

き裂エネルギー密度による安定成長き裂の破壊抵抗評価*

(第5報, き裂先端開口変位, 開口角による評価との比較)

渡辺勝彦**, 畔上秀幸***, 平野八州男**

An Evaluation of the Fracture Resistance of a Stably Growing Crack
by Crack Energy Density(5th Report, Comparison with the Fracture Resistances Evaluated
by CTOD and CTOA)

Katsuhiko WATANABE, Hideyuki AZEGAMI, and Yasuo HIRANO

In the previous reports, an experimental method to evaluate the fracture resistance of a stably growing crack by crack energy density was proposed, and its applicability and superiority were shown through the applications of the method to the stable crack growth problems of thin plates and the comparison with the fracture resistances evaluated by the J -integral. In this report, experiments on the stable growth fractures of thin plates are carried out, the fracture resistances evaluated by CTOD and CTOA are obtained, and they are compared with prior fracture resistances evaluated by crack energy density. The results are as follows: (1) Both show a similar tendency in their variations with crack extensions as was expected theoretically. (2) In comparison with the latter, the former are scattered because of the difficulty of the measurement of local deformation around a crack tip. Therefore, the proposed method is superior to the method based on CTOD and CTOA in the ease of the measurement of these quantities necessary for evaluation. The validity of the instability criterion on crack extension proposed before is also shown in the Appendix.

Key Words: Fracture, Fracture Resistance, Thin Plate, Stable Crack Growth, CTOD, CTOA, Crack Energy Density

1. 緒 言

本一連の研究においては, き裂を含む構造物が過大荷重を受けたとき, き裂の安定成長は生じても危険な状態には至らないような設計を可能とするうえで必要となる安定成長き裂の破壊抵抗評価法を提案し, その有効性を実証することを目標としている。

これまで, まず第1報⁽¹⁾でき裂エネルギー密度⁽²⁾⁽³⁾にかかわる本研究で必要とされる基本的関係の導出とそれに基づきき裂エネルギー密度をパラメータとした破壊抵抗評価法を提案し, 続いて第2, 3報⁽⁴⁾⁽⁵⁾では薄板延性き裂安定成長実験を行って, 提案した方法による破壊抵抗評価を試み, それがき裂の進展開始から破断に至るまでの, さらには板厚の効果も含めての一貫して有効な破壊抵抗評価手段となることを示してきた。また第4報⁽⁶⁾では, 第2, 3報で得た同じ実験結果を用いて評価した J 積分による破壊抵抗との比較を行い, それを通じて, 提案した方法の一般性, 優位性を実証した。

そこで本報では, 第4報の J 積分による評価との比較に続いて, 第2, 3報で行ったのと同条件下での薄板延性き裂安定成長実験を行ってき裂成長開始時のき裂先端開口変位⁽⁷⁾および十分なき裂成長を経た後も有効とされているき裂先端開口角⁽⁸⁾⁽⁹⁾による破壊抵抗を評価し, その結果との比較により先のき裂エネルギー密度による破壊抵抗評価結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾の妥当性, さらには本研究で提案している手法の有効性について検討する。なお, 著者らは本研究に先だって, き裂エネルギー密度によるき裂の安定・不安定クライテリオン⁽¹⁰⁾の提案を行ったが⁽¹⁰⁾, このき裂成長の不安定化条件と第2, 3報の実験で観察されたき裂の不安定成長発生条件が等価なものとなることをここで付録の形で示しておく。これにより先に提案したき裂エネルギー密度による安定・不安定条件の有効性が本研究の実験結果により裏付けられ, 安定・不安定条件も含めたき裂エネルギー密度によるき裂挙動評価の有効性が実証されたことになる。

