

瓜尔豆胶固化粉质黏土工程特性研究

张进武, 苏新鑫

中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年11月18日; 录用日期: 2024年12月14日; 发布日期: 2024年12月23日

摘要

粉质黏土的高压缩性和低强度特性, 限制了其在重大工程项目中的应用。为了克服这些限制, 采用生物聚合物——瓜尔豆胶固化粉质粘土。文章以某工地粉质黏土为研究对象, 开展渗透试验、三轴不固结不排水剪切试验及崩解试验, 深入探讨瓜尔豆胶固化粉质黏土的工程特性, 结果表明: 在围压相同的情况下, 随着瓜尔豆胶掺量的增加, 粘土试样的渗透系数逐渐降低, 在100 kPa时, 1.0%掺量的瓜尔豆胶固化土样的渗透系数为 $0.25 \times 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 相应的渗透系数降低了53.2%; 未添加瓜尔豆胶的粉质粘土峰值强度较低, 随着围压的增加, 峰值强度逐渐增大。围压在100 kPa, 瓜尔豆胶的掺量在1.0%时, 峰值强度达到最大为316.7 kPa; 未固化粉质粘土崩解量呈线性增长趋势, 在300 s内全部崩解, 经瓜尔豆胶固化粉质粘土在浸水崩解30分钟后, 最终崩解量为5.9%, 表明瓜尔豆胶固化后的粉质粘土保存有较好的抗崩解性; 未固化粉质粘土的土颗粒排列比较松散, 形成的孔隙较多。瓜尔豆胶固化后粉质粘土孔隙通道数量明显减小, 瓜尔豆胶在土颗粒之间起到良好的胶结效果。

关键词

瓜尔豆胶, 粉质粘土, 工程特性, 峰值强度

Study on Engineering Characteristics of Silty Clay Solidified by Guar Gum

Jinwu Zhang, Xinxin Su

Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Nov. 18th, 2024; accepted: Dec. 14th, 2024; published: Dec. 23rd, 2024

Abstract

The high compressibility and low strength of silty clay limit its application in major engineering projects. To overcome these limitations, silty clay is solidified with a biopolymer—guar gum. Taking silty clay at a construction site as the research object, this paper carried out permeability tests, triaxial

文章引用: 张进武, 苏新鑫. 瓜尔豆胶固化粉质黏土工程特性研究[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2282-2291.

DOI: 10.12677/hjce.2024.1312251

unconsolidated undrained shear tests, and disintegration tests to further explore the engineering characteristics of guar gum solidified silty clay. The results show that under the same confining pressure, with the increase of guar gum content, the permeability coefficient of clay samples decreased gradually. At 100 kPa, the permeability coefficient of 1.0% guar gum solidified soil sample was $0.25 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the corresponding permeability coefficient decreased by 53.2%. The peak strength of silty clay without guar gum is low, and the peak strength increases gradually with the increase of confining pressure. When the confining pressure is 100 kPa and the dosage of guar gum is 1.0%, the peak strength reaches a maximum of 316.7 kPa. The disintegration of uncured silty clay showed a linear increase trend, and all the silty clay disintegrated within 300 s. The disintegration of silty clay cured by guar gum was 5.9% after 30 minutes of immersion, indicating that the silty clay cured by guar gum had good disintegration resistance. The arrangement of soil particles of unconsolidated silty clay is relatively loose, and more pores are formed. After curing guar gum, the number of pore channels of silty clay decreased significantly, and guar gum had a good cementation effect among soil particles.

Keywords

Guar Gum, Silty Clay, Engineering Properties, Peak Strength

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

粉质黏土作为一种常见的土壤类型,以其细腻的颗粒和独特的工程性质而闻名[1]。然而,这种土壤的高压缩性和低强度特性[2],常常限制了其在重大工程项目中的应用。为了克服这些限制,通常会向土壤中添加固化剂[3],如水泥、石灰、粉煤灰或其他工业副产品,旨在改善粉质黏土的工程性能,并提高其耐久性。随着对环境影响和可持续性[4]的关注日益增加,迫切需要寻找一种更环保、更经济的固化方法。固化粉质黏土的过程涉及到向土壤中添加固化剂,如水泥、石灰、粉煤灰或其他工业副产品,这些固化剂与土壤中的水分和颗粒发生化学反应,形成新的、更坚固的化合物,不仅能够提高土壤的承载能力,还能减少其膨胀性和收缩性,从而降低因环境变化引起的结构破坏风险。

