

XYX型生物聚合物改良黏土抗开裂及抗冲刷特性研究

何承宗¹,赵岩²,刘瑾^{1*},梅红¹,高何敬然¹,祁长青¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 211100; 2. 浙江华东工程咨询有限公司,浙江 杭州 311122)

摘要: 为探究 XYX 型生物聚合物改良黏土抗开裂及抗冲刷特性,进行若干开裂及冲刷试验。试验结果表明:在干燥条件下,随着生物聚合物的掺入,试样的抗开裂特性明显改善,生物聚合物的掺入增强了土体的抗拉强度,使其大于试样因干燥脱水而产生的张拉应力,试样随生物聚合物掺量的增加由发生开裂转变为脱水聚缩,且试样残留的含水率随生物聚合物掺量的增加而增加,XYX 型生物聚合物的掺入增强了土体的保水性。素土试样在冲刷后,发现明显的冲蚀破坏痕迹,冲刷率达 49.56%,而生物聚合物改良土冲刷后结构仍较为完整。当生物聚合物掺量达 2.0% 时,试样的冲刷率仅为 0.81%,说明生物聚合物改良后黏土拥有良好的抗冲刷效果。同时微观机理分析得出,XYX 型生物聚合物可以有效填充黏土颗粒间的空隙,使其结构更加紧密,能有效改良黏土的抗开裂和抗冲刷特性。

关键词: 黏土;开裂试验;冲刷试验;微观机理分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Study on Anti-cracking and Anti-scouring Characteristics of XYX Biopolymer Modified Clay

HE Chengzong¹, ZHAO Yan², LIU Jin^{1*}, MEI Hong¹, GAOHE Jingran¹, QI Changqing¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, HoHai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang 311122, China)

Abstract: In order to explore the anti-cracking and anti-scouring characteristics of XYX biopolymer modified clay, several cracking and scouring tests were carried out. The test results show that under dry conditions, with the addition of biopolymer, the anti-cracking characteristics of the sample are significantly improved. The addition of biopolymer enhances the tensile strength of the soil, which is greater than the tensile stress of the sample due to drying and dehydration. With the increase of the biopolymer content, the sample changes from cracking to dehydration and shrinkage, the residual moisture content of the sample increases with the increase of the content of biopolymer. The addition of XYX biopolymer enhances the water retention of the soil. After scouring, plain soil samples develops obvious erosion damage traces, and the scouring rate is 49.56%, while the structure of biopolymer improved soil is still relatively complete. When the content of biopolymer reaches 2.0%, the scouring rate of the sample is only 0.81%, indicating that the clay improved by biopolymer has a good anti scouring effect. At the same time, the micro mechanism analysis shows that the XYX biopolymer can effectively fill voids between clay particles, make the clay structure more compact, and effectively improve the anti-cracking and anti-scouring characteristics of clay.

Key words: clay; cracking test; scouring test; micro mechanism analysis

收稿日期:2021-10-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41877212);中央高校基本科研业务费资助项目(B200202013,B210203037)

作者简介:何承宗(1998-),男,福建漳州人,硕士研究生,主要从事环境工程地质方面的研究。

* 通讯作者:刘瑾(1983-),女,福建漳州人,博士,教授,主要从事环境工程地质方面的研究。

黏性土在我国广泛分布存在,自然沉积状态下黏性土的密实度较高^[1]。但如今大量的工程建设开挖令许多植被遭严重破坏,黏土边坡土质较为松散,在恶劣天气的影响下易发生各种危害边坡稳定的地质问题^[2-3]。

黏性土的水敏性强,当发生强降雨时,由于土体本身含水率的变化会引起土体工程性质极大变化^[4-5]。此特性极易导致黏性土在恶劣天气下发生土体开裂、降雨冲刷导致强度损失及失稳等问题。黏性土干缩开裂在自然界中随处可见,这一现象大大弱化黏土体的工程特性,直接诱发很多地质和岩土工程问题。近年来国内外学者对黏性土干缩开裂开展了一系列研究,唐朝生等^[6-7]对黏土试样进行开裂试验研究,并分析各影响因素对土体开裂的影响;Lakshmikantha 等^[8]对模具形状分析后研究其对裂隙发育过程的影响;Fleureau 等^[9]分析了黏土中干缩裂缝的形成和扩展,直观了解了几种高岭石和蒙脱石为主要黏土矿物的黏性土干缩开裂行为;李正辉等^[10]通过计算机图像处理定量分析了含粗颗粒黏性土表面裂隙的几何特征,认为粗颗粒在一定程度上可阻碍裂隙宽度的发展,促进裂隙长度发展。Baram 等^[11]研究了黏性土干燥裂缝对地下蒸发和盐渍化的影响,在结果表明干旱区干燥裂缝会诱导地下较深土体的蒸发和盐渍化;Tollenaar 等^[12]对不同初始和边界条件下的黏土泥浆样品进行了一系列干燥试验,发现产生裂隙时的含水量主要取决于干燥速率,而不仅仅取决于初始含水量,同时由于受张拉应力控制裂隙在土壤表面倾向于相互垂直相交。

