

剪切试验中筋土界面土颗粒运动的细观量测

徐超^{1,2}, 石志龙^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 基于互相关理论, 将粒子图像测速(PIV)技术应用到筋土界面直剪试验中, 从细观角度来研究试验过程中土颗粒的运动情况. 筋土界面的剪切试验分别在法向应力为 50 和 87.5 kPa 下进行. 通过对一系列试验结果的分析, 可以得到: 界面附近砂颗粒的水平位移和竖向位移均随着剪切位移的增加而增加, 但增加的速率随剪切位移逐渐减小; 试验中砂颗粒的水平变位较为明显, 但随着距离筋土界面高度的增加, 变位的程度有所减弱; 试验中界面附近发生变位的砂颗粒范围不超过 45 mm, 即剪切带的范围大致为 45 mm, 相当于试验用砂平均粒径的 7~9 倍.

关键词: 粒子图像测速技术; 直剪试验; 细观量测; 剪切带
中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Micro-measurement of Soil Particle Movement in Geogrid-soil Interface Direct Shear Test

XU Chao^{1,2}, SHI Zhilong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on cross-correlation theory, the particle image velocimetry (PIV) technology is applied to reinforcement-soil interface direct shear test, and the soil particle movement near interface during the direct shear test is measured and analyzed from the standpoint of microscopic view. Reinforcement-soil interface direct shear tests were performed under 50 and 87.5 kPa normal stress, respectively. By analyzing the results of a series of tests, several conclusions can be obtained: horizontal and vertical displacement of soil particles increase with shear displacement increasing, but the increasing rate decreases with shear displacement; in the direct shear tests the horizontal displacement is more evident than vertical movement and it

attenuates with the distance to geogrid-soil interface; the scope of soil particle displacement doesn't exceed 45 mm, namely, the thickness of shear band is approximately 45 mm, which is 7~9 times of the average grain size of soil particle used in the direct shear tests.

Key words: particle image velocimetry technology; direct shear test; micro-measurement; shear band

筋土相互作用是土工合成材料加筋土及其工程应用的核心问题, 筋土界面的力学特性是加筋土结构设计和数值模拟的基础. 从细观的角度来研究分析土颗粒的变化情况, 能更好地认识筋土相互作用机理以及确定界面摩擦试验中剪切带的范围. 将细观的研究成果和宏观结合起来, 更有助于建立筋土界面的应力—应变关系. 因此, 近年来, 细观研究开始得到了众学者的关注. 比如: 周健等^[1]采用颗粒流程序(PFC^{2D})对土工合成材料的拉拔试验进行了模拟, 从细观角度分析了土工合成材料与土的接触界面; 张孟喜等^[2]也采用了颗粒流程序(PFC^{2D}), 对 H-V 加筋土的性状进行了细观模拟; 岳中琦等^[3]综合数字图像处理理论、几何矢量转换技术以及有限元网格自动生成原理, 提出了岩土工程材料的数字图像有限元分析方法. 但进行筋土相互作用的数值模拟时, 一些假设条件需要通过物理试验进行验证.

数字图像由于其具有再现性好、精度高、多个点位同时量测等优点, 在流体力学、空气动力学等领域已得到了广泛的应用. 在岩土工程领域, 基于数字图像技术的细观研究方法也得到了初步应用. 比如: 张嘎等^[4]建立了包括设备、算法及软件的细观量测系统, 进行了土与结构接触面试验中土颗粒运动的细观量测; 胡黎明等^[5]通过数字照相技术, 分析了土与

收稿日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878154)

作者简介: 徐超(1965—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为土工合成材料和地基加固.

E-mail: c_axu@tongji.edu.cn

结构物接触面剪切破坏的变形机理;李元海等^[6]基于数字照相量测和图像相关分析技术,提出了土体剪切带的识别方法;Guler 采用了 block-match 算法,对结构面附近土颗粒的运动进行了量测^[7].

在本次试验研究中,利用自行研制的大型结构面剪切仪进行土工格栅与粗颗粒砂的直剪试验,在试验过程中对砂颗粒进行图像采集,并通过分析砂颗粒的位移变化来研究剪切过程中筋土界面附近砂颗粒的运动规律及剪切带的厚度.

1 PIV 技术基本原理

一般地,粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术基于假设:示踪粒子跟随流场一起运动;示踪粒子在流场中均匀分布;判读区内具有唯一的速度.

在流场中布撒大量示踪粒子跟随流场一起运动,该技术是选择流场中合适的粒子,用激光片光源等将流场照明,使用数字相机拍摄流场照片,得到前后两帧粒子图像,对图像中的粒子图像进行互相关计算,得到流场一个切面内定量的速度分布.

