

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.018

生物胶-秸秆纤维复合改良黏性土强度特性试验研究

梁玉红¹, 刘玲¹, 蒋鹏¹, 刘瑾², 车文越², 陈志昊²

(1. 江苏省海洋地质调查院, 江苏 南京 210007; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对浅表层黏性土与大气环境相互作用强烈, 在气候因素影响下工程性质恶化而诱发地质灾害和生态环境的问题, 采用生物胶和稻秸秆纤维复合改良黏性土的强度特性, 通过无侧限抗压强度试验和直剪试验探究了单掺和复合改良方式下土体无侧限抗压强度特性及抗剪强度指标的变化规律, 分析了生物胶含量和纤维含量对复合改良效果的影响, 并基于扫描电镜分析了生物胶-秸秆纤维复合改良黏性土的作用机理。研究表明: 随着生物胶含量和纤维含量的增加, 改良土应力-应变曲线趋于应变硬化, 峰值位置后移, 且峰后应力衰减减缓; 改良土的无侧限抗压强度和抗剪强度显著增强, 其主要通过提升黏聚力来增强土体性能, 而对内摩擦角影响较小; 生物胶通过表面包覆、颗粒联结和孔隙填充改善土体结构, 提高纤维-土界面的加筋效果, 结合纤维形成的网络框架提升土体的力学性能。

关键词: 生物胶; 秸秆纤维; 黏性土; 复合改良; 强度特性; 扫描电镜

中图分类号: TU411; P642.16⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)06-0147-11

Experimental study on strength characteristics of bio-glue and straw fiber composite modified cohesive soil

LIANG Yuhong¹, LIU Ling¹, JIANG Peng¹, LIU Jin², CHE Wenyue², CHEN Zhihao²

(1. Marine Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210007, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Shallow cohesive soil interacts strongly with the atmospheric environment, and its engineering properties deteriorate severely due to the influence of climate factors, leading to geological disasters and ecological environmental problems. In response to the above issues, a combination of bio-glue and rice straw fiber was introduced to improve the mechanical properties of cohesive soil. Through unconfined compressive strength tests and direct shear tests, the changes in the unconfined compressive strength characteristics and shear strength parameters of soil with single admixture and composites were investigated. The effects of bio-glue and fiber contents on the improvement effect of composite treatment were studied, and the effect mechanism of bio-glue and straw fiber composite modified cohesive soil was analyzed based on scanning electron microscope (SEM). The results show that due to the increase in bio-glue content and fiber content, the stress-strain curves of modified soil tend to behave as strain hardening, with a prolonged peak position and reduced post-peak stress decay. Both unconfined compressive strength and shear strength of modified soil are significantly enhanced, which mainly enhances the soil's mechanical properties by increasing cohesion and has little effect on the internal friction angle. Bio-glue improves soil structure through surface coating, particle bonding, and pore filling, which also improves the reinforcement effect of fiber-soil interface and enhances soil's mechanical properties by combining the network framework formed by fibers.

Key words: bio-glue; straw fiber; cohesive soil; composite modification; strength characteristic; scanning electron microscope

浅表层黏性土由于直接暴露于大气中, 与大气的交互作用强烈。土体表层经历降雨入渗、水分蒸发、干缩开裂以及风化等过程, 工程性质会严重恶化^[1-2], 进而驱动土体结构破坏加剧, 整体性和稳定性大幅降低。随着铁路、公路、水利、矿山等诸多基础设施建设的蓬勃发展, 各类工程项目对土体工程特性的要求越来越

基金项目: 江苏省地质勘查项目(2024)

作者简介: 梁玉红(1978—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事矿山与海洋生态修复及地质灾害治理研究。E-mail: liangyuhongwu@163.com

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: 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.

高,对浅表层土体的强度特性也提出了更高的要求^[3-4]。

目前,常用的土体改良方法是通过化学手段提高土体的工程特性。水泥、石灰及粉煤灰等无机材料能够以合理的成本提升土体的强度特性^[5-6],但大规模和过量使用这些材料可能引起的环境污染和破坏不容忽视^[7]。此外,用水泥和石灰等传统材料改良后的土体表现出较为明显的脆性特征。为解决传统材料的缺陷并减少对环境的影响,随着科技的进步,许多生物型、环保型材料被开发用于岩土工程领域。例如: Cole 等^[8]研究发现生物聚合物在砂土加固方面具有可行性,生物聚合物的掺入可以大幅改善土体的各项工程性能; Zhang 等^[9]将木质素应用于公路路基施工中,认为木质素相较于水泥基稳定剂在环境保护、能源节约以及成本控制方面表现出更为显著的优势; 刘松玉等^[10]研究发现木质素可以用于路基土的加固改良,并在实际工程中得到应用验证; Chang 等^[11]针对韩国残积土的不良性质,利用 β -葡聚糖和结冷胶对其进行改良,验证了该材料应用于土体强度特性改良的可行性^[12]; 卢毅等^[13]发现将生物胶掺入黏土,能够大幅度提升黏土的抗崩解特性。此外,纤维加筋法由于成本低廉、效果优良而在土体改良中得到广泛应用。出于经济性和可持续性方面的考量,国内外学者对天然纤维在土体改良中的应用开展了大量研究。例如: Marandi 等^[14]通过室内试验研究了棕榈纤维对粉砂强度特性的影响,指出棕榈纤维在路基工程中具有良好应用前景; 常志璐等^[15]研究了椰丝纤维含量和长度对固化粉砂土无侧限抗压强度和渗透特性的影响; 郝建斌等^[16]分析了麦秸秆加筋对土体抗剪强度的影响,发现麦秸秆能够限制土体变形和裂纹扩展,认为其适宜作为黏性土的加筋材料。

然而,单一的土体改良方式常受到土体性质、应用场景、成本等条件的限制,结合化学改良和纤维加筋优点的复合改良方式在提升土体整体性能、增强力学性能以及改善土体结构等方面更具优势。例如: Ma 等^[17]采用聚氨酯型固化剂和剑麻纤维对土体进行改良,改良土体的抗压与抗拉强度均有显著提高; Mirzababaei 等^[18]研究了聚丙烯纤维和不同新型聚合物的联合加固对黏土力学行为的影响,并证实了不同聚合物固化土体的强度能够通过纤维的添加得到进一步增强; 刘雨彤等^[19]对国产土壤固化剂和聚丙烯纤维的研究表明,复合改良可有效增强土体稳定性。现有研究已证明,人工合成纤维与不同固化剂的复合加固方式相比于单一的土体改良方法效果更优,但目前针对天然纤维与环保型绿色固化剂复合用于土体改良的研究仍较为有限。

