

# GFRPの繊維方向の引張および圧縮破壊モードにおける限界エネルギー解放率に関する実験的研究

北村 勇斗<sup>1</sup>・北根 安雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)  
E-mail:kitamura.yuto@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)  
E-mail:y.kitane@civil.nagoya-u.ac.jp

FRPの有限要素法解析では異方性材料を用いた弾性解析を実施することが一般的であるが、接合部などの耐荷力を精度よく評価するために、損傷を考慮した損傷進展解析の開発が近年進められている。損傷進展解析モデルの中には損傷開始後の応力-ひずみ関係の定義に限界エネルギー解放率を用いる場合がある。本研究では、GFRPの繊維方向の引張と圧縮の限界エネルギー解放率を求めるため、コンパクト・テンション試験 (CT試験) とコンパクト・コンプレッション試験 (CC試験) を実施した。限界エネルギー解放率の導出で必要となる試験中のき裂長さや圧縮損傷長さの同定には画像関連法を用いた。結果から、引張の限界エネルギー解放率は既往の研究で得られた値と同程度であること、引張の限界エネルギー解放率が圧縮の限界エネルギー解放率を上回ることを明らかにした。

**Key Words :** GFRP, Critical energy release rate, CT test, CC test

## 1. はじめに

有限要素法によるFRPの解析では異方性材料を用いた線形弾性解析が一般的であるが、実際のFRP構造物は非弾性挙動を示すため、材料の損傷に伴う非弾性挙動を表現可能な損傷進展解析が近年注目されている。損傷進展解析では、要素毎に応力やひずみに基づいた破壊の判定を行い、要素の剛性を低下させることにより非弾性挙動を表現する。しかし、要素の剛性を急激に低下させると収束性が悪くなるや耐荷力を過少に判定してしまうといった問題が生じる。

これらの問題を解決する方法として、材料強度に達した後の応力-ひずみ関係を図-1 に示すような漸減型にすることが挙げられ、このとき繊維やマトリックス樹脂の限界エネルギー解放率が用いられる。Camanho ら<sup>1)</sup>は限界エネルギー解放率を用いて非線形の応力-ひずみ関係を定義した損傷進展解析モデルを用いることで、ボルト接合部の破壊形式や耐荷力を精度良く評価できるとしている。ボルト接合部の破壊形式の中で引張破壊と支圧破壊の評価に影響を及ぼす繊維方向の引張と圧縮の限界エネルギー解放率を求める標準的な方法は存在しないため、Camanho ら<sup>1)</sup>は、Pinho ら<sup>2)</sup>のコンパクト・テンシ

ョン試験 (CT 試験) とコンパクト・コンプレッション試験 (CC 試験) によってこれらを求めた。

本研究では、ハンドレイアップ成形された GFRP のボルト接合部の耐荷力評価を損傷進展解析を用いて行うことを最終目標としている。そこで、損傷進展解析に用いる繊維方向の引張と圧縮の限界エネルギー解放率を得ることを目的として、Pinho ら<sup>2)</sup>の試験方法に従い、GFRP の CT 試験と CC 試験を実施した。

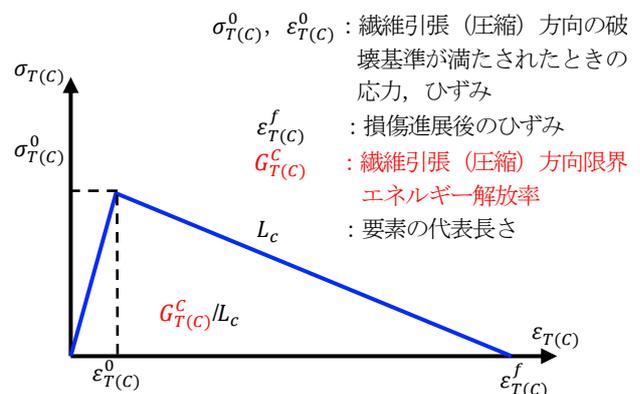


図-1 繊維方向の応力-ひずみ関係の例

## 2. CT・CC 試験概要

### (1) 材料

本研究では図-2 に示すような板厚 12mm のハンドレイアップ成形された GFRP 板を用いる。強化繊維には 0 度と 90 度に同量のガラス繊維が配向されたロービングクロス材を、マトリックス樹脂には不飽和ポリエステルを使用している。

この GFRP 板の材料特性を得ることを目的として引張試験、面内圧縮試験、面外圧縮試験、面内せん断試験、層間せん断試験の 5 種の材料試験を行った。それぞれの試験により、材料強度、弾性係数、ポアソン比を求める。

