

III-3 岩質材料の内部摩擦に関する一考察

日本大学工学部 正員 田野 久貴

1. まえがき

本文は岩質材料の典型的な破壊様式である、分離破壊およびすべり破壊の二つの破壊様式のうち、後者に注目しその微視的破壊機構と内部摩擦を論じたものである。岩質材料の内部摩擦角は、その材料のせん断抵抗を表す直線の勾配、または、破壊包絡線の接線の勾配と解釈されている。しかし、土質材料や岩盤節理のように、互いに分離した面では、その物理的意味が明かであるが、岩質材料ではその物理的意味が曖昧である。そこでこの点について次のような新しい解釈を与えている。

2. すべり破壊に関するモデル

2.1 すべり破壊開始の巨視的モデル まず、一軸引張下において定数 β を考え、次式を仮定する。

$$\sigma_t = \sigma_T / \beta \quad (1)$$

ここに、 σ_t は見かけの引っ張り強度、 σ_T は理想的引っ張り強度である。

また、材料固有のせん断強度を τ_{TH} とし、そのせん断抵抗（強度） τ はすべり面上の垂直応力 σ_n と線形の関係にあると考えて次式を仮定する。

$$\tau = \tau_{TH} + M_1 \cdot \sigma_n \quad (2) \quad \left| \quad M_1 = \tau_{TH} / \sigma_t \quad (3) \right.$$

ここに、 M_1 は破壊様式（モード）を左右するという意味で破壊モード数[1]と呼ぶことにする。

応力円がこの直線に接するときすべり破壊の発生開始であると考ええる。

すべり破壊開始時の τ について式(2)を仮定したが、ピーク強度時、すなわち破壊面上の巨視的せん断抵抗についても同様な次式を仮定する。

$$\tau = \tau_s + \frac{\tau_s}{\sigma_t} \sigma_n = \tau_s + M \cdot \sigma_n \quad (4) \quad \left| \quad M = \tau_s / \sigma_t \quad (5) \right.$$

すなわち、従来内部摩擦係数と呼ばれていたものを材料のせん断強度と引張強度との比と考え、破壊モード数 M と定義したことを意味する。式(2)、(4)を図示すると図-1の直線 S_1, S_2 となる。また、破壊開始およびピーク強度時の応力円はそれぞれ円 O_2, O_3 で示される。

2.2 すべり破壊開始の微視的モデル ここではすべり線上の摩擦の効果は考えない。そして図-2に示すように、一軸圧縮下においてせん断応力 τ が最大となる面上（ $\theta = \pi/4$ ）において、まずすべり線が発生すると考える。これらの微小なすべり線はランダムな長さで間隔をもつと考えられるが、ここでは図-2(a)に示すような、いわゆる *échelon* と呼ばれる規則的な場合を考察する。長さ L のすべり線に作用するせん断応力がある値に達すると、その両端に集中する引張応力が材料固有の引張強度（ σ_T ）に達し同図(b)に示すようなクラックが発生し、これらのクラックが互いに連結することにより、巨視的には面 OP に沿ってすべり破壊を生じると考える。 $\pi/4$ の面上で $\tau = \tau_{TH}$ となるとすべり線先端近傍においてクラックが発生する条件は次式で与えられる。

$$\left\{ \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{L}{r} \right)^{1/2} - 1 \right\} \frac{\sigma}{2} = \left\{ \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{L}{r} \right)^{1/2} - 1 \right\} \tau_{TH} = \sigma_T \quad (6)$$

せん断強度 τ_s についての報告は多いが理想的せん断強度 τ_{TH} に相当すると考えられるものの報告はほとんど見あたらないようである。Bieniawski [2] によるノーライトの破壊開始およびピーク強度時の応力円を示す図からは、 τ_s に対する τ_{TH} の比は約2であることが読み取れる。ここで、これらの強度の間に次のような関係を仮定しよう。

$$\tau_s = \gamma \tau_{TH} \quad (7)$$

先のBieniawskiの例では $\gamma \approx 2$ と推定される。非拘束圧縮下において、

式(5)、(6)、(7)よりすべり線長 L およびクラック長 r の関数としての M が次のように得られる。

$$M = \frac{\tau_s}{\sigma_t} = \frac{\gamma \beta}{\sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{L}{r} \right)^{1/2} - 1} \quad (8)$$

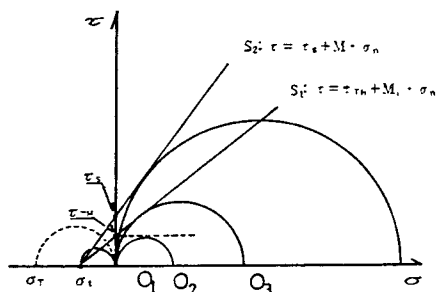


図-1 すべり破壊開始及び破壊の応力円
(すべり破壊の巨視的モデル)

