

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.009

生物胶改良黏土抗崩解特性试验研究

卢毅¹, 赵洪岩², 蔡田露¹, 朱旭芬³, 闵望¹, 张晨阳³, 姚亦姜³, 钱卫³

(1. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室(江苏省地质调查研究院), 江苏 南京 210018;

2. 国家开发银行江苏省分行, 江苏 南京 210024; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为研究生物胶对黏土抗崩解性的影响, 采用黄原胶、瓜尔胶及黄原胶与瓜尔胶质量比为 1:1 混合的复合胶对黏土进行改良, 通过抗崩解试验, 探究生物胶的含量和种类、压实度对改良黏土抗崩解特性的影响规律, 并结合扫描电镜试验进一步分析了生物胶的改良机理。结果表明: 生物胶通过增强土体颗粒之间黏聚力增强改良黏土的抗崩解特性, 其崩解破坏过程可分为稳定前崩解阶段、稳定崩解阶段及稳定后崩解阶段; 随着生物胶含量的增大, 改良黏土稳定前崩解阶段延长, 崩解速率减缓, 崩解率降低; 复合胶改良黏土抗崩解特性在质量分数大于 1.0% 后强于单一生物胶; 随着压实度的提升, 试样抗崩解特性明显改善。

关键词: 黏土; 黄原胶; 瓜尔胶; 压实度; 抗崩解特性

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0064-08

Experimental study on disintegration resistance of clay improved by biological glue

LU Yi¹, ZHAO Hongyan², CAI Tianlu¹, ZHU Xufen³, MIN Wang¹, ZHANG Chenyang³, YAO Yijiang³, QIAN Wei³

(1. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Natural Resources
(Geological Survey of Jiangsu Province), Nanjing 210018, China;

2. China Development Bank Jiangsu Branch, Nanjing 210024, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to study the anti-disintegration properties of biological glue modified clay, xanthan gum, guar gum, and mixed composite glue of xanthan gum and guar gum mass with ratio of 1:1 were used to improve the clay. Through the anti-disintegration test, the effects of biological glue content, type and compaction degree on the anti-disintegration properties of improved clay were investigated, and the improvement mechanism of biological glue was further analyzed by scanning electron microscopy test. The results show that the biological glue enhances the anti-disintegration property of the sample by enhancing the cohesion between soil particles. The collapse failure process can be divided into the pre-stable collapse stage, stable collapse stage and post-stable collapse stage. With the increase of biological glue content, the disintegration stage of the improved clay is prolonged, the disintegration rate slows down, and the disintegration rate decreases. The disintegration resistance of the modified composite adhesive is stronger than that of single biological adhesive when the content is greater than 1.0%. With the increase of compaction degree, the disintegration resistance of the sample is obviously improved.

Key words: clay; xanthan gum; guar gum; compaction degree; disintegration resistance

由于工程建设的需要, 经常会产生大量的裸露土质边坡^[1-2], 而黏土在湿水后极易因崩解而产生土体软化甚至崩解破坏等问题, 进而影响工程强度及稳定性。对于土体崩解问题, 国内外专家学者进行了一系列研究, 李家春等^[3]针对土体压实度及含水率的不同, 分析了有效孔隙比与崩解速率的相关性及对崩解的影响。李喜安等^[4]通过自制的崩解仪展开崩解试验, 对土体的崩解过程进行研究, 并着重分析了崩离、迸离和解离 3 种土体崩解作用方式的影响机制。张抒等^[5]通过对黄岗岩残积土进行崩解试验, 从微观和宏观角度分析了土体的崩解机制及孔隙气压即有效孔隙率及基质吸力对土体崩解特性的影响。王菁莪等^[6]通过对非饱

基金项目: 江苏省地面沉降地裂缝监测项目(2021—2025 年)(苏财资环 202146 号)

作者简介: 卢毅(1983—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事地质灾害监测研究。E-mail: lynju@163.com

通信作者: 钱卫(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事地球物理研究。E-mail: wei.geoserve@gmail.com

引用本文: 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.

和土的崩解特性进行研究,发现基质吸力影响土体中水分的渗透速度,基质吸力的增大会提升土体内部孔隙水压力,促进胶结物的溶解进而加速土体崩解;水分的进入使得土体中孔隙处空气被挤压逸出,形成对外的压力,进而影响土体崩解。实际工程中往往采用多种方法来改良黏土的水理特性,主要通过物理、化学及生物的方法来改良黏土,以解决黏土边坡水土流失等危害生态环境的地质问题,这也一直是地质、岩土工程等专业的重要研究方向^[7-8]。