5 種類の材料試験は表-1 に示す通り、JIS もしくは ASTM に規定される試験方法に基づき、いずれの試験も原則 5 体の試験体を準備した。

材料試験から得られた弾性係数、ポアソン比、材料強度の結果を表-1 と表-2 に示す。これらは 5 体以上の平均値である。

### (2) 試験体

CT・CC 試験では図-3 で示される試験体を用いる。



図-2 ハンドレイアップ成型された GFRP 板

表-1 材料試験の概要と結果

試験条件		強度(MPa)		弾性係数(GPa)	
試験	試験方向(°)	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
引張 (JIS K7164)	0	353	14.8	26.2	0.209
	90	335	6.51	25.1	0.424
面内圧縮 (JIS K7018)	0	267	17.9	26.1	1.876
	90	288	6.29	26.2	0.822
面外圧縮 (JIS K7181)	板厚方向	339	15.1	13.2	0.62
面内せん断 (ASTM D7087)	0	75.2	2.39	3.91	0.44
層間せん断 (JIS K7057)	0	34.3	0.42	4.44	0.19
	90	34	0.88	4.64	0.36

表-2 ポアソン比の結果

$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
0.14	0.38	0.41

第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム CT・CC 試験体の寸法は Ortega ら<sup>3)</sup>の試験体寸法に従って決定した。CT・CC 試験体の初期き裂はそれぞれ幅 0.6mm, 1.5mm のダイヤモンドソーを用いて入れた。

### (3) 試験方法

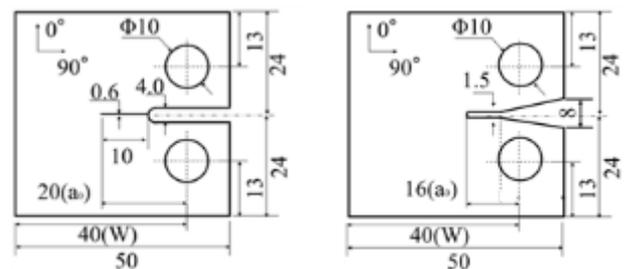
CT・CC 試験では載荷試験によって荷重-変位関係と試験中のき裂および圧縮損傷の進展を記録し、載荷試験後は画像相関法と有限要素方解析を用いたデータ整理を行い、限界エネルギー解放率を導出した。

#### a) 載荷試験

載荷試験では試験体を図-4 に示すように、MTS 材料試験機に設置し、毎分 0.5mm の速度で CT 試験では引張変位を、CC 試験では圧縮変位を与える。試験では載荷時の変位と荷重を記録する。変位計を試験体側面に設置し測定した。また、き裂および圧縮損傷の進展を記録するため、デジタルカメラを用いて試験体正面の動画撮影を行う。

#### b) 画像相関法によるき裂の特定

き裂・圧縮損傷の進展箇所では試験体表面でひずみが増大するため、本研究では、き裂・圧縮損傷の進展長さの特定は画像相関法を用いて行った。画像相関法ではデジタルカメラ等で撮影した画像・動画を数値解析するこ



(a) CT 試験体

(b) CC 試験体

図-3 試験体寸法



図-4 載荷試験の様子

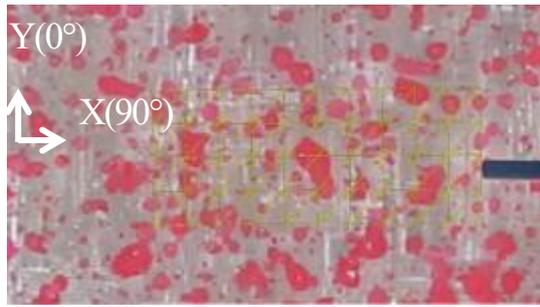


図-5 試験体表面のメッシュ

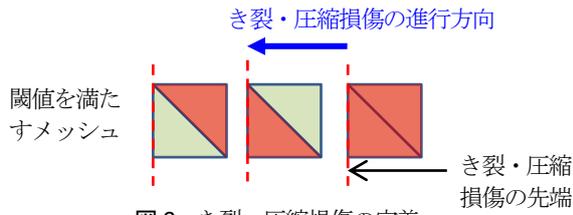


図-6 き裂・圧縮損傷の定義

とにより試験体表面の変位やひずみを測定することができる。用いたソフトウェアは DIPP-Motion V/2D ver1.131 である。

DIPP-Motion V/2D では、試験体表面を図-5 に示すように直角三角形の要素に分割し、画像相関法により求めた要素の各節点の変位から要素内部のひずみを計算する。各節点の変位はあらかじめ記憶した試験体表面の模様を追尾することにより計測されるため、図-5 に示すように試験体表面にペイントスプレーでまだら模様を付けた。

