

# 1 高じん性接着剤による CFRP 接着継手の混合モード破壊じん性評価

河野洋輔, 末村紘志, 今中 誠\*, 原 圭介\*\*, 福地雄介\*\*\*

Evaluation of mixed mode fracture toughness of adhesively bonded CFRP joints with high fracture toughness adhesive

KOUNO Yousuke, SUEMURA Hiroshi, IMANAKA Makoto, HARA Keisuke and FUKUCHI Yusuke

In the present study, fracture toughness tests of CFRP adhesively bonded joints under mixed mode I+II conditions were conducted with multiple linked loading system which has advantage of obtaining R-curve behavior. The energy release rate was examined under various mixed mode loading conditions and pure mode I, II conditions respectively. The relationship between total energy release rate and crack extension was almost steady for  $G_{II}/G_T < 0.55$  condition irrespective of crack extension. whereas for  $G_{II}/G_T \geq 0.55$  condition, it obviously increased with crack extension until crack length reaches about 10mm. A critical value of total energy release rate was increased with the mode II ratio.

## 1 緒 言

接着接合は CFRP 構造に広く適用され、部品を一体化させ荷重を伝達する役割を担う。ボルトやリベットを用いて機械的締結する場合も、締結後の剛性を向上させるため接着剤が併用されることがあり、接着接合は CFRP 構造に必要なプロセスである。このため CFRP の接着継手の強度特性を明らかにし、その結果を強度設計に反映させることで一体化構造の安全性を保障することが重要になる。

実用的な接着継手は多数の部位で拘束され外力の方向も複雑なため、接着領域に存在するき裂も複数の変形様式が混在した状態におかれる。このため接着継手の強度評価は、混合モード下におけるき裂欠陥から破壊挙動を評価する必要がある。

一方で、主剤に微細ゴム粒子を添加し、高じん性化された接着剤の適用が近年広まっている。高じん性接着剤は、従来の接着剤と比べて安定したき裂進展が見込まれるため、き裂進展初期の破壊じん性値だけでは破壊特性を把握するには不十分であり、破壊じん性値とき裂進展量との関係 (R 特性) の明確化が必要である。

本研究では、混合モードの変形様式を実現する試験片固定ジグを作製し、CFRP 接着継手の混合モード破壊じん性試験を行った。また、混合モード状態と純粋モード I, II 状態における CFRP 接着継手の破壊じん性試験からエネルギー解放率を取得し、種々のモード比 ( $G_{II}/G_T$ ) のき裂進展特性を検討した。

## 2 供試材料および試験ジグ

### 2.1 供試材料および試験片

図 1 は試験片形状を示している。被着体には一方向 CFRP 積層板 (強化繊維 TR50S, マトリックス #350, 三菱レイヨン), 接着剤には構造用フィルム接着剤 (AF163-2U, 公称厚さ 0.14mm, 3M) を用いた。被着体は接着面にサンディング処理を施し、表面をアセトンで脱脂した。フィルム接着剤は 2 枚重ねて脱泡しながら圧着し、内部の気泡を除去し、120°C で 1 時間加熱して硬化した。接着層の厚さを確保するために、0.2mm のスペーサを設けて硬化させた。接着フィルムの層間の一部に離型処理したフィルム (厚さ 10  $\mu$ m) を挿入して非接着領域を設け

