

エネルギー解放率を用いた破壊靱性評価

鶴谷久晴^{*1} 橋本堅一^{*2} 島袋淳^{*2}

Evaluation of Fracture Toughness Using the Energy Release Rate

Hisaharu TSURUTANI, Kenichi HASHIMOTO and Atsushi SHIMABUKURO

Abstract

In this study, the evaluation for fracture toughness of acrylic material is performed by three kinds of estimation method used energy release rate. Three point bending test and the tension test by specimens with different crack length are used as testing method. E-integral, J-integral and stress intensity factor are used as the parameter in estimation process. The fracture toughness of acryl resin is estimated by using the idea of energy release rate. In experimental result, only evaluation value by E-integral is independent of the crack length. Therefore, it is known that the evaluation by E-integral is more useful than other evaluation method.

Key Words : energy release rate, E-integral, J-integral, fracture toughness, acrylic resin material

1. はじめに

破壊靱性を評価する場合、物体内のき裂進展エネルギーを考えることがひとつの方法として挙げられる。この種の方法としてはき裂先端を囲む任意の経路積分で求まるRiceのJ積分があり、その簡便評価法も提案されている¹⁾。しかし、このJ積分での評価手法では弾性変形分を無視しているために材料によっては誤った評価が行われることがある。これらの問題点を考慮した手法として、過去に岩石材料で有効な評価手法として提案されたBegleyとRandesによる方法²⁾を若干修正したE積分による方法³⁾がある。

本研究では線形挙動を与え、比較的従来の破壊理論を説明できるアクリル樹脂材料を用いて、E積分による評価手法で破壊靱性について実験的に評価した。E積分での評価手法は、J積分による方法とは異なり、切り欠き長さの若干異なる同寸法の供試体を用いて引張り試験、3点曲げ試験の荷重-載荷点変位を求め、評価までの変位や荷重を一定にしないで、ある状態（たとえば最大荷重）

に至った点と点とを結び、その面積から破壊靱性を導くものである。ここで、E積分での評価手法の具体的な例をFig.1に示す。

Fig.1の手法により、E積分による評価は次式¹⁾で表される。

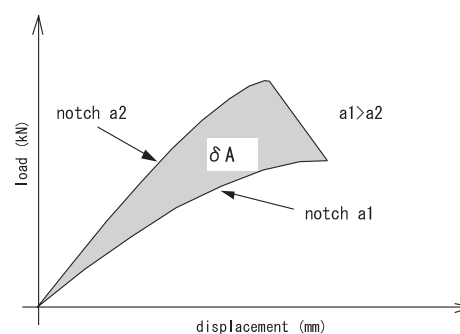


Fig.1 E積分による評価法¹⁾

^{*1} 環境建設工学専攻

^{*2} 土木建築工学科

$$E = \frac{\delta A}{B(a_1 - a_2)} \quad (1)$$

ここで、 a_1 は長い方の供試体の切り欠き長さ、 a_2 は短い方の供試体の切り欠き長さ、 δA は切り欠き長さ a_1 、 a_2 の供試体の実験結果から求まる面積(Fig. 1 参照)、 B は供試体幅である。この方法はE積分の概念に相当し、弾性材料であればエネルギー解放率に対応するものである。また、弾塑性体材料であればJ積分の物理的意味が明確でないのに対して、E積分は“ある状態に達するのに必要とされる外力がなすべき仕事のき裂長さの違いによる差”と解釈することができる。さらにE積分のほか、簡便式を用いたJ積分値、応力拡大係数から弾性係数を考えてのエネルギー解放率を求め、E積分の評価値と比較、検討を行った。そして、引張り試験、3点曲げ試験での結果によりそれぞれの方法により破壊靱性を評価し、その妥当性について比較検討を行った。

2. 破壊靱性の評価

(1) E積分による簡便式

前述の式(1)を用いて、同一材料、同寸法の供試体を、切り欠き長さを変えて引張り試験を行い、切り欠き長さの異なる2種類の供試体でのエネルギー差によって破壊靱性を導く方法である。

