

# 不同含水率花岗岩残积土-格栅界面剪切特性

刘飞禹<sup>1</sup>, 陈舒祺<sup>1</sup>, 孙宏磊<sup>2</sup>, 刘洪波<sup>3</sup>

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023;  
3. 广州环投增城环保能源有限公司, 广东 广州 511300)

**摘要:** 花岗岩残积土可作为回填土应用于加筋土结构, 含水率对结构的稳定性具有重要影响。以广州市增城区花岗岩残积土为研究对象, 通过室内大型直剪试验, 研究了不同含水率(13%、19%、25%、32%)、竖向应力(50、100、150、200kPa)对花岗岩残积土-格栅界面剪切特性曲线、抗剪强度、体变特性的影响。试验结果表明: 含水率为13%、竖向应力为50kPa时, 残积土-格栅界面剪应力随着剪切位移的增大先升后降, 降幅较小, 其余条件下剪应力随着剪切位移的增大而升高; 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; 筋土界面抗剪强度随着含水率的升高而大幅降低, 界面抗剪强度系数整体上随着含水率的升高先增加后降低, 含水率为19%和25%时格栅加筋的增强效果最佳; 筋土界面黏聚力随着含水率的增加先增大后减小, 界面内摩擦角随着含水率的升高而降低; 13%、19%含水率下筋土界面在50kPa竖向应力作用下发生了剪胀, 其余条件下体积应变以剪缩为主。

**关键词:** 筋土界面; 含水率; 花岗岩残积土; 土工格栅; 剪切特性

中图分类号: TU411

文献标志码: A

## Shear Characteristics of Granite Residual Geogrid-Soil Interface with Different Water Contents

LIU Feiyu<sup>1</sup>, CHEN Shuqi<sup>1</sup>, SUN Honglei<sup>2</sup>, LIU Hongbo<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 3. GZEPI Zhengcheng Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou 511300, China)

**Abstract:** Granite residual soil can be used as backfill in reinforced soil structure, and its water content has an important effect on its mechanical properties. Taking the granite residual soil in Zengcheng District, Guangzhou as the

research subject, large-scale direct tests are conducted to analyze the shear characteristics, shear strength, and volume deformation properties of the residual soil and its interface with different water contents (13%, 19%, 25%, and 32%) and normal stresses (50, 100, 150, and 200kPa). The test results show that when the water content is 13% and the vertical stress is 50kPa, the shear stress of residual soil-geogrid interface increases first and then decreases with the increase of shear displacement, and the shear stress increases with the increase of shear displacement in other conditions. The geogrid reinforcement can alleviate the shear softening of granite residual soil which decreases greatly after the shear stress reaches the peak value. The interface shear strength decreases greatly with the increase of water content, and the interface shear strength coefficient increases first and then decreases with the increase of water content. When the water content is 19% and 25%, the reinforcement effect is the best. The interface cohesion increases first and then decreases with the increase of water content, and the interface friction angle decreases with the increase of water content. At a water content of 13% and 19%, the soil-reinforced interface dilates at a vertical stress of 50kPa, and the bulk strain is mainly shear shrinkage under other conditions.

**Key words:** soil-geogrid interface; water content; granite residual soil; geogrid; shear characteristic

加筋土结构作为一种绿色经济的加固方法在工程中应用广泛, 其稳定性受到回填土、筋材、筋土界面力学性质的影响<sup>[1-2]</sup>。花岗岩残积土可作为回填土应用于加筋土结构, 该残积土风化剧烈, 遇水极易软化。从南方多雨的气候条件以及残积土的力学特性出发, 研究不同含水率下花岗岩残积土及其筋土界面的剪切特性具有重要意义。从南方多雨的气候条

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(52078285, 51878402)

