

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.067



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



含砾花岗岩残积土-土工织物界面剪切特性 细观分析

余炜¹, 高品红¹, 刘飞禹²

(1. 浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司, 杭州 310030; 2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要:为深入探究筋土界面的细观变形破坏机理,以室内大型直剪试验结果为基础,利用离散元软件 PFC3D 建立 3 种砾石含量(50%、75% 和 100%)和 2 种加载方式(法向静荷载和法向循环荷载)下含砾花岗岩残积土-土工织物界面的直剪试验模型,分析筋土界面孔隙率、配位数、组构各向异性和颗粒旋转情况等细观剪切特性的变化规律。结果表明:试样孔隙率变化量随砾石含量的增大而增大,且主要集中在剪切面附近,法向循环荷载作用也会使其略微增大;随着砾石含量的增大,界面处的配位数分别介于 5.19~6.05、4.74~5.77 和 4.35~5.53 之间,颗粒间的接触减少;两种加载方式下试样颗粒的接触力各向异性主方向均发生偏转,法向静荷载作用下的法向接触力相较法向循环荷载作用下均更大;砾石含量 100% 的颗粒平均旋转角度比 50% 时的更小,法向循环荷载作用会使其略微增大,曲线整体呈正态分布,最大值位于剪切面附近。

关键词:筋土界面;花岗岩残积土;数值模拟;砾石含量;细观分析

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)05-0141-09

Micromechanical analysis of shear properties at the interface between gravelly granite residual soil and geotextile

YU Wei¹, GAO Pinhong¹, LIU Feiyu²

(1. Zhejiang Huadong Geotechnical Investigation and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, P. R. China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China)

Abstract: To delve into the micromechanical deformation and failure mechanisms of the geotextile-soil interface, a series of direct shear test models for granite residual soil containing different rock contents (50%, 75%, and 100%) with geotextiles under two loading conditions (normal static load and normal cyclic load) were established using the discrete element software PFC3D, based on the results of large-scale direct shear tests. The study analyzed changes in micromechanical shear characteristics such as porosity, coordination number, fabric anisotropy, and particle rotation at the geotextile-soil interface. The results indicated that the change in sample porosity increased with higher rock content and was primarily concentrated near the shear plane, with

收稿日期:2024-05-14

基金项目:国家自然科学基金(52078285)

作者简介:余炜(1986-),男,高级工程师,主要从事岩土工程研究,E-mail:yu_w3@hdec.com。

刘飞禹(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:lfyzju@shu.edu.cn。

Received: 2024-05-14

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52078285)

Author brief: YU Wei (1986-), senior engineer, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: yu_w3@hdec.com.

LIU Feiyu (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lfyzju@shu.edu.cn.

normal cyclic loading causing a slight increase as well. The coordination number at the interface ranged from 5.19 to 6.05, 4.74 to 5.77, and 4.35 to 5.53 as the rock content increased, indicating a reduction in particle contacts. Under both loading conditions, the principal direction of anisotropy of contact forces between particles shifted, with the normal contact forces under normal static load greater than those under normal cyclic load. The average rotation angle of particles with 100% rock content was smaller than that with 50%, and normal cyclic loading caused a slight increase. Overall, the rotation angle followed a normal distribution, with the maximum value located near the shear plane.

Keywords: soil-geosynthetic interface; granite residual soil; numerical simulation; gravel content; micromechanical analysis

实际工程中花岗岩残积土常与土工合成材料配合使用,花岗岩残积土加筋路基具有施工便捷高效、地基适应性强、经济效益高等特点^[1],被广泛应用于山区公路工程建设中。为确保加筋路基的稳定性和安全性符合设计要求,需对筋土界面的相互作用特性进行深入分析研究。

许多学者对筋土界面的相互作用特性进行了研究。刘飞禹等^[2-3]通过室内大型直剪试验探究了砾石含量、筋材种类等因素对筋土界面抗剪强度和强度参数的影响。Zhong等^[4]研究发现,随着含砾花岗岩残积土砾石含量的增大,试样的似黏聚力呈线性减小趋势,内摩擦角呈“S”型增长趋势。刘飞禹等^[5]探讨了筋土界面在水平循环剪切作用下的动力特性以及循环剪切历史对筋土界面力学特性的影响。李亚然等^[6]对含砾花岗岩残积土进行力学特性和抗压强度试验研究发现,含水率对含砾花岗岩残积土的无侧限抗压强度有明显影响,其中最优含水率对应的无侧限抗压强度最大。Denine等^[7]对不同初始含水率的加筋砂进行了一系列直剪试验发现,界面内摩擦角与含水率呈负相关关系。Liu等^[8]开展了法向动荷载作用下的单调直剪试验,分析了法向初始应力和法向应力振幅对砾石-格栅界面剪切行为的影响。

