フィラメントワインディング製 FRP 円筒のエネルギー吸収特性

日大生産工(院)	〇川口 奨	日大生産工	坂田憲泰
日大生産工	平山紀夫	日大理工	青木義男
日大理工(院)	村田聖憲	日大理工(院)	保戸塚敬太
		日東紡㈱	佐野一教

1. まえがき

FRP円筒は軸方向に動的軸圧縮荷重が負荷されると 連続脆性破壊が発生するため、優れた衝撃吸収特性を 示す. そのため、これまで多くの自動車用前面衝撃吸 収部材 (クラッシュボックス) に適用する研究がなさ れてきた1,2). 現在, 自動車メーカーでは開発コストと 開発期間を低減させるために、実機での試作を抑え、 シミュレーションを用いた開発が行われている. その ため, FRP円筒を自動車用衝撃吸収部材に適用するた めには,破壊過程及び荷重-変位線図を高い精度で予 測する衝撃解析手法が必要となる.近年,様々な成形 法によって成形されたFRP円筒の衝撃解析手法に関す る研究が行なわれており、高い精度で実験結果を再現 した報告が数多くなされている3~5).本研究ではフィラ メントワインディング (FW) 製FRP円筒を解析対象と するが,その場合,材料物性値を取得するための材料 試験片もFW法で成形し,繊維体積含有率,界面特性を FRP円筒に近い状態にした方が好ましい. そこで本研 究では、FW製GFRP円筒の数値シミュレーション手法 の確立を目的とし、解析ソルバーPAM-CRASHに入力 する材料物性値用の試験片をFW法で成形して実験を 行った.本報告では、それらの材料物性値を用いて行 った解析結果と実験結果の比較を行い、解析手法の妥 当性の検証を行った.

2. GFRP円筒の衝撃解析

2.1 解析モデル

解析ソルバーにはPAM-CRASH (ESI) を用いた.解 析モデルを図1に示す.解析モデルの全長は135 mmで 板厚は2.25 mmとなっている.要素サイズは3 mmを基 本とし,板厚方向に4層のShell要素をモデリングし,各 層に+60°と-60°の繊維配向角®を順に割り当てること によってFW製FRP円筒の積層構成を表現した.また, 実験では,連続脆性破壊を誘発させるために,供試体 の上部にはテーパー加工を施しているが,解析では図 2に示すように板厚方向の各Shell要素の長さを変化さ せることでテーパーをモデル化した.解析では図3に示 す落錘子(先端部),上側治具,下側治具(供試体を固 定する平面部)についてもモデリングし,解析モデル の総節点数は27,152で,要素分割数は26,740となった.



図3 落錘子,上側治具,下側治具の解析モデル

2. 2 材料物性值

2. 2. 1 静的引張試験

繊維方向の引張弾性率EL、繊維直交方向の引張弾性 率Er,面内せん断弾性率GLTを取得するために一方向 GFRPの静的引張試験を行った.一方向GFRPの強化材 とマトリックス樹脂にはGFRP円筒と同様に,Eガラス

Energy absorption properties of FW-FRP cylinders

Tasuku KAWAGUCHI, Kazuhiro SAKATA, Norio HIRAYAMA, Yshio AOKI, Kiyonori MURATA, Keita HOTOZUKA and Kazunori SANO 繊維(日東紡)とエポキシ樹脂(XNR/H/A6805ナガセ ケムテックス)を使用し,FW法にて成形した.成形で は図4に示す一方向成形用マンドレルを使用し,樹脂を 含浸させたEガラス繊維に張力15Nを掛けてフープ巻 きを行った.巻き付け終了後は鏡面仕上げを施した板 を積層面に当て,圧力を負荷することで板厚の調整を 行い,85℃×4時間の条件で硬化させた.燃焼法によっ て求めた成形品の繊維体積含有率は56%であった.

繊維方向(L方向)および繊維直角方向(T方向)の 引張試験はJIS K 7165を参考にして行い,試験速度は それぞれ2 mm/min, 1 mm/minとした.LT方向の引張試 験はJIS K 7078を参照し,試験速度は1 mm/minとした. 試験力は試験機のロードセルから出力し,ひずみは試 験片中央部に貼りつけた2軸のひずみゲージで計測し た.静的引張試験で得られた材料物性値を表1に示す. 解析ではL方向の圧縮弾性率も必要となるが,本研究 では引張弾性率*E*Lの80%の値を用いた⁷.



