

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.011

剑麻纤维复合基材土岩界面剪切性能试验

梅红¹,赵洪岩²,李明阳¹,刘瑾¹,马柯¹,卢洪宁¹,张晨阳¹,黄庭伟¹,张继周³

(1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100; 2. 国家开发银行江苏省分行,江苏 南京 210019;
3. 宁夏公路勘察设计院有限责任公司,宁夏 银川 750004)

摘要:为揭示剑麻纤维掺量与界面粗糙度对土-岩界面剪切力学性能的影响规律,采用表面起伏的混凝土模块作为岩面相似材料,进行了一系列的改进室内直剪试验,并结合扫描电镜试验进一步分析了剑麻纤维参与强化界面剪切性能的机理。结果表明:剑麻纤维通过提高黏聚力提高土-混凝土界面间的剪切力学性能;纤维添加量为 0.8% 的土-混凝土界面黏聚力提高 80%~500%,内摩擦角提高 10%~20%;界面粗糙度主要通过提高黏聚力增强界面剪切力学性能,6.5 mm 粗糙度的界面黏聚力增量为 7~15.5 kPa,提高 20%~300%;对于素土界面和掺纤维界面,粗糙度对土-混凝土界面间剪切力学性能的强化表现为 2 种模式,加入纤维的界面黏聚力关于粗糙度的增长关系上,粗糙度的最优值出现在较小区间(0~2.5 mm)。

关键词:复合客土基材;土-岩界面;剑麻纤维;界面粗糙度;改进剪切试验

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)05-0079-08

Experimental study on shear properties of soil-rock interface of sisal fiber composite material

MEI Hong¹, ZHAO Hongyan², LI Mingyang¹, LIU Jin¹, MA Ke¹, LU Hongning¹,
ZHANG Chenyang¹, HUANG Tingwei¹, ZHANG Jizhou³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. China Development Bank Jiangsu Branch, Nanjing 210019 China;
3. Ningxia Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Yinchuan 750004, China)

Abstract: In order to study the influence of sisal fiber and interface roughness on the shear mechanical properties of soil-rock interface, concrete modules with rough surface were used as the rock surface similar material and a series of indoor shear tests were carried out. Combined with the SEM test, the mechanism of sisal fiber participating in the strengthening of the interface is further analyzed. The results show that sisal fiber can improve the shear mechanical properties of soil-concrete interface by improving the cohesion. The addition of 0.8% by weight increases the interfacial bond strength of soil-cement interface by 0.8-5 times and the internal friction angle by 0.1-0.2 times. The interface roughness mainly enhances the shear mechanical performance of the interface by improving the bond strength. For an interface roughness of 6.5 mm, the increase of interfacial bond strength ranges from 7 kPa to 15.5 kPa, resulting in an improvement of 0.2-3 times. The enhancement of roughness on the shear mechanical performance of the soil-cement interface exhibits two distinct patterns for the plain soil interface and the fiber-reinforced interface. Regarding the relationship between interfacial bond strength and roughness for the fiber-reinforced interface, the optimal value of roughness appears within a smaller range (0-2.5 mm).

Key words: composite guest soil; soil-rock interface; sisal fiber; interface roughness; improved shear test

广泛开展的各类基础建设工程会极大地改变当地的区域地貌,给工程当地留下大量的裸露岩质边坡。相比于自然边坡,此类裸露边坡稳定性差,易受扰动,会发育严重的工程地质隐患^[1-3]。在国内稳步推进生态建设战略的大背景下,工程地质领域对生态环保理念日益重视,针对裸露岩质边坡的生态护坡技术逐渐成为

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877212);国家重点研发计划项目(2018YFC1508501);国家级重点支持领域大学生创新训练项目(202110294055);2019 年度宁夏自然科学基金项目(2019AAC03261)

作者简介: 梅红(1976—),女,高级实验师,硕士,主要从事工程测量、岩土体变形监测和安全监控研究。E-mail: meihong@hhu.edu.cn
通信作者: 刘瑾(1983—),女,教授,博士,主要从事环境地质工程研究。E-mail: jinliu920@163.com

引用本文: 梅红,赵洪岩,李明阳,等. 剑麻纤维复合基材土岩界面剪切性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):79-86.
MEI Hong, ZHAO Hongyan, LI Mingyang, et al. Experimental study on shear properties of soil-rock interface of sisal fiber composite material[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5):79-86.

研究重点^[4-6],其中,客土喷播是较受关注的一项生态护坡技术。为客土基材加筋以改善基材的物理力学性能是改善基材物理力学性能的一种常用手段。

将客土基材喷播到岩质坡面上,基材与岩面形成基材土-岩体二元结构。土-岩界面是表现二元结构不均匀性和各向异性的主要区域,是发生边坡结构失稳和酝酿次生灾害的高发区域^[7]。在客土基材形变与界面稳定问题中,土-岩界面的剪切力学性能是学界长期以来的关注重点^[8]。Potyondy^[9]于1961年通过直剪试验研究了多种界面与上覆土体之间的剪切力学特性;Clough等^[10]对土-混凝土界面开展直剪试验研究界面剪切力学特征,提出界面上 τ - ω 存在双曲线关系,其中 τ 是土-混凝土界面上的剪切应力, ω 是土体与混凝土之间相对位移的速度差异;殷宗泽等^[11]通过分析土-混凝土界面的剪切变形特征,扬弃了Clough等的 τ - ω 双曲线关系理论,指出界面破坏的过程是由边缘向内部发展,并提出剪切带上土体的刚-塑性变形观点;高俊合等^[12]利用大型单剪设备对土-混凝土接触特性进行研究,给出了土体在剪切带内的双重变形机制。进入21世纪以来,也有大量学者通过单剪仪、环剪仪、大型直剪仪等多种剪切设备与试验方法对土-岩界面的受力特征、颗粒排布运移、宏细观破坏机制等进行了深入研究。