受测试技术的限制,试验通常用于分析试样的宏观力学特性,而数值模拟则可捕捉颗粒运动轨迹,因而被广泛应用于研究土体的微观力学特性和破坏机理^[9]。严颖等^[10]在含砾花岗岩残积土直剪试验模拟过程中发现,块石含量和空间分布会影响试样的力链结构特性。Shan等^[11]利用Matlab软件对含砾花岗岩残积土图像进行处理,并根据所得数据建立了PFC2D数值计算模型,研究试样颗粒细观参数和宏观参数之间的关系。Hu等^[12]采用一种考虑块石形态特征、内部裂缝和潜在破损的离散元建模方法,分析了40%砾石含量下的数值模型在直剪试验过程中的力学响应行为。Yao等^[13]通过离散元法研究了不同颗粒形状和砾石含量的含砾花岗岩

残积土模型中尺度特征差异。Li等^[14]通过数值模拟试验分析了尺度效应对含砾花岗岩残积土剪切行为的具体影响,发现混合法比剔除法、等量替代法和相似级配法更有效。Ahmadi等^[15]开发了一种能够生成不同相对密度颗粒填料的程序,并通过细观参数定量研究相对密度对不同细粒含量和间断级配填料内部稳定性的影响。张强等^[16]利用PFC2D软件研究了砾石含量、块石空间分布、围压加载方式等因素对土石混合体细观结构演化规律的影响。Bhandari等^[17]在PFC2D软件中采用线性接触模型将砂建模为无黏结颗粒,采用平行黏结模型将土工织物建模为黏结颗粒,探究了土工织物的铺设深度和刚度对路基性能的影响。Cheng等^[9]基于离散元数值分析方法提出了一种新的解析解,能够分析土工织物-砂界面的摩擦力、主应力分布和应力-应变关系。Cheng等^[18]通过数值模拟分析了土工袋中土体的应力状态和组构各向异性,提出了一种新的土工袋离散元建模方法,能够观察到土工织物破裂的演变过程。Feng等^[19]基于离散元软件模拟了砂-土工织物界面直剪试验、双面界面直剪试验和周期性边界界面直剪试验,揭示了界面在剪切过程中的细观演化规律。

目前对含砾花岗岩残积土与土工织物界面的研究较少,尤其是针对法向循环荷载的情况。笔者基于大型直剪试验结果,利用PFC3D软件建立了含砾花岗岩残积土-土工织物界面模型,并对法向静荷载和循环荷载下的界面特性进行分析。

1 室内直剪试验

试验仪器采用动态直剪仪,上、下剪切盒内部尺寸(长×宽×高)分别为305 mm×305 mm×150 mm和405 mm×305 mm×150 mm。试验用土由黏土质砂和强风化花岗岩组成,参考已有研究成果,取5 mm作为区分土颗粒与砾石颗粒的尺寸阈值^[20]。同时,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)要求,将粒径大于25 mm的颗粒全部剔除。选用土

工编织布作为试验筋材,其单位面积质量为 200 g/m^2 ,经、纬向极限延伸率分别为 24% 和 22% ,经、纬向极限抗拉强度分别为 26 、 23 kN/m 。

通过调整土颗粒与砾石颗粒之间的比例关系,分别制备砾石含量为 50% 、 75% 和 100% 的试样。含砾花岗岩残积土最优含水率为 14.3% ,所以试验中初始含水率设定为 14% 。采用分层压实法进行装样,压实度控制为 92% ,将土工织物铺设在上、下剪切盒之间。设计2种不同加载条件下的筋土界面直剪试验:1)静荷载作用下的法向应力保持为 60 kPa ;2)循环荷载作用下的法向应力由 40 kPa 的初始应力和 20 kPa 的附加应力两部分组成,表达式为

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_a |\sin(\pi f t)| \quad (1)$$

式中: σ 、 σ_i 和 σ_a 分别为法向应力、初始法向应力和法向应力振幅, kPa ; f 为法向加载频率, Hz ; t 为加载时间, s 。

参考已有研究成果^[21],设定法向加载频率为 1 Hz ,剪切速率为 1 mm/min ,剪切位移为 60 mm 时停止试验。

图1所示为法向静荷载及循环荷载作用下不同砾石含量的界面剪切应力-剪切位移曲线。不同条件下界面剪切应力-剪切位移曲线均表现出剪切硬化特征,界面抗剪强度在砾石含量为 75% 时达到最大。法向循环荷载作用下界面剪切应力-剪切位移曲线在一定范围内波动变化,其界面抗剪强度小于法向静荷载作用下。

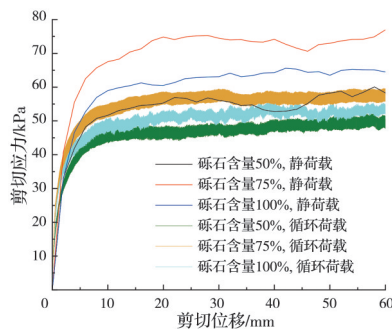


图1 不同砾石含量下界面剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 1 Interface shear stress-shear displacement curves under different gravel contents

