

文章编号:1673-9469(2026)03-0048-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.006

木质素衍生聚合物改良黏性土干缩开裂试验研究

姚亦姜,刘瑾*,卜凡,张鑫浩,郭子豪,王思睿

(河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100)

摘要:通过开展室内蒸发试验,对木质素衍生聚合物改良黏性土的保水性与抗开裂能力进行研究。分析在湿干循环过程中不同聚合物含量对改良黏性土内部水分变化的影响,并利用相关图像分析软件对土体表面的裂隙网络进行定量分析,进一步探究改良土体的裂隙发育规律。研究结果表明:(1)随着聚合物含量的增加,改良土体的水分保持能力先增强后降低,当聚合物含量为1.0%时,改良土体在常速率蒸发阶段的持续时间较素土延长约4 h,且该阶段的平均蒸发速率下降约22.95%。(2)聚合物通过团聚土颗粒和水分可有效限制土体表面裂隙的发育,但添加含量过高则易引发局部应力集中,诱使裂隙过度发育。(3)添加适量的聚合物可限制土体表面的裂隙发育,减少较宽大裂隙的产生,提升裂隙网络在湿干循环过程中的“愈合”程度。

关键词:有机聚合物;黏性土;湿干循环;保水性;抗开裂能力

中图分类号:TU42

文献标识码:A

Experimental Study on Cracking by Evaporation of Clay Soil Improved by Lignin-Derived Polymer

YAO Yijiang, LIU Jin*, BU Fan, ZHANG Xinhao, GUO Zihao, WANG Siyu

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: The water retention and anti-cracking ability of clay soils improved by lignin-derived polymer are studied by indoor evaporation tests. To explore the crack evolution patterns during the wet-dry cycle, the effects of different contents of polymer on internal moisture variation in improved soils were analyzed and the quantitative analysis was carried out for crack network on the soil surface using relevant image analysis software. The results show that: (1) The water retention capacity of improved soil is initially enhanced and then declined with increasing polymer content. When the content is 1.0%, the duration of the constant evaporation rate stage is extended by about 4 hours compared to the untreated soil and the average evaporation rate of this stage is reduced by about 22.95%. (2) The development of surface cracks is effectively limited by aggregating soil particles and water. However, excessive addition of polymer causes local stress concentration and induces extensive crack development. (3) The moderate content of polymer suppresses the development of cracks and the formation of wide cracks, thus enhances the “healing” capability of crack network during the wet-dry cycle.

Key words: organic polymer; clay soil; wet-dry cycle; water retention; anti-cracking ability

土体裂隙的产生将对建筑稳定性与水土保持工作产生极大威胁^[1-2]。极端高温天气的频发加剧了土体水分的蒸发与开裂程度,水分蒸发是土体表面产生裂隙的主要原因。除此之外,影响土

体蒸发过程与开裂行为的相关因素包括土壤结构、矿物构成、有机质含量、土体厚度以及土体内部水分的循环变化等^[3-7]。土体的初始含水率对裂隙的产生起着重要作用,且水分的循环变化会

收稿日期:2025-01-12 修回日期:2025-03-23

基金项目:江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX24_0202);国家自然科学基金面上项目(42472333)

第一作者:姚亦姜(1999—),男,江苏南京人,硕士研究生,从事土体加固方面的研究。

*通信作者:刘瑾(1983—),女,福建漳州人,博士,教授,从事工程地质方面的研究。

影响土壤整体的持水能力,在此期间土体表面的裂隙也将逐渐发育^[8-10]。

为限制土体裂隙发育,通常采取物理、化学、生物等方法对土体进行改良,以提高土体的抗开裂能力^[11-12]。高分子聚合物具有来源广、生态环保、物理化学性质稳定性强等优点,在土体改良领域具有显著优势^[13]。郝社锋等^[14]研究制备了一种可与土颗粒形成弹性黏膜的新型水溶性保水剂,能够有效提高盐渍土的持水能力。张俊然等^[15]研究发现黄原胶、结冷胶、瓜尔胶3种生物聚合物通过水合作用生成凝胶,可增强土颗粒间的黏结性,从而提高粉土的水稳性。段丽军等^[16]的崩解试验表明通过石灰的胶结作用与由水玻璃作用形成的脱水硅酸凝胶可共同起到胶结土颗粒、填充土体孔隙的作用,从而改良土体抗冲蚀性能。另一方面,徐永浩等^[17]研究表明通过瓜尔胶的胶结作用能显著提高土体的抗崩解性能。柳丽^[18]研究发现土凝岩固化剂能够抑制土体裂隙的发育,增强土体稳定性。李方等^[19]采用由3种成分混合形成的改良剂对土体进行改良,通过无侧限抗压试验发现土体稳定性随改良剂含量的增加而提高。Chang等^[20]研究表明生物聚合物通过增强颗粒间的黏聚力,对土体的持水能力与抗冲蚀性能有着很好的改良效果。Kwon等^[21]研究表明黄原胶与黏性土间的桥接作用能够改良土体力学性质,显著提升土体抗剪强度。

综上,上述改良方法虽能有效改善土体性质,但针对土体开裂领域的研究较少且仍存在如治理成本较高、存在二次污染风险等不足。而木质素衍生聚合物作为环境友好型改良剂,在自然界储量巨大、价格低廉,在保障性价比的同时还顺应绿色发展理念^[22-23]。本文针对木质素衍生聚合物对黏性土的改良效果开展研究,结合湿干循环试验对不同聚合物含量下黏性土开裂特性与含水率变化进行分析,获取适宜的聚合物含量。相关试验结果可为实际工程建设中改善黏性土保水性与抗开裂能力的研究提供一定的参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