本文选用生物胶和稻秸秆纤维对黏性土进行改良,探究复合改良方式下生物胶-秸秆纤维复合改良黏性土(以下简称“改良土”)无侧限抗压强度和抗剪强度特性的变化规律,并结合扫描电镜图像阐明了生物胶-纤维复合改良的作用机理,以期对浅表层黏性土工程性质改良提供新途径。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自南京地区某土坡,其在自然状态下呈黄褐色,取样时呈硬塑状。将取回的土料风干碾碎后过 2 mm 筛,去除土中杂质和砾石组分。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中的试验方法,通过轻型击实试验、颗粒分析试验和界限含水率试验测得试验用土的基本物理性质参数如下:最大干密度为 1.79 g/cm³,最优含水率为 18.94%,比重为 2.71,液限为 38.41%,塑限为 21.12%,塑性指数为 17.3。

选用的生物胶主要成分为黄原胶,是一种由油菜黄单胞菌以碳水化合物为底物,经发酵而产生的阴离子高分子多糖、颜色呈白色或淡黄色的粉末,如图 1 所示。该生物胶是以 D-葡萄糖为主链的线性结构,由重复的五糖单位以 2 : 2 : 1 的质量比组成,三糖侧链在主链上间隔排列并与主链相连,其结构式如图 2 所示;高分子链上的酸性基团和羟基赋予其高度的表面亲水特性和较强的凝胶作用,在土体改良和稳定方面具有广阔的应用前景,其基本物理参数如下:可溶,耐热性区间为 -98 ~ 90℃,耐酸碱区间为 3 ~ 11,相对分子量为 182,黏度为 1 200 ~ 1 600 Pa · s, pH 值(1%溶液)为 6 ~ 8。

试验所用纤维是一种天然植物纤维,是由稻谷收割后的秆和叶在自然条件下晾晒后经粉碎制成的纤维状物质,如图 3 所示。作为一种广泛存在的农业副产品,稻秸秆纤维具有良好的生态可持续性和环境友好性,来源广泛且价格低廉。根据已有研究^[20]和预试验结果,选用的稻秸秆纤维直径为 0.1 ~ 2 mm,长度为 5 ~ 20 mm,单根拉伸断裂强度为 0.1 ~ 0.46 N/tex。

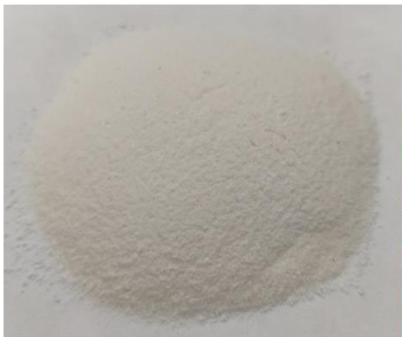


图 1 生物胶
Fig.1 Bio-glue

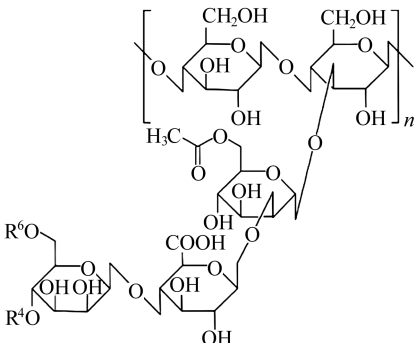


图 2 生物胶分子结构式
Fig.2 Molecular structure of bio-glue

1.2 试样制备与试验方法

为探究生物胶含量和纤维含量对改良土抗剪强度特性的影响,选取的生物胶含量(质量分数,下同)分别为 0%、0.5%、1%、1.5%和 2%,纤维含量分别为 0%、0.2%、0.4%、0.6%和 0.8%,两者均为与干土质量之比。根据轻型击实试验结果,设定所有试样的干密度为 1.7 g/cm³(95%压实度),含水率为 19%。试样的制备过程如图 4 所示,均采用千斤顶静压法一次静压成型,根据试验需求分别制成直径为 61.8 mm、高为 20 mm 和直径为 39.1 mm、高为 80 mm 的圆柱体。在试样制备过程中,先按比例将一定量的干土与生物胶充分混合,使生物胶均匀分散以避免其与大量水分接触而聚集成团;然后向土-胶混合物中分次加入水并搅拌均匀后将土料置于模具中静压 20 min 成样。试样脱模后用保鲜膜包裹密封并置于保湿容器中,使其内部水分、应力达到平衡,在室内条件下养护 7 d 后进行试验。



图 3 稻秸秆纤维
Fig.3 Straw fiber



图 4 试样制备过程
Fig.4 Sample preparation process

无侧限抗压强度试验和直剪试验均参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》所述步骤进行,具体的试验方案如表 1 所示。无侧限抗压强度试验采用南京土壤仪器厂生产的 YYW-2 型应变控制式无侧限抗压仪进行,加载速率设置为 2.4 mm/min。以应力-应变曲线峰值作为无侧限抗压强度,若曲线中的峰值不明显,则取 15%轴向应变的对应值。每组试样制备 3 个平行样,并取 3 组数据平均值进行分析。

直剪试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制直剪仪。试验在不固结不排水条件下进行,剪切速率为 0.8 mm/min,施加的法向应力分别为 100、200、300、400 kPa,在剪切位移达到 14 mm 后结束试验。试验前测得养护后各试样含水率在 18.7%左右,试验后试样含水率未有显著改变(小于 0.1%)。当应力-位移曲

表 1 试验方案
Table 1 Experimental scheme

试样编号	生物胶含量/%	纤维含量/%
S1	0、0.5、1、1.5、2	0
S2	0	0.2、0.4、0.6、0.8
S3	0.5	0.2、0.4、0.6、0.8
S4	1.5	0.2、0.4、0.6、0.8
S5	1、2	0.2、0.4
S6	1、2	0.6、0.8

线呈现峰值特征时,以峰值点处剪应力作为抗剪强度;若曲线无明显峰值显现,则采用剪切位移4 mm处剪应力来确定抗剪强度。根据莫尔-库仑强度准则,计算得到相应的抗剪强度指标,即黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

扫描电镜试验采用日立SU3500型扫描电镜。样品选用经直剪试验后的土样制备,生物胶含量和纤维含量分别为2%和0.8%。在试样的新鲜断面上取大小约1 cm³的代表性土块,先低温烘干脱水以达到充分干燥状态,而后去除样品表面粉尘和碎屑,并喷镀金粉以提高其导电性。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线特征

在单掺和复合改良方式下,不同生物胶含量和不同纤维含量改良土试样的应力-应变曲线如图5、图6所示,素土试样表现出较强的脆性特征,随着生物胶含量或纤维含量的增加,试样应力-应变曲线形态均发生显著改变,其应变软化行为有所减弱,并普遍呈现出由应变软化型逐渐向应变硬化型转变的趋势。

