

文章编号:1673-9469(2021)02-0031-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.02.006

# 干湿循环条件下有机聚合物复合黏土保水与开裂特性研究

何戏龙<sup>1</sup>, 宋京雷<sup>2,3</sup>, 理继红<sup>2,3</sup>, 卜凡<sup>1</sup>, 刘瑾<sup>1\*</sup>, 王梓<sup>1</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018;  
3. 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 针对添加不同浓度有机聚合物的复合黏性土开展室内干湿循环蒸发试验, 通过记录试验过程中试样的含水率变化以及获取裂隙发育特征图片, 以研究聚合物浓度的变化、干湿循环次数对黏性土内部的水分变化以及干缩开裂的影响。试验结果表明: (1) 黏土干燥失水过程主要分为三个阶段, 土体内部水分散失主要发生在常速率蒸发阶段, 由于聚合物与水反应所形成的弹性黏膜会堵塞土体内部的“疏水通道”, 因此随着聚合物浓度的增加, 土体的保水性逐渐提升, 常速率蒸发阶段的时间得到一定程度的延长。(2) 干湿循环作用会改变裂隙发育的形态, 且随着干湿循环次数的增加, 试样表面裂隙会出现不同程度的“愈合”, 随着聚合物浓度的提高, 土颗粒被弹性粘膜包裹与胶结, 试样表面裂隙形态变化较小, 整体稳定性得到提升。

**关键词:** 有机聚合物; 黏性土; 干缩开裂; 蒸发速率; 干湿循环

中图分类号: TU431

文献标识码: A

## Study on Water-retention and Cracking Characteristics of Organic Polymer Composite Clay under Dry-wet Cycling

HE Xilong<sup>1</sup>, SONG Jinglei<sup>2,3</sup>, LI Jihong<sup>2,3</sup>, BU Fan<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>1\*</sup>, WNAG ZI<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China;  
2. Geological Survey of Jiangsu Province, Jiangsu Nanjing, 210018, China;  
3. Technology Innovation Center for Ecological Monitoring & Restoration Project on Land (Arable), Ministry of Natural Resources, Jiangsu Nanjing, 210018, China)

**Abstract:** The indoor drying-wetting cycle tests of composite clayey soil with different concentrations of organic polymer were carried out. By recording the change of water content of the sample and obtaining the characteristic pictures of crack development, the influence of the change of polymer concentration and the number of drying-wetting cycles on the moisture change and desiccation cracking of clayey soil was studied. The results show that: (1) the drying and water loss process of clay can be divided into three stages, and the internal water loss mainly occurs in the constant rate evaporation stage. Because the elastic membrane formed by the reaction of curing agent and water will block the “hydrophobic channel” in the soil, the water holding capacity of the soil will be gradually improved with the increase of the concentration of the polymer, and the time of constant rate evaporation stage was prolonged to some extent. (2) With the increase of the number of drying-wetting cycles, the cracks on the surface of the samples will be “healed” in different degrees. However, with the increase of the concentration of polymer, the soil particles are wrapped and cemented by elastic membrane, and the surface crack morphology of the samples changes little, and the overall stability is improved.

**Key words:** organic polymer; clayey soil; desiccation cracking; evaporation rate; drying-wetting cycle

收稿日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472241); 中央高校基本科研业务费项目(B200203219); 江苏省研究生实践创新计划项目(SJ CX20\_0189); 江苏省自然资源科技项目(KJXM2019028); 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(2020)

作者简介: 何戏龙(1996-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 从事土体开裂方面的研究。

\* 通讯作者: 刘瑾(1983-), 女, 福建漳州人, 博士, 教授, 主要从事环境地质工程、地质灾害监测方面的工作。

近年来,植被护坡绿化技术作为一种新型的边坡防护治理技术,在工程实践中得到了广泛应用,其不仅能够一定程度上提高边坡的稳定性,防止地质灾害的发生,还能够改善生态环境,促进绿色发展<sup>[1-4]</sup>。客土喷播技术作为我国一种主要的边坡护坡绿化技术,其主要客土基材(黏土)在干旱气候条件下容易产生失水开裂的现象,对实际边坡工程防护效果产生严重影响,目前,针对黏性土体干缩开裂问题,国内外学者就黏性土开裂影响因素及裂隙网络定量化分析等方面进行了大量研究,但关于黏性土改良技术的研究较少<sup>[5-7]</sup>。近年来,高分子聚合物作为一种新型环保材料,被广泛应用于土体改良加固等方面<sup>[8-15]</sup>。因此,本文利用有机聚合物复合黏性土,通过一系列室内干湿循环蒸发试验,通过分析含水率、蒸发速率以及裂隙网络几何形态特征等方面的变化,研究了聚合物浓度与干湿循环次数对黏性土干裂特性的影响,并从微观角度进一步分析了有机聚合物对黏土干裂的影响机理。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验材料

