

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1760

三明治形加筋土筋-土界面动力剪切特性

刘飞禹¹, 施 静¹, 王 军^{2,3,4}, 蔡袁强⁵

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035;

3. 温州大学 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;

4. 温州大学 浙江省海涂围垦及其生态保护协同创新中心, 浙江 温州 325035; 5. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 三明治形加筋土是一种在黏土中加入加筋砂层形成的混合填料形式的新型加筋土。为了研究不同条件下三明治形加筋土筋-土界面的动力剪切特性, 采用大型直剪仪对三明治形加筋土进行了一系列循环剪切试验, 研究了不同薄砂层厚度、循环剪切幅值和竖向应力对界面剪切特性的影响。试验结果表明: 筋-土界面的剪应力峰值随着循环次数的增加而增加, 循环周次为 10 时, 薄砂层厚度为 5、6、7、8、9 mm 的条件下, 筋-土界面的剪应力峰值分别为 24.84、27.4、27.94、26.33、24.68 kPa, 表明薄砂层厚度为 7 mm 时, 筋-土界面在循环剪切阶段的峰值剪应力最大; 剪切幅值越大, 界面循环剪切的最终剪缩量越大, 同一循环次数对应的剪切刚度和阻尼比越小; 在不同竖向应力下, 界面在循环剪切过程中都发生了循环剪切硬化现象, 循环周次为 10 时, 竖向应力为 30、60、90 kPa 的条件下, 筋-土界面的剪应力峰值分别为 20.4、25.14、32.96 kPa, 表明剪应力峰值随竖向应力的增大而增大, 同一循环次数对应的剪切刚度也随竖向应力的增大而增大。

关 键 词: 加筋土; 循环剪切; 剪切刚度; 阻尼比

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)06-1991-08

Dynamic shear behavior of interface for clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand

LIU Fei-yu¹, SHI Jing¹, WANG Jun^{2,3,4}, CAI Yuan-qiang⁵

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 3. Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 4. Innovation Center of Tideland Reclamation and Ecological Protection, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 5. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: A new-style sandwich reinforced soil is clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand. To investigate the interfacial shear behavior of sandwich reinforced soil, a series of cyclic shear tests was performed through a large-scale direct shear device. The influence of thickness of sand layer, shear amplitude and normal stress on the interface shear behavior were investigated. Results indicated that the peak shear stress of the interface increased with the increase of cycle number. When the thickness of sand layers were 5, 6, 7, 8, 9 mm in the last cycle number, the corresponding peak shear stresses of the interface were 24.84, 27.4, 27.94, 26.33, 24.68 kPa, respectively, showing the maximum peak shear stress of the interface occurred with 7 mm of the thickness of thin sand layer. The ultimate vertical displacement increased with the increase of cyclic shear amplitude, and shear stiffness and damping ratio of the interface decreased with the increase of cyclic shear amplitude at the same cycle number. When the normal stresses were 30, 60, 90 kPa, in the last cycle number, the corresponding peak shear stresses of the interface were 20.4, 25.14, 32.96 kPa, respectively, showing the peak shear stress increased with the increase of normal stress, and the shear stiffness increased with the increase of normal stress at the same cycle number.

Keywords: reinforced soil; cyclic direct shear test; shear stiffness; damping ratio

1 引 言

加筋土结构之间的加筋效果是通过土体与加筋

材料之间的相互作用表现出来的,筋-土界面的相互作用较为复杂且在实际工程中又广泛存在,其力学特性对加筋土结构的稳定性和耐久性有直接影响,

收稿日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(No.51478255, No.51678352, No.51622810, No.51278383); 上海市自然科学基金(No.14ZR1416100); 科技部国家重点研发计划(No.2016YFC0800203); 科技部国际合作专项(No.2015DFA71550)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51478255, 51678352, 51622810, 51278383), the Natural Science Foundation of Shanghai (14ZR1416100), the National Key R & D Program of Ministry of Science and Technology (2016YFC0800203) and the Program of International Science and Technology Cooperation (2015DFA71550).

