

木质素磺酸钙改良的低液限黏土三轴压缩特性

魏世杰¹, 赵洪岩², 郝社锋^{3,4}, 梅红¹, 卜凡¹,
刘瑾¹, 葛礼强^{3,4}, 任静华^{3,4}, 梁雨¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100; 2. 国家开发银行江苏省分行, 江苏南京 210019;
3. 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏南京 210018;
4. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018)

摘要:通过对具有不同木质素磺酸钙掺量、不同养护时间的改良低液限黏土进行一系列三轴剪切试验,分析了改良土应力应变曲线、峰值偏应力及抗剪强度参数的变化规律,结合扫描电镜探究了其内在机制。试验结果表明:木质素磺酸钙的掺入能够显著提升土体抗剪强度,随着掺量的增加,改良土的抗剪强度先增加后减小,最优掺量为8%;随着养护时间的增加,改良土的抗剪强度提升,且增强速度逐渐变缓;养护7d后8%掺量的改良土获得最大峰值偏应力2017.23 kPa,比养护相同时间的纯黏土高236.25%;改良土黏聚力随着木质素磺酸钙掺量的增加先增加后减小,而内摩擦角增大到一定值后趋于稳定。改良土强度提升的内在机制可以概括为填充孔隙、离子交换、吸附包裹土粒以及胶结土粒团聚体。

关键词:黏土;木质素磺酸钙;强度特性;微观结构;改性机制

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)05-0100-07

Triaxial compression properties of calcium lignosulfonate-modified low liquid limit clay//WEI Shijie¹, ZHAO Hongyan², HAO Shefeng^{3,4}, MEI Hong¹, BU Fan¹, LIU Jin¹, GE Liqiang^{2,3}, REN Jinghua^{3,4}, LIANG Yu¹(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. China Development Bank Jiangsu Branch, Nanjing 210019, China; 3. Technology Innovation Center for Ecological Monitoring and Restoration Project on Land (Arable), MNR, Nanjing 210018, China; 4. Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: A series of triaxial shear tests were carried out on improved low liquid limit clay with different amounts of calcium lignosulfonate (Ca-LS) and different curing time. The law of the stress-strain curve, peak deviator stress and shear strength parameters were analyzed. The internal mechanism of the improved soil was analyzed with the scanning electron microscope. The test results show that Ca-LS can significantly improve the shear strength of clay. With the increase of Ca-LS content, the shear strength of improved soil first increases and then decreases, and the optimal content is 8%. With the increase of curing time, the shear strength of the improved soil becomes stronger, but the strengthening speed gradually slows down. After 7 d of curing, the peak deviator stress of the improved soil containing 8% of Ca-LS is 2017.23 kPa, which is 236.25% higher than the pure clay that cured for the same time. The cohesion force of the improved soil first increases and then decreases with the Ca-LS content, and the internal friction angle of the improved soil first increases and then remains stable. The internal mechanism of the modified soil strength improvement can be summarized as filling pores, ion exchange, adsorption of wrapped soil particles and cemented soil particle aggregates.

Key words: clay; calcium lignosulfonate; strength characteristics; microstructure; modification mechanism

工程建设中经常遇见强度特性达不到施工要求的土体,因此需要利用各种方法对其进行改良处理。随着国家区域发展总体战略的逐步实施,各地区推

出了数量众多的基础设施建设政策^[1],大量基础工程项目的建设对土体强度特性的提升提出了更高的要求。为了更好地获取工程性质优良的建筑

基金项目:自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心开放课题(GTST2021-006);国家自然科学基金项目(41877212);国家重点研发计划项目(2018YFC1508501)

作者简介:魏世杰(1998—),男,硕士研究生,主要从事土体加固研究。E-mail:2960881295@qq.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:Jinliu920@163.com

材料并提高资源利用率,开展针对土体改良技术的研究很有必要。

土体改良技术是指向土体中掺入由多种无机、有机材料复合而成的固化剂,从而改变土体成分与结构特征,以达到改善土体工程性质的目的。目前常用土体固化剂可分为无机类和有机类,其中无机类土体固化剂具有成本低、性能稳定等优点,缺点是容易造成资源浪费、不够环保等。而有有机类土体固化剂一般由环氧树脂、高分子聚合物等配制而成,通过有机材料本身性质胶结土粒。有机类固化剂具有掺入量少、施工方便、环保无污染等优点,具有良好的应用前景。为了减轻生产和使用无机类加固材料造成的环境污染,对环保友好型的新型加固材料的研究早有开展^[2,4]。

