

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.015

木质素衍生物改良黏性土抗崩解特性及微观机理

宋泽卓,刘瑾,姚亦姜,卜凡,陈志昊,史昕昊

(河海大学地球科学与工程学院)

摘要:为解决浅表层黏性土在降雨、干旱等气象因素作用下抗崩解性能易劣化,传统水泥、石灰等改良材料存在脆性强、不可逆等缺陷的问题,以南京地区黏性土为研究对象,制备不同木质素衍生物掺量的改良土样开展崩解试验,并结合扫描电镜(SEM)与能谱分析(EDS)揭示木质素衍生物改良黏性土抗崩解特性的宏微观机理。结果表明:改良黏性土崩解过程分为初始饱和、快速崩解与缓慢崩解3个阶段;1%掺量效果最优,初始饱和阶段延长至9 min,完全崩解时间较素土延长1倍,平均崩解速率降低20.13%;木质素衍生物通过在颗粒表面形成薄膜状结构,包裹并联结颗粒,减少孔隙连通性,同时引入 Ca^{2+} 增强胶结,可有效抑制水分入渗;当木质素衍生物掺量过高时薄膜聚集,颗粒间联结减弱,抗崩解性能下降。

关键词:黏性土;木质素衍生物;抗崩解特性;微观结构;改良机理

中图分类号:TU442

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2026)05-0129-09

Anti-disintegration properties and microscopic mechanism of clayey soil improved by lignin derivatives

Song Zezhuo, Liu Jin, Yao Yijiang, Bu Fan, Chen Zhihao, Shi Xinhao

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University)

Abstract: To address the problems that the anti-disintegration property of surficial clayey soils is prone to deterioration under meteorological factors such as rainfall and drought, and traditional improvement materials such as cement and lime have defects such as high brittleness and irreversibility, the clayey soil in Nanjing area was taken as the research object to prepare improved soil samples with different lignin derivative contents and conduct disintegration tests. Combined with scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS), the macroscopic and microscopic mechanisms of the anti-disintegration properties of clayey soils improved by lignin derivatives were revealed. The results show that the disintegration process of improved clayey soils is divided into three stages: initial saturation, rapid disintegration, and slow disintegration; the 1% content has the optimal effect, with the initial saturation stage extended to 9 min, the complete disintegration time doubled compared with that of untreated soil, and the average disintegration rate reduced by 20.13%; lignin derivatives form a film-like structure on particle surfaces to wrap and connect particles, reduce pore connectivity, introduce Ca^{2+} to enhance cementation, and inhibit water infiltration; when the lignin derivative content is too high, the films aggregate, interparticle connections weaken, and the anti-disintegration performance decreases.

Key words: clayey soil; lignin derivative; anti-disintegration property; microstructure; improvement mechanism

浅表层黏性土直接暴露于大气中,在降雨、干旱、风等气象因素作用下反复经历干湿循环和温度变化,导致其抗崩解性能显著劣化。降雨入渗使土体迅速吸水饱和,内部黏聚力降低,颗粒间联结减弱,极易发生崩解破碎。干旱蒸发则导致土体收缩开裂,加速后续降雨时的水分渗透与破坏进程。在全球气候变化背景下,暴雨与干旱交替愈发频繁,使得浅表层黏性土的抗崩解能力持续下降,整体性和稳定性随之削弱,更易发生表层崩解、剥落乃至结构失稳^[1-3]。当前,交通、水利、矿山等工程建设快速发展,亟须对黏性土抗崩解机理及改良措施展开深入研究。

目前,常用的土体改良方法是通过化学手段提高土体工程特性。传统化学稳定剂如水泥、石灰、粉煤灰

基金项目:江苏省基础研究计划项目(BK20250088);国家自然科学基金青年科学基金项目(C类)(42502264);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201229,B260201077)

作者简介:宋泽卓(1995—),男,讲师,博士,主要从事环境地质工程研究。E-mail:szzhu@163.com

通信作者:刘瑾(1983—),女,教授,博士,主要从事环境地质工程研究。E-mail:jlinliu920@163.com

等^[4-5],在某些工程项目中能够以合理成本提升土体强度,但针对浅表层黏性土的抗崩解性,这些材料存在明显缺陷。经水泥、石灰改良后的土体表现出较为明显的脆性特征,其屈服应变、塑性指数和延展性降低,在反复干湿循环或水流冲刷作用下更易发生开裂和崩解破坏,反而削弱了土体长期的结构稳定性^[6-8]。此外,水泥、石灰等材料难以降解,其改良过程不可逆,长期赋存会改变土体的化学环境,进而影响土体颗粒间的胶结与抗崩解性能的维持^[9-10]。因此,仅以提高土体强度为目标的传统改良思路,不利于实现抗崩解性的有效提升。为推进人与自然和谐共生的工程实践,遵循可持续发展原则,研究能够切实增强浅表层黏性土抗崩解性、同时兼顾生态环保与经济高效的新型改良方法和材料,具有重要的意义。

