

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.064



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



纤维含量对加筋土宏观和微观特性的影响

陈志波, 郭学文, 戴梦兰, 赖汉江, 谢永宁

(福州大学紫金地质与矿业学院; 智能环境岩土工程福建省闽台科技合作基地, 福州 350116)

摘要: 纤维含量是影响加筋土的重要参数, 现有研究中纤维含量的取值范围一般较小, 纤维含量较高的加筋土物理力学性能尚不清楚。为了研究较高纤维含量对稻草纤维加筋土的影响, 设置 10 个纤维质量分数, 采用直剪试验进行研究, 探讨不同纤维含量对加筋土强度特性的影响, 并通过扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)试验和核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)测试对纤维加筋土的微观结构特征进行分析。结果表明, 加入纤维能有效提高土体的抗剪强度。纤维加筋土的增强机理与纤维含量有关, 较低的纤维含量对土体孔隙率影响不大, 加筋土以土骨架为基础; 当纤维含量较高时, 孔隙率明显增大, 加筋土的主体结构将由土骨架和纤维骨架组成。

关键词: 加筋土; 纤维含量; 抗剪强度; 微观特征

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)04-0001-09

Influence of fiber content on macro and micro characteristics of reinforced soil

CHEN Zhibo, GUO Xuewen, DAI Menglan, LAI Hanjiang, XIE Yongning

(Zijin School of Geology and Mining; Fujian-Taiwan Science and Technology Cooperation Base of Fujian Province on Intelligent Geo-environmental Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P. R. China)

Abstract: Fiber content is an important parameter affecting reinforced soil. In existing research, the range of fiber content values is generally small, and the physical and mechanical properties of reinforced soil with higher fiber content are not well understood. In order to study the impact of higher fiber content on rice straw fiber-reinforced soil, this study sets up 10 fiber mass fractions and uses direct shear tests for research, exploring the effect of fiber content on the strength characteristics of reinforced soil. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) and nuclear magnetic resonance (NMR) tests are used to analyze the microstructure features of fiber-reinforced soil. The results show that adding fibers can effectively improve the shear strength of the soil. The reinforcement mechanism of fiber-reinforced soil is related to fiber content. A small fiber content has little

收稿日期: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(52278335); 福建省社会发展引导性(重点)项目(2021Y0004); 福建省自然资源厅科研项目(2022122105); 清电(厦门)能源服务有限公司项目(2021111904)

作者简介: 陈志波(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、地质工程研究, E-mail: czb@fzu.edu.cn。
谢永宁(通信作者), 男, 博士, E-mail: cexieyn@fzu.edu.cn。

Received: 2023-03-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No.52278335); Guiding (Key) Project of Social Development in Fujian Province (No. 2021Y0004); Natural Resources Department of Fujian Province (No.2022122105); Project of Qingdian (Xiamen) Energy Service Co., LTD. (No.2021111904)

Author brief: CHEN Zhibo (1977-), PhD, professor, main interests: geotechnical engineering, geological engineering. E-mail: czb@fzu.edu.cn.

XIE Yongning (corresponding author), PhD, E-mail: cexieyn@fzu.edu.cn.

effect on the porosity of the soil, and the reinforced soil is based on the soil skeleton. When the fiber content is high, the porosity increases significantly, and the main structure of the reinforced soil would be composed of both the soil skeleton and the fiber skeleton.

Keywords: reinforced soil; fiber content; shear strength; micro characteristics

土体力学强度是影响工程安全的关键因素。改良软弱土,提高土体强度是土木工程的重要研究方向。纤维加筋作为一种价格理想、施工简单的土体改良技术,自问世以来便引起了众多学者关注^[1-4],已大量应用于土木工程各领域中,如边坡工程、填方路堤及地基处理等。

已有研究表明,无论黏性土还是无黏性土,掺入一定含量的纤维都可以不同程度地提高土体强度^[5],且加筋土的抗剪强度一般随纤维含量的增加而增大^[6]。熊雨等^[7]通过直剪试验研究了当纤维含量为 0.3% 时玄武岩纤维、聚丙烯纤维、聚酯纤维和玻璃纤维 4 种常用人工合成纤维加筋黄土的抗剪性能,结果表明,纤维表面的粗糙程度对加筋土效果有一定影响,玄武岩纤维表面粗糙、抗拉强度大,其加筋土的抗剪性能最好。高磊等^[8-9]研究表明,玄武岩纤维加筋能显著增强黏土的有效黏聚力,但对内摩擦角影响不明显,其最优纤维掺量为 0.3%。荣德政等^[10]的试验结果表明,对南京地区的下蜀土而言,其最优纤维掺量为 0.1%,可改善土坯的韧性和残余抗拉强度。刘建龙等^[11]通过无侧限抗压强度试验,确定了棉纤维的最优加筋量和最优加筋长度分别为 1.0% 和 2.5 cm。安宁等^[12]研究表明,当纤维长度为 15 mm、掺量为 0.5% 时,加筋土的抗剪强度和抗崩解性达到最优。Ouedraogo 等^[13]的试验结果表明,黏土中的秸秆纤维添加量为 0.2%~0.4% 时物理力学性能最佳。Nezhad 等^[14]研究表明,当纤维长度为 7.5 mm、纤维含量为 2% 时,其抗拉强度和

