

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.021

生物胶与棕丝纤维复合改良黏土强度特性及其加固机理研究

王政杰¹, 胡书燕², 胡殿俊¹, 车文越¹, 祁长青¹, 张鑫浩¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院; 2. 江苏省建工建材质量检测中心有限公司)

摘要: 通过无侧限抗压强度试验、直接剪切强度试验及扫描电镜微观分析,探究了生物胶与棕丝纤维复合加固方式对黏土的改良效果及作用机理。试验结果表明:生物胶与棕丝纤维复合材料可显著提升黏土的抗压强度,其最大抗压强度达 876.4 kPa,最优配比为生物胶掺量 2%、棕丝纤维掺量 0.6%;改良后土体相较于仅采用生物胶改良减少了脆性破坏,相较于仅采用棕丝纤维改良提高了土体的整体性,受压时棕丝纤维可对土体裂纹起到桥接作用,生物胶则能大幅提高土体黏聚力,并减少了棕丝纤维受压时的向外移动。扫描电镜微观分析表明:生物胶通过形成膜状结构包裹土体,其分子中的羧基、羟基与黏土颗粒表面发生桥接和氢键作用,填充颗粒间隙以提高土体密实度;棕丝纤维主要发挥物理加筋作用,通过与土体间的摩擦力和拉力分担外部荷载,生物胶在棕丝纤维与土颗粒间起到黏结作用,棕丝纤维填充于土颗粒孔隙中,通过拉伸、嵌锁及摩擦效应优化土颗粒排列结构,进而提升土体强度与整体稳定性。

关键词: 黏土;生物胶;棕丝纤维;无侧限抗压试验;直接剪切强度试验;微观机理

Study on strength characteristics and reinforcement mechanism of clay improved by biogel and palm fiber composite

Wang Zhengjie¹, Hu Shuyan², Hu Dianjun¹, Che Wenyue¹, Qi Changqing¹, Zhang Xinhao¹

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

2. Jiangsu Construction Engineering Material Quality Testing Center Co., Ltd.)

Abstract: Unconfined compressive strength tests, direct shear strength tests, and scanning electron microscope microanalysis were conducted to investigate the improvement effect and reinforcement mechanism of the biogel and palm fiber composite on clay. The test results show that the biogel and palm fiber composite can significantly enhance the compressive strength of clay, with a maximum compressive strength of 876.4 kPa, and the optimal mixing ratio is a biogel content of 2% and a palm fiber content of 0.6%. Compared with the clay improved only by biogel, the modified soil exhibits less brittle failure; compared with that improved only by palm fiber, it presents better integrity. Under compression, palm fibers can bridge cracks in the soil, while biogel greatly increases the cohesion of the soil and reduces the outward movement of palm fibers under compression. Scanning electron microscope microanalysis reveals that biogel wraps the soil by forming a film-like structure, and the carboxyl and hydroxyl groups in its molecules bridge and form hydrogen bonds with the surfaces of clay particles, filling interparticle pores to improve soil compactness. Palm fibers mainly exert a physical reinforcement effect, sharing external loads through friction and tension with the soil. Biogel acts as a bonding agent between palm fibers and soil particles, and palm fibers fill the pores of soil particles, optimizing the arrangement structure of soil particles through stretching, interlocking, and friction effects, thereby improving the strength and overall stability of the soil.

Key words: clay; biogel; palm fiber; unconfined compressive strength test; direct shear test; micromechanism

黏土作为岩土工程中常见的工程材料,广泛应用于建筑、道路、堤坝等基础设施建设。但黏土自身存在强度较低、易产生塑性变形等固有缺陷,制约了其在工程中的应用。因此,对黏土进行有效改良,才能更好满足工程建设的实际需求。

土体改良的化学方法主要依赖于水泥、石灰和其他合成聚合物等化学添加剂^[1-2]。石灰、水泥复合改良

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(4247233);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201057)

作者简介: 王政杰(2001—),男,博士研究生,主要从事环境工程地质研究。E-mail:250409030002@hhu.edu.cn

通信作者: 祁长青(1979—),男,教授,博士,主要从事岩土工程和地质工程研究。E-mail:qichangqing@hhu.edu.cn

对黏土具有填充增强、硬凝、离子交换与水化作用,同时还有阻止水化作用的复合作用^[3]。物理方法中,纤维加筋是一种优良的土体加固技术,可极大提高土体脆性材料的破坏柔性和残余强度^[4]。为突破传统黏土加固技术的局限性与单一性,进一步提升加固效果,学者们开展了大量研究。唐朝生等^[5]研究表明,在水泥土中掺入适量聚丙烯纤维,可有效提高其强度与断裂破坏韧性;肖桂元等^[6]发现,玻璃纤维、石灰复合改良效果优于单一石灰或单一玻璃纤维改良;Boz 等^[7]则指出,在以石灰作为固化剂的基础上辅以纤维加筋,能使加固后的黏土呈现更强的延展性断裂特征,强度亦得到一定提升。

天然纤维因其成本较低、绿色环保等特点,在加筋土工程中的应用逐渐受到关注。棕丝纤维作为一种天然纤维,其加筋土的抗压强度^[8],与麦秸秆对土体抗压强度和抗变形能力相比提升更明显^[9];与素土相比,可有效减少土体的鼓胀现象^[10]。李丽华等^[11]将椰壳纤维作为加筋材料、石灰作为固化剂,结果表明,两者可协同作用,实现对黏土的加固。

然而,传统固化剂(如水泥、石灰等)会对环境造成不利影响,水泥在生产过程中将增大二氧化碳的排放量^[12-13],石灰窑则会释放二氧化硫、氮氧化物等污染物^[14]。近年来,随着可持续发展理念的深入,研究重点逐渐转向采用环境友好型和天然材料来改良土体^[15]。黄原胶是一类天然多糖生物聚合物,具有优良的增稠与黏结特性^[16],对土体改良效果明显,可有效提高土体的抗压强度、刚度^[17]与黏聚力^[18],使内部裂缝与孔隙逐渐减少^[19]。采用生物聚合物作为固化剂,比原有固化剂更环保、成本更低、工程性能更具优势^[20]。但目前针对生物胶与天然纤维复合改良土体的相关研究较为匮乏。