図4 一方向材用マンドレル

表1 材料物性值				
E _L [GPa]	E _T [GPa]	G _{LT} [GPa]	<i>v</i> _{LT} [-]	
44.2	15.5	5.69	0.29	

2. 2. 2 損傷パラメータ

PAM-CRASHには異方性材料モデルとしてLadevede らによる損傷モデル⁸⁾が実装されており、式(1)に示 すように初期の弾性率 G_0 と損傷度合を表す損傷変数dを用いて剛性低下後の弾性率Gを表現する.

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{G}_{\mathbf{0}}(\mathbf{1} - \boldsymbol{d}) \tag{1}$$

損傷変数dを定義する関数は、[±45°]2s及び[±67.5°]2s の積層構成を有する2種類の試験片で引張サイクリッ ク試験から求めることができる⁹.しかしながら、 [±67.5°]2s試験片の応力-ひずみ線図は明確な非線形性 を示さない⁸⁰ことから,解析に対する影響は小さいもの と考えられるため,本研究では[±45°]2s試験片のみ入力 することとした.

成形には図5のプレート状マンドレルを使用し、1層 ごとマンドレルの向きを90°回転させ、合計8層巻き付 けた.成形後は鏡面仕上げを行った板を積層面に当て、 圧力を負荷することで板厚の調整を行い、85℃×4時間 の条件で硬化させた. 試験片である±45°材は図6に示す ように硬化後のGFRP板のX方向から45°の方向に切り 出すことによって作成した. 燃焼法によって求めた繊 維体積含有率は55%である.

実験は試験速度を1 mm/minとし、1サイクルごとに試 験力を0.6k N増加させ、10サイクルまで続けた. 試験力 は試験機のロードセルから出力し、ひずみは2軸のひず みゲージで計測した. 図7に実験から得られたせん断応 力-せん断ひずみ線図を示す. 解析用パラメータである 損傷変数diと損傷値Yiは式(2)と(3)を用いて算出し

$$\boldsymbol{d}_{i} = \mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{G}_{LT}^{i}}{\boldsymbol{G}_{LT}^{0}} \tag{2}$$

$$Y_i = \sqrt{\frac{1}{2} G_{LT}^0 \cdot \varepsilon_{LT}^i}^2 \tag{3}$$

ここで、 G_{LT}^{0} は初期の面内せん断弾性率、 G_{LT}^{i} は各サイクルの面内せん断弾性率、 ε_{LT}^{i} は各サイクルの面内せん断ひずみを示す.



2.3 解析条件

FRPの衝撃解析では一般的に各要素に応力またはひ ずみを閾値に設定し,解析中に閾値を超えた場合にそ の要素を削除することによって繊維破断を再現する. また,各Shell要素間には接合要素を定義し,Mode I, Mode IIそれぞれの層間強度を閾値として設定し,解析 中に閾値を超えた場合,接合要素を解除することによ って層間はく離を再現する.本研究では要素削除基準 にEquivalent shear strainを使用し,実験結果との比較か ら0.043とした.Mode IとMode IIの層間強度は金らの 値を参考に90 MPaと110 MPaに設定した³⁾.

落錘子,上側治具,下側治具は剛体定義し,落錘子 と上側治具にはそれぞれ200 kg,6 kgの質量を与えた. 落錘子と上側治具はZ方向のみ変位を許容し,下側治具 は完全拘束とした.また,GFRP円筒は下部20 mmのX, Y方向の変位を拘束した.各モデル同士には接触定義 を行い,GFRP円筒の各層には自己接触を定義した.落 錘子に与える初速度は6.94 mm/ms (25 km/h)とし,上 側治具とGFRP円筒の接触反力を衝撃荷重,上側治具の 移動量を変位とした.なお,プロット間隔は実験と同 様に0.2 msとし,エネルギー吸収量EAは荷重-変位線図 の変位70 mmまでの面積から算出した.

2. 4 解析結果

荷重-変位線図を図8に示す. 落錘子衝突後, 荷重が約50kNまで立ち上がり, その後は45kN前後の荷重で推移し, エネルギー吸収量*E*_Aは2947Jとなった. 破壊形態を図9に示すが, 円筒外側と内側への破片の広がるような破壊と円筒壁が折りたたまれるような変形が確認された.

