

文章编号: 1000-7598-(2006)02-0224-04

细观非均匀性对脆性岩石材料宏观破坏形式的影响

王士民¹, 朱合华¹, 冯夏庭², 周 辉²

(1. 同济大学 地下建筑与工程学院, 上海 20092; 2. 中国科学院岩土力学重点实验室, 武汉 430071.)

摘 要: 岩石材料的宏观力学特征是材料内部细观力学特性的综合反映。对于脆性岩石材料, 其内部的非均匀性对材料的宏观破坏形式有着重要的影响。应用演化细胞自动机方法 (ECA) 对岩石的非均匀性进行了初步的探讨。该方法以位移、力、应力和应变等矢量和张量作为系统的基本变量, 定量计算了反映岩石破坏过程中应力集中以及应力重新分布的过程。在宏观上则认为脆性岩石材料是一种非均匀性材料, 并假定脆性岩石材料的非均匀性符合 Weibull 分布, 坡度参数 m 是 Weibull 分布中的反映分布非均匀程度的重要参数。通过对符合 Weibull 分布中不同坡度参数的脆性岩石材料进行数值模拟试验, 发现由 Weibull 分布中的坡度参数表示的非均匀性是影响脆性岩石材料破坏方式的重要因素, 材料的坡度参数越小, 材料越不均匀, 其破坏形式则越具有随机性; 材料的坡度参数越大, 材料越趋于均匀, 其破坏形式越具有规则性, 即趋于弹性材料的破坏形式, 这与试验结果是吻合的。

关 键 词: 演化细胞自动机; 非均匀性; 数值模拟

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Influence of heterogeneity on macroscopical crack form of the brittle rock

WANG Shi-min¹, ZHU He-hua¹, FENG Xia-ting², ZHOU Hui²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The macroscopic mechanical characteristic of the rock material is integrated exhibition of the inner mechanical characteristic of this kind of material in mesoscopic view. While for the brittle rock material, the inner heterogeneity is important to its macroscopic crack form. The primary discussion on the heterogeneity of the brittle rock has been carried out with the method of evolving cellular automata. In this method, displacement, force, stress and strain are taken as basic variables of the system and the stress concentration and stress adjustment are reflected by quantitative analysis. In the macroscopic view, the brittle rock is a kind of heterogeneity material and its heterogeneity distribution is assumed as Weibull distribution. The slope parameter m is a important parameter that reflects the heterogeneity level of the heterogeneity distribution. From the numerical simulation examinations on the brittle rock material when it has different slope parameter in Weibull distribution, it can be drawn out that the heterogeneity expressed by the slope parameter in Weibull distribution is a important factor that influences the crack form of the brittle rock; and the more the slope parameter m is small, the more the composition of the rock is asymmetric, and the more the crack form is stochastic; while the more the slope parameter m is great, the more the composition of the rock is symmetrical, and the more the crack form is regular and similar to the elasticity material. It is consistent with the results of the experimentation.

Key words: evolving cellular automata; heterogeneity; numerical simulation

1 引 言

岩石的弱化性质在一维情况下可以用岩石的应力-应变全过程曲线来描述, 该曲线的概念由南非的 Cook 等于 1965 年首次提出^[1]。岩石应力-应变全过程概念以及随后刚性或电液伺服控制试验机的出现, 使得人们对岩石破坏后期的力学性质研究有了迅速的发展。在理论方面, 不少人试图找到符合岩

石应力-应变全过程关系的理论表达式, 但所得到的结果大多都是经验性的。1977 年 Kovari^[2]引入了本构模型概念来描述试验过程中所观测到的微观机制, 并针对岩石类材料提出了累进破坏的微观机理模型, 反映了岩石的弹性、塑性以及由于裂纹和应力场的局部不均匀所引起的破裂。

早在 1933 年, 材料的强度理论中就已引入了统计性质的概念。亚历山德罗和伏尔科夫^[3]提出,

收稿日期: 2004-07-33

修改稿收到日期: 2004-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 50179034); 国家重点基础研究发展规划 (973) (No. 2002CB412708)资助。

作者简介: 王士民, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事地下结构与岩土工程方面的研究工作。E-mail: neumining@163.com

