

付冬平, 张弘, 林春秀, 等. 纤维掺量对花岗岩残积土剪切特性的影响[J]. 华南地震, 2024, 44(1): 165–174. [FU Dongping, ZHANG Hong, LIN Chunxiu, et al. Effect of Fiber Content on Shear Characteristics of Granite Residual Soil[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 165–174]

## 纤维掺量对花岗岩残积土剪切特性的影响

付冬平<sup>1</sup>, 张弘<sup>1</sup>, 林春秀<sup>1</sup>, 张欣亚<sup>2</sup>

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

**摘要:** 为探究纤维掺量对花岗岩残积土的剪切特性的影响, 采用气动直剪仪对纤维加筋花岗岩残积土试样进行直剪试验。考虑纤维掺量、剪切速率、竖向应力等因素, 分析不同剪切速率和竖向应力下纤维掺量对花岗岩残积土剪切特性的影响。试验结果表明: 竖向应力为 300 kPa 时, 与未掺纤维相比, 纤维掺量分别为 0.3%、0.6%、0.9% 时, 剪切强度分别增加了 23%、46.1%、79.2%, 即掺加纤维对花岗岩残积土剪切强度有明显的增强作用。内摩擦角随着纤维掺量的增加而增大, 黏聚力随着纤维掺量的增加而增加。低竖向应力下, 土样先剪缩再剪胀; 高竖向应力下, 土样只发生剪缩。在低速剪切的情况下, 剪切速率对花岗岩残积土的剪切强度特性影响较小; 剪胀程度随剪切速率增加而增强。

**关键词:** 纤维加筋; 聚丙烯纤维; 直剪试验; 抗剪强度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0165-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.19

## Effect of Fiber Content on Shear Characteristics of Granite Residual Soil

FU Dongping<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, LIN Chunxiu<sup>1</sup>, ZHANG Xinya<sup>2</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China;

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

**Abstract:** In order to investigate the shear characteristics of the residual soil under different fiber content, direct shear tests were carried out on the residual soil by using pneumatic direct shear apparatus. Considering fiber content, shear rate, vertical stress and other factors, the effect of fiber content on the shear characteristics of residual soil under different shear rates and vertical stresses is analyzed. The test results show that when the vertical stress is 300 kPa, compared with the undoped fiber, with the fiber content increase from 0 to 0.3%, 0.6% and 0.9%, shear strength increases by 23%, 46.1% and 79.2%, respectively, that is, the addition of fiber has a significant enhancement effect on the shear strength of granite residual soil. The internal friction angle increases with the increase of fiber content, and the cohesion decreases significantly with the increase of fiber content. Under low vertical stress, the soil is first dilatational and then shrunken, and under high vertical stress, the soil is shrunken constantly. In the case of low-speed shear, the shear rate has little effect on the shear strength characteristics of granite residual soil. The degree of shear expansion increases with increasing shear rate.

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678352)

作者简介: 付冬平(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程专业方面的研究。

E-mail: 47160390@qq.com

**Keywords:** Fiber reinforced soil; Polypropylene fiber; Interface between geogrid and soil; Direct shear test; Shear strength

## 0 引言

花岗岩残积土是花岗岩经物理风化和化学风化后残留在原地的碎屑物,由于未经其他介质的分选和运输,土体中仍然存在原岩的原生和次生结构面,具有特殊的成分和结构特征,属于区域性特殊土。花岗岩残积土广泛分布于我国东南沿海地区,具有均匀性差,遇水易软化、易崩解等不良工程特性<sup>[1]</sup>,对地基土的抗剪强度和边坡的稳定都具有重要影响。

国内外许多学者对花岗岩残积土的性质进行了研究。安然等<sup>[2]</sup>对花岗岩残积土进行了反复干湿循环下的三轴剪切试验,通过应力—应变关系、抗剪强度参数、孔隙体积含量等指标,研究了炎热多雨气候对土体性质的损伤效应;汪华斌等<sup>[3]</sup>通过三轴剪切试验和三轴压缩试验研究了结构性花岗岩残积土在三轴应力状态时的应变和孔压变化特征,以及结构性花岗岩残积土的剪切结构性屈服特性;舒荣军等<sup>[4]</sup>针对花岗岩残积土开展了一系列卸荷剪切—湿化试验,探究围压和先期卸荷程度对土体湿化特性的影响;刘飞禹等<sup>[5-6]</sup>研究了含水率和法向循环荷载等因素对花岗岩残积土静动力剪切特性的影响;Rahardjo等<sup>[7]</sup>研究了新加坡不同埋深与不同风化程度花岗岩残积土抗剪强度特性。Kong等<sup>[8]</sup>研究了花岗岩残积土在干湿循环作用下孔隙结构变异特性,以及干湿循环对残积土土水特征曲线和非饱和特性的影响。Liu等<sup>[9]</sup>对花岗岩残积土的微观结构进行了研究,发现花岗岩残积土中的含铁矿物具有胶结效果,会促使颗粒胶结形成团粒聚集体,进而提高土的强度。

