

一般三轴压缩下岩石的流动和破坏

东京大学地震研究所 茂木清夫教授

FLOW AND FRACTURE OF ROCKS UNDER GENERAL TRIAXIAL COMPRESSION

K · MOGI

Prof. Earthquake Research Institute
University of Tokyo

ABSTRACT

Recent laboratory studies of the flow and fracture of rocks under general triaxial compression are reviewed. New developments in laboratory techniques have made it possible to measure three principal stresses and strains under general triaxial stress states, in which all three principal stresses are different.

Strength and ductility of isotropic rocks are markedly affected not only by the least compression σ_3 , but also by the intermediate compression σ_2 , although these two effects are rather additional in strength, but opposite in ductility. The experimental results show that dilatancy is highly anisotropic under the general triaxial stress states.

Deformational properties of anisotropic rocks have been also measured under the general triaxial compression. In this case, the effect of the intermediate compression markedly depends on the orientations of the weak planes,

一、引 言

在天然条件下,岩石的破坏和流动是在复杂的组合应力下产生的。应力状态的影响在岩石力学里是个基本课题之一。为了研究这一影响,在各种组合应力状态下,进行了许多

这篇文章是作者在一九七九年九月在瑞士蒙托利亚召开的第四届国际岩石力学会议上宣读的有关岩石在一般三轴应力状态下的力学特性的总结性文章。

岩石变形的室内实验。Von Kármán (1911) 创制了对受有液体围压的圆柱体试件用固体活塞施加轴向压应力的精确的三轴压缩方法。在Kármán的方法里, 主应力中的两个是相等的。有时这一方法被称之为常规三轴实验, 以便与所有三个主应力都不相等的一般(真正)的三轴实验相区别。

当应力是不均匀时, 容易达到一般三轴应力状态。这些实验包括: 在围压下, 实心的和空心的圆柱体的扭转; 在压力下的冲孔法; 在压力下的Brazilian实验(Handin等, 1960; Hoskins, 1969; Jaeger和Hoskins, 1966)。在这些实验中, 用线性应力~应变关系的弹性理论估算应力。但是, 由于在一般三轴应力状态下的应力~应变关系是未知的, 因此, 应力分布的精确计算基本上是不可能的。故在非均匀应力下的试验结果是难于解释的。

为了达到真正均匀的三轴应力, 曾提出过各种方法。例如, Handin等(1967)进行了轴向和横向压力的组合下的空心圆柱体的扭转试验。虽然这一方法对延性金属是成功的, 但就更加脆性的天然岩石来说好像存在着某些技术上的困难。事实上, 他们的扭转试验的重复性是太差了以致于得不出任何明确的结论。

原则上, 用三对垂直于矩形六面体的表面力来加载的方法可以得到真正的均匀三轴应力。如果通过钢制垫块来施加应力, 则固体垫块和试件之间的摩擦力和试件端部的应力集中就能导致显著的误差。樱井(Sakurai)和世良田(Selata, 1967), 丹羽(Niwa)等(1967), 赤井(Akai)和森(Mori, 1967)以及Bieniawski(1971)使用这一方法进行三轴压缩试验。各自采用诸如涂黄油的橡皮板的润滑剂力求消除摩擦影响, 但是, 如果润滑剂挤进试体端部很可能形成径向应力, 因此, 在压缩中, 润滑的结果可能引起有些误差。到目前为止, 这种方法对于精确的试验来说, 还没有成功。

据我所知, 只有Hojem和Cook(1968)以及茂木(Mogi)及其同事们(1971a, 1977, 1978b)得到了在一般应力条件下的岩石的破坏和流动的有意义的结果。在Hojem和Cook的方法里, 用两对铜板扁千斤顶独立地施加最小压力和中间压力。在茂木(Mogi)的方法里, 用液压施加最小压力, 但是用横向固体活塞施加了中间压力, 因为中间压力的影响通常是大大小于最小压力的影响。两者的结果互相接近一致。但是, Hojem和Cook(1968)提供的数据很不够并且此后这些作者没有补充有用的数据。在Hojem和Cook的方法里, 因为扁千斤顶的薄铜板的强度所限, 高的横向压力的施加似乎是困难的, 而就茂木(Mogi)的方法而言, 不存在那样严重的高横向压力方面的限制。

在下面各节里, 我将稍微详细地叙述一般三轴压缩技术并将概括用这个一般三轴压缩方法得到的岩石的破坏和流动方面的试验结果。

二、实验技术

用三个主应力 σ_1 和 σ_2 以及 σ_3 描述应力状态。在本文里, 压应力取为正, 且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。作为最小主应力和中间主应力以及最大主应力的方向, 采用x、y、z轴。在x、y、z方向里, σ_x , σ_y , σ_z 是压应力, 并且将在后面确定的 ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z 分别是在x、y、z方向上的应变。

1. 三轴应力

图 1 表示用于一般三轴试验 (茂木 Mogi, 1971a) 的茂木 (Mogi) 的加荷设备。分别用轴向和横向活塞施加最大和中间主应力, 而用液压施加最小主应力 $\sigma_3 (= \sigma_x)$ 。最小主应力对力学特性的影响是很大的, 因此应该均匀地施加并且高精度的测量。为这一目的, 用液压施加最小压力。高压容器是一个为了横向活塞而具有径向孔的厚壁筒体。在这个容器里, 可以施加液压 $\sigma_3 (= \sigma_x)$ 到 700 MPa ($1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar} = 10.2 \text{ kg/cm}^2$, 译者注)。施加 σ_z 的轴向活塞连接到 70 吨千斤顶, 而施加 σ_y 的横向活塞是接到 30 吨千斤顶。通过在压力容器里的载荷盒测量轴向和横向荷载, 并且用 Heise 布尔登管压力计测量液压。液压 (σ_3) 测量精度约为 5.01 kg/cm^2 , 而 σ_y 和 σ_z 的测量精度约为 2 %。

