

DOI: 10.11779/CJGE2024S10033

# 钙质砂三轴排水试验围压与剪切速率对应力特性影响研究

王 欢, 杨立功\*, 左殿军, 罗基伟

(交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

**摘 要:** 以海南省三沙市西沙群岛钙质砂为研究对象开展不同剪切速率的三轴固结排水试验, 研究钙质砂剪切应力特性。试验结果表明: 围压越大偏应力峰值出现的越晚, 相同围压剪切速率越快应力峰值越大, 应力下降也越快应力下降比越大, 剪切速率对应力的峰值大小及残余剪切强度有一定影响, 低围压下剪切速率对偏应力峰值影响更大。围压越小偏应力比越大, 相同围压剪切速率越大偏应力比增长越快, 当剪切速率低于一定速度时, 偏应力比的变化并不受剪切速度的影响。相同围压条件下, 由于排水剪切时围压和孔压保持不变, 偏应力和平均有效应力关系为斜率 3 的直线, 不同剪切速率破坏线趋势相同, 剪切速率越大破坏线角度越大, 但相差不大, 破坏线为接近斜率 1.75 的直线, 钙质砂内摩擦角为  $42^\circ$ 。剪切过程平均有效应力先增大后减小, 剪切过程表现出剪缩到剪胀的变化过程, 剪缩阶段不同剪切速率下孔隙比下降速率相近, 剪切速率在剪胀阶段对孔隙比影响较大, 剪切速率越大, 孔隙比变化越大。

**关键词:** 钙质砂; 剪切速率; 偏应力; 偏应力比; 平均有效应力; 孔隙比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0249-05

**作者简介:** 王 欢(1984—), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事土的工程性质相关研究工作。E-mail: wanghuan@tiwte.ac.cn。

## Influences of confining pressure and shear rate on stress characteristics of triaxial drainage tests on calcareous sand

WANG Huan, YANG Ligong, ZUO Dianjun, LUO Jiwei

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** The triaxial consolidation drainage tests with different shear rates are carried out to study the shear stress characteristics of the calcareous sand in Xisha Islands, Sansha City, Hainan Province of China. The test results show that the larger the confining pressure is, the later the peak value of the deviator stress appears, and the faster the shear rate of the same confining pressure is, the larger the peak value of the stress is, the faster the stress drop is, the larger the stress drop ratio is, the shear rate has a certain effect on the peak value of the stress and the residual shear strength, and the lower the confining pressure is, the greater the impact of the shear rate on the peak value of the deviator stress. The smaller the confining pressure, the larger the deviator stress ratio, and the larger the shear rate of the same confining pressure, the faster the deviator stress ratio increases. When the shear rate is lower than a certain rate, the change of the deviator stress ratio is not affected by the shear rate. Under the same confining pressure, because the confining pressure and pore pressure remain unchanged during drainage shear, the relationship between the deviatoric stress and the average effective stress is a straight line with slope of 3, and the trend of failure line is the same at different shear rates. The larger the shear rate is, the larger the failure-line angle is, but the difference is not large. The failure line is a straight line with slope of 1.75, and the internal friction angle of the calcareous sand is  $42^\circ$ . The average effective stress increases first and then decreases during the shearing process, which shows a change process from shear shrinkage to dilatancy. The pore ratio decreases under similar rates at different shear rates at the shrinking stage. The shearing rate has a greater influence on the pore ratio at the dilatancy stage. The larger the shear rate is, the larger the change of the pore ratio is.

