

# 钙质砂抗剪强度特性的环剪试验

黄宏翔<sup>1,2</sup>, 陈育民<sup>1,2</sup>, 王建平<sup>3</sup>, 刘汉龙<sup>1,2,4</sup>, 周晓智<sup>1,2</sup>, 霍正格<sup>1,2,5</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;  
3. 海军工程设计研究局, 北京 100070; 4. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;  
5. 中铁时代建筑设计院有限公司, 安徽 芜湖 241001)

**摘 要:** 珊瑚礁沉积的钙质砂与石英砂的物理力学性质有较大差别。对取自南海岛礁的钙质砂进行了单次往返环剪试验以分析钙质砂的抗剪强度特性, 试验中考虑了相对密实度和竖向应力对结果的影响, 并与相同级配和试验条件下的石英砂进行对比分析。结果表明: 钙质砂正向剪切时应力-位移曲线为软化型, 具有明显的残余强度特性, 而反向剪切时则表现为硬化型, 正向和反向剪切强度基本一致; 石英砂正向剪切和反向剪切均表现为软化型。钙质砂正向剪切和反向剪切残余强度与峰值强度的比值在 0.75~0.93 之间; 石英砂正向剪切和反向剪切残余强度与对应峰值强度的比值在 0.89~0.96 之间。相同级配和试验条件下, 钙质砂残余强度均大于石英砂, 且强度比值基本保持在 1.05~1.3 之间。在 100、200 kPa 竖向荷载作用下, 钙质砂 0.5~2.0 mm 的颗粒发生了破碎, 破碎率分别为 4% 和 6%。

**关 键 词:** 钙质砂; 环剪试验; 残余强度; 颗粒破碎

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 06-2082-07

## Ring shear tests on shear strength of calcareous sand

HUANG Hong-xiang<sup>1,2</sup>, CHEN Yu-min<sup>1,2</sup>, WANG Jian-ping<sup>3</sup>, LIU Han-long<sup>1,2,4</sup>,  
ZHOU Xiao-zhi<sup>1,2</sup>, HUO Zheng-ge<sup>1,2,5</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;  
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Design and Research Bureau  
of Navy Engineering, Beijing 100070, China; 4. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;  
5. China Railway Shidai Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241001, China)

**Abstract:** Calcareous sands deposited on coral reefs are different from the quartz sands in their physical and mechanical properties. In this paper, we conducted ring shear tests with a single cycle on the calcareous sand sampled from the South China Sea. The effects of relative density and vertical stress were compared with the quartz sand under the same particle size and test conditions. The results indicate that shear stress and displacement curves of calcareous sand in forward ring shear tests tend to soften with a clear residual strength, while that tend to harden in reversed ring shear tests. The strength in forward and reversed ring shear tests are equal. The curves of the shear stress with displacement of quartz sand in forward and reversed ring shear tests tend to soften. The ratio of residual strength to peak strength of calcareous sand ranges from 0.75 to 0.93, while that of quartz sand ranges from 0.89 to 0.96. Residual strength of calcareous sand is higher than that of quartz sand with same particle size distribution and test conditions and the ratio ranges from 1.05 to 1.3. The particle of calcareous sand, in the size of 0.5 mm to 2 mm, occurs breakage under the vertical loading of 100 kPa and 200 kPa, and breakage percentages of particle are 4% and 6% respectively.

**Keywords:** calcareous sand; ring shear tests; residual strength; particle breakage

收稿日期: 2016-10-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.51379067, No.51679072); 国家自然科学基金重点国际 (地区) 合作研究项目 (No.51420105013); 教育部长江学者创新团队发展计划 (No.IRT-15R17)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51379067, 51679072), the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (51420105013) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT-15R17).

第一作者简介: 黄宏翔, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事土动力学与土工抗震方面的研究。E-mail: 499617449@qq.com

通讯作者: 陈育民, 男, 1981 年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学与土工抗震领域的教学和科研工作。E-mail: ymchenhhu@163.com

## 1 引言

钙质砂通常是指富含  $\text{CaCO}_3$  或其他难溶性碳酸盐类物质的特殊岩土介质。我国南海岛礁大量分布, 多为粒状或片状, 由于其沉积过程大多未经长距离搬运, 保留了原生物骨架中的孔隙, 故钙质砂土颗粒有多孔、形状不规则、易破碎等特点<sup>[1-3]</sup>, 其工程力学性质与一般土体有着明显的区别。

