

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.025

剪切大变形下滑带纤维加筋黄土的强度特性

郑楷浩¹, 骆亚生¹, 杨玉生^{2,3}, 宋虹兵³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3. 新疆维吾尔自治区塔里木河流域大石峡水利枢纽工程建设管理局, 新疆 乌什 843400)

摘要: 为揭示纤维加筋黄土在大变形条件下的力学行为机制, 通过环剪试验研究了玄武岩纤维掺量(0~0.5%)对黄土强度特性的影响, 并结合剪切面进行分析。结果表明: 高含水率削弱土体结构(黏聚力损失)及自由水润滑作用(摩擦角降低), 导致峰值与残余强度同步下降, 且二者差值缩小。干密度提升通过密实骨架增强颗粒咬合, 限制滑动空间, 显著提高峰值与残余强度。中低纤维掺量($\leq 0.2\%$)时纤维与土颗粒形成三维网格, 提升峰值强度; 大变形阶段, 纤维受剪胀效应驱动向剪切面迁移富集, 形成临时抗拉网络, 其“破坏-重组”动态循环导致残余强度显著波动。高纤维掺量($\geq 0.5\%$)时纤维纠缠成“墙状结构”, 隔断土体连续性, 导致局部抗剪强度骤降。人工分散工艺使纤维表面微毛刺化, 增大界面摩擦, 促使拉断取代拔出成为主导破坏模式, 强化纤维抗拉贡献。该研究阐明了环剪过程中纤维的迁移-富集-重构行为及掺量阈值机制, 可为优化滑坡防治纤维加筋技术提供理论支撑。

关键词: 黄土滑坡; 纤维加筋黄土; 环剪试验; 残余强度; 峰值强度

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0173-06

Strength Characteristics of Fiber-reinforced Loess in the Sliding Zone under Large Shear Deformation

ZHENG Kaihao¹, LUO Yasheng¹, YANG Yusheng^{2,3}, SONG Hongbing³

(1. College of Water Conservancy and Building Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. China Academy of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

3. Dashixia Water Conservancy Hub Project Construction Administration of Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Wushi, Xinjiang 843400, China)

Abstract: In order to reveal the mechanical behavior mechanism of fiber reinforced loess under large deformation conditions, this work analyzed the influence of basalt fiber content (0~0.5%) on the strength characteristics of loess through ring shear test. Combined with the microscopic analysis of shear surface. The results show that: high water content weakens the soil structure (cohesion loss) and free water lubrication (friction angle reduction), resulting in a simultaneous decrease in peak and residual strength, and the difference between them is reduced. The increase of dry density enhances the particle occlusion through the dense skeleton, limits the sliding space, and significantly improves the peak and residual strength. When the fiber content is low ($\leq 0.2\%$), the fiber and the soil particles form a three-dimensional grid to increase the peak strength; in the large deformation stage, the fiber is driven by the dilatancy effect to migrate and enrich to the shear plane, forming a temporary tensile network, and its failure-recombination dynamic cycle leads to significant fluctuations in residual strength. When the fiber content is high ($\geq 0.5\%$), the fiber entangles into a 'wall structure', which cuts off the continuity of the soil and causes the local shear strength to drop sharply. The artificial dispersion process makes the surface of the fiber micro-burr, increases the interface friction, promotes the breaking to replace the pulling out as the dominant failure mode, and strengthens the tensile contribution of the fiber. This work clarified the migration-enrichment-reconstruction behavior and dosage threshold mechanism of fiber in the process of ring shear, and provided theoretical support for optimizing fiber reinforcement technology for landslide prevention and control.

