

DOI: 10.11779/CJGE201602019

# 密实度不同时格栅-砂土界面循环剪切及其后直剪特性

王 军<sup>1, 3</sup>, 王 攀<sup>2</sup>, 刘飞禹<sup>\*2</sup>, 胡秀青<sup>1, 3</sup>, 蔡袁强<sup>1, 3</sup>

(1. 温州大学建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200072;

3. 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 浙江 温州 325035)

**摘 要:** 为研究密实度不同时格栅-砂土界面在经历循环剪切及其后的表现, 采用大型直剪仪进行了一系列大型单调直剪试验、循环直剪试验和循环后单调直剪试验。并将单调直剪试验与循环后单调直剪试验的结果进行对比分析。结果表明: 单调直剪试验中, 随着砂土密实度的增加筋土界面抗剪强度增加, 剪切体胀现象变的明显; 格栅-密砂界面发生循环剪切软化现象, 土样在循环剪切过程当中整体上发生剪缩, 且砂土密实度越大经历相同循环次数时的剪缩量越小; 循环后单调直剪试验中, 3种砂土密实度界面抗剪强度发展曲线都为软化型, 在直剪过程中都发生自始至终的剪胀; 遭受循环剪切后密砂-格栅界面抗剪强度发生了退化。

**关键词:** 筋土界面; 密实度; 循环剪切; 应力历史

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)02-0342-08

**作者简介:** 王 军(1980-), 男, 教授, 主要从事地基处理与土动力学方面的研究工作。E-mail: sunnystar1980@163.com。

## Cyclic and post-cyclic direct shear behaviors of geogrid-sand interface with different soil densities

WANG Jun<sup>1, 3</sup>, WANG Pan<sup>2</sup>, LIU Fei-yu<sup>2</sup>, HU Xiu-qing<sup>1, 3</sup>, CAI Yuan-qiang<sup>1, 3</sup>

(1. Architecture and Civil Engineering College, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. Department of Civil Engineering,

Shanghai University, Shanghai 200072, China; 3. The Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and

Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** In order to investigate the cyclic and post-cyclic shear behaviors of geogrid-sand interface with different soil densities, a series of large-scale monotonic direct shear tests, cyclic direct shear tests and post-cyclic monotonic direct shear tests are performed using a large-scale direct shear device. Comparison and analysis are made between the results from monotonic direct shear tests and post-cyclic monotonic direct shear tests. The results show that the interface shear strength increases with soil density, and more evident dilatancy is observed with higher soil density in the monotonic direct shear tests. The degradation of cyclic shear stress is observed in the geogrid-dense sand interface, the soil tends to be contracted when suffering from cyclic shear, and the volume contraction increases with soil density. The interface shear strength tends to be strain softening, and the soil exhibits dilatancy throughout the tests in the post-direct shear tests with different soil densities. The degradation of the post-cyclic shear is observed in the dense sand-geogrid interface.

**Key words:** soil-geogrid interface; density; cyclic shear; stress history

## 0 引 言

筋-土界面的相互作用特性直接决定着加筋土结构的内稳定性, 是加筋土结构设计的最关键技术指标。目前, 国内外许多学者对土工合成材料与土体界面相互作用特性进行了研究。赵爱根<sup>[1]</sup>、吴景海<sup>[2]</sup>、Lopes等<sup>[3]</sup>、Wasti等<sup>[4]</sup>、刘炜等<sup>[5]</sup>、Basudhar等<sup>[6]</sup>对土工布、土工膜、土工网、土工格室与不同土体的界面特性进行了研究。近年来, 随着土工格栅加筋土结构在工程实际中的广泛应用, 关于格栅-土界面特性的研究成果也不断增多。Moraci等<sup>[7]</sup>、吴景海等<sup>[8]</sup>、Liu等<sup>[9]</sup>、

Arulrajah等<sup>[10]</sup>研究了竖向应力、不同土体、肋的方向(单向、双向和三向)、网孔大小、加载速率等因素对格栅-土界面静力特性的影响。Nernheim等<sup>[11]</sup>、Moraci等<sup>[12]</sup>、Abdel-Rahman等<sup>[13]</sup>、徐超<sup>[14]</sup>等对格栅种类、土体类别、竖向应力、循环幅值、加载速率、循环次

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51478255, 51278383, 51238009, 51478364); 上海市自然科学基金项目(14ZR1416100); 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50020); 温州市重点科技创新团队项目(C20120006)

收稿日期: 2015-03-03

数等因素对格栅-土界面动力特性的影响进行了研究。

填料密实度是影响筋-土界面特性的一个重要因素。目前,有关填料密实度对筋-土界面相互作用特性的影响的研究主要有: O'Rourke 等<sup>[15]</sup>利用大型直剪仪,研究了土体密实度对聚合物-砂土界面特性的影响; Lopes 等<sup>[16]</sup>通过一组拉拔试验,研究了静力作用下两种不同砂土密实度的格栅-土界面特性; Abu-Farsakh 等<sup>[17]</sup>利用大型直剪仪,对不同填料干密度下的格栅-黏土界面特性进行了探究; 史旦达等<sup>[18]</sup>通过拉拔试验,研究了静力条件下砂土密实度对双向格栅-土界面特性的影响; 刘动等<sup>[19]</sup>通过室内直剪试验,研究了吹填砂的密实度对筋-土界面摩擦特性的影响。可以看出,有关填料密实度对格栅-砂土界面特性的影响的研究成果缺乏,且仅有的研究也都集中在静力作用条件下,而对于密实度不同时格栅-砂土界面的动力特性以及在遭受动力后的界面特性的变化,尚未见相关的报道。

