

FRTPとFRPの動的破断特性を考慮したFEMシミュレーションモデルの構築

日大生産工(院) ○杉本 直 日大生産工 平山 紀夫
日大生産工 坂田 憲泰

1. 緒言

近年、自動車の省エネルギー化、走行抵抗の低減の観点から自動車の車体の軽量化ニーズが高まっている。そのため、特に強化繊維としては炭素繊維あるいはガラス繊維、マトリクス樹脂としては熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂を用いたFRTPとFRPが軽量素材として注目されており、自動車への適用研究が実施されている¹⁾⁵⁾。FRTPとFRPを自動車に対して適用検討する際には、設計初期段階における性能予測の為に、FEM構造解析の中で、大変形及び材料破断を考慮した構造解析を行うことが重要となる。また、自動車は衝突時に高速で大変形をするため、静的だけでなく動的な強度と破断特性に関しても解析を行う必要がある。しかし、これまでの研究において、FRTP及びFRPの強度あるいは破断ひずみのひずみ速度依存性の考慮はユーザサブルーチンを用いた特殊な例⁶⁾であり、汎用性を持った形で実施されている例は殆ど無く、ひずみ速度依存性を考慮せずに破断のモデル化を行なっている例が多い⁷⁾。そこで本研究では汎用有限要素ソルバであるLS-DYNA v971 R8.0を用いてFRTPとFRPのひずみ速度依存性を考慮した破断挙動をFEMモデル上で表現することを試みた。クーパー試験からパラメータ抽出と同定を行い、自動車構造部材を想定したFRPの円筒の軸圧縮の実験と解析を行い、解析精度の妥当性を評価した結果について報告する。

2. FEM解析手法

2.1 解析対象材料のFRTPとFRP

解析の対象となるFRTPとFRPに関して、強化繊維には繊維物のガラス繊維と炭素繊維、マトリクス樹脂には、現場重合型PA6と速硬化エポキシ樹脂を用いたCFRTP, CFRP, GFRTP, GFRPの4種とした。これらの材料は著者らの過去の研究⁸⁾⁹⁾において、静的及び動的の強度特性を調査したものである。

2.2 材料構成則と必要なパラメータ

動的陽解法ソルバであるLS-DYNA で用いた材料

構成則は、汎用的であり、強度及び破断ひずみのひずみ速度依存性が考慮出来、本研究で取り扱う繊維物材の特に 45 度方向引張で予想される非線形せん断特性が表現可能な MAT_058 “Laminated_Composite_Fabric”を使用した。

2.2.1 弾性係数

直交異方性の板では独立な弾性係数は1方向ヤング率 E_1 、2方向のヤング率 E_2 、12平面のせん断弾性率 G_{12} である。これら弾性のパラメータはFRTP及びFRPの繊維方向の引張試験と45度方向の引張試験により求めることが出来る。また、繊維物の複合材料は1方向と2方向が同じ特性であるため $E_1=E_2$ となる。Table 1 に各材料の弾性係数を示す。

2.2.2 非線形特性

繊維複合材料はせん断変形において非線形挙動が観られる。直交異方性材料の応力とひずみの座標変換¹⁰⁾から式(1)と式(2)より、繊維FRTP, FRPの45度方向の引張試験からせん断応力とせん断ひずみを抽出できる。式(2)は引張方向の歪みと引張方向に対して90度方向の歪みが同じ量である前提である。せん断方向の非線形挙動のパラメータは、45度引張試験のS-S線図における降伏応力とその時のひずみ、引張強度とその時のひずみの4種類である。

$$\tau_{12} = \frac{1}{2} \sigma_{45^\circ} \quad (1)$$

$$\gamma_{12} = 2 \varepsilon_{45^\circ} \quad (2)$$

2.2.3 損傷・破壊特性

破断モデルは「修正された Hashin 則」¹¹⁾¹²⁾を用いた。式(3)に繊維方向の引張及び圧縮の破壊基準を示す。 X_t は繊維方向の引張強度、 X_c は繊維方向の圧縮強度で、 σ_{11} は繊維方向に発生する応力である。式(4)に繊維に対し直角方向の引張及び圧縮の破壊基準を示す。 Y_t は繊維に対し直角方向の引張強度、 Y_c は繊維に対し直角方向の圧縮強度で、 σ_{22} は繊維に対し直角方向に発生する応力である。式(5)にせん断方向の破壊基準を示す。 Sc はせん断

