過大過小応力下における疲労き裂伝ばの加速に
及ぼす環境効果*小寺 沢 良 一^{*1}, 納 所 孝 至^{*2}
小 谷 恵 生^{*3}, 小 沼 静 代^{*4}Effects of Environment on the Acceleration of Fatigue
Crack Growth under Periodic OverstressingRyoichi KOTERAZAWA, Takayoshi NOSHO,
Keisei KOTANI and Shizuyo KONUMA

The acceleration of fatigue crack growth under periodic overstressing was studied with center-notched plate specimens of low-carbon steel under push-pull loading. Tests were carried out in moist air, dry air, nitrogen, and vacuum. A very small number of cycles of overstress applied intermittently during a very large number of cyclings of understress below the threshold stress intensity range ΔK_{th} caused a significant acceleration of crack growth in the range of relatively large understress ΔK_1 ($\Delta K_{th}/\Delta K_1 > 0.5$) in moist air, dry air, and nitrogen. In the region of relatively small understress, however, acceleration of crack growth in moist air was less than that in dry air and nitrogen. It was found by means of Auger spectroscopy that the maximum thickness of excess oxide within the cracks enhanced crack closure and reduced the effective stress intensity range of understress, $(\Delta K_1)_{eff}$, resulting in less acceleration of crack growth in moist air. Acceleration of crack growth in vacuum, on the other hand, was less than that in other environments in all understress levels. Fractographic study suggested that rewelding in vacuum resulted in the less acceleration. There was no sequential effect of overload on the acceleration under two-level variable stress. The acceleration under multi-level variable stresses was predicted by a method using a linear cumulative concept on the basis of test data under simpler two-level variable stresses.

Key Words: Fatigue, Crack Growth, Periodic Overstressing, Acceleration, Environmental Effect, Crack Closure, Fractography

1. 緒 言

過大過小応力下における疲労き裂伝ばについて、著者の一人らは、鋭い切欠試験片を用いた回転曲げ試験および平板試験片を用いた面内曲げ試験により K_{th} 以下の過小応力の多数回の繰返し (10^5 回程度) と K_{th} 以上の過大応力の少数回 (2 回) を交互に加えた 2 段 (過小応力 1 段, 過大応力 1 段) および多段 (過小応力, 過大応力の段数が 2 以上) の過大過小応力試験を実施し、き裂伝ばの加速特性並びにフラクトグラフィによるき裂伝ば機構の検討を行ってきた^{(1)~(4)}。その結果、加速効果は両振応力下において特に著しく、片振応力下ではあまり大きくないこと、低強度材において加速効果が著しく、また、それ以下では顕著な加速を生じない過小応力の下限値は K_{th} より著しく低く、実機における設計応力と同程度の値となっていること、2 段試験におけるき裂伝ばの加速特性を基礎として、線形加算により多段試験におけるき裂伝ば加速特性を推定できること、き裂伝ばの加速は過小応力の多数回の繰

返しに伴うき裂先端の組織回復とこれに関連したき裂のジグザグ進展機構によると考えられることなどを報告している。

一方、疲労き裂伝ばに環境が影響を及ぼすことは古くから知られており、実用上の重要性から環境因子に関する研究が広く行われている。しかし、上記き裂伝ばの加速に及ぼす環境効果についての知見は得られていない。また、き裂伝ばの遅延に及ぼす過大応力の負荷順序効果についてはよく知られている⁽⁵⁾が、き裂伝ばの加速についてはその影響が明らかでない。

ここでは板試験片を用い、両振引張圧縮繰返応力下において過大過小応力試験を行い、この種の研究で最も重要と思われる顕著な加速を生じる過小応力の下限界値に環境が及ぼす影響、並びに過大応力の負荷順序がき裂伝ばの加速に及ぼす影響を検討する。また、2 段試験の結果から線形加算により多段試験におけるき裂伝ば加速を推定する方法の妥当性を検討する追加実験も行ったので併せて報告する。

2. 実験方法

2.1 試験材料, 試験片, 試験装置 供試材は、低炭素鋼 SS41 板材 (920°C 1 hr 焼ならし, 降伏応力: 305 MPa, 引張強さ: 449 MPa, 伸び: 34.5 %) およ

