

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.079



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



微生物加固钙质砂压缩前后细观尺度变化 试验研究

吴秉阳¹, 王磊², 蒋翔³, 史金权¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 泉州市审计局, 福建泉州 362000; 3. 重庆交通大学材料科学与工程学院, 重庆 400074)

摘要: MICP是岩土工程领域新兴的一种环境友好型砂土加固技术, 可以用于提高钙质砂的工程性能, 但由于MICP加固钙质砂试样的复杂结构, 需要对其细观尺度展开研究以解释宏观现象。运用CT扫描技术, 对三轴压缩前后的微生物加固钙质砂试样进行三维重构, 分析加载前后试样细观尺度变化。研究发现, 使用CT扫描得到的二维灰度图像可以显示试样的孔隙分布, 且在二维灰度图像的降噪处理过程中非局部均值滤波算法具有良好的降噪效果。在此基础上进行三维重构, 结果表明, 加载前试样孔隙主要分布在试样高度方向1/3处、2/3处及试样两端, 加载后这部分区域的孔隙会有所增加, 即加载过程中试样的破坏主要集中在试样本身已有的薄弱区域。在三维重构基础上分割显著破坏面, 显示低应力水平下试样破坏模式为X共轭剪切破坏, 而在高应力水平下的破坏模式为单斜面剪切破坏。

关键词: 微生物加固钙质砂; 细观尺度变化; 孔隙分布; 破坏模式

中图分类号: TU472.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0074-07

Experimental study of fine-scale changes in MICP-treated calcareous sand before and after compression

WU Bingyang¹, WANG Lei², JIANG Xiang³, SHI Jinquan¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Audit Office of Quanzhou, Quanzhou 362000, Fujian, P. R. China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: MICP is an emerging environmentally friendly sand reinforcement technique in the field of geotechnical engineering that can be used to improve the engineering performance of calcareous sands. However, due to the complex structure of MICP-treated calcareous sand specimens, more work needs to be carried out at the fine-scale to explain the macroscopic phenomena. This paper employs CT scanning to perform three-dimensional reconstruction of MICP-treated calcareous sand specimens before and after triaxial

收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(52178313)

作者简介: 吴秉阳(1999-), 男, 主要从事微生物土、岩石的声发射物理统计研究, E-mail: wby8840@163.com。

蒋翔(通信作者), 男, 教授, E-mail: cqjiangxiang@163.com。

Received: 2023-04-12

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52178313)

Author brief: WU Bingyang (1999-), main research interest: acoustic emission physical statistics of rocks and biotreated soil, E-mail: wby8840@163.com.

JIANG Xiang (corresponding author), professor, E-mail: cqjiangxiang@163.com.

compression, and analyzes the fine-scale changes of the specimens. The results show that the two-dimensional grey-scale images obtained using CT scanning can demonstrate the pore distribution of the specimen, and the non-local mean filtering algorithm has a good noise reduction effect in the reduction process of the 2D grey-scale images. Based on this, 3D reconstruction was conducted on the MICP-treated calcareous sand specimens. The results showed that before loading, the pores of the specimens mainly distributed at one-third, two-thirds, and both ends of the specimens in the vertical direction, and the pores in these parts of the specimens would increase after loading. It is indicated that the damage to the specimen during loading mainly concentrated in the existing weak areas of the specimen itself. Segmentation of significant damage surfaces on the basis of 3D reconstructions shows that the damage mode of the specimen at low stress levels is X-conjugate shear damage, while at high stress levels the damage mode is of single bevel shear damage.

Keywords: MICP-treated calcareous sand; fine-scale changes; pore distribution; failure mode

