

岩石破裂滑动过程及其声发射数值模拟^{*}

芮勇勤 唐春安

(东北大学岩石破裂与失稳研究中心 沈阳 110006)

(长沙交通学院路桥工程系 长沙 410076)

(中国科学院力学所非线性力学国家重点实验室 北京 100080)

摘要 运用岩石破裂与失稳过程分析 RFPA^{2D}系统,对滑动形成过程进行了数值模拟研究。滑动岩体似为非均匀弹-脆岩石材料,模拟结果再现了滑动形成从变形到破坏直至失稳的全过程及其声发射规律。结果表明,剪断面是滑动形成的主要形式,并首先在试样一端出现,然后再形成由一端及里的剪断面扩展直至另一端最后产生剪断面破坏贯通,形成统一的滑动面。

关键词 滑动 变形 破坏 声发射 RFPA^{2D}系统 数值模拟

中图分类号:O346,O245 文献标识码:A

NUMERICAL SIMULATION ON ROCK SLIP FAILURE AND ITS ASSOCIATED ACOUSTIC EMISSIONS

RUI Yongqin TANG Chun an

(CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006)

(Changsha Communications University, Changsha 410076)

(LNM Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Abstract By using a Rock Failure Process Analysis code (RFPA^{2D}), slip failure process and associated seismicity in rock masses are numerically studied. The slipping rock mass seems to be of brittle and heterogeneous materials. The simulation result reproduced the whole process from deformation to failure leading to instability inducing seismicity in slipping rock masses and associated acoustic emissions. It shows that shear plane is the main feature of the slip failure mode. The shear plane as it initiated on the one termination of the crack, extends to the center and then to another termination. Finally, a macroscopic shear fault plane is observed.

Key words Slip, Deformation and failure, Acoustic emission, RFPA^{2D} code, Numerical simulation.

1 引言

边坡失稳发生滑坡是岩体开挖过程中的重要地质灾害,其中岩石破裂与失稳-滑动形成过程是边坡开挖过程中的重要岩石力学问题。边坡开挖的设

立和优化要求更经济地投入和高效获取效益、以及更安全,以保证人们生活的正常进行。但是,许多边坡设计过于保险或冒险,而浪费了宝贵环境资源的高效利用。因此,为了揭示边坡岩体滑动,研究岩石破裂与失稳-滑动形成过程,滑动形成从变形到破坏直至失稳的全过程及其声发射规律,是提高边坡

* 收稿日期:2000-03-03;收到修改稿日期:2000-06-17。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:49974009),中国博士后科学基金和中国科学院力学研究所LNM国家重点实验室开放基金等项目资助。

第一作者简介:芮勇勤(1962-),男,江苏常州人,副教授,博士,岩石力学专业。Email:ruiyongqin@yahoo.com.cn

开挖优化设计和治理的重要途径。为此,必须研究在现场工况条件下岩石破裂与失稳-滑动形成过程的破坏机制,国内有的学者曾用解析方法研究了岩石破裂与失稳-滑动形成的条件,曾在现场观测的基础上对岩石破裂与失稳-滑动的破坏过程进行了定性的分析,国内有的学者还利用数值模拟方法研究了岩石破裂与失稳-滑动的受力情况。

然而,由于岩石破裂与失稳-滑动破坏现象的复杂性,人们很难用解析理论来分析岩石破裂与失稳-滑动破坏的实际过程,目前也未见有关用数值模拟方法分析岩石破裂与失稳-滑动破坏过程的报道。本文运用由东北大学岩石破裂与失稳研究中心最近研制开发的岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统,对岩石破裂与失稳-滑动的破坏过程进行了数值模拟研究,模拟结果再现了岩石破裂与失稳-滑动从变形到破坏的全过程^[1-4]。

2 数值模拟分析模型

RFPA2D 系统是一个岩石渐进破裂直至宏观破坏过程的分析程序。其基本思想是:通过考虑细观单元力学参数(弹性模量、强度等)的非均匀性,模拟岩石宏观变形、破坏的非线性行为;通过考虑材料破坏后单元的参数弱化(包括刚度退化),模拟材料破坏的非连续和不可逆行为^[4-7]。