本文针对格栅-砂土界面,通过一系列大型直剪试验,研究了密实度不同时格栅-土界面在遭受动力作用时的表现,以及遭受动力作用后界面静力特性的变化,并对试验中所产生的现象进行探讨分析,得到几个有益的结论。

1 试验设备与材料选取

1.1 仪器设备

试验用直剪仪为美国 Geocomp 公司生产的 ShearTracIII室内大型直剪仪,如图 1 所示。该直剪仪的剪切盒内部尺寸(长×宽×高),上剪切盒为 305 mm×305 mm×100 mm,下剪切盒为 405 mm×305 mm×100 mm。下剪切盒沿剪切方向上的长度较上剪切盒长,从而保证了剪切过程中剪切面的面积恒定。该设备能够运行应力、位移两种控制条件下的直剪试验。剪切过程中上剪切盒位置固定不动,下剪切盒在剪切方向上的移动通过高精度电机带动一系列齿轮来进行控制,其水平方向最大剪切位移可达 100 mm,可控制的剪切速率范围为 0.00003~15 mm/min。水平及竖向位移通过 LVDT 传感器进行测量。竖向荷载通过油压千斤顶和反力架施加,并通过试样上方的刚性荷载板将力传递至土体。试验数据由机载软件自动读取、记录。

1.2 材料特性

试验用砂土为中国 ISO 标准砂,其物理性质指标:相对密度  $G_s=2.71\text{ g/cm}^3$ ,最大孔隙比  $e_{\max}=0.66$ ,最小孔隙比  $e_{\min}=0.39$ ,  $D_{60}=0.66\text{ mm}$ ,  $D_{50}=0.50\text{ mm}$ ,  $D_{30}=0.24\text{ mm}$ ,  $D_{10}=0.11\text{ mm}$ ,不均匀系数  $C_u=5.991$ ,曲率系数  $C_c=1.006$ 。格栅为双向塑料土工格栅,如图 2 所示,其各项技术指标示于表 1。

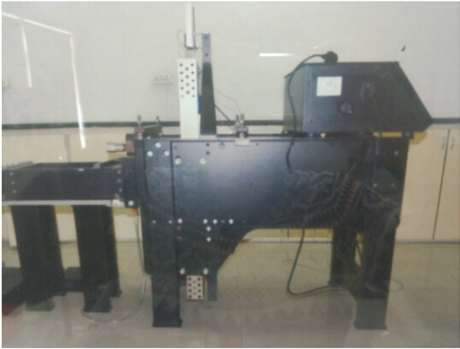


图 1 室内大型直剪仪

Fig. 1 Large-scale direct shear apparatus



图 2 试验用土工格栅

Fig. 2 Geogrid specimens

表 1 土工格栅技术指标

Table 1 Technical indices of geogrid

土工合成材料	单位面积质量 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	网孔尺寸 长×宽 /mm	纵横肋尺寸 /mm	极限延伸率 /%		极限抗拉强度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	
				横向	纵向	横向	纵向
聚丙烯土工格栅	250	35×25	5,5	13	15	20	

2 试验方案

2.1 方案制定

本次研究共进行了 27 组试验,分别进行了法向应力为 30, 60, 90 kPa 条件下的 3 种不同砂土密实度的单调直剪试验(MDS)、循环剪切试验(CDS)和循环后直剪试验(PDS),如表 2 所示。考虑到单调直剪试验中界面在剪切位移为 4 mm 左右时达到抗剪强度,为防止界面在循环剪切阶段发生破坏,本次试验中将循环剪切位移幅值定为 3 mm。参照《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50—2006)和前人的研究成果<sup>[20]</sup>,将各组试验的剪切速率设定为 1 mm/min,循环剪切次数为 10。循环剪切结束后,用相同的剪切速率在原试样上进行循环后直剪试验。单调直剪试验在重新装填的试样上进行。

2.2 砂土密实度

砂土密实度的控制是本次研究的一个关键点。由

于直剪盒的容积不变,因此可以通过控制装入直剪盒内的砂土的质量来控制密实度。根据砂土相对密实度 $D_r$ 将砂土试样分为松砂( $D_r\leq 1/3$ )、中密( $1/3<D_r\leq 2/3$ )和密实( $D_r>2/3$ )3种密实状态。选取松砂、中密砂和密实砂各一组进行研究,对应的相对密实度 $D_r$ 为22%,52%和75%。其中,松砂的装样方法采用落雨法,将标准砂从一定高度(15 cm)自然下落,直至达到指定标高,并记录装入砂土的总质量;中密砂和密实砂的密实度都通过分层装压来控制,将总质量一定的土样分五层(每层2 cm)填入剪切盒,控制每层土样质量相同,并将其压实至指定标高。