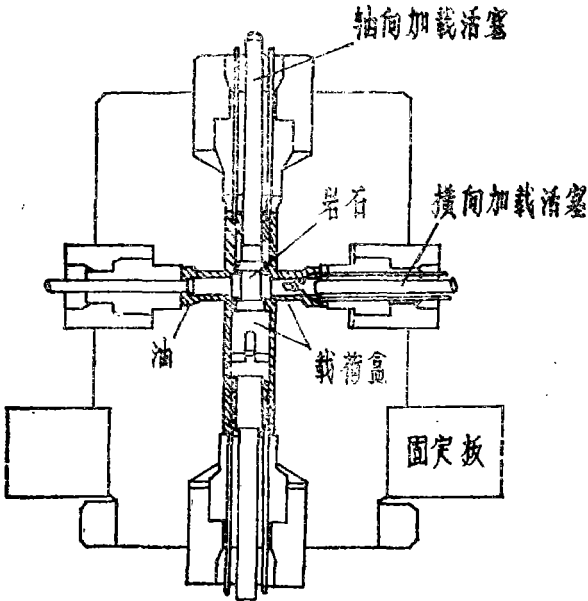


图1. 一般三轴压缩设备中具有轴向和横向活塞的高压室

在图 2 里, 示意地表示试件的装配。试件是 $1.5 \times 1.5 \times 3.0 \text{ cm}^3$ 的矩形棱柱体。用环氧树脂把圆柱状铜制垫块粘贴在试件的顶部和底部上, 并且横向铜制垫块是被连接于带有润滑剂的试件边上。在这一试件装配里, 在其顶部和底部附近, 可以预计有不均匀应力。但是, 在常规三轴试验里, 茂木 (1966)

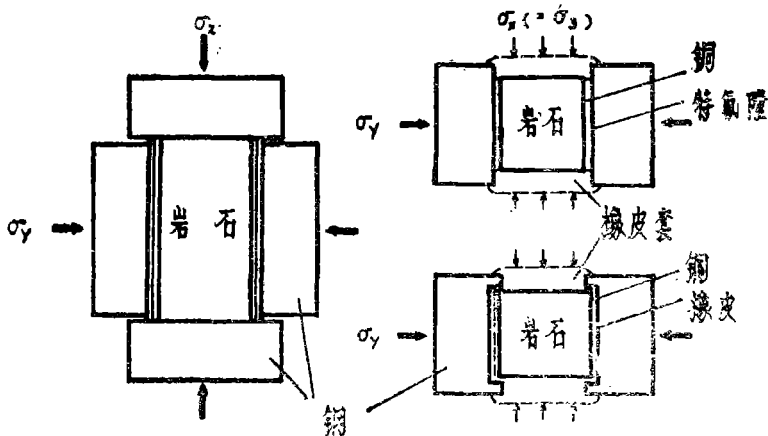


图2. 三轴压缩试验的试件, 左、正剖面; 右、水平剖面 (方法A和B)

指出了随着围压增加,在试件顶部和底部,端部效应明显消失。图3表示 Dunham 白云岩的情况。圆柱体岩石试件的高度/直径之比大大地影响单轴破坏强度,但在高围压下,强度变得不取决于高度/直径之比。结果表明,在几百 kg/cm^2 以上的围压下用环氧树脂粘贴于钢垫块上的白云岩试件的端部效应是微不足道的。因为在这三轴压缩里,试件是被液压围住的,因此,在顶部和底部处的端部效应在适当的围压下是可忽略不计的。

在这种试件装配里,在横向垫块边缘附近,应力可能集中。但是,在围压压,将可能大大减少应力集中效应。实际上,断层面是垂直于横向垫块边缘的。但是在很高的 σ_2 值下,应力集中可能变成明显并试验结果有时显得过早的破坏,这可以认为是由于这种应力集中所致。

另一个重要问题是 σ_2 方向的横向压力的施加方法。在图2里,示意地表示了两种不同的方法。在大多数试验里,使用方法A,用活塞通过钢垫块施加 σ_2 方向的横向应力 (σ_y)。在这一方法里,使用了聚四氟乙烯板作为润滑剂,通过它有效地减少侧面的摩擦效应。

为了理想的均匀三轴压缩,最好也用液压施加 σ_2 方向的横向应力 (σ_y)。用新近设计的横向垫块(方法B)(茂木1977)达到了这一点。即,用如图2(B)所示的特殊形状的横向垫块,通过厚的柔性橡皮板,用近似静水压力施加 σ_y 。

在图4里,比较用两种方法的试验结果,在那里,破坏强度作为 σ_2 的函数图表示(茂木等,1978a)。在方法A和B之间看不出差异。这意味着,方法A的侧面摩擦影响不显著,并意味着不仅用B法而且用A法也同

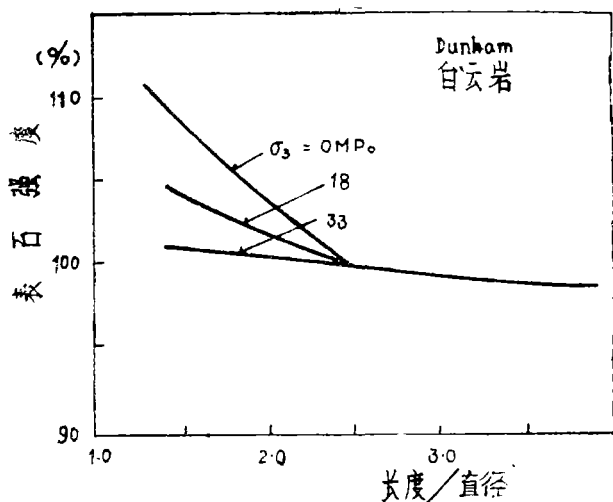


图3. Dunham白云岩在围压下的表面强度和圆柱体试件的长度与直径比之间的关系,在长度/直径=2.5处相对强度来重新计算强度,每条曲线的数字表示围压。

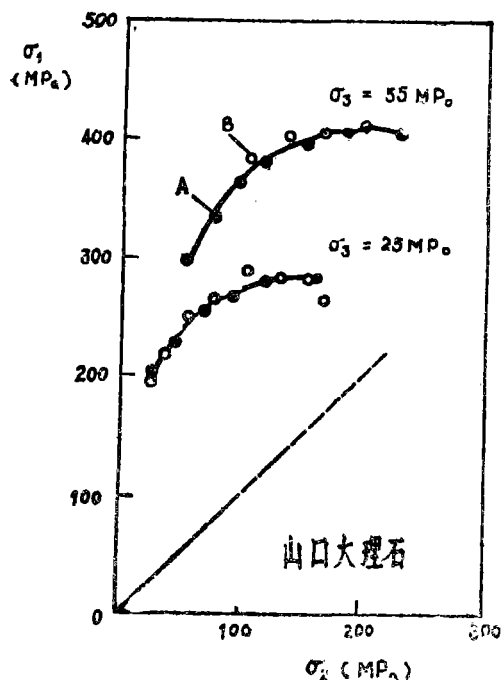


图4. 破坏强度(σ_1)与 σ_2 的函数关系,实心圆为方法A,空心圆为方法B。方法A和B见图2。

样达到接近均匀的一般三轴应力状态。因为用A法的试验比用B法的试验容易得多，因此，A法作为标准三轴压缩方法是适宜的。结论是，用这些方法，能均匀地并且独立地施加三个主应力。

