

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.021



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



含水率对花岗岩残积土-织物界面剪切特性的影响

刘飞禹¹, 宋文捷¹, 付冬平²

(1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要:作为一种广泛分布于中国东南沿海地区的特殊土,花岗岩残积土的特性容易受到水的影响,从而诱发灾害。为研究花岗岩残积土-土工织物界面的剪切特性,通过室内大型直剪仪分析不同含水率(12%、16%、20%、24%)和不同竖向应力(50、100、150、200 kPa)等因素对界面抗剪强度参数的影响;建立离散元模型,揭示不同含水率条件下花岗岩残积土-土工织物界面在剪切过程中的细观机理。数值模拟揭示了剪切带的形态变化和颗粒的位移规律,由于中间织物的存在,上下盒力链无法贯通,不同含水率条件下法向、切向接触力的主方向相同;能量损耗主要发生在土与土颗粒的滑移中。

关键词:含水率;花岗岩残积土;土工织物;筋土界面;离散元

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)02-0051-11

Effect of moisture content on shear characteristics of granite residual soil-geotextile interface

LIU Feiyu¹, SONG Wenjie¹, FU Dongping²

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China; 2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd, Beijing 100082, P. R. China)

Abstract: As a special soil widely distributed in the southeast coastal areas of China, granite residual soil is greatly influenced by water, leading to significant changes in its mechanical properties and greater susceptibility to disasters. To investigate the shear characteristics of the granite residual soil-geotextile interface, the effects of different moisture contents (12%, 16%, 20%, 24%) and vertical stresses (50, 100, 150, 200 kPa) were analyzed through large-scale direct shear tests. Based on the test results, the PFC2D model was established to reveal the meso-mechanism of the granite residual soil-geotextile interface under varying moisture content conditions during the shearing process. The results show that the interfacial shear strength and friction angle decrease with increasing moisture content, while the apparent cohesion increases first and then decreases, reaching the maximum value at a moisture content of 16%. Numerical simulation also shows the morphology of the shear zone and the displacement of soil particles. The presence of geotextile prevents the penetration of force chains between the upper and lower sections, and the primary directions of normal and tangential contact forces remain consistent under different moisture contents. Energy dissipation mainly occurs during the sliding between

收稿日期:2024-01-24

基金项目:国家自然科学基金(52378355、52078285)

作者简介:刘飞禹(1976-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事加筋土及土动力学研究,E-mail:lffyju@shu.edu.cn.

Received: 2024-01-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52378355, 52078285)

Author brief: LIU Feiyu (1976-), professor, PhD, doctoral supervisor, main research interest: reinforced soils and soil dynamics, E-mail: lffyju@shu.edu.cn.

soil and soil particles.

Keywords: moisture content; granite residual soil; geotextile; reinforcement soil interface; discrete element

花岗岩残积土是岩石风化后残留在原地的堆积物,广泛分布于中国华南地区^[1]。花岗岩残积土颗粒级配比较特殊,力学特性介于黏性土与砂性土之间,具有较强的水敏性,遇水软化严重,受外部扰动作用,易诱发滑坡等地质灾害^[2]。学者们对花岗岩残积土进行了一系列研究。基于理论推导和试验验证的方法,王延宁等^[3]研究了MICP加固花岗岩残积土的渗透特性,提出了MICP加固花岗岩残积土的碳酸钙生成量和渗透系数理论表达式。李大勇等^[4]采用GDS界面剪切仪开展不同剪切速率下吸力基础-黏土界面剪切试验,研究了沉贯过程中基础沉贯速率对吸力基础-黏土界面剪切特性的影响,分析了不同剪切速率、不同沉贯深度下的界面剪切特性。汤连生等^[5]通过自行研制的干湿循环崩解测试仪对干湿循环环境下改良花岗岩残积土崩解机理进行了研究。王港等^[6]对厦门花岗岩残积土原状样与重塑土样进行了一维压缩试验,研究花岗岩残积土压缩变形过程中微观结构的演化规律。安然等^[7]对花岗岩残积土开展反复干湿循环下的三轴固结不排水剪切试验与核磁共振成像扫描试验,从宏观-细观-微观尺度分析土体的损伤机制。

花岗岩残积土边坡分布地区大多位于亚热带季风气候区,降雨量大,容易诱发滑坡、崩塌等灾害^[8]。在工程中,通常选择铺设土工合成材料来提高边坡的稳定性。边坡的稳定性与筋土界面的剪切特性密切相关^[9-10]。针对花岗岩残积土加筋土界面剪切特性,刘飞禹等^[11]研究了含水率对花岗岩残积土加筋土界面的剪切特性和体变特性的影响,发现通过格栅加筋能够缓解花岗岩残积土剪应力达到峰值后大幅降低的剪切软化趋势。周卫东等^[12]通过循环剪切试验发现,非饱和含水率下筋土界面呈剪切软化特征。Ferreira等^[13]进行花岗岩残积土与多种土工合成材料的界面剪切特性研究发现,土体含水量的增加会显著降低土-土工合成材料界面的抗剪强度。土工织物作为常见的加筋材料之一,有很好的加固性、保土性和反滤性。Khoury等^[14]进行了细颗粒含量较大的非饱和土与土工织物的直剪试验,并采用弹塑性组成模型对试验结果进行模拟,合理地模拟了剪切响应和体积变化响应。Denine等^[15]对不同初始含水量的砂土进行了一系列直剪试验,并用两种土工织物以不同的排列方式进行加固,研究土工织物加筋对砂土性能的影响。目前,土工织物多应用于砂土等粗粒土中,针对细粒

