

DOI: 10.11779/CJGE20220653

纤维改性珊瑚泥裂隙动态演化规律试验研究

丁选明¹, 方华强^{*1}, 刘汉龙¹, 蒋春勇¹, 李根峰²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044; 2.重庆文理学院土木工程学院, 重庆 402160)

摘要: 土体龟裂在自然界中广泛存在, 而裂隙的存在极大地劣化了土体的工程性质。岛礁上工程材料缺乏, 如何就地取材, 利用珊瑚泥这种潜在的工程材料并进行改性, 是亟需解决的关键问题。采用 PVA 纤维对珊瑚泥龟裂特性进行改善, 通过龟裂试验, 利用图像处理技术, 获得了裂隙参数、分形维数、频率分布以及裂隙发育速率的变化规律, 从而得出不同纤维掺量下的珊瑚泥裂隙动态演化规律以及纤维加固效果。结果表明: PVA 纤维的掺入, 提高了土体的整体性能, 并起到桥接作用, 能在一定程度上阻碍土体的收缩以及抑制土体裂隙的拓展。此外, 还得出了纤维加固土体的裂隙开裂判据, 以及揭示了珊瑚泥纤维加固机理。这对珊瑚泥的潜在应用价值具有重要意义。

关键词: 珊瑚泥; 龟裂; PVA 纤维; 裂隙动态演化

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)09-1801-12

作者简介: 丁选明(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程、土力学与地基基础工程、土动力学与工程振动等方面的教学和科研工作。E-mail: dxmhhu@163.com。

Dynamic evolution laws of desiccation cracking of fiber-improved coral silt

DING Xuanming¹, FANG Huaqiang¹, LIU Hanlong¹, JIANG Chunyong¹, LI Genfeng²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: The desiccation cracking of soils is a widespread natural phenomenon, the existence of which greatly deteriorates the engineering properties of soils. There is a lack of engineering materials on coral islands. How to use the locally sourced coral silt, a potential engineering material, and improve its engineering performance is a key problem that needs to be solved urgently. The PVA fiber is used to improve the desiccation cracking characteristics of the coral silt. Through the desiccation cracking tests and the image processing technology, the changing laws of crack parameters, fractal dimension, frequency distribution and propagation velocity of the coral silt are obtained. Thus, the dynamic evolution laws of desiccation cracking of the coral silt and the fiber reinforcement effects under different fiber content are obtained. The results show that the incorporation of PVA fibers improves the overall performance of the coral silt and acts as a bridge, which can hinder the shrinkage of the soils and inhibit the expansion of desiccation cracks to a certain extent. The cracking criterion of fiber-reinforced soil is obtained, moreover, the fiber reinforcement mechanism of the coral silt is revealed, which is of great significance to the potential application value of the coral silt.

Key words: coral silt; desiccation cracking; PVA fiber; crack dynamic evolution

0 引言

土体龟裂在自然界中广泛存在^[1-2]。裂隙通常在土体的表面或内部发育, 破坏了土体的完整性, 严重影响着土体的强度、变形以及渗透特性, 极大地劣化了土体的工程性质, 由此引发了一系列工程灾害, 如边坡失稳^[3]、堤坝溃败^[4]、道路开裂^[5-6]等。

目前, 针对土体龟裂问题, 学者们采用了物理和化学等方法进行了土体加固和改善, 从而预防土体的龟裂。在化学方法加固方面, Abbey 等^[7]、Khemissa 等^[8]采用水泥、石灰等化学物质来降低土体的收缩性,

从而达到抑制裂隙发育的效果。Liu 等^[9]研究了 MICP 对黏性土开裂的影响, 发现随着处理次数的增加, 相关裂隙参数显著减小。化学方法会改变土体的结构和性质, 会对土体造成持久且不可逆的影响。而物理方法是一种经济环保且有效的加固土体的方式。在物理方法加固方面, Liu 等^[10]采用底灰等工业废物掺合料

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2022CDJQY-012); 国家自然科学基金项目(41831282); 重庆英才计划优秀科学家项目(cstc2021ycjh-bgzxm0051)

收稿日期: 2022-05-19

*通信作者(E-mail: charlesfeung@outlook.com)

来改善土体性能,发现其能在一定程度上减缓裂隙的形成。Zhang 等^[11]研究了生物炭对土体干燥开裂特性的影响,并进行了机理分析。Xie 等^[12]采用尼龙纤维和酶基产品来改性膨胀土,发现它能够显著改变裂隙发育模式,从而减轻裂隙的影响。张虎元等^[13]通过对膨润土-砂混合物泥浆样掺石英砂来限制混合物的干燥收缩,从而抑制其干缩开裂。然而,目前鲜有针对珊瑚泥的龟裂问题进行防治研究。珊瑚泥是吹填造岛的过程中在钙质砂地基上层所形成的细粒珊瑚土^[14-16]。由于岛礁接近赤道,接受太阳辐射的热量较多,水分蒸发量大,导致了珊瑚泥场地的龟裂。岛礁上工程材料缺乏,而珊瑚泥就是一种潜在的工程材料。珊瑚泥在失水的过程中会产生收缩,进而产生裂缝。因此,需要对就地取材的珊瑚泥进行性能改善,提高其力学性能以及抗裂性。性能改善的珊瑚泥可以很好地用于工程中,如地基、边坡、防渗层及墙面层等,具有很高的潜在工程应用价值。

因此,选用 PVA 纤维对珊瑚泥进行性能改善。通过龟裂试验,利用图像处理技术,获得了裂隙参数、分形维数、频率分布以及裂隙发育速率的变化规律,进行了裂隙动态演化机理分析,从而得出不同纤维掺量下的珊瑚泥裂隙动态演化规律以及纤维加固效果,揭示了纤维加固珊瑚泥机理,这对珊瑚泥的潜在开发利用具有重要意义。

1 试验材料及方法

1.1 土样

前期,已经在南海某岛礁进行了采样,获得了一批珊瑚泥材料^[15-16]。为了获取更多的试验材料,模拟吹填岛礁绞吸船粉碎珊瑚砂进行吹填造岛的原理,通过球磨机将自然风干的珊瑚砂进行磨制,得到目标粒径的珊瑚泥。通过物性试验测试,得出珊瑚泥人工制备样与吹填场地形成的珊瑚泥的物理力学指标相近。珊瑚泥人工制备样的相对质量密度为 2.79,液限为 25%,塑限为 15%,塑性指数为 10。采用重庆大学 S350 型激光粒度分析仪对土样进行了粒度分布测试,得出砂粒、粉粒以及黏粒分别为 15%, 64% 以及 21%。属于低液限粉土 (CL)。

1.2 PVA 纤维

采用产自日本的 PVA 纤维(维尼纶短纤)进行珊瑚泥性能改善。PVA 纤维呈白色(图 1(a)),其直径为 40 μm,长度为 12 mm,抗拉强度为 1560 MPa,弹性模量为 41 GPa,断裂伸长率为 6.5%。采用 LIOO SMZ61 显微镜可观察到单根 PVA 纤维丝表面粗糙不平(图 1(b))。