刘松玉等[5]以活性氧化镁碳化固化粉质黏土为研究对象,研究了活性氧化镁碳化加固粉质黏土的强度变化。结果表明了随着碳化时间增加,活性氧化镁碳化增加了粉质黏土的强度。Zhang 等[6]采用偏高岭土(MK)替代部分普通硅酸盐水泥(OPC),研究了 MK 基地聚合物胶结粉质粘土的力学性能和微观结构特征。研究表明了掺入 2% MK 后,粉质粘土的 UCS 和 E50 分别是未掺 MK 的 1.32 倍和 1.30 倍。此外,2% MK 改性后的样品微观结构最为均匀和致密。丁黔等[7]采用哈尔滨地区粉质黏土为研究对象,掺入石灰、水泥和粉煤灰对其进行改良,开展改良粉质黏土的击实试验、无侧限抗压试验。研究发现,粉煤灰对改良土的弹性模量影响最大;石灰掺量是改良土最终破坏形态的重要因素。Lu 等[8]的研究对水泥稳定粉质粘土进行了剪切试验。分析了影响水泥土抗剪性能的因素。结果表明:水泥稳定粉质粘土的剪应力-位移曲线峰值随着竖向压力的增大而增大,加水泥和不加水泥的土的破坏模式存在显著差异;水泥稳定土的抗剪强度和粘聚力随水泥掺量、干密度、养护龄期和养护温度的增加而增大。赵珊珊等[9]采用有机生态酯类材料——纳米水性黏合剂改良粉质黏土,试验结果表明:土的强度随纳米水性黏合剂加量的增加而增大;纳米水性黏合剂能够通过黏结、包裹细颗粒改良土的结构,粉质黏土的渗透系数随黏合剂加量的增加呈先增大后降低的规律;纳米水性黏合剂改良粉质黏土的渗透性为植被生长提供良好的基质环境,可以作为生态护坡材料应用于边坡防护。Wang 等[10]对石灰处理的粉质土在养护过程中导热系数、吸力及微观结构的变化进行了试验研究。结果表

明: 孔隙大小分布特征主要与其成型含水量有关。当样品在干侧压实时, 孔隙大小分布呈现出典型的双模态特征, 即大孔和微孔。相比之下, 当样品在湿侧压实时, 孔径分布呈现典型的单模态特征。随着固化时间的延长, 大孔和小孔的模态尺寸均减小。万旭升等[11]对常温、冻结两种情况下不同硫酸钠盐含量的粉质黏土进行了三轴剪切试验与改良试验。结果表明: 常温试样的破坏强度随围压的增大而增大, 随含盐量的增大先增大后减小; 冻结试样的破坏强度随冻结温度的降低而增大, 随含盐量的增加而减小。

生物聚合物能够填充孔隙并胶结颗粒, 从而改善粉质黏土的密实度, 瓜尔豆胶是一种从瓜尔豆种子胚乳中提取的非离子型半乳甘露聚糖, 是一种生物相容性和可生物降解的高分子化合物, 作为生物聚合物的一种, 它在自然界中含量十分丰富, 并且具有粘度高、pH 稳定、环境友好等特点。本文以某工地粉质黏土为研究对象, 通过渗透试验、三轴不固结不排水剪切试验及崩解试验, 分析瓜尔豆胶掺量及围压对固化粉质黏土渗透特性、抗剪强度及崩解特性的影响, 深入探讨瓜尔豆胶固化粉质黏土的工程特性, 同时进行 SEM 试验, 在微观层面分析瓜尔豆胶固化粉质黏土的作用机理, 为固化粉质黏土提供参考价值及理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

试验粉质黏土样取自某建筑工地, 塑性指数为 11.52, 取样时自下而上, 先采剖面的底层样品, 再采中层样品, 最后采上层样品。应及时将土样装入样品袋, 并做好标记, 随后通过室内土工试验, 得到粉质黏土的基本物理性质指标, 如表 1 所示。

Table 1. Basic physical properties of silty clay
表 1. 粉质黏土基本物理性质

天然含水率(%)	天然干密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重(Gs)	初始孔隙比	塑限(%)	液限(%)	塑性指数
14.6	1.71	2.70	0.73	15.83	27.35	11.52

瓜尔豆胶(Guar Gum)由 D-甘露糖直线型主链和 D-半乳糖短支链组成, 能在水中迅速溶解形成高粘度的胶体溶液, 但不溶于有机溶剂如乙醇、丙酮等粘度。瓜尔豆胶在冷水中即可水化, 形成高度粘性和触变性的溶液。并且是一种可再生资源, 具有生物可降解性, 对环境友好。

2.2. 试验设备

土体静三轴试验机是用于研究土体在不同应力条件下的力学特性的设备。通过模拟土体在实际环境中受到的应力状态, 来测定土体的强度和变形特性。采用 KTL-LDF 50 型土体静三轴试验机进行试验, 以研究瓜尔豆胶固化粉质黏土的渗透性和抗剪强度。