目前面向客土加筋的研究主要集中在加筋材料、加筋配比等与客土基材力学性能关系等方面^[13-18];面向土-岩界面的研究主要包括模型拟合、试验方法评价、粗糙度模拟、客土性质影响等方面^[11,16-17]。针对加筋纤维与界面粗糙度对土-岩界面稳定性复合影响的评价较为缺乏。土-岩界面的剪切力学性能是评价客土稳定的重要指标,揭示加筋纤维和界面粗糙度对界面剪切力学性能的影响规律具有理论与现实意义^[19-20]。利用预先制作的混凝土模块作为岩面相似材料,以剑麻纤维作为加筋改良材料,开展一系列改进室内直剪试验,分析纤维掺量与界面粗糙度对界面剪切力学性能的影响,并结合扫描电镜试验揭示剑麻纤维和界面粗糙度对界面剪切力学性能的强化机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土样采自南京市江宁区,为粉质黏土,呈浅棕黄色,质地均匀稍细腻,具有高可塑性、低膨胀性、失去水分后容易收缩开裂等特性。土样的最大干密度为1.79 g/cm³,最优含水率为20.3%,塑性指数为16.4,塑限为23.8%,液限为40.2%,相对密度为2.71,粒径分布曲线如图1所示。

试验所用纤维为剑麻纤维,呈米白色,质地坚韧,抗拉、耐腐蚀、吸湿放湿快,具有良好的物理力学性能^[21-24],是客土加筋中常用的天然纤维材料。试验采用纤维长度为2 cm,平均直径为0.2 mm,密度为1.05 g/cm³,杨氏模量为10.94~26.70 GPa,断裂拉伸强度为41 MPa,断裂拉伸率为2.01%~2.74%。

1.2 试验方法

采用具有规则折线形凹槽的混凝土模块模拟粗糙岩面,将制得的混凝土模块置于25℃恒温下养护26 d。为了统一考虑混凝土模块表面上起伏体高度和体积的综合影响,采用灌砂法计算得到的粗糙度 R (式(1),表征混凝土模块表面的粗糙起伏,不涉及模块表面的微观摩擦参量)进行界面粗糙度评价。

$$R = V_{si}/A_0$$

(1)

式中: V_{si} 为整平混凝土模块表面需要的砂体积; A_0 为整平后的混凝土模块表面积。

试验流程及所用仪器如图2所示。将土样干燥粉碎后过2 mm标准筛。试验共设置剑麻纤维掺量和界面粗糙度2组变量。纤维掺量 P 分别控制为0%、0.4%、0.8%、1.2%,界面粗糙度 R 分别控制为0、1.5、2.5、6.5 mm。将固定掺量的剑麻纤维和处理后的黏土颗粒进行混合,然后与混凝土模块压实,制得高20 mm,直径61.8 mm,密度1.7 g/cm³,含水率25%的直剪试样。把试样置于25℃恒温箱内湿养48 h。试验采用仪器为改进型应变式直剪仪,可以使剪切过程中直剪样的剪切面正好位于基材与混凝土模块的接触界面上。剪切试验施加各法向应力分别为100、200、300、400 kPa,剪切加载速率为1.2 mm/min。