計算された各要素の内部のひずみは一様であるため、ひずみが増大し、き裂・圧縮損傷判定の閾値を超えた場合、要素の内部において最もき裂・圧縮損傷進展長さが長くなる位置までき裂・圧縮損傷が進展したと定義した。したがって、き裂・圧縮損傷の先端は図-6 に示されるように定義される。き裂・圧縮損傷判定の閾値は、CT 試験においては 0°方向のひずみが 20%以上、CC 試験においては-20%以下とした。

c) 限界エネルギー解放率

試験で得られたき裂・圧縮損傷長さや荷重の関係から限界エネルギー解放率を求めるため、有限要素法解析を用いたデータ整理を行った。解析ソフトウェアは Abaqus ver.6.14 (SIMULIA, 2014)を使用した。

使用した解析モデルを図-7 に示す。対称性を利用し CT 試験体の 1/2 のみモデル化した。ノッチの形状がき裂先端部の破壊エネルギー導出の際に与える影響は小さいため、ノッチの形状はモデル化していない。材料特性は表-1 と表-2 の材料試験の結果を利用した。材料方向は y 軸方向と繊維 0 度の向きが一致するようにする。要素には S8R5 (8 節点, 曲面薄肉シェル, 低減積分, 節点あたり 5 自由度) を使用した。要素のサイズは 0.5mm で

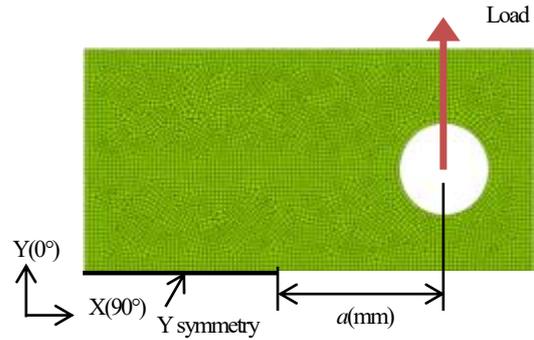


図-7 CT 試験有限要素解析モデル

ある。境界条件は、xy 平面に対し対称条件を与え、載荷部分に y 軸方向正の向きの単位荷重を加えた。相互作用としてき裂先端を定義し、仮想き裂進展方向を x 軸方向の負の向きとした。

き裂先端に J 積分を実施することで単位荷重・幅あたりの限界エネルギー解放率を得ることができる。単位荷重・幅あたりの限界エネルギー解放率  $f(a)$  と引張方向および圧縮方向の限界エネルギー解放率  $G_{T(C)}^C$  の関係は以下で表される。

$$G_T^C = \left(\frac{P(a)}{B}\right)^2 f(a) \quad (1)$$

ここで  $P(a)$  はき裂長さが  $a$  のときの荷重、 $B$  は板厚である。表-3 に  $a$  各における  $f(a)$  の解析値を示す。本研究で

表-3  $f(a)$  の解析値

$a$ (mm)	16	17	18	19
$f(a)$ (mm/N)	7.04E-05	7.90E-05	8.91E-05	1.01E-04
$a$ (mm)	20	21	22	23
$f(a)$ (mm/N)	1.16E-04	1.34E-04	1.57E-04	1.85E-04
$a$ (mm)	24	25	26	27
$f(a)$ (mm/N)	2.22E-04	2.69E-4	3.32E-4	4.17E-4
$a$ (mm)	28	29	30	31
$f(a)$ (mm/N)	5.35E-4	7.03E-4	9.49E-4	1.32E-3
$a$ (mm)	32	33	34	
$f(a)$ (mm/N)	1.92E-3	2.91E-3	4.71E-3	

表-4 近似式の係数  $c_i$

$a$ (mm)	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$16 \leq a < 20$	7.16E-8	-2.85E-8	4.43E-5	2.00E-4
$20 \leq a < 25$	2.86E-6	-1.94E-4	4.42E-3	-3.34E-2
$25 \leq a < 30$	3.06E-6	-2.30E-4	5.83E-3	-4.95E-2
$30 \leq a < 35$	8.23E-5	-7.70E-3	2.39E-1	-2.48

表-5 限界エネルギー解放率

	平均値(N/mm)	標準偏差(N/mm)
$G_T^C (=G_T^C _{\Delta a=0})$	43.3	4.42
$G_C^C (=G_C^C _{\Delta a=0})$	34.0	2.41

は $a$ について連続的な $f(a)$ を得るため、表-3の結果を3次式で近似した式(2)を用いる。近似式の各係数は表-4に示す。

$$f(a) = c_1 a^3 + c_2 a^2 + c_3 a + c_4 \quad (2)$$

### 3. CT・CC 試験結果

CT・CC 試験で得られた繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ および繊維圧縮方向の限界エネルギー解放率 $G_C^C$ を表-5に示す。式(1)より、 $G_T^C$ 、 $G_C^C$ はき裂長さおよび圧縮損傷進展長さ $a$ に関する関数となるため複数の値が得られるが、き裂進展開始時または圧縮損傷進展開始時( $\Delta a = 0$ )の値 $G_T^C|_{\Delta a=0}$ を $G_T^C$ 、 $G_C^C|_{\Delta a=0}$ を $G_C^C$ とした(Pinhoら, 2006)。ここで、 $\Delta a$ はき裂および圧縮損傷の進展長さであり、 $a = a_0 + \Delta a$ である。

