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3報, 薄板延性き裂破壊抵抗の板厚効果)

渡辺 勝彦**, 畔上 秀幸**, 平野 八州男**

Evaluation of Fracture Resistance of Stably Growing Crack by Crack Energy Density (3rd Report, Effect of Sheet Thickness on Fracture Resistance of Ductile Crack in Thin Plate)

by Katsuhiko WATANABE, Hideyuki AZEGAMI, and Yasuo HIRANO

The influence of sheet thickness on the fracture resistance of a stably growing crack evaluated by crack energy density based on the method proposed in the 1st Report is investigated. That is, the experiments of stable growth fracture similar to those in 2nd Report are carried out varying the sheet thickness, and the fracture resistances expressed by additional rate of crack energy density and crack energy density are evaluated. The results are as follows: (1) The fracture resistances are almost independent of initial crack lengths and specimen types for any sheet thickness. (2) With the decrease of sheet thickness, the fracture resistance expressed by crack energy density at the initiation of crack growth decreases and, on the other hand, the fracture resistances expressed by crack energy density and additional rate of crack energy density of stably growing cracks increase under the uniform slant fracture mode. These effects of sheet thickness can be explained by considering the admissible types of plastic deformation around a crack tip.

Key Words: Fracture, Thin Plate, Stable Crack Growth, Fracture Resistance, Effect of Sheet Thickness, Crack Energy Density

1. 緒 言

本研究では、何らかの原因で発生したき裂を含む構造物の破損様式を予測するうえで重要となる安定成長き裂の破壊抵抗をき裂エネルギー密度⁽¹⁾⁽²⁾により評価する手法を提案し、その有効性の検討を行っている。第1報⁽³⁾では、安定成長き裂におけるき裂先端のき裂エネルギー密度の評価を、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可能とする関係式を示し、それにより安定成長き裂の破壊抵抗を評価することを提案した。第2報⁽⁴⁾では、薄板延性き裂安定成長実験を行い、それに基づいて第1報で提案した方法で評価したき裂エネルギー密度の結果と破断面形状の観察から読取れる破壊様式の変化との対比により、提案した方法の薄板延性き裂の破壊抵抗評価における有効性を実証した。

本報はこれを受けて薄板延性き裂破壊抵抗の板厚効果についての検討を行うものであり、き裂安定成長実験を板厚を変えて行って、前報までに確立した方法によりき裂エネルギー密度破壊抵抗の評価を行い、破壊抵

抗に与える板厚効果について調べる。

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。

初期き裂長さ a_0 の二次元き裂材が時刻 $\tau=0$ 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 $\mathcal{E}(t, a_0) = \mathcal{E}(t, X_1)|_{X_1=a_0}$ 、ただし X_1 はき裂長さを測定するための基準点を原点としてき裂先端方向にとった座標である) は、初期き裂長さ a_0 、荷重点変位 $u(\tau)$ (時刻 τ と一対一対応) のときの荷重を $P(a_0, u)$ と表すと、

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

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 $\tau=t(t \geq t_0)$ におけるき裂先端のき裂エネルギー密度上乘せ率 $\partial \mathcal{E} / \partial a(t, a_0) = [(1/a) \partial \mathcal{E} / \partial \tau(t, X_1)|_{X_1=a}]$ は、

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

* 昭和61年4月3日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年9月27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)。

の測定結果を示す。

3.1 実験方法 供試材は前報と同様 Al 合金 2024-T 3 を採用し、板厚 B は前報の 2.0 mm に対して 1.5 mm と 1.0 mm とした。その化学成分、機械的性質を 2.0 mm の場合も含めて表 1, 2 に示す。板厚を除く試験片形状、負荷様式なども前報と同様であり、図 1 に示す片側き裂板 (SECP) 試験片と中央き裂板 (CCP) 試験片に図 2 のように負荷した。用いた試験片の初期き裂長さ a_0 は、各試験片、板厚に対して $a_0/W = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ (W : 板幅, 図 1 参照) の 6 種類である。実験方法の詳細については前報を参照されたい。

