

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6報, 平面ひずみ形破壊への適用)

畔上秀幸*¹, 権 五憲*², 渡辺勝彦*³

Evaluation of Fracture Resistance of Stably Growing Crack by Crack Energy Density (6th Report, Application to a Plane-Strain Fracture)

Hideyuki AZEGAMI, O Heon KWON, and Katsuhiko WATANABE

The objective of the present study is to propose a practical method to evaluate the fracture resistance of a stably growing crack by crack energy density and to verify its applicability. The 1st report proposed the method, and the 2nd to 5th reports showed its applicability to the ductile crack in the thin plate. The present report shows the applicability to a plane-strain fracture in a thick board by inspecting the correspondence of the evaluated fracture resistance to the fracture mode change and to the J -integral. Based on a stable growing crack test with 25 % side-groove CT specimens, we get the expected results: (1) The evaluated fracture resistance by the crack energy density becomes constant, corresponding to the stable crack growth with a uniform plane-strain fracture mode observed by SEM. (2) The additional rate of the crack energy density agrees with the variable rate of the J -integral to the crack growth.

Key Words: Fracture, Plane-Strain Fracture, Fracture Resistance, Crack Energy Density, J -integral

1. 序 論

安定成長き裂の挙動を解析することは、き裂が内在した構造物の過大荷重による破損様式を予測し、さらに危険な破損様式を回避し得るような設計を可能とする上で重要である。この課題に破壊力学的手法を適用するには、適切なき裂パラメータによる材料特性としてのき裂安定成長破壊抵抗を評価する手法と、その評価結果に基づいて部材の与えられた力学的環境下でのき裂の挙動を解析する手法を開発する必要がある。

本一連の研究は、き裂パラメータとしてき裂エネルギー密度⁽¹⁾⁽²⁾に注目して、前者の開発を目指したものである。

これまで、第1報⁽³⁾では荷重-成長き裂長さ-荷重点変位-初期き裂長さとき裂エネルギー密度の基本的な関係式を導出し、それに基づいてき裂エネルギー密度破壊抵抗を評価する方法を提案し、第2~5報^{(4)~(7)}において薄板延性破壊に対する提案した評価法の有効性

を、破断面性状との比較や J 積分⁽⁸⁾⁽⁹⁾、き裂先端開口変位(開口角)⁽¹⁰⁾との比較を通して示してきた。その中で、き裂エネルギー密度破壊抵抗の有効性を裏付ける重要な鍵になっていたのは、き裂エネルギー密度破壊抵抗は破壊様式の変化に対応して変化するという結果であった。実際、薄板延性破壊の場合き裂成長に伴って破壊抵抗の小さい引裂き形の破壊様式から破壊抵抗の大きいせん断形の破壊様式に変化するが、き裂エネルギー密度破壊抵抗はその変化に対応して増加し、一様なせん断形の破壊様式でき裂が安定成長したときには成長開始時の破壊抵抗の2~3倍の一定値になる結果が得られていた。また、 J 積分との関係について、き裂成長に対する J 積分の増加率とき裂エネルギー密度の上乗せ率に対応しており、 J 積分はき裂成長に伴って増加してもき裂エネルギー密度は必ずしも増加しないことを示してきた。

本報は、それに続き第1報で提案した方法を平面ひずみ形の破壊様式に適用した場合の評価結果を報告し考察したものである。本報の焦点は、き裂エネルギー密度破壊抵抗は破壊様式の変化に対応して変化するというのであれば、はたして平面ひずみ形破壊様式で一様にき裂が安定成長したときにはき裂エネルギー密度破壊抵抗は一定値として得られるかという点と、平面

* 平成元年3月10日 東海支部第38期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年4月26日。

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

*² 准員, 東京大学大学院 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

*³ 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)。

ひずみ形破壊様式の場合も、き裂成長に対する J 積分の増加率とき裂エネルギー密度の上乗せ率に対応しているかという点である。

本報の構成は次のようである。最初に提案しているき裂エネルギー密度破壊抵抗評価法を簡潔に示す。続いて実験方法と実験結果を示し、き裂エネルギー密度破壊抵抗の評価結果を示し、破壊様式との対応を考察する。最後に J 積分破壊抵抗の評価結果を示し、き裂エネルギー密度破壊抵抗との関係を通して J 積分破壊抵抗の意味を考察する。