本文采用生物胶与棕丝纤维复合改良黏土,基于无侧限抗压强度试验与直接剪切强度试验,系统分析不同生物胶掺量与棕丝纤维掺量对改良黏土强度特性的影响,并借助扫描电镜对改良黏土的微观结构及加固机理进行研究,以期生物胶与棕丝纤维复合改良黏土的实际工程应用提供理论依据与技术支持。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验所用黏土选自南京市江宁区某地下蜀土,自然状态下呈黄褐色,主要物理参数如下:最大干密度 1.79 g/cm³,最优含水率 20.3%,塑限 23.8%,液限 40.2%,比重 2.71。主要化学成分为 SiO₂(61.12%,为质量分数,下同)、Al₂O₃(14.60%)和 CaO(10.74%)。根据筛分法及比重计法得到黏土的粒径分布曲线,如图 1 所示。

将原状土置于烘箱中,设定温度为 105 ℃,直至烘干;烘干后的土样采用高速粉碎机粉碎,并过 2 mm 标准筛,处理完成后密封保存备用。

试验所用生物胶为自主研发的由微生物发酵的天然多糖化合物,化学成分为葡萄糖、甘露糖和葡萄糖醛酸构成的复合多糖,具有易溶解、黏结性强、增稠、抗酶解、耐酸碱、生态友好等特性,基础理化性质为:pH(1%溶液)6~8,黏度 1 200~1 600,分子量 182,耐热性区间-98~90℃,耐酸碱区间(黏度±10%)3~11。

棕丝纤维来源广泛、价格低廉,是一种天然植物纤维,具有高抗拉、耐腐蚀、侧表面粗糙等力学结构特性,常用于改良土壤。根据预实验相关结果及相关研究^[21],选用的棕丝纤维基础物理参数为:平均直径 0.3 mm,长度 20 mm,密度 1.32 g/cm³,杨氏模量 0.77 GPa,断裂拉伸强度 155.5 MPa,断裂拉伸率 2.01%~2.74%,裁剪后备用。

1.2 试验方案与试样制备

试验以生物胶掺量(0%、1%、2%、3%、4%)与棕丝纤维掺量(0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%)进行正交试验。①无侧限抗压强度试验样品制备:取 163.2 g 黏土,加入相应掺量的生物胶和棕丝纤维混合均匀,再加入 31 g 蒸馏水(含水率为 19%)搅拌均匀。将混合物置于直径 39.1 mm、高度 80 mm 的模具中,采用静压法压至高度 80 mm,取出后用保鲜膜包裹养护,制成标准圆柱形试样。②直接剪切强度试验试样制备:取 102 g 黏土,加入相应掺量的生物胶与棕丝纤维混合均匀,再加入 17.38 g 蒸馏水(含水率 19%)搅拌均匀,制成初始

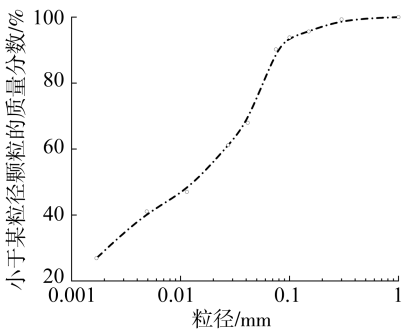


图 1 黏土粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of clay

直径 20 mm、高度 61.8 mm 的试样。无侧限抗压强度试验和直接剪切强度试验各 25 组,无侧限抗压强度试验每组制备 3 个平行样;直接剪切强度试验法向应力设置为 100、200、300、400 kPa,剪切应变率为 0.8 mm/min,均依据 GBT 50123—2019《土工试验方法标准》进行。土样制作完成后,在室温下养护 24 h,具体试验方案见表 1。

2 试验结果与分析

2.1 改良黏土的抗压特性

2.1.1 改良黏土的应力-应变特征

图 2 为素土掺入棕丝纤维与生物胶后改良黏土的应力-应变曲线。素土应力-应变曲线在达到峰值后迅速下降,残余强度较低,呈现应力软化现象。素土中掺入生物胶,改良黏土抗压强度明显提升,相较于素土,峰后强度降低程度有所改善,但总体的应力-应变曲线仍表现为应力软化;当生物胶掺量达 2%,继续增大其掺量,峰值应力不再明显提高。素土中掺入棕丝纤维后,改良黏土应力-应变曲线在峰值后趋于平缓,有效改善了应力软化现象;且随着棕丝纤维掺量的增加,改良黏土抗压强度持续提高。

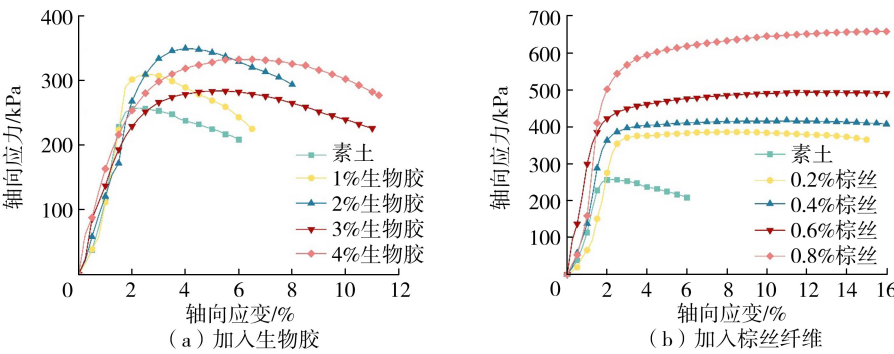


图 2 改良黏土应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of improved clay

由图 3 可知,在纤维加筋土中掺入生物胶,在低棕丝纤维掺量下,试样应力-应变曲线呈现应力硬化特征。随着棕丝纤维掺量增大,应力-应变曲线初期上升速率加快,峰值应力明显增大,达到峰值后抗压强度略有下降。在相同棕丝纤维掺量条件下,生物胶掺量为 2% 时的改良黏土抗压强度提升最为显著;掺量达到 3%,抗压强度有所下降,且应力在达到峰值后整体呈现一个较为平稳的区间。

