

DOI: 10.11779/CJGE2016S1043

玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性

高磊, 胡国辉, 杨晨, 相超, 傅钧义, 徐楠

(河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了了解玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性, 将玄武岩纤维丝均匀地掺入黏土中, 在控制含水率和干密度的条件下, 进行了直剪试验, 并借助扫描电镜, 从微观层面对剪切面上的土体进行了观察。试验中, 按纤维与干土质量的百分比 0.0%, 0.15%, 0.25%, 0.35% 配制了试样, 并从 400 kPa 压力下的剪切面中选取代表性土样进行微观测试。直剪试验结果表明: 随着纤维掺量的增加, 土样的黏聚力 c 不断增大; 和素土相比, 在掺量不超过 0.25% 时, 加筋土样的内摩擦角 φ 变化不大, 当掺量达到 0.35% 时, 内摩擦角 φ 有突然且较为显著的增大。SEM 结果表明: 掺量为 0.25% 时, 纤维在土体中的离散程度最高, 纤维与土体间的作用方式主要为握裹作用和纤维网作用; 剪切过程中, 纤维在土体中易发生滑移和磨损, 其中玄武岩纤维的磨损不同于其它纤维, 主要表现为端部的磨损, 表面仍较为平整。

关键词: 玄武岩纤维; 纤维加筋土; 纤维含量; 剪切强度; SEM

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S1-0231-07

作者简介: 高磊(1984-), 男, 汉族, 宁夏银川人, 博士, 讲师, 主要从事岩土和地质工程方面的研究。E-mail: taiyang360@gmail.com。

Shear strength characteristics of basalt fiber-reinforced clay

GAO Lei, HU Guo-hui, YANG Chen, XIANG Chao, FU Jun-yi, XU Nan

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the shear strength characteristics of basalt fiber-reinforced clay, a series of direct shear tests on clay reinforced by dispersed basalt fiber are performed under controlled water content and dry density conditions. With the application of scanning electron microscope (SEM), the soil particles on shear surface are investigated at micro level. The ratio of fiber content to dry soil by weight is 0.0%, 0.15%, 0.25% and 0.35%. And the representative soil samples are selected from shear surface under stress of 400 kPa for micro tests. The experimental results show that the inclusion of basalt fiber in clay can enhance the cohesive stress of soil, which increases with the increasing fiber content. Compared with that of pure soil, the internal friction angle of basalt fiber-reinforced clay changes little when the content is not higher than 0.25%. But when the content reaches 0.35%, the internal friction angle increases abruptly. At micro level, the dispersion of fiber in soil is the highest when the content is 0.25%. The interfacial interaction between fiber and soil particles mainly includes gripping effect of single fiber and fiber-net effect. The fiber on the shear surface may be either slipped or broken during shear, which the breaking of basalt fiber is different from that of other fibers. The ends of fiber are mainly broken, while the surface is smooth.

Key words: basalt fiber; fiber-reinforced soil; fiber content; shear strength; SEM

0 引言

近年来, 纤维加筋土技术一直是岩土工程研究的热点^[1-2]。纤维具有抗拉、防裂和耐酸碱等特点, 并且纤维在土体中的离散程度较高, 可以像水泥、石灰等一样在土体中均匀分布, 使得纤维加筋土的力学性质接近于各向同性, 可以有效弥补传统加筋土的不足^[3-8]。玄武岩纤维(简称 BF)是典型的硅酸盐纤维, 具有天然的相容性、优异的力学性能、耐高温性和耐酸碱等特点, 被誉为 21 世纪纯天然的高性能纤维, 并被广泛地用作绝热、吸声、耐热材料以及热固性树脂和混凝土的

增强材料等^[9]。现阶段将玄武岩纤维作为外掺剂应用于混凝土改性的研究较多^[10-11], 而将玄武岩纤维应用于黏土的成果相对较少。

目前, 国内外研究人员围绕纤维加筋土抗剪强度特性开展的试验主要包括直剪和三轴压缩, 其中直剪试验能更方便、快捷地获取土体的抗剪强度指标。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20120094120015); 江苏省自然科学基金项目(BK20130832); 国家自然科学基金项目(51508159)