本次试验选择南京某地区下蜀土作为试验用土。如图1(a)所示,试验用土在自然条件下呈黄褐色,经烘干、磨碎后使用2 mm孔径的筛网过筛并密封备用,其基本物理性质见表1。颗粒粒径为

0.001~0.005、0.005~0.075、0.075~0.500、0.500~1.000 mm的试验用土比例分别为32.14%、61.43%、5.10%、1.33%。

试验采用木质素衍生聚合物作为改良剂,其来源广泛且能有效胶结颗粒。如图1(b)所示,聚合物在自然条件下呈红褐色粉末状,略带木质芳香,具有较好的水溶性和吸湿性,化学性质稳定。其含有苯环和羟基等官能团,可与部分化学物质发生化学反应形成化学键,赋予其良好的黏结性。

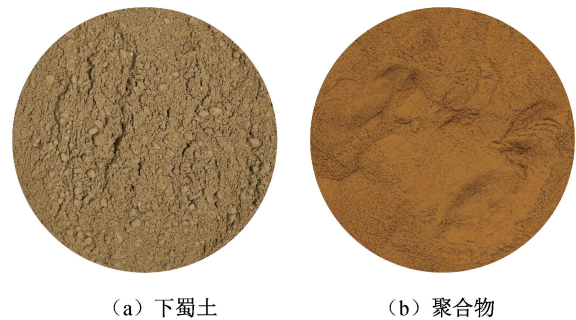


图1 试验材料

Fig. 1 Experimental materials

表1 试验用黏性土的基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of clay soil used in the experiment

天然含水率/%	比重	塑限/%	液限/%	塑性指数
20~27	2.71	22	36.7	14.7

1.2 试验方案

试验采用直径为100 mm、高度为60 mm的亚克力圆柱形容容器盛装试样,在试验过程中保持环境温度为30℃,相对湿度为50%。每个试样所用土体质量均为125 g,初始含水率均为65%,含水率(C_w)的计算方法如式(1)所示。试验共进行五轮湿干循环,当每两次试样质量的称量读数之差小于0.02 g时,则认为一轮湿干循环结束。有机聚合物的含量(C_c)分别设置为0.0%、0.5%、1.0%、2.0%和3.0%,计算方法如式(2)所示。此外,在每轮湿干循环结束后,需对各试样进行复湿,复湿试样的含水率应为初始含水率的二分之一,试样第一轮湿干循环流程如图2所示。

$$C_w = \frac{m_w}{m_s} \quad (1)$$

式中: C_w 为含水率,%; m_w 为蒸馏水质量,g; m_s 为黏性土质量,g。

$$C_c = \frac{m_c}{m_s} \quad (2)$$

式中: C_c 为聚合物含量,%; m_c 为聚合物质量,g。

试验样品的制备方法如下:首先,称取 125 g 定量黏性土与对应含量的水和聚合物置于容器内进行充分混合。然后,将混合物缓慢倒入亚克力容器内并置于振动台上匀速震荡 5 min,以排出泥浆内部的封闭气泡。最后,将试样密封静置 24 h。相同参数的试样均设置 2 个对照组。

同时,在试验过程中需定时对试样进行称重与定点拍照,记录试样含水率变化规律及表面裂隙发育特征。利用图像处理软件对试样表面裂隙网络中的裂隙最大宽度、裂隙平均宽度、裂隙率等参数进行定量计算。文中所列各项参数值均为各对照组试样的平均值。

2 试验结果与分析

2.1 聚合物含量对黏性土蒸发过程的影响

图 3 为第一至五轮湿干循环过程中试样含水率随时间的变化曲线。由图可知,在相同的初始含水率和湿干循环次数下,五轮湿干循环中聚合

物含量对试样含水率的变化有显著影响且含水率随时间的变化趋势大体相似。根据试样含水率随时间变化的规律可将蒸发过程划分为 3 个主要阶段:常速率蒸发阶段、减速率蒸发阶段和残余蒸发阶段。在干燥过程中水分蒸发流失主要发生在常速率蒸发阶段,且蒸发速率保持相对稳定。原因是试样在当前阶段处于饱和状态,试样内部水分能够顺利且稳定地运移至试样表面,从而在较长时间内稳定维持较高的蒸发速率。以第一轮湿干循环为例,在常速率蒸发阶段,聚合物含量为 0.0% 的试样的蒸发持续时间为 36 h。伴随聚合物含量的增加,试样在常速率蒸发阶段的持续时间先上升后下降,当聚合物含量为 1.0% 时,试样在常速率蒸发阶段的持续时间延长 4 h。在第一轮湿干循环中,常速率蒸发阶段结束时,试样含水率均处于 12%~20% 范围内。与常速率蒸发阶段相比,减速率蒸发阶段的蒸发速率逐渐降低且持续时间较短,原因是试样由饱和状态向非饱和状态转变,试样表面水分补给作用因试样内部含水率