* 原稿受付 平成 2 年 4 月 5 日。

^{*1} 正員, 筑波大学構造工学系 (〒305 つくば市天王台 1-1-1)。^{*2} 正員, 岡山大学工学部 (筑波大学大学院)。^{*3} 清水建設(株) (〒104 東京都中央区京橋 2-16-1)。^{*4} 正員, 新潟大学工学部 (〒950 新潟市五十嵐 2 の町 8050)。

び S15C 丸棒材 (920°C 1 hr 焼ならし, 降伏応力: 327 MPa, 引張強さ: 433 MPa, 伸び: 40.0 %, 絞り 67.4 %) で, SS41 板材は中央切欠平板試験片 (試験部長さ 160 mm, 幅 60 mm, 厚さ 7.5 mm, 切欠長さ 15 mm: 試験片 a), S15C 丸棒材はダブルテイル形つかみ部の中央切欠板試験片 (平行部長さ 50 mm, 幅 45 mm, 厚さ 5.5 mm, 切欠長さ 11 mm, つかみ部形状 $\phi 35 \times 15$ mm: 試験片 b, つかみ部形状 $\phi 38 \times 36$ mm: 試験片 c) に加工した。

試験機は容量 ± 98 kN の油圧サーボ疲労試験機 (島津製作所製, EA-10 形, 以下試験機 A) と, 真空チャンバ付きの容量 ± 49 kN の油圧サーボ疲労試験機 (島津製作所製, EB-5 形, 以下試験機 B) による。いずれの試験機もマイクロコンピュータ (マイコン) により制御しており, K 値制御条件下において試験を行っている。

試験環境は, 湿潤空気, 乾燥空気, 窒素, 真空である。湿潤空気中, 乾燥空気中の試験には試験機 A と試験片 a, c を用い, 簡易チャンバ (ステンレス製, 縦 255 mm $\times$ 横 255 mm $\times$ 高さ 400 mm) を取付けて, チャンバ内に水と乾燥剤を入れた容器および湿度計を置き, 水と乾燥剤の量を調整して湿度をほぼ一定に保った。湿潤空気および乾燥空気の相対湿度はそれぞれ 70~80 %, 20~30 % とした。窒素中の試験は, 簡易チャンバと窒素ポンペを圧力計と流量計を介して接続し, 毎分 0.3~0.5 L の流量で行った。真空試験は試験機 B と試験片 b により 7×10^{-4} Pa 程度の真空中で行った。

定常応力下におけるき裂伝ばに及ぼす環境の影響が, 破面に堆積した酸化物厚さとき裂開口の関係を定量的に検討することにより明らかにされていることから, 本研究におけるき裂伝ば加速に及ぼす環境の影響についても同様の検討をするために, 破面上の酸化物厚さをオージェ電子分光器を用い, スパッタリング法によって測定した。なお, き裂開口挙動の測定は, 荷重-き裂中央開口変化曲線を X - Y レコーダに描かせ, そのこう配の変化からき裂開口応力 K_{op} を求めた。

2.2 K 値制御 マイコン制御によって K 値制御を実行するにはき裂長さを自動計測する必要がある。ここではコンプライアンス法による。コンプライアンスは, 試験機のロードセルからの荷重信号と試験片に取付けた伸び計 (標点距離 12.5 mm) からの変位信号をマイコンが読み込み, 計算する。コンプライアンスとき裂長さとの関係は各試験片についてあらかじめ実験的に求めた。 K の計算は式 (1) を用いた。

$$K = \frac{P}{BW} \sqrt{\pi a \sec \frac{\pi a}{W}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで, P は荷重, B は試験片厚さ, W は試験片幅, a はき裂長さである。また, 本実験は両振引張圧縮応力下で行っているため, $\Delta K = K_{max}$ とした。

