

ひずみゲージを用いた疲労き裂開閉口点の測定法について*

真壁 朝敏^{*1}, 兼城 英夫^{*2}
糸数 真哉^{*3}, 屋富 祖建樹^{*2}A Measurement Method of Crack Tip Opening and Closing in Fatigue
by Means of Strain GaugeChobin MAKABE, Hideo KANESHIRO,
Masaya ITOKAZU, and Tateki YAFUSO

Effective stress intensity factor range ΔK_{eff} and the J integral range ΔJ which are determined by the crack tip opening or closing point are considered as the likely parameters controlling crack propagation behavior. Therefore, a development of the simple measurement method of crack tip opening and closing is considered to be important for the evaluation of crack propagation. In this study, for an elastic-plastic condition in a center-cracked plate, it is proposed that the crack tip opening and closing point can be simply determined with the $\sigma-(\epsilon_y - \alpha)/(\epsilon_x + \alpha)$ diagram and $\sigma-\epsilon_y$ diagram, where σ is the cyclic stress, ϵ_y and ϵ_x are the strains measured in the vicinity of the crack center by means of a strain gauge and α is a constant value. Then this measurement method is compared with results obtained by finite element method calculations.

Key Words: Fatigue, Crack Tip Opening, Crack Tip Closing, Strain Gauge, Measurement Method

1. 緒 言

Elber⁽¹⁾によって疲労き裂先端の開閉口挙動がき裂伝ば則に取り入れられて以来、き裂先端の開閉口点あるいは、閉口点を基準とした有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} ⁽²⁾ や J 積分範囲 ΔJ ⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ が疲労き裂伝ばを支配するパラメータとして有効であることが多くの研究によって明らかにされてきた。そして、き裂の開閉口現象は平均応力下および変動荷重下のき裂進展挙動を説明するうえでも重要である。

このようなことからき裂の開閉口点を精度よく測定する方法が種々提案されている。具体的には、菊川らが開発した除荷弾性コンプライアンス法⁽⁶⁾や超音波法⁽⁷⁾、電位差法⁽⁸⁾、ひずみゲージによる方法⁽⁹⁾、細線のずれによる直接測定法⁽¹⁰⁾およびレーザによる測定等によってき裂開閉口点が実測されている⁽¹¹⁾。本研究では、弾塑性状態にあるき裂についてき裂中心付近のひずみと応力の関係からき裂の開閉口挙動を実測する新しい方法を検討した。そして、き裂開閉口点測定法と

して現在、最もよく用いられている除荷弾性コンプライアンス法と比較し、その有効性を示した。この方法によれば除荷弾性コンプライアンス法よりも容易にき裂開閉口点の実測が可能であると考えられる。また、実験結果を有限要素法による解析結果と比較して、定性的な検証を行った。

2. 実験方法およびき裂開閉口点測定法

使用した素材は S15CK 丸棒材 (直径 25 mm) である。それを、900°C で 1 時間焼なました後、試験片を製作した。その化学成分と機械的性質をそれぞれ表 1 および表 2 に示す。試験片形状を図 1 に示す。試験片ゲージ部中央には、切欠半径 $\rho = 0.08$ mm、長さ 5 mm の切欠きを放電加工し、その切欠きから疲労き裂を発生させた。疲労試験は、島津サーボパルス Lab 5 を用い荷重制御方式により行った。繰返し応力振幅は $\sigma_a = 122.6$ MPa で応力比 R は -1 である。き裂の開閉口の測定は、切欠先端よりき裂が左右とも約 1 mm および約 2 mm 進展した段階で行った。そしてこの試験片を本実験では中央き裂試験片と等価とみなして、き裂開閉口挙動を測定し考察を行った。き裂開閉口点は、図 2 に示すようにき裂中心上に貼り付けた二軸用のひずみゲージ (ゲージ長さ 1 mm) より検出されるひずみと

* 原稿受付 平成元年 10 月 9 日。

^{*1} 正員、琉球大学短期大学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原 1)。^{*2} 正員、琉球大学工学部。^{*3} 准員、琉球大学工学部。

