

DOI: 10.11779/CJGE2024S20022

# 木质素改良黄土工程性质与加固机理

王 谦<sup>1,3,4</sup>, 王兰民<sup>1</sup>, 刘钊钊<sup>2,4</sup>, 钟秀梅<sup>\*1</sup>, 高中南<sup>1</sup>

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 4. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 为有效改善黄土的不良工程性质, 选择工业副产品木质素作为改良剂, 对黄土工程性能进行改善, 以满足工程对土体承载能力的要求。通过配置不同配比的木质素改良黄土, 测试了改良黄土的相对质量密度、界限含水率、最大干密度-最优含水率和无侧限抗压强度, 研究了素土和改良黄土的工程性质, 探讨了木质素用于改良黄土的可行性。并结合物理力学特性测试结果, 基于扫描电镜试验和X射线衍射试验, 从细观结构和矿物成分方面分析了木质素改良黄土的加固机理。结果表明: 与素压黄土相比, 木质素改良黄土的相对质量密度明显降低, 液限、塑限和塑性指数均减小, 最大干密度增大, 最优含水率有所下降。木质素掺量和养护龄期对改良黄土工程性质有显著影响, 养护龄期28 d、木质素掺量2%时, 改良黄土抗压强度最大, 相较于素压黄土强度提升32%。木质素对黄土的改良加固的机制主要包括木质素对黄土的填隙作用、胶结作用、黏土矿物强化作用、离子交换和双电层吸附作用。

**关键词:** 木质素; 改良处理; 抗压强度; SEM; XRD

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0150-06

**作者简介:** 王 谦 (1985—), 男, 博士, 研究员, 主要从事黄土动力学与黄土地震工程研究工作。E-mail: wangq0930@126.com

## Engineering properties and reinforcement mechanism of lignin-modified loess

WANG Qian<sup>1,3,4</sup>, WANG Lanmin<sup>1</sup>, LIU Zhaozhao<sup>2,4</sup>, ZHONG Xiumei<sup>1</sup>, GAO Zhongnan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. College of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, China; 4. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** To effectively improve its weak engineering properties, the industrial by-product lignin is selected to improve the strength of the loess. The specific gravity, Atterberg limit, maximum dry density-optimal moisture content, and unconfined compressive strength (UCS) of the lignin-modified loess are tested by configuring the modified loess with different lignin contents. The engineering properties of the lignin-modified and the compacted loess are studied. The feasibility of the lignin-modified loess is discussed. Based on the results of the SEM, XRD, physical and mechanical properties tests, the reinforcement mechanism of the lignin-modified loess is analyzed. The results show that compared with that of the compacted loess, the specific gravity of the lignin-modified loess is significantly reduced. The liquid limit, plastic limit and plasticity index are reduced. Moreover, the maximum dry density and the optimum moisture content decrease. The lignin content and curing age significantly affect the engineering properties of the modified loess. When the curing age is 28 days and the lignin content is equal to 2%, the UCS of the modified loess is the highest, which is 32% higher than that of the compacted loess. The reinforcement mechanism of the lignin-modified loess mainly includes the interstitial effects of the lignin on the loess, cementation, clay mineral, ion exchange and electric double-layer adsorption.

**Key words:** lignin; modified treatment; compressive strength; SEM; XRD

## 0 引言

黄土的特殊结构性决定了其具有极强的动力易损性和水敏性, 工程性能较差。黄土高原地形地貌条件复杂、新构造活动强烈, 历史上曾多次发生强震。黄

基金项目: 甘肃省地震局创新团队项目 (2020TD-01-01); 国家自然科学基金项目 (51778590); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费项目 (2023IESLZ5, 2021IESLZ03)

收稿日期: 2024-06-21

\*通信作者 (E-mail: xmzhong26@163.com)

土特殊的工程性质与黄土高原高危的地震活动背景决定了黄土高原地区与黄土有关的地质灾害频发, 对黄土地区人民生命财产安全、城乡建(构)筑物和基础设施安全构成了巨大威胁。

