

# 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性

王德银, 唐朝生\*, 李 建, 刘宝生, 唐 伟, 朱 昆

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

**摘 要:** 纤维加筋是近些年发展起来的一种土质改良技术, 系统掌握纤维加筋土的力学性质对评价纤维加筋土工程的稳定性和进一步推广该技术在工程中的应用具有重要意义。为了了解纤维加筋的剪切强度特性, 以非饱和黏性土为研究对象, 以聚丙烯纤维为加筋材料, 在控制含水率和干密度条件下开展了一系列直剪试验。借助扫描电镜, 从微观的角度探讨了纤维的增强机理, 并对相关宏观力学性质进行了分析。结果表明: 纤维加筋能有效提高土体的抗剪强度, 且抗剪强度随纤维掺量的增加而增加; 相对于内摩擦角, 纤维对黏聚力的增强效果要明显得多; 纤维加筋土的抗剪强度随含水率的增加而减小, 随干密度的增加而增加; 总体上, 低含水率和高密度条件有利于发挥纤维的拉筋效果, 提高纤维对强度的贡献。此外, 纤维加筋在提高土体峰值剪切强度的同时, 还能增加土体破坏时对应的应变及破坏后的残余强度, 改善土体的破坏韧性。由扫描电镜分析可知, 单根纤维一维拉筋作用和纤维网三维拉筋作用是纤维加筋土的主要增强机理, 增强效果则取决于纤维-土界面力大小; 剪切面上的纤维在剪切过程中呈现拔出和拉断两种失效模式。

**关键词:** 纤维加筋土; 非饱和黏性土; 剪切强度; 微观结构; 含水率; 干密度

**中图分类号:** TU44      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2013)10-1933-08

**作者简介:** 王德银(1990-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程和工程地质方面的研究工作。E-mail: wangdeyin\_nju@163.com。

## Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils

WANG De-yin, TANG Chao-sheng, LI Jian, LIU Bao-sheng, TANG Wei, ZHU Kun

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046)

**Abstract:** Fiber-reinforcement is a newly developed soil improvement technology. Better understanding the mechanical behaviors of fiber-reinforced soils is significant for evaluating the stability of the relevant earth structures and extending the application of this technology in engineering. This investigation aims to study the shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils. Polypropylene fiber is used as the reinforcement material. A series of direct shear tests are performed under controlled water content and dry density conditions. With the application of scanning electron microscope (SEM), the fiber reinforcement mechanisms are discussed, and the obtained macro behaviors are interpreted from micro level. The shear test results show that the inclusion of fiber in soils can significantly enhance the shear strength of soils, which increases with increasing fiber content. The fiber reinforcement benefit on cohesion force is more evident than that on internal friction angle. The shear strength decreases with the increasing water content and increases with the increasing dry density. Moreover, the fiber reinforcement contribution on strength is more pronounced under relative low water content and high dry density conditions, where the fiber reinforcement benefit can be motivated effectively. It is also found that the fiber reinforcement can increase the strain at failure and reduce the peak strength loss after failure and therefore improve the ductility of soil specimens. Based on the SEM analysis, it can be concluded that the 1D reinforcing effect of a single fiber and the 3D reinforcing effect of fiber mesh are the dominant mechanisms of fiber-reinforced soils, which are conditioned by the interfacial mechanical interactions between fiber and soil particles. The SEM images also indicate that fibers on the shear surface may be either pulled out or broken during shear.

**Key words:** fiber-reinforced soil; unsaturated cohesive soil; shear strength; microstructure; water content; dry density

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41072211); 国家自然科学基金重点基金项目(41230636); 江苏省自然科学基金项目(BK2011339); 优秀青年科学基金项目(41322019); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2013K010)

**收稿日期:** 2013-04-28

\*通讯作者

## 0 引 言

传统的加筋方法主要是在土体中植入面状或带状

的土工合成材料,包括土工布、土工格栅、土工网、土工条带等土工织物。该方法能有效提高土体工程力学性能,但由于上述加筋材料一般需要按一定方向和间距进行布设,筋材与土体之间往往形成潜在的软弱结构面,导致加筋土的力学性质呈显著的各向异性,在荷载作用下土体有可能沿筋/土界面发生相对滑动,出现较大变形甚至破坏。

近年来,纤维加筋技术的出现有效地弥补了传统土工合成材料的上述不足。该技术是通过在土体中随机掺入离散的纤维丝或网片,形成一种土工复合材料。由于纤维是均匀地分布在土体中,在各个方向上都能发挥加筋作用,因而纤维加筋被认为是一种三维加筋技术,纤维土也常被视为各向同性的均质材料。除此之外,纤维具有强度高、分散性好、易于拌合等优点。正因为如此,纤维加筋技术引起了国内外学者和工程技术人员广泛关注,并对纤维加筋土的工程性质开展了大量研究。