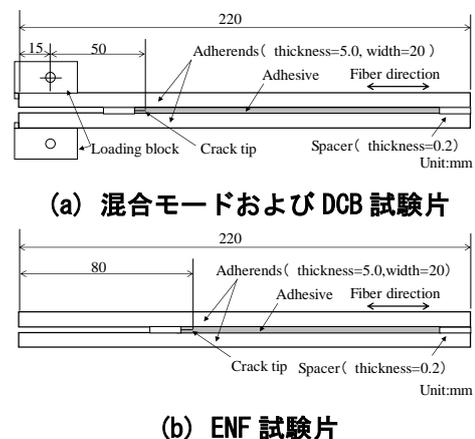


図 1 試験片形状

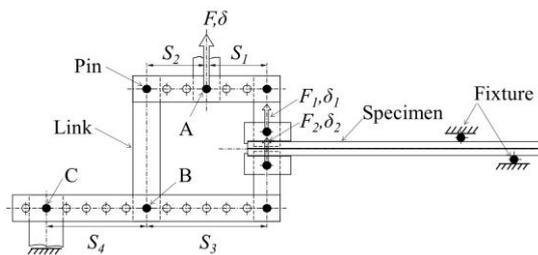
\*大阪教育大学, \*\*米子工業高等専門学校,

\*\*\*新産業創造研究機構

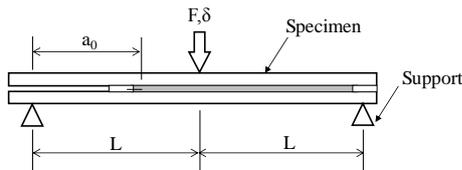
初期き裂とした。き裂長さを実測するため試験片側面をサンドペーパー (#1500) で研磨した。混合モード試験と DCB 試験には被着体の上下に荷重負荷用金属製ブロックを取付けて試験に供した。

## 2.2 試験ジグ

今回の実験に用いた試験片固定ジグを **図 2** に示す。混合モード試験には R 特性の取得に優位性があるリンク式混合モード破壊じん性ジグ<sup>1)2)</sup>を用いた。リンク式ジグの原理を以下に示す。**図 2 (a)** はリンク式ジグの概略図である。試験片は、荷重負荷用金属製ブロックを介してジグに固定した。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。混合モードの比率 ( $G_{II}/G_T$ ) はリンク間距離で決定される。 $F_1$ ,  $F_2$  は力のつり合いから求め、この時の相対変位  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  は試験片全体のひずみエネルギーの合計とカステリアノ定理から求まる。上記の力と変位の関係からコンプライアンス  $C$  が得られ、エネルギー解放率  $G_T$ ,  $G_I$ ,  $G_{II}$  はそれぞれ式 (1), (2), (3) で求まる<sup>3)</sup>。ここで式中の  $a$  はき裂長さ,  $B$  は試験片幅,  $h$  は被着体厚さである。  $E$  と  $G$  はそれぞれ被着体のヤング率とせん断弾性係数であるが、今回は被着体に一方方向 CFRP 積層板を用いるため、繊維方向ヤング率  $E_{11}$  とせん断弾性係数  $G_{31}$  に置き換えた。



(a) 混合モードおよび DCB 試験



(b) 3点曲げ ENF 試験

図 2 試験片固定ジグ

$$G_T = \frac{P^2 dC}{2B da} = G_I + G_{II} \quad (1)$$

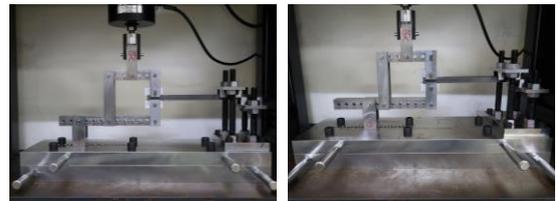
$$G_I = \frac{6(F_1 - F_2)^2}{4B^2 h} \left( \frac{2a^2}{Eh^2} + \frac{1}{5G} \right) \quad (2)$$

$$G_{II} = \frac{9(F_1 + F_2)^2 a^2}{4B^2 h^3 E} \quad (3)$$

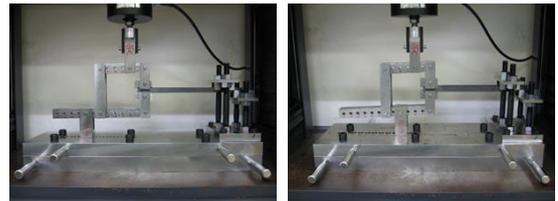
DCB 試験は、混合モード試験と同様にリンク式ジグを用いた。ENF 試験は、**図 2 (b)** に示す 3 点曲げジグを用いた。

## 3 き裂進展によるモード比の変化

混合モード試験の代表的なピン配置を **図 3** に示す。今回の混合モード試験では **図 3** の配置を含む 6 種類のモード比で試験を行った。各モード比に対応するエネルギー解放率を式 (1) から (3) と FEM 解析でそれぞれ算出し、き裂長さの変化に伴うモード比の変化を評価した。FEM 解析では、混合モード試験ジグのリンク機構を梁要素で簡易的にモデル化し、試験片は 4 節点シェル要素でメッシュ分割した。接着層の一部に 2 重節点を設け、予き裂を表現した。予き裂前縁のメッシュサイズは 0.015mm とした。き裂長さは、初期き裂から 0mm, 10mm, 20mm, 40mm, 60mm の 5 段階で進展したと仮定した。被着体と接着剤の機械的特性は、静的引張り試験の結果と接着剤のカタログ値を参照し **表 1** の値を用いた。拘束条件として試験片右側端部に剛体壁を設けて鉛直方向変位を拘束し、水平方向の摩擦係数は 0 とした。



