

文章编号:1671-6833(2018)02-0056-05

# 棕麻纤维加筋砂的三轴试验研究

马强, 邢文文, 李丽华, 胡兴

(湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 利用室内三轴试验研究棕麻纤维加筋土的应力-应变关系特性以及强度特征, 探讨不同棕麻纤维含量和不同围压下棕麻纤维加筋土主应力差以及抗剪强度指标的变化规律, 分析筋材在土体剪切过程中的阻抗机理. 试验结果表明: 棕麻纤维加筋土的强度和抗变形能力较纯砂的有显著增强; 与纯砂相比, 棕麻纤维加筋土的抗剪强度指标有所变化, 内摩擦角和黏聚力均增加, 但内摩擦角增加幅度较小, 黏聚力增幅较大; 在试样含水率和纤维长度一定的情况下, 棕麻纤维加筋土的主应力差、抗剪强度以及抗剪强度指标随着棕麻纤维百分含量的增加呈现先增加后减小的变化趋势, 且存在最佳棕麻纤维含量值.

**关键词:** 三轴试验; 加筋土; 棕麻纤维; 应力-应变关系; 强度指标

**中图分类号:** TU472.2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.009

## 0 引言

在土体中使用筋材加筋可以限制土体变形, 增加土体的强度<sup>[1-2]</sup>, 已有的加筋土研究侧重筋材加筋效果. 李金和等<sup>[3]</sup>总结了近20年国内外纤维加筋土研究成果, 介绍了研究纤维加筋土常用试验和理论方法. Wu等<sup>[4]</sup>对剑麻纤维加筋土进行了三轴试验分析, 璩继立等<sup>[5]</sup>运用直剪、无侧限压缩等试验方法研究得到了不同棕桐尺寸和混合方式等情况下加筋黏土的强度特性. 文献[6]研究了随机分布聚丙烯纤维加筋土的力学性能, 邓友生等<sup>[7]</sup>利用无侧限压缩试验研究了聚丙烯纤维对膨胀土强度的影响. 卢浩<sup>[8]</sup>采用模拟试验研究了麦秆纤维加筋边坡在降雨侵蚀下的力学特性, 表明麦秆加筋提高了土体的抗剪强度, 降低了坡面土体的渗透性. 施利国<sup>[9]</sup>和刘芳<sup>[10]</sup>运用三轴试验分别研究了聚丙烯纤维和玻璃纤维加筋土的特性及加筋效果. 目前, 天然纤维加筋尚缺少大范围的试验研究, 理论还不完善. 张艳美等<sup>[11]</sup>试验研究了多因素影响的土工合成纤维土补强机理. 王磊<sup>[12]</sup>采用线弹性模型和剑桥模型, 建立了纤维加筋土的

本构模型, 得到加筋土应力-应变增量表达式, 并结合三轴试验进行验证. 吴燕开<sup>[13]</sup>对剑麻纤维加筋土进行无侧限抗压试验和直接剪切试验, 研究了随机分布剑麻纤维加筋土力学性能. 文献[14]研究了随机分布剑麻纤维的加筋效果, 试验表明剑麻纤维能够增加土体的强度, 提高土体的工程性质. 综上, 棕麻纤维具有一定的强度和韧性, 可作为加筋材料, 目前关于棕麻纤维加筋的研究相对较少.

笔者通过控制纤维含量, 开展不同围压条件下的室内不固结不排水三轴试验, 研究棕麻纤维含量对棕麻纤维加筋土强度的影响规律, 分析棕麻纤维加筋砂的力学特征, 并揭示其工作机理.

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验用砂的基本参数见表1. 加筋材料为棕麻纤维, 取自湖北工业大学校园内棕麻树, 通过系列拉伸试验得到纤维轴向拉力-变形关系曲线, 并对其进行均值化处理, 得到棕麻纤维基本参数见表2.

**收稿日期:** 2017-09-27; **修订日期:** 2017-12-17

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51678223); 湖北省教育厅重点资助项目(D20171402); 湖北工业大学绿色工业科技引领计划项目(YXQN2017001)

**作者简介:** 马强(1983—), 男, 湖北丹江口人, 湖北工业大学副教授, 博士, 主要从事加筋土方面的研究, E-mail: maqiang927@163.com.

表 1 砂土参数

Tab.1 Parameters of sand

最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最小干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	土粒比重	不均匀系数 C <sub>u</sub>	曲率系数 C <sub>c</sub>	最大孔隙比	最小孔隙比
1.89	1.65	10	2.67	5.40	1.40	0.62	0.41

表 2 棕麻纤维均值化参数

Tab.2 Parameters of flax fiber

纤维长度	纤维直径	界面形态	抗拉强度	模量
20 mm	0.35 mm	近似圆形	127.54 MPa	0.51 GPa

1.2 试验方法

试验采用 TSZ-2 型全自动三轴仪(南京土壤仪器厂有限公司生产)开展不固结不排水(UU)三轴试验,加载速度为 0.50 mm/min. 通过控制纤维含量和围压来研究棕麻纤维加筋砂土的力学特性及棕麻纤维含量对加筋效果的影响.