2. き裂先端開口変位およびき裂先端開口角
による破壊抵抗の評価

ここでは, 第2, 3報で行ったものと同様の薄板延性き裂安定成長実験を行い, き裂先端近傍の変形状態

* 昭和61年7月18日 東海支部豊橋地方講演会において講演, 原稿受付 昭和60年12月24日。

** 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

*** 正員, 豊橋技術科学大学 (〒440 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

を顕微鏡観察することにより、き裂成長開始時のき裂先端開口変位およびき裂成長開始後のき裂先端開口角による破壊抵抗を評価する。

実験は、片側き裂板 (SECP) 試験片と中央き裂板 (CCP) 試験片を用いて行い、その方法は第2, 3報に示したとおりであるが、異なるのは、第2, 3報で得られた荷重および荷重点変位に対するき裂成長長さの関係を参考にしてき裂成長開始時およびき裂成長長さが0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 32.0 mm程度の時点でクロスヘッドの動きを停止し、き裂を作成する前にモアレで用いられる技法で試験片表面に焼付けておいた0.1 mm間隔の格子の変形を読取顕微鏡を通して写真撮影を行った点である。また、初期き裂長さ a_0 については先の実験では板厚 W に対して $a_0/W=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ の6種類行ったが、ここでは $a_0/W=0.2, 0.4, 0.6$ となる3種類だけとした。

図1は、成長き裂先端近傍の読取り顕微鏡写真の一部である。ただし、図1中の $\tau, a-a_0$ は時刻、き裂成長長さを表し、 $\tau=0$ および $\tau=t_0$ は変形前およびき裂成長開始時である。このような写真から、き裂先端開口変位は図2(a)に示すような荷荷を受ける前にき裂先端であった点の相対変位として、き裂先端開口角は図2(b)に示す r と δ_r により δ_r/r として求めた。ただし、き裂成長長さが1.0 mm (図1において10目盛り)までは r をき裂成長長さ、 δ_r をき裂成長開始時の初期き裂先端における相対変位増分とし、き裂成長長さが1.0 mmを超えてからは $r=1.0$ mmとして求めた。表1にき裂成長開始時のき裂先端開口変位による破壊抵抗 $CTOD_c(t_0)$ を、図3にき裂成長長さに対するき裂先端開口角 $CTOA_c(t)$ ($\tau=t>t_0$) の評価結果の一部を示す。

これらの結果から次のことがいえる。

(i) $CTOD_c(t_0)$ は、初期き裂長さあまり依存

表1 き裂成長開始時のき裂先端開口変位 $CTOD_c(t_0)$ の測定結果

THICKNESS mm	a_0/W	SECP	CCP
		$CTOD_c(t_0)$ mm	$CTOD_c(t_0)$ mm
2.0	0.2	0.080	0.060
	0.4	0.080	0.060
	0.6	0.070	0.065
1.5	0.2	0.050	0.050
	0.4	0.065	0.045
	0.6	0.060	0.055
1.0	0.2	0.035	0.060
	0.4	0.050	0.055
	0.6	0.045	0.055

せず、ほぼ試験片に固有の値を読取ることができると考えてよいようである。

(ii) $CTOA_c(t)$ の変化も、初期き裂長さあまり依存せず、試験片に固有の変化を示すと判断することができるようであり、さらにその変化は破断面形状の変化 (第2, 3報に示した破断面写真参照) に対応しており、傾斜破壊部 (shear lip) の成長とともに減少し、一様な傾斜破壊状態に至った後では一定値になるものと考えられる。

ここで、(i)における固有の値は、破断面形状の観察から引裂破壊 (tear fracture) が支配的な破壊様式に対応してき裂先端開口変位による破壊抵抗と考えられることから $CTOD_{c,tear}$ と表し、一方(ii)における一定値は、せん断破壊 (shear fracture) が支配的な破壊様式に対応したき裂先端開口角による破壊抵抗と考えられることから $CTOA_{c,shear}$ と表して、各初期き裂長さに対して読取った値の平均値が、各板厚に対して表2に示してある。これより次のことがいえるようである。

