

氏名	阿部孝弘		
生年月日			
本籍	福井県		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第497号		
学位授与の日付	平成14年3月22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	エネルギー解放率破壊基準によるき裂干渉問題に関する研究		
論文審査委員(主査)	矢富 盟祥(工学部・教授)		
論文審査委員(副査)	川村 満紀(工学部・教授)	北浦 勝(自然科学研究科・教授)	
	鳥居 和之(工学部・教授)	田村 武(京都大学大学院・教授)	

## 学位論文要旨

### ABSTRACT

In this paper, we examine the extension behavior of parallel cracks in a linear isotropic elastic body subjected the tension loads or compressive loads. Assuming the isotropy of fracture toughness of a body, we discuss the crack extension behavior based on maximum energy release rate criterion. By using the E-integral, which is path independent even for a path containing stationary crack tips, we compute the energy release rate for all the crack tips at the onset of crack kinking. We compare the analytical result with experimental result. We find that both results are almost agreed.

## 1. まえがき

材料内に多数のき裂が存在する時、き裂の長さや、き裂相互の位置関係によって、き裂の進展を助長させたり、あるいは逆にき裂の進展を抑制したりするような相互干渉状態にある。また、き裂の位置関係によっては、折れ曲がり進展する場合や、他のき裂先端に飛び移り進展する場合も生じる。本研究では、材料内に存在する複数のき裂の進展挙動を、線形弾性体を対象として、複数き裂の基本的なき裂配置をモデル化し、そのき裂配置および荷重条件によるき裂進展挙動をき裂の進展がエネルギー解放率による破壊規準に従うものと仮定し、また、材料の破壊靱性値の等方性を仮定して検討した。エネルギー解放率は、積分経路内に非均質性、干渉き裂などがあっても経路独立であり、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率を求めることができるなど数多くの有用性がある E 積分を用いて求めた。

## 2. 2本のき裂の相互干渉

まず最初に、図1に示すように線形弾性体帯板中央に2本の平行き裂が存在する場合のき裂進展挙動を検討した。ここで便宜上以後、き裂面方向を水平方向、き裂面と垂直の方向を鉛直方向と呼ぶことにする。図2にき裂 A および B の長さが等しく一様引張（載荷角度  $\gamma=90^\circ$ ）を受ける場合に、き裂先端が折れ曲がり進展する瞬間時の E 積分によるエネルギー解放率の解析結果を示す。使用した E 積分公式は次式 (1) に示す線形弾性体を対象とした相反作用型 E 積分公式を用いた。

$$E(l) = \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \left( s \cdot \frac{\partial u}{\partial l} - \frac{\partial s}{\partial l} \cdot u \right) ds \quad (1)$$

ここに  $\Gamma$  は領域内に設定した積分経路であり、 $s$  および  $u$  は経路上における表面力ベクトルおよび変位ベクトルである。また、 $l$  はき裂長さである。

図2において、縦軸のエネルギー解放率は帯板中央にき裂が1本のみ存在し、それが直進進展するときの解析解で除して無次元化してある。横軸はき裂折れ曲がり角度であり、上向きを正とする。図2からわかるように、き裂の配置が、荷重方向に対して、鉛直方向、水平方向ともに対称な配置となっていることから、全てのき裂先端で同じエネルギー解放率となる。図2において曲線が2本現れているのは、き裂折れ曲がり角度のとり方が左右の先端で逆向きにとっているためである。

下側にあるき裂 B 右先端における解析結果を見ると、エネルギー解放率は、折れ曲がり角度  $-15^\circ$ （下向き  $15^\circ$ ）における値が最大であるが、直進方向である  $0^\circ$  と  $-30^\circ$  における値を比較すると、 $0^\circ$  における値の