构成物体的材料从总体上看可能是均质的,但从微观上看却十分不均一。宏观的破坏现象是许多微观破坏的综合表现,这些不均质的微观破坏,只能采用统计的办法来研究。唐春安^[4]提出了有关岩石细观单元强度满足 Weibull 分布的假设,才使对岩石材料的研究开始考虑微观上的非均匀性,他认为细观非均匀性是造成准脆性材料宏观非线性的根本原因,并用统计损伤的本构关系考虑岩石材料的非均匀性和缺陷分布的随机性,开发了岩石破裂过程分析数值模拟系统 RFPA-2D。为了反映岩石材料性质的细观非均匀性,该系统假定材料在总体上满足 Weibull 分布^[5]。周辉等^[6~9]基于能量守恒定律和广义能量传递规则所建立的模拟岩体非线性破坏演化过程的物理细胞自动机模型(PCA),对岩石自身所固有的非均匀性也作了相应的考虑。

本文应用演化细胞自动机方法,针对岩石细观上的非均匀性,对宏观上的破坏形式的影响进行初步探讨,得出了一些新的结论。

2 数值模拟方法简述

演化细胞自动机(evolving cellular automata—ECA)模型^[10]是以细胞自动机方法的基本理论为基础、结合岩石力学的基本原理提出的一种模型。该模型认为,脆性岩石的应力-应变关系在细观上符合理想线弹脆性本构关系,在宏观上则认为脆性岩石材料是一种非均匀性材料,并假定非均匀性符合 Weibull 分布^[4],坡度参数是 Weibull 分布中的反映分布均匀性的重要参数。ECA 模型突破以往细胞自动机只有一类细胞的限制,采用包含节点细胞和三角形细胞在内的两类细胞的邻居模型,将张量和纯量定义在三角形细胞中,而将矢量定义在节点细胞上,两类细胞共同形成细胞空间。在 ECA 系统中,两类细胞互为邻居,依据模型所建立的局部作用规则进行演化,并且按照以修正的摩尔-库仑准则为依据建立的破坏演化规则进行破坏演化,分别考虑了由拉伸和剪切两种原因所引起的破坏情况,进而实现对脆性岩石材料加载及破坏过程的模拟。

3 数值模拟试验

本次试验主要研究在单轴压缩情况的受压破坏过程中,同一种岩石试件在不同的非均匀性情况下所表现出来的差异及其分布规律。试验共分为3组,岩石试件分别取不同的 Weibull 坡度参数($m=1.5, 2.0, 5.0$)模拟岩石材料在不同非均匀性情况下的破坏情况,分析岩石材料的非均匀性对材料破坏形式

的影响,并以某地的似斑状花岗闪长岩作为背景进行模拟试验,具体参数见表1。

表1 岩石试件参数
Table 1 The parameters of rock specimen

弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	泊松比	密度 /g·cm ⁻³
60.95	6.19	54.9	47.7	0.274	2.6

4 数值模拟试验结果及分析

应用演化细胞自动机软件系统对上述3组试验进行了数值模拟,结果如图1~3所示,图中:20, 21, ..., 36, ...为位移加载步编号, -6, -12, ...为每一步岩石破坏的子步编号。

从图1可以看出,当岩石试件的非均匀性符合 Weibull 坡度参数 $m=1.5$ 的分布时,由于岩石试件所取的坡度参数较小,反映出来的就是岩石试件具有很强的非均匀性,材料的弹性模量以及抗拉强度离散性非常大,造成岩石试件在细观上各个细胞的性质差异很大。岩石试件受载后,首先从弱化的位置开始出现破坏,局部发生破坏以后,岩石试件内部的应力场会发生重新分布,从而产生局部性的应力集中现象,导致破坏区附近的区域产生破坏,宏观上表现为裂纹的生成与扩展。在试验过程中岩石试件的破坏很不规则。究其原因,主要是由于强烈的非均匀性使得岩石试件内部存在着许多分布很不规则的软弱区域,这些软弱区域在加载过程中首先破坏,继而相互贯通,由于岩石试件细观上软弱区域分布的不规则性,也造成了宏观上破坏的无规律性。从岩石试件的破坏图上可以看出,岩石的整个破坏过程起始于细观上的软弱带或者软弱区域,终止于宏观上的大裂纹的相互贯通和大面积的细胞破坏,岩石的整个破坏过程是一个渐进的过程,而且大部分细胞的破坏不是发生在应力-应变曲线的峰值处,而是发生在峰值之后。

从图2可见,当岩石试件的非均匀性符合 Weibull 坡度参数 $m=2.0$ 的分布时,加载后岩石试件首先在细观上发生局部的随机破坏,随着载荷的增加,随机破坏的破坏细胞附近发生应力集中现象,后续发生破坏的细胞多分布在其周围,逐渐形成主破坏区域并且不断扩展,在宏观上则表现为裂纹的发生,之后便是以这个主破坏区域为主导发生破坏,形成宏观上裂纹的扩展和相互贯通,其表现形式为两个相互交叉的剪裂带。当破坏达到一定程度以后,岩石试件便发生整体上的失稳,残留一个