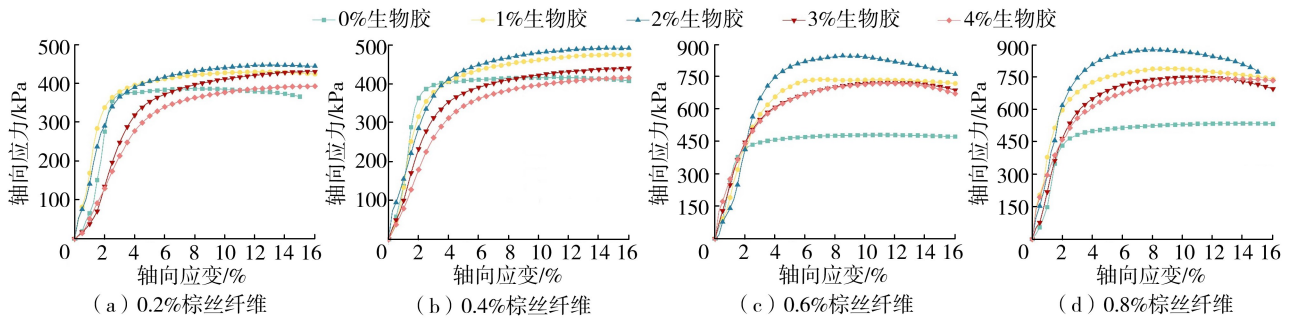


图 3 不同生物胶掺量复合改良黏土应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of composite improved clay under different biogel contents

应力-应变曲线总体可分为初始压密、弹性变形、塑性变形及峰后变形 4 个阶段。由图 4 可知,与素土单加生物胶相比,棕丝纤维的加入可显著改善试样的应力-应变软化特性。初始压密阶段,生物胶已开始发挥作用,应力快速增长,土体更为密实。当应变达 4% 时,应力-应变曲线达到峰值,此时生物胶与土颗粒间黏结紧密,生物胶继续发挥作用;随后进入峰后变形阶段,土体结构发生破坏。

当应变为 3% 时,应力-应变曲线随着棕丝纤维掺量增加显著上移,表明初始压密阶段后,棕丝纤维在土

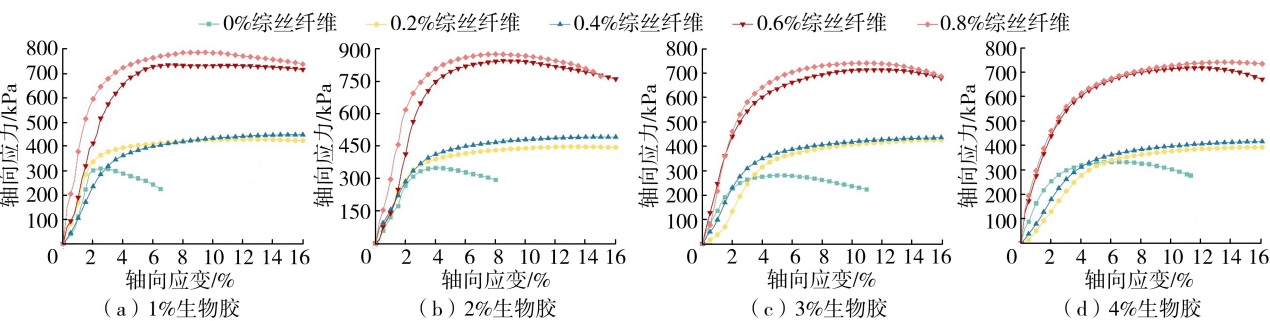


图4 不同棕丝纤维掺量复合改良黏土应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of composite improved clay under different palm fiber contents

体中更为紧密,并开始发生加筋作用,抗压强度大幅提升。随着应变的增加,土体进入塑性变形阶段;当应变达7%时,轴向应力达到峰值,可见棕丝纤维有效延缓了土体结构的破坏过程。进入峰后变形阶段,棕丝纤维可使土体维持一定的残余强度。

图5为不同生物胶和棕丝纤维掺量应力峰值曲线,可见,随着生物胶与棕丝纤维掺量的增加,改良黏土峰值抗压强度呈非线性增长。在相同生物胶掺量条件下,棕丝纤维掺量的提高可显著提升抗压强度。素土的峰值抗压强度为257.5 kPa;不添加生物胶时,棕丝纤维掺量从0%增至0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,改良黏土抗压强度分别提升50.3%、62.5%、92.0%、108.1%;不添加棕丝纤维时,生物胶掺量从0%增至1%、2%、3%、4%,改良黏土抗压强度分别提升20.1%、35.8%、10.3%、29.3%。

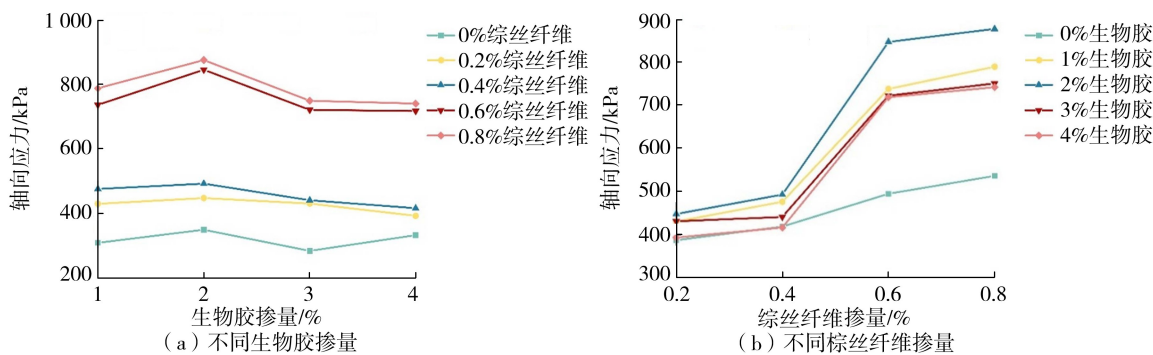


图5 应力峰值曲线

Fig.5 Peak stress curves

在1%生物胶掺量下,棕丝纤维掺量从0%增至0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,改良黏土抗压强度分别提升67.1%、84.9%、186.3%、206.3%;2%生物胶掺量下分别提升73.9%、91.3%、228.6%、240.3%,此时改良黏土抗压强度达到最大值876.4 kPa(棕丝纤维掺量0.8%)。在3%生物胶掺量下,棕丝纤维掺量从0%增至0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,改良黏土抗压强度分别提升67.3%、71.2%、180.3%、191.3%;4%生物胶掺量下分别提升52.6%、61.7%、178.8%、187.9%。