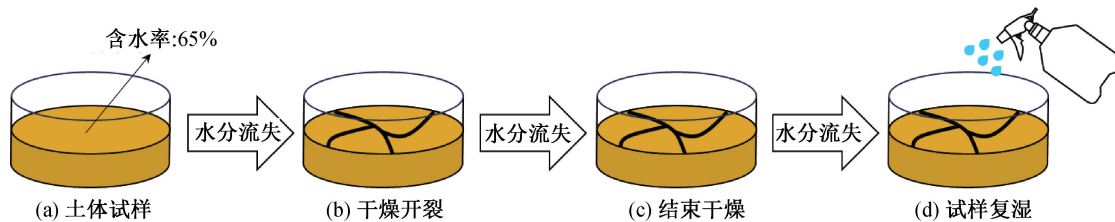


图 2 第一轮湿干循环流程示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the first wet-dry cycle process

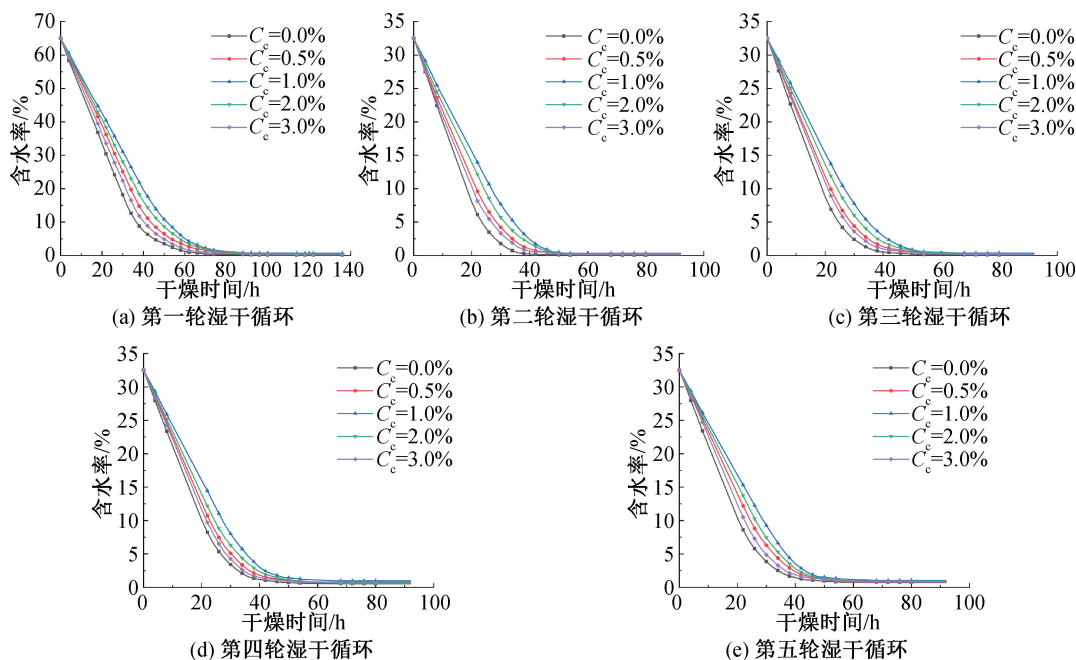


图 3 五轮湿干循环过程中不同聚合物含量改良土体的含水率-时间曲线

Fig. 3 Curves of moisture content in five wet-dry cycles with time for improved sample with different polymer contents

降低而减弱,从而导致蒸发作用减弱。5 种不同聚合物含量下试样含水率变化进入残余蒸发阶段的转折点大致出现在含水率为 2% 时刻。

综上所述,在五轮湿干循环过程中,当聚合物含量为 1.0% 时,试样在常速率蒸发阶段的持续时间最长,且在相同轮次湿干循环的同一时刻,其含水率均高于素土试样与其余改良试样,说明聚合物对黏性土保水性的改善具有良好效果。

图 4 为第一至五轮湿干循环过程中试样水分蒸发速率随时间的变化曲线。由图 4(a) 可知,在第一轮湿干循环中,未改良试样在常速率蒸发阶段的平均蒸发速率约为 1.96 g/h,而 1.0% 聚合物含量的改良试样平均蒸发速率约为 1.51 g/h,相较前者约下降 22.95%。随着聚合物含量的增加,试样在常速率蒸发阶段的蒸发速率呈先下降后上升的趋势。当聚合物含量上升至 2.0% 及以上时,蒸发速率逐渐降低,该阶段蒸发速率变化规律与含水率变化规律相对应。将减速率蒸发阶段的试样水分蒸发速率与常速率蒸发阶段进行对比可知,减速率蒸发阶段的试样水分蒸发速率呈非线性降低,且随聚合物含量增加,相同时间点的蒸发速率先上升后下降。残余蒸发阶段的试样水分蒸发速率未随干燥时间延长发生显著变化,表明该阶段试样水分蒸发作用效果较微弱。

在五轮湿干循环中,试样水分蒸发速率随时间的变化曲线基本相似,说明聚合物在湿干循环

条件下可持续限制土体内部水分的蒸发,但其限制水分蒸发作用的效果随其含量的增加呈先上升后下降的趋势。原因是聚合物具有黏结性,能够紧密吸附土颗粒并与土颗粒和水分形成较大团聚体,从而有效填充土体内部的部分孔隙、延长水分蒸发路径,弥补部分聚合物占据水分吸附位点的影响,进而抑制土体水分蒸发、提高土体水分保持能力。但聚合物掺量过高时,聚合物优先与自身结合,破坏土体均匀性,致使土体保水性改良效果降低。此外,当聚合物含量为 1.0% 时,改良试样在常速率蒸发阶段的蒸发速率均低于素土试样与其余改良试样。

