

# CFRTP の低コスト成形加工技術の開発 (第7報)

## 3 CFRP 衝撃解析精度の向上

松永尚徳, 末村紘志

Improvement of CFRP crash analysis accuracy

MATSUNAGA Hisanori and SUEMURA Hiroshi

The adaptation of CFRP has begun in some automobile part for weight reduction, its crash and impact performance have been extensively researched and improved. One challenge is to predict the CFRP energy absorption capabilities by simulation. In this study, we have been focusing on the axial compression test of a CFRP cylinder, to make it possible to reproduce the difference in fracture and crash behavior due to the delamination effects.

キーワード: シミュレーション, 炭素繊維強化プラスチック, エネルギー吸収

### 1 結 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は, 軽くて強いことから, 軽量化に有効な素材として注目され, 自動車用部品や車体に採用される等, 普及が進んでいる。また, CFRP のエネルギー吸収性能の高さについては以前から注目されており, 例えば CFRP 車体はスチール車体の 1.89 倍となることが報告されている<sup>1)</sup>。

一方, CFRP は破壊形態が複雑であることから解析の難易度は高い。CFRP の軸圧縮を対象とした解析においては, 個々の試験条件や対象物の形状・積層構成に応じたチューニングにより実験を再現した解析事例<sup>2)</sup>が公開されている。しかし, 様々な試験条件や試験体に汎用的に予測した解析事例は公開されていない。

本研究においては, 解析に用いる CFRP 材料モデルを同定した。さらに衝撃解析の対象として4種類の積層構成で CFRP 円筒の軸圧縮実験を行い, 同一の材料モデルと解析メッシュにより, そのエネルギー吸収性能の予測を試みたことについて第6報<sup>3)</sup>として報告した。

本報告では, CFRP 材料モデルとして繊維の破壊靱性を考慮したダメージモデルを用いることで, 解析精度を向上させることができたので, その概要を研究ノートとして紹介する。

### 2 CFRP 材料モデルの同定

#### 2.1 解析ソルバーと解析手法

本研究では解析ソルバーとして, ESI の PAM-CRASH (Virtual Performance Solution 2017.0) を使用した。このソルバーには, CFRP の異方性材料モデルとして Ladevese ら<sup>4)</sup>により提言されたダメージモデルが実装

されている。このダメージモデルに Pineda ら<sup>5)</sup>によって提言された繊維の破壊靱性を考慮した破壊クライテリアを組み合わせた Waas Pineda model を用いた。

また, 一般的な CFRP 積層体の解析手法としては, Shell 要素の厚み方向に複数の積分点を構成し, それに積層構成を割り当てることで CFRP 積層体を計算する。しかし, その手法では層間剥離を伴う CFRP の複雑な破壊形態を再現できない。そこで, 本研究では, 複数枚の Shell 要素を積み重ねてそれらを Tied 要素で結合し, 適切な条件で Tied 要素を削除して層間剥離を再現するモデル化手法を試みた。

#### 2.2 弾性係数の決定

本研究では, 一方向連続繊維の CFRP プリプレグ (東レ(株)製 P3252S-12) を素材としたオートクレーブ成形品を実験と解析の対象とした。繊維方向を 1, 繊維直交方向を 2 とすると, 縦弾性係数  $E_{11}$  と  $E_{22}$ , ポアソン比  $\nu_{12}$ , せん断弾性係数  $G_{12}$  を, 引張試験 (JIS K 7165), 圧縮試験 (JIS K 7076), 面内せん断試験 (JIS K 7078) により求めた。

Waas Pineda model では, 式(1), (2)に示すように初期の縦弾性係数  $E_0$ , 初期のせん断弾性係数  $G_0$  から損傷度合いを示すダメージ  $d$  と  $d'$  に応じて弾性係数を低下させることで, 材料非線形を表現する。

$$E = E_0 (1 - d) \quad (1)$$

$$G = G_0 (1 - d') \quad (2)$$

ここでは, 簡略化のため方向を示す添字は省略している。 $d$  と  $d'$  を定義する関数は, 2種類の積層構成について負荷と除荷を繰り返す反復引張試験から同定できる<sup>6)</sup>。一例として積層構成  $[45/-45]_{45}$  の試験結果を図 1 に示す。

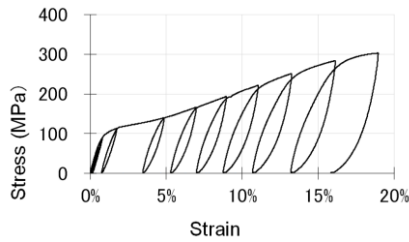


図1 反復引張試験結果 (積層構成[45/-45]<sub>4S</sub>)

