

含预制裂纹脆性岩石破坏数值模拟研究

王士民¹, 刘丰军^{1,2}, 叶 飞¹, 李 鹏¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 河南科技大学 建筑工程学院, 洛阳 471003)

摘 要: 岩石是经过变形、遭受过破坏的地质体。在外界荷载条件下岩石内部缺陷引起的渐进性破坏, 这个过程与材料本身存在的缺陷有着密切的关系。应用数值模拟方法对含有预制裂纹的脆性岩石的破坏规律进行了初步的研究, 分析了裂纹的存在对岩石破坏的影响机制。研究发现, 在对带有预制裂纹的岩石试件进行加载试验过程中, 预制裂纹的存在成为了影响岩石破裂方式的主要因素。与之相比, 由材料非均质性所造成的影响便成了次要因素, 而对于含有双预制裂纹的岩石试件裂纹的间距是影响岩石破坏型式的重要因素。

关 键 词: 脆性岩石; 预制裂纹; 数值模拟

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

The numerical simulation to model fallure of brittle rock with prefab crack

WANG Shi-min¹, LIU Feng-jun^{1,2}, YE Fei¹, LI Peng¹

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

2. School of Architecture Engineering, HAUST, Luoyang 471003, China)

Abstract: The rock is a geological media that underwent distortion and destroy. The failure of rock is progressive failure process that is conducd by the inner flaws under the condition of the outside load. This process has intimate relation with the media's inner flaws. The pilot study on the failure law of brittle rock with prefab crack is carried out by numerical sisulation, and the influencing mechanism of the cracks on the brittle rock failure is analyzed. Based on the study results, some conclusions can be drawn. In the failure process of the brittle rock with prefab crack under load, the existence of the cracks becomes the master factor that influences the failure mode of the brittle rock instead of the heterogeneity. And the distance between the prefab cracks is an important factor influencing the failure mode of the brittle rock with double cracks.

Key words: brittle rock; prefab crack; numerical simulation

1 引 言

岩石变形破裂过程研究是岩石力学研究的核心内容, 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, 它赋予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地、连续地, 而不是间断地, 这就是所谓的岩石破裂过程。Kovari^[2]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, 反映出岩石的弹性、塑性以及由于裂纹和应力场的局部不均匀所引起的破裂。

天然岩石是非线性、非均质、各向异性的复杂介质, 人们目前尚缺乏对岩石材料的不均匀性和物理力学非线性本质的认识及解决这些问题的方法, 致使许多岩石力学问题仍然无法从理论上定量和定性的解释。岩石应力-应变全过程曲线之所以是非线性的, 主要是因为岩石在加卸载过程中其内部不断产生细观破裂, 而这种细观破裂的发展累积最终导致岩石的宏观破裂。岩石内部因地质作用形成的节理裂隙则是影响岩石承载后失稳破坏的重要因素。

在经典断裂力学中,关于裂纹的研究一般只涉及到裂纹尖端引起应力集中所导致的裂纹扩展问题,不能研究非均质介质中的裂纹扩展,而岩石的非均匀性对于岩石中的裂纹扩展具有很大的影响,因此,在研究岩石中的裂纹扩展时考虑岩石材料的非均匀性是非常重要的^[3]。近年来,用数值模拟方法研究岩石的断裂问题是岩石力学界的一个热点方向,相比而言,数值方法可以考虑岩石的非均匀特性和所处的复杂受力条件,具有较强的适用性^[4]。

本文主要针对单轴压缩试验中考虑材料的非均匀性,研究预制裂纹对岩石破坏模式的影响。

2 数值模拟方法简介

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,建立一种含有两种细胞的演化细胞自动机模型^[5~7]。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;另一类为节点细胞,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。根据计算的需要,一个模型中同时包含了两类细胞,二者互为邻居,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。本文模型的演化规则如下:

(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

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

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, 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

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

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, 具体规则是: 如果 $f_3(\sigma_i, c, \varphi, \tau_c)$, 三角形细胞死亡, 则应力

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

式中, 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。

3 个规则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型式, 故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, 对岩石受力破坏的整个演化过程进行模拟, 具体步骤为: ①在每步加载过程中, 根据整个系统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 含单预制裂纹单轴压缩试验

