



Title	ひずみ情報による非貫通穴材の疲労き裂進展挙動の検知
Author(s)	真壁, 朝敏; 糸数, 真哉; 大場, 克巳; 兼城, 英夫
Citation	日本機械学会論文集. A編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, 58(546): 34-39
Issue Date	1992-02-25
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/226
Rights	Copyright (c) 1992 日本機械学会

ひずみ情報による非貫通穴材の疲労き裂進展挙動の検知*

真壁 朝敏^{*1}, 糸数 真哉^{*2}
大場 克巳^{*3}, 兼城 英夫^{*2}An Inspection of Fatigue Crack Extension of a Blind-Holed Specimen
Based on Strain Information

Chobin MAKABE, Masaya ITOKAZU, Katumi OHBA and Hideo KANESHIRO

A detection of fatigue crack initiation and growth behavior of a blind-holed specimen was carried out by means of the strain interference method. The strains on the center axis of the hole are used for the determination of the strain function 'h'. The crack initiation can be detected using the waveform of the strain function 'h'. The waveform of 'h' of the precracking can be distinguished from that of the postcracking. The penetration of crack depth into the specimen thickness can also be inspected using the waveform of the strain function 'h'. Such variations of the waveform are based on the crack tip opening and closing behavior. Furthermore, the approximate estimation of crack length was carried out using the value of the strain function 'hh' measured at the maximum stress point.

Key Words: Fatigue, Blind-Holed Specimen, Crack Initiation, Crack Growth, Crack Opening, Crack Closing, Strain Gauge, Measurement Method

1. 緒 言

機械構造物の破壊事故を防ぐために定期的な非破壊検査手法による点検が行われている。機械要素の破壊は、疲労に関するものが多く、その大多数は欠陥や切欠部等の応力集中部から発生した疲労き裂に起因している⁽¹⁾。したがって、機械の定期点検に加え、切欠部等の弱い部分の日常的な検査を行えば、疲労破壊事故は減少するものと考えられる。本研究では、前報⁽²⁾同様に、そのような切欠部からの疲労の進行の日常的な監視方法の開発の可能性について検討した。そして、安価なシステムでの疲労き裂発生・進展挙動の検知を目的として、切欠部周辺のひずみ(ひずみゲージにより検出)を用いる手法を考案した。また、これまでにき裂発生・進展したき裂の長さ・形状を精密に測定する手法⁽³⁾が多々提案されているが、本研究では、前報⁽²⁾⁻⁽⁴⁾で提案したひずみ干渉法を基にして機械の安全性の観点から簡便な手法によって大まかな計測ができないか否かを検討した。切欠きとしては、非貫通穴を平板試

験片に加工し、主にその穴からの疲労き裂発生およびき裂の板厚方向への貫通挙動を検討した。なお、応力振幅は一定の場合について検討したが、本手法はある限られた範囲では変動荷重への応用も可能であると思われる。

2. 使用材料および実験方法

素材は、S15CK丸棒材(直径25mm)である。それを900°Cで1時間焼なました後に試験片を作製した。その化学成分と機械的性質をそれぞれ表1, 2に示す。試験片形状を図1に示す。試験片には、直径、深さが約2mmの非貫通穴を試験部中央に放電加工によって作製した後、600°Cで1時間真空焼なましを行い実験に供した。図2に二軸形ひずみゲージ(ゲージ長

表1 化学成分(wt.%)

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_{y1} (MPa)	Ultimate tensile strength σ_B (MPa)	True fracture stress σ_T (MPa)	Reduction of area ψ (%)
283	449	956	68.8

* 平成3年4月1日 第68期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成3年4月26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、琉球大学工学部。

