

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.083

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



颗粒形状对粗粒土-格栅界面剪切特性的影响

刘飞禹¹, 郑其婷¹, 王军², 应梦杰¹

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

摘要:为研究颗粒形状对粗粒土-格栅界面剪切行为的影响,选择碎石和具有相同粒径分布的玻璃珠作为试验材料,利用动态直剪仪对碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面进行一系列单调直剪试验、循环剪切试验和循环后单调直剪试验,分析竖向应力分别为30、60、90 kPa下加筋碎石和加筋玻璃珠界面的单调直剪特性;研究在位移幅值分别为1、3、6、9、12、15 mm的循环加载作用下两种加筋界面的循环剪切特性,并对比分析了循环剪切前、后两种加筋界面单调剪切特性的异同点。结果表明:单调直剪试验中,3种竖向应力下碎石-格栅界面的抗剪强度和最大剪胀量均大于玻璃珠-格栅界面的相应值。循环剪切试验中,在不同剪切幅值的循环加载作用下,碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的循环剪切行为存在差异。循环后单调直剪试验中,碎石-格栅界面循环后的界面抗剪强度较未经受循环加载的界面有所提高,幅值为15 mm的界面除外;所有幅值下玻璃珠-格栅界面循环后的抗剪强度均发生退化。

关键词:道路工程;加筋土;直剪试验;颗粒形状

中图分类号:TU411.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)06-0048-09

Effects of particle shape on shear behaviors of interface between coarse-grained soil and geogrid

LIU Feiyu¹, ZHENG Qiting¹, WANG Jun², YING Mengjie¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: In order to study the effect of particle shape on shear behaviors of interface between coarse-grained soil and geogrid, the gravel and glass beads with the same particle size distribution were selected as test materials. A series of monotonic direct shear tests, cyclic shear tests and post-cyclic direct shear tests were carried out on the gravel-geogrid interface and glass bead-geogrid interface using a dynamic direct shear apparatus. The monotonic direct shear characteristics of the interface between reinforced gravel and reinforced glass beads under normal stresses of 30, 60, 90 kPa were analyzed. Then, the cyclic shear characteristics of two reinforced interfaces under cyclic loading with displacement amplitudes of 1, 3, 6, 9, 12, 15 mm were studied. The similarities and differences of monotonic shear characteristics of the two

收稿日期:2020-05-17

基金项目:国家自然科学基金(51678352、51622810、51878402、51978534)

作者简介:刘飞禹(1980-),博士,教授,主要从事加筋土及土动力学研究,E-mail:lffyju@shu.edu.cn。

王军(通信作者),博士,教授,E-mail:sunnystar1980@163.com。

Received:2020-05-17

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 51678352, 51622810, 51878402, 51978534)

Author brief:LIU Feiyu (1980-), main research interests: reinforced soil and soil dynamics, E-mail: lffyju@shu.edu.cn.

WANG Jun (corresponding author), PhD, professor, E-mail: sunnystar1980@163.com.

reinforced interfaces before and after cyclic shear were compared and analyzed. The results show that in the monotonic shear tests, the shear strength and maximum dilation of gravel-geogrid interface under the three types of normal stresses are greater than the corresponding values of glass beads-geogrid interface. In the cyclic shear tests, the cyclic shear behaviors of gravel-geogrid and glass beads-geogrid interfaces under the cyclic loading with different shear amplitudes are not exactly the same. In the post-cyclic direct shear tests after cycling, the interface shear strength of gravel-geogrid interface after cycling is greater than that of the interface without cyclic loading, except for the interface with amplitude of 15 mm, while the corresponding value of glass beads-geogrid interface at all amplitudes is degraded.

Keywords: road engineering; reinforced soil; direct shear test; particle shape

目前,加筋土结构已在工程中得到广泛应用,筋-土界面间相互作用机理研究的重要性日益凸显。由于筋-土界面间作用方式的多样化,研究界面间剪切机制可以有效地提高加筋土结构的安全性和稳定性。