過大過小応力試験において K 値制御で試験を実行する場合の問題点の一つとして, 過小応力ブロック中におけるき裂長さの計算がある。すなわち, コンプライアンス法によるき裂長さの計算が, 荷重変位曲線のき裂開口点以上の直線部分の傾きにより行われているため, K_{th} 以下の過小応力では振幅が小さく, 計算誤差が大きくなるため正確な K 値制御が困難になる。ここでは過大過小応力 1 ブロック当たりのき裂伝ば量が小さい (10 μ m 程度以下) ことから, 過大応力部分で計算したき裂長さを基にこれに続く過小応力を制御する方法をとった⁽⁶⁾。なお, 本研究における過小応力の繰返し数は 10^5 回程度の極めて多数回で, これに要する時間を短くするため, 過小応力の繰返し速度は伸び計の使用限度の 20 Hz とし, 過大応力のそれはき裂長さの計算精度の点から 5 Hz とした (き裂長さの測定誤差は ± 0.1 mm 程度)。

3. 実験結果と検討

3.1 定常応力下におけるき裂伝ばに及ぼす環境の影響

過大過小応力下におけるき裂伝ばの加速を評価するためには基礎となる定常応力下におけるき裂伝ば特性を知る必要がある。そのために湿潤空気中, 乾燥空気中, 窒素中および真空中における定常応力下におけるき裂伝ば挙動を調べた。

荷重減少法⁽⁷⁾により得たき裂伝ば速度と ΔK の関係を図 1 (a) に示す。き裂伝ば速度が比較的大きい領域においては, 同じ ΔK で比較すると, 湿潤空気中, 乾燥空気中, 窒素中のき裂伝ば速度はほぼ一致しており, 真空中のき裂伝ば速度はそれらの 1/5 程度の値になっている。低伝ば速度域では, 湿潤空気中と真空中のき裂伝ば速度がほぼ一致し, 窒素中のき裂伝ば速度は湿潤空気中と真空中に比して大きい。これに対応して, 疲労き裂伝ばの下限界応力拡大係数 ΔK_{th} は窒素中で最も小さく, 湿潤空気中と真空中はほぼ一致している。

図 1 (b) はき裂開口応力 K_{op} の測定結果から有効応力拡大係数 $\Delta K_{eff} (= \Delta K - K_{op})$ を計算し, これに対してき裂伝ば速度を図示したものである。窒素中においてはき裂開口がほとんどなかったため, 図 1 (a) における da/dN - ΔK 関係とほぼ一致している。湿潤空気中, 乾燥空気中のき裂伝ば速度は試験を行った伝ば

速度領域全体にわたって窒素中のそれにほぼ一致した。真空中のき裂伝ば速度は高伝ば速度域、低伝ば速度域ともに湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中におけるき裂伝ば速度の1/5程度の値になっているが、下限値 ΔK_{th} はそれらの ΔK_{th} にほぼ一致している。

定常応力下におけるき裂伝ばに及ぼす環境の影響について、湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中ではき裂閉口を考慮して ΔK_{eff} を用いるときき裂伝ば速度がほぼ一致したことから環境はき裂閉口を介してき裂伝ば速度に影響を及ぼすことがわかる。したがって、これらの環境ではき裂閉口がき裂伝ばを支配する因子と思われる。しかし、真空中のき裂伝ば速度はき裂閉口を考慮した ΔK_{eff} によっても湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中におけるき裂伝ば速度に一致しなかった。この理由については3・3・1項破面観察結果で述べるが、き裂先端の再溶着によると考えられる。

3・2 過大過小応力下のき裂伝ば加速に及ぼす環境効果

(a) da/dN - ΔK 線図

(b) da/dN - ΔK_{eff} 線図

図1 定常応力下のき裂伝ば速度と応力拡大係数幅の関係

3・2・1 湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中、真空中におけるき裂伝ばの加速 試験は、 ΔK_{th} 以下の過小応力 ΔK_1 の繰返しと ΔK_{th} 以上の過大応力 ΔK_2 の繰返しを交互に加える2段階過大過小応力試験で、 ΔK_1 および ΔK_2 の繰返しはそれぞれ 2.2×10^5 回、2回であり、過大応力の値は、いずれの環境中においても定常応力下のき裂伝ば速度が $0.03 \mu\text{m}/\text{cycle}$ 程度となるように選んでいる。

