

一种透明土的抗剪强度特性试验研究

刘玉飞, 董旭光, 高 铭

宁夏大学土木水利与工程学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2023年5月9日; 录用日期: 2023年5月29日; 发布日期: 2023年6月14日

摘 要

为探究透明土的抗剪强度特性, 对干、湿状态下的石英砂进行直剪试验, 通过荷载 - 剪切位移曲线、拟合强度线进行对比分析。结果表明: 随着剪切位移增大, 石英砂由应变硬化转为应变软化, 混合白油的石英砂在不同垂直荷载作用下, 均会出现应变软化, 混合蒸馏水的石英砂均出现应变硬化现象; 粘聚力方面, 石英砂最小, 混合蒸馏水的石英砂次之, 混合白油的石英砂最大; 内摩擦角方面, 石英砂最大, 混合蒸馏水的石英砂次之, 混合白油的石英砂最小; 总体强度上, 当垂直荷载较大时, 石英砂强度最大, 其次是混合蒸馏水的石英砂, 最小是混合白油的石英砂。

关键词

透明土, 熔融石英砂, 颗粒级配, 直剪试验, 抗剪强度

Experimental Study on the Shear Strength Characteristics of a Transparent Soil

Yufei Liu, Xuguang Dong, Ming Gao

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

Received: May 9th, 2023; accepted: May 29th, 2023; published: Jun. 14th, 2023

Abstract

In order to explore the shear strength characteristics of transparent soil, direct shear tests were carried out on quartz sand under dry and wet conditions. The results show that with the increase of shear displacement, quartz sand changes from strain hardening to strain softening, quartz sand mixed with white oil will appear to strain softening under different vertical loads, and quartz sand mixed with distilled water will appear to strain hardening; In terms of cohesion, quartz sand is the smallest, followed by quartz sand mixed with distilled water, and quartz sand mixed with white oil

is the largest. In terms of internal friction angle, quartz sand is the largest, followed by quartz sand mixed with distilled water, and quartz sand mixed with white oil is the smallest. In terms of overall strength, when the vertical load is large, the strength of quartz sand is the largest, followed by quartz sand mixed with distilled water, and the smallest is quartz sand mixed with white oil.

Keywords

Transparent Soil, Fused Silica Sand, Particle Size Distribution, Direct Shear Test, Shear Strength

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

通常情况下,常规的室内试验需要植入传感器部件才能获取土体内部的渗流、变形数据,但却无法获得整体的变形场,并且对小尺寸模型试验而言,由于传感器力学性质与土体的差异性,也会给试验结果带来误差[1]。近年来,透明土与粒子图像测速技术(PIV)的结合使土体内部渗流及变形可视化得到有效解决。相关研究表明熔融石英砂与天然砂土具有相似的力学特性,可模拟天然砂土开展相关模型试验研究[2] [3]。

目前,沉淀无定形二氧化硅粉和熔融石英砂是用来模拟土颗粒骨架最常用的两种透明固体颗粒材料,其中采用硅粉配制的透明土更适合模拟天然黏土[4],而熔融石英砂则更适合模拟天然砂土[5]。针对无定形二氧化硅配制的透明土材料,相关研究人员开展了压缩模量、剪切强度等静力特性试验[6],动剪切模量与阻尼比等动变形特性试验[7],并开展了振动作用下土与结构相互作用模型试验应用[8]。针对熔融石英砂配制成的透明土材料,相关学者开展了固结试验、渗透试验、直剪试验等分析其静力特性,并与天然砂土进行对比分析[9] [10] [11];吴跃东等人[12]提出一种新型透明黏土(AVC)配制方法并进行了固结试验与十字板剪切试验,分析了透明土的压缩固结特性与强度影响因素;武亚军等[13]对不同粒径硅粉配制的透明土试样进行颗粒分析试验,并对三种级配试样进行固结试验探究透明土的压缩特性。以上学者完成的工作表明,研究透明土材料的压缩性、强度、渗透性等物理力学性质对透明土技术的发展,支撑透明土模型试验研究,具有积极的指导及推动作用。

