

# 圧縮荷重下にあるき裂進展挙動の破壊力学的研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/16222">http://hdl.handle.net/2297/16222</a>

氏名	鱧 洋一
生年月日	
本籍	愛知県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第313号
学位授与の日付	平成11年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	圧縮荷重下にあるき裂進展挙動の破壊力学的研究
論文審査委員	(主査) 矢富 盟祥 (副査) 石田 啓, 川村 満紀, 北浦 勝, 田村 武

## 学位論文要旨

### ABSTRACT

In this paper, we analyze the energy release rate for a frictional crack subjected to remote proportional and non-proportional compressive loads using the finite element method. The energy release rate is calculated by using the path-independent E-integral of the complementary strain energy type, which is path independent even at the onset of crack kinking. We find that the E-integral gives the energy release rate under the compressive loads with a high accuracy.

図1のような圧縮荷重下にある2次元平面内を準静的に進展しているき裂を考える。そのときE積分公式は次の3つが導かれる。

ひずみエネルギー型E積分公式 (E-integral of the strain energy type)

$$E(l, \alpha) = \int_{\Gamma \cap C^+} s \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \ell} ds - \frac{\partial}{\partial \ell} \left( \int_{\Gamma \cap C^+} \int_0^\alpha s \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \beta} d\beta ds \right) \quad (1)$$

相反作用型E積分公式 (E-integral of the reciprocal type)

$$E(l, \alpha) = \int_{\Gamma \cap C^+} \int_0^\alpha \left( \frac{\partial s}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \ell} - \frac{\partial s}{\partial \ell} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \beta} \right) d\beta ds \quad (2)$$

補ひずみエネルギー型E積分公式 (E-integral of the complementary strain energy type)

$$E(l, \alpha) = \frac{\partial}{\partial \ell} \left( \int_{\Gamma \cap C^+} \int_0^\alpha \frac{\partial s}{\partial \beta} \cdot \mathbf{u} d\beta ds \right) - \int_{\Gamma \cap C^+} \frac{\partial s}{\partial \ell} \cdot \mathbf{u} ds \quad (3)$$

ここで式(1)から式(2), また式(2)から式(3)を導く際に, 境界 $\Gamma \cap C^+$ による積分と, き裂長さ $\ell$ による偏微分の入替えを行ったが, 進展き裂面上に摩擦力などの表面力が存在する場合は, き裂長さの変化につれて, その境界 $C^+$ の大きさが変化する。その場合, 理論的には3者とも同一の値となることが容易に証明できるが, 数値解析する際には補ひずみエネルギー型E積分公式(3)が最も精度が良いことが推察できる。これらのE積分公式を接触・摩擦条件を考慮した有限要素解析に導入し, 圧縮荷重下での進展き裂のエネルギー解放率を求める。

有限要素解析に使用したモデルは図2に示すような, 8節点アイソパラメトリック要素を基本とした要素分割しており, 基本モデルの要素数は332, 節点数は920である。き裂進展モデルは, 基本モデルのき裂先

端の要素において、1つの要素辺を新たな、き裂面とするために2つの要素辺に再メッシュした、すなわち図3に示すような2つの節点を解除（生成）したモデルである。そのため、き裂進展モデルでは節点数は2つ増え922となる。ヤング係数Eは花崗岩を想定し68.6Gpa, ポアソン比 $\nu$ は0.3とした。

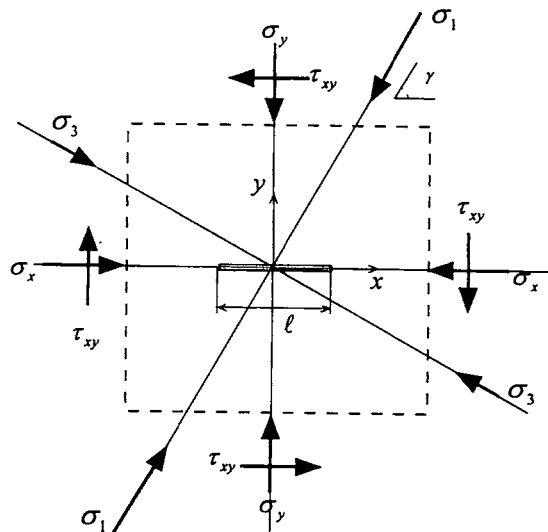


図1 二軸一様圧縮荷重下にある2次元平面内を準静的に進展しているき裂.