表 2 剪切试验方案

Table 2 Programs of cyclic shear tests			
试验类型	相对密实度 $D_r/\%$	竖向应力 /kPa	剪切速率 /( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
MDS	22	30, 60, 90	1.0
	52	30, 60, 90	1.0
	75	30, 60, 90	1.0
CDS	22	30, 60, 90	1.0
	52	30, 60, 90	1.0
	75	30, 60, 90	1.0
PDS	22	30, 60, 90	1.0
	52	30, 60, 90	1.0
	75	30, 60, 90	1.0

2.3 剪切平面

使用钢块、螺栓等工具将格栅紧紧地固定在填满标准砂的下剪切盒上,使得格栅与下剪切盒在剪切过程中不发生相对位移,从而保证试验过程中沿筋-土界面进行剪切。循环剪切的加载路径如图3所示,循环剪切从平衡位置开始,沿①—②—③—④—①这一路径进行循环,定义①—②—③—④为一个完整的循环圈。

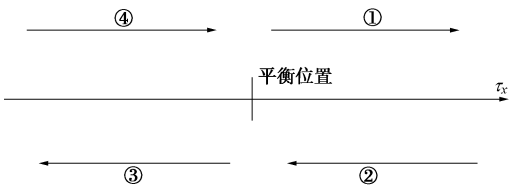


图 3 循环剪切路径图

Fig. 3 Schematic view of cyclic shear paths

3 试验结果及分析

3.1 单调直剪试验

图4为竖向应力90 kPa时不同密实度下单调直剪试验结果,其中图4(a)为剪应力-剪切位移关系曲线,图4(b)为剪切位移-竖向位移关系曲线。取剪应力-剪切位移关系曲线中的峰值为界面抗剪强度,峰值后出现的剪应力极小值为残余强度,由于格栅-松砂界面强度发展曲线并没有明显的峰值,参考对纯

砂土的相关研究,并观察到当剪位移达到5 mm左右时曲线出现明显的拐点,本文将剪位移为5 mm时所对应的剪应力作为格栅-松砂界面的抗剪强度。从图4(a)中可以看出:①砂土密实度越大界面抗剪强度和残余抗剪强度越大,相同剪位移对应的界面剪应力值也越大;②随着砂土密实度的增加,格栅-砂界面的剪应力-剪位移关系曲线由剪切硬化型转变为剪切软化型。

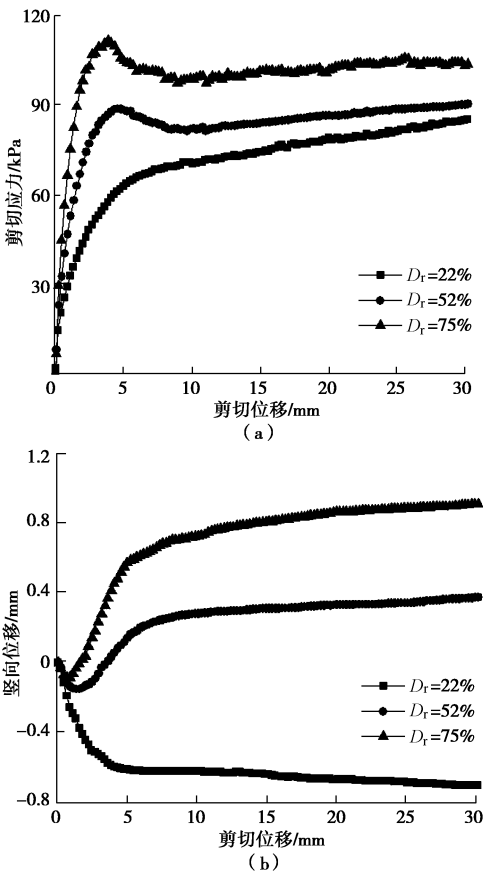


图 4 不同砂土密实度下单调直剪试验结果

Fig. 4 Results of monotonic direct shear tests on sand with different relative densities

试验中的剪切面积恒定,因此土样上方刚性加载板的竖向位移的变化能够反映土样的剪切体变规律,本文规定土样体变以压缩为负,膨胀为正。图4(b)给出了不同砂土密实度下的格栅-砂土界面的剪切位移-竖向位移关系曲线。可以看出:①格栅-松砂界面的体变发展呈现出自始至终的剪缩特征,而当砂土密实度较大时,土样在剪切初期发生短暂、小量的剪缩之后,紧跟着产生了持续的剪胀,当剪切位移超过6 mm左右之后,曲线变的缓慢增长;②砂土密实度越高,相同剪切位移所对应的土样的剪胀量(剪缩为负值)越大。

图5为单调直剪试验中,3种不同砂土密实度界面的抗剪强度包络曲线, $R^2$ 为包络曲线的相关系数。可以看出,在单调直剪试验中, $R^2$ 的数值都接近1,

界面抗剪强度同竖向应力之间表现出了良好的线性相关性, 能够用莫尔-库仑准则:  $\tau = c + \sigma \tan \varphi$  进行描述, 其中  $c$ ,  $\varphi$  分别为界面的似黏聚力和摩擦角。通过线性拟合得到, 单调直剪情况下, 3 种砂土密实度 (22%, 52%, 75%) 界面的似黏聚力为 10, 25, 44 kPa; 摩擦角为  $31^\circ$ ,  $36^\circ$  和  $37^\circ$ 。可见, 在单调直剪试验中, 格栅-砂土界面的似黏聚力和摩擦角都随着砂土密实度的增加而增长。