2 数值模拟试验

2.1 模型的建立

在PFC3D软件中用wall单元构建剪切盒模型,尺寸大小与室内试验保持一致。为了简化模型,在建模时进行两点假设:1)剪切过程中不考虑剪切盒的受力变形;2)不考虑含砾花岗岩残积土颗粒与剪切盒内壁的摩擦作用。在试验加载阶段,法向荷载作用于上剪切盒顶板,荷载经由顶板向下传递至填

料与织物界面,因此采用刚性簇(clump)建立上剪切盒顶板,以传递法向静荷载与循环荷载。

模型填料颗粒采用“ball distribute”命令按工况级配生成,填料颗粒选用线性接触模型。考虑到计算机效能和前人研究成果^[22],定义ball的最小粒径为 2 mm ,模型中土颗粒粒径设定为 $2\sim 5\text{ mm}$,砾石颗粒粒径设定为 $5\sim 25\text{ mm}$,通过半径扩大法生成不同砾石含量下的试样颗粒。土工织物模型由ball颗粒构成,为了更好地体现土工织物只能承受拉力而不能承受压力的特性^[23],选用平行黏结模型。各砾石含量条件下的模型如图2所示。

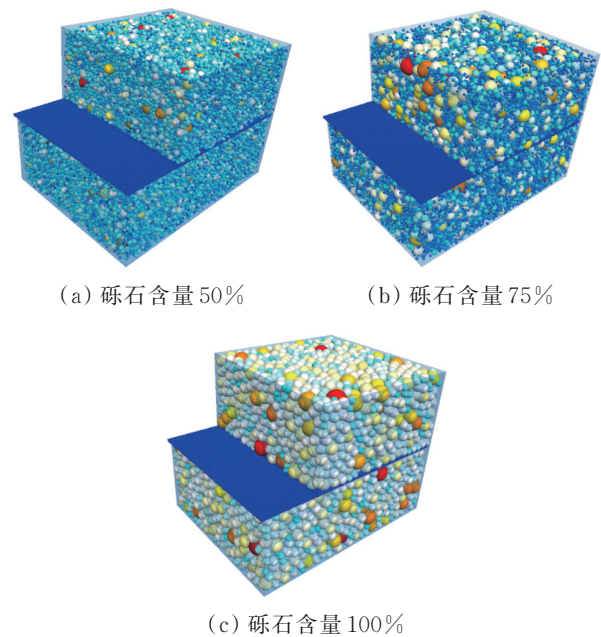


图2 不同砾石含量下的试样模型

Fig. 2 Sample models under different gravel contents

2.2 细观参数选取

为了确定土工织物模型的细观参数,在PFC3D软件中进行土工织物拉伸试验,并将数值模拟结果与拉伸试验结果进行对比验证,得到的拉伸强度-延伸率关系曲线如图3所示,由此验证了数值模拟中土工织物模型的拉伸性能。土工织物的细观参数取值如表1所示。

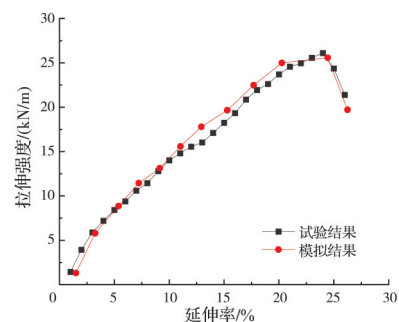


图3 土工织物的拉伸强度-延伸率关系曲线

Fig. 3 Tensile strength-elongation curves of geotextile

表 1 土工织物的数值模型细观参数取值

Table 1 Micromechanical parameter values of numerical model of geotextile

颗粒密度/(kg/m ³)	黏结半径/mm	平行黏结模型弹性模量/GPa
350	1.0	45
刚度比	法向黏结强度/GPa	切向黏结强度/GPa
1.0	5	5

为了提高模拟精度,采用试错标定法^[24]确定含

砾花岗岩残积土颗粒的细观参数。在模型调试过程中,分别对颗粒密度、接触刚度、摩擦系数等进行校验,使得数值模拟结果与宏观试验结果相匹配,图 4 所示为法向静荷载条件下含砾花岗岩残积土-土工织物界面的室内直剪试验与数值模拟结果的对比。从图 4 中可以看出,室内试验与数值模拟剪切行为曲线的特征变化规律基本一致,验证了数值模型的准确性。填料的细观参数取值如表 2 所示。

表 2 含砾花岗岩残积土颗粒细观参数取值

Table 2 Micromechanical parameter values of gravelly granite residual soil particles