承载比值达到最大。Bekhiti 等^[15]研究了橡胶纤维对水泥土的作用,发现橡胶纤维的添加量为 2% 时,其无侧限抗压强度和延性提高程度最大。

综上可知,许多学者在对纤维加筋土的研究中发现,加筋土存在最优加筋率,且最优加筋率会随纤维材料的类型、加工方式和使用量等发生变化。其中,纤维含量是影响纤维加筋土强度特性的重要因素,而已有研究中所选取的纤维含量范围一般较小,随着纤维含量的增加可能存在类似量变的效果,较小的纤维用量范围无法全面体现其对加筋土作用的影响。笔者以稻草纤维为加筋材料,通过控制较大范围内不同纤维含量对纤维加筋土开展一系列直剪试验,重点分析纤维含量变化对纤维土强度的影响;通过扫描电镜(SEM)分析和核磁共振(NMR)测试,结合宏观和微观两个角度探讨纤维加筋土的增强机理和强度特性。

1 试样制备与试验方法

1.1 试验材料与试样制备

试验用土取自漳州长泰某特高压变电站边坡工程,属于粉质黏土,其基本物理性质见表 1,颗粒级配曲线见图 1。将土风干碾碎后过 2 mm 筛,并装袋备用。试验用纤维为工程建设中常用的干稻草纤维,是天然稻草的秆和叶在自然条件下晾晒后经机械粉碎且过 2 cm 筛后的纤维状物质,如图 2 所示。经测定,纤维直径范围为 0.1~2 mm,长度范围为 5~20 mm,拉伸断裂强度为 0.1~0.46 N。

表 1 试验用土样的物理参数

Table 1 The physical parameters of test soil sample

比重 G_s	颗粒组成/%			最大干密度/(g/cm ³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
	砂粒	粉粒	黏粒					
2.61	57	30	13	1.64	22.1	37.5	24.5	13

为了研究稻草纤维含量对加筋土的影响,试验选取 10 个纤维含量(稻草纤维质量与干土质量之比),测试加筋土抗剪强度指标。试样制备过程如下:首先,称取一定质量的纤维及风干土,充分搅拌,当纤维含量较高时,增加混合物总质量(比例不变)并使用卧制式搅拌机机械搅拌 5~10 min,尽可能使纤维与土样混合均匀,并根据天然土最优含水率(22%),用喷雾器向土中喷洒一定质量的水;然后,将配制好的土样装入聚乙烯袋中,密封养护

24 h,使土样中水分均匀;待养护结束后,称取适量土,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]中的静力压样法,制备直径为 61.8 mm、高为 20 mm 的试样。所制备试样的干密度约为 1.5 g/cm³。

1.2 试验方法

1.2.1 直接剪切试验

试样制备完成后,采用四联直剪仪进行快剪试验,剪切速率控制为 0.8 mm/min。垂直压力控制

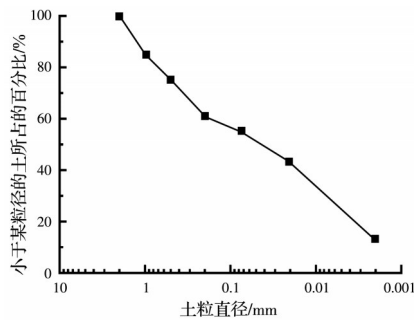


图1 试验用土样的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain distribution curve of test soil sample



图2 稻草纤维

Fig. 2 Straw fiber

为100、200、300、400 kPa。以剪应力与剪切位移关系曲线上的峰值点或稳定值作为抗剪强度。当无明显峰值点时,取剪切位移4 mm对应的剪应力作为抗剪强度。

1.2.2 扫描电镜(SEM)分析

采用场发射扫描电子显微镜对不同纤维含量的纤维加筋土微观结构特征进行观察。试验前,先将待测试样进行烘干处理,再取一小块进行喷金,然后进行扫描电镜观测。

1.2.3 核磁共振(NMR)测试

采用苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的AniMR-150型核磁共振分析仪进行测试。待测试样在测试前需进行抽气饱和,饱和时间为12 h,然后将饱和试样放入仪器样品管进行测试。NMR主要测量土孔隙中含氢流体的弛豫特征,通过核磁共振横向弛豫时间分布谱获取土的孔隙率及孔隙分布特征参数。土的孔隙结构与弛豫时间 T_2 存在以下关系^[17]

