

論文の内容の要旨

論文題目 界面き裂の破壊基準に関する研究

氏名 半谷 禎彦

近年、軽量化、高強度化、高機能化の為に様々な材料を接合、複合して使用する動きが活発になってきている。これにともなって、材料と材料の境界、つまり界面の強度もクローズアップされてきた。そして、界面は異なる材料の接合の為にしわ寄せが集中することや、接合における不具合などにより、欠陥が多く存在する可能性が高い場所である。その為、界面き裂の問題は大変重要になってきており、界面き裂の破壊基準の確立が急務で、これまでに盛んに研究されている。しかしながら、界面き裂の問題は

1. 線形弾性解においては、き裂先端近傍で応力が振動し、変位がオーバーラッピングする。
2. 必ず混合モード状態となり、上記1. の振動と密接に関係して各変形モードに分離することができない。
3. 非弾性域を伴った場合、従来のパラメータでは適用限界がはっきりしない。
4. 界面き裂の3次元の理論解や信頼できる解が少なく、2次元近似の意味がはっきりしないまま、2次元近似を3次元現象に適用している。

といったような様々な問題があり、その破壊基準は十分に確立されているとは言い難いように思われる。

そこで本研究では、上記の問題を克服し、界面き裂の脆性破壊から非弾性破壊まで統一的に考慮できる破壊基準を提案する。その破壊基準として、界面き裂の評価を「き裂エネルギー密度 (Crack Energy Density, 以下CEDと呼ぶ)」という非弾性状態においても、力学的な意味が明確なパラメータを用いて行おうとするものであり、その基本的な検討を行う。

CEDは従来からの研究で、均質材における混合モード破壊に対しては、破壊基準となることが知られている。本研究ではこの均質材で有効であるCEDを界面き裂に拡張し、図1に示すように、き裂先端前方に均質材1から均質材2へ材料定数が連続的に変化する層を考え、連続的な場を考慮することにより、均質材に準ずる形で、CEDを求めることができるようにモデル化を行った。また、解析を行う場合には、実際のき裂に対応する有限の ρ を用いるので、上記の界面き裂の問題点で述べた振動の問題も回避されている。また、このCEDは任意方向にも定義することができ、各モード変形に分離することもできる。本研究においては、この各モードに分離されたCEDで評価を行う。

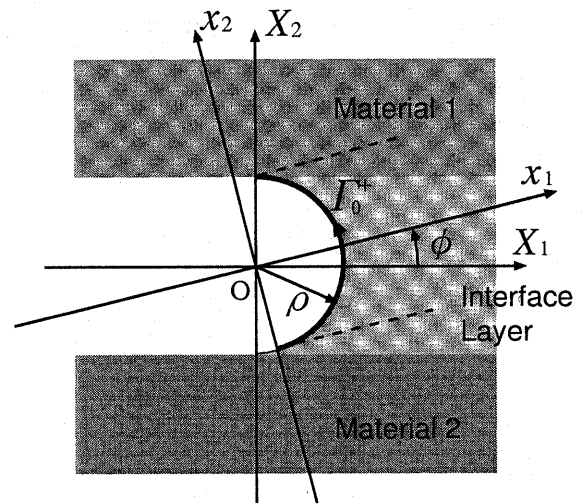


図1: 界面き裂モデル

このCEDの有効性の検討を行う為に、混合モード破壊試験の為に考案された図2に示すようなBNS (Brazil-Nut-Sandwich) 試験片による実際の破壊実験と、実験に対応した2次元弾塑性有限要素解析を行い、実験結果と解析結果を比較する。本研究で使用したBNS試験片は金属の間にエポキシ樹脂をはさみこむような材料の組合せであり、試験片作成の際には、常温硬化のエポキシ樹脂を用いることにより、残留応力の影響を極力押さえ、また、硬化しきっていないエポキシ樹脂を用いることにより、エポキシ樹脂部で非弾性効果を入れている。実際の破壊実験の前に、エポキシ樹脂単体の引張試験を行うことにより、実験条件下でのエポキシ樹脂の応力-歪み特性など、基本的な特性を調べた。その特性を反映させて、実験や解析を行う。