收稿日期: 2015-11-30

Welker 等^[12]开展了一系列直剪试验来研究聚丙烯纤维加筋土的抗剪强度特性,在最优含水率的条件下,通过改变纤维的掺量,得到试样抗剪强度指标的变化,最终确定纤维最佳掺量为 0.2%。蔡华南等^[13]配制了不同纤维掺量、不同压实度和不同含水率多种组合工况下聚丙烯短丝纤维加筋黄土及素黄土试样,通过直剪试验得出:纤维掺量较高时可以使黄土从应变软化型转变为应变硬化型;当纤维掺量大于 0.3%时,纤维的掺入可以明显提高黄土的黏聚力,并且随纤维掺量的增加其黏聚力随之增大。王德银等^[1]通过直剪试验研究了聚丙烯纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性,结果表明:纤维加筋土的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;并且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。已有研究表明,纤维加筋土的抗剪强度与纤维的种类、掺量、粗细、长短等诸多因素有关,其中掺量的影响最为显著^[14-16]。

本文采用玄武岩纤维对黏土进行加筋处理,通过控制含水率和干密度,开展了一系列直剪试验,分析了纤维掺量对玄武岩纤维加筋黏土抗剪强度指标的影响。从剪切面上选取土样,通过扫描电镜,从微观层面分析了不同掺量下纤维在土体中的分布情况、纤维与土体之间的作用方式及纤维的破坏特征等,得到了一些新的认识,以为相关研究提供参考。

1 试验材料

1.1 玄武岩纤维

本次试验所采用的玄武岩纤维为直径 17 μm,长度 12 mm 的纤维丝压制而成的条状纤维(见图 1),在将其与土样拌合前,需把条状纤维撕开,再均匀掺入土体中,纤维丝细而多。其基本物理力学参数见表 1。

1.2 试验土样

本次试验所采用的土样取自南京某工地。试验前对土样的物理力学性质进行了测定,详见表 2。

表 1 玄武岩纤维的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical behaviors of basalt fiber							
纤维类型	密度/(g·cm ⁻³)	长度/mm	单丝直径/μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	耐酸性
束状单丝	2.65	12	17	2611	85.9	3.12	极强

表 2 黏土的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical behaviors of clay soil											
液限 w _L /%	塑性指数 I _p	最优含水率 w _{op} /%	最大干密度 ρ _d /(g·cm ⁻³)	颗粒百分含量/%			D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c
				2~0.075	0.075~0.005	<0.005					
				mm	mm	mm					
27.2	10	17.0	1.72	43	42	15	0.081	0.028	0.0041	19.8	2.4



图 1 玄武岩纤维图
Fig. 1 Basalt fiber

2 试验内容

2.1 试验方案

玄武岩纤维加筋黏土的抗剪强度指标一般可通过直剪试验快速地获得。为了对比纤维掺量对土样抗剪强度指标的影响,在控制干密度(1.72 g/cm³)和含水率(17%)的条件下开展了一系列直剪(快剪)试验。将长度为 12 mm 的玄武岩纤维丝按干土质量百分比分别为 0.15%, 0.25%和 0.35%的掺量掺入到素土中,包含素土样共制备了 4 组试样(C1~C4)进行试验,各组试样相关参数如表 3 所示。每组配比制备 4 个平行试样,分别施加 100, 200, 300, 400 kPa 4 个垂直压力,共 16 个试样。

2.2 试样制备

在直剪试样制备过程中,将玄武岩纤维丝均匀掺入到黏土中的方法对试验结果有着重要的影响。在以往的试验研究中,有学者^[5]先将风干土样掺水配制目标含水率的湿土,然后将湿土样与纤维丝均匀混合压制成样。由于本文采用的玄武岩纤维丝需要人工散开后再与土样拌合,此过程所需时间较长,如果先掺水将会造成土中水分大量损失,所以本文采用后掺水的拌合方法。将每个试样所需土样与玄武岩纤维丝分成 5 份,逐份拌合后再将 5 份集中拌合,最后再掺水调至最优含水率,这样既可以使玄武岩纤维丝均匀地分布在土体中,又降低了水分的损失程度,可以确保实际含水率达到目标值。在土样配制完成后,将其装入塑料袋中,密封养护 24 h,以便土样中的水分均匀分布。养护结束后,将土样倒入内径 61.8 mm,高 20 mm 的环刀中,压实到目标干密度 1.72 g/cm³。由于