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{3}{R} \right) \quad (1)$$

式中: ρ_2 为表面弛豫率; R 为孔隙半径。 T_2 分布的信号强度反映不同孔径的孔隙数量,信号峰的位置反映孔径的大小。 T_2 分布与孔径大小呈正相关,即 T_2 值越小,孔隙孔径越小。 T_2 分布曲线下方的峰面积代表对应 T_2 范围内孔隙水的含量,由于试样经抽气饱和,此时孔隙水体积约等于孔隙体积,其与试样

总体积的比值即为孔隙率。

2 试验结果与分析

2.1 剪应力-剪切位移曲线

图3为不同纤维含量加筋土在不同法向应力作用下的剪应力-剪切位移曲线。从图3中可看出,在各法向力作用下,纤维加筋土的剪应力-剪切位移曲线均在未加筋土之上,表明纤维材料可显著提高土体的抗剪强度。值得注意的是,纤维含量16%的曲线大致都位于纤维含量12%的曲线之下,表明纤维含量超过某一值后,继续增加纤维含量无法继续增大加筋土的强度,反而可能会降低加筋土的强度。此外,在较低的法向应力作用下,如图3(a)所示,较低纤维含量加筋土的剪应力-剪切位移曲线呈应变硬化特征,无明显的峰值点;随着纤维含量的增加,剪应力-剪切位移曲线逐渐显现峰值,且峰值位置存在左移的趋势,最终,在较高纤维含量条件下(如纤维含量超过6%),剪应力-剪切位移曲线出现应变软化现象。而在较大法向应力条件下,如图3(b)~(d)所示,加筋土的剪应力-剪切位移曲线均呈应变硬化现象。分析其原因,可能是由于土体的孔隙结构和颗粒排列发生变化所致。在低法向应力作用下,土体内部的孔隙结构可能被压缩和改变,颗粒间接触面积增大,孔隙率减小,从而导致土体内部摩擦力增强;施加的剪切应力随应变逐渐增加至超过土体内部摩擦力时,土体内部裂纹扩展发生破坏,从而导致应变软化现象。此外,低法向应力下土体的约束较小,受剪时颗粒排列容易错动也会导致应变软化。相反,在高法向应力作用下,颗粒间的接触应力增大,摩擦作用增强,颗粒间的位移变得更加困难,使土体整体变得更加坚硬,出现应变硬化现象。此外,高法向应力下土体的压缩变形也会导致土体的微观结构发生变化,颗粒之间的相互咬合作用增强,也是造成应变硬化的原因之一。随着纤维含量的增加,加筋土中纤维填充了部分孔隙,使得颗粒间接触应力增大,摩擦作用进一步增强,在剪切过程中剪应力快速增大;当纤维含量较高时,土颗粒占比相对减小,在低法向应力下土颗粒之间的接触应力很小,部分纤维并没有填充孔隙,而是在土颗粒之间形成了大量团聚结构。这种结构抵抗剪切应力的能力较弱,在低法向应力下,纤维含量较高的加筋土会出现应变软化现象。