2. 应变

用如下的方法测量了x、y、z三个方向上的应变。用粘贴在垂直于x轴的试件表面上的电阻应变片测定了轴向应变 ϵ_z 和横向应变 ϵ_y （图5 A）。同时从轴向活塞的位移测量了轴向应变 ϵ_z ，因为粘贴在试件上的电阻应变片对于大的应变或不均匀应变来说是不适应的。为此目的，用图5 B所示的方法测量的岩石试件的真正轴向变形跟用差动变压器测量的轴向活塞的位移作了比较。通过这一比较，得到了由活塞的位移测量变形是正确的。这样，用上述两个方法测量了轴向应变 ϵ_z 。两者的结果在小应变范围内一致，但对于大应变，只有后者可靠。

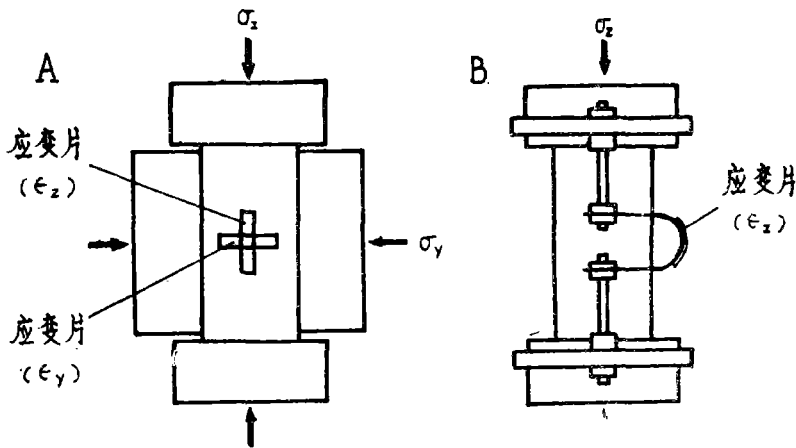


图5. 轴向变形(Z—轴)和横向应变(Y—轴)的测量方法。

用图6所示的方法测定了最小压力方向的横向应变 ϵ_x 。用贴在弯曲的金属片上的电阻应变片测量了x轴方向的试件宽度上的变化，其金属片一端是固定于试体表面上，另一端固定于在铅垂方向上可移动的环状基座上，在试验之前用灵敏度为 $\pm 10^{-3}$ mm的测微表标定了用于目前试验中的这些变形计（图5 B和6）。

首先施加了围压(σ_x)并且施加 σ_y 用的横向荷载增加到常数值，然后以几乎不变的速率(10^{-5} /秒)增加施加 σ_z 之用的轴向荷载。通过上述方法测量了三个方向 (x、y、z) 上的应变。在本文里， ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 被定义为在恒定的 σ_x 和 σ_y 下，由于增加轴向应力差 ($\sigma_z - \sigma_x$) 所引起的应变。对于

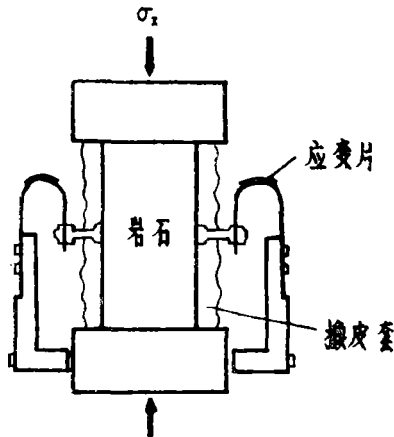


图6. 在最小压缩方向(X—轴)处横向变形的测量方法，正剖面(茂木，1977)

($\sigma_z - \sigma_x$) = 0, $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$ 。用如下公式计算了由于增加轴向应力差($\sigma_z - \sigma_x$)所引起的体积应变。

$$\Delta V/V_0 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

应该注意的是这个公式只适合于试件内部产生均匀的变形的情况。

三、各向同性岩石

曾用均匀的各向同性的岩石, 诸如大理岩, 石灰岩, 白云岩, 粗面岩, 花岗岩, 安山岩, 粗晶玄武岩以及二长岩做了许多室内实验。

1. 破坏应力

用三个主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 可以描述由于破坏或屈服而导致损伤所需的应力状态, 并且对于给定的材料在恒温 and 恒定速度等条件下, 许多试验表明存在着由 $\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3)$ 所表示的破裂或屈服的极限表面。对于普通的延性金属, 可以从Von Mises准则得到完全确定的屈服极限面。但是对于更脆性的岩石, Von Mises准则是不适用的。岩石力学的基本问题之一是这一表面形状的确立。

据常规三轴试验, 脆性岩石的抗压强度($\sigma_1 - \sigma_3$), 随着围压($\sigma_2 = \sigma_3$)明显地增加。用库伦或莫尔准则, 已经解释了这些强度~压力关系曲线。破坏强度和屈服强度对压力从属性是随着延性的增加而逐渐减少。

大多数普遍使用的破损准则, 诸如库伦和莫尔以及Griffith准则都假定或预计中间主应力不影响强度。就这些准则而言, 强度($\sigma_1 - \sigma_3$)只是最小主应力 σ_3 的函数, 并且通过常规三轴试验完全可以确定破损条件。但是, Murrell(1965), Handin等(1967), 茂木(1967)以及其他发现了有些岩石的压缩试验($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)和引张试验($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)的莫尔包线之间有明显差异(图7)。这一事实提出 σ_2 对破坏强度的影响是相当大的。

