

简 明 教 程

黎澄生

1964977182@qq.com

<https://github.com/lichengshengHK/iDVC>

汕头大学/中国科学院武汉岩土力学研究所

目录

基于 iDVC 的相关成果	1
iDVC 使用流程图	2
一 软件运行.....	3
1.1、软件运行环境	3
1.2 密钥申请	3
1.3 运行软件	4
二 DVC 前期处理模块	5
2.1 分割阈值选取	5
2.2 Z 轴方向的某体积含量计算.....	7
2.3 XY 平面旋转角度调整	8
2.4 生成.mat 格式的三维矩阵数据	9
三 DVC 计算	10
3.1 计算参数设置	10
3.2 DVC 执行计算.....	12
3.3 二次编辑	13
3.4 不规则形状材料的 DVC 计算.....	14
四 应变计算.....	15
4.1 位移场修正与平滑	15
4.2 应变场计算	16
4.3 位移场坐标系投射	17
五 后处理显示.....	18
5.1 三维剖面显示	18
5.2 三维曲面显示	21
六 常见问题.....	22
附录 1-交互执行代码	23
F1-1 不规则形状计算区域标记.....	23
F1-2 采用云点显示不规则云场.....	23
F1-3 采用散点显示不规则云场.....	23
附录 2 基于 iDVC 的分析实例	25
F2-1 应变场-剪切带分析	25
F2-2 复杂次生裂隙分析.....	28

基于 iDVC 的相关成果

DVC 算法	1	Accurate and simple digital volume correlation using pre-interpolation <i>Measurement Science and Technology</i> https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab85b0
裂隙 分类 分析 方法	2	Evolution of cracks in the shear bands of granite residual soil <i>Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering</i> https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.028
	3	花岗岩残积土复杂次生裂隙的分类与损伤特征 <i>岩土力学</i> https://doi.org/10.16285/j.rsm.2023.0713
	4	花岗岩残积土剪切带上的细观结构损伤规律 <i>岩土力学</i> https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.1732
	5	Determination of damage evolution characteristics in granite residual soil shear bands by micro-CT-based advanced digital volume correlation <i>Engineering Geology</i> https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107505
相关 应用	6	Dynamic three-dimensional imaging and digital volume correlation analysis to quantify shear bands in grus <i>Mechanics of Materials</i> https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103646
	7	Experimental investigation of damage evolution characteristics of coral reef limestone based on acoustic emission and digital volume correlation techniques <i>Rock Mechanics and Rock Engineering</i> https://doi.org/10.1007/s00603-022-03186-y
	8	Mesoscopic measurement of damage and shear bands of granite residual soil using Micro-CT and digital volume correlation <i>Journal of Mountain Science</i> https://doi.org/10.1007/s11629-023-8159-6
	9	Evolution of Shear Band in Plane Strain Compression of Naturally Structured Clay with a High Sensitivity <i>Applied Sciences</i> https://doi.org/10.3390/app12031180
	10	平面应变条件下不同裂隙方向原状膨胀土变形破坏性状与剪切带演化特征 <i>岩土力学</i> https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.1433

QQ 讨论群: 544465573 (FreeDIC/iDVC 测量分析)

视频教程 (b 站): “数字图像测量”



一 软件运行

1.1、软件运行环境

如果没有安装完整版 **MATLAB2019b**，则必须要下载安装 **MATLAB 2019b runtime**（官网免费），链接：

<https://ww2.mathworks.cn/products/compiler/matlab-runtime.html>

1.2 密钥申请

正确运行软件需要密钥，请在 **GitHub** 下载申请表格，填写相关内容，发送至开发者 QQ 邮箱 1964977182@qq.com，免费返回 **iDVC-key.mat** 密钥文件。

其中，主机名称、CPU 序列号的获取，可参考图 1.1。



图 1.1 获取计算机主机名

CPU ID 可参考图 1.2 方法获取，在 **cmd** 或者 **shell** 里面输入：“**wmic cpu get processorID**”可获得相关硬件信息。

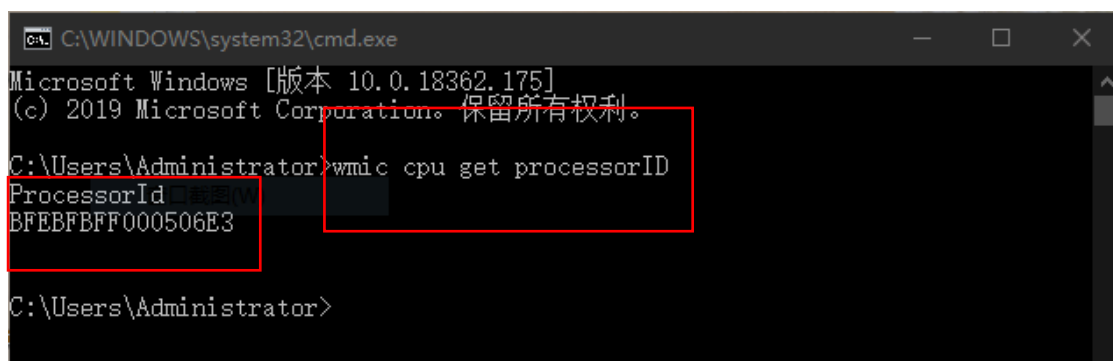


图 1.2 获取计算的 CPU ID

1.3 运行软件

启动 iDVC 软件出现如图 1.3，点击【License 验证】，出现图 1.4，在点击【Licence】加载 iDVC-key.mat 文件路径，点击【CHECK】，生成 License.mat 文件（用于 iDVC 执行检验）。

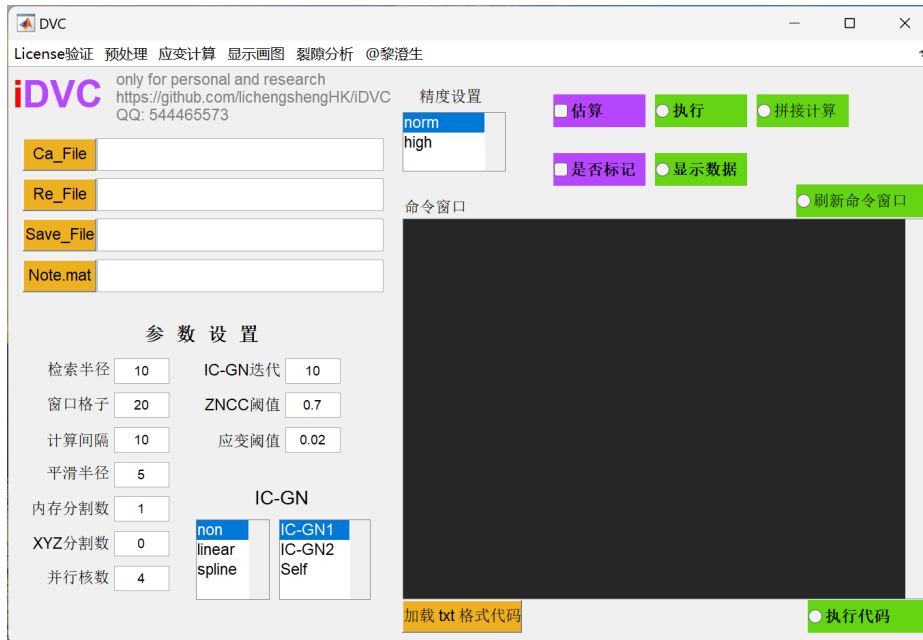


图 1.3 软件主界面

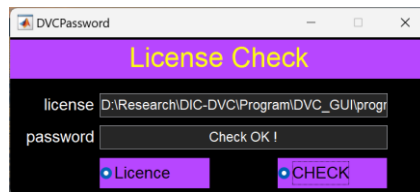


图 1.4 加载并验证 License

如果 License 错误或支持时间过期，会出现如下结果：

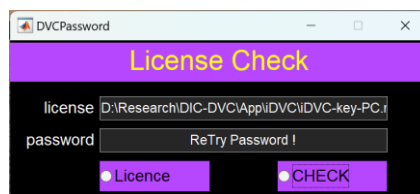


图 1.5 License 出现错误显示

注：软件的放置文件路径不能有中文！！

二 DVC 前期处理模块

2.1 分割阈值选取

点击 iDVC 主界面中的【预处理】，出现图 2.1 界面。

如图 2.1，提前选取好保存路径【Save】、参考图像【V0】和当前图像【V1】文件 path（注：当前仅支持 tif 格式，非 RGB 的 3 层数据格式，最好是 uint8 格式，降低内存需求）。阈值的选取是为了调整两个 CT 数据在 Z 上的匹配，减少后期 DVC 计算压力，同时也提高准确度。