试样含水率较低, 土体收缩变形较小, 因此用于扫描电镜分析的土样可采用低温烘干法制备。

表 3 试样参数

Table 3 Test parameters of soil samples					
土样 编号	BF 掺量 /%	BF 长度 /mm	土样 编号	BF 掺量 /%	BF 长度 /mm
C1	0.00	12	C2	0.15	12
C3	0.25	12	C4	0.35	12

2.3 试验过程

本文直剪试验采用的是 TKA-2 型应变式直剪仪, 仪器调整完成后将量力环百分表调零, 然后分四级进行竖向加载, 四级垂直压力分别为 100, 200, 300, 400 kPa。依据设定的垂直压力放置好砝码后立即拔除销钉, 以 1.2 mm/min 的速率剪切。剪切过程中, 以测力计读数达到稳定或出现显著后退为剪切破坏标志, 一般试验进行至剪切变形为 4 mm 时停止剪切, 当没有破坏现象出现时则至剪切变形为 6 mm 时停止剪切。整个剪切过程持续 3~5 min, 剪切结束后, 退去剪切力和垂直压力, 分离上、下剪切盒, 然后从剪切破坏面上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。

3 直剪试验结果与分析

土体抗剪强度的两个重要参数是黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 各掺量土样的抗剪强度指标, 如表 4 所示。基于表 4 中各掺量土样的抗剪强度指标, 可得到控制干密度 (1.72 g/cm^3) 和含水率 (17%) 时玄武岩纤维加筋黏土样的抗剪强度指标随纤维掺量的变化情况, 如图 2 所示。

表 4 试样的抗剪强度指标

Table 4 Shear strength indices of soil samples			
试样编号	BF 掺量/%	抗剪强度指标	
		黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
C1	0	48.81	27.12
C2	0.15	54.23	26.90
C3	0.25	55.43	26.40
C4	0.35	60.25	30.66

从图 2 (a) 中可看出, 在控制干密度和含水率的条件下, 玄武岩纤维的掺入可有效提高黏土的黏聚力。随着纤维掺量的增加, 黏聚力 c 不断增大, 在掺量达到 0.35% 时, 增强效果最为显著, 增幅达到 23.4%。由图 2 (b) 可知, 和素土相比, 在掺量不超过 0.25% 时, 玄武岩纤维加筋黏土的内摩擦角 φ 变化不大, 当掺量达到 0.35% 时, 内摩擦角 φ 有突然且较为显著的增大, 这说明纤维的掺入在小掺量的情况下对内摩擦角的影响较小, 在大掺量的情况下有可能使土体内摩擦角产生较为显著的增大。

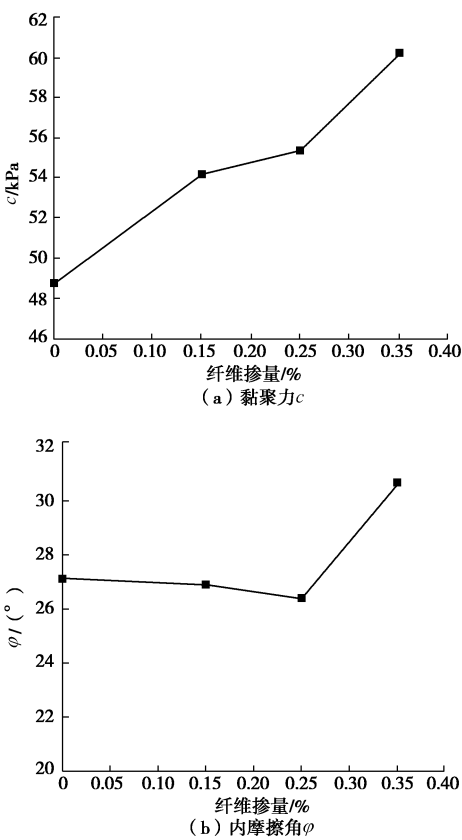


图 2 抗剪强度指标随纤维掺量的变化
Fig. 2 Variation of shear strength parameters with BF content

4 扫描电镜结果与分析

选择扫描电镜低倍模式, 观察各土样整体形貌, 当找到需要观察的区域时, 切换到高倍模式对其进行局部放大, 选择代表性的图像进行拍照和保存。所获取 SEM 照片的放大倍数范围为 100 倍至 5000 倍。当放大倍数在 100 倍至 500 倍范围内时, 可以清晰地显示剪切面的剪切擦痕和多根纤维在土中交织的形态; 当放大倍数增加到 2000 倍至 5000 倍时, 可以清晰地观察到单根玄武岩纤维在土中的形态和纤维端部及表皮的破损状况。以下选取部分具有代表性的 SEM 照片进行分析。

