界面き裂の進展挙動に関する破壊力学的研究

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: 島袋, 淳 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16612

氏　　名	島　袋　　淳
生　年　月　日	
本　　籍	沖縄県
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第603号
学位授与の日付	平成15年9月30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	界面き裂の進展挙動に関する破壊力学的研究
論文審査委員(主査)	矢富　盟祥（自然科学研究科・教授）
論文審査委員(副査)	川村　満紀（工学部・教授）鳥居　和之（工学部・教授） 北浦　　勝（工学部・教授）田村　　武（京都大学・教授）

学位論文要旨

Abstract

Subject to inclined tension and compression loads, we obtain the energy release rate for an interface crack in an isotropic elastic material. The energy release rate is calculated by the path independent E-integral using the finite element method with a singular element. In the finite element analysis, we consider the contact conditions with existing the friction along the crack surfaces and with avoiding overlapping of the crack surfaces. Using the maximum energy release rate criterion, we examine the extension behavior of an interface crack under the inclined tension and compression loads.

1．はじめに

界面の強度評価は，「界面を進展するき裂の抵抗」としてとらえる破壊力学的な手法が考えられるが，均質材中のき裂に対する力学や評価法とは異なるアプローチが必要になってくる．例えば，均質材中のき裂に対する線形破壊力学パラメータとして汎用されている応力拡大係数は，界面き裂の場合，荷重条件としては純粋なモードI載荷においても，き裂先端近傍の応力状態は混合モード状態となるため，これを用いた破壊クライテリオンは非常に複雑なものとなる．一方，非線形破壊力学パラメータにも用いられるエネルギ解放率は，混合モードの場合でも単一のパラメータであるため，それを用いた破壊クライテリオンは，応力拡大係数を用いた場合[1), 2), 3), 4)]より単純になる．しかしながら，これまでの界面き裂のエネルギ解放率による議論は，直線的な界面き裂の場合に限られ，その進展方向も直線界面に沿った場合，または，微小き裂進展後の折れ曲がり進展の場合[5), 6), 7)]しか考慮されておらず，界面と異なった母材方向へのき裂折れ曲がり瞬間時のエネルギ解放率を求めたものに関しては，一切考察されていないのが現状である．よって，破壊力学的な考察により界面強度の評価を行う場合は，破壊力学パラメータとしてエネルギ解放率を用いることは非常に有効であると考えられ，また，き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギ解放率が求められれば，より綿密な界面の強度評価が得られる．以上のことを背景に，本論文では，破壊力学パラメータとして，E積分法により求められるき裂折れ曲がり瞬間時のエネルギ解放率を用いて，界面き裂の進展挙動を明らかにするために，①最大エネルギ解放率クライテリオンによる様々な方向から一軸引張荷重を受ける場合の種々の弾性係数比をもつ界面き裂の引張荷重下でのき裂進展挙動，及び②様々な方向から一軸及び二軸圧縮荷重を受ける場合の界面き裂の圧縮荷重下でのき裂進展挙動に関しての考察を行った．

2．解析モデルと解析条件

2．1　引張モデル

解析したモデルは，図-1 に示すような縦 800mm，横 800mm の無限遠一方向に引張応力 σ_0 を受ける材料界面上に長さ 2ℓ（=40mm）のき裂を有する 2 種類の線形等方弾性体（E_1=68.6GPa，E_2=E_1/5.0～10，ゆえに E_1 >E_2）からなるモデルである．補ひずみエネルギ型 E 積分公式[8]により，き裂右側先端が直進または折れ曲がり瞬間時のエネルギ解放率を求める．エネルギ解放率に影響を与えるパラメータとしては弾性係数 E_1，E_2 の他にき裂長さ 2ℓ，無限遠応力の大きさ σ_0 およびその荷重角度 θ_L（Loading angle）き裂折れ曲がり角 θ_K（Kinking angle）である．ここで荷重角度 θ_L 及びき裂折れ曲がり角 θ_K はともに反時計回りを正としている．もし E_1=E_2 である均一物体の場合で，荷重角度およびき裂の折れ曲がり角が零の場合（θ_L=0，θ_K=0）はよく知られた応力拡大係数の厳密解（$K_I=\sigma_0(\pi\ell)^{1/2}$）により容易にエネルギ解放率の厳密解（$G=K_I^2/E$）が求められる．後述する無次元化エネルギ解放率はこの厳密解で正規化している．また，均一物体の場合の荷重角度 θ_L およびき裂の折れ曲がり角 θ_K を考慮したエネルギ解放率は Wu[9]や Hayashi and Nasser[10]により，半理論的に得られている．

