

# 基于SEM测试的玄武岩纤维加筋黄土作用机制研究

李黎<sup>1</sup>, 韩顺利<sup>1,2</sup>, 杨沛东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

<sup>2</sup>江苏省仪征市精诚高级中学, 江苏 仪征

收稿日期: 2023年2月24日; 录用日期: 2023年3月16日; 发布日期: 2023年3月29日

## 摘要

为了研究玄武岩纤维加筋黄土的作用机理, 本文采用扫描电镜试验分析了玄武岩纤维在不同尺寸、掺量的因素下对加筋黄土试样在静、动荷载下微观结构的影响。结果表明: 1) 当纤维含量较小时, 加筋土体结构优于未加筋土。当纤维含量逐渐增加时, 纤维相互交织形成三维网架结构, 从而提高了加筋土的强度, 最优掺量为0.8%。2) 随着纤维长度的增加, 纤维与土壤接触面积增大, 增强了加筋土的内聚力和摩擦力, 最佳长度为16 mm。

## 关键词

玄武岩纤维, 黄土, 纤维加筋土, 微观结构

# Study on the Action Mechanism of Basalt Fiber Reinforced Loess Based on SEM Test

Li Li<sup>1</sup>, Shunli Han<sup>1,2</sup>, Peidong Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, Xijing University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Jingcheng Jingcheng Senior High School of Yizheng City, Yizheng Jiangsu

Received: Feb. 24<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 16<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to study the action mechanism of basalt fiber reinforced loess, this paper analyzed the effects of the factors of different sizes and contents of basalt fiber on the microstructure of reinforced loess samples under static and dynamic load by Scanning Electron Microscopy (SEM). The results show that: 1) When the fiber content is small, the structure of reinforced soil is better than that of unrein-

forced soil. When the fiber content increases gradually, the fibers interweave with each other to form a three-dimensional mesh structure, thus improving the strength of the reinforced soil, and the optimal content is 0.8%. 2) With the increase of fiber length, the contact area between fiber and soil increases, which enhances the cohesion and friction force of reinforced soil, and the optimal length is 16 mm.

## Keywords

Basalt Fiber, Loess, Fiber Reinforced Soil, Microstructure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

黄土是一种分布于干旱、半干旱地区的第四纪沉积物[1], 广泛分布于我国西北地区。近年来, 随着我国西北大开发和“一带一路”国家重大战略的相继提出与持续地稳步推进, 我国黄土高原地区大规模的交通基础设施建设伴随着城市化在不断扩大。然而, 黄土具有多孔隙、弱胶结、欠压密等结构形式, 导致其工程实践中易受到降雨等因素的影响, 从而诱发类似不均匀沉降、边坡失稳等问题[2] [3] [4]。为此, 应采取有效的加固技术对黄土进行改良, 从而使其更好地满足工程需要。玄武岩纤维具有高强度、耐腐蚀、耐高温、低成本等特点, 近年来应用于土体加筋研究日益增多[5]。目前, 针对玄武岩纤维加筋土的强度特性, 学者们已经开展了一些初步研究工作。李沛达等[6]研究了纤维加筋黄土 CBR (California Bearing Ratio)值影响因素及纤维增强土体机理, 得出了纤维加筋土 CBR 值随含水率的增加呈现先增大后减小的趋势。胡文乐等[7] [8]研究了不同含水率、压实度、纤维掺量、围压等因素对抗剪强度的影响, 得出实际工程中的最优掺量。高磊等[9] [10] [11]对黏土进行了不同纤维掺量的三轴试验, 得出了纤维掺量和黏聚力的关系, 并基于数值模拟的方法研究了纤维加筋黏土的力学特性及加筋机理。李胜男等[12]从动力学的角度研究了纤维加筋对土的作用。柳涛[13]通过三轴试验研究了纤维加筋粉质黏土的静、动力学特性, 得出纤维的掺量不是越大越好, 掺量为 0.2%时, 能够显著提高黏土的静、动力学特性。尹倩[14]指出, 纤维加筋黄土的抗拉强度随纤维长度和纤维掺量的增加均呈现先增大后减小的趋势, 纤维加筋作用使黄土的峰值强度和峰值位移均增大。上述研究表明: 玄武岩纤维加筋土可以明显改善土体性能, 对土体强度有着显著提高, 纤维加筋提高了土体的韧性, 改善了土体的脆性破坏特征。然而, 目前关于加筋土微观作用机理层面上的研究较少。基于此, 本文选取西安某地黄土, 开展静、动三轴试验, 通过对三轴试验破坏后的试件进行 SEM 试验, 研究不同掺量、不同长度纤维加筋土在静、动荷载下的微观作用机理, 得出最佳掺加条件, 以期为相关研究提供参考。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料及制备