通信作者: 孙宏磊(1981—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为土动力学及地基处理。

E-mail: sunhonglei@zju.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

件以及残积土的力学特性出发,研究不同含水率下花岗岩残积土-格栅界面的剪切特性和土工格栅加筋效果具有工程应用价值。

针对风化花岗岩物理力学性质的研究已有一些成果。安然等<sup>[3]</sup>通过干湿循环下的三轴剪切试验来研究多雨气候对花岗岩残积土抗剪强度、微观结构等的影响。茆大炜等<sup>[4]</sup>通过大型三轴试验研究了含水率、应力水平、浸水湿化对全风化蚀变带花岗岩力学性能的影响,并基于试验规律构建了岩土体湿化数学模型。李凯等<sup>[5]</sup>通过直剪试验研究了饱和度对不同风化程度花岗岩抗剪特性的影响,发现饱和度对土体黏聚力影响大,且存在最优饱和度使土体抗剪强度最高。尚彦军等<sup>[6]</sup>通过CT监测的三轴试验研究了风化花岗岩的宏观力学性能和细观损伤演化进程。We等<sup>[7]</sup>研究了含水率对不同风化程度花岗岩剪切特性的影响,探讨其各向异性特征和土体抗剪强度等力学特性。

筋土界面研究领域已有许多的成果。刘飞禹等<sup>[8-12]</sup>通过大型直剪试验研究了不同颗粒粒径、级配、粒孔比、筋材肋厚及剪切速率下筋土界面静、动剪切特性,对筋土界面抗剪强度、体变特性等指标进行了全面的分析。徐超等<sup>[13]</sup>、周健等<sup>[14]</sup>利用数字图像技术对筋土界面剪切试验和拉拔试验中界面相互作用特性、颗粒运动情况进行了细观分析。Lashkari等<sup>[15]</sup>分析了不同颗粒形状、粒径、初始相对密度条件下砂土-土工合成材料界面的摩擦性能、剪切带厚度。Liu等<sup>[16]</sup>研究了不同抗拉强度、开孔率和孔径类型的土工格栅与不同类型土体的界面抗剪强度,并提出了一种计算土工格栅横肋承载阻力的简单模型。在众多因素中,含水率能够体现降雨对土质特性的作用,是影响土体与筋土界面剪切特性的重要因素之一。尹光志等<sup>[17]</sup>研究了密实度、含水率及竖向荷载对筋土界面作用特性的影响,分析细尾矿加筋的作用机制,研究表明含水率对界面似摩擦系数有较大影响。王协群等<sup>[18]</sup>研究了黏土、砂砾石和4种不同类型的土工格栅之间的界面剪切特性,分析了含水量、剪切速度等因素的影响,提出了改进的筋土界面强度模型。徐林荣等<sup>[19]</sup>通过拉拔试验发现含水量对膨胀土-格栅界面摩擦阻力系数影响较大。Abu-Farsakh等<sup>[20]</sup>通过大型直剪试验研究了含水率及干密度对砂土、黏土加筋效果的影响,并提出了加筋时黏土参数的合理取值。Ferreira等<sup>[21]</sup>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,结果表明双向土工格栅加筋效果最佳,土体密度及含水率影响较大。

综上所述,目前在筋土界面研究领域,探究含水率对花岗岩残积土-格栅界面剪切特性影响的研究较少,缺乏系统深入研究不同含水率下花岗岩残积土-格栅界面剪切特性和土工格栅加筋效果。因此本文利用大型直剪仪对花岗岩残积土-格栅界面展开一系列单调直剪试验,探究含水率对筋土界面剪切特性曲线、抗剪强度、剪缩剪胀等方面的影响。

## 1 试验设备、材料及方案

### 1.1 试验设备

试验设备是型号为HM-5780.3F的室内大型直剪仪(图1)。直剪仪可以按照恒定速率对下剪切盒施加应力或应变。试验数据通过传感器采集,机载软件进行实时记录并显示。

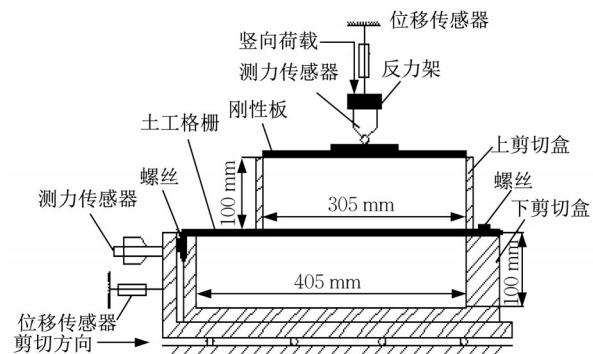


图1 大型直剪仪

Fig. 1 Large scale direct shear apparatus

### 1.2 试验材料

试验材料包括向聚丙烯土工格栅和花岗岩残积土(图2)。土工格栅技术指标见表1。试验所用的花岗岩残积土取自广州市增城区,呈褐色、黄褐色,呈土状,含有较多中粗砾粒及碎石,偶见块石,其基本物理指标见表2。颗粒级配曲线如图3所示,不均匀系数和曲率系数分别为38.1、0.42。其中粒径小于0.075mm土粒质量分数占45.15%,粒径大于2mm的占19.62%。

