

残余强度特性对岩石宏观破坏的影响

刘文彬 唐春安 唐烈先

(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁沈阳 110004)

【摘要】 运用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统, 数值模拟了单轴压缩试验下试样破裂失稳的过程, 主要研究了残余强度特性对岩石类非均质材料弹-脆-塑性的影响。对大量不同残余强度岩石试样的数值模拟结果显示: 残余强度是影响岩石弹-脆-塑性的重要方面, 残余强度越高, 岩石越容易表现为塑性, 岩石试样所承受的峰值载荷也越高。

【关键词】 岩石; 残余强度; 弹-脆-塑性; 数值模拟

【中图分类号】 TU 452; TU 458

Numerical Simulation on Influence of Residual Strength on Macroscopic Behavior of Rock Failure

Liu Wenbin Tang Chun'an Tang Liexian

(Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Liaoning Shenyang 110004 China)

【Abstract】 By RFPA^{2D} (Rock Failure Process Analysis) Code, the failure processes of lots of rock specimens are simulated under uniaxial test. The influence of residual strength on elasticity, brittleness and plasticity of rock is mainly studied. The results of numerical simulation show that the residual strength has great effect on elasticity, brittleness and plasticity of rock, with the increase of residual strength, rock specimens perform more plasticity and higher peak compression strength.

【Key words】 rock; residual strength; elasticity-brittleness-plasticity; numerical simulation

0 引言

岩石是一种具有内部结构的非均匀介质, 在外载荷作用下, 岩石内部微裂纹萌生、扩展、相互贯通、形成宏观裂纹后失稳破坏。不同岩石失稳破裂过程表现出不同的力学性质。岩石等非均质材料的弹-脆-塑性是控制其破坏演化和各种非线性力学行为的决定性因素。研究其产生的机理对于改善合成材料的力学性能、预测和控制岩石等非均质材料的破坏行为无疑具有重要的理论和实用价值。一些学者从不同的角度给出了非均质材料的弹-脆-塑性等性质的解释, 如残余应力的释放和裂纹尖端的细观塑性变形解释^[1], 位错塞积解释^[2], 非均质性解释^[3-5], 细观能量耗散效应解释^[6]等。为进一步揭示岩石等非均质材料的力学性质提供了不同的研究方法, 具有重要的参考价值。

在前人研究的基础上, 本文应用东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的 RFPA^{2D} (Rock Failure Process Analysis) 软件, 通过数值模拟试样的单轴抗

压试验探讨了残余强度对岩石等非均质材料弹-脆-塑性性质的影响。

1 数值试验模型

1.1 岩石破裂分析系统 RFPA^{2D} 概述

本文所用 RFPA^{2D} 系统, 是一个能模拟岩石介质逐渐破坏过程的数值模拟工具^[7, 8]。和其他已有的逐渐破坏模型 (Progressive Failure Fracture Damage Model) 一样^[9], RFPA^{2D} 包括两方面的功能: 应力分析和破坏分析。RFPA^{2D} 采用有限元法进行应力分析。破坏分析则是根据一定的破坏准则来检查材料中是否有单元破坏。对破坏单元采用刚度特性退化 (处理分离) 和刚度重建 (处理接触) 的办法进行处理。为了模拟试验机加载情况, 采用位移加载方式。对于每一步给定的位移增量, 首先进行应力计算。然后根据破坏准则来检查模型中是否有单元发生破坏。如果没有, 继续增加一个位移量, 进行下一步应力计算; 如果有破坏单元, 则根据单元的拉伸或剪切破坏状态进行刚度退化处理, 然后重新进行当

基金项目: 国家自然科学基金 (50374020; 50134040; 50174013)

作者简介: 刘文彬, 1973 年生, 男, 汉族, 山东泰安人。1998 年毕业于山东科技大学, 现在东北大学攻读硕士学位, 主要从事岩石力学试验研究工作。E-mail: WbL73@163.com