**Key words:** calcareous sand; shear rate; deviatoric stress;

deviatoric stress ratio; average effective stress; pore ratio

## 0 引 言

钙质砂是一种分布于热带海洋的特殊岩土介质,

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2022YFB2602800); 国家自然科学基金青年基金项目 (52308401)

**收稿日期:** 2024-04-26

**\*通信作者** (E-mail: yanglg@tiwte.ac.cn)

由于其成因和组构上的特殊性导致其工程力学性质与普通的陆源砂有明显区别。目前国内外针对钙质砂地基应力变化及破坏模式等研究很少，其工程特征及地基性能尚无明确统一的说法，这给基础设施的设计、施工建设带来很大的困难，因此需要研究钙质砂类岩石的应力特性和承载机理。

钙质砂的应力特性，国内外已作了一些研究。文哲等<sup>[1]</sup>采用中国南沙某岛礁吹填珊瑚钙质砂，在级配和组分分析的基础上，研究不同密实度、含水率条件下轴向荷载钙质砂的剪切力学特性。王刚等<sup>[2]</sup>进行钙质砂不破碎三轴剪切过程的数值试验，以确定临界状态与固定级配的对应关系。相盈盈<sup>[3]</sup>采用三轴固结不排水剪切试验，对南海海区岛礁饱和钙质砂进行剪切特性分析。张季如等<sup>[4]</sup>为了研究不同应力路径对钙质砂的颗粒破碎和力学性质的影响，对不同固结压力的钙质砂进行了 5 种应力路径下的排水三轴压缩试验。Lade 等<sup>[5]</sup>针对珊瑚砂的时间变量开展了三轴压缩试验，提出了应力下降原因。Yamamuro 等<sup>[6]</sup>开展了钙质砂三轴排水试验，考虑了不同的围压状态和相对密实度，抗剪强度与轴向应变的变化规律。其他学者<sup>[7-9]</sup>对钙质砂的工程承载特性进行了部分研究。

由以上研究可以发现，针对钙质珊瑚砂的力学工程特性性质已经已有一定基础，与其他砂类试验对比分析，结果显示钙质砂是一种天然特殊砂，钙质砂在高压条件下发生颗粒破碎，其破碎性质也会引起钙质砂的力学性质发生改变，其性质与普通砂存在很大差异，工程中不能使用普通砂的成果分析。目前有关三轴试验剪切速率的影响因素相关研究较少，本文在不同围压下采用不同剪切速率对高低围压下钙质砂进行三轴固结排水试验，分析围压、剪切速率对钙质砂应力影响分析。

1 三轴排水剪切试验

1.1 试验材料

试验采用的试样取自中国海南省三沙市西沙群岛，试样中存在大块的砂砾和尖锐的贝壳，见图 1，为避免戳破橡胶膜影响试验，对原试样进行烘干、筛分、按一定比例进行配比后使用见图 2，试验筛除大于 2 mm 颗粒的钙质砂，将钙质砂分为 9 个粒径范围，不同粒径含量见表 1。颗粒级配见图 3，试验用钙质砂基本物理参数见表 2。

1.2 试验仪器

试验采用英国 GDS 公司生产的自动三轴试验系统 GDSTAS 完成（图 4）。应变控制速率从 0.00001~9.99999 mm/min。压力室最大承受压力为 3.5 MPa，2 MPa 孔隙水压力传感器精度为全量程的 0.15%，内置

水下荷重传感器精度为全量程的 0.1%。3 MPa/ 200 mm<sup>3</sup> 标准围压/体积控制器（围压控制），具有自动压力和体积溢出保护，测量精度为量测值的 0.25%，压力精度为全量程的 0.1%，体积变化测量和显示分辨率为 1 mm<sup>3</sup>。3 MPa/200 mm<sup>3</sup> 标准反压/体积控制器（反压控制），具有自动压力和体积溢出保护，测量精度为量测值的 0.25%，压力精度为全量程的 0.1%，体积变化测量和显示分辨率为 1 mm<sup>3</sup>。



