

黄原胶复合掺砂黏性土抗裂性能及其机理研究

黄兰华¹,赵宁宁²,戴承江¹,梅绪哲¹,刘瑾^{1*},王梓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 311100)

摘要: 采用黄原胶对掺砂黏性土进行复合改良,通过一系列不同黄原胶和砂粒含量条件下的干燥开裂试验,分析土体表层裂隙特征,探究不同黄原胶和砂粒含量对土体抗裂性能的影响,并对抗裂机理进行较深入的分析。研究表明:黄原胶和砂粒作为添加剂均能在一定程度上抑制裂隙发育,在二者共同作用下的土体具有更好的抗裂性能。当黏性土试样中黄原胶含量由0增加至0.25%时,其裂隙率由11.586%减小至0。当掺砂率小于30%时,土体开裂受影响较小,无黄原胶试样裂隙率在10%~14%之间,掺砂率增大至70%时,裂隙率降低至1.412%;0.15%黄原胶复合掺砂土样无开裂迹象。黄原胶能够增强黏土颗粒间的粘聚作用,与砂土颗粒胶结固化形成稳定结构,提升土体抵抗断裂的能力,从而达到增强黏性土抗裂性能的目的。

关键词: 黄原胶;掺砂量;黏性土;裂隙发育;抗裂性能

中图分类号: P66

文献标识码: A

Study on Crack Resistance Performance and Mechanism of Xanthan Gum Composite Sandy Clay

HUANG Lanhua¹, ZHAO Ningning², DAI Chengjiang¹, MEI Xuzhe¹, LIU Jin^{1*}, WANG Zi¹

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

2. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Cooperation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311100, China)

Abstract: The composite of xanthan gum and clay mixed with sand was used to analyze the crack characteristics of soil surface through a series of dry cracking tests under different xanthan gums and sand contents, and to explore the influence of different xanthan gums and sand contents on the crack resistance performance of soil. In addition, the mechanism of crack resistance is analyzed in depth, and the relevant results have certain reference value for the prevention and control of clay cracks in practical engineering. The results show that both xanthan gum and sand as additives can inhibit the crack development to a certain extent, and the soil under the combined action of them shows better crack resistance. When the content of xanthan gum in clay increases from 0 to 0.25%, the crack intensity factor (CIF) decreases from 11.586% to 0. When the sand ratio is less than 30%, the cracking of soil is less affected. The CIF of the sample without xanthan gum is between 10% and 14%. When the sand rate increases to 70%, the CIF decreases to 1.412%. The composite of sand mixed soil sample containing 0.15% xanthan gum does not crack. Xanthan gum can enhance the cohesion between clay particles and solidify with sand particles to form a stable structure, so as to improve the ability of soil to resist fracture and enhance the crack resistance of clay.

Key words: xanthan gum; sand content; clayey soil; fracture development; crack resistance performance

收稿日期:2022-02-25

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);中央高校基本科研业务费项目(B200203219);国家自然科学基金资助项目(41472241);江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX21_0195);大学生创新创业训练计划项目(202110294055)

作者简介:黄兰华(1997-),女,广西钦州人,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。

黏性土作为载体被广泛应用于人类工程地质活动中。在干旱气候条件下,黏性土体干缩失水到达一定程度后,土体表面和内部就会发育大量纵横交错的干缩裂隙^[1-2]。在黏粒含量较高的膨胀土中,这种现象尤其普遍和典型^[3],极大地弱化了土体的各项工程性质,影响建筑规划。此外,土体内部的裂隙为物质运移提供了路径,具体可表现为增大水土及养分的流失,加速地下污染物的运移及扩散等^[4-6]。黏性土边坡开裂之后形成流水通道,降雨时雨水入渗,坡面更容易被冲刷失稳,进而诱发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害^[7-9]。在极端气候现象频繁出现的当下及未来,土体开裂失稳的现象愈发值得重视,因此应对天然的黏性土加以改良,以期减少其裂隙发育,使之更好地满足工程建设要求。现如今,以石灰、水泥等材料加固土体从而遏制开裂的技术应用较为成熟,其带来的环境问题也相对严重。相比之下,许多新兴高分子材料克服了上述不足,在土体加固领域展现出独特优势。黄原胶作为一种生物高分子聚合物,环境友好且成本低廉,近年来被作为土壤改良添加剂得到广泛研究和应用^[10-12]。黄原胶能够与黏粒作用,大大提高黏性土体的整体稳定性^[10],因此能够达成限制土体干缩开裂的目的。现下学界对于黄原胶复合黏性土的研究大多集中于土体强度及其力学性能,对于复合土体的干缩开裂及其机理有待作更进一步探究。

