

文章编号: 1000-7598 (2011) 12-3780-07

基于数字图像处理的非均质 岩石材料破坏过程模拟

朱泽奇¹, 肖培伟², 盛 谦¹, 刘继国³, 冷先伦¹(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610041; 3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

摘 要: 以三峡花岗岩为例, 利用有限差分程序 FLAC 进行非均质岩石材料的破坏过程模拟。首先, 利用花岗岩微观结构观测图像确定数值模拟计算网格的合适尺寸; 进一步结合花岗岩的矿物鉴定结果, 在数字图像处理的基础上, 利用模糊 C 均值聚类方法, 实现了数值计算模型与材料真实细观结构的耦合分析, 形成了一套较完整的、更加方便快捷的非均质岩石材料数字图像处理技术。在此基础上, 利用同批次三峡花岗岩的经验应变软化模型, 进行了单轴抗压下岩石的剪切带分布及裂纹破坏过程模拟, 对破坏过程中的应力集中现象进行了探讨。最后, 围绕该花岗岩岩样进行了不同围压三轴压缩的数值仿真研究, 得到了一些有益的结论, 同时也表明, 在岩石破裂过程数值模拟分析中引入数字图像处理技术是岩石细观结构破坏力学行为研究的一种方便而有效的方法。

关 键 词: 数字图像处理; 非均质材料; 模糊聚类; 破坏过程; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Numerical simulation of fracture propagation of heterogeneous rock material based on digital image processing

ZHU Ze-qi¹, XIAO Pei-wei², SHENG Qian¹, LIU Ji-guo³, LENG Xian-lun¹(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Daduhe Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China;
3. China Second Highway Survey, Design and Research Institute of Communications, Wuhan 430056, China)

Abstract: For the Three Gorges granite, a finite difference software package FLAC is used to study failure process of heterogeneous rock material. Firstly, proper scale of finite difference grids is under consideration with scanning electron microscopy photo of the granite. Based on mineral components identification results of the granite and fuzzy clustering method, the actual image data are transformed into the finite difference grid by applying image processing techniques. A convenient and efficient two-dimensional numerical modeling method for heterogeneous geomaterials is presented. Furthermore, shear bond propagation and failure process of the granite are simulated in uniaxial compression test based on experimental strain soft model; and stress concentration phenomena are analyzed. Finally, numerical simulation of granite samples under different triaxial compression tests is studied. The results show that the numerical modeling method based on digital image processing can be used to calculate the mechanical responses of geomaterials by taking their heterogeneities into considerations.

Key words: digital image processing; heterogeneous material; fuzzy clustering; fracture process; numerical simulation

1 引 言

岩土工程中的岩石材料是天然材料或者由天然材料组成的非均质复合材料。组成岩石材料的内部物质有不同类型和结构的矿物颗粒, 它们有着不

同的物理力学性质, 其在外力作用下的反应也有很大的差异。岩石材料的内部细观结构决定了材料的局部应力和应变分布, 并能影响到材料的最终破坏模式。目前在岩石破裂的细观研究方面已取得了一些有益的成果^[1-3], 如唐春安等^[4-6]运用有限元程序

收稿日期: 2010-06-07

基金项目: 国家 973 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB732001); 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (No. 90715042); 国家自然科学基金项目 (No. 51009130)。

第一作者简介: 朱泽奇, 男, 1980 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事数值岩石力学与工程方面研究。E-mail: zhuzeqi2005@tom.com

RFPA 来模拟岩石的破裂过程，其岩石的细观结构运用 Weibull 分布函数来生成。Fang 和 Harrison^[7-8]提出了一种局部退化模型来模拟脆性材料的破坏，并运用有限差分程序 FLAC 计算了在不同围压下岩石的全过程应力-应变曲线与裂纹产生及发展的过程。这些方法主要是通过数值分析模型中生成虚拟的细观结构来研究岩石破裂等细观力学行为，是基于统计和随机赋值的数值分析方法，因此，不能准确反映真实材料细观结构的复杂性。