本文选用目前模拟天然砂土效果最好的熔融石英砂与有机油溶性溶液配制成的透明土材料,通过相关试验装置,开展了透明土抗剪强度特性试验,主要分析了石英砂在干、湿两种状态下强度特征,为室内透明土模型试验研究提供参考与借鉴。

2. 粒径级配试验及结果

对土的粒径组成的测定称为粒径分析或颗粒分析,粒径分析的方法,一般分为筛分法和沉淀法两种。筛分法用于测定粒径小于或等于 60 mm 而大于 0.075 mm 粗土粒,用沉淀法测定粒径小于 0.075 mm 的细土粒。本试验选用的熔融石英砂粒径范围为 0.5~1 mm,因此采用筛分法对其进行粒径分析。将烘干、分散后的土样放进一套标准筛的最上层,各层筛的筛孔自上而下由大到小,最下面接以底盘。经过震摇,即可筛分出不同粒组的含量。工程中一般常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来评价粗粒土的级配情况,通常当 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 时,粒径分布不均匀且级配良好。通过筛分法得到石英砂颗粒级配曲线如图 1 所示,计算得 $C_u = 2.42$, $C_c = 1.25$,因此判定该砂级配不良。

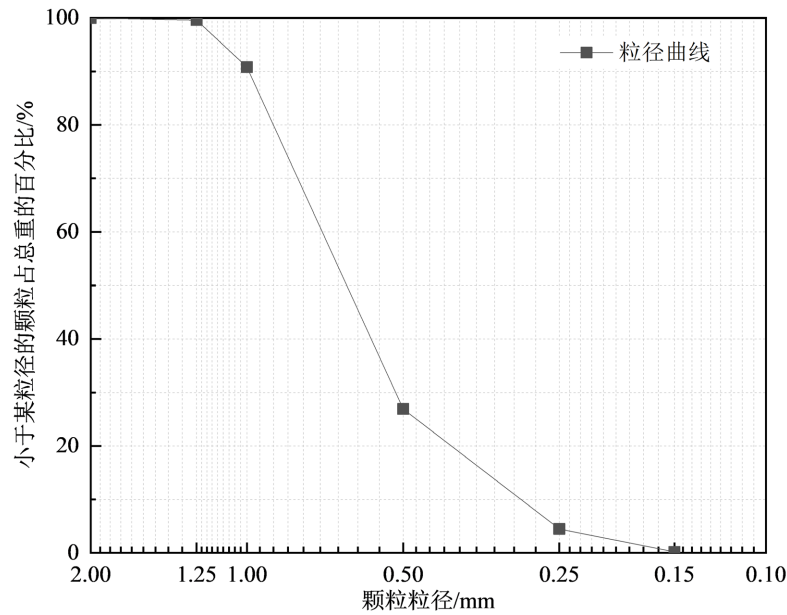


Figure 1. The curve of particle size distribution
图 1. 颗粒级配曲线

3. 休止角试验及结果

休止角通常是指在重力场中颗粒堆积体处于极限平衡状态(临滑状态)时自由表面与水平面的夹角,是衡量砂土颗粒间相对运动的自由程度,对边坡堆积坡角具有决定性作用,其大小与颗粒的粒径大小、形状、密度和材料摩擦系数等因素有关。休止角越小意味着颗粒物质的流动性越好,对模型边坡塑形越不利,试验中主要采用注入法、排出法、容器倾斜法测量颗粒堆积体的休止角。本文选用排出法进行测量,其基本原理是:颗粒散体从容器底部豁口排出,待颗粒散体停止流动后,颗粒散体的自由表面与水平面的夹角即为休止,图 2 为休止角测量装置及测量过程,按式(1)计算,

$$\beta = \arctan \frac{\bar{h}}{\frac{1}{2}(D-d)} \quad (1)$$

式中: β 为石英砂休止角($^{\circ}$); \bar{h} 为石英砂堆积体高度 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 的平均值(cm); D 为测量装置直径(cm); d 为底部豁口直径(cm)。