随着对海洋资源的开发与利用, 南海地区岛礁上进行了大规模的基础设施建设, 需要考虑地基土钙质砂对构筑物的影响。构筑物对地基土施加的附加应力造成钙质砂的破碎, 其力学性能发生较大改变, 进而对地基土的工程力学性质产生很大的影响<sup>[4-7]</sup>。对于颗粒破碎, 国内外学者进行了一系列直剪、三轴试验研究了钙质砂的破碎现象, 结果表明, 钙质砂在低压力下就会发生破碎, 而在高压 (12 MPa) 条件下, 钙质砂颗粒破碎情况更严重, 试样的细粒、粉粒含量大幅增加<sup>[8-12]</sup>。对于钙质砂抗剪强度, 国内外的学者进行了广泛的研究, 考虑了竖向应力、相对密实度、排水条件、粒径分布的影响<sup>[9-11,13]</sup>。

在海浪、地震荷载作用下, 岛礁边坡会像陆地边坡一样发生失稳而破坏。残余强度对于研究陆地边坡失稳有重要的意义, 钙质砂的残余强度成为研究岛礁边坡稳定的重要组成部分, 分析钙质砂残余强度有较强的工程意义。直剪试验剪切面固定, 并非试样抗剪能力最弱的面, 剪切面上的应力分布不均匀, 且剪切面随着剪切位移的增加逐渐减小。三轴试验受限于破坏时的剪切位移, 不能研究钙质砂发生大变形后的残余强度。已有研究表明, 钙质砂环剪会达到最终稳定的状态, 此时级配和残余强度都相对稳定, 达到此状态需要的剪切应变与初始级配、竖向应力有关<sup>[14-16]</sup>。钙质砂的强度和颗粒破碎已有较为深入的研究, 但关于颗粒破碎对残余强度特性的影响分析较少。

针对以上研究工作的不足, 本文提出了正向剪切和反向剪切的试验方法。对南海岛礁现场所取钙质砂, 采用环剪仪对不同相对密实度的试样进行不同竖向应力下的环剪试验, 连续进行正向剪切和反向剪切, 对大变形条件下的残余强度进行分析, 对比正向剪切和反向剪切残余强度, 探究颗粒破碎对钙质砂性质的影响规律。配制与钙质砂同级配的石英砂, 进行 9 组对比环剪试验, 分析钙质砂与石英砂性质上的差异。

## 2 试验方案

### 2.1 试验用砂

试样取自我国南海某岛礁附近, 试验前筛除了大粒径颗粒, 仅保留颗粒粒径小于 2 mm 的部分。根据室内筛分试验, 该钙质砂试样的限制粒径  $d_{60}=0.294$  mm, 平均粒径  $d_{50}=0.214$  mm, 有效粒径  $d_{10}=0.052$  mm, 不均匀系数  $C_u=5.628$ , 曲率系数  $C_c=0.814$ , 黏粒含量为 0%, 土粒相对密度  $G_s=2.75$ , 最大和最小干密度分别为 1.51、1.14 g/cm<sup>3</sup>。图 1 为钙质砂的颗粒级配曲线, 由其粒径分布曲线可以看出该砂样属级配不良的砂土。

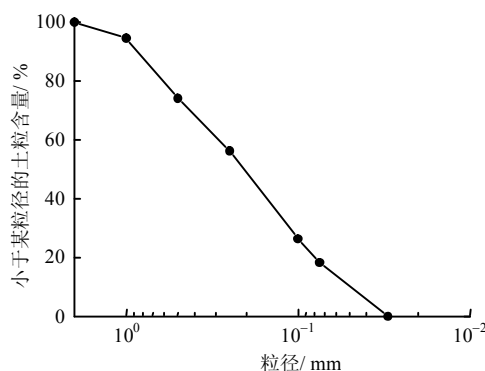
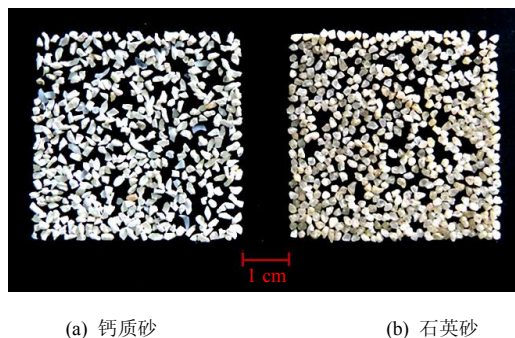


