疲労き裂先端近傍の残留応力分布とき裂進展*

本 田 和 男** 細 川 智 生***
皿 井 孝 明** 岡 本 改 造****

Distribution of Residual Stress in the Vicinity of Fatigue Crack Tip and Crack Growth

by

Kazuo HONDA

(Faculty of Engineering, Okayama University, Okayama)

Norio HOSOKAWA

(Okayama University of Science, Okayama)

Takaaki SARAI and Kaizou OKAMOTO

(Faculty of Engineering, Okayama University, Okayama)

The distributions of residual stress in the vicinities of fatigue crack tips and behind them were measured in various conditions of crack length, stress amplitude and stress ratio by the counter method for X-ray microbeam stress measurement. On the basis of the distributions of residual stress, the crack closure behavior was examined analytically by the finite element method and the correlation between the crack growth and the distribution of residual stress was discussed.

It was found that the distribution of residual stress in the vicinity of the crack tip was affected by the crack length and the loading conditions. The plastic zone size ahead of the crack tip was related to the maximum applied stress and the crack length, and it was evaluated from the maximum stress intensity factor K_{max} . The crack growth rate was expressed in terms of the effective stress intensity range ΔK_{eff} that was calculated by the finite element method based on the distribution of residual stress. It is considered that the crack growth behavior is closely related to the distribution of residual stress, and the crack growth rates can be predicted from the effective stress intensity range ΔK_{eff} calculated by taking account of the distributions.

(Received July 21, 1981)

キー・ワード：疲労き裂進展，残留応力分布，き裂開口応力，細束X線応力測定，有限要素法

1 緒 言

疲労き裂先端近傍の残留応力分布はき裂進展挙動に大きな影響を及ぼすと思われ，これら残留応力に対する考察からは，き裂進展を伴う材料の力学的挙動に関する有益な知見が得られると考えられる．このようなき裂進展における残留応力の重要性はElber¹⁾によるき裂閉口現象において指摘されており，き裂進展速度に及ぼす平均応力および変動荷重の影響などが有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を用いて説明されている^{2,3)}．き裂閉口現象は，き裂先端近傍に形成される塑性域をき裂が順次進展することによるき裂面の圧縮残留応力に起因すると考えられる．したがって，き裂進展挙動の考察

には，き裂先端近傍およびき裂先端後方の残留応力分布のき裂進展に伴う変化，および残留応力分布に及ぼす平均応力の影響を明らかにし，得られた分布とき裂開閉挙動の関係を知ることが重要である．そのためには，微小領域における応力測定が必要となるが，著者らは前報⁴⁾において計数管法による細束X線応力測定の適用限界および測定精度などを実験的に検討し，本方法がき裂先端等の応力状態を考察するための有力な実験的手段であることを示した．

そこで本報告では，この計数管法による細束X線応力測定を用いて疲労き裂先端近傍および先端後方の軸方向残留応力分布を求めた．すなわち，き裂進展に伴う残留応力分布の変化を応力振幅および応力比をかえて測定するとともに，得られた分布を初期値とした有限要素法解析からき裂開閉挙動を考察し，き裂進展と残留応力分布の相関性について検討した．

* 原稿受理 昭和56年7月21日

** 正 会 員 岡山大学工学部 岡山市津島中

*** 正 会 員 岡山理科大学 岡山市理大町

**** 学生会員 岡山大学大学院 岡山市津島中

2 実験方法

2.1 供試材および試験片

実験には前報と同じ高張力鋼 HT 60 を使用した。試験片は長さ 4 mm の中央切欠き付きのものであり、Fig. 1 に示す形状寸法に機械加工後、850℃水焼入れ 600℃1時間保持の焼もどし処理を施した。その後、エメリー紙仕上げおよび電解研磨仕上げを行い実験に供した。なお、試料の機械的性質は降伏応力が 62.0 kgf/mm²、引張強さが 69.5 kgf/mm²、また化学成分は C : 0.15, Si : 0.29, Mn : 1.42 などであり、結晶粒は十分に細かく細束 X 線応力測定が可能とみなしうるものである。

Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

2.2 疲労き裂進展曲線と残留応力分布測定

疲労き裂進展曲線を電気油圧サーボ方式の疲労試験機により荷重制御のもとで、応力比 $R = -1$ の完全両振り引張圧縮および $R = 0$ の完全片振り引張りの場合についてそれぞれ求めた。ここで、荷重波形は正弦波であり、繰返し速度を 20 Hz とした。き裂長さの測定は、試験機に取り付けた光学顕微鏡 ($\times 100$) により試験機運転状態で行い、繰返し数との関係を求めた。

疲労き裂先端近傍およびき裂先端後方の軸方向残留応力分布の測定には、前報において測定精度などを検討した計数管法による細束 X 線応力測定装置を用いた。以下に、本装置の特徴を簡単に説明する。これは市販の分析用ゴニオメーターに結晶振動法⁵⁾として試料の鉛直軸まわりの振動装置を付加したもので、入射 X 線の強度損失を少なくするために X 線管球を被測定物に接近させたため、管球および被測定物の幾何学的配置から計数管を超小型ペンタイプ比例計数管としている。このように、本装置は結晶振動法の導入および X 線出力の有効利用などから細束 X 線を用いた場合の応力測定を計数管法により可能としたものである。測定条件は前報と同じであり、 $\text{CrK}\alpha(211)$ 面を回折面とし照射域直径 450 μm における応力値を半価幅法により求めた。試験片の鉛直軸まわりの振動は、振動角 $4\phi = \pm 3\text{deg}$ 、振動速度 7.1 deg/sec とし、中央切欠き底からき裂先端前方に約 2 mm の範囲で X 線管球 (入射 X 線) および計数管をき裂と平行に移動させることにより残留

応力分布を測定した。

3 有限要素法によるき裂開口応力の計算

疲労き裂先端近傍および先端後方の残留応力分布を考慮して、き裂開口応力を有限要素法を用いた弾性解析より求めた。計算は平面応力状態を仮定し、中央切欠き底からの片側き裂長さ $l_c = 2 \sim 6 \text{ mm}$ に対して行った。Fig. 2 は、 $l_c = 4 \text{ mm}$ の場合のき裂先端近傍における要素分割を示したもので、計算に用いた試験片平行部の 1/4 に対する節点数 294、要素数 498 であり、他のき裂長さにおいても要素の分割方法などはほぼ同じである。なお、中央切欠きはき裂とみなして要素分割を行った。

Fig. 2. Finite element representation in the vicinity of a crack tip.

実際の計算では、力のつりあい条件を考慮して、各要素の初期応力値を残留応力分布の測定結果から決定した。初期状態では、圧縮残留応力によりき裂上の節点力は圧縮となり、き裂は閉じている。そこで、この状態から引張荷重を加え、き裂上の節点反力が 0 となる節点から順次その変位拘束を解き、き裂先端から一つ手前の節点反力が 0 となったときの応力をき裂先端の開口応力とした。なお、本計算ではすべてき裂先端が最後に開口した。

4 実験結果および考察

4.1 疲労き裂先端近傍の残留応力分布

Fig. 3 は、両振り $R = -1$ の応力振幅 $\sigma_a = 15 \text{ kgf/mm}^2$ および片振り $R = 0$ の $\sigma_a = 7$ および 9 kgf/mm^2 におけるき裂長さ l_c と繰返し数 N の関係を示したき裂進展曲線である。ここで、応力振幅 σ_a は中央切欠きを含めた全断面積に対する値である。また、 l_c は中央切欠きの両側におけるき裂長さの平均値であり、両側の差はいずれの場合も 0.5 mm 以下であった。図において、両振り $\sigma_a = 15 \text{ kgf/mm}^2$ と片振り $\sigma_a = 9 \text{ kgf/mm}^2$ の同一き裂長さにおけるき裂進展速度 dl_c/dN