(2) J積分による簡便式³⁾

Riceらは、き裂が深く、部材の荷重-荷重点変位が主としてリガメント長さ b のみに依存する場合のJ積分式を提案している。リガメント長さとは、板厚から切り欠き分を差し引いた部材の長さ(Fig. 4中の b) のことである。曲げによる変形が支配的な試験片に対して、J積分値は、次式²⁾により表される。

$$J = \frac{2}{b} \int_0^{\Delta} \left(\frac{P}{B} \right) d\Delta \quad (2)$$

ここで、 b はリガメント長さ、 P は載荷荷重、 B は供試体幅、 Δ は荷重点変位である。したがって、実験により試験片の荷重-荷重点変位図がFig. 2のように得られたら、Fig. 2の面積Aの部分をもとに、 $2/b$ を乗じればJ積分によるエネルギー解放率が求まる。この式は実験的にJ積分を評価しようとする場合に、以下に示す二つの利点を持ち評価できる。

- ① 実験によって得られるP- Δ 曲線がそのまま使える。
- ② BegleyとLandesの方法と異なり、ただ1本のP- Δ 曲線によりJ積分が評価できる。

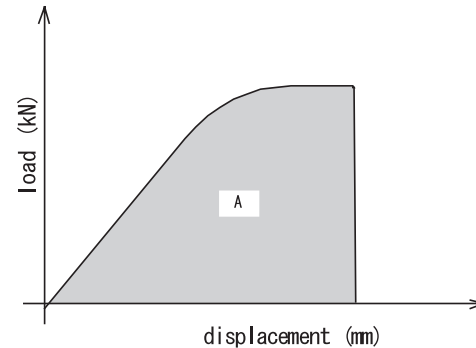


Fig. 2 J積分による評価法³⁾

(3) 応力拡大係数³⁾

応力拡大係数は破壊力学において中心的な役割を果たすパラメータであり、この概念の導入によって、種々の現象に対するき裂の挙動を定量的に論じることが可能となる。応力拡大係数は実験結果から級数解により計算することができ、引張り試験での計算式は次式(3)³⁾である。

$$K_{Ic} = \sigma_0 \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad (3)$$

ここで

$$F(\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi \xi} \tan \frac{\pi \xi}{2} \frac{0.752 + 2.02\xi + 0.37[1 - \sin(\pi \xi / 2)]^3}{\cos(\pi \xi / 2)}}$$

σ_0 は一様引張応力、 ξ は板幅 W とき裂長さ a の比 a/W である。

また、3点曲げ試験での計算式は次式(4)³⁾である。

$$K_{Ic} = \frac{P_Q S}{B W^{3/2}} f(\xi) \quad (4)$$

ここで

$$f(\xi) = \frac{3(\xi)^{1/2} [1.99 - (\xi)(1 - \xi)(2.15 - 3.93\xi + 2.7\xi^2)]}{2(1 + 2\xi)(1 - \xi)^{3/2}}$$

P_Q は荷重、 B は板厚、 S は支点間距離である。

(4) J_{Ic} と K_{Ic} の概念³⁾

J積分はき裂長さの変化に伴う試験片単位厚さ当たりのポテンシャルエネルギー解放率を表す。すなわち、線形弾性体の場合、J積分はエネルギー解放率と等価である。したがって、き裂面の変位様式がモード I (開口型) の場合にはエネルギー解放率と応力拡大係数 K_I の関係から、小規模降伏状態において平面ひずみ状態では次式(5)²⁾が成立する。

$$J_I = \frac{(1 - \nu^2) K_I^2}{E} \quad (5)$$

ここで E は縦弾性係数、 ν はポアソン比である。した

がって線形弾性体に限れば、弾性係数を介して一意的な関係となる。小規模降伏状態におけるエネルギー平衡 K_{Ic} 、 J_{Ic} は破壊靱性と呼ばれる材料特性値であり、エネルギー解放率にその基礎をおく破壊の基準 $J_1 \geq J_{Ic}$ は $K_1 \geq K_{Ic}$ のように記述できる。また、応力拡大係数による破壊靱性の評価が弾性係数などの物性値に依存しないのに対して、 J 積分などのエネルギーの概念による破壊靱性は、式(5)より弾性係数に依存することから、応力拡大係数 K_1 のようにその値が大きいからき裂に対して強いと必ずしもいえないことに注意を要する。