木质素作为一种天然聚合物在自然界中储量巨大,在植物组织中分布广泛,存量仅次于纤维素,具备较高碳含量且为储量第二大的天然大分子有机资源。它由法国科学家 Anselme Payen 在木材纤维素分离试验过程中首次发现^[11]。木质素同时也是工业副产品之一,主要来源于造纸行业,作为一种可再生资源,其具有产量丰富、价格低廉、结构独特等优势,在保持高性价比的同时还可顺应绿色可持续发展理念^[12-13]。在木质素分离过程中,由于使用的工艺不同,会产生多种不同的衍生物,如木质素磺酸钙、乙醇木质素、盐酸木质素、木质素磺酸钠等,这些衍生物常用于污染土壤修复、水泥复合固化、土体固化与稳定等方面,国内外学者针对木质素衍生物在土体改良领域的应用开展了一系列的试验研究^[14-18]。Zhang 等^[19]使用木质素对粉土进行改良,构建改良土体剪切波速试验与无侧限抗压试验间的归一化模型,发现养护期间可通过剪切波速的监测数据获取改良土体强度的变化规律。贺智强等^[20]采用崩解与三轴压缩试验对比分析了两类木质素衍生物对黄土的改良效果,发现木质素磺酸钙能够提升黄土工程特性。Orakoglu 等^[21]使用粉煤灰与木质素纤维对黏性土进行改良,发现该改良方式能够有效减小冻融循环条件下土体强度的下降幅度。现有对木质素衍生物改良黏性土的研究主要集中于其对黏性土工程特性的影响,对其改良机理的认识多停留在单一尺度或定性层面,对于随木质素衍生物掺量变化的演化规律,以及其与土体抗崩解性之间的内在关联,仍缺乏系统验证,在一定程度上制约了其在提升黏性土抗崩解性能方面的工程应用。

本文以南京地区黏性土为研究对象,系统开展不同木质素衍生物掺量条件下改良土体的崩解试验,并结合扫描电子显微镜(SEM)与能谱分析(EDS)技术,从宏观崩解行为与微观结构特征角度揭示木质素衍生物对黏性土抗崩解特性的影响及其微观机理的表现,以期为该材料在浅表层黏性土改良中的绿色应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验使用的土体取自南京市某河道岸坡。获取土体后,对其进行烘干、粉碎,并过 2 mm 孔径筛后备用。根据 GBT 50123—2019《土工试验方法标准》对过筛后黏性土开展颗粒分析试验和基本物理性质试验,结果如下:土体颜色为黄褐色,粉粒、黏粒、砂粒的质量分数分别为 68.5%、23.8%、7.7%,天然含水率为 21.8%,天然干密度为 1.65 g/cm³,比重为 2.71,液限为 37.7%,塑限为 19.5%,塑性指数为 18.2。

试验中使用的木质素衍生物以酸法制浆工业的蒸煮废液作为原材料,通过喷雾干燥加工形成的生物基聚合物,储量巨大,来源广泛,分子式为 C₂₀H₂₄CaO₁₀S₂。在自然条件下,木质素衍生物为红褐色粉末,具有木质芳香气味,分子链中富含羟基、磺酸基及苯环等活性官能团,可通过氢键作用、离子交换和络合反应与土颗粒形成稳定胶结结构。同时木质素衍生物具备抗氧化特性,使其能够被用作土体改良材料,在相关领域具有广泛应用前景。作为造纸行业副产品,木质素衍生物的回收利用可实现双重效益,在减少工业废液处理成本及污染物排放的同时,符合资源循环与低碳工程发展趋势。本文试验使用的木质素衍生物由合肥巴斯夫生物科技有限公司生产,其主要成分为木质素磺酸钙,等级为分析纯,纯度大于 98%。

1.2 试验方法

开展崩解试验时,将试样浸入水中模拟崩解过程,记录其质量变化并据此计算崩解率,用以研究各木质素衍生物掺量条件下试样崩解率的变化规律。为避免崩解过程中试样吸水导致测得质量与实际试样残余质量出现误差,试验分两组同时进行,试验装置如图 1 所示。试验过程中,将金属网悬置在精度为 0.01 g 的电子秤上,对照组在金属网下放置一塑料制托盘,避免土体散落,试验组不放置托盘,让试样自然崩解落入水箱中。通过对照组测定的试样吸水质量、试验组测定的土体损失质量,计算试样崩解率:

$$Y_i = \frac{m_0 - m_i / (1 + C_i)}{m_0} \times 100\%$$

(1)

其中

$$C_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100\%$$

式中: Y_i 为 i 时刻的崩解率; m_i 为试验组 i 时刻电子秤读数; m_0 为试验组试样浸入水中瞬间电子秤读数; C_i 为对照组试样 i 时刻的含水率; M_i 为对照组 i 时刻电子秤读数; M_0 为对照组试样浸入水中瞬间电子秤读数。

试验过程中,设定变量为木质素衍生物掺量分别为 0%、0.5%、1%、2%、3%,试样含水率均为 19.1%。试样制备步骤如下:称取经过烘干、磨碎、过筛处理后的土样;称量对应试样所需质量的蒸馏水与木质素衍生物;将称量的土体与木质素衍生物进行充分混合,倒入蒸馏水进行搅拌,使水分均匀分布在土样与木质素衍生物的混合物中;将搅拌均匀的土体倒入环刀模具中,环刀模具需采用凡士林涂抹内壁,便于试样脱模;使用千斤顶对土体施加为期 4 min 的静态压力,在压制结束后进行试样脱模,获得高 20 mm,底面直径为 61.8 mm 的扁平圆柱形试样,每组试样均需制备对照组与平行样。各掺量试样均设置 3 个平行样。制样结束后,将制备的试样包裹密封,置于背光处进行为期 14 d 的养护。

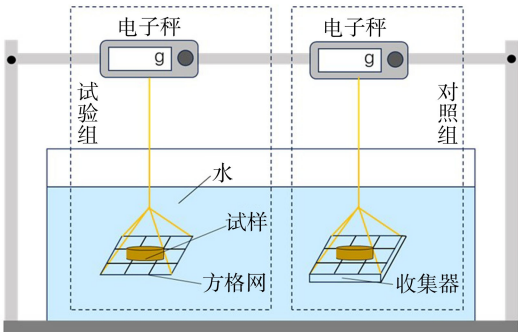


图 1 崩解装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of disintegration device