木质素是一种典型的生物资源,在植物界储量仅次于纤维素,具有可再生、成本低、环境友好等特点^[5]。造纸产业中将木质素与纤维素分离,木质素及其副产品被作为废弃物大量排放到自然界,增加碳排放的同时也不能充分利用资源。将木质素用于土体改良技术中,不仅能够更经济有效地改良土体工程特性,还有助于避免传统土体固化剂带来的环境污染问题。随着木质素被越来越多地应用于土体改良,其对土体性质的影响也越来越受到重视。目前基于木质素类固化剂的土体改良技术已有开展,Ceylan等^[6]通过试验验证了木质素用于改良土体的可行性;张涛等^[7,9]采用木质素对粉土进行了改良,分别进行了无侧限单轴抗压、固结不排水剪、固结排水剪等试验,发现木质素改良粉土的最优掺量为12%,改良土的孔隙水压力低于素土,且龄期对改良土强度有着显著影响;陈学军等^[10]研究发现木质素改良红黏土的最优掺量为8%,且红黏土液塑限和pH值随着木质素掺量的增加而增大。根据造纸产业分离方法的不同,工业木质素可分为酸木质素、碱木质素、木质素磺酸盐等^[11],其中木质素磺酸盐用途最为广泛,在土体改良方面也有应用。Sharmila等^[12]将木质素磺酸钙(以下简称“木钙”)用于改良膨胀土,发现处理后的膨胀土膨胀压力大大降低;贺智强等^[13]对木钙加固黄土的工程性能进行了试验研究,结果表明适量木钙的掺入能够明显加强黄土的抗渗透性、抗崩解性;姬胜戈等^[14]用木钙进行了改性分散性土试验,研究结果表明木钙的掺入能够显著降低分散性土的崩解性。张建伟等^[15]采用木钙对黄泛区粉土进行了改良,结果表明木钙最优掺量为5%,且在经历冻融循环后改良土的无侧限抗压强度仍明显高于素土。

目前国内对于木钙改良土体的研究主要集中在

其分散性、崩解性等方面,对木钙改良低液限黏土的力学特性与内部结构之间联系的研究较少,特别是缺少自然养护条件下改良土抗剪强度参数变化的研究。因此本文对不同木钙的掺量、不同土样养护时间条件下低液限黏土的改良土进行三轴压缩试验,研究了木钙掺量和养护时间对其强度特性的影响,并结合微观扫描电镜试验分析总结其内在机制,以为木钙改良黏土的工程实践应用提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

1.1.1 试验土样

试验用土取自南京江宁某边坡,根据筛分试验结果,试验用土中粒径大于0.075 mm的土粒质量分数为12.81%,粒径为0.005~0.075 mm的土粒含量为71.77%,粒径小于0.005 mm的土粒含量为15.42%,塑性指数为10.21,为低液限黏土。通过标准击实试验测得试验用土的最优含水率为14.13%,最大干密度为1.73 g/cm³,比重为2.72,液限为25.55%,塑限为15.34%。

1.1.2 木钙

木钙是一种高分子聚合物,通常来自酸法制浆的蒸煮废液,经喷雾干燥形成,其水溶液呈黑色,如果不对其进行合理利用,作为废水排放便会污染自然环境^[16]。试验所用木钙为某化工公司生产产品,外观为棕黄色粉末,略带芳香气味,木质素质量分数大于或等于55%,还原物质量分数小于或等于10%,水分质量分数小于或等于9%,pH值(1%水溶液)在4~6之间,水不溶物质量分数小于或等于1.5%,分子式为C₂₀H₂₄CaO₁₀S₂,无毒无害,稳定性好。