试验所用黄土取自西安某建设工地, 取土深度约为 4 m, 将所取黄土土样经过烘干和粉碎后, 过 2 mm 筛。其主要物理性质指标见表 1。

试验所采用的玄武岩纤维为束状单丝压制而成的条状纤维, 试验前将条状纤维分散均匀加入土体中, 基本物化参数见表 2。

**Table 1.** Test the physical properties of soil samples**表 1.** 试验土样物理性质指标

塑限/%	液限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/%
16.2	31.5	15.3	1.78	14.8

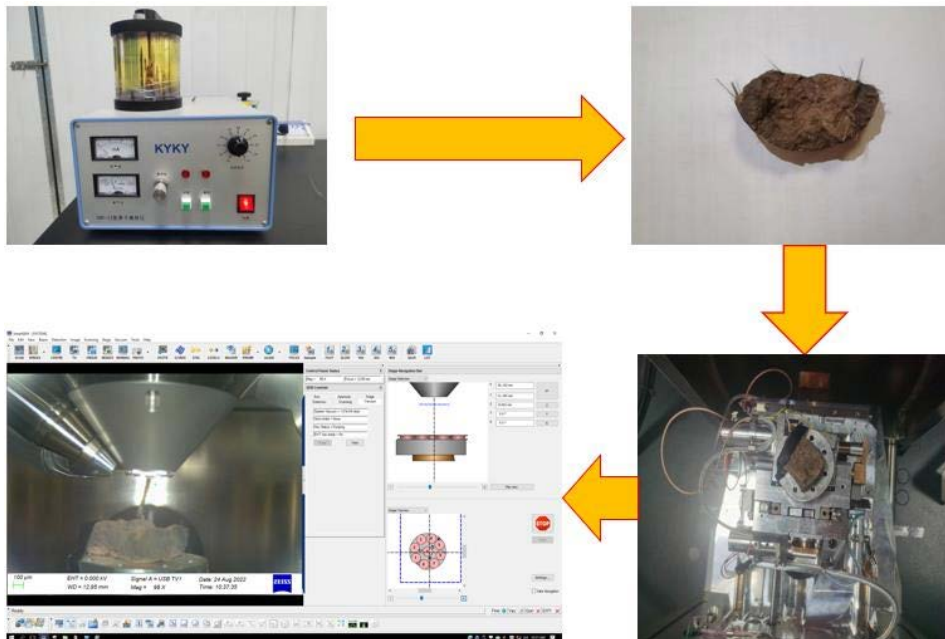
**Table 2.** Physicochemical parameters of basalt fiber**表 2.** 玄武岩纤维的物化参数

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	单丝直径/ $\mu\text{m}$	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	耐酸碱碱性
2.64	14	3200~4800	91~110	2.4~3.2	较强

在制样前,将黄土过 2 mm 筛后烘干,根据预设的含水率计算加水量,向土样中加入蒸馏水,密闭闷料 24 h 后,根据不同纤维掺量和长度将纤维打散后均匀加入到土体中。将拌合后的土样分成 5 份,逐层击实,为保证每两层接触土样之间能够更好地黏结在一起,每层击实完成之后,对接触面进行刮毛处理,再倒入下一层土料,直至第五层击实后试样制作完毕。

## 2.2. 试验方法

为了分析玄武岩纤维加筋黄土的微观结构,针对素土、0.8%纤维含量加筋土(纤维长度分别为 4 mm、8 mm、12 mm 及 16 mm)及 16 mm 纤维长度加筋土(纤维含量分别为 0.2%、0.4%、0.6% 及 0.8%)试样,采用 ZEISSEVO10 型高分辨电子扫描显微镜(卡尔·蔡司,德国)开展试验。试验前,首先选取具有代表性的试样进行烘干处理,然后切割薄片保证高度在 1 cm 以内,长度与宽度在 3 cm 以内(防止阻挡显微镜镜头)。随后进行密封保存,防止空气中的水分渗透。扫描电镜试验过程中,必须先将切割样品放入真空镀膜机内做喷金处理,之后将喷金后的样品安置在观测台上,最后在电子显微镜下测试其微观结构,试验过程图见图 1。