3. 実験概要

本研究では供試体として、アクリル樹脂板を加工したものを利用した。Table 1に本研究で用いたアクリル樹脂材料の力学的性質を示す。表中の破壊靱性値 K_{max} は片側き裂を有する供試体の引張り試験における破壊荷重(最大荷重)により求めたものであり、他の値はASTMの試験法に準じて測定されたものである。試験機には静的容量15kNの油圧サーボ式材料試験機(島津サーボパルスEHF-FG1-4LA型)を用い、変位については、岩質材料等では支点や載荷点の局所変形が入るためその変位を取り除く必要があるが、アクリル樹脂の場合は弾性係数が花崗岩の1/10で変形性が大きいので、そういった処理をしなくても破壊までの線形挙動がアクチュエータ内臓の変位計の変位により得られることを確認している。そこで材料試験機の載荷システムで得られる載荷荷重、載荷点変位をコンピュータでオンライン処理を行い、直接データの記録とした。

(1) 引張り試験

扱うモデルはFig. 3に示す軸方向で引張応力を受ける片側き裂を有する帯板モデルである。寸法は厚さ2mm、幅20cm、長さ55cmで、き裂の長さは95,100,105mmの3種とした。き裂はき裂先端形状により破壊応力が著しく変化するため、切り欠き先端の加工はピンバイスを用い曲面上に加工した後、カッターナイフでさらに鋭敏な切り欠きを挿入する。このことにより、破壊き裂の発生がき裂先端の中央の一箇所に限られ著しい実験精度の向上が確認できた。また、本試験のために特別に設計した治具に供試体を取り付け、載荷速度0.1mm/minで載荷をする。

(2) 3点曲げ試験

ASTMで定められている方法で3点曲げ試験を行った。Fig. 4に供試体と3点曲げ試験用供試体の側面図を示す。

Table 1 供試体材料特性⁴⁾

破壊靱性値(K_{max})	2.81MPa \sqrt{m}
引張強度	7.54MPa
圧縮強度	117.7MPa
せん断強度	61.8MPa
弾性係数	2.94GPa

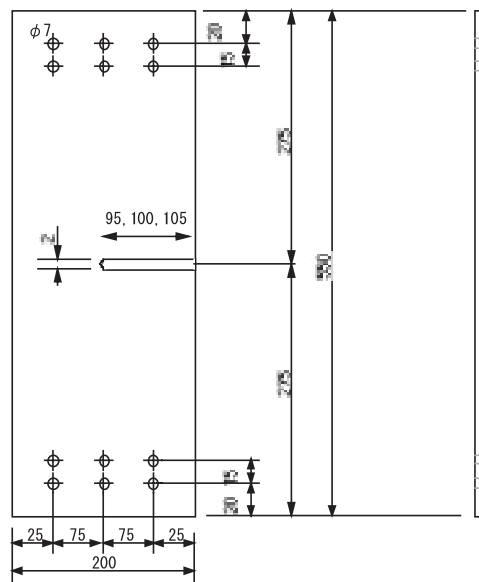


Fig. 3 引張り試験用供試体

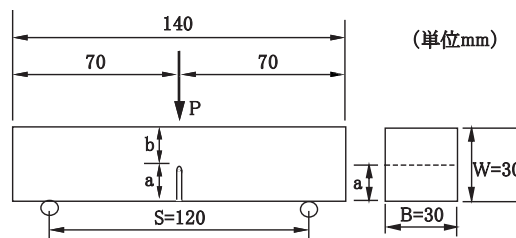


Fig. 4 3点曲げ試験用供試体

Table 2 破壊靱性値

	name	a/w	K_{Ic} (Mpa \cdot m ^{1/2})
引張り試験	95	0.475	1.833
	100	0.5	1.953
	105	0.525	1.888
3点曲げ試験	14	0.466	1.547
	15	0.499	1.509
	16	0.532	1.351

