切欠き底に発生した微小疲労き裂の検出とき裂閉口の測定*

李 宗 炯**, 小 林 英 男**

Detection and Closure Measurement of Short Fatigue Crack
Initiated at Notch Root

by Jong-Hyung LEE and Hideo KOBAYASHI

Short fatigue cracks initiated at the notch root were successfully detected at a fairly high accuracy by the ultrasonic amplitude calibration method for the notched compact specimens of an A508-3 steel. Crack closure measurements by the ultrasonic and back-face strain compliance methods were also performed.

Crack growth characteristics at the notch root are similar to those of delayed retardation caused by a single peak overload. Also, transitional behavior from short cracks to long cracks was interpreted in terms of effective stress intensity ΔK_{eff} . The relation between crack growth rate da/dN and ΔK_{eff} for short cracks shows a fairly good agreement with those for long cracks.

Key Words: Fatigue, Crack Initiation, Crack Growth, Short Crack, Crack Detection, Crack Closure, Notched Specimen, A508-3 Steel

1. 序 言

疲労破壊過程はき裂の発生, 成長および最終破壊の三つの段階からなる。また, き裂の発生, 成長の過程はモード II の成分を含む第 1 段階, モード I の第 2 段階のき裂成長過程としても区別されている⁽¹⁾。疲労き裂成長速度と応力拡大係数の関係を決定する大部分の実験的研究では, Paris 則が成立する第 2 段階, すなわち比較的大きなき裂(大き裂)が対象とされてきた。

しかし, 疲労破壊過程で重要なのは比較的小さなき裂(微小き裂)の発生, 成長である。微小き裂は場合によって, 大き裂で得られたき裂成長則に従わない。微小き裂の定義として, 下記が考えられる。

(1) き裂寸法が塑性域寸法とオーダ的に等しいき裂。

(2) 切欠き底に発生し, 寸法が切欠き曲率半径とオーダ的に等しいき裂。

(3) き裂寸法が材料の組織寸法(結晶粒径など)とオーダ的に等しいき裂。

特に, 切欠き底に発生した微小き裂の検出, およびそ

の成長特性の測定は, 疲労破壊の防止対策上から重要な問題で, 多くの手法が用いられている。しかし, 微小き裂の成長特性に及ぼす切欠きの効果に関しては, 必ずしも明らかにされていない。

そこで, 本研究では上述した定義(2)に着目し, 切欠き試験片を用いて, 切欠き底に発生した微小き裂の検出およびき裂開閉口の測定を超音波法および背面ひずみ除荷弾性コンプライアンス法により試みた。そして, 微小き裂の検出限界と成長特性に及ぼす切欠きの効果について検討を加えた。

2. 材料および実験方法

供試材は原子炉圧力容器用低合金鋼 SFV 3 (A508-3 相当) であり, その化学成分を表 1 に, 力学的性質を表 2 に示す。試験片は図 1 に示すコンパクト形(幅 $W=51.0$ mm, 厚さ $B=12.5$ mm)である。切欠き曲率半径 ρ は 0.1, 0.5 および 1.0 mm の 3 種類に加工し, 620°C で 1 h の真空焼なましした後に試験に供した。

試験は ± 10 tf (98 kN) 電気油圧式疲労試験機を使用し, 応力比 $R=0.06$ の正弦波形, 繰返し速度 10 Hz で行った。き裂進展に伴い荷重範囲 ($\Delta P = P_{max} - P_{min}$) を漸減させ, 初期応力拡大係数範囲 ΔK_i を一定に制

* 昭和 59 年 11 月 29 日 第 929 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 59 年 5 月 31 日。

** 正員, 東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al
0.18	0.22	1.46	0.003	0.005	0.69	0.15	0.05	0.57	<0.01	0.029

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
460	595	31.2	74.4

The diagram illustrates the experimental setup for studying the effect of load on the rate of crack growth. It includes a Load cell, a specimen, a Send/receive Ultrasonic probe, a Strain gauge, two amplifiers (Amp.), a Subtractive circuit, an X-Y1,Y2 recorder, an Ultrasonic flaw detector, and a Multi-pen recorder. The X-Y1,Y2 recorder plots ΔE and ϵ' against ΔE and ϵ' . The Multi-pen recorder plots ϵ against N .