当前,针对黏性土体开裂及其机理研究,国内外多名学者基于不同温度、边界效应、土体厚度、水分蒸发、干湿循环等诸多试验条件展开探索并取得了较大的进展^[13-17]。大部分试验皆采用无砂颗粒的黏土作为研究材料,而自然界中土体粒度分布不均,含有一定质量砂的混合土体十分常见。董薇等^[18]对掺砂红黏土在干湿循环作用下的收缩开裂情况进行研究,发现红黏土的收缩性随掺砂率增大而降低,干湿循环作用下,掺砂土样表面裂隙的发展受到遏制。张虎元等^[19]通过室内恒温干燥试验研究膨润土-石英砂混合物的干缩开裂特征,发现掺砂率大于 30%时,石英砂颗粒逐渐相互接触,土体的收缩及开裂受到抑制。除此之外对于掺砂黏土干缩开裂的研究较少,掺砂率对土体干缩裂隙的发育及其发展形式的影响等有着更深的研究价值。现阶段学界对于黄原胶复合砂-黏混合物的相关研究有限,Ni 等^[20]通过无侧限压缩强度试验探究黄原胶处理砂-黏混合物的力学性

能,发现土体的最佳初始含水率随掺砂率的增加而减小,并总结了不同黏土类型的混合物中最佳黄原胶含量,但关于土体干缩开裂的研究留待补充,掺砂率对复合黏土抗裂性能的改良效果及机理仍需进一步探索。

本文基于上述背景与亟待解决的问题,探索黄原胶和砂粒含量对土体裂隙发育的影响,评价复合土体的抗裂性能,进而分析抗裂机理。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

本次室内试验的黏土样采用南京江宁地区下蜀土,自然状态下的土体呈黄褐色,如图 1(a)。经干燥、粉碎后过 2 mm 筛备用,比重为 2.71,塑液限分别为 22%与 36.6%,塑性指数为 14.6。采用的黄原胶为某品牌黄原胶,呈白色粉末状,如图 1(b)。试验采用的砂为南京江宁地区的砂土,如图 1(c),其粒径分布曲线如图 2,物理参数如表 1。



图 1 黏土、黄原胶粉末与砂

Fig. 1 Clay, xanthan gum powder and sand

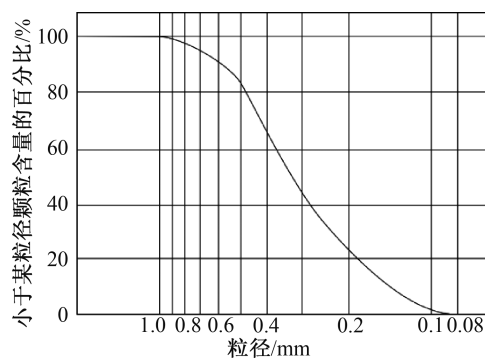


图 2 砂土的粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of sand

表 1 砂土物理参数

Tab. 1 Physical parameters of sand

最大干密度 $\rho_{\max}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最小干密度 $\rho_{\min}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	有效粒径 d_{10}/mm	曲率系数 C_c	不均匀 系数 C_u
1.66	1.35	0.14	1.05	2.57

1.2 试样方案

本文采用干燥试验研究黄原胶复合黏性土抗裂性能。采用制样容器为规格 16 cm×16 cm×6 cm 的试样盒,并将 60 目的砂纸以玻璃胶粘于容器底部,模拟自然条件下土体干缩开裂受到的摩擦效应的影响,同时为减少边界摩擦力造成的误差,将凡士林均匀涂抹在容器的四壁上。设定每份土体试样为 800 g 的总质量,50%的初始含水率(I_w),计算公式如下:

$$I_w = \frac{M_w}{M_s}$$

(1)