3.2 測定結果 図 3, 4 に板厚 1.5, 1.0 mm の試験片について 6 種類の初期き裂長さ a_0 に対する単

位板厚当たりの荷重 P/B -き裂成長長さ $(a-a_0)$ -荷重点変位 u の測定結果を示す。

図 5, 6 は、板厚 1.5, 1.0 mm の試験片の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。図 5, 6 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、き裂成長長さが板厚の 2~4 倍になった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. 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、板

図 3 荷重-き裂成長長さ-荷重点変位の測定結果 (板厚 1.5 mm)

図 4 荷重-き裂成長長さ-荷重点変位の測定結果 (板厚 1.0 mm)

で与えられる。ただし a は $\tau=t$ におけるき裂長さである。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)、(2)により破壊抵抗 $\varepsilon_c(t_0, a_0)$, $\partial\varepsilon_c/\partial a(t, a)$ 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添字 c を付す)。また、き裂が安定に成長している時刻 $\tau=t(\geq t_0)$ におけるき裂先端のき裂エネルギー密度分布の傾きを $\partial\varepsilon/\partial X_1(t, a)[=\partial\varepsilon/\partial X_1(t, X_1)|_{X_1=a}]$ と表して、き裂先端のき裂エネルギー密度 $\varepsilon(t, a)$, き裂エネルギー密度先端変化率 $d\varepsilon/da(t, a)[=(1/\dot{a})d\varepsilon/d\tau(t, X_1)|_{X_1=a}]$ は,

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

$$\frac{d\varepsilon}{da}(t, a) = \frac{\partial\varepsilon}{\partial a}(t, a) + \frac{\partial\varepsilon}{\partial X_1}(t, a) \quad \cdots (4)$$

で与えられるので、 $\varepsilon_c(t_0, a_0)$, $\partial\varepsilon_c/\partial a(t, a)$ に加えて $\partial\varepsilon_c/\partial X_1(t, a)$ に適当な値を設定すれば破壊抵抗

$\varepsilon_c(t, a)$ も評価される。ただし $(\cdot) = \partial(\cdot)/\partial\tau$ である。

本論文では、前報と同様な薄板延性き裂安定成長実験を板厚を変えて行い、それに基づいて破壊抵抗 $\varepsilon_c(t_0, a_0)$, $\partial\varepsilon_c/\partial a(t, a)$ を評価し、さらに、破壊様式が一定のもとのき裂成長においては $d\varepsilon_c/da(t, a) = 0$, $\partial\varepsilon_c/\partial a(t, a) = (\partial\varepsilon_c/\partial a)_{uni} (= \text{const.})$ となると考えられるので,

$$\frac{\partial\varepsilon_c}{\partial X_1}(t, a) = - \left(\frac{\partial\varepsilon_c}{\partial a} \right)_{uni} \quad \cdots (5)$$

として、式(2)、(4)、(5)を代入した式(3)により破壊抵抗 $\varepsilon_c(t, a)$ を評価する。

3. 薄板延性き裂安定成長実験

本章では、前報⁽⁴⁾に示した方法で板厚を違えた薄板延性き裂安定成長実験を行い、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

表 1 供試材の化学成分

THICKNESS	Si	Fe	Cu	Mn	Ma	Cr
mm	%	%	%	%	%	%
2.0	0.14	0.20	4.48	0.54	1.40	0.02
1.5	0.12	0.24	4.63	0.61	1.45	0.05
1.0	0.12	0.21	4.64	0.53	1.50	0.02

Zn	Tr+Ti	Ti	OTHERS EACH	OTHERS TOTAL	AL
%	%	%	%	%	%
0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	RE
0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	RE
0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	RE

図 1 試験片形状

表 2 供試材の機械的性質

THICKNESS	0.2% PROOF STRESS	TENSILE STRENGTH	ELONGATION
mm	GPa	GPa	%
2.0	0.327	0.470	22.0
1.5	0.322	0.473	20.3
1.0	0.328	0.470	19.3