荷重の関係から測定した。これまでの研究によるとき裂面近くのひずみと、荷重の関係より得られる曲線は、き裂開閉口点近傍で折れ曲がりあるいは曲率の変化が生じることが示されている。そこで、本研究ではき裂中心付近の応力、ひずみの挙動に注目し、き裂面より約 2 mm 離れた位置における縦方向ひずみ ϵ_y (荷重軸方向のひずみ) と横方向ひずみ ϵ_x の比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ と荷重との関係を検出し、それによってき裂開閉口挙動を実測することを考えた。ここで、 α, β は ϵ_x のオーダーの小さい数値であり、そして α は上述のひずみ比の分母が零になり発散するのを防ぐための定数である。荷重とひずみ比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ の関係は、電気回路で直接検出するのは困難ではあるが、AD コンバータによって荷重、ひずみ信号をパーソナルコンピュータ (以下パソコン) に取り入れ BASIC 等によって処理し求めることができる。本研究では、エルムデータ社の AD コンバータ (FB16-ADCH, 1 チャンネルの AD 変換時間 = 10 μ s) から取り込んだデータを富士通のパソコン (FM16 β) によって処理した。なお、本研究で提案した方法と除荷弾性コンプライアンス法を比較するため、き裂をはさむき裂中心軸に取付けたゲージ長さ 10 mm のクリップゲージ (島津ダイナストレイン) からの信号も荷重、ひずみ ϵ_x, ϵ_y 信号と同時にパソコンに取り入れ解析した。また、応力繰返し速度は、き裂進展の際は 1 Hz であるが、き裂開閉口の測定時には、AD コンバータの性能、データ取り込みプログラム (BASIC) およびデータ点数の関係から、0.02

Hz にした。実験データ解析は 1 サイクルについて行っているが、そのデータ点数は約 2000 点である。

3. ひずみ比によるき裂開閉口点測定

本研究では、弾塑性状態におけるき裂の開閉口挙動を検討した。き裂開閉口点の測定は、等価き裂長さ (き裂長さ + 切欠長さ 5 mm) が $2a = 7.2$ mm と $2a = 8.7$ mm の場合において行ったが、両方ともほぼ同じ傾向を示したので主に $2a = 8.7$ mm の場合を用いて考察する。1 サイクル中のき裂中心近く (図 2 参照) の縦方向ひずみ ϵ_y と横方向ひずみ ϵ_x の関係を、図 3 に示す。線図上に折れ曲がり点が生ずることがわかる。この折れ曲がり点は何を意味するのか問題であるが、後に示す除荷弾性コンプライアンス法および、新しく提案した方法で求めたき裂開閉口点と図 3 の折れ曲がり点は、ほぼ対応している。なお OP を付した印はき裂開閉口点を示しており CL を付した箇所は西谷、陳の S 形除荷曲線法⁽¹²⁾によって求めたき裂開閉口点に相当する点を示している。図 4 に繰返し応力 σ と ϵ_y, ϵ_x の関係を示す。 $\sigma - \epsilon_x$ の関係ではき裂開閉口点では若干折れ曲がりが見られるが、き裂開閉口点付近でははっきりした曲線の変化がみられない。それに対し、 $\sigma - \epsilon_y$ ではき裂の開閉口点付近に曲線が変化する点が見られる。そして、それらはき裂開閉口点 (図中の OP 点、CL 点) と

表 1 化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.15	0.30	0.50	0.013	0.013	0.05	0.19	0.14

表 2 機械的性質

Lower yield point σ_{s1} (MPa)	Ultimate tensile strength σ_B (MPa)	True fracture stress σ_T (MPa)	Reduction of area ψ (%)
283	449	956	68.8