Construction of FEM simulation model
for the dynamic fracture properties of FRTP and FRP

Nao SUGIMOTO, Norio HIRAYAMA and Kazuhiro SAKATA

強度, τ_{12} はせん断方向に発生する応力である. ω_{ij} は各方向のダメージパラメータで式(6)に示す. ε_f は最大応力時の弾性歪み, m_{ij} は各方向の損傷指数で式(7)により表される. ε_q は実験値の最大応力時の歪みである.

$$F_{11} = \left(\frac{\sigma_{11}}{(1-\omega_{11t,c})X_{t,c}} \right)^2 = \begin{cases} \geq 1: \text{Failure} \\ \leq 1: \text{no Failure} \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{22} = \left(\frac{\sigma_{22}}{(1-\omega_{22t,c})Y_{t,c}} \right)^2 = \begin{cases} \geq 1: \text{Failure} \\ \leq 1: \text{no Failure} \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{12} = \left(\frac{\tau_{12}}{(1-\omega_{12t,c})S_c} \right)^2 = \begin{cases} \geq 1: \text{Failure} \\ \leq 1: \text{no Failure} \end{cases} \quad (5)$$

$$\omega_{ij} = 1 - \exp \left[-\frac{1}{m_{ij}} \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_f} \right)^{m_{ij}} \right] \quad (6)$$

$$m_{ij} = \frac{1}{\ln \left(\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_f} \right)} \quad (7)$$

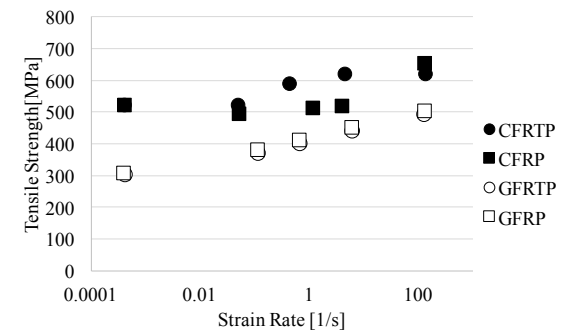
上記の破壊閾値に対し, 負荷を受けて変形する要素内の各応力成分は独立して計算される. そして, 各応力成分が何れかの強度値に達した時に要素は損傷したと見なされる. 上式より, FEM上でFRTPとFRPの破壊をモデル化するためのパラメータは, X_t , X_c , Y_t , Y_c , S_c と ω_{11t} , ω_{11c} , ω_{22t} , ω_{22c} , ω_{12} の10種類である. これらは, 繊維複合材料の0度方向の引張試験及び圧縮試験の最大応力値と最大ひずみ, 45度引張試験のS-S線図における引張強度とその時のひずみが得られれば導出可能である.

2.2.4 ひずみ速度依存性

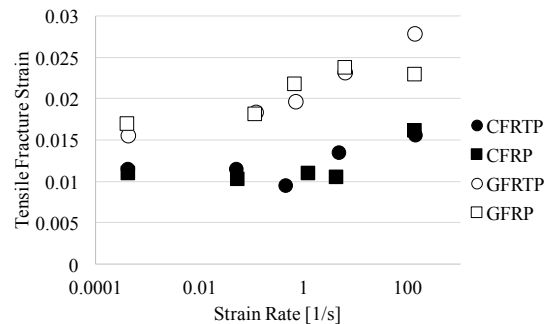
ひずみ速度依存性の表現については, これまで述べた静的な非線形挙動, 損傷・破壊の表現の各パラメータにおいて, 各ひずみ速度に対し, 増加あるいは減少していく情報をカーブデータとして直接的にプロットすることで各パラメータのひずみ速度依存性が表現出来る. 各種材料のパラメータとひずみ速度の関係を実験的に求め, FEM解析に入力する値をFig.1からFig.3に示す. Fig.1(a)は繊維方向の引張強度, Fig.1(b)は繊維方向の破断ひずみである. Fig.2(a)は繊維方向の圧縮強度, Fig.2(b)は繊維方向の圧縮破断ひずみ, Fig.3(a)はせん断強度, Fig.3(b)はせん断方向の破断ひずみである.