(a) SECP

(b) CCP

図 2 負荷様式

厚1.5, 1.0 mm の薄板延性き裂に対するき裂エネルギー密度による破壊抵抗を評価し, 前報で得られた板厚2.0 mm の破壊抵抗の評価結果と合せて, 薄板延性き裂破壊抵抗の板厚効果について調べる。

4.1 $\varepsilon_c(t, a_0)$, $\partial \varepsilon_c / \partial a(t, a)$ の評価 ここでは, 式(1), (2)により板厚1.5, 1.0 mm の薄板延性き裂に対する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 $\varepsilon(t, a_0)$, き裂成長に対するき裂先端のき裂エネルギー密度上乘せ率 $\partial \varepsilon_c / \partial a(t, a)$ を評価する。

3章で得られた測定結果に基づいて, 前報と同様荷重, 成長き裂長さを初期き裂長さ a_0 と荷重点変位 u の関数 $P(a_0, u)$, $a(a_0, u)$ と仮定してそれらの平滑化関数を求め, その平滑化関数の各偏微分値を式(1)および式(2)に代入して得られた $\varepsilon(t, a_0)$ および $\partial \varepsilon_c /$

図5 板面に垂直な方向からの破断面写真(板厚1.5 mm)

図6 板面に垂直な方向からの破断面写真(板厚1.0 mm)

(a) SECP

(b) CCP

図7 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(板厚1.5 mm)

(a) SECP

(b) CCP

図8 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(板厚1.0 mm)

$\partial a(t, a)$ を図 7, 8 および図 9, 10 に示す。なお, 図 7, 8 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 7, 8 および図 9, 10 の結果から, 前報で得られた板厚 2.0 mm の薄板延性き裂に対する結果と同様の傾向が読取れる。すなわち, $\varepsilon_c(t_0, a_0)$ は初期き裂長

さに依存せず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いると考えられる試験片に固有の値を読取ることができる。また, $\partial \varepsilon_c / \partial a(t, a)$ も初期き裂長さに依存せず試験片に固有の変化を読取ることができ, 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 frac-

(a) SECP

(b) CCP

図 9 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 (板厚 1.5 mm)

(a) SECP

(b) CCP

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 (板厚 1.0 mm)

ture) が支配的で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一定値になっている。試験片に固有の $\varepsilon_c(t_0, a_0)$ の値を ε_{ctear} , $\partial\varepsilon_c/\partial a(t, a)$ の一定値を $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$ と表し、それぞれ各初期き裂長さに対して求まった値の平均値として、前報のそれらに対する結果とともに示すと、表3のようになる。

これより、片側き裂板試験片と中央き裂板試験片では、 ε_{ctear} , $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$ ともにその値はほぼ同程度とみなせるが、中央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とがわかる。また板厚の影響として次の傾向が見られる。

- (1) ε_{ctear} は板厚の減少に伴って減少する。
- (2) $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$ は板厚の減少に伴って増加する。

4・2 $\varepsilon_c(t, a)$ の評価 ここでは式(2), (4), (5)を代入した式(3)により、板厚 1.5, 1.0 mm の薄板延性き裂に対する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 $\varepsilon_c(t, a)$ を評価する。

図 11, 12 はこのようにして、図 7~10 の結果を用いて評価した $\varepsilon_c(t, a)$ である。式(3)の $\varepsilon(t_0, a_0)$ と

しては各試験片、各初期き裂長さにおける値を用いており、式(5)の $(\partial\varepsilon/\partial a)_{uni}$ としては各試験片に対して得られた表3の $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$ の値を用いて、前報と同様の計算法により評価した。

図 11, 12 の結果から、ここでも前報で得られた板厚 2.0 mm の薄板延性き裂に対する結果と同様の傾向が読取れる。すなわち、 $\varepsilon_c(t, a)$ 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、せん断破壊が支配的で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一定値になっている。試験片に固有の $\varepsilon_c(t, a)$ の一定値を ε_{cshear} と表し、各初期き裂長さに対して求まった値の平均値として、前報のそれに対する結果とともに示したものが、表4である。

