低サイクル疲労下の微小き裂の開閉口挙動と
進展特性に及ぼす平均応力の影響*

幡 中 憲 治**, 藤 満 達 朗**, 白 石 進***

Effect of Mean Stress on Closure and Growth of Short Cracks
in Low Cycle Fatigue

Kenji HATANAKA, Tatsuro FUJIMITSU, and Susumu SHIRAISHI

Low cycle fatigue tests were performed under load controlled conditions with tensile mean stress, and short surface crack growth was investigated in association with crack closure. The short crack growth rate was successfully analyzed in terms of the cyclic J integral range ΔJ and the strain intensity factor range ΔK_e , which were estimated by disregarding the crack closure, in a practical sense. The detailed discussion, however, showed that crack closure should be taken into consideration in the estimation of ΔJ even for short cracks since an effective load ratio U is about 0.85 especially in the load controlled test with a load ratio of $R = -1.0$. The crack tip opening displacement range $\Delta \phi_i$ is a more important parameter for controlling short crack growth than ΔJ and ΔK_e . It was noticed that the da/dN vs. $\Delta \phi_i$ plot of a short crack was situated on the higher side of da/dN , compared with that of a through-thickness center crack.

Key Words: Metallic Material, Low Cycle Fatigue, Mean Stress, Short Surface Crack, Crack Closure, Crack Growth, Cyclic J -integral, Strain Intensity Factor

1. 緒 言

近年, 低サイクル疲労下の微小き裂進展速度を評価するパラメータとして繰返し J 積分幅 $\Delta J^{(1)-(7)}$, ひずみ拡大係数幅 $\Delta K_e^{(6)(7)}$ およびき裂先端開口変位幅 $\Delta \phi_i^{(3)(5)}$ の有効性が指摘されている。ところで, 微小き裂の開閉口挙動はき裂進展速度を評価する際の重要な破壊力学的因子であるにもかかわらず, これに関する報告, 特に塑性疲労下のそれは比較的少ないように思われる。

著者らは, 微小き裂の進展速度と貫通寸法き裂のそれとを繰返し J 積分幅 ΔJ およびひずみ拡大係数幅 ΔK_e を用いて整理した結果, 両者は必ずしも一致しないことを報告した⁽⁶⁾⁽⁸⁾。このように, 微小疲労き裂進展特性と貫通寸法き裂のそれとの関連性, 微小疲労き裂のき裂先端開閉口挙動およびそれに及ぼす平均応力の影響など微小疲労き裂に対する弾・塑性破壊力学的因子についてはまだ不明な点が数多く残されているのが現状である。

そこで, 本研究では JIS SNCM 439 鋼について, 平

均応力を伴う低サイクル引張・圧縮疲労試験を実施した。そして, き裂先端開閉口量をレプリカ法を用いて測定し, 平均応力を伴うき裂先端開閉口挙動を詳細に調べた。この結果に基づき, 平均応力を伴う試験条件下の微小疲労き裂進展速度を弾・塑性破壊力学的に評価することを試みた。

2. 供試材料および試験方法

本試験に供した JIS SNCM 439 鋼の化学成分, この材料に施した熱処理条件および熱処理後の材料の静機械的性質がそれぞれ表 1, 2 および表 3 に示されてい

表 1 供試材料の化学成分 (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
SNCM439	0.38	0.27	0.66	0.017	0.015	0.17	0.68	1.65	0.19

表 2 供試材料に施された熱処理の条件

Material	Normalizing & Quenching	Tempering
SNCM 439	Heated at 855°C for 30min → Air cooled and then Heated at 845°C for 30min → Oil quenched	Heated at 635°C for 1 hr → Water quenched

* 昭和 61 年 11 月 25 日 第 941 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 6 月 2 日。

** 正員, 山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台 2557)。

*** 学生員, 山口大学大学院。

る。図1に示した形状および寸法をもつ低サイクル引張・圧縮疲労用試験片が機械加工により作製された。なお、微小疲労き裂の発生位置を限定するために50 μm 程度の深さを有する浅い切欠が試験片平行部の中央に付与された(図1)。また、試験に先立ち、試験片平行部および切欠部はエメリーペーパーで研磨された後、電解研磨された。