2.2 抗剪强度及其参数

图4为不同法向应力作用下加筋土抗剪强度随纤维含量增加的变化。可以看出,纤维加筋土的抗剪强度随着纤维含量的增加呈先增大后减小的趋

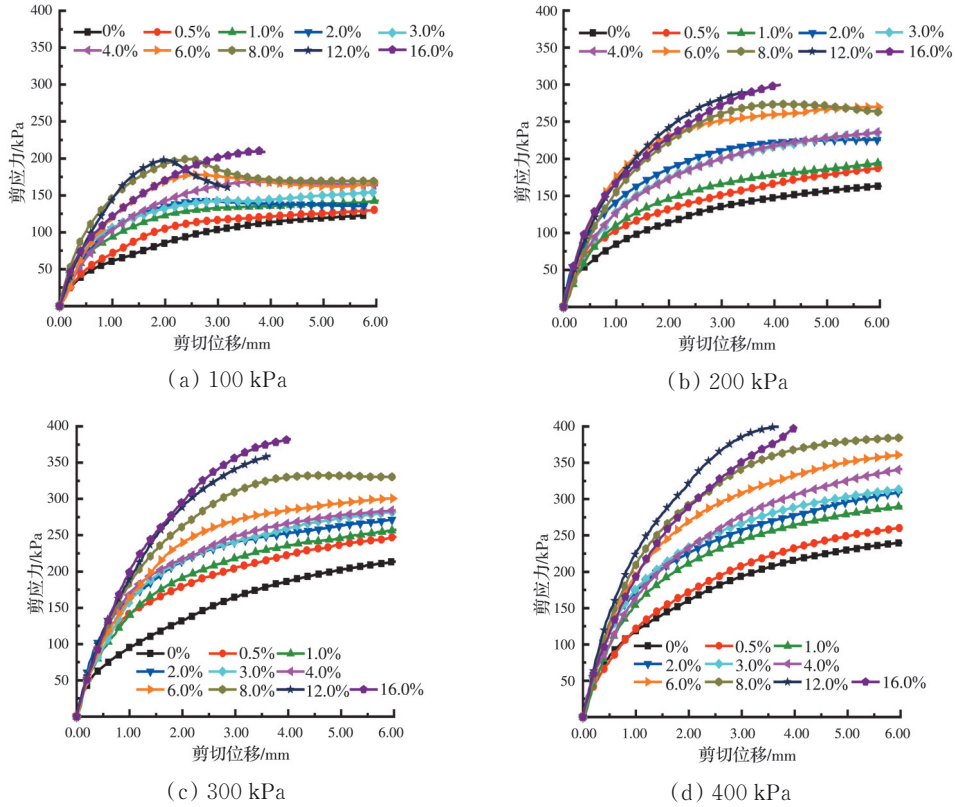


图 3 不同纤维含量加筋土的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 3 Shear stress-shear displacement curves of reinforced soil with different fiber content

势。此外,在低法向应力作用下,随着纤维含量的增加,纤维加筋土的抗剪强度曲线较为平缓;在高法向应力作用下,随着纤维含量的增加,其抗剪强度增加幅度较大。上述结果表明,法向应力的提高有利于增强纤维加筋效果^[18-19],分析其原因:在外部荷载作用下,纤维与土颗粒结合更紧密,增加了纤维与土界面的有效接触面积,提高了纤维-土界面的摩擦作用力,宏观上表现为抗剪强度的增大。图 5 为加筋土抗剪强度参数随纤维含量增加的变化。整体而言,在一定范围内,黏聚力和内摩擦角均随着纤维含量的增加而增大。如图 5 所示,黏聚力变化曲线可分为 2 个阶段:当纤维含量为 0%~8% 时,黏聚力的增加近似呈线性增长;当纤维含量为

8%~12% 时,黏聚力的增加趋于平缓。在图 5 中,内摩擦角的变化曲线可划分为 3 个阶段:当纤维含量为 0%~4% 时,内摩擦角无明显变化;当纤维含量

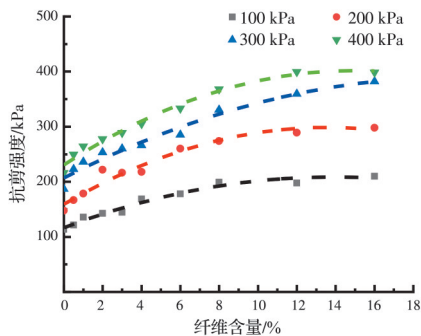
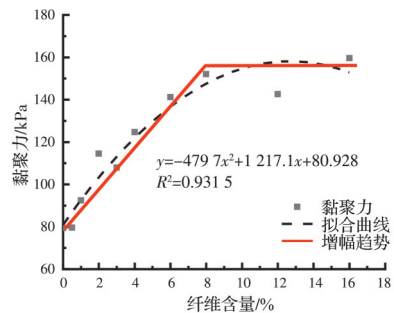
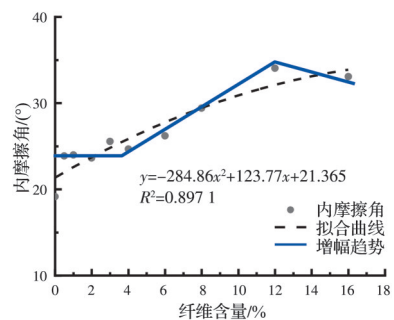


图 4 不同纤维含量加筋土的抗剪强度

Fig. 4 Shear strength of reinforced soil with different fiber content



(a) 黏聚力变化



(b) 内摩擦角变化

图 5 纤维加筋土抗剪强度参数随纤维含量增加的变化

Fig. 5 Variation of shear strength parameters of fiber reinforced soil with fiber content increasing

量为4%~12%时,内摩擦角逐渐呈线性增长;当纤维含量为12%~16%时,内摩擦角减小。试验时配制了纤维含量为20%的加筋土,但在制样过程中,因纤维含量高导致混合土料过于蓬松,难以压缩进模具,并且出现严重的回弹现象,故难以开展直剪试验。纤维含量为12%和16%的加筋土在制样过程中也出现上述情况,但相对来说,纤维含量为12%的加筋土回弹仍在可接受范围内,纤维含量为16%的加筋土体积已出现明显膨胀。因此,结合剪切破坏试样的表现性状和直剪试验结果,可确定12%为土体极限纤维含量,即在土体中纤维可替代的极限土粒质量。

3 纤维加筋土微观结构特征

3.1 电镜扫描分析

图6所示为纤维含量为0%、0.5%、1%、3%、6%、12%的纤维加筋土微观形态。从图6中可看出,在纤维含量较低时,纤维在土中以单一分布为主,而随着纤维含量的增加,逐渐发展为局部交织,甚至交织成网(如纤维含量超过3%时),形成纤维网结构包裹土体。当纤维含量为12%时,如图6(f)所示,在加筋土中可观察到“粗、细纤维”相互交织,