(iii) $CTOD_{c,tear}$ は、板厚の減少とともに小さくなる傾向を示し、特にその傾向は片側き裂試験片において大きい。

(iv) $CTOA_{c,shear}$ は、板厚の影響をあまり受けない。しいていえばその減少とともに多少小さくなる傾向が見られる。

3. 考 察

先に著者らは、注目している量がき裂端でのエネルギーと変形という違いはあるが、き裂進展開始前においてはき裂先端き裂エネルギー密度 \mathcal{E} と $CTOD$ の間、およびき裂進展開始後においてはき裂先端き裂エネルギー密度上乘せ率 $\partial\mathcal{E}/\partial a$ と $CTOA$ の間に一対一対応、すなわち

$$\mathcal{E} = m \cdot CTOD \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial\mathcal{E}}{\partial a} = n \cdot CTOA \dots\dots\dots (2)$$

なる関係が期待されることを示した⁽¹⁾⁽¹⁰⁾。ここで m, n は材料の構成関係に依存して定まる係数である。したがってき裂エネルギー密度およびその上乘せ率によって評価された破壊抵抗と $CTOD$ および $CTOA$ によって評価された破壊抵抗の間には類似の傾向が期待されるが、ここで得られた結果はそれを裏付けるものとなっている。すなわち、まず(i)の結果は、第2, 3報で示したようにき裂進展開始時のき裂エネルギー密度があまり初期き裂長さの影響を受けないという結果に対応している。また(ii)の結果は、図4に対比のた

め特に第2報で求めた図3の例に相当する条件のもとでのき裂エネルギー密度上乘せ率による破壊抵抗評価の結果を示すが、ここで見られる傾向に全く対応したのとなっていることがわかる。式(2)において、定常なき裂進展状態に対しては n が定数となることが期待されるが、図4でもき裂エネルギー密度上乘せ率がほぼ一定値に落ち着くあたりは一般的な傾斜破壊が始まるあたりに相当しており、それ以後期待どおりの結果が得られている。

表3は表2の結果に対応する $\epsilon_{c\ tear} \cdot (\partial \epsilon_c / \partial a)_{s\ hear}$ (下付きの tear, shear は表2と同じ意味で用いている)を示したものであり、 $\epsilon_{c\ tear}$ については(iii)と同一の傾向を示していることがわかる。 $(\partial \epsilon_c / \partial a)_{s\ hear}$ については板厚の減少とともに増加する傾向があり、(iv)の結果と異なるようであるが、板厚の効果についてはその式(2)の係数 n への影響との組合せで決ま

るものであり、これは式(2)の関係と矛盾するものではない。

以上のことから、き裂エネルギー密度とその上乘せ率による破壊抵抗評価の結果とCTODとCTOAによるそれとは、それらの妥当性を相互に保証し合う関係にあるものと考えられるが、前者が実験的にその評価が比較的容易な量から求められるのに対し、後者においては一般にCTOD, CTOAの精度良い実験の評価が困難であり、したがって図3のようなかなりばらつきを持った結果しか得られないことを考えるとき、本研究における手法の有効性、優位性が主張できるものと思われる。

