

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.017



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



木质素纤维-石灰复合改良膨胀土的力学特性 与微观结构分析

刘昊潼¹, 王叶娇¹, 王泰安², 郭兆敏¹

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 上海申通地铁建设集团有限公司, 上海 201103)

摘要: 膨胀土是一种特殊的问题土, 具有遇水膨胀失水收缩的工程特性, 对气候影响较为敏感, 极易诱发边坡失稳、滑坡等工程灾害。传统无机化学改良剂(如石灰、水泥等)虽能有效提高土体强度, 但此类改良剂普遍存在高碳排放等环境问题。将木质素纤维(LF)这种新型绿色低碳材料用于膨胀土的改良, 通过无侧限抗压试验、直剪试验、无荷膨胀率试验、压汞试验和扫描电镜试验研究木质素纤维改良膨胀土的力学性能, 并分析改良剂的掺量比以及养护龄期对木质素纤维-石灰复合改良土的力学性能和微观结构的影响。结果表明, 木质素纤维能显著提高膨胀土的抗剪、抗压强度, 其最优掺量为8%; 在最佳掺量比条件下, 复合改良土的力学性能接近4%石灰改良土; 木质素纤维能有效改善膨胀土的微观孔隙结构, 增强土颗粒间的联结作用; 木质素纤维对膨胀土的工程特性具有较好的改良效果, 可部分替代传统改良剂, 减少传统改良剂的使用。

关键词: 木质素纤维; 石灰复合改良; 膨胀土; 力学性能; 微观结构

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Mechanical properties and microstructural analysis of lignin fiber-lime composite expansive soils

LIU Haotong¹, WANG Yejiao¹, WANG Taian², GUO Zhaomin¹

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China;

2. Shanghai Shentong Metro Construction Group Co., Ltd, Shanghai 201103, P. R. China)

Abstract: Expansive soil is a typically problematic soil that exhibits the engineering characteristics of swelling and shrinkage. It is highly sensitive to climatic changes, often leading to engineering disasters such as slope instability and landslides. While traditional inorganic chemical modifiers (such as lime, cement, etc.) can effectively improve soil strength, these modifiers are associated with environmental issues, particularly high carbon emissions. This study investigated the use of a novel green, low-carbon material-lignin fiber (LF)-for the modification of expansive soil. Unconfined compressive strength test, direct shear test, free swell test, mercury intrusion porosimetry, and scanning electron microscope were performed to analyze the mechanical properties of lignin fiber improved expansive soil. The effects of modifier dosage and curing age on the mechanical properties

收稿日期: 2024-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(42477186)

作者简介: 刘昊潼(1998-), 男, 主要从事非饱和土研究, E-mail: liuhaotong@shu.edu.cn

王叶娇(通信作者), 女, 副教授, E-mail: yejiaowang@shu.edu.cn。

Received: 2024-09-08

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 42477186)

Author brief: LIU Haotong (1998-), main research interest: unsaturated soil, E-mail: liuhaotong@shu.edu.cn.

WANG Yejiao (corresponding author), associate professor, E-mail: yejiaowang@shu.edu.cn.

and microstructure of lignin fiber-lime composite-treated soil were also studied. The results indicated that 8% lignin fiber significantly improved both the shear and compressive strengths of expansive soil. After the optimal treatment, the mechanical properties of the composite improved soil were comparable to those of 4% lime-treated soil. Lignin fiber can effectively enhance the micro-structure of expansive soil by enhancing the bonds among soil particles. The results illustrated that lignin fiber, as a new low-carbon material, can significantly improve the engineering properties of expansive soil, to partially replace or reduce the use of traditional modifiers in the field of soil improvement.

Keywords: lignin fiber; lime composite improvement; expansive soil; mechanical properties; microstructure

膨胀土及其相关工程问题一直是全球岩土工程领域备受瞩目的技术难题,被形象地描述为岩土工程界的“癌症”。膨胀土具有胀缩性、裂隙性和超固结性的工程特性。膨胀土特殊的工程特性主要受强亲水矿物成分影响,如蒙脱石、伊利石等在其成分中占主导地位^[1]。这类典型的黏土矿物具有与水较强的结合能力,吸水膨胀软化,失水收缩变硬,而裂隙性就是这种强烈的胀缩性的宏观表现^[2]。

工程上通常采用土质改良的方法来降低其危害,土体改良法主要分为物理和化学改良两大类。物理改良法通常向土体中掺入纤维^[3-4]、土工织物等,或者通过掺入钢渣、砂、橡胶颗粒^[5]、碎石、建筑垃圾等粗颗粒来改变其颗粒级配,从而增强土体的物理和强度特性。化学改良法目前主要采用向土中掺入石灰^[6]、水泥^[7]或化学浆液^[8]等,通过改变土体内部矿物成分或结构以达到改良的目的。然而,石灰、水泥等碱性化学材料的生产和使用都会产生大量的二氧化碳,这将进一步加剧温室效应以及气候变化等带来的危害。

目前,绿色经济型的改良材料越来越被关注。木质素纤维作为广泛来源且价格低廉的造纸工业副产品,它具有较高的韧性,在水和弱酸弱碱溶液中不溶,无毒、无味、无污染。木质素纤维在改善沥青路用性能方面已经较为成熟,如王玉林等^[9]、谢明君等^[10]开展了木质素纤维对沥青混合料路用性能研究,采用木质素纤维进行土体改良具备广阔前景。如今,对木质素纤维在土体改良的研究逐渐深入,如Orakoglu等^[11]对冻融循环前后的粉煤灰-木质素纤维改良土进行了不固结不排水三轴剪切试验,发现粉煤灰与木质素纤维的掺入可一定程度降低由于冻融循环作用产生的改良土剪切强度减小现象,且改良土抗冻融性能随着木质素纤维掺量的增加逐渐变强。Fan等^[12]对木质素纤维膨胀土开展了固结不排水三轴试验等一系列试验,发现木质素纤维在土体中形成了空间网络,黏聚力显著增加。Moslemi等^[13]采用不同含量、长度以及养护天数的木质素纤维进行土体改良,发现改良土的抗剪强度