2. き裂エネルギー密度による破壊抵抗評価法

第1報⁽³⁾で提案した評価法は次のとおりである。

き裂エネルギー密度 \mathcal{E} はき裂先端以外でも定義できることから⁽³⁾、時間と場所の関数として表すことができる。時間の基準を荷重開始時刻において時刻 t_0 からき裂が成長を開始するものとし、き裂長さの基点からき裂先端方向にとった座標 X_1 で場所を表すものとする、き裂エネルギー密度は $\mathcal{E}(t, X_1)$ と表される。特に、初期き裂長さ a_0 のき裂材のき裂成長開始前の時刻 $t \leq t_0$ におけるき裂先端 $X_1 = a_0$ のき裂エネルギー密度は $\mathcal{E}(t, a_0)$ と表される。

き裂成長開始前 $t \leq t_0$ のき裂先端のき裂エネルギー密度 $\mathcal{E}(t, a_0)$ は、初期き裂長さ a_0 、荷重点変位 $u(t)$ (時刻 t と 1 対 1 対応) のときの荷重を $P(a_0, u)$ と表すと、

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

で与えられる。ただし B は板厚である。

また、き裂が安定に成長している時刻 $t \geq t_0$ におけるき裂先端のき裂エネルギー密度上乗せ率 $\partial \mathcal{E} / \partial a(t, a) [(1/a) \partial \mathcal{E} / \partial t(t, X_1)|_{X_1=a}]$ は、

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

で与えられる。ただし a は t における成長き裂長さ (初期き裂長さとき裂成長長さの和) であり、 $(\cdot) = \partial(\cdot) / \partial t$ である。

したがって、初期き裂長さの異なる何本かの試験片に対するき裂安定成長実験を行って、荷重、荷重点変位、成長き裂長さの測定を行えば、式(1)と(2)によりき裂エネルギー密度破壊抵抗である $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ と $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a)$ (材料特性としての破壊抵抗ということの下付きの c を付す) を評価することができる。

さらに、き裂が安定に成長している時刻 $t \geq t_0$ におけるき裂先端のき裂エネルギー密度 $\mathcal{E}(t, a)$ は、き裂先端のき裂エネルギー密度分布の傾きを $\partial \mathcal{E} / \partial X_1(t, a) [(= \partial \mathcal{E} / \partial X_1(t, X_1)|_{X_1=a})]$ と表すと、

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

$$\frac{d\mathcal{E}}{da}(t, a) = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a}(t, a) + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial X_1}(t, a) \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。ただし $d\mathcal{E} / da(t, a) [(= (1/a) d\mathcal{E} / dt(t, X_1)|_{X_1=a})]$ はき裂エネルギー密度先端変化率である。したがって、 $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ と $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a)$ に加えて $(\partial \mathcal{E} / \partial X_1)_c(t, a)$ が評価されれば、き裂が安定に成長しているときのき裂エネルギー密度破壊抵抗 $\mathcal{E}_c(t, a)$ も評価されることになる。 $(\partial \mathcal{E} / \partial X_1)_c(t, a)$ は、破壊様式が一定のものでき裂が安定成長するときには $(d\mathcal{E} / da)_c(t, a) = 0$ 、 $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a) = (\partial \mathcal{E} / \partial a)_{c, uni} (= \text{const.})$ となると考えられるので、

$$\left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial X_1} \right)_c(t, a) = - \left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial a} \right)_{c, uni} \dots\dots\dots (5)$$

によって評価される。

3. 厚板延性き裂安定成長実験

本章では、ASTM 規格 (E 813)⁽¹¹⁾あるいは JSME 規格 (S 010)⁽¹²⁾に準じて平面ひずみ形の破壊様式でき裂が安定成長する実験を行い、それによって得られた荷重-成長き裂長さ-荷重点変位-初期き裂長さの関係の測定結果と破面の観察結果を示す。

3-1 実験方法 供試材は前報⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾の薄板の実験結果と比較できるように前報と同じアルミニウム合金 2024-T3 を採用した。表1, 2にその化学成分および機械的性質を示す。試験片は、き裂をリガメント面に沿って成長させるためと一様な平面ひずみ形の破壊様式を発生させるために 25% サイドグループ付コンパクト (CT) 試験片を使用した⁽¹¹⁾⁽¹³⁾。その形状を図1に示す (有効板厚は 7.5 mm)。初期き裂長さ a_0 は板幅 $W = 50.8$ mm に対して、 $a_0 / W = 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75$ となる 6 種類とした。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) となるように作成され、疲労予き裂は最大応力拡大係数 $K_{I, max}$ が 0.33 kN/mm^{3/2} となるような繰返し荷重により仕上げられた。

