

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.062



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 羟丙基甲基纤维素改性珊瑚泥龟裂特性试验研究

王红, 丁选明, 方祥位, 方华强, 李一夫, 辛义文

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**为实现岛礁珊瑚泥的有效利用,对岛礁珊瑚泥性能进行研究,发现岛礁珊瑚泥作为工程材料利用时存在龟裂现象,因此,对珊瑚泥进行龟裂研究及改性研究具有现实意义。引入羟丙基甲基纤维素(HPMC)与珊瑚泥制备室内面层模型,进行龟裂试验,在不同时段对试验模型进行图像采集,并通过图像处理技术获取珊瑚泥相关参数变化;探究经 HPMC 改性后珊瑚泥裂隙发育速率等龟裂参数的变化规律及裂隙的动态演化规律;分析 HPMC 对珊瑚泥龟裂行为的抑制作用和抑制机制。结果表明:HPMC 的加入能明显改善珊瑚泥土体龟裂性质,通过减少土体内自由水含量,在土体内部吸附珊瑚泥颗粒形成团聚体,阻止土体收缩并抑制裂隙生成,显著改善了珊瑚泥面层的整体性能和抗裂性能。

**关键词:**羟丙基甲基纤维素;珊瑚泥面层;龟裂;改性机制

**中图分类号:**TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)01-0054-09

## Cracking characteristics of hydroxypropyl methylcellulose modification coral clay

WANG Hong, DING Xuanming, FANG Xiangwei, FANG Huaqiang, LI Yifu, XIN Yiwen

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** For effective use of island reef coral mud, the performance of island reef coral mud was investigated to examine the cracking phenomenon when this coral mud was utilised as engineering material, and it is of practical significance to carry out the research on the cracking and modification of coral mud. Firstly, hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) and coral mud were used to prepare an indoor surface model for the cracking test. Images were captured at different time periods and then the changes in coral mud-related parameters were obtained by image processing techniques; Secondly, the changing patterns of coral mud cracking parameters such as crack development rate and the dynamic evolution patterns of cracks in coral mud after HPMC modification were investigated; Finally, the inhibitory effect of HPMC on the cracking behaviour of coral mud was analysed and the cracking inhibition mechanisms were described. The results of the study show that the addition of HPMC can significantly improve the anti-cracking properties of coral mud soil samples, and HPMC can prevent the contraction of the soil body and inhibit the generation of cracks by reducing the content of free water in the soil samples and adsorbing the coral mud particles inside the soil samples to form

**收稿日期:**2024-04-08

**基金项目:**中央高校基本科研业务费(2022CDJQY-012)

**作者简介:**王红(1999-),女,主要从事土体龟裂行为研究,E-mail:wh@stu.cqu.edu.cn。

方华强(通信作者),男,博士生,E-mail:charlesfeung@outlook.com

**Received:** 2024-04-08

**Foundation item:** Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2022CDJQY-012)

**Author brief:** WANG Hong (1999-), main research interest: soil cracking behaviour, E-mail: wh@stu.cqu.edu.cn.

FANG Huaqiang (corresponding author), PhD candidate, E-mail: charlesfeung@outlook.com.

agglomerates. This can significantly optimise the overall performance of the coral mud surface layer and its anti-cracking performance.

**Keywords:** hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC); coral mud surface layer; cracking; modification mechanism

近年来,岛礁建设与海洋资源开发已成为重要的国家战略。南海岛礁因远离大陆,工程材料极其匮乏且造价极高,极大限制了岛礁建设。值得注意的是,南海岛上具有丰富的珊瑚砂资源,但珊瑚砂颗粒强度低,易破碎,在吹填造岛过程中会在地基上层形成细粒珊瑚土(珊瑚泥)<sup>[1]</sup>。若采用本地珊瑚泥作为建筑材料,不仅具有就地取材、运输成本低的优点,还具备极高的经济效益。此外,岛礁珊瑚泥细度高,质地柔软,还具有一定黏性,是一种天然的优质待开发绿色建筑墙面材料。但由于岛礁接近赤道,强烈的太阳辐射使珊瑚泥水分大量蒸发,从而导致珊瑚泥场地的龟裂现象较为严重<sup>[2]</sup>。因此,要实现珊瑚泥的开发利用,就必须解决珊瑚泥土体的龟裂问题。

龟裂的产生会破坏土体内部结构及土体完整性,严重劣化土体工程性质<sup>[3]</sup>,因此有必要研究龟裂的防治与改善。针对土体龟裂问题的研究,目前已有较多的成果。林奎等<sup>[4]</sup>利用数字图像识别与处理技术对岩土体裂隙各形态参数进行测量,提出了完整的裂隙图像识别方法;目前龟裂改善方法可大致分为物理方法和化学方法两类,传统的化学手段多会损坏土壤性能,新兴的化学方法则以微生物技术进行土壤强化<sup>[5-6]</sup>,以达到预防土体开裂的目的。而物理方法则是目前龟裂改善研究的主流方法,Blanco-Canqui<sup>[7]</sup>发现生物炭能有效改善土壤孔隙及理化性质,提高土壤的持水能力,改善土壤团聚体的稳定性。Zhang等<sup>[8]</sup>据此探究了木材生物炭对土体裂隙的影响,结果表明,木材生物炭能减小裂隙宽度,有效抑制土壤开裂。Tang等<sup>[9]</sup>以纤维强化土体为研究对象,发现纤维夹杂物对土壤裂隙干燥行为有显著改善作用。丁选明等<sup>[10]</sup>采用PVA纤维对珊瑚泥龟裂行为进行改善,发现PVA纤维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。而近年来羟丙基甲基纤维素(HPMC)因其保水性能优越常被用作建筑材料黏合剂,且可掺入建筑材料进行材料改性。Liu等<sup>[11]</sup>通过试验证明了HPMC掺入混凝土能形成絮凝体,对混凝土的触变性及可构建性有显著贡献。李龙等<sup>[12]</sup>通过试验发现HPMC中的亲水性基团能吸附石膏溶液中水分子,使自由水转变为结合水,能有效提高建筑石膏的保水性能。吴军虎等<sup>[13]</sup>探究了HPMC作为土壤改良剂对缓解土体水土养分流失的重要意义。HPMC在工