在筋-土界面静力特性的研究方面,Vangla等^[1]提出了颗粒尺寸对加筋砂界面剪切强度的影响,得出中等粒径的砂与界面单位面积有效接触点的数量越多,界面抗剪强度越高。刘飞禹等^[2]选取粗砂、粗细混合砂和细砂3种材料,研究了颗粒级配对筋-土界面剪切特性的影响,并建立了同时考虑限制粒径和竖向应力影响的界面剪胀系数公式。赵程等^[3]对粗砂和结构物界面进行了直剪试验,结果表明,试样的变形特性与剪切带有关。李丽华等^[4]分析了未加筋、三向格栅加筋和土工格室加筋3种情况下界面的剪切性能,发现土工格室加筋效果较优。王军等^[5]通过大型直剪试验研究了填料平均粒径与土工格栅孔径尺寸间的比例关系对界面剪切行为的影响。Sweta等^[6-7]探讨了未加筋和土工格栅加筋道碴在不同剪切速率下的性能,得出格栅加筋道碴界面和道碴-亚道碴界面的抗剪强度受剪切速率影响较大的结论。上述学者从填料性质、筋材特性以及试验条件等方面对筋-土界面的静力剪切特性进行了较为全面的研究。

动荷载作用下筋-土界面间剪切特性和传递机理对土工合成材料加筋土结构的设计和性能分析有着重要的意义。刘飞禹等^[8-10]研究了在颗粒粒径、粒孔比、竖向应力、位移幅值等因素的循环剪切作用下筋-土界面的强度特性和体积变化行为。王军等^[11]讨论了不同颗粒粒径下界面的循环剪切行为,并分析了界面的剪切刚度和阻尼比。Nye等^[12]分析了剪切位移幅值、循环次数、频率和运动波形对材

料循环剪切响应的影响,提出界面循环剪切行为主要受到剪切位移幅值的影响。Vieira等^[13]发现循环加载不会导致循环后界面峰值剪切强度的降低;然而,大位移下界面后循环剪切强度表现出明显的降低。Feng等^[14]开发了一种大型简易剪切装置,用于研究双向直线、交叉和圆形剪切路径中砾石-钢界面的三维单调和循环剪切行为。

近年来,颗粒形状对筋-土界面的影响已引起很多学者的关注。Cho等^[15-16]指出,颗粒形状作为一种重要的填料特性指数,需要对其进行适当的表征和记录。Alshibli等^[17]通过三轴试验研究了颗粒形态对应力-应变响应和体变行为的影响,并建立了可以预测峰值摩擦角、临界摩擦角和剪胀角的统计模型。Tsomokos等^[18]在空心圆柱试验中发现角砂的强度随应变增加不断增加,之后表现出稳定的响应;而圆形砂在瞬态峰值强度后表现出不稳定的行为。薛亚东等^[19]对不同砾石形状的砂砾混合物进行了直剪试验研究,结果表明,角砾石界面的抗剪强度和剪胀性更大。Afzali-Nejad等^[20]采用角砂和玻璃珠分别与土工布和钢界面进行了一系列直剪试验,发现玻璃珠试样的峰值摩擦角、残余摩擦角和剪胀角均小于角砂;同样地,Anubhav等^[21]也做了相似的研究,发现颗粒形状显著影响界面行为,尤其是峰后行为。此外,Xiao等^[22]发现界面峰值状态摩擦角与最大膨胀角之间的关系与颗粒形状无关。

综上所述,采用直剪试验来研究颗粒形状对粗粒土-格栅界面剪切行为影响的相关报道较少,尤其缺乏颗粒形状对筋-土界面动力剪切特性影响的相关讨论。笔者对碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面分别进行了一系列直剪试验,探讨了颗粒形状对粗粒土-格栅界面静、动剪切特性的影响,并对比分析了加筋碎石和加筋玻璃珠界面在经受了不同位移幅值循环

加载作用后界面静力直剪特性的变化。

1 试验研究

1.1 试验仪器

使用的直剪试验装置为同济大学自主研制设计的 RAW-60/2 微机控制电液伺服动态直剪仪^[23],如图 1 所示。上剪切盒的内部尺寸(长×宽)为 600 mm×200 mm,下剪切盒的内部尺寸(长×宽)为 800 mm×200 mm,总深度为 100 mm。该设备的竖向和水平向均能够运行应力和位移两种控制,试验竖向采用应力控制,水平向采用位移控制。在剪切过程中,竖向应力、竖向位移、剪应力和剪切位移均通过自动化的数据采集系统获得。