### 2.3 層間剥離の考慮

層間剥離を表現するため、1枚のプリプレグを1枚のShell要素でメッシングし、Tied要素で結合した。Tied要素にはMAT303を使用し、それに設定する強度と破壊靱性および数値パラメータは、図2に示す4点曲げ試験を行い、実験と解析の比較検討により決定した。ここではJIS規格(JIS K 7074)から外れることになるが、板厚方向のせん断と層間剥離の影響を大きくするために板厚を増した試験片を使用した。

4点曲げ試験の解析モデルの模式図を図3に示す。支持台と圧子は剛体とした。なお、図中では簡略化のため4枚のShell要素で表示している。

試験結果と解析結果を比較検討し、Tied要素の破壊靱性値と数値計算上のパラメータ、及び繊維方向の圧縮強度を対象に調整を行った。また、その調整は、個々の試験条件に対して行うものではなく、全ての試験条件の解析に対して共通のパラメータを使用することとした。その具体的手法は、0度の試験片では層間剥離が試験結果と同程度の荷重で発生し、かつ45度及び90度の試験片では試験結果と同様に引張側から破壊が生じるように調整した。

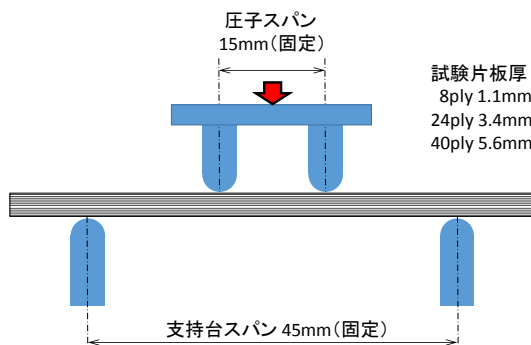


図2 4点曲げ試験

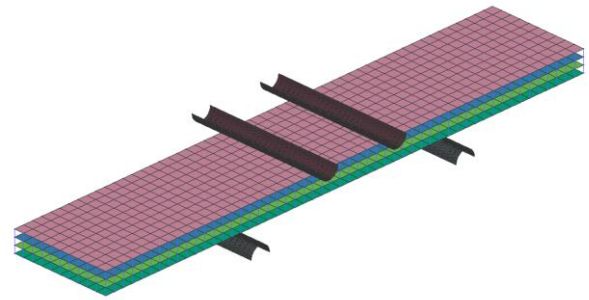
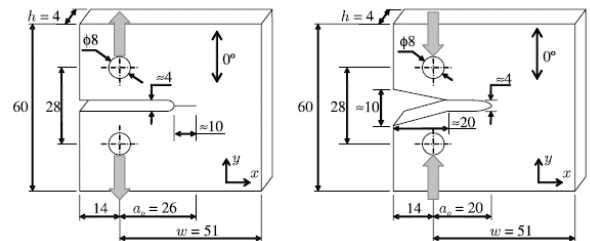


図3 4点曲げ試験 解析モデルの模式図

### 2.4 繊維の破壊靱性

Waas Pineda model に設定する繊維の破壊靱性は、Pinho らによると図4に示す予亀裂を形成した試験片を用いた Compact Tension / Compression 試験により求めることができる<sup>7)</sup>。本研究では、板厚 0.1mm のカミソリを用いて加工を試みたが、予亀裂の先端を鋭利に形成できなかった。不完全な予亀裂による試験では、せん断による割れが発生し、亀裂進展を計測できなかった。よって、解析にはPinho らにより示された値を用いた。



(a) Compact Tension (b) Compact Compression  
図4 破壊靱性を求めるための試験片

### 2.5 円筒軸圧縮に対する調整

試験体は、図5に示すCFRP円筒とした。積層構成は軸方向を0度とし、①[0/90]<sub>4S</sub>、②[45/-45]<sub>4S</sub>、③[0/45/90/-45]<sub>2S</sub>、④[0/90/0/90/0]<sub>12</sub>の4種類とした。試験体の先端部は、30度の先端角度に切削加工した。これに対して写真1に示す落錘試験機(IMATEK社製IM10T-30)により軸圧縮実験を行った。122.4kgの錘体を高さ1.58mから自由落下させ、試験台直下に設置したロードセルにより荷重を測定した。衝突時の速度は5.56m/s、付与エネルギーは1,896Jとなる。なお、測定に際して1.5kHzのローパスフィルタ処理を施した。

この試験に対して、図6(a)に示すように解析モデルを作成した。試験体の先端部拡大図を図6(b)に示す。試験体の要素サイズは1mmを基本とし、前述の4点曲げ試験と同様にShell要素を積み重ねてTied要素で結合してモデル化した。Shell要素をずらして配置すること

で、先端角度を表現した。試験体を完全拘束された剛体の試験台の上に配置し、剛体とした錘体と同様に衝突の初速 5.56m/s、質量 122.4kg を設定した。試験台に生じる反力について、実験のローパスフィルタに相当