1.2 试验方案

1.2.1 制样过程

将试验用土敲碎放入105℃烘箱烘干10h,取出土样降至室温后用研磨机磨碎,过2mm筛后密封备用。本次试验取木钙掺量和试样养护时间为变量,木钙掺量(与黏土的干质量比)分别取0%、4%、8%、12%,试样养护时间分别取1、3、5、7d。根据试验设计,按95%压实度分别取一定量的黏土和木钙粉末搅拌均匀,按含水率(与黏土质量比)14.13%取适量常温水,倒入混合物中充分搅拌。搅拌好的土料按质量平均分为5份,依次倒入模具中击实到相应高度,直至击实最后一层结束后用千斤顶将试样压出。最终得到直径39.1mm、高80.0mm的圆柱形试样,制备好的试样在室温25℃、湿度50%条件下自然养护至相应龄期。

1.2.2 试验过程

三轴剪切试验采用仪器为南京土壤仪器厂生产的TSZ-1型全自动三轴剪切仪,分别以100、200、300 kPa围压进行不固结不排水剪试验,试验前不对试样进行饱和处理。试验过程按照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行,控制剪切仪的应变速率为0.8 mm/min。试验结束后根据不同围压下的峰值偏应力绘制破坏应力圆及包络线,以此获得不同试样的强度参数。

2 试验结果与分析

2.1 应力应变曲线分析

图1为100 kPa围压下不同养护时间的试样应力应变曲线,围压200、300 kPa时也有类似规律。从曲线形态上看,三轴压缩试验开始阶段为弹性阶段,试样的偏应力与轴向应变近似线性关系,曲线切线模量较大;随着试验过程的进行,试样达到屈服强度后转变为塑性阶段,应力应变曲线变为非线性,试样达到峰值强度后剪破。由图1可知,木钙掺量的变化对试样的强度特性有着显著影响,当木钙掺量为8%时试样强度最高。与纯黏土相比,改良土的抗剪切变形能力明显更强,后者的屈服强度和破坏强度更高。随着应变的增加,纯黏土试样的轴向偏应力表现为先增加后平缓,而改良土试样的应力应变曲线则有较明显的峰值。这是因为当试样掺入木钙并养护一定时间后,其一部分抗剪切变形能力由木钙胶结物提供,发生剪切破坏后这部分抗剪切能力消

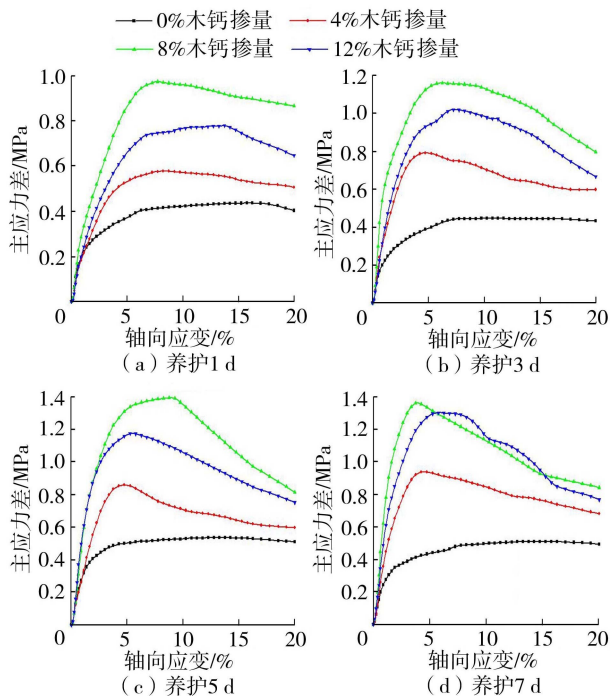


图1 100 kPa围压下不同养护时间试样应力应变曲线

失或大幅度减小,使得试样进一步发生应变所需的应力比原来要小,从而出现应变软化现象。

随着养护时间的增加,试样的强度特性也会发生明显变化。土体剪切破坏后偏应力衰减率 D 的计算公式为

$$D = (1 - q_{20}/q) \times 100\% \quad (1)$$

式中: q_{20} 为试样轴向应变20%时的偏应力; q 为试样破坏强度。对于应力应变曲线峰值明显的试样,取峰值偏应力为破坏强度;无明显峰值时,取轴向应变15%时的偏应力为破坏强度。通过分析衰减率的变化,可以更好地了解试样的强度特性。