得到显著提高,且较长的纤维对其强度特性贡献更高。董吉等^[14]通过室内土工试验及SEM试验对木质素纤维改良红黏土强度及变形特性进行研究,发现木质素纤维红黏土压缩模量随着纤维掺量增加先增加后减小,表明木质素纤维能一定程度提高红黏土的强度。陈颖辉等^[15]通过无侧限抗压强度试验和直剪试验对木质素纤维-粉煤灰复合改良膨胀土的力学特性变化及微观机理进行研究,发现单掺粉煤灰能够提升改良土强度,掺入木质素纤维后能够进一步增强破坏韧性,水稳性也大大增强。樊科伟等^[16]通过剪切试验以及对经历冻融循环的膨胀土进行强度特性研究,发现木质素纤维对于膨胀土改良具有显著效果。根据已有研究表明,采用传统改良剂如石灰改良膨胀土的最佳掺量普遍在4%~6%^[17-18]。这种改良方法的强度虽然得到提升,但高掺量所带来的碳排放和对周围土体的环境污染不容小觑。因此,采用新型低碳材料逐步代替传统改良剂不仅是对工业废料的二次利用,也能够响应国家可持续发展政策。

目前,在关于木质素纤维改良膨胀土的研究中,通常侧重于通过抗压或抗剪试验评估改良效果,但对膨胀土的其他关键属性,如膨胀性、持水特性和孔隙结构等的研究相对较少。笔者在传统力学性能试验基础上,进一步深入探究改良土的膨胀性能和持水性能,并结合微观结构特征分析了改良机理,实现对木质素纤维单掺以及与石灰互掺时作为膨胀土改良剂的全面综合评价。

1 试验材料与试样制备

1.1 试验材料

试验所用土体取自陕西省安康市地区某建筑工地,采样深度为2 m,土体颜色为浅黄色,且不含植物根系。试验采用BT-9300ST激光粒度分布仪对试验土进行了粒度分析,具体结果见图1。

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19]测得土体基本物理性质,根据统一土体分类系统(USCS)将液限为58.41%、塑限为33.73%、塑

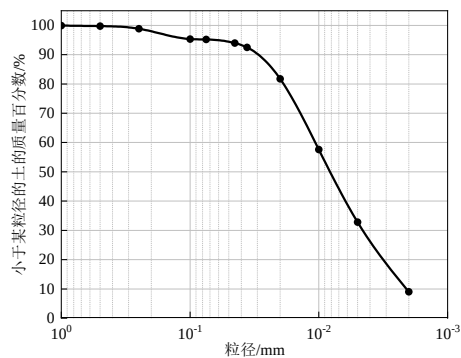


图1 试验用土颗粒分析曲线

Fig. 1 Analysis curve of test soil particles

性指数为 24.68 的膨胀土归类为高塑性黏土(CH)。膨胀土的自由膨胀率为 77%,为中等膨胀土。采用 XRD 定量分析对试验用土进行矿物成分测定,详细物理指标及矿物成分如表 1、表 2 所示。

表 1 安康膨胀土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Ankang expansive soil

土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.51	58.41	33.73	24.68
最大干密度/(g/cm ³)		最优含水率/%	自由膨胀率/%
1.57		22.00	77.00

表 2 安康膨胀土矿物成分

Table 2 Mineral compositions of Ankang expansive soil

石英	蒙脱石	伊利石	斜长石	微斜长石	高岭石
2.51	58.41	33.73	26.68	1.57	22.00

试验中使用的木质素纤维呈白色絮状固体,约 1.5 mm,直径约为 46 μm,这些纤维是经过化学处理的天然木材获得的有机纤维,具有芳香气味、良好的韧性、化学稳定性和耐腐蚀性。试验所用生石灰 CaO 含量>98%,呈白色粉末状。

1.2 试样制备

首先将原状土进行风干、粉碎、过 2 mm 筛后制备成土颗粒用于制备重塑土样。制样方法为:将木质素纤维先过 1 mm 筛,并将所需要的木质素纤维分 4 次掺入干燥的膨胀土中并拌和均匀,然后按照最优含水率向拌和物中喷洒纯水并再次拌和,用保鲜袋将拌好后的土样密封保存,静置 12 h,使得土样中的水分分布均匀。

无侧限抗压试样的直径为 38 mm、高度为 80 mm。具体的试样制作流程如下:将改良膨胀土分为 3 层装入圆柱形模具中,采用千斤顶两端静压的方式,以保持土样的干密度为 1.57 g/cm³。每层压实后,使用土工刀在表面刮毛,以确保每层之间不会产生断层。直剪试样为直径 50 mm、高度 20 mm

的圆饼状样品,通过静态压实方法以确保土样的干密度一致。无荷膨胀率试样为直径 61.8 mm、高度 20 mm 的圆饼状样品,由液压千斤顶将混合好的土样压制而成。持水特性试验使用特制模具将土样制成高度为 5 mm、直径为 35 mm 的圆饼形试样,以确保试样在仪器中充分暴露且不污染探头。最终,将制备好的试样用保鲜膜包裹,并置于恒温恒湿箱中进行标准养护,养护条件为 20 ℃,湿度为 (92±2)%。

2 试验方案

采用复合方法(即在膨胀土中掺入木质素纤维+石灰)进行改良。试验的主要内容包括无侧限抗压强度试验、直剪试验、无荷膨胀率试验、压汞试验以及扫描电镜。在减少石灰掺量的基础上,进一步掺入不同比例的木质素纤维进行复合改良。通过比较单一木质素纤维改良、单一石灰改良以及复合改良后的膨胀土,探讨各种改良方法的优势。具体试验土样信息如表 3 所示。

表 3 土体信息及试验计划

Table 3 Basic parameters of specimens and test program

土样名称	木质素纤维掺量/%	石灰掺量/%	养护龄期/d
素土			
木质素纤维改良土	2、4、6、8、10		1、7、14
石灰改良土		2、4	
复合改良土	2、4、6、8、10	2	

无侧限抗压强度试验使用仪器为万用试验机,试验过程遵照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19]进行。试验中所采用的轴向加载速率为 1 mm/min,控制在 8~15 min 内使其发生破坏。直剪试验所使用仪器为气动直剪仪,应变速率为 0.8 mm/min,每 6 s 取一次数据,竖向压力分别为:50、100、200、400 kPa。无荷膨胀率试验采用的主要设备为膨胀仪、环刀(直径 61.8 mm、高 20 mm)、等直径环刀接环(高 10 mm)、百分表、天平、计时器、吸水球及刮土刀,试验过程同样按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[19]执行。持水特性试验使用美国 Meter 公司生产的露点水势仪(Dewpoint Potentiometer, WP4C)测定土样的持水特性。该仪器利用露点技术,精确测量土样的吸力范围为 0~300 MPa,并允许根据环境温度调节样品室温度。试验结束后,选取代表性土样进行扫描电镜分析,观察纤维在土体中分布特征及其界面形态。电镜扫描(SEM)所用仪器为 Hitachi S4800,拍摄放大倍数为 500、1 000 倍的显微结构照片。压汞试验所用设备为 Autopore IV 9510 型压汞仪,可测定的孔径