在黏性土冲刷特性方面,陈开圣^[13]以红粘土边坡为研究对象,对边坡的冲刷破坏过程进行了全程观测,验证了降雨条件下红粘土边坡的破坏和其它土类不同;吴月勇等^[14]发现黏性原状土的抗冲刷特性随颗粒的减小而增大。Yun 等^[15]为恢复海洋生态而建立人工礁体,研究了不同土壤类型的沉降和抗冲刷特性;Dong 等^[16]针对高含沙河流撕毁河床现象,通过试验分析黏土干密度、含水率、塑性指数与抗剪强度、力学性能的关系,为研究河床底部冲刷撕裂创造条件。针对黏性土在恶劣天气下易发生土体开裂、降雨入渗导致强度损失及失稳等问题,本文通过开裂试验和冲刷试验对 XYY 型生物聚合物改良后的黏土抗开裂及抗冲刷特性进行探究。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

本次试验采用南京市栖霞区某边坡的粉质黏土,试验土样的物理性质如表 1 所示,粒径分布曲线如图 1。试验采用的黏土改良材料是 XYY 型生物聚合物,外观为类白色的粉末状物质,黏度大,当掺量为 1.0% 时,溶液的黏度高达 10 600 mPa·s。此生物聚合物是自主研发,黄单胞菌发酵葡萄糖产生,假塑性是其主要特性。在一定的条件下,XYY 型生物聚合物掺入会使液体的粘度显著增加,且表现出不易酶解的稳定性,适宜作为环保工程材料出现在工程现场。

表 1 试验土样的物理性质

Tab. 1 Physical properties of test soil samples		
液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 I_p
34.3	17.5	16.8
天然含水率 $\omega/\%$	天然干密度 $\rho_d/\%$	比重 G_s
21.8	1.65	2.71
最优含水率 $\omega_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/\%$	
18.3	1.78	

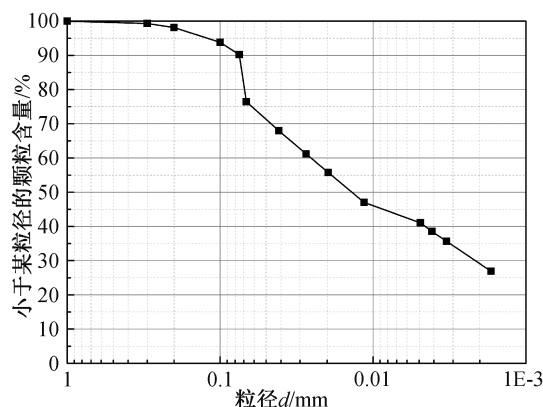


图 1 黏土粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of clay

1.2 开裂试验方案

将现场取回后的土样经过风干并碾碎后过 2 mm 细筛,将过筛后的土样与 XYY 型生物聚合物粉末等比例混合成不同生物聚合物掺量的试验土样。将其在直径为 20 cm、高 6 cm 的圆柱形有机玻璃容器中配置成含水率为 50% 的黏土试样,将有机玻璃容器盖密封静置 24 h 以均匀含水率。有机玻璃容器底部使用环氧树脂粘贴 60 目的砂纸以模拟原状土体间的界面粗糙度,在静置一昼夜后,对不同生物聚合物改良土开盖进行风干干燥,干燥条件为恒定温度 (25 ± 2) °C 的空调间,通风条件良好,试验在干燥条件下每 2 h 使用精度 0.01 g 的

电子秤称量试样重量的变化,计算并绘制不同 XY 型生物聚合物掺量改良土试样含水率的实时变化曲线,以研究不同生物聚合物掺量改良土的蒸发特性。同时使用固定在支架上的拍照设备对试样表面拍照,实时记录各试样表面裂隙发展情况。

1.3 冲刷试验方案

本文冲刷试验的目的在于研究 XY 型生物聚合物改良土的抗冲刷性能的变化。试验采用自行设计的冲刷模拟装置进行,试验前,将配置好土样与 XY 型生物聚合物粉末的混合物,加入定量的 80 ℃ 恒温去离子水,使得试样平均含水率为 18.4%,将拌制好的黏土均匀地分为三等分依次平铺在试样盒中 (20 cm×15 cm×5 cm) 中,每次平铺后将黏土击实到指定高度,以达到 1.65 g/cm³ 的干密度。将养护两周的试样放置在坡度约 45° 的