**Figure 1.** Test flow chart**图 1.** 试验流程图

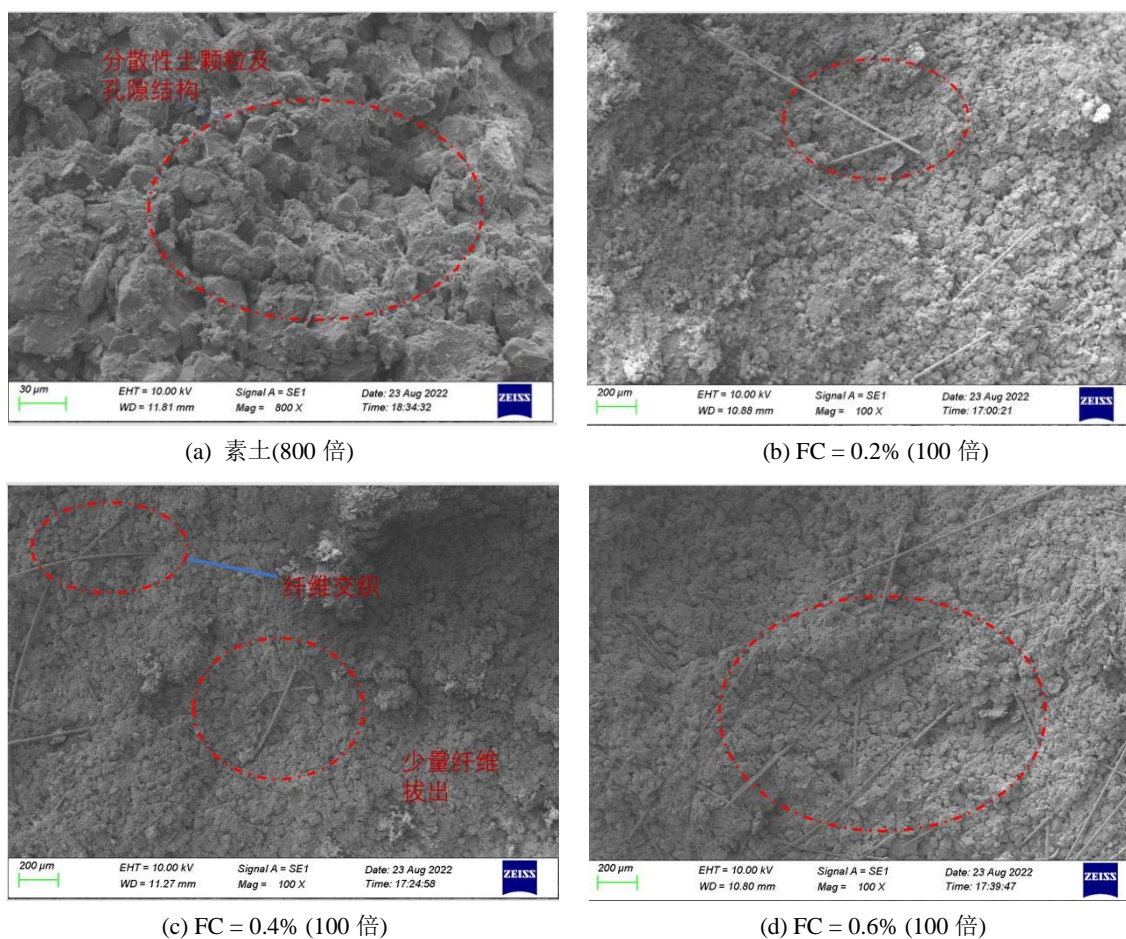
试验步骤如下:

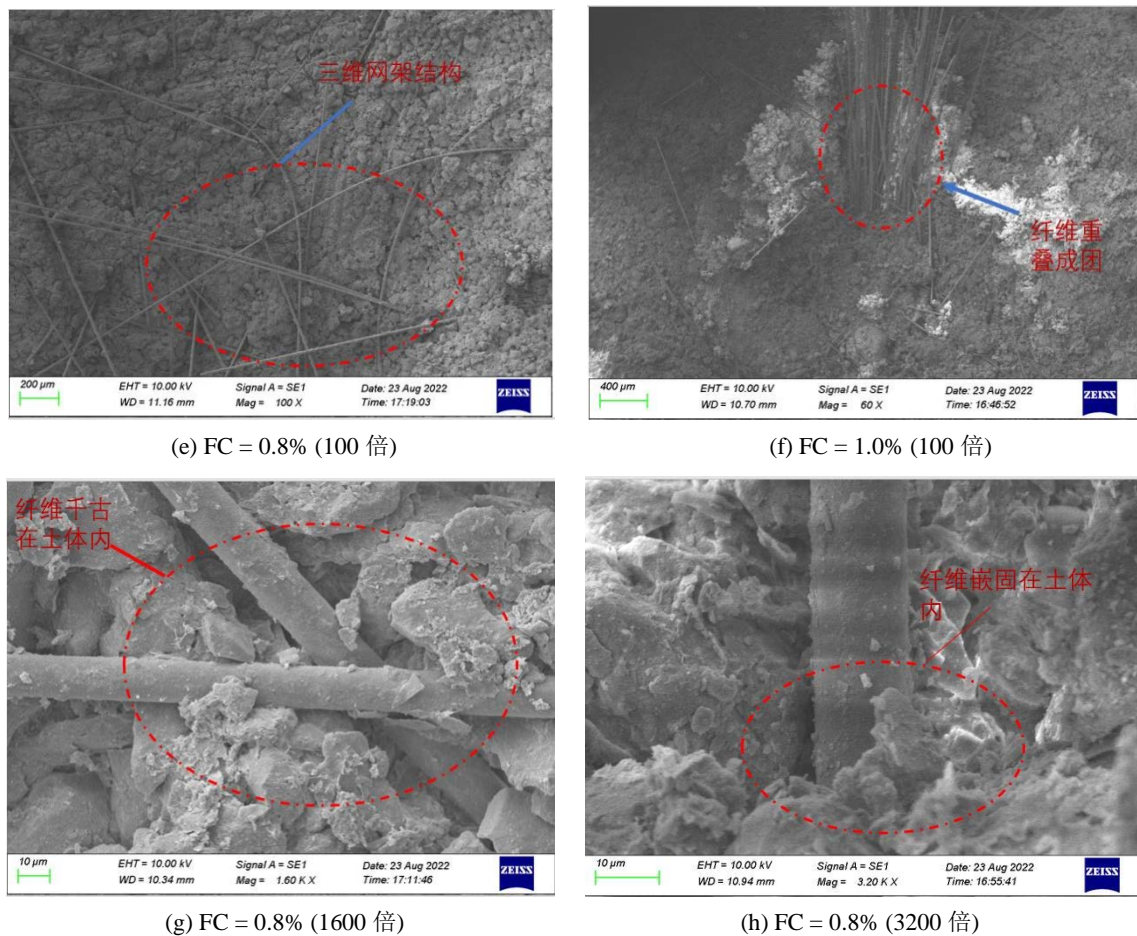
- 1) 土样切割及固定;
- 2) 抽成真空, 喷金;
- 3) 样品放置, 调整焦距;
- 4) 有序观测。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 纤维含量对加筋土固化影响