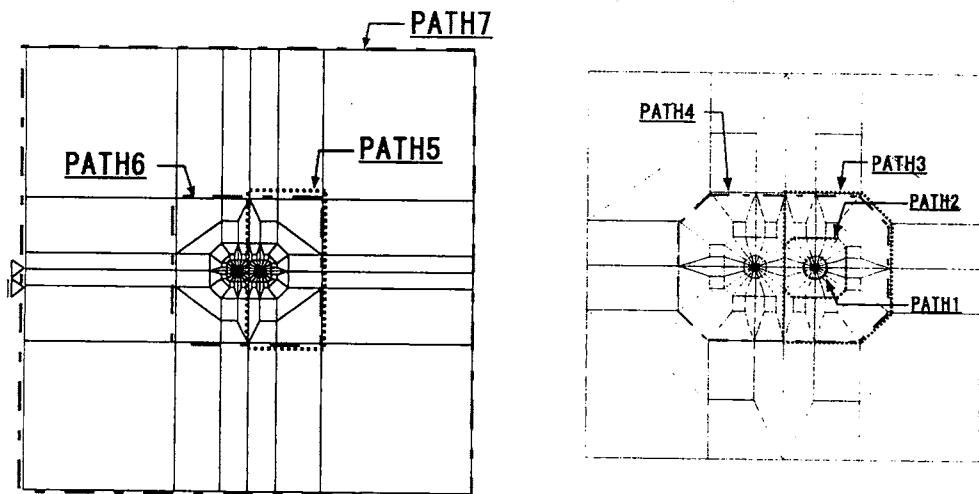
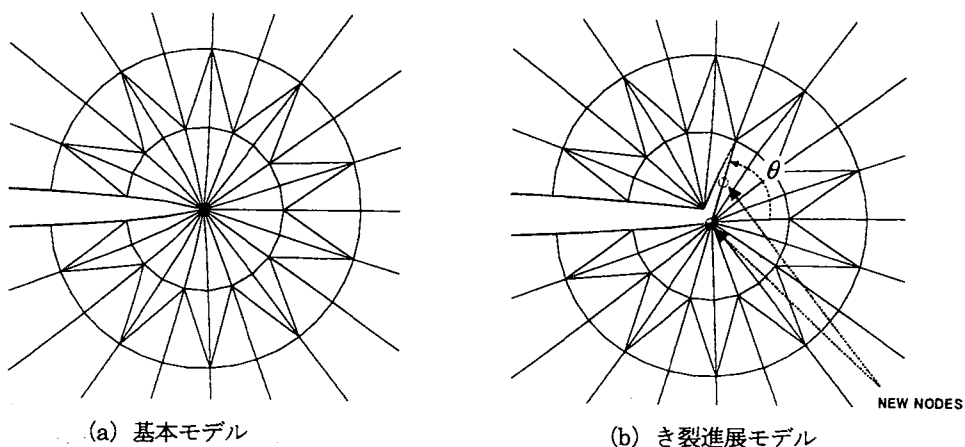


