

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.053



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



不同含水率花岗岩残积土-格栅界面的 循环剪切特性

周卫东¹, 陈舒祺², 刘飞禹², 刘洪波³

(1. 广州环保投资集团有限公司, 广州 511300; 2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444;
3. 广州环投增城环保能源有限公司, 广州 511300)

摘要: 含水率对土工格栅加筋花岗岩残积土力学特性的影响较大, 为研究不同含水率下花岗岩残积土-格栅界面的循环剪切特性, 利用室内大型直剪仪开展循环剪切试验, 分析 4 种含水率 (13%、19%、25%、32%)、3 种竖向应力 (50、100、150 kPa)、4 种剪切频率 (0.2、0.5、1.0、2.0 Hz) 和 4 种剪切幅值 (5、10、15、20 mm) 下筋土界面的剪应力-剪切位移曲线、抗剪强度、剪切刚度、体积应变。结果表明: 含水率为 32% 时, 土体饱和, 筋土界面峰值剪应力和剪切刚度在循环剪切过程中先增加后降低, 50、100、150 kPa 竖向应力作用下峰值剪应力初始增幅分别为 6.2%、22.3%、33.0%, 表明竖向应力越大筋土界面初期增幅越大, 而非饱和含水率下筋土界面呈现剪切软化的特征; 不同竖向应力下筋土界面循环抗剪强度与含水率均呈负相关; 筋土界面在循环剪切作用下发生剪缩, 含水率为 13%、19%、25%、32% 时, 筋土界面最终剪缩量分别为 4.6、7.7、8.6、7.2 mm, 表明剪缩量随着含水率的升高先增大后减小; 各含水率下, 筋土界面最大剪切刚度随剪切频率的升高先减小后增大, 随剪切幅值的增大而减小, 0.5 Hz 的剪切频率对筋土界面剪切刚度的弱化作用最强。

关键词: 筋土界面; 含水率; 花岗岩残积土; 循环剪切; 剪切刚度

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)03-0058-08

Cyclic shear characteristics of granite residual soil-geogrid interface with different water contents

ZHOU Weidong¹, CHEN Shuqi², LIU Feiyu², LIU Hongbo³

(1. Guangzhou Environmental Protection Investment Group Co., Ltd., Guangzhou 510330, P. R. China;
2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China; 3. GZEPI Zengcheng
Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou 511300, P. R. China)

Abstract: Water content has a great influence on the mechanical properties of granite residual soil reinforced with geogrids. In order to study the cyclic shear characteristics of granite residual soil-geogrid interface under different water contents, a series of cyclic shear tests were carried out by large-scale indoor direct shear

收稿日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金 (52078285、52378355)

作者简介: 周卫东 (1968-), 男, 高级工程师, 主要从事工程管理和环保工程研究, E-mail: zhouweidong@gzepi.com.cn。

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

Received: 2023-02-03

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52078285, 52378355)

Author brief: ZHOU Weidong (1968-), senior engineer, main research interest: engineering management and environmental engineering, E-mail: zhouweidong@gzepi.com.cn.

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

apparatus. The shear stress-shear displacement curves, shear strength, shear stiffness and volume of the soil-reinforced interface were analyzed under four values of water content (13%, 19%, 25%, 32%), three values of normal stress (50, 100, 150 kPa), four shear frequencies (0.2, 0.5, 1, 2 Hz) and four shear amplitudes (5, 10, 15, 20 mm). The test results show that: When the soil is saturated with water content of 32%, the peak shear stress and shear stiffness of the interface increase first and then decrease during the cyclic shearing process. The initial increase of the peak shear stress under the normal stress of 50, 100 and 150 kPa is 6.2%, 22.3% and 33.0%, respectively, indicating that the increase of the normal stress is greater than that of the interface at the initial stage. The interface of soil-reinforced unsaturated soil shows shear softening characteristics. Under different normal stresses, the cyclic shear strength of the interface is negatively correlated with the water content. When the water content is 13%, 19%, 25% and 32%, the final shear shrinkage of the interface is 4.6, 7.7, 8.6 and 7.2 mm, respectively, indicating that the shear shrinkage increases first and then decreases with water content. At each water content, the maximum shear stiffness of the interface decreases first and then increases with the increase of shear frequency, and decreases with the increase of shear amplitude. The shear frequency of 0.5 Hz has the strongest weakening effect on the interface shear stiffness of the interface.