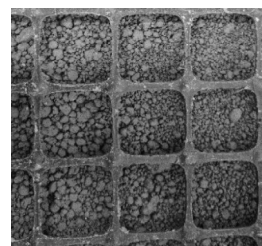


图2 试验材料与筋材

Fig. 2 Test material and geogrid

表 1 土工格栅技术指标  
Tab. 1 Technical indicators of geogrid

土工合成材料	单位面积质量/(g·m <sup>-2</sup> )	网孔尺寸/mm×mm	极限延伸率/%	极限抗拉强度/(kN·m <sup>-1</sup> )
土工格栅	330	35×35	19.8	46.5

表 2 花岗岩残积土基本物理性质  
Tab. 2 Physical properties of granite residual soil

天然含水率/%	最优含水率/%	干密度/(g·m <sup>-3</sup> )	土粒相对密度	孔隙比	塑限/%	液限/%
22.9	14.7	1.55	2.66	0.7	22.6	40

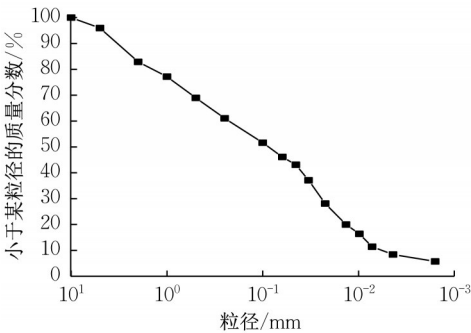


图 3 颗粒级配曲线  
Fig. 3 Curve of particle distribution

1.3 试验方案

在实际工程中,加筋结构的回填土常就近取材,而广泛分布于我国东南沿海地区的花岗岩残积土就

可作为回填土应用于加筋土结构,该土体风化剧烈,遇水极易软化,含水率对其物理力学性质影响较大。因此,对花岗岩残积土和残积土-格栅界面进行了一系列单调直剪试验,研究含水率和竖向应力对界面剪切特性和加筋效果的影响。根据花岗岩残积土相关含水率参数及工程中边坡竖向应力的分布对含水率及竖向应力进行取值,本试验对残积土和残积土-格栅界面在不同含水率(13%、19%、25%、32%)和不同竖向应力(50、100、150、200kPa)下进行单调剪切试验。不同含水率下土颗粒形态如图 4 所示。为控制各组试样干密度均匀一致,花岗岩残积土按一定的干密度计算每组试验的用量,土体分层装样并击实至指定高度,土工格栅由螺栓固定于上下剪切盒之间,水平剪切速率为 1mm·min<sup>-1</sup>。

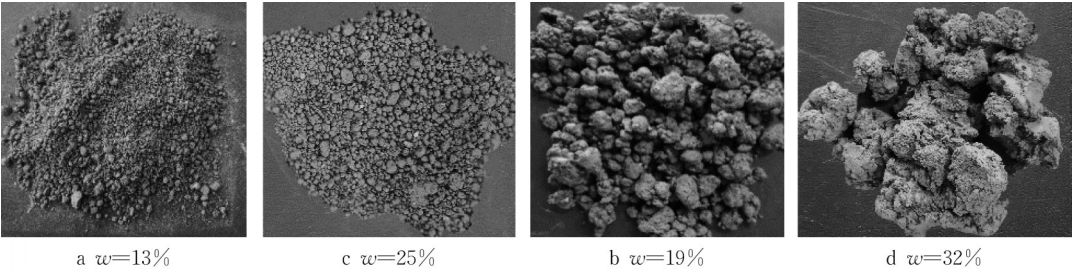


图 4 不同含水率下土颗粒形态  
Fig. 4 Soil particle morphology at different water contents

2 试验结果分析

2.1 筋土界面剪应力-剪切位移关系

为分析加筋的作用,对比图 5 和图 6。显著差异在于:含水率为 13%、竖向应力为 50kPa 时,残积土剪应力随剪切位移的升高先增大后降低,呈现剪切软化趋势,而从图 6a 可见,同条件下筋土界面在剪切后期的降幅微弱,这说明土工格栅加筋对于提高残积土整体剪切强度有一定的促进作用,能有效缓解剪应力达到峰值后大幅降低的剪切软化趋势。