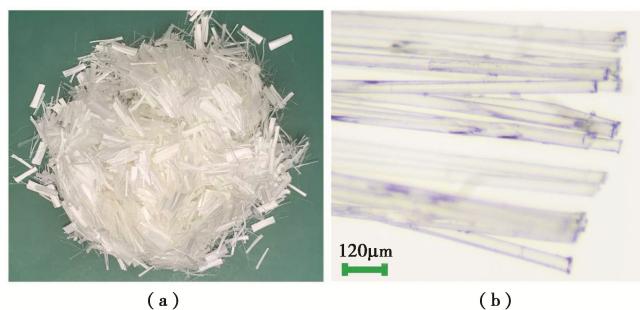


图 1 PVA 纤维

Fig. 1 PVA fiber

1.3 试验方法

为研究纤维掺量对珊瑚泥试样干缩裂隙发育的影响,试验中一共配置了 4 组试样(如表 1)。在试验之前,进行了纤维掺量的优化预试验,发现当 PVA 纤维掺量超过 0.5% 之后,发生明显的团聚现象,纤维过多,不能充分分散均匀。因此,最高纤维掺量控制为 0.5%。在内径为 20 cm×20 cm×5 cm 的长方体有机玻璃容器侧壁贴上带有刻度的胶带,以方便记录试样的厚度。配置含水率为 50% 的过饱和不同纤维掺量的试样,采用 H2025G 电动搅拌器进行充分搅拌,让 PVA 纤维均匀分散在泥浆中,并赶出试样中的气体,减少试样中气泡的影响。采用塑料薄膜将试样密封,静置 24 h,以便泥浆水分均匀分布。最后,将试样表面多余的水分吸出,并计算出试样的平均含水率约为 45%。干燥过程中,为了准确的测量试样的平均含水率,采用精度为 0.01 g 电子天平。试样均处于 30℃ 的恒温环境中,为了记录干缩裂隙发育过程,进行定时拍照,在试样表面出现干缩裂缝后,增加拍照的频率。当试样质量不再发生变化后,认为试样干燥已经完成。试验完成后,采用南京大学开发的 PCAS 裂隙图像处理软件获得各相关龟裂参数^[17]。

表 1 试样主要参数

Table 1 Main parameters of samples

试样 编号	初始厚度/ mm	初始含 水率/%	纤维掺 量/%	试样尺寸/ (mm×mm)
S1	10	45	0.00	200×200
S2	10	45	0.10	
S3	10	45	0.25	
S4	10	45	0.50	

2 试验结果与分析

2.1 珊瑚泥试样蒸发过程

试样含水率随时间变化关系曲线如图 2 所示。随着水分的持续蒸发,不同纤维掺量的珊瑚泥平均含水率均逐渐降低,而后趋于稳定状态。可以看出,珊瑚泥的蒸发曲线可以分为两个阶段,在 6000 min 之前,表现为快速蒸发失水期,而在 6000 min 之后,为蒸发

稳定期。纤维的掺量对珊瑚泥的蒸发过程几乎无影响, 这与其他学者得出的规律一致^[18]。

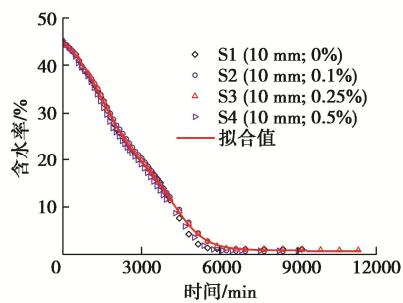


图 2 含水率随时间变化曲线

Fig. 2 Change of water content with elapsed time

2.2 珊瑚泥裂隙动态发育过程

试验得到各试样在不同时刻的裂隙图像, 通过各试样裂隙图像对比, 可直观地看出各纤维掺量下裂隙形态变化过程的差异性。图 3 为 S1~S4 的典型裂

隙动态变化。裂隙从边缘处萌生, 而后向中心发育和扩展。当未添加纤维时, 裂隙分割出的土块明显。随着纤维掺量的添加, 裂隙在发育的过程中, 由于受到纤维的抑制作用, 裂隙扩展的长度更小, 裂隙的宽度也显著降低, 而裂隙密度明显增多, 土体更加破碎, 分割出的土块显著减少。说明, 纤维能在一定程度上抑制裂隙的扩展, 降低裂隙发育的长度, 但会促使裂隙更多的产生, 反而使得土体变得更破碎。从图 3 中也可以观察出不同纤维掺量的土体裂隙形态有明显差异。

2.3 珊瑚泥裂隙参数变化规律

裂隙参数的变化规律可以在一定程度上反映出不同纤维掺量对裂隙发育抑制的效果。方华强等^[19]已给出了相关参数的定义。

从图 4 中可以看出, 不同纤维掺量试样裂隙的萌生时间较为接近, 说明纤维的掺入对裂隙的产生时间

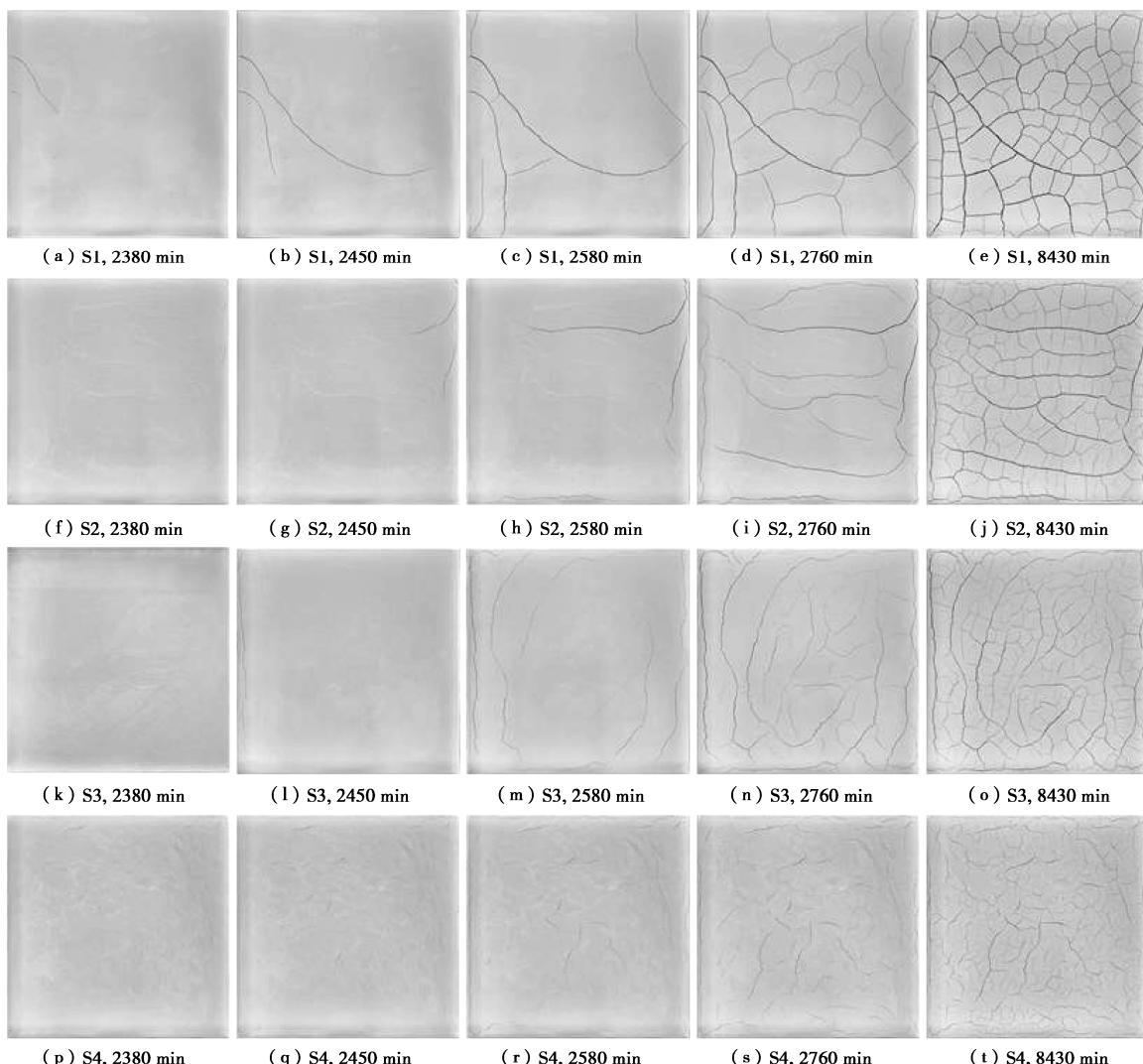


图 3 不同纤维掺量珊瑚泥裂隙萌生和发育

Fig. 3 Initiation and propagation of desiccation cracks in coral silt with different fiber contents

