

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S1.021

筋-土界面循环剪切刚度和阻尼比的试验研究

刘飞禹¹, 王 攀¹, 王 军^{2,3,4}, 胡秀青^{2,3,4}, 蔡袁强²

(1. 上海大学 土木系, 上海 200072; 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)

摘 要: 为了研究筋-土界面在遭受动力作用时的表现, 利用大型直剪仪对土工格栅、土工编织布、土工无纺布和砂土界面进行了一系列循环剪切试验, 得到了不同工况下界面的剪切刚度和阻尼比, 并探究了循环次数与剪切刚度和阻尼比之间的规律。研究表明, 同一循环次数时格栅-土界面的循环剪切刚度最大, 土工编织布-土界面的阻尼比最大; 剪切位移幅值为 3 mm 时 3 种竖向应力下界面都呈现出循环剪切硬化的特征, 随着循环次数的增加, 各竖向应力下的界面阻尼比有趋于某一值的趋势; 砂土密实度越大, 同一循环次数对应的剪切刚度越大, 阻尼比越小, 且随着循环次数的增加 3 种砂土密实度的界面阻尼比有趋于同一值的趋势; 循环剪切位移幅值为 5 mm 的界面发生循环剪切软化现象, 剪切位移幅值越大, 界面同一循环次数的阻尼比也越大。

关 键 词: 加筋土; 筋土界面; 循环剪切; 剪切刚度; 阻尼比

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增1-0159-07

Experimental research on reinforcement-soil interface stiffness and damping ratio under cyclic shearing

LIU Fei-yu¹, WANG Pan¹, WANG Jun^{2,3,4}, HU Xiu-qing^{2,3,4}, CAI Yuan-qiang²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, 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, Zhejiang, 325035, China;

4. Innovation Center of Tideland Reclamation and Ecological Protection, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang, 325035, China)

Abstract: In order to investigate the behavior of reinforcement-soil interface under dynamic load, a series of cyclic direct shear tests focused on geogrid, woven geotextile, non-woven geotextile with sand interface are performed through large-scale direct shear device. The shear stiffness and damping ratio of the interface in different conditions are gained; and then the relationship between cycle number and shear stiffness or damping ratio are analyzed. Results show that, in the same cycle number, the geogrid-sand interface has the largest value of shear stiffness; and the woven geotextile-sand interface has the largest value of damping ratio. The interface exhibit cyclic shear hardening in the three values of normal stress with the cyclic shear amplitude of 3 mm. The damping ratio of the interface in different normal stresses tends to a same stable value with the increase of cycle number. The interface shear stiffness is increased and damping ratio is decreased with sand relative density, and with the increase of cycle number the damping ratio of the interface in different sand relative densities tends to a same stable value. Cyclic shear degradation is observed in the interface suffering cyclic direct shear with shear amplitude of 5 mm; the interface with a larger shear amplitude in cyclic direct shear has larger value of stiffness.

Keywords: reinforced soil; reinforcement-soil interface; cyclic shearing; shear stiffness; damping ratio

1 引 言

加筋土结构广泛应用于路基、堤坝、边坡和挡

土墙等工程中, 筋材与土体界面的相互作用特性是评价加筋土结构安全性和稳定性的重要依据, 目前用于研究筋-土界面相互作用特性的方法主要有直

收稿日期: 2015-12-18

基金项目: 科技部国际合作专项 (No. 2015DFA71550); 国家自然科学基金 (No. 51478255, No. 51278383, No. 51478364); 上海市自然科学基金 (No. 14ZR1416100); 浙江省重点科技创新团队项目 (No. 2011R50020)。

This work was supported by the Program of International Science and Technology cooperation (2015DFA71550), the National Natural Science Foundation of China (51478255, 51278383, 51478364), the Science Foundation of Shanghai (14ZR1416100) and Key Innovation Team Project of Science and Technology of Zhejiang Province (2011R50020).

