

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.017

玄武岩纤维加筋膨胀土三轴剪切试验研究

汪鹏程, 夏文丽, 郭劲松, 刘明, 王旭洋

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对玄武岩纤维加筋重塑膨胀土加筋效果及其物理力学性能,文章开展相关试验研究。将长度为 6 mm 的玄武岩纤维按照质量分数分别为 0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00% 配制相同含水率和干密度纤维加筋土试样,进行不同围压下三轴固结不排水试验,对围压 300 kPa 下试样中代表性土体使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)进行微观结构观察。结果表明:玄武岩纤维加筋改良膨胀土为明显的中间鼓胀的塑性破坏;加筋土黏聚力随纤维质量分数增加先增大后减小,当纤维质量分数为 0.50% 时,黏聚力最大;相较于黏聚力,纤维质量分数对内摩擦角的影响不大;纤维加筋土应力-应变总体表现为硬化型,可以用双曲线来拟合;随纤维掺量的增加,纤维在土样中分布方式由简单握裹作用变为纤维三维空间网作用,限制了试样内部微观裂隙的发展。

关键词:加筋膨胀土;微观结构;玄武岩纤维;三轴剪切试验

中图分类号:TU411.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)12-1697-08

Triaxial shear test of basalt fiber reinforced expansive soil

WANG Pengcheng, XIA Wenli, GUO Jinsong, LIU Ming, WANG Xuyang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The reinforcement effect and physical and mechanical properties of basalt fiber reinforced expansive soil were tested. The fiber reinforced soil samples with the same water content and dry density were prepared with 6 mm basalt fibers at mass fractions of 0, 0.25%, 0.50%, 0.75% and 1.00%, and the triaxial consolidated undrained tests were carried out under different confining pressures. The microstructure of the representative soil mass under 300 kPa confining pressure was observed by scanning electron microscope(SEM). The results show that the basalt fiber reinforced modified expansive soil exhibits a distinct plastic failure with middle swelling. The cohesion of reinforced soil firstly increases and then decreases with the increase of fiber mass fraction, and the cohesion reaches the maximum when the fiber mass fraction is 0.50%. Compared to cohesion, the fiber mass fraction has little effect on the internal friction angle. The stress-strain of fiber reinforced soil generally shows a hardening type, which can be fitted by hyperbolic curve. With the increase of fiber content, the distribution mode of fibers in soil samples changes from simple handhold to three-dimensional spatial network of fibers, which restricts the development of microscopic cracks in the samples.

Key words: reinforced expansive soil; microstructure; basalt fiber; triaxial shear test

加筋土^[1]是首次由法国工程师 Henri Vidal 提出的概念,随着加筋土被更多人认识,纤维加筋技术在土体改良领域越来越受欢迎^[2-3]。纤维因

其易于实现随机分布、易于拌和等优点,作为加筋体被用在土体改良中,在土体中以纤维丝和空间纤维网出现,通常被视为各向同性的材料,这与其

收稿日期:2023-07-07;修回日期:2023-08-11

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U1965101)

作者简介:汪鹏程(1968—),男,安徽桐城人,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:zjuwangpc@126.com.

他材料相比有更加简单的本构关系^[4]。此外,与传统加筋材料相比,纤维还具有以下特点:①具有一定强度和较高模量;②成本较低,制作方便,利于施工;③不会像土工布、格栅因布筋方向和距离产生软弱面等。这些优势大大弥补了传统加筋土的缺点^[5]。玄武岩纤维是一种绿色、环保材料,价格便宜、力学性能优越和稳定性高,被誉为 21 世纪新型无污染绿色高性能纤维^[6],吸引了越来越多研究人员的注意,在工程中逐渐得到应用和发展。现阶段将玄武岩纤维应用于黏土的改良研究较多^[7-9],而将玄武岩纤维应用于膨胀土的成果相对较少。

目前,研究人员主要通过三轴、直剪试验来研究纤维加筋土的抗剪强度指标。文献^[10]对纤维加筋土进行室内抗剪强度试验,研究表明,峰值强度提高不显著,而土体的残余剪切强度得到一定提高;文献^[11]对不同纤维质量分数下的加筋土分别进行三轴剪切试验,结果表明,加筋土强度较未掺纤维的素土整体提高,黏聚力和内摩擦角都增大;文献^[12]通过三轴不固结不排水试验进行涤纶树脂纤维加筋粉土应力-应变曲线研究,结果表明加筋土体抵抗变形能力提高;文献^[8]通过三轴试验和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察,发现玄武岩纤维加筋土内摩擦角和黏聚力随纤维质量分数变化,并在微观上解释纤维土破坏方式和机理;文献^[13]通过三轴蠕变试验探究纤维加筋膨胀土蠕变特性,发现纤维可以减小膨胀土蠕变变形,存在最优值,长期强度也提高;文献^[14-15]对聚酯纤维加筋黏土进行三轴试验和直接剪切试验,发现存在最佳掺筋量。