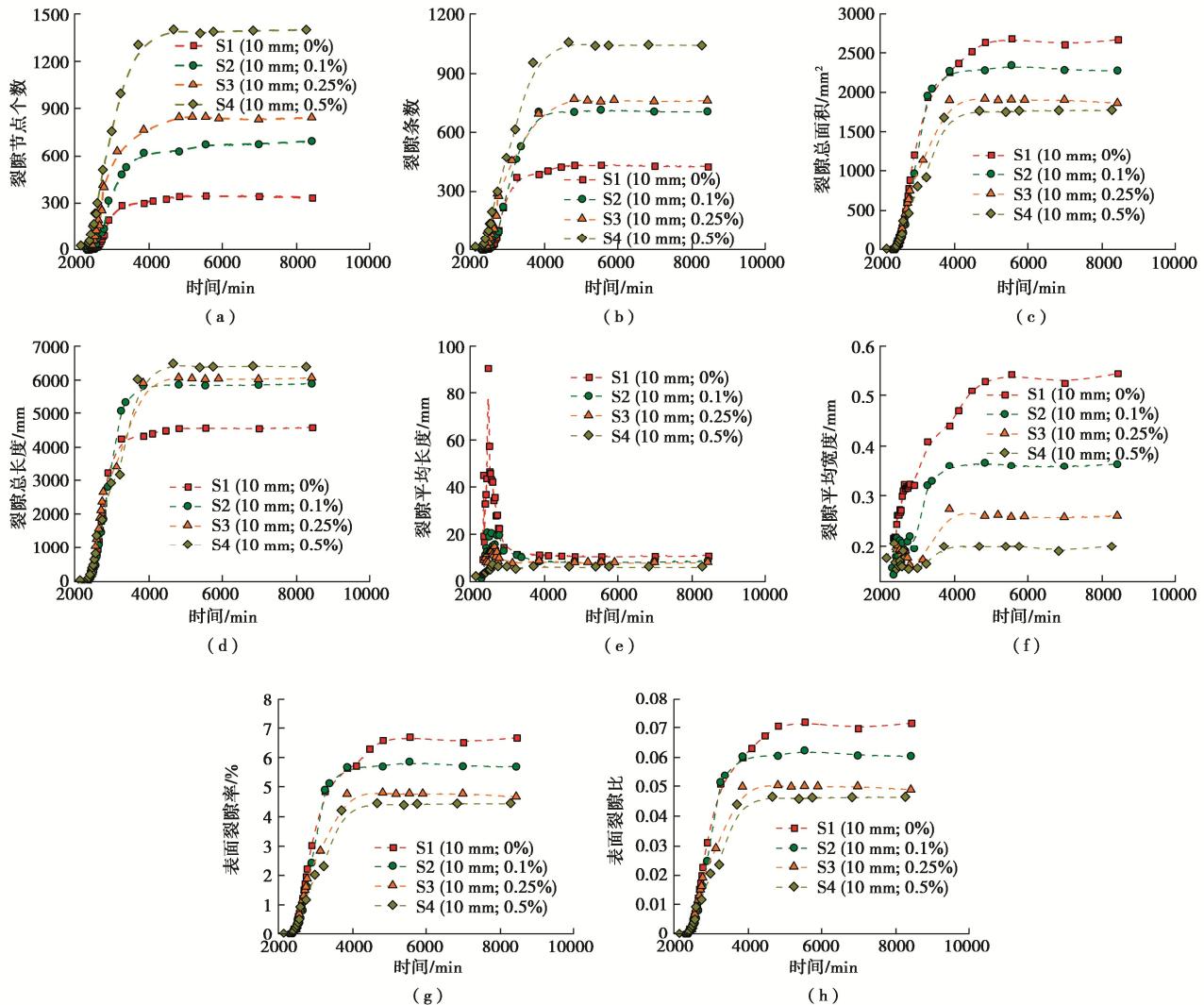


图 4 裂隙参数随时间变化

Fig. 4 Change of crack parameters with elapsed time

几乎无影响。从图 4 (a), (b), (c), (d), (g), (h) 中可以看出, 不同纤维掺量的试样, 裂隙节点个数、裂隙条数、裂隙总面积、裂隙总长度、表面裂隙率以及表面裂隙比均随着时间的流逝表现为先显著增加随后趋于稳定。随着纤维掺量的增加, 相应的裂隙总面积、表面裂隙率以及表面裂隙比前期均较为接近, 后期均表现为减小(图 4 (c), (g), (h))。表面裂隙率与表面裂隙比之间的关系在方华强等的研究中已有提出^[20]。图 4 (e) 中可以看出, 各纤维掺量下的试样, 裂隙平均长度随时间变化规律较为一致。裂隙平均长度在前期表现为增加的趋势, 而纤维掺量高的试样有着较低的增加速率, 随之表现为显著减小, 纤维掺量少的试样反而降低速率更快, 最终趋于稳定。稳定阶段时, 裂隙平均长度均较为接近, 也可以看出随着纤维掺量的增加, 相应的裂隙平均长度逐渐降低。图 4 (f) 中可以看出, 在前期, 不同纤维掺量试样的平均裂隙宽度呈现出先增加后降低的趋势, 而未添加纤维

的试样 S1 则随着时间的消逝, 呈现为持续增加直至趋于稳定。稳定阶段时, 纤维掺量越多, 相应的裂隙平均宽度越小。综上可知, 试样掺入不同比例的纤维, 均能有效降低裂隙总面积、裂隙平均长度、裂隙平均宽度、表面裂隙率以及表面裂隙比。但纤维的掺入, 反而会导致裂隙节点数、裂隙条数以及裂隙总长度的显著增加。这也体现出纤维能有效抑制裂隙的发育和扩展, 在降低裂隙发育的长度方面能起到一定作用, 但也会导致更多的裂隙出现, 反而使得土体裂隙密度更大, 土体更破碎, 土体的完整性受到进一步破坏(图 3)。

分形维数是土体裂隙形态特征的重要参数。本文采用裂隙面积分形维数以及裂隙长度分形维数来描述裂隙规律。其中裂隙面积分形维数通过将二值化后的裂隙图像直接进行分形维数的计算得到, 而裂隙长度分形维数则是通过对二值化后的裂隙图像进行骨架化处理, 得到裂隙的中轴, 剔除了裂隙宽度的影响, 仅

对裂隙的长度及平面分布情况进行考虑的另外一种形式的裂隙形态规律反映^[21]。从图 5 (a), (b) 中可以看出, 裂隙面积分形维数和裂隙长度分形维数均随着时间的消逝表现为先显著增加后趋于稳定, 裂隙面积分形维数随时间变化曲线基本重合(图 5 (a)), 说明, 纤维的掺入对裂隙面积分形维数影响较小。裂隙长度分形维数与时间关系曲线在前期基本重合, 在稳定阶段则有一定差异, 即裂隙长度分形维数随着纤维掺量的增加呈现为微小增加。说明裂隙宽度会对分形维数有一定的影响。