前步的应力计算。重复上述过程,直到整个材料产生宏观破坏。由于单元的破坏为脆性,因此认为单元破坏释放的弹性能以声发射的形式释放^[7,8]。根据声发射特性来观察岩石破裂过程,考虑到岩石类脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度,因此本文采用了修正后的库仑准则、包含拉伸截断^[10]作为单元破坏的强度判据。根据这一准则,单元的破坏可能是拉伸破坏也可能是剪切破坏。

1.2 模型说明

RFPA^{2D}程序以某种分布形式对材料强度和弹性模量进行初始赋值,本文采用韦布尔(Weibull)分布 $U_c(m, L)$ 来近似反映缺陷和晶粒等各微元强度等力学参数的不同。根据文献[11]中结论知,韦布尔参数 m 是材料的结构参数,它反映了材料结构中缺陷分布不规则程度,在量值上是该材料结构分形维数 D 的2倍。其中参数 m 越大,表明岩石的性质越均匀。 L 为反映岩石材料平均性质的参数。本模型中,破坏准则控制参数和岩石力学参数见表1、表2。

表1 破坏准则控制参数

控制参数	参 数 值
摩擦角/(°)	30
残余强度系数	0.01, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7
最大拉应变系数	10 000
最大压应变系数	10 000
破坏准则	Mohr-Coulomb

表2 试样力学性质参数表

力学参数及加载控制方式	参 数 值
均质度 M	2.0
单元弹性模量 E/MPa	60 000
单元抗压强度 σ/MPa	200
泊松比 μ	0.25
拉压比 λ	1/10
样本数量/个	10
加载方式	压缩

在这里分别选取了6种不同残余强度参数的试样,进行岩石试件单轴压缩试验。为了消除偶然误差的影响,对每一种岩石试样选取10个样本进行加载。同时为了充分体现残余强度带来的影响,最大拉应变系数和最大压应变系数都取了很大的值(10 000)。试样模型尺寸为140 mm×70 mm,网格划分为9 800(140×70)个等面积的单元。采用平面应力分析模型,整个模拟过程采用位移控制的加载方式,每步加载量为0.002 mm。6种试样中仅细观单元的残余强度值分别给定为0.01、0.05、0.1、0.3、0.5、0.7等6个不同的数值,其他参数均相同,对比试验结果重点分析残余强度对岩石材料弹—脆—塑性的影响。

2 试验结果分析

2.1 不同残余强度岩石试样破坏后的应力与声发射图(见图1)

