

文章编号:1673-9469(2021)04-0044-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.04.007

剑麻纤维复合黏土基材与底面力学耦合特性试验研究

卢洪宁¹, 胡国长², 朱晓勇², 刘瑾^{1*}, 薛建², 张发明¹, 王梓¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省山水资源开发集团有限公司, 江苏 南京 210001)

摘要: 土-岩界面是岩质边坡容土修复中常见的二元地质结构, 基于纤维加筋技术, 对纤维复合黏土基材与底面耦合稳定性展开研究, 通过开展滑动摩擦试验, 研究含水率、剑麻纤维含量等变量对接触界面土体滑动过程的影响, 与微观分析相结合, 探究剑麻纤维对黏土的改良机理。研究结果表明: (1) 随含水率的增加, 试样的动摩擦系数平均值呈先增大后减小的变化趋势; 临界摩擦角 α 均随试样含水率的提高先增大到最大值, 而后呈减小的趋势。当试样含水率位于塑限、液限之间时, 存在最优含水率值使动摩擦系数与临界摩擦角达到最大值, 此时黏土试样的黏附效果最优; (2) 随着纤维掺量由0%增至1.2%, 试样的动摩擦系数平均值及临界摩擦角呈先增大后减小的变化趋势; 剑麻纤维的掺入能有效提高试样抗滑破坏能力, 但会随着纤维掺量增加加固效果会减弱, 试验中剑麻纤维掺量为0.8%时纤维复合黏土与亚克力板接触界面的耦合效果最佳。

关键词: 岩质边坡; 纤维复合黏土; 滑动摩擦试验; 耦合特性; 微观分析

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

Experimental Study on Coupling Characteristics of Contact Surface Between Fiber Composite Clay and Subface

LU Hongning¹, HU Guochang², ZHU Xiaoyong², LIU Jin^{1*}, XUE Jian², ZHANG Faming¹, WANG Zi¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Jiangsu Shanshui Resources Development Group Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210001, China)

Abstract: The soil-rock interface is a common binary geological structure in the remediation of rock slopes. Based on the fiber reinforcement technology, this paper studies the coupling stability between the fiber composite clay substrate and the bottom. Through the sliding friction test, the influence of moisture content, sisal fiber content and other variables on the sliding process of the soil at the contact interface is studied. Combined with the micro analysis, the improvement mechanism of sisal fiber on clay is explored. The main research results are as follows: (1) With the increase of moisture content, the average value of dynamic friction coefficient of the sample increases first and then decreases. The critical friction angle α increases to the maximum value first and then decreases with the increase of moisture content. When the moisture content of the sample is between the plastic limit and the liquid limit, there is an optimal moisture content value to maximize the dynamic friction coefficient and the critical friction angle, and the adhesion effect of the clay sample is the best. (2) With the increase of fiber content from 0% to 1.2%, the average dynamic friction coefficient and the critical friction angle of the sample increase first and then decrease. The addition of sisal fiber can effectively improve the sliding failure resistance of the sample, but the reinforcement effect will be weakened with the increase of fiber content. The coupling effect of fiber composite clay and acrylic plate contact interface is the best when the content of sisal fiber is 0.8%.

收稿日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472241); 江苏省地质矿产勘查局科研项目(2019KY13)

作者简介: 卢洪宁(1997-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 从事环境地质工程方面的研究。

* 通讯作者: 刘瑾(1983-), 女, 福建漳州人, 博士, 教授, 从事工程地质领域的研究。

Key words: rocky slope; fiber composite clay; sliding friction test; coupling stability; microscopic analysis

随着我国基础设施建设规模逐渐扩大,大量公路、铁路、水利、矿业等工程在施工过程中,必然出现大量不合理挖填的现象,从而对天然边坡造成不同程度的扰动^[1-2]。在自然应力及工程荷载的共同作用下,此类边坡极易诱发滑坡地质灾害。客土喷播技术通过高压喷播设备将客土基材喷附于岩质边坡表面,由于客土基材与岩体性质不同,在客土基材与岩体接触处形成一个对边坡稳定性起控制作用的薄弱面,在实际工程中客土基材沿此界面发生滑动、位移及脱落^[3-4]。因此,对客土自身物理力学性质、客土-岩体接触面剪切力学特性进行研究具有重要的工程指导意义。

土体-岩体接触面常常是导致边坡发生滑移错动的薄弱面。徐彬等^[5]通过直剪、三轴试验研究含水量、试样密度与发育裂隙等参数对膨胀土强度的影响。明成涛等^[6]以某红黏土边坡为研究对象,分析其滑塌破坏的原因在于连续降水导致红黏土的强度显著降低。李鹏等^[7]对某土岩界面滑坡体进行研究,分析其形成原因并得出土-岩界面是这类堆积层滑坡主控滑动面的结论。因此,客土基材的选择成为目前工程实际应用的热点研究对象,已有大量学者就此问题展开广泛研究。舒安平等^[8]指出基材材料配置合理对客土喷播的生态恢复效果存在影响。吕宋等^[9]认为纤维加筋作用及土壤团粒化使基质层能良好地附着于边坡表面。吕大伟等^[10]以木质纤维作为稳定剂,高分子材料作为粘结剂,提高客土基质层与边坡坡面的黏附性能。王丽等^[11]开展系列试验得出植物发芽率、覆盖度、基质孔隙率及抗冲刷性能呈现先上升后下降的变化趋势。李广信等^[12]对纤维加筋土开展拉伸、剪切、断裂韧度测定及水力劈裂等系列试验,研究成果表明纤维加筋能大幅度提高黏土的抗剪强度、塑性及韧性^[13-16]。