本试验所用土体为南京地区下蜀土,自然状态下呈黄褐色(图1(a)),经烘干、碾碎后过2 mm的筛备用,其基本物理性质见表1。试验所用有机聚合物(简称PU),自然状态下呈浅黄色粘稠状液体(图1(b)),其能与任意比例水混合形成乳白色溶液(图1(c)),其基本物理参数见表2。

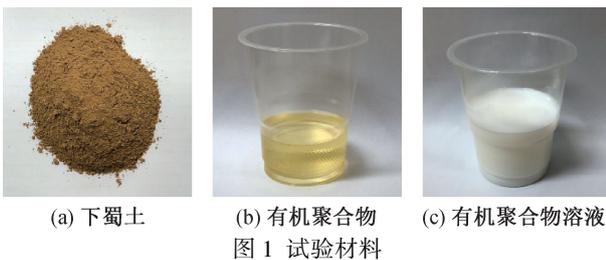


Fig. 1 Materials of experiment

表1 试验用黏土的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of clay for test

比重	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.71	16.68	40.1	17.3	22.8

表2 有机聚合物的物理性质

Tab. 2 Physical properties of polyurethane curing agent

pH	粘度/(MPa·s)	比重	固含量/%	凝固时间/s
2.71	650~700	1.18	85	30~1 800

### 1.2 试验方案

本文通过控制聚合物浓度( $C_{PU}$ )以及干湿循环次数,研究二者对黏土干裂特性的影响。其中,聚合物浓度( $C_{PU}$ )定义为聚合物与水质量比,由公式(1)计算所得。本次试验设置试样厚度为1 cm; $C_{PU}$ 分别为0%、0.1%、0.2%、0.5%、1%,对每个聚合物浓度条件下制备3个平行试样;试样初始含水率 $C_w$ 为65%;最大干湿循环次数为3次,且一次干湿循环的结束定义为开始统计试样含水率变化至试样干燥完全。

$$C_{PU} = \frac{M_{PU}}{M_w} \quad (1)$$

式中: $C_{PU}$ —聚合物的浓度,%; $M_{PU}$ —聚合物的质量,g; $M_w$ —水的质量,g。

本试验采用10 cm×10 cm×3 cm规格的塑料盒作为试样盒,并在盒底部粘贴一张规格为60目的砂纸,以模拟土层在自然状态下所存在的外界摩擦力。根据试验设计的试样初始含水率、聚合物浓度,定量称取黏土与聚合物,将聚合物与蒸馏水混合均匀后迅速与黏土进行充分拌合形成饱和浆液,并缓慢倒入试样盒中,最后放置于振动台上振动3 min,以排除试样内部的封闭气泡。制备完成的试样密封静置24 h后放入温度为20℃,相对湿度为50%的恒温/湿箱中进行干燥,并按时对各组试样进行称重、拍照,至每两次读数之差小于1 g时,标志为试样干燥完全。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 聚合物浓度、干湿循环次数对黏性土含水率的影响

当试样初始含水率以及干湿循环次数相同时,聚合物浓度对试样的含水率变化存在着明显的影响。图2为试样经过3次干湿循环后的含水率变化曲线。从图2可以看出,试样在干燥过程中含水率随干燥时间的变化主要分为三个阶段:线性减小阶段,非线性减小阶段,稳定阶段。如图2(a)所示,聚合物浓度为0%、0.1%、0.2%、0.5%、1%的试样对应的含水率线性减小阶段所持续的时间分别约为96、98、102、114、120 h,其中聚合物浓度为1%的试样较无添加的素土试样,其含水率线性减小阶段的时间延长了约24 h,表明黏性土含水率线性减小阶段的时间随着聚合物浓度的提高而逐渐延长。图2(b)与图3(c)为第二、三次干湿循环的含水率变化曲线,可以看出第二、三次干湿

