

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240512002

不同厚度的珊瑚泥与高岭土面层龟裂特性对比 模型试验研究*

丁选明^{1,2}, 李一夫¹, 方华强¹, 王红¹, 辛义文¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400450; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400450)

摘要: 为探究珊瑚泥面层的龟裂特性, 重点考虑了厚度影响, 进行了珊瑚泥面层和高岭土面层的室内模型对比试验, 利用 Python 和 PCAS 对试验结果进行处理, 定量分析了两种土体面层的裂隙节点数、裂隙条数、裂隙平均长度、裂隙平均宽度、表面裂隙率以及分形维数在不同厚度下随时间的变化规律, 并使用扫描电子显微镜 (SEM) 对珊瑚泥面层样进行了微观扫描。结果表明: (1) 对于珊瑚泥面层, 最终裂隙面积分形维数、最终裂隙长度分形维数、最终裂隙节点数、最终裂隙条数以及最终表面裂隙率随厚度增加而减小, 裂隙平均宽度峰值、最终裂隙平均长度随厚度增加而增大。高岭土面层的裂隙参数受厚度的影响形式与珊瑚泥相同, 但受影响程度明显低于珊瑚泥; (2) 珊瑚泥面层和高岭土面层的裂隙平均长度变化趋势一致, 而对于珊瑚泥和高岭土的其他裂隙参数, 前者的增长速率在初始阶段较大, 后者则符合 S 型增长曲线, 初始阶段的增长速率较低; (3) 面层裂隙以水平和竖向裂隙为主, 这是因为水分在重力和蒸发作用下向底部和表层迁移, 造成面层形成水力梯度, 进而导致了不均匀收缩并产生定向裂隙; (4) 此外, 结合断裂力学理论分析了珊瑚泥龟裂的特点。珊瑚泥具有多孔结构, 裂隙很可能在孔隙处萌发。黏粒团簇的基质吸力对外表现为拉应力并作用于裂隙尖端, 珊瑚泥中砂粒粉粒的干扰造成黏粒团簇分布不均, 改变了拉应力方向, 进而将张开型断裂转变为滑移型断裂, 导致珊瑚泥裂隙发育方向容易改变; (5) 在撕开型断裂中, 随着面层厚度增加, 裂隙面上的剪应力分布会变得更加复杂, 进而导致裂缝传播的驱动力增加, 也就造成了珊瑚泥面层的裂隙参数对于厚度变化的敏感程度要高于高岭土。该研究对后续珊瑚泥新型绿色工程材料的研发与应用具有重要参考价值。

关键词: 珊瑚泥; 面层; 龟裂; 模型试验; 断裂力学

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0501-12

Comparative Model Test Study on the Cracking Characteristics of Coral Mud and Kaolin Layers of Different Thicknesses

DING Xuanming^{1,2}, LI Yifu¹, FANG Huaqiang¹, WANG Hong¹, XIN Yiwen¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To investigate the cracking behavior of coral mud surface layers, this study focuses on the effect of layer thickness. Comparative indoor model tests were conducted on coral mud and kaolin surface layers. The experimental results were processed using Python and PCAS, allowing for a quantitative analysis of the evolution of crack node number, crack count, average crack length, average crack

* 收稿日期: 2024-05-12; 修回日期: 2024-07-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2022CDJQY-012)资助

作者简介: 丁选明(1980—), 男, 教授, 博士。主要从事土力学与地基基础方面的研究。E-mail: dxmhu@163.com

width, surface crack ratio, and fractal dimension over time for both soil types at different thicknesses. Additionally, Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to conduct microstructural analysis of the coral mud surface samples. The results indicated that: (1) for the coral mud surface layer, the final fractal dimension of crack area and length, final crack node number, crack count, and surface crack rate decreased with increasing thickness, whereas the peak average crack width and final average crack length increased. The influence of thickness on the cracking parameters of kaolin surface layers followed a similar trend but was significantly less pronounced than that observed in coral mud. (2) The average crack length in both coral mud and kaolin surface layers exhibited a similar increasing trend over time. However, for other crack parameters, coral mud showed a faster growth rate in the initial stage, while kaolin followed an S-shaped growth curve with a relatively slower initial rate. (3) The cracks mainly developed in horizontal and vertical orientations, which was attributed to the migration of moisture toward both the bottom and the surface due to gravity and evaporation. This caused the formation of a hydraulic gradient in the surface layer, leading to uneven shrinkage and the generation of directional cracks. (4) Furthermore, the cracking mechanisms of coral mud were analyzed using fracture mechanics theory. Coral mud featured a highly porous structure, where cracks were likely to initiate at pore locations. The matric suction of clay particle clusters manifested as tensile stress at crack tips. The interference of sand and silt particles led to uneven distribution of clay clusters, altering the direction of tensile stress and thereby transforming opening-mode fractures into slip-mode fractures, which made the crack propagation direction more variable. (5) In tearing-mode fractures, as the thickness of the surface layer increased, the shear stress distribution on crack surfaces became more complex, thereby increasing the driving force for crack propagation. Consequently, the sensitivity of coral mud cracking parameters to thickness variation was greater than that of kaolin. This study provides important insights for the future development and engineering application of new green construction materials based on coral mud.

Keywords: coral mud; surface layer; cracking; model experiment; fracture mechanics

0 引言

从大陆运输建筑材料到岛礁需要耗费大量的财力物力,利用岛礁周边海域的天然材料作为替代,能够在极大程度上降低岛礁建筑的修建成本并缩短施工周期^[1-2]。珊瑚泥是一种珊瑚、贝类等海洋生物经过长期地质作用形成的岩土介质^[3]。这种天然材料广泛分布于热带和亚热带海域,如澳大利亚的大堡礁、东南亚的诸多海域以及我国南海^[4],其独特的成分和结构赋予其良好的物理和化学稳定性,表现出优异的负载承受能力和耐腐蚀性^[5-7]。因此,将珊瑚泥作为替代性建筑材料不仅是一种新型、环保、经济的潜在方案,而且具有较高的学术价值和应用前景。

龟裂行为是导致珊瑚泥无法进一步广泛应用的重要原因,该现象会严重影响土体的工程性质^[8],

从而引发诸多工程灾害,如边坡失稳^[9]、堤坝溃败^[10]、道路开裂^[11]等。目前,针对珊瑚泥龟裂问题,部分学者进行了前期考察以及室内试验研究。Z. H. Chen等^[12]研究了珊瑚砂吹填过程中所形成的珊瑚泥基础夹层,发现其内部的裂隙严重影响了基础的稳定性。C. J. Jiang等^[13]通过粒度分布测试获取了珊瑚泥的颗粒组成,结果表明,珊瑚泥含有少量砂粒,而高岭土仅含有粉粒和黏粒,且珊瑚泥属于低塑性土。C. S. Tang等^[14]研究了不同砂粒含量和不同厚度对高塑性黏土试样裂缝表面模式和裂缝深度的影响,发现砂粒含量和厚度影响了裂隙发育参数和萌发时间。因此,珊瑚泥含砂粒和多孔隙的特性可能导致珊瑚泥与高岭土等黏性土的龟裂行为存在差异。土体的开裂是一个比较复杂的过程,它受到很多因素的影响^[15-17],比如密实度、土体尺寸、环境温度等。一般来说,厚度对土体开裂的影响尤其大^[18]。对于珊瑚泥,H. Q. Fang等^[19]开展