围压为100 kPa时,试样剪切破坏后的偏应力衰减率与养护时间、木钙掺量的关系如图2所示。由图2可知,养护时间的增加对改良土力学特性的影响更为显著。与纯黏土试样相比,改良土试样在4个不同养护时间下的衰减率变化幅度更大,且衰减率与养护时间成正相关,说明改良土试样在4个养护时间的应力应变曲线均产生应变软化,且养护时间越长应变软化越明显。这是由于随着养护时间的增加,试样中木钙与土体反应更彻底,试样脆性增强。

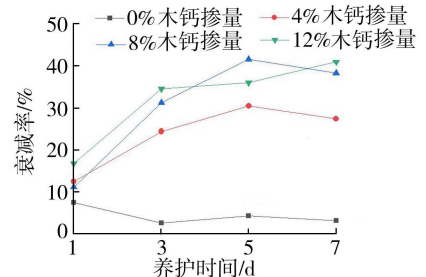


图2 100 kPa围压下试样的偏应力衰减率

根据应力应变曲线可确定试样的弹性模量。图3为100 kPa围压下试样弹性模量与木钙掺量关系图。由图3可知,养护时间为1d时,不同木钙掺量的试样弹性模量几乎一致。养护时间延长后,试样的弹性模量受木钙掺量影响明显,随着木钙掺量的增加,弹性模量先增加后降低,即适量木钙有利于提高黏土弹性模量,过量的木钙掺入会使黏土弹性模量下降。当养护时间为7d时,木钙掺量为8%的试样弹性模量达到60.07 MPa,比养护相同时间的纯黏土增加了138.02%。

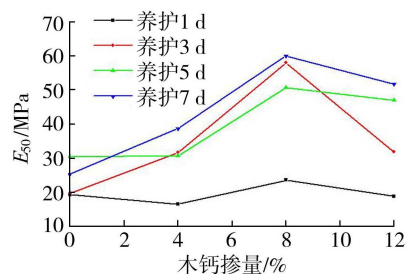


图3 100 kPa围压下试样弹性模量与木钙掺量关系

2.2 峰值偏应力分析

图4为不同围压条件下试样峰值偏应力随木钙掺量变化的曲线。从图4可以看出,掺入木钙能够显著提升土体抗剪强度,且峰值偏应力与围压之间存在正相关关系。这是因为围压越大,受压试样受到的侧向约束也越强,试样轴向的抗变形能力也因此变强。峰值偏应力随着木钙掺量的增加呈现先增加后下降的趋势,在0%到8%区间内均表现为随着木钙掺量单调增强,到12%掺量时下降。木钙掺量超过8%后,木钙本身更容易与其他木钙发生团聚,缺少了土粒骨架的支撑作用,因此导致试样峰值强度降低。张涛等^[7]、Chen等^[17]分别从木质素磺酸盐改良粉土、砂质粉土的试验研究中得到了与本文相似的结论,土体强度随木质素磺酸盐掺量的增加而增加,超过一定值后土体强度降低。