Keywords: loess landslide; fiber reinforced loess; ring shear test; residual strength; peak strength

收稿日期: 2025-11-09

修稿日期: 2026-01-07

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JLM-51)

作者简介: 郑楷浩(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为黄土及其工程性质。E-mail: 2478927840@qq.com

通讯作者: 骆亚生(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事黄土力学与工程方面的教学与科研工作。E-mail: lyas1967@nwsuaf.edu.cn

我国滑坡灾害频发,具有频率高、破坏范围广的特点^[1-2]。国家统计局数据显示,2015—2023年间,滑坡灾害约占全国地质灾害的64%。黄土高原区面积广阔,在人类活动与自然因素共同作用下,水土及荷载条件变化导致黄土台塬区滑坡频发,塬体面积萎缩,严重威胁环境安全。例如,“天下第一塬”董志塬历经1300年,面积减少近半(约600 km²);洛川塬因滑坡灾害迫使县城南迁数十公里。因此,在人类活动、地震及降雨影响下,黄土台塬区滑坡治理刻不容缓。然而,受自然与工程活动影响的黄土边坡量大面广,传统加固方式成本高昂。纤维加筋技术因其成本低、环保、施工简便等优点^[3],成为一种极具潜力的黄土边坡加固方法。

在加筋土研究领域,早期研究揭示了加筋提升土体强度的基本机制。McGown等^[4]发现铝网通过限制土体变形增强稳定性。保华富等^[5]与李广信等^[6]对土工格栅加筋碎石土开展了较为系统的试验研究,结果表明,加筋效果与复合体受力条件、围压大小、轴向应变水平、加筋层间距以及填料性质等因素密切相关。合理设置加筋结构不仅能够提高土体强度,还能够改善其变形特征,并在一定程度上增强破坏后的恢复能力。随着相关研究的不断深入,天然纤维和合成纤维逐渐成为土体改良领域的重要研究方向。Tang等^[7]指出纤维-土壤界面强度受土颗粒重排主导,受含水率、干密度及水泥掺入影响。赵宁雨等^[8]通过三轴试验研究了纤维加筋红黏土,发现纤维长度、配合比和类型(聚丙烯优于涤纶)显著影响黏聚力提升效果。宋金岩等^[9]证实玻璃纤维加筋砂土主要提高黏聚力,建立了其与纤维参数的公式。Yang等^[10]发现聚丙烯纤维加筋砂粘强度存在最优掺量(0.3%),其增强源于纤维网络引发的闭锁摩擦与空间约束。Rao等^[11]量化了亚麻纤维对粉砂土的增强效果,确定了最优含量与长径比。针对特定土体,熊右波等^[12]探讨了含盐量及聚丙烯纤维参数对黄土抗剪强度的影响;Zhong等^[13]与钟秀梅等^[14]则研究了木质素对黄土湿陷性、渗透性及力学特性的改良效果,揭示了最优掺量与搅拌方法的显著影响;胡成等^[15]进一步探索了不同纤维在水泥土中的增强机制与最优组合方式。其他学者也针对不同纤维(如棉纤维^[16]、玄武岩纤维与玉米秸秆纤维^[17]、聚丙烯纤维^[18])和土类(如滨海盐渍土^[19]、砂土^[18,20])开展了广泛研究,系统分析了纤维参数、土体状态^[19,21](含水率、干密度)及加筋方式^[22](位置、层数)对力学性能、抗拉强度^[20]的优化

作用,并探讨了相关机理。

随着对加筋机理认识的深化,研究者开始更多地关注如何更真实地模拟如滑带土等的大变形特性,在这一背景下,环剪试验逐渐被应用于研究土体破坏后残余强度的衰减规律。胡明鉴等^[23]发现高剪切速率可导致不排水液化,强度骤降并引发恶性循环。Liu等^[18]指出纤维能显著提升中高密度砂土的抗静液化能力,抑制松散砂土塌陷。朱兆波等^[24]观察到高法向应力与高剪切速率下可形成阶状剪切带及强度缓慢增长现象。

综上所述,既有研究明确了纤维加筋提升土体峰值强度的效果,但对其在环剪大变形条件下的行为机制、高掺量负面效应根源以及剪切面纤维富集重构现象尚未深入揭示。本研究通过玄武岩纤维改良黄土的环剪试验与剪切面分析,阐明了纤维在剪切过程中的迁移-富集-重构行为,研究人工分散工艺对纤维破坏模式及纤维群负面效应的影响,可为优化纤维加筋滑坡防治技术提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用黄土取自陕西省试验土样取自杨凌示范区某黄土边坡。室内试验结果表明,该黄土天然含水率为17.7%,土粒比重为2.71。通过击实试验确定其最优含水率为19.3%,对应的最大干密度为1.75 g/cm³。图1为该黄土的击实曲线。