第一作者简介: 刘飞禹, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事加筋土及土动力学方面的研究工作。E-mail: lfyzy@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: wangjunx9s@zju.edu.cn

剪试验、拉拔试验、斜板试验、扭剪试验和数值模型试验^[1-5]，其中直剪试验是最常用于测试筋-土界面力学特性的方法之一。

国内外学者已经对筋-土界面静力条件下的直剪特性进行了较多的研究，徐超等^[6]、刘飞禹等^[7]、Fishman等^[8]、Lee等^[9]、Abu-farsakh等^[10]研究了筋材种类、填土类别、竖向应力、剪切速率、粗粒土级配、土样密实度和含水率等因素对筋-土界面静力直剪特性的影响。在动力直剪条件下的研究方面，Nye等^[11]研究了针刺土工合成材料与黏土界面的动力剪切特性，并分析了不同条件下界面刚度和阻尼比的变化规律。Ling等^[12]对土工格栅与黏土和与砂土混合物界面的循环剪切特性进行了研究，因直剪盒的尺寸过小，未对界面刚度与阻尼比进行探讨。Fox等^[13]利用大型直剪仪对土工膜与砂土界面的循环剪切特性进行了研究，给出了界面在单一条件下的刚度和阻尼比。Vieira等^[14]对石英砂与土工布界面的循环剪切特性进行了研究，同时分析了各种条件下界面刚度和阻尼比的发展规律。徐超等^[15]运行了一系列循环剪切试验，研究了不同条件下土工格栅与砂土界面的循环剪切特性，但未对界面刚度和阻尼比进行分析。

加筋土结构会遭受机械振动、波浪荷载和地震等动力作用，筋-土界面往往发生循环剪切。筋-土界面的剪切刚度和阻尼比是反映加筋界面在遭受动力作用时的动力响应的重要指标，然而，以往的研究中并没有针对筋-土界面剪切刚度和阻尼比较为全面的研究，且国内更是鲜见有对筋-土界面剪切刚度和阻尼比进行研究的相关报道。本次针对筋-土界面进行一系列大型循环剪切试验，研究了材料特性对界面刚度和阻尼比的影响，同时分析了不同条件下格栅-砂土界面的刚度和阻尼比的发展规律，为加筋土结构的设计和施工提供参考和依据。

2 试验方法

2.1 试验设备

试验用直剪仪为美国 Geocomp 公司生产的 ShearTrac III 室内大型直剪仪，能进行位移和应力两种控制条件下的直剪试验。图 1 为直剪仪的示意图，其直剪盒尺寸（长×宽×高）分别为，上盒为 305 mm×305 mm×100 mm，下盒为 405 mm×305 mm×100 mm。为了保证剪切过程中剪切面积的恒定，下剪切盒较上剪切盒长。剪切过程中上剪切盒位置固定，下剪切盒在剪切方向上的运动通过高精度电机带动一系

列齿轮进行控制，直剪仪水平方向最大剪切位移为 100 mm，其可控制的剪切速率范围为 0.000 03~15 mm/min。水平及竖向位移通过 LVDT 传感器进行测量后，由计算机机载软件自动读取。竖向应力通过油压千斤顶和反力架施加，并通过土样上方的刚性荷载板传至土体。

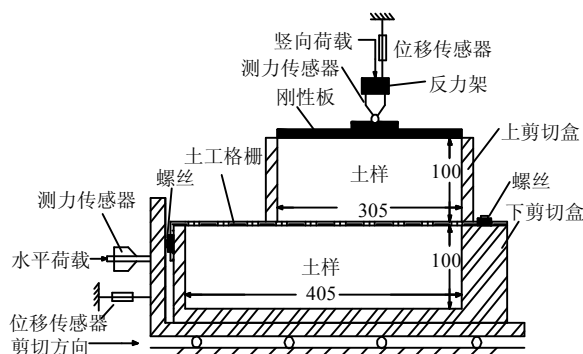


图 1 大型直剪仪示意图 (单位: mm)