崩解试验是一种用于测定土体在水中崩解速度的试验, 试验装置采用 SHY-1 型土壤湿化试验仪(北京中科路达试验仪器有限公司), 仪器设备包括浮筒、网板、有机玻璃水筒等。

通过 SEM 扫描粉质黏土试样, 可以深入了解粉土的微观结构特性, 为研究粉土的宏观特性提供重要的微观机制解释。试验采用 ZEISS EVO Sigma 300 型高分辨电子扫描显微镜, 试验设备如图 4 所示。

2.3. 试验方法

将取回的粉质黏土碾碎, 随后置于烘箱中烘干 8 小时, 烘干后取出备用。将瓜尔豆胶添加到土中均匀混合, 并称取适宜水, 将土样含水率控制在 20%, 将土样密封并静置 24 小时。按照土工试验方法标准《GB/T50123-2019》, 将粉质黏土分层放入制样器中, 分 5 层制样。层与层之间进行刮毛处理。制样流程如图 1 所示。制备完成后进行渗透试验及三轴不固结不排水剪切试验, 在渗透试验前对试样进行饱和,

以模拟土体在实际工程中受到的复杂应力状态, 从而得到更接近实际的力学性质参数, 最后进行 SEM 试验观测固化后的粉质黏土形态。试验设置围压为 25 kPa、50 kPa, 瓜尔豆胶掺量(GC)为 0%、0.5%、0.75% 及 1.0%, 渗透系数如式(1)所示, 试验方案如表 2 所示。

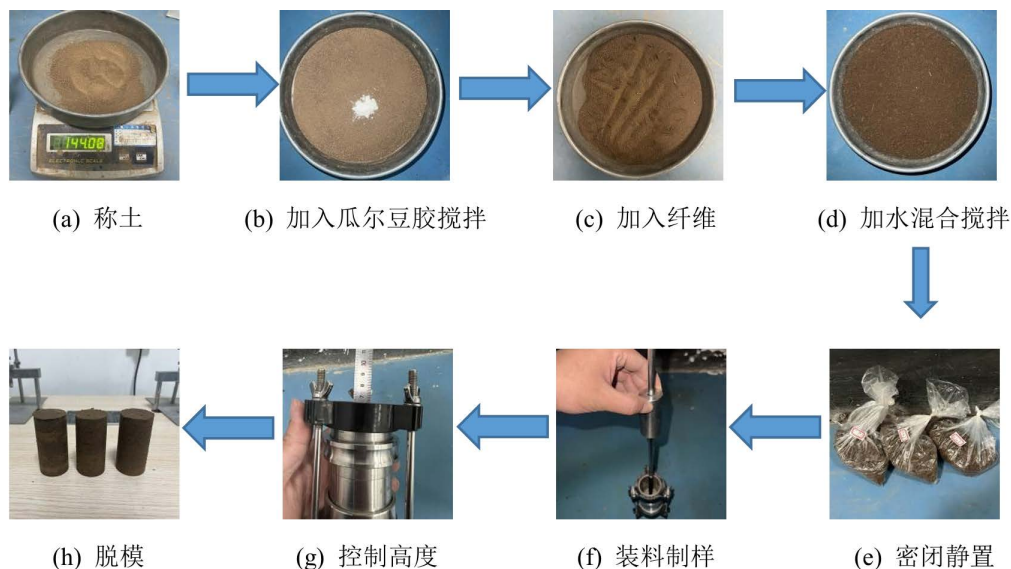


Figure 1. Silty clay sample preparation process

图 1. 粉质黏土制样流程

$$k = \frac{(Q_1 + Q_2)H}{204\Delta t A(P_1 - P_2)} \quad (1)$$

式(1)中, Q_1 为流入土体总流量(mm^3/s); Q_2 为流出土体总流量(mm^3/s); H 为试样高度(mm); A 为试样截面积(mm^2); Δt 为渗流时间(s); P_1 和 P_2 分别为反压和底压(kPa); k 为渗透系数(mm/s)。

为分析粉质粘土的崩解特性, 利用 SHY-1 型土壤湿化试验仪进行崩解试验, 试验首先取出试样放至崩解装置的漏网上并放进水中, 并记录刻度读数(记为将要发生崩解时的试样初始质量), 每隔一段时间记录一次读数直至崩解完成或刻度长时间不发生变化为止。崩解计算公式如式(1)、(2)所示。

$$D_t = \frac{R_t - R_0}{R_0} \times 100 \quad (2)$$

式(2)中, D_t 为 t 时刻试样崩解量(%); R_t 为 t 时刻水面处刻度读数(cm); R_0 为开始时水面刻度的稳定读数(cm)。

Table 2. Test scheme

表 2. 试验方案

围压(kPa)	含水率(%)	瓜尔豆胶掺量(%)	围压(kPa)	含水率(%)	瓜尔豆胶掺量(%)
25	20	0	50	20	0.75
25	20	0.5	50	20	1.0
25	20	0.75	100	20	0
25	20	1.0	100	20	0.5
50	20	0	100	20	0.75
50	20	0.5	100	20	1.0