斜坡上进行冲刷,试验中冲刷强度为 3 L/min,冲刷时间为 180 min。

2 试验结果及分析

2.1 开裂试验结果与分析

在黏土试样的干燥脱水过程中,土体内水分蒸发引起重量发生改变,通过实时称重记录不同掺量改良土试样的重量,得到各试样蒸发过程中的含水率变化曲线,试验根据试样含水率实时变化的结果,进一步计算了不同掺量试样的蒸发速率 R_e ,相关计算如式(1)所示:

$$R_e = \frac{m_t - m_{t-1}}{t} \quad (1)$$

不同 XY 型生物聚合物掺量改良土在开裂试验中试样的蒸发速率与含水率变化曲线如图 2 所示。

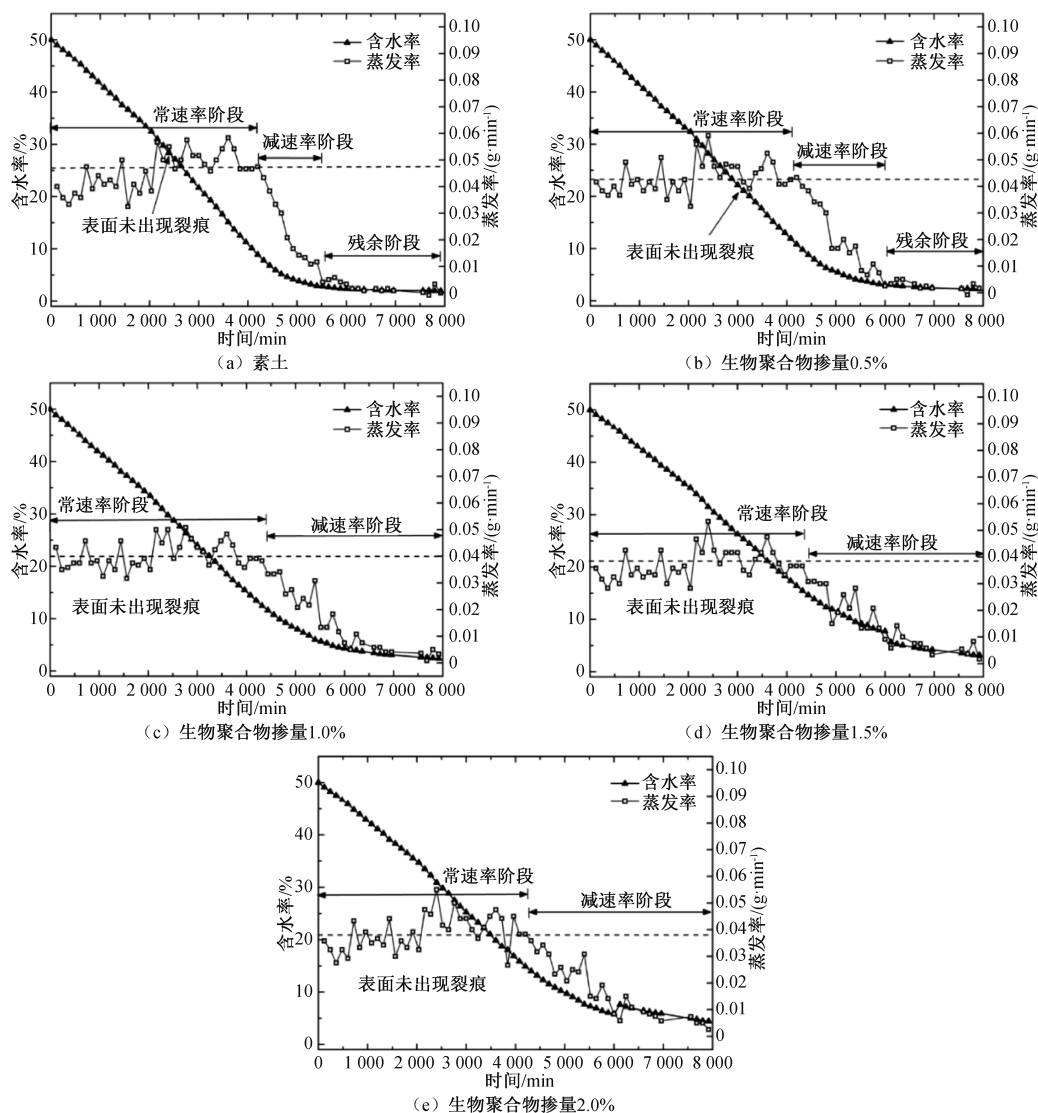


图2 生物聚合物掺量不同的改良土蒸发曲线

Fig. 2 Evaporation curve of improved soil with different biopolymer contents

由图可以看出,在试验进行过程中按照蒸发速率可以将试样的蒸发过程分为常速率、减速率和残余这三个阶段。随着生物聚合物掺量的增加,在常速率阶段,各试样的蒸发速率和持续时间基本不变,而随着生物聚合物掺量的增加,试样在常速率阶段的平均蒸发速率有所下降,当 XYY 型生物聚合物掺量从 0% 增至 2%,试样平均蒸发速率从 0.48 g/min 下降至 0.38 g/min。在减速率阶段:各试样对应减速率阶段的开始时间基本不变,而随着 XYY 型生物聚合物掺量的增加,试样减速率阶段相对应的持续时间逐渐延长,随 XYY 型生物聚合物掺量从 0% 增至 2%,试样减速率阶段持续时间从 1 680 min 增加至 3 600 min。在残余阶段:各试样对应残余阶段的平均蒸发率基本为 0 g/min,表明试样已经干燥脱水完毕,试样的总质量不再发生变化。