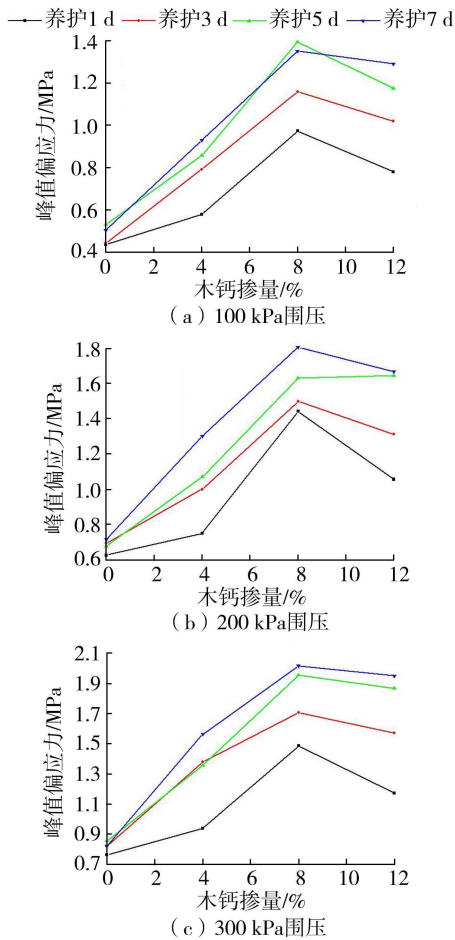


图4 木钙掺量对不同养护时间试样峰值偏应力的影响

当木钙掺量达到12%后,峰值偏应力相较掺量8%的试样稍有下降,但高于木钙掺量4%的试样和纯黏土试样,仍然能起到加固效果。由图4(b)可知,养护1 d时,200 kPa围压条件下木钙掺量8%、12%的试样峰值强度分别为1440.26、1054.86 kPa,相比纯黏土试样的增长幅度分别为130.17%、68.58%,养护7 d后的增长幅度分别为152.98%、

133.40%,可以看出随着养护时间的增加,8%与12%木钙掺量试样的强度变得接近。养护时间较短时,木钙加固效果不充分,富余木钙会造成受压试样局部软弱^[6,18],12%掺量的改良土强度比8%掺量的更低。随着养护时间的增加,木钙凝固黏结在土粒表面和孔隙中,多余的木钙影响变小,12%掺量与8%掺量改良土的抗剪强度越来越接近。综上,对于本试验所取用的黏土而言,木钙加固的最佳掺量为8%。

从图4还可以看出,随着养护时间的增加,试样峰值偏应力也不断提升,其中改良土试样增强幅度远远超过纯黏土试样。由图4(c)可知,当养护时间为7 d时,木钙掺量为8%的试样的峰值偏应力达到最大值2017.23 kPa,相较养护同样时间的纯黏土试样提升了236.25%。改良土试样在养护1~3 d区段增强幅度较大,300 kPa围压下4%掺量改良土试样养护3 d后的峰值偏应力相较养护1 d时提升了46.77%。随着养护时间的增加,增强速度也随之变缓,当养护时间达到7 d后,8%和12%掺量的试样峰值偏应力差异不大,说明此时掺入土体中的木钙已经充分发挥加固作用。

2.3 抗剪强度参数分析

图5为试样抗剪强度参数随木钙掺量的变化。从图5(a)可以看出,掺入木钙能够提升试样的内摩擦角。养护时间较短时,随着木钙掺量从0%增加到12%,试样内摩擦角呈现先升高后降低的趋势;在养护时间延长后,试样内摩擦角呈现先增加后不变的趋势,而掺量0%到4%的试样摩擦角变化幅度最大。

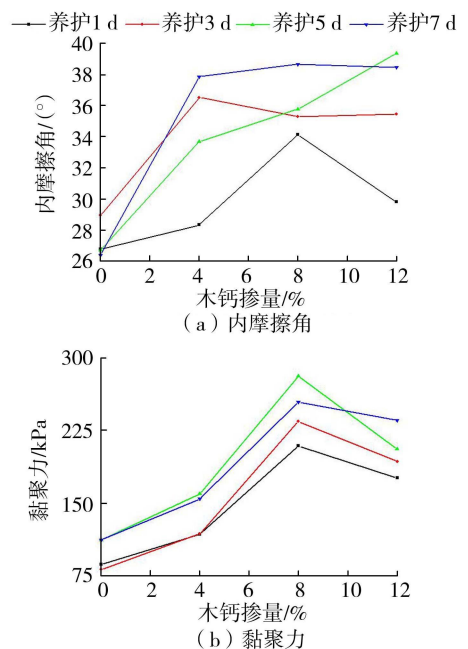


图5 试样抗剪强度参数随木钙掺量的变化

从图5(b)可以看出,随着木钙掺量的增加,改良土的黏聚力呈现出先增加后减小的趋势,在木钙掺量8%时达到最大值。相同养护时间下,木钙掺量12%的试样黏聚力小于8%的试样,但仍然高于纯黏土试样和4%掺量的改良土,试样抗剪强度随木钙掺量变化的趋势高度相似。结合图5(a)不难发现,当黏土掺入过量的木钙并养护一定时间后,改良土抗剪强度的减小是由其黏聚力降低引起的。富余的木钙聚集在土粒之间,缺少了土粒作为骨架,从而起到了反作用,降低了土体黏聚力,而内摩擦角受富余木钙的影响较小。

