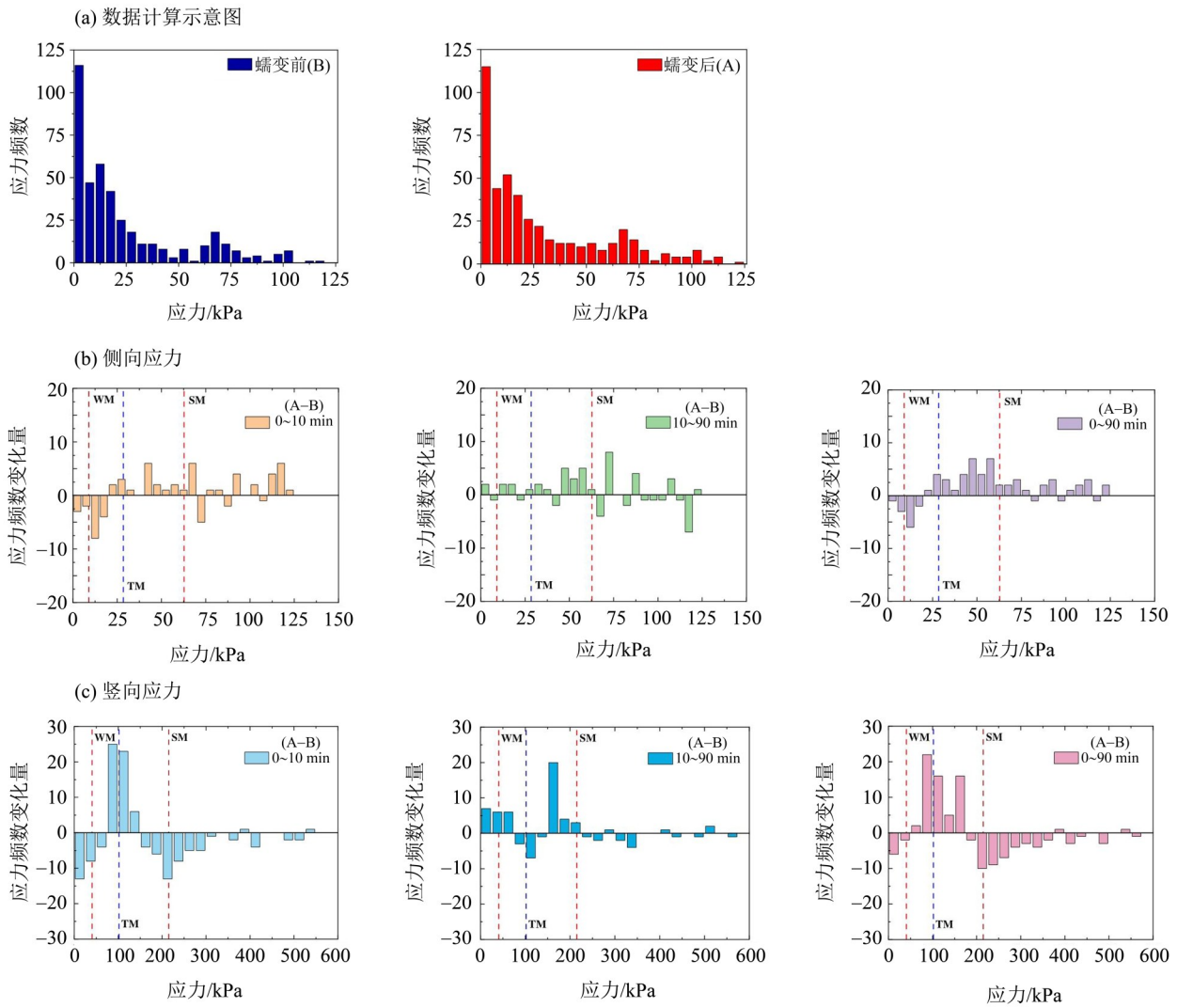


图 12 100 kPa 荷载和侧限条件下 1.0~2.0 mm 粒径钙质砂蠕变过程中内部竖向应力与侧向应力分布变化

Fig. 12 Changes in internal vertical/lateral stress distributions of calcareous sand with 1.0~2.0 mm particle size during creep under 100 kPa with lateral confinement