程材料的优化方面具有显著优势。

目前土体龟裂技术及防治研究较为成熟<sup>[14]</sup>,但对珊瑚泥这一新型材料的龟裂研究尚不多见。笔者采用HPMC作为外加剂对珊瑚泥进行性能改善,通过室内面层模型进行龟裂试验,采用图像处理技术获取珊瑚泥土体的相关裂隙参数,通过数据分析探究恒温恒湿环境条件下珊瑚泥土体裂隙的动态演化规律及HPMC对珊瑚泥土体的改良效果,并分析HPMC改良珊瑚泥龟裂行为的作用机理,以期珊瑚泥土体的开发利用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

土样:通过球磨机对自然风干的珊瑚砂进行磨制,得到目标粒径的珊瑚泥人工制备样。物性试验结果表明,珊瑚泥比重为2.79,液限、塑限分别为25%、15%;粒度分布测试结果表明,其粒度分布为砂粒、粉粒、黏粒分别占15%、64%、21%,表明珊瑚泥人工制备样为低液限粉土(CL)<sup>[10]</sup>;矿物成分分析结果显示,珊瑚泥的主要化学成分为CaCO<sub>3</sub>,主要矿物成分为文石、方解石及高镁方解石,各矿物成分含量分别为39.5%、35.5%和25%<sup>[15]</sup>。

黏合剂:HPMC,为羟丙基甲基纤维素,水溶性高分子材料,白色粉末,材料细度范围为80~100目,灰度为3%~4%,无毒环保。可由纤维素醚碱活化处理后与氯甲烷和环氧丙烷进行醚化反应制得<sup>[16]</sup>,在反应过程中,纤维素分子上的羟基被甲氧基和羟丙基取代,HPMC分子结构如图1所示。

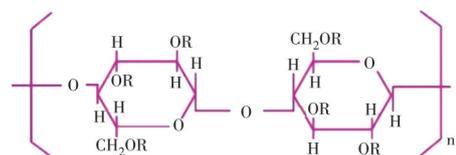


图1 HPMC分子结构示意图

Fig. 1 Molecular structure of HPMC

### 1.2 试验方案及测试方法

#### 1.2.1 试验方案

为探究HPMC掺量对珊瑚泥裂隙发育的抑制作用,试验将不同质量分数的HPMC(占水质量的百分比)与一定质量的水混合,制备HPMC溶液,并与干燥的珊瑚泥土样混合,采用电动搅拌机充分搅拌,制备试验样品。通过预试验发现,当含水率在20%~23%时,珊瑚泥与模型墙体之间具有很好的

黏结性能。考虑到强度、防水及保温等因素,国家建筑标准规定的外墙抹灰厚度一般为8~10 mm,因此,试验中含水率控制为22%,面层厚度控制为10 mm,试验参数如表1所示。为保证HPMC掺量为试验唯一影响因素,设置恒温恒湿条件,其中室内环境温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,环境湿度为 $75\%\pm 2\%$ 。

表1 试样编号及参数

Table 1 Specimen numbers and parameters

编号	面层厚度/ mm	含水 率/%	HPMC 掺量/%	模型尺寸
S1	10	22	0.00	120 cm×120 cm
S2	10	22	0.10	120 cm×120 cm
S3	10	22	0.25	120 cm×120 cm
S4	10	22	0.50	120 cm×120 cm

### 1.2.2 裂隙参数获取方法

为详细记录面层裂隙发育过程,在裂隙发育周期内使用摄像机进行高频率图像采集。当面层表面不再有新生裂隙产生,且裂隙不再有明显拓宽时视为试验结束。获取试样裂隙发育图像后,利用Photoshop软件对图像进行裁剪、尺寸校正等预处理,利用MATLAB及Python软件编程,进行图像的灰度化、去噪及二值化处理,最后采用南京大学开发的PCAS裂隙图像处理软件进行图像裂隙相关龟裂参数的获取<sup>[17]</sup>。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 珊瑚泥裂隙动态发育过程

不同HPMC掺量下,局部面层模型最终裂隙对比如图2所示。对比试样S1与S2裂隙图像发现,未掺HPMC的试样S1中,深度较大的裂隙分布方向较为均匀,而试样S2中深层裂隙多为垂直向,说明HPMC的掺入对裂隙的生长方向有一定影响。对比4个面层图像可以看出,HPMC的掺入对珊瑚泥裂隙发育行为有显著的抑制作用,其中试样S4最终裂隙不明显,在后续图像处理过程中,部分有效裂隙无法被识别到,且相关文献研究表明<sup>[16]</sup>,当HPMC的掺量为0.4%以上时,土样基本不会再有泌水现象产生。笔者在试验中也发现该规律,HPMC掺量达到0.5%时,珊瑚泥试样龟裂现象不明显。因此,仅对试样S1、S2、S3裂隙图像进行分析。

