



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309491

引用格式:王浩,付德伟,郭剑波,等.黄原胶和木质素纤维改良粉砂土抗压强度特性及微观机理分析[J].科学技术与工程,2025,25(4):1602-1612.

Wang Hao, Fu Dewei, Guo Jianbo, et al. Analysis of compressive strength characteristics and microscopic mechanism of silty soil improved by xanthan gum and lignin fiber[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1602-1612.

黄原胶和木质素纤维改良粉砂土抗压强度特性及微观机理分析

王浩,付德伟,郭剑波,晏田田,宋昊明

(河南大学建筑工程学院,开封 475004)

摘要 为改良黄泛区粉砂土强度低、易变形,黏结能力差的工程特性,采用力学测试和扫描电镜(scanning electron microscope,SEM),对加入不同含量的黄原胶(xanthan gum,XG)、木质素纤维(lignin fiber,LF)和养护龄期作用下的力学性能和改良机理进行研究。结果表明:XG和LF作为改良材料均可提高粉砂土的抗压强度;XG掺量的增加,粉砂土抗压强度呈现先增大后减小趋势;LF含量的提高,粉砂土的抗压强度随之增大,过量地加入LF会削弱改良效果;当在粉砂土中同时加入两者材料,粉砂土的抗压强度较单独添加其中1种材料都有不同程度的提高;XG遇水产生高黏性凝胶,松散的粉砂土被紧紧胶结在一起,土体强度得到提高;LF内部含有大分子集团,与周围土颗粒形成空间网状结构,加强了土体间的联合力。研究成果可为黄泛区粉砂土路基改良工程提供参考性数值。

关键词 粉砂土;改良;抗压强度;黄原胶(XG);木质素纤维(LF);微观结构

中图分类号 TU411.6;

文献标志码 A

Analysis of Compressive Strength Characteristics and Microscopic Mechanism of Silty Soil Improved by Xanthan Gum and Lignin Fiber

WANG Hao, FU De-wei, GUO Jian-bo, YAN Tian-tian, SONG Hao-ming

(School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China)

[Abstract] In order to improve the engineering characteristics of silty soil in yellow plain area with low strength, easy deformation and poor bonding ability, mechanical testing and scanning electron microscope (SEM) were used to add different contents of xanthan gum (XG), The mechanical properties and improvement mechanism of XG, lignin fiber (LF) and curing age were studied. The results show that both XG and LF as improved materials can increase the compressive strength of silty sand. With the increase of XG content, the compressive strength of silty sand first increases and then decreases. With the increase of LF content, the compressive strength of silt will increase, and the improvement effect will be weakened by adding too much LF. When the two materials are added to the silt simultaneously, the compressive strength of the silt is higher than that of one material alone. XG produces high viscosity gel when it encounters water, the loose silty soil is tightly cemented together, and the strength of the soil is improved. LF contains large molecular groups, forming a spatial network structure with surrounding soil particles, which strengthens the joint force between soils. The research results can provide reference values for the silty soil subgrade improvement project in the yellow plain area.

[Keywords] silty soil; modification; compressive strength; xanthan gum (XG); lignin fiber (LF); microstructure

黄河是中国北部大河,流经9个省区,全长5 464 km,流域面积约752 443 km²,其在历史上进行6次改道。抗战时期,南京国民政府将郑州花园口大堤掘开,从而形成长约400 km,宽30~80 km的黄河泛滥区域^[1-2]。长达近9年的黄泛灾害,豫东、豫中地区泥沙堆积严重,吞没大量农田用地,导致这些地区形成软弱地基层^[3]。开封及周边区域属于黄泛区,其土质以粉土及粉砂土为主,这类土

质较松散、颗粒间联结强度低、黏聚力差,承载能力低。路基工程和多高层建筑需要对地基进行加固,研究一种高效且低廉改良土质方法至关重要。

生物聚合物作为一种新型改良土体材料,因其低碳环保、改良效果良好等优点,被广泛应用于土体改良领域。黄原胶(xanthan gum, XG)是可持续发展环保添加剂,是生物聚合物的一种。XG优点是抗氧化、抗酶解,能在较宽酸碱(pH为1~11)具

收稿日期:2023-11-29; 修订日期:2024-11-06

基金项目:河南省科技攻关计划(242102321007,232102321012)

第一作者:王浩(1986—),男,汉族,河南开封人,博士,副教授。研究方向:特殊土工程地质。E-mail:wanghao8023@henu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

有较高稳定性。XG 特性为假塑性,在低浓度下可以具有较强的稳定性^[4],研究表明,由于其材料性质的优势,XG 逐渐成为岩土工程中的一种有机黏合剂^[5]。关于添加 XG 对不同土质的影响,Rashid 等^[6]在红土中添加 XG,在 28 d 内显著提高了土壤强度,且含量为 1.5% 时效果最显著。Weng 等^[7]在红黏土中加入 XG,在 1.5% 掺量和 28 d 养护龄期,土体抗压强度提升 93.91%,XG 有效提升了红黏土的宏观力学性能。王天亮等^[8]在膨胀土中加入 XG,其无侧限抗压强度 (unconfined compression strength, UCS) 提升 104.20%。周天宝等^[9]研究发现,以 XG 作为生物聚合物改良西北地区粉土,黄原胶起到极强的胶结作用,土体强度得到提升。

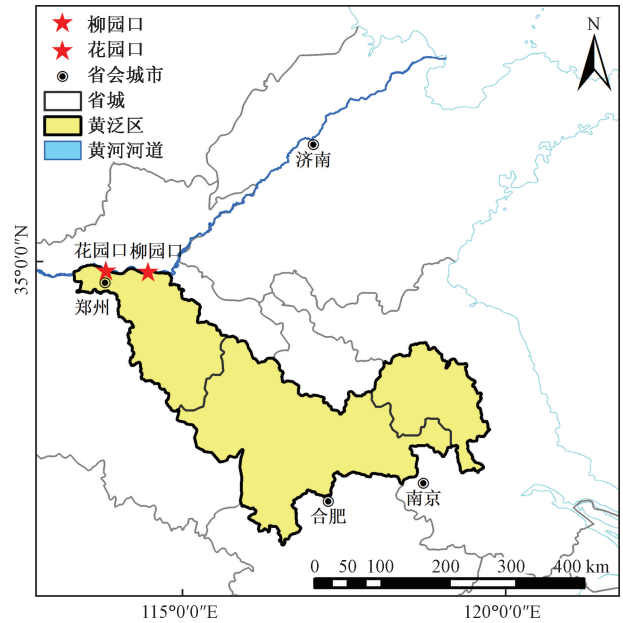
木质素纤维 (lignin fiber, LF) 作为造纸和生物燃料工业副产品,价格低、来源广,具有环保经济、优良柔韧性的优点^[10-11],其作为环境友好、绿色的材料符合生态文明建设的当今时代主题。Gao 等^[12]对黄土进行改良,发现纤维掺小于 1%,黄土 UCS 增长速率最快。刘松玉等^[13]、张涛等^[14]采用 LF 分别改良黏土和粉土,发现其主要通过胶结作用、离子交换、填充土体孔隙等方面对土体进行加固。朱锐等^[15]采用 LF 对膨胀土进行改良,发现纤维掺量为 2%,抗压强度特性较明显。蒋潇伊^[16]采用 LF 对粉质黏土进行力学性能研究,发现纤维掺量为 4% 时,UCS 达到最大值 180 kPa,土体强度提高约 80%。陈颖辉等^[17]采用 LF 改良云南省膨胀土,发现改良后土体会有更好的破坏韧性。

