ひずみ干渉法による疲労き裂開閉口点の測定* (除荷弾性コンプライアンス法との比較と測定精度について)

真壁 朝敏^{*1}, 西田 新一^{*2}, 兼城 英夫^{*3}

A Measurement of Fatigue Crack Tip Opening and Closing Points by Means of Strain Interference Method (Accuracy and Comparison with Unloading Elastic Compliance Method)

Chobin MAKABE, Shin-ichi NISHIDA and Hideo KANESHIRO

Fatigue crack tip opening stress σ_{op} and closing stress σ_{cl} can be easily determined with the relationship between the following strain functions f , h and the cyclic stress σ . $f = (\varepsilon_y - \beta) / (\varepsilon_x + \alpha)$, $h = \varepsilon_y + \lambda \varepsilon_x$, where ε_y and ε_x are the strains measured in the vicinity of the crack center (or the crack face), and α , β and λ are constants. With regard to small-size specimens having a center crack or notch, the accuracy of this measurement method is confirmed. If the constants α , β and λ are chosen to proper values, the crack tip opening stress σ_{op} and closing stress σ_{cl} can be judged from the inflection points of the σ - h diagram and σ - f diagram. These stresses coincide with the opening stress σ_{op} and the closing stress σ_{cl} determined by the unloading elastic compliance method.

Key Words: Fatigue, Crack Tip Opening, Crack Tip Closing, Accuracy, Measurement Method

1. 緒 言

疲労き裂伝ば挙動を適正に評価するために、疲労き裂開閉口挙動がき裂伝ば速度を評価するパラメータである応力拡大係数範囲や繰返し J 積分範囲に取り入れられている。疲労き裂開閉口点応力は現在最も一般的な方法として用いられている除荷弾性コンプライアンス法⁽¹⁾等によって測定されている。そして、それらは広い範囲の形状の試験片に適用され、高精度でき裂開閉口点が測定できることが報告⁽²⁾されている。しかし、複雑な形状を有する機械構造物の疲労き裂開閉口点の測定は必ずしも容易ではなく⁽³⁾、まだ十分にはき裂開閉口点を考慮した疲労き裂伝ば則が実働機械に対して実用化されているとはいえない。そのため、簡便でかつ精度の高い新たなき裂開閉口点測定法を開発することは実用上の観点から有意義なことであると考えられる。

著者らは前報^{(4)~(6)}においてき裂中心軸上あるいは切欠中心軸上の荷重方向ひずみ ε_y とそれに垂直方向

のひずみ ε_x を用いたひずみ関数と繰返し応力との関係によってき裂開閉口点が測定できることを明らかにした。そして、そのひずみ関数を用いたき裂開閉口点測定法をひずみ干渉法と称することにした。著者らはひずみ干渉法を用いることによって、ある程度の範囲で大形機械構造物のき裂開閉口現象を検出することが可能であると考えている。例えば、機械構造物によっては、背面ゲージやクリップゲージ等の利用が困難な場合があることが予想される。これらの機械構造物に対してひずみ干渉法が適用できるものと考えられる。すなわち除荷弾性コンプライアンス法によるき裂開閉口点応力の測定が困難な場合、ひずみ干渉法の適用あるいは両者を併用すればよい結果が得られる可能性がある。しかし、前報^{(4)~(6)}においては、その測定方法を提案したのみで特にその測定精度については検討していない。したがって、ひずみ干渉法を実用化するには測定精度についても明らかにする必要がある。本報では小形の試験片を用いて前報同様にき裂開閉口点測定方法として最も信頼性のある除荷弾性コンプライアンス法⁽¹⁾⁽²⁾と比較し、ひずみ干渉法によるき裂開閉口点の測定精度について考察する。