试样S1、S2、S3珊瑚泥面层模型裂隙发育过程图像如图3所示,由图3可以看出,试样S1、S2裂隙发育规律一致,对比不同时刻裂隙发育情况可直观看出裂隙形态发育特点。裂隙的发育可分为3个阶段<sup>[18]</sup>:1)裂隙萌生阶段。面层表面首先形成各自独

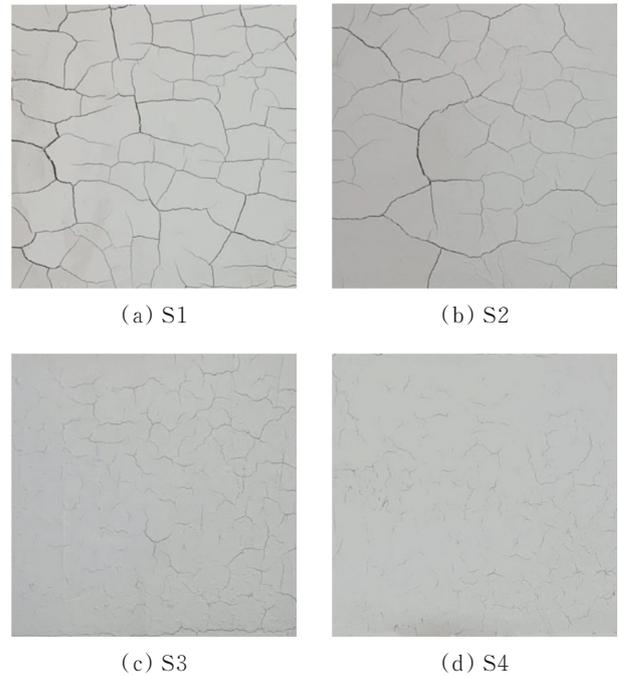


图2 试样局部面层裂隙对比

Fig. 2 Comparison of localised surface cracks of specimens

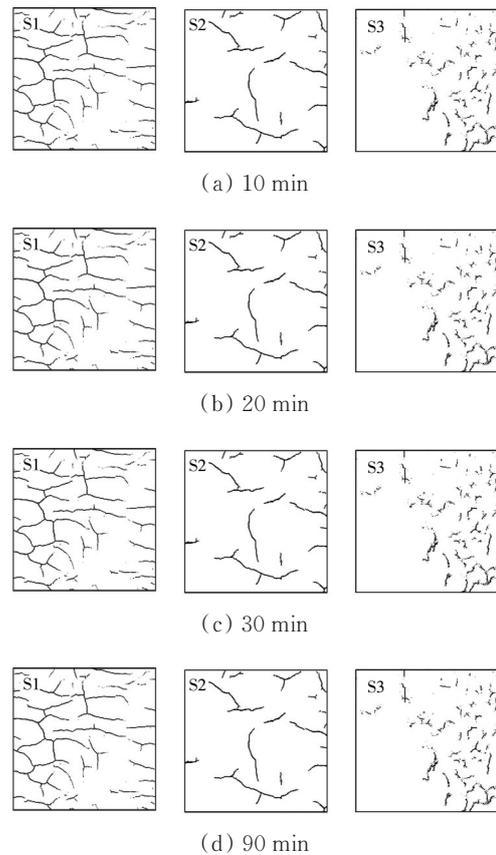


图3 试样裂隙发育过程对比

Fig. 3 Comparison of fracture development processes of specimens

立的主裂隙,主裂隙多由边缘向中心萌生,此时的主裂隙各自发展,互不接触,随后裂隙发展迅速,各

主裂隙从不同方向朝模型中心迅速扩张,扩张过程中主裂隙相互接触,将整个面层分割成几大区域(见图 3(a))。2)裂隙发育阶段。在主裂隙分割土块过程中,还会衍生次级裂隙对较大土块进行二次分割,可观察到次级裂隙往往从主裂隙上衍生,以近乎垂直于主裂隙的姿态发育(见图 3(b)、(c))。3)裂隙扩展阶段。在主裂隙及衍生裂隙将土样分割成较为均匀土块后,在接下来的发育过程中,裂隙不仅会在表面持续加宽,且在土样内部也会持续加深,直到足够长的发育时间后,裂隙发育过程结束,土样达到稳定。但可明显看出,不论发育时间长短,主裂隙的最终宽度总远大于次级衍生裂隙(见图 3(d))。而试样 S3 为高 HPMC 掺量,裂隙整

体呈现出细、浅、短的样貌,裂隙发育与前述 3 个阶段不同,具体情况通过裂隙参数对比进行说明。

## 2.2 HPMC 对珊瑚泥裂隙参数的影响

土样裂隙参数随时间的变化如图 4 所示。裂隙参数变化能有效反映不同掺量 HPMC 对珊瑚泥裂隙发育的抑制作用。通过观察试样 S1、S2 与 S3 裂隙参数曲线变化可发现,试样 S1 的裂隙节点个数、裂隙条数、裂隙总长度及裂隙总面积在 50 min 内快速发展且最终趋于稳定,而掺入 HPMC 的试样 S2、S3 裂隙在 50 min 后仍持续发展,最终在 80 min 左右发育稳定。不论发育时间多少,试样 S2、S3 裂隙各参数始终远低于试样 S1,说明 HPMC 的加入对珊瑚泥的裂隙发育有显著影响。