安定き裂成長実験は負荷容量 2 t の低速引張試験機を用いて行われ、クロスヘッドと支柱の相対変位速度は 1 mm/min とした。き裂成長長さは、荷重点変位がある一定値になるごとに試験機を止めてマーキングを行い、破断後に破面に現れた縞模様を読取り顕微鏡で

観測することによって得られた。測定方法は、板厚方向9点についてストレッチゾーンを含めた長さを求め、その結果を平均した。マーキングは注射器を用いてメチルバイオレットとオイルを交互にき裂面へ注入することによって行った。なお、注入の際に空気ポンプを用いてそれらがき裂の前縁まで達するように工夫した。また後述する破面観察でわかるようにき裂前縁はほぼストレートであったことから、試験片の表面に引いた0.5 mm 間隔の線を参照しながら、ひずみゲージ式ダイヤルゲージを取付けた読取り顕微鏡で表面におけるき裂先端を追うことによって連続的にき裂成長

長さを測定し、破面観測の結果を補った。

3・2 測定結果 荷重-き裂成長長さ-荷重点変位-初期き裂長さの測定結果を図2に示す。なお、図中き裂成長長さを与えるマークは破面観測の結果であり、連続的な線は表面観測の結果である。

3・3 破面観察 図3は、 $a_0/W=0.65$ の試験片についての破面写真であり、図4は、その破面の走査形電子顕微鏡 (SEM) 写真である。ただし図4の(a), (b), (c)はき裂成長開始付近, 成長長さ5 mm 付近, 成長長さ10 mm 付近についてのものである。

図3に基づく巨視的な観察からは、破面が一様に平

表1 供試材の化学成分

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
%	%	%	%	%	%	%
0.11	0.23	4.49	0.55	1.44	0.01	0.03
Zr+Ti	Ti	OTHERS EACH	OTHERS TOTAL	Al	RE	
%	%	%	%	%		
0.04	0.02	0.01	0.02	RE		

表2 供試材の機械的性質

0.2%PROOF STRESS	TENSILE STRENGTH	ELONGATION
GPa	GPa	%
0.329	0.479	20.8

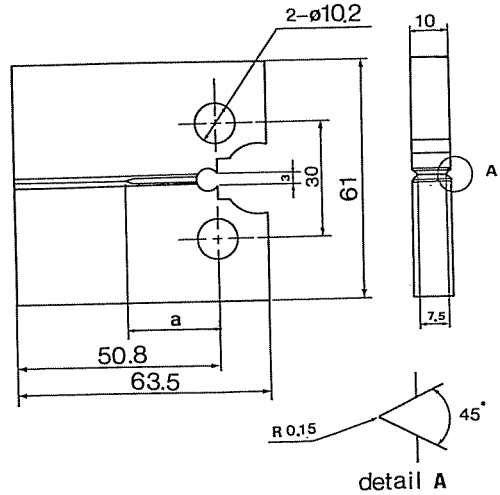


図1 試験片形状

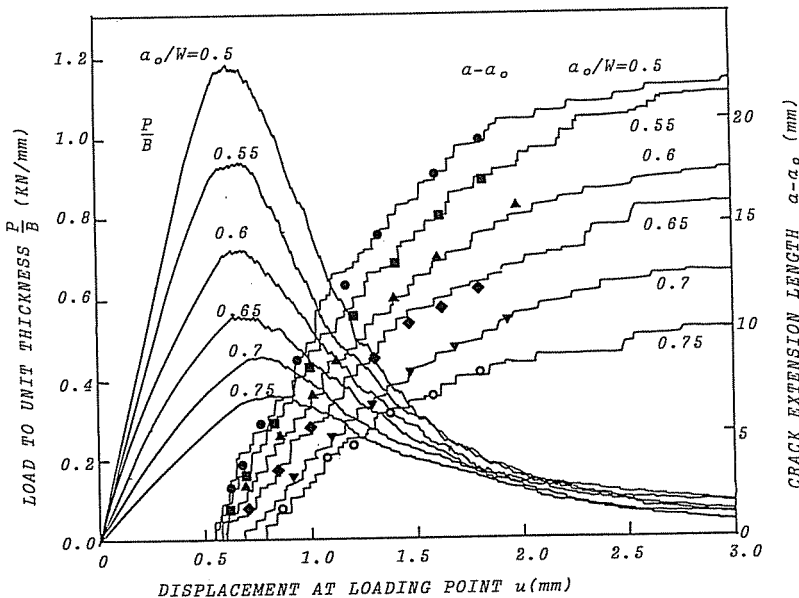


図2 荷重-き裂成長長さ-荷重点変位-初期き裂長さの測定結果

坦でき裂前縁の形状は直線であること、また図4に基づく微視的な観察からは、ディンプルの形状と大きさがき裂成長に対して大きく変化していないことが認められ、これらの観察結果からき裂は一樣な平面ひずみ形の破壊様式で安定成長したものと考えることができる。