为了分析纤维含量对玄武岩纤维增强黄土的作用机制, 图 2 列出了素土与纤维加筋土的微观结构图。从图中可以看出, 素土颗粒呈分散结构, 粒间以面面接触为主, 且由于剪切作用导致土体颗粒的孔隙数量较少。对于纤维加筋土, 当掺量为 0.2%~0.8% 时, 纤维分布较为均匀, 分散程度较高, 呈现随机分布特征, 导致加筋土力学性能呈各向同性, 不存在软面。但当纤维含量达到 1.0% 时, 发现纤维不易分散, 容易交叉、重叠成簇, 导致土体颗粒间孔隙增多, 土体本身的结构性受损, 这与文献[15]的研究结果相似, 说明当纤维掺量达到一定限值时, 纤维与纤维之间的接触增加, 土颗粒不能更好地对纤维起到握裹作用, 从而降低土体强度。此外, 从图中可以观察到, 当纤维含量较小时, 纤维与土体颗粒的接触面积较小, 纤维的加固主要是基于一维拉筋作用, 连接周围的土体颗粒。但随着纤维含量的增加, 纤维增强主要以三维网格结构形式存在。从不同倍数的微观图可以看出, 纤维表面被大量的土颗粒所包裹, 由于纤维的





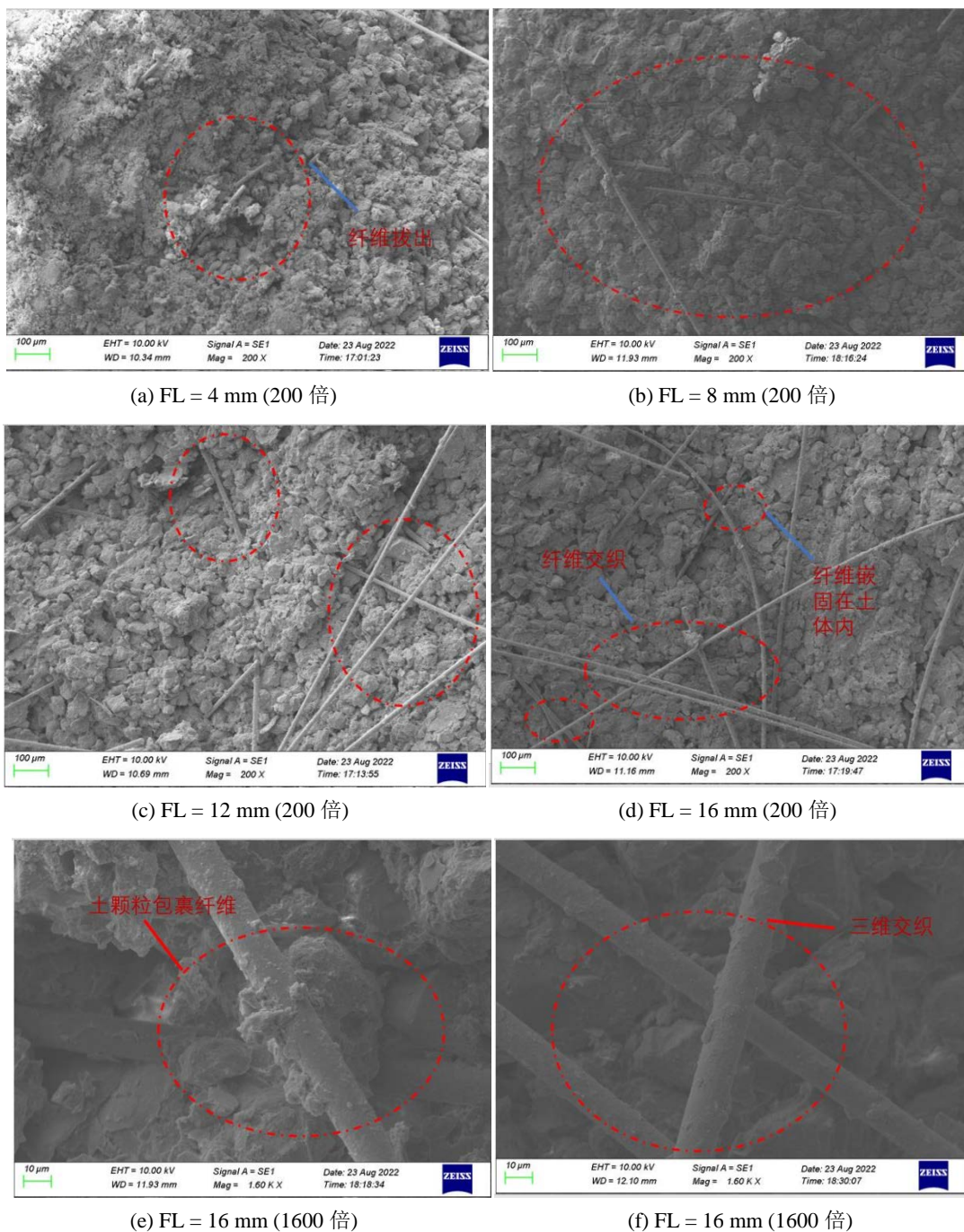
**Figure 2.** Distribution of different fiber contents  
**图 2.** 不同纤维掺量分布情况