低サイクル引張・圧縮疲労試験は、閉ループ形電気油圧式疲労試験機を用い、標点間距離12 mmの間の変位を制御する軸方向変位制御試験あるいは軸荷重を制御する荷重制御試験により実施された。なお、荷重制御試験は、変位制御・低サイクル引張・圧縮疲労試験によりあらかじめ約20 μm 程度の長さを有する疲労き裂を導入した試験片に対し、応力比 R_σ を変化させてなされた。疲労試験中、適宜試験機を停止させ、前述した浅い切欠部からレプリカを採取した。なお、き裂開口量を測定するために、手動により一サイクルの負荷を与え、そのとき得られる最小および最大負荷を含むループプロフィール上の数点でレプリカを採取した。微小疲労き裂長さおよびき裂先端開口変位は、採取されたレプリカ中のき裂を光学顕微鏡により写真撮影することによりなされた。き裂先端開口変位はき裂先端後方5 μm および10 μm の位置で測定された。そして、最大負荷時のき裂先端開口変位 $\phi_{t, \max}$ と最小負荷時のき裂先端開口変位 $\phi_{t, \min}$ との差をき裂先端開口変位幅 $\Delta\phi_t$ とした。なお、き裂開口比 U は、最大および最小負荷荷重を $P_{\max}$ および $P_{\min}$ 、開口点荷重を P_{op} としたとき、次式で表される。

$$U = (P_{\max} - P_{op}) / (P_{\max} - P_{\min}) \quad \cdots \cdots (1)$$

繰返し J 積分幅 ΔJ およびひずみ拡大係数幅 ΔK_ϵ の算出は前報⁽⁶⁾に示した手法によった。なお、微小表

面き裂の形状は半だ円と仮定し、その長軸径 l (試験片の表面におけるき裂長さ) に対する短軸半径 a (き裂深さ) の比は、 $a/l = 0.38^{(6)(9)}$ とした。

(a) 繰返し変形過程中的全ひずみの変化

(b) 繰返し変形過程中的一方向伸びの変化

図2 平均応力を伴う荷重制御低サイクル試験中の繰返し変形挙動

表3 供試材料の静機械的性質

Materials	Yield stress, MPa	Ultimate strength, MPa	Elongation, %	Reduction of area, %	Fracture ductility, %	Hardness Hv (300g)
SNM 439	*866	963	18.3	64.0	102	300

* 0.2% proof stress

図1 試験片の形状および寸法

図3 荷重および変位制御試験下で得られた微小表面き裂進展曲線

3. 試験結果および考察

3.1 繰返し変形挙動 図2に平均応力を伴う荷重制御試験中の繰返し変形挙動を示した。図2(a)よ

(a) 変位制御試験 ($R_\sigma = -1$) (b) 荷重制御試験 ($R_\sigma = -1$) (c) 荷重制御試験 ($R_\sigma = -3/5$)

図4 変位および荷重制御試験条件下におけるき裂先端開口変位 ϕ_t とヒステリシスループの圧縮側頂点を原点として測定したプロフィール(除荷半サイクル)上のひずみ ϵ との関係

り、平均応力が増加するにつれて繰返し変形過程中、ひずみ幅が顕著に増加することがわかる。また、図2(b)は平均応力下の荷重制御試験中、いわゆるラチェット変形が進行することを示している。

3.2 き裂開閉口挙動 図3に荷重および変位制御試験下で得られた微小表面き裂進展曲線を示した。ただし、荷重制御試験における応力幅 $\Delta\sigma$ としては $\Delta\epsilon_t = 0.7 \times 10^{-2}$ およびひずみ比 $R_\epsilon = -1.0$ の変位制御試験中に生じる $N_f/2$ (N_f : 破断繰返し数) の時点での応力幅を採用してある。この応力幅一定のもとで応力比 R_σ を変化させて荷重制御試験を実施した。図3より微小表面き裂の進展速度は応力比の影響を顕著に受けることがわかる。また、図3中、白丸印で示された $R_\epsilon = -1.0$ の変位制御試験下で得られた、ある与えられたき裂長さにおける微小表面き裂進展速度はこれと同じき裂長さにおける、 $R_\sigma = -1.0$ の荷重制御下のそれより遅い傾向にあることも明らかである。ところで、図3で試験片を最終破断に至らしめないき裂 (not