Fig. 3. Fatigue crack growth curves.

dN はほぼ等しくなっている。図中の横線は、本実験において残留応力分布の測定を行ったき裂進展曲線上の位置を示したもので、き裂長さ $l_c = 2 \sim 6$ mm、き裂進展速度 $dl_c/dN = (0.18 \sim 1.14) \times 10^{-4}$ mm/cycle 程度の安定成長段階のき裂を対象とした。

Fig. 4 は、同一応力振幅下でのき裂進展に伴う残留応力分布の変化をき裂先端の後方 1.7 mm から前方約 2 mm の範囲に着目して示したもので、 $R = -1$, $\sigma_a = 15$ kgf/mm² における実験結果である。細束 X 線により測定した残留応力分布には、き裂先端付近において圧縮残留応力の最大値が、またき裂先端前方に引張残留応力の最大値がそれぞれ認められ、この領域で残留応力分布は急激に変化している。圧縮残留応力の最大値およびき裂開閉挙動に影響を及ぼすと考えられるき裂先端後方の残留応力分布はき裂長さ l_c により異なり、 $l_c = 2$ mm の場合は他のき裂長さと比較してき裂先端付近の圧縮残留応力の絶対値が小さくなっている。

Fig. 4. Change in distribution of residual stress in the vicinity of fatigue crack tip as crack propagates, $R = -1$, $\sigma_a = 15.0$ kgf/mm².

このような残留応力分布において、引張残留応力が最大となる位置は、最大荷重時のき裂先端前方における応力分布を考えた場合の弾塑性境界に一致すると考えられる。前報のスリット状切欠き先端近傍での静的引張り時の負荷応力分布と除荷後の残留応力分布を比較した結果において、負荷時の弾塑性境界と引張残留応力の最大値を生じる位置がほぼ一致することを確認しており、き裂の場合と幾分条件は異なるが、残留応力分布の形態に大きな影響はないと思われる。そこで、き裂先端近傍の圧縮および引張残留応力のピーク間距離を残留応力分布より求める最大荷重時の塑性域寸法 ω とすると、同一応力振幅下で進展するき裂先端の ω は

き裂長さとともに変化することがわかる。

つぎに、 $R = 0$, $\sigma_a = 9$ kgf/mm² の場合のき裂進展に伴う残留応力分布の変化を Fig. 5 に示す。これより、片振りの場合のき裂先端および先端後方の圧縮残留応力の絶対値は、いずれのき裂長さにおいても両振りに比較して大きく、ほぼ等しい速度で進展しているき裂のき裂先端近傍の残留応力分布には応力比による相違が明確に認められる。また、同一き裂長さにおける塑性域寸法は両振りよりも片振りにおいて大きくなっている。Fig. 6 は $R = 0$, $\sigma_a = 7$ kgf/mm² における同様の結果を示したものである。図から、 $l_c = 2$ mm

Fig. 5. Change in distribution of residual stress in the vicinity of fatigue crack tip as crack propagates, $R = 0$, $\sigma_a = 9.0$ kgf/mm².

Fig. 6. Change in distribution of residual stress in the vicinity of fatigue crack tip as crack propagates, $R = 0$, $\sigma_a = 7.0$ kgf/mm².

のき裂先端および先端後方の圧縮残留応力の絶対値は他のき裂長さに比較して小さいことがわかる。また、 $l_c=6\text{ mm}$ の圧縮残留応力の最大値は Fig. 5 の $\sigma_a=9\text{ kgf/mm}^2$ の値とほぼ等しいが、き裂先端後方の圧縮残留応力の絶対値は $\sigma_a=7\text{ kgf/mm}^2$ において小さくなっている。一方、Fig. 4 の両振りの結果との比較においてもき裂先端後方の残留応力の値などは両者で大きく異なり、き裂先端近傍の残留応力分布は荷重条件の影響を受けることがわかる。以上のように、き裂長さ、応力振幅および応力比をかねて測定した残留応力分布によるき裂進展挙動の考察には、き裂先端の塑性域寸法およびき裂先端後方の残留応力分布の検討が重要と思われる。そこで、以下ではこれらの点について考察を行った。