在土体改良领域高分子聚合物以其效果稳定、生态环保、性价比高等优点广泛应用于复合土体中^[9-10]。因其可以显著提高土体性质,使复合土体达到工程要求,而得到国内外学者的研究和关注^[11-12]。高分子聚合物主要通过复合土体内发生的物理化学反应,直接作用于土颗粒表面,改变土颗粒间的结构和作用方式,从而使土体的性质发生显著变化^[13]。生物胶作为高分子聚合物中的天然高分子聚合物,主要是通过化学手段由天然物质内提取而成的多聚糖类、腐殖酸类、纤维素类、木质素类等有机材料,应用于土壤对环境的影响较小,且效果相对于无机添加剂更加有效^[14-15]。倪静等^[16]通过对土体添加生物聚合物提升了土体保水性,增强了土体颗粒间黏结效应。Chang 等^[17]采用 β -1、3/1、6-葡聚糖对残积土进行处理,发现土体的无侧限抗压强度、抗拉强度显著增大。Cabalar 等^[18]对黄原胶复合砂土进行剪切特性试验,结果表明土体抗剪强度与黄原胶含量正相关。Latifi 等^[19]通过对黄原胶固化泥炭土进行无侧限抗压试验,发现在养护 28 d 后,黄原胶质量分数为 2.0% 的固化土无侧限抗压强度是素土的 6 倍。付宏渊等^[20]发现瓜尔胶可有效提升炭质泥岩边坡表层预崩解炭质泥岩的力学性能、持水特性、水稳性及抗冲刷性能,减小其渗透系数。Sulaiman 等^[21]通过对不同含量的黄原胶和瓜尔胶改良土体进行研究,发现土体的无侧限抗压强度随生物胶含量增大呈上升趋势。

目前生物胶改良黏土方面的研究主要体现在改良黏土的力学特性,生物胶改良黏土抗崩解特性的试验研究较少。本文针对土质边坡抗崩解特性问题,采用黄原胶、瓜尔胶及黄原胶与瓜尔胶质量比为 1 : 1 混合的复合胶对黏土进行改良,结合浸泡崩解测试法对改良黏土的抗崩解性进行评价,以期对土质边坡的改良提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用的黏土取自南京市江宁区,天然状态下呈黄褐色,硬塑状态,无特殊气味,质地均匀。试验土样颗粒粒径分布曲线如图 1 所示,试验用土的液限 w_L 为 38.41%,塑限 w_p 为 21.12%,塑性指数 I_p 为 17.29,比重 G_s 为 2.70,最优含水率 w_{op} 为 18.94%,最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.70 g/cm³。

试验所用的生物胶分别为黄原胶及瓜尔胶,二者均为浅黄色至白色的粉末颗粒,稍带臭味。二者分子中均存在大量亲水性基团,分子之间存在较强的氢键作用,可显著提高水溶液或分散体系的黏度和稳定性,分子结构式如图 2 所示。当黄原胶及瓜尔胶进行混合,所形成的溶液具有协同增效作用,在食品、医药及印染等领域受到广泛的关注^[22-23]。

1.2 试验方法

使用黄原胶、瓜尔胶及黄原胶与瓜尔胶复合胶 3 种生物胶,设计质量分数 w 为 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%,设计压实度为 90%、94%、98%。经测定,质量分数为 2.0% 的生物胶改良黏土试样的最大干密度与素土的最大干密度近似相等,视为最大干密度相同。试

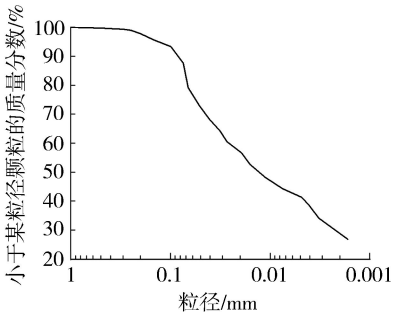
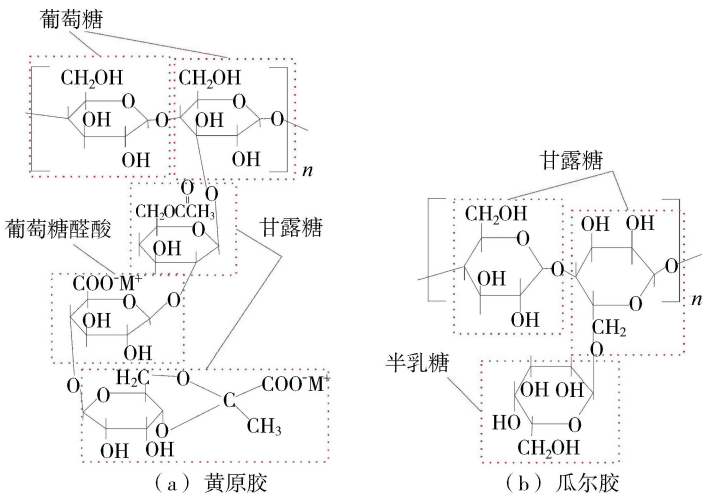


图 1 试验土样粒径分布曲线
Fig. 1 Particle size distribution curve



注: $M^+ = Na, K, 1/2Cs$, n 为聚合度。

图 2 生物胶分子结构式

Fig. 2 Molecular structure formula of biological glue

验仪器为自行设计的崩解试验装置(图 3),装置中金属方格网为 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中所规定的 1 cm × 1 cm 网眼,试样按设计参数制备成圆饼状(直径 61.8 mm、高度 20 mm)并在 26℃ 的空调房中恒温恒湿下养护 7 d,使得试样含水率几乎不发生改变,视为含水率相同。

