

残留応力場を進展する疲労き裂の進展特性と ESPI 法による有効駆動力評価

青学大[院]

○木村征道

青学大

小川武史

Fatigue Crack Growth in Residual Stress Field and Net Crack Driving Force Evaluated by ESPI Method

Yukimichi KIMURA and Takeshi OGAWA

1 緒 言

本研究では、残留応力場における疲労き裂進展の予測を目的として、インデンテーションにより残留応力が生じた試験片について疲労試験を行い、残留応力場における疲労き裂進展挙動を調べた。疲労き裂進展の予測にあたり、FEM 解析より残留応力分布を求めて重ね合わせの原理¹⁾を適用した。

応力拡大係数 K は、有限要素法などから求めることができるが、実際にはき裂開口現象や多軸応力状態などが原因となり、き裂進展の有効駆動力は FEM 解析で求めた K とは異なる。そこで、実験的な評価を行うため、光学的手法である ESPI 法からき裂先端近傍の変位分布を実験的に求め、直接的にき裂進展の有効駆動力を評価した。また、コンプライアンス法によるき裂開口挙動も調べて比較検討し、有効性を確かめるとともに、残留応力場における疲労き裂進展挙動に検討を加えた。

2 材料および実験方法

供試材は、アルミニウム合金 2024-T3 で、0.2%耐力は 325 MPa、引張強さは 455 MPa である。ASTM 規格の 1 インチ CT 試験片(幅 $W=50.8$ mm、厚さ $B=5$ mm)を用いた。インデンテーションは、Brinell 球圧子(超硬合金)を用いて押し込み荷重 $F=3.92$ および 7.85 kN とし、疲労予き裂の導入された CT 試験片の両面に圧痕を付与した。用いた試験機は容量 10 kN の電気油圧式疲労試験機であり、自作のソフトにより試験を行った。試験条件は、繰返し速度 $f=20$ Hz、応力比 $R=0.1$ とし、荷重範囲 ΔP 一定の疲労き裂進展試験を行った。き裂長さの測定には背面ひずみ徐荷弾性コンプライアンス法を用いて、き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK また有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を算出した。

3 応力拡大係数 K の解析方法

3.1 残留応力場中の K 値

残留応力場中の疲労き裂進展速度を予測するにあたり、重ね合わせの原理を適用した²⁾。小規模降伏状態において、き裂進展による残留応力の解放は、き裂面上の初期残留応力に等しく、逆符号の分布力を負荷することと等価である。ここで、新たに残留応力による応力拡大係数 K_R が生じる。試験片の残留応力分布が厚さに関わらず一様である場合には、 K_R の算出は 2 次元で取り扱うことができる。しかし、本研究では試験片に付与した圧痕による残留応力分布が一様ではない。そこで、FEM 解析で求めた残留応力を試験片厚さ方向に平均化して算出し、2 次元問題として K_R の予測を行った。

3.2 残留応力の FEM 解析と X 線応力測定法

K_R を求めるため、初期残留応力分布を FEM 解析から求めた。インデンテーション試験をモデル化し、要素数 2218、節点数 2312 の 2 次元軸対称解析モデルを作成した。解析には汎

用 FEM コード MARC を用いて、弾完全塑性解析を行った。球圧子を剛体とし、ヤング率と最大押し込み荷重値は試験片と同条件、降伏応力は 325 MPa、ポアソン比 ν は 0.34 とした。また、FEM 解析の有効性を調べるため、PHILIPS 社製 X'Pert-XRD: 薄膜用 X 線回折装置を用いて電解研磨した試験片表面の残留応力分布を測定した。

3.3 電子スเปックルパターン干渉 (ESPI) 法

K 値を算出するための変位分布測定には、ETTEMAYER 社製レーザーストレインアナライザー Q-100 を用いた。変位分解能は $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$ である。

3.4 変位分布から K 値を解析する方法

ESPI 法により測定された変位分布から、ニュートン・ラプソン法を基にした非線形最小二乗法³⁾⁴⁾を用いて K の解析を行った。その原理を以下に示す。

線形破壊力学より、Mode I き裂先端近傍に生じる y 方向変位 v の一般解は次式で示される。

$$v = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{2G} r^{n/2} \left\{ -\kappa \cos \frac{n}{2} \theta - \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta + \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \cos \frac{n}{2} \theta \right\} \quad (1)$$