图 1 动态直剪仪示意图

Fig. 1 Schematic view of the dynamic direct shear device

1.2 试验材料

选择碎石(A)和具有相同颗粒级配的玻璃珠(R)作为研究的角形和圆形粗粒土,选用玻璃珠的原因在于其成分主要为 Al_2O_3 ,与碎石成分相近,可较好地模拟粗粒土。两种试样的基本物理指标:有效粒径 $D_{10}=4.42$ mm,中值粒径 $D_{30}=4.97$ mm,平均粒径 $D_{50}=5.90$ mm,限制粒径 $D_{60}=6.45$ mm,不均匀系数 $C_u=1.46$,曲率系数 $C_c=0.87$;碎石的最大和最小孔隙比 e_{max} 和 e_{min} 分别为 0.80 和 0.59,玻璃珠的 e_{max} 和 e_{min} 分别为 0.62 和 0.58。图 2 给出了用于理解碎石和玻璃珠物理外观的照片。试验选用的加筋材料为双向聚丙烯土工格栅,其各项技术指标如表 1 所示。

表 1 土工格栅技术指标

Table 1 Main characteristics of the geogrid

土工合成材料	单位面积质量/ ($g \cdot m^{-2}$)	网孔尺寸	纵、横肋尺		极限延伸率/%		极限抗拉强度/ $(kN \cdot m^{-1})$	
			寸/mm	寸/mm	纵向	横向	纵向	横向
聚丙烯土工格栅	280	30 mm×30 mm	5.5	5.5	13	15	20	20



(a)碎石 (b)玻璃珠

图 2 碎石和玻璃珠示意图

Fig. 2 Schematic view of gravel and glass beads

1.3 试验方案

在碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面上共进行 30 次位移控制直剪试验,包括 6 次单调直剪试验(MDS),12 次循环剪切试验(CDS)和 12 次循环后单调直剪试验(PCDS),试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 2 Testing programs

试验类型	粗粒土试样	竖向应力/kPa	剪切幅值/mm	循环次数 N
MDS	碎石	30、60、90		
CDS	玻璃珠	60	1、3、6、9、12、15	100
PCDS		60		

首先,在竖向应力分别为 30、60、90 kPa,剪切速率为 1 mm/min 的条件下进行碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的单调直剪试验,当水平位移达到 60 mm 时,剪切结束。其次,在竖向应力为 60 kPa,剪切频率为 0.05 Hz,剪切幅值(Δ_a)分别为 1、3、6、9、12、15 mm 的条件下对两种加筋界面分别进行循环剪切试验;循环剪切路径如图 3 所示,下剪切盒沿①—②—③—④—①这一路径进行循环剪切;循环载荷的波形为正弦波,当达到 100 次时,终止测试。最后,在循环剪切试验结束的原试样上进行循环后单调直剪试验。

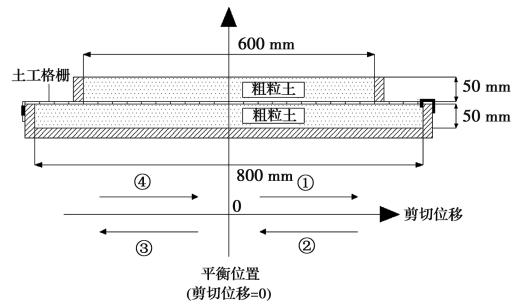


图 3 循环剪切路径示意图

Fig. 3 Schematic view of cyclic shear paths

为了进行比较,根据上、下剪切盒的相对尺寸计算出它们的装样质量,然后通过方形金属板以不同的夯实力将碎石和玻璃珠以相同的密实度放入剪切盒中,保证试验中所有试样的相对密实度(D_r)均为75%。

2 结果分析

2.1 单调直剪试验

图4给出了竖向应力分别为30、60、90 kPa的单调直剪试验中碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的剪应力-剪切位移曲线和竖向位移-剪切位移曲线。其中, τ_A 、 τ_R 、 δ_A 和 δ_R 分别表示单调直剪试验中加筋碎石和加筋玻璃珠界面的剪应力和竖向位移,例如,图4(a)中 $\tau_A-\sigma_{30}$ 表示竖向应力为30 kPa下碎石-格栅界面的剪应力。

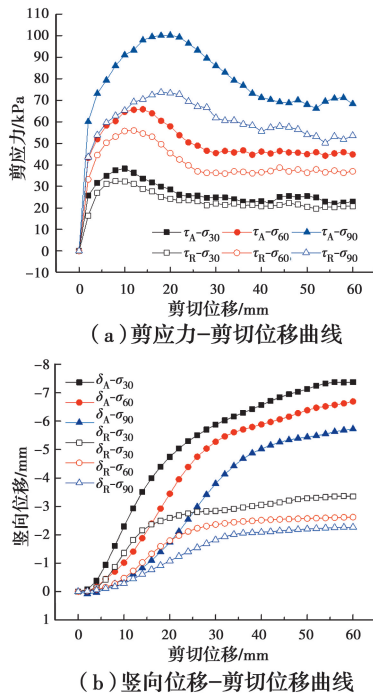


图4 碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面单调直剪试验结果

Fig. 4 Results of monotonic direct shear tests for gravel-geogrid and glass beads-geogrid interface