XG 和 LF 是一种绿色环保可运用于改良土体的非传统材料^[18-19],目前针对两者改良黄泛区粉砂土研究甚少。鉴于此,基于无侧限抗压强度试验,考虑 XG 含量、LF 含量、养护龄期的基础上,探讨利用 XG 和 LF 对粉砂土进行改良的强度变化规律,通过扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 揭示其改良机理,为 XG 和 LF 改良粉砂土的理论研究和工程应用提供一定的参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土获取于图 1 的黄河开封段柳园口险工段 25 处,将采集回土体放置在大号保鲜袋,保存在实验室阴凉通风处。将土样进行烘干、破碎,使用前过 2 mm 标准土工筛。通过筛析法和乙种密度计法得到图 2 所示的颗粒级配曲线,曲率系数 $C_c = 3.91$,不均匀系数 $C_u = 0.8$,判定试验用土为级配不良。通过轻型击实试验,如图 3 所示,测得土体最优含水率为 12.0%,最大干密度为 1.80 g/cm³。严格



审图号:GS(2023)2767

图 1 试验用土采集地

Fig. 1 Test soil collection site

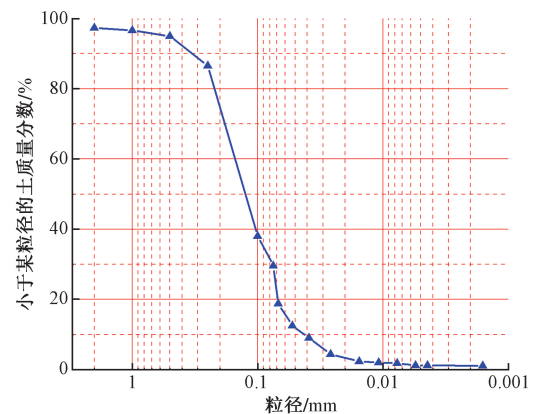


图 2 土体颗粒级配曲线

Fig. 2 Soil particle grading curve

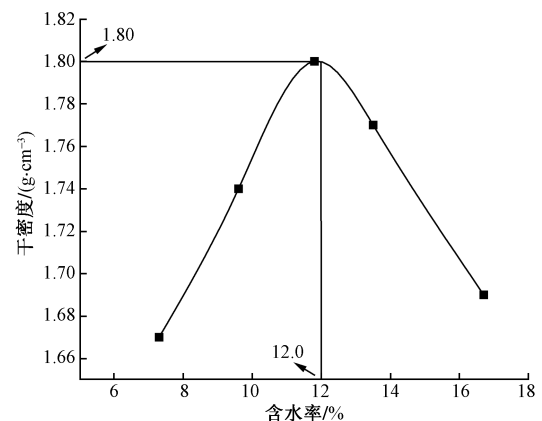


图 3 粉砂土击实曲线

Fig. 3 Compaction curve of silty soil

按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[20]对土体基本物理力学性质进行测试,参数如表 1 所

示。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21]相关规定,可以得出该土样属于含砂低液限粉土(MLS,简称粉砂土)。

试验添加 XG 购于山东省某建材品牌厂工业级材料,为浅褐黄色粉末状固体,是野油菜黄单胞杆菌以碳水化合物为主要原料发酵产生的一种微生物胞外多糖,由 D-甘露糖、D-葡萄糖、D-葡萄糖醛酸、乙酸和丙酮酸构成的“五糖重复单元”结构聚合物^[22],如图 4 所示,其水溶液仅为 1.0% 条件下,黏度高达 10 500 mPa·s,效果远高于同浓度下的其他胶类。XG 二级结构为侧链绕主链骨架反向缠绕,由氢键形成棒状双螺旋结构^[23],使其具有较强的耐酸、耐碱、耐热和盐、酶稳定性。XG 物理参数如表 2 所示。

试验添加 LF 购于山东某建材化工厂,呈白色、灰白色粉末状固体,主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,作为一种生物质资源,年产量约为 1 800 亿 t,具有碳中和、经济性和易得性的优点。其

表 1 试验用土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil for testing

塑限/ %	液限/ %	塑性指 数 I_p	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	压缩系数 /MPa ⁻¹	渗透系数
10.3	15.4	5.1	6.7	12.3	0.31	$7.2 \times 10^{-5} \sim 7.5 \times 10^{-5}$

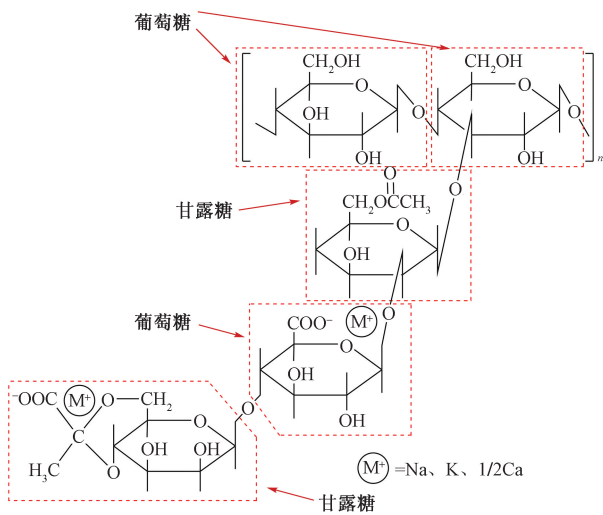


图 4 黄原胶结构式

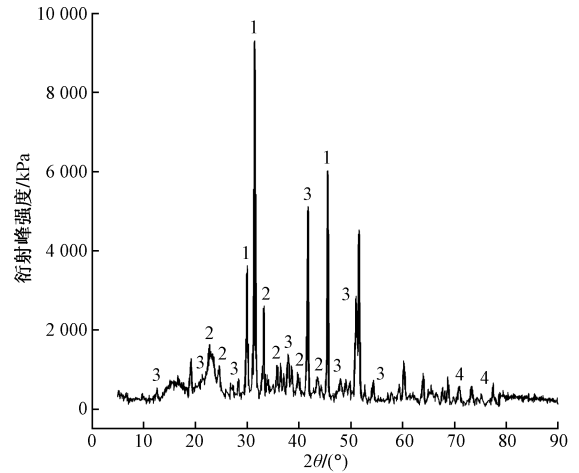
Fig. 4 Xanthan gum structure formula

表 2 黄原胶物理参数

Table 2 Physical parameters of xanthan gum

分子量	黏度/ (Pa·s)	灰分/ %	熔点/ °C	水溶性	pH 耐受 范围
$250 \times 10^4 \sim 650 \times 10^4$	0.8~1.0	16.0	64.4	中性	1~11

XRD 衍射谱图中如图 5 所示,LF 以 C、O、N、H 等元素为主,衍射峰值大多存在于 30°~40°,LF 内部以复杂的有机聚合物为主,不溶于水、弱酸和碱性溶液,有轻微芳香气味,pH 呈中性,无毒性^[11],其物理参数如表 3 所示。



