

试样特征对花岗岩残积土强度特性的影响

陈志波^{1,2,3}, 方军^{1,2}, 蔡锦阳^{1,2}, 谢永宁^{1,2}, 陈峰^{3,4}

(1.福州大学紫金地质与矿业学院,福州 350116; 2.智能环境岩土工程福建省闽台科技合作基地,福州 350116;
3.福建省建筑废弃物再生利用工程技术研究中心,福州 350108; 4.福建江夏学院工程学院,福州 350108)

摘要: [目的] 为明确试样尺寸、试样形状、试样类型等试样特征对花岗岩残积土抗剪强度的影响。[方法] 对花岗岩残积土开展一系列大型直剪试验,基于剪应力-位移曲线、抗剪强度及其参数等指标,分析上述试样特征对花岗岩残积土强度特性的影响规律,并为实际工程中强度参数确定提供建议。[结果] 花岗岩残积土的抗剪强度及其强度参数均随试样尺寸的增大而呈先减小后趋于稳定的变化规律,在最佳试样尺寸下所得到的土体强度能够较好地克服尺寸效应对试验结果的影响;正方形试样抗剪强度及其黏聚力小于圆柱形试样,而内摩擦角大于圆柱形试样,其应力分布的不均匀性加快正方形试样的破坏过程;花岗岩残积土原状样抗剪强度显著高于重塑样,而随着法向应力的增大,原状样与重塑样抗剪强度的差值逐渐减小;采用指数型函数可很好地描述试样强度与试样尺寸之间的关系。[结论] 在实际工程应用中,尽量用大直径的试样或采用考虑抗剪强度误差的小直径的试样进行大型直剪试验,以获取较为符合工程实际的强度参数。

关键词: 花岗岩残积土; 大型直剪试验; 试样特征; 强度特性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0127-08

Effect of Sample Characteristics on the Strength Characteristics of Granite Residual Soil

CHEN Zhibo^{1,2,3}, FANG Jun^{1,2}, CAI Jinyang^{1,2}, XIE Yongning^{1,2}, CHEN Feng^{3,4}

(1. Department of Geotechnical and Geological Engineering, Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Fujian-Taiwan Science and Technology Cooperation Base of Fujian Province on Intelligent Geo-Environmental Engineering, Fuzhou 350116, China; 3. Fujian Province Engineering Technology Research Center for Recycling and Reuse of Construction Waste, Fuzhou 350108, China; 4. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: [Objective] To determine the influence of sample characteristics such as sample size, sample shape, and sample type on the shear strength of granite residual soil. [Methods] A series of large-scale direct shear tests were carried out on granite residual soil by using a large-scale direct shear instrument. Based on the shear stress-displacement curve, shear strength and its parameters, the influence of the above-mentioned sample characteristics on the strength characteristics of granite residual soil was studied, and a recommendation was provided for determining strength parameters in practical engineering applications. [Results] Both the shear strength and its parameters of granite residual soil decreased first and then tended to stabilize as the sample size increased. The soil strength obtained under the optimal sample size could effectively overcome the influence of size effect on the test results. The shear strength and cohesion of square samples were smaller, while the internal friction angle was larger, than that of cylindrical samples. The non-uniformity of stress distribution speeded up the failure process of square samples. The shear strength of the original sample was significantly higher than that of the reconstructed sample, and the difference in shear strength between the original sample and reconstructed sample decreased with

收稿日期: 2024-11-11

修回日期: 2024-12-30

录用日期: 2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(52278335); 福建省自然资源厅科研项目(KY-070000-04-2022-021, KY-070000-04-2022-026); 福建省建筑废弃物再生利用工程技术研究中心基金项目(JXKFA202203)

第一作者: 陈志波(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、地质工程教学与研究。E-mail: czb@fzu.edu.cn

通信作者: 谢永宁(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学研究。E-mail: cexieyn@fzu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

the increase of normal stress. The exponential function can be used to well describe the relationship between sample strength and sample size. [Conclusion] In practical engineering applications, large-diameter samples or small-diameter samples considering shear strength error should be used for large-scale direct shear test to obtain strength parameters that are better in line with practical engineering.

Keywords: granite residual soil; large-scale direct shear test; sample characteristics; strength characteristics

Received: 2024-11-11

Revised: 2024-12-30

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-26

花岗岩残积土是在特定的地理、地质条件和气候环境等多重因素的共同作用下形成的,被视为一种区域性特殊土^[1-2]。花岗岩残积土广泛分布于世界各地^[3-6],在我国,花岗岩残积土主要分布在东南沿海、东北和西南山区,以福建、广东、香港等地区最具代表性。这些地区的花岗岩残积土的出露面积达到各地区总面积的 30%~40%,且不同地区的花岗岩残积土之间存在明显的区域性差异^[7-9]。