范围为 5 nm~360 μm 。

3 改良土试验结果与分析

3.1 无侧限抗压强度

图 2 为不同木质素纤维(LF)掺量,养护龄期为 14 d 的纤维改良土轴向应力与应变关系曲线。由图 2 可知,在相同养护龄期下,纤维改良土的抗压强度随着木质素纤维掺量的增加先增加后减少;纤维改良土达到峰值应力的应变值随着木质素纤维掺量的增加均有不同程度的增加;在初始阶段,随着木质素纤维掺量的增加,曲线的斜率也在提高。这表明木质素纤维能够有效地提高膨胀土的抗压强度,改善膨胀土的韧性,同时对弹性模量也有一定的提升。

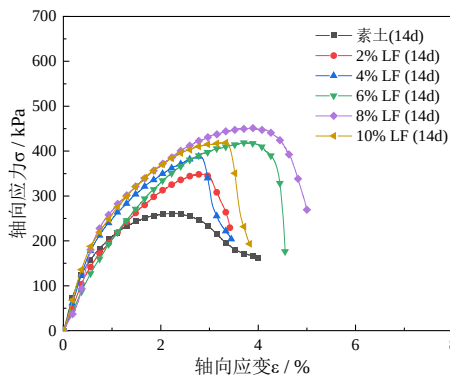


图 2 木质素纤维改良土轴向应力与应变关系曲线

Fig. 2 The relationship curves between axial stress and strain of lignin fiber modified soil

图 3 为不同养护龄期(1、7、14 d)下木质素纤维掺量与抗压强度关系曲线。由图 3 可知,纤维改良土的抗压强度明显高于素土。在相同养护龄期下,纤维改良土的抗压强度随纤维掺量的增加先增加后减小,在 8% 掺量达到峰值。这是由于木质素纤维在土体中随机分布,相互搭接形成三维交织的网络结构,这种结构能有效提高土体的载荷传递能力。另外木质素纤维的弹性模量优于土体,在土体变形过程能够有效限制土颗粒位移,进而提高土体整体性。而当纤维掺量超过 8% 时,过量的纤维会在土体中形成团聚体难以与土颗粒产生有效的连接作用,从而削弱土体的力学性能。已有研究表明^[20],纤维掺量对土体强度的影响存在临界值,且本文结论与陈颖辉等^[15]文中数据变化趋势基本吻合。

图 4 为在 2% 石灰(LM)掺量条件下,不同木质素纤维掺量(0%~10%)与复合改良土抗压强度关系图。由图 4 可知,相同掺量下,复合改良土的抗压强度随着养护时间增加显著提升;养护天数一定时,复合改良土的抗压强度随着纤维掺量的增加呈

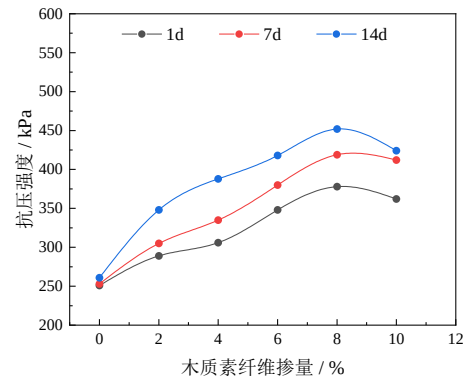


图 3 木质素纤维掺量与抗压强度关系曲线

Fig. 3 The relationship curves between lignin fiber content and compressive strength

现先增后减的趋势,在 8% 纤维掺量时达到最大值,与单掺木质素纤维改良土的无侧限抗压强度有相同的趋势。在相同木质素纤维掺量下,复合改良土的抗压强度在同一养护龄期相较于单掺木质素纤维改良土明显提高,这是由于石灰可以与土体发生反应生成胶凝物质,改变土颗粒间的连接方式,进而加固土体。复合改良土与单石灰(2% 掺量)改良相比,在 7 d 和 14 d 时的强度分别提升了 39.32% 和 49.66%。由无侧限抗压强度试验表明复合改良土的最优掺量比为 8% 木质素纤维和 2% 石灰。

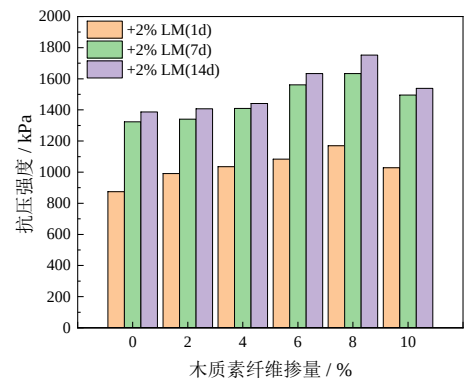


图 4 木质素纤维掺量与复合改良土抗压强度关系图

Fig. 4 Relationship between lignin fiber content and compressive strength of composite improved soil

图 5 为复合改良土(最佳掺量比)与石灰改良土(2%、4%)的抗压强度与养护天数关系图。由图 5 可知,复合改良土的抗压强度在不同养护天数下均强于单石灰(2%)改良土的抗压强度,但都并未达到单石灰(4%)改良土的抗压强度,在养护 7 d 和 14 d 时分别达到单石灰(4%)改良土强度的 92.40% 和 76.84%。且相对于单石灰(2%)改良土地方强度提升了 23.435%~33.71%,整体上满足强度要求。

在最优掺量比条件下,木质素纤维-石灰改良土体抗压强度相较于陈颖辉等^[15]木质素纤维-高钙粉煤灰改良,前者的改良效果更加明显。例如,在养

护 7 d 时,木质素纤维-高钙粉煤灰改良膨胀土的抗压强度为素土的 1.6 倍,而木质素纤维-石灰改良膨胀土则可达到将近 5 倍。并且木质素纤维-高钙粉煤灰改良的粉煤灰用量为 20%,而木质素纤维-石灰改良的石灰用量仅为 2%,更加经济环保。

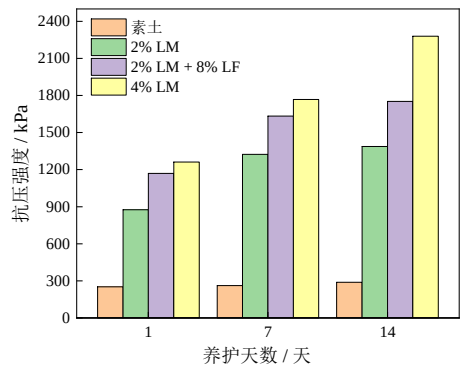


图 5 不同配比下改良土抗压强度与养护天数关系图
Fig.5 The relationship between compressive strength and curing days of improved soil under different ratios