4.1 整体形貌分析

图 3 为本次试验所用素土的 SEM 照片, 当放大 1000 倍时, 可以发现试验所选用黏土为分散结构, 片状黏土颗粒接近于平行排列, 粒间以面-面接触为主, 这也正是黏土颗粒所组成的细粒土所特有的结构; 并且可明显观察到剪切面上的土体较为破碎, 土体颗粒由于受到剪切挤压, 孔隙减少, 土体变得较为密实。图 4 为 0.15% 掺量土样的 SEM 照片, 由于纤维掺量较少, 纤维在土体中的分布较为均匀, 离散程度较高, 但密集程度低, 纤维之间的交织形态大部分为图 7 (a) 所示的简单相交, 此时纤维与土之间的作用主要以图

8 (a) 所示单根纤维的握裹作用为主。当纤维掺量增加到 0.25% 时, 纤维在土中的分布较 0.15% 掺量更为均匀, 且纤维在土中的密集程度适中, 离散程度高。此时土体中像图 5 所示纤维之间的交错重叠现象较为普遍, 而不是图 7 (a) 所示纤维之间的简单相交。当纤维掺量达到 0.35% 时, 与之前的较低掺量相比, 纤维在土体中的分布明显变得不均匀 (如图 6 所示), 并且部分纤维在土体中局部集中, 纤维之间有较多如图 7 (b) 中所示的抱团现象, 此时纤维在土体中的离散程度较低, 部分纤维甚至没有与土颗粒直接接触, 纤维与土颗粒之间的握裹作用减小, 但纤维网作用较为突出。

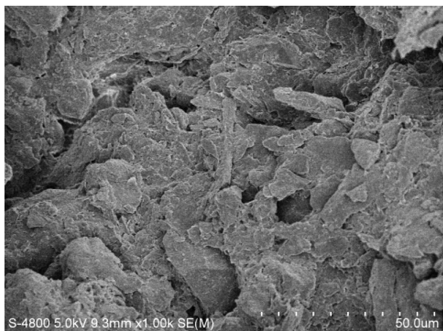


图 3 素土 SEM 照片 (放大 1000 倍)
Fig. 3 SEM image of pure soil

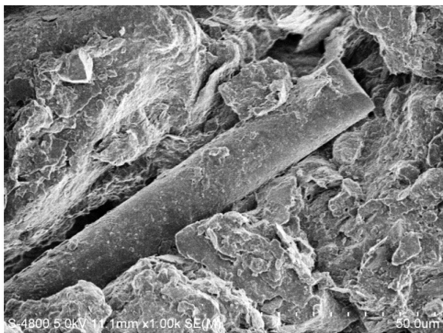


图 4 0.15% 掺量纤维土 SEM 照片 (放大 1000 倍)
Fig. 4 SEM image of 0.15% fiber-reinforced soil

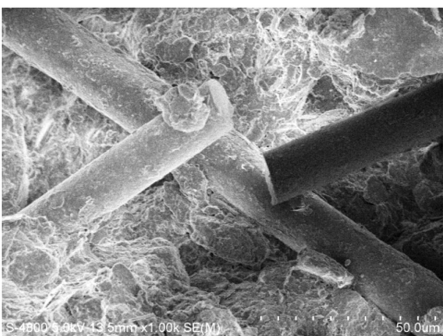


图 5 0.25% 掺量纤维土 SEM 照片 (放大 1000 倍)
Fig. 5 SEM image of 0.25% fiber-reinforced soil