循环含水率曲线变化趋势与第一次干湿循环一致。如图 2 所示,试样在第一阶段结束后其含水率均约为 12%,随后蒸发进入第二阶段(非线性减小阶段),该阶段试样的蒸发速率逐渐减小且持续时间较短,主要是因为该试样内部含水率已处于较低水平,对表面的补给作用减弱。在试样干燥进行至第三阶段(稳定阶段)时,含水率几乎不再变化,约为 5%~6%。由上述分析可知,各试样在第一阶段含水量损失约 53%,在第二阶段含水量损失约 6%,故在一次干燥过程中,试样水分蒸发主要发生在第一阶段,并且蒸发速率恒定,原因在于该阶段内试样含水率较高,水分可以持续稳定地运移至蒸发面,使其蒸发速率能在一个相对长的时间内维持在一个较高的水平。

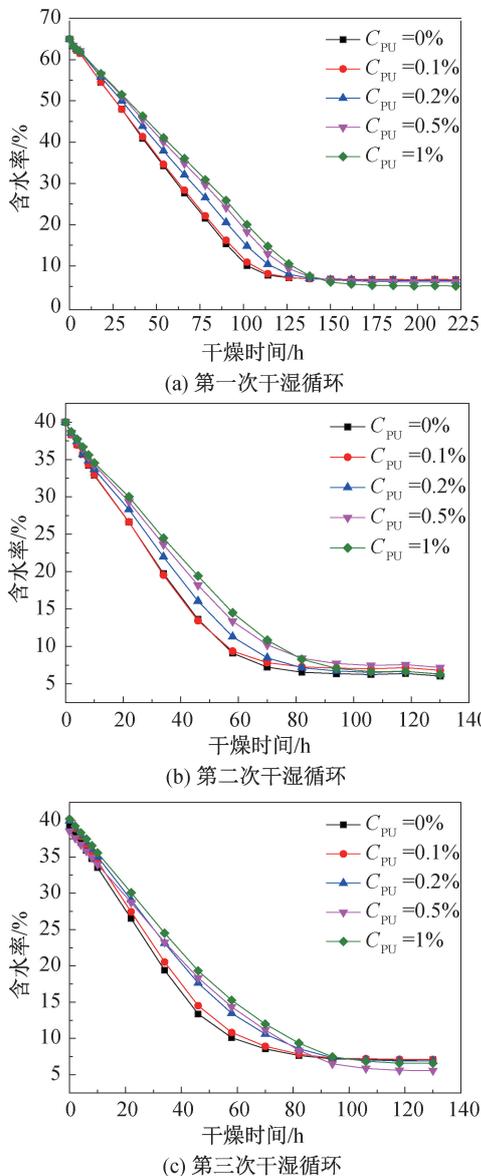


图 2 试样含水率随干燥时间的变化

Fig. 2 Change of moisture content of sample with drying time

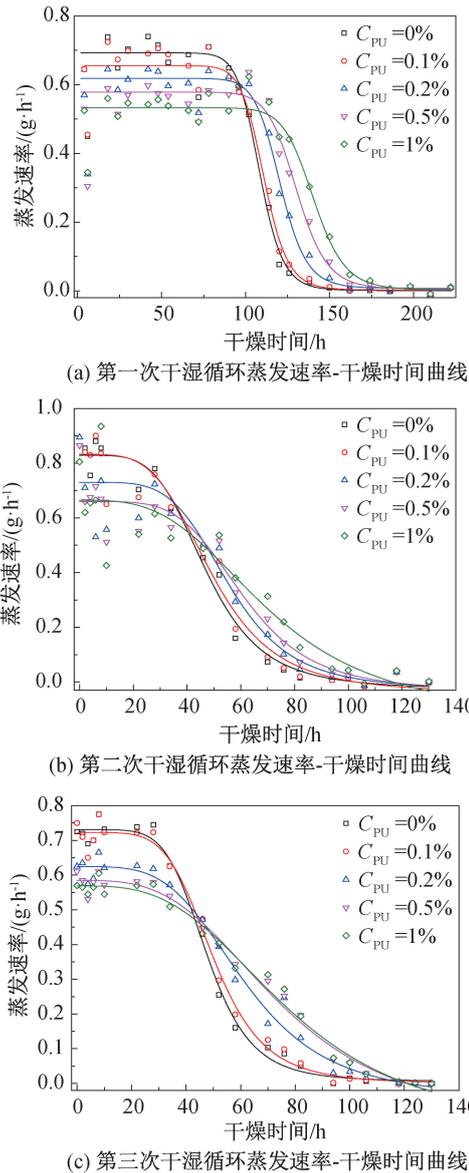


图 3 蒸发速率随干燥时间的变化

Fig. 3 Variation of evaporation rate with drying time

图 3 为 3 次干湿循环试样内部水分蒸发速率随时间变化的曲线。由图 3 可知,试样在干燥过程中水分蒸发速率变化需经历三个过程:常速率蒸发阶段,减速率蒸发阶段,残余蒸发阶段。图 3(a) 为添加不同浓度聚合物的试样第一次干燥过程中蒸发速率的变化。由图可知,随着聚合物浓度的提高,试样在常速率蒸发阶段的蒸发速率逐渐降低,聚合物浓度为 0%、0.1%、0.2%、0.5%、1% 的试样所对应的常速率蒸发阶段的蒸发速率分别约为 0.67、0.66、0.58、0.55、0.53 g/h。并且随着聚合物浓度的提高,试样常速率蒸发阶段所持续的时间增长,该阶段与含水率变化曲线的线性减小阶段相对应。在减速率蒸发阶段,试样蒸发速率