Fig.1 Sketch of large-scale direct shear apparatus (uni: mm)

2.2 材料特性

加筋填土试样为单一粒径（1~2 mm）的石英砂，干密度为 2.65 g/cm³。土工合成材料分别为土工格栅、土工编织布和土工无纺布，其技术指标见表 1。

表 1 土工合成材料技术指标
Table 1 Technical indices of geosynthetics

土工合成材料	土工格栅	土工编织布	土工无纺布
单位面积质量/(g/m ²)	250	150	300
网孔尺寸(长×宽)/(mm×mm)	35×25		
纵、横肋尺寸/mm	5, 5		
抗拉强度/(kN/m)			
横		20	12
纵	20	28	10
极限/断裂延伸率/%			
横	13		64
纵	15	28	70
撕破强力/kN			
横			0.32
纵		0.4	0.28

2.3 试验方案

本次分别开展了不同条件下的循环剪切试验，研究了筋材特性、竖向应力 σ_v 、剪切幅值 A_w 和土样相对密实度 D_r 对筋土界面循环剪刚度和阻尼比的影响，试验方案见表 2。参考公路工程土工合成材料试验规程，将各组试验的剪切速率设定为 1 mm/min，循环剪切加载波形如图 2 所示（ T 为一个周期）。考虑到仪器本身的限制，将各组试验中的剪切循环次数定为 10 次。砂土试样密实度的控制采用

分层压实法, 将砂土试样分 5 层 (每层 2 cm) 填入上下剪切盒内, 控制每层填入的砂土质量相同, 并将其压至指定标高。装样时, 使用钢块、螺丝将土工合成材料固定在装满砂土的下剪切盒上并铺平, 保证剪切过程中沿筋-土界面进行剪切。

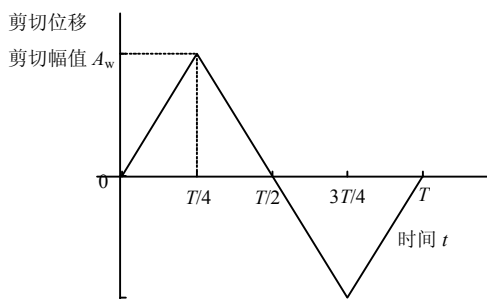


图 2 循环剪切波形

Fig.2 Waveform of the cyclic load

表 2 试验方案
Table 2 Testing scheme

试验编号	加筋材料	竖向应力 /kPa	剪切幅值 /mm	相对密实度 /%
GT-1	土工格栅	30	3	55
GT-2	土工格栅	90	3	55
GT-3	土工格栅	60	1	55
GT-4	土工格栅	60	5	55
GT-5	土工格栅	60	3	25
GT-6	土工格栅	60	3	85
GT-7	土工格栅	60	3	55
GT-8	土工编织布	60	3	55
GT-9	土工无纺布	60	3	55

3 剪切刚度与阻尼比

土体的刚度和阻尼比常用于土体的动力响应分析, Desai 等^[17]对刚度阻尼比的方法进行了修正并将其用于描述砂土-混凝土界面的动力特性。Yegian 等^[18]将其应用于土工膜-土工布界面的动力响应分析。近年来 Nye 等^[11]、Vieira 等^[14]将刚度与阻尼比应用于土工合成材料与土体界面的动剪切特性分析当中。本文通过类似的方法, 将剪切刚度与阻尼比用于衡量筋土界面的循环剪切特性。图 3 为单个滞回圈中剪切刚度与阻尼比计算过程中的参数定义。

在考虑同一滞回圈在两个剪切方向上的不对称性之后, 滞回圈中的剪切刚度 K 按式 (1) 计算:

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2} = \frac{\tau^1 + \tau^2}{2\Delta a} \quad (1)$$