#### (1) CT 試験結果

CT 試験で得られた荷重-変位関係の一例(T06)を図-8に、き裂進展長さ-限界エネルギー解放率関係を図-9に示す。また、荷重-変位曲線上の点(赤の四角)はき裂の進展が確認されたデータを示している。図-8において、点A、B、Cは、それぞれ、き裂進展開始時、限界エネルギー解放率 $G_T^C$ が初めて極大値となった時( $\Delta a = \Delta a_p$ )、 $G_T^C$ が極大値となった直後のき裂進展時( $\Delta a = \Delta a_q$ )の荷重と変位の関係を示している。また、最大荷重の平均値は7.71kNであり、最大荷重以降ではき裂の進展とともに荷重は徐々に低下した。試験体T06の点A、B、Cにおけるき裂先端の様子は図-10~図-12に示す。

##### a) き裂進展開始前の剛性の低下

図-8より、き裂の進展が開始するまでに、荷重-変位関係には非線形性が現れ、剛性の低下が見られた。試験体T06の場合、荷重が最大荷重の80%であるときき裂進展開始時の間の割線剛性は、荷重が最大荷重の20%時と40%時の間の割線剛性に対して、42.7%低下した。き裂の進展が開始するまでの剛性の低下は、マトリックス樹脂の塑性化によるものであると考えられる<sup>4)</sup>

##### b) き裂進展の開始

き裂進展の開始は、荷重が最大荷重に達する前後で確認された。き裂進展開始時の荷重は5体の平均で7.33kNであった。き裂進展開始時の引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C|_{a=a_0}$ の平均値は43.3kN/mm、標準偏差は4.22kN/mmであった。

##### c) き裂進展開始後の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ の増加

図-9において、き裂進展の開始時からき裂進展長さが $\Delta a = \Delta a_p$ なる点まで繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ はき裂の進展とともに増加した。 $\Delta a_p$ の平均値は1.8mmであった。図-11に見られるようにき裂が進展

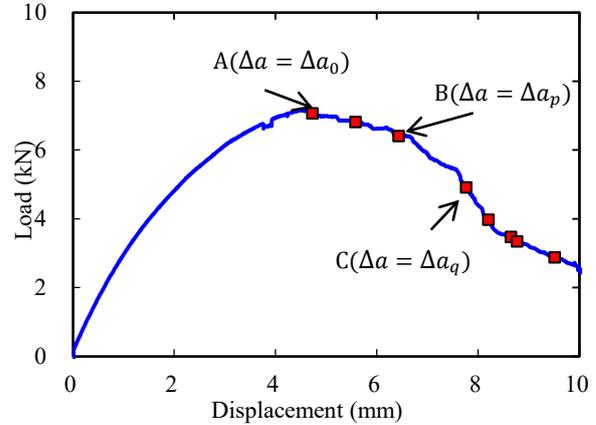


図-8 荷重-変位関係(T06)

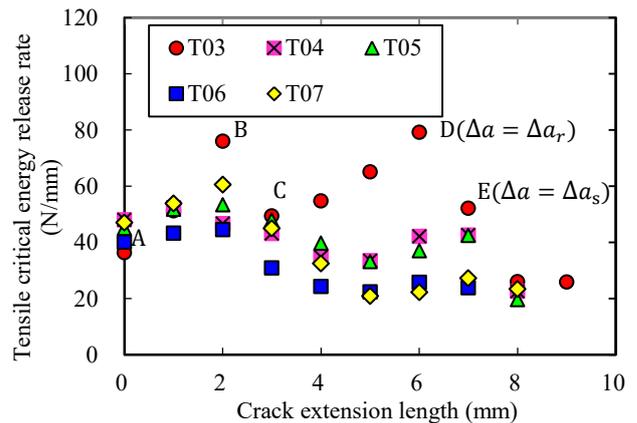
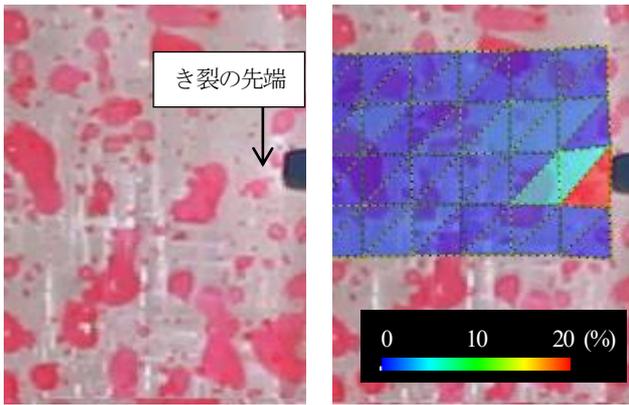


