

纤维加筋土剪切过程中颗粒运动特征研究

张福海^{1,2},白岩辉^{1,2*},周天宝^{1,2},陈良^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘要: 为探究纤维对土体的加固机理,通过离散元法进行直剪试验,分析纤维土与素土在剪切过程中颗粒运动特征。建立素土模型与0.6%纤维含量的纤维土模型,选取3个典型位移点,分析在典型位移点下素土与纤维土的运动特征,得出如下结论:纤维土在剪切部位位移较大,在上部位移较小,体现出了更大的整体性。在峰值位移前,纤维土的大转角区域较素土大。峰值位移后,素土的大转角区域较粗,周围土体基本不存在大转角区域;纤维土的大转角区域较细,周围土体存在大转角区域且呈条状分布。纤维土的大转角主要分布在剪切处与纤维处。素土的剪切带较纤维土的剪切带大。剪切带内纤维土的相对滑动与相对转动都略大于素土。剪切带外纤维土与素土的相对滑动与相对转动相差不大。不论剪切带内外土体的相对滑动与相对转动都随着剪切发展而增加。

关键词: 纤维土;剪切;颗粒运动;离散元;纤维加筋机理

中图分类号:TU431

文献标识码:A

Study on Particle Motion Characteristics of Fiber Reinforced Soil during Shearing

ZHANG Fuhai^{1,2}, BAI Yanhui^{1,2*}, ZHOU Tianbao^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the reinforcement mechanism of fiber to soil, a direct shear test was carried out by discrete element method to analyze the particle movement characteristics of texsol and plain soil in the shear process. A plain soil model and a texsol model with 0.6% fiber content were established. Besides, three typical displacement points were selected to analyze the movement characteristics of plain soil and texsol at the typical displacement points. Conclusions are as follows. The texsol has a larger displacement at the shear part and a smaller displacement at the upper part, showing greater integrity. Before the peak displacement, the large corner area of texsol is larger than that of plain soil. After the peak displacement, the large corner area of the plain soil is coarse, and there is basically no large corner area in the surrounding soil; the large corner area of the texsol is thin, and the large corner area is in the surrounding soil, distributed in strips. The large turning angle of texsol is mainly distributed at the shear and fiber. The shear zone of plain soil is larger than that of texsol. The relative sliding and relative rotation of the texsol in the shear zone are slightly larger than that of the plain soil. The relative sliding and relative rotation of the texsol and plain soil outside the shear zone are not much different. Both the relative sliding and the relative rotation of the soil inside and outside the shear zone increase with the development of shear.

Key words: texsol; shear; particle motion; discrete element method; mechanism of fiber reinforcement

收稿日期:2020-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778211);江苏省自然科学基金资助项目(BK20171434)

作者简介:张福海(1970-),男,山东沂源人,博士,副教授,从事软土地基处理方面的研究。

* 通讯作者:白岩辉(1996-),男,内蒙古乌兰浩特人,硕士研究生,从事软土地基处理方面的研究。

随着社会的不断发展,基础设施的建设愈加完善,越来越多的设施建立在软弱土、特殊土等不良地基上。在这一背景下,纤维加筋技术作为软弱土改良技术中的一员,因其具有价格低廉、原材料来源广泛、绿色无污染、施工工艺简单和改良效果显著等优点,引起了岩土工程领域的广泛关注^[1]。Jamshidi 等研究了纤维长宽比与含量对加筋土板桩在地震作用下的影响,得出加筋能够改善土板桩动力响应特性^[2]。Plé 等通过试验得出纤维能够提高黏土的初始杨氏模量、脆性指数以及内摩擦角^[3]。卢凯等研究发现纤维能够改善混凝土的强度及韧性^[4]。Mirzababaei 等指出低纤维含量也可能增加土体在大剪切位移下的抗剪强度^[5]。Michalowsk 和 zhao 基于纤维加筋粗粒土在破坏时纤维中部拉断两端滑移的假设建立了在平面应变状态下纤维加筋土能量均化模型^[6]。现有的研究更加关注纤维加筋土其抗剪强度与工程性质的研究,对纤维加固机理方面的研究关注较少^[7]。本文是从剪切过程中纤维土颗粒运动特征这一角度出发,从微观层面来分析纤维的加固机理,为纤维加固机理的研究提供些许参考价值。

1 直剪试验计算模型与颗粒运动特征

1.1 模型的建立与参数的选择

本文通过直剪试验来研究剪切过程中纤维对纤维土的作用机理。因纤维在土体中分布的复杂性与直剪试验下土体的大变形,故本文采用离散元法进行数值模拟。模型使用 PFC2D (version