大量的科学的研究和工程实践证明, 黄土地基改良加固处理可有效解决建筑地基的变形沉降问题, 提高建筑地基承载力<sup>[1-3]</sup>。这些方法可在一定程度上提高黄土地基强度, 但也存在一些问题, 如资源浪费、环境污染, 或者处理成本相对高昂, 在一般工程中应用时存在一定的局限性。

木质素具有良好的黏结性、螯合性和抗腐蚀性, 能够有效增强散体材料的胶结强度, 且储量丰富可再生。国内外将木质素用于土体加固的研究工作早已开展<sup>[4-6]</sup>, 其作为改良剂可以有效降低建筑地基处理的成本, 具有良好的经济效益、社会效益和环境效益。然而目前对木质素改良黄土的工程性质研究较少涉及, 对木质素改良黄土的加固机理也尚不明确。本文通过相对质量密度、界限含水率、击实和无侧限抗压强度(UCS)等室内试验, 较为系统地对比研究了素土和木质素改良黄土的工程性质, 并基于扫描电镜试验和X射线衍射测试, 分析了改良黄土的细观结构特征和结构参数变化规律, 得出了改良黄土的主要矿物成分, 并综合物理力学特性试验结果, 对木质素改良黄土的加固机理进行了讨论。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验所用黄土取自宁夏西吉县, 由于黄土地区路基填料遵循就地取材原则, 即一般选用去除根植层的浅层黄土作为路基填料, 因此本研究中黄土的取土深度为3~3.2 m, 按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)<sup>[7]</sup>测试黄土基本物理性质, 结果如表1所示。黄土中砂粒、粉粒、黏粒含量分别为13.7%, 80.2%, 6.1%。

表1 黄土基本物理性质

Table 1 Basic physical parameters of test loess

密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/ %	塑性 指数	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水 率/%
1.35	5.2	9.5	1.78	14.6

试验所用木质素来源于河南洛阳某造纸厂生产过程中的副产品, 为棕褐色粉末状固体, 其中包括约60%~80%的木质素及其衍生物、少量纤维素、微量水分和其他杂质, 有一定的芳香气味, 具有较大黏性, 可溶于水, PH值为9.0, 呈碱性, 无毒性, 颗粒状结构。为明确该种木质素的化学成分组成和分子结构, 对木质素进行了傅里叶红外光谱分析(FTIR), 该木

质素中主要含醇羟基(-OH, 3385 cm<sup>-1</sup>)、苯环C=C键(653, 780, 159 cm<sup>-1</sup>)、烷烃(C-H(CH<sub>2</sub>), 1417, 2974 cm<sup>-1</sup>)、伯醇(R<sub>1</sub>-CH<sub>2</sub>-OH, 1051 cm<sup>-1</sup>)和仲醇(R<sub>1</sub>-CH(R<sub>2</sub>)-OH, 1090 cm<sup>-1</sup>)等活性官能团。

### 1.2 试验方法

黄土在室内风干、碾碎和过筛(2 mm), 根据预先设定的木质素与黄土的质量比(0%, 2%, 4%, 6%, 8%), 将木质素加入黄土中进行充分拌合, 随后根据击实试验得到的不同掺量木质素改良黄土的最优含水率, 分别向干拌均匀的混合土料中加入相应质量的蒸馏水, 再次充分拌合, 密封静置24 h待水分迁移均匀后备用。各类试验均依据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)进行。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 相对质量密度

木质素掺量对改良黄土相对质量密度的影响如图1所示。掺入木质素后, 改良黄土的相对质量密度迅速下降, 当掺量为2%时, 改良黄土的相对质量密度最小。研究表明, 土体相对质量密度和土的矿物成分密切相关, 土中含有大量有机质时, 土粒相对质量密度会显著减小。由于木质素是造纸工艺中产生的一种有机高分子化合物, 当黄土中掺入木质素后, 土体内由于有机质含量的增多而导致相对质量密度迅速下降, 随着木质素掺量的继续增大, 改良土的相对质量密度基本趋于稳定。