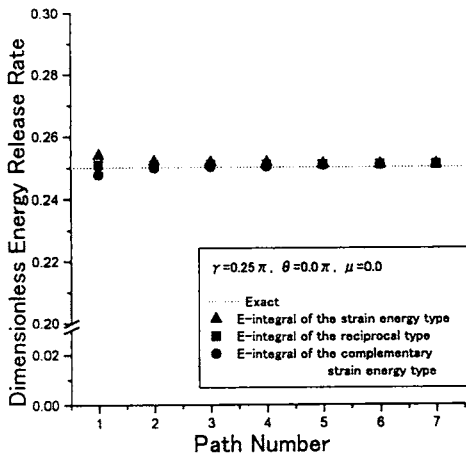
図2 有限要素モデル



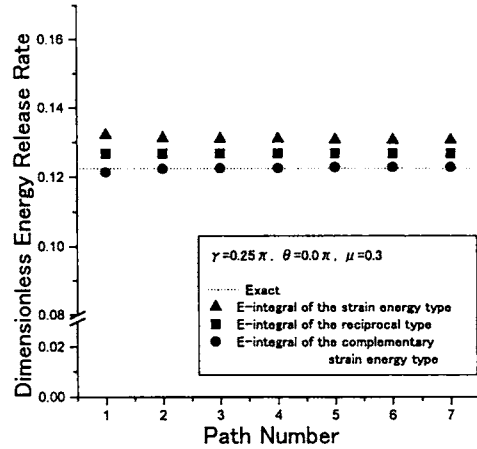
(a) 基本モデル

(b) き裂進展モデル

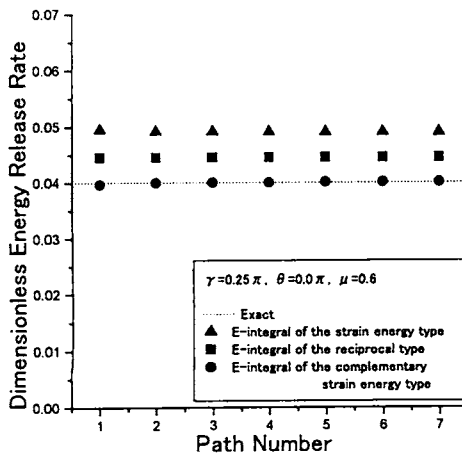
図3 き裂先端付近の有限要素分割と、き裂折れ曲がり角度 $\theta$ .



(a) 摩擦係数  $\mu=0.0$



(b) 摩擦係数  $\mu=0.3$



(c) 摩擦係数  $\mu=0.6$

図4 任意の積分経路で3種類のE積分を用い求めた、き裂面上での摩擦係数が違う進展き裂のエネルギー解放率。

図4 (a) は、き裂面上での摩擦係数  $\mu$  が0.0の場合であり、(b) は  $\mu$  が0.3、(c) は  $\mu$  が0.6の場合の結果である。それぞれの図の横軸は経路番号であり、縦軸は無遠からの一様引張り荷重下にある進展き裂の理論解により求まるエネルギー解放率で無次元化したものである。

図4 (a) は、き裂面上での摩擦係数  $\mu$  が0.0の場合であり、(b) は  $\mu$  が0.3、(c) は  $\mu$  が0.6の場合の結果である。それぞれの図の横軸は経路番号であり、縦軸は無遠からの一様引張り荷重下にある進展き裂の理論解により求まるエネルギー解放率で無次元化したものである。

図からわかるように、3種類のどの積分公式においても、き裂右先端のみを囲む経路1,2,3,5、および、き裂両先端を囲む経路4,6,7のどの経路において一定の値となっており、経路独立性が示されている。進展き裂面上での摩擦係数  $\mu$  は0.0、0.3、0.6の3つの場合をそれぞれ解析したが、どの摩擦係数でも経路独立性が示されていることが分かる。

図中の点線は、き裂面上に摩擦力が存在する場合のエネルギー解放率の理論解である。図中▲で示されるひずみエネルギー型E積分公式の値と、図中■で示される相反作用型E積分公式の値は、摩擦係数が大きくな

積分経路は要素辺上に設定してあり、き裂右側先端を囲む経路(図中点線)を小さい方から1,2,3,5、き裂両側先端を囲む経路(図中一点鎖線)を小さい方から4,6,7としてある。ここでの各積分経路中には、き裂面  $C^+$  の要素辺も含めなければならない。特に、き裂両側先端を囲む積分経路には全き裂面が含まれている。このように、E積分では、周知のJ積分と異なり、積分経路を要素辺上に設定し、節点での表面力、変位を直接積分公式の中に代入し計算することができ、精度を上げることができる。

図4は、図1のような無限板内にあるき裂に一軸一様圧縮荷重  $\sigma_1$  ( $< 0$ ; 主応力比  $\sigma_3/\sigma_1 = 0.0$ ) が  $\gamma = 0.25\pi$  ( $=45^\circ$ ) の方向から比例的に荷重されたときに、き裂が直進する場合 ( $\theta = 0.0\pi$  と

るにつれて理論解から離れていくことがわかる。図中●で示される補ひずみエネルギー型E積分公式の値は、摩擦係数が大きくなって理論解と良く一致していることがわかる。補ひずみエネルギー型E積分公式が、3種類の公式の中で最も精度の良いことが数値解析的にも確かめられた。