进一步分析发现,在相同生物胶掺量条件下,棕丝纤维掺量由0.4%增至0.6%时改良黏土抗压强度提升最显著,0.8%时达到最大值;相同棕丝纤维掺量条件下,生物胶掺量为1%和2%时改良黏土抗压强度有所提升,但超过3%后提升不明显,4%时甚至出现下降。综合考虑材料成本与改良效果,推荐采用棕丝纤维掺量0.6%、生物胶掺量2%的复合材料用于工程加固,对应的抗压强度为846.3 kPa。

2.1.2 弹性模量与韧性

弹性模量直接反映材料刚度,在应力-应变曲线上是一条直线。因此本文选取应变为1%~2%的应力变化作为直线,以此估算弹性模量。素土弹性模量为1.44 MPa,单一生物胶或棕丝纤维对黏土的改良效果,与复合改良黏土相比,弹性模量变化并不明显;而在生物胶和棕丝纤维的共同作用下,弹性模量增长显著。图6(b)中,生物胶掺量由1%增至2%时,弹性模量增大,超过2%后,弹性模量开始下降。图6(b)显示,随着棕丝纤维掺量的增加,弹性模量近似线性增长,同时导致土体中有效体积相应增加,从而增强了土体刚度。

材料的韧性可通过韧性指数进行表征,本文以应力-应变曲线与坐标轴围成的面积作为韧性计算依据,

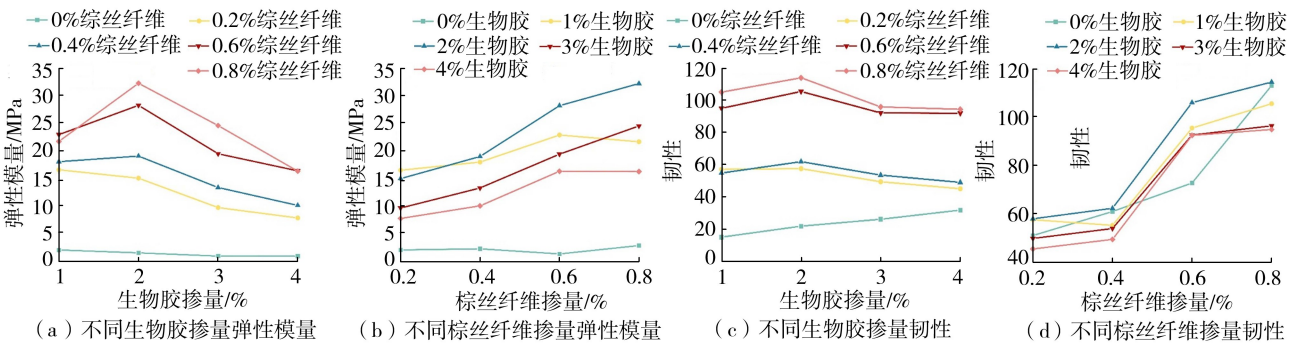


图 6 黏土弹性模量与韧性变化

Fig. 6 Changes in elastic modulus and toughness of clay

计算得到素土的韧性面积为 12.1。生物胶与棕丝纤维均能有效提升黏土的韧性,且棕丝纤维对黏土韧性的改善效果优于生物胶。由图 6(c)可知,生物胶在低掺量(<2%)条件下,改良黏土韧性随着掺量增加呈上升趋势;当掺量大于 3%后,韧性反而下降;继续增大生物胶掺量,改良黏土韧性逐渐趋于平稳。由图 6(d)可知,改良黏土的韧性随着棕丝纤维掺量的增加而增加;棕丝纤维掺量由 0.4%增至 0.6%时,改良黏土韧性快速增长;进一步增加棕丝纤维掺量,改良黏土韧性提升幅度明显减缓并逐渐趋于稳定。

2.1.3 破坏模式

由图 7(a)可见,素土试样表现出明显的剪切破坏特征,裂纹几乎贯穿整个试样。图 7(b)显示,加入少量生物胶后,在胶结作用下,试样裂纹明显缩短,深度及贯通性均显著降低,抗裂性与整体稳定性得到改善。加入棕丝纤维后,裂纹主要集中在试样表面,分布较浅且分散,纤维的存在提高了试样韧性,减少了贯穿性裂纹,但土体发生了膨胀破坏,部分纤维暴露于表面,导致表面不平整,对抗压强度产生不利影响。

对比图 7(c) (d),生物胶的加入可使棕丝纤维分布更为均匀,改善了图 7(c) 中因压缩挤压造成的棕丝纤维外移现象。生物胶可增强土体黏聚力,抑制裂缝的产生与扩展,使内部应力分布均匀,减小应力集中与纤维外露,显著提升土体整体性,同时从裂缝中可观察到棕丝纤维的桥接作用。图 7(e) 显示,随着棕丝纤维掺量增加,裂缝数量减少、深度变浅,土体完整性与形态保持较好。图 7(f)表明,生物胶掺量较高时,表面颗粒更为细密,结合更加紧密。

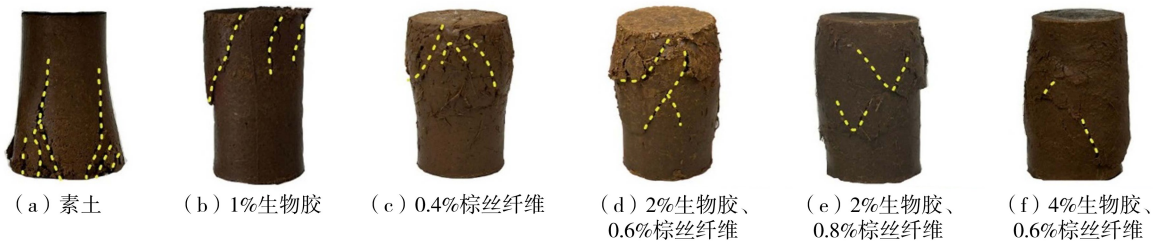


图 7 不同掺量试样破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimens under different contents

2.2 复合材料改良黏土的剪切特性

2.2.1 改良黏土抗剪强度-位移特征

图 8 为不同生物胶和棕丝纤维掺量的剪应力变化曲线,法向应力从 100 kPa 增加到 400 kPa,以模拟不同工况条件。0.4%棕丝纤维加筋黏土在 100 kPa 下曲线出现明显峰值,剪切位移达 2 mm 后剪应力显著降低,呈现应力软化现象;随着法向应力的提高,抗剪强度逐渐增加,200 kPa 及更高法向应力下,剪应力降低现象得到改善。棕丝纤维表面粗糙,存在沟槽和孔室结构^[22-23],在摩擦和挤压作用下,土颗粒可嵌入纤维表面,改善复合材料界面性能,增强土颗粒与加筋材料间的摩擦力。最终,曲线降至残余强度并保持稳定,或表现出应力硬化现象。随着生物胶掺量的提高,100 kPa 下剪应力突然降低的现象得到明显改善。生物胶通过聚集土颗粒,增强土体黏聚力,使改良黏土可承受更高的剪应力,同时残余强度也显著提高。

