

# 清洁粗中砂的强度特性研究

郑凯旋, 崔自治, 李希虎

宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2023年5月30日; 录用日期: 2023年6月20日; 发布日期: 2023年6月30日

## 摘要

岩土工程和土力学理论的发展离不开对土体性质的认识, 土强度与变形特征基本上受2类关键因素控制和影响: 土颗粒物理属性及土体存在状态。因此设计直接剪切试验和十字板方案, 研究了中粗砂的剪切强度特性, 探索各因素的作用规律和作用机理。研究结果表明: 1) 砂土的干密度随着粒径的增大而增大且在饱和状态下的干密度最大, 在潮湿状态下的干密度最小; 在粒径较小时, 砂土的内摩擦角受含水状态的影响较小, 而在粒径较大时, 受含水状态的影响较大。2) 砂土的粘聚力随着平均粒径的增大而减小; 在粒径较小时, 砂土的内摩擦角受含水状态的影响较小, 而在粒径较大时, 受含水状态的影响较大。3) 砂土的内摩擦角随着平均粒径的增大而增大; 在粒径较小时, 砂土的剪切强度受含水状态的影响较大, 而在粒径较大时, 受含水状态的影响较小。4) 砂土的剪切强度随着平均粒径的增大而增大; 在粒径较小时, 砂土的剪切强度受含水状态的影响较大, 而在粒径较大时, 受含水状态的影响较小。5) 干密度与砂土的剪切强度具有一定的相关性。

## 关键词

中粗砂, 粒径, 含水状态, 强度特性

# Study on Strength Characteristics of Clean Coarse Medium Sand

Kaixuan Zheng, Zizhi Cui, Xihu Li

School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Received: May 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The development of geotechnical engineering and soil mechanics theory cannot be separated from the understanding of soil properties. The strength and deformation characteristics of soil are basically controlled and affected by two key factors: the physical properties of soil particles and the

existence state of soil. Therefore, the direct shear test and cross plate scheme are designed to study the shear strength characteristics of medium coarse sand and explore the action law and mechanism of various factors. The results show that: 1) the dry density of sand increases with the increase of particle size, and the dry density is the highest under saturated condition and the minimum under wet condition. When the particle size is small, the internal friction Angle of sand is less affected by the water state, while when the particle size is large, it is more affected by the water state. 2) The cohesion of sand decreases with the increase of average particle size; When the particle size is small, the internal friction Angle of sand is less affected by the water state, while when the particle size is large, it is more affected by the water state. 3) The internal friction Angle of sand increases with the increase of average particle size; When the particle size is small, the shear strength of sand is greatly affected by the water state, while when the particle size is large, it is less affected by the water state. 4) The shear strength of sand increases with the increase of the average particle size. When the particle size is small, the shear strength of the sand is greatly affected by the water state, but it is less affected by the water state when the particle size is large. 5) There is a certain correlation between dry density and shear strength of sand.

## Keywords

Medium Coarse Sand, Particle Size, State of Water, Strength Characteristic

Copyright © 2023 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

岩土工程和土力学理论的发展离不开对土体性质的认识。砂土力学性能与变形特征基本上受 2 类关键因素控制和影响：土颗粒物理属性及土体存在状态。前者包括矿物组分、粒径、含水状态，后者包括土体结构、密实程度、有效应力状态等[1]。K. Shinohara 等[2]通过雾化不锈钢粉末的三轴压缩试验得出该材料的内摩擦角随颗粒棱角角度及初始密实度的增大而增大。无粘性土中的土粒基本呈单粒结构，细砂有的也呈蜂巢结构，这类土的压缩主要取决于土颗粒的重新排列和破碎[3]。