由于花岗岩残积土工程性质的特殊性,用作路基填筑时需进行一定的处理,目前常用的特殊路基处理方法有改良和换填等,换填涉及的土石方量大,处于对经济效益和环境保护的考虑,目前对花岗岩残积土路基的处理方法主要是改良。国内外诸多学者对不同物质不同方式改良的花岗岩残积土的性质进行了一系列研究。刘文骏等<sup>[10]</sup>通过三轴试验和崩解试验研究了水泥改良花岗岩残积土的剪切特性和崩解特性;汤连生等<sup>[11]</sup>采用了高岭土、石灰和水泥对花岗岩残积土进行了改良,研究了干湿循环环境下改良花岗岩残积土的崩解特性。李自立等<sup>[12]</sup>

将木质素掺入花岗岩残积土,通过击实和单轴压缩试验,对比研究了木质素掺量和含水率变化对土样压实性和单轴抗压强度特性的影响;周援衡等<sup>[13]</sup>研究了全风化花岗岩改良土路基的循环加载特性,验证了全风化花岗岩经过改良后可用于高速铁路轨道基床底层和路基本体填筑。Liang等<sup>[14]</sup>通过直剪试验和崩解试验,研究了含水率对微生物固化花岗岩残余土力学性能和抗崩解性的影响。Ferreira等<sup>[15]</sup>通过加筋的方式,分析了不同类型筋材、含水率、土体密度等因素对花岗岩残积土直剪特性的影响,结果表明含水率影响较大。刘飞禹等<sup>[16-17]</sup>研究了不同含水率对花岗岩残积土筋土界面静动力剪切特性的影响,分析界面抗剪强度和体变特性等参数的变化规律。

综上所述,目前关于纤维加筋对花岗岩残积土剪切特性的研究相对较少。因此,本研究主要考虑纤维掺量的影响,通过一系列直剪试验分析残积土的剪切强度特性。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验仪器

本次直剪试验通过气动直剪仪完成,如图1所示。气动直剪仪分上下两盒,剪切盒直径为50 mm,高为20 mm。



图1 气动直剪仪

Fig.1 Pneumatic direct shear apparatus

### 1.2 试验材料

试验土均为广州某工程现场取得的残积土,具体物理参数如表1所示:

表1 残积土的物理性质  
Table 1 Physical properties of residual soil

名称	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比重	塑限/(%)	液限/(%)	塑性指数/(%)
残积土	1.58	2.75	25.91	46.8	21.89

将原状土碾碎烘干，过孔径为2 mm的筛网，得到干土。称取一定质量的干土，分别掺入含量为0%、0.3%、0.6%、0.9%的聚乙烯纤维，拌匀后喷水至含水率达22.5%，静置12 h。采用直径50 mm的制样器，通过液压千斤顶压到指定压实度，压样完成后由脱模器将试样取出，制样完毕后立即用保鲜膜密封以防止水分蒸发。

1.3 试验方案

具体的试验方案如表2所示。为了研究不同纤维掺量下花岗岩残积土的剪切特性，以纤维掺量作为主要变量进行试验。

表2 试验方案  
Table 2 Test scheme

纤维掺量/(%)	剪切速率(mm·min <sup>-1</sup> )	竖向应力/(kPa)
0.3	0.5	100
0.6	1	200
0.9	2	300

2 结果分析

2.1 纤维掺量对剪切强度特性的影响

2.1.1 剪切应力—剪切位移关系曲线

图2为不同纤维掺量下花岗岩残积土在不同法向应力作用下的剪应力—剪切位移曲线。从图2中可看出，在不同法向力作用下，纤维加筋土的剪应力—剪切位移曲线均在纯土上方，表明添加纤维材料可显著提高土体的抗剪强度。取剪切位移为6 mm时的剪切应力为破坏强度，在低竖向应力(100 kPa，如图2(a)所示)下，相对于未掺纤维，剪切强度为85 kPa，纤维掺量增加到0.3%时，剪切强度为97.83 kPa，增加了15.09%；纤维掺量增加到0.6%时，剪切强度为105.89 kPa，相对于未掺时增加了24.57%，纤维掺量增加到0.9%时，剪切强度为115.99 kPa，相对于未掺时增加了36.45%。在高竖向应力(300 kPa，如图2(c)所示)下，相对于纤维掺量为0%时，剪切强度为170 kPa，纤维掺量增

加到0.3%时，剪切强度为200.01 kPa，增加了17.65%；纤维掺量增加到0.6%时，剪切强度为221.66 kPa，相对于未掺时增加了23.31%，纤维掺量增加到0.6%时，剪切强度为247.38 kPa，相对于未掺时增加了45.52%。可见纤维对土剪切强度的增强作用在高竖向应力下发挥的更好。

此外，不论是纯土还是纤维加筋土，在不同法向力作用下，剪切应力—剪切位移呈现出相似的规律，随着剪切位移的增大，剪切应力的增大趋势逐渐减缓，最后趋于平缓，剪应力—剪切位移曲线都呈应变硬化特征，无明显的峰值点，分析其原因，可能是由于土体的孔隙结构和颗粒排列发生变化导致的。在法向应力作用下，土体内部的孔隙结构可能被压缩，颗粒间接触面积增大，颗粒间的相互咬合作用增强，孔隙率减小，从而导致土体内部摩擦力增强，随着剪切位移的增大，颗粒间的位移变得更加困难，使土体整体变得更加坚硬，出现应变硬化现象。随着纤维含量的增加，加筋土中纤维填充了部分孔隙，使得颗粒间接触应力增大，摩擦作用进一步增强，在剪切过程中剪应力快速增大，故而随着纤维掺量的增强，土体的抗剪强度也在不段增大。

