

衝撃曲げ負荷を受ける FW 製 GFRP 円筒の数値解析

日大生産工(院) ○范 翔稷 日大生産工 坂田憲泰

1. 緒言

近年、地球温暖化の問題を背景に自動車の燃費規制が年々厳しくなっている。その対策の一つである車両の軽量化は重要な技術課題となっており、自動車は安全性を確保しながら可能な限り軽量に設計する必要がある。

繊維プラスチック (FRP) は金属材料と比べて、比強度、比剛性に優れているため、自動車の構造部材への適用が検討されている。FRP の代表的な強化繊維には炭素繊維とガラス繊維がある。炭素繊維は高い比強度と比剛性を有するが、高価格で生産量も少ないなどの課題がある。一方、ガラス繊維は炭素繊維と比べると、比強度と比剛性は低くなるが、低価格で破断ひずみは2倍以上となっている。また、ガラス繊維には速度依存性があり、高速領域においては一方向材 GFRP の弾性率と強度は一方向 CFRP と同等になることが報告されている¹⁾。そのため、GFRP は CFRP より衝撃吸収部材に適した材料と考えられる。本研究では軽量で衝撃吸収特性に優れたサイドインパクトビームを開発することを目的とし、衝撃曲げ負荷を受ける GFRP 円筒の数値解析を行い、実験結果との比較を行った。

2. 使用材料および供試体

強化繊維には E ガラス繊維ロービング (RS110QL-520AS, 日東紡)、マトリックス樹脂にはエポキシ樹脂 (XNR/H/A6805, ナガセケムテックス) を用いた。供試体となる GFRP 円筒の成形には FW 法を用いた。FW 装置のレジンバスでガラス繊維ロービングにマトリックス樹脂を含浸させ、15N の張力を掛けながらマンドレルに巻き付けた。巻き角度 θ は $\pm 45^\circ$ と $\pm 60^\circ$ での 2 通りとして、以降、それぞれの巻き角度で成形した供試体を GFRP-45 と GFRP-60 と呼ぶ。硬化条件は 85°C で 4 時間とした。供試体の寸法は、長さ 1000mm、内径 25mm、外径 33mm となっている。

3. 実験方法

実験は落錘衝撃装置で行った。支点間距離は 800mm とし、質量 100kg の落錘子を高さ 4.09m から自由落下させることで、供試材に横衝撃荷重を

負荷した。衝撃荷重は両サイドの供試体支持部内のロードセル (CLP-500KNB, 東京測器研究所) で計測し、変位は高速カメラ (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計測した。試験本数は各 3 本となっている。エネルギー吸収量 E_A は荷重-変位線図の面積を積分することで求め、積分範囲は 150mm とした²⁾。

4. 数値解析

4.1 解析条件

数値解析には衝撃・衝突解析ソフトウェア PAM-CRASH (ESI) を用いた。解析モデルを Fig.1 に示す。GFRP 円筒には積層シェル要素 (MAT 131) を使い、周方向に 1 mm の独立した Shell 要素を設け、 $+\theta$ 層と $-\theta$ 層を順番に定義することで FW 材を再現した。GFRP 層の層間には Tied 要素 MAT303 を用いた。落錘子と支持部は剛体 (MAT100) とし、落錘子には衝突直前の速度 8.89 mm/sec を初速度として与えた。落錘子と GFRP 円筒、支持部と GFRP 円筒の接触には Contact type 33 を使い、各層には自己接触設定 Contact type 36 を使用した。破損則には Equivalent shear strain²⁾⁻³⁾ を用いた。

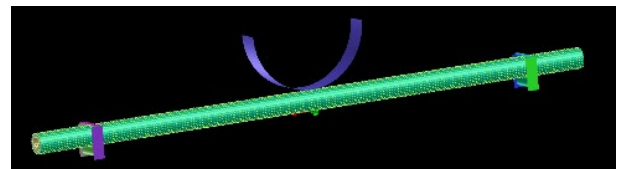


Fig.1 Analytical model in PAM-CRASH

4.2 材料物性値

解析に用いた材料物性値は、FW 装置を用いて成形した一方向 GFRP 材の繊維 (L) 方向、繊維直角 (T) 方向、繊維と 45 度 (LT) 方向の引張試験から求めた。試験片本数は各 3 本とした。各試験片の両端部にはアルミニウム合金製のタブを設け、LT 方向の試験片には、せん断変形を抑制するためにオブリークタブを用いた。試験速度は L 方向が 2mm/min、T 方向と LT 方向が 1mm/min とした。得られた材料物性値を Table 1 に示す。

