

# CFRTP の低コスト成形加工技術の開発（第6報）

## 1 CFRP 衝撃解析手法の確立

松永尚徳

Establishment of CFRP crash analysis method

MATSUNAGA Hisanori

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。

本研究では、解析に用いる CFRP 材料モデルを同定した。次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。本報では、その手法を報告する。

### 2 CFRP 材料モデルの同定

#### 2.1 解析ソルバーと解析手法

解析ソルバーは、ESI 製の Virtual Performance Solution 2016.0（以下、VPS）を使用した。CFRP 用の材料モデルと破壊則を組み合わせることで、CFRP の異方性と材料非線形を考慮した解析ができる。一般的には、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 積層体を計算するが、ここでは、層間剥離を考慮するために、複数層の Shell 要素を積み重ねてそれらを Tied 要素で結合し、適切な

タイミングで 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 CFRP の材料モデル

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ている。一方向連続繊維 CFRP の模式図を図1に示す。繊維方向を1、繊維直交方向を2、厚さ方向を3とすると、23面内では等方性とみなした直交異方性として一般的に計算される。解析に必要な物性値（縦弾性係数  $E_{11}$  と  $E_{22}$ 、ポアソン比  $\nu_{12}$ 、せん断弾性係数  $G_{12}$ ）は、引張試験（JIS K 7165）、面内せん断試験（JIS K 7078）により求めることができる。

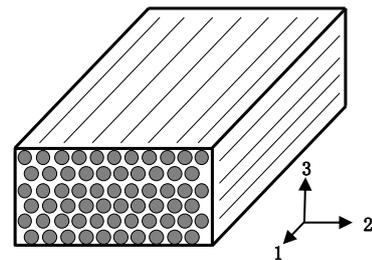


図1 一方向連続繊維 CFRP の模式図

VPS には CFRP の材料モデルとして Ladevese らにより提言されたダメージモデル<sup>3)</sup>が実装されている。このモデルでは、式1と式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' は、Calibration 手順書<sup>4)</sup>に従って、2種類の積層構成による負荷と除荷を繰り返す反復引張試験を行うことで同定できる。一例として積層構成 [45/-45]<sub>4S</sub> の試験結果を図2に示す。なお、本報の積層構成の表示については、JIS 規格<sup>5)</sup>に則ったものである。

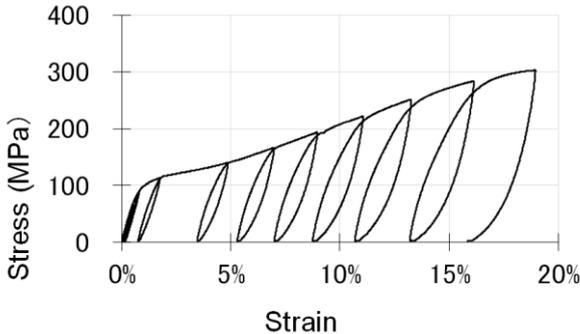


図2 反復引張試験結果 (積層構成 [45/-45]<sub>4S</sub>)

### 2.3 層間剥離の考慮

長手方向に対して0度、45度、90度方向に一方方向積層した試験片について、図3に示す4点曲げ試験 (JIS K 7074) を行った。JIS 規格では厚さ方向のせん断の影響を小さくするために試験片の板厚に応じてスパンを変更することと定められている。そのため、プリプレグを8枚積層した8ply では板厚が1.1mm となり支持台スパンを45mm に設定すると JIS 規格に則った試験条件となる。ここでは、JIS 規格から外れることになるが、厚さ方向のせん断の影響を把握するために、板厚を増した試験片に対しても支持台スパンを45mm に固定した。なお、プリプレグを24枚積層した24ply では板厚3.4mm、同様に40ply では板厚5.6mm となる。

