

7 接着剤の材料非線形性を考慮した CFRP 接着継手の混合モード破壊じん性評価

河野洋輔, 今中 誠*, 原 圭介**, 福地雄介***

Evaluation of mixed mode fracture toughness of adhesively bonded CFRP joints with consideration of material nonlinearity

KOUNO Yousuke, IMANAKA Makoto, HARA Keisuke and FUKUCHI Yusuke

The fracture toughness of adhesively bonded CFRP joint under mixed I and II mode condition was investigated using finite element analysis with the J -integral calculation considering the nonlinear deformation of adhesive. In the case of $G_{II}/G_T=0$ and 0.21, the plastic strain was distributed only near the crack tip, and there was no significant difference in the J -integral values between elastic analysis and elasto-plastic analysis irrespective of crack propagation. In the cases of $G_{II}/G_T=0.55, 0.68$ and 0.80, the plastic strain was widely distributed along the adhesive layer, and the J -integral value of the elasto-plastic analysis was relatively higher than that of the elastic analysis. The difference of the J -integral values between the elastic analysis and the elasto-plastic analysis increased with the increase of mode II component. It was found that the fracture toughness value is affected by the plastic deformation of the adhesive at the crack tip due to shear deformation.

キーワード：混合モード破壊じん性試験, J 積分, CFRP 接着継手

1 緒 言

環境負荷低減と省エネルギー化に関心が高まり、温室効果ガスの排出と化石燃料の消費を削減するため、ものづくり産業では CFRP などの軽量性に優れた素材を構造材料に採用することで、運動性能を向上させ燃費効率を改善する取り組みが活発に行われている。一方で軽量素材は単位重量あたりの材料コストが高く、大量に適用すると製品価格の高騰を招く。このため、軽量素材を必要量だけ適材適所に組み合わせて軽量化を実現するマルチマテリアル設計に関心が高まっている。マルチマテリアル化の実現には、個別の部品設計だけでなく、それらを一体化させた構造の強度を確保する必要がある。構造物を接着接合するには、使用環境や荷重条件など様々な要素に配慮しなければならない。また、接着接合は、接着工程で異物や空隙などの非接着領域を取り込むリスクがあるため、これらの存在を前提とした設計を行い、接着継手の安全性と信頼性を確保することが重要である。以上を踏まえると、静的引張試験のみで接着継手の強度評価を行うだけでは不十分である。このため接着継手の破壊じん性試験を行い、接着構造のき裂に対する感受性と破壊メカニズムを明らかにする必要がある。

これまでに、き裂の開口（モード I）と曲げ変形によるせん断力（モード II）の混合モード状態における接着継手の破壊じん性試験を実施し、き裂先端の前縁にマイクロき裂が発生し、それらが成長し合体することで、き裂が進展することを確認した。また、モード II 成分の増加に伴い、き裂前縁に発生するマイクロき裂の分布が拡大し、き裂が接着層に沿ってジグザグに進展することを確認した¹⁾。マイクロき裂の出現は、接着層に発生した応力が降伏点を超えて塑性変形が生じていることを示唆しているため、接着剤の塑性変形が破壊じん性値に及ぼす影響を評価する必要がある。

本研究では接着継手の混合モード（モード I+II）破壊じん性試験で、種々のモード比（ G_{II}/G_T ）における負荷荷重とき裂進展長さの測定を行い、それらの実験結果を有限要素モデルに反映させて解析上で破壊じん性値を評価した。具体的には接着剤の機械的特性が弾性体、弾塑性体のそれぞれの条件で破壊じん性値を取得して比較することで、混合モード破壊じん性試験におけるモード比と接着剤の塑性変形が破壊じん性値に与える影響を確認した。

2 供試材料および試験片

図 1 に破壊じん性試験片の概略図を示す。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

*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

称厚さ 0.14mm, 3M 製) を用いた。接着継手は以下の要領で作製した。被着体の接着面にサンディング処理を施し, アセトンで洗浄後, 2 枚重ねた接着剤を挿入し, 120°C の乾燥炉で 1 時間硬化させ接着を行った。接着剤の重ね合わせは, 気泡の混入を避けるため, 密閉された真空バッグ内で行った。接着層の厚さを一定に保つため, 厚さ 0.2mm のスペーサを接着層に挿入した。初期き裂は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, 非接着領域を設けることで導入した。接着剤の硬化後, はみ出た余分な接着剤を除去し, 側面部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。接着継手は荷重負荷用金属ブロックを取付けて試験に供した。