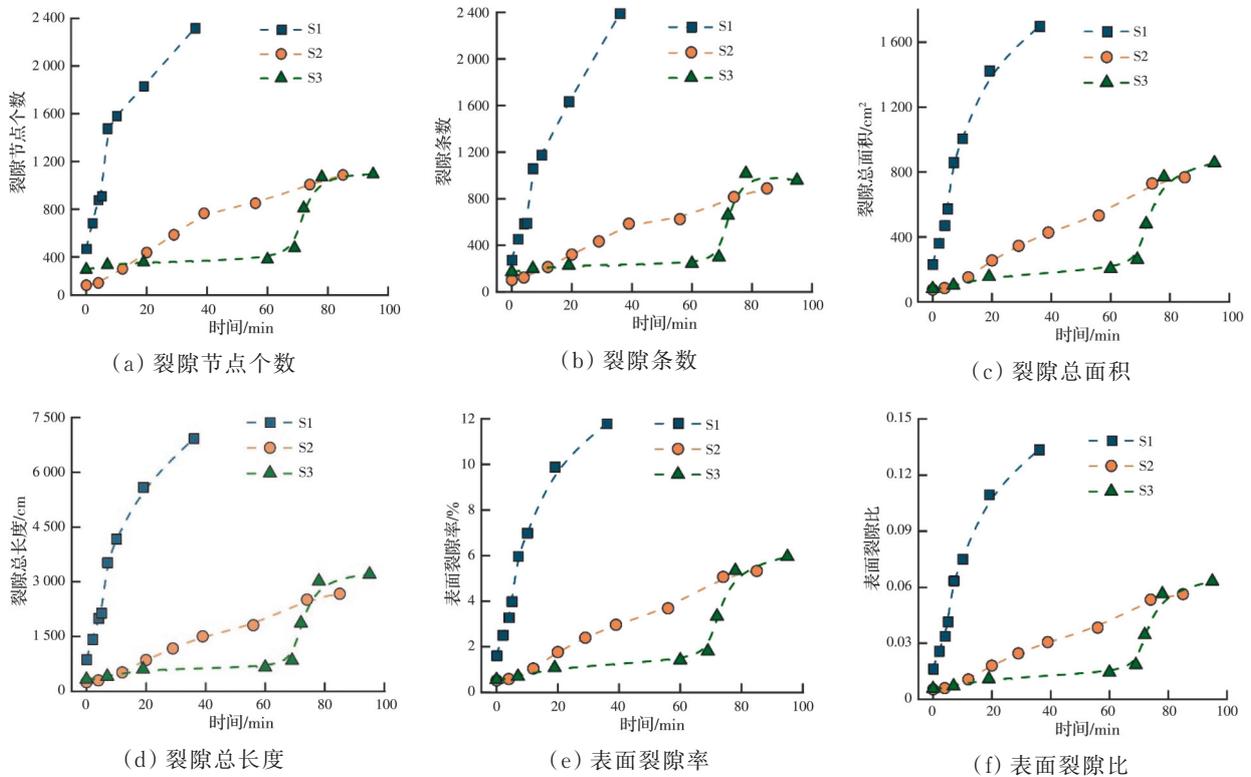


图 4 试样裂隙参数随时间的变化

Fig. 4 Variation of fracture parameters of specimens with time

裂隙节点个数与裂隙条数能有效反映土样破碎程度,软件识别的裂隙节点包括裂隙交点与孤立裂隙末梢点两种,并以两相邻节点间的裂隙迹线作为裂隙条数的判断依据。从图 4 中可以看出,裂隙节点个数与裂隙条数的多少依次为试样 S1>S2>S3(见图 4(a)、(b)),即试样 S1 的土样破碎程度最大,说明掺入 HPMC 能有效降低珊瑚泥土样破碎程度。而在发育后期,试样 S2 与 S3 的节点个数与裂隙条数曲线高度重合,说明 HPMC 掺量对珊瑚泥土样最终破碎程度作用不明显;裂隙总长度、裂隙总面积能反映土样的裂隙形貌及整体发育情况。试

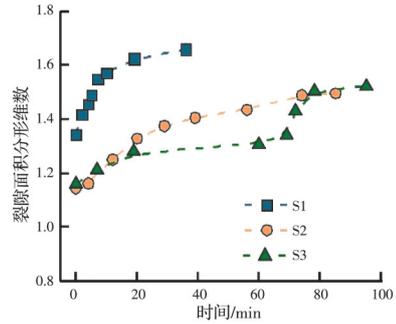
样 S1 的裂隙总面积、裂隙总长度均远高于试样 S2、S3(见图 4(c)、(d)),进一步证明了试样 S1 土样破碎程度最高,土样完整性不佳;表面裂隙率定义为裂隙面积与土样总面积之比,其中表面裂隙率与表面裂隙比之间的关系可参考方华强等提出的理论<sup>[19]</sup>。表面裂隙率与表面裂隙比能有效反映土样开裂程度,并且对于同一类土样,可采用表面裂隙率对土样收缩性能进行评价,土样收缩性越强,裂隙产生的可能性越大。从图 4(e)、(f)可以看出,表面裂隙率与表面裂隙比的大小均为试样 S1>S2>S3,说明试样 S1 破碎,且试样 S1 的收缩性明显强于