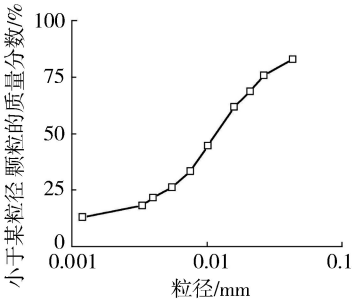


图1 试验用土的粒径分布曲线
Fig.1 Particle size curve of test soil

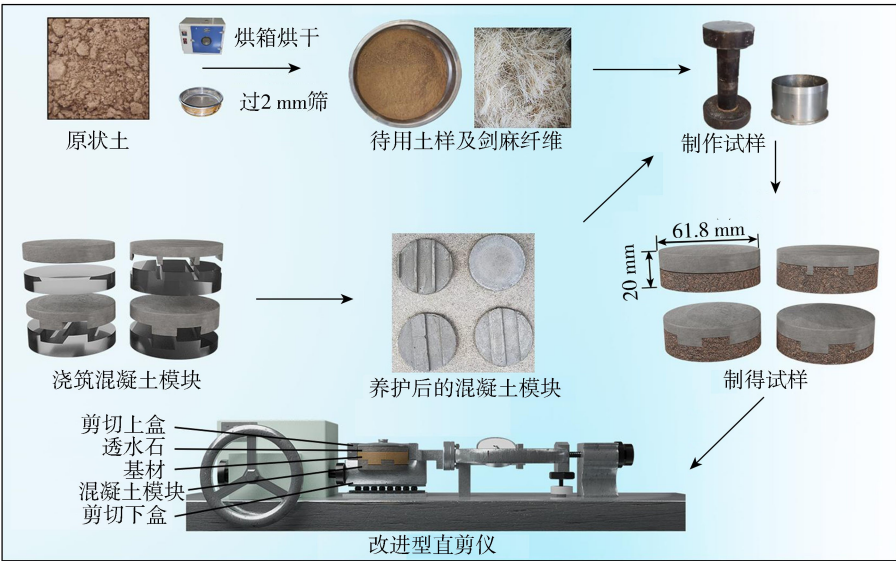


图 2 试验流程及所用仪器

Fig. 2 Experiment procedure and instrumentation

2 试验结果与分析

通过改进直剪试验对剑麻纤维复合基材土-岩界面的剪切力学性能进行研究,得出 P 、 R 和界面剪切强度间的关系如表 1 所示。

表 1 界面的剪切强度指标

Table 1 Shear strength parameters of each sample interface

试样编号	峰值剪切应力/kPa				$c/$ kPa	$\varphi/(^{\circ})$
	$\sigma = 100$ kPa	$\sigma = 200$ kPa	$\sigma = 300$ kPa	$\sigma = 400$ kPa		
P0-R0	36	60	86	122	5.0	15.85
P0-R1.5	38	71	100	131	8.0	17.12
P0-R2.5	49	84	125	161	10.5	20.66
0-R6.5	57	105	143	178	20.5	21.85
P0.4-R0	57	86	118	150	25.0	17.28
P0.4-R1.5	62	112	140	178	29.0	20.61
P0.4-R2.5	67	119	149	182	35.5	20.56
P0.4-R6.5	79	126	166	205	39.5	22.68
P0.8-R0	63	87	121	154	29.5	17.07
P0.8-R1.5	72	106	145	183	33.5	20.41
P0.8-R2.5	78	111	156	198	34.5	22.05
P0.8-R6.5	90	132	185	239	36.5	26.57
P1.2-R0	53	75	115	148	16.5	18.00
P1.2-R1.5	59	107	137	176	24.5	20.86
P1.2-R2.5	70	111	143	200	25.5	22.88
P1.2-R6.5	74	120	160	209	29.5	23.99

注:试样编号 P0-R1.5 代表 $P=0\%$ 、 $R=1.5$ mm; σ 为法向应力, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

2.1 应力-应变曲线分析

由图 3 可知,在试验选用剪切方案下, $R=0$ mm 时,界面应力-应变曲线在各级法向应力下呈现软化特征; $R\neq 0$ mm 时,界面应力-应变曲线呈现硬化特征。

由图 3(a) ~ (d) 可以发现,相同的法向压力下, R 越大,峰值剪切应力越大。这初步说明,增加界面的粗糙度能够提高界面的剪切力学性能;对比图 3(d) ~ (g) 可以发现, $P\leq 1.2\%$ 时,相同的法向压力下, P 越大,峰值剪切应力越大。

在不同纤维掺量和界面粗糙度下,应力-应变曲线变化情况可归纳为 3 阶段:①弹性变形阶段。剪切起始阶段,混凝土模块上层土体受法向应力影响,密度不断增大,以抵抗剪切形变。此阶段,剪切应力与剪切位