^{*3} 学生員、琉球大学大学院。

さ 1 mm, ゲージ抵抗 120Ω) の貼り付け位置を示す, 図 2 には, 穴部より上側部分のみを示しているが, 一部の試験については上下対称にひずみゲージを貼り付けた. ひずみ計測結果は, 上下で定量的にほぼ一致したので本研究では図 2 に番号を付して示した片側の結果について示す. ひずみゲージの位置については, 番号 ①の位置はベースを含むゲージ長さを考慮し, ひずみ測定箇所となるべく穴縁近くになるように選び, ②の位置はひずみゲージ間に貼り付けたゲージ端子の長さ (4 mm) とハンダ付作業を考慮して決定した. 本実験では試験片寸法とひずみゲージ貼付作業の都合によってひずみ測定位置を適当に選んだ. その位置は本実験範囲では差支えなかったが, 本研究の手法を実用化するためには, 種々の実験や数値計算等によりひずみゲージの位置と測定感度の関係を検討する必要がある. 本研究では, 前報¹⁾ 同様ひずみ干渉法を用いて穴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 によってき裂の進展挙動を検出した. なお, ひずみには測定位置を示す添字 1, 2 を付してある.

疲労試験は, 島津サーボ・パルス Lab5 を用い, 荷重制御方式で行った. 応力振幅は一定振幅であり $\sigma_a=98$ MPa~171.5 MPa の間で 4 種類とした. 応力比 R は -1 である. 穴からのき裂進展量は, 図 2 に示すように穴縁左右の平均長さ c で定義し, 穴径 d を含めた場合はき裂半長を $a=c+d/2$ として定義した.

3. ひずみ関数の定義

前報¹⁾ では, 主にひずみ干渉法により切欠部より発生するき裂の検出の可能性を示した. 本研究においては, き裂発生に加え, き裂の板厚方向への貫通挙動等の検知の可能性を次のひずみ関数を用いて検討する.

$$\left. \begin{aligned} h &= \epsilon_a + \lambda \epsilon_b \\ \lambda &= \Delta \epsilon_a / \Delta \epsilon_b \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで $\Delta \epsilon_a, \Delta \epsilon_b$ は 1 応力サイクル間のひずみ ϵ_a, ϵ_b の変化幅である. また, ひずみ ϵ_a, ϵ_b としては単一箇所

$$\epsilon_a = \epsilon_{y1}, \epsilon_b = \epsilon_{x1} \quad (i=1, 2) \dots \dots \dots (2)$$

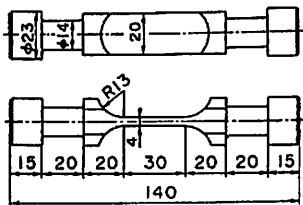


図 1 試験片形状 (mm)

i は測定位置を示す記号であるが本報では $i=1$ の場合について示す.

2 箇所のひずみを用いた場合は,

$$\epsilon_a = \epsilon_{y1} - \epsilon_{y2}, \epsilon_b = \epsilon_{x1} - \epsilon_{x2} \dots \dots \dots (3)$$

とした.

4. ひずみ干渉法によるき裂発生検知

き裂が発生した場合には Elber⁶⁾ によって見いだされたき裂開口挙動が生じる. その開口挙動はき裂付近のひずみあるいはき裂を挟むあるゲージ長さ間の変位になんらかの変化をもたらす. このような変化を利用して除荷弾性コンプライアンス法⁷⁾ やひずみ干渉法^{12)~14)} ではき裂開口点応力を求めている. そして, このひずみや変位の変動はき裂の発生検出にも利用できることが考えられる.

図 3 に 1 サイクル間の単独の二軸形ひずみゲージ (ゲージ位置: $i=1$) によって得られるひずみ関数 h の波形を示す. なお, 繰返し応力 $\sigma=0$ の時点をデータ取込み開始点としたが, $\sigma=0$ の点で h の値は, 応力の繰返しにより若干変化するので, 以下の図では任意の点の値から開始点 ($\sigma=0$) の値を差引いて平行移動し補正したものを h として用いた. 図 3 には応力振幅が $\sigma_a=122.5$ MPa, 171.5 MPa の 2 例について示した. これらの図から明らかのようにき裂発生前にはほぼ 1/2 サイクルの位置に最大値を持つ波形である. そして, き裂が発生するとその波形に明りような変化が生じ, 極値の位置や数に変化することがわかる.