因此,本文基于纤维加筋技术,对纤维复合黏土与亚克力板界面耦合稳定性展开研究,采用室内试验与微观分析相结合的方法,研究不同含水率、剑麻纤维含量等变量对基材滑动过程的影响,根据对视频图像的分析处理和位移-时间曲线的拟合可得出临界摩擦角与接触界面动摩擦系数,运用扫描电镜试验观察剑麻纤维与土颗粒间的相互作用,对探究剑麻纤维对黏土的改良作用及对基材-接触界面耦合特性,进一步解决岩质边坡表层

客土的稳定性问题具有重要的指导意义。

1 试验装置与材料

1.1 试验材料

本次试验所选用的土样为南京地区某边坡的下蜀土(图1),呈黄褐色,质地均匀,属于黏土,其基本物理性质见表1。黏土是由地表硅铝酸盐矿物经过长期风化作用形成,其颗粒大多呈片状晶体或非晶体结构,由于蒙脱石、伊利石等黏土矿物的亲水性,使黏土具有孔隙比大、弱膨胀性、可塑、触变、失水易收缩开裂等特性,其中弱膨胀性主要表现在黏土遇水后体积发生膨胀,结构改变,抗剪切强度降低。黏土内部垂直节理发育,土体易沿垂直节理发生劈裂。另外,由于黏土含钙质结核,对土体的结构强度影响较大,对土体的稳定性易产生不利影响。



图1 试验所用土样制备流程

Fig. 1 Preparation process of soil samples used in the test

表1 试验所用土样基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of soil samples used in the test

容重 γ $/(kN \cdot m^{-3})$	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p	天然含水 率 ω /%
2.71	38.3	20.1	18.2	18.3

试验中采用的纤维为剑麻纤维,经加工裁剪其长度约为2 cm,如图2所示,其物理力学参数见表2。剑麻纤维是一种天然植物纤维,由剑麻叶片通过机械敲击、高温浸渍、冲洗、蒸煮等处理工艺后得到^[17]。剑麻纤维色泽呈米白色,质地坚韧,弹性大,拉力强,耐摩擦性、耐腐蚀好,绿色环保无污染,在渔业、航海业、矿业、石油业、运输业、冶金业等领域应用广泛。

表2 剑麻纤维物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of sisal fiber

平均直 径/mm	长度 /cm	密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	杨氏模 量/GPa	断裂拉 伸强度 /MPa	断裂拉 伸率/%
0.2	2.0	0.75~ 10.70	10.94~ 26.70	227.8~ 1 002.3	2.01~ 2.74



图2 客土改良材料——剑麻纤维

Fig. 2 Improved material of guest soil-sisal fibers

1.2 试样制备及试验过程

为深入研究黏土含水率、剑麻纤维及其掺量对黏土-边坡界面耦合特性的影响,开展滑动摩擦试验,分析含水率、剑麻纤维等对黏土试样与接触界面耦合特性的影响程度及作用规律。试样制作过程制备纯黏土、纤维加筋黏土共20样,对其编号为S1—S20,其制备方法及步骤如下:

(1) 纯黏土试样制备过程。首先,将取得的土样放至烘箱在105℃条件下烘干,之后将干燥土样碾碎,过2mm筛备用。然后,将试样制备模具内壁均匀涂抹凡士林,并放置在水平亚克力面板上一固定初始位置。在制备纯黏土试样(S1—S5)时,根据试验方案设定的含水率参数,称取定量烘干土样,与蒸馏水混合后充分搅拌形成均匀的黏土泥浆。随后,依据分层制样原则,将一漏斗置于模具盒上部一定高度处,将所制得的质量为875g的黏土泥浆通过这一漏斗分5次、缓慢地倾倒入模具盒中,使试样在自身重力的作用下自然堆积,注意倾倒过程中应避免土样内部产生较大孔隙。堆积结束后刮平试样表面并封口静置5min,使土样稳定且保证其底面与亚克力板充分接触。

(2) 改良黏土试样制备过程。在开展纤维加筋黏土滑动摩擦试验时,设定试样含水率分别为25%、30%、35%、40%、45%,剑麻纤维含量分别为0%、0.4%、0.8%、1.2%。在制备纤维加筋黏土试样(S6—S20)时,根据试验设计的纤维含量称取定量的剑麻纤维,将剑麻纤维、黏土及蒸馏水混合均匀后,再分5次、缓慢地通过模具上部一定高度处的漏斗倾倒入模具盒中。在堆积结束后刮平纤维加筋黏土试样表面并封口静置5min,使得试样稳

定且保证其底面与亚克力面板充分接触。

本试验中,纤维含量(C_F)定义为剑麻纤维质量与干黏土质量的比值,即:

$$C_F = \frac{M_F}{M_s} \quad (1)$$

式中: C_F —纤维含量, M_F —剑麻纤维质量, M_s —黏土质量。

2 黏土与接触面耦合特性影响分析

待土样稳定后,从顶部缓慢移除制备模具,转动螺旋千斤顶的摇杆使亚克力面板匀速缓慢抬升,直至试样由静止状态转为向倾斜方向滑动时,停止转动,由电子测角仪读取亚克力面板倾角,记为临界摩擦角 α 。试验中,用数码摄像机对土样的运动过程进行全程记录。逐帧查阅得到的视频资料,对每一帧影像中的位移 S 和时间 t 两组数据分别记录,并以二者作为纵、横坐标,绘制散点分布图,并选择适宜的曲线类型对其进行拟合,从而得到不同试验条件下土样在二元接触界面的滑动位移曲线 $S(t)$ 。

