

# 真三軸破壊条件におけるグリフィスクラック・ インクルージョンの効果<sup>†</sup>

小 出 仁\* 高 橋 学\*\* 木 下 重 教\*\*\*  
石 島 洋 二\*\*\* 中 村 章\*\*\*

## Effects of Griffith Cracks and Inclusions on Fracture Criteria under a General Triaxial Stress State

by

Hitoshi KOIDE\*, Manabu TAKAHASHI\*\*, Shigenori KINOSHITA\*\*\*,  
Youji ISHIJIMA\*\*\* and Akira NAKAMURA\*\*\*

New cracks are formed in a rock around Griffith cracks or Griffith inclusions with various aspect ratios and various mechanical characteristics. Parabolic Griffith-type criteria for fracture can be derived from the analysis of the condition for formation of new cracks from the penny-shaped cracks or inclusions. The parabolic criteria for fracture for the incompressible Griffith inclusions become more flattened as they are less sensitive to compressive stress. The closure of Griffith cracks with various aspect ratios leads to the linear Coulomb criteria for brittle fracture.

However, the effect of intermediate principal stress is neglected in the conventional theory of generalized Griffith fracture criteria, although it is against the recent results of general triaxial compression experiments of rocks. The statistical distributions of aspect ratio and orientation of Griffith cracks or Griffith inclusions should be considered in order to explain the effect of intermediate principal stress on the fracturing of rocks. The von Mises criteria and Mogi criteria are derived as the special cases of the statistical generalized Griffith theory.

キー・ワード：破壊条件，真三軸試験，グリフィス理論，確率

### 1 はじめに

破壊理論は，工学的にもきわめて重要であるが，すべての場合に当てはまり得るような理論はまだ現れていない。特に岩石は不均質な多結晶集合体であるため，単一の破壊条件式を求めることは困難である。したがって，様々の理論式や実験式が提案され，状況にあわせて比較的近いと思われる条件式が適宜使われているのが実情である。岩石において使われている破壊条件は，Coulomb 破壊条件式または Griffith 理論を基礎としているものが大部分である。さらに一般的な条件として，Mohr の限界曲線があるが，これは本質的には実験式の表現方法というべきものであり，Coulomb 条件式や Griffith 条件式もその一形態として含まれるような包括的なものである。

しかし，Coulomb 条件式や Griffith 条件式を含む Mohr の限界曲線は，最大応力と最小応力で決まる応力円が限界曲線に接すると破壊が生じるとするため，中間応力の影響はないことが前提になっている。ところが，最近の真三軸試験の結果によれば，破壊強度へ

の中間応力の影響は小さいながらも存在することが明らかになっている。そのため中間主応力の影響が入っている von Mises 条件式の修正等多くの破壊条件式が提案されてきている。しかし，未だ完全に成功したといえる破壊理論は見出されていない。ここでは，真三軸試験等の最近の知見から見た破壊モデルについて論じる。

### 2 真三軸破壊実験の結果と破壊条件

地下においては，岩石は通常すべての方向から圧縮される状態にあるのが普通である。そこで，通常材料試験のような一方向からのみの引張りや圧縮試験のみではなく，あらゆる方向から圧力が加えられるようないわゆる三軸圧縮試験が発達してきた。しかし，通常の三軸圧縮試験は三主応力のうちの二つが等しい状態の実験しかできない，いわゆる封圧三軸試験であった。封圧三軸試験によって限界曲線が実験的に求められ，また低封圧下ではぜい性的な岩石も，高封圧下では延性的になるといった基本的な性質が明らかにされた。しかし，封圧三軸試験では中間応力の影響を知る

<sup>†</sup> 原稿受理 昭和60年7月31日 Received July 31, 1985

\* 正会員 地質調査所 茨城県筑波郡谷田部町, Geological Survey of Japan, Yatabe-cho, Tsukuba-gun, Ibaraki

\*\* 地質調査所 茨城県筑波郡谷田部町, Geological Survey of Japan, Yatabe-cho, Tsukuba-gun, Ibaraki

\*\*\* 北海道大学工学部 札幌市北区, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo

ことはできない。

そこで1960年代後半頃から、三主応力を独立に変えられる試験機が試作されるようになった。これらの試験機は本来の意味の三軸試験機であるが、従来型の封圧三軸試験と区別するため、組合せ応力下の試験、多軸試験、真三軸試験、一般的三軸試験、絶対三軸試験などまちまちの名称で呼ばれている。

