

4 結合力要素法を用いた混合モード破壊じん性試験のき裂進展シミュレーションによる接着強度の予測

河野洋輔, 今中誠*, 原圭介**, 福地雄介***

Prediction of strength for adhesively bonded joint using crack growth simulation of mixed mode condition with cohesive zone model

KONO Yosuke, IMANAKA Makoto, HARA Keisuke and FUKUCHI Yusuke

A prediction method for tensile shear strength of single lap adhesively bonded joint was examined using FE analysis with cohesive zone model (CZM). The energy release rate under mode I and II conditions was obtained from mixed mode fracture toughness test. Damage initiation parameter and maximum tractions which were CZM parameters were determined by crack growth simulations. In the analytical results, the maximum load of the single lap adhesively bonded joint predicted by FE analysis was in good agreement with the experimental one especially the condition of 40 mm bonding length.

キーワード：混合モード破壊じん性試験, CZM, CFRP 接着継手

1 緒 言

近年は、機械構造物の軽量化を実現するため、マルチマテリアル構造が注目されている。マルチマテリアル構造は、軽量化効果を最大化させるため、ボルト締結のかわりに、接着接合が多用されている。接着継手は機械的締結と比較して強度の信頼性が低い。このため、設計段階において接着継手の強度をシミュレーションで予測できる必要がある。

接着継手は接着剤と被着体の材料特性が異なるため均一な応力状態とならない(特異応力)。このため応力で強度を評価することが困難である。この問題に対し、接着継手の破壊を接着層のき裂進展とみなし、き裂先端のエネルギー解放率から、接着強度を評価する取り組みが行われている¹⁻²⁾。

有限要素解析でエネルギー解放率を計算する機能が結合力要素モデル(CZM)に実装されている。結合力要素モデルは炭素繊維複合材料(CFRP)の強化繊維とマトリックス樹脂の界面強度など、異種材料の接着強度の評価に適用される。結合力要素は異なる材料モデルの要素を特殊なバネで結合し、力と変位を伝達する役割がある。このバネ力に破壊基準を設定することで、結合力を消失させ要素を分離することができる。

本研究は接着継手の有限要素モデルに結合力要素を組み込み、結合力要素の破壊をモデル化して接着強度の評価を試みた。結合力要素の破壊基準は破壊じん性試験で定義する必要がある。一般的な接着継手は接着層に剥離応力とせん断応力が発生する。このため、破壊じん性はモードI(開口)とモードII(せん断)の混合モード状態で評価した。

結合力要素のパラメータは破壊じん性試験を模擬した有限要素モデルで同定する取り組みが行われている³⁾。そのため本研究では、種々の混合モード状態における破壊じん性試験の有限要素モデルでき裂進展シミュレーションを行い、解析結果と実験結果を比較検討することで結合力要素のパラメータを同定した。このパラメータをシングルラップの接着継手(重ね合わせ継手)の有限要素モデルに組み込み、接着強度を評価した。接着強度は種々の接着長さで評価し、解析結果と実験結果と比較して、強度予測の有効性を検討した。

2 混合モード破壊じん性試験

2.1 供試材料および試験片

混合モード破壊じん性試験に用いるDCB型試験片の概略図を図1に示す。被着体には一方向CFRP積層板(強化繊維TR50S,マトリックス樹脂#350,三菱ケミカル製)を用いた。接着剤には、構造用フィルム接着剤(AF163-2U,公称厚さ0.14mm,3M製)を用いた。接着継手は以下の手順で作製した。①被着体の接着面にサンディング処理を施す,②接着面をアセトンで洗浄する,③接着剤を2枚重ねた被着体の間に挿入する,④接着

*大阪教育大学, **大阪市立大学工学部,
***スマートものづくりセンター神戸

継手を 120°C の乾燥炉で 1 時間加熱し接着剤を硬化させる。

フィルム接着剤の重ね合わせは、空隙の混入を避けるため、密閉された真空バッグ内で行った。被着体の間に厚さ 0.2mm のスペーサを挿入し、接着層の厚さを一定に確保した。離型処理を施した厚さ 10 μ m のフィルムを接着層の中間に挿入し、非接着領域を設けてき裂を導入した。接着剤の硬化後、被着体からはみ出た余分な接着剤を除去し、側面をサンドペーパーで研磨して、き裂先端が顕微鏡で観察できることを確認した。その後、荷重負荷用金属製ブロックを被着体に取り付けて試験に供した。