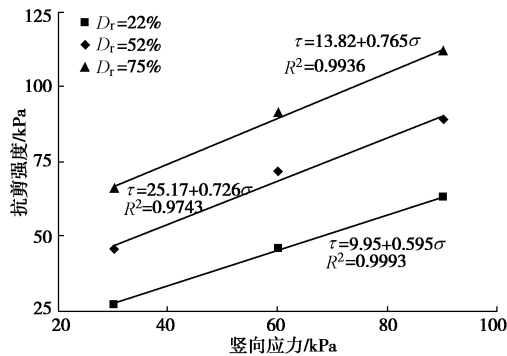


图5 单调直剪试验中界面抗剪强度包络曲线

Fig. 5 Shear strength envelopes in monotonic direct shear tests

### 3.2 循环剪切试验

图6给出了竖向应力 90 kPa 时 3 种砂土密实度下格栅-土界面在循环剪切过程中剪应力随时间的发展曲线。可以观察到, 在砂土较松散时, 界面在循环剪切过程中发生硬化, 随着砂土密实度的增加, 循环剪切硬化特征逐渐变的不明显, 格栅-密砂界面在循环剪切过程中发生了循环剪切软化现象。

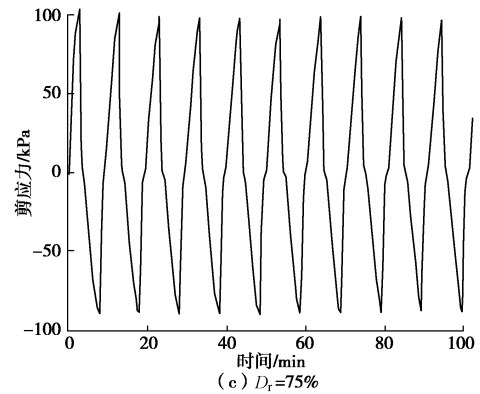
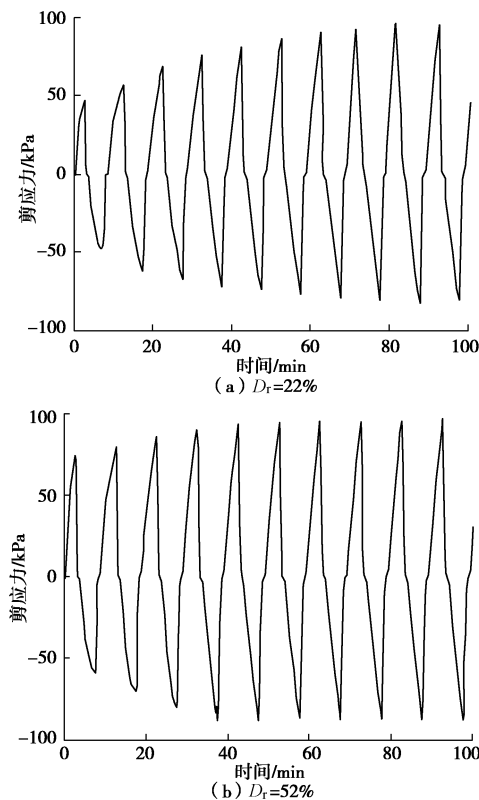
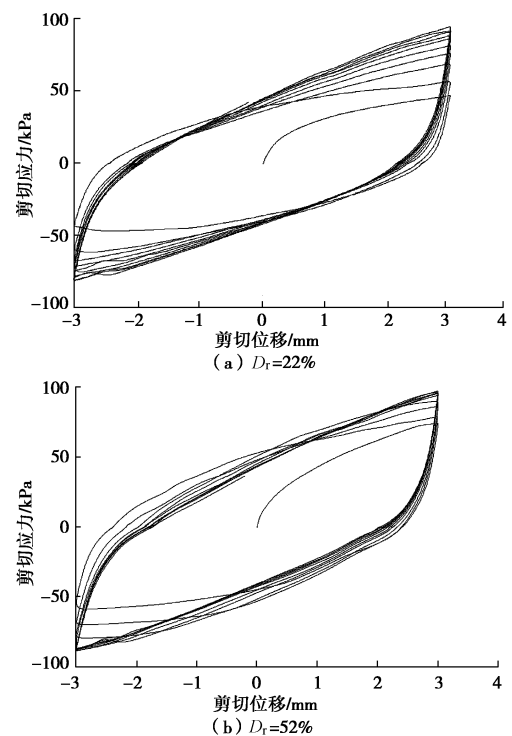


图6 不同砂土密实度下循环剪切试验中时间-剪应力关系曲线

Fig. 6 Evolution of shear stress with time under different soil densities

图7给出了3种砂土密实度下界面在循环剪切过程中的剪应力-剪切位移关系曲线。从图7可以看出, 砂土密实度较小的两种界面的滞回圈的发展为从内向外扩张, 而格栅-密砂界面则由外向里收缩, 这两种不同的滞回圈发展模式分别对应着循环剪切硬化和软化两种界面强度发展特征。

