

两类三轴实验花岗岩的微破裂对比研究

姚孝新 耿乃光

许东俊

(国家地震局地球物理研究所) (中国科学院武汉岩体土力学研究所)

摘要

用显微镜对三轴实验后,稻田花岗岩样品内部的微破裂进行了观测。对比了两类三轴实验的微破裂,一种是常规三轴实验($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$),另一种是真三轴实验($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)。观测表明,茂木清夫在真三轴实验中发现的脆性岩石体积膨胀的各向异性效应是由微破裂的各向异性引起的,从而阐明了这一效应的微观机制,并对中等主应力引起的膨胀和微破裂的各向异性效应在地震研究中的意义进行了初步探讨。

一、引言

岩石力学中的常规三轴实验方法^[1]有一个局限性,即在实验中,中等主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 始终保持相等。为了弥补这个不足,茂木清夫设计了真三轴实验方法^[2,3],使三个主应力在实验中均可独立变化。茂木用此方法研究了中等主应力的效应,得到了中等主应力对岩石的一系列性质的影响^[2,3]。在中等主应力的各种效应中,有一种被称作“体积膨胀的各向异性效应”。茂木发现,在真三轴实验中的脆性岩石破坏前,在最大主应力 σ_1 方向压缩的同时, σ_2 和 σ_3 方向的膨胀不相等,而明显地向 σ_3 方向偏离。体积膨胀主要由 σ_3 方向的应变 ε_3 引起。这种现象被茂木称作体积膨胀的各向异性效应^[4]。茂木曾对这种效应的机制作过推测,然而由于缺少显微观测的资料,这些推测还有待于证实。本文作者在东京大学地震研究所进行了花岗岩的两类三轴实验之后^[5],又将样品制成薄片在国家地震局地球物理研究所进行显微观测,从而阐明了这一效应的微观机制。

二、实验方法

显微观测的方法可参阅过去的文章^[6]。真三轴实验的设备和方法,茂木已有详细的介绍^[2-4]。本研究所用样品为稻田花岗岩。加载的方式有三种:(1)常规三轴实验(A型);(2)真三轴实验(AM型);(3)从一定应力状态开始,保持 σ_1 和 σ_3 不变,增加 σ_2 使岩石破坏(M⁺型)。三种加载方式的应力途径图,和有关稻田花岗岩在这三种加载方式下的力学效应的详细情况,均在另文中给出^[5]。

样品的尺寸为 $1.5 \times 1.5 \times 3.0$ 厘米的方柱。实验后的样品先用环氧树脂胶结,然后

本文1983年9月27日收到,1984年1月20日收到修改稿。

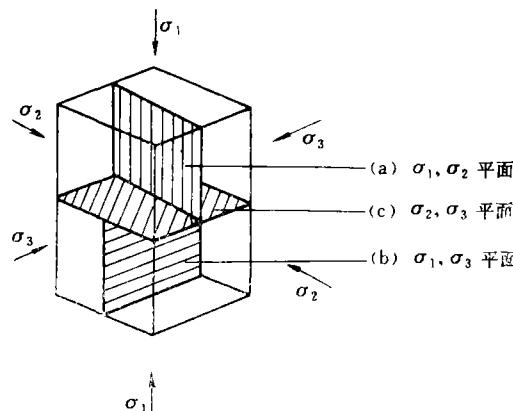


图 1 岩石样品实验时的应力状态和实验后
制作薄片的切割方式

Fig. 1 The stress state of the rock samples in experiments
and the cutting way of the thin section after experiments

(如图 1 所示), 根据其实验时的应力状态定向地切割。切片分为三组: *a* 组表示 σ_1 和 σ_2 所在平面; *b* 组表示 σ_1 和 σ_3 所在平面; *c* 组表示 σ_2 和 σ_3 所在平面。所有切片制成标准薄片。然后在显微镜下放大 100 倍拍摄偏光照片。