了珊瑚泥室内龟裂试验研究,发现珊瑚泥的裂隙宽度、裂隙长度、表面裂隙率的变化趋势均受到土体厚度的显著影响。丁选明等^[20]研究了纤维改性后不同厚度珊瑚泥的龟裂过程,总结了厚度对于裂隙分形维数的影响规律。这些研究在一定程度上初步讨论了厚度对珊瑚泥龟裂的影响,但还未进一步考虑工程实际情况。

以上针对珊瑚泥龟裂的研究多以水平小尺寸试样为对象,而竖直方向上的大尺寸龟裂行为在实际工程中更为常见^[21],如外墙抹灰层龟裂^[22]、挡土墙龟裂^[23]、护坡龟裂^[24]等,模拟实际工程中的垂直土层情况可以更真实地反映土体在工程应用中的龟裂行为。因此,本文基于珊瑚泥与高岭土面层模型试验,考虑厚度影响,定量分析了珊瑚泥面层的裂隙特征,并结合SEM电镜扫描结果,探究了竖向大面积珊瑚泥面层的裂隙发育机理,揭示了珊瑚泥面层龟裂特性,以期为下一步抑制龟裂提供依据。这对未来珊瑚泥建筑面层材料性能研发和实际工程应用具有重要意义。

1 试验材料及方法

1.1 土样

本试验采用细粒珊瑚泥人工制备样作为试验土样。通过物性试验测试^[25],发现珊瑚泥人工制备样与吹填场地形成的珊瑚泥在物理力学指标上具有相似性。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,分别得出砂粒、粉粒以及黏粒百分比含量。为了研究珊瑚泥与一般黏性土在龟裂行为上的差异,本研究还选用高岭土作为对照组。土样的基本物理性质指标详见表1^[19]。

表1 土样基本物理性质指标

试样	比重	液限/塑限/塑性			颗粒组成/%		
		%	%	指数	砂粒	粉粒	黏粒
珊瑚泥	2.79	32	21	11	12	46	42
高岭土	2.39	70	35	34	0	54	46

1.2 试验方法

为了研究不同厚度珊瑚泥与高岭土面层的裂隙发育规律及差异,一共配置了三组珊瑚泥试样

(S1、S2、S3)和三组高岭土试样(T1、T2、T3),分别控制厚度为5、10和20 mm。流动性指数(Liquidity Index)是土壤力学中的一个重要参数,用来表征土的稠度和可塑性。流动性指数为0时,土体的状态处于塑限,这意味着土体具有明显的黏性,不具有流动性^[26]。本试验通过调配初始含水率以控制珊瑚泥和高岭土的流动性指数均为0,使得土体不产生流动且具备足够的黏附性以附着于墙面。

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} \quad (1)$$

式中, ω 为含水率; LI 为流动性指数; PL 为塑限; LL 为液限。

在初始流动性指数相同的条件下,初始含水率不会影响土体龟裂过程的总体趋势和模式^[27]。因此,本试验通过对比珊瑚泥和高岭土在龟裂过程中裂隙参数变化趋势、龟裂模式以及厚度对面层影响程度,以研究珊瑚泥龟裂特性。具体试验工况见表2。

表2 试样的主要参数

Table 2 Main parameters of samples

试样编号	试样成分	土体厚度/mm	初始流动性指数	环境温度/°C	环境湿度/%	面层尺寸/(cm×cm)
S1	珊瑚泥	5	0	20±2	75±2	120×120
S2	珊瑚泥	10	0	20±2	75±2	120×120
S3	珊瑚泥	20	0	20±2	75±2	120×120
T1	高岭土	5	0	20±2	75±2	120×120
T2	高岭土	10	0	20±2	75±2	120×120
T3	高岭土	20	0	20±2	75±2	120×120

试验方案如下:如图1所示,①在洁净的室内用蒸压加气混凝土砌块砌筑三堵略大于120 cm×120 cm的矮墙,保证墙体表面及边缘平整(图1(a));②对墙体进行凿毛和抹平,以确保基层与涂层之间的牢固黏结并减少砖缝对于面层的影响,从而提高试验数据的准确性;③每隔3 h对墙面进行一次浇水,共三次,以防止干燥墙体吸收水分导致面层过早开裂;④取一定量干燥珊瑚粉和水倒入塑料桶内,使用电动搅拌机进行充分搅拌以获取珊瑚泥(图1(b));⑤用抹子、灰托板、水平尺、靠尺等工具将所制样品均匀且快速地涂抹到墙体上,同时精确控制面层厚度和尺寸(图1(c));⑥控制室内温度湿度,安装补光灯和拍摄相机,在裂隙发展的过程中定时进行拍照和记录(图1(d))。

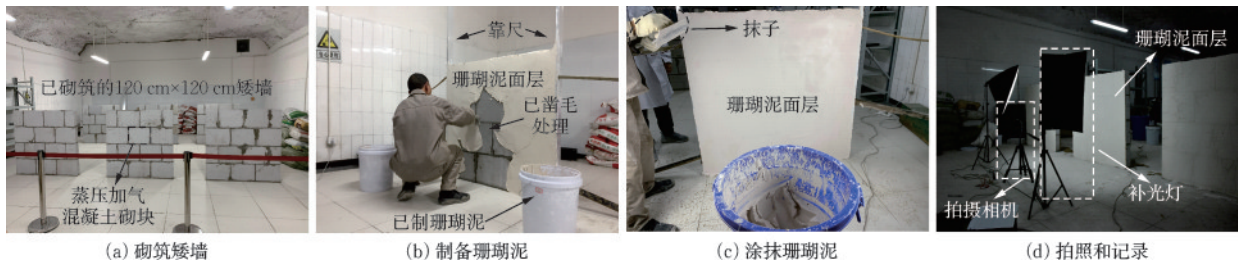


图1 试验过程

Fig.1 Experimental procedure

1.3 图像处理

使用Python软件和PCAS软件^[28]对图像进行处理,以S3试样末期图像为例(图2):①图像选取,对应于每组试样选取8张具有代表性图像;②图像裁剪,为了避免边缘脱落、接地面脱落等因素的影响,裁取图像

中心区域2 900 px*2 900 px像素作为分析对象;③二值化处理,采用python软件对图像依次进行灰度化、边界提取、二值化以及开运算操作,以消除图像含有杂质、不清晰、光照不均匀等影响因素;④参数提取,基于最终的二值化图像,采用PCAS软件提取裂隙节点数、裂隙条数、裂隙平均宽度、裂隙平均长度、表面裂隙率。

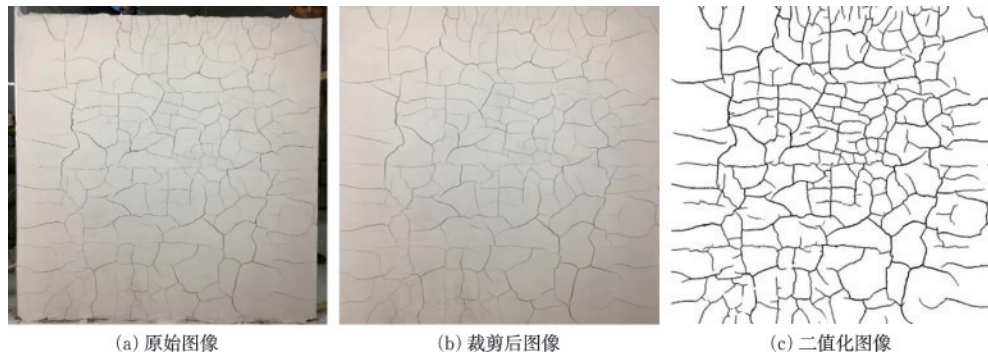


图2 图像处理流程

Fig.2 Image processing pipeline

2 试验结果与分析

2.1 裂隙动态发育过程

通过试验得到了不同厚度条件下珊瑚泥和高岭土的裂隙演化图像。由于墙面尺寸较大,直接观察较为困难,本文选取了典型的裂隙区域进行放大处理,以便更准确地描述裂隙演化的实际情况,如图3所示。