而随生物聚合物掺量的增加,试样残余阶段相对应的持续时间逐渐缩短,随生物聚合物掺量从 0% 增至 2%,试样减速率阶段持续时间从 1 920 min 下降至 0 min。当素土试样平均蒸发率降至 0 g/min 时,XYY 型生物聚合物改良土试样仍有一定的蒸发速率,这表明 XYY 型生物聚合物对于试样的保水性有一定的提升。

图 3 为素土试样在干燥试验中随时间变化的裂隙发育情况,由图可知,试样表面出现裂隙的时间约为 40 h,此时试样仍处于常速率蒸发阶段,土体含水率相对较高。随着干燥时间的逐渐增加,已有的细小的裂隙开始发育并开始向外延展的同

时也开始发育新的裂隙。当干燥蒸发时间约 52 h 时,试样裂隙基本发育完全且形态不再变化,而试样含水率仍然不断降低,当干燥时间达 76 h 时,试样的含水率基本不再变化,试样表面最终发育的裂隙贯穿整个试样表面。

图 4 为 0.5% XYY 型生物聚合物改良土试样在干燥试验中随时间变化的裂隙发育情况,由图可知,随着生物聚合物的掺入,0.5% 生物聚合物掺量的改良土在第 40 h 仅出现少量裂隙,此时试样仍处于常速率蒸发阶段,土体含水率相对较高。与素土试样不同的是,随着干燥时间的逐渐增加,已有的细小的裂隙开始向外延展但没有继续产生新的裂隙。当干燥蒸发时间约 52 h 时,试样裂隙基本发育完全且形态不再变化,而试样含水率仍然不断降低,当干燥时间达 76 h 时,试样的含水率基本不再变化,试样表面最终发育的裂隙没有贯穿试样表面,其发育裂隙主要集中在试样的边界,试样未开裂部分主要表现为向试验盒中心缩聚,且裂隙条数明显较素土试样的裂隙条数少。

图 5 为不同 XYY 型生物聚合物掺量改良土在开裂试验结束后的裂隙发育对比,由图可知,随着生物聚合物掺量的继续增加,高于 0.5% 生物聚合物掺量的改良土试样在开裂试验结束后基本不发育裂隙,表现为试样整体随着开裂试验的进行呈圆饼状与边界分离并向试样中心缩聚。且随着生物聚合物掺量的增加,试样整体的收缩程度变大。