试样 S2、S3,即 HPMC 的加入能降低珊瑚泥土样的收缩性,在一定程度上阻碍裂隙的生成。

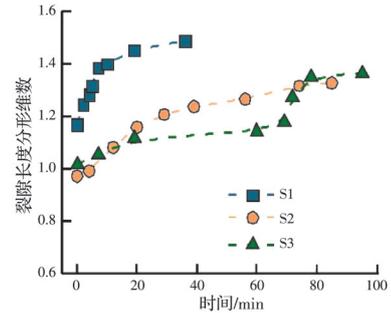
综上所述,HPMC 的掺入能有效降低珊瑚泥土样的裂隙节点个数、裂隙条数、裂隙总面积和总长度、表面裂隙率及表面裂隙比,延缓裂隙发育时间。此外,HPMC 能改变土样裂隙形貌并降低土样的收缩性,有效降低土样破碎程度。

### 2.3 HPMC 对珊瑚泥裂隙分形维数的影响

裂隙面积分形维数、裂隙长度分形维数随时间的变化如图 5 所示。土样裂隙发育具有随机分形特征,因此,可以基于统计分布规律,采用盒维数法对土样裂隙网格的分形数值进行计算,从而对其分形特征进行描述。采用裂隙面积分形维数、裂隙长度分形维数两个指标对珊瑚泥土样裂隙变化进行描述<sup>[10,20]</sup>。其中,通过二值化裂隙图像计算得到裂隙面积分形维数,再对二值化裂隙图像进行骨架化处理,得到裂隙中轴,计算得到裂隙长度分形维数,以此描述排除裂隙宽度影响的裂隙规律。可以看出,两者曲线有近似的发展规律,均随时间的增加而先增加后趋于稳定。说明 HPMC 的掺入对珊瑚泥试样裂隙面积分形维数和裂隙长度分形维数都具有影响作用,曲线规律较为一致,但裂隙长度分形维数比对应的裂隙面积分形维数的值低,这是由于忽略了裂隙宽度影响而引起的差异,说明裂隙宽度对分形维数存在一定影响作用。



(a) 裂隙面积分形维数



(b) 裂隙长度分形维数

图 5 试样分形维数随时间的变化  
Fig. 5 Variation of fractal dimension of specimens over time

### 2.4 HPMC 对珊瑚泥裂隙形态分布的影响

为探究 HPMC 对珊瑚泥裂隙形态分布特征的影响,采用形态参数频率分布变化描述裂隙的动态演化规律,选取裂隙长度频率分布(见图 6)、裂隙宽度频率分布(见图 7)与裂隙方向频率分布(见图 8)对珊瑚泥形态分布进行描述。

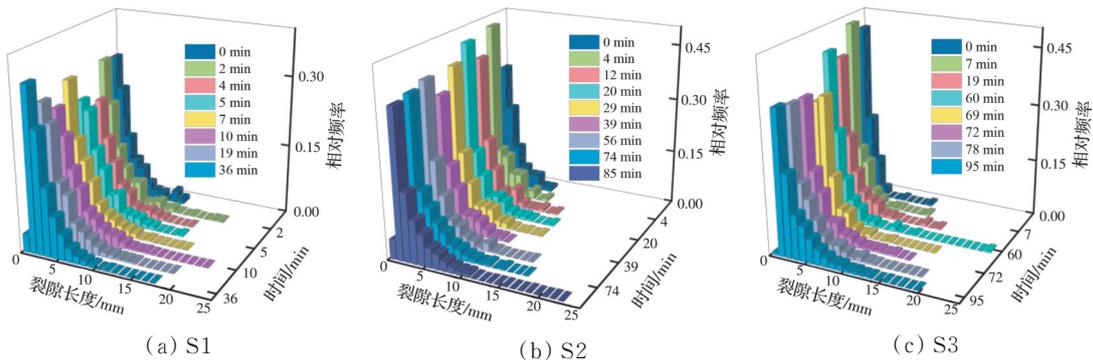


图 6 试样裂隙长度频率分布的变化

Fig. 6 Changes in the frequency distribution of fracture lengths of specimens

试样 S1、S2、S3 裂隙长度频数分布如图 6 所示。在整个裂隙发育周期内,试样 S1、S2、S3 的裂隙长度集中范围分别为 1~3、1~2、1~3 cm;最大裂隙长度频数变化范围分别为 0.244~0.347、0.355~0.484、0.355~0.465,最大裂隙长度的相对频率增加明显,并且,试样 S1、S2、S3 的最终裂隙长度分布范围分别为 0~18、0~22、0~20 cm。这是由于

HPMC 的加入减少了珊瑚泥次生裂隙的产生,使得主裂隙被分割成较短裂隙的可能减少,在宏观上表现为裂隙长度频数分布范围增大。

试样 S1、S2、S3 裂隙宽度频数分布如图 7 所示。在裂隙的发育过程中,由于原有裂隙会进一步拓宽,同时伴随新裂隙的产生,在宏观上即表现为裂隙宽度分布范围的增加,但由于 HPMC 加入后一定