第一作者简介: 刘飞禹, 男, 1976 年生, 博士, 教授, 主要从事加筋土及土动力学研究。E-mail: lfyju@shu.edu.cn

通讯作者: 王军, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事地基处理方面的研究工作。E-mail: sunnystar1980@163.com

因此,对筋-土界面力学特性的研究一直是筋-土界面相互作用系统研究中的重要课题。国内外已经有很多学者对静力作用下筋材与土体界面的力学特性进行了研究。Liu^[1-2]、刘飞禹^[3]、Vangla^[4]等就不同竖向应力、填料种类、颗粒级配、密实度、筋材种类、土工格栅横肋以及筋材粗糙度等因素在静力作用下对筋-土界面力学特性的影响进行了研究。

然而加筋土结构在实际工程中不仅受到静力荷载的作用,还会受到交通荷载、地震作用等动荷载的影响,因此,对筋-土界面动力剪切性能方面的研究也同样重要。刘飞禹等^[5-6]研究了不同条件下砂土与土工格栅界面的剪切强度、体变以及循环剪切作用对界面剪切特性的影响;Nye等^[7]通过一系列单调和循环直剪试验,研究了黏土与水刺无纺土工布界面的剪切特性,并对界面刚度、阻尼比进行了研究;Vieira等^[8]研究了石英砂与高强度的土工布在静力和动力作用下的界面剪切特性,尤其是对界面剪切刚度与阻尼比进行了一定的分析;Fox等^[9]就动力荷载作用下土工织物与土体界面的损伤特性、剪切刚度和阻尼比进行了研究。以上学者对筋-土界面的动力特性进行了细致的研究。然而近些年出现了一种三明治形加筋土结构,目前国内外对其筋-土界面相互作用特性的研究还不够充分。

如图1所示,三明治形加筋土是一种新型混合填料的加筋土结构,由黏土层从上下两侧夹住加筋的薄砂层而形成层状混合式加筋结构。这种新型加筋土结构结合了黏土的经济、取材方便和砂土界面的剪切强度较高等优点。Abdi等^[10-11]研究了静力作用下三明治形加筋土的界面剪切特性,尤其是薄砂层厚度对三明治形加筋土界面剪切特性的影响。

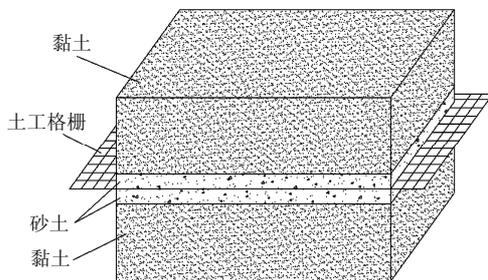


图1 三明治形加筋土示意图

Fig.1 Schematic view of sandwich reinforced soil

由前述文献可以看出,目前循环剪切作用对三明治形加筋土界面剪切特性影响的研究相对较少。本文采用室内大型循环剪切试验,分析了薄砂层厚度、剪切幅值、竖向应力等因素对三明治形加筋土界面剪切特性的影响,得到了一些有益的结论。

2 试验设备与材料选取

2.1 试验设备

本试验采用 ShearTracIII室内大型直剪仪,见图2。直剪仪上剪切盒的有效尺寸305 mm×305 mm×100 mm(长×宽×高),下剪切盒有效尺寸为405 mm×305 mm×100 mm。本次试验采用位移控制法。



图2 室内大型直剪仪

Fig.2 Large-scale direct shear apparatus

2.2 试验材料及试样制作

本次研究所使用的土样是福建标准砂,物理性质指标如表1所示。试验用的黏土取于温州市洞头区,软黏土的基本物理参数如表2所示,土样的制备是在试验前,将土样烘干、粉碎并加水搅拌,制成含水率30%的重塑土样,密闭静置24 h以保证土样含水率分布均匀。试验所用加筋材料采用土工编织布如图3所示,土工编织布的各项技术指标如表3所示。

表1 福建标准砂的物理性质指标

Table 1 Physical indices of Fujian standard sand

限定粒径	平均粒径	中值粒径	有效粒径	不均匀系数	曲率系数
D_{60}	D_{50}	D_{30}	D_{10}	C_u	C_c
/mm	/mm	/mm	/mm		
0.66	0.39	0.66	0.50	0.24	0.11

表2 软黏土基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of soft clay

含水率	土粒相对	重度	孔隙比	饱和度	塑限	液限
w/%	密度 G_s	$\gamma / (\text{kN/m}^3)$	e	$S_r / \%$	w _p / %	w _L / %
85.5	2.71	14.4	1.74	99.5	33.0	66.5

为了保证剪切始终发生在筋-土界面,参照 Sayeed等^[12]在剪切盒下放置铁块,将裁剪好的土工编织布平铺在铁块上表面并由下部剪切盒前、后的钢板和螺栓进行固定。在土样填装过程中为了保证不同黏土试样具有相同的密实度,试样分5层(每层厚2 cm)填入上剪切盒,并且控制每层土样的质量相同,将其压至标定标高。