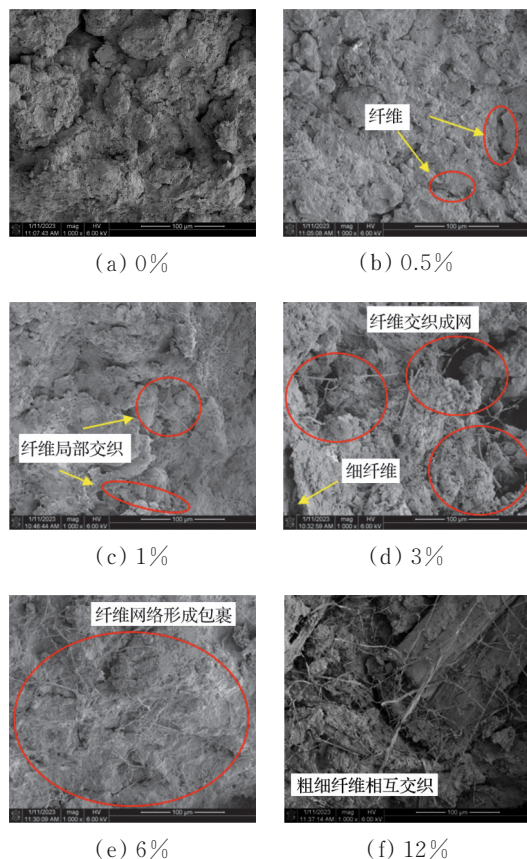


图6 纤维加筋土试样的SEM照片(放大1 000倍)
Fig. 6 SEM photos of fiber reinforced soil samples
(magnified 1 000 times)

按照比例尺估算,粗纤维直径约为0.1 mm,而大量的细小纤维长度甚至不足0.1 mm。本文所用纤维材料为干稻草纤维,细小的纤维可能是在粉碎切割时便存在的细小纤维碎末,其附着在相对粗的纤维上,在制样搅拌时分散于土中。显然,除粗纤维外,这些细小纤维也具备加筋作用。

3.2 核磁共振测试

图7为纤维加筋土的 T_2 分布曲线,可以看出, T_2 分布曲线大致有两个明显的波峰。基于现有研究^[20],设定 T_2 阈值为10 ms,将孔隙区分为大孔隙和小孔隙,其中弛豫时间为0~10 ms的主峰代表小孔径孔隙,弛豫时间为10~100 ms的次峰代表大孔径孔隙,信号强度代表对应的孔隙体积。主峰远大于次峰,表明试样中的孔隙主要以小孔径孔隙为主。随着纤维含量的增加,波峰的位置呈先左移后右移的趋势,表明孔隙半径呈先减小后增大的变化规律。纤维含量为0%的未加筋土主峰较为显著,而次峰不明显,表明其内部以小孔隙为主,而大孔隙较少;随着纤维含量的增加,次峰越来越明显并向左移,表明土体内开始出现孔径相对小的中等孔隙,其相应的孔隙体积也在增大;当纤维含量增加至3%时,主峰的信号强度有所降低,而主峰和次峰之间的信号强度开始增大,出现波谷,表明小孔隙逐渐在扩展、连通,转变成中孔隙和少量的大孔隙;当纤维含量为3.0%~12.0%时,主峰的信号强度开始提高,主峰和次峰间的波谷也逐渐上升直至融入主峰,而次峰逐渐稳定,表明在这一阶段随着纤维含量的增加,小孔隙和中孔隙都在不断扩展,没有发育出更大孔径的孔隙。

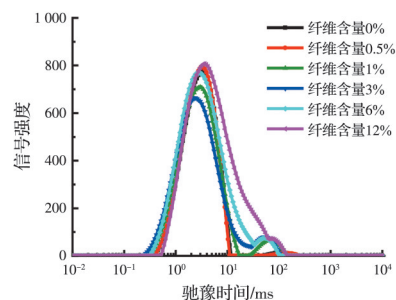


图7 纤维加筋土的 T_2 分布曲线

Fig. 7 T_2 distribution curves of fiber reinforced soil

图8为加筋土孔隙率随纤维含量增加的变化,可以看出,整体上加筋土的孔隙率随着纤维含量的增加而增大。当纤维含量为0%~3%时,孔隙率的数值仍相对较小;当纤维含量超过3%后,孔隙率的增大较为显著。分析其原因:土体是松散的多孔介质,其本身具备一定的孔隙,当纤维材料混入土中后,由于其蓬松的特性,必然使得孔隙增大。当纤