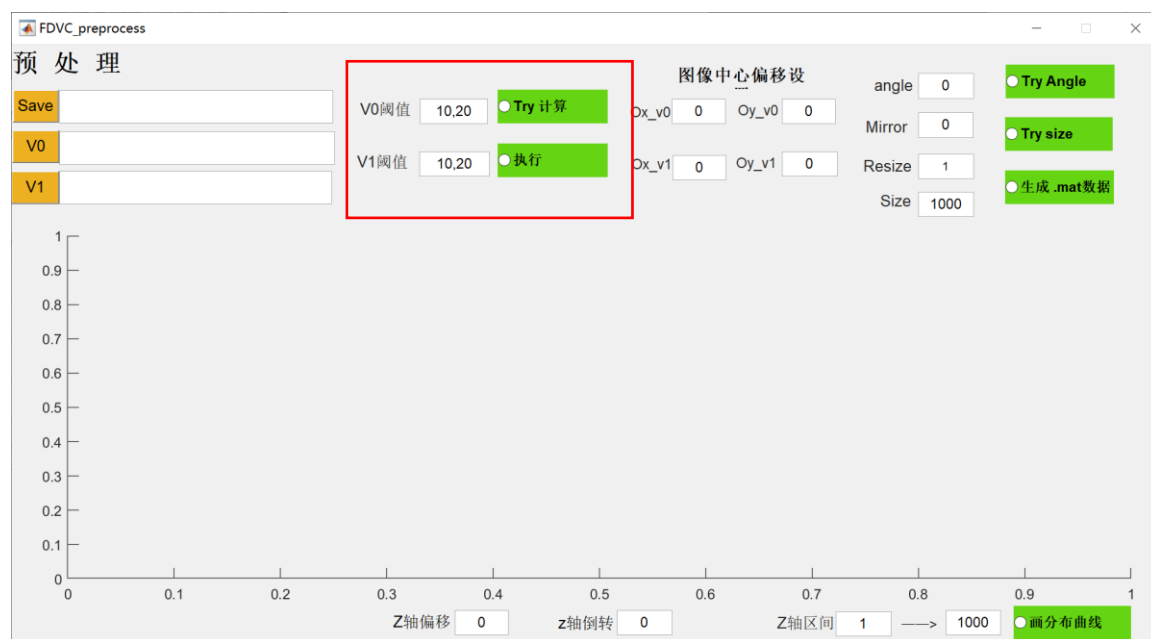


图 2.1 iDVC 的预处理界面

一开始,可以随机选取分割阈值,比如“0,1”(只能是这种形式,两个数值中间一个英文逗号,且必须是英文),单后点击【Try 计算】,根据结果中最突出稳定的材料来选取合适阈值。如图 2.2 所示,此材料是花岗岩残积土,含有黏土和石英颗粒,而石英颗粒是比较稳定的,可以初步获得图左侧的灰度值分布规律。

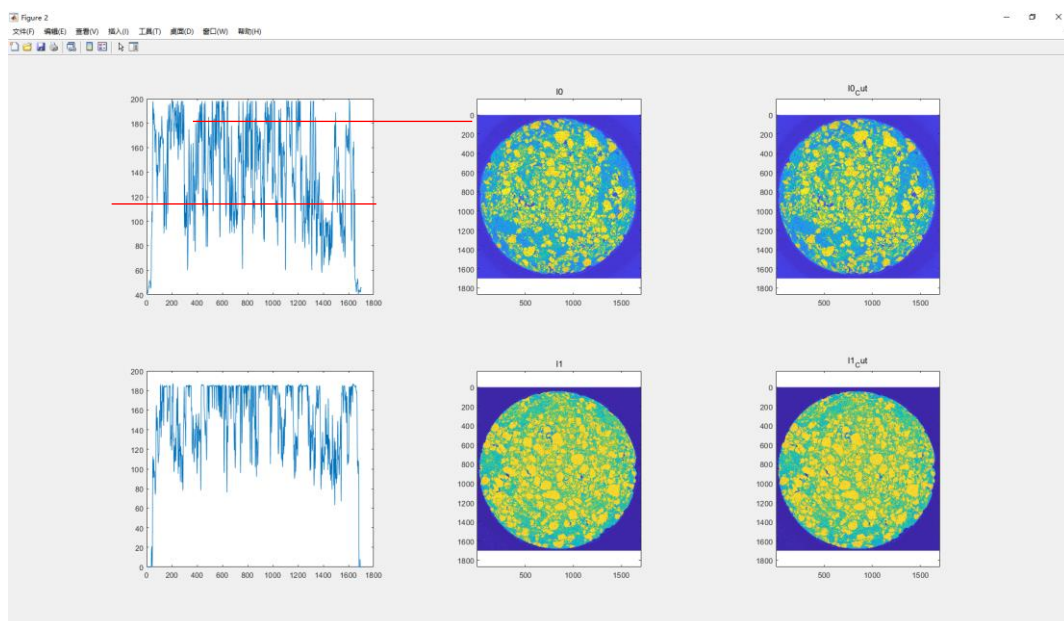


图 2.2 花岗岩残积土中石英颗粒的灰度值分布

根据上图的剖面图可以确认石英颗粒大概的灰度值范围（不需要非常准确）为“120,200”，得到如下图，依据 2-3，5-6 的对比效果不断调整阈值范围直至合理为止。