近年来，随着数字图像处理（digital image process，简称 DIP）技术的发展，人们开始发展一种新的基于数字图像处理技术的材料细观力学数值分析方法。由于岩石中含有不同的矿物，这些矿物一般具有不同的颜色。因此，在数字图像处理过程中，图像作为一种信息资源，能够通过不同的灰度和颜色很好地反映材料的细观结构，并可以用来研究材料内部的结构和缺陷。数字图像处理技术在岩土工程中的应用，近年来主要有岳中琦等^[9-10]、陈沙等^[11-12]采用数字图像技术获得岩土工程材料的真实细观结构，文献中采用多阈值的区域分割方法来分割图像，对于多种矿物成分的岩石材料，其阈值的确定过程较为繁琐。DIP 技术在其他岩土工程材料上的应用，还有 Kwan 等^[13]采用 Qwin 数字图像系统研究了混凝土中粗骨料形状分布及骨料的厚薄率与延伸率；Lebourg 等^[14]基于数字图像处理技术对冰水堆积物中块体的大小和形状进行了研究；徐文杰等^[15]采用数字图像处理技术研究了土石混合体内部细观结构特征。

本文以三峡花岗岩为例，将模糊聚类方法引入到数字图像处理过程，更加方便快捷地实现了数值计算模型与材料真实细观结构的耦合分析。进一步利用应变软化模型，采用三维有限差分软件 FLAC，模拟了在单轴抗压下岩石的应力分布及裂纹破坏过程，得到了一些有益的结论。同时也表明，在岩石破裂过程数值模拟分析中引入数字图像处理技术是岩石细观结构破坏力学行为研究的一种方便而有效的方法。

2 数字图像处理

2.1 数字图像和图像数据

计算机中的物理图像文件是不能直接用来加工与处理的。数字图像在计算机中是由矩形排列的一个个图像元素，亦称像素点组成的。每个像素点是横向和纵向的扫描线组成的交叉区域，这些扫描线均有相同的宽度 h 。由研究需要，可将岩石试样

某截面的数码图像通过图像处理软件将其存储为不同精度的图像，这里所谓精度，正是由像素控制，比如，图 1 是岩石试样侧向表面的图像。

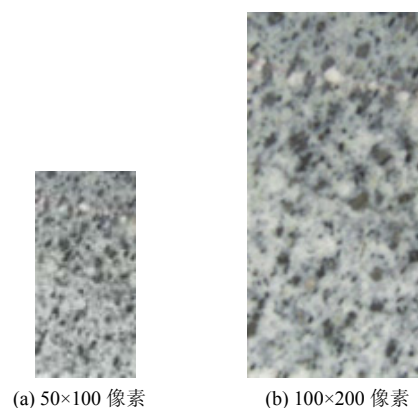


图 1 三峡花岗岩表面图像

Fig.1 An illustration of rock surface image

比如图 1(a)的数字图像，它由 100 条横向扫描线和 50 条纵向扫描线组成，而岩石的实际尺寸为 50 mm×100 mm，因此，每个扫描线的实际宽度是 1 mm，对应的像素点尺寸为 1 mm×1 mm。对于灰色图像，在每个像素点，有对应的整数值来代表该像素点的亮度，亦称为该像素点的灰度。常见的 256 色或二值图像其灰度值的范围分别为 0~255 和 0~1。这个灰度值包含了灰色图像的基本信息，也是进一步数字图像处理的基础。

2.2 岩石细观结构

对于如图 1 所示的三峡花岗岩试样，本文利用带 X 射线能谱仪的扫描电子显微镜（SEM）进行了微观结构观测。利用扫描电子显微镜观测样品的微观结构，图 2 为花岗岩中长石矿物颗粒的扫描电镜照片，这一试验观测成果可以为数值计算的单元网格划分提供依据。图 2 反映的是 1 mm×1 mm 区域长石颗粒的形貌特征，主要表现为板条状，边界平直，具有定向排列的微观结构特征。说明该区域较完整，具有较好的连续性，数值网格划分单元最大尺寸取为 1 mm 可满足计算要求，能够反映该花岗岩岩样的物理细观结构破坏力学行为。

