



考虑形态及含水率的颗粒材料尺寸效应室内三轴试验研究

黄林冲¹, 叶文², 赖正首²

- (1. 中山大学 航空航天学院, 广东 深圳 518107;
2. 中山大学 智能工程学院, 广东 深圳 518107)

摘要: 针对石英砂和玻璃珠2种材料, 考虑饱和与干燥2种含水率状态, 开展颗粒材料尺寸效应的室内固结排水三轴剪切试验研究, 探讨颗粒形态和含水状态对颗粒尺寸效应的影响。试验结果表明: 在制样方式一致的情况下, 颗粒尺寸效应对试样孔隙率影响较小; 水的润滑作用降低了颗粒间的摩擦因数, 从而减弱了颗粒尺寸效应, 使得不同粒径饱和试样之间的应力应变曲线差异相对于干燥试样较小, 而且当颗粒形态不规则时, 水对颗粒尺寸效应的减弱现象更为明显; 试样的黏聚力总体上随粒径增大而略微增大, 其中干燥石英砂试样最为明显; 不规则颗粒材料的宏观摩擦角随粒径增大呈略微减小的趋势, 减小的趋势在小粒径时较为明显, 粒径对光滑颗粒材料摩擦角影响较小。

关键词: 尺寸效应; 三轴试验; 颗粒形态; 含水率; 抗剪强度

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-7029(2020)09-2262-09

Laboratory triaxial tests on the particle size effects of granular materials with different particle shapes and moisture conditions

HUANG Linchong¹, YE Wen², LAI Zhengshou²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

2. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

Abstract: Laboratory consolidated drained triaxial compression tests were performed on quartz sand and glass beads with different groups of sizes and two moisture conditions (i.e., dry and fully saturated). The particle size effects, along with the consideration of particle shape and moisture conditions in particular, on the mechanical behavior of granular materials were investigated, in terms of bulk density, stress-strain relations, and strength parameters. Results indicate that by using the same procedures to make specimens, particle size exhibits negligible impact on the bulk porosity. The strain-strain curves of the fully saturated specimens of difference particle sizes exhibit less variations than those of the dry specimens, indicating that moisture would mitigate the particle size effects. The bulk cohesion of granular materials increases slightly with the increasing particle size, and this phenomenon is more notable for materials of irregularly-shaped particles and under dry condition. The bulk friction angle of irregularly-shaped granular materials decreases slightly with the increasing particle size, which is practically notable for small-particle-size samples; the particle size effects on the materials of round particles are minimal.

Key words: particle size effects; triaxial test; particle shape; moisture content; shear strength

收稿日期: 2019-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678578, 51909289, 51978677); 博士后基金资助项目(2019M663240); 深圳市自然科学基金(JCYJ20190807162401662)

通信作者: 黄林冲(1980-), 男, 湖北咸宁人, 教授, 博士, 从事土木工程研究; E-mail: hlinch@mail.sysu.edu.cn

砂土等颗粒材料在土木工程领域具有广泛的应用(如地基处理、混凝土制备、坝体填筑等),其物理力学特性的研究也一直是本领域的重点内容。在实际工程中,砂土颗粒通常尺寸不一、形态各异,微观尺度内颗粒的运动与颗粒间的相互作用造成了宏观尺度上的复杂物理力学特性。而在砂土材料的室内试验或数值模拟过程中,因试验或模拟条件的限制,经常需要对颗粒尺寸进行缩尺或扩尺处理:比如,实际工程中用于坝体填筑的土石料粒径较大(可达 800~1 200 mm),常规的试验设备通常无法进行原始尺寸的土石料力学试验,因而一般会采用等比例缩尺后的小尺寸砂土料进行替代试验;在利用离散元方法模拟诸如边坡失稳等大尺度问题时,若考虑真实的颗粒尺寸,则需要模拟的颗粒数量将异常庞大,因而有必要对颗粒进行扩尺处理以实现边坡失稳等问题的微观机理研究。颗粒尺寸不同所带来的颗粒材料宏观物理力学特性的差异,即为颗粒的尺寸效应。对颗粒材料的尺寸效应进行研究对深入理解颗粒材料的复杂宏观物理力学特性具有重要意义:一方面,通过研究一定范围内的颗粒尺寸所对应的宏观物理力学特性,探究尺寸效应的显著程度,可以为室内试验或数值模拟过程中的缩尺或扩尺处理提供理论依据;另一方面,通过分析颗粒尺寸与材料物理力学参数之间的变化规律,概化出相应的经验公式或物理模型,可以用于外推其他范围颗粒尺寸所对应的材料物理力学参数。关于颗粒材料的尺寸效应,国内外已有不少研究。比如在室内静力学试验方面,魏静等^[1]对粒径为 0.5~1.0 mm 和 1.0~3.0 mm 的熔融石英砂进行固结排水与固结不排水试验,发现当粒径较大时,试样的应力应变曲线会更陡,即试样的压缩模量与粒径呈正相关关系;冯晓腊等^[2]对砂土进行直剪试验,发现试样的平均粒径对试样的抗剪强度有较为显著影响,随着平均粒径的增大,试样的黏聚力提高、内摩擦角降低;类似地,张祺等^[3]通过光滑的玻璃珠的直剪试验,发现材料的抗剪强度随粒径的增大而增大。此外,郇能惠等^[4-8]也对大粒径堆石体的尺寸效应进行了大量研究。在室内试验动力学方面,王娜^[9]通过海岸砂土的动三轴试验发现,砂土颗粒粒径越小,在振动荷载作用下材料的变形和孔隙水压力发展也快,材料的抗液化性能越差。另外,国