2.2 聚合物含量对黏性土裂隙发育的影响

图 5 为未改良试样在第一轮干燥过程中的裂隙网络发育过程图。由图 5(b) 可知,在经过 26 h 的干燥过程后,试样表面出现 3 条主裂隙。如图 5(c) 所示,伴随蒸发作用的持续进行,土体含水率持续降低,试样表面新增多条依附于主裂隙发育的次级裂隙,该时刻土体含水率约为 16.58%。如图 5(d) 所示,未改良试样表面最终形成由 3 条主裂隙与若干条依附于主裂隙发育的次级裂隙共同构成的裂隙网络,主裂隙与次级裂隙呈“T”字型相交。当试样裂隙网络基本稳定后,不再出现新生的次级裂隙,随后土体持续收缩,裂隙宽度逐渐增加。

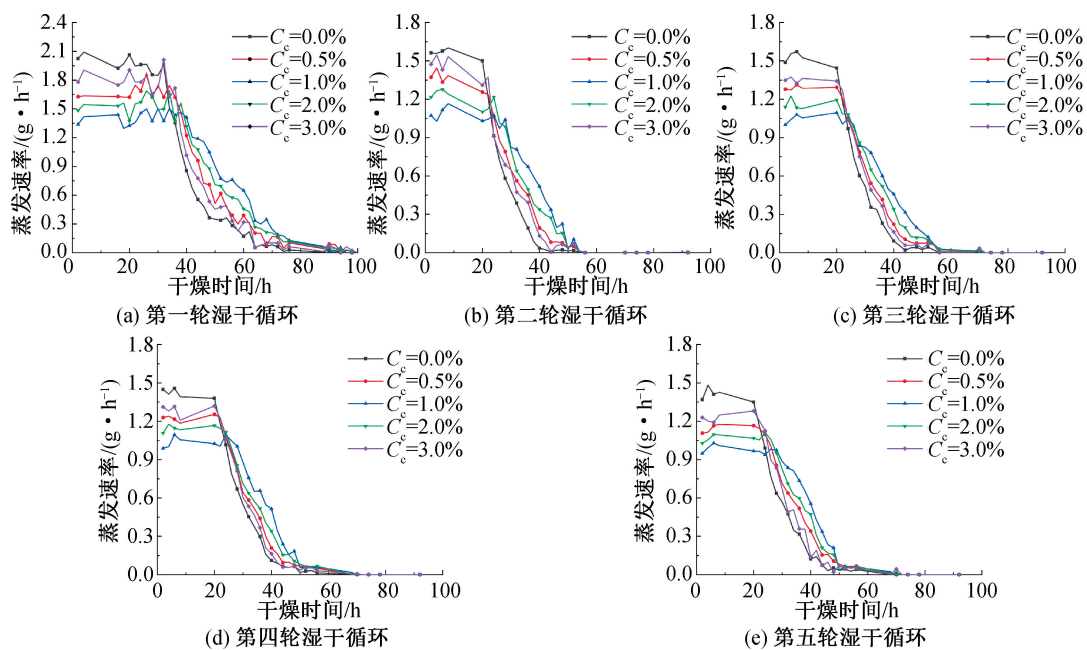


图 4 五轮湿干循环过程中不同聚合物含量改良土体的蒸发速率-时间曲线

Fig. 4 Curves of evaporation rate in five wet-dry cycles with time for improved sample with different polymer contents

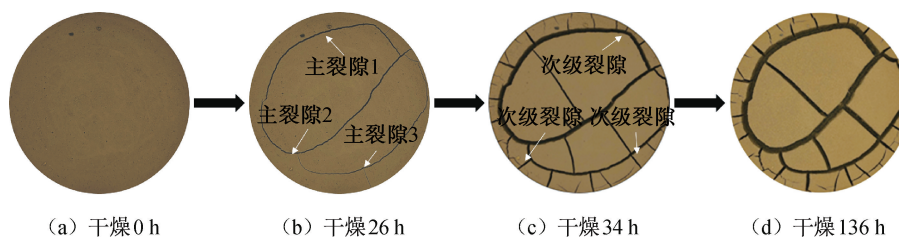


图5 未改良土体表面裂隙网络发育过程

Fig. 5 Development process of surface crack network in unimproved soil

图6为第一轮湿干循环中相同时刻不同聚合物含量改良土体表面裂隙网络图。由图可知,不同聚合物含量下的试样表面首次出现主裂隙均发生于试样常速率蒸发阶段。随着聚合物含量的增加,试样表面首次出现主裂隙所需的干燥时间呈先上升后下降的规律。当聚合物含量为1.0%时,改良试样经过30h的干燥过程后表面出现主裂隙,较未改良试样主裂隙首次出现所需的干燥时间延长约10h,此时试样含水率约为31.1%,原因是聚合物通过团聚土颗粒与水分,阻碍水分蒸发流失并增强土颗粒间的黏结力。伴随干燥过程的持续进行,土体内部水分持续蒸发,依附于主裂隙发育形成若干条次级裂隙。1.0%聚合物含量改良的试样表面裂隙网络发育所需的干燥时间约为48h,相较于未改良试样,时间延长了约14h,该时刻改良试样含水率约为12.2%。原因是聚合物对土颗粒的团聚作用显著提高土体的结构稳定性,抑制土体裂隙发育,阻碍试样表面积在蒸发开裂过程中因裂隙发育而增大,降低蒸发过程中土-气界面的有效接触面积,致使水分蒸发速率降低。