式中: I_w 为试样的初始含水率,%; M_w 为所添加水的质量,g; M_s 为干黏土的质量,g。

本次试验样品分别控制质量分数为 0%、0.05%、0.10%、0.15%、0.25% 的黄原胶与素土混合;控制质量分数为 0%、15%、30%、50%、70% 的砂分别与素土、0.05% 黄原胶黏土及 0.15% 黄原胶黏土混合。控制试样厚度为 3 cm,样品加水搅拌均匀后缓慢地倒入试样盒中,振动 3 min,排除搅拌过程中样品内部产生的密闭气泡,随后用配套塑料盒盖将试样盒密封,静置 24 h 使试样沉积稳定。试样稳定后取下容器盖,使其表面暴露于空气中,进行自然失水干燥,并按时拍照、称重,每两次称重的读数之差小于 1 g 时,标志为试样干燥完全。

2 试验结果与分析

2.1 黄原胶含量对黏土裂隙发育的影响

图 3 为不同黄原胶含量黏土干缩开裂过程。由于土体裂隙无法超出容器边界自由延伸发育,故为了减小边界限制造成的影响,本文所示试样照片均向中心等比例截取 1 cm,选择各组中的特征图片进行展示。不同黄原胶含量的黏土初始状态基本一致,其中素土达到稳定状态时绽开多条主裂隙,衍生出数条次生裂隙与之呈近似直角相交,随着黄原胶含量的增加,土体整体上开裂减少,裂隙由宽变窄。

根据试验最终开裂图片,利用裂隙图像处理与定量分析系统^[21-23]进行定量分析计算,得到不同黄原胶含量黏土的各项裂隙参数,如表 2 所示。其中分形维数反映了复杂形体占有空间的有效性,是复杂形体不规则性的量度。在当前的应用场景下,试样表面的分形维数越大,其复杂程度与

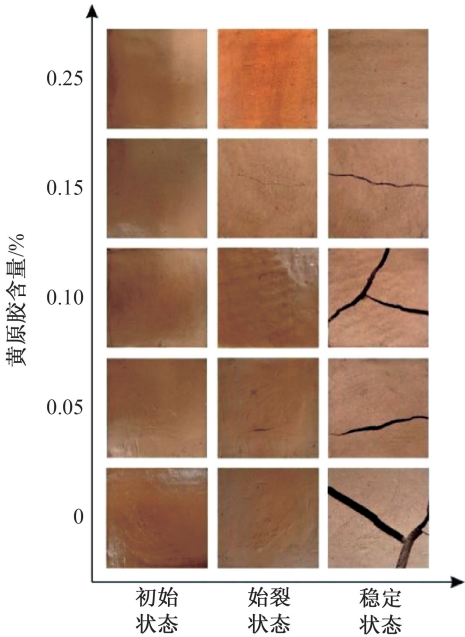


图 3 黄原胶含量对黏土试样裂隙发育的影响
Fig. 3 Effect of xanthan gum content on crack development of clay sample

不规则性也就越高。分析表 2 可知,随着黏土试样中黄原胶含量的增大,试样各项裂隙参数整体上呈递减趋势,及至含量为 0.25% 时通通减为 0。可见,较高含量的黄原胶可以有效遏制黏土的裂隙发育,提高黏土的稳定性。

表 2 不同黄原胶含量黏土试样的各项裂隙参数统计表

Tab. 2 Statistical table of various crack parameters of clay samples with different xanthan gum contents

黄原胶 含量/%	裂隙率 /%	裂隙平均 宽度(像素)	裂隙最大 宽度(像素)	分形 维数
0	11.586	84.892	172.82	1.698 3
0.05	2.263	43.189	43.189	1.499 4
0.10	5.812	70.346	81.314	1.595 2
0.15	1.052	12.979	19.096	1.391 9
0.25	0	0	0	0