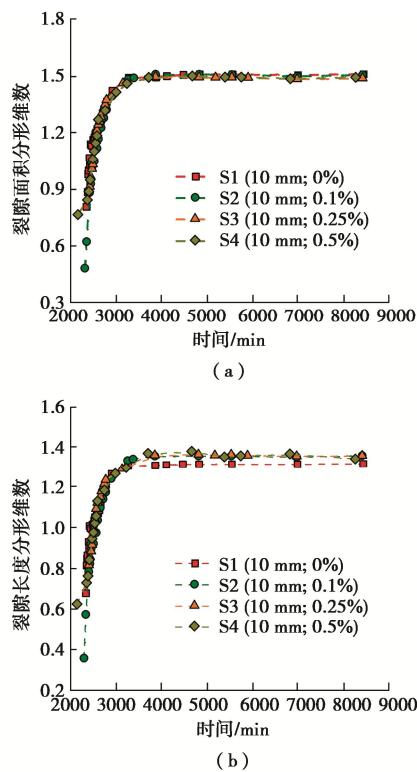


图 5 分形维数随时间变化

Fig. 5 Change of fractal dimension with elapsed time

裂隙面积分形维数和裂隙长度分形维数均随着表面裂隙率的增加表现为先显著增加后缓慢增加直至趋于稳定(图 6 (a), (b)), 均有着较好的幂函数关系, 即

$$y = ax^b \quad . \quad (1)$$

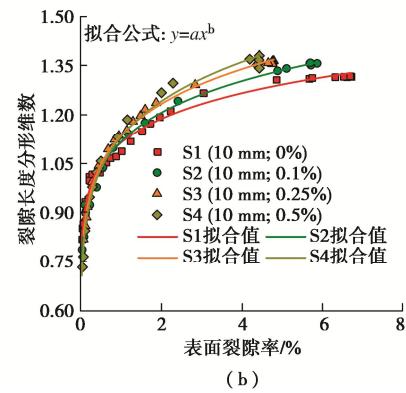
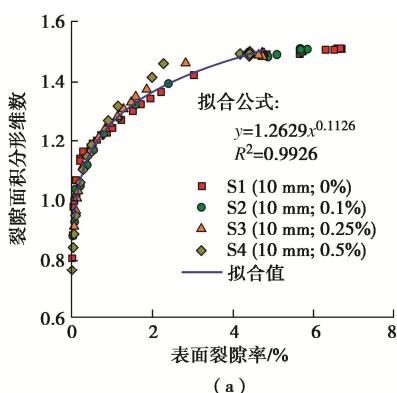


图 6 表面裂隙率与分形维数关系

Fig. 6 Relationship between surface crack rate and fractal dimension

裂隙面积分形维数与表面裂隙率关系曲线基本重合, 裂隙长度分形维数在前期基本重合, 后期在表面裂隙率一定时, 随着纤维掺量的增加而增加。

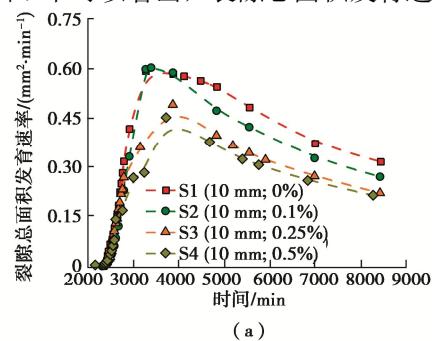
裂隙发育速率可以用来表征裂隙发育的快慢程度。裂隙发育速率可采用单位时间的裂隙总面积和单位时间的裂隙总长度来衡量。即

$$v_s = \frac{S_t}{t} \quad , \quad (2)$$

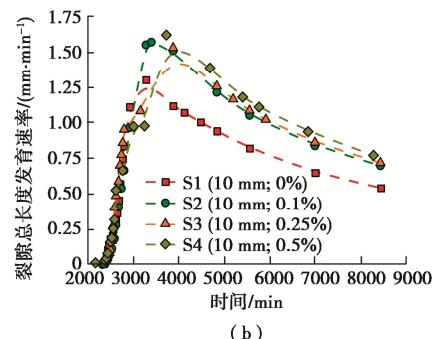
$$v_L = \frac{L_t}{t} \quad . \quad (3)$$

式中: v_s , v_L 分别为裂隙总面积发育速率和裂隙总长度发育速率, S_t , L_t 分别为 t 时刻所对应的裂隙总面积与裂隙总长度。

从图 7 中可以看出, 裂隙总面积发育速率和裂隙



(a)



(b)

图 7 裂隙发育速率与时间关系

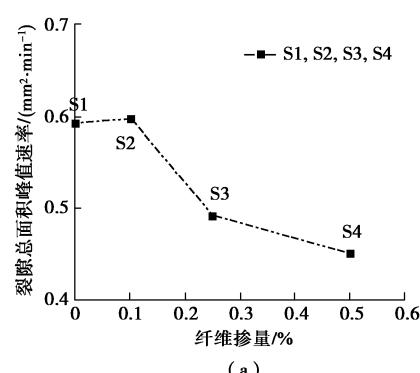
Fig. 7 Relationship between propagation velocity of cracks and elapsed time

总长度发育速率均随着时间的消逝，表现为先显著增加达到峰值后缓慢降低。当时间一定时，在前期，不同纤维掺量下的裂隙总面积发育速率和裂隙总长度发育速率均基本接近，而后，裂隙总面积发育速率随着纤维掺量的增加而降低，裂隙总长度发育速率则表现为相反的趋势。说明，裂隙宽度的增加对裂隙总面积发育速率的提高有一定的贡献。

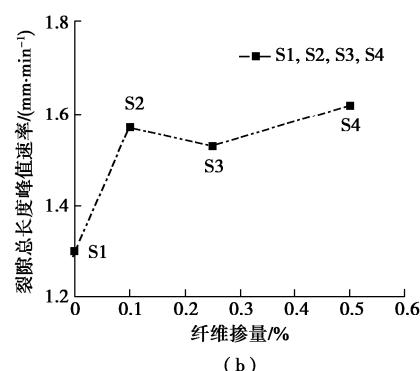
随着纤维掺量的增加，裂隙总面积峰值速率呈现出降低的趋势（图 8（a）），裂隙总长度峰值速率则表现为增加的趋势（图 8（b））。裂隙总面积残余速率随着纤维掺量的增加而减小，裂隙总长度残余速率则随着纤维掺量的增加而呈现出增加的趋势（图 8（c），（d））。而且裂隙总面积残余速率、裂隙总长度残余速率与纤维掺量之间有着较好的指数函数关系，即

$$y = y_0 + Ae^{R_0 x} \quad (4)$$

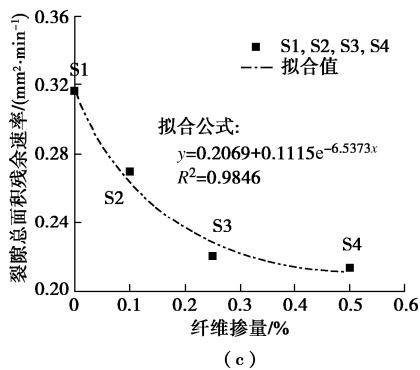
式中： y 为裂隙总面积残余速率、裂隙总长度残余速率， x 为纤维掺量， y_0 ， A 与 R_0 为常量。



(a)



(b)



(c)

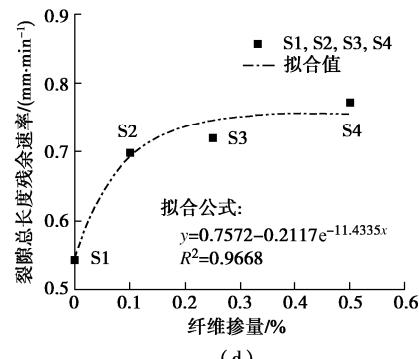
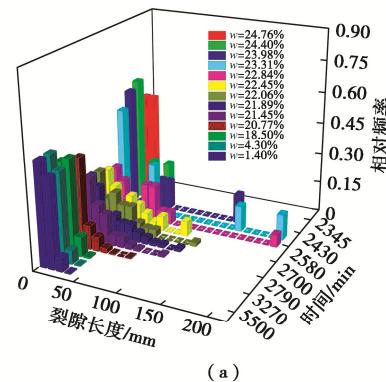


图 8 裂隙发育特征速率

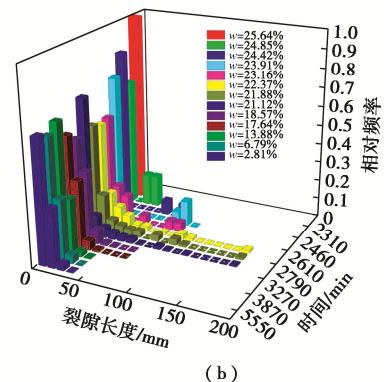
Fig. 8 Characteristic propagation velocities of cracks