3. 落錘衝撃試験

3.1 成形及び実験方法

GFRP円筒の成形は図10に示すように外径100 mmの マンドレルを使用し、巻き角度±60°になるように2層巻 き付けた.成形後は回転硬化炉を用いて85°×4時間の条 件で硬化させた.供試体本数は3本とし、供試体の全長 は135 mmである.供試体の平均板厚は2.26 mmで、燃 焼法で求めた繊維体積含有率は56%となっている.な お、連続脆性破壊を誘発するために供試体の一端には 45°のテーパー加工を施している.

実験は図11に示す大型落錘衝撃試験装置で行った. 下側治具に固定した供試体の上に平板状の上側治具を 乗せ,衝突速度25 km/hで高さ2.46 mから上側治具の上 に質量200 kgの落錘子を自由落下させた.破壊様相の 観察をしやすくするために実験前に供試体の外側(上 から赤,黄,緑)と内側(水色)に塗装を行っている. 衝撃荷重は下側治具に設置したロードセル(東京計器 研究所)で計測し,変位は高速度カメラ(HX-7S,ナッ クイメージテクノロジー)で撮影した動画を画像解析 することによって求めた.エネルギー吸収量*E*₄は解析 と同様に変位70 mmまでの荷重-変位線図の面積から算 出した.



図10 GFRP円筒のFW成形



3.2 実験結果と解析結果の比較

実験と解析の荷重-変位線図の比較を図12に、エネル ギー吸収量の比較を表2に示す.実験結果と解析結果の 荷重が横ばいになる値は概ね一致し、エネルギー吸収 量は良好な一致を示した.破壊形態の比較を図13に示 す.実験では解析結果と同様に、図13(a)の破片が円 筒外側と内側に広がるような破壊と、図13(b)の円筒 壁が折りたたまれるような破壊が確認された.

4. 結論

本研究では、解析ソルバーPAM-CRASHに入力する ための材料物性値をFW法で成形した試験片を用いた 実験から取得した.それらの物性値を用いて行った解 析結果は実験結果と概ね一致し、解析手法の妥当性を 確認することができた.



	表2 エネルギー吸収量の比較			
	実験結果	解析結果	誤差[%]	
$E_A[\mathbf{J}]$	3053	2947	3.6	





(a) 上面部



(b) 底面部図13 破壊後の様子の比較

参考文献

- 中谷有,三石洋之,濱田泰以,FRP円筒のエネル ギ吸収特性-エネルギ吸収メカニズムの概念-,自 動車研究所所報,Vol.20,No.1(1998)pp.38-43
- H. Hamada, S. Ramakrishna, H. Satoh, Crushing mechanism of carbon fiber/PEEK composite tubes, *Composites*, Vol.26, No.11(1995)p.749-755
- 金炯秀, 邉吾一, 青木義男, 自動車用フロンサイ ドメンバ用CFRP角柱の衝撃実験と解析, 日本複 合材料学会誌, Vol.34, No,2(2008) pp. 51-59
- 4) Haipeng Han, Farid Taheri, Neil Pegg, You Lu, *Composite Structures*, 80(2000)pp. 253-264
- 5) 杉本直, 邉吾一, 平山紀夫, 衝撃軸圧縮負荷を受ける織物CFRP円筒の実験結果との比較検討によるFEM解析の有用性, 日本複合材料学会誌, Vol.44, No.6(2018) pp.242-249
- 6) 坂田憲泰,平山紀夫,青木義男,瓦口翔馬,加藤 優作,佐野一教,相澤恒史,山田誠司,高強度ガ ラス繊維を用いた FW 円筒のエネルギー吸収特 性,強化プラスチックス, Vol.64, No.5(2018), pp.18-23
- 7) 松井醇一,野村晋,石井義明,炭素繊維とその複 合材料の力学的性質の関係・圧縮および剪断,日 本複合材料学会誌,Vol.12,No.6(1986), pp.251~258
- P. Ladevese, E. Le Dantec, Damage modelling of the elementary ply for laminated composites, Composites Science and Technology, 43(1992), pp.257-267
- 9) ESI, VPS-2015 Solver reference manual vol.6, (2015), pp.245-247