

東京大学 正員 堀井 秀之
 東京大学 正員 長谷川彰夫
 東京大学 正員 西野 文雄

1. まえがき 岩石等初期欠陥を含む脆性材料の圧縮下における変形及び破壊様式は複雑であり、荷重条件に強く依存する。近年、光学、電子顕微鏡やAEを用いた研究により材料の微小構造の変化、特に微小クラックの進展がその巨視的挙動を支配していることが明らかにされている¹⁾。このような微視的観察に基づきその解析モデルを開発することは、材料の挙動機構を解明し、その応答、破壊様式、強度等を予測するうえで重要である。初期欠陥を原因とする圧縮下におけるクラック進展の解析モデルにより縦割れ破壊を説明し、またそれらの相互干渉を考慮しせん断破壊における強度を予測する試みがなされている²⁾が、そのためには複雑な数値計算を必要とする。そこで、ここでは単純化されたクラック進展モデルを提案し、加えられた荷重に対するクラックの方向、長さ、及びクラックの進展に伴う非弾性歪が簡単な式で与えられることを示した。

2. クラック進展モデル 岩石等の材料は異質粒塊、粒塊境界に偏在する空隙、初期クラック、すべり面等多くの欠陥を含む。圧縮下においてそれらが摩擦すべりや塑性変形を起こすことにより、局所的に引張応力が発生し、クラックが発生、進展する。図1aはWesterly granite中のbiotiteの塑性変形によってクラックが成長した例³⁾である。このようなクラック進展機構のモデルとして図1bに示される二次元境界値問題が提案されている。摩擦すべりと塑性変形を起こす初期欠陥PP'上での境界条件は、

$$u_Y^+ = u_Y^-, \quad \tau_{xy} = -\tau_c + \mu \sigma_y \quad (1)$$

で与えられ、クラックPQ, P'Q'上での境界条件は、

$$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0 \quad (2)$$

で与えられる。この問題は分布された転位を考えることによって転位密度に関する積分方程式に置き換えられ、それを数値的に解いてクラック先端での応力拡大係数を求めることができる。しかし、そのためには複雑な計算を必要とする。そこで、ここではクラック進展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集中荷重に置き換え、図1cに示されるモデルを考える。ここで、集中荷重の大きさは、

$$F = 2c\tau^*, \quad \tau^* = -\frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_1)\sin 2\gamma - \tau_c + \mu \frac{1}{2}[\sigma_1 + \sigma_2 - (\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\gamma] \quad (3)$$

で与える。このときクラック先端QQ'でのモードIの応力拡大係数 K_I は、

$$K_I = \frac{2c\tau^* \sin \theta}{\sqrt{(\ell + \ell^*)}} + \sqrt{\pi \ell} \frac{1}{2}[\sigma_1 + \sigma_2 - (\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\theta - \gamma)] \quad (4)$$

となる。ここで ℓ^* は、 $\ell \rightarrow 0$ の場合の式²⁾

$$K_I = \frac{3}{4}\sqrt{\pi c} \tau^* (\sin \theta/2 + \sin 3\theta/2) \quad (5)$$

と K_I が最大となる $\theta = 0.392\pi$ のとき式(4)の値が一致するよう $\ell^*/c = 0.27$ を用いる。クラックは K_I が最大となる方向に進展するという条件を用いれば θ が定まり、対応する K_I の値が材料の破壊靱性値 K_{Ic} に等しいとき進展するという条件より荷重とクラックの長さの関係が得られる。