在纤维加筋土微观机理解释方面,文献^[16]利用 SEM 分析纤维在素土、水泥土和石灰土中的表面形态学特征及接触面之间力的产生和传递过程,得出筋土作用面有黏接和摩擦作用;文献^[17]通过扫描玄武岩纤维加筋黄土表面发现土体微观结构发生了改变,随数量增加,纤维从握裹现象过渡到相互搭接最后变为抱团现象。

综上所述,纤维加筋改良土的研究很多,加筋改良效果显著,特别是土的抗剪强度、抗压强度和变形能力得到很大的提高。而提高膨胀土强度,降低外界因素对土体变形的影响是研究的热点之一。玄武岩纤维作为一种新型无污染绿色高性能纤维,是一种良好的加筋材料,鉴于玄武岩加筋膨胀土的研究相对较少,对玄武岩纤维加筋机

理认识也不够深,因此有必要对玄武岩纤维加筋膨胀土强度机理进行研究。

本文采用 6 mm 玄武岩纤维对取自引江济淮河道内的膨胀土土样进行加筋处理,在最大干密度和最佳含水率条件下开展不同围压下的三轴固结不排水试验,分析纤维质量分数对加筋土抗剪强度的影响,探究玄武岩纤维最佳质量分数改良效果。从三轴剪切面上选取代表性土样进行 SEM 分析,从微观层面上分析不同质量分数纤维分布情况、土体与纤维之间的作用方式和破坏特征等,为膨胀土改良工程提供参考。

1 试 验

1.1 试验材料

膨胀土取自引江济淮中线工程施工区河道内,取样深度约为 1.1 m,土样呈黄褐色,通过室内试验测得土样基本物理指标,见表 1 所列。

表 1 膨胀土的基本物理参数

塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	自由膨 胀率/%	最佳含 水率/%	最大干密度/ (g/cm ³)
24	54	30	52	21	1.6

玄武岩纤维是以纯天然玄武岩矿石为原料,在 1 450~1 500 °C 下经高温熔融后喷丝板拉伸成的一种高性能天然无机纤维,其主要化学成分为 SiO₂、Fe₂O₃ 等。本次试验采用工厂机器生产的短切玄武岩纤维,实物如图 1 所示,纤维长度为 6 mm,每束纤维由多根单丝纤维组成。通过试验得到玄武岩纤维的基本物理指标,具体见表 2 所列。



图 1 短切 6 mm 玄武岩纤维

表 2 短切单丝玄武岩纤维基本性能物理指标

单丝直径/ μm	密度/ (g/cm^3)	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	极限延伸率/ $\%$	耐酸碱性/ $\%$
17	2.65	2 660	>759	2.81	99

1.2 试验方法

本次试验土样经烘干粉碎后与玄武岩纤维混合成改良土。结合实际工程和现场地质情况采用固结不排水试验测定改良膨胀土的抗剪强度。将玄武岩纤维按质量分数为 0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00% 分别掺入膨胀土中,每种土样均在 100、200、300、400 kPa 这 4 种围压下进行固结不排水剪切试验,探究玄武岩纤维对膨胀土强度的影响。随后选取三轴剪切试验试样破坏面上代表性土样界面,使用 SEM 观察纤维-土界面相互作用情况,解释纤维加筋膨胀土机理。

1.3 试验过程

三轴剪切试验利用室内 TSZ-3 应变控制式三轴仪进行,微观结构采用高倍率场发射电子显微镜分析。试样制作按照土工标准制成高为 80 mm、直径为 39.1 mm 的圆柱试样,含水率按照最佳含水率 21% 进行配制,参考土工规范,制样方法采用静压法。

试样为重塑试样,都是非饱和土。为避免非饱和土里基质吸力对试验结果的影响,所有试样都要饱和,将试样放在饱和器里抽气约 2 h。利用游标卡尺测量试样的体积,直径沿高度方向测量上、中、下 3 个部位,高度测量 2 次,在相互垂直位置测量,用平均数代替试样实际尺寸。将试样和透水石都放置在压力室底座上,密封好加压室。以围压 100 kPa 为例,试样在围压 100 kPa 下固结,当孔隙水压力降到围压 5% 时,固结完成。调整试样-压力室-量力环球头接触完整,设定剪切速率为 0.08 mm/min,打开加载按钮,以设定的加载速率加载,直至试样破坏为止。当测力计读数下降时停止加载,或者测力计读数一直增大或不变,加载到应变为 17.5% 左右停止加载。