PIV 技术基于互相关理论(图 1). 对采集的图像进行分析,通过对判读区进行信号处理,获得速度. 假设系统在 t_0 和 $t_0 + \Delta t$ 这两个时刻分别获取图 a 和图 b,在图 a 和图 b 中相同位置获取两个同样尺寸大小的判读区 $f(m, n)$ 以及 $g(m, n)$,对 f 和 g 进行处理以获得此判读区对应的位移向量 $s(m, n)$.

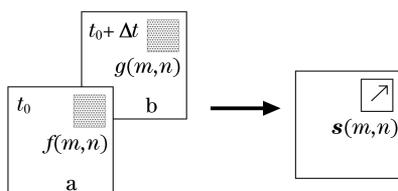


图 1 互相关理论示意图

Fig. 1 Sketch of cross-correlation theory

PIV 图像分析的主要任务是计算空间函数 $s(m, n)$,但同时需要考虑附加噪声 $d(m, n)$ 的影响,整个系统的工作关系式为

$$g(m, n) = [f(m, n) * s(m, n)] + d(m, n) \quad (1)$$

式中：“*”表示 f 与 s 的卷积运算.

试验中,假定噪声可以忽略,对式(1)两边分别进行傅里叶运算,可得:

$$g(m, n) \approx f(m, n) * s(m, n)$$

$$\Leftrightarrow G(u, v) = F(u, v)S(u, v)$$

函数 G 、 F 和 S 分别表示函数 g 、 f 和 s 的离散傅立叶变换. 通常使用快速傅立叶变换来加速运算速度.

2 试验研究方法

2.1 试验设备

本篇研究所采用的仪器为同济大学自主研制的大型结构面剪切仪(SJW-200),该设备(图 2)可进行多种材料接触面的静动力学特性试验研究.



图 2 SJW-200 主体部分

Fig. 2 Main part of SJW-200

该结构面剪切仪的主要特点是:能够提供较大尺寸的接触面(600 mm × 400 mm);可以进行单调以及循环剪切试验;具有 MOOG 伺服阀和自动数据采集系统 EDC(electronic digital computer)的控制系统及试验数据采集系统,可以方便地控制试验条件. 在剪切盒一侧的中央设置了有机玻璃视窗(165 mm × 50 mm),以便试验过程中进行图像采集.

与该剪切仪配套的 PIV 系统主要由高速相机、照明装置以及图像分析软件等部分组成. 图 3 给出了照明以及图像采集系统. 照明所用的探照灯功率为 2 kW,高速相机的采集速率可达 200 幅 · s⁻¹,能够对砂颗粒的图像进行清晰而完整的采集;图像采集与后处理分析采用 MicroVec V2.0 软件系统.



图 3 照明及图像采集

Fig. 3 Lighting and image collection

2.2 试验材料及试验方法

(1) 试验材料

试验中所用格栅是由江苏鼎泰工程材料有限公司生产的塑料双向拉伸土工格栅 TGSG30-30,该格栅的网孔尺寸为 $45\text{ mm} \times 45\text{ mm}$,单位面积质量为 $510\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,纵向与横向的极限抗拉强度均为 $30.6\text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,纵向与横向的极限延伸率分别为 6.8% 和 7% ,在 2% 伸长率时格栅纵向和横向的极限抗拉强度分别为 12 和 $14\text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,在 5% 伸长率时格栅纵向和横向的极限抗拉强度分别为 17 和 $20\text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$.

试验用填料为浙江长兴申兴装饰材料厂生产的石英砂.试验用砂是将 $8\sim 12$ 目以及 $16\sim 20$ 目两种规格的石英砂按体积比 $2:1$ 混合而成,充分搅拌,混合均匀.通过颗粒分析试验及相关的计算,得到了混合后砂的技术指标(表 1).表 1 中, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 表示累积百分含量达到 10% 、 30% 、 60% 时的土颗粒粒径.

表 1 试验用砂的主要技术指标

Tab.1 Main technical index of the tested sand

限制粒径 d_{60}/mm	有效粒径 d_{10}/mm	d_{30} /mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	内聚力 c/kPa	摩擦角 $\phi/(\text{°})$
2.02	0.82	1.33	2.46	1.07	2.68	41.2

(2) 图像采集

高速相机通过网线与电脑主机相连,将相机置于特制的架子上并将架子固定,调整相机的位置使其正对有机玻璃视窗,运行软件 MicroVec V2.0,调节相机的光圈和焦距,使得砂颗粒的实时显示图片清晰可见.依据土工合成材料测试规程^[8],剪切速率设为 $0.5\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,相机的采集速率设为每 5 s 采集一副图像.对图像进行初步处理时,判读区窗口大小为 $32\text{ pixel} \times 32\text{ pixel}$,计算步长为 16 pixel .

