

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.010

刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土力学性质研究

吴 鹏¹, 刘 瑾¹, 史兴萍², 王长家², 车文越¹, 张 全², 朴春德³, 张 明²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 青海威斯特铜业有限责任公司, 青海 玛沁 814000; 3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为分析刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土的效果, 采用室内无侧限抗压强度试验结合数值模拟方法, 对改良红黏土的无侧限抗压强度响应特征和微观结构损伤机制进行了分析。结果表明: 刺槐豆胶和剑麻纤维对红黏土的抗压强度有显著提升, 素红黏土的抗压强度仅为 75.5 kPa, 刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数分别为 4% 和 0.6% 时, 改良红黏土的抗压强度达到 888.3 kPa; 复合改良红黏土的微裂纹主要呈菱形分布, 数量随着刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数增大而减少, 主导微裂纹以剪切微裂纹为主; 刺槐豆胶和剑麻纤维有效增强了土体颗粒之间的接触力链强度, 使其抵抗破坏变形的能力增强; 剑麻纤维质量分数增大使得接触力链的不定向性更强, 传递方向更丰富; 刺槐豆胶和剑麻纤维在改良红黏土的微观机理方面存在协同作用, 复合材料的改良效果优于单一材料。

关键词: 改良红黏土; 抗压特性; 微观机理; 刺槐豆胶; 剑麻纤维

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)03-0076-11

Investigation on mechanical properties of red clay improved by locust bean gum and sisal fiber

WU Peng¹, LIU Jin¹, SHI Xingping², WANG Changjia², CHE Wenyue¹, ZHANG Quan², PIAO Chunde³, ZHANG Ming²

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

2. Qinghai West Copper Industry Co., Ltd., Maqin 814000, China;

3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To evaluate the effectiveness of locust bean gum (LBG) and sisal fiber (SF) for improving red clay, laboratory unconfined compressive strength tests and numerical simulation methods were employed. The unconfined compressive strength response characteristics and the microscopic structural damage mechanisms of the improved red clay were investigated. The results show that LBG and SF significantly promote the compressive strength of red clay. The compressive strength of the unimproved red clay is 75.5 kPa, and that of the improved red clay reaches 888.3 kPa when the mass fraction of LBG and SF is 4% and 0.6%, respectively. The microcracks of the red clay improved by the composite material are mainly diamond-shaped, and their number decreases with the increase in the mass fraction of LBG and SF, with shear microcracks dominated. LBG and SF can effectively improve the strength of the contact force chain between soil particles and enhance its resistance to damage and deformation. With the increase in the mass fraction of SF, the non-orientation of the contact force chain is stronger, and the transmission direction is richer. There is a synergistic effect between LBG and SF in improving the microcosmic mechanism of red clay, and the improvement effect of their composite material is better than that of a single material.

Key words: improved red clay; compressive property; microcosmic mechanism; locust bean gum; sisal fiber

红黏土是一种在我国南方分布广泛的特殊土^[1], 在工程领域被广泛用作天然地基填料^[2]。红黏土地区地基中易存在软弱下卧层^[3], 常引起地面不均匀沉降、地裂缝等地质灾害。为解决红黏土存在的工程隐患, 需对红黏土进行加固处理。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(4247233)

作者简介: 吴鹏(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事土体改良研究。E-mail: wup@hhu.edu.cn

通信作者: 刘瑾(1983—), 女, 教授, 博士, 主要从事工程地质与环境岩土工程研究。E-mail: jinliu920@163.com

引用本文: 吴鹏, 刘瑾, 史兴萍, 等. 刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土力学性质研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 76-86.

WU Peng, LIU Jin, SHI Xingping, et al. Investigation on mechanical properties of red clay improved by locust bean gum and sisal fiber [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 76-86.

化学加固和物理加筋是目前常用的改良土体的手段。石灰、水泥^[4-6]等传统化学固化材料能够改良土体的力学特性,但其改良方法环境效益低^[7-8]。生物聚合物是一种新型环保的化学土壤固化剂,具有掺量小、适应性好、运输方便等优点,常温下能在土体颗粒或黏土矿物表面形成胶结,从而达到改良土体的效果^[9-12],在边坡生态修复、路基处理等领域具有较大的应用潜力。刺槐豆胶作为一种植物基生物聚合物,其分子侧链中含有大量羟基,遇水反应生成大量氢键,能改良土体的性质^[13],但有关刺槐豆胶复合纤维对土体的改良研究较少。物理加筋是将土工布、网片、纤维等材料与土体混合制成土工复合物。纤维材料因具有强度高、分散性好、易拌和等优点,因此被广泛用于加固土体;熊雨等^[14]认为纤维的加筋效果与表面粗糙程度有关;梅红等^[15]研究发现存在最优掺量使纤维的加筋效果达到最佳;胡达等^[16]研究发现纤维加筋通过提高土体的整体性改善土体的破坏形态。剑麻纤维是一种被广泛用于土体改良的加筋材料,具有储量大、成本低的特点^[17],相较于人造纤维具有绿色环保的优势。生物聚合物和纤维材料对土体改良的侧重点不同,生物聚合物主要通过改变土体颗粒表面特征改良土体,纤维主要通过产生相互作用改良土体,采用生物聚合物复合纤维材料对土体加固可以结合二者优点^[18]。

数值模拟可以从细观尺度对土体的变形破坏进行深入分析;李皋等^[19]基于颗粒流软件研究了颗粒粒径与颗粒形态对砾岩力学特性的影响;柳伟等^[20]提出了红黏土的超固结非饱和统一硬化模型,并基于该模型采用三维有限差分软件计算了降雨入渗的非饱和渗流场;张金利等^[21]对加筋红黏土开展了三轴试验,采用有限元软件建立了三维计算模型,验证了试验结果的可靠性。

本文采用刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土,通过无侧限抗压强度试验和数值模拟揭示改良红黏土的无侧限抗压强度响应特征和微观结构损伤机制,并基于电镜扫描结果,阐明刺槐豆胶与剑麻纤维的协同固化机制。

1 研究方法

1.1 试验材料

试验所用红黏土来自广西阳朔地区,比重为 2.76,最大干密度为 1.71 g/cm^3 ,最优含水率为 23%,液限为 45.5%,塑限为 24.1%。生物聚合物为刺槐豆胶(LBG,图 1(a)),由刺槐树种子加工而成,为白色粉末,pH 为 6.5~7.0,相对分子质量为 $3.1\times 10^5\sim 2\times 10^6$ 。纤维材料为剑麻纤维(SF,图 1(b)),是一种天然环保、坚韧耐磨的材料,平均直径为 0.2 mm,平均长度为 20 mm,密度为 1.05 g/cm^3 。