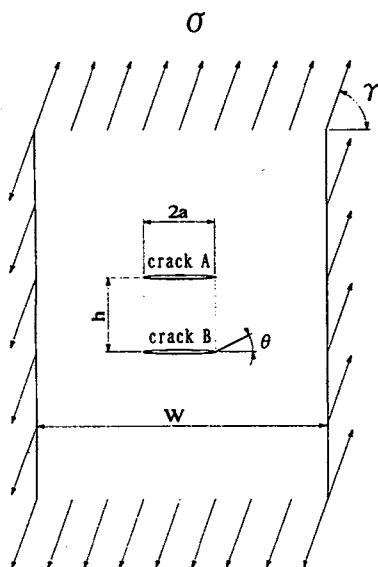


図1 平行2き裂の解析モデル

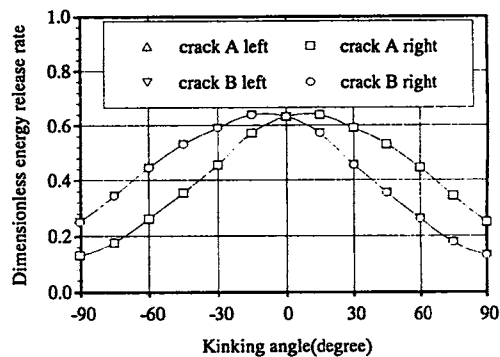


図2 等長2本の平行き裂の解析結果  
( $W=10\text{cm}$ ,  $2a=2\text{cm}$ ,  $h=0.217\text{cm}$ ,  $\gamma=90^\circ$ )

方が大きい。このことから、実際には、直進方向より多少下向きに最大値があることがわかる。したがって、この場合エネルギー解放率による破壊規準によってき裂が進展するとすれば、下側のき裂が直進方向よりも多少下向きに、上側のき裂が直進方向よりも多少上向きに、進展することになる。また、無次元化したエネルギー解放率の最大値が1.0よりも小さいことから、この場合、き裂が1本の場合よりも、き裂の本数が増えたにもかかわらず、き裂の進展が抑制され、材料の鉛直方向の見かけの引張破壊強度が大きくなることになる。

このように、あるき裂配置でき裂進展挙動をエネルギー解放率による破壊規準で検討する場合、エネルギー解放率が最大となる方向とその値が重要となる。そこで、無次元化したエネルギー解放率の最大値を  $E_{max}$  として、き裂配置の違いによる  $E_{max}$  の変化を図3に示す。

図3はき裂間隔  $h$  と下側にあるき裂 B の長さを変えたときのき裂 B 右先端における  $E_{max}$  を示したものである。 $h$  の小さい、A, B 両き裂が接近した状態では、き裂長さの違いによるエネルギー解放率の差は著しく非常に敏感だが、2つのき裂が離れるにしたがい、その影響は小さくなり、収束していくという自明の結果が得られた。しかし、き裂 B の長さがき裂 A と等長あるいは長い場合に  $h$  の増加に伴って  $E_{max}$  に極小値が存在するという興味深い結果が得られた。これらの解析を  $2a$  の値を 1.5cm, 1.0cm と変えて行っても、同様の結果が得られた。 $h$  の増加に伴い、極小値が存在することを等長の場合で考察すると、 $h$  がかなり大きい場合には、き裂相互の影響がなくなり、き裂1本の場合に収束する。 $h$  が小さい場合にはき裂相互の影響が大きくなり、進展が抑制され、エネルギー解放率は減少する。しかし、さらに  $h$  が小さい場合、すなわち  $h$  が0になる極限を、2本のき裂が1本となると考えれば、エネルギー解放率は、 $h$  が非常に小さい場合もき裂1本の状態に近づくことになる。き裂長さが異なる場合には長い方のき裂1本に相当することとなる。その結果極小値が存在することになる。このことは、アクリル板を用いた実験を行ない、実験による最大荷重値をき裂が進展するときの破壊荷重値と仮定して、 $h$  に対する最大荷重値の変化が極大値を持つことで確認した。

図4に荷重角度の違いによるエネルギー解放率の変化を示す。図4は等長な2本の平行き裂における下側にあるき裂 B 右先端におけるエネルギー解放率の変化である。図4から荷重角度によってエネルギー解放率の変化は大きく異なり、荷重角度が  $60^\circ$  のときにエネルギー解放率が最大であり、荷重方向が図1に示されるような場合には、下側にあるき裂は下向き  $45^\circ$  の方向に進展することになる。また、すべての荷重角度で無次元化したエネルギー解放率は1.0よりも小さく、水平方向の位置が等しい場合にはき裂本数が増えるとき裂の進展が抑制されることになる。