また、せん断損傷パラメータを求めるために $[\pm 45^\circ]_{2s}$ 試験片の静的引張サイクリック試験を行

った。試験速度は1mm/minとし、1サイクルあたり荷重を0.6N増加させながら、荷重の負荷と除荷を10サイクル行った。そして、実験結果から解析用パラメータである損傷変数 d_i と損傷値 Y_i は式(1)と(2)を用いて算出した。

$$d_i = 1 - \frac{G_{LT}^i}{G_{LT}^0} \quad (1)$$

$$Y_i = \sqrt{\frac{1}{2} G_{LT}^0 \varepsilon_{LT}^i{}^2} \quad (2)$$

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。得られ損傷変数 d_i と損傷値 Y 線図をFig.2に示す。

Table 1 Material properties of GFRP

Modulus of elasticity	
Longitudinal, E_L	41.5 GPa
Transverse, E_T	14.1 GPa
Shear, G_{LT}	5.5 GPa
Poisson's ratio	
Longitudinal, ν_{LT}	0.30
Tensile strength	
Longitudinal, F_L	1091 MPa
Transverse, F_T	16.9 MPa
Shear, F_{LT}	8.8 MPa

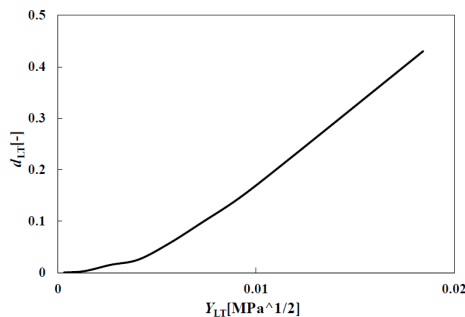
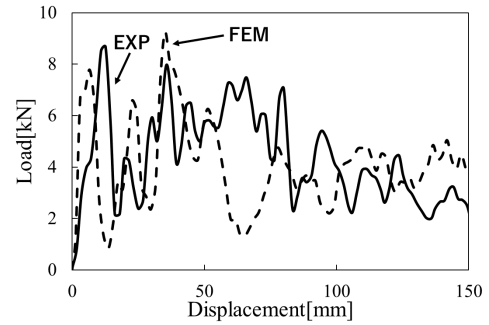


Fig.2 Shear damage curve

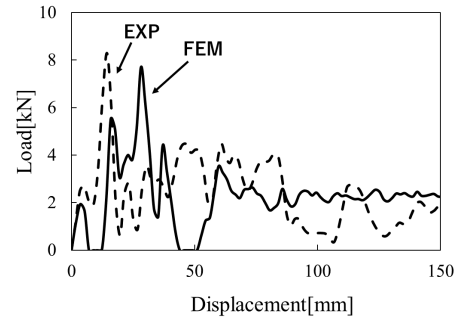
4.3 実験結果との比較

GFRP-45 と GFRP-60 の荷重-変位線図の比較を Fig.3 に示す。GFRP-60 では最大荷重に到達する変位に差が確認できるが、GFRP-45 と GFRP-60 とともに解析結果は実験結果と概ね同じ挙動を示した。次に、破壊形態の一例として、GFRP-45 の変位 60mm における解析結果と実験結果の比較を Fig.4 に示す。両者共には圧縮応力側で損傷が発生しており、解析の妥当性を確認することができる。

また、解析結果と実験結果から求めたエネルギー吸収量は GFRP-45 が 621J と 665J、GFRP-60 が 378J と 365J となり、両供試体ともに誤差は 10% 以下となった。

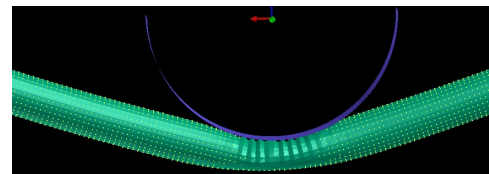


(a) GFRP-45

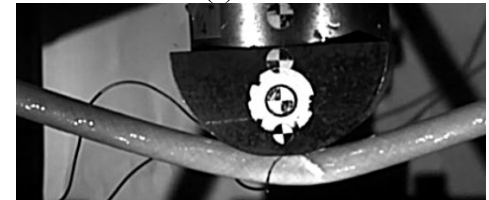


(b) GFRP-60

Fig.3 Load-displacement curves



(a) FEM



(b) Experiment

Fig.4 Comparison between FEM and experiment

5. 結言

PAM-CRASH を用いた GFRP 円筒の衝撃曲げ試験の結果は実験結果と良好な一致を示し、エネルギー吸収量向上のためのツールとして使用できることを示した。

参考文献

- 1) 谷口憲彦, 西脇剛史, 平山紀夫, 中村幸一, 荒尾与史彦, 川田宏之, 日本機械学会論文集 (A編), 78-793(2012), 1284-1299
- 2) 范翔稷, 外島亘, 坂田憲泰, 日本設計工学会 2021年度春季大会研究発表講演会, A22
- 3) ESI:VPS-2015 Solver reference manual (2015)
- 4) F. Rondina, Mechanical performance assessment and dynamic crash simulation of composite materials Tipologia deldocument (2018)