当聚合物含量增加至2.0%及以上时,试样表面裂隙发育所需的干燥时间逐渐减少,原因是聚合物含量过高时,土体内部因聚合物相互结合导致应力集中,且依附于土颗粒表面扩展土颗粒间的距离,使土颗粒不易团聚,促进了土体内部的孔隙发育,为水分蒸发提供蒸发路径。当土体裂隙网络发育稳定后,土体裂隙发育由数量层面向宽度与深度层面转变,裂隙逐渐向两侧扩张且逐步贯穿整个试样。试样表面最终形成以主裂隙为主、若干条依附于主裂隙发育的次级裂隙为辅的裂隙网络。

图7为五轮湿干循环中试样裂隙网络中裂隙最大宽度、裂隙平均宽度与裂隙率的变化规律图。随着聚合物含量的增加,裂隙最大宽度、裂隙平均宽度与裂隙率呈先下降后上升的趋势。在第一轮湿干循环中,当聚合物含量为1.0%时,与未改良试样相比,裂隙最大宽度由4.82mm降至3.09mm,降幅约为35.9%;裂隙平均宽度由2.42mm降至1.66mm,降幅约为31.4%;裂隙率由16.34%降至13.48%,降幅约为17.5%。

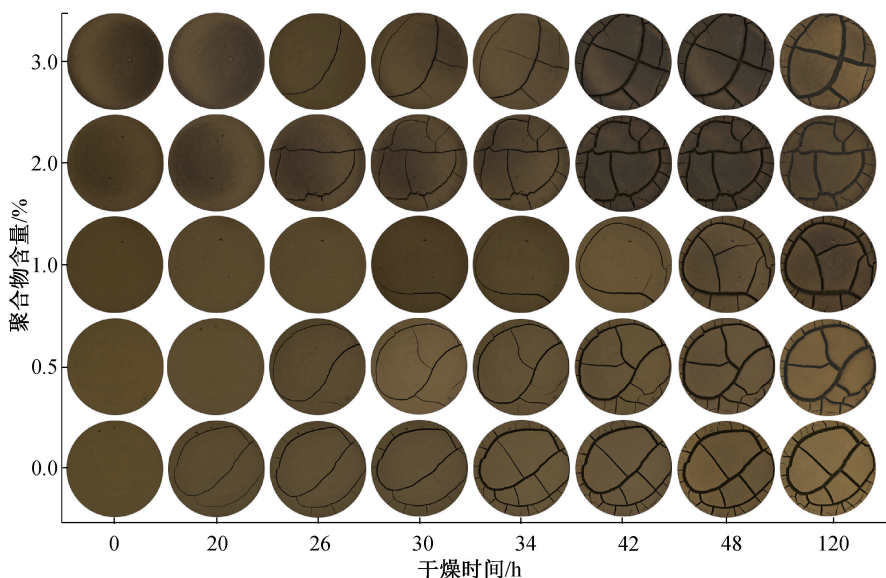


图6 第一轮湿干循环中相同时刻不同聚合物含量改良土体表面裂隙网络图

Fig. 6 Surface crack network patterns of improved soil with different polymer contents at the same time in the first wet-dry cycle

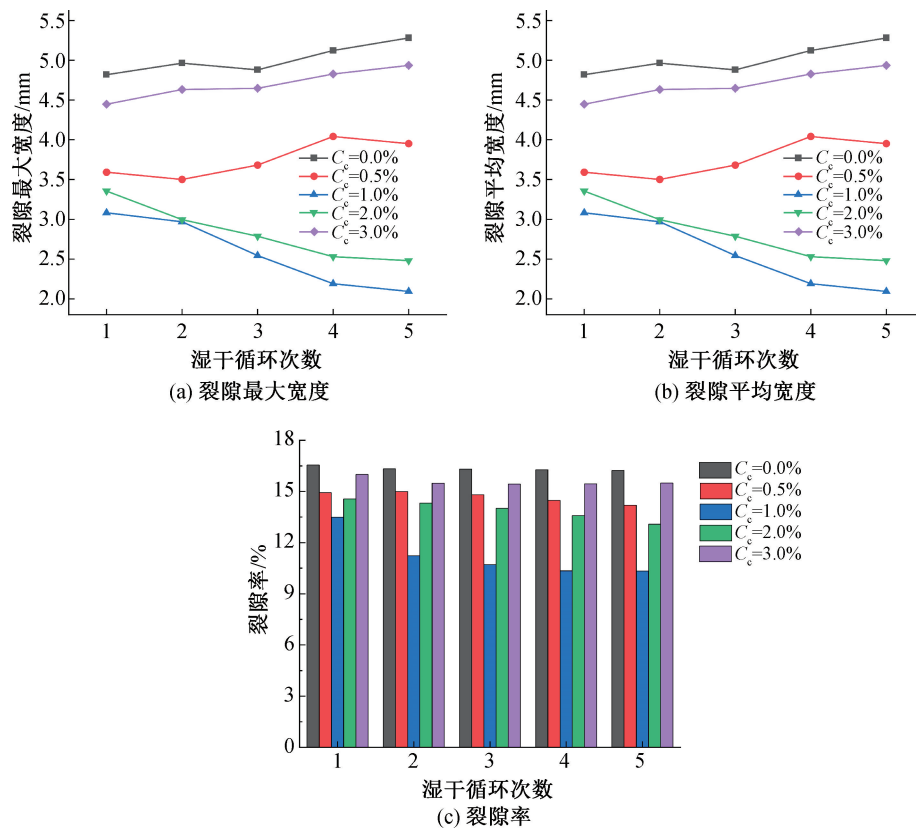


图7 不同聚合物含量改良土体表面裂隙网络的主要参数

Fig. 7 Main parameters of surface crack network in improved soils with different polymer contents