残余强度, 这个残余强度是细观上未破坏细胞与破坏细胞共同作用在宏观上的表现。此时如果进一步

加载岩石试件就会发生宏观上的破裂, 从而完全丧失支撑能力。

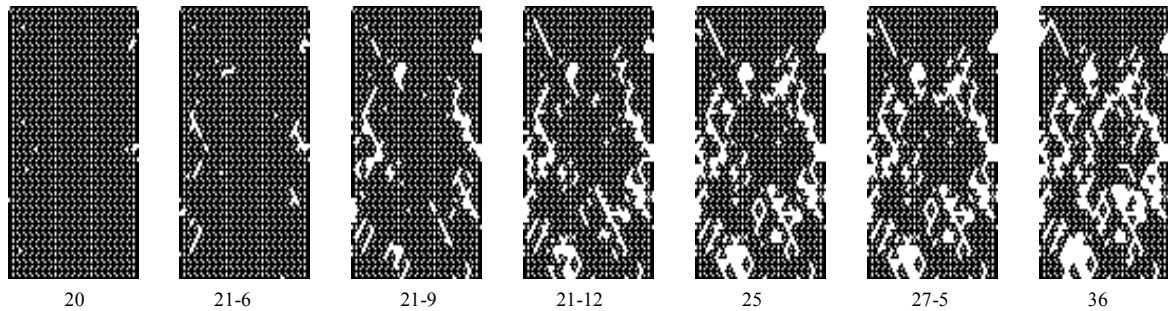


图 1 $m=1.5$ 岩石试件破坏过程

Fig.1 Failure process of rock specimen with $m=1.5$

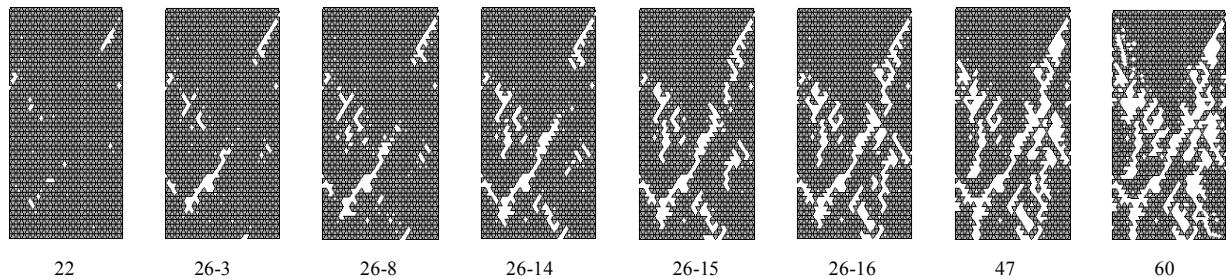


图 2 $m=2.0$ 岩石试件破坏过程

Fig.2 Failure process of rock specimen with $m=2.0$

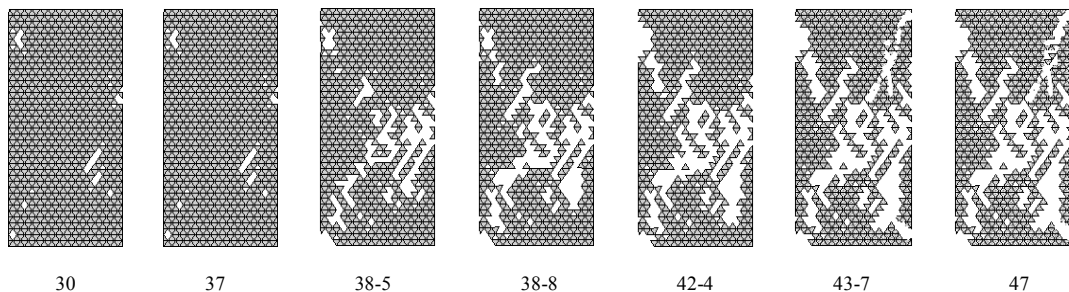


图 3 $m=5.0$ 岩石试件破坏过程

Fig.3 Failure process of rock specimen with $m=5.0$

从图 3 可以看出, 当岩石试件的非均匀性符合 Weibull 坡度参数 $m=5.0$ 的分布时, 岩石试件在细观上各个细胞之间参数的差异明显减小, 大部分细胞的参数值都集中在给定值的附近, 使得材料的非均匀性降低, 更加趋于均质材料的性质。岩石试件加载后, 由于仍然存在着比较薄弱的区域, 因此起初的破坏仍然具有随机性, 但随后的破坏便都集中在岩石试件两条对角线上及其附近。可以看出, 随着载荷的增加, 分布在岩石试件两条对角线上及其附近的破裂带成为岩石试件破坏的主导, 它们扩展并相互贯通。与此同时, 其它的由于分布的非均匀性而产生的随机破坏细胞也在一定范围内扩展, 并

