

基于视频图像和扩展有限元法的花岗岩裂缝扩展过程

朱健伟¹, 叶伟英², 徐金明¹, 冯旭¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 中国地质图书馆, 北京 100083)

摘要: 裂隙的萌生扩展过程对岩石变形破坏过程起着极为重要的作用。根据花岗岩室内单轴压缩试验时拍摄的视频图像, 使用数字图像处理技术确定岩石中不同细观组分的分布情况, 将最大周向拉应力破坏准则作为裂缝的起始条件, 使用扩展有限元方法研究了变形破坏过程中岩石试样中的应力场、位移场、不同组分损伤情况及其与裂缝萌生扩展过程的关系。结果表明, 根据应力场分布和损伤状态变化特征可以估计裂缝的萌生扩展过程, 裂缝通常萌生于荷载的作用位置附近和细观组分强度较低分布的区域, 裂缝扩展伴随着裂缝尖端的应力集中现象, 纵向和横向裂缝扩展方向均受荷载方向影响, 裂缝相互贯穿则导致岩石的完全破坏。研究成果对分析岩石变形破坏过程具有一定的参考价值。

关键词: 花岗岩; 裂缝扩展; 视频图像; 扩展有限元法

文章编号: 1003-8035(2013)03-0122-05

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

0 引言

岩石破坏过程, 通常是岩石中裂隙不断萌生、扩展、连通、聚合的过程。这些裂隙的变化过程, 又与所受围压大小、岩石中细观成分的类型与分布有很大关系。要真正理解岩石的变形破坏过程, 尤其是岩石的破坏过程, 必须充分认识岩石中各种裂隙的萌生扩展过程。

关于岩石中裂隙的萌生扩展过程, 国内外已有大量研究。比如, Lin 等^[1] (2009) 综合使用室内试验、声发射量测、粒子图像观测和离散元数值试验, 研究了砂岩试样中复合型裂缝的起裂和扩展过程; Burchardt 和 Walter^[2] (2010) 使用图像相关技术、室内试验、二维应变分析方法研究了火山口附近环状断层系统的起裂、扩展与连通机制; Bornert 等^[3] (2010) 使用图像相关技术分析不同湿度粘土岩试样在单轴压缩条件下的序列图像, 研究了不同尺度下岩石的非均质性、位移分布与应变特征; Vajdov 等^[4] (2010) 研究了石灰岩细观裂纹的产生条件、细观裂纹方向性、剪切局部化、损伤演化之间的关系; 石露等^[5] (2011) 使用扩展有限元法解决了数值模拟中的裂隙不连续问题; 茹忠良等^[6] (2011) 使用扩展有限元法分析了应力强度因子的 J 积分计算方法及积分区域的选取方法; 张震韬等^[7] (2011) 将扩展有限元法引入沥青路面表面裂纹二维扩展分析, 建立了相应的平面应变模型; 冯德成^[8] 等 (2011) 使用扩展有限元法研究了路面纵向裂缝的扩展过程; Zhou 和 Qi

(2010)^[9] 在设置合理几何尺寸和物理参数基础上, 提出了不连续界面问题流固耦合的处理方法。

但是, 已有研究对不同组分类型、分布在岩石破坏过程的作用关注不够, 对破坏过程中裂缝萌生扩展与变形场变化的关系也还没有很好研究。本文将根据花岗岩室内单轴压缩试验时拍摄的视频图像, 在使用数字图像处理技术确定不同细观组分分布基础上, 使用大型有限元软件 ABAQUS 和扩展有限元法研究单轴压缩条件下岩石变形破坏过程中的应力场、位移场、不同组分损伤情况及其与裂缝萌生扩展过程的关系。

1 数值模拟模型

1.1 几何模型

本次数值模拟时, 几何模型根据花岗岩单轴压缩试验所摄视频图像得到。选取的视频图像总时间为 315s, 共 7892 帧静态图像, 每秒 25 帧。在 270s 以后对试件加载, 到 300s 时试件发生破坏。因此, 选择 270~300s 之间的帧图像为本次研究的基础资料。图 1 为视频图像在 270s 时的静态图像。

为方便分析, 截取原始视频中相同位置、相同大小的区域进行研究。所截区域的左上角像素坐

收稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40972191)