θ为衍射角; 1为C₇H₅NO₂; 2为C₅₆H₁₂₀C₁₂₄O₁₆O₆₄; 3为O₂₄H₃₂C₂₈; 4为N₈O₈

图 5 木质纤维 XRD 衍射谱图

Fig. 5 XRD pattern of lignin fiber

表 3 木质纤维物理参数

Table 3 Lignin fiber physical parameters

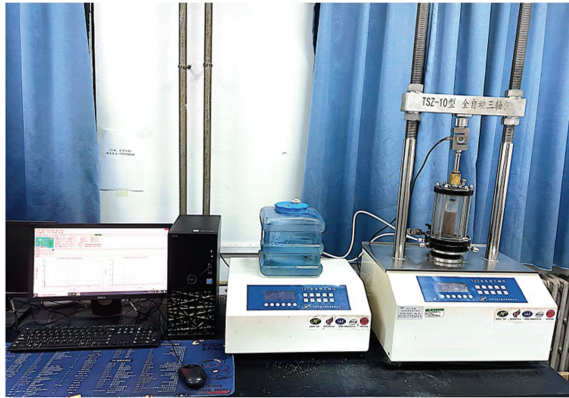
长度/mm	比热/ (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (g·cm ⁻³)	熔点/ °C	抗酸 碱性
0.5~2	0.3~0.5	0.09~0.12	1.5	260	强

1.2 试验方案

为研究 XG-LF 改良土体的力学特征演变规律,对土体在外加剂、掺量、养护龄期作用后无侧限抗压强度进行测试。本次试验样品由 4 大组完成,分别为素土、单掺 XG、单掺 LF、复合改良土(XG+LF)。试样制备中,以干土质量为基准,设置 XG 含量为 0、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%,LF 含量为 0、1.0%、3.0%、5.0%,控制试样的含水率为 12%,干密度控制在 1.80 g/cm³。因此,所需干土和水的质量分别为 172.82 g 和 20.74 g,XG 质量分别为 1.73、2.59、3.46、4.32 g,LF 质量分别为 1.73、5.18、8.64 g。采用南京宁曦土壤仪器公司生产 TSZ-10 型全自动三轴仪,如图 6(a)所示,其垂直载荷测力范围 0~1 000N,位移测量范围为 0~30 mm,荷载加载速率为 0.8 mm/min。

为研究 XG-LF 改良土体微观结构的演化规律,采用扫描电镜对试样在镀膜的基础上,通过抽真空环境下成像观察。采用环境扫描电子显微镜(FEI Quanta250),如图 6(b)所示,产自荷兰,该仪器是显微镜及图像分析仪器的一种,运用二次电子信号成像

原理,仪器的最高腔内真空 2 kPa 以下。在试样过程中微观扫描电子显微镜的测试参数如表 4 所示。



(a) TSZ-10型全自动三轴仪



(b) FEI Quanta 250

图 6 试验仪器

Fig. 6 Test apparatus

表 4 FEI Quanta250 仪器参数

Table 4 FEI Quanta250 instrument parameters

电压/kV	束流/nA	放大倍数	重复精度/ μm	换样时间/s
25	200	$0.8 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^3$	2	150

在试样制备过程中,如图 7 所示,采用干法拌合制样,首先称取所需质量的干土、水、XG 和 LF,将 XG 或 LF 与较低含水率的干土拌合,加水至指定含水率,闷料 24 h 使其充分溶解,使用圆柱形底部直径 39.1 mm,高度 80 mm 标准模具,每次击实锤敲击 27 下,层间进行刮毛,共分为 3 次均匀加土进行击实制样,用抹刀对试件的顶面和底面进行修整,以避免测试中出现应力分布不均匀情况^[24]。接着将试件放入标准养护室 [(20 ± 3) °C,相对湿度 ≥ 95%] 养护,养护时间为 1、7、14、28 d,最后将 4 组试样进行室内力学性能试验,观察并记录每组试样的 UCS。为排除偶然性因素的影响,试件每组做 3 个平行样,样品共计 240 个。

2 试验结果与分析

2.1 黄原胶对土体强度的影响

图 8 为用 XG 处理土体在养护龄期 7 d 和 28 d

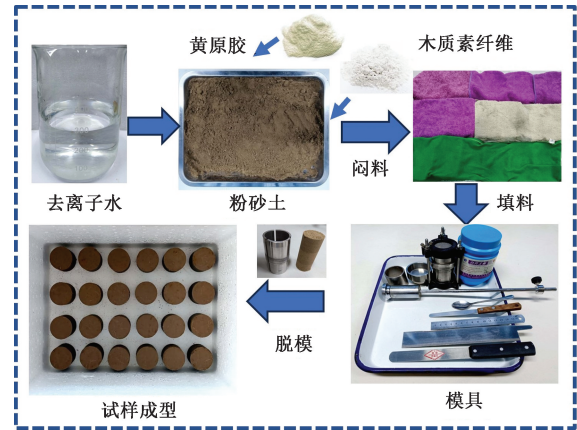


图 7 试件制备流程

Fig. 7 Test preparation process

时的应力-应变曲线。可以看出,试样的轴向应力呈倒“V”形趋势,即随着轴向应变的增加,轴向应力先增大后减小。在曲线上升阶段,XG 土体和粉砂土的强度增长趋势相似。但随着 XG 含量的增加,改良土体达到峰值应力的时间逐渐延长,土体的峰值应力先增大后减少。在曲线下降阶段,随着 XG 含量的增加,土体表现出大于素土的残余强度,说明 XG 对土体强度有提升效果,同时,养护龄期的增加导致土体延性略有降低。如图 9 所示,在 7 d 养护龄期内,对照组(粉砂土) UCS 为 67.14 kPa,掺入 XG 含量 1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 的 UCS 为 83.86、95.28、120.50、110.20 kPa,分别增加了 24.90%、41.91%、78.48%、64.13%。在 28d 的养护龄期内,粉砂土的强度为 80.39 kPa,1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 含量的 XG 土体强度为 114.3、142.7、181.1、165.7 kPa,分别增加了 42.18%、77.51%、125.28%、106.12%。

如图 10(a) 所示,随着养护龄期的增加,试样的抗压强度 q_u 有不同程度的提高,XG 土体的抗压强度均显著大于粉砂土。各养护龄期下,1.0% XG 土体强度随养护龄期增加幅度较小,斜率为 1.58,2.0% XG 土体强度增加幅度最大,斜率为 3.03。1.0% XG、1.5% XG 在养护龄期 1、7、14 d 时,抗压强度变化差异不大,养护 14 d 后强度值变化较明显。如图 10(b) 所示,随着养护龄期的增加,XG 土体抗压强度逐渐增大,在养护 14 d 后强度迅速提高。对照组(粉砂土)在 1~28 d 养护龄期内抗压强度增量为 19.6 kPa,2.0% XG 在 1~28 d 内达到 82.97 kPa,且 2.0% XG 土体在养护 1、7、14、28 d 后,抗压强度分别较粉砂土提高 37.34、53.36、70.50、100.71 kPa。结果表明,XG 土体在养护龄期 14 d 内逐渐出现固结现象,并且在 14~28 d 迅速增长。

