

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.103



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



木质素改良膨胀土的工程特性及微观机理

王欢, 曹素娟, 曹义康, 邱翱博
(河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004)

摘要:为了探究木质素对新乡地区弱膨胀土的作用效果,通过室内试验、ESEM(环境扫描电子显微镜)试验研究了不同掺量木质素改良新乡地区弱膨胀土的物理性质及力学特性,对不同掺量改良土体微观结构特征及其孔隙形态特征进行定性描述与量化表征,并基于XRD(X射线衍射)试验结果探讨了改良土体中矿物成分的变化,从而揭示木质素与土体间的相互作用机理。试验结果表明:采用木质素改良膨胀土时,3%木质素抑制膨胀土膨胀性效果最好,且此时土体抗压强度最高,超过最优掺量后,土体抗压强度反而降低。土体中孔隙结构复杂,孔隙排列混乱无秩序、定向性较差,木质素胶结物可以填充土体孔隙使其微观结构更加密实。木质素在膨胀土中起胶结作用,并不能与膨胀土反应生成新的矿物成分,与土作用时稳定性较好,属于物理改良。木质素作为一种高效、环保的改良剂,可有效改善膨胀土的基本工程特性,值得深入研究。

关键词:改良土;膨胀土;木质素;微观特性;改良机理

中图分类号:TU443 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2024)06-0009-07

Engineering characteristics and microscopic mechanism of lignin improved expansive soil

WANG Huan, CAO Sujuan, CAO Yikang, QIU Aobo

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

Abstract: In order to explore the effect of lignin on weak expansive soil in Xinxiang area, the physical and mechanical properties of weak expansive soil in Xinxiang area with different lignin contents were examined by laboratory test and ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) test. The microstructure characteristics and pore morphology characteristics of the improved soil with different lignin contents were qualitatively described and quantitatively characterized. Based on the XRD (X-Ray Diffraction) testing results, the changes of mineral composition in the improved soil were discussed, so as to reveal the interaction mechanism between lignin and soil. The test results show that when lignin is used to improve expansive soil, 3% lignin has the optimal effect on inhibiting the expansion, and simultaneously the compressive strength reaches the maximum, while the compressive strength of soil decreases after exceeding the optimal dosage. The pore structure in the

收稿日期:2022-06-04

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(18A580002);开封市科技发展计划项目(1801004);甘肃省交通运输厅科研项目(2013-07)

作者简介:王欢(1982-),男,博士,主要从事特殊土处理、道路工程研究,E-mail:happy_king0924@sina.com。

Received: 2022-06-04

Foundation items: Key Scientific Research Project of Higher Education Institutions of Henan Province (No. 18A580002); Science and Technology Development Program of Kaifeng (No. 1801004); Research Project of Gansu Provincial Department of Transport (No. 2013-07).

Author brief: WANG Huan (1982-), PhD, main research interests: special soil treatment, road engineering, E-mail: happy_king0924@sina.com.

soil is complex, the pore arrangement is disordered and the orientation is less satisfactory. The lignin cement can fill the soil pores to make its microstructure more dense. Lignin plays a cementing role in expansive soil, and cannot react with expansive soil to form new mineral components. It has satisfactory stability when interacting with soil, which belongs to physical improvement. As an efficient and environmentally friendly modifier, lignin can effectively improve the basic engineering properties of expansive soil, of which further study is promising.

Keywords: improved soil; expansive soil; lignin; micro characteristics; improvement mechanism