木钙被掺入黏土后,会覆盖在土壤颗粒表面或填充在颗粒间的孔隙中,包裹、联结土粒形成团聚体,增强土体稳定性。因此相比纯黏土,改良土的黏聚力有明显的提升,且随着养护时间的增加,试样水分蒸发后木钙凝固形成强度更高的胶结物质,阻止试样发生变形破坏的能力更强,导致改良土的黏聚力升高,土体抗剪强度更强。Kong等^[19]使用木质素磺酸盐改良淤泥土,取得了相似的结果。

3 改良土微观结构分析

为进一步研究改良土强度提升机制,并对上述试验结果从微观角度进行验证,对掺入木钙的试样进行了微观扫描电镜试验。图6为8%掺量改良土试样的微观扫描电镜图像,分别放大3000~7000倍。从图6(a)可以看出,木钙生成的胶结物质在土粒之间架桥,从而增强了土体的黏聚力,限制了土粒的相对滑动。从图6(b)(c)可以看出,木钙填充土粒间的空隙,同时吸附于土粒表面。图6(d)显示木钙与多个土粒形成团聚体,从而增强土体的整体性

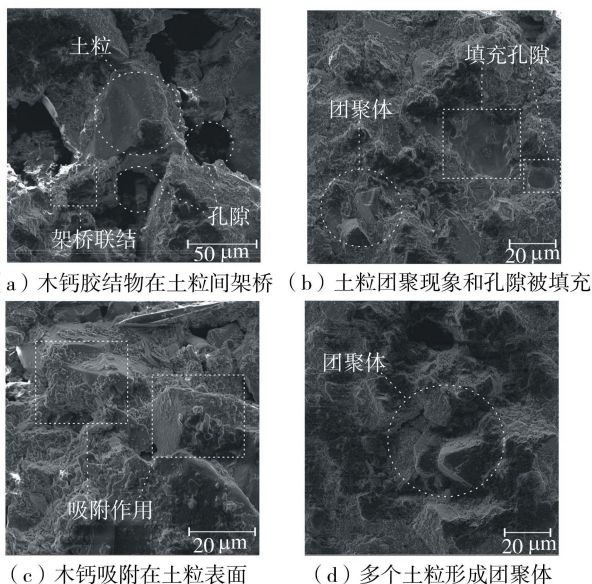


图6 8%木钙掺量试样微观扫描电镜图

和稳定性,试样抵抗受外力变形的能力因此变得更强,并且最终形成致密、稳定的土体结构,宏观上表现为改良土抗剪强度增强。

结合三轴压缩试验和微观扫描电镜试验结果,对木钙改良试验土体的反应过程进行探讨,图7为木钙的固土机制示意图。木钙固土机制可以归纳为以下几个方面:①填充孔隙。如图7(a)所示,木钙掺入土体后会填充土粒间的大孔隙,随着掺量增加填充小孔隙,增加土体密实度,图6(b)也验证了这一点。②离子交换。木钙溶于水后会释放出 Ca^{2+} ,增大土体自由水中的 Ca^{2+} 浓度,由于土体中阳离子交换作用与离子浓度有关^[20],且不同价的阳离子与土粒表面的亲和力也不同,高价阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+})可以替换结合水膜中的低价阳离子(Na^{+})。文献[14]经过试验发现木钙改良分散性土后土壤吸附的交换性钠离子占阳离子总量的百分比(ESP)下降,说明木钙掺入土体促使 Ca^{2+} 与土粒吸附的阳离子发生离子交换反应,削弱了土粒表面吸附的结合水层厚度,土体粒间作用力相应增大。③吸附包裹土粒。木钙掺入土体中会吸附在土粒表面(图6(c)),文献[8,21]指出这是由于木钙发生质子化反应形成带正电荷的木质素磺酸盐化合物,吸附在带负电荷的黏土表面,从而包裹覆盖土粒。④胶结作用。木钙形成的胶结物质在土体孔隙中沉淀,在距离远的土粒之间架桥联结(图6(a)),把距离近的土粒黏结成团聚体(图6(d)),形成更稳定的土体结构。随着养护时间的增长,胶结物的强度也逐渐变强,改良土试样的抗剪强度也随之增强。改良土的抗剪强度随着木钙掺量的增加而增加,当土体中木钙掺量超过最佳掺量时,由于缺少土粒作为骨架,富余的木质素聚集会降低土体密实性,形成局部软弱带,使得改良土抗剪强度降低。