本数値解析の補ひずみエネルギー型E積分公式を用いたエネルギー解放率の理論解との誤差は、摩擦係数の大きさに関わらず、どの経路においても約0.3%程度であり、非常に良い精度で解析できている。よって以後の解析結果は、補ひずみエネルギー型E積分公式の数値解公式で求めたエネルギー解放率の値を無次元化したものである。またどの解析においても経路独立性が成立していたので、解析結果としては一番外側で物体境界上に設定した経路7の値を代表して示す。

図5は一軸一様圧縮荷重下で、圧縮荷重角度 $\gamma$ が $0.25\pi$  ( $=45^\circ$ )の場合の、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率を求めたものである。横軸は、き裂折れ曲がり角度 $\theta$ で、縦軸は無次元化したエネルギー解放率である。き裂折れ曲がり角度 $\theta$ は $0.0\pi$ から $0.9\pi$ までの $0.1\pi$ ごと、摩擦係数 $\mu$ は $0.0, 0.3, 0.6$ の場合をそれぞれ解析した。この図から、最大エネルギー解放率破壊規準を使用し、破壊靱性値が等方的であると仮定するならば、摩擦係数の大きさによらず、き裂は初期き裂面から約 $0.4\pi$  ( $\approx 72^\circ$ ) 圧縮荷重 $\sigma_1$ 方向へ折れ曲がって進みやすいことがいえる。これは図6に示すような圧縮荷重下でのウィングクラックタイプの、き裂の折れ曲がり進展開始方向を表わしていると考えられる。以後、便宜上、このエネルギー解放率を最大にする、き裂折れ曲がり角度を破壊角度 (Fracture angle) と呼び、 $\theta_c$ と表すことにする。

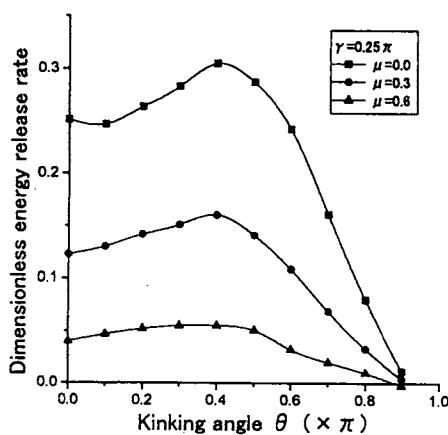


図5 一軸一様圧縮荷重下での、き裂面上に摩擦力の存在する、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率； $\gamma = 0.25\pi$ ； $\mu = 0.0, 0.3, 0.6$ 。

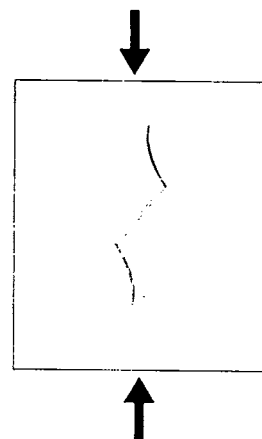


図6 一軸一様圧縮荷重下でのウィングクラックタイプの進展き裂

図7は、二軸一様圧縮荷重を $\gamma = 0.2\pi$  ( $=36^\circ$ )の方向から、主応力比 $\sigma_3/\sigma_1$ を $0.0$ から $0.9$ まで $0.1$ ごと変えて比例的に载荷した場合の、き裂面上に摩擦の無い、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率を求めた図である。この図から、主応力比が増えていくと等方応力状態に近づくため、どの折れ曲がり角度でもエネルギー解放率が小さくなって行き、き裂が不安定進展を開始するには $|\sigma_1|$ および $|\sigma_3|$ の両方もが、より大きくなる必要があることがわかる。進展方向は主応力比が $0.1$ から $0.3$ ぐらいまでは、一軸の場合（主応力比が $0.0$ ）のように、初期き裂面に対して最大主応力 $\sigma_1$ 方向へ約 $0.4\pi$ 傾いた方向に進展しやすいことがわかるが、主応力比が $0.4$ から $0.9$ までは直進方向 ( $\theta = 0.0\pi$ )のほうが大きくなっており、エネルギー解放率一定でき裂が進展することを仮定するならば、図8のように、折れ曲がらず直進する方向に、せん断破壊 (モードII破壊) していくことが予想される。