图8为3种砂土密实度下界面在循环剪切过程中的剪切位移-竖向位移关系曲线。可以看出, 在循环剪切过程中每一个循环圈内都发生了剪缩和剪胀的交替, 且这种现象在砂土密实度较高时更加明显。定义每一个循环圈结束时的竖向位移为该循环圈的竖向位移, 将3种砂土密实度下的循环次数与界面竖向位移关系曲线示于图9中, 可以观察到在循环剪切过程中3种砂土密实度下的加筋土试样都发生了剪缩, 随着循环次数的增加剪缩量也增加, 但增加的幅度逐渐降低; 经历相同的循环次数时, 砂土密实度低的土样的最终剪缩量较大。



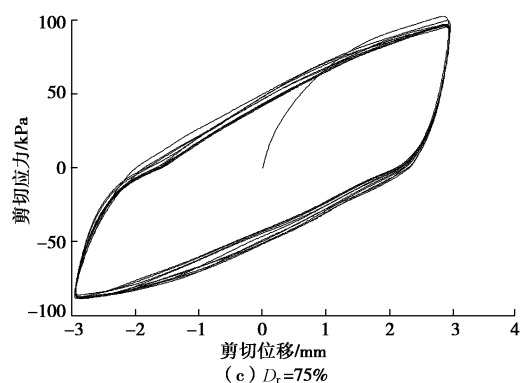


图 7 不同砂土密实度下界面剪应力 - 剪切位移曲线

Fig. 7 Shear stress-displacement behavior of soil/geogrid interface under different soil densities

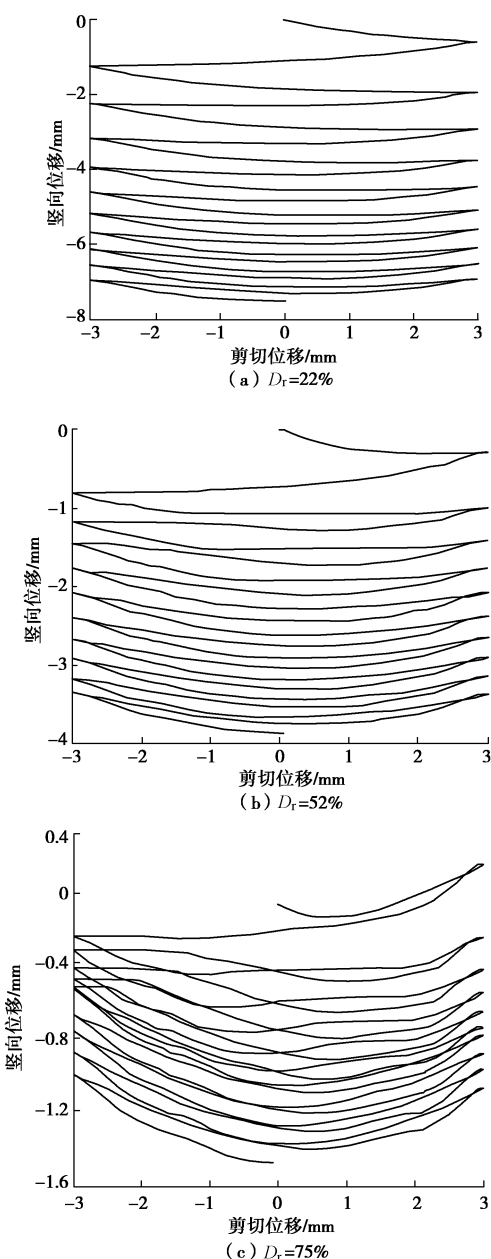


图 8 不同砂土密实度下界面剪切位移 - 竖向位移曲线

Fig. 8 Shear displacement-vertical displacement behavior of soil/geogrid interface under different soil densities

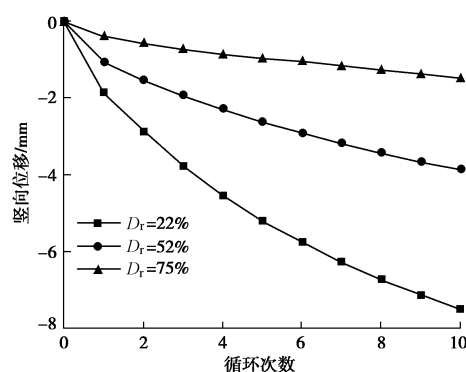


图 9 不同砂土密实度下循环次数与竖向位移关系曲线

Fig. 9 Relationship between interface vertical displacement and cyclic number under different soil densities