花岗岩残积土往往含有较多的粗颗粒^[10],常规直剪试验通常需对试样进行过筛处理^[11],改变原有试样的组成和结构,如此得到的试验结果往往难以准确反映实际情况的土体强度特性。采用大型直剪试验能有效克服尺寸效应的影响,获得较为接近工程实际情况的物理力学指标。现今大型直剪试验主要运用于粗粒料、土石混合体等方面^[12-16],对花岗岩残积土的研究有所欠缺,胡屏等^[17]初步研究含粗颗粒花岗岩残积土,模拟原状土剪切破坏过程,对真实工程应用还有局限性;安然等^[18]研究发现,原位剪切试验获取的剪切特性更符合工程实际,解释特定条件下有关指标的选取范围;邵嘉波等^[19]采用现场大型直剪仪,进一步探究花岗岩残积土的剪切特性,对试样尺寸与强度参数的适用性还有不足。因此,探究花岗岩残积土在大型直剪试验下的土体破坏机理和强度参数变化规律还需要深入分析。

试样特征对不同土体的强度研究中,大量的学者已经做出重要论断。在试样尺寸方面,刘飞禹等^[20]、魏厚振等^[21]研究不同土体大试样尺寸强度效应,得到土体在大尺寸下剪切软化现象更明显;朱云江等^[22]探究黄土不同试样的尺寸关系,得到大尺寸试样强度参数小于小尺寸试样,且更符合工程实际要求;对于试样形状方面,吴秋红等^[23]研究不同截面形状砂岩试样的力学特性发现,方形试样与圆柱形试样相比,其内部应力分布差异显著,强度更低,圆柱形试样呈现张拉破坏,方形试样则呈现“沙漏”形破坏。从试样类型上看,原状土样、重塑土样由于颗粒结构的天然与人为再造差别,强度特性也大不相同,不同土体有不同的结构特性^[24-27]。针对花岗岩残积土颗粒成分复杂、结构疏松

和抗剪强度复杂等特殊性质,需要更深入地研究,揭示其背后的机理和破坏机制。

综上所述,本文对花岗岩残积土强度参数选取不明确、适用性不广泛等问题,开展大尺寸直剪试验,以试样尺寸、试样形状及试样类型等因素为切入点,确定各影响因素与抗剪强度和强度参数之间的关系,建立经验公式推测实际工况下花岗岩残积土强度特性,为工程应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 供试土样

试验土样于 2022 年 10 月 5 日取自福州市闽侯县溪源宫后山山坡,通过前期进行相关试验确定试验土样的相关物理力学性质指标,土样体积质量为 1.73 g/cm³,干密度为 1.46 g/cm³,含水率为 18.6%,比重为 2.63,孔隙比为 0.803,液限为 46.3%,塑限为 25.3%。根据 XRD 衍射试验发现,该地区的矿物成分主要以高岭石为主,石英次之,另含有少量伊利石,其中,高岭石质量分数为 82.5%,石英质量分数为 12.7%,伊利石质量分数为 4.8%,土样具有较高的风化程度,砂粒质量分数为 46.2%,粉粒质量分数为 27.5%,黏粒质量分数为 26.3%,依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[1],该地区花岗岩残积土属于残积砂质黏性土。

1.2 试验仪器

试验仪器采用自主研发 TKA-DDS-30F 大型直剪仪和福建省地质工程勘察院 DJZ-300 型大型直剪仪,其中,TKA-DDS-30F 大型直剪仪可进行直径分别为 100、150、200、250、300 mm 的多尺寸圆柱形试样直剪试验,DJZ-300 型大型直剪仪可进行边长分别为 150、200、250、300 mm 的多尺寸正方形试样直剪试验。

1.3 试验方案

根据已有研究^[22,25]参数选取和《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[28]方法进行试样制备。探究试样尺寸、试样形状及试样类型等特征因素对花岗岩残积土强度特性的影响,对花岗岩残积土进行一系列大型直剪试验,确定试验方案见表 1。原状样采用大直径 PVC 管现场挖取套装原状土样并于室内切削至试验尺寸;重塑样为室内重塑,并控制密度、

含水率等指标与原状样一致;各个试验的试样高度均为 100 mm,剪切速率均设定为 2.4 mm/min。

表 1 试验方案

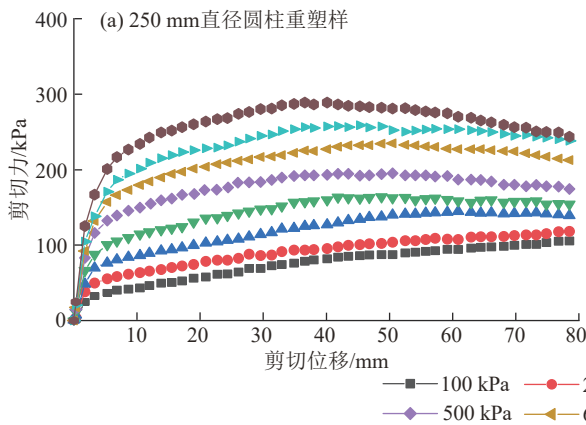
Table 1 Test scheme

试样形状与类型	试样直径(边长)/mm	法向应力/kPa
圆柱原状样	100、150、200	100、200、300、
圆柱重塑样	100、150、200、250、300	400、500、600、
正方形重塑样	150、200、250、300	700、800