从图4(a)中可以看出:在剪切初期,两种加筋界面的剪应力显著上升,之后随着水平位移的持续增加而下降,表现出明显的界面软化行为。定义剪应力-剪切位移曲线中的最大剪应力为峰值剪切强度,曲线刚开始进入残余段的剪应力直至剪切结束时的剪应力的平均值为残余剪切强度^[24]。3种竖向应力下,碎石-格栅界面的峰值剪切强度和残余剪切

强度均高于玻璃珠-格栅界面的相应值。这可能与试样的颗粒形状有关,棱角度较大的碎石之间咬合比较紧密,在剪切过程中,碎石比玻璃珠需要更大的剪切力来破坏颗粒与颗粒之间以及颗粒与格栅之间的互锁^[25];而玻璃珠颗粒之间基本为“点对点”接触,试样间不连续性和随机性更大,很难形成颗粒之间接触力的传递路径^[26-27],剪切强度较低。

由于试样一直保持恒定面积剪切,因此,界面的体积响应可以用竖向位移来表示,负值表示剪胀。从图4(b)中可以看出:3种竖向应力下,碎石-格栅界面的最大剪胀量分别为-7.37、-6.69、-5.72 mm;相应地,玻璃珠-格栅界面的最大剪胀量分别为-3.35、-2.62、-2.27 mm。可以看出,加筋碎石和加筋玻璃珠界面的最大剪胀量均随竖向应力的增加而降低,即高应力抑制了试样剪胀。此外,碎石-格栅界面的最大剪胀量均大于玻璃珠-格栅界面的相应值,这反映了颗粒形状对界面剪胀性的显著影响。对玻璃珠-格栅界面来说,剪切过程中主要以玻璃珠试样的滑动和滚动为主,界面剪胀量较小;而对碎石-格栅界面来说,剪切过程中,除了上述作用外,棱角度大、球形度低的碎石颗粒之间不断地翻滚、爬升和隆起,因而界面剪胀量更大^[28]。

根据摩尔-库伦准则,将竖向应力分别为30、60、90 kPa下碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的峰值剪应力和残余剪应力进行线性回归分析,得到了两种加筋界面的抗剪强度参数,如图5所示。将通过峰值剪应力和残余剪应力所得的似黏聚力分别记为峰值似黏聚力(c_p)和残余似黏聚力(c_r),内摩擦角分别记为峰值内摩擦角(φ_p)和残余内摩擦角(φ_r)。可以看出,加筋碎石的 c_p 、 c_r 、 φ_p 和 φ_r 分别为6.16 kPa、2.51 kPa、45.90°、37.08°;加筋玻璃珠的 c_p 、 c_r 、 φ_p 和 φ_r 分别为9.74 kPa、4.29 kPa、34.52°和29.14°。可见,加筋玻璃珠的峰值似黏聚力和残余似黏聚力均大于加筋碎石界面的相应值;而玻璃珠-格栅界面的峰值内摩擦角和残余内摩擦角均明显低于加筋碎石界面的相应值。

2.2 循环剪切试验

在碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面上进行了竖向应力为60 kPa、剪切频率为0.05 Hz、6种剪切位移幅值($\Delta_a = 1, 3, 6, 9, 12, 15$ mm)的循环剪切试验。图6给出了 Δ_a 为1 mm时碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的剪应力-剪切位移曲线,由于滞回圈比较

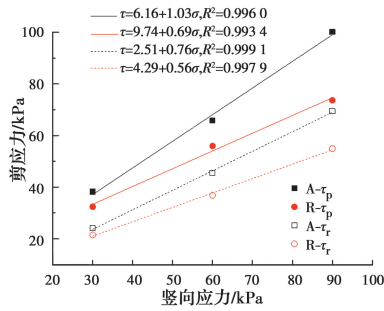


图 5 碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的峰值剪应力
和残余剪应力包络曲线

Fig. 5 Failure envelopes for peak and residual shear stress of gravel-geogrid and glass beads-geogrid interface