4・2 き裂先端の塑性域寸法

Fig. 7 は、残留応力分布から求めたき裂先端の塑性域寸法 ω とき裂長さ l_c の関係を示したもので、 ω は圧縮および引張りのピーク位置付近における分布をそれぞれ放物線近似することにより算出した。図において、 $R=-1$, $\sigma_a=15\text{ kgf/mm}^2$ と $R=0$, $\sigma_a=7\text{ kgf/mm}^2$ の ω は比較的近い値となっている。前述のように、塑性域寸法は最大荷重応力 $\sigma_{\max}$ に関係すると考えられるため、 $\sigma_{\max}$ がほぼ等しいこれら両者の ω はほぼ同様の値が測定されたものと思われる。ここで、 $\sigma_{\max}$ の小さい $\sigma_a=7\text{ kgf/mm}^2$ の ω は $\sigma_a=15\text{ kgf/mm}^2$ のそれよりわずかに大きい、これは残留応力分布のピーク位置付近における測定誤差およびX線照射面積などの影響が幾分現れたものと考えられる。

Fig. 7. Variation of plastic zone size with crack length.

つぎに、 $\sigma_{\max}$ およびき裂長さを考慮した整理を検討するために ω と最大応力拡大係数 $K_{\max}$ の関係を調べた。Fig. 8 は両者の関係を対数グラフ上に示したもので、応力拡大係数はセカント公式を用いて計算した。図より ω の $K_{\max}$ による整理からは、幾分ばらつきはあるがほぼ直線関係が得られることがわかる。このように ω の $K_{\max}$ による整理は有効であり、き裂先端の塑性域寸法は $K_{\max}$ にほぼ支配されるものと思われる。したがって、 ω と $K_{\max}$ の関係を求めておけば、

Fig. 8. Plastic zone size as a function of maximum stress intensity factor.

き裂先端近傍の残留応力分布を測定することにより $K_{\max}$ の値を推定することができると考えられる。

4・3 き裂開口応力とき裂進展

Fig. 4~6 の残留応力分布を有するき裂に対し、き裂開口応力 σ_{op} を有限要素法を用いて計算した。Fig. 9 は、き裂長さ $l_c=6\text{ mm}$ の場合について、き裂先端後方の各位置における σ_{op} の計算結果を一例として示したものである。図より、いずれの場合もき裂先端から先端後方約 1 mm の範囲で σ_{op} の増加が顕著に認められ、 σ_{op} は両振りよりも片振りにおいて大きくなっている。これはき裂先端後方の圧縮残留応力の分布状態に起因し、その絶対値が大きい片振りにおいてき裂開口を抑制する効果が大きいと考えられ、片振り

Fig. 9. Crack opening stress behind fatigue crack tip.

の $\sigma_a=7$ と 9 kgf/mm^2 の比較においても同様の傾向が認められる。また、片振りにおけるき裂先端の残留応力の値は $\sigma_a=7$ および 9 kgf/mm^2 ではほぼ等しいが、 σ_{op} は両者で異なり、き裂先端の開口応力は残留応力分布の影響を受けることがわかる。

Fig. 10 は、Elber¹⁾ による有効応力範囲比

$$U = (\sigma_{\max} - \sigma_{op}) / (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

とき裂長さ l_c の関係を示したもので、 σ_{op} はき裂先

Fig. 10. Variation of effective stress range ratio with crack length.