图 3 土工编织布
Fig.3 Woven geotextile

表 3 土工编织布技术指标

Table 3 Technical indices of woven geotextile

单位面积质量 /(g/m ²)	极限延伸率/%		极限抗拉强度/(kN/m)	
	横向	纵向	横向	纵向
150	28	28	20	28

3 试验方案

本文试验循环圈数为 10 次,剪切试验方案示于表 4。每个方案中不变量的值的设定都参照了《公路工程土工合成材料试验规程》^[13]的要求,并借鉴

了前期试验所得结果^[6]。

表 4 剪切试验方案
Table 4 Cyclic shear experimental program

试验方案	薄砂层厚度 d/mm	剪切速率 /(mm/min)	剪切幅值 A _w /mm	竖向应力 σ/kPa
I	5, 6, 7, 8, 9	1	3	60
II	5	1	1, 3, 5	60
III	5	1	3	30, 60, 90

4 试验结果分析

4.1 薄砂层厚度对筋-土界面循环剪切特性的影响

图 4 为三明治形加筋土筋-土界面在竖向应力为 60 kPa、剪切幅值为 3 mm 时,不同薄砂层厚度情况下循环剪切试验对应的剪应力-剪切位移曲线。可以看出:①在一定竖向应力的条件下,不同薄砂层厚度对应筋-土界面的剪切特性基本一致,即在加载过程中,界面剪应力随着剪切位移的增加不断增大,且增大的速率先减小后增大;②随着循环周次的增加,滞回圈趋于重合,每两个相邻的滞回圈剪应力-剪切位移曲线越来越相似,且滞回圈的峰值剪应力不断增大,相邻两滞回圈的峰值剪应力差值不