三轴剪切试验加载剪切时试样被压缩,横向截面面积会改变,试样的校正面积和总应力差计算公式为:

$$A_a = \frac{A_c}{1 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (2)$$

其中: A_a 为试样的断面积; A_c 为试样固结后的横

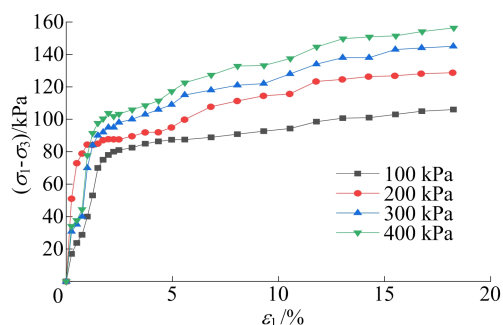
截面积; ε_1 为轴向应变; σ_1 为大主应力; σ_3 为小主应力; C 为测力计校正系数; R 为测力计读数,精度取 0.01 mm。

试验全程由相机记录过程,统计数据时应变在 6% 之前时,应变每增大 0.25% 记录 1 次数据,应变超过 6% 后,应变每增大 0.50% 记录 1 次。根据轴向应变与主应力差逐一一对对应关系在直角坐标纸上绘制应力-应变曲线。试验后切取三轴固结不排水破坏后的圆柱试样中间部分作为代表性土样。借助 SEM 观察土样整体形貌,分析玄武岩纤维质量分数对土样内部结构的影响、纤维与土颗粒界面作用和破坏机理分析。本次扫描取得的照片分为 100、200 倍 2 种放大倍数下的图像。选取部分代表性 SEM 照片进行分析。

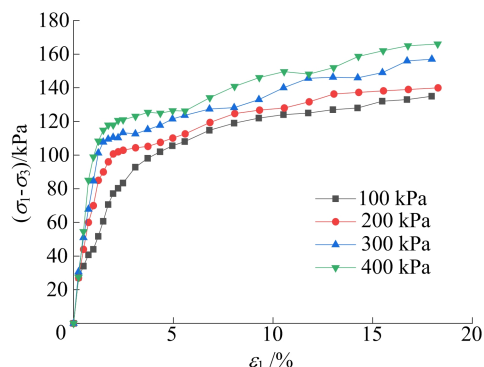
2 结果与讨论

2.1 纤维质量分数对应力-应变曲线的影响

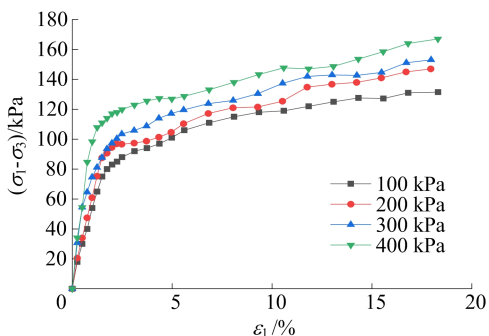
玄武岩纤维质量分数对膨胀土三轴剪切试验加载曲线如图 2 所示。由图 2 可知:主应力差随着轴向应变的增大而增大,在轴向应变小于 3.0% 时,主应力差的增加速率最大,随后主应力差的增加速率减小;当轴向应变超过 7.5% 后,主应力差的增加速率变小,应力-应变曲线表现为弱硬化型,试验中始终没有出现峰值应力,为典型的塑性破坏特征。



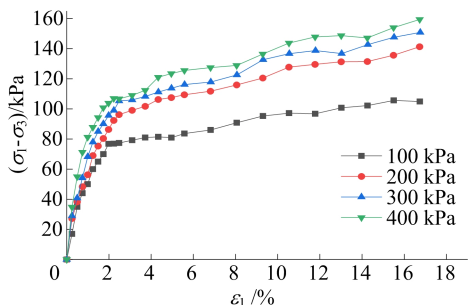
(a) 纤维质量分数为 0



(b) 纤维质量分数为 0.50%



(c) 纤维质量分数为0.75%



(d) 纤维质量分数为1.00%

图 2 玄武岩纤维加筋土应力-应变曲线

从图 2 可以看出,随着纤维质量分数的增加,最大偏应力先增加后减小,在质量分数为 0.50% 时达到 135 kPa,较未掺纤维时提高 36.5%,为最优纤维掺量。纤维质量分数增加,加筋土加载曲线都呈现硬化型,相比未掺纤维时,随围压增加主应力差提高幅度逐渐减小,不同围压下应力-应变曲线差异变小。

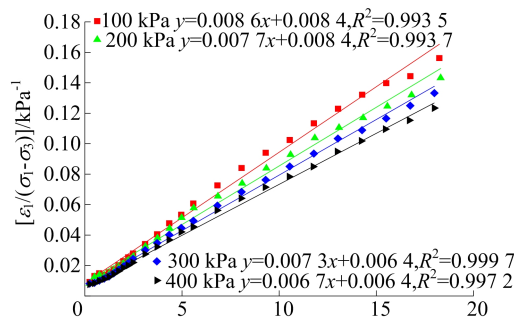
本文试验中各试样的应力-应变曲线总体表现为弱硬化型,可以用双曲线来拟合,计算公式为:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b \epsilon_1} \quad (3)$$