土的研究相对较少。对于花岗岩残积土而言,土工织物能够很好地防止土颗粒流失,有效缓解降雨引起的颗粒流失,从而降低滑坡风险。

室内直剪试验仅从宏观层面分析筋土界面的变化规律,一些学者还通过离散元法从细观层面对筋土界面进行研究。Liu等^[16]基于室内试验,通过PFC3D建立不同粒径比的直剪模型,揭示了直剪过程中的细观力学机制。Feng等^[18]通过离散单元法生成了具有可破碎凹凸的纹理土工膜,研究了凹凸结合水平、纤维间结合水平和颗粒间摩擦系数等参数。Nitka等^[19]通过研究砂直剪过程的微观行为分析了不同初始孔隙比和不同竖向应力的影响。刘飞禹等^[20-21]通过室内大型直剪仪研究橡胶掺量与级配对剪切特性的影响;并基于室内试验建立PFC3D直剪模型,揭示了土工格栅加筋橡胶砂在直剪过程中的细观力学机理。李水江等^[22]基于不同含水率下残积土及筋土界面室内直剪试验数据,在有限差分软件中考虑不同含水率下筋土界面抗剪强度参数,分析加筋边坡在不同含水率下的地震响应。

目前针对花岗岩残积土加筋结构的研究尚少,使用土工织物作为加筋材料的更少,对筋土界面剪切过程中的细观机理研究更罕见。笔者通过大型直剪仪对花岗岩残积土-土工织物界面进行一系列直剪试验,建立PFC2D模型,将细观参数与实际试验参数建立对应公式,研究花岗岩残积土-土工织物界面的宏、细观剪切特性。

1 试验概况

1.1 试验仪器

试验所用仪器为室内大型直剪仪,上剪切盒尺寸为305 mm×305 mm×150 mm,下剪切盒尺寸为405 mm×305 mm×150 mm。主机部分由两套作动器组成,分别是60 kN的垂向作动器和35 kN的水平向作动器,均带有负荷传感器和位移传感器,可进行位移和力值的测量。所用大型直剪仪如图1所示。

1.2 试验材料

试验材料为土工织物和花岗岩残积土。编织土工织物采用SF200,断裂伸长率为22%,CBR顶破强度为3 300 N,其余技术指标见表1。试验土样取自广州市番禺区某工程,呈褐红色和褐黄色,可塑,遇水易软化、崩解,局部为砾质黏性土,其基本物理指标见表2,颗粒级配曲线如图2所示,该土样



图 1 大型直剪仪

Fig. 1 Large direct shearing apparatus

颗粒大小相对集中,细粒组分占据了显著比例。

表 1 土工织物技术指标

Table 1 Technical indicators of geotextile

单位面积质量/ (g/m ²)	极限延伸率/%		极限抗拉强度/(kN/m)	
	经向	纬向	经向	纬向
200	24	22	26	23

表 2 花岗岩残积土的基本物理性质

Table 2 Physical properties of granite residual soil

天然含水率/%	最优含水率/%	干密度/(g/cm ³)	土粒相对密度	孔隙比	塑限/%	液限/%	压缩系数 a/(1/MPa)
21.9	15.7	1.49	2.69	0.9	22.6	39.2	0.491

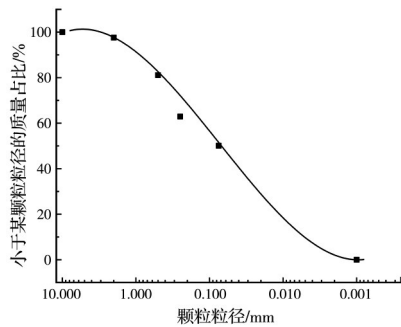


图 2 花岗岩残积土的级配曲线

Fig. 2 Grading curve of granite residual soil

1.3 试验方法

先将土样放入烘箱,待土样充分风干后进行碾碎,按照《土工试验规程》规定过孔径 2 mm 筛网。测出该风干土样的含水率,加入不同质量的水,使其达到所需含水率,拌合均匀后盖上保鲜膜,使其静置 24 h,以防止水分的蒸发。不同含水率的土样如图 3 所示。

试验考虑了竖向应力等因素的影响,具体方案见表 3。根据所定密实度称量所需质量土样,采用分层压实法进行装样,分 6 层,每层 50 mm。土工织物通过螺栓固定在下盒中,剪切位移控制为剪切面长度的 1/5。剪切速率为 1 mm/min,确保试验过程中的剪切应力、剪切位移等参数能够稳定、连续地变化。试验仪器未设置排水口,由于剪切速率较



图 3 不同含水率的土样图片

Fig. 3 Photos of soil samples at different moisture contents

表 3 试验方案

Table 3 Test scheme

试验对象	含水率/%	竖向应力/kPa	干密度/(g/cm ³)
花岗岩残积土-土工织物	12、16、20、24	50、100、150、200	1.49

慢,剪切过程中会有少量水分被挤出附着于仪器内壁和土工织物上方,并无大量的水分堆积。

2 试验结果分析

2.1 剪切应力-位移曲线分析

图 4 为不同竖向应力下 4 种含水率花岗岩残积土-土工织物界面的剪切应力-位移曲线。不同竖向应力下筋土界面的剪切应力-位移曲线均呈现出相似的规律,即剪切应力随着剪切位移的增加而增加,达到峰值后保持不变,直至剪切过程结束,呈现出剪切硬化特征。

在相同竖向应力下,相同剪切位移下的剪切应力随着含水率的增大而减小。在竖向应力为 50 kPa 时,试验的含水率从 12% 增长到 24%,其抗剪强度分别降低了 9.1%、23.64%、41.82%。而在竖向应力为 200 kPa 时,试验的抗剪强度分别降低了 23.38%、41.56%、56.49%,与低竖向应力相比,强度下降更迅速。更高的竖向应力容易将土颗粒之间的水分挤出,特别是在高含水率的情况下,结合水膜对土颗粒与土工织物的相对移动起到了润滑作用,摩擦减弱,导致抗剪强度显著降低。

法向应力从 50 kPa 增长到 200 kPa 时,不同含水率的界面抗剪强度增长率也不同。当试验含水率为 12%,竖向应力从 50 kPa 增长到 200 kPa,花岗岩残积土-土工织物的界面抗剪强度分别为 55.02、

