

•土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202301074



本刊网刊

## 椰壳纤维加筋石灰改良土力学性能试验研究

李丽华<sup>1,2</sup>, 刘文<sup>1,2</sup>, 李玉涛<sup>1,2\*</sup>, 王翠英<sup>1,2</sup>, 叶治<sup>1,2</sup>

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 湖北工业大学 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**摘要:**为进一步提高石灰土在工程中的适用性,解决植物椰壳纤维合理利用的问题,对椰壳纤维改性石灰土进行试验研究。通过开展无侧限抗压强度试验、干湿循环试验,核磁共振(NMR)试验和扫描电镜(SEM)试验,分析不同养护龄期、椰壳纤维掺量及干湿循环次数对改性石灰土力学性能的影响规律,揭示纤维加筋石灰土力学性能改善的内在机理。结果表明:纤维的掺入改善了石灰土性质,随着椰壳纤维的增加,抗压强度呈现先增大后减小的趋势,但掺入纤维的石灰土强度比石灰土高;加入纤维后试样破坏形式由脆性变为塑性,纤维最优掺量为0.75%。养护龄期越长,椰壳纤维石灰土抗压强度越大,在破坏应变时抵抗变形需要吸收的能量越多。随着干湿循环次数增加,土体质量损失率逐渐增加;压实度相同时,纤维石灰土抗压强度随干湿循环次数的增加先上升后下降,在第1次循环时抗压强度最大;循环次数与纤维掺量一定时,压实度越大试样抗压强度越大。微观试验显示:随着干湿循环次数增加,土体孔隙呈现先减小后增大的趋势;椰壳纤维的加入虽然使石灰土中孔隙显著增多,但椰壳纤维可以引导水化物分布,产生黏结力,且受力时与土体产生较大摩擦力,限制土体变形,从而有效抑制破坏面的扩展。研究结果可为椰壳纤维石灰土在实际工程中的应用提供参考。

**关键词:**椰壳纤维;石灰;无侧限抗压强度;干湿循环;微观分析

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2025)06-0131-11

早在公元前1600—1100年,商朝人已开始用石灰改善土体性能<sup>[1]</sup>;在国外,石灰土的应用也得到了广泛关注,在罗马、希腊的建筑<sup>[2]</sup>中都有所体现。

目前,将石灰作为固化剂处理土体的技术已经十分成熟。周葆春等<sup>[3]</sup>研究石灰改良膨胀土发现,石灰土具有较高的刚度和强度。Pu等<sup>[4]</sup>研究石灰固化淤泥土得出,当石灰掺量为8%时,土体的无侧限抗压强度(UCS)最佳。但石灰土也有缺点,例如脆性大、早期强度低、应用于道路易开裂等。为改善石灰土性能,研究者们引入土工合成材料<sup>[5-7]</sup>和纤维<sup>[8-9]</sup>,使其在复杂几何形状和有限空间中使用的通用性更强<sup>[10]</sup>、延展性及可变形性更高。陈雷等<sup>[11]</sup>将不同掺量聚丙烯纤维加入石灰改良膨胀土发现,加入适量纤维可以抑制土体膨胀,提高土体抗压强度和抗剪强度。Jahandari等<sup>[12]</sup>采用土工格栅改善土体延性,研究土工格栅和石灰处理

土的UCS、破坏应变、割线模量、变形指数、回弹模量、体积模量和剪切模量,结果表明土工格栅和石灰的加入显著提高了黏性土的土工特性。Jiang等<sup>[13]</sup>将聚丙烯纤维加入石灰土进行无侧限抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验,结果发现,纤维在石灰土中主要起到加筋作用,提高了石灰土的UCS和劈裂抗拉强度(STS)。阮波等<sup>[14]</sup>研究玻璃纤维的长度和掺量对石灰固化红黏土力学性能的影响,得出纤维掺量最优值为1%,长度最优值为9 mm。Wei等<sup>[15]</sup>研究了掺入小麦纤维、稻草纤维、黄麻纤维及聚丙烯纤维对石灰土性能的影响,结果表明,聚丙烯纤维石灰土和黄麻石灰土的内聚力增加,稻草纤维石灰土和麦草石灰土的内聚力减少。

综上所述,目前土体性能改良材料大多采用玻璃纤维、聚丙烯纤维等。随着环境污染问题日益严

收稿日期:2023-12-28 修回日期:2024-03-03 网络出版日期:2024-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52278347;42407265);湖北省基金创新群体项目(2024AFA009);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队项目(T2023006)

作者简介:李丽华(1980—),女,教授,博士。研究方向:加筋土;环境岩土。E-mail:researchmailbox@163.com

\*通信作者:李玉涛,讲师,E-mail:liyutaomail@163.com

峻,急需发展经济、绿色环保的土体改良措施。椰壳纤维作为天然高分子材料,具有良好的力学性能,且椰壳纤维全球产量高达 $5 \times 10^6$  t/年,堆积严重,将其应用于路基或边坡,不仅能大大降低工程造价,提高土体强度和稳定性,而且解决了资源浪费和环境污染的问题。

本文以椰壳纤维加筋石灰土为研究对象,开展无侧限抗压强度试验,研究在不同养护龄期下,不同纤维掺量对石灰土性能的影响。采用干湿循环试验方法对椰壳纤维石灰土的耐久性进行分析,研究干湿循环次数、压实度、纤维掺量对石灰土性能的影响规律。结合核磁共振(NMR)试验和扫描电镜(SEM)试验对椰

壳纤维石灰土进行微观分析,揭示椰壳纤维加筋石灰土性能改善的内在机理。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验土样塑限为 26.2%,液限为 51.3%,最大干密度为  $1.7 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为 19.6%,为高塑限黏土。

土体力学性能改良材料采用天然椰壳纤维和石灰。天然纤维在天津市加加绿色产品科技有限公司购买,长度为 12~20 cm,颜色为黄褐色,抗拉强度良好,纤维基本性质见表 1;石灰采用含钙量为 99% 的生石灰。

表 1 椰壳纤维性质

Tab. 1 Properties of coconut fiber

纤维长度/cm	纤维密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗拉强度/MPa	延伸率/%	初始弹性模量/GPa
12.0~20.0	1.1~1.2	85.2~110.5	0.2~0.3	2.1~2.4

### 1.2 试验设计

参考前人研究成果<sup>[16-17]</sup>,设计石灰掺量为 3%,纤维掺量为 0、0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00%。此外,前期相关研究表明纤维长度为 3 mm 时纤维土的性能最佳,因此试验纤维长度采用 3 mm。试验前将纤维表面附着物用水清洗干净,然后晾干。试样养护龄期设置为 7、14、28 和 60 d。将石灰掺量定义为石灰质量与

土样干土质量之比,将纤维掺量定义为纤维质量与土样干土质量之比。试验配比设计见表 2。

为方便表述,将每种配比用代号表示,如  $L_3F_{0.75}$  表示石灰掺量为 3%,椰壳纤维掺量为 0.75%,以此类推。在标准养护箱(温度为  $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度为  $(99 \pm 5)\%$ )中养护至指定龄期。为保证数据可靠性,每组试样均设置 3 个平行试样。

表 2 试验配比设计

Tab. 2 Design of each test ratio

组别	试验类型	石灰掺量/%	纤维掺量/%	压实度/%	养护龄期/d	循环次数
1	无侧限抗压强度试验	3	0、0.25、0.50、0.75、1.00	96	7、14、28、60	
2	干湿循环试验	3	0、0.75	90、93、96、99	28	0、1、2、3、4、5、6
3	核磁共振(NMR)试验	3	0、0.75	96	28	0、1、2、3、4、5、6
4	扫描电镜(SEM)试验	3	0、0.75	96	28	0、6