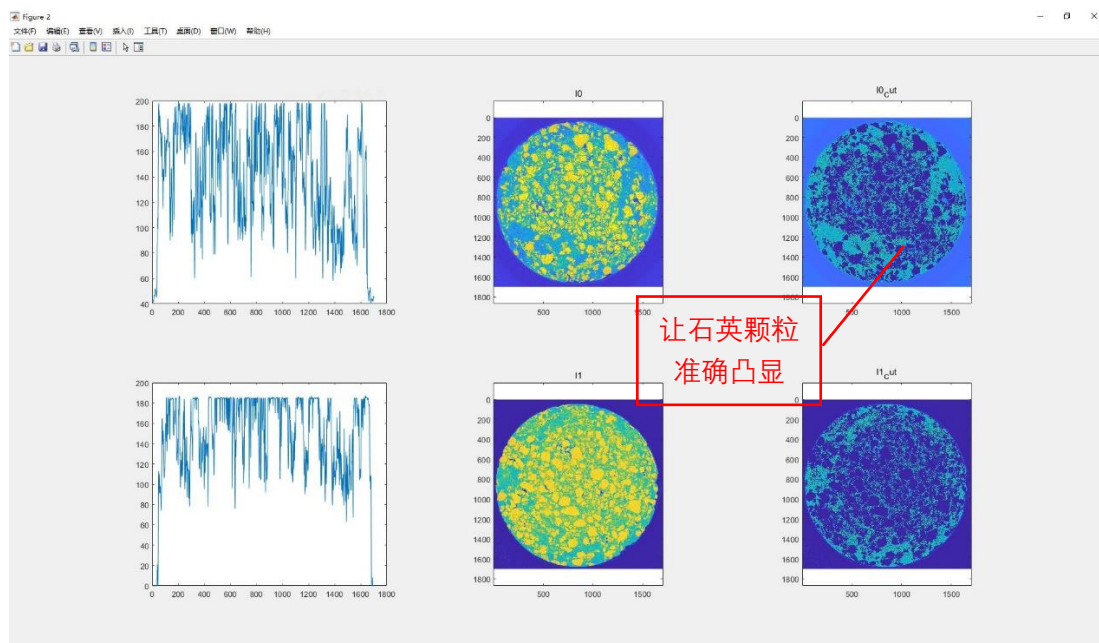


图 2.3 调节合理阈值后的分割效果

2.2 Z 轴方向的某体积含量计算

当选取合适的阈值后，点击【执行】计算某灰度范围内的 Z 轴含量分布，将生成 `content.mat` 和 `Z.mat`。

点击【画分布曲线】画出 Z 轴分布曲线。如果 CT 扫描过程中试样有颠倒，在【Z 轴倒转】中选取“1”（原位实时加载一般不会出现该情况）。

选择相应的【Z 轴偏移】来使两条曲线变化趋势尽量匹配。

选取适当的【Z 轴区间】，来选取需要计算的层范围，只要曲线吻合好，可尽量取大一些，最终结果如下图所示：



图 2.4 Z 轴方向的显示与偏移调整

注意：如果【Z 轴区间】选择范围超过图片文件数量，不然无法生成 volume image。

2.3 XY 平面旋转角度调整

同样也是为了减少计算误差，进行角度匹配（注：如果是实时同步加载，设置为 0 就行，但必须要点击【Try_Angle】（0-360°）生成相应的设置参数）。通过不断对比结果调试获取合理的角度匹配。如图 2.5 所示：

注意：

- （1）如果原始 CT 图片不是居中的，需要采用【Ox, Oy】进行调整
- （2）如果前后 tif 图片尺寸不同，需要调整【Size】

对上述 2 组参数的调整，可以直接点击【Try size】来调节中心偏移参数和 Size 参数。

最终的匹配效果如图 2.6 所示



图 2.5 xy 平面旋转与中心位置调整参数

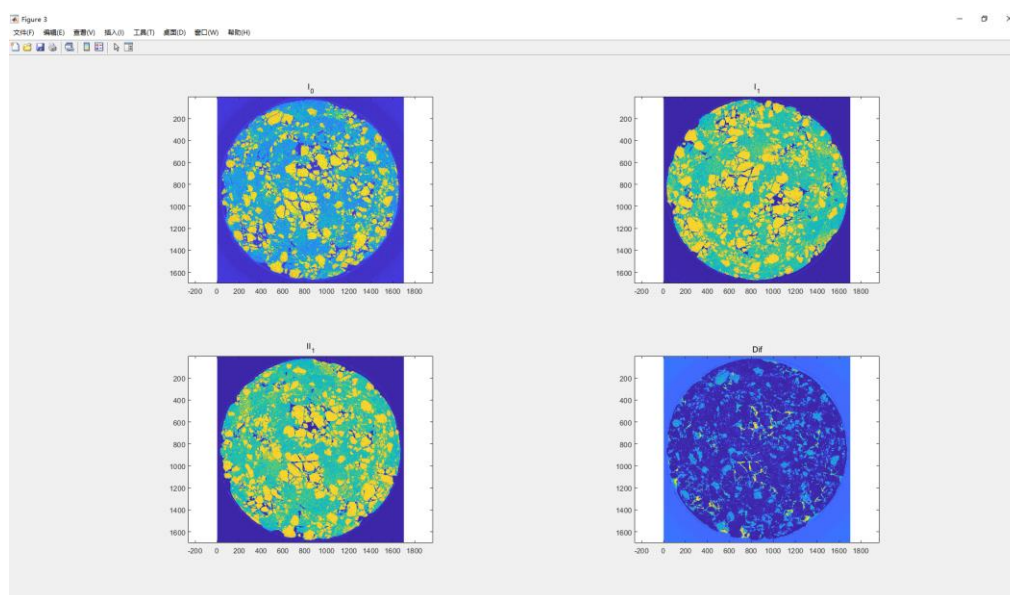


图 2.6 花岗岩残积土石英颗粒旋转调整匹配效果

2.4 生成.mat 格式的三维矩阵数据

当前面参数全部设置合理后，即可生成矩阵。但需要注意的是：

- (1) 如果 CT 矩阵很大（相比计算机的内存），可以选择合适的【**resize**】来降低内存的压力，比如选取“0.5”，原来 1000^3 的矩阵将转化成 500^3 的矩阵；
- (2) 如果感兴趣的区域比较小，可以选择【**Size**】来进行正方形切割，具体可以【**Try size**】的效果来确定。如果图形有中心偏移，根据前一节的参数进行调节。【注，该功能已不建议使用，可以参考不规则区域的选取，不规则计算区域的设置可以尽量提高计算区域的范围】

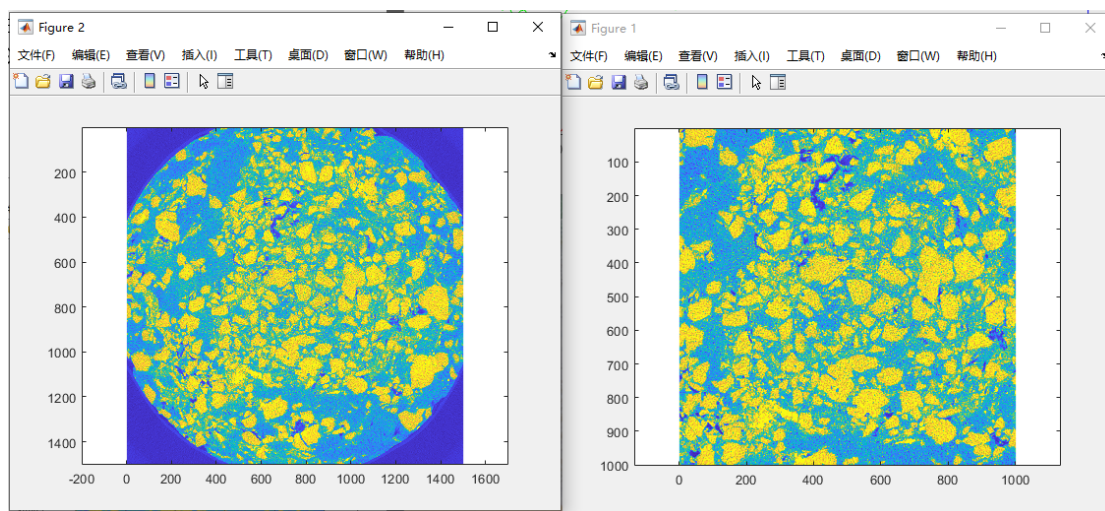


图 2.7 计算区域的正方形切割

当全部参数确认无误后，可以点击【**生成.mat 数据**】，最终生成‘V0.mat’和“V1.mat”。

注：

1、如果文件名太长，特别是数值太长，有可能无法处理，这时需要重新命名简单的文件名，具体操作如下：

批量修改文件名：首先打开需要批量修改文件名的文件，然后在键盘上按ctrl+a全选，然后右键重新命名，修改文件名，最后敲击回车就完成了对文件名进行批量修改了。

其实批量修改文件名非常简单，打开需要批量修改名称及排序的文件，ctrl+a 全选，右键选择重命名给第一个文件命名，修改结束后回车，文件名称已修改，并且出现序号排序自动排序。如果在操作中出现失误，可以按Ctrl+Z进行撤销，重新修改即可！