图 1 试样原样  
Fig. 1 Original sample



图 2 试验试样  
Fig. 2 Test sample

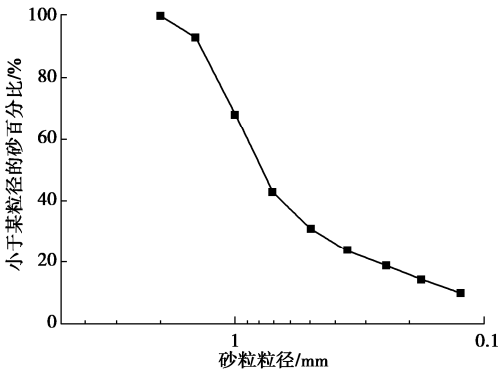


图 3 试样颗粒级配

Fig. 3 Grain-size distribution curve of sample

表 1 试样粒径范围

Table 1 Grain-size ranges of sample					
粒径/ mm	1.45~ 2	1~ 1.45	0.71~ 1	0.5~ 0.71	0.355~ 0.5
百分比/%	7	25	25	12	7
粒径/mm	0.25~ 0.355	0.18~ 0.25	0.125~ 0.18	0.075~ 0.125	
百分比/%	5	4.5	4.5	10	

表 2 试样基本物理参数  
Table 2 Basic physical parameters of sample

$G_s$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$D_{60}/\text{mm}$	$D_{30}/\text{mm}$	$D_{10}/\text{mm}$
2.80	0.58	1.07	0.9	0.49	0.125



图 4 试验仪器  
Fig. 4 Test instruments

1.3 试验方案

试验方案如表 3 所示。试验为三轴固结排水试验，试样相对密实度为 70%，有效围压为 300，600 kPa。剪切应变速率分别为 0.15%，0.035%，0.0045%/min，研究钙质砂在不同围压、不同剪切速率下的应力变化特性。试样直径为 50 mm，高度 100 mm。

表 3 试验方案  
Table 3 Test schemes

相对密实度 $D_r$	有效围压/kPa	剪切应变速率/(%·min <sup>-1</sup> )
0.70	300, 600	0.0045, 0.035, 0.15

试验采用干法制样，将配比好的试样按一定质量分层装入模具，因钙质砂的特性导致内部空隙较多，试验中利用 CO<sub>2</sub>、水头饱和、反压饱和相结合的方法对试样进行饱和，提高试样的饱和度。首先从试样底部缓慢通入 CO<sub>2</sub>，从试样顶部排出，通气时间为 2 h，此过程置换试样内部的空气。然后水头饱和，从试样底部缓慢进水，从试样顶部排水，控制水流速度，时间为 2 h，此过程置换试样中的 CO<sub>2</sub>。最后进行反压分级饱和，并监测试样饱和度，直到饱和度大于 95%。接下来进行试样固结，实时监测孔隙水压力变化，直到孔隙水压力消散，有效围压达到预定值。按照设定的剪切速率进行三轴排水试验，轴向位移达到 20%试验停止。

2 结果分析

2.1 围压与剪切速率对偏应力影响

不同围压下各剪切速率的偏应力应变曲线，见图 5。偏应力曲线趋势相同，剪切初期偏应力上升较快，当应变超过 5%时偏应力增长变缓，低围压下应变达到 10%左右时偏应力出现峰值，高围压下应变达到 12%左右时偏应力出现峰值，随后偏应力开始下降，高围压偏应力峰值出现的较晚。

不同围压下剪切速率对峰值的影响规律相同，偏应力峰值随剪切速率的增大而增大，剪切速率越快应力峰值越大，应力下降也越快应力下降比越大，可见剪切速率对应力的峰值大小及残余剪切强度有一定影响。低围压下不同剪切速率最大偏应力峰值差比为 11%，且在低围压约束力下剪切速率减小时试样颗粒发生重组后再剪切，因此速率 0.035%，0.0045%/min 的偏应力峰值软化后又会出现硬化趋势；高围压下不同剪切速率最大偏应力峰值差比为 4%，可见低围压下剪切速率对偏应力峰值影响更大。这与福建标准砂的性质不同，周杰<sup>[10]</sup>对不同应力下福建标准砂进行 5 种剪切速率试验，表明在低应力下砂的抗剪强度与剪切速率基本无关，高围压下，砂的抗剪强度随剪切速度增大而减小。