抗拉强度大于土体的抗拉强度，当纤维同时受到应力并产生一定程度的变形时，土体颗粒与纤维必然会形成相互错位的现象，这样纤维就会被拉伸，从而产生纤维与土壤之间的界面力。界面力主要由界面摩擦力和粘结力决定。此外，在纤维拉伸过程中，土体颗粒在纤维弯曲位置会受到一定的约束，从而限制了土体的变形。

### 3.2. 纤维长度对加筋土固化影响

为了分析玄武岩纤维增强黄土在纤维长度的作用机制，纤维增强土的微观结构图如图 3 所示。从图中可以看出，添加纤维后，土体的完整性得到了改善。当纤维的长度相对较短时，部分纤维在受到外力作用后被拉出。随着纤维长度的增加，纤维逐渐嵌固于土体中，对周围土体颗粒起“桥接”作用。当土体处于破坏状态时，由于纤维的抗拉作用，土体呈现断而不裂的现象。而当纤维长度逐渐增加时，纤维之间的交织和弯曲形成三维网格结构更为明显，当土颗粒有移动倾向时，纤维网对土颗粒形成强有力的围箍作用。这与文献[15]的研究结果相似，说明当纤维长度增加时，土颗粒对纤维的简单握裹作用逐渐转变为纤维之间的搭接作用，形成三维网状结构。即当其中一根纤维受到拉力时，必须将周围的其他纤维拉到一起，发挥三维应力网络的作用，从而将局部载荷转移到更广的区域，从而进一步提高纤维的拉伸效应域。此外，当纤维数量较少时，纤维与土颗粒有夹持作用。虽然纤维的长度较长，但它们不能与其他纤维完全交织，此时纤维只能发挥一维拉筋作用。但随着纤维长度的增加，单根纤维可接触的土颗粒