总体而言,掺加黄原胶的黏土裂隙发育更少,张开度更小。这是由于随着黄原胶含量的增加,细小的土体颗粒与黄原胶分子形成基质胶结,抵抗土体本身因失水产生的张拉应力,维持土体结构稳定。当黄原胶含量较高时,多余的黄原胶粉末会吸附水分,形成高度粘滞的悬浮液,填补土壤颗粒之间的孔隙^[24]。由表 3 可知,素土试样在 1.5 h 左右发生开裂,黄原胶复合土样产生裂隙的时间推迟甚至不开裂。如图 4(a) 所示不同黄原胶含量黏土含水率随时间变化曲线,随着黄原胶含

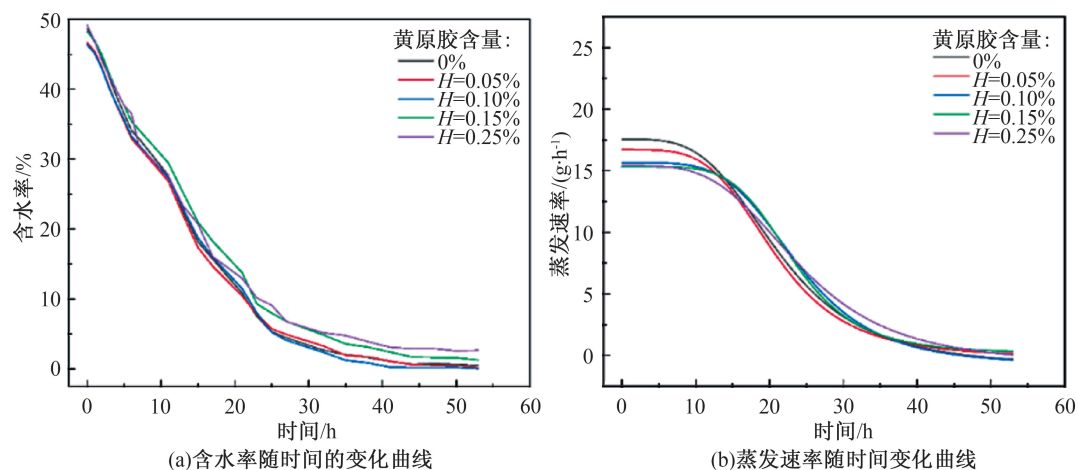


图4 黄原胶含量对黏土试样蒸发的影响

Fig. 4 Effect of xanthan gum content on evaporation of clay sample

量的增加,含水率-失水时间曲线变缓,曲线趋于水平的时间推迟。如图4(b)所示不同黄原胶含量黏土蒸发速率随时间的变化曲线,试样初始蒸发速率与黄原胶含量呈负相关,蒸发速率的下降逐渐变缓。可见,黄原胶能够阻碍黏土中水分的运移,具有一定的保水性,延缓了土体开裂。

表3 不同黄原胶含量下黏土试样的始裂时间

Tab. 3 Initial cracking time of clay samples with different xanthan gum contents

黄原胶含量/%	始裂时间/h
0.00	1.5
0.05	2.0
0.10	2.0
0.15	29.0
0.25	—

2.2 掺砂率对不同黄原胶含量黏土裂隙发育的影响

图5为不同掺砂率下黄原胶黏土最终开裂情况。可见,随着掺砂率的增大,各黄原胶含量的土样干燥收缩范围减小,裂隙向窄小化方向发展,部分表层土体边缘向上卷曲变形,出现“煎饼效应”^[2],0.15%黄原胶含量且掺砂的试样始终不开裂。结合图像分析获得的裂隙参数(表4)可知,较低黄原胶含量下,掺砂率较低(0~30%)时,砂土对试样抗裂性能改善较小;随着掺砂率的增大,土体整体上的裂隙率、裂隙平均宽度及分形维数呈现出递减趋势。以上皆表明掺砂在一定程度上能够限制土样裂隙的发育,这是因为砂粒本身不具备收缩性质,颗粒较大的砂掺入后在颗粒较小的黏土集合体间形成较大孔隙,降低了土体颗粒间的毛细效应,减小了裂隙表面的张拉应力,抑制了其