如图7(a)所示,随着湿干循环次数的增加,未改良试样与0.5%和3.0%聚合物含量下的试样裂隙最大宽度呈上升趋势。当聚合物含量为1.0%和2.0%时,改良试样裂隙最大宽度随着湿干循环次数的增加逐渐降低。在第三轮湿干循环结束后其裂隙最大宽度降低速率逐渐下降,最终保持基本稳定,且1.0%聚合物含量的试样裂隙最大宽度由3.08 mm降至2.09 mm,降幅约为32.1%。

如图7(b)所示,裂隙平均宽度随着湿干循环次数的增加逐渐下降。在五轮湿干循环中,改良试样裂隙的平均宽度均低于未改良试样,降幅随聚合物含量的增加呈先上升后下降的趋势,且1.0%聚合物含量的试样裂隙平均宽度均低于其余改良试样。在五轮湿干循环中,裂隙平均宽度由1.66 mm降至1.10 mm,降幅约为33.7%,说明当前聚合物含量能有效缓解裂隙宽度的持续发育。

如图7(c)所示,试样裂隙率随湿干循环次数的增加保持相对稳定,但1.0%聚合物含量的改良试样裂隙率随湿干循环次数的增加逐渐下降,由13.48%降至10.33%,降幅约为23.3%。原因是试样原有裂隙边缘的土颗粒在润湿过程中出现崩解与滑落现象,对部分宽度较小的裂隙进行填充,使

裂隙发生“愈合”。因未改良土体内部均匀性较强,裂隙边缘的土体结构相对稳定,且未改良试样中多数裂隙较为宽大,导致裂隙难以发生“愈合”。随着聚合物含量的增加,土体裂隙边缘的结构稳定性得到削弱,且因聚合物团聚土颗粒和水分,有效提高土体内部结构的稳定性、抑制较宽大裂隙的发育,使改良试样表面的裂隙网络在湿干循环过程中逐渐“愈合”。

综合以上分析可知,土体中掺入聚合物可有效改善土体的稳定性。然而,当聚合物的添加含量过高时,聚合物将优先与自身结合,诱使土体表面因密集的应力集中现象而产生较为宽大的裂隙。因此,当聚合物含量为1.0%时,可在有效缓解土体蒸发作用的同时抑制土体裂隙的发育,且增强改良土体抗开裂能力的效果最为显著。

3 机理分析

如图8所示,在饱和状态下土颗粒充满水分,土颗粒间存在一定距离,没有发生直接接触,这为黏性土失水收缩提供了足够的空间。当饱和状态下的均匀土体处于干燥状态时,土体表层的水分开始流失。当土体处于干燥过程初始阶段时,土

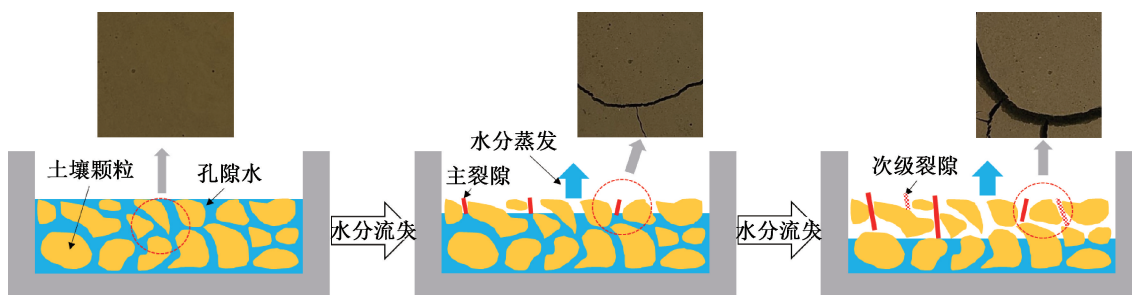


图8 土体裂隙形成原因示意图

Fig. 8 Schematic diagrams of the causes of soil crack formation

体内部结构与应力、应变状态未受到明显影响,但伴随水分的进一步流失,土体由饱和状态向不饱和状态转变,处于不饱和状态的土体通过毛细吸力将土体内部下层的水分运移至土体表层。随着干燥过程的持续进行,土体内部的毛细吸力逐渐增大。以单个土颗粒为观察对象,土颗粒受毛细吸力作用,在土体内部形成拉应力场。在干燥过程中,当土体表层颗粒所受的拉应力超出土体的抗拉强度时,便在土体表层应力场薄弱处形成主裂隙。伴随土体蒸发作用的持续进行,因不同土壤深度间含水率存在梯度差,裂隙不断向下延伸。在此过程中,依附于主裂隙应力场薄弱处形成多条次级裂隙,由主裂隙与次级裂隙共同构成土体裂隙网络。由裂隙发育过程可知,水分蒸发导致的土体含水率变化对土体裂隙的出现与发育起着重要作用。