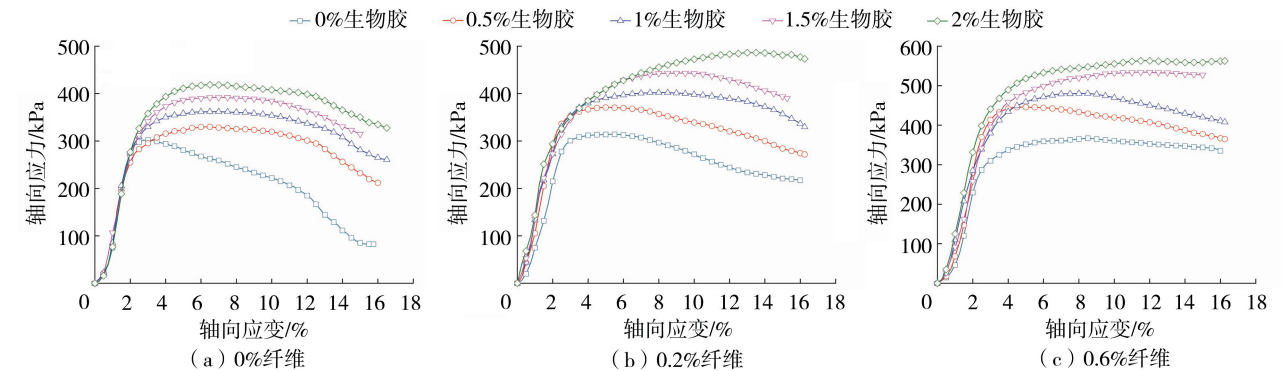


图5 不同生物胶含量改良土试样的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of modified soil samples with different contents of bio-glue

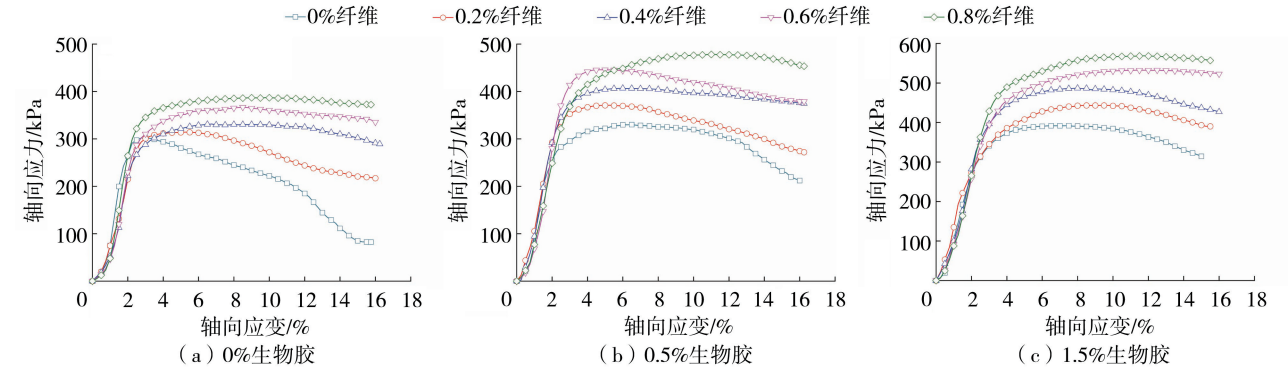


图6 不同纤维含量改良土试样的应力-应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of modified soil samples with different contents of fiber

生物胶含量和纤维含量对曲线斜率的影响存在明显差异。当纤维含量一定时,试样弹性模量随着生物胶含量的增加而略微增长,反映为整体刚度的提升。当纤维含量为0%且生物胶含量为2%时,试样弹性模量相较于素土由11.6 MPa增大至13.1 MPa,增幅约为12.9%。试样在生物胶的胶结作用下变得更加坚硬,这是土颗粒间相互联系紧密且排布紧凑的结果。当生物胶含量一定时,纤维含量的增加未引起试样弹性模量的显著变化。这说明纤维在土体弹性变形阶段所发挥的作用有限,而纤维与土体间的耦合作用由于生物胶的胶结作用得到增强。

在生物胶和纤维的改良作用下,应力-应变曲线的峰形逐渐变宽,峰值位置后延,表明改良土试样在受力而产生破坏之前的塑性变形能力增强,较素土具有更为良好的延展性。例如,素土试样的破坏应变约为3.0%,而在单掺生物胶含量为0.5%时提高约116.7%,提升至6.5%;在单掺纤维含量为0.2%时提高约76.7%,提升至5.3%。然而,对于不同生物胶含量的改良土试样,其破坏应变差异不显著;对于不同纤维含量的改良土试样,其破坏应变随纤维含量的增加而逐步递增,在较高纤维含量时增长显著,这表明密集分布

的纤维更易在塑性变形阶段发挥作用而延缓试样脆性断裂的发生。

此外,纤维的加入有助于减小峰后应力衰减程度,峰后应力-应变曲线呈现出更加平缓的趋势,从而提高试样的强度特性和稳定性。相较于素土,试样峰后应力衰减程度随纤维含量的增加而减少,说明纤维在破坏扩张、贯通阶段发挥的作用显著。在不同生物胶含量下,改良土试样峰后应力衰减程度均呈减小趋势,但生物胶含量增加所引起的减小量相对较小,这应与较大应变时土颗粒间胶结失效有关。在复合改良方式下,纤维对峰后应力衰减程度的削弱作用愈发显著,如在生物胶含量为 1.5%、纤维含量为 0.6%时,曲线趋于应变硬化型。

由上述应力-应变曲线特征分析可知,改良土试样的应力-应变曲线特征主要表现为破坏应变增大和峰后应力衰减程度减弱。其中,生物胶的改良效果作用于试样变形破坏的全过程,而纤维则是在试样产生塑性变形后发挥加筋作用。在两者的协同作用下,生物胶通过胶结作用增加纤维与土体间接触面积,增强界面相互作用,从而减弱峰后损伤破坏。

2.2 无侧限抗压强度

根据应力-应变曲线,得到不同生物胶含量和不同纤维含量改良土试样的无侧限抗压强度,试验结果如图 7 所示,图中虚线为无侧限抗压强度与生物胶含量关系的拟合曲线。由图 7(a)可知,在未掺入生物胶条件下,试样无侧限抗压强度随着纤维含量的增加而呈分段线性递增关系,增长幅度在纤维含量达到 0.4%后显著增大,说明纤维产生的土体强度改良作用取决于其在土体内的分布密度。在生物胶含量为 0.5%和 1.5%时,试样无侧限抗压强度与纤维含量呈线性递增关系。生物胶的存在可有效弥补较低纤维含量时土体强度的不足,两者存在明显的协同效应。此外,生物胶含量分别为 0%、0.5%、1.5%时,试样无侧限抗压强度每 1%纤维含量的增长幅度分别为 141.07、185.47、221.16 kPa,呈逐步增长的变化趋势。这一现象表明复合改良效果是由生物胶含量所主导的,生物胶含量的增加能够进一步增强土体内部纤维的拉筋效果,从而更大幅度地提高试样无侧限抗压强度。

