

III-179 岩石の破壊と降伏(弾性と塑性、延性と脆性)

飛島建設(株) 正会員 福島啓一

1 はじめに

岩石やコンクリートの破壊基準を説明するものとして、Griffithの理論や、それを発展したものがある。しかし、必ずしも実験等により得られた挙動を十分に説明できていない。一方、数値解析の技術が進み、岩石等を弾性～完全塑性体等と仮定して計算する例が増えているが、破壊基準や降伏基準のとり方、脆性破壊と延性破壊の区別に疑問が残っており、せっきくの精密な計算の信頼性も今一步である。ここではGriffith理論を少し拡張し、岩石やコンクリートの物性をより良く説明することを試みる。

2 従来の理論

原子と原子の間に働く引力や斥力についての研究が進んで(図-1)、物質の理論引張強度 σ_{th} 、理論剪断強度 τ_{th} が求められるようになった($\sigma_{th} \doteq E/10$, $\tau_{th} \doteq G/(2\pi)$, E : ヤング率, G : 剛性率)。この理論より、固体は引張り、または剪断で壊れることはあっても、圧縮では壊れないことが分る。ところで、現実の材料の強度はこの理論引張強度の $1/10 \sim 1/100$ 、理論剪断強度の $1/1000 \sim 1/10000$ 位しかない。その原因として、Griffith (1920) は材料中に微細なひび割れがあり応力集中が起るためと考えた。また、Taylor (1934), Orowan (1934) は結晶格子には欠陥があり、原子の結合が一個ずつ、将棋倒し的に隣りに移って行って剪断されるので(結晶中の格子欠陥の転位によるすべり)、全体の結晶が一気に隣りの格子点へ移るのとは比べ小さな力で剪断されるものと考えた。延性的な挙動をする金属材料については後者で現象が説明できる。また、X線回析などにより格子欠陥の存在も確認されている。ここに述べたような格子欠陥の転位による剪断では、強度の変化も体積の変化も起らず、弾性・完全塑性体として挙動することが推測される(実際は更に複雑でひずみ硬化などが生じる)。Griffithのひび割れ論は金属材料にはあまり適用できないが、岩石などの脆性材料の強度特性は比較的良く説明できる。即ち、外力を σ_1 , σ_3 , ひび割れを含む材料全体の軸引張強度を S_t とすると、次の関係が導かれる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 8 S_t (\sigma_1 + \sigma_3) = 0 \quad - (1)$$

$$\text{または } \tau^2 = 4 S_t (S_t - \sigma) \quad - (2)$$

これより一軸圧縮強度 S_c と一軸引張強度 S_t の比は8となるのがわかる。

Murrell (1963) は回転円体の微細空洞がある場合を考え、Griffithの考えを三次元へと拡張し、次の式を導いた。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 24 S_t (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 0 \quad - (3)$$

これより見ると一軸圧縮強度と一軸引張強度の比は12となる。McClintockとWalsh (1962) は実測された圧縮強度と引張強度の比は $3 \sim 110$ であることから、これは圧縮応力によりひび割れの一部が閉じて、そこに摩擦力が働くためであると考えた。摩擦を考えた時の S_c/S_t の比は約10となる。日比野によると実測した強度は、 $(\tau/\tau_r)^2 = 1 + \sigma/S_t \quad - (4)$

で表わされ、砂などでは a は1に近く、十分に固結した岩石では a は2に近い値になる。軟岩やコンクリートなどは $1 < a < 2$ となる、としている。茂木、Byerlee は実験結果より、

岩石が脆性破壊するか延性破壊するかは拘束圧力により決ることを示し、判別曲線を与えている。

3 提案する降伏～破壊の考え方

前に述べたように、固体は引張り、または剪断によってのみ破壊する。但し、物体の表面では転位が妨げられるので、表面のごく近くでは剪断は起りにくくなる。今、物体中に円筒状の(但し互いに離れている)

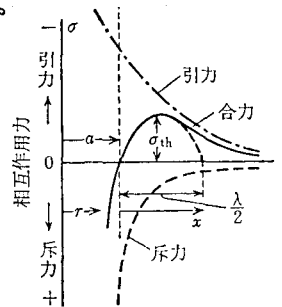


図-1 理論引張強度

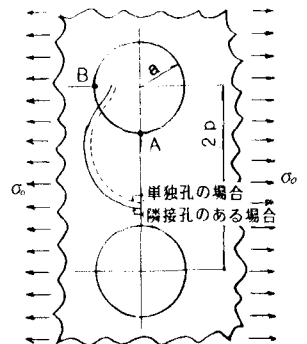


図-2 円孔まわりの応力集中

微細な空洞があり、この物体が外力 σ_0 を受けていると考えると空洞内空面では $3\sigma_0$ (A点)、 $-\sigma_0$ (B点)の応力が働く。この材料の純引張強度を σ_t とすると、このような空洞を含む材料の見掛けの強度は、圧縮強度 $S_c = -\sigma_c$ - (5) 引張強度 $S_t = \sigma_t/3$ - (6)となる。