膨胀土是一种特殊黏性土,其主要矿物成分有蒙脱石、高岭石、伊利石等^[1],在中国多个省份均存在^[2],且分布面积十分广泛,高达 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[3]。由于膨胀土成因类型复杂且具有吸水膨胀和失水收缩的特性,在反复的吸水膨胀和失水收缩过程中,膨胀土内部结构往往发生变形,产生大量裂隙,进而使得土体结构遭到破坏^[4],造成土体承载力、抗剪强度骤然下降^[5],从而给工程项目带来巨大的安全隐患,严重威胁人们的生命财产安全。在膨胀土广泛存在的地区进行工程建设时,为了避免膨胀土带来的潜在威胁,往往采用添加外加剂的方法对膨胀土进行改良。以水泥^[6]、粉煤灰^[7]、石灰^[8]等作为外加剂改良膨胀土工程特性目前已经取得了良好效果,但具有一定的弊端。传统外加剂改良土体容易给周围环境及土体带来严重污染,不符合绿色发展的基本方针,为了消除传统外加剂的弊端,寻求一种经济、绿色环保的外加剂至关重要。

木质素是造纸产业的副产品之一,是一种天然、经济环保的材料^[9]。学者们对木质素改良土体的研究已经取得了诸多成果。王明岳等^[10]研究发现,木质素能减小济南低液限粉土空隙,提高土体最大干密度及无侧限抗压强度。Tingle等^[11]采用木质素磺酸盐分别对粉砂和黏土进行改良,木质素主要通过填充土体内孔隙、离子交换和胶结作用对土体进行改良。于宝富等^[12]对比了木质素磺酸钙(木钙)与木质素磺酸钠(木钠)对高液限黏土的改良效果,结果表明,木钙改良高液限黏土的抗压强度效果更好。Ceylan等^[13]探讨了生物燃料副产物木质素在固化土体中的应用,发现木质素能够提高土体强度,且满足路基工程建设要求,但掺量过高强度反而会下降。张涛等^[14]研究发现,木质素在一定范围内可以提高粉土的强度,且强度与pH值呈线性关系;木质素能够提高土体的致密性。并从微观结构方面揭示了木质素与土体间的作用机理。贺智强等^[15]利用木质素磺酸盐加固黄土,结果表明,木质素磺酸钙固化黄土效果明显,而木质素磺酸钠则相反;木质素磺酸钙加入土体后,能够提高土体的抗压强度和抗拉强度、改善黄土的崩解特性、降低其

渗透性。Indraratna等^[16]研究发现,用木质素磺酸盐处理后土的抗剪强度、刚度等性能均有所提高。另外,黏土中矿物在黏土的稳定中起着重要作用,其稳定机理主要是由于木质素磺酸盐-黏土通过静电反应过程形成非晶态化合物。

目前,中国关于木质素改良膨胀土方面的研究不多。笔者采用自由膨胀率试验、无荷载膨胀率试验、重型击实试验、无侧限抗压强度试验、微观扫描电镜试验、XRD衍射实验,对木质素改良膨胀土的胀缩性以及力学特性进行试验研究,探讨木质素改良膨胀土的可行性,并从微观角度探讨木质素改良土的微观结构特征,进而研究木质素与土体间相互作用的机制。

1 试验

1.1 试验材料及方法

试验用膨胀土土样选自河南省新乡市潞王坟段两泉路与新中大道交界点附近,潞王坟段以弱膨胀土为主,其次为中、强膨胀土,取土深度为0.5~1.5 m^[17]。对膨胀土样进行室内土工试验,试验结果如表1所示。

表1 膨胀土基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of expansive soil

最优含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)	液限 W_L /%
16.94	1.67	33.6
塑限 W_p /%	塑性指数 I_p /%	自由膨胀率/%
16.2	17.4	49.6

测得膨胀土自由膨胀率为49.6%,根据规范^[18],可以判断试验土样为弱膨胀土。

试验用木质素(lignin)采购于河北省灵寿县玖宝建材销售部,粉剂颜色为黄褐色,有轻微芳香气味,主要成分为 β -萘磺酸钠甲醛缩合物,易溶于水,水溶液pH值为10.8,呈碱性,常作为混凝土减水剂使用,木质素粉末及水溶液如图1、图2所示。