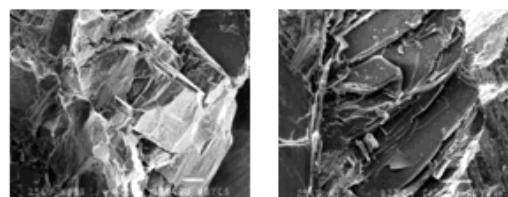


图 2 花岗岩扫描电镜照片

Fig.2 Scanning electron microscopy photo of the granite

2.3 模糊聚类算法及图像分区

数学上一种按照样本的彼此相近的程度进行分类的理论称为模糊聚类。人们利用它的基本原理在岩土工程中进行了膨胀土的分类、砂土的地震液化判别等^[16]。利用模糊聚类技术,可将特征数据聚类成几类,使数据聚集在聚类中心附近。模糊聚类主要有两类:模糊 C 均值聚类和模糊减法聚类。模糊 C 均值聚类(FCM)算法是基于目标函数的聚类方法。该方法把聚类分析归结成一个带约束的非线性规划问题,通过优化求解获得数据集的最优模糊划分和聚类。将给定数据集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset R$ 分为 $C (2 \leq C \leq n)$ 类,设 X 中的任意样本 x_k 对第 i 类的隶属度为 $u_{ik} (0 \leq u_{ik} \leq 1)$ 。FCM 的一般描述为

$$J_m(U, P) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^C (u_{ik})^m (d_{ik})^2, m \in [1, \infty), U \subset M_{fc} \quad (1)$$

式中: m 称为加权指数,又称作平滑参数; M_{fc} 为 X 的模糊 C 划分空间; U 为 $C \times n$ 阶模糊划分矩阵。 d_{ik} 是样本 x_k 与第 i 类聚类原型 P_i 之间的距离度量,一般表达式定义为

$$(d_{ik})^2 = \|x_k - P_i\|_A = (x_k - P_i)^T A (x_k - P_i) \quad (2)$$

式中: A 为对称正定矩阵,聚类的准则是求取 $J_m(U, P)$ 的极小值 $\min \{J_m(U, P)\}$, 由于矩阵 U 中各列都是独立的,因此

$$\min \{J_m(U, P)\} = \min \left\{ \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^C (u_{ik})^m (d_{ik})^2 \right\} = \sum_{k=1}^n \min \left\{ \sum_{i=1}^C [(u_{ik})^m (d_{ik})^2] \right\} \quad (3)$$

若数据集 X 、聚类类别数 C 和加权指数 m 值已知,就能确定最佳模糊分类矩阵和聚类中心。

花岗岩是一种火成岩,其矿物成分主要由石英、长石和黑云母组成。岳中琦等^[9]采用了基于灰色图像的两种不同的数字图像技术:区域分割法和边缘检测法用来区分沥青混凝土的两种内部不同材料(粗骨料和充填物)。当不同内部材料的图像属性区分不明显时, Nasrabadi^[17]采用神经网络等算法来自动分割图像。本文基于图 1(a)的数字图像,采用模糊聚类算法进行辅助分割图像。

首先在 Matlab 中编程读入数字图像(图 1(a)),将数码照片的 RGB(红绿蓝)颜色空间转换为灰色图像(256 色图像)颜色空间,建立灰度值数据集并纪录相应像素点的具体位置。然后对三峡花岗岩岩样进行了 X 射线衍射的矿物鉴定分析,结果表明,

主要矿物成分及其含量为:黑云母 20%,石英 25%,长石 50%。花岗岩中这 3 种材料的灰度值 I 从小到大依次为: $I_{\text{黑云母}} < I_{\text{石英}} < I_{\text{长石}}$, 假设岩石表面的矿物分布与完整岩石的矿物含量比例一致,依据 3 种矿物的含量多少及它们的灰度值 I 对于材料的单调递增性质,利用式(3)可以确定 3 个灰度值聚类中心,从而达到进行快速材料分区的目的。最后根据图 1(a)细观结构的尺寸,在 FLAC 程序中生成有限差分矩形栅格见图 3,模型尺寸为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,栅格尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,共划分 5 000 个单元,与图 1(a)的像素点一一对应。根据每一个像素点灰度值的模糊聚类分区判断该像素点所属颜色的类别,在数值计算中可以在 FLAC 相应栅格中赋予相应的材料属性,从而在力学计算中考虑了岩石真实的非均质性。