岩石试样的高、宽比为 1:1,其尺寸 100 × 100mm,试样划分为 100 × 100 = 10000 个单元。岩石试样采用上部加恒定载荷,侧边传递给岩石试样的剪力(不断增加),采用位移控制的剪力加载方式模拟滑动引起的岩石试样位移,共计加载 400 步,每步为 0.002mm。为了研究岩石非均匀性的影响,设定岩石的力学性质(单元的弹性及强度性质)服从韦布尔分布 $\Phi_c(m, \mu)$,其中参数 m 为形状参数,反映岩石材料力学性质的均质程度, m 越大,表明岩石的性质越均匀; μ 为反映岩石材料平均性质的参数。本模型中,弹性模量和抗压强度的分布参数分别为 Φ_c (5600MPa) 和 Φ_o (32MPa),内摩擦角为 30°,拉压强度比 1/10 等参数。采用修正的莫尔-库仑判据作为单元破坏的准则,由此得到的模型材料可以模拟准脆性岩石的材料性质(图 1)。

3 “空洞”的萌生与扩展

随着剪应力的不断增加,岩石试样中出现微单

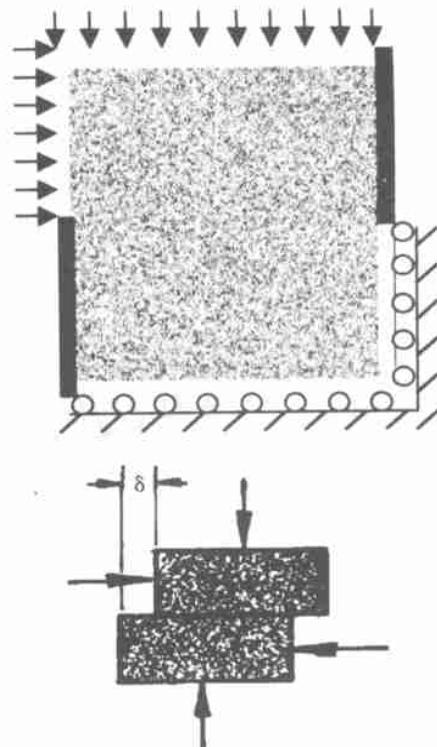


图 1 分析模型和试件剪切示意图

Fig. 1 Analysis model and sample shearing

元破坏,具有金属材料中韧性断裂结构的破坏机理特征,类似于变形试样应力增大区域出现了“空洞”,即微单元破坏-“空洞”的萌生,如图 2 所示(图中灰度代表剪应力大小)。通过数值模拟可以揭示和认识“空洞”萌生与扩展的现象,“空洞”萌生与扩展是剪切破裂面出现与扩展的前提条件,其规律和一般准则是:同一应力状态下的微弱单元首先破坏,处于高应力状态下的同类微单元首先破坏。“空洞”萌生与扩展是剪切破裂面出现与扩展的前提。

4 剪切破裂面出现和滑动面扩展形成

4.1 剪切破裂面出现与扩展

由于材料非均匀性的影响,微破裂在试样中部的分布并非完全对称(模型的几何尺寸是对称的),而是在试样左侧的中部发展较快,造成了明显的变形和微破裂局部化现象,这种变形和微破裂的局部化也在试样右侧的中部出现,剪切破裂面扩展呈现偏离中部的趋势,剪切变形与剪切带扩展过程数值模拟如图 3 所示。