棕丝纤维掺量增加时,在低法向应力条件下抗剪强度提升较为显著;而随着法向应力的增大,抗剪强度的提升趋于平缓。这是因为在低法向应力条件下,棕丝纤维能够较好地分布于土体中,增强土体结构;而在

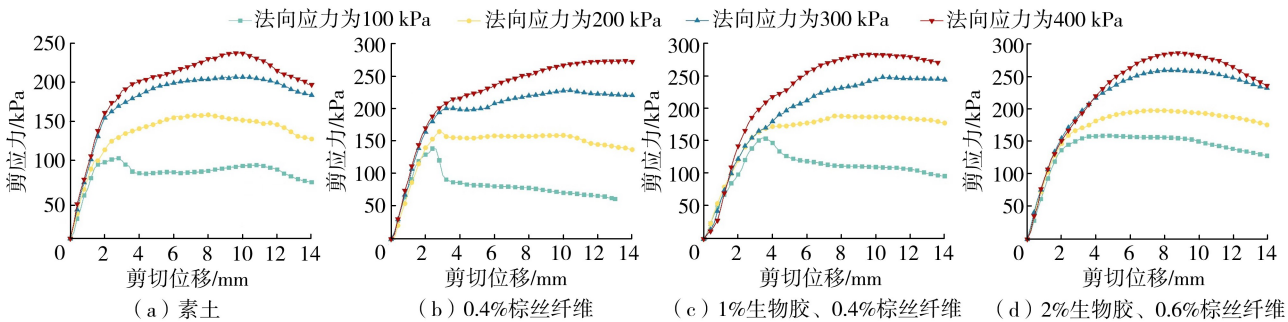


图8 不同生物胶和棕丝纤维掺量下剪应力变化曲线

Fig. 8 Variation curves of shear stress under different biogel and palm fiber contents

高法向应力条件下,棕丝纤维的增强作用已趋于饱和,抗剪强度不再显著增加。

图9、图10分别为不同生物胶和棕丝纤维掺量条件下,法向应力为100、200、300、400 kPa抗剪强度峰值变化曲线。由图9可见,棕丝纤维掺量为0.2%的抗剪强度比其他掺量高,掺量超过0.2%时抗剪强度有所下降。由图10可见,在低棕丝纤维掺量条件下,加筋土中加入生物胶可提升抗剪强度,生物胶掺量达2%时抗剪强度处于最高点,掺量继续增加,抗剪强度随之降低。

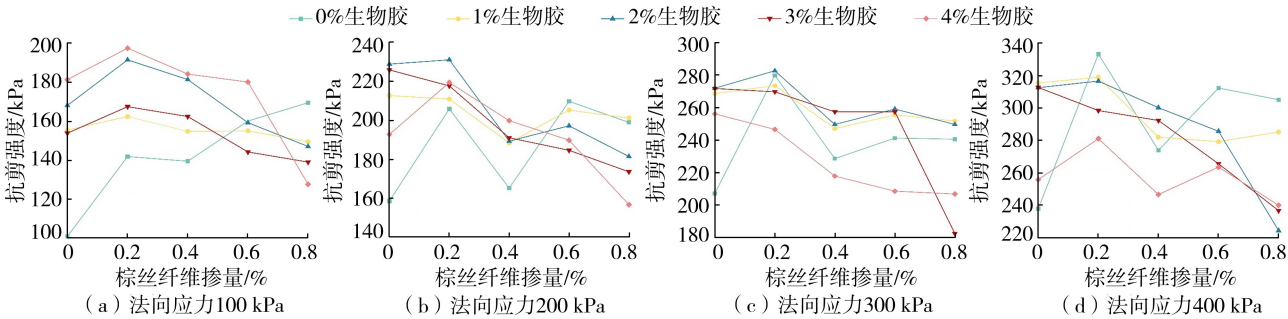


图9 不同棕丝纤维掺量抗剪强度峰值变化曲线

Fig. 9 Variation curves of peak shear strength under different palm fiber contents

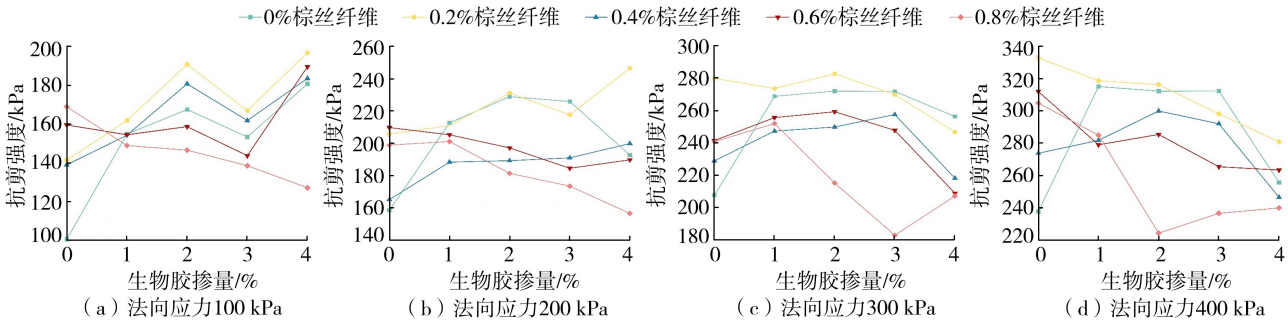


图10 不同生物胶掺量抗剪强度峰值变化曲线

Fig. 10 Variation curves of peak shear strength under different biogel contents

在低法向应力条件下,生物胶掺量为2%、4%时,抗剪强度均高于3%掺量情况。其中,2%的生物胶提供了充足的黏聚力,减少了土颗粒间的孔隙,增强了土体整体结构的稳定性;3%的生物胶处于临界掺量,未能充分发挥其填充与增强作用,也未能使黏土达到最佳的结构稳定性;4%的生物胶能够完全填充并覆盖土颗粒间的孔隙,使土体结构更为紧密和坚固。随着法向应力的提高,棕丝纤维和生物胶与土颗粒的接触更加紧密,孔隙空间减少,进一步增强了生物胶和棕丝纤维对土体的改良效果,提高了抗剪强度。在高法向应力条件下,2%的生物胶能够在土体中均匀分布,提供足够的黏聚力与增强效果;而4%的生物胶掺量偏高,可能出现生物胶在土体中分布不均或局部堆积现象,致使抗剪强度相对较低。