3.2 剪切强度

综合分析所有试样的应力-应变关系曲线,发现改良土均出现“应变软化现象”,且全部试样均已破坏,故定义应力-应变关系曲线的峰值为该试样的抗剪强度。

图 6 为不同木质素纤维掺量的纤维改良土在 400 kPa 垂直压力下的应力-应变关系曲线。由图 6 可知,在掺入纤维后,应力-应变曲线由弱硬化型向软化型转变。土样在掺入纤维后,剪应力随着剪切位移的增加而增加,在达到峰值后逐渐降低,最大剪切应力随着纤维掺量的增加先增大后减小。

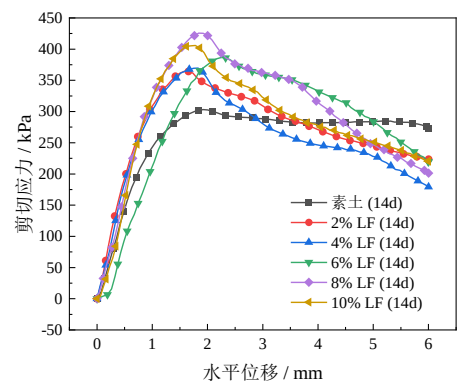


图 6 不同纤维掺量下剪切应力与位移关系曲线 (400 kPa)
Fig. 6 The relationship curve between shear stress and displacement under different fiber content (400 kPa)

表 4 为木质素纤维改良土在不同养护龄期(1、7、14 d)下不同木质素纤维掺量与黏聚力和内摩擦角的关系。由表 4 可见,黏聚力与内摩擦角都随着纤维掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,并在 8% 掺量时达到最大值。这是由于木质素纤维的掺

入使得土颗粒之间的联结能力得到加强,并且这种联结作用约束了土体颗粒间的相对滑动,进而提高了土体的黏聚力及内摩擦角。但当纤维掺量大于 8% 时,过多的纤维会在土体中形成团聚体,难以与土颗粒之间形成有效的连接作用,容易在土体中形成软弱滑动面,从而导致黏聚力和内摩擦角减小。该结论与陈颖辉等^[15]的研究结果不同,陈颖辉等^[15]指出木质素纤维的掺入对土体内摩擦角产生的影响较小,但根据其他研究^[21],改良土的内摩擦角也会随着纤维掺量的增加而先增后减,这可能是所用纤维的种类、长度及直径不同所导致的。综合对比可得 8% 木质素纤维改良土的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角改良效果最佳。

表 4 不同木质素纤维掺量下改良土的强度参数
Table 4 Strength parameters of improved soil with different lignin fiber content

掺量 / %	养护 1 d		养护 7 d		养护 14 d	
	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
0	166.83	15.482 7	171.42	16.124 6	176.89	16.898 8
2	183.46	17.462 4	191.03	18.729 1	201.81	19.432 8
4	200.64	20.385 1	207.10	20.661 5	213.80	21.171 4
6	207.51	21.880 4	216.07	22.631 3	223.06	22.874 9
8	210.53	26.007 7	216.69	26.155 7	225.51	27.293 6
10	204.16	25.009 1	216.50	26.026 3	220.62	26.072 5

图 7 为在竖向压力为 400 kPa、2% 石灰(LM)掺量下,木质素纤维掺量(0%~10%)与复合改良土抗剪强度的关系图。

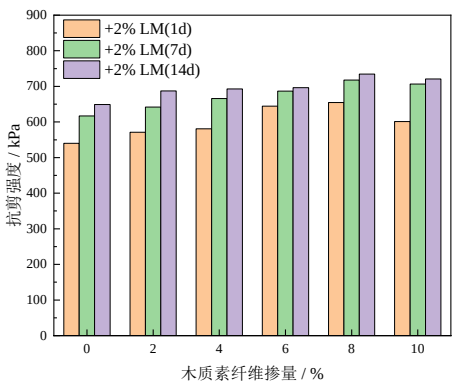


图 7 木质素纤维掺量与复合改良土抗剪强度关系图
Fig. 7 Relationship between lignin fiber dosage and shear strength of composite amended soil

由图 7 可知,相同掺量下,复合改良土的抗剪强度随着养护天数增加而增加。在养护时间一定时,复合改良土的抗剪强度随着纤维掺量的增加先增加后减少,整体趋势及木质素纤维最优掺量与无侧限抗压强度一致。因此确定复合改良土的最佳掺量比为 8% 木质素纤维和 2% 石灰。

为了进一步分析复合改良土(最佳掺量比)的

强度特征,将复合改良土(最佳掺量比)、石灰改良土(2%、4%)的黏聚力与内摩擦角进行对比分析,如图8、图9所示。

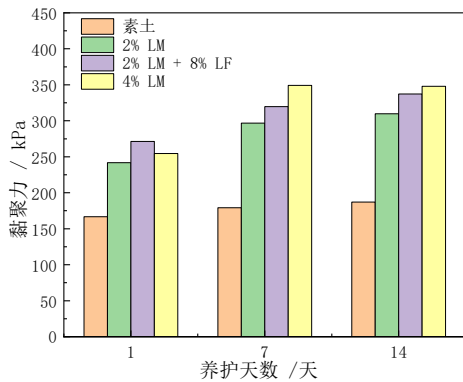


图8 不同配比下改良土黏聚力与养护天数关系图

Fig.8 The relationship between cohesion of improved soil and curing days under different ratios

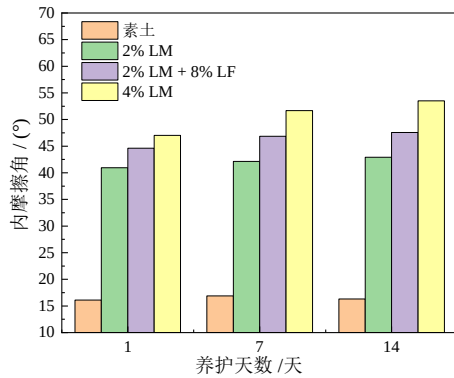


图9 不同配比下改良土内摩擦角与养护天数关系图

Fig.9 Relationship between internal friction angle and curing days of improved soil under different ratios