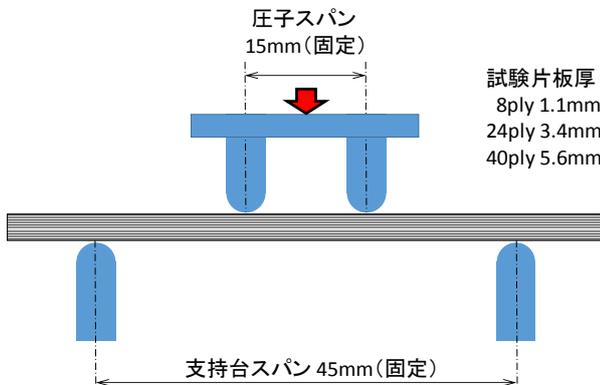


図3 スパンを固定した4点曲げ試験

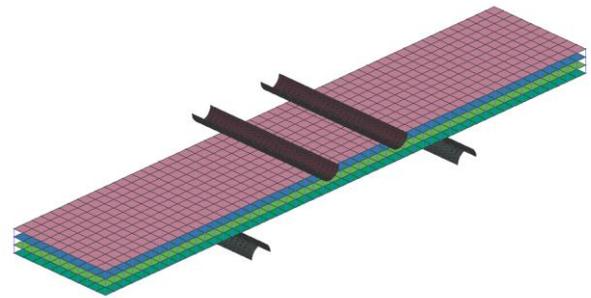


図4 4点曲げ試験 解析モデルの模式図

この4点曲げ試験の解析モデル模式図を図4に示す。試験片については、1枚のプリプレグを1枚の Shell 要素でメッシングし、各層間を Tied 要素で結合した。すなわち、8ply の試験片は8枚の Shell 要素の積み重ねとなり、また、40ply の試験片は40枚の Shell 要素の積み重ねとなる。なお、ここでは簡略化のため、4枚の Shell 要素として表示している。支持台と圧子は剛体とし、試験片との接触を考慮した。

試験結果と解析結果を比較検証し、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チューニングを行った。また、そのチューニングは、個々の試験条件に対して個別に行うものではなく、全ての試験条件の解析に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対象のパラメータを調整した。

4点曲げ試験の荷重-ストローク曲線 (以下、FS 曲線) について、試験結果 (N=3) と解析結果を図5に示す。なお、ここで用いた試験片は切出し工程に起因する試験片幅 B のばらつきが大きく、その影響を排除するために縦軸には荷重を B で除した値としている。

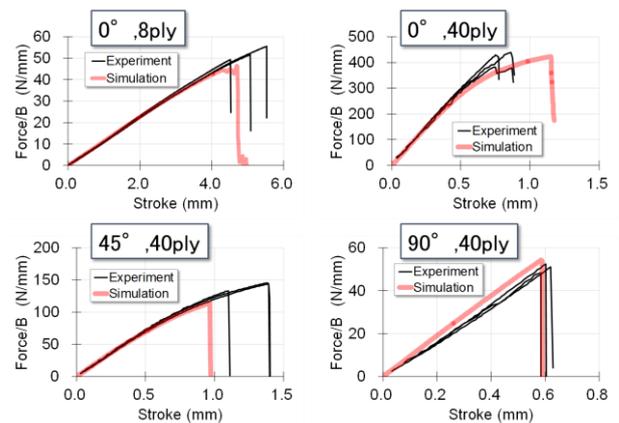
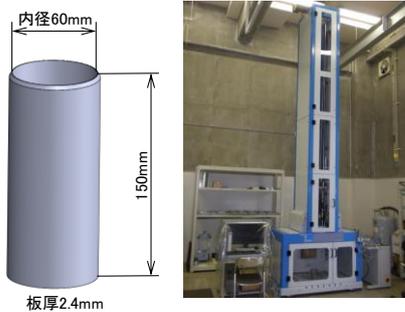


図5 4点曲げ試験のFS曲線 (抜粋)