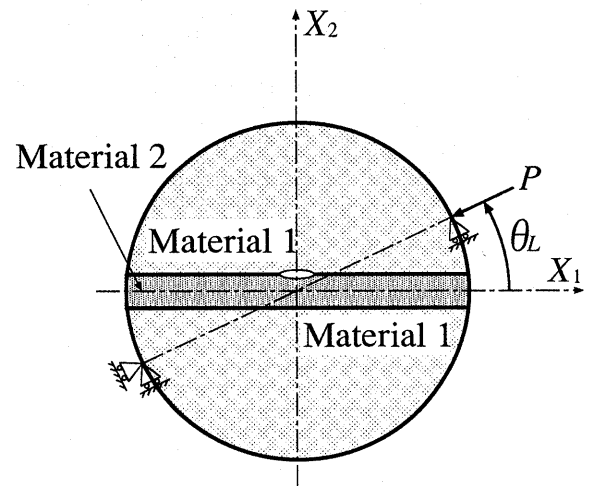


図2: BNS試験片

その結果を表1に示す。 θ_L が破壊試験の際の荷重方向、 θ_F が実際の破壊方向、 ϕ_{max}^I は解析によって得られたCEDのモードI寄与分が最大の方角、そして、 $\varepsilon_{\phi_{max}}^I$ がCEDのモードI寄与分の最大値である。荷重方向 θ_L が 15° 圧縮の場合について示したのが図3で、横軸にき裂先端からの方向 ϕ 、縦軸にCEDの変化量をとっているが、実際の破壊方向 θ_F とCEDのモードI寄与分が最大の方角 ϕ_{max}^I がほぼ一致するものとなっており、エポキシ樹脂がモードIで壊れることを考慮すると、CEDが破壊の方向に関して破壊基準となっていることが分かる。表1に示す他の荷重条件のものにおいても、破壊方向をCEDのモードI寄与分が最大の方角で予測することができることが分かる。

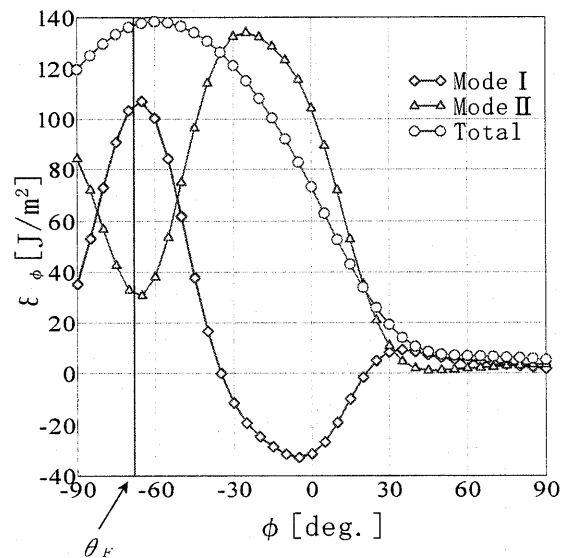


図3: 解析結果 (圧縮方向 15°)

表 1: C E D解析結果

荷重方向 θ_L [deg.]	15(引張)	30(引張)	15(圧縮)	30(圧縮)
破壊方向 θ_F [deg.]	-65	-64	-68	-73
ϕ_{max}^I [deg.]	-68	-67	-66	-68
$\mathcal{E}_{\phi_{max}}^I$ [J/m ²]	68.90	74.04	107.1	354.9

