

I-98

クラック先端の塑性変形に基づく疲労クラック進展の力学モデル

大林組 正員 Kiertisak Sahasakmontri

東京大学 正員 堀井 秀之

1. はじめに 疲労クラックの進展過程が繰り返し塑性変形に支配されていることは広く受け入れられているが、塑性変形に基づく疲労クラック進展の解析的なモデルは未だ確立されていない。近年、クラック進展下限界、クラック閉口、ショートクラック等の問題に関する精力的な研究により多くの実験事実が明らかにされたが、これらの現象を整理・説明し、疲労現象のメカニズムを解明するためには、疲労クラック進展の解析的なモデルの確立が不可欠である。本研究の目的は、疲労クラック進展の解析的モデルを構築し、得られる結果を実験事実と比較することにより、疲労クラック進展における各メカニズムの効果を把握することにある。

2. 疲労クラック進展モデル 繰り返し過程で生じる順逆両方向の塑性変形を考慮し、それを連続分布転位からなる二組のすべり面により表わす。先に生じた繰り返し塑性変形による残留ひずみは、過去の载荷に際して求めた分布転位としてモデルに含まれる(図1)。ここでの説明のため、応力比の小さい、クラック閉口の起こる場合を考える。あるサイクルにおいて载荷状態($K_{I_{max}}$)と閉口状態($K_{I_{cl}}$)を考え、降伏条件、応力の有限性、閉口状態においてクラック先端開口変位(CTOD)がゼロになるという条件より、塑性域の大きさ、塑性変形(転位)の分布、最大開口変位($CTOD_{max}$)、クラック閉口時の応力拡大係数($K_{I_{cl}}$)が求まる。クラック進展の解析をするためには、 $CTOD_{max}$ とクラックの進展量(Δa)の間に、ある関係が存在することを仮定することが必要である。ここでは、クラック先端形状の相似性を考え、線形関係を仮定する。すなわち、

$$\Delta a = c[CTOD], \quad c = \lambda E / 4\pi(1-\nu^2)\sigma_y$$

これにより、与えられた λ の値に対してクラックの進展解析を行うことができる。無次元化の結果、本モデルにおいて必要となるパラメータはこの λ 1つだけである。任意の荷重履歴に対して、最初のサイクルから順に計算を繰り返し、残留ひずみを毎回加え、クラックの進展を追跡することができる。また、一定の繰り返し荷重に対して十分にクラックが進展した定常状態を考え、過去の塑性変形と現在の塑性変形が同じであるという条件を用いることにより、一度の計算から定常解を求めることもできる。

3. 解析結果と実験結果との比較 定常状態に対する解析結果として、疲労クラック進展の二乗則が得られる。得られる Δa と $CTOD_{max}$ は実験で観察されるストライエーション間隔、及び、 $CTOD_{max}$ の値とよく一致する(図2)。アルミ合金7075-T6のデータは $\lambda=0.043\sim0.061$ の間に収まっているが、これは $\Delta a/CTOD_{max}=0.51\sim0.71$ に対応する。この結果はLankford(1983)により報告された実験値0.65と一致している。

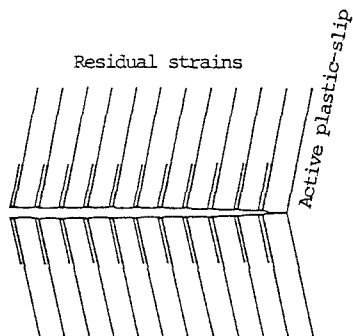
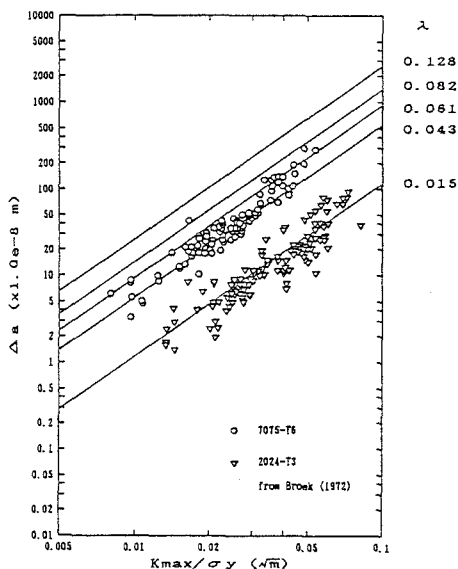