する移動平均処理を施して計測荷重とした。また、計算時間が長大となるため衝突後 6ms で計算を終了させ、概ね 30mm までのストロークで評価した。

円筒軸圧縮の実験に対して、解析の比較検討の繰り返しにより、Tied 要素の破壊靱性値の再調整と、Shell 要素に用いた Waas Pineda model に関する強度及び数値計算上のパラメータの調整を行った。

### 3 解析結果

4 種類の積層構成について、同一の材料モデルと解析メッシュを用いて解析を行った。実験結果と解析結果の比較を図 7 から図 10 に示す。なお、各図において、(a) は実験後の試験体の写真、(b) は ZX 平面で断面表示した解析のダメージ分布図、(c) は荷重-変位曲線を示す。

いずれの積層構成においても、実験値から概ね 20% 程度の誤差範囲内で荷重を再現することができた。解析精度については、さらに材料モデルの調整を進めることで改善の余地があると考えている。

また、最外層に 0 度層が存在する積層構成において、解析では最外層の折り返しが発生し、実験とは異なる挙動となっており、改善すべき課題となっている。

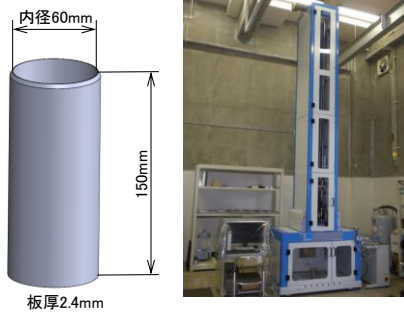


図 5 試験体形状 写真 1 落錘試験機

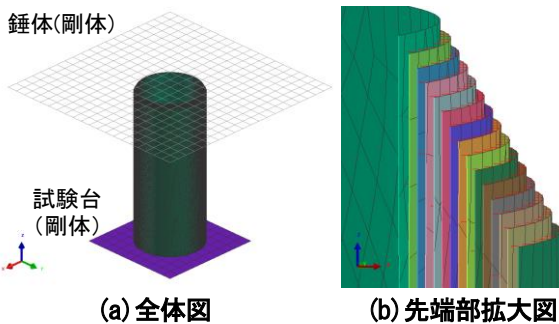


図 6 CFRP 円筒の軸圧縮 解析モデル

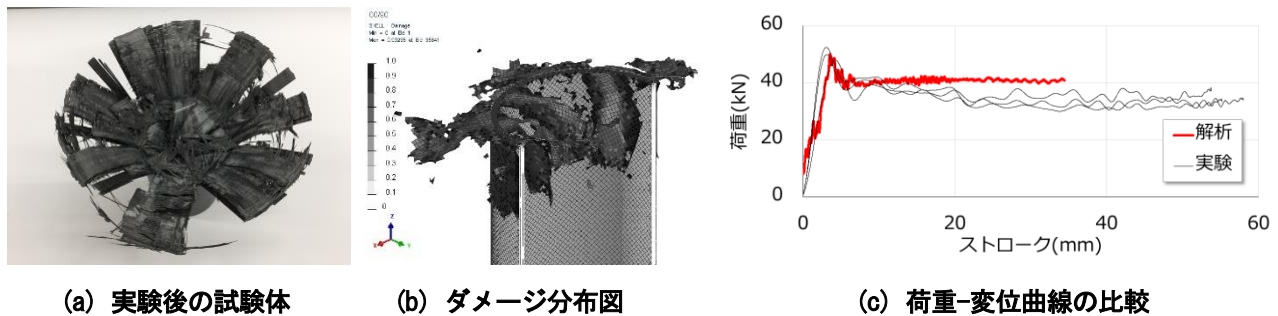


図 7 CFRP 円筒軸圧縮における実験と解析の比較 (①[0/90]<sub>4s</sub>)