在国内,清华大学李广信课题组较早地开展了相关研究。如陈轮等<sup>[1]</sup>通过单轴拉伸试验,发现纤维加筋土试样在断裂后能继续承受拉应力作用,呈现裂而不断的特性;李广信等<sup>[2]</sup>通过开展三轴压缩试验,发现连续纤维加筋可显著提高土体的剪切强度,尤其是增加土体的黏聚力;介玉新等<sup>[3]</sup>通过开展离心模型试验,发现素土边坡的破坏具有突发性特点,而纤维加筋土坡的破坏则是渐进性的,据此得到纤维加筋能提高土质边坡稳定性的结论。此外,张小江等<sup>[4]</sup>通过开展动力试验,发现纤维加筋能提高土体在动荷载作用下的强度、韧性和塑性;Tang等<sup>[5]</sup>利用扫描电镜(SEM)定性分析了纤维与土体触面之间的微观作用特点及界面力学传递过程,指出纤维的加筋效果在本质上取决于界面间的摩擦力和黏结力大小,即界面剪切强度。此后,他们通过开展单根纤维拉拔试验,定量获得了纤维-土界面剪切强度大小,并分析了含水率、干密度等因素的影响<sup>[6]</sup>;施利国等<sup>[7]</sup>通过开展三轴试验,发现纤维加筋灰土的峰值偏应力和抗剪强度均高于普通灰土;雷胜友等<sup>[8]</sup>指出,纤维加筋还能抑制膨胀土

的膨胀性。

在国外,研究人员围绕纤维加筋土的力学性质也开展了一系列试验,包括直剪、三轴、无侧限抗压、CBR等。如Yetimoglu等<sup>[9-10]</sup>指出,纤维的加入可提高砂土的残余剪切强度,土体的承载力随纤维掺量的增加而增加;Welker等<sup>[11]</sup>在研究中发现,纤维掺量并不是越多越好,基于剪切强度参数,他们确定了最佳纤维掺量为0.2%;Akbulut等<sup>[12]</sup>基于无侧限抗压强度结果,也得到了纤维的最佳掺量在0.2%附近,但纤维长度对强度参数的影响无明显规律;Maheshwari等<sup>[13]</sup>的荷载试验结果表明纤维加筋能有效提高土体的极限承载力,并同时减小沉降量;Mohamed<sup>[14]</sup>发现土体的抗剪强度随纤维掺量的增加而增加,但当掺量达到1%时,抗剪强度开始下降。

上述研究成果从不同角度展示了纤维加筋土的工程性质,充分表明纤维加筋是一种优良的土质改良技术。但需要指出的是,已有研究基本上都是在饱和条件下进行的,且大部分工作都是以砂土为研究对象,黏性土相对较少。尽管有部分研究以黏性土为对象,但研究重点基本局限于纤维掺量或长度对力学参数的影响,在纤维加筋机理方面缺乏深入探讨。尤其是在剪切强度方面,关于纤维加筋对黏聚力和内摩擦角的影响尚缺乏统一认识。

本文以聚丙烯纤维为加筋材料,通过控制含水率和干密度,对纤维加筋非饱和黏性土开展了一系列直剪试验,重点分析了纤维掺量、含水率、干密度等主要因素对纤维加筋土剪切强度参数的影响。通过扫描电镜分析,从筋/土界面作用的角度探讨了纤维的增强机理及纤维加筋土的剪切破坏模式,得到了一些新的认识。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

本次试验所用土样为南京地区的下蜀土,其物理性质如表1所示。试验中采用的纤维为直径0.048 mm,长度12 mm的聚丙烯纤维丝,其物理力学参数见表2。

表1 南京地区下蜀土的物理性质

Table 1 Physical properties of Xiashu loess in Nanjing area

天然含水率 /%	比重 $G_s$	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p/\%$
7.22	2.81	1.96	15.7	1.71	34.2	17.3

表2 聚丙烯纤维的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of polypropylene fiber

类型	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	直径 /mm	平均长度 /mm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	熔点/ °C	燃点/ °C	耐酸碱 性	分散 性
束状单丝	0.91	0.04	12	≥350	≥3500	165	590	极强	极好

## 1.2 试验方法

### (1) 试样的制备

将取回的下蜀土风干碾碎, 并过 2 mm 筛, 土样的风干含水率为 4.3%。试验中选取的纤维掺量分别为 0, 0.1% 和 0.15%。试验过程中, 首先将定量的纤维同风干土充分搅拌, 待纤维分散均匀后, 再在土中洒入适量的水配制到表 3 的目标含水率 (12.5%, 14.5% 和 16.5%)。将配制好的土样装入塑料袋, 密封养护 24 h, 以便土样中的水分分布均匀。养护结束后, 称取适量的土样, 倒入内径 61.8 mm, 高 20 mm 的环刀中, 压实到表 3 的目标干密度 (1.6 和 1.7 g/cm<sup>3</sup>)。本次研究共开展了 14 组试验 (T1~T14), 每组试验对应的土样参数详见表 3, 每组土样按上述方法压制了 4 个平行样。