选取一组相同掺量的试样,分别将试样放置在崩解装置中的两个金属网上,向玻璃容器内注入蒸馏水,并将金属网置于水平面上,让两组试样同时接触水面,直至水面完全淹没试样,需确保试样不会与容器底部直接接触。试验中,崩解装置内蒸馏水的温度恒定为 25℃。崩解过程中使用数码相机进行定时拍摄,获取对应时刻下试样崩解形态。读取并记录没入水中瞬间的电子秤读数以及浸水相应时间时电子秤的读数,按式(1)计算崩解率,将对照组试样的含水率视为该时刻下试验组试样的含水率,用于减小试验误差。同一掺量平行样计算的崩解率取平均后记为该掺量试样的试验结果。结合记录的图像,研究试样崩解模式,绘制不同木质素衍生物掺量试样的崩解率变化曲线、崩解速率变化曲线、崩解持续时间图,探究试样抗崩解性能的影响因素。

2 试验结果与分析

2.1 改良黏性土崩解率

试验通过对照组消除试样崩解过程中因土体吸收水分导致的崩解率计算误差,获得不同木质素衍生物掺量试样崩解率变化。由图 2(a)可知,素土(0%掺量)与改良黏性土崩解率变化曲线均呈现出相似的变化趋势。在试验初期保持相对稳定,随着试验的进行,试样的崩解率呈现先快速增长后缓速上升的趋势,可以将曲线划分为初始饱和阶段、快速崩解阶段与缓速崩解阶段。木质素衍生物改良黏性土的崩解率曲线均低于素土,且试样崩解率随浸润时间延长产生显著差异,二者间差异主要集中于快速崩解阶段与缓速崩解阶段中试样崩解率变化。

初始饱和阶段,试样崩解率保持相对稳定,曲线斜率未随浸润时间延长发生显著变化,试样崩解率为 2.4%~3.8%。由于木质素衍生物掺量的不同,各曲线存在着一定的差异。对于素土,在浸润 3 min 后,试样的崩解率出现大幅度的提升。掺入木质素衍生物试样的崩解率显著提升起始时间均晚于素土,其中 1%掺量试样延迟最为明显,延迟至 9 min。

快速崩解阶段,试样表层发生大规模土体剥落,为土体发生崩解的主要阶段。该阶段,试样均已吸水饱和,初始崩解速率较缓,但随着时间的延长,试样发生大规模崩解,崩解率曲线斜率大幅提升。素土崩解率在该阶段初始时便快速上升,表明在该阶段中试样发生长时间的大规模崩解现象。1%掺量试样的崩解率在该阶段开始时先保持缓速上升,随着浸润时间的延长,曲线的斜率逐渐增大,最终保持相对稳定。3%掺量试样的崩解率曲线与素土呈现出相似的变化趋势。在该阶段开始时,3%掺量试样崩解率低于素土。但随着浸润时间延长,二者崩解率与时间的关系逐渐趋于一致,表明在快速崩解阶段 3%掺量试样的崩解规模高于素

土。随着木质素衍生生物的掺量增大,试样快速崩解阶段持续的时间呈现先上升后下降的趋势。在浸润时间相同的条件下,1%掺量试样的崩解率均低于素土与其他木质素衍生物掺量试样。当浸润时间为 10 min 时,相较于素土与 0.5%、2%、3% 掺量试样降幅分别为 67.21%、56.46%、47.48%与 61.78%;当浸润时间为 35 min 时,素土进入快速崩解阶段尾声,试样崩解率为 94.34%,表明将木质素衍生物掺入土体可以显著抑制试样崩解进程。

进入缓速崩解阶段前试样均已发生大规模崩解,崩解率经历了一段时间的快速上升。进入缓速崩解阶段后,试样的崩解率曲线斜率随着浸润时间的延长逐渐下降。当试样崩解率高于 96%后,曲线斜率趋近于 0。素土试样在崩解率达到 94.34%后进入缓速崩解阶段,崩解率曲线的斜率仅发生一定的下降,残余土体经过 15 min 发生完全崩解。改良黏性土试样进入缓速崩解阶段时的崩解率均小于素土试样,崩解率曲线斜率在该阶段中持续下降。1% 掺量试样进入缓速崩解阶段的崩解率最低,为 82.22%,相较于素土下降了 12.85%。该掺量试样残余土体发生完全崩解所需时间为 40 min,相较于素土延长 25 min。

由图 2(b)可知,经过相同时间的浸润后,素土与改良黏性土的崩解率存在一定的差异。在浸润 5 min 后,素土与 0.5%、2%、3% 掺量试样均进入快速崩解阶段,而 1% 掺量试样仍处于吸水饱和阶段。随着浸润时间延长,各掺量试样崩解率均发生快速增长。改良黏性土崩解率因木质素衍生物掺量的不同而表现出一定的差异。改良土体崩解率随木质素衍生物掺量增加,呈现出先下降后上升的趋势。在浸润 20 min 后,素土与 0.5%、1%、2%、3% 掺量试样崩解率分别为 53.41%、46.93%、36.58%、42.79%与 52.18%。浸润 40 min 后,素土崩解率趋近于 100%,仅有少量土体残留,几近完全崩解。当试样浸润时间为 60 min 时,素土已完全崩解,而掺入木质素衍生生物的试样仍有部分土体残余,其中 1% 掺量试样崩解率为 85.48%。当浸润时间达到 80 min 时,仅有 1%与 2% 掺量试样存在部分未崩解土体,崩解率分别为 95.26%与 99.61%。当浸润时间为 100 min 时,试样均已完全崩解。根据各浸润时间条件下试样崩解率可知,1% 掺量试样在相同浸润时间条件下,崩解率均为最低值且试样完全崩解所需时间最长,表明 1% 掺量能够有效提升土体水稳定性与土体抗崩解性能。