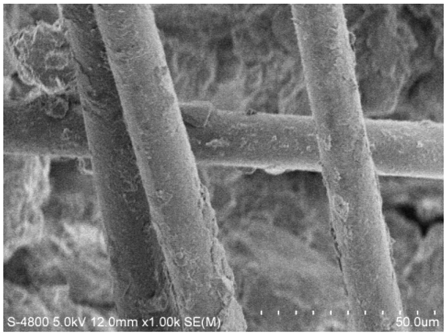
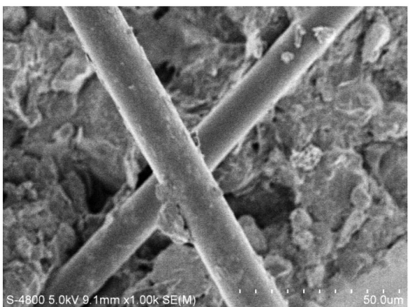
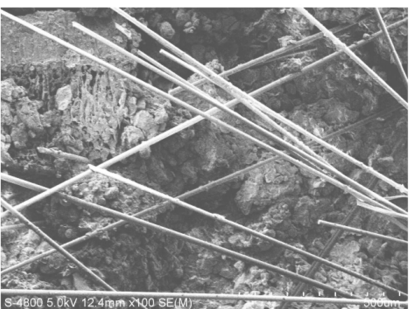


图 6 0.35% 掺量纤维土 SEM 照片 (放大 1000 倍)
Fig. 6 SEM image of 0.35% fiber-reinforced soil



(a) 简单相交 (放大 1000 倍)



(b) 抱团 (放大 100 倍)

图 7 纤维的相交

Fig. 7 Intersection of fiber

4.2 界面作用及破坏特征分析

(1) 握裹作用

图 8 (a) 所示为单根纤维在土体中的形态, 纤维未被拔出, 被周围的黏土颗粒紧紧包裹, 由于纤维与土体颗粒之间存在界面作用, 两者在剪切过程中共同受力。在该作用下剪破面上的黏土颗粒黏附在玄武岩纤维上, 受到剪力时, 黏土颗粒相对纤维有滑动的趋势而产生摩擦力, 黏土颗粒部分分离, 纤维承受拉力, 本文将此类筋/土界面作用定义为纤维加筋土的握裹作用, 即握裹作用产生的摩擦力提高了纤维加筋土的抗剪强度。唐朝生等^[17]提出筋/土界面之间的力学作用主要有 2 种形式: 黏接和摩擦, 这 2 种形式的力便是由握裹作用产生的。图 8 (b) 所示为局部集中纤维的

同向握裹作用, 在纤维离散程度较低时比较常见。

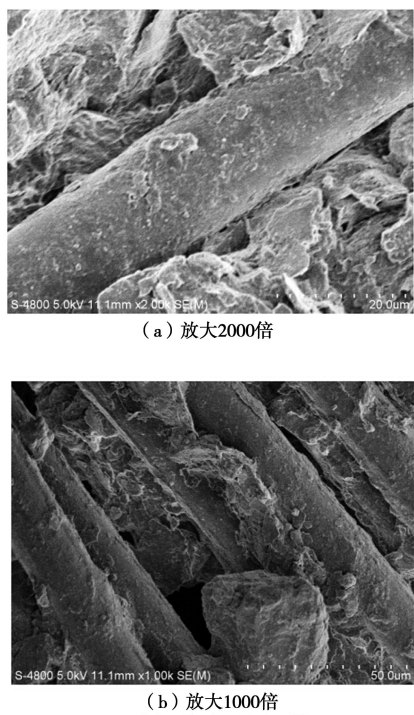


图 8 纤维的握裹作用

Fig. 8 Gripping interaction of fiber

(2) 纤维网作用

除了单根纤维的握裹作用, 由于纤维在土体中分布的随机性, 其在土体内部常呈现密集的空间网状结构, 如下图 9 所示, 这能够增大加筋土体的受力区域, 使其受力更加均匀, 并有效地约束土体颗粒之间的位移, 提高土体的整体性。从图 9 中还可以发现纤维在土体中均匀分布, 交错排列, 当纤维的交织处受到外力作用产生位移趋势时, 会遇到相邻其它纤维丝阻止这种趋势, 这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。即在纤维网作用下, 剪切面上的加筋土体能够更好地承受剪力作用, 使得土样整体的抗剪强度提高。