### 1.3 试验过程

无侧限抗压强度试验采用微机控制电子万能试验机。在试验中的应力-应变曲线有明显峰值后,停止加载;若没有明显峰值,当轴向应变达到 20% 时,停止加载;破坏应变选取轴向应变为 15% 时的取值。

干湿循环试验采用先湿后干,将达到养护龄期的土样放至室温下完全浸水 12 h,然后取出试样,置于低温烘箱( $50^\circ\text{C}$ )中 12 h,此为一个完整的干湿循环。

从无侧限抗压强度压碎试验中取出的高度为 15~30 mm、直径 10~15 mm 的土样作为核磁共振试验的样品,抽真空 8 h、饱和 12 h,采用饱和试样进行核磁共振试验。

扫描电镜试验取无侧限抗压试验试样中心代表性土样,面积为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,厚度小于 2 mm。将其置

于真空冷冻干燥机进行干燥,对试样表面进行真空金属喷金技术预处理,以减小样品在扫描时表面放电的干扰<sup>[18]</sup>。最后,采用合适倍数进行观测。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 无侧限抗压强度试验

#### 2.1.1 无侧限抗压强度

图 1 为不同纤维掺量下椰壳纤维石灰土的无侧限抗压强度。由图 1 可以看出:

1)在同一龄期下,不同含量椰壳纤维的加入改变土样抗压强度且呈现先增大后减小趋势。以 28 d 养护龄期为例,不同纤维掺量下土样无侧限抗压强度与石灰土相比至少提高了 1.19 倍,最高提高了 1.34 倍,并且椰壳纤维的加入存在一个最优掺量,为 0.75%。由于

椰壳纤维在土体里面随机分布,相互搭接交织,形成 3 维受力网,且受力时因椰壳纤维的弹性模量大于土体,土体和椰壳纤维产生不同变形;在受力过程中,椰壳纤维石灰土中的纤维与土体之间产生的摩擦力与土体本身和椰壳纤维之间的黏结力共同对土体变形产生约束作用,限制了土颗粒体位移,从而提高土体整体性。当纤维掺量超过 0.75% 时,纤维掺量过多割裂土体,形成了薄弱平面,土体强度降低。既有研究<sup>[19]</sup>表明,纤维掺量对土体强度的影响存在临界值,超过掺量临界值后土体强度下降,这与本文研究结论一致。

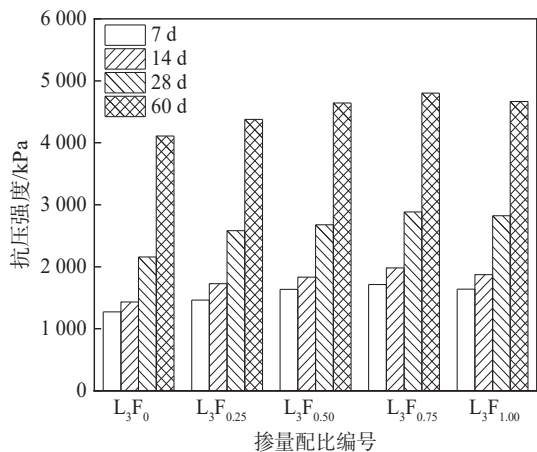


图 1 不同纤维掺量下椰壳纤维石灰土无侧限抗压强度  
Fig. 1 Unconfined compressive strength of coconut fiber lime soil with different fiber dosages

2) 不同龄期条件下,随着养护龄期增加,椰壳纤维石灰土抗压强度不断升高,在 60 d 时土样强度最高。在 7~14、14~28、28~60 d 这三个不同阶段,抗压强度增长速度分别为 32.1、61.2、59.2 kPa/d,这说明在 14~60 d 固化剂与土之间的反应最快,石灰后期强度增强效果最佳。石灰对土体有离子交换作用、火山灰反应、Ca(OH)<sub>2</sub> 碳化反应。最开始是离子交换,石灰加入土中生成 Ca(OH)<sub>2</sub>,形成 Ca<sup>2+</sup>和 OH<sup>-</sup>,土体表面有 1 价的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>;离子交换作用使大量高价钙离子团聚附着在土体表面,填充土颗粒之间的孔隙。石灰加入与水、土体发生火山灰反应,生成水合硅酸钙和水合铝酸钙,与土颗粒黏结在一起,使土颗粒缝隙减小。最后发生的是 Ca(OH)<sub>2</sub> 碳化反应,碳化反应最慢,主要是石灰加入土体后与空气中的 CO<sub>2</sub> 反应,生成 CaCO<sub>3</sub> (式 (1)),对土体起到胶结作用,加固土体。

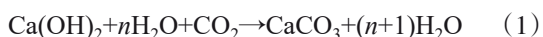


图 2 为本文试验结果与其他学者试验结果的对比,所有的结果均是采用最优纤维掺量、石灰掺量得到的。由图 2 可知:加入不同类型的纤维后,石灰土强度有所提高;掺入椰壳纤维、玻璃纤维<sup>[14]</sup>、小麦纤维<sup>[15]</sup>、稻草纤维<sup>[15]</sup>、黄麻纤维<sup>[15]</sup>、聚丙烯纤维<sup>[15]</sup>后,纤维

石灰土无侧限抗压强度较石灰土分别提高 33.6%、13.0%、42.6%、46.4%、77.6%、118.6%。可见,椰壳纤维对石灰土的加筋效果处于中等水平,对石灰土强度提升有帮助。

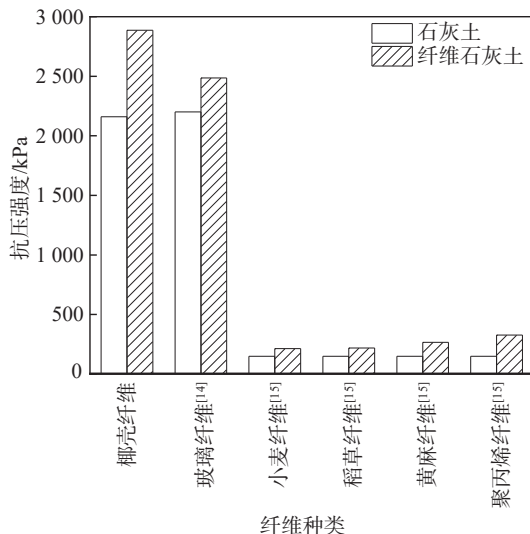


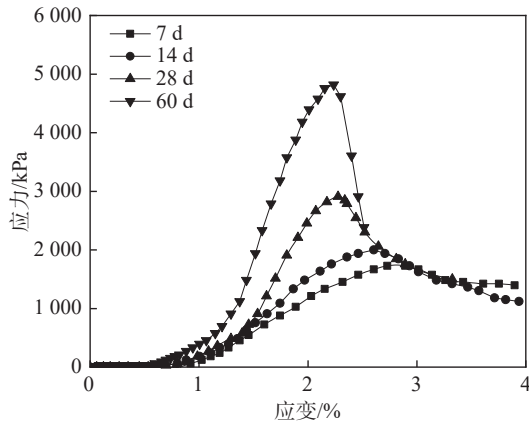
图 2 本文试验与其他学者试验纤维石灰土无侧限抗压强度对比结果

Fig. 2 Comparison of the unconfined compressive strength results of fibre lime soil in this experiment with those of other scholars

