

钙质砂抗剪强度的试验研究

袁宇洋¹, 黄昕^{1,2}, 张子新^{1*}

¹同济大学土木工程学院, 上海

²新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年1月19日; 录用日期: 2024年2月16日; 发布日期: 2024年2月26日

摘要

文章主要是通过对钙质砂和硅质砂进行直剪试验, 探究钙质砂的剪切破坏和抗剪强度与硅质砂的区别, 并对钙质砂设置不同的孔隙比和颗粒级配、以及干砂与湿砂的对比试验, 研究多种参数对钙质砂抗剪强度的影响。结果表明: 钙质砂的黏聚力随着不均匀系数增加先减小后增大, 而内摩擦角先增大后减小; 钙质砂的黏聚力和内摩擦角均随着孔隙比增加而减小; 钙质湿砂的黏聚力和内摩擦角均比钙质干砂的小; 随着剪切位移越来越大, 硅质砂的剪应力先增大后减小, 出现明显的峰值, 钙质砂的剪应力持续增大; 同等条件下, 钙质砂的黏聚力和内摩擦角都远大于硅质砂。

关键词

钙质砂, 直剪试验, 抗剪强度, 颗粒级配, 孔隙比, 硅质砂

Experimental Study on the Shear Strength of Calcareous Sand

Yuyang Yuan¹, Xin Huang^{1,2}, Zixin Zhang^{1*}

¹School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: Jan. 19th, 2024; accepted: Feb. 16th, 2024; published: Feb. 26th, 2024

Abstract

This article mainly conducts direct shear tests on calcareous sand and siliceous sand to explore the differences in shear failure and shear strength between calcareous sand and siliceous sand. Different pore ratios and particle sizes are set for calcareous sand, as well as comparative tests between dry and wet sand, to study the influence of various parameters on the shear strength of

*通讯作者。

文章引用: 袁宇洋, 黄昕, 张子新. 钙质砂抗剪强度的试验研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(2): 119-129.

DOI: 10.12677/ag.2024.142012

calcareous sand. The results show that the cohesive force of calcareous sand decreases first and then increases with the increase of non-uniformity coefficient, while the internal friction angle increases first and then decreases; The cohesion and internal friction angle of calcareous sand decrease with the increase of pore ratio; The cohesive force and internal friction angle of calcareous wet sand are smaller than those of calcareous dry sand; As the shear displacement increases, the shear stress of siliceous sand first increases and then decreases, showing a clear peak, while the shear stress of calcareous sand continues to increase; Under the same conditions, the cohesion and internal friction angle of calcareous sand are much greater than those of siliceous sand.

Keywords

Calcareous Sand, Direct Shear Test, Shear Strength, Particle Size Distribution, Porosity, Siliceous Sand

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钙质砂通常是指海洋生物(珊瑚、海藻、贝壳等)成因的富含碳酸钙或其它难溶碳酸盐类物质的特殊砂土。它的主要矿物成分为碳酸钙(>50%), 是长期在饱和的碳酸钙溶液中, 经物理、生物化学及化学作用过程(其中包括有机质碎屑的破碎和胶结过程, 以及一定的压力、温度和溶解度的变化过程), 而形成的一种与陆相沉积物有很大差异的碳酸盐沉积物。由于其沉积过程大多未经长途搬运, 保留了原生生物骨架中的细小孔隙, 形成的土颗粒多孔隙、形状不规则、易破碎、颗粒易胶结等, 使得其工程力学性质与硅质砂土相比有较明显的差异。钙质砂广泛分布于我国南海开发的工程建设场地, 所以为了能够指导后续的工程开发并解决一系列工程问题, 亟需对钙质砂的物理力学特性进行更多的研究。目前, 国内外学者对钙质砂开展了一系列研究, 取得了诸多成果。

张家铭等[1]对钙质砂进行三轴剪切试验, 分析了钙质砂颗粒破碎与剪胀对其抗剪强度的影响。试验结果表明, 低围压下剪胀对其强度的影响远大于颗粒破碎, 随着围压的增加, 钙质砂颗粒破碎加剧, 剪胀影响越来越小, 而颗粒破碎的影响则越来越显著; 颗粒破碎对强度的影响随着围压的增大而增大, 当破碎达到一定程度后颗粒破碎渐趋减弱, 其影响也渐趋于稳定。张弼文[2]通过侧限压缩试验研究钙质砂的压缩特性, 结果表明: 钙质砂的压缩变形主要为塑性变形; 加载初期压缩变形变化最剧烈, 压缩性及其变化趋势与试验荷载和试样粒径的大小有关。刘江[3]通过室内物理力学试验等研究手段, 发现钙质砂具有较高孔隙比, 且孔隙比随固结压力的增大而略微减小; 松散钙质砂的压缩性较大, 压缩模量通常随深度增大而增大; 钙质砂的抗剪强度参数基本不随深度变化, 与密实程度和胶结度有关。钱炜[4]对某岛礁钻孔钙质砂开展了室内大型直剪试验和大型高压固结试验, 对其剪切性能及压缩特性进行试验研究, 发现珊瑚砂砾混合碎屑物的剪切性能和压缩变形与珊瑚砾块和珊瑚砂的质量组成有关, 同时也受到含水量的影响。张早辉[5]对相同干密度、不同含水率的钙质砂进行多组平行直剪试验, 得到了含水率对其抗剪强度的影响规律。黄宏翔[6]等对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。刘萌成等[7]通过扫描电镜(SEM)和一系列三轴试验分别研究了钙质砂的基本物理性质及固结不排水剪切特性。采用试验数据的非线性拟合方法, 定量分析了剪切模量、抗剪强度和临界状态孔隙比的变化规律,