4. き裂エネルギー密度破壊抵抗評価

本章では3章で得られた測定結果に基づいて、2章に示した方法でき裂エネルギー密度破壊抵抗を評価し、破面観察の結果との対応を考察する。

4.1 評価結果 ここでは式(1)、(2)によりき裂成長開始におけるき裂エネルギー密度破壊抵抗 $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ 、き裂成長に対するき裂エネルギー密度上乘せ率破壊抵抗 $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a)$ およびき裂エネルギー密度破壊抵抗 $\mathcal{E}_c(t, a)$ の評価結果を示す。評価方法の詳細は前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾と同様である。

図5は、図2の測定結果に基づいて、初期き裂長さ a_0 と荷重点変位 u に対する荷重 $P(a_0, u)$ および成長き裂長さ $a(a_0, u)$ を双3次のB-spline関数を用いて平滑化した結果とそれらを偏微分した結果である。

図5の結果に基づいて式(1)によって評価された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 $\mathcal{E}(t, a_0)(t \leq t_0)$ の結果を図6に、式(2)によって評価されたき裂成長に対するき裂エネルギー密度上乘せ率破壊抵抗 $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a)$ の結果を図7に示す。なお、図6においてそれぞれの初期き裂長さに対する $\mathcal{E}(t, a_0)$ の最大値がき裂成長開始時のき裂エネルギー密度破壊抵抗 $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ である。また図7には、厚さ1mmの片側き裂板試験片 (SECP) の結果⁽⁵⁾を併記した。

図6、7の結果から、次のことがいえる。

- (1) $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ は初期き裂長さに影響されない。
- (2) $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a)$ は初期き裂長さに影響されず、き裂成長に対して一定となる。

また、上記(1)、(2)に基づいてそれぞれの試験片に対して得られた $\mathcal{E}_c(t_0, a_0)$ 、 $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a)$ の平均値を用いて、式(3)~(5)によって評価されたき裂成長に対するき裂エネルギー密度破壊抵抗 $\mathcal{E}_c(t, a)$ の結果を図8に示す。また、図8にも厚さ1mmの片側き裂板試験片の結果⁽⁵⁾を併記した。上記(2)から当然ではあるが、図8の結果について次のことがいえる。

- (3) $\mathcal{E}_c(t, a)$ はき裂成長に対して一定となる。

4.2 考察 破面観察の結果は、一樣な平面ひずみ形破壊様式でき裂が安定成長したことを裏付けるものになっていたため、上記(1)~(3)の $\mathcal{E}_c(t, a)$ および $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_c(t, a)$ の一定値は一樣な平面ひずみ形の破

壊様式に対応した特性値になっていると考えられる。そこでそれらを $\mathcal{E}_{1c}(\partial \mathcal{E} / \partial a)_{1c}$ と表すことにして、結果を表3に示す。これによって、き裂エネルギー密度破壊抵抗は破壊様式に対応して変化することを平面ひずみ形の破壊様式においても確認できたことになる。

得られた \mathcal{E}_{1c} 、 $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_{1c}$ の値は、薄板の場合の対応した破壊抵抗との比較において次のように考察され

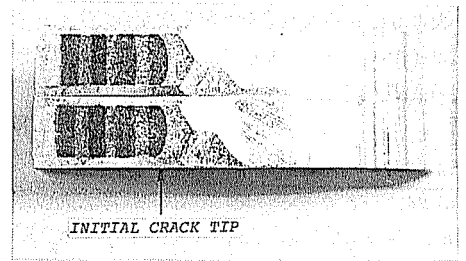
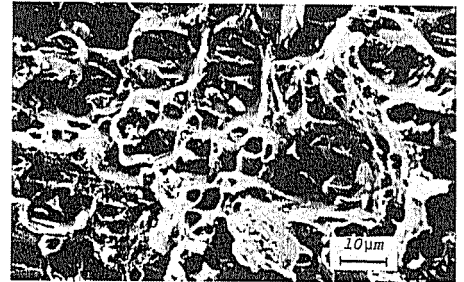
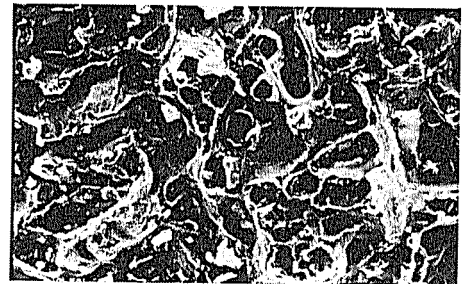