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; Δa 为剪切位移幅值。相似地, 阻尼比 D 计算公式为

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{4\pi A_1} + \frac{A}{4\pi A_2} \right) = \frac{A}{4\pi \Delta a} \left(\frac{1}{\tau^1} + \frac{1}{\tau^2} \right) \quad (2)$$

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 3 中阴影部分面积。

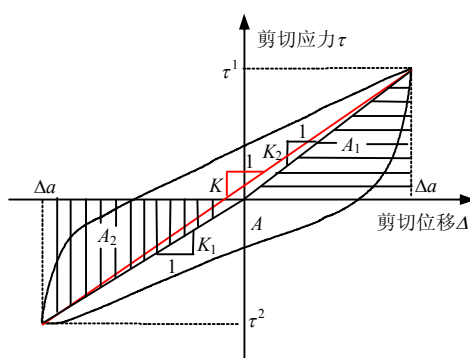


图 3 滞回圈中剪切刚度与阻尼比的计算

Fig.3 Calculation of secant shear stiffness and damping ratio from hysteresis loop

4 试验结果及分析

4.1 筋材特性的影响

选取 3 种较为常用的土工合成材料 (土工格栅、土工编织布和土工无纺布), 并针对其与砂土界面的剪切刚度与阻尼比进行研究。图 4 为竖向应力为 60 kPa、砂土相对密实度为 55%、循环剪切幅值为 3 mm 时 3 种土工合成材料-砂土界面的剪切刚度和阻尼比随着循环剪切次数发展的关系曲线。从图 4(a) 中可以看出, 3 种界面剪切刚度的发展呈现出相似的规律, 即在初始的几个循环当中, 随着循环次数的增加, 界面剪切刚度迅速增长, 此后剪切刚度的发展逐渐趋于平缓, 表明在循环剪切的过程当中界面呈现出循环剪切硬化的特征。同时, 同一循环次数对应的 3 种界面剪切刚度值之间又存在差异, 土工格栅-砂土界面的剪切刚度明显大于其他两种界面。土工格栅与砂土界面的剪切刚度较大, 这与界面抗剪强度的组成有关。土工布-砂土界面的抗剪强度主要由土颗粒与土工布的滑动摩擦提供, 而格栅-砂土界面的抗剪强度由格栅横肋的阻力、砂土颗粒与格栅纵肋的滑动摩擦和砂土颗粒间的摩擦咬合三部分组成, 土颗粒间的摩擦咬合作用在效力上明显大于土工布与土颗粒间的滑动摩擦, 格栅-砂土

界面表现出较大的剪切刚度。图 4(b)中, 3 种界面阻尼比的发展也存在着一致的规律性, 即随着循环次数的增加, 界面的阻尼比逐渐减少, 表明在遭受循环剪切时循环剪切次数将会对界面的安全性和稳定性产生一定的影响; 另外, 同一循环次数下土工无纺布-砂土界面的阻尼比明显较其他两种界面大; 阻尼比是衡量结构在遭受动力作用时能量耗散快慢的一个参量, 3 种界面阻尼比的大小排序为土工编织布>土工格栅>土工无纺布, 表明在遭受循环剪切作用时土工编织布-砂土界面在遭受循环剪切作用时的能量耗散更快。