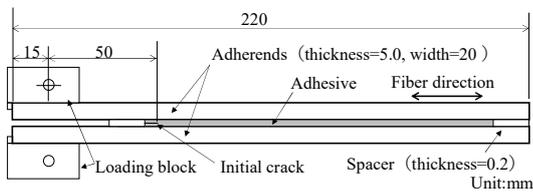


図 1 DCB 型試験片

2.2 実験方法

混合モード破壊じん性試験は Fernlund と Spelt が提案した、図 2 に示すリンク型の試験片固定ジグで実施した⁴⁾。実験は万能試験機 (AG-100NE, 島津製作所製) の定盤に試験片固定ジグを設置し、DCB 型試験片をジグに取り付け、試験速度 0.5mm/min で実施した。図 2 に示す Load point における荷重と変位の関係を、サンプリング周波数 5Hz で記録した。き裂長さは、XYZ ステージ上に固定した光学顕微鏡とエリアスキャンカメラを用いて、試験片側面からき裂先端を追跡し、き裂長さをリニアゲージ (LG-1100N, ミットヨ製) で読み取った。

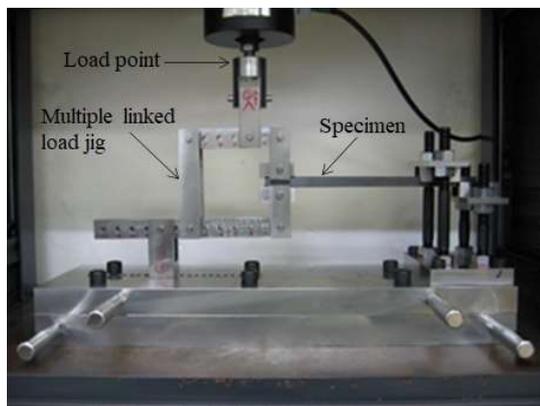


図 2 リンク型試験片固定ジグ

破壊じん性試験は、モード I とモード II の割合 (モード比, G_{II}/G_T) が $G_{II}/G_T = 0.08, 0.21, 0.68$ および 0.80 の合計 4 種類のモード比で実施した。ここで、 $G_{II}/G_T = 0$ は純粋モード I (開口モード), $G_{II}/G_T = 1.0$ は純粋モード II (せん断モード) である。

3 き裂進展シミュレーション

3.1 解析方法

混合モード破壊じん性試験の有限要素モデルを図 3 に示す。試験片および試験片固定ジグは 8 節点のソリッド要素, ピンは 4 節点のシェル要素でそれぞれモデル化した。試験片固定ジグとピンの接触, 試験片と支持点の接触は, ともに摩擦を無視した。有限要素のメッシュサイズは 2mm とした。被着体の機械的特性は表 1 とした。

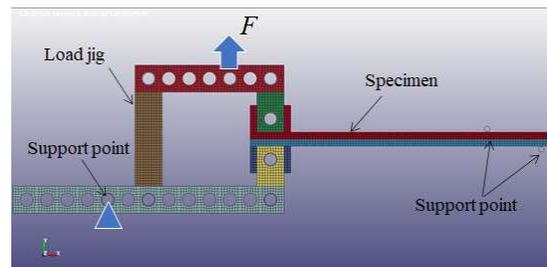


図 3 き裂進展シミュレーションの有限要素モデル

表 1 被着体の機械的特性

Adherend (unidirectional CFRP)

Young's modulus (GPa)			Poisson's ratio			Shear modulus (GPa)		
E_{11}	E_{22}	E_{33}	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}	G_{12}	G_{23}	G_{31}
130	9.9	9.9	0.31	0.21	0.02	4.0	7.5	4.0

今回の解析は、接着層を結合力要素でモデル化した。結合力要素とは、隣り合う要素の節点を特殊なバネで結合する要素である。結合力要素の節点に生じる力が結合力要素の破壊基準以下であれば、力を隣接する要素へ伝達する。節点力が結合力要素の破壊基準に達したとき、ダメージのレベルに応じて節点の結合力を弱めることができる。さらにダメージが大きくなると、要素間の節点を分離させることでき裂の発生と進展が模擬できる。

