

脆性岩石破坏数值模拟研究的两个问题

王士民¹, 朱合华¹, 冯夏庭²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中国科学院 岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 应用数值模拟方法, 对脆性岩石单轴压缩情况下破坏规律进行了初步研究, 主要讨论了脆性岩石的破坏机理、脆性岩石破坏数值模拟试验中的端部效应问题, 并得出了一些初步的结论。在单轴压缩试验中, 脆性岩石破坏过程主要以拉伸破坏为主。端部效应则是除了岩石试件本身所具有的材料非均匀性外影响岩石试件破坏形式的另一个重要因素。总体上存在这样的规律, 即端部约束越大, 岩石试件破坏型式越趋近于“X”型剪胀破坏, 端部约束越小, 则岩石试件破坏型式越趋近于张拉破坏。

关 键 词: 脆性岩石; 非均匀性; 数值模拟; 单轴压缩试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Two problems of numerical simulation of brittle rock failure

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

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

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

Abstract: The failure rules of brittle rock under uniaxial compression test are studied primarily by using numerical simulation. The brittle rock failure mechanism and the end effect in the numerical simulation test of brittle rock failure are discussed; and some primary conclusions have been drawn. In the uniaxial compression test of brittle rock, tension failure dominates the failure process. Besides the material heterogeneity of rock specimen, the end effect is another important factor to affect the failure pattern of rock specimen. In general, such rules are in existence; the end restraint is more bigger, the failure pattern of rock specimen is more close to “X” dilatancy failure; the end restraint is more smaller, the failure pattern of rock specimen is more close to tension failure.

Key words: brittle rock; heterogeneity; numerical simulation; uniaxial compression test

1 引 言

岩石变形破裂过程研究是岩石力学的核心内容, 对于理解井巷工程稳定性、边坡失稳和地震等地壳介质破裂过程的机制具有重要意义。自从 N. G.W. Cook 1965 年提出岩石应力-应变全过程的概念^[1], 以及后来刚性或电液伺服控制试验机的出现, 使得人们对岩石变形破坏的力学机理有了一个全新的认识, 即岩石材料达到极限荷载之后, 仍然具有一定的残余承载能力, 这个概念使得人们对岩石的本构关系有了更新的认识, 它赋予了岩石强度或岩石破坏这个概念以新的内容, 岩石承载能力的丧失是逐渐的、连续的, 而不是间断的, 这就是所

谓的岩石破裂过程。Kovari^[2]于 1977 年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^[8]提出, 构成物体的材料从总体上看可能是均质的, 但从微观上看, 却是十分不均一的。宏观的破坏现象, 是微观破坏的综合表现, 这些不均质的微观破坏, 只能用统计的办法来研究。唐春安^[2]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质性。唐春安^[9]

认为, 细观非均质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}, 在该系统中, 为了反映岩石材料性质的细观非均匀性, 假定材料在总体上满足 Weibull 分布。

本文在前人研究的基础上, 应用数值模拟方法, 主要讨论了脆性岩石的破坏机理、脆性岩石破坏数值模拟试验中的端部效应和网格效应等问题, 并得出了一些初步的结论。

2 数值模拟方法简介

本文所应用的演化细胞自动机方法是结合岩石力学的基本原理和细胞自动机的基本理论, 以位移、力、应力和应变等矢量为系统的基本变量, 建立的一种含有两种细胞的演化细胞自动机模型^[4, 6]。

在该模型中将岩石试件划分成一定数目的两类细胞: 一类为三角形细胞, 其状态变量为三角形细胞内的应力和应变; 一类为节点细胞, 其状态变量为节点细胞上的位移和力。两种细胞相互连接起来, 共同形成细胞空间。本文根据计算的需要, 在一个模型中同时包含了两类细胞, 两类细胞互为邻居共同构成整个系统的邻居结构。

细胞自动机的演化规则是细胞自动机系统演化的基本依据, 它是由一系列的子规则构成, 每一个子规则都定义了一个细胞从上一时刻到下一时刻细胞状态改变的映射关系。在本文模型中的演化规则具体阐述如下。