并将分析结果与试验结果进行对比。随后刘萌成等[8]又通过一系列三轴试验研究了钙质砂固结排水剪切特性,定性分析了钙质砂应力应变、体变与应力路径变化规律,非线性拟合试验数据获得了不同特征状态下钙质砂抗剪强度、内摩擦角和孔隙比的归一化表达式及其参数取值,进一步定性分析给出了抗剪强度、内摩擦角和孔隙比的非线性变化特征。王青等[9]为了深入研究粒径、含水率及剪切速率对钙质砂强度及颗粒破碎特性的影响,在不同粒径、含水率和剪切速率等因素下对钙质砂进行直剪试验,得到了诸多成果。黄良等[10]对钙质砂的特征形状进行三维定量描述,配制三种不同形状参量的钙质砂试样进行三轴固结不排水剪切试验,研究钙质砂的特征形状对其剪切特性的影响。研究成果不但加深了对钙质砂特征形状的理解,还为准确评估钙质砂的抗剪强度提供了新思路。李钊等[11]对钙质砂进行了一系列的环剪试验和颗粒形状分析,探究了大剪应变作用下试样替换对钙质砂最终级配的影响。

本文主要是通过对钙质砂和硅质砂进行直剪试验,探究钙质砂的剪切破坏和抗剪强度与硅质砂的区别,并对钙质砂设置不同的孔隙比和颗粒级配,以及干砂与湿砂的对比试验,研究多种参数对钙质砂抗剪强度的影响。

2. 试验材料及方案

2.1. 试验材料

先将天然的钙质砂进行晒干,然后使用标准筛分机对晒干后的钙质砂进行筛分。然后根据工况需要配置四种不同颗粒级配的钙质砂土,分别为一号土($Cu = 2$)、二号土($Cu = 4$)、三号土($Cu = 8$)和四号土($Cu = 16$)。各砂土样的级配曲线如图 1(a)所示。其中,一号土和二号土为均匀土,级配不良;三号土为不均匀土,级配良好;四号土为不连续级配土。而为了与硅质砂抗剪强度进行对比,以同样的处理方法配置级配良好的三号硅质砂土。因为标准砂土的颗粒粒径小于 2 mm ,所以只能控制标准砂和钙质砂土样的不均匀系数及曲率系数相同来得到三号硅质砂土,级配曲线如图 1(b)所示。为了研究钙质砂干砂与湿砂抗剪强度的不同,将同等工况设置的钙质砂和硅质砂进行浸泡一天,充分吸水后进行直剪试验得到抗剪强度并对比分析。