对拟合所得函数 $S(t)$ 求时间 t 的二阶导数,可以计算出土样下滑过程中的拟合加速度 a ^[18]。如图3所示,土样从A点开始下滑,根据牛顿第二定律 $F=ma$,AB段的加速度 a 即为:

$$a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha) \quad (2)$$

式中: α 为亚克力面板倾角,即临界摩擦角; g 为重力加速度,取9.8m/s²; μ 为黏土试样与亚克力面板面之间的动摩擦系数,根据式(2)可以得出:

$$\mu = \tan\alpha - \frac{a}{g\cos\alpha} \quad (3)$$

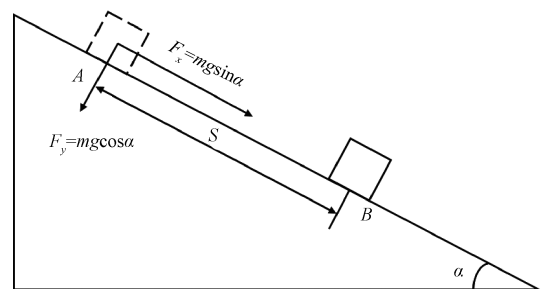


图3 土样滑动加速度分析示意图

Fig. 3 Analysis diagram of sliding acceleration of soil sample

滑动摩擦试验得到位移 S 和时间 t 两组数据,根据所得数据点绘制 $S-t$ 散点分布图,由于 $S-t$ 图像明显存在非线性关系,因此,本文利用函数绘图软件Origin2021对实测数据点进行3阶多项式函

数拟合。对得到的各拟合函数 $S(t)$ 进行二阶求导,可以得到试样下滑过程中的拟合加速度 a ,进而通过式(2)计算得到试样下滑过程中的底面动摩擦系数 μ 。其试验参数及试验结果如表3所示。

2.1 含水率对黏土与接触面耦合特性影响分析

从表3可以看出,当试样含水率为25%、35%时,纯黏土动摩擦系数-时间曲线的斜率为负值,说明试样动摩擦系数随时间的延长而逐渐减小;而当试样含水率为30%、40%及45%时,试样动摩擦系数-时间曲线的斜率为正值,说明试样动摩擦系数随时间的增长而增大,试样下滑所需的力越大,越不容易发生下滑破坏。由表中数据可知,不同含水率下的试样其动摩擦系数-时间曲线斜率的绝对值大小关系为 $S5 > S4 > S3 > S1 > S2$,表明含水率45%的试样其动摩擦系数随时间变化速度最大,而含水率30%的试样其动摩擦系数随时间变化的速度相较而言更缓慢。随试样含水率的提高,纯黏土试样动摩擦系数平均值呈先升高后降低的变化趋势;类似地,纯黏土试样临界摩擦角随含水率的增大呈先增大后减小的变化趋势。

当试样含水率为30%、45%时,纤维加筋试样动摩擦系数随时间的延长而逐渐减小,而当试样含水率为25%、35%及40%时,试样动摩擦系数-时

间曲线的斜率为正值,试样动摩擦系数随时间的增长而增大。表明含水率值在液限及塑限附近时,纤维加筋黏土对动摩擦系数的影响更显著,其原因是黏土含水率在接近液限时,水的表面张力使得试样与接触面之间的黏附力增加,并且黏土颗粒在塑限附近时有更大的摩擦阻力,因此动摩擦系数随时间的增长而逐渐增大。由表3数据可知,当含水率为25%、35%、45%时,动摩擦系数-时间曲线斜率的绝对值大小关系分别为 $S6 > S7, S10 > S11, S14 > S15$,即纤维含量为0.4%的试样的动摩擦系数-时间曲线斜率均大于纤维含量0.8%试样,表明纤维含量0.4%的试样在25%、35%及45%含水率下其动摩擦系数随时间变化速度较纤维含量0.8%的试样大。当含水率为30%和40%时,动摩擦系数-时间曲线斜率的绝对值大小关系分别为 $S9 > S8, S13 > S12$,即纤维含量为0.8%的试样的动摩擦系数-时间曲线斜率均大于纤维含量0.4%试样,表明纤维含量0.8%的试样在30%、40%含水率下其动摩擦系数随时间变化速度较纤维含量0.4%的试样大。在同一含水率下,试样动摩擦系数平均值随纤维添加含量的增加而提高,同样,试样临界摩擦角随纤维添加含量的提高而呈增大趋势。