一方、複数試験片について、エコー出力あるいは背

き裂開閉口の測定に際しては、繰返し速度を 0.1 Hz に落として、荷重一サイクルにおけるエコー出力および背面ひずみを連続測定した。

図4からわかるように、 $\rho=0.1$ および 1.0 mm の場合、 $\Delta a_{\max}$ の最も大きいデータは微小表面き裂から貫通き裂へ遷移する直前であり、いずれも $\Delta a_{\max}$ は ρ の値をわずかに超えている。すなわち、微小表面き裂の $\Delta a_{\max}$ がほぼ ρ の値を超えれば、貫通き裂へ遷移すると判断される。後述するように、微小表面き裂の深さ方向への成長速度は、き裂成長に伴い減少し、最小値をとった後に増大する。このために、最初に発生

した微小表面き裂が深さ方向へ緩慢に成長している間に、他の複数の微小表面き裂が発生、成長し、これらが合体に至ると考えられる。したがって、貫通き裂に遷移する $\Delta a_{\max} (= \rho)$ は、同時にき裂成長速度が最小値となる $\Delta a_{\max}$ である。 ρ が小さい場合に微小表面き裂の発生数が多く、形状が扁平であるのに反して、 ρ が大きい場合に微小表面き裂の発生数が少なく、形状がほぼ半円状であることも、同様に理解できる。

UT 法の場合の荷重とエコー出力の関係、BFS 法の場合の荷重と背面ひずみの関係は、いずれもき裂発生以前は良好な直線性を示すが、き裂発生以後は非線形となる。このようなき裂閉口の有無により、き裂発生

の検出が可能である。しかし、その精度は $\rho = 0.1 \text{ mm}$ の場合、 $\Delta a_{\max} = 0.1 \text{ mm}$ 程度であった。したがって、上述した UT 法のエコー出力変化に基づく手法のほうが、検出精度はかなり高い。

3.2 き裂成長特性 $\rho = 0.1 \text{ mm}$, $\Delta K_i = 9.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合について、微小表面き裂から貫通き裂への遷移直後において、試験片両面で測定したき裂長さ増分 $\Delta a = a - a_0$ と繰返し数 N の関係を図 6 に示す。ここで、 a はき裂長さ、 a_0 は切欠き長さである。両面の結果に差異が認められる。図中の黒印はそれぞれ両面における最初の貫通き裂発生点である。他の ΔK_i の結果は省略するが、両面における Δa の差異は、

図 3 エコー出力 E と繰返し数 N の関係

図 5 E と $\Delta a_{\max}$ の関係

図 4 微小表面き裂の形状、寸法

ΔK_i が低い $\Delta K_i = 9.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合が最も顕著である。また、破面様相も他の ΔK_i の場合と異なり、フレッチング酸化物の生成が顕著に認められた。

前述した UT 法および BFS 法に基づき、き裂閉口の有無によりき裂発生を検出した。その結果を、破面上で測定した微小表面き裂の最大深さ Δa_{max} と繰返し数 N の関係として、図 6 に○印で示す。なお、大きい裂の下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{\text{th}}^{(4)}$ に等しい $\Delta K_i = 7.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合、 $N = 10^7$ 回まで表面および切欠き底において、き裂発生あるいは停滞き裂は認められなかった。すなわち、 $\Delta K_i > \Delta K_{\text{th}}$ で微小表面き裂が発生することになる。

$\rho = 0.5 \text{ mm}$ の結果は省略する。 $\rho = 1.0 \text{ mm}$, $\Delta K_i = 15.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合について、 Δa と N の関係を図 7 に示す。図 7 からわかるように、 ρ の増大に伴い両面における Δa の差異は顕著になる。また、 ΔK_i が高いにもかかわらず貫通き裂発生までの繰返し数は増大するが、発生直後の成長速度はかなり大きい。貫通き裂発生直後の両面における Δa の顕著な差異は、 Δa

の増大に伴い消滅してゆく。

図 6 と同様に、図 7 においても貫通き裂発生以前に、すでに切欠き底において微小表面き裂が発生、成長する過程が存在している (○印)。また、 ρ の値に関係なく、いずれの場合にも上述した貫通き裂の成長曲線に、切欠き試験片に特有な変曲点⁽⁵⁾は出現していない。なお、 $\rho = 0.5, 1.0 \text{ mm}$ の場合、 $\Delta K_i = 12.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で $N = 5 \times 10^6$ 回まで、表面および切欠き底において、き裂発生あるいは停滞き裂は認められなかった。