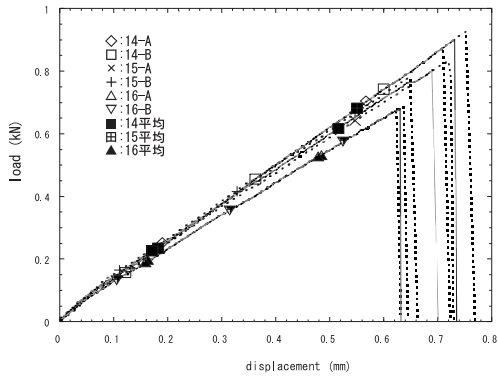


Fig. 5 3点曲げ試験での荷重-荷重点変位

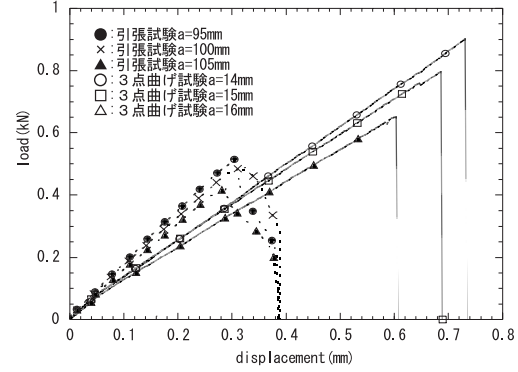


Fig. 9 荷重-荷重点変位

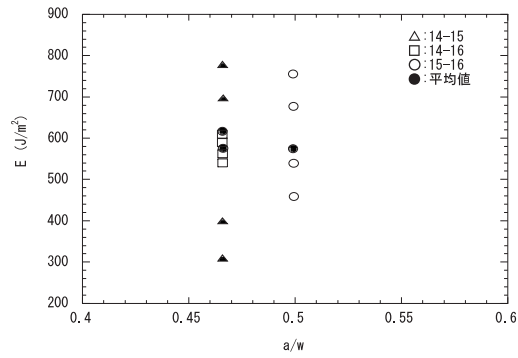


Fig. 6 E積分によるエネルギー解放率

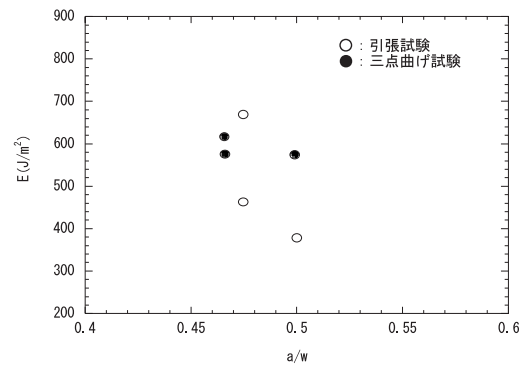


Fig. 10 E積分によるエネルギー解放率

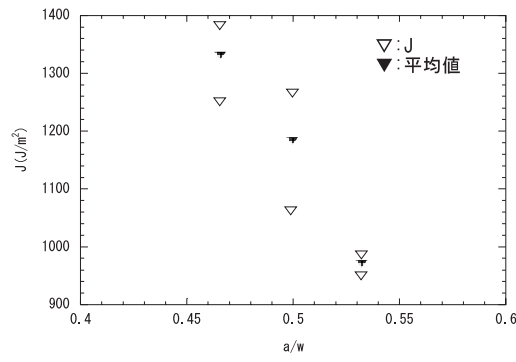


Fig. 7 J積分によるエネルギー解放率

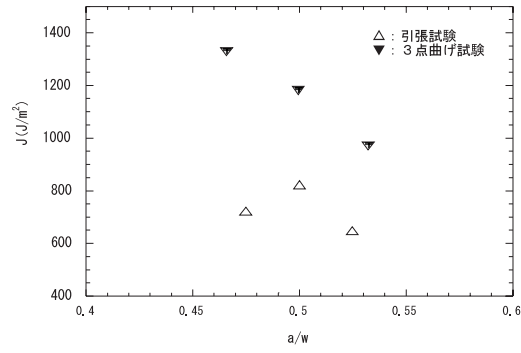


Fig. 11 J積分によるエネルギー解放率

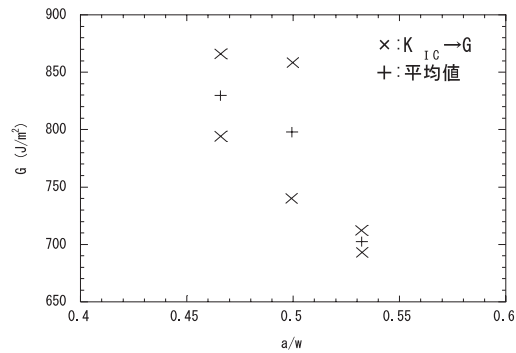


Fig. 8 応力拡大係数からのエネルギー解放率

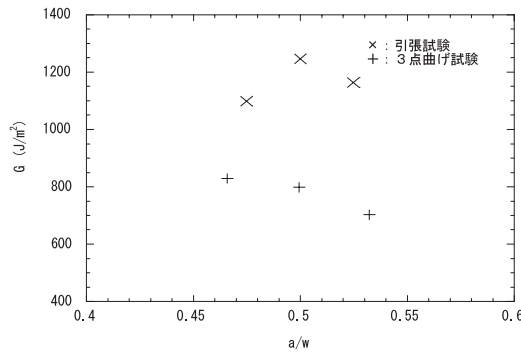


Fig. 12 応力拡大係数からのエネルギー解放率

供試体の寸法は $30 \times 30 \times 140\text{mm}$ とし、スパン長さは 120mm とした。供試体中央部の切り欠き長さは $14, 15, 16\text{mm}$ の3種類を用意し、機械加工とした。また、切り欠きはカッターナイフでさらに鋭敏にした。このことにより、引張試験と同様、破壊き裂の発生がき裂先端の中央の1箇所に限られ、著しい実験精度の向上が確認できる。載荷点は切り欠き部の真上にくるようにし、載荷変位速度は $25\text{mm}/\text{min}$ とした。

4. 実験結果と考察