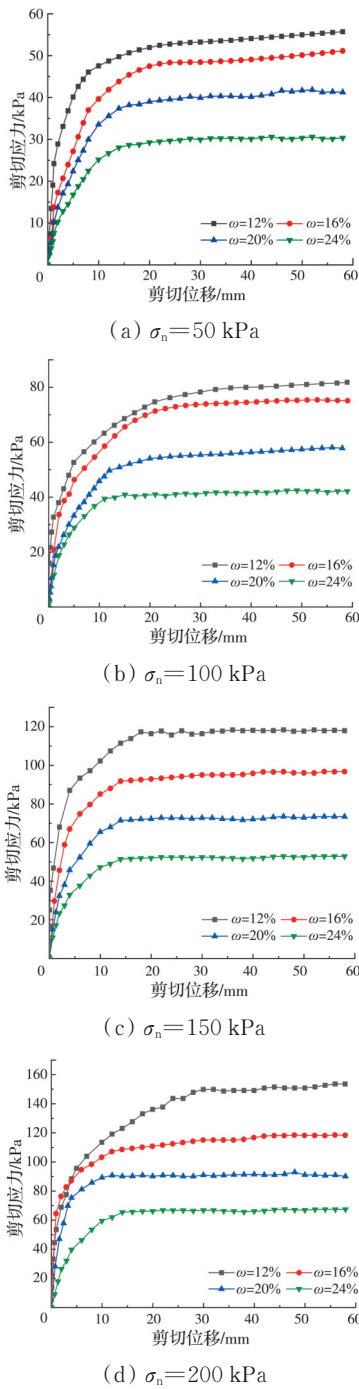


图 4 界面剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig. 4 Interfacial shear stress-shear displacement curves

82.18、117.94、154.37 kPa,低含水率的界面抗剪强度随着竖向应力的增加而明显提高。低含水率的土样颗粒小,并且颗粒与颗粒间的黏结力弱,排列松散,孔隙较多,并且粗糙的土颗粒多位于表面,在剪切过程中与土工织物的摩擦作用更强,土体颗粒更易发生滑移和错动,使得低含水率的剪切应力-位移曲线相较于其他曲线波动更大。而试验含水率为 24%,竖向应力从 50 kPa 增长到 200 kPa,花岗岩残积土-土工织物的界面抗剪强度分别为 30.61、42.32、53.14、67.81 kPa,相较于 12% 含水率,增长相对缓慢且界面抗剪强度相差较大。

图 5 为界面抗剪强度随竖向应力和含水率变化三维图,更直观地反映了抗剪强度与含水率、竖向应力之间的变化规律。界面抗剪强度与竖向应力呈正相关关系,与含水率呈负相关关系。如当竖向应力从 50 kPa 增加到 200 kPa 时,含水率为 12% 的界面抗剪强度从 55.02 kPa 增加到 154.37 kPa。当含水率从 12% 增加到 24%,竖向应力为 100 kPa 的界面抗剪强度从 82.18 kPa 降低至 42.32 kPa。并且,竖向应力越高,界面抗剪强度的变化幅度也越明显。而在高含水率情况下,界面抗剪强度的变化幅度较小。

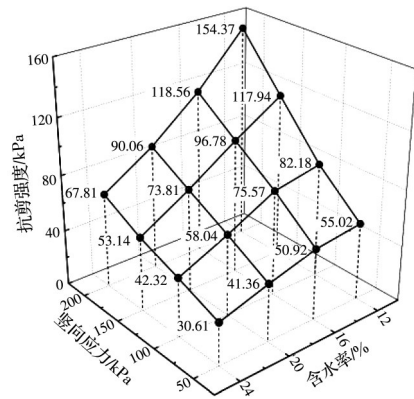


图 5 界面抗剪强度随竖向应力和含水率变化三维图
Fig. 5 Three-dimensional diagram of interface shear strength with vertical stress and moisture content

2.2 抗剪强度分析

图 6 为不同含水率下界面抗剪强度包络线。含水率对筋土界面黏聚力与界面摩擦角均有影响,通过线性关系拟合可得出拟合曲线的斜率与截距,且相关系数 R^2 均为 0.99,拟合效果良好,此界面抗剪强度符合摩尔库伦强度准则。

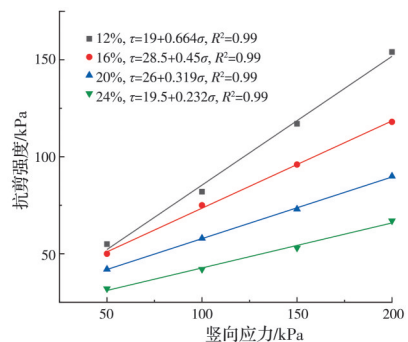


图 6 不同含水率下界面抗剪强度-竖向应力曲线
Fig. 6 Interface shear strength-vertical stress curves under different moisture contents

图 7 为界面摩擦角、似黏聚力与含水率的关系曲线。似黏聚力是指在非黏性土壤中由于颗粒间的机械咬合、摩擦或其他非黏性因素而产生的强度。土工织物与土颗粒间的作用类似于黏聚力,主要是依靠颗粒间的相互作用,因此将其定义为似黏聚力。

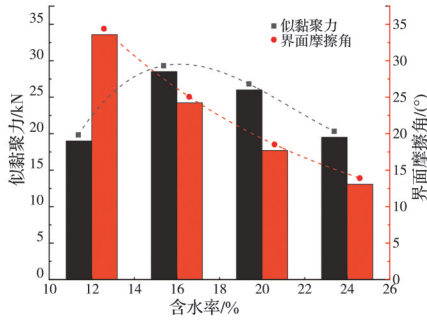


图 7 界面摩擦角、似黏聚力和含水率的关系曲线

Fig. 7 Relation curves of interface friction angle, apparent cohesion and moisture content