(a) 荷重制御試験

(b) 変位制御試験

図5 荷重および変位制御試験下におけるき裂開口比 U と微小表面き裂長さ l との関係

main crack) の進展速度は繰返し数の増加につれて次第に減少することが示されている。

図 4 にき裂先端開口変位 ϕ_i とヒステリシスループの圧縮側頂点を原点として測定した、除荷半サイクル側のループプロフィール上のひずみ ε との関係を示した。図 4 (a) は変位制御試験下で、また、図 4 (b) および図 4 (c) は荷重制御試験下で得られた ϕ_i - ε 関係である。図 4 (a) および図 4 (b) より、ひずみ比 $R_\varepsilon = -1.0$ の変位制御試験下および $R_\sigma = -1.0$ の荷重制御試験下では $\varepsilon = 0.1 \times 10^{-2}$ 辺りから ϕ_i - ε 関係は ε の減少につれて急に水平に移行する。これは、き裂が閉口したために生じる現象と考えられる。そこで、本研究では、水平線と、これより大きいひずみ域で成立する正のこう配をもつ ϕ_i - ε 関係の外挿線との交点をき裂閉口点と定義した。なお、図 4 (c) より明らかなように、 $R_\sigma = -3/5$ の荷重制御試験下の ϕ_i - ε 関係にはこのような急な折れ曲がりが生じない。これは、この試験条件下では、最小荷重下においてもき裂は閉口しないことを示しているものと考えられる。

図 5 (a) および図 5 (b) に荷重制御および $R_\varepsilon = -1$ の変位制御試験下におけるき裂開口比 U と微小表面き裂長さ l との関係を示した。なお、ここでは先に定義したき裂閉口点荷重をそのままき裂閉口点荷重とした。ところで、一つのき裂に対して複数の ϕ_i - ε 曲線がある場合にはそれらによって得られるき裂閉口荷重の平均値より U を求めた。図 5 (a) によると、 $R_\sigma = -3/5$ 下では $U = 1.0$ であるが $R_\sigma = -2/3$ および $R_\sigma = -1.0$ 下では $U < 1.0$ である。また、図 5 (b) はひずみ比 $R_\varepsilon = -1.0$ の変位制御試験中にもき裂閉口が生じることを示している。

3.3 繰返し J 積分幅 ΔJ およびひずみ拡大係数幅 ΔK_e によるき裂進展速度の評価 図 6 に深さ方向のき裂進展速度 da/dN と繰返し J 積分幅 ΔJ との関係を示した。なお、ここでは ΔJ は、従来、微小き裂進展速度の ΔJ 解析に際して行われてきたように、応力あるいはひずみ繰返しの一サイクル中、き裂は閉口しないと仮定することにより算出されている。図 6 (a) は各種応力比の荷重制御試験下の (da/dN) - ΔJ 関係である。また、図 6 (b) には図 6 (a) の結果に変位制御試験下で得られた (da/dN) - ΔJ 関係を加えてプロットしてある。図 6 中の太線はデータを最小二乗法を用いて直線回帰することにより得られた直線で、次式で与えられる。

$$da/dN = 10^{-3.85} (\Delta J)^{1.26} \dots\dots\dots (2)$$

この太線を中心にして上下に引かれた細線は、その 2 倍および 1/2 倍のき裂進展速度域を示している。また、

矢印およびスラッシュマークは、微小き裂どうしの合体および $50 \mu\text{m}$ 以下の長さ (深さ: $a \leq 50 \times 0.38 = 19 \mu\text{m}$) を有する微小き裂に関するデータを示す。さらに、極太線は中央貫通き裂試験片における $a/W \geq 0.4$ ($2a$: き裂長さ, $2W$: 試験片幅) のき裂長さ域の (da/dN) - ΔJ 関係⁽¹⁰⁾を示す。なお、この貫通き裂に対する ΔJ は Rice ら⁽¹¹⁾により提案された簡便法に基づいて求められている。