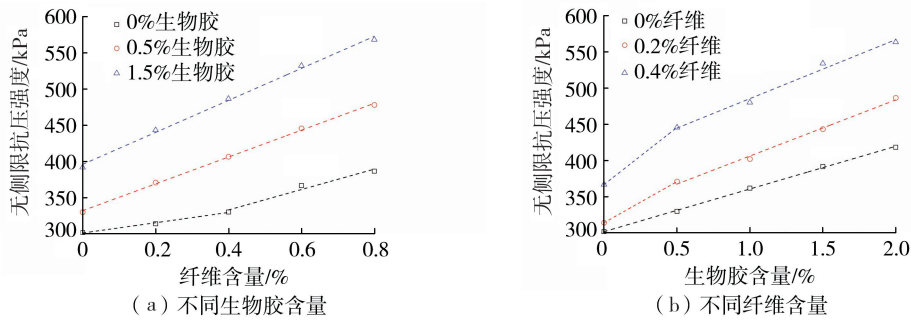


图 7 不同生物胶含量和不同纤维含量改良土试样的无侧限抗压强度

Fig. 7 Unconfined compressive strength of modified soil samples with different contents of bio-glue and fiber

由图 7(b)可以看出,不同纤维含量下试样无侧限抗压强度均随着生物胶含量的增加而增大,但增长趋势受纤维含量影响而表现出明显差异。在相同生物胶含量条件下,复合改良试样无侧限抗压强度在高纤维含量下显著较高。对于纤维含量为 0.2%和 0.6%的试样,生物胶含量对无侧限抗压强度的影响呈现出相似的模式,具体表现为无侧限抗压强度在生物胶含量增至 0.5%时迅速增长,而后随着生物胶含量进一步增加,其增长幅度有所减弱且不受纤维含量变化的显著影响。以纤维含量为 0.6%的试样为例,其在生物胶含量为 0%时的无侧限抗压强度为 366.98 kPa,当生物胶含量为 0.5%时增至 445.85 kPa,每 1%生物胶含量增加约 157.74 kPa;而当生物胶含量为 2%时,无侧限抗压强度从 445.85 kPa 增大到约 563.68 kPa,相应的增长幅度约为每 1%生物胶含量增大 78.55 kPa。然而,对于纤维含量为 0%的试样,其无侧限抗压强度随着生物胶含量的增加而呈线性增大的趋势,但增长幅度显著降低至 58.97 kPa。增长幅度的变化表明生物胶-纤维复合改良对土体强度的贡献优于单掺改良,两者在较高生物胶和纤维含量下的差异更为明显。

2.3 抗剪强度指标

不同生物胶含量和不同纤维含量改良土试样的抗剪强度及其拟合曲线如图 8 和图 9 所示,可以看出,无论生物胶含量和纤维含量如何变化,抗剪强度均呈现出随法向应力增大而增强的趋势,两者呈良好的线性关系。在单掺方式下,生物胶含量和纤维含量的增加均对土体抗剪强度有显著的增强效果。在复合改良方式

下,抗剪强度较单掺方式下有明显增大,其拟合曲线表现出与单掺方式下高度相似的变化规律。

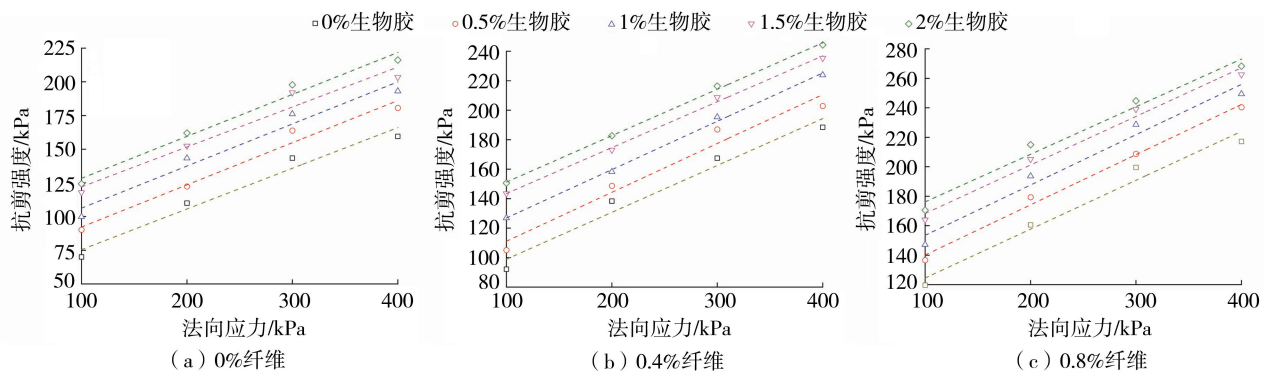


图 8 不同生物胶含量改良土试样的抗剪强度及其拟合曲线

Fig. 8 Shear strength of modified soil samples with different contents of bio-glue and their fitting curves

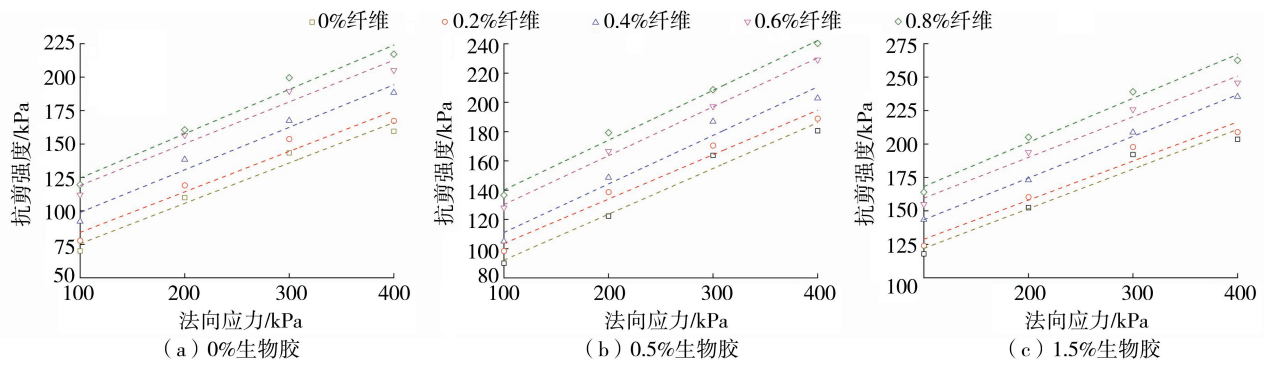


图 9 不同纤维含量改良土试样的抗剪强度及其拟合曲线

Fig. 9 Shear strength of modified soil samples with different contents of fiber and their fitting curves