按照《公路土工试验规程》所述扰动土样的

制备程序制备试验土样. 所用加筋棕麻纤维直径为 0.1~0.6 mm,统一长度 20 mm. 棕麻纤维与砂土拌合均匀,加水搅拌,使试样含水率为 10%,然后养护 24 h,使其含水率稳定. 最后统一称取 150 g 土样,采用统一的击实锤从相同高度进行击实,控制试样的击实度为 90%,最终制得试样尺寸为:Φ39.1 mm×70 mm. 棕麻纤维取自然风干状态,以纤维含量作为加筋试样的控制影响因素,棕麻纤维加筋含量为其质量百分比,分别取 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4% 和 1.6%. 不同纤维含量下的各组试样均在 100、200 和 300 kPa 进行三轴试验,共进行 24 组试验.

2 试验结果及分析

2.1 主应力差(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)与轴向应变(ε<sub>1</sub>)的关系

试验结果取试样轴向应变≤15%的数据进行分析研究. 图 1 为纯砂和各棕麻加筋土的主应力差与轴向应变的关系曲线.

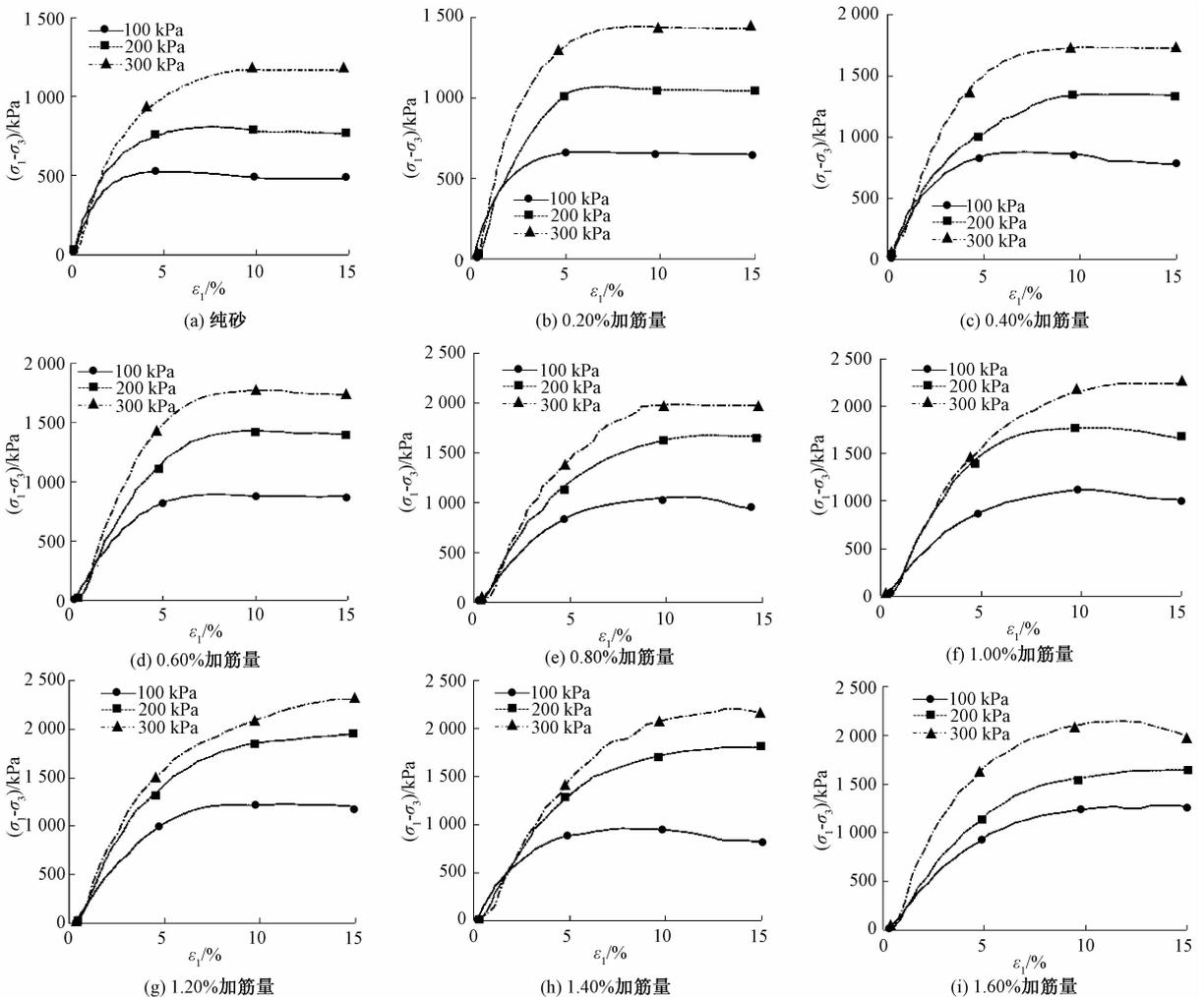


图 1 主应力差值与轴向应变关系曲线

Fig.1 (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>) vs. ε<sub>1</sub> of reinforced sand

由图1可以看出:①试样的主应力差与轴向应变关系曲线呈现应变硬化现象;②在应变 $<2\%$ 时,不同围压下的应力-应变曲线很接近,但随着应变逐渐增加,不同围压下的试样主应力差与轴向应变关系曲线的距离逐渐拉开且不断增加,并在应变大于 $10\%$ 后趋于稳定,说明围压对于主应力差的影响在应变较大时较为显著;③试样峰值主应力差值随着棕麻纤维掺量的增加而有所提升,说明纤维含量影响加筋土的强度和抗变形能力;④与纯砂相比,加入棕麻纤维后加筋土的强度均增加,且棕麻纤维加筋土的峰值主应力差值随着纤维含量的增加呈现先增大后减小的趋势;⑤棕麻纤维含量为 $1.2\%$ 时,加筋土的峰值主应力差值提高最大,加筋效果达到最佳状态。

