

III-206

自由表面の影響による圧縮下におけるクラックの不安定成長

東京大学 学生員 木村 憲治

東京大学 正員 堀井 秀之

東京大学 正員 長谷川彰夫

1. まえがき 岩石等不均質な材料は多くの初期欠陥を含み、圧縮下において、その初期欠陥が摩擦すべりや塑性変形を起こすことによって、微小なクラックが発生し、最大圧縮軸方向へ成長する。岩石の複雑な破壊挙動はこの微小クラックの発生・成長に起因するものと考えられている。岩石の一軸圧縮試験において観察される割裂破壊は初期欠陥から発生したクラックの不安定成長によって説明しうるものと考えられる。このクラックの不安定成長の主たる要因の1つとして自由表面の影響が挙げられるが、それは圧縮軸と平行に表面が剥離する破壊様式に現れている。ここでは、自由表面を考慮した単純なクラック成長モデルを提案し、自由表面がクラックの不安定成長に与える影響を定量的に評価した。また、三軸圧縮試験における拘束圧の影響を定量的に評価した。これにより、わずかな拘束圧で割裂破壊からせん断破壊に破壊モードが変化するという実験事実を裏付ける結果が得られた。

2. 自由表面を考慮したクラック成長モデル

圧縮下において、材料中の初期欠陥が摩擦すべり・塑性変形を起こすことにより、局所的な引張応力が発生し、クラックが成長する。このようなクラック成長機構のモデルとして Fig. 1 に示される二次元境界値問題が提案されている。Fig. 1(a) では初期欠陥 P P' 上ですべり条件が与えられている。Fig. 1(b) における集中荷重 F は、クラック成長の原因となる初期欠陥の摩擦すべりや塑性変形による効果を置き換えたものであり、その大きさは、

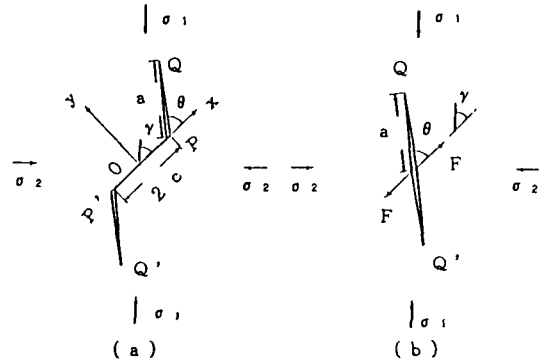


Fig.1 クラック成長モデル（無限体中）

$$F = 2c\tau^*, \quad \tau^* = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\gamma - \tau_c + \mu \frac{1}{2}[\sigma_1 + \sigma_2 - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\gamma] \quad (1)$$

で与える。Fig. 1(a), Fig. 1(b) のモデルにおいてクラック先端 Q Q' でのモード I の応力拡大係数 K_I が最大となる方向にクラックが成長し、対応する K_I の値が材料の破壊靱性値 K_{IC} に等しいとき成長するという条件を用いると、荷重に対するクラックの方向と長さが求められる。Fig. 1(b) に示されるモデルは Fig. 1(a) のより複雑なモデルに対し十分な精度を与え、またクラックの長さが初期欠陥に比べ十分大きいとき、その方向は最大圧縮応力の方向と平行になる¹⁾。このことに基づき、境界面の影響を考慮するため Fig. 2 に示された半無限体中のクラック成長モデルを提案する。

Fig. 2 における集中荷重は式 (1) の F を用いて

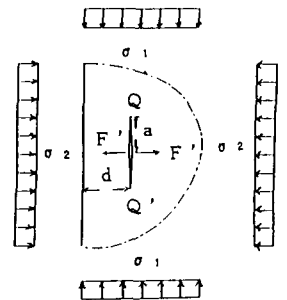


Fig.2 クラック成長モデル（半無限体中）

$$F' = F \sin \gamma \quad (2)$$

で与える。

3. 数値解析結果 Fig. 2 に示される二次元境界値問題に対して複素

応力関数を用い²⁾、連続転位分布法に基づいて、転位密度 α に関する積分方程式を以下のように導いた。

$$\int_{-a}^a \frac{2\alpha}{x-t} dt + \int_{-a}^a [K_1(x,t)\alpha + K_2(x,t)\bar{\alpha}] dt + \frac{F'a}{2\pi} [-M_1(x) - M_2(x) - 2id\{M_3(x) - M_4(x)\}] = 0 \quad (3)$$