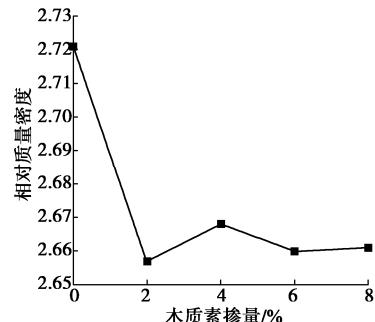


图1 不同掺量木质素改良黄土相对质量密度

Fig. 1 Specific gravities of lignin-modified loess

### 2.2 界限含水率

掺入木质素后, 改良黄土的塑限、液限和塑性指数均发生了较大变化, 如图2所示。改良黄土的液限和塑限随木质素掺量增加而减小。木质素掺量从0%增加至8%时, 改良黄土的塑限由14.5%降低至9.5%, 液限由24%降到16%。塑性指数也呈现出了明显的下降趋势, 相较于素压实黄土, 木质素掺量为2%, 4%, 6%, 8%的改良黄土塑性指数分别减小了21.1%, 25.3%, 31.6%, 31.6%。由于塑性指数的大小与土体的颗粒组成、矿物成分及土中水的离子成分和浓度以

及土颗粒表面的结合水膜厚度密切相关。木质素作为一种含有多种活性官能团有机材料,掺入木质素对黄土的颗粒形态、矿物成分和土中水的离子成分浓度影响较大;木质素包裹在黄土颗粒表面以及胶结颗粒使得颗粒粒径增大,比表面积相应减小;木质素中的阳离子促使改良土中的离子浓度增加,土颗粒表面的阳离子层变薄,使土体内的结合水含量下降,并且木质素促使土颗粒表面结合水膜的厚度减小,多因素耦合共同促使改良黄土塑性指数降低。

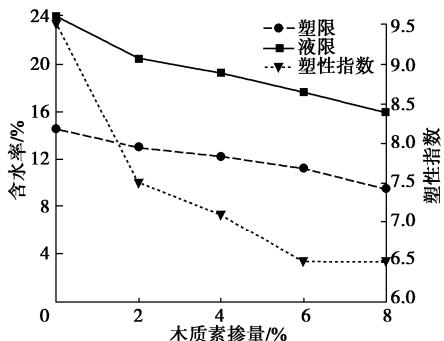


图2 不同掺量木质素改良黄土界限含水率

Fig. 2 Atterberg limits of lignin-modified loess

### 2.3 最大干密度和最优含水率

木质素改良黄土的轻型击实试验结果如图3所示,由图可得最大干密度、最优含水率随木质素掺量的变化规律。随着木质素掺量的增加,改良黄土的最大干密度不断增加,最优含水率总体呈现出下降的趋势。考虑到土体的击实特性和其内部结构具有密切联系,当木质素和黄土充分搅拌并经过压实处理后,木质素本身所具有的黏结性和螯合性会使黄土中的细小颗粒紧密黏结形成团聚体,同时,细小的木质素颗粒具有填充黄土孔隙的作用,减小了黄土孔隙体积,最终导致最大干密度的增加,这一点也在后续基于扫描电镜的细观结构分析中得到证实。此外,由于木质素自身所具有的吸附、分散、电性、表面自由能降低等作用,使土体内部原来被颗粒包裹的游离水释放出来,因此随着木质素掺量的增加,改良黄土的最优含水率下降。

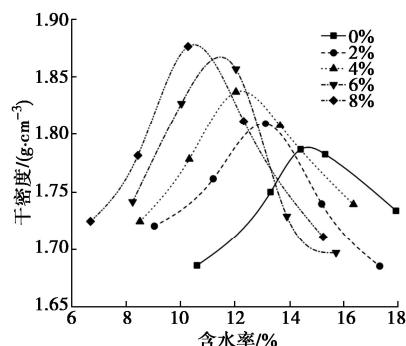


图3 木质素改良黄土最大干密度-最优含水率关系曲线

Fig. 3 Compaction curves of lignin-modified loess

### 2.4 抗压强度

通过对不同掺量和养护龄期的木质素改良黄土进行UCS试验,结果如图4,5所示。

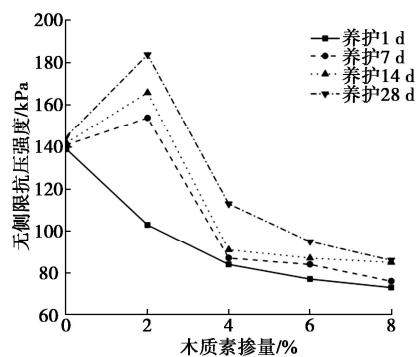


图4 不同养护龄期下抗压强度和木质素掺量的关系曲线

Fig. 4 Relationship between UCS and lignin content of modified loess with different curing ages

