

# 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2報, 薄板延性き裂への適用)

渡辺 勝彦\*\*, 畑上 秀幸\*\*, 平野 八州男\*\*

## Evaluation of Fracture Resistance of a Stably Growing Crack by Crack Energy Density (2nd Report, Application to a Ductile Crack in a Thin Plate)

by Katsuhiko WATANABE, Hideyuki AZEGAMI, and Yasuo HIRANO

The method proposed in the 1st Report for evaluating the fracture resistance of a stably growing crack by crack energy density is applied to the stable crack growth problems of thin plates, and its applicability and validity are confirmed. That is, the experiments of stable growth fractures of thin single-edge cracked specimens with different initial crack lengths under bending moment, and thin center cracked specimens also with different initial crack lengths under tensile force are carried out. The fracture resistances expressed by additional rates of crack energy density and crack energy density are evaluated, based on the results. When fracture modes are almost the same, fracture resistances have almost the same values regardless of initial crack lengths, and their values vary only corresponding to the change of fracture mode caused by crack extension. Also, the difference of specimen types has no remarkable influence on their values.

**Key Words:** Fracture, Thin Plate, Stable Crack Growth, Fracture Resistance, Crack Energy Density, Additional Rate of Crack Energy Density

### 1. 緒 言

延性を有するき裂材が静的な単調負荷を受けてき裂が安定に成長するときの破壊抵抗が、き裂進展開始から安定成長過程まで一貫して物理的意味が明白なき裂の力学量によって表され、その値が破壊様式に対応して定まるものであることが確認されれば、その破壊抵抗は材料特性値とみなすことができ、これを知ることにより構造物中に発生したき裂の安定成長挙動の評価が可能となる。本研究は、材料特性値としての破壊抵抗を与えるものとなることが期待されるき裂エネルギー密度<sup>(1)(2)</sup>による安定成長き裂の破壊抵抗評価法を提案し、実際問題への適用を通じてその有効性の実証を目指すものであり、前報<sup>(3)</sup>においては、安定成長き裂の破壊抵抗が、き裂エネルギー密度に基づき、実験で容易に測定が可能な荷重-成長き裂長さ-荷重点変位-初期き裂長さの関係だけから評価できる方法を提案した。本報は、その薄板延性き裂への適用を試みるものであり、薄板延性き裂の安定成長実験に基づき実際にき裂エネルギー密度による破壊抵抗の評価を試み、得られた

破壊抵抗と破壊様式との対応およびき裂材形状や負荷様式の影響等についての検討を行う。

### 2. き裂エネルギー密度による 破壊抵抗評価法

前報で提案した破壊抵抗評価法は次のとおりである。

初期き裂長さ  $a_0$  のき裂材が時刻  $\tau=0$  から負荷を受け時刻  $\tau=t_0$  に至ってき裂の成長が始まるような場合を考えると、き裂成長開始前の時刻  $\tau=t(\leq t_0)$  におけるき裂先端のき裂エネルギー密度  $\varepsilon(t, a_0)$  は初期き裂長さ  $a_0$ 、荷重点変位  $u(\tau)$  (時刻  $\tau$  と一対一対応) のときの荷重を  $P(a_0, u)$  と表すと

$$\varepsilon(t, a_0) = -\frac{1}{B} \int_0^{u(\tau)} \frac{\partial P}{\partial a_0}(a_0, u) du \quad \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。ただし  $B$  は板厚である。またき裂が安定に成長する時刻  $\tau=t(\leq t_0)$  におけるき裂先端のき裂エネルギー密度上乗せ率  $\partial \varepsilon / \partial a(t, a)$  は、

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a}(t, a) = -\frac{1}{B} \frac{\partial P}{\partial a_0}(a_0, u) / \left\{ \frac{\partial a}{\partial u}(a_0, u) \cdot \frac{\partial a}{\partial a_0}(a_0, u) \right\} \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる。したがって、初期き裂長さの異なる何

\* 昭和60年12月3日 第935回講演会において講演、原稿受付 昭和60年5月1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)。

本かの試験片を用意し、それらに対するき裂安定成長実験を行い、荷重-荷重点変位曲線等必要な諸量の測定を行えば、式(1)、(2)により破壊抵抗  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ 、 $\partial\mathcal{E}_c/\partial a(t, a)$  が評価される（材料特性としての破壊抵抗ということで下付き  $c$  を付すが、安定成長過程においては力学的条件により定まるものと一致する）。また

$$\mathcal{E}(t, a) = \mathcal{E}(t_0, a_0) + \int_{t_0}^t \frac{d\mathcal{E}}{da}(\tau, a) da d\tau \cdots (3)$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{da}(\tau, a) = \dot{a} \frac{d\mathcal{E}}{d\tau}(\tau, a)$$

$$= \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a}(\tau, a) + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial X_1}(\tau, a) \cdots \cdots \cdots (4)$$