4. 結 言

本論文では、き裂成長開始時のき裂先端開口変位および安定成長き裂のき裂先端開口角による破壊抵抗を

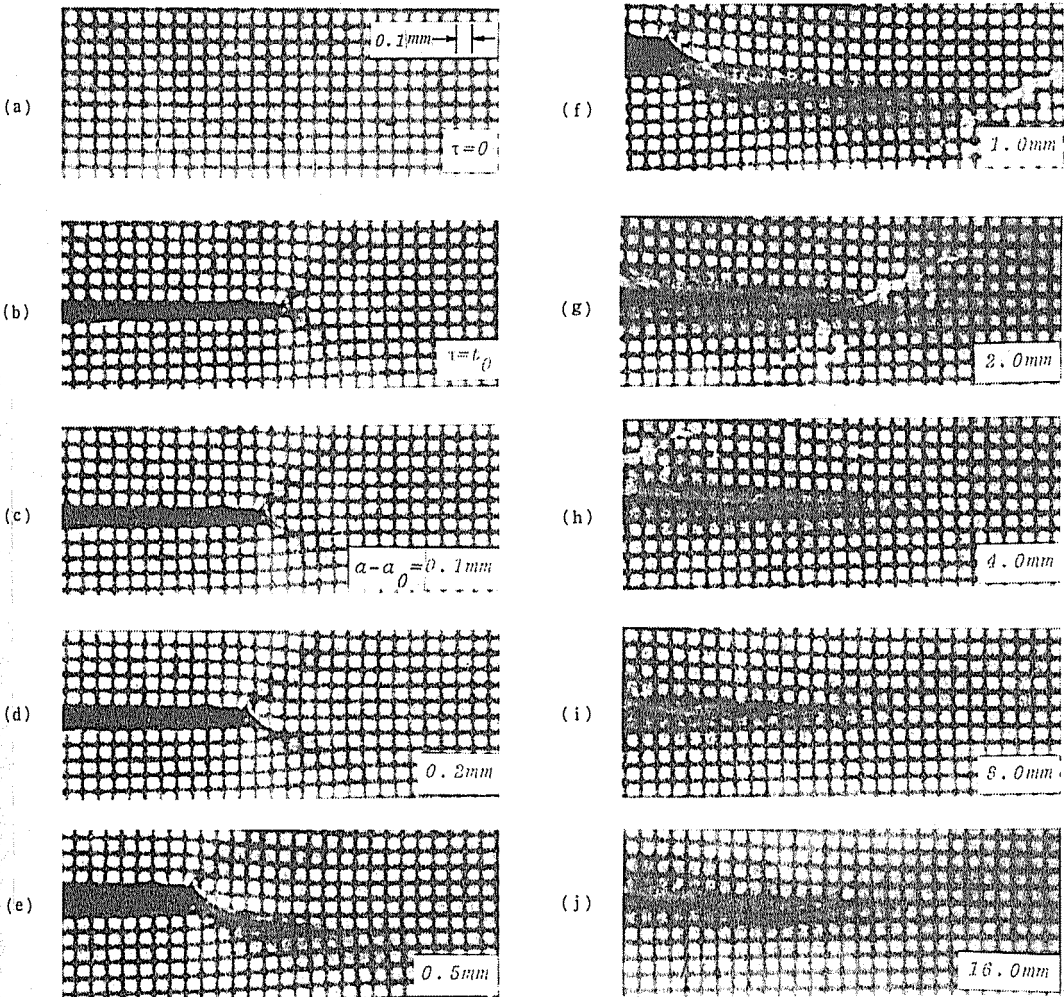


図1 成長き裂先端近傍の脱取り顕微鏡写真 (SECP, 板厚 2.0 mm, $a_0/W = 0.4$)

評価し、その結果との比較により第2, 3報で評価したき裂エネルギー密度による破壊抵抗の妥当性, 優位性を示した。なお, 付録において, 全体的挙動を反映するパラメータにより表されたき裂不安定条件と局所的パラメータであるき裂エネルギー密度により表された不安定化条件の等価性を論じ, 先に提案したき裂エネルギー密度による安定・不安定条件の有効性を実証した。

付録. 成長き裂の不安定化条件について

第2, 3報に示した薄板き裂材の延性破壊実験において, き裂の不安定成長は, 与えられた実験条件のもとで荷重点変位の増加に対する荷重の減少率が試験機剛性より常に小さかった片側き裂板試験片の実験では発生せず, この荷重の減少率が試験機剛性に等しくなる中央き裂板試験片の実験でおおむねこの条件が満たされた時点で発生している。この観察結果は, き裂の