表 3 土样的试验参数

Table 3 Test parameters of soil samples

试样编号	纤维掺量/%	含水率 w/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
T1	0	12.5	1.7
T2	0	14.5	1.7
T3	0	16.5	1.7
T4	0.1	12.5	1.7
T5	0.1	14.5	1.7
T6	0.1	16.5	1.7
T7	0.15	12.5	1.7
T8	0.15	14.5	1.7
T9	0.15	16.5	1.7
T10	0	12.5	1.6
T11	0	14.5	1.6
T12	0	16.5	1.6
T13	0.1	12.5	1.6
T14	0.15	12.5	1.6

### (2) 试验方法

土体剪切强度的测定通常有两种试验方法: 直接剪切试验和三轴压缩试验。本试验采用的方法是直接剪切试验, 所采用的仪器为南京土壤仪器厂生产的四联应变控制式的直剪仪。试验过程中, 将压好的土样装入剪切盒, 土样上下表面各垫上一层薄塑料片, 防止水分蒸发和流失, 在 4 个土样上分别施加 50, 100, 200 和 300 kPa 的轴向压力, 设定的剪切速率为 0.02 mm/s, 最大剪切位移为 12 mm。试验过程中应力应变数据通过试验仪器自动采集记录。试验结束后, 选取代表性土样进行扫描电镜分析, 观测纤维在土体中的分布特征及其界面形态。由于不考虑土体的收缩变形影响, 因此用于扫描电镜分析的土样采用烘干法制备。

## 2 结果与讨论

按上述试验方法, 对表 3 中各组试样进行了直剪试验, 相关结果如表 4 所示。下面基于表 4 的剪切试验结果, 分别从纤维掺量、含水率和干密度的角度对纤维加筋效果进行分析。

### 2.1 纤维掺量的影响

为了分析纤维掺量对剪切强度参数的影响, 选取 T1-T9 的试验结果为代表, 相关结果如图 1 所示。

从图 1 (a) 中可以看出, 在本文研究的含水率范围内, 土样的黏聚力  $c$  总体上随纤维掺量的增加而增加, 但在不同区间内, 纤维掺量对  $c$  值贡献存在明显差异。如纤维掺量从 0 增加到 0.1% 时,  $c$  值平均增加了 4.0%, 而纤维掺量从 0.1% 增加到 0.15% 时, 尽管纤维增量只有 0.05%,  $c$  值则增加了 49.1%。由此可知,

表 4 土样的剪切强度指标

Table 4 Shear strength indices of soil samples

试样编号	纤维掺量/%	含水率 w/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	剪切强度	
				黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ (°)
T1	0	12.5	1.7	107.28	25.62
T2	0	14.5	1.7	100.68	24.30
T3	0	16.5	1.7	82.30	23.40
T4	0.1	12.5	1.7	112.47	29.90
T5	0.1	14.5	1.7	103.85	26.49
T6	0.1	16.5	1.7	85.61	24.92
T7	0.15	12.5	1.7	177.64	28.09
T8	0.15	14.5	1.7	154.19	26.80
T9	0.15	16.5	1.7	118.24	23.27
T10	0	12.5	1.6	98.19	20.63
T11	0	14.5	1.6	88.24	18.43
T12	0	16.5	1.6	67.80	16.64
T13	0.1	12.5	1.6	103.93	28.90
T14	0.15	12.5	1.6	147.98	27.00

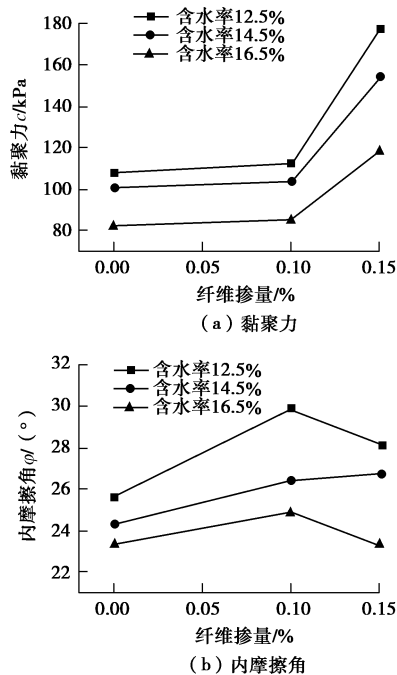


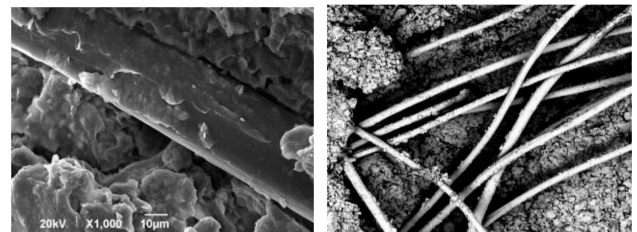
图1 剪切强度参数随纤维掺量的变化 (干密度为  $1.7 \text{ g/cm}^3$ )