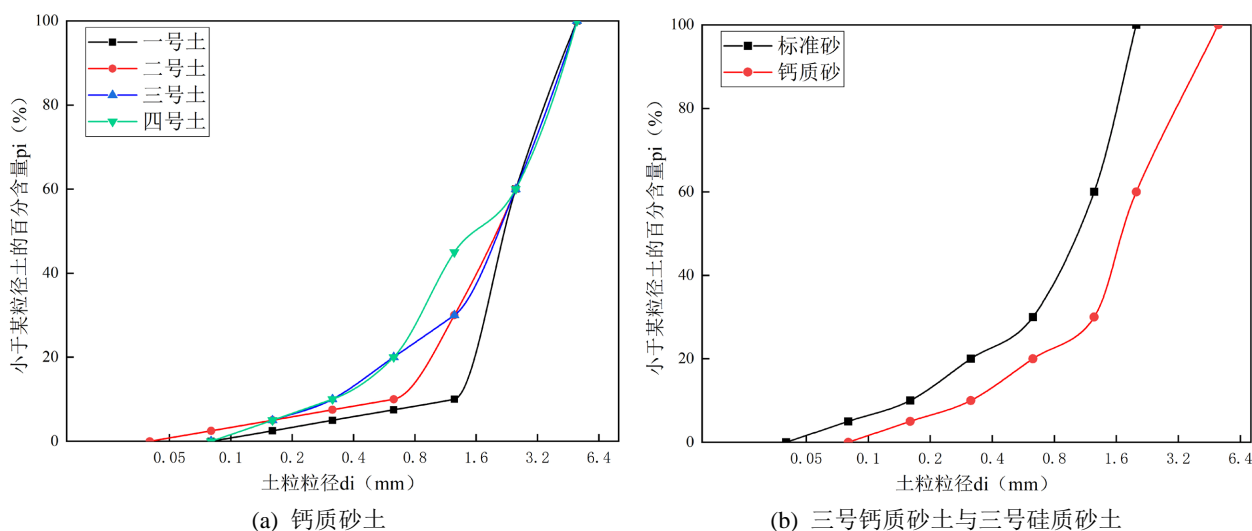


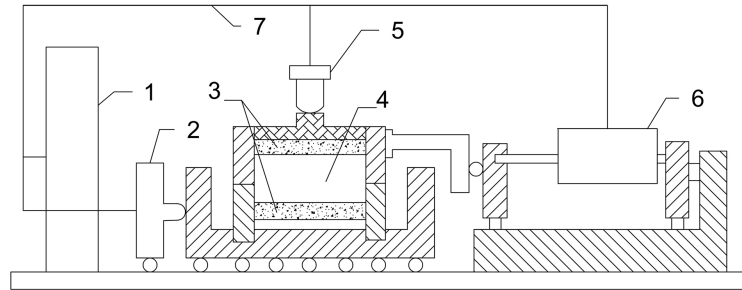
Figure 1. Grading curves of each sand sample

图 1. 各砂土样的级配曲线

2.2. 试验仪器

本次试验采用同济大学软土实验室的应变控制式直剪仪进行快剪试验。应变控制式直剪仪由剪切盒、

垂直加压装置、剪切传动装置、测力计、位移控制系统组成。环刀的内径为 61.8 mm，高度为 20 mm，容积为 60 mm³。由于采用了信息系统，竖向压力、剪切位移、剪切应力均可直接在显示屏中读取记录。试验装置原理图如图 2 所示。



1-显示屏；2-位移控制系统；3-透水石；4-土样；5-垂直加压装置；6-测力计；7-电路

Figure 2. Strain controlled direct shear apparatus
图 2. 应变控制式直剪仪

2.3. 试验方案

本次试验研究不同颗粒级配、孔隙比、干湿对钙质砂抗剪强度的影响，并与相同条件下硅质砂的抗剪强度进行对比分析，所以设置试验工况如表 1~4 所示。

Table 1. Experimental conditions considering particle size distribution factors

表 1. 考虑颗粒级配因素的试验工况

土样	不均匀系数	孔隙比
一号土	2	1.2
二号土	4	1.2
三号土	8	1.2
四号土	16	1.2

注：试验土样为钙质砂干土。

Table 2. Experimental conditions considering porosity factor

表 2. 考虑孔隙比因素的试验工况

土样	不均匀系数	孔隙比
三号土	8	0.9
三号土	8	1.2
三号土	8	1.5

注：试验土样为钙质砂干土。

Table 3. Experimental conditions considering dry wet comparison of calcareous sand

表 3. 考虑钙质砂干湿对比的试验工况

钙质砂土样	孔隙比	不均匀系数
干砂	1.2	2/4/8/16
	0.9/1.2/1.5	8
湿砂	1.2	2/4/8/16
	0.9/1.2/1.5	8

Table 4. Experimental conditions considering the comparison between calcareous sand and siliceous sand
表 4. 考虑钙质砂与硅质砂对比的试验工况

土样	不均匀系数	相对密实度
钙质砂湿土	8	0.457
硅质砂湿土	8	0.457

注：钙质砂内部孔隙较多，孔隙率远大于硅质砂，故采用相同的相对密实度。

根据不同工况设置计算出砂土样的试验密度，称取相应质量的砂土样倒入剪切盒中，轻轻击打使试样达到指定高度。对砂土试样分别施加 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 的竖向压力，以 0.8 mm/min 的剪切速率进行剪切使试件破坏，剪切位移达到 6 mm 时停止剪切，且每组试验重复三次。