表3 纤维加筋黏土试样滑动摩擦试验结果

Tab.3 Sliding friction test results of fiber-reinforced clay

试样编号	试样含水率/%	纤维掺量/%	动摩擦系数-时间曲线斜率 $k \times 10^{-6}$	动摩擦系数平均值 $\bar{\mu}$	临界摩擦角 $\alpha/(^{\circ})$
S1	25%	—	-2.69	0.45	24.52
S2	30%	—	2.19	0.64	32.89
S3	35%	—	-1.32	0.54	28.74
S5	40%	—	3.39	0.40	22.20
S4	45%	—	8.73	0.46	25.13
S6	25%	0.4	6.81	0.48	25.97
S7	25%	0.8	2.73	0.49	26.14
S8	25%	1.2	1.36	0.47	25.45
S9	30%	0.4	-2.22	0.68	34.35
S10	30%	0.8	-3.14	0.80	38.84
S11	30%	1.2	-1.50	0.70	35.28
S12	35%	0.4	4.32	0.62	31.80
S13	35%	0.8	1.52	0.73	36.32
S14	35%	1.2	-1.64	0.69	34.92
S15	40%	0.4	7.16	0.49	26.19
S16	40%	0.8	1.03	0.53	28.09
S17	40%	1.2	2.14	0.52	27.58
S18	45%	0.4	-1.33	0.42	22.84
S19	45%	0.8	-6.66	0.42	23.18
S20	45%	1.2	3.31	0.44	23.91

2.2 剑麻纤维掺量对黏土滑移过程的影响分析

在试样沿接触面下滑的过程中,试样与接触界面的耦合特性可以通过其滑移过程的位移-时间曲线来反映。图4是不同含水率下不同纤维掺量试样的位移-时间拟合曲线。从图4中可以看出,试样在滑移过程中一般经历加速下滑阶段和减速下滑阶段。在初始启动阶段,试样在重力、摩擦力等的作用下加速下滑,曲线随时间变化的趋势较陡,而随着时间的延长,试样在下滑过程中逐渐发生变形破坏,其底面与接触界面间的接触面积逐渐增大,且裂隙、微小型断裂面逐渐发育,导致试样底面的粗糙度逐渐提高,位移随时间变化的趋势逐渐趋于平缓,反映出试样底面的黏附力逐渐增强。当试样含水率不变,且下滑时间相同时,纤

维加筋土试样比纯黏土试样滑移的距离更小,且试样的滑动位移随剑麻纤维掺量的增加呈先减小后增大趋势,其中纤维掺量为0.8%时,试样下滑过程的整体时间延长,说明在该纤维掺量下,试样的位移随下滑时间的增长变化较缓。试样含水率为45%时,当试样下滑时间达到6s时,纯黏土试样已结束滑移,位移达到59.69cm,而S18(纤维掺量0.4%)试样的滑移距离达到28.81cm,S20(纤维掺量1.2%)试样下滑22.81cm,S19(纤维掺量0.8%)试样则仅滑移了17.9cm。本文定义试样滑出亚克力面板的时刻为滑移结束时间 t ,试样在滑移过程中的最大速度为滑移峰值速度 V ,纤维加筋土试样的滑移峰值速度和滑移结束时间与含水率的变化关系曲线如图5所示。