花岗岩残积土-土工织物界面摩擦角随着含水率的增加而不断降低,而似黏聚力的变化趋势则是随着含水率的升高先增后减,在最优含水率附近(16%)达到最大值。通过非线性拟合可得出含水率与似黏聚力、界面摩擦角的关系曲线。最优含水率下,土体的黏聚力往往能够达到一个相对较高的值,因此土体与织物界面的似黏聚力也较大。然而,对于内摩擦角而言,其大小不仅与颗粒间的摩擦有关,还受到颗粒形状、大小、排列方式等多种因素的影响。随着含水率的变化,土体的内摩擦角也会发生变化。最优含水率下,虽然土体的密度最大,但界面摩擦角不一定达到最大值。

含水率与似黏聚力的关系曲线如式(1)所示。

$$\omega = -47.01 + 8.68c - 0.25c^2 \quad (1)$$

含水率与界面摩擦角的关系曲线如式(2)所示。

$$\omega = 77.84 - 4.45\varphi + 0.07375\varphi^2 \quad (2)$$

界面摩擦角主要受土颗粒与土工织物间摩擦的影响,土工织物的糙面凸起增大了界面的粗糙度。较小的土颗粒能填充土工织物未凸起的表面,使得接触面更广,界面摩擦角也更大。而随着含水率的增加,孔隙体积不断减小,逐渐形成团聚体,结构单元表面相对光滑,与土工织物的接触面减少,导致界面花岗岩残积土-土工织物的界面摩擦角不断减小。土样含水率从12%增加至24%,界面摩擦角减少了9.35°、15.89°、20.52°。

似黏聚力主要取决于土体性质,土工织物糙面的凸起主要提供摩擦力,而似黏聚力主要由土体提供。当含水率较低时(12%),土体颗粒靠强结合水联结,较为松散,对土工织物没有太强的黏聚力。而随着含水率升高至最优含水率附近(16%),土体表面的弱结合水逐渐增厚,形成较厚的公共水化膜,与土工织物形成较好的连接,此时界面黏聚力也达到最大值。随着含水率的不断增加,孔隙间开始形成较少的非结合水,在剪切过程中水分被挤出,使得土工织物与土体接触面被浸湿,与土体黏

聚力变差,界面黏聚力不断减小。

2.3 竖向位移-剪切位移曲线分析

图 8 为不同竖向应力下花岗岩残积土-土工织物界面竖向位移-剪切位移曲线。由于在剪切的过程中剪切的面积保持不变,界面的变形可由竖向位移的变化来表示,其中规定剪缩为正,剪胀为负。从图 8 可以看出,界面竖向位移同时受到含水率与

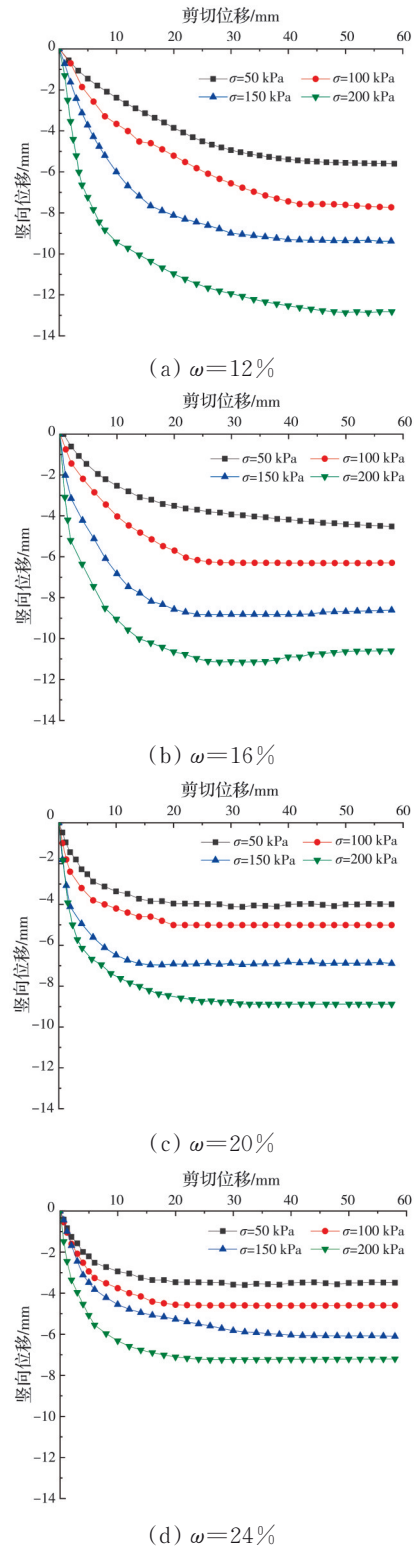


图 8 竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig. 8 Vertical displacement-shear displacement curves

竖向应力的影响,并且一直表现为剪缩特征。在同一含水率条件下,最终竖向位移随着竖向应力增大而增大,且在高竖向应力下,最终竖向位移的增幅也更大。当 $\omega=12\%$ 时,竖向应力从 50 kPa 增加到 200 kPa,最终竖向位移分别为 5.60、7.73、9.38、12.82 mm,相较于前一竖向应力,分别增长了 2.13、1.65、3.44 mm。同一竖向应力下界面竖向位移与含水率呈负相关,且在低含水率时界面竖向位移增长缓慢,在剪切过程中后期才逐渐平稳。高含水率时竖向位移在剪切过程初期增长迅速,但在之后的剪切过程中保持平稳。这是因为对于黏土矿物颗粒来说,吸水后可能发生的层间膨胀以及土颗粒表面结合水膜变厚导致粒间膨胀^[23]。而在剪切过程中,膨胀的黏土矿物颗粒在外部应力作用下重新排列,形成更紧密的结构,导致土体体积减小,呈现出剪缩特征。