2 结果与分析

2.1 不同试样特征的应力应变关系

根据不同尺寸重塑样的试验结果,整理得到直



径为 250 mm 的圆柱重塑样和试样边长为 250 m 的正方形土体剪应力-剪切位移的关系曲线(图 1),其他试验曲线类似,限于篇幅未列出。由图 1 可知,不同法向应力下,圆柱试样的剪应力-剪切位移关系曲线变化规律与正方形试样有所不同,低应力下试样呈应变硬化现象,随着法向应力增大,剪应力-剪切位移关系出现应变由硬化向软化转化的现象,特别是在高法向应力条件下,软化现象尤为明显。随着法向应力的进一步增大,由硬化向软化转化的趋势越发显著,出现的时间也更早。正方形试样则均呈应变软化现象。

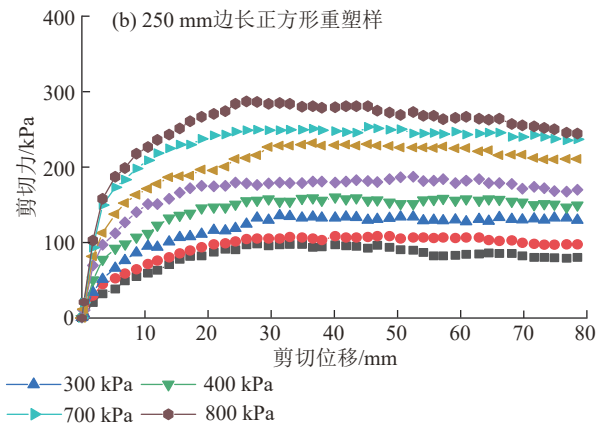


图 1 重塑样土体剪应力-剪切位移关系

Fig. 1 The shear stress-shear displacement relationship of cylindrical reshaped soil with a diameter of 250 mm

2.2 抗剪强度与试样特征关系

由图 2 可知,在相同法向应力作用下,花岗岩残积土试样抗剪强度随着试样尺寸的增大而逐渐减小,减小幅度呈减小趋势,最终趋于稳定。此现象在高法向应力作用下,表现尤为显著;而在低法向应力作用下,该种趋势表现不明显。即试样尺寸对花岗岩残积土强度有一定影响,而该影响随着尺寸的增大而逐渐减弱,试样尺寸达到某一临界之后,试样尺寸的继续增大几乎不影响测得的抗剪强度。

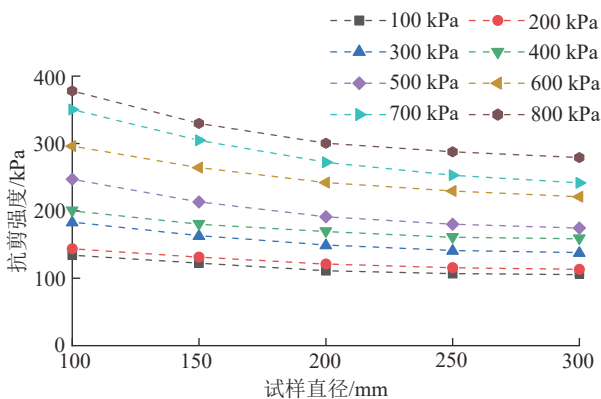


图 2 花岗岩残积土抗剪强度-试样直径关系

Fig. 2 Shear strength-sample diameter relationship of granite residual soil

当以试样类型为代表进行分析,得到不同试样类型抗剪强度-试样直径的关系。由图 3 可知,花岗岩残积土的原状样和重塑样在抗剪强度方面表现出显著的差异。在相同试样尺寸下,原状样的抗剪强度均显著高于重塑样,这是由于花岗岩残积土原状样具有较强的结构。

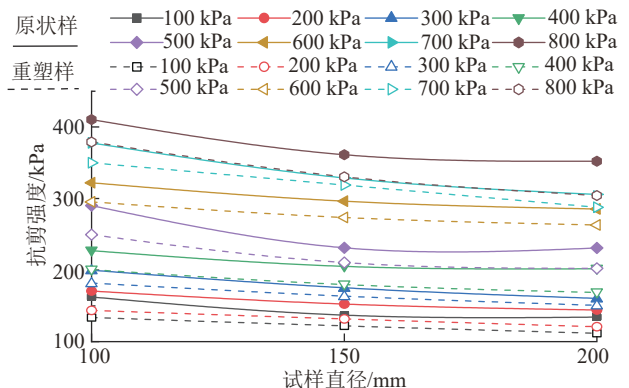


图 3 原状样和重塑样抗剪强度-试样直径的关系

Fig. 3 The shear strength-sample diameter relationship of the original and reconstructed samples