Table 1 Elastic properties of FRTP and FRP

	Elastic Modulus E_1, E_2 [MPa]	Shear Modulus G_{12} [MPa]
CFRTP	49000	2242
CFRP	57000	2562
GFRTTP	14600	941
GFRP	17000	2625

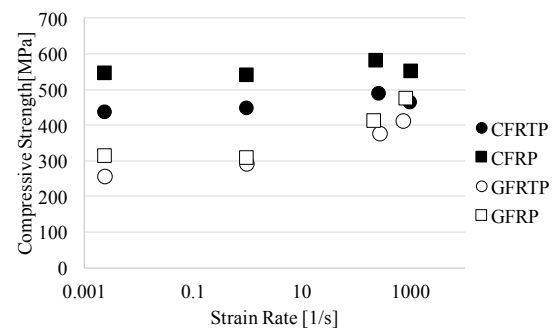


(a) Strength

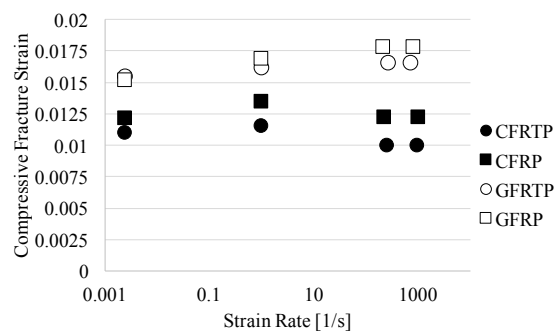


(b) Fracture Strain

Fig.1 Strain rate dependency of tension

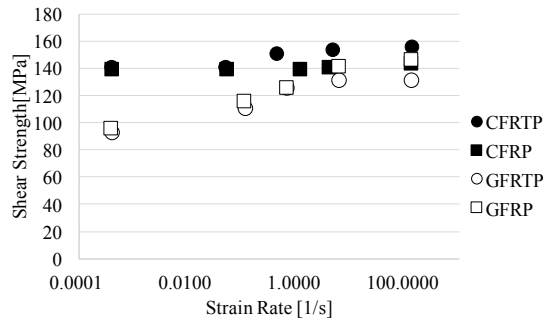


(a) Strength

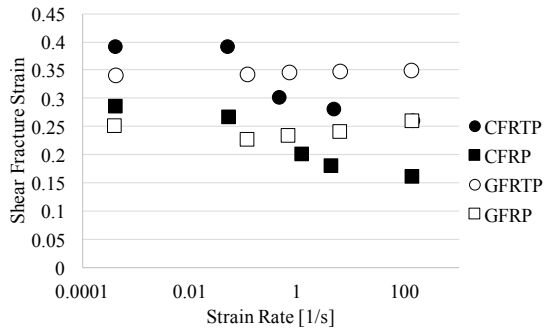


(b) Fracture Strain

Fig.2 Strain rate dependency of compression



(a) Strength



(b) Fracture Strain

Fig.3 Strain rate dependency of shear

2.3 材料パラメータの検証

前節に示した、弾性係数、非線形特性、損傷・破壊及びひずみ速度依存性のパラメータを用いて、パラメータを導出した試験片の形状をFEM上でモデル化した。そして、静的・動的の引張及び圧縮を実施し、荷重-変位線図を実験結果と比較した。これにより、解析の変形挙動と破断挙動の精度検証を行なった。Fig.4(a)に引張試験片モデル、Fig.4(b)に圧縮試験片モデルを示す。FEM上の引張及び圧縮速度は実験と同じ速度で行った。

各材料、各試験モードを代表して、Fig.5にGFRPの0度材の静的及び動的引張の実験結果とFEM解析結果の比較を示し、Fig.6にGFRTPの0度材の静的及び動的圧縮の実験結果とFEM解析結果の比較を示す。また、Fig.7にCFRPの45度材の静的及び動的引張の実験結果とFEM解析結果の比較を示す。