3 数值模拟结果分析

3.1 模型建立

采用黏性抗转动线性模型,主要是在抗转动线性模型中添加黏聚分量,通过短程吸引力提供内聚颗粒材料。黏聚分量具有两个参数:最大吸引力(F_0)和吸引力范围(D_0)。当且仅当颗粒表面间隙小于吸引力范围时(D_0),此模型的接触处于活动状态,并呈线性关系。在剪切过程中始终保持施加的竖向应力不变,只在竖向应力-剪切方向所在的平面产生剪应变和在竖向应力方向产生正应变,其余所有方向应变均为零,处于平面应变状态,因此,选择建立二维模型。模型中剪切盒尺寸与实际试验剪切盒尺寸一致(上剪切盒尺寸为 305 mm×150 mm,下剪切盒尺寸为 405 mm×150 mm),且模型加载方式也与试验仪器工作方式相同。在剪切盒中随机生成 Ball 颗粒,约 18 000 颗左右,最小颗粒粒径为 0.8 mm,最大颗粒粒径为 1.6 mm。

土工织物建模的主要目的是研究其与土体的相互作用。在目前的 DEM 研究中,通常忽略土工织物的空间结构,仅考虑其厚度,选择试验单层颗粒模拟土工织物^[24]。由于试验中土颗粒并不能从土工织物的孔隙经过,因此将其粒径定为 0.5 mm。将织物两端固定在剪切盒,使其在剪切过程中不发生错动。模型示意图见图 9。

对模型进行简化不可避免地带来结果上的误差,用二维模型模拟试验会引起误差,主要是因为三维空间的另一维度上的局部小变形在二维模型中无法得到体现,但与剪切方向的变形相比可以忽略不计。

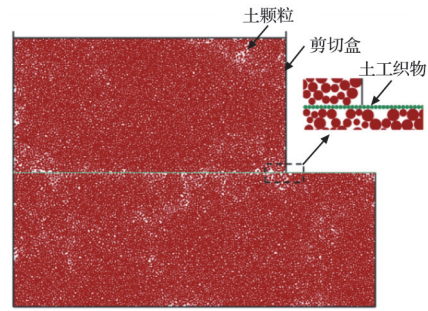


图 9 模型示意图

Fig.9 Schematic diagram of the model

3.2 细观参数的标定以及结果对比分析

试验的宏观剪切特性通过调试黏聚分量、颗粒接触刚度、孔隙比、摩擦系数、颗粒密度等细观参数来与之匹配。对于花岗岩残积土来说,力学性质受含水率影响较大;对于颗粒来说,颗粒之间似黏聚力大小主要取决于黏聚分量。因此,以似黏聚力为中间变量,建立黏聚分量与似黏聚力的关系,再与实际试验数据拟合得出的含水率与似黏聚力的函数相结合,建立含水率-似黏聚力-黏聚分量三者的函数关系,最后得出含水率与黏聚分量的对应关系。通过此关系式,可在模拟中近似地采用黏聚分量对应不同含水率下的直剪试验^[25]。

通过控制其他参数不变,分析黏聚分量这一单一变量对似黏聚力的影响。在同一 F_0 下分别进行 4 组不同竖向应力的模拟,通过抗剪强度包络线得出该 F_0 下似黏聚力和界面摩擦角,继而改变 F_0 ,得出不同 F_0 下的似黏聚力,拟合出 F_0 与似黏聚力的关系曲线,如图 10 所示。

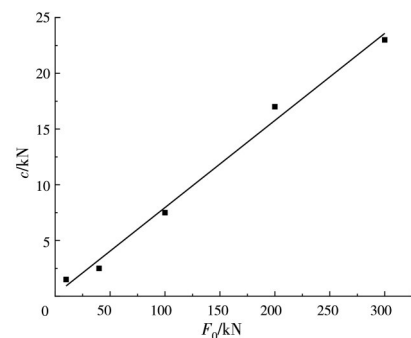


图 10 F_0 与似黏聚力关系曲线

Fig. 10 Relation curve between F_0 and apparent cohesion

似黏聚力与 F_0 的关系曲线由模拟数据拟合得出,如式(3)所示。

$$c = 0.14 + 0.078F_0 \quad (3)$$

将式(3)带入式(1),即可得出 ω 与 F_0 的关系式式(4)。

$$\omega = -45.03 + 0.74F_0 - 0.00175F_0^2 \quad (4)$$

通过式(4)可得出与试验含水率相对应的 F_0 ,将得出的模拟结果与试验结果相对比,如图 11 所

示。由图 11 可以发现,曲线变化基本相同,但由于是二维模型,模拟曲线比试验曲线波动更大。其余细观参数见表 4。

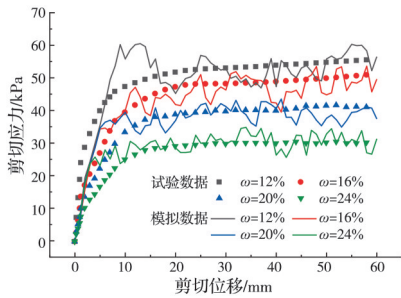


图 11 试验剪切应力-剪切位移曲线与模拟曲线对比
Fig. 11 Comparison of experimental shear stress-shear displacement curves and simulation curves

表 4 细观参数标定值

Table 4 Calibration values of mesoscopic parameters

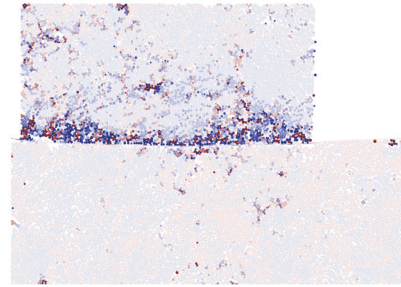
参数名称	单位	标定值
黏土颗粒密度	kg/m ³	2 300
织物颗粒密度	kg/m ³	2 000
颗粒摩擦系数		0.5
颗粒-织物摩擦系数		0.8
墙体摩擦系数		0
黏土颗粒有效模量	N/m	5.0×10 ⁶
织物颗粒有效模量	N/m	5.5×10 ⁹
刚度比		1.0
孔隙率		0.2
吸引力范围(D_0)	m	0.05× d_{min}