1.2 试验方案

根据前期预试验结果,设定刺槐豆胶质量分数(与红黏土质量的百分比)为 0%、1%、2%、3%、4%,剑麻纤维质量分数(与红黏土质量的百分比)为 0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,试样含水率设定为最优含水率 23%,干密度设定最大干密度的 95%,即 1.62 g/cm^3 。将红黏土、纯水、刺槐豆胶充分混合后加入剑麻纤维,再利用工具分散剑麻纤维。搅拌均匀的红黏土-剑麻纤维-刺槐豆胶混合物倒入模具中,采用静压法将混合物一次压成直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的柱状试样,脱模试样置于室内条件下养护 2 d^[22],每组试验设置 3 个平行样。试验仪器采用南京土壤仪器厂研发的 YYW-2 应变控制式无侧限压力仪,试验加载速率根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》设定为 2.4 mm/min ,试验结束条件为轴向应变达到 16%。取轴向应力-轴向应变曲线上的峰值点处的轴向应力作为抗压强度,若轴向应力-轴向应变曲线无明显下降则取 15%应变所对应的轴向应力作为抗压强度。

1.3 数值模型

数值模拟可以深入研究土体的变形破坏特征,进一步分析复合改良土的微观结构损伤规律。离散元方法通过将材料离散化为一系列颗粒,模拟每个颗粒的空间位置变化和每个颗粒之间的相互作用,适用于颗粒



(a) 刺槐豆胶 (b) 剑麻纤维

图 1 改良材料

Fig. 1 Improved material

组合体在外部荷载下的变形破坏过程的模拟,因此基于刺槐豆胶质量分数(w_{LBG})为1%和4%,剑麻纤维质量分数(w_{SF})为0.2%和0.8%的4组无侧限抗压试验结果建立离散元模型。初始模型与室内试样尺寸一致,高度为80 mm,直径为39.1 mm(图2),初始模型参数见表1。剑麻纤维与红黏土颗粒被简化为单元颗粒球,根据挤压排斥法生成与土体粒径曲线一致的颗粒集合,颗粒单元大约11 000个。红黏土颗粒之间、纤维颗粒与红黏土颗粒界面接触采用平行黏结模型(图3(a)),红黏土颗粒与加载板之间采用线性模型(图3(b)),图中 g_s 为颗粒黏结间隙; $\bar{\sigma}_c$ 为黏结拉应力; μ 为摩擦系数; $\bar{c}$ 为黏结强度; $\bar{\varphi}$ 为摩擦角; k_n 为线性弹簧的法向刚度; $\bar{k}_n$ 为黏结弹簧的法向刚度; k_s 为线性弹簧的切向刚度; $\bar{k}_s$ 为黏结弹簧的切向刚度。线性模型主要由线性弹簧组成,平行黏结模型主要由线性弹簧和黏结弹簧组成。线性弹簧在颗粒球之间发生接触时生效,与土体颗粒与土体颗粒、土体颗粒与纤维颗粒以及土体颗粒与加载板之间的接触模式相同;黏结弹簧在颗粒球之间的距离小于某个阈值时生效,与生物聚合物为土体颗粒、纤维颗粒赋予的胶结力作用方式相同。

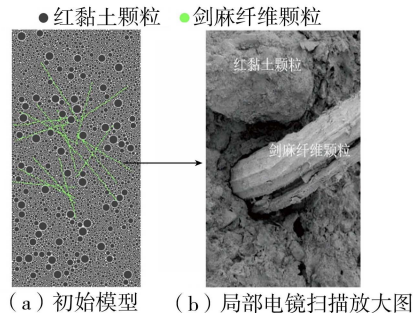


图2 初始模型及局部放大图

表1 初始模型参数
Table 1 Initial model parameters

模型	参数	单位	参数取值
红黏土颗粒	模型高度	m	0.08
	模型宽度	m	0.04
	最小粒径	m	4×10^{-4}
	初始颗粒密度	g/cm^3	1.62
	初始孔隙率	%	10
	阻尼系数		0.7
线性模型	线性有效模量	GPa	0.7~1.2
	线性刚度比		1.5
平行黏结模型	平行黏结有效模量	kPa	100~500
	平行黏结刚度比		2
	黏结激活间隙	m	4×10^{-5}
	抗拉强度	kPa	100~900
	黏聚力	kPa	50~500
	摩擦角	°	18~25

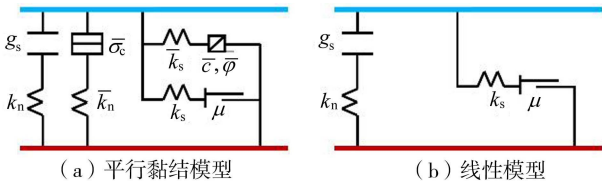


图3 接触模型示意图
Fig.3 Contact model

由图4可知,室内试验和数值模拟的轴向应力-轴向应变曲线形态基本一致,峰值应力对应良好,初始模型和参数标定有效可靠,可以认为数值模拟的标定结果具有较好的一致性和可靠性,模拟结果可以再现改良红黏土的力学行为。

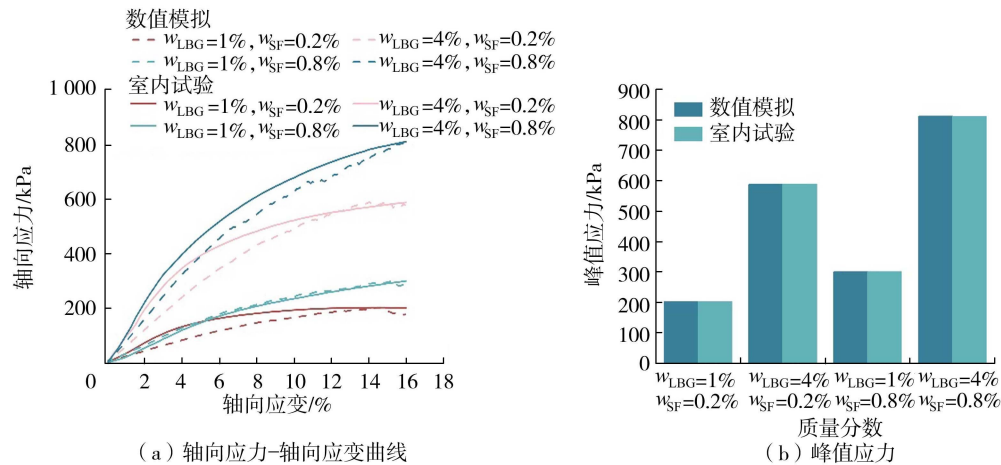


图4 室内试验与数值模拟结果对比

Fig.4 Comparison of results of laboratory test and numerical simulation

2 结果与分析

2.1 室内试验

如图 5 所示,不同刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数下改良红黏土的轴向应力-轴向应变曲线具有相同的变化趋势,在轴向应变较小时,轴向应力随着轴向应变的增加几乎呈直线增加,随着轴向应变的增大,曲率逐渐变小,轴向应力增大的速度减小甚至为零;不同刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数下的红黏土的轴向应力-轴向应变曲线的形态均为应变硬化型。改良试样的轴向应力-轴向应变曲线具体可以分为 3 个阶段:压实阶段、弹性变形阶段和塑性变形阶段。以图 5(c)为例,轴向应变为 0%~1%(压实阶段),轴向应力随着轴向应变增加而缓慢上升,土体颗粒在外部荷载作用下向致密趋势发展^[23];轴向应变为 1%~5%(弹性变形阶段),轴向应力随着轴向应变呈线性增加;轴向应变大于 5%(塑性变形阶段),轴向应力的增加速度逐渐减慢。