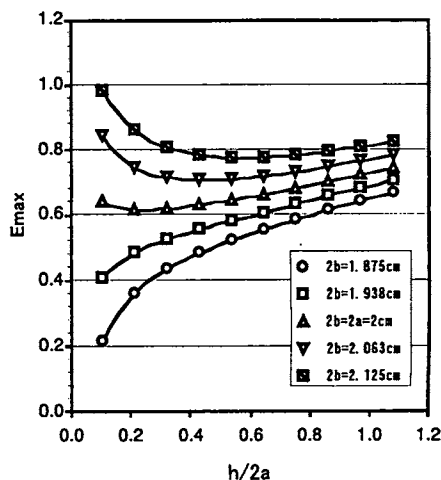


図3 き裂配置の違いによる  $E_{max}$  の変化

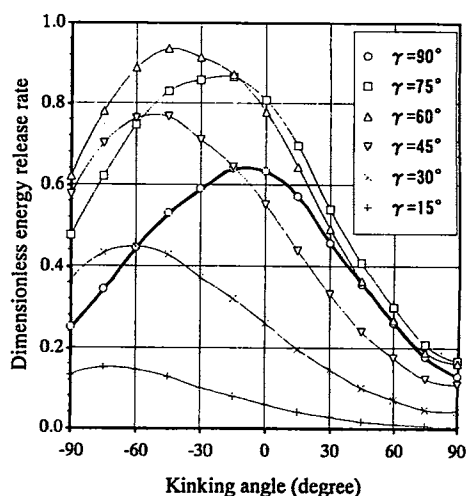


図4 荷重角度の違いによるエネルギー解放率の変化  
( $2a=2b=2\text{cm}$ ,  $h=0.217\text{cm}$ )

### 3. 主き裂に及ぼす干渉き裂の影響

次に、図 5 に示すように線形弾性体帯板中央にある片側き裂（主き裂と呼ぶ）先端近傍に、主き裂と平行で長さが短い他のき裂（干渉き裂と呼ぶ）がある場合のき裂進展挙動を検討した。この場合もき裂面方向を水平方向、それと直角の方向を鉛直方向と呼ぶこととし、主き裂と干渉き裂の鉛直方向の間隔  $h$  を鉛直き裂間隔、主き裂先端と干渉き裂左端との間の水平方向の距離  $d$  を水平き裂間距離と呼ぶことにする。

干渉き裂 A のみが存在する場合および A, B ともに存在する場合について、主き裂長さ  $l$ 、干渉き裂長さ  $2a$ 、鉛直き裂間隔  $h$  および水平き裂間距離  $d$  を種々変化させたき裂配置において、すべての各き裂先端が折れ曲がり進展する際のエネルギー解放率を  $E$  積分により求めた。き裂折れ曲がり角度  $\theta$  はすべての先端で上向きを正とした。解析に用いた  $E$  積分公式は式(1)である。

図 6 に、干渉き裂が 1 本の場合で  $l$ 、 $2a$ 、および  $h$  を固定し、 $d$  を変えたき裂配置において、各先端におけるエネルギー解放率の最大値 ( $E_{max}$ ) の変化を示す。ただし、エネルギー解放率は主き裂のみが存在し、それが直進進展する時のエネルギー解放率の解析解を除して無次元化してある。また、主き裂先端の最大値を  $mrE_{max}$ 、干渉き裂左端の最大値を  $ilE_{max}$ 、干渉き裂右端の最大値を  $irE_{max}$  とする。また、横軸は  $d$  を干渉き裂長さ  $2a$  で除して無次元化した値である。

図 6 において、干渉き裂の水平方向の位置が異なることによって、 $mrE_{max}$  が 1.0 よりも大きくなる場合と小さくなる場合があることがわかる。すなわち、干渉き裂の存在によって主き