2、遇到无法生成 V0.mat 数据时，检查是否每个功能按钮都进行了？因为数据生成依赖前面部分文件结果。

三 DVC 计算

3.1 计算参数设置

iDVC 主界面如图 3.1 所示。

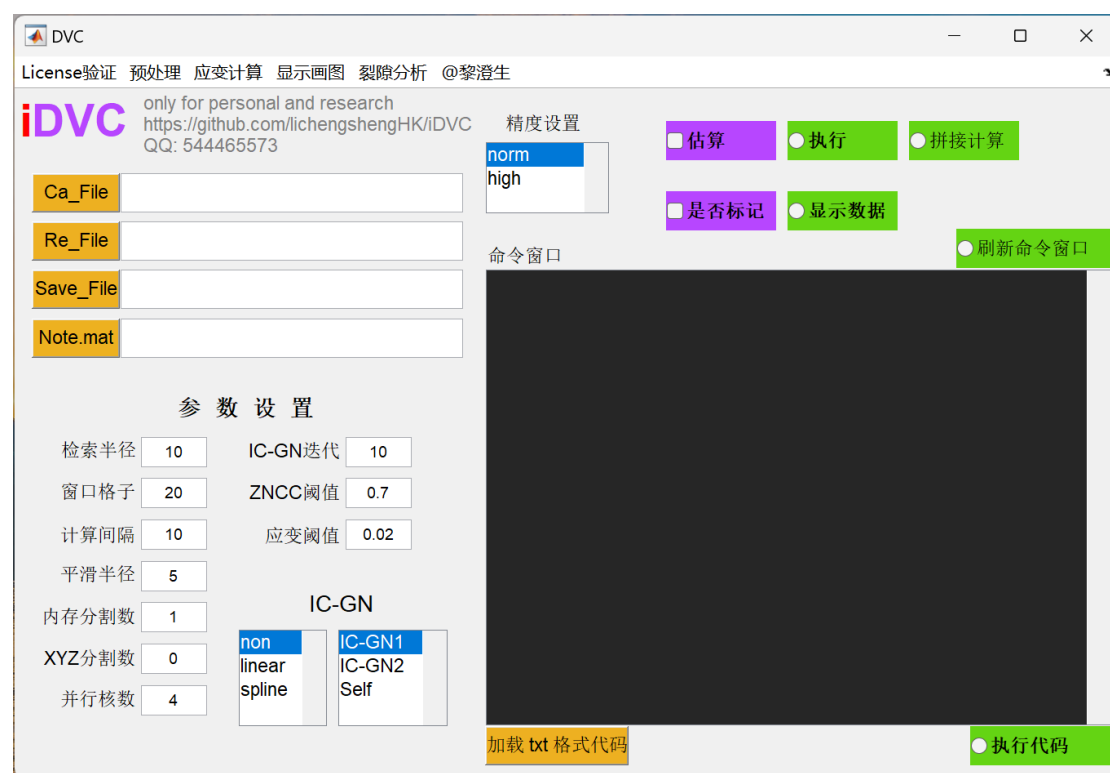


图 3.1 iDVC 主界面

设置好【Ca_ile】和【Re_ile】(打开参考 V0.mat 和当前 V1.mat 文件, Ca_File 为需要计算的数字体图像, Re_File 是用于参考的数字体图像)

【Save_File】结果文件保存路径。

【Note.mat】选取标记好计算区域的数据, 通常为 V0_note.mat。

DVC 计算所需的参数详细设置:

- (1) 【检索半径】单位是体素, 最大的可能位移; 配合后面的【估算】模块进行调节合适数值, 一般要稍微大一些。
- (2) 【窗口格子】单位体素, 计算格子半径, 选取“20”则计算窗口为“41” ($2 \times n + 1$), 小应变用大窗口, 大应变用较大的窗口。(至少能够反映图片中纹理特征所对应的窗口格子)
- (3) 【计算间隔】网格状计算间隔; 数值越小, 计算数据密度越大。
- (4) 【平滑半径】是高斯滤波半径, 在 CT 扫描中一般会出现一些噪声, 进行预处理掉, 如果已经处理过了, 可以选取较小的值。

- (5) **【内存分割数】**用于减小内存需求操作，当数据很大时（比如矩阵大于 500^3 ）可选择“3”，数据较小时可选择“1”，一般大可选择“2”。
- (6) **【XYZ 分割数】**当计算内存小但计算数据很大时可选用，比如选取“2”进行 $2^3=8$ 分割。
- (7) **【并行核数】**设置并行计算核数，最大为“8”； 最理想是选择 CPU 的物理核数，而不是线程数。
- (8) **【IC-GN 迭代】**IC-GN 迭代计算最大次数。
- (9) **【ZNCC 阈值】**当计算的 ZNCC 小于该阈值则需要重新修正。
(注：当自身数据散斑或纹理特征很差时，这个阈值要调小)
- (10) **【应变阈值】**定义大变形的阈值。
- (11) IC-GN 插值方法 **【non, linear, spline】**对应不同精度需求。
- (12) IC-GN 插值方法 **【IC-GN1, IC-GN2, Self】**对应不同精度需求；推荐使用 IC-GN1。
- (13) 计算速度选择 **【norm, high】**选择正常速度“norm_s”、高速度“high_s”；建议使用‘norm’，否则对内存的需要急剧增大；

3.2 DVC 执行计算

3.2.1 估算

【估算】在计算初期，需要动态调整【检索半径】，根据当前的结果进行调整，会生成 `DD_first.mat`，并在命令窗口显示必要的计算过程信息。

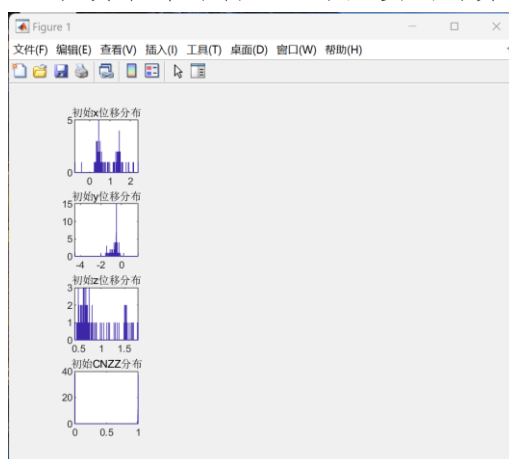


图 3.2 未经 ZNCC 阈值修正的位移场分布

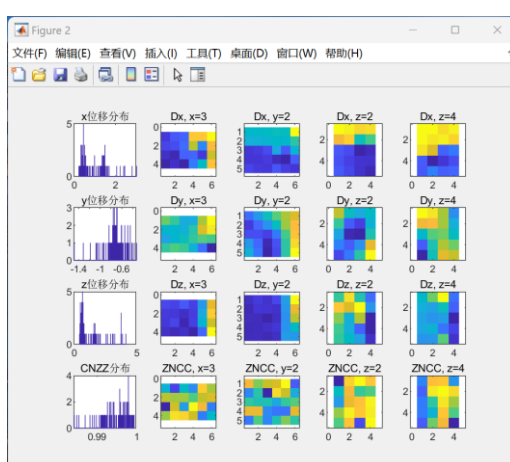


图 3.3 经 ZNCC 阈值修正后的位移场分布

3.2.2 计算项目提交

当前通过【估算】调整确定计算参数后，【估算】必须要取消。

然后点击【执行】进行 DVC 主体计算，计算过程会在【命令窗口】动态显示计算过程信息，最后生成 `DVC.mat`。

注：【拼接计算】用于前后变形过大的情况。一般采用计算相邻变形较小的数据，然后整体拼接生成完成的一系列应变场。但该功能比较复杂，暂时未完成模块开发。有需要的学者可联系 QQ 邮箱。