图 10、图 11 为不同生物胶含量和不同纤维含量改良土试样的抗剪强度指标,在单掺和复合改良方式下,改良土试样的黏聚力与生物胶含量和纤维含量均呈正相关性(图 10)。随着生物胶含量的增加,生物胶在土颗粒之间提供的黏结力增强;随着纤维含量的增加,纤维在土体中分布密度的增大增加了纤维出现在剪切面附近的概率,并有效产生拉筋作用以阻碍试样剪切破坏的产生。在复合改良方式下,试样黏聚力的显著提升应是生物胶增强纤维与土界面间相互作用力的结果。因此,在相同生物胶含量下,纤维含量的增加对黏聚力的提升更为有利。例如,当生物胶含量为 2% 时,纤维含量为 0.4% 的改良土试样相较于素土增幅为每 1% 纤维含量黏聚力增大 56.18%,而在纤维含量增至 0.8% 后相应地降低至 24.64 kPa;而当纤维含量为 0.8% 时,生物胶含量为 0.5% 和 1.5% 的改良土试样黏聚力增幅则分别为每 1% 生物胶含量增大 121.50 kPa 和 60.02 kPa。在其他含量下也可观察到试样黏聚力具有相似的变化规律。由图 10 还可以看出,当生物胶含量大于 1.5% 或纤维含量大于 0.6% 时,黏聚力增长均呈现减缓趋势,表明过量生物胶或纤维对黏聚力的增强作用减弱,其含量应存在最优值。

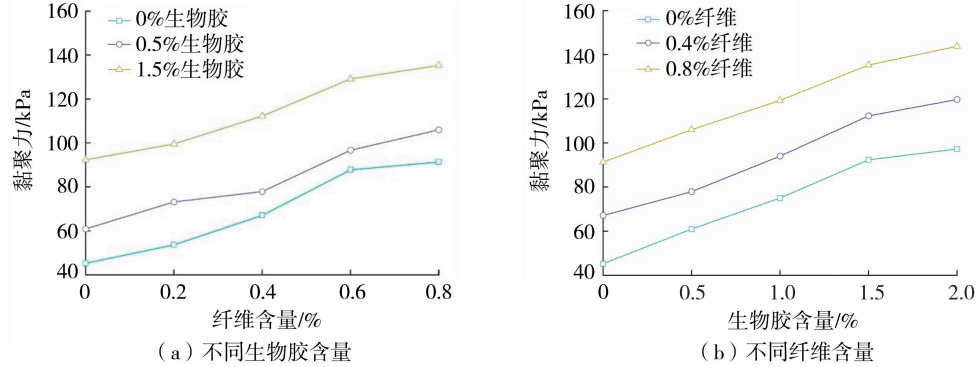


图 10 不同生物胶含量和不同纤维含量改良土试样的黏聚力

Fig. 10 Cohesion of modified soil samples with different contents of bio-glue and fiber

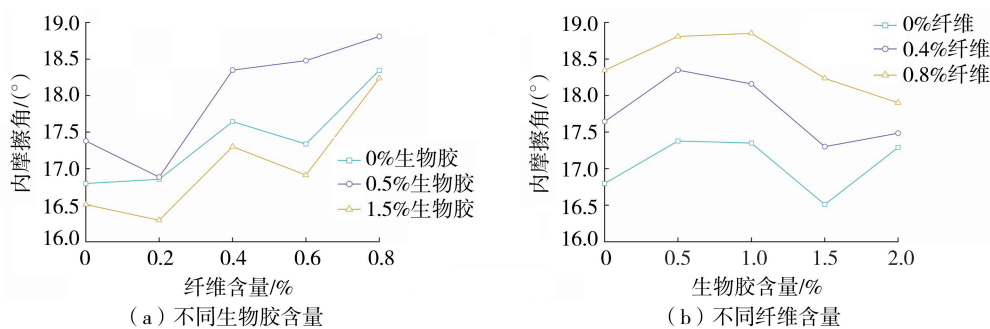


图 11 不同生物胶含量和不同纤维含量改良土试样的内摩擦角

Fig. 11 Internal friction angle of modified soil samples with different contents of bio-glue and fiber

改良土试样内摩擦角受生物胶含量和纤维含量的影响相对较小,其值大致在 $16^{\circ} \sim 19^{\circ}$ 范围内变化,最大差值约为 2° (图 11)。进一步分析可以发现,随着纤维含量的增加,内摩擦角整体呈逐步增大态势。然而,随着生物胶含量的增加,内摩擦角呈先增大后减小的变化趋势,转折出现在生物胶含量为 0.5% 或 1% 时,表明较高的生物胶含量可能会引起土颗粒间摩阻力减小,削弱颗粒间的咬合互锁。这一结果与 Ayeldeen 等^[21]关于生物聚合物改良湿陷性土力学性能的研究结果保持一致。

3 讨 论

3.1 应力-应变曲线特征

由图 7(a) 可知,生物胶含量的增加往往引起弹性变形阶段应力-应变曲线斜率的上升,改良土具有更高的刚度。这一现象在石灰、水泥等固化材料改良土中是常见的^[22-23],其原因在于生成的胶结物质填充土体内部孔隙并增强土颗粒之间的联结力,从而改变了土体的微观结构。另一方面,试验结果显示,纤维的掺入对改良土试样弹性模量的影响较小(图 7(b))。Yetimoglu 等^[24]在承载比试验中同样发现,纤维的掺入对荷载-贯入曲线的初始刚度没有显著影响。根据蔡奕等^[25]关于纤维石灰土工程性质的试验研究,纤维可有效增强素土弹性模量。然而,黄晓如等^[26]的研究表明,在相同含水率条件下,纤维的加入对土体刚度起到降低作用,且随纤维掺量的增加降低程度增大。结合本文试验结果可以发现,纤维在弹性变形阶段发挥的作用与土的性质密切相关。对于质地较为坚硬的土体,其自身的弹性模量较大,纤维对土体弹性模量的影响难以体现。在复合改良方式下,生物胶增强纤维-土界面间相互作用,使得纤维与土体在荷载作用下协调变形。纤维抵抗弯曲变形而产生的拉应力分担外部荷载,是改良土应力-应变曲线斜率随生物胶含量增加而逐步增长的主要原因。