相较于土体颗粒,XG 粉末尺寸粒径更小,加入

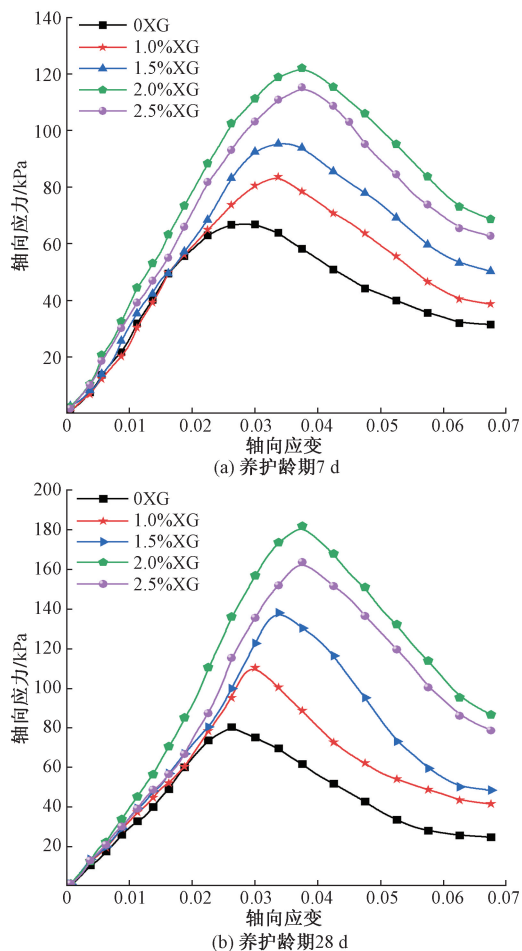


图8 不同养护龄期 XG 土体应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of XG soil at different curing ages

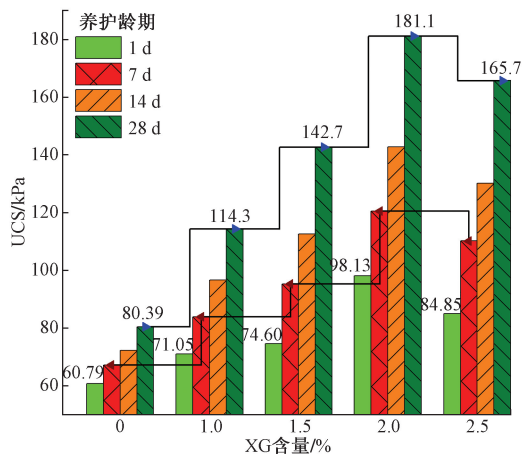


图9 XG 含量对土体强度的影响

Fig. 9 Effect of XG content on soil strength

XG 后,土颗粒间空隙能够有效被填充,土颗粒排列紧密、大孔隙数量与尺寸减少,土体的密实度得到提升,从而出现显著土壤改良效果^[25]。当 XG 含量超过 2.0%,过量的 XG 单体会吸附水分,在粉砂土中形成较大的胶结团块并填充于土颗粒的孔隙空间,增加局部颗粒之间的连接,因此,试件在受力变形过程中会形成局部薄弱点,土体强度出现衰减。

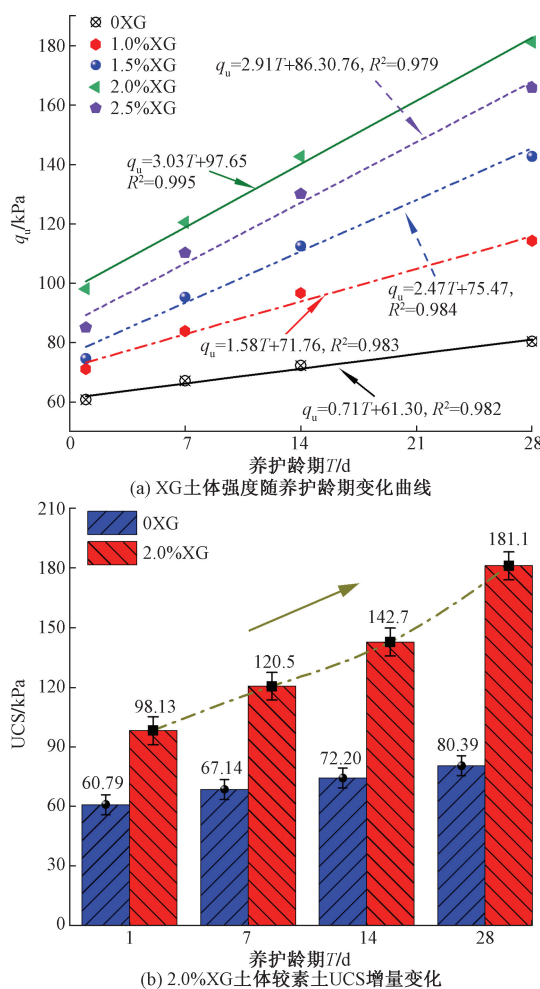


图10 养护龄期对 XG 土体抗压强度的影响

Fig. 10 Effect of curing age on compressive strength of XG soil

故较高掺量的 XG 土体强度较 2.0% XG 土体强度下降,存在最优掺量使得土体改良效果最好。

2.2 木质素纤维对土体强度的影响

图 11 为用 LF 处理土体在养护龄期 7 d 和 28 d 时的应力-应变曲线。可以看出,随着轴向应变的增加,土体的轴向应力呈现先增大后减小的趋势。在同一养护龄期内,LF 土体的强度均高于粉砂土。在曲线上升阶段,改良土表现出快速上升的趋势,而素土上升较缓慢。在曲线下阶段,素土下降较缓慢,改良土急速下降并表现出脆性破坏现象。

如图 12 所示,在 7 d 养护龄期,对照组素土的无侧限抗压强度为 67.14 kPa,掺入 LF 含量为 1.0%、3.0%、5.0% 的土体抗压强度分别为 98.72、111.7、105.1 kPa,分别较同龄期素土增加了 47.03%、66.37%、56.54%。在 28 d 养护龄期,粉砂土的强度为 80.39 kPa,LF 含量 1.0%、3.0%、5.0% 的土体强度为 152.7、193.2、168.4 kPa,分别增加了 89.95%、140.32%、109.48%。

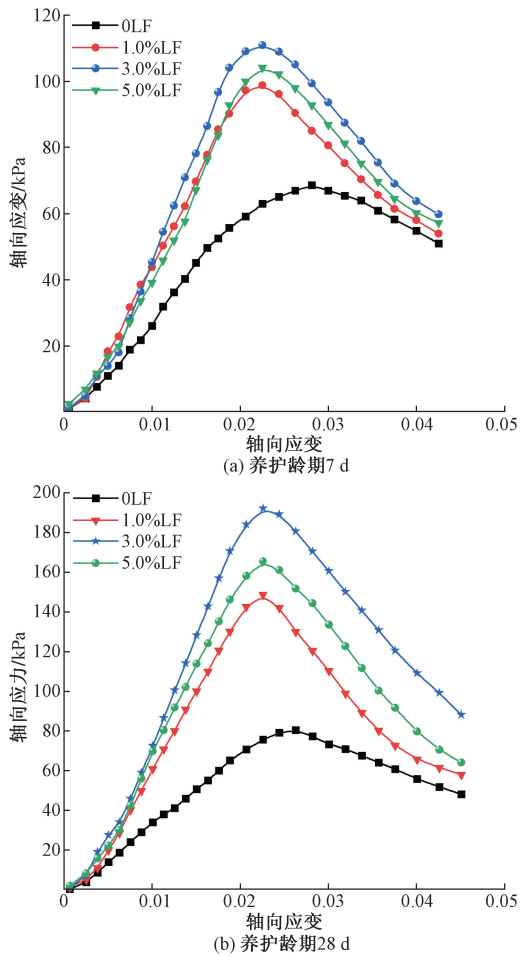


图 11 不同养护龄期 LF 土体应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of LF soil at different curing ages