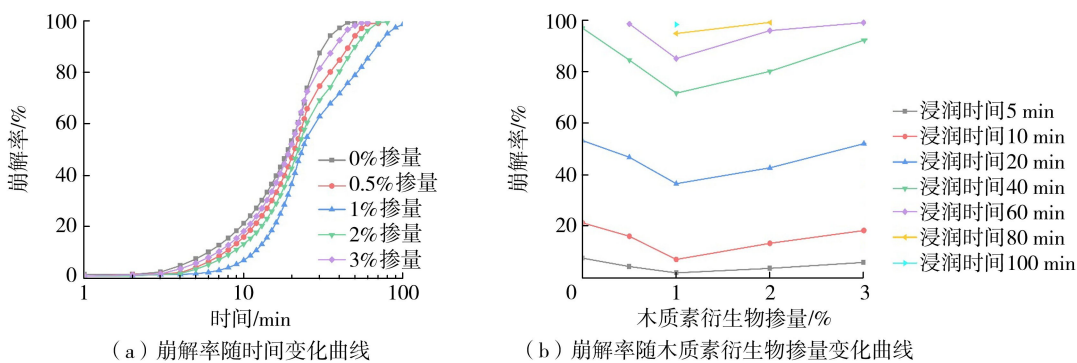


图 2 试样崩解率变化曲线

Fig. 2 Variation curves of disintegration ratio of specimens

2.2 改良黏性土崩解速率

根据试样崩解率随时间变化数据对不同木质素衍生物掺量试样崩解率速率进行计算:

$$R = m_0(Y_{i+1} - Y_i) / \Delta t \tag{2}$$

式中: R 为试样的崩解速率; Y_{i+1} 为试样在 $i+1$ 时刻的崩解率; Y_i 为试样在 i 时刻的崩解率; Δt 为崩解时间间隔。根据计算结果绘制不同木质素衍生物掺量试样崩解速率随时间变化曲线,如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可知,素土与木质素衍生物改良黏性土的崩解速率存在一定差异,且二者间的差异随浸润时间延长愈发明显。

各试样的崩解速率在浸润开始阶段均处于较低值,对应试样的初始饱和阶段。崩解速率随浸润时间延长缓速上升,且不同木质素衍生物掺量试样的持续时间存在一定差异,1% 掺量试样的持续时间最长。在初始饱和阶段中,试样逐步吸收水分填充土体内部微小孔隙,挤占空气存储空间,排出土体内部蕴含的空气,试样未发生显著崩解现象,结构保持相对稳定,因此崩解速率均较低。

试样崩解速率在初始饱和阶段结束后发生快速上升,当崩解速率达到最高值后崩解速率逐步缓速减小,

该阶段为快速崩解阶段。在这个阶段,各试样均已吸水饱和,土体颗粒间的相互作用力因水分进入土体颗粒间孔隙导致水膜增厚而降低,土体稳定性下降,试样发生大规模土体剥落。素土的平均崩解速率约为 1.54 g/min。1% 掺量试样的平均崩解速率最低,约为 1.23 g/min,较素土降幅约为 20.13%。素土与 0.5%、2%与 3% 掺量试样的曲线呈现出相似的变化趋势,而 1% 掺量试样的曲线转折点较为平滑。经过一段时间的快速崩解后,试样的平均崩解速率逐渐减小,且随着浸润时间逐步延长,崩解速率逐渐趋近于 0 g/min。

由图 3(b) 可知,初始饱和阶段、快速崩解阶段与缓速崩解阶段的持续时间均随木质素衍生物掺量增大呈现出先上升后下降的趋势。在初始饱和阶段,素土的阶段持续时间为 3 min,而 0.5%、1%、2%与 3% 掺量试样持续时间分别为 4、9、5、3 min,增幅分别为 33.33%、200%、66.67%与 0%。试样吸水饱和后进入快速崩解阶段,各试样均发生大规模崩解现象,崩解率快速上升。素土在该阶段中基本完全崩解,持续时间为 32 min,而 1% 掺量试样在快速崩解阶段的持续时间为 46 min,相较于素土延长约 14 min,增幅约为 43.75%。2%与 3% 掺量试样在该阶段的持续时间分别为 40、32 min,相较于 1% 掺量试样持续时间随着木质素衍生物掺量增大而缩短,降幅分别为 13.04%与 30.43%。相较于改良黏性土试样,素土在缓速崩解阶段的持续时间较短,约 15 min。而 0.5%、1%、2%与 3% 掺量试样在该阶段持续时间分别为 30、45、35、30 min,分别延长了 15、30、20、15 min。在整个崩解过程中,1% 掺量试样持续时间均长于其他试样,实现完全崩解所需时间为 100 min,相较于素土完全崩解所需的 50 min 时间延长了 1 倍。