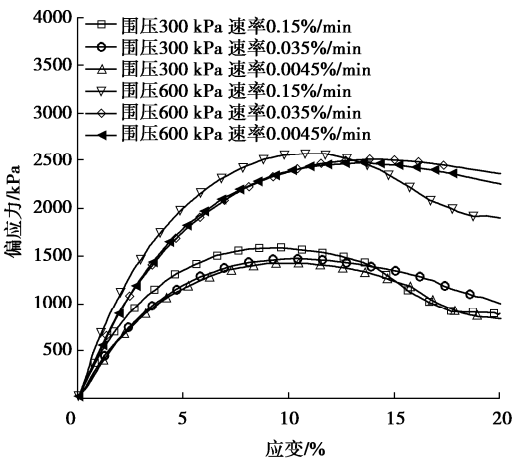


图 5 应力-应变  
Fig. 5 Stress-strain curves

2.2 围压与剪切速率对偏应力比影响

不同围压下各剪切速率的偏应力比曲线，见图 6。偏应力比曲线趋势相同先增大后减小趋于稳定。围压越小偏应力比上升越快、偏应力比越大，可见低围压下的剪切效果更明显，偏应力和峰值的变化情况相对于平均有效应力的变化更大，因为围压越低对颗粒束缚较小，钙质砂的越容易发生错动导致偏应力上升。应力应变分析中低围压下剪切速率越小时偏应力出现峰值然后减小有又硬化的趋势，因此在低围压下剪切速率越小偏应力比峰值后减小有又上升趋势。

相同围压下剪切速率越大，偏应力增长越快、偏应力比越大，剪切时砂粒之间重组排列，高剪切速度使得砂粒之间迅速咬合偏应力快速上升导致试样破坏，钙质砂的结构特征使得对剪切速率更加敏感。但是相对于 0.15%/min 的剪切速度，0.035%/min 和 0.0045%/min 的速度偏应力比的变化几乎相同，可见当剪切速率低于一定速率时，偏应力比的变化并不受剪切速度的影响。

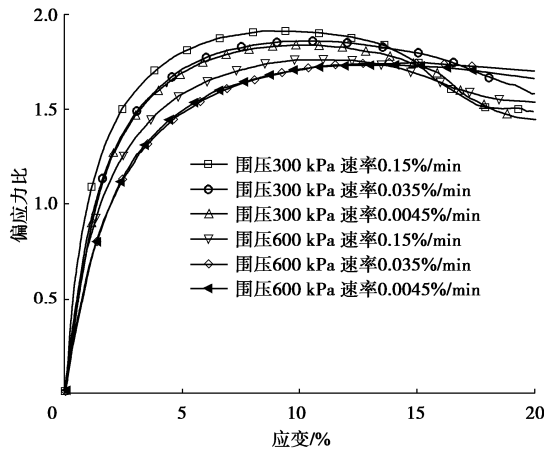


图6 偏应力比

Fig. 6 Deviatoric stress ratios

### 2.3 围压与剪切速率对应力路径影响

固结排水试验的偏应力-平均有效应力曲线,见图7。不同围压条件下,偏应力-平均有效应力关系曲线都是斜率为3的直线,是因为剪切时排水条件使得孔隙保持恒定值不变,且围压为一定值,根据平均有效应力为 $p'=[2(\sigma_3-\mu)+(\sigma_1-\mu)]/3$ , $\sigma_3$ 为围压, $\sigma_1$ 为轴向应力, $\mu$ 为孔隙水压力,经计算相邻点有效应力变化为 $p'=(\sigma_{11}-\sigma_{12})/3$ ,即为轴向应力差除以3,相邻点偏应力为 $q'=\sigma_{11}-\sigma_{12}$ ,即为轴向应力差,所以曲线斜率为 $q'/p'=3$ 。