5.0) 建立,试样尺寸为 50 mm×100 mm,由 11 000 个二维刚性颗粒组成(不计纤维颗粒数),如图 1 所示,其颗粒粒径满足 ASTM D3080-90 的要求(即试样的高宽与最大颗粒粒径比值不小于 6 到 10^[8])。模型中纤维土为加纤维的膨胀土,其颗粒密度为 2 790 kg/m³。膨胀土的初始孔隙比是根据何咏睿^[9]的研究成果,将天然的孔隙比进行换算得到用于 PFC2D 模拟的孔隙比,根据实验结果膨胀土的天然孔隙比为 0.45,换算得到试样的孔隙比为 0.18。模型纤维含量为 0.6%。因土体为膨胀土,故本文选用接触粘结模型,其参数值参考现有对膨胀土模拟的参数,进行一定调整使其符合膨胀土的性质,具体参数如表 1 所列。模型中纤维采用接触粘结模型,模拟不考虑纤维断裂的影响,因此纤维的接触粘结抗拉与抗剪强度需取一个极大的值,使纤维不会产生断裂,本文俩值均取 1e9,通过观察模拟过程中纤维均不会产生断裂;纤维土作为一种土工加筋技术,需要纤维的变形模量要远大于土体的变形模量,因此模型中纤维的法相刚度与切向刚度的值取为土体的 100 倍与 200 倍。本文模拟了竖向压力为 100 kPa 时素土与纤维土体两种试样的直剪过程,剪切位移即为剪切盒上盒移动的距离,当达到 16 mm 时停止剪切。

1.2 直剪的应力应变曲线

图 2 为素土与纤维土在竖向压力为 100 kPa 时的剪应力与剪切位移的关系曲线。其中试样所受剪应力为墙体 1、2、4、5 所受 X 方向的应力平均值,竖向应力为墙体 1 与墙体 4 所受到的 Y 方向应

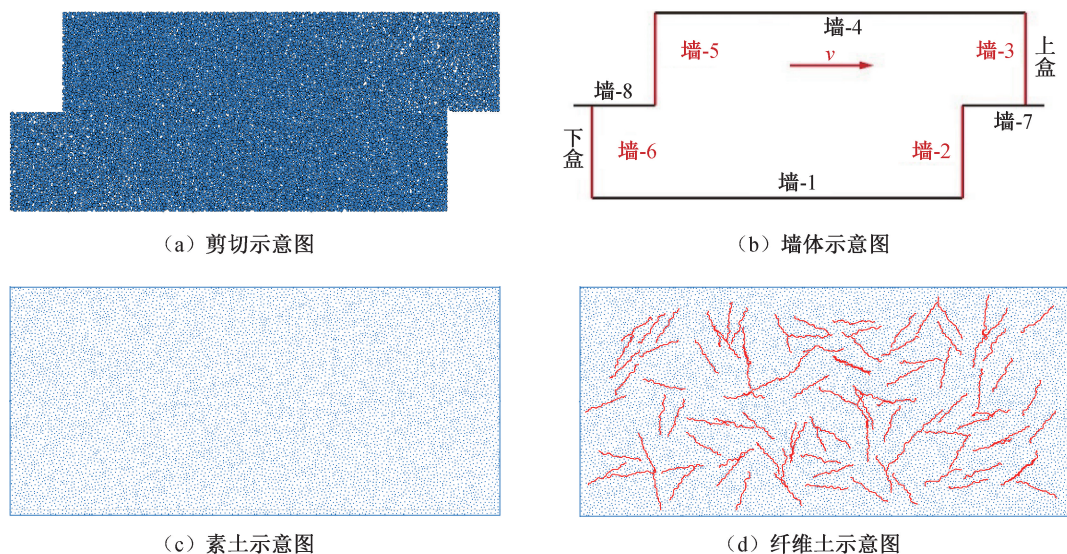


图 1 直剪试验模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of direct shear test model

表 1 土体参数值

Tab. 1 Soil parameter values

参数名称	参数值
颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 790
初始孔隙比	0.18
法相刚度/kPa	2.0E+03
切向刚度/kPa	1.0E+03
接触粘结抗拉强度/N	100
接触粘结抗剪强度/N	50
摩擦系数	0.2

力平均值。如图 2 所示,素土与纤维土的应力应变曲线都具有相同的变化趋势,剪应力都随着剪切位移的增加而逐渐增加,没有明显的峰值强度,呈现出应变硬化型,这与试验得出趋势相同;在剪切初期素土与纤维土的强度曲线基本一致,随着剪切位移的增加素土与纤维土的曲线开始不同。纤维土与素土的峰值强度分别为 86 kPa 与 75 kPa,纤维土峰值强度为素土的 1.15 倍,纤维土与素土的残余强度分别为 75 kPa 与 65 kPa,纤维土残余强度为素土的 1.15 倍,其强度增加也与实际相符。以上结果可表明,该模型得出的结果与真实土体反映的规律趋势一致,故可用来进行剪切过程中纤维与土体作用机理的研究。选取剪切过程中三个典型位移点(图 2)进行分析,分别位于剪切位移为 2 mm 处即峰值位移前(I)、剪切位移为 8 mm 处即峰值位移处(II)与剪切位移为 12 mm 处即峰值位移后(III)。