作者简介: 朱健伟 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土材料破坏机理。

E-mail: zhuyesyes@163.com



图 1 原始视频图像中 270s 时的静态图像

Fig. 1 Static image of 270th second in original video

标为(1200, 480)、长宽均为 30mm。使用阈值分割法对花岗岩灰度图像进行分割,得到花岗岩不同细观组分分布的二值图像。为了减少计算时间、避免计算不收敛,在此区域内取出大小为 5mm × 5mm 的较小区域。这一区域中心离试样左边 38mm、离底部 39mm。

使用多边形拟合细观组分边界,将长石和石英竖向延伸至试样底部,各组分区域边界条件采用实际尺寸。组分分布、荷载分布和约束情况如图 2 所示,网格划分如图 3 所示。

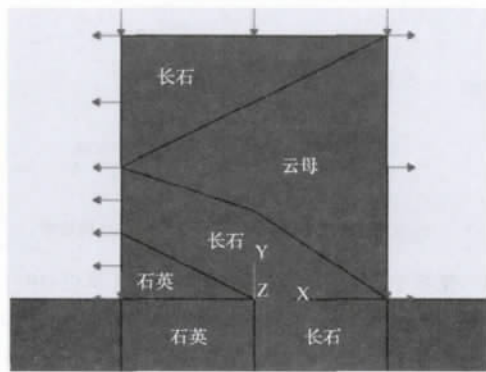


图 2 试样的组分分布、受力分布和约束情况

Fig. 2 Composition distributions, external forces and constraints of the sample

1.2 物理模型

裂纹萌生时网格单元开始损伤,裂纹扩展的常用准则有最大周向拉应力强度因子理论、最大周向拉应变强度因子理论、最小应变能密度强度因子理论、最大周向拉应力理论和能量释放率理论等。本次研究采用最大拉应力准则:当最大主应力达到拉伸强度时材料发生破坏,拉伸强度由拉伸试验确定。裂纹扩展时,岩石系统内的弹性能由于裂纹扩展而释放潜在增量。

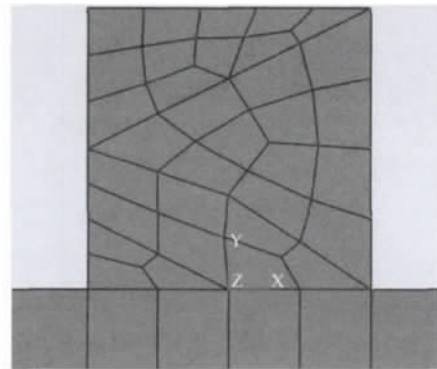


图 3 有限元网格分布

Fig. 3 Mesh in finite element method

平面应变条件下,平均动态传播韧度为:

$$K_I = \sqrt{\frac{G_f E}{(1 - \nu^2)}} \quad (1)$$

式中: ν ——泊松比;

K_I ——平均传播韧度;

G_f ——断裂能;

E ——弹性模量。

根据陈荣等(2010)的成果,平均传播韧度取 $K_I = 1.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

花岗岩主要成分为长石、云母以及石英等。为了比较组分类型对裂缝扩展的影响,根据已有研究成果^[10-11],长石弹性模量取 $E = 28.2 \text{ GPa}$ 、轴心抗拉强度取 $f_t = 9.0 \text{ MPa}$ 、泊松比取 $\nu = 0.288$ 、密度取 $\rho = 2530 \text{ kg/m}^3$ 、断裂能取 $G_f = 105.9 \text{ N/m}$,石英弹性模量取 $E = 34.0 \text{ GPa}$ 、轴心抗拉强度取 $f_t = 9.0 \text{ MPa}$ 、泊松比取 $\nu = 0.20$ 、密度取 $\rho = 2530 \text{ kg/m}^3$ 、断裂能取 $G_f = 91.5 \text{ N/m}$,云母弹性模量取 $E = 24.0 \text{ GPa}$ 、轴心抗拉强度取 $f_t = 9.0 \text{ MPa}$ 、泊松比取 $\nu = 0.24$ 、密度取 $\rho = 2530 \text{ kg/m}^3$ 、断裂能取 $G_f = 127.2 \text{ N/m}$ 。

2 模拟结果分析

2.1 裂缝扩展过程中的应力场

图 4 表示裂缝未产生时试样中的应力等值线分布。可以看出,应力等值线在不同组分连接处基本连续,应力在试件底部变化较大。

图 5 为初始裂缝产生时的应力等值线分布。由图 5 可以看出,裂缝萌生时产生三条新生裂缝,这些裂缝均位于长石区域,上部长石区域应力增大,最大应力为 15.59 MPa 。图 6 为试样产生裂缝后继续加压时的应力等值线图。由图 6 可以看出,随着荷载的增