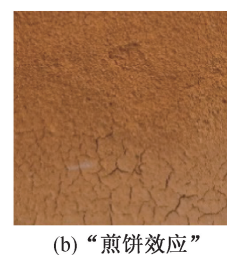
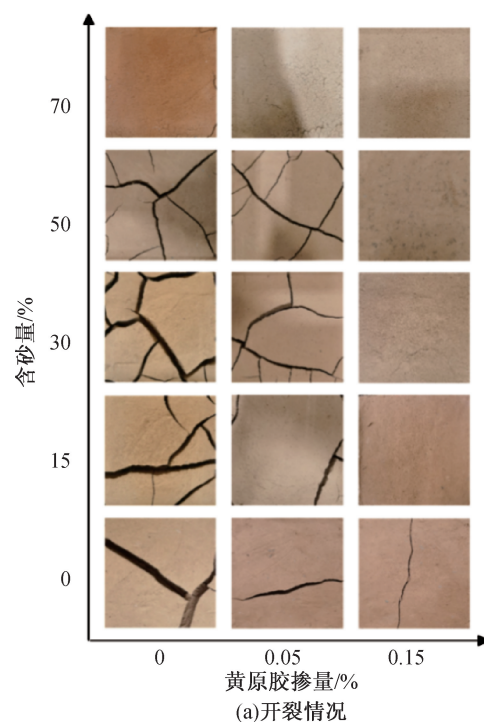


图5 不同掺砂率下黄原胶黏土试样最终开裂情况
Fig. 5 Final cracking of xanthan gum clay sample under different sand contents

张力和延伸^[19],土块收缩范围随之减小,而各试样始裂时间也随掺砂率增大而推迟(表5)。其后随着黄原胶的加入,土体试样抵抗张拉应力的能力得到提高,裂隙发育被进一步抑制,至0.15%黄原胶含量时掺砂土样皆无裂隙产生。

表 4 不同掺砂率下黄原胶黏土试样的各项裂隙参数统计表

Tab. 4 Statistical table of various crack parameters of xanthan gum clay samples under different sand mixing rates		掺砂率/%				
黄原胶含量/%	裂隙参数	0	15	30	50	70
0	裂隙率/%	11.586	10.742	13.529	6.900	1.412
	裂隙平均宽度(像素)	84.892	67.180	69.003	32.968	2.768
	裂隙最大宽度(像素)	172.820	137.870	131.650	86.248	12.538
	分形维数	1.698	1.677	1.689	1.582	1.384
0.05	裂隙率/%	2.263	2.602	6.407	5.510	2.495
	裂隙平均宽度(像素)	43.189	35.181	36.747	30.582	3.001
	裂隙最大宽度(像素)	43.189	75.103	95.510	56.681	5.026
	分形维数	1.499	1.502	1.609	1.580	1.421
0.15	裂隙率/%	1.052	0	0	0	0
	裂隙平均宽度(像素)	12.979	0	0	0	0
	裂隙最大宽度(像素)	19.096	0	0	0	0
	分形维数	1.392	0	0	0	0

表 5 不同掺砂率下黄原胶黏土的始裂时间(单位:h)
Tab. 5 Initial cracking time of xanthan gum clay under different sand mixing rates

黄原胶含量/%	掺砂率/%				
	0	15	30	50	70
0	1.5	2	2	4	13
0.05	2	9	10	12	25

3 机理分析

3.1 黄原胶影响黏土抗裂性能的机理

黏土颗粒因为双电层作用,其表面往往有一层结合水化膜附着,阻隔了颗粒间的直接接触,也为土体失水收缩提供空间。干燥失水过程中,黏土表面的自由水首先蒸发,土体下层的水分在毛细作用下运移至表层并产生基质吸力,孔隙半径因此减小,进而形成张拉应力场。当土体内部某处的张拉应力逐渐增大并超过抗拉强度时,便会引发拉裂破坏,形成“V”字形裂隙^[2]。