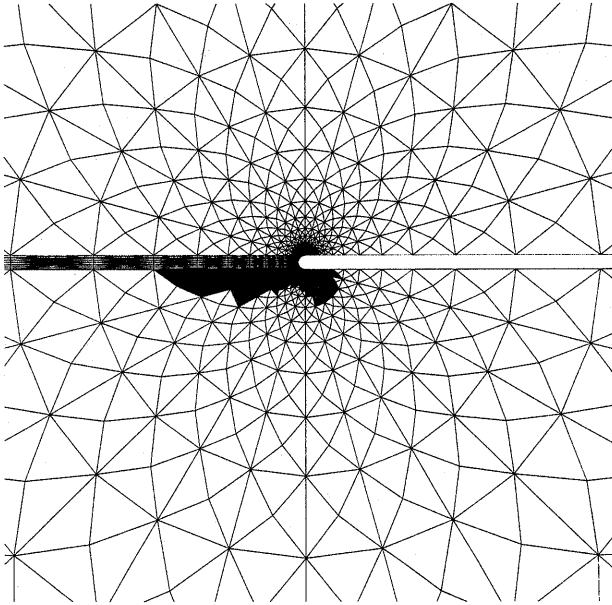


図 4: 非弾性領域 (15° 圧縮)

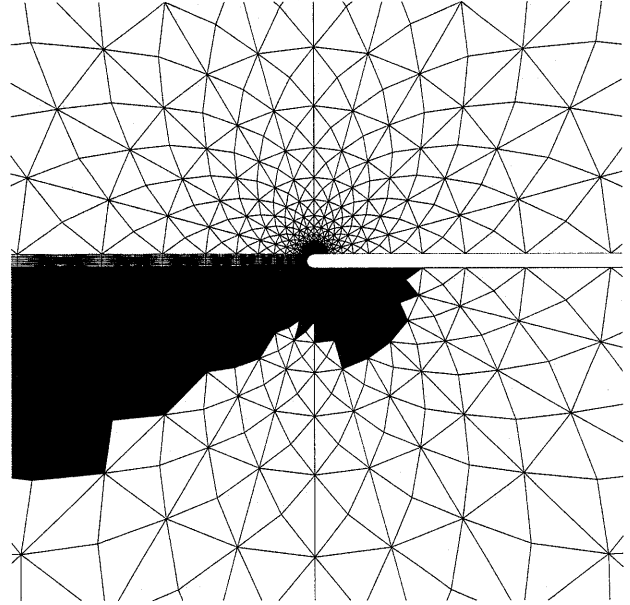


図 5: 非弾性領域 (30° 圧縮)

しかし、破壊の限界値に関しては、荷重条件によって異なるものとなっている。この理由として、破壊時の非弾性域の広がり図4、図5のように荷重条件によって大分異なるものとなっており、破壊時のき裂先端でのエネルギーの吸収の量が異なるためと思われる。このように、非弾性変形を伴う組合せの場合には、非弾性効果を入れた解析が必要と思われるが、CEDはき裂の進展が始まるまでにき裂端が破壊面で吸収した単位面積当たりのエネルギーという意味をもっているため、その大小により破壊の抵抗値が表現されていると考えられる。

次に、引張試験の場合には、非弾性領域が小さく、従来からの破壊パラメータで、弾性で定義されている $\sigma_{\theta_{max}}$ クライテリオンを適用できると思われるので、CEDの結果と比較する。表2は破壊方向に関する結果であるが、 $\sigma_{\theta_{max}}$ クライテリオンでもCEDと同程度に破壊方向が予測できることが分かる。表3は破壊の抵抗値に関する結果であるが、こちらも、CEDの破壊抵抗値と同様の傾向を表しており、脆性的な破壊ならば、従来からの破壊基準の役割をCEDが含んでいることが分かる。

表 2: $\sigma_{\theta_{max}}$ クライテリオンとの比較 (破壊方向)

荷重方向	破壊方向	$\mathcal{E}_{\phi_{max}}^I$ クライテリオン	$\sigma_{\theta_{max}}$ クライテリオン
θ_L [deg.]	θ_F [deg.]	ϕ_{max}^I [deg.]	θ_{max} [deg.]
15	-65	-68	-67
30	-64	-66	-60

表 3: $\sigma_{\theta_{max}}$ クライテリオンとの比較 (破壊抵抗値)

荷重方向 θ_L [deg.]	$\mathcal{E}_{\phi_{max}}^I$ [J/m ²]	$K_{\theta_{max}}$ [MN/m ^{3/2}]
15	68.90	0.8195
30	74.04	0.8811