3. 试验结果分析

3.1. 颗粒级配对钙质砂抗剪强度的影响

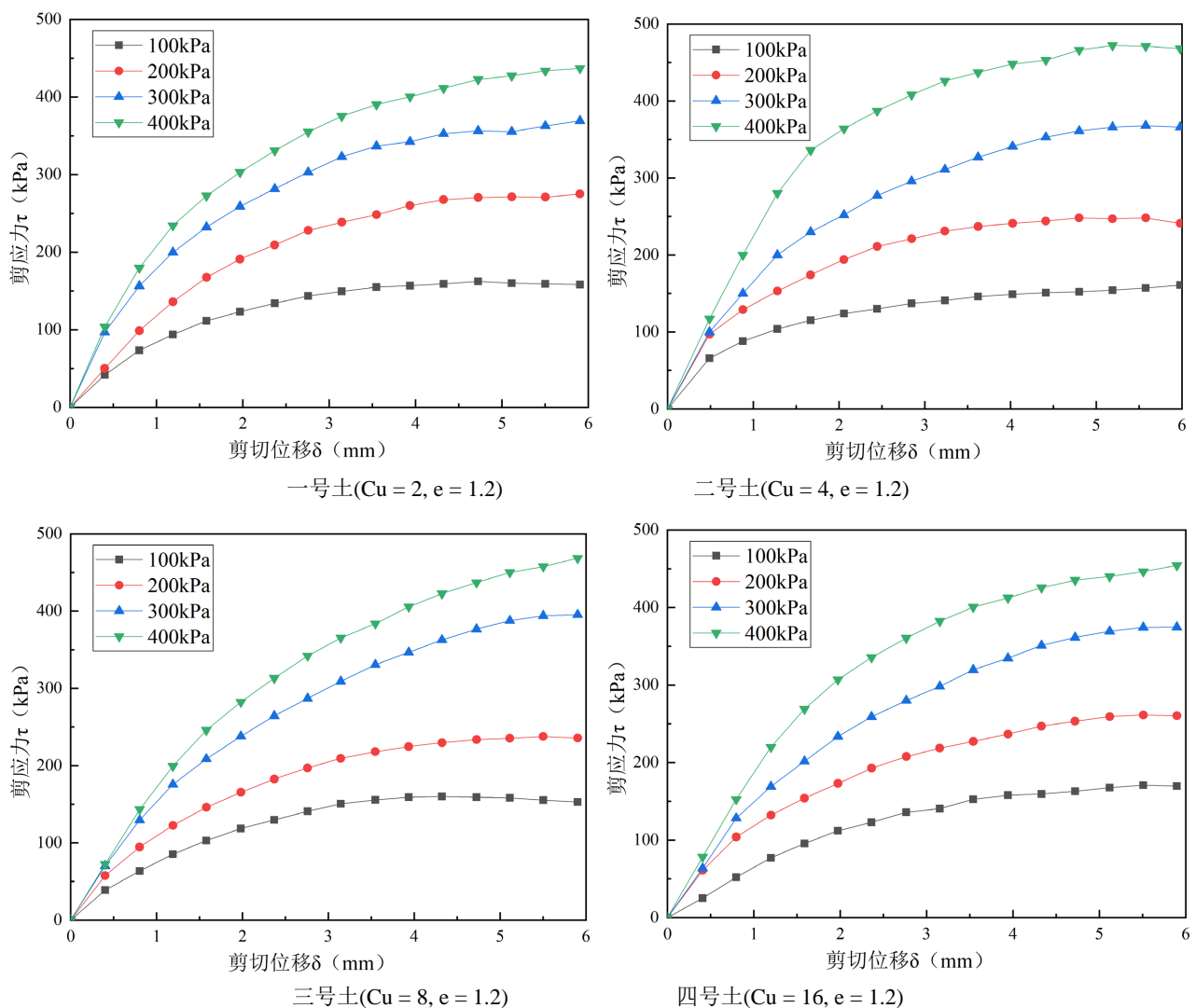


Figure 3. Relationship curve between shear stress and shear displacement of calcareous sand with different particle sizes

图 3. 不同颗粒级配钙质砂剪应力与剪切位移的关系曲线

图 3 为不同颗粒级配钙质砂土的剪应力随剪切位移变化的关系曲线。可以看出，随着剪切位移越来越大，剪应力也越来越大，直至剪切位移达到 6 mm 时停止剪切。主要是因为钙质砂有明显的剪切破碎现象，破碎后变小的钙质砂颗粒在竖向正应力的作用下，继续互相咬合以抵抗多余的剪应力。且不同颗粒级配的砂土，同一竖向应力条件下的最大剪应力也不相同，因为不同粒径的颗粒在剪切过程中相互咬合作用存在较大差异，从而导致钙质砂土的最大剪应力产生差异。

取出各竖向应力条件下的最大剪应力进行摩尔包络线拟合，得到不同颗粒级配钙质砂的抗剪强度指标如图 4 所示。可以看出，钙质砂的黏聚力随着不均匀系数增加先减小后增大，在不均匀系数为 8 时最小；钙质砂的内摩擦角随着不均匀系数增加先增大后减小，在不均匀系数为 8 时最大。可能是因为颗粒级配良好时，颗粒间咬合作用较大，而颗粒间摩擦较小。