* 原稿受付 平成2年9月21日。

^{*1} 正員、琉球大学短期大学部 (〒903-01 沖縄県西原町千原1)。

^{*2} 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1)。

^{*3} 正員、琉球大学工学部。

2. 使用材料および実験方法

使用した素材は、S 15 CK 丸棒材(直径 25 mm)である。それを 900°C で 1 時間焼なましした後、試験片を作製した。その化学成分と機械的性質を表 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、き裂を発生させるために切欠先端半径 ρ が約 0.2 mm、切欠長さが約 4 mm の切欠きおよび切欠先端半径約 1 mm、長さ約 7.5 mm の切欠きを放電加工した。試験片は放電加工後、600°C で 1 時間真空焼なましして、表面を金属研磨剤で鏡面仕上げした後に実験に供した。本研究においては切欠きから発生した長いき裂の開閉口点の測定精度を検討するとともに、これらの切欠きから発生した微小き裂の開閉口点の測定も行った。なお、切欠先端半径が約 1 mm の切欠きの先端には半径 0.05 mm のワイヤを用いて放電加工して半円柱状の二重切欠きを作製し、試験片両面でき裂が均等に発生するよう工夫した。図 2 にひずみゲージの貼り付け位置を示す。使用したひずみゲージはゲージ長さ 1 mm、低抗値 120 Ω の普通鋼用二軸形ひずみゲージである。切欠先端半径が約 0.2 mm の切欠きにおいては除荷弾性コンプライアンス法とひずみ干渉法との比較のため、標線間 10 mm のクリップゲージ(島津ダイナストレイン)を切欠きをはさんだ位置に取付けた。

疲労試験は島津サーボパルサー・Lab 5 を用い荷重制御方式により行った。本研究では A/D コンバータの性能とデータ取込みプログラムの都合上、き裂の開閉口挙動を検出する際の繰返し速度は 0.02 Hz とし

た。また、疲労き裂を進展させる際の繰返し速度は 1 Hz である。図 2 に示すひずみゲージから検出される ϵ_y , ϵ_x の信号および荷重信号は A/D コンバータ(エルムデータ: FB 16-ADCH)を介してパーソナルコンピュータ(富士通: FM 16 β)に取り入れ、1 サイクルごとに実験データ解析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 中央き裂のき裂開閉口点測定精度について

前報^{(4)~(6)}においては、次式に示すひずみ関数と繰返し応力との関係による疲労き裂開閉口点の測定方法を提案した。

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

$$h = \epsilon_y + \lambda \cdot \epsilon_x \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 ϵ_y , ϵ_x は図 2 に示したき裂あるいは切欠中心軸上の荷重軸方向およびそれに垂直方向のひずみである。また、 α , β はひずみ ϵ_y , ϵ_x のオダの定数であり、また λ はひずみ幅の比 $\Delta\epsilon_y/\Delta\epsilon_x$ のオダの定数である。疲労き裂先端が開閉する時点付近で繰返し応力 σ とき裂近くのひずみ ϵ の関係等に折れ曲がり点あるいは曲率の変化が現れる。ひずみ干渉法では上記のひずみ ϵ_y , ϵ_x そして繰返し応力 σ の 3 者でき裂の開閉口現象を検出するため、高精度なき裂開閉口点測定が期待できるものと考えられる。そこで、ひずみ干渉法でのき裂開閉口点測定精度を向上させるために、定数 α , β そして λ の値の決定方法を明らかにすることを試みた。

除荷弾性コンプライアンス法によってき裂開閉口点を検討した結果を図 3 に示す。この場合、繰返し応力幅 $\Delta\sigma$ は 245 MPa であり、応力比は $R = -1$ である。

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(mm)

(a) 切欠長さ 4 mm、切欠半径 0.2 mm の場合

(b) 切欠長さ 7.5 mm、切欠半径 1 mm の場合

図 2 ひずみ測定位置

また、切欠きを含めたき裂長さ $2a$ は 7.3 mm である。き裂開閉口点はよく知られているように除荷弾性線と負荷線の接点として図中の OP を付した矢印のように求まる⁽¹⁾。また、閉口点は西谷・陳の提案⁽⁷⁾によると除荷過程における変曲点であるが、図 3 からは明りようにはわからない。なお、図 3 は若干の平滑化処理を行っている。また、図中の CL と付した矢印は参考までにひずみ干渉法で求めたき裂閉口点を示している。