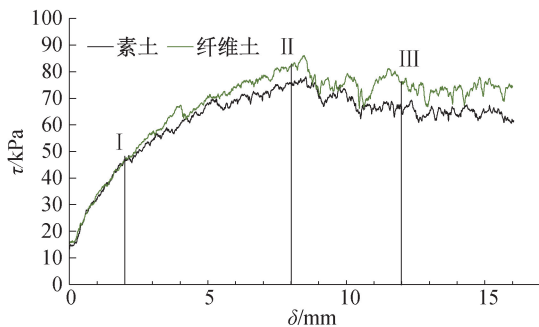


图 2 素土与纤维土剪应力与剪切位移关系曲线图

Fig. 2 Curves of shear stress and shear displacement of plain soil and fiber soil

1.3 颗粒运动特征

(1) 单颗粒运动

如图 3 所示,颗粒在 t 时刻时处于 O 点,经过 Δt 时间后处于 O' 点,则其位移矢量为 ds ,其 X 方

向位移为 dx , Y 方向位移为 dy ,其转角位 $d\theta$,规定以逆时针方向为正。

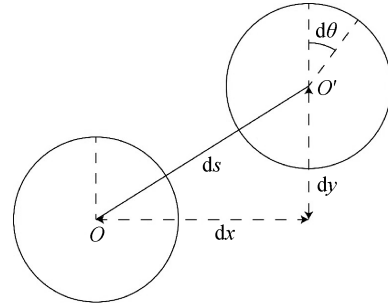


图 3 单颗粒运动位移转角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single particle motion displacement angle

(2) 颗粒间接触运动

如图 4 所示,颗粒一与颗粒二半径分别为 r_1 、 r_2 ,在 t 时刻两个颗粒接触点上的法向量记为 n ,经过 Δt 时间后接触点上的法向量记为 n' , n 与 n' 间的转角记为 $d\beta$ 。两颗粒的转角分别为 $d\theta_1$ 、 $d\theta_2$ 。它们之间满足

$$da = r_1(d\theta_1 - d\beta) \quad (1)$$

$$db = r_2(d\theta_2 - d\beta) \quad (2)$$

da 与 db 分别为颗粒一与颗粒二转动的弧长,其可分解为颗粒间的滑动 dUs 与转动 dUr ,即

$$da = dUs + dUr \quad (3)$$

$$db = dUs - dUr \quad (4)$$

因此颗粒间的滑动与转动分别为

$$dUs = \frac{da + db}{2} \quad (5)$$

$$dUr = \frac{da - db}{2} \quad (6)$$

该定义可较直观地反映颗粒间的相互运动。因颗粒间接触的滑动与转动无方向选择性^[10],故对其取绝对值进行分析。

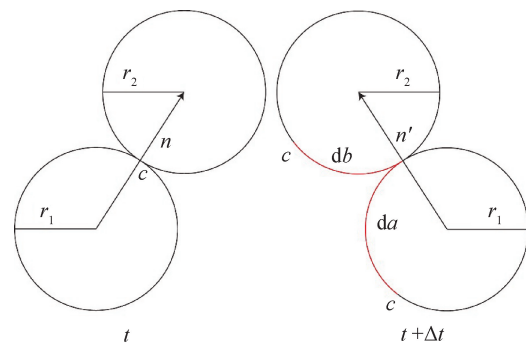


图 4 颗粒间运动位移转角示意图(据 Yuan 等^[10]与陈庆^[12])