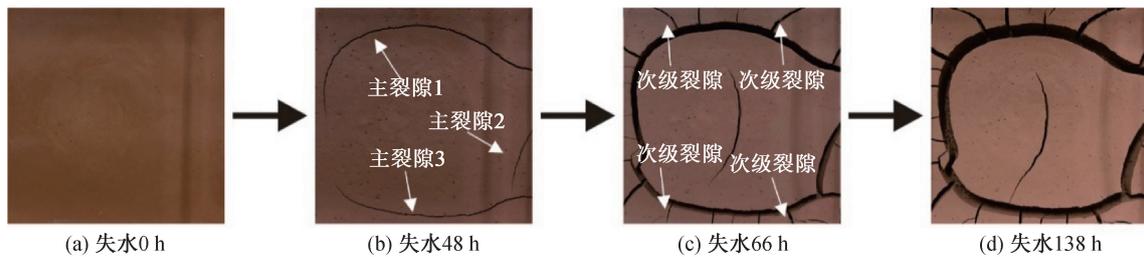


图4 无添加试样裂隙发育过程

Fig. 4 Formation and development of cracks in plain soil samples

逐渐减小,且随着聚合物浓度的提高,蒸发速率下降越慢,曲线越平缓。残余蒸发阶段试样蒸发速率基本不再发生变化,表明试样逐渐趋于稳定。因此,在试样的干燥过程中,聚合物的加入可以有效地减缓土体内部水分的蒸发,起到一定的保水作用,其原因在于聚氨酯型聚合物中含有亲水基团,能够紧密吸附土体内部水分,延缓了水分的蒸发,并且当聚合物与水产生反应时,会在土颗粒周围形成具有一定弹性的网状膜结构,包裹土颗粒,填充了颗粒之间的孔隙,导致水分向试样表面运移的通道减少,并延长了水分运移路径,进而影响土体内部的水分蒸发。

## 2.2 聚合物浓度、干湿循环次数对黏性土裂隙发育的影响

由于容器的边界存在限制,导致土体裂隙无法无限地延伸发育,故文中所示试样照片均向中心等比例截取1 cm,从而在一定程度上减小边界限制对试验所造成的影响。图4为无添加试样第一次干燥过程表面裂隙发育特征图。经历48 h的干燥,试样表面出现三条“主干裂隙”(图4(b))。此时试样的含水率约为37.4%,唐朝生等<sup>[16]</sup>将试样表面首次出现裂隙对应的含水率称为临界含水率 $C_w$ 。当含水率持续降低,试样表面“次级裂隙”与前期形成的“主干裂隙”相交后,停止延伸,向两侧持续扩张。图4(c)为试样表面裂隙网络基本形成时的图像,此时试样含水率为27.7%。可以看出,试样表面裂隙主要由三条主干裂隙以及沿着主干裂隙形成的“次级裂隙”所组成,这些“次级裂隙”一般与“主干裂隙”呈直角相交,交点处一般为“T”字形。当试样表面裂隙网络基本形成后,即使干燥继续进行,含水率继续下降,试样表面也不再产生新的裂隙,仅为裂隙在宽度上的扩展,如图4(d)所示。