3 试验结果与讨论

3.1 颗粒运动量测结果与分析方法

分别在法向应力为 50 和 87.5 kPa 下进行土工格栅与石英砂的界面直剪试验.有机玻璃视窗的尺寸为 $165\text{ mm} \times 50\text{ mm}$.图 4 为试验中拍到的一幅砂颗粒图像.在试验的过程中,透过有机视窗所拍摄到的砂颗粒均在某一切面上,记作平面 $ABCD$ (图 5).为结果分析方便,图中规定了砂颗粒的运动方向,将 A 作为原点,即 $A(0,0)$ 点.

在试验结束后,将所记录的砂颗粒运动的图像序列用 PIV 系统的分析软件 MicroVec V2.0 做初步处理,分析时将所采集的每一幅图像均与第一幅作比较,可得到在不同剪切位移时砂颗粒的变位情况.

将分析获得的数据导入数据后处理软件 Tecplot10,进一步做数据处理.

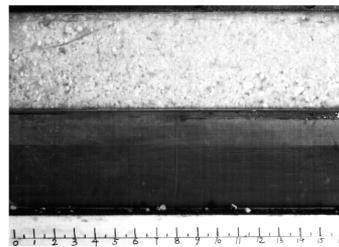


图 4 试验中某幅砂颗粒图像

Fig.4 One soil particle image in the test

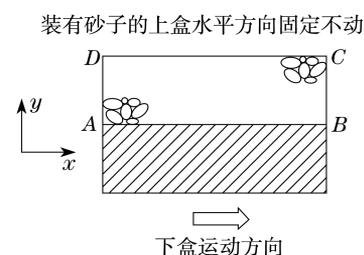


图 5 试验过程中土颗粒的运动方向

Fig.5 Movement direction of soil particle in the test

在试验结果分析时,切面 $ABCD$ 可划分成多个判读区,限于篇幅这里仅对切面 $ABCD$ 上 $x = 10\text{ mm}$ 和 $y = 5\text{ mm}$ 两条线所经过的判读区进行分析,基本上可以认识界面剪切过程中,与界面平行和垂直两个方向上砂颗粒的变位情况,变位包括砂颗粒的水平位移和竖向位移.

3.2 试验结果

图 6 给出了在法向应力为 50 kPa 下的试验结果.图中 u 表示剪切位移.由图 6a 可以看出:在剪切开始之前,砂颗粒处于相对静止状态,水平位移为 0 ;随着剪切位移逐渐增加,砂颗粒的水平位移也逐渐增大,但是增大的速率逐渐减小,表现为在经历相同的剪切位移时曲线的水平间距有所减小;在直剪试验结束时,砂颗粒水平位移的最大变化量为 2.8 mm 左右.同时从图中可以看出:在筋土界面发生一定剪切位移时,在距离筋土界面较近的范围内,砂颗粒的水平变位相对较大,随着离筋土界面距离的增加,砂颗粒的水平变位逐渐减小,在离界面 45 mm 处,砂颗粒基本上不发生水平变位.

对图 6a 进一步分析发现:在剪切位移达到和超过 16 mm 后,几条曲线几乎重叠在一起,说明当剪切位移达到 16 mm 后,砂颗粒随剪切位移的水平位移变化很小.而该组试验剪应力峰值对应的剪切位移为 15 mm ,表明砂土颗粒的水平变位与筋土界面剪应力发展之间存在内在联系,当界面附近颗粒不

再变位和调整时,界面剪应力达到峰值.

由图 6b 可以看出:随着剪切位移增加砂土颗粒竖向位移的变位较小,在整个剪切过程中最大竖向位移量仅为 0.65 mm 左右;从大致趋势上,砂土颗粒竖向位移随剪切位移逐渐增大,在剪切位移达到 12 mm 后,增加的幅度就变得很小.在垂直筋土界面的方向上,砂土颗粒的竖向变位并不一致,表现出靠近界面处和远离界面处竖向位移小,而中间颗粒竖向变位大的特点.