(a)  $G_{II}/G_T = 0.80$  (b)  $G_{II}/G_T = 0.68$



(c)  $G_{II}/G_T = 0.55$  (d)  $G_{II}/G_T = 0.21$

図 3 混合モード試験ジグの代表的なピン配置

表 1 CFRP と接着剤の機械的特性

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

Adhesive	
Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
$E$	$\nu$
1.1	0.34

荷重条件としてリンクの支点 A にあたる梁要素上の節点に仮想的に荷重 100 N を与え、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。エネルギー解放率  $G_T$  の計算には、VCCT 法 (Virtual crack closure technique) を用いた。

FEM 解析と式 (1) から (3) に基づいて算出したモード比の結果を図 4 に示す。いずれの場合も、モード比はき裂長さによらず一定で、理論値と FEM 解析の差はわずかであることが確認できた。

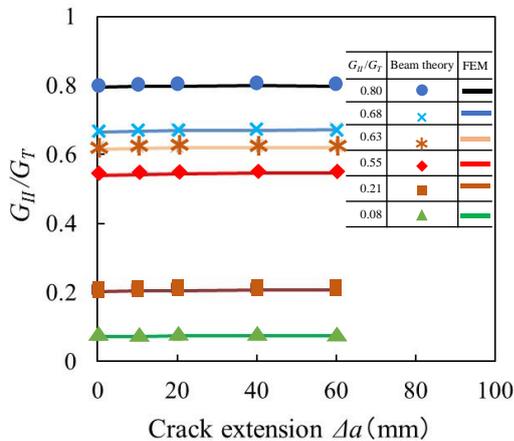


図 4 モード比とき裂長さの関係

#### 4 実験方法

混合モード破壊じん性試験は、万能試験機 (AG-100NE, 島津製作所) の定盤にリンク式ジグを固定し、支点 A に強制変位を与え試験速度 0.5mm/min の条件で実施した。き裂先端を 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で追跡し、き裂先端の変位をリニアゲージ (LG-1100N, ミットヨ) で読み取った。この方法で、

き裂長さをサンプリング周波数 5Hz で取得し、任意のタイミングでき裂進展の様子を静止画で取得した。DCB 試験は混合モード試験と同様に、図 2 (a) に示したリンク式ジグで  $G_{II}/G_T = 0.00$  となる条件で実験を行った。ENF 試験は図 2 (b) に示した 3 点曲げ試験で行い、支点から荷重負荷点までの距離  $L$  は 100mm とした。き裂長さの測定は混合モード試験と同様の方法で実施した。

#### 5 実験結果および考察

混合モード試験、DCB 試験、ENF 試験の代表的な荷重変位の関係とき裂進展長さの測定結果を図 5 に示す。モード II 成分の比率が小さい  $G_{II}/G_T = 0.21$  および DCB 試験では、最大荷重と同時にき裂が進展し、荷重の低下に伴い緩やかに進展した。一方、モード II 成分の比率が大きい  $G_{II}/G_T = 0.80$  および ENF 試験では、最大荷重より前にき裂が進展し、その後は急速に進展した。後述する図 7 に示すように試験片側面からの顕微鏡観察から、 $G_{II}/G_T \geq 0.55$  の条件では、き裂先端の前縁に多数のマイクロき裂が見られ、それらはモード II 成分の比率が高い条件で顕著であった。

図 6 はき裂進展に伴う、全エネルギー解放率の変化を示している。実験結果は、き裂長さに対応するエネルギー解放率を試験片本数で平均している。図 6 (a) はモード II 成分の比率が小さい場合である。いずれの条件も、エネルギー解放率はき裂進展によらず一定の値を示している。図 6 (b) は、モード II 成分の比率が大きい場合である。ENF を除く混合