3. 结果与分析

3.1. 渗透特性分析

为评估瓜尔豆胶掺量固化粉质黏土的渗透性能, 进行三轴不固结不排水剪切试验[12], 图 2 为瓜尔豆胶掺量对粉质黏土渗透系数变化关系曲线图。由此可见, 在围压相同的情况下, 随着瓜尔豆胶掺量的增加, 粘土试样的渗透系数逐渐降低, 在瓜尔豆胶掺量为 0%~0.5%时, 降低率较大, 瓜尔豆胶对土体孔隙的填充和胶结作用最为显著。当掺量继续增加到 0.5%~1.0%时, 由于土体中可被填充的孔隙减少, 瓜尔豆胶的填充效果逐渐减弱, 因此渗透系数的降低率趋于平缓。随着围压的增加, 渗透系数逐渐降低, 其中在 100 kPa 时, 1.0%掺量的瓜尔豆胶固化土样的渗透系数为 $0.25 \times 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 相应的渗透系数降低了 53.2%。产生上述现象的主要原因是瓜尔豆胶水化后形成的高黏度水凝胶能够填充土体孔隙, 能够黏结土颗粒, 增加土体的整体性, 减少水分子通过土体的通道, 从而降低渗透系数。瓜尔豆胶通过改变土体的孔隙结构、增强土体的整体性以及胶结土颗粒, 有效降低了粉质黏土的渗透系数。同时围压的增加也有助于降低渗透系数。

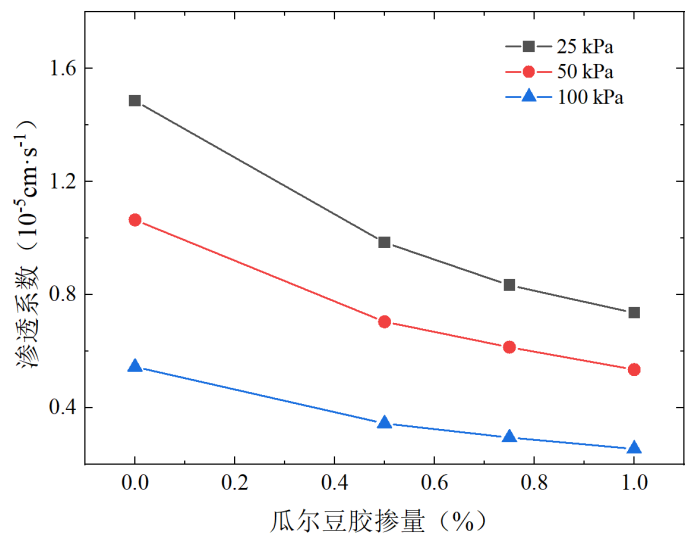


Figure 2. The relationship between guar gum content and permeability coefficient of silty clay

图 2. 瓜尔豆胶掺量固化粉质黏土渗透系数变化关系曲线图

3.2. 抗剪强度分析

抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的极限能力, 是土力学中的重要参数之一。通过三轴不固结不排水剪切试验, 可以确定粉质粘土在不同条件下的稳定性, 为了研究瓜尔豆胶固化粉质粘土在不同围压下的抗剪强度, 图 3 为不同围压下的瓜尔豆胶掺量对粉质黏土应力 - 应变变化关系曲线图。由图可见, 在相同围压下, 未添加瓜尔豆胶的粉质粘土峰值强度较低, 随着围压的增加, 峰值强度逐渐增大。经瓜尔豆胶固化后的粉质粘土峰值强度显著提高, 当围压在 25 kPa, 瓜尔豆胶的掺量在 0.5%时, 峰值强度达到最大为 274.7 kPa, 提高了 34.2 kPa。当围压在 100 kPa, 瓜尔豆胶的掺量在 1.0%时, 峰值强度达到最大为 316.7 kPa, 提高了 118.0 kPa。瓜尔豆胶固化土的峰值强度随着围压的增加逐渐增大, 这与文献[13]的研究结论一致。产生上述现象的主要原因在于瓜尔豆胶水化后形成的水凝胶具有较高的黏度, 能够与土颗粒形成更为致密的三维结构网, 这种黏性使得土颗粒之间的界面力得到增强, 提升了土体的整体抗剪性能。水凝胶填充了土体中的孔隙并胶结了土颗粒, 减少了土体受剪切时的颗粒间相对位移, 从而提高了土体的