結合力要素は、混合モード状態の破壊を考慮するため、モードIとモードIIの破壊じん性を考慮できる要素タイプを用いた。結合力要素は力と節点の相対変位の関係からエネルギー解放率を計算する。エネルギー解放率の計算精度は結合力要素の要素サイズに依存する。このため結合力要素の要素サイズは、エネルギー解放率の計算精度に影響しない大きさに設定した。き裂進展シミュレーションはLS-DYNAを使用して陽解法で計算を行った。

3.2 結合力要素パラメータの同定方法および解析結果

結合力要素のパラメータ（結合力-相対変位の関係と最大結合力）は混合モード破壊じん性試験とき裂進展シミュレーションを比較検討することで同定した。パラメータの探索は、2.2節に示した4種類のモード比で、実験と解析の荷重-変位関係を比較してトライ&エラー方式で決定した。

結合力要素のパラメータを同定した後の解析結果と、混合モード破壊じん性試験の荷重-変位関係を図4に示す。 $G_{II}/G_T = 0.08$ の条件では、荷重-変位関係は解析と実験で概ね一致しており、き裂の発生とき裂の進展を解析で再現することができた。一方、 $G_{II}/G_T = 0.21, 0.68, 0.80$ の条件では、荷重-変位関係の傾きでやや差が生じたが、き裂の発生荷重は概ね一致している。以上の結果から、き裂進展シミュレーションで同定した結合力要素パラメータで、4つの異なる混合モード状態のき裂の発生と進展を解析で再現できた。

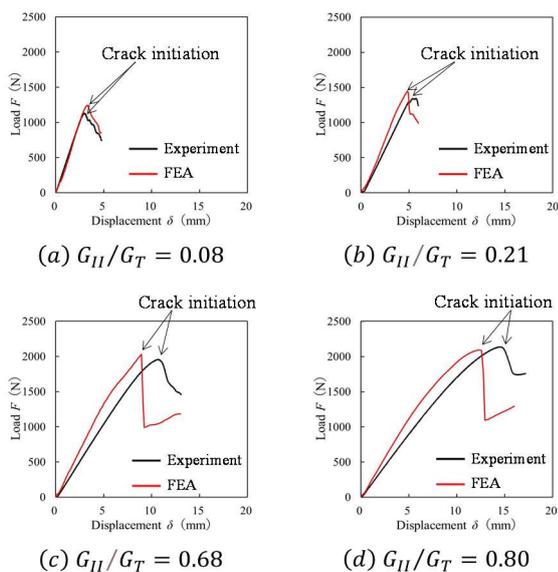


図4 混合モード破壊じん性試験とき裂進展シミュレーションの荷重-変位曲線の関係

4 シングルラップ接着継手の強度予測

4.1 シングルラップ接着継手の解析方法

3節で求めた結合力要素のパラメータを用いてシングルラップ接着継手の強度を評価した。図5に示すシングルラップ接着継手の有限要素モデルの接合部に結合力要素を組み込んだ。重ね合わせ長さによる接着強度の予測精度を確認するため、シングルラップの重ね合わせ長さ L は 10mm, 20mm, 30mm, 40mm の 4 種類で強度を評価した。

シングルラップに引張り荷重を負荷すると、接着部は剥離応力とせん断応力が同時に生じるため、混合モード状態を考慮する必要がある。このため結合力要素は、き裂進展シミュレーションと同様の混合モード状態の破壊基準が適用できると考えられる。

図5に示すとおりシングルラップ接着継手の左端部を固定し右端部に引張り荷重を与えた。結合力要素が破壊基準に達して結合力を失い、上下の被着体が分離した状態を接着継手の破断と定義した。

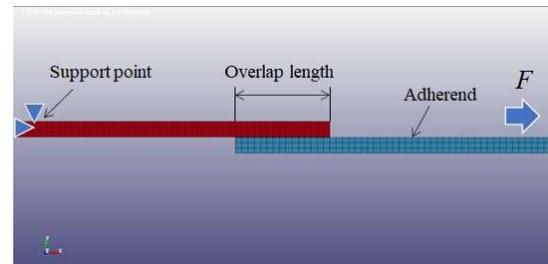


図5 シングルラップ接着継手の有限要素モデル

4.2 シングルラップ接着継手の引張試験結果

4.1節の解析結果の有効性を確認するため、解析と同じ形状の接着継手を作製し、同じ荷重条件で強度を評価した。被着体は一般構造用圧延鋼板 (SS400) を用いた。接着剤は構造用フィルム接着剤 (AF163-2U, 公称厚さ 0.14mm, 3M 製) を用いた。これらを図5と同様の形状に重ね合わせ 120°C のオーブンで 1 時間接着剤を硬化させて試験片とした。引張試験は試験片の両端を万能試験機 (AG-100NE, 島津製作所製) のチャックで固定し、試験速度 1.0mm/min で実施した。接着層の