ここで、 G はせん断弾性係数、 κ は平面応力の場合 $(3-\nu)/(1+\nu)$ 、平面ひずみの場合 $(3-4\nu)$ 、 ν はポアソン比、 r および θ はき裂先端を原点とした極座標である。 A_n (未知数) は試験片やき裂形状およびその寸法に依存し、かつ外力に比例する係数である。 $n=1$ の場合には、Mode I 応力拡大係数 K_I との間に式(2)の関係がある。式(1)のき裂先端近傍変位場を式(3)で書き換える。

$$A_{11} = K_I / \sqrt{2\pi} \quad (2) \quad v = \sum_{n=1}^{N_T} A_n f_n(r, \theta) + v_r + \theta_r x \quad (3)$$

理論的には無限級数であるが、変位場が $n=1 \sim N_T$ までの級数で表されるものとする。 u_r は剛体変位量(未知数)、 θ_r は回転変位量(未知数)である。き裂先端を原点とする極座標 (r, θ) は式(4)で表現できる。ただし、 x_0, y_0 はき裂先端の座標(未知数)である。ここで、実験により測定された変位データ u_k と未知数を含む一般解との関係を式(5)のように定義する。なお、 k は測定されたデータ数であり、解析に用いる領域内の ESPI 法で測定された変位点数である。

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (4) \quad v_k = \sum_{n=1}^{N_T} A_n f_n(r_k, \theta_k) + v_r + \theta_r x \quad (5)$$

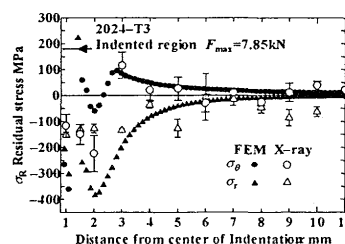


Fig.1 Residual Stress comparison of FEM analysis

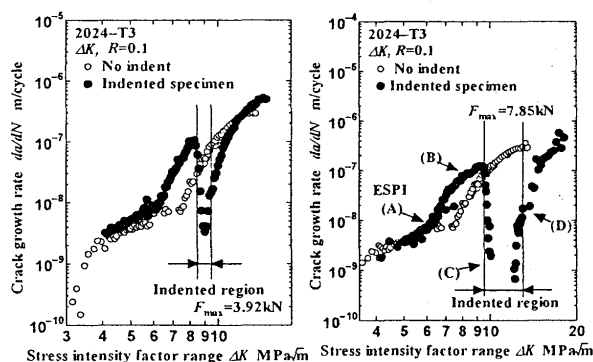


Fig.2 Crack growth characteristics for $F=3.92$ kN(a) and 7.85 kN(b)

式(5)について、ニュートン・ラプソン法に基づき、 A_1 の修正量が 1 Pa 以下になるまで繰返し計算を行った。求めた K 値は、式(3)の一般解の項数 N_T ごとに複数の値が算出される。そこで、類似度と相違度による評価を適用した。解析により得られた変位分布と実験により測定された変位分布を、類似度と相違度を用いて比較し、最も実験結果に対して近似精度が高いときの K 値を解析値とし、得られた応力拡大係数を K_E と定義した。

4 FEM 解析結果と残留応力測定の結果

FEM 解析と X 線応力測定による $F=7.85$ kN の圧痕の半径方向、円周方向の残留応力を Fig.1 に示す。半径方向の σ_r はあまり一致しないが、 σ_θ はほぼ一致している。 K_R 算出には σ_θ を利用するため、大きな問題はないものと考えた。

5 疲労き裂進展の実験結果および考察

5.1 疲労き裂進展特性

試験片に $F=3.92$ kN および 7.85 kN の圧痕を付与した場合と付与していない場合のき裂進展速度 da/dN と ΔK の関係を Fig.2 に示す。いずれの場合にも、網掛けで示した圧痕の領域に近づくに伴って da/dN は加速し、圧痕の領域内において減速する。その後、元の速度に近づいていくことがわかった。 $F=3.92$ kN の場合、荷重振幅一定の試験条件で連続的なき裂進展が生じた。一方、 $F=7.85$ kN の場合、圧痕領域内でき裂が停留した。そこで、 ΔK を徐々に増やして試験を継続したところ $\Delta K=13$ MPa $\sqrt{m}$ にて再びき裂進展を始めた。また、上記の試験において、Fig.2(b)に示した矢印の点(A)~(D)において、ESPI 法による測定を行った。