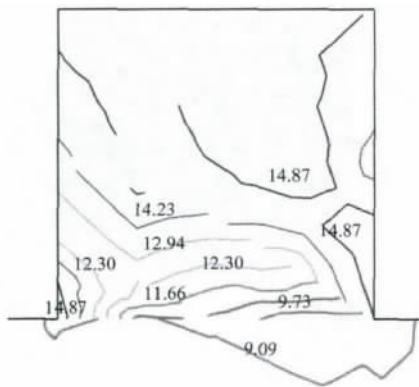


图 4 第 1 个增量步时的应力等值线 (单位: MPa)
Fig. 4 Stress contours at 1st step (unit: MPa)

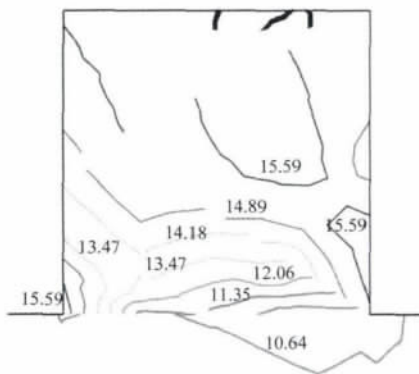


图 5 第 3 个增量步时的应力等值线 (单位: MPa)
Fig. 5 Stress contours at 3rd step (unit: MPa)

加,位于区域中部的裂缝扩展方向与荷载方向完全一致,而第二条裂缝与荷载方向呈 60°,靠近右边的裂缝扩展方向与荷载方向基本一致。

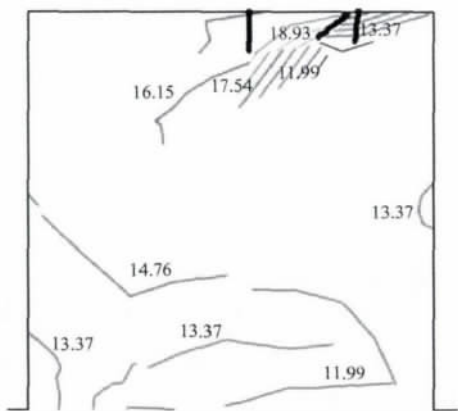


图 6 第 4 个增量步应力等值线 (单位: MPa)
Fig. 6 Stress contours at 4th step (unit: MPa)

2.2 裂缝扩展过程中的的位移场

图 7 为试样未产生裂缝时的位移等值线图。此

时,位移等值线分布比较均匀,水平位移基本呈对称分布,左边位移为 0.667×10^{-3} mm、方向向左,右边的位移则向右、大小相同,总体位移方向向下、且从上至下逐渐减小。

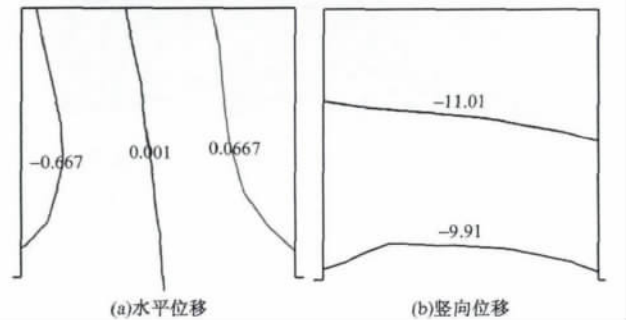


图 7 第 2 个分析步时花岗岩的位移场 (单位: 10^{-3} mm)
Fig. 7 Displacement field on granite surface at 2nd step (unit: 10^{-3} mm) in (a) horizontal and (b) vertical directions

图 8 为裂缝产生时试样中的位移等值线图。此时,上部水平位移等值线变化较大,岩石中产生了微裂隙。

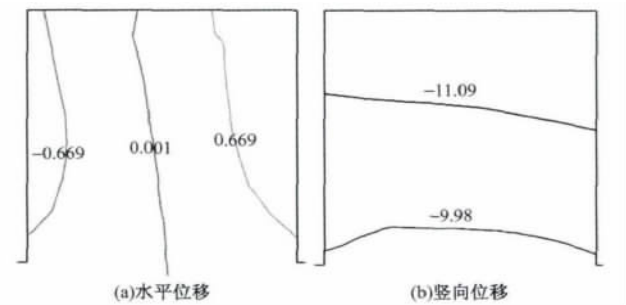


图 8 第 8 个分析步时花岗岩的位移场 (单位: 10^{-3} mm)
Fig. 8 Displacement field on granite surface at 8th step (unit: 10^{-3} mm) in (a) horizontal and (b) vertical directions