为减少试样在崩解过程中吸收周围水分产生的影响,每组试样均设置对照组。对照组试样与试验组同时制得并同时进行崩解试验,搭载对照组试样的金属方格网加装收集容器,使得对照组试样所测得质量为试样自身质量与试样吸水质量之和,且收集容器并未影响试样下方水体对试样的作用。试验组与对照组的试验条件相同,可视为两组试样在同一时刻具有相同的含水率。由对照组在试验过程中的吸水量计算该时刻试样含水率:

$$w_t = (m_t - m_0)/m_0$$

(1)

式中: w_t 为 t 时刻的含水率; m_t 为 t 时刻电子测力计读数; m_0 为试样放入水中瞬间电子测力计读数。将 t 时刻对照组试样含水率视为该时刻试验组试样的含水率,计算试样 t 时刻的崩解率 D_t :

$$D_t = \frac{1}{m_0} \left(m_0 - \frac{m_t}{1 + w_t} \right) \times 100\%$$

(2)

计算并绘制不同压实度及生物胶含量及试样压实度改良黏土试样随时间的崩解率曲线,分析生物胶含量及试样压实度对试样抗崩解特性的影响。

2 试验结果与分析

2.1 崩解率曲线分析

浸水过程中,在水的浸润作用下,浸润的土体颗粒间水膜厚度迅速增加,使得土颗粒逐渐剥离并在底部堆积,土体本身抵抗这种浸润作用的特性即为抗崩解特性。黏土的典型崩解率-时间关系典型曲线^[24]一般呈 S 形,可分成 3 段:①稳定前崩解阶段,反映的是试样在崩解过程初期水进入土体内的孔隙,土体内气体排出,未发生明显的崩解,崩解速率较小;②稳定崩解阶段,斜率大幅度增加且崩解速率趋于稳定,在该阶段试样表面土体大量脱落,是土体崩解的主要阶段;③稳定后崩解阶段,反映的是试样的崩解已基本完成,剩余的土体已趋于稳定状态,崩解速率较小。

由图 4 可知,素土试样均未出现典型曲线中的稳定后崩解阶段,即素土试样在土体崩解过程中持续崩解,未出现崩解完成后的残余部分,表现为试样在稳定崩解阶段即发生完全崩解。改良试样在不同压实度下的崩解率曲线呈现出完整的典型关系曲线,即改良后试样抗崩解特性显著提升,出现崩解后残余部分,且可以在水中长时间维持状态。由此可知,生物胶可以有效减少黏土因湿水而完全崩解的情况,使得土体出现残余部分,提高试样崩解后的完整性。

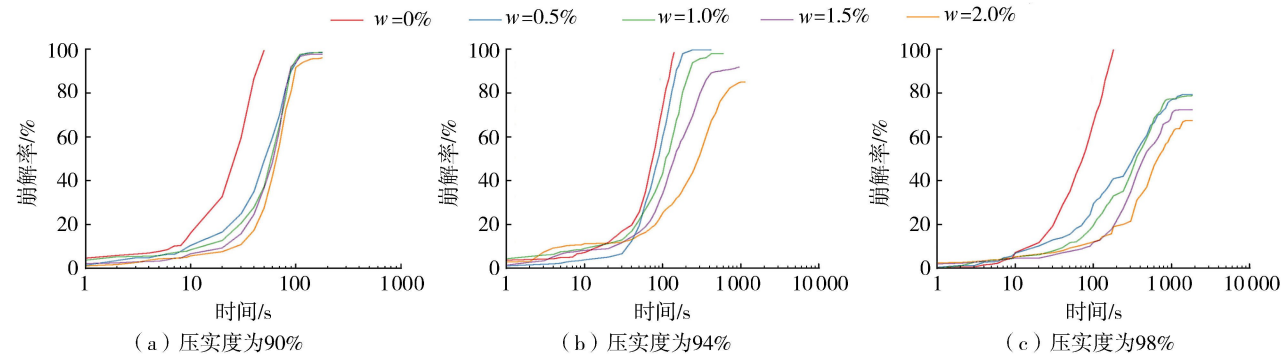


图 4 不同压实度下黄原胶改良黏土崩解率-时间关系曲线

Fig. 4 Disintegration rate-time curve of xanthan gum modified clay under different compaction degrees

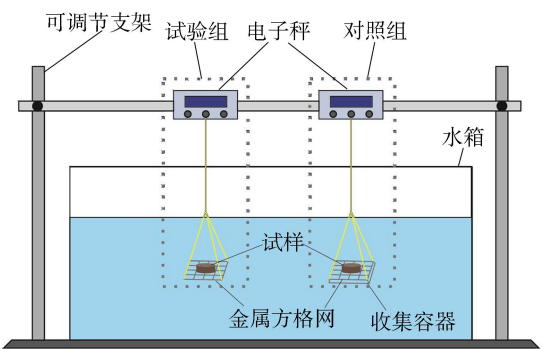


图 3 崩解试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of disintegration test device

