

ひずみ干渉法による疲労き裂開閉口点の測定* (ひずみ干渉法の実用性について)

真壁朝敏*¹ 西田新一*², 兼城英夫*³
大場克巳*⁴, 屋良秀夫*³

A Measurement of Fatigue Crack Tip Opening and Closing Points by Means of Strain Interference Method (On Practicality of Strain Interference Method)

Chobin MAKABE, Shin-ichi NISHIDA, Hideo KANESHIRO,
Katsumi OHBA and Hideo YARA

The measurement of fatigue crack tip opening stress σ_{op} and closing stress σ_{cl} occurring in actual equipment is generally very difficult. This is the reason why the range of effective stress intensity factor is not sufficiently applied to the fatigue crack propagation behavior of actual equipment. In this study, the measurement of σ_{op} and σ_{cl} in large size specimen is carried out by means of the strain interference method and the crack opening and closing points of long crack are successfully measured. Furthermore, σ_{op} and σ_{cl} in a specimen subjected to a rotating bending stress is measured. From these experimental results, the strain interference method is expected to be applicable to the measurement of σ_{op} and σ_{cl} in actual equipment.

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

1. 結 言

疲労き裂が伝ばする際には疲労き裂先端が開閉するが、その現象は Elber⁽¹⁾ によって初めてき裂伝ば則に取り入れられた。き裂開閉口挙動を考慮することによって、変動荷重下や平均応力下のき裂伝ば挙動を論理的に説明できることは多くの研究によって明らかにされている。しかし、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、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用化されているとはいえない。著者らは前報⁽²⁾⁽³⁾ 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 を用いたひずみ干渉法によってき裂開閉口点が測定できることを明らかにし、さらにその測定精度についても検討した。ひずみ干渉法はひずみゲージを用いる点や複雑な計算を必要としない点等から実用的であると思われる。しかし、前報⁽²⁾⁽³⁾ の

結果は小形試験片を用いた結果であるので、ひずみ干渉法が大形の機械構造物に対して適用できるか否かは明らかでなかった。

本研究ではひずみ干渉法の実用性について検討するため大形試験片を用いて実験を行った。十分に長いき裂においてもき裂開閉口点が検出できれば、ひずみ干渉法が実用的であることが実証できると考えられる。また、本研究では小形試験片を用いて、回転曲げ疲労試験へのひずみ干渉法の適応を試みた。回転曲げ試験でき裂開閉口点が検出できれば、切欠材の回転曲げ疲労過程でのき裂開閉口挙動とき裂伝ば則との係わりが明らかにできる。

2. 使用材料および実験方法

使用した素材は、大形試験片の場合は SM 50 鋼板 (9×2 438×14 000 mm) であり、回転曲げ疲労試験片の場合は S 15 CK 丸棒材 (直径 25 mm) である。それら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。図 1 (a) が大形試験片、(b) が回転曲げ試験片である。大形試験片には、き裂発生源として長さが約 30 mm、先端半径約 0.12 mm の中央切欠きを放電加工によって作製した。また、回転曲げ試験片には、平行部中央付近に直径、深さとも

* 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 沖縄県中頭郡西原町千原 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 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原 1)。

⁴ 琉球大学大学院。

約 1 mm の非貫通穴をドリル加工した。

図 2 にそれぞれの試験片に貼り付けたゲージの位置を示す。大形試験片では数箇所に二軸形ひずみゲージを貼り付けたのでひずみの記号は後に示すように、測定位置に対応させて添字を付す。また、切欠中心部付近のひずみゲージ以外、き裂が切欠底から 1 mm 以上成長した後、試験片を試験機から取り外してひずみゲージを貼り付けた。回転曲げ試験片については実験前にひずみゲージを貼り付けた。そして、穴中心軸上の対向した位置に単軸形ひずみゲージをそれぞれ試験片軸方向とそれに垂直方向に貼り付けてある。ゲージ長さはすべて 1 mm とした。き裂開閉口の測定方法は

表 1 化学成分

(a) SM50A

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.16	0.39	1.44	0.15	0.04	-	-	-

