曲げ・ねじり組合せ二軸応力下のモード I 表面き裂の進展に及ぼす板厚の影響*

北岡 征一郎^{*1}, 御厨 照明^{*1}, 尾崎 裕二^{*2}

The Effect of Plate Thickness on the Propagation Behaviour of Mode I Surface Crack under Biaxial Stresses by the Combination of Plane Bending and Cyclic Torsion

Seiichiro KITAOKA, Teruaki MIKURIYA and Yuji OZAKI

The effect of plate thickness on the propagation rate of a mode I surface crack under biaxial stresses by the simultaneous action of plane bending and cyclic torsion was examined, and the crack opening displacement COD was measured by magnifying a scanning electron micrograph 15 000 times. The relationship between the propagation rate da/dN and the stress intensity factor range ΔK depends on both the biaxial stress ratio C and the maximum principal stress amplitude σ_1 . COD measured under the same conditions of σ_1 and crack length increases with the decrease in C . A unique relationship is obtained between da/dN and crack tip opening displacement CTOD, irrespective of C and σ_1 . Thus, it can be concluded that the main factor which controls da/dN is CTOD.

Key Words: Fatigue, Crack Propagation, Biaxial Stress, Crack Tip Opening Displacement, Mode I Surface Crack, Stress Intensity Factor

1. 緒 言

フェイル・セーフあるいは損傷許容設計による機械・構造物に発生する疲労き裂は、その進展の初期段階においてモード I 表面き裂となることが多く、曲げとねじりが同時に作用するような二軸応力状態でき裂の進展・成長が生ずる場合も頻りに生ずる⁽¹⁾。

この観点から、前報⁽²⁾では上述の負荷状態にある表面き裂の進展を支配する因子に検討を加えることを目的とした。すなわち、曲げ・ねじり組合せ荷重を受ける平板のモード I 表面き裂を対象とし、種々の二軸応力比 C ($=$ 第2主応力 σ_2 /第1主応力 σ_1)に対するき裂進展速度を求め、き裂先端開口変位 (CTOD)、き裂先端開口応力 (CTOS) さらにはき裂先端部すべり領域などと C の関連を調査した。その結果、き裂断面のアスペクト比は C によらず等しくなること；同一の ΔK に対するき裂進展速度 da/dN は C の低下につれて大きくなり、この傾向は ΔK_{err} を用いても改善されないこと； C が異なれば ΔK_{err} が等しくても CTOD は同一とはならず、 C が低い場合には CTOD は大きくなることなどが明らかとなった。

これらの諸結果は、曲げ・ねじりの組合せ負荷を受ける平板中の二軸応力状態となるモード I 表面き裂の進展を規定する因子としては ΔK あるいは ΔK_{err} よりも COD あるいは CTOD がより有効となることを示唆している。しかしながら、 da/dN と COD の関係あるいは da/dN と CTOD の関係およびこれに及ぼす C の影響を定量的に評価するには至っていない。これは、試験機の構造上、 C が $-0.5 \leq C \leq 0$ に限定され、しかも異なる C に対しては異なるき裂を使用して光学顕微鏡により COD を測定したことによる。すなわち、 C のわずかな相違による μm オーダの COD の差異を検出するには測定精度の点で必ずしも十分でなく、しかもき裂の相違による微視的形狀の差異が COD に影響を及ぼす可能性があることによる。

ところで、前報では特定の板厚 ($h = 3 \text{ mm}$) に対して調査を実施したが、上述の組合せ負荷状態では、板厚の相違によって板内の応力勾配に差異が生じ、これはき裂断面形状やき裂の進展に影響を及ぼすものと考えられる。したがって、このような負荷を受ける場合には、き裂の進展挙動に及ぼす板厚の効果に対する検討が不可欠といえる。

そこで、本報告では試験片の板厚を2種類に選ぶとともに、予き裂の作製方法を変えて、 $C = -1$ の場合に対する進展速度の調査と同一のき裂を対象として異な

* 平成3年3月15日 東海支部第40期総会講演会において講演、原稿受付 平成3年9月19日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中区不老町)。

^{*2} 准員、豊田自動織機(株) (〒448 刈谷市豊田町2-1)。

るCに対するCODの測定を可能にすることにより、き裂進展に及ぼす板厚の効果と曲げ・ねじりの組合せ二軸応力下のモードI表面き裂の進展を支配する因子にさらに詳細な検討を加えることとした。

2. 実験方法

2・1 試験片および試験機 本実験に使用した試験片素材は、前報と同一の炭素工具鋼SK-5、板厚6 mmのみがき特殊帯板である。旋削加工により、板厚を $h=2.5$ mmおよび3.5 mmとした後、図1 (a)、(b)に示すような中央部に所定の切欠きを有する試験片を作製した。試験片に対する研磨条件および熱処理条件は前報と同一である。