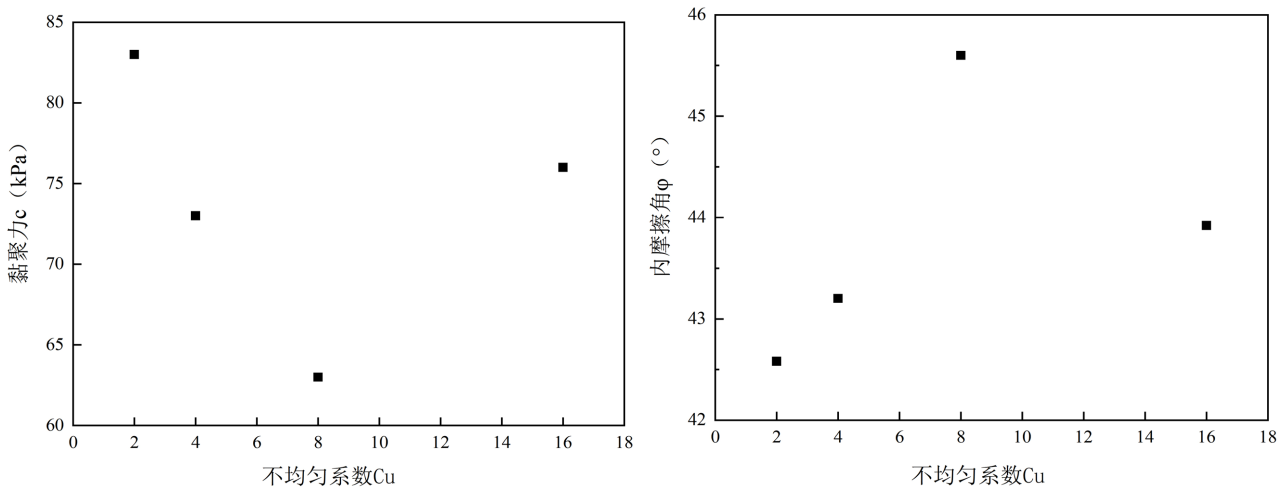
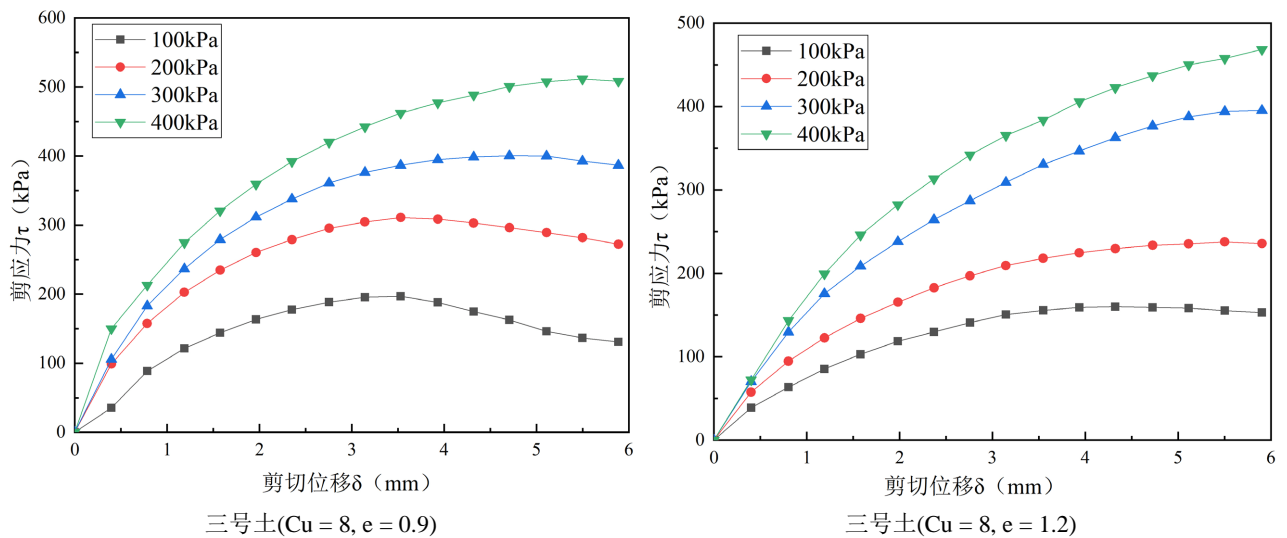


Figure 4. Comparison of shear strength of calcium sand with different particle sizes
图 4. 不同颗粒级配钙质砂的抗剪强度对比

3.2. 孔隙比对钙质砂抗剪强度的影响

图 5 为不同颗粒级配钙质砂土的剪应力随剪切位移变化的关系曲线。可以看出，相同竖向应力条件下，孔隙比越小，其最大剪应力越大。因为孔隙比越小，钙质砂颗粒咬合越紧密，相应的剪应力就越大。