端における値である。両振りの場合, Fig. 4 に示す残留応力分布はき裂長さにより異なるが, U すなわち σ_{op} はほぼ一定となっている。また, 片振りでは応力振幅の違いによる U の値に両振りの値との間にみられる程の差異はなく, いずれのき裂長さにおいても両振りの値より大きいことがわかる。すなわち, U に及ぼす影響はき裂長さや応力振幅よりも応力比において大きく, これらの計算結果には Elber¹⁾ による結果 とほぼ 同様の傾向が認められる。

そこで, Fig. 10 の U から有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff} = U \Delta K$ を計算し, き裂進展速度 dl_c/dN との関係求めた。Fig. 11 はその結果であり, dl_c/dN は残留応力分布を測定したき裂長さにおける値のみを示し

Fig. 11. Fatigue crack growth rate as a function of effective stress intensity range.

た。これより, 両者の関係はほぼ 1 本の直線で表され, dl_c/dN を残留応力分布の測定結果と有限要素法を用いて求めた ΔK_{eff} により応力比に無関係に整理できることがわかる。したがって, き裂進展挙動はき裂先端近傍および先端後方の残留応力分布の状態に大きく影響を受けるものと思われ, 変動荷重下などのき裂進展においても指摘されているように^{2,7)}, これらの問題の考察には残留応力分布を考慮する必要があると考えられ

る。また, き裂開口応力を求めるには負荷状態を必要とする場合が多いのに対し, 本方法ではその必要はなく非破壊的に開口応力を得ることが可能である。したがって, 残留応力分布を測定した場合, き裂先端の塑性域寸法から求まる K_{max} とき裂開口時の応力拡大係数 K_{op} から ΔK_{eff} を計算することができ, dl_c/dN と ΔK_{eff} の関係が既知であれば, それらの測定結果からき裂進展速度を推定することが可能と考えられる。

5 結 言

疲労き裂先端近傍およびき裂先端後方の軸方向残留応力分布を, き裂長さ, 応力振幅および応力比を変化させた種々の条件のもとで細束 X 線により測定した。さらに, 得られた結果を初期値とした有限要素法による解析からき裂開閉挙動を考察し, き裂進展と残留応力分布の相関性について検討した結果, 以下のことが明らかになった。

(1) 疲労き裂先端の圧縮残留応力は, き裂先端から離れるに伴いその絶対値を減少し, き裂先端前方には引張残留応力の最大値が認められる。き裂先端近傍の残留応力分布はき裂長さおよび荷重条件の影響を受け, き裂先端後方の圧縮残留応力などは応力比により大きく異なる。

(2) 残留応力分布より求めたき裂先端の塑性域寸法 ω は最大負荷応力およびき裂長さに関係し, ω を最大応力拡大係数 K_{max} により整理することができる。

(3) き裂先端近傍および先端後方の残留応力分布の測定結果と有限要素法解析から求めた有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} により, き裂進展速度を応力比に無関係に説明することができる。

(4) 残留応力分布からは K_{max} およびき裂開口時の応力拡大係数 K_{op} を非破壊的に求めることができ, ΔK_{eff} からき裂進展速度を推定することが可能と考えられる。

(昭和56年7月14日 第18回 X 線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Elber, W., ASTM STP, **486**, 230 (1971).
- 2) 小倉敏二, 大路清嗣, 大久保好二, 芝野芳樹, 日本機械学会論文集, **42**, 1615 (1976).
- 3) 西谷弘信, 高尾健一, 日本機械学会論文集, **42**, 1964 (1976).
- 4) 本田和男, 細川智生, 皿井孝明, 材料, **27**, 1209 (1978).
- 5) 小長哲郎, 本田和男, 日本機械学会誌, **73**, 972 (1970).
- 6) Feddersen, R. E., ASTM STP, **410**, 77 (1966).
- 7) Matsuoka, S., K. Tanaka, and M. Kawahara, Eng. Fract. Mech., **8**, 507 (1976).
- 8) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, **25**, 899 (1976).
- 9) 本間寛臣, 中沢 一, 日本機械学会論文集, **42**, 2977 (1976).