Fig. 4 Schematic diagram of motion displacement angle between particles

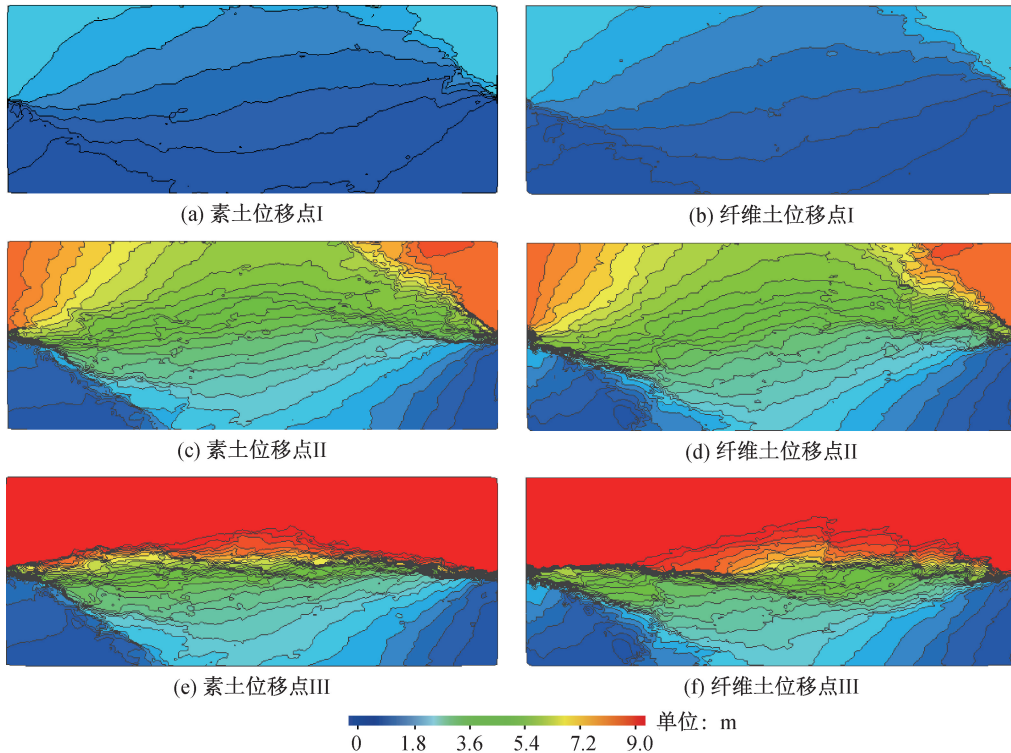


图5 素土与纤维土颗粒位移大小在典型剪切位移点的等值线分布

Fig. 5 Contour distribution of particle displacement of plain soil and texsol at typical shear displacement points

2 颗粒运动特征

2.1 单颗粒运动特征

图5展示了素土与纤维土随着剪切的进行土体内部颗粒位移的等值线分布规律。从图中可以看出,在剪切刚进行时素土与纤维土的位移规律基本一致,等值线均匀的分布在盒内,并且位移从上盒到下盒逐渐减小;随着剪切的进行,素土与纤维土的等值线分布规律图出现了一些差别,素土中等值线在中间部分较为密集,纤维土的等值线较为均匀地分布在上下盒中。随着剪切的进一步进行,等值线已经集中分布在试样的剪切部位,素土等值线集中区域较大,纤维土等值线集中区域较小。在上半盒集中区域外素土等值线分布范围小且集中,纤维土等值线分布范围大且均匀。从上面这些现象可以看出,在剪切刚进行时由于剪切位移较小此时纤维并未发挥作用素土与纤维土的位移基本一致,随着剪切的进行纤维对土体的作用逐渐增强,致使上半部分与素土相比位移变小,下半部分与素土相比位移变大。当土体的剪切位移超过峰值位移后,素土的剪切带较宽对剪切带周围土体的影响较弱,纤维土的剪切带较细对剪切带周围土体的影响较强。为更加清晰地展示纤维土与素土的位移变化,本文把试样从下到

上分成了 n 份,求每份位移的平均值,再用素土每份的位移减去对应的纤维土的位移,得到图6。通过图6可以更加清晰的看出纤维土与素土的位移变化的趋势,即:随着剪切位移的增加纤维土与素土的位移差别也逐渐增加,在剪切带周围纤维土的位移更大,在上部纤维土的位移更小,纤维土表现出更大的整体性土体的位移更加均匀。

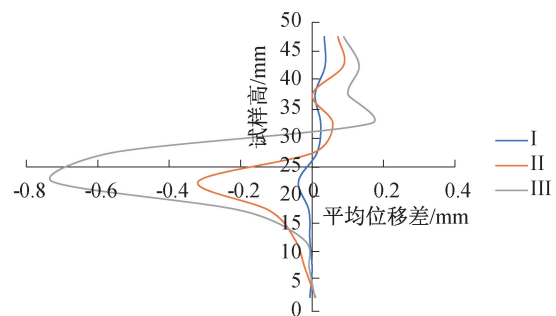


图6 典型剪切点素土与纤维土位移差值图

Fig. 6 Graph of displacement difference between plain soil and texsol at typical shear point

土体转动的空间分布规律如图7所示。在剪切刚开始时,素土与纤维土的转动规律基本一致。当剪切位移达到峰值位移时,素土在土体开裂处有些许转角,试样中部没有转角;纤维土在裂开处存在转角且范围较大,在试样中部存在些许转角并以初步贯通试样。当剪切位移超过峰值位移