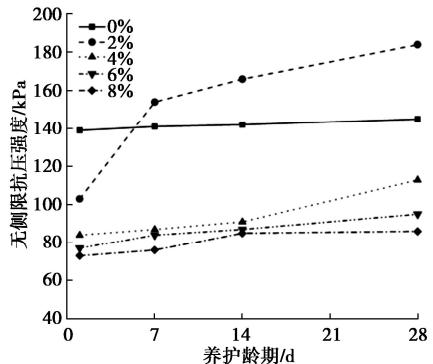


图5 不同木质素掺量下抗压强度和养护龄期的关系曲线

Fig. 5 Relationship between compressive strength and curing time of modified loess with different lignin contents

由图4可知,在养护龄期为7, 14, 28 d的条件下,改良黄土的无侧限抗压强度随着木质素掺量的增加均呈现出先增加后减小的趋势。而在养护龄期为1 d时,木质素改良黄土的抗压强度均低于素压黄土。木质素掺量为2%时,改良黄土的抗压强度达到最大,并在养护龄期为28 d时达到最大值184 kPa,相较于素压黄土的抗压强度提高了32%。掺量为4%, 6%, 8%的改良黄土抗压强度在所有养护龄期下均低于素压黄土,表明木质素掺量的持续增加并不会持续增强土体强度。因此,将工业副产品木质素用于改良黄土时应当严格控制掺量,当掺量大于2%后反而难以起到改良加固的效果,抗压强度降低。因为适当的木质素加入可以有效地胶结颗粒和填充孔隙,并增强土体双电层吸附作用从而提升黏聚力,增强抗压强度。但当掺量过大时,木质素本身黏结性和螯合性会促使木质素优先与自身结合,而不是胶结颗粒和填充孔隙,由胶结作用转变为“润滑作用”导致无法有效加固土体;同时土颗粒间的木质素颗粒增多,会加大土颗粒

间的距离, 导致颗粒间的引力降低, 土体颗粒更易于滑动, 反而降低土体内部黏聚力和抗压强度。

由图 5 可得, 不同木质素掺量的改良黄土的无侧限抗压强度均随着养护龄期的增加而增加。其中, 木质素掺量为 2% 的改良黄土抗压强度的变化最为明显: 养护龄期为 1 d 时, 改良黄土的抗压强度为 103 kPa, 低于素压实黄土; 养护龄期为 7 d 时, 改良黄土的抗压强度迅速增加, 强度较养护龄期 1 d 时提升 49%; 养护龄期为 28 d 时, 改良黄土的抗压强度达到最大, 相较于养护龄期为 1 d 时改良黄土的抗压强度提升 78%。且随着养护龄期的增加, 素压实黄土抗压强度未发生明显变化, 掺量 4%, 6%, 8% 的抗压强度提升极为有限, 且均小于素压实黄土的抗压强度。因此, 改良黄土养护龄期不宜过短, 短期养护情况下木质素还未与黄土充分反应结合, 改良加固效果十分有限。

## 2.5 细观结构特征

结合无侧限抗压强度试验结果, 选择养护龄期 28 d 下的掺量为 0%, 2%, 4%, 6%, 8% 的改良黄土试样以及 2% 掺量下养护龄期为 1, 7, 14, 28 d 的改良黄土试样进行扫描电镜试验。图 6 为不同掺量的木质素改良黄土在养护 28 d 后的放大 500 倍的细观结构图像。图 7 为木质素掺量为 2% 的改良黄土在不同龄期下的放大 500 倍细观结构图像。