砂土与其它岩土材料的区别在于，其力学特性与砂土的密度有很密切的关系。对于同一种砂土，密度不同，应力应变曲线也明显不同[4] [5]。

目前对于砂土压缩过程中的力学特性研究已经比较完善，但大部分都集中于细砂或是粗砂[6]-[11]，沈素平等研究了细砂的压缩性；韩莉等研究了细砂的强度特性；刘兵等研究了粗砂在微观下的压缩和强度特性；王云飞等对粗砂的破坏过程中的能量演变进行了研究；尹光志等则通过三轴试验对粗砂的力学特性进行了研究。总的来说，目前对于粗中砂的强度研究相对较少，特别是在砂土的强度特性研究中并没有将砂土中的黏粒洗去进行研究[12]，为了排除细粒土、黏土的胶结对试验的影响，通过水洗过筛的方式将砂土中粒径小于 0.075 mm 的颗粒去除，使试验土变成完全的无粘性土并进行室内强度试验，试验研究清洁粗中砂的强度与其密度、含水状态及粒径大小变化的规律，建立显著的相关关系模型，用以预测和确定其压缩性，为砂土的压缩性和压缩机理研究提供相关的基础数据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料

砂土为银川市贺兰山洪积物，天然含水率为 2.75%，土粒的相对密度为 2.65，粒径大于 0.075 mm 的

颗粒占比为 88.66%。黏粒的含量为 10.94%，平均径为 0.494 mm，不均匀系数为 8，曲率系数为 0.14，级配不良。砂土的粒径分布如图 1 所示：

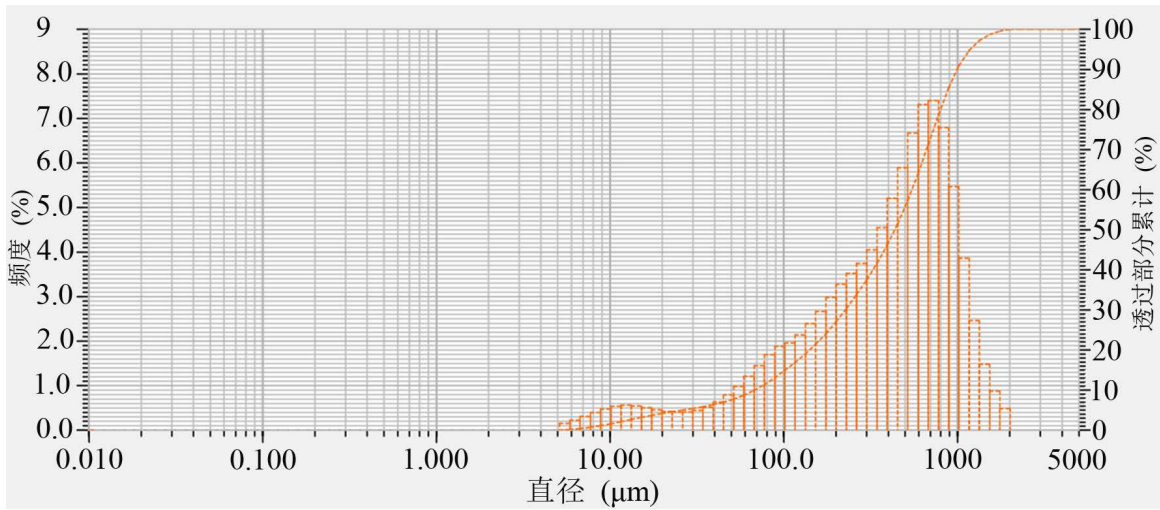


Figure 1. Particle size distribution of sand  
图 1. 砂土的粒径分布

## 2.2. 试验方案

砂土的粒径和含水状态是影响其强度的重要因素，为探究干密度和饱和度对洁净粗中砂的强度特性的影响，从粒径、含水状态两个角度进行单因素试验。为了研究粒径和含水状态对砂土强度的影响，将粒径分为 1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.075~0.25 mm 的 4 个粒径组，为便于分析，采用平均粒径表示粒径组对砂土强度特性的影响；将砂土含水状态设置为干燥状态、潮湿状态、饱和状态 3 种。其中，潮湿状态下的试样含水率为 3%。试验方案如表 1 所示：