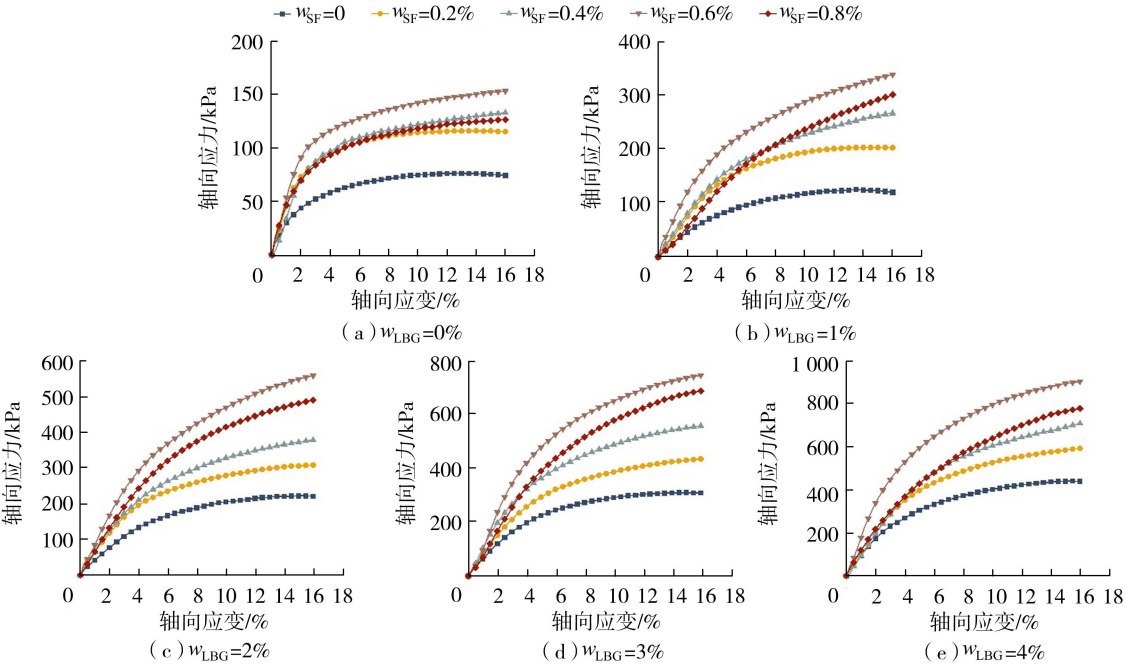


图 5 不同刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数下改良红黏土的轴向应力-轴向应变曲线

Fig. 5 Axial stress-axial strain curves of improved red clay under different mass fractions of LBG and SF

刺槐豆胶对红黏土的轴向应力-轴向应变曲线形态有明显改善,曲线曲率增大,峰值应力显著提高,且峰值应力随着刺槐豆胶质量分数的增大而增大。刺槐豆胶黏附在土体颗粒表面,桥接土体颗粒,提高了土体颗粒之间的黏聚力,使得土体抵抗破坏变形的能力增强。相比于素土,剑麻纤维加筋土的轴向应力-轴向应变曲线的曲率在弹性变形阶段显著上升,塑性变形阶段变化不明显。剑麻纤维的弹性模量远高于土体,在外部荷载的作用下剑麻纤维与土体发生差异变形^[24],部分纤维在土体发生塑性变形时被挤压出土体,使其对土体的加筋作用减弱,因此轴向应力在塑性变形阶段变化不明显。

刺槐豆胶复合剑麻纤维对红黏土的峰值应力和曲线曲率改良效果优于单一材料,并且使曲线的应变硬化特征更明显。刺槐豆胶为剑麻纤维与土体颗粒的接触界面附加胶结,使纤维与土体颗粒在外部荷载作用下发生的变形差异减小,在发生塑性变形时不易被挤压出土体,仍能发挥较好的加筋作用,轴向应力在塑性变形阶段随轴向应变的变化明显。

由图 6(a)可知,刺槐豆胶和剑麻纤维的加入能够显著提高红黏土的抗压强度(轴向应变为 15%时对应的轴向应力)。改良红黏土的抗压强度随着刺槐豆胶质量分数的增大而提高,在剑麻纤维质量分数较小时(0.2%~0.6%),随着质量分数增大而提高,在质量分数超过 0.6%后发生下降。素红黏土的抗压强度仅为 75.5 kPa,刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数分别为 4%和 0.6%时,改良红黏土的抗压强度达到 888.3 kPa。刺槐豆胶质量分数从 0%增大至 4%,抗压强度增量的范围为 47.73~217.57 kPa。高含量的剑麻纤维在土体中分布不均匀,聚集的剑麻纤维成为软弱面^[25],破坏了土体的整体性,从而使得土体抗压强度降低。由

图 6(b) 可知,复合改性红黏土抗压强度增量(与素土相比)高于刺槐豆胶和剑麻纤维单独作用的抗压强度增量之和,并且二者的差值随着刺槐豆胶含量上升而增大,刺槐豆胶与剑麻纤维之间存在协同改良作用。

为研究改良红黏土抵抗变形破坏的能力,以弹性模量为特征,对比不同刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数的改良效果。由图 7 可知,改良红黏土的弹性模量(以割线模量代替^[26])随着刺槐豆胶的质量分数增大而增大,随着剑麻纤维质量分数的增大先增大后减小,在刺槐豆胶质量分数为 4%,剑麻纤维质量分数为 0.6%时达到峰值。刺槐豆胶质量分数较小时对红黏土弹性模量的作用效果不明显,原因是质量分数较小时,刺槐豆胶不能充分填充土体颗粒之间的孔隙,无法在土体颗粒发生位移时发挥润滑作用,使土体抵抗破坏变形的能力下降,减弱了刺槐豆胶胶结作用对土体弹性模量的提升效果。

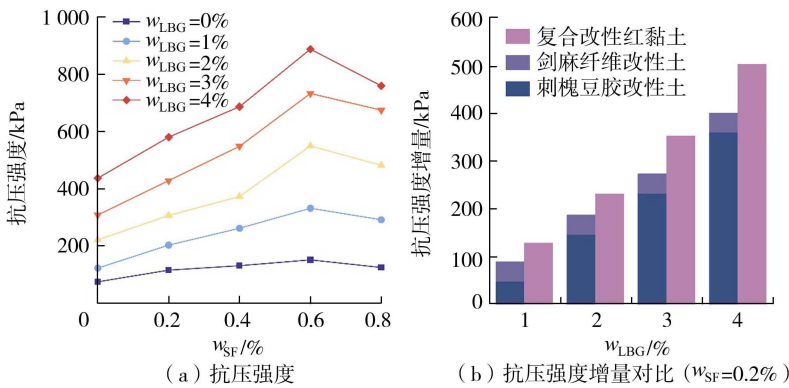


图 6 刺槐豆胶和剑麻纤维含量对改良红黏土的抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of LBG and SF content on compressive strength of improved red clay