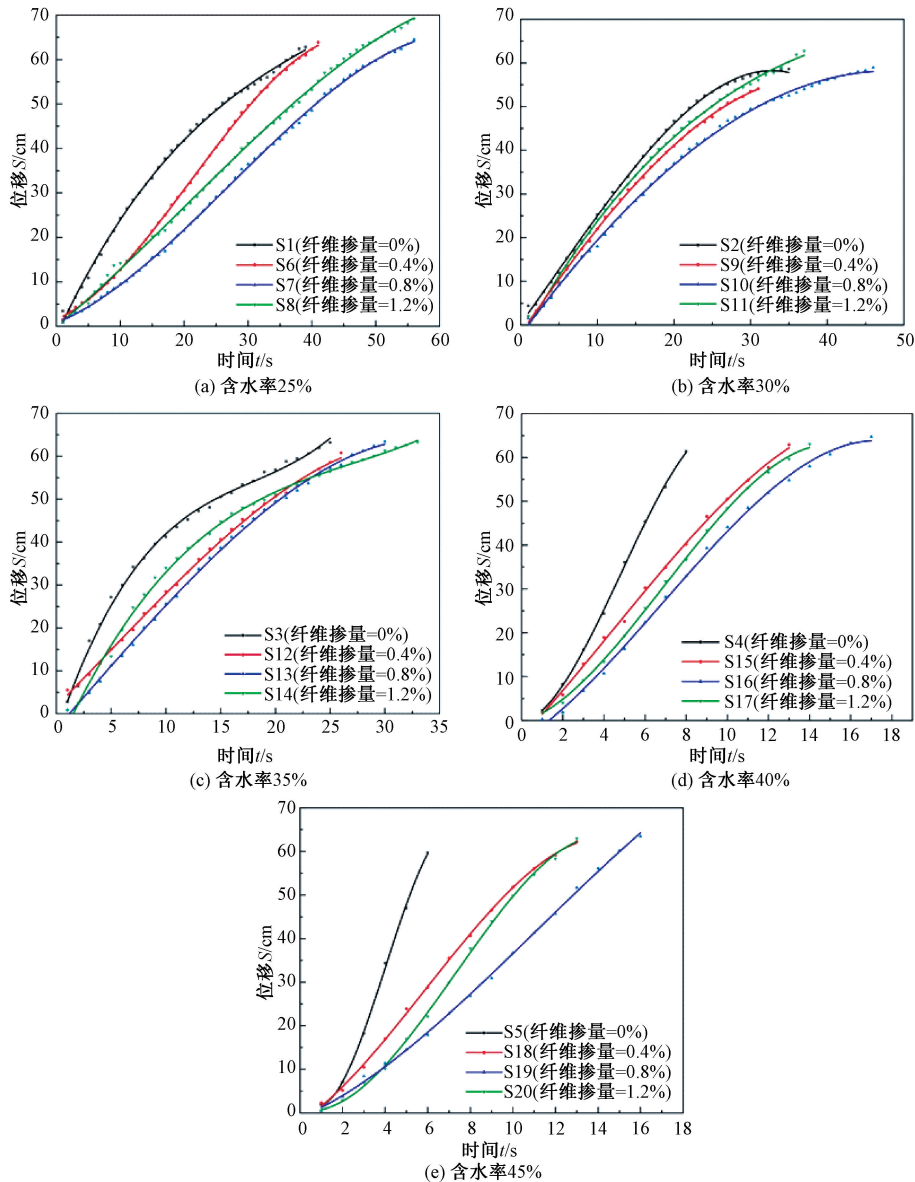


图4 不同纤维掺量试样的位移-时间拟合曲线

Fig. 4 Displacement-time fitting curve of samples with different fiber content

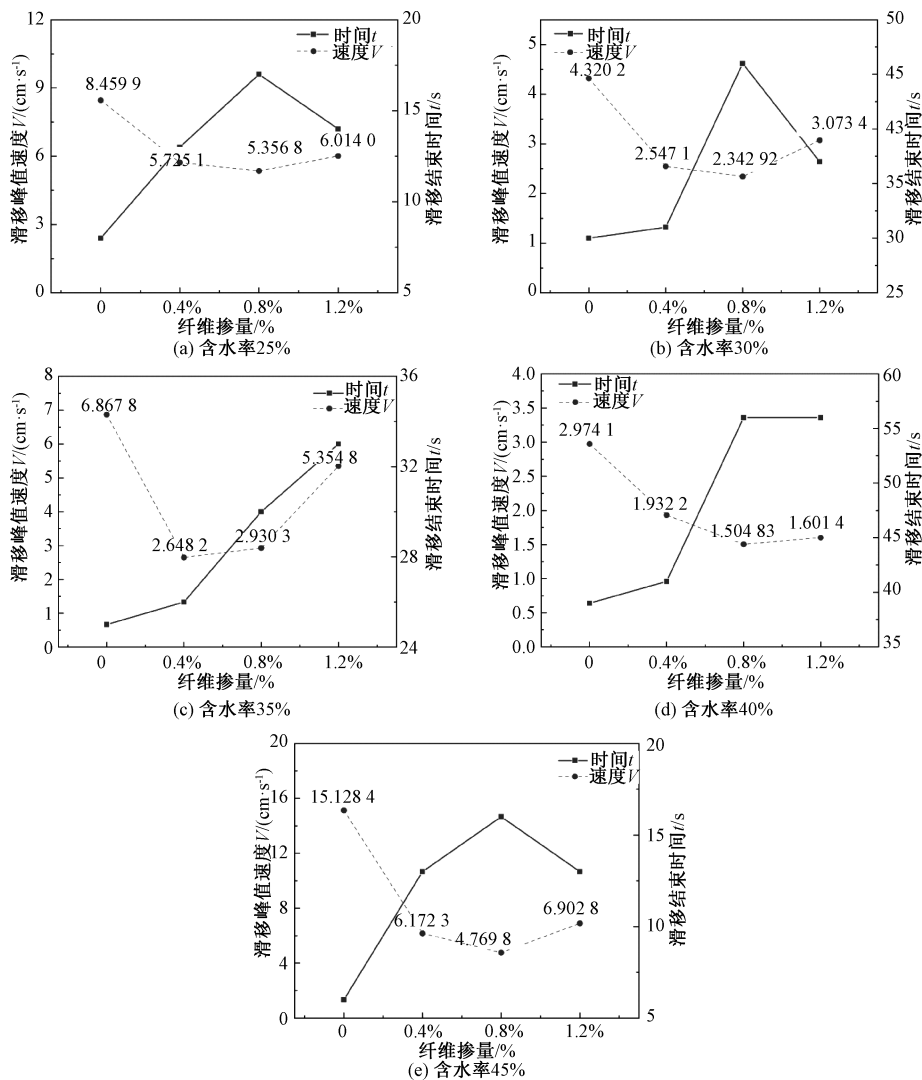


图 5 不同含水率试样的滑移停止位移和时间与纤维掺量的变化关系曲线

Fig. 5 The variation curve of the displacement and time of the sliding stop of the samples with different water content and the fiber content

结合图 5 可知,剑麻纤维的掺入使得试样的滑移峰值速度整体有所降低,试样含水率不变的情况下,随剑麻纤维掺量的增加,试样滑移峰值速度呈先降低后升高的变化趋势,其中当纤维掺量为 0.8% 时,试样的滑移峰值速度随含水率的提高分别为 1.50、2.34、2.93、5.36、4.76 cm/s,在各纤维掺量梯度下呈最小值。从图 5 中可以看出,当剑麻纤维掺入到黏土体中,滑移峰值速度显著减小,在各含水率梯度下 (25% ~ 45%) 分别减小了 37%、46%、57%、49% 及 68%。当含水率为 25%、30%、40% 及 45% 时,试样的滑移结束时间随纤维掺量的提高呈先增加后减少趋势;而当试样含水率为 35% 时,试样的滑移结束时间随着纤维添加含量的增加呈持续增长的趋势。由此可见剑麻纤维对改善黏土试样底面的黏附特性具有一定效果,且纤维掺量为 0.8% 时,改善效果最优。