2.1.2 最大剪切应力

图3更加直观的反应了最大剪切应力与纤维掺量、竖向应力之间的变化规律。由图3可知，纤维掺量和竖向应力对最大剪切应力都有明显影响。随着纤维掺量的增加，最大剪切应力增加，表明添加纤维会增强土的抗剪强度，且在低纤维掺量下，纤维掺量越高，增强效果越好；随着竖向应力的增大，最大剪切应力也增大，这是由于竖向应力越大，土样就越密实，抗剪强度越高<sup>[18]</sup>。

2.1.3 抗剪强度指标

花岗岩残积土的剪切符合摩尔库伦定律，即 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ (其中， $\tau$ 为抗剪强度， $\varphi$ 为内摩擦角， $c$ 为黏聚力)，按照摩尔库伦准则对实验结果进行拟合，拟合结果见表3。结合图4和表3可知，纤维掺量同时对花岗岩残积土的黏聚力与内摩擦角有影响。随着纤维掺量的增加，黏聚力增加，内摩擦角增大。

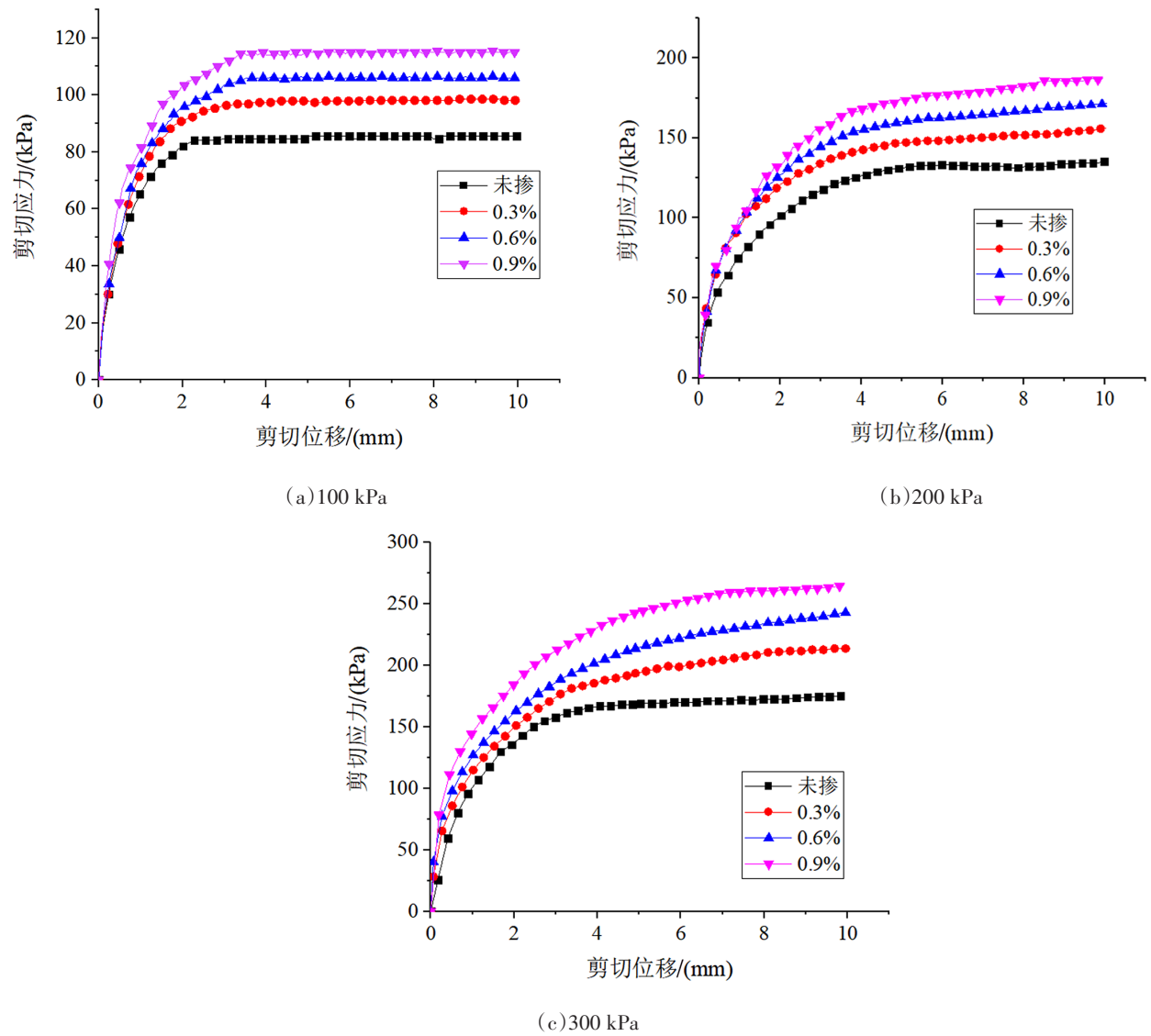


图2 不同纤维掺量下剪切应力—剪切位移曲线

Fig.2 Shear stress-shear displacement curves under different fiber content

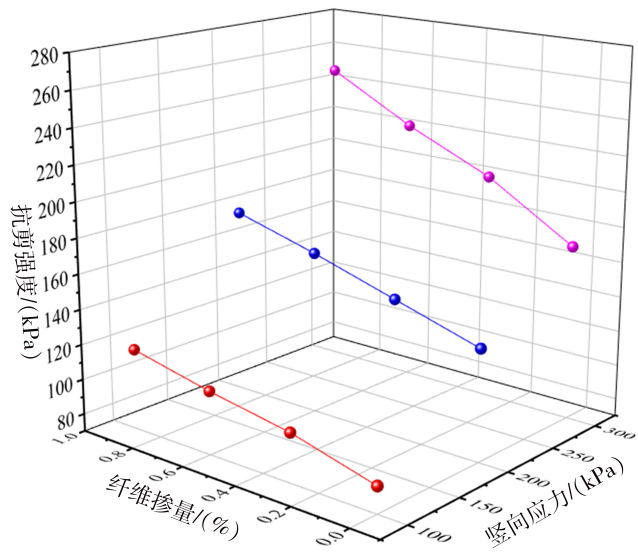


图3 最大剪切应力三维图

Fig.3 Three-dimensional diagram of the maximum shear stress



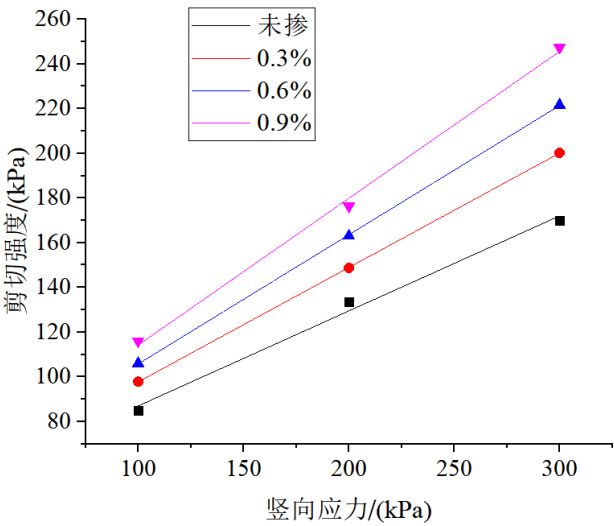


图4 不同纤维掺量下的抗剪强度包线

Fig.4 Shear strength envelopes with different fiber content

表3 不同纤维掺量下的内摩擦角和黏聚力

Table 3 Friction angle and cohesion with different fiber content

纤维掺量/%	剪切速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	c/kPa	φ/(°)
未掺	2	44.5	23
0.3		46.55	27.1