本次试验主要研究带含预制裂纹的岩石试件在单轴压缩情况的受压破坏过程, 并分析单裂纹对岩石试件破坏方式的影响, 取某地的英云闪长岩作为试件进行模拟试验, 其中岩石的具体参数见表 1。试件尺寸为 $60 \text{ mm} \times \phi 30 \text{ mm}$, 将试件共剖分为 1 200 (30×40) 个三角形细胞, 656 (16×41) 个节点细胞, 岩石的弹性模量和抗拉强度符合坡度参数 $m = 3.0$ 的韦伯分布; 试件在试验前添加一条预制裂纹, 裂纹与水平方向成 50° , 裂纹长度为 20 mm; 试验以位移方式加载, 每步加载量为 0.001 mm, 加载步数为 100 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。试验中岩石试件破坏演化过程如图 1 所示。

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	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
57.3	6.54	29.4	56.2	0.22	26

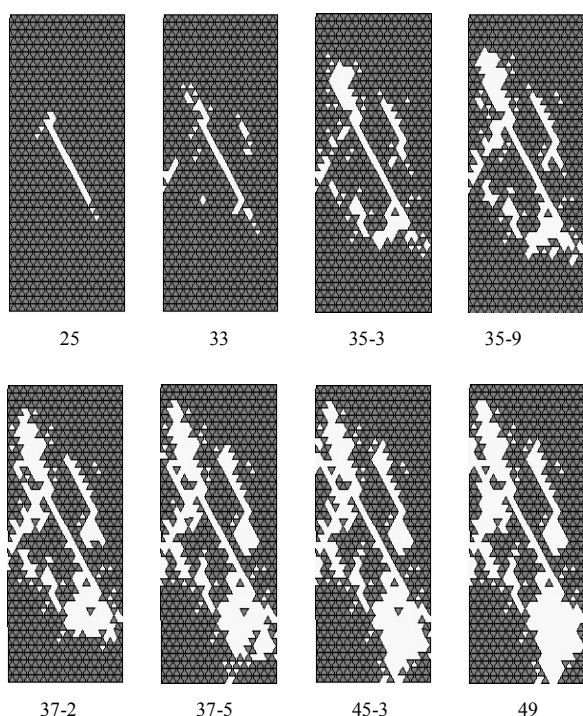


图1 带单裂纹岩石试件破坏过程图

Fig.1 The crack process of rock specimen with single crack

从图1中可以看出,该试验中的岩石试件含有预制的裂纹,相对于材料的非均质性来说,裂纹成为了影响岩石试件破坏的主要因素。从图中第25步的岩石试件的情况可见,岩石试件在加载后,由于预制裂纹区域的应力集中效应,岩石首先从预制裂纹的两端开始发生破坏,随着荷载增加,裂纹从两端开始延伸扩展,扩展方向主要是两个方向的合成,一个方向是沿裂纹方向扩展,另一个方向是垂直裂纹方向。值得注意的是,与此同时,在预制裂纹的两侧都出现了破坏现象,这也是由于预制裂纹的存在所致。而在整个试验中,由于岩石试件的非均质性所造成的随机破坏并不明显,因此可以得出结论:对带有预制裂纹的岩石试件进行加载试验过程中,预制裂纹的存在成为了影响岩石破裂方式的主要因素。与之相比,由于材料非均质性所造成的影响便成了次要因素。从岩石试件的最终破坏形式可见,主破坏区主要分布在包含裂纹在内的一个区域,大部分破坏的细胞都集中在预制裂纹的两端部位,预制裂纹的两侧也有分布。

4 含双预制裂纹单轴压缩试验

本次该试验主要研究包括双预制裂纹的岩石试件在单轴压缩情况的受压破坏过程,并分析双裂纹对岩石试件破坏方式的影响以及双裂纹相互贯通的

形式。试验取某地的似斑状花岗闪长岩作为试件进行模拟试验,岩石的具体参数见表1。试件尺寸为 $60\text{ mm} \times \phi 30\text{ mm}$,将试件共剖分为1200(30×40)个三角形细胞,656(16×41)个节点细胞,岩石的弹性模量和抗拉强度符合坡度参数 $m=2$ 的韦伯尔分布。试件在试验前添加两条相互平行,并且间隔一段距离的预制裂纹,两个裂纹与水平方向的角度均为 50° ,裂纹长度为20 mm,两裂纹之间垂直距离长度为10 mm。试验以位移方式加载,每步加载量为0.001 mm,加载步数为100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。试验中岩石试件破坏演化过程如图2所示。