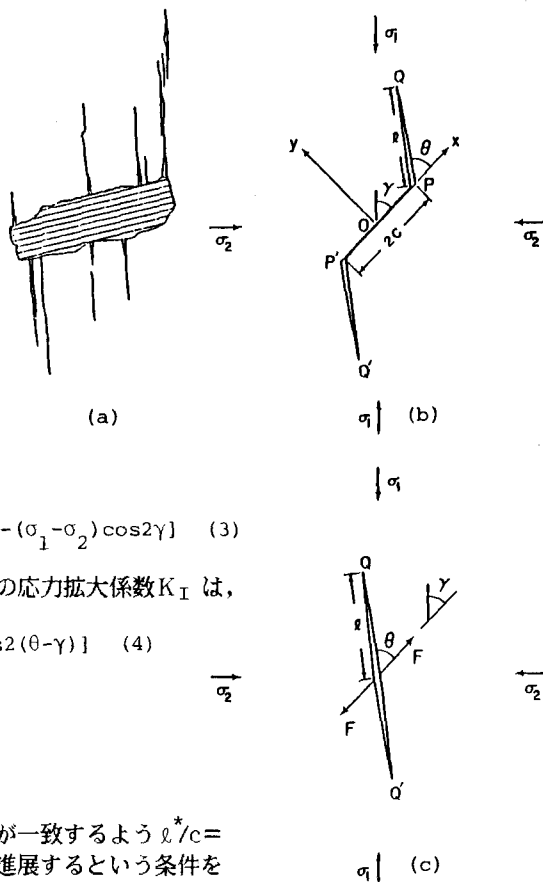


図1 圧縮下のクラック進展

3. クラックの進展 初期欠陥の方向 γ の様々な値に対するクラックの方向 θ と対応する K_I の値を前述の数値解²⁾と共に図2に表わした。簡単なモデル(図1c)による式(4)がモデル図1bの数値解に対して十分な精度の結果を与えることがわかる。クラックの長さが短いとき θ は γ によらず約70度で一定である。一方、クラックが長いときにはほぼ $\theta = \gamma$ の関係が成り立つ。これはクラックが最大圧縮軸に平行であることを意味する。すなわち、クラックは γ の値によらずほぼ70度の方向に発生し、曲がりながら進展して最大圧縮応力の方向と平行になる。加えられる荷重とクラックの長さの関係を様々な応力比に対して図3に表わした。横方向の荷重が圧縮のときクラックの成長は安定であり、ある長さに達すると進展が止まる。一方、横方向荷重が引っ張りのときにはクラックがある長さに達するとその成長が不安定となる。これは一軸圧縮における縦割れ破壊の主要なメカニズムであると考えられる。事実、一軸圧縮下の材料内部には端部の摩擦等の影響によって軸圧縮の4-8%の引っ張り応力が発生することが知られている。図3の縦軸は圧縮応力を引っ張り強度で割った量になっており、クラックの不安定成長が起こるピークの値のオーダーは実験事実と一致する。

4. 非弾性歪 クラックの進展によって引き起こされる非弾性歪は材料の応答、特にダイレイタンスー等を考えるとき重要である。クラックを原因とする非弾性歪は次式で計算される⁴⁾：

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{V} \int_S \frac{1}{2} ([u_i] n_j + [u_j] n_i) dS \quad (6)$$

ここで S はクラックの表面、 V は材料の体積を表わす。図1cのモデルによりクラック進展に伴う非弾性歪は、式(6)に従って簡単な式に表わすことができる。ここではその結果を図4に示した。荷重が増すに従って体積膨張が起こることがわかる。

5. 結語 提案した圧縮下における単純化されたクラック進展モデルはクラックどうし、及びクラックと自由表面の相互干渉の問題に適用でき、せん断破壊、壁面崩壊のメカニズムを研究する上で有用であると考えられる。また、ここに示したクラックの進展に伴う非弾性歪を、実測された歪、クラック数等のデータと比較することは今後の課題の一つに数えられる。

参考文献 1) Paterson, M.S., Experimental Rock Deformation-The Brittle field, Springer-Verlag, (1978). 2) Horii, H. and S. Nemat-Nasser, Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure, J. Geophys. Res., 90, (1985) 3105-3125. 3) Tapponnier, P. and W.F. Brace, Development of stress-induced microcracks in Westerly granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, (1976) 103-112. 4) Horii, H. and S. Nemat-Nasser, Overall moduli of solids with microcracks: load-induced anisotropy, J. Mech. Phys. Solids, 31, (1983) 155-171.

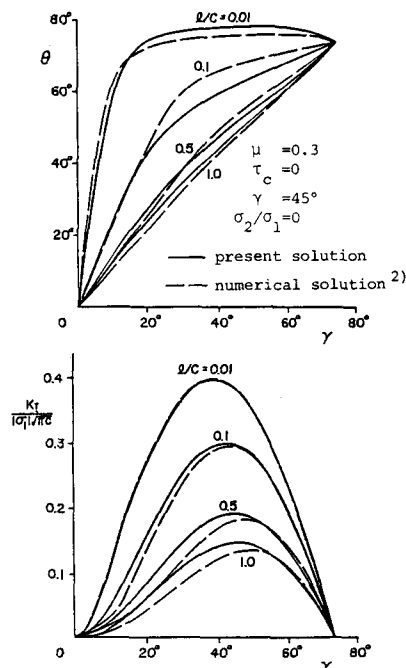


図2 クラック進展方向と応力拡大係数

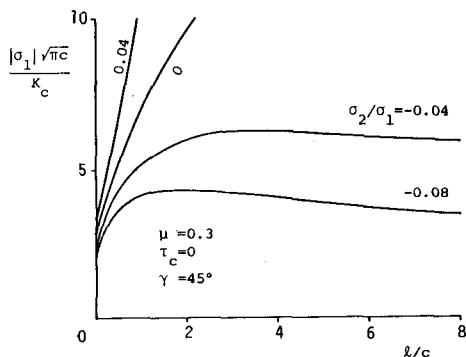


図3 荷重とクラックの長さの関係

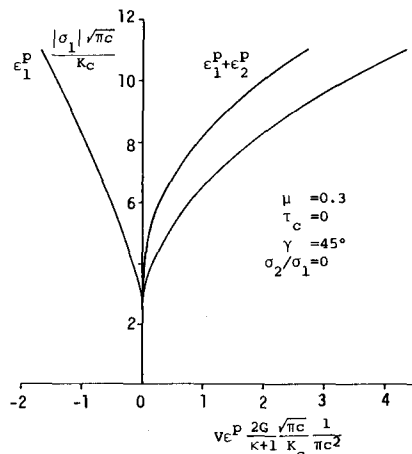


図4 クラック進展に伴う非弾性歪