图4展示了S1-S3典型龟裂区域的图像,对于珊瑚泥面层,裂隙萌发后在单方向上发育,而后产生分叉,将土块分割为诸多小正方形土块。随着厚度的增加,裂隙宽度增加,分割出的土块面积也明显增大。裂隙的发育时长随厚度的增加而缩短。

图5展示了T1-T3典型龟裂区域的图像,高岭土面层的裂隙主要在墙体边缘处萌生,而后单向扩

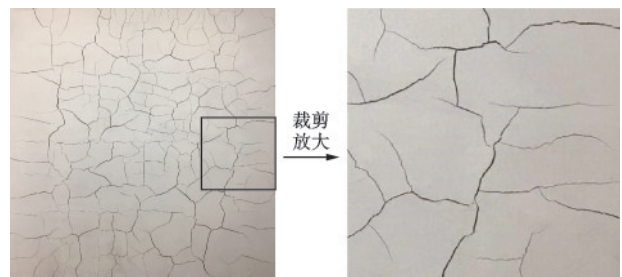


图3 区域截取

Fig.3 Region selection

展为主,因此分叉点较少。随着土体厚度的增加,裂隙宽度增加,裂隙发育时间更长,分割出的土块面积没有明显的区别。

对比两种面层的龟裂模式,面层裂隙的发育速度总是随厚度的增加而增加,土体越厚裂隙越明显。不过珊瑚泥裂隙分叉点数量明显更多,面层显得更为破碎;高岭土裂隙相对长而连续,大多数土块表现为长条形。