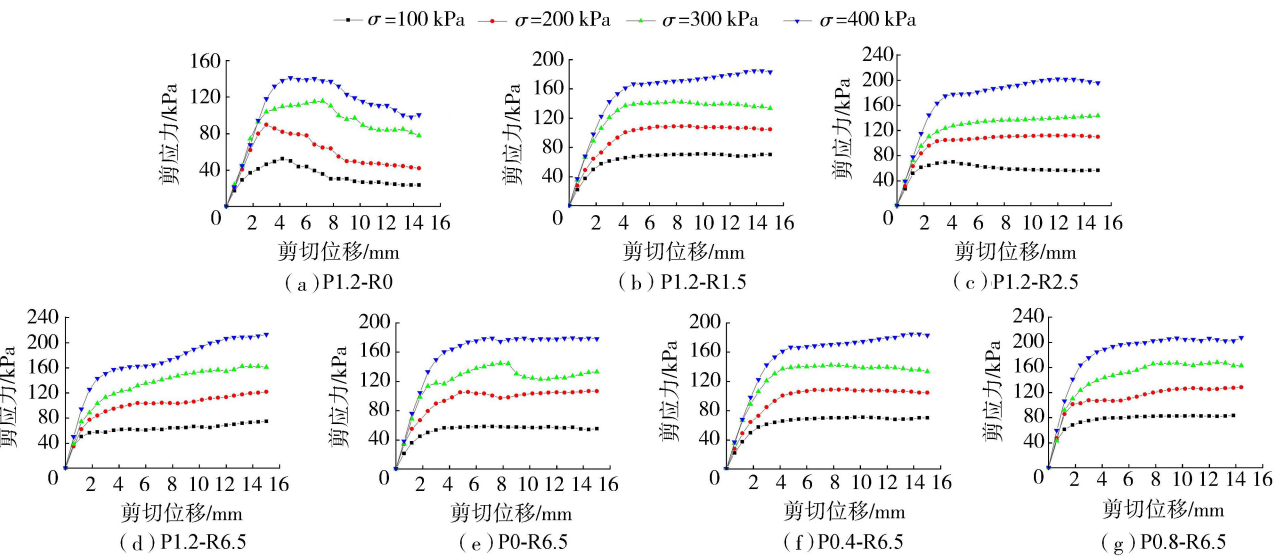


图 3 不同条件下界面的剪切应力-应变曲线

Fig. 3 Shear stress-strain curves of the interface under different conditions

移呈线性关系;②弹塑性变形阶段。随着剪切位移的增加,界面间作用与纤维强化作用的参与程度继续增加,界面间剪切应力持续增大,但剪切应力关于剪切位移的增长速率逐步降低;③破坏变形阶段。剪切位移继续增大,界面间作用与纤维强化作用逐渐发挥充分,界面处开始出现剪切破坏。 $R=0\text{ mm}$ 的平坦界面缺少宏观嵌合结构,界面变形破坏易沿界面所处二维平面开展。因此随着剪切继续,界面剪切应力达到峰值后开始降低,应力-应变曲线呈现出软化特征; $R\neq 0\text{ mm}$ 的粗糙界面为土体与混凝土模块耦合提供的宏观嵌合结构阻挡了土体直接沿界面发生平移破坏,并调动界面上层薄层土体参与抵抗剪切变形,在试验所采取的高法向应力下,应力-应变曲线呈现出非软化特征。

2.2 界面粗糙度与纤维掺量对界面剪切强度的影响

图 4(a) ~ (d) 可知,增加界面的粗糙度可以提高界面的剪切强度; R 从 0 mm 增加至 6.5 mm ,界面的剪切强度提升了 $21\sim 85\text{ kPa}$,提升幅度为 $39\%\sim 75\%$ 。由图 4(e) ~ (h) 可知,在不同粗糙度下,当 $P\leq 0.8\%$,增加 P 可以提高界面的剪切强度,随着 P 从 0% 增长至 0.8% ,界面的剪切强度提升了 $27\sim 61\text{ kPa}$,提升幅度为 $25\%\sim 89\%$ 。当 $P>0.8\%$ 时,剑麻纤维对界面剪切力学性能的强化效果会下降。以图 4(h) 为例, $P=1.2\%$ 时,各级法向应力下界面的峰值剪切应力分别为 $74、120、160、209\text{ kPa}$,小于纤维掺量 $P=0.8\%$ 时的峰

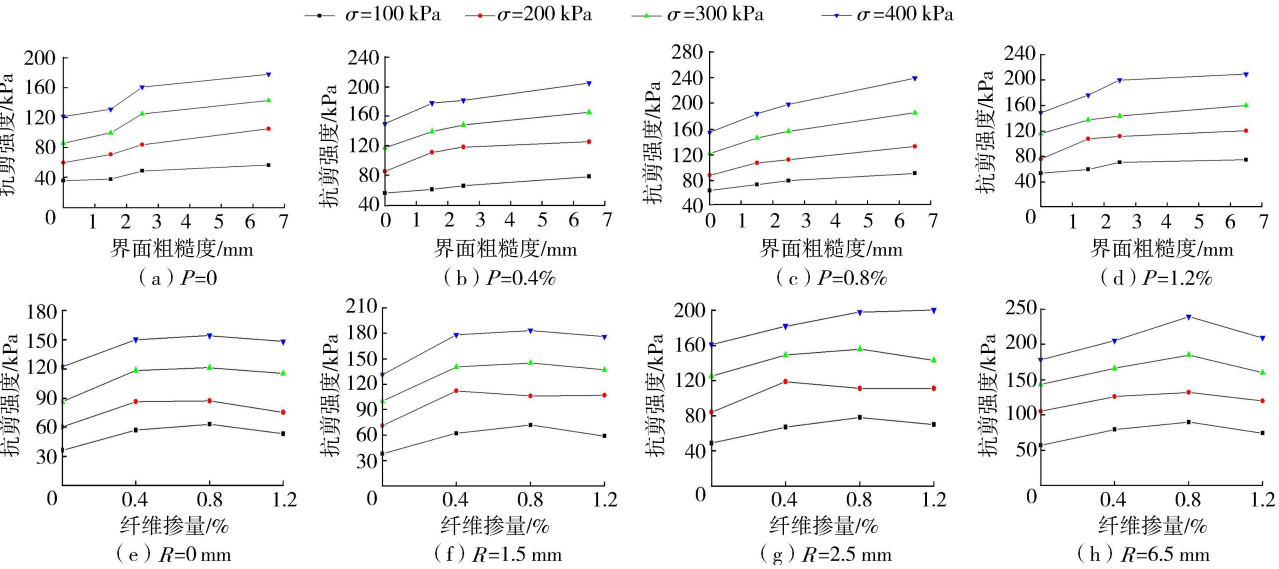


图 4 界面粗糙度与纤维含量对界面剪切强度的影响

Fig. 4 Influences of interface roughness and fiber content on interfacial shear strength