Fig. 5は3点曲げ試験での荷重-載荷点変位の結果を切り欠き長さごとに図を最小二乗近似して平均化したものと、それぞれの実験結果の値と比較したものである。Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8は、Fig. 5からE積分によるエネルギー解放率、J積分によるエネルギー解放率、応力拡大係数をエネルギー解放率に換算したものである。それぞれの結果を比較すると、それぞれの実験結果による値はかなりばらつきがあるが、Fig. 6に示したE積分による評価は他の評価が切り欠きの長さに依存しているのに対して、各実験結果による値にはばらつきを生じているが、切り欠き長さには依存せず、平均化したものでの評価はほぼ一定な値を示している。このことは、破壊靱性値の評価に対して有効であるといえる。これらの結果により引張試験と3点曲げ試験の破壊靱性値の比較方法として、荷重-載荷点変位の実験結果から切り欠き長さごとに平均化した曲線により、E積分によるエネルギー解放率、J積分によるエネルギー解放率、応力拡大係数をエネルギー解放率に換算したものを求め、破壊靱性の評価を行った。

(1) 荷重-載荷点変位の関係

Fig. 9は実験結果から縦軸に荷重 $P(\text{kN})$ 、横軸に載荷点での変位 (mm) をとり図示したものである。切り欠き長さ a が等しければ、荷重-載荷点変位の傾きはほぼ等しく、全ての載荷荷重-載荷点変位図は線形挙動に近いことがわかる。しかし、引張り試験の破壊状況は破壊点を過ぎた後の載荷荷重が急に除荷されず、断続的にき裂進展が起きているような形となり、本来のアクリルの性質である脆性的な破壊は起こらなかった。また、破壊荷重には引張り試験、3点曲げ試験共に、ばらつきが多くみられた。これらの原因としては、3点曲げ試験、引張り試験ともに載荷の偏心が起こっていることが考えられ、特に引張り試験では供試体加工の際、材料の性質が変化した場合も考えられる。