(1) 对于任意三角形细胞 i , 其邻居是与它相邻的节点细胞, 因此, 其状态变量应力在下一时刻的状态由其邻居节点细胞的位移共同决定, 即:

$$\sigma_i^{t+1} = f_1(\sigma_i^t, u_{ij}^t) \quad (j=0, 1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

式中 σ_i^{t+1} 为三角形细胞 i 在 $(t+1)$ 时刻的应力状态; σ_i^t 为三角形细胞 i 在 t 时刻的应力状态; u_{ij}^t 为三角形细胞 i 的第 j 个邻居节点细胞在 t 时刻的位移状态。

(2) 对于任意节点细胞 i , 其邻居是与它相邻的三角形细胞, 因此, 它的状态变量位移在下一时刻的状态由其邻居三角形细胞的应力和系统外力共同决定, 即

$$u_i^{t+1} = f_2(u_i^t, \sigma_{ij}^t, F) \quad (j=0, 1, 2) \quad (2)$$

式中 u_i^{t+1} 为节点细胞 i 在 $(t+1)$ 时刻的位移状态; u_i^t 为节点细胞在 t 时刻的位移状态; σ_{ij}^t 为节点细胞 i 的第 j 个邻居三角形细胞在 t 时刻的应力状态; F 为系统外力。

(3) 在模拟过程中, 当系统演化达到平衡以后, 要对三角形细胞的应力状态进行破坏判断, 因而建立三角形细胞破坏演化规则, 具体规则表述如下:

如果 $f_3(\sigma_i, c, \varphi, \tau_c)$, 三角形细胞死亡, 应力

$$\sigma_i = 0 \quad (3)$$

其中: σ_i 为系统平衡以后三角形细胞的应力状态; c 为三角形细胞的凝聚力; φ 为三角形细胞的内摩擦角; τ_c 为三角形细胞的抗拉强度。

规则(1)~(3)的具体定义可以根据实际问题的不同而不同。在本文模型中, 由于考虑的脆性岩石的破坏问题是属于含有材料非线性因素的弹性问题, 并且假设岩石的弹性模量和抗拉强度均符合 Weibull 分布^[2, 4], 本构关系为线弹性。本模型考虑拉伸破坏和剪切破坏两种形式, 因此, 采用最大拉应力准则和莫尔-库仑准则作为系统的破坏演化规则。

应用以上 3 个演化规则, 即可对岩石受力破坏的整个演化过程进行模拟, 具体步骤如下:

(1) 在每步加载过程中, 整个系统根据节点细胞演化规则和三角形细胞演化规则进行演化, 直到整个系统达到平衡。

(2) 应用破坏演化规则对所有三角形细胞的应力状态进行破坏判定, 如果满足破坏演化规则, 则按式(3)进行细胞死亡处理, 并重复步骤(1), 以寻找新的平衡状态; 否则系统在此次加载过程中达到了真正的平衡。

3 脆性岩石破坏的主要方式

脆性岩石的破坏机制主要有两种, 一种是剪破坏, 也就是通常所说的“X”型破坏, 剪破坏主要是因为岩石在剪应力作用下抗剪强度不足而产生的一种破坏, 即这种破裂面是剪切作用的结果; 另一种破坏型式是破裂面平行于最大主应力, 这种破裂的力学过程相当于张拉作用, 实际上是岩石在外力作用下产生张应变超过极限张应变的结果^[10]。本文模型中的破坏准则采用了最大拉应力准则和莫尔-库仑准则, 但是作者在数值模拟试验过程中发现, 对于脆性岩石, 两种破坏形式在试验中具有主次之分, 而且往往只是一种破坏形式。因此, 本文针对这个问题, 在不改变其他试验参数的前提下, 分别应用最大拉应力准则和莫尔-库仑准则作为破坏演化规则进行了试验, 具体如下。

3.1 数值模拟试验

本次试验共有 3 个试验, 试验一选择最大拉应

力准则作为破坏演化规则；试验二选择莫尔-库仑准则作为破坏演化规则；试验三则同时选择最大拉应力准则与莫尔-库仑准则作为破坏演化规则。试验中，其他试验参数均相同，如表 1 所示。