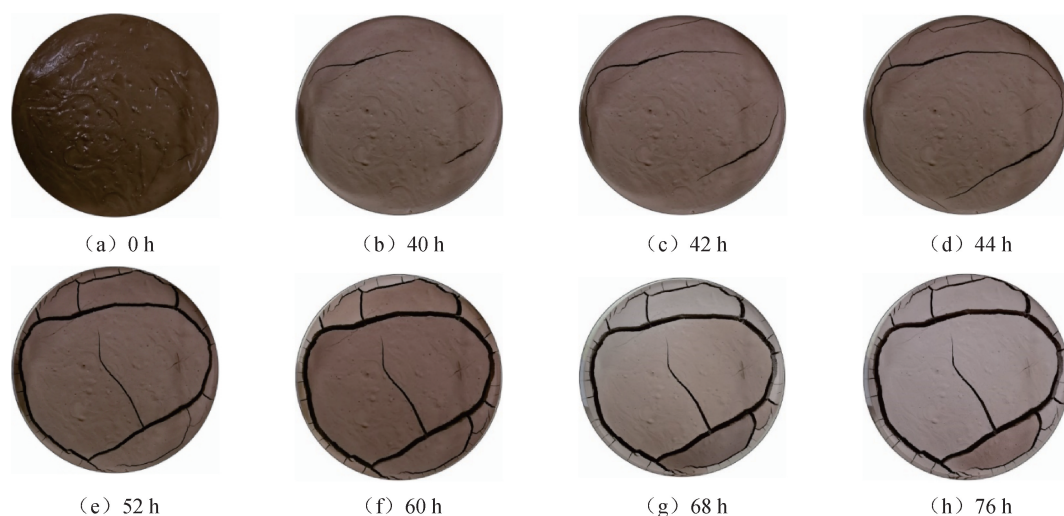


图 3 素土干燥不同时间对应的开裂图

Fig. 3 Corresponding cracking diagram of clay at different drying times

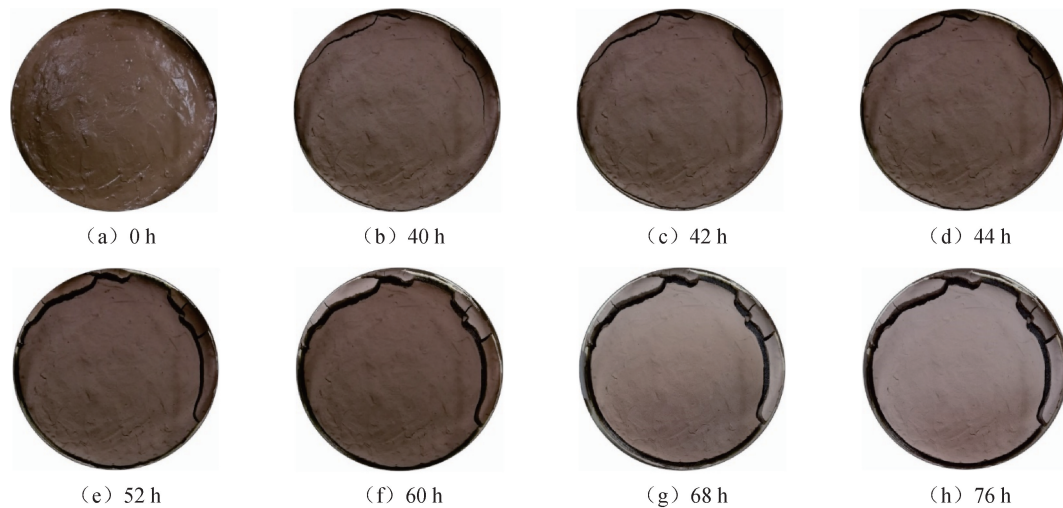


图4 改良土干燥不同时间对应的开裂图

Fig. 4 Cracking diagram of improved soil at different drying times



图5 不同生物聚合物掺量改良土开裂试验结束后的裂隙发育图

Fig. 5 Crack development of improved soil with different biopolymer contents after cracking test

由于土体在干燥脱水过程中,孔隙水在土体颗粒之间由于毛细作用形成弯液面,且其表面存在表面张力。干燥脱水过程中,随含水率的降低,试样的土体中逐渐产生较强的张拉应力,由于水分的损失,土体颗粒相互靠拢,宏观上表现为土体收缩变形。当土体在收缩变形的过程中产生的张拉应力大于试验土体的抗拉强度时,试验土体就会产生裂隙。随着生物聚合物掺量的增加,土体颗粒与生物聚合物分子形成的离子键作用力使得土体本身的抗拉强度明显高于土体因失水产生的张拉应力,土体本身不再发育裂隙,宏观上表现为克服土体底部与砂纸间的摩擦力,试样整体向中心缩聚,且生物聚合物掺量越高离子键作用就越强使得土体收缩越明显。

2.2 冲刷试验结果与分析

土质边坡在强降雨的气候条件下,受暴雨冲刷,极易产生地表径流,发生大量的水土流失,甚至导致边坡失稳发生滑坡等地质灾害。为了研究在降雨条件下XYX型生物聚合物改良土抗冲刷性能的变化,对素土试样及五个不同生物聚合物掺量改良土进行冲刷试验,在试验结束后将试样盒

中的残余土体放入烘箱中调至60℃通风干燥。称量其剩余质量 m_2 ,并定义试验土样的冲刷率 E_p 如式(2)所示:

$$E_p = \frac{m_0 + m_1 - m_2}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 —试样盒质量,g; m_1 —土体与生物聚合物粉末混合干质量,g。

通过试样在进行180 min的模拟降雨冲刷试验后,依据最终试样土体冲刷率对改良土试样的抗冲刷性能进行效果评价,冲刷率 E_p 越高则表明试样水土流失越严重,越低则表明试样的抗冲刷性能越好。

在降雨过程中雨水的淋滤以及冲刷作用下,表层土体颗粒逐渐剥离并分离出来随雨水流失,土体本身抵抗这种雨水作用的特性即为抗冲刷特性。本次冲刷试验采用小尺度的试样以便进行定量分析,不同掺量生物聚合物改良土试样的冲刷率的变化曲线如图6所示,由图可知,素土试样与改良土试样的冲刷率随冲刷时间变化具有很大的差异性,素土试样随着雨水的冲刷,土体表面在雨水的淋滤和冲刷作用下含水率不断增加,土体颗粒间自由水不断增加,颗粒间联结能力大大降低,