図2は ΔK_{th} で無次元化した過小応力 $\Delta K_1/\Delta K_{th}$ に対して加速率 R_{ac}^{**1} を示したものである。まず、湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中の結果についてみる。通常の大気雰囲気に近い本研究の乾燥空气中(◆印)の結果は著者の一人らにより報告されている同程度の強度の低炭素鋼に関する回転曲げ試験の結果⁽¹⁾(○印)および板試験片の面内曲げ試験の結果⁽⁹⁾(□印)にほぼ一致し、過小応力が大きい場合には加速率は100に近い高い値となっている。過小応力が小さい場合には、湿潤空气中の加速率は窒素中、乾燥空气中に比べて小さく、この領域では環境の影響がみられる。次に、真空中の結果を見ると、加速率は他の環境に比して小さく、特に過小応力の大きいところでは1/5~1/10程度の値になっている。環境による加速率の差については後に議論するが、過小応力の小さい領域において湿潤空气中の加速率が小さいのはき裂閉口に、真空中の加速率が他の環境に比して小さいのはき裂先端の再溶着に起因することが考えられる。

3・2・2 き裂伝ばの加速とき裂閉口 図2において、過小応力が小さい場合($\Delta K_1/\Delta K_{th} = 0.6$ 以下)、湿潤空气中の加速率は乾燥空气中、窒素中のそれに比して小さく、環境による差が見られる。定常応力下においてはき裂閉口がき裂伝ばを支配する因子とみられる

図2 無次元化した過小応力 ΔK_1 と加速率の関係

^{**1} 過大過小応力の各応力段階のき裂伝ば速度が定常応力に対するものと同じであるとして1ブロック当たりのき裂伝ば量の推定値 Δa^* を加算則により計算し、過大過小応力1ブロックの実際のき裂伝ば量 Δa を Δa^* で割ったものを加速率 R_{ac} と定義する。

ことを上に述べた。過大過小応力下におけるき裂伝ばの加速に対しても定常応力下における場合と同様に、き裂開口がその支配因子となり得るかどうかをみるために過大過小応力試験中の K_{op} を測定した。その結果を図3に示す。湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中における K_{op} は試験前の K_{op} (縦軸上の点) とほぼ等しく、大きい変化はないため、試験中の K_{op} を平均した。真空中の K_{op} は、試験開始後徐々に減少し、10ブロック程度で試験開始前のほぼ60%になり、以後はほぼ一定となっているため、この一定値となった値を試験中の K_{op} 値とした。

片振引張繰返応力下においては過大応力負荷後にき裂開口応力が上昇することはよく知られている。しかし、本実験の両振繰返応力では過大応力負荷後のき裂開口応力が負荷前のき裂開口応力と等しくなった。これは、引張過大応力により生じたき裂先端近傍の塑性域内の圧縮残留応力がそれに続く圧縮の過大応力により解放されたためと思われる。引張過大応力負荷後に圧縮過大応力を加えると、き裂伝ばにほとんど遅延のみられないことが報告⁽⁵⁾されている。これは過大応力負荷後のき裂開口応力上昇がほとんどないことを意味

図3 2段過大過小応力試験中の K_{op} の変化

図4 無次元化した過小応力 ΔK_I と過大応力の有効値 ΔK_{2eff} により計算した加速率の関係

し、上記の考え方を支持している。き裂伝ばの加速がき裂開口に伴う過大応力の有効値の変化によるものかどうかを見るために、過大過小応力試験中の K_{op} から過大応力の有効応力振幅 $\Delta K_{2eff} (= K_{2max} - K_{op})$ を計算し、これに対するき裂伝ば速度 (da/dN) を図1(b)の $da/dN - \Delta K_{eff}$ 関係より求め、加速率を計算して図4に示す。図2における場合とほぼ同じ値であり、き裂開口に伴う過大応力有効値の変化によっては本研究におけるような顕著なき裂伝ばの加速を説明できないことを示している。

次に、き裂開口に伴う過小応力の有効値の変化によって加速特性が説明できるかどうかを調べた。図5は、過大過小応力試験中の K_{op} から過小応力の有効応力振幅 $\Delta K_{1eff} (= K_{1max} - K_{op})$ を計算し、定常応力下のき裂伝ばの下限界有効応力拡大係数幅 $(\Delta K_{eff})_{th}$ で無次元化した値 $\Delta K_{1eff} / (\Delta K_{eff})_{th}$ に対して加速率を示した図である。湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中の加速率はほぼ一致し、1本の曲線で近似でき、過小応力の有効応力振幅 ΔK_{1eff} により加速率が一義的に定まる。また、この曲線を $\Delta K_{1eff} / (\Delta K_{eff})_{th} = 0$ まで外挿すると $R_{sc} \approx 1$ となる。これは繰返し負荷を受ける疲労き裂において、繰返応力が小さくてもき裂先端が開くような負荷応力であれば、き裂伝ばの加速が生じることを示唆するものと考えられる。