多,为了表达的清晰性,图中只给出了第 1、5、10、50 和 100 圈的试验结果。如图 6(a)所示, τ_a 和 τ_b 分别代表一个滞回圈中的最大剪应力和最小剪应力;本文中取 τ_a 和 τ_b 绝对值的平均值为该循环圈的剪应力(τ);定义 100 个滞回圈中出现的最大剪应力为界面抗剪强度(τ_m)。对于给定的剪切幅值,剪应力随循环次数的增加而减小,呈现出界面软化特征^[13]。

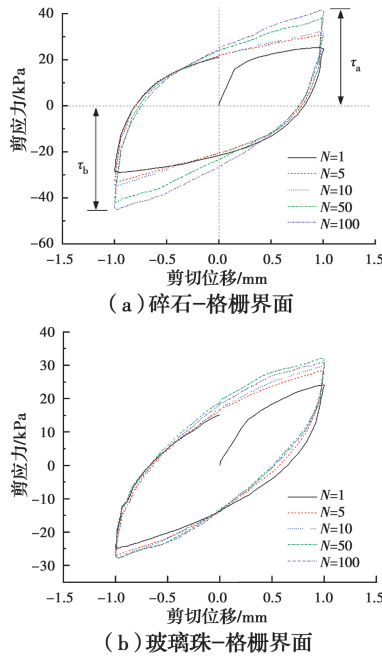


图 6 循环剪切试验中碎石-格栅和玻璃珠-格栅
界面的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves of cyclic direct shear tests for gravel-geogrid and glass beads-geogrid interface

从图 6 中可以看出,碎石-格栅界面的剪应力随循环圈数的增加一直增大,滞回圈一直处于外扩状态,表现为剪切硬化的特征;而玻璃珠-格栅界面的剪应力随循环圈数先增加后降低, $N=100$ 圈时对应的剪应力值低于 $N=50$ 圈时对应的值,呈现出剪切

软化的特征。

图 7 给出了 6 种剪切幅值下碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的循环剪切强度曲线,具体数值如表 3 所示。对于碎石-格栅界面, Δ_a 为 1、3 mm 时,循环至 100 圈时,界面剪应力仍在增加; Δ_a 为 6、9、12、15 mm 时,界面达到一定的循环次数后,发生软化现象,该循环次数对应的剪应力即界面抗剪强度(τ_m),之后界面剪应力逐渐减小;且幅值越大,界面剪切软化时所对应的循环次数越小。对于玻璃珠-格栅界面,所有幅值下,100 次循环内界面均循环剪切软化;且幅值越大,界面软化时所对应的循环次数越小;幅值超过 9 mm 后,界面刚开始循环即软化。可见,循环剪切试验中,玻璃珠-格栅界面发生软化现象时所对应的幅值小于碎石-格栅界面的相应值。

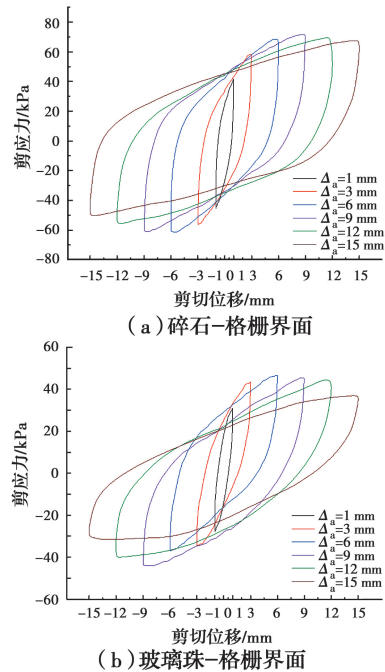


图 7 不同剪切幅值下两种加筋界面抗剪强度的比较
Fig. 7 Comparison of shear strength for two reinforced interfaces with varying displacement amplitudes

表 3 碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面循环剪切试验的结果
Table 3 Results of cyclic direct shear tests on gravel-geogrid and glass beads-geogrid interface

界面类型	剪切幅值/mm	循环剪切强度/kPa	软化时的次数 N
碎石-格栅	1	43.48	>100
	3	57.34	>100
	6	64.99	93
	9	66.29	50
	12	62.46	26
	15	58.82	17

续表 3

界面类型	剪切幅值/mm	循环剪切强度/kPa	软化时的次数 N
玻璃珠-格栅	1	29.38	67
	3	38.92	61
	6	41.74	36
	9	44.73	1
	12	42.19	1
	15	34.27	1

