

圧縮下岩石の微小破壊過程と巨視的破壊強度

Fracture process and macroscopic strength of rocks under axial loading of compression

山本 清彦[1]

Kiyohiko Yamamoto[1]

[1] none

[1] none

1. はじめに：破壊強度の寸法効果は断層の強度の議論にとって考慮しなければならない一要素であろう。ここでは、軸圧縮試験で岩石試料内に生じる微小剪断破壊を基礎に、試料の破壊過程をモデル化し、そのモデルから導かれる破壊条件と破壊強度の寸法依存性について述べる。

2. 実験データから：軸圧縮試験下で測定される既存の P 速度データから、張力型割れ目の密度を c とすると、 $c = f(p)G(r)$ の関係が得られる。ここで、 p は封圧、 r は破壊時の差応力で規格化した印加差応力である。 $G(r)$ は、差応力だけの関数であるから、試料内の剪断割れ目の密度に比例していると解釈できる。したがって、この式は、剪断割れ目の密度がある値になると試料が破壊することを表している。微小破壊がクーロン則に従っているとき、 $G(r)$ は法線応力を一定としたときの印加剪断応力 t を用いて $g(t)$ のように書き換えられる。ここで、 t は一定法線応力での試料の剪断破壊強度で規格化してある。(Yamamoto, 1995, Fracture Imaging, 3rd SEG/SEGJ Int. Symposium, 327 - 334)

3. 破壊過程モデル：試料を等体積の微小要素（物理要素）に分割し、それぞれに剪断強度が与えられているとする。一個の物理要素に生じた破壊は複数個の物理要素にわたって拡大する。この拡大で強度を失う物理要素の集まりを微小破壊要素と呼ぶ。微小破壊要素の強度はその要素中にある最弱の物理要素の強度に等しい。

破壊面に加えられる剪断応力の法線応力に対する比を u で表し、微小破壊要素の剪断強度の分布関数が、関数値の変域が 0 から 1 に限られた冪関数で近似できるとする。すでに破壊した要素には応力はないとして、この冪関数を印加剪断応力で書き換えて得られる関数 $g_m(u)$ を破壊過程関数と呼ぶ。この関数は u ($.LE.U$) の 2 価関数であり、 u の最大値 U は試料の剪断破壊強度 (ultimate strength) をあらわす。すなわち、破壊密度 (既破壊の体積要素の割合) が $g_c = g_m(U)$ になると巨視的破壊が起こる。この結果は上記 2 に述べた実験結果を説明している。冪を m とすると、 $g_c = 1/(m+1)$ がある。上記 2 の実験データから m は約 10 に求まる。この場合、 g_c は約 0.1 であり、試料体積の約 10% が強度を失ったときに巨視的破壊が起こることを示している。(山本, 1998, 地震 2, 50, 169 ? 180; Yamamoto et al., 2002, EPS, 54, 1181 - 1194)

4. 圧縮強度の試料寸法依存性：同一の岩石では、物理要素の大きさは不変であると考えられるから、物理要素の数は試料の体積に比例する。ここで、試料を大きくすると大きな微小破壊が生じると仮定すると、微小破壊要素中に含まれる物理要素数は多くなる。したがって、微小破壊要素の強度が確率的に小さくなり、巨視的強度も小さくなる。

軸圧縮によって試料が完全に破壊するには、物理要素の剪断強度 (内部摩擦係数) の最大値が 1 に極めて近いものでなければならない。一方、物理要素と微小破壊要素の寸法が等しいとき、試料の強度が最大になる。このときの試料強度 (内部摩擦係数) は、 $m = 5$ で約 0.55、 $m = 10$ では 0.72 である。これらは、試料を小さくした場合の内部摩擦係数の上限値と考えられる。実際、これらの値は室内実験で得られている内部摩擦係数に極めて近い。一方、圧縮破壊強度の寸法効果に関する実験データは、室内実験の寸法から長さ約 1 m 程度の試料のものがある。寸法効果に関する理論式はこれらの実験データによく適合する。この適合により得られる摩擦係数は、約 1 m 長の試料では 0.15 以下である。(山本, 1996, 地震学会, A34)

5. 議論： $M = 0$ の地震を発生する断層の長さは 10 m のオーダーである。以上の結果が地震発生の場合に直接適用できないにしても、地震を発生する断層の巨視的な摩擦係数が 0.15 以下になる可能性を考慮する必要はあろう。また、以上の結果は高圧間隙流体がなくても、巨視的摩擦係数が小さくなることを示唆しており、その機構を知ることは重要である。その解明の鍵は断層構造の研究によって得られることが期待される。