由于篇幅所限,图1仅列出了6种试样失稳过程中最后一步的应力图及声发射图。

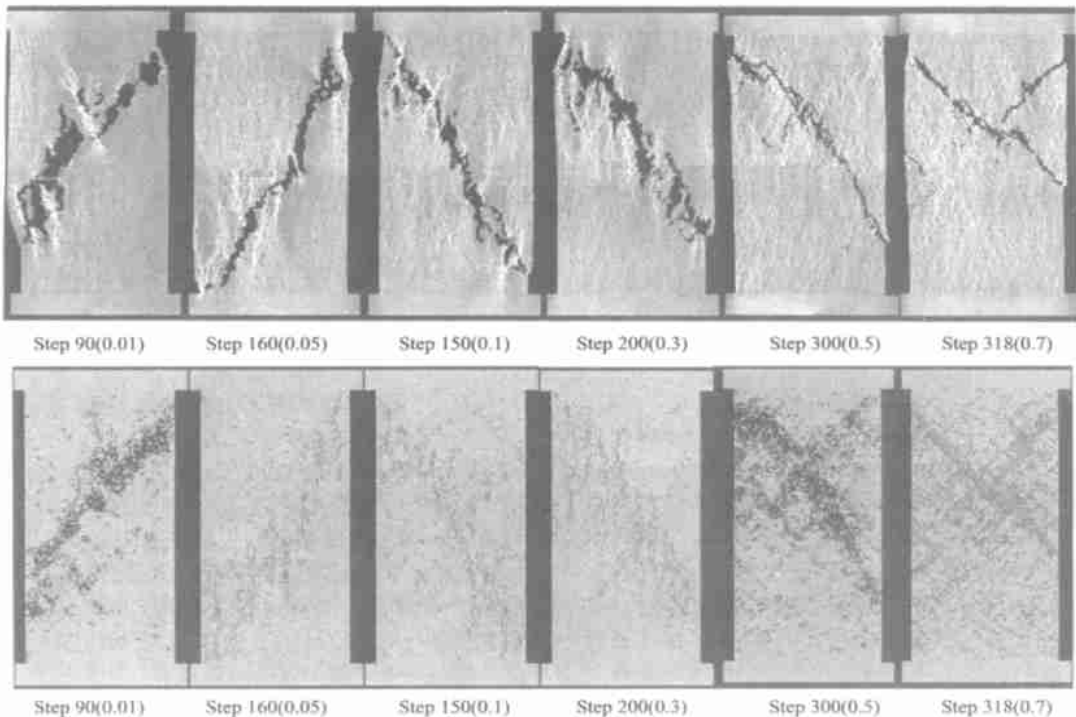


图1 不同残余强度试样的应力图(上)与声发射图(下)

2.2 不同残余强度岩石试样的应力-应变曲线及伴随的声发射图(见图 2)

从图 2 可以看出, 当残余强度 $f_r=0.01$ 时(图 2a), 岩石试样在某一时刻突然发生整体失稳, 应力应变曲线在同一位置呈直线下降, 声发射数量急剧增加。曲线在破坏前区呈现出良好的线性, 强度峰值和弹性变形的极限重合, 另外声发射在发生主破坏后的数量极少或者没有, 这是脆性岩石破坏时所具有的典型特征。当残余强度 $f_r=0.05$ 时(图 2b), 岩石试样在某一时刻发生主破坏, 但此时岩石并没有完全失稳, 而是又经过了一系列的微破坏演化才走向“崩溃”。从发生主破坏到岩石试样完全失

稳虽然历时很短, 且试样的破坏也呈现出一定程度的突发性, 但是其弹性极限与强度峰值不重合, 破坏前区和破坏后区均产生了一定的塑性变形, 声发射的分布也相对比较分散, 因此可以认为, 此试样的脆性程度较弱, 破坏前的塑性性质增强。当残余强度增加 $f_r=0.7$ 时(图 2f), 岩石的破坏行为未发生突发性现象, 在空间上不存在明显的主破坏区域, 在应力应变曲线的破坏前区和破坏后区均产生了明显的塑性变形, 声发射分布较均匀, 呈现出典型的塑性破坏特征。分析图 2a~f, 可以得到随着残余强度 f_r 的增大, 岩石试样的破裂失稳过程表现出脆性减弱塑性增强的规律。