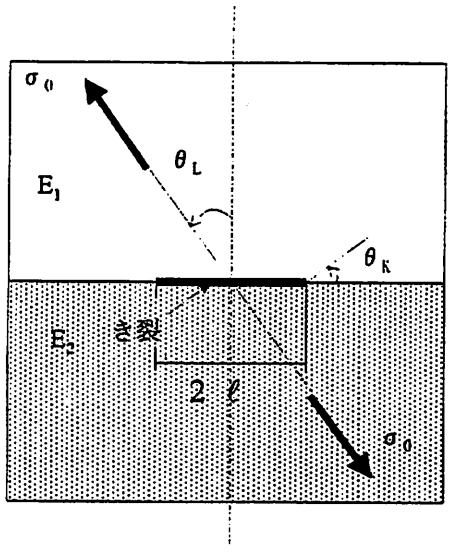


図-1　引張モデル

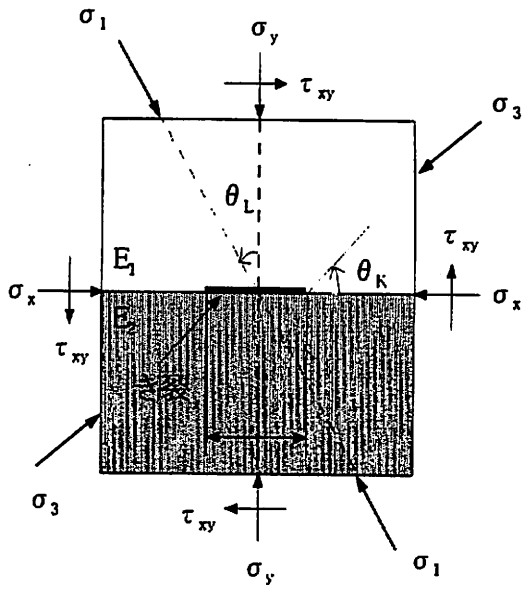


図-2　圧縮モデル

2．2　圧縮モデル

解析したモデルは，図-2 に示すような縦 800mm，横 800mm の無限遠からの一様圧縮（主）応力 σ_1，σ_3 を受ける材料界面上に長さ 2ℓ(=40mm) の界面き裂を有する 2 種類の異なるヤング係数 E_1，E_2（E_1=68.6GPa，E_2=E_1/10，ゆえに E_1>E_2）を持った線形等方弾性体からなるモデルである．ここで，σ_1 と σ_3 の方向は直交しており，σ_1>σ_3 である（すなわち，σ_1 が最大圧縮応力）．また，初期界面き裂面の法線方向と最大主応力 σ_1 の方向との成す角度を荷重角度 θ_L としている．引張モデル同様，補ひずみ型 E 積分公式により，き裂右側先端が直進または折れ曲がり瞬間時のエネルギ解放率を求める．ここで，補ひずみエネルギ型 E 積分公式は，引張荷重のみでなく，圧縮荷重下にある均質材中のき裂のき裂面が閉じ，き裂面に摩擦力が生じる場合でも精度良くエネルギ解放率を与える E 積分公式である．また，圧縮モデルにおいても前節同様，無次元化エネルギ解放率は，エネルギ解放率の厳密解（$G=K_I^2/E$）で正規化している．