これより片側き裂板試験片と中央き裂板試験片を比べると、 ε_{cshear} もその値はほぼ同程度ではあるが、中央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とがわかる。また板厚の影響としては次の傾向が見られる。

- (3) ε_{cshear} は板厚の減少に伴って増加する。

4・3 考察 上でみられた傾向のうち ε_{ctear} , $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$, ε_{cshear} の試験片形状や負荷様式の違いによる影響については、前報でも述べたように、リガメント面での応力分布が片側き裂板試験片の場合には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の場合は引張領域だけであり、この違いがき裂先端近傍の変形状態さらには破壊様式に影響を及ぼした結果と推察できる。

表 3 ε_{ctear} , $(\partial\varepsilon_c/\partial a)_{shear}$ の評価結果

THICKNESS mm	SECP		CCP	
	ε_{ctear} KN/mm	$\frac{\partial\varepsilon_c}{\partial a} shear$ KN/mm ²	ε_{ctear} KN/mm	$\frac{\partial\varepsilon_c}{\partial a} shear$ 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

(a) SECP

(b) CCP

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 (板厚 1.5 mm)

さて, ε_{ctear} , $(\partial \varepsilon_c / \partial a)_{shear}$, ε_{cshear} に及ぼす前記 (1)~(3) の板厚効果についてであるが, それらは次のように考えることができるものと思われる。

まず, ε_{ctear} が板厚の減少に伴って減少する傾向については, Tetelman ら⁽⁵⁾の考察を引用して次のように考えることができる。すなわち Tetelman は, 板厚が小さく平面応力状態に近ければ Hahn ら⁽⁶⁾によって観察されたようにき裂先端近傍は図 13 に示すようなすべり変形が発生していると考えられることから, き裂先端近傍の状態は標点距離が板厚 B 程度の大きさであるような仮想的な小形引張試験片がき裂先端近傍に並列的に埋め込まれている状態によって近似できるとし, この小形引張試験片に生ずる代表ひずみを ε とすると, この試験片の変位 v は,

$$v = EB \quad \dots\dots\dots (6)$$

で与えられ, き裂が成長を開始するときのひずみを ε_c と表せば, そのときの変位 v_c は,

$$v_c = E_c B \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられることから, 薄板における限界 COD の板厚効果を説明している。ここで v はき裂先端開口変位に対応すると考えられ, き裂先端開口変位とき裂先端

のき裂エネルギー密度の関係は注目しているのが変位とエネルギーという違いはあるが共にき裂先端の変形状態を表すパラメータで一对一に対応すると考えられるので⁽⁷⁾, $v(v_c)$ と $\varepsilon(\varepsilon_c)$ は板厚の変化に対して同様の傾向を示すと考えられる。式 (7) より v_c は板厚の減少に伴って減少し, したがって ε_{ctear} が板厚の減少に伴って減少するという傾向も説明できることになる。

また, ε_{cshear} が板厚の減少に伴って増加する傾向については次のように考えることができる。き裂が成長を開始し, き裂先端が充分な塑性変形を生じている領域に達すると, き裂面との食違いが抵抗となって生じにくかったせん断破壊が生ずるようになり, 表面からしだいに板厚全域を占めるようになる。ここで ε_{ctear} より ε_{cshear} のほうが大きな値を示すことについて考えてみる。引裂破壊とせん断破壊を比較した場合, 引裂破壊は負の静水圧応力が主として関与すると考えられるのに対してせん断破壊はせん断応力が主として関与しており, 塑性変形はせん断応力により生じることから, せん断破壊のほうがより大きな塑性変形を経た後の破壊と考えられ, したがって分離までになされた仕事量であるき裂エネルギー密度も引裂破壊に対する ε_{ctear} よりせん断破壊に対する ε_{cshear} のほうが大きな値を示すものと考えられる。この考察に基づくと, ε_{cshear} が板厚の減少に伴って増加する傾向も, 板厚が薄くなると板厚方向の変位の拘束によって生ずるき裂先端の負の静水圧応力が減少し, それにより支配的ではないにしろ関与していた引裂破壊が発生しにくく, 破壊抵抗の大きなせん断破壊がより支配的となるためと考えることにより理解できる。

