

真三軸圧縮応力下にある脆性岩石の破壊過程模型

A generalized fracture process model for brittle rocks under true tri-axial compression

山本 清彦[1]

Kiyohiko Yamamoto[1]

[1] 東北大・理・観測セ

[1] RCPEV, Tohoku Univ.

[研究の経緯] 破砕帯が断層面にたいする法線応力のもとで post-failure の状態にあり、破砕帯の応力が破砕帯のせん断強度に釣り合っていると考えると、「破壊過程模型」をもちいて破砕帯内の破砕度と割れ目密度を見積もることができ、さらに、弾性定数を計算することができる。このようにして得られた結果から、破砕帯が断層面に働く法線応力に対して大きなヤング率、剪断応力には小さな剛性率を持つこと、この弾性的性質がウィークフォールトを形成する可能性が示された。また、この弾性定数から得られる破砕帯内の地震波速度が測定されている P 波速度や S 波速度と平均的によく一致することも確かめられている。このように、破砕帯内の応力から破砕帯の弾性定数がわかり、これを用いて断層のせん断強度の下限が推定できることが示されている。

[本研究の目的] 「破壊過程関数」は、封圧下の軸圧縮試験における岩石試料内の破壊密度を印加応力の関数として与える。任意の応力場では、主応力値はそれぞれ異なる。したがって任意の応力場にある破砕帯の弾性は異方的であり、断層のせん断強度にも異方性が生じるであろう。ここでは、断層の破壊強度の異方性を議論するために、任意の応力場にある岩石に適用できるように一般化された破壊過程模型を提案する。

[模型] 三軸 x_1, x_2, x_3 方向からの圧縮応力, s_1, s_2, s_3 ($s_1 > s_2 > s_3$) のもとにある岩石試料を考える。試料内には差応力(s_1-s_3)と(s_2-s_3)によって微小破壊が生じるが、これによって生じる微小破壊は互に独立であるとする。このようにして、 s_2 と s_3 が一定のとき s_1 の増加に伴う破壊密度の増加だけを模型化する。そのために、 x_1 軸方向に直交する任意の方向に x_r 軸をとり、その方向の応力を s_r として、以下の仮定からなる模型を考える。1) 試料は等体積の微小体積要素からなる。2) 各要素は (x_1, x_r) 面内に法線を持つ破壊面で 1 回だけ破壊する。この要素を x_r 方向の要素とよぶ。3) x_r 方向の要素数(密度)は x_r の方向によらず一定である。4) 要素のせん断強度はクーロン則に従い、そのときの法線応力は $(s_1+s_r)/2$ で表される。5) ある基準の強度を t_r とすると、要素のせん断強度 t_s は $u_s = t_s/t_r$ で表すことができる。6) 要素にかかるせん断応力を 0 から t_e まで増加させると、破壊した要素が全体に占める割合は冪 m の冪関数 t_e^{*m} で表すことができる。7) 破壊後の要素内では $s_1=s_r=(s_1+s_r)/2$ が成り立つ。以上の仮定は、 $s_1 > s_2 = s_3$ とした三軸圧縮試験での破壊過程を説明するのに提案された破壊過程模型に関する仮定に等しい。

[巨視的強度の推定] 任意の応力場にたいして応力と破壊密度の関係を解析的に解くのは難しい。ここでは、試料内には(x_1, x_2)と(x_1, x_3)面内に法線をもつ面でのみ破壊が生じると仮定し、 $s_1=s_2$ の場合について試料の巨視的強度を考察した。差応力の増加に伴い既破壊要素の数が加速度的に増加するという事を考慮すると、この仮定は印加応力に対する既破壊要素の数を課題評価することにより、巨視的強度を過小評価するであろうと推察される。

計算された巨視的せん断破壊強度は $s_2=s_3$ の場合のそれよりも $m=5$ の場合で約 5.9%、 $m=4$ の場合で約 7.5% 大きい。圧縮試験では、試料内の法線応力は軸応力が大きくなると大きくなる。これを考慮すると、巨視的圧縮破壊強度(s_1-s_3) f は、 $s_2=s_3$ の場合よりも $m=5$ の場合で約 16%、 $m=4$ の場合で約 21%大きいという結果になる。

[実験データとの比較] 真三軸圧縮破壊強度試験は Mogi (1971) や高橋・他 (1983) によって行われている。苦灰岩、粗面岩、頁岩や砂岩を用いた実験では、 s_3 を一定にして s_2 を大きくすると強度 $s_1 f$ が大きくなるが、ある値以上の s_2 に対してはほぼ一定である(高橋・他, 1988)。 s_3 が 10 MPa よりも大きい場合、その強度の増加は約 20~30% 程度である。計算結果はこれらの実験結果と比べてやや小さいが、計算のために破壊面の方向分布についてなされた仮定を考慮すれば妥当なものと考えられる。

[結論] 提案された模型は試料の巨視的破壊強度をほぼうまく説明している。これはこの模型が一般的な応力下での試料の破壊過程を説明できる可能性を示すものである。ただし、さらに模型の精度を検討するには、より厳密な計算が必要である。