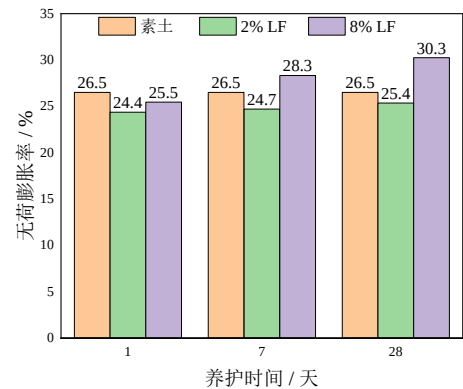
由图8和图9可知,随着养护时间的增加,不同配比改良土的黏聚力和内摩擦角均呈现不同程度的提升。在养护7 d和14 d时,复合改良土的黏聚力及内摩擦角均介于2%石灰改良土和4%石灰改良土之间。这是由于木质素纤维的掺入增强了土颗粒之间的相互连接,同时石灰反应生成的胶结物质附着在纤维表面,进一步强化了这种作用。然而,4%石灰改良土中胶结物质的含量高于复合改良土,因此其黏聚力及内摩擦角也相对更高。

3.3 无荷膨胀率

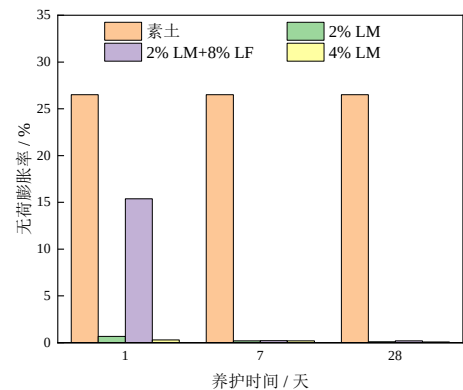
根据无侧限抗压试验及直剪试验认定为纤维掺量为8%时改良效果最好。因此以素土、较低掺量(2%)及最优掺量(8%)纤维改良土为一对照组,以素土、单掺石灰改良土(2%、4%)及复合改良土(最优掺量比)为另一对照组进行无荷膨胀率试验。研究木质素纤维及石灰对膨胀土无荷膨胀率的改良效果,结果如图10所示。

由图10(a)可知,纤维改良土的无荷膨胀率随

着养护时间的增加均有所提高,2%纤维改良土在不同养护时间下均低于素土,而8%纤维改良土无荷膨胀率随着养护时间增加逐渐高于素土。这表明掺入少量的木质素纤维可以减小膨胀土的无荷膨胀率,过量则会引起反效果。这种现象主要由于少量纤维可以在土体膨胀时,产生拉力抵消土体内部膨胀力,从而抑制土体膨胀。而过量的纤维容易在土体内遇水成团,难以与土颗粒之间产生有效连接,影响纤维对膨胀土的加筋作用,进而无法抑制土颗粒的膨胀变形,并且无论是纤维形成的网络结构还是团聚体,都会造成土体的孔隙率增加,进一步导致纤维改良土的膨胀率提升。这与王钰珊等^[22]的数据趋势基本一致,只是木质素纤维相较于椰壳纤维对膨胀土无荷膨胀率的改良效果较小。



(a) 不同掺量单掺木质素纤维改良土



(b) 不同掺量单掺石灰及复合改良土

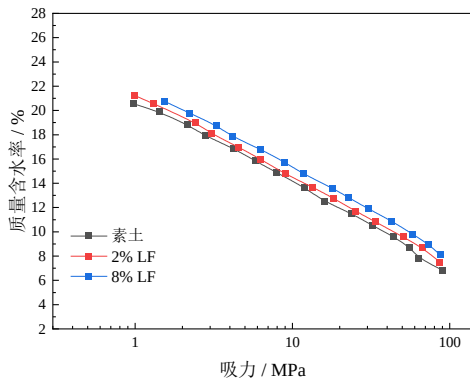
图10 不同配比下改良土无荷膨胀率与养护时间关系图

Fig.10 The relationship between the no-load expansion rate and the curing time of the improved soil under different ratios

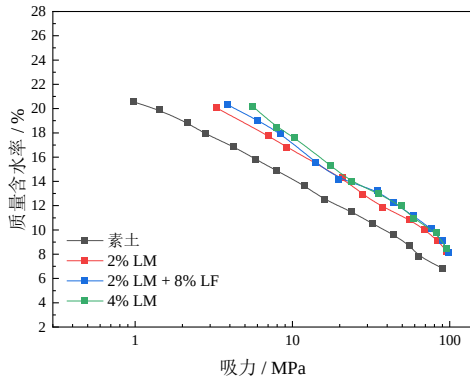
由图10(b)可知,在不同养护时间下,石灰改良土(2%、4%)的无荷膨胀率均在1%以内,表现为无膨胀性,相较于单掺木质素纤维改良土及素土改良效果显著。这是由于石灰可以与土颗粒之间发生离子交换和絮凝效应,增加土体稳定性,从而限制土体膨胀。

3.4 持水特性

图 11 为养护龄期 28 d 下不同配比改良土土水特征曲线。由图 11(a)可知,木质素纤维的掺入导致改良土的土水特征曲线相对于素土的曲线明显右移,在相同养护龄期及相同含水率下,改良土的吸力会随着木质素纤维掺量的增加而增加,这是因为随着掺量的增加,纤维之间以及纤维与土粒之间的相互联结作用增强,土体这种联结作用可以更有效地将土粒固定,增加土体结构的稳定性,从而提高吸力。土体持水特性提高的另一重要原因可能是由于木质素纤维具有一定的吸水性,可以在土体的孔隙中充当额外的储水层^[23-24]。



(a) 不同掺量单掺木质素纤维改良土



(b) 不同掺量单掺石灰及复合改良土

图 11 养护龄期 28 d 不同配比下改良土土水特征曲线

Fig. 11 The soil-water characteristic curves of the improved soil under different ratios at the curing age of 28 days

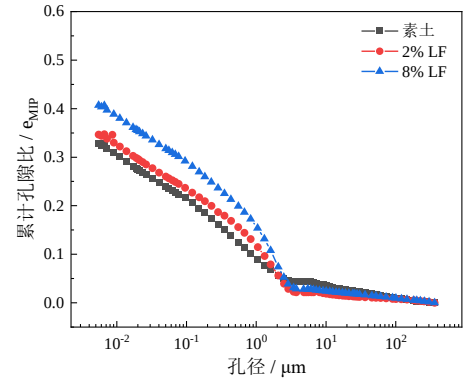
将图 11(a)与图 11(b)对比可知,复合改良土与石灰改良土的土水特征曲线明显位于单掺木质素纤维改良土及素土的曲线右侧,表明石灰改良相较于单掺木质素纤维改良更能增强膨胀土的持水特性。石灰主要通过化学反应,生成新的矿物质如水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)等产物,这些新生成的结构提高了土体的持水能力^[25]。