3.3 二次编辑

如果对计算结果需要修正或其余操作，可选用二次编辑功能，该功能可执行大部分 MATLAB 自带函数和自己编写的代码，但需要注意的是：在代码中不能出现“%”符号。

1) 如果有编写好的模块代码可以保存成 TXT 文档（仅支持 TXT），选择【加载 txt 格式代码】即可加入并在【命令窗口】，同时也可在【命令窗口】直接进行修改；

2) 在执行【执行】之前，必须要选取【Ca_File】数据。

注：更加建议的是，自己把数据导入 matlab 或第三方软件，再进行编辑。

3.4 不规则形状材料的 DVC 计算

3.4.1 不规则形状的区别

iDVC 软件中所使用的规整数据为：“方块形”；其余像：圆柱形、椭圆形、环形等均属于不规则形状，其中岩土试验常用的圆柱样属于不规则形状。

3.4.2 不规则形状数据的预处理

如果需要计算的几何外形不规则，需要根据灰度特征值进行标记计算区域。

操作细则参考 6.1。

【Ca_File】 选择 **V0.mat** 文件；

然后执行 **6.1** 代码，生成 **V0_note.mat** 标记矩阵数据。

3.4.3 不规则形状数据的计算

完成 **【预处理】** 处理后；

其余全部按照正常步骤，其中 **【Note.mat】** 选择 **V0_note.mat** 文件，然后必须勾选 **【是否标记】**，最后点击 **【执行】** 提交完整计算。

四 应变计算

点击 iDVC 主界面中的【应变计算】，出现图 4.1 界面。

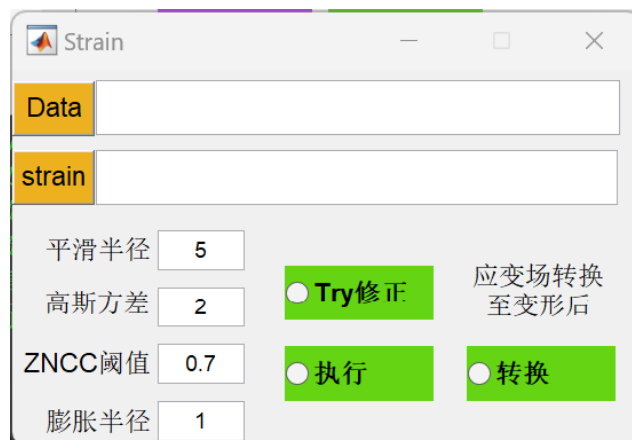


图 4.1 iDVC 应变计算模块界面

4.1 位移场修正与平滑

应变计算基于最小二乘法。

- (1) **【Data】** 选取 DVC 计算结果文件 **DVC.mat**;
- (2) **【平滑半径】** 高斯平滑半径，一般选取“5-10”
- (3) **【高斯方差】** 一般选取“1-3”用于平滑数据；
- (4) **【ZNCC 阈值】** 小于该阈值需要进行平滑修正；
- (5) 参数选择 OK 后，可执行 **【Try 修正】**，修正、平滑三维位移场；当前后的‘ZNCC 阈值’相同时，不会执行 Try 修正计算（如有其它参数改动，可以对 ZNCC 阈值进行小数值改动）；

4.2 应变场计算

【执行】完成整体的应变场计算，将生成如下数据：

Data	说明
XX_XX_para	最小二乘法求解拟合参数
DVC_Dx/Dy/Dz	平滑前的 x,y,z 方向位移场，单位：体素
DVC_R_D1/D2/D3	<u>已删除该功能</u>
DVC_R_Dts	总位移场 $ts = \sqrt{Dx^2 + Dy^2 + Dz^2}$
DVC_R_Ds	等效应变
DVC_R_Dv	体应变
DVC_R_Dx/Dy/Dz	平滑后的 x,y,z 方向位移场
DVC_R_Dxx/Dyy/Dzz	x,y,z 方向上的应变场
DVC_R_Dxy/Dyz/Dzx	剪应变

4.3 位移场坐标系投射

当前的位移场和应变场的数据均是在当前计算当前坐标系,有些事时候需要把应变场转换至变形后的坐标系。

具体操作:

【Data】选择 DVC.mat,

【strain】选择需要转换的应变场结果.mat,

【膨胀半径】选择小正整数,用于腐蚀表层边界误差;

最后点击【转换】,可生成‘xxx-Con.mat’形式结果。

五 后处理显示

点击 iDVC 主界面中的【显示画图】，出现图 5.1 界面。



图 5.1 iDVC 画图显示模块界面

5.1 三维剖面显示

5.1.1 方块形数据显示

【Date】加载应变计算结果，比如等效应变 Ds.mat，由于边界很容易出现计算错误，因此可以在 xyz 进行首尾端截取，x1,x2,y1,y2,z1,z2 可输入大于 0 的整数（或者在命令窗口界面输入，V=V(30:end-30,15:end-15,122:end-12)），根据结果**【切割显示】**进行调整（如下图所示）。当参数确认后，同时会生成切割后的 Ds_Cut.mat 数据。

三维云图显示的参数调整：

形态学修正：腐蚀-开运算半径，修正不规则几何形状，剔除表层的部分异常数值。

数值范围：当没有确认的显示数值范围时，**【最小值】**和**【最大值】**选择字符，比如“n”，此时会显示全部注释范围内的结果；当需要选择范围时可以直接选择需要显示的范围。

色条范围：c1-c2，选择已知的色条数值范围，突出所需要的范围值。

云图透明度：三维云图的透明度设置。（0 对应完全透明）

背景、灯光、标题、边界颜色、曲面颜色：可以根据需要设置

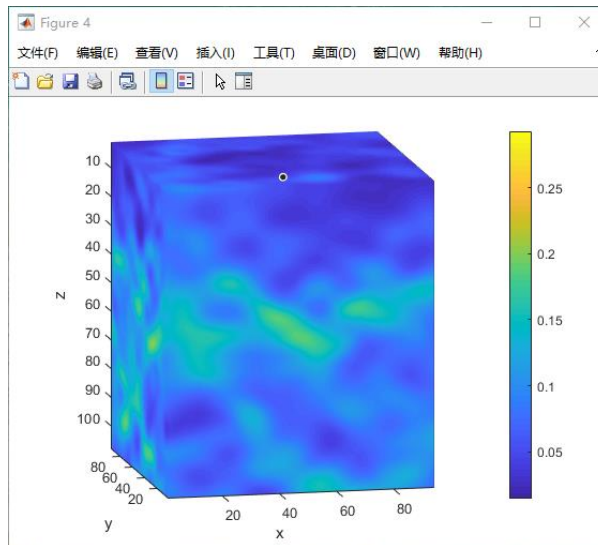


图 5.2 等效应变场的规则形状显示

5.1.2 不规则形状显示

当在进行了不规则数据的 DVC 计算时，对于未计算的区域会标记成 **nan**；无需对 XYZ 切割数据进行调整，形态学修正、数值范围等还需要按需调整。点击【切割显示】可得到不规则形状的三维云图，如图 5.3。