## 2.2 加筋土的抗剪强度

在 $100$ 、 $200$ 和 $300$  kPa的围压下分别进行试验,根据多组试验得其均值绘制均值摩尔应力圆和相应的应力圆包线.图2为棕麻纤维含量为 $0.6\%$ 的加筋土及纯砂的摩尔应力圆和强度包线.

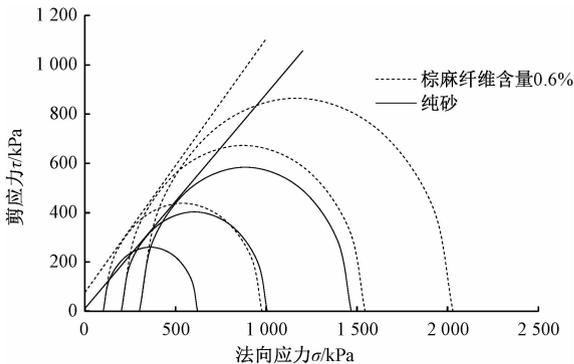


图2 加筋土及纯砂的强度包线

Fig.2 Mohr envelope of reinforced sand and pure sand

从图2可以看出,棕麻纤维加筋土的抗剪强度较纯砂有所提高,棕麻纤维加筋土的黏聚力和内摩擦角均有所增加。

表3为不同棕麻纤维含量的土体黏聚力和内摩擦角数值.与纯砂相比,棕麻纤维加筋土的黏聚力和内摩擦角均有所提高,但黏聚力增加较大,内摩擦角增加较小。

## 2.3 主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与棕麻纤维含量的关系

图3为峰值主应力差值与棕麻纤维含量关系曲线.由图3可以看出,峰值主应力差随着棕麻纤维含量的增加先增加后减小,并且存在峰值,即存在最佳棕麻纤维含量,本次试验测得最佳棕麻纤维含量为 $1.2\%$ .当砂土中棕麻纤维含量较小时,随着棕麻纤维含量的增加,纤维与砂土之间的

表3 抗剪强度指标

Tab.3 Shear strength indexes

棕麻纤维含量/%	抗剪强度指标	
	$c/\text{kPa}$	$\varphi /(^{\circ})$
0.00	11.3	41.06
0.20	14.8	44.77
0.40	21.7	48.12
0.60	22.6	48.77
0.80	26.9	49.12
1.00	27.7	49.21
1.20	29.9	50.19
1.40	29.2	49.39
1.60	21.4	42.29