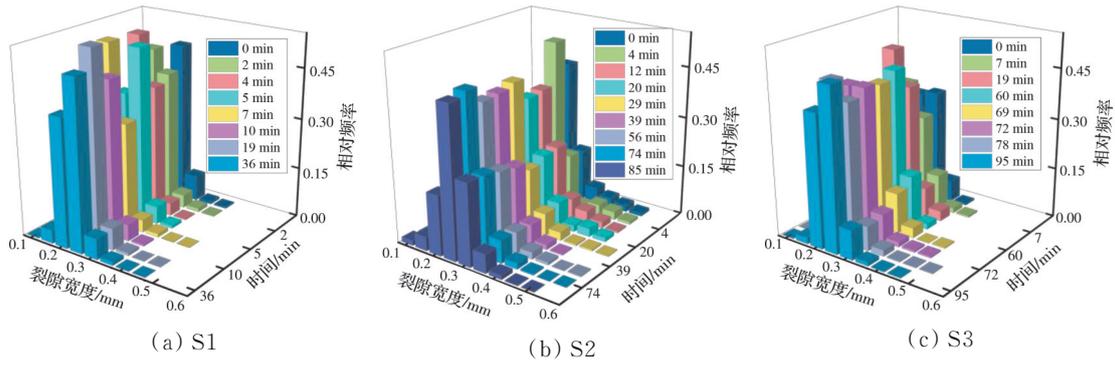


图 7 试样裂隙宽度频率分布变化

Fig. 7 Changes in the frequency distribution of fracture widths of specimens

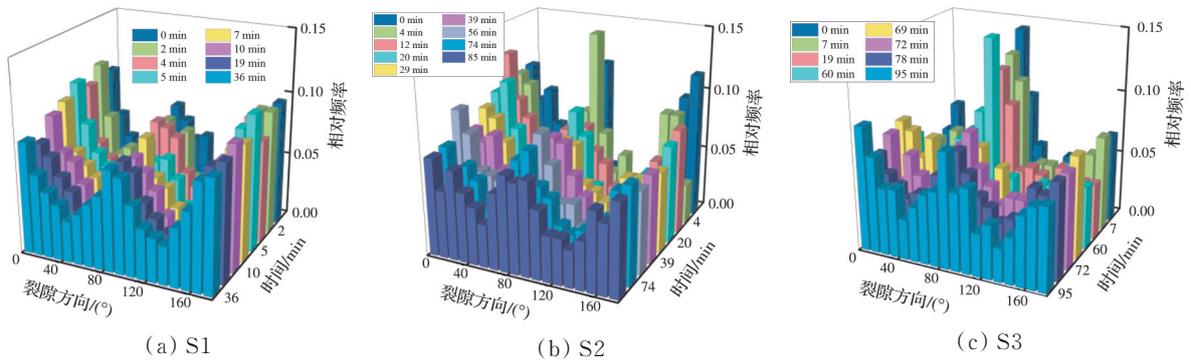


图 8 试样裂隙方向频率分布变化

Fig. 8 Changes in the frequency distribution of fracture direction of specimens

程度上减少了次生裂隙的产生,因此,相对未添加 HPMC 土样来说,珊瑚泥最终裂隙宽度分布范围仅出现小幅增加。

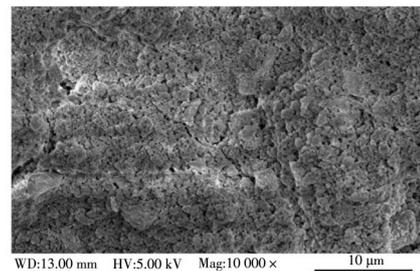
试样 S1、S2、S3 裂隙角度频数分布如图 8 所示。由图 8 可以看出,裂隙发育方向较为随机,但发育后期方向分布较为规律,多集中分布在面层竖向与面层横向。如试样 S1 裂隙角度频数多分布在 0°~20°、80°~100°、160°~180° 范围内。试样 S2、S3 在发育前期裂隙角度分布同试样 S1 有显著差异,试样 S1 水平向、垂直向裂隙差异不明显;试样 S2 垂直向裂隙较水平向裂隙突出,试样 S3 则是垂直向裂隙明显居多。而在裂隙发育后期,试样 S2、S3 裂隙角度频数分布从集中分布转为近似均匀分布,各方向角度分布较均匀。

### 3 珊瑚泥龟裂 HPMC 改性机制讨论

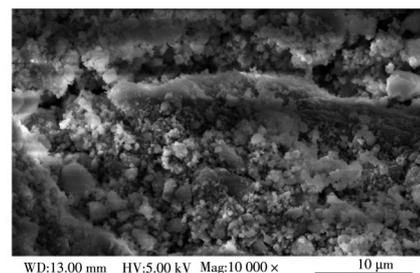
试样 S1、S2 的微观结构如图 9 所示,为探究 HPMC 的掺入对珊瑚泥微观结构的影响,对比试样 S1、S2 的微观图片可以发现,在试样 S1 中,未添加 HPMC 时,珊瑚泥土样疏松,且部分土样颗粒间存在无效黏接及大量孔隙(见图 9(a))。在试样 S2 中,HPMC 掺量为 0.1% 时,土样颗粒相较 S1 更紧密,原有大孔隙被 HPMC 与珊瑚泥颗粒黏接形成的絮