从图 6 可见,在 50kPa 竖向应力作用下,含水率

为 13% 时的筋土界面剪应力随着剪切位移的增大先逐渐升高,当剪切位移超过 20mm,剪应力小幅下降,剪切软化现象较弱。筋土界面在其余含水率和竖向应力条件下剪应力先大幅升高后趋于稳定或仍小幅上升,主要呈现出剪切硬化特征。低含水率土样土颗粒小且分散(图 4a),装样击实后已非常密实,在剪切过程中,剪切面附近土颗粒发生滑移和错动,土体变疏松,而在低竖向应力作用下界面受压实作用弱,此时剪切作用对界面强度的弱化作用更强,因此在 50kPa 竖向应力作用下筋土呈现一定的剪切软化特征。当竖向应力提高至 100kPa 及以上,压实作



用明显提高,易发生剪切硬化。中高含水率下筋土界面发生剪切硬化,这是因土颗粒在水的作用下易因结合水膜及胶结作用而团聚在一起,形成大小不

一的碎球体<sup>[22]</sup>(图4b),孔隙大且含水率越高,土样初始孔隙率越高,在竖向应力以及剪切作用下,颗粒间孔隙逐渐减小,土体逐渐密实,界面强度有所提高。

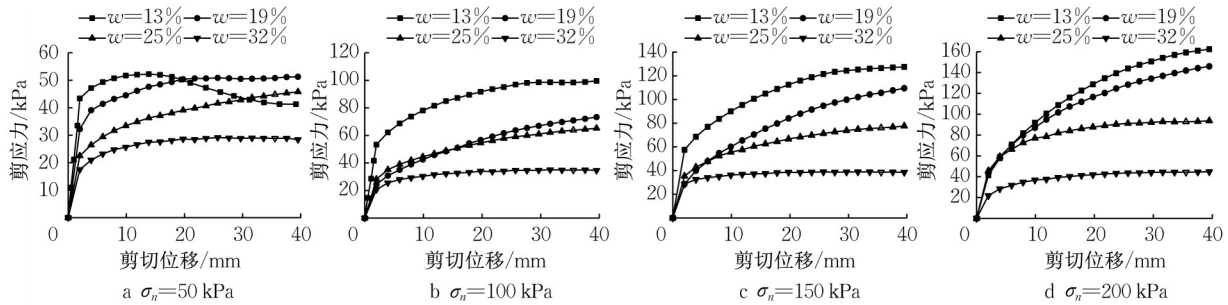


图5 不同含水率残积土剪应力-剪切位移关系

Fig. 5 Curve of interface shear stress-shear displacement of residual soil at different water contents

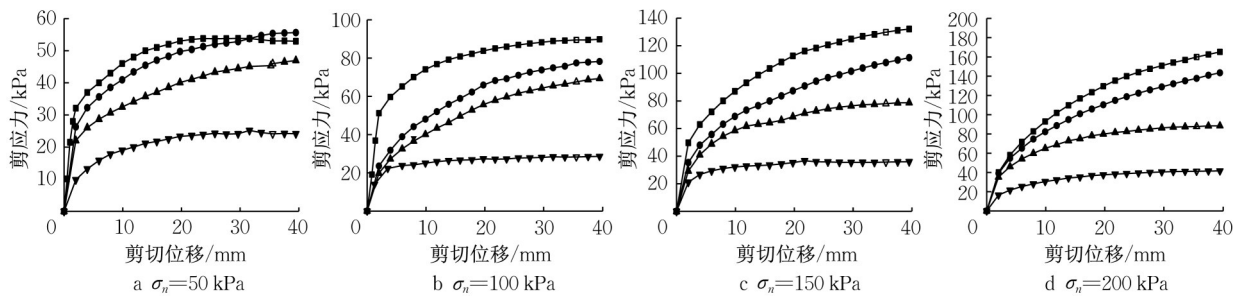


图6 不同含水率筋土界面剪应力-剪切位移关系

Fig. 6 Curve of shear stress-shear displacement of reinforced soil at different water contents