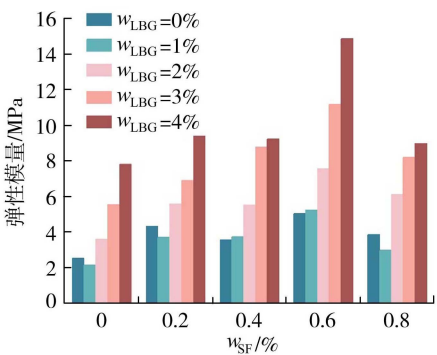


图 7 刺槐豆胶和剑麻纤维对改良红黏土的弹性模量的影响

Fig. 7 Effect of LBG and SF on elastic modulus of improved red clay

2.2 数值模拟

由图 8、图 9 可知,模型颗粒位移大小和方向的变化具有相同的趋势,模型四周的颗粒向模型外侧发生较大的位移,中间菱形区域发生的位移较小,微裂纹主要沿着菱形区域分布。刺槐豆胶和剑麻纤维改善了土

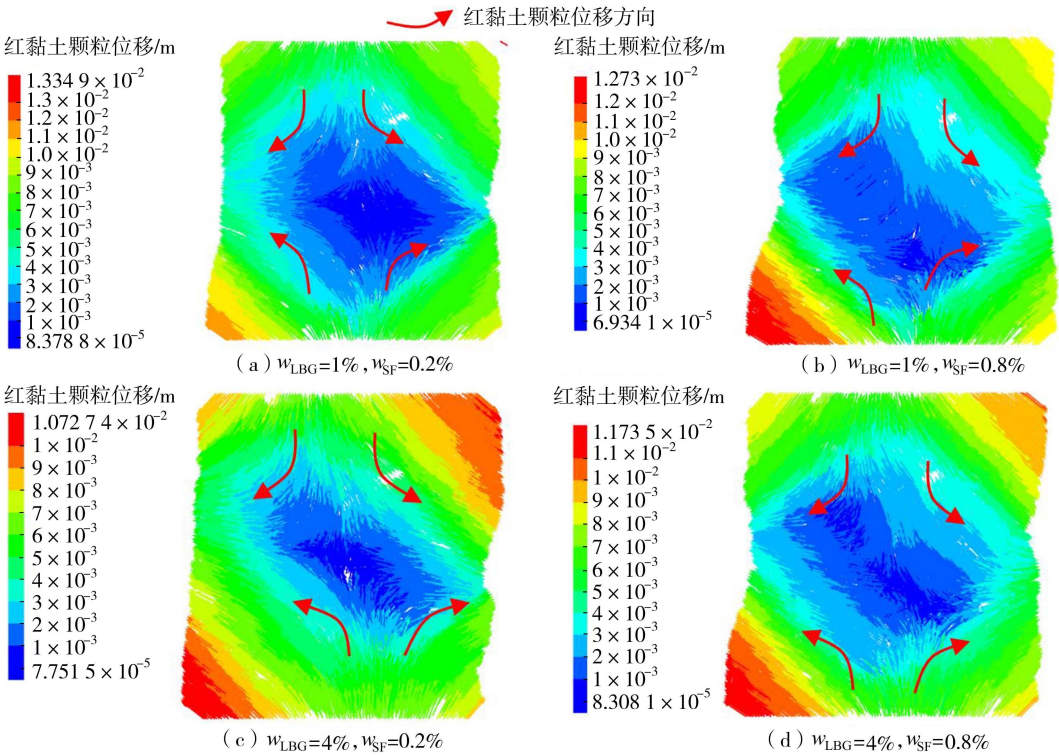


图 8 红黏土颗粒位移演化规律

Fig. 8 Displacement evolution pattern of red clay particles

体的破坏形态,模型中的裂纹数量随着二者质量分数增大而较少。刺槐豆胶和剑麻纤维能够有效增强红黏土颗粒之间的黏结力,宏观上表现为抵抗外部荷载的能力增强,抗压强度上升,同时使得土体内的应力分布更加均匀,避免微裂纹进一步扩展而形成连通裂纹。

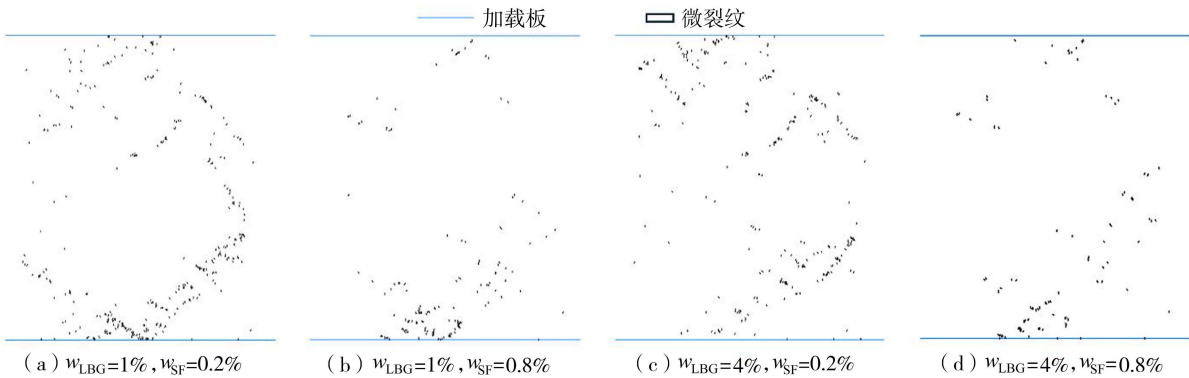


图 9 红黏土微裂纹分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of microcracks in red clay

由图 10 可知,模型中的微裂纹在试验过程中大致分为 3 个阶段:压密和弹性变形阶段、缓慢发展阶段、快速发展阶段。试验初期,外部荷载使土体中的孔隙减小,土体颗粒之间发生弹性变形,外部荷载不足以破坏土体颗粒之间的黏结力,因此微裂纹数量较少。随着试验继续进行,土体颗粒之间的黏结力不足以抵抗外部荷载,颗粒间发生相对位移,产生微裂纹。微裂纹的出现破坏了土体的整体性,在微裂纹周围出现应力集中现象,周围的土体颗粒间受到先存微裂纹的影响更容易发生相对位移,因此微裂纹数量增加的同时增加速度也在变大。随着刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数的增大,土体微裂纹的数量由 339 条减少至 93 条。对比单一改良材料和复合改良材料质量分数增大后微裂纹数量的下降幅度,发现复合改良土对微裂纹的抑制效果优于单一改良土。高质量分数剑麻纤维所形成的网状结构能够充分缠绕土体颗粒,限制土体颗粒发生翻转、移动,从而有效减少了微裂纹的数量。高质量分数刺槐豆胶形成的团聚体具有一定的板体性和刚性^[27],提高了土体的内聚力,抑制了微裂纹的发展。