土颗粒法向接触刚度/(N/m)	土颗粒切向接触刚度/(N/m)	砾石颗粒法向接触刚度/(N/m)	砾石颗粒切向接触刚度/(N/m)	墙体法向接触刚度/(N/m)	墙体切向接触刚度/(N/m)	刚度比	土颗粒摩擦系数	砾石颗粒摩擦系数	墙体摩擦系数	土颗粒密度/(kg/m ³)	砾石颗粒密度/(kg/m ³)
2.0×10 ⁶	1.0×10 ⁶	5.0×10 ⁶	2.0×10 ⁶	2.0×10 ⁸	1.0×10 ⁸	2.0	0.54	0.88	0	2 100	2 700

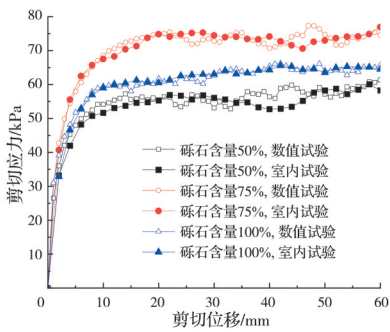


图 4 法向静荷载下室内试验与数值模拟结果曲线的对比

Fig. 4 Comparison of indoor tests and numerical simulation results under normal static loading

基于法向静荷载作用下的单调直剪试验数值模型通过 FISH 语言编写半正弦函数外力,对 clump 面板施加法向循环荷载,建立法向循环荷载作用下的数值模型,模拟结果与试验结果的对比如图 5 所示。

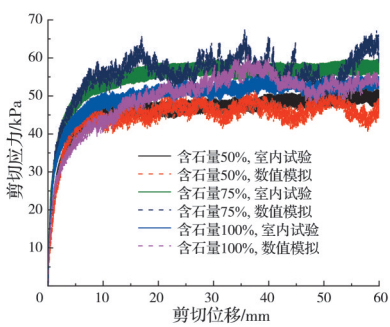


图 5 法向循环荷载下室内试验与数值模拟结果曲线的对比

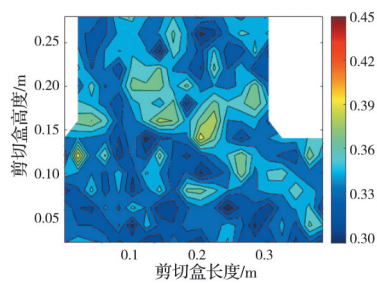
Fig. 5 Comparison of indoor tests and numerical simulation results under normal cyclic loading

3 细观特性分析

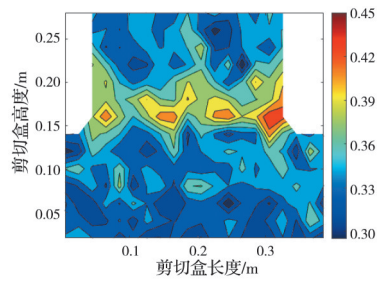
3.1 孔隙率变化规律

为了分析剪切过程中试样孔隙率的变化情况,在数值模型中每隔 10 mm 布置一个测量球进行监

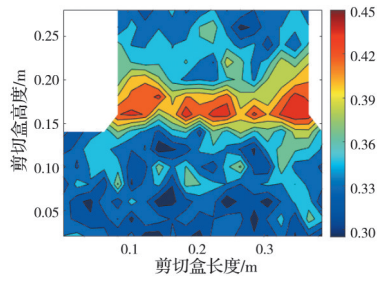
控与记录,并将所得数据用 Matlab 软件进行处理、绘图。其中,法向静荷载条件下 75% 砾石含量试样的孔隙率分布情况如图 6 所示。在剪切初期(剪切位移为 0),试样颗粒在剪切盒内分布较为均匀,孔



(a) 剪切初期



(b) 剪切中期



(c) 剪切后期

图 6 法向静荷载下试样砾石含量为 75% 时的孔隙率分布情况

Fig. 6 Porosity distribution of the sample with 75% gravel content under normal static loading

隙率数值较小。在剪切中期(剪切位移为30 mm),上剪切盒内试样的孔隙率增大,剪切面附近孔隙率增大现象尤为明显,表明上剪切盒内的颗粒发生了剧烈的翻滚、错动现象,导致试样内部的孔隙增大。下剪切盒内试样的孔隙率基本保持不变,这是由于土工织物对下剪切盒颗粒的运动具有限制作用。在剪切后期(剪切位移为50 mm),剪切面附近形成了一个孔隙率较大的带状区域,表明试样结构已发生破坏。

为了分析剪切盒内不同位置试样的孔隙率,在上剪切盒、剪切面和下剪切盒(Au、Am和Ad)3个区域内分别布置3个测量球,如图7所示,各区域测量球监测所得数据的平均值即为该区域的孔隙率。