なお、試験機には MTS 材料試験装置 (30 Hz) および
シェンク式疲労試験機 (33 Hz) を使用した。

2・2 実験方法 曲げ・ねじり試験装置⁽²⁾ を
 シェンク式疲労試験機に装着し、試験機のトルク棒と
 試験片(a)の長手方向のなす角度 ψ を 90° ($C=0$)
 および 30° ($C=-0.5$)に設定し、前報と同様の手順
 により表面き裂を有するき裂試験片を作製した〔き裂
 試験片(a)〕。また、図1(b)の試験片に対し、MTS 材
 料試験装置により応力比 $R=-1$ の4点曲げ試験を実施
 し、所定の表面長さを有する表面き裂を作製した〔き
 裂試験片(b)〕。さらに、このき裂試験片を図1(c)に
 示す θ を $\theta \cong 45^\circ$ にとって破線のように切断し〔き裂
 試験片(c)〕、これらのき裂試験片に真空焼なましを施
 した。

次いで、繰返し最大主応力 σ_1 を数種類に設定し、き裂試験片(a)に対しては予き製作製時と同一の ψ で、き裂試験片(c)に対しては $\psi = 0^\circ$ ($C = -1$)でき裂進展曲線を求めた。 $C = -1$ に対しては、通常交差き裂が発生するが、上述の方法を採用することにより、他の C と同一形状のき裂を取扱うことができる。ここに、疲労試験はすべて両振り(応力比 $R = -1$)で実施した。

COD の調査は、まず前報と同様にき裂試験片 (a) に対してき裂進展の種々の段階で実施した。また、同一き裂の異なる C に対する COD を調査するため、まずき裂試験片 (b) に対し無負荷の状態、次いで 4 点曲げにより $C=0$ で静的負荷を与え、き裂先端部近傍の状態をレプリカに転写した。さらに、このき裂試験片を所定の二軸応力比に対してき裂に垂直に σ_1 が作用するよう、図 1 (c) の θ を $\theta=45^\circ$ あるいは $\theta=55^\circ$ にとってき裂試験片 (c) に加工し、曲げ・ねじり試験装置に装着してそれぞれ $\psi=0^\circ$ および $\psi=30^\circ$ に対して同様にレプリカを採取した。COD の測定はこれら

のレプリカを走査型電子顕微鏡により3000倍に拡大して撮影し、さらに拡大投影器により最終倍率を15000倍とし、き裂を挟んで存在する特定のセメントイト粒子間の距離の変化を求めることにより実施した。

3. 実験結果および考察

3・1 き裂の進展方向および断面形状 試験片の長手方向の軸を挟んで、き裂の発生方向および最大主応力の作用方向の振れ角をそれぞれ θ および θ とし、各Cにおいて得られた θ 、 θ および $\theta + \theta$ の値を表1に示す。ここに、各板厚に対し、 θ は3枚の試験片により得られた値の平均値である。いずれの板厚およびCにおいても $\theta + \theta$ の値はほぼ 90° となり、き裂は材料表面でモードIとなる。

図2に種々の二軸応力比Cにおいて得られた試験片

(a) き裂試験片(a)

(b) き裂試験片 (b)

(c) き裂試験片(c)

図1 試験片の形状・寸法

表面におけるき裂長さの半長 a とき裂深さ b の関係を示す。なお、図中の破線は前報の $h = 3 \text{ mm}$ の結果である。き裂表面長さ a とアスペクト比の関係は試験片の板厚に依存するが、前報の $h = 3 \text{ mm}$ の場合と同様に、 h を特定すれば C は a とアスペクト比の関数に影響を及ぼさず、 a が等しい場合には、 C の値にかかわらずその断面形状は同一と見なすことができる。また、き裂の横断面はいずれの C においても試験片表面に垂直であることが確認できた。

表 1 および上述の結果より、本材料に発生するき裂は、板厚および二軸応力比の値の如何にかかわらず、き裂面に垂直に σ_1 、平行に σ_2 が作用するモード I の変位様式になっているとみなすことができる。

3・2 き裂進展速度に及ぼす二軸応力および板厚の影響 図 3 に、き裂進展曲線の測定例をき裂長さの半長 a と繰返し数 N の関係で示す。いずれの場合も C が低下する程、同一の繰返し数 N におけるき裂進展量 Δa は大きくなり、この傾向は板厚の増加につれて顕著となる。

得られたき裂進展曲線を、き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK で整理すれば図 4 となる。ここに、