花岗岩残积土原状样未经较大扰动,试样保持原有土体结构,土颗粒之间存在着天然的联系和胶结作用,这种结构性使得原状样具有较高的抗剪强度,而重塑样则在制备过程中经历颗粒的重新排列

和再重组的过程,土颗粒之间的联系和胶结作用被破坏或减弱,因此其抗剪强度明显低于原状样。

由图 4 可知,正方形试样抗剪强度小于圆柱形试样,二者抗剪强度差值均在 10% 以内,相差较小。在相同的试验条件下,不同形状的试样在抗剪能力上的表现并不显著,具有一定的相似性。在较小的法向应力作用下,二者抗剪强度差距较大,而在较高应力作用下,二者的差距较小。由图 5 可知,对于同种试样土体,不同法向应力作用下,其抵抗外部荷载的能力有所区别。在较小的法向应力下,正方形试样相较于圆柱形试样存在更多应力分布不均的情况,棱角出现应力集中现象,导致试样整体抵抗外部荷载的能力较弱,棱角应力集中对试样抗剪强度的影响较大;而在较高的法向应力作用下,正方形试样和圆柱形试样的抗剪强度差距显著减小。

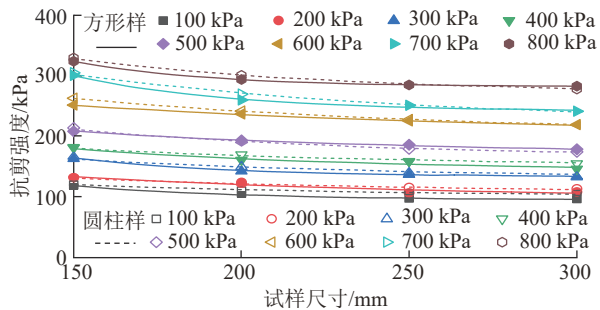


图 4 正方形试样和圆柱形试样抗剪强度-试样直径的关系

Fig. 4 Shear strength-sample diameter relationship of the square and cylindrical samples

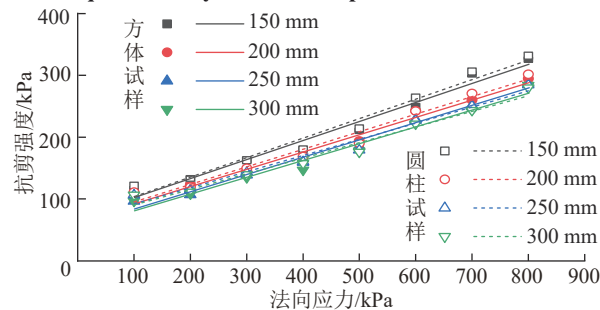


图 5 正方形试样和圆柱形试样抗剪强度-法向应力的关系

Fig. 5 Shear strength-normal stress relationship of the square and cylindrical samples

2.3 抗剪强度指标分析

根据摩尔库伦公式,由上述抗剪强度可得到不同试样的抗剪强度指标。采用指数型函数对试验结果进行拟合,可以得到内摩擦角与试样直径的关系为:

$$\varphi = \varphi_0 + pe^{-qD} \quad (1)$$

式中: p 、 q 为与试样土体性质相关的系数; φ_0 为天然状态下的内摩擦角, ($^{\circ}$); D 为试样直径, mm。

同样地,可得黏聚力与试样直径的关系为:

$$c = c_0 + me^{-nD} \quad (2)$$

式中: m 、 n 为与试样土体性质相关的系数; c_0 为天然

状态下的黏聚力, kPa。

采用公式(1)和公式(2)拟合得到的抗剪强度指标与试样直径关系曲线。由图 6 可知,花岗岩残积土的内摩擦角和黏聚力均随试样直径的增大而减小,且减小的趋势逐渐变缓直至相对稳定,存在与抗剪强度相同的变化趋势。抗剪强度指标随试样直径的变化而变化,所对应的黏聚力临界值为 66.19 kPa,内摩擦角临界值为 14.6 $^{\circ}$ 。当试样直径 < 250 mm 时,黏聚力和内摩擦角随试样直径的增大而显著减小;当试样直径 > 250 mm 时,黏聚力和内摩擦角随试样尺寸的变化较小,趋近于相对稳定。根据公式(1)和公式(2)可知,当试样直径进一步增大时,可认为试样不再受到尺寸效应和边界效应的影响,所得出的抗剪强度参数能更好反映实际工况的情况。