图5为添加不同浓度聚合物的试样在不同次数干湿循环作用后表面裂隙形态特征。从图5中可以看出,试样在经历第一次干湿循环后,表面出

现大量裂隙,裂隙网络均以较少的“主干裂隙”为主体,伴生若干条“次级裂隙”,试样表面较为平整、光滑。在第二次干湿循环后,试样表面粗糙度增加,并产生大量的“凹凸点”,且试样表面微细裂纹增多。与此同时,第一次干燥结束之后,试样表面未贯通的独立裂隙在第二次干湿循环之后也逐渐发育,并与“主干裂隙”呈近直角相交。通过图5还可以看出,当聚合物浓度较低时,第二次干湿循环后试样表面裂隙被部分充填,但随着试样聚合物浓度的提高,试样裂隙被充填现象不明显,原因在于低浓度聚合物团聚土颗粒能力较弱,在增湿过程中,土颗粒被冲散进而发生“崩解”,部分“崩解”后的土体对前期形成的裂隙进行了充填;而较高浓度聚合物团聚土颗粒的能力增强,进而提升了土体的整体稳定性。第三次干湿循环结束后,试样表面部分裂隙被进一步充填,裂隙出现不同程度的“愈合”,裂隙宽度较第一、二次干湿循环后大幅度减小。综上所述,通过对图5的纵向对比分析,可以发现随着干湿循环的进行,高浓度聚合物试样表面裂隙形态变化较小,在干湿循环的破坏下能保持较高的稳定性。

图6为第一次干燥过程中试样含水率随干燥时间变化时所对应的特征裂隙图像。从图6中可以看出,添加不同浓度聚合物的试样表面首次出现裂隙均发生在含水率线性减小阶段,即常速率蒸发阶段,且随着聚合物浓度的提高,试样表面首次出现裂隙的时间相对滞后。聚合物浓度为0%、0.1%、0.2%、0.5%、1%的试样表面首次出现裂隙的时间分别为48、48、54、54、66 h,对应裂隙出现的临界含水率分别为37.4%、37.9%、37.9%、38.9%、36.0%,集中分布于36%~39%之间。当试样表面裂隙网络的基本形态发育完全时,添加聚合物浓度由低到高的试样所需时间分别为66、72、78、78、90 h,此时对应含水率为27.7%、25.5%、26.5%、28.6%、25.9%,集中分布于25%~29%之

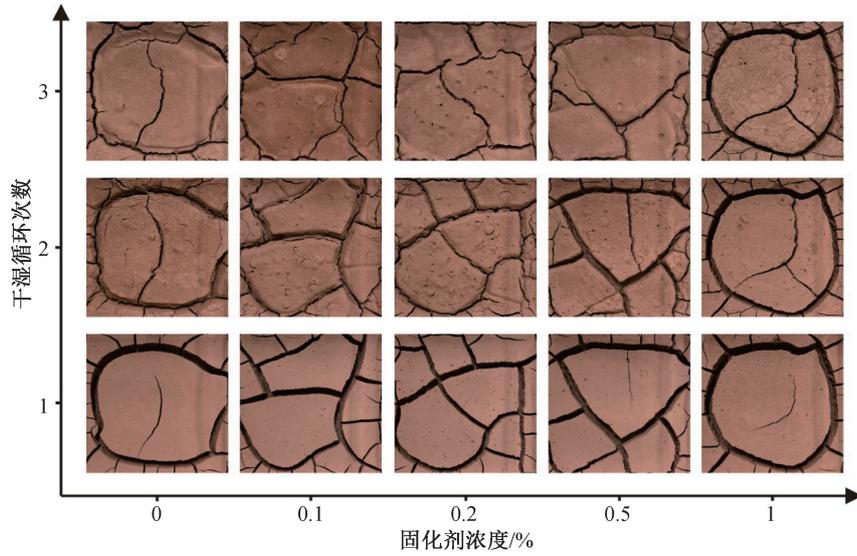


图 5 不同聚合物浓度的试样干湿循环作用下裂隙发育规律

Fig. 5 Crack development law of samples with different polymer concentrations under drying-wetting cycle

