文章编号:1008-1534(2026)05-0396-09

干湿交替下 LBG-RSF 协同改良红黏土的静力特性

刘颖琳[1],张庆建[2],牛　坤[2],罗绪远[2],王立娜[3],丁修银[3]

(1.红河州大型灌区管理局,云南蒙自　661199;2.中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津　300222;3.云南农业大学水利学院,云南昆明　650201)

摘　要:为了解决云南弥勒红黏土干湿交替条件下力学特性易劣化的问题,进行刺槐豆胶(locust bean gum,LBG)-稻草秸秆纤维(rice straw fiber,RSF)协同改良试验研究。在 LBG 掺量为 4%(质量分数,下同)条件下,设置 RSF 掺量分别为 0%、0.2%、0.4%和 0.6%(质量分数,下同),分别进行 0、2、4、6 次干湿交替,通过无侧限抗压强度(以下简称抗压强度)试验与直剪试验,分析改良红黏土的静力特性。结果表明:LBG 可显著提高红黏土的抗压强度和黏聚力,掺入适量 RSF 可进一步加强改良效果,其中当 RSF 掺量为 0.4%时,其综合力学性能最优。随着干湿交替次数的增加,改良红黏土的抗压强度、弹性模量及黏聚力均呈下降趋势,且强度衰减主要集中在 2～4 次交替阶段。与未改良红黏土相比,LBG-RSF 协同改良红黏土可有效减缓干湿交替引起的抗压强度损失;直剪试验表明,协同改良对红黏土内摩擦角影响较小,静力特性的提升主要取决于黏聚力的显著增强;SEM 分析表明,LBG 在土颗粒表面及颗粒间形成凝胶网络结构,填充孔隙并胶结土颗粒,而 RSF 与凝胶及土颗粒相互搭接,形成复合骨架结构并发挥桥联加筋作用,从微观上提高了土体的整体性与稳定性。LBG-RSF 协同改良技术能够显著提高干湿交替环境下红黏土的结构稳定性和力学耐久性,可为红黏土地区的地基处理与长期服役性能设计提供一种低碳、可持续的改良途径。

关键词:岩土力学;干湿交替;红黏土;刺槐豆胶;稻草秸秆纤维;微观机理

中图分类号:TU446　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbgykj.2026yx05002

Static mechanical properties of red clay stabilized with locust bean gum and rice straw fiber under wet-dry cycling

LIU Yinglin[1], ZHANG Qingjian[2], NIU Kun[2], LUO Xuyuan[2], WANG Lina[3], DING Xiuyin[3]

(1. Honghe Prefecture Large-Scale Irrigation District Administration Bureau, Mengzi, Yunnan 661199, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Company Limited, Tianjin 300222, China; 3. School of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: To address the susceptibility of red clay from Mile, Yunnan Province, to mechanical degradation under wet-dry cycling, an experimental study was conducted using locust bean gum (LBG) and rice straw fiber (RSF). Under the condition

收稿日期:2026-01-05;修回日期:2026-08-31;责任编辑:王海云

基金项目:云南省"兴滇英才支持计划"青年人才项目(XDYC-QNRC-2022-0180);云南省弥泸灌区水库填筑料物理力学特性专题研究(H20250271)

第一作者简介:刘颖琳(1986—),女,云南金平人,高级工程师,主要从事水利水电工程相关技术研究和管理方面的工作。

通信作者:王立娜副教授。E-mail:wlnyongji@126.com

刘颖琳,张庆建,牛坤,等.干湿交替下 LBG-RSF 协同改良红黏土的静力特性[J].河北工业科技,2026,43(5):396-404.

Liu Yinglin, Zhang Qingjian, Niu Kun, et al. Static mechanical properties of red clay stabilized with locust bean gum and rice straw fiber under wet-dry cycling[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2026, 43(5): 396-404.

of LBG content (mass fraction, the same below) of 4% and RSF content (mass fraction, the same below) of 0%, 0.2%, 0.4%, and 0.6%, 0, 2, 4, and 6 wet-dry cycles were conducted to analyze the static mechanical properties of the stabilized red clay through unconfined compression and direct shear tests. The results show that LBG substantially increases the unconfined compressive strength and cohesion of red clay, while an appropriate RSF content further enhances the stabilization effect. The best overall mechanical performance is achieved at an RSF content of 0.4%. Compressive strength, elastic modulus, and cohesion generally decreases with increasing numbers of wet-dry cycles, with strength degradation occurring predominantly between the second and fourth cycles. Compared with untreated red clay, LBG-RSF stabilization effectively mitigates compressive strength loss induced by wet-dry cycle. Direct shear tests indicate that the combined treatment has a minor effect on the internal friction angle, with mechanical improvements primarily attributable to increased cohesion. Scanning electron microscopy (SEM) observations reveal that LBG forms a gel network on soil particle surfaces and between particles, filling pores and cementing particles together. RSF interlocks with the gel and soil particles to form a composite skeleton, providing bridging reinforcement and improving soil integrity and stability at the microscale. LBG-RSF stabilization can substantially enhance the structural stability and mechanical durability of red clay under wet-dry cycling environment. This approach provides a low-carbon, sustainable option for ground improvement and design for long-term service performance in red clay regions.