后,素土的贯通区域宽但周围土体很少有大转角的区域;纤维土贯通区窄,但周围土体排列着一些大转动区,并使纤维土的大转角区域呈现出类似“鱼骨”状。我们更进一步将土体分为若干区域,分析土体每一区域的平均转动列出图 8。通过图 8 可以看出素土在剪切带附近的转角大于纤维土的

转角,在远离剪切带处纤维土的转角与素土的转角相差不大。通过对比图 7 与图 8 从中可以分析出在剪切带内纤维土的转角略小于素土的转角,在剪切带外纤维土在纤维处土体具有很大的转角,远离纤维处土体转角很小。故纤维土的大转角主要分布在剪切处与纤维处。

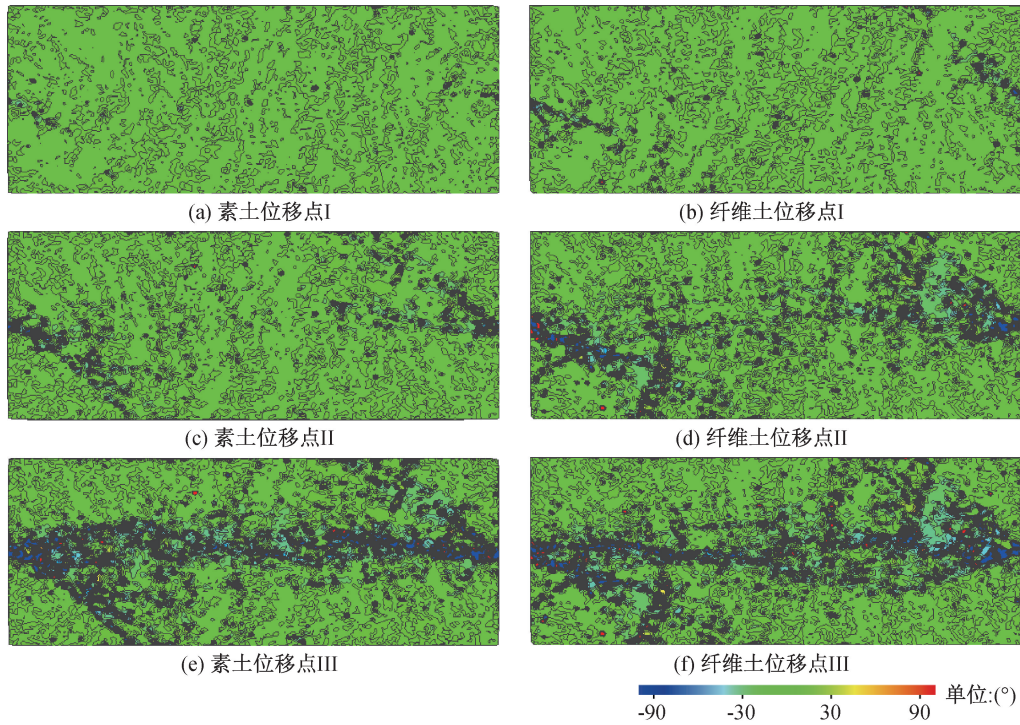


图 7 素土与纤维土颗粒转动在典型剪切位移点的等值线分布

Fig. 7 Contour distribution of particle rotation of plain soil and texsol at typical shear displacement points