2.3 循环后单调直剪试验

图 8 给出了循环后单调直剪试验中碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的剪应力-剪切位移曲线,其中, $\Delta_a=0$ mm 所对应的曲线表示单调直剪试验的结果。可以看出,对于碎石-格栅界面,循环加载后的单调剪切强度均大于循环加载前的单调剪切强度,幅值为 15 mm 的除外,这是由于循环加载使加筋界面略微致密化,导致循环加载后静态剪切强度增加^[29]。而对于玻璃珠-格栅界面,循环加载后的静态强度均小于循环加载前的静态强度。

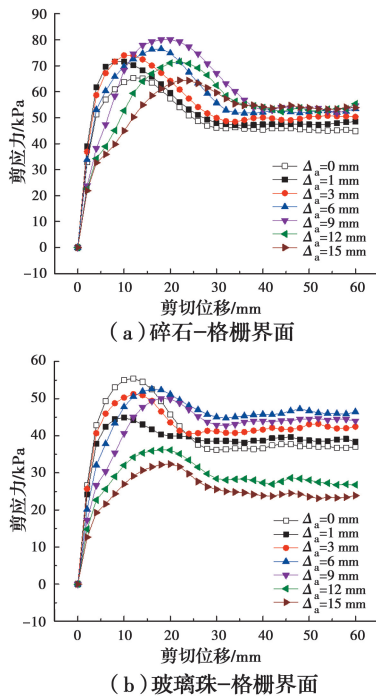


图 8 循环后单调直剪试验中碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 8 Shear stress-shear displacement curves of gravel-geogrid and glass beads-geogrid interface in PCDS tests

此外,两种加筋界面在循环后单调直剪试验中的峰值剪切强度随剪切幅值的增加先增加后减小。

碎石-格栅界面和玻璃珠-格栅界面均存在临界应变幅值,加筋碎石界面的临界应变幅值为 9 mm,而加筋玻璃珠界面的临界应变幅值为 6 mm,小于此幅值时,循环后的强度随剪切幅值的增大而增大,反之剪切强度减小。临界应变幅值后的试验结果与 Seed 等^[30]的研究结果较为一致,即循环加载期间较大的应变会导致更大的强度损失。

图 9 给出了单调直剪试验和循环后单调直剪试验中碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的峰值剪切强度、残余剪切强度以及对应的位移。将单调直剪试验中的峰值剪切强度、残余剪切强度以及达到峰值剪切强度和残余剪切强度时所对应的峰值剪切位移和残余剪切位移分别记为 τ_p 、 τ_r 、 δ_p 和 δ_r 。相应地,循环后单调直剪试验中的相应值分别记为 τ_p^* 、 τ_r^* 、 δ_p^* 和 δ_r^* 。

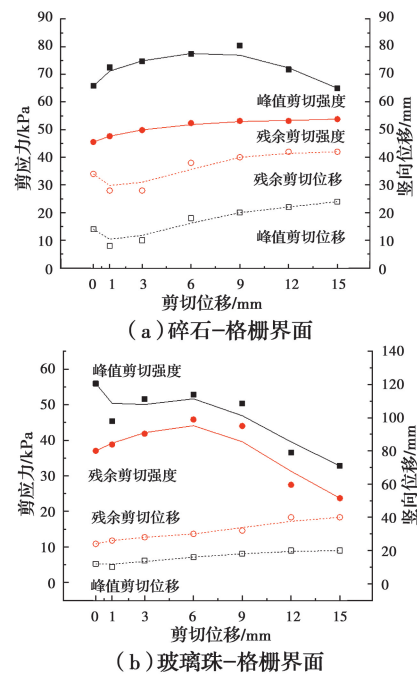


图 9 不同位移幅值下两种加筋界面循环后单调峰值和残余剪切强度以及对应的位移

Fig. 9 Peak and residual shear strength and corresponding displacements in PCDS tests of two reinforced interfaces under different displacement amplitudes

对碎石-格栅界面来说, $\Delta_a = 1, 3$ mm 时, $\delta_p^* < \delta_p$, 其余幅值下, $\delta_p^* > \delta_p$; $\Delta_a = 1, 3, 6, 9, 12$ mm 时, $\tau_p^* > \tau_p$; $\Delta_a = 15$ mm 时, $\tau_p^* < \tau_p$ 。对玻璃珠-格栅界面来说, $\Delta_a = 1$ mm 时, $\delta_p^* < \delta_p$, 其余幅值下, $\delta_p^* > \delta_p$, 所有幅值下, $\tau_p^* < \tau_p$ 。幅值较小时,循环后单调