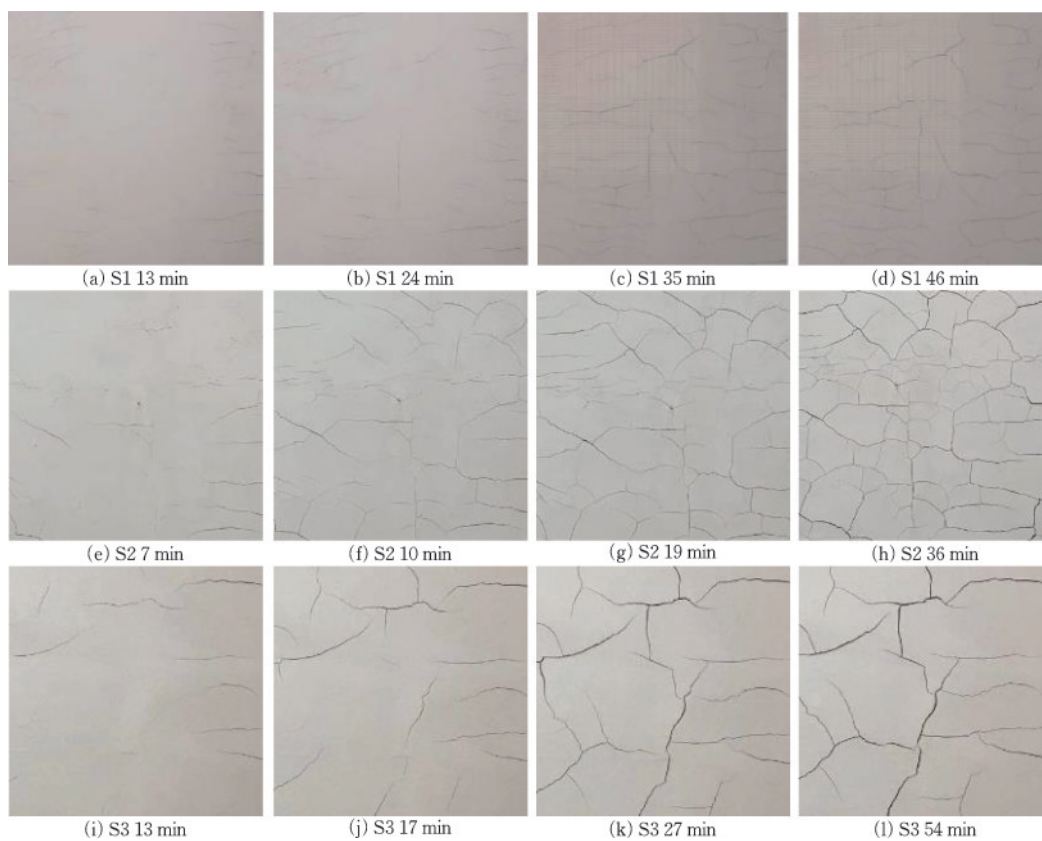


图4 珊瑚泥裂隙发育过程

Fig.4 Development process of coral mud cracks

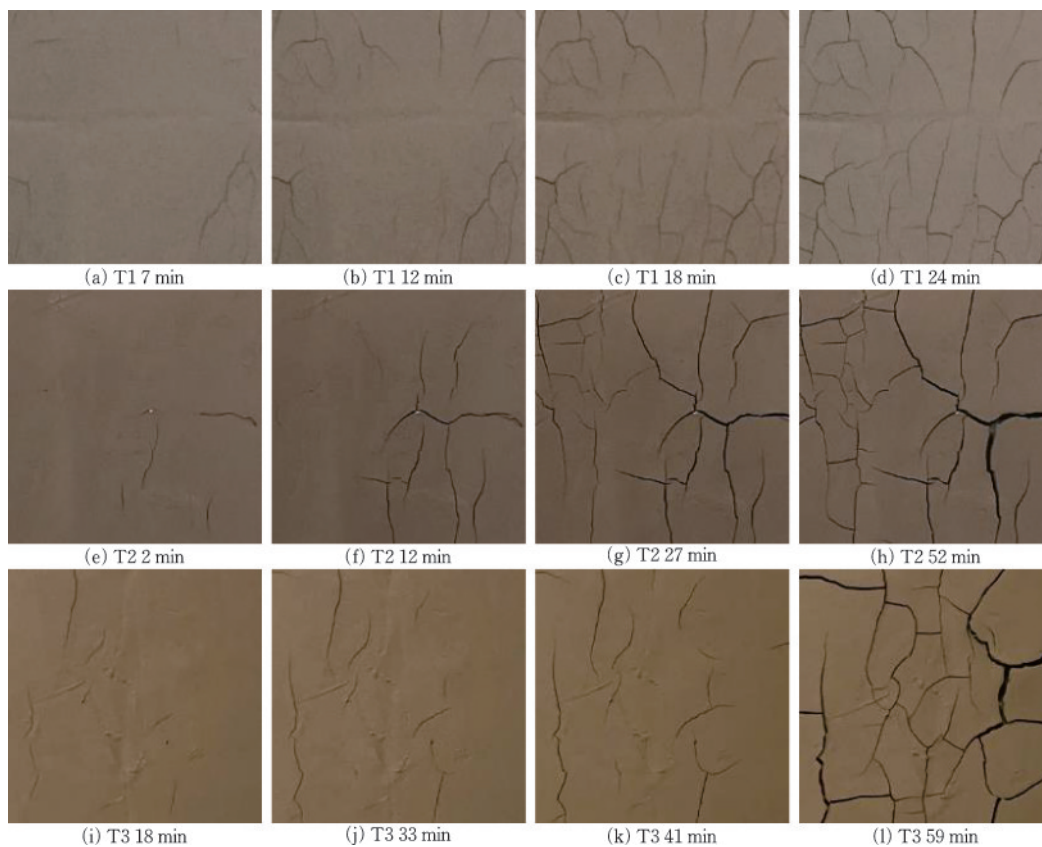


图5 高岭土裂隙发育过程

Fig.5 Development process of kaolin cracks

2.2 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厚度下珊瑚泥裂隙发育的情况^[22],裂隙条数、裂隙节点数、裂隙平均长度、裂隙平均宽度和表面裂隙率等基本指标随时间变化的关系曲线如图6所示。

图6(a)、(b)分别为裂隙节点数和裂隙条数随时间变化的关系曲线,可以一定程度上体现裂隙分叉情况和发育速率。对于珊瑚泥面层(S1~S3),厚度依次增大,最终节点数分别为1 884、1 218和556,最终裂隙条数分别为3 145、2 389和593,裂隙发育

稳定的时间点分别为7、10和24 min。说明,随着厚度的增加,珊瑚泥面层的最终节点数和最终裂隙条数显著减小,裂隙发育时长增大。对于高岭土面层(T1~T3),裂隙节点数随着厚度增加而减小,而裂隙条数没有受到厚度的显著影响。

图6(c)、(d)分别为裂隙平均长度和裂隙平均宽度随时间变化的关系曲线,一定程度上展现了裂隙的形态特征。对珊瑚泥面层(S1~S3),随着试样厚度的增加,裂隙平均长度峰值增加,裂隙达到其平均长度最大值的时间显著缩短。在5、10、20 mm厚度条件下,珊瑚泥面层最终裂隙平均宽度为0.4、0.5、0.7 cm,面层厚度增加会增大珊瑚泥裂隙平均

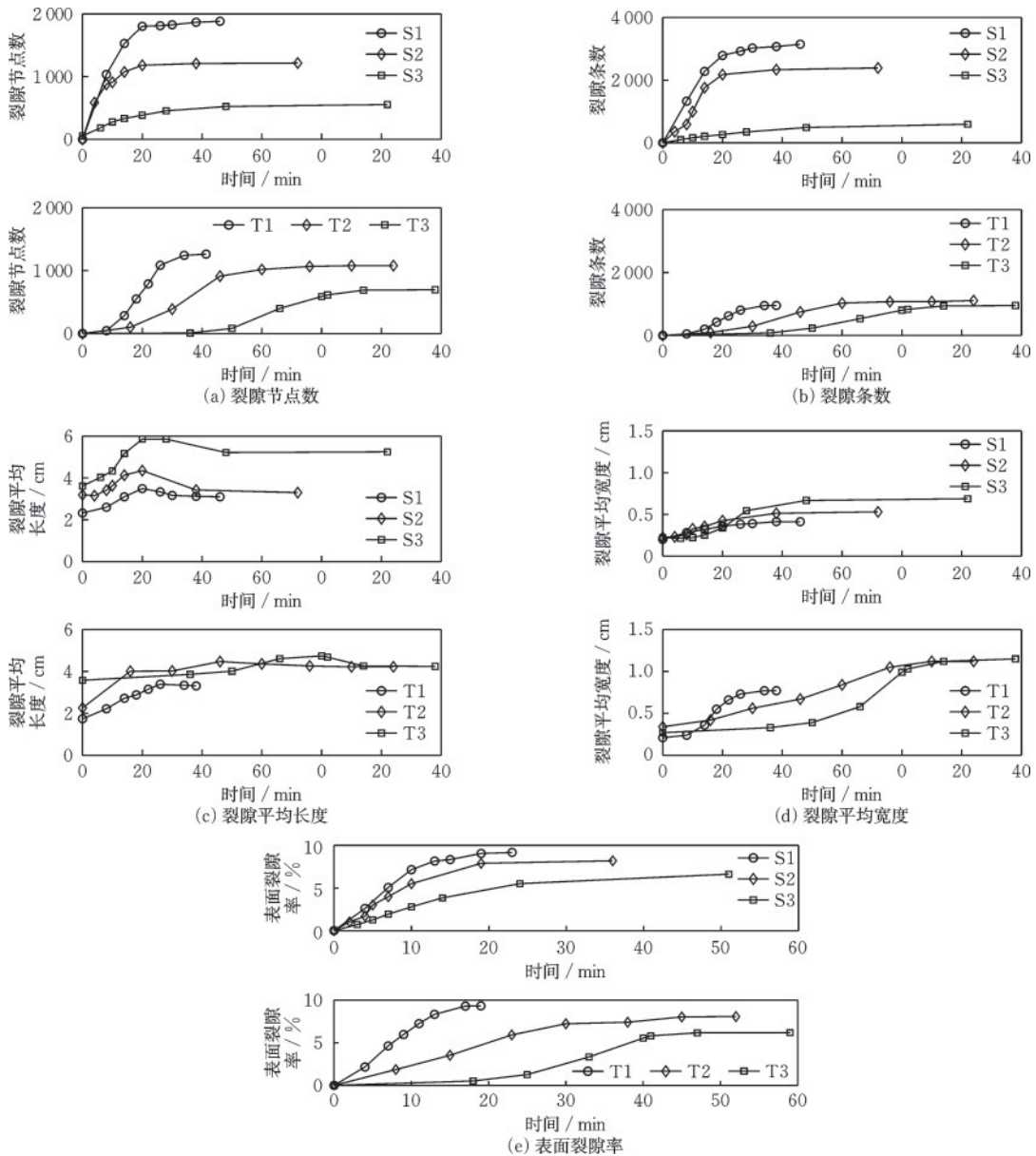


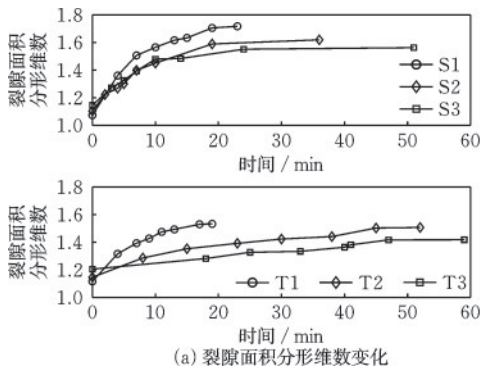
图6 裂隙参数变化

Fig.6 Variation of crack parameters

宽度并减缓裂隙宽向发育速率。对于高岭土面层 5 mm 厚度试样(T1)和 10 mm 厚度试样(T2),厚度的增加也会一定程度上增加裂隙平均长度峰值和最终裂隙平均宽度,但 20 mm 厚度试样(T3)与 T2 的相关参数差别并不明显。