图 1 钙质砂颗粒级配曲线

Fig.1 Grain size distribution of the calcareous sand

为了比较钙质砂与石英砂的性质差异, 配制了与钙质砂级配相同的石英砂试样, 试验所用石英砂取自我国福建, 主要成分为  $\text{SiO}_2$ , 土粒相对密度  $G_s=2.65$ , 最大和最小干密度分别为 1.778、1.483 g/cm<sup>3</sup>。图 2 为钙质砂和石英砂颗粒 (粒径 1~2 mm) 对比图, 钙质砂颗粒多为片状和粒状, 颗粒形状差别很大, 而石英砂颗粒多为圆粒, 形状较稳定。



(a) 钙质砂 (b) 石英砂

图 2 钙质砂与石英砂颗粒对比

Fig.2 Particle comparison of calcareous sand and quartz sand

### 2.2 试验仪器

本次试验所采用的仪器为江苏省溧阳市永昌工

程实验仪器厂生产的 HJ-1 型环剪仪, 仪器所采用试样的外径为 100 mm, 内径为 60 mm, 高为 20 mm。试样的面积为 5 027 mm<sup>2</sup>, 平均直径为 81.7 mm。对试样所能施加的最大法向应力为 900 kPa。

与常规的直剪仪相比, 环剪仪的突出优点为在剪切的过程中试样剪切面不发生变化, 受力均匀, 可在 0°~180° 的范围内发生任一角度的剪切变形, 适合研究土体遭受破坏后强度衰减的变化规律。剪切扭矩可通过计算机自动采集, 剪应力与扭矩的转化关系为

$$\tau = \frac{M}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 dr} = \frac{3M}{2\pi(r_2^3 - r_1^3)} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为剪切应力;  $M$  为剪切扭矩;  $r_1$  和  $r_2$  分别为试样的内半径和外半径。

### 2.3 试验工况

对取自南海的钙质砂试样, 本次试验主要考虑相对密度  $D_r$  和竖向应力  $\sigma_v$  两个因素, 相对密度选取 30%、50% 和 70%, 分别对应疏松、中密和密实状态, 竖向应力选取 50、100、200 kPa, 进行 9 组饱和排水剪切试验。《土工试验规程》<sup>[17]</sup> 中并未对环剪试验剪切速率做出规定, 本试验参照其对直剪试验速率的规定, 选定剪切速度为 0.8 mm/min。

### 2.4 试验步骤

考虑到钙质砂的实际工况, 试样在试验前浸泡 2 h, 装样时不采取振捣等压密方法, 避免人为因素带来的颗粒破碎。环剪试验一般有单级剪、预剪和多级剪等多种试验方法<sup>[18-19]</sup>, 为研究钙质砂残余强度的变化, 本文采取的是单次往返的试验方法, 即首先使下部剪切盒进行顺时针转动, 对土体进行剪切, 称为正向剪切, 土体达到一定的剪切位移后再使下部剪切盒逆时针转动, 对土体进行剪切, 称为反向剪切。提出了正向剪切和反向剪切的概念, 对同一组试样, 首先进行正向剪切, 待土体达到残余强度后, 进行反向剪切。取出试样, 放入恒温烘箱烘干, 对试样进行筛分, 分析其颗粒破碎的规律。

同时, 配制与钙质砂颗粒级配相同的石英砂, 进行 9 组对比饱和排水剪切试验, 试验结束后取出试样放入恒温烘箱烘干, 对每组试样进行筛分, 比较石英砂与钙质砂的颗粒破碎性状。

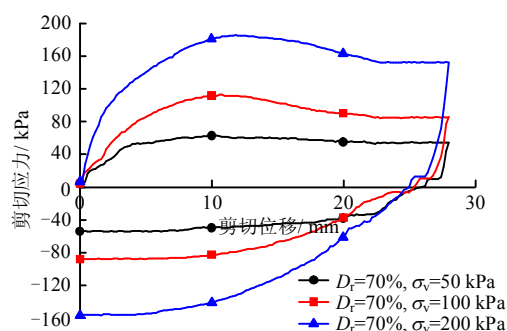
## 3 试验结果及分析

对钙质砂和石英砂剪切全程剪切应力-位移曲线的分析, 分析了两组剪切特性的异同。对正向、反向剪切残余强度的比较分析, 得出其一般规律, 并从环剪机制上进行了阐述。对钙质砂的颗粒破碎