MICP(Microbially Induced Calcite Precipitation)是岩土工程领域新兴的一种环境友好型砂土加固技术^[1-2],大量研究人员对利用MICP技术加固钙质砂展开了相关研究,发现经过MICP处理后,钙质砂强度和刚度均得到了较大程度的提升,并且随着加固程度的增大,提升效果更加明显^[3-4],在大尺度模型试验中也是如此^[5]。然而,MICP加固钙质砂试样是一种复杂结构的胶结颗粒固体材料,其宏观力学行为受到试样细观结构的影响,需要对此展开研究^[6]。电子计算机断层扫描(CT)技术具有无损检测以及能够观测材料内部细观结构等优点,一直被广泛应用于医用领域,近年来被引入岩土领域进行相关研究^[7]。Fan等^[8]利用CT技术展开了对冻融引起的土壤大孔隙变化的定量研究;Dadda等^[9]通过CT技术分析了MICP加固对砂土体孔隙填充的影响。CT技术也可以在试验过程中使用:蔡正银等^[10]通过CT技术研究了冻融循环下膨胀土的裂缝生长情况;蒲毅彬等^[11]则利用CT技术对黄土在单轴、三轴、渗水等作用下进行扫描和图像处理,观察土体破坏发展过程。CT技术具有的三维模型重构功能可以用于分析土体孔隙特征,从而研究土体的渗透特性^[12-13]。而通过对比试验前后试样的CT图像,可以得到土体内部各种组分的分布,从而研究微观结构与中观力学特性之间的关系^[14];也可以通过试验前后CT数统计值的变化,分析土体内部物质密度的变化以及岩体损伤程度^[14]。利用CT图像在分析砂土内部细观结构中的显著优势,笔者对三轴试验中加载前后的微生物加固试样进行CT扫描,基于CT图像评估试样加载前后细观尺度变化。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用钙质砂取自中国南海某岛礁,主要矿物成分为碳酸钙(含量达99.24%),颗粒表面存在

较多孔隙,筛选出的钙质砂粒径范围为0.15~1 mm,基本物理参数如表1所示。加固用菌液为巴士芽孢杆菌菌液,其OD₆₀₀为1~1.5,脲酶活性为0.15~0.25 mmol/(L·min);反应液是浓度均为1 mol/L的分析纯级尿素与氯化钙的混合溶液。

表1 钙质砂物理参数

Table 1 Physical parameters for calcareous sand

平均粒径/mm	最小干密度/(g/cm ³)	最大干密度/(g/cm ³)
0.75	1.06	1.24
不均匀系数	曲率系数	比重
2.33	1.34	2.79

1.2 试验设备

微生物加固钙质砂的岩石三轴压缩试验选用多场煤与瓦斯突出过程宏细观试验机,其三轴压缩功能模块测量精度高、性能稳定,能够进行位移控制加载,本研究试验的加载速率选择0.1 mm/min。

CT扫描试验使用SOMATOM scope型CT扫描系统,其X线球管最大电流为345 mA,额定X线电压为130 kV,最大扫描长度为153 cm,层厚范围为0.6~19.2 mm,空间分辨率为0.283 203 mm×0.283 203 mm×0.7 mm。

三轴试验机和CT扫描仪见图1。



(a) 试样 (b) 热缩管 (c) 三轴压力室 (d) CT扫描仪

图1 三轴试验机和CT扫描仪

Fig. 1 Triaxial testing machine and CT scanner

1.3 试验方案

首先制备MICP加固钙质砂试样,然后开展不同围压(0.5、1.0、2.0 MPa)下的岩石三轴压缩试

验,试验前后的试样均进行CT扫描。

三轴试样为直径50 mm、高度100 mm的圆柱体,控制相对密实度 $D_r=0.34$ 、孔隙比 $e=1.5$,使用分层湿装法制备3个相同的钙质砂试样。

制备好的试样用预先配制的菌液与反应液进行加固,加固方法为两相加固法,试样均加固10次。加固完成后松散的钙质砂形成密实的砂柱,从图2也可以观察到,钙质砂表面附着微生物诱导产生的碳酸钙,在形成碳酸钙外壳的同时,钙质砂颗粒接触点的碳酸钙也将钙质砂颗粒胶结在一起。