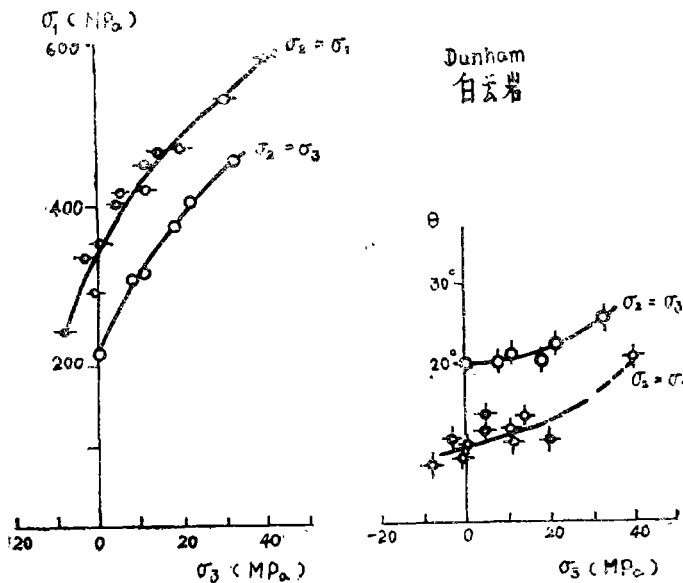


图7. Dunham白云岩的破坏应力(σ_1)和破坏角(θ)作为最小主应力(σ_3)的函数。空心圆为压缩, 实心圆和方块为引张。(茂木1967)

通过上述一般三轴压缩技术，已经澄清了 σ_2 效应的总的特性。图 8 表明，对于各种 σ_3 ，破坏应力 σ_1 和 σ_2 的函数关系。其结果表明 σ_2 对于破坏强度的影响虽然小于 σ_3 的影响，但确实是显著的。流行的破坏准则做不到把这些在一般的组合应力下观测到的应力之间建立关系，于是推广 Von Mises 准则，茂木 (1971 b) 提出了如下的破坏准则：

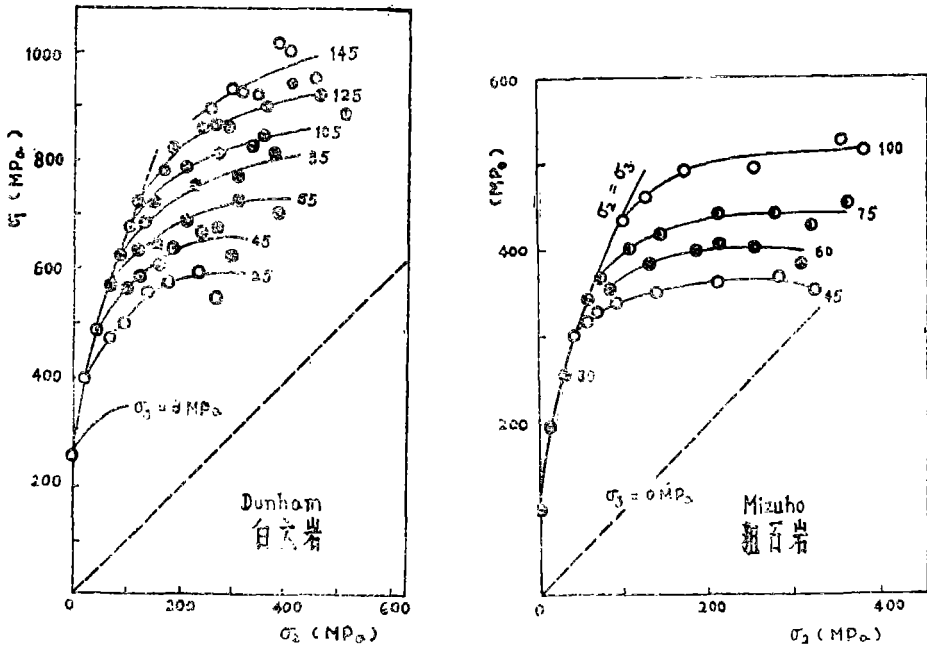


图 8. Dunham 白云岩和 Mizuho 粗面岩的破坏应力(σ_1)
作为中间主应力(σ_2)的函数、不同的符号表示不同的
最小主应力(σ_3)，用数字表示 MPa。

$$\tau_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_3)$$

或

$$\tau_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_3 + \alpha \sigma_2)$$

式中， τ_{oct} 是八面体剪应力， α 是小于 1 的常数。然后提出了如下经验公式 (茂木, 1971 b)：

$$\tau_{oct} = A(\sigma_1 + \sigma_3)^n$$

式中 A 和 n 是常数。

往往不能清晰地确定岩石的屈服点。但是，在有些情况下却可以很好的确定它。用如下的不同于破坏方程的公式，很好的表达在一般的组合应力下的岩石的屈服应力。

$$\tau_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

作为一个特殊情况，这个公式包括着 Von Mises 准则($f = \text{常数}$)。可用 Von Mises 准则表达 Solenhofen 石灰岩的屈服条件。可以如下的给出推广了的 Von Mises 准则的物理解释：即，当畸变应变能达到一个临界值时，便出现破坏或屈服。这个临界能量不是常数，而单调地随着有效的平均法向应力而增加，有效平均法向应力在破坏时为 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 而屈服时为 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 。

2. 破坏角

在常规的三轴压缩试验里, 典型的破坏是剪切破坏。 σ_1 方向和断层面之间的破坏角 θ 随着增加围压而增加。假定断层上的剪应力是断层面的法向应力的函数, 莫尔理论能从剪应力~法向应力曲线预计破坏角。精心的试验 (Brace, 1964; 茂木, 1967) 表明, 在常规三轴压缩试验 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 中预计值和观测值极为一致。但在引张试验里 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$), 其破坏角为 $5^\circ \sim 20^\circ$, 它小于压缩试验的破坏角 (图 7), 并且莫尔准则不能预计破坏角 (茂木 1967)。莫尔准则在这方面的困难, 是由于它的基本假定, 即, 中间主应力 (σ_2), 对破坏状态没有影响。

图 9 表示 Dunham 白云岩在常规三轴应力下的破坏角和 σ_2 的函数关系 (茂木, 1972b)。断层面平行于 σ_2 方向, 并且破坏角随着增加 σ_2 而减少。随着减少 σ_3 值, σ_2 的影响变得更显著。用莫尔理论不能预计这个结果, 但用它的修正理论可以解释这一结果。

3. 延展性

随着增加围压, 延性增加并且破坏特性从脆性破坏转变到延性流动。虽然还没有普遍适用的有关延性的数值量度, 但使用恰好破坏时的永久应变作为延性的量度 (Handin 1966)。

在屈服后的区域里, 存在着两个不同类型的变形曲线 A 和 B (茂

木, 1972 a)。在类型 A 里, 屈服后的永久变形主要是以均匀塑性变形方式发生, 并且在某个永久应变值时发生破坏。在类型 B 里, 在屈服时出现了宏观破坏, 并且在屈服之后的区域里, 发生了碎裂变形或摩擦滑动的永久变形。上述的延性量度法更适合于 A 类。