1.2 试验方案

将取回的天然膨胀土烘干、碾碎、过2 mm筛后,在标准条件下,将膨胀土分别与1%、3%、5%、7%木质素混合均匀,分别进行重型击实试验、无荷

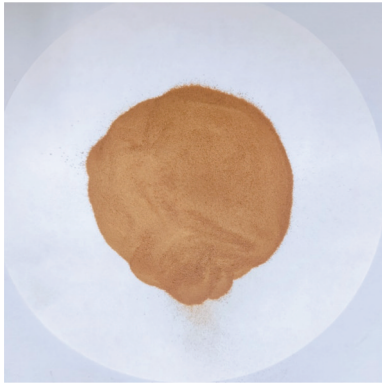


图1 木质素粉末

Fig. 1 Lignin powder

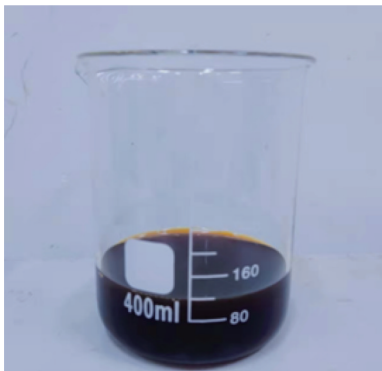


图2 木质素水溶液

Fig. 2 Lignin aqueous solution

载膨胀率试验、无侧限抗压强度试验。试验步骤按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[19]进行。

微观试验仪器采用环境扫描电子显微镜(FEI Quanta 250)。将不同掺量的改良膨胀土养护7 d,取尺寸5 mm×5 mm×2 mm的试块各一个,在40 °C烘箱内烘干48 h。首先对土样表面进行喷金处理,并保证喷涂均匀,然后放进扫描电镜仓里抽真空,对土样进行电镜扫描试验,得到放大2 000倍的微观扫描图像。

利用PCAS(Pores and Cracks Analysis System)软件对微观图片进行图像二值化处理与孔隙识别。首先将图片导入系统,然后通过分割阈值对SEM图像进行二值化处理,调整合适的灰度值进行分割优化,设置Element radius(元素半径)为2.1 pixel,Minimum area(最小面积)为50 pixel,最后统计得到土体孔隙的定向概率熵、分形维数、形状系数、孔隙度、平均面积等参数。

称取养护7 d龄期下的改良膨胀土试样50 g,对其进行风干处理后过0.075 mm筛,采用德国布鲁克AXS有限公司的Bluker D8 ADVANCE型X射线衍射仪(X-ray Diffraction)对土样晶体结构进行物性表征。测试条件:扫描范围10°~80°,光源Cu K α 辐射,波长 λ 近似为0.154 nm。

2 试验结果与分析

2.1 木质素改良膨胀土击实特性

图3、图4为不同配比木质素加入膨胀土后的击实试验结果。从图3可看出,改良土的干密度峰值均大于膨胀土,5种土样的干密度均呈先升后降趋势。从图4可看出,随着木质素的加入,改良土的最大干密度先不断增加后降低。掺量为3%时最大干密度达到最大值1.73 g/cm³,超过3%后呈逐渐下降态势,但总体改良土最大干密度仍大于素膨胀土。木质素掺入比分别是1%、3%、5%、7%时,改良土的 ρ_{\max} (最大干密度)与素土相比分别增大了0.03、0.06、0.03、0.02 g/cm³。这表明木质素的添加使膨胀土的 ρ_{\max} 增加,这是因为木质素可以黏结土颗粒形成团聚体,填充孔隙。但过多木质素的加入反而会降低土体 ρ_{\max} ,主要是因为过量木质素的存在会阻碍土颗粒间的接触,团聚体增多,但团聚体间空隙增大,从而降低土体密实度。从图4还可看出,改良土的最优含水率随木质素掺量的增加呈不断降低的趋势,当木质素掺量为1%、3%、5%、7%时,改良土的最优含水率与素土相比分别下降了0.24%、0.58%、0.84%、1.00%。这与木质素本身性质有关,在工程中木质素常常作为混凝土减水剂使用,因此,木质素的加入会降低混合