根据图 6 (a), 经过压实后的素黄土尽管结构较为紧密, 但颗粒间依然存在大、中孔隙, 且颗粒间连接以搭接为主, 颗粒间团絮状胶结物质及团粒较少。根据图 6 (b) ~ (e), 木质素使得土体内团絮状胶结物质和团粒明显增多, 说明木质素对黄土颗粒起到了良好的胶结作用, 加固了颗粒骨架, 且细小的木质素颗粒填充了黄土中的孔隙, 使得改良土的孔隙率减小, 从而增强了土体强度。

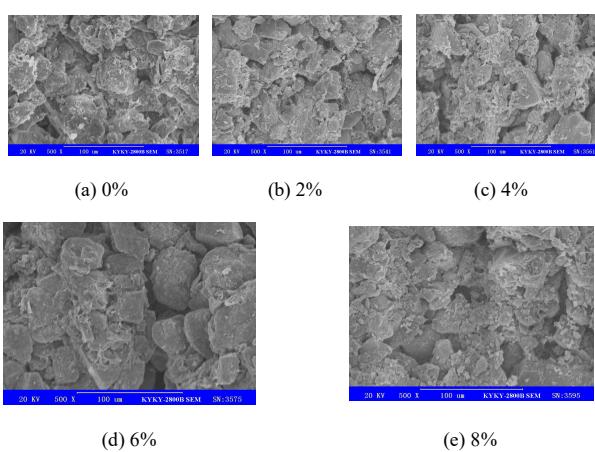


图 6 养护龄期 28 d 不同掺量改良黄土细观结构图像

Fig. 6 Microfeatures of lignin-modified loess

根据图 7, 养护龄期为 1 d 和养护龄期为 7, 14,

28 d 的改良黄土在团絮状胶结物质和团粒数量上有较大差异, 且在养护龄期大于 7 d 时改良黄土的颗粒之间逐渐形成了一种网状结构胶结物, 即颗粒之间分布的细密纤维状物质 (图 8)。根据无侧限抗压强度试验结果, 养护龄期为 7 d 时, 木质素掺量为 2% 的改良黄土无侧限抗压强度较养护龄期 1 d 时显著增大, 说明木质素对黄土的孔隙填充、颗粒胶结以及网状结构胶结物产生和稳固需要一定的时间。此外, 此种网状结构胶结物不仅可对黄土颗粒起到黏结和锚固作用, 从而使土骨架强度得到提升, 还可填充于孔隙之内, 增加土体的密实度, 对未充分填充的孔隙起到支架作用, 进一步增加了土体结构的稳定性和强度。

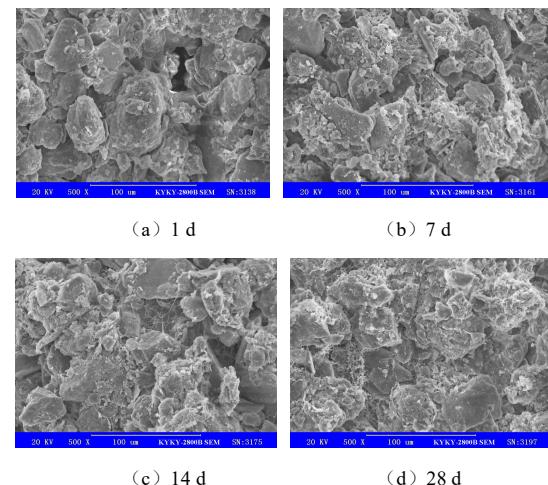


图 7 掺量 2% 不同养护龄期改良黄土细观结构图像

Fig. 7 Microfeatures of lignin-modified loess with lignin content of 2% under different curing ages