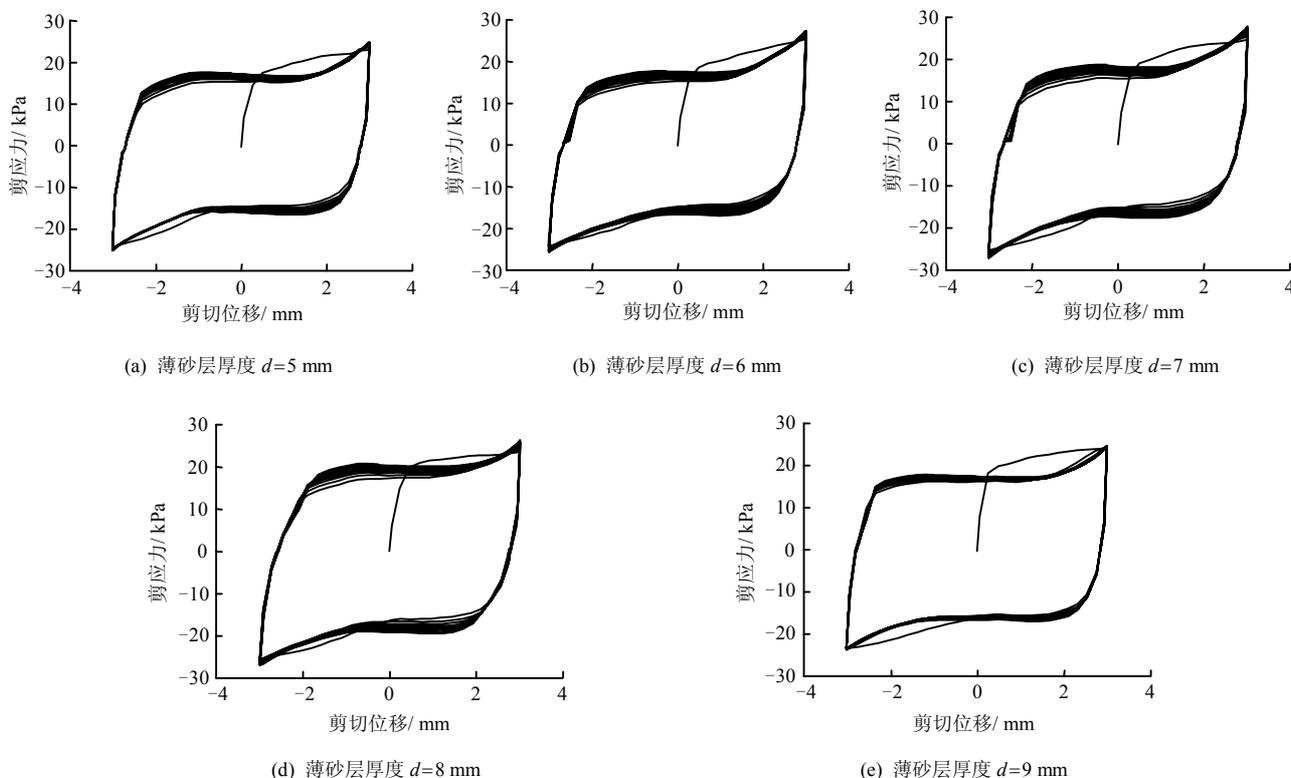


图 4 不同薄砂层厚度下筋-土界面剪应力-位移曲线

Fig.4 Shear stress-displacement behavior of sand-geotextile interface under different thicknesses of sand layer

断减小。

取剪应力-剪切位移关系曲线中每个循环的剪

应力峰值作为该循环的最大剪应力,将筋-土界面最大剪应力-循环次数曲线绘制于图 5。可以发现:随

着循环次数的增加，筋-土界面最大剪应力不断增大，呈现出剪切硬化的特点。循环周次为10时，5种薄砂层厚度5、6、7、8、9 mm对应的最大剪应力分别为24.84、27.4、27.94、26.33、24.68 kPa。可见筋-土界面的最大剪应力并不是随着薄砂层厚度单调增加，而是呈现出先增大后减小的趋势，这表明在该循环剪切试验中存在一个最优薄砂层厚度，即薄砂层厚度为7 mm时，筋-土界面最大剪应力的值最大。

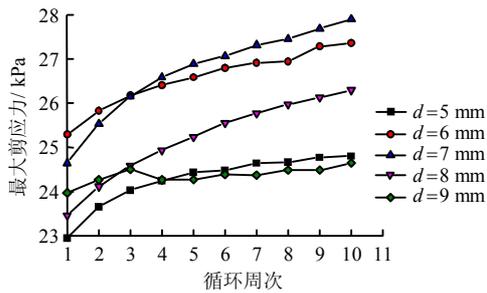


图5 不同薄砂层厚度下筋-土界面最大剪应力-循环次数曲线

Fig.5 Relationship between maximum shear stress and cyclic number under different thicknesses of sand layer

图6为不同薄砂层厚度的情况下筋-土界面竖向位移-循环次数曲线。从图可以看出，在5种不同薄砂层厚度的情况下，三明治形加筋土筋-土界面都发生了剪缩，且剪缩量随循环次数的增加而增加，但是增加的速率不断降低。5种薄砂层厚度5、6、7、8、9 mm对应的土样最终剪缩量分别为0.97、0.89、1.10、0.90、0.68 mm，可见各薄砂层厚度下筋-土界面的体变量相差不大，这可能是由于薄砂层厚度相差较小造成。

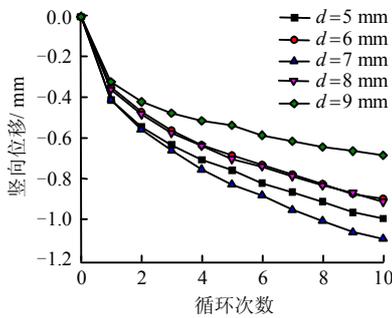


图6 不同薄砂层厚度下筋-土界面竖向位移-循环次数曲线

Fig.6 Relationship between interface vertical displacement with cyclic number under different thicknesses of sand layer

参照 Nye^[7]、Vieira^[8]等将刚度与阻尼比应用于土工合成材料与土体界面的动剪特性分析，本文通

过类似的方法来分析三明治型加筋土筋-土界面的动剪特性。

图7为滞回圈中剪切刚度与阻尼比的计算示意图。定义滞回圈中的剪切刚度 K 为

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2\Delta_a} \quad (1)$$

式中： K_1 、 K_2 分别为两个剪切方向上的剪切刚度； τ_1 、 τ_2 分别为两个剪切方向上的剪应力峰值； Δ_a 为剪切位移幅值。

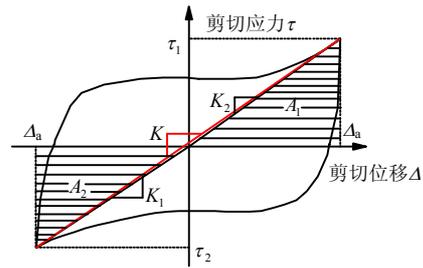


图7 滞回圈中剪切刚度与阻尼比的计算

Fig.7 Calculation of shear stiffness and damping ratio from hysteresis loop

定义滞回圈中的阻尼比 D 为

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{4\pi A_1} + \frac{A}{4\pi A_2} \right) = \frac{A}{4\pi \Delta_a} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \quad (2)$$