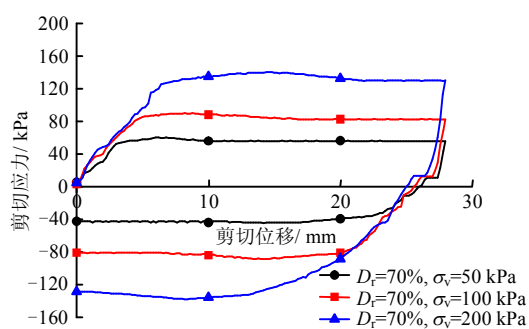
进行分析, 初步了解了其颗粒破碎特性, 并与石英砂进行了对比分析。

### 3.1 剪切全程剪切应力-位移曲线分析

图 3 为钙质砂和石英砂剪切全程剪切应力-位移曲线。正向剪切时, 剪切应力随着剪切位移的增加而增大, 开始增长较快, 随后趋缓, 某一时刻, 达到正向剪切峰值强度。剪切位移再增加, 剪切应力逐渐减小, 最后在一个稳定值上下波动, 此值即正向剪切残余强度。正向剪切过程中, 钙质砂与石英砂剪切应力-位移曲线为软化型, 但与石英砂相比, 钙质砂正向剪切峰值强度更加明显。



(a) 钙质砂



(b) 石英砂

图 3 全程剪切应力-位移曲线

Fig.3 Complete shear stress-displacement curves

无黏性土抗剪强度与土粒接触面上的滑动摩擦有关。正向剪切开始时, 在剪切力的作用下发生平移、翻转等不同方式的运动, 试样中粗颗粒调整位置, 开始互相接触摩擦, 导致剪切应力在这一阶段急剧增大, 并且竖向应力越大, 粗颗粒之间摩擦接触越强烈, 剪切应力增长越快, 并达到正向剪切峰值强度。随着剪切位移的增加, 剪切面上土体结构遭到破坏, 持续的扭剪使剪切面上的土体完成定向排列, 形成稳定的残余强度。

反向剪切时, 剪切位移为 28 mm 时, 剪切应力与正向剪切残余强度相同, 随后开始急剧下降, 在降为 0 之前, 会产生时间较短的应力相等的台阶阶

段, 随后剪切应力降为 0。从正向剪切残余强度降到 0, 这一过程可以理解为过渡阶段, 此阶段的应力在较短时间发生了急剧的变化。对钙质砂和石英砂 9 组试验数据分析, 发现 0 点对应的剪切位移在 24~26 mm 之间, 且相对密实度相同的条件下, 竖向应力越大, 其值越小, 即过渡阶段时间更长。

出现应力相等的台阶阶段的原因: 正向剪切时, 试样达到了残余强度, 剪切破坏产生了破坏面, 颗粒间有了定向的排列, 反向剪切时, 由于剪切作用力方向的转变, 颗粒间原有的定向排列遭到破坏, 向着新的定向排列方向过渡。

此后剪切过程, 两者剪切特性并不完全相同。

钙质砂随着剪切位移的增加, 剪切应力逐渐增加, 开始速度较快, 随后速度趋缓, 最后达到一个稳定值, 此值即反向剪切残余强度, 也就是反向剪切峰值强度。石英砂随着剪切位移的增加, 剪切应力逐渐增加, 而后达到反向剪切峰值强度。剪切位移再增加, 剪切应力逐渐减小, 最后在一个稳定值上下波动, 此值即反向剪切残余强度。石英砂反向剪切应力-位移曲线为软化型, 而钙质砂则为硬化型。