多くの真三軸試験装置は三方向共すべて剛性のピストンで加圧するタイプのもので、ピストン同志の接触の危険からピストンの間に多少の間げきが必要であり、試験精度を十分に高めることが困難であった。このため真三軸破壊条件も十分な精度をもって求めることができなかった。しかし、茂木清夫<sup>1)</sup>は、一方向の主応力は流体圧で加えるタイプの新しい真三軸試験装置を考案した (Fig. 1)。茂木型真三軸試験装置は、いかえれば、封圧下で二軸試験を行うものであり、封圧三軸試験の精度に比較的近い精度での真三軸試験が可能になった。この結果、中間主応力の効果を明らかにする決定的な結果が得られるようになった。

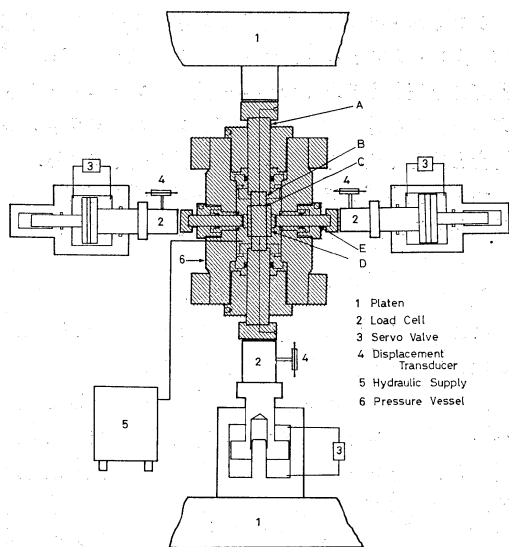


Fig. 1. Mogi type general tri-axial apparatus.

茂木による実験結果は、強度に対する中間主応力効果は小さいが、確かに影響はあることを示していた。延性金属材料によくあてはまるとされている von Mises の降伏条件式は、中間主応力の影響が入っているが、岩石の真三軸実験の結果は von Mises 式では中間主応力の影響が過大であることが明らかになった。茂木<sup>1)</sup>は、von Mises 式を一般化し、次のような経験式を提案した。

$$\tau_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (1)$$

ここで、八面体応力

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

$\sigma_1$ : 最大主応力,  $\sigma_2$ : 中間主応力,

$\sigma_3$ : 最小主応力,  $f$  は関数を表す (ここでは圧縮応力を正とするので、最大応力は最大圧縮応力と同じである)。式(1)を茂木条件式と呼ぶことにする。茂木条件式は、簡単であるが、真三軸実験結果によくあてはまる (Fig. 2)。Fig. 2 ではほぼ直線になっているので、 $(\sigma_1 + \sigma_3)$  の一次式で表せる。しかし、岩石によっては直線にならない場合も多く、一次式で表せない場合もある。茂木条件式は実用的に秀れているが、物理的意味を明らかにする必要がある。

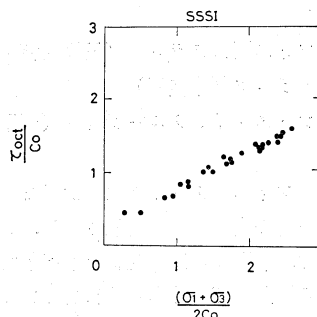


Fig. 2. General tri-axial strength of Shirahama sandstone on the Mogi diagram.

### 3 グリフィス核からのクラック発生モデル

岩石中の空から粒界等の弱面や異質介在物がクラック発生核になっていることは実験的に確かめられる<sup>2)</sup>。これらの欠陥は広義のグリフィス核と考えることができる。三軸圧縮応力下の岩石破壊では、発生したマイクロクラックがそのままでは大きく成長せず、複雑な発達過程を経て大きな破壊に至ることが観察される<sup>2)</sup>。空から発生したクラックが直ちに成長して全体的な破壊に至るとする狭義のグリフィス理論は、地下の岩石の場合には大幅に修正する必要がある。

グリフィス理論を拡張修正する試みは数多くなされているが、それぞれ一長一短があり、岩石破壊を完全に記述できる理論は見出されていない<sup>3)~7)</sup>。