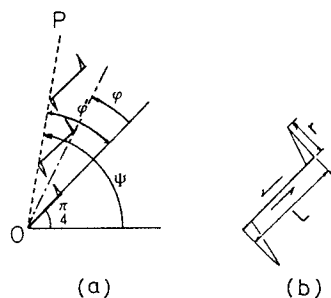


図-2 すべり破壊の微視的モデル

3. 非拘束圧縮下における岩質材料の内部摩擦

図-1に示す直線Sがσ軸に平行な場合に $M=0$ （すなわち内部摩擦が0）となるが、このような材料では見掛け一軸引張強度 $\sigma_t \rightarrow \infty$ に相当している。さらに式(1)より $\sigma_t = \sigma_T / \beta$ であるから、この場合 $\sigma_t \rightarrow \infty$ は $\beta \rightarrow 0$ に対応する。

一方、式(8)において β のいかにかわらず $M=0$ となるためには、 $r \rightarrow 0$ を満足する必要がある。 r はすべり線先端のクラック長さ（正確には引張集中応力の及ぶ距離）であるから、 $M=0$ のような材料では $r=0$ 、すなわちクラック長さゼロとなりほとんどクラックは発生せず、すべり線のみによる単純すべりとなることを意味する。すなわち、このような材料ではすべり線の先端に引張応力が集中しても、その周囲がすぐ塑性状態となりクラックが成長しにくいことを示すものと考えられる。したがって、粘土のような材料では一軸圧縮下において単純すべりが生じ破壊面の角度は $\theta = \pi/4$ を示すものと考えられる。このように、内部摩擦とはクラックの発生し易さを表す指標と考えられる。

4. 拘束圧縮下における内部摩擦

前述のように、内部摩擦を左右するものは非拘束下ではすべり線先端の、実質的な引っ張り応力集中の程度である。応力集中点近傍が塑性化したり微視的組織上クラックが進展しにくい材料の内部摩擦は小さく、これはいわば材料特性である。一方、拘束圧縮下では内部摩擦にさらに拘束圧が影響を及ぼす。すなわち、拘束圧はすべり線近傍に発生するクラックの進展を妨げる効果をもち、それはその先端から離れるほど、また、拘束圧が大きいほど大きくなると考えられる。したがって、この効果は引っ張り強度 σ_t を見かけ上増加させ、式(5)は一般的に式(9)のような形式で表されるであろう。

$$\tau = \tau_s + \frac{\tau_s}{f(\sigma_t, \sigma_3)} \sigma_n \quad (9)$$

もし、この $f(\sigma_t, \sigma_3)$ が拘束圧 σ_3 の二次関数で表される場合は、図-3のような破壊の包絡線が得られる。このとき、C点がいわゆるBarton [3] によって岩質材料に定義された、"Critical state" と解釈される点に対応している。 $\sigma_3 \rightarrow \infty$ のとき $M \rightarrow 0$ 、すなわちせん断抵抗直線はσ軸と平行となるからこの場合いわゆるトレスカの条件に近付くことになる。

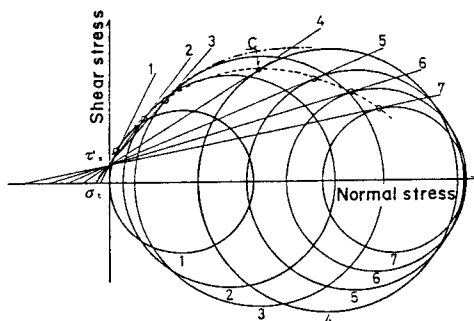


図-3 拘束圧縮下の拡張Coulomb

以上をまとめると、すべり破壊は最大せん断応力面上でまずすべり線が発生する（図-1、円 O_1 ： $\sigma = 2\tau_{TH}$ ）。さらに外応力の増加の後、一般にすべり線先端に引っ張り応力集中による微視的クラックが生じる（実質的破壊開始：同、円 O_2 ）。これらのクラックがさらに成長して（図-2(a)）すべり面が形成される。せん断応力成分に対してクラックが成長しやすい程、内部摩擦は見かけ上大きく破壊面の角度 ψ も増加する。

1)佐武, 田野: 岩石の圧縮試験における破壊様式と強度に関する考察, 第4回岩の力学国内シンポジウム, 49-54. 2) Bieniawski, Z.T.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 4, 407-423, 1967. 3) Barton, N.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 13, 255-279, 1976.