0.6		47.9	30.1
0.9		48.5	33.3

2.2 剪切速率对剪切强度特性的影响

2.2.1 剪切应力—剪切位移关系曲线

图5为不同剪切速率下花岗岩残积土在不同法向应力作用下的剪应力—剪切位移曲线。由图5可知,在低竖向应力(100 kPa)下,剪切速率从0.5 mm/min分别变为1 mm/min和2 mm/min时,剪切强度从74.9 kPa变为82.3 kPa和89.7 kPa,分别增加了9.9%和19.8%。在高竖向应力(300 kPa)下,剪切速率从0.5 mm/min分别变为1 mm/min和2 mm/min时,剪切强度从152.4 kPa变为154.6 kPa和157.5 kPa,分别增加了1.4%和3.3%。随着剪切速率的增大,最大剪切应力相应有所增大,且随着竖向应力的增加,这一增幅逐渐减小,至竖向应力达到300 kPa时,最大剪切应力基本不随剪切速率的变化而变化。总体来看,低剪切速率下,剪切速率对最大剪切应力的影响并不大。

2.2.2 最大剪切应力

图6更加直观的反应了最大剪切应力与剪切速率、竖向应力之间的变化规律。由图6可知,竖向

应力对最大剪切应力有明显影响,剪切速率对最大剪切应力的影响并不大。随着竖向应力的增大,最大剪切应力也增大,这是由于竖向应力越大,土样就越密实,抗剪强度越高。

2.2.3 剪切强度指标

结合图7和表4可知,剪切速率同时对花岗岩残积土的黏聚力与内摩擦角有影响。随着剪切速率的增加,黏聚力显著降低,内摩擦角增大。

表4 不同剪切速率下的内摩擦角和黏聚力

Table 4 Friction angle and cohesion with different shear rate

剪切速率/(mm/min)	纤维掺量/(%)	c/(kPa)	φ/(°)
0.5	未掺	37.8	20.7
1		48.7	19.9
2		59.1	18.8

2.3 纤维掺量对剪切体变特性的影响

2.3.1 竖向位移与剪切位移关系曲线

取剪切速率为1 mm/min时的试验数据进行分析,图8反映了不同纤维含量下竖向位移与剪切位移的关系。规定剪胀为正,分析图8可知,在低竖向应力下,剪切初始阶段有剪缩过程,随着剪切位移的增大,呈现剪胀的趋势,在中高竖向应力下,试样一直处于剪缩状态。