圧縮応力下の岩石中では、核から発生したクラックの相互干渉により割れ目帯が形成され、さらに新しいクラックを形成する。一般に岩石は、天然に長期間の応力履歴を受けているので、古いクラックや断層が既に形成されていて、大きなクラック発生核が存在していることがある。

クラック発生核は多種多様なので、その厳密な評価は難しい。しかし、破壊条件に特に大きな効果を持つクラック発生核は、グリフィス型の扁平な核である。扁平な核が、もっとも高い応力集中源になりやすいためである。球形や偏長型の空からクラックが発生し

たとしても, 発生したクラックは偏平な空かとして近似できるようになる(そうならない場合には, その後のクラックの進展は期待できないので, 巨視的破壊には影響を与えない)。

周囲の媒体に比べて, きわめて固い介在物もまた, クラック発生核となりうるが, これもクラック発生後には, 空かまたは弱部として取扱うことができる。ソリッド・インクルージョンはクラックの初期発生時には重要であるが, 岩石の場合, 破壊プロセスの後期にはあまり重要でなくなる。

そこで, 破壊プロセスに大きな影響を持つクラック発生核は, 岩石の場合力学的には次の3種に要約されよう。

- (1) グリフィス開口クラック (偏平な空か)
- (2) 閉鎖クラック (摩擦面)
- (3) グリフィス・インクルージョン (偏平な軟質介在物)

ここで, グリフィス・クラックは2次元では, きわめて偏平な円型の空かとして近似される。3次元に拡張する場合は, 偏平な円筒体空かとするべきであるが, 円筒体空かの周囲の応力分布の解析解はまだ得られていない。しかし, 偏平な回転円筒体(長径=中間径 $\gg$ 短径, Fig. 3)型の空かないし介在物のまわりの応力分布については完全な解析解が得られている<sup>8)</sup>。きわめて偏平な回転円筒体はペニー型ないし円盤型と呼ばれ, 偏平になるほど, いいかえればアスペクト比(短径/長径)が小さくなるほど応力集中係数が大きくなる。2次元のグリフィス・クラックによる応力集中と3次元のペニー型クラックによる応力集中は係数が異なるだけである。一般の3次元円筒体空かの場合の応力集中は両者の中間になると考えられる。ここでは, 簡単のため, 3次元でもっとも妥当な形態であるペニー型の空かないし介在物を, 3次元のグリフィス・クラックないしグリフィス・インクルージョンとして扱う。

ペニー型のグリフィス・クラックおよびグリフィス

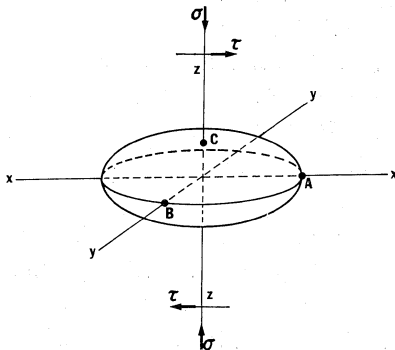


Fig. 3. A penny-shaped Griffith crack or inclusion.

・インクルージョンからのクラック発生条件は小出によって求められている。局所的な引張応力の最大値が局所的引張強度に達したときに破壊するというグリフィスのクライテリアは広域圧縮応力下にも適用できる。他の破壊クライテリア, 例えばK値は圧縮応力下では $K_{II}$ の評価に問題が残るため, この論文では, 最もプリミティブな引張強度のクライテリアを用いることとする。

ペニー型グリフィス・クラックの伸展条件は2次元グリフィス理論と同型であるが係数が異なる次式で表される。グリフィス・クラック赤道面内の応力成分の影響は小さいので通常の場合は省略してさしつかえないが, グリフィス・クラック内部の流体圧も考慮する必要がある。

$$\tau = \frac{(2-\nu)\pi s T_m}{4} \sqrt{1+4(\sigma-p)/\pi s T_m} \quad (3)$$

ただし,  $s$ : ペニー型空かのアスペクト比(短径/長径),  $\nu$ : 媒体のポアソン比,  $T_m$ : 媒体の引張強度(小スケールの場合理想引張強度に近くなる),  $\sigma$ : グリフィス・クラック赤道面に対する巨視的垂直応力,  $\tau$ : グリフィス・クラック赤道面に対する巨視的せん断応力,  $p$ : グリフィス・クラック内の流体圧である。圧縮応力を正とする。このペニー型グリフィス・クラックの伸展の条件式は, 2次元グリフィス・クラックの場合と同じく放物線型のモールの限界曲線になる。