## 2.2 抗剪强度分析

由图7可见,随着含水率的升高,筋土界面的抗剪强度呈递减趋势。为反映含水率从13%升至32%时抗剪强度降低的程度,量化水分对筋土界面抗剪强度的弱化作用,将含水率为32%和13%下得到的剪切强度相除,得到50、100、150、200kPa竖向应力下的比值分别为0.48、0.32、0.28、0.27。可以看出,水分对界面抗剪强度的弱化作用十分明显。此外,竖向应力越高,弱化作用越强,而高含水率下竖向应力影响较小。水分对土颗粒间胶结连接、土颗粒与土工格栅接触均有明显的润滑作用,宏观表现为界面抗剪强度的显著降低。

在中高竖向应力下(>50kPa),含水率为25%时的筋土界面抗剪强度降幅较小。这可能是因为含水率为25%时,土体孔隙率大,在中高竖向应力的作用下,土样密实度显著提高,使土颗粒与颗粒、土与土工格栅的相互作用增强,能够减缓抗剪强度的下降。土体中的水分大多通过非饱和土中细颗粒土基质吸力的作用而吸持于土颗粒表面,含水率的增大使土颗粒表面结合水膜变厚,颗粒间胶结力逐渐弱化<sup>[23]</sup>。当含水率增长至32%时,土体已经接近饱

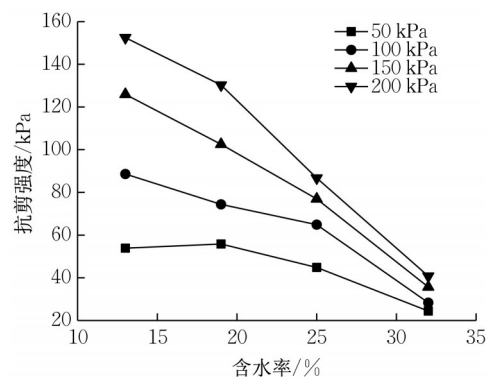


图7 不同竖向应力下筋土界面抗剪强度随含水率变化规律

Fig. 7 Shear strength versus water content at different normal stresses

和状态,土体孔隙间存在较多的自由水,且在竖向应力下无法较好地排出,因此抗剪强度降幅仍较大。

利用Liu等<sup>[16]</sup>提出的界面抗剪强度系数(式(1))以定量地研究不同竖向应力下含水率对土工格栅加筋效果的影响。

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{geogrid}}}{\tau_{\text{soil}}} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为界面抗剪强度系数; $\tau_{\text{geogrid}}$ 为筋土界面抗剪

强度; $\tau_{\text{soil}}$ 为土体抗剪强度。

图8试验数据显示,界面抗剪强度系数的变化范围为0.81~1.10。此外可见,含水率为19%和25%土样的界面抗剪强度系数整体上高于含水率为13%和32%的土样,可见19%~25%含水率下筋土界面的加筋效果较好。含水率为13%和32%时, $\alpha$ 值整体上随着竖向应力的升高而升高,而19%和25%含水率下 $\alpha$ 值随着竖向应力的升高而降低。

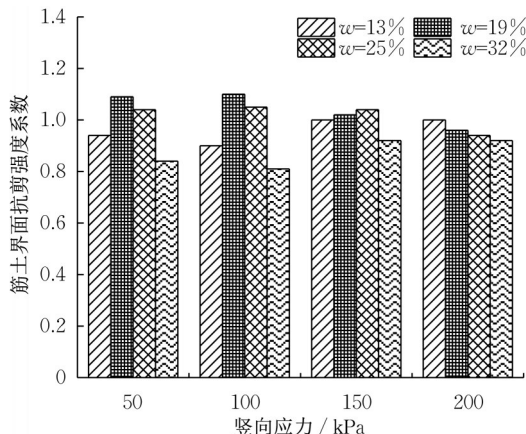


图8 不同含水率下筋土界面抗剪强度系数

Fig. 8 Interface shear strength coefficient of reinforced soil at different water contents

将同一含水率土体在4种竖向应力下4个值取平均值,可得含水率为13%、19%、25%、32%土体的平均值分别为0.96、1.04、1.02、0.87,变化幅度分别为8.30%、-1.92%、-14.70%。可见,随含水率的增加,加筋效果先增大后减小,界面加筋效果降幅增大。当土体含水率达到32%时,4种竖向应力下的值均小于1.0,表明土体接近饱和时土工格栅加筋增强效果不佳,筋土界面可成为潜在滑动面,反而进一步加剧水的弱化效果使筋土界面抗剪强度下降。