式(1)、(2)の各定数 α , β , λ を変化させた場合のひずみ関数 f , h と繰返し応力 σ との関係を図 4, 5 に示す。これは図 3 のデータと同時に測定したデータである。ひずみ ε_y は $-1.29 \times 10^{-4} \sim 4.23 \times 10^{-5}$, ε_x は $-1.35 \times 10^{-4} \sim 7.57 \times 10^{-5}$ の範囲で変動する。そこで、定数 λ はひずみ幅比 $\Delta\varepsilon_y/\Delta\varepsilon_x = 1.23$ を基準として変化させた。また、 α は関数 f の分母が零にならないようにするための定数であるので、 ε_x の値を考慮して $\pm 2 \times 10^{-4}$ を選んだ。また $\beta = \lambda \cdot \alpha$ とした。図 4 は関数 f の場合、図 5 は関数 h の場合である。図 4, 5 の各線図にはそれぞれの線図において判断したき裂開閉口点(OP と付した矢印)と閉口点(CL と付した矢印)が印されている。有効応力範囲($\sigma_{\max} - \sigma_{op}$, $\sigma_{\max}$ は最大繰返し応力, σ_{op} はき裂開閉口応力)は除荷弾性コンプライアンス法の場合が 149 MPa であり、ひずみ干渉法の場合も 149 MPa である。したがって、現在最もよく使用され、精度が高い除荷弾性コンプライアンス法とひずみ干渉法の測定値は一致している。このことから、ひずみ干渉法の測定精度は実用上その誤差が問題にならない精度であることがわかる。

まず、関数 f を用いた結果から詳しく検討する。図 4(a)~(c) はそれぞれ、 $\lambda = 2.4, 1.23, 0.6$ とした場合の結果である。前報⁽⁴⁾の結果は(b)の $\alpha = 2 \times 10^{-4}$ の場合に相当する。前報では除荷弾性コンプライアンス法の結果を参考にしてき裂開閉口点を見積もり考察を行ったが、本報ではひずみ干渉法のみによってき裂開閉

図 3 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(δ : 標線間変位, C: 除荷弾性線のこう配)

口点を判断した。(除荷弾性コンプライアンス法と比較し、有効性について考察した点は同じである)。その結果は関数 f の α が正の場合のみで検討した前報⁽⁴⁾とほぼ一致するが、前報では十分な検討を行っていないため、き裂開閉口点の決定法に多少あいまいな点があった。すなわち、 $\alpha = 2 \times 10^{-4}$ の場合、図 4(a), (b) にみられるように、 σ - f 線図のき裂開閉口点付近の折れ曲りは鈍く、き裂開閉口点が多少判断しづらい(実

(a) $\lambda = 2.4$

(b) $\lambda = 1.23$

(c) $\lambda = 0.6$

図 4 ひずみ関数 f の変動によるき裂開閉口点応力の測定 ($\alpha = \pm 2 \times 10^{-4}$)

用的には十分な精度で判断できる)。しかし、図4(a)に破線で補助線を引いて示したように $\alpha = -2 \times 10^{-4}$ とすると明りょうな曲率の変化によって容易にき裂開閉口点が判断できることがわかる。そして、 $\alpha = 2 \times 10^{-4}$ の場合にはき裂開閉口点が鈍い折れ曲がりの上側(応力が高い側)の点として求まることがわかる。このようなひずみ関数の曲率の変化は、西谷・陳⁷⁾がき裂閉口点を求める際に考察しているように、き裂の開閉口に伴う材料の局所的な降伏現象と関連していると考えられる。また、 $\lambda = 0.6$ の場合には除荷弾性コンプライアンス法で得られる線図と類似した線図になっている。この場合には図4(c)にみられるように、き裂開