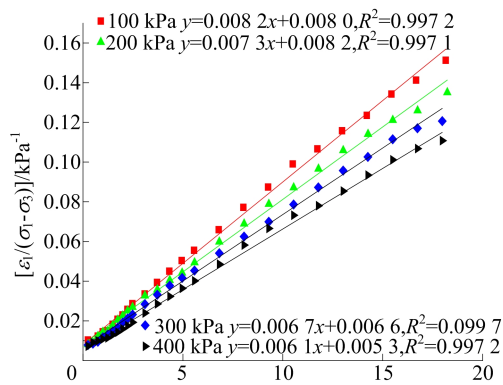
$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b \epsilon_1 \quad (4)$$

其中:直线方程截距 a 为初始切线模量的倒数;斜率 b 为偏差应力的倒数; σ_1 为大主应力; σ_3 为小主应力; ϵ_1 为轴向应变值。将式(3)中双曲线方程通过两边除以 ϵ_1 ,将方程分子分母互换位置变为直线方程,得到式(4),以 ϵ_1 为横坐标, $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为纵坐标。选取各试样中代表性拟合结果如图 3 所示。结合图 3 交互分析可得,试样的 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ_1 均能较好地用直线方程来拟合,各拟合方程均在图表中标明,结合拟合方程和曲线走势可以得出,拟合系数 R^2 最大为纤维掺量为 1.00% 时的 0.998 4,最小的拟合系数 R^2 是纤维掺量为 0.75% 时的 0.992 2,表明两者线性相关

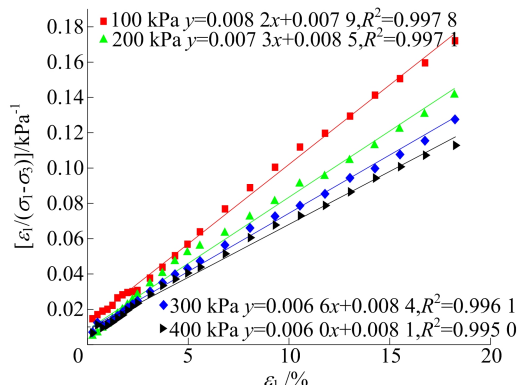
程度较高。



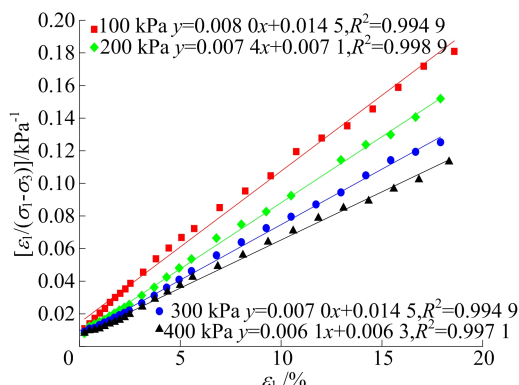
(a) 纤维质量分数为0



(b) 纤维质量分数为0.25%



(c) 纤维质量分数为0.75%



(d) 纤维质量分数为1.00%

图 3 应力-应变关系的双曲线拟合

研究表明,玄武岩纤维加筋膨胀土的应

力-应变关系与双曲线的吻合程度较高,符合弱硬化型关系,可以用双曲线来拟合。在纤维长度相同条件下,拟合曲线吻合度较高。

不同纤维质量分数下,参数 b 与不同围压的关系见表 3 所列。由表 3 可知:在相同纤维质量分数下, b 随着围压的增大而逐渐增大;当围压一定时, b 随纤维质量分数的增大先慢慢减小而后逐渐增大。前文分析最大偏差应力时,当围压一定时,随着纤维质量分数的增加,最大偏应力先增加后减小,当质量分数为 0.50% 时达到了峰值 135 kPa,这两者具有相同规律和结论。

表 3 拟合曲线参数 b 值

围压/kPa	质量分数/%			
	0	0.25	0.50	1.00
100	0.008 6	0.008 2	0.007 9	0.008 0
200	0.007 7	0.007 3	0.007 3	0.007 4
300	0.007 3	0.006 7	0.006 6	0.007 0
400	0.006 7	0.006 1	0.006 0	0.006 1