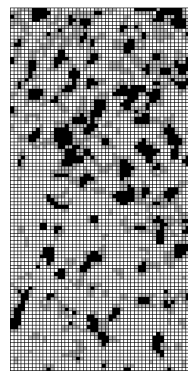


图 3 考虑真实细观结构的有限差分栅格
Fig.3 Finite difference grid with actual rock heterogeneity

3 计算模型

笔者曾针对如图 1 所示的三峡花岗岩圆柱形岩样进行过不同围压的三轴压缩测试,并通过应力-应变峰后曲线的塑性分析,以摩尔-库仑准则拟合不同塑性屈服阶段的屈服面,由此建立花岗岩强度参数与峰后应变软化参量的关系,发现花岗岩在应变软化过程中,黏聚力 c 值随应变软化参量-广义塑性应变 ϵ^{ps} 的增大而快速减小(见图 4),而内摩擦角 φ 值在应变软化的过程中几乎保持不变^[18]。本文采用如图 4 所示的应变软化模型来模拟花岗岩类脆性岩石材料的破坏,由于其强度参数的软化规律来自对同批次花岗岩岩样的试验测试数据的拟合分析,因此,在力学模型选用上具有一定的现实意义,也有利于本文进行破坏过程及破坏模式的对比分析。

FLAC 有限差分程序采用拉格朗日差分公式来处理有限变形问题,计算过程中允许材料发生屈服

及流变，适合于解决岩土工程中经常遇到的大变形及破坏分析，是一种理想的岩土工程计算软件。基于图 4 中的应变软化关系，利用 FLAC 程序建立的有限差分栅格，依据材料属性的聚类分析，对每个有限差分栅格赋予相应的物理力学参数，如图 3 所示。针对图 3 建立考虑岩石真实细观结构的有限差分模型进行单轴压缩试验数值仿真，计算模型与边界条件如图 5 所示，加载过程采用轴向位移控制方式。三峡花岗岩内部不同矿物的力学参数，见表 1^[12]。

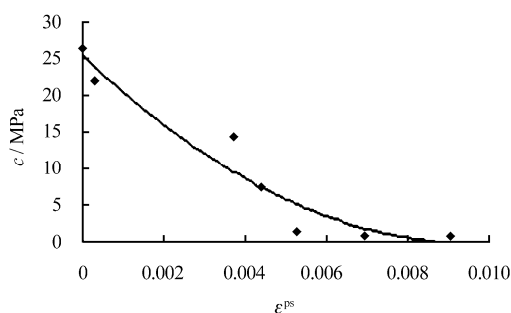


图 4 c 与应变软化参数 ϵ^{ps} 的关系曲线^[18]
Fig.4 Relation curve between c and ϵ^{ps} ^[18]

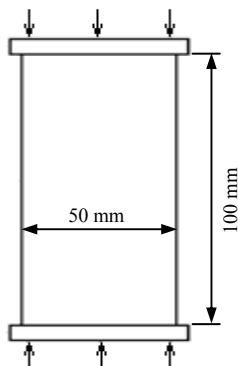


图 5 单轴压缩试验的计算模型与边界条件
Fig.5 Numerical model of uniaxial compression test

表 1 非均质三峡花岗岩矿物材料参数取值^[12]
Table 1 Material parameters of anisotropic Three Gorges granite^[12]

岩石材料	弹性模量 / GPa	泊松比	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	抗拉强度 / MPa
云母	40	0.25	25	30	5.0
长石	70	0.25	40	40	7.5
石英	90	0.25	50	60	11.0

4 破坏过程模拟

图 6 为单轴加载试验模拟得到的应力-应变曲线。可以发现应力-应变曲线表现出了典型的非均匀

特性，在峰值强度之前，有一个明显的非线性变形阶段（CD）；因为不同的矿物颗粒力学性质不一样（见表 1），具有不同的强度极限，在同级载荷下，表现出不同的力学响应。由不同加载阶段的破坏单元数量统计图（见图 6）可以看出，在 CE 段的破坏单元数量较多，裂纹发展迅速，岩石达到峰值强度，剪切带贯通并最终形成宏观破裂面；在 E 点之后，试样局部的微破裂继续发展，但呈逐渐减少的趋势，之后的曲线表现出很强的非线性。