2.3 剑麻纤维掺量对滑动摩擦特征系数的影响分析

图 6 是试样动摩擦系数平均值与纤维含量的关系图。从图 6 可以看出,控制试样含水率不变,随着纤维掺量由 0% 增至 0.8%,试样的动摩擦系数平均值增大,而当纤维掺量由 0.8% 增至 1.2% 时,试样的动摩擦系数平均值减小。其中当含水率值为 30% 时,纤维掺量 0.8% 试样的动摩擦系数平均值为 0.80,纯黏土试样的动摩擦系数平均值为 0.64;当含水率为 35% 时,纤维掺量 0.8% 试样的动摩擦系数平均值为 0.73,纯黏土试样的动摩擦系数平均值为 0.54,由此可知,在含水率为 30% 和 35% 梯度下,试样动摩擦系数平均值随纤维添加量的提高增幅较大,纤维掺量 0.8% 试样较纯黏土试样动摩擦系数平均值分别提高约 1.25 倍与 1.34 倍,而其余含水率值试样动摩擦系数平均值

增加幅度较平缓。当试样剑麻纤维添加量为 0.4% 时,各含水率梯度下试样的动摩擦系数平均值的最大值为 0.68,最小值为 0.42,二者相差近 1.62 倍,而当试样中剑麻纤维添加量达到 0.8% 时,各含水率梯度下试样的最大动摩擦系数平均值为 0.80,比最小值 0.42 大近 1.88 倍。这说明,剑麻纤维能有效提高试样底面动摩擦系数,且随着剑麻纤维含量的增加,提高试样底面动摩擦系数的能力变强。但纤维掺量不是越多越好,存在一个最优剑麻纤维掺量 0.8% 使得纤维加筋黏土与接触界面的耦合效果最佳。

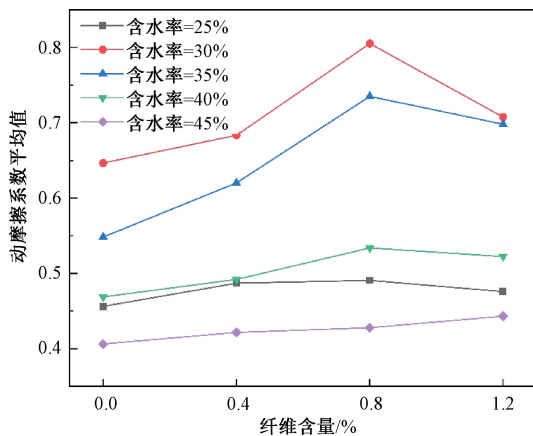


图 6 试样动摩擦系数平均值与纤维含量的关系

Fig. 6 Relationship between average coefficient of dynamic friction and fiber content of sample

图 7 是不同含水率下试样临界摩擦角随纤维含量变化关系图。结合图 7 可知,在控制含水率条件下,试样的临界摩擦角 α 随剑麻纤维掺量的增加呈先增大后减小的变化趋势,但不同含水率条件下,试样临界摩擦角随纤维掺量的增大幅度不尽相同。当含水率为 25% 时,随纤维掺量的增加,试样临界摩擦角分别为 24.52° 、 25.97° 、 26.14° 、 25.45° ; 当含水率为 45% 时,试样临界摩擦角随纤维掺量的增加分别为 22.20° 、 22.84° 、 23.18° 及 23.91° 。由此可知,当含水率值为 25% 和 45% 时,临界摩擦角 α 随试样纤维掺量的提高增大幅度较小,且 25% 含水率试样在三个纤维含量梯度下的临界摩擦角数值均大于 45% 试样含水率。而当含水率为 30%、35%、40% 时,在 0~0.8% 的纤维掺量范围内,每提高 0.4% 剑麻纤维的掺量,各试样临界摩擦角增大 1 倍左右。结合图 7 可知,当含水率为 30% 时,加筋土在纤维掺量 0%、0.4%、0.8%、1.2% 的变化过程中临界摩擦角值分别为 32.89° 、 34.35° 、 38.84° 及 35.28° ,在各含水率梯度中呈最

大值;相反,当含水率为 45% 时,试样临界摩擦角在各含水率梯度中最小。临界角 α 反映物体最大静滑动摩擦力值,表示试样在粗糙倾斜面上恰好处于滑动的临界状态,此时其静摩擦力达到最大值。因此试样的临界摩擦角与最大静滑动摩擦力有直接联系,临界摩擦角越大,反映试样抵抗下滑破坏的能力越强;反之,试样抵抗下滑破坏的能力越弱。因此,剑麻纤维的加入能有效提高试样抗滑破坏能力,且存在一个最优纤维掺量。