式中： D_1 、 D_2 分别为两个剪切方向上的阻尼比； A 为整个滞回圈的面积； A_1 、 A_2 分别为图中所示的阴影部分面积。

图8给出了薄砂层厚度为5、6、7、8、9 mm时，三明治形加筋土筋-土界面的剪切刚度随循环次数发展的关系曲线。从图中可以看出：随着循环次数的增加，5种薄砂层厚度下的筋-土界面剪切强度

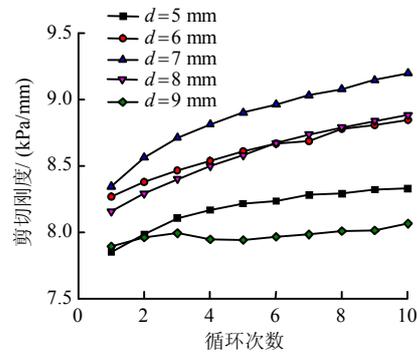


图8 不同薄砂层厚度下剪切刚度随循环次数的发展规律
Fig.8 Development of shear stiffness with cyclic number under different thicknesses of sand layer

都有一定增加，这表明在循环剪切过程中界面出现了剪切硬化现象。同时，随着薄砂层厚度的增加，同一循环次数下的剪切刚度先增大后减小，这表明在本文的试验条件下，存在 1 个最优薄砂层厚度，即薄砂层厚度为 7 mm 时，在循环剪切过程中筋-土界面剪切强度最大，界面抵抗土体变形能力最强。

图 9 给出了薄砂层厚度为 5、6、7、8、9 mm 时，三明治形加筋土筋-土界面的阻尼比随循环次数发展的关系曲线。从图中可以看出：随着薄砂层厚度增加，同一循环周次对应的阻尼比先减小后增大，这说明在本文试验条件下，薄砂层厚度为 7 mm 时，筋-土界面在循环剪切过程中能量耗散最慢。

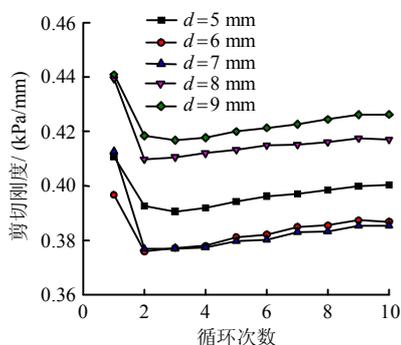


图 9 不同薄砂层厚度下阻尼比随循环次数的发展规律
Fig.9 Development of damping ratio with cycle number under different thicknesses of sand layer

4.2 剪切位移幅值对筋-土界面循环剪切特性的影响

图 10 为薄砂层厚度为 5 mm 的三明治形加筋土界面在竖向应力为 60 kPa，剪切幅值为 1、3、5 mm 时的剪切位移-竖向位移曲线。由图可以看出，在循环剪切后期，每一个循环圈内都发生了剪缩和剪胀的交替，3 种剪切幅值对应的土样整体上都呈剪缩现象，且剪切幅值越大最终剪缩量越大。同时可以看出，在循环剪切过程中，剪缩增量随循环次数的增加逐渐减小，在图中表现为相邻循环周次的竖向位移-剪切位移曲线越来越接近。

当剪切幅值为 1 mm 时（见图 10(a)），在第 1 个循环周次中竖向位移随着循环次数的增加持续增大，即在此循环阶段内土体始终呈剪缩状态，而在后 9 个循环周次的剪切过程中，剪缩和剪胀交替出现。当剪切幅值为 3 mm 时（见图 10(b)），在土体在前 6 个周次中呈剪缩状态，在后 4 个循环周次中剪缩、剪胀交替出现。当剪切幅值为 5 mm 时（见图 10(c)），剪缩、剪胀交替出现的现象并不明显。