2.2 三轴剪切破坏类型分析

三轴固结不排水试验试样的破坏形态如图 4 所示。

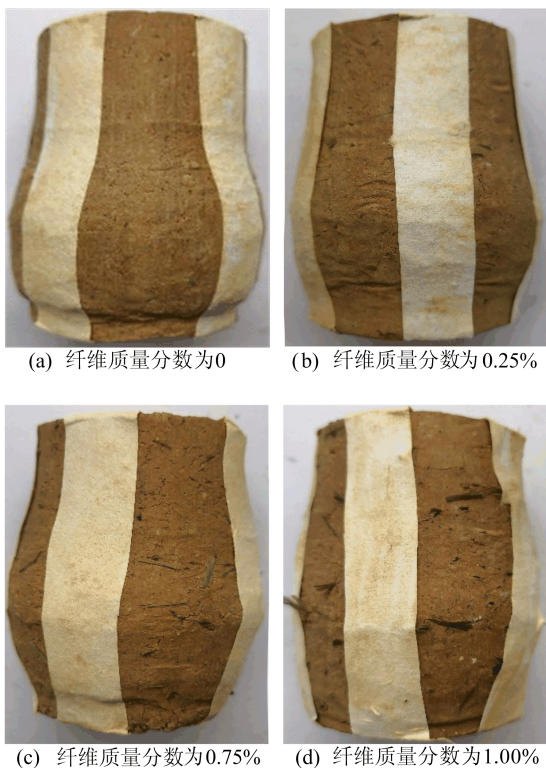


图 4 加筋膨胀土试样剪切破坏形态

由于试样为饱和重塑土,没有出现明显的剪切破坏面,所有试样均为鼓胀型破坏,这是由于重塑样与原状土在结构上有很大的区别,重塑土由

于制样饱和,颗粒之间相互咬合没有达到超固结时的紧密程度,在围压作用下,剪切试样会发生土体压密实这一过程,且试样中间土体远离约束端,不受到约束作用,只能发生鼓胀型破坏,这与文献 [8] 的试验结果基本相符。随着试样中纤维质量分数的增加,试样鼓胀部位逐渐从试样端部移动到试样中间,得益于纤维-土的加筋作用,纤维良好的抗拉能力发挥出来,使得试样抗剪、抗拉强度提高,而抗压强度提高不明显,试样表现为横向变形超过允许值,发生鼓胀破坏。此外,随机分布的纤维将外力传递到试样更广泛的区域中,提高了试样的整体强度,使得试样受力更加均匀。

2.3 纤维质量分数对抗剪强度指标的影响

由试验结果整理的应力-应变关系曲线可知,曲线没有出现明显的下降趋势,取 17.5% 应变对应的应力值作为破坏点。平面图上绘制不同围压下破损应力圆及其公切线,找出该公切线与横轴的夹角即所求的内摩擦角 φ ,该公切线与纵轴的截距为黏聚力 c ,结果如图 5 所示。

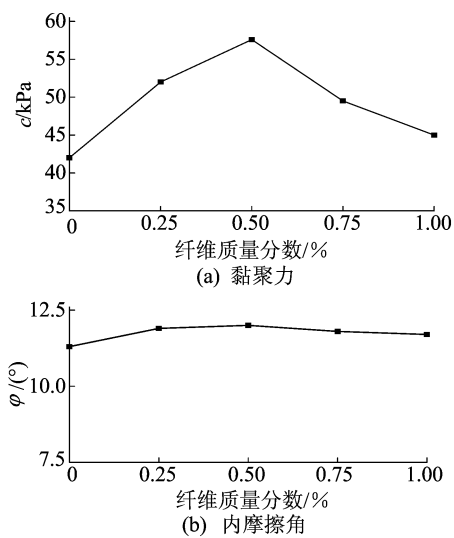


图 5 纤维加筋土强度指标随纤维掺量的变化曲线

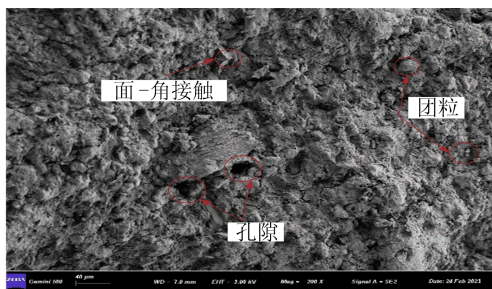
由图 5 可知:纤维加筋膨胀土的黏聚力随着纤维掺质量分数的增加先增大后减小,当纤维质量分数为 0.50% 时,土样的黏聚力最大,此时纤维质量分数为最优掺量,纤维加筋土较素土黏聚力提高 37.14%;纤维加筋膨胀土的内摩擦角随纤维质量分数的变化不大,纤维加筋后土体的有效内摩擦角相对素土变化较小,即纤维对试样内摩擦角影响不大,改良效果不理想。