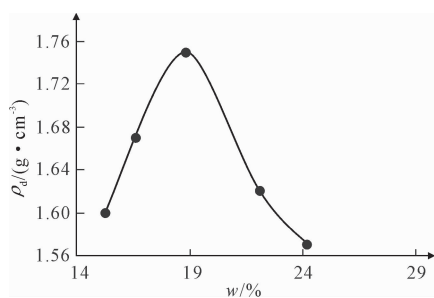


图1 黄土击实曲线

选用玄武岩纤维作为土体加筋材料(见图2)。该纤维具有较高的强度和模量,同时具备良好的耐高温性能和化学稳定性,在复杂环境条件下仍能够保持较稳定的力学性能。与部分有机纤维材料相比,玄武岩纤维来源于天然矿物,生产过程相对环保,且材料成本较低,因而在岩土工程领域具有较好的应用前景。纤维掺入土体后,可在颗粒之间形成一定的空间网络结构,对土体颗粒起到约束和桥联作用,从而改善土体的变形特性并提高整体强度。

玄武岩纤维的主要力学性能参数见表1。



图2 玄武岩纤维

表1 玄武岩纤维机械参数

密度 /(g·cm ⁻³)	平均直径 /μm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	极限伸长率/%
2.65	17	2611	85.9	3.12

试验采用的环剪仪由江苏溧阳市永昌工程实验仪器有限公司生产,型号为HJ-1型环剪仪。该环剪仪主要由上、下剪切盒组成,上剪切盒可分离,带有螺栓(调节缝宽)、与扭矩传感器和轴向加载横梁的连接点,下剪切盒可正反旋转且速率可调。剪切速率通过一次和二次变速箱配合调节并显示。轴向加载通过底部砝码施加垂直荷载至土样。设备配有百分表监测土样竖向位移,水平转角记录盘记录转动角度,扭矩显示器实时显示扭矩(可换算剪应力)。

1.2 试样制备及试验方案

风干原状土,碾碎过2 mm筛后密封备用。所需总水量 m_w 及所需纤维质量 m_f 计算式为:

$$m_w = \frac{m_0}{1 + w_i} \times (1 + w) \quad (1)$$

$$m_f = \frac{m_0}{1 + w_i} \times a_f \quad (2)$$

式中: m_w 为目标含水率下的总湿土质量; m_0 为初始湿土质量; w_i 为初始含水率; w 为目标含水率。

将毛糙、分离后的玄武岩纤维与干土混合,喷洒目标水量(考虑10%~20%损耗)后密封静置24 h,使水分均匀。按下式计算所需湿土质量 m :

$$m = \rho_d \times (1 + w + a_f) \times (R_1^2 - R_2^2) \times \pi \times h \quad (3)$$

式中: ρ_d 为目标干密度; R_1 、 R_2 、 h 分别为环形试样的外半径、内半径及高度。

分层装入制样器(含环刀及玻璃圆柱),轻压初步保证均匀。用千斤顶压实(避免压坏设备)。拆除底座及玻璃圆柱,倒置装置于千斤顶上,用顶样器配合有机玻璃板缓慢顶出环形试样(如图3)。

由以往的研究可得知,对纤维加筋黄土影响较

大的有含水率、纤维掺量和干密度,因此本试验土样将设含水率为15%、18%、21%和24%,纤维掺量为0.0%、0.2%和0.5%,干密度设为1.57、1.62和1.66 g/cm³。纤维采用20 mm的玄武岩纤维,有效法向应力设为50 kPa,剪切速率设为1.76 mm/min。



图3 环形土样

1.3 计算指标及平均剪切位移

HJ-1环剪仪剪切的土样为100 mm外径,60 mm内径,高为20 mm的环形空心土样,其竖直方向上面积为50.27 cm²,平均直径为8.17 cm。而仪器可提供的扭矩最大值为300 N·m,转速为3.2 × 10⁻⁶ ~ 2.4 × 10⁻²转/分,可提供的最大竖向荷载约为900 kPa。