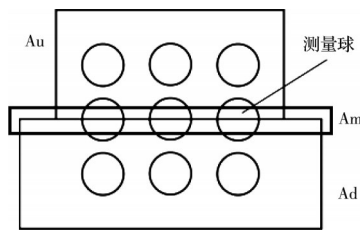


图7 测量球布置示意图

Fig. 7 Measurement ball layout diagram

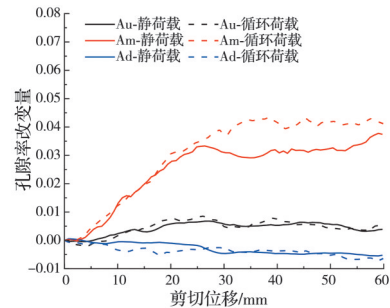
图8所示为不同砾石含量试样在法向静荷载及循环荷载作用下的孔隙率改变量-剪切位移关系曲线。剪切盒不同区域试样的孔隙率变化具有较大差异性。Ad范围内试样的孔隙率大致呈极其微弱的减小趋势,说明土工织物的存在削弱了上、下剪切盒间试样颗粒的接触、交换行为,使得下剪切盒内试样受到的影响较小。Am范围内试样的孔隙率呈显著增大趋势,说明试样的剪胀行为主要由剪切面附近的颗粒错动引起。Au范围内试样的孔隙率变化情况介于Am和Ad之间,呈略微增大的趋势。Am范围内试样的孔隙率改变量最大,并沿上、下两侧逐渐减小。法向循环荷载作用下试样孔隙率改变量-剪切位移关系曲线的波动变化特征较法向静荷载作用下更明显,其孔隙率改变量数值也更大,表明在周期性变化的法向荷载作用下颗粒间反复出现“紧密-松动-紧密”的交替现象,进而使得试样整体的孔隙较法向静荷载作用下更多。

3.2 配位数的变化规律

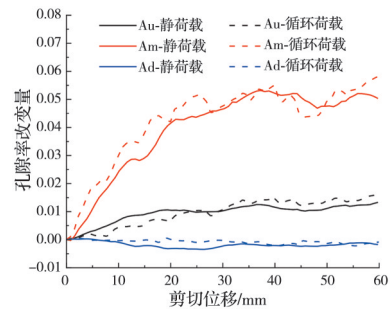
配位数 z 是指测量球范围内颗粒的平均接触数目,常用来表征颗粒材料的密实程度,其表达式为

$$z = \frac{2N_c}{N_p} \quad (2)$$

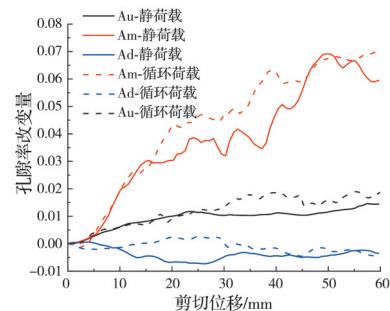
式中: N_c 为颗粒间的接触总数; N_p 为颗粒总数。一般情况下,配位数 z 的数值越大,颗粒间的接触越



(a) 砾石含量50%



(b) 砾石含量75%



(c) 砾石含量100%

图8 法向静荷载和循环荷载作用下的孔隙率改变量-剪切位移关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of porosity change-shear displacement under normal static loading and cyclic loading

好;配位数 z 的数值越小,颗粒间的接触越差。

在法向静荷载作用下,不同砾石含量含砾花岗岩残积土-土工织物界面处的配位数变化曲线如图9(a)所示。曲线呈波动变化特征,表明剪切面处颗粒发生旋转、错动的现象频繁。随着剪切位移的增大,各砾石含量下配位数的变化趋势基本一致。在剪切初期,配位数呈减小趋势,表明颗粒间的接触关系变差,使得试样内部出现架空现象。在剪切后期,配位数基本稳定在一定范围内,表明颗粒间的接触关系基本不变,试样整体已到达相对稳定状态。各砾石含量下(50%、75%和100%)界面配位数分布分别介于5.19~6.05、4.74~5.77和4.35~5.53之间,表明随着砾石含量的增大,试样内部孔隙增多,从而导致颗粒间的接触减少。配位数差值

分别为 0.86、1.03 和 1.18,说明界面的剪胀效应随着砾石含量的增大而增大。

在法向循环荷载作用下,不同砾石含量含砾花岗岩残积土-土工织物界面处配位数的变化曲线如图 9(b)所示。曲线的波动变化特征相较于法向静荷载作用下更加明显,这是由于受到周期性波动法向循环荷载的影响,剪切面处颗粒发生重排列的现象更加频繁。曲线的整体变化趋势与法向静荷载条件下相同,均为先减小后保持相对稳定。各砾石含量下界面配位数的分布分别介于 4.78~6.08、4.36~5.86 和 3.86~5.44 之间,差值分别为 1.31、1.50 和 1.58。法向循环荷载作用下的配位数要小于法向静荷载作用下,这是由于剧烈颗粒运动造成的接触不稳定,也从侧面验证了法向循环荷载作用下界面抗剪强度相较法向静荷载作用下更低。