(b) S15CK

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

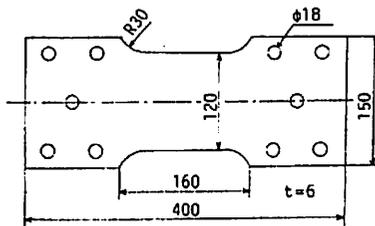
表 2 機械的性質

(a) SM50A

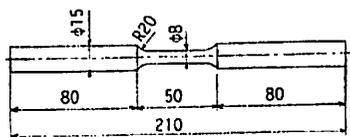
Yield point σ_s MPa	Ultimate tensile strength σ_b MPa	True fracture stress σ_T MPa	Elongation ϕ %
383	540	-	25

(b) S15CK

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



(a) 大形試験片



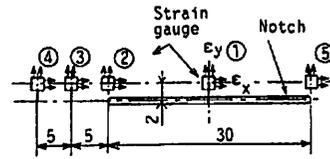
(b) 回転曲げ試験片

図 1 試験片形状 (mm)

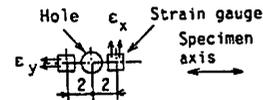
ほぼ前報⁽²⁾⁽³⁾と同様である。なお、ひずみ干渉法との比較のため、大形試験片ではき裂長さが約 52 mm の場合において、試験片側面に貼り付けたひずみゲージによって、除荷弾性コンプライアンス法によるき裂開閉口の測定を行った。

回転曲げ疲労試験においては図 3 (片側のみについて図示した) に示す方法によりひずみゲージからの信号を検出した。ひずみゲージからのリード線は、試験片のつかみ部に設けた幅約 0.2 mm、深さ約 0.5 mm の溝をとおして、回転曲げ試験機のチャッキング・ロッドに両面絶縁テープで貼り付けた銅薄膜にハンダ付けしてある。ひずみ信号はその銅薄膜と回転中に接触する銅薄膜の帯を介してひずみアンプに取り込まれる。ただし、この方法では試験片に加わる局所的な応力のはっきりしない(銅薄膜によって加わる張力は無視できる程度であると思われる)。そのため、回転曲げ疲労については、本実験範囲ではき裂開閉口が測定可能か否かを調べるにとどめ詳細な実験は行っていない。この方法は今後改善する予定である。

用いた試験機は東京試験機製作所の二軸形疲労試験機 LIST-30-01、島津製作所の小野式回転曲げ試験機 H-5 形である。き裂開閉口測定等のための繰返し荷重



(a) 大形試験片の場合



(b) 回転曲げ試験片の場合

図 2 ひずみ測定位置 (mm)

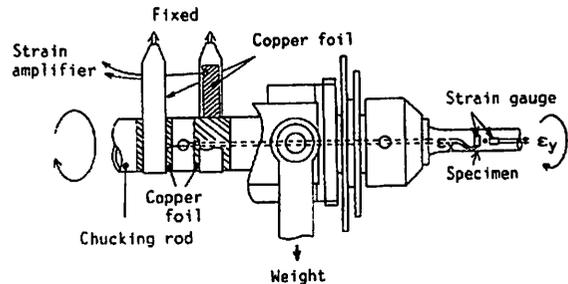


図 3 回転曲げ試験片におけるひずみ検出方法

速度は大形試験機の場合、0.1 Hz、回転曲げ試験の場合、約 60 Hz である。繰返し速度が両者で違うのは、回転曲げ試験機の速度が可変できないためであり、特に理由はない。用いた A/D コンバータはエルメック、EC-2390 である。実験データはパーソナルコンピュータ (NEC PC 9801-VX 2) を用いて 1 サイクルごとに解析してある。

3. 実験結果および考察

3.1 大形試験片のき裂開閉口点測定について

ひずみ干渉法が実用的であるか否かを調べるため、大形試験片のき裂開閉口点測定を行った。き裂が長くなるとき裂中心軸上の引張方向ひずみが小さくなるため、十分な精度でき裂開閉口点が求められなくなる可能性がある。そのため、図 2 に示すようにき裂面の近くに貼り付けた二軸形ひずみゲージでき裂開閉口点が実用上の精度で測定できるか否かを検討する必要がある。菊川ら⁽⁴⁾は、除荷弾性コンプライアンス法を用いて、き裂面近くに引張方向に貼り付けたひずみゲージにより判断したき裂開閉口点応力は、真の値よりも高めであることを示した。図 2 のように試験片に貼り付けたひずみゲージとき裂先端との相対位置はき裂の進展によって変化する。したがって、ゲージの位置によっては、ひずみ干渉法においても菊川らが指摘したことと同様なことが起こりえるので、その点にも注意する必要がある。