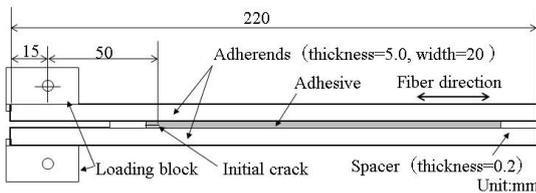
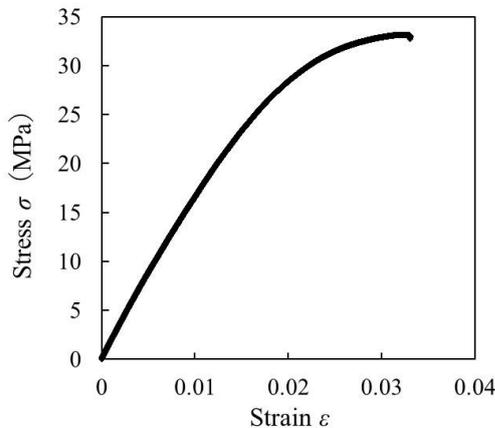
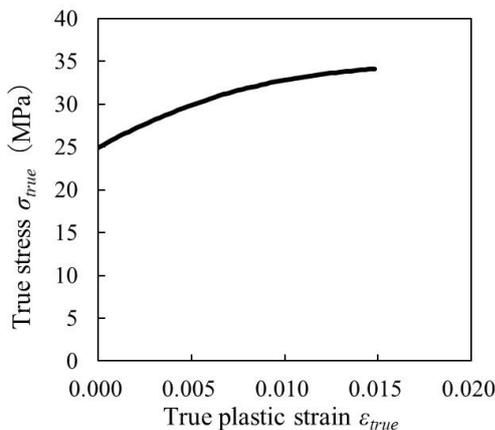


図 1 DCB 試験片



(a) 接着剤の応力ひずみ関係



(b) 真応力-塑性ひずみの関係

図 2 接着剤の応力ひずみ曲線

3 接着剤の機械的特性

有限要素解析に用いる接着剤の機械的特性を取得するため静的引張試験を実施した。実験の概要を以下に示す。

破壊じん性試験と同様の接着剤を積層して加熱硬化させた平板を機械加工し, 平行部長さ 60mm, 幅 10mm, 板厚 3mm のダンベル型の試験片を作製した。静的引張試験は, 試験温度 23°C, 試験速度 0.5mm/min の条件で実施した。試験片平行部に接触式伸び計 (SIE-560SA, 島津製作所製) を取り付け, 評点間距離の伸びを測定した。引張試験で得られた応力ひずみ曲線を図 2 (a) に示す。応力とひずみの関係は, ひずみが 1% 程度までは概ね線形を示し, 弾性率は応力ひずみ曲線の線形領域から取得した。応力ひずみ曲線は, 真応力と真ひずみに変換し, 図 2 (b) に示す真応力と塑性ひずみの関係を有限要素解析に用いた。

4 混合モード破壊じん性試験のモード比

混合モード破壊じん性試験は Fernlund と Speltz が提案した, リンク式の試験片固定ジグを用いた²⁾。リンク式ジグの概略図を図 3 に示す。リンク式ジグの原理は DCB 試験片をジグに固定し, 支点 A に荷重を負荷することで, 予き裂導入部を開口させながら, 曲げ変形を与えることができる。従来の混合モード試験に使用される MMB ジグと同様に混合モード状態の破壊じん性値を取得できる。リンク式ジグは, き裂先端から接着継手端部までの距離 (リガメント長さ) を MMB ジグと比較して長く確保できる点に優位性があり, 接着継手の破壊じん性試験で安定したき裂進展を伴う場合の R 曲線取得に適している。

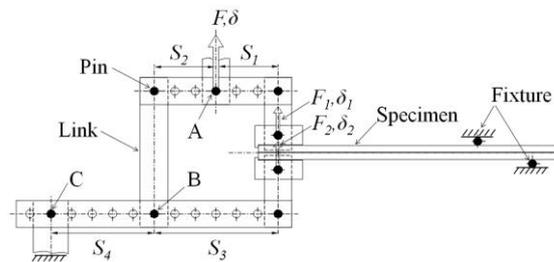


図 3 混合モード破壊じん性試験ジグ

リンク式ジグの原理を以下に示す。支点 A に与えられた力 F はリンク機構を経由することで F_1 , F_2 として試験片に外力を与える。リンク間距離 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 は, ピンの配置によって長さを変えることができる。これらを所定の位置に設定することで試験