不仅是 σ_3 而且 σ_2 也影响延性度 (Handin 等, 1967; 茂木, 1971 a)。图 10 表示延性 (在 σ_1 方向上, 恰好破坏时的永久变形) 与 σ_2 和 σ_3 的函数关系。延性明显地随着增加 σ_3 而增加, 但随着增加 σ_2 而减少。等延性轮廓线大致互相平行。由于这个规律性, 可用下式表示在一般三轴应力状态下的延性 (ϵ_n)。

$$\epsilon_n = f(\sigma_3 - \delta \sigma_2)$$

式中 f 是单调增加的函数。对于某些碳酸岩类岩石, 如下经验公式是合适的。

$$\log \epsilon_n = K_1 (\sigma_3 - \delta \sigma_2) + K_2$$

式中 δ 和 K_1 以及 K_2 是常数。

破坏时的应力降随着增加 σ_3 而减少且随着增加 σ_2 而增加 (茂木, 1972 b)。应力降

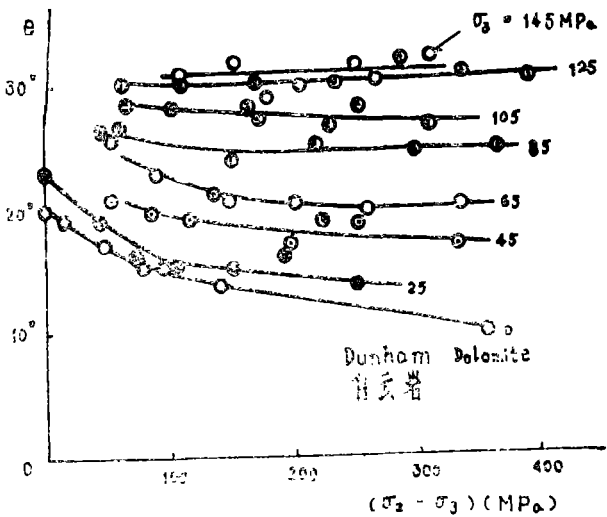


图 9. Duntam 白云岩的破坏角(θ)作为中间主应力 (σ_2) 的函数, 不同的符号表示不同的 σ_3 的值。

大致跟延性成反比。在更加延性的状态中，应力降更缓慢地出现。

4. 应力~应变曲线

图11是在各种应力状态下的山口(Yamaguchi)大理岩的代表性应力~应变曲线(茂木1973)。以 ϵ_z (σ_1 方向的应变)的函数的形式表示了应力差($\sigma_z - \sigma_x$)。图11a、b、c分别表示在各种围压下和各种 σ_y 值下($\sigma_x =$ 常数)以及各种 σ_x 值下($\sigma_y =$ 常数)的曲线。一个重要的结果是，各种横向应力状态对应力~应变曲线上的影响是很不同的。如上所述，延性随着增加 σ_3 ($= \sigma_x$)

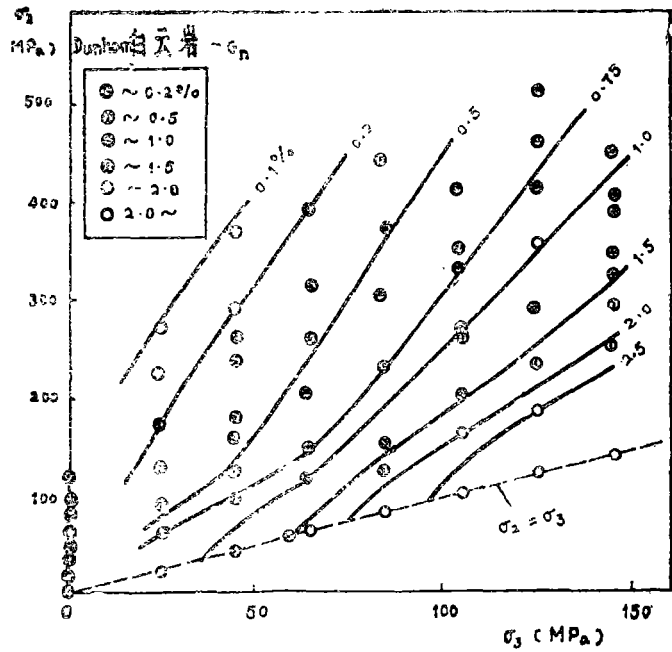


图10. Dunham 白云岩 恰好破坏时的非弹性应变作为最小主应力(σ_3)和中间主应力(σ_2)的函数

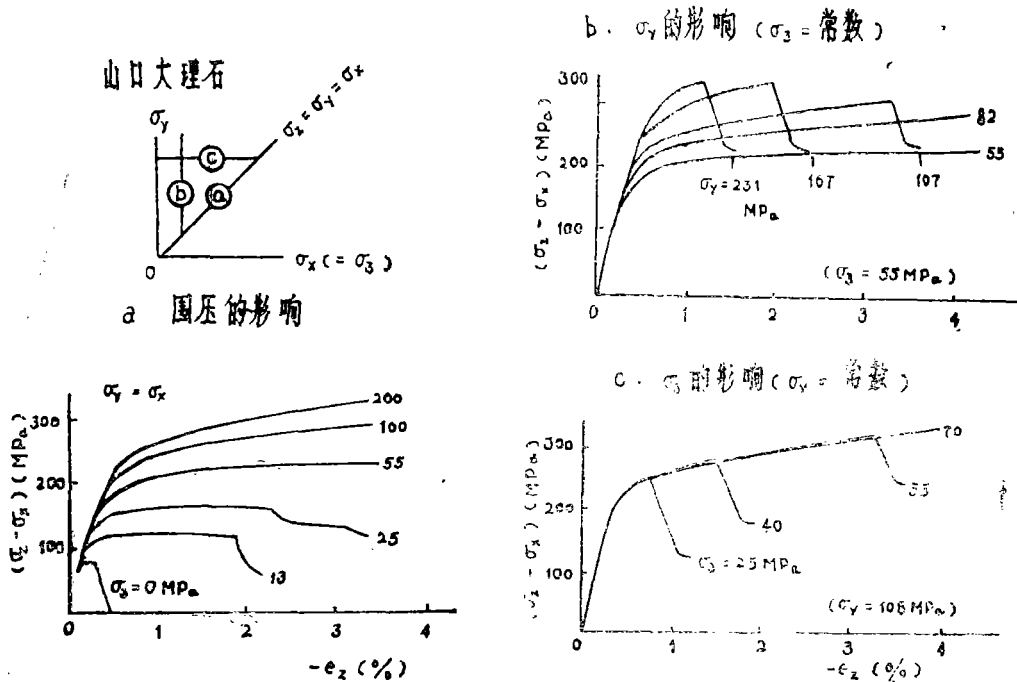


图11. 在一般三轴压缩下山口大理石的应力—应变曲线:
a、不同围压时的曲线($\sigma_y = \sigma_x$) b、不同 σ_y 值时的曲线($\sigma_x = 55\text{MPa}$) c、不同 σ_3 值时的曲线($\sigma_y = 1.08\text{MPa}$)