宏观上表现为试样的冲刷率随冲刷时间的增加整体呈线性增加,表明素土试样在雨水的冲刷作用下水土流失较为严重。随着土体中掺入 XYY 型生物聚合物粉末后,生物聚合物分子中的阴离子与土体颗粒表面富含的阳离子形成的离子键作用大大增强了土体颗粒间的联结能力,且当生物聚合物掺量为 0.5% 时,改良土试样的冲刷率就得到了明显的降低,说明少量的生物聚合物在改善土体抗冲刷性能中即可取得明显的效果,随着生物聚合物掺量的继续增加,改良土试样在不同冲刷时间下的冲刷率均不断下降,但生物聚合物掺量由 0.5% 增至 2.0% 时土体抗冲刷性能的改良程度明显低于 XYY 型生物聚合物掺量由 0% 增至 0.5% 时的土体抗冲刷性能的改良程度。

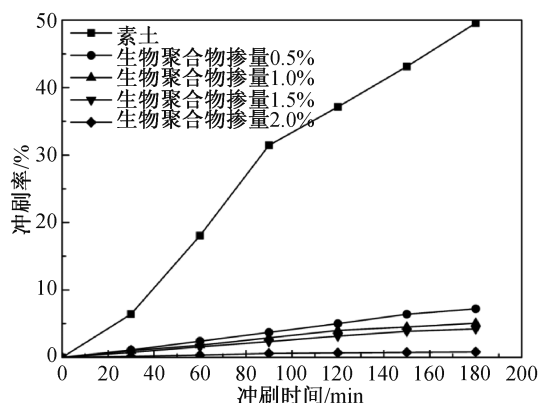


图 6 改良土冲刷率随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curve of scouring rate of improved soil with time

表 2 为经历 180 min 的冲刷试验后素土试样及不同 XYY 型生物聚合物掺量改良土试样的冲刷试验结果,从表中可知,素土试样在经历 180 min 的降雨冲刷后,总质量 1 500 g 的素土试样损失了 853.9 g 质量的土体,接近试样总质量的一半,冲刷率高达 49.56%。随着 XYY 型生物聚合物的掺入,0.5% 生物聚合物改良土试样的冲刷率仅为 7.20%,试样的冲刷率得到明显的降低,当生物聚合物掺量为 1.0% 时,试样的最终冲刷率为 5.07%;增至 2.0% 时,冲刷率降低到了 0.81%,生物聚合物改良土阶段试样冲刷率的降低程度,表明随着生物聚合物掺量的增加,改良土试样的冲刷率不断降低,且刚加入生物聚合物时,试样的冲刷率降低的效果最为明显。

试样的冲刷破坏形态如图 7 所示,结合表 2 的冲刷试验结果分析 XYY 型生物聚合物掺量对改良土抗冲刷特性的影响。素土试样在经历 180 min 的模拟强降雨冲刷后,表明发育明显的冲蚀破坏

痕迹,冲沟明显,冲刷率 E_p 为 49.56%,这表明未掺入生物聚合物的试样在冲刷后损失近一半的土体。而生物聚合物改良土在经历同时间的冲刷后,土体整体结构仍较为完整,冲蚀量低,没有明显发育冲沟,仅有部分水流冲击留下的细微水印,且随着生物聚合物掺量的增加,水印明显缩小,0.5% 生物聚合物掺量的改良土试样冲刷率为 7.20%,1.0% 掺量的试样冲刷率为 5.07%,当生物聚合物掺量为 1.5% 和 2.0% 时,试样的冲刷率仅为 4.21% 和 0.81%。对比生物聚合物掺量为 2% 的冲刷破坏试样图 7(f) 与未冲刷试样图 7(a) 几乎无异,这表明生物聚合物的掺加可以明显改良土体的抗冲刷特性。

表 2 冲刷试验结果

Tab. 2 Results of scouring test

试验编号	生物聚合物掺量/%	剩余质量/g	冲刷率/%
S1	0	853.9	49.56
S2	0.5	1 489.3	7.20
S3	1.0	1 521.3	5.07
S4	1.5	1 534.2	4.21
S5	2.0	1 585.1	0.81

3 微观机理分析

土体开裂和冲刷是由于土体颗粒结构发生破坏,颗粒间孔隙增大的共同结果。XYY 型生物聚合物的掺入可以与土体产生填充和胶结作用使得土体架构中的稳定性增加,同时 XYY 型生物聚合物的阴离子和亲水表面特性促进其与阳离子和其他多糖产生相互作用形成凝胶化,可以与黏土颗粒之间的孔隙结合,从而提高了黏土的抗开裂和抗冲刷特性。