片に負荷される F_1, F_2 のバランスが変わり, 開口(モード I) と曲げ変形によるせん断力(モード II) が生じ混合モード状態となる。 F_1, F_2 は力のつり合いから式(1), (2)で求まる。

$$F_1 = F \frac{S_2}{S_3} \quad (1)$$

$$F_2 = F \frac{S_1 S_4}{S_3(S_3 + S_4)} \quad (2)$$

被着体の曲げモーメントによるひずみエネルギーとカスティリアノ定理から相対変位 δ_1, δ_2 が求まる。外力と変位の関係からコンプライアンス C が得られ, 全エネルギー解放率は式(3)で求まる。ここで式中の a はき裂長さ, B は試験片幅, h は被着体厚さ, E は被着体のヤング率である。

$$G_T = \frac{P^2 dC}{2B da} = \frac{6(F_1 a)^2}{B^2 E h^3} \left[1 + \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(1 + \left(\frac{F_2}{F_1} \right) \right)^2 \right] \quad (3)$$

モード I とモード II のエネルギー解放率 G_I, G_{II} は位相角 ψ を用いて式(4), (5), (6)で表すことができる。混合モードの比率(G_{II}/G_T)は式(3)及び(6)で決まる。

$$\psi = \arctan \left[\frac{\sqrt{3} \left(\frac{F_1}{F_2} + 1 \right)}{2 \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)} \right] \quad (4)$$

$$G_I = G_T \left[\frac{1}{1 + \tan^2(\psi)} \right] \quad (5)$$

$$G_{II} = G_T \left[\frac{\tan^2(\psi)}{1 + \tan^2(\psi)} \right] \quad (6)$$

5 接着継手の混合モード破壊じん性試験

混合モード破壊じん性試験の実験手順を以下に示す。実験は万能試験機(AG-100NE, 島津製作所製)の定盤に試験ジグを固定し, DCB 試験片をジグに取付け, 試験速度 0.5mm/min で実施した。き裂長さの測定は, 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, 変位をリニアゲージ(LG-1100N, ミツトヨ製)で読み取った。リニアゲージで出力された変位とロードセルで出力された荷重を同期させ,

サンプリング周波数 5Hz で取得した。破壊じん性試験は, $G_{II}/G_T = 0, 0.21, 0.55, 0.68$ および 0.80 の合計 5 種類のモード比で実施した。

6 有限要素解析

混合モード破壊じん性試験における接着層の塑性ひずみ分布を調べるため, 有限要素法により弾塑性解析を行った。図4は接着継手の混合モード破壊じん性試験を模擬した有限要素モデルである。試験片は四角形一次要素でモデル化した。初期き裂導入部は2重節点を設け, 要素の接触を考慮し, き裂を模擬した。き裂の接触による摩擦は無視した。被着体は異方性弾性体と仮定し機械的特性は表1の値を用いた。接着剤は非線形硬化塑性体とし, 加工硬化曲線は, 接着剤の単軸引張試験で得られた応力ひずみ関係を多直線形式で表現した。降伏条件はミーゼスの降伏条件と等方硬化則を用いた。リンク機構は梁要素で簡易的にモデル化してリンクが正常に動作すること確認した。モード比(G_{II}/G_T)は, リンク機構で梁要素の節点間距離を所定の長さに設定することで種々のモード比を定義した。試験片右端部の支持は, 剛体壁を設け鉛直方向の変位を拘束し, 水平方向の摩擦係数はゼロとした。荷重はリンク機構の荷重負荷点に該当する節点に, 実験結果と同じ荷重を与えて試験片に外力を負荷した。解析は幾何学的非線形を考慮した平面ひずみ状態で行った。なお, FEM 解析ソルバーは MSC/Marc を使用した。