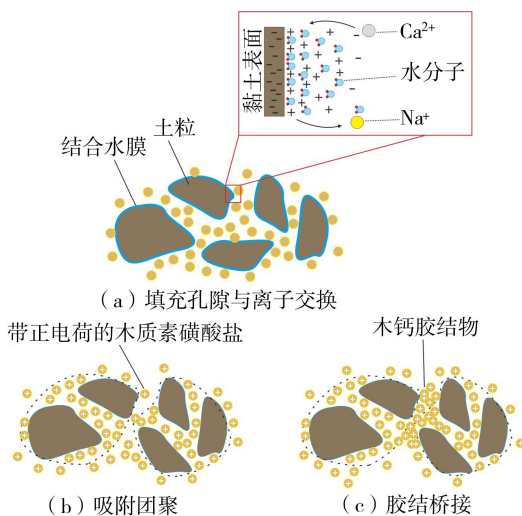


图7 木钙固土机制示意图

4 结 论

a. 木钙掺入黏土能显著提升土体抗剪强度,改良土的应力应变曲线有较明显的峰值,达到峰值后的曲线有应变软化现象。与纯黏土相比,养护时间对改良土的强度特性影响更为显著。

b. 改良土试样峰值偏应力与养护时间和围压呈正相关关系。随着木钙掺量的增加,抗剪强度先增后减,最优掺量为8%。养护7d后8%掺量的改良土获得最大峰值偏应力2017.23 kPa,相较纯黏土提升了236.25%。掺入木钙的土体试样黏聚力也同样随着木钙掺量的增加先增后减,内摩擦角则先增加至一定值后趋于稳定。

c. 木钙改良黏土的内在机制可以概括为填充孔隙、离子交换、吸附包裹土粒以及胶结土粒团聚体,通过增强土体密实度、削减结合水层厚、吸附胶结土粒团聚体来形成更稳定的土体结构,从而增强土体抗剪强度。由于木钙是一种有机物,其用于土体改良时存在发生降解的可能,因此木钙改良土体的耐久性还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 邓翔,袁满,李双强. 西部大开发二十年基础设施建设效果评估[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版), 2021, 42(6): 141-151. (DENG Xiang, YUAN Man, LI Shuangqiang. Evaluation of the effectiveness of infrastructure construction in the 20 years of western development[J]. Journal of Southwest Minzu University (Humanities and Social Sciences Edition), 2021, 42(6): 141-151. (in Chinese))

[2] SONG Zezhuo, LIU Jin, YU Yongxiang, et al. Characterization of artificially reconstructed clayey soil treated by polyol prepolymer for rock-slope topsoil erosion control[J]. Engineering Geology, 2021, 287: 106114.

[3] 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. (ZHOU Tianbao, ZHANG Fuhai, ZHOU Bingsheng, et al. Laboratory experiment and mechanism of solidified soil of biopolymer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 107-110. (in Chinese))

[4] 吴忠,刘瑾,何勇,等. 高分子固化剂-植被复合改良砂土抗冲刷特性[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 28-33. (WU Zhong, LIU Jin, HE Yong, et al. Erosion resistance characteristics of surface sand soil improved by polymer curing agent and vegetation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 28-33. (in Chinese))

[5] 姜波,金永灿. 基于木质素分子结构特性的功能材料研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3059-3083.

(JIANG Bo, JIN Yongchan. Research progress of lignin functional materials based on its structural properties[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3059-3083. (in Chinese))

[6] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, KIM S. Soil stabilization with bioenergy coproduct[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2186(1): 130-137.