直剪试验中两种加筋界面的峰值剪切位移小于单调直剪试验中的相应值。此外,各幅值下,碎石-格栅界面循环后的单调剪切强度有所提高,幅值为 15 mm 的除外,而玻璃珠-格栅界面循环后的单调剪切强度均发生了退化。

图 10 给出了循环后单调直剪试验中碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的竖向位移-剪切位移曲线,将单调直剪试验和循环后单调直剪试验中的最大剪胀量分别记为 δ_v 和 δ_v^* 。根据图 4(b),竖向应力为 60 kPa 下,碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的 δ_v 分别为 -6.69、-2.62 mm。经历了分别 Δ_a 为 1、3、6、9、12、15 mm 的循环加载作用后,碎石-格栅界面的 δ_v^* 分别为 -8.34、-7.97、-7.56、-7.11、-6.44、-6.02 mm;玻璃珠-格栅界面的 δ_v^* 分别为 -4.49、-3.58、-2.96、-2.41、-1.47、-0.76 mm。对于加筋碎石界面来说, $\Delta_a = 1、3、6、9$ mm 时, $\delta_v^* > \delta_v$, $\Delta_a = 12、15$ mm 时, $\delta_v^* < \delta_v$;而对于加筋玻璃珠界面来说, $\Delta_a = 1、3、6$ mm 时, $\delta_v^* > \delta_v$; $\Delta_a = 9、12、15$ mm 时, $\delta_v^* < \delta_v$ 。可见,经历了较小幅值的循环剪切作用后,界面剪胀量有所提高,而较大幅值的循环剪切作用之后,界面剪胀量降低。

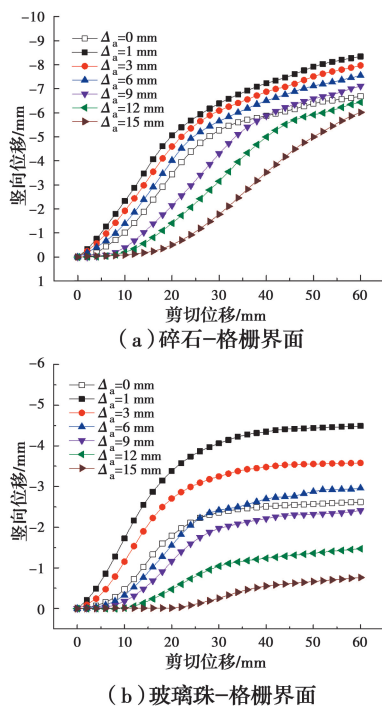


图 10 循环后单调直剪试验中碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的竖向位移-剪切位移曲线

Fig. 10 Vertical displacement-shear displacement curves of gravel-geogrid and glass beads-geogrid interface in PCDS tests

3 结论

1) 不同位移幅值循环加载作用下,碎石-格栅和玻璃珠-格栅界面的循环剪切行为存在差异。碎石-格栅界面在幅值为 1、3 mm 时表现出循环剪切硬化现象,在幅值为 6、9、12、15 mm 时表现出循环剪切软化现象;而玻璃珠-格栅界面在 6 种幅值下均表现出循环剪切软化现象。

2) 碎石-格栅界面循环后单调剪切强度均比单调剪切强度大,幅值为 15 mm 的除外;而玻璃珠-格栅界面循环后单调剪切强度低于其对应的单调剪切强度。

3) 通过对不同颗粒形状下粗粒土-格栅界面剪切行为的相关研究,一方面为实际工程中填料的合理选用提供参考依据,另一方面满足地震荷载作用下加筋土结构稳定性分析的需要。

参考文献:

- [1] VANGLA P, LATHA GALI M. Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(3): 254-268.
- [2] 刘飞禹, 林旭, 王军. 砂土颗粒级配对接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 F Y, LIN X, WANG J. 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. (in Chinese)
- [3] 赵程, 谢俊飞, 王文东, 等. 粗砂与结构物接触面的剪切特性试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(10): 1406-1413.
ZHAO C, XIE J F, WANG W D, et al. Experimental study on shear behavior of interface between coarse sand and structure [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(10): 1406-1413. (in Chinese)
- [4] 李丽华, 文贝, 胡智, 等. 建筑垃圾填料与土工合成材料加筋剪切性能研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2019, 52(4): 311-316.
LI L H, WEN B, HU Z, et al. Study on reinforced shear behavior of construction waste filler and geosynthetics [J]. *Engineering Journal of Wuhan*