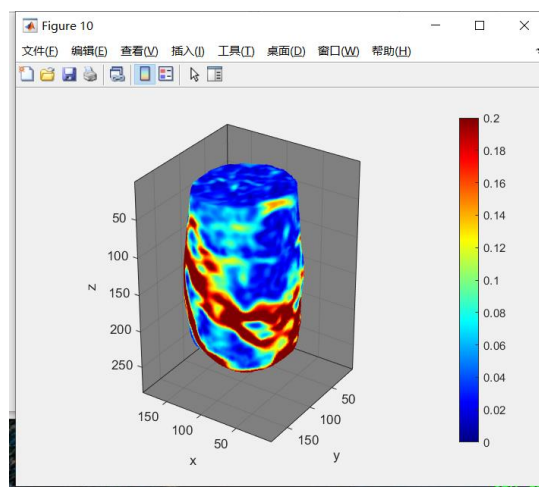


图 5.3 不规则形状的三维显示

如果需要对体数据进行二次编辑，可以在【命令窗口】直接进行数据操作，可操作的数据变量为“**V**”，格式和【DVC】模块一样。

例如，如图 5.4，要进行 1/4 块体切割显示，在【命令窗口】输入如下代码：

```
Vn = zeros(size(V), 'int8');
n = round(size(V,1)/2);
m = round(size(V,2)/2);
```

```
Vn(1:n, 1:m, :) = 1;
```

```
V(Vn == 1) = nan;
```

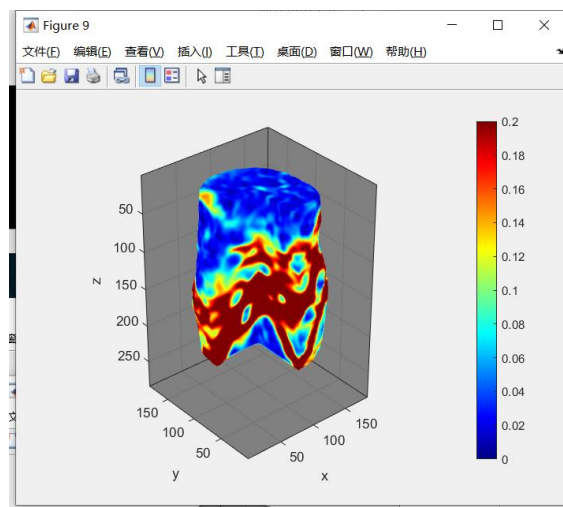


图 5.4 不规则形状的 1/4 切割显示

注: 6.2 和 6.3 的云点显示功能不推荐使用; 建议使用本节的三角面片云图显示。

5.2 三维曲面显示

该模块主要用于三维剪切带的显示。

【IsoFace】模块，【边界颜色】、【曲面颜色】、【背景】(0-1) 和【灯光】(0-1)、【转百分】等根据自己需要调节，【标题】可以给图片添加标题。

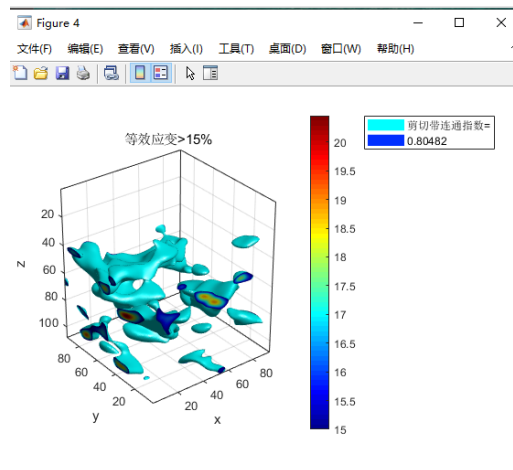


图 5.5 三维剪切带画图

其中在计算剪切带过程中，可以同时计算剪切带的连通性指数。(连通性指数在[0,1]范围内，当剪切带完全连同时，连通性指数为 1，当理想完全离散孤立时，接近 0。[但计算公式适用性有限，不推荐使用](#))；。

六 常见问题

- 1、未正确安装 matlab 2019b runtime
- 2、软件放置路径可能存在中文路径
- 3、CT 数据预处理不够
- 4、参数设置没有根据“估算”结果进行调整
- 5、IC-GN 计算方法选择

.....

附录 1-交互执行代码

不能执行带有循环、判断等结构语句！
全部必须是英文字符串，符合 **matlab** 语法。

F1-1 不规则形状计算区域标记

标记原理：根据计算预定计算区域的灰度特征范围进行形态学标记，尽量把代表空气的部分（非孔裂隙）标记成非计算区域。

点击【Ca_File】加载变形后的V.mat数据

```
V0 = evalin('base', 'V0');
Thred = [ 40, 256 ]; % 主体的阈值范围，根据CT图片的灰度值选取合适范围
Stre_open = 1; % 开运算结构半径
Stre_close = 30; % 闭运算接结构半径
Try = 1; % 1—尝试， 0—执行整体计算
Pz = [0, 0]; % V' = V*(1-Pz(1)*abs(z-zo)^Pz(2)); z轴矫正
SigNan( Parameter, Thred, Stre_open, Stre_close, Try, V0, Pz );
```

F1-2 采用云点显示不规则云场

（不推荐使用）

```
V = evalin('base', 'V0');
[x, y, z] = ind2sub( size(V), find( ~isnan(V) ) );
s = single( V( sub2ind( size(V), x, y, z ) ) );
T = int16( [x, y, z] );
figure, pcshow([x(:),y(:),z(:)], s);
colormap('jet'); %设置色条
```

F1-3 采用散点显示不规则云场

（不推荐使用）

```
V = evalin('base', 'V0');
[x, y, z] = ind2sub( size(V), find( ~isnan(V) ) );
```

```
s = single( V( sub2ind( size(V), x, y, z ) ) );  
T = int16( [x, y, z] );  
figure, scatter3( x(:),y(:),z(:), 5, s, 'filled' );  
axis equal;  
colormap('jet'); %设置色条  
colorbar;  
xlabel( 'x');  
ylabel( 'y');  
zlabel( 'z');  
grid on;  
set(gca,'color','none');  
title('总位移');
```