随着生物胶含量的增大,试样的抗崩解性能逐渐提升,且崩解率曲线均出现完整的 3 个阶段(图 4)。即生物胶含量的增大使得试样内部土体颗粒间黏聚力提升,土体受到水分浸润而崩解的程度降低;随着压实度的提升,试样崩解率曲线出现明显延后,当压实度为 98% 时崩解率曲线大幅度延后。由此可知,试样压实度的提升使得试样间接触更为紧密,试样中孔隙减小,水分浸润试样所需时间延长,且生物胶可以更有效地胶结土体颗粒。

在相同压实度条件下,随着生物胶含量的增大,试样稳定前崩解阶段所经历时间出现小幅度延长(图 4),由此可知,生物胶含量的增大有利于试样内部土体颗粒的相对稳定性,减缓试样土体因水分浸润而崩解剥落的速度。试样稳定崩解阶段的斜率,即稳定崩解阶段试样崩解的速率随生物胶含量的提升而明显降低,由此可知,生物胶含量的增大可以较为明显地减缓水分在充满试样孔隙后对试样土体的作用力,使得土体颗粒从试样中脱离所需的时间延长。试样稳定后崩解阶段的稳定崩解率随生物胶含量的增大而明显降低,即在崩解完成后试样残留质量随生物胶含量的增大而增大,试样崩解后完整性提升。

由图 4(b)和图 5 可知,瓜尔胶改良黏土试样抗崩解性能整体上强于黄原胶改良黏土试样;复合胶改良黏土试样抗崩解性能在质量分数达到 1.5% 后明显强于单一生物胶改良黏土试样。黄原胶、瓜尔胶改良黏土试样稳定前崩解阶段平均持续时间分别为 50、70 s。当复合胶质量分数为 2.0% 时,改良黏土试样无稳定崩解阶段,其余复合胶改良黏土试样稳定前崩解阶段平均持续时间为 90 s。

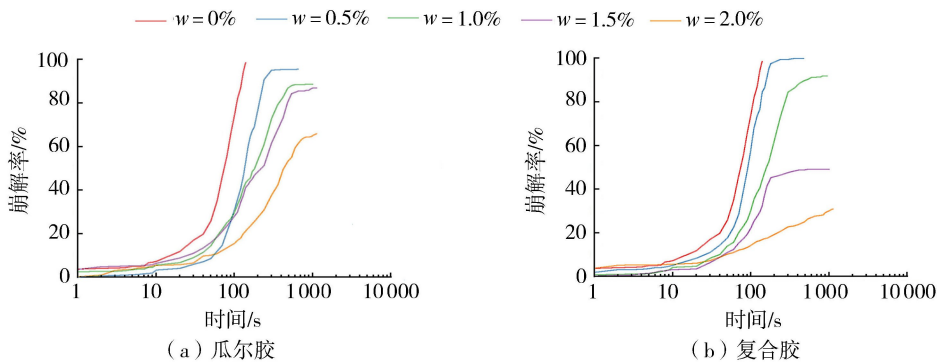


图 5 压实度 94% 时瓜尔胶与复合胶改良黏土的崩解率-时间关系曲线

Fig. 5 Disintegration rate-time curve of guar gum and compound gum modified clay with 94% compaction degree

由表 1 可知,瓜尔胶改良黏土试样的崩解率均低于黄原胶改良黏土试样,当质量分数为 2.0% 时,瓜尔胶改良黏土试样的崩解率为黄原胶改良黏土的 77.64%。复合胶改良黏土试样在质量分数达到 1.5% 后崩解率大幅度减小,当质量分数为 2.0% 时,其崩解率分别为黄原胶改良试样与瓜尔胶改良试样的 36.45% 与 46.95%。由此可知,瓜尔胶改良黏土抗崩解性能略高于黄原胶改良试样。复合胶改良试样在质量分数达到 1.5% 后,抗崩解性能相比于单一生物胶大幅度提升。

2.2 崩解破坏形态分析

由图 6~8 可知,不同压实度下改良试样的崩解破坏形态均随生物胶含量的增大而呈现出残余颗粒体积明显增大的趋势。当生物胶质量分数为 0.5% 时,残余土体颗粒均呈粒状,土体颗粒之间存在较小黏聚力,使得部分细小颗粒得以团聚并稳定于金属方格网上。随着生物胶含量的增大残余土体颗粒转变为块状,土体颗粒间黏聚力增强,使得试样能有效以较大团聚状态稳定,不再因水的作用而产生进一步崩解。当压实度达到 98% 或生物胶质量分数达到 2.0% 时,试样残余土体遭受崩解破坏程度较低,可以较好地维持试样崩解前的形态,仅试样外部与水充分接触部分发生崩解,试样内部土体颗粒相互之间黏聚力较大,可以稳定于金属方格网之上。

对于单一生物胶而言,在不同质量分数及不同压实度的情况下,瓜尔胶改良黏土的崩解破坏程度均小于黄原胶改良黏土试样,当质量分数达到 1.5% 后,瓜尔胶改良黏土试样的破坏形态均呈现出峰状,相比于压实度为 90% 的黄原胶改良试样所呈现的块状,具有更大的体积与更强的稳定性,试样残余部分为一个整体,