真空中の結果($\triangle$ 印)は、湿潤空气中、乾燥空气中、窒素中の結果($\diamond$, $\blacklozenge$, $\blacktriangle$ 印)に一致しておらず、特に過小応力が比較的大きい場合には他の環境における結果の1/10程度の値である。この理由については3.3.2項破面観察結果で述べる。

3.3 破面観察結果

3.3.1 定常応力試験の破面 窒素中および真空中の破面を図6に示す。窒素中の破面は角張っており、また、粒界も見られ、やや脆性的な様相を呈している

図5 無次元化した過小応力の有効値 ΔK_{1eff} と加速率の関係

[図 6 (a)], 真空中の破面は窒素中のそれに比して平坦で凹凸の角部が丸みを帯びている[図 6 (b)], 真空中の破面の凹凸の角部が丸みを帯びているのは, 応力増加時に生じたき裂新生面に酸化膜が形成されず, 除荷時に逆すべり部分が再溶着し, き裂先端で再溶着を繰り返したためと思われる。再溶着が生じることにより, 真空中のき裂伝ぱ速度は ΔK_{eff} によっても他の環境に比して小さくなる(3・1節)。

再溶着は, 酸素および水蒸気の気体分子によりき裂新生面が酸化されない場合に起こると考えられてい

る。このことは再溶着が真空環境のみならず窒素環境においても起こることを意味するが, 本実験の窒素環境では上記のように再溶着は生じなかった。この理由として, 本実験で使用した窒素に酸素および水蒸気の残留気体分子がそれぞれ最大で 50 ppm, 13.95 ppm (露点 -58°C 以下からの換算値) 存在すること, さらに本実験の窒素環境がチャンバ内に窒素を通す簡単な装置によっているため, チャンバ内に酸素および水蒸気の気体分子が上記に加えて残留する可能性のあることが考えられる。本実験のように微量な酸素および水

(a) 窒素中

(b) 真空中

図 6 定常応力下の破面 ($da/dN \approx 2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$), 矢印はき裂伝ぱ方向 (a) 乾燥空气中 ($\Delta K_I/\Delta K_{th} = 0.62$, $R_{ac} = 50$) (b) 窒素中 ($\Delta K_I/\Delta K_{th} = 0.86$, $R_{ac} = 79$) (c) 湿潤空气中 ($\Delta K_I/\Delta K_{th} = 0.93$, $R_{ac} = 76$) (d) 真空中 ($\Delta K_I/\Delta K_{th} = 0.6$, $R_{ac} = 6$)図 7 過大過小応力下の波面 (Δa : 過大過小応力試験部分)

蒸気の気体分子が存在する窒素中の疲労き裂伝ば挙動は、真空中と異なることが Ranganatham ら⁽¹⁰⁾によっても示されている。その結果によると、 ΔK_{th} 近傍では、窒素中のき裂伝ば速度が真空中に比して 100 倍程度大きい。また、本実験における真空中と窒素中のき裂伝ば挙動の相違、および破面観察結果は、駒井ら⁽⁸⁾の HT55 鋼による真空中と乾燥空気中の疲労き裂伝ば試験結果ともほぼ一致している。これらのことから、酸素および水蒸気の気体分子が存在する窒素環境では再溶着の生じないことがあり、乾燥空気中とほぼ同様のき裂伝ば機構となることが考えられる。

3・3・2 過大過小応力試験の破面 過大過小応力試験部分の破面例を図 7 に示す。乾燥空気中、窒素中の破面には酸化物の付着がほとんどなく、破面上にビーチマークが明瞭に観察される [図 7 (a), (b)]。これに対して、湿潤空気中の破面は酸化物の付着により黒ずんでおり、応力の変動に対応するビーチマークが明瞭でない [図 7 (c)]。破面様相の相違は加速特性の相違と対応しており、湿潤空気中の加速特性が乾燥空気中、窒素中と異なるのは、3・3・3 項で述べる酸化物誘起き裂閉口に伴う過小応力の有効応力振幅の減少によると思われる。真空中の破面は上記のいずれとも相