- University, 2019, 52(4): 311-316. (in Chinese)
- [5] 王军, 胡惠丽, 刘飞禹, 等. 粒孔比对筋土界面直剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(Sup2): 115-122.
WANG J, HU H L, LIU F Y, et al. Effects of direct shear characteristics of sand-geogrid interface under different aperture ratios[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup2): 115-122.
- [6] SWETA K, HUSSAINI S K K. Effect of shearing rate on the behavior of geogrid-reinforced railroad ballast under direct shear conditions [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(3): 251-256.
- [7] SWETA K, HUSSAINI S K K. Behavior evaluation of geogrid-reinforced ballast-subballast interface under shear condition [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(1): 23-31.
- [8] 刘飞禹, 张端阳, 王军. 循环前后不同颗粒粒径下 sandwich 形加筋土筋土界面单调直剪特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(3): 456-466.
LIU F Y, ZHANG D Y, WANG J. Cyclic and post-cyclic direct shear behavior of sandwich reinforcement-soil interface under different sand particle sizes [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2018, 24(3): 456-466. (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] LIU F Y, WANG P, GENG X Y, et al. Cyclic and post-cyclic behaviour from sand-geogrid interface large-scale direct shear tests [J]. Geosynthetics International, 2016, 23(2): 129-139.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] FENG D K, ZHANG J M, DENG L J. Three-dimensional monotonic and cyclic behavior of a gravel-steel interface from large-scale simple-shear tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55 (11): 1657-1667.
- [15] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength; natural and crushed sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(5): 591-602.
- [16] CHERIF TAIBA A, MAHMOUDI Y, BELKHATIR M, et al. Experimental investigation into the influence of roundness and sphericity on the undrained shear response of silty sand soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41(3): 619-633.
- [17] ALSHIBLI K A, CIL M B. Influence of particle morphology on the friction and dilatancy of sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(3): 04017118.
- [18] TSOMOKOS A, GEORGIANNOU V N. Effect of grain shape and angularity on the undrained response of fine sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(5): 539-551.
- [19] 薛亚东, 刘忠强, 黄宏伟. 砂砾石混合物抗剪强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 75-79.
XUE Y D, LIU Z Q, HUANG H W. Experimental analysis on shear strength characteristics of sand-gravel mixtures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(6): 75-79. (in Chinese)
- [20] AFZALI-NEJAD A, LASHKARI A, SHOURIJEH P T. Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(1): 54-66.
- [21] ANUBHAV, BASUDHAR P K. Interface behavior of woven geotextile with rounded and angular particle sand [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(12): 1970-1974.
- [22] XIAO Y, LONG L H, MATTHEW EVANS T, et al. Effect of particle shape on stress-dilatancy responses of medium-dense sands [J]. Journal of Geotechnical and

- Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(2): 04018105.
- [23] CHANG J Y, FENG S J, SHEN Y, et al. Experimental study of shear strength of geosynthetic clay liner for monotonic loading [C]//Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics, 2019, 2: 641-648.
- [24] VIEIRA C S, PEREIRA P M. Interface shear properties of geosynthetics and construction and demolition waste from large-scale direct shear tests [J]. Geosynthetics International, 2016, 23(1): 62-70.
- [25] GUO P J, SU X B. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(5): 579-591.
- [26] YANG H, XU W J, SUN Q C, et al. Study on the meso-structure development in direct shear tests of a granular material [J]. Powder Technology, 2017, 314: 129-139.
- [27] JONGCHANSITTO P, PREECHAWUTTIPONG I, BALANDRAUD X, et al. Numerical investigation of the influence of particle size and particle number ratios on texture and force transmission in binary granular composites [J]. Powder Technology, 2017, 308: 324-333.
- [28] 刘清秉, 项伟, BUDHU M, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(Sup1): 190-197.
- LIU Q B, XIANG W, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1): 190-197. (in Chinese)
- [29] LAI J, DANIEL D E, WRIGHT S G. Effects of cyclic loading on internal shear strength of unreinforced geosynthetic clay liner [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(1): 45-52.
- [30] SEED H B, CHAN C. Clay strength under earthquake loading conditions [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 1966, 92(2): 53-78.

(编辑 王秀玲)