であるので、上のようにして求められた  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ 、 $\partial\mathcal{E}_c/\partial a(t, a)$  を用い、さらに  $\partial\mathcal{E}_c/\partial X_1(\tau, a)$  に適當な値を設定すれば破壊抵抗  $\mathcal{E}_c(t, a)$  も評価される。ただし  $(\cdot) = (\cdot)/\partial\tau$  である。

本論文では薄板延性き裂安定成長実験を行い、その場合の破壊抵抗  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ 、 $\partial\mathcal{E}_c/\partial a(t, a)$  の、また破壊様式が一定のもとでのき裂進展においては  $d\mathcal{E}_c/da(\tau, a) = 0$ 、 $\partial\mathcal{E}_c/\partial a(\tau, a) = (\partial\mathcal{E}_c/\partial a)_{uni} (=const)$  となると考えられるので、 $\partial\mathcal{E}_c/\partial X_1(\tau, a) = -(\partial\mathcal{E}_c/\partial a)_{uni}$  として式(4)参照上述のようにして求められる破壊抵抗  $\mathcal{E}_c(t, a)$  の評価を試みる。

表 1 供試材の化学成分

THICKNESS mm	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mo %	Cr %
2.0	0.14	0.20	4.48	0.54	1.10	0.02
<hr/>						
Zn	Tr+Ti	Ti	OTHERS EACH	OTHERS TOTAL	A2	
%	%	%	%	%	%	
0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	RE	

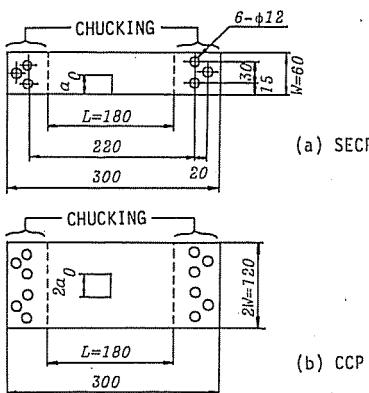


図 1 試験片形状

## 3. 薄板延性き裂安定成長実験

本章では、式(1)、(2)に基づき  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ 、 $\partial\mathcal{E}_c/\partial a(t, a)$  を評価するために必要となる荷重-成長き裂長さ-荷重点変位-初期き裂長さの間の関係を得るために行った薄板延性き裂安定成長実験についてその方法と測定結果を示す。なおせん断形の一様な破壊様式のき裂成長がすみやかに生じることと、成長き裂長さの測定が容易であるという観点から薄板を採用した。

3・1 実験方法 供試材としては Al 合金 2024-T3 を採用し、板厚  $B$  は 2.0 mm とした。その化学成分、機械的性質を表 1、表 2 に示す。また評価される破壊抵抗のき裂材形状や負荷様式への依存性を調べるために、試験片形状は図 1 に示す片側き裂板 (SECP) 試験片と中央き裂板 (CCP) 試験片とし、図 2 のような負荷様式を採用した。初期き裂長さ  $a_0$  は板幅  $W$  (図 1 参照) に対して  $a_0/W = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$  とした。なお、試験片はいずれもき裂方向が  $L-T$  方向 (き裂面がロール方向に垂直) になるように裁断した。

初期のき裂形態は図 3 のようであり、疲労予き裂は

表 2 供試材の機械的性質

THICKNESS mm	0.2% PROOF TENSILE STRESS GPa	STRENGTH GPa	ELONGATION %
2.0	0.327	0.470	22.0

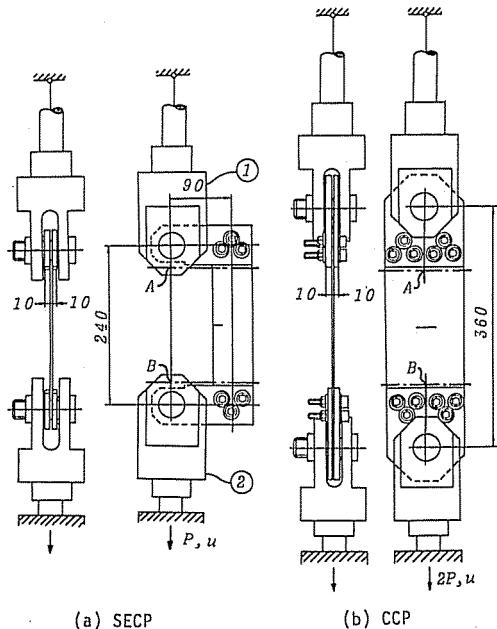


図 2 負荷様式

いずれも中央き裂板試験片の状態で最大応力拡大係数  $K_{I\max}$  が  $0.25 \text{ kN/mm}^{3/2}$  となる繰返し荷重で目標の長さになるように仕上げた。片側き裂板試験片は中央き裂板試験片の状態で疲労予き裂作成後切断して作製した。なお、この  $K_{I\max}$  を平面応力状態を仮定したときのき裂エネルギー密度に書き換えた値は後で示す  $\varepsilon_c(t_0, a_0)$  の評価結果の 20 % 程度である。