違しており、酸化物の付着もビーチマークも見られない [図 7 (d)]。真空中の加速特性が他の環境と異なるのは以下に述べる再溶着とき裂進展機構の相違によると思われる。

図 7 (b) の窒素中の破面と図 7 (d) の真空中の破面を細かく観察すると、真空中の破面は比較的平坦で凹凸の角部が丸みを帯びているが、窒素中の破面は真空中に比して凹凸が著しく角張っている。この破面様相の相違は定常応力下における場合と同じで、真空中におけるき裂先端の再溶着を示唆している。このため、真空中の加速率が再溶着を生じない他の環境中に比して小さいものと考えられる。

真空中の加速率が他の環境に比してかなり小さいのは、上記再溶着の他、以下に述べるき裂進展機構の相違にも関係があると思われる。著者の一人ら⁽⁴⁾は多数回の過小応力の繰返しに伴うき裂先端近傍の組織回復とこれに関連したき裂のジグザグ進展機構が顕著なき裂伝ばの加速の一因と考えられることを示している。本実験では湿潤空気中の破面は酸化物の付着により詳細な観察が困難であるため、窒素中の破面をステレオマッピング観察した結果、著者の一人らの報告と同様、き裂のジグザグ進展が見られた。これに対して、真空中の破面は図 8 に示すように平坦で、き裂のジグザグ進展は見られなかった。真空中のき裂進展機構が加速率の大きい窒素中とは異なり、ジグザグ進展機構でないことも加速率の小さいことの一因であると思われる。

3・3・3 破面に堆積した酸化物とき裂伝ばの加速 繰返応力下においては、破面の繰返し接触によりフレッチングを生じ、酸化物がき裂の中で徐々に厚みを増してき裂伝ば挙動に影響を及ぼすことが報告されている⁽¹¹⁾。このようなフレッチング酸化物が過大過小応力下におけるき裂伝ば加速に及ぼす影響については

表 1 酸化物厚さの測定値 S_{ox} と推定値 $S_{\Delta x}$

Environment	$\Delta K_I / \Delta K_{th}$	R_{ac}	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	K_{op} (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{Ieff} (MPa $\sqrt{m}$)	$S_{\Delta x}$ (μm)	S_{ox} (μm)
Moist air	0.93	76	5.8	2.0	3.8	1600	1700
	0.73	54	4.6	2.6	2.0	1400	650
	0.57	16	4.0	2.4	1.6	1100	1500
Nitrogen	0.54	36	1.9	0.0	1.9	0	200

図 8 真空中における過大過小応力下の破面(マッチング写真と立体観察模型図)

図 9 き裂先端の酸化物厚さとき裂先端開口変位の関係

まだ明らかでない。ここでは湿潤空気中および窒素中の2段階過大過小応力試験部分の破面に堆積した酸化物(Fe_2O_3)をオージェ電子分光器中でスパッタリングし、OとFeの量比の変化をスパッタ時間に対して調べて**2、酸化物厚さを決定し、き裂伝ばの加速に及ぼす影響について検討する。

2段階過大過小応力試験部分の破面に堆積した酸化物の厚さ測定結果を表1に示す。また図9にき裂先端における酸化物厚さとき裂開口変位の関係を模式的に示す。酸化物が生成されることにより、き裂先端の母地の厚さは減少する。しかし、鉄は酸化により体積がほぼ2倍になる⁽¹¹⁾ことから、母地の減少量分がき裂面より露出する。これがき裂先端開口変位と等しくなった場合にき裂が閉じる。き裂閉口に寄与する酸化物厚さは、破面に堆積した酸化物厚さ S_{ox} の1/2である。窒素中における K_{op} レベルがほぼ0である(図3参照)ことから、塑性誘起き裂閉口がほとんどないとし、疲労破面に形成された酸化物のみによりき裂閉口が生じるとすれば、次式