(2) E積分による評価

E積分の計算方法は、Fig. 9より荷重-載荷点変位が線形挙動に近いことから、これに対して直線近似を行い、エネルギー解放率の計算を行った。ここで、E積分の概念によるエネルギー解放率の計算結果をまとめたものがFig. 10である。E積分によるエネルギー解放率の評価手法は、前述した式(1)を用いてき裂長さの違いによって生じるエネルギー解放率から求める。Fig. 10より、エネルギー解放率は $400 \sim 700 \text{J}/\text{m}^2$ の間に分布しており、ばらつきはあるが引張り試験と3点曲げ試験のE積分値の比較では近いものとなった。

(3) J, K_{Ic} との比較

J積分によるエネルギー解放率と応力拡大係数 K_{Ic} の計算を行い、E積分により得られたエネルギー解放率との比較、検討を行った。J積分による評価方法は、E積分による評価法と同じようにFig. 9より近似曲線を取り、式(2)を用いてJ積分値を求めた。また、応力拡大係数から得られるエネルギー解放率は、式(3)および式(4)により応力拡大係数を求め、式(5)を用いてエネルギー解放率に換算する。その際の弾性係数 E はTable 1より 2.94GPa 、ポアソン比 ν は 0.2 とした。応力拡大係数の計算結果をTable 2、J積分によるエネルギー解放率をFig. 10、応力拡大係数をエネルギー解放率に換算した値をFig. 11に示す。

Fig. 11より、J積分により得られるエネルギー解放率の特徴は、 a/W の値が増加すればエネルギー解放率は減少傾向にある。引張り試験による値は3点曲げ試験の値に比べかなり低く、引張り試験と3点曲げ試験のJ積分により得られるエネルギー解放率は異なった傾向を示しているといえる。次にFig. 12より、応力拡大係数をエネルギー解放率に換算した値は、引張り試験ではJ積分によるエネルギー解放率よりも大きい値となった。3点曲げ試験ではJ積分によるエネルギー解放率よりも小さい値をとった。また引張り試験でのJ積分によるエネルギー解放率は3点曲げ試験でのJ積分によるエネルギー解放率より大きい値をとった。ここでもやはり3点曲げ試験と引張り試験では異なった傾向を示した。

5. 結論

線形弾性体に近い変形挙動を与えるアクリル樹脂を用いた供試体で破壊靱性試験を行い、エネルギー解放率に基づいた破壊靱性値の評価を行った。その結果、次のことが確認できた。

- (1) E 積分によるエネルギー解放率の値は 400~700 J/m² の間に分布しており, 多少ばらつきは存在するが引張り試験, 三点曲げ試験共に類似した傾向を示した.
- (2) J 積分により得られるエネルギー解放率を評価した結果, J 積分によるエネルギー解放率は a/W の値が増えるにつれ減少傾向にあり, E 積分により求められたエネルギー解放率と異なって引張り試験, 三点曲げ試験では違った傾向を示した.
- (3) 応力拡大係数をエネルギー解放率に換算した値は, 引張り試験では J 積分によるエネルギー解放率よりも大きい値となり, 3 点曲げ試験では J 積分によるエネルギー解放率よりも小さい値となった. また, J 積分の結果と同様に減少傾向にあり, 切り欠き長さ依存性を示した.

以上のことから E 積分により得られるエネルギー解放率,

J 積分により得られるエネルギー解放率, 応力拡大係数得られるエネルギー解放率で, 三点曲げ試験と引張り試験の結果を比較した結果, E 積分による評価が有効であることが確認できた. しかしばらつきが多く, 今後は精度の高い実験が必要となるものと考えられる.

文献

- 1) 清水順生: E積分を用いた花崗岩の破壊靱性評価, 平成3年度徳山工業高等専門学校卒業研究論文, (1992)
- 2) 矢富盟祥: エネルギー解放率の新公式とその応用—多軸荷重の場合の簡便式—, 材料, vol.35, No.394, pp.57-61, (1986)
- 3) 國尾武, 中沢一, 林郁彦, 中村弘之: 破壊力学実験法, 朝倉書店, pp.45—88, (1984)
- 4) 篠原康一: モード I およびモード II 独立負荷条件下における破壊靱性値の評価, 平成 11 年度徳山工業高等専門学校卒業研究論文, pp.173-178. (1999)

(2002. 9. 5 受理)