### 3 CFRP 円筒軸圧縮の実験

#### 3.1 実験方法

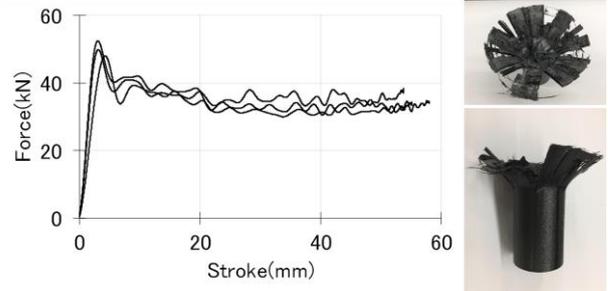
試験体は、**図 6** に示す CFRP 円筒とした。積層構成は軸方向を 0 度とし、①  $[0/90]_{4S}$ 、②  $[45/-45]_{4S}$ 、③  $[0/45/90/-45]_{2S}$ 、④  $[0/90/0/90/0]_{12}$  の 4 種類とした。本報では、誌面の制約により①、②、③の 3 種類について報告する。試験体の先端部は、30 度の先端角度に切削加工した。これを**写真 1** に示す落錘試験機 (IMATEK 社製 IM10T-30) により軸圧縮の実験を行った。122.4kg の錘体を高さ 1.58m から自由落下させて試験台直下に設置したロードセルにより反力を測定した。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、測定には 1.5kHz のローパスフィルタ処理を施した。積層構成①と②の N 数は 3、積層構成③の N 数は欠測により 2 となった。



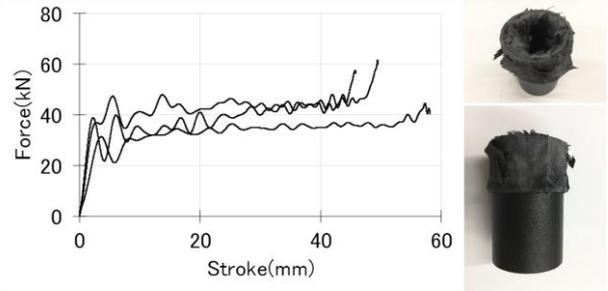
**図 6** 試験体形状 **写真 1** 落錘試験機

#### 3.2 実験結果

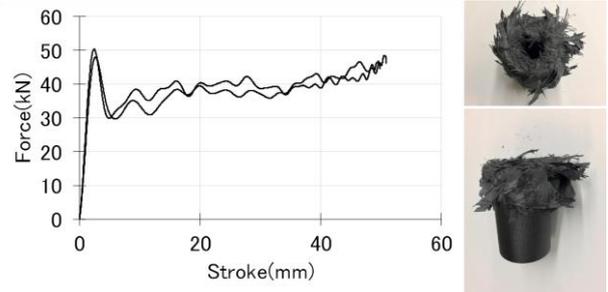
各積層構成の荷重変位 (FS) 曲線と実験後の試験体の写真を**図 7** に示す。**図 7 (a)** に示す積層構成①の荷重は、平均 50kN のピークを示した後にやや右肩下がりに推移し、静止までの平均荷重は 35kN となった。試験体は錘体に接触後に剥離と亀裂を伴いながら大きく広がる挙動を示す。**図 7 (b)** に示す積層構成②では、顕著なピークを示さずに荷重がたち上がり静止する直前に荷重が上昇した。平均荷重は 38kN となった。試験体は錘体に接触後に、内側と外側に分かれて筒面に沿って折り返す挙動を示した。**図 7 (c)** に示す積層構成③の荷重は、平均 49kN のピークを示した後に右肩上がりに推移し、平均荷重は 38kN となった。試験体は錘体に接触後に内側と外側に分かれてカールするような挙動を示した。**図 7 (b)** と**図 7 (c)** では静止直前の荷重が上昇している。この 2 つの積層構成には 45 度層が存在しており、このことから速度が高くなるとせん断弾性係数が小さくなる速度依存性が存在すると考えられる。



**(a) 積層構成①:  $[0/90]_{4S}$**



**(b) 積層構成②:  $[45/-45]_{4S}$**



**(c) 積層構成③:  $[0/45/90/-45]_{2S}$**

**図 7** CFRP 円筒軸圧縮 実験結果

## 4 CFRP 円筒軸圧縮の解析

### 4.1 解析モデル

試験体は、**図 8 (a)** に示すように完全拘束された剛体の試験台の上に配置した。錘体は剛体とし、実験と同様に衝突の初速 5.56m/s、質量 122.4kg と設定した。試験体と試験台・錘体は接触を考慮した。

試験体の先端部拡大図を**図 8 (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。また、計算時間が長大となるため衝突後 6ms で計算を中断し、概ねストローク 30mm までの範囲で評価した。

前述の実験のうち積層構成①と②について、同一の解析メッシュと同一の材料モデル・解析パラメータを用い、

積層構成の設定を変更することで、積層構成による FS 曲線と破壊挙動の違いの再現を目標とした。CFRP の軸圧縮に対応する解析モデルのチューニングとして、(1)計算が破綻しない範囲内で要素削除を最小限に留める設定と、(2)Tied 要素の破壊靱性値の調整を行った。本調整結果を用いて積層構成③と④（本報では省略）についても解析し、チューニングの汎用性を確認した。