$(\partial \varepsilon_c / \partial a)_{shear}$ が板厚の減少に伴って増加する傾向

表 4 ε_{cshear} の評価結果

THICKNESS <i>mm</i>	SECP	CCP
	ε_{cshear}	ε_{cshear}
	<i>KN/mm</i>	<i>KN/mm</i>
2.0	0.077	0.084
1.5	0.115	0.146
1.0	0.102	0.137

(a) SECP

(b) CCP

図 12 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 (板厚 1.0 mm)

図 13 開口形負荷を受ける薄板き裂材の塑性変形様式⁽⁶⁾

は、同じせん断破壊に対するき裂先端のき裂エネルギー密度である $\varepsilon_{c, \text{shear}}$ が板厚の減少に伴って増加すれば、そのときのき裂先端におけるき裂エネルギー密度分布の傾き $(\partial \varepsilon_c / \partial X_1)_{\text{shear}}$ の絶対値も増加すると考えられ、式(5)の関係から $(\partial \varepsilon_c / \partial a)_{\text{shear}}$ も増加するものと思われる。

5. 結 言

本報では、第2報で得られたき裂エネルギー密度破壊

抵抗のき裂材形状、負荷様式依存性に加えて新たに板厚効果について次のような結果を得た。

(1) き裂成長開始時の引裂破壊が支配的な破壊様式に対応したき裂先端のき裂エネルギー密度 $\varepsilon_{c, \text{tear}}$ は板厚の減少に伴って減少する傾向がある。

(2) 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きのき裂先端のき裂エネルギー密度上乘せ率 $(\partial \varepsilon_c / \partial a)_{\text{shear}}$ は板厚の減少に伴って増加する傾向がある。

(3) 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きのき裂先端のき裂エネルギー密度も板厚の減少に伴って増加する傾向がある。

(1)の結果は Tetelman らの考察を引用することにより理解でき、(2)、(3)の結果は引裂破壊よりもせん断破壊のほうがより大きな塑性変形を経た後の破壊と考えられることから理解できる。

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, 機論, 52-475, A (昭61), 727.
- (4) 渡辺・畔上・平野, 機論, 52-475, A (昭61), 736.
- (5) Tetelman, A. S. and McEvily, Jr., A. J. (宮本訳), 構造材料の強度と破壊, 1 (昭45), 52, 培風館.
- (6) Hahn, G. T. and Rosenfield, A. R., *Acta Met.*, 13-223 (1965), 293.
- (7) 渡辺, 機論, 51-463, A (昭60), 873.

討 論

〔質問〕 岸本 喜久雄〔東京工業大学〕

き裂進展中の $\varepsilon_c(t, a)$, $\partial \varepsilon_c(t, a) / \partial a$ の値は、片側き裂試験片に比較して中央き裂試験片のほうが高くなっているが、この点に関してお考えがあったらご教示願いたい。

〔回答〕 ご質問に対し結論的にお答えするにはデータがまだ十分ではないが、おおよそ次のようなことではないかと考えている。

両試験片のリガメント部での変形状態を比較すると、片側き裂板試験片では応力こう配が大きく、塑性

変形域がき裂先端近傍に拘束されているのに対し、中央き裂板試験片ではよく知られているようなキャンドルフレーム形に近いびやかな塑性域が発生していると思われる。したがって、両者を比較するとき、片側き裂板試験片のほうが、塑性変形に対する拘束の度合から、より平面ひずみ形に近い様式での破壊が起こっていると考えられ、平面ひずみ形と平面応力形を比較した場合平面応力形のほうがより大きな破壊抵抗を示すと考えられることからご指摘の傾向が理解される。