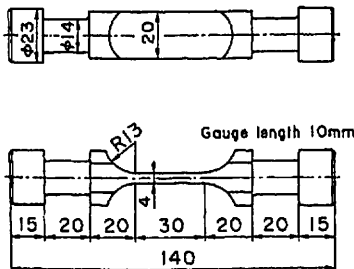


図 1 試験片形状

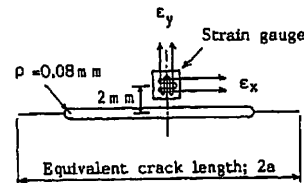


図 2 ひずみ測定位置

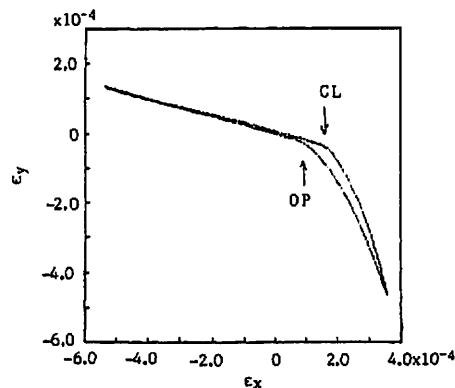


図 3 ひずみ ϵ_y と ϵ_x の関係 ($2a = 8.7$ mm)

ほぼ一致していることがわかる。したがって条件によっては中央き裂の場合 σ , ϵ_x および ϵ_y の相関関係である程度、き裂開閉口点の測定ができる可能性がある。

ϵ_y , ϵ_x の関係には、き裂開閉口点で折れ曲がりが生じるので、次に ϵ_y , ϵ_x の比と応力 σ の関係によりき裂開閉口点を検出することを試みた。図5は比較のために示した除荷弾性コンプライアンス法によって得られた結果である。本実験では、き裂先端が開閉する際の荷重あるいは応力の値のみでき裂開閉口点を判定することを目的としているので、図5の横軸は従来の研究と同様にスケールを刻んでいないが δ_1 -CP に相当する量である。ここで δ_1 はクリップゲージによる変位量、 P は荷重、 C は荷重 P が P - δ_1 線図の最高荷重点から除荷していく段階の直線部分の傾きである。除荷弾性コンプライアンス法では、開閉点は、除荷弾性線に平行に引いた直線と負荷線の接点として図5中の記

号 OP を付した矢印のように求まる。また閉口点は S 形除荷曲線法⁽¹²⁾で求めるとほぼ記号 CL を付した矢印の付近にある。本研究で新しく提案した方法による結果を図6に示す。折れ曲がり点から判定したき裂開閉口点は除荷弾性コンプライアンス法の場合とほとんど一致しておりき裂中心軸上のひずみ比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ と繰返し応力 σ の関係によってき裂の開閉口を測定できることがわかる。 α はひずみ比の分母が零にならないようにするための定数であるが、本実験では図3からわかるように ϵ_x の最小値が約 -5.5×10^{-4} であるので、その絶対値より少し大きい値をとり $\alpha = 7 \times 10^{-4}$ とした。また β の値は、図6(a)では $\beta = 0$ 、(b)では $\beta = \alpha$ とした。これらより α と β の値により曲線の形が変化するが、両線図上の折れ曲がり点の応力は移動しないことがわかる。そして図6(b)では、垂線と線図の接点が開閉口点对应するので、除荷弾性コンプライアンス法の場合よりもき裂開閉口点の測

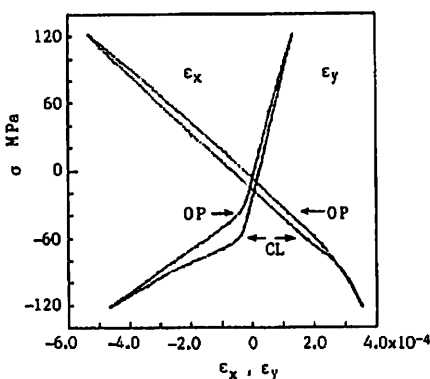


図4 繰返し応力 σ とひずみ ϵ_y , ϵ_x によるき裂開閉口点の測定 ($2a=8.7$ mm)