図 6 (a) より、巨視的には (da/dN) - ΔJ 関係に応力比の影響はほとんど現れないこと、および $da/dN \leq 10^{-9} \text{ m/cycle}$ の低き裂進展速度域で $\log(da/dN)$ - $\log \Delta J$ は太線から低き裂進展速度側へはずれることがわかる。しかし、詳細には、図 6 (a) で、 $R_\sigma = -1.0$ の荷重制御試験下で得られた $\log(da/dN)$ - $\log \Delta J$ 関係は、これ以外の応力比下で得られたそれより、若干高 ΔJ 側 (低き裂進展速度側) に位置する傾向にある。ところで、図 5 (a) に示したように、 $R_\sigma = -1.0$ の試験条件下ではき裂閉口が生じるのに対し、他の応力比下ではこれがほとんど生じない。応力比 $R_\sigma = -1.0$ 下での、このような $\log(da/dN)$ - $\log \Delta J$ 関係の高 ΔJ 側への移動は、後述するようにこの試験条件下において生ずるき裂閉口を無視して ΔJ を算出したことに起因するものと思われる。なお、 $R_\sigma = -3/5$ および $R_\sigma = -1/2$ の荷重制御試験下では、図 2 (b) に示したようになりに顕著なラチェット変形が生じている。図 6 (a) は $\log(da/dN)$ - $\log \Delta J$ 関係にはこのようなラチェット変形の影響がほとんど現れないことを示している。ところで、図 6 中〔〕印で囲んだデータは、図 3 の、試験片を最終破断に至らしめないき裂の、〔〕で囲んだデータに対応している。これらのデータの (da/dN) - ΔJ 関係は他のそれらより大きく低き裂進展速度側にはずれる。

図 6 (b) によると、荷重制御下で得られた $\log(da/dN)$ - $\log \Delta J$ 関係は変位制御下で得られたもののほぼ延長線上に乗っている。また、微小表面き裂の $\log(da/dN)$ - $\log \Delta J$ 関係と、中央貫通き裂のそれとの比較より、両者がほぼ同じ直線によって表現されることがわかる。なお、先に指摘したように、S 35 C 焼ならし材では $da/dN \leq 10^{-6} \text{ m/cycle}$ のき裂進展速度域で前者は後者に比して高き裂進展速度側にはずれる⁽⁸⁾。微小き裂と貫通大寸法き裂の進展特性におけるこのような相違は材料の強度・延性レベルの相違に起因しているものと思われるが、その詳細は現時点では明らかではない。

図 7 (a) は、図 6 (b) から、き裂開閉口挙動を測定したデータのみを抽出することにより得られた $(da/$

da/dN - ΔJ 関係を示している。また、図 7 (b) は、図 7 (a) に示したき裂進展速度 da/dN に関するデータをき裂開口点以上の応力-ひずみヒステリシスループ面積から得られた J 積分幅、 ΔJ_{eff} に関して整理した結果を示している。図 7 中の太線、細線およびスラッシュマークは図 6 中のものと同じことを意味している。図 7 (a) および図 7 (b) の太線はそれぞれ次式で与えられる。

$$da/dN = 10^{-3.94} (\Delta J)^{1.25} \dots\dots\dots (3)$$

$$da/dN = 10^{-3.96} (\Delta J_{eff})^{1.23} \dots\dots\dots (4)$$

図 7 (a) および図 7 (b) の比較は次のことを示している。 $R_\sigma = -1.0$ および $R_\sigma = -2/3$ 下で得られた (da/dN) - ΔJ_{eff} 関係は (da/dN) - ΔJ 関係に比して低 ΔJ 側へ移動する。その移動の程度は $R_\sigma = -1.0$ 下において $R_\sigma = -2/3$ 下におけるより、また、低 ΔJ 域において高 ΔJ 域におけるより顕著である。これは、 $R_\sigma = -1.0$ 下において $R_\sigma = -2/3$ 下におけるよりき裂開口比 U が小さいこと〔図 5 (a)〕および高 ΔJ 域では低 ΔJ 域

(a) 荷重制御試験

(a) da/dN - ΔJ 関係

(a) 荷重制御試験

(b) 荷重および変位制御試験

(b) da/dN - ΔJ_{eff} 関係

(b) 荷重および変位制御試験

図 6 微小表面き裂進展速度 da/dN と繰返し J 積分幅 ΔJ との関係図 7 微小表面き裂進展速度と ΔJ および ΔJ_{eff} との関係図 8 微小表面き裂進展速度とひずみ拡大係数幅 ΔK_ϵ との関係