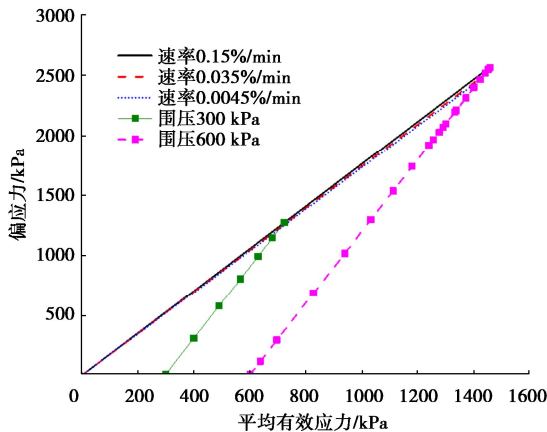


图7 应力路径

Fig. 7 Stress paths

不同剪切速率下的破坏线 $q'=Mp'$ 趋势相同,由应力应变分析可以看出偏应力峰值随剪切速率的增大而增大,破坏线是关系偏应力峰值与圆点的连线,可见剪切速率越大破坏线角度越大,三条线的 $M$ 值近似为1.75,由公式 $\varphi=\arcsin(3M/(6+M))=42^\circ$ ,钙质砂的内摩擦角近似为 $42^\circ$ 。这由钙质砂的结构特性决定,钙质砂形状不规则且尖锐,颗粒之间咬合错动,剪切破坏角较大,内摩擦角较大。

### 2.4 围压与剪切速率对孔隙比影响

不同围压及剪切速率条件下,孔隙比-平均有效应

力关系曲线,见图8。偏应力峰值以前平均有效应力逐渐增大,偏应力峰值以后平均有效应力逐渐变小,且偏应力峰值以前不同围压下孔隙比相对于平均有效应力的下降速率相近呈线性变化,可见孔隙比与平均有效应力的变化趋势在剪切初始阶段不受剪切速率的变化影响。偏应力峰值以后孔隙比相对于平均有效应力变化呈曲线增大状态。

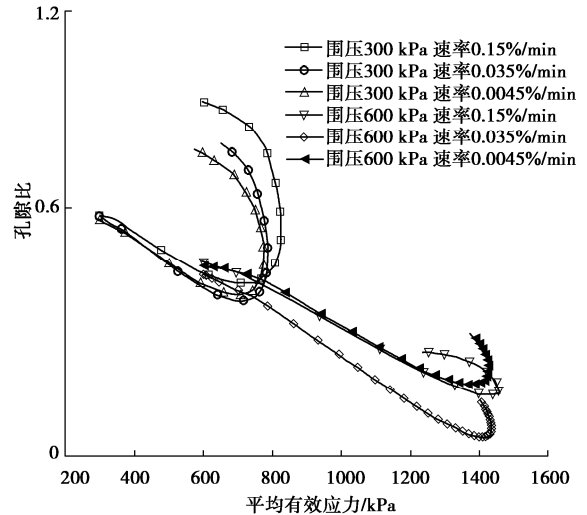


图8 孔隙比-平均有效应力

Fig. 8 Porosity-average effective stress curves

剪切过程中试样体积先减小后增大,孔隙比表现为先减小后增大,拐点发生在偏应力峰值的前后,剪切过程表现为密砂的特征。不同围压孔隙比下降速率相近,低围压剪缩阶段剪切速率对孔隙比的影响不明显,剪缩阶段颗粒之间位置调整砂粒发生相互错动重新排列压实,试样体积减小,孔隙比减小。剪胀阶段剪切速率对孔隙比的影响较大,剪切速率越大,孔隙比增大越快,随着剪切阶段颗粒间的作用力逐渐小于颗粒的抗剪强度试样破坏,尖利不规则的砂粒重新组合排列试样体积增大,孔隙比增大。