在试验过程中记录上下剪切盒之间的扭矩,加上试验方案中选择的剪切速率以及仪器本身的参数,可由以下公式算出纤维加筋土的平均剪应力与平均剪切位移:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi(R_1^3 - R_2^3)} \quad (4)$$

式中: τ 为纤维加筋土的平均剪应力; M 为环剪仪上显示的扭矩。

$$S = \pi D_m v_2 t = 8.17\pi v_2 t \quad (5)$$

式中: S 为环形土样的平均剪切位移; D_m 为环形土样的平均直径; v_2 为环剪仪上显示的剪切速率; t 为剪切土样时间。

$$D_m = \frac{2}{3} \left(\frac{R_1^3 - R_2^3}{R_1^2 - R_2^2} \right) = 8.17 \text{ cm} \quad (6)$$

式中: D_m 为环形土样的平均直径。

2 试验结果与分析

2.1 含水率对大变形条件下力学特性的影响

图4为不同含水率下剪应力与剪切位移的关系,由图4可知,在剪切初期的小应变范围内,剪应力线性增加,达到强度峰值,黏聚力发挥最大作用。随着应变的继续增大,剪切面上的土体遭到破坏,黏

聚力迅速丧失,转变为由摩擦力发挥主要作用。而在其他条件不变化,单独增加土体含水率的情况下,黄土的峰值强度与残余强度均有所降低,这是由于黄土的水敏性^[1],即黄土在受到水分作用时,其物理与力学性质发生显著变化的现象,本质为吸应力变化与应变响应。此外,当含水率增加时,土体的峰值强度与残余强度的差距将减小,这是由于土体水分的增加将降低土体结构性在其中起到的作用,即峰值强度中黏聚力因水分的加入而大量降低,同时由于土体颗粒已经具有足够的结合水,额外加入的水分将成为自由水并起到一定的润滑作用,从而降低了摩擦角。这也是黄土滑坡往往发生在大量降雨后的原因。

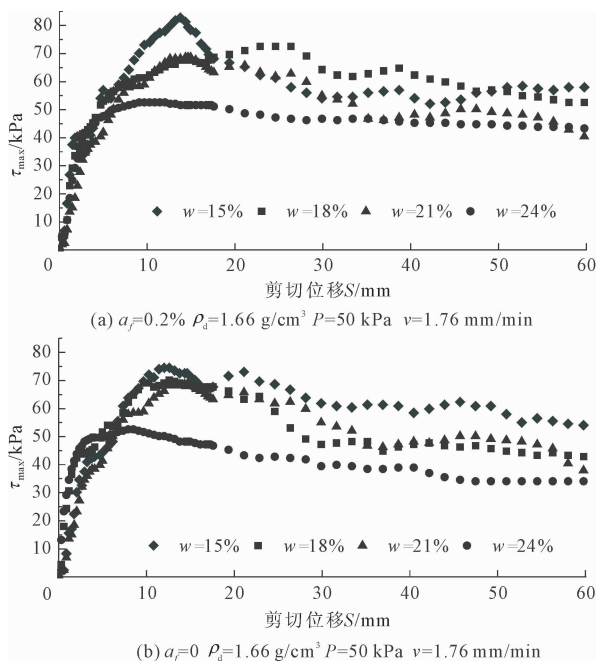


图 4 不同含水率下剪应力-剪切位移关系曲线

2.2 干密度对大变形条件下力学特性的影响

图 5 为不同干密度下剪应力与剪切位移的关系,由图 5 可知,在其它条件不发生变化的情况下,土体干密度的增加将使土体颗粒排列得更加密集,土颗粒与土颗粒之间接触的面积更多,因此具有更加稳定的骨架结构,使得更加容易产生黏聚力,导致土体的峰值强度增加。同时由于高干密度黄土在变形之后,仍保持着相对低干密度更多的颗粒接触点,紧密的结构也减少了土体破坏后颗粒的滑动空间,因此在土体遭到破坏之后,其残余强度也将增加。而在重组形成的纤维网络的影响下,残余强度存在波动,可能导致局部残余强度存在反常情况,但不影响整体趋势,该波动在后文 3.1 结合剪切面进行分析。