Table 1. Testing program  
表 1. 试验方案

组别	湿度状态	粒径范围/mm	平均粒径 $d$ /mm
G1	干燥	0.075~0.25	0.163
G2	干燥	0.25~0.5	0.375
G3	干燥	0.5~1.0	0.750
G4	干燥	1.0~2.0	1.500
G5	潮湿	0.075~0.25	0.163
G6	潮湿	0.25~0.5	0.375
G7	潮湿	0.5~1.0	0.750
G8	潮湿	1.0~2.0	1.500
G9	饱和	0.075~0.25	0.163
G10	饱和	0.25~0.5	0.375
G11	饱和	0.5~1.0	0.750
G12	饱和	1.0~2.0	1.500

### 2.3. 试样制备

为了消除细粒土产生的粘结作用的影响, 试验前对土样进行冲洗, 通过 0.075 mm 的标准筛后烘干。试样制备参考公路土工试验规程(JTG E40-2007) [13]和土工试验方法标准(GBT 50123-2019) [14]。采用漏斗法制备松装试样以模拟砂土的自然沉积状态, 测定干密度以探索自然沉积情况下的密实性。分别采用直剪试验和十字板剪切试验测定砂土的强度指标, 分析砂土干密度与剪切强度的相关性。密度试验和十字板剪切试验在容量为 1 L 的标准容积桶中成样, 直剪试验则直接在剪切盒中成样。

### 2.4. 试验方法

采用容积法测定试样干密度  $\rho_d$ , 强度试验分别采用十字板剪切试验测定砂土的抗剪强度  $\tau$  和直剪试验的快剪试验测定其强度指标粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。

## 3. 结果与分析

在直剪试验试验得出各组在不同荷载下的剪切强度后, 通过斜截式计算法, 计算出各组别的粘聚力和内摩擦角数值, 并作图画出趋势线进行对比。而十字板剪切试验则通过系数计算出相应的剪切强度。试验结果如表 2 所示:

Table 2. Test results

表 2. 试验结果

组别	$\rho_d/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$e$	$c/\text{kPa}$	$\varphi^\circ$	$\tau/\text{kPa}$
G1	1.27	1.09	1.75	30.2	22.00
G2	1.31	1.02	0.70	31.2	30.00
G3	1.4	0.89	0.45	32.5	38.00
G4	1.42	0.87	0.30	37.6	46.00
G5	0.74	2.58	2.15	25.6	9.00
G6	0.88	2.00	1.20	25.7	16.00
G7	1.08	1.45	0.80	26.3	20.00
G8	1.12	1.36	0.65	29.8	22.20
G9	1.37	0.94	1.70	27.6	20.20
G10	1.42	0.86	0.60	27.9	26.40
G11	1.47	0.8	0.40	29.0	34.00
G12	1.51	0.76	0.20	32.8	40.20

### 3.1. 干密度试验结果分析

由图 2 可以看出, 砂样的干密度随着粒径的增大而增大, 呈非线性增加。此外, 砂土在饱和状态下的干密度最大, 随粒径的变化比较平缓; 在潮湿状态下的干密度最小, 随粒径的变化比较大; 在干燥状态下的干密度、介于饱和和潮湿状态之间。在粒径为 0.075~0.5 mm 时, 干密度的变化幅度较大, 其中潮湿状态下的极差为 0.34, 变化幅度最大; 饱和状态下的极差为 0.1, 变化幅度最小; 干燥状态下的极差为 0.13, 变化幅度介于潮湿和饱和状态之间。在粒径为 0.5~2.0 mm 时, 干密度的变化幅度较小, 其中潮湿和饱和状态下的极差为 0.04; 干燥状态下的极差为 0.02, 干密度变化量显著减小。可见, 在粒径较小时,