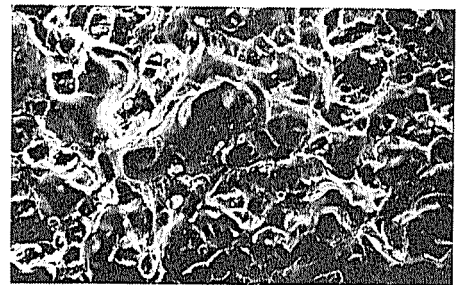
図3 破面写真



(a)



(b)



(c)

図4 破面のSEM写真

る。

薄板の場合のき裂成長開始時の引裂き形破壊様式に対するき裂エネルギー密度破壊抵抗 $\mathcal{E}_{c, \text{tear}}$ は、板厚効果や多少の試験片依存性から $0.03 \sim 0.04 \text{ kN/mm}$ であったが、本実験で得られた \mathcal{E}_{ic} はそれより小さい結果になっている。この傾向は、前報⁽⁵⁾で考察したように、引裂き形破壊様式とせん断形破壊様式を比較した場合引裂き形破壊様式のほうが破壊抵抗が小さく、薄板のような平面応力に近い状態であれば支配的ではな

いにしせん断形破壊様式が関与していると考えられることから理解できる。

また、薄板の場合のせん断形破壊様式に対するき裂エネルギー密度上乘せ率破壊抵抗 $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_{c, \text{shear}}$ は、板厚効果や多少の試験片依存性から $0.012 \sim 0.018 \text{ kN/mm}^2$ であったが、本実験で得られた $(\partial \mathcal{E} / \partial a)_{ic}$ はそれより小さい結果になっている。この傾向は、き裂先端のき裂エネルギー密度が小さければき裂エネルギー密度分布の傾きも小さいと考えられ、さらに一様な