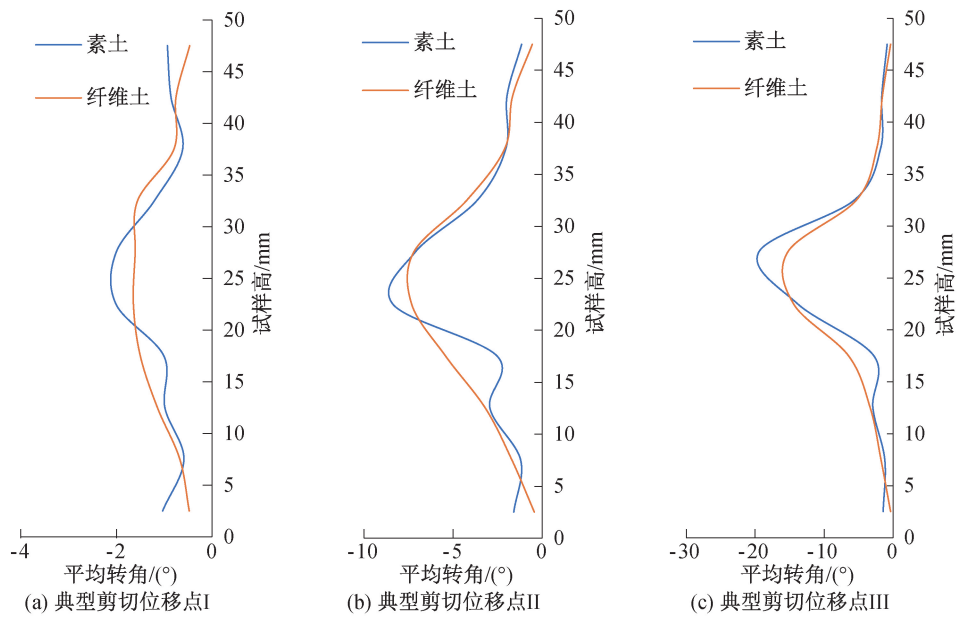


图 8 素土与纤维土平均颗粒转动在典型剪切位移点的分布

Fig. 8 Distribution of average particle rotation of plain soil and texsol at typical shear displacement points

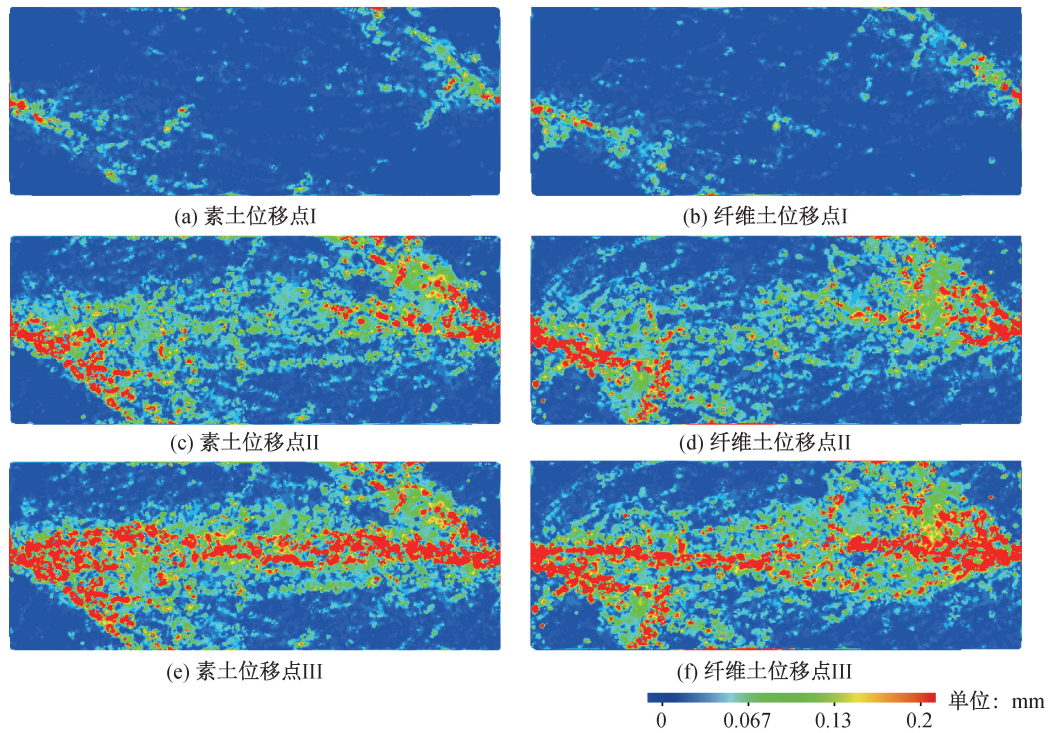


图9 素土与纤维土相对滑动在典型剪切位移点云图

Fig. 9 Cloud diagram of typical shear displacement points of plain soil and tessoil sliding relative to each other