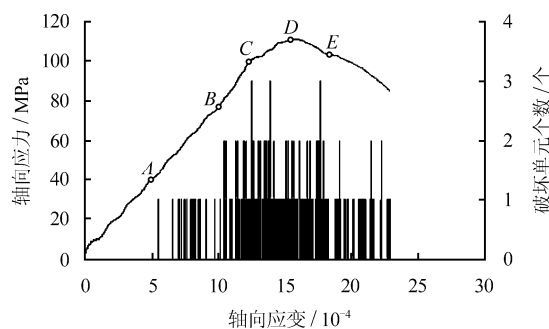


图 6 单轴加载模拟的应力-应变曲线和破坏单元数量统计图

Fig.6 Stress-strain curve and failure element statistic diagram in uniaxial compression test

图 7、8 分别为单轴加载过程中的塑性区分布图和剪切带云图。图中标号 A、B、C、D、E 分别与图 6 中所标出的各加载水平相对应。图 7 展现了裂纹萌生、扩展、贯通的过程。裂纹首先在石英-云母和石英-长石颗粒的边界产生，发生拉伸破坏，此后持续观察到颗粒边界的拉伸裂纹出现，这与文献[17]观察到的结果相符合。此时岩样近似处于线弹性阶段，直到 C 点附近时，岩样内部局部出现剪切破坏裂纹，这是因为岩石材料的抗剪性能大于抗拉性能，只有随着加载力的不断增加，岩样内部的压应力集中到了一定程度才会导致剪切破坏发生。剪切破坏裂纹从 C 点开始迅速发展、贯通，与拉伸破坏裂纹一起形成宏观破裂面。破坏过程模拟结果表明，裂纹的萌生阶段主要以拉破坏为主，裂纹扩展贯通阶段主要以剪破坏为主。图 8 显示出岩样破坏过程中的剪切带演化规律。C 点以前的剪切变形呈局部集中和零星分布的特点；到 C 点以后才逐渐形成条带状剪切变形集中带，出现的部位与剪破坏裂纹扩展贯通的部位一致。由于岩样的非均匀性，剪切带的图案不规则，但最终的剪切带图案可以反映岩样的破坏模式。