におけるより試験片に生じる塑性変形量が大きく、したがって、き裂が閉じ難くなることに起因しているものと考えられる。このことは、き裂閉口を考慮すると、図6において認められる $(da/dN)-\Delta J$ 関係の、低 ΔJ 域における低き裂進展速度側への折れ曲がり点がさらに低 ΔJ 側へ移動し、 $\log(da/dN)-\log \Delta J$ 関係の直線成立域が拡大することを示唆している。なお、 $R_\sigma = -3/5$ 下および変位制御下の $(da/dN)-\Delta J_{eff}$ 関係は $(da/dN)-\Delta J$ 関係とほぼ一致している。これは、これらの試験条件下では $U < 1.0$ ではあるものの、その値はほとんど1.0に近い〔図5(a)および(b)〕ことに起因している。このように、厳密には塑性疲労下の微小き裂の問題に対してもき裂の開閉口挙動を考慮する必要がある。しかし、図7(a)および図7(b)の比較より明らかなように、 $(da/dN)-\Delta J$ 関係と $(da/dN)-\Delta J_{eff}$ 関係との間の相違は実用的見地から問題になるほどの大きさのものではない。

図8にき裂進展速度 da/dN とひずみ拡大係数 ΔK_e との関係を示した。図8(a)より明らかなように、巨視的には、荷重制御試験下で得られた $(da/dN)-\Delta K_e$ 関係には、先述した $(da/dN)-\Delta J$ 関係同様、応力比の影響はほとんど現れない。なお、図8(a)中、他のデータより大きく低き裂進展速度側にはずれている〔〕で囲んだデータは図3および図6(a)中、〔〕で囲んだ、試験片を直接破断に至らしめないき裂に関するデータに対応している。また、図8(b)は荷重制御

図9 荷重および変位制御試験下における微小表面き裂進展速度 da/dN とき裂先端開口変位幅 $\Delta\Phi_t$ との関係

試験および変位制御試験を問わず、両試験下で得られた $\log(da/dN)-\log \Delta K_e$ 関係は共通の直線(次式)により表現されることを示している。

$$da/dN = 10^{1.79} (\Delta K_e)^{2.28} \dots \dots \dots (5)$$

3・4 き裂先端開口変位幅 $\Delta\Phi_t$ によるき裂進展速度の評価

図9に荷重および変位制御試験下におけるき裂進展速度 da/dN とき裂先端開口変位幅 $\Delta\Phi_t$ との関係を示した。図9中、太線、細線、矢印およびスラッシュマークの意味はこれまでに示してきたとおりである。ばらつきはかなり大きい、 $(da/dN)-\Delta\Phi_t$ 関係は荷重制御試験下において応力比の影響をほとんど受けず、次式で表現される。

$$da/dN = 10^{2.54} (\Delta\Phi_t)^{1.71} \dots \dots \dots (6)$$

そして、この関係には、 $R_\sigma = -1.0$ に対する $(da/dN)-\Delta J$ および $(da/dN)-\Delta K_e$ 関係において生じたように、整理結果が低き裂進展速度側にはずれる傾向も認められない。

ところで、図6(a)および図8(a)において〔〕で囲んだデータが極端に低き裂進展速度側にはずれている。これは先にも述べたように、試験片を直接破断に導かないき裂に関するものである(図3)。同じデータが図9で〔〕を付されている。図9において明らかなように $(da/dN)-\Delta\Phi_t$ 関係においては、このデータは他の、試験片を直接破断に導くき裂に関するデータ群中にうまく収まっている。また、荷重あるいは変位制御方法を問わず、 $\log(da/dN)-\log \Delta\Phi_t$ 関係は、全整理結果に対し、共通の1本の直線により表現できる。このように、局所力学量である $\Delta\Phi_t$ は、微小き裂進展速度を律する、より直接的なパラメータであると考えられる。

図9によると、微小き裂に関する $(da/dN)-\Delta\Phi_t$ 関係が中央貫通き裂に関するそれより高き裂進展速度側

図10 繰返し J 積分幅 ΔJ と微小表面き裂先端開口変位幅 $\Delta\Phi_t$ との関係

に位置する。これは微小表面き裂の特徴を表すものと考えられる。しかし、その詳細は、現時点では不明である。

今、静止き裂を仮定し、また、いわゆる H. R. R. 特異場が微小き裂に対しても成立するとする。また、これらのことが微小疲労き裂に対しても成立すると仮定すると、一般に、

$$\Delta\phi_i = A(\Delta J)^q$$

なる関係を導くことができる⁽³⁾。

図 10 に $\Delta\phi_i$ と ΔJ との間の関係をプロットした結果を示す。太い実線はこの整理結果を最小二乗法を用いて直線回帰することにより得られたもので、次式で与えられる。