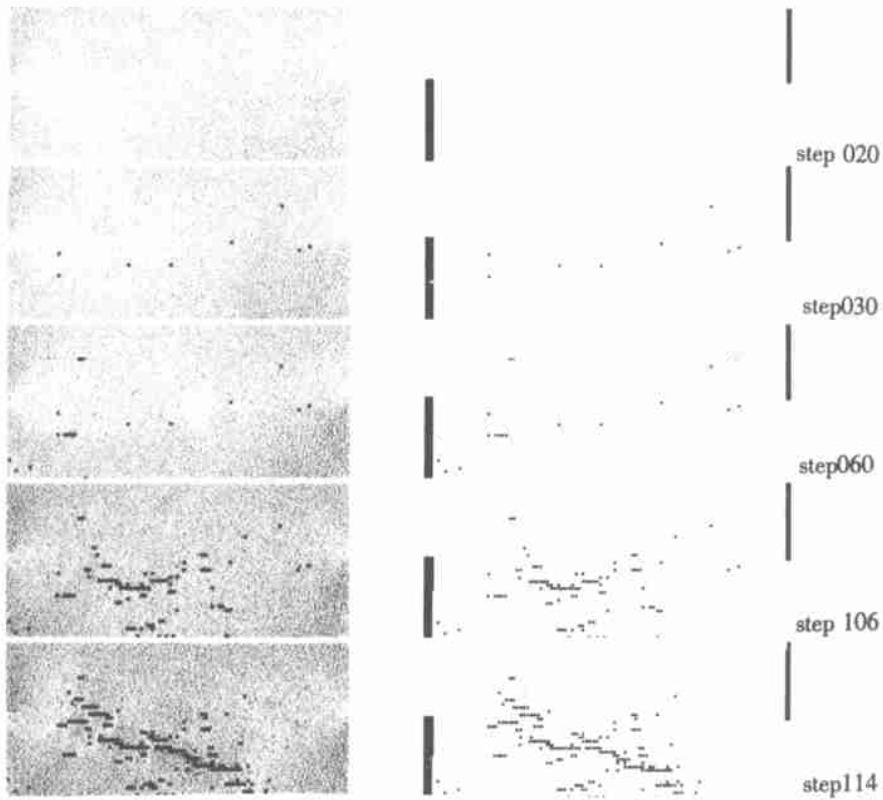


图2 “空洞”的萌生与扩展

Fig. 2 Nucleation and growth of "void", shear crack growth

4.2 滑动面贯通与形成

随着剪切载荷的增加,微破裂面扩展明显加剧,而且由于变形和微破裂局部化的影响,最后导致试样右侧中部产生剧烈的破裂破坏,此时预示着滑动面贯通与形成——试样失稳前兆的即将到来,数值模拟结果见图4。

剪切载荷进一步的增加,试样中部出现大量微破裂面,为迅速形成贯通剪切破裂面—滑动面奠定了条件,此时宏观剪切断裂面形成,试样失稳破坏。滑动面凹凸起伏恰恰反映出剪切破裂面的粗糙程度,反映了岩石试样材料的力学性能。随着剪切位移的增加,试样处于破坏后的残余剪切,宏观粗糙剪切断裂面上不断有剪应力局部集中出现,对应了滑动试样一定的残余抗剪能力。

5 滑动面扩展形成过程中的声发射模式

根据数值模拟的结果,给出的试样应力-应变

曲线如图5和图6所示,可以将试样的变形、破坏过程分为5个阶段,分别对应于应力-应变和声发射累计能量与加载步曲线上的5个应力,声发射累计能量和变形状态。模拟结果分述如下:

第1阶段(OA):在剪应力加载的初期,由于载荷的幅度较小,试样中部仅在某些低强度及剪应力较大的部位发生弥散的微破裂,产生较少的声发射数,相应的应力-应变曲线表现为近似线性行为,此阶段对应稳定的变形阶段。

第2阶段(AB):由于材料非均匀性的影响,微破裂在试样中部的分布并非完全对称(模型的几何尺寸是对称的),而是在试样左侧的中部发展较快,造成了明显的变形和微破裂局部化现象,这种变形和微破裂的局部化也在试样右侧的中部出现,应力-应变曲线呈现偏离线性的趋势,此阶段对应试样亚稳定的变形阶段。