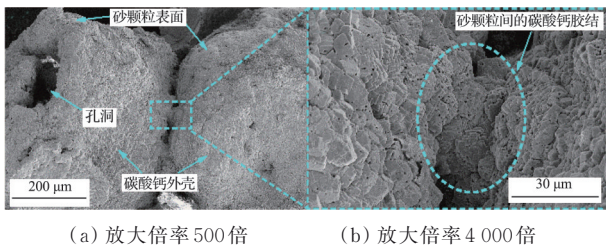


图2 钙质砂微生物加固后SEM图

Fig. 2 SEM photograph of calcareous sand sample after biotreatment

对微生物加固后的3个钙质砂试样进行CT扫描,扫描完成后进行三轴压缩试验,利用三轴压缩模块控制围压,选取在0.5、1.0、2.0 MPa 3个围压水平下对试样进行三轴压缩,均持续1 h,即在轴向位移达到6 mm时结束试验,试样均已发生破坏。在试验时试样外部被热缩管包裹,卸载后试样会发生部分回弹,但整体上使微生物加固钙质砂试样破坏后的状态得以保持。随后,取出三轴压缩后的试样进行CT扫描。

1.4 CT扫描试验原理

CT扫描利用X射线的穿透性对物质进行成像,其数据采集可在CT扫描系统上完成。X射线是一种具有高频率的电磁波,因此具有较强的穿透能力,其穿透能力取决于射线能量和物质密度。由于物质的密度差异,能量相同的X射线对射线能量的吸收和反射程存在差别,因此穿过物质后保留的能量不同。对于密度相近的材料,使用初始能量不同的X射线,其产生相同程度的能量衰减后所剩余的射线强度存在差异。

在CT扫描系统中,X射线信号发射源产生射线照射在试验试样上,穿过试样后被探测器接收并转换为光信号,再通过光电转换器转变为电信号,最终由数字转换器将电信号转化为数字信号。这样就可以得到试样的连续切片图像,进行三维重构,建立物质的三维模型,并利用图像处理技术提取模型中的有用信息进行分析。通过将加载前后的试样分别进行连续的X光照射扫描,得到一系列

切片图像,并根据CT扫描所得的试样连续切片图像进行三维重构,建立微生物加固钙质砂试样的三维模型。通过图像处理技术提取模型中的有用信息,可以对细观孔隙特征进行分析。

2 CT扫描试验及处理

2.1 CT扫描流程

在进行试样扫描时,需要按照一定的步骤操作。首先将样品台调整到初始位置,然后打开X射线源,并将试样放置在样品台上,尽可能将其对准射线源的中心位置。接着进行试拍,以确定扫描范围,同时对电压、电流强度等参数进行调整。然后开始正式扫描,沿着试样长度方向移动X射线源,设备系统会不断合成扫描面的图像。在射线源移动的方向(即竖直方向)上,每张切片的扫描间距确定为0.75 mm。扫描完成后,可以使用CT试验系统的图像重构软件生成一系列二维灰度图像,以便进一步分析和研究样品。

图3是由CT扫描所得的微生物加固钙质砂试样的二维灰度图像。由于密度不同的物质对X射线的吸收程度存在差异,CT扫描可以通过对不同区域X射线的吸收情况进行分析,从而得到不同密度物质的成像。物质的密度越大,对光子的能量吸收越多,则透过物质时的波数减少,会使CT成像底片的曝光更少、灰度值更低、颜色更白。

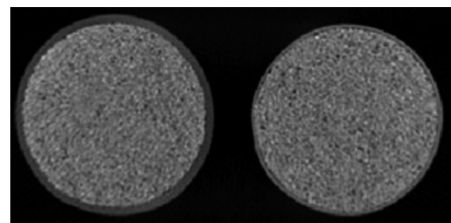


图3 CT扫描的二维灰度图像

Fig. 3 Two-dimensional grayscale image from CT scanning

如图3所示,二维灰度图像中灰度值较低、颜色较白的区域为微生物加固钙质砂试样,且区域颜色越白,该区域就越密实。在试样外圈的灰色区域代表热缩管,其灰度值略高于微生物加固钙质砂试样,但低于周边环境的灰度值。最外侧为外部环境,其密度为0,因而在图像中呈现最高的灰度值,颜色为黑色。

由CT扫描系统直接生成的二维灰度图像成像结果不能直接用于提取孔隙信息,此外,在扫描和成像过程中,由于噪声干扰存在于设备进行的一系列信号输入与信号转换中,外界环境中的电磁波、电流中电子运动的离散性以及光电信号转变时光子运动的随机性等会影响图像质量。因此,需要运