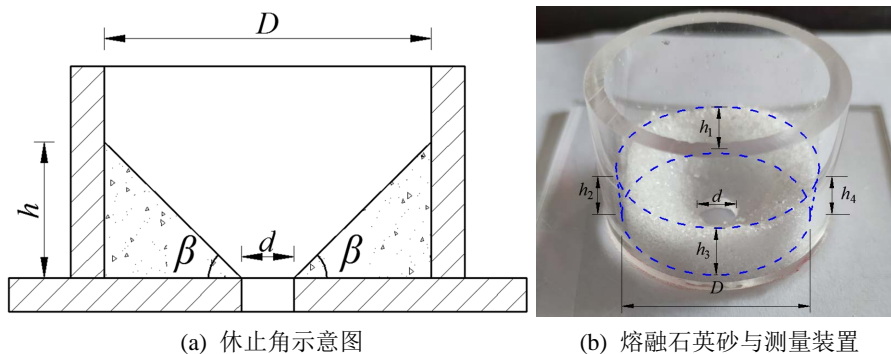


Figure 2. Measurement of repose angle by discharge method
图 2. 排出法测休止角

Table 1. Rest angle test data**表 1.** 休止角试验数据

h_1/cm	h_2/cm	h_3/cm	h_4/cm	\bar{h}/cm	D/cm	d/cm
1.80	1.65	1.80	1.63	1.745	5	1

将表 1 的数据代入(1)式得到石英砂休止角 $\beta = 41.1^\circ$ 。

4. 直剪试验及结果分析

4.1. 直剪试验方案

直剪试验所用试验仪器称为直剪仪，仪器主要为上下两个重叠在一起的土样剪切盒，一个固定，另一个可沿水平接触面滑动，土样置于剪切盒内，土样上下置透水石，以利于土样排水，其上加钢盖板。设土样断面为 A ，在钢盖板上加垂直压力，压力通过盖板均匀分布在土样上，然后对下段剪力盒逐渐施加水平剪力 T ，直到土样顺着截面被剪断为止。假设土样断面为固定剪切面，在其上的平均压力为 $\sigma = N/A$ ，而平均剪应力为 $\tau = T/A$ 。在 σ 不变的情况下，逐渐增加 τ 值，土样同时发生剪切位移，当 τ 值达到最大值 τ_{max} 时，土样被剪破，这时可取 τ_{max} 作为破坏应力，即土的抗剪强度 S 。再取同类型土样，改变垂直压力 N ，用同样方法可求得与之相应的另一最大剪应力 τ_{max} 。这样用 3~4 个相同土样，采用不同垂直压力，可测得 3~4 组 σ 和 τ_{max} 的数据。再以 σ 为横坐标， $\tau_{max} = S$ 为纵坐标，把这些数据绘在坐标图上，并拟合得到强度线。本文主要研究透明土抗剪特性与其骨架颗粒(熔融石英砂)在强度方面的区别，因此，将对三种砂土试样进行剪切试验，分别为石英砂、混合蒸馏水的石英砂、混合白油的石英砂，将所得试验结果对比分析。

4.2. 结果分析

取四个直径为 61.8 mm，高为 20 mm 的不同试样，以 12 rad/min 的速度依次在 50、100、200 和 400 kPa 的垂直压力下进行剪切试验，记录测力计上百分表峰值或者稳定值作为破坏点。剪切过程中，绘制出剪应力与剪切位移之间的关系。

4.2.1. 石英砂直剪

从图 3 可以知道，对于石英砂的直剪(快剪)试验，对于四种不同垂直压力作用下工况，当垂直压力为 50 kPa 时，剪切位移达 1 mm 前、后，剪应力呈现逐渐增大、基本保持不变的趋势；对于其它三种垂直压力作用下的直剪试验，当剪切位移达到 2 mm 后，剪应力也达到最大并基本保持平稳，但垂直压力为 400 kPa 的干砂直剪在剪切位移达 4.5 mm 时剪应力逐渐减小，剪应力出现峰值，呈现应变软化。