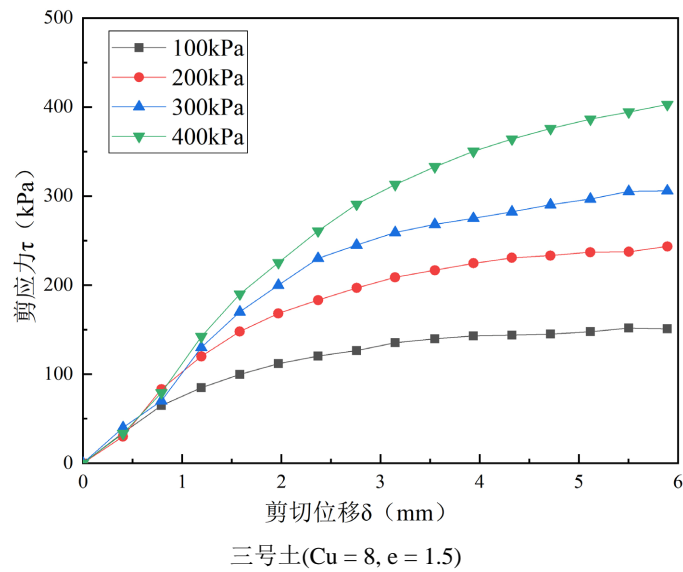


Figure 5. Relationship curve between shear stress and shear displacement of calcareous sand with different pore ratios
图 5. 不同孔隙比钙质砂剪应力与剪切位移的关系曲线

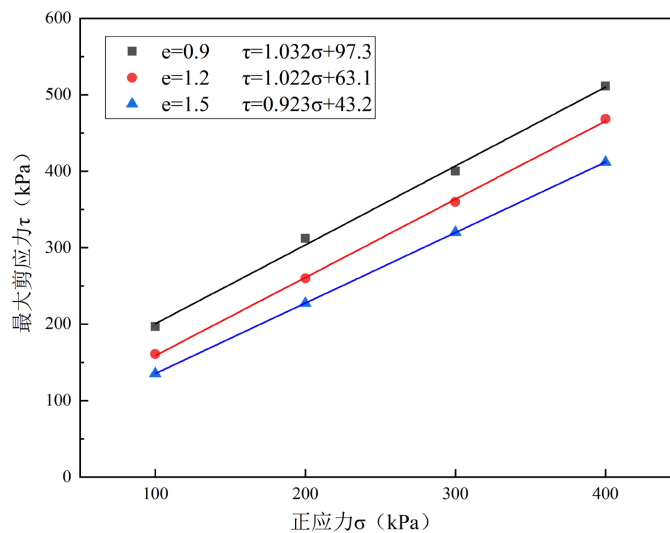


Figure 6. Shear strength of calcareous sand with different pore ratios
图 6. 不同孔隙比钙质砂的抗剪强度

Table 5. Shear strength of calcareous sand with different pore ratios
表 5. 不同孔隙比钙质砂的抗剪强度

孔隙比	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)
0.9	97.3	45.9
1.2	63.1	45.6
1.5	43.2	42.7

取出各竖向应力条件下的最大剪应力进行摩尔包络线拟合如图 6 所示, 得到不同颗粒级配钙质砂的抗剪强度如表 5 所示。可以看出, 钙质砂的黏聚力和内摩擦角均随着孔隙比增加而减小。因为孔隙比越小, 钙质砂颗粒咬合越紧密, 导致内摩擦角和黏聚力都增大。