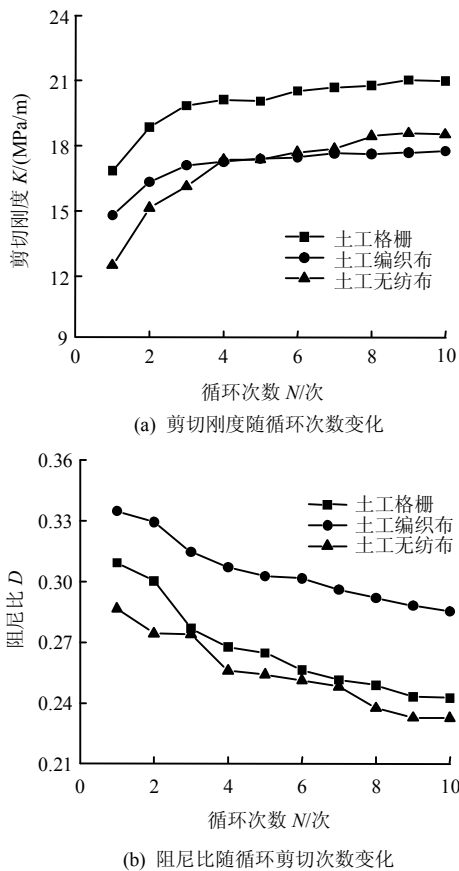


图 4 剪切刚度和阻尼比随循环剪切次数的发展规律 ($\sigma = 60 \text{ kPa}$)

Fig.4 Development of shear stiffness and damping ratio with cycle number ($\sigma = 60 \text{ kPa}$)

4.2 竖向应力的影响

图 5 为砂土相对密实度为 55%、剪切位移幅值为 3 mm 时 3 种竖向应力 ($\sigma = 30、60、90 \text{ kPa}$) 下的格栅-砂土界面的剪切刚度和阻尼比随着循环剪切次数发展的关系曲线。从图中可以看出, 3 种竖向应力条件下界面的剪切刚度都随着循环次数的增加而得到发展, 且竖向应力越大, 同一循环次数对应的剪切刚度越大, 见图 5(a)。相关研究表明^[9], 筋-土界面的剪切强度与纯土的剪切强度同时符合

摩尔-库仑定理, 因此, 竖向应力的增加必然会导致界面剪切刚度的增加。从图 5(b)可以看出, 在初始的几个剪切循环中 3 种竖向应力下界面的阻尼比存在着较大的差异, 随着循环次数的增加 3 种竖向应力下的界面阻尼比的发展有趋于同一值的趋势, 表明在不考虑高竖向应力时的土颗粒破碎和材料变形磨损等界面的物态变化时, 无论在何种应力水平下格栅-土界面在遭受循环剪切时的能量耗散会随着循环次数的增加而趋于同一个稳定值。

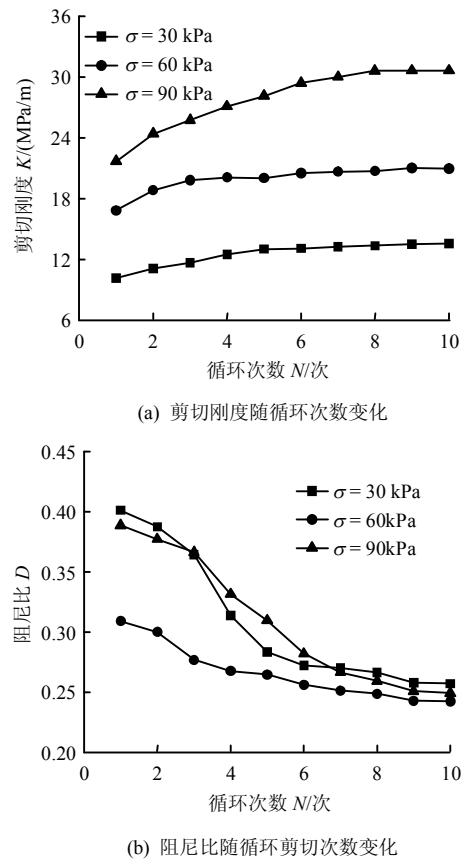


图 5 3 种竖向应力下剪切刚度和阻尼比随循环剪切次数发展规律

Fig.5 Development of shear stiffness damping ratio with cycle number under three kinds of vertical stress