$$\Delta(CTOD)_{eff} = \Delta(CTOD) - S_{ox} \cdots \cdots (2)$$

の関係が成り立つ。ここで、 $\Delta(CTOD)$ および $\Delta(CTOD)_{eff}$ は、 ΔK_I および ΔK_{Ieff} によるき裂先端開口変位で、次式

$$\Delta(CTOD) = \frac{\Delta K^2}{2E\sigma_{ys}^*} \cdots \cdots (3)$$

E : ヤング率, σ_{ys}^* : 繰返し降伏応力

の ΔK に ΔK_I , ΔK_{Ieff} を代入して求めた。式(2)による酸化物厚さの計算値 S_{ox}^* を先の表1の中に示している。酸化物厚さの測定値 S_{ox} とき裂開口変位から計算した S_{ox}^* はほぼ同程度の値である。この結果と加速を生じる過小応力の下限界値がき裂開口応力とほぼ等しくなっている事実は、き裂先端に堆積した酸化物がき裂閉口を生じさせ、これにより加速を生じる過小応力の下限界値が上昇したことを示唆するものである。限られた結果ではあるが、き裂伝ばの加速に及ぼす環境効果に関する一つの新しい知見が得られたものと考える。

3.4 過大応力の負荷順序効果 過大応力の負荷順序効果について、Stephens ら⁽¹⁰⁾は過大応力負荷後のき裂伝ば挙動が過大応力の負荷順序によって変わることを示している。すなわち、過大応力負荷後のき裂伝ばに対して、過大応力が引張-圧縮形の場合は圧縮

のみの過大応力と同じ影響を及ぼし、き裂伝ばの遅延をほとんど生じないが、圧縮-引張形の過大応力は引張りのみの過大応力とほぼ同じ影響を及ぼし、き裂伝ばの著しい遅延を生じるとしている。過大過小応力下のき裂伝ばの加速に関しても、圧縮-引張形の過大応力下ではき裂伝ばの遅延が生じ、加速率の小さくなることが考えらる。ここではこの影響を検討する。

前節までの試験は過大応力が引張-圧縮形負荷であり、ここでは比較のため過大応力を圧縮-引張形負荷とした他は前節までの2段階過大過小応力試験と同じ条件にした。なお、試験は窒素中で行った。図10に結果を●印で示す。過小応力の大きさによらず加速率は3・2・1項の結果にほぼ一致した。特に、過小応力の比較的大きい場合には100に近い顕著なき裂伝ばの加速が生じており、き裂伝ばの遅延により加速率が小さくなることはなかった。この理由については明らかでないが、き裂伝ばの加速に影響を及ぼすき裂開口応力 K_{op} が試験中ほぼ0で、引張-圧縮形における場合(図3参照)と同じであったことによるとと思われる。

3.5 多段階過大過小応力下におけるき裂伝ば加速の推定法

前節までは2段階過大過小応力下におけるき裂伝ばの加速特性について述べたが、実際にはより複雑な多段階過大過小応力下におけるき裂伝ばの加速特性について知ることが必要である。この問題に関して、著者の一人ら⁽²⁾は、複雑な多段階応力下におけるき裂伝ば加速を簡単な2段階応力試験結果から推定する方法を報告している。すなわち、過大過小応力下の顕著な加速

表2 多段階過大過小応力下の R_{ac} と推定値 R_{ac}^*

Program	Environment	ΔK_{I1} (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{I2} (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II1} (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II2} (MPa $\sqrt{m}$)	n_{I1}	n_{I2}	n_{II1}	n_{II2}	R_{ac}	R_{ac}^*
I	Nitrogen	3.1	—	17.4	7.3	22	10 ⁵	2	66	79	
II	Moist air	5.2	3.2	16.7	—	22	10 ⁵	2	16	17	
II	Nitrogen	2.8	1.6	17.3	—	22	10 ⁵	2	35	36

図10 過大応力の負荷順序効果

**2 スパッタリング法で厚さを決定するためには測定対象物のスパッタリング時間とスパッタリング深さの関係を知らなければならない。本研究では、測定対象の酸化物が Fe_2O_3 であることから、Fe について上記関係を調べた。

の主要部分が2段応力試験により捉えられ、多段応力試験における加速はその単純な組合せ(線形加算)により得られると仮定し、それにより実用上ほぼ満足な推定値が与えられることを示した。ここでは、上記推定法の妥当性を調べた二、三の追加実験結果について述べる。