对主破裂产生一定的影响。在宏观上则表现为裂纹的附近有一些不规则的破裂区域的出现。

5 结 语

岩石材料的宏观力学特征是材料内部细观力学特性的综合反映。对于脆性岩石材料, 其内部的非均匀性对材料的宏观破坏形式有着重要的影响。本文通过对同一种脆性岩石材料在不同均匀性的条件下进行模拟试验, 发现由 Weibull 分布中的坡度参数表示的非均匀性是影响脆性岩石材料破坏方式的重要因素, 并且存在如下规律: 在其它条件不变的情况下, 材料的坡度参数越小, 材料越不均匀,

其破坏形式则越具有随机性, 材料的坡度参数越大, 材料越趋于均匀, 其破坏形式越具有规则性, 这与试验结果是吻合的。

参 考 文 献

- [1] Cook N GW. The failure of rock[J]. **Joutnal Rock Mechanics Min Science**, 1965, (2): 389—403.
- [2] Kovari K. 岩石和似岩石材料的累进破裂的微观机理模型[A]. 隧道译丛[M]. 邱一平译. 1983, (3): 53—62.
- [3] [苏]C. И. 沃尔科夫. 强度统计理论[M]. 吴学蔺译. 北京: 科学出版社, 1965.
- [4] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [5] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析(RFPA2D)系统的细观单元本构关系及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 24—29.
ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA2D and its validations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 24—29.
- [6] 周辉, 王泳嘉, 谭云亮, 等. 岩石破坏过程的物理细胞自动机模型(I)——基本模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 475—478.
ZHOU Hui, WANG Yong-jia, TAN Yun-liang, et al. Study on physical cellular automata model of rock mass failure (I)—basic model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 475—478.
- [7] 周辉, 谭云亮, 冯夏庭, 等. 岩石破坏过程的物理细胞自动机模型(II)——模拟例证[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 782—786.
ZHOU Hui, TAN Yun-liang, FENG Xia-ting, et al. Study on physical cellular automata model of rock mass failure (II)—examples[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 782—786.
- [8] 谭云亮, 周辉, 王泳嘉, 等. 模拟细观非均质材料破坏演化的物理系胞自动机理论[J]. 物理学报, 2001, (4): 704—710.
TAN Yun-liang, ZHOU Hui, WANG Yong-jia, et al. Physical cellular automaton theory for simulating the failure process of micro-heterogeneous material[J]. **Acta Physica Sinica**, 2001, 50(4): 704—710.
- [9] Hui Zhou, Xia-ting Feng, Yong-jia Wang. Numerical Simulation of rockmass fracture process using physical cellular automata[A]. **SIF2002**[C]. Australia: [s. n.], 2002.
- [10] 王士民. 脆性岩石细观破坏过程中的演化细胞自动机方法研究[硕士学位论文D]. 沈阳: 东北大学, 2004.

上接第223页

- [1] 杨军, 高文学, 金乾坤. 岩石动态损伤特性实验及爆破模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 320—323.
YANG Jun, GAO Wen-xue, JIN Qian-kun. Experiment on dynamic damage property of rock and a new damage model for rock fragmentation by blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(3): 320—323.
- [2] 杨军, 金乾坤. 应力波衰减基础上的岩石爆破损伤模型[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 241—246.
YANG Jun, JIN Qian-kun. A new damage model for rock fragmentation by blasting based on stress wave attenuation[J]. **Explosions and Shock Waves**, 2000, 20(3): 241—246.
- [3] Rubin A M, Ahrens T J. Dynamic tensile failure induced velocity deficits in rock [J]. **Geophysics Research Letter**, 1991, 18(2): 219—223.
- [4] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 江苏: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [5] Furlong J R, Davis J F, Alme M L. Modeling the dynamic load/ unload behavior of ceramics under impact loading[R]. RDA-TR-0030-0001, Arlington: R and D Associates, 1990.
- [6] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理和计算[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.
- [7] Huang Fenglei, Wu Haijun, Jin Qiankun. A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets[J]. **International Journal of Impact Engineering** (In press), 2005.
- [8] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [9] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Modeling of wave propagation induced by underground explosion[J]. **Computers and Geotechnics**, 1998, 22(3/4): 283—303.