図-9 き裂進展長さ-限界エネルギー解放率関係

した領域においても繊維は完全に切断されていないため、その領域でさらに荷重が受け持たれることにより、式(1)における $P(a)$ が大きくなり、 $G_T^C$ も増加したと考えられる。

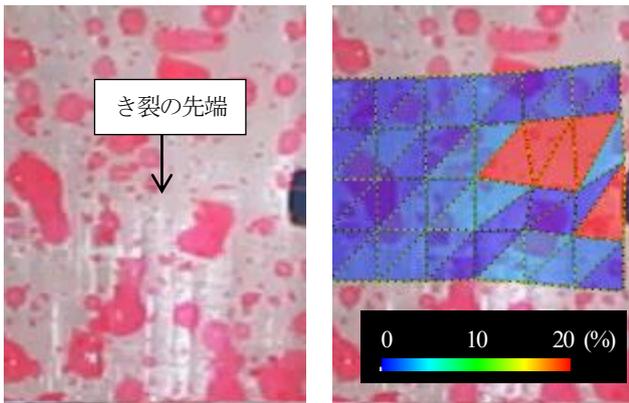
##### d) 限界エネルギー解放率 $G_T^C$ の減少

図-9において、限界エネルギー解放率 $G_T^C$ はCにおいてき裂進展が開始してから初めて減少し、その後、き裂進展長さの増加とともに、 $G_T^C$ はき裂進展開始時の値 $G_T^C|_{\Delta a=0}$ を下回る値まで低下した。ここで、点A、B、Cにおける試験体T06の表面の様子は図-13~図-15に示す。図-14と図-15より点Bに比べ点Cの方がき裂の先端周辺や試験体端部で損傷(白っぽく見える部分)が大きくなっている。また、図-8においては点Bと点Cの間で荷重が大きく減少している。したがって、試験体の損傷が進展することにより、式(1)における $P(a)$ が小さくなっ



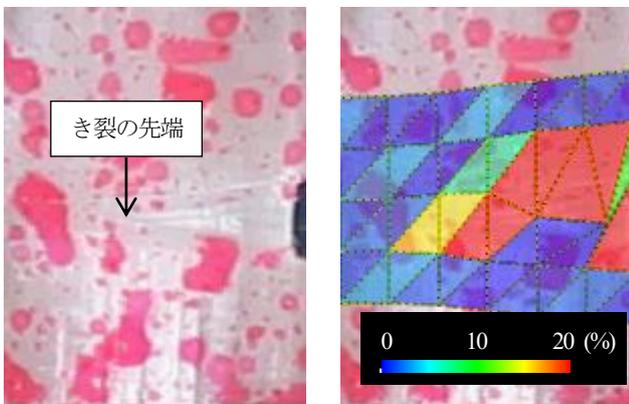
(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-10 A( $\Delta a = 0$ )におけるき裂先端の様子(T06)



(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-11 B( $\Delta a = \Delta a_p$ )におけるき裂先端の様子(T06)



(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

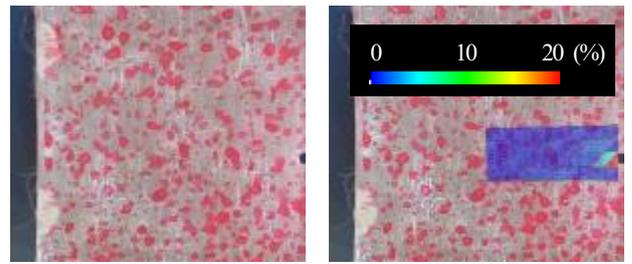
図-12 C( $\Delta a = \Delta a_q$ )におけるき裂先端の様子(T06)

たことで、 $G_T^c$ が減少したことがわかる。

e) 試験体 T03 について

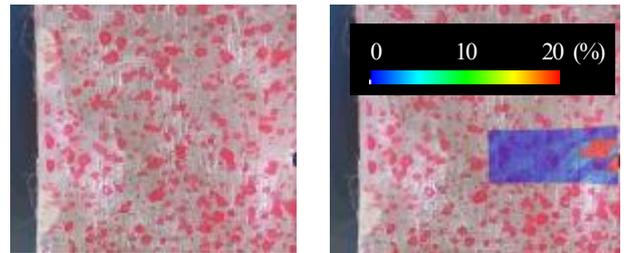
図-9 において、T03 の限界エネルギー解放率 $G_T^c$ は点 C で大きく減少したが、き裂進展長さの増加とともに再び $G_T^c$ は増加した。その後、点 D( $\Delta a = \Delta a_r$ )で最大値となった後、点 E( $\Delta a = \Delta a_s$ )で再び減少した。ここで、点 C、D、E における試験体表面の様子を図-16～図-18 に示す。