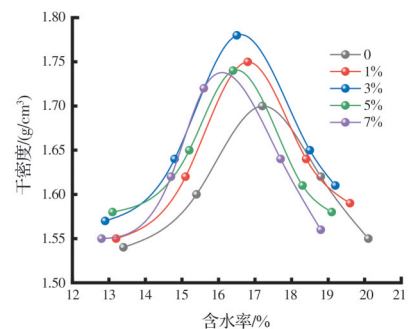


图3 木质素改良土击实曲线图

Fig. 3 Lignin improved soil compaction curves

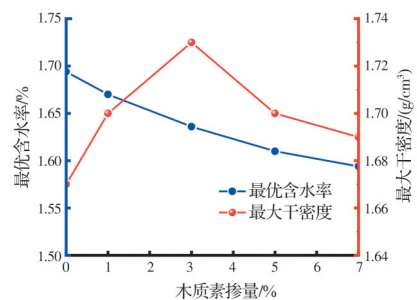


图4 木质素掺量与改良土最优含水率、最大干密度关系曲线图

Fig. 4 Curves of relationship between lignin content and optimum moisture content and maximum dry density of improved soil

料的最优含水率。

2.2 木质素改良膨胀土膨胀性

选取试验进行72 h后的无荷载膨胀率作为基准,对不同木质素掺量下改性膨胀土膨胀速率进行分析,从图5可以看出,改良膨胀土的膨胀速率可大致分为3个阶段:急剧膨胀阶段、慢速膨胀阶段、膨胀稳定阶段。在注入纯水后6 h以内,改良膨胀土处于快速膨胀阶段,此时膨胀性急速上升,无荷载膨胀率从0分别上升至6.5%、5.7%、4.4%、4.5%、4.8%,注入纯水6~24 h,相较于前6 h,无荷载膨胀率增长缓慢,注入纯水72 h后,逐渐趋于稳定。并且可以发现,加入木质素后,相较于素膨胀土,改良膨胀土的膨胀速率和增长幅度均有显著降低。木质素掺量为3%时,对无荷载膨胀率的抑制效果最为明显。这主要是因为木质素的加入限制了外界水分向土体内的渗入,导致土体吸水率降低,使得改良后的土体膨胀率降低。

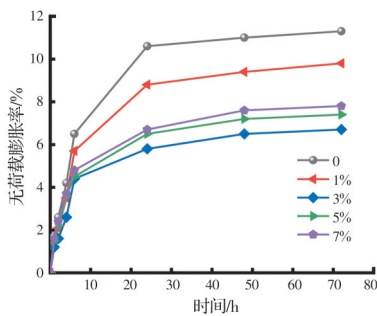


图5 无荷载膨胀率时效图

Fig. 5 Time-effect diagram of load-free expansion rate

2.3 木质素改良膨胀土力学特性

由图6可以看出,在1%~3%范围内,木质素改良土抗压强度逐步提高,木质素掺量为3%时抗压强度达到峰值,超过3%时,土体抗压强度反而有所降低。这表明适当的木质素加入可以有效填充土体中孔隙,将土颗粒胶结在一起,从而提升土体抗压强度。但当超过最佳掺量时,可能会造成土体内部木质素存在堆叠、聚集现象,促使木质素之间的相互结合,使得土颗粒间距离变大,降低土颗粒间

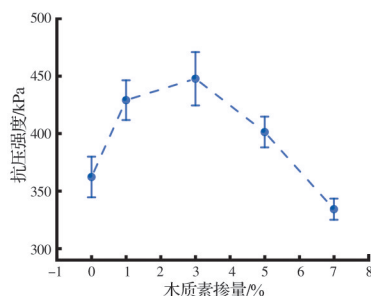


图6 木质素掺量与改良土抗压强度关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between lignin content and compressive strength of improved soil

黏聚力与吸引力,从而降低土体抗压强度。因此,适量的木质素对膨胀土进行改良,可以提高膨胀土的峰值抗压强度,超过一定范围时,土体抗压强度反而降低。

3 木质素改良膨胀土机理分析

为了探究膨胀土改良前后微观结构变化规律,对不同木质素掺量的改良土样进行微观扫描电镜试验,图7所示为木质素改良膨胀土放大2 000倍微观扫描图像(左)及PCAS处理后孔隙分布结果(右)。