2．3　解析手法

数値解析して計算する場合，き裂長さ ℓ のモデル（以下，基本モデルと呼ぶ）と，き裂が微小長さ $\Delta\ell$ 伸びたモデル（以下，き裂進展モデルと呼ぶ）の 2 つのモデルの解析が必要となり，き裂長さによる偏微分項は 2 点差分近似することにより，また経路積分は表面力と変位をそれぞれ離散化した等価節点表面力 t_i と節点

変位$\mathbf{u}_i$を用い，積分経路上の全節点で和をとることによりエネルギ解放率が求められる．エネルギ解放率を得るために用いた補ひずみエネルギ型E積分公式は，次式のように表される．

$$E(\ell)=\frac{\partial}{\partial \ell}\left[\int_{\Gamma\cap C^{\pm}}\left(\frac{1}{2}\mathbf{t}\cdot\mathbf{u}\right)d\Gamma\right]-\int_{\Gamma\cap C^{\pm}}\left(\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \ell}\cdot\mathbf{u}\right)d\Gamma \tag{1}$$

ここで，Γはき裂先端を含む閉領域の境界，$C^{\pm}$は閉領域内のき裂上下面である．$\mathbf{t}$は表面力ベクトル，$\mathbf{u}$は変位ベクトルである．この式を数値解公式に変形すると，

$$E=\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\mathbf{t}_i(\ell+\Delta\ell)\cdot\mathbf{u}_i(\ell+\Delta\ell)-\mathbf{t}_i(\ell)\cdot\mathbf{u}_i(\ell)}{2\Delta\ell}-\frac{\mathbf{t}_i(\ell+\Delta\ell)-\mathbf{t}_i(\ell)}{\Delta\ell}\cdot\mathbf{u}_i(\ell)\right] \tag{2}$$

となる．ここで，n は積分経路上の節点数であり，(ℓ) および $(\ell+\Delta\ell)$ はそれぞれ基本モデル，き裂進展モデルの物理量であることを示している．有限要素モデルについては，図-3 に示す．ここで，図-3 の上の