砂土的干密度受含水状态的影响较大，而在粒径较大时，砂土的干密度受含水状态的影响较小。砂土潮湿状态下由于受到毛细粘聚力的作用，且成样自重较小，难以沉积的密实，因此潮湿状态下的干密度最小。自然沉积状态下毛细粘聚力和棚架作用是影响砂土干密度的重要因素。饱和和干燥状态下没有毛细作用，但饱和状态下有结合水膜使摩擦阻力减小，强度降低，使砂土的密实度最高。砂土的干密度在潮湿状态下随着粒径的变化较大，是因为在潮湿状态下，颗粒表面的吸附力增强，水分分子容易与砂土颗粒粘结，导致颗粒之间的空隙减小，从而使得干密度增大。而在饱和状态下，砂土已经饱和了水分，颗粒之间的空隙已经被水分填满，因此水分分子对颗粒之间的粘结力并没有太大的影响，导致干密度随粒径变化较小。

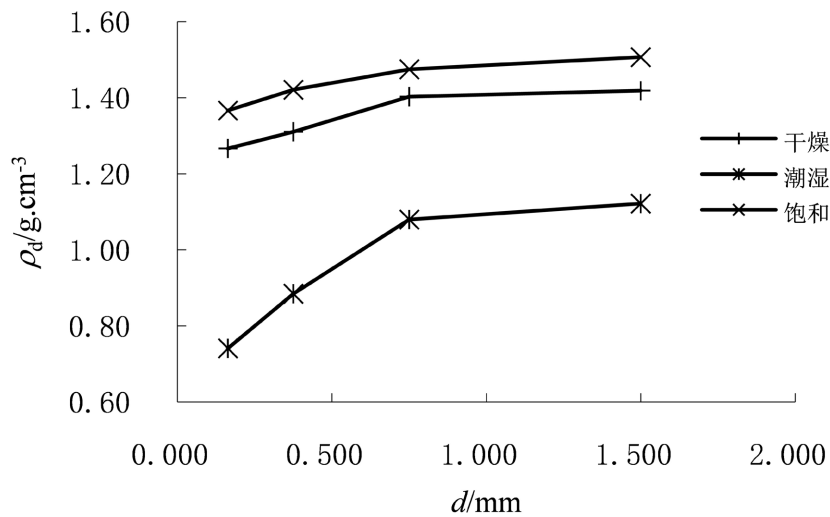


Figure 2. The relationship between dry density and mean particle size  
图 2. 干密度与平均粒径的关系

### 3.2. 直接剪切试验结果分析

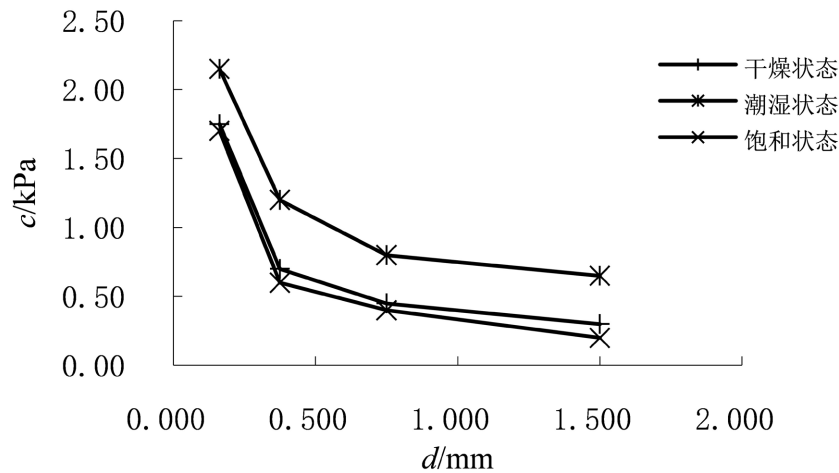


Figure 3. Relationship between cohesion and mean particle size  
图 3. 粘聚力与平均粒径的关系

由表 2 可以看出，砂样的粘聚力普遍较低。这是由于试验砂样经过水洗后为无粘性土，但由于试验存在误差以及试样在剪切盒内受到的挤压作用导致砂粒间相互咬合、嵌固产生了一定的粘聚力；同时，