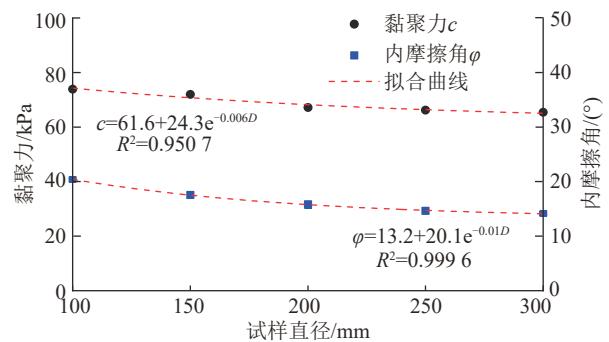


图 6 花岗岩残积土抗剪强度参数-试样直径的关系

Fig. 6 Shear strength parameters-sample diameter relationship of granite residual soil

由图 7 可知,从试样类型上看,原状样的土体其内摩擦角和黏聚力等参数表现出显著的差异。同时,发现原状样和重塑样抗剪强度指标的差别主要体现在黏聚力方面,在小尺寸的试样中,原状样和重塑样的黏聚力相差较大,随着试样直径的增大,差距逐渐减小并趋于相对稳定,是由于该地区花岗岩残积土属于黏性土,黏土矿物含量较多,黏聚力对抗剪强度的影响较大。因此,在小尺寸试样中,黏聚力的变化对抗剪强度的影响更加明显,导致原状样和重塑样之间的差异显著。

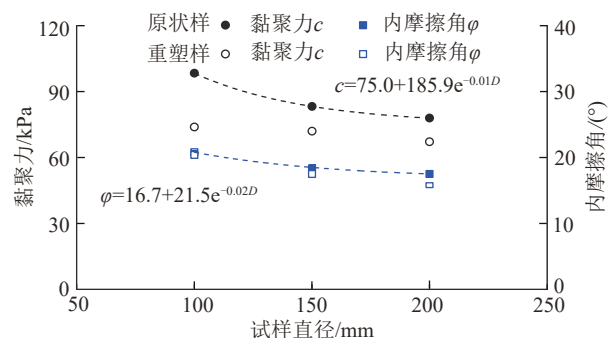


图 7 原状样和重塑样抗剪强度参数变化

Fig. 7 Variation of shear strength parameters for the original and reconstructed samples

由图8可知,通过库伦公式计算不同形状下试样抗剪强度指标并分析其关系。结果得到正方形试样的抗剪强度参数在试样尺寸趋近于无限大后,所得的黏聚力为45.9 kPa,内摩擦角为15.3°;而圆柱形试样的黏聚力为61.6 kPa,内摩擦角为13.2°,其黏聚力明显比正方形试样大,是因为在大尺寸条件下,试样整体的抵抗外部荷载的能力增强,局部的应力集中效应对整体抗剪强度的影响相对减弱。此时,正方形试样的棱角虽然仍然存在应力集中,但由于整体承载能力的提升,其抗剪强度得到改善,使得试样土体整体的抗剪强度指标趋于稳定。

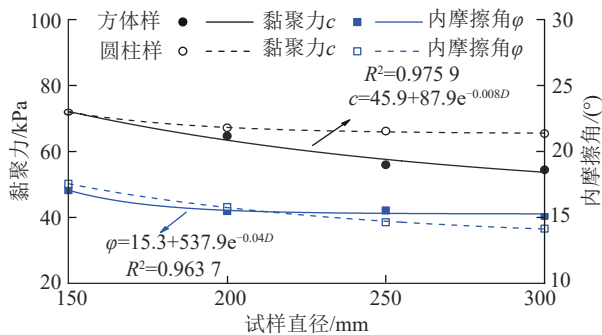


图8 正方形试样与圆柱形试样抗剪强度参数变化

Fig. 8 Variation of shear strength parameters for square and cylindrical samples

3 讨论

3.1 不同试样的受力特征

不同的试样特征主要先影响试验土体的受力情况和内部结构,从而影响试验结果,吴能森^[8]、安然等^[10]的研究亦可得到相关的印证。通过对比试样尺寸、试样类型和试样形状3种因素对花岗岩残积土强度特性的影响可以发现,试样类型对强度特性的影响最大,试样尺寸次之,试样形状对其影响最小。不同类型试样的内部结构存在显著差异,使其对试验结果产生较大影响。而试样尺寸和形状的变化直接改变试样的受力情况,进而影响试验结果。胡峰等^[12]、刘新荣等^[13]对土石混合体及粗粒料的研究,从颗粒破碎角度进行相关阐释。而对残积土的受力破坏研究还不多,因而,需要更深入的机理解释。

花岗岩残积土属于黏性土的范畴,根据黏性土的定义,其抗剪强度主要由2部分组成:一部分为摩阻力即内摩擦角,其本质是土体颗粒在移动过程中所受到的滑动摩擦以及凹凸面间的镶嵌作用的摩阻力;另一部分为土体颗粒间的黏聚力,其大小主要取决于矿物成分、含水率、土颗粒间的胶结作用和静电引力效应等因素。内摩擦角的大小主要取决于土粒间的摩擦作用、土粒形状和土粒间的间隙大小等因素,此次试验土体含有大量黏土矿物且粗颗粒含量