Keywords: geotechnical mechanics; wet-dry cycle; red clay; locust bean gum (LBG); rice straw fiber (RSF); microscopic mechanism

红黏土作为广泛分布在云南地区的特殊土体[1]，具有胀缩性和水敏性[2]。受干湿交替的影响，红黏土的强度和变形易发生显著劣化，进而影响坝体稳定性，不宜直接应用于大坝填筑工程中[3]，亟需合理的改良措施以提升其在干湿交替作用下的静力特性。

常见的红黏土处理方法是利用水泥和石灰等传统固化材料来改良红黏土的工程性质[4-6]。但此类传统材料的使用会消耗大量的不可再生资源，其排放的大量温室气体，会破坏动植物和微生物的生活环境，给生态系统造成不可逆的影响[7]。因此，迫切需要探索一种改良措施来减轻传统固化材料对环境的影响，确保工程建设的生态安全。随着科学技术的进步，许多生物型、环保型材料被开发并应用于岩土工程领域，有望弥补传统材料的缺陷并减少对环境造成的影响[8]。

目前，生物聚合物作为环境友好型改良剂被广泛应用于土壤固化[9-10]。已有研究表明，生物聚合物能够改善土颗粒间的胶结状态和排列结构，从而提高土体的工程性能。Cole 等[11]研究发现生物聚合物在砂土固化方面具有可行性，可极大改善土体的各项工程性能。Wang 等[12]研究表明黄原胶与土颗粒之间形成了致密的生物聚合物-红黏土结构，并改变了土颗粒间的排列规律，使得红黏土的抗剪强度得到显著提升。Liu 等[13]提出了一种使用刺槐豆胶(locust bean gum，LBG)加固天然土壤的新方法，试验结果表明，随着 LBG 含量的增加，处理后土壤的抗压强度、抗剪强度和抗拉强度显著提高。

纤维加筋技术经济高效，并与可持续发展理念相契合，在土体改良中应用较广[14-15]。该技术主要通过限制土体变形、抑制破裂面发展，达到提升土体力学性能的目的[16]。其中秸秆纤维作为常见的农业废弃物，来源广泛、成本低廉，且具有出色的生态可持续性与环境友好特性，是极好的绿色改良剂。郝建斌等[17]研究了麦秸秆纤维对土体抗剪强度的影响，发现麦秸秆可有效抑制土体变形及微裂隙发育，适宜作为黏性土的加筋材料。综上可知，纤维能够改善土体的变形与破坏特征，但单一纤维主要发挥物理加筋作用，其改良效果仍受到土体性质和工程环境等因素的制约。

将生物聚合物固化与纤维加筋相结合，可发挥二者的协同作用，改善土体的力学性能[18-19]。倪静等[20]的研究发现，生物聚合物联合纤维固化黄土能有效提升黄土在干湿交替和冻融环境下的工程耐久性。Mirzababaei 等[21]研究了聚丙烯纤维与不同新型聚合物的协同作用对黏土力学特性的影响，并发现不同聚合物均可通过添加纤维来进一步增强固化土体的强度。综上，现有红黏土改良研究多聚焦于理想条件下单一改良剂对其强度特性的影响。尽管近年来生物聚合物与纤维协同改良土体逐渐受到关注，但关于干湿交替条件下生物聚合物与纤维协同改良红黏土的研究仍较为缺乏。

本文以云南弥勒地区红黏土作为研究对象，选用 LBG 及稻草秸秆纤维(rice straw fiber，RSF)为改良剂，通过无侧限抗压强度(以下简称抗压强度)试验、直剪试验和微观分析，探究不同干湿交替次数及不同 RSF

掺量条件下 LBG-RSF 协同改良红黏土的静力特性及其微观机理。

1 试验材料

1.1 红黏土

试验所用红黏土取自云南省弥勒市弥泸灌区，该地区处于北亚热带季风气候区，干湿季分明，所选红黏土在自然状态下呈红棕色硬塑状，被用作水库坝体填筑材料，长期经受干湿交替影响。依据《公路土工试验规程》[22]开展击实、比重、界限含水率和颗粒分析试验，测得基本物理性质参数，如表 1 所示。结果表明，该土为高液限黏土，其颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 试验用红黏土的基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of test red clay

参 数	取值
液限/%	77.40
塑限/%	35.20
塑性指数	42.20
比重	2.72
最大干密度/(g/cm^3)	1.25
最优含水率/%	39.60

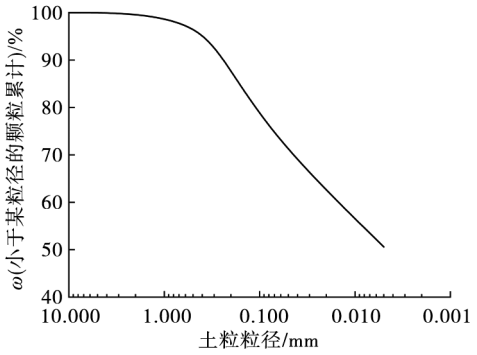


图 1 红黏土颗粒级配曲线

Fig. 1 Red clay particle gradation curve

1.2 LBG 和 RSF

试验所用生物聚合物为 LBG[见图 2 a)]，提取于刺槐树种子的胚乳，白色粉末，属于天然亲水性植物凝胶。LBG 的主要成分为半乳甘露聚糖，是以半乳糖与甘露糖残基为基本结构单元的多糖类化合物[23]，其分子结构式如图 2 c)所示，基本物理性质如表 2 所示。

试验所用 RSF[见图 2 b)]为天然植物纤维材料，是由水稻秸秆晒干后粉碎制成的纤维状物质。RSF 具有来源广泛、可再生及环境友好等特点，适用于土体加筋与改良研究。