由图8可知,同一低竖向应力(100 kPa)下,随着纤维含量的增加,剪胀效应逐渐增强,竖向位移为0 mm时的剪切位移也在不断减小,最终剪胀位移不断增大,纤维掺量从0%增大到0.3%、0.6%、

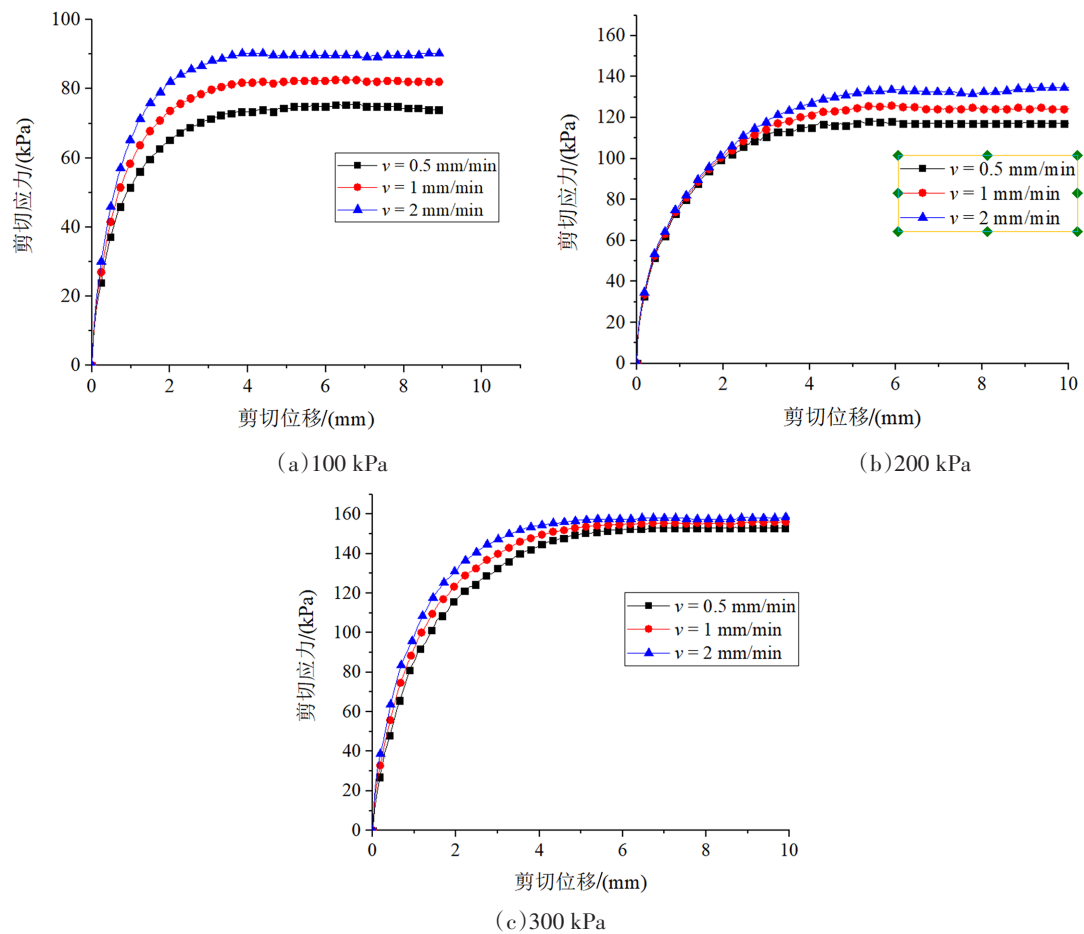


图5 不同剪切速率下剪切应力—剪切位移曲线

Fig.5 Shear stress-shear displacement curves under different shear rate

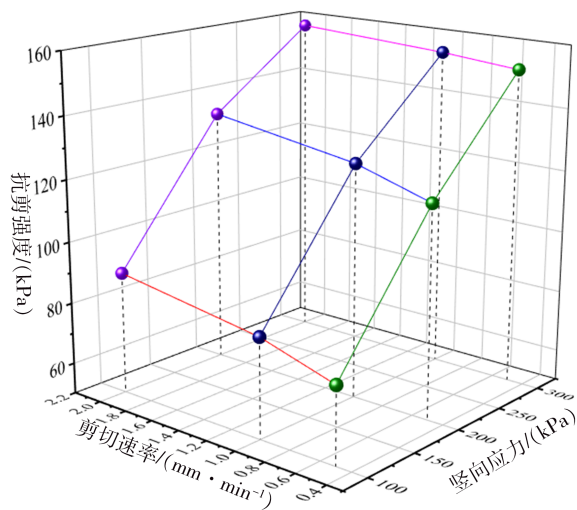


图6 最大剪切应力三维图

Fig.6 Three-dimensional diagram of the maximum shear stress

0.9% 时，最终剪胀位移分别从 0.12 mm 增大到 0.154 mm、0.296 mm、0.38 mm。在同一高竖向应力下，未掺加纤维时，随着剪切位移增大，剪缩效应持续增强，掺加纤维后随着剪切位移增大，剪缩