図-16 と図-17 より、点 C と点 D ではき裂先端の周辺でのみ損傷が大きくなっており、他の試験体に見られる



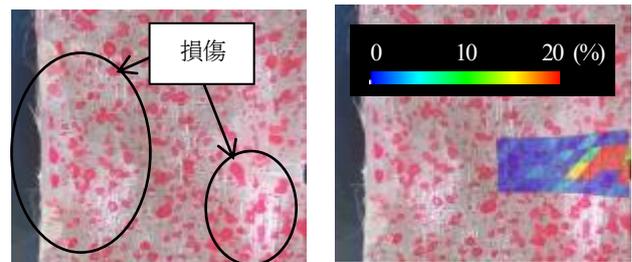
(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-13 A( $\Delta a = 0$ )における試験体表面の様子(T06)



(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-14 B( $\Delta a = \Delta a_p$ )における試験体表面の様子(T06)



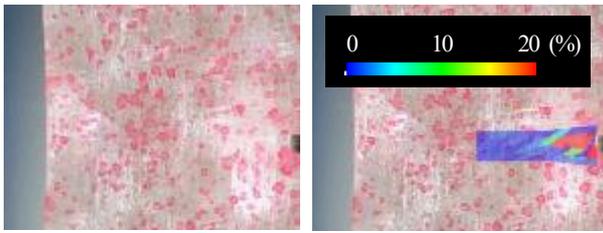
(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-15 C( $\Delta a = \Delta a_q$ )における試験体表面の様子(T06)

ような試験体端部での大きな損傷は見られなかったが、E では試験体端部でも大きな損傷が見られた。したがって、T03 は損傷により点 C において一度 $G_T^c$ が減少したが、損傷の程度が他の試験体に比べて小さかったため、点 C と点 D の間の区間では、損傷の進展が $G_T^c$ に与える影響を、繊維が完全に切断されていない領域で荷重が受け持たれることによる影響が上回り、再び $G_T^c$ が大きく増加したと考えられる。また、点 E では他の試験体と同様に試験体端部で損傷が進展したことにより、 $G_T^c$ は再び大きく減少したと考えられる。

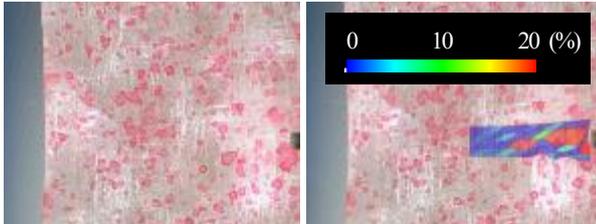
f) 限界エネルギー解放率 $G_T^c$ の決定について

本研究では、繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^c$ はき裂進展開始時の値 $G_T^c|_{\Delta a=0}$ と、き裂進展開始時より後の値 $G_T^c|_{\Delta a>0}$ を同定した。ここで、 $G_T^c|_{\Delta a>0}$ については繊維が完全に切断されていない領域の影響やき裂先端部周辺や試験体端部の損傷の影響が大きいいため $G_T^c$ として適当な値とはいえない。本研究では、得られた値のうち、Pinho ら<sup>2)</sup>と同様に、 $G_T^c$ として $G_T^c|_{\Delta a=0}$ を採用す



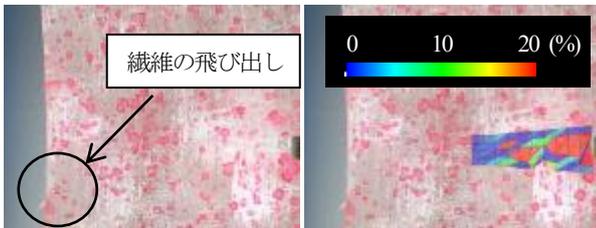
(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-16 C ( $a = a_q$ )における試験体表面の様子(T03)



(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-17 D ( $a = a_r$ )における試験体表面の様子(T03)



(a) ひずみ $\epsilon_y$ の表示なし (b) ひずみ $\epsilon_y$ の表示あり

図-18 E ( $a = a_s$ )における試験体表面の様子(T03)

表-6 文献4)との比較

	本研究	Rokbi らの研究
$G_T^C$ (N/mm)	43.3	37.7

る。

#### g) Rokbi ら<sup>4)</sup>の研究との比較

本研究と Rokbi ら<sup>4)</sup>の研究で得られた繊維引張方向の限界エネルギー解放率  $G_T^C$  を表-6 に示す。Rokbi ら<sup>4)</sup>は 0 度方向 (載荷方向) と 90 度方向に同量の繊維が配向され、0 度方向引張強度が 442MPa の GFRP 板を用いて CT 試験を実施し、 $G_T^C$  を得た。表-6 からわかるように、本研究と Rokbi ら<sup>4)</sup>の研究で得られた  $G_T^C$  は大きく変わらなかった。引張強度が同程度で、繊維構成も同じであることが、 $G_T^C$  は同程度の値になった理由であると推定される。