图 6(e)为表面裂隙率随时间变化的关系曲线,一定程度上反映了土体的龟裂程度。对于珊瑚泥面层(S1~S3),S1、S2、S3 的最终表面裂隙率达到了 9.17%、7.97%、6.62%,厚度的增加减少了面层的龟裂程度。对于高岭土面层(T1~T3),面层的表面裂隙率也随厚度增加而显著减小。

珊瑚泥面层和高岭土面层的裂隙平均长度在变化趋势上呈现出一致性,大致会经历以下 3 个阶段:增长阶段、减小阶段和稳定阶段。而两种面层的裂隙节点数、裂隙条数、裂隙平均宽度、表面裂隙率在变化趋势上存在一定的区别:珊瑚泥的相关裂隙参数随时间推移表现为先单调递增后趋于稳定,但增长速率在初始阶段就迅速达到了较大值;高岭土的相关裂隙参数总体变化更加符合 S 型增长曲线^[29],增长速率在初始阶段较低,而后逐渐提升。这个现象可能是珊瑚泥的多孔隙结构造成的,珊瑚泥的初始裂隙可能在多处孔隙并行萌发,进而提升了珊瑚泥在初始阶段的裂隙发育速率,导致裂隙参数变化曲线在前期便快速增长。



2.3 裂隙分形维数

分形维数可用于评估复杂裂隙网络对面层的填充程度^[18]。本文采用裂隙面积分形维数和裂隙长度分形维数来描述裂隙形态的分布规律。其中,裂隙面积分形维数直接通过对二值化裂隙图像进行计算得出,而裂隙长度分形维数则需要先提取二值化裂隙图像的骨架中轴,然后再进行分形维数的计算。后者排除了裂隙宽度的影响,从而更直观地反映了裂隙长度和裂隙平面分布规律^[23]。

从图 7 中可以看出,对于珊瑚泥面层(S1~S3),最终裂隙面积分形维数和最终裂隙长度分形维数均随厚度的增加而显著减小;高岭土面层(T1~T3)也表现出类似的特性,最终裂隙面积分形维数和最终裂隙长度分形维数均随厚度的增加而有一定程度的减小。说明,珊瑚泥裂隙形态和平面分布规律对于面层厚度的变化相较于高岭土更为敏感。

在变化趋势上,珊瑚泥面层的裂隙面积分形维数和裂隙长度分形维数的增长速率在初始阶段就迅速达到了较大值,而高岭土对应参数的增长速率在初始阶段较低,而后逐渐提升。这与两种土体面层在裂隙节点数、裂隙条数、裂隙平均宽度、表面裂隙率在变化趋势上的区别相似,也可能是受到了珊瑚泥多孔隙结构的影响。

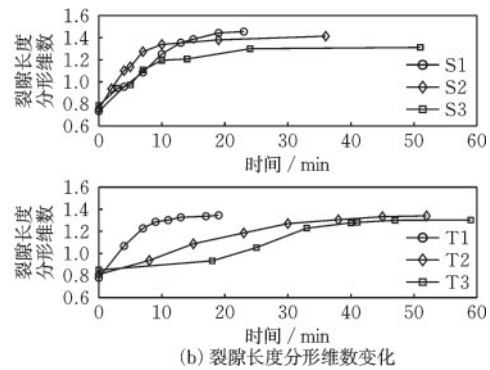


图 7 裂隙分形维数变化

Fig.7 Variation of fractal dimensions

3 分析与讨论

3.1 面层龟裂的特性

在墙体经过凿毛和抹平处理后,砖缝对裂隙的影响基本可忽略不计^[23]。图 8 统计了 S1~S3、T1~T3 的最终裂隙发育角度,其中 0°代表水平向右,其余角度则表示相对于 0°的逆时针旋转角度。

由图可知,S1~S3 和 T1~T3 均以水平裂隙(0°; 180°)和竖向裂隙(90°)为主。室内试验^[20]中,试样水平放置,水分主要通过蒸发损失;而在本试验中,试样垂直于地面,除了蒸发作用还有顶部区域向底部的水分迁移作用,造成了厚度方向以及垂直方向上的水力梯度,导致顶部更快失水并收缩,这种不均匀收缩造成了应力集中,进而产生了横向裂隙(图 9)。因此,水平裂隙在面层裂隙中占了较大比