3.1 ESEM微观结构分析

由图7可以看出,素膨胀土中土颗粒排列松散、杂乱堆积,存在许多较大的架空孔隙,其内部结构较为疏松,颗粒间连接处有较多裂缝出现,导致颗粒间连接作用差,土体结构不够致密、较为松散。随着木质素的加入,土颗粒间孔隙被木质素填充,土颗粒联结成团聚体,放大后发现,相较于素膨胀土,土体结构变得更加致密。当掺量增加到3%时,可以看到土体中较大孔隙逐渐消失,大量小团聚体相互靠拢、聚集形成较大团聚体,这是由于土体内部形成的絮状胶结物进一步填充团聚体间空隙,使得土体结构变得更加密实,这也表明土颗粒间的联结能力变得更强。然而当木质素掺量增加至5%、7%时,可以发现土体间空隙逐渐增大,原因是过多木质素使得木质素-木质素相互接触增多,土颗粒-土颗粒、木质素-土颗粒间的接触减少,阻碍了土颗粒间的相互接触,使得木质素改性膨胀土结构间出现明显的交错重叠现象,从而导致土体结构密度降低。

对比不同木质素掺入比的5种土样可以发现,3%木质素对于膨胀土的微观结构作用效果最好,木质素胶结物可以有效填充膨胀土颗粒间空隙、改善颗粒级配,使改良土体微观结构更为致密,整体性、稳定性更好。

利用PCAS软件对土体微结构图像进行分类测量,提取孔隙的定向概率熵、分形维数、形状系数、孔隙度、平均面积等基本微观参数。

1) 定向概率熵^[20]

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \lg_n(P_i) \quad (1)$$

式中: H 为定向概率熵; P_i 为孔隙在某个区间内出现的概率; n 为区间个数,将方向区间按 10° 分成18个部分, $n=18$ 。

2) 分形维数^[21]