2.4 珊瑚泥形态分布变化规律

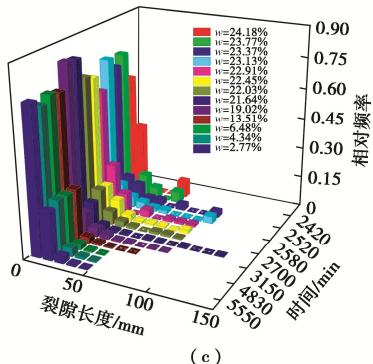
龟裂形态参数的频率分布变化可以在一定程度上反映出裂隙的动态演化规律。图 9 中可以看出，随着时间的消逝，含水率持续降低，不同纤维掺量的裂隙长度分布范围均表现为先逐渐增大后逐渐减小直至趋近稳定的趋势。这是由于在裂隙的发育阶段，裂隙尖端处存在应力集中，裂隙会沿着尖端继续向前延伸和弯曲，裂隙平均长度会逐渐增加，从而导致裂隙长度频率分布范围进一步扩大。随着出现垂直于主裂隙的次生裂隙的产生，将主裂隙分割成较短长度的裂隙，裂隙平均长度会逐渐降低，这会促使裂隙长度频率分布范围逐渐缩小。直至裂隙扩展稳定，裂隙平均长度也将达到稳定，此时，裂隙长度频率分布范围也同样达到稳定状态。同时，也可以看出，最大裂隙长度频率分布范围随着纤维掺量的增加而减小，说明纤维对裂隙的进一步扩展起到有效遏制作用。



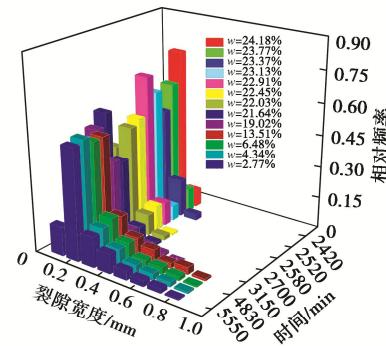
(a)



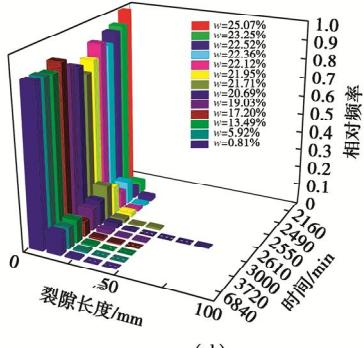
(b)



(c)



(e)

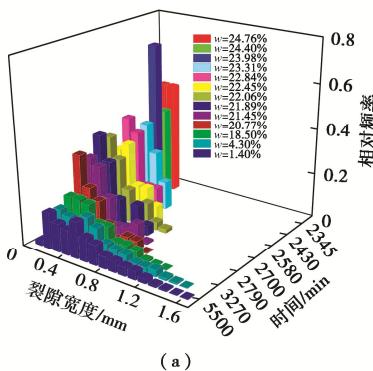


(d)

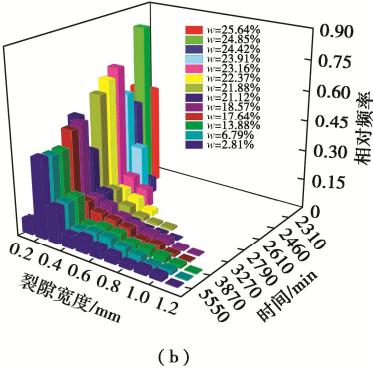
图9 裂隙长度频率分布变化

Fig. 9 Variation in frequency distribution of crack length

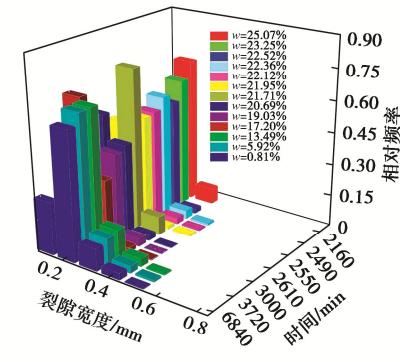
从图 10 中可以得出, 随着蒸发的进行, 含水率持续降低, 不同纤维掺量下的裂隙宽度频率分布范围表现为持续增加直至趋近稳定。这也表明, 裂隙在发育和扩展阶段, 原有裂隙会进一步拓宽, 同时也有新生裂隙出现, 从而引起裂隙宽度频率分布范围的增加。随着干燥时间的继续延长, 裂隙宽度频率分布范围将会继续有所扩大, 但所需的时间会更长。最大裂隙宽度频率分布范围随着纤维掺量的增加而减小, 说明纤维能有效遏制裂隙宽度的横向拓展。



(a)



(b)



(c)

图10 裂隙宽度频率分布变化

Fig. 10 Variation in frequency distribution of crack width

研究裂隙角度频率分布的变化, 能够更好地揭示出龟裂动态演化过程中裂隙发育方向选择的概率随时间和含水率的变化规律。图 11 可以看出, 裂隙萌生阶段, 裂隙发育少, 裂隙角度频率分布较为集中。随着裂隙的继续发育, 裂隙角度频率分布差异明显, 从裂隙角度频率分布相对集中逐渐向均匀性转变。随着裂隙扩展逐渐稳定, 裂隙角度频率分布较为均匀, 而后, 随着裂隙扩展逐渐趋于稳定, 裂隙角度频率分布也逐渐趋于稳定。不同纤维掺量下, 稳定阶段的裂隙角度频率多分布在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 、 $60^\circ \sim 100^\circ$ 以及 $160^\circ \sim 180^\circ$ 。说明, 不同比例的纤维掺量, 对裂隙角度频率分布影响不大, 且裂隙多表现为水平向和竖直向分布, 图 3 也能反映出这一现象。

3 分析与讨论

在试验的过程中发现, 裂隙不仅在表面发育, 而且在侧面也有较多裂隙发育(图 12)。在侧面存在着由表面向底面方向发育的裂隙、由底面向表面方向发育的裂隙以及侧面中部张拉裂隙。表面裂隙会向下拓深, 产生了由表面向底面方向发育的裂隙; 局部土体向收缩中心移动的过程中, 土体底部会受到容器底部界面的阻碍作用, 当张拉应力超过土体抗拉强度和容器底部摩擦力时, 裂隙就产生了, 随着土体继续向收缩中心移动, 土体裂隙由底部向表面方向继续发育;