4.3 砂土密实度的影响

填料密实度是影响筋-土界面直剪特性的一个重要参数, 目前仍然缺少有关砂土密实度对筋-土界面循环剪切特性影响的研究成果。本文选取松砂 ($D_r = 25\%$)、中密砂 ($D_r = 55\%$) 和密实砂 ($D_r = 85\%$) 3 种不同密实状态的砂土作为加筋填料进行研究。图 6 为在竖向应力为 60 kPa、剪切位移幅值为 3 mm 时 3 种砂土密实度下的格栅-砂土界面的剪切刚度和阻尼比随着循环剪切次数发展的关系曲线。从图 6(a)中可以看出, 砂土密实度越大, 同一循环次数对应的界面剪切刚度也越大, 表明砂土密

实度大的界面抵抗土体变形能力更强。值得一提的是,本研究并没有在高密实度砂土-格栅界面观察到循环剪切软化现象,与 Shahrou 等^[19]针对土与结构接触面的研究存在差异。从图 6(b)中发现,砂土密实度越高,同一循环次数对应的界面阻尼比越小,与松砂和中密砂相比,密砂-格栅界面在循环剪切过程中的能量耗散更加缓慢;随着循环剪切次数的增加,3 种密实度砂土-格栅界面的阻尼比的发展有趋于同一值的趋势;不同密实度砂土-格栅界面在循环剪切的过程中都会发生由土颗粒破碎和位置调整引起的土体密实化、格栅磨损等物态变化,循环剪切初期,由于密实度的差异,界面在循环剪切时的能量耗散会有较大差别;随着循环剪切的进行,这种由土体密实度造成的差异逐渐缩小,造成了在循环剪切后期界面能量耗散的趋同性。

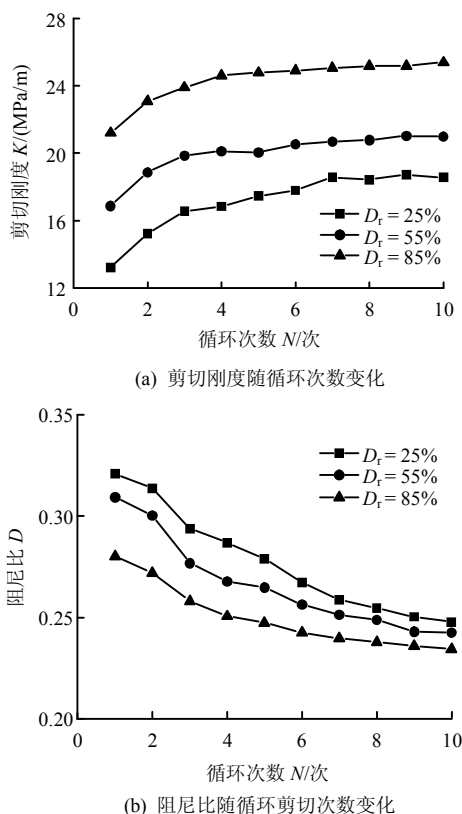


图 6 3 种砂土剪切刚度和阻尼比随循环次数的发展规律
Fig.6 Development of shear stiffness and damping ratio with cycle number for three kinds of sand

4.4 循环剪切幅值的影响

图 7 为竖向应力为 60 kPa、砂土密实度为 55% 时 3 种剪切位移幅值条件下的格栅-砂土界面的剪切刚度和阻尼比随着循环剪切次数发展曲线。从图 7(a)中可以看出,随着循环次数的增加,循环剪切位移幅值 $A_w = 5$ mm 的界面剪切刚度在逐渐减小,表明界面在循环剪切的过程中发生了循环剪切软化