$$\Delta\phi_i = 10^{-3.94}(\Delta J)^{0.687} \dots\dots\dots (7)$$

なお、極太線は前報⁽¹⁰⁾で与えられた中央貫通試験片の $\Delta\phi_i$ - ΔJ 関係である。両者の比較より、後者は前者より高 $\Delta\phi_i$ 側に位置するが、 $\log \Delta\phi_i$ - $\log \Delta J$ 関係のこの配は両者においてほぼ等しいことがわかる。局所力学量である $\Delta\phi_i$ がき裂進展速度を律する最も直接的なパラメータであると考え、図 6 に示した (da/dN) - ΔJ 関係ではなく、図 9 に示した (da/dN) - $\Delta\phi_i$ 関係が微小疲労き裂進展特性と寸法貫通き裂進展特性との本質的相違を表現しているものと考えられる。なお、試験片を直接破断に導かないき裂に関する $\Delta\phi_i$ - ΔJ 関係は図 3、6 および図 8 の〔 〕で囲まれたデータと同じものが、〔 〕で示されている。このデータは他のデータより、低 $\Delta\phi_i$ 側に大きくはずれることを付言しておく。

4. 結 言

機械構造用合金鋼 SNCM 439 調質材について、平均応力を伴う試験条件下で低サイクル引張・圧縮疲労試験を実施した。得られた主な結果は次のようにとりまとめられる。

(1) 変位および荷重制御試験下で、ひずみ比 R_ϵ および応力比 R_σ がともに -1.0 の場合には、明確なき裂閉口点が認められた。応力比の増加につれてき裂

閉口比 U は次第に増加し、 $R_\sigma = -3/5$ では $U=1.0$ となる。

(2) 巨視的には、き裂進展速度 da/dN と繰返し J 積分幅 ΔJ およびひずみ拡大係数幅 ΔK_ϵ との間には、 $da/dN \leq 10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/cycle のき裂進展速度域を除いて、両対数グラフ上で直線関係が成立する。また、これらの関係には応力比の影響はほとんど現れない。しかし、詳細には、き裂閉口を生じる $R_\sigma = -1.0$ の荷重制御試験下の (da/dN) - ΔJ および (da/dN) - ΔK_ϵ 関係は他の応力比下のそれらより高 ΔJ あるいは高 ΔK_ϵ 側にはずれる傾向を有する。き裂閉口を考慮すれば、両者の差はほとんど消失する。

(3) 試験片を直接破断に導かない微小き裂の (da/dN) - ΔJ および (da/dN) - ΔK_ϵ 関係は、大きく低き裂進展速度側にはずれる。一方、き裂先端開口変位幅 $\Delta\phi_i$ は荷重制御・変位制御試験下、進展性・非進展性のき裂および応力比の相違を問わず、き裂進展速度を評価するための有効なパラメータとなり得る。

(4) 微小表面き裂と中央貫通き裂における (da/dN) - $\Delta\phi_i$ 関係には明確な差異が認められ、前者は後者より高き裂進展速度側に位置する。これは微小き裂進展抵抗の特徴を示しているものと考えられる。

文 献

- (1) Dowling, N. E., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, No. 601 (1976), 19.
- (2) Dowling, N. E., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, No. 637 (1977), 97.
- (3) Tanaka, K., Hoshida, T. and Sakai, N., *Eng. Fract. Mech.*, 19-5 (1984), 805.
- (4) 星出・田中・仲田, 材料, 31-345 (昭 57), 566.
- (5) 星出・田中・酒井・仲田・森田, 材料, 33-367 (昭 59), 461.
- (6) 幡中・藤満・渡辺, 機論, 51-463, A (昭 60), 790.
- (7) 幡中・藤満・渡辺, 機論, 52-475, A (昭 61), 579.
- (8) 藤満・幡中, 機論, 52-480, A (昭 61), 1839.
- (9) 幡中・藤満・渡辺, 機論, 50-452, A (昭 59), 737.
- (10) 幡中・藤満・市山, 機械学会第 23 回シンポジウム=破壊および破壊力学講演論文集, No. 860-3 (昭 61), 213.
- (11) Rice, J. R., Paris, P. C. and Merkle, J. C. *ASTM Spec. Tech. Publ.*, No. 536 (1973), 231.