在生物胶和纤维的共同作用下,改良土无侧限抗压强度的峰值位置向右移动,无侧限抗压强度显著提高,其应力-应变曲线表现出向弱应变硬化型转变的趋势。纤维的加入有助于增强土体塑性特性,当土体受力产生微裂隙时,纤维能够阻碍裂隙的发展,从而提高土体的整体强度和韧性。Tang 等^[27]指出,土体与纤维相互错动时,两者间界面应力决定着纤维的改良效果。在这一过程中,生物胶在纤维表面与土颗粒之间产生胶结作用,纤维表面的界面摩擦增强并反作用于土体,有效阻碍土颗粒位移。因此,生物胶-纤维复合改良方式试样的无侧限抗压强度和韧性均优于单掺生物胶或纤维试样。

在单掺生物胶方式下,改良土峰后应力由于生物胶的胶结失效、结构破损而迅速降低。在单掺纤维和复合改良方式下,峰后应力衰减程度明显减弱,其原因在于分布在破坏面附近的纤维连接两侧土体,一定程度上阻碍裂隙的快速扩张。当拉应力超过纤维抗拉极限或纤维-土界面剪切强度时,纤维被拔出或断裂,从而失去改良效果^[28-29],应力显著降低。这一现象在低纤维含量($\leq 0.4\%$)试样中较为多见。随着纤维含量的增加,峰后应力的降低相对较为平缓,说明土体内部纤维没有全部断裂,或是断裂后仍提供摩擦力。因此,在复合改良过程中,生物胶在峰后阶段发挥的作用体现在:①在纤维两端形成锚固区,使纤维抗拉性能得到充分利用;②建立土颗粒间以及纤维与土颗粒间的联结,减少软弱区域,使纤维的加筋作用扩散于更大范围。

3.2 抗剪强度指标

根据直剪试验结果,生物胶和纤维的掺入并未对改良土抗剪强度拟合曲线的斜率产生显著影响,改良土

抗剪强度拟合曲线仅向左产生平行移动(图 8,9)。生物胶产生的胶结作用以及纤维产生的加筋作用是改良土抗剪强度拟合曲线在纵轴上截距增大的主要原因。随着生物胶含量和纤维含量的增加,改良土黏聚力逐渐增大,且均在较高含量下出现增长速率减缓的现象(图 10)。一方面,黏聚力的显著增大与生物胶含量呈正相关关系,这与土颗粒之间生物胶基质建立的物理连接密切相关;另一方面,剪切面上纤维分布数量是决定纤维对土体黏聚力影响程度的重要因素之一。过多的纤维相互搭接,可能导致土体内部出现架空空洞或纤维分布不均,引起周围土体软弱面形成,因而限制黏聚力的增大^[30]。

试验结果还显示,内摩擦角受生物胶含量和纤维含量的影响相对较小,但总体上仍呈现出规律性变化(图 11)。当生物胶含量小于 1% 时,改良土内摩擦角随生物胶含量的增加而提高,其原因可能是生物胶促成细粒凝聚为大团聚体,进而增强粗粒与团聚体、团聚体与团聚体间的界面相互作用。当生物胶含量由 1% 增至 2% 时,改良土内摩擦角呈减小趋势,这应是过量生物胶削弱土颗粒间的直接相互作用,并减小纤维与土颗粒之间的摩擦力和机械咬合所致,此时生物胶起到层间润滑作用。此外,生物胶包裹土颗粒,减少其表面粗糙程度,也可能导致内摩擦角减小。纤维与土体间的相互作用使得改良土内摩擦角随着纤维含量的增加而逐渐增大(图 11)。纤维的粗糙表面和不规则表面形态增加了与土颗粒的接触面积,土颗粒在挤压作用下嵌入纤维表面,因而限制了土颗粒的位移和旋转,阻止其受力时的相对滑动。

4 生物胶-纤维复合改良机理

上述的一系列试验结果表明,生物胶-纤维复合改良是通过提高土颗粒间的黏聚力来增强土体力学强度和韧性等工程性质的,改良土所表现出的力学行为是土体内在微观结构发生变化的外在反应。为进一步揭示生物胶和纤维对土体微观结构的影响,对改良土进行扫描电镜分析,结果如图 12 所示。