Keywords: reinforced soil interface; water content; granitic residual soil; cyclic shearing; shear stiffness

加筋土结构在边坡工程、道路工程、水利工程中应用广泛。回填土的性质和筋土界面相互作用特性是影响加筋土结构稳定性的关键因素。在实际工程中,回填土常就近取材,广泛分布于中国东南沿海地区的花岗岩残积土常常作为回填土用于加筋土结构。花岗岩残积土属于黏性土,内部具有较多裂隙、易扰动,遇水易发生变形和软化,含水率对其物理力学性质影响较大^[1]。

针对含水率对筋土界面力学性能影响的研究已取得一些成果。Abu-Farsakh等^[2]、Ferreira等^[3-4]针对黏土-土工合成材料界面进行了单剪试验,研究了含水率、干密度以及不同类型筋材对筋土界面剪切特性的影响,结果表明,含水率增加时界面抗剪强度大幅降低。Hatami等^[5]、Namjoo等^[6]通过直剪试验和拉拔试验,研究了含水率对土体-编织土工布界面和砂土-格栅界面剪切特性的影响,试验发现筋土界面抗剪强度参数随着含水率的升高而降低。Bergado等^[7]根据垃圾填埋场真实条件模拟了复合衬砌系统-黏土界面,并研究干湿条件、土工织物和土工膜对界面直剪特性的影响,发现不同条件下衬砌系统均有较好的稳定性。

考虑到地震、车辆等动荷载的作用,研究筋土界面动剪切特性具有重要意义。刘飞禹等^[8-9]、应梦杰等^[10]和徐超等^[11]对粗颗粒-格栅界面、砂-格栅界面进行了系列循环剪切试验,研究了剪切速率、法向循环荷载频率、粒孔比、法向应力等因素的影响。Ferreira等^[12]、周斌等^[13]、Cen等^[14-15]及Alaie等^[16]分别研究了花岗岩残积土-土工格栅界面、砂-土工膜界面及EPS砂混合物-格栅界面动剪切特性受剪切幅值、剪切频率等因素的影响,发现剪切频率对界面

剪切刚度的影响较小,剪切幅值的影响较大,循环应力历史有利于界面抗剪强度的增加。Nye等^[17]对黏土-土工合成材料界面进行了循环剪切试验,研究不同剪切幅值、剪切频率、循环次数和波形下界面的动剪切特性,结果表明,循环剪切幅值对界面剪切特性影响较大。Wang等^[18-19]和刘飞禹等^[20-21]开展了单剪、循环剪和循环后直剪试验,研究颗粒粒径、粒孔比、剪切速率、循环次数、循环应力历史等因素对筋土界面动、静剪切特性的影响。Liu等^[22]和Ying等^[23]针对颗粒形状对筋土界面动剪切特性的影响进行了试验研究,利用图像处理技术将颗粒形状进行量化,结果表明,颗粒形状对界面剪切特性和体变特性的影响显著。

综上所述,在筋土界面研究领域,针对含水率对筋土界面剪切特性影响的研究大多在静力条件下进行。而在筋土界面动剪切特性研究中,学者们探究了动力加载条件、土体特性和筋材特性等因素对界面剪切特性的影响,并取得了丰富的研究成果。在土体特性影响因素研究中,对土颗粒粒径、形状、颗粒级配等因素的研究较多,而考虑含水率因素影响的研究较为缺乏。笔者利用室内大型直剪仪,进行循环剪切试验,探究含水率、剪切幅值及剪切频率等因素对花岗岩残积土-格栅界面动剪切特性的影响。

1 试验设备、材料及方案

1.1 试验设备

采用型号为RAW-60/2的电液伺服动态大型直剪仪(图1),其上剪切盒尺寸为600 mm×200 mm×50 mm,下剪切盒尺寸为800 mm×200 mm×50 mm。