较少,黏土矿物包裹于颗粒表面,使得颗粒粗糙度、颗粒级配等因素对试验结果影响较小,故本试验中对于内摩擦角的影响主要表现为土体的不均匀性和软弱节理面的存在。

陈东霞等^[11]、胡屏等^[17]、邵嘉波等^[19]对花岗岩残积土强度变化规律的研究,侧面证明对其受力分析的正确性和必要性,也对本研究侧重试样特性研究结论起到一定的支撑作用。试样尺寸对试样应力场的均匀性产生较为显著的影响,可理解为土体的软弱节理面存在区域差异,较大尺寸的试样所存在的应力场软弱节理面区域相对较大,该区域土体的物理力学特性相对较低,当试样发生剪切位移时,土颗粒有足够的空间发生错动和重新排列,其有效接触点较少,导致其受到的摩阻力较小;而当试样尺寸较小时,该薄弱区域相对较小,提供给土颗粒发生错动和重新排列的空间减少,导致其摩阻力相对较大。当试样尺寸到达一定程度时,本身土体在剪切过程中,试样土体整体性显著降低,较快形成软弱节理面及其区域,土颗粒间的接触范围趋于固定,试样土体整体的抗剪强度指标趋于稳定。

根据剪切面形状和受力情况分析,正方形与圆柱试样在直剪试验过程中产生差异的原因。方体试样剪切面为方形,圆柱试样剪切面为圆形,由于本研究中方体试样的边长与圆柱试样直径等长,其剪切面积和周长均大于圆柱试样,不考虑试样形状对其影响,根据上文所述试样尺寸对花岗岩残积土强度特性的影响,在较大面积的试样中其边界效应较弱,故方体试样呈现的抗剪强度和黏聚力较小。试样形状不同导致试样剪切面的受力情况存在差异,剪切力沿着试样剪切面不同方向传递。圆柱试样剪切力作用于剪切面的切线方向,下部试样受力面为半圆面,由于曲率因素的影响,通常在弯曲部分的内侧应力较大,外侧应力较小;而方体试样剪切力作用于剪切面边界平行方向,下部试样受力面为矩形面,整体上受力较为均匀,但在棱角处出现应力集中现象,当应力集中过大时,试样率先发生破坏,导致其破坏时间缩短,抗剪强度较小。局部应力集中影响土体颗粒的错动和重新排列,由于应力分布的不均匀性,土体颗粒的运动更为杂乱无章,表现为内摩擦角较大。

3.2 试样尺寸选取建议

安然等^[18]、朱云江等^[22]、温勇等^[25]在研究直剪试验符合工程实际的土力学特性参数及充分考虑尺寸效应的影响中,已经作出一定贡献,为实际工程的尺寸选取提供建议。结合花岗岩残积土自身特殊的工程特性和研究成果,得到试样类型对土体强度参数

影响最大的结论。通过不同尺寸下原状样与重塑样试验结果对比,统计并进行对比分析给出合理的尺寸选取依据。

由表 2 可知,在大型直剪试验中,花岗岩残积土的原状样和重塑样在抗剪强度、内摩擦角和黏聚力等参数均表现出显著差异;在相同试样尺寸下,原状样的参数值均明显高于重塑样。其中,黏聚力差别较大,试样直径较小时(100 mm),原状样与重塑样差别较大,随着试样直径的增大,误差下降至 13.7%,基本稳定;原状样与重塑样内摩擦角误差在 10% 以内,随试样直径增大而有所增大;原状样与重塑样二者抗剪强度的误差维持在稳定的 11% 左右。

深入分析,是由于花岗岩残积土原状样具有较强的结构性,花岗岩残积土原状样未经较大扰动,试样保持原有土体结构,土颗粒之间存在着天然的联系和胶结作用,这种结构性使得原状样具有较高的抗剪强度,而重塑样则在制备过程中经历土颗粒的重新排列和再重组的过程,土颗粒之间的联系和胶结作用被破坏或减弱,因此其抗剪强度低于原状样。

表 2 原状样与重塑样强度指标对比

Table 2 Comparison of the test results between the original and reconstructed samples

强度指标	试样直径/mm	原状样	重塑样	误差/%
黏聚力/kPa	100	98.4	73.9	24.9
	150	83.3	71.9	13.7
	200	77.9	67.2	13.7
内摩擦角/(°)	100	20.8	20.4	1.92
	150	18.5	17.5	5.41
	200	17.5	15.8	9.71
抗剪强度/kPa	100	226.4	200.3	11.5
	150	204.6	180.7	11.7
	200	190.1	169	11.1