表 1 不同质量分数生物胶改良黏土的稳定崩解率

Table 1 Stable disintegration rate of modified clay with different content of biological glue				
生物胶	崩解率/%			
	w=0.5%	w=1.0%	w=1.5%	w=2.0%
黄原胶	99.67	98.08	91.83	84.97
瓜尔胶	95.62	88.61	86.88	65.97
复合胶	99.87	91.91	49.10	30.97

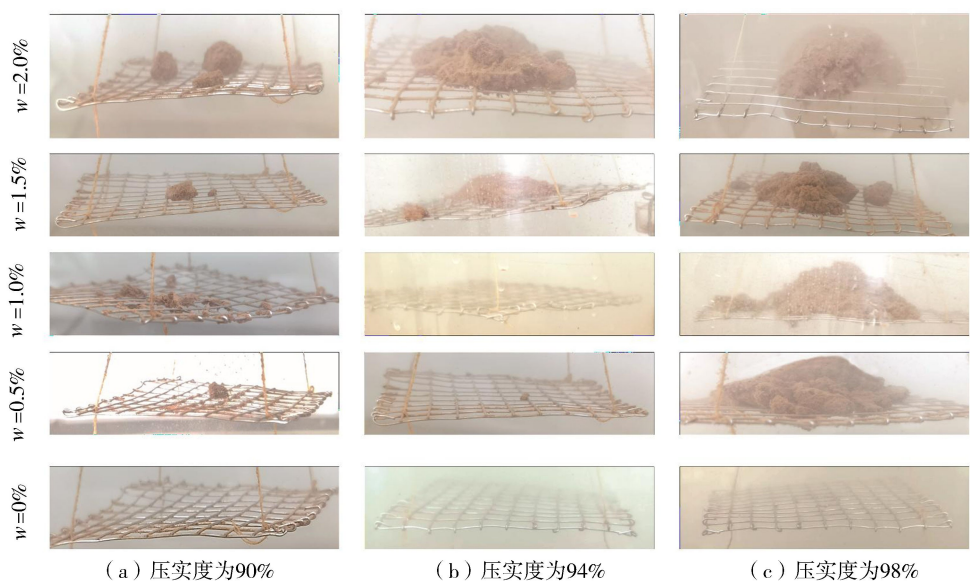


图 6 黄原胶改良黏土稳定崩解破坏形态

Fig. 6 Stable disintegration failure pattern of xanthan gum improved clay

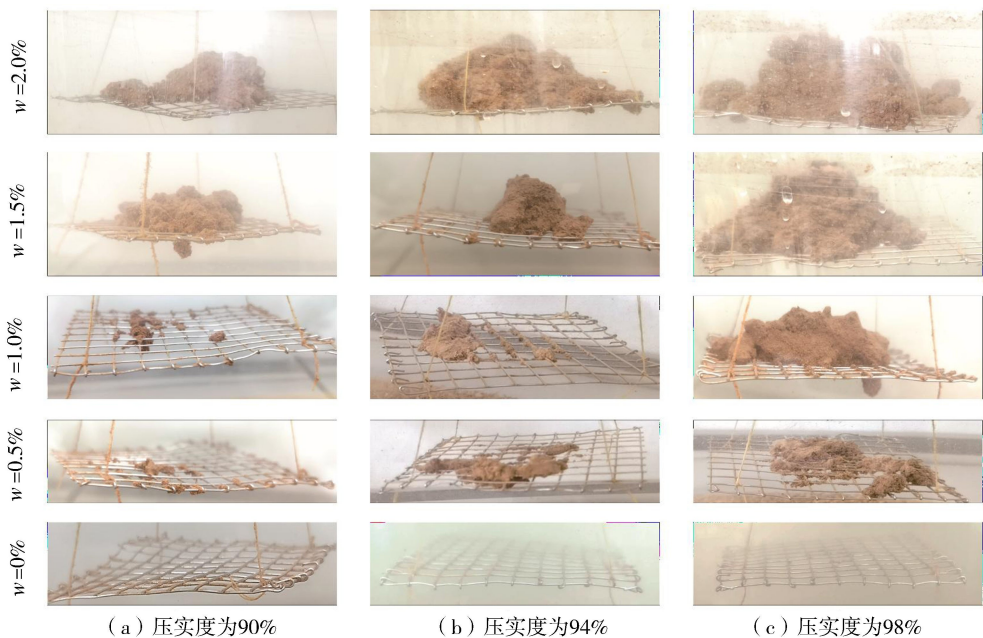


图 7 瓜尔胶改良黏土稳定崩解破坏形态

Fig. 7 Stable disintegration failure pattern of guar gum improved clay

较好地保持其状态。对于复合生物胶而言,当压实度达到 94%,生物胶质量分数达到 1.5% 后,其崩解破坏形态呈现圆饼状,基本维持试样浸水前状态,即此时复合胶改良黏土试样具有较好的抗崩解特性,浸水后其崩解破坏程度较小,仅试样外层出现少量土体颗粒脱落,使得试样形态未发生较大变化。相较于单一生物胶具有更为显著的抗崩解特性。