4.2.2. 石英砂混合蒸馏水直剪

将干砂进行饱和，经试验测得其饱和含水率约为 34%，再分别取四个样进行 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa 不同法向荷载下的直剪试验，并将剪切位移与剪应力关系曲线绘制如图 4 所示，由图可知，对于四种不同法向荷载作用下的直剪试验，当剪切位移在 0~1 mm 区段内，剪应力的增幅最大，之后增幅逐渐减小，但法向荷载为 400 kPa 的增幅相对其它三个更大，剪应力自始至终未出现峰值，四种不同法向荷载作用下石英砂混合蒸馏水的直剪试验均呈现应变硬化的现象。

4.2.3. 石英砂混合白油直剪

对适量干砂进行饱和和处理，饱和含油量约 34%，再分别取四个样进行 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa 不同法向荷载下的直剪试验，试验结果如图 5 所示，由图可知，当法向荷载为 50 kPa 时，剪切位移

在 1 mm 前剪应力增幅基本成线性，而在 1~2.2 mm 内增幅明显减慢，在 2.2 mm 出剪应力出现峰值，之后逐渐减小；当法向荷载为 100 kPa 时，剪切位移为 0~0.5 mm 区间内，剪应力线性增大，0.5~1 mm 内，剪应力增幅逐渐减小，1~1.4 mm 区段内，剪应力基本呈线性增大并在 1.4 mm 处出现峰值，而后逐渐减小；当法向荷载为 200 kPa 时，剪应力在剪切位移为 0~0.75 mm 内逐渐增大，但增幅略微减小，剪应力在剪切位移为 0.75 mm 处出现峰值，之后逐渐减小；当法向荷载为 400 kPa 时，剪应力分别在剪切位移为 0~0.5 mm、0.5~1.2 mm 内线性逐渐增大，但前者增幅比后者更大，并且剪切位移达 1.2 mm 后剪应力减小，剪应力在剪切位移为 1.2 mm 处出现峰值。总之，混合白油的石英砂在直剪过程中，剪应力会在剪切位移达到某值时出现峰值，之后逐渐减小，呈现应变软化。原因是白油与石英砂混合后颗粒之间相对更加致密，这可能与白油的粘滞系数较大有关，因此混合白油的石英砂环刀试样表现出密砂的性质；当上下剪切盒错动时，部分土颗粒向上下两侧运动，排列方式的发生改变了，使得石英砂颗粒间的孔隙增加，于是宏观上呈现总体积增加，即密砂的剪胀性，从而出现了应变软化现象。

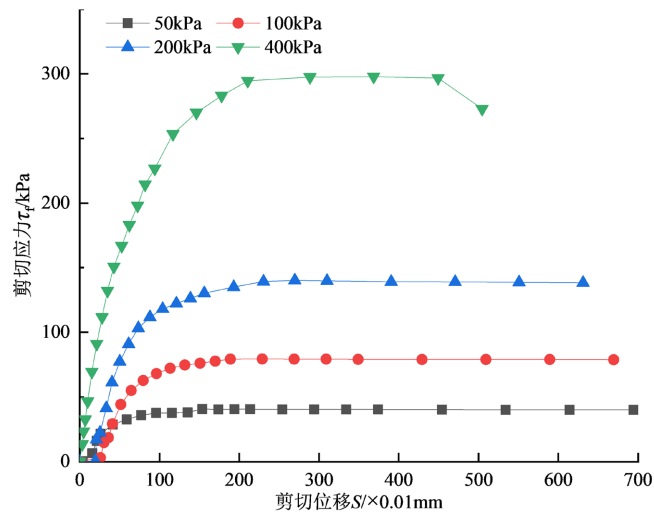


Figure 3. Shear displacement and shear stress curve of quartz sand
图 3. 石英砂的剪切应力 - 位移曲线