在潮湿状态下砂粒之间的水也会形成水膜为砂提供毛细粘聚力。

从图 3 可以看出在三种状态下砂样的粘聚力较低,粘聚力随着平均粒径的增大而减小并呈非线性关系。这种情况的出现是由于随着粒径的增大,砂粒的比表面积在减小,颗粒间的空隙增大导致毛细作用减小,砂粒之间的相互作用也随之减小导致粘聚力下降。此外在粒径为 0.075~0.5 mm 时,粘聚力的变化幅度较大,其中干燥和饱和状态下的极差为 1.3,潮湿状态下的极差为 1.35;在粒径为 0.5~2.0 mm 时,粘聚力的变化幅度较小,其中干燥和潮湿状态下的极差为 0.15,饱和状态下的极差为 0.2。可见,在粒径较小时,砂土的粘聚力受含水状态的影响较大,而在粒径较大时,受含水状态的影响较小。这是因为当砂土粒径较小时,由于表面积相对较大,因此水分更容易被吸附在颗粒表面,从而增加颗粒间的吸引力,导致粘聚力增大。而当砂土粒径较大时,表面积相对较小,水分的吸附作用也相对较弱,因此粘聚力受含水状态的影响较小。总体上看砂土在潮湿状态下的粘聚力最大,其主要影响因素为砂粒间的毛细粘聚力,而干燥和饱和状态下无毛细粘聚力导致粘聚力略低。

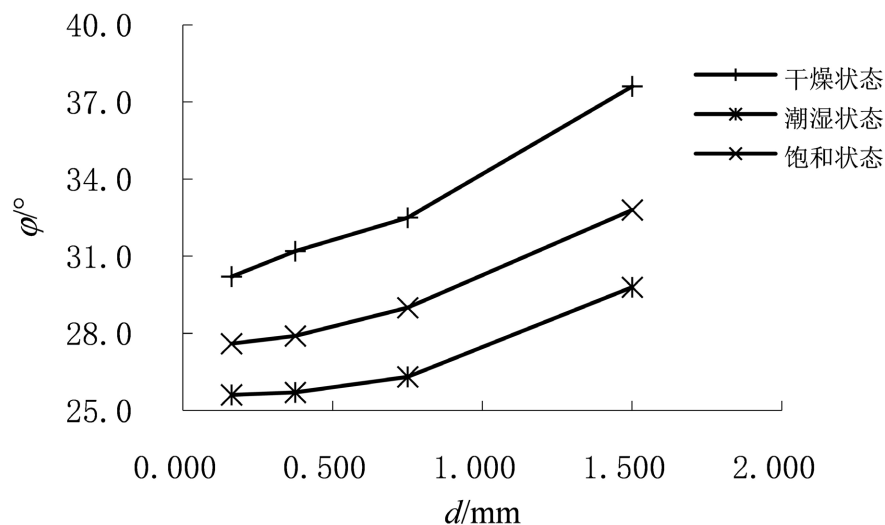


Figure 4. Relation between internal friction Angle and mean particle size  
图 4. 内摩擦角与平均粒径的关系

从图 4 中可以看出内摩擦角随着平均粒径的增大而增大并呈非线性关系。在粒径为 0.075~0.5 mm 时,内摩擦角的变化幅度较小,其中干燥状态下的极差为 2.3,饱和状态下的极差为 1.4,潮湿状态下的极差为 0.7;在粒径为 0.5~2.0 mm 时,内摩擦角的变化幅度较大,其中干燥状态下的极差为 5.1,饱和状态下的极差为 3.8,潮湿状态下的极差为 3.5。可见,在粒径较小时,砂土的内摩擦角受含水状态的影响较小,而在粒径较大时,受含水状态的影响较大。砂土在干燥状态下由于没有水的润滑作用,在受到剪切时砂粒间的咬合作用更加明显,内摩擦角更大。