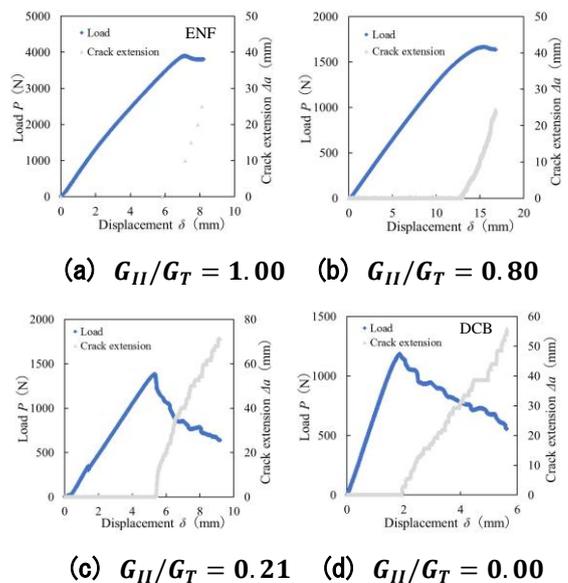
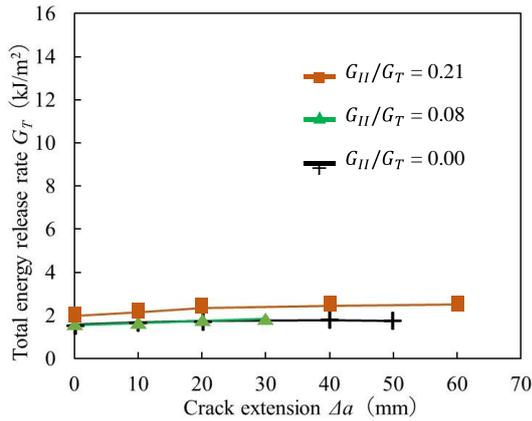
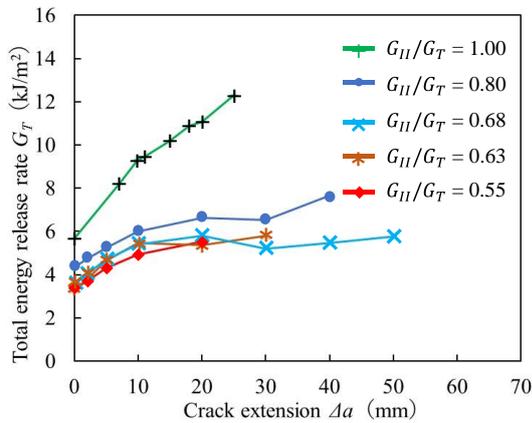


図 5 破壊じん性試験の荷重、変位、き裂長さの関係



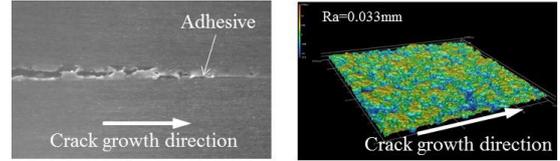
(a)  $0 \leq G_{II}/G_T < 0.55$



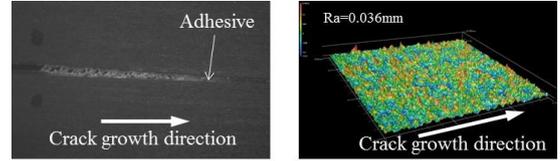
(b)  $0.55 \leq G_{II}/G_T \leq 1.0$

図6 エネルギー解放率とき裂長さの関係

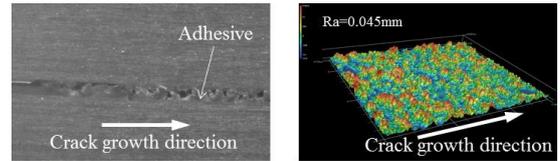
モード条件では、き裂進展長さが10mmに達するまでに全エネルギー解放率が緩やかに上昇し、その後は概ね一定値を示している。図7は試験片側面から見たき裂進展画像と破面の表面粗さの測定結果を示している。き裂進展画像はき裂が2mmまたは10mm進展した様子を光学顕微鏡で観察し、表面粗さは実験終了後の試験片から予き裂先端から前縁の10mm×10mmの領域をデジタルマイクロスコープ(VR-3050, キーエンス)で測定した。き裂進展画像から、DCB試験ではき裂が接着層と平行に直進する様子が見られ、混合モード試験とENF試験では、接着層に対し45°方向に迂回しながら進む様子が見られた。モードII成分の増加に伴いき裂の進展経路がジグザグを示した。表面粗さは、DCB試験が平滑であるのに対し、混合モード試験とENF試験は凹凸が見られ、算術平均粗さRaはモードII成分の増加に伴い増加する傾向が認められる。Mohanら<sup>4)</sup>は、接着継手の混合モード破壊じん性試験で、モードII成分の比率の増加により、破面の表面積が増加することを報告しており、図7に示した表面粗さとモ