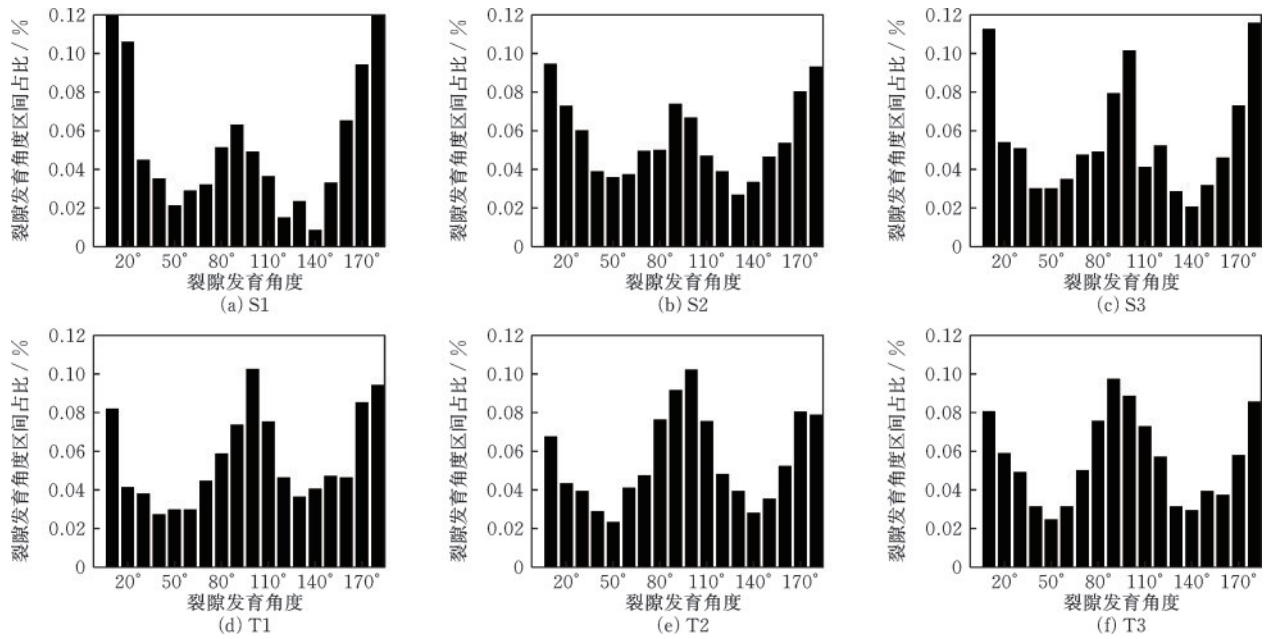


图8 裂隙角度分布

Fig.8 Fracture angle distribution

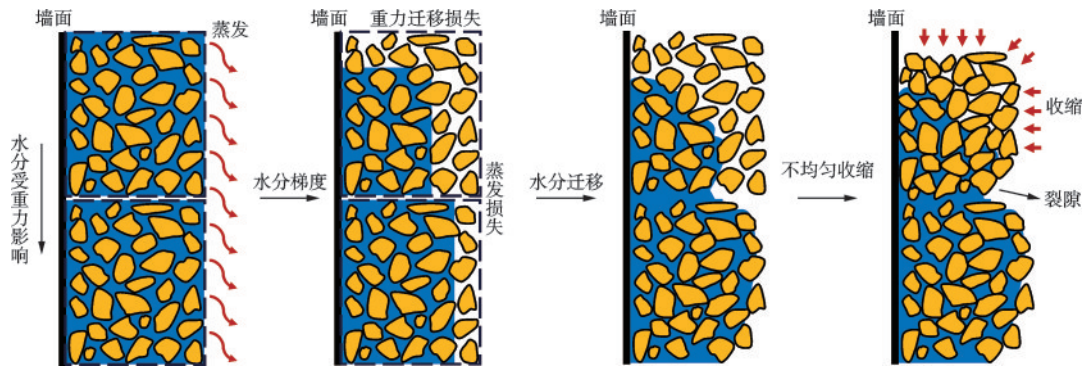


图9 面层裂隙萌发机理

Fig.9 Mechanism of surface layer crack initiation

重。此外,根据浓度正交性原理,次级裂缝容易在垂直于主裂缝的方向上发育^[30],这导致水平裂隙衍生出大量的竖向裂隙,使其也成为面层龟裂的主要方向之一。

3.2 珊瑚泥龟裂机理初探

在断裂力学中^[31],按力学特性可将裂隙的断裂分为张开型(I型, Opening mode)、滑移型(II型, Sliding Mode)以及撕开型(III型, Anti-plane Shear Mode)。对于土体裂隙的断裂,主要涉及张开型和滑移型这两种形式,前者是在与裂隙面正交的拉应力作用下产生的张开位移,不会改变裂隙扩展方向,后者是在与裂隙面平行而与裂隙尖端线垂直的切应力作用下裂纹面产生相对滑移而产生的,会改变裂隙扩展方向^[24]。

如图10,在珊瑚泥面层中,①号、②号以及③号裂隙在扩展过程中发生多次变向、分叉,并以水平和竖向扩展为主,将面层分割为多个正方形区块。珊瑚泥面层裂隙的发育方向发生了多次改变,其扩展以滑移型断裂为主。而在高岭土面层中,④号和⑤号裂隙则主要以竖向扩展为主,最终将面层分割为多个长条形区块。这表明高岭土面层裂隙更倾向于单方向扩展(主要为竖向扩展),张开型断裂是其扩展的主要形式。

通过扫描电子显微镜(SEM)对珊瑚泥表层进行详细扫描,获取了珊瑚泥微观裂隙的图像(图11(a))。将微观裂隙进一步放大后,可以观察到裂隙周围存在大量微观孔隙(图11(b))。这一现象与珊瑚泥的多孔隙结构有关,裂隙的萌发很可能始于这类孔隙。由于珊瑚泥微观孔隙众多,导致多处孔隙同时

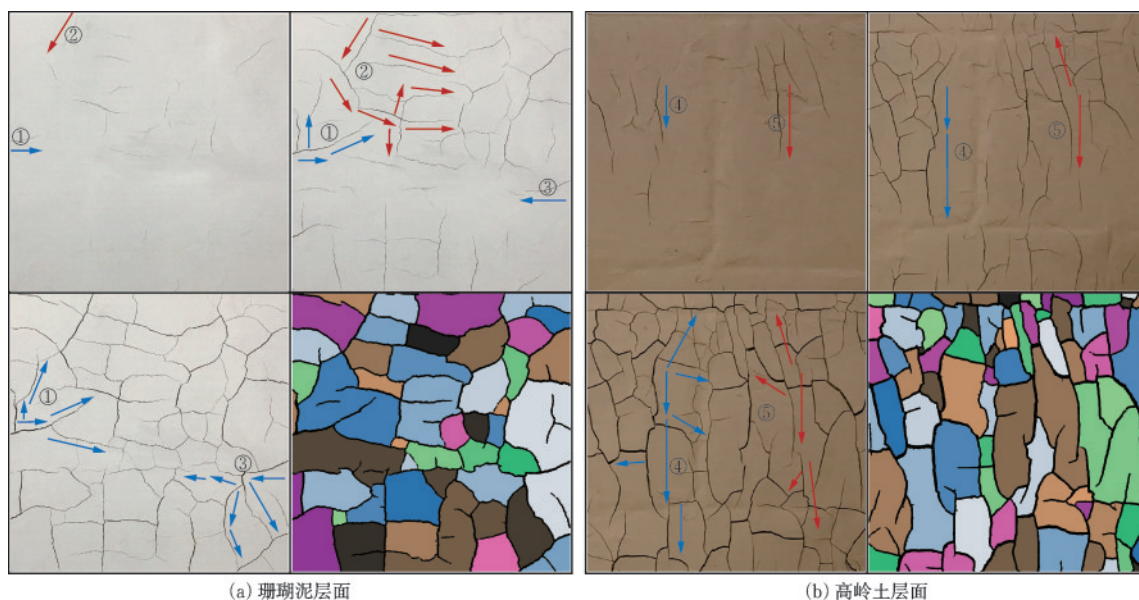


图10 裂隙演化过程(S3)

Fig.10 Fracture evolution process (S3)

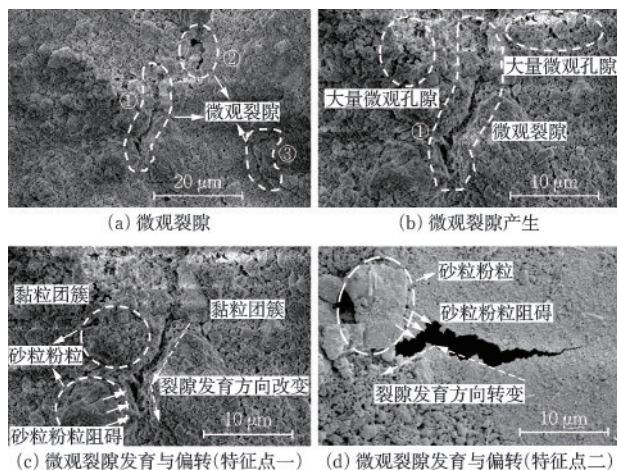


图11 珊瑚泥微观裂隙(S3)

Fig.11 Microscopic cracks in coral mud (S3)

萌发裂隙,进而造成发育速率在初始阶段就达到了较大值。

基质吸力(matric suction)是土体中的一种负压,产生于土颗粒间的水分束缚力,主要由毛细作用和颗粒表面的吸附力引起^[32]。当土体中同时存在大量砂粒、粉粒以及黏粒时,基质吸力主要由黏粒产生^[33],而粒径较大的砂粒则起了阻隔作用。在干缩过程中,基质吸力在水-土颗粒团簇的中心作用,并随土体失水而增大,这种应力必须通过土壤结构向外传递,以保持系统力的平衡,向团簇中心方向的拉应力实际上是基质吸力对外的表现形式,当拉应力超过土壤的抗拉强度时,就会导致裂隙的产生和扩展^[34]。