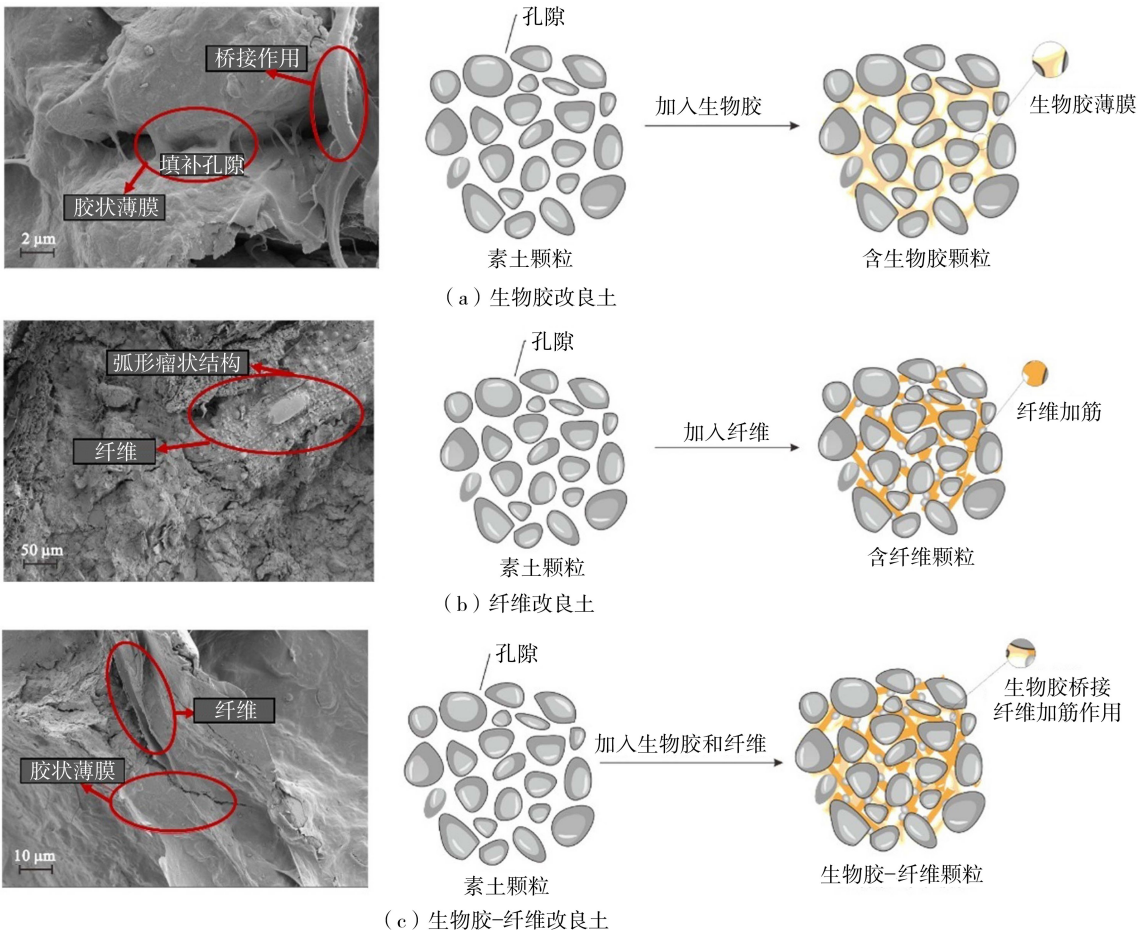


图 12 扫描电镜图像及改良机理示意图

Fig. 12 SEM images and reinforcement mechanism

由图 12(a)可见,生物胶附着在土颗粒表面并填充土颗粒间的孔隙,包裹在黏土表面的胶状薄膜将黏土颗粒之间的接触方式由点对点接触变成了面与面接触。土颗粒通过生物胶构建的膜结构桥接并结合在一起,形成稳定的整体结构。土体内部形成的三维网状结构能够约束土颗粒并限制其产生位移,胶状薄膜具有的弹性能够通过自身的变形抵消土体的变形,以此提高土体黏聚力和抗剪强度。一方面,生物胶聚合物链上的羧酸根(—COO^-)基团吸引黏土矿物中的阳离子,并与带负电的黏土矿物形成阳离子桥接,从而改变黏土颗粒表面电荷性质,促进黏土颗粒聚集;另一方面,生物胶通过其自带的羧酸(—COOH)和羟基(—OH)基团与黏土矿物形成静电键合或氢键,构建稳定的空间网络结构。因此,生物胶对黏土改良效果随生物胶含量的增加而逐渐提升,其原因在于生物胶与黏土颗粒间的成键和胶结作用、填充和成膜作用以及桥接和团聚作用均随着生物胶含量的增加而增强。

由图 12(b)可以观察到,凹凸不平的纤维表面增加了与土颗粒的接触面积,并增强了界面摩擦力,这使得纤维与土颗粒之间的紧密咬合可以有效地限制土颗粒的移动。并且,纤维的粗糙表面使得土颗粒容易附着或嵌入,形成类似“锚固”的效果,进一步增强纤维与土颗粒之间的黏结力。此外,纤维含量决定其在土体内部所形成的网络结构,进而影响对土颗粒的接触和摩擦作用。在适宜纤维含量下,相互交叉、分布的纤维形成完整的骨架,将土颗粒紧密地连接在一起。凹凸不平的纤维表面有助于增加这种网络结构的复杂性和稳定性,使得土体在受力时能够更加均匀地承载,减少局部破坏的风险。

在生物胶-纤维复合改良方式下,生物胶黏结在土颗粒和纤维表面,并通过自身强度进一步增强两者间的黏结力(图 12(c))。纤维-土的界面相互作用极大程度上决定着纤维对土体强度特性的改良效果,而生物胶作为不同材料相间连接的“纽带”,使得纤维的抗拉性能得以充分发挥。纤维-土界面的黏结力由以下三方面因素决定:①由纤维的表面形状和粗糙度引起的界面滑动摩擦力;②由土颗粒挤压嵌入而在纤维表面产生的咬合摩擦力;③由水膜黏结力和土粒黏结力构成的土壤黏结力。天然纤维高分子结构中通常含有大量的亲水性基团,易与生物胶通过氢键相结合,从而建立与土颗粒的紧密联系。由于生物胶增强纤维-土界面的黏结力,当纤维随着土体发生变形时,纤维两端锚定而不易拔出,这使得破坏面附近纤维能够处于充分拉伸状态。同时,纤维所形成的网状结构也能够为生物胶提供更好的支撑和分布,使得生物胶的胶结作用得到更加充分的发挥。因此,土体强度特性在两者的协同作用下得到显著提升。

5 结 论

a. 随着生物胶含量和纤维含量的增加,改良土应力-应变曲线趋于应变硬化,塑性特征显著增强。应力-应变曲线峰值位置后移,峰后应力衰减减缓,曲线趋于平缓。生物胶的改良效果作用于变形破坏全过程,而纤维则是在塑性变形阶段发挥加筋作用。

b. 生物胶-纤维复合改良方式相较于单掺生物胶或纤维改良方式,改良土无侧限抗压强度显著增强,尤其在生物胶和纤维含量较高时两者差异更为明显。在不同纤维含量下,改良土无侧限抗压强度的增长幅度随生物胶含量的增加而逐步增大,表明复合改良效果受生物胶含量主导,生物胶含量的增加能提升土体内部纤维的加筋作用。

c. 在不同围压条件下,抗剪强度随生物胶含量和纤维含量的增加而逐渐增大,其变化趋势与单掺方式相似。改良土黏聚力与生物胶含量和纤维含量均呈正相关关系,当生物胶含量大于 1.5%或纤维含量大于 0.6%时,黏聚力增长趋势明显放缓,而内摩擦角变化不显著。生物胶-纤维复合改良主要通过提升黏聚力来增强土体的力学性能。

d. 生物胶通过阳离子桥接、静电键合及氢键作用吸附于土颗粒表层,并通过土颗粒表面包覆作用、颗粒联结效应和孔隙填充机制改善土体结构。稻秸秆纤维相互交织,穿插于土颗粒间,形成网络框架,为生物胶的胶结作用提供支撑结构。生物胶能增强纤维-土界面的黏结强度,减少纤维拔出,提升土体的力学性能。

参考文献:

[1] 李卓,刘斯宏,王柳江,等. 极端气候条件下南京附近黏土冻融强度试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1): 40-44. (LI Zhuo, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Freeze-thaw strength test of clay soil around Nanjing City under extreme climatic conditions[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2014,42(1):40-44. (in Chinese))

[2] 叶伟,马福恒,胡江,等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):102-109. (YE Wei,MA Fuheng,HU Jiang,et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):102-109. (in Chinese))