用数字图像处理技术对二维灰度图像进行降噪处理,并进行灰度分割、信息提取和建模重构等工作。

2.2 图像滤波

噪声会影响输出的灰度图像,导致一些像素点与周围像素的值差异很大,造成数值上的不连续,这会对试验结果的可信度产生影响。因此,需要对图像进行滤波处理来减少噪声的影响。常用的滤波方法有

高斯滤波算法(Gaussian Filter)、盒式滤波算法(Box Filter)、中值滤波算法(Median Filter)、递归滤波算法(Recursive Filter)、非局部均值滤波算法(Non-local Means Filter)。
高斯滤波算法是一种线性滤波方法,采用高斯函数对目标像素点周围一定相邻区域内的像素值进行加权平均运算,得到目标像素点的最终像素值。高斯滤波可以通过傅里叶变换或者离散化窗口滑窗卷积运算实现,该算法特别适用于去除正态分布形式的高斯噪声。盒式滤波算法为线性滤波方法,它主要在一定区域内对像素值进行求和运算,该算法的计算速度较快,但是容易丢失图像边缘的部分信息,导致结果的精度相对较低。中值滤波算法为非线性滤波算法,其基本理论是以目标像素点为中心,对相邻范围内的像素值进行排序,选取中位数代替目标像素点的像素值,其优点在于可以有效地消除图像中的随机噪声,同时不会造成图像边缘信息的损失,因而在图像处理领域中被广泛应用。递归滤波算法是一种利用递归函数计算像素值,然后将计算结果作为输入值进行下一次计算的滤波方法。相较于循环计算,递归滤波算法可以减少计算量,提高图像处理速度。

非局部均值滤波算法是均值滤波算法的一种类型,其原理是为减少离散数值的影响,对所计算像素点邻近区域内的所有像素进行平均计算,均匀平滑图像整体的像素值。在计算过程中,计算点相邻区域内的像素点与该计算点的距离存在差异,导致相邻各像素点与计算点在灰度数值上的不同。为解决该问题,非局部均值滤波算法以距离为指标,对计算点周边的各像素值赋予不同的权重系数,进行加权平均运算,将运算结果作为该计算点的像素值。这种算法有效地保留了图像信息,降低了噪声的影响,因而被广泛采用。

为选取合适的滤波方法,本文对图像采用不同的滤波算法进行处理比较。每种算法的降噪处理效果如图 4 所示,从结果对比中可以发现,非局部均值滤波算法在对 CT 扫描生成的灰度图像进行噪声平滑和过滤方面具有更好的效果。因此,该算法被选为对本试验中微生物加固钙质砂试样二维灰度

图像进行滤波处理的方法。

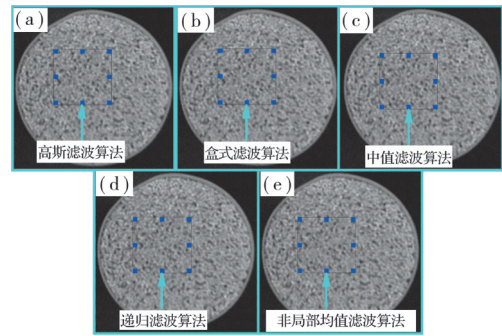
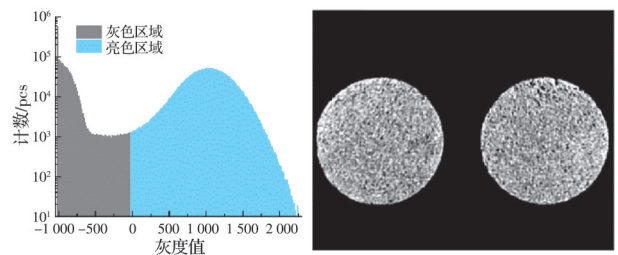


图 4 不同滤波算法的降噪处理效果

Fig. 4 Noise reduction processing effect of different filtering algorithms

2.3 孔隙信息提取

经过非局部均值滤波算法对 CT 扫描获得的二维灰度图像进行降噪处理后,可进一步进行孔隙信息提取工作。如图 5(a)所示,CT 图像中物质密度不同的区域呈现不同的灰度值。因此,可以根据这一属性采用二值化处理方法对图像进行处理,为区分微生物加固钙质砂试样骨架、孔隙、热缩管和外部环境,根据孔隙分割的要求设定灰度阈值,提取出数据处理所需的部分。经阈值分割后的效果如图 5(b)所示,通过设定合理的阈值,可有效区分微生物加固钙质砂试样骨架、孔隙和热缩管,即白色区域为试样骨架,试样内部黑色区域为孔隙,而在试样边缘有一圈灰色区域,此为热缩管,因厚度较小而不显著。基于这一结果,可使用处理后的 CT 扫描获得的二维灰度图像进行三维模型重构。