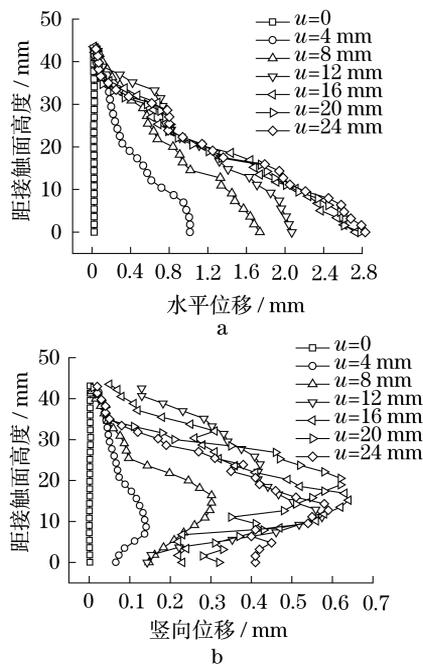


图 6 50 kPa 下与界面垂直方向砂颗粒的变位情况

Fig. 6 Displacement of soil particle along vertical to interface under 50 kPa

再分析距接触面 5 mm(即 $y = 5$ mm)处,且与筋土界面平行的平面上砂颗粒的变位情形.图 7 给出了在法向应力为 50 kPa 下,该平面上砂颗粒水平与竖向位移.从图中可看出:随着剪切位移的增加,水平位移和竖向位移均逐渐增大,但水平方向上的变位比竖直方向要明显一些,二者增加的速率均随剪切位移而有所减小;沿水平方向砂土颗粒的水平变位比较接近,但由于土工格栅横肋的影响,颗粒水平变位存在波动现象.

图 8 给出了在法向应力为 87.5 kPa 下,直剪试验中砂颗粒 PIV 观测结果.与 50 kPa 下结果比较可以发现:不同法向荷载下,曲线的变化趋势相似.在筋土界面剪切位移相同时,较大法向应力下砂颗粒的水平位移及竖向位移均有所减小;砂颗粒的变位程度随着距界面距离的增加而逐渐减弱,在距界面

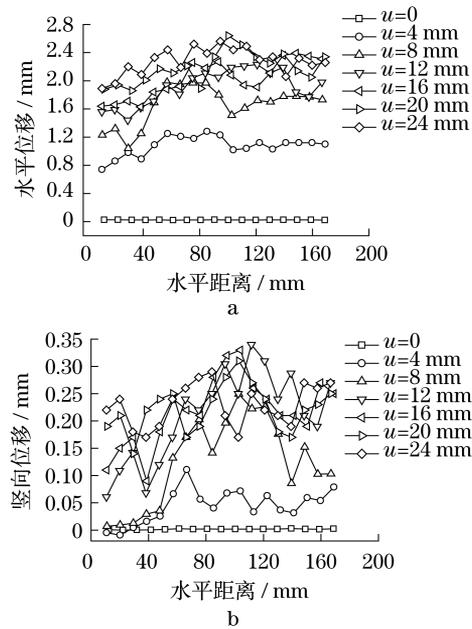


图 7 50 kPa 下与界面平行方向砂颗粒的变位情况

Fig. 7 Displacement of soil particle along horizontal to interface under 50 kPa

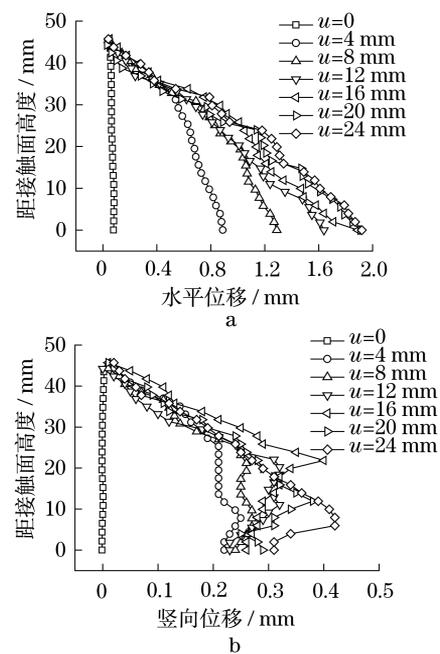


图 8 87.5 kPa 下与界面垂直方向砂颗粒的变位情况

Fig. 8 Displacement of soil particle along vertical to interface under 87.5 kPa

45 mm 处砂颗粒处于相对静止状态.这表明在法向应力 87.5 kPa 下,发生砂颗粒变位的范围亦不超过 45 mm.

图 9 给出了法向应力为 87.5 kPa 下,距筋土界面 5 mm 处砂颗粒变位情况.与 50 kPa 下的结果做

对比可以发现,在法向应力较大时,砂颗粒的水平位移和竖向位移的变化均有所减小.图 9a 显示同样受土工格栅横肋的影响,颗粒水平位移曲线呈现出不同程度的波动.图 9b 显示颗粒竖向变位很小,最大变位距离不超过 0.06 mm.