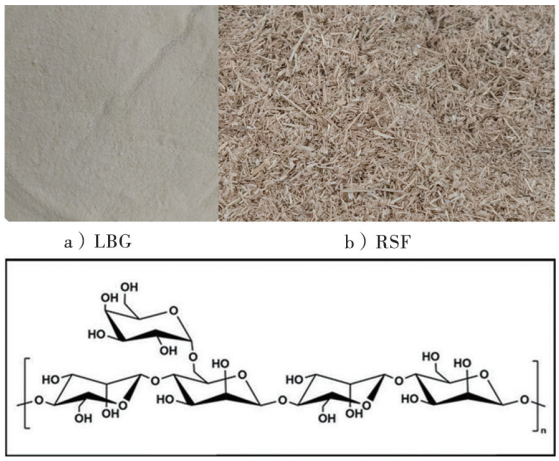


图 2 改良材料及 LBG 分子结构式

Fig. 2 Molecular structural formula of the modified material and locust bean gum

表 2 LBG 基本物理性质

Tab. 2 Basic physical properties of locust bean gum

参 数	取 值
颜色	白色
pH	5.5～7.0
ω(灰分)/%	1.2
黏度(1%)/(MPa·s)	1 100 ～1 700
干燥失重/%	≤14
ω(半乳甘露聚糖)/%	≥78

2 试验方法

2.1 样品制备

首先，将原状红黏土置于 105 ℃干燥箱中干燥 24 h，随后利用土壤粉碎机粉碎并过 2 mm 筛。其次，按设计掺量将 LBG 粉末、RSF 与干土采用干拌法充分混合，再利用喷壶将去离子水均匀喷洒在胶土混合料中，混合均匀后，置于密封袋内养护 24 h，确保水分均匀分布。最后，采用击实法将无侧限抗压试样分 3 层成型，试样直径为 39.1 mm，高度为 80 mm。直剪试样采用静压法一次成型，试样尺寸直径为 61.8 mm，高度为 20 mm，干密度误差控制在 0.02 g/cm^3。成型后的试样用保鲜膜包裹密封，在标准养护条件下养护 14 d 后进行后续试验。养护龄期依据抗压强度预试验确定。预试验结果表明，养护 14 d 后，试样抗压强度增长趋缓。通过击实试验获得试样的最大干密度为 1.25 g/cm^3，最优含水率为 39.6%。依据已有研究成果[24]及预试验，LBG 掺量(质量分数，下同)固定为 4%，RSF 掺量分别设为 0%、0.2%、0.4%、0.6%(质量分数，下同)。

LBG-RSF 协同改良红黏土的试样制备与试验流程如图 3 所示。

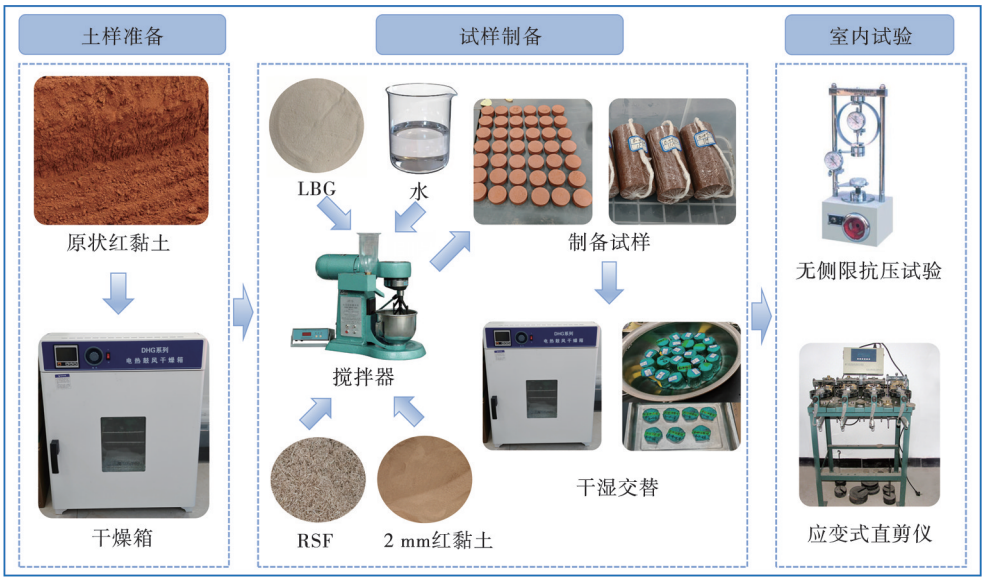


图 3　LBG-RSF 协同改良红黏土的试样制备与试验流程

Fig. 3　Specimen preparation and experimental procedures for LBG-RSF synergistically improved red clay

2.2　干湿交替试验

干湿交替试验中，考虑到红黏土显著的水敏性，试样直接浸入水中，极易快速软化崩解。为此，在养护结束后用超薄无纺布包裹试样，可防止试样在浸水后迅速崩解及细颗粒组分的流失。湿润阶段采用浸水法，将包裹后的试样置于水中浸泡 12 h，水面高于试样顶面 2 cm。干燥过程采用质量控制法，将浸泡试样置于干燥箱中，温度设为 40 ℃，每间隔 0.5 h 称量一次，直至试样含水率降至 10%。至此视为一次干湿交替循环。重复上述操作，以实现多次干湿交替过程。本试验干湿交替次数分别设置为 0、2、4、6 次。干湿交替过程如图 4 所示。