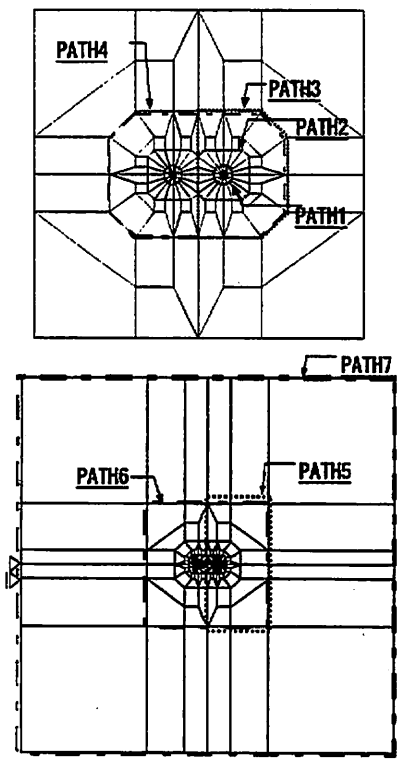


図-3　有限要素分割と積分経路（上図は下図の中央部分の拡大）

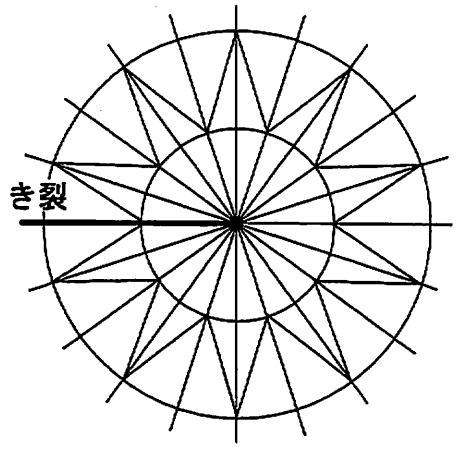


図-4　き裂先端折れ曲がり方向メッシュ図

図は下の図の中央部分を拡大した図である．2つの解析モデルのうち，き裂が進展する前の基本モデルについては節点数が920，要素数が332であり，き裂進展モデルについては，要素数は同じで，節点数は922である．積分経路は7本（図-3参照）設け，き裂の折れ曲がり角は19方向（図-4参照）を考えた．解析結果については，破壊力学パラメータとして，上記解析手法により得られるエネルギ解放率を用いていることから，このエネルギ解放率を用いた最大エネルギ解放率クライテリオン[9,11,12]により，界面き裂の進展挙動を考察する．

3．結果と考察

3．1　種々の弾性係数比を有する界面き裂に及ぼす引張荷重角度の影響

弾性係数比の影響に関して，引張荷重下にある界面き裂の進展挙動を検討するため，荷重角度θ_Lとき裂折れ曲がり角θ_Kの関係をまとめたものが図-5，及びどの荷重角度が最もき裂が進展しやすいかを検討するため正規化最大エネルギ解放率と荷重角度とを関係づけたものが図-6である．両図中とも，均質材の例とし

てWuによる結果も付記してある[9]．図-5より，界面き裂材及び均質材ともに荷重角度が負の方向に作用している場合，き裂折れ曲がり角も負の方向に進展（図-1 参照）し，界面き裂材の場合は，荷重角度$\theta_L \leqq -0.2\pi$では，すべての弾性係数比において，ほぼ同じ方向（$\theta_K=-0.4\pi$方向）に折れ曲がって進展していく．このことは，き裂面の法線方向に対して時計回り方向の載荷は，界面き裂材においては弾性係数の小さいE_2方向へ折れ曲がってき裂は進展し，ある荷重角度を超えると，弾性係数比の違いに関わらず，ほぼ同じ方向（$\theta_K=-0.4\pi$方向）にき裂は進展していくことを表している．また，荷重角度が正の方向へ大きくなるにつれ，均質材では正の方向に大きく折れ曲がるのに対し，界面き裂材においては，荷重角度が$0 \leqq \theta_L < 0.2\pi$の間では，その角度が正であってもき裂折れ曲がり角度は$-0.24\pi \leqq \theta_K < 0$の範囲で$E_2$方向に折れ曲がり，荷重角度$\theta_L \geqq 0.2\pi$になると，弾性係数比$E_1/E_2=8.0\sim10.0$ではその値がいくら大きくなっても，