图 9 为裂缝扩展后长石区域的位移等值线图。可以看出,水平位移等值线变化比较集中,且位移方向为指向裂缝区域;试样两侧位移变化较大,在右上角出现了大小为 1.352×10^{-3} mm 的水平位移,裂纹迅速向两侧扩张;竖向位移集中于试样中部,移动方向向上。

2.3 裂缝扩展过程中的损伤状态

损伤是指环境作用下试样因结构缺陷引起裂化的过程^[12](蒋金宝等 2009)。损伤状态由损伤因子 w ($0 \leq w \leq 1$) 来描述, $w = 0$ 对应材料完全无损状态; $w = 1$ 表示损伤的最终状态,材料完全丧失承受能力、连续介质破裂。

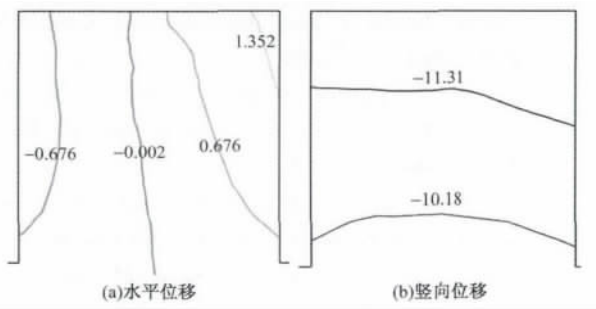


图9 第14个分析步时花岗岩的位移场(单位: 10^{-3} mm)

Fig. 9 Displacement field on granite surface at 14th step unit: 10^{-3} mm) in (a) horizontal and (b) vertical directions

图10为试样裂缝扩展过程中的损伤状态。图中黑线表示裂缝,数值为损伤因子 w 。从图10可以看出,长石区域首先产生裂缝,损伤因子为0.4,损伤区域在裂缝周围约0.5mm以内;损伤最先发生单元是细观组分的边缘位置。

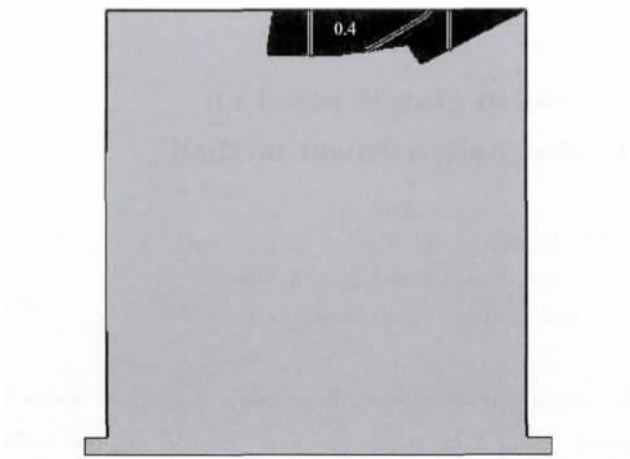


图10 裂缝产生时的损伤状态(第3个分析步)

Fig. 10 Damage state when cracks initiation (at 3rd step)

3 结论

本文根据室内单轴压缩试验视频图像建立了试样裂纹萌生扩展过程数值模拟的几何模型,使用多边形拟合不同细观组分的边界位置,根据已有文献建立了相应的物理模型,使用扩展有限元法对裂纹萌生扩展过程及其与岩石中应力场、位移场、损伤状态的关系进行了分析,结果表明:

(1) 裂缝未产生前试样中应力等值线在不同组分连接处基本连续,初始裂缝多分布在长石区域,产生裂缝后继续加压时大多数裂缝扩展方向与荷载方向一致。

(2) 产生裂缝前试样中的位移等值线均匀分布,产生裂缝时上部位移变化较大,裂缝扩展后水平位移方向指向裂缝区域、试样两侧位移变化较大,竖向位移集中于试样中部、移动方向向上。