き裂開閉口点の測定は前報⁽²⁾⁽³⁾と同様に次式を用いてひずみ干渉法によって測定した。

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

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

ただし、 ϵ_y , ϵ_x は荷重軸方向およびそれに垂直方向のひずみである。また、以下においては、ひずみの測定位置を示す場合には図 2 に示す番号に対応した数字をひ

ずみの記号に添える。上式の定数 α , β , λ は前報⁽³⁾に記したようにして決定した。特に λ の値はひずみ幅比 $\Delta\epsilon_y / \Delta\epsilon_x$ の値がそれより若干小さい値を採用した。

図 4 はき裂長さ $2a$ (切欠長さ 30 mm を含む) が約 52 mm の場合のき裂中心軸上のひずみ ϵ_{y1} , ϵ_{x1} によるひずみ関数 f の変化を示したものである。疲労試験は繰返し応力振幅 53 MPa (切欠きのない部分の公称応力)、応力比 -1 で行った。図中に示したき裂開閉口点 (後に示す図 5 を用いて判断し、それぞれ記号 OP, CL で示した) と思われる付近で線図に折れ曲がりが見られる。しかし、ひずみが小さいために線図に現れるノイズが大きく、また切欠きが長いため、その変形等の影響を受け、き裂開閉口点以外のほかの場所にも折れ曲がりが生じている。関数 h を用いても同じ結果が得られた。また、き裂発生前にもほぼそれと同じ位置に明りょうな折れ曲がりが生じる。このようなことから、測定精度を高めるためおよび実用化のために、切欠先端付近あるいはき裂先端付近等の位置でき裂開閉口点を測定し検討したのが、図 5, 7, 8 である。これらは若干の平滑化処理を行っているが平滑化によって変曲点は移動しない。また、この際には、中央き裂の片側の先端のみのき裂開閉口点応力を求めることになるが、き裂長さが切欠きを挟んでほぼ左右対称に進展したので本研究目的の達成のためには差支えないものと考えられる。そして、一部のき裂長さの場合において、両切欠先端のひずみ ϵ_{y2} , ϵ_{x2} とひずみ ϵ_{y5} , ϵ_{x5} を用いてき裂開閉口点を求めた結果はほぼ同じであった。

切欠先端付近のひずみ ϵ_{y2} , ϵ_{x2} を用いてき裂開閉口点を測定したのが図 5 である。前報⁽³⁾の結果を用いて判断すると OP, CL と付した矢印の点がそれぞれき裂開閉口点、閉口点とみなせる。杵渕ら⁽⁵⁾の中央き裂試験片 (切欠きからき裂が成長) の結果では、き裂中心軸

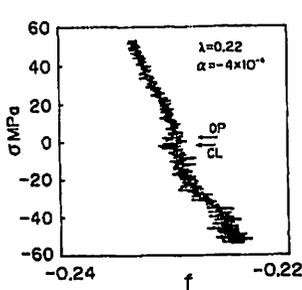


図 4 き裂中央付近のひずみを用いた場合のひずみ関数 f によるき裂開閉口点の測定

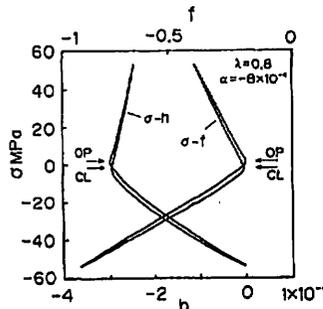


図 5 切欠先端付近のひずみによるき裂開閉口点応力の測定

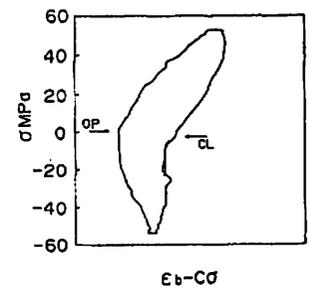


図 6 背面ゲージによるき裂開閉口点の測定 (ϵ_b : 背面のひずみ, C: 除荷弾性線のごう配)

と切欠先端近くの変位によって測定したき裂閉閉口点はほぼ一致している。そのことと、図4に示すようにき裂中心軸上のひずみを用いた場合でもほぼ同じような応力で $\sigma-f$ 線図および $\sigma-h$ 線図に変曲点が生じることから図5によって実用上の精度でき裂閉閉口点が判断できたと考えられる。また、図6は試験片側面のき裂面の延長線との交点付近に貼り付けた単軸形ひずみゲージ(いわゆる背面ゲージ)を用い、除荷弾性コンプライアンス法によって、き裂閉閉口点を検討したものである。図6には、図5で求めたき裂閉閉口点(図中のOP点)付近に変曲点が存在する。