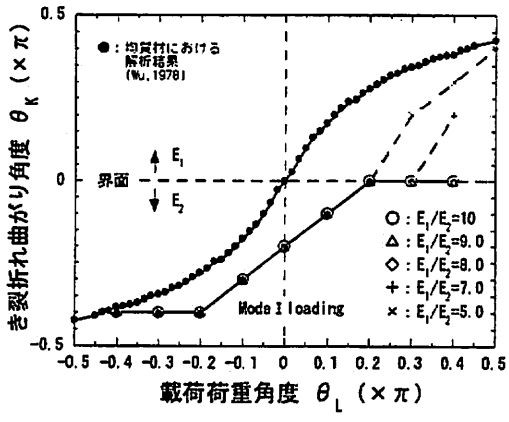


図-5 種々の弾性係数比による載荷荷重角度とき裂折れ曲がり角度の関係

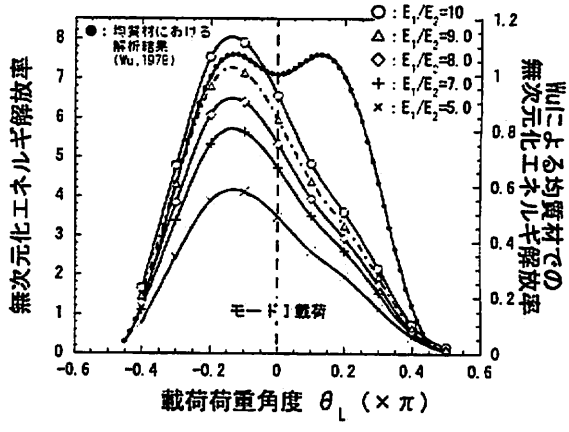


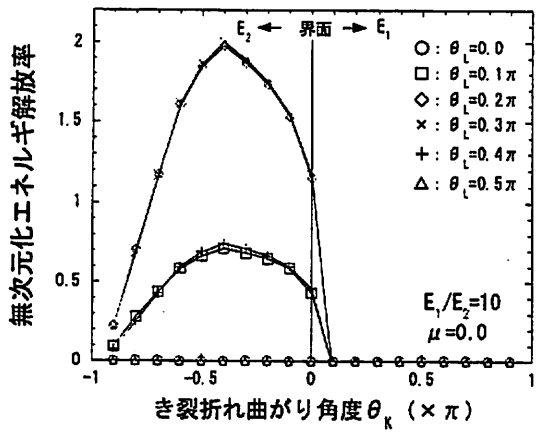
図-6 種々の弾性係数比による載荷荷重角度と無次元化エネルギ解放率との関係

最大エネルギ解放率はき裂折れ曲がり角度$\theta_K=0$の方向となる．つまり，界面上を直線的にき裂は進展し，E_1方向には決して進展しないことになる．また，弾性係数比$E_1/E_2=5.0$，7.0においては，$E_1/E_2=8.0\sim10.0$の結果と異なり，荷重角度$\theta_L \geqq 0.2\pi$になると界面上を直線的にき裂は進展せず，弾性係数の高いE_1側にも進展する可能性を示す．このことから，界面き裂材において，弾性係数比が$E_1/E_2=7.0$付近で，これより低い弾性係数比では，き裂面の法線方向に対して反時計回り方向の載荷は，ある荷重角度を超えると，き裂は界面上を進展せず，弾性係数の高い側にき裂が進展すると考えられる．図-6を見ると，均質材においては$\pm0.15\pi$付近でエネルギ解放率のピークがみられることから，荷重角度$\theta_L=\pm0.15\pi$付近が最もき裂が進展しやすいと考えられるが，界面き裂材においては，弾性係数比に関わらず，荷重角度-0.15π付近のみで最もエネルギ解放率が大きくなり，それより荷重角度の絶対値が大きくなるにつれ，エネルギ解放率は低下していく．またエネルギ解放率の大きさは，弾性係数比が大きいものほど大きくなっている．このことから，界面き裂材においては弾性係数比に関わらず，荷重角度$\theta_L=-0.15\pi$付近で最もき裂が進展しやすく，これより荷重角度の絶対値が大きくなれば，き裂は進展しにくくなると考えられ，また，材料の弾性係数比が大きいほど，き裂は進展しやすいと考えられる．

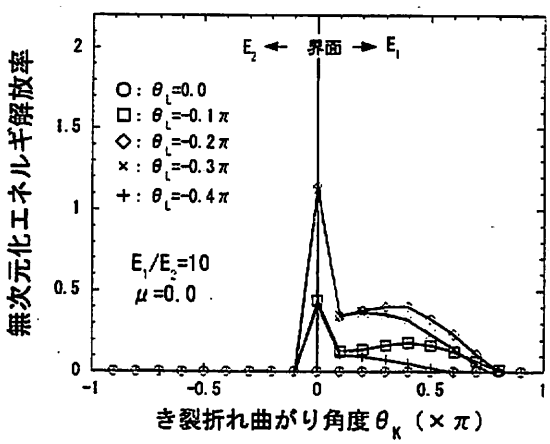
3．2 一軸圧縮荷重下にある摩擦を有する界面き裂の進展挙動に及ぼす圧縮荷重角度の影響