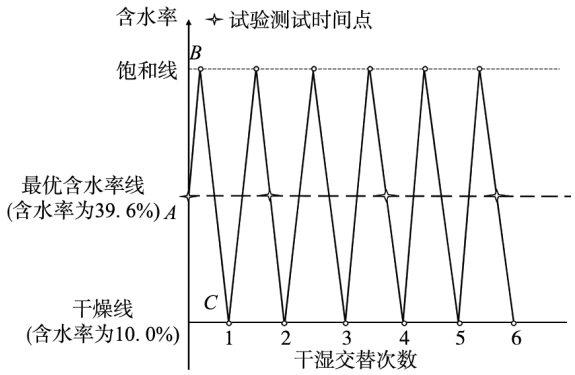


图 4　干湿交替过程

Fig. 4　Dry-wet cycle process

2.3　力学特性试验

无侧限抗压强度试验采用 YYW-2 型应变控制式三轴仪（南京土壤仪器厂有限公司提供），试验方法严格遵循《公路土工试验规程》[22]。设定加载速率为 2.4 mm/min，试样尺寸为 Φ 39.1 mm×80.0 mm。将应力-应变曲线峰值作为抗压强度，若曲线中无明显峰值，则取轴向应变为 15%时的轴向应力值。为降低试验误差，各工况均制备 3 个平行试样，试验结果取其算术平均值进行分析。同时测量应力-应变曲线原点与峰值强度一半（$q_u/2$）之间的斜率，得到弹性模量（E_{50}），表示试样的弹性刚度[26]。采用强度损失率评价干湿交替引起的强度衰减，计算公式为

$$R_s=\frac{q_{u,0}-q_{u,N}}{q_{u,0}}, \tag{1}$$

式（1）中：R_s 为试样的强度损失率，%；$q_{u,0}$ 为未经历干湿交替的抗压强度，kPa；$q_{u,N}$ 为第 N 次干湿交替后的抗压强度，kPa。

直剪试验采用 ZJ 型应变控制式直剪仪（南京土壤仪器厂有限公司提供），试验步骤依据《公路土工试验规程》[22] 快剪试验进行，剪切速率设置为 0.8 mm/min，法向应力分别设置为 100、200、300、400 kPa。且每种试验条件下分别制备 6 个平行试样，其中 2 个试样备用。后续根据莫尔-库伦强度准则，计算抗剪强度指标（即黏聚力 c 和内摩擦角 φ）。

2.4　微观试验

采用扫描电子显微镜（TESCAN VEGA3，泰斯肯集团提供）分析 LBG 及 RSF 对红黏土的改良效果及其作用机理。测试样品需经过烘箱（上海精宏实验设备有限公司提供）60 ℃干燥 3 d，对试样进行干燥处理。试验前，还需对其表面进行镀金处理，以提高导电性，处理后将试样置于扫描电子显微镜进行抽真空处理，并进行扫描观察。

3 结果与分析

3.1 无侧限抗压强度试验分析

图 5 为不同改良剂配比下试样经过不同干湿交替次数后的应力-应变关系曲线。由图 5 可知，改良剂掺量相同条件下，随着干湿交替次数的增加，试样的抗压强度逐渐降低，峰值强度出现后，抗压强度随应变增加迅速衰减。LBG 的加入显著提高了试样的抗压强度，并有效增大了峰值应变，掺入适量 RSF 可进一步增强改良效果，表明 RSF 可有效改善土体变形能力。然而，随着干湿交替次数的增加，抗压强度峰值及对应的应变值明显呈下降趋势。以 LBG 掺量为 4%、RSF 掺量为 0.4%为例，随干湿交替次数的增加，应变峰值从 11.00%降低至 7.25%，反映出干湿交替对改良红黏土变形性能的持续削弱作用。