XYY 型生物聚合物改良土进行扫描电镜观察,以探究生物聚合物改良后土体的机理试验试样的扫描电镜如图 8 所示,从图 8(a) 中我们可以观察到黏土颗粒之间存在空隙,遇水会填充,破坏了其本身的黏粒结构,导致其稳定性降低。在图 8(b) 中,我们可以观察到改良土颗粒的表面覆盖了大量白色的薄膜,这是由于 XYY 型生物聚合物遇水形成具有粘性的凝胶状薄膜覆盖在土颗粒表面而形成,这些凝胶状薄膜可以非常有效填充黏土颗粒表面的孔隙及裂缝,并增加黏土颗粒之间的有效接触面积。在图 8(c) 中,我们观察到生物聚合物遇水还可形成丝状胶质,产生的胶质可以使不直接接触的颗粒之间产生桥接作用,这个现象与图 8(a) 素土试样在电镜下照片作对比,表明生

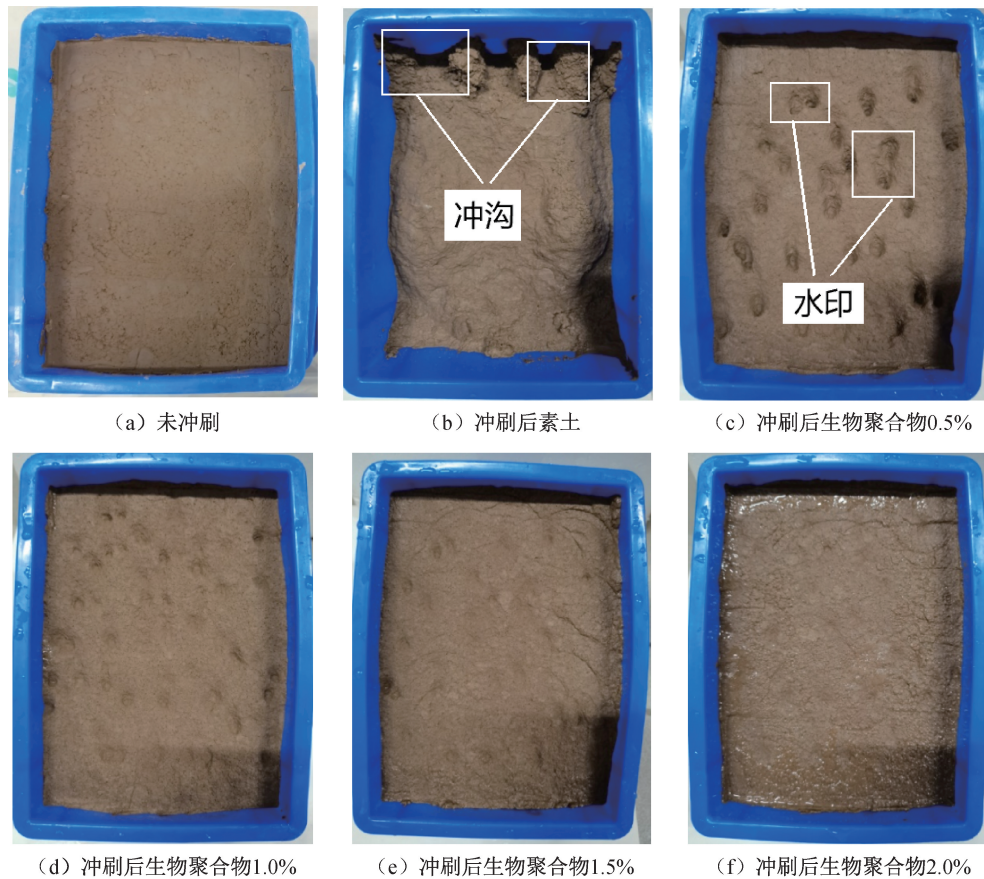


图7 试样冲刷破坏形态

Fig. 7 Erosion failure mode of the samples

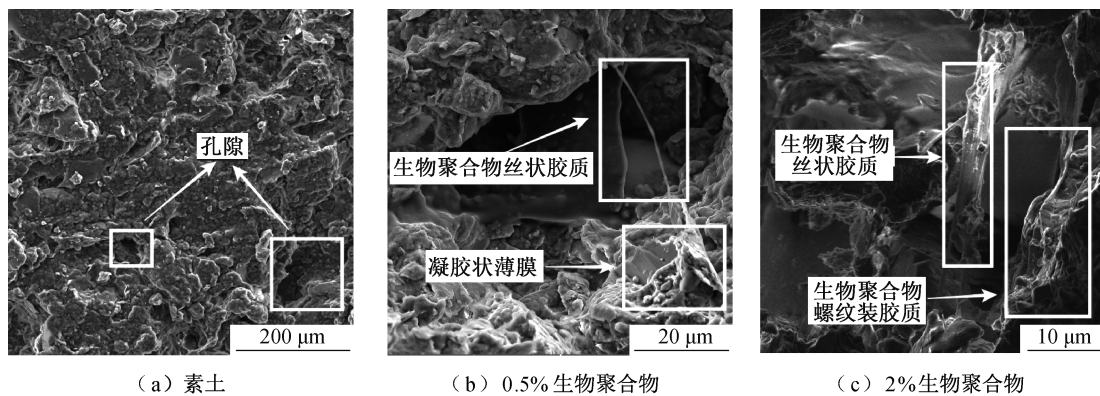


图8 试验试样的扫描电镜图像

Fig. 8 SEM images of the test samples

物聚合物处理后的强度值在很大程度上取决于孔隙空间中存在的生物聚合物胶质(以螺旋或织物的形式存在)的强度,同时可以观察到生物聚合物遇水形成的胶质自身具有一定的延展性,这些胶质可以使土体之间形成团粒,使得土颗粒之间的整体结构更为紧密,可以很大程度上提升黏土颗粒之间的黏结度以及结构的稳定性,从而大幅度改良土的抗开裂和抗冲刷特性。

4 结论

1)黏土中 XYX 型生物聚合物的掺入可明显改良土体抗开裂性能。试样残留的含水率随生物聚合物掺量的增加而增加,表明生物聚合物增强了土体的保水性。试样干燥开裂过程中,由于生物聚合物的掺入增强了土体的抗拉强度,使其大于试样因干燥脱水而产生的张拉应力,使得试样生物聚合物掺量的增加,在蒸发过程中并不会发

生开裂现象。

2)改良土试样的冲刷率降低,且随着 XYY 型生物聚合物掺量的增加,冲刷率降低率越来越小,在生物聚合物掺量为 0~0.5%时冲刷率降低最为明显。素土试样在冲刷后,发育明显的冲蚀破坏痕迹,冲刷率达 49.56%,而生物聚合物改良土冲刷后结构仍较为完整,仅发育少许雨水冲击形成的小水坑,而随着生物聚合物掺量的增加,该现象也逐渐消失。当生物聚合物掺量达 2.0%时,试样的冲刷率仅为 0.81%,这表明 XYY 型生物聚合物能显著改良黏土的抗冲刷效果。

3)XYY 型生物聚合物遇水会形成具有粘性的凝胶状薄膜,这些凝胶状薄膜可以非常有效地填充黏土颗粒表面的孔隙,使改良土整体结构更为紧密,不易开裂和被冲刷,提高了黏土的抗开裂和抗冲刷特性。

参考文献:

- [1]陈铁林,周成,沈珠江.结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J].岩土工程学报,2004(1):31-35.
- [2]罗先启,李海岭,葛修润,等.降雨条件下滑坡灾害及滑坡排水效果研究[J].岩土力学,2000,21(3):231-234.
- [3]张社荣,谭尧升,王超,等.强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):4102-4112.
- [4]谈云志,胡焱,曹玲,等.偏高岭土协同石灰钝化红黏土水敏性的机制[J].岩土力学,2020,41(7):2207-2214+2282.
- [5]张宏,何灵灵,刘海洋.呼和浩特地区压实红黏土收缩开裂特性研究[J].工程地质学报,2019,27(6):1311-1319.