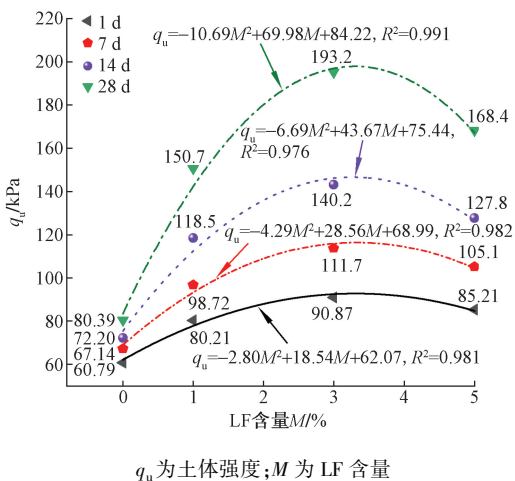


图 12 LF 含量对土体强度的影响

Fig. 12 Effect of LF content on soil strength

图 13(a)为不同养护龄期对 LF 土体强度的影响模式。素土和 LF 土体的抗压强度随养护龄期的增加而增大,LF 掺量为 3.0%、养护 28 d 时,土体抗压强度最大,为 193.2 kPa。各养护龄期下,1.0% LF 土体强度随养护龄期增加幅度较小,斜率为 2.59,

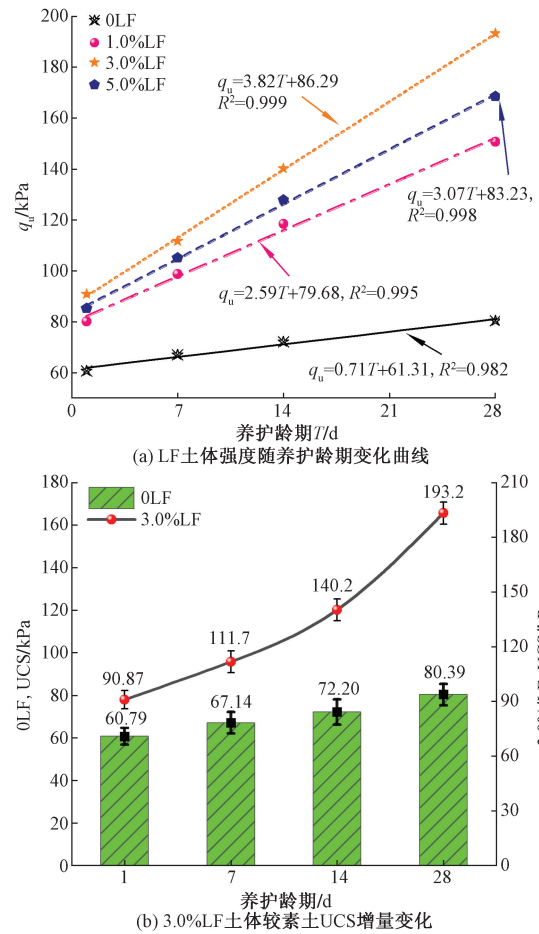


图 13 养护龄期对 LF 土体抗压强度的影响

Fig. 13 Effect of curing age on compressive strength of LF soil

3.0% LF 土体强度增加幅度最大,斜率为 3.82。1.0% LF、3.0% LF 在养护龄期 1、7 d 时,强度变化差异不大,养护 7 d 后强度值变化较明显。图 13(b),改良土的强度随着养护龄期的增加较明显,在 1~28 d 的养护期内,素土增量为 19.60 kPa, LF 土体强度在相应龄期内增量为 102.33 kPa。此外,与素土相比较,3.0% LF 土体在养护龄期 1、7、14、28 d 后强度分别增加了 30.08、44.56、68.00、112.81 kPa。结果表明,土体掺入 LF 后在 7 d 内进行固结,固结完成后,土体形成致密结构,骨架结构的强度提高,从而使强度增大。

LF 是天然可再生的有机絮状纤维物质,具有良好的柔韧性,与水混合后会形成网状三维结构,能够有效提高土体的强度。在土体中加入 LF 后,其分子可均匀吸附在粉砂土颗粒表面并产生胶黏性物质,在土体颗粒孔隙起到了支撑和黏结作用,从而在宏观上表现为增强了土体的抗压强度。当 LF 含量超过 3.0%,过量的 LF 产生的胶黏性物质在填充了土颗粒孔隙基础上仍在增加,土体颗粒受到挤压、间距增大,无法良好的形成稳定骨架结构,土体

强度出现衰减。故较高 LF 掺量的土体强度较 3.0% LF 出现下降趋势,所以存在最优掺量使得土体改良效果最好。

2.3 黄原胶和木质素纤维对土体强度综合影响

图 14 为 XG、LF 土体在养护龄期 14 d 应力-应变曲线,随着轴向应变的增大,复合改良土轴向应

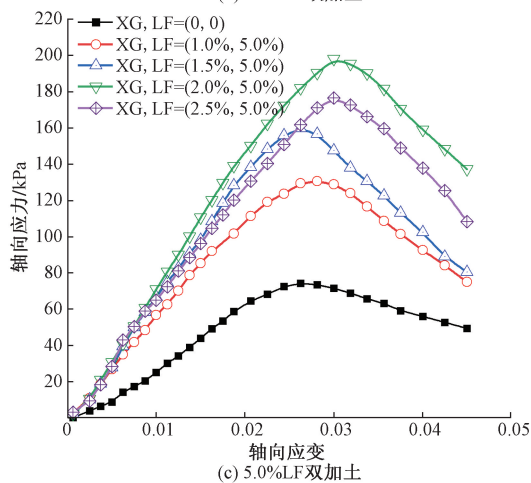
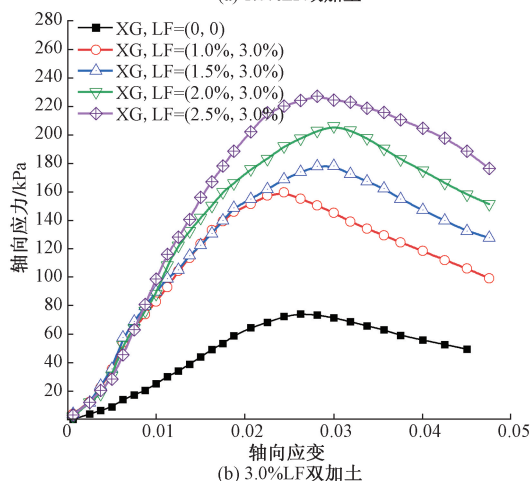
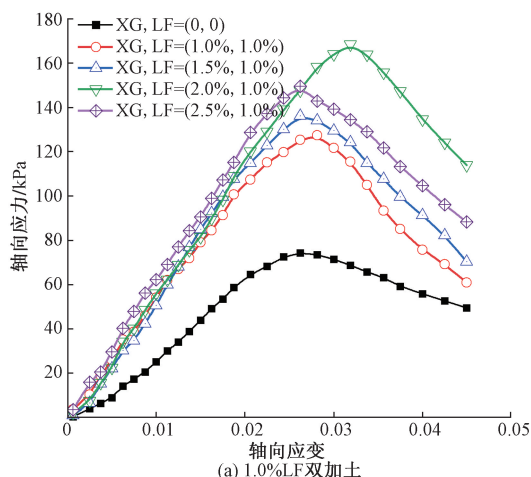