3.5 微观结构

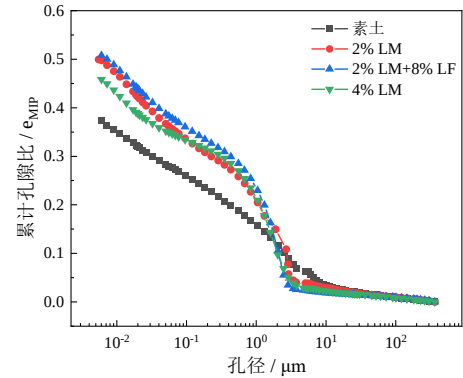
为探究不同改良剂对膨胀土微观结构的影响,

分别对单掺木质素纤维改良土、复合改良土(最佳掺量比)和石灰改良土进行压汞试验以及扫描电镜试验,分析不同配比改良土的孔隙分布变化以及微观结构规律。

图 12(a)为不同配比改良土累计孔隙比曲线的累计孔隙比曲线。如图 12(a)所示,木质素纤维改良土的累计孔隙比曲线向上偏移,说明随着纤维掺量的增加,纤维改良土的累计孔隙比逐渐增大。图 12(b)为不同掺量下单掺石灰及复合改良土的累计孔隙比曲线,如图 12(b)所示,单掺石灰及复合改良土的累计孔隙比曲线相较于单掺木质素纤维改良土整体更加向上偏移,其中以复合改良土偏移量最大,即复合改良土的累计孔隙比最大。



(a) 不同掺量下单掺木质素纤维改良土



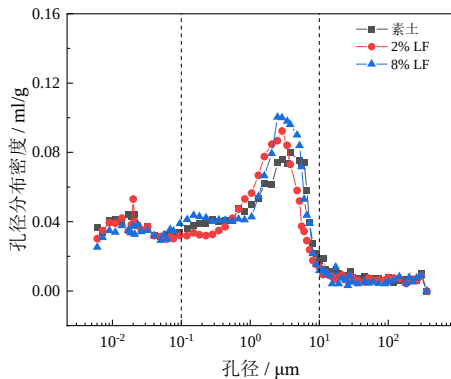
(b) 不同掺量下单掺石灰及复合改良土

图 12 不同配比改良土累计孔隙比曲线

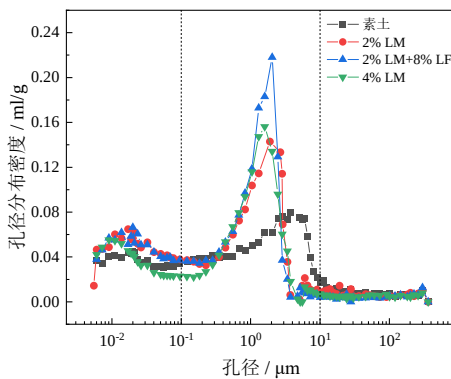
Fig.12 Cumulative void ratio curves of improved soil with different proportions

图 13 为不同配比改良土孔径分布密度曲线。如图 13(a)所示,随着纤维掺量的增加,孔径分布密度的峰值点向左上方移动,孔径从 3.76 μm 逐渐移动到 2.48 μm 。由 13(b)可知,不同配比下改良土的孔径分布密度曲线呈双峰分布。素土、2% 石灰改良土,复合改良土以及 4% 石灰改良土的孔径分布密度峰值所对应的孔径分别为 3.76、1.89、2.46、1.61 μm ,对应的孔隙分布密度分别为 0.08、0.14、

0.22、0.16。后3种改良土的孔隙分布密度峰值明显高于单掺木质纤维改良土,说明石灰相对于木质素纤维更能影响改良土的孔隙分布密度。



(a) 不同掺量下单掺木质素纤维改良土



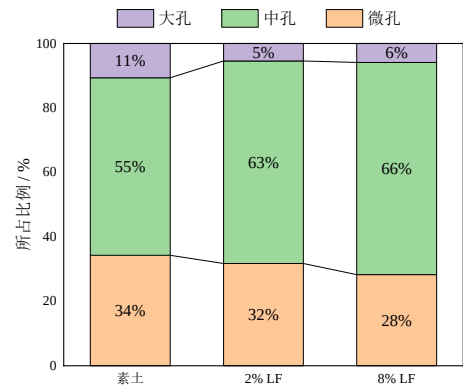
(b) 不同掺量下单掺石灰及复合改良土

图 13 不同配比改良土孔径分布密度曲线

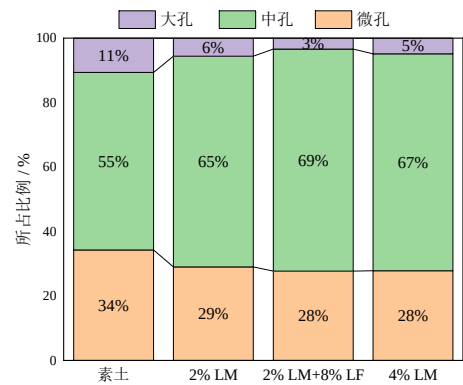
Fig.13 Pore size distribution density curve of improved soil with different proportions

目前对于黏性土的划分界限成果较多^[26-27],为方便分析,将改良土的孔径划分为3个等级,即大孔($>10\ \mu\text{m}$)、中孔($1\sim10\ \mu\text{m}$)、微孔($<1\ \mu\text{m}$)。图14为不同配比改良土孔隙所占比例柱状图,如图14(a)所示,与素土相比,随着纤维掺量的增加,纤维改良土中的中孔比例显著提高8%~11%,而大孔比例下降了5%~6%,微孔比例下降了2%~6%。这表明木质素纤维的掺入可以改变膨胀土的孔径分布,促进中孔的形成,同时减少大孔和微孔的比例。主要原因是,木质素纤维的掺入填补了土体内原有的大孔隙,进而促进土颗粒之间更紧密地结合,导致大孔比例较少而中孔显著提高。

如图14(b)所示,不同掺量下单掺石灰及复合改良土的大孔比例相对于素土下降了5%~8%,微孔比例下降了5%左右;2%石灰改良土和4%石灰改良土的中孔比例分别增加了10%、12%,而复合改良土中孔比例增加了14%。这表明随着石灰掺量的增加,石灰改良土中的微孔和大孔有所下降,



(a) 不同掺量下单掺木质素纤维改良土



(b) 不同掺量下单掺石灰及复合改良土

图 14 不同配比改良土孔隙所占比例柱状图

Fig. 14 Columnar diagram of the proportion of pores in different proportions of improved soil

而中孔增加。当掺入纤维进行复合改良后,复合改良土中的微孔减少,中孔显著增加,大孔变化不明显。主要原因是石灰与土体发生化学反应生成的水化硅酸钙等胶结物质,这些物质能够填充原有的大孔和微孔,导致大孔和微孔比例下降,而木质素纤维的掺入进一步填充了土体内的大孔隙,导致复合改良土中的大孔比例最低。石灰提供的化学反应产物和木质素纤维提供的物理支撑、填充作用共同促进了中孔的形成,同时有效地控制了微孔和大孔的比例。