2.2.2 抗剪强度指标

图11为黏聚力与内摩擦角的变化图。在生物胶作用下,土体黏聚力较仅添加棕丝纤维时有显著提升。其中,4%与2%生物胶掺量对应的改良黏土黏聚力高于其他掺量,而4%生物胶掺量的改良黏土内摩擦角低

于其他掺量。在实际工程中,若对黏聚力要求较高而不需要对内摩擦角过多考虑,可以采用较高掺量(4%)的生物胶作为添加剂。棕丝纤维对黏聚力的影响总体呈先增大后减小的趋势,掺量为 0.2% 时土体黏聚力较未添加棕丝纤维时提升显著,继续增大掺量则黏聚力逐渐降低。

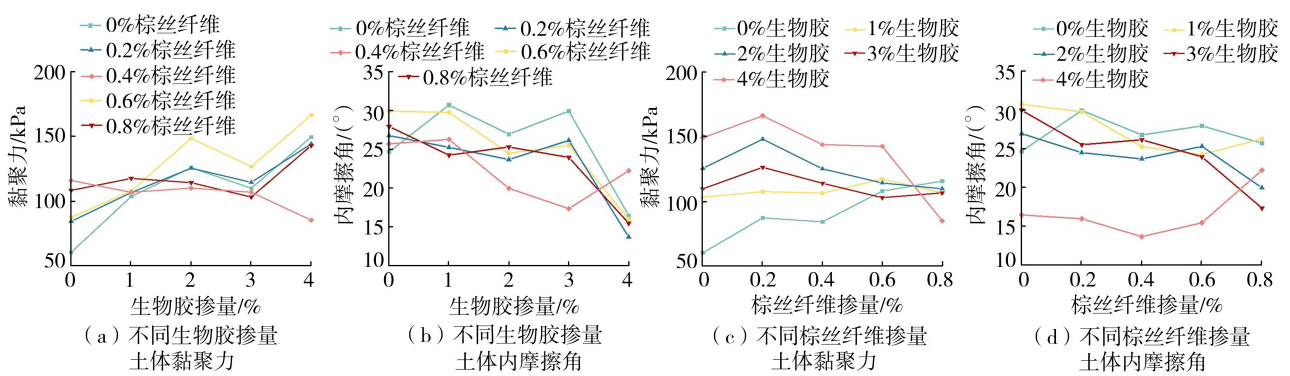


图 11 黏聚力与内摩擦角变化

Fig. 11 Changes in cohesion and internal friction angle

3 机理分析

图 12 为试样的扫描电镜图。图 12(a) 中,生物胶与水结合后可提高黏度并形成弱凝胶,以膜状结构附着、包裹并黏结于土体表面,发挥联结与加固作用。生物胶在黏土改良中充当固化剂,主要通过化学反应发挥作用,其分子中的羧基(—COOH)与羟基(—OH)可与黏土颗粒表面的阳离子产生桥接作用及氢键作用^[17],将原本难以直接接触的土颗粒联结起来,填充颗粒间的孔隙,降低孔隙率,提升土体密实度与结构完整性。

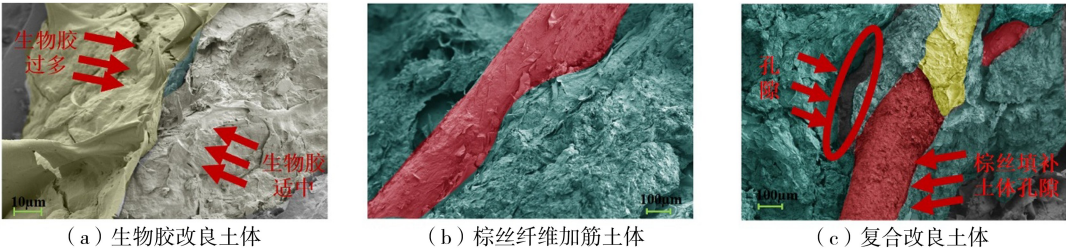


图 12 试样的扫描电镜图

Fig. 12 Scanning electron microscope images of specimens

棕丝纤维在黏土改良过程中主要发挥物理加筋作用。图 12(b) 为单根棕丝纤维镶嵌于土颗粒之间,在试样受外部荷载作用发生破坏时,因棕丝纤维与土体弹性模量存在差异,与土颗粒间产生了相对错动并形成摩擦力,棕丝纤维同时承受拉力,可分担部分外部荷载。当棕丝纤维在土体中受拉伸作用或被拔出时,需要克服土颗粒对其的黏附力,及二者间的摩擦力,该阻力提高了纤维加筋土承受外部荷载的能力^[24],能够增强土体的韧性与延性,减少脆性破坏^[25]。

随着生物胶掺量的增加,当其超过 2% 时,孔隙流体黏度随之升高,高黏度的孔隙流体使土颗粒难以紧密排列,易形成团聚体^[26],增大了土颗粒间的孔隙率,降低了土体整体的抗破坏性能。棕丝纤维的加入可有效弥补该缺陷,纤维在土体中填充孔隙并搭建颗粒间联结桥梁(图 12(c)),减少了因生物胶掺量过高导致的孔隙率增大问题。

生物胶与棕丝纤维复合改良机理如图 13 所示。生物胶基质在棕丝纤维与土颗粒之间起到黏结作用,使土颗粒可附着于棕丝纤维表面,生物胶与棕丝纤维之间以物理黏附作用为主。棕丝纤维穿插并填充于土颗粒孔隙(图 13(c)),在土颗粒的挤压作用下,依靠棕丝纤维的延展性^[27]嵌入颗粒之间,在土颗粒间呈弧形桥接状结构(图 13(d)(e))。该结构增强了土颗粒之间的相互作用,通过纤维的拉伸、嵌锁与摩擦效应,有效提高了改良土体的整体强度和抗变形能力。在外部荷载作用下,棕丝纤维能够分担部分应力,延缓土体破坏进程。生物胶基质与棕丝纤维的协同作用,通过纤维的嵌锁效应和生物胶的黏结作用,共同提升了土体的整