図7は図4, 5と同時に測定した切欠底から5mmき裂進展方向にずれた位置(切欠底とき裂先端の中心近くの位置)のひずみ ϵ_{y3} , ϵ_{x3} を用いた場合の結果である。図7中の実線の矢印は図5によって求めたき裂閉閉口点を示している。小形試験片を用いた前報⁽²⁾⁽³⁾の結果から類推すると、図7から判断されるき裂閉閉口点と思われる変曲点は同図中の破線の矢印位置にある。これは図5によって判断した値よりも高めである。この結果は前述した菊川ら⁽⁴⁾が除荷弾性コンプラ

イアンス法によって指摘したことと同様になっているように思える。また、この結果はひずみゲージを貼り付けた位置の近くのき裂面の開閉と関係しているようにも思える。しかし、疲労き裂の進展を伴う場合、 ϵ_{y3} , ϵ_{x3} の位置に近いき裂面が閉じるのはき裂先端より遅く、そのき裂面が開くのはき裂先端より早いはずである。このことから判断すると、そのき裂面の開閉する応力はき裂先端閉閉口点の値より低くなるはずである。したがって、図7に破線で示した部分の変曲点はき裂面近傍に生じる残留ひずみ等の影響によるものであると考えられる。そこで、き裂の開閉に関連すると思われる変化が図7に生じていないかどうか再検討してみると、き裂閉閉口点近く(図7中の実線の矢印)でも変曲点が生じていることが確認できる。図8はき裂先端近傍のひずみ ϵ_{y4} , ϵ_{x4} によるひずみ関数 f と繰返し応力 σ との関係である。この場合はき裂先端の繰返し塑性域と残留ひずみ等が関連すると思われる明りょうな折れ曲がりが生じる(図中に破線の矢印で示す)。き裂閉閉口点はそれとは別のOP, CLと付した矢印で示す変曲点(図5の場合と一致)である。その他のき裂長さの場合においても、き裂先端付近のき裂面近くでは図8のようにき裂閉閉口点と残留ひずみ等