维含量较少时,在外力作用下,土颗粒压密,少量纤维与土紧密接触,填充孔隙,使得孔隙半径和孔隙数量减小,纤维加入土中后,增大的孔隙率与纤维填充孔隙减小的孔隙率可维持一定平衡;当纤维含量较多时,土颗粒中可填充的孔隙数量不足以平衡纤维加入土中后增加的孔隙数量,即表现出孔隙率的增大。同时,随机分布的纤维越多,越容易出现交织重叠,也使得孔隙扩展、连通,进一步增大孔隙率,当纤维含量为 12% 时,孔隙率达到 71.39%。

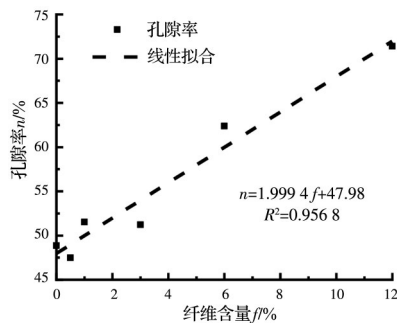


图 8 纤维加筋土的孔隙率变化

Fig. 8 Variation of porosity in fiber reinforced soil

4 纤维加筋土增强机理探讨

纤维加筋土的实质是利用等质量的纤维替代土颗粒,在外界压力作用下部分土颗粒减少引起的抗剪性能损失部分由纤维与土之间的界面作用进行代偿。随着纤维含量的变化,这种代偿作用也发生变化,具体可分为 3 个阶段。

1) 当纤维含量较低时,加筋土的增强机理主要是纤维土中单根纤维的一维拉筋作用^[6]。在受到外界压力时,土体颗粒间有致密的趋势,颗粒旋转、重排列使得随机分散在土中的纤维开始发生变形,纤维与土体间互锁,产生咬合摩擦力^[7,21],在纤维与土的接触界面产生滑动摩擦力,如图 9(a)所示。然而,纤维的弹性模量远高于土体,变形的不一致必然导致二者之间产生相对错动^[22-23],使单根纤维上产生拉应力,这 3 种力共同承担外荷载传递至土中的部分作用,宏观上表现为土体抗剪强度的提升。此外,利用一部分纤维替代土颗粒会导致加筋土中土颗粒所占比例减小,这种替代现象的影响范围可能取决于纤维与土颗粒的尺寸差异、分布状态、纤维的形状和方向等因素。在纤维替换土颗粒的过程中,可能是一部分纤维填充了土中的孔隙,导致孔隙率减小;另一部分纤维替代土颗粒的位置,改变了土中颗粒排列,导致孔隙率增大。当纤维含量较低时,替代的土颗粒也较少,对土骨架本身影响也相对较小,因此,在孔隙率此消彼长的情况下,加

筋土孔隙率可维持在一个相对稳定的变化范围。在 0%~3% 的纤维含量范围内,随着纤维含量的增加,纤维逐渐填充了土中的孔隙,除了承担部分外界荷载外,局部密实度的提高也增加了材料整体强度。但纤维含量较低时,填充作用也相对较弱,纤维与土界面的摩擦主要由纤维与土颗粒之间产生,而相较于土颗粒之间的摩擦,纤维与土颗粒之间的摩擦仍然较小。因此,直剪试验结果呈现出黏聚力增强而内摩擦角无明显变化。

2) 需要说明的是,内摩擦角无明显变化的前提是加筋土中纤维含量较少,此前许多学者的研究中所涉及的纤维用量最大为 0.15%^[6]、0.3%^[24]、0.4%^[9]、0.6%^[25]、1%^[26]、2%^[14]。在本文试验研究范围内,当纤维含量较高(4%~12%)时,内摩擦角逐渐呈线性增长,直至极限纤维含量为 12%。此时,相当一部分等质量纤维替代了土颗粒,土颗粒所占比例大幅降低,由土颗粒作为空间骨架构成加筋土的情况发生改变。一部分纤维填充了土中孔隙,但更多的纤维由于彼此交织已形成独立的纤维网络,反过来包裹土颗粒,或者在纤维形成的网络中填充了土颗粒。此外,土颗粒的减少使得加筋土中的孔隙率大幅增长,加筋土的主体以土骨架和纤维骨架两种形式共同承担外界荷载。在外界压力作用下,由于纤维构成的纤维骨架具备一定弹性变形能力,使得加筋土的整体性提高,当发生剪切时,加筋土中的摩擦除纤维与土颗粒间的作用外,还包括大量纤维与纤维间的摩擦。如图 9(b)、(c)所示,纤维含量的增加使得土体中随机分布的纤维与纤维之间交织联结,当加筋土体受外界压力作用触发单根纤维上的拉应力时,借纤维间的联结牵动,其他纤维共同受力,进一步使土体中形成更大范围的加筋区域。在图 9(d)中可明显观察到大量纤维形成的空间网络结构紧密包裹在土粒团聚体表面。另外,在剪切位移的过程中,随着纤维含量的增加,实际剪切面上分布的纤维比例也得到提高,这也是抗剪强度进一步提高的原因。