该直剪仪通过传感器和数据采集系统为试验剪切过程中数据的完整性和有效性提供保障。

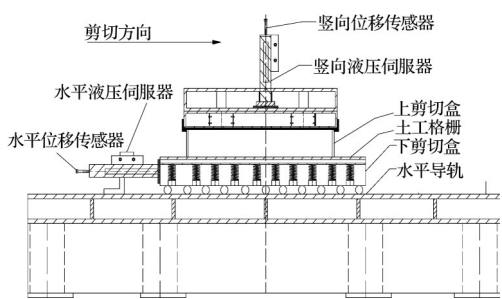


图 1 大型直剪仪

Fig. 1 Large scale direct shear apparatus

1.2 试验材料

试验筋材为双向聚丙烯土工格栅(图 2),其技术指标如表 1 所示。试验土样为广州市增城区的花岗岩残积土,试验室定名为砂质黏性土。不同含水率的试验土样由天然状态下的土样烘干处理后加不同水量配置得到,即筛除天然状态下土样中的杂质后,放置在烘箱中,以 105℃ 的温度烘干 12 h,其间将土样拿出后轻轻敲散,防止完全烘干后成硬块而无法敲散。计算不同含水率的试验土样所需的干土质量和用水量,用电子秤称量对应的干土和水,将其混合配置成一定含水率的土样。不同含水率下的土样外观、颗粒形态如图 3 所示,呈褐色、黄褐色,含中粗砾粒及碎石较多,偶见块石,物理性质指标如表 2 所示。土体颗粒级配曲线如图 4 所示,不均匀系数和曲率系数分别为 38.1、0.42。

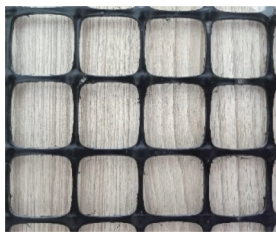


图 2 双向聚丙烯土工格栅

Fig. 2 Bidirectional polypropylene geogrid

表 1 土工格栅技术指标

Table 1 Technical parameters of geogrid

单位面积质量/ (g/m ²)	网孔尺寸	极限延伸 率/%	极限抗拉 强度/(kN/m)
330	35 mm×35 mm	19.8	46.5

表 2 花岗岩残积土物理参数

Table 2 Physical parameters of granite residual soil

天然含 水率/%	最优含水 率/%	干密度/ (g/m ³)	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

1.3 试验方案

根据含水率相关物理指标以及工程中边坡竖

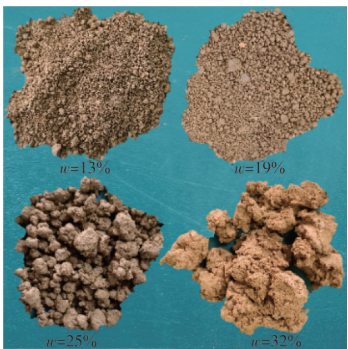


图 3 不同含水率的残积土

Fig. 3 Residual soil with different water content

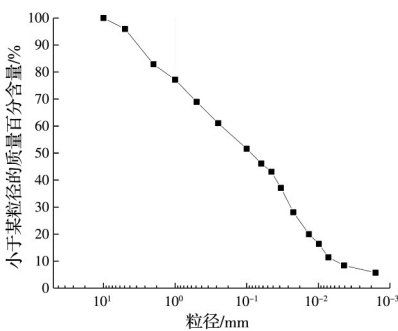


图 4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle distribution curve

向应力的分布,对含水率及竖向应力进行合理取值。参考 Chang 等^[24]的研究,在直剪试验中模拟一般地震可以采用频率为 1 Hz 的正弦波循环加载。试验中动荷载采用正弦波,对残积土-格栅界面循环剪切 100 次,具体试验方案如表 3 所示。为控制各组试样干密度一致,采用分层装样,每次装填厚度 25 mm,分 4 次装填。土工格栅置于上下剪切盒之间,用螺栓和卡扣固定在下剪切盒两端。

表 3 循环剪切试验方案

Table 3 Cyclic shear test plan

含水率/%	竖向应力/kPa	剪切频率/Hz	剪切幅值/mm
	50、100、150	1	10
13、19、25、32	100	0.2、0.5、1、2	10
	100	1	5、10、15、20

2 试验结果分析

2.1 含水率对剪切位移-剪应力曲线的影响

剪切频率为 1 Hz,剪切幅值为 10 mm,竖向应力为 50 kPa 时,不同含水率和竖向应力作用下筋土界面剪应力-剪切位移曲线如图 5 所示。图 6 为 100、150 kPa 下含水率为 32% 的筋土界面剪应力-剪切位移曲线。含水率为 13%、19%、25% 的筋土界面峰值剪应力与循环次数呈负相关,而含水率为 32% 的筋土界面峰值剪应力随着循环次数的增加先升高后降低。在剪切过程中,低含水率试样经简