3.3 细观力学响应分析

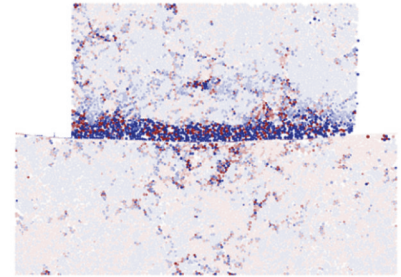
3.3.1 剪切带变化分析

颗粒旋转量是表征剪切带演化过程的重要细观力学参数。含水率为 20% 时不同剪切过程的剪切带变化如图 12 所示。剪切带分布在土工织物上方,剪切开始前颗粒位置相对固定。在剪切初期,上盒剪切面两侧颗粒旋转量较大,同时带动上盒上部部分颗粒旋转,下盒颗粒相对稳定。而随着剪切过程的不断进行,在颗粒的相互挤压作用下,上盒中部发生翻转的颗粒增加,颗粒旋转量增大,逐渐形成一个均匀的矩形带,且剪切带厚度随着剪切过程的进行有所增加。

图 13 为不同含水率条件下剪切带厚度对比图。随着含水率的增加,剪切带的厚度有所下降,且在低含水率下,剪切带区域内颗粒的旋转角度也更大。在含水率为 16% 时,剪切带受剪切盒限制明显,两侧发生旋转颗粒增多,而中间颗粒较少,这一现象也发生在更高含水率情况下。这是由于低含水率下颗粒之间最大吸引力 F_0 较小,在剪切过程中颗粒发生错动,超出吸引力范围,带动更多周围的颗粒发生旋转。



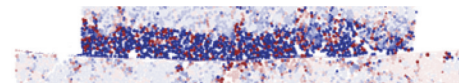
(a) 剪切初期



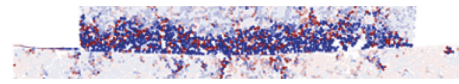
(b) 剪切后期

图 12 剪切带的形成及演化

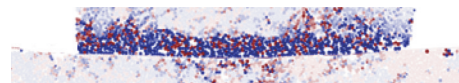
Fig. 12 Formation and evolution of the shear zone



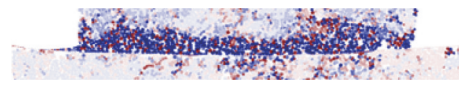
(a) $\omega=12\%$



(b) $\omega=16\%$



(c) $\omega=20\%$



(d) $\omega=24\%$

图 13 不同含水率条件下剪切带对比图

Fig. 13 Comparison of shear zones under different moisture contents

3.3.2 位移场的变化分析

图 14 为含水率为 20% 时剪切过程中位移场的变化。施加竖向应力后,上盒位移场方向与竖向应力方向一致,由于下盒尺寸大于上盒,下盒颗粒在竖向应力下逐渐向两边扩散。在剪切过程中,下盒沿着剪切方向移动且位移最大;上盒下部与土工织物接触的颗粒随着下盒向左位移,上盒上部颗粒随着剪切带颗粒的移动而发生向下的位移,因为上盒的限制,左侧颗粒并不能无限制地位移,在右边颗粒的挤压下逐渐向上位移,形成一个弧形滑动面。

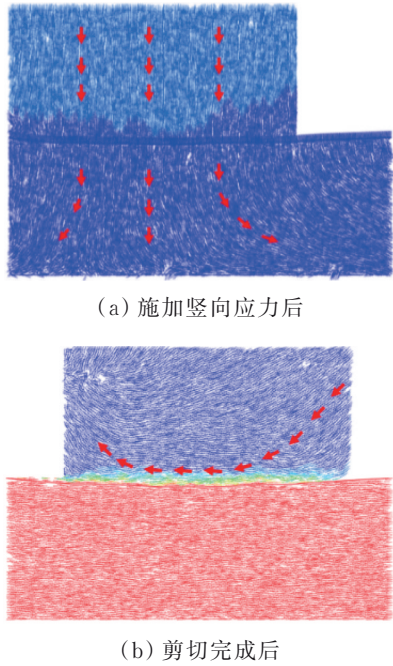


图 14 位移场的变化

Fig. 14 Variation of the displacement field

由于上盒运动过程中颗粒位移变化复杂,因此重点分析上盒颗粒在剪切过程中的位移变化。如图 15 所示,在剪切初期,剪切带附近颗粒位移杂乱无序,随着剪切进行到一定阶段,颗粒在运动过程中将孔隙填满后,运动方向与剪切方向一致,而到了剪切后期,上盒剪切面两侧颗粒运动不再剧烈,并逐渐集中于剪切面中部,并在上盒形成一个移动面。

3.3.3 接触力链分析与组构各向异性

力链是指相邻颗粒之间传递荷载的准直线型链状结构,能够反映荷载的传递路径,通过力链的厚度反应接触力的大小。图 16 为含水率为 20% 时剪切过程中力链的变化。由图 16 可知,在加载阶段,由于自重及竖向应力的作用,主接触力系主要呈竖向分布。剪切开始后,上盒强力链主要集中在左侧,沿 60° 分布;下盒强力链分布方向仍接近于竖直方向。由于土工织物的存在,上盒传递的力大多由织物承担,传递到下盒的很少,因此,上盒力链粗于下盒。由图 16(d) 可知,传递到土工织物上的力链远大于土体颗粒之间的力链,这也能证明在剪切过程中土工织物发挥着很大作用。

图 17 为不同含水率条件下的法向、切向接触力玫瑰图。玫瑰图绘制以每 10° 为一个区间,统计接触力时取值为该区间所有接触点法向、切向接触力的平均值。法向、切向接触力分布分别类似于花生状和花瓣状。法向、切向接触力为互相垂直的关系,