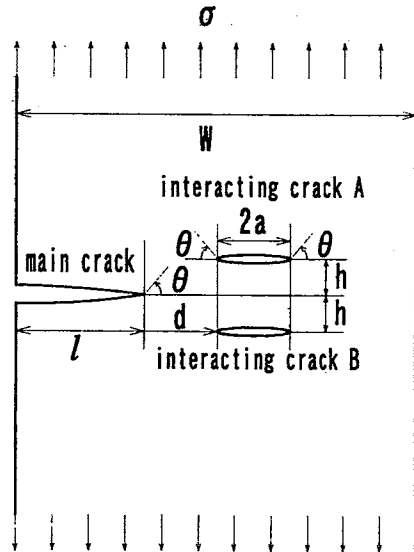


図 5 主き裂先端近傍に干渉き裂が存在する場合の解析モデル

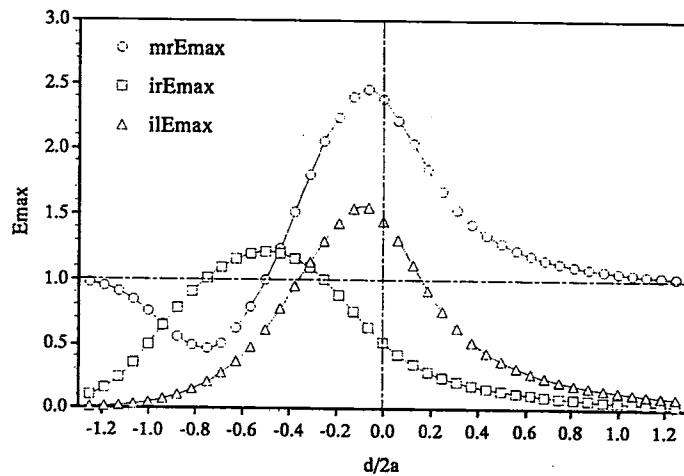


図 6 水平き裂間距離に対する  $E_{max}$  の変化（干渉き裂が 1 本の場合）

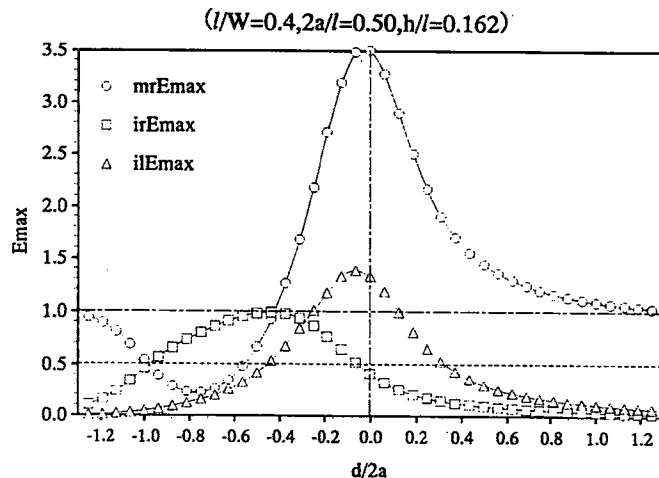


図 7 水平き裂間距離に対する  $E_{max}$  の変化（干渉き裂が 2 本の場合）

$$(l/W=0.4, 2a/l=0.50, h/l=0.162)$$

裂の進展が助長される場合と抑制される場合があることが明らかとなる。干渉き裂の水平方向の位置が主き裂先端から離れるとこの影響は小さくなる。また、主き裂の進展が抑制される場合において  $mrE_{max}$  よりも  $irE_{max}$  が大きくなるき裂配置があることがわかる。この場合は、主き裂が進展せずに干渉き裂右端に飛び移り進展することになる。主き裂の進展が抑制されていても飛び移り進展する場合に  $irE_{max}$  が 1.0 を越えていれば、主き裂のみの場合よりも材料の荷重方向の見かけ上の引張破壊強度は小さくなる。 $d/2a=-0.938$  の時に  $mrE_{max}$  と  $irE_{max}$  の値が等しくまた 1.0 よりも小さい。この時が、最もき裂が進展し難く、材料の見かけ上の引張破壊強度が最大となるときである。この時の  $E_{max}$  の値はほぼ 0.65 であり、換言すれば、このとき干渉き裂が無い場合より、き裂の進展が約 35% 抑制されていることになる。飛び移り進展をする他のき裂配置においても、 $mrE_{max}$  と  $irE_{max}$  の値が等しくまた 1.0 よりも小さい時の  $E_{max}$  はほぼ 0.65 となることを確認した。

図 7 にき裂の位置関係は図 6 と等しく干渉き裂を 2 本とした場合の解析結果を示す。図 7 からわかるように、干渉き裂の本数が増えたことにより、主き裂の進展に及ぼす干渉き裂の影響が大きくなり、干渉き裂が 1 本の場合である図 6 よりも  $mrE_{max}$  の最大値は大きく、最小値は小さくなっている。しかし、飛び移り進展をするときには、 $irE_{max}$  の値は 1.0 よりも小さくなっている。これは、2 本の干渉き裂の水平方向の位置が等しいため、干渉き裂相互の位置関係により応力の伝達が遮断されたことの影響による。また、 $mrE_{max}$  と  $irE_{max}$  の値が等しくまた 1.0 よりも小さくなり、材料の見かけ上の引張破壊強度が最大となるときの  $E_{max}$  の値はほぼ 0.5 である。飛び移り進展をする他のき裂配置においてもこの値となることを確認した。き裂本数が増えたにもかかわらず、き裂進展が抑制されることになる。