通过图11(c)、(d)可以观察到,砂粒和粉粒会阻碍裂隙的发育,使其偏离原本发育方向。图12进一步描述了这一现象,裂隙分割出了两个黏粒团簇,每个团簇受基质吸力作用影响会产生对外的拉应力,并作用于裂隙尖端。当没有大颗粒影响,两个拉应力作用方向相反,且与裂隙发育方向垂直,导致裂隙具有发生张开型断裂的趋势;当有大颗粒阻碍,两个拉应力作用方向相反,且与裂隙发育方向在同一直线上,导致裂隙具有发生撕开型断裂的趋势。由于珊瑚泥含有砂粒,且粉粒含量也多于高岭土,其受到的大颗粒阻碍作用更多,更容易产生撕开型断裂,进而造成裂隙发育方向容易改变并产生更多节点。这解释了2.2节珊瑚泥在发育过程中为何产生了大量节点。

具体是否发生断裂还与土体本身的抗拉强度有关^[28],裂隙实际发育方向与拉应力作用方向也并非只存在垂直和在同一直线上两种,通常情况下呈一定夹角^[35]。因此,裂隙断裂形式判据可表示为:

张开型断裂:

$$S_{m1} \cdot |\cos \theta_1| + S_{m2} \cdot |\cos \theta_2| > [S_1] \quad (2)$$

式中, S_{m1} 、 S_{m2} 为黏粒团簇基质吸力所产生的对外拉应力; θ_1 、 θ_2 为基质吸力与裂隙发育方向的夹角; $[S_1]$ 为土体张开型断裂抗拉强度。

撕开型断裂(θ_1 或 θ_2 大于90度):

$$S_{m1} \cdot |\sin \theta_1| + S_{m2} \cdot |\sin \theta_2| > [S_2] \quad (3)$$

式中, $[S_2]$ 为土体撕开型断裂抗拉强度。

在砂粒、粉粒的阻碍作用下,珊瑚泥的黏粒团

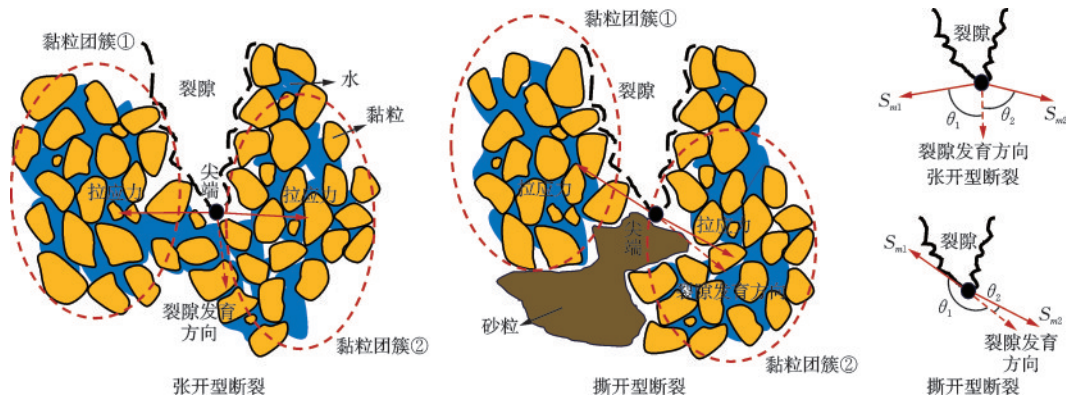


图12 裂隙扩展的断裂机理

Fig.12 Fracture mechanism of crack propagation

簇分布不均匀,导致土体撕开型断裂更易发生。因此,珊瑚泥面层的裂隙在发育过程中更容易发生方向上的改变,产生小而多的正方形区块(图10)。而高岭土面层裂隙在发育过程中更易发生张开型断裂,裂隙方向不会改变,产生长条形区块。此外,由于珊瑚泥裂隙在发育过程中产生诸多裂隙节点,其表面复杂裂隙网络对面层的填充程度更高,分形维数数值更大,这与2.1、2.2节的结论相吻合。

3.3 厚度对面层裂隙的影响

试验结果表明,珊瑚泥面层的裂隙参数对于厚度的敏感程度明显高于高岭土面层,这可能是两种面层裂隙断裂的形式不同所导致的。

在张开型断裂中,应力场相对均匀地分布在裂隙前沿,随着厚度增加,应力集中区域变化不大,裂隙传播的驱动力相对稳定;而对于撕开型断裂,应力集中在剪切面上,随着面层厚度增加,裂隙面上的剪应力分布会变得更加复杂。这种复杂的应力状态会导致裂缝传播的驱动力增加,从而使得裂隙更容易发育^[36]。3.2节分析得出:珊瑚泥面层的龟裂以撕开型断裂为主,而高岭土面层的龟裂以张开型断裂为主。因此,面层厚度对珊瑚泥面层裂隙发育难度的影响要远大于高岭土面层,也就造成了珊瑚泥面层裂隙参数对于厚度更为敏感。这解释了2.2节中,珊瑚泥面层的裂隙参数受厚度的影响形式与高岭土相同,但受影响程度明显高于高岭土。

4 结论

对不同厚度的珊瑚泥与高岭土面层龟裂特性进行了对比模型试验研究,得到以下结论:

(1) 珊瑚泥面层的最终裂隙面积分形维数、最

终裂隙长度分形维数、最终裂隙节点数、最终裂隙条数以及最终表面裂隙率随厚度增加而减小,裂隙平均宽度峰值、最终裂隙平均长度随厚度增加而增大。高岭土面层的裂隙参数受厚度的影响形式与珊瑚泥相同,但受影响程度明显低于珊瑚泥。

(2) 珊瑚泥面层和高岭土面层的裂隙平均长度在变化趋势上呈现出一致性,大致可分为增长阶段、减小阶段和稳定阶段。而两种面层的裂隙节点数、裂隙条数、裂隙平均宽度、表面裂隙率以及分形维数在变化趋势上存在一定的区别:珊瑚泥的相关裂隙参数随时间推移表现为先单调递增后趋于稳定,但增长速率在初始阶段就迅速达到了较大值;高岭土的相关裂隙参数总体变化符合S型增长曲线,增长速率在初始阶段较低,而后逐渐提升。结合SEM电镜微观图像,珊瑚泥的多孔隙结构可能导致裂隙在多处孔隙并行萌发,进而造成了珊瑚泥在初始阶段的裂隙发育速率较大。

(3) 竖直面层的裂隙以水平和垂直方向为主,这可能是由于:试样垂直于地面,顶部区域土体的水分会向底部迁移,导致顶部更快失水并收缩,这种不均匀收缩造成面层产生横向裂隙。根据浓度正交性原理,水平裂隙衍生出大量的竖向裂隙,使其也成为面层龟裂的主要方向之一。

(4) 黏粒团簇的基质吸力对外表现为拉应力并作用于裂隙尖端。根据拉应力对裂隙尖端的作用方向,裂隙可能产生张开型断裂和滑移型断裂。高岭土不含砂粒,其基质吸力通常垂直于裂隙发育方向,造成张开型断裂,导致裂隙单方向发育,最终将面层分割为多个长条形区块。珊瑚泥中砂粒粉粒的干扰造成黏粒团簇分布不均,改变了拉应力方向,进而将张开型断裂转变为滑移型断裂,导致珊瑚泥裂隙发育方向容易变化,最终将面层分割为多

个正方形小区块。

(5) 高岭土面层龟裂以张开型断裂为主,随着厚度增加,这种断裂的裂隙传播的驱动力相对稳定;珊瑚泥面层龟裂以撕开型断裂为主,随着面层厚度增加,这种断裂裂隙面上的剪应力分布会变得更加复杂,进而导致裂缝传播的驱动力增加。因此,珊瑚泥面层的裂隙参数对于厚度变化的敏感程度要高于高岭土。