### 3.3 循环后直剪试验

图 10 给出了竖向应力 90 kPa 时不同砂土密实度下界面循环后单调直剪试验的结果, 其中图 10 (a) 为剪应力 - 剪切位移关系曲线, 图 10 (b) 为剪切位移 - 竖向位移关系曲线。从图 10 (a) 中可看出, 在循环后单调直剪过程中 3 种界面的剪应力 - 剪切位移关系曲线都呈现出剪切软化的特点。初始密实度越大, 界面抗剪强度和残余强度也越大。但是, 与单调直剪试验相比, 砂土密实度对界面抗剪强度的影响降低, 3 种界面之间的抗剪强度差值不大。从图 10 (b) 可看出循环后直剪过程中土样的体变发展规律: 3 种不同砂土密实度的土样在循环后直剪过程中都发生了剪胀, 且砂土密实度越大, 相同剪切位移所对应的剪胀量越大。

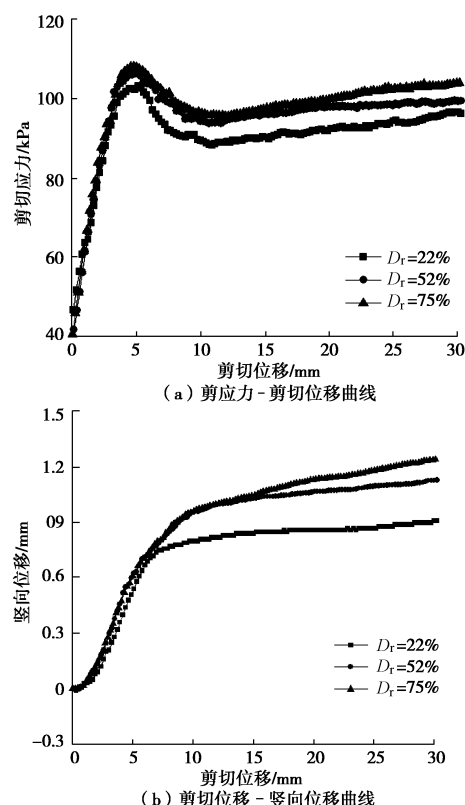


图 10 不同砂土密实度下循环后单调直剪试验结果

Fig. 10 Results of post-cyclic direct shear tests on sand with different soil densities

图 11 为循环后单调直剪试验中, 3 种不同砂土密实度界面在不同竖向应力下的抗剪强度包络曲线。通过线性拟合, 得到循环后直剪试验中, 3 种砂土密实度界面的似黏聚力为 12, 28 和 37 kPa; 摩擦角为 46°, 41° 和 39°。可以看出, 在循环后直剪试验中, 砂土密实度越大, 界面似黏聚力越大, 摩擦角越小。

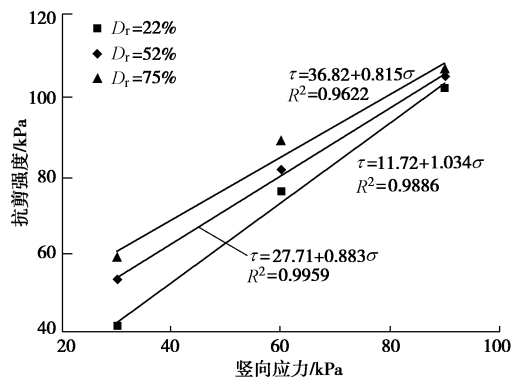


图 11 循环后单调直剪试验中界面抗剪强度包络曲线  
Fig. 11 Shear strength envelopes in post-cyclic direct shear tests

3.4 循环剪切应力历史对界面单调直剪的影响

为研究循环剪切对不同砂土密实度下格栅-土界面直剪特性的影响, 将单调直剪试验与循环后单调直剪试验结果进行对比。图 12 给出了竖向应力 90 kPa 时, 单调直剪试验与循环后单调直剪试验的剪应力 - 剪切位移关系曲线的对比图。可以看出, 未受循环剪切作用时, 格栅-松砂界面的剪应力发展曲线呈现出剪切硬化规律; 经历循环剪切后, 格栅-松砂界面的剪应力发展曲线呈现出剪切软化规律。在经受循环剪切作用后, 格栅-松砂和格栅-中密砂的界面抗剪强度都有了明显的提高, 且松砂的提高幅度更加明显, 这可能与循环剪切过程导致砂土密实度增加有关; 格栅-密砂界面的抗剪强度和残余强度都发生了轻微的退化, 这可能与循环剪切使密实砂土的密实度降低有关。

将两种单调直剪试验所得界面的抗剪强度参数列于表 3 中进行对比。可以看出, 在经历循环剪切之后, 格栅-松砂和格栅-中密砂界面的似黏聚力和摩擦角都有所增加, 而格栅-密砂界面, 在经历循环剪切之后似黏聚力减小, 摩擦角增加。在经历循环剪切之后, 格栅-松砂与格栅-中密砂界面处土体密实度得到增长, 因此格栅对砂土的约束作用得到了更加充分的发挥, 这是界面似黏聚力增加的主要原因; 而格栅-密砂界面在循环剪切过程中由于格栅磨损和变形等弱化机制的作用削弱了格栅对砂土的约束作用, 从而使得界面似黏聚力的下降。界面摩擦角主要与砂土颗粒之间以及砂土颗粒与格栅之间的咬合摩擦作用有关, 砂土密实度的增加使得界面处的摩擦咬合作用加剧, 因此在经历循环剪切之后界面摩擦角增加。