薄板延性き裂安定成長実験は負荷容量 10 t のインストロン形引張試験機を用いて図 4 のように行った。なお、クロスヘッドと支柱の相対速度は片側き裂板試験片の場合  $0.5 \text{ mm/min}$ 、中央き裂板試験片の場合  $0.1 \text{ mm/min}$  とした。試験機の剛性はクロスヘッドと支柱の相対変位から荷重点変位を引いた変位と荷重の関係から約  $45 \text{ kN/mm}$  の値が得られている。

片側き裂板試験片の場合荷重  $P$ 、成長き裂長さ  $a$ 、荷重点変位  $u$  は次のように測定した。荷重は図 4 (a) の上方に取付けたフルスケール 1 t のひずみゲージ式荷重計により測定した。成長き裂長さは、読取顕微鏡によりき裂を観察し、き裂を作成する前にモアレの技術により試験片の表面に焼きつけておいた  $0.5 \text{ mm}$  間隔の格子に基づいて、き裂先端が格子を通過するごとに荷重-荷重点変位曲線記録紙上にパルスを発生させるようにしておいたスイッチを押し、後でパルスを数えることにより測定した。荷重点変位は図 2 (a)において荷重の作用線と試験部の端に沿う一点鎖線の交点である A, B 点の相対変位とし、測定範囲土  $12.5 \text{ mm}$  の差動トランス式変位計 [図 4 (a) 中①] で測定した。なお変位計は A, B 点に位置するピンによって支えられており、そのピンは試験片に爪を介して固定され一点鎖線に沿って伸びた腕 [図 4 (a) 中②, ③] によって支えられている。またピンが作用線上に位置するように図 2 (a) の部品①, ②にテフロンを加工し

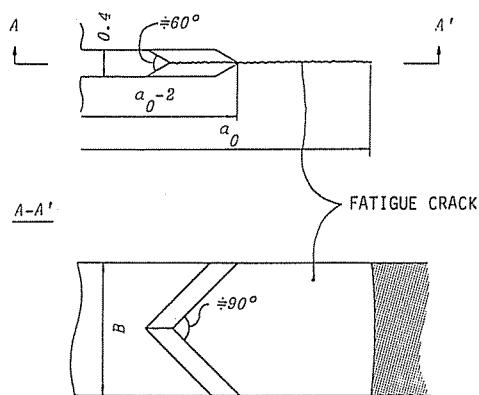


図 3 初期のき裂形態

て埋め込んだピンのガイドが設けられている。また、この実験では次のような工夫を行った。試験片の座屈は側板 [図 4 (a) 中の④] を両側に取付けることにより防止した。この側板の試験片に接する面はグリースが塗られその上に直径  $2 \text{ mm}$  の鋼製ボールが敷き詰められている。なおこの側板は図 2 (a) の上方に取付けられているバーに掛けられたワイヤで吊されており、試験片を下に引張るとき試験片との間にすべりが生ずる。この側板と試験片間の摩擦力はこのすべりに対する最大摩擦力をバーに貼付したひずみゲージで測定することによりその概略値を押さえた。いずれの実験でも測定した力は  $0.04 \text{ kN}$  以下であった。さらに、使用した試験機が縦型 (引張方向が鉛直) であるために図 2 (a) の負荷様式のままでは試験片、チャック治具、変位計などの自重によりき裂面に面内せん断力が作用する。この力を除去するために自重分だけ補正する必要があり、そのために物体を上下に分けたときのそれぞれの重心をワイヤで結び、それを定滑車に吊し、さらにその定滑車を下方に取付けられた柱の先端と上方の間に設けられた動滑車に吊す仕組にした。これにより負荷前に自重分だけ支えるようにしておけば試験片を下方に引張っても常に自重分を支えることができる。

一方、中央き裂板試験片の場合には荷重  $P$  (実際は  $2P$ ) は図 4 (b) の上方に取付けたフルスケール 10 t のひずみゲージ式荷重計により、成長き裂長さ  $a$  (実際は  $2a$ ) は片側き裂板試験片の実験と同様読取顕微鏡 [図 4 (b) 中①] によるき裂観察により測定した。荷重点変位  $u$  は、図 2 (b) において、A, B 点の相対変位とし、測定範囲土  $5 \text{ mm}$  のひずみゲージ式パイ形変位計 [図 4 (b) 中②] で測定した。なお、変位計は図 2

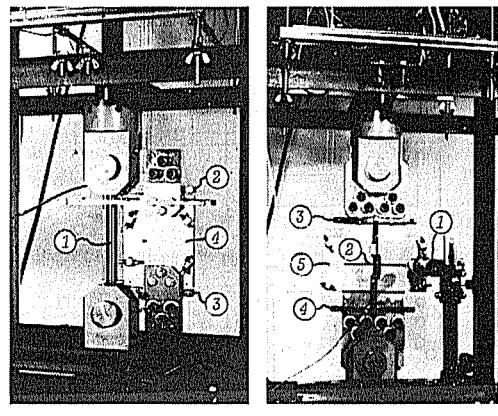
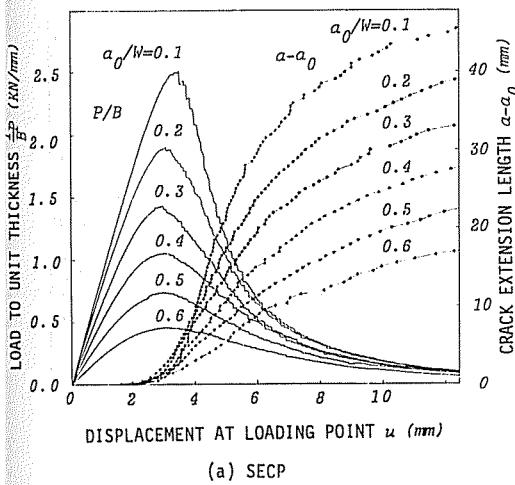