图 14 复合改良土在养护龄期 14 d 应力-应变曲线
Fig. 14 Stress-strain curve of composite improved soil at 14 d curing age

力呈现先增大后减小趋势。曲线上升阶段,粉砂土率先达到应力峰值,随着 XG 含量的增加,复合改良土达到峰值应力时间逐渐增加。曲线下降阶段,粉砂土强度下降缓慢,复合改良土表现略快于粉砂土下降趋势,具有一定的延性和较高的残余强度。

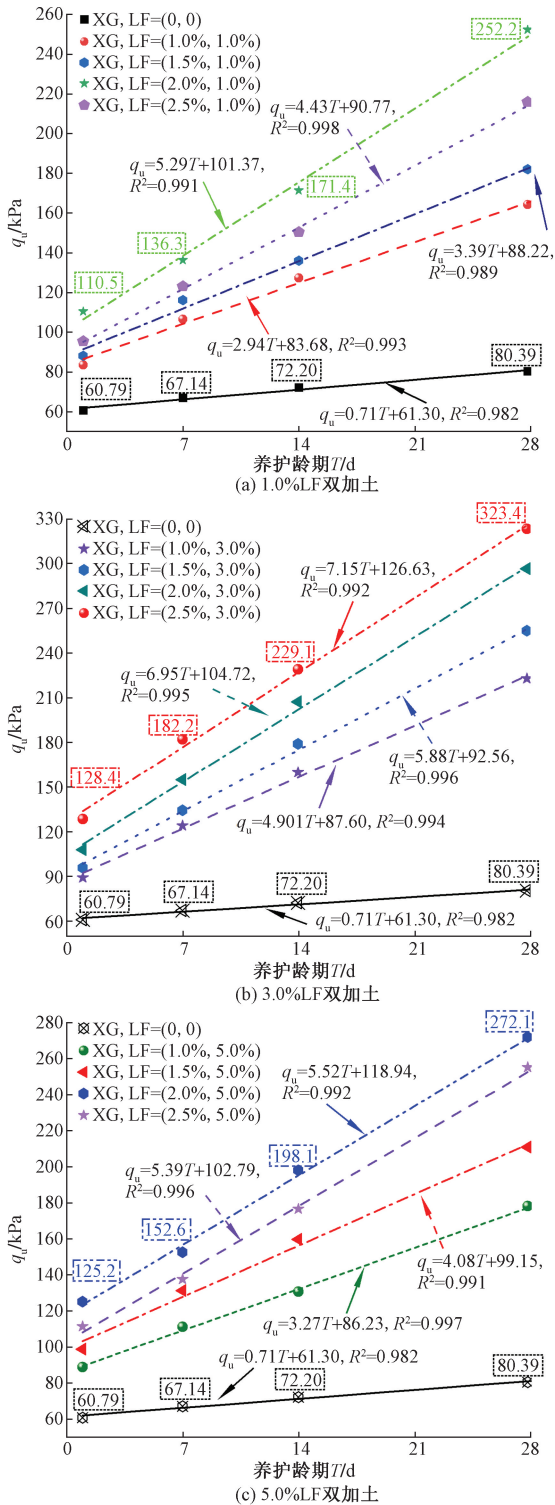
图 15 为复合改良土强度随养护龄期变化曲线,复合改良土随着养护龄期的增加,抗压强度相应增大。由图 10、图 13、图 15 分析可知,在各龄期内,复合改良土的抗压强度较单独添加其中 1 种材料均有不同程度的提升,且均大于素土。在 14 d 养护龄期,对照组素土的抗压强度为 72.20 kPa,LF, XG = (1.0%, 2.0%)、LF, XG = (3.0%, 2.5%)、LF, XG = (5.0%, 2.0%) 土体强度分别为 171.4、229.1、198.1 kPa,分别增加了 137%、217%、174%。

表 5 为复合改良土在不同养护龄期内较素土强度提升比率,对于混掺的改良粉砂土,当 LF 为 1.0% 时,2.0% XG 土体抗压强度最大,当 LF 为 3.0% 时,2.5% XG 土体抗压强度最大,当 LF 为 5.0%、2.0% XG 土体抗压强度最大,且三者强度相比, XG, LF = (2.5%、3.0%) > XG, LF = (2.0%、5.0%) > XG, LF = (2.0%、1.0%)。综上,2.5% XG,3.0% LF,养护龄期为 28 d,土体的抗压强度最大,为同龄期素土的 4.02 倍。

复合改良土强度增强效果较单独掺入其中一种材料有所提升,这是因为 XG 与 LF 形成“协同增效作用”,XG 吸收水分后会形成悬浮液,LF 在土体中处于杂乱均匀分布,两者会形成“纤维-胶结网”,在土体受到竖向荷载时,会起到一定的约束作用,从而限制了位移和变形,土体的抗压强度得到提升。

表 5 复合改良土在不同养护龄期内较素土强度提升结果
Table 5 Results of strength improvement of composite improved soil compared with plain soil in different curing ages

LF/%	XG/%	不同养护龄期(单位:d)下抗压强度/kPa			
		1	7	14	28
0	0	60.79	67.14	72.20	80.39
	1.0	83.53	106.60	127.30	164.30
	1.5	88.13	116.20	136.10	182.10
	2.0	110.50	136.30	171.40	252.20
	2.5	95.47	123.10	150.40	215.80
1.0	1.0	89.11	124.00	159.70	222.80
	1.5	95.79	134.30	179.10	255.00
	2.0	107.80	154.90	207.20	296.50
3.0	2.5	128.40	182.20	229.10	323.40
	1.0	88.76	111.10	130.60	182.10
	1.5	98.72	131.20	159.80	211.00
5.0	2.0	125.20	152.60	198.10	272.10
	2.5	111.40	137.60	176.50	255.30



q_u 为土体强度; T 为养护龄期

图 15 复合改良土随养护龄期强度变化曲线

Fig. 15 Strength change curve of composite improved soil with curing age

3 试验微观机理分析

采用 SEM 观察 XG、LF 改良粉砂土机理。选用

素土、2.0% XG 土体、3.0% LF 土体、复合改良土 (2.5% XG、3.0% LF), 共 4 种代表性土样, 养护 28 d 后分别放大 800 倍和 3 000 倍进行扫描电镜, 试验结果如图 16 所示。图 16(a)、图 16(b) 为素土放大后的微观图像, 未处理过的土体孔隙较大, 且土体排列错落, 放大 3 000 倍后, 能看到有贯穿裂缝情况, 这是导致土体强度不高的原因。图 16(c)、图 16(d) 为 2.0% XG 土体微观图像。图 16(c) 中, 加入 XG, 土体空隙被 XG 基质覆盖, 土体颗粒间空隙能够有效被填充, 土颗粒排列紧密、大孔隙数量与尺寸相对减少, 这与上文 XG 土体强度增大现象一致。图 16(d) 中, XG 覆盖颗粒表面, 松散的粉砂土被紧紧的胶结在一起, 增大了土颗粒之间的接触面积, 土体强度得到提升。