ペニー型のグリフィス・クラックは圧縮応力下で容易に閉じる。閉鎖する圧力は次式で求められる。

$$\sigma \cong \frac{\pi G s}{2(1-\nu)} = \frac{\pi E s}{4(1-\nu^2)} \quad (4)$$

ここで,  $G$ : 媒体の剛性率,  $E$ : 媒体のヤング率,  $\sigma$ はクラックに垂直な圧縮応力である。

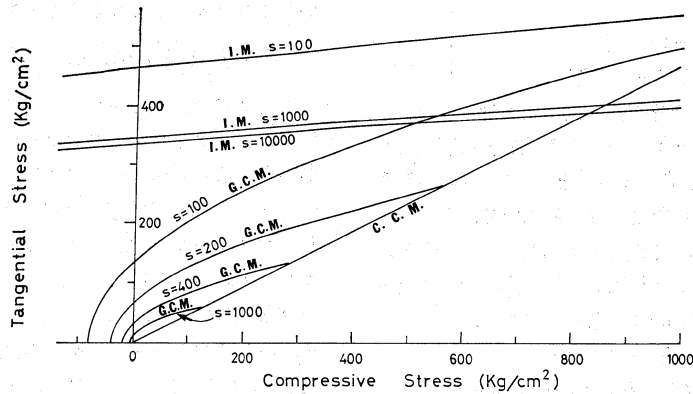
式(4)で求められる垂直応力以上の圧縮応力下では, ペニー型グリフィス・クラックは閉じてしまうため, (3)のグリフィス・クラック伸展条件式は成立しなくなる。したがって, 式(3)は, 式(4)で定められる圧縮応力下では成り立たない。閉鎖する圧縮応力はアスペクト比により異なるが, 式(4)を(3)式に代入してアスペクト比を消去すると,

$$\tau = \mu_c \sigma \quad (5)$$

ただし,

$$\mu_c = \frac{(2-\nu)(1-\nu) T_m}{2G} \sqrt{1+2G/(1-\nu) T_m} \quad (6)$$

すなわち, モールの応力図上で式(5)で示される直線より下では, グリフィス開口クラックの伸展はあり得ない(Fig. 4)。逆に, もし, あらゆるアスペクト比のグリフィス・クラックが存在するような場合, 式(5)で示されるより大きなせん断力がかわるとクラックの伸展が起きる。式(5)はきわめて潜在クラックの多い岩石の



G.C.M.: condition for extension of a penny-shaped Griffith crack.  
 C.C.M.: condition for closing of penny-shaped Griffith cracks of various aspect ratios.  
 I.M.: condition for fracture nucleation around a penny-shaped Griffith inclusion.  
 S.: aspect ratio.

Fig. 4. Generalized Griffith criteria for local fracture nucleation.

破壊条件を示すと考えられ、いわゆる残留強度のCoulomb条件式に対応すると考えられる。したがって、式(6)は、破碎岩のCoulombの摩擦係数の理論値を示していると考えられる。理想引張強度はヤング率の10分の1程度であることが多い。ポアソン比を0.3とすれば、式(6)から摩擦係数の理論値は $\mu_c = 0.54$ であり、ポアソン比を0.25としても $\mu_c = 0.56$ となる。この値は破碎岩の場合にはほぼ妥当な値といえよう。

破断面が完全にクリーンで、接触部では両端の岩盤が完全に圧着されるとすると、破断面に沿って様々なアスペクト比のグリフィスクラックが断続的に分布していると考えられることもできる。この場合、式(5)がこの破断面に沿うすべりの条件式と考えることもできる。実際には、破断面は必ずしもクリーンではなく、式(5)は複雑な摩擦現象の一つの理論的な場合を説明するにすぎないが、特に地震の原因の一つとして重視されているスティック・スリップ現象を説明しようと考えられる。