90 min), 强弱应力均有所增减, 整体呈现均匀化, 促进蠕变速率降低。对于侧向应力则随蠕变时间的增加, 强力增加, 弱力减少, 呈现一定的应力集中, 同样在蠕变初期应力重分布的程度更大。且竖向应力的变化幅度大于侧向应力。外部竖向应力的增大并没有改变内部应力的变化规律, 仅表现为颗粒间力的增大。

图 14 为 100 kPa 外部竖向应力下, 不同粒径钙质砂内部的竖向应力及侧向应力均值与 COV 随蠕变时间变化曲线。由图可看出, 对于同一粒径钙质砂, 其内部竖向应力及侧向应力的 COV 均随蠕变时间的增大逐渐减小, 这表明蠕变过程中应力分布趋于均匀, 且应力重分布增加了颗粒间接触

使内部侧向应力均值有所增加, 内部竖向应力的均值与外部施加的竖向应力大小一致 (100 kPa), 钙质砂蠕变过程中的颗粒破碎导致颗粒间位置重分布, 使得侧向应力均值有所上升。对于不同粒径钙质砂, 其粒径越小在相同蠕变时间下的 COV 越小。即粒径越小, 颗粒间接触更多, 应力分布趋于更加均匀。

不同竖向应力 200、400、800、1 200、1 600 kPa 下钙质砂内部竖向应力及侧向应力均值与 COV 随时间变化趋势与 100 kPa 条件下一致。以 1 600 kPa 为例, 其变化趋势如图 15, 相较于 100 kPa (图 14), 仅表现为 COV 随竖向应力的增加而增加, 不均匀性增加。

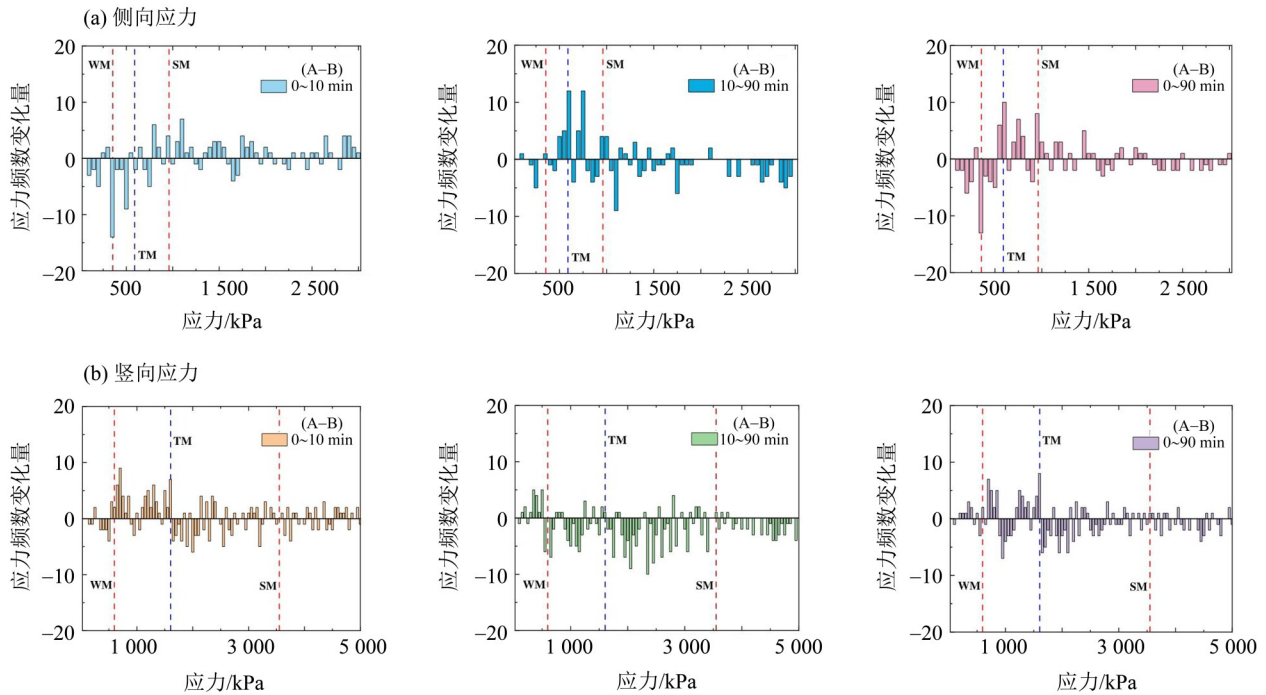


图 13 1 600 kPa 荷载和侧限条件下 1.0~2.0 mm 粒径钙质砂蠕变过程中内部竖向应力与侧向应力分布变化
 Fig. 13 Changes in internal stress distributions of calcareous sand with 1.0~2.0 mm particle size during creep under 1 600 kPa with lateral confinement