Mohrの応力円で表わせば、 $\sigma_1 = 3\sigma_0 - S_t$ - (7)、または、 $\tau = -\sigma/\sqrt{3} + S_c/\sqrt{12}$ - (8)となる。非常に扁平な円筒状空洞ではGriffith理論より、(2)式となる。球形の空洞と考えれば、 $S_t = 1.5 \{ (1+5\nu)\sigma_2 + (1-5\nu)\sigma_3 - (9-5\nu)\sigma_1 \} / (7-5\nu)$ - (9)

より降伏曲面が求められる。この時の S_c/S_t の比はポアソン比 ν により変るが3~8になる。Murrellの説とこの球形空洞の間が実際の岩石とすればより正確である。軽石などを観察すると、球形に近い空洞がある。また結晶粒界と考えると、かなり扁平な空洞が残っていると考えられる。つまり現実の岩石などには、成因により扁平率の異なる空洞が生じているものと考えられ、そのため日比野の式の a の値が岩質により変化するものと考えられる。また、従来は物体内において互いのひび割れは充分離れているものと考えて諸計算を行っているが、岩石の層理面、結晶の粒界、コンクリートの成層面などを想定すると、ひび割れ(空洞)はある線または面沿いに多数並んでいる場合も多いと考えられる。平面ひずみ状態で、一列に並んだ円筒状の空洞がある場合の応力状態についての解析結果を図-2に示す。内空面沿いのA点の応力は単独孔の場合の $3\sigma_0$ より大きく、B点では単独孔の場合の $-\sigma_0$ より小さいことがわかる。だ円筒状空洞や球形空洞、回転だ円形状空洞の場合も同じ現象が生じる。これより、引張強度と圧縮強度の比は円筒形単独孔の時の3から、空隙が並んだ場合は、100以上にもなり得ることがわかる。

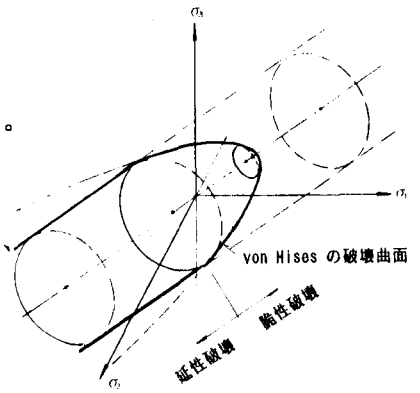


図-3 破壊曲面
(延性破壊と脆性破壊の区別)

圧縮応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 が大きく、微細空洞の内空面に引張応力が生じなくても、材料全体が剪断で降伏する場合も考えられる。この場合、微細空洞内空面近くでは転位が起りにくいので、全体を連続体と考えてもあまり誤差はない筈である。その時の降伏曲面は von Mises理論による円筒になる。現実の降伏曲面は、微細空洞による脆性破壊(擬円錐降伏面)と、転位による剪断に基づく延性降伏(円筒)の両者の組合わせになるものと考えられる(図-3)。引張りによる破壊は急激に起り、また復元しないので体積膨張が生じる。一方、転位による剪断は延性的であり、また体積膨張を伴わない。茂木、Byerlee の脆性と延性の区別は、この曲面の交点を示しているものと考えられる。

4 まとめ

Griffithの仮定は卓見と考えられるが、実験結果等を十分に説明できなかった。また脆性と延性、弾性と塑性をすべて包含して説明する理論がなかった。この考察で一応全体の見通しがつくことになったと思う。今後、実験、実例による確認が望まれる。

参考文献

西田正孝：応力集中 増補版 1973 森北出版

横堀武夫：材料強度学 第二版 1974 岩波全書

茂木清夫：Pressure Dependence of Rock Strength and Transition from Brittle Fracture

to Ductile Flow. Bull. of the Earthquake Research Institute (No.44) 1966

James D Byerlee : Brittle-Ductile Transition in Rocks: Jour. of Geophysical Research July 1968

F.A.McClintock, J.B.Walsh: Friction on Griffith Cracks in Rocks under Pressure:

Proc. of the 4th U.S. Nat. Cong. of Appl. Mech. 1962

日比野敏：砂、粘土、軟岩や断層材料など地盤材料の非線形な物性について 第10回土質工学会研究発表会