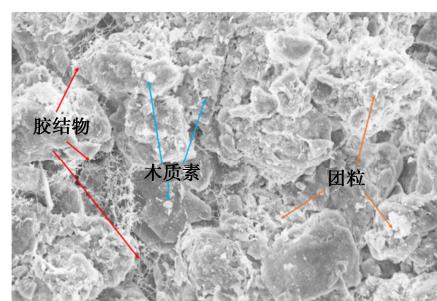


图 8 2% 掺量改良黄土胶结物及团粒

Fig. 8 Cementation of lignin-modified loess

利用 PCAS 孔隙图像识别与分析系统<sup>[8]</sup>对不同木质素掺量和养护龄期的改良黄土 SEM 图像进行统计分析, 得出木质素改良黄土的孔隙率, 如图 9 所示。根据图 9 (a), 养护龄期 28 d 条件下素压实黄土的孔隙率为 16.5%, 掺入木质素后, 孔隙率显著下降, 在掺量 2% 时达到最低值为 10.2%, 随后逐渐增加。根据图 9 (b), 随着养护龄期的增加, 改良黄土孔隙率呈现出逐渐下降的趋势, 从养护 1 d 到 28 d, 孔隙率从

13.3%逐步降为10.2%。此结果证明木质素可有效填充孔隙,降低孔隙率,增加密实度,且木质素掺量和养护龄期对其孔隙填充效果有显著影响。孔隙率分析结果与前文抗压强度和细观结构性定性分析结果具有一致性。

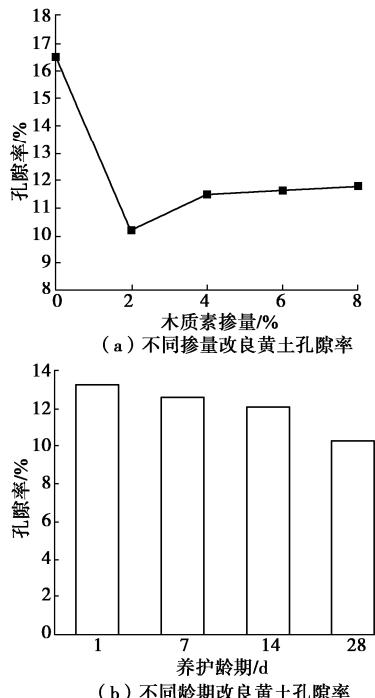


图9 木质素改良黄土孔隙率

Fig. 9 Apparent void ratios of lignin-modified loess

## 2.6 矿物成分

木质素改良黄土试样的X射线衍射试验结果如图10所示。图中给出了养护龄期28 d条件下木质素掺量为0%, 2%, 8%的X射线衍射图像。通过对X射线衍射图进行对比分析发现,不同掺量木质素改良黄土的衍射峰值出现位置基本相同,且没有新衍射峰值出现,表明相较于原状土,木质素改良黄土并未生成新的矿物成分。