抗剪强度。

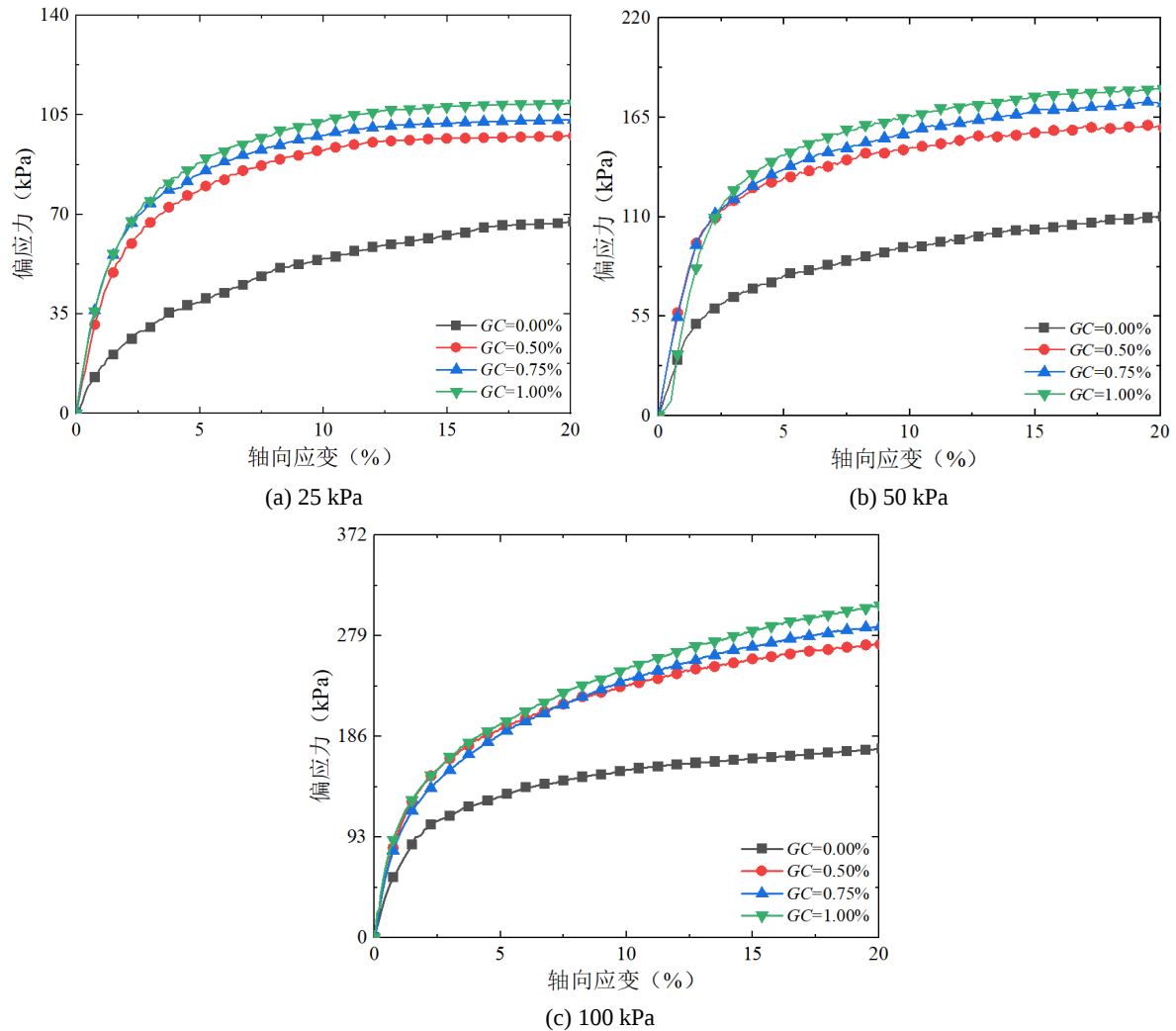


Figure 3. Curve of the change of guar gum content on the shear strength of silty clay
图 3. 瓜尔豆胶掺量固化粉质黏土应力 - 应变关系曲线图