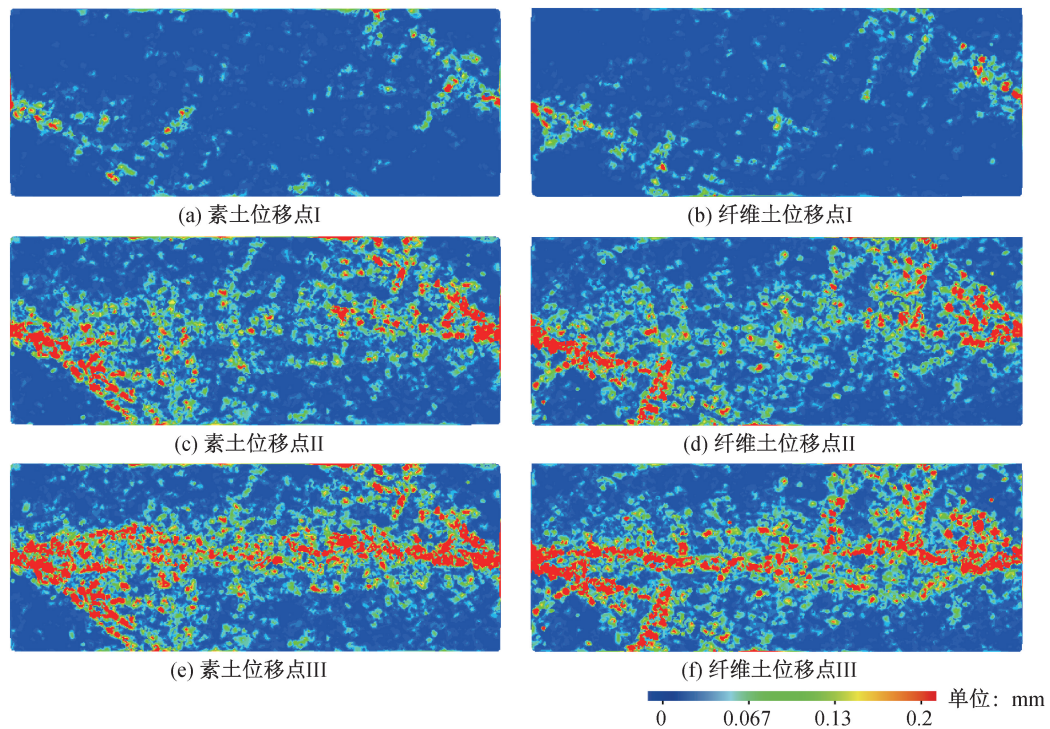


图10 素土与纤维土相对转动在典型剪切位移点云图

Fig. 10 Cloud diagram of typical shear displacement points with respect to rotation of plain soil and tessoil

2.2 颗粒间运动特征

颗粒间运动特征能够较为清晰地展示颗粒之间的相互运动,因此更能够直观地展示出剪切带的大小。通过观察图9与图10可以看出在峰值位

移前,因为土体的开裂土体在左下角与右上角产生了滑动与转动。当达到峰值位移时,素土颗粒间的滑动与转动较为集中且范围更大,纤维土的滑动与转动范围与素土相比较小。当剪切位移超