不安定成長が発生した条件が, 試験機剛性を K_M , き裂が da だけ安定成長したときの荷重, 荷重点変位の変化量を dP_c , du_c として

$$-\frac{dP_c}{du_c} \geq K_M \quad (\text{不安定}) \dots \dots \dots (3)$$

と与えられることを示しており, この条件が全体的挙動に対応するパラメータで表した一般的な不安定化条件であることは, 力学系の釣合いを考えることにより明らかである (これと同じ条件は, 例えば J 積分による不安定化条件の議論(12)においても用いられてい

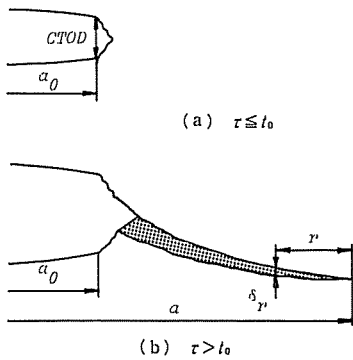


図2 き裂先端開口変位と成長き裂のき裂先端開口角

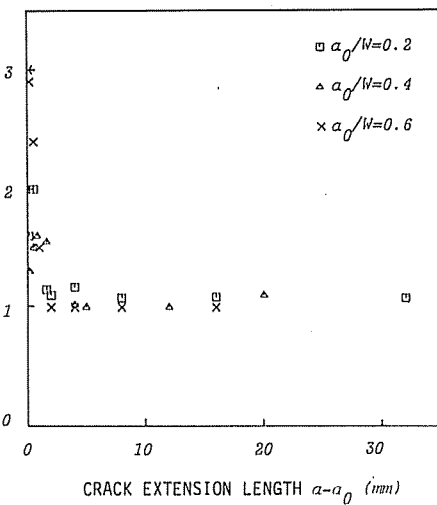


図3 き裂先端開口角 $CTOAc(t)$ の測定結果 (SECP, 板厚 2.0 mm)

表2 $CTOD_{c\ tear} \cdot CTOA_{c\ shear}$ の評価結果

THICKNESS mm	SECP		CCP	
	$CTOD_{c\ tear}$ mm	$CTOA_{c\ shear}$	$CTOD_{c\ tear}$ mm	$CTOA_{c\ shear}$
2.0	0.077	0.104	0.062	0.110
1.5	0.058	0.107	0.050	0.107
1.0	0.043	0.098	0.057	0.100

表3 $\epsilon_{c\ tear} \cdot (\partial \epsilon_c / \partial a)_{shear}$ の評価結果

THICKNESS mm	SECP		CCP	
	$\epsilon_{c\ tear}$ KN/mm	$\frac{\partial \epsilon_c}{\partial a} shear$ KN/mm ²	$\epsilon_{c\ tear}$ KN/mm	$\frac{\partial \epsilon_c}{\partial a} shear$ KN/mm ²
2.0	0.041	0.012	0.040	0.016
1.5	0.037	0.014	0.042	0.018
1.0	0.029	0.016	0.039	0.018

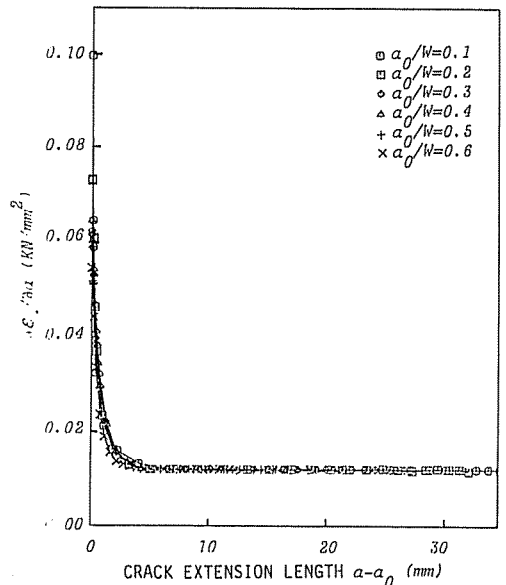


図4 き裂成長に対するき裂先端き裂エネルギー密度上乘せ率 (SECP, 板厚 2.0 mm)