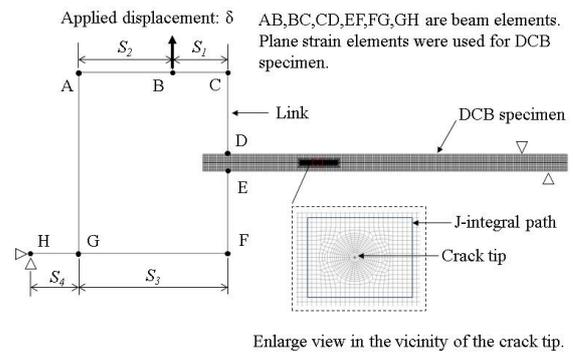


図4 混合モード破壊じん性試験の有限要素モデル

表1 被着体の機械的特性

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

7 J積分による破壊じん性値の計算

弾塑性解析における破壊じん性値を J 積分で計算する。破壊じん性値は、き裂先端の小規模降伏が満足される範囲で、エネルギー解放率、応力拡大係数などで表現されるが、降伏規模が拡大する場合は、これらのパラメータの適用範囲を逸脱する。弾塑性体における大規模降伏下で破壊じん性を評価するには J 積分を適用する。J 積分はき裂を有する物体において、き裂進展が生じる際のポテンシャルエネルギーの変化と定義され、式(7)で表される³⁾。

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (7)$$

ここで、 Γ はき裂先端を囲む積分経路、 W はひずみエネルギー密度、 T は経路 Γ に沿う表面力ベクトル、 u は経路 Γ に沿う変位ベクトル、 ds は経路 Γ に沿う微小要素である。有限要素解析では式(7)の線積分を面積積分に置き換えて計算する⁴⁾。このため、メッシュの形状とサイズが計算結果に与える影響を考慮して、積分経路は適切に設定した。なお、比較対象として接着剤を弾性体と仮定した場合についても同様に J 積分を行った。

8 解析結果および考察

混合モード破壊じん性試験の有限要素解析における相当塑性ひずみ分布を図5に示す。ここで相当塑性ひずみは、き裂進展長さが0mmの初期き裂の状態、破壊じん性試験で得られた臨界荷重 P_{cr} を有限要素モデルに入力して弾塑性解析で計算した。ひずみ分布は、 $G_{II}/G_T = 0.21$ および 0.80 のモード比が異なる2種類の代表的な有限要素モデルの結果のみ示している。 $G_{II}/G_T = 0.21$ では、塑性ひずみはき裂先端の前縁で狭い範囲に限定して分布している。一方、 $G_{II}/G_T = 0.80$ ではき裂先端から接着層に沿って広範囲に分布している。

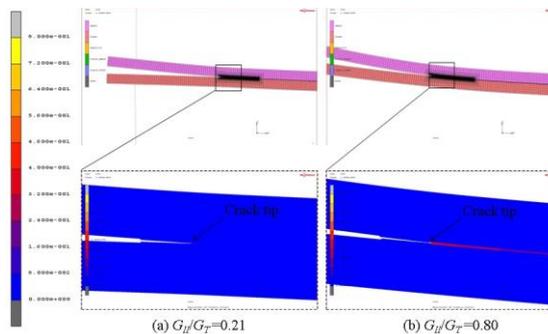


図5 き裂先端の相当塑性ひずみ分布

次に J 積分値とき裂進展長さの関係を図6に示す。J 積分値は、個別のモード比ごとの破壊じん性試験で得られたき裂長さとの関係、有限要素モデルに反映させて弾塑性解析を行い J 積分で計算した。また、比較対象として、接着剤の機械的特性を弾性体に変更し、同様の計算を行った弾性解析の結果も合わせて示している。 $G_{II}/G_T = 0$ および 0.21 の2条件において J 積分値は、弾性解析と弾塑性解析で顕著な差はないことがわかった。一方で $G_{II}/G_T = 0.55, 0.68,$ および 0.80 の3条件で J 積分値は、弾塑性解析の方が弾性解析と比較して高いことがわかった。この結果から、混合モード破壊じん性試験において、モード II 成分のせん断変形による塑性ひずみが、J 積分値に影響することがわかった。

J-integral value was calculated by,		G_{II}/G_T	(a)	(b)
(a) Elastic plastic J-integral		0.80	●—	○---
(b) Linear elastic J-integral		0.68	▲—	△---
		0.55	◆—	◇---
		0.21	■—	□---
		0.00	●—	○---