三轴剪切试验表明,适量的玄武岩纤维能够提高土体的抗剪强度,增大土体破坏时的延性。随着纤维质量分数的增加,土体抗剪强度不升反

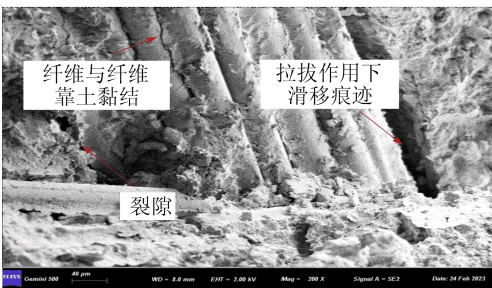
降。纤维质量分数不高时,在土体里随机分散,筋-土颗粒接触不紧密,两者有效接触面积不足,其筋-土作用效果不明显。随纤维质量分数增加,纤维被土颗粒牢牢“锚固”,筋-土界面摩擦力达到最佳效果,试样强度进一步提高。而当质量分数超过最优掺量时,一方面会导致部分纤维不与土完全接触,在土体中造成一定的薄弱面,土体会沿着这些薄弱面破坏,降低了试样的整体性强度;另一方面纤维易在土中重叠、积聚,使土体无法挤压密实,此时试样强度反而降低^[18]。加筋膨胀土三轴剪切强度变化主要是由于纤维随机存在,在试样中形成了三维空间网格,有效地限制了土颗粒的变形,提高了土体的韧性和强度^[19]。

2.4 SEM 表征结果分析

纤维质量分数为 0(素土)和质量分数为 0.50% 的纤维加筋土的 SEM 图如图 6 所示,放大倍数为 200。



(a) 素土



(b) 纤维质量分数0.50%

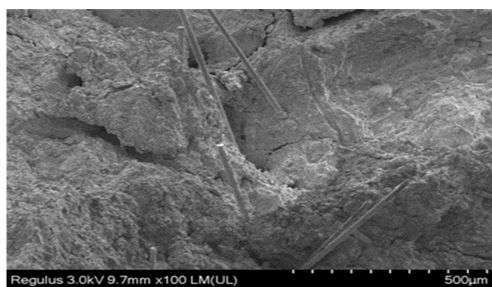
图 6 素土和 0.50%纤维加筋土的 SEM 图

从图 6a 可以看出,试样选用的膨胀性黏土有许多黑色空隙,表面不平整,团粒较多,呈现分散结构,纤维-纤维、纤维-土存在接触作用。此时多数单根纤维聚集在一起,纤维之间被土颗粒填充,起到黏结作用,不再是单根纤维起到拉结摩擦力,而是单根纤维组成的纤维束起到握裹作用为主。

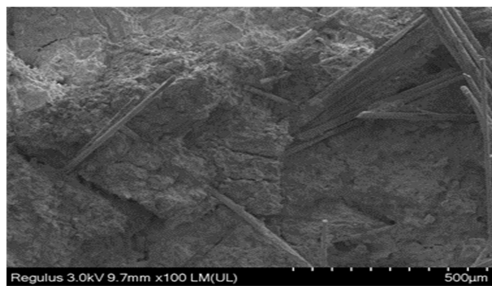
从图 6b 可以看出,纤维以纤维束的方式被土颗粒牢牢地包裹在试样的中间,纤维与土之间的

界面作用使得两者能够共同受力。纤维表面粗糙,在土样受到压缩破坏时,由于土颗粒的变形导致纤维与土出现相对移动的趋势,从而产生摩擦力。当土颗粒受到极限拉应力时,结构破坏且土颗粒破碎,拉力全部由纤维承担。这种握裹作用产生的摩擦力提高了试样的整体强度,文献^[16]将这种筋土相互作用概括为摩擦和黏结。当拉力超过纤维-土之间的作用力时,留下如图 6 中长长的滑移痕迹。

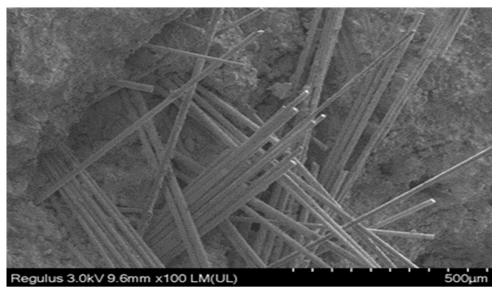
纤维质量分数影响着土样中纤维的形态分布情况。不同纤维质量分数下土样的 SEM 图(放大倍数为 100)如图 7 所示。



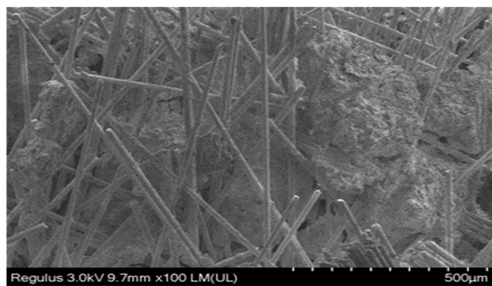
(a) 质量分数为 0.25%



(b) 质量分数为 0.50%



(c) 质量分数为 0.75%



(d) 质量分数为 1.00%

图 7 不同纤维质量分数下土样的 SEM 图

从图 7 可以看出,随纤维质量分数的增加,相同面积下纤维数量也增加,逐渐由少数纤维单独握裹过渡到众多纤维构成的纤维网。

从图 7a 可以看出,纤维出现的数量稀少,且纤维之间离散程度比较高,没有交叉现象,土样微裂隙较明显;随着纤维质量分数的增加,纤维之间不再简单相交,而是出现互相抱团,交错重叠现象,起到限制微裂缝的发展(图 7c);当纤维质量分数达到 1.00% 时,纤维的分布十分均匀,且与土颗粒相互接触,在土样空间内部形成了巨大的纤维网状物(图 7d),随机分布的纤维构成了一个三维空间网状结构,这种结构使各纤维之间相互交错接触,土颗粒填充在纤维空隙之间,一旦土体受到变形,将会通过纤维迅速传递到整个试样,使得试样变形大大减小,提高了试样的整体性。且纤维的移动会被相邻纤维抑制,使得纤维产生拉力,提高了土体的抗剪性能。