值剪切应力 90、132、185、239 kPa。这说明当 P 达到 1.2% 时,界面的剪切强度会降低。同时在 0.8% ~ 1.2% 区间存在一个优势掺量,可使剑麻纤维对界面峰值剪切应力有最佳强化效果。

2.3 界面粗糙度对界面黏聚力与内摩擦角的影响

图 5(a) 表明提高 R 可以提高界面的黏聚力。以 $P=0.4\%$ 为例, R 从 1.5 mm 增加到 6.5 mm,对应的黏聚力分别为 29.0、35.5、39.5 kPa,比 $R=0$ mm 界面的黏聚力分别提高了 4.0、10.5、14.5 kPa。同时,对比 $P=0\%$ 未加筋土体和 $P\neq 0\%$ 的加筋土体,黏聚力关于 R 的增长关系表现出不同的形式。以黏聚力增量与界面粗糙度变化区间的无量纲比值为黏聚力增长速率。 $P=0\%$ 时,粗糙度 0 ~ 1.5 mm、1.5 ~ 2.5 mm、2.5 ~ 6.5 mm 对应的黏聚力增长速率分别为 2、2.5、2.5,表明 $P=0\%$ 时,黏聚力随 R 增加呈近均匀增长趋势; $P\neq 0\%$ 时,纤维掺量 P 为 0.4%、0.8% 和 1.2% 下粗糙度 0 ~ 2.5 mm 区段对应的黏聚力增长速率分别为 4.2、2、3.6。纤维掺量 P 为 0.4%、0.8% 和 1.2% 下 2.5 ~ 6.5 mm 对应的黏聚力增长速率分别为 1、0.5、1。表明 $P\neq 0\%$ 时,界面黏聚力关于 R 的增长可划分为 0 ~ 2.5 mm 的陡增区段和 2.5 ~ 6.5 mm 的缓增区段。

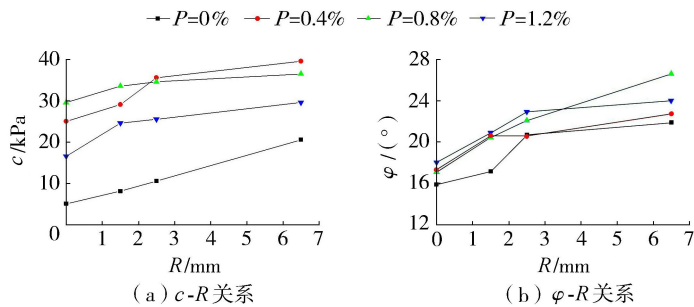


图 5 界面粗糙度对界面黏聚力和内摩擦角的影响

Fig. 5 Effects of interface roughness on cohesion and internal friction angle of interface

图 5(b) 表明提高 R 可以提高界面的内摩擦角。以 $P=0.8\%$ 为例, R 从 1.5 mm 增加到 6.5 mm,对应的内摩擦角分别为 20.41°、22.05°、26.57°,比 $R=0$ mm 界面的内摩擦角分别提高了 3.34°、4.98°、9.50°。

粗糙界面主要通过土-混凝土接触面积和宏观起伏体保证界面间的剪切力学性能。粗糙界面间的黏聚力主要来自于 2 个方面,一是土中水对界面上异相颗粒间的吸附力,二是接触面过渡带内土体的黏聚力^[8,19]。界面的内摩擦角主要来自界面间土颗粒与混凝土骨料颗粒间的摩擦啮合作用。随着 R 的增大,界面上土颗粒与混凝土骨料颗粒之间的接触面积增大,界面上起伏体调动上层土体抵抗剪切变形的能力也随之增强。界面间的黏聚力和内摩擦角均随着 R 的增大而提高。同时 R 存在一最优质值,可使界面黏聚力达到最大。剑麻纤维强化了接触面过渡带内土体的剪切力学性能,因此 R 对无纤维参与的界面和有纤维参与的界面的强化表现为 2 种模式。对于加入纤维的界面黏聚力关于 R 的增长关系, R 的最优值出现在较小区间(0 ~ 2.5 mm)。

2.4 纤维掺量对界面黏聚力与内摩擦角的影响

图 6(a) 表明剑麻纤维的加入可明显影响界面的黏聚力,且存在一最优掺量可使界面的黏聚力达到最大,在 P 小于最优掺量时,随着 P 增加,界面间黏聚力增大。当 P 大于最优掺量时,随着 P 增加,界面间黏聚力减小。不同 R 下,剑麻纤维的最优掺量分布区间不同。对于 $R=0$ mm 和 $R=1.5$ mm,剑麻纤维最优掺量在 0.8% ~ 1.2% 区间;对于 $R=2.5$ mm 和 $R=6.5$ mm,剑麻纤维最优掺量在 0.4% ~ 0.8% 区间。