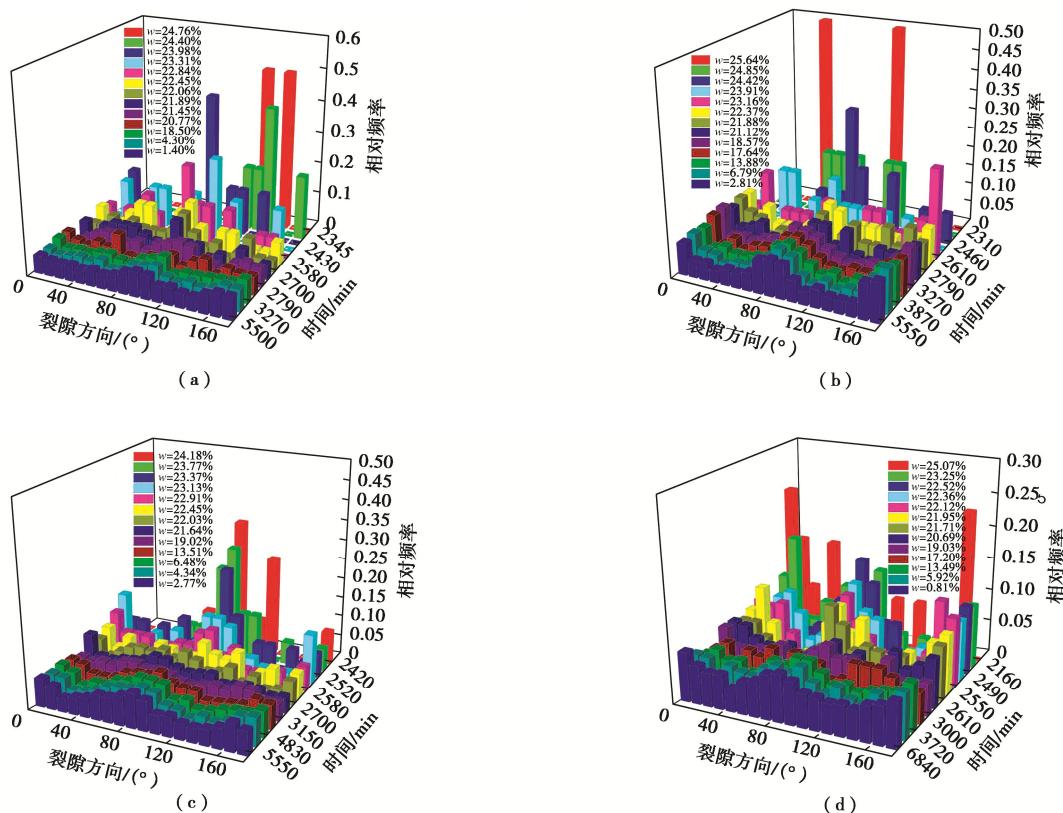


图 11 裂隙方向频率分布变化

Fig. 11 Variation in frequency distribution of crack direction

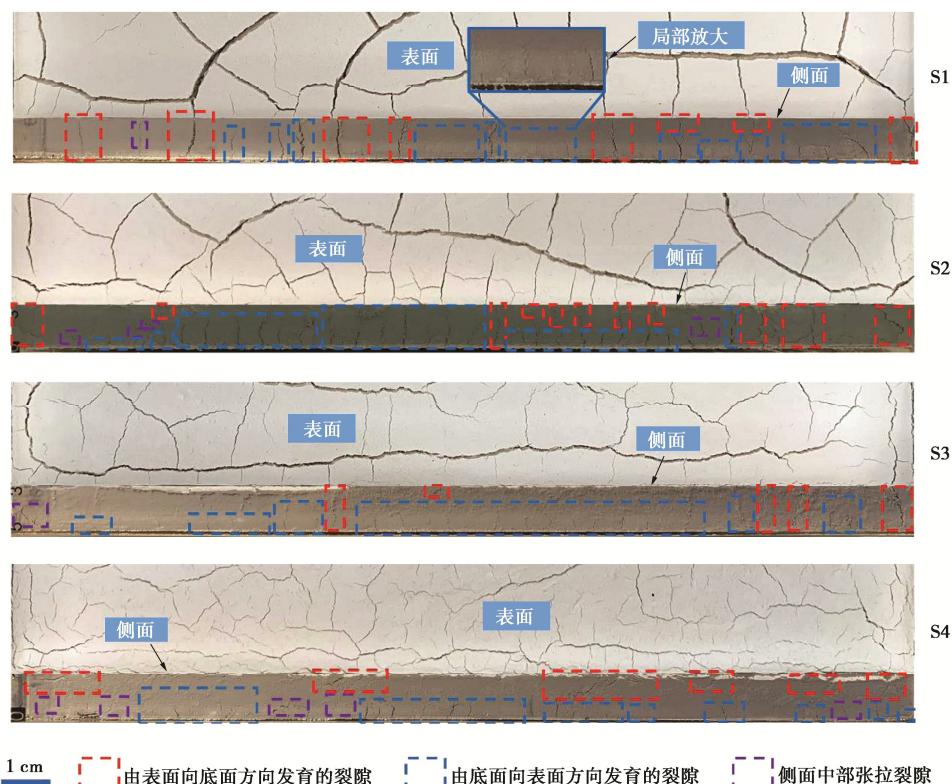


图 12 侧面裂隙发育形态

Fig. 12 Lateral crack propagation morphology

此外, 在土体向收缩中心移动的过程中, 土体侧面中部也会产生张拉裂隙。

从图 13 中可以看出, 纤维起到桥接作用, 阻止裂隙进一步拓宽。同时可以看出纤维存在松弛现象, 这是由于其他纤维已经处于拉直状态, 限制了土体继续移动, 从而导致该部分纤维丝还未充分发挥其加固作用。

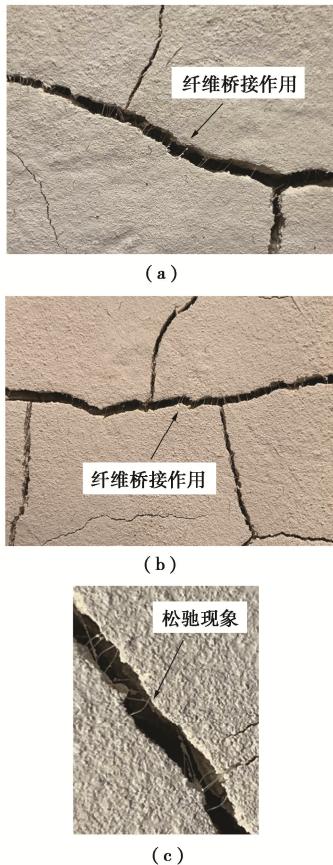


图 13 纤维桥接作用与松弛现象 (局部放大图)

Fig. 13 Fiber bridging and relaxation phenomenon (partially enlarged image)

由基质吸力引起的张拉应力 σ_t 和抗拉强度 $[\sigma_t]$ 这两个重要力学参数之间的大小关系决定了土体是否开裂。而 PVA 纤维的掺入, 提高了土体的整体性能, 能在一定程度上阻碍土体的收缩以及抑制土体裂隙的拓展 (图 14)。纤维与土体之间的作用力可表示为

$$F_{fs} = F_f + F_b + F_c \quad (5)$$

式中: F_{fs} 为纤维与土体之间的作用力, F_f 为纤维与土体之间的摩擦力, F_b 为纤维与土体之间的咬合力建立在微观状态下的纤维表面较为粗糙, 与土颗粒之间会存在咬合作用), F_c 为纤维与土体之间的胶结作用力 (珊瑚泥主要成分是 CaCO_3 , 随着失水的过程中, 土体会胶结, 从而包裹 PVA 纤维)。

假定纤维与土体之间的摩擦面积为 A_f , 纤维与土体之间的咬合面积为 A_b , 纤维与土体之间的胶结面积

为 A_c , 则可以得出纤维与土体之间的作用应力 σ_{fs} 、纤维与土体之间的摩擦应力 σ_f 、纤维与土体之间咬合应力 σ_b 以及纤维与土体之间的胶结应力 σ_c , 即

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f}; \quad \sigma_b = \frac{F_b}{A_b}; \quad \sigma_c = \frac{F_c}{A_c}; \quad (6)$$

$$\sigma_{fs} = \sigma_f + \sigma_b + \sigma_c = \frac{F_f}{A_f} + \frac{F_b}{A_b} + \frac{F_c}{A_c} \quad (7)$$

同时, 容器底部与土体之间存在界面摩擦效应, 这种界面摩擦效应随着接近土体表面则逐渐减弱。设基底与土体之间的界面摩擦应力为 σ_{fc} , 界面摩擦效应折减系数为 ξ ($0 < \xi \leq 1$)。