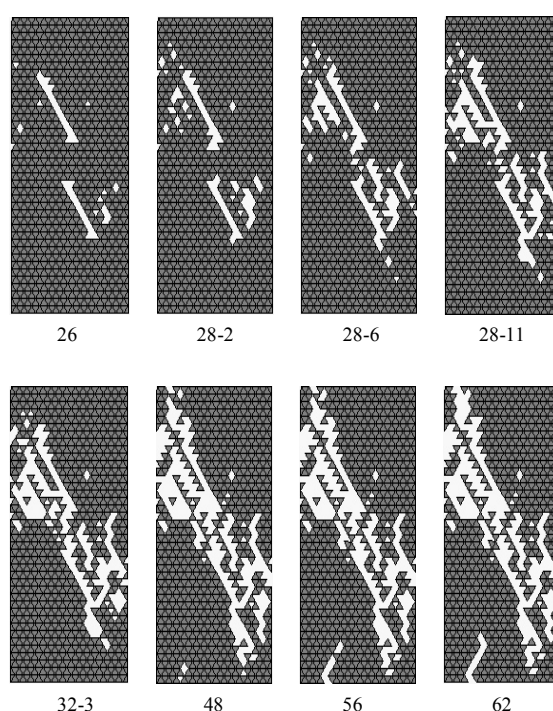


图2 含双裂纹岩石试件破坏过程图及应力-应变曲线图

Fig.2 The crack process of rock specimen with double cracks

从图2可以看出,岩石试件首先从两条预制裂纹的端部开始破坏,尤其是两条裂纹相邻的岩桥部位。随着荷载的施加,在预制裂纹的两侧开始出现破坏区域。之后,两条预制裂纹相邻的岩桥部位互相搭接、贯通,并且与两裂纹两侧的破坏区域合并为一个与预制裂纹的方向一致的破裂带。该试验显示,两条预制裂纹对岩石的破坏形式有着非常重要的影响,由于两条裂纹的间距较小,所以裂纹的贯通不十分明显,而是形成了一个以两裂纹为中心的破裂条带,因此可以得出预制裂纹的间距是影响裂纹扩展形式的一个重要因素的结论,同时也是影响岩石破坏情况的重要因素。

5 结 语

本文应用数值模拟方法,对含有预制裂纹的脆性岩石的破坏规律进行了初步地研究,分析了裂纹的存在对岩石破坏的影响机制。研究发现,在对带有预制裂纹的岩石试件进行加载试验过程中,预制裂纹的存在成为影响岩石破裂方式的主要因素。与之相比,由于材料非均质性所造成的影响便成了次要因素,而且,对于含有双预制裂纹的岩石试件,双预制裂纹的间距是影响岩石破坏形式的重要因素。此外,单裂纹的角度、长度和双裂纹的角度、长度以及相对位置等因素都是影响脆性岩石材料破坏形式的重要因素,有待进一步地研究。

参 考 文 献

- [1] Cook N G W. The failure of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 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. 11—30.
- [3] 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): 555—569.
- [4] 朱万成, 黄志平, 唐春安, 等. 含预制裂纹巴西盘试样破裂模式的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 609—1 612.
ZHU Wan-cheng, HUANG Zhi-ping, TANG Chun-an, et al. Numerical simulation on failure process of pre-cracked Brazilian disk specimen of rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1 609—1 612.
- [5] 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.
- [6] 王士民, 冯夏庭, 王永嘉, 等. 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): 2 634—2 639.
WANG Shi-min, FENG Xia-ting, WANG Yong-jia et al. Study on evolving cellular automata(eca) to model crack of brittle rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2 634—2 639.
- [7] 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, 2006, 27(2): 224—228.
WANG Shi-min, ZHU He-hua, FENG Xia-ting, et al. Influence of heterogeneity on macroscopical crack form of the brittle rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 224—228.