引算した式 (3) に示すひずみによるひずみ関数 h の波形を図 4 に示す. この場合においても図 3 と同様にき裂発生前後において応力振幅レベルによらず, 波形に変化が生じることが確認できる. そして, この場合には, 単独の二軸形ひずみゲージの結果よりもき裂発生による波形の変化が明りようである. その理由としては, ひずみ差を用いることによってひずみ倍号のノイズが減少し, さらにき裂開口挙動の波形に及ぼ

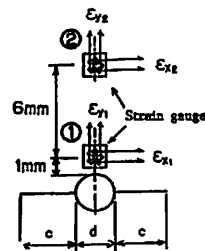


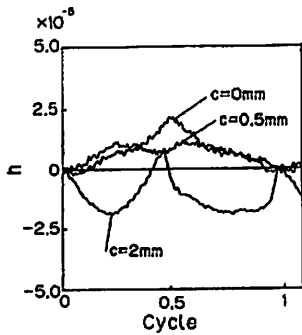
図 2 ひずみ測定位置 (mm)

す影響が強調されることが考えられる。前報⁽¹⁾では、き裂発生による波形の変化を明りょう化するために、き裂発生前の基準波形から同じ箇所のき裂発生後のひずみ波形を差引いたものを用いたが、この場合には、周波数のずれ、応力振幅のずれ等の影響を除去する必要があった。したがって、実用的な面からは、本研究の場合の2箇所のひずみ差を用いたほうが有利である。

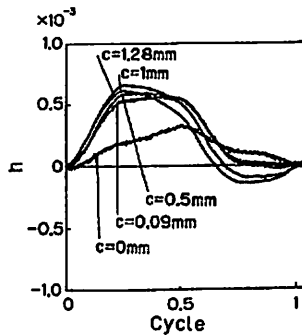
以上のことからひずみ波形の変化によってき裂の発生が検知できることが明らかである。またき裂が大きくなるに従って、波形の初期状態からの変化の程度も激しくなる。そして極値の位置のずれや波形の振幅の変化を利用すれば、ひずみ情報による切欠部からの疲労き裂発生の自動検出が可能になると思われる。

き裂発生前とき裂発生後の公称応力 σ と引算した式(3)によるひずみ関数 h の関係を図5に示す。穴部があることの影響によってき裂発生前には σ - h 線図には複雑な折れ曲がりが生じる。そして、き裂が発生

すると σ - h 線図へのき裂開口挙動の影響が穴部の変形挙動による影響よりも大きくなり線図に変化が生じる。この変化は、き裂が大きくなるほど明りょうである。前述したようにこのようなき裂発生によるき裂

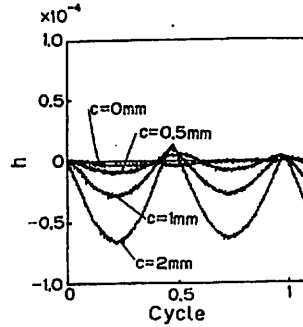


(a) $\sigma_a=122.5$ MPa($c=0$ mm のとき $\lambda=7.8$, $c=0.5$ mm のとき $\lambda=8.1$, $c=2$ mm のとき $\lambda=7.7$)

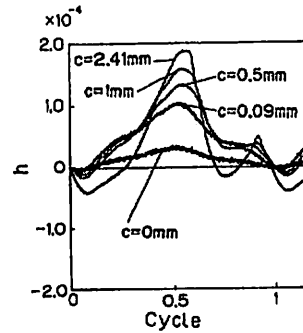


(b) $\sigma_a=171.5$ MPa($c=0$ mm のとき $\lambda=9.32$, $c=0.09$ mm のとき $\lambda=9.75$, $c=0.5$ mm のとき $\lambda=10$, $c=1$ mm のとき $\lambda=8.76$, $c=1.28$ mm のとき $\lambda=7.38$)

図3 単独のひずみゲージを用いたひずみ関数 h によるき裂発生の検知



(a) $\sigma_a=122.5$ MPa($c=0$ mm のとき $\lambda=2.3$, $c=0.5$ mm のとき $\lambda=2.6$, $c=2$ mm のとき $\lambda=2.8$)