析。

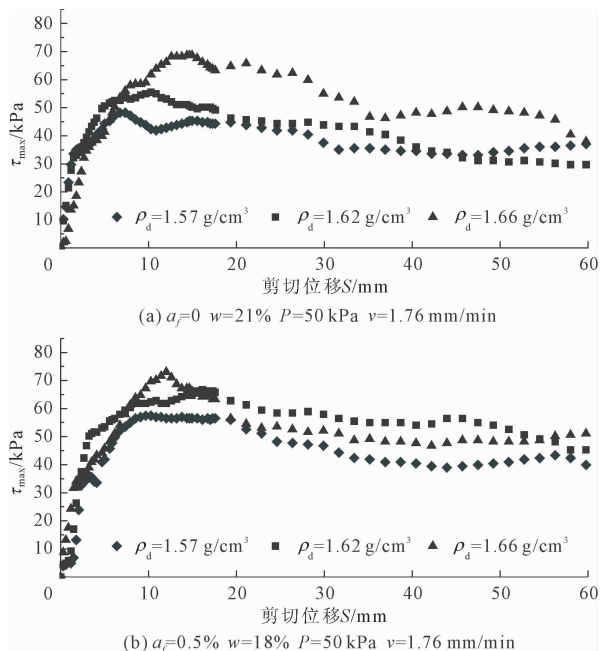


图 5 不同干密度下剪应力-剪切位移关系曲线

2.3 纤维掺量对大变形条件下力学特性的影响

图 6 为不同纤维掺量下剪应力-剪切位移关系曲线,从图 6 可以看出,随着玄武岩纤维掺量的增加,黄土的剪应力峰值呈上升趋势。同时,纤维的加入对大变形后的残余强度改善明显,说明纤维能够有效增强土体的整体抗剪性能。由于玄武岩纤维均匀地掺入黄土中,其在内部形成了三维网络结构,通过与土颗粒的摩擦力与机械咬合力相互作用,使其在受到剪切或者拉伸时,纤维承担部分荷载,增加了土体的峰值强度。而在破坏过程中纤维通过桥接作用拉伸吸收了部分剪切能量,延缓了土体的脆性破坏,表现为应力应变曲线的下降速度更慢。而局部不符合规律的残余强度仍在 3.1 进行分析。

3 试样剪切面分析

3.1 剪切面玄武岩纤维富集现象

试样的剪应力-剪切位移曲线在大变形后,即剪切位移长度远超出纤维长度时玄武岩纤维仍然在影响黄土的残余强度,若仅仅是因为桥接作用才使得残余强度增加,那么在剪切后期纤维掺量较高的黄土,残余强度应当逐渐逼近低纤维掺量的试样甚至逼近素土,并且强度应当稳定至残余强度。为了研究应力反常的原因,在环剪试样剪切完毕后对其进行了观察分析。