图 16(e)、图 16(f) 为 3.0% LF 土体的微观图像。图 16(e) 中, LF 能使土颗粒之间无明显边界且存在胶结物质使其联结起来, 土体形成稳定、致密结构。图 16(f) 中, LF 内部有大分子集团, 与周围土颗粒形成空间网状结构, 加强了土体间的联合力, 宏观上表现为土体抵抗变形能力得到提高, 当 LF 掺量最优时, 增强效果最显著, 此时改良土力学性能最佳。图 16(g)、图 16(h) 为复合改良土微观图像, XG 接触水后会形成高黏性凝胶, 覆盖在土体颗粒外表, 起到增大黏性作用。粉砂土颗粒表面存在阳离子, XG 分子链上有羧基 (—COOH) 和羟基 (—OH) 基团, 两者可以形成离子键^[26-27], 土颗粒间的静电吸附作用远低于离子键作用, 提高了土颗粒完整性, 表现为土体强度增加。LF 的加入, 会与 XG 形成牢固稳定的“纤维-胶结网”桥接作用, 在土体中形成空间约束, 限制了土颗粒的相对位移, 土体的抗压强度得到提升。同时, LF 中亲水基团会吸附粉砂土中的部分水分, 纤维与土颗粒间的摩擦力能有效阻止土颗粒间的错位与重新排列, “协同增强效果”进一步增强。

图 17(a) 为对照组素土, 其破坏形态沿试块 45° 剪切面破坏。图 17(b) 为 2.5% XG、3.0% LF 土体试块, 其破坏形态同样沿着 45° 剪切面, 但相对于素土来说, 裂纹特征更加曲折。可以证实, 在试块受到竖向荷载发生侧向形变过程中, LF 在土颗粒间形成相互交叉的空间网状结构, 使土体的整体稳定性增强。同时 XG 形成的高黏性凝胶会增强土体间的黏性, 延缓土体的整体破坏。在试块达到整体破坏形态时, XG、LF 与土体颗粒结合紧密处局部抵抗变形能力较强, 而抵抗变形能力较弱处的颗粒会逐渐分离, 从而形成与素土相比较不规则的裂缝。

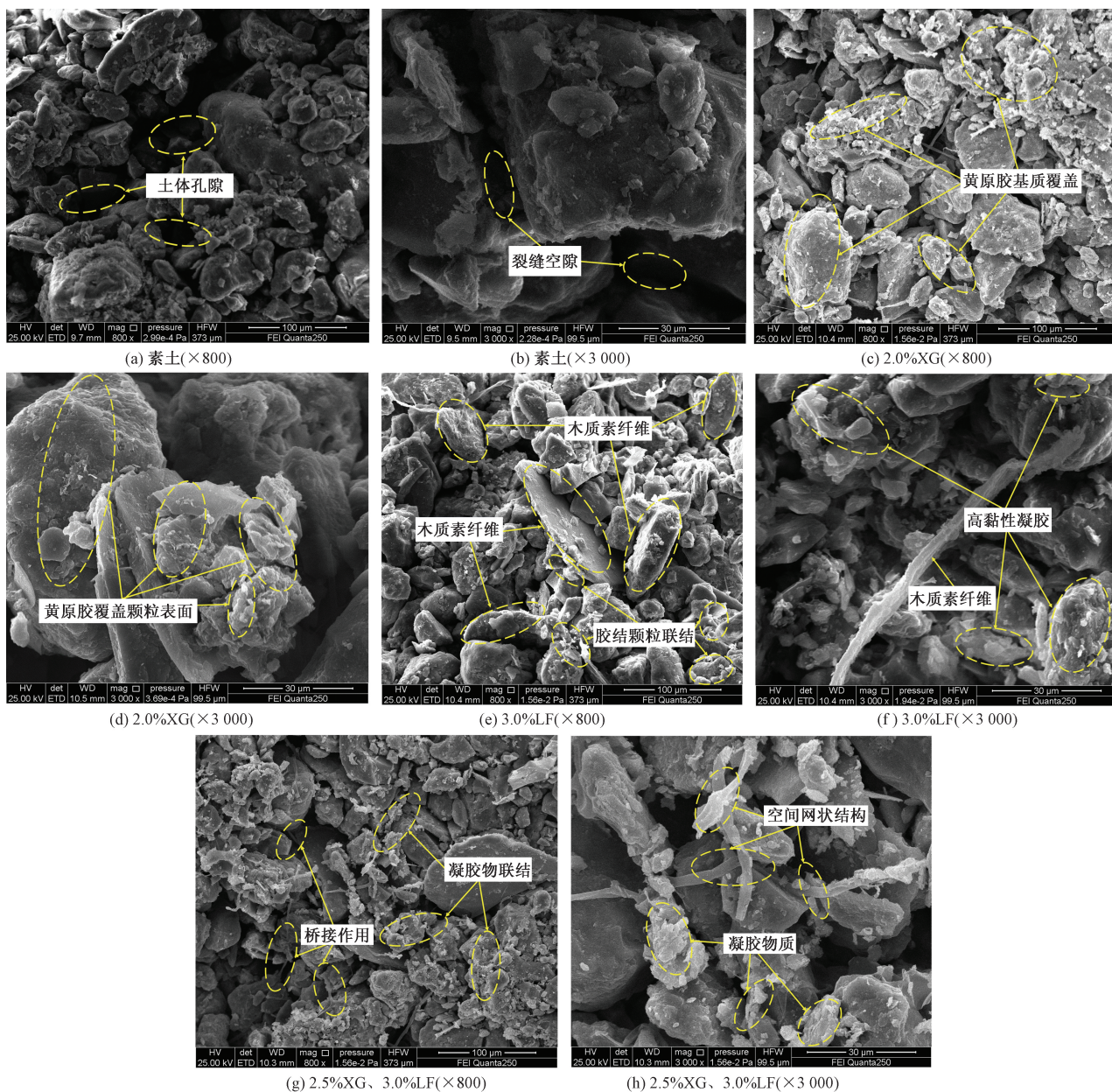


图 16 土体 SEM 图像

Fig. 16 Soil SEM image

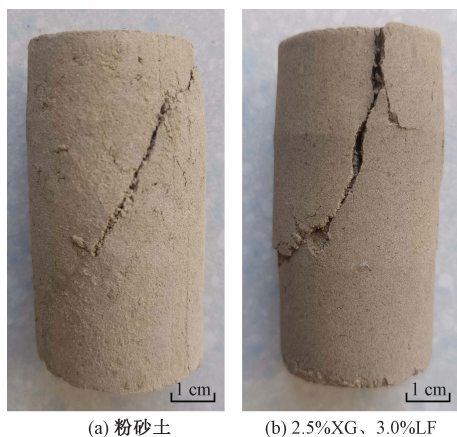


图 17 土体试块抗压强度试验破坏形态

Fig. 17 Failure mode of soil block compressive strength test

4 结论

针对黄泛区粉砂土地区的基础工程进行室内力学试验,初步获得不同掺量 XG、LF 随养护龄期下的土体强度变化规律,根据 SEM 微观电镜扫描试验,对土体颗粒的排列状态、接触关系、孔隙特征进行机理分析,得出以下结论。