参考文献:

- [1] 沈扬,冯照雁,刘汉龙,等.初始浓度对南海珊瑚泥沉积浊液面沉速特性影响试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(增2):22-26.
Shen Y, Feng Z Y, Liu H L, et al. Experimental study on effects of initial concentration on settling velocity characteristics of turbid surface of South China Sea coral mud[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup2): 22-26. (in Chinese)
- [2] 马成昊,朱长歧,瞿茹,等.中国南海珊瑚砂的多尺度颗粒形貌特征分析[J].岩土力学,2023,44(增1):117-126.
Ma C H, Zhu C Q, Qu R, et al. Multi-scale particle morphology analysis of coral sand in South China Sea [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(Sup1): 117-126. (in Chinese)
- [3] 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,2021,40(12):2570-2583.
Fang H Q, Jiang C Y, Wang C L, et al. Effects of layer thickness and temperature on the crack morphology of chongqing silt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2570-2583. (in Chinese)
- [4] Gao R, Ye J H. Mechanical behaviors of coral sand and relationship between particle breakage and plastic work [J]. Engineering Geology, 2023, 316: 107063.
- [5] Xu D S, Zhao H X, Fan X C, et al. Influence of spatial distribution of fine sand layers on the mechanical behavior of coral reef sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 169: 107897.
- [6] 刘俊东,唐朝生,曾浩,等.干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征[J].岩土力学,2021,42(10):1-10.
Liu J D, Tang C S, Zeng H, et al. Evolution of desiccation cracking behavior of clays under drying-wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 1-10. (in Chinese)
- [7] 卫仁杰,彭劫,陈泳,等. MICP结合南海岛礁资源加固珊瑚砂的方法及效果研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1255-1265.
Wei R J, Peng J, Chen Y, et al. Study on methods and effects of coral sand reinforcement by MICP combined with reef resources in South China Sea [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1255-1265. (in Chinese)
- [8] 牟文,唐朝生,程青,等.裂隙对土体水分蒸发过程的影响[J].岩土工程学报,2023,45(12):2641-2648.
Mou W, Tang C S, Cheng Q, et al. Effects of cracks on evaporation process of water in soils [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 45(12): 2641-2648. (in Chinese)
- [9] Liu X, Luo Y, Tang L, et al. Slope crack propagation law and numerical simulation of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Sustainability, 2023, 15(7): 5655.
- [10] Lu Y, Liu S H, Alonso E, et al. Model test study on the deformation and stability of rainfall-induced expansive soil slope with weak interlayer[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 83(3): 76.
- [11] Wang H, Wang Y, Jin F. Stability of expansive soil slopes under wetting-drying cycles based on the discrete element method[J]. Water, 2024, 16(6): 861.
- [12] Chen Z H, Guo N. Sedimentary characteristics of coral mud in the South China Sea during the reclamation process[J]. Geo-Marine Letters, 2019, 39(5): 417-425.
- [13] Jiang C J, Ding X M, Fang H Q, et al. The undrained shear behavior of clean coral silt and coral silt-sand mixtures[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2023, 51(5): 3596-3611.
- [14] Tang C S, Cheng Q, Gong X P, et al. Investigation on microstructure evolution of clayey soils: a review focusing on wetting/drying process[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 269-284.
- [15] 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: 103586.
- [16] Cheng Q, Zhou C, Ng C W, et al. Thermal effects on water retention behaviour of unsaturated collapsible loess [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(2): 756-762.
- [17] Goodman C, Vahedifard F. Effects of sample thickness and shape on cracking patterns and crack depth in a compacted clay[M]. Charlotte: Geo-Congress, 2022: 169-179.

- [18] 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 Z G, Wang S J, Zhang J W, et al. Thickness effect on crack evolution of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1922-1930. (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): 391.
- [20] 丁选明, 方华强, 刘汉龙, 等. 纤维改性珊瑚泥裂隙动态演化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1801-1811.
Ding X M, Fang H Q, Liu H L, et al. Dynamic evolution laws of desiccation cracking of fiber-improved coral silt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(9): 1801-1811. (in Chinese)
- [21] 苏醒, 阎石, 付江监, 等. 一种自复位摇摆墙的改进 Bouc-Wen 滞回模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(1): 39-49.
Su X, Yan S, Fu J J, et al. An improved Bouc-Wen hysteresis model for self-centering rocking walls [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1): 39-49. (in Chinese)
- [22] Jia Q, Chen W, Tong Y, et al. Laboratory study on shrinkage and cracking behavior of earthen plaster [J]. Engineering Geology, 2023, 318: 107096.
- [23] 骆赵刚, 汪时机, 杨振北. 膨胀土湿干胀缩裂隙演化及其定量分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2312-2323.
Luo Z G, Wang S J, Yang Z B. Quantitative analysis of fracture evolution of expansive soils under wetting-drying cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2312-2323. (in Chinese)
- [24] 徐其良. 基于断裂力学的土体干缩开裂机理研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
Xu Q L. Study on mechanism of soil desiccation cracking based on fracture mechanics [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)
- [25] 林久卿, 牛昊, 刘致延, 等. 水泥基砂土注浆材料抗海水侵蚀性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(3): 551-559.
Lin J Q, Niu H, Liu Z Y, et al. Cement instant sealing material anti-seawater erosion performance research [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 551-559. (in Chinese)
- [26] Britta S, Arash A, Wiebke, et al. Face support, interaction modeling in mechanized tunneling [M]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 165-252.
- [27] Zhong Y Q, Cai G H, Zeng G. The effect of initial water content and density on the swelling-shrinkage and cracking characteristics of compacted clay [J]. Separations, 2022, 9(12): 424.
- [28] 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: 103586.
- [29] Zhang H, Liu C, Tang C S, et al. Desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using S-shaped growth curve model [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 152: 107014.
- [30] Dai B B, Yang J, Liu F T, et al. Morphological description of desiccation cracks in soils: insights from the perspective of anisotropy [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(3): 94.
- [31] 周峙, 张表志, 张家铭, 等. 基于 COD 断裂准则的土体干缩裂隙萌生扩展力学机制 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 62-71.
Zhou Z, Zhang B Z, Zhang J M, et al. Mechanical mechanism of shrinkage crack initiation and propagation based on COD fracture criterion [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(11): 62-71. (in Chinese)
- [32] Wang X, Wang K C, Deng T, et al. Contribution of soil matric suction on slope stability under different vegetation types [J]. Journal of Soils and Sediments, 2024, 24: 575-588.
- [33] Liu B, Tang C S, Pan X H, et al. Influence of layer thickness on bioremediation of drought-induced soil desiccation cracks using microbially induced calcite precipitation [J]. Acta Geotechnica, 2023, 81: 391.
- [34] Tang C S, Cheng Q, Leng T, et al. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil [J]. Catena (Giessen), 2020, 194: 104721.
- [35] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 717-725.
Zeng H, Tang C S, Liu C L, et al. Measurement and analysis of shrinkage stress of expansive soils during drying process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 717-725. (in Chinese)
- [36] Ping Q, Liu X, Ma C, et al. Analysis of the fracture characteristics and crack propagation mechanism of fractured sandstone under dynamic loading [J]. Applied Sciences, 2024, 14(5): 2042.

(本文编辑: 赵霞)