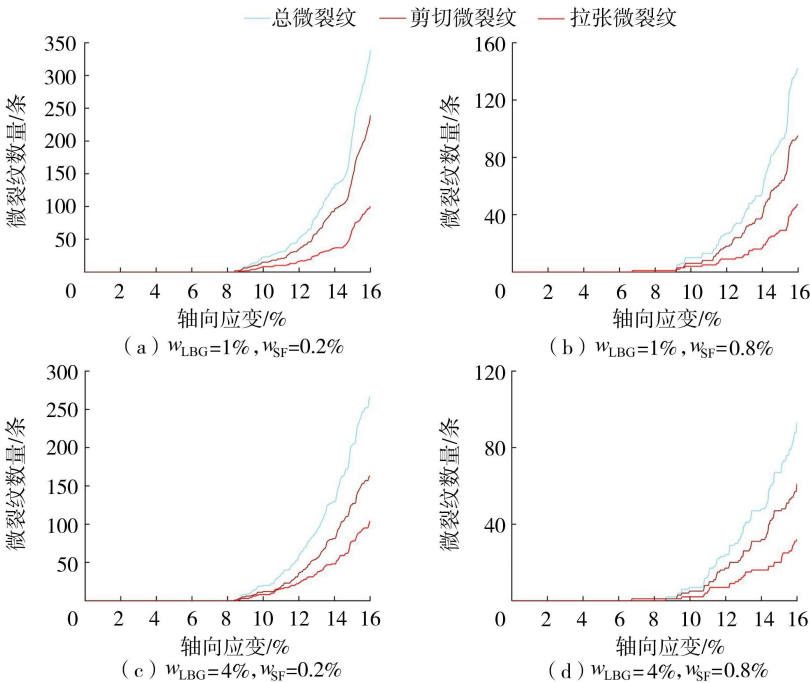


图 10 不同刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数下数值模型裂纹发育规律

Fig. 10 Crack development pattern of numerical model under different mass fractions of LBG and SF

单位颗粒力链数量定义为土体内接触力链总数量与土体颗粒总数量之比。由图 11 可知,随着轴向应变的增大,单位颗粒力链数量几乎呈直线增加,在外部荷载的作用下,土体中的孔隙被压缩,土体颗粒之间发生接触并产生接触力,使得土体中单位颗粒接触力链数量几乎呈直线上升。高含量的剑麻纤维提高了土体中单位颗粒力链数量,增加了外界荷载作用的传递路径,将外界荷载作用传递给远处的土体颗粒,能够缓解局部应力集中的现象,减少微裂纹的数量。最大力链强度受轴向应变的影响较大,随着轴向应变的增大先增大再保持稳定。刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数的增大使得改良土体的最大力链强度从 874.0 Pa 上升到 6585.7 Pa。高含量刺槐豆胶能包裹土体颗粒,形成了刺槐豆胶-土体颗粒团聚体,相比低含量刺槐豆胶对土体颗粒的桥接作用黏结得更稳固,使其能够产生更大的力量抵抗变形,从而提高了土体的抗压强度;高含量的剑麻纤维形成三维网状结构,将承担的荷载分担到每根纤维,相比低含量剑麻纤维的锚固作用能承受更大的变形,产生更高强度的力链。

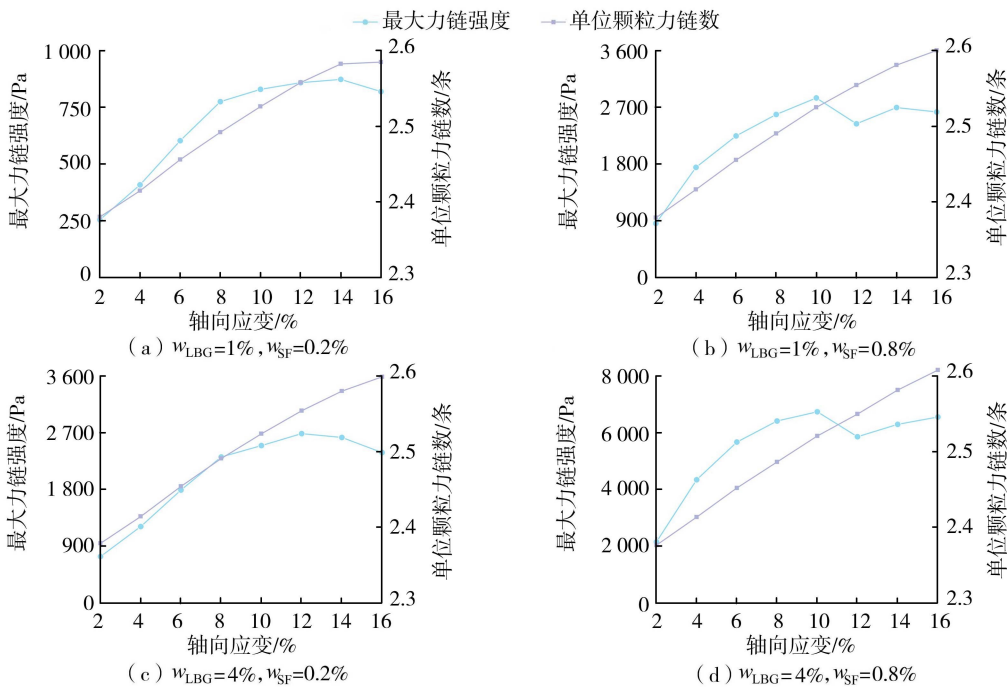


图 11 不同刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数数值模型接触力链参数变化

Fig. 11 Change in contact force chain parameters of numerical model under different mass fractions of LBG and SF

由图 12 可知,接触力链在模型中分布比较均匀,沿着红黏土颗粒半径的方向传递,以竖直方向为主。接触力链的分布与颗粒直径具有相关性,粒径小的部位比较密,粒径大的部位疏。刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数的增大使得模型中所有的接触力链强度均有不同程度的增加,说明高含量刺槐豆胶和高含量剑麻纤维形成的刺槐豆胶-红黏土团聚体、三维网状结构与土体内更大范围的红黏土颗粒相互作用,提升了土体的整体强度。对比图 12(a)(b),发现高含量剑麻纤维模型中接触力链的不定向性更强,接触力链的方向更丰富。不同方向的剑麻纤维随机分布在土体中,在红黏土颗粒之间发生挤压变形之后将接触力链顺着纤维传递,纤维质量分数的增大能够为接触力链产生更多不同方向的传递路径。