3.3. 含水率对钙质砂抗剪强度的影响

图 7 为各工况湿砂土的剪应力随剪切位移变化的关系曲线。

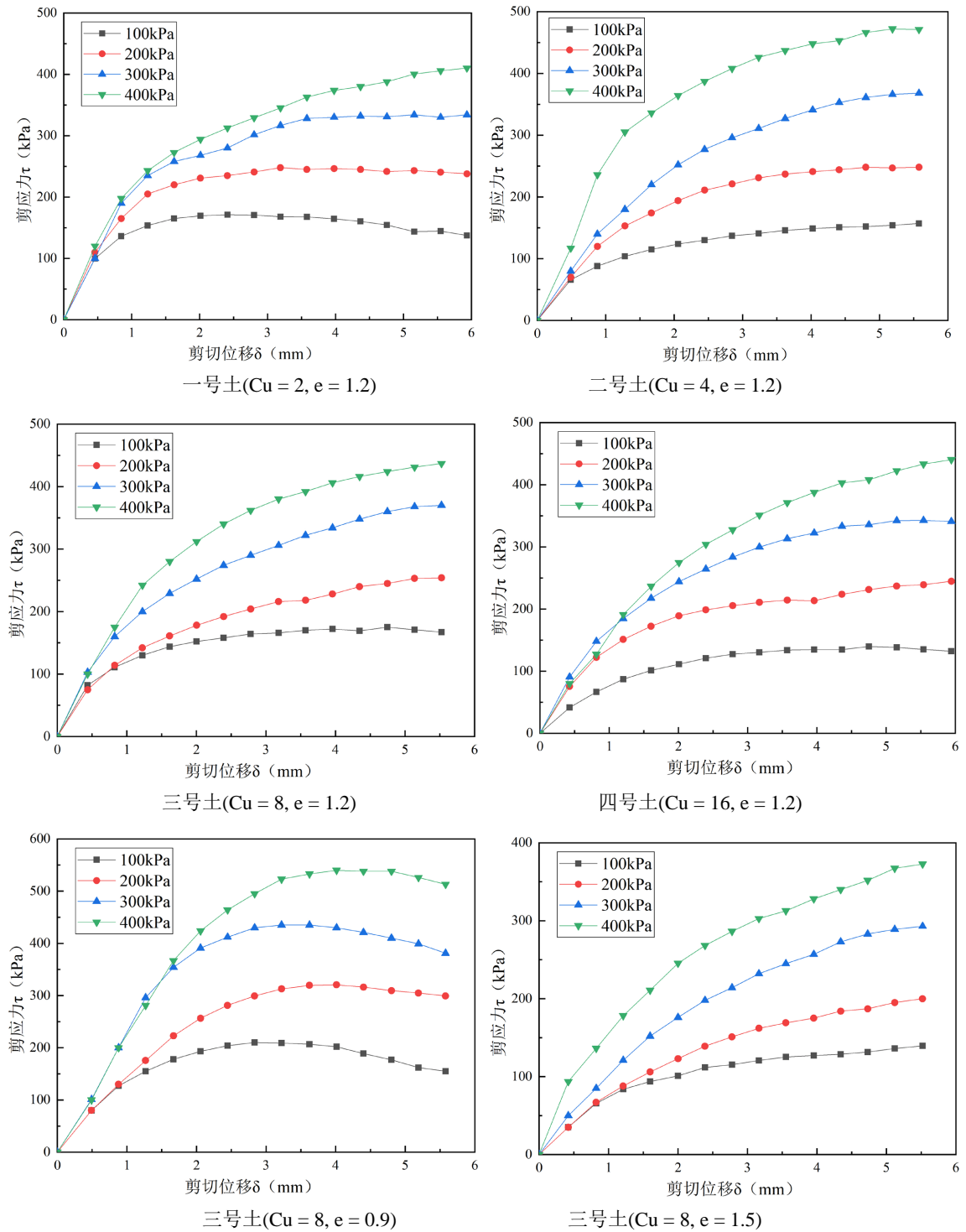


Figure 7. The relationship curve between shear stress and shear displacement of calcareous sand wet sand under various working conditions

图 7. 各工况下钙质砂湿砂的剪应力与剪切位移的关系曲线

取出各竖向应力条件下的最大剪应力进行摩尔包络线拟合分析, 得到含水钙质砂的抗剪强度如表 6 所示。可以看出, 钙质湿砂的黏聚力和内摩擦角均比钙质干砂的小, 可能是因为土体内水分有利于颗粒的活动, 减小颗粒间摩擦和咬合作用。且孔隙比相同时, 随不均匀系数的增大黏聚力先减小后增大, 内摩擦角则先增大后减小; 不均匀系数相同时, 钙质砂的黏聚力和内摩擦角均随着孔隙比的增大而减小。与干砂规律一致。

Table 6. Shear strength of calcareous sand wet sand under various working conditions

表 6. 各工况下钙质砂湿砂的抗剪强度

土样	黏聚力(kPa)	内摩擦角($^{\circ}$)
(Cu = 2, e = 1.2)	75.7	33.9
(Cu = 4, e = 1.2)	60.4	41.9
(Cu = 8, e = 1.2)	55.6	44.9
(Cu = 16, e = 1.2)	58.3	43.2
(Cu = 8, e = 0.9)	45.2	94.4
(Cu = 8, e = 1.2)	44.9	55.6
(Cu = 8, e = 1.5)	41.1	26.8

3.4. 钙质砂与硅质砂抗剪强度的对比分析

图 8 为三号硅质砂湿土的剪应力随剪切位移变化的关系曲线。可以看出, 随着剪切位移越来越大, 硅质砂的剪应力先增大后减小, 出现明显的峰值, 与钙质砂差异很大。主要是因为钙质砂有明显的剪切破碎现象, 破碎后变小的钙质砂继续抵抗更大的剪应力, 而硅质砂剪切破坏后剪应力逐渐减小。

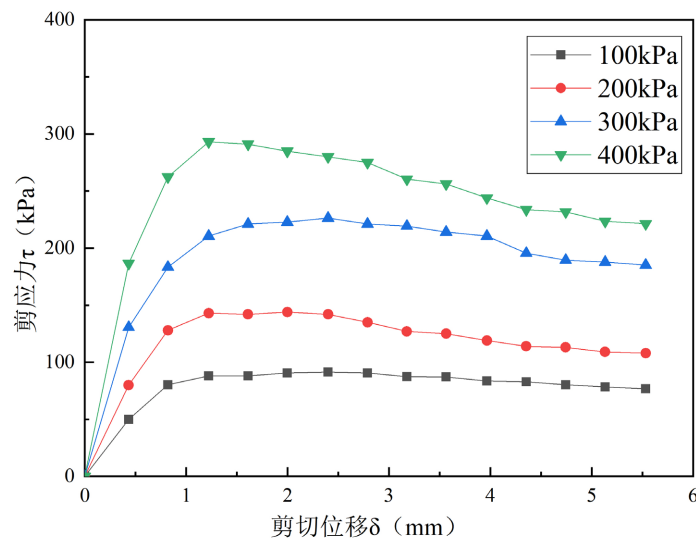


Figure 8. The relationship curve between shear stress and shear displacement of siliceous sand