3 纤维加筋机理分析

从三轴剪切试验和微观结构观察分析出玄武岩纤维加筋土机理主要有筋-土界面相互作用和纤维网三维空间骨架作用。加筋土筋-土界面力学作用主要可以分为筋土摩擦力和黏结力的作用,纤维土柱-纤维网空间分布如图 8 所示。

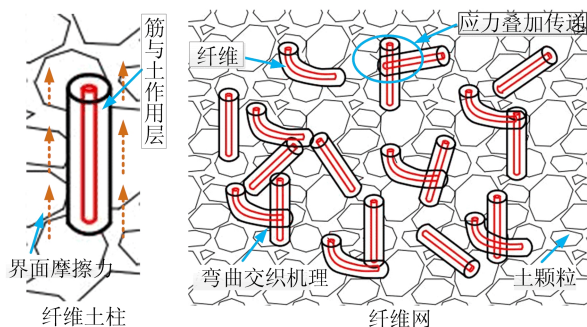


图 8 纤维土柱-纤维网空间分布图

土样受到外力时,土颗粒产生移动,彼此间相互挤压,分散在土颗粒之间的纤维由于土颗粒的挤压作用而产生黏结力和摩擦力;当土体变形增大时,土颗粒与随机分散的纤维产生相对移动。随着外荷载的增加,土颗粒进一步移动,颗粒之间孔隙减小,土体变得更加密实,土颗粒对纤维的握裹作用更紧,纤维与土颗粒之间的摩擦和黏结力更大,纤维进一步限制了土体的变形。纤维的弯曲和纤维彼此之间形成的三维空间网络骨架结构^[16],能将松散的土颗粒牢牢地裹在一起,增加

彼此间的关联性,提高土体的整体性和强度。

4 结 论

本文通过对玄武岩纤维加筋重塑膨胀土进行不同围压下三轴固结不排水试验和微观结构分析,得到结论如下:

1) 纤维加筋土应力-应变曲线趋势与素土相同,变化不明显,均表现为硬化型;随纤维质量分数增加,曲线峰值主应力差也增加。

2) 纤维加筋土破坏形态均为鼓胀型破坏,纤维的掺入提高了土体的抗拉、抗剪强度,而抗压强度提高幅度不大,试样呈现中间横向变形过大的鼓胀破坏。

3) 纤维加筋土黏聚力随纤维质量分数的增加先增大后减小,存在最佳纤维掺量;相比较黏聚力,纤维质量分数对内摩擦角的影响不大,改良作用不明显。

4) 微观结构分析结果表明,纤维加筋作用主要有筋-土界面的摩擦和黏结作用、三维空间网作用,随纤维质量分数的增加,土中纤维由简单的握裹作用加筋过渡到三维空间网加筋作用。

[参 考 文 献]

- [1] STIPHO A S. On the engineering properties of salina soil [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, 1985, 18(2): 129-137.
- [2] 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.
- [3] TANG C S, SHI B, ZHAO L Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(1): 54-62.
- [4] TANG C S, SHI B, CUI Y J, et al. Desiccation cracking behavior of poly propylene fiber-reinforced clayey soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1088-1101.
- [5] 刘宝生,唐朝生,李建,等. 纤维加筋土工程性质研究进展 [J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 540-547.
- [6] 许星,张金才,王宝凤,等. 玄武岩纤维表面改性的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 575-586, 606.
- [7] 高磊,胡国辉,徐楠,等. 玄武岩纤维工程性质研究进展 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊 2): 1749-1754.
- [8] 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.
- [9] 柳涛. 玄武岩纤维加筋粉质黏土的静动力学特性试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1734-1742.
- [10] YETIMOGLU T, SALBAS O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2003, 21(2): 103-110.