$$\lg C = (D_f/2) \cdot \lg S + c_1 \quad (2)$$

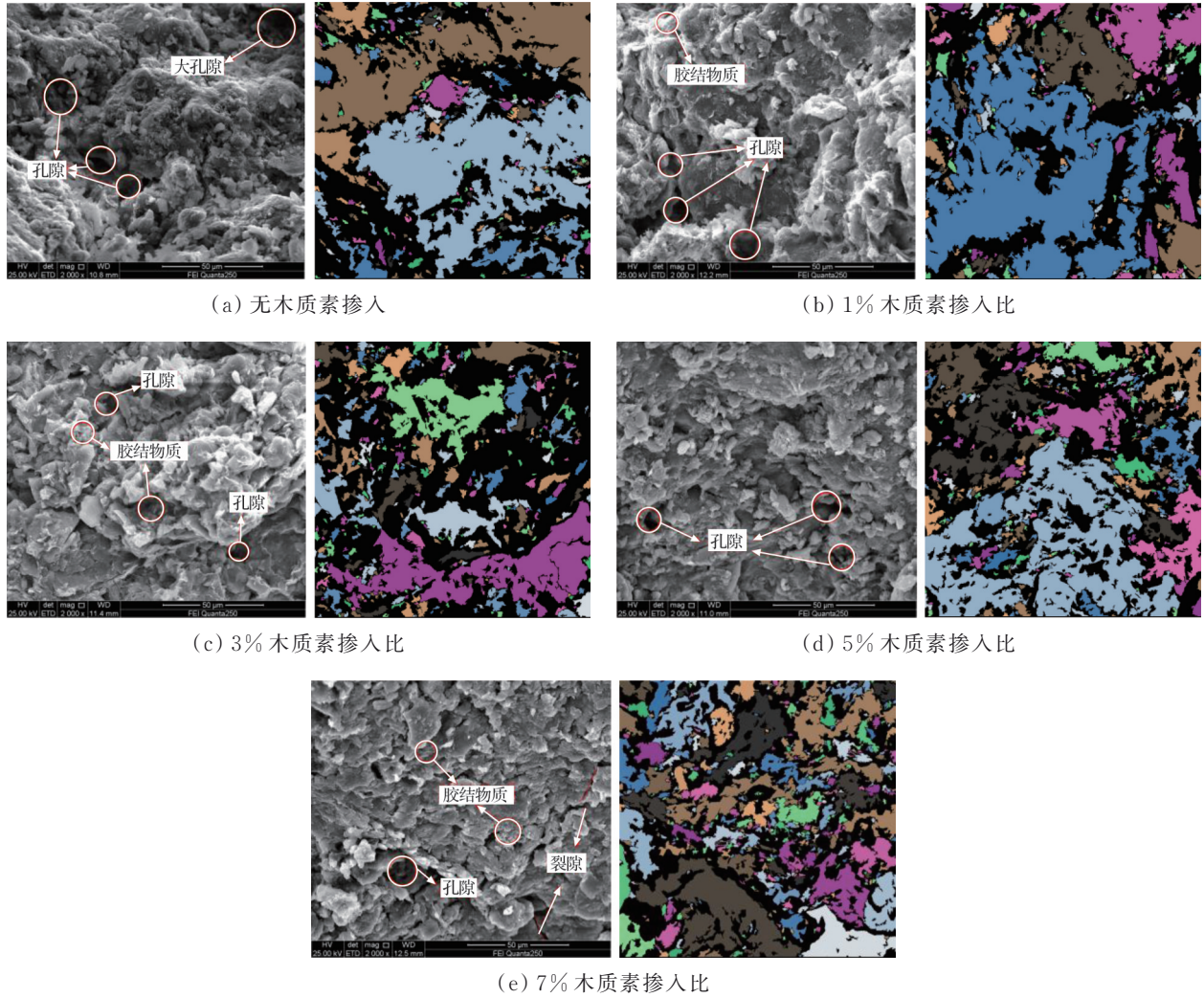


图 7 不同木质素掺量下膨胀土、改良土微观结构及 PCAS 处理后孔隙分布图像

Fig. 7 Microstructure of expansive soil and improved soil with different lignin contents and pore distribution image after PCAS treatment

式中： D_f 为分形维数； C 为孔隙周长； S 为孔隙面积； c_1 为常数。

3) 形状系数^[21]

$$f_i = 4\pi S / C^2 \quad (3)$$

式中： f_i 为形状系数。

计算得到孔隙参数如表 2 所示。

从表 2 可以看出,随着木质素的加入,土样的定向概率熵、分形维数、形状系数均无明显变化。土

表 2 不同木质素掺量下土体孔隙统计参数

Table 2 Pore statistical parameters of soil under different lignin contents					
配比	定向 概率熵	分形 维数	形状 系数	孔隙 度/%	平均面积/ 像素
(0,0)	0.950 2	1.254	0.431	58.71	1 769.68
(1,0)	0.986 6	1.234	0.436	61.72	1 709.74
(3,0)	0.987 2	1.253	0.416	41.46	884.03
(5,0)	0.973 7	1.278	0.389	55.88	1 352.77
(7,0)	0.969 0	1.278	0.410	57.57	1 036.46

体孔隙的定向概率熵均在 0.95 左右,表明土体中颗粒排列混乱无秩序,颗粒的定向性较差,也意味着颗粒间接触点较多、孔隙较少,土体结构较密实。土体孔隙分形维数为 1.23~1.28,表明孔隙结构复杂性较高。孔隙平均形状系数较低,范围在 0.38~0.44 之间,表明孔隙轮廓结构比较复杂。

此外可以看到,土体微观结构孔隙度、孔隙平均面积的变化规律与微观图像定性分析结论基本一致。随着木质素的加入,土体的孔隙度及孔隙平均面积有所变化,改良土的孔隙度、孔隙平均面积总体上都小于素土,且在木质素掺量为 3% 时达到最小,说明此时土体中孔隙较少,结构比较密实。