(3) 试样中长石区域首先产生裂缝,在裂缝周围的长石区域产生损伤,损伤因子为0.4,损伤区域位于裂缝周围约0.5mm以内,最先发生的损伤单元主要是试件中细观组分的边缘位置。

参考文献:

- [1] LIN Q, Fakhimi A, Haggerty M, Labuz J. F. Initiation of tensile and mixed-mode fracture in sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46: 489-497.
- [2] Burchardt S, Walter TR. Propagation, linkage, and interaction of caldera ring-faults: comparison between analogue experiments and caldera collapse at Miyakejima, Japan, in 2000. Bulletin of Volcanology, 2010, 72: 297-308.
- [3] Bornert M, Valès F, Gharbi H, Minh D. N. Multiscale full-field strain measurements for micromechanical investigations of the hydromechanical behaviour of clayey rocks [J]. Strain: An International Journal for Experimental Mechanics, 2010, 46: 33-46.
- [4] Vajdov V, Zhu W, Chen TMN, Wong TF. Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Tavel limestone [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32: 1158-1169.
- [5] 石露,李小春,王伟,等.基于互补理论的扩展有限元接触问题实现[J].岩土力学,2011,32(12): 3805-3820.
SHI Lu, LI Xiaochun, WANG Wei, et al. Implementation of XFEM's contact problem based on complementary law [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3805-3820.
- [6] 茹忠亮,朱传锐,张友良,等.断裂问题的扩展有限元研究[J].岩土力学,2011,32(7): 2171-2176.
RU Zhongliang, ZHU Chuanrui, ZHANG Youliang, et al. Study of fracture problem with extended finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2171-2176.
- [7] 张震韬,李芳武,杨擎,等.用扩展有限元法分析沥青路面表面裂纹二维扩展[J].土木工程与管理学报, 2011, 28(2): 22-25.
ZHANG Zhentao, LI Fangwu, YANG Qing, et al. Two-

- dimensional extended finite element method for top-down crack growth in asphalt pavement [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011, 28(2): 22–25.
- [8] 冯德成, 田林, 曹鹏. 基于扩展有限元方法的路基不均匀沉降纵向裂缝分析 [J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 149–154.
- FENG Decheng, TIAN Lin, CAO Peng. Study on longitudinal cracking during settlement of soil based on extended finite element method [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 149–154.
- [9] ZHOU J M, QI L H. Treatment of discontinuous interface in liquid-solid forming with extended finite element method [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20: 911–915.
- [10] 陈荣, 郭弦, 卢芳云, 等. Stanstead 花岗岩动态断裂性能 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 28(2): 375–380.
- CHEN Rong, GUO Xuan, LU Fangyun, et al. Research on dynamic fracture behaviors of stanstead granite [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 28(2): 375–380.
- [11] 杜守继, 刘华, 职洪涛, 等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2359–2364.
- DU Shouji, LIU Hua, ZHI Hongtao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2359–2364.
- [12] 蒋金宝, 林英松, 张瑞英. 激波掠过岩石相对损伤度与裂缝渗透率关系模拟实验研究 [J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 947–950.
- JIANG Jinbao, LIN Yingsong, ZHANG Ruiying. Simulation research on relationship between relative damage of rock and fracture permeability after exploding wave bypassing [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 947–950.

Simulation of propagation of cracks in granite based on digital image processing and extended finite element method

ZHU Jian-wei¹, YE Wei-ying², XU Jin-ming¹, FENG Xu¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, P. R. China;

(2. National Geological Library of China, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: The initiation and propagation of cracks play an important role in the deformation/failure process of the rock materials. In the present study, the video images photographed during laboratory tests were used to determine the locations of various compositions in a frame of the video images using the digital image processing technique. The maximal extension stress criterion was utilized as the initiation condition of the new-generated cracks. The extended finite element method was used to examine the stress field, displacement field, damage state, and their relations with the initiation/propagation process of the cracks. It shows that the initiation and propagation of crack may be estimated based on the distributions of the stress field and damage status; the cracks were easily generated near the loading region or across the compositions with lower strength; the propagation of crack accompanied generally with the stress concentrations at the crack tips; the vertical and horizontal directions of the cracks on the specimen were much influenced by the load direction; the connection of cracks may result in the complete failure. The results presented herein may be referable in investigating the deformation/failure process of rock materials.

Key words: granite; propagation of crack; video image; extended finite element method