表 1 二軸応力比 C と $\theta + \theta_0$ 。

C	h = 2.5 mm		h = 3.5 mm	
	0	-0.5	0	-0.5
θ°	90	54.7	90	55.0
θ_0°	0	34.0	0	34.5
$\theta + \theta_0^\circ$	90	88.7	90	89.5

ΔK は次式によった。

$$\Delta K = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

応力幅 $\Delta \sigma$ は本実験条件 ($R = -1$) に対して $\Delta \sigma = \sigma_1$ である。

なお、 $C \neq 0$ の場合には、板の内部方向への σ_1 の分布は $C = 0$ の直線分布からはずれ、 C の低下に伴って凸形の曲線分布の傾向が顕著となる⁽³⁾。しかしながら、図 2 のき裂断面形状がこのような応力勾配の相違の影響を受けないことから、補正係数 F に及ぼす C の影響は軽微であるとみなし、 $C \neq 0$ の場合に対しても Newman らの計算式⁽⁴⁾ を利用した。

C と σ_1 を特定すれば、進展速度は Paris 則

$$da/dN = D (\Delta K)^n \quad (2)$$

によって整理できるが、 C の低下につれて h の相違が

図 2 き裂深さとき裂長さの関係

(a) $\sigma_1 = 150 \text{ MPa}$

(b) $\sigma_1 = 170 \text{ MPa}$

(c) $\sigma_1 = 190 \text{ MPa}$

図 3 き裂進展曲線

$da/dN - \Delta K$ 関係に及ぼす影響が顕著となり、同一の ΔK に対する da/dN の値は板厚の厚い場合のほうが大きくなる。また、 C の差異が $da/dN - \Delta K$ 関係に及ぼす影響は σ_1 が高くなる程顕著となる。これは、降伏応力に対する σ_1 の割合が大きくなるにつれ、二軸応力状態の相違がき裂先端塑性域寸法の差異に及ぼす影響が顕著となる⁽¹⁵⁾ ことによると考えられる。

き裂断面形状を図2に基づいて次式で近似する。

$$b = A a^B \text{ ----- (3)}$$

式(3)を用いて各繰返し数ごとの a に対する b を求め、き裂底の F^* 値をNewmanらの計算式により決定し、材料の深さ方向へのき裂進展速度 db/dN とその位

置における ΔK^* の関係を調査した(図5)。第1主応力 σ_1 や C が $db/dN - \Delta K^*$ 関係に及ぼす影響は、試験片表面におけるよりもさらに顕著となり、 σ_1 の上昇と C の低下は同一の ΔK^* に対する db/dN を著しく増加させる。すなわち、 σ_1 や C が異なれば、試験片表面や内部方向へのき裂進展速度を同一のParis則によって整理することは困難といえる。

3・3 き裂開口変位に及ぼす二軸応力比 C の影響

前報では、複数のき裂を対象として CTOD と C の関係を光学顕微鏡写真に基づいて調査した。この結果、同一の σ_1 における CTOD は C が低い場合のほうが大きくなる傾向が認められ、 da/dN と CTOD の相関は

図4 da/dN と ΔK の関係

図5 db/dN と ΔK^* の関係

da/dN と ΔK あるいは da/dN と ΔK_{err} よりも大きくなることが予測された。しかしながら、分解能の制約上、 da/dN - CTOD 関係に及ぼす C の効果を定量的に評価するには至っていない。

そこで、本報告では da/dN に及ぼす C の影響が顕著な板厚 $h = 3.5$ mm を対象としてき裂先端近傍のき裂開口状態を SEM による撮影に基づいて測定した。

図6は各 C に対して別個のき裂を対象とし、それぞれのき裂進展過程における COD と き裂先端からの距離 r をき裂の半長 a で無次元化した $\sqrt{r/a}$ の関係を調査

した結果の一例である。COD と $\sqrt{r/a}$ の間には

$$COD = M\sqrt{r/a} + N \quad (M, N \text{ は定数})$$

----- (4)

の関係が成立し、 a の増加につれて M, N は大きくなる傾向を示す。また、 σ_1 と a が同一でも C の低い場合のほうが M, N は大きくなる。これは、 C の低下は同一の K に対する COD を増加させることを示唆している。

図7は、同一のき裂を対象とし、異なる C に対して COD を測定した結果の一例である。この場合には、長

図6 き裂開口変位COD と $\sqrt{r/a}$ の関係

図7 同一き裂のCOD - $\sqrt{r/a}$ 関係に及ぼす C の影響

図8 CTOD/ F^2 と a の関係

図9 da/dN と CTOD の関係

さが等しくてもき裂が相違することにより生ずる可能性のある COD の差異は起こり得ない。したがって、図に認められる COD の差異は C の相違によって生じたものといえる。この傾向は $C=0$ と $C=-0.5$ の間でも明確に認められた。これらの結果より、C の低下は COD を増加させることが明らかであり、これは σ_1 が等しくても CTOD が C により異なることを示唆している。