図9, 図10は、同様な二軸一様圧縮荷重下で、き裂面上に摩擦が存在する場合の、き裂折れ曲がり瞬間時の

エネルギー解放率である。図9は $\mu=0.3$ の場合で、主応力比は0.1ごとに解析を行ったものであり、主応力比が0.6より大きいと、エネルギー解放率がゼロであったため省略した。図10は $\mu=0.6$ の場合で、主応力比が0.3より大きいと、エネルギー解放率がゼロであったため省略し、主応力比を0.05ごとに調べて解析をおこなった。

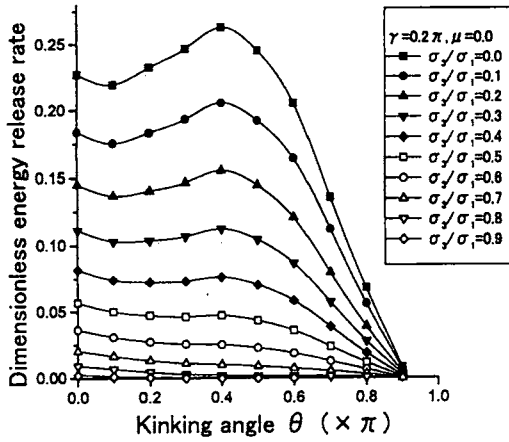


図7 主応力比を変化させた、二軸一様圧縮荷重下での、き裂面上に摩擦のない、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率； $\gamma = 0.2\pi$ ； $\mu = 0.0$ 。

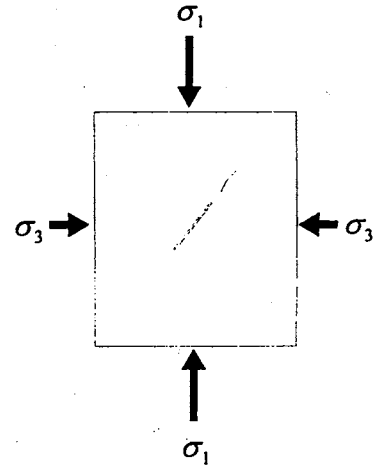


図8 二軸一様圧縮荷重下での、せん断型き裂

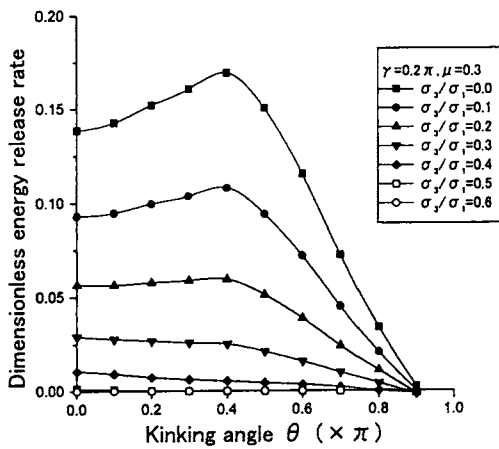


図9 主応力比を変化させた、二軸一様圧縮荷重下での、き裂面上に摩擦の存在する、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率； $\gamma = 0.2\pi$ ； $\mu = 0.3$ 。

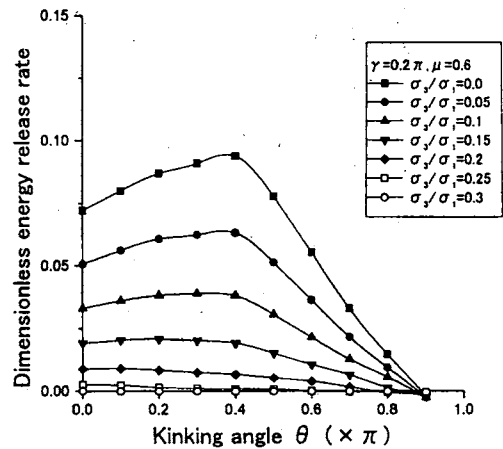


図10 主応力比を変化させた、二軸一様圧縮荷重下での、き裂面上に摩擦の存在する、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率； $\gamma = 0.2\pi$ ； $\mu = 0.6$ 。