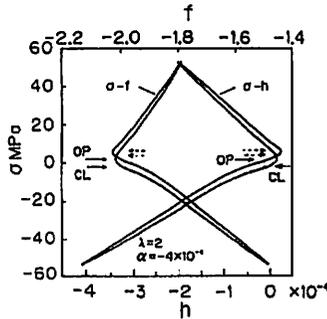


図7 閉閉するき裂面付近のひずみによるき裂閉閉口点測定

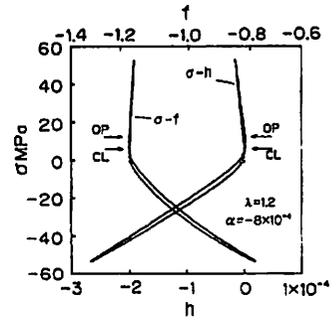


図9 切欠先端付近のひずみによるき裂閉閉口点の測定

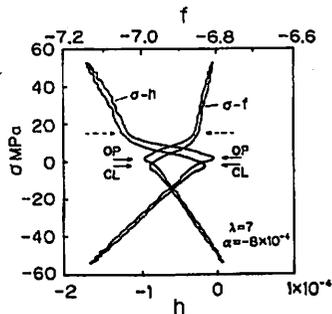


図8 き裂先端付近(き裂中心側)におけるひずみを用いたき裂閉閉口点の測定

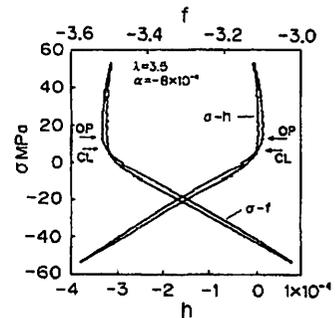


図10 き裂先方のひずみによるき裂閉閉口点の測定

による双方の変曲点が明りょうに現れた。

図9, 10は図5~8の場合と異なり、き裂長さが、 $2a = 36.9 \text{ mm}$ (切欠長さ 30 mm を含む) の場合の結果である。この場合は、本実験で使用したA/Dコンバータの不具合によりき裂開閉口点付近でノイズが生じたがき裂開閉口点は判断できる(ノイズのためき裂開閉口点を誤って判断しないように平滑化は行っていない)。図9は切欠先端付近のひずみ ε_{x2} , ε_{x3} を用いたひずみ関数の変動であり、図10はき裂先方のひずみ ε_{y3} , ε_{x3} を用いた場合である。両者の変曲点により判断したき裂開閉口点はほとんど一致している。この結果からき裂先方に貼り付けたひずみゲージによってもき裂開閉口点が実用上の精度で評価できることが期待できる。西谷・陳のき裂閉口点を求めた実験⁽⁶⁾でも、小形試験片の場合において同様な結果が得られている。

き裂面近くのひずみからもき裂開閉口点が実用上の精度で判断できることを図7, 8によって示した。それをさらにはっきりさせるため、図11に別な実験結果を示し検討した。この場合はき裂の開閉口点はもちろん負荷と除荷の際のひずみ関数の経路がほぼ一致しているので考察しやすい。き裂長さ $2a$ は約 48 mm であり、用いたひずみ関数は式(2)の h である。線図にはひずみを測定した位置の番号(切欠先端近く: 2, き裂面の近く: 3)と定数 λ の値を記入してある。二つの線図の引張過程について比較すると、開閉する際に残留応力等の影響が生じるとと思われるき裂面付近と切欠先端付近のひずみ関数と応力の関係には、荷重が圧縮から引張りに反転した後に零になる付近までの曲率に明らかな違いがあることがわかる。圧縮過程においても同様なことが生じてる。そして、両者のき裂開閉口点は前述したように図中の矢印付近として判断できる。したがって、このようなき裂先端開閉口やき裂面近傍に生ずる残留応力等による変曲点を区別できればひずみ干渉法によるき裂開閉口点測定が実用上の精度で可能になる。また、この現象の応用として、疲労試験

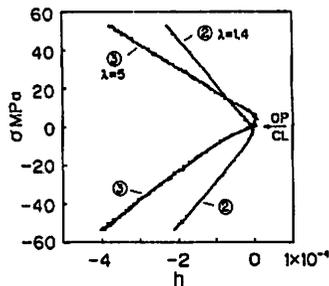
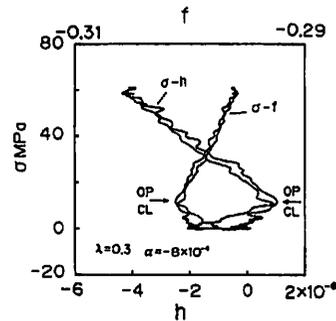


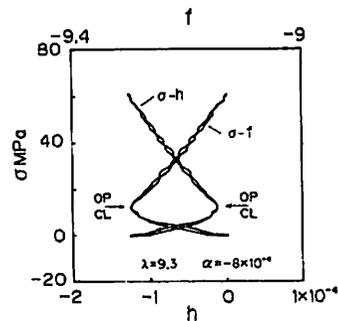
図11 き裂面付近と切欠先端付近の σ - h 線図の違い

の前にあらかじめき裂の先方に二軸形ひずみゲージを貼り付け連続的に監視すると、き裂が進展していく際のひずみ関数 f , h と応力 σ の関係を示す線図の変化によって、き裂がそのひずみゲージの位置を通過したのか否かが判断できる。

以上の結果から、ひずみ干渉法を用いた場合、き裂面付近あるいはき裂先方のひずみを用いて提案したひずみ関数と応力の関係を示す線図の変曲点によってき裂開閉口点が決定できることがわかる。また、き裂先端付近のひずみを用いると残留ひずみ等による変曲点が生じるが、判断を誤らなければ、それとは別の変曲点によってき裂開閉口点が判定できることがわかった。したがって、これらの点に注意すれば、実際の大型機械構造物においても実用上の精度でき裂開閉口点の応力が測定できる可能性がある。ただし、ひずみアンブやA/Dコンバータ等によって検出されるひずみ値が小さい場合、ひずみ信号のノイズが大きくなる場合があるので、その点に注意してひずみゲージを貼る必要がある。そして、なるべく、数箇所に貼ったひずみゲージから得られる複数の線図を比較してき裂開閉口点を判断するのが好ましいと考えられる。