图 6(b) 表明当纤维掺量 $P\leq 0.8\%$ 时,界面内摩擦角会随着 P 的增加而增大,当纤维掺量达到 1.2% 时,界面的内摩擦角提高幅度会降低。纤维掺量 $P=0.8\%$ 时,各 R 下界面的内摩擦角达到 17.07°、20.41°、22.05°、26.57°,而 P 提高到 1.2% 时,各 R 下界面的内摩擦角分别为 18.00°、20.86°、22.88°、23.99°。说明提高 P 可以提高界面的内摩擦角,而当掺量超过 0.8% 时,纤维对内摩擦角的强化效率会发生下降。

界面间黏聚力主要是由接触面过渡带内土体的黏聚力提供,界面间内摩擦角由接触面间土颗粒与混凝土骨料颗粒间的啮合摩擦提供。在达到最优掺量之前,接触面过渡带内土体的剪切力学性能随着 P 的增加而增大,因此界面的黏聚力随着 P 的增加而提高。剑麻纤维探出基材,粗糙的纤维侧表面和尖锐的纤维两端参与到界面间异相颗粒间的接触摩擦作用,能在一定程度上(2.15° ~ 6.83°)影响界面的内摩擦角变化,但影响程度有限。

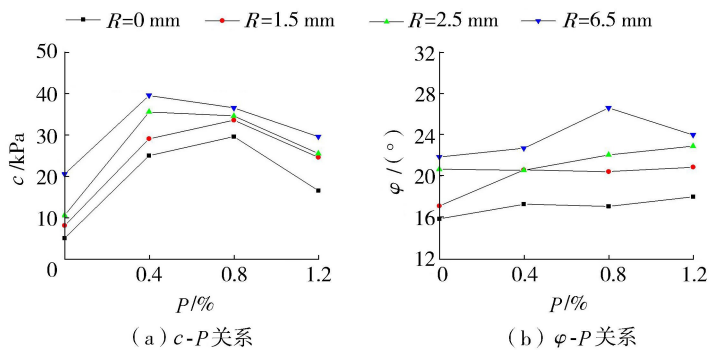


图 6 界面粗糙度与剑麻纤维掺量对界面内摩擦角影响

Fig. 6 Influences of interface roughness and sisal fiber concentration on internal friction angle of interface

3 机理分析

土-混凝土界面上下部分之间为不同介质,具有显著的各向异性。土-混凝土界面的剪切力学性能是界面上部土体内土颗粒黏聚摩擦、土颗粒与混凝土骨料颗粒挤压咬合、土体与混凝土模块的宏观起伏结构间接接触咬合作用的统一表现(图 7)。以上作用的相对变化决定土-混凝土界面的剪切力学性能。 R 对界面剪切强度特性的影响主要体现在两方面:①一定范围内增大的 R 可以明显增大黏土基材与混凝土模块之间的接触面积,提高了黏土颗粒与混凝土微骨料颗粒之间的接触耦合机会;②接触面粗糙起伏程度的增大为土-岩耦合提供了明显的宏观嵌合结构。具有明显粗糙形态的接触面的剪切变形破坏不仅局限于在界面上,同时可能会发生在界面上层一定厚度的土体之中。且上层土体受影响范围和程度与接触面的宏观粗糙程度密切相关。

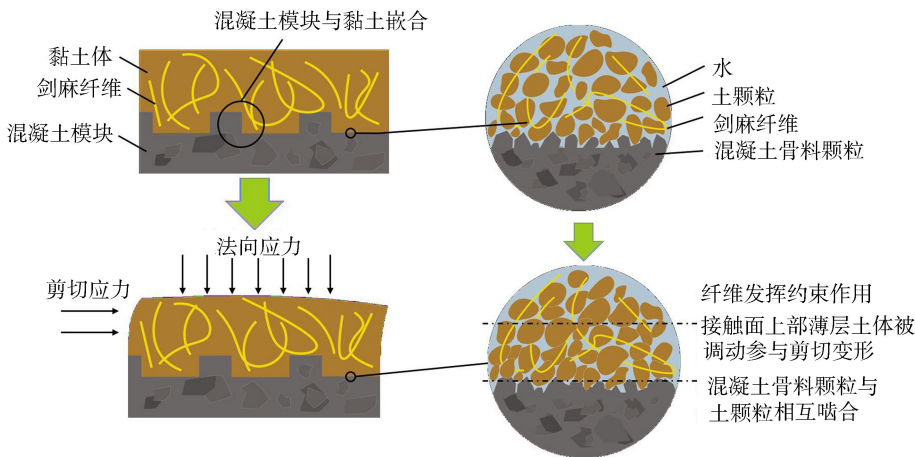


图 7 土-混凝土接触形式
Fig. 7 Contact forms of soil-concrete interface

图 8 为纤维与黏土颗粒之间的微观接触关系。剑麻纤维与黏土混合后呈三维随机态分布于黏土体之间,通过交织作用、扩散作用、固定作用提高界面的剪切力学特征。

a. 交织作用。剑麻纤维是一种柔性纤维材料,同时具有粗糙的侧表面。将剑麻纤维充分混合于土体中后,剑麻纤维在土颗粒孔隙间相互交错接触,不同纤维之间搭接交织,在纤维交织点上纤维的粗糙侧表面发挥摩擦阻作用,使得纤维在土体内相互形成三维网络结构(图 8(a))。加筋后的土体在横向剪切作用下发生剪切变形时,纤维相互交织形成的网络结构能协助抵抗土体的剪切形变。但是如果纤维的掺量过多,在混入土体过程中就会出现纤维在粗糙侧表面摩擦作用下相互团聚的现象,纤维团聚体会在土体间形成软弱部位,从而显著降低土体的剪切力学性能。