(b) $\sigma_a=171.5$ MPa($c=0$ mm のとき $\lambda=1.99$, $c=0.09$ mm のとき $\lambda=1.7$, $c=0.5$ mm のとき $\lambda=1.86$, $c=1$ mm のとき $\lambda=1.98$, $c=1.28$ mm のとき $\lambda=2.51$)

図4 2箇所のひずみゲージを用いたひずみ関数 h によるき裂発生の検知

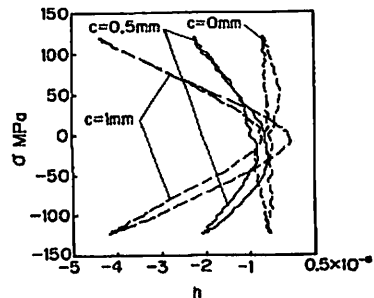
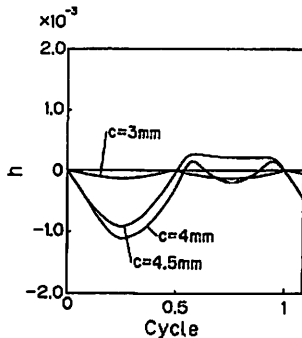


図5 き裂発生前後での2箇所のひずみ差を用いたひずみ関数 h と公称応力 σ との関係($\sigma_a=122.5$ MPa, $c=0$ mm のとき $\lambda=2.3$, $c=0.5$ mm のとき $\lambda=2.4$, $c=1$ mm のとき $\lambda=2.6$, $c=2$ mm のとき $\lambda=2.8$)

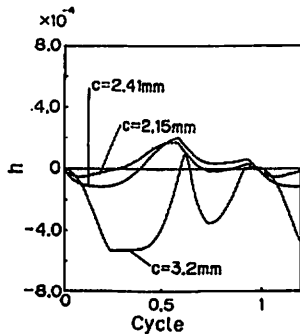
開閉口挙動の出現がひずみ関数 h によるき裂発生
の検知が可能になる根拠となっている。したがって、き
裂開閉口挙動がなんらかの手法によって求められ
れば、本研究と同様な手法によってき裂発生が検知で
きるものと考えられる。なお、単独の二軸形ひずみゲ
ージでもき裂開閉口点の検出は可能であるが、2箇所の
ひずみを用いればき裂発生によるひずみ関数の波形の
変化が明りょうになり単一箇所の場合より短いき裂の
開閉口点が測定できる。また、変動荷重下においては
パワースペクトル解析を用いることによってより効果
的なき裂検知が可能になると考えている。そのことは
今後の検討課題である。

5. ひずみ干渉法によるき裂貫通の検出

前章に示すように、ひずみ関数 h の波形はき裂長さ
によって変化する。したがって、 h の波形の変化を連
続的に調べれば、き裂の貫通挙動についてもなんらか



(a) $\sigma_a = 122.5 \text{ MPa}$ ($c=3 \text{ mm}$ のとき $\lambda=3.3$, $c=4 \text{ mm}$ のとき $\lambda=7.3$, $c=4.5 \text{ mm}$ のとき $\lambda=2.2$)



(b) $\sigma_a = 171.5 \text{ MPa}$ ($c=2.15 \text{ mm}$ のとき $\lambda=2.31$, $c=2.41 \text{ mm}$ のとき $\lambda=2.51$, $c=3.2 \text{ mm}$ のとき $\lambda=5.94$)