#### (2) CC 試験

CC 試験で得られた荷重-変位関係の一例 (C04) を図-19 に、限界エネルギー解放率-圧縮損傷進展長さ関係

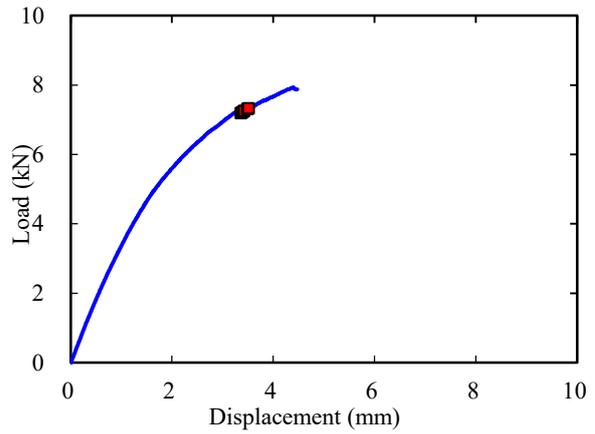


図-19 荷重-変位関係(C04)

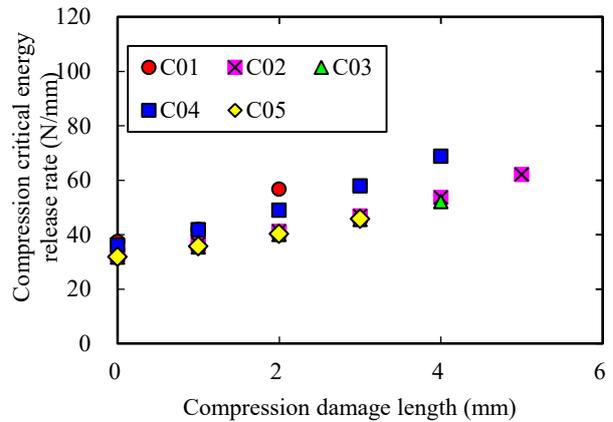


図-20 限界エネルギー解放率-圧縮損傷進展長さ関係

を図-20 に示す。また、荷重-変位曲線上の点 (赤の四角) は圧縮損傷の進展が確認されたデータを示している。CC 試験では、圧縮損傷開始後も荷重が増加し、最大荷重に達する前に初期き裂導入箇所の上下間で接触を生じたため、試験を終了した。

#### a) 圧縮損傷進展開始前の剛性の低下

図-19 より、圧縮損傷の進展が開始するまでに、荷重-変位関係に非線形性が現れ、剛性の低下が見られた。圧縮損傷の進展開始時荷重の 90% である点と圧縮損傷の進展開始点の間の割線剛性は、圧縮損傷の進展開始時荷重の 20% である点と 40% である点の間の割線剛性に対して、69.6% 低下している。圧縮損傷の進展開始時までに剛性が低下している理由は、CT 試験の場合と同様にマトリックス樹脂の塑性化が原因であると考えられる。

#### b) 圧縮損傷の進展開始

図-21 に圧縮損傷が開始したときの損傷の様子を示す。圧縮損傷開始時の荷重は試験体 5 体の平均で 8.04kN であった。また、圧縮損傷進展開始時の限界エネルギー解放率  $G_T^C|_{\Delta a=0}$  の平均値は 34.0kN/mm であり、標準偏差は 2.41kN/mm であった。

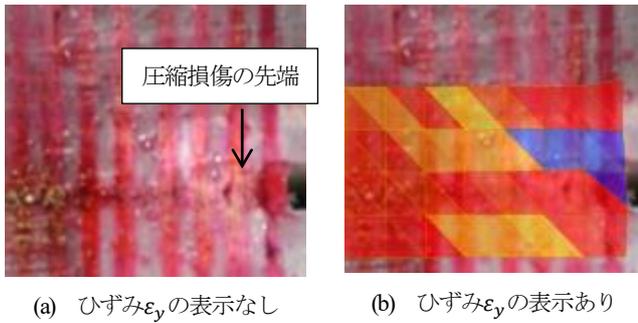


図-21 圧縮損傷進展開始時の様子(C04)