为了分析经瓜尔豆胶固化后粉质粘土在不同围压下的强度特性, 图 4 表示在 25 kPa、50 kPa、100 kPa 不同围压下瓜尔豆胶固化粉质粘土的应力 - 应变关系曲线图。由图可见, 当围压保持不变时, 瓜尔豆胶掺量达到 1.00% 时, 粉质粘土的峰值强度较高, 其中掺量为 1.00% 时的瓜尔豆胶固化粉质粘土强度最大。当围压逐渐增大时, 粉质粘土试样的峰值强度也相应增大, 在瓜尔豆胶含量为 0.50% 时, 100 kPa 围压下的强度较 25 kPa 围压提升了 160.75 kPa。在瓜尔豆胶含量为 1.00% 时, 100 kPa 围压下的强度较 25 kPa 围压提升了 175.63 kPa。产生上述现象的主要原因是瓜尔豆胶的加入可以显著改善粉质粘土的力学特性。瓜尔豆胶作为一种高分子聚合物, 能够与水分子发生反应, 在土壤基质内颗粒间产生交联, 增强颗粒间的凝聚力, 从而提高土体的强度和稳定性。瓜尔豆胶掺量和围压对粉质粘土强度的协同增强作用, 表明瓜尔豆胶能显著提高粉质粘土的抗剪强度和抗渗透性。

3.3. 崩解特性分析

为分析瓜尔豆胶固化粉质粘土的崩解特性, 图 5 表示未固化粉质粘土及瓜尔豆胶固化后粉质粘土在

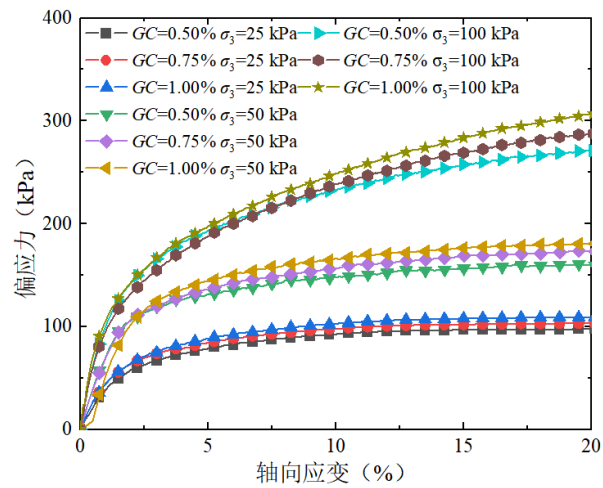


Figure 4. Stress-strain curve of confining pressure on guar gum solidified silty clay
图 4. 围压对瓜尔豆胶固化粉质粘土应力 - 应变关系曲线图



(a) 未固化粉质粘土崩解过程



(b) 瓜尔豆胶固化粉质粘土崩解过程

Figure 5. Disintegration process of uncured silty clay and silty clay after curing of guar gum
图 5. 未固化粉质粘土、瓜尔豆胶固化后粉质粘土崩解过程

60 s (左)~180 s (右)的崩解过程。由图 5(a)可见, 在浸水初期, 试样表面保持完整, 无大孔隙。随后试样表面开始出现孔隙及多条裂缝, 裂缝迅速扩展致边缘土颗粒快速崩解; 由图 5(b)可见, 经瓜尔豆胶固化粉质粘土后开始产生少量气泡, 在 180 s 时试样表面的裂纹较少, 且坍塌的总量也小, 在试样边缘仅有少量片状坍塌, 液体表面清澈, 表明经瓜尔豆胶固化后的粉质粘土保存较好的抗崩解性。

图 6 表示不同的瓜尔豆胶掺量下粉质粘土的崩解量随时间的变化关系曲线图, 由中可以看出, 未固化粉质粘土崩解量呈线性增长趋势, 在 300 s 内全部崩解, 这表明了素土抵抗崩解特性较低。在掺入了瓜尔豆胶固化的粉质粘土后崩解量具有显著下降, 其中 1.0% 掺量的瓜尔豆胶固化粉质粘土试样在浸水崩解 30 分钟后, 最终崩解量为 5.9%。瓜尔豆胶固化粉质粘土试样的抗崩解性随着瓜尔豆胶掺入比例的增加而明显提高[13]。产生上述现象的主要原因是瓜尔豆胶的加入显著提升了粉质粘土的抗崩解性。瓜尔豆胶水化后产生的水凝胶堵塞了水分入渗通道, 并在土颗粒之间起到胶结作用, 从而增强了土体的内聚力和整体性。水凝胶具有一定的胶结强度, 能够有效降低水分侵入土体时的孔隙气压, 从而抑制土体在水中的崩解开裂。