クリーンなグリフィス型のクラックが閉じた場合、クラック面に沿って摩擦が作用すると考えられるので、式(5)のようなCoulombの摩擦条件式が成立する。

岩石中には粒界や雲母等のすべりやすい鉱物や粘土層や破碎帯のような軟質の介在物がある。これらも応力集中源となり、クラックの核となるが、開口したグリフィスクラックや閉鎖したクリーンなクラックとは異なる特質を持っている。小出は、ペニー型の軟弱インクルージョンからのクラック発生条件は、グリフィス条件式と同型の次の式で示されることを示した。

$$\tau = \frac{2T_m}{b} \sqrt{1 + \sigma_i/T_m} \quad (7)$$

ここで、 $\tau$ : インクルージョン面に対する巨視的せん断応力、 $T_m$ : 引張強度、 $b$ : せん断力に対する応力

集中係数、 $\sigma_i$ : グリフィス・インクルージョンの先端部における有効垂直応力であり、 $b$ および $\sigma_i$ は次式で求められる。

$$b = 4 \left(1 - \frac{G'}{G}\right) \left\{ (2 - \nu)\pi s + (1 - \nu)\frac{G'}{G} \right\} \quad (8)$$

$$\sigma_i = \left[ 8 \left(1 - \nu\frac{G'}{G}\right) \left\{ \left(1 - \frac{K'}{K}\right)(\sigma - p) - K'\Delta V \right\} \right] \left\{ 2\pi s + 4(1 - \nu)\frac{K'}{G} + \frac{16(1 - \nu)G'}{3G} \right\} \quad (9)$$

上の2式で、 $s$ : グリフィス・インクルージョンのアスペクト比、 $G$ : 媒体の剛性率、 $\nu$ : 媒体のポアソン比、 $K$ : 媒体の体積弾性率、 $\sigma$ : インクルージョン面に対する巨視的垂直応力、 $p$ : インクルージョンの初期内部圧、 $\Delta V$ : 温度変化やダイラタンスーによるインクルージョンの相対体積膨張である。

岩盤中には断層破碎帯が存在したり、また破壊の過程で破碎ゾーンが形成されることがある。このような破碎帯も、単純化すればインクルージョンと考えることができる。粘土帯の場合は、軟弱なグリフィス・インクルージョンと考えられるので式(7)で破壊条件を見積ることができる。しかし、破碎帯は必ずしも粘土化していないので、破碎帯内部では式(5)のようなCoulomb摩擦条件式が成り立つと考える方が妥当であろう。そうすると、破碎帯内部が摩擦条件を越えるとはじめて、きわめて弱いグリフィス・インクルージョンになると考えることができよう。このような弱いインクルージョンでは、見かけ剛性率 $G'$ はきわめて小さいと考えられる。また、 $K'/K$ も小さいと考えてよいであろう。このような場合の破碎帯のグリフィス・インクルージョン破壊条件式は式(7)を変形して、次のようになると考えられる。

$$\tau = \mu_c(\sigma - p) + c_1 \sqrt{1 + c_2(\sigma - p - K'\Delta V)} \quad (10)$$

ただし、 $\mu_c$ : 見かけ摩擦係数、 $C_1$ 、 $C_2$ は次式で表さ

れる係数である。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= (2-\nu)\pi s T_m / 4 \\ C_2 &= 2G / (1-\nu) / K' / T_m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(10)中の  $\rho$  は断層破砕帯内の流体圧と解釈され、 $\Delta V$  は温度変化やダイラタンシーによる破砕帯の膨張である。もし、引張強度  $T_m \doteq E/10$  とすれば、 $C_2 = 11/K'$  となり、係数  $C_2$  はかなり小さな値になる。したがって、 $C_1$  は Coulomb 式の粘着力とほぼ同等になる。すなわち、 $K'$  が比較的大きな場合、式(10)は次のように粘着力を含んだ Coulomb 条件式になる。

$$\tau = C_1 + \mu_c(\sigma - p) \quad (12)$$

4 マイクロクラック発生 の確率論的考察

上述のように、岩石中には様々のタイプのクラック発生核が考えられ、その特性やアスペクト比によって、クラック発生条件も異なっている。ペニー型のグリフィス・クラックやグリフィス・インクルージョンの性質から、放物型の Mohr の限界曲線だけではなく、Coulomb 条件式も導き出せる。しかし、これらの条件式には中間主応力の影響が入らない。