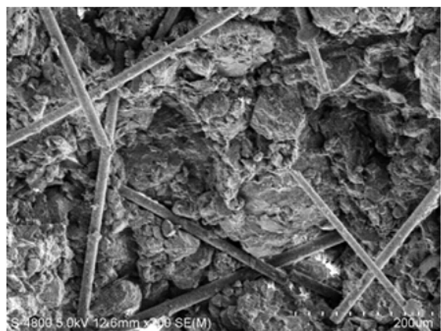


图 9 纤维网作用 (放大 200 倍)

Fig. 9 Fiber-net interaction

(3) 纤维的磨损

剪切过程中, 玄武岩纤维在土体中的磨损不同于

其它纤维, 其一般只有端部发生磨损, 并且绝大部分是因剪切挤压作用磨损 (图 10 (a) 所示), 而非拉断破坏。这不同于聚丙烯纤维加筋土在剪切过程中纤维表面皮层发生较为严重的剥落磨损等^[1], 玄武岩纤维加筋黏土样在剪切过后, 即使纤维端部磨损严重, 其表面皮层依然较为平整 (图 10 (b) 所示)。

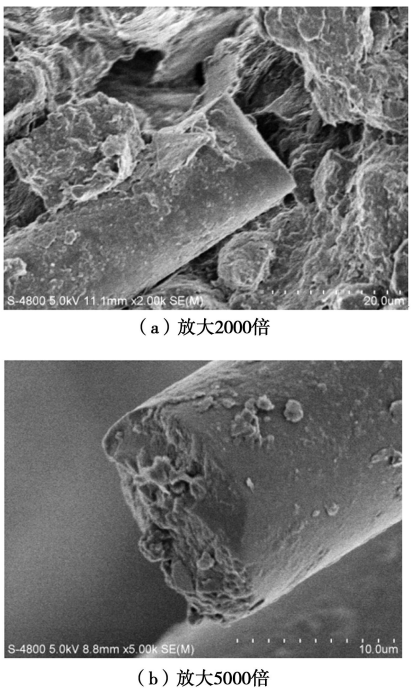
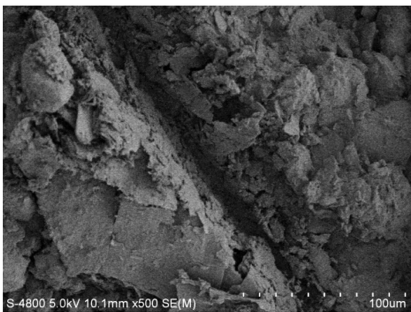


图 10 纤维的磨损

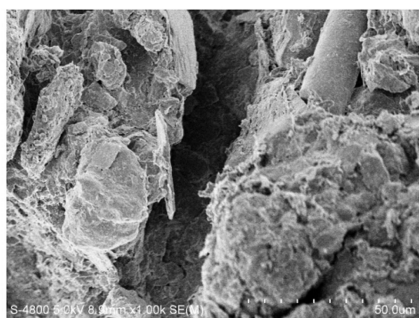
Fig. 10 Breaking of fiber

(4) 纤维的剪切滑移

从扫描电镜中观察土体各区域可知, 玄武岩纤维加筋黏土样在剪切过后, 纤维在土体中一般不会拉断, 主要是发生剪切滑移现象。纤维在土体中的剪切滑移主要分为 2 种, 一种是图 11 (a) 所示的整根纤维滑移, 从图中可以看出纤维在土体中有较为明显的滑移痕迹, 此类滑移中纤维周围包裹的土颗粒一般较少, 此时纤维主要是克服纤维表面皮层与土颗粒之间的摩擦作用; 另一种是纤维端部的拔出滑移 (图 11 (b) 所示), 此类滑移中纤维端部大多包裹着大量土体颗粒, 纤维滑移时会 将土颗粒群连带拔出, 此时纤维主要是克服土颗粒之间的摩擦作用。



(a) 滑移 (放大500倍)



(b) 拔出 (放大100倍)

图 11 纤维的剪切滑移

Fig. 11 Shear slippage of fiber

5 结 论

(1) 将玄武岩纤维掺入黏土中能有效提高土体的黏聚力, 随着掺量的增加, 黏聚力 c 不断增大, 当掺量达到 0.35% 时, 增强效果最为显著, 增幅达到 23.4%; 和素土相比, 在掺量不超过 0.25% 时, 玄武岩纤维加筋黏土的内摩擦角 φ 变化不大, 当掺量达到 0.35% 时, 内摩擦角 φ 有突然且较为显著的增大。这说明纤维的掺入在小掺量的情况下对内摩擦角的影响较小, 在大掺量的情况下有可能使土体内摩擦角产生较为显著的增大。