次に、3次元界面き裂の弾性解析を行い、実際の破壊現象の中での2次元近似の意味の検討を行う。その際にき裂の特異性と界面端の特異性の両方を考慮に入れ、精度良く数値解析できる「複合メッシュ法」を新たに開発し、最初に「複合メッシュ法」の基本的な検討を行い、その手法の有効性を明らかにした。その上で、3次元異材中央貫通き裂をモデル(図6)とした数値解析を行いCEDの評価を行った。図7は板厚の違いによるCEDの比較の結果であるが、これより

1. 板厚方向(Z方向)に対しての表面付近以外でのCEDは、2次元平面ひずみ近似におけるCEDと一定の比率を保つように、ある一定の値になる。
2. 板厚方向(Z方向)に対しての表面付近(コーナー点)では、破壊の起点となり厳しくなっているが、板幅に対する板厚の比が小さくなるに従って、その厳しさは少なくなり、早くに一定の値に近づく。

という事が分かり、先に述べた破壊実験における試験片の寸法位であれば、2次元解析のパラメータと対応づけられ、2次元解析によるCEDの評価でも、十分に意味の持つ物になっていることが分かる。

以上、本研究では界面き裂の破壊基準CEDの界面き裂における有効性を検討してきた。まず、き裂先端前方で連続の場を持ち、均質材に準ずることのできる新たな界面き裂モデルを提案し、それを介してCEDの定義を行った。また、破壊パラメータCEDの有効性を検討するために、BNS試験片を用いた、実験及び、それに対応する解析を行い、CEDが界面き裂問題に対して、脆性破壊から非弾性破壊を含むものまで、統一的に評価することができることを示した。次に異材界面の数値解析用に開発した複合メッシュ法により、3次元の異材中央貫通き裂の解析を行い、2次元近似の意味を明確にした。

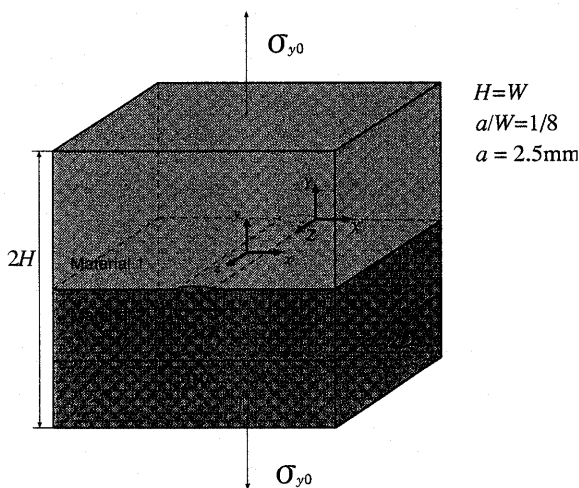


図 6: 3次元中央貫通き裂モデル

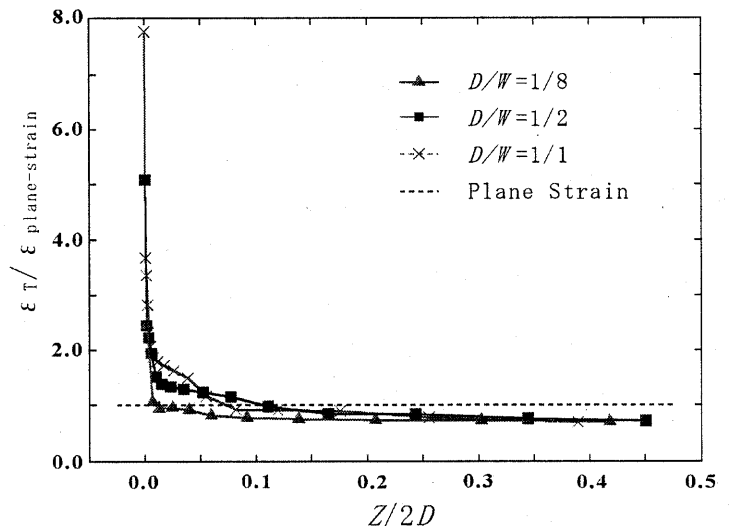


図 7: 板厚の違いによるCEDの比較