效应逐渐减弱。竖向应力越大，这种趋势越明显。

2.3.2 最大剪胀率

直剪试验中的应力—剪胀规律可通过下式表示<sup>[19]</sup>。

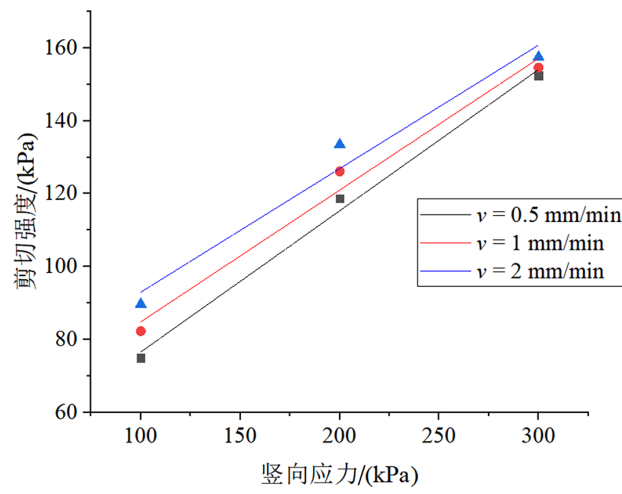


图7 不同剪切速率下的抗剪强度包线

Fig.7 Shear strength envelopes with different shear rate

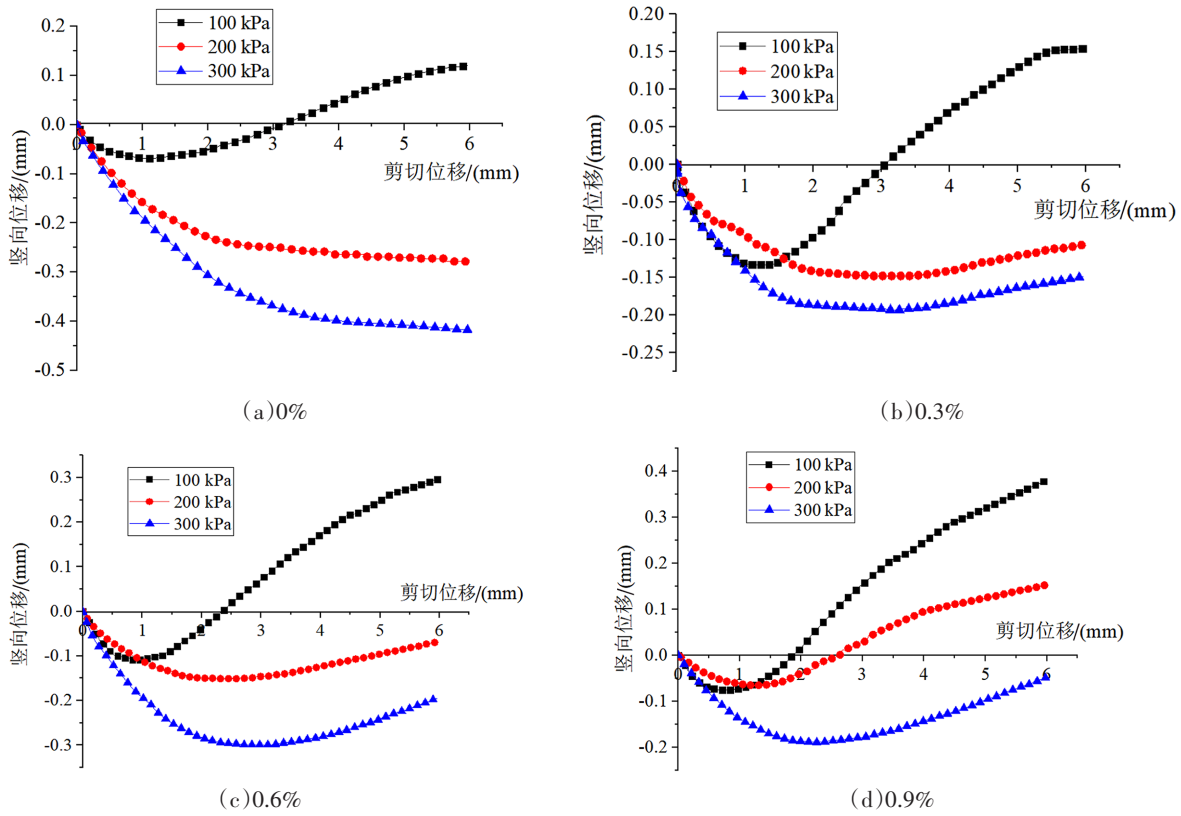


图8 不同纤维含量下竖向位移—剪切位移曲线

Fig.8 Vertical displacement-shear displacement curves under different fiber content

$$\Psi_{\max} = \arctan \left( -\frac{\delta_v}{\delta_u} \right)_{\max} \quad (1)$$

式(1)中,  $\Psi_{\max}$  为最大剪胀角,  $\delta_v$  和  $\delta_u$  分别为竖向位移和水平位移的增量。

图9为不同竖向应力下纤维掺量对最大剪胀率的影响。随着纤维掺量的增加,最大剪胀率先增大后减小,也即剪胀程度随纤维掺量增加先增强后减弱,在纤维掺量为0.3%时,剪胀程度最大。

## 2.4 剪切速率对剪切体变特性的影响

### 2.4.1 竖向位移与剪切位移关系曲线

取未掺纤维时的试验数据进行分析,图10反映了不同剪切速率下竖向位移与剪切位移的关系。规定剪胀为正,分析图10可知,在低竖向应力下,剪切初始阶段有剪缩过程,随着剪切位移的增大,呈现剪胀的趋势,在中高竖向应力下,试样一直处于剪缩状态。

