

1. 緒言

岩石のような脆性材料の破壊機構に関してはいまだに不明の点が多いが、いわゆる Mohr-Coulomb で代表される仮説が、圧縮試験等の結果と比較的によく一致するといわれている。これらの理論は、経験的かつ巨視的に現象をとらえたものであるが、微視的な立場から検討したものとすれば、先在クラック周辺の引張集中応力を考察した Griffith<sup>1)</sup> や McClintock<sup>2)</sup> の理論、岩石内の粒界すべりによる応力集中に着目した Hoek<sup>3)</sup> や Brady<sup>4)</sup> の考察がある。本文では、この引張集中応力の評価に関して、これらと若干異なる考えを示し、すべり発生応力とこれに伴って生じる引張クラック発生応力等の関係について考察を加えるものである。

2. 材料の破壊様式と従来の研究との比較

脆性材料の圧縮下における破壊様式には、斜め方向にすべるすべり破壊と、圧縮軸方向に分離する分離破壊に大別される。これらの破壊様式によって現象論的に上記の破壊に関する理論を対比させると、見掛け上せん断応力によってすべるとする Mohr-Coulomb の説は前者と、クラック発生を論じる Griffith らの考えは後者と対応しているように考えられる。この考えを概念的に示したのが図-1 である。すなわち、包絡線 L に円 O が接するとき、ある角度で材料はすべり破壊を生じ、一方、円 O' のように接しないで最大応力に達する場合は、破壊面は圧縮軸に平行となり分離破壊となると解釈されよう。また、Mohr-Coulomb の理論は破壊直前の巨視的な応力のつり合い状態を論じていると考えられるのに対して、Griffith らの考えは周知のように破壊発生条件であるとされ、この点についても対称的であるように思われる。このように全く異なる破壊機構によって破壊が生じるのではないかと考えられる一方において、多くの脆性材料（これらの中には分離破壊を示したり、両破壊様式が混在する場合も含まれると思われる）は前述のように Mohr らの理論と傾向的に合うとされている。この事実から考えられることは、巨視的すべりと考えられる破壊現象においても部分的にクラックによる破壊が存在し、一方、クラックの発生のみによって生じると思われる分離破壊においても、すべり線によるクラックの発生もおこり得ることを示唆していると思われる。すなわち、すべり線の顕著な場合がすべり破壊であり、小規模な場合が分離破壊であるといえよう。

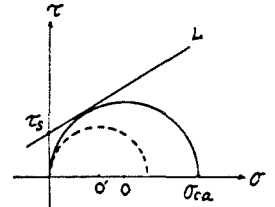


図-1

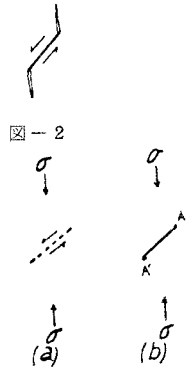


図-2

図-3

3. すべり線発生機構に関する考察

図-2 に、すべり線先端にクラックの発生する様子を模式的に示す。このような機構によって破壊を論じたものとしては、前述のように Hoek や Brady らのモデルがあり、圧着クラックを考察した McClintock らの修正 Griffith 理論も概念的にはほぼこれに相当すると考えられる。これらは、あらかじめすべり線としての結晶粒界や先在クラックを想定するものである。そして、このすべり線に作用するせん断応力がその材料の固有のせん断強度に達することを条件としている。しかし、図-3 に示すように、圧縮過程においてあらたにすべり線が生じる場合には、せん断応力の解放によってその直後には、本来引張応力が発生すべき A 点に圧縮応力の集中する場合のあることを図-4 で示そう。同図 (a) においてせん断応力  $\tau_0$  を与える微小領域を考える。これを (b) のようにそのままとりだしてすべり線を与えると、(c) に示すようにくい違いが生じる。そこで (d) に示すように  $\tau_0$  とは等値異符号のせん断応力を作用させることによって、図-4 (a) の破線内にこのすべり線をもつ要素をはめこむことができる。従って、同図 (d) において加えたせん断応力によって、図-3 (b) におけるすべり線の先端の A 点に圧縮応力が集中する。この圧縮応力は外応力がさらに増加すると、発生する引張応力と打消し合い、や

