短繊維CFRPの切り欠き強度と破壊靭性

システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻　阿部　嵩大
システム情報系 構造エネルギー工学域　河井　昌道

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP）はプラスチックを炭素繊維で強化した複合材料であり、炭素繊維に由来する高強度・高剛性とプラスチックに由来する軽量性・耐食性などの利点を併せ持つ優れた材料である。連続繊維を用いたCFRPは、比剛性と比強度の高さから、航空宇宙分野で広く利用されている。一方、長さ数mm程度のカーボン短繊維と熱可塑性プラスチックを用いた短繊維強化CFRPは、射出成形によって自由度の高い形状設計が可能となり、熱硬化性樹脂を用いたCFRPに比べて短時間かつ低コストで成形することも可能となる。これらの特徴から、高い生産性が求められる自動車分野での利用拡大が進んでいる。

射出成形された短繊維強化CFRPの繊維配向には射出時の流れ方向の影響を受けて偏りが生じる。このため、成形された短繊維強化CFRPは異方性を示す。射出成形カーボン短繊維強化複合材料の特性を評価する上でこの異方性を上手に処理することが重要な課題となっている。また、射出成形された短繊維強化CFRPを実構造物に適用するためには、脆性破壊に対する強さ、すなわちき裂成長に対する抵抗（破壊靭性）、を評価することも重要な要件となる。

本研究では、短繊維強化射出成形CFRPの破壊靭性とその方位依存性を明らかにすることを目的とする。このため、試験片中央にスリットを設けた射出成形短繊維強化CFRP（以下、中央スリット材）の切り欠き強度とその方位依存性を明らかにする。さらに、破壊靭性値を同定する。具体的には、異なる長さのスリットを試験片中央に設けた切り欠き試験片を用いて静的引張試験を行い、引張強度のスリットサイズ依存性を定量化し、射出成形短繊維強化CFRPの切り欠き感度を同定する。また、種々の強度モデル（切り欠き感度モデル、Average Stressモデル、Point Stressモデル、Linear Elastic Fracture Mechanicsモデル、Camanhoモデル）を利用して試験材料の切り欠き強度の予測と破壊靭性値の評価を試みた。

2. 試験片および試験方法

2.1試験片

供試材はカーボン短繊維強化ナイロン複合材料であり、カーボン短繊維とナイロン6を用いたペレットを鋳型に溶融射出して成形された材料である。本研究では、繊維配向の違いが機械的特性に与える影響を調査するために、射出成形板から射出方向に対してθ＝0°，45°，90°の方位に3種類の試験片を切り出した。以下ではそれぞれ0°材、45°材、および90°材と呼ぶ。これら3種類の試験片の中央に相対切り欠き寸法0.2および0.4のスリットを機械加工によって設けた。試験片のスリット機械加工は筑波大学研究基盤総合センター工作部門に依頼した。

2.2試験方法

油圧サーボ材料試験機を用いて静的引張試験を行った。引張りによる公称ひずみ速度が1 %/minとなるように変位を制御し、試験片が破断するまで負荷した。試験は室温（23℃）で行った。

3. 静的引張試験の結果および考察

3.1破断強度

Fig.1、Fig.2およびFig.3に、それぞれ、0°材、45°材および90°材の平滑強度（$2a/W$＝0）と切

り欠き強度（$2a/W$＝0.2, 0.4）の比較を示す。

これらの図から、切り欠き寸法の増加とともに引張強度が低下することが確認できる。これらの強度は公称強度であるから、強度低下が切り欠きによる断面減少によるものか、それとも切り欠き先端の応力集中によるものであるかはさらに調べる必要がある。