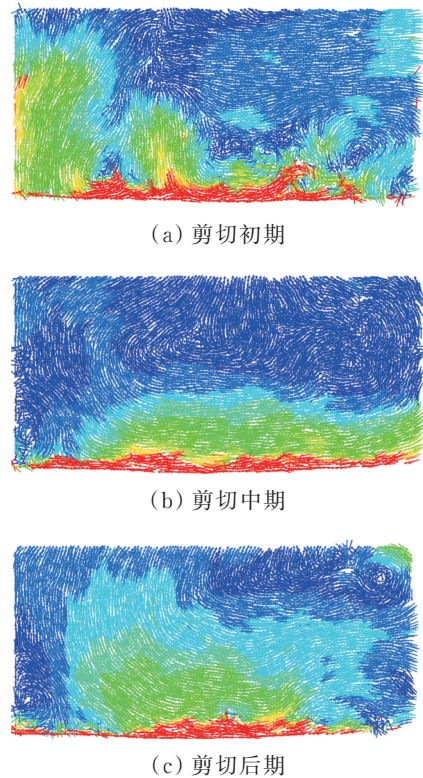


图 15 剪切过程中上盒位移场变化

Fig. 15 Displacement field variation in the upper box during shearing

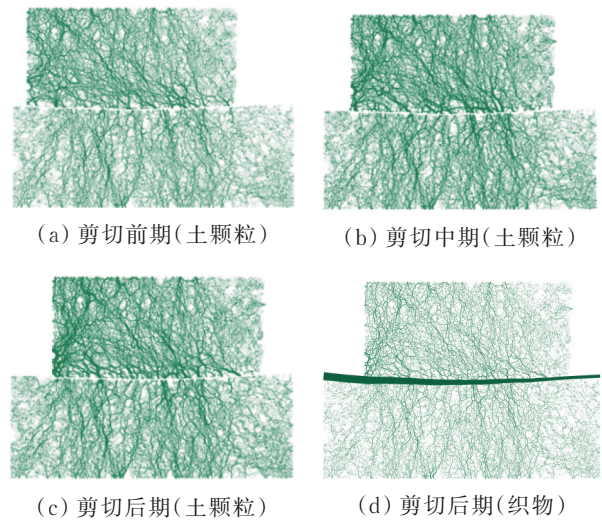


图 16 剪切过程中力链变化

Fig. 16 Variation of force chains during shearing

各向异性的主方向由法向接触的主方向确定。不同含水率条件下法向、切向接触力的主方向相近,大小不同,这是因为含水率的变化体现在黏聚力 F_0 的不同,法向接触力随着颗粒间的黏聚力增加而增大;含水率越高,法向、切向接触力越大。法向接触力主要受颗粒间直接接触面积和间隙中水的黏聚力的影响,而切向接触力则更多地受颗粒表面粗糙度的影响。

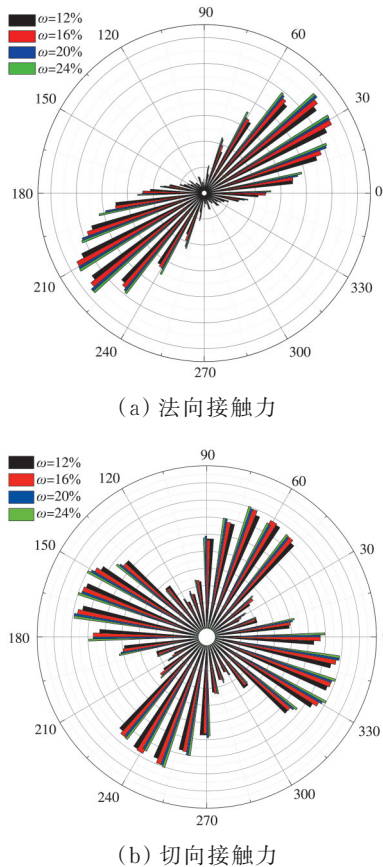


图17 不同含水率条件下的结构各向异性

Fig. 17 Fabric anisotropy under different moisture contents

3.3.4 能量变化分析

通过检测黏合能量 E_a 、滑移耗能 E_s 能够更直观地探究直剪过程中能量的变化,能量损耗发生在土颗粒与土颗粒(c-c)、土颗粒与土工织物颗粒(c-f)之间。图18为剪切过程中滑移耗能、黏合能量的变化曲线。由图18可见,剪切过程中能量损耗大部分发生在土体颗粒之间,土颗粒与织物之间的能量损耗占比较小。不同能量之间的损耗也不相同,颗粒间的滑移耗能随着剪切过程一直保持匀速上升的趋势;黏合能量损耗曲线在剪切初期上升速率较快,之后逐渐缓慢。

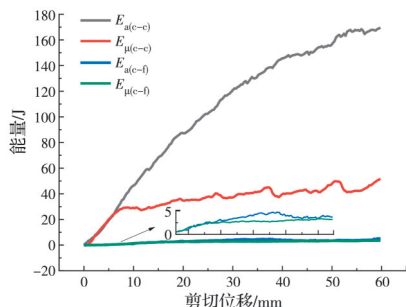


图18 滑移耗能、黏合能量与剪切位移的关系曲线

Fig. 18 Relation curves of slip dissipated energy, adhesive energy and shear displacement