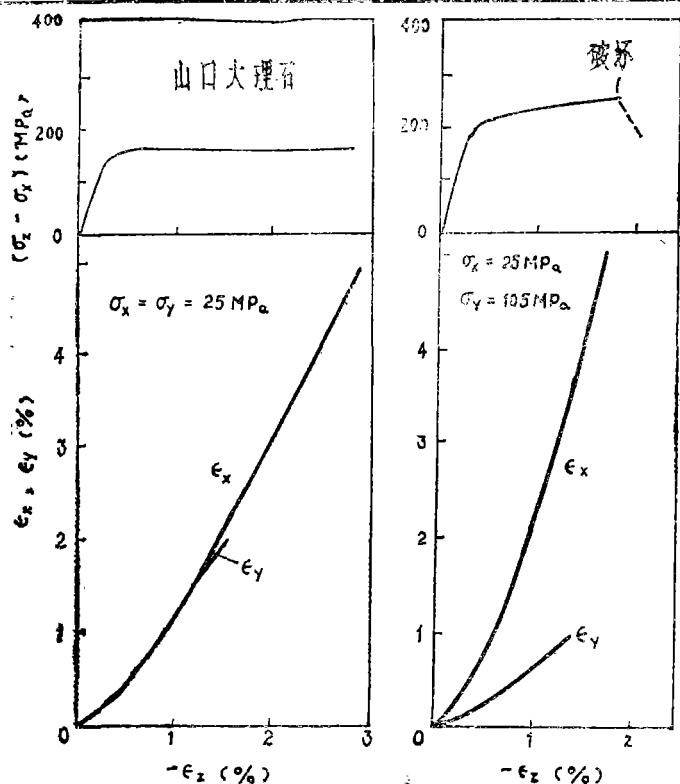


图12. 山口大理石的应力差 $(\sigma_z - \sigma_x)$ 和横向应变 ϵ_x 、 ϵ_y 作为轴向应变 ϵ_z 的函数。左，轴对称应力状态；右，一般三轴应力状态。

而增加，但随着增加 σ_2 而减少。屈服应力随着增加 σ_2 而增加，但几乎与 σ_3 无关。在屈服后区里，以应力~应变曲线的直线段的斜率作为应变硬化系数随着增加 σ_2 而单调地增加，但是几乎与 $\sigma_3 (= \sigma_x)$ 无关。应力~应变曲线的形状与最小主应力 σ_3 无关，而且明显地受另一个横向压力 σ_y 的影响，这是引人注目的结果。

如上所述，在一般三轴应力状态下，曾测定了所有三个主应力和三个主应变（茂木 1977）。图12表示山口(Yamaguchi)大理岩的情况，山口大理岩在适当的围压下显示明显的延性（类型A，§3.3）。应力 $(\sigma_z - \sigma_x)$ 和横向应变 ϵ_x 以及 ϵ_y 是作为轴向应变 ϵ_z 的函数来表出。最小压力 $\sigma_3 (= \sigma_x)$ 是 25 MPa (255 kg/cm²)。

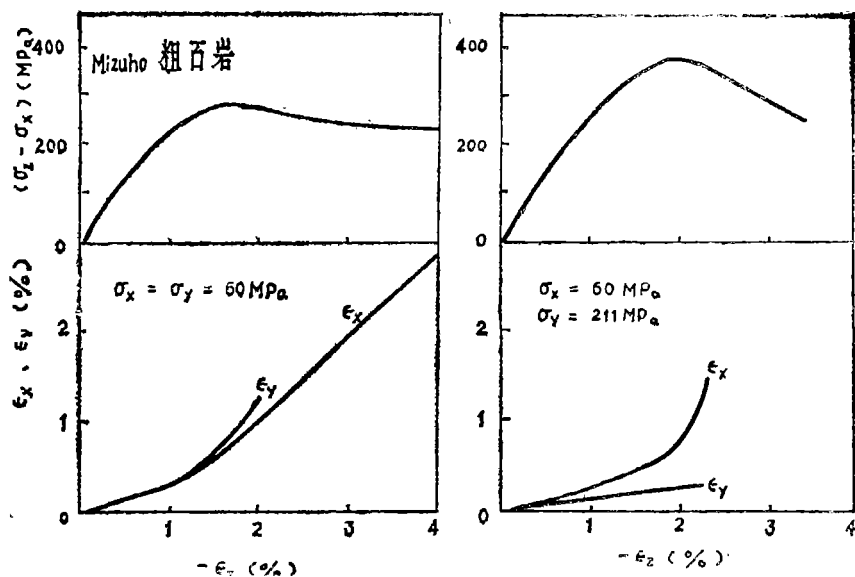


图13. Mizuho粗面岩的应力差 $(\sigma_z - \sigma_x)$ 和横向应变 ϵ_x 、 ϵ_y 作为轴向应变 ϵ_z 的函数图，左边，轴对称应力状态；右边，一般三轴应力状态。

左图表示轴对称应力 $(\sigma_x = \sigma_y)$ 的情形。在这一例子中， $(\sigma_z - \sigma_x) \sim \epsilon_z$ 曲线是属于延性类并且两个横向主应变 (ϵ_x 和 ϵ_y) 几乎相等。右图表示在一般三轴应力状态的典型情况 ($\sigma_x = 255 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_y = 1071 \text{ kg/cm}^2$) 在这一情况中，最终强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 高于轴对称应力状态下的最终强度，