外学者也有一些有关砂土尺寸效应的研究,如 Indraratna 等^[10-11]研究表明,在低围压条件下颗粒越大,试样的强度越高,但围压较大时,颗粒尺寸大的试样强度小于尺寸小的;Vangla 等^[12]研究发现,颗粒材料在剪切破坏时,剪切带的宽度随粒径的增大而增大,但其宽度与粒径的比值随粒径的增大而减小;相关的研究还有 CHEN^[13], Islam^[14]和 Roessler^[15]等。在数值模拟方面,乐天呈等^[16-19]采用离散元方法对砂土进行数值分析,也得到了与室内试验相吻合的结论,并从微观尺度上颗粒组构、接触力链等角度对颗粒材料的尺寸效应进行解释。然而,目前关于颗粒材料的尺寸研究大多针对一般的干燥性砂土,较少提及颗粒形态及含水率对尺寸效应的影响。为此,本文考虑干燥及饱和 2 种不同含水率状态,对 4 种不同粒径的石英砂和玻璃珠分别进行室内固结排水三轴剪切试验,并结合试样的密度、应力应变曲线、强度参数等物理力学指标,分析颗粒尺寸对其堆积体宏观物理力学特性的影响,探讨不同颗粒形态及含水率状态下颗粒尺寸效应的规律与机理。

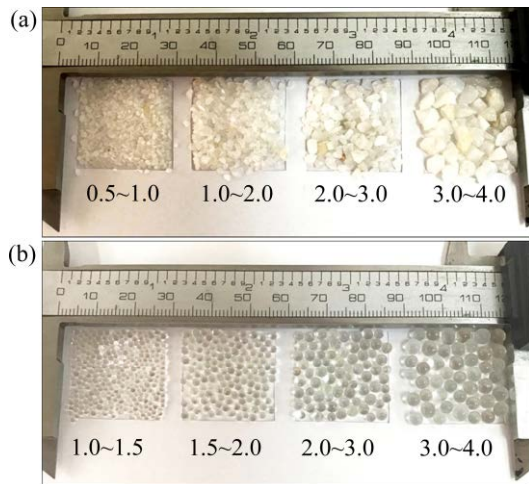
1 试验概况

1.1 试验材料

试验材料包括石英砂与玻璃珠 2 种:石英砂产自广东省河源市,为天然石英石(原石二氧化硅含量达 99% 以上)加工而成,颗粒多为不规则形状(图 1(a));玻璃珠购买自广东兆通玻塑科技有限公司(网址: <https://b2b1981799843.51pla.com/>),颗粒为球形或椭球形,球形度为 90% 以上,表面光滑(图 1(b))。

将石英砂及玻璃珠颗粒清洗,晾干并筛分。将样品按照粒径大小分为 4 组,如表 1 所示。其中,玻璃珠颗粒在各粒径组别中的尺寸分布较为均匀,即生产时所采用的标准规格;而石英砂尺寸较不均匀,因此采用了筛径为 4.0, 3.0(定制), 2.0, 1.0 和 0.5 mm(标准筛)的筛子对石英砂进行筛分,使得各分组内的石英砂颗粒尺寸较为统一(见表 1)。

采用密度计测量石英砂和玻璃珠的颗粒密度,测得石英砂的颗粒密度为 2.63 kg/m³,玻璃珠的颗粒密度为 2.48 kg/m³,不同颗粒尺寸所对应的颗粒密度无明显差别。



单位: mm

(a) 石英砂; (b) 玻璃珠

图1 4种不同粒径的石英砂及玻璃珠颗粒

Fig. 1 Quartz sand and glass beads with four groups of sizes

表1 石英砂和玻璃珠颗粒尺寸分组

Table 1 Particle sizes of the quartz sand and

编号	glass beads				mm
	S-1	S-2	S-3	S-4	
石英砂	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	
玻璃珠	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	

1.2 试验方案

试验采用南京土壤仪器厂有限公司生产的TSZ2-6(T)型全自动三轴仪,围压、反压和孔压传感器的量程均为 2.0 MPa,轴力传感器的量程为 10 kN,精度为 0.001 kN,剪切速率范围为 0.000 1~2.4 mm/min。