3) 在受力过程中,显然是土骨架在承担主要作用,纤维的作用则主要是为土颗粒间提供附加力^[27],当纤维含量超过极限纤维含量 12% 时,等质量纤维替代的土颗粒增多,试样中土颗粒的占比下降过多,必然导致强度降低。此外,当纤维含量增多时,容易在土中集聚成团,如图 9(e)所示,隔绝了纤维与土颗粒之间的接触,纤维骨架脱离团聚体,由于缺少土体的包裹,成团的纤维在土中形成软弱结构面^[28]。

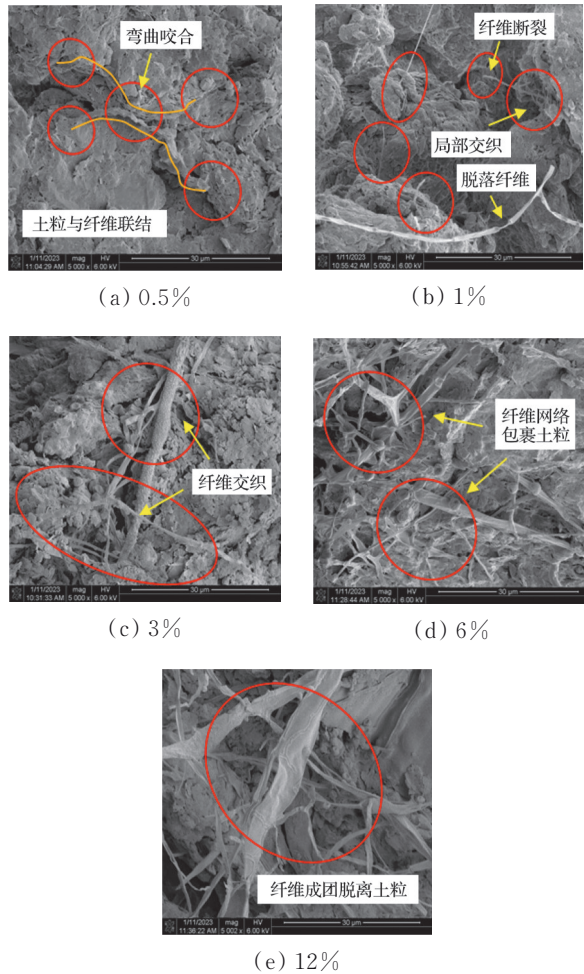


图9 纤维加筋土试样的SEM照片(放大5 000倍)

Fig. 9 SEM photos of fiber reinforced soil samples (magnified 5 000 times)

5 结论

1)加入纤维能有效提高土体的抗剪强度。当纤维含量较低(0%~3%)时,抗剪强度主要表现为黏聚力的增强,而内摩擦角无明显变化;随着纤维含量逐渐增加,内摩擦角呈线性增长;存在极限纤维含量12%。

2)在SEM图像中,观察到细小纤维(长度小于0.1 mm)在土体中交织形成的纤维网结构,表明除肉眼可见的纤维外,细小纤维也有助于改善土体性质。

3)较低的纤维含量(0%~3%)对土体孔隙率影响不大,加筋土以土骨架为基础,增强机理主要为单纤维加筋作用;当纤维含量较高(4%~12%)时,孔隙率明显增长,加筋土的主体结构将由土骨架和纤维骨架组成,增强机理主要为多纤维网络加筋作用。超出极限纤维含量12%后,由于纤维骨架中缺少土颗粒的填充,反而在土中形成软弱结构面。