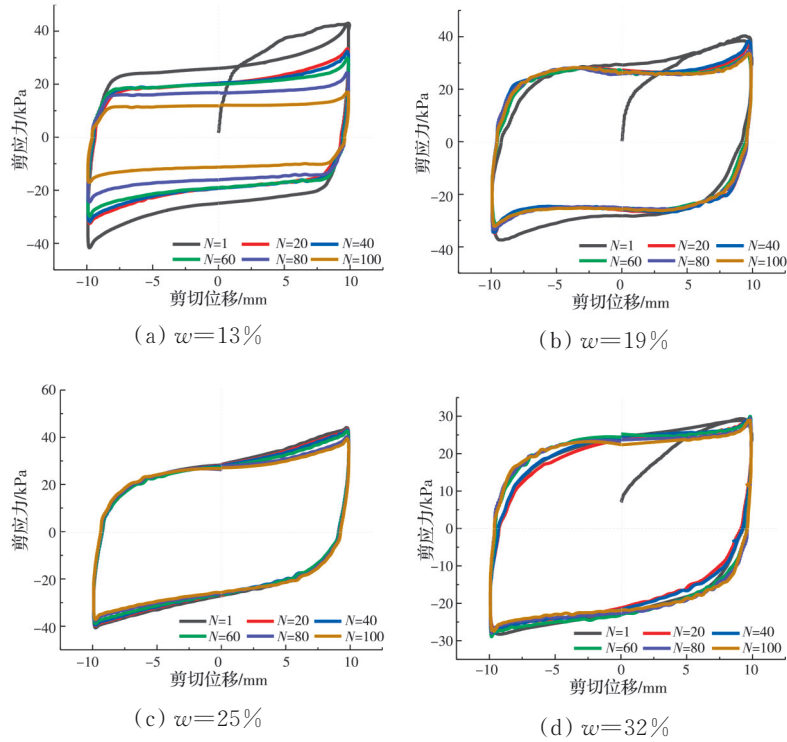


图5 竖向应力 50 kPa 下筋土界面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 5 Interface shear stress-shear displacement curves of reinforced soil under normal stress of 50 kPa

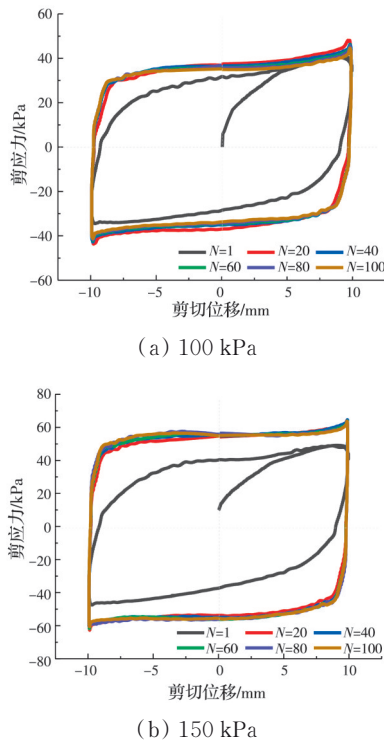


图6 不同竖向应力下 32% 含水率筋土界面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Interface shear stress-shear displacement curves of 32% water content reinforced soil under different normal stress

短的压密后便开始抵抗剪切作用^[24],剪切面在低竖向应力作用下受压实作用弱,因此,50 kPa 竖向应力作用下含水率越低的筋土界面峰值剪应力下降越

显著,而 100 kPa 竖向应力作用下峰值剪应力降幅减小。当竖向应力进一步增大,筋土界面相互作用愈强,界面受剪切弱化作用更显著,表现为峰值剪应力降幅更大。土体含水率高时,土颗粒在水的作用下形成团聚体,装填后试样初始孔隙率高,压缩性强,压缩空间大,竖向应力使土体被挤密压实,土颗粒间和筋土间相互作用更充分,因此,在剪切初期,含水率为 32% 的筋土界面峰值剪应力升高,50、100、150 kPa 竖向应力作用下峰值剪应力初始增幅分别为 6.2%、22.3%、33.0%,这可能是因为竖向应力越大,压实效果越显著,筋土界面因压实作用产生的峰值剪应力初期增幅越大。

2.2 含水率对抗剪强度及参数的影响

剪切频率为 1 Hz、剪切幅值为 10 mm 时,不同含水率和竖向应力下筋土界面的循环抗剪强度如图 7 所示。由图 7 可知,不同竖向应力下筋土界面循环抗剪强度呈现相同的趋势,即随着含水率的增大,界面抗剪强度减小。当含水率从 13% 升至 32%,竖向应力 σ_n 为 50、100、150 kPa 的筋土界面抗剪强度分别从 43 kPa 降至 29.78 kPa、从 75 kPa 降至 48.4 kPa、从 114.9 kPa 降至 65.3 kPa。竖向应力 50 kPa 下筋土界面抗剪强度参数随含水率的变化规律如图 8 所示。由图 8 可知,循环摩擦角随着含水率的升高而不断降低,循环黏聚力先升后降,在 25% 含水率时达到峰值黏聚力。在低竖向应力(50 kPa)