Fig. 1 Variation of shear strength parameters with fiber content  
纤维加筋对土体强度的贡献与纤维掺量之间并不是单纯的线性关系, 这与纤维对土体的增强机理有关。

纤维的增强机理主要有两个方面: 单根纤维的一维拉筋作用和纤维网的三维拉筋作用。下面结合图2中给出的2张典型纤维加筋土扫描电镜照片分别进行阐述。图2(a)为放大了1000倍的SEM照片, 展示了单根纤维在土中的状态, 从图中可以看出, 纤维被拉出之前, 纤维表面被大量土颗粒所包裹, 由于纤维的弹模远高于土体, 同时受力时, 变形的不一致性必然导致二者之间出现相互错动趋势, 使纤维受拉, 产生界面力, 其大小主要取决于界面摩擦力和黏聚力<sup>[5]</sup>。纤维与土颗粒之间的界面力必然对纤维的相对滑动起限制作用, 使土体中的纤维能承受一定的拉应力, 从而起到分担外部荷载的作用。此外, 纤维受拉时, 在纤维弯曲部位还会对土颗粒产生约束作用, 限制土体的变形, 也有利于提高土体的力学性质。纤维的这种增强方式主要以离散纤维的一维拉筋作用为主。从图2(b)中可以发现, 大量纤维在土体中随机分布, 并相互交织成网, 当其中一根纤维受拉时, 必定牵动其它纤维共同受力, 形成三维受力网, 使荷载分布到更广的区域, 进一步改善纤维的拉筋效果。纤维的这种增强方式主要以纤维网的三维拉筋作用为主。

纤维掺量不同, 有可能影响纤维的主要增强方式。当纤维掺量较低时, 由于纤维间距较大, 无法形成有效的纤维网, 纤维对  $c$  值的贡献主要来自离散纤维的一维拉筋作用。而随着纤维掺量的增加, 越来越多的纤维开始交织成网, 此时纤维对  $c$  值的贡献除了一维

拉筋作用外, 还会叠加上三维拉筋作用, 从而导致  $c$  值在高纤维掺量区间增加更加明显 (图1(a))。理论上, 土体中纤维掺量越多, 剪切面上纤维密度越大, 纤维对剪应力的分担能力就越高, 但事实并非如此。已有研究表明, 纤维加筋对  $c$  值或其它强度指标的贡献存在临界掺量, 超过临界值后, 强度指标随纤维掺量的增幅可能减小, 并有可能下降。如 Prabakar 等<sup>[15]</sup>在研究中发现, 当纤维掺量超过 0.75% 时,  $c$  值开始减小; Akbulut 等<sup>[12]</sup>研究了纤维加筋土的无侧限抗压强度, 发现当纤维掺量超过 0.2%, 无侧限抗压强度开始减小; 蔡奕等<sup>[16]</sup>通过直剪试验, 得到最佳纤维掺量为干土重的 0.3%, 最佳纤维长度为 15 mm; 吴继玲等<sup>[17]</sup>的试验结果表明, 膨胀土的抗剪强度随着纤维掺量先增加而后减小, 峰值对应的纤维掺量为 0.3%。由此可见, 一般纤维掺量临界值都大于 0.3%, 在本文研究的纤维掺量范围之外。



(a) 放大1000倍

(b) 放大50倍

图2 纤维加筋土典型 SEM 照片

Fig. 2 Typical SEM images of fiber-reinforced soils

从图1(b)中可看出, 纤维加筋对内摩擦角的影响无明显规律, 该现象与其他学者的结果基本一致<sup>[18]</sup>。但总体上, 纤维加筋土试样的内摩擦角略高于素土, 主要是因为剪切面上的绝大部分纤维排列与剪切方向并不平行, 有利于增加土颗粒和纤维间的咬合摩擦作用。图3(a)是某试样剪切完成后剪切面的SEM照片, 从图上椭圆标记区域内可以看到明显的剪切擦痕, 对擦痕进行分析可知该试样的剪切方向为从上至下 (图中箭头)。对图3(a)右下角的方形标记区域内的纤维进行局部放大到2000倍, 得到图3(b), 可以看出纤维表面在剪切过程中发生了明显的塑性变形, 主要是受到土颗粒的挤压和摩擦所致。图3(c)展示了某剪切面上另一根纤维的表面形态, 塑性变形更加明显, 局部地方甚至发生破坏, 进一步说明剪切面上纤维-土颗粒间存在较强的摩擦作用。但当纤维的排列与剪切方向一致时, 纤维则有可能被拔出。图3(d)为纤维被拔出后留下的线状凹槽。

图1(b)中, 对于含水率为12.5%和16.5%的试样, 当纤维掺量从0.1%增加到0.15%时, 内摩擦角略有减小。而对于含水率为14.5%的试样, 内摩擦角则略有上升, 这可能是试验误差所致。Yang等<sup>[18]</sup>对纤维