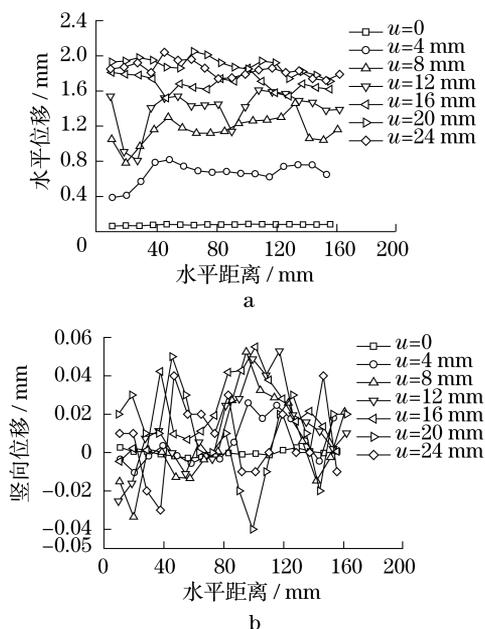


图 9 87.5 kPa 下与界面平行方向砂颗粒的变位情况
Fig.9 Displacement of soil particle along horizontal to interface under 87.5 kPa

3.3 分析与讨论

由 3.2 中的试验结果可知:两种大小不同的法向应力下,在距离筋土界面大约 45 mm 处,砂颗粒基本不发生水平和竖向变位,颗粒处于相对静止状态.说明在该土工格栅与石英砂的界面直剪试验中,发生变位的砂颗粒的范围在距筋土界面 45 mm 的范围内,可以认为在本次试验条件下剪切带的厚度为 45 mm 左右.这一距离相当于本次用砂平均粒径的 7~9 倍.

在剪切过程中,发现贴近界面的砂土颗粒水平变位总是相对较大,这些土颗粒又通过颗粒之间的接触应力,带动界面附近一定范围内颗粒运动.由于砂颗粒之间的相互错动与调整,以及受到格栅横肋的影响,导致砂土颗粒变位无论在水平方向,还是在竖直方向表现不一致.同时,受到单向直剪的影响,砂颗粒水平变位要比竖向变位明显的多,表现出明显的方向性.

当法向应力增大时,一方面,砂颗粒之间较之应力较小时变得比较紧密,砂颗粒不易移动;另一方面,法向应力增大又造成筋土界面处剪应力的增大,

使得界面剪切的影响范围有增强的趋势.这两者的共同影响,使得不同法向应力下,发生砂颗粒变位的范围基本上一致,均为距离界面 45 mm 左右.

目前,关于界面摩擦试验中砂颗粒变位的研究成果相对很少.从机理上分析,法向压力、筋土界面的摩擦特性、格栅力学特性与结构特征、土颗粒的粒径与形状等均会影响颗粒的变位范围.在已有的研究成果中,大都提到了土颗粒粒径对变位范围的影响;对于法向应力的研究,成果很少.本次试验研究仅涉及两种法向应力,发现土颗粒变位范围基本一致,由此推测直剪试验中法向应力大小对剪切带的范围影响不大,但这一结论需进一步试验证实.对于界面粗糙度的影响,张嘎^[9]通过研究发现:粗糙度增大时,土颗粒的水平位移增大,但出现明显变位的砂颗粒的范围变化并不大.其他因素对砂颗粒变位及其范围的影响,需要作进一步探讨.

4 结论

将基于互相关理论的 PIV 系统应用到土工格栅与砂界面试验的细观量测中,通过分析得到结论:

(1) 在筋土界面直剪试验中,砂颗粒的水平位移和竖向位移均随着剪切位移的增加而增大,但增加的速率逐渐减小,在剪应力达到峰值后,砂颗粒的变位基本不再发展.

(2) 砂颗粒的水平变位要比竖向变位明显得多,但随着距接触面越来越远,砂粒变位的程度逐渐减弱;砂颗粒竖向位移呈现靠近界面处和远离界面处变位小,而中间变位大的特点.

(3) 直剪试验中,在两种大小不同法向应力下得到的剪切带范围基本一致.发生变位的砂颗粒范围大致距筋土界面 45 mm,表明剪切带的厚度约 45 mm,这相当于试验用砂颗粒平均粒径的 7~9 倍.

参考文献:

- [1] 周健,孔祥利,鞠庆海,等.土工合成材料与土界面的细观研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增1):3196.
ZHOU Jian, KONG Xiangli, JU Qinghai, et al. Mesoscopic study on interface between geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (suppl. 1): 3196.
- [2] 张孟喜,张石磊.H-V加筋土性状的颗粒流细观模拟[J].岩土工程学报,2008,30(5):625.

(下转第 1668 页)