図 4 実験状況

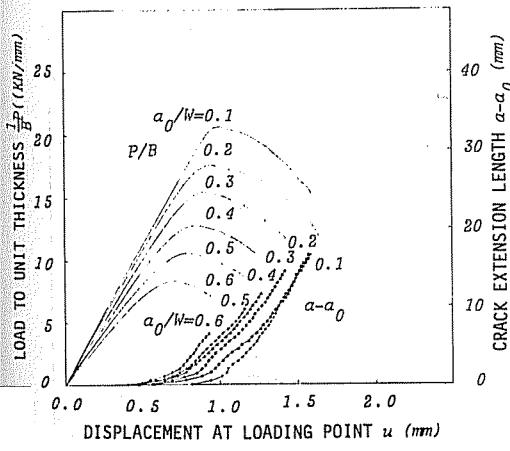
(b)の一点鎖線に沿って試験片に爪を介して固定されている治具 [図4(b)中③, ④]に取付けられている。また、この実験でも試験片の座屈は側板 [図4(b)中⑥]で防止している。なお片側き裂板試験片の実験と同様の方法で測定した側板に作用した摩擦力の概略値はいずれも0.04 kN以下であった。

**3・2 測定結果** 6種類の初期き裂長さ  $a_0$ に対する単位板厚当りの荷重  $P/B$ -き裂成長長さ  $a-a_0$ -初期き裂長さ  $a_0$ -荷重点変位  $u$  の測定結果を図5に示す。

き裂の不安定成長は、荷重点変位の増加に対する荷重の減少率  $-dP/du$  が試験機剛性より小さい片側き裂板試験片の実験では発生せず、中央き裂板試験片の実験では  $-2dP/du$  が試験機剛性に近づいたときに発生している。



(a) SECP



(b) CCP

図5 荷重-き裂成長長さ-荷重点変位の測定結果

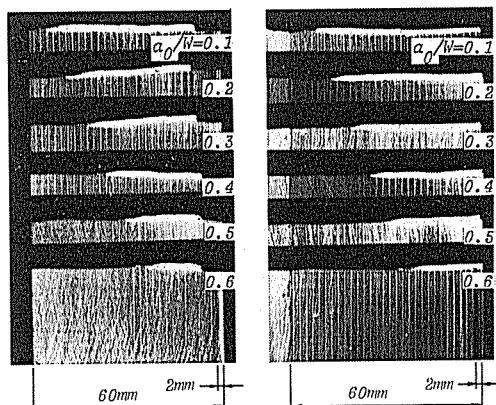
図6は板面に垂直な方向からの破断面写真である。図中白く見える破断面が板面に対して45°の傾斜破断面である。これらの図より、き裂成長に伴う破壊様式の変化は、初期き裂長さ、き裂材形状や負荷様式の影響をほとんど受けず、いずれも引裂破壊が支配的な平面ひずみ形からせん断破壊が支配的な平面応力形に移行し、き裂成長長さが4~8 mmあたりから一様な平面応力形の破壊様式になっている。

#### 4. 薄板延性き裂の破壊抵抗評価

本章では、前章で得られた測定結果に基づいて、き裂エネルギー密度による薄板延性き裂の破壊抵抗を評価し、得られた破壊抵抗と破壊様式との対応、き裂板形状や負荷様式の影響について調べる。

**4・1  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0), \partial\mathcal{E}_c/\partial a(t, a)$  の評価** ここでは式(1), (2)により、き裂成長開始時におけるき裂先端のき裂エネルギー密度  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ 、き裂成長に対するき裂先端のき裂エネルギー密度上乗せ率  $\partial\mathcal{E}_c/\partial a(t, a)$  を評価する。

前章で得られた測定結果は、不連続な微小き裂成長の発生や材質、初期き裂長さを含めた試験片形状、治具の取付け状態などのばらつきによる影響を受けていると考えられる。そこで荷重  $P$ 、成長き裂長さ  $a$  は式(1), (2)の導出に当たって仮定したように初期き裂長さ  $a_0$  と荷重点変位  $u$  の関数として  $P(a_0, u)$ ,  $a(a_0, u)$  で与えられるものとし、それらの平滑化関数を最小二乗法と各偏微分値が局所的に変動しないようとするための測定値の多少の修正により求めた。その結果を図7, 8に示す。ただし、平滑化関数は  $a_0, u$  上の適当な節点で区切られた長方形領域ごとに定義されている双3次のB-spline関数<sup>(4)</sup>の集合で、全領域において