按照《土工试验规程》(SL 237—1999)^[20]进行石英砂和玻璃珠的排水固结三轴剪切试验,试样直径约为 40.2 mm、高约为 82.0 mm,采用分层落雨并轻微击实的方式制备^[21]。试样的制备一般可按 2 类标准: 1) 保持试样的堆积密度一致; 2) 保持试样制备方式一致。为充分反映颗粒的尺寸效应影响,本文采用第 2 种方式,即保持试样制备过程中试样的最终尺寸、分层的数量、击实的次数和压力等参数一致。制备试样时,先在压力室底座上放上透水石,将橡皮膜套在对开膜成模筒里面,并用抽气泵抽气,使橡皮膜紧贴对开膜。将砂样分 5 等分

填入橡皮膜内,每装完一层用击样器击实,用钢尺检查是否达到预定高度,并将表面刮花,开始装下一层,直至砂土试样高度与对开筒上边缘齐平,用刮刀整平砂面,放上透水石和试样帽,并用皮筋扎紧橡皮膜。

除石英砂和玻璃珠这 2 种不同材料所带来的颗粒形态差异,本文亦考虑干燥和饱和 2 种试样状态,以反映实际工程中岩土材料不同含水率的影响。在开展试验过程中,发现不同含水率(如 10%、50%等)较难控制,水分因重力作用会集中在试验下部,因此本文仅考虑了干燥、完全饱和 2 种状态,如何克服并完善不同含水率的样品制备有待进一步研究。对于饱和试样,在装填好试样后往橡胶膜内注水,直至有水从试样表面溢出(如图 2 所示)。



图2 干试样及湿润试样示意图

Fig. 2 Dry and fully saturated samples

预试验发现,当围压达 200 kPa 时,石英砂颗粒在压缩的过程中出现棱角破碎的现象。本文为排除颗粒破碎的影响,重点研究颗粒尺寸效应本身对颗粒材料堆积体宏观物理力学特性的影响,仅选取低于 200 kPa 围压。此外,根据土工试验规范,剪切速率定为 0.5 mm/min。详细的试验方案及控制参数如表 2 所示。

表2 排水估计试验方案及控制参数

Table 2 Testing programs and settings

项目	方案及参数
材料	4 组不同尺寸的石英砂、玻璃珠
含水状态	干燥、饱和
围压/kPa	25, 50, 100, 150
剪切速率/(mm·min ⁻¹)	0.5
终止应变/%	20

2 试验结果与分析

2.1 试样密度及孔隙率

颗粒材料的抗剪强度跟其堆积密度息息相关,因此本章首先研究颗粒尺寸效应对材料堆积密度的影响。采用保持制样方法一致的制样标准,所得试样的密度和孔隙率如表3所示。由表可以看出,无论是石英砂还是玻璃珠,颗粒的尺寸效应对材料的堆积密度或孔隙率影响较小。相比较而言,石英砂试样的孔隙率要明显大于玻璃珠试样的孔隙率。这是由于颗粒形态效应的影响:不规则形态的颗粒有着较高抗转动能力及颗粒间咬合作用,相比于玻璃珠较容易形成稳定骨架,颗粒间囊括更多的孔隙。

表3 试样密度及孔隙率

编号	密度/(g·mm ⁻³)		孔隙率	
	石英砂	玻璃珠	石英砂	玻璃珠
S-1	1.529	1.555	0.417	0.372
S-2	1.534	1.552	0.415	0.374
S-3	1.552	1.549	0.411	0.376
S-4	1.561	1.546	0.408	0.379