注:误差为原状样与重塑样参数值之差与原状样参数值的比值。

此外,在固结和剪切过程中都会破坏结构性土体的土体结构。进一步分析法向应力对结构性损伤破坏的影响可知,土体结构性随着法向应力的变化出现不同的损伤破坏,且法向应力越大,对土体结构性的损伤破坏越严重,当法向应力达到一定程度后,土体结构性可能被完全破坏,在这一阶段的原状样可能表现为与重塑样相似的强度特性。当法向应力较低时,原状样在剪切前其整体结构较为完整,损伤程度较低,故试样的抗剪强度明显高于重塑样;而随着法向应力的进一步增大,原状样的整体结构发生明显破坏,损伤程度进一步增大,导致原状样和重塑样抗剪强度的差距减小。

本研究通过对试样特征的影响分析发现,试样类型对花岗岩残积土抗剪强度指标影响最为明显。通过对这一现象在大、小尺寸原状样中呈现的变化规律,认识到大尺寸原状样由于试样尺寸较大,土体结构能够承载的外部荷载较大,在现有法向应力下,土体结构的损伤破坏程度较小。因此,在综合对比考虑试样类型后,确定通过测定某一试样直径(直径为 150 mm)试样的抗剪强度参数指标,为工程实际提供参数依据。

4 结论

1)随着试样尺寸的增大,花岗岩残积土的抗剪强度及其抗剪强度参数均呈先减小后稳定的变化趋势,强度变化在 250 mm 试样尺寸后达到稳定。在最佳尺寸下所得到的强度能够较好地克服尺寸效应对试验结果的影响,获得更符合天然状态下的土体强度特性。

2)正方形试样的黏聚力小于圆柱形试样,而内摩擦角大于圆柱形试样。在小尺寸中,正方形试样抗剪强度与圆柱形试样存在较大差距,而随着试样尺寸的增大,抗剪强度的差距逐渐减小。

3)各类试验中,抗剪强度指标内摩擦角及黏聚力均随着试样直径的增大而逐步减小,并趋于稳定;采用指数型函数均可很好地描述内摩擦角或黏聚力与试样直径的关系。

4)根据试验得出,100~200 mm 3 种试样直径中,重塑样直剪试验成果指标值均比原状样低;其中,抗剪强度指标值均比原状样低约 11%。由此,在条件受限时,可采用重塑样代替原状样试验,并考虑强度指标的折算比例。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Planning Press,2012.
- [2] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M].4 版. 北京:中国建筑工业出版社,2007:28-34. Engineering Geology Manual Editorial Board. Engineering geology manual[M].4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press,2007:28-34.
- [3] RUTHERFORD G K. Pedogenesis of two ultisols (red earth soils) on granite in Belize, central America[J].Geoderma,1987,40(1/2):225-236.
- [4] PINHEIRO BRANCO L, TOPA GOMES A, SILVA CARDOSO A, et al. Natural variability of shear strength

- in a granite residual soil from Porto[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(4):911-922.
- [5] LUMB P. The residual soils of Hong Kong [J]. *Géotechnique*, 1965, 15(2):180-194.
- [6] PHAM K, KIM D, LEE I M, et al. Hydraulic-mechanical properties of unsaturated granite-weathered residual soil in Korea[J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18(1):1-13.
- [7] WANG C, ROSS G J, REES H W. Characteristics of residual and colluvial soils developed on granite and of the associated pre-Wisconsin landforms in north-central New Brunswick[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1981, 18(3):487-494.
- [8] 吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[D]. 南京:南京林业大学, 2005.
- WU N S. Study on characteristics and engineering problems of structural granite residual soil[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005.
- [9] 刘新宇, 张先伟, 孔令伟, 等. 冲击荷载作用下花岗岩残积土的动力损伤与破坏机理[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(10):1872-1881.
- LIU X Y, ZHANG X W, KONG L W, et al. Structural damage and dynamic failure mechanism of granite residual soils under impact loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(10):1872-1881.
- [10] 安然, 孔令伟, 张先伟, 等. 干湿循环效应下花岗岩残积土结构损伤的多尺度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3):758-767.
- AN R, KONG L W, ZHANG X W, et al. A multi-scale study on structure damage of granite residual soil under wetting-drying environments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3):758-767.
- [11] 陈东霞, 龚晓南, 马亢. 厦门地区非饱和残积土的强度随含水量变化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1):3484-3490.
- CHEN D X, GONG X N, MA K. Variation of the shear strength of Xiamen unsaturated residual soils with water content[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1):3484-3490.
- [12] 胡峰, 李志清, 胡瑞林, 等. 基于大型直剪试验的土石混合物剪切带变形特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3):766-778.
- HU F, LI Z Q, HU R L, et al. Research on the deformation characteristics of shear band of soil-rock mixture based on large scale direct shear test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3):766-778.
- [13] 刘新荣, 涂义亮, 王鹏, 等. 基于大型直剪试验的土石混合物颗粒破碎特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(8):1425-1434.
- LIU X R, TU Y L, WANG P, et al. Particle breakage of soil-rock aggregate based on large-scale direct shear tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(8):1425-1434.
- [14] 李雪梅, 李红文, 方华建. 基于大型直剪试验的粗粒料颗粒破碎对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1):3581-3587.
- LI X M, LI H W, FANG H J. Comparative study of crushing of coarse-grained soils by large-scale direct shear tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1):3581-3587.
- [15] 杨继红, 董金玉, 黄志全, 等. 不同含石量条件下堆积体抗剪强度特性的大型直剪试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊2):161-166.
- YANG J H, DONG J Y, HUANG Z Q, et al. Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(S2):161-166.
- [16] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合物剪切特性的影响[J]. *岩土力学*, 2018, 39(1):93-102.
- TANG J Y, XU D S, LIU H B. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1):93-102.
- [17] 胡屏, 陈志波, 罗旋, 等. 含粗颗粒花岗岩残积土大型直剪试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(6):119-126.
- HU P, CHEN Z B, LUO X, et al. Large direct shear test study on coarse-grained granite residual soil [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(6):119-126.
- [18] 安然, 孔令伟, 张先伟, 等. 基于原位孔内剪切试验的残积土强度指标及风化程度影响评价[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(5):1275-1286.
- AN R, KONG L W, ZHANG X W, et al. Weathering degree effects on strength indexes of residual soil based on in situ borehole shear tests [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(5):1275-1286.
- [19] 邵嘉波, 宋常军, 徐凤银, 等. 花岗岩残积土的室内外剪切特性对比[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(增刊1):192-198.
- SHAO J B, SONG C J, XU F Y, et al. Shear property of granite residual soil based on laboratory and in situ direct shear test [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(S1):192-198.
- [20] 刘飞禹, 何江荟, 曾威翔. 不同含水率下残积土-织物界面动力剪切特性研究[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(6):57-65.
- LIU F Y, HE J H, ZENG W X. Dynamic shear characteristics of residual soil-geotextile interface under different water contents [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(6):57-65.
- [21] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同含水率直剪强度特征[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5):221-224.
- WEI H Z, WANG R, HU M J, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different water content in Jiangjiagou ravine [J]. *Journal of Soil and Water Conser-*