结合图 8、图 9、图 11,发现接触力链的强度和红黏土颗粒位移场之间存在关联,高强度接触力链与红黏土体颗粒位移方向呈大角度相交。与红黏土颗粒运动方向呈大角度相交的纤维颗粒和红黏土颗粒能够阻挡周边红黏土颗粒发生位移,其自身在周边红黏土颗粒的挤压下也产生较大的接触力链强度,与红黏土颗粒位移方向呈小角度相交的纤维颗粒和红黏土颗粒对红黏土颗粒位移的限制作用较小,产生的接触力链强度也较小。微裂纹分布密集的部位出现应力凹陷区,即接触力链强度明显低于周围区域。在外部荷载作用下,红黏土颗粒之间发生位移,产生微裂纹,红黏土颗粒之间的力链经过断裂和重构,胶结弹簧失效,强度低于周围接触力链。应力凹陷区范围与微裂纹数量变化相同,随着刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数增大而减少,刺槐豆胶和剑麻纤维能通过增强土体内各组分之间的联系从而改善土体内部局部失稳的现象。

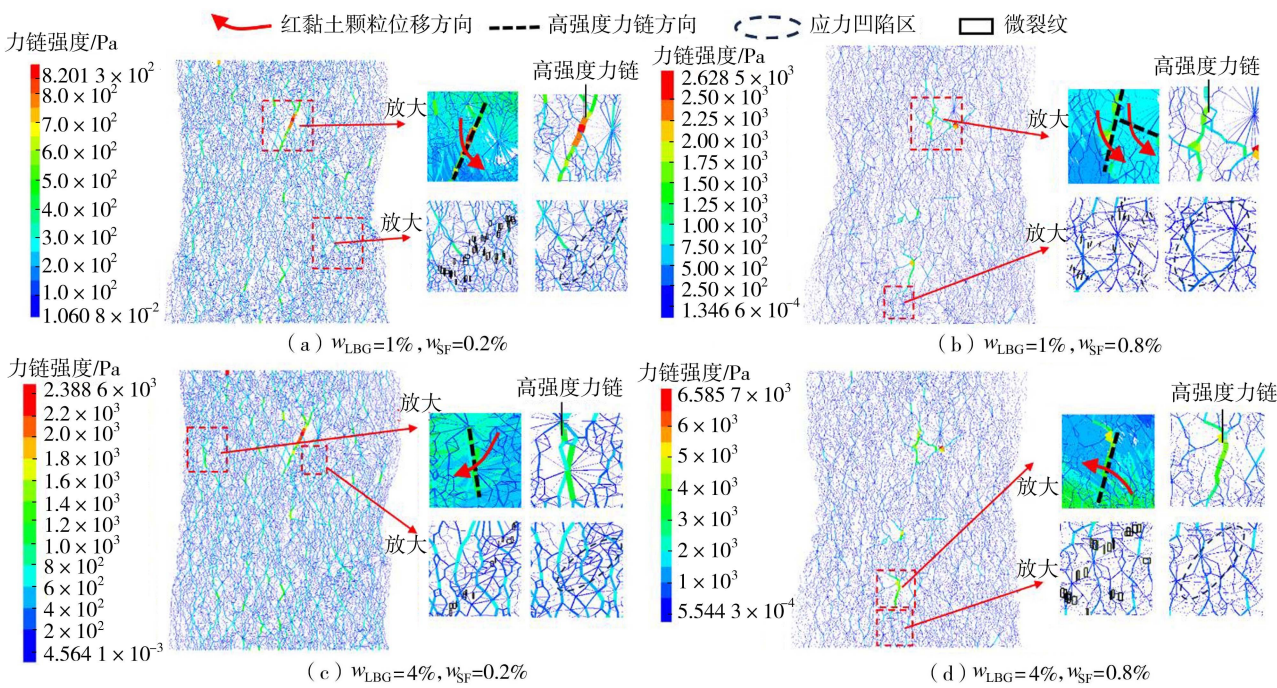


图 12 不同刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数数值模型接触力链分布

Fig. 12 Contact force chain distribution of numerical model under different mass fractions of LBG and SF

3 讨 论

刺槐豆胶改良红黏土力学性质的微观机理可以分为物理机理和化学机理。刺槐豆胶与水反应形成水凝胶,与土体颗粒接触后黏附在土体颗粒表面,为土体颗粒之间附加胶结力,改变了土体颗粒之间的接触模式。刺槐豆胶质量分数较小时,零星的黏附在土体颗粒表面,此时对土体的改良作用主要是桥接土体颗粒以增加土体颗粒之间的黏结力(图 13(b))。随着刺槐豆胶质量分数增大,刺槐豆胶附着的土体颗粒相对面积增大,刺槐豆胶逐渐呈网络状包裹土体颗粒,形成刺槐豆胶-土体颗粒团聚体,提高了土体的整体性。同时,刺槐豆胶也能有效填充土体颗粒间的孔隙,使得土体密实度增大^[28],土体抗压强度随之提高。红黏土中的黏土矿物表面带有负电荷,对刺槐豆胶中的阳离子有吸附作用,改变了土体颗粒的表面特征,使刺槐豆胶更加牢固地黏附在土体颗粒表面,提高了刺槐豆胶-土体颗粒团聚体的内部凝聚力。此外,土体颗粒表面与刺槐豆胶中的羟基形成氢键,进一步提高了刺槐豆胶-土体颗粒团聚体的稳定性。

剑麻纤维对红黏土力学性质的改良机理可以分为单条纤维对土体颗粒的锚固作用和纤维在土体中交错形成立体网状结构。如图 13(d)所示,剑麻纤维与土体颗粒充分接触,在外部荷载作用下,土体颗粒与剑麻纤维之间发生挤压变形,增大了土体颗粒与剑麻纤维之间的接触面积和咬合程度,剑麻纤维对周围土体颗粒起到锚固作用。剑麻纤维与土体颗粒在发生相对位移时接触面上存在摩擦力,抵抗土体发生的破坏变形。受拉的剑麻纤维同时也在一定程度上限制了土体颗粒的位移,提高了土体的整体性,减缓了土体变形破坏。剑麻纤维含量较低时,剑麻纤维随机分布在土体内,不足以构成网状结构,随着剑麻纤维含量的增大,纤维在土体中彼此交织,形成三维网状结构(图 13(e)),剑麻纤维发挥的作用逐渐由一维拉筋作用逐渐转向一维拉筋和三维拉筋共同作用^[29],三维网状结构可以将荷载分到每条纤维,使土体内部受力更加均匀,荷载分布更加宽广,从而使土体的抗压强度明显上升。此外,随着剑麻纤维含量增大,剑麻纤维逐渐充实了土体之间的孔隙,土体密实度的上升提高了土体整体强度^[23]。