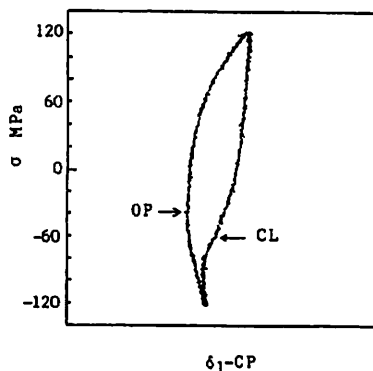
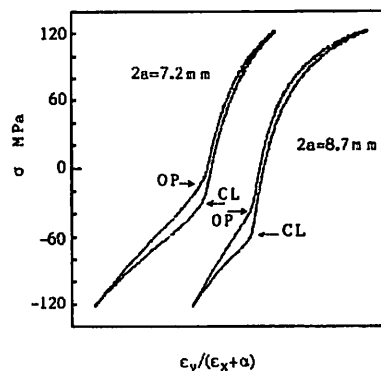
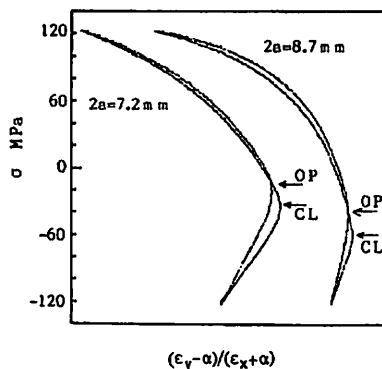


図5 除荷弾性コンプライアンス法によるき裂開閉口点の測定 ($2a=8.7$ mm)



(a) $\beta=0$ の場合



(b) $\beta=\alpha$ の場合

図6 ひずみ比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ - σ 線図によるき裂開閉口点の測定

定は、比較的容易であると思われる。

本実験範囲では、提案したひずみ比の β の値によらず、折れ曲がり点によりき裂開閉口点が評価できる。この理由についてひずみ比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ の σ に対する導関数の性質により検討する。ひずみ比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ を応力の関数として表すと

$$f(\sigma) = (\epsilon_y(\sigma) - \beta) / (\epsilon_x(\sigma) + \alpha) \quad \cdots \cdots (1)$$

上式を微分すると

$$f'(\sigma) = \{\epsilon_y'(\sigma)\epsilon_x(\sigma) - \epsilon_x'(\sigma)\epsilon_y(\sigma) + \alpha\epsilon_y'(\sigma) + \beta\epsilon_x'(\sigma)\} / \{\epsilon_x(\sigma) + \alpha\}^2 \quad \cdots \cdots (2)$$

導関数 $f'(\sigma)$ は、 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha) - \sigma$ 線図の接線こう配を表すので、折れ曲がり点は、 $f'(\sigma)$ の値が急変する点である。式(2)を検討すると、その分子は、 ϵ_y/ϵ_x の導関数の分子 $\epsilon_y'(\sigma)\epsilon_x(\sigma) - \epsilon_x'(\sigma)\epsilon_y(\sigma)$ と ϵ_y および ϵ_x の導関数に係数を掛けたものの和である。ところで、図3の $\epsilon_y - \epsilon_x$ 線図の折れ曲がり点は、 $\epsilon_y/\epsilon_x - \sigma$ 関係にき裂開閉口点で折れ曲がりが生じることを示しており(本文には示していないが実験的に確認している)、また図4の $\epsilon_y - \sigma$ 線図はき裂開閉口点で折れ曲がっている。 $\epsilon_x - \sigma$ 線図も若干の折れ曲がりなき裂開閉口点でみられる。このようなことから、本実験の場合、式(1)の α と β の値の変化によって $f(\sigma) - \sigma$ 線図の形が変わると同時に、き裂開閉口点を示す線図の折れ曲がりの程度が α と β の値によって強調されたり、弱まったりすることが考えられる。そして、 $\epsilon_x - \epsilon_y$ 、 $\sigma - \epsilon_y$ 線図等の折れ曲がり点の応力値はほぼ一致することか