凝状团聚体填充,一定程度上减少了土样的孔隙数量,且 HPMC 的掺入使得原本分散的土颗粒变得相对紧实,一定程度上抑制了土样裂隙的扩展。

裂隙的产生会破坏土体的完整性,导致局部土颗粒丧失胶结能力,使得土体的承载能力和整体稳



(a) S1



(b) S2

图 9 HPMC 改性微观结构对比

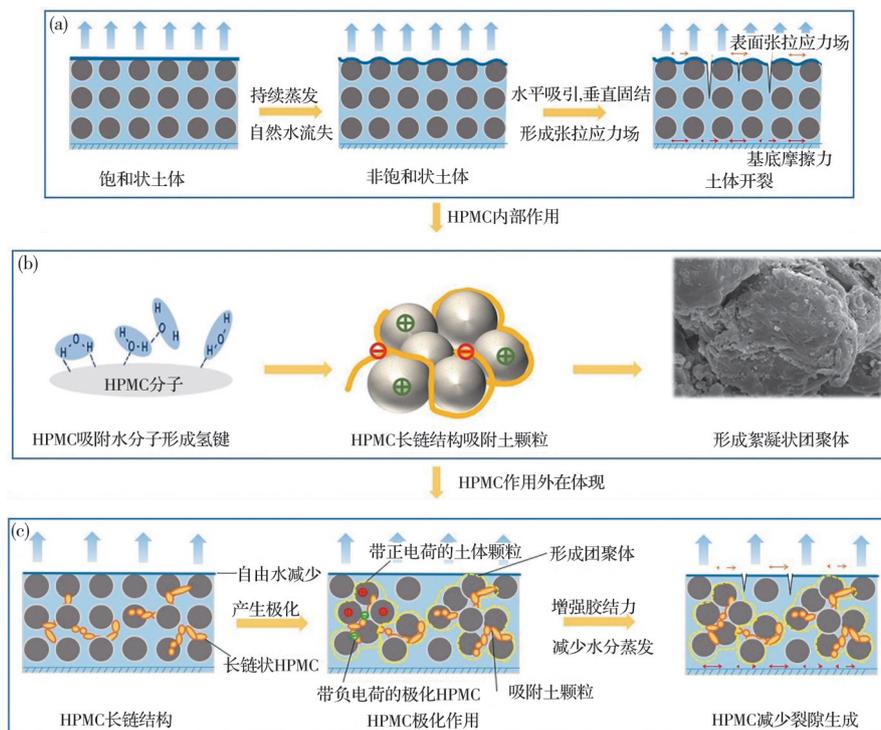
Fig. 9 Comparison of HPMC-modified microstructures

定性降低。土体龟裂受到水分蒸发<sup>[21]</sup>、土体内收缩空间<sup>[22]</sup>、张拉应力场<sup>[23]</sup>3个因素影响,如图10(a)所示,土体表面蒸发行为会导致土体状态由饱和态向不饱和态转变<sup>[24]</sup>,在土体内部产生毛细作用,从而导致土体体积收缩,因此认为水分蒸发是导致土体收缩与开裂的直接因素;其次,土体内部可收缩空间的存在为土体颗粒提供了可移动空间,即为土体开裂提供了条件,因此认为土体内存在可收缩空间是土体开裂的前提条件;土体干燥过程中内部水分的变化及毛细作用的产生会导致土体表面形成复杂张拉应力场,一旦土表张拉应力场失去平衡,土体裂隙则会产生,因此认为土体表面张拉应力场的存在是土体龟裂的重要力学诱因。

珊瑚泥的主要化学成分是 $\text{CaCO}_3$ , $\text{CaCO}_3$ 的存在能促进土颗粒间的结合并增强土体的保水能力,而HPMC属于高分子聚合物,为大分子线状结构,保水作用和黏结作用优越。将HPMC加入珊瑚泥土体内,其分别在土体内部与土体空气-水界面(即收缩膜处)产生作用,从而对珊瑚泥面层的龟裂行为产生影响。在土体内,HPMC存在结合、包裹、极化3种机制<sup>[25]</sup>;在空气-水界面上,HPMC存在扩散、渗透与吸附3种机制<sup>[26]</sup>,如图10(b)所示。HPMC分子结构中的羟基与醚基的氧原子具有较强的电负性,其孤对电子和水分子中氢产生吸引作用,形成氢键,使土体内部的自由水转变为结合水;HPMC

结构中的一些官能团还可使土体内的水分子产生极化作用,这种极化作用为HPMC分子链提供了电荷,使得HPMC存在吸附能力,并且HPMC的长分子链结构间会相互吸引、相互缠绕,且具备良好的成膜能力,能形成三维网络结构。由于HPMC的疏水基团(甲基)与亲水基团(羟丙基)分布在其主链上,HPMC在空气-水界面可以形成表面膜界面,阻止水分蒸发活动,因此,水分子在进入HPMC大分子链内部后会受到较强的约束,被包裹在三维网络结构内。在HPMC作用下,自由水一部分被转变为结合水,一部分被包裹在HPMC网络结构内,导致土体内部的水分子无法移动,自由水含量减少,且在表层自由水被消耗殆尽后,无法通过毛细水作用传递到土体表面以维持蒸发行为。同时,HPMC的极化作用吸附珊瑚泥颗粒,形成土体颗粒聚集现象,而这种絮凝状团聚体的形成,一定程度上使土体内部的大孔隙减少,小孔隙增加。

综上所述,HPMC对土体的改性作用如图10(c)所示,加入珊瑚泥土体后,HPMC在土体内部结合、包裹自由水,阻碍土体毛细水作用,降低了土表水分蒸发运动的速率。吸附珊瑚泥颗粒形成胶凝团聚体,减少土体内部孔隙与可收缩空间,增加土体基底的胶结能力。在土体空气-水界面扩散,降低土体表面张力,使得土体内的张拉应力场大小不易超过土体颗粒间的连接力,最终表现为抑制裂隙的产