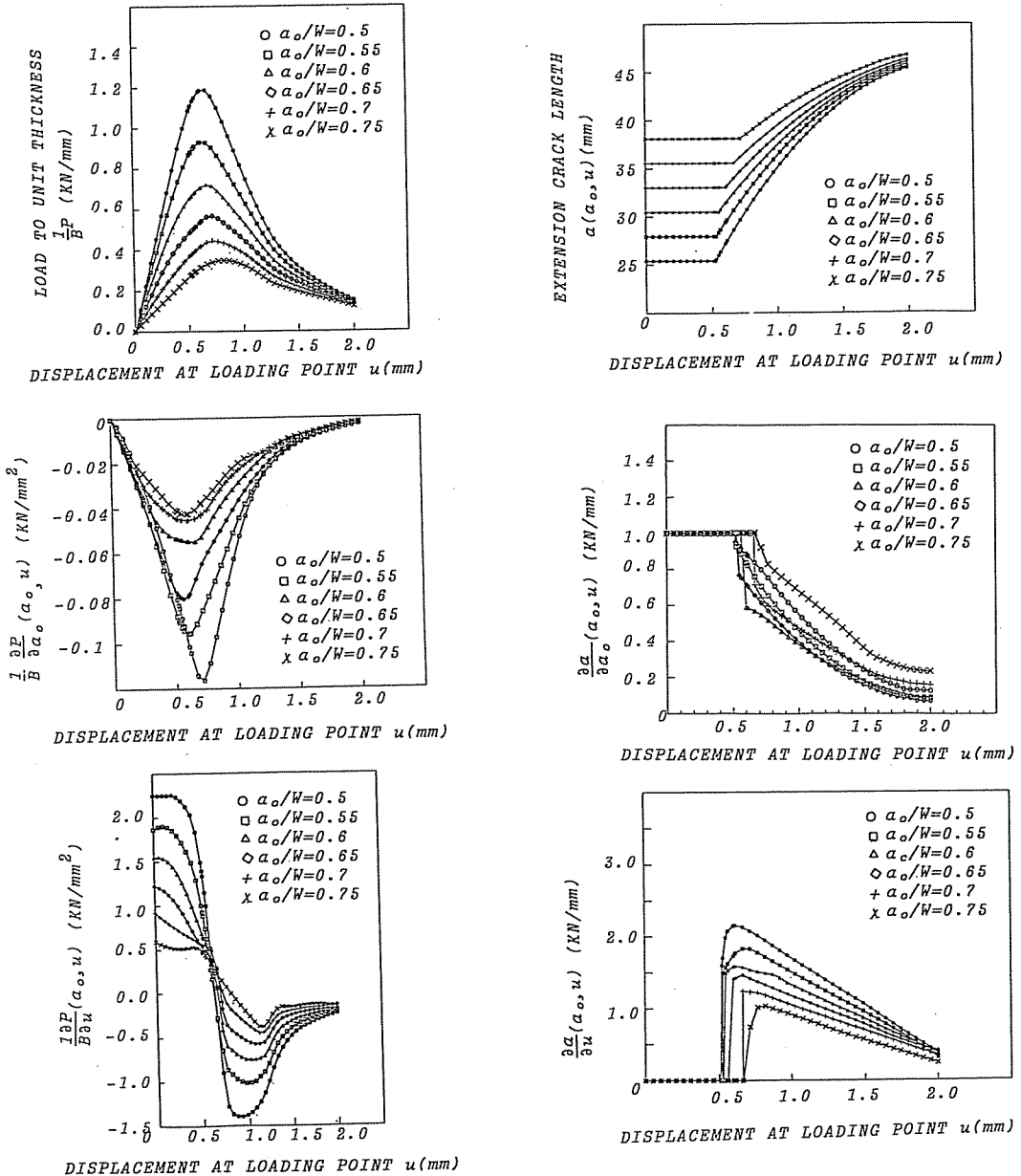


図5 平滑化した $P(a_0, u)$, $a(a_0, u)$ および各偏微分値

破壊様式でき裂が安定成長するときにはき裂エネルギー密度上乘せ率と分布の傾きの関係は式(5)の関係になることから理解できる。

5. J積分破壊抵抗との比較

本章では3章で得られた測定結果に基づいてJ積分破壊抵抗を評価し、4章で得られたき裂エネルギー密度破壊抵抗との関係をとおしてJ積分破壊抵抗の意味について考察する。

5.1 J積分破壊抵抗評価 き裂成長を考慮しないCT試験片に対するJ積分評価法としてMerkle-Corten⁽¹⁴⁾の方法を用いる。この方法によるJ積分 $J_M(t)$ は次のように与えられる。

$$J_M(t) = \{\eta_r \phi_r(t) + \eta_c \phi_c(t)\} / b$$

$$\phi_r(t) = \int_0^u \frac{P}{B} du, \quad \phi_c(t) = \int_0^{P/B} u d\left(\frac{P}{B}\right)$$

$$\eta_r = \frac{2\alpha(1-2\alpha-\alpha^2)}{(1-\alpha^2)^2}, \quad \eta_c = \frac{2(1+\alpha)}{1+\alpha^2}$$

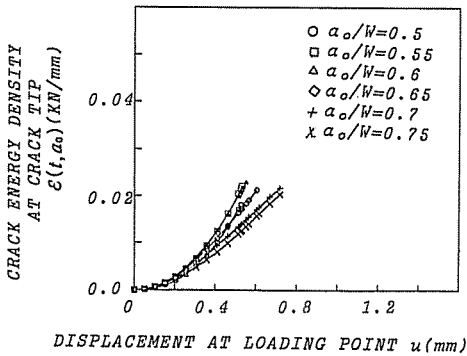


図6 き裂成長開始前におけるき裂先端のき裂エネルギー密度

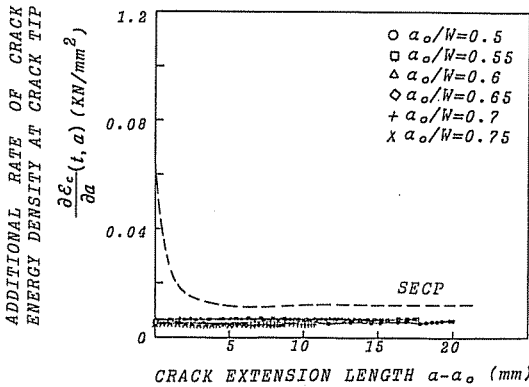


図7 き裂成長に対するき裂先端のき裂エネルギー密度上乘せ率

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{2a}{b}\right)^2 + \frac{4a}{b} + 2} - \left(\frac{2a}{b} + 1\right), \quad b = W - a$$

.....(6)

図9は式(6)による評価結果である。ここでもそれぞれの初期き裂長さに対する $J_M(t)$ の最大値がき裂成長開始時のJ積分破壊抵抗値 $J_{Mc}(t_0)$ である。