(a)  $G_{II}/G_T = 0.00$  (DCB)



(b)  $G_{II}/G_T = 0.55$  (Mixed mode)



(c)  $G_{II}/G_T = 1.00$  (ENF)

図7 き裂進展の様子と破面の表面粗さ解析結果

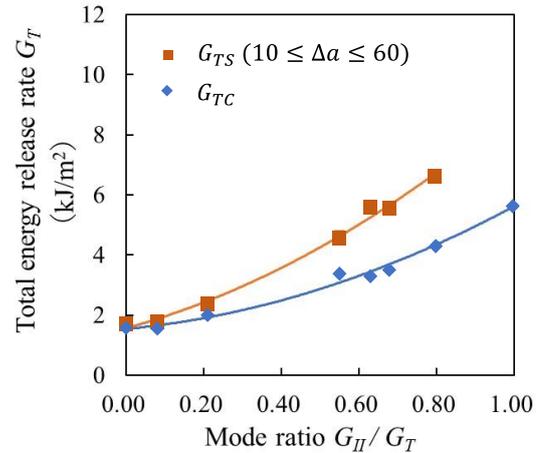


図8 エネルギー解放率とモード比の関係

ード比の関係と対応している。図8は全エネルギー解放率とモード比の関係を示している。全エネルギー解放率はき裂進展初期の臨界値 $G_{TC}$ とき裂の安定成長時の値 $G_{TS}$ をそれぞれ示している。 $G_{TC}$ はモードII成分の増加に比例して単調に増加している。これは、モードII成分の増加に伴いき裂先端部の塑性域が拡大するためと推察される。 $G_{TC}$ と $G_{TS}$ の差は、モードII成分の増加に伴い拡大する傾向がみられた。この一因として図7に示したようにモードII成分の増加により破面が粗くなり、き裂の進展抵抗が大きくなるためと推察される。

## 6 結 言

高じん性接着剤による CFRP 接着継手の混合モード破壊じん性試験をリンク式混合モード試験ジグを用いて実施した。DCB 試験, ENF 試験および 6 種類の混合モード試験の結果から, エネルギー解放率とき裂長さの関係を取得した。

- (1)  $G_{II}/G_T < 0.55$  の条件では, 全エネルギー解放率はき裂長さによらず概ね一定値を示し,  $G_{II}/G_T \geq 0.55$  の条件ではき裂長さが 10mm 以下で全エネルギー解放率が増加する傾向がみられた。
- (2) き裂進展初期の全エネルギー解放率はモード II 成分の比率に比例して単調に増加した。
- (3) き裂進展および破面観察から, DCB 試験ではき裂が直進する傾向が見られた。これに対し, モード II の比率が大きい混合モード試験や ENF 試験では, き裂が接着層をジグザグに進展し, 破面の算術平均粗さが増加した。このため,  $G_{TC}$  と  $G_{TS}$  の差がモード II 成分の増加に伴い拡大すると推察される。

## 文 献

- 1) G. Fernlund, J. K. Spelt : Composites Science and Technology, 50, (1994), 441.
- 2) L. F. M. da Silva, D. A. Dillard, B. Blackman, R. D. Adams : Testing adhesive joints—best practices, Wiley-VCH, (2012), 216.
- 3) F. J. P. Chaves, M. F. S. F. de Moura, L. F. M. da Silva, D. A. Dillard : Journal of Engineering Fracture Mechanics, 107, (2013), 38.
- 4) J. Mohan, A. Ivankovič, N. Murphy : Engineering Fracture Mechanics, 134, (2015), 148.