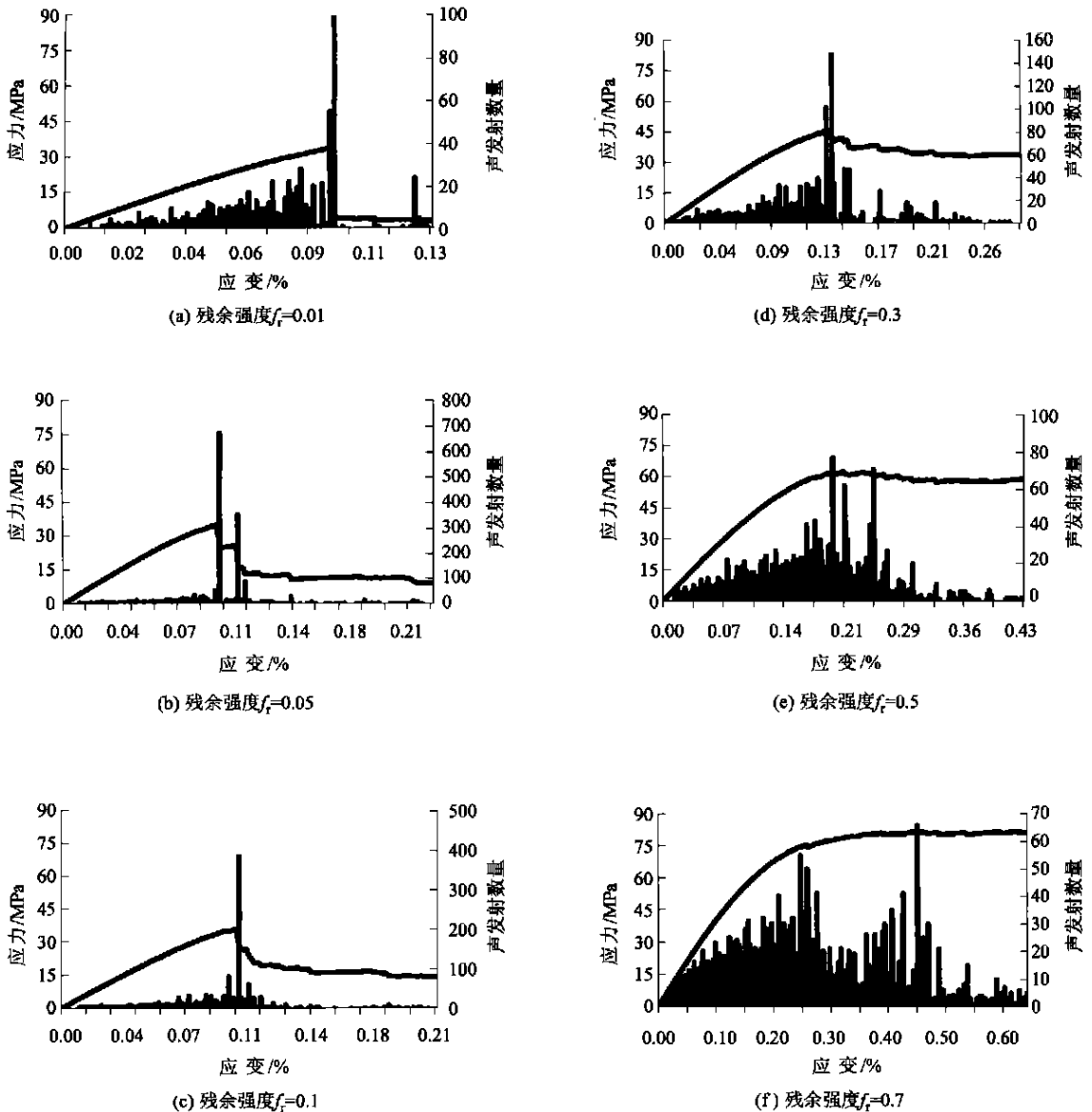


图 2 不同残余强度岩石试样的应力-应变曲线及伴随的声发射图

2.3 不同残余强度岩石试样破坏过程的应力-应变曲线(见图3)

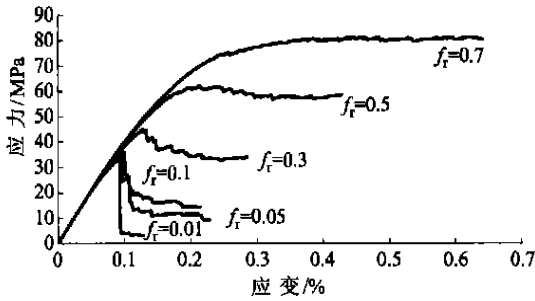


图3 不同残余强度岩石试样破坏过程的应力-应变曲线

2.4 试样残余强度和最大载荷的关系曲线(见图4)