また、き裂成長を考慮したCT試験片に対するJ積分の評価法としてErnst⁽¹⁵⁾の漸化式による方法を用いる。この方法によるJ積分 $J_E(t)$ は、 $J_E(t_i) = J_{Ei}(i=1, 2, \dots)(t_0 < t_1 < t_2 < \dots)$ のように表して、次のように与えられる。

$$J_{E(i+1)} = \left\{ J_i + \frac{\eta_i}{b_i} A_{i,i+1} \right\} \left\{ 1 - \frac{\gamma_i}{b_i} (a_{i+1} - a_i) \right\}$$

$$A_{i,i+1} = \int_{u_i}^{u_{i+1}} \frac{P}{B} du$$

$$\eta_i = 2 + 0.522 \frac{b_i}{W}, \quad \gamma_i = 1 + 0.76 \frac{b_i}{W} \dots\dots\dots(7)$$

図10は式(7)によって評価されたき裂成長前における $J_E(t)$ の評価結果であり、図11は、き裂成長に対する $J_{Ec}(t)$ の評価結果である。なお、図10においてそれぞれの初期き裂長さに対する $J_E(t)$ の最大値がき裂成長開始時のJ積分破壊抵抗値 $J_{Ec}(t_0)$ である。また、図11には ϵ_{1c} を同時に示している。

これらの結果から次のことがいえる。

(4) $J_{Mc}(t_0)$ および $J_{Ec}(t_0)$ は初期き裂長さに影響されず、両者はほぼ等しい一定値となる。なお、その値 $J_c(t_0)$ は、 J_{1c} としての有効判定条件⁽¹¹⁾⁽¹²⁾：

表3 ϵ_{1c} と $(\partial \epsilon / \partial a)_{1c}$ の評価結果

ϵ_{1c}	$(\partial \epsilon / \partial a)_{1c}$
KN/mm	KN/mm ²
0.021	0.0059

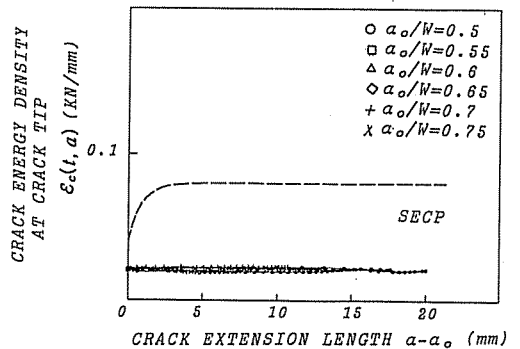


図8 き裂成長に対するき裂先端のき裂エネルギー密度

$$B, b \geq 25 \frac{J_c(t_0)}{\sigma_{fs}} \dots\dots\dots (8)$$

を満たしていることから、それぞれ J_{M1c} および J_{E1c} と表す。

ただし σ_{fs} は有効降伏強度で耐力と引張強度の平均値である。

(5) き裂成長に対する $J_{Ec}(t)$ は初期き裂長さに影響されず、き裂成長に対してほぼ一定の傾きで増加する。なお、その傾きの値 $(dJ_E/da)_c(t) = (1/a)(dJ_E/dt)_c(t)$ は、 J 積分支配き裂成長 (J -controlled growth) の条件⁽⁹⁾ :

$$B, b \gg J_c(t) / \left(\frac{dJ_E}{da} \right)_c(t) \dots\dots\dots (9)$$

を満たしていることから $(dJ_E/da)_{1c}$ と表す。

得られた J_{M1c} , J_{E1c} および $(dJ_E/da)_{1c}$ を表4に示す。

5.2 考察 表3の結果と表4の結果を比較して考察する。

\mathcal{E}_{1c} の値と J_{M1c} , J_{E1c} の値が一致することは、前報⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾でも再三述べた関係であることからここでは省略する。

$(\partial \mathcal{E} / \partial a)_{1c}$ と $(dJ_E/da)_{1c}$ の値が一致する関係は、 J 積分支配き裂成長の条件が成立しているときき裂成長開

始時に両者が一致することを前報⁽⁶⁾⁽¹⁶⁾で予想したが、それを裏付けるものになっている。すなわち、この関係によって、様な平面ひずみ形破壊様式でき裂が安定成長したときの J 積分のき裂成長に対する増加率は、これまでのき裂先端を取り巻く変形域の変形強さの増加率といった理解⁽⁹⁾を超えて、き裂エネルギー密度上乘せ率の意味をもち、さらにき裂エネルギー密度に変換することによって破壊様式に直接対応した破壊抵抗になりうるものと考えられることができる。