作用下,界面剪切作用弱,25%含水率时界面的高黏聚力能有效增强界面抗剪强度。

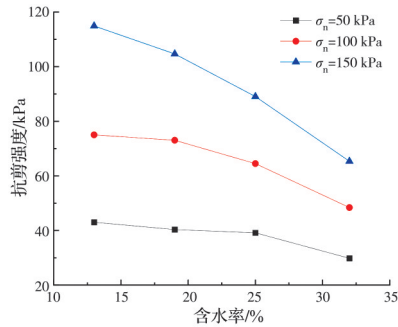


图 7 不同含水率下筋土界面的循环抗剪强度

Fig. 7 Cyclic shear strength of reinforced soil interface under different water content

将花岗岩残积土-格栅界面在循环剪切和单调直剪下的抗剪强度参数随含水率的变化规律进行对比,如图 8 所示。从图 8 可以看出,二者变化趋势一致:界面内摩擦角随着含水率的升高分别降低了 45.2% 和 81.2%;界面黏聚力随着含水率的升高先增后降,在 25% 含水率时达到峰值黏聚力。二者差异在于循环黏聚力整体低于静黏聚力,循环内摩擦角整体高于静内摩擦角。这可能是因为相比于单调直剪,循环剪切过程能让土颗粒与土颗粒、土颗

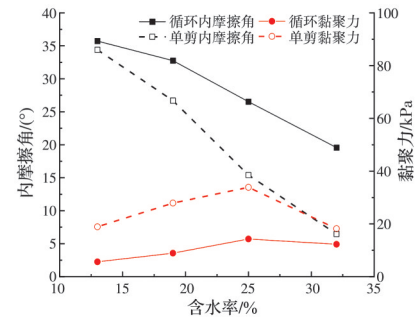


图 8 筋土界面抗剪强度参数随含水率的变化规律

Fig. 8 The variation law of interface shear strength parameters of reinforced soil with water content

粒与土工格栅的相互作用更充分地发挥,而含水率越高,试样孔隙率越高,压缩挤密空间大,循环剪切的上述效果就越明显。

2.3 体变特性

剪切过程中,试样的剪切面积保持不变,竖向位移量能反映剪切过程中的体积应变。以竖向应力 100 kPa 为例,不同含水率下筋土界面竖向位移-剪切位移曲线如图 9 所示。含水率为 13%、19%、25%、32% 时筋土界面最终剪缩量为 4.6、7.7、8.6、7.2 mm,竖向位移随着含水率的增加先增大后减小,且含水率越高,剪切前期竖向位移增幅越大,后

