

I-246 クラック進展におけるクラック先端の塑性域の影響

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 クラックの進展機構を解明する上で、クラック先端で生ずるボイドの発生・連結等の微視的構造の変化が重要であると考えられているが、クラックの進展を支配する要因の一つとしてクラック先端の塑性変形、残留ひずみが挙げられる。クラックの不安定な成長開始、延性材料におけるクラックの安定成長、疲労クラックの進展における過荷重による回復効果、繰返し荷重に対するクラックの閉口等の問題においてクラック先端の塑性変形が重要な役割を果たしているものと考えられる(1)。ここでは塑性域を先端に有するクラックの脆性的成長の力学モデルを提案し、クラック成長に対する塑性域の影響を評価した。

2. クラック不安定成長モデル クラック先端の塑性域は平面歪状態において図1(a)に示すような形を成すことが知られており、このモデルとして、Dugdale モデルは図1(b)に示すように改良されている(2)。このモデルにより、荷重に対する塑性域の寸法、方向、CTOD 等の諸量が求められるが、クラックの進展に関しては議論することが出来ず、荷重の増加に従って塑性域が増大を続けるという結果を与える。実際の現象としては、材料の ductility に応じて、荷重がある限界値に達するとクラックの不安定成長、又は、塑性域を伴う延性的なクラックの安定成長が引き起こされる。ここでは、クラックの不安定成長を議論するために、前者に対して図1(c)に示すモデルを提案する。(b)の状態からクラックが脆性的に成長した状態(c)を考え、塑性域の残留歪がクラック先端の応力拡大係数に及ぼす影響を評価する。まず(b)の問題において、クラック表面 OQ、塑性域 OP、OP' 上の境界条件は、

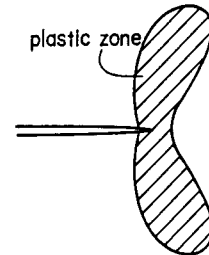
$$\begin{aligned} \sigma_y = \tau_{xy} = 0, \text{ on } OQ \\ u_\theta^+ = u_\theta^-, \tau_{r\theta} = \tau_Y, \text{ on } OP, OP' \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる。荷重としては、塑性域が存在しない場合におけるクラック先端の応力拡大係数 K_{IA} が与えられるものとする。塑性域を連続分布転位で置き換え、クラック近傍の転位の解を用いることによって、問題は転位密度 β に関する特異積分方程式

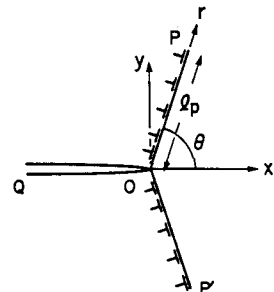
$$\begin{aligned} -2 \int_0^{\ell_p} \frac{\beta(\xi)}{\xi - \eta} d\xi + \int_0^{\ell} \beta(\xi) \kappa(\xi, \eta; \theta) d\xi \\ + \frac{K_{IA}}{\sqrt{2\pi\eta}} \frac{1}{2} \sin\theta \cos\frac{\theta}{2} = \tau_Y \end{aligned} \quad (2)$$

に帰着されることが導かれる。塑性域先端で応力が有限であるという条件の下で式(2)を数値的に解くことにより、塑性すべりの分布、荷重 K_{IA} と塑性域の長さ ℓ_p の関係、塑性仕事量等が塑性域の方向 θ の関数として求められる。一定荷重に対して塑性仕事が最大となる $\theta = 76.1^\circ$ を塑性域の方向に選べば、

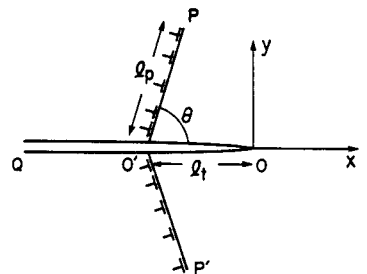
$$\frac{K_{IA}}{\tau_Y \sqrt{\pi \ell_p}} = 2.35 \quad (3)$$



(a)



(b)



(c)

Fig.1 Crack initiation model

となる。求めた塑性すべり分布を残留歪として与え、図1(c)の状態を考えれば、クラック先端の応力拡大係数は次式で与えられる。

$$K_I = K_{IA} - 4\sqrt{2\pi}\sin\theta \int_0^{l_p} \beta(\xi) \operatorname{Re}\left[\frac{1}{\sqrt{z_0}} + \frac{\xi e^{i\theta}}{2z_0\sqrt{z_0}}\right] d\xi, \quad z_0 = -l_t + \xi e^{i\theta} \quad (4)$$