- [6]唐朝生,施斌,刘春,等.黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J].岩土工程学报,2007,29(5):743-749.
- [7]唐朝生,施斌,刘春,等.影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J].水利学报,2007,38(10):1186-1193.
- [8]LAKSHMIKANTHA M R, PRAT P C, LEDESMA A. An Experimental Study of Cracking Mechanisms in Drying Soils[C]// Proceedings of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics. 2006:533-540.
- [9]FLEUREAU J M, WEI X, IGHIL-AMEUR L, et al. Experimental Study of the Cracking Mechanisms of Clay During Drying[C]// XV Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015:2101-2108.
- [10]李正辉,王世梅,金来福.粗颗粒对黏性土干缩开裂影响的试验研究[J].长江科学院院报,2019,36(6):99-105.
- [11]BARAM S, RONEN Z, KURTZMAN D, et al. Desiccation-Crack-Induced Salinization in Deep Clay Sediment[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(4):1533-1545.
- [12]TOLLENAAR R N, VAN PAASSEN L A, JOMMI C. Observations on the Desiccation and Cracking of Clay Layers[J]. Engineering Geology, 2017, 230, 23-31.
- [13]陈开圣.红粘土边坡降雨冲刷试验研究[J].公路工程,2015,40(5):18-22.
- [14]吴月勇,范力阳,陈国平,等.细颗粒黏性原状土的冲刷特性试验研究[J].水道港口,2017,038(5):453-457+483.
- [15]YUN D H, KIM Y T. Experimental Study on Settlement and Scour Characteristics of Artificial Reef with Different Reinforcement Type and Soil Type[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4):448-454.
- [16]DONG W S, JIANG X F, HE X F, et al. Study on the Clay Mechanical Characteristics of "Ripping Up the Bottom" in the Yellow River[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 212-213:108-112.

(责任编辑 周雪梅)