ら α と β の値(ひずみ ϵ_x 、 ϵ_y のオーダ)は、 $f(\sigma)$ の折れ曲がり点の応力値に影響を与えないことが考察される。したがって、 α と β の値を適当に選べば、き裂開閉口点を比較的容易に測定できる可能性がある。最近ではパソコンが普及し、ADコンバータにより容易にひずみ、荷重等の信号がパソコンに数値として取り込めるので、この方法は手軽に適用できるものと考えている。さらにこの場合クリップゲージ等を必要とせず、き裂の進展に伴うひずみゲージの貼かえの必要がないことは長所である。なお、 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha) - \sigma$ 線図によるき裂開閉口点測定では、 ϵ_x 、 ϵ_y および σ の3者の線図の開閉口点での折れ曲がりを強調して検出できる可能性がある。今後切欠きから発生する短いき裂の開閉口挙動に応用できるか否か検討する予定である。切欠半径が比較的大きい場合は、き裂開閉口が切欠中心上の横方向ひずみ ϵ_x に影響することが報告されている⁽⁹⁾。

4. 有限要素法による実験結果の検討

本研究で提案したき裂開閉口測定法を有限要素法により定性的に検討した。本実験では、繰返し応力ひずみ線図を実験的に測定していないために、計算条件は、実験材料の機械的性質とは、一致させていないが定性的にき裂開閉口挙動を検討することはできる。有限要素解析は、公開されたプログラム⁽¹³⁾をき裂進展およびき裂が開閉口するように手直した。解析は平面応力条件で行い構成式は、Zieglerの式を用いた移動硬化則⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾(文献⁽¹³⁾ではPragerの式を用いている)を用いた。これまでに有限要素法によってき裂を進展させる方法としては、最大圧縮時に進展させる大路ら⁽¹⁷⁾の方法や白鳥ら⁽¹⁸⁾の最大引張時に進展させる方法等が提案されている。本研究では荷重が圧縮から引張りに反転した後にき裂の先端の節点力が零になった時点でき裂を進展させたが、本質的には大路らの方法と同様であると思われる。計算に用いた応力ひずみ関係を次に示す。

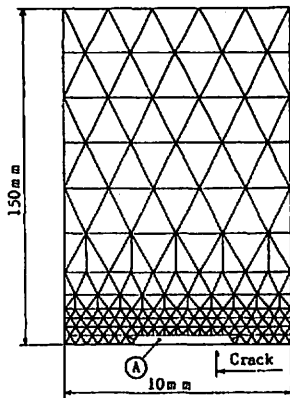
弾性範囲

$$\sigma = E\epsilon$$

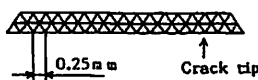
塑性範囲 (ϵ_p は塑性ひずみ)

$$\sigma = C(a + \epsilon_p)^n$$

ここで、ヤング率は $E=210$ GPa、 $C=12$ GPa、 $a=0.0006$ 、加工硬化係数 $n=0.5$ とした。降伏応力は 293 MPa である。試験片は板幅 20 mm、板厚が 4 mm の中央き裂試験片とした。き裂進展に関する要素の一辺の長さは 0.25 mm である。要素分割を図7に示す。き裂は初期き裂半長が 2.5 mm の中央き裂である。き裂半



(a) 全体の1/4の部分



(b) A部詳細

図7 要素分割図

長が 3.25 mm になる段階の引張りから圧縮の順の 1 サイクルについて結果を示したが、き裂をさらに進めても計算結果に定性的な差は生じない。また計算結果は荷重が反転する際の最初の点と最高荷重の点、最低荷重の点はもちろん、き裂が開閉口する際は、1 ステ

ップごとに出力しているが、その他は 4 ステップごとに出力してある。

実験結果と対応させてき裂中心軸上でき裂面より 2 mm 程度はなれた要素における縦方向ひずみ ϵ_y 横方向ひずみ ϵ_x および公称応力 σ によりき裂開閉口挙動を検討した。図 8、9 にそれぞれ $\epsilon_y-\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y-\sigma$ の関係を示す。き裂の開閉口点を矢印で示したがそれらの点で曲線に折れ曲がりが生じ実験結果と同様にき裂開閉口挙動が $\epsilon_y-\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y-\sigma$ 線図に現われていることを示している。なお、き裂の開閉口点はき裂先端よりき裂中心方向に一つずれた節点に変位が生じる点であり、き裂開閉口点はき裂面の荷重軸方向変位が零になり始める点として定義した。