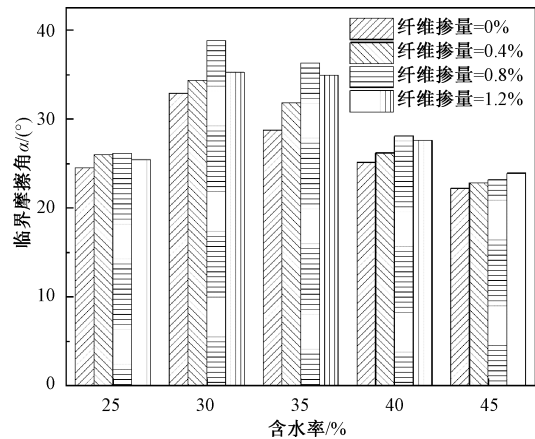


图 7 试样临界摩擦角随纤维含量变化关系图

Fig. 7 Relation diagram of critical friction angle of samples with fiber content

3 机理分析

滑动摩擦试验中试样滑移形态的变化可以很好地反映出纤维加筋黏土滑移、错动的过程,图 8 是含水率为 45% 时纯黏土与纤维掺量 0.8% 试样的滑动状态记录图。从图 8 中可以看出,随着时间的发展,纤维加筋土试样逐渐发生变形,试样表面有微裂隙发育,但其错切变形程度相比于纯黏土试样较小。随着剑麻纤维掺量的增加,黏土样发生错切变形的起始时间逐渐变大。虽然试样底部与亚克力面板接触面存在摩擦作用与黏附作用,但由于剑麻纤维的掺入,有效改善了土体结构,增强了土体的强度与整体性,因此在滑移过程中,黏土体剥落现象不明显,试样能保持较完整的状态,亚克力面板上残余的剪切破坏土体较少。

剑麻纤维与黏土颗粒相互作用,增大了纤维与土颗粒间的接触面积(图 9),增强了纤维与土颗粒间相互交织的程度,纤维-黏土复合基材受外荷载发生变形时,因纤维与土颗粒间发生错动而产生摩擦阻力,这使得筋土接触界面的摩擦力提高,进而在一定程度上提高了筋土接触界面的粘聚力,使得

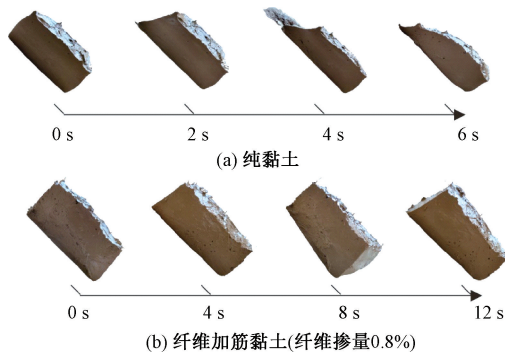


图 8 含水率 45% 试样滑动状态记录图

Fig. 8 Sliding state of sample with 45% moisture content and 0.8% fiber content

加筋黏土强度有所提高;同时,纤维掺入黏土中充填黏土颗粒间的孔隙,增大黏土颗粒有效接触面积,因此纤维加筋土在受外荷载过程中,应力传递及扩散路径受到影响发生变化,对土体变形起了阻碍作用,增强土体整体的稳定性,从而对土体下滑倾向产生抑制作用,增强土体与接触界面间的黏附作用。