刺槐豆胶和剑麻纤维之间在改良红黏土的微观机理方面存在协同作用。如图 13(f)所示,剑麻纤维锚固于刺槐豆胶-土体颗粒团聚体当中,刺槐豆胶紧密地附着在剑麻纤维表面。刺槐豆胶为剑麻纤维与土体颗粒接触的表面附加胶结,提高了二者接触表面的黏聚力。刺槐豆胶能促进剑麻纤维在土体中形成网状结构^[25],增加力链传递途径,扩大受力变形范围,并且作用于纤维之间接触的界面,提高网状结构的稳定性,降低局部土体失稳的概率,提升土体的力学强度。剑麻纤维增大了土体内部表面积,所构成的网状结构为刺槐

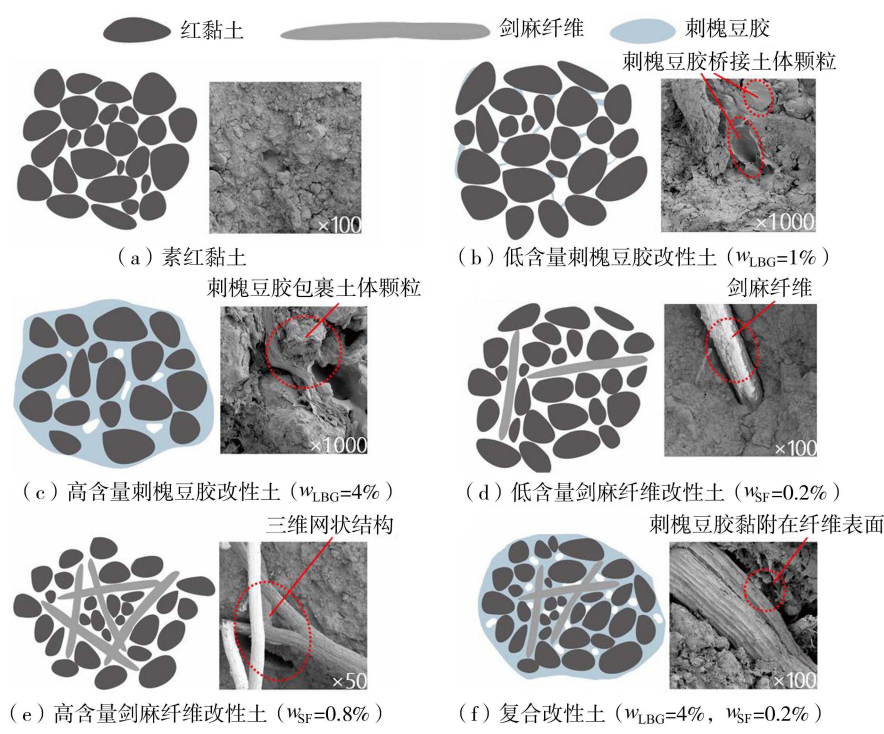


图 13 素土与不同材料改性土改良机理示意图

Fig. 13 Improvement mechanism of unimproved soil and soil improved by different materials

豆胶-土体颗粒团聚体提供良好的附着环境^[27],同时受拉的剑麻纤维对刺槐豆胶-土体颗粒团聚体在外部荷载作用下所发生的位移具有约束作用,改善了土体的破坏形态。

4 结 论

- a. 刺槐豆胶和剑麻纤维对红黏土的抗压强度、弹性模量以及轴向应力-轴向应变曲线曲率具有明显的提升效果。刺槐豆胶的改良效果随着质量分数增大而更显著,剑麻纤维的改良效果随着质量分数增大呈先增强后减弱,最佳质量分数分别为 4% 和 0.6%。
- b. 刺槐豆胶和剑麻纤维均有效增强了土体颗粒之间的接触力链强度。随着刺槐豆胶和剑麻纤维质量分数增大,剑麻纤维提供的粒间传递路径和刺槐豆胶产生的胶结效应显著提升,降低了土体微裂纹数量和应力凹陷范围,使得改良土体的最大力链强度从 874.0 Pa 上升到 6 585.7 Pa,微裂纹数量从 339 条下降至 93 条。
- c. 刺槐豆胶和剑麻纤维在改良红黏土方面存在协同改良作用,微观上主要表现为刺槐豆胶能够促进剑麻纤维在土体中形成三维结构,剑麻纤维能够为刺槐豆胶-土体颗粒团聚体提供附着环境。

参考文献:

[1] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,等. 广西原状红粘土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学,2003,24(4):568-572. (ZHAO Yingwen,KONG Lingwei,GUO Aiguo,et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite[J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(4):568-572. (in Chinese))

[2] 孔令伟,陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(5):141-161. (KONG Lingwei,CHEN Zhenghan. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(5):141-161. (in Chinese))

[3] 张雪莲,吴道勇,叶雷,等. 胶体氧化物对红黏土微观结构和胀缩性的影响[J]. 长江科学院院报,2023,40(5):139-144. (ZHANG Xuelian,WU Daoyong,YE Lei,et al. Effect of colloidal oxides on microstructure and swelling-shrinkage property of red clay[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2023,40(5):139-144. (in Chinese))

[4] 李敏,张然然,田冰雪. 无机材料固化镉铅镍污染土的环境效应及失稳机制[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2024,46(4):202-210. (LI Min,ZHANG Ranran,TIAN Bingxue. Environmental effects and instability mechanism of cadmium,lead and

nickel contaminated soil solidified by inorganic materials[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(4): 202-210. (in Chinese))

[5] PARHIZKAR A, NAZARPOUR A, KHAYAT N. Investigation of geotechnical and microstructure characteristics of gypsum soil using ground granulated blast-furnace slag (GGBS), fly ash, and lime[J]. Construction and Building Materials, 2024, 418: 135358.

[6] 祝珺,李长明,狄龙飞,等. 黄河淤泥固化改性材料力学性能与微观结构试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 99-103. (ZHU Jun, LI Changming, DI Longfei, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructures of modified Yellow River sludge materials[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 99-103. (in Chinese))

[7] 刘松玉,夏威夷,魏明俐,等. MC 固化高浓度锌铅镉污染土的浸出和强度特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(增刊1): 51-56. (LIU Songyu, XIA Weiyi, WEI Mingli, et al. Leaching and strength properties of Zn, Pb and Cd contaminated soils stabilized by MC[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2016, 46(Sup1): 51-56. (in Chinese))

[8] 米吉福,汪浩,刘晶冰,等. 土壤固化剂的研究及应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(增刊1): 388-391. (MI Jifu, WANG Hao, LIU Jingbing, et al. Research and application progress of soil stabilizer[J]. Materials Reports, 2017, 31(Sup1): 388-391.