第3阶段(BC):随着载荷的增加,微破裂明显加剧,而且由于变形和微破裂局部化的影响,最后导

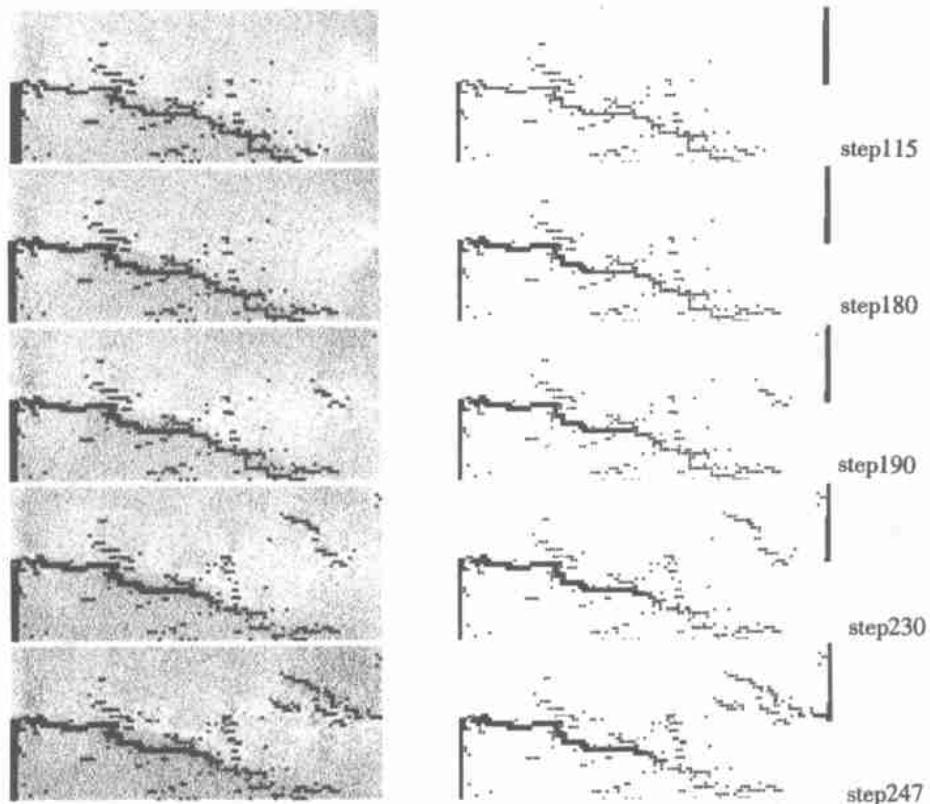


图3 剪切变形与剪切破裂扩展过程

Fig. 3 Shear deformation and fracture growth process

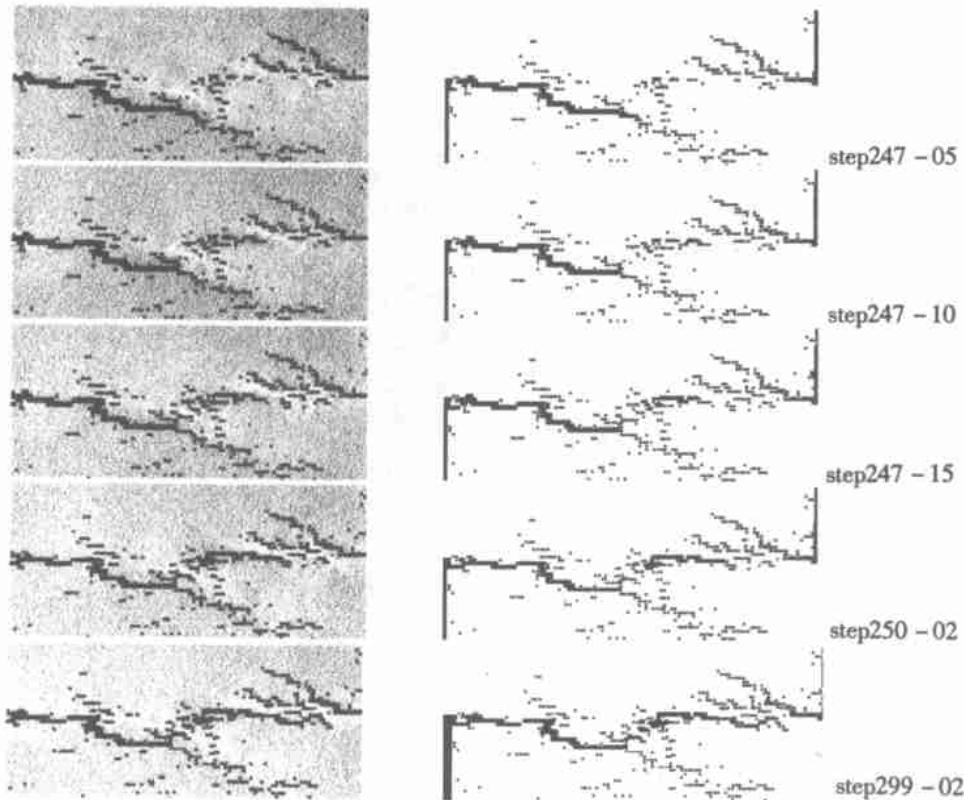


图4 剪切带扩展与滑动面形成过程

Fig. 4 Shear crack growth and formation process of slip plane

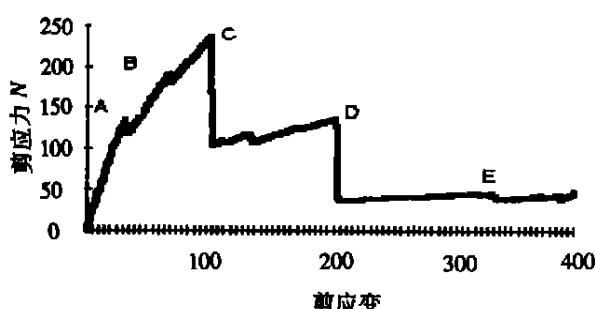


图5 剪切力与剪应变曲线

Fig. 5 Shear force - stain curve

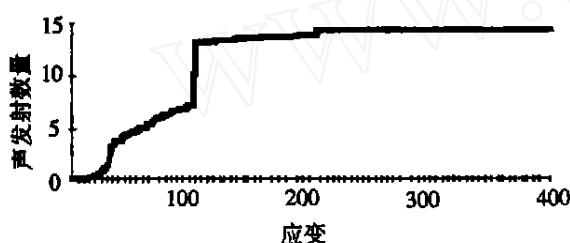


图6 滑动破裂面扩展过程声发射数量变化曲线

Fig. 6 AE number - stain curve

致试样左侧中部产生剧烈的破裂破坏,产生明显的声发射,应力-应变曲线进一步偏离线性。在最大剪应力出现时,微破裂达到高潮,使声发射数连续高出前2次声发射数的10多倍以上,应力-应变曲线出现一次大的应力降,此阶段对应失稳的前兆阶段(极限稳定阶段)。

第4阶段(CD):此时试样抗剪切力已超过极限强度,试样中部出现大量微破裂,迅速出现贯通剪切破裂面-滑动面,此时宏观剪切断裂面已形成,此阶段对应失稳的破坏阶段。

第5阶段(DE):在再次产生一个微破裂次级高潮后,试样处于破坏后的残余剪切阶段,此时宏观剪切断裂面的抗剪切力进一步降低。此后试样中的微破裂数急剧减少,但试样仍然具有残余抗剪切能力,此阶段对应残余抗剪切的变形阶段(余震阶段)。

6 结 论

运用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D}系统,模拟再现了岩石由“空洞”到剪切破坏的全过程,得到了岩石变形与破坏过程中的“稳定变形”、“亚稳定变形”、“失稳前兆”、“失稳”及“残余变形”等5个基本阶

段。值得注意的是,在整个试样变形与破裂过程中,微破裂始终积聚在中部区域发生,而很少在接近上、下区域发生,其原因是中部区域内的岩石主要处于剪应力集中状态,这是早就被现场观测和实验室岩样试验所证实了的事实。另外,声发射规律可以揭示滑动孕育与形成现象。特别需要指出的是,由于在模型中考虑了非均匀性的影响,数值模拟中的剪应力图像不再是均匀的,而是呈现出尤加水波纹一样的复杂图像,这是在以往的均匀材料数值模拟或光弹试验中观察不到的现象。进一步的详细研究将包括岩石材料非均匀性、不同强度性质、岩石尺寸、粗糙剪切断裂面分形和力学特性等对岩石破坏过程的影响^[5~7]。

参 考 文 献

- [1] 唐春安,乔河,徐小荷.矿柱破坏过程及其声发射规律的数值模拟[J].煤炭学报,1999,24(3):266~269.