シングルラップ接着継手の引張試験の実験結果を図6に示す。図6の荷重-変位曲線において (a), (b), (c) で示す部分では荷重の低下がみられ

た。その時の接着部の端部を顕微鏡カメラで撮影した。顕微鏡カメラの画像から、最初の荷重低下(a)で接着層の端部に小さなき裂が発生したことがわかった。その後き裂は一定の長さを維持しながら、(b)でき裂の開口量が徐々に大きくなり、(c)でき裂が接着層に沿って進展したことが確認できた。

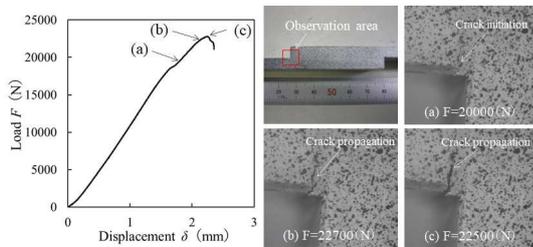


図6 シングルラップ接着継手のき裂進展

4.3 解析結果と実験結果の比較

シングルラップ接着継手の最大荷重と重ね合わせ長さの関係を図7に示す。重ね合わせ長さとも最大荷重の関係は、解析と実験ともに概ね線形で推移しており、傾向は一致している。重ね合わせ長さが $L=40\text{mm}$ の条件では、最大荷重は解析と実験で概ね一致した。一方、 $L=10\text{mm}$, 20mm , 30mm の条件では、解析の最大荷重は実験をやや下回った。以上のことから、今回の解析は接着長さによって強度の予測精度に差が生じることがわかった。

接着長さによらず、接着強度を統一的に予測するためには、結合力要素パラメータや混合モード破壊基準などの適正化が必要である。また、解析と実験の接着剤の破壊形態のミスマッチを解消する必要がある。

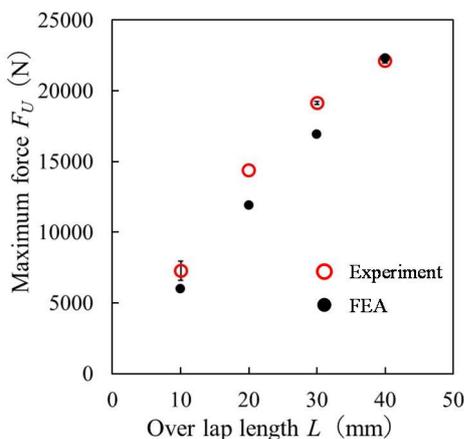


図7 接着長さと引張り強さの関係

5 結 言

混合モード破壊じん性試験の有限要素モデルに結合力要素を組み込み、き裂の進展をモデル化した。種々の混合モードの破壊じん性試験と、き裂進展シミュレーションの荷重-変位曲線を比較し、両者が一致する条件を探索することで結合力要素のパラメータを同定できた。それらをシングルラップ接着継手の有限要素モデルに組み込み、種々の接着長さの接着強度を評価した。その結果、有限要素モデルで予測した強度は、特定の接着長さに限定して実験結果と一致することを確認した。

謝 辞

本研究は、ひろしまデジタルイノベーションセンターが保有するLS-DYNAおよびCAEワークステーションを利用して行った。ここに謝意を申し上げる。

文 献

- 1) Anyfantis KN, Tsouvalis NG. A novel traction-separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints. *Int J Solids Struc.* 2012;49:213-226.
- 2) Kim M-H, Hong H-S. An adaptation of mixed-mode I+II continuum damage model for prediction of fracture characteristics in adhesively bonded joint. *Int J Adhes Adhes.* 2018;80:87-103.
- 3) Alfano M, Furguele F, Leonardi A, et al. Mode I fracture of adhesive joints using tailored cohesive zone models. *Int J Fract.* 2009;157:193-204.
- 4) Fernlund G, Spelt JK. Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints. *Comp Sci Technol* 1994;50(4):441-9.