本次制样采用的黏土已经粉碎研磨且过 2 mm 筛,因此无黄原胶未掺砂的素土试样可视

为均质土体,粒间孔隙分布较均匀,水分自下而上运移的路径较短且规律。图 6 为黄原胶影响土体开裂的机理示意图,其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,阻塞了土体下层的水分向上运移补偿表层蒸发的通道,减少并延长了水分迁移路径,如图 6(a)所示。黄原胶遇水形成高黏性的凝胶,包裹在土颗粒表面增强黏性,或在非接触的土颗粒间起到桥梁作用,加强颗粒间的相互连接,如图 6(b)(c)所示。由于黏土颗粒表面存在着阳离子吸附,黄原胶分子链上的羟基(-OH)和羧基(-COOH)可以与之形成离子键桥联,进而牢固地吸附在颗粒表面胶结土颗粒^[12]。可见,黄原胶的掺入降低了黏土的孔隙度,阻碍了水分蒸发,减小了土体表面张拉应力,同时增强了土颗粒间的联结能力,提高了土体的完整性,增强了土体的抗拉性能。随着黄原胶含量的提升,黄原胶与黏土颗粒的结合越发紧密,土体结构越发稳定,土体抗裂性能得到增强。

3.2 砂影响不同黄原胶含量黏土抗裂性能的机理
砂颗粒粒径远大于黏土颗粒,表面能较低且

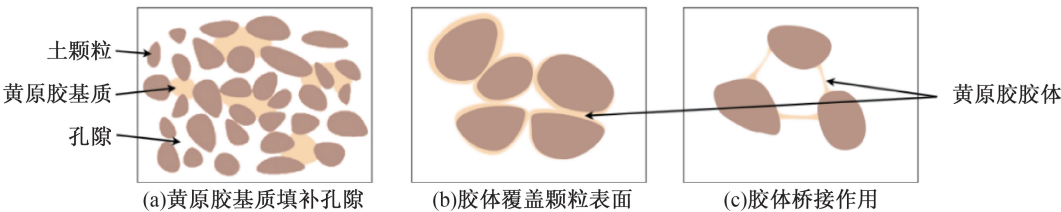


图 6 黄原胶影响土体开裂的机理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of mechanism of xanthan gum affecting soil cracking

不具备收缩性,掺入土体后加速了刚性颗粒在干燥过程中的相互接触,导致了区块收缩范围的减小^[19]。同时,砂的掺入改变了土体的内部结构,扰乱了原有的孔隙分布,在黏土集合体间形成较大孔隙,其孔径更甚于集合体间孔隙^[25],导致水分迁移路径变更,减缓了运移速率,推迟了土体产生开裂的时间(表5)。根据非饱和土力学理论,土体毛细水效应产生的基质吸力与孔径成反比,因此随着掺砂率的提高,土颗粒间孔隙增大,基质吸力减小,进而使得土体表面颗粒所受的张拉应力降低,遏制了裂纹扩展。

图7为不同掺砂率下砂颗粒与土颗粒间的关系示意图。相关研究表明,在掺砂率不足30%的条件下,砂颗粒被黏土颗粒包围,相互之间难以接触,混合土体的基本特性主要由黏土控制,砂对土体干缩开裂的抑制作用不明显;掺砂率大于30%后,砂颗粒间相互靠近,易在土体间形成大孔隙,显著阻碍了裂隙进一步发展^[19],与前文图6及表4描述相符合。结合断裂力学理论,土体产生龟裂后,裂纹尖端出现应力集中和应力无穷大的奇异性现象,而随着蒸发的持续进行,基质吸力逐步增强,土体表面张拉应力增大,裂纹的应力强度因子达到其断裂韧度,随即发生失稳扩展^[26-27]。通过对黏土-砂混合试样断裂韧度的测定,可以发现其随着掺砂率的增大呈现先升高后降低的趋势,约在掺砂率30%时达到峰值^[28]。因此,砂的掺入增大了颗粒间的摩擦力,大大提高了土体的抗断裂能力^[29]。土体掺砂率在大于30%后,还在持续增大,导致了颗粒间的基质吸力减小,裂纹的应力强度因子减小,裂隙纵向发育困难,宏观表现为其宽度及深度的减小。