体稳定性。纤维的填充与桥接作用优化了土颗粒间的应力传递路径,而生物胶的固化效应则进一步提高了土体的均匀性与抗变形能力。

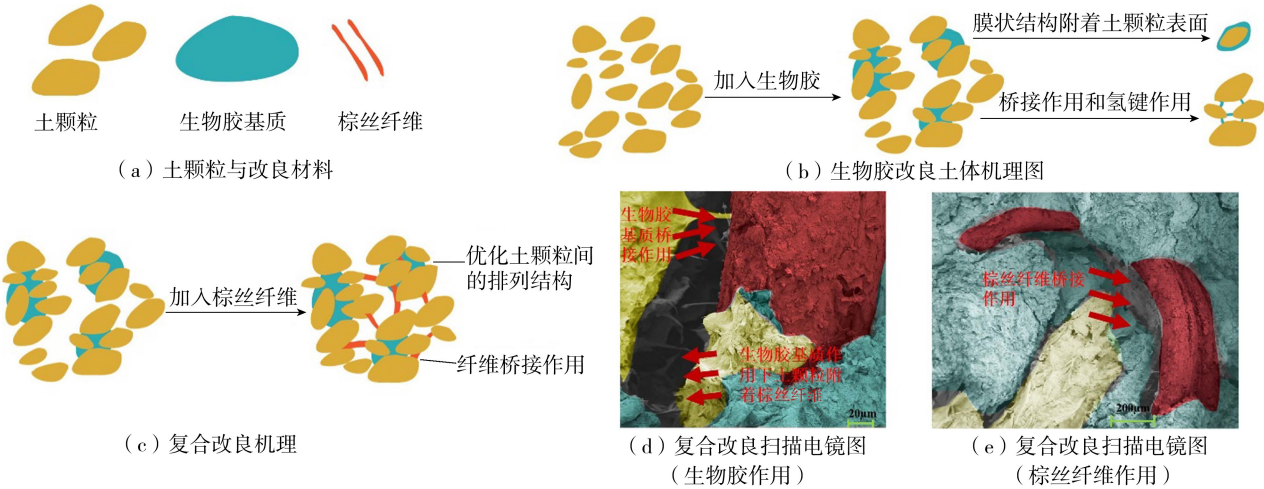


图 13 生物胶与棕丝纤维复合改良机理

Fig. 13 Composite improvement mechanism of biogel and palm fiber

改良黏土的破坏过程如图 14 所示。在外力作用初期,土体内部生物胶基质与棕丝纤维共同作用,使土颗粒间联结更为紧密,土体表现出较好的整体性和抗变形能力。随着外力的施加,土体开始变形,此时生物胶基质通过连接土颗粒与棕丝纤维的桥接作用显著发挥效能,同时土颗粒与棕丝纤维之间的摩擦力共同抵抗土体内部结构的破坏。当外力进一步增大,生物胶基质对土颗粒的黏结作用逐渐减弱,棕丝纤维开始被拔出或拉伸,直至纤维断裂。此时,土体内部逐渐产生裂纹,并随着裂纹的不断扩展,土体的整体结构遭到破坏,最终失去承载能力。

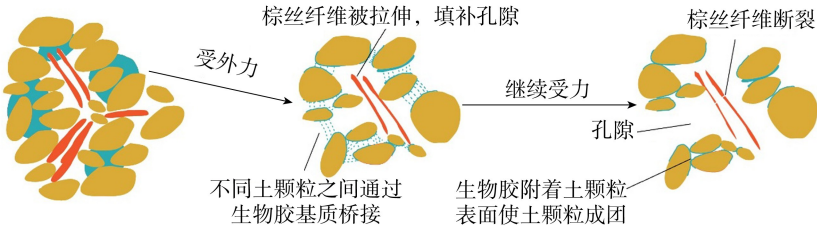


图 14 改良黏土的破坏过程

Fig. 14 Failure process of improved clay

4 结 论

- a. 生物胶与棕丝纤维复合改良黏土可有效提升土体的强度特性,改良后黏土抗压强度呈非线性增长。生物胶掺量过高会使改良黏土内部过于紧密,导致抗压强度降低。生物胶掺量 2%、棕丝纤维掺量 0.8% 时抗压强度最大,为 876.4 kPa;综合工程成本与实际应用,最优掺配方案为生物胶 2%、棕丝纤维 0.6%,此时抗压强度为 846.3 kPa。
- b. 生物胶的加入可显著提升土体黏聚力,但掺量过高会增大改良黏土的脆性。棕丝纤维能有效抑制生物胶引发的脆性变形,提升土体的韧性与延性,增强土体的结构完整性。棕丝纤维掺量为 0.2% 时,土体黏聚力提升显著,而内摩擦角增幅相对较小。
- c. 改良黏土受压后裂纹数量、深度及贯通程度均较素土明显降低。仅添加棕丝纤维时,土体呈膨胀型破坏,延展性提高,但受压后纤维易暴露于试样表面;加入生物胶可减少棕丝纤维受挤压向外迁移的现象,使改良黏土中棕丝纤维分布更均匀,大幅提升了土体内部结构的整体性。受压后的改良黏土中可清晰观察到棕丝纤维的桥接作用。
- d. 微观机理表明,生物胶与棕丝纤维复合改良体系通过多重作用机制提升了黏土的工程性能:生物胶中的羧基和羟基官能团与土颗粒形成化学键合,促进了土颗粒的团聚作用;棕丝纤维可有效填充生物胶黏结

过程中形成的孔隙,优化了土体的微观结构。两种材料的协同作用构建了高效的应力传递网络,提升了改良黏土的力学性能与结构稳定性。

参考文献:

[1] 王天亮,刘建坤,田亚护. 水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(11):1733-1737. (Wang Tianliang,Liu Jiankun,Tian Yahu. Dynamic properties of cement- and lime-improved soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(11):1733-1737. (in Chinese))

[2] 赵雪,谷天峰,范楠楠. 水泥改良黄土崩解试验研究[J]. 西北大学学报(自然科学版),2024,54(1):18-25. (Zhao Xue,Gu Tianfeng,Fan Nannan. Experimental study on disintegration of loess improved by cement[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition),2024,54(1):18-25. (in Chinese))