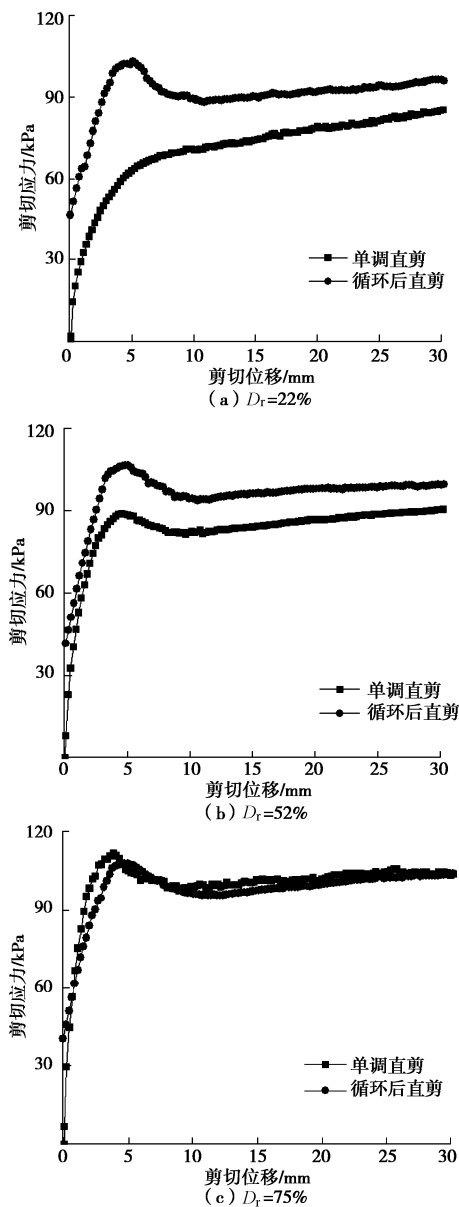


图 12 单调直剪试验与循环后直剪试验中剪应力 - 剪切位移关系曲线的对比

Fig. 12 Comparison of shear stress-displacement curves between monotonic and post-cyclic direct shear tests

表 3 单次直剪与循环后直剪试验所得  $c, \varphi$  值

Table 3 Values of  $c, \varphi$  in direct and post-cyclic direct shear tests

$D_r/\%$	单次直剪		循环后直剪	
	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^\circ)$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^\circ)$
22	10	31	12	46
52	25	36	28	41
75	44	37	37	39

图 13 为竖向应力为 90 kPa 时, 单调直剪试验与循环后单调直剪试验的剪切位移 - 竖向位移关系曲线的对比图。可以看出: ①经历循环剪切之后, 界面在单调直剪中的剪胀现象更加明显, 相同剪切位移时, 循环后单调直剪中所产生的剪胀量更大; ②经历循环

剪切后,界面在单调直剪初期不发生剪缩;③经历循环剪切后,界面剪切位移-竖向位移关系曲线的拐点有向后推移的趋势。与单调直剪相比,土样在循环后直剪中都表现出了更加明显的剪胀,这是因为在经历循环剪切后,土样变的更加密实,在剪切过程中界面处土颗粒的运动主要以翻滚和攀爬为主,从而导致较明显的剪胀。

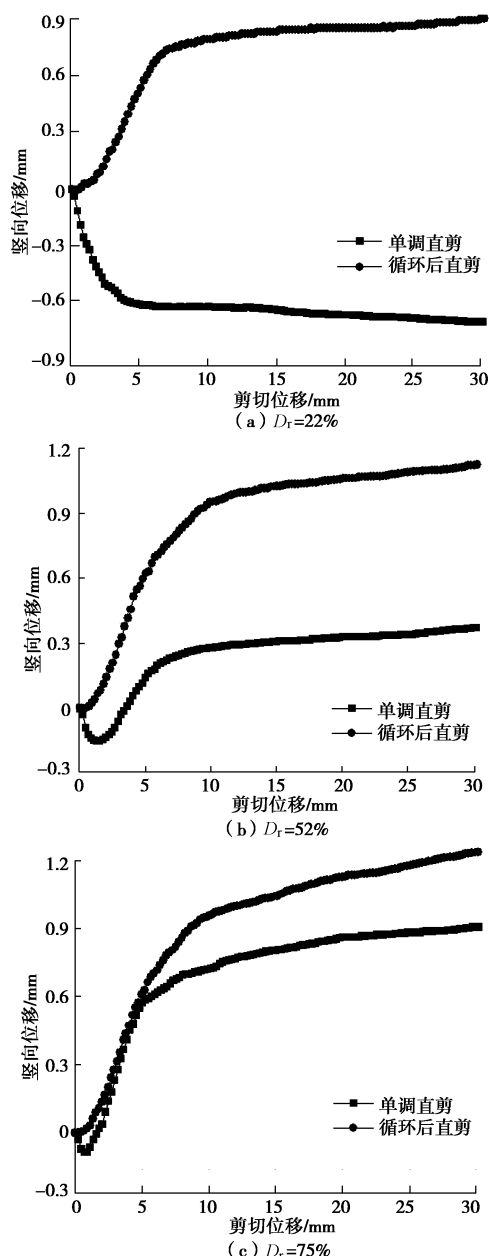


图 13 单调直剪试验与循环后直剪试验中剪切位移-竖向位移关系曲线的对比

Fig. 13 Comparison of shear displacement-vertical displacement curves between monotonic and post-cyclic direct shear tests