る)。

一方、先の研究で与えとき裂エネルギー密度によるき裂の不安定化条件は、き裂エネルギー密度先端変化率に注目した

$$\frac{d\mathcal{E}_{ap}}{da}(t, a) \geq \frac{d\mathcal{E}_c}{da}(t, a) \quad (\text{不安定}) \dots\dots\dots (4)$$

およびそれと等価なき裂先端のき裂エネルギー密度上乘せ率に注目した

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{ap}}{\partial a}(t, a) \geq \frac{\partial \mathcal{E}_c}{\partial a}(t, a) \quad (\text{不安定}) \dots\dots\dots (5)$$

であった⁽⁴⁾。ただし下付 ap と c は、き裂長さが a となっている実際に実現されている状態から、与えられた力学的条件 (境界条件および構成則) を満たしながらき裂を仮想成長させたときの変化率と実際にき裂が安定成長したときの変化率であることを表す (以下同様)。ここで、き裂先端のき裂エネルギー密度上乘せ率は、初期き裂長さ a_0 、荷重点変位 u のときの荷重および成長き裂長さをそれぞれ $P(a_0, u)$ 、 $a(a_0, u)$ と表して

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a}(t, a) = -\frac{1}{B} \frac{\partial P}{\partial a_0}(a_0, u) / \left\{ \frac{\partial a}{\partial u}(a_0, u) \frac{\partial a}{\partial a_0}(a_0, u) \right\} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられたので⁽⁴⁾、この関係を式(5)に代入し、式(5)はき裂長さが a となっている実際の状態からの da に対する変化であるので、下付き ap を付した $\partial P / \partial a_0(a_0, u)$ および $\partial a / \partial a_0(a_0, u)$ はそれぞれ下付き c を付したそれらと等しくなることを考慮すると、式(5)と等価 [したがって式(4)とも等価] な条件として、

$$\frac{du_{ap}}{da} \geq \frac{du_c}{da} \quad (\text{不安定}) \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。ただし、式(6)中の B は板厚である。

ここで、式(3)と式(5)を比較する。両式において da 、 dP_c 、 du_c はき裂が安定成長したときの変化量であるが、それに対して試験機剛性 K_M をもった力学系でき裂を da だけ仮想成長させたときの荷重、荷重点変位の変化量を $dP_c + \delta P \cdot du_c + \delta u$ と表す (図5) と、式(3)は、

$$-\frac{dP_c}{du_c} \geq -\frac{dP_c + \delta P}{du_c + \delta u} \quad (\text{不安定}) \dots\dots\dots (8)$$

と表せ、式(7)は、

$$\frac{du_c}{da} \leq \frac{du_c + \delta u}{da} \quad (\text{不安定}) \dots\dots\dots (9)$$

と表せる。式(8)、(9)における $\delta P \cdot \delta u$ はき裂が da

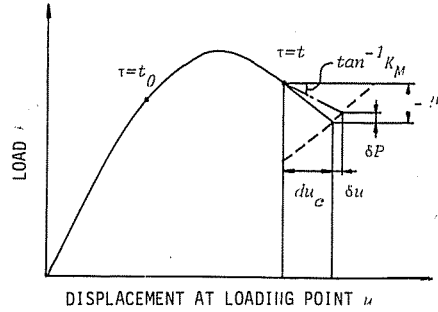


図5 き裂の微小成長 da に対する荷重、荷重点変位の変化

だけ安定成長したときの荷重、荷重点変位の変化と力学的条件を満たしながら da だけき裂を仮想成長させたときのそれらの変化の間の差であるが、これらは変位制御の場合 ($K_M \rightarrow \infty$) $\delta u = -du_c < 0$ 、 $\delta P = dP_{ap} - dP_c < 0$ となり、一方荷重制御の場合 ($K_M = 0$) $\delta P = -dP_c < 0$ 、 $\delta u = du_{ap} - du_c > 0$ となると考えられることから、一般に

$$\frac{\delta P}{\delta u} > 0 \dots\dots\dots (10)$$

なる関係が成立すると考えられる。したがって式(8)と式(9)を比較するとわかるが、これらの条件は等価なものとなり、式(3)と式(4)、(5)の等価性が示されたことになる。