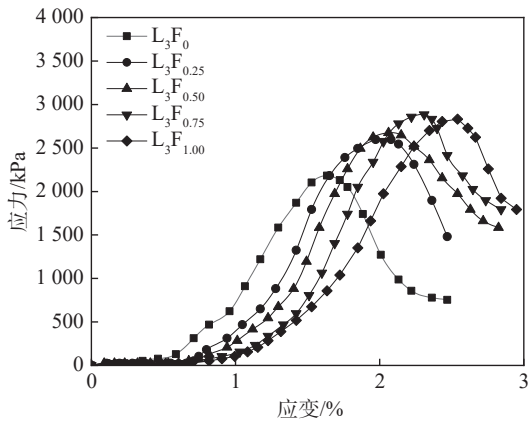
### 2.1.2 应力-应变曲线

图 3 为不同养护龄期及不同配比情况下土体无侧限抗压强度应力-应变曲线。试样的破坏应变为峰值应力对应的应变。由图 3(a)可以看出:在最优纤维掺量下,随着龄期增长,曲线应力峰值增大;曲线到达峰值前其上升趋势变得陡峭,到达峰值后应力-应变曲线突降;试样破坏时的应变值逐渐减小。这表明随着养护龄期增加,椰壳纤维石灰土脆性增大,塑性逐渐减小。由图 3(b)可以看出:当石灰掺量为 3% 时,随着椰壳纤维的加入,破坏应变逐渐远离 y 轴,破坏应变由 1.5% 增长到 2.5%,说明椰壳纤维的加入使土体由脆性逐渐变为塑性;但随着椰壳纤维掺量增加,曲线峰值应变存在临界纤维掺量 0.75%,在临界值前曲线峰值增加,一旦超过临界值随即下降。这说明椰壳纤维过多会影响试样应力值,过多的椰壳纤维会有一部分相互吸附在一起,使得其与土体间接触减小,导致试样整体性变差,应力降低。

图 4 为养护 28 d 时,纤维掺量对无侧限抗压强度及破坏应变的影响。由图 4 可知:土体抗压强度随椰壳纤维增加先增后减,破坏应变一直增大,说明试样延性增大。当纤维掺量超过一定值时,抗压强度下降,可视为椰壳纤维增强效果接近饱和<sup>[20]</sup>。当椰壳纤维含量较大时,纤维间容易相互黏结导致其利用率降低<sup>[21]</sup>。



(a) 不同养护龄期下试样应力-应变曲线



(b) 28 d不同配比下试样应力-应变曲线

图3 不同养护龄期及不同配比条件下土体无侧限抗压强度应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of unconfined compressive strength of soil under different curing ages and different ratios

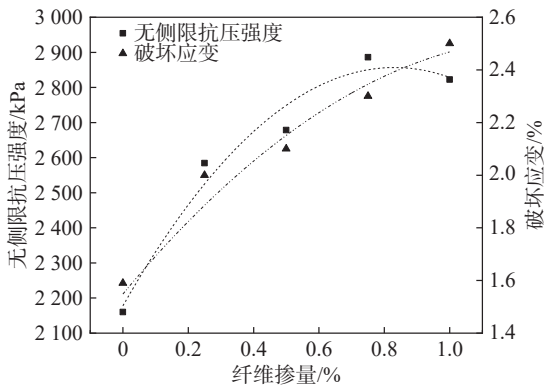


图4 无侧限抗压强度与破坏应变随纤维掺量变化曲线

Fig. 4 Curves of unconfined compressive strength and breaking strain varying with fiber content

## 2.1.3 试样能量吸收能力

能量吸收是指在椰壳纤维增强材料中引起变形所需的能量,可以通过计算应力-应变曲线下的面积确定<sup>[22]</sup>,采用达到最大应力对应的轴向应变,即破坏应变 $\varepsilon_f$ 时试样的能量吸收能力( $E(\varepsilon_f)$ )定量研究纤维掺量与龄期对其能量吸收能力的影响,根据式(2)计算:

$$E(\varepsilon_f) = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_f$ 为破坏应变, $\sigma$ 为应力-应变曲线。

图5为纤维掺量与椰壳纤维石灰土能量吸收能力的关系。由图5可知:随着纤维掺量增加,椰壳纤维石灰土的能量吸收能力先增大后减小,且存在临界纤维掺量0.75%。当纤维掺量一定时,椰壳纤维石灰土的能量吸收能力随养护龄期增加而增大。椰壳纤维的加入对试样起到加筋作用,当试样受力后,土颗粒与纤维之间产生摩擦力,抑制试样变形,有效提高椰壳纤维石灰土强度,在达到破坏应变时所需要吸收的能量增多;当大于临界纤维掺量时,椰壳纤维加入过多,会产生消极作用,能量吸收能力减弱<sup>[23]</sup>。随着养护龄期增加,能量吸收能力增强,这是由于石灰的加入产生胶凝物质,养护时间越久,石灰反应越彻底,产生的胶凝物质越多,发生变形所需要的能量也越多。

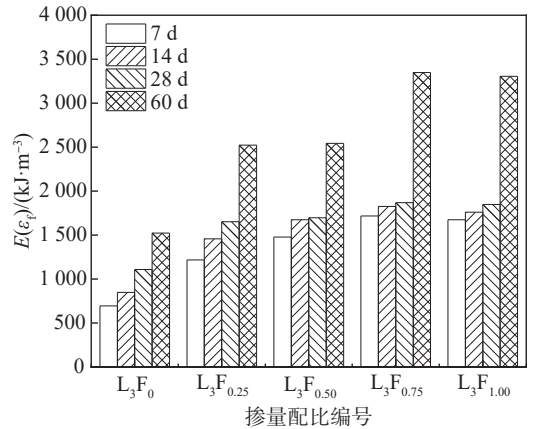


图5 纤维掺量对试样能量吸收能力的影响

Fig. 5 Effect of fiber content on energy absorption capacity of samples

## 2.1.4 试样表面破坏形式

图6为养护28 d时,不同配比下试样的破坏形态。由图6可知:未掺入椰壳纤维的固化土在单轴受压时有明显裂缝,形成剪切破坏面,倾角 $60^\circ \sim 90^\circ$ ,试样水平方向无鼓胀现象,轴向破坏十分明显,为典型脆性破坏;随着椰壳纤维的加入,试样的裂缝减少,较少出现石灰固化土中的贯裂缝,出现鼓胀现象,两头体积大于中间部分<sup>[24]</sup>,呈现出塑性破坏。当纤维掺量为1.00%时,形成较多裂纹且不均匀,由于纤维含量过多,纤维缠绕交织使纤维和土体形成一个较弱接触面,竖向压力增加,因试样体内不够密实,承受压力减小。纤维掺量为0.25%~0.75%时,纤维随机分布在土体内,当试样受到轴向压力时,纤维起到加筋作用,代替土体承担部分竖向压力,承受的抗压强度会逐渐增加;同时,因土体和纤维之间产生摩擦力,限制土体的位移和变形,使试样裂缝减少,无明显的剪切破坏面。

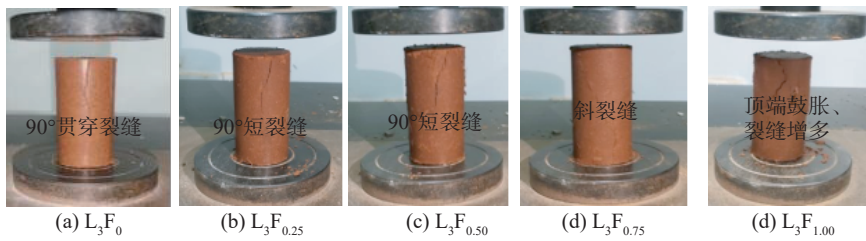


图 6 养护龄期 28 d 时不同配比下椰壳纤维石灰土试样破坏形态

Fig. 6 Failure morphology of coconut shell fiber lime soil samples with different ratios at a curing age of 28 days