现象。在遭受位移幅值为 1、3 mm 时的循环剪切时格栅-砂土界面都呈现出剪切硬化的特征。剪切位移幅值对筋-土界面循环剪切刚度的影响已有学者关注。Vieira 等^[14]在针对土工布-砂土界面的循环剪切试验中认为,各循环剪切幅值下的界面在循环剪切过程中都呈现出循环剪切硬化的特征,循环剪切幅值越大,同一循环次数对应的剪切刚度越小,与本研究所得结论有较大差别。循环剪切位移幅值为 5 mm 的界面发生了循环剪切软化现象,产生这种现象的原因可能有两个:(1)循环剪切幅值越大,循环剪切过程中格栅的磨损越严重,格栅的损耗是造成界面抗剪强度退化原因之一;(2)循环剪切幅值过大,在初始剪切循环中界面在剪切位移为 5 mm 之前就达到了同条件下的单调直剪强度,直接影响了之后抗剪强度随循环剪切次数的发展。图 7(b)为不同剪切位移幅值条件下阻尼比随循环剪切次数的发展规律曲线。从图中可以看出,剪切位移幅值越大,界面同一循环次数对应的阻尼比的值也越大,表明位移幅值的增加导致界面在循环剪切时的能量耗散更大,同时可见剪切幅值为 5 mm 的界面阻尼比随着循环次数的增加而增加,与其余两种幅值条件下的规律相反。

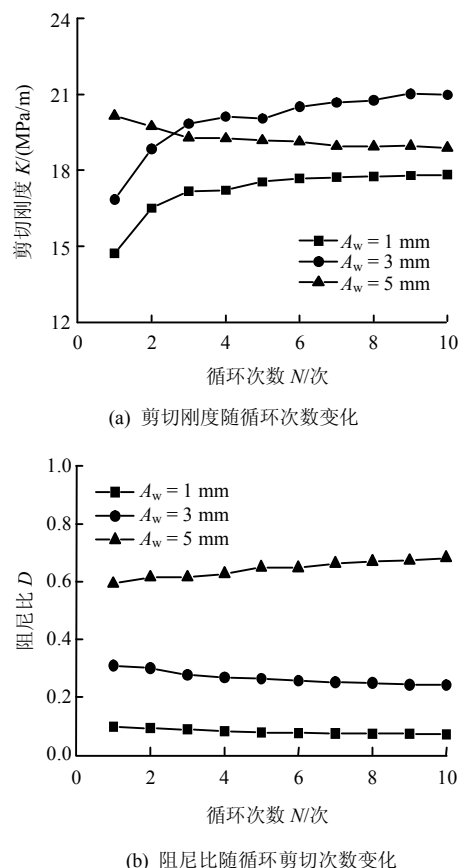


图 7 剪切刚度和阻尼比随循环剪切次数的发展规律
Fig.7 Development of shear stiffness and damping ratio

with cycle number

5 讨 论

结构形式、材料组成、计算方法和试验条件等因素都会对筋-土界面的剪切刚度和阻尼比产生影响,作为试验条件中的一项,循环剪切次数对界面动力响应的影响并没有被业内学者充分研究。由于试验设备本身存在的缺陷,本研究有关循环剪切次数的结论都是在10个循环次数条件下得到的,试验次数虽然不能完全反映加筋土结构在遭受地震、交通荷载等反复动力作用条件下的特性,但仍然可以在一定程度上为工程实际和后续的研究提供参考依据。至于在更多的循环剪切次数下界面剪切刚度和阻尼比变化规律是否会发生突变,则需要进一步的研究。

6 结 论

(1) 3种筋材-砂界面的剪切刚度都随着循环次数的增加而增加,阻尼比都随着循环次数的增加而减少。循环次数相同时,格栅-砂界面的剪切刚度最大,土工编织布-砂界面的阻尼比最大。

(2) 剪切幅值为3 mm时,各竖向应力条件下的界面在循环剪切中都呈现出循环剪切硬化的特征,且竖向应力越大,同一循环次数对应的剪切刚度越大。

(3) 砂土密实度越大,同一循环次数对应的界面剪切刚度越大,阻尼比越小。各密实度下的界面阻尼比有随着循环次数增加而趋于同一值的趋势。

(4) 剪切位移幅值为1 mm和3 mm的界面在循环剪切中都呈现出剪切硬化的特征,剪切位移幅值为5 mm的界面发生循环剪切软化现象。剪切幅值越大,同一循环次数对应的界面阻尼比越大。