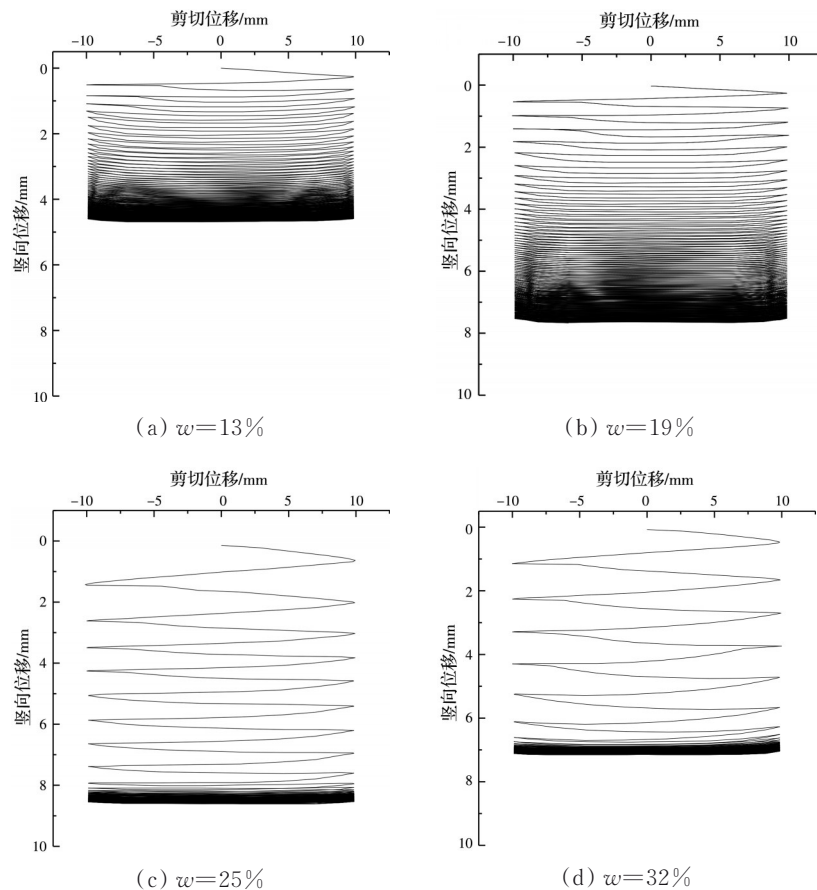


图 9 不同含水率下界面竖向位移-剪切位移曲线

Fig. 9 Vertical displacement-shear displacement curves of interface under different water content

期变化量越小。随着含水率的上升,土体初始孔隙率升高,压缩性更强,压缩空间更大。因此,在竖向应力和循环荷载作用下,随着含水率的升高,试样剪缩量整体呈上升趋势,但含水率由 25% 上升至 32% 时,剪缩量下降。这是因为 32% 最接近残积土饱和含水率,饱和时试样由土颗粒、自由水和筋材构成,三者体积压缩量微小,由于试验条件的限制,剪切过程中自由水无法排除,宏观表现为较小的剪缩量。

2.4 剪切刚度

2.4.1 含水率的影响

剪切刚度是土体动力响应中的重要动力参数,能够分别反映土体在动荷载作用下的刚度变化情况。基于筋土界面在循环剪切作用下的典型剪切位移-剪应力滞回曲线,Nye 等^[17]、Vieira 等^[25]将剪切刚度 K 应用于筋土界面动剪切特性分析。竖向应力为 100 kPa 时,不同含水率筋土界面剪切刚度在循环剪切过程中的动态变化规律如图 10 所示。由图 10 可以看出,非饱和含水率筋土界面剪切刚度随循环次数的增加呈递减趋势,饱和含水率(32%)筋土界面剪切刚度先升高后缓慢降低。在循环剪切作用下,13%、19%、25% 含水率筋土界面剪切刚度整体降低了 20.2%、7.4%、19.1%,而 32% 含水率界面剪切刚度在循环第 20 次后降低了 6.6%。13%、25% 含水率下剪切刚度降幅最大,界面剪切刚度软化速度快。19% 含水率界面剪切刚度降幅小,说明该含水率下筋土界面在循环动荷载作用下剪切刚度弱化程度小,抵抗变形的能力较强。循环剪切 100 次后,仅 32% 含水率下筋土界面剪切刚度整体提高了 13.0%,其余含水率下均表现为剪切软化,表明循环动荷载对于饱和土筋土界面剪切刚度有一定的增强效果,而对中低含水率筋土界面则为弱化效果。

2.4.2 剪切频率的影响

图 11 为竖向应力 100 kPa 时不同剪切频率和含水率条件下筋土界面最大剪切刚度。从图中可以

看出,随剪切频率的升高,各含水率下筋土界面最大剪切刚度先减小后增大,且剪切频率为 0.5 Hz 时达到最小值,说明 0.5 Hz 的剪切频率对筋土界面刚度弱化作用最强。土体接近饱和(32%)时,筋土界面剪切刚度受剪切频率影响较小。峰后强度比是循环最后一圈($N=100$)筋土界面剪应力峰值与抗剪强度的比值,能反映筋土界面的软化特性。表 4 为竖向应力 100 kPa 时筋土界面在不同含水率和剪切频率条件下的峰后强度比。从表中可以看出,19% 和 32% 含水率下筋土界面峰后软化程度小。各含水率下,筋土界面峰后强度比随剪切频率的升高先增大后减小,表明剪切时间越长、剪切速率越大,筋土界面峰后软化越显著。

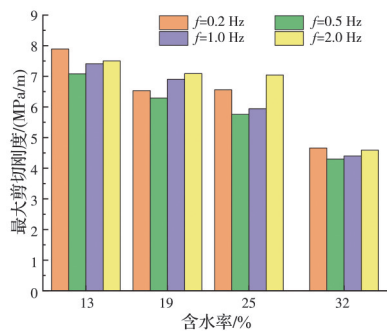


图 11 不同剪切频率下筋土界面最大剪切刚度
Fig. 11 Maximum shear stiffness of soil-reinforced interface under different shear frequency