土体结构越密实,抗压性能越好,外界水分进入土体的过程就越受到限制,这也解释了改良土膨胀性降低、抗压强度提高的原因。

3.2 物相分析

为了确认木质素与膨胀土作用是否有新矿物

生成,对膨胀土及木质素改良膨胀土进行XRD衍射试验,并对两组衍射图谱利用jade 6.0软件对土体内各组成矿物成分进行分析。XRD测试分析结果如图8所示。

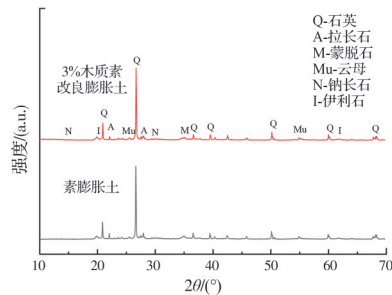


图8 膨胀土及木质素改良土XRD衍射图谱

Fig. 8 XRD patterns of expansive soil and lignin improved soil

从膨胀土及木质素改良膨胀土的XRD衍射图谱可以发现,木质素的加入并没有使木质素改良土产生新的峰强,峰强也没有产生明显的偏移,膨胀土与改良土中矿物成分较多是石英、拉长石、伊利石。这表明,掺入木质素后,土体内部并没有新矿物产生,说明木质素不与膨胀土发生化学反应,其在膨胀土中起到胶结、黏聚的作用,能够填充颗粒间孔隙和联结土颗粒,提高土体的致密性、整体性,改良土体时稳定性较好,这种改良效果属于物理变化。然而在加入木质素后矿物晶体的峰强都有所降低。Alazigha等^[22]认为,这可能是由于木质素吸附在土体矿物表面,木质素胶结物限制了原子平面的特征衍射,并且阻止了水分进入黏土基质,从而抑制了土体膨胀。

4 结论

从试验结果可以看出,加入木质素后,膨胀土的击实特性、膨胀性、抗压性等工程性质有所改善。

1)木质素可以提高膨胀土的最大干密度,降低其最优含水率,使得土体更易压实,进而对土体的抗压强度产生影响,使得工程性质得到改善。木质素掺量3%时抗压强度达到峰值,相比于素膨胀土,改良土抗压强度值提高了25.3%,超过最优掺量时,土体抗压强度反而降低。

2)木质素可以降低膨胀土的膨胀性能,并且木质素掺量为3%时,膨胀性降至最低,无荷载膨胀率降低了4.6%。掺量过高时,对胀缩性的抑制效果并不明显,但相比于素膨胀土膨胀性仍然有所下降。

3)适量木质素可以填充膨胀土内部孔隙,并且在土体内部产生木质素胶结物填充孔隙、包裹土颗

粒,优化土体结构,使得土体结构变得更加密实。土体孔隙定量分析结果发现:土体中孔隙形态复杂,孔隙排列混乱无秩序,定向性较差。适量木质素的加入可以降低膨胀土的孔隙度、平均孔隙面积。土体孔隙越少,结构越密实,这也是土体膨胀性降低、强度提高的原因。木质素在膨胀土中起到胶结作用,能够填充孔隙、联结土颗粒,提高土体的整体性,属于物理变化。