2.2 干湿循环试验

干湿循环试验采用的石灰掺量为 3%、纤维掺量为 0.75%，压实度分别取 90%、93%、96%、99%，养护龄期 28 d。

2.2.1 外观变化

图 7 为压实度为 96% 时试样经历不同干湿循环次数后的外观变化。由图 7 可知：经过干湿循环，试样表面有明显缺损，质量严重缺失。石灰土在第 2 次干湿循环时开始在出现局部脱落，在第 4 次干湿循环时出现

明显裂缝，在第 6 次时顶端出现明显质量减少并伴随较多裂缝出现；椰壳纤维石灰土在第 2 次干湿循环时底部脱落，在第 4 次时表面层大部分土体掉落使椰壳纤维裸露在试样表面，在第 6 次时开始出现细微裂缝。上述情况表明：椰壳纤维的加入可以抑制试样在干湿循环下裂缝的出现，减少表面脱落。这可能是由于试样在压实时椰壳纤维与土体产生相互作用力，椰壳纤维限制了土体在干湿过程中的脱落和裂缝的产生，因此椰壳纤维石灰土具有较好的抵抗干湿循环的能力。

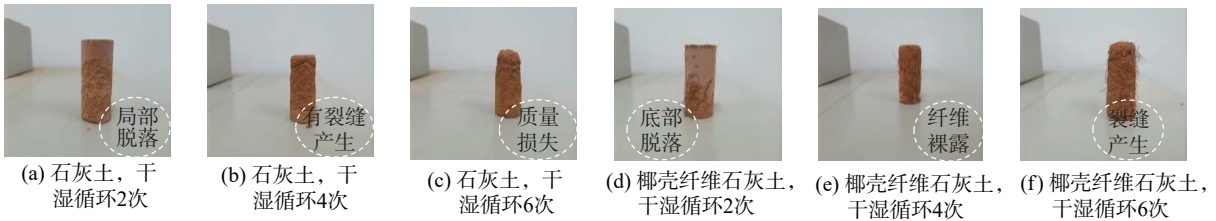


图 7 压实度为 96% 时试样在不同干湿循环次数后外观变化

Fig. 7 Appearance changes of the specimen at 96% compaction degree after different numbers of wet-dry cycles

2.2.2 质量损失率

质量损失率根据式(3)计算：

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中， $W_n$  为  $n$  次干湿循环后试样质量损失率， $m_0$  为试样原始质量， $m_n$  为第  $n$  次干湿循环后试样的质量。

图 8 为不同干湿循环次数试验后石灰土和椰壳纤维石灰土质量损失率。由图 8 可以看出：随着干湿循环次数的增加，石灰土和椰壳纤维石灰土的质量损失率不断增加，试样表面土体颗粒脱落，试样质量逐渐减

小。总体而言，椰壳纤维石灰土的质量损失率比石灰土大；压实度的改变对试样质量损失影响较小。可能原因是：在干湿循环中，土体含水率为动态变化，在试样增湿过程中，试样所处环境湿度高，试样含水率升高，土颗粒间存在的结合水膜变厚，造成土体膨胀并使土颗粒软化。当试样处于干燥环境中，含水率下降，水分缺失使土体收缩，破坏了土体原有的骨架，产生裂缝和脱落现象。随着循环次数增加，土体整体性下降，土体持水性降低，导致土体表面严重脱落和裂缝增多<sup>[25]</sup>。

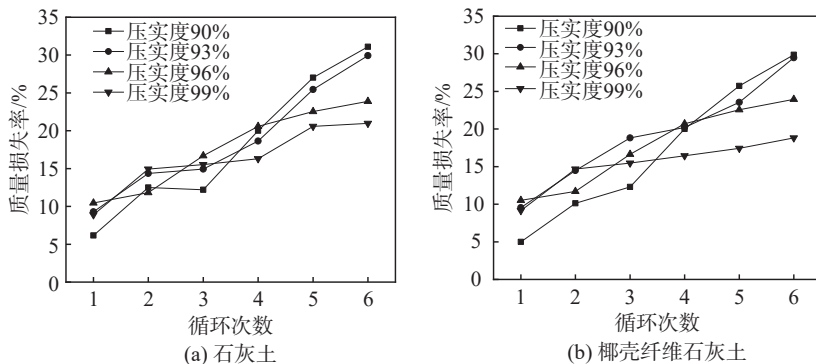


图 8 不同干湿循环次数试验后石灰土和椰壳纤维石灰土质量损失率

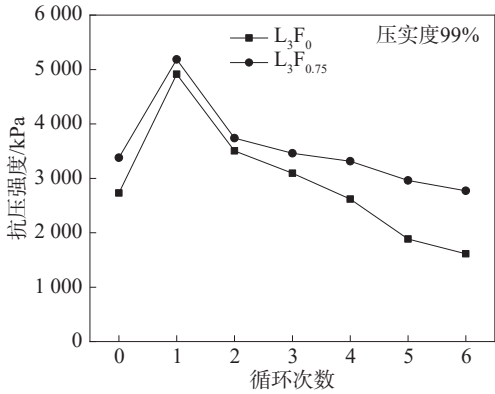
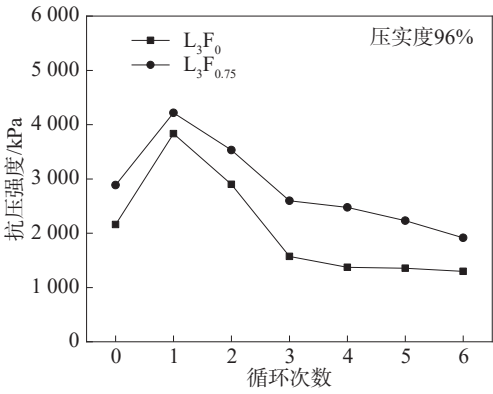
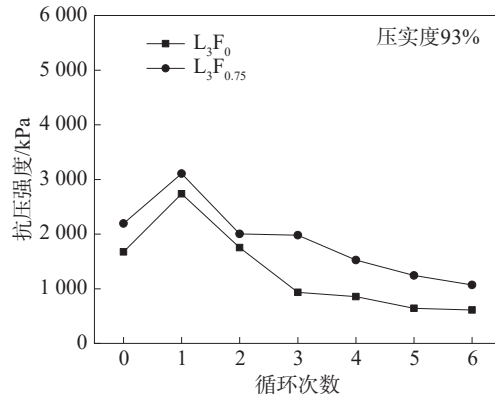
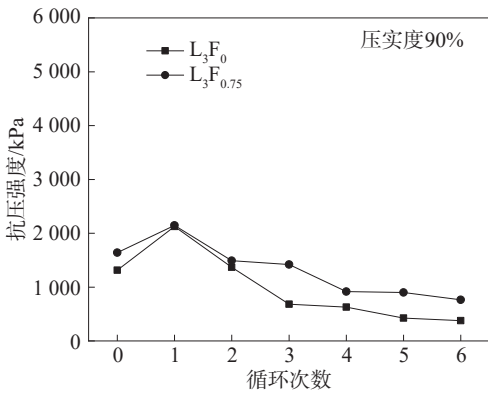
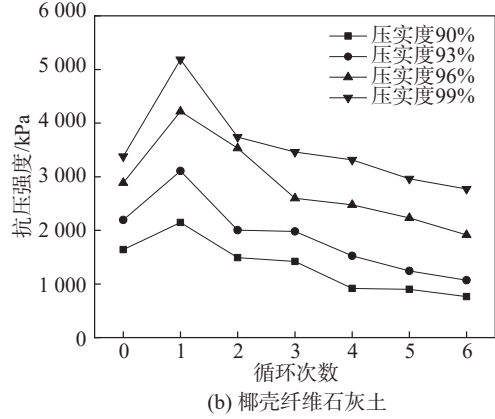
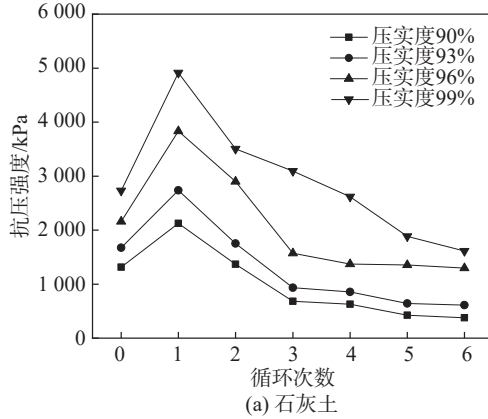
Fig. 8 Mass loss rates of lime-stabilized soil and coconut fiber reinforced lime-stabilized soil after different wet-dry cycles