表-7 文献2)との比較

	圧縮方向の限界エネルギー解放率 $G_C^C$ (N/mm)	引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ (N/mm)
本研究	34.0	43.3
Pinho らの研究	79.9	91.6

c) 限界エネルギー解放率の増加

圧縮損傷の進展開始時以降、 $G_C^C$ は圧縮損傷の進展とともに増加した。圧縮損傷を生じた領域においても、荷重を受け持つため、式(1)における $P(a)$ が大きくなることから、 $G_C^C$ が増加する原因である。

d) 限界エネルギー解放率 $G_C^C$ の決定

本研究では、繊維圧縮方向の限界エネルギー解放率 $G_C^C$ として圧縮損傷開始時の値 $G_C^C|_{\Delta a=0}$ 、増加時の値 $G_C^C|_{\Delta a>0}$ を同定した。 $G_C^C|_{\Delta a>0}$ は圧縮損傷が進展した領域で荷重がさらに受け持たれる影響を含む。したがって、本研究では、Pinho ら<sup>2)</sup>の研究と同様に、圧縮損傷が進展した領域の影響を含まない $G_C^C|_{\Delta a=0}$ を $G_C^C$ として採用した<sup>2)</sup>。

e) Pinho ら<sup>2)</sup>の研究との比較

本研究と Pinho ら<sup>2)</sup>の研究で得られた繊維圧縮方向の限界エネルギー解放率 $G_C^C$ と繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ を表-7に示す。Pinho ら<sup>2)</sup>の研究では、GFRP 板ではなく、積層構成が $(0^\circ/90^\circ)_{8S}$ の CFRP 板を使用している。CFRP 板の0度方向の引張強度は2120MPa、圧縮強度は1450MPaであり、圧縮強度が引張強度より約30%低い。

本研究の限界エネルギー開放率は、Pinho ら<sup>2)</sup>の $G_C^C$ と $G_T^C$ より小さな値となっているが、これは、使用した GFRP 板の材料強度が CFRP 板より小さいことが原因であると考えられる。また、本研究で得られた $G_C^C$ は $G_T^C$ より21%小さくなっているが、本研究で使用した GFRP 板の圧縮強度が引張強度より約20%小さいことが原因であると考えられる。したがって、圧縮強度が引張強度より低い GFRP や CFRP を用いた場合、 $G_C^C$ は $G_T^C$ より小さくなることが明らかとなった。

4. 結論

本研究では、損傷進展解析に用いる繊維方向の引張と圧縮の限界エネルギー解放率を得ることを目的として、GFRP 板の CT 試験と CC 試験を実施した。その結果から、以下のような結論が得られた。

- (1) 本研究で使用した GFRP 板について、CT 試験で得られた繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ の平均値は 43.3N/mm であった。また、CC 試験で得られた繊維圧縮方向の限界エネルギー解放率 $G_C^C$ の平均値は 34.0N/mm であった。
- (2) 繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ は、き裂進展開始時以降で増加した。これは、き裂が進展した領域においても繊維が完全に切断されおらず、き裂進展領域でさらに荷重が受け持たれたためであると考えられる。
- (3) 繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ は、き裂進展開始時以降で増加した後に、最大値をとり、その後減少した。これは、き裂の先端周辺や試験体端部等で損傷が進展し、荷重が減少したためである。
- (4) 繊維圧縮方向の限界エネルギー解放率 $G_C^C$ は、圧縮損傷の進展開始時以降で増加した。これは、圧縮損傷を生じた領域でも、さらに荷重を受け持つことができるためであると考えられる。
- (5) 圧縮強度が引張強度より小さい GFRP を用いたため、繊維圧縮方向の限界エネルギー解放率 $G_C^C$ は、繊維引張方向の限界エネルギー解放率 $G_T^C$ より小さな値となった。

参考文献

- 1) Camanho, P. P. and Koerber, H. : Simlation of Progressive Damage in Bolted Composite Joints, in 13<sup>th</sup> European Conference on Composite Material, 2008.
- 2) Pinho, P. T. Robinson, P. and Iannucci, L. : Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes in laminated composites, *Composites Science and Technology*, Vol.66, pp. 2069–2079, 2006.
- 3) Ortega, A. Maimi, P. Gonzalez, E.V. Sainz de Aja, J. R. de la Escalera, F. M. and Cruz, P. :Translaminar fracture toughness of interply hybrid laminates under tensile and compressive loads, *Composites Science and Technology*, Vol. 3, pp. 1-12, 2017.
- 4) Rokbi, M. Osmani, H. Benseddqi, N and Lmad, A. : On experimental investigation of failure process of woven-fabric composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 71, pp. 1375-1384, 2011.

EXPERIMENTAL STUDY ON CRITICAL ENERGY RELEASE RATE OF  
TENSILE AND COMPRESSIVE FAILURE MODES IN FIBER DIRECTION OF  
GFRP

Yuto KITAMURA and Yasuo KITANE

Progressive damage analysis is one of the ways which can consider the nonlinear behavior of FRP composite materials. In the progressive damage analysis, the critical energy release rate is used to define the stress-strain relation after the initiation of damage. In this study, compact tension test (CT test) and compact compression test (CC test) were carried out to obtain the critical energy release rate of tensile and compressive failure modes in fiber direction of GFRP. To identify the crack length during the CT and CC tests, the digital image correlation method was used. From this study, it was shown that the critical energy release rate in tension is almost the same as the value obtained in the past research for a similar material, and that the critical energy release rate in tension exceeds the critical energy release rate in compression.