### 2.3 抗剪强度参数

由图9可见,筋土界面黏聚力随含水率升高先增后减,在含水率25%时达到峰值。当含水率为19%~32%时,筋土界面黏聚力整体变化趋势与土体变化规律相似。其中19%和25%含水率下筋土界面黏聚力明显大于土体内部黏聚力,说明土工格栅横肋阻力发挥了良好作用。13%和32%含水率下筋土界面黏聚力明显小于土体黏聚力,这可能由于土颗粒间的相互作用力强于土颗粒与筋材间的作用力,且筋土界面作用力受水分弱化效果更显著。

由图10可见,不同含水率下筋土界面内摩擦角变化范围为6.1°~33.7°,降幅约81.9%,表明筋土

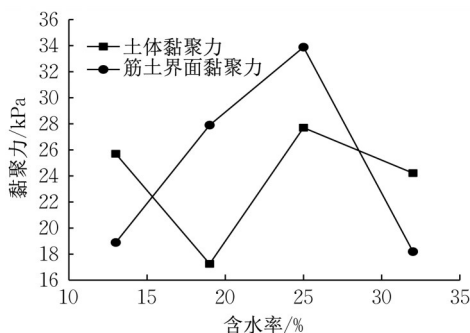


图9 黏聚力与含水率关系

Fig. 9 Cohesion versus water content

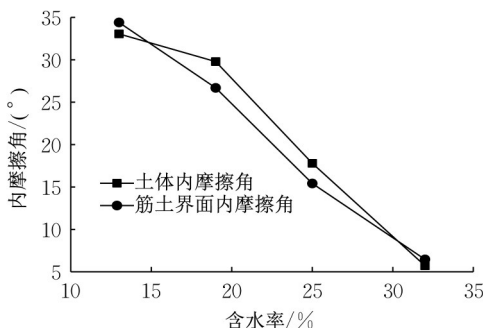


图10 内摩擦角与含水率关系

Fig. 10 Internal friction angle versus water content

界面内摩擦角随含水率的升高显著降低。当土体含水率升高,土中较粗颗粒周围被细颗粒所形成的“泥浆”包裹<sup>[23]</sup>,粗颗粒表面变光滑,土颗粒间相互作用减弱。对比筋土界面与土体内摩擦角的差异,可见在13%和32%含水率时二者内摩擦角相差不大,这可能因含水率为13%时土体最为密实,土颗粒间摩擦特性均较好,内摩擦角已达到一个较高值,而加筋后土颗粒与格栅的咬合作用能使内摩擦角有小幅提升。含水率为32%时,土体接近饱和,水的润滑作用最强,加筋效果微弱。含水率为19%和25%时,筋土界面内摩擦角更小,这可能由于随含水率进一步升高,土体颗粒间形成一定厚度的结合水膜,筋材与土体相互作用减弱,而筋土界面对水分润滑作用更为敏感,滑动摩擦降幅更大,导致内摩擦角较小。

### 2.4 体变特性分析

在剪切过程中,试样底面积保持不变,因此竖向位移量可反映剪切过程中的体积应变。图11中最终竖向位移为正值时代表土体发生剪缩,反之为剪胀。由图可见,筋土界面体积应变以剪缩为主,只有含水率为13%的筋土界面在50kPa竖向应力条件下发生了剪胀,这是因为剪切面附近土颗粒松散,低应力下土颗粒难充分填充土样剪切产生的孔隙<sup>[23]</sup>。含

水率从13%升至25%,筋土界面的竖向位移量大致呈递增趋势。含水率越高,土样的初始孔隙越大,压缩性强,土颗粒受剪切作用而移动,孔隙率减小,土样逐渐密实,剪缩现象更为明显。由图12可见,各含水率界面竖向位移量随着竖向应力的升高而升

高。在高含水率(32%)条件下,最终剪缩量整体较小,这是因为接近饱和时土体由土颗粒和自由水组成,由于试验条件的限制导致这些自由水无法较好地排出,而固体土颗粒与水的压缩量微小,宏观表现为剪缩量较小。