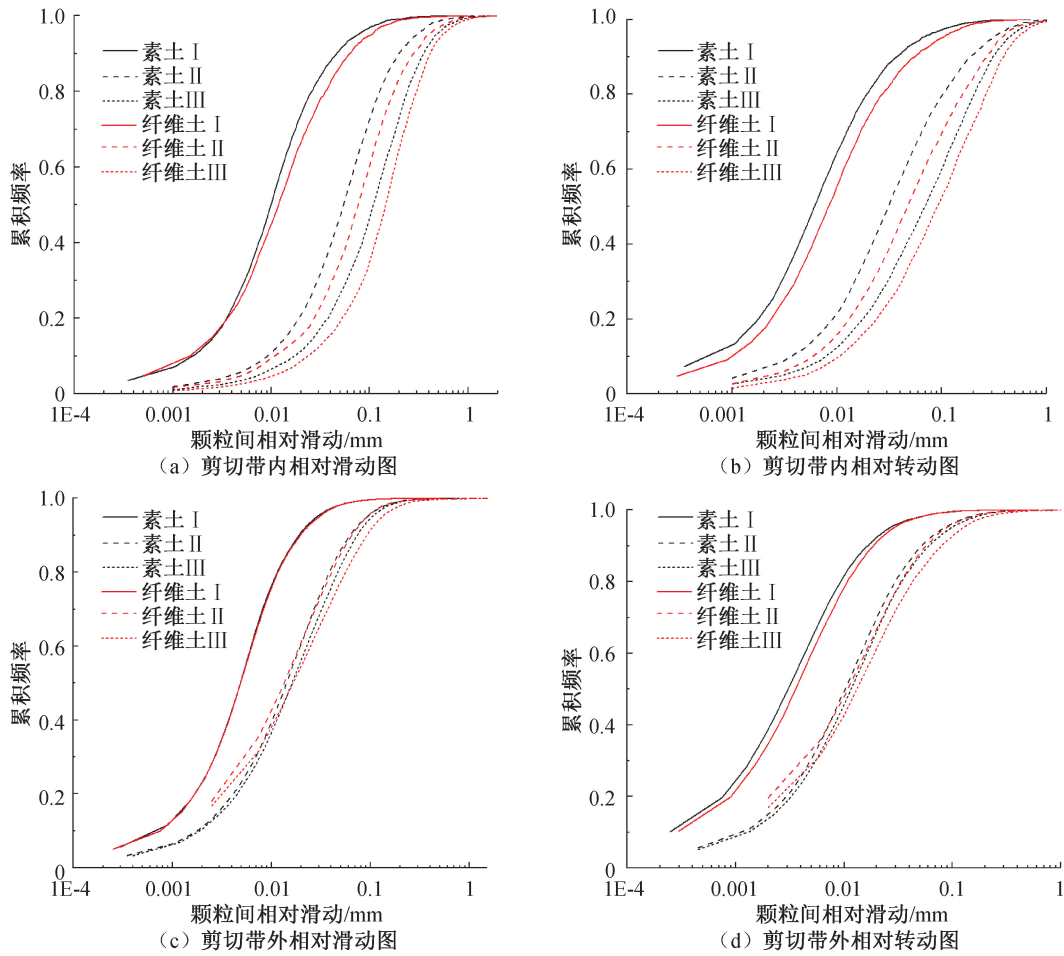


图 11 素土与纤维土在滑动带内外的相对转动与相对滑动的频率分布图

Fig. 11 Frequency distribution of relative rotation and relative sliding of plain soil and texsol inside and outside the sliding zone

过峰值位移后颗粒间的大滑动集中于剪切带内,且形状与剪切带一致。据此估算出素土的剪切带约为 8 mm,纤维土的剪切带约为 5 mm。图 11 为素土与纤维土在滑动带内、外的相对转动与相对滑动的频率分布图,可以看出随着剪切的进行土体的相对转动与相对滑动都相应地增大,剪切带内纤维土的相对滑动与相对转动都略大于素土,剪切带外纤维土与素土的相对滑动与相对转动基本一致,在 I 阶段时剪切带内外的相对滑动与相对转动基本一致,随着剪切的进行,当剪切到达 II 阶段时剪切带内的相对滑动与相对转动大于剪切带外的约 1.2 倍,当剪切到达 III 阶段时剪切带内的相对转动与相对滑动大于剪切外的约 10 倍。

3 结论

1) 剪切刚开始时素土与纤维土的位移等值线差别不大,随着剪切的进行等值线逐渐向中间集中,素土等值线集中区域较宽,纤维土等值线集中

区域较窄。纤维土在剪切部位位移较大,在上部位移较小,体现出了更大的整体性。

2) 在峰值位移前,纤维土的大转角区域较素土大。峰值位移后,素土的大转角区域较粗,周围土体基本不存在大转角区域;纤维土的大转角区域较细,周围土体条状分布着大转角区域。纤维土的大转角主要分布在剪切处与纤维处。

3) 素土的剪切带较纤维土的剪切带大。剪切带内纤维土的相对滑动与相对转动都略大于素土。剪切带外纤维土与素土的相对滑动与相对转动相差不大。不论剪切带内外土体的相对滑动与相对转动都随着剪切发展而增加。

参考文献:

[1] 郭盼盼. 纤维加筋土抗剪强度影响机理及本构模型研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
 [2] JAMSHIDI R, TOWHATA I, GHIASSIAN H, et al. Experimental Evaluation of Dynamic Deformation Characteristics of Sheet Pile Retaining Walls with Fiber Reinforced

- Backfill[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(6):438-446.
- [3] PIÉ O, LÊ H, GOTTELAND P. A Mechanical Approach for Fibre-reinforced Clay in Landfill Caps Cover Application[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2009, 13(1):53-69.
- [4] 卢凯, 毛超, 薛文. 不同纤维种类及掺量的 RPC 抗压强度试验研究[J]. *浙江科技学院学报*, 2019, 31(06):484-487.
- [5] MIRZABABAEI M, ARULRAJAH A, HORPIBULSUK S, et al. Shear Strength of a Fibre-reinforced Clay at Large Shear Displacement when Subjected to Different Stress Histories[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(5):422-429.
- [6] MICHALOWSK R L, ZHAO A. Failure of Fiber-reinforced Granular Soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(3):226-234.
- [7] 蒋志琳, 王崇淦, 肖伟, 等. 纤维加筋土无侧限抗压强度试验及数值分析[J/OL]. *铁道科学与工程学报*, (2020-03-26) [2020-05-10]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200074>.
- [8] D3080/D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions[S].
- [9] 何咏睿, 朱晟, 武利强. 粗粒料二维与三维孔隙率的对应关系研究[J]. *水力发电*, 2014, 40(05):27-29+47.
- [10] YUAN Q, WANG Y H, TAM P O, et al. Experimental Characterizations of Contact Movement in Two-Dimensional Rod Assembly Subjected to Direct Shearing[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(1):1532-1541.
- [11] 蒋明镜, 付昌, 刘静德, 等. 各向异性结构性砂土离散元分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S1):577-584.
- [12] 陈庆, 高燕, 袁泉. 密实砂土剪切过程中的颗粒运动与微观力学特征[J/OL]. *水利水电技术*, (2020-04-20) [2020-05-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1757.TV.20200420.1322.002.html>.

(责任编辑 周雪梅)