討 論

〔質問〕 中 井 善 一 (大阪大学工学部)

(1) $a/l=0.38$ というのは、回転曲げに対して得られた結果であると思う。引張圧縮の場合、この値は異なるのではないか。

(2) S35C とは異なり、SNCM439 鋼では微小き

裂と長いき裂の $\log(da/dN) - \log(\Delta J)$ が低伝ば速度域まで一致すると述べておられる。しかし、文献(10)の長いき裂の実験結果は、 $da/dN > 5 \times 10^{-8}$ に限られており、これ以下の伝ば速度域まで $da/dN - \Delta J$ 関係にべき乗則が成立する保証はない。その後、長いき裂の

実験を追加されたか。

(3) $da/dN-\Delta\phi_i$ 関係が微小き裂と長いき裂で異なることより、両者の伝ば特性には本質的な相違があると考えておられるようであるが、もしそうであれば微小き裂と長いき裂における $da/dN-\Delta J$, ΔJ_{eff} , または ΔK_e 関係の一致は偶然と考えるのか。なお、この場合も長いき裂の実験点は、 $da/dN > 5 \times 10^{-8}$ m/cycle に対するものであり、微小き裂の実験範囲と重なっている部分は少ないようである。両者の実験点のみを比較すると、本質的な相違があるとは考えられないのではないか。

〔回答〕 (1) き裂深さ a と表面き裂長さ l との関係を図 1 に示す。実線および○印はそれぞれ回転曲げおよび引張圧縮試験下で得られた $a-l$ 関係を示す。この図より、○印は実線によくのっており、両試験条件下の $a-l$ 関係はほぼ一致していることがわかる。このように、回転曲げ試験下の $a-l$ 関係に直線則が成立する範囲内 ($l \leq 5 \times 10^{-3}$ m) では引張圧縮試験下においてもそれが成り立つと思われる。したがって、ご指摘のような問題は生じないと考えている。

(2) Dowling⁽¹⁾、星出ら^(付1)および著者ら⁽⁷⁾はそれぞれ、 2.5×10^{-9} , 5×10^{-9} および 4×10^{-9} m/cycle 以上のき裂進展速度域で $da/dN-\Delta J$ 関係にべき乗則が成立することを確認している。したがって、SNCM439 鋼では微小き裂と長いき裂の $\log(da/dN)-\log(\Delta J)$ 関係が $da/dN \cong 10^{-9}$ m/cycle あたりの低き裂進展速度域まで一致するという記述は当を得ているものと考えている。

(3) 大寸法き裂の $da/dN-\Delta J$ 関係のべき乗則成立範囲から判断すると $da/dN < 5 \times 10^{-8}$ m/cycle のき裂進展速度域においてもこのべき乗則は拡張できるものと考えている。また、低き裂進展速度域の $\log(da/dN)-\log(\Delta J)$ 関係の形から判断すると $\log(da/dN)-$

付図 1 き裂深さ a と表面き裂長さ l との関係

$\log(\Delta\phi_i)$ 関係の低き裂進展速度域におけるべき乗則からの逸脱は低き裂進展速度側に生じると考えられる。これらのことより図 9 において大寸法き裂の $da/dN-\Delta\phi_i$ 関係が微小き裂のそれより全般的に低き裂進展速度側に位置すると判断することは当を得ているものと考えられる。局所力学量である $\Delta\phi_i$ がき裂進展速度を律するより直接的なパラメータと考えられることより図 9 より微小き裂の特徴を指摘することは妥当であると考えている。

なお、 $da/dN-\Delta J$ 関係は図 9 の $da/dN-\Delta\phi_i$ 関係と図 10 の $\Delta\phi_i-\Delta J$ 関係を組合せることによって導かれる。その結果、微小き裂の $da/dN-\Delta J$ 関係は大寸法き裂のそれとほぼ一致することが示されている。なお、大寸法き裂と微小き裂の $da/dN-\Delta J$, $da/dN-\Delta K_e$ 関係の相対関係には材質依存性が生じることは本論文において指摘しているところである。これについては微小き裂と大寸法き裂の進展機構の検討も含めたより詳細な検討が必要であると思われる。

(付 1) 星出・ほか 2 名, 材料, 31-345 (昭 57), 566.