3.3 き裂成長速度 全データについて、貫通き裂の成長速度 da/dN と、き裂長さ増分 Δa の関係を図 8 に示す。ここで、 Δa は両面で測定したき裂長さ増分の平均値である。また、図中の黒塗り印は図 4 の結果および図 6, 7 の○印に対応し、微小表面き裂のデータから得られた da/dN である。図 8 からわかるように、 $\Delta a > 1.0 \text{ mm}$ の場合、 da/dN は Δa に無関係にほぼ一定であり、大きい裂の特性を示している。一方、 $\Delta a < 1.0 \text{ mm}$ の場合、 Δa の減少に伴い da/dN は低下している。すなわち、切欠き底における微小き裂の特性は加速でなく減速である。この原因としては、下記の三つが考えられる。

- (1) ΔK の算出に際して切欠きの効果を見逃していること。
- (2) き裂前縁のわん曲。
- (3) 微小き裂の特性。

上記の(1)に関しては、 $\Delta a > \rho$ であれば切欠きの効果は無視できることが知られている⁽⁶⁾。しかし、特に $\rho = 0.1 \text{ mm}$ の場合、それよりも大きい Δa から da/dN の低下が生じている。(2)に関しては、実際のき裂寸法は貫通き裂とみなした場合よりも大であるから、逆の傾向である。したがって、(3)の効果の寄与

図 6 き裂成長特性 ($\rho = 0.1 \text{ mm}$, $\Delta K_i = 9.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

図 7 き裂成長特性 ($\rho = 1.0 \text{ mm}$, $\Delta K_i = 15.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

図 8 da/dN と Δa の関係

が最も大きいと考えられる。

微小表面き裂のデータを考慮すれば、 da/dN は Δa の増大に伴い減少し、最小値を示した後に増大して、一定値（大きき裂の特性）に落ち着くとみなすことができる。これは理想き裂に一定振幅荷重⁽⁷⁾を、あるいは疲労き裂に単一過大荷重⁽⁸⁾を負荷した後に、き裂成長の遅れ遅延が生じる場合の da/dN の特性と同様である。 $\rho=0.1$ mm の場合、切欠き底における塑性域寸法は 0.05 ($\Delta K_i=9.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$), 0.1 ($\Delta K_i=12.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$), 0.2 ($\Delta K_i=18.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) mm 程度である。 Δa の増大に伴う da/dN の減少は、塑性域内部をき裂が成長する際に生じる塑性誘起き裂閉口と、それを引き金とするフレッチング酸化物誘起き裂閉口に起因していると考えられる。なお、 $\rho=0.5$ および 1.0 mm の場合には、この特性は顕著でなく、上記の(1)の効果の寄与が最も大きいと判断される。

上述したデータを大きき裂に対する da/dN - ΔK 広範囲特性⁽⁴⁾と比較する。代表的なデータを図9に示す。 $\Delta a > 1.0$ mm の場合、 da/dN と ΔK の関係は ρ および ΔK_i にかかわらず、大きき裂に対するそれとよく一致している（白抜き印）。しかし、 $\Delta a < 1.0$ mm の

場合、 da/dN と ΔK の関係は大きき裂に対するその下側に位置する（半黒塗り印）。

以上では $\Delta K (= \Delta K_i)$ の算出に際して切欠きの効果を無視した。したがって、以下では ΔK の算出に検討を加える。厳密に言えば複数表面き裂として取扱う必要があるけれども、簡単のために貫通き裂とみなす。 $\Delta a < \rho$ の場合、 ΔK は式(1)で与えられる。

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW} K_t \sqrt{\pi \Delta a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta a = a - a_0$ はき裂長さ増分、 a はき裂長さ、 a_0 は切欠き長さ、 $f(a/W)$ は通常のコンパクト試験片の補正項であり、応力集中係数 K_t は式(2)で定義される⁽⁹⁾。

$$\left. \begin{aligned} K_t &= \frac{\Delta \sigma_{\max}}{\Delta \sigma_n}, \quad \Delta \sigma_{\max} = \frac{2\Delta K}{\sqrt{\pi \rho}} \\ \Delta \sigma_n &= \frac{\Delta P}{B(W-a_0)} \left(1 + 3 \frac{W+a_0}{W-a_0}\right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta a < 1.0$ mm の場合、代表的なデータを式(1)の ΔK を用いて表示し、図9に黒塗り印で示す。式(1)の ΔK を用いることにより、特に $\rho=0.5$ および 1.0 mm の場合に、大きき裂の特性に近づくことがわかる。

図9 da/dN と ΔK の関係

図10 K_{op}/K_{max} と Δa の関係 (UT 法)

図11 K_{op}/K_{max} と Δa の関係 (BFS 法)