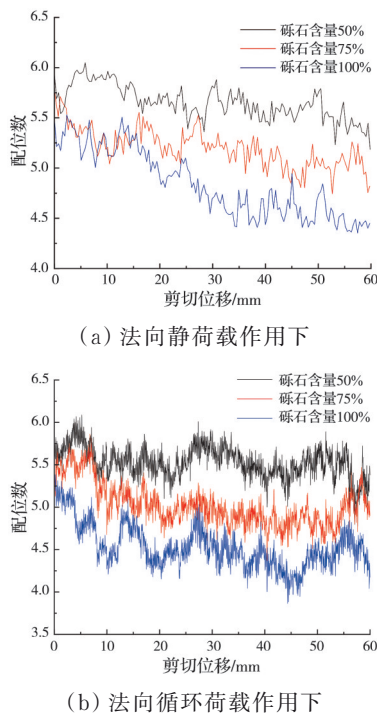


图 9 含砾花岗岩残积土-土工织物界面处的配位数变化曲线

Fig. 9 Variation curves of coordination number at the interface of gravelly granite residual soil and geotextile

3.3 组构各向异性的演化

图 10、图 11 所示分别为法向静荷载和循环荷载作用下试样颗粒在不同剪切时期的法向接触力分布情况。法向接触力的分布呈花生状,其各向异性主方向最初位于 90°附近,最终位于 150°附近,表明在剪切过程中力链由于试样颗粒重排列而发生了偏转。法向静荷载作用下不同砾石含量试样的初始法向接触力分布情况相似,主要是由于此时试样

颗粒均受到相同大小的法向荷载及自身重力的影响。随着剪切位移的增大,法向接触力迅速增大并逐渐趋于稳定,增长幅度与砾石含量存在显著的正相关关系,表明不断增多的砾石颗粒与土工织物共同构成骨架型受力体系,能更充分地发挥出摩擦效应并形成互锁机制;同时,砾石颗粒的增多也会导致试样内部孔隙增多,进一步加剧应力集中现象。法向循环荷载作用下试样颗粒的法向接触力变化规律与法向静荷载作用基本一致,但其初始法向接触力分布受砾石含量的影响更大,且各剪切时期的峰值、谷值法向接触力相较法向静荷载作用下均更小。

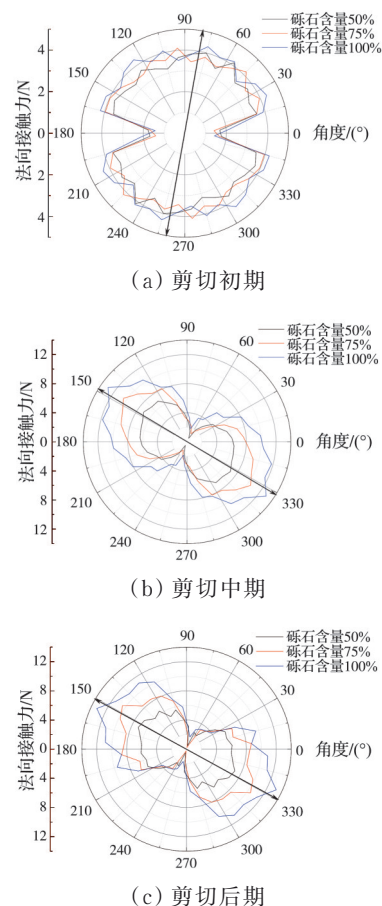


图 10 法向静荷载下试样颗粒法向接触力的分布情况
Fig. 10 Distribution of normal contact force of sample particles under normal static loading

3.4 颗粒旋转的变化规律

在直剪试验中,随着剪切过程的进行,试样颗粒不断发生翻滚、错动和爬升,进而产生不同的抗剪强度和界面剪胀剪缩状态,目前常用颗粒旋转角度这一细观力学量来表征。为了分析剪切过程中试样颗粒的旋转变化情况,取 5 mm 作为竖向间隔,分别统计各间隔内颗粒绕质心旋转的角度并求取平均值,最终得到法向静荷载和循环荷载作用下不

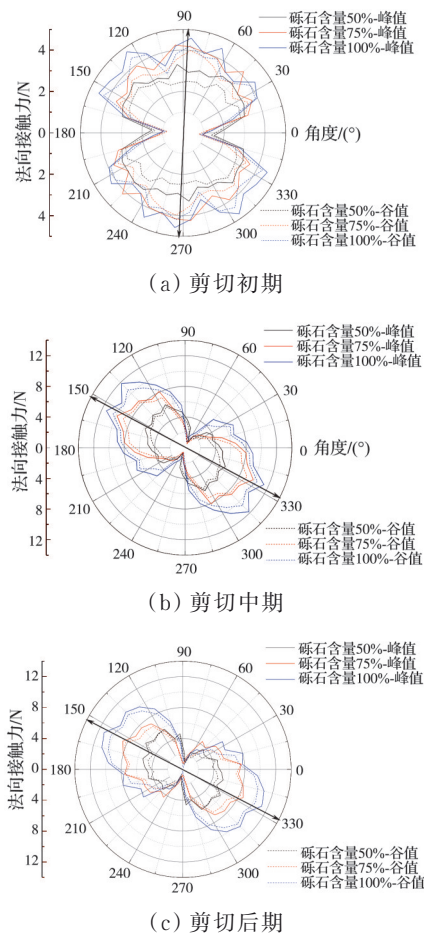


图11 法向循环荷载下试样颗粒法向接触力的分布情况
Fig. 11 Distribution of normal contact force of sample particles under normal cyclic loading