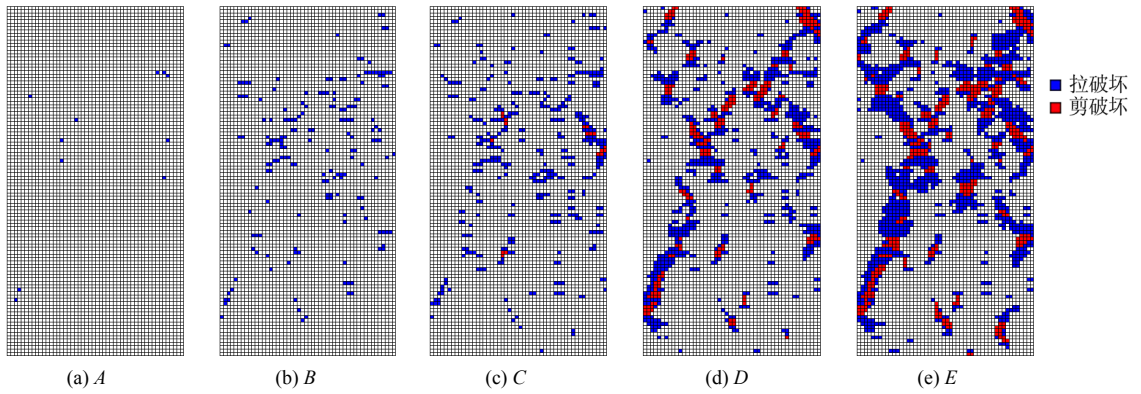


图 7 单轴压缩试验的裂纹破坏过程

Fig.7 Crack propagation process in uniaxial compression test

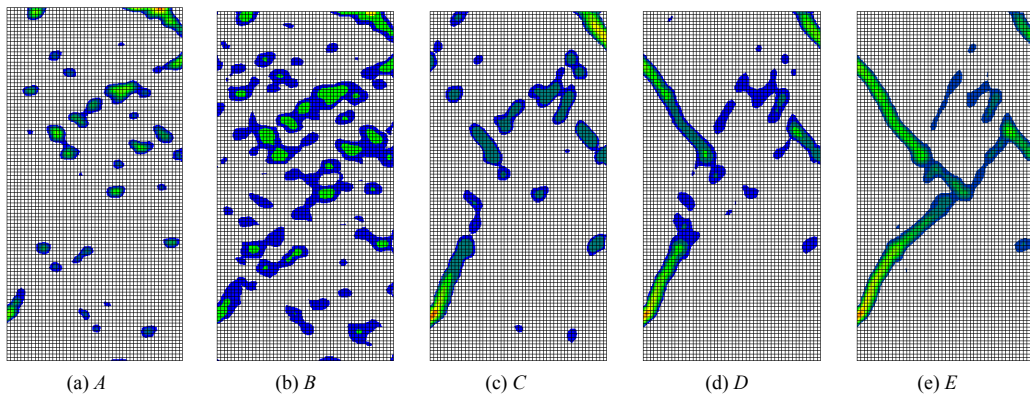


图 8 单轴压缩试验的剪切带孕育发展过程

Fig.8 Shear band propagation process in uniaxial compression test

图 9、10 分别为 *D* 点，亦即岩样达到峰值应力时的最大主应力及最小主应力云图。可以看出，加载后应力在试件中并不是均匀分布，而是出现了明显的应力集中，为了更加清晰地显示试件中的应力集中现象，图 9、10 只给出了最大主应力中的 75%~100%（应力绝对值）范围，最小主应力中的应力值为正（拉为正）的应力范围。图中椭圆圈定的区域分别为压应力和拉应力集中区，一个明显的现象是压应力集中区近似平行于加载力方向分布，而拉应力集中区垂直于加载力方向分布，压应力最大约为 158 MPa，拉应力最大约为 8.6 MPa，是岩石颗粒发生压剪破坏和拉伸破坏的主要诱因。另一个有趣的现象是压应力与拉应力集中区主要出现在长石颗粒分布的区域。花岗岩内部力学性质最弱的云母呈上“团块”状分布，一般被力学性质最强的石英颗粒包围，在加载过程中似乎形成一个独立的“安全岛”。从图 9、10 可以看出，应力集中区大小不一，一般以较狭长的长石颗粒（力学性质中等）分布区域为中心，止于“安全岛”，基本上没有发生“安全岛”被穿越的情况。鉴于篇幅，本文对于这一由于岩石细观结构的非均质性引起的应力集中现象的深入研究将在后续文章中报道。

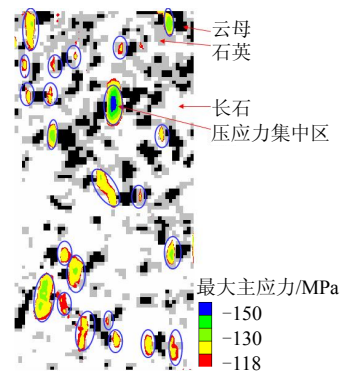


图 9 应力峰值阶段的最大主应力云图

Fig.9 Maximum principal stress nephogram

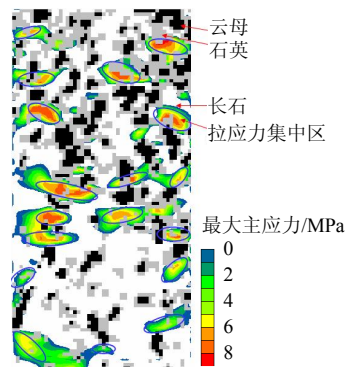


图 10 应力峰值阶段的最小主应力云图

Fig.10 Minor principal stress nephogram

5 围压效应

室内岩石试验由于取样、加工及自身的细观结构差异造成岩石物理力学性质具有很大的离散性，例如文献[19]中，笔者从同一地点采集的花岗岩岩样，经室内试验机加载测试，其变形模量最大相差超过 10 GPa。本文基于同一考虑真实细观结构的岩石试件进行不同围压的加载试验数值仿真，可以有效地避免岩石试件的这种离散性，合理研究围压对于岩石变形模量、抗压强度、峰后变形特性和破坏过程及模式的影响。