加筋土开展了三轴压缩试验, 也发现内摩擦角随纤维掺量呈现先增加后减小的趋势。这可能与剪切面上过多土颗粒被纤维取代有关, 也可能是局部纤维成团、相互叠加, 导致界面摩擦系数减小有关。鉴于纤维加筋土是一种非常复杂的复合材料, 目前学术界关于纤维-土界面力学特性的研究报道或可供参考的成果非常之少, 相关问题亟待进一步研究, 尤其在纤维加筋土内摩擦角的物理机制方面, 至今未见有代表性的研究成果或统一认识, 这将是接下来该课题研究工作的重点。

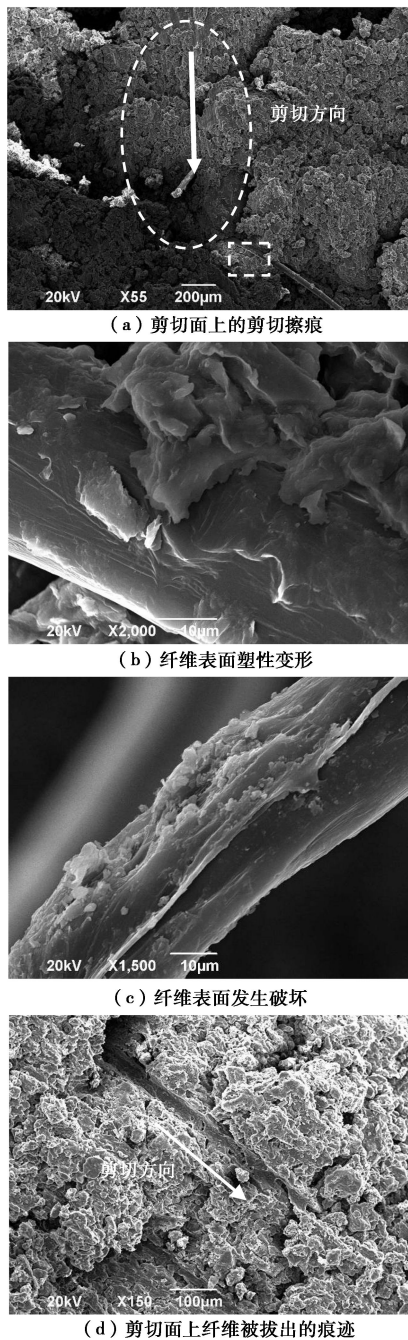


图 3 剪切面及纤维表面形态特征 SEM 照片  
Fig. 3 SEM images of shear face and fiber surface

### 2.2 含水率的影响

基于表 4 中 T1~T9 的试验结果, 得到干密度为  $1.7 \text{ g/cm}^3$  时各组试样剪切强度参数随含水率的变化情况, 如图 4 所示。无论是黏聚力(图 4 (a))还是内摩擦角(图 4 (b)), 均随含水率的增加呈递减趋势。如纤维掺量为 0 时, 当含水率从 12.5% 增加到 16.5%, 黏聚力减小了 23.3%, 内摩擦角减小了 8.7%; 纤维掺量为 0.15% 时, 对应黏聚力和内摩擦角分别减小了 33.4% 和 17.2%。对于干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的试样, 也有类似趋势。主要是由于含水率增加, 土体吸力减小, 土颗粒间的联接力减弱。此外, 较多的水分还会在剪切面上起到润滑作用。其他学者在研究非饱和土的剪切强度与含水率关系时也得到了类似的结果<sup>[19]</sup>。

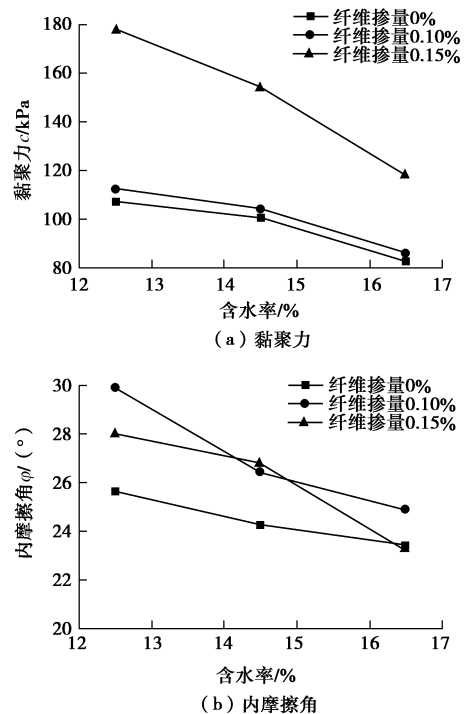


图 4 剪切强度参数随含水率的变化

Fig. 4 Variation of shear strength parameters with water content

对图 4 (a) 的黏聚力再做进一步分析, 可以发现纤维的增强效果在不同含水率条件下存在差异。如含水率为 12.5%, 14.5% 和 16.5% 时, 当纤维掺量从 0 增加到 0.15%, 对应土样的黏聚力分别增加了 65.6%, 53.1% 和 43.7%, 说明纤维的增强效果随含水率的增加有递减趋势。这主要是因为含水率的增加从以下两个方面削弱了纤维-土界面作用力: ①界面自由水分增多, 润滑作用加强, 界面摩擦作用降低; ②黏土颗粒的水化膜变厚, 土吸力及粒间作用力减小, 当纤维在土中发生滑动时, 界面上土颗粒发生重排所需克服的阻力也会减小。因此, 随着含水率的增加, 试样中纤维的抗拉拔能力呈下降趋势, 其对强度的贡献发生折