附录 2 基于 iDVC 的分析实例

F2-1 应变场-剪切带分析

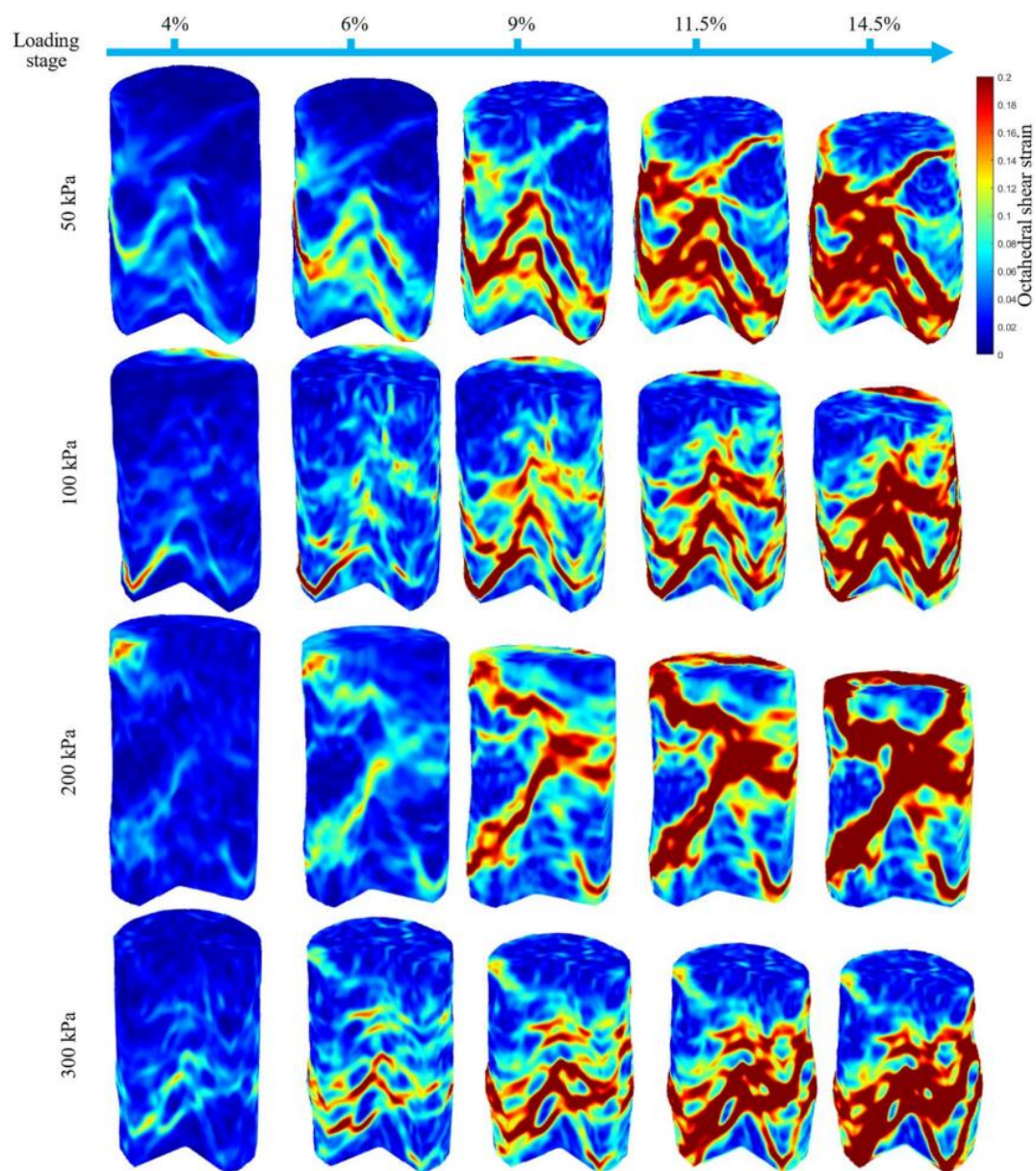


图 f1-1 三维应变场

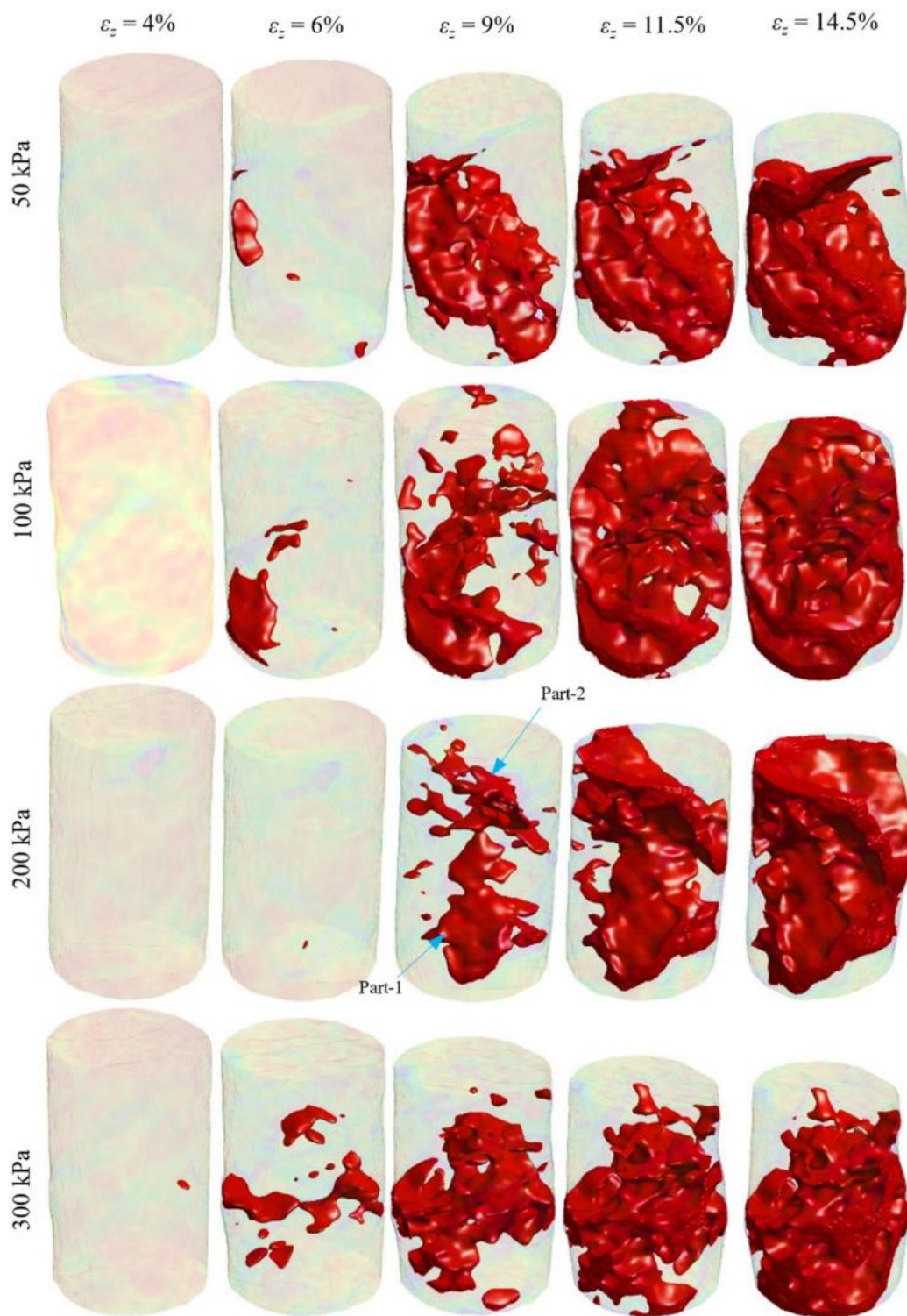


图 f1-2 三维剪切带

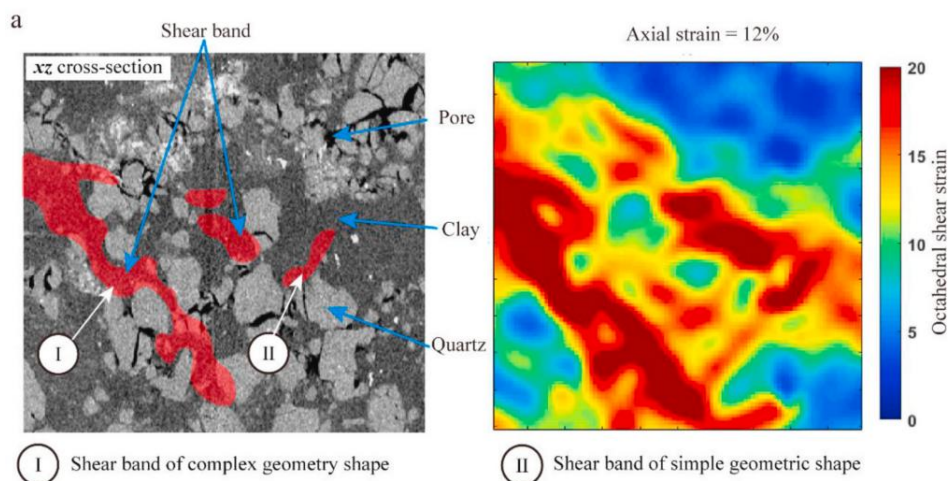


图 f1-3 剪切带分布与石英颗粒的关系

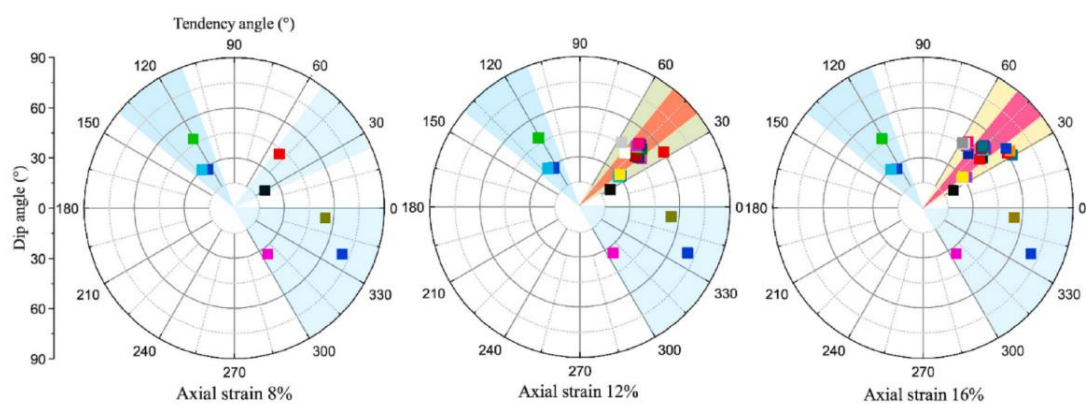