図 6 2箇所のひずみ差を用いたひずみ関数 h の波形によるき裂の板厚方向への貫通の検知

の情報が得られるはずである。そこで、き裂の板厚方
向への貫通挙動がひずみ干渉法によって検出できるか
否かについて検討した。

き裂が板厚を貫通する前後での引算した式(3)を用
いたひずみ関数 h の波形の変化の様子を $\sigma_a = 122.5$
MPa, 171.5 MPa の 2 例についてそれぞれ図 6 (a),
(b) に示す。破断面のピーチマーク等によって判断し
た貫通時のき裂長さは $\sigma_a = 122.5 \text{ MPa}$ では約 $c=4.3$
mm, 171.5 MPa では約 $c=3.8 \text{ mm}$ である。図 6 によ
れば、き裂が板厚を貫通する直前付近で波形に顕著な
変化が見られる。図 7 は $\sigma_a = 122.5 \text{ MPa}$ の例で、貫
通前後における $\sigma-h$ [式(3)を用いた場合] 線図である。
これから、貫通前後においては $\sigma-h$ 線図に変化がみ
られ、き裂開閉口点も移動していることがわかる。し
たがって、き裂が板厚を貫通する付近では、き裂伝ば
挙動、き裂開閉口挙動に穴部裏側の試験片表面の影響
が現れることが考えられ、また貫通による穴部周辺で
のひずみ振幅の変化が生じることが考えられる。この
ようなことがひずみ関数 h の波形の変化に反映して
いると思われる。

き裂貫通前後では、波形の振幅に著しい変化が生じ
る。そこで、次に式(3)に示すひずみ差を用いたひず
み関数 h の変化幅 Δh とき裂半長 a (穴径を含む) の関
係を図 8 に示す。図 8 からき裂の貫通直前に Δh に急
激な変化が生じることがわかる。したがって、図 7, 8
からき裂の発生同様にき裂の板厚方向への貫通もひず
み関数 h の変化によって検知できることがわかる。ま
た、本研究範囲においては $\Delta h = 4 \times 10^{-4}$ 程度を目安と
しておけばき裂の板厚への貫通を未然に防ぎ、実験を
中止することができる。なお、単一箇所のひずみを用
いても、ひずみ干渉法によって、貫通挙動が検出でき

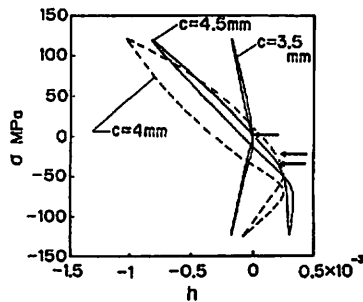


図 7 き裂貫通前後での 2 箇所のひずみ差を用いたひずみ関数 h と公称応力 σ との関係 [$\sigma_a = 122.5 \text{ MPa}$, $c = 3.35 \text{ mm}$ のとき $\lambda = 3.67$, $c = 4.33 \text{ mm}$ のとき $\lambda = 7.34$, $c = 4.65 \text{ mm}$ のとき $\lambda = 1.77$, (←はき裂開口点を示す)]

るが、2箇所のひずみを用いた場合が、より明りょうな変化が生じた。また、 $\sigma_a=98$ MPaの場合、き裂の発生後、き裂半長が $a=2.62$ mm (貫通前) でき裂進展速度が極端に低下したため繰返し数 $N=5\,950\,000$ で実験を中止し応力振幅を $\sigma_a=147$ MPa に切り換えた。

大路ら¹⁰⁾による電気ポテンシャルCT法は、き裂の精密な位置や形状を測定することを目的としており、医学のCTスキャナ手法による患部の検査にたとえられる。また、本手法では切欠部という限定された箇所ではあるが、その箇所が機械の破壊挙動に影響するのであれば、波形の変化によるき裂発生および成長挙動の監視は医者が患者の病状を心電図で調べることに類似していると考えられる。

6. ひずみ情報によるき裂長さの推定

き裂進展に伴いひずみ関数の波形に変化が生じる。このことからひずみ関数を用いてき裂長さの大まかな推定が可能か否か検討した。前章までのひずみ関数 h の波形振幅 Δh は、き裂開閉口挙動の影響を受ける。そのため、き裂開閉口点が移動する場合や応力レベルによってき裂開閉口点応力が異なる場合には Δh によるき裂長さの評価は合理的でないと思われる。そこで、同じひずみ情報を用いてき裂長さを推定するための手段として最大引張荷重時における次のひずみ関数の値 hh を用いることを考えた。