减。Tang 等<sup>[20]</sup>通过单根纤维拉拔试验,测试了不同含水率条件下纤维-土界面的剪切强度大小,其结果也证实上述观点。

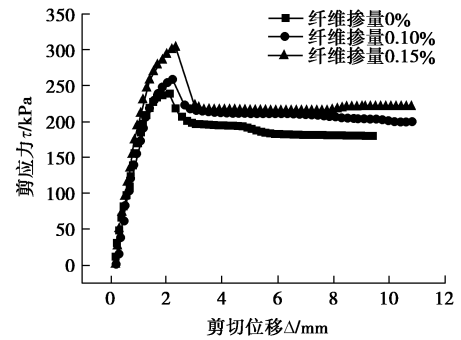
### 2.3 干密度的影响

从表 4 的结果可知,当其它条件相同时,增加干密度能有效提高土样的黏聚力和内摩擦角。以素土样 T1~T3 和 T10~T12 为例,其含水率变化区间为 12.5%~16.5%。当干密度从 1.6 增加到 1.7 g/cm<sup>3</sup> 时,黏聚力和内摩擦角的平均值分别增加了 14.2% 和 31.6%。对于纤维加筋土而言,选取 T1、T4、T7、T10、T13 和 T14 的结果进行分析,其中含水率均为 12.5%,当纤维掺量从 0 增加到 0.15% 时,干密度为 1.6 g/cm<sup>3</sup> 的试样黏聚力从 98.19 增加到 147.98 kPa,增幅为 50.7%,而干密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup> 的试样黏聚力从 107.28 增加到 177.64 kPa,增幅为 65.6%。由此可见,即使是纤维增量相同的情况下,纤维在压实度高的试样中能发挥出最佳的拉筋效果。这主要是因为干密度越高的试样孔隙比越小,纤维-土界面有效接触面积增加,界面作用力得以提高。Tang 等<sup>[20]</sup>通过开展单根纤维拉拔试验,发现干密度从 1.6 g/cm<sup>3</sup> 增加到 1.7 g/cm<sup>3</sup> 时,纤维-土界面作用力增加了 40%。因此,纤维在土体中的抗滑能力和承担拉应力的能力会随干密度的增加而增加。此外,制备干密度较高的试样需要较大的压实功,土体中比较坚硬的土颗粒(如砂)在压样时有可能破坏纤维表面或导致纤维发生塑性变形,增加纤维表面的粗糙度,从而改善界面力学作用<sup>[5]</sup>。

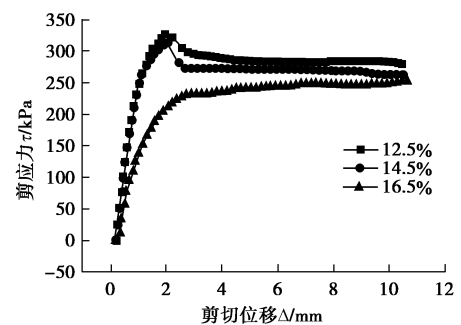
## 3 剪切破坏过程分析

图 5 给出了加筋土试样在不同纤维掺量、含水率、干密度和正应力条件下的典型剪切应力-位移曲线。由图 5 (a) 可知,无论素土还是加筋土,在剪应力到达峰值之前,剪应力均随剪切位移逐渐增加,曲线斜率无明显差异,说明纤维加筋对试样初始刚度的影响较小。但纤维加筋土试样的峰值强度和破坏后的残余强度均高于素土,且峰值强度对应的剪切位移随纤维掺量有增加趋势,说明纤维加筋在提高土体力学性质的同时,还能改善土体的破坏韧性。

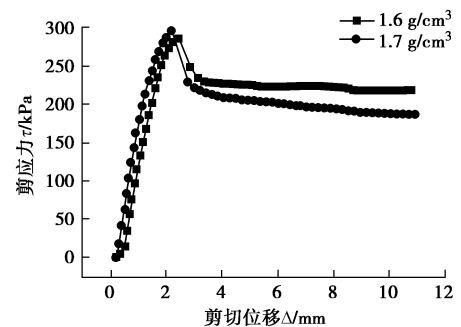
从图 5 (b) 中可以看出,含水率为 12.5% 和 14.5% 的试样在剪切过程中有明显的峰值强度,试样破坏后曲线急剧下降,剪应力减小到残余强度,且随剪切位移的增加几乎保持不变。而当含水率增加到 16.5% 时,曲线上未见明显峰值和突然“软化”现象,相反,剪应力随剪切位移逐渐增加,试样在剪切后期呈轻微的应变硬化趋势。该现象与含水率增加导致土吸力减小、结构强度变弱和破坏韧性增加有关。