図12 da/dN と ΔK_{eff} の関係

しかし、大きき裂の特性とは完全に一致せず、なお下側に位置する。

3・4 き裂閉閉口 UT法およびBFS法に基づき、き裂閉閉口を測定した。図10および図11に K_{Op}/K_{max} と Δa の関係を示す。ここで、 K_{Op} はき裂閉閉口応力拡大係数、 K_{max} は最大応力拡大係数である。図中の黒塗り印は破面上で測定した微小表面き裂の最大深さ増分 Δa_{max} に関するデータである。 $\rho=0.1\text{ mm}$ の結果に注目すれば、 K_{Op}/K_{max} は微小表面き裂の場合に低く、 Δa の増大に伴い上昇し、最大値を示した後に低下して、一定値に落ち着く。この特性は前述した da/dN のそれと対応している。すなわち、発生直後の微小表面き裂の K_{Op} は低いが、切欠き底に形成されている塑性域内部をき裂が成長する際に生じる塑性誘起き裂閉閉口に起因して K_{Op} が上昇し、き裂成長に遅れ遅延をもたらすと考えられる。き裂が塑性域を超えて成長すれば、この効果は消滅し、大きき裂の成長特性となる。なお、図10および図11を比較すれば、UT法とBFS法の傾向は一致しているが、定量的にはUT法の K_{Op}/K_{max} のほうが高い。

$\rho=0.5\text{ mm}$ および 1.0 mm の場合、 $\rho=0.1\text{ mm}$ の場合よりも K_{Op}/K_{max} は低く、フレッチング酸化物も顕著に認められない。これは ΔK_i の差異に起因していると考えられる。また、 $\rho=0.5\text{ mm}$ および 1.0 mm の場合、 K_{Op}/K_{max} は Δa の増大に伴い単調に上昇し、一定値に落ち着いており、 $\rho=0.1\text{ mm}$ の場合とは異なる。

全データについて、 da/dN とUT法に基づく有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff}=K_{max}-K_{Op}$ の関係を図12に示す。 da/dN と ΔK_{eff} の関係は大きき裂に対するそれと一致しない。特に、 ΔK_i が低いデータは大きき裂に対するその下方に位置している。 $\Delta a<1.0\text{ mm}$ の場合、代表的なデータを式(1)の ΔK を用いて表示し、図12に黒塗り印で示す。黒塗り印はほぼ大きき裂の特性に一致している。すなわち、切欠き底に発生した微小き裂の成長特性(da/dN と ΔK_{eff} の関係)は、 ΔK と

K_{Op} が正確に評価されるならば、大きき裂の成長特性(da/dN と ΔK_{eff} の関係)に一致することが結論される。

4. 結 言

原子炉圧力容器用低合金鋼SFVV 3のコンパクト試験片について、切欠き底に発生した微小き裂の検出およびき裂閉閉口の測定を実施し、微小き裂の発生、成長の特性について検討を加えた。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 切欠き底における微小き裂の発生、成長は超音波法のエコー出力変化により高い精度で検出される。検出された微小表面き裂の深さは $\rho=0.1\text{ mm}$ の場合に 0.04 mm 程度である。

(2) 切欠き底における微小き裂の特性は加速でなく減速である。き裂成長およびき裂閉閉口の特性は、理想き裂に一定振幅荷重を、あるいは疲労き裂に単一過大荷重を負荷した後に、き裂成長の遅れ遅延が生じる場合の特性と同様である。

(3) 微小表面き裂は試験片厚さ中央部で発生し、最大深さ増分がほぼ切欠き曲率半径の寸法を超えれば、貫通き裂へ遷移する。これは上記(2)の特性に関連している。

(4) 切欠き底に発生した微小き裂の応力拡大係数およびき裂閉閉口が正確に評価されるならば、微小き裂の成長特性(da/dN と ΔK_{eff} の関係)は大きき裂のそれに一致する。

文 献

- (1) 小林, 材料科学, 17-6 (昭56), 282.
- (2) 中沢・ほか2名, 材料科学, 20-1 (昭58), 11.
- (3) 菊川・ほか3名, 材料, 25-276 (昭51), 899.
- (4) 小林・ほか3名, 機論, 50-451, A (昭59), 309.
- (5) 小林・ほか2名, 機論, 36-288 (昭45), 1238.
- (6) 西谷・石田, 機論, 39-317 (昭48), 7.
- (7) 小川・ほか2名, 機講論, No. 830-10 (昭58-10), 191.
- (8) 平野・ほか3名, 機論, 46-410, A (昭55), 1040.
- (9) Saanouni, K. and Bathias, C., *Eng. Fract. Mech.*, 16-5 (1982), 695.