この積分方程式を数値的に解くことによって、集中荷重 F' と拘束圧 σ_2 に対するクラック先端における応力拡大係数を求めた。境界面からの距離 d と応力拡大係数の関係を Fig. 3 に示した。

4. クラックの不安定成長 Fig. 3 の数値結果を利用して、クラックの長さ a と荷重 σ_1 の関係を求めた。 $\sigma_2 = 0$ で一定にして、いろいろな深さについてクラック長と荷重の関係を Fig. 4 に示した。荷重の増加とともにクラックは安定成長する。荷重が限界値に達するとクラックは不安定成長する。即ち、荷重を増加させることなくクラックが成長する。これは自由表面の影響であり、自由表面からの深さが大きくなるに従って限界荷重の値は大きくなる。

5. 拘束圧の影響 深さを $d/c = 10$ で一定にして、いろいろな拘束圧に対するクラック長と荷重の関係を Fig. 5 に示した。拘束圧を0から徐々に大きくしていくと、クラックが不安定成長を起こすときの荷重は大きくなる。拘束圧がある一定値以上になると荷重のピークがなくなり不安定成長が起こらなくなる。また、そのときの拘束圧の値は非常に小さい。このことは小さな拘束圧によって割裂破壊が抑制されることを意味している。岩石の圧縮試験において、小さな拘束圧で割裂破壊からせん断破壊に破壊のモードが変化するが³⁾、上の結果はこの実験事実を裏付けるものである。

6. まとめ 提案した圧縮下における自由表面近傍のクラック成長モデルによって、クラックが不安定成長するときの荷重を初期欠陥の大きさ、深さ、破壊靱性値の関数として定量化できた。また、このモデルを用いて、拘束圧の影響による破壊モードの変化を説明できるという結果が得られた。

参考文献 1) H. Horii and S. Nemat-Nasser, Brittle failure in compression, splitting faulting and brittle-ductile transition, Philosophical

Transactions of the Royal Society, (1986). 2) A.H. England, Complex variable methods in elasticity Wiley-Inter-Science a division of John Wiley and Sons Ltd., (1971). 3) K. Willam, B.H. Synopsis and S. Sture, Experimental Constitutive and Computational Aspects of Concrete Failure, Seminar on finite element analysis of reinforced concrete structure, vol. 1, JCI, (1985) 149-171.

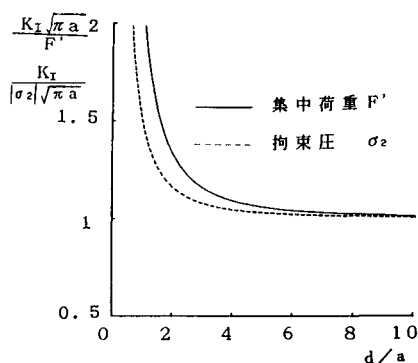


Fig. 3 応力拡大係数

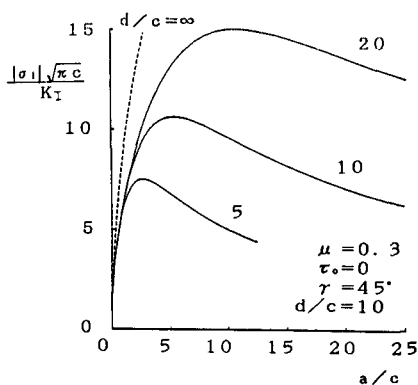


Fig. 4 クラックの不安定成長

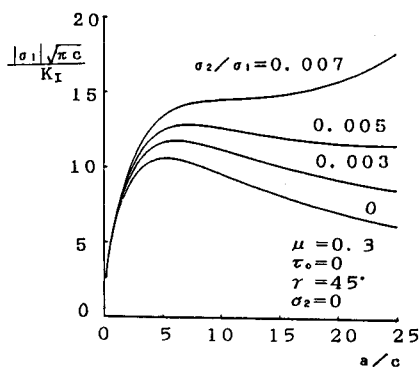


Fig. 5 拘束圧による影響