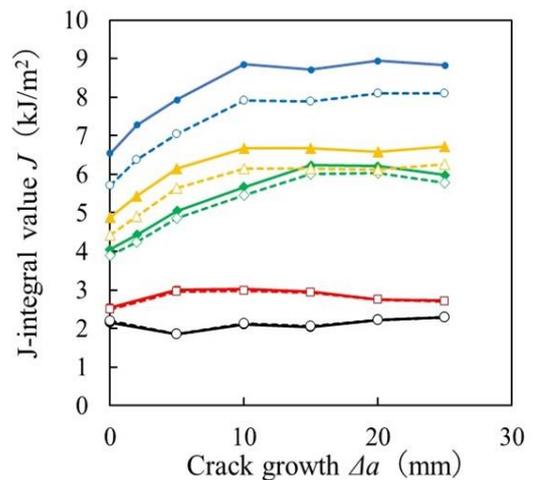


図6 J積分値とき裂長さの関係

次に J 積分値とモード比の関係を図7に示す。ここで J 積分値は、き裂進展開始点の J_C と、き裂の安定成長時における J_S に分けて示している。 J_S はき裂進展長さが10mmから25mmまでの J 積分値の平均値である。 $G_{II}/G_T = 0$ および 0.21 の2条件において J 積分値は、弾性解析と弾塑性解析で顕著な差は無かった。一方で、 $G_{II}/G_T = 0.55, 0.68,$ および 0.80 の3条件において、弾塑性解析による J 積分値は、弾性解析と比較して、 J_C で4%~13%、 J_S で3%~9%高くなった。また、各モード比ごとの弾性解析と弾塑性解析の J 積分値の差は J_C, J_S ともに、モード II の割合の増加に伴い拡大していることがわかった。

以上のことから、混合モード破壊じん性試験において接着剤の塑性変形が J 積分値に与える影響はモード II 成分の割合が高い条件で顕著であり、その原因としてせん断変形による接着層の塑性変形が影響していることがわかった。

	Steady state J-integral value : J_S	Crack initiation J- integral value : J_C
Linear elastic analysis	■	●
Elastic plastic analysis	□	○

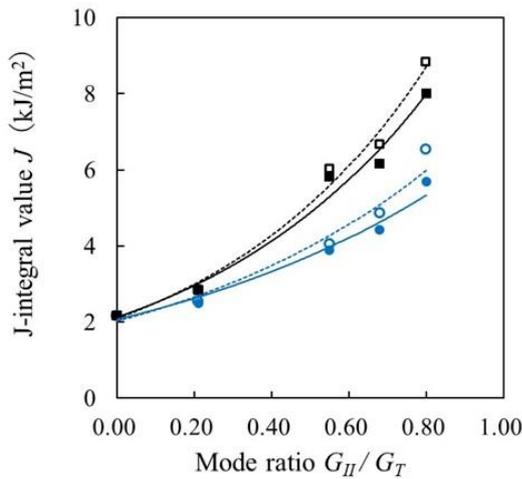


図7 J 積分値とモード比の関係

9 結 言

CFRP 接着継手の混合モード破壊じん性を、有限要素解析による J 積分を用いて計算し、接着剤の機械的特性を、弾性体および弾塑性体と仮定した場合でそれぞれの J 積分値を比較した。これを、種々のモード比、き裂長さごとに実施した結果、以下のことがわかった。

- (1) $G_{II}/G_T = 0$ および 0.21 の 2 条件では、接着層の塑性ひずみは、き裂先端の前縁近傍の狭い範囲で分布することがわかった。これらの条件において J 積分値は、き裂長さによらず、弾性解析と弾塑性解析でほとんど差がなかった。
- (2) $G_{II}/G_T = 0.55, 0.68,$ および 0.80 の 3 条件では、接着層の塑性ひずみは、き裂先端の前縁に広範囲に分布することがわかった。これらの条件において弾塑性解析による J 積分値は、弾性解析と比較して J_C で 4%~13%, J_S で 3%~9% 高くなった。
- (3) 弾性解析と弾塑性解析による J 積分値の差は、モード II の割合の増加に伴い拡大し、せん断変形によるき裂前縁の接着剤の塑性変形が破壊じん性値に影響している。

文 献

- 1) 河野洋輔, 今中誠, 原圭介, 福地雄介, 末村紘志, JCCM-10, 1A-15
- 2) Fernlund G, Spelt JK. Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints. Comp Sci Technol 1994;50(4):441-9
- 3) 東郷敬一郎 : 材料強度解析学, 内田老鶴圃, (2004), p. 99-105
- 4) Marc 2010 Product documentation, Volume A, "Theory and user information", pp. 151-153(2010)