图 11 给出了不同围压的加载试验模拟得到的应力-应变曲线（曲线上数字为施加的围压）。可以看出，随围压增加岩石抗压强度显著增大，这与一般试验测试结论相符。但围压对于岩石变形模量几乎没有影响，对比众多的试验测试成果可以认为，在较低围压范围内，如 0~40 MPa，围压对于硬岩的变形模量影响不大，但由于目前的认识水平有限，还缺乏大量级围压下的试验数据，因此，这一问题还需要更进一步地深入研究。从图 11 还可以看出，随围压增加岩石峰后变形特性有从脆性向延性转化的趋势。

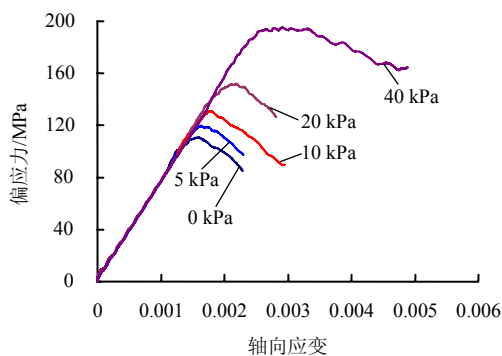


图 11 不同围压的加载模拟应力-应变曲线
Fig.11 Stress-strain curves with different confining pressures

图 12 为不同围压的加载模拟在应力峰值时的塑性区分布图。从图可看出，由于围压的制约作用，岩石内部矿物颗粒边界间的拉裂纹发生、扩展受到限制，随围压升高，岩石以剪切破坏为主。这与室内岩石加载破坏中观察到的试验现象一致，即单轴加载情况下，岩石多发生劈裂破坏，施加一定围压后，岩石多发生剪切破坏。这些研究表明了基于数字图像处理技术的室内试验数值模拟研究方法是一种方便而有效的方法，能够模拟非均质岩石材料的细观结构破坏力学行为。

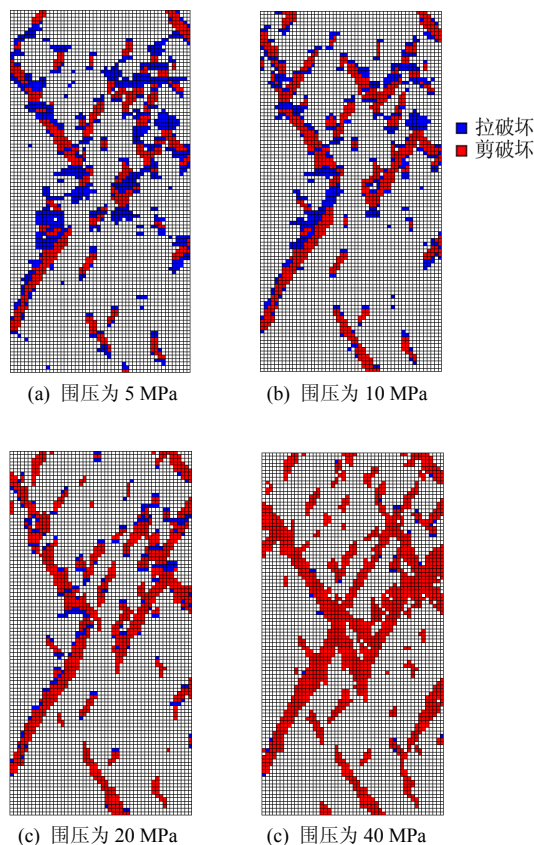


图 12 不同围压的花岗岩破坏模式
Fig.12 Failure patterns of the granite with different confining pressures

6 结 论

(1) 将模糊聚类方法引入到数字图像处理中，结合花岗岩的矿物鉴定结果，实现了数值计算模型与材料真实细观结构的耦合分析，形成了一套较完整的、更加方便快捷的非均质岩土材料数字图形处理技术。