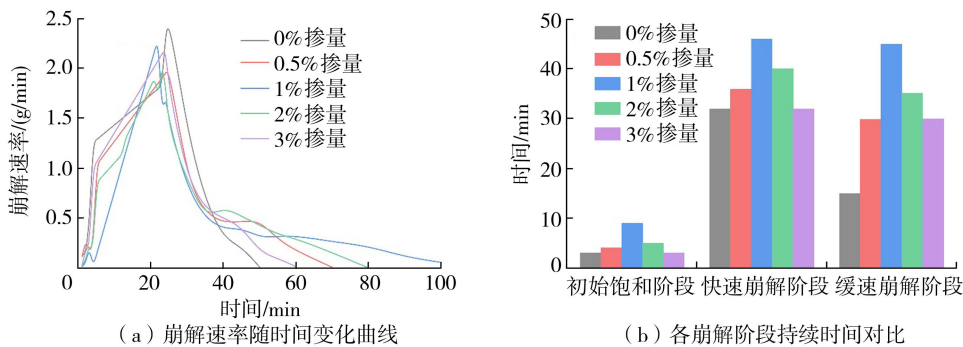


图 3 木质素衍生物掺量对试样崩解速率的影响

Fig. 3 Effect of lignin derivative content on disintegration rate of specimens

2.3 改良黏性土崩解形态

由图 4 可知,1% 掺量试样在浸入水中后,试样逐步发生崩解,崩解过程持续约 100 min,可以观察到明显的雾化现象。试样的崩解过程也可以划分为 3 个阶段:吸水饱和阶段、颗粒剥落阶段、缓速剥落阶段。在吸水饱和阶段(浸润时间为 1 min),试样主体未发生显著变化,形态保持相对稳定,未发生显著土体崩落现象。随着浸润时间延长,试样逐渐吸水饱和,部分土体发生崩解,但总质量并未随着崩解过程出现下降,反而由于土体吸收水分出现了一定程度上的增加,该阶段试样表面出现大量小气泡,气泡逐渐向上漂浮直至露出水面发生破裂。这些微小气泡产生的原因主要是由于试样内部存在微小孔隙,其内部存有一定空气。随着土体吸收水分,水分进入土体孔隙内,挤占空气的存储空间,将土体内空气挤出土体,排出的空气在土体表面形成微小气泡。在颗粒剥落阶段(浸润时间 10、45 min),随浸润时间增加,土体持续受到剥蚀,试样体积逐渐减小,试样内部结构遭到破坏。颗粒剥落阶段初期,试样表层气泡逐渐消失,表层出现细小裂纹,部分表层土样发生剥落,试样形态开始发生破坏。随着试样浸润时间的持续延长,试样表层微小裂纹进一步发育,最终贯通整个试样,对试样结构完整性造成严重破坏,试样表层的细小颗粒被逐渐剥蚀,侵蚀现象愈发明显,土体剥落速率逐步上升。伴随剥

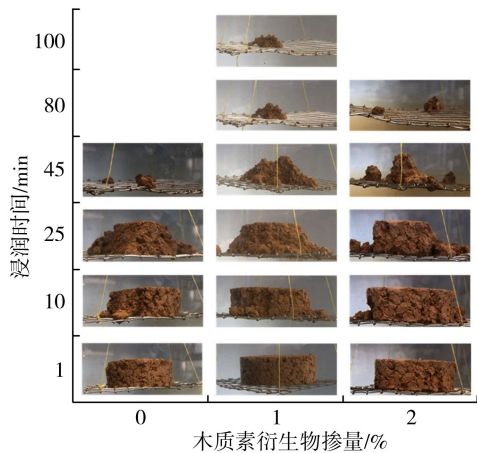


图 4 不同掺量试样崩解过程

Fig. 4 Disintegration process of specimens with different contents

蚀现象的发生,水分进一步渗透到土体内部,将土体内部孔隙残余的空气进一步排出。在形成气泡的同时由于水分的渗透,使得裂隙进一步发育。经长时间浸润后最终导致试样发生断裂与坍塌现象,试样结构发生严重破坏,体积发生显著减小,残存土体质量降低。经过长时间的浸润后,试样进入缓速剥落阶段(浸润时间为 100 min),发生大规模坍塌断裂现象。在这个过程中,试样吸水膨胀,试样中细小颗粒掉落至容器底部,部分团聚体仍然聚集在一起。试样质量存在一定程度的减小,但试样状态逐渐趋于稳定,不再发生大规模崩落,土体剥落速率减缓。

由图 4 可知,素土、1%、2%掺量试样经过相同时间的浸润后结构存在明显的差异,1%掺量试样相较于素土与 2%掺量试样结构更为完整。

当浸润时间为 1 min 时,3 类试样呈现出相似的形态特征,试样吸水膨胀且土体表面产生大量微小气泡。与 1%掺量试样相比,素土与 2%掺量试样表面因水分作用发生一定的剥蚀。随着浸润时间延长,试样崩解率持续上升,土体持续崩落。当浸润时间为 10 min 时,试样表面出现一定缺口。该缺口主要是由于土体吸水导致土体颗粒间水膜增厚,土体颗粒间相互作用力减弱,在土体应力薄弱处发生一定程度的土体崩解现象。观察 3 类试样缺口的形态可以发现,1%掺量试样在 1 ~ 10 min 区间内崩解量最少,表明 1%掺量能有效抵抗土体崩解现象。

当浸润时间为 25 min 时,试样形态相较于初始阶段发生显著变化。素土与 1%掺量试样上部均发生显著崩解现象,土体为上窄下宽的堆积体。2%掺量试样表面形成较多的裂隙。随浸润时间延长,裂隙持续延展发育,最终贯穿试样整体,导致试样呈现为块状崩解,试样形态结构遭受严重破坏。素土在浸润 45 min 后仅存有少量土体,已无法从残余土体中推测出试样原始形态。相较于素土,掺入木质素衍生物的试样仍有部分土体堆积。

当浸润时间大于 45 min 时,素土已基本完全崩解,残余土体质量过于微小,可忽略不计。对 1%与 2%掺量试样进行对比可以发现,两试样均有部分土体受金属网的支撑作用留存于网格上,1%掺量试样残余土体结构较为紧密。在进一步浸润过程中,残余土体未发生显著变化,表明该部分残余土体具备较高的水稳定性与抗崩解性能。2%掺量试样经 80 min 的浸润后仅有两部分较大块体残余,其余团聚体均因未受到金属网格支撑发生崩解,堆积于容器底部。在进一步浸润过程中,上述残余块体持续崩解为诸多较小团聚体,试样发生完全崩解。