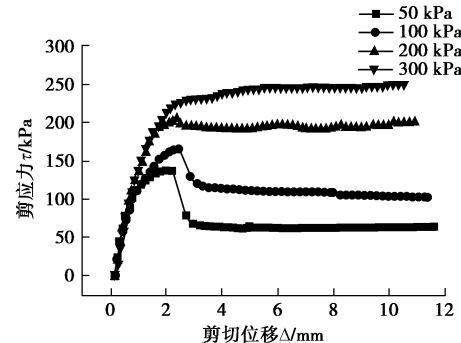
(a) 不同纤维掺量条件  
(正应力 200 kPa, 含水率 12.5%, 干密度 1.7 g/cm<sup>3</sup>)



(b) 不同含水率条件  
(正应力 300 kPa, 纤维掺量 0.15%, 干密度 1.7 g/cm<sup>3</sup>)



(c) 不同干密度条件  
(正应力 200 kPa, 含水率 12.5%, 纤维掺量 0.15%)



(d) 不同正应力条件  
(含水率 16.5%, 纤维掺量 0.15%, 干密度 1.7 g/cm<sup>3</sup>)

图 5 纤维加筋土试样的典型剪切应力-位移曲线

Fig. 5 Typical shear stress-displacement curves of fiber-reinforced soil samples

图 5 (c) 的结果表明,纤维加筋土的峰值抗剪强度随干密度的增加而增加,符合一般土力学规律,但残余强度却出现了减小的现象。这可能是与剪切面上纤维拉筋的失效模式有关。纤维加筋土在剪应力作用

下发生剪切位移时, 剪切面上纤维有可能被拔出, 也可能被拉断, 这取决于纤维 - 土界面作用力和纤维自身的抗拉断强度。如果前者大于后者, 则纤维在剪切过程中以拉断失效为主, 否则以拔出失效为主。但必须指出的是, 纤维 - 土界面作用过程非常复杂, 作用力大小受许多因素的影响, 包括纤维形状、长度、表面粗糙度及土体密度、含水率、矿物成分、粒度成分和正压力等<sup>[5, 20]</sup>。在本次研究中, 通过对剪切面进行扫描电镜分析, 发现纤维既有被拔出也有被拉断的现象(图 3(d)、图 6)。因此, 当土体的干密度较大时, 纤维 - 土界面作用力有可能大于纤维自身的抗拉强度, 纤维被拉断而完全丧失拉筋作用; 当干密度较小时, 纤维 - 土界面作用力不足以拉断纤维, 纤维主要以拔出失效为主, 但界面滑动摩擦作用仍然能使纤维对强度产生贡献, 因而出现干密度较小的试样残余强度反而较大的现象(图 5(c))。

从图 5(d)中可以看出, 当正压力从 50 kPa 增加到 300 kPa 的过程中, 加筋土试样破坏后的峰值强度损失逐渐减小, 由应变软化逐渐向应变硬化过渡, 这主要是因为正压力增加有利于提高纤维 - 土界面摩擦作用力, 改善剪切面上纤维的拉筋效果。

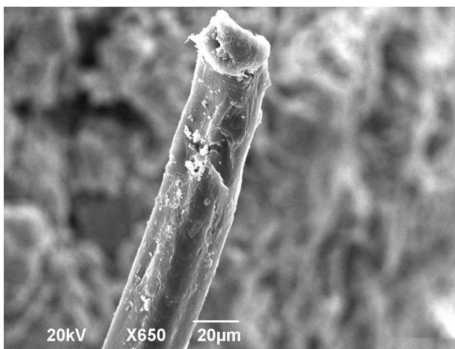


图 6 被拉断的纤维 SEM 照片

Fig. 6 SEM image of broken fiber

## 4 结 论

(1) 在黏性土中加入纤维, 能有效提高土体的剪切强度及对应的剪切强度参数。其中黏聚力随纤维掺量的增加而增加, 而内摩擦角与纤维掺量之间无明显规律。纤维的增强机理主要有两个方面: 单根纤维的一维拉筋作用和纤维网的三维拉筋作用, 后者与纤维掺量有关。

(2) 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度随含水率的增加而减小, 但在低含水率条件下, 纤维的增强效果优于高含水率条件, 主要是因为筋 - 土界面摩擦作用在低含水率条件下能得到更好的发挥, 有利于提高土体中纤维的抗拉拔能力。

(3) 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度随干密度的增加而增加, 且纤维对峰值强度的贡献也与干密度成正比, 主要是由于土样干密度越大, 筋 - 土界面的有效接触面积也越大, 有利于提高界面作用力, 发挥纤维的拉筋作用。