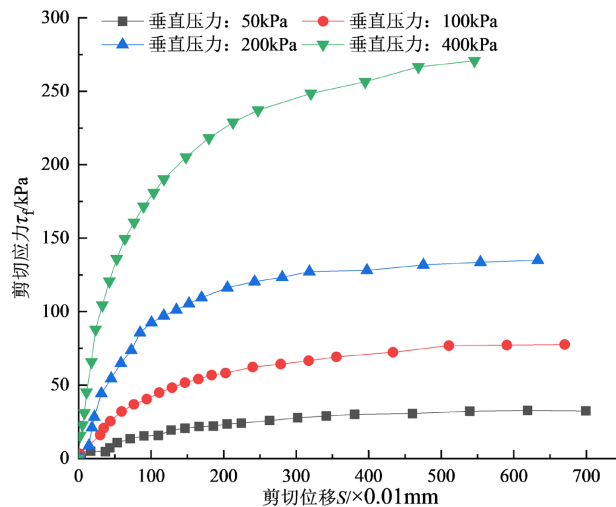


Figure 4. Shear displacement and shear stress curve of quartz sand with mixed distilled water
图 4. 混合蒸馏水的石英砂剪切应力 - 位移曲线

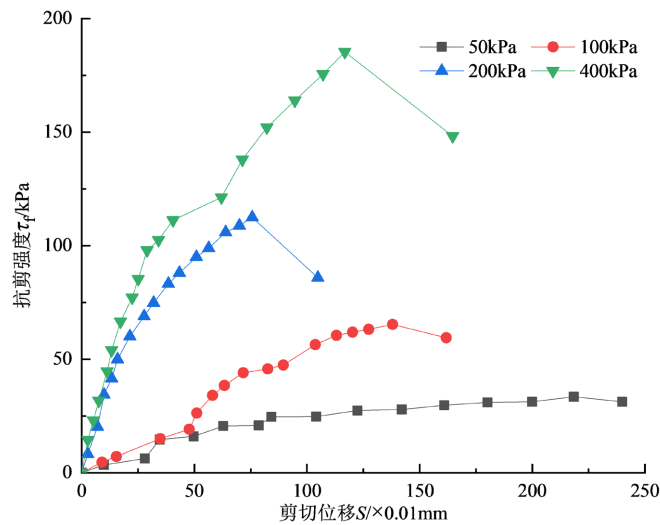


Figure 5. Shear displacement and shear stress curve of quartz sand mixed with white oil
图 5. 混合白油的石英砂的剪切应力 - 位移曲线

4.2.4. 抗剪强度

根据不同法向荷载对应的峰值可以得到不同荷载作用下的最大剪应力，从而可得垂直应力与抗剪强度之间的关系，分别将石英砂、混合蒸馏水的石英砂、混合白油的石英砂法的法向荷载与抗剪强度的数据点拟合成的一条直线，如图 6 所示。利用公式 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ ，可计算出直剪试验相关参数粘聚力 c 和内摩擦角 φ 。即熔融石英干砂土 c 约为 2.66 kPa， φ 约为 36° ；混合蒸馏水的石英砂的 c 约为 3.93 kPa， φ 约为 34° ；混合白油的石英砂的 c 约为 19.61 kPa， φ 约为 23° 。

不难发现，粘聚力大小方面：石英砂 < 混合蒸馏水的石英砂 < 混合白油的石英砂，内摩擦角大小方面：石英砂 > 混合蒸馏水的石英砂 > 混合白油的石英砂，实际上这与孔隙流体的粘滞系数(或粘度)有密切关联，空气粘滞系数相对更小，其次是水，最大的是白油；总体上看，在垂直压力较大的情况下(大于或等于 70 kPa)，石英砂强度最大，其次是混合蒸馏水的石英砂，最小的是混合白油的石英砂。