图 8. 硅质砂剪应力与剪切位移的关系曲线

取出各竖向应力条件下的最大剪应力进行摩尔包络线拟合如图 9 所示, 得到硅质砂的抗剪强度并与钙质砂进行对比如表 7 所示。钙质砂由于特殊的颗粒形状, 颗粒间摩擦及咬合作用远大于硅质砂, 所以

黏聚力和内摩擦角都远大于硅质砂。

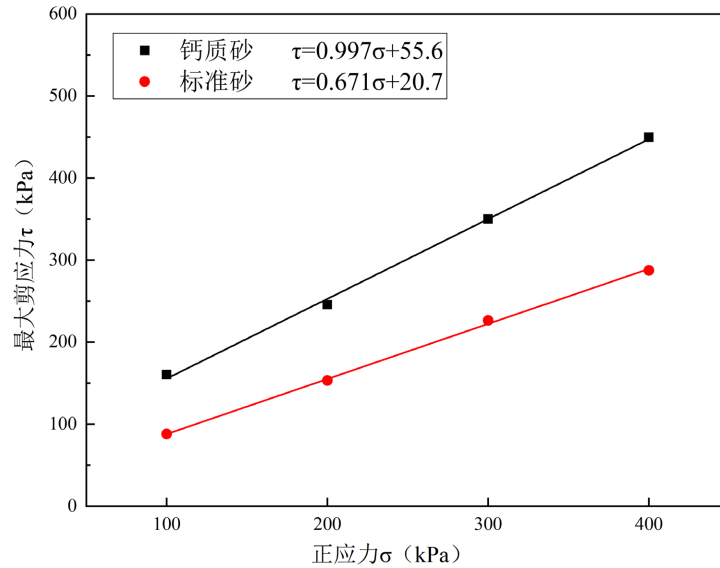


Figure 9. Comparison of shear strength between siliceous sand and calcareous sand

图 9. 硅质砂与钙质砂的抗剪强度对比

Table 7. Comparison of shear strength between calcareous sand and siliceous sand

表 7. 钙质砂与硅质砂抗剪强度的对比

土样	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)
钙质砂	55.6	44.9
硅质砂	20.7	33.9

4. 结论

本文主要通过对钙质砂和硅质砂进行直剪试验，得到以下结论：

- 1) 钙质砂的黏聚力随着不均匀系数增加先减小后增大，在不均匀系数为 8 时最小；钙质砂的内摩擦角随着不均匀系数增加先增大后减小，在不均匀系数为 8 时最大。
- 2) 钙质砂的黏聚力和内摩擦角均随着孔隙比增加而减小。
- 3) 钙质湿砂的黏聚力和内摩擦角均比钙质干砂的小。
- 4) 随着剪切位移越来越大，硅质砂的剪应力先增大后减小，出现明显的峰值，与钙质砂差异很大。钙质砂的黏聚力和内摩擦角都远大于硅质砂。

参考文献

- [1] 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, 2009, 30(7): 2043-2048.
- [2] 张弼文. 侧限条件下钙质砂的颗粒破碎特性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [3] 刘江. 珊瑚礁浅部钙质砂物理力学特性研究[J]. 土工基础, 2016, 30(6): 696-698.
- [4] 钱炜. 某岛礁珊瑚砂力学性质的室内试验研究[J]. 土工基础, 2016, 30(4): 527-532.
- [5] 张早辉, 单继鹏, 曹梦. 直剪条件下含水率对钙质砂强度的影响[J]. 土工基础, 2017, 31(2): 244-246.
- [6] 黄宏翔, 陈育民, 王建平, 等. 钙质砂抗剪强度特性的环剪试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2082-2088.

-
- [7] 刘萌成, 胡帅峰, 戴鹏飞. 南海钙质砂不排水剪切特性三轴试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 69-76.
- [8] 刘萌成, 陈茂林, 王涓. 钙质砂固结排水剪切特性三轴试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 47-57.
- [9] 王青, 侯贺营, 康鑫睿, 等. 直剪条件下钙质砂强度及颗粒破碎[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6240-6247.
- [10] 黄良, 刘鑫, 兰恒星. 钙质砂特征形状分析及不排水剪切强度研究[J]. 工程地质学报, 2022: 1-13.
<https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0049>
- [11] 李钊, 陈远中, 廖洁, 等. 颗粒形状对钙质砂最终级配影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 41-45+71.