

I-124 弾塑性応力下の疲れ亀裂進展

東京大学工学部 学生員 赤羽弘和
 東京大学工学部 正員 西野文雄
 東京大学工学部 正員 三木千寿

1. はじめに 石油タンク、橋梁、海洋構造物などの鋼構造物が、地震、波浪などの過大な繰返し外力をうけて継手部等に疲れ亀裂が発生、進展し破壊にいたることがある。そのような疲れ亀裂の先端付近では大きな降伏領域が生じるため、弾性理論に基づいた破壊力学パラメータである応力拡大係数範囲(ΔK_I)で亀裂進展速度を評価することはできなくなる。本研究ではこのような弾塑性応力下での亀裂進展を評価する目的で、非線形破壊力学のパラメータであるJ積分について検討を行った。

2. 疲れ亀裂進展試験 供試鋼材は80kgf/cm²級調質型高張力鋼である。試験片はA.S.T.M規格E-399に準拠したC.T.型であり、その寸法、形状を図1に示す。本試験は全て荷重制御で行い、応力比は0.1とした。応力波形は正弦波であり、周波数は0.1~15.0Hzである。疲れ亀裂進展速度は試験体に貼付したピッチ0.1mmのクラック・ゲージにより測定した。

3. 繰返しJ積分値範囲(ΔJ) 繰返し荷重条件下での亀裂先端付近の塑性域の大きさ σ_p は、B.C.S.モデルに対してRiceが求めた解から次式で計算できる。

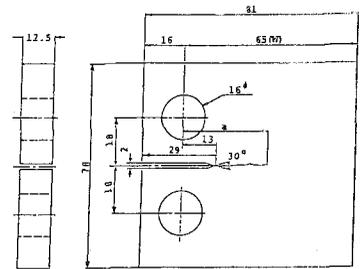
$$\sigma_p = \frac{\pi(\Delta K_I)^2}{32(\sigma_f)^2} \quad (1)$$

この σ_p と亀裂進展速度との比較から、疲れ亀裂は塑性ひずみの繰返しを多数回うけた領域を進展することが明らかである。また、この領域は周辺の弾性域に拘束されてその応力-ひずみ性状はひずみ制御的であると考えられる。したがって、繰返し荷重をうけたときに亀裂先端周辺に繰返される応力範囲、ひずみ範囲は、素材のひずみ制御疲れ試験の定常ヒステリシスループから求まる繰返し応力範囲-ひずみ範囲曲線を応力-ひずみ曲線とした有限要素法弾塑性解析により求められる。ここで対象としている素材の繰返し応力範囲-ひずみ範囲曲線は、真応力範囲 σ_r 、全ひずみ範囲 ϵ_{pr} 、塑性ひずみ範囲 ϵ_p として次式で表わされる。

$$\sigma_r = \begin{cases} E \epsilon_{pr} & (0 \leq \epsilon_{pr} \leq \frac{\sigma_f}{E}, \sigma_f = 112.4 \text{ kgf/mm}^2) \\ 254.8 (\epsilon_{pr} + 0.00888)^{0.1933} & (0 \leq \epsilon_{pr}) \end{cases} \quad (2)$$

ここでは、応力-ひずみ関係に式(2)を用いて有限要素法弾塑性解析を行い、径路積分により求めたJ積分値を繰返しJ積分値範囲(ΔJ)と考える。図2に要素分割(要素数1831、節点数1042、最小要素寸法0.1mm)と、 ΔJ を計算するための積分径路を示す。図3に積分径路によるJ積分値の変動を示す。図中、破線は平均値である。いずれの荷重においても ΔJ 値の径路による変動はほとんど認められず、ここでの解析法により安定したJ積分値を求めることが可能といえる。図4は a/w が0.65の場合の荷重- ΔJ の関係と、 K_I 値の計算式から $J = G = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{E}$ (ν : ポアソン比)の関係を用いて求めた荷重-G曲線と比較したものである。荷重が小さい範囲では両者は良く一致している。 ΔJ 値が G より大きくなり始めるのは、 $\Delta K_I = 690 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 付近からである。