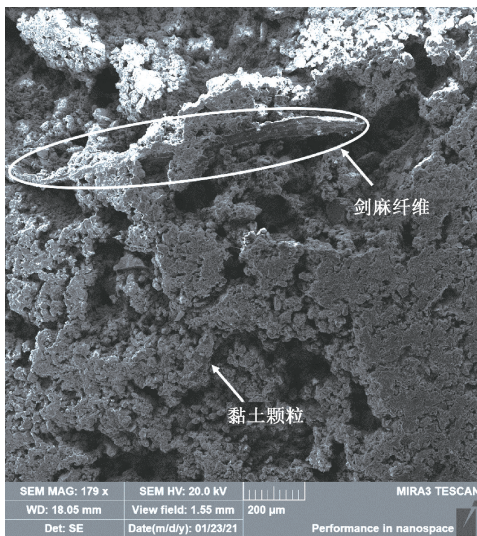


图 9 纤维加筋土扫描电镜图

Fig. 9 Scanning electron microscope image of fiber reinforced clay

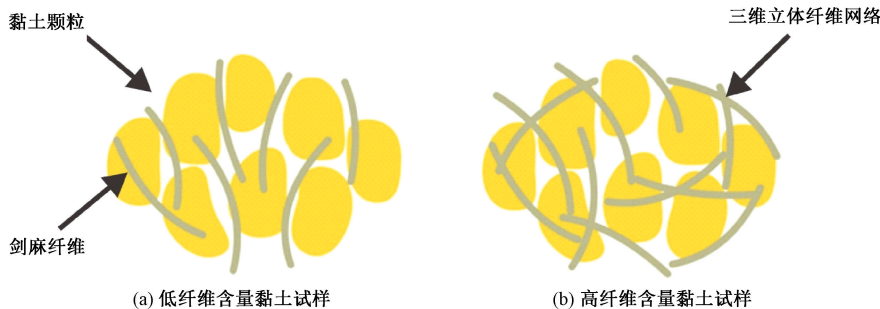


图 10 纤维加筋土示意图

Fig. 10 Schematic diagram of fiber reinforced clay

当剑麻纤维含量较少时,绝大部分剑麻纤维以相互搭接的形式存在于土体中,见图 10(a),而随着纤维含量的增多,剑麻纤维随机分布于土体中,相邻的剑麻纤维相互交织接触,形成骨架般的三维立体纤维土网包裹土颗粒,见图 10(b),更多的黏土骨架颗粒与剑麻纤维接触,通过三维纤维网络的拉筋作用,黏土颗粒充分靠拢集中,阻碍了黏土颗粒的相对滑动,减小其位移和变形,增强土体的整体稳定性。当掺入黏土体中的纤维含量较高时,相互接触的剑麻纤维间存在多处交错点,当加筋土体受外荷载作用,一处交错点受力产生相对滑动,单根纤维发生位移,此时其他与之交织的剑麻纤维可传递并分散受到的作用力,这种传递作用在各个交错点间持续扩张分散,可减少外荷载在土体中分布不均引起的应力集中现象,提高加筋土的整体强度。另外,由于剑麻纤维具有良好的柔韧性,因此在受外荷载时可以产生拉伸形变抵抗外力破坏^[19-21],能够像“桥梁”一样连接相互错动的黏土颗粒,起到“桥接”的效果,有利于提高土体结构的整体稳定性和安全性。然而,纤维掺量并不是越高越好,当纤维掺量高于 0.8% 时,纤维加筋黏土试样与接触界面的耦合程度逐渐变差,这主要是由于纤维掺量过多时,剑麻纤维易相互纠结缠绕,产生重复的交叉、交织,形成团聚现象,导致其与黏土颗粒间的直接接触减少,纤维自身之间的作用力增加,纤维之间的相互作用力明显小于纤维与黏土颗粒间的相互作用力,加之成团的剑麻纤维在黏土体内部分布不均匀,加筋黏土结构易发生破坏,影响纤维加筋土试样与界面间的耦合特性。

4 结论

1) 试样含水率的变化会对黏土试样滑动过程产生较大影响。随含水率的增加,试样的动摩擦系数平均值呈先增大后减小的变化趋势;临界摩

摩擦角 α 均随试样含水率的提高先增大到最大值,而后呈减小的趋势。当试样含水率介于塑限、液限之间时,存在最优含水率值使动摩擦系数与临界摩擦角达到最大值,此时黏土试样的黏附效果有明显提升。

2) 剑麻纤维及其掺量会对黏土-接触面耦合特性产生较大影响。控制试样含水率不变,随着纤维掺量由0%增至0.8%,试样的动摩擦系数平均值及临界摩擦角 α 呈逐渐增大趋势;而随着剑麻纤维掺量的继续增加,试样的动摩擦系数平均值及临界摩擦角 α 均有所减小。剑麻纤维的掺入能有效提高试样的抗滑破坏能力,但纤维掺量过多也会有负效果,存在一个最优剑麻纤维掺量0.8%,使得纤维加筋黏土与接触面的耦合效果最佳。

3) 剑麻纤维的掺入在黏土体中形成三维立体网格,增大了筋土界面的黏结和咬合摩擦作用,使黏土-黏土与黏土-接触面间的联结更为充分、紧密,进而提高黏土-接触面的黏附效果。

参考文献:

- [1] 赵亮. 某公路边坡滑坡治理方案研究[J]. 新疆有色金属, 2021, 44(6): 38-39.
- [2] 黄金青. 高速公路边坡滑坡成因分析及治理措施[J]. 工程建设与设计, 2021(13): 91-93.
- [3] 潘树林, 辜彬, 李家祥. 岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6404-6411.
- [4] 黄凯湘, 温忠义, 彭卫平. 土岩组合高边坡稳定性分析与治理[J]. 城市勘测, 2021(3): 200-204.
- [5] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50.
- [6] 明成涛. 贵州者告河流域灾害分析及防治建议[J]. 红水河, 2020, 39(5): 90-93+107.
- [7] 李鹏, 赵洋洋. 土-岩界面滑坡变形及成因分析——以陕西南部某滑坡为例[J]. 江西建材, 2015(15): 227.
- [8] 舒安平, 赵冉, 高小虎, 等. 公路边坡干湿客土喷播生态恢复效果评价[J]. 交通运输研究, 2020, 6(4): 45-51.
- [9] 吕宋, 魏少伟, 姚建平, 等. 不同坡率下纤维结构团粒喷播技术的适用性研究与应用[J]. 铁道建筑, 2021, 61(2): 79-82+94.
- [10] 吕大伟, 杨永红. 客土喷播技术在山区高速公路边坡防护绿化中的应用[J]. 公路交通技术, 2006(3): 141-145.
- [11] 王丽, 张金池, 张小庆, 等. 土壤保水剂含量对喷播基质物理性质及抗冲性能的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 79-82.
- [12] 李广信, 陈轮, 郑继勤, 等. 纤维加筋粘性土的试验研究[J]. 水利学报, 1995(6): 31-36.
- [13] 李良勇, 马炜迪, 谢朋, 等. 天然椰壳纤维加固红黏土地基模型试验[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 182-188.
- [14] TANG C S, WANG D Y, CUI Y J, et al. Tensile Strength of Fiber-Reinforced Soil[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(7): 04016031.
- [15] 熊雨, 邓华锋, 彭萌, 等. 四种人工合成纤维加筋黄土抗剪特性研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-6 [2021-10-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20210510.1123.002.html>.
- [16] 李沛达, 骆亚生, 陈箐芮, 等. 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.
- [17] 郁崇文, 傅佳佳, 张元明, 等. 剑麻纤维的制备方法: 中国专利, CN 101294309[P]. 2008-10-29.
- [18] 刘宏伟, 杨情情, 苏志满. 颗粒材料底面动摩擦系数特征研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 740-747.
- [19] 江灿琿, 吴鸣飞, 刘瑾, 等. 高分子聚合物-剑麻纤维复合加固砂土抗压特性试验研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2021, 38(1): 32-39.
- [20] 刘瑾, 施斌, 黄河, 等. STW型生态土壤稳定剂改良工程粘性土胀缩性试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 820-825.
- [21] 武立林, 钱卫, 刘瑾, 等. 剑麻纤维/砂土复合材料三轴剪切强度特性[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2020, 37(4): 26-33.

(责任编辑 周雪梅)