同砾石含量试样的颗粒平均旋转角度分布情况,如图12所示。

随着剪切的进行,试样颗粒的平均旋转角度迅速增大,其中剪切面附近增幅最大,沿上、下剪切盒两侧逐渐减小,整体呈正态分布。这是因为颗粒旋转由剪切盒相互错动引起,界面处颗粒受到的影响最大,距离界面越远,受影响程度越小。100%砾石含量下颗粒平均旋转角度的变化曲线较50%砾石含量下更曲折,且数值也更小。这是由于砾石颗粒的粒径与摩擦系数均比土颗粒更大,在外界荷载作用下更难发生转动;同时,随着砾石含量的逐渐增大,砾石颗粒与土工织物共同构成的空间网络骨架逐渐成形,颗粒间的相互接触力也变得更大,进一步限制了颗粒运动,从而导致试样颗粒整体的旋转角度减小。法向循环荷载作用下试样颗粒平均旋转角度略微大于法向静荷载作用下,这是因为周期性变化的法向应力导致试样颗粒间的接触作用较弱,进而使得颗粒更易发生转动和重排列。任意试验条件下,试样颗粒平均旋转角度的最大值均位于

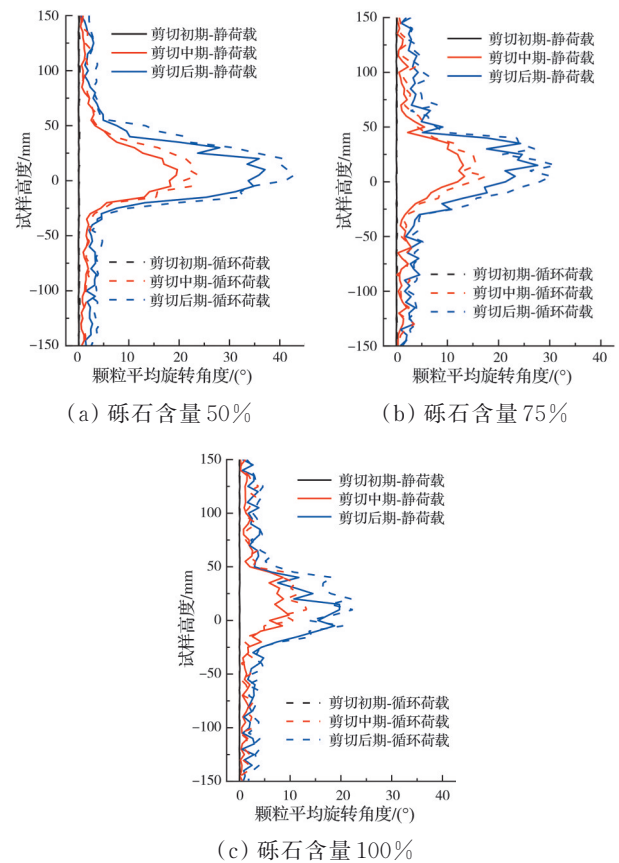


图12 试样颗粒平均旋转角度分布图

Fig. 12 Distribution of average rotation angle of sample particles

靠近上剪切盒的剪切面附近,可能是因为数值模型中设置了上剪切盒向右移动、下剪切盒固定不动,从而使得上剪切盒中的颗粒受到更大扰动。

4 结论

1) 剪切面范围内试样孔隙率从两侧开始增大并逐渐向中间发展;孔隙率变化量随砾石含量的增大而增大,法向循环荷载作用也会使其略微增大。

2) 界面处配位数随剪切位移的增大呈先减小后稳定的趋势,与砾石含量呈负相关关系;法向循环荷载作用下配位数变化曲线的波动特征较法向静荷载作用下更明显,数值也更小。

3) 试样颗粒的接触力与砾石含量呈正相关关系;法向循环荷载作用下接触力具有周期性变化特征,但数值与法向静荷载作用下相比均更小。

4) 试样剪切过程中,颗粒平均旋转角度整体呈正态分布,最大值均位于剪切面附近;随着砾石含量的增大,试样颗粒的平均旋转角度减小;法向循环荷载作用使试样颗粒接触变差,平均旋转角度也随之增大。