(a) SECP (b) CCP

図6 板面に垂直な方向からの破断面写真

て2回微分まで連続という条件を満たしている。なお、中央き裂板試験片の実験ではき裂の不安定成長が発生したため  $a_0 - u$  平面上にき裂が安定成長したときの測定値が得られていない領域ができるが、その領域では測定値が得られている領域で評価される偏微分値を乱さないような外そう値で代用した。また、き裂成長開始時に荷重点変位に対する成長き裂長さの変化率が実験によって測定された零でない正の値をもつとすると成長き裂長さの荷重点変位に対する偏微分値はき裂成長開始時に不連続となるが、これに対してはき裂成長開始前の成長き裂長さに初期き裂長さよりも小さな値

を入力しておいて偏微分値を求めた後で初期き裂長さに置き換えるという操作を行った。

平滑化した  $P(a_0, u)$ ,  $a(a_0, u)$  およびそれらの各偏微分値に基づいて、式(1)により評価した  $\mathcal{E}_c(t, a_0)$  を図9に、式(2)により評価した  $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$  を図10に示す。なお、図9においてき裂エネルギー密度が最大となる点がき裂成長開始時に対応する。図9、図10の結果から次のことがいえる。

(i)  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$  は初期き裂長さに依存せず試験片に固有の値を読み取ることができる。

(ii)  $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$  も初期き裂長さに依存せず試

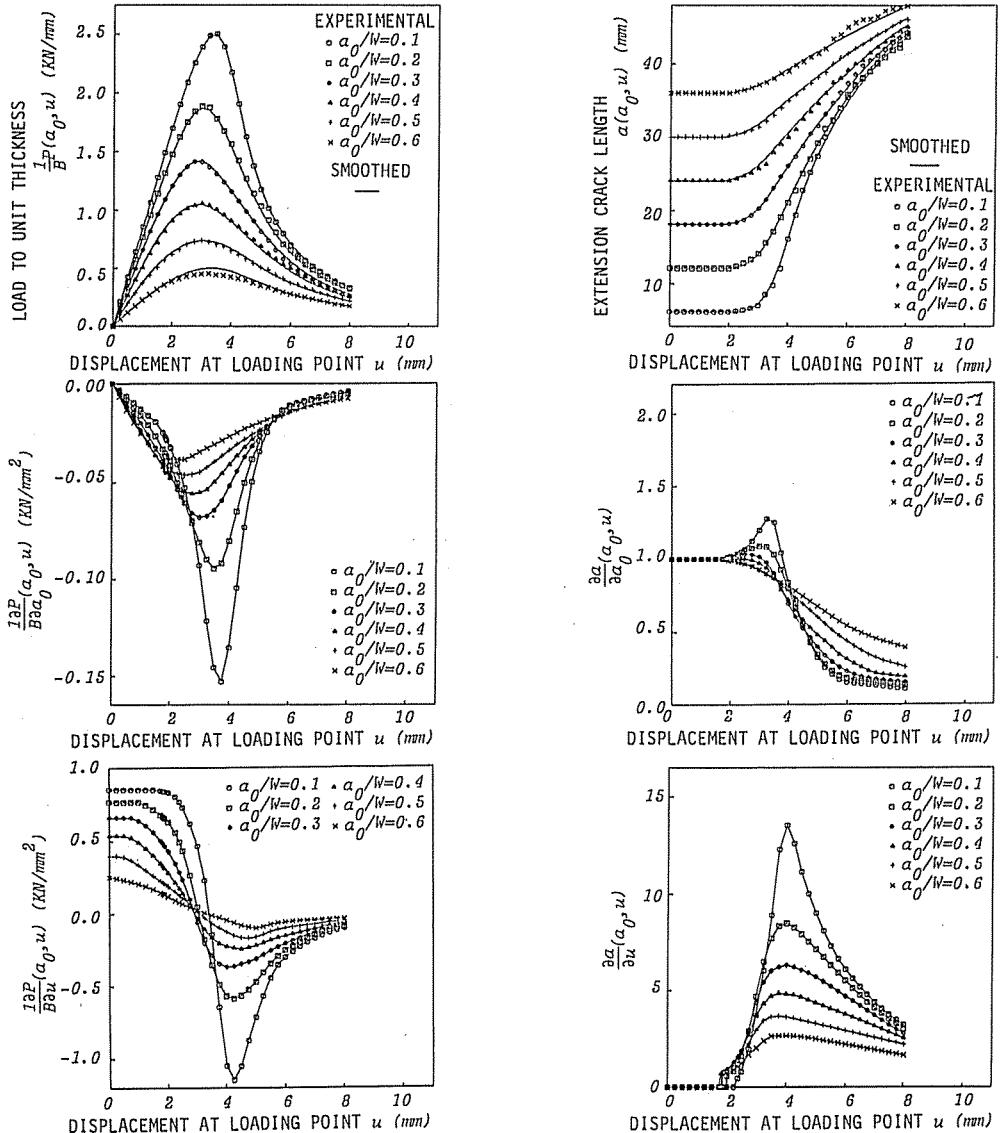


図7 平滑化した  $P(a_0, u)$ ,  $a(a_0, u)$  および各偏微分値の結果 (SECP)