三组试验存在着一定的误差,由于斜截式算法选点要合理搭配,两点之间实行间隔选取。求出的  $c$ 、 $\phi$  值取其平均值作为最后结果。为了减少斜截式算法带来的误差,应尽量多选取有代表性的点以便提高计算精度。在剪切实验的过程中,随着剪切位移的不断增大剪切面积逐渐减小。在试验资料的分析中,假定试样中的剪应力分布均匀,而这与实际情况并不吻合。当试样被剪坏时,靠近剪切盒边缘的应变最大,而试样竖向中轴部分的应变相对要小很多,剪切面附近的应变大于试样顶部和底部的应变。因此,在剪切过程中,特别是剪切破坏时,试样内的应力和应变,既不均匀又难确定。同时试样的密度和含水状态会直接影响抗剪强度[15][16]。



### 3.3. 十字板剪切试验结果分析

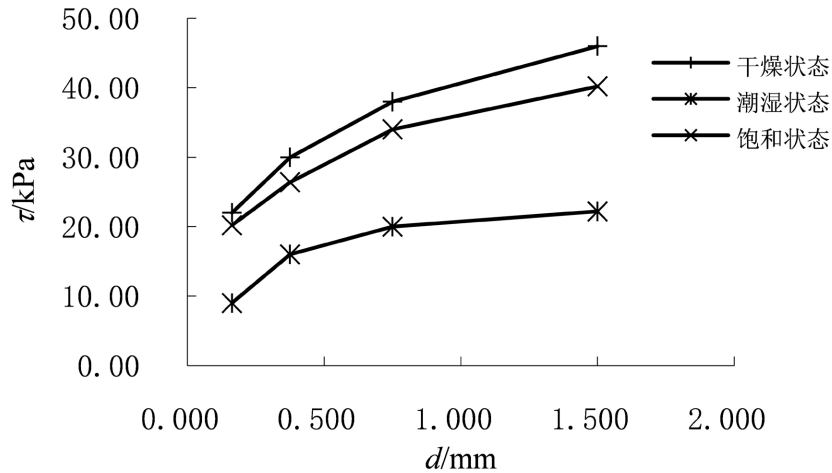


Figure 5. Relationship between shear strength and mean particle size of cross plates  
图 5. 十字板剪切强度与平均粒径的关系

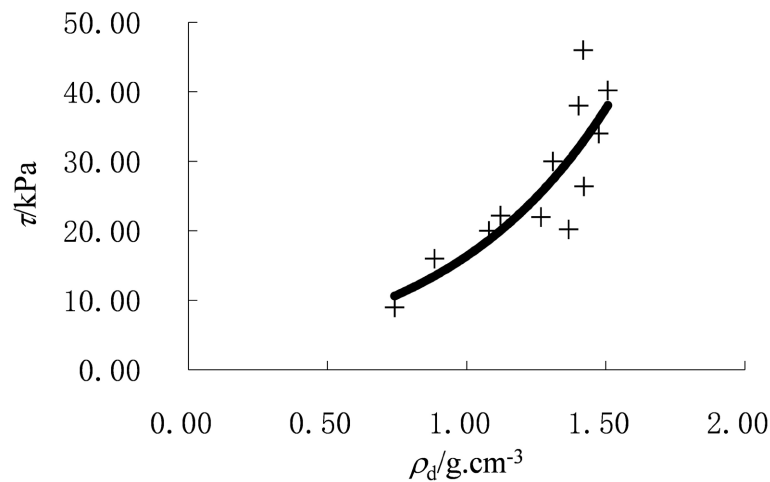


Figure 6. The relationship between dry density and shear strength  
图 6. 干密度与剪切强度的关系