### 2.2.3 无侧限抗压强度

图9为不同干湿循环次数下试样的无侧限抗压强度。由图9(a)、(b)可以看出:

1)当压实度相同时,随着循环次数不断增加,试样的抗压强度先增加后减小<sup>[26]</sup>,石灰土的抗压强度最大可达4 921.7 kPa,椰壳纤维石灰土抗压强度最大可达5 184.2 kPa。0~1次干湿循环时,试样的抗压强

度增加,1~6次干湿循环后试样的抗压强度逐渐减小。这是由于试样在浸水时有未反应的石灰需要水分继续反应,在干燥过程中温度升高引起火山灰反应,生成胶凝物质,填充了土颗粒之间孔隙,使土体强度增强;当循环次数逐渐增多,因为未反应的石灰反应完全,试样在干湿过程中有质量损失,并且胶凝物质也由于多次循环逐渐减少,导致土体强度降低。



(c) 4种压实度下的两种固化土试样抗压强度随干湿次数变化规律

图9 不同干湿循环次数下两种固化土试样的无侧限抗压强度

Fig. 9 Unconfined compressive strength of two types of stabilized soil samples under different wet-dry cycles

2)当循环次数相同时,随着压实度增加,试样的抗压强度增加。石灰土的压实度越大,土颗粒与土颗粒之间孔隙越小,抗压强度越大。椰壳纤维石灰土的压实度越大,土结构越紧密,椰壳纤维与土体有效接触面积增多,筋土界面的作用力增大;另外,压实度越

高,压实功越大,椰壳纤维受到的力越大,所以筋土界面的摩擦力和土体强度变大。

由图9(c)可知:在压实度与干湿循环次数相同的情况下,椰壳纤维石灰土的抗压强度大于石灰土,说明椰壳纤维的加入对石灰土的干湿循环起到积极作用。

这是由于椰壳纤维的加入产生了黏聚力和摩擦力,限制了土体变形,提高了土体整体性,导致椰壳纤维石灰土强度增加。这说明椰壳纤维石灰土可以有效缓解干湿循环过程中土体的劣化现象。

为更清楚地体现椰壳纤维石灰土在经历干湿循环后的强度变化规律,定义干湿循环后试样无侧限抗压强度与标准养护试样抗压强度之比为试样强度残余系数<sup>[27]</sup>。图 10 为试样强度残余系数随干湿循环次数

的变化规律。由图 10 可知,石灰土和椰壳纤维石灰土在发生干湿循环破坏时的强度残余系数分别为 0.29~1.79、0.46~1.53,证明随着干湿循环次数增加土样强度明显劣化。经 6 次干湿循环后,椰壳纤维石灰土强度残余系数明显大于石灰土;并且两种试样的压实度越大,强度残余系数越大。这表明加入椰壳纤维和增加压实度均可增大土样强度残余系数,即有效增加土体抵抗干湿循环的性能,弱化干湿循环对土体的作用。

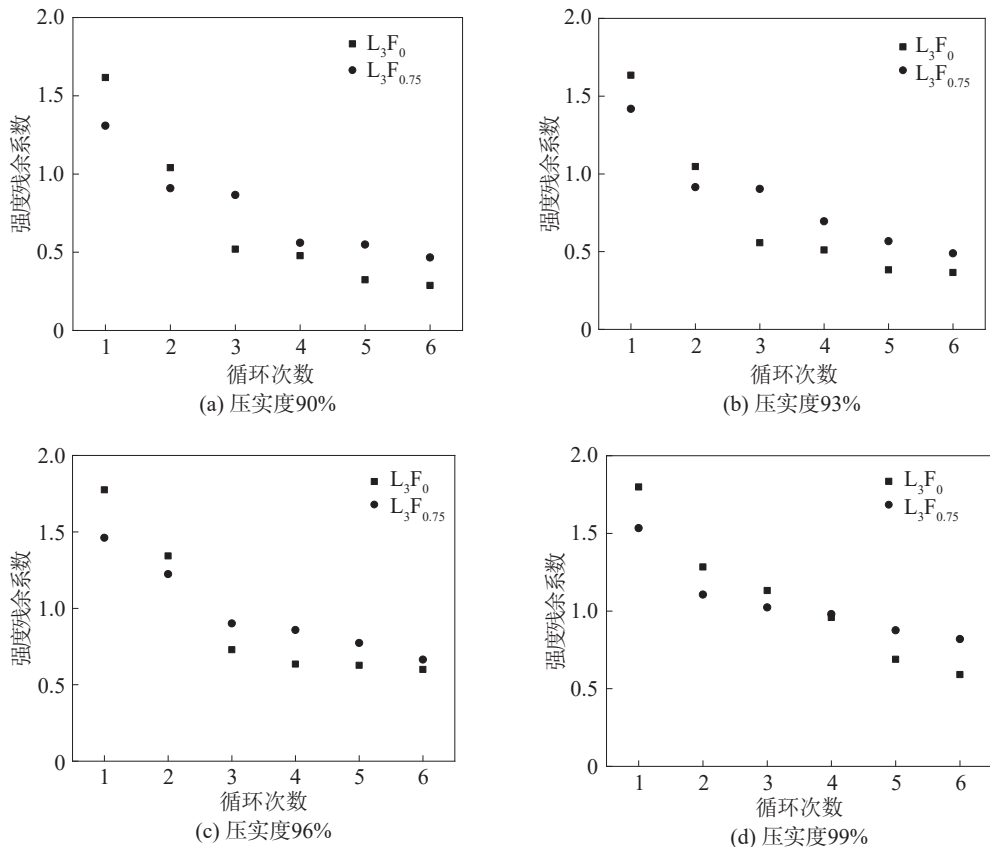


图 10 试样强度残余系数随干湿循环次数变化规律

Fig. 10 Variation of residual coefficient of sample strength with the number of dry wet cycles