このように、き裂の位置関係によってき裂進展挙動は大きく異なる。本研究では種々のき裂配置における解析を行ない、干渉き裂長さ、鉛直き裂間隔の違いによるき裂進展挙動への影響を明らかにした。また、アクリル板による引張実験を行ない、解析の妥当性を検証した。

#### 4. 圧縮荷重下にあるき裂進展

これまで、き裂面に対して引張荷重が作用する場合であったが、コンクリートなどでは圧縮応力場における検討が重要となる。そこで、き裂面に対して傾斜した圧縮荷重が作用する場合の検討も行なった。まず、図 8 に示すように、打ち込み時に PET によって初期き裂を挿入したセメントペーストの円盤型供試体による圧裂実験を行いき裂進展状況を観察した。き裂進展が非常に早く複雑であるため、この確認には 4000~8000 フレーム/秒で撮影した高速度ビデオ画像に画像処理を施し、その画像により確認した。画像処理の中では、き裂進展前の画像を基準とした差画像を取り、それにレベル補正を施した画像が最もよいことが明らかとなった。その結果、載荷点に最も近いき裂先端から載荷点に向かって進展するき裂が最初に生じることを確認した。その結果を基に E 積分によってエネルギー解放率を求め、その変化と実験結果における最大荷重値の変化を比較した。圧縮場の場合、き裂面の接触が生じるため使用した E 積分は、補ひずみエネルギー型の E 積分公式を用いた。

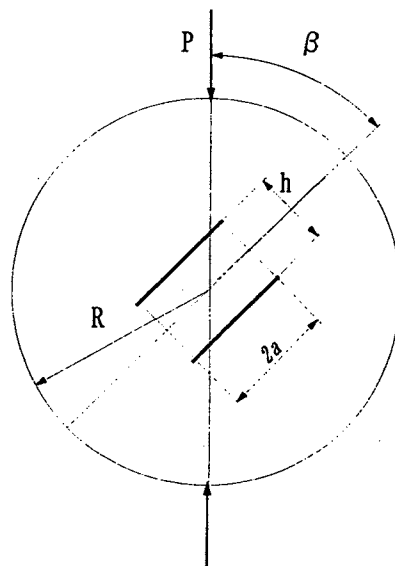


図 8 圧縮場におけるき裂配置と過重方向

図 9 に実験における載荷角度の違いによる最大荷重値の変化を示す。本来であれば、最大荷重値ではなくき裂

が進展した瞬間における破壊荷重値で議論しなければならないが、その測定が困難なことおよび荷重の測定間隔を1秒としてあることなどから、最大荷重値を破壊荷重と仮定した。また、図10にE積分によるエネルギー解放率の変化を示す。エネルギー解放率は載荷角度ごとにき裂折れ曲がり角度を変えて計算した結果における最大値を、無限板内にある1本のき裂に一樣圧縮力が作用する場合の解析解で除して無次元化してある。

図9より最大荷重値は載荷角度が大きくなるに従って減少し、載荷角度が50°付近で極小となりその後増大する。言い換えれば、最大荷重値が破壊荷重であるとするれば、載荷角度が50°付近で最もき裂が進展しやすいことになる。図10を見ると、エネルギー解放率は載荷角度が大きくなるに従って増大し、摩擦係数 $\mu=0.0$ では載荷角度が50°付近で極大となりその後減少する。き裂進展がエネルギー解放率による破壊規準に従うものとするれば、エネルギー解放率が大きいほどき裂は進展しやすい。したがって、図9において最大荷重値に極小値が存在し、図10に極大値が存在することで、圧縮場における複数き裂の進展挙動が破壊力学的に説明できたことになる。

### 5. あとがき

以上のように、本研究ではこれまでに解析することが困難であった複数き裂の進展挙動をE積分によって解析し、幾つかのき裂配置においてはその結果を実験において確認し、き裂面に対して引張力が作用する場合には、位置関係におけるき裂進展挙動を明らかにすることができた。き裂面に対して圧縮力が作用する場合にも、E積分の有効性が確認されたことにより、圧縮場におけるき裂進展挙動をさらに明らかとすることを今後の課題としたい。