- [11] NILO C C, MICHELE D T, PEDRO D M, et al. Plate load test on fiber-reinforced soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(10): 951-955.
- [12] BOTERO E, OSSA A, SHERWELL G, et al. Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(4): 363-369.
- [13] 陈晓雪, 独莎莎, 张丹, 等. 纤维加筋膨胀土的三轴蠕变特性试验研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 80-87.
- [14] 宋金岩, 孙红, 葛修润, 等. 玻璃纤维加筋土强度特征试验研究[J]. *中外公路*, 2012, 32(5): 268-271.
- [15] 孙红, 姜开锋, 吴雪萍, 等. 软弱土路堤的玻璃纤维加筋土加固技术[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(增刊 2): 1893-1898.
- [16] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 610-614.
- [17] 杨若辰, 张吾渝, 童国庆, 等. 玄武岩纤维加筋黄土力学性质及微观机理研究[J]. *青海大学学报*, 2022, 40(6): 61-67.
- [18] 尤波, 徐洪钟, 董金梅. 玄武岩纤维加筋膨胀土三轴试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(4): 503-507, 514.
- [19] 唐朝生, 施斌, 蔡奕, 等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1796-1800.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1651 页)

- [4] TALIBI I, BOUBAKER H, BOUDYACH E H, et al. Alternative methods for the control of postharvest citrus diseases[J]. *Appl Microbiol*, 2014, 117(1): 1-17.
- [5] 白亚男, 周蓉, 虞悦, 等. 芽孢杆菌拮抗镰孢菌机制的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(12): 2787-2796.
- [6] FIRA D, DIMKIĆ I, BERIĆ T, et al. Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species[J]. *J Biotechnol*, 2018, 285: 44-55.
- [7] 付欢, 李亚婷, 肖贵谦, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) MCCC 1A15695 抑菌蛋白分离纯化及应用研究[J]. *应用海洋学学报*, 2024, 43(2): 217-224.
- [8] 王洁, 田露, 闵建红, 等. 短短芽孢杆菌 JH3 抗菌蛋白的分离纯化及其抗菌性能[J]. *陕西科技大学学报*, 2021, 39(4): 51-55.
- [9] 黄娜. 枯草芽孢杆菌粗蛋白的提取纯化及抑菌作用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
- [10] MEENA K R, KANWAR S S. Lipopeptides as the antifungal and antibacterial agents: applications in food safety and therapeutics[J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015: 473050.
- [11] PARK G, NAM J, KIM J, et al. Structure and mechanism of surfactin peptide from *Bacillus velezensis* antagonistic to fungi plant pathogens[J]. *Bull Korean Chem Soc*, 2019, 40(7): 704-709.
- [12] 苗永美, 苗翠苹, 于庆才. 枯草芽孢杆菌 BBs-27 发酵液性质及脂肽对黄色镰孢菌的抑菌作用[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(9): 255-267.
- [13] 赵焕兰, 曹嘉灿, 刘奎, 等. 贝莱斯芽孢杆菌发酵液对樱桃番茄贮藏品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(20): 12-18.
- [14] 方芳, 张梦寒, 张继冉, 等. 一种控制芽孢杆菌产生臭味的培养方法: CN105441369B[P]. 2018-07-06.
- [15] 秦楠. 解淀粉芽孢杆菌 HRH317 抗菌蛋白鉴定及抑菌机理研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2015.
- [16] 曾国洪, 丛丽娜, 毕楠. 枯草芽孢杆菌诱变株产抗菌脂肽的特性[J]. *大连工业大学学报*, 2019, 38(4): 235-238.
- [17] 徐慧婷, 王颖, 张玉国, 等. 发酵液多糖提取方法的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(1): 351-356.
- [18] ISA M H M, SHAMSUDIN N H, AL-SHORGANI N K N, et al. Evaluation of antibacterial potential of biosurfactant produced by surfactin-producing *Bacillus* isolated from selected Malaysian fermented foods[J]. *Food Biotechnol*, 2020, 34(1): 1-24.
- [19] KOST B L, KUNICKA-STYCZYNSKA A, PLUCINSKA A, et al. Microfluidic preparation of antimicrobial micro-particles composed of L-lactide/1,3-dioxolane (co)polymers loaded with quercetin[J]. *Food Chem*, 2022, 396: 133639.
- [20] 蔡高磊, 张凡, 欧阳友香, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) 研究进展[J]. *北方园艺*, 2018(12): 162-167.
- [21] FAN Y, LIU K, LU R, et al. Cell-free supernatant of *Bacillus subtilis* reduces Kiwifruit rot caused by *Botryosphaeria dothidea* through inducing oxidative stress in the pathogen[J]. *J Fungi (Basel)*, 2023, 9(1): 127.
- [22] 庄国宏, 宋涛, 陆金荣, 等. 产抗大肠杆菌脂肽化合物枯草芽孢杆菌筛选及脂肽化合物的分离纯化[J]. *中国家禽*, 2019, 41(13): 20-25.
- [23] CAO Y, PI H, CHANDRANGSU P, et al. Antagonism of two plant-growth promoting *Bacillus velezensis* isolates against *Ralstonia solanacearum* and *Fusarium oxysporum* [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 4360.
- [24] 贺丹, 李鹏, 赵坤, 等. 多黏类芽孢杆菌的生防机制研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(8): 1-8.

(责任编辑 闫杏丽)