而延性却低于轴对称应力状态下的延性，并且值得注意的是 ε_x 比 ε_y 大得多，特别是在屈服后的区域里。

图13表示Miguho粗面岩在屈服后的区域里呈现明显的碎裂性流动的例子（类型B）。左图表示轴对称应力状态的例子（ $\sigma_x = \sigma_y = 612 \text{ kg/cm}^2$ ）。在这一例子中，两个横向主应变（ ε_x 和 ε_y ）也几乎相等。右图表示一般三轴应力状态的情况（ $\sigma_x = 612 \text{ kg/cm}^2$ ， $\sigma_y = 2152.2 \text{ kg/cm}^2$ ）。在这一例子中，最终强度（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）高于轴对称应力状态的最终强度，并且屈服后的应力降比轴对称状态大，而且 ε_x 比 ε_y 大得多。如果最小应力（ σ_3 ）为常数，则随着增加 σ_y ， ε_x 增加而 ε_y 减少。

图14表示在一定的围压下，非常脆的稻田（Inada）花岗岩的例子。在一般三轴应力状态下（ $\sigma_x = 714 \text{ kg/cm}^2$ ， $\sigma_y = 2580.6 \text{ kg/cm}^2$ ）三个主应变 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 以及体积应变 $\Delta v/v_0$ 是作为应力差（ $\sigma_z - \sigma_x$ ）的函数而表示出。在此图中，虚线相应于弹性体积应变。体积膨胀曲线相当类似于轴对称状态，但试验结果表明，体积膨胀主要是由于 ε_x 的增加而引起的。

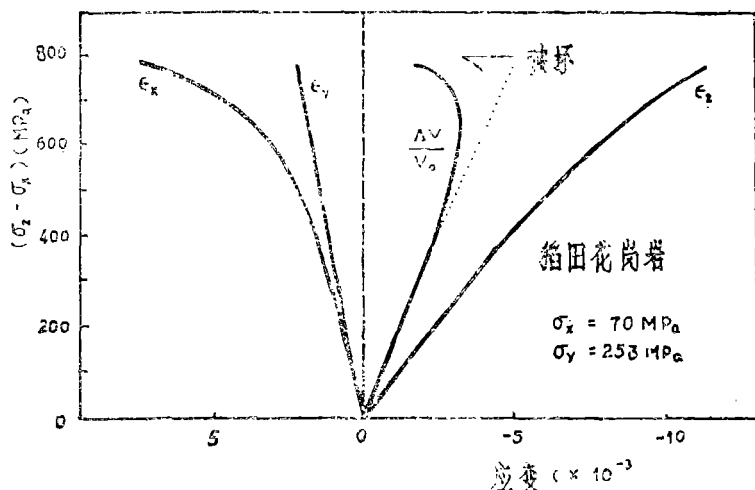


图14. 稻田花岗岩的三个主应变（ ε_x 、 ε_y 、 ε_z ）和体积应变 $\Delta v/v_0$ 作为应力差（ $\sigma_z - \sigma_x$ ）的函数。

根据这些试验结果，已经搞清楚了在一般三轴应力状态下的各种各向同性岩石的基本

变形特性。一个重要的结果是，在中间主应力的高值下有很大的各向异性体积膨胀。用垂直于最小主应力方向的裂隙的张开来解释这个各向异性膨胀。图15示意地表示在逆断层和横断层的情况下，错位之前张裂隙的方向。

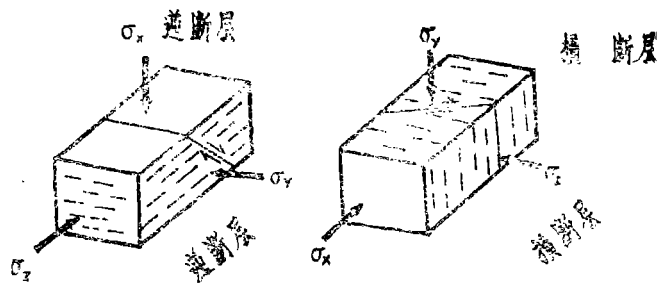


图15. 在一般三轴应力状态下，形成断层前张开裂缝的方向，左，逆断层；右，横断层

四. 各种异性岩石

在天然状态中，岩石或岩体或多或少是各向异性的或有节理的。许多研究工作者曾经研究过应力状态对各向异性岩石的破坏特性的影响。

在一般三轴试验里（ $\sigma_2 = \sigma_3$ ），曾观测过二维的各向异性对破坏强度和断层角度方

面的强烈影响(如, Donath, 1964)。最小强度出现于 σ_1 轴和层面之间的夹角约为 30° 的时候。对于中等程度的倾角来说, 层状岩石的剪切破裂面跟软弱面趋于一致, 但对于更陡的倾角, 其破裂与各向同性岩石一样, 产生在大约 30° 的角度上。

茂木等人在一般三轴压缩下也曾研究过破坏特性的二维各向异性的影响(1978b)。应用于各向同性岩石的一般三轴压缩技术也同样适合于各向异性岩石。在初步的研究中, 曾对倾角 $\Psi = 30^\circ$ 和 90° 观测过中间主应力的效应。在图16里, 对呈现强烈的各向异性的绿色片磨岩, 绘制了破坏应力 σ_1 和中间主应力 σ_2 的关系曲线。在第Ⅳ种情况里, 弱面垂直于 σ_1 轴, 即, $\Psi = 90^\circ$, 中间主应力效应很近似于各向同性岩石。在这个图上, 用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ表示常规三轴试验强度最小的 $\Psi = 30^\circ$ 的二维各向异性的三种不同倾向的情况。 σ_2 轴和弱面走向之间的夹角 r 对于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ种情况分别为 0° , 45° , 90° 。中间主应力效应明显地取决于弱面的走向, 也就是, 在第Ⅰ种情况里(弱面平行于 σ_2 轴), σ_2 的影响是可忽略的, 在第Ⅱ种情况里是中等的, 在第Ⅲ种情况里是很显著的。为了得到更全面的结论, 针对各种倾向, 需要进一步试验。就宏观各向同性岩石而言, 这个结果似乎也给出一个关于 σ_2 对破坏强度的影响机制的启发, 因为常见的各向同性岩石可认为具有随机方向的微小软弱面的微观不均匀的岩石(茂木等, 1978b)。