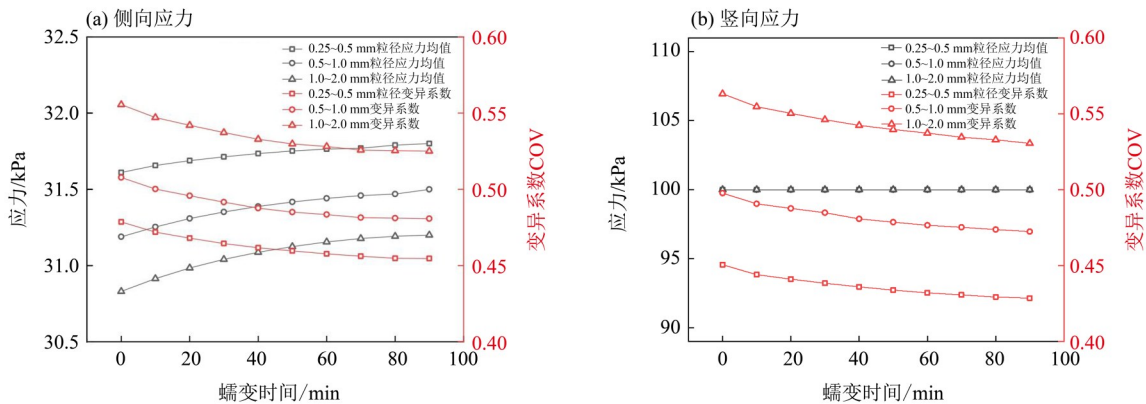


图 14 侧限条件下不同粒径的钙质砂在 100 kPa 外部竖向应力下蠕变过程中内部竖向应力与侧向应力均值及 COV 变化
 Fig. 14 Changes of mean and COV of calcareous sands with different particle sizes during creep under 100 kPa with lateral confinement for lateral and vertical stress

4 结 论

本文通过自设计的亚克力模型盒对不同粒径钙质砂进行侧限压缩与蠕变试验, 研究不同应力下不同粒径钙质砂的颗粒破碎与变形特征、压缩与蠕变过程中的应力分布特征, 得到如下主要结论:

1) 相同荷载条件下, 钙质砂的压缩变形量随粒径的增大而增大。相同粒径条件下, 钙质砂的压缩变形量随竖向应力的增大而增大。钙质砂的压缩特性由颗粒破碎及颗粒位置重新调整共同控

制, 随着钙质砂粒径增大, 颗粒破碎增多随之产生更大的变形。

2) 在侧限条件下, 对同一粒径钙质砂, 随着竖向应力增大, 钙质砂产生颗粒破碎, 产生较大变形, 并引起颗粒间接触发生变化, 加剧了应力重分布, 试样内部竖向及侧向应力大小的分布由 Weibull 分布逐渐向正态分布过渡, 最终表现为正态分布, 且竖向应力比侧向应力更快达到稳定。