き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギ解放率を求め，最大エネルギ解放率クライテリオンを用いて引張荷重下での界面き裂進展挙動を検討した結果，比較的容易にその進展挙動を検討できたことから，圧縮荷重下での界面き裂も同様に，最大エネルギ解放率クライテリオンにより議論する．また，$E_1/E_2=10$が引張荷重下で最も大きいエネルギ解放率を示したことから，ここでは，$E_1/E_2=10$に固定し，この弾性係数比における圧

縮荷重下での界面き裂の進展挙動を検討する．図-7 は摩擦係数μ=0.0，図-8 はμ=0.3 での一軸圧縮荷重下にある界面き裂の進展挙動に関して解析結果をまとめたものである．まず図-7(a)，(b)において，θ_L=±0.2，±0.3π（プロット：◇，×）での無次元化エネルギ解放率は 1 を超えていることからμ=0.0 におけるこの載荷状態では，均質材のモードⅠ状態よりもき裂は進展しやすいことになる．また双方のエネルギ解放率の値はほぼ等しい値を示しているのに対し，図-8(a)，(b)の摩擦係数μ=0.3 においては，そのエネルギ解放率はμ=0.0 の値と比較して 1 を超えることなく，双方のエネルギ解放率の値も異なりθ_L=±0.3πでのエネルギ解放率が最も大きい．また，θ_L=±0.1π（プロット：□）において，エネルギ解放率の値は，μ=0.0 では特定のき裂折れ曲がり角度では，0 以上の値を有すことに対し，μ=0.3 では，折れ曲がり角度によらず 0

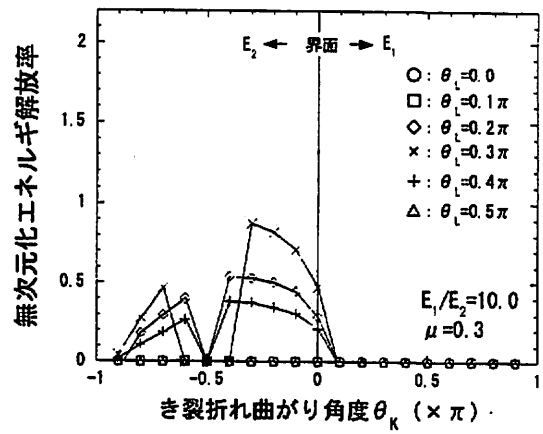


(a)　θ_L≧0.0

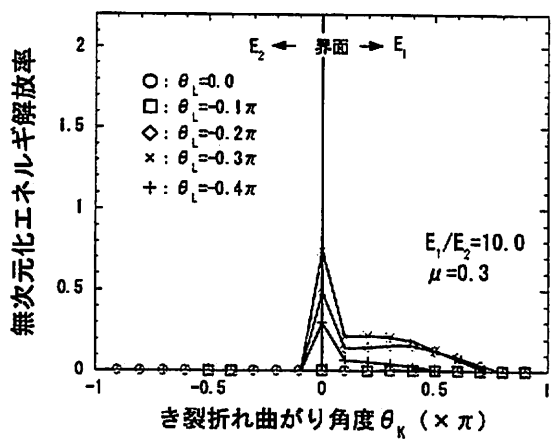


(b)　θ_L≦0.0

図-7　無次元化エネルギ解放率と
き裂折れ曲がり角度の関係（μ=0.0）



(a)　θ_L≧0.0



(b)　θ_L≦0.0

図-8　無次元化エネルギ解放率と
き裂折れ曲がり角度の関係（μ=0.3）

となる．よって，圧縮荷重下での界面き裂の進展挙動は摩擦係数に大きく依存する．次に，図-7(a)，図-8(a)をみてみると，荷重角度θ_L=0.2～0.4π（プロット：◇，×，＋）においては，μ=0.3 の結果（図-8(a)）の場合で，き裂折れ曲がり角度θ_K=−0.5πでのエネルギ解放率が 0 であることからθ_K=−0.5π方向へき裂は進展しないといえる．このことは，この方向（θ_L=0.2～0.4π）から一軸圧縮荷重を受ける界面き裂は，接触・摩擦の影響により，弾性係数の小さいE_2側に初期き裂から 90°折れ曲がって進展することはないといえる．