此外,饱和试样是在干燥试样的基础上注水饱和而得,在注水的过程中,在试样中未发现颗粒重分布的现象。因此,本文中饱和试样和干燥试样的堆积密度或孔隙率相同。

2.2 应力-应变曲线特性

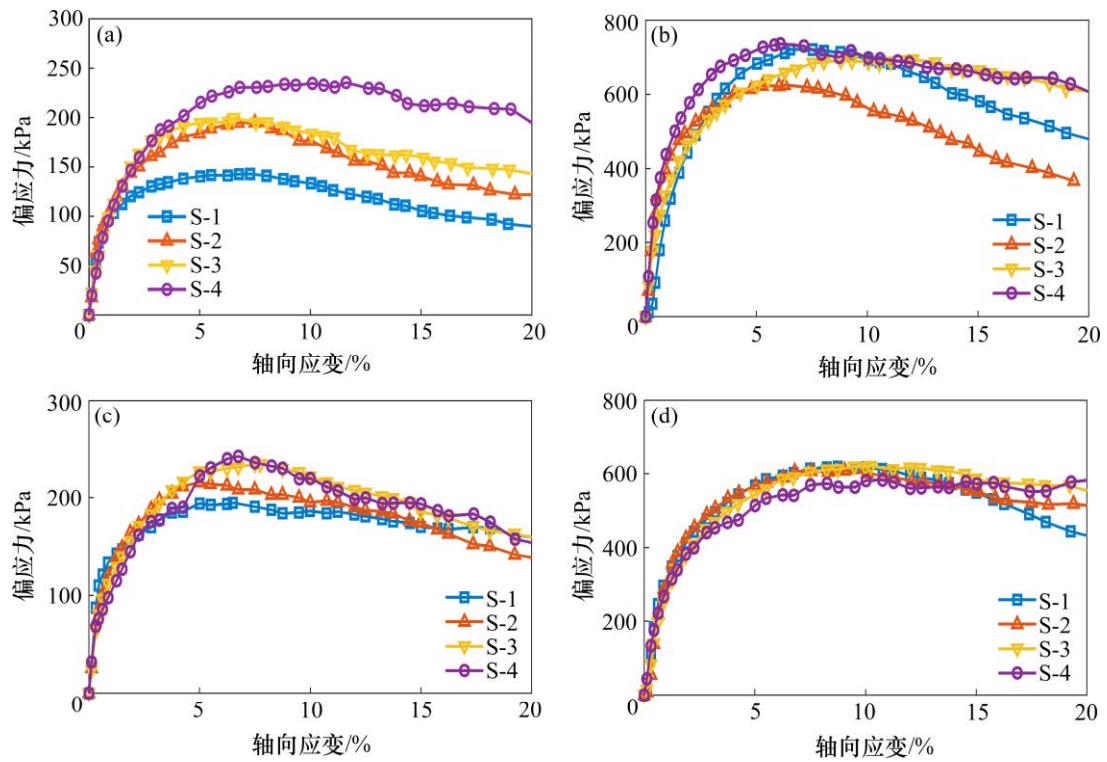
本节将从2个方面阐述尺寸效应对颗粒材料的应力-应变曲线特性的影响:1)考虑颗粒形态;2)考虑材料的含水率。图3显示的是围压为25 kPa和150 kPa时,石英砂在干燥及饱和状态下(即4种不同试验情形)的固结排水三轴剪切试验应力-应变曲线。对于这4种不同情形,不同颗粒尺寸下试样的应力应变曲线都分别呈现出较为相似的模式:剪应力随着轴向应变的增大而增大,剪应力在达到峰值后,开始下降,即应变软化现象;此外,剪应力峰值出现的位置(及剪切破坏位置)基本上都在5%~10%轴向应变区间内,剪应力下降的幅度较小(基本上都在20%以内)。

对比干燥与饱和这2种不同含水率状态下的应力应变曲线可以发现,当试样干燥时,不同颗粒尺寸试样所对应的应力应变曲线差异较明显,而饱和试样的应力应变曲线差异相对较小。由此可以看出,饱和含水情况可以减弱颗粒的尺寸效应。

图4显示的是围压为25 kPa和150 kPa时,玻璃珠在干燥及饱和状态下的固结排水试验应力-应变曲线。对比石英砂的应力应变曲线(即图3),玻璃珠试样的应力应变曲线呈现出较为相似的整体变化趋势。不同的是,玻璃珠试样的线性加载段(即峰值应力之前)斜率较大,即表现出较大的弹性模量。考虑到石英砂和玻璃珠颗粒的主要成分都是二氧化硅,颗粒的弹性模量相近,因此石英砂和玻璃珠试样所表现出的宏观弹性模量差异主要由试样的堆积密度(或孔隙率)造成。玻璃珠的堆积密度相对较大,即表现出更大的弹性模量。在试样的破坏应变方面,玻璃珠试样的峰值剪应力基本上出现在2%~5%轴线应变区间,明显小于石英砂试样。此外,与石英砂试验类似,在饱和玻璃珠的三轴剪切过程中,水的存在降低了玻璃珠的尺寸效应影响。因此,不同颗粒尺寸的饱和玻璃珠试样的应力应变曲线之间的差异比干燥试样更小(对比图3(a)与3(c)或3(b)与3(d))。

为了更加直观地对比石英砂、玻璃珠、干燥、饱和等4种不同情形对颗粒尺寸效应的影响,图5显示了不同试样在不同围压下的抗剪强度(及剪应力峰值)。对于这4种不同情形,随着围压的增大,抗剪强度也随着增大,试样抗剪强度与围压都呈现出较好的线性关系。