### 3.2 正剪和反剪抗剪强度对比分析

为了对比正向和反向剪切, 取反向剪切应力降为 0 之后的应力-位移曲线与同等试验条件下的正向剪切曲线对比, 其结果见图 4。

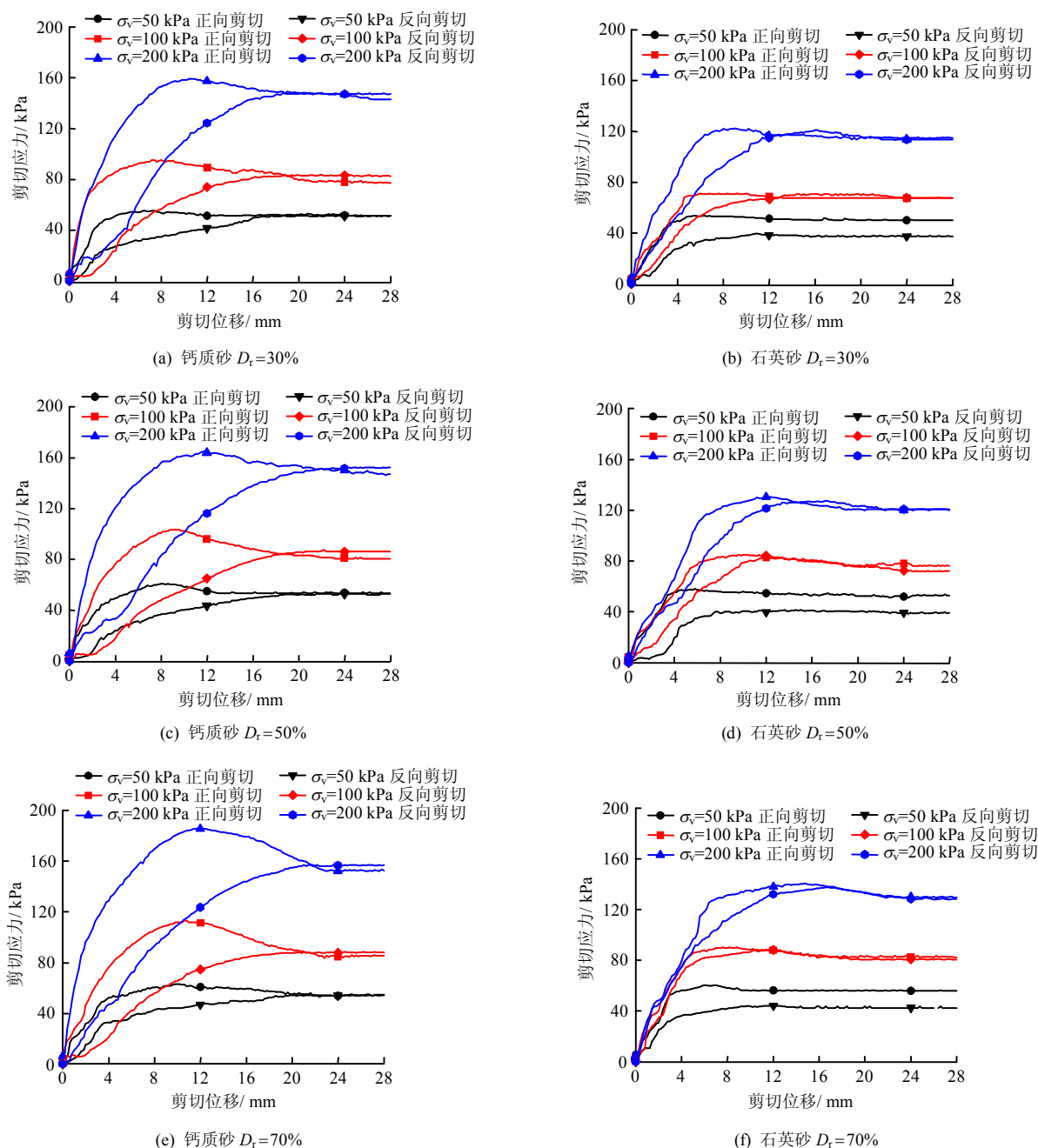


图4 正向、反向剪切应力-位移曲线

Fig.4 Shear stress and displacement curves in forward and reversed ring shear tests



在剪切过程中, 钙质砂颗粒由于剪切力的作用发生了破碎, 且随着竖向应力的增大, 破碎越严重。细颗粒填充孔隙, 达到正向剪切残余强度后进行的反向剪切使其颗粒进一步破碎, 并且在竖向应力作用下, 进一步降低孔隙率。钙质砂颗粒间的滑动摩擦更加剧烈, 土粒重新排列受到的阻力也越大, 宏观表现即残余强度值的变化。

在 50 kPa 的竖向应力下, 颗粒几乎未发生破碎, 且竖向应力较小, 正向和反向剪切孔隙率变化较小, 故正向和反向剪切残余强度基本一致。竖向应力为 100、200 kPa 时, 颗粒发生了破碎, 反向剪切后孔隙被填充的更多, 故反向剪切残余强度略高于正向剪切残余强度。分析试验数据, 反向剪切残余强度相对正向剪切平均增加了 4%。