范围更大，使土颗粒与纤维之间的界面力更强，即黏聚力和内摩擦角更大。当有外部载荷时，纤维会分担土壤上的力，并将力均匀地转移到更大的区域。



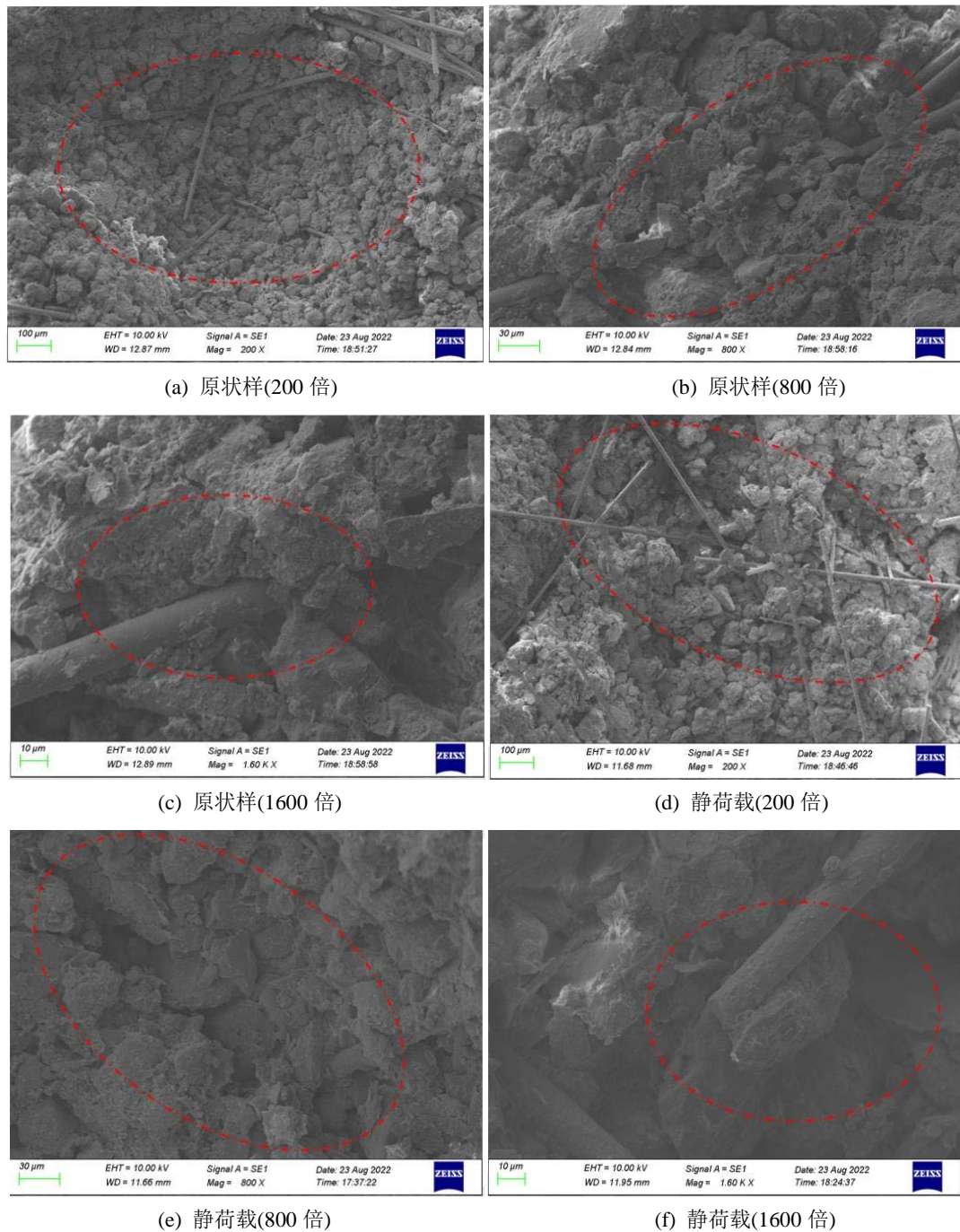
**Figure 3.** Distribution of different fiber lengths  
**图 3.** 不同纤维长度分布情况

### 3.3. 静荷载下玄武岩纤维加筋黄土作用机制

静三轴试验与动三轴试验主要是针对玄武岩纤维加筋黄土的宏观性能，宏观主要集中考察土体的强

度与变形,但微观结构的形态与变化决定了宏观力学特性。为了进一步分析静荷载与循环动荷载下纤维加筋作用机理,分别选取纤维长度为16 mm、纤维掺量为0.8%的原状样、静荷载下试样及循环动荷载下的试样,每一类土样取200倍、800倍、1600倍下的微观图进行对比分析研究,从而对玄武岩纤维加筋黄土的作用机理补充解释。

对比图4可知,原试样受力前,颗粒相对分散,存在架空结构。土颗粒以面-边接触和边-边接触为



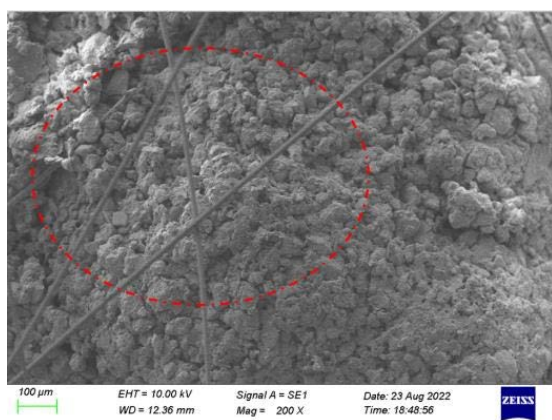
**Figure 4.** Fiber action under static load