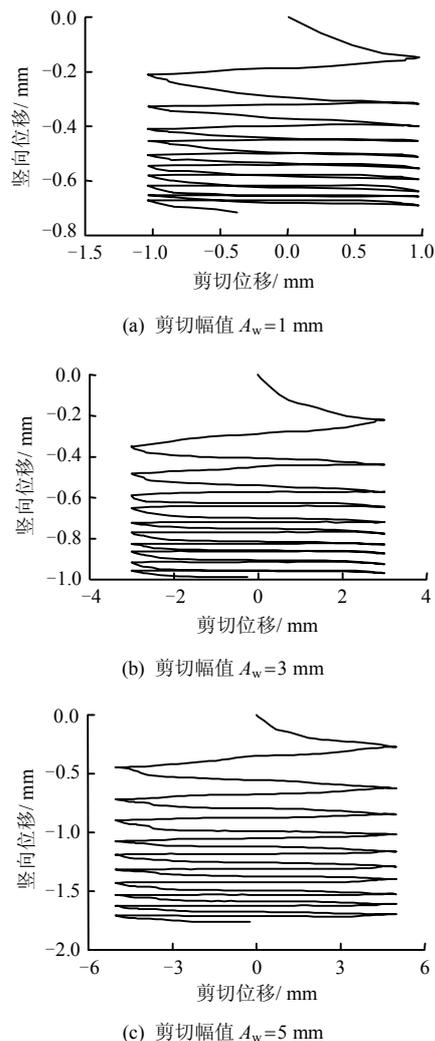


图 10 不同剪切幅值对应界面竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig.10 Shear displacement-vertical displacement behavior of interface under different cyclic amplitudes

图 11 给出了剪切幅值为 1、3、5 mm 时，三明治形加筋土筋-土界面的剪切刚度随循环次数发展的关系曲线。从图中可以看出，随着剪切幅值的增大，同一循环次数所对应的剪切刚度减小；在循环剪切过程中，随着循环次数增加，3 种剪切幅值下的界面剪切刚度都有一定程度的增加，这表明界面在剪切过程中发生了剪切硬化现象，这与 Vieira 等^[8]在土工布-砂土界面的循环剪切试验中的结论相似。图 12 给出了剪切幅值为 1、3、5 mm 时，三明治形加筋土筋-土界面的阻尼比随循环次数发展的关系曲线。从图中可以看出，随着剪切幅值的增大，同一循环次数所对应的界面阻尼比越小，这表明剪切幅值的降低导致筋-土界面在循环剪切过程中的能量耗散更大。

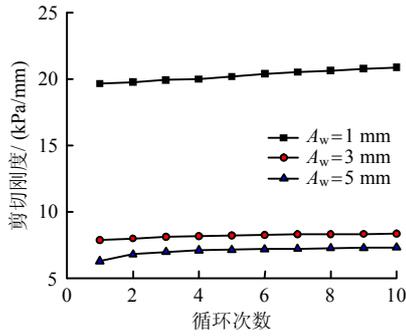


图 11 不同剪切幅值下剪切刚度随循环次数的发展规律
 Fig.11 Development of shear stiffness with cycle number under different cyclic amplitudes

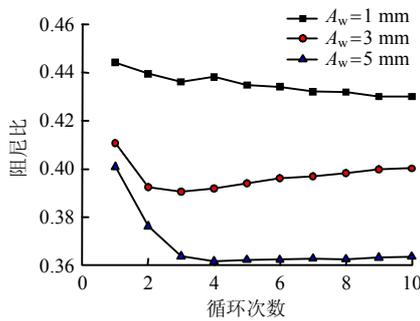
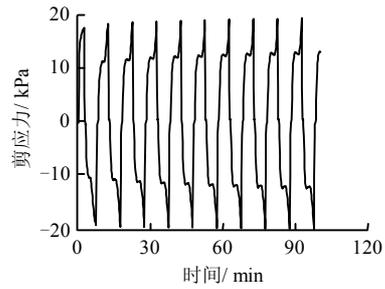


图 12 不同剪切幅值下阻尼比随循环次数的发展规律
 Fig.12 Development of damping ratio with cycle number under different cyclic amplitudes