3) 随着蠕变应力的增加, 蠕变量增加, 蠕变速率也随之增大。对于相同荷载条件下不同粒径钙质砂而言, 钙质砂颗粒破碎影响其蠕变量, 表

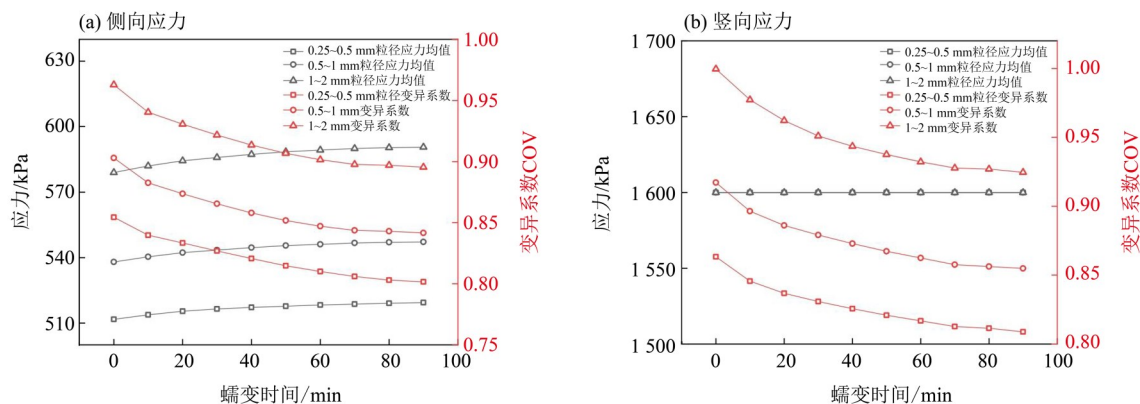


图 15 在 1 600 kPa 外部竖向应力和侧限条件下不同粒径钙质砂蠕变过程中内部竖向应力与侧向应力均值及 COV 变化

Fig. 15 Changes of mean and COV of calcareous sands with different particle sizes during creep under 1 600 kPa with lateral confinement for lateral and vertical stress

现为当竖向应力较低时, 颗粒破碎不明显, 大粒径钙质砂形状不规则嵌固力大, 对应的蠕变量及蠕变速率小; 当竖向应力变大后, 颗粒破碎显著

增加, 大粒径钙质砂颗粒破碎导致的蠕变量增大, 蠕变速率也随之增大。

参考文献:

- 陈莎莎, 2022. 冲击荷载下钙质砂颗粒破碎的尺寸效应研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学.
- 甘怡东, 徐东升, 魏龙海, 等, 2023. 级配效应下珊瑚砂不排水剪切特性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 45(7): 95-101.
- 顾琳琳, 余玮平, 王建平, 等, 2023. 高应力作用下不同颗粒特征的钙质砂压缩破碎特性 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 51(1): 31-38.
- 梁珂, 岳冲, 周正龙, 等, 2023. 考虑级配影响的珊瑚砂最大动剪切模量试验研究 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 45(6): 95-103.
- 刘崇权, 杨志强, 汪稔, 等, 1995. 钙质土力学性质研究现状与进展 [J]. 岩土力学, 16(4): 74-84.
- 刘崇权, 汪稔, 吴新生, 等, 1999. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 18: 91-94.
- 孟敏强, 袁正鑫, 蒋翔, 等, 2022. 钙质砂-石英砂单颗粒破碎-强度-尺寸效应试验研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 52(7): 1035-1047.
- 闫超萍, 龙志林, 周益春, 等, 2020. 钙质砂剪切特性的围压效应和粒径效应研究 [J]. 岩土力学, 41(2): 581-591+634.
- 孙刘留, 唐小欣, 等, 2022. 珊瑚砂压缩特性研究 [J]. 土工基础, 36(4): 645-648.
- 王新志, 翁贻令, 王星, 等, 2018. 钙质土颗粒咬合作用机制 [J]. 岩土力学, 39(9): 3113-3120.
- 熊雪梅, 郑宇轩, 黄俊宇, 等, 2023. 粒径和围压对珊瑚砂侧限

- 压缩性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 42(6): 2037-2046.
- 徐东升, 黄明, 黄佛光, 等, 2020. 不同级配珊瑚砂水泥胶结体的破坏行为分析 [J]. 岩土力学, 41(5): 1531-1539.
- 赵胜华, 赵艳林, 何江, 等, 2021. 颗粒级配对南沙珊瑚砂液化特性的影响 [J]. 中国科技论文, 16(4): 402-407.
- CHEN Y Y, TANG Y, GUAN Y F, et al, 2023. Study on the mechanical properties of coral sands with different particle gradations [J]. Mar Georesour & Geotechnol, 41(3): 327-338.
- RADJAI F, WOLF D E, JEAN M, et al, 1998. Bimodal character of stress transmission in granular packings [J]. Phys Rev Lett, 80(1): 61-64.
- HARDIN B O, 1985. Crushing of soil particles [J]. J Geotech Engrng, 111(10): 1177-1192.
- HASSANLOURAD M, RASOULI M R, SALEHZADEH H, 2014. A comparison between the undrained shear behavior of carbonate and quartz sands [J]. Int J Civil Eng, 12: 338-350.
- WANG G, WANG Z, YE Q, 2020. Particle breakage and deformation behavior of carbonate sand under drained and undrained triaxial compression [J]. Int J Geomech, 20: 3.
- XIAO Y, YUAN Z, DESAI C S, 2020. Effects of load duration and stress level on deformation and particle breakage of carbonate sands [J]. Int J Geomech, 20: 7.