表 1 岩石试件参数
Table 1 Parameters of rock specimen

弹性模量 /MPa	抗拉强度 /MPa	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	泊松 比	密度 /g·cm ⁻³
60 950	6.19	54.9	47.7	0.274	2 600

试件尺寸为 30 mm×60 mm，将试件共剖分为 1 800(30×60)个三角形细胞、976(16×61)个节点细胞，岩石的弹性模量和抗拉强度符合坡度参数 $m=2.0$ 的 Weibull 分布；试件在试验前完整、无预制裂纹；试验以位移方式加载，每步加载量为 0.001 mm，加载步数为 50 步；试验过程中，侧面无约束，顶底面均为 Y 方向进行约束、X 方向自由。

3.2 数值模拟试验结果及分析

从图 1 可以看出，试验一岩石试件从第 9 步开始出现随机破坏；到第 12 加载步第 1 子步时，随即破坏开始相互贯通，所体现出来的破坏形式为岩石试件从中间劈裂；加载至 16 步第 3 子步时，试件在 X 方向的应变突然明显增加，导致试件失稳。图 2 为试验二的破坏过程，岩石试件从第 35 步开始出现少量随机破坏；加载至 50 步第 1 子步时，试件左上部出现局部破坏；加载至 53 步第 2 子步时，试件左上部局部破坏区域增大，此时由于 X 方向无约束，试件失稳。试验三岩石试件从第 30 步开始出现随机破坏；到第 38 加载步第 5 子步时，随即破坏开始相互贯通，大部分破坏集中在试件中部；加载至 47 步第 3 子步时，局部破坏沿对角线方向相互贯通，X 方向的应变突然明显增加，导致试件失稳。从图 4^[6]可以看出，实际的岩石的破坏是一个渐进的过程，应力-应变曲线峰值大约出现在应变为