参考文献

- [1] GOWTHAMAN S, NAKASHIMA K, KAWASAKI S. A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions [J]. Materials, 2018, 11(4): 553.
- [2] CHOBBASTI A J, SAMAKOOSH M A, KUTANAEI S S. Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers [J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 1094-1104.
- [3] 郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 15-21.
ZHENG J J, SONG Y, LAI H J, et al. Experimental study on the shear behavior of fiber-reinforced biocemented sand [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 15-21. (in Chinese)
- [4] ZHANG D, ZHANG W G, YANG Y, et al. Enhancing splitting tensile strength of biocarbonated reactive magnesia-based sand using polypropylene fiber reinforcement [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(10): 4761-4768.
- [5] 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.
LI J H, HAO J B, CHEN W L. Advances in study of fiber reinforced soil [J]. World Sci-Tech R & D, 2015, 37(3): 319-325. (in Chinese)
- [6] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1933-1940.
WANG D Y, TANG C S, LI J, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1933-1940. (in Chinese)
- [7] 熊雨, 邓华锋, 彭萌, 等. 四种人工合成纤维加筋黄土的抗剪特性[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 122-126, 133.
XIONG Y, DENG H F, PENG M, et al. Shear properties of loess reinforced with four synthetic fibers [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(1): 122-126, 133. (in Chinese)
- [8] 高磊, 胡国辉, 杨晨, 等. 玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊1): 231-237.
GAO L, HU G H, YANG C, et al. Shear strength characteristics of basalt fiber-reinforced clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup 1): 231-237. (in Chinese)
- [9] 高磊, 胡国辉, 陈永辉, 等. 玄武岩纤维加筋黏土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊1): 198-203.
GAO L, HU G H, CHEN Y H, et al. Triaxial tests clay reinforced by basalt fiber [J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup 1): 198-203. (in Chinese)
- [10] 荣德政, 唐朝生, 曾浩, 等. 纤维加筋土坯的蒸发过程及抗拉强度特性[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 670-678.
- RONG D Z, TANG C S, ZENG H, et al. Evaporation process and tensile behavior of fiber-reinforced rammed earth [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 670-678. (in Chinese)
- [11] 刘建龙, 侯天顺, 骆亚生. 棉纤维加筋土无侧限抗压强度试验研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 12-21.
- LIU J L, HOU T S, LUO Y S. Unconfined compressive strength of synthetic cotton fibers reinforced soil [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2): 12-21. (in Chinese)
- [12] 安宁, 晏长根, 王亚冲, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土抗侵蚀性能试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 501-510.
- AN N, YAN C G, WANG Y C, et al. Experimental study on anti-erosion performance of polypropylene fiber-reinforced loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 501-510. (in Chinese)
- [13] OUEDRAOGO M, DAO K, MILLOGO Y, et al. Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 23: 250-258.
- [14] NEZHAD M G, TABARSA A, LATIFI N. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(3): 626-642.
- [15] BEKHITI M, TROUZINE H, RABEHI M. Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil [J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 304-313.
- [16] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [17] HUANG W, DU J X, SUN H, et al. New polymer composites improve silty clay soil microstructure: An evaluation using NMR [J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(11): 3272-3281.
- [18] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度与偏应力应变[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 109-114.
- WEI L, CHAI S X, CAI H Z, et al. Triaxial shear strength and deviatoric stress-strain of saline soils reinforced with wheat straws [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 109-114. (in Chinese)
- [19] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆的筋土摩擦性能及加筋作用[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 53-59.
- WEI L, CHAI S X, CAI H Z, et al. Frictional characteristics of wheat straw in saline soil and evaluation of reinforcing effect [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(6): 53-59. (in Chinese)
- [20] CHEN Y Q, ZHOU Z F, WANG J G, et al. Quantification and division of unfrozen water content during the freezing process and the influence of soil properties by low-field nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: 126719.
- [21] 张嘎, 王刚, 尹振宇, 等. 土的基本特性及本构关系[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 105-118.
- ZHANG G, WANG G, YIN Z Y, et al. A critical review on the research of fundamental behavior and constitutive relationship of the soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 105-118. (in Chinese)
- [22] 陈永辉, 赵维炳, 汪志强. 一个加筋复合土体的本构关系[J]. 水利学报, 2002, 33(12): 26-32.
- CHEN Y H, ZHAO W B, WANG Z Q. The constitutive relationship of reinforced soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(12): 26-32. (in Chinese)
- [23] 陈永辉, 施建勇, 马文斌. 土工织物加筋堤坝复合有限元分析方法[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 28-33.
- CHEN Y H, SHI J Y, MA W B. Composite FEM analysis on geotextile-reinforced embankment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 28-33. (in Chinese)
- [24] 高真, 曹鹏, 孙新建, 等. 玄武岩纤维混凝土抗压强度分析与微观表征[J]. 水力发电学报, 2018, 37(8): 111-120.
- GAO Z, CAO P, SUN X J, et al. Compressive strength analysis and microscopic characterization of basalt fiber reinforced concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(8): 111-120. (in Chinese)
- [25] 李丽华, 万畅, 刘永莉, 等. 玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 102-106.
- LI L H, WAN C, LIU Y L, et al. Shear strength characteristics of glass fiber reinforced sandy soil [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(1): 102-106.
- [26] 唐皓, 李华华, 刘驰洋, 等. 棕榈加筋黄土剪切强度特性及细观结构[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7832-7837.
- TANG H, LI H H, LIU C Y, et al. Shear strength characteristics and meso-mechanism of palm-reinforced loess [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7832-7837

- [27] 王宗建,李畅,肖亮,等. 加筋黏性土加筋效果的三轴试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(7): 99-106.
- WANG Z J, LI C, XIAO L, et al. Triaxial test study on reinforcement effect of reinforced cohesive soil [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(7): 99-106.
- [28] 卢浩,晏长根,贾卓龙,等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 82-92.
- LU H, YAN C G, JIA Z L, et al. Shear strength and disintegration properties of polypropylene fiber-reinforced loess [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 82-92. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)