3 改良机理

生物胶改良黏土的抗崩解能力得到显著提高,未改良与改良黏土的崩解示意图如图 9 所示。对于未改良的素土试样,土体颗粒间具有黏聚力,可以在浸水前较好地保持试样的形态。当试样浸水后,试样中的孔隙迅速被水填充,在水的浸润作用下,试样中土体颗粒逐渐崩解分离,外层颗粒分离后内部颗粒变为外层颗粒,同样受水的浸润作用而分离,直至试样完全崩解。几乎不存在土体颗粒黏聚残留的情况。

对于改良黏土试样,生物胶填充于颗粒孔隙之中,形成了较为牢固的结构,可以有效保持试样浸水前的

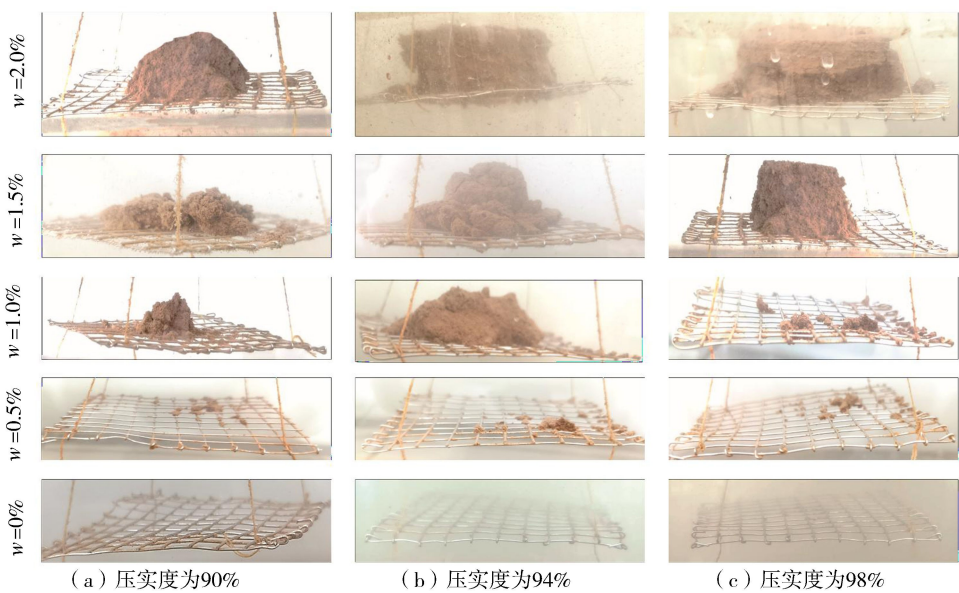


图 8 复合胶改良黏土稳定崩解破坏形态

Fig. 8 Stable disintegration failure pattern of compound gum improved clay

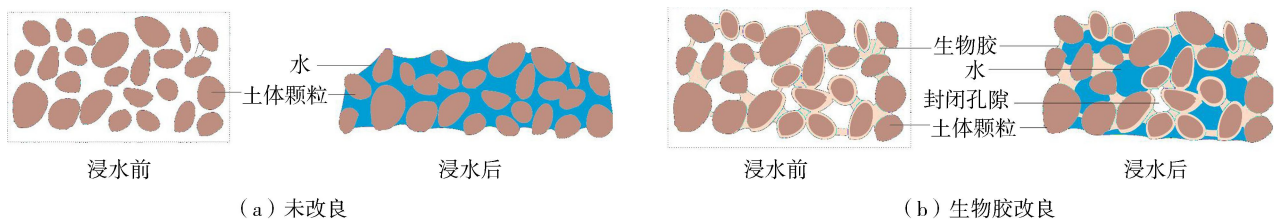


图 9 未改良与改良黏土崩解示意图

Fig. 9 Schematic diagram of disintegration of unmodified and improved clays

形态。当试样浸水后,由于生物胶的存在,使得试样孔隙度相对减小,外部环境中的水浸入试样的时间延长。因此,试样拥有更长的崩解前稳定阶段,在此阶段试样孔隙中的气体因水的浸入而被挤出,水逐渐充填试样中的孔隙,试样未发生明显的崩解。部分孔隙因生物胶的作用,形成封闭孔隙,使得外部环境中的水无法浸入,进而减少水的浸润作用。随着浸润时间的延长,孔隙逐步被填充,试样外层部分颗粒受水的浸润作用而崩解分离,内部颗粒间随着生物胶含量的提升,其对土体颗粒的包裹联结能力增强,使内部颗粒具有更强的稳定性,崩解程度降低。当崩解进行到一定程度,试样体积与表面积减小,生物胶可以有效维持残余部分稳定性,进而使得试样基本保持稳定,土体颗粒不再崩解。

当试样压实度提升,试样中土体干密度增大,孔隙度减小。对于未改良素土试样,土体颗粒间黏聚力较小,在水的浸润作用下同样完全崩解。随着生物胶含量的提升,土体颗粒间黏聚力增大,试样中出现大量封闭孔隙,环境中的水无法浸入,减少了对内部土体颗粒的浸润作用,使得试样崩解完成后的残余部分体积增大。