石英砂反向剪切峰值强度和残余强度相对正向剪切都出现了不同程度的下降, 与钙质砂有明显的区别, 说明在反向剪切过程中土体孔隙率并未下降。

残余强度与峰值强度是环剪试验的重要结果, 在滑带土研究中, 国内学者对峰值强度与残余强度进行了线性拟合, 发现残余强度与峰值强度存在明显的线性关系<sup>[20]</sup>。

残余强度与峰值强度的比值可以反映在大变形条件下土体强度衰减的程度, 本文对此开展分析。对相同竖向应力不同相对密实度下此比值进行分析, 发现其中规律, 可以为工程提供一定的参考。

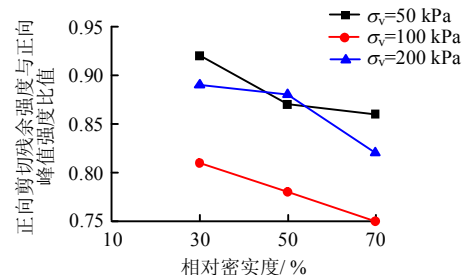
由图 5(a)可知,  $\sigma_v = 50$  kPa,  $D_r = 30\%$ 、50%、70%时, 正向剪切残余强度与峰值强度的比值分别为 0.92、0.87、0.86;  $\sigma_v = 100$  kPa 时, 对应比值分别为 0.81、0.78、0.75;  $\sigma_v = 200$  kPa 时, 对应比值分别为 0.89、0.88、0.82。竖向应力相同的情况下, 正向剪切残余强度与峰值强度的比值随着相对密实度的增加而减小, 正向剪切残余强度相对峰值强度下降最多为 25%。

由图 5(b)可知, 竖向应力相同的情况下, 反向剪切残余强度与正向峰值强度的比值随着相对密实度的增加而减小, 与正向剪切规律相同。

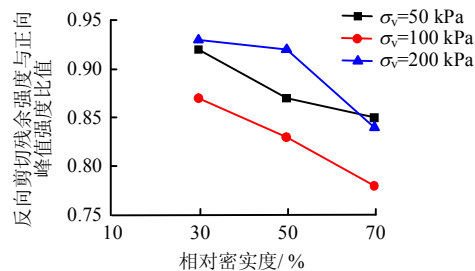
通过对石英砂数据分析, 在大变形条件下, 石英砂残余强度相对峰值强度下降的并不明显, 基本在 10%以内。

### 3.3 残余强度特性对比

图 6 为相对密实度为 70%钙质砂和石英砂正向剪切峰值强度和残余强度的对比曲线。竖向应力和相对密实度相同的情况下, 钙质砂的峰值强度和残余强度均大于石英砂的强度值。相对密实度为 30%和 50%时亦有此规律。



(a) 正向剪切残余强度与正向峰值强度比值



(b) 反向剪切残余强度与正向峰值强度比值

图 5 强度比值与相对密实度关系曲线

Fig.5 Relationship between the ratio of shear strength and relative density

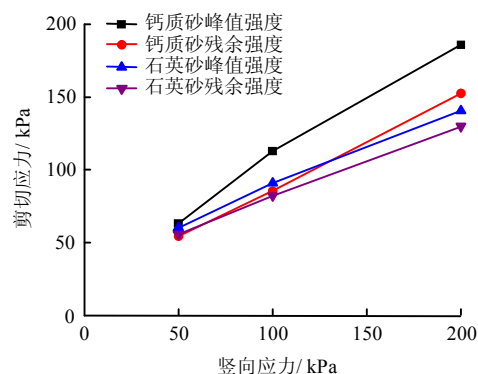


图 6 正向剪切峰值强度与残余强度的对比

Fig.6 Comparison of peak strength and residual strength in forward ring shear tests

图 7 对钙质砂与石英砂残余强度比值进行了统计, 除了  $\sigma_v = 50$  kPa, 残余强度比值相差较大, 其他比值相对较稳定, 基本维持在 1.05~1.3 之间, 且随着  $D_r$  增大, 该比值是逐渐减小的。

石英砂的主要矿物成分为  $\text{SiO}_2$ , 钙质砂的主要矿物成分为  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  强度高于  $\text{CaCO}_3$ , 出现同种级配的石英砂的峰值强度和残余强度小于钙质砂的原因可能是由于试样质量、颗粒级配、颗粒形状的影响。