6. 結 論

本報では、第1報で提案したき裂エネルギー密度による破壊抵抗評価法を平面ひずみ形破壊様式の場合に適用し、次のような評価結果を得た。

(1) 破面観察の結果に基づいて様な平面ひずみ形破壊様式でき裂が安定成長したと考えるときにき裂エネルギー密度破壊抵抗は一定値 \mathcal{E}_{1c} として得られた。 \mathcal{E}_{1c} は J_{1c} とほぼ一致した。

(2) き裂成長に対する J 積分の増加率はき裂エネルギー密度上乘せ率の評価結果と一致した。

これらの評価結果から、き裂エネルギー密度破壊抵抗は平面ひずみ形破壊様式の場合にも破壊様式に対応した特性値となり得ること、また J 積分はその増加率をき裂エネルギー密度上乘せ率の意味と解釈してき裂エネルギー密度に変換することによって破壊様式に直接対応した破壊抵抗になり得ることを考察した。

なお本研究は、昭和62年度科学研究費補助金(奨励

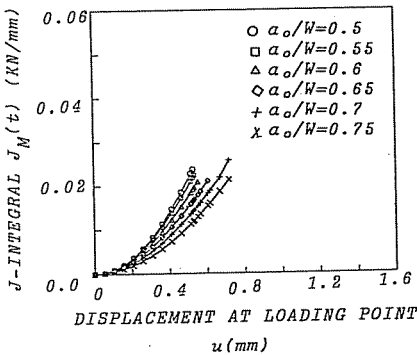


図9 き裂成長開始前における $J_M(t)$

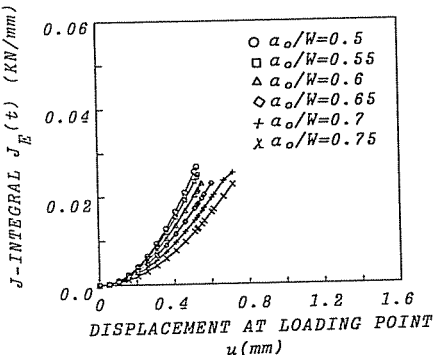


図10 き裂成長開始前における $J_E(t)$

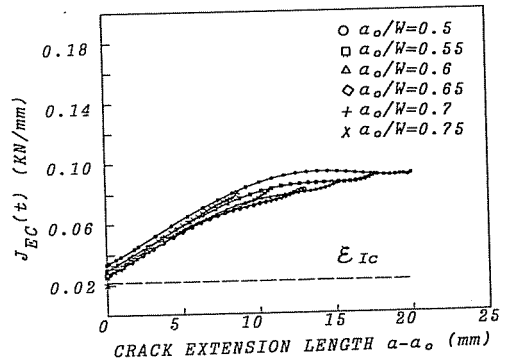


図11 き裂成長に対する $J_{Ec}(t)$

表4 J_{M1c} , J_{E1c} および $(dJ_E/da)_{1c}$ の評価結果

J_{M1c} KN/mm	J_{E1c} KN/mm	$(dJ_E/da)_{1c}$ KN/mm ²
0.022	0.024	0.0059

研究 A) に負っていることを付記する。

文 献

- (1) 渡辺, 機論, 47-416, A (1980), 416.
- (2) 渡辺, 機論, 48-433, A (1982), 1226.
- (3) 渡辺・畔上, 機論, 52-475, A (1986), 727.
- (4) 渡辺・畔上・平野, 文献(3)の736ページ.
- (5) 渡辺・畔上・平野, 機論, 52-480, A (1986), 1891.
- (6) 渡辺・畔上, 文献(5)の1899ページ.
- (7) 渡辺・畔上・平野, 機論, 52-483, A (1986), 2493.
- (8) Paris, P. C., ほか3名, *ASTM STP*, 668 (1979), 5.
- (9) Hutchinson, J. W. and Paris, P. C., 文献(8)の37ページ.
- (10) de Koning, A. U., *The Netherlands National Aerospace Laboratory Report NLR MP 75035 U*, (1975).
- (11) ASTM E 813-81, Standard Test for J_{1c} , A MEASURE OF FRACTURE TOUGHNESS, *Annual Book of ASTM standards*, Part 10 (1981).
- (12) 日本機械学会基準, 弾塑性破壊靱性 J_{1c} 試験方法, *JSME S 001* (1981).
- (13) 橋田・坂・安齊・庄子・高橋, 機論, 48-433, A (1982), 1111.
- (14) Merkle, J. G. and Corten, H. T., *Trans. ASME*, Ser. J, 96-4 (1974), 286.
- (15) Ernst, H., ほか2名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 743 (1981), 476.
- (16) 渡辺・畔上, 機論, 51-464, A (1985), 1122.