これにより、第2、3報に示した薄板き裂材の延性破壊実験において実際に観察されたき裂の不安定成長は、先に提案したき裂の不安定条件を満たしたときに発生していたことが確かめられたことになり、き裂エネルギー密度による安定・不安定条件の有効性が実証されたものと考えられる。

文 献

- (1) 渡辺・畔上, 機論, 52-475, A (昭61), 727.
- (2) 渡辺, 機論, 47-416, A (昭55), 416.
- (3) 渡辺, 機論, 48-433, A (昭57), 1226.
- (4) 渡辺・畔上・平野, 機論, 52-475, A (昭61), 736.
- (5) 渡辺・畔上・平野, 機論, 52-480, A (昭61), 1891.
- (6) 渡辺・畔上, 機論, 52-480, A (昭61), 1899.
- (7) Wells, A. A., *Br. Weld. Res. Ass. Rep.*, M13/63 (1963).
- (8) de Koning, A. U., *Netherl. Natl. Aero-space Laboratory Rep.*, NLR, MP75035U (1975).
- (9) Shih, C. F., ほか2名, *ASTM Spec. Tech. Publ.* 668 (1979), 65.
- (10) 渡辺・畔上, 機論, 51-464, A (昭60), 1122.
- (11) 渡辺, 機論, 51-463, A (昭60), 873.
- (12) Hutchinson, J. W. and Paris, P. C., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 668 (1979), 37.

討 論

〔質問〕 安藤 柱〔横浜国立大学工学部〕

き裂エネルギー密度という新しい概念を提案し、それに基づいた破壊抵抗評価法を開発された一連の研究に敬意を表す。本論文の範囲を逸脱して恐縮であるが、本き裂エネルギー密度で破壊抵抗を評価する際の得失を、クライテリオンの物理的意味、評価の容易さ、材料特性値の安定性、実構造への適用性等の観点から J 積分や COD と比較してお教えいただきたい。

〔回答〕 本研究対象である延性き裂の安定成長に関して比較すると、およそ付表1のようになると考えられる。

まず、クライテリオンに用いられているパラメータの物理的意味について考えると、き裂エネルギー密度は、「き裂前縁を含む面内の各部分が担ったエネルギーをその面内の単位面積当たりで表したもの」という物理的意味を有しており、また、CTOD および CTOA は、き裂先端の変形量という意味を有しているのに対し、 J 積分は、HRR 解に基づく比例負荷域が存在するとき、微小き裂成長の範囲内で、その領域の変形状態を代表する量と考えられているが、比例負荷域が存在しないときの物理的意味は不明である。

しかし、評価の容易さについて考えると、 J 積分は、経路積分や荷重-荷重点変位曲線から簡便法により評価されるのに対して、本研究で提案したき裂エネルギー密度の評価法は、やや複雑で、さらに、CTOD や CTOA の評価は、き裂先端近傍の精密な観察や解析が必要で、正確な評価は困難を伴うと思われる。

また、材料特性値の安定性については、 J 積分はその物理的意味が存在するときは安定した材料特性値を与えるが、それ以外のときはき裂材形状に依存するようである⁽⁶⁾。き裂エネルギー密度は、なお検討する必要があるが、本研究の範囲内では良好である。