[3] 张智慧,朱文文,马天,等. 静压沉桩后黏土中超孔压时空分布规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):88-96. (ZHANG Zhihui,ZHU Wenwen,MA Tian,et al. Study on spatiotemporal distribution of excess pore water pressure in clay after static pile sinking[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):88-96. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 胡俊. 水泥改良前后土体冻结温度及力学特性试验研究[J]. 铁道建筑,2013(4):156-159. (HU Jun. Experimental study on freezing temperature and mechanical performance of soil before and after cement-improving[J]. Railway Engineering,2013(4):156-159. (in Chinese))

[6] 蒋林华,张炎,李辰治,等. 石灰石粉水泥基材料的研究与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):83-89. (JIANG Linhua,ZHANG Yan,LI Chenzhi,et al. Review on the research and application of cement-based materials with limestone powder[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(1):83-89. (in Chinese))

[7] 王鑫,李玉华,何立环,等. 中国水泥行业2011—2022年二氧化碳和大气污染物排放分析[J]. 中国环境监测,2024,40(2):8-18. (WANG Xin,LI Yuhua,HE Lihuan,et al. Analysis on the emissions of carbon dioxide and air pollutants in China's cement industry from 2011 to 2022[J]. Environmental Monitoring in China,2024,40(2):8-18. (in Chinese))

[8] 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.

[9] ZHANG Tao,CAI Guojun,LIU Songyu. Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade:a field investigation[J]. Journal of Cleaner Production,2017,142:4243-4257.

[10] 刘松玉,张涛,蔡国军. 工业废弃木质素固化改良粉土路基技术与应用研究[J]. 中国公路学报,2018,31(3):1-11. (LIU Songyu,ZHANG Tao,CAI Guojun. Research on technology and engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product[J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(3):1-11. (in Chinese))

[11] CHANG I,CHO G C. Strengthening of Korean residual soil with β -1,3/1,6-glucan biopolymer[J]. Construction and Building Materials,2012,30:30-35.

[12] CHANG I,PRASIDHI A K,IM J,et al. Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers[J]. Construction and Building Materials,2015,77:430-438.

[13] 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))

[14] MARANDI S M,BAGHERIPOUR 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.

[15] 常志璐,裴向军,吴梦秋,等. 植物纤维加筋固化土抗压强度和渗透试验研究[J]. 工程地质学报,2017,25(4):912-919. (CHANG Zhilu,PEI Xiangjun,WU Mengqiu,et al. Experimental study on compressive strength and permeability of soil solidified with coconut-fiber and double polyethylene material[J]. Journal of Engineering Geology,2017,25(4):912-919. (in Chinese))

[16] 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 Xingme,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. (in Chinese))

[17] MA Ke,LIU Jin,JIANG Canhui,et al. Compressive and tensile strength of polymer-based fiber composite sand[J]. Journal of Central South University,2022,29(2):528-545.

[18] 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.

[19] 刘雨彤,杨林. 冻融作用下PPF稳定土力学性能研究[J]. 冰川冻土,2017,39(4):850-857 (LIU Yutong,YANG Lin. Study of the mechanical properties of stabilized soil containing PPF under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(4):850-857. (in Chinese))

[20] 陈志波,郭学文,戴梦兰,等. 纤维含量对加筋土宏观和微观特性的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2025,47(4):1-9. (CHEN Zhibo,GUO Xuewen,DAI Menglan,et al. Influence of fiber content on macro and micro characteristics of

reinforced soil[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025,47(4):1-9. (in Chinese))

[21] AYELDEEN M,NEGM A,EL-SAWWAF M,et al. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2017,9(2):329-339.

[22] 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. (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. (in Chinese))

[23] 李丽华,刘文,白玉霞,等. 椰壳纤维-石灰协同作用改良黏土性能试验研究[J]. 水文地质工程地质,2025,52(1):130-140. (LI Lihua,LIU Wen,BAI Yuxia,et al. Experimental study on the synergistic effect of coir fiber and lime to improve soil performance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2025,52(1):130-140. (in Chinese))

[24] YETIMOGLU T, INANIR M, INANIR O E. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay[J]. Geotextiles and Geomembranes,2005,23(2):174-183.

[25] 蔡奕,施斌,高玮,等. 纤维石灰土工程性质的试验研究[J]. 岩石工程学报,2006,28(10):1283-1287. (CAI Yi,SHI Bin,GAO Wei,et al. Experimental study on engineering properties of fibre-lime treated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(10):1283-1287. (in Chinese))

[26] 黄晓如,璩继立. 含水率和加筋条件对棕榈加筋土的影响[J]. 上海理工大学学报,2019,41(4):395-402. (HUANG Xiaoru,QU Jili. Influence of water content and reinforcement conditions on palm reinforced soil[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology,2019,41(4):395-402. (in Chinese))

[27] TANG Chaosheng,SHI Bin,ZHAO Lizheng. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010,28(1):54-62.

[28] 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. (RONG Dezhen,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. (in Chinese))

[29] 朱旭芬,郑加强,魏继红,等. 纤维-水溶性聚合物加固砂土抗剪强度特性试验研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):50-59. (ZHU Xufen,ZHENG Jiaqiang,WEI Jihong,et al. Experimental study on shear strength of fiber-water soluble polymer composite modified sand[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):50-59. (in Chinese))

[30] CHADUVULA U,VISWANADHAM B V S,KODIKARA J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay[J]. Applied Clay Science,2017,142:163-172.

(收稿日期:2025-01-03 编辑:熊水斌)

(上接第 123 页)

[13] 李琳. 带浮力块的柔性立管涡激振动特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.

[14] 宋吉宁,吕林,张建侨,等. 三根附属控制杆对海洋立管涡激振动抑制作用实验研究[J]. 海洋工程,2009,27(3):23-29. (SONG Jining,LYU Lin,ZHANG Jianqiao,et al. Experimental investigation of suppression of vortex induced vibration of marine risers by three control rods[J]. The Ocean Engineering,2009,27(3):23-29. (in Chinese))

[15] MIYATA H,SHIKAZONO N,KANAI M. Forces on a circular cylinder advancing steadily beneath the free-surface[J]. Ocean Engineering,1990,17(1/2):81-104.

[16] TRIM A D,BRAATEN H,LIE H,et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. Journal of Fluids and Structures,2005,21(3):335-361.

[17] SARPKEYA T. In-line and transverse forces on cylinders in oscillatory flow at high Reynolds numbers[J]. Journal of Ship Research,1977,21(4):200-216.

[18] 吴仕鹏,王晓飞,赵福臣,等. 螺旋列板涡激振动抑制效率试验研究和分析[J]. 中国造船,2022,63(3):159-166. (WU Shipeng,WANG Xiaofei,ZHAO Fuchen,et al. Experimental study on suppression efficiency of vortex induced vibration for spiral plate[J]. Shipbuilding of China,2022,63(3):159-166. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-02 编辑:雷燕)