**图 4.** 静荷载状态下纤维作用情况

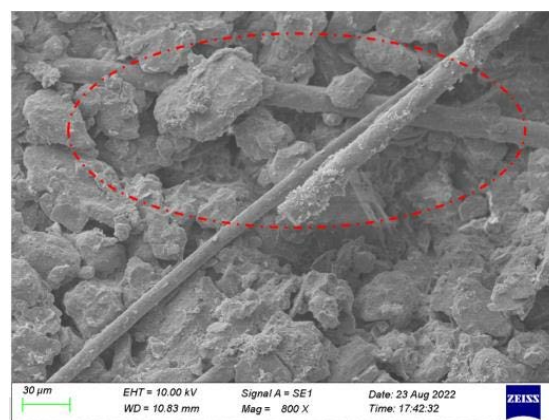
主, 土体密实度较低。此时, 纤维并没有深深地嵌入到土体中。在静载试验条件下, 土体主要承受轴向压应力。在压缩过程中, 土体颗粒之间相互靠近, 颗粒之间的接触主要是面-边、面-面接触为主。大孔隙减少, 单一纤维可以接触的土体颗粒数量增加, 纤维嵌入土的深度增加, 并连接周围的土体, 此时纤维所起到的是桥接作用。颗粒与纤维之间的界面力增强, 宏观抗剪强度提高。此外, 随着土颗粒间距的减小, 黄土颗粒对纤维的握裹力增大。当轴向力较大时, 由于黄土颗粒对纤维的握裹力小于纤维所能承受的拉应力, 纤维被拉出并出现一定程度的细小裂纹。也就是说, 当土颗粒有位移倾向时, 由于纤维的嵌入性和桥接作用, 可以防止土体变形的扩大。宏观表现为随着纤维加筋土长度和掺量的增加, 纤维加筋土的抗剪强度显著提高。

### 3.4. 动荷载下玄武岩纤维加筋黄土作用机制

在动荷载试验条件下, 土体主要承受循环动应力作用。对比图 5 可知, 颗粒间仍以面-边、面-面接触为主, 纤维磨损更严重且表层出现破损。此外, 在动荷载的往复加载、卸载过程中, 土体颗粒产生破碎、挤压等现象, 土颗粒间的错动使得相互间的联结力减弱, 且由于纤维承受着循环往复的动应力, 导致纤维产生断裂现象, 宏观表现为土体间产生细微裂纹, 同时, 随着振动次数的增加, 加筋土的动强度减小。此外, 随着振动次数的增加, 内部骨架重新分布且孔隙减小, 纤维与土颗粒接触面积增大, 纤维相互交织形成的三维网架结构涉及的范围更广, 使得土颗粒与纤维成为一个更完整的加筋体系。即在动荷载后期, 土体结构的密实度提高并趋于稳定状态, 宏观表现为纤维加筋土的轴向累积应变速率减慢。在随机分布、交织分布情况下, 纤维发挥着一维拉筋、三维网架结构作用, 从而使得纤维与土颗粒间的咬合摩擦力与空间约束力增强, 土体的抗变形能力由此提高。此外, 张艳美等[16]将随机分布的纤维对土体的作用机制划分为两类, 分别是“弯曲机理”与“交织机理”。如图 6(a)弯曲机理, 指的是纤维在土中的分布形态是由无数个弯曲转折构成的, 且很少存在直线段。当土体承受外部荷载而使纤维受拉时, 在纤维弯曲的凹侧就会产生纤维对土颗粒的界面力, 从而起到加固土体的作用。如图 6(b)交织机理, 指的是由于土中乱序分布的纤维之间形成了众多的交织点, 一旦纤维的交织处受到力的作用, 土颗粒的位移趋势就会受到纤维网围箍作用的遏制, 即任何一段纤维的受力变形均会牵扯与之交织的各个位置的纤维, 这种交织结构形成了空间受力区, 从而提高加筋土整体强度。刘宝生等[17]通过研究得出, 纤维的加筋效果取决于纤维与土界面作用强度, 即摩擦力和黏结力。界面摩擦力的大小与土的颗粒形状、粒径级配、界面摩擦系数、有效接触面积等因素有关, 界面黏结力的大小主要取决于土中黏粒含量、天然胶结物以及纤维表面与黏土颗粒的相互作用。结合宏微观试验结果得出, 玄武岩纤维加筋对黄土的加固效果显著, 且玄武岩纤维加筋黄土的最优纤维长度为 16 mm, 最优加筋掺量为 0.8%。

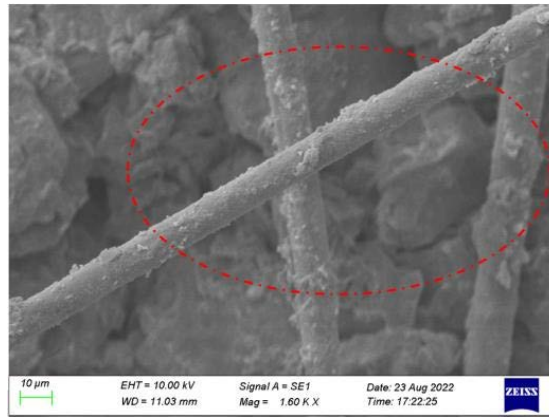


(a) 循环动荷载(200倍)



(b) 循环动荷载(800倍)





(c) 循环动荷载(1600倍)