参 考 文 献

- [1] BERGADO D T, RAMANA G V, SIA H I, et al. 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.
- [2] MADHAV M R, GURUNG N, IWAO Y. A theoretical model for the pull-out response of geosynthetic reinforcement[J]. **Geosynthetics International**, 1998, 5(4): 399—424.
- [3] EID H T. Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2011, 29: 335—344.
- [4] BRIANCON L, GIRARD H, GOURC J P. A new procedure for measuring geosynthetic friction with an inclined plane[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2011, 29(5): 472—482.
- [5] ZHOU J, CHEN J F, XUE J F, et al. Micro-mechanism of the interaction between sand and geogrid transverse ribs[J]. **Geosynthetics International**, 2012, 19(6): 426—437.
- [6] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响[J]. **岩土力学**, 2010, 31(10): 3101—3106.
- XU Chao, MENG Fan-xiang. Effect of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3101—3106.
- [7] 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.
- [8] FISHMAN K L, PAL S. Further study of geomembrane/cohesive soil interface shear behavior[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1994, 13(9): 571—590.
- [9] LEE K M, MANJUNATH V R. Soil-geotextile interface friction by direct shear tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(1): 238—252.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] LING H I, WANG J P, LESHCHINSKY D. Cyclic behaviour of soil-structure interfaces associated with modular-block reinforced soil-retaining walls[J]. **Geosynthetics International**, 2008, 15(1): 14—21.
- [13] FOX P J, ROSS J D, SURA J M, et al. Geomembrane

- damage due to static and cyclic shearing over compacted gravelly sand[J]. **Geosynthetics International**, 2011, 18(5): 272—279.
- [14] VIEIRA C S, LOPES M D L, CALDEIRA L. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests[J]. **Geosynthetics International**, 2013, 20(1): 26—37.
- [15] 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 cyclic shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1553—1559.
- [16] 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]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Highway Science Research Institute of Ministry of Communications. JTG E50-2006 Test methods of geosynthetics for highway engineering[S]. Beijing: People Traffic Press, 2006.
- [17] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1985, 111(6): 793—815.
- [18] YEGIAN M K, KADAKAL U. Geosynthetic interface behavior under dynamic loading[J]. **Geosynthetics International. Special Issue on Geosynthetics in Earthquake Engineering**, 1998, 5(1-2): 1—16.
- [19] SHAHROUR I, REZAIE F. An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 1997, 21(1): 21—39.
- Knowledge-based System, 1998(10): 431—440.
- [10] 胡宝清. 可拓评价方法在围岩稳定性分类中的应用[J]. 水利学报, 2000, 44(2): 66—70.
- HU Bao-qing. Application of extension assessment method to stability classification of surrounding rocks[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2000, 44(2): 66—70.
- [11] 罗宝力, 王子茹. 基于多目标可变模糊评价法的导流隧洞围岩稳定性分级研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 113—116.
- LUO Bao-li, WANG Zi-ru. Study on variable fuzzy evaluation for stabilizing of surrounding rock in diversion tunnel[J]. **Water Resources and Power**, 2009, 27(3): 113—116.

上接第 144 页

- [7] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究和发展, 1995, 32(6): 16—21.
- LI De-yi, MENG Hai-jun, SHI Xue-mei. Membership clouds and membership cloud generations[J]. **Journal of Computer Research and Development**, 1995, 32(6): 16—21.
- [8] LI De-yi, SHI Xue-mei, WARD P, et al. Soft inference mechanism based on cloud models[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Logic Programming and Soft Computing. Bonn: Reach Studies Press, 1997: 38—63.
- [9] LI De-yi, HAN Jian-wei, SHI Xue-mei. Knowledge representation and discovery based on linguistic atoms[J].