$$hh = \epsilon_{xm} + \epsilon_{ym} \dots\dots\dots(4)$$

ϵ_{xm} , ϵ_{ym} は最大引張荷重時の荷重方向ひずみとそれに垂直方向のひずみである。

ひずみ関数 hh を用いると、除荷弾性コンプライアンス法¹¹⁾や他の手法に比べれば精度は落ちると思わ

れるが、大まかなき裂長さの即時推定が可能であると考えられる。式(4)を用いた例として前報¹¹⁾の中央切欠き(切欠幅が細いので実質的に中央き裂とみなせる)の場合についてまず検討する。図9は、中央き裂の場合の応力の測定位置(き裂中心軸上)とき裂長さの関係を示したものである。線形破壊力学¹²⁾からこの場合には次式が成り立つ(記号は図9を参照)。

$$\sigma_x + \sigma_y = \sigma_y^0 \left(\frac{2y}{\sqrt{a^2 + y^2}} - 1 \right) \dots\dots\dots(5)$$

そして、最大引張荷重時の局所応力 σ_x , σ_y に対応するひずみが ϵ_{xm} , ϵ_{ym} であるから、フックの法則と式(4), (5)より (ν はポアソン比, E はヤング率)

$$hh = \frac{(1-\nu)\sigma_y^0}{E} \left(\frac{2y}{\sqrt{a^2 + y^2}} - 1 \right) \dots\dots\dots(6)$$

ここで σ_y^0 は最大荷重時の公称応力である。式(6)によるき裂長さ a と hh の関係は簡単な式で表せる。そこで前報の中央切欠き(中央き裂)の場合の実験結果と式(6)を比較したのが図10である。図10の縦軸は hh を公称ひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ で除した値で、横軸がき裂半長 a である。これから小規模降伏条件を満たすと思われる $a=4$ mm までの範囲で応力レベルによらず実験結果と式(6)の値は比較的よく一致している。したがって、関数 hh を式(4)のように単純なひずみ和にすれば、図10に示すように実験条件によっては、理論的な値を用いて大まかに hh の値からき裂長さが推定できる。また、本実験の場合は測定位置 y を固定したので hh はき裂長さ a に対して単調減少関数となっている。

図11に本実験の場合の非貫通穴から発生したき裂の場合について示す。これからき裂が短い範囲($a=4$ mm)では、応力レベルによらず $hh/\Delta \epsilon$ と穴径を含めたき裂半長 a には比較的よい対応関係があると思われる。応力振幅 $\sigma_a=171.5$ MPa においてピーチマーク法によりアスペクト比(き裂深さ/き裂半長)を調べたところ、き裂発生初期ではアスペクト比は0.5より大

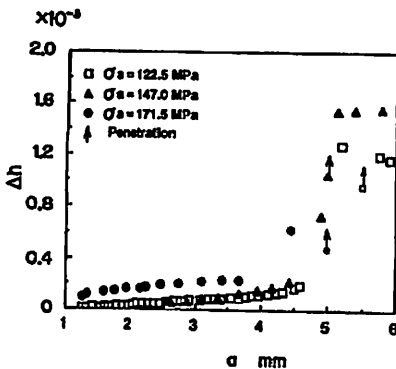


図8 2箇所のひずみ差によるひずみ関数 h の変化幅 Δh とき裂長さ a との関係(矢印は貫通時の表面き裂長さを示し、矢印に付した記号は応力振幅レベルに対応する)

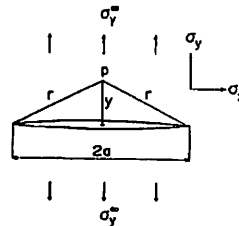


図9 単軸引張りを受ける無限板にあるき裂の応力測定位置(r は測定点Pとき裂先端との距離, y はき裂中心と測定点Pとの距離)

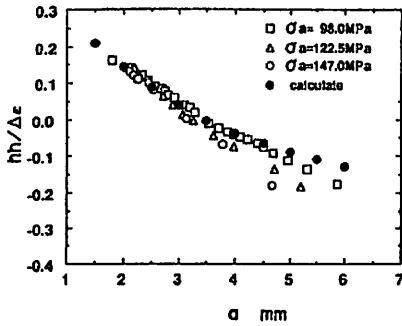


図 10 中央き裂材における $hh/\Delta\varepsilon$ とき裂長さ a との関係 ($y=2$ mm)