从图 5 中可以看出砂样的剪切强度随着平均粒径的增大而增大并呈非线性关系，在粒径为 0.075~0.5 mm 时，剪切强度的变化幅度较大，其中干燥状态下的极差为 16，饱和状态下的极差为 13.8，潮湿状态下的极差为 11；在粒径为 0.5~2.0 mm 时，剪切强度的变化幅度较小，其中干燥状态下的极差为 8，潮湿状态下的极差为 2，饱和状态下的极差为 6。可见，在粒径较小时，砂土的剪切强度受含水状态的影响较大，而在粒径较大时，受含水状态的影响较小。这是由于砂样在容积桶中成样，除了自重外还受到筒壁的正应力，在干燥状态下，砂粒间的嵌固、咬合作用较为明显，使砂土的剪切强度提高；而在饱和和潮湿状态下，由于饱和状态下的密度较大，砂粒间的挤密程度较高，剪切强度相应的要大于潮湿状态。

### 3.4. 相关性分析

由图 6 可以看出，干密度与剪切强度之间具有一定的相关性，说明干密度也是影响砂土强度指标的一个重要因素。结合表 2 中三种不同含水状态下 4 种不同粒径组下的干密度可以看出，干密度与砂土的

剪切强度在干燥和潮湿状态下呈正相关。

#### 4. 结论

1) 砂土的干密度随粒径的增大而增大,但在不同的含水状态下变化趋势不同,饱和状态下变化最小,潮湿状态下变化最大。此外,在粒径较小时,砂土的内摩擦角受含水状态的影响较小,而在粒径较大时受影响较大。

2) 砂土的粘聚力随着平均粒径的增大而减小并呈非线性关系;在粒径较小时,砂土的内摩擦角受含水状态的影响较小,而在粒径较大时,受含水状态的影响较大;砂土在潮湿状态下的粘聚力最大。

3) 砂土的内摩擦角随着粒径增大呈非线性增加关系;粒径较小时,砂土的剪切强度受含水状态的影响较大,粒径较大时,受含水状态的影响较小。在干燥状态下,砂土粒间的咬合作用更加明显,导致内摩擦角增大。

4) 砂土的剪切强度随着平均粒径的增大而增大并呈非线性关系;在粒径较小时,砂土的剪切强度受含水状态的影响较大,而在粒径较大时,受含水状态的影响较小;在干燥状态下砂土的剪切强度最大,潮湿状态下最小,饱和状态介于二者之间。

5) 干密度与砂土的剪切强度具有一定的相关性。

#### 参考文献

- [1] 刘清秉, 项伟, Lehane, B.M., 崔德山, 李雨浓. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 400-410.
- [2] Shinohara, K., Oida, M. and Golman, B. (2000) Effect of Particle Shape on Angle of Internal Friction by Triaxial Compression Test. *Powder Technology*, **107**, 131-136. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00179-5)
- [3] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004.
- [4] 赵春雷. 饱和砂土基于相变状态的循环本构模型的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [5] 熊赞睿. 加筋风积砂地基浅基础抗拔承载特性研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
- [6] Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A. and Shiomi, T. (1999) *Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- [7] 沈素平, 马晓霞, 崔自治, 孙长昊, 徐韩宝, 闫浩, 杨陇波. 银川平原粉细砂的压缩性[J]. 土工基础, 2019, 33(5): 567-570.
- [8] 韩莉, 徐韩宝, 崔自治, 沈素平, 孙长昊, 闫浩, 杨陇波. 银川平原粉细砂的强度特性[J]. 土工基础, 2020, 34(1): 33-36.
- [9] 刘兵. 砂土压缩过程中微观结构提取、定量分析及力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2018.
- [10] 王云飞, 郑晓娟. 粗砂岩变形破坏过程中的能量演化机制[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 30-34. <https://doi.org/10.16186/j.cnki.1673-9787.2015.01.007>
- [11] 尹光志, 李小双, 赵洪宝. 高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 598-604.
- [12] 郭元强. 水洗法对海砂氯离子含量影响的研究[J]. 广东建材, 2018, 34(9): 27-29.
- [13] 交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2007.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [15] 胡健, 王芳. 直剪实验可靠性因素分析[J]. 安徽建筑, 2016, 23(6): 173-174+176.
- [16] 谈云志, 王世梅. 直剪试验数据处理方法的对比分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2005(2): 132-133+141.