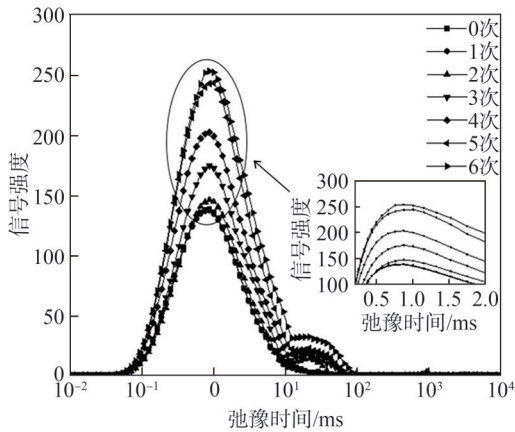
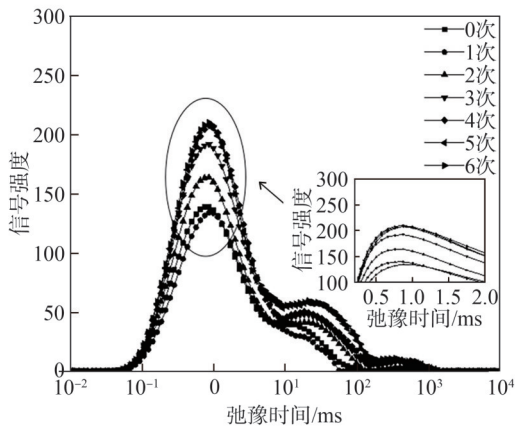
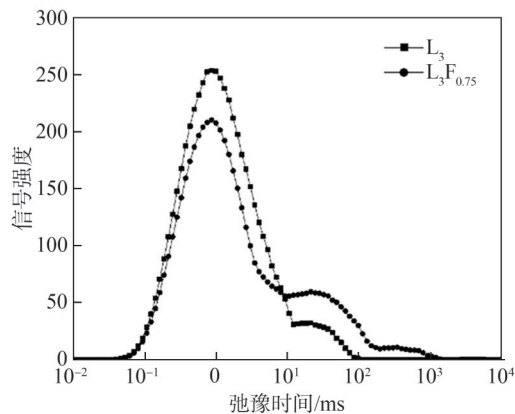
2.3 微观试验

微观试验选取的试样压实度为 96%、石灰掺量为 3%、纤维掺量为 0.75%。

2.3.1 核磁共振(NMR)

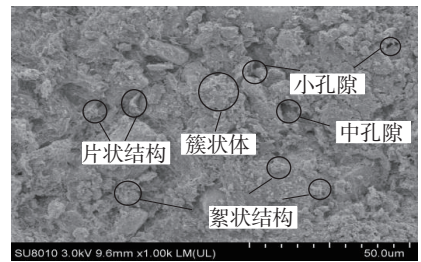
图 11 为石灰土和椰壳纤维石灰土的  $T_2$  分布。 $T_2$  曲线呈现的峰值分别为主峰、次峰 1、次峰 2,为便于分析,将峰值进行分类:主峰对应小孔隙,次峰 1 对应中孔隙,次峰 2 对应大孔隙<sup>[28]</sup>。由图 11(a)可以看出: $T_2$  曲线有明显的两峰值,第 1 个峰值分布在 0.1~10.0 ms,为小孔隙;第 2 个峰值分布在 10.0~100.0 ms,为中孔隙;第 3 个峰值几乎没有。由图 11(b)可知: $T_2$  曲线有 3 个峰值,分别分布在 0.1~10.0 ms、10.0~100.0 ms、100.0~1 000.0 ms,分别为小孔隙、中孔隙、大孔隙。图 11 中,曲线的峰值在 0~1 次干湿循环时下降,在 1~6

次干湿循环时曲线峰值沿着 x 轴右移动,覆盖的面积变宽,对应孔径变大。0~1 次干湿循环时曲线峰值下降是由于干湿循环中温度升高引起的火山灰反应增加,胶凝物质略有增加,孔隙减小<sup>[29]</sup>。对石灰土而言,在 1~6 次循环波峰右移的过程中,主峰信号和次峰 1 信号呈现增加趋势且向上移动趋势显著,主要原因是随着干湿循环增加,试样经历湿润和干燥,土体里水分不断迁移变化,黏团不断溶解,土里细小颗粒随土体逐渐析出,原有孔隙不断增大<sup>[30]</sup>;当进行第 6 次干湿循环时,峰值达到最高,弛豫时间覆盖范围最广,此时中小孔隙和中孔隙达到最多。经历 1~6 次干湿循环作用后,土体结构的劣化表现为孔隙结构的持续发展。由图 11(c)可知,石灰土的小孔隙比椰壳纤维石灰土多,椰壳纤维石灰土的中孔隙比石灰土多。

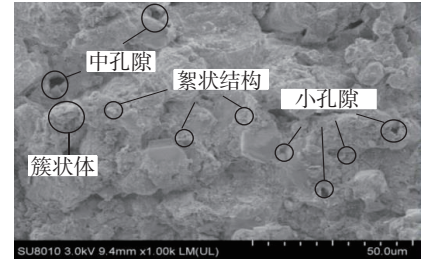
(a) 石灰土在不同干湿循环次数下的 $T_2$ 分布(b) 椰壳纤维石灰土在不同干湿循环次数下的 $T_2$ 分布(c) 石灰土和椰壳纤维石灰土在第6次干湿循环时的 $T_2$ 分布图 11 石灰土和椰壳纤维石灰土的 $T_2$ 分布Fig. 11  $T_2$  distribution of lime soil and lime soil with coconut fiber

### 2.3.2 SEM 试验

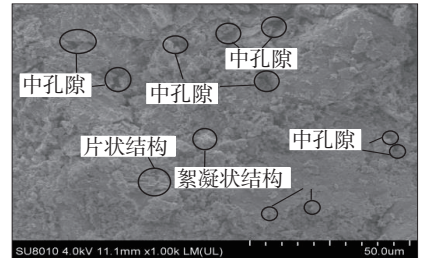
图 12 为椰壳纤维与石灰加筋固化土 SEM 图。由图 12(a)~(d)可知:经过一系列复杂化学反应后,生成产物主要以片状结构、絮状结构、簇状结构、针状结构<sup>[31]</sup>胶结物为主。没有进行干湿时,土体表面经过水化反应与火山灰反应生成胶结物,孔隙较少,其原因是生成的胶结物质吸附在土体表面,填充土颗粒与土颗粒之间的孔隙,形成致密结构,使骨架强度提高,导致宏



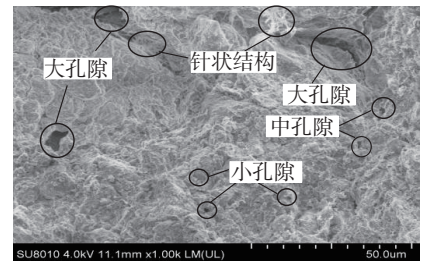
(a) 石灰土, 0次干湿循环



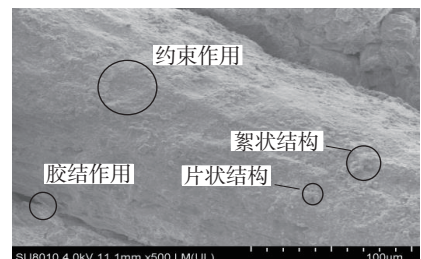
(b) 石灰土, 6次干湿循环



(c) 椰壳纤维石灰土, 0次干湿循环



(d) 椰壳纤维石灰土, 6次干湿循环



(e) 500倍椰壳纤维石灰土

图 12 椰壳纤维与石灰加筋固化土 SEM 图

Fig. 12 SEM images of coconut fiber and lime reinforced solidified soil

观上土体强度提升。经过干湿循环后,土体表面水化产物减少,孔隙增加,这是由于在循环过程中水带走了土体里的胶结物和土体,对土体结构造成不可逆损伤,导致孔隙增大;同时,反复吸水、失水使得土体孔隙扩张,并伴有新裂隙产生,降低了土体的整体性和均一性<sup>[32]</sup>。随着干湿循环次数增加,土体在宏观上表现为强度劣

化。由图12(e)可以看出,椰壳纤维表面粗糙并伴随有胶凝物质生长。一方面,纤维在土体中引导水化产物分布,为水化产物提供生长环境,并附着在椰壳纤维表面,生成的胶结物黏结土体和椰壳纤维;另一方面,椰壳纤维表面粗糙,土体受力两者会产生摩擦力,对土体起到约束作用,抵抗土体变形。