(a) 灰度直方图 (b) 阈值分割效果图

图 5 CT 图像灰度分布直方图和阈值分割效果图

Fig. 5 Gray histogram and threshold segmentation result of CT image

3 三维重构与试样细观尺度变化

3.1 三维重构结果

在 3 个围压水平下加载前后钙质砂试样的 CT 扫描图像处理的基础上进行三维重构。从图 6 来看,3 个微生物加固钙质砂试样在三轴压缩前孔隙分布大致相同,主要分布于试样垂直方向的 1/3 和 2/3 处,这两处位置恰是制样过程中采用分层装样

的层间位置。试样压缩前后的三维重构结果分别展示在图 6 和图 7 中, 试样装样时层间接触较为松散导致孔隙较多; 同时试样两端也存在少量的孔隙, 这可能是在微生物加固过程中反应液和菌液渗流导致的。在图 7 中可以观察到, 在三轴压缩后试样孔隙数量有所增加, 且这种增加的趋势表现在试样垂直方向的 1/3 和 2/3 位置以及上下端部处, 这些区域也是加载前试样孔隙集中的区域, 表明微生物加固钙质砂试样在加载前孔隙分布集中的位置在加载后会更密集。

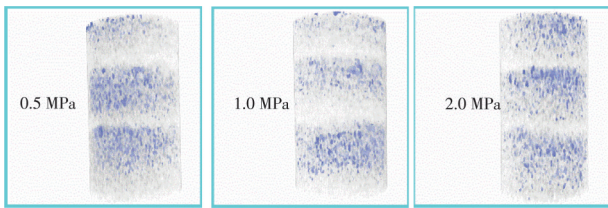


图 6 微生物加固钙质砂试样加载前的三维重构结果

Fig. 6 Three-dimensional reconstruction of biotreated calcareous sand sample before loading

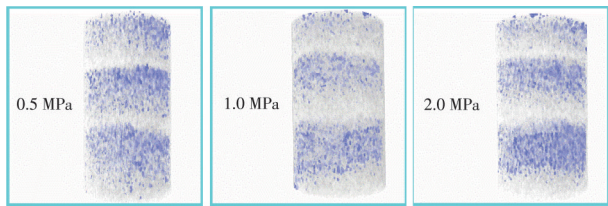


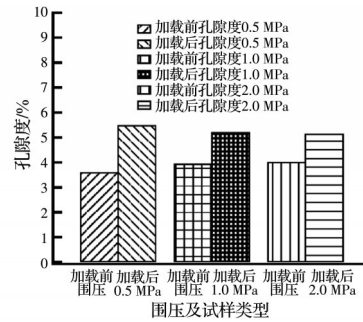
图 7 微生物加固钙质砂试样加载后的三维重构结果

Fig. 7 Three-dimensional reconstruction of biotreated calcareous sand sample after loading

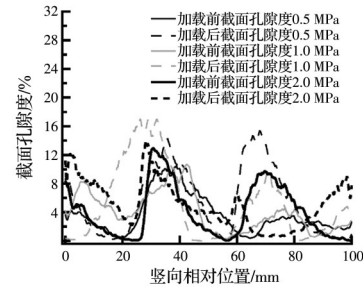
3.2 孔隙度分析

图 8 为 3 种不同的围压水平下, 微生物加固钙质砂试样在加载前后总体孔隙度和截面孔隙度的变化。总体孔隙度是试样中所有孔隙的体积占试样总体积的比例, 而截面孔隙度则是切片截面上孔隙面积与切片截面总面积之比。从图 8(a) 可以看出, 所选用的 3 种微生物加固钙质砂试样的孔隙度相似, 差异较小。然而, 加载后, 微生物加固的钙质砂试样的孔隙度增大, 而且增大程度随围压的增大而减小。这是因为微生物加固钙质砂试样在三轴剪切中发生颗粒破碎, 产生的块体和砂颗粒会错动和重排, 引起试样孔隙略微增大。这类似于砂土三轴剪切试验中常见的剪胀现象, 与先前的研究结论一致^[15-17]。此外, 随着围压的增大, 试样剪胀的趋势会不断减弱, 因此微生物加固钙质砂试样的孔隙增大程度会降低。