[9] 欧阳森,张红日,邓人睿,等. 黄原胶生物聚合物改良膨胀土裂隙演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(1): 106-114. (OUYANG Miao, ZHANG Hongri, DENG Renrui, et al. Development of cracks in expansive soil improved by xanthan gum biopolymer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(1): 106-114. (in Chinese))

[10] 卢毅,赵洪岩,蔡田露,等. 生物胶改良黏土抗崩解特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 64-71. (LU Yi, ZHAO Hongyan, CAI Tianlu, et al. Experimental study on disintegration resistance of clay improved by biological glue[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 64-71. (in Chinese))

[11] 王天亮,王林,刘松松,等. 黄原胶和瓜尔胶改良膨胀土力学特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 1-10. (WANG Tianliang, WANG Lin, LIU Songsong, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil improved by xanthan gum and guar gum[J]. China Railway Science, 2023, 44(2): 1-10. (in Chinese))

[12] 马晓凡,张晨阳,刘瑾,等. 含砂量对黄原胶复合黏土抗裂和抗冲刷性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 59-66. (MA Xiaofan, ZHANG Chenyang, LIU Jin, et al. Effect of sand content on anti-crack and anti-scour property of xanthan gum composite silty clay[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 59-66. (in Chinese))

[13] 齐梦瑶,胡梦园,刘瑾,等. 刺槐豆胶改良黏土强度抗压抗拉力学特性试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 43-50. (QI Mengyao, HU Mengyuan, LIU Jin, et al. Experimental study on compressive and tensile properties of locust bean gum modified clay soil strength[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2024, 41(2): 43-50. (in Chinese))

[14] 熊雨,邓华锋,彭萌,等. 四种人工合成纤维加筋黄土的抗剪特性[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 122-126. (XIONG Yu, DENG Huafeng, PENG Meng, et al. Shear properties of loess reinforced with four synthetic fibers[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(1): 122-126. (in Chinese))

[15] 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. (in Chinese))

[16] 胡达,璩继立. 纤维素纤维加筋土的力学特性[J]. 公路交通科技, 2018, 35(1): 22-27. (HU Da, QU Jili. Mechanical property of cellulose fiber reinforced clay[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(01): 22-27. (in Chinese))

[17] 宋泽卓,刘瑾,王梓,等. 剑麻纤维-聚丙烯酰胺改良客土干缩开裂试验研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 28-38. (SONG Zezhuo, LU Jin, WANG Zi, et al. Experimental study on dry shrinkage cracking of sisal fiber-polyacrylamide modified external soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 28-38. (in Chinese))

[18] WENG Zhiyu, WANG Lina, LIU Qiang, et al. Improving the unconfined compressive strength of red clay by combining biopolymers with fibers[J]. Journal of Renewable Materials, 2021, 9(8): 1503-1517.

[19] 李皋,舒淋,简旭,等. 基于不规则颗粒的砾岩力学性能数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8660-8665. (LI Gao, SHU Lin, JIAN Xu, et al. Numerical simulation for mechanical properties of conglomerate based on irregular particles[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(20): 8660-8665. (in Chinese))

[20] 柳伟,徐长节,杜昊东,等. 基于修正统一硬化模型的超固结非饱和红黏土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 1233-1241. (LIU Wei, XU Changjie, DU Haodong, et al. Stability analysis of overconsolidated unsaturated red clay slope based on

modified UH model[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(4):1233-1241. (in Chinese))

[21] 张金利,袁满,蒋正国,等. 纤维红黏土三轴试验与数值分析[J]. 人民长江,2013,44(19):64-68. (ZHANG Jinli,YUAN Man,JIANG Zhengguo, et al. Triaxial test and numerical analysis on fiber reinforced laterite clay[J]. Yangtze River,2013,44(19):64-68. (in Chinese))

[22] 陈志昊,刘瑾,钱卫,等. 高分子固化剂/纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J]. 工程地质学报,2019,27(2):350-359. (CHEN Zhihao,LIU Jin,QIAN Wei, et al. Experimental study on tensile strength of polymer curing agent/fiber modified sand [J]. Journal of Engineering Geology,2019,27(2):350-359. (in Chinese))

[23] 郭青林,李平,张博,等. 微纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 加固遗址土室内试验研究[J]. 岩土力学,2023,44(8):2221-2228. (GUO Qinglin,LI Ping,ZHANG Bo, et al. Laboratory test of micro-nano $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reinforced earthen sites[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(8):2221-2228. (in Chinese))

[24] 陈永辉,赵维炳,汪志强. 一个加筋复合土体的本构关系[J]. 水利学报,2002,33(12):26-32. (CEHN Yonghui,ZHAO Weibing,WANG Zhiqiang. The constitutive relationship of reinforced soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(12):26-32. (in Chinese))

[25] 卢浩,晏长根,贾卓龙,等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. 交通运输工程学报,2021,21(2):82-92. (LU Hao,YAN Changgen,JIA Zhuolong, et al. Shear strength and disintegration properties of polypropylene fiber-reinforced loess[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2021,21(2):82-92. (in Chinese))

[26] 马晓凡,陈红,刘瑾,等. CT 扫描视域下黏土干湿循环劣化机理[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):111-118. (MA Xiaofan,CHEN Hong,LIU Jin, et al. Deterioration mechanism of clay in dry-wet cycle under CT scanning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):111-118. (in Chinese))

[27] 贾卓龙,晏长根,包含,等. 生物胶-纤维固化黄土的三轴剪切特性研究[J]. 中国公路学报,2024,37(6):122-131. (JIA Zhuolong,YAN Changgen,BAO Han, et al. Triaxial shear characteristics of biological gum-fiber-reinforced loess [J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(6):122-131. (in Chinese))

[28] 杨万里,石玉玲,穆鹏雪,等. 瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究[J]. 水文地质工程地质,2022,49(4):117-124. (YANG Wanli,SHI Yuling,MU Pengxue, et al. An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2022,49(4):117-124. (in Chinese))

[29] 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))

(收稿日期:2024-06-05 编辑:刘晓艳)

(上接第 75 页)

[18] WANG Hongwei,WU Zhimin,WANG Yanjie, et al. Investigation on crack propagation perpendicular to mortar-rock interface: experimental and numerical[J]. International Journal of Fracture,2020,226(1):45-69.

[19] 汪铁楠. 不同界面粗糙度混凝土:花岗岩组合体的压缩力学性能及峰前裂纹演化模型研究[D]. 西安:长安大学,2023.

[20] 王伟,张宽,梅胜尧,等. 不排气条件下低渗透岩石力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):110-117. (WANG Wei,ZHANG Kuan,MEI Shengyao, et al. Experimental study on mechanical characteristics of low permeability rock under gas undrained condition[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):110-117. (in Chinese))

[21] 李地元,陈昱达. 单轴压缩下岩石裂纹扩展应力阈值识别与验证[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3121-3130. (LI Diyuan,CHEN Yuda. Identification and verification of stress threshold for rock crack propagation under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(Sup1):3121-3130. (in Chinese))

[22] 曹吉胜,戴前伟,周岩,等. 考虑界面倾角及分形特性的组合煤岩体强度及破坏机制分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(1):175-182. (CAO Jisheng,DAI Qianwei,ZHOU Yan, et al. Failure mechanism and strength of coal-rock combination bodies considering dip angles and fractal characteristics of interface [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(1):175-182. (in Chinese))

[23] LIU H H,RUTQVIST J,BERRYMAN J G. On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2009,46(2):289-296.

(收稿日期:2024-10-21 编辑:刘晓艳)