4. $da/dN - \Delta J$ 曲線 図5は疲れ亀裂進展試験における亀裂進展速度 da/dN を ΔJ で整理した結果である。実験は7荷重範囲で行っている。



$$K_I = \sigma \sqrt{F(a/w)}, \quad \sigma = P/w$$

$$F(a/w) = 29.6 - 185.5(a/w) + 655.7(a/w)^2 - 1019.0(a/w)^3 + 638.9(a/w)^4$$

P: 単位厚さあたりの力
 a: 亀裂長さ、w: 試験片深さ

図1. C.T.型試験片の寸法・形状および K_I 値の計算式

図中の直線①は全データを用い、②は $\Delta J \leq 10$ のデータを用いてそれぞれ最小二乗法により求めた。 da/dN と ΔJ の関係は荷重レベル、および亀裂長さにかかわらず、 da/dN が 10^{-5} mm/cycle付近から1mm/cycleの付近までの広い領域ではほぼ直線とみなせる滑らかな曲線となっており、ここで提案した ΔJ により弾塑性応力下での疲れ亀裂進展をうまく評価できることがわかる。 ΔJ が10以上では、 $\Delta J - da/dN$ の関係は直線からはずれる傾向が認められるが、これに関しては、ここで提案する ΔJ の妥当性、試験体の板厚に関する実験値の妥当性について検討を行っている。

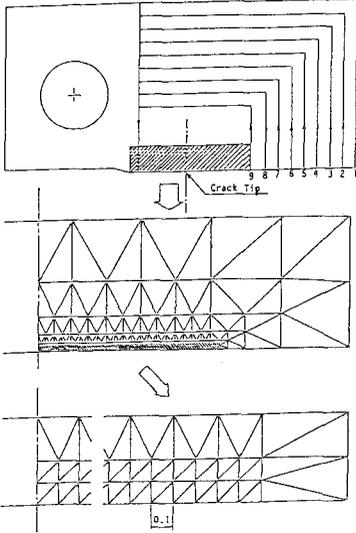


図2. 有限要素モデルと積分経路

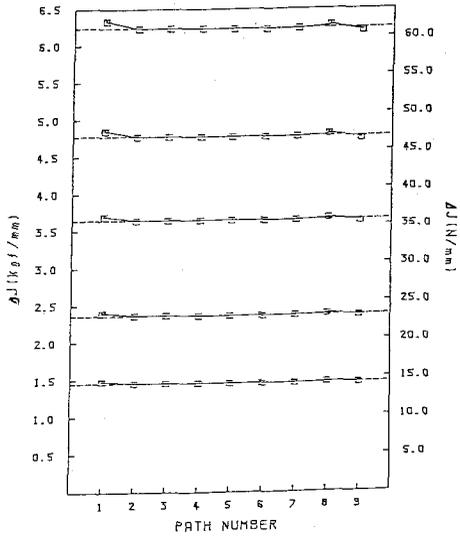


図3. ΔJ の積分経路による変動

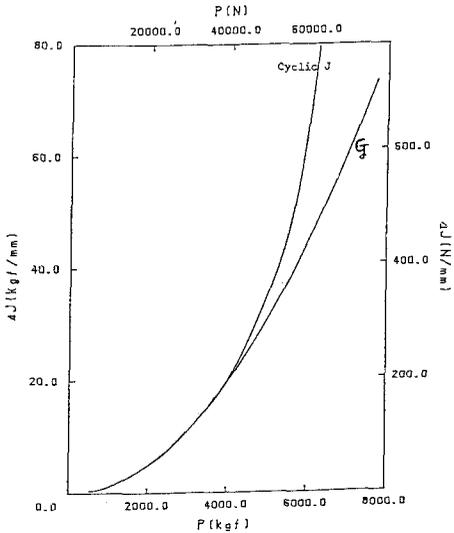


図4. ΔJ と弾性解析による解との比較

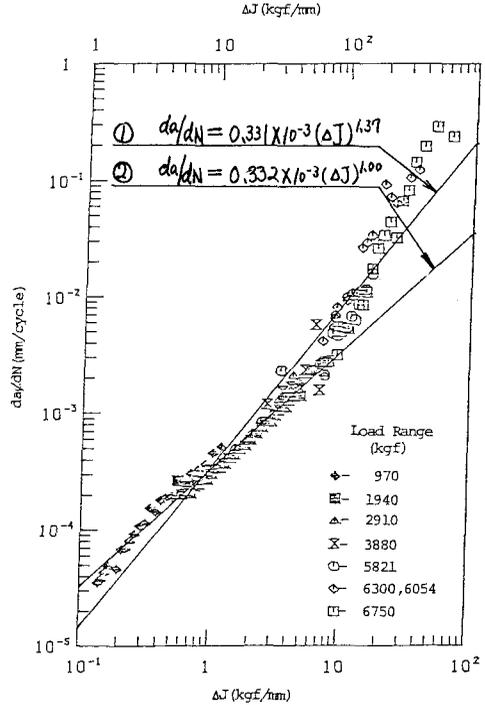


図5. $\Delta J - da/dN$