3 微观结构演化分析

将试验结束后对照组的试样进行烘干,并按照扫描电子显微镜分析试验(SEM)以及能谱分析试验(EDS)的要求进行试样的制备与试验的开展,进而获取素土与改良黏性土的微细观结构。试验中,SEM 和 EDS 试验采用 SU3500 型扫描电子显微镜。扫描电子显微镜分析试验结果如图 5 所示,图中浅蓝色部分为典型的黏性土颗粒,黄色部分为木质素衍生物形成的典型的薄膜状结构。

由图 5 可知,木质素衍生物能够在黏性土颗粒表面形成一层薄膜状结构,这些薄膜状结构包裹着黏性土颗粒,改变了黏性土颗粒表面的结构特征,进而影响了改良黏性土的整体性。对于未改良的素土(图 5(a)),整体结构较为松散,黏性土颗粒之间存在着较多的孔隙。颗粒边缘较为锐利,颗粒之间无明显联结结构,呈现出无序排列。对于 1%掺量的改良黏性土(图 5(b)),黏性土颗粒边缘较为圆钝,颗粒之间孔隙的数量和体积较素土均发生明显的下降。黏性土颗粒表面可以观察到明显的薄膜状结构,这些薄膜状结构将相邻的黏性土颗粒进行联结,使得黏性土颗粒形成较大体积的团聚体,土体的整体性得到有效提升。当木质素衍生物的掺量进一步增大(图 5(c)),黏性土的微观结构发生进一步的变化。木质素衍生物形成的薄膜状结构出现聚集现象,从而在黏性土内部形成块状的胶结物。这些块状的胶结物能够有效的填充黏性土内部的一部分大孔隙,但其联结作用效果出现明显的降低,黏性土颗粒之间的联结减弱,黏性土颗粒无法形成较为稳定的团聚体,土体的整体性相较于 1%掺量的改良土体出现一定的降低。

采用南京大学研制的 CIAS 图像处理软件对图 5 中的 SEM 图像进行二值化处理,处理中保持原有 SEM 图像的尺寸与放大倍数不变,处理过程中阈值设置为 95。在二值化图像中,白色部分表示黏性土颗粒,黑色表示黏性土颗粒之间的孔隙。由图 5 可知,当木质素衍生物掺量由 0%增大到 1%时,二值化图像中黑色部分的占比出现明显的下降,黑色部分由素土中“相连成片”的状态转变为 1%掺量中“独立分布”的状态。以

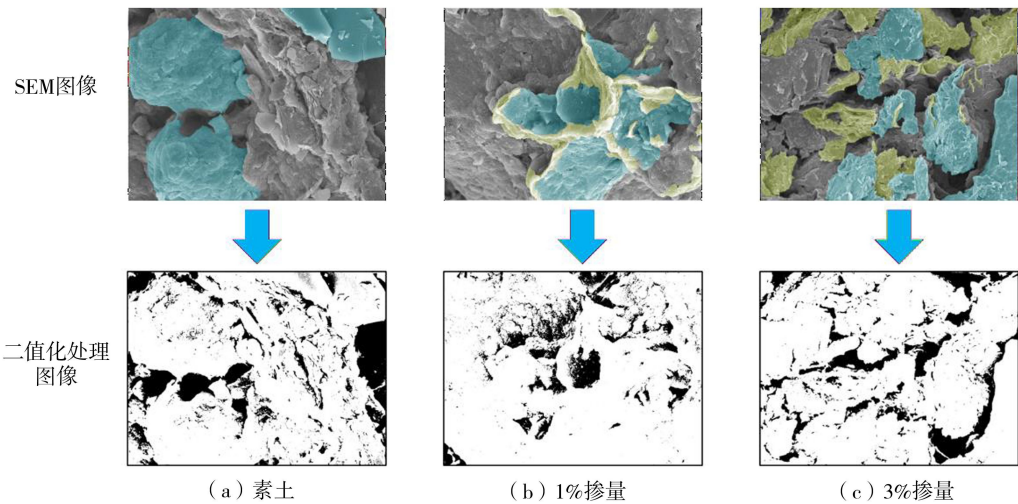


图 5 SEM 图片及其二值化处理图片(放大 5000 倍)

Fig.5 SEM images and their binarization processing images (magnified 5000 times)

上现象表明,随着木质素衍生物掺量的增大,黏性土内部的孔隙体积减小,孔隙之间的连通性降低,由连通的大孔隙逐渐转变为相对独立的小孔隙。当木质素衍生物掺量由 1% 增加至 3% 时,二值化图像中黑色部分的占比出现一定程度的增加。与 1% 掺量的试样相比,“独立分布”的黑色部分的数量发生一定程度的增加。以上现象表明,随着木质素衍生物掺量的进一步增加,木质素衍生物形成的薄膜状结构能够填充一部分黏性土颗粒之间的大孔隙,但其无法有效地联结相邻的黏性土颗粒,颗粒间相对独立的小孔隙的数量出现增减。