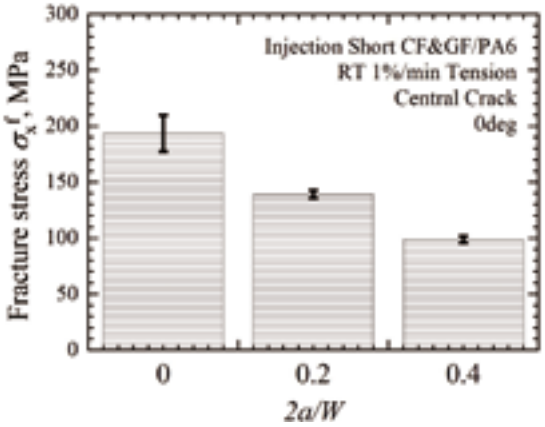


Fig.1　0 °材の平滑強度と切り欠き強度

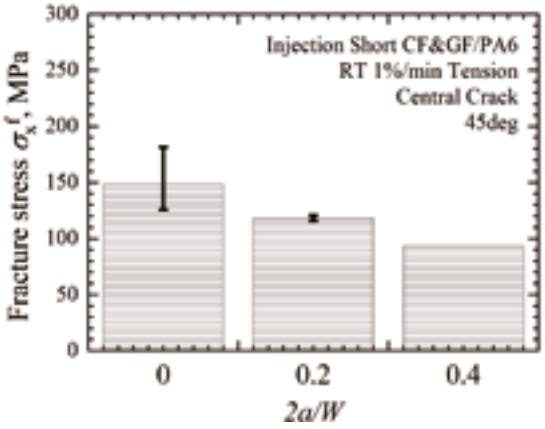


Fig.2　45°材の平滑強度と切り欠き強度

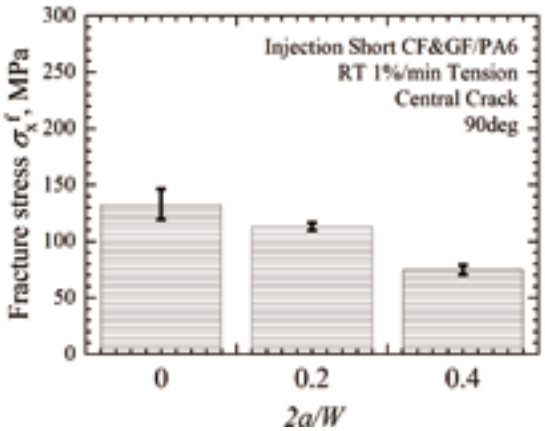


Fig.3　90°材の平滑強度と切り欠き強度

3.2切り欠き感度

0 °材、45°材、90°材の切り欠き強度を平滑強度で除して無次元化した切り欠き強度比と相対切欠寸法の関係（切り欠き感度線図）を Fig.4から Fig.6

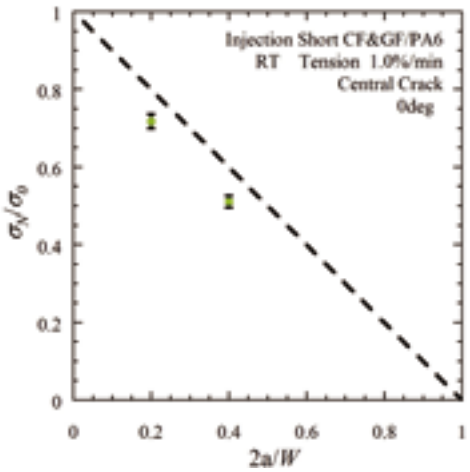


Fig.4　0 °材の切り欠き感度図

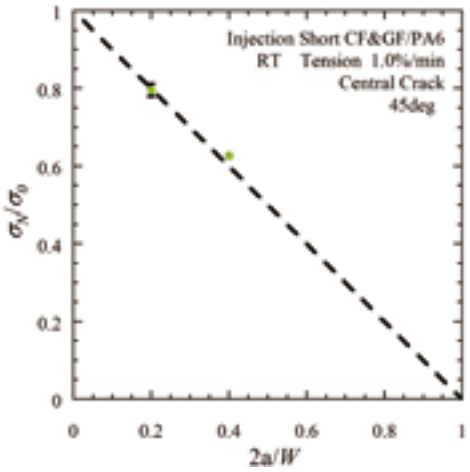


Fig.5　45°材の切り欠き感度図

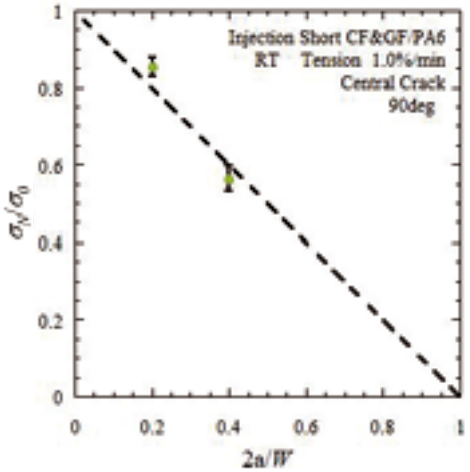


Fig.6　90°材の切り欠き感度図

に示す。

Fig.4、Fig.5およびFig.6の破線は正味断面強度レベルを表している。データ点がこの破線上に分布する場合は切り欠き強度低下が断面減少のみに起因することを表し、それよりも下に分布する場合は切り欠き先端の応力集中の影響を受けて切り欠き感度を呈することを表す。0°材はわずかに切り欠き感度を示したが、45°材と90°材は切り欠き不敏感であった。

3.3破壊靭性値およびその方位依存性