b. 扩散作用。剑麻纤维均匀地分布于土颗粒孔隙中,相邻的纤维间存在许多接触点(图 8(b)),加筋土在外荷载作用下发生变形时,只要一个接触点受力发生相对错动,其他相邻的接触点便会阻碍土颗粒位移错动的发展,形成了单根纤维发生错动,其他交错的纤维也有受力分担,且这种受力分担通过交织点持续扩散

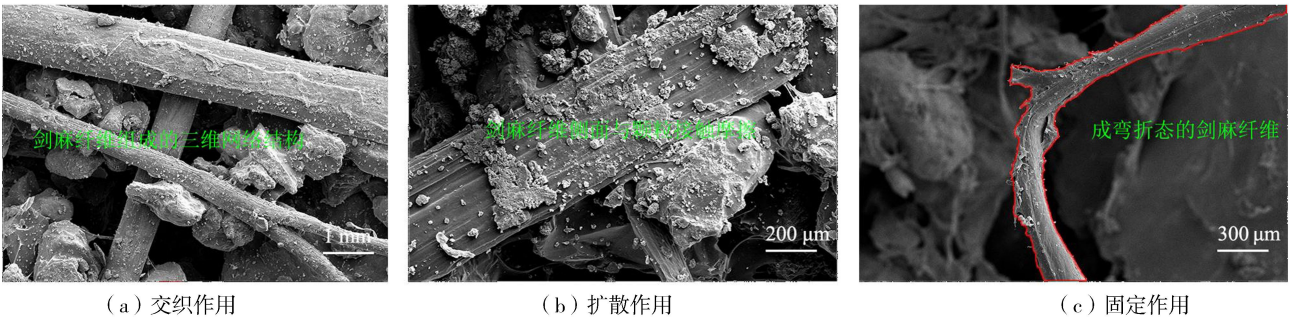


图 8 剑麻纤维改良土体的电镜照片

Fig. 8 SEM images of soil improved by sisal fiber

传递,最终形成“牵一发而动全身”共同抑制土体的变形,从而提高了加筋土体的强度。

c. 固定作用。在合适掺量下,剑麻纤维均匀分布于土体之中,在土颗粒孔隙交织起较为完整的三维网络结构。同时剑麻作为一种柔性材料,可以在土颗粒空隙之间实现弯曲转折(图 8(c)),固定黏土的团聚土颗粒,达到纤维与土颗粒之间的互锁。在剪切荷载作用下,纤维与土颗粒之间的互锁作用对土体的剪切变形起到限制作用。

4 结 论

a. 掺入剑麻纤维和增加界面粗糙度可以提高土-混凝土界面的剪切力学性能。掺量为 0.4%、0.8%、1.2% 的界面剪切强度均高于素土基材的土-混凝土界面;随着 R 从 0 mm 增加到 6.5 mm,界面剪切强度不断增加。纤维存在优势掺量,使界面剪切强度达到最大。

b. 粗糙界面主要通过提供土-混凝土接触面积和宏观起伏体保证界面间的剪切力学性能。界面的黏聚力与内摩擦角随 R 的增加而增大。界面黏聚力关于 R 的增长关系中存在一最优 R 使界面黏聚作用达到最佳效果。剑麻纤维的掺入使 R 的最优值出现在较小区间(0~2.5 mm)

c. 剑麻纤维主要通过固定作用、扩散作用、交织作用强化界面过渡带间土体的力学性能以强化界面的剪切力学性能。剑麻纤维掺入可提高界面黏聚力,存在一最优掺量使剑麻对界面黏聚力的强化效果达到最大。不同界面粗糙度 R 下,剑麻纤维的最优掺量分布区间不同。对于 $R=0$ mm 和 $R=1.5$ mm,剑麻纤维最优掺量在 0.8%~1.2% 区间;对于 $R=2.5$ mm 和 $R=6.5$ mm,剑麻纤维最优掺量在 0.4%~0.8% 区间。

参考文献:

[1] 孟国涛,徐卫亚,郑文棠,等. 岩质高边坡开挖变形的三维离散单元法分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(4):393-397. (MENG Guotao,XU Weiya,ZHENG Wentang,et al. Analysis of excavation-induced high rock slope deformation with 3D discrete element code[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2007,35(4):393-397. (in Chinese))

[2] 王盛年,石崇,陈鸿杰,等. 江坪河水电站高陡边坡落石运动分析及防护措施[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(2):162-167. (WANG Shengnian,SHI Chong,CHEN Hongjie,et al. Analysis of movement of rockfall from high and steep slopes at Jiangping River Hydropower Station and protective measures[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(2):162-167. (in Chinese))