試験応力プログラムは、過小応力1段、過大応力2段(プログラムI)、および過小応力2段、過大応力1段(プログラムII)である。プログラムIは窒素中において、プログラムIIは湿潤空気中と窒素中で行った。試験により得られた加速率を R_{ac} 、著者の一人ら⁽²⁾が示した方法による加速率の推定値を R_{ac}^* とし、応力条件とともに表2に示す。 R_{ac} と R_{ac}^* の比の値は0.84~0.97となり、実験データのばらつきの範囲で推定値は実験値に一致しているとみられる。このことは、回転曲げ試験によって得られたき裂伝ば加速の推定法に関する知見が、破壊力学的に、より吟味された条件で行ったこの実験結果と本質的に相違なく、一般性を有することを示唆している。今後もこの線に沿って検討を進めることにより、より合理的な推定法が得られるものと考えている。

4. 結 言

低炭素鋼SS41およびS15Cを用いて破壊力学的に明確な条件を与える中央切欠板試験片により、両振引張圧縮繰返応力下において湿潤空気、乾燥空気、窒素および真空環境中で2段および多段過大過小応力試験を行い、き裂伝ばの加速特性について検討した。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 2段試験において、過小応力 ΔK_I が大きい場合、乾燥空気中、湿潤空気中、窒素中の加速率はほぼ等しく、100倍に近い顕著なき裂伝ばの加速が得られた。過小応力が小さい場合、湿潤空気中の加速率は、乾燥空気中および窒素中の加速率よりも小さかった。

(2) 2段試験において、真空中の加速率は過小応力値の全体にわたって他の環境よりも小さかった。

(3) 2段試験において、乾燥空気中、湿潤空気中、

窒素中の加速率については、き裂閉口を考慮した過小応力の有効応力振幅 ΔK_{Ieff} との関係を1本の曲線で表すことができた。すなわち、加速率は、本実験の範囲において、 ΔK_{Ieff} によって一義的に定まる。真空中の加速率は同じ ΔK_{Ieff} にして他の環境よりも小さい値となった。これは、き裂先端の再溶着によると考えられる。

(4) いずれの環境においても $\Delta K_{Ieff}=0$ で $R_{ac}\approx 1$ となるもののようで、これは、過小応力が小さくてもき裂先端の開口する場合には、き裂伝ばの加速が生じることを意味している。

(5) 湿潤空気中では破面に堆積したフレッティング酸化物の厚さがき裂先端開口変位にほぼ等しくなったときにき裂閉口を生じ、これにより過小応力の有効応力振幅 ΔK_{Ieff} が減少するために加速を生じる過小応力の下限界値が上昇する。

(6) 2段試験において、過大応力の負荷順序はき裂伝ば加速に影響を及ぼさなかった。

(7) 2段過大過小応力下における加速率を線形加算することにより、多段過大過小応力下の加速率を推定することができた。

終わりに、本実験に協力された筑波大学学生・長浜操、川平浩司、高松茂、木谷秀幸(実験当時)の諸氏、並びに、オージェ分光器による測定に際して多大なご援助をいただいた筑波大学物質工学系・川辺光央教授、横山新講師に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 小寺沢・材料, 27-300 (1978), 871.
- (2) 小寺沢・ほか2名, 材料, 31-346 (1982), 685.
- (3) 小寺沢・ほか2名, 材料, 27-292 (1978), 54.
- (4) 片桐・ほか3名, 材料, 32-355 (1983), 400.
- (5) Stephens, R. I., ほか2名, ASTM STP, 595 (1976), 27.
- (6) 納所・小寺沢, 機構論, No. 840-2 (1984-3), 16.
- (7) ASTM committee E-24, ASTM STP, 738 (1978), 340.
- (8) 駒井・ほか2名, 材料, 33-368 (1984), 566.
- (9) 小寺沢・ほか2名, 材料, 28-312 (1979), 868.
- (10) Ranganathan, N., ほか2名, ASTM STP, 948 (1987), 424.
- (11) Suresh, S., ほか2名, Met. trans., A, 12 (1981), 1435.