閉口点が精度よく判断できる。このように、 σ - f 線図のき裂開口部分の傾きが垂直に近くなるように λ の値を選ぶときき裂開閉口点が明りょうになる。

次にひずみ関数 h を用いた結果について検討する。図5(a)~(c)は、それぞれ $\lambda = 2.4, 1.23, 0.6$ とした場合の結果である。き裂開閉口点はそれぞれ図中に OP、CL と付した矢印によって示してある。図5(a)と(b)の場合、図5(a)に破線で補助線で強調してあるように、き裂開口点は変曲点あるいは折れ曲がり点付近での直線部分からのずれによって判定できる(次報に示すが大形試験片の長いき裂の場合にはき裂開口後の引張りの際の σ - h 線図の直線性はより明りょうである)。また、き裂閉口点も変曲点によって判断できる。ひずみ関数 h を用いる方法は本質的には除荷弾性コンプライアンス法と同様な方法であると考えられる。そのため、定数 λ をある値に選ぶと図5(c)に示すような除荷弾性コンプライアンス法とよく類似した線図が得られる。そして、き裂開口点は除荷弾性コンプライアンス法と同様に負荷線の変曲点として決定できる。また、この場合、特に除荷弾性線のような補助線を求める必要はない。さらに、閉口点での変曲点はクリップゲージを用いた本実験の場合の除荷弾性コンプライアンス法の結果よりも明りょうであり、き裂開閉口点が同時に精度よく判定できる。

以上のことから、き裂の開閉口挙動に基づくコンプライアンスの変化によってき裂開閉口点を求めている点で、除荷弾性コンプライアンス法とひずみ干渉法は本質的には似通っていることがわかる。しかし、ひずみ干渉法では変曲点を強調することによってき裂の開閉口点を求めるため、除荷弾性線のこう配を特に求める必要がない点は異なっている。また、ひずみ干渉法では式(1)、式(2)の α, β, λ の値を適当に変化させて得られた線図を比較することで測定精度を向上させることができる。したがって、 α, β, λ の値を決定するのがひずみ干渉法では問題となる。 λ の値はひずみ幅の比 $\Delta\epsilon_y/\Delta\epsilon_x$ のオーダーの値であればよく、曲率の変化に注意すれば高精度でき裂開閉口点の測定が行える。さらに、本実験のような中央き裂試験片の場合、より簡単に精度よくき裂開閉口点の測定を行うためには、 λ はひずみ比 $\Delta\epsilon_y/\Delta\epsilon_x$ の値より若干低めの値がよいようである(なるべく、き裂開口時の σ - f 、 σ - h 線図の傾きを垂直に近付けるとよい)。関数 h を用いる場合、図5(a)の場合よりも λ の値を大きくすると変曲点が判断し難くなったりする。また λ が小さいと図6のようになる。図7には関数 f の $\alpha = \pm 4 \times 10^{-4}$ の場合の一例を示すが、この線図からもき裂開閉口点が判断で

図5 ひずみ関数 h の変動によるき裂開閉口点応力の測定

きる。本実験範囲で検討した結果によれば、中央き裂の場合、関数 f を用いる際の α の絶対値はひずみ ε_x あるいは ε_y の最小値あるいは最大値の絶対値の 1.5~4.0 倍程度であればよい。 β の値は簡便のため本研究では $\beta = \lambda \cdot \alpha$ とした。なお、実験は行っていないが、繰返し中に ε_x と ε_y の値の符号が変化しない場合には $f = \varepsilon_y / \varepsilon_x$ としてもき裂開閉口点が求まることが期待できる。切欠材を含め、一般的な測定に際しては、ひずみ干渉法を使用する場合、 λ は $\Delta \varepsilon_y / \Delta \varepsilon_x$ 、 α は ε_x の最大値あるいは ε_y の最大値の 1.5 倍の負の値を目安にすればよいと考えられる。また $\beta = \alpha \cdot \lambda$ としたほ

うがよい。そして関数 h は λ のみを決定すればよいので、関数 f よりも便利である。

関数 h を用いて、 $\lambda = \Delta \varepsilon_y / \Delta \varepsilon_x (= 1.23)$ とした場合、有効応力範囲 ($\sigma_{\max} - \sigma_{op}$, $\sigma_{\max}$ は最大繰返し応力, σ_{op} はき裂開口点応力) は 149 MPa である。これに対し、負荷過程の折れ曲がりの頂点の応力 [図 5(b) に OO を付した破線の矢印で示した] で仮に評価した有効応力範囲は 157 MPa である。この場合、後者のほうが約 5% 程度高めとなるが実用上は差支えない誤差であると思われる。また安全側の誤差である。 λ の値を $\Delta \varepsilon_y / \varepsilon_x$ より若干小さめにとるとそのような誤差が小さくなる。図 5 の場合、特に $\lambda = 0.6$ とすると、その誤差がなくなった。