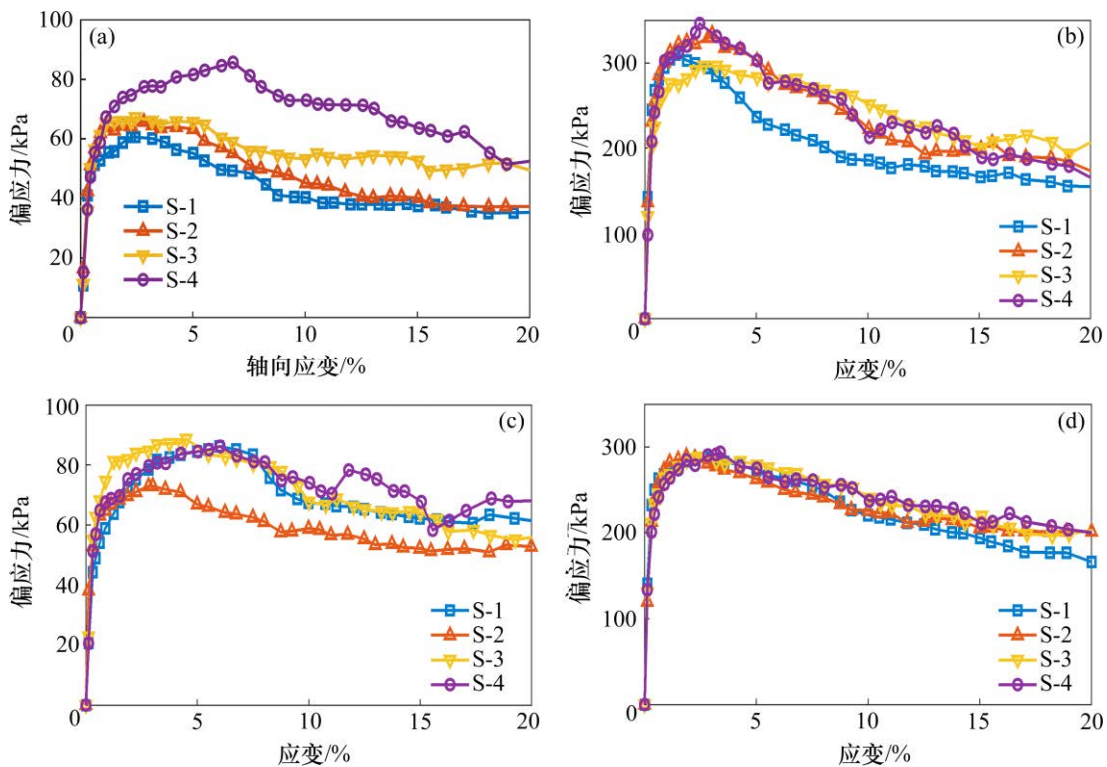
对比石英砂和玻璃珠这两种不同颗粒形态的试样抗剪强度可以看出,颗粒的形态对试样的抗剪强度有显著的影响。石英砂颗粒的不规则形态及表面的棱角增强了颗粒间的咬合作用,提高了颗粒的抗转动能力,因此表现出更高的抗剪强度。另一方面,颗粒材料的抗剪强度也与试样的堆积密度有关,抗剪强度通常随着堆积密度的增大而提高。在本项工作中,石英砂试样的堆积密度均比玻璃珠试样低。此试验结果表明,试样堆积密度对抗剪强度的影响要弱于颗粒形态的影响。



(a) 石英砂、25 kPa、干燥; (b) 石英砂、150 kPa、干燥; (c) 石英砂、25 kPa、饱和; (d) 石英砂、150 kPa、饱和

图3 石英砂应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain relations of quartz sand



(a) 玻璃珠、25 kPa、干燥; (b) 玻璃珠、150 kPa、干燥; (c) 玻璃珠、25 kPa、饱和; (d) 玻璃珠、150 kPa、饱和

图4 玻璃珠应力-应变曲线

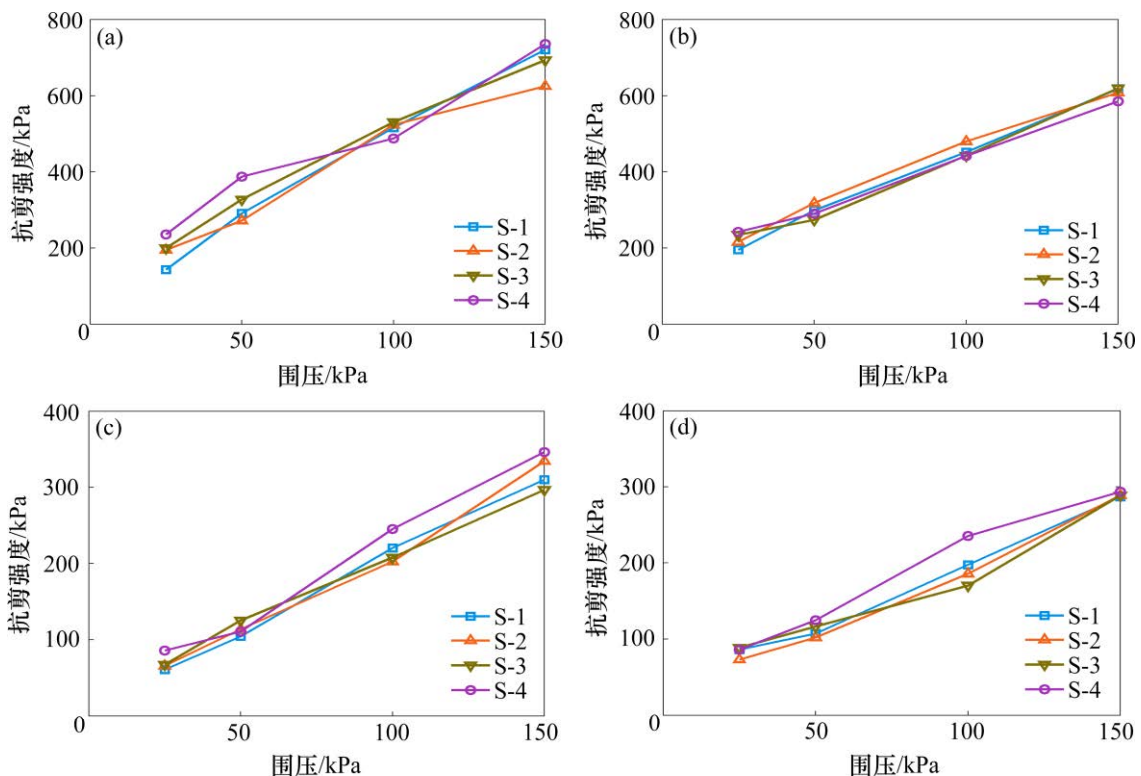
Fig. 4 Stress-strain relations of glass beads