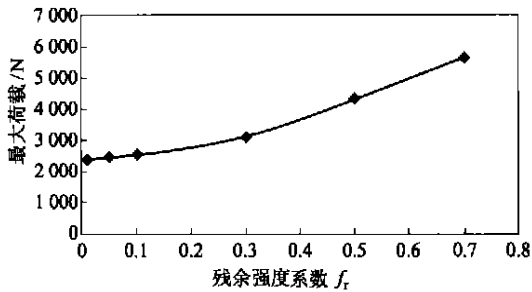


图4 试样残余强度和最大载荷的关系曲线

剪切破坏面之间摩擦力维持的承载能力就是残余强度,而摩擦力仅在具有相对滑移或者有相对滑移的趋势时才会产生。同样,岩石内摩擦力也只能在岩石屈服面间产生塑性滑移或滑移趋势过程中才逐步增加,正如皮带与带轮之间摩擦力是随着皮带在带轮上滑移伸长而逐段产生一样^[12]。对比不同残余强度下岩石试样的应力-应变曲线(见图3),在加载开始阶段载荷值较小,还没有发生剪切破坏面的相对滑移,残余强度不同的影响也没有体现出来,所以各试样的应力-应变曲线均呈现较明显的线性,并且保持较好的一致性。随着载荷增大,由于岩石材料非均质性的缘故,强度阈值较低的单元开始发生破坏,微裂隙不断的扩展、贯通,有了破坏面的相对滑移,不同残余强度岩石试样的应力-应变曲线也开始表现出明显的不同。相同条件下,残余强度 $f_r=0.01$ 的试样强度峰值仅为 33.65 MPa,发生的应变约为 0.09%,应力-应变关系近似为一直线;而残余强度 $f_r=0.7$ 的岩石试样在应力达到 81.90 MPa 应变达到 0.64% 时还没有发生主破坏;应力-应变曲线开始先有很小一段直线部分,然后是非弹性的曲线部分,并且继续不断地蠕变。在残余强度从 0.01 增加到 0.7 的过程中,曲线的斜率越来越小,主破坏

发生的越来越晚,主破坏前后的非线性阶段也越来越长。岩石试样宏观整体破坏所表现出来的脆性减弱,塑性增加。另外,岩石的承载能力由正压力产生的内摩擦力(即残余强度)和由材料强度产生的粘结力共同构成的^[13],残余强度与岩石正压力产生的内摩擦力是相对应的,内摩擦力越大,残余强度就越大,二者存在必然的内在联系。所以试样的强度峰值在一定程度上受到残余强度的影响,会随着残余强度的增大而增大(见图4);比较不同残余强度试样宏观破坏过程的应力-应变曲线,可以发现峰值过后突然的应力降越来越不明显,试样的失稳过程越来越表现为塑性破坏。文献^[13]也提出内摩擦力系数随屈服过程增大是岩石由脆性转变为延性的根本原因,内摩擦力系数增大则内摩擦力增大即残余强度增大,因此与本文结论基本一致。

3 结论

1) 本文利用数值试验研究了残余强度对岩石材料弹-脆-塑性力学性质的影响,从细观上揭示了岩石试样宏观破坏失稳过程中,随着残余强度的增大,岩石等非均质材料的脆性逐渐减弱,塑性逐渐增强的规律。

2) 试验结果同时表明残余强度对试样极限载荷值有很大的影响,残余强度越大,试样的极限载荷值就越大;反之,岩石试样的极限载荷值就越小。

3) 需要特别指出的是,细观单元残余强度与岩石试样所表现出来的整体宏观残余强度并不完全相同。岩石试样表现出来的整体宏观残余强度是指以缓慢剪切速率达到相当大的剪切位移条件下达到的剪切强度值^[14]。宏观残余强度并非一个常数,受到矿物成分^[15]、有效法向应力效应^[16]、剪切速率^[17]和孔隙水化学特征^[18]等因素的影响,还受到结构控制和围压的影响^[19]。从图5可以看到细观单元的残余强度对岩石表现出来的整体宏观残余强度的影响。试样宏观残余强度随着细观单元残余强度的增加而增加,单元残余强度反映了试样宏观残余强度,二者之间近似为线性关系。