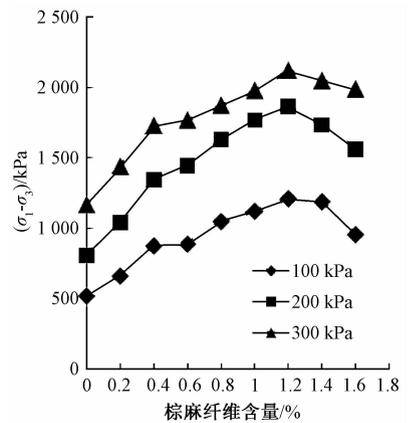


图3 主应力差值与棕麻纤维含量关系曲线

Fig.3 Relationships between  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  and flax fiber

接触面积不断增加,它们之间的摩擦阻力也随之不断增加,棕麻纤维充分发挥其加筋作用,于是主应力差值较纯砂增加,并且该值随着棕麻纤维含量的增加而增大,直达到峰值.当棕麻纤维含量超过峰值时,由于棕麻纤维含量过多,使得棕麻纤维在土体内堆积,不能与砂土充分接触从而发挥加筋作用,并且形成了一定的“隔断层”,破坏了土体的整体性,从而表现出峰值主应力差值增幅随着棕麻纤维含量增加而下降的现象。

## 2.4 棕麻纤维加筋土补强机理分析

棕麻纤维加筋砂土的补强机理可结合弯曲交织机理和纤维在土中的状态解释<sup>[11]</sup>,图4为弯曲与交织机理示意图,图5为棕麻纤维随机分布示意图。

试样在击实状态下颗粒之间孔隙被压缩,颗粒主要以面面接触为主.当原土中掺入棕麻纤维时,纤维加强了颗粒之间的粘结,有效约束了土颗粒的变形和位移,增加了加筋土的黏聚力,从而提高加筋土的抗剪强度.当掺入量较低时,棕麻纤维在土中以图5(a)和(b)形式较均匀分布,呈现

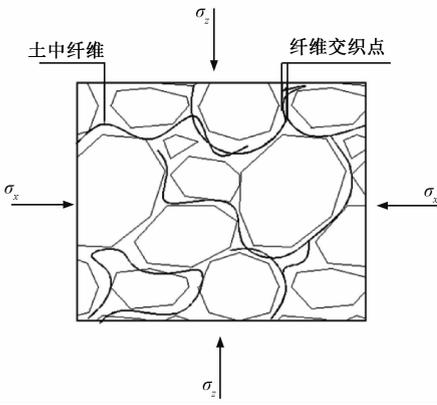


图 4 弯曲机理与交织机理示意图  
Fig. 4 Bending intercrossing

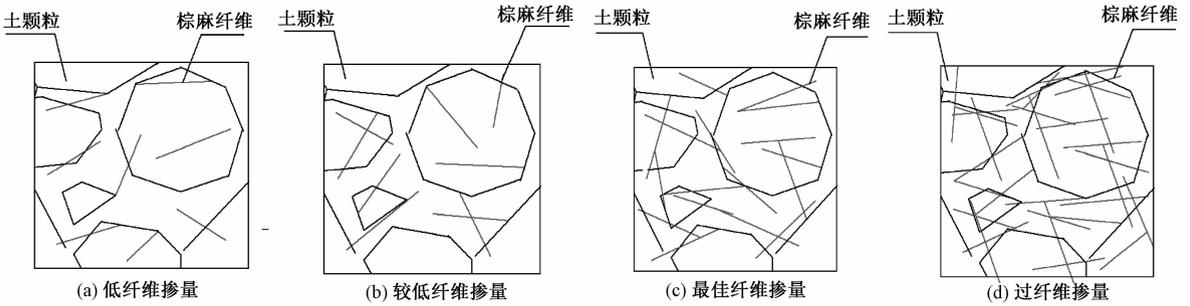


图 5 棕麻纤维分布示意图

Fig. 5 Distribution diagram of flax fiber

分布明显变得不均匀,如图 5(d)所示,部分纤维在土体中局部集中,没有跟土颗粒接触,并且形成了一定的“隔断层”,破坏了土体的整体性,从而降低抗剪强度。

### 3 结论

通过控制纤维含量,开展不同围压条件下的室内不固结不排水三轴试验,分析棕麻纤维含量对加筋土强度的影响规律,得到以下结论:

- (1) 棕麻纤维作为加筋材料,可以提高砂土的强度和抗变形能力,并且这种补强效果在轴向应变较大时比较明显;
- (2) 棕麻纤维加筋土的黏聚力和内摩擦角较纯砂都有所增加,但黏聚力增幅较大,内摩擦角增幅较小,符合摩擦加筋理论和准黏聚力理论;
- (3) 加筋土抗剪强度随棕麻纤维含量的增加先增大后减小,并存在峰值,峰值对应最佳纤维含量,笔者得到棕麻纤维最佳含量为 1.2% ;
- (4) 棕麻纤维与土体之间的摩擦阻力和纤维形成的纤维网格对土体的空间约束作用提高了加筋土的抗剪强度。

### 参考文献:

[1] 张卫东,王振波,何卫忠.冻融循环作用下橡胶自密

不相交或者局部相交的状态,此时棕麻纤维加筋的效果主要表现为纤维加强了土体颗粒之间的粘结,纤维受拉增强加筋土的抗剪强度.当掺入量在最佳掺入量附近时,棕麻纤维在土中以图 5(c)形态分布为主,此时纤维相互交错,形成网状结构,进一步形成局部加强体,增加土样的整体性,且纤维之间相互约束,交织处受到外力作用产生位移趋势时,相邻其它纤维可阻止这种趋势,使得外力能够在纤维之间叠加传递,各个方向的纤维都能承受拉力,实现力的分解,促进试样中内力的重分布,充分发挥纤维的加筋作用.当掺量超过最佳掺入量时,与之前的较低掺量相比,纤维在土体中的

实混凝土力学性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017,38(2):78-82.

[2] 申俊敏,张军,赵建斌. 土工格栅加筋桥头相邻路堤的受力分析与计算[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 28-31.

[3] 李金和,郝建斌,陈文玲. 纤维加筋土技术国内外研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2015,37(3): 319-325.

[4] WU Y K, LI Y B, NIU B. Assessment of the mechanical properties of sisal fiber-reinforced silty clay using triaxial shear tests[J]. The scientific world journal, 2014(13): 1-9.

[5] 璩继立,俞汉林,江海洋. 棕榈丝与麦秸秆丝加筋土无侧限抗压强度比较[J]. 地下空间与工程学报, 2015,11(5):1216-1220.

[6] PRADHAN P, KAR R, NAIK A. Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil [J]. Geotechnical and geological engineering, 2012,30(1): 15-25.

[7] 邓友生,吴鹏,赵明华. 基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2):349-353.

[8] 卢浩,晏长根,杨晓华. 麦秆纤维加筋土对黄土边坡抗冲刷的试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016,39(12):1671-1675.

- [9] 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.
- [10] 刘芳,孙红,葛修润. 玻璃纤维土的三轴试验研究[J]. 上海交通大学学报,2011,45(5):762-766.
- [11] 张艳美,张旭东,张鸿儒. 土工合成纤维土补强机理试验研究及工程应用[J]. 岩土力学,2005,26(8):1323-1326.
- [12] 王磊,朱斌,李俊超. 一种纤维加筋土的两相本构模型[J]. 岩土工程学报,2014,36(7):1326-1333.
- [13] 吴燕开,牛斌,桑贤松. 随机分布剑麻纤维加筋土力学性能试验研究[J]. 水文地质工程地质,2012,39(6):77-81.
- [14] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behavior of sand[J]. Construction and building materials, 2002, 16(2): 123-131.

## Study on Flax Fiber-reinforced Sand by Triaxial Test

MA Qiang, XING Wenwen, LI Lihua, HU Xin

(School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Triaxial test were carried out to research the stress-strain relationship and strength property of flax fiber-reinforced sand. The variation of shear strength indexes of flax fiber-reinforced sand in different flax fiber content and different confining pressure was investigated. And the frictional mechanism between the flax fiber and sand in the shearing process was studied. The laboratory test results showed that, the strength and the capacity for resisting the deformation of flax fiber-reinforced sand were better than those of pure sand. Compared with the pure sand, the shear strength indexes of flax fiber-reinforced sand were changed, the cohesive and friction angle were increased, while the friction angle increased relatively less, the cohesive force increased greatly; in the certain number of rate of water and fiber length, the value of deviator stress, shear strength and cohesion firstly increased and then decreased with the increase of flax fiber content, and there existed an optimum fiber content.

**Key words:** triaxial test; reinforced sand; flax fiber; stress-strain relationship; strength index