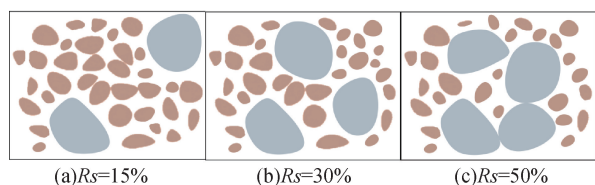


图7 不同掺砂率下砂颗粒与土颗粒间的关系示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the relationship between sand particles and soil particles under different sand mixing rates

如上文所述,将黄原胶掺入混合土体后,在掺砂率不超过30%的条件下,其加固机理与纯黏土类似,黄原胶聚合物与黏土颗粒直接相互作用形成稳定结构加固土体,遏制了裂隙的产生。掺砂率超过30%后,砂颗粒之间接触增多,黄原胶聚集

覆盖在砂颗粒表面,增大了粒间接触面积,也在离散的砂颗粒之间建立了连接桥梁,如图8所示。与表面带电的黏土颗粒不同,砂颗粒表面呈电中性,黄原胶胶体紧密地包裹并缠绕在砂土颗粒之间,二者没有显著的相互作用产生^[10]。随着蒸发的持续进行,黄原胶胶体中的水分不断挥发,形成网状膜,将松散的砂土颗粒固结成一个较为稳定的结构。混合物中的掺砂率越大,土体的固结作用也就越发明。在此基础上,多余的黄原胶分子与含量较少的黏土颗粒相互作用形成基质,填补粒间孔隙,降低了土体的毛细作用及渗透性能,增强了粒间联结能力,提高了土体的完整性,增大了其表面强度,显著阻碍了裂隙发育。

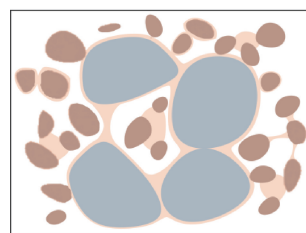


图8 黄原胶胶体含砂黏土微观示意图

Fig. 8 Microscopic diagram of xanthan gum cemented sandy clay

4 结论

1)黄原胶的掺入能够延缓水分运移,提升土体的稳定性,有效减少土体开裂。随着黄原胶含量的增加,土体裂隙率、裂隙宽度、分形维数皆呈现递减趋势,试样初始蒸发速率减小,始裂时间推迟,蒸发速率的下降变缓。当黄原胶含量达到0.25%时,无裂隙产生。

2)较高的掺砂率对土体干缩开裂具有一定抑制效果,且与黄原胶的复合改良效果明显。由于砂粒的存在导致区块收缩范围减小,当掺砂率小于30%,试样裂隙参数受影响较小;当掺砂率逐渐增大,土体裂隙率、裂隙平均宽度及分形维数降低,裂隙发育受到抑制。

3)黄原胶在土体中与水和黏土颗粒反应形成胶体和基质,令土颗粒间的联结能力增强,土体的抗拉性能得到提升,同时降低了黏土的渗透性,延缓了水分蒸发,使得土体表面张拉应力减小。随着黄原胶含量的提升,土体抗裂性能增强,裂隙向窄小化方向发展。

4)砂粒掺入黏土中后,加速了刚性颗粒的相互接触,限制了土体的干燥收缩。同时土体内部

孔隙及粒间摩擦力增大,水分运移速率和基质吸力降低,土体抵抗断裂的能力增加,裂隙向表层发展。掺入黄原胶后,胶体与砂土颗粒胶结固化形成稳定结构,增强了土体抗裂能力。抑制混合物干缩开裂的最低掺砂率为30%。

参考文献:

- [1] 胡忠平,段刘贺. 黏性土干缩开裂特征规律研究现状分析[J]. 南方农业,2020,14(26):209-210.
- [2] 唐朝生,施斌,崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423.
- [3] 谢建宝,姚亚辉,龚绪龙,等. 黏土失水开裂演化过程的影响试验[J]. 地质学刊,2016,40(2):346-351.
- [4] 王进. 喀斯特石漠化区裂隙水土养分漏失研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2020.
- [5] NOVAK V, SIMUNEK J, VAN Genuchten M T. Infiltration of Water into Soil with Cracks [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2000,126(1):41-47.
- [6] 沈欢,黄勇,苏悦,等. 裂隙介质中LNAPL污染物迁移研究进展[J]. 环境科技,2021,34(2):68-72.
- [7] 习羽,李同录,邢鲜丽. 灌渠渗漏诱发的黄土滑坡泥流触发机理分析[J]. 地球科学与环境学报,2017,39(1):135-142.
- [8] 戚赏,刘磊,杜丹,等. 河南丹江口库区滑坡危害性评价及防治对策[J]. 矿产勘查,2020,11(3):624-629.
- [9] 陈铁林,邓刚,陈生水,等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):210-215.
- [10] CHANG I, IM J, PRASIDHI A K, et al. Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Strengthening [J]. Construction and Building Materials,2015,74:65-72.
- [11] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Xanthan Gum Biopolymer: An Eco-friendly Additive for Stabilization of Tropical Organic Peat[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(9):825.
- [12] 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):107-110,116.
- [13] TANG C S, CUI Y J, TANG A M, et al. Experiment Evidence on the Temperature Dependence of Desiccation Cracking Behavior of Clayey Soils[J]. Engineering Geology,2010,114(3-4):261-266.
- [14] 袁权,谢锦宇,任柯. 边界约束对膨胀土干缩开裂的影响[J]. 工程地质学报,2016,24(4):604-609.
- [15] 曾浩,唐朝生,刘昌黎,等. 控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应[J]. 岩土工程学报,2019,41(3):544-553.
- [16] CORTE A, HIGASHI A. Experimental Research on Desiccation Cracks in Soil[R]. U. S. army Snow Ice & Permafrost Research Establishment,1964.
- [17] SONG W. Experimental Investigation of Water Evaporation from Sand and Clay Using an Environmental Chamber [D]. Docteur de l' Université Paris-Est,2014.
- [18] 董薇,黄待望,王红英. 掺砂改良红黏土室内试验研究[J]. 能源与环保,2018,40(11):157-162.
- [19] 张虎元,谭煜,何东进,等. 石英砂参量对膨润土-砂混合物泥浆样干缩开裂的控制机制[J]. 岩土工程学报,2019,41(2):277-285.
- [20] NI J, HAO G L, CHEN J Q, et al. The Optimisation Analysis of Sand-clay Mixtures Stabilised with Xanthan Gum Biopolymers [J]. Sustainability, 2021, 13 (7): 3732-3732.
- [21] ZENG H, TANG C, CHENG Q, et al. Coupling Effects of Interfacial Friction and Layer Thickness on Soil Desiccation Cracking Behavior [J]. Engineering Geology, 2019,260,105220.
- [22] TANG C, ZHU C, LENG T, et al. Three-dimensional Characterization of Desiccation Cracking Behavior of Compacted Clayey Soil Using X-ray Computed Tomography[J]. Engineering Geology,2019,255,1-10.
- [23] WANG L L, TANG C S, SHI B, et al. Nucleation and Propagation Mechanisms of Soil Desiccation Cracks[J]. Engineering Geology,2018,238:27-35.
- [24] WHITCOMB P J, MACOSKO C W. Rheology of Xanthan Gum[J]. Journal of Rheology,1978,22(5):493-505.
- [25] PRIKRYL R, WEISHAUPTOVA Z. Hierarchical Porosity of Bentonite-based Buffer and Its Modification Due to Increased Temperature and Hydration[J]. Applied Clay Science,2010,47(1):163-170.
- [26] 白杨. 土体I型断裂韧度试验及数值模拟研究[D]. 南京:南京大学,2020.
- [27] 郑少河. 膨胀土的开裂机理及雨水入渗条件下的边坡稳定性分析[D]. 上海:上海交通大学,2003.
- [28] WANG J J, HUANG S Y, HU J F. Mode II Fracture Toughness of a Clay Mixed with Sand[J]. Engineering Fracture Mechanics,2016,165:19-23.
- [29] PRAKASHA K S, CHANDRASEKARAN V S. Behavior of Marine Sand-clay Mixtures Under Static and Cyclic Triaxial Shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2005,131(2):213-222.

(责任编辑 王利君)