质量分数为 2.0% 的黄原胶、瓜尔胶及复合胶改良黏土试样的 SEM 图像如图 10 所示。由图 10 可知,生

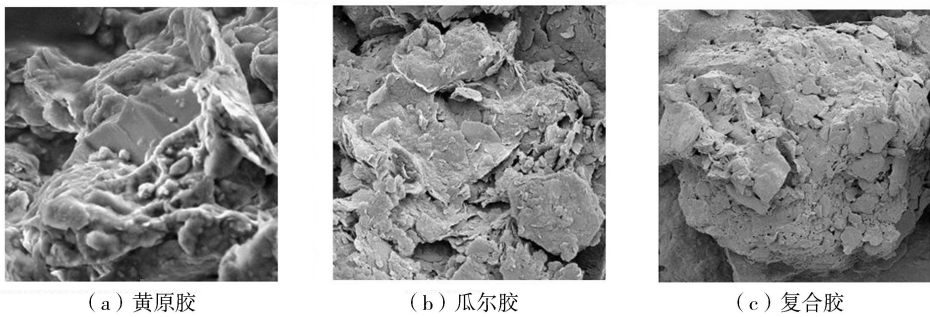


图 10 改良黏土试样 SEM 图像

Fig. 10 SEM image of improved clay sample

物胶均呈现凝胶状,其通过一系列作用增强黏土试样的抗崩解能力以改良黏土:①包裹作用。生物胶对土体颗粒进行包裹,使得土体颗粒与外部环境中的水相互隔绝,减少土体颗粒吸水膨胀而产生的体积变化。当水浸润试样时,未被包裹的土体颗粒受水的浸润作用而崩解分离,被包裹的土体颗粒可以有效保持其原有状态,稳定于试样之中,宏观表现为试样的崩解率降低。②联结作用。生物胶的羟基(—OH)和羧基(—COOH)可以形成离子键相互联结,使土体颗粒相互联系,共同组成较为稳定的整体,使试样中土体颗粒具有更强的黏聚力,抵抗水的浸润作用,提升试样完整性。③填充孔隙。生物胶掺入土体后与细小颗粒形成基质,胶结加固土体并填充粒间孔隙,使得部分土体颗粒间形成封闭孔隙,阻隔水的浸入,使得内部颗粒减少与水的接触,进而提升试样的抗崩解性能。

由图 10 可知,在相同生物胶含量的改良黏土试样中,瓜尔胶改良黏土对土体颗粒的包裹联结程度更大,可以有效地将较多土体颗粒结合成一个整体,拥有更强的稳定性。复合胶因其特有的协同增效作用,可以有效改善土颗粒之间的黏结强度、提高土体黏聚力及力学强度^[25]。其协同增效作用的机理近年来一直存在争议,一般认为其协同增效作用是通过静电作用、氢键作用等作用力协同完成的^[26]。静电作用是形成高分子复合物的主要作用力,可以通过改变电荷密度,影响天然高分子间的相互作用。氢键对物质的聚集状态和结构等方面有很大影响,可以显著提高物质的稳定性。黄原胶分子链在溶液中形成螺旋结构,进一步提升凝胶的稳定程度,分子侧链上的官能团起到良好的黏附效果,瓜尔胶中的半乳糖与黄原胶螺旋结合后形成更为稳定的三维网状结构,进而使得试样中土体颗粒得以更有效地黏附在一起,抵抗侵蚀效果增强。表现为其对土体颗粒的包裹联结作用更为紧密,大幅度提升试样的整体性,对试样的抗崩解能力有显著的提升。

在生物胶含量相同情况下,复合胶中生物胶质量为单一生物胶的 50%,且由于两种生物胶的协同增效作用使得复合胶在含量较小时无法充分包裹黏结土体颗粒,因而在质量分数低于 1.0% 时其抗崩解特性较差。当质量分数大于 1.0%,复合胶充分有效包裹土体颗粒,使得试样黏结为一个整体,其抗崩解特性大幅度提升。

4 结 论

- a. 生物胶的掺入使得黏土抗崩解性能得到大幅度提升,随着生物胶含量的增大,改良黏土开始出现崩解的时间大幅度延后,崩解速率减缓,崩解后的稳定崩解率降低。
- b. 复合胶改良黏土抗崩解特性在质量分数大于 1.0% 后强于单一生物胶,瓜尔胶改良黏土抗崩解特性强于黄原胶。
- c. 随着黏土压实度的提升,生物胶改良黏土抗崩解性能明显提升。试样压实度越大,颗粒间接触越紧密,生物胶黏附作用越明显,抗崩解特性越大。在设计的试验中,当压实度为 98% 时效果最显著。
- d. 黏土崩解破坏过程均由试样外层向内部破坏,随着生物胶含量及试样压实度的增大,生物胶对于土体颗粒的黏附效果增强,黏土试样抗崩解特性增强。

参考文献:

[1] 叶伟,马福恒,胡江,等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):102-109. (YE Wei,MA Fuheng,HU Jiang,et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):102-109. (in Chinese))