(2) 由于岩石的非均质性，应力在试件中并不是均匀分布，而是出现了明显的应力集中，且主要出现在长石颗粒分布的区域。其中，压应力集中区近似平行于加载力方向分布，而拉应力集中区垂直于加载力方向分布。

(3) 破坏过程模拟结果表明，裂纹的萌生阶段主要以拉破坏为主，裂纹扩展、贯通阶段主要以剪破坏为主。随围压升高，岩石内部矿物颗粒边界间的拉裂纹发生、扩展受到限制，岩石以剪切破坏为主。

本文只是对非均质岩石材料破坏过程进行示例研究，以阐述该方法的使用。随着计算机性能的提高或引入大规模科学计算后，对岩石材料的细观结构破坏力学行为更深入地研究将是下一步的工作。

参 考 文 献

- [1] BLAIR S C, COOK N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: Part I. A non-linear rule-based model[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(7): 837—848.
- [2] TANG C A, LIU H, LEE P K K, et al. Numerical tests on micro-macro relationship of rock failure under uniaxial compression—Part I: Effect of heterogeneity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(4): 555—569.
- [3] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, et al. Numerical tests on micro-macro relationship of rock failure under uniaxial compression—Part II: Constraint, slenderness and size effect[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(4): 571—583.
- [4] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统RFP^{2D}[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507—508.
TANG Chun-an, ZHAO Wen. RFP^{2D} system for rock failure process analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(5): 507—508.
- [5] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060—1066.
LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Coupling analysis of hydraulic fracturing process of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1060—1066.
- [6] 朱万成, 唐春安, 黄志平, 等. 静态和动态荷载作用下岩石劈裂破坏模式的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 1—7.
ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, HUANG Zhi-ping, et al. Numerical simulation on splitting failure mode of rock under static and dynamic loadings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(1): 1—7.
- [7] FANG Z, HARRISON J P. Development of a local degradation approach to the modeling of brittle fracture in heterogeneous rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 443—457.
- [8] FANG Z, HARRISON J P. Application of a local degradation model to the analysis of brittle fracture of laboratory scale rock specimens under triaxial conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 459—476.
- [9] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(5): 375—397.
- [10] 岳中琦, 陈沙, 郑宏, 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 889—897.
YUE Zhong-qi, CHEN Sha, ZHENG Hong, et al. Digital image processing based on finite element method for geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 889—897.
- [11] CHEN S, YUE Z Q, THAM L G. Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(6): 939—957.
- [12] 陈沙, 岳中琦, 谭国焕. 基于数字图像的非均质岩土工程材料数值分析方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 956—964.
CHEN Sha, YUE Zhong-qi, THAM L G. Digital image based numerical modeling method for heterogeneous geomaterials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 956—964.
- [13] KWAN A K H, MORA C F, CHAN H C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing[J]. **Cement and Concrete Research**, 1999, 29(9): 1403—1411.
- [14] LEBOURG I, RISS J, PIRARD E. Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraine formations on their mechanical behaviour using image and statistical analysis[J]. **Engineering Geology**, 2004, 73(1—2): 37—50.
- [15] XU W J, YUE Z Y, HU R L. Study of the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(5): 749—762.
- [16] 何广讷, 朱范宇, 张业民. 场地砂土地震液化的模糊聚类分析[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 9(4): 83—91.
HE Guang-na, ZHU Fan-yu, ZHANG Ye-min. Fuzzy clustering analysis for predicting seismic liquefaction potential of sandy deposits[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1989, 9(4): 83—91.
- [17] NASRABADI N M, KATSAGGELOS A K. Applications of artificial neural networks in image processing IV[M]. California: SPIE, 1997.
- [18] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2651—2655.
ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Study of post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of the Three Gorges granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp. 1): 2651—2655.
- [19] 朱泽奇, 盛谦, 张占荣. 脆性岩石侧向变形特征及损伤机理研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2137—2143.
ZHU Ze-qi, SHENG Qian, ZHANG Zhan-rong. Study of lateral deformational characteristics and damage mechanism of brittle rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2137—2143.