切り欠き感度モデル（NS）、Average Stress（AS）モデルおよびPoint Stress（PS）モデルを用いて評価した破壊靭性値を0°材、45°材、90°材についてそれぞれFig.7からFig.9に示す。90°材については切り欠き不敏感となったため、切り欠き感度モデルを用いて破壊靭性値を算出することができなかった。得られた破壊靭性値を比較すると、切り欠き感度モデルを用いて評価した破壊靭性値がAverage Stressモデルおよび Point Stressモデルを用いて評価した値よりも大きくなった。この特徴は切り欠き感度モデルがき裂成長に対する抵抗を大きめに評価することを意味しており、他の方法に比べて危険側の評価となることを示唆する。試験に用いた射出成形CFRPの破壊靭性の方位依存性は、いずれのモデルによっても明瞭には予測されなかった。

3.4切り欠き強度予測

中央スリット材の切り欠き強度をFinite Fracture Mechanicsモデルを用いて予測した。その結果をFig.10～Fig.12に示す。Finite Fracture Mechanicsモデルでは、切り欠き強度の予測に平滑強度と破壊靭性値を必要とする。このため、上述の異なる強度モデルを用いて算出された破壊靭性値をそれぞれ用いて切り欠き強度の予測を行った。

切り欠き感度モデル以外のモデルを用いて算出した破壊靭性値を仮定した場合、予測した切り欠き強度は、実験値に近いか、わずかに小さい値となっており、精度の良い、または安全側の予測が得られた。最も高い精度の切り欠き強度予測はAverage Stressモデルから算出した破壊靭性値を仮定した場合に得られた。