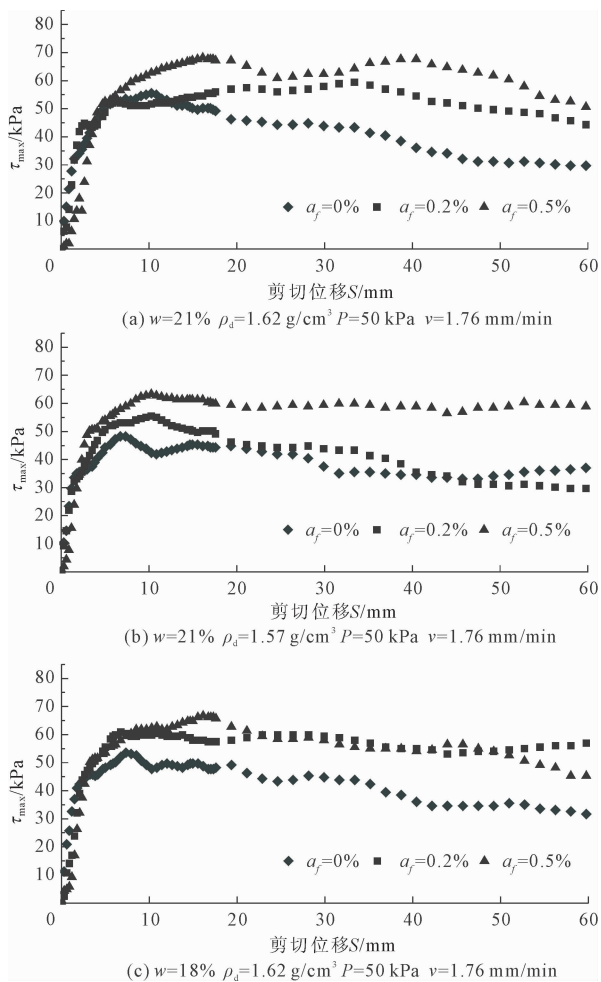


图 6 不同纤维掺量下剪应力-剪切位移关系曲线

被翻转出的玄武岩纤维如图 7 所示,由图 7 可知,在具有较高纤维掺量的试样中,普遍能观察到在剪切过程中被翻转出来的玄武岩纤维。这是由于在环剪过程中,剪切面会因为剪胀而产生一道类似微裂隙的区域,纤维在剪切时由于其较为细长的特征,周围运动的土颗粒将对玄武岩纤维产生黏性拖拽力,缓慢地将相邻的纤维网络卷入并集中在该剪切面,使该区域的纤维掺量显著增加,而富集的纤维网络又相互搭接,形成临时的纤维抗拉网络。当剪切继续进行,导致剪切位移超过临界值时,纤维-土体界面将被破坏,使应力下降,而被破坏的纤维网络又重新组成。每次剪切时形成的纤维网络又不完全一致,这使得残余应力增加并呈现一定幅度的波动,而较低的竖向应力也使得纤维在大变形之后仍然难以定向排列。

3.2 破坏过程中玄武岩纤维的表现

能观察到剪切面上的玄武岩纤维因环剪而大部分朝着同一方向,且在随机选取的破坏截面中,玄武

岩纤维部分出现了拉断现象,如图 8 所示。

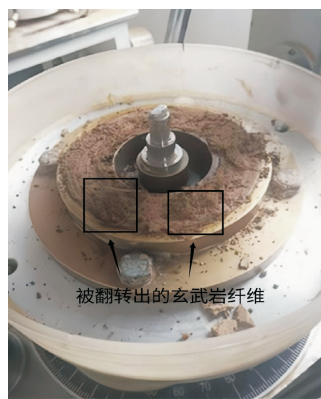


图 7 被翻转出的玄武岩纤维



图 8 剪切面上被拉断的玄武岩纤维

这是由于为了将玄武岩纤维更加均匀地散布在黄土试样中,在人为拆开玄武岩纤维的这一过程中将纤维分离得更细,使得在土体颗粒与玄武岩纤维摩擦力变化不大的情况下降低了单簇玄武岩纤维的抗拉应力,导致在最终试样破坏的情况下能观察到大部分纤维被拉断而非拔出,这证明玄武岩纤维在这种情况下是由抗拉强度,而非黄土颗粒与玄武岩纤维之间的摩擦力占主导地位。

而在纤维掺量为 0.5% 的试样中,出现了类似墙状的玄武岩纤维群,如图 9 所示。

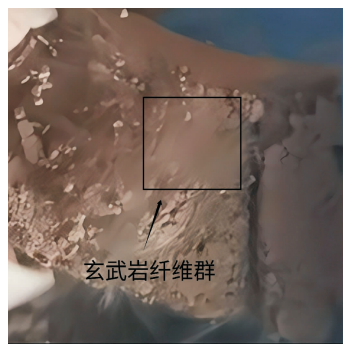


图 9 隔断土体的玄武岩纤维群

该玄武岩纤维群是由于纤维掺量较高而相互纠缠产生的,由于纤维群隔断了土与土之间的黏结力,因此降低了该截面的土体抗剪强度。

4 讨论

4.1 玄武岩纤维分散方式的影响

在本次试验中,玄武岩纤维的分散方式为人为分散,这可能导致玄武岩纤维在分离过程中在纤维表面产生微毛刺,从而增大玄武岩纤维与黄土的摩擦力,并且由于玄武岩纤维在分离后更细,导致单根玄武岩纤维更偏向于被拉断而非拔出,而在玄武岩纤维分离方式不同时向玄武岩纤维被拔出转变。