对不同木质素衍生物掺量试样开展 EDS 试验。试验中,测试区域的面积约为 $3.825\times10^{-4}\text{ cm}^2$ 。根据相关试验结果计算不同试样中元素的质量分数,结果如图 6 所示。由图 6 可知,改良前后土体中的元素类型未发生改变,主要元素均为 C、O、Mg、Al、Si、S、K、Ca、Fe 等,主要的变化为不同掺量木质素衍生物改良土体中各元素的质量分数。素土中,主要的元素为 C、O、Si、Al、Ca、Fe、K 等,其中 C 和 Ca 两种元素均来源于构成黏性土的原生矿物,其质量分数分别为 14.41% 和 0.47%。随着木质素衍生物掺量的增大,土体中除 C 和 Ca 之外, Si、Al、Fe 等元素的质量分数均呈现出一定程度减小,主要是由于木质素衍生物的加入对黏性土中其他元素产生了一定的稀释效应。随着木质素衍生物掺量的增大, C 和 Ca 两者的质量分数呈现出不同的增大趋势。C 元素由 0% 掺量时的 14.41% 增加至 3% 掺量时的 15.26%。Ca 元素由 0% 掺量时的 0.47% 增加至 3% 掺量时的 1.19%。Ca 元素的增加,有利于黏性土颗粒间联结作用的发生。但 Ca 元素参与的联结作用存在作用上限。当达到该上限后,进一步增加 Ca 元素,多余的 Ca 元素无法促进黏性土颗粒间联结作用的发生。与 SEM 试验结果进行对比可以发现,当木质素衍生物的掺量过多时,木质素衍生物形成的薄膜状结构出现聚集,无法有效地在黏性土颗粒之间形成联结。

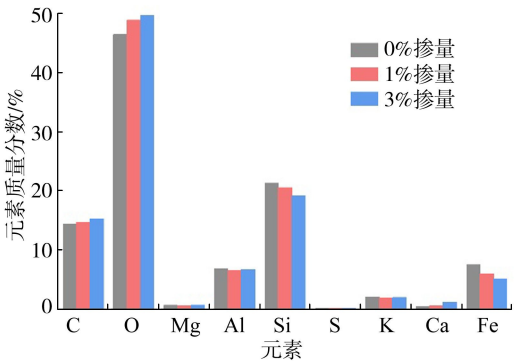


图 6 EDS 试验结果

Fig.6 EDS test results

土体崩解是大量水的侵入造成的。当土样浸没于水中时,外界水分通过大量孔隙通道渗透,导致孔隙内基质吸力的变化和不均匀的水分分布,从而引发受力的不均衡,并在局部产生应力集中,促进微裂隙的扩展,最终致使土体结构的整体破坏。木质素衍生物形成的薄膜状结构相互连接形成的三维网状结构将黏性土颗粒联结为一个整体的同时,填充孔隙空间,大大减少了水分的优势渗流路径,使得土体的浸水增湿过程受到抑制(图 7)。

木质素衍生物对黏性土抗崩解特性的提升具体表现为:①表层未完全饱和的薄膜状结构吸水膨胀,进一步阻塞了渗流通道,导致孔隙连通性下降,从而使水分更难渗透至土体内部,延长了土体发生崩解破坏的时间;②薄膜状结构通过在土颗粒表面的包裹作用,减少了黏性土颗粒与水分的直接接触,在吸水饱和后形成

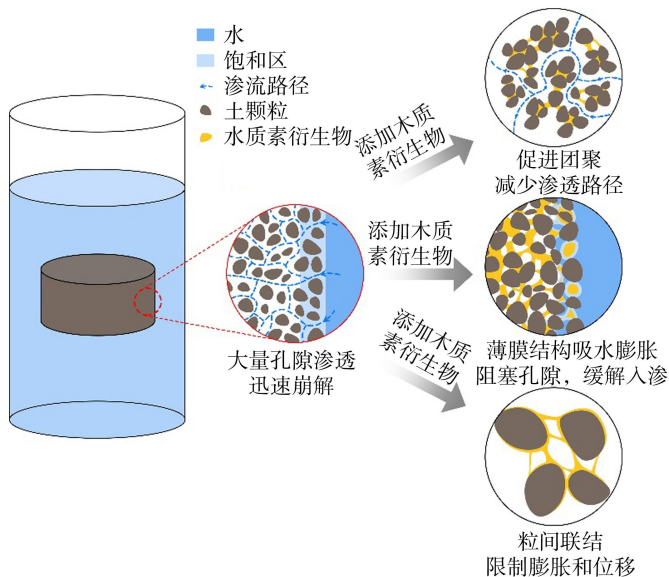


图 7 木质素衍生物改良黏性土机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of mechanism of clayey soil improved by lignin derivatives

临时的疏水层,进而延缓了黏性土颗粒的湿化过程;③木质素衍生物改善的颗粒间胶结作用和土体团聚体稳定性限制了黏性土颗粒浸水后的不均匀膨胀变形及其伴随的差异性位移,减少了因水分场和孔隙分布不均所导致的基质吸力差异,有效防止了土体团块的崩落^[22]。当木质素衍生物的掺量过高(3%)时,黏性土表面参与土颗粒之间联结作用的点位饱和,薄膜状结构发生聚集,从而形成一些块状的胶结物。这些胶结物能够填充一部分的孔隙,但无法有效地联结黏性土颗粒,使得黏性土的整体结构性发生降低,从而导致水分能够进入土体内部,加速了土体的湿化过程。此外,这些胶结物无法限制土颗粒吸水后的差异性位移。两者综合作用后的结果导致了木质素衍生物掺量过高的条件下,黏性土的抗崩解性出现下降的现象。

4 结 论

- a. 木质素衍生物能显著延缓黏性土的崩解进程,其中 1%掺量效果最优。1%掺量试样的初始饱和阶段延长至 9 min,完全崩解所需时间较素土延长 1 倍。在相同浸润时间下,1%掺量试样的崩解率始终最低,表明 1%掺量可有效提升土体的水稳定性与抗崩解性能。
- b. 木质素衍生物对崩解速率及阶段持续时间的影响呈先升后降趋势,以 1%掺量为转折点。1%掺量试样的平均崩解速率最低,较素土降低 20.13%;其快速崩解阶段与缓速崩解阶段的持续时间分别为 46 min 和 45 min,较素土分别延长 14 min 和 30 min。掺量继续增大至 2%或 3%时,各阶段持续时间及抗崩解效果均出现下降。
- c. 微观机理分析表明,木质素衍生物在黏性土颗粒表面形成薄膜状结构,包裹并联结颗粒,减少孔隙数量与连通性,从而抑制水分入渗和颗粒湿化崩落。但当掺量过高时,薄膜结构发生聚集形成块状胶结物,颗粒间联结减弱,整体结构性下降,导致抗崩解性能降低。