对于饱和和湿润这2种不同的含水率状态,饱和和试样的抗剪强度相对较低,这是由于水的润滑作用降低了颗粒间的摩擦因数,从而降低了颗粒间的咬合作用及颗粒的抗转动能力,使得饱和试样表现出更低的抗剪强度。特别地,同样是由于水的润滑作用,玻璃珠试样的抗剪强度降低程度要小于石英砂。这是因为石英砂颗粒非常不规则、而玻璃珠颗粒比较光滑,因此石英砂颗粒的摩擦因数比玻璃珠颗粒大,水的润滑作用对石英砂颗粒摩擦因数的影响更为明显。

从微观角度考虑,水对颗粒材料的作用体现在2个方面:一是通过浮力的作用等效地降低了土颗粒的密度,二是水的润滑作用降低了土颗粒之间的摩擦因数。在颗粒材料的剪切过程中,颗粒与颗粒之间的咬合作用提供了大量的抗剪强度,而咬合作用又与颗粒的尺寸、形态以及颗粒的摩擦因数息息相关。水的存在降低了颗粒尺寸对咬合作用的影

响,使应力应变曲线的差异减小。当砂土含水时,土中水的毛细作用产生部分黏聚力,即气-水界面的收缩膜上的表面张力的反作用力作用在土粒上,对土粒产生压应力,从而造成土的黏聚力;当土粒完全被水所包围,起到润滑的作用,从而导致了黏聚力相对于干燥状态减小。

此外,对比不同粒径试样的抗剪强度,可以发现:当围压较低、试样干燥时,试样的抗剪强度随粒径的增大而增大(图5(a)和5(c)),光滑颗粒材料(即玻璃珠)的颗粒尺寸效应较为明显,而不规则颗粒材料(及石英砂)的颗粒尺寸效应相对较弱(图5(a));当围压较高、试样饱和时,试样抗剪强度随粒径变化的规律较不明显,即当围压较低时,颗粒粒径与偏应力峰值的正相关程度较高,而高围压在一定程度上抑制尺寸效应,导致粒径与峰值之间的关系不明显。此外水的作用也会降低颗粒尺寸效应。



(a) 石英砂、干燥; (b) 石英砂、饱和; (c) 玻璃珠、干燥; (d) 玻璃珠、饱和

图5 干燥及饱和状态下石英砂和玻璃珠抗剪强度

Fig. 5 Shear strength of quartz sands and glass beads under dry and fully saturated conditions

2.3 强度参数

莫尔-库伦强度准则是描述砂土强度较为常用

的强度准则之一。根据三轴固结排水试验结果,不同颗粒形态、含水率状态下的试样的莫尔-库伦强

度参数(即黏聚力与摩擦角)整理在表4中。从表4的结果可以看出,所有情形下的试样都表现出一定的黏聚力。石英砂试样的黏聚力约为20~30 kPa,玻璃珠的约为0~10 kPa。

本次试验中试样所表现出的黏聚力可能由以下3个方面的因素引起:1)砂土的实际强度准则包络线是一条经过原点的曲线,而莫尔-库伦强度准则包络线为直线,其在原点附近的拟合误差即导致了黏聚力^[22];2)颗粒间的咬合作用使试样表现出黏聚力的现象^[23],而且此黏聚力现象随颗粒间的咬合作用增大而增大;3)橡皮膜的约束作用使得试样所承受的实际围压比预设围压略大,用预设围压计算而得的强度参数存在一定误差,即导致了黏聚力的产生^[24]。对比石英砂和玻璃珠,前者的黏聚力相对较大,这与前述的第二项原因吻合,即石英砂颗粒因形态不规则而具有更强的咬合作用,使试验在宏观上表现出更大的黏聚力。对比干燥和湿润这两种状态,湿润试样的黏聚力略大于干燥试样,这可能是由于水带来的微弱毛细力导致。

此外,对于石英砂、玻璃珠、干燥及湿润等4种不同情形,试样的黏聚力均呈现出随颗粒尺寸增大而略微增大的总体趋势。其中,干燥石英砂试样黏聚力变化最为明显。此试验现象表明,颗粒的尺寸效应与颗粒间的摩擦因数有关,形态光滑或水的润滑作用降低了颗粒间的摩擦因数,进一步弱化了颗粒尺寸效应对宏观黏聚力的影响。