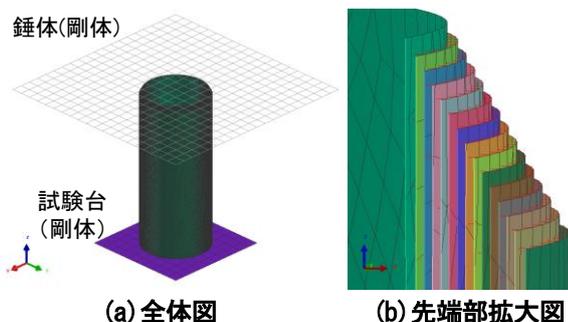


図 8 CFRP 円筒の軸圧縮 解析モデル

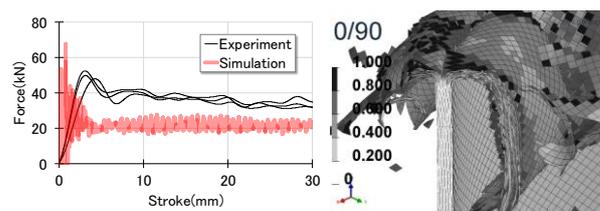
## 4.2 解析と実験の比較

各積層構成における実験及び解析の FS 曲線と衝突部の解析結果の拡大図を図 9 に示す。拡大図の色の濃淡はダメージを表している。図 9 (a) に示す積層構成①では、実験と比較して、解析では荷重の立ち上がり早く、その後概ね実験値の 6～7 割程度の低い荷重で推移した。

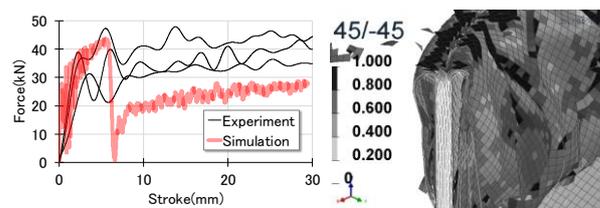
図 9 (b) に示す積層構成②では、荷重の立ち上がりはほぼ合っている。値としては実験値よりも低いものの、右肩上がりの荷重推移を再現できた。また、実験で確認された内側と外側に分かれて筒面に沿って折り返す挙動を再現できた。図 9 (c) に示す積層構成③では、荷重の推移は概ね再現できた。積層構成①の解析と比較して、繊維方向の圧縮ひずみに起因する要素削除が多いことを確認した。

## 5 結 言

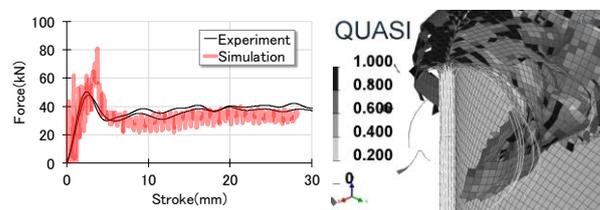
4 種類の積層構成による CFRP 円筒の軸圧縮実験を行い、それを再現する衝撃解析を行った。要素削除のタイミングと層間剥離を考慮するための Tied 要素のパラメータを調整するチューニングを行った。その結果、同一の材料モデルと解析メッシュを用いて、積層構成による破壊挙動と発生荷重の違いを再現することができた。現時点では、解析精度が十分ではなく改善の余地は大きいですが、CFRP の軸圧縮問題に対して、解析による予測の可能性が示唆された。



(a) 積層構成①: [0/90]<sub>4S</sub>



(b) 積層構成②: [45/-45]<sub>4S</sub>



(c) 積層構成③: [0/45/90/-45]<sub>2S</sub>

図 9 CFRP 円筒の軸圧縮 実験と解析の比較

## 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) P.Ladevese 他：Damage modelling of the elementary ply for laminated composites(1991)
- 4) ESI Group：Composite Material Parameters Calibration for VPS(2015)
- 5) JIS K 7016-1:1999, 繊維強化プラスチック—試験板の作り方—第 1 部：総則，附属書 A 積層指示書