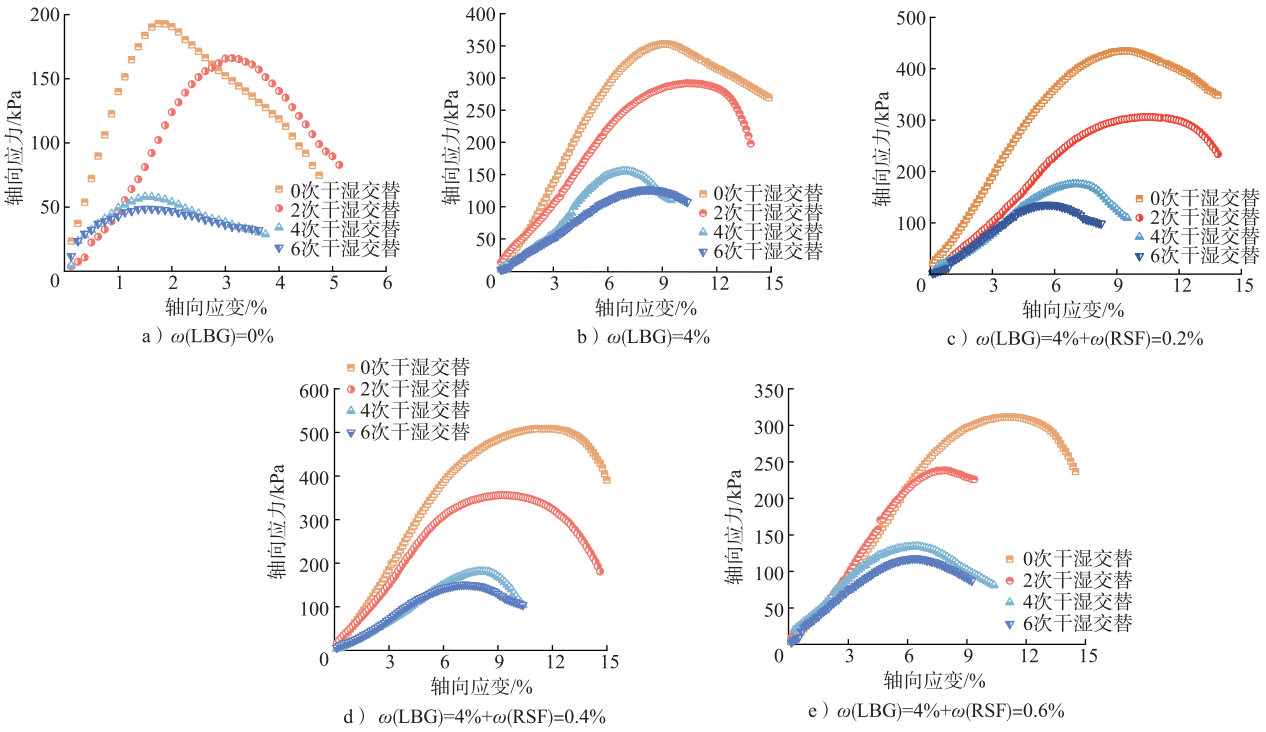


图 5 不同改良剂配比下试样经过不同干湿交替次数后的应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain relationship curves of specimens with different modifier ratios after undergoing different dry-wet cycles

图 6 为在不同的改良剂配比和干湿交替次数下试样的抗压强度变化曲线。

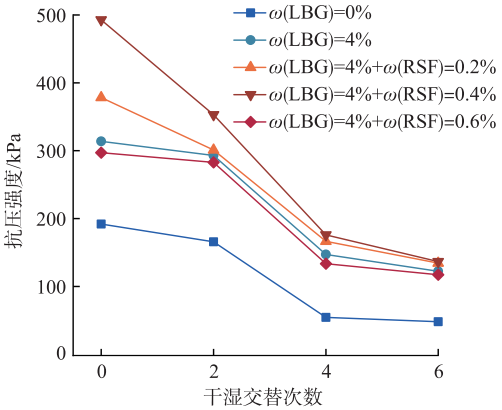


图 6 不同改良剂配比和干湿交替次数下试样的抗压强度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of the compressive strength of the specimens under different ratios of modifiers and different numbers of dry-wet alternations

从图 6 可知，在 LBG 掺量为 4%、RSF 掺量为 0.4%时，试样的抗压强度达到最大值。且未经历干湿交替作用时，试样在 LBG 掺量固定为 4%时，抗压强度随 RSF 掺量增加呈先增大后减小的趋势，表明当 RSF 掺量较低时，纤维起到正向作用，可作为“增强筋”传递应力抑制裂缝产生，并与 LBG 凝胶网络协同发挥作用；RSF 掺量过高易发生团聚，破坏凝胶网络导致土体内部出现薄弱区，从而削弱改良效果。当改良剂掺量相同，且经过 2～4 次干湿交替作用时，试样的抗压强度下降最为显著。不同改良剂配比下，0 次干湿交替时试样的抗压强度分别为 192.98、313.79、378.23、492.72、297.09 kPa，经历 6 次干湿交替后，试样的抗压强度分别为 48.31、122.32、134.43、136.62、117.64 kPa，由此可知，经历 6 次干湿交替后，试样的抗压强度分别降低了 74.97%、61.02%、64.45%、72.27%、60.40%。

干湿交替作用下改良红黏土的抗压强度的衰

减，主要源于土体内部微结构损伤及胶结作用的劣化。在湿润阶段，LBG 凝胶结构发生吸水膨胀软化，黏结力降低，同时纤维-土体的界面黏结被削弱；在干燥阶段，土体失水收缩导致凝胶胶结键发生疲劳断裂，且易在纤维附近产生微裂隙，导致团聚体结构逐步破坏。干湿交替作用逐渐导致凝胶结构持续劣化、微裂隙发展，最终导致试样的抗压强度不断降低。

为进一步揭示改良红黏土的抗变形破坏能力，选取弹性模量作为关键力学指标，分析不同 RSF 和 LBG 掺量下试样弹性模量与干湿交替次数之间的关系，从而评价改良剂对红黏土力学性能的影响。图 7 为不同改良剂配比和干湿交替次数下试样的弹性模量的变化曲线。

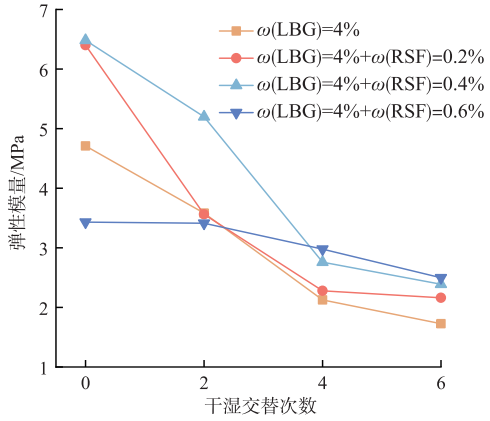


图 7　不同改良剂配比和干湿交替次数下试样的弹性模量变化曲线

Fig. 7　Variation curves of the elastic modulus of the specimens under different modifiers ratios and wet-dry cycles

由图 7 可知，在未经历干湿交替作用时，改良试样的弹性模量随着 RSF 掺量的增加先增大后减小，并在 RSF 掺量为 0.4%时达到峰值。这表明适当掺入 RSF 可有效提高土体的整体刚度，而过量的 RSF 因团聚效应会削弱土体的改良效果。随着干湿交替次数增加，试样的弹性模量呈现先降低后趋于稳定的趋势，其中在 2～4 次干湿交替阶段的降幅最为显著，表明在干湿交替过程中反复吸水与失水，加剧了 RSF、土体及 LBG 凝胶结构间的损伤，而可能促进了微裂隙的产生与扩展。干湿交替对土体结构的影响主要集中于前期循环阶段。