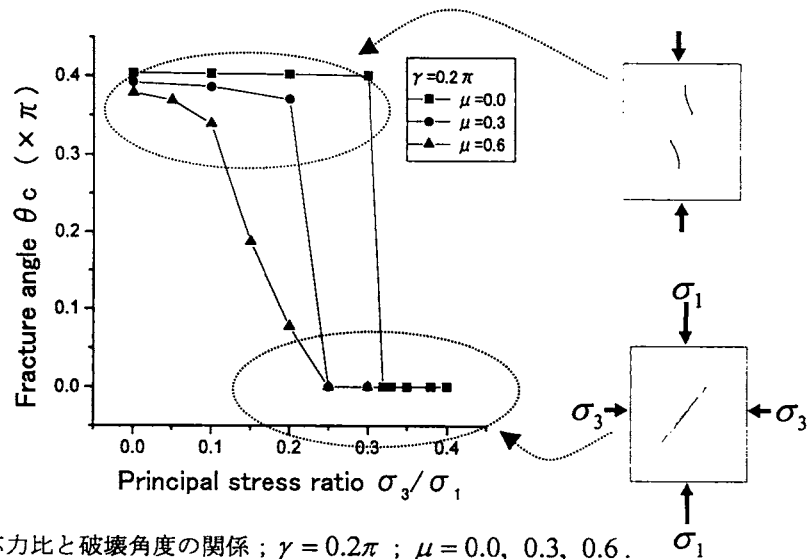


図 11 主応力比と破壊角度の関係；  $\gamma = 0.2\pi$ ；  $\mu = 0.0, 0.3, 0.6$ 。

図11は、二軸一様圧縮荷重を  $\gamma = 0.2\pi$  ( $=36^\circ$ ) の方向から比例的に载荷した場合の、主応力比と破壊角度の関係を表した図である。横軸は主応力比、縦軸は破壊角度である。■は  $\mu = 0.0$ 、●は  $\mu = 0.3$ 、▲は  $\mu = 0.6$  の摩擦係数を持つ進展き裂の破壊角度であるが、 $\mu = 0.0$  の場合は前述のように、主応力比が0.3より大きいと直進方向（元のき裂面と同方向）に進展しやすいことが示されている。 $\mu = 0.3$ 、 $\mu = 0.6$  の場合は主応力比が約0.25以上であると、直進方向にエネルギー解放率の最大方向が現れている。また摩擦係数が大きいくほど、図11の破壊角度は、主応力比が大きくなるにつれて滑らかに減少している。 $\mu = 0.0$  の場合に破壊角度が急に降下している付近を詳細に検討すると、図7のように、き裂折れ曲がり角度が  $0.0\pi$  と  $0.4\pi$  ( $=72^\circ$ ) の間には下に凸の関数となっているため、主応力比が0.3付近で、破壊角度が  $\theta_c \approx 0.4\pi$  から  $\theta_c = 0.0\pi$  へ飛び移っていることがわかる。

## 学位論文審査結果の要旨

学位論文審査委員会は平成11年1月26日に第1回審査委員会を開催し、平成11年2月1日に行われた口頭発表後に開催した最終審査委員会において協議の結果以下の通り判定した。

本論文は、圧縮荷重下での破壊現象を明らかにする目的で、き裂面上に摩擦が存在する場合のE積分によるエネルギー解放率の理論および数値解析的研究を行ったものである。その際、3種類のE積分公式を、新たに分離導入し、き裂面上に摩擦力が作用する場合の数値解析を行う際には、補ひずみエネルギー型が最も精度が良いことの理論的かつ数値解析的検証を与えている。応用例として、最初に、1軸圧縮荷重下および主応力比を広範囲に変化させた2軸圧縮荷重下での、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率を求め、本解析手法が非常に良い精度を与える事を立証している。特に、主応力比の違いにより、通常みられる引張り折れ曲がりき裂が発生する場合以外に、折れ曲がらず元のき裂と同方向にせん断破壊する圧縮・せん断き裂となる場合の存在を解明している。次に、圧縮荷重が非比例負荷で与えられる場合を解析し、新しい破壊力学パラメータである仕事変化率についての理論解、および高精度な数値解を得、荷重が非比例負荷になる場合の重要性を指摘している。このような圧縮荷重下でのエネルギー解放率を考察した研究は、国内・外でも他に見られず、本論文は、破壊力学の分野において非常に有意義な知見を得ている。

以上の結果を総合して、本申請者は博士(工学)の学位を受けるに値するものと判定した。