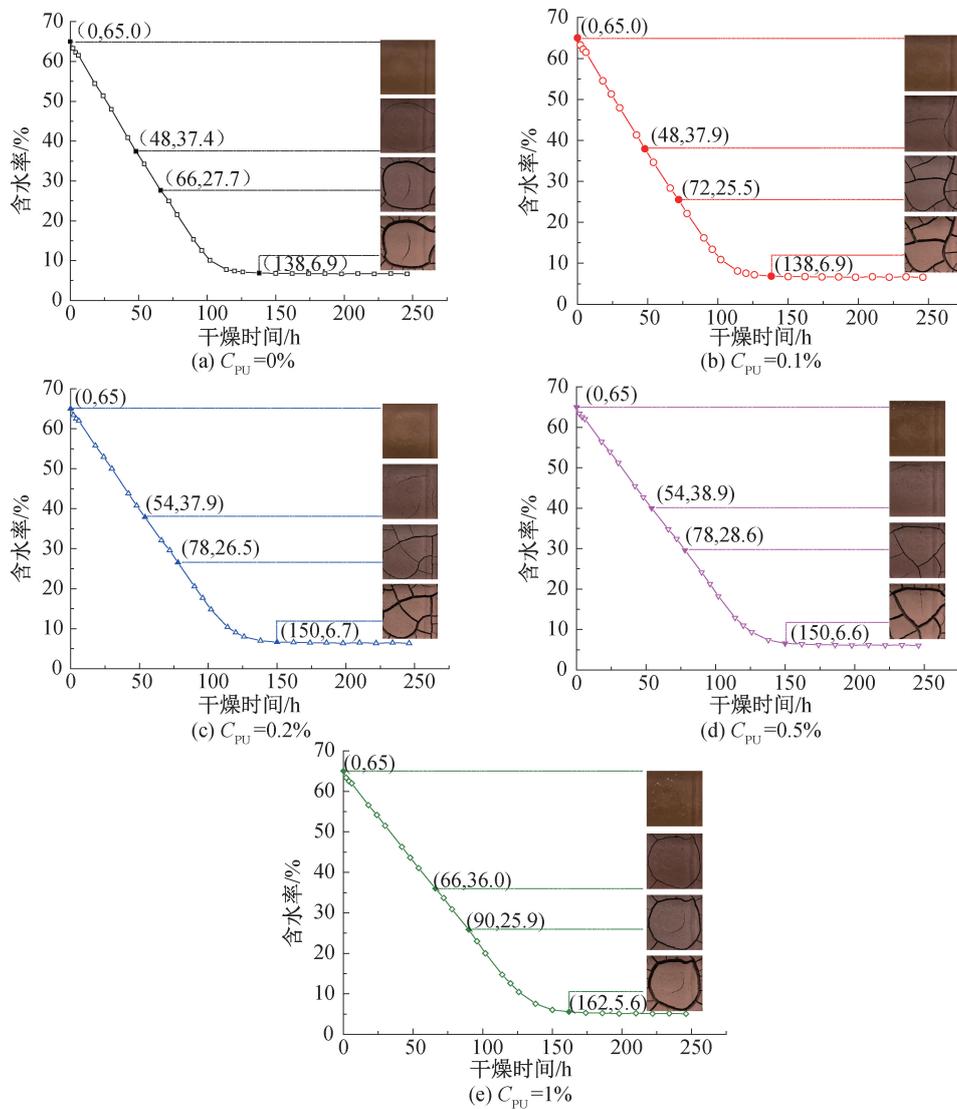


图 6 第一次干燥过程中试样含水率随干燥时间变化时所对应的特征裂隙图像

Fig. 6 Characteristic crack image corresponding to the change of moisture content with drying time in the first drying process

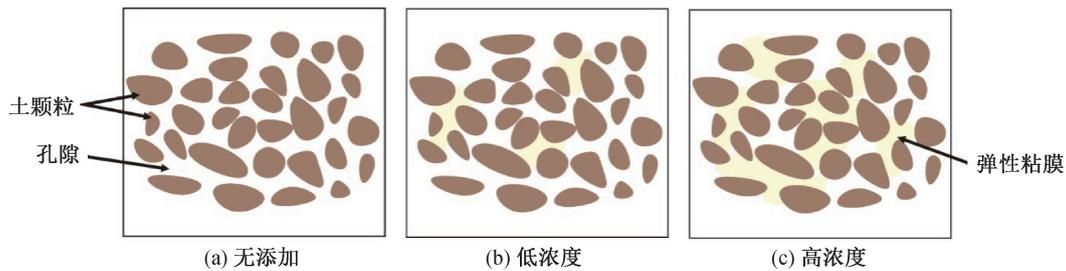


图7 不同浓度聚合物溶液对黏性土产生影响的原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the influence of polymer solutions with different concentrations on the clayey soil