[7] 张涛,刘松玉,蔡国军. 木质素改良粉土临界状态剪切特性试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 20-28. (ZHANG Tao, LIU Songyu, CAI Guojun. Experiment on shear behaviour of silt treated with lignin at critical state [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 20-28. (in Chinese))

[8] 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. 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))

[9] 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 engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 1-11. (in Chinese))

[10] 陈学军,丁翔,宋宇,等. 木质素对红黏土物理力学特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5922-5928. (CHEN Xuejun, DING Xiang, SONG Yu, et al. Effects of lignin on physical and mechanical properties of red clay [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5922-5928. (in Chinese))

[11] 刘尧伍. 无磺木质素加固碳酸型盐渍土工程效果与机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

[12] SHARMILA B, BHUVANESHWARI S, LANDLIN G. Application of lignosulphonate: a sustainable approach towards strength improvement and swell management of expansive soils [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(8): 6395-6413.

[13] 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))

[14] 姬胜戈,王宝仲,杨秀娟,等. 木质素磺酸钙改性分散性土的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2405-2415. (JI Shengge, WANG Baozhong, YANG Xiujian, et al. Experimental study of dispersive clay modified by calcium lignosulfonate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2405-2415. (in Chinese))

- [15] 张建伟, 亢飞翔, 边汉亮, 等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2020(增刊2): 1-6 [2022-12-11]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0097>. (ZHANG Jianwei, KANG Feixiang, BIAN Hanliang, et al. Experiments on unconfined compressive strength of lignin modified silt in Yellow River flood area under freezing-thawing cycles [J/OL]. Rock and Soil Mechanics, 2020 (Sup2): 1-6 [2022-12-11]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0097>. (in Chinese))
- [16] 李军海, 接道波, 张涛, 等. 工业副产品木质素的岩土工程应用与发展[J]. 路基工程, 2015(1): 43-47. (LI Junhai, JIE Daobo, ZHANG Tao, et al. Application and development of lignin of industrial by-product in geotechnical engineering [J]. Subgrade Engineering, 2015 (1): 43-47. (in Chinese))
- [17] CHEN Qingsheng, INDRARATNA B, CARTER J, et al. A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 316-327.
- [18] KIM S, GOPALAKRISHNAN K, CEYLAN H. Moisture susceptibility of subgrade soils stabilized by lignin-based renewable energy coproduct [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(11): 1283-1290.
- [19] KONG Xianghui, SONG Shuguang, WANG Mingyue, 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.
- [20] AL-MUKHTAR M, KHATTAB S, ALCOVER J F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil [J]. Engineering Geology, 2012, 139-140: 17-27.
- [21] VINOD J S, INDRARATNA B, MAHAMUD M A A. Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 2010, 163(1): 43-51.

(收稿日期: 2022-11-07 编辑: 俞云利)

(上接第 81 页)

- [26] 齐文超, 侯精明, 刘家宏, 等. 城市湖泊对地表径流致涝控制作用模拟研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(9): 8-18. (QI Wenchao, HOU Jingming, LIU Jiahong, et al. Lake control on surface runoff causing urban flood inundation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(9): 8-18. (in Chinese))
- [27] 潘鑫鑫, 侯精明, 陈光照, 等. 基于 K 近邻和水动力模型的城市内涝快速预报[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 91-100. (PAN Xinxin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Rapid forecasting of urban waterlogging based on K-nearest neighbor and hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 91-100. (in Chinese))
- [28] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49. (HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese))
- [29] HOU Jingming, LIANG Qihua, ZHANG Hongbin, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66: 131-152.
- [30] 侯精明, 张兆安, 马利平, 等. 基于 GPU 加速技术的非结构流域雨洪数值模型[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 567-576. (HOU Jingming, ZHANG Zhaoan, MA Liping, et al. Unstructured numerical model for rainfall-runoff process in watershed based on GPU acceleration technology [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 567-576. (in Chinese))
- [31] 侯精明, 李东来, 王小军, 等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 45-55. (in Chinese))
- [32] 马鑫, 侯精明, 李丙尧, 等. 建筑小区雨水花园空间布局对径流过程影响规律研究[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 105-111. (MA Xin, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Influence law of rainwater gardens spatial layout on runoff process in building communities [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12): 105-111. (in Chinese))
- [33] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562. (YIN Zhane, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562. (in Chinese))
- [34] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong Basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))
- [35] 西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 西安统计年鉴(2018) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

(收稿日期: 2022-10-08 编辑: 俞云利)