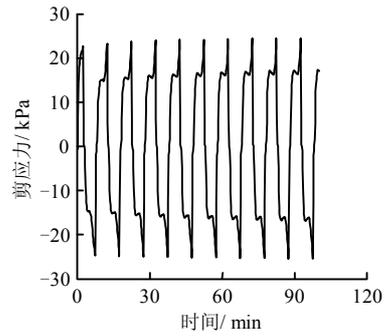
4.3 竖向应力对筋-土界面循环剪切特性的影响

图 13 为薄砂层厚度为 5 mm 的三明治形加筋土界面在剪切幅值为 3 mm 时, 不同竖向应力条件下的界面剪应力-时间关系曲线。从图中可以看出, 3 种不同竖向应力的条件下, 峰值剪应力随着循环次数的增加而增加, 筋-土界面呈剪切硬化现象。循环周次为 10 时, 竖向应力 30、60、90 kPa 对应的最大剪应力分别为 20.4、25.14、32.96 kPa, 可见随着竖向应力的增加, 界面最大剪应力随之增加, 相应的增幅也随之增大。随着竖向应力的增大, 筋-土界面附近砂土的密实度不断增加, 土工编织布附近的土颗粒完成高低位势的转换需要克服的力也随之增大, 筋-土界面抗剪强度得到提高, 界面力学性质发生强化。

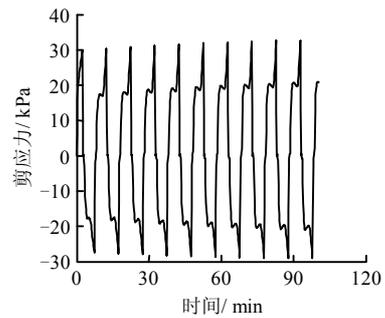
图 14 给出了薄砂层厚度为 5 mm 的三明治形加筋土在剪切幅值为 3 mm 时, 不同竖向应力条件下其筋-土界面竖向位移随循环次数发展的关系曲线。从图中可以看出, 三明治形加筋土筋-土界面在不同竖向应力作用下的循环剪切过程中, 总体都发生了剪缩, 剪缩量增加的速率随着竖向应力的增大而变快, 最终竖向应力越大, 界面的剪缩量越大。



(a) 竖向应力 $\sigma = 30$ kPa



(b) 竖向应力 $\sigma = 60$ kPa



(c) 竖向应力 $\sigma = 90$ kPa

图 13 不同竖向应力作用下界面剪应力-时间关系曲线
 Fig.13 Shear stress-time behavior of interface under different vertical stresses

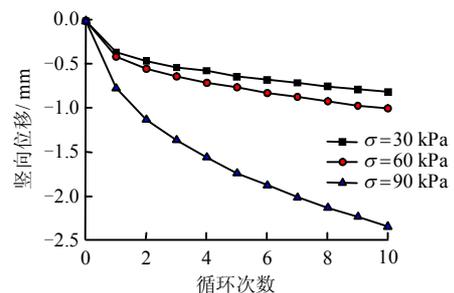


图 14 不同竖向应力下筋-土界面竖向位移-循环次数曲线
 Fig.14 Relationship between interface vertical displacement with cyclic number under different vertical stresses

图 15 给出了 3 种竖向应力下三明治形加筋土筋-土界面的剪切刚度随循环次数发展的关系曲线。从图中可以看出, 3 种竖向应力条件下, 竖向应力越大同一循环周次对应的剪切刚度越大, 其次, 筋-

土界面的剪切刚度随循环次数的增加而增加，这表明筋-土界面在剪切过程中发生了剪切硬化现象。图 16 给出了 3 种竖向应力下筋-土界面的阻尼比随循环次数发展的关系曲线。从图中可以看出，在前 2 个循环周次内筋-土界面阻尼比都随循环次数的增加而减小，但从第 3 个循环周次开始，阻尼比随着循环次数的增加而不断增大，这表明在刚遭受循环剪切作用时，土工界面的能量耗散较大，即在整个循环剪切过程中界面能量耗散的速度先降低然后有一定增加。同时可以看出，从第 2 个循环开始竖向应力越大，界面同一循环次数对应的阻尼比的值也越大，说明竖向应力的增加会使界面在循环剪切时的能量耗散增大。

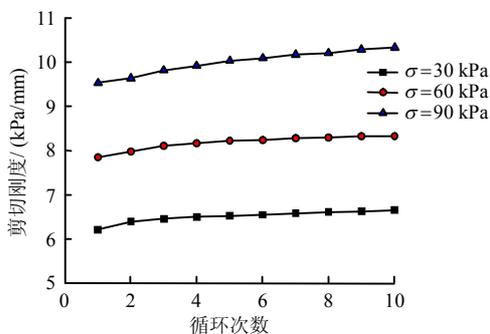


图 15 不同竖向应力下剪切刚度随循环次数的发展规律
Fig.15 Development of shear stiffness with cycle number under different vertical stresses