三、实验结果及分析

照片(见书末图版)1—5 显示了三种加载方式下三个不同方向的岩石样品断面内的微破裂情况。

1. 未受压样品的天然裂纹

照片 1 是未受压的稻田花岗岩样品的显微照片。可以看出, 在放大 100 倍的情况下, 在天然的稻田花岗岩中只能看到很少的细小裂纹。

2. 常规三轴实验的微破裂

照片 2 是围压为 200 巴的常规三轴实验(A型实验)花岗岩样品三个不同方向断面内的微破裂显微照片。照片 2(a)与 2(b)显示的微破裂分布情况基本相同。微破裂在沿 σ_1 方向占优势, 沿 σ_2 或 σ_3 方向的微破裂较少。在照片 2(c)显示的 σ_2 和 σ_3 所在平面中, 沿 σ_2 方向和沿 σ_3 方向的微破裂大体相等。这些情况均符合常规三轴实验 $\sigma_2 = \sigma_3$ 这一特点。

3. 真三轴实验的微破裂

照片 3 和照片 4 显示了真三轴实验(AM型实验)花岗岩样品中的微破裂。照片 3 相应于 $\sigma_3 = 200$ 巴, $\sigma_2 = 1000$ 巴; 照片 4 相应于 $\sigma_3 = 200$ 巴, $\sigma_2 = 3000$ 巴。对比照片 3(a)和 3(b)可以看出, 虽然在这两张照片中仍显示沿 σ_1 方向的微破裂占优势, 但 3(a)和 3(b)两张照片已不同。3(b)中的微破裂明显地多于 3(a)中的微破裂。照片 3(c)更明确显示, 在 σ_2 和 σ_3 所在平面中, 沿 σ_2 方向的微破裂数明显地超过沿 σ_3 方向的微破裂数。这

些现象均由真三轴实验条件 $\sigma_2 > \sigma_3$ 所引起。照片 4 与照片 3 类似, 由于 σ_2 已相当大, 达到与 σ_1 可相比拟的程度。照片 4(a) 和 4(b) 中微破裂沿 σ_1 方向的集中程度已不及照片 3(a) 和 3(b) 中那样明显。在照片 4(c) 表示的 σ_2 和 σ_3 所在平面内, 沿 σ_2 方向的微破裂数大大超过沿 σ_3 方向的微破裂数。这些现象均与 $\sigma_1 > \sigma_2 \gg \sigma_3$ 的条件相符合。

4. 增加 σ_2 使岩石破坏 (M^+ 型实验) 的微破裂

照片 5 是花岗岩 M^+ 型实验的微破裂显微摄影。由于保持 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 的条件, 照片 5 和照片 3 大体相同。这里最大的不同之处, 在于在照片 5(c) 中, 沿 σ_2 方向的微破裂的宽度, 显著大于照片 3(c) 中沿 σ_2 方向的微破裂宽度。这是因为 M^+ 型实验的最终破裂是由 σ_2 增加引起的缘故。

四、讨 论

真三轴实验的典型的应力-应变曲线如图 2 所示。这里给出的曲线是在 $\sigma_3 = 200$ 巴, $\sigma_2 = 1000$ 巴条件下的实验结果, 与照片 3 的条件相同。这与茂木的结果一样^[4]。由图 2 可见, 花岗岩破坏前轴向变形 (ϵ_1) 表现为持续的压缩过程。岩石体积 ($\Delta V/V$ 表示体应变) 开始压缩, 破坏前发生膨胀现象。膨胀是由于横向变形加速引起的。真三轴实验与常规三轴实验不同之处在于两个方向的横向变形不相等 ($\epsilon_2 \neq \epsilon_3$)。在图 2 中 $\epsilon_3 > \epsilon_2$ 。在横向变形中弹性变形部分不会引起岩石的体积增加。引起岩石体积膨胀的是非弹性变形。如图 2 所示, 在真三轴实验中岩石破坏前 σ_2 方向的非弹性变形很小。非弹性变形主要在 σ_3 方向。照片 3(c) 所示, 与非弹性变形相关的微破裂, 在 σ_3 方向很少, 主要集中在 σ_2 方向。微破裂的宽度方向则与 σ_3 方向相合。由此阐明, 在真三轴实验中脆性岩石破坏