Figure 5. Fiber action under dynamic load  
图 5. 动荷载下纤维作用情况

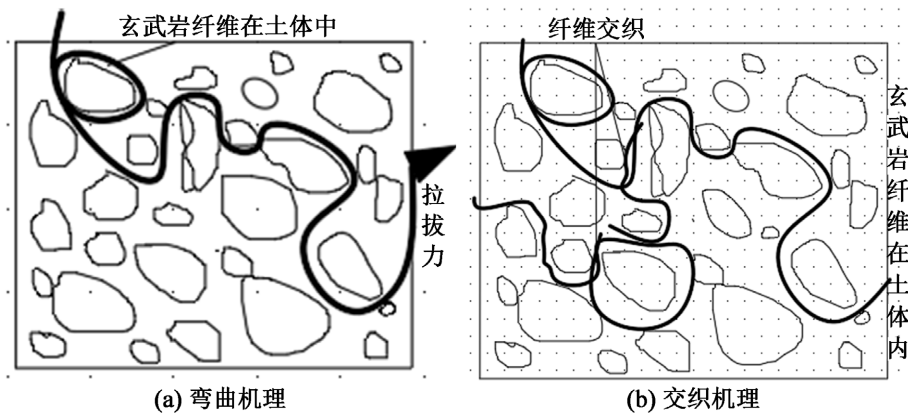


Figure 6. Action mode of fiber reinforced soil  
图 6. 纤维加筋土作用方式

#### 4. 结论

本文利用 ZEISSEVO10 高分辨率扫描电镜对素土和纤维加筋土开展了扫描电镜试验, 分析了纤维含量和纤维长度对加筋土固化机理的影响, 探讨了单纤维拉伸效应和交织纤维的空间网架作用。主要结论如下:

1) 土体在剪切荷载作用下容易产生裂缝。当纤维含量较小时, 加筋土体结构优于未加筋土。纤维与土颗粒的接触面积相对较小, 纤维在土壤中主要起到一维拉筋作用, 连接周围土体。当纤维含量逐渐增加时, 纤维相互交织形成三维网架结构, 从而限制了土粒的运动, 提高了加筋土的强度。最佳纤维含量为 0.8%。

2) 当纤维长度较短时, 土体在剪切荷载作用下会产生一定程度的裂缝。但与未加筋土相比, 纤维与土颗粒相互嵌入良好, 结构完整。随着纤维长度的增加, 纤维与土壤接触面积增大, 纤维有弯曲现象, 会缠绕土颗粒。纤维相互交织, 增强了加筋土的内聚力和摩擦力。即最佳长度为 16 mm。

#### 参考文献

[1] Gao, G. (1996) The Distribution and Geotechnical Properties of Loess Soils, Lateritic Soils and Clayey Soils in China. *Engineering Geology*, **42**, 95-104. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00056-9)

- [2] Wang, J.D., Li, P., Ma, Y., *et al.* (2020) Change in Pore-Size Distribution of Collapsible Loess Due to Loading and Inundating. *Acta Geotechnica*, **15**, 1081-1094. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00815-9>
- [3] Weng, X., Zhou, R., Rao, W., *et al.* (2021) Research on Subway Shield Tunnel Induced by Local Water Immersion of Collapsible Loess. *Natural Hazards*, **108**, 1197-1219. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04727-4>
- [4] Wang, J., Zhang, D., Chen, C., *et al.* (2020) Measurement and Modelling of Stress-Dependent Water Permeability of Collapsible Loess in China. *Engineering Geology*, **266**, Article ID: 105393. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105393>
- [5] 吴晓斌. 玄武岩纤维在土木工程中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1043-1049+1056. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.04.005>
- [6] 李沛达, 骆亚生, 陈箐芮, 汪国刚. 玄武岩纤维加筋黄土承载比试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 131-137. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002031>
- [7] 胡文乐, 何朋立, 刘华. 玄武岩纤维黄土抗剪强度变化规律与最优配合比分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 92-97. <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.04.13>
- [8] 胡文乐, 何朋立, 刘华, 谷宏全, 胡鹏飞, 王梦南, 冯旭晨. 玄武岩纤维加筋黄土力学参数优化试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 222-227. <https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.05.037>
- [9] 高磊, 胡国辉, 杨晨, 相超, 傅钧义, 徐楠. 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(z1): 231-237.
- [10] 高磊, 胡国辉, 陈永辉, 胡艳杰, 龚云皓. 玄武岩纤维加筋黏土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(z1): 198-203.
- [11] 高磊, 胡国辉, 秦仕伟. 玄武岩纤维加筋黏土数值模拟及机理研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 237-246. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2019-551>
- [12] 李胜男, 骆亚生, 严武庆, Samnang Phoak, 尹倩. 玄武岩纤维加筋土的动本构特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 211-216+223.
- [13] 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. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20200131>
- [14] 尹倩. 纤维加筋土的抗拉特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [15] 杨若辰, 张吾渝, 童国庆, 刘成奎. 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. <https://doi.org/10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2022.06.010>
- [16] 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. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2005.08.029>
- [17] 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.