そこで、き裂進展過程において得られた各き裂の COD の測定点 (図 6) を外挿し、 $\sqrt{r/a} = 0$ の COD を CTOD とみなし、得られた CTOD に基づいて $CTOD/F^2$ と a の関係を求めれば、図 8 となる。図より、C および σ_1 を特定すれば、 $CTOD/F^2$ と a の間にはほぼ線形関係が成立することがわかる。材料の降伏応力を σ_{ys} とし、降伏条件に Mises の基準が適用できるとすれば、CTOD は

$$CTOD \cong \lambda K^2 \frac{1}{\sigma_{ys} + (2\sqrt{2}/3\sqrt{3})(\sigma_2 - \sigma_1)} \\ = \lambda^* \frac{\sigma_1^2 a}{\sigma_{ys} + \gamma(\sigma_2 - \sigma_1)} \quad (5)$$

となり⁽⁶⁾、図 8 の結果はこれを反映していることによるものと考えられ、COD が十分な精度で測定できたことを裏付けている。

この結果に基づいて、図 4 の da/dN と ΔK の関係を da/dN と CTOD で整理すれば、図 9 となる。 ΔK に代わり ΔK_{err} を採用し、 da/dN を ΔK_{err} により整理しても da/dN には明確な二軸応力比依存性が認められたが⁽²⁾、き裂進展時におけるき裂先端開口変位 CTOD を用いれば、 da/dN と CTOD の間には二軸応力比 C やき裂進展時に作用する第 1 主応力 σ_1 の値の如何にかかわらず、ほぼ固有の関係が成立することがわかる。

4. 結 論

平面曲げと繰返しねじりの組合せによって二軸応力状態となる炭素工具鋼製平板のモード I 表面き裂を対象とし、種々の板厚および二軸応力比 C の下でき裂進展速度を求め、き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅

ΔK の関連を調査するとともに、き裂開口変位 COD を走査型電子顕微鏡撮影により詳細に計測し、 da/dN とき裂先端開口変位 CTOD の関連およびこれに及ぼす C の効果に検討を加えた。

得られた結果を要約すれば、以下のようになる。

- (1) き裂断面形状は板厚に依存するが、板厚を特定すれば、C の相違は断面形状に影響を及ぼさない。
- (2) 板厚の相違が $da/dN - \Delta K$ 関係に及ぼす影響は C の低下につれて顕著となり、同一の ΔK に対する da/dN の値は板厚が大きい場合のほうが高くなる。
- (3) 材料表面におけるき裂進展速度 da/dN および最深部における内部方向への進展速度 db/dN とその点における ΔK の関係には、C および最大主応力振幅 $\Delta \sigma_1$ が影響し、 da/dN (db/dN) と ΔK の関係は同一の Paris 則により統一的に整理できない。

- (4) き裂開口変位 COD と $\sqrt{r/a}$ の間には

$$COD = M\sqrt{r/a} + N$$

の関係が成立し、C の低下は係数 M の増加をもたらす。また、C の如何にかかわらず a の増加につれて同一の $\sqrt{r/a}$ に対する COD は大きくなる。

- (5) 同一のき裂を対象とし、 $C=0$ と $C=-0.5$ および $C=0$ と $C=-1$ に対して COD を測定した結果、 σ_1 が等しくても COD はいずれの場合も後者のほうが大きくなることが確認できた。

- (6) COD の測定値に基づいて CTOD を外挿により求めた結果、 $CTOD/F^2$ と a の間にはほぼ線形関係が成立することが確認できた。

- (7) き裂進展速度は C や σ_1 の値の如何にかかわらず、き裂先端開口変位の大きさに支配される。

文 献

- (1) Au, N.M. and Liu, S.R., Mixed Mode Crack Propagation, (1981), 55, Sijthoff and Noordhoff.
- (2) 北岡・御厨, 機論, 56-532, A(1990), 2399.
- (3) S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, Theory of Elasticity, (1987), 309, McGRAW-HILL.
- (4) J.C. Newman, Jr. and I.S. Raju, Eng. Fract. Mech., 15-1(1981), 185.
- (5) 結城・北川・東郷・田部, 機論, 51-469 (1985), 2057.
- (6) J.R. Rice, J. Mech. Phys. Solids, 22(1974), 17.