図 8 は参考のためにひずみ干渉法と除荷弾性コンプライアンス法を併用したものである。この線図でもき裂開閉口点が明りょうである。横軸はひずみ関数 f , h を除荷弾性線のこう配を考慮して修正したものである。また、 m , n はそれぞれ関数 f , h に対する除荷弾性線のこう配である。図 9, 10 は他のき裂長さの場合のき裂開閉口点の測定例である。また、他の応力レベルでの両振疲労試験でも同様な結果が得られた。以上

図 6 関数 h を用いた場合 ($\lambda = 0.3$)

図 7 関数 f を用いた場合 ($\lambda = 1.23$, $\alpha = \pm 4 \times 10^{-4}$)

図 8 ひずみ干渉法への除荷弾性コンプライアンス法の適用 (m , n : ひずみ関数の除荷弾性線のこう配)

図 9 き裂長さ $2a = 8\text{mm}$ の場合

図 10 き裂長さ $2a = 6\text{mm}$ の場合

のことから、ひずみ干渉法によると変曲点によって、除荷弾性コンプライアンス法と同程度の精度で機械構造物におけるき裂開閉口点応力が求められることが期待される。そしてひずみ干渉法は、背面ゲージやクリップゲージが利用できない場合に適用できる可能性がある。ひずみゲージの位置によっては、き裂面近くの荷重軸方向のひずみ ε_y に対しき裂開閉口挙動の影響が大きい場合、あるいは ε_y よりもそれに垂直方向の ε_x に対しその影響が大きい場合があることが予想される。 ε_y 、 ε_x の両者を取り入れた点がひずみ干渉法の利点である。今後、極薄板材や溶接材の疲労き裂伝ばの整理にひずみ干渉法を用いる予定である。

3・2 切欠きから発生した微小き裂の開閉口点の測定 切欠底から発生する微小き裂の開閉口挙動の検出は困難である。城野ら⁽²⁾は高精度除荷弾性コンプライアンス法を開発し背面ひずみゲージによって微小き裂の開閉口点を精度よく測定している。本研究のひずみ干渉法においても、城野らの手法と似通った手法により切欠底から発生した微小き裂の開閉口点が検出できることがわかった。その方法は、切欠中心軸上のき裂発生時のひずみ ε_x 、 ε_y からき裂発生前のひずみ ε'_x 、 ε'_y を差引いた値 $\varepsilon_{xx}(=\varepsilon_x - \varepsilon'_x)$ および $\varepsilon_{yy}(=\varepsilon_y - \varepsilon'_y)$ を式(1)、式(2)に適用し、1サイクル間のそのひずみ差の関数 f 、 h の応力による変化によってき裂開閉

口点を判定するものである。ただし、その方法には後に示すような問題点もある。なお、本節で示す実験においては、切欠底に発生したすべり帯の広がりから判断して、き裂は小規模降伏状態を満足せず伝ばすると考えられる。