(2) 在扫描电镜低倍模式下, 观察纤维加筋土样的整体形貌, 相对 0.15% 和 0.35% 掺量, 掺量为 0.25% 时, 纤维在土体中的分布最为均匀, 密集程度适中, 离散程度最高。

(3) 在扫描电镜高倍模式下, 纤维与黏土颗粒间的界面作用主要为握裹作用和纤维网作用; 剪切过程中, 纤维在土体中易发生滑移和磨损, 其中玄武岩纤维的磨损不同于其它纤维, 主要表现为端部的磨损, 表面仍较为平整。

参考文献:

- [1] 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 - 1939. (WANG De-yin, TANG Chao-sheng, LI Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1933 - 1939. (in Chinese))
- [2] JAMEI M P, GUIRAS H. Shear failure criterion based on experimental and modeling results for fiber-reinforced clay[J]. Int J Geomech, 2013, **13**(6): 882 - 893.
- [3] 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. (LIU Bao-sheng, TANG Chao-sheng, LI Jian, et al. Advances in engineering properties of fiber reinforced soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, **21**(4): 540 - 547. (in Chinese))
- [4] 王 磊, 朱 斌, 李俊超, 等. 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. (WANG Lei, ZHU Bin, LI Jun-chao, et al. A constitutive model for fiber reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1326 - 1333. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] FATAHI Behzad, FATAHI Behnam, LE T M, et al. Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement[J]. Geosynthetics International, 2013, **20**(4): 286 - 300.
- [7] FALORCA I M C F G, PINTO M I M. Effect of short, randomly distributed, polypropylene microfibres on shear strength behaviour of soils[J]. Geosynthetics International, 2011, **18**(1): 2 - 11.
- [8] 李 建, 唐朝生, 王德银, 等. 基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1696 - 1704. (LI Jian, TANG Chao-sheng, WANG De-yin, et al. Single fiber pullout tests on interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1696 - 1704. (in Chinese))
- [9] 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. (GAO Lei, HU Guo-hui, XU Nan, et al. Advances in research on engineering properties of basalt fiber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, **10**(S2): 1749 - 1754. (in Chinese))
- [10] 林希宁, 张凤林, 周玉梅. 玄武岩纤维及其复合材料的研究进展[J]. 玻璃纤维, 2013(2): 39 - 44. (LIN Xi-ning, ZHANG Feng-lin, ZHOU Yu-mei. Progress of research on basalt fiber and composites[J]. Fiber Glass, 2013(2): 39 - 44. (in Chinese))
- [11] 陈 峰, 陈 欣. 玄武岩纤维高性能混凝土力学性能正交试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2013, **30**(6): 6 - 10. (CHEN Feng, CHEN Xin. Orthogonal experimental research on strength of high-performance concrete reinforced by basalt fiber[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013, **30**(6): 6 - 10. (in Chinese))
- [12] WELKER AL, JOSTEN N. Interface friction of a

- geomembrane with a fiber reinforced soil[C]// Conference Proceedings Geo-technical Special Publication, Geo-Frontiers. Austin, 2005: 2 903 - 2 910.
- [13] 蔡华南, 申俊敏, 赵健斌, 等. 纤维加筋黄土抗剪特性研究[J]. 交通科技, 2013(3): 129 - 132. (CAI Hua-nan, SHEN Jun-min, ZHAO Jian-bin, et al. Research on shear properties of fiber-reinforced loess[J]. Transportation Science & Technology, 2013(3): 129 - 132. (in Chinese))
- [14] CRISTELO N, CUNHA V M C F, DIAS M, et al. Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, **43**(1): 1 - 13.
- [15] O Plé, T N H Lê. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2012, **32**(2): 111 - 116.
- [16] XU L, CHAI S, WEI H. Relationship between electrical resistivity and direct shear strength of basalt residual soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(10): 10 - 16.
- [17] 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. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, GU Kai. Microstructural study on interfacial interaction between fiber reinforcement and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(4): 610 - 614. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)