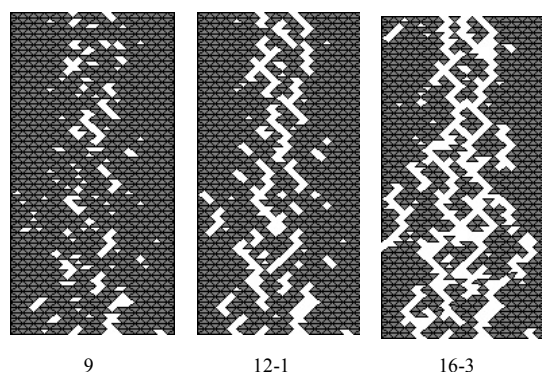


图 1 试验一岩石试件破坏过程图

Fig.1 Failure process of rock specimen in test 1

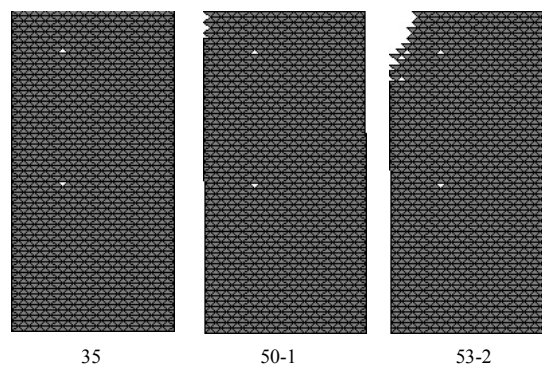


图 2 试验二岩石试件破坏过程图

Fig.2 Failure process of rock specimen in test 2

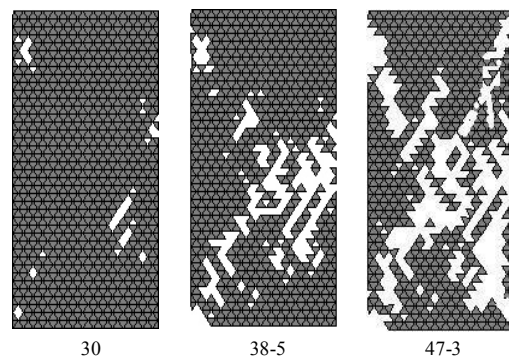


图 3 试验三岩石试件破坏过程图

Fig.3 Failure process of rock specimen in test 3

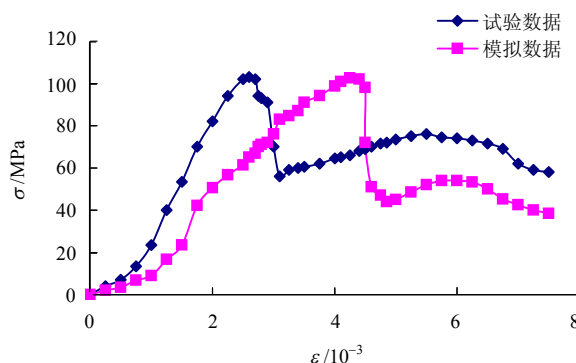


图 4 岩石试件破坏过程图及应力-应变曲线

Fig.4 Failure process and stress-strain curve of rock specimen

2.6×10^{-3} 处，峰值之后存在一个残留强度。

岩石试件破坏大部分发生在应力-应变曲线峰值之后。将 3 个试验对比可以发现，试验一的破坏过程与实际的岩石试件破坏过程基本吻合，峰值位置比较接近但是比较靠前，这主要是端部效应的影响，下一节中将详细讨论；而从图 2 与图 3 可以看出，试验二与试验三应力-应变曲线峰值较实际滞后较多。加之考虑脆性岩石抗压不抗拉的特性，因此，可以得出结论，在单轴压缩试验中，脆性岩石破坏过程主要以拉伸破坏为主。

4 脆性岩石破坏数值模拟中的端部效应问题

无论是实验室试验还是现场原位试验,都存在很多人因素干扰使得试验结果失真,这些因素中影响最为突出的则是压板与试件匹配而产生的端部效应^[10]。如在材料力学单轴压缩试验中,经常见到一种剪破坏实例实方试件受压后形成“X”型破坏,实际上就是端部效应的显示。在岩石单轴压缩破坏试验中,基本的破坏方式有如下几种,如图 5 所示。这些破坏形式之所以会存在差异,除了岩石试件本身所具有的材料非均匀性的影响外,端部效应也是一个重要的影响因素。

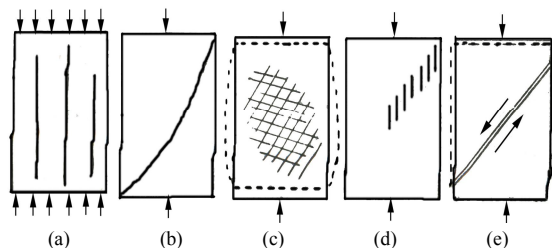


图 5 岩石试件破坏现象

Fig.5 Failure phenomena of rock specimen

4.1 数值模拟试验

本文针对岩石单轴压缩破坏试验中的端部效应,设计了 2 个试验(试验四和试验五)。试验四与试验五的根本区别在于:试验四的上下端部 X 方向为自由,试验五的上下端部 X 方向进行位移约束,除此之外,两个试验的其他参数均相同。其中,试验四与试验一相同,所以下面的讨论中,提及试验四直接参考图 1。试验中,其他试验参数均相同,如表 1 所示。

试件尺寸为 $30\text{ mm} \times 60\text{ mm}$,将试件共划分为 1 800(30×60)个三角形细胞、976(16×61)个节点细胞,岩石的弹性模量和抗拉强度符合坡度参数 $m = 2.0$ 的 Weibull 分布;试件在试验前完整、无预制裂纹;试验以位移方式加载,每步加载量为 0.001 mm ,加载步数为 50 步;试验过程中,侧面无约束,顶底面均为 X 、 Y 方向进行约束。