## 4 结 论

本文对福建标准砂与土工格栅界面进行了室内大型单调直剪试验、循环剪切试验和循环后单调直剪

试验,研究了不同砂土密实度下筋-土界面循环剪切特性及循环后单调直剪特性,得到以下几个结论:

(1) 单调直剪试验中,随着砂土密实度增加,筋土界面的抗剪强度增加,剪胀现象更加明显。砂土密实度较高时,界面拥有较大的似黏聚力和摩擦角。

(2) 格栅-密砂界面在循环剪切过程中发生了循环剪切软化现象;加筋土样在循环剪切过程中都发生整体上的剪缩,且砂土密实度越高,相同循环次数引起的剪缩量越小。

(3) 循环后单调直剪试验中,筋土界面抗剪强度发展曲线都为软化型,剪切初期不发生剪缩。砂土初始密实度越高,界面似黏聚力越大,摩擦角越小。

(4) 在遭受循环剪切后,格栅-松砂和格栅-中密砂界面抗剪强度增加,格栅-密砂界面抗剪强度产生退化。界面剪胀现象在遭受循环剪切之后更加明显。

## 参考文献:

- [1] 赵爱根. 加筋黏土的抗剪强度特性[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 69 - 75. (ZHAO Ai-gen. Shear behavior of reinforced clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 69 - 75. (in Chinese))
- [2] 吴景海. 土工合成材料与土工合成材料加筋砂土的相关特性[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 538 - 541. (WU Jing-hai. Behavior of geosynthetics versus geosynthetic reinforced sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 538 - 541. (in Chinese))
- [3] LOPES P C, LOPES M L, LOPES M P. Shear behaviour of geosynthetics in the inclined plane test-influence of soil particle size and geosynthetic structure[J]. Geosynthetics International, 2001, 8(4): 327 - 342.
- [4] WASTI Y, BAHADIR ÖZDÜZGÜN Z. Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(1): 45-57.
- [5] 刘 炜, 汪益敏, 陈页开, 等. 土工室加筋土的大尺寸直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3133 - 3138. (LIU Wei, WANG Yi-min, CHEN Ye-kai, et al. Research on large scale direct shear test for geocell reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3133 - 3138. (in Chinese))
- [6] BASUDHAR P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4): 403 - 408.
- [7] MORACI N, RECALCATI P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(4):

- 220 - 242.
- [8] 吴景海, 陈 环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 89 - 93. (WU Jing-hai, CHEN Huan, WANG Ling-juan, et al. Study on soil interaction characteristics of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 89 - 93. (in Chinese))
- [9] LIU C N, HO Y H, HUANG J W. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(1): 19 - 30.
- [10] ARULRAJAH A, RAHMAN M A, PIRATHEEPAN J, et al. Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, **26**(5): 974 - 982.
- [11] NERNHEIM A, MEYER N. Cyclic pull-out tests on geogrids[C]//International Conference on Geotechnical Engineering. Sharjah-United Arab Emirates, 2004.
- [12] MORACI N, CARDILE G. Influence of cyclic tensile loading on pullout resistance of geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(6): 475 - 487.
- [13] ABDEL-RAHMAN A H, IBBRAHIM M A M. Soil/geogrid behavior subjected to cyclic loading[C]// Geo-Frontiers 2011@ Advances in Geotechnical Engineering, ASCE. Dallas, 2011: 3087 - 3096.
- [14] 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 Chao, CHEN Hong-shuai, SHI Zhi-long, et al. Research on the mechanical behavior of soil-reinforcement interface by horizontal cyclicsheartest[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1553 - 1559. (in Chinese))
- [15] O'ROURKE T D, DRUSCHEL S J, NETRAVALI A N. Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(3): 451 - 469.
- [16] LOPES M L, LADEIRA M. Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, **14**(10): 543 - 554.
- [17] ABU-FARSAKH M, CORONEL J, TAO M. 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.
- [18] 史旦达, 刘文白, 水伟厚, 等. 单, 双向塑料土工格栅与不同填料界面作用特性对比试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2237 - 2244. (SHI Dan-da, LIU Wen-bai, SHUI Wei-hou, et al. Comparative experimental studies of interface characteristics between uniaxial/biaxial plastic geogrids and different soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2237 - 2244. (in Chinese))
- [19] 刘 动, 陈晓平, 常学宁. 基于筋-土界面摩擦特性的加筋边坡分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 217 - 223. (LIU Dong, CHEN Xiao-ping, CHANG Xue-ning. Analysis of reinforced slop based on interface properties of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 217 - 223. (in Chinese))
- [20] 刘 博, 李海波, 朱小明. 循环剪切荷载作用下岩石节理强度劣化规律试验模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(10): 2033 - 2039. (LIU Bo, LI Hai-bo, ZHU Xiao-ming. Experiment simulation study of strength degradation of rock joints under cyclic shearloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(10): 2033 - 2039. (in Chinese))