図11は切欠先端半径 $\rho=0.2\text{mm}$ 、切欠先端からのき裂長さ c が約 0.1mm の場合において除荷弾性コンプライアンス法を適用した結果である。測定データと平滑化処理後のデータを同時に示した。この場合、本実験で使用したクリップゲージ等の不安定性によって除荷弾性コンプライアンス法によるき裂開閉口点の精密な測定が困難であった。また、ノイズ等のためクリップゲージを用いた本結果には高精度除荷弾性コンプライアンス法も適用できない。そのため、図11との比較においてはひずみ干渉法の詳細な測定精度の検討はできないが、3・1節の中央き裂の場合から判断して切欠材の場合にも変曲点によって、ひずみ干渉法によりき裂開閉口点が決定できると考えられる。図11と同じ試験片におけるき裂発生前とき裂発生後のひずみ関数 h の変化を図12に示す。 λ の値はき裂発生後のひずみ幅の比 $\Delta\varepsilon_y/\Delta\varepsilon_x$ を選んだ。これからき裂発生前にも線図には、ふくらみがあることがわかる。き裂発生後には、き裂先端が開閉すると思われる点で若干の折れ曲がりが見られるがき裂開閉口点は明りょうでない。そこで、この結果に上述のひずみ差を用いて関数 h の変動を調べてみた。その結果が図13である(測定データと平滑化したものを同時に示した)。これからひずみ差を用いるとき裂開閉口点が明確に判定できることが期待できる。図13において測定されるき裂開閉口点応力は -79MPa である。それに対し本実験の除荷弾性コンプライアンス法の場合(図11)では $-58\sim-85\text{MPa}$ にき裂開閉口点があると判断される。また図10、図13は同じ試験片、同じ応力振幅、応力比の実験である。図10のき裂開閉口点応力、 -43MPa より図13の開閉口点応力は低い値である。切欠底の短いき裂の場合が、長い

図11 除荷弾性コンプライアンス法による切欠先端の微小き裂のき裂開閉口点の測定

図12 ひずみ関数 h のき裂発生前と発生後の比較

図13 ひずみ差を用いた、ひずみ関数による微小き裂のき裂開閉口点の測定

長いき裂の場合よりき裂開閉口点応力が低い⁽⁶⁾ことを考えると本実験結果には妥当性があると判断される。図14はこの方法を切欠先端半径 $\rho=1\text{mm}$ の切欠き(ただし、実験方法に示したような二重切欠きである)に適応した結果である。切欠底(二重切欠きの底)から約 0.2mm のき裂が発生した場合の結果であるが、図13と同様な結果となっている。このように、ひずみ差 ε_{xx} , ε_{yy} を用いると切欠底の微小き裂(または短いき裂)の開閉口点が明りようになる。しかし、この方法ではき裂発生前と発生後の応力繰返し周波数や繰返し応力振幅を厳密に一致させる必要がある。そのためこの方法は実用性に欠ける点がある。

図12の結果において、き裂発生後のひずみを用いた関数 h の λ の値を変化させたのが図15である。図15に示すように、ひずみ干渉法では λ の値を若干変化させることによって、ある程度の精度でき裂開閉口点が検出できる。すなわち、この場合には λ の値をひずみ幅比($\lambda=6.5$)より小さくするとき裂閉口点付近での曲率の変化が明りようになり、また大きめにするとき裂開口点付近に若干の折れ曲がりが生じることがわかる。これらの変曲点等によって実用上の精度でき裂開閉口点が判定できることが期待される。また、関数 f を用いた場合にも同様な結果が得られた。

(a) き裂発生前と発生後の σ - h 線図の比較

(b) ひずみ差による関数 h の変化とき裂開閉口点

図14 切欠長さ 7.5mm 、切欠半径 1mm の切欠きから発生した微小き裂のき裂開閉口点測定

3.3 ひずみ関数の波形によるき裂開閉口点の検出

前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾に示すように、き裂開閉口挙動はひずみあるいはひずみ関数の波形にも現れる。本節では図4, 5と同じデータを用いてひずみ波形によってき裂開閉口点応力が測定できるか否かを検討する。図16は1サイクル間のひずみ ε_y , ε_x そして応力 σ の波形である。図中の縦線はき裂が開閉する時点(サイクル時間)をそれぞれ OP, CL と付して示してある。き裂開閉口点付近で ε_y , ε_x の波形に変曲点がみられる。図17, 18は、それぞれひずみ関数 f , h の波形を調べたものである。これらの波形にもき裂開閉口点付近で変曲点が生じる。き裂開閉口点の応力はこれらの波形に変曲点が生じる時点(サイクル時間)の応力値で判断できる。また、関数 h について $\lambda=1.23$ (ひずみ幅の比)の場合について検討すると、極大値で仮に見積もったき裂開閉口点応力 σ_{op} は -32MPa である。この値は、図5によって判断したき裂開閉口点応力 -24MPa より若干低めめであるが、3.1節で述べたように実用的には差支えない程度の誤差であると思われる。また、本実験の $\lambda=0.6$ の場合には高精度かつ容易にき裂開閉口点の応力が測定できる。