図 10 は、割り算 ϵ_y/ϵ_x と σ の関係である。実験では分母の ϵ_x が零になる付近で線図が不安定になるが、計算値は $\epsilon_x=0$ の点を避けているため、定性的な検討ができる。これよりき裂開閉口点で明りような折れ曲がりが生じることがわかる。なお、実験結果も $\epsilon_x=0$ 付近の不安定部分を除くとほとんど図 10 と同じ形の線図となる。

図 11、12 は図 6 に示した実験結果と対応させひずみ比 $(\epsilon_y-\beta)/(\epsilon_x+\alpha)$ によるき裂開閉口点測定の有効性を検討したものである。それぞれ、 $\epsilon_y/(\epsilon_x+\alpha)$ 、 $(\epsilon_y-\alpha)/(\epsilon_x+\alpha)$ と σ との関係を示してあるが、き裂開閉口点で曲線が折れ曲がり、図 6 に示した実験結果と定性的に比較的良好に対応していることがわかる。したがってひずみ比 $(\epsilon_y-\beta)/(\epsilon_x+\alpha)$ によってき裂開閉口点が測定できることは有限要素法による計算結果からも明らかである。

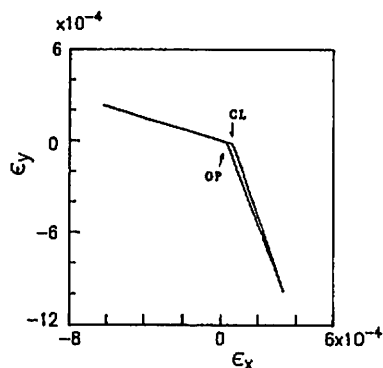


図 8 $\epsilon_y-\epsilon_x$ 線図とき裂開閉口点

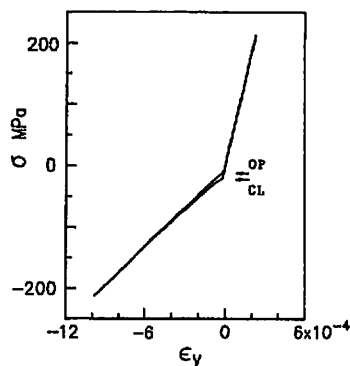


図 9 $\sigma-\epsilon_y$ 線図上のき裂開閉口点

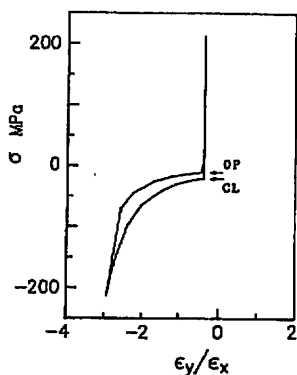


図 10 σ と ϵ_y/ϵ_x によるき裂開閉口点測定の検討

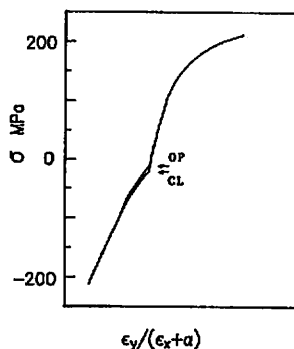


図 11 $\epsilon_y/(\epsilon_x+\alpha)-\sigma$ 線図上のき裂開閉口点 ($\alpha=8 \times 10^{-4}$)

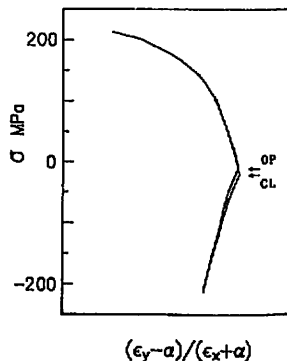


図 12 $(\epsilon_y-\alpha)/(\epsilon_x+\alpha)-\sigma$ 線図上のき裂開閉口点 ($\alpha=8 \times 10^{-4}$)