4 结论

1) 竖向应力和含水率对界面剪切特性有显著影响,界面抗剪强度与竖向应力呈正相关,与含水率呈负相关。

2) 界面摩擦角随着含水率的增加而减小。而界面黏聚力随着含水率的增加呈先增后减的趋势,最终在16%达到峰值。

3) 剪切带呈矩形状,剪切带厚度随着剪切过程的进行而不断增加,但随含水率的增加而降低。上盒颗粒在剪切过程中形成一个弧形滑动面。

4) 上、下盒强力链分布方向不同,土工织物上的力链远大于土体颗粒。而能量损耗主要发生在土与土颗粒之间,且颗粒间滑移耗能远大于黏合能量的损耗。

参考文献

- [1] NIU X R, XIE H Y, SUN Y F, et al. Basic physical properties and mechanical behavior of compacted weathered granite soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(10): 04017082.
- [2] 安然,黎澄生,孔令伟,等.花岗岩残积土原位力学特性的钻探扰动与卸荷滞时效应[J].岩土工程学报, 2020, 42(1): 109-116.
AN R, LI C S, KONG L W, et al. Effects of drilling disturbance and unloading lag on in situ mechanical characteristics of granite residual soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 109-116. (in Chinese)
- [3] 王延宁,黄龙剑,陈前,等. MICP加固花岗岩残积土的渗透特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 38-46.
WANG Y N, HUANG L J, CHEN Q, et al. Hydraulic conductivity of MICP-treated granite residual soil [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(2): 38-46. (in Chinese)
- [4] 李大勇,张雨坤,高玉峰,等.不同剪切速率下吸力基础-黏土界面剪切特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 231-236.
LI D Y, ZHANG Y K, GAO Y F, et al. Shear behavior of suction foundation-clay interface under different shear rates [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 231-236. (in Chinese)
- [5] 汤连生,许瀚升,刘其鑫,等.改良花岗岩残积土崩解特性试验研究[J].中国公路学报, 2022, 35(10): 75-87.
TANG L S, XU H S, LIU Q X, et al. Experimental study on disintegration characteristics of improved granite residual soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 75-87. (in Chinese)

- [6] 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, 3314.
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, 3314. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 马彦彬, 李红蕊, 王林, 等. 机器学习方法在滑坡易发性评价中的应用[J]. 土木与环境工程学报, 2022, 44(1): 53-67.
MA Y B, LI H R, WANG L, et al. Machine learning algorithms and techniques for landslide susceptibility investigation: A literature review [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(1): 53-67. (in English)
- [9] 刘飞禹, 朱晨, 王军. 剪切速率和法向加载频率对筋土界面剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 832-840.
LIU F Y, ZHU C, WANG J. Influences of shear rate and loading frequency on shear behavior of geogrid-soil interfaces [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 832-840. (in Chinese)
- [10] LIU F Y, YING M J, YUAN G H, et al. Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 991-1003.
- [11] 刘飞禹, 陈舒祺, 孙宏磊, 等. 不同含水率花岗岩残积土-格栅界面剪切特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 222-228.
LIU F Y, CHEN S Q, SUN H L, et al. Shear characteristics of granite residual geogrid-soil interface with different water contents [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(2): 222-228. (in Chinese)
- [12] 周卫东, 陈舒祺, 刘飞禹, 等. 不同含水率花岗岩残积土-格栅界面的循环剪切特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(3): 58-65.
ZHOU W D, CHEN S Q, LIU F Y, et al. Cyclic shear characteristics of granite residual soil-grid interface with different water content [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(3): 58-65. (in Chinese)
- [13] FERREIRA F B, VIEIRA C S, LOPES M L. Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type [J]. Geosynthetics International, 2015, 22(3): 257-272.
- [14] KHOURY C N, MILLER G A, HATAMI K. Unsaturated soil-geotextile interface behavior [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(1): 17-28.
- [15] DENINE S, DELLA N, FEIA S, et al. Shear behavior of geotextile-reinforced Chlef sand in the Mediterranean Region: Laboratory investigation [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(5): 599-608.
- [16] LIU F Y, FU J, WANG J, et al. Effect of the particle size ratio on macro- and mesoscopic shear characteristics of the geogrid-reinforced rubber and sand mixture interface [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50(4): 779-793.
- [17] YANG H, XU W J, SUN Q C, et al. Study on the meso-structure development in direct shear tests of a granular material [J]. Powder Technology, 2017, 314: 129-139.
- [18] FENG S J, WANG Y Q, CHEN H X. DEM simulation of geotextile-geomembrane interface direct shear test considering the interlocking and wearing processes [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148: 104805.
- [19] NITKA M, GRABOWSKI A. Shear band evolution phenomena in direct shear test modelled with DEM [J]. Powder Technology, 2021, 391: 369-384.
- [20] 刘飞禹, 符军, 王军, 等. 橡胶掺量对格栅-橡胶砂界面宏细观剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1006-1015.
LIU F Y, FU J, WANG J, et al. Effects of rubber content on macro-and meso-scope shear characteristics of geogrid-rubber sand interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1006-1015. (in Chinese)
- [21] 刘飞禹, 李昊泽, 符军, 等. 橡胶砂级配对混合土体剪切特性影响研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 663-672.
LIU F Y, LI H Z, FU J, et al. Effect of rubber-sand mixtures gradation on shear characteristics of mixed soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 663-672. (in Chinese)
- [22] 李水江, 童艳光, 刘飞禹, 等. 不同含水率下考虑筋土界面刚度软化的加筋边坡地震响应[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 862-870, 877.
LI S J, TONG Y G, LIU F Y, et al. Seismic response of reinforced soil slope considering interface stiffness softening under different water content [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 862-870, 877. (in Chinese)

- [23] 贾海梁, 王婷, 项伟, 等. 含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1618-1628.
- JIA H L, WANG T, XIANG W, et al. Influence of water content on the physical and mechanical behaviour of argillaceous siltstone and some microscopic explanations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1618-1628. (in Chinese)
- [24] CHENG H Y, YAMAMOTO H, THOENI K, et al. An analytical solution for geotextile-wrapped soil based on insights from DEM analysis [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(4): 361-376.
- [25] 蔡国庆, 刘少鹏, 宋建正, 等. 非饱和土三维离散元计算中宏-细观参数关系探究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(增刊1): 110-115.
- CAI G Q, LIU S P, SONG J Z, et al. Study on the relationship between macro and micro parameters in three-dimensional discrete element calculation of unsaturated soil [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(Sup 1): 110-115. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)