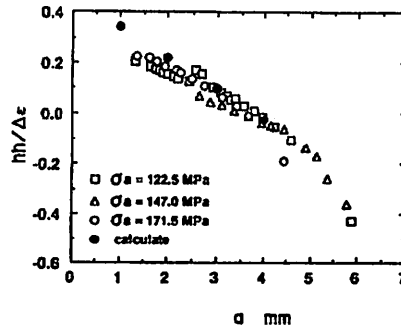


図 11 非貫通穴材における $hh/\Delta\varepsilon$ とき裂長さ a との関係

きい次第に減少していきき裂半長 a が約 2.5~4.0 mm の間ではほぼ半円形を維持していた。そこで、Newman-Ragu⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ によって求められた半円形表面き裂における応力拡大係数の補正係数 F の値を求め、それを式(6)に掛け合わせた値を数点図 11 に併記した(黒丸印)。応力拡大係数と補正係数 F の関係は次のように表される。

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{E_1} F \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 E_1 は第 2 種完全円積分、 F は補正係数 [詳細は文献(9)、(10)参照]。図 11 に示すように、き裂半長 2.5~4.0 mm の間で実験値と計算値はよい対応関係がみられる。表面き裂を二次元の等価き裂長さとして考えた場合の応力拡大係数の補正係数 F がそのまま式(6)の補正係数として使えるかは確認していないが参考値とはなると思われる。

以上のことから、応力レベルによらず小規模降伏条件が成り立つと思われる範囲で、き裂長さ a と $hh/\Delta\varepsilon$ の間にはある程度の相関性があり、ひずみ関数 hh により大まかな表面き裂長さの推定ができることが期待される。あらかじめ存在するき裂の進展の追尾や実験室での大まかなき裂計測に本研究の手法が適用できる可能性がある。この手法は今後改良していく予定である。

7. 結 言

疲労き裂が進展する際には、き裂開閉口現象が現れる。その開閉口現象はき裂周辺のひずみの変動に影響を及ぼす。本研究では、非貫通穴材を用いてひずみ情報によるき裂の発生・進展挙動を検知する方法を開発することを試みた。得られた主な結果は次のとおりで

ある。

- (1) 穴縁からき裂が発生するとき裂の開閉口現象によりひずみ関数 h の波形に変化が生じる。その波形の変化によりき裂の発生が検知できる。
- (2) 発生したき裂は板厚方向へ進展しやがて貫通する。ひずみ関数 h の波形はき裂の板厚方向への貫通によって大きく変化する。そしてその変動幅 Δh を連続的に観察することによってき裂貫通を安全側に検知することができる。
- (3) 小規模降伏条件が成り立つと思われる範囲でひずみ関数 hh とき裂長さ a の間にはある程度の相関性があり、ひずみ関数 hh により大まかなあらかじめ存在する表面き裂長さが推定できる。
- (4) 本研究のき裂発生・進展挙動の検知方法は現在の段階である限られた範囲ではあるが十分に実用に供することが期待できる。

文 献

- (1) 西田, 機械機器破損の原因と対策, (1986), 4, 日刊工業新聞社.
- (2) 真壁・兼城, 機論, 56-531, A(1990), 2223.
- (3) 真壁・兼城・糸数・屋富祖, 機論, 56-526, A(1990), 1360.
- (4) 真壁・西田・兼城, 機論, 57-537, A(1991), 1035.
- (5) 例えば, 大路・久保・阪上, 機論, 51-467, A(1989), 1109; 村上, 機械の研究, 41-9(1989), 993; 同41-10(1989), 1109.
- (6) Elber, W., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 485(1971), 230.
- (7) 菊川・城野・田中・高谷, 材料, 25-276(1976), 899.
- (8) 岡村, 線形破壊力学入門, (1976), 191, 倍風館.
- (9) Newman, J. C. Jr. and Raju, I. S., *NASA Technical Memorandum 83200*, (1981), 1.
- (10) Murakami, Y. (editor-in-chief), *Stress intensity factor hand book*, (1987), 712, Pergamon Press.