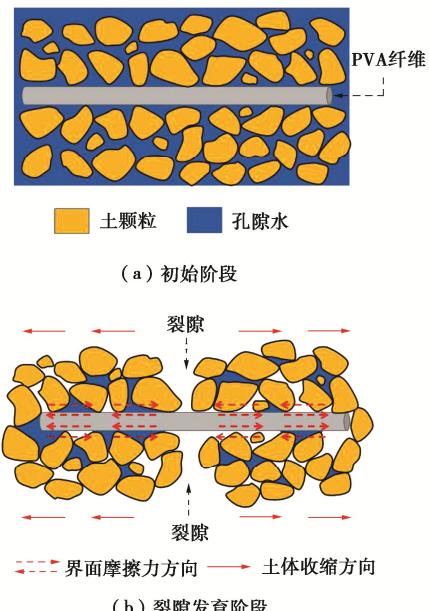


图 14 局部土体纤维作用微观状态

Fig. 14 Microscopic states of local soil fiber action

土体的抗拉强度由 3 部分组成, 其中, 一部分为土体本身具有的抗拉强度 $[\sigma_{t0}]$, 一部分为边界摩擦作用对土体收缩的限制对土体抗拉强度的贡献值 $[\sigma_{tfc}]$, 另外一部分为纤维对土体性能的改善对土体抗拉强度的贡献值 $[\sigma_{tfs}]$, 即

$$[\sigma_t] = [\sigma_{t0}] + [\sigma_{tfc}] + [\sigma_{tfs}] \quad (8)$$

$$[\sigma_{tfc}] = \xi \sigma_{fc} \quad (9)$$

$$[\sigma_{tfs}] = \sigma_{fs} \quad (10)$$

当土体局部张拉应力 σ_t 等于或超过土体抗拉强度 $[\sigma_t]$, 土体裂隙就产生了。由于土体会存在一些初始缺陷, 如微裂隙以及孔洞, 这些都会降低土体的抗拉强度。因此, 采用 η 系数 ($0 < \eta \leq 1$) 对抗拉强度值 $[\sigma_t]$ 进行折减。即

$$\sigma_t \geq \eta [\sigma_t] \quad (11)$$

将上述式 (8), (9) 和 (10) 代入式 (11) 可得到纤维加固土体的裂隙开裂判据,

$$\sigma_t \geq \eta([\sigma_{t0}] + \xi\sigma_{fc} + \sigma_{fs}) \quad . \quad (12)$$

开裂判据可以用来反映纤维掺量的变化对裂隙开裂程度的影响。

龟裂是土体的一种特殊的破坏形式,与通常情况下的由外力作用下的剪切破坏有显著的区别,它是一种由内力作用下的张拉破坏,由水分蒸发引起的收缩导致的^[19, 22-23]。初始阶段,土体处于饱和状态,土体孔隙由水所占据,而PVA纤维则随机分布在土体中(图15(a))。随着干燥试验的进行,水分开始蒸发,而水分率先从土体表面逃逸到空气中。表层土体的含水率不断减小,而下层土体中的水分在毛细作用下不断向上迁移。同时,土颗粒产生移动并重新排列,原先由孔隙水占据的空间逐渐被土颗粒填充,宏观表现为土体的收缩变形。从试验中观察到,土体水平向整体收缩微小,与其他土体有着显著差异,而竖向沉降较为明显,此时竖向累积沉降值为 ΔY_1 (图15(b))。同时,在土体表面也能观察到不均匀沉降现象(图13),这是由于土体的非均质性以及组构的差异性所引起的。此过程中,土体的状态发生变化,由饱和状态转化为非饱和状态,土体中的基质吸力也逐渐增大。土体表面局部范围的水分蒸发的快慢程度不同,所引起的基质吸力也有所差异。因此,由基质吸力所引起的土体张拉应力也不同,土体表面形成了不均匀的张拉应力场。土体在张拉应力的作用下,局部土体向收缩中心移动,而在这个过程中,PVA纤维会对土颗粒的移动起到抑制效果。这是由于PVA纤维与土颗粒之间存在咬合作用、摩擦作用以及胶结作用。随着蒸发的持续进行,土体继续产生沉降,累计沉降量达到 ΔY_2 。局部土体也进一步向收缩核移动,当土体表面局部张拉应力等于或超过土体抗拉强度时(式12),裂隙就产生了(图15(c))。此时,PVA纤维逐渐发挥作用,对裂隙的发育起到一定的阻碍作用,宏观表现为“桥接作用”(图13)。由于裂隙尖端应力集中,处于优势地位,会驱使裂隙继续向前延伸和弯曲,同时也会拓深拓宽,与此同时,PVA纤维阻碍作用也会进一步增大,纤维也会逐渐由弯曲状态转变为拉直状态。随着裂隙的发育和扩展,土体内部集聚的应变能逐渐得到释放。此时,土体中存在着表面向底面方向发育的裂隙、由底面向表面方向发育的裂隙以及侧面中部张拉裂隙,同时,也有部分贯通裂隙(图12和图15(d))。当土体裂隙扩展达到稳定阶段时,土体累积沉降值为 ΔY_3 ,土体中集聚的应变能得到彻底的释放。而此时,土体中仍然存在残余含水率(图2),而且在裂隙动态发育全过程中,土体表面的含水率较低于底部土体含水率。同时,也观察到,随着PVA纤维掺量的增加,有部分PVA纤维仍然处于弯曲状态,未完全

发挥作用,表现为“松弛现象”(图13(c)),这在上文中已经得到了解释。后续工作中,将会继续在珊瑚泥性能改善方面进行深入研究,从而进一步提高珊瑚泥的力学性能以及抗裂性能,为珊瑚泥的潜在应用价值提供技术支持,这对推动海洋强国的建设与发展具有重要意义。

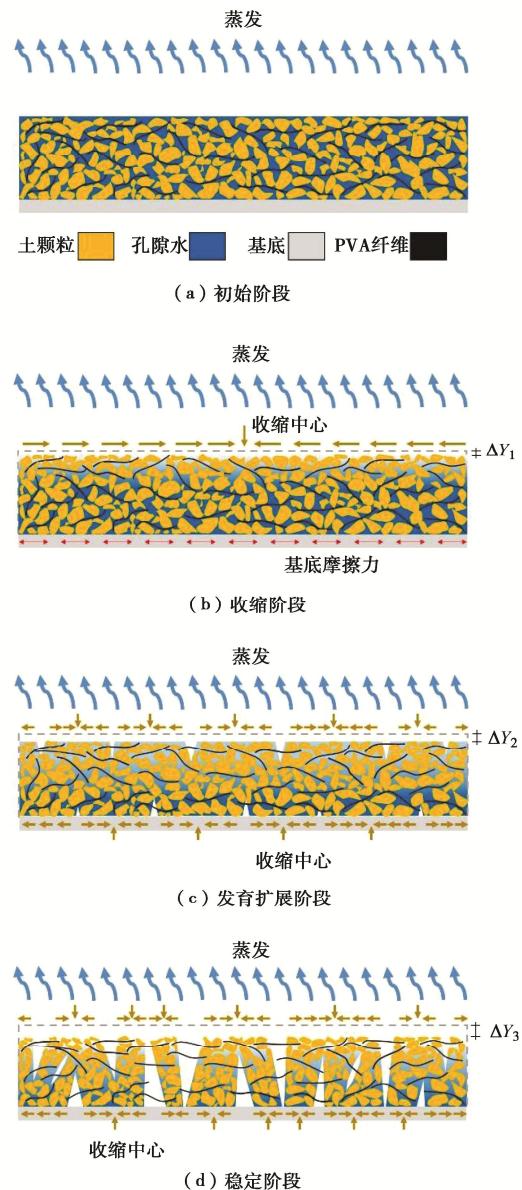


图 15 纤维改性珊瑚泥裂隙演化机制

Fig. 15 Evolution mechanism of desiccation cracking of fiber-modified coral silt

4 结 论

纤维的掺入能在一定程度上提升土体的整体性能。为揭示纤维加固土体的效果,通过对不同纤维掺量的珊瑚泥进行试验和分析,得到以下4点结论。

(1) 试样掺入不同比例的纤维,均能有效降低裂隙总面积、裂隙平均长度、裂隙平均宽度、表面裂隙率以及表面裂隙比。但纤维的掺入,反而会导致裂隙

节点数、裂隙条数以及裂隙总长度的显著增加。裂隙面积分形维数和裂隙长度分形维数与表面裂隙率均有着较好的幂函数关系。

(2) 裂隙总面积发育速率和裂隙总长度发育速率均随着蒸发的进行, 表现为先显著增加达到峰值而后缓慢降低。随着纤维掺量的增加, 裂隙总面积峰值速率呈现出降低的趋势, 而裂隙总长度峰值速率则表现为增加的趋势。裂隙总面积残余速率、裂隙总长度残余速率与纤维掺量之间有着较好的指数函数关系。