表 4 含水率和剪切频率对峰后强度比的影响

Table 4 Effects of water content and shear frequency on post-peak strength ratio

含水率/%	峰后强度比				平均值
	$f=0.2\text{ Hz}$	$f=0.5\text{ Hz}$	$f=1.0\text{ Hz}$	$f=2.0\text{ Hz}$	
13	0.851	0.967	0.794	0.787	0.85
19	0.868	0.990	0.951	0.893	0.93
25	0.805	0.915	0.818	0.783	0.83
32	0.967	0.970	0.920	0.913	0.94

2.4.3 剪切幅值的影响

图 12 为竖向应力 100 kPa 下各含水率筋土界面的骨架曲线。从图 12 可以发现,剪切幅值不大于 10 mm 时,各含水率筋土界面最大剪应力随剪切幅值的增大而增大;剪切幅值大于 10 mm 时,13% 含水率筋土界面最大剪应力随剪切幅值的增大而减小,其余中高含水率下界面最大剪应力受剪切幅值影响较小。图 13 为界面最大剪切刚度随剪切幅值的变化规律,由图 13 可见,不同含水率下的变化趋势相似,筋土界面最大剪切刚度与剪切幅值负相关,且随着剪切幅值的增大,降幅逐渐减小。剪切幅值越大,代表剪切荷载强度越大^[24],筋土界面最大剪切刚度越小。

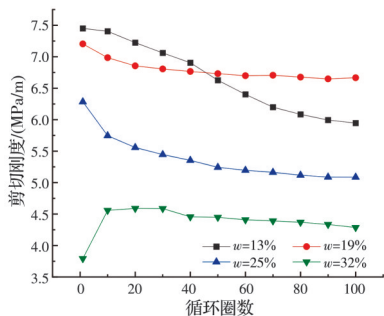


图 10 筋土界面剪切刚度动态变化规律
Fig. 10 Dynamic variation of interfacial shear stiffness of reinforced soil

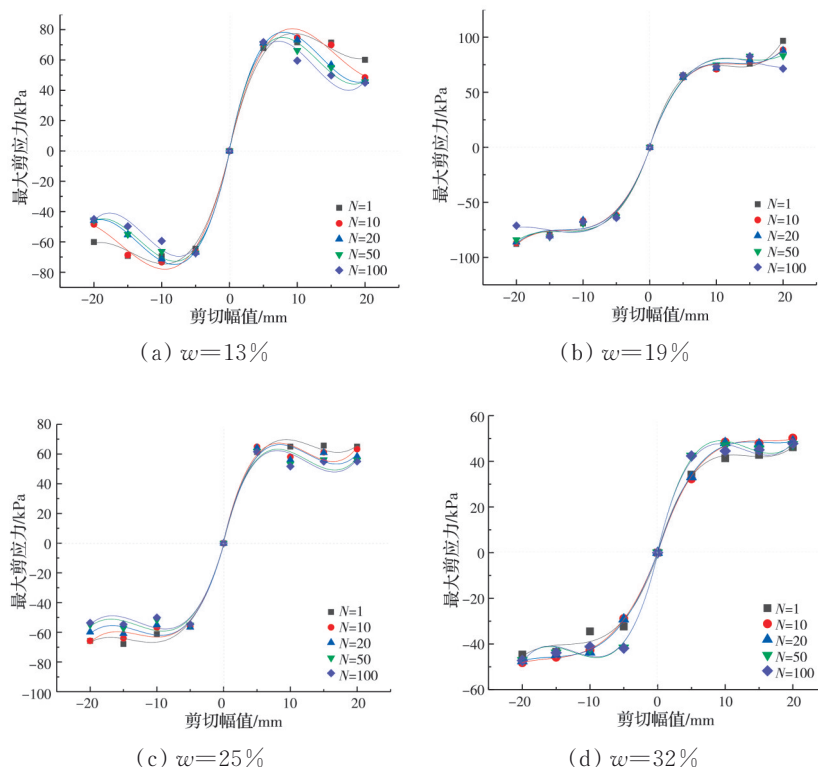


图 12 不同含水率下筋土界面骨架曲线

Fig.12 Interface skeleton curves of reinforced soil under different moisture content