さらに注意して考えると、クラック発生条件式は厳密には、ペニー型グリフィス・クラックまたはインクルージョンの赤道面に対する巨視的せん断応力と垂直応力および内圧の関数となっている。赤道面内の応力成分の影響はペニー型クラックやインクルージョンの先端部では無視しうるほど小さいためである。もし、これらの欠陥面が中間主応力に平行であれば、中間主応力の影響はほとんどないことになる。実際の欠陥は、もちろん様々な方向の核が混在するので、必ずしも中間主応力に平行ではないが、中間主応力に平行な面におけるせん断応力が垂直応力に比較してもっとも大きくなる(いいかえれば、Mohr の応力円のもっとも外側の円が中間主応力に平行な面に対する応力円である)ために、前節の条件から、中間主応力に平行な面を赤道面にするようなグリフィス・クラックないしグリフィス・インクルージョンがもっともクラック発生核になりやすい。したがって、あらゆる方向の欠陥面が常に岩石中に存在し、そのうちの一つの欠陥からクラックが発生すると直ちに全体の破壊につながるという仮定を置くかぎり、中間主応力の影響はないということになる。

しかし、一つのクラックの発生が直ちに巨視的破壊に直結するという仮定は、実験における観察から見て正しくない。圧縮応力下では多数のマイクロクラックが発生した後巨視的破壊が生じることが確かめられている。西松は、グリフィス・クラックの方向やアスペクト比の確率分布を考える必要があることを指摘した。ある組合せ応力 ( $\sigma^*$ ) のもとで、単位体積の岩体中に、クラックを発生しうるグリフィス・クラックな

いインクルージョンが含まれる確率  $F(\sigma^*)$  は、

$$F(\sigma^*) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{s'} f(s, \alpha, \beta) \sin(\alpha) ds d\alpha d\beta \quad (13)$$

ここで  $f$  は、 $(\alpha, \beta)$  方向の法線を持つアスペクト比  $s$  のグリフィス・クラックないしインクルージョンが存在する確率密度関数である。 $s'$ : 組合せ応力 ( $\sigma^*$ ) のもとで、 $(\alpha, \beta)$  方向のグリフィス・クラックないしインクルージョンからクラックを発生するクリティカルなアスペクト比である。すなわち、 $(\alpha, \beta)$  方向の  $s'$  以下のアスペクト比を持つグリフィス・クラックないしインクルージョンからはマイクロクラックを生じる。 $s'$  は一般にグリフィス・クラックないしインクルージョンの力学特性と応力状態と方向によって、前節の諸クライテリアから求められる。

確率密度関数  $f$  については、ほとんど分っていないが、 $s$  についてゼロから無限大までの間に分布する関数になるはずである。クリティカルなアスペクト比  $s'$  はきわめて小さいと考えていいので、破壊問題を考えるときは、 $s$  がゼロに近い範囲だけを考えればよい。簡単のために、方向による分布の異方性はないとすれば、確率密度関数  $f$  は  $s$  が小さい範囲では  $s$  のべき乗で表しうるとしても、差しつかえない。そうすると式(13)は、

$$F(\sigma^*) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{A}{n} s'^n \sin(\alpha) d\alpha d\beta \quad (14)$$

ただし、 $s' \ll 1$ ,  $A$  は係数である。

西松は、破壊様式によって、巨視的破壊に至るマイクロクラック発生数が異なり、引張破壊では1個のクラック発生が巨視的破壊に導くとして極値理論を展開している。しかし、三軸圧縮応力下では、多数のマイクロクラックが生じうるので、極値理論を用いず確率  $F$  が一定の値に達したときに巨視的破壊が生じるとする。 $s'$  は、前節のクラック発生条件式から求められるが、一般には複雑なので、式(13)ないし(14)は数値積分する他ない。しかし、きわめてせん断に弱い、体積弾性率は比較的小さくないようなインクルージョン(多くの流体介在物・潤滑材の介在物やすべり面はこの条件をほぼ満たす)は、式(9)から垂直応力の影響を無視できるので、式(7)から  $s'$  はせん断応力のみ関数として次のように求まる。

$$s' = \frac{4\tau}{(2-\nu)\pi T_m} \quad (15)$$

この式を式(14)に代入し、指数はもっとも小さい値をとって  $n=2$  とすれば、方向積分が可能になり、発生しうるマイクロクラックの密度は次式のようになる。

$$F(\sigma^*) = \left(\frac{2}{15}\right) \pi A \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\} \quad (16)$$

マイクロクラック密度が一定値に達すると巨視的破

壊に達するとすれば、式(10)から八面体応力一定となつて von Mises 条件式が求まる。しかし、マイクロクラック密度を一定とすると、マイクロクラックの発生数のみを問題にしていることになり、クラックの伝ばが考慮されていない。実験から、封圧の高い方がマイクロクラックの密度が高くなることが観察されているが、<sup>2)</sup> 圧縮応力下でクラック伝ばが困難になる程度と対応すると考えられる。巨視的破壊に達するクラック密度が最大応力と最小応力の平均値の関数の自乗に比例するとすれば、式(10)から茂木条件式が導かれる。