图 8 为不同改良剂配比及干湿交替次数下试样的抗压强度损失率。在干湿交替次数相同时，当 LBG 的掺量为 4%时，试样的抗压强度损失量最小，抗压强度损失率显著降低。随 RSF 掺量的增加，试样的抗压强度损失率先增加后减小，但整体平均低于未改良红黏土的抗压强度损失率。在不同干湿交替次数作用下，未改良红黏土的抗压强度损失率分别为 42.37%、79.82%、83.05%，当 LBG 的掺量为 4%时，试样的抗压强度损失率分别为 17.43%、56.01%、64.10%。

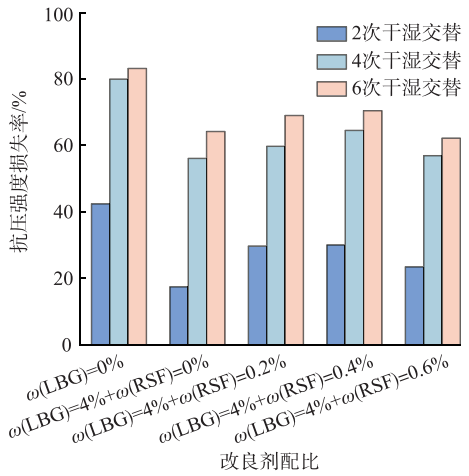


图 8　不同改良剂配比及干湿交替次数下试样的抗压强度损失率

Fig. 8　Compressive strength loss rate of specimens under different modifier ratios and dry-wet cycles

结果表明，LBG 对减缓干湿交替引起的强度劣化具有显著效果。RSF 的加入，可有效提高试样抗压强度的峰值，与单独掺入 LBG 相比，干湿交替作用的影响更为显著。

3.2　直剪试验分析

基于不同法向应力条件下测得的抗剪强度试验结果，整理得到不同 LBG 与 RSF 配比下改良红黏土试样的黏聚力随干湿交替次数的变化规律，如图 9 所示。

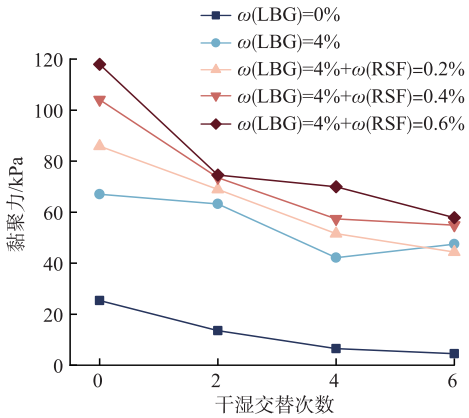


图 9　不同改良剂配比下试样黏聚力随干湿交替次数的变化关系

Fig. 9　Relationship between cohesion of specimens and wet-dry cycles under different modifier ratios

由图 9 可知，不同改良剂配比下，0 次干湿交替后改良试样的黏聚力分别为 25.38、66.99、85.92、

104.14、117.94 kPa；6 次干湿交替后试样黏聚力降幅依次为 82.23%、29.16%、48.39%、47.25%、50.98%。与未改良土试样相比，LBG 与 RSF 协同改良可显著降低干湿交替对红黏土黏聚力的不利影响。在不同改良剂配比条件下，试样黏聚力随着干湿交替次数的增加而降低，黏聚力的衰减呈现出明显的阶段性特征。前 2 次干湿交替后，黏聚力降幅最为显著；3～6 次干湿交替后，黏聚力下降程度趋于平缓。这表明在干湿交替初期试样内部结构破坏较为剧烈，导致黏聚力快速衰减。随着交替次数的增加，黏聚力变化幅度相应较小，土体内部结构趋于稳定。综上所述，6 次干湿交替后，改良红黏土的黏聚力平均下降 43.95%，与未改良土试样相比下降程度减缓 46.55%。改良处理对红黏土力学性能的提升主要体现在黏聚力的增加。

在单掺和协同改良条件下，改良红黏土的黏聚力总体而言与 LBG 和 RSF 的掺量呈正相关。LBG 的掺入增强了土颗粒间的黏结力，RSF 在土体中起到了拉筋作用，并与 LBG 协同强化了纤维-土体界面的胶结能力，从而大幅提升黏聚力。尽管 RSF 掺量较大的土试样受到的干湿交替作用影响较大，但经历 6 次干湿循环后，改良土试样的黏聚力仍比未受干湿交替影响的未改良土试样提高了18.96 kPa。

不同改良剂配比下试样的内摩擦角随干湿交替次数的变化关系如图 10 所示。由图可知，不同 LBG 和 RSF 配比下改良红黏土的内摩擦角，随干湿交替次数的增加先减小后趋于稳定，变化范围约为 21°～28°，最大差值约为 7°。随着 RSF 掺量的增加，内摩擦角呈减小趋势，主要原因是 RSF 的加入减小了土颗粒间的直接接触，同时纤维与土界面间的摩阻力有限；当 RSF 掺量较大时，纤维团聚现象进一步破坏了颗粒间的约束作用。研究表明，干湿交替作用通过改变土颗粒表面的接触条件促使颗粒结构发生重排，是导致试样内摩擦角变化的主要原因[26]。综上所述，LBG-RSF 协同作用更多是通过提高黏聚力来改善红黏土的力学性能，而非增大内摩擦角。