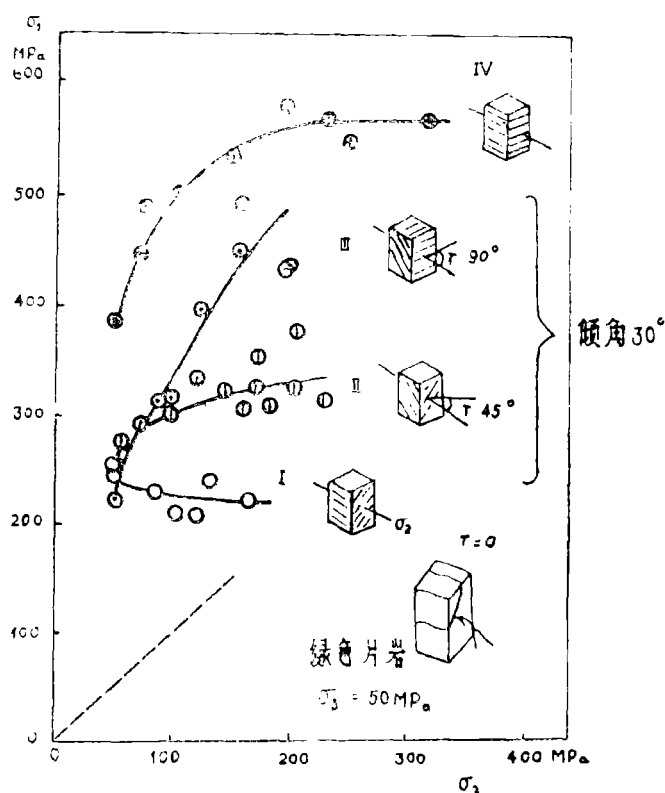


图16. 绿色片岩的破坏应力(σ_1)作为 σ_2 的函数。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ是三轴轴应力系统的平面各向异性的不同方向的情况, 见正文

四、结 语

本文讨论了组合应力状态对各向同性及各向异性岩石的流动和破坏的效应。虽然, 应力状态的效应在岩石力学里是个基本问题, 但是我认为对中间主应力效应的认识是不令人满意的。原因是, 在一般三轴应力状态下的高精度试验很少并且缺乏对已报告的试验结果的正确评价。本文着重于一般三轴应力状态的效应, 特别是中间主应力的效应。中间主应力的影响不仅在各向异性岩石里是显著的, 而且在各向同性岩石里也同样是显著的。在恒

定应变率的试验里, 业已大体上搞清楚了在一般三轴应力状态下的岩石的流动和破坏的一般特性; 但在一般应力状态下, 与时间相关的性状有待进一步研究。

参 考 文 献

- Akai, K., and H. Mori, "Study on the failure mechanism of a sandstone under combined compressive stresses (in Japanese)", Proc. Japan Sci. Civil. Eng., Vol. 147, 1967, pp. 11-24
- Bieniawski, Z. T., "Deformational behaviour of fractured rock under multiaxial compression", In: Structure, Solid Mechanics and Engineering Design. Tereni, M. (ed.). Proc. Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference. London: Wiley-Interscience, 1971 pp. 589-598
- Brace, W. F., "Brittle fracture of rocks", In: Proceedings of International Conference on State of Stress in the Earth's Crust, edited by W. R. Judd, 1964, pp. 111-178, Elsevier, New York
- Handin, J., "Strength and ductility", In: Handbook of Physical Constants. Revised ed. Clark, S. P. (ed.). Geol. Soc. Am. Memoir, Vol. 97, 1966, pp. 223-289
- Handin, J., D. V. Higgs, and J. K. O'Brien, "Torsion of Yule marble under confining pressure", In: Rock Deformation, Geol. Soc. Amer. Mem. 79, edited by D. Griggs and J. Handin, 1960, pp. 245-274
- Handin, J., Heard, H. C., and Magouirk, J. N., "Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperatures and strain rates", J. Geophys. Res., Vol 72, 1967, pp. 611-640
- Hojem, J. P. M., and N. G. W. Cook, "The design and construction of a triaxial and polyaxial cell for testing rock specimens", S. African Mech. Eng., Vol. 18, 1968, pp. 57-61
- Hoskins, E. R., "The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol 6, 1969, pp. 99-125
- Jaeger, J. C., and E. R. Hoskins, "Rock failure under the confined Brazilian test", J. Geophys. Res., Vol. 71, 1966, pp. 2651-2659
- Mogi, K., "Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress", Rock Mech. Eng. Geol.

Vol. 4, 1966, pp. 41-55

- Mogi, K., "Effect of the intermediate principal stress on rock failure",
J. Geophys. Res., Vol. 72, 1967, pp. 5117-5131
- Mogi, K., "Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone", Tectonophysics, Vol. 11, 1971a, pp. 111-127
- Mogi, K., "Fracture and flow of rocks under high triaxial compression",
J. Geophys. Res. Vol. 76, 1971b. pp. 1255-1269
- Mogi, K., "Fracture and flow of rocks", Tectonophysics, Vol. 13,
1972a, pp. 541-568
- Mogi, K., "Effect of the triaxial stress system on fracture and flow of rocks",
phys. Earth planet. Inter., Vol. 5. 1972b, pp. 318-324
- Mogi, K., "Rock fracture", Annual Review Earth Planet. Sci., Vol 1,
1973, pp. 63-84
- Mogi, K., "Dilatancy of rocks under general triaxial stress states with
special reference to earthquake precursors", J. Phys. Earth,
Vol. 25, Suppl., 1977, pp.S203-S217
- Mogi, K., K. Igarashi and H. Mochizuki, "Deformation and fracture
of rocks under general triaxial stress states — Anisotropic
dilatancy (in Japanese)", J. Material Sci. Japan, Vol. 27, 1978a
pp. 148-154
- Mogi, K., M. Kwasniewski, and H. Mochizuki, "Fracture of anisotropic
rocks under general triaxial compression (in Japanese)",
Abstract, Seismol. Soc. Japan, No. 1, 1978b, P. 225
- Murrell, S. A. F., "The effect of triaxial stress systems on the strength
of rocks at atmospheric temperatures", Geophys. J., Vol. 10,
1965, pp. 231-282
- Niwa, Y., W. Koyanagi, and S. Kobayashi, "Failure criterion of
lightweight concrete to triaxial compression (in Japanese)",
Proc. Japan Soc. Civil. Eng., Vol. 143, 1967, pp. 28-35
- Sakurai, S., and S. Serata, "Mechanical properties of rock salt under
three dimensional loading conditions", proc. Japan Congr.
Tect. Mater., 10th, 1967, pp. 139-142
- Von Kármán, Th., "Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck", Z.
Verein Deut Ingr., Vol. 55, 1911, pp. 1749-1759

许东俊 译于东京

吴绵拔 校于武汉