FEM解析の荷重-変位線図は強度及び破断歪みの歪み速度依存性を表現しており、実験結果と良い一致を示した。

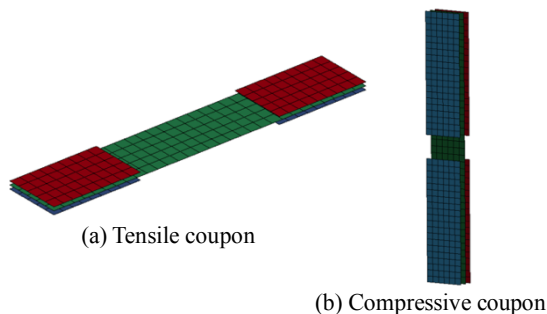


Fig.4 Test piece of FEM model for verification of parameters

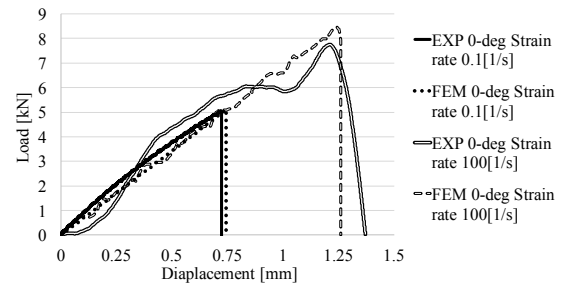


Fig.5 Experimental result and FEM result of GFRP tensile test 0deg specimen

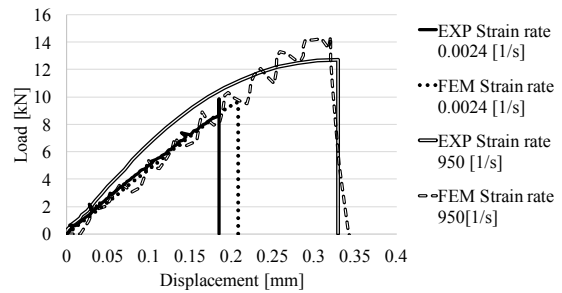


Fig.6 Experimental result and FEM result of GFRTP compressive test 0deg specimen

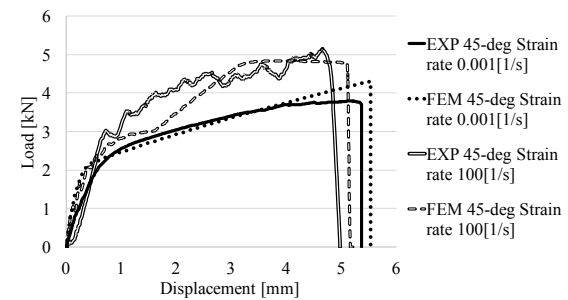


Fig.7 Experimental result and FEM result of CFRP tensile test 45deg specimen

3. CFRP円筒部材の動的軸圧縮シミュレーション

3.1 CFRP円筒動的軸圧縮試験とFEM解析

自動車の衝突時のエネルギーを軸圧縮により吸収する部材を模擬した構造において、CFRPの円筒部材の動的軸圧縮試験を実施した。試験体は内径25mm、全長100mmの円筒をこれまで述べてきた試験片と同じ綾織炭素繊維と速硬化エポキシ樹脂を用いたCFRPをロール成形によって作成した。繊維配向は円筒の長手方向に対して0度、積層数は4plyである。試験は鷺ノ宮社製油圧サーボ式試験機を用いて、平面圧子による軸圧縮を速度1000mm/secで行なった。

FEM解析では、試験体と同形状のメッシュモデルを作成した。材料パラメータは2.2節で示したものをを用いた。Fig.8(a)に試験前の試験体、Fig.8(b)にFEM解析モデルを示し、Fig.9(a)に試験後の試験体の破断様相とFig.9(b)に解析後のFEM解析モデルの破断様相を示す。また、Fig.10に実験の荷重-変位線図にFEM解析結果を重ねたものを示す。これらの結

果より、実験とFEM解析は良い一致を示していることが判る。

特に、Fig.10では、部材に平面圧子が接触した最初の発生荷重の傾き、ピーク荷重、部材先端部から逐次破断していく際の平均荷重を全て表現することが可能なことを示した。変位65mmまでの吸収エネルギーは、実験が601.7Jであったのに対し、FEM解析は646.5Jであり、誤差は約7.4%であった。

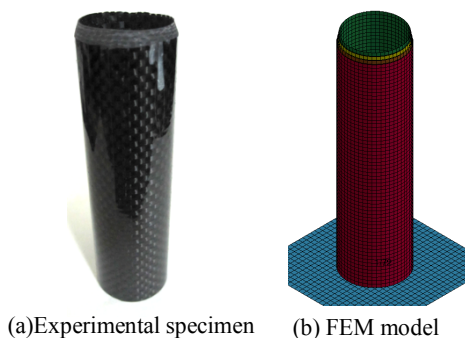
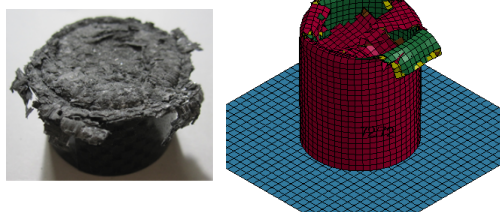