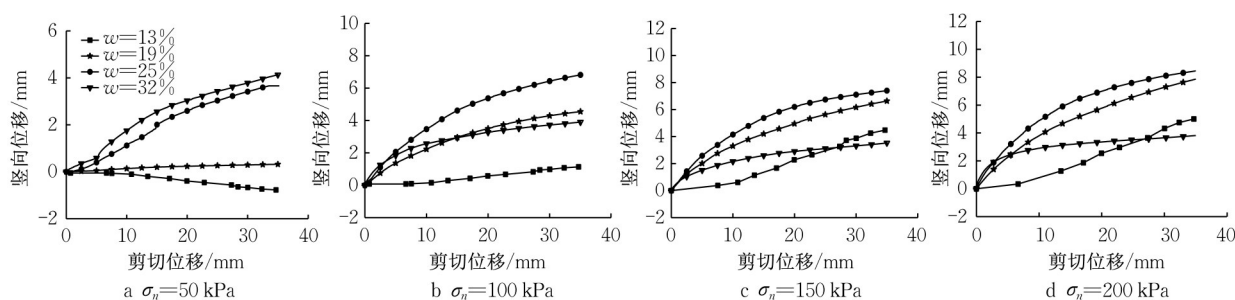


图11 不同含水率下筋土界面竖向位移-剪切位移曲线

Fig. 11 Curves of vertical displacement-shear displacement at different water contents

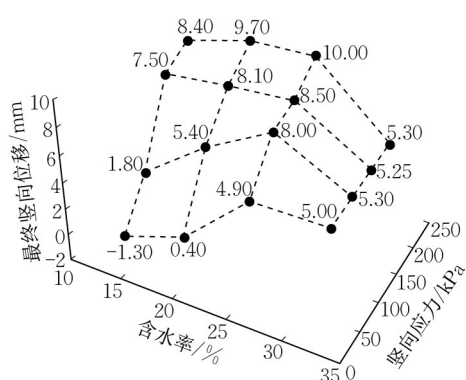


图12 不同含水率条件下筋土界面最终竖向位移

Fig. 12 Final vertical displacement of reinforced soil interface at different water contents

### 3 结论

(1)含水率为13%、竖向应力为50kPa时,花岗岩残积土-格栅界面在剪切过程中剪应力先增加后小幅下降,其余条件下呈递增趋势;含水率为13%、竖向应力为50kPa时,花岗岩残积土-格栅界面在剪切过程中先发生剪胀,其他条件下筋土界面均只发生剪缩。

(2)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,且含水率为19%~25%时土工格栅加筋效果较好,而当土体接近饱和含水率时加筋效果不佳。

(3)筋土界面抗剪强度随着含水率的升高大幅降低,筋土界面黏聚力随着含水率的增加先增大后减小,内摩擦角随着含水率的升高显著降低。

### 作者贡献声明:

刘飞禹:负责论文的研究思路,方案,及整体框架的指导,参与论文写作、修改的全过程。

陈舒祺:负责进行试验及数据分析,论文撰写。

孙宏磊:参与论文方案讨论,并指导试验结果分析,论文修改。

刘洪波:负责现场指导和协调,策划和设立横向课题,参与论文的审定和修改讨论。

### 参考文献:

- [1] WANG Jun, LIU Feiyu, WANG Pan, *et al.* Particle size effects on coarse soil-geogrid interface response in cyclic and post-cyclic direct shear tests [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(6): 854.
- [2] 徐超, 陈洪帅, 石志龙, 等. 筋-土界面力学特性的水平循环剪切试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1553.  
XU Chao, CHEN Hongshuai, SHI Zhilong, *et al.* Research on the mechanical behavior of soil-reinforcement interface by horizontal cyclic shear test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1553.
- [3] 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(9): 1902.  
AN Ran, KONG Lingwei, LI Chengsheng, *et al.* Strength attenuation and microstructure damage of granite residual soils under hot and rainy weather [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1902.
- [4] 茆大炜, 杜少华, 李地元, 等. 基于大型三轴试验的蚀变花岗岩力学行为及浸水湿化研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1819.  
MAO Dawei, DU Shaohua, LI Diyuan, *et al.* Mechanical