[3] 杜家论,范建军,王颖轶,等. 敏感因素劣化对导堤边坡稳定性影响的数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(6):525-530. (DU Jialun,FAN Jianjun,WANG Yingyi,et al. Numerical simulation of effect of sensitivity factor degradation on stability of jetty slope[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(6):525-530. (in Chinese))

[4] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报,2000(4):36-38. (ZHANG Junyun,ZHOU Depei,LI Shaocai. Brief introduction of study on slope ecoengineering for rock slope protection[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2000(4):36-38. (in Chinese))

[5] 许文年,叶建军,周明涛,等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术,2004(10):50-52. (XU Wennian, YE Jianjun,ZHOU Mingtao,et al. Several problems of vegetation technology for protecting slopes using vegetation-growing concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2004(10):50-52. (in Chinese))

[6] 方文,杨勇兵. 习近平绿色发展思想探析[J]. 社会主义研究,2018(4):15-23. (FANG Wen,YANG Yongbing. Analysis of XI Jinping green development thoughts [J]. Socialism Studies,2018(4):15-23. (in Chinese))

[7] 杨烜宇,王闫超,陈辉,等. 模拟不同形态土-岩界面的直剪试验[J]. 科学技术与工程,2020,20(5):2030-2036. (YANG Xuanyu,WANG Yanchao,CHEN Hui,et al. Direct shear test simulating soil-rock interface with different forms[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(5):2030-2036. (in Chinese))

[8] 丁瑜,杨奇,夏振尧,等. 生态护坡基材土-岩接触面原位剪切试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(增刊2):383-388. (DING Yu,YANG Qi,XIA Zhenyao,et al. In-situ shear tests on base material soil-rock interface in ecological slope protection system [J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(Sup2):383-388. (in Chinese))

[9] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique,1961,11(4):339-353.

[10] CLOUGH G W,DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanic Sand Foundations Division,ASCE,1971,97(12):1657-1672.

[11] 殷宗泽,朱泓,许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报,1994,16(3):14-22. (YIN Zongze,ZHU Hong,XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1994,16(3):14-22. (in Chinese))

[12] 高俊合,于海学,赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报,2000,33(4):42-46. (GAO Junhe,YU Haixue,ZHAO Weibing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(4):42-46. (in Chinese))

[13] 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 Baosheng,TANG Chaosheng,LI Jian,et al. Advances in engineering properties of fiber reinforced soil[J]. Journal of Engineering Geology,2013,21(4):540-547. (in Chinese))

[14] 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 Deyin,TANG Chaosheng,LI Jian,et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(10):1933-1940. (in Chinese))

[15] 余伟. 纤维改性膨胀土工程性质的试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.

[16] 刘鹭. 冻融作用下秸秆纤维加筋土力学特性研究[J]. 岩土工程技术,2022,36(3):243-247. (LIU Lu. Effects of freeze-thaw cycles on the strength of straw fiber-reinforced soil [J]. Geotechnical Engineering Technique,2022,36(3):243-247. (in Chinese))

[17] 唐皓,李华华,刘驰洋,等. 棕榈加筋黄土剪切强度特性及微观结构[J]. 科学技术与工程,2020,20(19):7832-7837. (TANG Hao,LI Huahua,LIU Chiyang,et al. Shear strength characteristics and meso-mechanism of palm-reinforced loess[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(19):7832-7837. (in Chinese))

[18] 樊科伟,严俊,刘冬杰,等. 木质素纤维改性季冻区膨胀土强度特性与微观结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):326-334. (FAN Kewei,YAN Jun,LIU Lingjie,et al. Study on strength characteristics and microstructure of expansivesoil treated with lignin fibers in seasonal frozen area[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2022,53(1):326-334. (in Chinese))

[19] 卢廷浩,王伟,王晓妮. 土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006(1):82-85. (LU Tinghao,WANG Wei,WANG Xiaoni. Experimental study on soil-structure contact surface behavior by improved direct shear tests [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science),2006(1):82-85. (in Chinese))

[20] ZHANG Q. Mechanical behavior and constitutive relation of the interface between warm frozen silt and cemented soil[J]. Transportation Geotechnics,2021,30:100624.

[21] 何美香,王恩过. 剑麻纤维化学脱胶技术的探讨[J]. 湛江师范学院学报,2011,32(6):115-118. (HE Meixiang,WANG Enguo. Study on degumming technology of sisal fiber[J]. Journal of Zhanjiang Normal College,2011,32(6):115-118. (in Chinese))

[22] VELA S M,FERREIRA J W S,CASAGRANDE M D T. Effect of surface treatment on natural aging and mechanical behavior of sisal fiber-reinforced sand composite[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2022,34(6):06022001.

[23] THOMAS B C,JOSE Y S. A study on characteristics of sisal fiber and its performance in fiber reinforced concrete[J]. Materials Today Proceedings,2022,51(P1):1238-1242.

[24] BING W. Mechanical,biodegradation and morphological properties of sisal fiber reinforced poly(Lactic Acid) Biocomposites[J]. Journal of Macromolecular Science:Part B,2019,58(2):275-289.