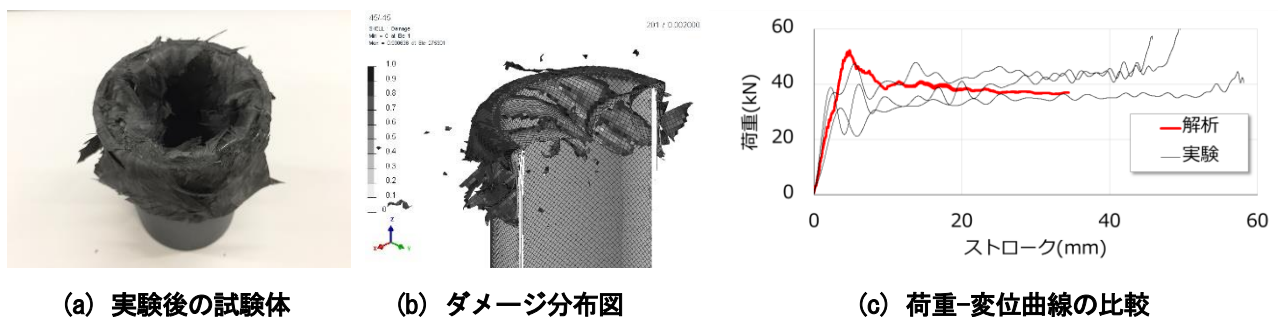
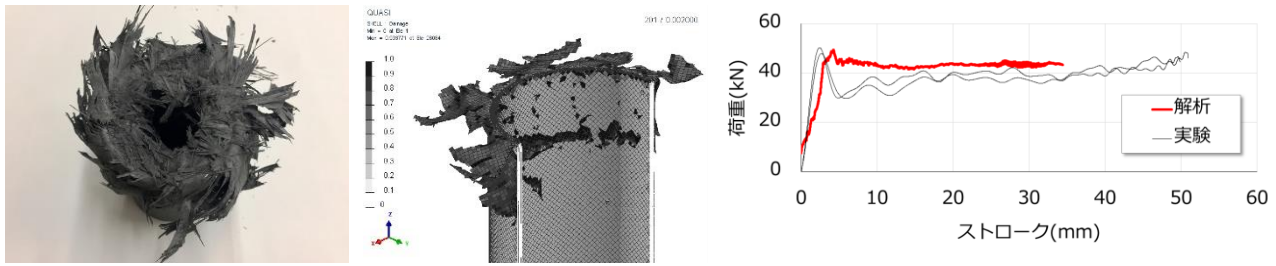
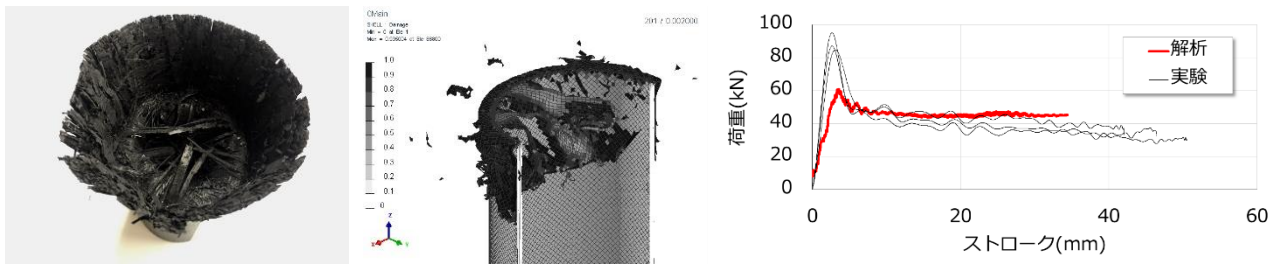


図 8 CFRP 円筒軸圧縮における実験と解析の比較 (②[45/-45]<sub>4s</sub>)



(a) 実験後の試験体 (b) ダメージ分布図 (c) 荷重-変位曲線の比較

図9 CFRP円筒軸圧縮における実験と解析の比較 (③[0/45/90/-45]<sub>28</sub>)



(a) 実験後の試験体 (b) ダメージ分布図 (c) 荷重-変位曲線の比較

図10 CFRP円筒軸圧縮における実験と解析の比較 (④[0/90/0/90/0]<sub>12</sub>)

## 4 結 言

CFRP材料モデルとして繊維の破壊靱性を考慮したダメージモデルを用い、Shell要素を積み重ねてTied要素で結合することでCFRP円筒の軸圧縮の衝撃解析を試みた。材料モデルは、弾性係数等の基本となるパラメータを試験により求め、厚肉曲げ試験及びCFRP円筒の軸圧縮実験及び斜突実験との比較検証により、強度及び数値計算上のパラメータについて調整を行った。その結果、同一の材料モデルと解析メッシュを用いて、異なる積層構成の破壊挙動及びその荷重の推移について、ある程度再現できた。

これは、エネルギー吸収性能の予測や、破壊現象の掌握・分析にFEM衝撃解析が有効な手段となり得ることを示唆している。

## 文 献

- 1) NEDO 技術開発機構：(事後評価) 第1回分科会資料「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」(2008)，48  
<http://www.nedo.go.jp/content/100094882.pdf>
- 2) MARCUS ANDERSSON 他：Crash behavior of composite structures(2014)  
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/199981/199981.pdf>
- 3) 松永：広島県西部工技研究報告，61(2018)，1
- 4) P.Ladevese 他：Damage modelling of the elementary ply for laminated composites(1991)
- 5) Evan J. Pineda 他：Numerical implementation of a multiple-ISV thermodynamically-based work potential theory for modeling progressive damage and failure in fiber-reinforced laminates(2013)
- 6) ESI Group：Composite Material Parameters Calibration for VPS(2015)
- 7) S.T.Pinho 他：Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes in laminated composites (2006)