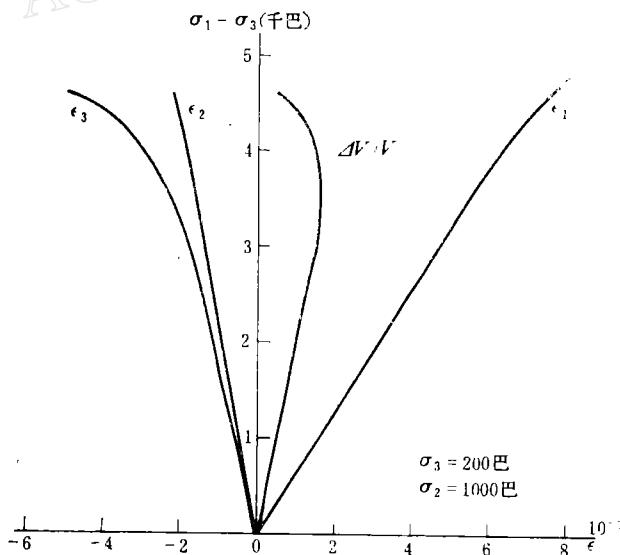


图 2 花岗岩真三轴实验的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve for Inada granite, obtained by using the general triaxial test machine

前的体积膨胀各向异性效应是由于岩石内部微破裂发育的各向异性所引起的。

膨胀的各向异性效应对地震及其前兆的研究具有重要的意义。当地壳中的应力处于三向不等的状态时, 岩石破裂前的微破裂可能是定向发育的。微破裂的各向异性又能导致地下流体运动的各向异性, 从而引起一些与之有关的地震前兆活动的各向异性。此外, 大量微破裂的定向集中有可能对主断裂形成的方向有一定的影响。

真三轴实验得到茂木清夫教授和望月裕峰先生的帮助。耿建明同志为显微观测磨制薄片。作者在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Von Kármán, Th., Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck, *Z. Ver. Dt. Ing.*, **55**, 1749—1757, 1911.
- [2] Mogi, K., Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone, *Tectonophysics*, **11**, 11, 111—127, 1971.
- [3] Mogi, K. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, *J. Geophys. Res.* **76**, 5, 1255—1269, 1971.
- [4] Mogi, K., Dilatancy of rocks under general triaxial stress states with special reference to earthquake precursors, *J. Geophys. Res.* **25**, Suppl, 203—217, 1977.
- [5] 许东俊、耿乃光, 中等主应力变化引起的岩石破坏与地震, *地震学报*, **6**, 2, 159—166, 1984.
- [6] Chen Rong, Yao Xiaoxin, and Xie Hongsen, Studies of fracture of gabbro, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, **16**, 187—193, 1979.

COMPARATIVE STUDIES OF MICROCRACKS IN GRANITE SAMPLES IN TWO TRIAXIAL EXPERIMENTS

YAO XIAOXIN GENG NAI GUANG

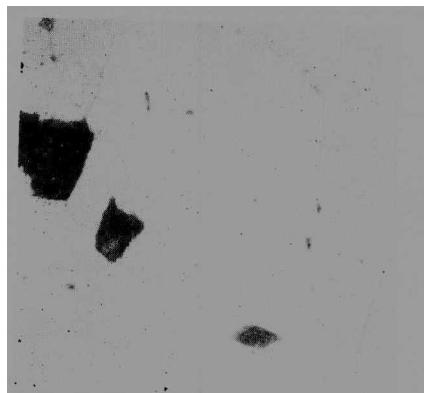
(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