### 3 结论

本文研究了在不同养护龄期下椰壳纤维掺量对石灰土力学性能的影响,并对椰壳纤维石灰土进行干湿循环耐久性分析,研究了干湿循环次数、压实度和纤维掺量对石灰土力学性能的影响规律,最后结合核磁共振和扫描电镜对纤维石灰土进行微观分析。主要结论如下:

1)随着椰壳纤维掺量增加,石灰土无侧限抗压强度先增大后减小,在纤维掺量为0.75%时强度最大,但整体强度较石灰土提高了6.5%~38.3%;土体破坏应变逐渐增大,由1.5%增长到2.5%;应力-应变曲线由应变软化过渡到应变硬化,破坏形式由脆性破坏转为塑性破坏。

2)随着养护龄期增加,椰壳纤维石灰土抗压强度逐渐升高,试样破坏应变逐渐减小,应力-应变曲线呈现软化现象。在破坏应变时,试样抵抗变形所吸收的能量与抗压强度成正比。

3)干湿循环作用下,土样质量损失率逐渐增加,抗压强度先增加后减小,土样强度最高可达5 184.2 kPa。循环次数相同时,压实度增加,土体抗压强度增大。加入纤维后,石灰土的强度残余系数从0.29~1.79变为0.46~1.53,有效缓解了试样干湿循环时的劣化现象,弱化了干湿循环对土体作用。

4)从微观试验可以看出,随着干湿循环次数增加,土体孔隙呈现先减小后增大的趋势。在第6次干湿循环时,土体孔隙达到最大,胶凝物质最少,纤维的加入使石灰土的中孔隙显著增多。

5)纤维可以引导水化物分布,产生更多的胶凝物质,使纤维与土体黏结在一起;纤维表面粗糙,受力时与土体产生较大摩擦力,限制了土体变形。此外,纤维在土体里相互搭接形成空间网状结构,直接约束并且限制土颗粒移动,当土体受到外力时,纤维能有效抑制破坏面的扩展。

#### 参考文献:

[1] Hu Zaiqiang, Liang Zhichao, Guo Jing, et al. Prediction of seepage coefficient of unsaturated lime improved loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (Supp2):26-31.[胡再强,梁志超,郭婧,等.非饱和石灰改良

黄土的渗水系数预测[J].岩土工程学报,2020,42(增刊2):26-31.]

- [2] Wang Hao. Analysis of influencing factors and microscopic mechanism of unconfined compressive strength of lime soil[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021. [王浩. 石灰土无侧限抗压强度影响因素分析及微观机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.]
- [3] Zhou Baochun, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Stress-strain-strength behaviour and constitutive description of lime-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4):999-1005. [周葆春,孔令伟,郭爱国. 石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J]. 岩土力学, 2012,33(4):999-1005.]
- [4] Pu Shaoyun, Zhu Zhiduo, Wang Hairong, et al. Mechanical characteristics and water stability of silt solidified by incorporating lime, lime and cement mixture, and SEU-2 binder[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 111-120.
- [5] Li Lihua, Shi Anning, Zhang Lei, et al. Experimental investigations on the mechanically stabilised earth wall under static load conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, 25(4):575-598.
- [6] Li Lihua, Li Zijian, Xiao Henglin, et al. Cyclic shear test of geogrid reinforced construction waste soil[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(6):1612-1623. [李丽华,李孜健,肖衡林,等. 土工格栅加筋建筑垃圾土循环剪切试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024,54(6):1612-1623.]
- [7] Li Lihua, Cui Feilong, Xiao Henglin, et al. Research on performance and bearing capacity of reinforced embankment with tyres and lattice chambers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1):81-88. [李丽华,崔飞龙,肖衡林,等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2017,39(1):81-88.]
- [8] Li Lihua, Zang Tianbao, Liu Yongli, et al. Cyclic shear performance of fiber bottom ash mixed soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1):196-205. 李丽华,臧天宝,刘永莉,等. 纤维底渣混合土循环剪切性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(1):196-205.
- [9] Rong Dezheng, Tang Chaosheng, Zeng Hao, et al. Evaporation process and tensile behavior of fiber-reinforced rammed earth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4):670-678. [荣德政,唐朝生,曾浩,等. 纤维加筋土坯的蒸发过程及抗拉强度特性[J]. 岩土工程学报, 2021,43(4):670-678.]
- [10] Valipour M, Shourijeh P T, Mohammadinia A. Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 27:100474.
- [11] Chen Lei, Zhang Fuhai, Li Zhipeng. Experimental study on expansive soil stabilized with lime and fibers[J]. Advanced Engineering Sciences, 2014, 46(Supp2):65-69. [陈雷,张福海,李治朋. 纤维加筋石灰改良膨胀土工程性质试验研究

- [J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(增刊2):65–69.]
- [12] Jahandari S, Mojtahedi S F, Zivari F, et al. The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils[J]. *Geomechanics and Geoengineering*,2022,17(1):269–281.
- [13] Jiang Ping, Zhou Lin, Zhang Weiqing, et al. Unconfined compressive strength and splitting tensile strength of lime soil modified by nano clay and polypropylene fiber[J]. *Crystals*,2022,12(2):285.
- [14] Ruan Bo, Peng Xuexian, Ma Chao, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of glass fiber reinforced lime soil[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2018,15(9):2246–2251. [阮波, 彭学先, 马超, 等. 玻璃纤维加筋石灰土无侧限抗压强度试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*,2018,15(9):2246–2251.]
- [15] Wei Li, Chai Shouxi, Zhang Huyuan, et al. Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber[J]. *Construction and Building Materials*,2018,172:300–308.
- [16] Li Xinming, Lu Guangyuan, Zhang Haoyang, et al. Strength characteristics and micro-mechanism of lime-metakaolin modified silty soil[J]. *Journal of Building Materials*,2021,24(3):648–655. [李新明, 路广远, 张浩扬, 等. 石灰偏高岭土改良粉砂土强度特性与微观机理[J]. *建筑材料学报*,2021,24(3):648–655.]
- [17] Xue Yanhua, Gao Mingxing, Yuan Feilong, et al. Effect of polyacrylamide on early strength and failure form of lime stabilized soil[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,2021,38(4):1283–1291. [薛艳华, 高明星, 袁飞龙, 等. 聚丙烯酰胺对石灰稳定土早期强度和破坏形式的影响[J]. *复合材料学报*,2021,38(4):1283–1291.]
- [18] Li Lihua, Yue Yuwei, Li Wentao, et al. Mechanical properties and microstructure of heavy metal contaminated soil solidified by rice husk ash[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2022,19(11):3275–3282. [李丽华, 岳雨薇, 李文涛, 等. 稻壳灰固化重金属污染土力学性能及微观结构研究[J]. *铁道科学与工程学报*,2022,19(11):3275–3282.]
- [19] Rajabi A M, Ghorashi S M S, Yeganeh M M. The effect of polypropylene and glass fibers on strength and failure behavior of clayey sand soil[J]. *Arabian Journal of Geosciences*,2022,16(1):6.
- [20] Ruan Bo, Ruan Chenxi, Deng Linfei, et al. Experimental study on unconfined compressive strength and splitting tensile strength of polypropylene fiber reinforced cement mixing soil[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2021,18(1):95–103. [阮波, 阮晨希, 邓林飞, 等. 聚丙烯纤维加筋水泥搅拌土拉压性能试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*,2021,18(1):95–103.]
- [21] Yadav J S, Tiwari S K. Behaviour of cement stabilized treated coir fibre-reinforced clay-pond ash mixtures[J]. *Journal of Building Engineering*,2016,8:131–140.
- [22] Hamidi A, Hooresfand M. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*,2013,36:1–9.
- [23] Ruan Bo, Zhu Yanzhang, Zhang Xiangjing, et al. Influence of fiber content on unconfined compressive strength and pore size distribution of cemented aeolian sand reinforced with fiber[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2023,20(6):2131–2138. [阮波, 朱晏樟, 张向京, 等. 纤维掺量对水泥改良风积沙强度及孔径分布的影响[J]. *铁道科学与工程学报*,2023,20(6):2131–2138.]
- [24] Bi Dongmin, Kong Gangqiang, Chen Geng, et al. Strength characteristics and failure mode of solidified soil reinforced by waste masks[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*,2022,42(5):993–998. [闭东民, 孔纲强, 陈庚, 等. 废弃口罩加筋固化土的强度特性与破坏模式[J]. *防灾减灾工程学报*,2022,42(5):993–998.]
- [25] Ren Xiaofeng. Experimental study on durability of SH and lime reinforced loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. [任晓峰. SH及石灰加固黄土耐久性试验研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.]
- [26] Jalali J, Noorzad R. Discrete fiber reinforcement efficiency in the mechanical properties and wet-dry performance of fat clay treated with industrial sewage sludge ash[J]. *Construction and Building Materials*,2021,284:122739.
- [27] Wang Dongxing, Wang Hongwei, Zou Weilie, et al. Study of durability of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2019,40(12):4675–4684. [王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 活性MgO-粉煤灰固化淤泥耐久性研究[J]. *岩土力学*,2019,40(12):4675–4684.]
- [28] Li Tianguo, Kong Lingwei, Wang Juntao, et al. Trimodal pore structure evolution characteristics and mechanical effects of expansive soil in seasonally frozen areas based on NMR test[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2021,42(10):2741–2754. [李甜果, 孔令伟, 王俊涛, 等. 基于核磁共振的季冻区膨胀土三峰孔隙结构演化特征及其力学效应[J]. *岩土力学*,2021,42(10):2741–2754.]
- [29] Zhang R J, Lu Y T, Tan T S, et al. Long-term effect of curing temperature on the strength behavior of cement-stabilized clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,2014,140(8):04014045.
- [30] Ye Wanjun, Wu Yuntao, Yang Gengshe, et al. Study on microstructure and macro-mechanical properties of paleosol under dry-wet cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2019,38(10):2126–2137. [叶万军, 吴云涛, 杨更社, 等. 干湿循环作用下古土壤微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2019,38(10):2126–2137.]
- [31] Li Lihua, Huang Chang, Li Wentao, et al. Study on mechanical and microscopic characterization of expansive soil solidified by rice husk ash-granulated blast furnace slag[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2023,44(10):2821–2832. [李丽华, 黄畅, 李文涛, 等. 稻壳灰-矿渣固化膨胀土力学与微观特性研究[J]. *岩土力学*,2023,44(10):2821–2832.]