图 f1-4 三维剪切带的倾向-倾角统计分布

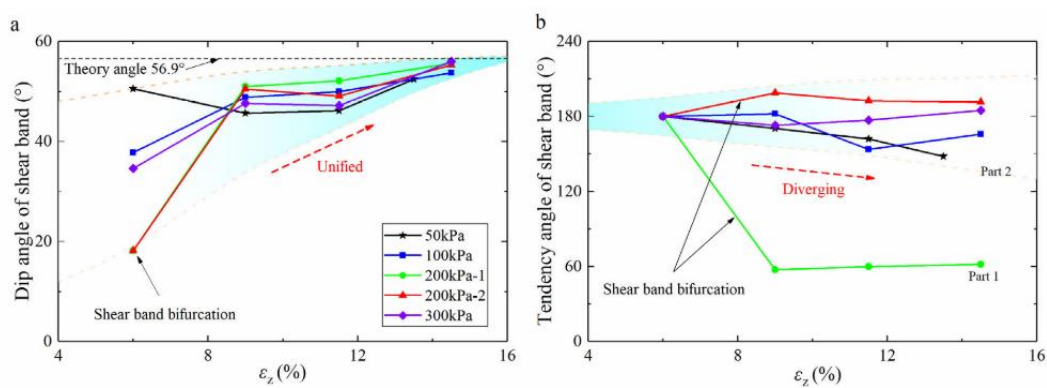


图 f1-5 剪切带的倾向-倾角整体变化

F2-2 复杂次生裂隙分析

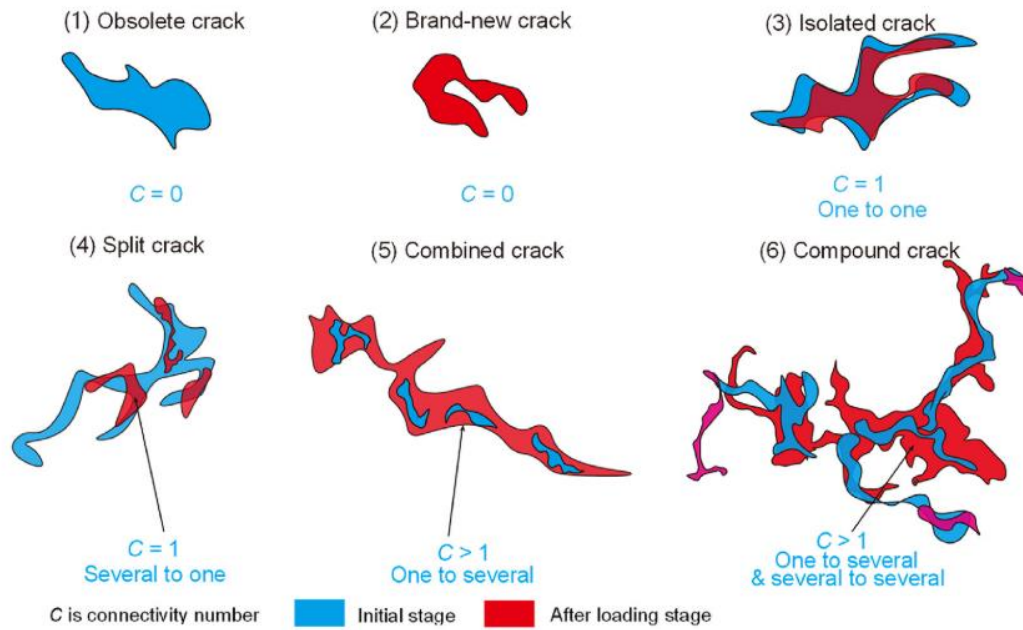


图 f2-1 复杂裂隙的分类分析方法示意图

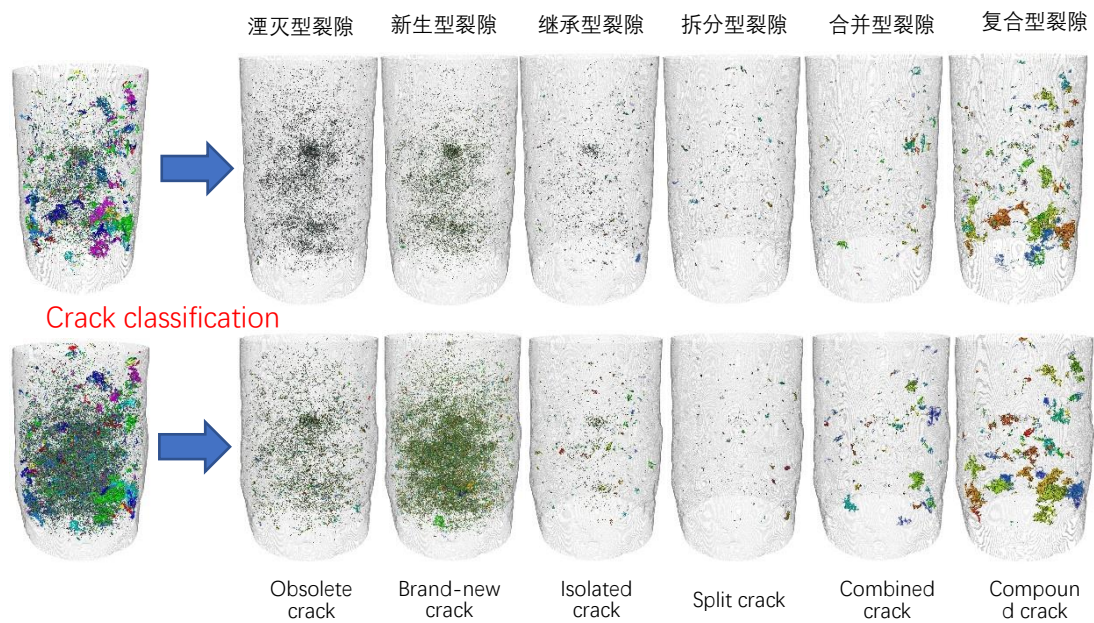


图 f2-2 基于 iDVC 的裂隙分类分析效果图 1



图 f2-3 基于 iDVC 的裂隙分类分析效果图 2