3. 結果と考察 材料の破壊靱性値を G_c 、 K_{IC} とし、材料の長さの次元を持つ特性値 $r_p = K_C^2/8\pi\tau_Y^2$ を用いて式(4)から求められる応力拡大係数を図2に示した。荷重が増加するに従い、原点を出発し縦軸上を進む（塑性域が成長）。ある荷重、塑性域長におけるクラックの成長（縦軸上から水平に平行移動）の可能性を検討すると、斜線で示した領域は $K_I < K_{IC}$ であるから $K_{IA} < K_{IC}$ ではクラックの成長は不可能であることが解る。 $K_{IA} > K_{IC}$ においては斜線部分を飛び越すことができればクラックの成長が可能となる。クラック成長に必要なエネルギー E_i は、応力拡大係数とエネルギー開放率との関係を用いて求めた図3において、 $G = G_c$ と、対応する曲線とで囲まれた面積として計算される。図4に示したように、クラック成長に必要なエネルギー E_i は荷重 K_{IA} が大きくなるに従い小さくなる。 E_i の最大値は $0.25G_c r_p$ であり、これは長さ $0.25r_p$ の表面を分離するエネルギーに等しい。脆性材料ではこのエネルギーは非常に小さくクラック成長が可能となる $K_{IA} = K_{IC}$ 近傍においてクラックは成長するものと考えられる。即ち、Griffith のクラック進展条件は、脆性材料に対して塑性域の存在を考慮する場合においても妥当であると言うことが出来る。材料が延性になるに従って E_i の最大値は急激に大きくなり（例えば原子炉用鋼材は構造用鋼材の100～1000倍）クラックの成長は容易に起こり得なくなる。さらに荷重を増加させれば材料の ductility により、クラックの不安定成長、または延性的な安定成長が起こるものと考えられる。

4. 結語 本研究で提案したモデルにより、クラック先端の塑性域のクラック進展に及ぼす影響を定量的に評価出来た。本モデルは疲労クラック進展に対する過荷重の影響の定量的評価にも役立つものと考えられる。

参考文献 (1) Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff & Noordhoff (1978). (2) Vitek, V. "Yielding on inclined planes at the tip of a crack loaded in uniform tension, J. Mech. Phys. Solids, 24 (1976) 263-275.

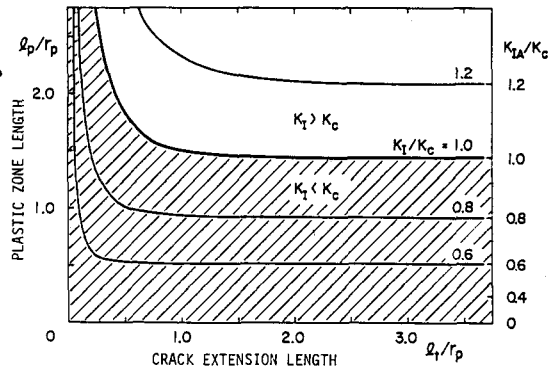


Fig.2 Stress intensity factor

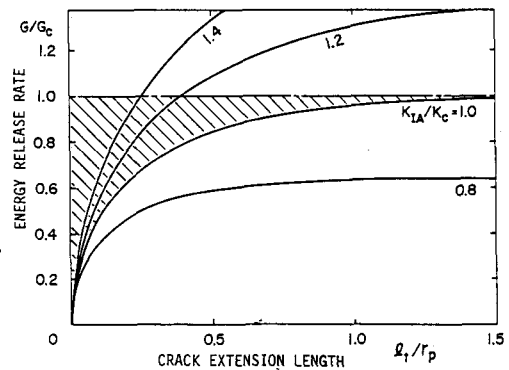


Fig.3 Energy release rate

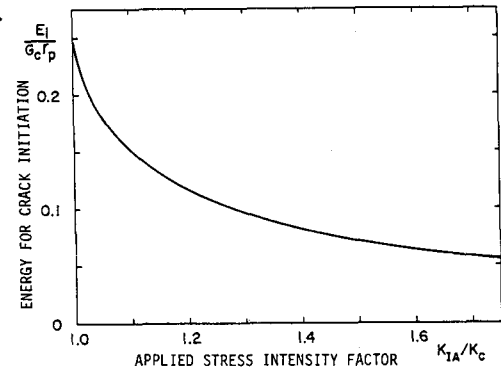


Fig.4 Energy required for crack initiation