图9为聚合物改良试样的扫描电镜图,图10为作用机理示意图。聚合物主要通过3种方式对土体性质进行改良:黏结颗粒、填充孔隙和团聚颗粒。因聚合物具有良好的黏结性与螯合性,能够大量团聚土体内部的土颗粒与水分,通过黏结与团聚土颗粒增强土体的结构稳定性,有效限制土体裂隙的发育,表现为减少土体表面较宽大裂隙的产生。聚合物与孔隙水反应后析出 Ca^{2+} 并与土颗粒表面的 Na^+ 反应,进行离子交换。因携带正电荷的聚合物通过离子键作用吸附于带负电荷的土颗粒表面发生孔隙填充,使土颗粒间连接更紧密,从而阻塞水分运移通道、延长水分运移距离、降低水分蒸发速率。未改良土体内部孔隙为水分运移提供流畅的通道,土体内水分受毛细作用驱动,沿孔隙网络迁移至土体蒸发表面,维持水分蒸发速率相对稳定。当聚合物掺量较低时,因聚合物可以包裹土颗粒并黏结相邻土颗粒,在土体内部形成少量团聚体,土体的结构稳定性得到部分提升,土体裂隙最大宽度、裂隙平均宽度与裂隙率均出

现小幅下降。伴随聚合物含量的上升,土体内部团聚体数量逐渐增加,土体内部孔隙被大量填充,有效延长水分运移距离、降低蒸发速率,且团聚体有效增强土颗粒间的黏结力、提高土体稳定性与抗开裂能力。但当过量聚合物进入土体后,过量的聚合物会相互结合,导致局部区域出现应力集中现象,促进裂隙发育。同时,伴随过高聚合物含量下土体裂隙的发育,为水分蒸发作用提供了更多空间,导致土壤持水性能改良效果降低。因此,需要选取合适的聚合物含量对土体进行改良。

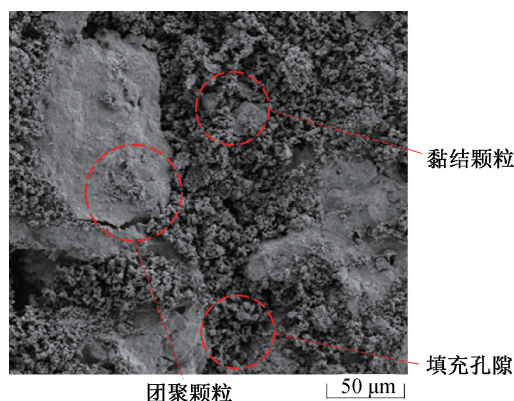


图9 聚合物改良试样的扫描电镜图

Fig. 9 Scanning electron microscope image of the polymer-improved sample

4 结论

本研究通过设置不同聚合物含量,开展五轮室内湿干循环试验。通过监测土体内部水分变化情况与其表面裂隙网络的发展规律,研究在湿干循环条件下,不同聚合物含量对改良黏性土保水性与抗开裂能力的影响,得出以下结论:

1) 聚合物可团聚土颗粒和水分,通过形成较大的团聚体填充土体内部部分孔隙,进而延长水分蒸发路径,有效提升改良土体的水分保持能力。随着聚合物含量的增加,改良土体的水分保持能

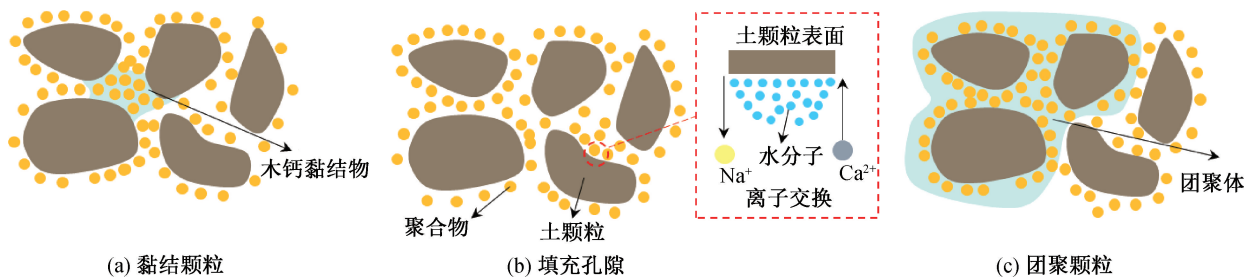


图10 聚合物改良试样的作用机理示意图

Fig. 10 Schematic diagrams of the action mechanism for the polymer-improved sample

力呈先增强后下降的趋势。其中,当聚合物含量达到 1.0% 时,较素土而言,改良土体在常速率蒸发阶段的持续时间延长约 4 h,该阶段的平均蒸发速率下降约 22.95%。

2) 聚合物凭借其良好的螯合性可大量团聚土体内部的土颗粒与水分,从而提升土体内部结构的稳定性,有效缓解土体表面裂隙的发育。然而,当聚合物的添加含量过高时,聚合物将优先与自身结合,容易造成局部区域的应力集中,促使裂隙发育。以第一轮湿干循环试验的结果为例,聚合物含量为 1.0% 时,改良土体的抗开裂能力达到最佳,其裂隙最大宽度、裂隙平均宽度和裂隙率相比素土分别下降约 35.9%、31.4%、17.5%。

3) 在湿干循环过程中,原有裂隙边缘的土颗粒进行再湿润时将出现崩解与滑落现象,从而填充部分宽度较小的裂隙。未改良土体由于其内部均匀性强,导致裂隙边缘的土体结构较稳定,且原有裂隙多为较宽大裂隙,故难以在湿干循环过程中被“愈合”。而聚合物的存在限制了土体表面的裂隙发育,减少了较宽大裂隙的产生,同时削弱了原有裂隙边缘的结构稳定性,使裂隙网络在湿干循环过程中逐渐被“愈合”。

参考文献:

- [1] 王司法,江兴元,杨义,等. 降雨条件下裂隙土坡水土响应与变形破坏特征试验研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(11):143-153.
WANG S F, JIANG X Y, YANG Y, et al. Hydrological response and deformation and failure characteristics of tension fracture slope under rainfall conditions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(11): 143-153.
- [2] 黄丽华,刘顺青. 考虑裂隙影响的红黏土边坡浅层稳定性分析[J]. 华南地震,2022,42(2):102-108.
HUANG L H, LIU S Q. Shallow stability analysis of red clay slope considering the influence of fissure[J]. South China Journal of Seismology, 2022, 42(2): 102-108.
- [3] JAHANGIR M H. Heat and mass transfer analysis in unsaturated ground soils around the buried heating pipe [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015, 10(1): JTST0012.
- [4] GRAY C W, ALLBROOK R. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils[J]. Geoderma, 2002, 108(3/4): 287-299.
- [5] 张展羽,朱文渊,朱磊,等. 根系及盐分含量对农田土壤干缩裂缝发育规律的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 83-89.
ZHANG Z Y, ZHU W Y, ZHU L, et al. Effects of roots and salinity on law of development for farmland soil desiccation crack[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 83-89.
- [6] CHENG Q, TANG C S, ZENG H, et al. Effects of microstructure on desiccation cracking of a compacted soil [J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105418.
- [7] XU J, WANG S H, WANG Z Q, et al. Heat transfer and water migration in loess slopes during freeze-thaw cycling in Northern Shaanxi, China [J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(11): 1591-1605.
- [8] ZHAO G T, ZOU W L, HAN Z, et al. Evolution of soil-water and shrinkage characteristics of an expansive clay during freeze-thaw and drying-wetting cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 186: 103275.
- [9] KONG L W, SAYEM H M, TIAN H H. Influence of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance (NMR) spin-spin relaxation time (T_2) relaxometry [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 55(2): 208-216.
- [10] 杨辉鸿,张志卫. 干湿循环下红黏土裂隙发育及抗剪强度劣化规律研究[J]. 土工基础, 2024, 38(3): 512-515+534.
YANG H H, ZHANG Z W. The study of crack development and shear strength deterioration of red clay soil under dry and wet cycles [J]. Soil Engineering and Foundation, 2024, 38(3): 512-515+534.

- [11] PATIL U D, SHELTON III A J, AQUINO E. Bioengineering solution to prevent rainfall-induced slope failures in tropical soil[J]. *Land*, 2021, 10(3):299.
- [12] 邹维列, 蒯建国, 韩仲, 等. 膨胀土边坡加固技术研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 126-139.
- ZOU W L, LIN J G, HAN Z, et al. Progress on strengthening techniques for expansive soil slopes[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1):126-139.
- [13] HAMZA M, NIE Z H, AZIZ M, et al. Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro-micro-study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(3):91.
- [14] 郝社锋, 葛礼强, 任静华, 等. 新型水溶性保水剂改良盐渍土保水特性试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(1):35-40.
- HAO S F, GE L Q, REN J H, et al. Experimental study on water retention characteristics of new water-soluble water-retention agent for improving saline soils[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2023, 40(1):35-40.
- [15] 张俊然, 赵鑫鑫, 姜彤. 3种生物聚合物改良粉土的水特性研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8):2157-2164.
- ZHANG J R, ZHAO X X, JIANG T. Water retention characteristics of silt improved by three types of biopolymer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8):2157-2164.
- [16] 段丽军, 张福海, 胡明涛, 等. 石灰和水玻璃改良粉土的水稳定性试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(4):35-39.
- DUAN L J, ZHANG F H, HU M T, et al. Experimental study on water stability of lime and water glass modified silt[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2018, 35(4):35-39.
- [17] 徐永浩, 潘雪敏, 王立娜, 等. 生物聚合物改良玄武岩残积土崩解特性研究[J]. *河北工业科技*, 2023, 40(3):183-191.
- XU Y H, PAN X M, WANG L N, et al. Research on disintegration characteristics of biopolymer modified basalt residual soils[J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2023, 40(3):183-191.
- [18] 柳丽. 固化剂改良公路路基土体的干燥收缩性能研究[J]. *公路工程*, 2020, 45(2):168-172+177.
- LIU L. Study on drying shrinkage property of highway subgrade soil modified by curing agent[J]. *Highway Engineering*, 2020, 45(2):168-172+177.
- [19] 李方, 孙树林, 张德恒. 改良滨海盐渍土物理性质及水稳定性试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)* 2019, 36(4):58-64.
- LI F, SUN S L, ZHANG D H. Experimental study on improving physical properties and water stability of coastal saline soil[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 36(4):58-64.
- [20] CHANG I, PRASIDHI A K, IM J, et al. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes[J]. *Geoderma*, 2015, 253:39-47.
- [21] KWON Y M, CHANG I, CHO G C. Xanthan biopolymer-based soil treatment effect on kaolinite clay fabric and structure using XRD analysis[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13:11666.
- [22] 席鸿定. 水泥行业污染控制及低碳环保发展分析[J]. *资源节约与环保*, 2023(2):124-127.
- XI H D. Analysis of pollution control and low-carbon environmental protection development in cement industry[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2023(2):124-127.
- [23] 刘东发, 张豫川, 高旭龙, 等. 木质素磺酸钙改良黄土的结构机理[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(4):468-475.
- LIU D F, ZHANG Y C, GAO X L, et al. The structural mechanism of calcium lignosulfonate loess[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2023, 59(4):468-475.

(责任编辑 唐彦彦)