- behaviors and wetting-induced deformation of metamorphic granite based on large-scale triaxial test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1819.
- [5] 李凯, 王志兵, 韦昌富, 等. 饱和度对风化花岗岩边坡土体抗剪特性的影响[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 267.
- LI Kai, WANG Zhibing, WEI Changfu, *et al.* Effect of saturation on shear strength characteristics of weathered granite slope soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 267.
- [6] 尚彦军, 王思敬, 岳中琦, 等. 原状全风化花岗岩三轴实验CT监测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(3): 365.
- SHANG Yanjun, WANG Sijing, YUE Zhongqi, *et al.* Triaxial test of undisturbed completely decomposed granite under CT monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(3): 365.
- [7] WEI Yujie, WU Xinliang, XIA Jinwen, *et al.* The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 187: 50.
- [8] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 颗粒粒径对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. *岩土力学*, 2017, 38(1): 150.
- LIU Feiyu, WANG Pan, WANG Jun, *et al.* Influence of soil particle size on monotonic and cyclic direct shear behaviors of geogrid-soil interface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 150.
- [9] 刘飞禹, 林旭, 王军. 砂土颗粒级配对筋土界面抗剪特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2575.
- LIU Feiyu, LIN Xu, WANG Jun. Influence of particle-size gradation on shear behavior of geosynthetics and sand interface [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2575.
- [10] 刘飞禹, 武文静, 符洪涛, 等. 基于3D打印的立体格栅网筋土界面剪切特性研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 60.
- LIU Feiyu, WU Wenjing, FU Hongtao, *et al.* Research on shear behavior of 3D printed three-dimensional geogrid-sand interface[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 60.
- [11] 刘飞禹, 胡惠丽, 王军, 等. 粒孔比对筋-土界面循环剪切特性的影响[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(12): 115.
- LIU Feiyu, HU Huili, WANG Jun, *et al.* Influence of aperture ratio on cyclic shear behavior of geogrid-soil interface[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(12): 115.
- [12] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 不同剪切速率下格栅-土界面循环剪切及其后直剪特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 387.
- LIU Feiyu, WANG Pan, WANG Jun, *et al.* Cyclic and post-cyclic shear behavior of sand-geogrid interface under different shear rates [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 387.
- [13] 徐超, 石志龙. 剪切试验中筋土界面土颗粒运动的细观量测[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(11): 1605.
- XU Chao, SHI Zhilong. Micro-measurement of soil particle movement in geogrid-soil interface direct shear test[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(11): 1605.
- [14] 周健, 唐群艳, 王家全, 等. 土工格栅横肋与砂土接触面的细观试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(8): 1128.
- ZHOU Jian, TANG Qunyan, WANG Jiaquan, *et al.* Mesoscopical study on interface between transvers rib of geogrid and sand [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(8): 1128.
- [15] LASHKARI A, JAMALI V. Global and local sand-geosynthetic interface behavior [J]. *Géotechnique*, 2021, 71(4): 346.
- [16] LIU Chianan, HO Yuhsien, HUANG Jianwen. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 27(1): 19.
- [17] 尹光志, 张东明, 魏作安, 等. 土工合成材料与细粒尾矿界面作用特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 426.
- YIN Guangzhi, ZHANG Dongming, WEI Zuoan, *et al.* Testing study on interaction characteristics between fine grained tailings and geosynthetics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 426.
- [18] 王协群, 张俊峰, 邹维列, 等. 格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(4): 133.
- WANG Xiequn, ZHANG Junfeng, ZOU Weilie, *et al.* A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(4): 133.
- [19] 徐林荣, 凌建明, 刘宝琛. 土工格栅与膨胀土界面摩擦阻力系数试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004(2): 172.
- XU Linrong, LING Jianming, LIU Baochen. Experiment on interface friction coefficient parameters between geogrids and expansive soil [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2004(2): 172.
- [20] ABU-FARSAKH M, CORONEL J, TAO M J. Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(7): 540.
- [21] 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.
- [22] 赵蕊, 左双英, 王嵩, 等. 不同含水量贵阳重塑红黏土三轴抗剪强度试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(5): 90.
- ZHAO Rui, ZUO Shuangying, WANG Song, *et al.* Experiment and mechanism analysis of water contents on triaxial shear strength of the remodeled red clay of Guiyang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(5): 90.
- [23] 刘龙旗, 毛雪松, 肖亚军, 等. 含水率对坡积路基填料剪切特性影响试验研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 126.
- LIU Longqi, MAO Xuesong, XIAO Yajun, *et al.* Effect of water content on shear characteristics of landslide deposit subgrade fillers[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 126.