- vation, 2008, 22(5): 221-224.
- [22] 朱云江, 姜彤, 霍继炜, 等. 三门峡原状黄土的大型直剪试验及其尺寸效应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 84-89.
ZHU Y J, JIANG T, HUO J W, et al. Large scale direct shear test of undisturbed loess in Sanmenxia and its size effect[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 84-89.
- [23] 吴秋红, 赵伏军, 李夕兵, 等. 不同截面形状砂岩试样的力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 428-434.
WU Q H, ZHAO F J, LI X B, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone with different cross-sectional shapes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 428-434.
- [24] HOSSAIN M A, YIN J H. Behavior of a compacted completely decomposed granite soil from suction controlled direct shear tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1): 189-198.
- [25] 温勇, 杨光华, 汤连生, 等. 广州地区花岗岩残积土力学特性试验及参数研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 209-215.
WEN Y, YANG G H, TANG L S, et al. Tests and parameters study of mechanical properties of granite residual soil in Guangzhou area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 209-215.
- [26] 王港, 张先伟, 刘新宇, 等. 厦门花岗岩残积土的压缩变形特性及其微观机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3291-3300.
WANG G, ZHANG X W, LIU X Y, et al. Compression characteristics and microscopic mechanism of Xiamen granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3291-3300.
- [27] 崔喜友, 宋常军, 邵嘉波, 等. 粤西北地区花岗岩残积土的抗剪强度特性[J]. 公路工程, 2024, 49(1): 131-138.
CUI X Y, SONG C J, SHAO J B, et al. Shear strength characteristics of granite residual soil in northwest Guangdong [J]. Highway Engineering, 2024, 49(1): 131-138.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- (上接第 126 页)
- [28] 马仁明, 付娟, 贾燕锋, 等. 不同机械压实条件下黑土性质及入渗特征变化研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(1): 54-65.
MA R M, FU J, JIA Y F, et al. Characterization of black soil infiltration under different mechanical compaction conditions [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(1): 54-65.
- [29] 张静举. 广西喀斯特区甘蔗地土壤大孔隙流特征研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
ZHANG J J. Study on characteristics of soil macropore flow in sugarcane field in karst area of Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- [30] ZHANG W J, ZHU X A, XIONG X, et al. Changes in soil infiltration and water flow paths: Insights from subtropical forest succession sequence [J]. Catena, 2023, 221: e106748.
- [31] 安迪, 彭旭东, 戴全厚, 等. 石漠化区岩-土与非岩-土界面土壤孔隙变异及入渗对干湿变化的响应[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 139-149.
AN D, PENG X D, DAI Q H, et al. Response of soil pore variation and infiltration to dry-wet changes at rock-soil and non-rock-soil interface in rocky desertification areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(11): 139-149.
- [32] LIU Y, GAO M S, WU W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 7-12.
- [33] SONG Q N, LU H, LIU J, et al. Assessing the impacts of bamboo expansion on NPP and N cycling in evergreen broadleaved forest in subtropical China [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): e40383.