图15为不同配比改良土试样放大500倍及100倍的扫描电镜示意图。当纤维掺量为2%时,少量纤维分散在土颗粒之间,并与土颗粒相互联接,而纤维掺量为8%时,纤维在土颗粒之间相互交织。这表明纤维掺量不同,对其抗剪强度的增强方式也可能不同,当纤维掺量较低时,由于纤维间距较大(如图15(b)),无法形成有效的纤维网络,此时对黏聚力的贡献主要为离散纤维的一维拉筋作用。当纤维掺量逐渐增加时,纤维之间开始相互交错成网(如图15(c)),此时除了一维拉筋作用外,还会叠加三维拉筋作用,这就导致其抗剪强度在高纤维掺量时提升得更加明显。图15(d)为2%石灰改良土的

微观结构示意图,由于石灰掺量较少,其较少的胶凝物无法明显看出,单相较于图 15(a)依然能够看出土颗粒间的孔隙中有少量胶凝物附着。将图 15(e)与图 15(b)对比发现,纤维与土颗粒连接处存在胶凝物附着,这可以进一步增强了纤维与土颗粒之

间的联结强度。图 15(f)为复合改良土(最佳掺量比)的微观结构示意图,相较于图 15(c)可明显看出在纤维表面均附着有胶凝物,这导致纤维的表面由光滑变得更加粗糙,从而提高了纤维与土颗粒之间的摩擦力,增大了纤维与土颗粒之间的咬合作用。

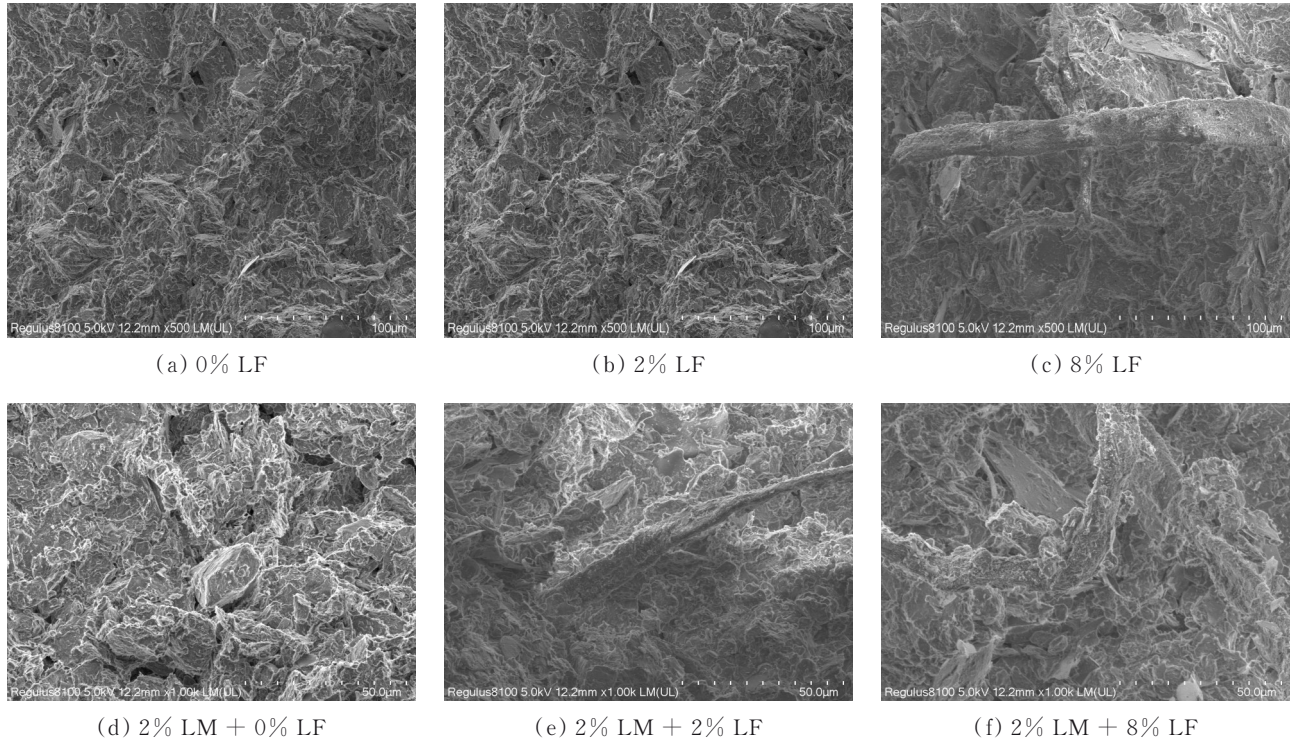


图 15 不同配比改良土试样扫描电镜图像

Fig.15 Scanning electron microscope images of improved soil samples with different proportions

4 结论

根据木质素纤维和石灰复合改良膨胀土的力学特性和微观结构试验分析,得到如下结论:

1)木质素纤维显著提高了膨胀土的抗压强度,最佳纤维含量为8%。相比之下,与2%石灰改良土相比,复合改良土(最佳掺量比)的抗压强度进一步提高了约49.66%。

2)8%木质素纤维改良土的最大黏聚力为210.53 kPa。与单掺2%石灰处理的土相比,复合改良土(最佳掺量比)的黏聚力提高了近50%。

3)2%木质素纤维改良土的膨胀性能有所改善,而8%木质素纤维改良土的无荷膨胀率超过素土。复合改良时,经过养护后的复合改良土的无荷膨胀率均在1%以内,表现为无膨胀性。

4)木质素纤维能够改善土体内部孔隙结构,随着掺量增加,改良土中的大孔比例减小,中孔比例增加。对于复合改良土,与单掺石灰改良土相比,复合改良土的中孔比例显著增加。

5)电镜扫描试验结果表明,木质素纤维能够通

过形成强度的网络结构填充土颗粒间的孔隙,从而有效改善土体的微观结构。此外,石灰的掺入进一步优化了改良土的微观结构,其生成的胶凝物质附着在纤维表面,增强了纤维与土颗粒之间的结合作用。

参考文献

- [1] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1839-1846.
SUN D A, ZHANG J R, LÜ H B. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1839-1846. (in Chinese)
- [2] 王澄菡, 查文华, 王京九. 膨胀土的胀缩机理及新型处理方法综述[J]. 路基工程, 2020(2): 6-11.
WANG C H, ZHA W H, WANG J J. Review on expansion and shrinkage mechanism and new treatment methods of expansive soil [J]. Subgrade Engineering, 2020(2): 6-11. (in Chinese)
- [3] 刘飞禹, 付晨, 余炜. 纤维加筋花岗岩残积土的动单剪特性[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024: 1-