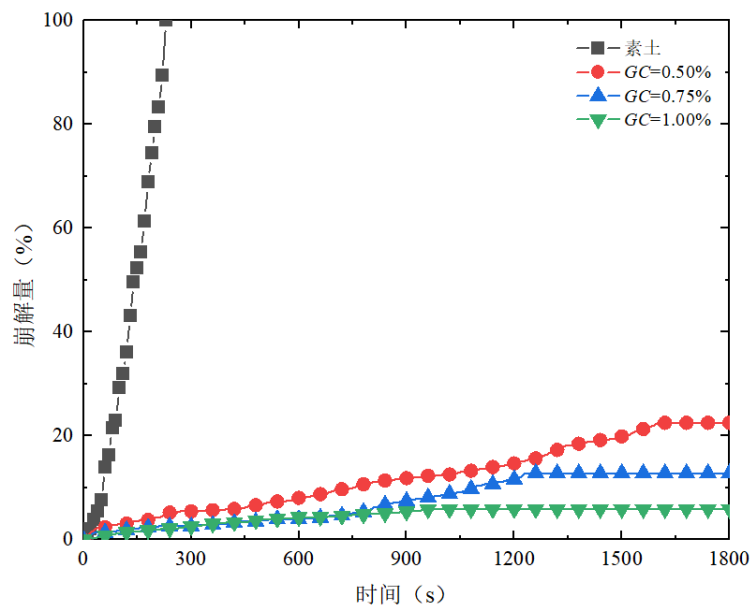


Figure 6. Curve of disintegration of guar gum solidified silty clay over time
图 6. 瓜尔豆胶固化粉质粘土崩解量随时间关系曲线图

3.4. 瓜尔豆胶固化粉质粘土微观结构分析

为了分析瓜尔豆胶固化粉质粘土的微观作用形态, 图 7 列出未固化粉质粘土与瓜尔豆胶固化后粉质粘土的微观结构。由图可见, 未固化粉质粘土的土颗粒排列比较松散, 形成的孔隙较多, 导致颗粒间的连接作用减弱, 土颗粒有清晰的棱边和棱角。而当掺入了瓜尔豆胶固化的粉质粘土, 瓜尔豆胶附着在土颗粒表面, 孔隙通道数量明显减小, 瓜尔豆胶在土颗粒之间起到胶结作用, 这与文献[14]结论一致。产生上述现象的主要原因是瓜尔豆胶的加入显著改变了粉质粘土的微观结构。瓜尔豆胶是一种天然的高分子聚合物, 具有很好的水溶性和黏结性。当瓜尔豆胶掺入粉质粘土后, 瓜尔豆胶能够附着在土颗粒表面, 形成一层黏结层, 增强了土颗粒之间的连接作用。瓜尔豆胶的水凝胶具有一定的胶结强度, 能够有效降低水分侵入土体时的孔隙气压, 从而抑制土体在水中的崩解开裂, 从而使得土体的整体性得到增强, 从而提高了粉质粘土的工程性能。

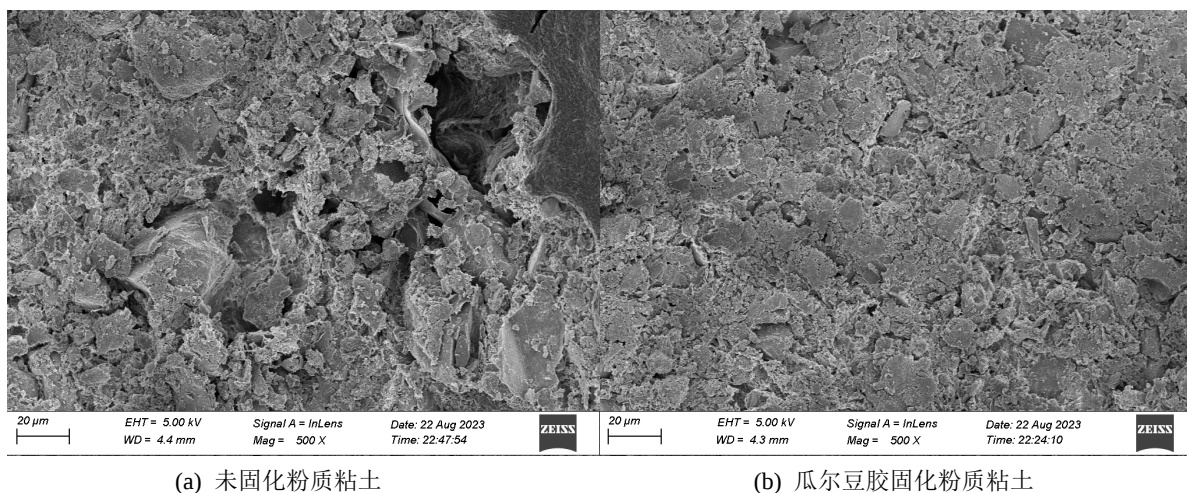


Figure 7. Microstructure of uncured silty clay and guar gum after curing
图 7. 未固化粉质粘土、瓜尔豆胶固化后粉质粘土微观结构

4. 结论

本文以瓜尔豆胶固化粉质粘土为研究对象,开展渗透试验、三轴不固结不排水剪切试验及崩解试验,分析瓜尔豆胶掺量及围压对固化粉质黏土渗透特性、抗剪强度及崩解特性的影响。主要结论如下:

1) 在围压相同的情况下,随着瓜尔豆胶掺量的增加,粘土试样的渗透系数逐渐降低,在瓜尔豆胶掺量为 0-0.5%时降低率较大,瓜尔豆胶对土体孔隙的填充和胶结作用最为显著。随着围压的增加,渗透系数逐渐降低,其中在 100 kPa 时,1.0%掺量的瓜尔豆胶固化土样的渗透系数为 $0.25 \times 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,相应的渗透系数降低了 53.2%。

2) 在相同围压下,未添加瓜尔豆胶的粉质粘土峰值强度较低,随着围压的增加,峰值强度逐渐增大。经瓜尔豆胶固化后的粉质粘土峰值强度具有显著提高,当围压在 100 kPa,瓜尔豆胶的掺量在 1.0%时,峰值强度达到最大为 316.7 kPa,提高了 118.0 kPa。瓜尔豆胶固化土的峰值强度随着围压的增加逐渐增大。

3) 未固化粉质粘土崩解量呈线性增长趋势,在 300 s 内全部崩解,这表明了素土抵抗崩解特性较低;经瓜尔豆胶固化,粉质粘土在浸水崩解 30 分钟后,最终崩解量为 5.9%。坍塌的总量也小,在试样边缘仅有少量片状坍塌,液体表面清澈,表明经瓜尔豆胶固化后的粉质粘土保存较好的抗崩解性。

4) 未固化粉质粘土的土颗粒排列比较松散,形成的孔隙较多,导致颗粒间的连接作用减弱,土颗粒有清晰的棱边和棱角。而当掺入了瓜尔豆胶固化的粉质粘土,瓜尔豆胶附着在土颗粒表面,孔隙通道数量明显减小,瓜尔豆胶在土颗粒之间起到良好的胶结效果。

参考文献

- [1] 王天亮,王海航,宋宏芳,等. 人工冻结粉质黏土力学性能演化规律研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 1-7.
- [2] 王儒默. 人工冻结粉质黏土力学性能试验与微观结构分析[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [3] 王建伟. 基于固化技术的粉质黏土填方路基压实特性研究[J]. 交通世界, 2023(26): 82-84.
- [4] 石亚军,马巍,杨成松,等. 冻融条件下粉质黏土中吸附水和自由水动态变化规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(3): 89-97.
- [5] 刘松玉,曹菁菁,蔡光华. 活性氧化镁碳化固化粉质黏土微观机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1543-1552+1563.
- [6] Zhang, R.R. and Ma, D.D. (2020) Effects of Curing Time on the Mechanical Property and Microstructure Characteristics of Metakaolin-Based Geopolymer Cement-Stabilized Silty Clay. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020,

Article 9605941. <https://doi.org/10.1155/2020/9605941>

- [7] 丁黔, 胡争, 黄帅, 等. 三灰改良寒区盐渍粉质黏土最优比研究[J]. 森林工程, 2022, 38(3): 134-142.
- [8] Lu, J., Tan, L., Pei, W., Gao, J., Deng, F., Zhou, X., *et al.* (2024) Shear Behavior of Cement-Stabilized Silty Clay Exposed to Low-Temperature Curing. *Cold Regions Science and Technology*, **223**, Article 104215. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104215>
- [9] 赵珊珊, 刘镇, 杨旭, 等. 有机生态酯类材料改良粉质黏土试验[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(4): 119-129.
- [10] Wang, Y., Cui, Y., Tang, A.M., Tang, C. and Benahmed, N. (2016) Changes in Thermal Conductivity, Suction and Microstructure of a Compacted Lime-Treated Silty Soil during Curing. *Engineering Geology*, **202**, 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.008>
- [11] 万旭升, 颜梦宇, 路建国, 等. 硫酸钠粉质黏土变形规律及改良研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(9): 63-74.
- [12] Ratananikom, W., Yimsiri, S. and Likitlersuang, S. (2015) Undrained Shear Strength of Very Soft to Medium Stiff Bangkok Clay from Various Laboratory Tests. *Geotechnical Engineering, Journal of the SEAGS & AGSSEA*, **46**, Article No. 15.
- [13] Sujatha, E.R. and Saisree, S. (2019) Geotechnical Behaviour of Guar Gum-Treated Soil. *Soils and Foundations*, **59**, 2155-2166. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.012>
- [14] Ni, J., Li, S., Ma, L. and Geng, X. (2020) Performance of Soils Enhanced with Eco-Friendly Biopolymers in Unconfined Compression Strength Tests and Fatigue Loading Tests. *Construction and Building Materials*, **263**, Article 120039. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120039>