钙质砂与石英砂最大和最小干密度不同, 相对密实度相同的两种试样, 钙质砂的试样质量比石英砂的质量大。试样细粒组 (粒径小于 0.075 mm) 含量达到了 26%, 粒径小于 0.25 mm 的颗粒含量达到了 56%, 使试样强度更大地取决于颗粒间的接触摩擦。

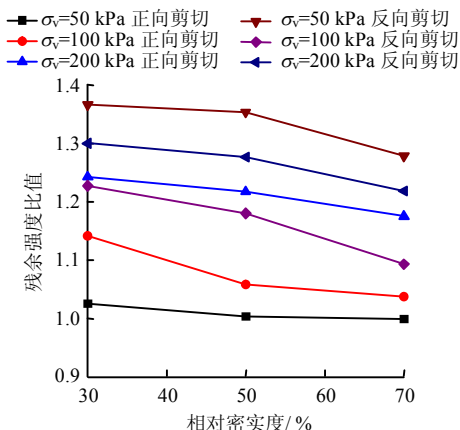


图7 钙质砂与石英砂残余强度比值的对比  
Fig.7 Comparison of ratio of residual strength for calcareous sand and quartz sand

钙质砂颗粒长宽比在1~3之间,统计平均值为2.02<sup>[1]</sup>,且其颗粒具有片状颗粒,增大了颗粒间的接触面积,从而增强了颗粒间的摩擦,由于其长宽比特性,这种摩擦是滑动摩擦。而石英砂颗粒长宽比接近于1,没有片状颗粒,颗粒间的咬合作用远没有钙质砂强,长宽比接近1,类似滚动摩擦。滚动摩擦的摩擦阻力小于滑动摩擦。

对钙质砂和石英砂峰值内摩擦角和残余内摩擦角进行分析,钙质砂内摩擦角在31.7°~34.4°之间,石英砂内摩擦角在25.8°~29.2°之间。对于无黏性土,内摩擦角反映了土体的抗剪能力,钙质砂抗剪强度大于石英砂抗剪强度。

### 3.4 破碎特性对比

钙质砂的破碎主要原因在于其富含CaCO<sub>3</sub>或其他难溶性碳酸盐类物质,莫氏硬度基本为3,比石英砂(莫氏硬度为7)要小得多。本节对环剪试验前后钙质砂的破碎特性进行了分析,图8给出了 $D_r=70\%$ ,竖向应力200 kPa条件下环剪试验前后的颗粒级配曲线对比图,可以发现,粒径小于0.25 mm的颗粒所占比例几乎没有发生变化,颗粒变化主要是0.25 mm以上的颗粒。通过对本文试验中的级配曲线进行的汇总分析,可以得到以下规律:

(1) 粒径在0.5~2.0 mm的颗粒所占比例减小,说明破碎主要发生在此粒径组范围内;0.25~0.50 mm的颗粒所占比例增加,说明0.50 mm以上的较大颗粒最终转化为0.25~0.50 mm的较小颗粒。

(2) 竖向应力为50 kPa时,钙质砂颗粒未发生破碎;竖向应力为100、200 kPa时,0.50 mm以上颗粒颗粒发生破碎,且竖向应力越大,破碎越多。竖向应力为100 kPa时,0.50 mm以上的颗粒破碎了4%,竖向应力为200 kPa时,0.50 mm以上的颗

粒破碎了6%。

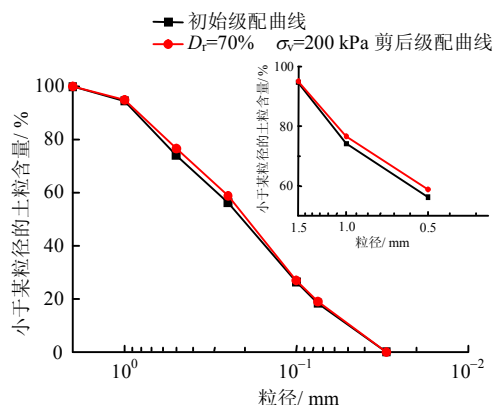


图8 钙质砂环剪前、后颗粒级配曲线  
Fig.8 Grain size distribution curves of calcareous sand before and after ring shear test