(a) 切欠先端付近のひずみ ε_{x2} , ε_{x3} によるき裂開閉口点の測定



(b) き裂面近くのひずみ ε_{y3} , ε_{x3} によるき裂開閉口点の測定

図12 片振疲労におけるき裂開閉口点の測定

本研究では、同じ試験片を用いて、応力振幅 $\sigma_a=32$ MPa で片振り疲労試験（応力比はほとんど零）を行い、き裂長さが約 55 mm～約 80 mm の間の数箇所でき裂開閉口点の測定を行った。得られた結果の一例 ($2a=63$ mm の場合) を図 12 に示す。この結果から、両振り疲労試験の場合と同様な手法によって実用上の精度でき裂開閉口点が求まることが期待できる。なお、本研究の実験条件ではき裂は平面応力状態で進展していると考えられる。平面ひずみ状態でも同様なことが成り立つのかについては検討する余地がある。

3・2 ひずみ干渉法による回転曲げ疲労試験でのき裂開閉口点測定 回転曲げ試験においてはき裂開閉口点の測定の可能性のみについて示す。試験機構造と本実験法の都合上、回転曲げでは試験片に加わる局所的な応力は測定していない（応力を求めるには工夫が必要である）。そのため、穴中心軸上の表面応力は余弦波と仮定し、測定したひずみ ϵ_y の最大値を起点とした 1 サイクル間の時間の関数として仮に決定した。穴径を含む表面き裂長さが約 2.5 mm の場合に測定したひずみ関数 h と仮定した応力の関係を図 13 に示す。図 13 には平滑化処理したデータと平滑化してないデータを併記した（煩雑さを避けるため、横軸のスケールは刻んでいない）。この線図には OP、CL と付した矢印の点で折れ曲がりが生じている。これらの点はいはき裂の開閉口点に対応することが予想される。今後、この方法を改善し、回転曲げ試験における穴材のき裂開閉口挙動とき裂伝ば挙動の関係を調べたいと思っている。

4. 結 言

ひずみ干渉法によるき裂開閉口点応力測定の実用性について検討した。ひずみ干渉法ではき裂の先方あるいはき裂面の近くのひずみを用いて、大形試験片のき裂開閉口点の応力が測定できる。前報⁽⁹⁾ とこの結果から、ひずみ干渉法は機械構造物における疲労き裂開閉口点の応力の測定に応用できることが期待できる。得られた主な結果は次のとおりである。

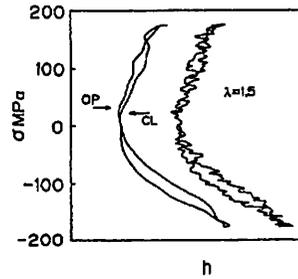


図 13 回転曲げ試験におけるき裂開閉口点の測定

- (1) 大形試験片では、き裂長さが長い場合、き裂中央の荷重軸方向ひずみ ϵ_y とそれに垂直なひずみ ϵ_x を用いるとノイズ等のためにひずみ干渉法によるき裂開閉口点の測定精度が落ちることがある。その場合には他のき裂面近くあるいはき裂先方のひずみを用いる必要がある。
- (2) き裂中心軸（あるいは切欠先端）に近い箇所あるいはき裂の先方付近のひずみ ϵ_y 、 ϵ_x を用いると、前報の手法により簡便にき裂開閉口点の応力が求められる。
- (3) き裂先端に近い箇所ではき裂開閉口点以外にも残留ひずみ等の影響のためにひずみ関数と応力の関係に変曲点が生じる。このような場合は、線図の形に注意してき裂開閉口点を求める必要がある。
- (4) 結論(1)～(3)の方法を考慮すれば、ひずみ干渉法によって、機械構造物におけるき裂開閉口点が容易に求められる可能性がある。
- (5) ひずみ干渉法によって、回転曲げ疲労試験においてもき裂開閉口点が求まる可能性がある。

文 献

- (1) Elber, W., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 468 (1971), 230.
- (2) 貞壁・兼城・糸数・塚富祖, *機論*, 56-526, A (1990), 1360.
- (3) 貞壁・西田・兼城, *機論*, 57-537, A (1991), 1035.
- (4) 菊川・城野・田中・高谷, *材料*, 25-276 (1976), 899.
- (5) 伴浩・秋庭・田中, *機論*, 56-522, A (1990), 251.
- (6) 西谷・陳, *機論*, 51-465, A (1985), 1436.