[2] 朱伟,赵笛,范惜辉,等. 渣土改良为流动化回填土的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):134-139. (ZHU Wei,ZHAO Di,FAN Xihui,et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):134-139. (in Chinese))

[3] 李家春,崔世富,田伟平. 公路边坡降雨侵蚀特征及土的崩解试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2007(1):23-26. (LI Jiachun,CUI Shifu,TIAN Weiping. Erosion characteristic of road slope and test of soil disintegration[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2007(1):23-26. (in Chinese))

[4] 李喜安,黄润秋,彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3207-3213. (LI Xi'an,HUANG Runqiu,PENG Jianbing. Experimental research on disintegration of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Sup1):3207-3213. (in Chinese))

[5] 张抒,唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(6):1668-1674. (ZHANG Shu,TANG

- Huiming. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(6):1668-1674. (in Chinese))
- [6] 王菁莪,项伟,毕仁能. 基质吸力对非饱和重塑黄土崩解性影响试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(11):3258-3262. (WANG Jing'e, XIANG Wei, BI Renneng. Experimental study of influence of matric suction on disintegration of unsaturated remolded loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(11):3258-3262. (in Chinese))
- [7] PATIL U, SHELTON A, AQUINO E. Bioengineering solution to prevent rainfall-induced slope failures in tropical soil[J]. Land, 2021,10(3):299.
- [8] 孙政. 生物酶改良粉质黏土的应力-应变特性试验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
- [9] 彭劫,商志阳,曹天赐,等. 高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(1):99-104. (PENG Jie, SHANG Zhiyang, CAO Tianci, et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,51(1):99-104. (in Chinese))
- [10] LIU J, FENG Q, WANG Y, et al. The effect of polymer-fiber stabilization on the unconfined compressive strength and shear strength of sand[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017,2017:1-9.
- [11] WANG Y, YANG K, TANG Z. In situ effect of combined utilization of fly ash and polyacrylamide on sand stabilization in North China[J]. Catena, 2018,172:170-178.
- [12] DING X, XU G, LIU W, et al. Effect of polymer stabilizers' viscosity on red sand structure strength and dust pollution resistance [J]. Powder Technology, 2019,352:117-125.
- [13] JEON I K, QUDOOS A, LEE H, et al. Effect of PVA/PVAc based polymer coating on dust reduction in playground[J]. Applied Sciences, 2021,11(7):3144.
- [14] HOSSEIN S, MOHAMMAD B, ALI R. Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019,157:187-195.
- [15] KALRA N, JAIN M, JOSHI H, et al. Flyash as a soil conditioner and fertilizer[J]. Bioresource Technology, 1998,64(3):163-167.
- [16] 倪静,王子腾,耿雪玉. 植物-生物聚合物联合法固土的试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,356(11):169-175. (NI Jing, WANG Ziteng, GENG Xueyu. Experimental study on combined plant-biopolymer method for soil stabilization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020,356(11):169-175. (in Chinese))
- [17] CHANG L, CHO G. Strengthening of korean residual soil with β -1,3/1,6-glucan biopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2012,30:30-35.
- [18] CABALAR A, CANAKCI H. Direct shear tests on sand treated with xanthan gum[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2011,164(2):57-64.
- [19] LATIFI N, HORPIBULSUK S, CHRISTOPHER L. Xanthan gum biopolymer: an eco-friendly additive for stabilization of tropical organic peat[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(9):1-10.
- [20] 付宏渊,查焕奕,潘浩强,等. 生物聚合物改良预崩解炭质泥岩水稳性及冲刷试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022,53(7):2633-2644. (FU Hongyuan, ZHA Huanyi, PAN Haoqiang, et al. Experimental study on water stability and scour resistance of biopolymer modified disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(7):2633-2644. (in Chinese))
- [21] SULAIMAN H, TAHA M, ABD R, et al. Performance of soil stabilized with biopolymer materials-xanthan gum and guar gum[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2022,128:883-893.
- [22] WANG F, WANG Y, SUN Z. Conformational role of xanthan gum in its interaction with guar gum[J]. Journal of Food Science, 2002,67(9):3289-3294.
- [23] TAKEMASA M, NISHINARI K. Solution structure of molecular associations investigated using NMR for polysaccharides: xanthan / galactomannan mixtures[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2016,120(2):3027-3037.
- [24] 李家春,田伟平. 工程压实黄土崩解试验研究[J]. 重庆交通学院学报,2005,24(5):74-77. (LI Jiachun, TIAN Weiping. Experiment of compacted loess disintegration[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005,24(5):74-77. (in Chinese))
- [25] 王天亮,王林,刘松松,等. 黄原胶和瓜尔胶改良膨胀土力学特性试验研究[J]. 中国铁道科学,2023,44(2):1-10. (WANG Tianliang, WANG Lin, LIU Songsong, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil improved by xanthan gum and guar gum[J]. China Railway Science, 2023,44(2):1-10. (in Chinese))
- [26] TAKO M, ASATO A, NAKAMURA S. Rheological aspects of the intermolecular interaction between xanthan and locust bean gum in aqueous media[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 2014,48(12):2995-3000.