3．3　二軸圧縮荷重下にある摩擦を有する界面き裂の進展挙動に及ぼす主応力比の影響

図-8 において，摩擦を有する（μ=0.3）界面き裂のエネルギ解放率は，荷重角度θ_L=±0.3πが最も大き

いことから，$\theta_L=\pm 0.3\pi$に固定して主応力比r（$=\sigma_3/\sigma_1$）を変化させ，その影響を検討する．ここで，主応力比の影響によりき裂がどの方向に進展するかを検討したものが，図-9，図-10である．図-9，図-10の両図において，き裂面の法線方向から-0.3π方向に傾いた圧縮載荷は，どの主応力比においても折れ曲がらず，初期き裂と同方向にすなわち界面上を進展する．また，両図において，き裂面の法線方向から0.3π傾いた圧縮載荷は，エネルギ解放率が0以上におけるどの主応力比においても，E_2方向に折れ曲がって進展し，初期き裂と同方向への直進的な進展をすることはない．このことは，均質材中のき裂において同様な二軸一

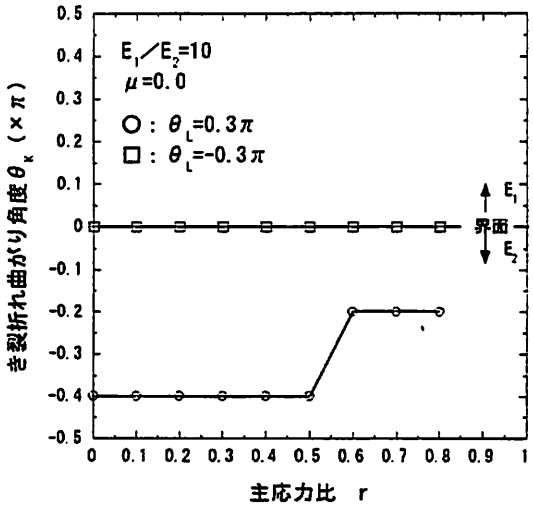


図-9 き裂折れ曲がり角度と主応力比の関係（$\mu=0.0$）

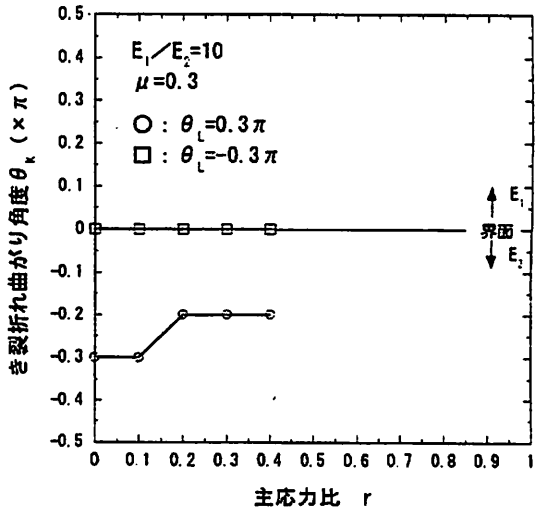


図-10 き裂折れ曲がり角度と主応力比の関係（$\mu=0.3$）

様圧縮荷重を載荷した場合，折れ曲がって進展していたき裂が，主応力比の増加に伴い，折れ曲がらず直進するといった結果[8]と異なる傾向を示す．すなわち，圧縮荷重下にある界面き裂は，き裂面の法線方向から0.3π傾いた圧縮荷重を受ける場合，主応力比が増加しても，初期き裂と同方向すなわち界面上を直進進展せず，弾性係数の小さい方向に折れ曲がって進展する．

参考文献

1) Akisanya,A.R. and Fleck,N.A. : Analysis of a wavy crack in sandwich specimens, Int.J.Frac., Vol.55, pp.29-45. 1992.