XU DONGJUN

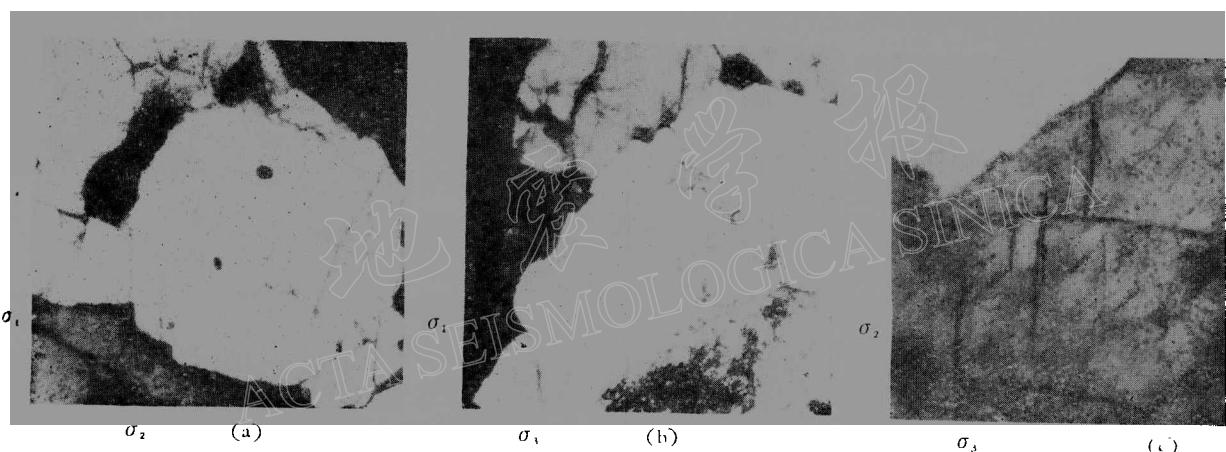
(Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

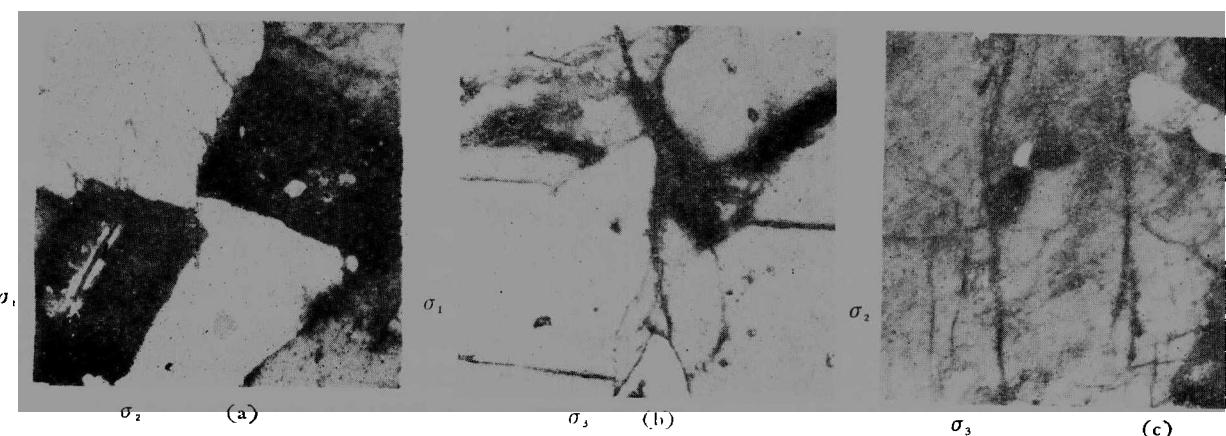
The microcracks in samples of Inada granite after triaxial experiments were examined by microscope. The microcracks in two types of triaxial experiments, conventional triaxial ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) and true triaxial ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) were compared. The observation showed that the anisotropic dilatancy effect of brittle rocks as revealed by K. Mogi in true triaxial experiment was caused by anisotropic microcracks in rocks, thus indicating its microscopic nature. The effect of anisotropic dilatancy and anisotropic microcracks caused by the principal stress of intermediate magnitude with regard to earthquake studies was preliminarily discussed.