间。此后,即便试样含水率随着干燥时间的延长而继续下降,但试样表面裂隙网络形态基本不变,仅为裂隙宽度向两侧逐渐扩展。由此可知,聚合物的加入可以延长试样表面裂隙出现以及裂隙网络基本发育完全的时间,且上述影响效果与添加聚合物浓度呈正相关。

### 3 机理分析

黏性土开裂宏观上是水分蒸发、体积缩小的过程。由于黏土颗粒表面被一层结合水化膜包裹,导致颗粒之间并不是直接接触,而是存在着一定的间隔,这为黏土失水收缩提供了必要的空间条件<sup>[17]</sup>。干燥开始时,试样表面的自由水首先被蒸发,随着蒸发的继续,试样内部产生毛细水将试样下部的的水分运移至试样表面以维持蒸发的进行,并在试样内部形成张拉应力场。当土体内部某处的张拉应力增大至超过土体的抗拉强度时,便会产生拉裂破坏,形成裂隙<sup>[18]</sup>。

图7为不同浓度聚合物溶液对黏土开裂产生影响的机理示意图。聚合物与水反应后生成弹性粘膜,其对黏土颗粒的影响主要为充填、包裹与胶结作用。当黏土颗粒与聚合物溶液混合之后,反应生成的弹性粘膜会充填黏土颗粒与颗粒之间的孔隙,造成水分向上运移通道的“阻塞”,且聚合物浓度越高,孔隙被充填的程度越高。图7(a)为无添加的素土试样微观结构示意图,土中孔隙未被充填,试样下部的自由水可以通过毛细作用无阻碍地运移至试样表面维持蒸发的进行。图7(b)、(c)为不同浓度聚合物复合黏土试样的微观结构示意图,可以看出,当聚合物浓度较低时,试样内仅有少部分孔隙被充填,当聚合物浓度达到较高水平时,试样内部的孔隙被大量充填,试样下部的自由水运移至试样表面的通道被“阻塞”,减少并延长了试样水分迁移路径,进而导致试样蒸发速率降低。这是图3中试样蒸发速率随聚合物浓度

增大而降低的主要原因。弹性粘膜的存在不仅会充填颗粒间孔隙,还会对土颗粒进行包裹与胶结作用。如图5所示,当一次干湿循环结束,在对试样进行增湿的过程中,无添加的素土试样以及低浓度聚合物复合黏土试样上部土颗粒由于颗粒间联结较弱被水流冲散,进而充填先期形成的裂隙,而高浓度聚合物混合黏土试样由于聚合物的包裹与胶结作用,增强了颗粒间的联结,在水流的作用下土颗粒不会轻易被冲散,试样表层土体能维持整体稳定性,如图7(c)所示,当土颗粒周围孔隙全部被弹性粘膜充填时,弹性粘膜会包裹与胶结土颗粒,增强颗粒间的联结力,这也解释了在经历多次干湿循环后高浓度聚合物复合黏土试样表面裂隙形态变化较小,稳定性较高的原因。

### 4 结论

本文通过改变聚氨酯型聚合物浓度以及干湿循环次数,开展了一系列室内干湿循环蒸发试验,从含水率变化、蒸发速率以及裂隙网络形态特征等方面研究了二者对黏性土干缩开裂的影响,得到如下结论:

1) 黏土干燥失水过程中含水率-蒸发速率变化主要经历三个阶段:线性减小-常速率蒸发阶段,非线性减小-减速率蒸发阶段,稳定-残余蒸发阶段。试样内部水分损失主要发生在第一阶段,失水量约为53%,第二阶段失水量仅为6%。随着聚合物浓度提高,试样含水率线性减小阶段所持续时间延长且蒸发速率降低,其中1%聚合物浓度的试样较无添加的素土试样含水率线性减小阶段的时间延长了约24 h,蒸发速率降低了0.14 g/h。其原因为聚合物与水反应生成的弹性粘膜对土体孔隙的充填作用,造成水分向上运移通道的“阻塞”,进而降低水分蒸发速率,延长蒸发时间,起到一定程度的保水作用。