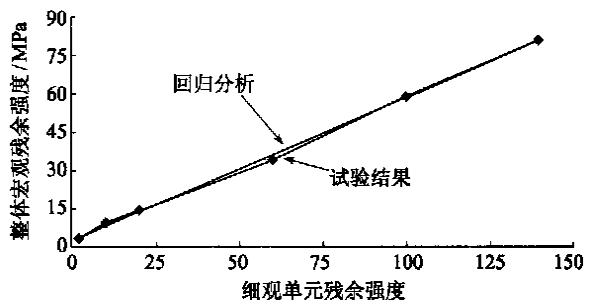


图5 细观单元残余强度与试样宏观残余强度的关系

4)本文只对不同残余强度岩石试样进行了单轴压缩模拟试验和初步分析,多向加载试验和拉伸试验有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Yu S W, Feng X Q. Micro-mechanical damage model for brittle materials with residual strain [A]. Proceedings of the Ninth International Conference on Fracture. 1997, (2): 1167~1174.
- 2 李宗全,陈湘明.材料结构与性能.杭州:浙江大学出版社.2001.159~160.
- 3 唐春安.岩石破裂过程中的灾变.北京:煤炭工业出版社.1993.26~27.
- 4 傅宇方,梁正召,唐春安.岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响.岩土工程学报,2000,22(6):705~710
- 5 梁正召,唐春安,黄明利等.岩石破裂过程中声发射模式的数值模拟.东北大学学报,2002,23(10):1008~1011
- 6 周 辉,冯夏庭,谭云亮等.物理细胞自动机与岩石弹—脆—塑性性质的细观机制研究.岩土力学,2002,23(6):678~682
- 7 唐春安.岩石声发射规律数值模拟初探.岩石力学与工程学报,1997,16(2):368~374
- 8 Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34: 249~262
- 9 崔维成.复合材料结构破坏过程的计算机模拟.复合材料学报,1996,13(4):102~111
- 10 Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining. Second Edition, London, Chapman & Hall, 1993, 106~108
- 11 高 峰,谢和平.脆性材料的分形统计强度理论.固体力学学报,1996,17(3):239~245
- 12 牛树仁,陈滋平.煤矿固定机械和运输设备.北京:煤炭工业出版社,1994,32~34.
- 13 尤明庆,华安增.岩石试样的强度准则及内摩擦系数.地质力学学报,2001,7(1):53~60
- 14 Skempton A. W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. Geotechnique, 1986, 35(1): 3~18.
- 15 Lupini J F, et al. The drained residual strength of cohesive soils. Geotechnique, 1981, 31(2), 181~213.
- 16 Hawkins A B, Privett K D. Residual strength; Does it help or hinder Geological Society, Engineering Geology Special Publication, 1986(2): 279~282.
- 17 Vaughan P V Possible actions to help developing countries to mitigate hazards due to landslides. Land slides Hazard Mitigation, IDNDR, 1995. 114~121.
- 18 Ramiah B K, Dayalu N K, Punushtamaraj P. Influence of chemicals on residual strength of silty clay. Soils and Foundations, 1970. (10): 25~36.
- 19 陈庆敏,张 农,赵海云,张少华.岩石残余强度与变形特性的试验研究.中国矿业大学学报,1997,26(3):42~45

收稿日期:2003-12-15

《第六届全国岩土工程实录交流会岩土工程实录集》征订通知

由中国勘察设计协会工程勘察与岩土分会、中国建筑学会工程勘察分会、国防机械工业工程勘察科技情报网联合筹备的第六届全国岩土工程实录交流会将于2004年5月底在湖南长沙召开。会前将由兵器工业出版社出版《第六届全国岩土工程实录交流会岩土工程实录集》,实录集共收录论文80余篇,其中含第七届、第八届全国优秀工程勘察获奖项目(金质奖、银质奖、铜质奖)的岩土工程实录35篇。

本实录集主要供本届交流会使用。鉴于能参加交流会人数有限,根据国内岩土工程界广大科技工作者的需要,将适当增加一些印数,以共享交流会的科技创新成果。欢迎单位或个人来函或来人订购,每本定价75元。欲购者,请将购书款通过邮局汇出,或通过银行信汇,寄“北京市573信箱第六届全国岩土工程实录集编辑部”张素兰收,邮政编码:100053。

开户银行:北京商业银行天津支行

帐 号:03508001201090108-34

收款单位:《岩土工程技术》杂志社

欢迎有关岩土工程勘察、设计、施工、测试、检测等各方面的设备生产厂家和单位参加“第六届全国岩土工程实录交流会”,展示他们产品最新的技术创新成果,也可在大会上介绍他们名牌产品的软件和硬件的质量和特色。要求参加大会的生产厂家和单位,来函请寄北京573信箱国防机械工业情报网转第六届全国岩土工程实录交流会秘书处收。

国防机械工业工程勘察科技情报网
《第六届全国岩土工程实录集》编辑部

2004-03-16