参考文献

- [1] 韩琳琳. 干湿循环作用下离子固化剂改性膨胀土的胀缩特性研究[J]. 西部交通科技, 2021(6): 20-24.
HAN L L. Study on expansion and shrinkage characteristics of ion curing agent modified expansive soil under dry wet cycle [J]. Western China Communications Science & Technology, 2021(6): 20-24. (in Chinese)
- [2] 董均贵. 干湿循环影响下膨胀土孔隙结构的核磁共振试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
DONG J G. Nuclear magnetic resonance test and analysis on pore structure of expansive soil effected by drying-wetting cycle [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] 徐永福, 程岩, 唐宏华. 膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 1-20.
XU Y F, CHENG Y, TANG H H. Failure characteristics of expansive soil slope and standardization of slope slide prevention by geotextile bag [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 1-20. (in Chinese)
- [4] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161.
YIN Z Z, YUAN J P, WEI J, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2161. (in Chinese)
- [5] 黄震, 陈斌. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 87-93.
HUANG Z, CHEN C. A study of the swelling shrinkage cracks of the modified expansive soil and its relationship with the shear strength [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 87-93. (in Chinese)
- [6] 杨俊, 刘子豪, 张国栋, 等. 复合方法改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1069-1076.
YANG J, LIU Z H, ZHANG G D, et al. Experimental research on unconfined compressive strength of expansive soil improved by composite method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1069-1076. (in Chinese)

- [7] 崔高航, 席晨, 程卓, 等. 粉煤灰掺量对含黏粒粉砂土力学性能影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14688-14695.
- CUI G H, XI C, CHENG Z, et al. Influence of fly ash content on mechanical properties of clay-containing silt soil [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (34): 14688-14695. (in Chinese)
- [8] IJAZ N, DAI F C, MENG L C, et al. Integrating lignosulphonate and hydrated lime for the amelioration of expansive soil: A sustainable waste solution [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 119985.
- [9] 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 T, LIU S Y, CAI G J. Boundary surface plasticity model for lignin-treated silt considering cementation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 670-680. (in Chinese)
- [10] 王明岳, 孔祥辉, 冉晋. 木质素改良低液限粉土相关性试验研究[J]. 路基工程, 2019(6): 51-55.
- WANG M Y, KONG X H, RAN J. Experimental study on properties of lignin improved low liquid limit silt [J]. Subgrade Engineering, 2019(6): 51-55. (in Chinese)
- [11] TINGLE J S, NEWMAN J K, LARSON S L, et al. Stabilization mechanisms of nontraditional additives [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007 (1): 59-67.
- [12] 于宝富, 王明岳, 巩曰明, 等. 木质素改良高液限黏土试验研究[J]. 北方交通, 2021(3): 63-66.
- YU B F, WANG M Y, GONG Y M, et al. Experimental study on high liquid limit clay improved by lignin [J]. Northern Communications, 2021(3): 63-66. (in Chinese)
- [13] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, KIM S. Soil stabilization with bioenergy coproduct [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010(1): 130-137.
- [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 T, CAI G J, LIU S Y, et al. Research on stabilization microcosmic mechanism of lignin based industrial by-product treated subgrade silt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1665-1672. (in Chinese)
- [15] 贺智强, 樊恒辉, 王军强, 等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 731-739.
- HE Z Q, FAN H H, WANG J Q, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (3): 731-739. (in Chinese)
- [16] INDRARATNA B, MAHAMUD M A A, VINOD J S. Chemical and mineralogical behaviour of lignosulfonate treated soils [C]//GeoCongress 2012. March 25-29, 2012, Oakland, California, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 1146-1155.
- [17] 邹志理. 南水北调中线工程总干渠潞王坟试验段膨胀岩工程地质特性研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26 (11): 85-88.
- ZOU Z L. Study on engineering geological properties of expansive rock of middle route of South to North Water Diversion Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(11): 85-88. (in Chinese)
- [18] 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Technical code for buildings in expansive soil regions: GB 50112—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [19] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Regulation of geotechnical test for highway: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [20] 施斌. 粘性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 57-62.
- SHI B. Quantitative assessment of changes of microstructure for clayey soil in the process of compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18 (4): 57-62. (in Chinese)
- [21] 刘春, 许强, 施斌, 等. 岩石颗粒与孔隙系统数字图像识别方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 925-931.
- LIU C, XU Q, SHI B, et al. Digital image recognition method of rock particle and pore system and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 925-931. (in Chinese)
- [22] ALAZIGHA D P, INDRARATNA B, VINOD J S, et al. The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2016, 169(3): 182-193.