試験片に固有の変化を読み取ることができ、さらにその変化は破断面形状の変化に対応しており、せん断破壊(shear fracture)が支配的で一様な破壊様式でき裂が成長したと考えられるところでは2章で予想したとおり一定値になっている。

ここで(i)における固有の値は破断面形状の観察(図6参照)から引裂破壊(tear fracture)が支配的な破壊様式に対応していると考えられることから $\varepsilon_{ctear}$ 、(ii)における一定値を $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$ と表し、各負荷様式に対し、各初期き裂長さに対して求まった値の平均値を表3に示す。この表からさらに次のことがいえる。

(iii)  $\varepsilon_{ctear}$ は試験片形状と負荷様式の影響をほとんど受けない。

(iv)  $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$ は片側き裂板試験片よりも中央き裂板試験片のほうがやや大きな値を示す。

上の(iv)で見られる傾向は、リガメント面での応力分布を比較するとき、片側き裂板試験片の場合引張りから圧縮まで大きく変化しているのに対し中央き裂板試験片では引張領域だけであることから、き裂端が通過するまでの変形履歴が異なってくると考えられ、この違いが破壊様式の差となって現れているものと考えられる。このことも考慮すると、本節の結果より、

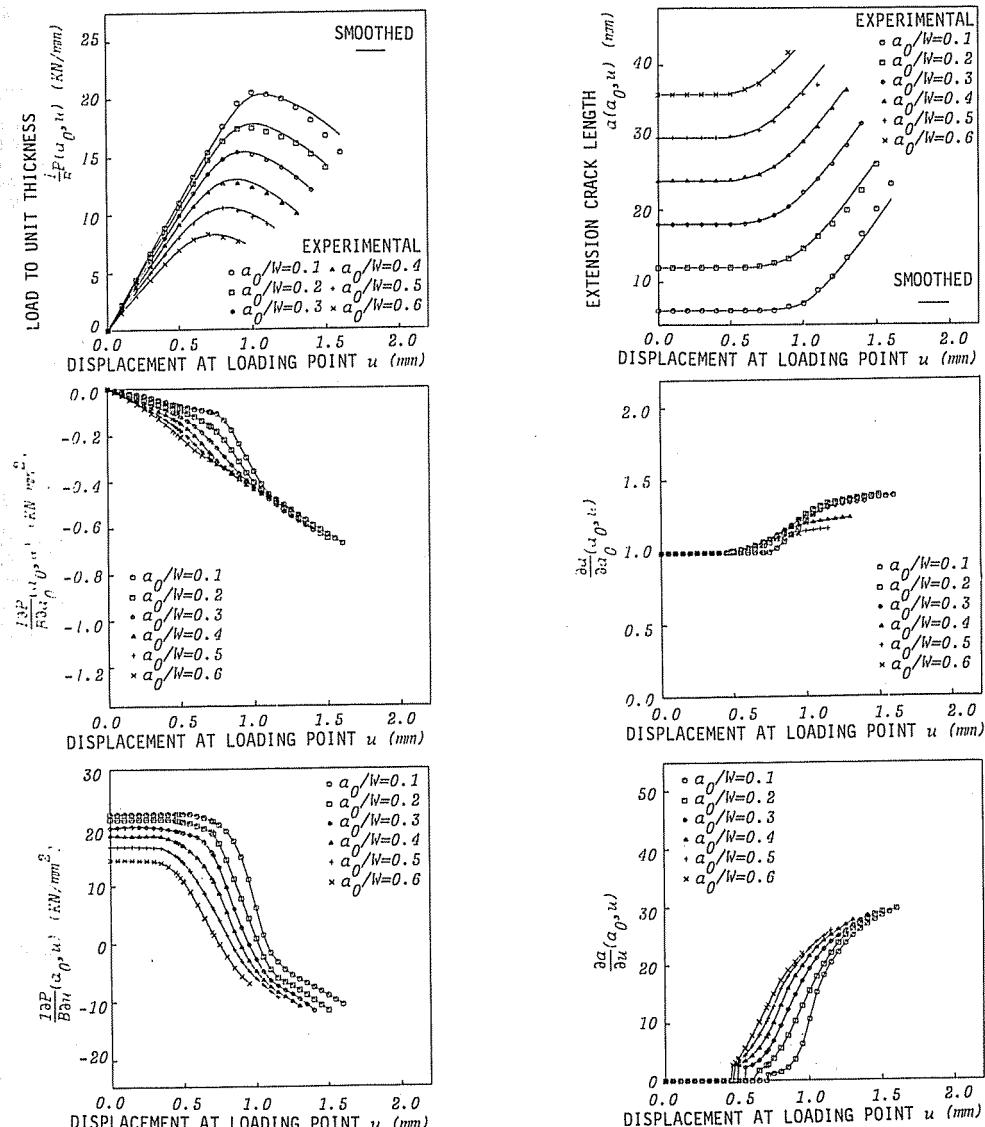


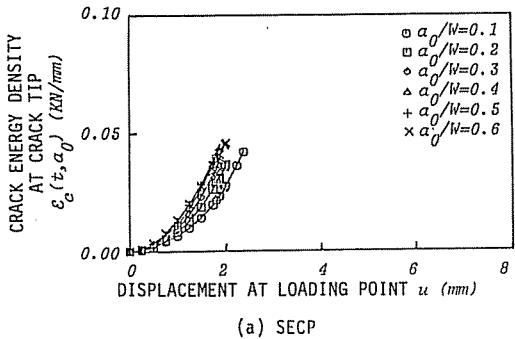
図8 平滑化した  $P(a_0, u)$ ,  $a(a_0, u)$  および各偏微分値の結果 (CCP)

$\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ ,  $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$  は破壊様式に対応した材料特性値を表すものとなっていると判断され,  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ ,  $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$  の組合せにより破壊抵抗を評価することは有効かつ妥当なものと思われる。