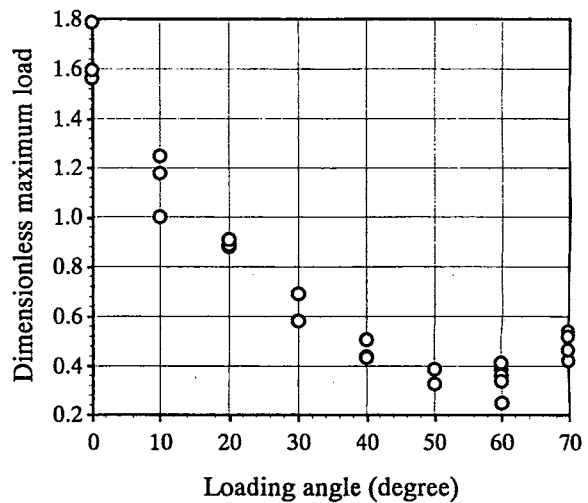


図9 載荷角度による最大荷重値の変化  
( $2a=2\text{cm}, h=2\text{cm}$ )

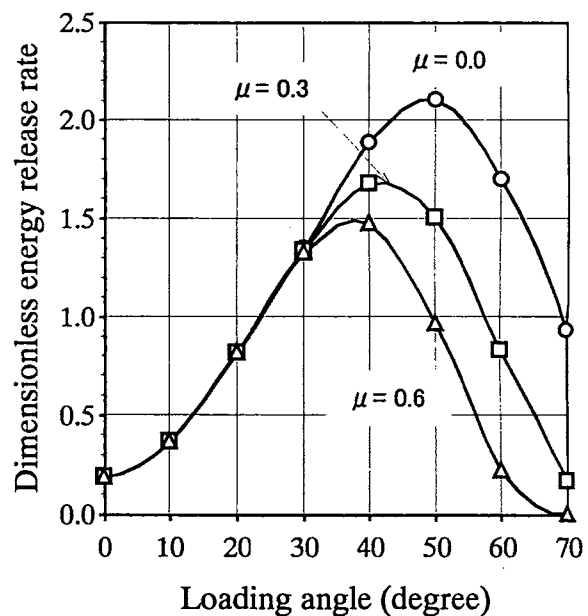


図10 エネルギー解放率と載荷角度の関係  
( $2a=2\text{cm}, h=2\text{cm}$ )

## 学位論文審査結果の要旨

当学位論文に関して、平成14年1月22日に第1回審査委員会を開催し、平成14年1月30日に行われた公聴会の結果を踏まえて、第2回審査委員会を開催し、各審査委員の個別審査と合わせて協議を行った結果、以下のように判定した。

本論文は、材料内に存在する複数のき裂の進展挙動を、等方線形弾性体を対象とし、材料の破壊靱性値の等方性を仮定して、き裂の進展がエネルギー解放率による破壊規準に従うものとして検討している。エネルギー解放率は積分経路内に他の静止き裂などがあっても経路独立であるE積分を用いた有限要素解析によって求めている。結果は以下のように要約できる。

- 1 引張荷重下にあるき裂進展としては、帯板中央に平行き裂が存在する場合に、き裂本数、き裂間隔、き裂長さの差、荷重の載荷角度などの条件がき裂進展挙動に及ぼす影響を明らかにした。
- 2 また、帯板中央にある片側き裂（主き裂）先端近傍に、主き裂より短い平行き裂（干渉き裂）がある場合を想定し、干渉き裂の存在がき裂進展挙動に及ぼす影響を明らかにした。
- 3 これらの解析結果はアクリル板による引張試験の結果との比較を行ない、その妥当性を検証している。
- 4 圧縮荷重下では、硬化セメントペーストで作成した円盤型供試体を用いた圧裂実験をし、き裂進展状況を高速度ビデオカメラで撮影する事により、得られた画像に画像処理を行った。その結果、き裂進展前の画像を基準とした差画像をとることによって、き裂進展状況を明確に捉えることができた。
- 5 圧縮荷重下で、実験によって得られた最大荷重値と載荷角度との関係と、解析によるエネルギー解放率と載荷角度との関係を比較した結果、両者の変化は非常に良く一致し、圧縮荷重下におけるき裂進展においてもE積分の有用性が立証された。

上記のように、複数き裂の干渉を考慮したき裂進展挙動を定量的に表し、由減要素解析および実験との比較によりその妥当性を検討しており、工学上有意義な知見を得たと認められるので、当学位論文は博士（工学）の授与に値するものと判断した。