2) Akisanya,A.R. and Fleck,N.A. : Brittle fracture of adhesive joints, Int.J.Frac., Vol.58, pp.93-114, 1992.

3) 結城良治，許金泉：異材界面き裂の屈折条件・破壊基準の検討，日本機械学会論文集，Vol.56, No.529, A, pp.1945-1951. 1990.

4) 池田徹，菰原裕二，中村敦，宮崎則幸：混合モード界面き裂の破壊と屈曲条件，日本機械学会論文集，Vol.66, No.644, A, pp.796-803. 2000.

5) He,M.Y. and Hutchinson,J.W. : Kinking of a Crack Out of an Interface, J.Appl.Mech., Vol.56, pp.270-277, 1989.

6) He,M.Y., Bartlett, A and Evans, A.G : Kinking of a Crack out of an Interface: Role of In-Plane Stress, Ceram.Soc., Vol.74-4, pp.767-771, 1991.

7) Geubelle and Knauss, W.G : Crack Propagation at and Near Bimaterial Interface: Linear Analysis, J.Appl.Mech., Vol.61, pp.560-565, 1994.

8) 矢富盟祥，鳩洋一：圧縮荷重下にある進展き裂のE積分によるエネルギ解放率の有限要素解析，土木学会論文集，No.612／I-46, pp.251-263. 1999.

9) C. H. Wu : Fracture under combined loads by Maximum - energy release - rate criterion, J. Appl. Mech., Vol.45, pp.553 - 558. 1978.

10) Hayashi, K. and Nemat-Nasser, S. : Energy-release rate and crack kinking under combined loading, J. Appl. Mech., Vol.48, pp.520-524, 1981.

11) 影山和郎，岡村弘之：引張りと面内せん断を受ける無限小屈折き裂の弾性解析と最大エネルギ解放率破壊条件，日本機械学会論文集，Vol.48, No.430, A, pp.783-790, 1982.

12) Hussain, M. A., Pu, S. L. and Underwood, J. : Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II, ASTM STP 560, pp.2-28, 1974.

学位論文審査結果の要旨

第1回審査会を7月29日に開催し、面接審査の後、論文内容を詳細に検討した。さらに、第2回審査委員会を8月4日の公聴会後に行い、審査の結果、以下のように判定した。

本論文は、界面き裂のき裂進展挙動に関して、破壊力学的手法を用い、より容易な検討手法を考えることを目的とした研究であり、破壊力学パラメータとして、E積分法により求められるき裂折れ曲がり瞬間時のエネルギ解放率を用いて、最大エネルギ解放率クライテリオンによる①様々な方向から一軸引張荷重を受ける場合の種々の弾性係数比をもつ界面き裂の引張荷重下でのき裂進展挙動、及び②様々な方向から一軸及び二軸圧縮荷重を受ける場合の界面き裂の圧縮荷重下でのき裂進展挙動に関して検討している。①に関しては、き裂面の法線方向に対して、時計回り方向に引張荷重を受ける界面き裂の進展挙動は、弾性係数の小さい方向に折れ曲がって進展することを明らかにしている。②に関しては、一軸圧縮荷重下での界面き裂のき裂進展挙動は、荷重角度がき裂面の法線方向から反時計回り方向に傾いた載荷は弾性係数の小さい方向に折れ曲がって進展し、き裂面の法線方向から時計回り方向に傾いた載荷は初期き裂と同方向、すなわち界面上を直進進展することを明らかにしている。また二軸圧縮荷重下において、き裂面の法線方向から0.3 π 反時計回り方向に傾いた圧縮載荷は、どの主応力比においても折れ曲がらず、界面上を直進進展し、き裂面の法線方向から0.3 π 時計回りに傾いた圧縮載荷は、どの主応力比においても、界面上を直進進展せず、折れ曲がり進展することを明らかにしている。

以上より、複雑になりがちな界面き裂の進展挙動を、比較的容易に検討できるといった有用な研究成果を得ており、博士（工学）に値すると判断する。