Fig.8 CFRP cylindrical shell before test



(a)Experimental specimen (b) FEM model

Fig.9 CFRP cylindrical shell after test

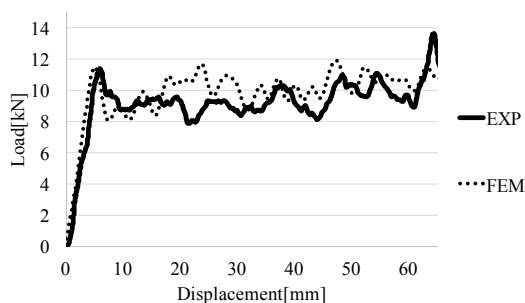


Fig.10 Experimental result and FEM result of dynamic axial crash of CFRP cylindrical shell

3.2 各種FRTPとFRPの円筒 動的軸圧縮シミュレーション

前節で示した円筒FEM構造解析のモデルを用いて、材料特性のみ変化させて構造解析を実施した。材料はCFRTP、CFRP、GFRTP、GFRPの4種であり、Fig.11に動的軸圧縮FEM解析の荷重-変位線図を示す。この結果から、同じ構造、同じ板厚の軸圧縮部材に対し、強化繊維、マトリクス樹脂を変化させることにより、荷重特性を変化させることが可能であることが確認出来た。

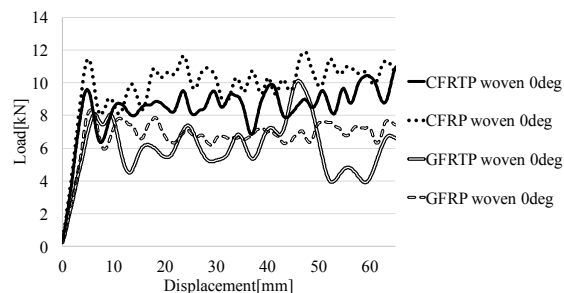


Fig.11 FEM result of dynamic axial crash of FRTP and FRP cylindrical shell

4. 結言

FRTPとFRPの材料特性を取得する静的及び動的の引張試験と圧縮試験の結果から求めた弾性係数、損傷・破壊、歪み速度依存性のパラメータを用いて、FEM構造解析を試験片と構造部材に対して実施した。

試験片では、FEM解析の荷重-変位線図は強度及び破断歪みの歪み速度依存性を表現しており、実験結果と良い一致を示した。

自動車構造部材を想定したCFRPの動的軸圧縮試験に対しても、FEM構造解析の荷重-変位線図は実験結果と良い一致を示した。

これらより、本研究において、FEM解析上で歪み速度依存性を考慮して破壊現象を精度良く表現することが可能であることを示した。

参考文献

- 1) 金 炯秀, 邊 吾一, 青木 義男: 日本複合材料学会誌, 34, 2 (2008), 51-59
- 2) 邊 吾一, 杉本 直, 青木 義男, 金 炯秀, 飯塚由佳: 日本複合材料学会誌, 34, 6 (2008), 211-218.
- 3) 石川隆司: 自動車技術, vol.68, No.11, p4-11(2014)
- 4) 山根健: オートデスク主催「自動車軽量化のための複合材料の活用と未来」セミナー April,21,2015
- 5) Maurice Bitterlich et al. : Kunststoffe 3/2014, pp.80-84
- 6) A. Martin¹, R. Othman, P. Rozycki : 15th European conference on composite materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012
- 7) Oliver Tomlin, Neil Reynolds: 9th European LS-DYNA Conference, 2013
- 8) 杉本 直, 邊 吾一, 坂田 憲泰, 平山 紀夫: 日本大学生産工学部学術講演会 2015,4-4
- 9) 日下部智史, 杉本 直, 邊 吾一, 坂田 憲泰: 日本大学生産工学部学術講演会 2015,4-5
- 10) 福田 博, 邊 吾一: 複合材料の力学序説, P64-P70
- 11) K.Schweizerhof, K.Weimar, Th. Münz, Th.Rottner : LS-DYNA Conference, Detroit, Michigan, 1998.
- 12) Matzenmiller, A., Lubiner, J. Taylor R. L. : Mechanics of Materials (20), 125-152(1995)