[32] Ji Hui,Zhang Tao,Liu Jiankang.Experimental study on shear mechanical properties of composite improved loess under dry wet cycles[J].Journal of the Yangtze River Ac-

ademy of Sciences,2021,38(8):120–126.[冀慧,张涛,刘保健.干湿循环下复合改良黄土剪切力学特性试验研究[J].长江科学院院报,2021,38(8):120–126.]

## Experimental Study on Mechanical Properties of Coconut Fiber Reinforced Lime Improved Soil Mechanics

LI Lihua<sup>1,2</sup>, LIU Wen<sup>1,2</sup>, LI Yutao<sup>1,2\*</sup>, WANG Cuiying<sup>1,2</sup>, YE Zhi<sup>1,2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Sensing and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

### Abstract:

**Objective** The application of lime soil in engineering is further enhanced through the introduction of new materials for improvement and optimization. Coconut fiber, a natural high-molecular material with superior mechanical properties, presents a promising solution. Utilizing coconut fiber to improve lime soil not only reduces construction costs but also increases soil strength and stability while mitigating resource waste and environmental pollution. Therefore, this study aims to enhance the mechanical properties of lime soil by employing coconut fiber as a reinforcing material and to examine its macroscopic mechanical behavior and microstructural characteristics.

**Methods** The study analyzed the effects of different curing ages (7, 14, 28, and 60 days), coconut fiber content (0, 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1.00%), dry and wet cycles (0, 1, 2, 3, 4, 5, and 6 times), and compaction degrees (90%, 93%, 96%, and 99%) on the mechanical properties of lime soil by conducting the unconfined compressive strength test, dry and wet cycle test, nuclear magnetic resonance (NMR) test, and scanning electron microscope (SEM) test. These tests were performed to reveal the internal mechanism behind the improvement of the mechanical behavior of coconut fiber reinforced lime soil.

**Results and Discussions** 1) For soils of the same age, the addition of coconut fiber significantly increased soil strength compared to soils without coconut fiber. As the amount of coconut fiber increased, the strength of the soil showed a tendency to first increase and then decrease, while the destructive strain of the soil gradually increased, changing the soil behavior from brittle to plastic. This occurred because the random distribution of coconut fiber formed a spatial mesh structure that restrained soil deformation and particle movement, improving soil integrity. However, fiber doping exceeding 0.75% created weak planes, reducing strength. Under different maintenance ages, the compressive strength gradually increased, and the destructive strain became smaller, showing brittle damage. This was mainly due to ion exchange, volcanic ash reaction, and carbonation reaction of lime, generating cementitious substances that reinforced the soil. 2) Under the action of dry and wet cycles, the soil surface produced cracks and shedding, and its quality was obviously reduced. However, the mass loss of lime soil mixed with coconut fiber was significantly less, proving that coconut fiber inhibited crack formation and reduced surface detachment. When the compaction degree was the same, with the increase in the number of cycles, the soil mass showed a trend of increasing and then decreasing, reaching the maximum after the first cycle. This initial increase was attributed to the ongoing reactions of unreacted lime requiring moisture and the volcanic ash reaction during drying, generating gelling substances that filled pores and increased strength. However, with further cycles, the lime was consumed, cementitious material and quality gradually reduced, leading to a decrease in compressive strength. When the cycle times were the same, an increased compaction degree led to greater soil compressive strength. A higher compaction degree resulted in smaller soil pores and a larger contact area between coconut fiber and soil, producing greater interface friction and higher soil strength. This indicated that the addition of coconut fiber and increased compaction degree enabled the soil to effectively resist the effects of wet and dry cycles. 3) The microscopic test showed that the pore space of the soil exhibited a tendency to decrease and then increase with the number of wet and dry cycles, reaching the maximum and having the least cementitious material in the sixth cycle. The addition of fiber caused the pore space in the lime soil to increase significantly. Fiber guided the distribution of hydrate, producing more gelling material that bonded the fiber and soil together. The rough fiber surface generated greater friction with the soil, limiting soil deformation.

**Conclusions** Coconut fiber-lime-treated soil shows strong potential for application in road and slope engineering projects. The research findings provide valuable insights for practical implementation. The study demonstrates that incorporating coconut fiber effectively enhances the mechanical properties and durability of lime-treated soil, increases its strength, alters its failure mode from brittle to more plastic behavior, and improves its resistance to damaging wet-dry cycles.

**Key words:** coconut fiber; lime; unconfined compressive strength; dry and wet cycle; microanalysis

(编辑 李轶楠)

引用格式: Li Lihua,Liu Wen,Li Yutao,et al.Experimental study on mechanical properties of coconut fiber reinforced lime improved soil mechanics[J].Advanced Engineering Sciences,2025,57(6):131–141.[李丽华,刘文,李玉涛,等.椰壳纤维加筋石灰改良土力学性能试验研究[J].工程科学与技术,2025,57(6):131–141.]