## 3 结 论

本文开展了钙质砂三轴排水剪切试验速率对应力特性影响研究,分析不同围压、不同剪切速率状态下钙质砂剪切过程中应力的变化规律,得出以下4点结论。

(1) 偏应力应变曲线趋势相同,偏应力曲线均出现峰值,高围压偏应力峰值出现比低围压偏应力峰值出现的晚。剪切速率越快,偏应力峰值越大,偏应力下降越快,剪切速率对偏应力峰值大小及残余剪切强度有一定影响,低围压下剪切速率对偏应力峰值影响更大。

(2) 偏应力比应变曲线趋势相同先增大后减小趋于稳定。围压越小偏应力比上升越快,偏应力比越大,



相同围压下剪切速率越大, 偏应力比增长越快偏应力比越大。当剪切速率低于一定速度时, 偏应力比的变化并不受剪切速度的影响。

(3) 不同围压下偏应力平均有效应力的关系是斜率为 3 的直线, 不同速率下的破坏线趋势相同, 偏应力峰值随剪切速率的增大而增大, 破坏线是关系偏应力峰值与圆点的连线, 因此剪切速率越大破坏线角度越大, 破坏线的斜率近似为 1.75, 钙质砂内摩擦角近似为  $42^\circ$ 。

(4) 偏应力峰值以前平均有效应力逐渐增大, 偏应力峰值以后平均有效应力逐渐变小, 且偏应力峰值以前不同围压下孔隙比相对于平均有效应力的下降速率相近。低围压剪缩阶段剪切速率对孔隙比下降速率的影响不明显, 剪胀阶段剪切速率越大, 孔隙比的增长越大。

#### 参考文献:

- [1] 文哲, 段志刚, 李守定, 等. 中国南海岛礁吹填珊瑚砂剪切力学特性[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(1): 77-84. (WEN Zhe, DUAN Zhigang, LI Shouding, et al. Shear mechanical properties of dredged coral sands from south china sea, china[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(1): 77-84. (in Chinese))
- [2] 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): 1511-1517. (WANG Gang, YANG Junjie, WANG Zhaonan. Evolution of critical state of calcareous sand during particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(8): 1511-1517. (in Chinese))
- [3] 相盈盈. 钙质砂三轴固结不排水剪切特性研究[J]. 路基工程, 2020(6): 99-101, 117. (XIANG Yingying. Study on shear properties of calcareous sand by consolidated undrained triaxial test[J]. Subgrade Engineering, 2020(6): 99-101, 117. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] LADE P V, LIGGIO C D, NAM J. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(7): 941-953.
- [6] YAMAMURO J A, ABRANTES A E, LADE P V. Effect of strain rate on the stress-strain behavior of sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(12): 1169-1178.
- [7] LÜ 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.
- [8] 杨锦健. 非均质钙质砂地基的承载力及变形特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022. (YANG Jinjian. Study on Bearing Capacity and Deformation Characteristics of Inhomogeneous Calcareous Sand Foundation[D]. Nanning: Guangxi University, 2022. (in Chinese))
- [9] 纪文栋, 张宇亭, 裴文斌, 等. 钙质珊瑚砂液化特性的动三轴试验研究[J]. 水道港口, 2018, **39**(1): 101-106. (JI Wendong, ZHANG Yuting, PEI Wenbin, et al. Study on the coral sand liquefaction characteristics by dynamic triaxial test[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, **39**(1): 101-106. (in Chinese))
- [10] 周杰, 周国庆, 赵光思, 等. 高应力下剪切速率对砂土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2019, **31**(9): 2805-2810. (ZHOU Jie, ZHOU Guoqing, ZHAO Guangsi, et al. Analysis of influence of shear rate on shear strength of sand under high stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **31**(9): 2805-2810. (in Chinese))

(编校: 孙振远)