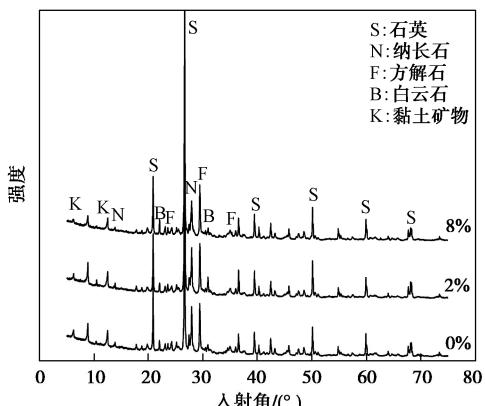


图10 改良黄土X射线衍射图像

Fig. 10 XRD results of lignin-modified loess

## 2.7 木质素改良黄土加固机理

基于SEM试验和XRD试验结果,并结合木质素改良黄土工程性质以及前人研究所得,木质素改良黄土的加固机理和木质素与黄土颗粒的相互作用密切相关。木质素加入黄土后,其细小的颗粒填充于黄土中原有的大、中孔隙中,致使改良黄土的孔隙率明显下降,大、中孔隙转变为小、微孔隙,土体趋于密实、强度提高。由于木质素具有良好的黏结性和螯合性,能够有效改善散体结构胶结性能,从而促使黄土中细小的颗粒黏结形成团粒且木质素附着于黄土原有颗粒的连接处,使得土颗粒之间的胶结作用进一步增强,从而有效提升了黄土的骨架强度。此外,网状结构胶结物对黄土颗粒起到黏结和锚固作用,并填充于孔隙内增加土体的密实度,还可对未充分填充的孔隙起到支架作用,进一步增加了土体结构的稳定性。木质素改良黄土中的黏土矿物含量有较大增加,其所具备的良好胶结性可提升颗粒间的胶结强度,增强改良黄土强度。此外,改良黄土通过水解作用和仲醇羟基上的氧原子质子化作用,促使木质素的正电荷和颗粒表面的负电荷中和,缩小了双电层厚度,且木质素携带的 $\text{Na}^+$ 水解后与土中的 $\text{Ca}^{2+}$ 进行离子交换,也有助于土体细微颗粒形成团粒,从而改善土体的胶结性。

## 3 结论

(1)相较于素压黄土,木质素改良黄土的相对质量密度明显降低,液塑限和塑性指数均有所降低。随着木质素掺量的增加,改良黄土的最大干密度逐渐增加,最优含水率总体下降。

(2)养护龄期28 d、木质素掺量2%的改良黄土抗压强度明显大于其他养护龄期和掺量下的改良黄土。木质素改良黄土应当严格控制掺量和龄期,当掺量过大和养护龄期过短时,会削弱木质素的改良加固效果。

(3)木质素对黄土的改良加固机制包括木质素对黄土的填隙作用、胶结作用、黏土矿物强化作用、离子交换和双电层吸附作用。

## 参考文献:

- [1] 杨博瀚,翁兴中,刘军忠,等.改性聚丙烯纤维和水泥加固黄土的力学性能[J].建筑材料学报,2016,19(4): 694-701.  
(YANG Bohan, WENG Xingzhong, LIU Junzhong, et al. Mechanical properties of modified polypropylene fibre reinforced cement stabilized loess[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 694-701. (in Chinese))

(下转第215页)

- [6] KITAZUME M, TERASHI M. The Deep Mixing Method[M]. London: CRC Press, 2013.
- [7] 徐 晗, 饶锡保, 吕文志, 等. 格栅状搅拌桩复合地基静载试验数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 102-104, 120. (XU Han, RAO Xibao, LÜ Wenzhi, et al. Numerical simulation on static load test of grid-structured cement mixing pile composite foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5): 102-104, 120. (in Chinese))
- [8] 吕文志, 饶锡保, 徐 晗, 等. 格栅状搅拌桩复合地基静载试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 65-69. (LÜ Wenzhi, RAO Xibao, XU Han, et al. Static load tests on composite foundation of grid-shaped CDM piles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 65-69. (in Chinese))
- [9] YAMASHITA K, SHIGENO Y, HAMADA J, et al. Seismic response analysis of piled raft with grid-form deep mixing walls under strong earthquakes with performance-based design concerns[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(1): 65-84.
- [10] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zongze. Geotechnical Principle[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [11] YIN J H, ZHANG F. Physical modeling of a footing on soft soil ground with deep cement mixed soil columns under vertical loading[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2010, 28(2): 173-188.

(编校: 黄贤沙)

(上接第 154 页)

- [2] WANG Q, WANG L M, ZHONG X M, et al. Dynamic behaviour and constitutive relationship of saturated fly ash-modified loess[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 25: 1302 - 1317.
- [3] 张 耀, 胡再强, 陈 晖, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 681-688. (ZHANG Yao, HU Zaiqiang, CHEN Hao, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 681-688. (in Chinese))
- [4] INDRARATNA B, MUTTUVEL T, KHABBAZ H. Modelling the erosion rate of chemically stabilized soil incorporating tensile force-deformation characteristics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(1): 57-68.
- [5] KONG X H, SONG S G, WANG M Y, et al. Experimental research of low liquid limit silt stabilized by lignin in the flooding area of Yellow River[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(6): 5211-5217.
- [6] YANG B, ZHANG Y, CEYLAN H, et al. Assessment of soils stabilized with lignin-based byproducts[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 17: 122-132.
- [7] 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))
- [8] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers & Geosciences, 2013, 57: 77-80.

(编校: 胡海霞)