2) 干湿循环作用将对黏性土表面及内部裂隙

的形态产生改变。随着干湿循环次数的增加,试样表面裂隙会出现不同程度的“愈合”,但随着聚合物浓度的提高,土颗粒被弹性粘膜包裹与胶结,颗粒间的联结增强,在水体的作用下不会轻易被破坏,试样表面裂隙形态变化较小,整体稳定性得到一定程度的提升。

#### 参考文献:

- [1]周利恩,尚彦,余建新.工程边坡生态防护技术[J].云南农业大学学报,2006,21(4):517-522.
- [2]李冰.浅谈高速公路边坡生态防护技术[J].福建建材,2014,12:13-15.
- [3]廖琳.边坡绿化防护技术的发展和植被护坡机理[J].企业科技与发展,2016,07:78-80.
- [4]徐文有.公路岩石边坡TBS植被护坡绿化技术的应用[J].交通企业管理,2012,27(06):64-65.
- [5]廖一蕾,张子新,肖时辉,等.水泥加固黏土微观特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):4318-4327.
- [6]曾智,沈水龙,王志丰,等.上海水泥固化黏土的强度与硬度相关性研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(02):311-314.
- [7]钱程.石灰改良红黏土试验研究[J].西部交通科技,2020,03:36-38.
- [8]ATE A. The Effect of POLYMER-CEMENT Stabilization on the Unconfined Compressive Strength of Liquefiable Soils[J]. International Journal of Polymer Science, 2013: 155-171.
- [9]IYENGAR S R, MASAD E, RODRIGUEZ A K, et al. Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(4): 472-483.
- [10]LIU Jin, BAI Yuxia, LI Ding, et al. An Experimental Study on the Shear Behaviors of POLYMER-SAND Composite Materials after Immersion[J]. Polymers, 2018, 10(8):924.
- [11]LIU Jin, BAI Yuxia, SONG Zezhuo, et al. Evaluation of Strength Properties of Sand Modified with Organic Polymers[J]. Polymers, 2018, 10(3):287.
- [12]LIU Jin, WANG Yong, LU Yi, et al. Effect of Polyvinyl Acetate Stabilization on the SWELLING-SHRINKAGE Properties of Expansive soil[J]. International Journal of Polymer Science, 2017:1-8.
- [13]张伟锋,刘清秉,蔡松桃.用HEC聚合物加固黄土的试验研究[J].人民长江,2009,40(03):56-59.
- [14]王银梅,杨重存,谌文武,等.新型高分子材料SH加固黄土强度及机理探讨[J].岩石力学与工程学报,2005,14:2554-2559.
- [15]董金梅,王沛,柴寿喜.水泥改性聚乙烯醇固化轻质土的强度特性[J].建筑材料学报,2011,14(04):576-580.
- [16]唐朝生,崔玉军,ANH-Minh,等.膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J].岩土工程学报,2012,34(12):2181-2187.
- [17]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(08):1415-1423.
- [18]罗茂泉,杨松,马泽慧,等.干湿循环下气-液界面张力对黏土收缩开裂的影响[J].土壤学报,2018,55(02):369-379.

(责任编辑 王利君)

(上接第13页)

- [9]GAO J, YU Z, SONG L, et al. Durability of Concrete Exposed to Sulfate Attack under Flexural Loading and Drying-wetting Cycles[J]. Construction and Building Materials, 2013, 39(2):33-38.
- [10]TAN Y, YU H, MA H, et al. Study on the Microcrack Evolution of Concrete Subjected to Stress Corrosion and Magnesium Sulfate[J]. Construction and Building Materials, 2017,141:453-460.
- [11]XU H, ZHAO Y, CUI L, et al. Sulphate Attack Resistance of High-performance Concrete under Compressive Loading[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2013,14(7):459-468.
- [12]高鑫,申向东,王萧萧,等.应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能[J].硅酸盐学报,2014,42(10):1247-1252.
- [13]梁咏宁,袁迎曙.超声检测混凝土硫酸盐侵蚀的研究[J].混凝土,2004(8):15-17.
- [14]孙丛涛,牛荻涛,元成方.混凝土动弹性模量与超声声速及抗压强度的关系研究[J].混凝土,2010(04):14-16.

(责任编辑 王利君)