10. (2024-07-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240724.1046.004.html>. LIU F Y, FU C, YU W. Dynamic simple shear characteristics of fiber reinforced granite residual soil [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024: 1-10. (2024-07-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240724.1046.004.html>. (in Chinese)
- [4] 蒋钊, 彭劼, 许鹏旭, 等. 微生物结合碳纤维加固钙质砂的高强度试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 64-73.
JIANG Z, PENG J, XU P X, et al. High strength test study on coral sand reinforced by microbe and fiber [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(5): 64-73. (in Chinese)
- [5] 周恩全, 崔磊, 姚缘, 等. 非饱和和橡胶粉土土水特征曲线及颗粒接触状态[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 104-112.
ZHOU E Q, CUI L, YAO Y, et al. Soil-water characteristic curve and particle contact state of unsaturated rubber silt [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 104-112. (in Chinese)
- [6] 靳奉雨, 王叶娇, 孙德安, 等. 不同龄期下石灰改良土持水特性的温度效应[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(3): 24-31.
JIN F Y, WANG Y J, SUN D A, et al. Temperature effect on the water retention curve of lime-treated soil during curing [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 24-31. (in Chinese)
- [7] POR S, NISHIMURA S, LIKITLERSUANG S. Deformation characteristics and stress responses of cement-treated expansive clay under confined one-dimensional swelling [J]. Applied Clay Science, 2017, 146: 316-324.
- [8] DARMIYANTI D, RACHMANSYAH A, MUNAWIR A, et al. Voltage optimization in expansive soil improvement with saline solution on swelling and shear strength [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1263(1): 012050.
- [9] 王玉林, 卢东, 徐宁. 木质素纤维对再生透水沥青混合料路用性能研究[J]. 公路, 2021, 66(2): 52-56.
WANG Y L, LU D, XU N. Effect of lignin fiber on the road performance of recycled pervious asphalt mixtures [J]. Highway, 2021, 66(2): 52-56. (in Chinese)
- [10] 谢明君, 温宇彤, 徐玲琳, 等. 木质素/玻璃纤维复合改性沥青混凝土路用性能提升效果研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(11): 1200-1206.
XIE M J, WEN Y T, XU L L, et al. Composite modification with cellulose fiber/glass fiber to enhance the pavement performance of asphalt concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11): 1200-1206. (in Chinese)
- [11] ORAKOGLU M E, LIU J K, LIN R, et al. Performance of clay soil reinforced with fly ash and lignin fiber subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2017, 31(4): 04017013.
- [12] FAN K, PEI Q, LIU L, et al. Strength and microstructure of a lignin fiber-reinforced expansive soil in cold regions [J]. Geosynthetics International, 2022, 29(6): 622-629.
- [13] MOSLEMI A, TABARSA A, MOUSAVI S Y, et al. Shear strength and microstructure characteristics of soil reinforced with lignocellulosic fibers-Sustainable materials for construction [J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129246.
- [14] 董吉, 陈筠, 邬忠虎, 等. 木质素纤维红黏土强度及变形特性试验研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(3): 421-427.
DONG J, CHEN J, WU Z H, et al. Experimental study on the shear strength and deformation characteristics of lignin-fiber red clay [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(3): 421-427. (in Chinese)
- [15] 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 Y H, CAI Y, OU M X. Experimental study on expansive soil improved by lignin fiber-high calcium fly ash composite [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(3): 978-985. (in Chinese)
- [16] 樊科伟, 严俊, 刘苓杰, 等. 木质素纤维改性季冻区膨胀土强度特性与微观结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 326-334.
FAN K W, YAN J, LIU L J, et al. Study on strength characteristics and microstructure of expansive soil treated with lignin fibers in seasonal frozen area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 326-334. (in Chinese)
- [17] JHA A K, SIVAPULLAIAH P V. Lime stabilization of soil: a physico-chemical and micro-mechanistic perspective [J]. Indian Geotechnical Journal, 2020, 50(3): 339-347.
- [18] 龚锦林, 柳厚祥, 王真. 石灰改良膨胀土压缩特性及力学特性研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 35-40.
GONG J L, LIU H X, WANG Z. Study on compression characteristics and mechanical properties of lime modified expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 35-40. (in Chinese)
- [19] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [20] 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.

[21] 徐维生, 张驰, 李丽华, 等. 稻壳纤维加筋水泥土强度试验及估测模型研究[J/OL]. 武汉大学学报(工学版), 2023: 1-11. (2023-10-12). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20231010.1507.002.html>.XU W S, ZHANG C, LI L H, et al. Study on strength test and estimation model of rice hull fiber reinforced cement-soil [J/OL]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023: 1-11. (2023-10-12). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20231010.1507.002.html>.(in Chinese)

[22] 王钰珊, 袁童, 雷学文. 椰壳纤维-MICP复合改良膨胀土膨胀特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(5): 67-71, 81.

WANG Y S, YUAN T, LEI X W. Expansion characteristics of the coir fiber-MICP composite improved expansive soil [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2024, 22(5): 67-71, 81. (in Chinese)

[23] SAHA A, GUPT C B, SEKHARAN S. Recycling natural fibre to superabsorbent hydrogel composite for conservation of irrigation water in semi-arid regions [J]. Waste and Biomass Valorization, 2021, 12(12): 6433-6448.

[24] HATTAMLEH OAL, RABABAH S, ALAWNEH A, et al. Verification of unified effective stress theory based on the effect of moisture on mechanical properties of fiber reinforced unsaturated soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 976-990.

[25] 王叶娇, 王有为, 靳奉雨, 等. 石灰改良土的土水特征曲线及其冻结特征曲线[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 967-973.

WANG Y J, WANG Y W, JIN F Y, et al. Soil-water characteristic curve and freezing characteristic curve of lime improved soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 967-973. (in Chinese)

[26] 孙德安, 汪健, 何家浩, 等. 原状扬州黏性土压缩特性与孔径分布[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 111-116.

SUN D A, WANG J, HE J H, et al. Compression characteristics and pore-size distributions of the undisturbed Yangzhou clayey soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 111-116. (in Chinese)

[27] 盛宴, 林焕生, 杜月林, 等. 腐殖土土-水特性及孔径分布特征研究[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(2): 20-27.

SHENG Y, LIN H S, DU Y L, et al. Study of soil-water and pore size distribution properties of the humus [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2024, 32(2): 20-27. (in Chinese)

(编辑 XXX)