4. 結言

射出成形短繊維CFRPの中央スリット試験片を用いて切り欠き強度と破壊靭性を調べた。本研究によって得られた知見は以下のように要約できる。

（1）0°材、45°材、90°材は、いずれも、スリット

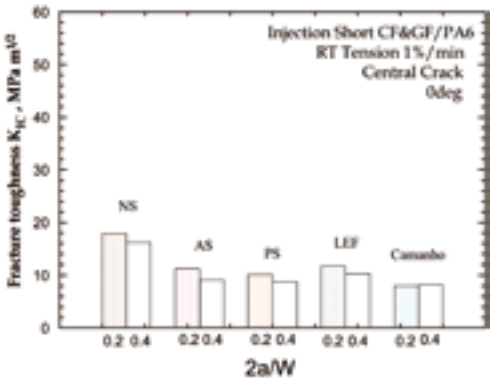


Fig.7　0°材の破壊靭性値

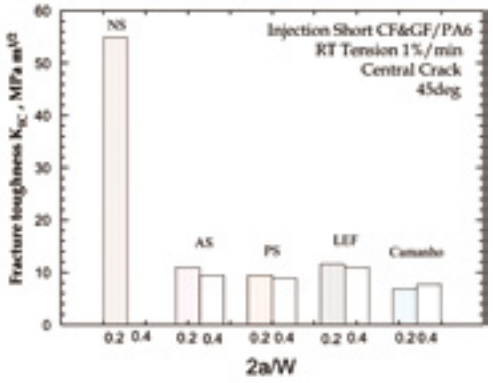


Fig.8　45°材の破壊靭性値

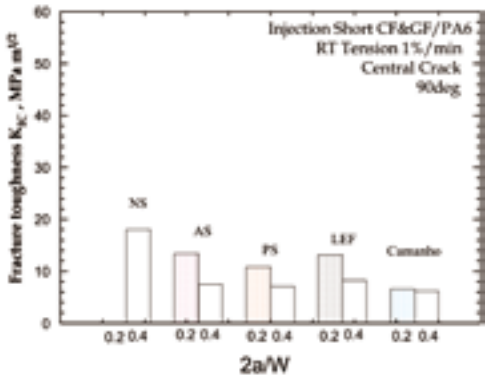


Fig.9　90°材の破壊靭性値

サイズの増大に伴い、強度が低下する。

（2）0°材は切り欠きに対して僅かに感度を示すが、45°材と90°材は切り欠きに対して不敏感となる。

（3）Average Stress モデル、Point Stress モデル、Linear Elastic Fracture Mechanics モデル、および Camanho モデルを用いて評価した破壊靭性は、いずれのモデルを用いた場合においても、前後の値を示した。破壊靭性の方位依存性はいずれのモデルを用いた場合においても明瞭には確認されなかった。切り欠き感度モデルを用いて評価した破壊靭性値は、その他の強度モデルを用いて評価した値よりも大きくなる傾向がある。

（4）切り欠き感度モデル以外の強度モデルを利用して評価した破壊靭性値を Finite Fracture Mechanics モデルに代入して予測した切り欠き強度は、実験値とほぼ等しい、あるいは僅かに小さくなり、安全側の予測となることが分かった。

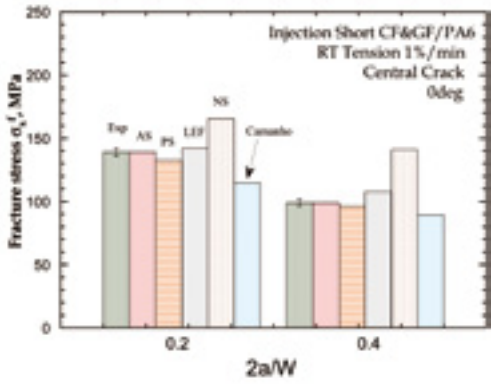


Fig.10　0°材の強度の実験値と予測値

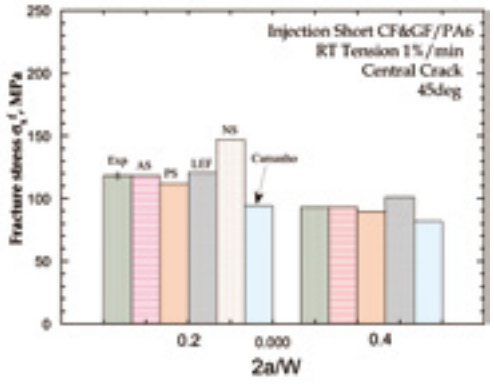


Fig.11　45°材の強度の実験値と予測値

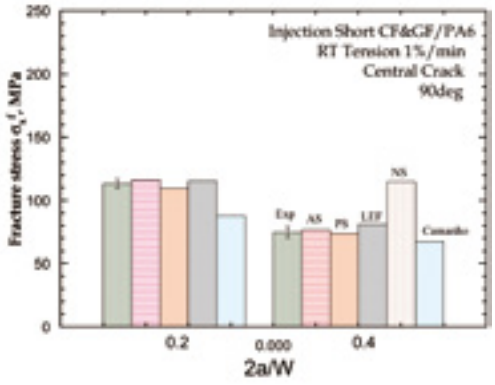


Fig.12　90°材の強度の実験値と予測値

謝辞

本研究に使用した切り欠き試験片の準備において、工作部門の皆様に多大なご協力をいただいた。CFRP に対してスリットの周囲に傷をつけないように機械加工（Fig.13）することは簡単ではない。このため外部に発注すれば時間と費用を多く要する加工となる。工作部門の皆様にこの難しい加工を迅速かつ安価に仕上げていただいたことで、研究を円滑に進めることができました。技術支援に深く御礼を申し上げます。



Fig.13　スリット加工の例（幅0.3mm）