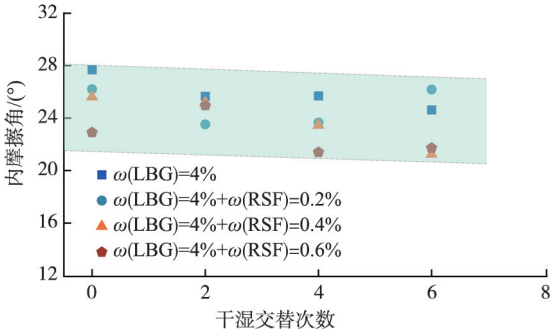
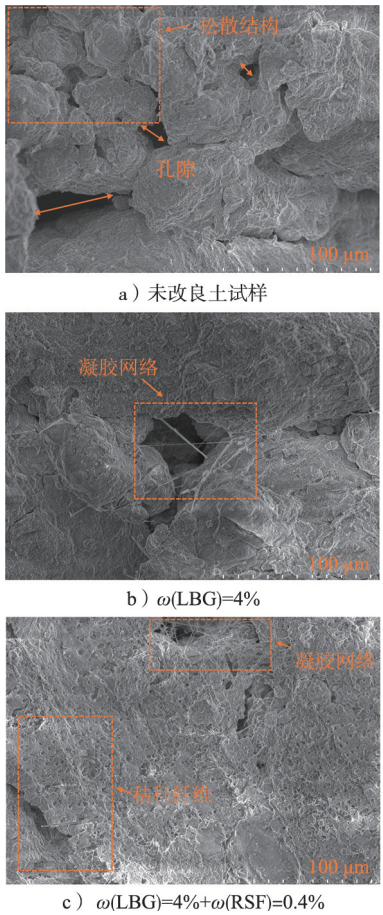


图 10 不同改良剂配比下试样的内摩擦角随干湿交替次数的变化范围

Fig. 10 Distribution range of internal friction angle with wet-dry cycles

3.3 微观分析

图 11 为未改良土试样与改良土试样的 SEM 图。由图可知，未改良土试样颗粒分布较为松散，团聚体之间存在较多形态不规则的孔隙，颗粒间接触较弱，整体结构较疏松。掺入 4%LBG 后，土颗粒表面及颗粒之间形成了较明显的凝胶结构，该结构对颗粒起到了包裹、胶结和填充作用，使原有大孔隙得到一定程度的填充，颗粒间连接也由原来的松散接触逐渐转变为较紧密的胶结连接，土体密实性明显增强。进一步掺入 0.4%RSF 后，可以观察到 RSF 与周围土颗粒及 LBG 凝胶相互交织，形成了较为稳定的复合骨架。RSF 的桥联和牵拉作用有助于限制颗粒位移，减弱局部结构破坏，同时降低孔隙连通性，从而提高土体的整体性和稳定性。因此，LBG 的胶结填充作用与 RSF 的加筋桥联作用相互配合，共同促进了改良土强度和结构稳定性的提升。



a）未改良土试样

b）ω(LBG)=4%

c）ω(LBG)=4%+ω(RSF)=0.4%

图 11 未改良土试样与改良土试样的 SEM 图

Fig. 11 SEM images of untreated and treated soil specimens

4　结　语

本研究以云南弥勒地区水库坝体填筑用红黏土为研究对象，通过抗压强度试验、直剪试验和微观分析，揭示了其在不同干湿交替次数及不同 LBG 和 RSF 配比条件下，改良红黏土的静力特性及其微观机理。主要结论如下。

1）LBG 改良可显著提高红黏土的抗压强度；相比于单掺，LBG-RSF 协同作用下红黏土的抗压强度提升更为显著，且随着 RSF 的增加呈先增后降的变化规律。

2）干湿交替作用下，改良红黏土的抗压强度及弹性模量呈整体下降趋势，其中 2～4 次干湿交替阶段下降幅度最为显著。当 LBG 和 RSF 的掺量分别为 4%和 0.4%时，其力学特性影响最小，抗干湿劣化效果最好。

3）干湿交替次数对红黏土的抗剪强度的影响较为显著。随干湿交替作用的增加，黏聚力总体呈现先减小后逐渐趋于平稳的变化趋势，内摩擦角的变化范围为 21°～28°，最大差值约为 7°。经 6 次干湿交替后改良红黏土的黏聚力平均下降 43.95%；与未改良土试样相比，下降程度减缓 46.55%。说明协同改良对红黏土力学性能的提升主要体现在黏聚力的增强。

4）SEM 结果表明，LBG 的胶结填充作用与 RSF 的桥联加筋作用共同构成了协同改良红黏土强度提升的主要微观基础。

5）干湿交替作用会损伤 LBG 形成的凝胶网络并削弱秸秆纤维与土体界面的相互作用。经历 6 次干湿交替后，3 个协同改良组的抗压强度均高于未改良组，其中“ω(LBG)＝4%＋ω(RSF)＝0.2%”组和“ω(LBG)＝4%＋ω(RSF)＝0.4%”组高于单掺 LBG 组。

由此可见，LBG 及 RSF 作为环保型土体改良添加剂，在岩土工程实践中具有广阔的应用潜力。后续可针对不同长度的 RSF 进行深入分析，为绿色改良剂应用于土壤改良领域提供参考。

参考文献/References：

[1] 王泽成，李栋伟，张潮潮，等. 考虑含水率对人工冻结红黏土力学特性的影响[J]. 地质科技通报，2022，41(6)：287-293.
Wang Zecheng，Li Dongwei，Zhang Chaochao，et al. Effect of water content on the mechanical properties of artificially frozen red clay[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2022，41(6)：287-293.