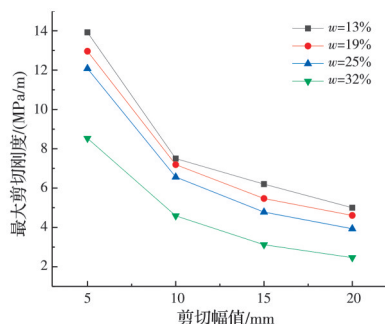


图 13 界面最大剪切刚度随剪切幅值的变化规律

Fig. 13 The maximum shear stiffness of interface varies with shear amplitude

3 结论

1) 含水率接近饱和(32%)时,筋土界面峰值剪应力和剪切刚度在循环剪切过程中先升高后降低,而非饱和含水率下筋土界面呈现剪切软化特征。

2) 不同竖向应力作用下,筋土界面循环抗剪强度随着含水率的升高而降低。

3) 筋土界面在循环剪切作用下发生剪缩,剪缩量随着含水率的升高先增大后减小,并与竖向应力正相关。

4) 各含水率下,筋土界面最大剪切刚度随剪切幅值的增大而减小,剪切频率为 0.5 Hz 时筋土界面软化最显著。

参考文献

- [1] ZENG Z X, KONG L W, WANG M, et al. Assessment of engineering behaviour of an intensely weathered swelling mudstone under full range of seasonal variation and the relationships among measured parameters [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(12): 1837-1849.
- [2] 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): 540-549.
- [3] 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.
- [4] FERREIRA F B, VIEIRA C S, DE LURDES LOPES M. Pullout behavior of different geosynthetics— Influence of soil density and moisture content [J]. Frontiers in Built Environment, 2020, 6: 12.
- [5] HATAMI K, ESMAILI D. Unsaturated soil-woven geotextile interface strength properties from small-scale pullout and interface tests [J]. Geosynthetics International, 2015, 22(2): 161-172.
- [6] NAMJOO A M, SOLTANI F, TOUFIGH V. Effects of moisture on the mechanical behavior of sand-geogrid: An experimental investigation [J]. International Journal of

- Geosynthetics and Ground Engineering, 2021, 7(1): 1-13.
- [7] BERGADO D T, RAMANA G V, SIA H I. Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24 (6): 371-393.
- [8] 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)
- [9] 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): 115-122, 131.
- LIU F Y, HU H L, WANG J, et al. Influence of aperture ratio on cyclic shear behavior of geogrid-soil interface [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 115-122, 131. (in Chinese)
- [10] 应梦杰, 王军, 刘飞禹. 循环剪切作用下砾石-格栅界面颗粒破碎特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1484-1490.
- YING M J, WANG J, LIU F Y. Study on particle fragmentation characteristics of gravel-grid interface under cyclic shear [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1484-1490. (in Chinese)
- [11] 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): 1553-1559.
- XU C, CHEN H S, SHI Z L, et al. Research on the mechanical behavior of soil-reinforcement interface by horizontal cyclic shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1553-1559. (in Chinese)
- [12] FERREIRA F, VIEIRA C, DE LURDES LOPES M. Cyclic and post-cyclic shear behaviour of a granite residual soil-geogrid interface [J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 379-386.
- [13] 周斌, 邵迟. 花岗岩残积土-土工格栅界面的后循环剪切行为研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(1): 90-94.
- ZHOU B, SHAO C. Post cyclic interface shear behavior of granite residual soil-geotechnical grille [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(1): 90-94(in Chinese)
- [14] CEN W J, BAUER E, WEN L S, et al. Experimental investigations and constitutive modeling of cyclic interface shearing between HDPE geomembrane and sandy gravel [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(2): 269-279.
- [15] CEN W J, WANG H, YU L, et al. Response of high-density polyethylene geomembrane-sand interfaces under cyclic shear loading: Laboratory investigation [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(2): 04019166.
- [16] ALAIE R, CHENARI R J. Cyclic and post-cyclic shear behaviour of interface between geogrid and EPS beads-sand backfill [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(9): 3340-3357.
- [17] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 973-983.
- [18] WANG J, LIU F Y, WANG P, 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): 854-861.
- [19] WANG J, LIU F Y, ZHENG Q T, et al. Effect of aperture ratio on the cyclic shear behaviour of aggregate-geogrid interfaces [J]. Geosynthetics International, 2021, 28(2): 158-173.
- [20] 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)
- [21] 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): 387-395.
- LIU F Y, WANG P, WANG J, et al. Cyclic shear and post-direct shear characteristics of grid-soil interface under different shear rates [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 387-395. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] YING M J, LIU F Y, WANG J, et al. Coupling effects of particle shape and cyclic shear history on shear properties of coarse-grained soil-geogrid interface [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 27: 100504.
- [24] CHANG J Y, FENG S J. Dynamic shear behaviors of textured geomembrane/nonwoven geotextile interface under cyclic loading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(2): 388-398.
- [25] VIEIRA C S, LOPES M L, CALDEIRA L M. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests [J]. Geosynthetics International, 2013, 20(1): 26-38.