Fig. 1 Fatigue crack growth model

Fig. 2 Crack-growth rate for various λ and striation data from experiments

本モデルにより、クラックの閉口時の応力拡大係数 K_{Ic1} が求まる。定常解において、 K_{Ic1}/K_{Imax} の値は λ の関数であり、 λ の値が減少するに従ってその値は増大する（図3）。図2よりアルミ合金7075-T6, 2024-T3のデータはそれぞれ $\lambda=0.043, 0.015$ の結果と一致するが、この場合、本モデルにより予測される K_{Ic1}/K_{Imax} の値はそれぞれ0.2, 0.42である。平面ひずみ状態における K_{Ic1} の実測値はないが、平面ひずみ状態では平面応力状態より小さい値となることが予想される。平面応力状態における7075-T6, 2024-T3に対する実測値として $K_{Ic1}/K_{Imax}=0.3, 0.5$ という報告がある。

一定の繰返し荷重を考えれば、各サイクルごとにクラック進展量を計算する逐次解析の結果はサイクル数の増加とともに定常解析の結果に収束する。初期の段階では、クラック閉口時の応力拡大係数の値は、累積する残留ひずみの影響によりクラックの進展とともに大きく増大する。この結果により、進展を始めたクラックがやがて停止する、いわゆる非伝播クラックの問題は説明されるものと考えられる。また、変動繰返し荷重に対しては、実験において観測される、荷重相互干渉の影響と呼ばれる過渡的現象が本モデルにより再現される（図4）。

疲労クラック進展の下限界近傍におけるクラックの進展は、塑性変形の他にも多くのメカニズムに支配されていることが知られている。クラック面に形成される酸化皮膜、あるいは、クラック面の凹凸によりクラックの閉口が早まる効果は、CTOD*というもう1つの材料パラメータを用いることによって本モデルに組み入れることができる。すなわち、クラックの閉口が $CTOD = CTOD^*$ において起こるものとする。このCTOD*の存在により低荷重振幅におけるクラックの進展挙動が大きく変わることが示される。与えられたCTOD*の各値に

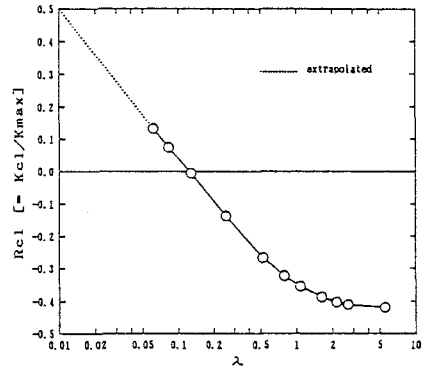


Fig. 3 Crack closure level as a function of λ

対してそれぞれクラック進展下限界が得られる（図5）。実験によって求まる下限界有効応力拡大係数範囲と一致する結果を与えるCTOD*値と、酸化皮膜の厚みやクラック面の凹凸とを比較することによりモデルの妥当性を議論できる。粒界の影響を初めとして、様々な要因をモデルに取り込み、それらの影響を定量的に評価することが今後の課題である。

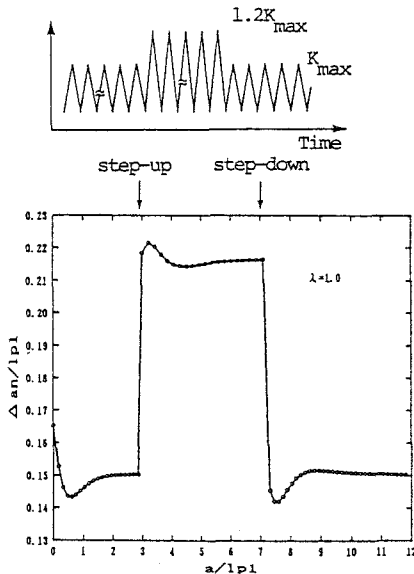


Fig. 4 Behavior of the crack extension length during block-loading

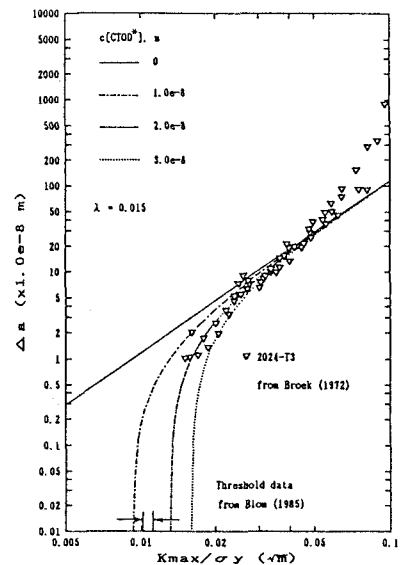


Fig. 5 Crack-growth rate as function of CTOD* and average crack-growth rate data from experiments

【参考文献】 K. Sahasakmontri, 博士論文、東京大学、1989。