在摩擦角方面,不同颗粒尺寸的湿润试样的摩擦角均小于干燥试样。如前述分析,水的润滑作用

降低了颗粒间的摩擦因数,使得试样整体表现出更低的宏观摩擦角(摩擦角降低约6%~12%,即宏观摩擦因数降低约8%~17%)。因颗粒形态的影响,石英砂试样的摩擦角比玻璃珠试样大22%~32%左右(摩擦因数约为27%~37%,即颗粒的形态效应提供了约32%的抗剪强度)。

不同粒径下试样的宏观摩擦角对比结果显示:对于石英砂,不管是干燥还是饱和状态,其摩擦角随颗粒尺寸的增大呈略微减小的趋势,减小的趋势在小粒径(0.5~2.0 mm)时较为明显,但随着粒径的增大而减弱,颗粒平均尺寸从0.5 mm增大到3 mm时,石英砂材料的宏观摩擦角降低约7%;对于玻璃珠,不同颗粒尺寸试样的摩擦角较为接近,基本上不受颗粒尺寸的影响,由此可见,光滑材料的颗粒尺寸效应在摩擦角方面的影响相对较弱。与尺寸效应对黏聚力的影响类似,当颗粒形态不规则、试样干燥时,颗粒的尺寸效应较为显著,即形态光滑或水的润滑作用降低了颗粒间的摩擦因数,进一步弱化了颗粒的尺寸效应影响。

需要指出的是,在微观尺度上,如玻璃珠、石英砂等颗粒材料的颗粒之间本没有黏聚力,三轴试验测得的黏聚力为假黏聚力,是宏观尺度上的概念。黏聚力来源于2个方面,一方面是颗粒之间真实的胶结作用,如黏土颗粒;另一方面是由莫尔库伦强度准则线性拟合所造成的假黏聚力,其本质上是由微观尺度上颗粒间的咬合作用导致。而且,颗粒间的咬合力与黏聚力存在着一定的相关性,颗粒间的咬合作用越强,颗粒材料的宏观黏聚力越大。

表4 莫尔-库伦强度参数

Table 4 Mohr-Coulomb strength parameters

	石英砂、干燥		石英砂、饱和		玻璃珠、干燥		玻璃珠、饱和	
	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
S-1	9.85	44.07	28.98	38.65	2.39	30.30	10.79	26.90
S-2	25.58	40.09	37.53	37.52	1.95	30.95	6.30	27.74
S-3	26.85	41.48	33.21	37.79	8.37	28.27	12.19	26.01
S-4	36.43	40.62	41.62	35.69	5.49	31.46	13.71	27.54

3 结论

1) 在制样方式一致的情况下,无论是形态光滑

(即玻璃珠)还是不规则(即石英砂)的颗粒材料,颗粒的尺寸效应(0.5~4 mm 粒径区间)对其堆积密度或孔隙率影响都较小。

2) 对于石英砂,不管是干燥还是饱和状态,其摩擦角随颗粒尺寸的增大呈略微减小的趋势,减小的趋势在小粒径(0.5~2.0 mm)时较为明显,但随着粒径的增大而减弱,颗粒平均尺寸从 0.5 mm 增大到 3 mm 时,石英砂材料的宏观摩擦角降低约 7%;对于玻璃珠,不同颗粒尺寸试样的摩擦角较为接近,基本上不受颗粒尺寸的影响。

3) 由于水的润滑作用,试样整体表现出更低的宏观摩擦角(降低约 6%~12%,即宏观摩擦因数降低约 8%~17%)。水的润滑作用降低了颗粒间的摩擦因数,从而减弱了颗粒的尺寸效应,而且当颗粒形态不规则时,水对颗粒尺寸效应的减弱现象更为明显。

4) 对于石英砂、玻璃珠、干燥及饱和等 4 种不同情形,试样的黏聚力均呈现出随颗粒尺寸增大而略微增大的总体趋势;其中,干燥石英砂试样黏聚力变化(即颗粒尺寸效应)最为明显。

5) 对于不规则颗粒材料,不管是干燥还是饱和状态,其宏观摩擦角随颗粒尺寸的增大呈略微减小的趋势,减小的趋势在小粒径时较为明显,但随着粒径的增大而减弱;不同粒径的玻璃珠试样摩擦角变化较小,即颗粒尺寸效应对光滑材料的摩擦角影响相对较弱。

参考文献:

- [1] 魏静,鲍宁,魏平,等.透明砂土力学性质三轴试验研究[J].铁道工程学报,2018,35(11):14-19.
WEI Jing, BAO Ning, WEI Ping, et al. Research on the mechanical properties of transparents and based on triaxial test[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(11): 14-19.
- [2] 冯晓腊,王方艳,唐璇,等.剪切盒尺寸与平均粒径对砂土抗剪强度的影响[J].科学技术与工程,2017,17(34):104-110.
FENG Xiaola, WANG Fangyan, TANG Xuan, et al. Effects of shear box size and mean grain size on sandy soil shearing strength[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 104-110.
- [3] 张祺,厚美瑛.直剪颗粒体系的尺寸效应研究[J].物理学报,2012,61(24):348-353.
ZHANG Qi, HOU Meiyang. Research on size effect of direct shear test[J]. Acta Physica Sinica, 61(24): 348-353.
- [4] 邴能惠,朱铁,米占宽.小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J].水电能源科学,2001(2):39-42.
LI Nenghui, ZHU Tie, MI Zhankuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi Dam and scale effect[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, 19(2): 39-42.
- [5] 董槐三,尹承瑶.天生桥一级水电站面板堆石坝筑坝材料性质研究[J].红水河,1996(4):9-14.
DONG Huaisan, YIN Chengyao. Study of construction material properties for TSQ-I concrete faced rock fill dam [J]. Hongshui River, 1996, 15(4): 7-12.
- [6] 李响,马刚,周伟,等.考虑颗粒强度尺寸效应的堆石体缩尺效应研究[J].水力发电学报,2016,35(12):12-22.
LI Xiang, MA Gang, ZHOU Wei, et al. Scale effects of rockfill materials considering size effect of particle strength[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001(2): 39-42.
- [7] 李翀,何昌荣,王琛,等.粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J].岩土力学,2008,29(增1):563-566.
LI Chong, HE Changrong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Suppl 1): 563-566.
- [8] 王继庄.粗粒料的变形特性和缩尺效应[J].岩土工程学报,1994(4):89-95.
WANG Jizhuang. The deformation characteristics and scale effect of coarse aggregate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4): 89-95.
- [9] 王娜.粒径与级配对海岸砂土液化影响的动三轴试验[D].青岛:中国海洋大学,2015.
WANG Na. Dynamic triaxial experiment of the influence of diameter and gradation to coastal sandy liquefaction [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [10] Indraratna B, Balasubramaniam A S, Wijewardena L S S. Discussion: Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill[J]. Géotechnique, 1993, 43(1): 37-51.
- [11] HU W, Dano C, Hicher P Y, et al. Effect of sample size on the behavior of granular materials[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(3):186-197.
- [12] Vangla P, Roy N, Gali M L. Image based shape characterization of granular materials and its effect on kinematics of particle motion[J]. Granular Matter, 2018, 20(1): 19.

- [13] CHEN Y, XIAO Y, ZHANG W, et al. Particle size effects in granular soils under true triaxial conditions[J]. *Géotechnique*, 64(8): 667–672.
- [14] Islam M N, Siddika A, Hossain M B, et al. Effect of particle size on the shear strength behavior of sands[J]. arXiv preprint arXiv, 2019, 1902.09079.
- [15] Roessler T, Katterfeld A. Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using upscaled particles[J]. *Powder Technology*, 2018, 330: 58–66.
- [16] 乐天呈, 顾颖凡, 刘春, 等. 级配与颗粒形态对砂土压缩性影响的试验和离散元数值模拟[C]// 2018 年全国工程地质学术年会. 西安, 2018: 8.
LE Tiancheng, GU Yingfan, LIU Chun, et al. Experiment and DEM numerical simulation for influence of particle size distribution and shape on compressibility of sand[C]// 2018 National Annual Conference of Engineering Geolog. Xi'an, 2018: 8.
- [17] 刘军, 孙田, 张豫湘, 等. 不同粒径砂土的细观离散元模拟[J]. *北京建筑大学学报*, 2016, 32(4): 18–22.
LIU Jun, SUN Tian, ZHANG Yuxiang, et al. Mesoscopic simulations by the DEM based on different sand particle diameters[J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2016, 32(4): 18–22.
- [18] Cil M B, Buscarnera G. DEM assessment of scaling laws capturing the grain size dependence of yielding in granular soils[J]. *Granular Matter*, 2016, 18(3): 26.
- [19] Sitharam T G, Nimbkar M S. Micromechanical modelling of granular materials: Effect of particle size and gradation[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2000, 18(2): 91–117.
- [20] 南京水利科学研究所. 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. Rules of geotechnical testing[S]. China Water & Power Press, 1999.
- [21] 陆勇, 周国庆, 顾欢达. 常压至高压下砂土强度、变形特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(11): 2369–2376.
LU Yong, ZHOU Guoqing, GU Huanda. Experimental study of strength and deformation characteristics of sand under different pressures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(11): 2369–2376.
- [22] 张俊. 考虑非连续性土体性状的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
ZHANG Jun. Experimental research on properties of soil considering its non continuum[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [23] LAI Z, CHEN Q. Characterization and discrete element simulation of grading and shape-dependent behavior of JSC-1A Martian regolith simulant[J]. *Granular Matter*, 2017, 19(4): 69.
- [24] 郭爱国, 茜平一. 三轴压缩试验中橡皮膜约束影响的校正[J]. *岩土力学*, 2002(4): 442–445.
GUO Aiguo, QIAN Pingyi. Correction for influence for influence of membrane restraint in triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002(4): 442–445.

(编辑 涂鹏)