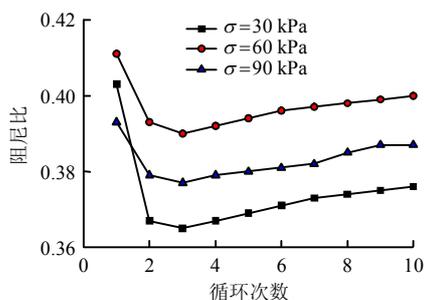


图 16 不同竖向应力下阻尼比随循环次数的发展规律
Fig.16 Development of damping ratio with cycle number under different vertical stresses

5 结 论

本文对三明治形加筋土筋-土界面进行了室内循环剪切试验，对比分析了不同条件下筋土界面的剪应力变化及体变规律，得到了以下几点结论：

- (1) 三明治形加筋土存在一个最优的薄砂层厚度，在该厚度时筋-土界面剪切强度最大。
- (2) 不同剪切幅值条件下，筋-土界面在循环剪切过程中都呈现出剪切硬化的特征和整体上的剪

缩。

- (3) 竖向应力越大，筋-土界面在循环剪切过程中的最大剪应力、剪切刚度就越大。

参 考 文 献

- [1] LIU C N, ZORNBERG J G, CHEN T C, et al. Behavior of geogrid-sand interface in direct shear mode[J]. **Geotechnical and Geoenvironmental**, 2009, 135(12): 1863—1871.
- [2] LIU C N, HO Y H, HUANG J W. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces[J]. **Geotextile and Geomembranes**, 2009, 27(1): 19—30.
- [3] 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—2582.
LIU Fei-yu, 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—2582.
- [4] VANGLA P, MADHAVI L G. Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour[J]. **Geotextiles & Geomembranes**, 2015, 44(3): 254—268.
- [5] 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—156.
LIU Fei-yu, 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—156.
- [6] 刘飞禹, 林旭, 王军, 等. 循环剪切作用对格栅与砂土界面剪切特性的影响[J]. **中国公路学报**, 2015, 28(2): 1—7.
LIU Fei-yu, LIN Xu, WANG Jun, et al. Effect of cyclic shear load on behavior of sand-geogrid interface[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2015, 28(2): 1—7.
- [7] 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.
- [8] VIEIRA C S, LOPES M L, CALDEIRA L M. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests[J]. **Gesynthetics**

- International**, 2013, 20(1): 26—38.
- [9] FOX P J, ROSS J D, SURAJ M, et al. Geomembrane damage due to static and cyclic shearing over compacted gravelly sand[J]. **Geosynthetics International**, 2011, 18(5): 272—279.
- [10] ABDI M R, ARJOMAND M A. Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2011, 29(6): 588—595.
- [11] ABDI M R, SADRNEJAD S A, ARJOMAND M A. Clay reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2009, 7(4): 224—235.
- [12] SAYEED M M A, RAMAIAH B J, RAWAL A. Interface shear characteristics of jute/polypropylene hybrid nonwoven geotextiles and sand using large size direct shear test[J]. **Geotextiles & Geomembranes**, 2014, 42(1): 63—68.
- [13] 交通部公路科学研究院. JTG E50-2006 公路工程土工合成材料试验规程[S]. 上海: 上海文化出版社, 2006. Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E50-2006 Highway engineering test procedures of geosynthetics[S]. Shanghai: Shanghai Culture Publishing House, 2006.

上接第 1990 页

- [12] KRASINSHI A. Numerical simulation of screw displacement pile interaction with non-cohesive soil[J]. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, 2014, 14(1): 122—133.
- [13] 杨仲轩, 李相崧, 明海燕. 砂土各向异性和不排水剪切特性研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2009, 26(2): 158—163.
YANG Zhong-xuan, LI Xiang-song, MING Hai-yan. Fabric anisotropy and undrained shear behavior of granular soil[J]. **Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)**, 2009, 26(2): 158—163.
- [14] SHI D D, XUE J F, ZHAO Z Y, et al. A DEM investigation on simple shear behavior of dense granular assemblies[J]. **Journal of Central South University**, 2015, 22(12): 4844—4855.
- [15] 周健, 史旦达, 吴峰, 等. 基于数字图像技术的砂土液化可视化动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 81—87.
ZHOU Jian, SHI Dan-da, WU Feng, et al. Visualized cyclic triaxial tests on sand liquefaction using digital imaging technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(1): 81—87.
- [16] ROTHENBURG L, BATHURST R. Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials[J]. **Geotechnique**, 1989, 39(4): 601—614.