参考文献

- [1] 赵建斌, 白晓红, 谢明星, 等. 循环荷载作用下小间距加筋土动力响应特性试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 125-133.
Zhao J B, Bai X H, Xie M X, et al. Experimental study on dynamic response characteristics of small-spaced reinforced soil under cyclic loading[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 125-133. (in Chinese)
- [2] 刘飞禹, 孔剑捷, 姚嘉敏. 含石量和压实度对格栅-土石混合体界面剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 903-911.
Liu F Y, Kong J J, Yao J M. Effects of rock content and degree of compaction on interface shear characteristics of geogrid-soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 903-911. (in Chinese)
- [3] 刘飞禹, 姚嘉敏, 孔剑捷. 土石混合料-土工织物界面剪切特性研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(1): 35-43.
Liu F Y, Yao J M, Kong J J. Study on shear characteristics of soil-rock mixture-geotextile interface[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(1): 35-43. (in Chinese)
- [4] Zhong Z L, Xu J, Liu X R, et al. Large-scale triaxial tests on deformation and mechanical behavior of soil-rock mixture in mountain area[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 21: 10325-10336.
- [5] 刘飞禹, 江淮, 王军. 砾石-格栅界面循环剪切软化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1485-1492.
Liu F Y, Jiang H, Wang J. Experimental study on cyclic shear softening characteristics of gravel-geogrid interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1485-1492. (in Chinese)
- [6] 李亚然, 马丽娜, 肖锐, 等. 土石混合料工程特性试验研究[J]. 公路, 2023, 68(12): 53-58.
Li Y R, Ma L N, Xiao R, et al. Research on engineering properties of soil and gravel mixture[J]. Highway, 2023, 68(12): 53-58. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] Liu F Y, Zhu C, Yuan G H, et al. Behaviour evaluation of a gravelly soil-geogrid interface under normal cyclic loading[J]. Geosynthetics International, 2021, 28(5): 508-520.
- [9] 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.
- [10] 严颖, 赵金凤, 季顺迎. 块石含量和空间分布对土石混合体抗剪强度影响的离散元分析[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 146-156.
Yan Y, Zhao J F, Ji S Y. Discrete element analysis of the influence of rock content and rock spatial distribution on shear strength of rock-soil mixtures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 146-156. (in Chinese)
- [11] Shan P F, Lai X P. Mesoscopic structure PFC2D model of soil rock mixture based on digital image[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019, 58: 407-415.
- [12] Hu X L, Zhang H, Boldini D, et al. 3D modelling of soil-rock mixtures considering the morphology and fracture characteristics of breakable blocks[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 132: 103985.
- [13] Yao Y S, Li J, Ni J J, et al. Effects of gravel content and shape on shear behaviour of soil-rock mixture: experiment and DEM modelling[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141: 104476.
- [14] Li S Q, Yang Z P, Tian X, et al. Influencing factors of scale effects in large-scale direct shear tests of soil-rock mixtures based on particle breakage[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100677.
- [15] Ahmadi M, Shire T, Mehdizadeh A, et al. DEM modelling to assess internal stability of gap-graded assemblies of spherical particles under various relative densities, fine contents and gap ratios[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 126: 103710.
- [16] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 不同围压加载方式下土石混合体变形破坏机制颗粒流模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2051-2060.
Zhang Q, Wang X G, Zhao Y F, et al. Particle flow modelling of deformation and failure mechanism of soil-rock mixture under different loading modes of confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2051-2060. (in Chinese)
- [17] Bhandari A, Han J. Investigation of geotextile-soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(1): 33-43.
- [18] Cheng H Y, Yamamoto H, Thoeni K. Numerical study on stress states and fabric anisotropies in soilbags using the DEM[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76: 170-183.
- [19] Feng S J, Chen J N, Chen H X, et al. Analysis of sand-woven geotextile interface shear behavior using discrete element method (DEM) [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(3): 433-447.
- [20] 张敏超, 刘新荣, 王鹏, 等. 不同含石量下泥岩土石混

- 合体剪切特性及细观破坏机制[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 17-26.
- Zhang M C, Liu X R, Wang P, et al. Shear properties and failure meso-mechanism of soil-rock mixture composed of mudstone under different rock block proportions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 17-26. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 张振平, 盛谦, 付晓东, 等. 基于颗粒离散元的土石混
合体直剪试验模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 135-146.
- Zhang Z P, Sheng Q, Fu X D, et al. Research on numerical direct shear test of soil-rock mixture based on particle flow code simulation[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(1): 135-146. (in Chinese)
- [23] Jia F, Liu S H, Shen C M, et al. Predicting strength of soilbags under cyclic compression[J]. Geosynthetics International, 2020, 27(6): 646-654.
- [24] Zhang Z L, Wang T. Numerical analysis of loess and weak intercalated layer failure behavior under direct shearing and cyclic loading[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(11): 2796-2815.
- (编辑 王秀玲)