図15 ひずみ関数 h の定数 λ の変化に伴う変曲点の変化(切欠きからの微小き裂について)

図16 ひずみ ε_x , ε_y の波形とき裂開閉口点

図 17 ひずみ関数 f の波形とき裂開閉口点 図 18 ひずみ関数 h の波形とき裂開閉口点

4. 結 言

著者らは前報^{(4)~(6)}において、ひずみ干渉法によるき裂開閉口点の測定方法を提案した。本報では小形試験片を用いて、一般的に広く用いられ、精度の高い除荷弾性コンプライアンス法と比較しながら、ひずみ干渉法によるき裂開閉口点応力の測定精度について検討した。本実験範囲で得られた主な結果は次のとおりである。

(1) ひずみ干渉法では次式のひずみ関数 f , h によってき裂開閉口点が判断できる。

$$f = (\varepsilon_y - \beta) / (\varepsilon_x + \alpha)$$

$$h = \varepsilon_y + \lambda \cdot \varepsilon_x$$

ただし、本実験では ε_y , ε_x はき裂または切欠中心軸上の荷重方向およびそれに垂直方向のひずみである。また α , β , λ は定数である。

(2) ひずみ干渉法では、 α , β , λ の値を適当に変化させることによって、き裂開閉口に伴う関数 f , h の変曲点を強調して検出できるので、精度よくき裂開閉口点が求められる。特に、中央き裂試験片に対しては λ はひずみ幅の比 $\Delta\varepsilon_y/\Delta\varepsilon_x$ の値かそれより若干低めの値が好ましい。

(3) ひずみ干渉法ではき裂開閉口挙動に基づくコ

図 19 ひずみ ε_x , ε_y を用いた除荷弾性コンプライアンス法によるき裂開閉口点応力の測定 (m , n : 除荷弾性線のこう配)

ンプライアンスの変化によってき裂開閉口点応力を求めるので、本質的には除荷弾性コンプライアンス法と同一である。しかし、ひずみ干渉法では除荷弾性線のこう配を特に求める必要がなく、変曲点でき裂開閉口点が判断できる。なお、ひずみ干渉法によるき裂開閉口点の測定精度は除荷弾性コンプライアンス法の場合とほぼ同じであると考えられる。

(4) 高精度除荷弾性コンプライアンス法とほぼ同様な手法によってひずみ干渉法でも精度よく切欠底から発生した微小き裂の開閉口点が測定できることが期待される。また、 α , β , λ を適当に変化させることによっても実用上の精度で切欠きから発生した微小き裂の開閉口点が求まる。

(5) ひずみ関数 f , h の波形の変化からもき裂開閉口点が実用上の精度で求められる。

最後に実験を手伝っていただいた琉球大学学生、田仲康将君、飯田成昭君に感謝する。

付 録

図 19 にき裂中央付近のひずみ ε_x , ε_y を用いて、除荷弾性コンプライアンス法によって判断したき裂開閉口点を示す。クリップゲージの場合と同様な結果が得られている。

文 献

- (1) 菊田・ほか3名, 材料, **25** 276(1976), 899.
- (2) 城野・ほか5名, 機論, **51** 567, A(1985), 1677.
- (3) 田中(西谷編), 疲労強度学, (1985), 162, オーム社.
- (4) 真壁・ほか3名, 機論, **56** 526, A(1990), 1360.
- (5) 真壁・兼城, 機論, **56** 531, A(1990), 2223.
- (6) 真壁・兼城, 日本材料学会第39期学術講演会前報, (1990) 51, 190.
- (7) 西谷・陳, 機論, **51** 465, A(1985), 1436.
- (8) 星富田・ほか3名, 日本機械学会材料力学講演会講演概要集, No. 890-59(1989-11), 50.