一般に、式(10)と(11)からクリティカルな  $s'$  は求められるが、式(14)は数値積分する他はない。数値積分によって確率  $F$  一定の条件で実験結果にあてはめて、式(10)の係数を定めてみると、封圧状態での強度は式(10)の最初の項でほぼ定まり、中間主応力の影響は式(14)の  $s$  の指数  $n$  の大きさでほぼ決まる。

白浜砂岩の真三軸実験結果へのあてはめでは (Fig. 5),  $n=2$  とすると明らかに中間応力効果が大きすぎ、最小主応力 20 MPa 以下では  $n=12$ 、最小主応力 30 MPa 以上では  $n=6$  とすると実験結果とよく一致する。 $n$  が変わる最小主応力は、白浜砂岩の破壊様式がぜい性から延性に変るとはほぼ一致している。すなわち、

延性に近い方がぜい性状態より中間主応力の効果が大きいといえる。

ここで指数  $n$  の変化は、高圧下でクラック源となりやすいグリフィス・インクルージョンが変わることにもよるがむしろクラックの伝ば力を反映していると考えられる。すなわち、指数  $n$  が大きい方が、巨視的破壊に対して高せん断応力下で発生したクラックの影響を大きく見積ることになる。

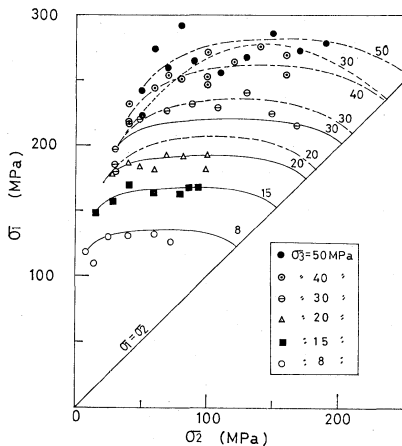
## 5 結 論

岩石中には様々なアスペクト比のグリフィス開口型クラックや閉鎖クラックが存在し、また様々なタイプのグリフィス・インクルージョンも介在する。これらのペニー型の核から新しいクラックが発生するとして解析すると、様々な偏平度の放物線型のグリフィス条件式や直線状のクローン条件式が導き出せる。しかし、これらの破壊条件は中間主応力の影響が入らないので、岩石の真三軸破壊実験の結果にあわない。グリフィス・クラックやグリフィス・インクルージョンのアスペクト比と方向の確率分布を考慮することにより破壊への中間主応力効果が説明できる。von Mises 条件式や、それを修正した茂木の真三軸破壊条件式は、この統計一般化グリフィス理論を単純化した式として説明される。

(昭和59年12月7日 第6回岩の力学国内シンポジウムにて講演)

## 参 考 文 献

- 1) 茂木清夫, 材料, **20**, 143 (1971).
- 2) 小出 仁, 星野一男, 南雲昭三郎, 第2回岩の力学シンポジウム論文集, p.51 (1967).
- 3) 小林昭一, 材料, **20**, 164 (1971).
- 4) 荻野正二, 水田義明, 浦野洋三, 日鉱誌, **95**, 843 (1979).
- 5) 下谷高瀧, 山富二郎, 山口梅太郎, 日鉱誌, **96**, 529 (1980).
- 6) G. A. Wiebols and N. G. W. Cook, Int., J. Rock Mech., Min. Sci., **5**, 529 (1968).
- 7) 高橋 学, 小出 仁, 木下重教, 石島洋二, 中村 章, 第17回岩盤力学シンポジウム論文集, p.51 (1985).
- 8) 小出 仁, 材料科学, **7**, 252 (1970).
- 9) 小出 仁, 第3回岩の力学シンポジウム論文集, p.53 (1970).
- 10) 西松裕一, 第2回岩の力学シンポジウム論文集, p.37 (1967).



$n$ : index in the statistical generalized Griffith criteria.  
 $n=2$  for broken line,  
 $n=6$  for dotted broken line,  
 $n=12$  for solid line.

Fig. 5. Effect of intermediate stress on strength of Shirahama sandstone and statistical generalized Griffith theory.