图 8(b) 为试样不同竖向位置上截面孔隙度的分布, 试样在加载前的孔隙主要集中分布于试样垂直方向的 1/3 处、2/3 处区域, 同时试样上下两端也



(a) 孔隙度



(b) 截面孔隙度

图 8 不同围压下微生物加固钙质砂试样加载前后的孔隙度

Fig. 8 Porosity of biotreated calcareous sand sample before and after loading under different confining stress

存在部分孔隙分布, 这与图 6 得到的结果相同。三轴加载后, 试样原有孔隙分布处的孔隙度普遍有所升高。此外, 虽然微生物加固钙质砂试样在垂直方向经过三轴压缩加载后存在一定程度的压缩, 但孔隙集中分布的垂直方向相对位置与加载前基本相同或仅有小幅偏移。这表明微生物加固钙质砂试样在加载前的孔隙集中分布区域为试样强度较弱的区域, 在三轴压缩过程中试样的破坏会主要发生在这部分区域。表 2 列出了微生物加固钙质砂试样在加载前后的孔隙度具体数值。

表 2 加载前后试样的孔隙度

Table 2 Porosity of the sample before and after loading

有效固结围压/MPa	孔隙度(加载前)	孔隙度(加载后)
0.5	0.036	0.054
1.0	0.039	0.052
2.0	0.040	0.051

3.3 显著破坏面分析

根据不同围压水平三轴压缩后微生物加固钙质砂试样的三维重构模型, 在显著破坏面上进行分割, 并生成正视图、侧视图和俯视图, 3 个试样的结果展示在图 9 中。正视图方向选择试样垂直方向为基准, 根据图 9 中的坐标系可知, 侧视图为正视图视角沿水平方向逆时针旋转 90° 之后的图像, 俯视图是由侧视图向上旋转 90° 之后得到的结果。根据这些视图可以发现, 经过显著破坏面分割后, 0.5、1.0 MPa 围压水平下的试样在三轴压缩时表现为 X 共

辄剪切破坏形式,其破坏面为双斜面,沿破坏面切割后试样大致呈圆锥形。而在2.0 MPa围压水平下,试样在三轴压缩时则表现为单斜面剪切破坏,显著破坏面为单一斜面。X共辄剪切破坏与单斜面剪切破坏均为剪切破坏,即试样薄弱面上的剪应力超过了其剪切强度,导致破坏。可能是因微生物加固钙质砂试样的差异性,试样内部结构薄弱面形成、分布各异,导致了X共辄剪切破坏与单一斜面剪切破坏两种剪切破坏模式的出现。

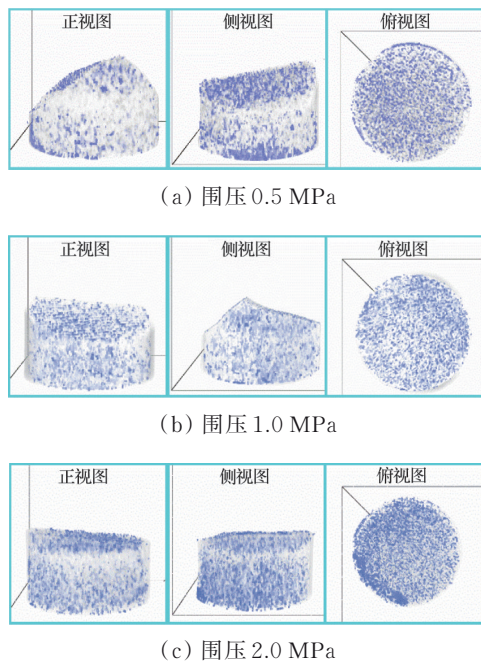


图9 加载后微生物加固钙质砂试样的三维重构结果

Fig. 9 Three-dimensional reconstruction of MICP-treated calcareous sand sample after loading