[3] 贾尚华,申向东,解国梁. 石灰-水泥复合土增强机制研究[J]. 岩土力学,2011,32(增刊 1):382-387. (Jia Shanghua,Shen Xiangdong,Xie Guoliang. Reinforcement mechanism of lime-cement soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(S1):382-387. (in Chinese))

[4] 刘宝生,唐朝生,李建,等. 纤维加筋土工程性质研究进展[J]. 工程地质学报,2013,21(4):540-547. (Liu Baosheng,Tang Chaosheng,Li Jian,et al. Advances in engineering properties of fiber reinforced soil[J]. Journal of Engineering Geology,2013,21(4):540-547. (in Chinese))

[5] 唐朝生,顾凯. 聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J]. 土木工程学报,2011,44(增刊 2):5-8. (Tang Chaosheng,Gu Kai. Strength behaviour of polypropylene fiber reinforced cement stabilized soft soil[J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(S2):5-8. (in Chinese))

[6] 肖桂元,刘星,刘巍,等. 玻璃纤维-石灰复合改良红黏土的强度特性研究[J]. 公路,2024,69(9):275-284. (Xiao Guiyuan,Liu Xing,Liu Wei,et al. Research on strength characteristics of glass fiber-lime composite modified red clay[J]. Highway,2024,69(9):275-284. (in Chinese))

[7] Boz A,Sezer A,Ozdemir T,et al. Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers[J]. Arabian Journal of Geosciences,2018,11:1-14.

[8] 胡恬静,赵宁宁,刘瑾,等. 棕榈纤维加固黏土无侧限抗压强度试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2020,37(4):34-39. (Hu Tianjing,Zhao Ningning,Liu Jin,et al. Research on unconfined compressive strength of the clay reinforced by palm fiber[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition),2020,37(4):34-39. (in Chinese))

[9] 璩继立,俞汉宁,江海洋,等. 棕榈丝与麦秸秆丝加筋土无侧限抗压强度比较[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(5):1216-1220. (Qu Jili,Yu Hanning,Jiang Haiyang,et al. Comparison of unconfined compressive strength of soil reinforced by palm fiber or wheat straw fiber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(5):1216-1220. (in Chinese))

[10] 吴靖江,潘世起,陈小羊,等. 棕榈纤维加筋粉质黏土力学性能试验研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(9):142-148. (Wu Jingjiang,Pan Shiqi,Chen Xiaoyang,et al. Mechanical properties test of palm fiber reinforced silty clay[J]. Construction Technology,2022,51(9):142-148. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 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))

[13] 魏军晓,耿元波,沈镭,等. 中国水泥生产与碳排放现状分析[J]. 环境科学与技术,2015,38(8):80-86. (Wei Junxiao,Geng Yuanbo,Shen Lei,et al. Analysis of Chinese cement production and CO₂ emission[J]. Environmental Science & Technology,2015,38(8):80-86. (in Chinese))

[14] 刘杰. 中国石灰工业大气污染物排放标准现状研究[J]. 耐火与石灰,2019,44(6):1-6. (Liu Jie. Study on the emission standards of air pollutants for lime industry in China[J]. Refractories & Lime,2019,44(6):1-6. (in Chinese))

[15] 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))

[16] 郭瑞,丁恩勇. 黄原胶的结构、性能与应用[J]. 日用化学工业,2006(1):42-45. (Guo Rui,Ding Enyong. Structure performance and applications of xanthan gum[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics,2006(1):42-45. (in Chinese))

[17] 魏世杰,杨宇,王梓,等. 黄原胶改良黏土无侧限抗压强度及其加固机理研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021,38(2): 66-71. (Wei Shijie, Yang Yu, Wang Zi, et al. Study on unconfined compressive strength and strengthening mechanism of xanthan gum modified clay[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2021,38(2):66-71. (in Chinese))

[18] Bagheri P,Gratchev I,Rybachuk M. Effects of xanthan gum biopolymer on soil mechanical properties[J]. Applied Sciences, 2023,13(2):887.

[19] 张胜杰,王鸥,王天亮,等. 黄原胶及瓜尔胶改良尾矿砂强度特性及微观机制[J]. 工程地质学报,2023,31(2):441-448. (Zhang Shengjie, Wang Ou, Wang Tianliang, et al. Strength improvement and microscopic mechanisms of tailings sands using xanthan gum and guar gum[J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(2):441-448. (in Chinese))

[20] 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.

[21] 蒋希雁,刘嘉璐,李明洋,等. 棕榈纤维加筋土抗剪强度特性及机理研究[J]. 力学季刊,2024,45(1):274-285. (Jiang Xiyan,Liu Jialu, Li Mingyang, et al. Study on the shear strength characteristics and reinforcement mechanism of palm fiber reinforced soil[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2024,45(1):274-285. (in Chinese))

[22] 李晓龙. 棕榈纤维的基本性能研究[D]. 重庆:西南大学,2012.

[23] 璩继立,赵冬雪,李贝贝. 加筋条件对棕榈加筋土强度的影响[J]. 工业建筑,2015,45(3):115-119. (Qu Jili, Zhao Dongxue,Li Beibei. Impact of reinforced conditions on the strength of palm reinforced soil[J]. Industrial Construction,2015,45(3):115-119. (in Chinese))

[24] 唐皓,李华华,刘驰洋,等. 棕榈加筋黄土剪切强度特性及细观结构[J]. 科学技术与工程,2020,20(19):7832-7837. (Tang Hao,Li Huahua, Liu Chiyang, et al. Shear strength characteristics and mesomechanism of palm reinforced loess[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(19):7832-7837. (in Chinese))

[25] 唐逸凡,焦艳梅,刘新原,等. 地下水位升降过程中的黏土地基孔压变化试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2024,46(1):103-111. (Tang Yifan,Jiao Yanmei, Liu Xinyuan, et al. Experimental study on variation of pore pressure of clay foundation during groundwater level fluctuation[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition),2024,46(1):103-111. (in Chinese))

[26] Sujatha E R, Atchaya S, Sivasaran A, et al. Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum-an eco-friendly alternative to traditional stabilizers[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2021,80:1157-1167.

[27] 朱旭芬,黄庭伟,刘瑾,等. 有机聚合物复合纤维改良砂土无侧限抗压强度研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):90-98. (Zhu Xufen,Huang Tingwei,Liu Jin, et al. Study on unconfined compressive strength of sand improved by organic polymer composite fiber[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(6):90-98. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 11 - 02 编辑:胡新宇)