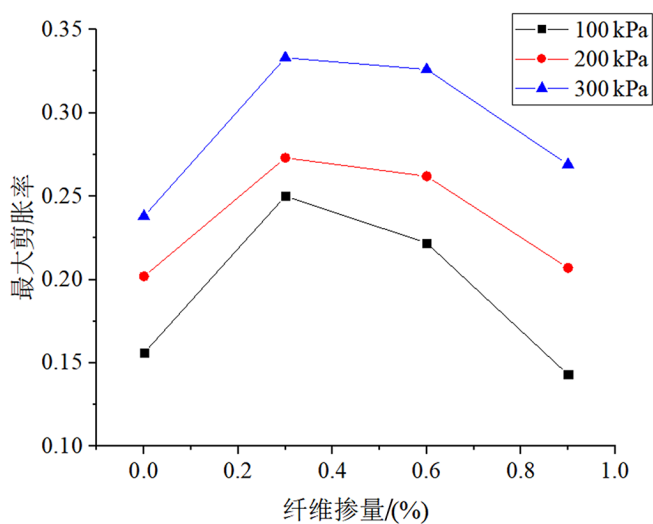


图9 纤维掺量对最大剪胀率的影响

Fig.9 Effect of fiber content on the maximum dilatancy ratio

由图10可知,在竖向应力为100 kPa时,随着剪切速率的增加,剪胀效应先减弱再增强,竖向位移为0 mm时的剪切位移也先减小再增大,剪切速率从0.5 mm/min增大到1 mm/min、2 mm/min时,最终剪胀位移分别从0.352 mm增大到0.292 mm、

0.38 mm。在竖向应力为100 kPa时,剪切速率在0.5 mm/min和1 mm/min表现为先剪缩再剪胀的趋势,在剪切速率为2 mm/min时,仅有剪缩过程。在高竖向应力(300 kPa)下,始终仅有剪缩过程。试验表明,剪切速率对试验的剪胀特性有明显影响。

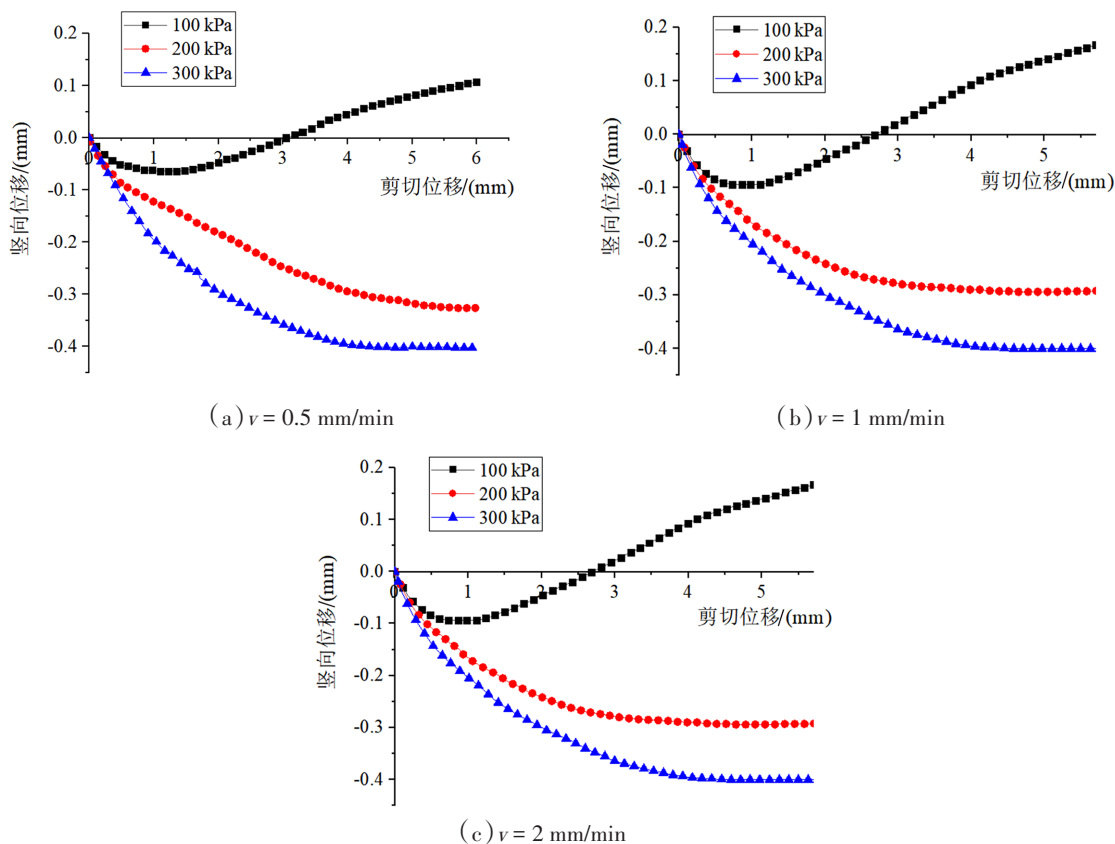


图10 不同剪切速率下竖向位移—剪切位移曲线

Fig.10 Vertical displacement—shear displacement curves under different shear rate