5. 結 論

き裂の開閉口点や閉口点を基準とした有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} や J 積分範囲 ΔJ によって合理的なき裂伝ば挙動の解釈ができることが、これまでの多くの研究によって明らかにされてきた。したがって、き裂の開閉口点を精度良く測定することは、き裂伝ばを適正に評価することにつながる。これまでも、多数のき裂開閉口測定に関する報告がなされてきているが本報では、き裂中心付近の縦方向ひずみ ϵ_y と横方向ひずみ ϵ_x の比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ と応力の関係により弾塑性状態におけるき裂開閉口挙動を検討することを試みた。そして、その結果を除荷弾性コンプライアンス法による結果と比較し、検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 本実験範囲ではき裂面近く(き裂中心軸上)の縦方向ひずみ ϵ_y と繰返し応力 σ の関係から折れ曲がり点によってき裂開閉口点が判断できる。また、き裂面近くの横方向ひずみ ϵ_x と縦方向ひずみ ϵ_y の関係もき裂開閉口点で折れ曲がりを生じる。

(2) 提案したひずみ比 $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ と σ の関係により求めたき裂開閉口点は、除荷弾性コンプライアンス法で求めた開閉口点とよく一致する。そして本実験範囲では係数 $\alpha = \beta (\alpha = 7 \times 10^{-4})$ とすることにより、き裂開閉口点の線図の折れ曲がり方が明りようになる。

(3) 応力、ひずみの信号は、AD コンバータによりパソコンに容易に数値として取り込めるので $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha)$ と σ の関係は、手軽に求められる。

(4) 有限要素法により検討した、中央き裂材の $\epsilon_y - \sigma$ と $(\epsilon_y - \beta)/(\epsilon_x + \alpha) - \sigma$ 線図のき裂開閉口挙動による変化は、本実験結果と定性的に一致している。

最後に実験を行うに当たってご助力いただいた琉球大学学生、岡田義彦氏〔現・シーケーディ(株)〕に感謝する。また、九州大学村上敬宜教授ならび西谷弘信教授に感謝申し上げる。

文 献

- (1) Elber, W., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 486(1971), 230.
- (2) 星出・田中・仲田, 材料, 21-345(1982), 566.
- (3) 田中, 疲労強度学(西谷編), (1985), 150, オーム社.
- (4) Dowling, N. E. and Begley, J. A., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 590(1976), 82.
- (5) 久保・ほか4名, 機論, 54-498, A(1988), 318.
- (6) 菊川・ほか3名, 材料, 25-276(1976), 899.
- (7) 小林・ほか3名, 機論, 50-451, A(1984), 309.
- (8) Lindley, T. C. and Richards, C. E., *Mater. Sci. Eng.*, 14-3(1974), 281.
- (9) 趙, 大阪大学学位論文, (1987), 54.
- (10) Nisitani, H. and Kage, M., *Fracture* 1977, 2, ICF 4(1977), 1099.
- (11) 小林, 破壊力学実験法(瀧尾・ほか3名共編), (1984), 169, 朝倉書店.
- (12) 西谷・陳, 機論, 51-465, A(1985), 1436.
- (13) 井上・ほか4名, 続・初心者のための有限要素法(日本材料学会編), (1982), 84, 日本材料学会.
- (14) 浜田・田中, 機論, 38-305(1972), 36.
- (15) 宮本・三好, 有限要素法ハンドブックII(鷗津・ほか4名共編), (1985), 345, 培風館.
- (16) Miyamoto, H. and Shiratori, M., *Proc. 1973 Symp. MBM*, (1974), 149.
- (17) Ohji, K., Ogura, K. and Ohkubo, Y., *Eng. Fract. Mech.*, 7(1975), 457.
- (18) 白鳥・ほか2名, 機論, 43-357(1977), 3577.