参考文献:

[1] 谢栎,吴建奇. 循环荷载作用下红黏土累积变形研究[J]. 地震工程学报,2019,41(6):1623-1629. (Xie Li,Wu Jianqi. Accumulative deformation of red clay in Southern Jiangxi under cyclic loading[J]. China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1623-1629. (in Chinese))

[2] 杨南如,徐玲玲. 粘土的结构特点和开发利用[J]. 建筑材料学报,2003(4):337-344. (Yang Nanru,Xu Lingling. Structure characteristics of clay and its application in industries[J]. Journal of Building Materials,2003(4):337-344. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 惠迎新,张如江,袁东东,等. 粉煤灰改良土在公路工程中的应用研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版),2026,46(1):1-22. (Hui Yingxin,Zhang Rujiang,Yuan Dongdong, et al. Advances in application research of fly ash-stabilized soil for highway engineering[J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition),2026,46(1):1-22. (in Chinese))

[5] 张春雷,朱伟,范公俊. 水泥固化高含水率淤泥的收缩性质[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(3):295-299. (Zhang Chunlei,Zhu Wei,Fan Gongjun. Shrinkage properties of cement solidified sludge with high water content[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(3):295-299. (in Chinese))

[6] Ahmed F,Marawan M S. Ground improvement using soil-cement columns:experimental investigation[J]. Alexandria Engineering Journal,2013,52(4):733-740.

[7] 向文俊,牛宏斌,施接锋,等. 宁淮高速公路改良膨胀土压实特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(4):434-436. (Xiang Wenjun,Niu Hongbin,Shi Jiefeng, et al. Study on compaction characteristics of improved expansive soil of Ninghuai Expressway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2004,32(4):434-436. (in Chinese))

[8] 郭乔明,陈峰,李春志,等. 粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基填料水稳性与耐久性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(1):119-128. (Guo Qiaoming,Chen Feng,Li Chunzhi, et al. Research on water stability and durability of fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed filler [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(1):119-128. (in Chinese))

[9] Abiola A A,Zalihe N. A Laboratory model study on the performance of lime pile application for marine soils [J]. Marine Georesources & Geotechnology,2017,35(3):397-405.

[10] 张小平,施斌,陆现彩. 石灰改良膨胀土微孔结构试验研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(6):761-763. (Zhang Xiaoping,Shi Bin,Lu Xiancai. Experimental study on micro-pore structure of expansive soil improved by lime [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(6):761-763. (in Chinese))

[11] Feofilova E P,Mysyakina I S. Lignin: chemical structure, biodegradation, and practical application (a review) [J]. Applied Biochemistry and Microbiology,2016,52(6):573-581.

[12] Lyu Zilu,Xu Jikun,Li Chenyu, et al. pH-Responsive lignin hydrogel for lignin fractionation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2021,9(41):13972-13978.

[13] 张建伟,钱思羽,王小锯,等. EICP 与木质素联合改性粉土边坡抗雨蚀试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):70-76. (Zhang Jianwei,Qian Siyu,Wang Xiaoju, et al. Experimental study on resistance of EICP and lignin joint-modified silt slope to rain erosion[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):70-76. (in Chinese))

[14] 侯鑫,马巍,李国玉,等. 木质素磺酸盐对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学,2017,38(增刊 2):18-26. (Hou Xin,Ma Wei,Li Guoyu, et al. Influence of lignosulfonate on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(S2):18-26. (in Chinese))

[15] Breilly D,Fadlallah S,Froidevaux V, et al. Origin and industrial applications of lignosulfonates with a focus on their use as superplasticizers in concrete[J]. Construction and Building Materials,2021,301:124065.

[16] 孟令超,朴森,张鸿秋,等. 干湿循环条件下木质素改良膨胀土胀缩特性[J]. 工程地质学报,2023,31(2):386-396. (Meng Lingchao,Piao Miao,Zhang Hongqiu, et al. Swelling nd shrinkage behaviour of expansive soil ameliorated by calcium lignosulphonate during wetting-drying cycles [J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(2):386-396. (in Chinese))

[17] 王芮芮,项伟,王菁莪,等. 生态复合改性黄土抗水蚀与强度特性试验研究[J]. 安全与环境工程,2019,26(3):44-49. (Wang Ruirui,Xiang Wei,Wang Jing' e, et al. Experimental study on anti-water erosion ability and strength of loess by ecological composite modification[J]. Safety and Environmental Engineering,2019,26(3):44-49. (in Chinese))

[18] Ijaz N,Ye W,Rehman Z, et al. Numerical study on stability of lignosulphonate-based stabilized surficial layer of unsaturated expansive soil slope considering hydro-mechanical effect[J]. Transportation Geotechnics,2022,32:100697.

[19] Zhang Tao,Cai Guojun,Liu Songyu. Assessment of mechanical properties in recycled lignin-stabilized silty soil as base fill material[J]. Journal of Cleaner Production,2018,172:1788-1799.

[20] 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 Zhiqiang,Fan Henghui,Wang Junqiang, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate [J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(3):731-739. (in Chinese))

[21] Orakoglu M E,Liu J,Lin R B, 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):4017013.

[22] 姬胜戈. 木质素磺酸钙改性分散性土试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.