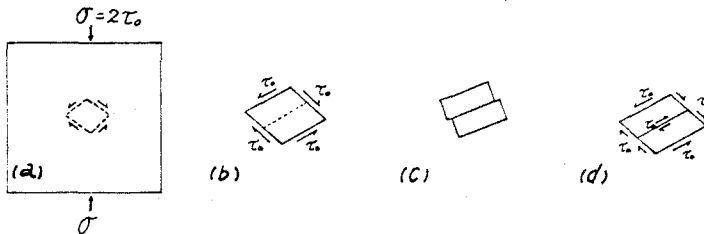


図-4

$$\begin{array}{c} \sigma_y \\ \downarrow \tau_{xy} \\ \sigma_x \rightarrow \end{array} \begin{array}{c} \tau_0 \\ \leftarrow \end{array} \begin{array}{c} \sigma_x \\ \leftarrow \end{array} = \begin{array}{c} \sigma_y \\ \downarrow \tau_{xy} - \tau_0 \\ \sigma_x \rightarrow \end{array} + \begin{array}{c} \tau_0 \\ \leftarrow \end{array} + \begin{array}{c} \tau_0 \\ \leftarrow \end{array} \begin{array}{c} \tau_0 \\ \leftarrow \end{array}$$

(a)    (b)    (c)    (d)

図-5

がA点には引張応力が集中することになる。図-5はこの点の応力状態を重ね合によって求める方法を示したものである。図-5より、すべり線先端に引張応力が生じるための条件は、同図(a)に示す有効せん断応力 $\tau_0$ が次式を満足する場合である。

$$\tau_0 = \tau_{xy} - \tau_0' - \tau_0 \geq 0 \quad (1)$$

$$\therefore \tau_{xy} \geq \tau_0' + \tau_0 \quad (2)$$

図-5(c)において、すべり線先端の集中応力はStroh<sup>6)</sup>によって得られており、次式で示される。

$$\sigma_0 = -\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{L}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \tau_0 \quad (3)$$

ここに、Lはすべり線の長さ、rはその先端からの距離である。一方、このすべり線を動かすために必要なせん断応力を $\tau_0'$ とすると、図-5(d)に示す応力状態におけるクラック先端の引張集中応力 $\sigma_0'$ は次式で示される。

$$\sigma_0' = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\frac{L}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \tau_0' \quad (4)$$

すべり線先端に引張応力が生じるための条件は、(3)及(4)式の右辺の和をゼロとおいて次式を得る。

$$\tau_0' / \tau_0 \cong 3 \quad (5)$$

一軸圧縮応力下において、すべり線が発生する面は最大せん断応力の作用する面であるとする、クラックの発生しうる限界の外応力 $\sigma_c$ は、(2)および(5)式より次式を得る。

$$\sigma_c = 2 \tau_{xy} \cong 8 \tau_0 \quad (6)$$

ここに、 $\tau_0$ はすべり線発生に必要な材料固有のせん断強度である。

従って、すべり線発生時における外応力は $2 \tau_0$ であるから、その発生後クラックが発生するためには、すくなくとも約4倍の応力増加が必要となる。

#### 4. 結 言

脆性材料内の圧縮応力下における破壊機構について、すべり線によるクラック発生を考察したが、それによると、すべり開始後直ちに引張応力が発生するのではなく、クラック発生までにはかなりの圧縮応力(外力)の増加が必要であるという結果を得た。いわゆるAEの測定等によれば、クラックの発生は強度の50%前後よりひん発するといわれていることを考慮すると、本文の結果によれば、すべり線発生は15%前後の荷重下において生じ得ることを示す。すべり線発生に必要なせん断応力 $\tau_0$ がいわゆるMohrの包絡線によるせん断強度と等しいか否か、また、今回は考慮していないすべり面上の摩擦の評価等については、実験によって検討の必要があると思われる。

#### 参 考 文 献

- 1) Griffith, A. A.: Theory of rupture, Intern. Congr. Appl. Mech., 1st, Delft, 55-63, 1924.
- 2) McClintock, E. A., Walsh, J. B.: Friction on Griffith cracks in rocks under pressure, In Proc. 14th U. S. National Congr. Appl. Mech., Berkeley, 10/5-10/21, 1962.
- 3) Hoek, E.: Brittle failure of rock, Rock Mechanics in Engineering Practice, 1968
- 4) Brady, B. T.: Effect of the intermediate principal stress on the fracture of brittle rock, Rock Mechanics—Theory and Practice, 11th symposium on rock mechanics
- 5) 佐武正雄, 田野久貴: 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1973
- 6) Stroh, A. N.: The Formation of Cracks as a Result of Plastic Flow, Proc. Roy. Soc. A223, 404-414, 1954.