(4) 纤维加筋对土体的初始刚度影响不明显, 但纤维的加入有利于提高土样破坏时的应变, 减小峰值强度损失, 改善土体的破坏韧性。剪切过程中, 其拉筋失效模式主要有拔出和拉断两种, 这取决于纤维材料属性及纤维 - 土界面作用力大小。

## 参考文献:

- [1] 陈 轮, 李广信. 纤维加筋粘性土的抗拉和抗裂性能研究[J]. 地基处理, 1992, 3(2): 25 - 31. (CHEN Lun, LI Guang-xin. Tensile strength and crack resistance of fiber reinforced cohesive soil[J]. Ground Improvement, 1992, 3(2): 25 - 31. (in Chinese))
- [2] 李广信, 陈 轮, 郑继勤, 等. 纤维加筋黏性土的试验研究[J]. 水利学报, 1995(6): 31 - 36. (LI Guang-xin, CHEN Lun, ZHENG Ji-qin, et al. Experimental study on fiber-reinforced cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(6): 31 - 36. (in Chinese))
- [3] 介玉新, 李广信, 陈 轮. 纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 12-15. (JIE Yu-xin, LI Guang-xin, CHEN Lun. Study on centrifugal model tests on textile and cohesive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 12 - 15. (in Chinese))
- [4] 张小江, 周克骥, 周景星. 纤维加筋土的动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 45 - 49. (ZHANG Xiao-jiang, ZHOU Ke-ji, ZHOU Jing-xing. Experimental study on dynamic properties of cohesive soil reinforced with fibres[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 45 - 49. (in Chinese))
- [5] TANG C, SHI B, GAO W, CHEN F, CAI Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(3): 194 - 202.
- [6] 唐朝生, 施 斌, 高 玮, 等. 纤维加筋土中单根纤维的拉拔试验及临界加筋长度的确定[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2225 - 2230. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, GAO Wei, et al. Single fiber pull-out test and the determination of critical fiber reinforcement length for fiber reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2225 - 2230. (in Chinese))
- [7] 施利国, 张孟喜, 曹 鹏. 聚丙烯纤维加筋灰土的三轴强

- 度特性[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2721 - 2728. (SHI Li-guo, ZHANG Meng-xi, CAO Peng. Triaxial shear strength characteristics of lime-soil reinforced with polypropylene fiber inclusions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2721 - 2728. (in Chinese))
- [8] 雷胜友, 丁万涛. 加筋纤维抑制膨胀土膨胀性的试验[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 482 - 485. (LEI Sheng-you, DING Wan-tao. Experimental investigation on restraining the swell of expansive soil with fibre-reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 482 - 485. (in Chinese))
- [9] YETIMOGLU T, SALBA O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, **21**(2): 103 - 110.
- [10] YETIMOGLU T, INANIR M, INANIR O E. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, **23**(2): 174 - 183.
- [11] WELKER A L, JOSTEN N. Interface friction of a geomembrane with a fiber reinforced soil[C] // Geo-Frontiers Congress, ASCE, Austin, Texas, United States, 2005: 1 - 7.
- [12] AKBULUT S, ARASAN S, KALKAN E. Modification of clay soils using scrap tire rubber and synthetic fibers[J]. Applied Clay Science, 2007, **38**(1): 23 - 32.
- [13] MAHESHWARI K V, DESAI A K, SOLANKI C H. Performance of fiber reinforced clayey soil[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **16**: 1067 - 1082.
- [14] MOHAMED A E M K. Improvement of swelling clay properties using hay fibers[J]. Construction and Building Materials, 2013, **38**: 242 - 247.
- [15] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strengthbehaviour of soil[J]. Construction and Building Material, 2002, **16**(2): 123 - 131.
- [16] 蔡奕, 施斌, 高玮, 等. 纤维石灰土工程性质的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1283 - 1287. (CAI Yi, SHI Bin, GAO Wei, et al. Experimental study on engineering properties of fibre-lime treated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1283 - 1287. (in Chinese))
- [17] 吴继玲, 张小平. 聚丙烯纤维加筋膨胀土强度试验研究[J]. 土工基础, 2011, **24**(6): 71 - 73. (WU Ji-ling, ZHANG Xiao-ping. Study on strength of polypropylene fiber reinforced expansive soil[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, **24**(6): 71 - 73. (in Chinese))
- [18] YANG Y, CHENG S, GU J, et al. Triaxial tests research on strength properties of the polypropylene fiber reinforced soil[C]// Multimedia Technology (ICMT), 2011 International Conference on IEEE, Kyoto, Japan, 2011: 1869 - 1872.
- [19] 叶为民, 陈宝, 卞祚麻, 等. 上海软土的非饱和三轴强度[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 317 - 321. (YE Wei-min, CHEN Bao, BIAN Zuo-xiu, et al. Triaxial shear strength of Shanghai unsaturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 317 - 321. (in Chinese))
- [20] TANG C S, SHI B, ZHAO L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(1): 54 - 62.