(3) 随着蒸发的持续, 不同纤维掺量的裂隙长度分布范围均表现为先逐渐增大后逐渐减小直至趋近稳定的趋势。而不同纤维掺量下的裂隙宽度频率分布范围表现为持续增加直至趋近稳定。最大裂隙长度及最大裂隙宽度的频率分布范围随着纤维掺量的增加而减小。说明纤维能有效遏制裂隙的延伸和拓宽。裂隙角度频率分布从相对集中逐渐向均匀性转变。不同比例的纤维掺量, 对裂隙角度频率分布影响不大, 且裂隙多表现为水平向和竖直向分布。

(4) 得出了纤维加固土体的裂隙开裂判据。土体中存在着表面向底面方向发育的裂隙、由底面向表面方向发育的裂隙以及侧面中部张拉裂隙。而PVA纤维的掺入, 提高了土体的整体性能, 并起到桥接作用, 能在一定程度上阻碍土体的收缩以及抑制土体裂隙的拓展。

参考文献:

- [1] TANG C S, ZHU C, CHENG Q, et al. Desiccation cracking of soils: a review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, **216**(4):103586.
- [2] BORDOLOI S, NI J, NG C W W. Soil desiccation cracking and its characterization in vegetated soil: a perspective review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**: 138760.
- [3] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2155-2161. (YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(12): 2155-2161. (in Chinese))
- [4] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(5): 1000-1024.
- [5] KHAN M S, HOSSAIN S, AHMED A, et al. Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in Texas[J]. *Engineering Geology*, 2017, **219**: 118-129.
- [6] INTHARASOMBAT N, PUPPALA A J, WILLIAMMEE R. Compost amended soil treatment for mitigating highway shoulder desiccation cracks[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2007, **13**(4): 287-298.
- [7] ABBEY S J, EYO E U, NG'AMBI S. Swell and microstructural characteristics of high-plasticity clay blended with cement[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, **79**(4): 2119-2130.
- [8] KHEMISMA M, MAHAMEDI A. Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay[J]. *Applied Clay Science*, 2014, **95**: 104-110.
- [9] LIU B, ZHU C, TANG C S, et al. Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP)[J]. *Engineering Geology*, 2020, **264**: 105389.
- [10] LIU R, VAIL M, KOOHBOR B, et al. Desiccation cracking in clay-bottom ash mixtures: insights from crack image analysis and digital image correlation[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, **81**(4): 139.
- [11] ZHANG Y P, GU K, LI J W, et al. Effect of biochar on desiccation cracking characteristics of clayey soils[J]. *Geoderma*, 2020, **364**: 114182.
- [12] XIE Y K, COSTA S, ZHOU L M, et al. Mitigation of desiccation cracks in clay using fibre and enzyme[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, **79**(8): 4429-4440.
- [13] 张虎元, 谭煜, 何东进, 等. 石英砂掺量对膨润土-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. (ZHANG Huyuan, TAN Yu, HE Dongjin, et al. Influence mechanism of quartz sand content on drying shrinkage and crack of paste-like bentonite-sand mixtures as buffer/backfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(2): 277-285. (in Chinese))
- [14] JIANG C Y, DING X M, CHEN X S, et al. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay[J]. *Journal of Central South University*, 2022, **29**(2): 572-581.
- [15] 王竞州, 丁选明, 蒋春勇, 等. 钙质软土的真空预压与电渗固结室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊2): 36-40. (WANG Jingzhou, DING Xuanming, JIANG Chunyong, et al. Laboratory tests on vacuum preloading and electro-osmotic consolidation of calcareous soft soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(S2): 36-40. (in Chinese))
- [16] 陈信升, 丁选明, 蒋春勇, 等. 吹填珊瑚岛礁钙质软泥的渗透特性试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, **43**(4): 58-66. (CHEN Xinsheng, DING Xuanming,

- JIANG Chunyong, et al. Experimental study on permeability characteristics of hydraulic reclamation calcareous clay in coral reef island[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, **43**(4): 58-66. (in Chinese))
- [17] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers & Geosciences, 2013, **57**: 77-80.
- [18] 荣德政, 唐朝生, 曾 浩, 等. 纤维加筋土坯的蒸发过程及抗拉强度特性[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(4): 670-678. (RONG Dezheng, TANG Chaosheng, ZENG Hao, et al. Evaporation process and tensile behavior of fiber-reinforced rammed earth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 670-678. (in Chinese))
- [19] FANG H Q, DING X M, JIANG C Y, et al. Effects of layer thickness and temperature on desiccation cracking characteristics of coral clay[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, **81**(9): 1-25.
- [20] 方华强, 蒋春勇, 王成龙, 等. 厚度及温度影响下重庆淤泥质土裂隙形态试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,
- [21] 骆赵刚, 汪时机, 张继伟, 等. 膨胀土裂隙发育的厚度效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(10): 1922-1930. (LUO Zhaogang, WANG Shiji, ZHANG Jiwei, et al. Thickness effect on crack evolution of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(10): 1922-1930. (in Chinese))
- [22] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer[J]. Applied Clay Science, 2011, **52**(1/2): 69-77.
- [23] 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. (TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1415-1423. (in Chinese))

CHINA ROCK 2023 第二十次中国岩石力学与工程学术年会第 2 号通知

为了加强我国岩石力学与工程领域的学术交流,促进岩石力学与岩土工程领域科技创新,经研究决定,于 2023 年 10 月 20-22 日召开“CHINA ROCK 2023 第二十次中国岩石力学与工程学术年会”。为更好地秉承“规模化、国际化、一体化”办会精神,服务好广大岩石力学与工程相关领域在校学生和青年会员,将在京外组织各地中心会场。北京主会场将设置不同议题的分会场。现将会议有关事项通知如下:

一、举办单位

指导单位: 中国科学技术协会 (CAST)

主办单位: 中国岩石力学与工程学会 (CSRME); 国际地质灾害与减灾协会 (ICGdR)

承办单位: 国际岩石力学与岩石工程学会各专业委员会; 中国岩石力学与工程学会各专委会、分会、省级学会等

二、会议时间、主会场地点

时间: 2023 年 10 月 20-22 日 (10 月 20 日报到), 主会场地点: 北京九华国际会展中心。

三、论文投稿与出版

为进一步贯彻《中国岩石力学与工程学会“十四五”规划》,落实“将论文写在祖国大地上”,提高 CHINA ROCK 会议成果质量,大会设三种论文发表方式,投稿截止日期为 2023 年 7 月 15 日。具体安排如下:

(1) 学会主办及合作期刊发表

作者须在各期刊主页自行投稿,投稿时请务必标注所参与的会场信息。如,在中文期刊投稿系统注明“ChinaRock 2023 以

及分会场编号/中心会场名称”,在英文期刊投稿系统注明“ChinaRock 2023,Session No./ Local Session No.”。

(2) 会议论文集

大会会议论文集由中国建筑工业出版社出版 (有 ISBN 号)。作者直接投稿全文,投稿网址: <http://chinarock.csrme.com>。

(3) 会议摘要集

大会会议摘要集仅需投递 500 字左右摘要 (无 ISBN 号),投递网址: <http://chinarock.csrme.com>。

四、科技创新工业展览会

学术会议同期,还将举办“CHINA ROCK 2023 第二十次中国岩石力学与工程学术年会科技创新工业展览会”,创建国际一流 CHINA ROCK 品牌展会,搭建展示交流平台。

本次展会继续采用“线下+线上”的模式,线下设置六大主题展区,同时打造线上 VR 展厅;继续以“国际化、规模化、一体化”为方向,为工程装备制造单位、科研院所及相关企、事业单位搭建科技创新展示交流平台。

六大主题展区总体规划: ①重大工程展区; ②重点实验室及高校创新成果展区; ③新材料、新仪器、新设备、新软件展区; ④CSRME 科学技术奖及优秀项目展区; ⑤礼赞科学家精神与青托展区; ⑥学术期刊及科普基地展区。

联系方式: 潘秋景 qijing.pan@csu.edu.cn (征文), 胡丹婷 010-6266 0545 (分会场/中心会场), 崔家宇 15810687582 (展览), 大会邮箱: chinarock_csrme@163.com。

(中国岩石力学与工程学会 供稿)