## 4 结 论

通过对钙质砂和石英砂正向反向环剪试验结果分析,发现了钙质砂与石英砂环剪性状的差异,峰值强度和残余强度的区别以及颗粒破碎上的不同,对钙质砂的性质有了初步的了解。

(1) 钙质砂正向剪切时应力-位移曲线为软化型,具有明显的残余强度特性,而反向剪切时表现为硬化型;石英砂正向剪切和反向剪切均表现为软化型。

(2) 竖向应力相同,钙质砂残余强度与正向剪切峰值强度的比值随着 $D_r$ 的增加而减小,比值在0.75~0.93之间。石英砂残余强度相对峰值强度下降的并不明显,比值在0.89~0.96之间,基本在10%以内。

(3) 相同试验条件下,钙质砂残余强度大于石英砂,钙质砂和石英砂残余强度的比值基本保持在1.05~1.30之间,且随着相对密实度的增大而减小。

(4) 钙质砂内摩擦角在31.7°~34.4°之间,石英砂内摩擦角在25.8°~29.2°之间,钙质砂抗剪强度大于石英砂。

(5) 竖向应力为100、200 kPa时,钙质砂颗粒发生破碎,主要在0.5~2.0 mm的粒组范围内,且转化为0.25~0.50 mm的小颗粒,而0.25 mm以下的颗粒基本不发生变化;石英砂颗粒则未发生破碎。

## 参 考 文 献

- [1] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389—1392.  
CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(9): 1389—1392.

- [2] 刘崇权, 王稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 32—38.  
LIU Chong-quan, WANG Ren. Physical and mechanical properties of calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(1): 32—38.
- [3] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831—1836.  
ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1831—1836.
- [4] HASSANLOURAD M, SALEHZADEH H, SHAHNAZARI H. Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2008, 6(2): 108—119.
- [5] 张家铭, 汪稔, 石祥峰, 等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3327—3331.  
ZHANG Jia-ming, WANG Ren, SHI Xiang-feng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3327—3331.
- [6] 江浩, 汪稔, 吕颖慧, 等. 钙质砂中群桩模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3023—3028.  
JIANG Hao, WANG Ren, LÜ Ying-hui, et al. Model tests of pile groups in calcareous sands[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.1): 3023—3028.
- [7] 江浩, 汪稔, 吕颖慧, 等. 钙质砂中模型桩的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 780—784.  
JIANG Hao, WANG Ren, LÜ Ying-hui, et al. Test study of model pile in calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 780—784.
- [8] HARDIN B O, ASCE, F. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1985, 111(10): 1177—1192.
- [9] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2789—2793.  
ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, JIANG Guo-sheng, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2789—2793.
- [10] 张家铭, 张凌, 刘慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 3010—3015.  
ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, LIU Hui, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 3010—3015.
- [11] 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, 2015, 30(7): 2043—2048.  
ZHANG Jia-ming, JIANG Guo-sheng, WANG Ren. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 30(7): 2043—2048.
- [12] 孙吉主, 汪稔. 三轴压缩条件下钙质砂的颗粒破裂过程研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 822—825.  
SUN Ji-zhu, WANG Ren. Study on particle failure process of calcareous sand under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 822—825.
- [13] AIREY D W. Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119(9): 1379—1398.
- [14] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. **Géotechnique**, 2004, 54(3): 157—163.
- [15] WANG X Z, JIAO Y Y, WANG R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in nansha islands, south China sea[J]. **Engineering Geology**, 2011, 120(1-4): 40—47.
- [16] MIAO G, AIREY D. Breakage and ultimate states for a carbonate sand[J]. **Géotechnique**, 2013, 63(14): 1221—1229.
- [17] 南京水利科学研究所. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [18] 丁树云, 毕庆涛, 蔡正银, 等. 环剪仪的试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 197—201.  
DING Shu-yun, BI Qing-tao, CAI Zheng-yin, et al. Test procedures for ring shear apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 197—201.
- [19] 王顺, 项伟, 崔德山, 等. 不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2967—2972.  
WANG Shun, XIANG Wei, CUI De-shan, et al. Study of residual strength of slide zone soil under different ring-shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(10): 2967—2972.
- [20] 张昆, 郭菊彬. 滑带土残余强度参数试验研究[J]. 铁道工程学报, 2007, (8): 13—15.  
ZHANG Kun, GUO Ju-bin. Experimental research on the residual strength parameters of slip soils[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2007, (8): 13—15.