4・2  $\mathcal{E}_c(t, a)$  の評価 ここでは式(3), (4)によりき裂成長開始後におけるき裂先端のき裂エネルギー密度

表 3  $\mathcal{E}_{c,tear}$ ,  $(\partial \mathcal{E}_c / \partial a)_{shear}$  の評価結果

THICKNESS mm	SECP		CCP	
	$\mathcal{E}_{c,tear}$ KN/mm	$\frac{\partial \mathcal{E}_c}{\partial a}$ shear KN/mm <sup>2</sup>	$\mathcal{E}_{c,tear}$ KN/mm	$\frac{\partial \mathcal{E}_c}{\partial a}$ shear KN/mm <sup>2</sup>
	2.0	0.041	0.012	0.040
				0.016



密度  $\mathcal{E}_c(t, a)$  を評価する。

図9, 10に基づいて式(3), (4)により評価した  $\mathcal{E}_c(t, a)$  を図11に示す。ただし、式(3)の  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$  としては各試験片、各初期き裂長さにおける値を代入し、 $(\partial \mathcal{E}_c / \partial a)_{un}$  は各試験片に対し得られた  $(\partial \mathcal{E}_c / \partial a)_{shear}$  の値を代入した。なお、式(3)の積分値は評価を行った荷重点変位の離散点に対して求められた成長き裂長さに対して計算される被積分値間を補間する3次のB-spline関数の積分により求めた。図11の結果から次のことがいえる。

(i)  $\mathcal{E}_c(t, a)$  は初期き裂長さに依存せず試験片に固有の変化を読み取ることができ、さらにその変化は破断面形状の変化に対応しており、一様なせん断破壊