4 结论

对钙质砂进行微生物加固形成3个可用于三轴岩石压缩试验的圆柱体试样,试样在三轴压缩前后进行CT扫描,利用CT图像对微观尺度变化进行分析,主要得到以下结论:

1)对加载前微生物加固钙质砂试样的CT扫描三维重构结果显示,试样孔隙分布集中在试样高度方向的1/3处和2/3处,对应于分层装样的层高,孔隙也存在于试样的两端,提示微生物加固过程中液体渗流可能会导致试样两端的松散。

2)对比试样加载前后的三维重构结果,加载后试样的孔隙有所增多,且集中于加载前孔隙密集的区域,即试样高度1/3处和2/3处及试样两端,表明试样破坏主要发生在加载前试样已有的薄弱区域。

3)显著破坏面的三维重构模型显示,可能因试样内部结构薄弱面的差异,围压为0.5、1.0 MPa下

的三轴压缩破坏形式为X共辄剪切破坏,2.0 MPa下的破坏形式为单斜面剪切破坏。

参考文献

- [1] XIAO Y, HE X A, ZAMAN M, et al. Review of strength improvements of biocemented soils [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(11): 03122001.
- [2] BU C M, WEN K J, LIU S H, et al. Development of bio-cemented constructional materials through microbial induced calcite precipitation [J]. *Materials and Structures*, 2018, 51(1): 30.
- [3] TERZIS D, LALLOU L. 3-D micro-architecture and mechanical response of soil cemented via microbial-induced calcite precipitation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1416.
- [4] DARBY K M, HERNANDEZ G L, DEJONG J T, et al. Centrifuge model testing of liquefaction mitigation via microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(10): 04019084.
- [5] 刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究[J]. *地基处理*, 2019, 1(1): 26-31.
LIU H L, MA G L, XIAO Y, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2019, 1(1): 26-31. (in Chinese)
- [6] 雷东霖. 基于CT图像处理的微生物诱导加固钙质砂微观结构研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
LEI D L. Study on microstructure of calcareous sand reinforced by microorganism based on CT image processing [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022. (in Chinese)
- [7] 张革, 刘恩龙. 基于CT动态扫描的冻土细观二元介质本构模型[J/OL]. *岩土工程学报*, 2023: 1-9. (2023-03-07) [2023-04-12]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20230306.0850.002.html>.
ZHANG G, LIU E L. Binary-medium constitutive model for frozen soil based on CT dynamic scanning[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*: 1-9. (2023-03-07) [2023-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20230306.0850.002.html>.(in Chinese)
- [8] FAN W H, YANG P, YANG Z H. Freeze-thaw impact on macropore structure of clay by 3D X-ray computed tomography [J]. *Engineering Geology*, 2021, 280: 105921.
- [9] DADDA A, GEINDREAU C, EMERIAULT F, et al. Characterization of microstructural and physical properties changes in biocemented sand using 3D X-ray

- microtomography [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(5): 955-970.
- [10] 蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4555-4563.
CAI Z Y, ZHU X, HUANG Y H, et al. Influences of freeze-thaw process on evolution characteristics of fissures in expansive soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4555-4563. (in Chinese)
- [11] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的CT结构变化研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1): 49-54.
PU Y B, CHEN W Y, LIAO Q R. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(1): 49-54. (in Chinese)
- [12] HAMAMOTO S, MOLDRUP P, KAWAMOTO K, et al. Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters [J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56(4): 676-690.
- [13] NGUYEN T T, INDRARATNA B. The role of particle shape on hydraulic conductivity of granular soils captured through Kozeny-Carman approach [J]. *Géotechnique Letters*, 2020, 10(3): 398-403.
- [14] 何东进. CT图像在岩土工程研究中的分析方法[J]. *施工技术*, 2018, 47(Sup4): 1771-1774.
HE D J. Analysis methods of CT image in geotechnical engineering [J]. *Construction Technology*, 2018, 47 (Sup4): 1771-1774. (in Chinese)
- [15] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [16] FENG K, MONTOYA B M. Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(1): 04015057.
- [17] LIN H, SULEIMAN M T, BROWN D G, et al. Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(2): 04015066.

(编辑 胡玲)