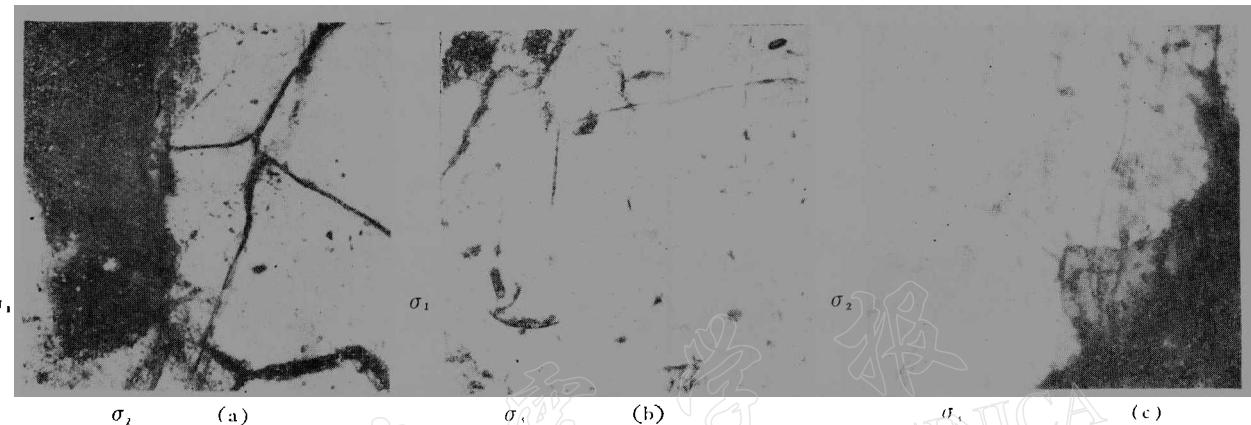
照片 1 花岗岩样品的天然微裂纹



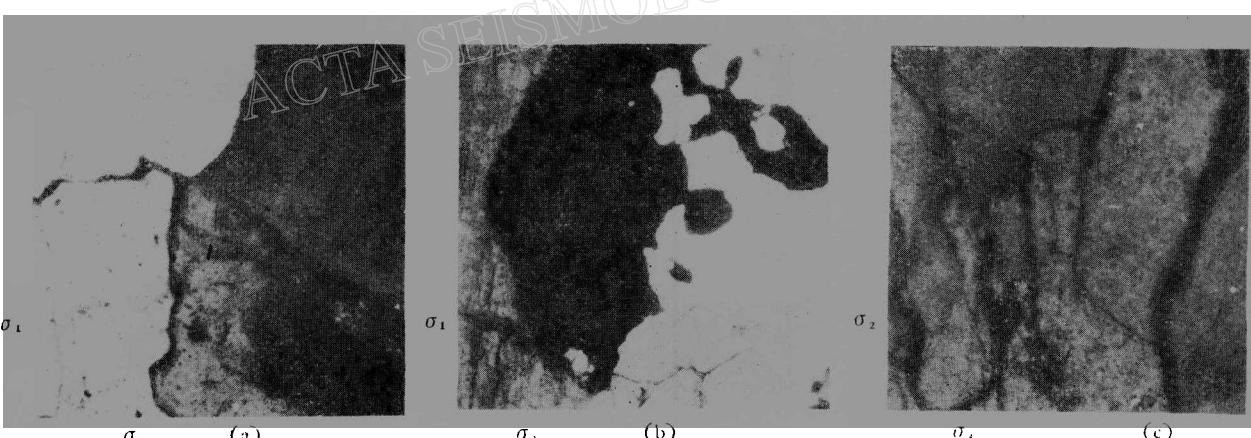
照片 2 $\sigma_3 = \sigma_4 = 200$ 巴的常规三轴实验花岗岩样品三个断面的微破裂



照片 3 $\sigma_3 = 200$ 巴、 $\sigma_1 = 1000$ 巴的真三轴实验花岗岩样品三个断面的微破裂



照片 4 $\sigma_3 = 200$ 巴、 $\sigma_i = 5000$ 巴的真三轴实验花岗岩样品三个断面的微破裂



照片 5 $\sigma_3 = 200$ 巴、 $\sigma_i = 5000$ 巴, 增加 σ_2 到 2300 巴, 使花岗岩破坏, 破坏后样品三个断面的微破裂