(1) XG 掺量的增加,土体的抗压强度先增后减,2.0% XG,28 d 养护龄期时抗压强度达到最大,为 181.1 kPa,是粉砂土的 2.25 倍;随着 LF 掺量提高,土体抗压强度随之增大,过量地加入 LF 会削弱改良效果,3.0% LF,养护龄期 28 d,土体抗压强度为 193.2 kPa,为素土的 2.4 倍。

(2) XG 和 LF 同时作为改良材料可以提高黄泛区粉砂土的抗压强度,与单掺 XG 土体相比,提高了土体的抗压强度,与单掺 LF 土体相比,提高了土体抗压强度、延性、残余强度。XG 含量为 2.5%, LF 为 3.0%, 养护龄期 28d 土体强度最大,为素土的 4.02 倍。

(3) 在粉砂土中同时加入 XG 和 LF,两者会形成牢固稳定“纤维-胶结网”桥接作用,在土体中形成空间约束,限制了土颗粒的相对位移,可显著提高土体抗压强度。

XG 与 LF 作为改良材料可改善黄泛区粉砂土的工程性质。本次研究只提供了增强黄泛区粉砂土强度的一种方法,但施工工艺、成本控制等问题,仍需在未来实际工程中进行系统研究。

参 考 文 献

- [1] 王菲,曹永强,周姝含,等. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2501-2514.
Wang Fei, Cao Yongqiang, Zhou Shuhan, et al. Estimation of vegetation carbon sink and its climate influencing factors in ecological functional areas of the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2501-2514.
- [2] 汪战国. 抗战时期花园口决堤对皖北黄泛区生态环境的影响[J]. 安徽史学, 2013(3): 108-113.
Wang Zhanguo. The impact of the burst of the Huayankou dike on the ecological environment in the Yellow Plain Area of north Anhui[J]. Anhui Historiography, 2013(3): 108-113.
- [3] 张宝玺,岳建伟,张慧,等. MICP 技术改良黄泛区土体力学性能研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(7): 79-86.
Zhang Baoxi, Yue Jianwei, Zhang Hui, et al. Study on mechanical properties of soil mass improved by MICP technology[J]. Building Science, 2020, 36(7): 79-86.
- [4] Weng Z Y, Wang L N, Liu Q, et al. Improving the unconfined compressive strength of red clay by combing bio-polymers with fibers[J]. Journal of Renewable Materials, 2021, 9(8): 1503-1517.
- [5] Chen C H, Wu L, Perdjon M, et al. The drying effect on xanthan gum biopolymer treated sandy soil shear strength[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 271-279.
- [6] Rashid A S A, Latifi N, Meehan C L, et al. Sustainable improvement of tropical residual soil using an environmentally friendly additive[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35: 2613-2623.
- [7] Weng Z, Yu J, Deng Y, 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.
- [8] 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.
- [9] 周天宝,张福海,周炳生,等. 生物聚合物固化粉土室内试验与机理研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 107-110, 116.
Zhou Tianbao, Zhang Fuhai, Zhou Bingsheng, et al. Laboratory test and mechanism study of polymer solidified silt[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 107-110, 116.
- [10] 张涛,刘松玉,蔡国军. 考虑胶结作用的木质素固化粉土界面塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 670-680.
Zhang Tao, Liu Songyu, Cai Guojun. Plastic model of lignin-solidified silt boundary surface considering cementation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 670-680.
- [11] 董吉. 木质素纤维对贵阳红黏土物理力学性质影响的试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
Dong Ji. Experimental study on effect of lignin fiber on physical and mechanical properties of Guiyang red clay[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [12] Gao Z, Zhong X, Wang Q, et al. The influence of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of lignin fiber-reinforced loess[J]. Journal of Renewable Materials, 2022, 10(4): 1063.
- [13] 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 application of industrial waste lignin curing improved silt roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 1-11.
- [14] 张涛,蔡国军,刘松玉,等. 工业副产品木质素改良路基粉土的微观机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1665-1672.
Zhang Tao, Cai Guojun, Liu Songyu, et al. Study on the microscopic mechanism of lignin improved subgrade silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1665-1672.
- [15] 朱锐,王燕杰,黄英豪,等. 木质素纤维改良膨胀土的冻融特性及微观机理[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 263-272.
Zhu Rui, Wang Yanjie, Huang Yinghao, et al. Freeze-thaw characteristics and microscopic mechanism of lignin fiber modified expansive soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 263-272.
- [16] 蒋潇伊. 木质素纤维-水泥改良土力学性能与微观结构研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
Jiang Xiaoyi. Study on mechanical properties and micro-structure of Lignin fiber-cement modified soil[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2022.
- [17] 陈颖辉,蔡祎,欧明喜. 木质素纤维-高钙粉煤灰复合改良膨胀土试验研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 978-985.
Chen Yinghui, Cai Yi, Ou Mingxi. Experimental study on lignin fiber-high calcium fly ash composite modified expansive soil[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(3): 978-985.
- [18] 金柏成,赵攀,崔允亮,等. 灌注桩绿色泥浆制备及泥皮的渗透特性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5935-5942.
Jin Baicheng, Zhao Pan, Cui Yunliang, et al. Preparation of green mud for cast-in pile and permeability characteristics of mud skin[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(14): 5935-5942.
- [19] 陈诚,郭伟,任宇晓. 冻融循环条件下木质素纤维改良土性质研究及微观分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 135-

140.
Chen Cheng, Guo Wei, Ren Yuxiao. Properties and microscopic analysis of lignin fiber modified soil under freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (S2): 135-140.
- [20] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Highway geotechnical test code: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2020.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China. Geotechnical test method standard: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [22] 杨秋霞, 肖燕, 陆伟根, 等. 剪切工艺对含黄原胶的口服混悬液溶出性能的影响[J]. 中国医药工业杂志, 2019, 50(3): 302-307.
Yang Qiuxia, Xiao Yan, Lu Weigen, et al. Effect of shearing process on dissolution performance of oral suspension containing xanthan gum [J]. China Journal of Pharmaceutical Industry, 2019, 50(3): 302-307.
- [23] 汪恩良, 杜世林, 姜海强, 等. 不同改良方法下膨胀土性能变化试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(12): 72-87.
Wang Enliang, Du Shilin, Jiang Haiqiang, et al. Experimental study on variation of expansive soil properties under different improvement methods[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(12): 72-87.
- [24] Chang I, Im J, Prasadhi A K, et al. Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening[J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 65-72.
- [25] 曹智民, 璩继立. 黄原胶和棕榈丝纤维对上海黏土抗压强度的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 209-214.
Cao Zhimin, Qu Jili. Effects of xanthan gum and palm silk fiber on compressive strength of Shanghai clay [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30 (5): 209-214.
- [26] 黄兰华, 赵宁宁, 戴承江, 等. 黄原胶复合掺砂黏性土抗裂性能及其机理研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 23-29.
Huang Lanhua, Zhao Ningning, Dai Chengjiang, et al. Study on crack resistance and mechanism of xanthan gum composite sand-doped clay[J]. Journal of Hebei University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 39(3): 23-29.
- [27] 马晓凡, 张晨阳, 刘瑾, 等. 含砂量对黄原胶复合黏性土抗裂和抗冲刷性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 59-66, 7.
Ma Xiaofan, Zhang Chenyang, Liu Jin, et al. Effect of sand content on cracking and erosion resistance of xanthan gum composite clay[J]. Progress in Water Resources and Hydropower Science and Technology, 2023, 43(4): 59-66, 7.