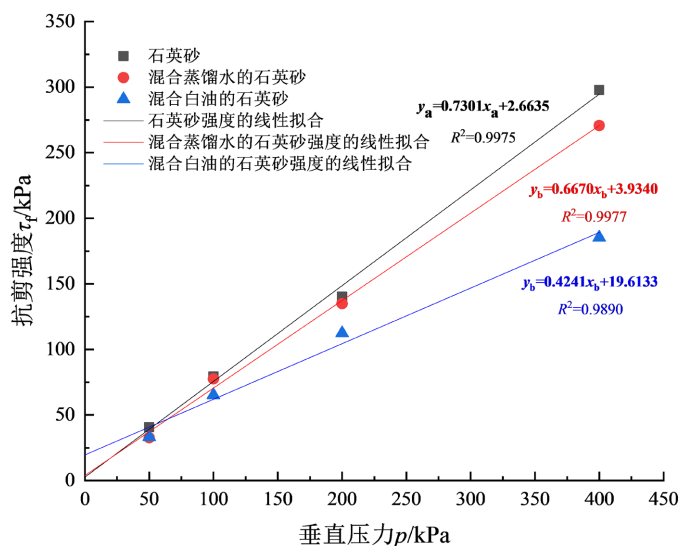


Figure 6. Linear fitting between vertical pressure and shear strength
图 6. 垂直压力与抗剪强度线性拟合

5. 结论

本文主要对不同状态下的熔融石英砂进行相关试验,对所得数据进行分析总结,得出以下几点结论:

- 1) 粒径级配试验的计算结果表明石英砂级配不良,排出法测得石英砂堆积体的休止角约为 41° 。
- 2) 当垂直荷载为 400 kPa 时,石英砂才会出现应变软化,而混合白油的石英砂在不同垂直荷载作用下,均会出现应变软化,混合蒸馏水的石英砂均出现应变硬化现象。
- 3) 粘聚力方面,石英砂最小,混合蒸馏水的石英砂次之,混合白油的石英砂最大;内摩擦角方面,石英砂最大,混合蒸馏水的石英砂次之,混合白油的石英砂最小;总体强度上,当垂直荷载较大时,石英砂强度最大,其次是混合蒸馏水的石英砂,最小是混合白油的石英砂。

基金项目

宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03023; 2021BEG03118)。

参考文献

- [1] 陈永辉, 齐昌广, 王新泉, 等. 透明土及其在岩土工程模型试验中的应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6): 69-73.
- [2] 孔纲强, 李辉, 王忠涛, 等. 透明砂土与天然砂土动力特性对比[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1935-1940+1947.
- [3] 常艳, 雷振坤, 赵红华, 等. 熔融石英粒径对透明土位移测量精度的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 493-500.
- [4] 袁井荣. 新型透明粘土基本力学特性及在异形桩沉桩挤土中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [5] Iskander, M., Bathurst, R.J. and Omidvar, M. (2015) Past, Present, and Future of Transparent Soils. *Geotechnical Testing Journal*, **38**, 557-573. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150079>
- [6] Iskander, M. (2010) Modeling with Transparent Soils, Visualizing Soil Structure Interaction and Multi Phase Flow, Non-Intrusively. Springer, New York.
- [7] Zhao, H.H. and Ge, L. (2014) Investigation on the Shear Moduli and Damping Ratios of Silica Gel. *Granular Matter*, **16**, 449-456. <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0495-3>
- [8] 赵红华, 葛玉宁, 李鹏飞. 粒子测速技术和透明土在土与结构动力相互作用研究中的应用[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 148-154.
- [9] Ezzein, F.M. and Bathurst, R.J. (2011) A Transparent Sand for Geotechnical Laboratory Modeling. *Geotechnical Testing Journal*, **34**, 590-601. <https://doi.org/10.1520/GTJ103808>
- [10] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂变形特性对比三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140-1146.
- [11] Guzman, I.L., Iskander, M., Suescun-Florez, E., et al. (2014) A Transparent Aqueous-Saturated Sand Surrogate for Use in Physical Modeling. *Acta Geotechnica*, **9**, 187-206. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0247-2>
- [12] 吴跃东, 陈明建, 周云峰, 等. 新型透明黏土的配制及其基本特性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 141-145.
- [13] 武亚军, 韩亚东, 唐欣, 等. 污染土壤高压旋喷修复药剂迁移透明土试验及数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 645-652.