[2] 杨鑫，陈学军，宋宇，等. 中国红黏土的成因及物理力学特征研究进展[J]. 河北地质大学学报，2022，45(4)：1-5.
Yang Xin，Chen Xuejun，Song Yu，et al. Research progress on genesis and physico-mechanical characteristics of red clay in China[J]. Journal of Hebei Geo University，2022，45(4)：1-5.

[3] 曾宏，熊湾. 石家水库大坝填筑红黏土掺砂改良试验分析[J]. 广西水利水电，2025(4)：12-15.
Zeng Hong，Xiong Wan. Experimental analysis on the improvement of red clay mixed with sand for dam filling of Shijia reservoir[J]. Guang Xi Water Resources & Hydropower Engineering，2025(4)：12-15.

[4] 龚锦林，卓斌. 水泥改良高液限红黏土力学性能及微观机制研究[J]. 湖南交通科技，2022，48(3)：17-22.
Gong Jinlin，Zhuo Bin. Study on mechanical properties and micro mechanism of cement modified high liquid limit red clay[J]. Hunan Communication Science and Technology，2022，48(3)：17-22.

[5] 王红旗，李栋伟，钟石明，等. 石灰改良红黏土导热系数影响因素及模型预测[J]. 科学技术与工程，2023，23(5)：2084-2092.
Wang Hongqi，Li Dongwei，Zhong Shiming，et al. Influence factors and model prediction of thermal conductivity of lime-modified red clay[J]. Science Technology and Engineering，2023，23(5)：2084-2092.

[6] 赵秀绍，陈子溪，饶江龙，等. 红黏土、石灰复合改良千枚岩土胀缩特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2023，42(11)：50-56.
Zhao Xiushao，Chen Zixi，Rao Jianglong，et al. Expansion and shrinkage characteristics of red clay and lime composite modified phyllite[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)，2023，42(11)：50-56.

[7] Gao Tianming，Dai Tao，Shen Lei，et al. Benefits of using steel slag in cement clinker production for environmental conservation and economic revenue generation[J]. Journal of Cleaner Production，2021，282：124538.

[8] 梁玉红，刘玲，蒋鹏，等. 生物胶-秸秆纤维复合改良黏性土强度特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2025，53(6)：147-157.
Liang Yuhong，Liu Ling，Jiang Peng，et al. Experimental study on strength characteristics of bio-glue and straw fiber composite modified cohesive soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences)，2025，53(6)：147-157.

[9] 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.

[10] Weng Zhiyu，Yu Jin，Deng Yongfeng，et al. Mechanical behavior and strengthening mechanism of red clay solidified by xanthan gum biopolymer[J]. Journal of Central South University，2023，30(6)：1948-1963.

[11] Cole D M，Ringelberg D B，Reynolds C M. Small-scale mechanical properties of biopolymers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2012，138(9)：1063-1074.

[12] Wang Lina，Weng Zhiyu，Liu Qiang，et al. Improving the mechanical properties of red clay using xanthan gum biopolymer[J]. International Journal of Polymer Science，2021，2021(1)：1535772.

[13] Liu Jin, Che Wenyue, Lan Xiaowei, et al. Performance and mechanism of a novel biopolymer binder for clayey soil stabilization: Mechanical properties and microstructure characteristics[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 42: 101044.

[14] 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.

[15] Marandi S M, Bagheripou M H, Rahgozar R, et al. Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils[J]. American Journal of Applied Sciences, 2008, 5(3): 209-220.

[16] 王鹏，唐朝生，王德银，等. 纤维加筋市政污泥干燥蒸发与开裂特性的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2016，46(增刊 1)：88-93.
Wang Peng, Tang Chaosheng, Wang Deyin, et al. Experimental investigation on dry evaporation and cracking behavior of fiber reinforced municipal sludge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(S1): 88-93.

[17] 郝建斌，魏兴梅，姚婕，等. 麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2019，47(6)：764-768.
Hao Jianbin, Wei Xingmei, Yao Jie, et al. Strength characteristics and mesostructure of wheat straw reinforced soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6): 764-768.

[18] 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.

[19] 杜常博，李枫，易富，等. 瓜尔豆胶-纤维协同改性固化土的多尺度作用机制[J]. 复合材料学报，2026，43(7)：4315-4331.
Du Changbo, Li Feng, Yi Fu, et al. The multi-scale action mechanism of guar gum-fiber synergistic modified stabilized soil[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(7): 4315-4331.

[20] 倪静，朱莉莉，耿雪玉. 生物聚合物联合纤维固化黄土的耐久性研究[J]. 硅酸盐通报，2025，44(6)：2222-2232.
Ni Jing, Zhu Lili, Geng Xueyu. Durability of biopolymers combined with fiber-treated loess[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(6): 2222-2232.

[21] Mirzababaei M, Arulrajah A, Horpibulsuk S, et al. Stabilization of soft clay using short fibers and poly vinyl alcohol[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(5): 646-655.

[22] JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S].

[23] 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.

[24] Altun S, Göktepe B, Sezer A. Relationships between shape characteristics and shear strength of sands[J]. Soils and Foundations, 2011, 51(5): 857-871.

[25] Shen Xianfei, Wang Lina, Yang Bijin, et al. Effect of locust bean gum biopolymer on mechanical properties of organic soil [J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 84(1): 34.

[26] 杜志祥，白丁伟，时步炯，等. 干湿循环作用下嵊州-新昌地区红层软岩崩解及强度弱化特性[J]. 地质科技通报，2024，43(1)：253-261.
Du Zhixiang, Bai Dingwei, Shi Bujiong, et al. Disintegration and strength weakening characteristics of red-bed soft rock in the Shengzhou-Xinchang area under dry-wet cycles[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 253-261.