注:(a)土体龟裂示意;(b)HPMC内部作用示意;(c)HPMC改性作用示意。

图10 HPMC改性作用示意图

Fig.10 Schematic diagram of HPMC modification mechanism

生。以上机制分析与试验探究结果相符,掺入 HPMC 的试样裂隙产生、发育速率均较未掺入 HPMC 试样缓慢,可以认为 HPMC 的掺入对珊瑚泥土体的龟裂行为有显著的抑制作用,对珊瑚泥土体的开发利用具有极大的促进作用。

## 4 结论

通过探究 HPMC 改性后珊瑚泥裂隙发育速率等龟裂参数的变化规律及裂隙的动态演化规律,对珊瑚泥龟裂 HPMC 改性机制进行讨论,得到以下结论:

1) HPMC 的掺入会显著影响裂隙各参数的发育速率,达到延缓珊瑚泥面层裂隙发育时间的作用,当 HPMC 掺量达到 0.5% 时,珊瑚泥面层几乎无裂隙产生。HPMC 能显著优化珊瑚泥面层的整体性能和抗裂性能。

2) HPMC 能改变土体裂隙形貌并降低土体的收缩性,有效降低土体破碎程度,并会影响裂隙的发育方向。

3) 加入 HPMC 后,减缓了珊瑚泥土体的水分蒸发活动;形成胶凝团聚体,减少了土体可收缩空间;其胶结作用增大了土体基底胶结力,表面扩散现象降低了表面张力,可抑制裂隙的发展。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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 X S, DING X M, JIANG C Y, 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)
- [3] ROKSANA K, HEWAGE S A, LOMBOY M M, et al. Desiccation cracking remediation through enzyme induced calcite precipitation in fine-grained soils under wetting drying cycles [J]. *Biogeotechnics*, 2023, 1: 100049.
- [4] 林鑫, 唐朝生, 程青, 等. 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7): 1311-1318.  
LIN L, TANG C S, CHENG Q, et al. Desiccation cracking behavior of soils based on digital image correlation technique [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(7): 1311-1318. (in Chinese)
- [5] FU T Z, SARACHO A C, HAIGH S K. Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: A comprehensive review [J]. *Biogeotechnics*, 2023, 1(1): 100002.
- [6] HE J, LIU Y, LIU L X, et al. Recent development on optimization of bio-cementation for soil stabilization and wind erosion control [J]. *Biogeotechnics*, 2023, 1(2): 100022.
- [7] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(4): 687-711.
- [8] 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.
- [9] TANG C S, SHI B, CUI Y J, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(9): 1088-1101.
- [10] 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): 1801-1812.  
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): 1801-1812. (in Chinese)
- [11] LIU C, CHEN Y N, XIONG Y L, et al. Influence of HPMC and SF on buildability of 3D printing foam concrete: From water state and flocculation point of view [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 242: 110075.
- [12] 李龙, 李北星, 陈鹏博, 等. 外加剂对磷建筑石膏的改性及其机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(7): 2400-2410.  
LI L, LI B X, CHEN P B, et al. Modification and mechanism of phosphorus building gypsum using admixtures [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(7): 2400-2410. (in Chinese)
- [13] 吴军虎, 任敏. 羟丙基甲基纤维素作土壤改良剂对土壤溶质运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 141-147.  
WU J H, REN M. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose as soil modifier on solute migration in soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(5): 141-147. (in Chinese)
- [14] 唐朝生, 王德银, 施斌, 等. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2298-2305.  
TANG C S, WANG D Y, SHI B, et al. Quantitative analysis of soil desiccation crack network [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2298-2305. (in Chinese)
- [15] 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): 391-416.
- [16] 高种晟, 诸剑峰, 方磊, 等. HPMC对水泥稳定全深式冷再生材料的性能影响研究[J]. *上海理工大学学报*, 2019, 41(3): 300-306.  
GAO Z S, ZHU J F, FANG L, et al. Effects of hydroxypropyl methyl cellulose ether on the full-deep cold regenerated mixture stabilized with cement [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2019, 41(3): 300-306. (in Chinese)
- [17] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials [J]. *Applied Clay Science*, 2011, 54(1): 97-106.
- [18] 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 C S, SHI B, CUI Y J. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(8): 1415-1423. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 易顺民, 黎志恒, 张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(3): 294-298.  
YI S M, LI Z H, ZHANG Y Z. The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(3): 294-298.
- [21] 欧阳斌强, 唐朝生, 王德银, 等. 土体水分蒸发研究进展[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3): 625-636, 654.  
OUYANG B Q, TANG C S, WANG D Y, et al. Advances on soil moisture evaporation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 625-636, 654. (in Chinese)
- [22] 唐朝生, 崔玉军, Anh-Minh Tang, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 1271-1279.  
TANG C S, CUI Y J, TANG A M, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1271-1279. (in Chinese)
- [23] 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.
- [24] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(6): 875-881.  
TANG C S, SHI B, GU K. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(6): 875-881. (in Chinese)
- [25] LIM C, SONG Y H, SONG Y, et al. Adaptive amphiphilic interaction mechanism of hydroxypropyl methylcellulose in water [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 565: 150535.
- [26] MANOUSAKIS M, AVRANAS A. Dynamic surface tension studies of mixtures of hydroxypropyl methylcellulose with the double chain cationic surfactants didodecyl dimethyl ammonium bromide and ditetradecyl dimethyl ammonium bromide [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 402: 237-245.

(编辑 胡英奎)