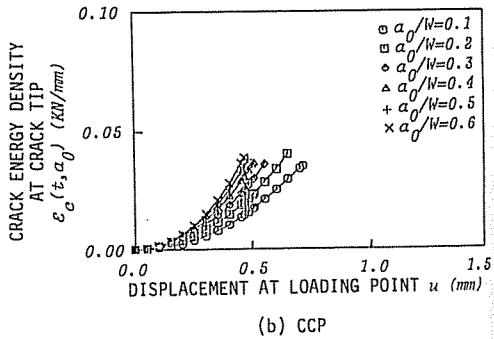


図9 き裂成長開始前におけるき裂先端のき裂エネルギー密度  $\mathcal{E}(t, a_0)$

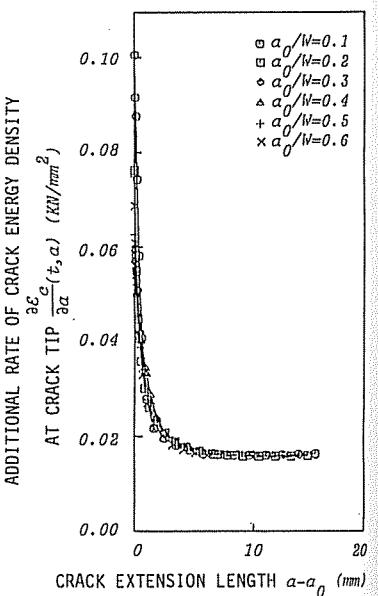
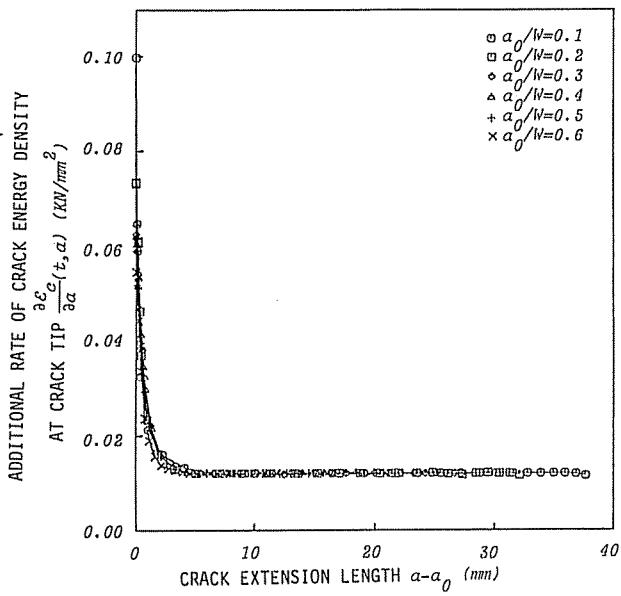
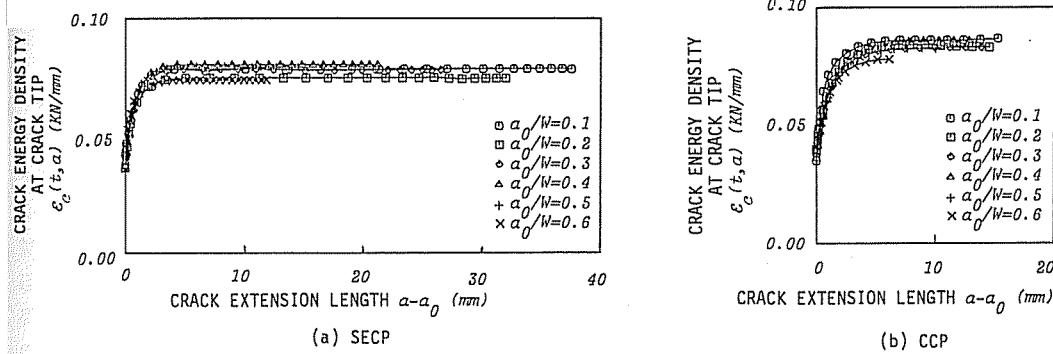


図10 き裂成長に対するき裂先端のき裂エネルギー密度上乗せ率

図 11 き裂成長開始後におけるき裂先端のき裂エネルギー密度  $\mathcal{E}_c(t, a)$ 表 4  $\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$  の評価結果

THICKNESS mm	SECP	CCP
	$\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$ KN/mm	$\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$ KN/mm
2.0	0.077	0.084

が支配的な破壊様式でき裂が成長したところでは一定値になっている。

この一定値を  $\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$  と表し、各き裂長さに対し図から読み取った  $\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$  の平均値を表 4 に示す。この表からさらに次のことがいえる。

(ii)  $\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$  は  $\mathcal{E}_{c\text{ tear}}$  のほぼ 2 倍となっており、片側き裂板試験片よりも中央き裂板試験片のほうがやや大きめの値を示す。

上の(ii)の傾向は先の  $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$  に見られた傾向に対応するもので、 $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$  における場合と同様に理解され、このことも考慮すると、 $\mathcal{E}_c(t, a)$  はき裂の進展開始から安定成長過程までの一貫した破壊様式に対応した材料特性値としての破壊抵抗を表すものとなっていると判断される。

## 5. 結 言

本論文では、薄板延性き裂の安定成長実験を行い、その結果に基づいて前報で提案した方法によりき裂エネルギー密度による薄板延性き裂の安定成長破壊抵抗を評価し、次のような結果を得た。

(1) き裂成長開始時におけるき裂先端のき裂エネルギー密度  $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$  は初期き裂長さに依存せず破壊様式に対応する固有の値  $\mathcal{E}_{c\text{ tear}}$  をとる。

(2) 成長き裂におけるき裂先端のき裂エネルギー密度上乗せ率  $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$ 、き裂先端のき裂エネルギー密度  $\mathcal{E}_c(t, a)$  も初期き裂長さに依存せず、破断面形状の変化に対応した固有の変化を示し、せん断破壊が支配的で一様な破壊様式でき裂が成長したと考えられるところでは表 3, 4 のような一定の値  $(\partial \mathcal{E}_c / \partial a)_{\text{shear}}$ ,  $\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$  をとる。

(3) 片側き裂板試験片と中央き裂板試験片では  $\mathcal{E}_{c\text{ tear}}$ ,  $(\partial \mathcal{E}_c / \partial a)_{\text{shear}}$ ,  $\mathcal{E}_{c\text{ shear}}$  ともほぼ同程度の値をとるが、特に後二者についてはそれぞれの試験片における破壊様式の違いに対応して片側き裂板試験片のほうがやや大きめの値を示す傾向がある。

これらの結果より、 $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ ,  $\partial \mathcal{E}_c / \partial a(t, a)$  あるいは  $\mathcal{E}_c(t, a)$  は破壊様式に対応した材料特性値としての破壊抵抗を表すものとなっていると考えられ、提案した破壊抵抗評価法は有効かつ妥当なものと判断される。

## 文 献

- (1) 渡辺, 機論, 47-416, A (昭 55), 406.
- (2) 渡辺, 機論, 48-433, A (昭 57), 1226.
- (3) 渡辺・畔上, 本論文集の 727 ページ.
- (4) FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書, 79 SP-0050-5, (昭 55), 46, 富士通.