5.2 き裂開閉口挙動

Fig.3 にき裂開口応力拡大係数 K_{op} を ΔK を横軸として示す。これより、圧痕領域内にき裂先端が達すると K_{op} は増大し、圧痕の終端部分で最大値を示す。圧痕領域を通過後に K_{op} は徐々に低下しているが、Fig.2 に示したき裂進展速度が定常状態に戻るよりも変化は遅れている。これは本研究の除荷弾性コンプライアンス法で検出したき裂閉口点が、き裂先端後方の破面接触を検出しているからである。

5.3 残留応力の影響

Fig.4 では、 ΔK を横軸として FEM 解析の残留応力分布から計算される K_R を実線で示した。また、Fig.2 において、圧痕のある試験片の da/dN - ΔK 関係と圧痕のない試験片の結果を比較し、同一の da/dN を示す両者の ΔK の差が実験的な K_R 値と考えて Fig.4 に併記した。これらは da/dN が減速する部分においてよく一致した。しかし、FEM 解析による K_R は圧痕領

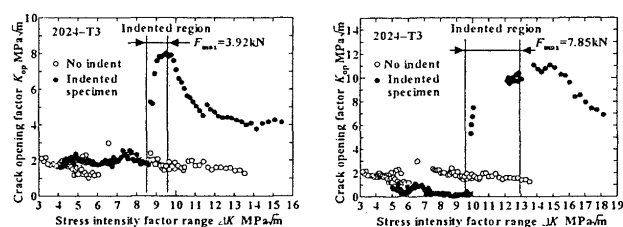


Fig.3 Variations of crack opening point.

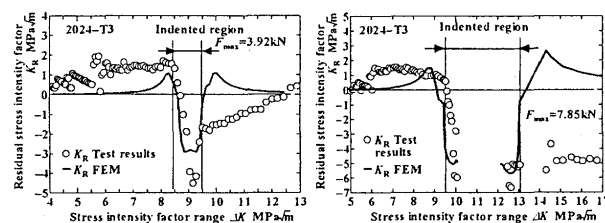


Fig.4 Variations of K_R due to residual stress.

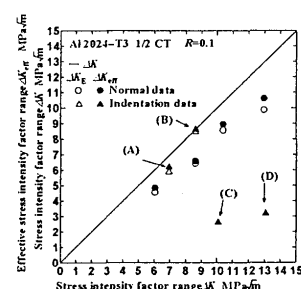


Fig.5 Comparison of K_E and ΔK_{eff} value

域を通過すると直ちに増大し、実験的な K_R 値の変化と一致していない。この原因は、き裂面接触を考慮していないためと考えられる。

5.4 き裂進展駆動力

以上の結果から、除荷弾性コンプライアンス法によるき裂閉口の評価では、き裂進展特性に及ぼすき裂面接触の影響を過大評価し、FEM 解析による K_R の評価では過小評価している。そこで、ESPI 法による変位分布測定から、き裂進展駆動力として実際にき裂先端に作用している応力拡大係数の直接解析を行った。測定点は Fig.2(b)の(A)~(D)であり、 ΔK_E と除荷弾性コンプライアンス法によって求めた ΔK_{eff} を Fig.5 に示した。ただし、(C)(D)に関しては妥当な ΔK_E を得られなかった。この原因は明らかでないが、Fig.5 からわかるように、これらの位置では ΔK_{eff} が ΔK よりもかなり小さく顕著なき裂閉口現象を示している。き裂が完全に閉口した後も外力が除荷されれば一様な変形が生じる。(C)(D)に関しては、この変形量が大きくなり、 ΔK_E が解析できなくなったのではないかと考えられる。解析法に関しては今後の課題である。なお、圧痕による減速が始まる前の(A)(B)では、 ΔK_E は ΔK_{eff} とよく一致している。

結言：省略

参考文献

- 1) 轟, 小林, 中村, 日本機械学会論文集, **54**, 498 Page.205-211 (1988).
- 2) Mall, S. and Newman, J. C., *Int. J. Fracture*, **21** (1983), 279.
- 3) 米山, 隆, 実験力学, **1**, 4, Page.22-26 (2001).
- 4) 米山, 森本, 隆, 非破壊検査, **51**, 10, Page.667-673 (2002).