### 2.4.2 最大剪胀率

图 11 为不同竖向应力下剪切对最大剪胀率的影响。随着剪切速率的增加,最大剪胀率持续增

大,也即在低剪切速率下,剪胀程度随剪切速率增加而增强。

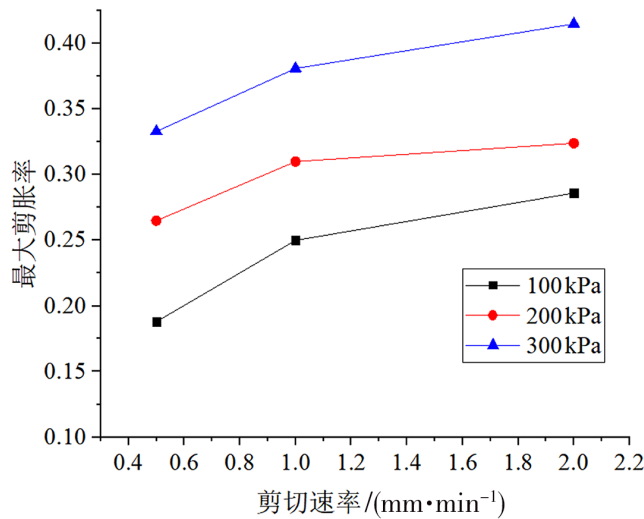


图 11 剪切速率对最大剪胀率的影响

Fig.11 Effect of shear rate on the maximum dilatancy ratio

## 3 结论

(1)掺加纤维对花岗岩残积土剪切特性有明显的增强作用,随着纤维掺量越大,剪切强度越大。内摩擦角随着纤维掺量的增加而增大,粘聚力随着纤维掺量的增加而显著降低。

(2)总体来说,在低速剪切的情况下,剪切速率对花岗岩残积土的剪切强度特性影响较小。剪切速率同时对花岗岩残积土的粘聚力与内摩擦角有影响。随着剪切速率的增加,粘聚力增加,内摩擦角增大。

(3)纤维掺量对花岗岩残积土的体变特性有显著影响。低竖向应力下,土样先剪缩再剪胀,随着纤维含量的增加,剪胀效应逐渐增强;高竖向应力下,土样发生剪缩,随着纤维掺量的增加,剪缩程度逐渐减弱,竖向应力越大,这种趋势越明显。

(4)剪切速率对花岗岩残积土的体变特性有显著影响。随着剪切速率的增加,最大剪胀率持续增大,也即在低剪切速率下,剪胀程度随剪切速率增加而增强。

### 参考文献

[1] Coutinho R Q, Silva M M, Dos santos A N, et al. Geotechnical characterization and failure mechanism of landslide in granite residual soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(8): 05019004.

[2] 安然,孔令伟,黎澄生,等. 炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(09): 1902-1911.

[3] 汪华斌,周宇,余刚,等. 结构性花岗岩残积土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(04): 991-1002.

[4] 舒荣军,孔令伟,王俊涛,等. 考虑先期卸荷影响的花岗岩残积土湿化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 154-159+165.

[5] 刘飞禹,梁崇旭,王军,等. 不同含水率下花岗岩残积土循环剪切特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(08): 2048-2057.

[6] 刘飞禹,梁崇旭,王军,等. 含水率和法向循环荷载对残积土剪切特性的影响[J]. 中国公路学报, 2023, 36(08): 172-180.

[7] Rahardjo H, Aung K K, Leong E C, et al. Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering[J]. Engineering Geology, 2004, 73(1): 157-169.

[8] Kong L W, Sayem H M, Tian H. Influence of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance (NMR) spin-spin relaxation time (T2) relaxometry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(2): 208-216.

[9] Liu X Y, Zhang X W, Kong L W, et al. Effect of cementation on the small-strain stiffness of granite residual soil[J]. Soils and Foundations, 2021, 61(2): 520-532.

[10] 刘文骏,陈秋南,赵磊军,等. 水泥改良花岗岩残积土的强度和崩解特性研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(01): 54-59.

- [11] 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.
- [12] 李自立, 陈志波, 胡屏, 等. 掺木质素花岗岩残积土的单轴抗压强度特性[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 30-33+55.
- [13] 周援衡, 王永和, 卿启湘, 等. 全风化花岗岩改良土高速铁路路基填料的适宜性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(03): 625-634.
- [14] Liang Z, Wu Z, Noori M, et al. A new ecological control method for Pisha sandstone based on hydrophilic polyurethane[J]. Journal of arid land, 2017, 9(5): 790-796.
- [15] Ferreira F B, Vieira C, 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.
- [16] 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(02): 222-228.
- [17] 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/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-9[2023-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230508.0926.002.html>.
- [18] Dai B B, Yang J, Zhou C Y. Observed effects of interparticle friction and particle size on shear behavior of granular materials [J/OL]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): 04015011[2023-08-15]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128689011>. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000520
- [19] 陈胜, 徐采薇, 徐其功, 等. 极限状态下灌浆套筒内锚固钢筋的受力原理及变形分析[J]. 华南地震, 2023, 43(02): 151-157.