Tang Chun'an, Qiao He, Xu Xiaohe. Numerical simulation of the process of ore pile failure and regularity of its acoustic emissions. J. Coal, 1999, 24(3): 266~269.
- [2] 李世平,吴振业等.岩石力学简明教程[M].徐州:煤炭工业出版社,1996,25~42.
Li Shiping, Wu Zhenya, et al.. Short course of rock mechanics. Xuzhou: Coal Industry Press, 1996, 25~42.
- [3] Hock E and Bray J. Rock slope engineering[M]. London: Unwin Brothers Limited, 1974, 74~109.
- [4] 芮勇勤.蠕动边坡稳定性动态控制探讨[A].岩土工程的实践与发展[C].上海:上海交通大学出版社,1999,127~131.
Rui Yongqin. A discussion of dynamic control on creeping slope stability. Rock - soil Engineering Practice and Development. Shanghai: Press of Shanghai Jiaotong University , 1999, 127 ~ 131.
- [5] 芮勇勤,徐小荷等.露天煤矿蠕动边坡变形破坏过程中的动态控制技术问题[J].中国矿业,1999,8(4):34~37.
Rui Yongqin, Xu Xiaohe, et al.. Creeping slope deformation and failure process in open coal mine and its dynamic control techniques. Mining Indusrey in China, 1999, 8(4): 34~37.
- [6] Y. Q. RUI, Z. M. JIANG, et al., Analysis Methods on Stability of Tall and Bedding Creep Slope, Rock Mechanics and Strata Control in Mining and Geotechnical Engineering[A]. Proceedings of the International Mining tech'95 Symposium[C], Beijing, 1995, 119~124.
- [7] Tang C A, Numerical simulation of rock failure and associated seismicity[J]. Int J. Rock Mech. Min. Sci. ,1997,34(2):249~262.