最後に、実構造物への適用性を考えてみると、CTOD および CTOA の解析には、き裂先端近傍で精

密な有限要素モデルなどを必要とするのに対して、 J 積分はそのような必要がなく、き裂先端を取り囲む経路積分により評価できることから適用性は良好と考えられる。また、き裂エネルギー密度も、先に提案したき裂前縁を含む面における変位の非連続性を考慮したき裂モデル(付1)の有限要素解析により容易に評価できることから適用性は良好と考えられる。

〔質問〕 青木 繁〔東京工業大学〕

(1) 以下の三つの実験結果

(i) 限界き裂先端開口変位 CTOD_{ctonr} が板厚の減少とともに小さくなること

(ii) CTOD_{ctonr} は中央き裂板 (CCP) と片側き裂板 (SECP) とで異なった値をとること

(iii) 限界き裂先端開口角 CTOA_{cshear} は板厚および試験片形状 (CCP と SECP) によらずほぼ一定値をとること

および

(iv) 限界表面エネルギー密度 E_c またはその変化 $\partial E_c / \partial a$ が上述の実験結果と同じ傾向をとることの物理的な理由についてお考えがあったらお教え願いたい。

(2) き裂進展開始の検出法についてお教え願いたい。

〔回答〕 (1) 次のようにお答えする。

(i) 第3報⁽⁶⁾で示しているように、Tetelmanら(付2)の考察によって理解できる。すなわち、板厚が小さく平面応力状態に近ければ、Hahnら(付3)によって観察されたように、き裂先端近傍は、板面とき裂面に対して45°の面ですべりが発生していることから、き裂先端から板厚程度の範囲内ですべり変形が発生していると考えられる。そこで、き裂先端近傍の状態を、標点距離が板厚程度の仮想的な小形引張試験片が並列的に埋め込まれているものと近似し、その小形引張試験片の限界ひずみを一定と考えれば、標点距離である板厚の減少は、限界伸びであるCTODを減少させることになり、問題の板厚効果が理解できる。

(ii) CCP と SECP の塑性領域を比較すると、CCP のそれは、いわゆるキャンドルフレーム形で伸

付表1 J 積分, CTOD(CTOA)およびき裂エネルギー密度の比較

	き裂エネルギー密度	J 積分		CTODおよびCTOA
		微小成長	大成長	
物理的意味	○	○	×	○
評価の容易さ	△	○	—	×
材料特性値の安定性	○*	○	×	○
実構造物への適用性	○	○	×	×

* 検討が必要

(付1) 渡辺・畔上, 機論, 51-469, A (昭60), 2154.

(付2) Tetelman, A. S. and McEvily, Jr., A. J., (宮本訳), 構造材料の強度と破壊 I, (昭45), 52, 培風館.

(付3) Hahn, G. T. and Rosenfield, A. R., *Acta Met.*, 13-223 (1965), 293.

びやかであるのに対して、SECPのそれは、き裂先端近傍に拘束されていると考えられる。この塑性領域の拘束は、き裂先端近傍の変形状態をより平面ひずみ状態に近くしていると考えられ、き裂が成長を開始するまでの限界変形能であるCTODを小さくしていると考えられることから、理解できる。

(iii) 図1のような読取り顕微鏡写真による評価では、 $CTOA_{\text{shear}}$ の精度はよいとはいえず、試験片形状によらないとは言いきれないが、どちらの試験片もせん断破壊が支配的な破壊様式であることから、同程度の値が得られたものと考えられる。

(iv) き裂エネルギー密度およびき裂エネルギー密

度上乗せ率は、き裂先端の状態をエネルギーで表したものおよびき裂成長に対するその上乗せ率であるのに対して、CTODおよびCTOAは、き裂先端の状態を変形量で表したものおよびき裂成長に対するその上乗せ率であるといった違いはあるが、両者は、ともに対応したき裂のパラメータであることから、それらの材料特性値は同様の傾向を示すものと理解できる。

(2) 薄板であることから、き裂が板厚中央部で成長を開始し表面まで達するまでの時間は短いと考えて、き裂板表面でき裂成長が観察されたときをき裂成長開始時とした。