人工分散使纤维更细,可能导致低掺量下即形成纤维群;而未分散纤维相互纠缠概率更低,高掺量时才可能形成阻隔土体的纤维群。同时,由于环剪试样的土样截面通常面积较小,导致纤维群在较小的规模就可以阻断土样截面,从而影响试验结果,但实际工程活动中土的截面往往由于面积较大,往往不那么容易被隔断,从而削弱纤维群的影响,但其存在可能导致应力集中与薄弱面的产生,因此仍需要避免。

4.2 竖向应力与干密度对纤维富集现象的影响

由于本次试验模拟的是表层滑带土的大变形力学指标分析,因此竖向应力选取的值偏小,这可能导致环剪试样在大变形的过程中剪切面的微裂隙区域较大,使更多的玄武岩纤维更容易被卷入剪切面中,最终导致剪切后期剪应力的波动更加剧烈。但若竖向应力或干密度增大,则可能使剪胀效应减弱,纤维富集现象减小,导致相应的剪应力波动以及额外提高的抗剪强度也减小。

5 结论

(1) 高含水率会削弱黄土结构并导致黏聚力损失,同时自由水产生的润滑作用会降低摩擦角,最终使土体峰值强度与残余强度同步下降,且二者差值缩小;而干密度提升能让土颗粒排列更密实,形成稳定骨架以增强颗粒咬合,既显著提高峰值强度,又通过限制颗粒滑动空间间接提升残余强度。

(2) 中低玄武岩纤维掺量($\leq 0.2\%$)时,纤维与土颗粒形成三维网格结构,可有效提升土体峰值强度;进入大变形阶段后,纤维受剪胀效应驱动向剪切面迁移富集,形成临时抗拉网络,其“破坏-重组”的动态循环会导致残余强度显著波动。

(3) 高玄武岩纤维掺量($\geq 0.5\%$)时,纤维易纠缠成“墙状结构”,隔断土体连续性,造成局部抗

剪强度骤降;人工分散工艺能使纤维表面微毛刺化,增大界面摩擦,促使拉断取代拔出成为纤维主导破坏模式,进而强化纤维对土体的抗拉贡献。

参考文献:

- [1] 崔鹏. 我国泥石流防治进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 7-13, 31.
- [2] Kou M M, Liu X R, Wang Z Q, et al. Mechanical properties, failure behaviors and permeability evolutions of fissured rock-like materials under coupled hydro-mechanical unloading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 254: 107929.
- [3] 张龙飞, 胡再强, 李宏儒, 等. 纤维加筋黄土冻融循环后的工程力学特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(4): 594-602.
- [4] McGown A, Andrawes K Z, Al-Hasani M M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand[J]. Geotechnique, 1978, 28(3): 327-346.
- [5] 保华富, 周亦唐, 赵川, 等. 聚合物土工格栅加筋碎石土试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 82-86.
- [6] 李广信, 介玉新. 纤维加筋土直立边坡的离心模型试验及临界高度计算[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 清华大学水利水电系; 清华大学水利水电系, 1999: 92-95.
- [7] Tang Chaosheng, Shi Bin, Zhao Lizheng. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2010, 28(1): 54-62.
- [8] 赵宁雨, 荆林立. 纤维加筋红黏土强度特性影响因素的试验[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2010, 24(9): 47-51, 68.
- [9] 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): 261-264.
- [10] Yang Yunhua, Cheng Shengguo, Gu Jianyun, et al. Triaxial tests research on strength properties of the polypropylene fiber reinforced soil[J]. IEEE [2025-06-26].
- [11] Rao S V K, Nasr A M A. Laboratory study on the relative performance of silty-sand soils reinforced with linen fiber[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2012, 30(1): 63-74.
- [12] 熊右波, 王家鼎, 李丹阳. 含盐量与纤维条件对加筋土抗剪强度的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(5): 585-591, 600.
- [13] Zhong Xiumei, Liang Yuxin, Wang Qian, et al. Evaluation and analysis of the effect of lignin amelioration on loess collapsibility[J]. Journal of Renewable Materials, 2022, 10(12): 3405-3424.