此外,根据上节试验所得的结论,将最大拉应力准则作为破坏演化规则。

4.2 数值模拟试验结果及分析

试验四上下端部 X 方向的位移边界条件为自由位移边界条件,如图 1 所示,试件的破坏过程为一渐进性破坏过程,试件的强度是逐步丧失的,宏观

上表现为劈裂破坏,属于图 5 中的(a)型破坏。而试验五上下端部 X 方向的位移边界条件为强制约束,如图 6 所示,试验五岩石试件从第 20 步开始出现随机破坏;到第 29 加载步第 7 子步时,随即破坏开始相互贯通,分布在岩石试件两条对角线上及其附近的破裂带成为了岩石试件破坏的主导方向,加载至 30 步时,试件内部的破坏继续发展贯通,导致试件失稳。所体现出来的破坏形式为类似于图 5 中的(c)型破坏,即剪胀破坏。

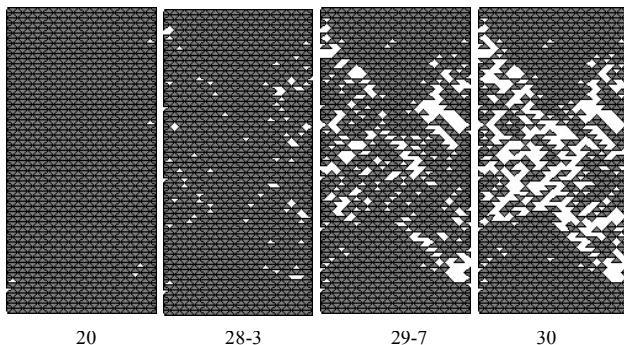


图 6 试验五岩石试件破坏过程图

Fig.6 Failure process of rock specimen in test 5

从试验四与试验五的对比可以看出,试验过程中,试件上下端部 X 方向的位移边界条件(即端部效应)是影响岩石试件破坏型式的一个重要因素。而在实验室试验和者现场原位试验中,端部效应的存在是不可避免的,而且根据试验条件是变换不定的,因此,实验室试验和现场原位试验所得出的结果会因为端部效应的不同出现如图 5 所示的各种不同的破坏型式。但是总体上存在这样的规律,即端部约束越大,岩石试件破坏型式越趋近于“X”型剪胀破坏,端部约束越小,则岩石试件破坏型式越趋近于张拉破坏。

5 结 论

本文应用数值模拟方法,对脆性岩石破坏规律进行了初步的研究,主要讨论了脆性岩石的破坏机理、脆性岩石破坏数值模拟试验中的端部效应问题,通过对数值模拟的结果进行分析,得出如下结论:

(1) 脆性岩石的破坏机制主要有两种,一种是剪破坏;另一种破坏型式是破裂面平行于最大主应力方向的拉伸破坏。在单轴压缩试验中,脆性岩石破坏过程主要以拉伸破坏为主。

(2) 无论是实验室试验还是现场原位试验,压板与试件匹配而产生的端部效应是造成试验结果失真的一个重要因素。在岩石单轴压缩破坏试验中,破坏形式存在不同程度的差异,除了岩石试件本身

所具有的材料非均匀性的影响外，端部效应也是一个重要的影响因素。总体上存在这样的规律，即端部约束越大，岩石试件破坏型式越趋近于“X”型剪胀破坏，端部约束越小，则岩石试件破坏型式越趋近于张拉破坏。

参 考 文 献

- [1] Cook N G W. The failure of rock[J]. **Int. J Rock Mech. Sci.**,1965, 2: 389—403.
- [2] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [3] Kovari K., 邱一平译. 岩石和似岩石材料的累进破裂的微观机理模型[J]. 隧道译丛, 1983, 3: 53—62.
- [4] 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.
- [5] 王士民, 朱合华, 冯夏庭, 等. 细观非均匀性对脆性岩石材料宏观破坏形式的影响[J]. 岩土力学, 27(2): 224—228.
- [6] 王士民, 冯夏庭. 脆性岩石破坏的演化细胞自动机(ECA)研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15):
- [7] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] [苏]C.И.沃尔科夫, 吴学蒨译. 强度统计理论[M]. 科学出版社, 1965.
- [9] 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 RFPA^{2D} and its validations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 24—29.
- [10] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 科学出版社, 1988.