

縫合糸を有する炭素繊維ドライファブリックの力学的特性に関する研究 (Part 2)

Study on mechanical properties of carbon fiber non-crimp fabric with stitch (Part 2)

(CTC)○山本琢也、榊原辰雄、今奥亜希、(大阪大学)座古勝、李興盛、
(株)本田技術研究所(正)小林正俊

Though a non-crimp fabric is one of valuable materials for automobile structure to reduce weight, a technical problem which the forming simulation is not easy for complex procedure to determine the parameters of constitutive equation. In order to solve the above problems, the method which these parameters have been identified by the experiments of tension, shear, bending and compaction tests for a fabric has been proposed. The behaviors of a non-crimp fabric during forming process has been simulated with accuracy by the proposed method. In this paper, the procedure about the identification for parameters and numerical results for draping simulation has been described.

Keywords: Composites, NCF, Finite element

1. 緒言

Resin transfer molding (RTM)で用いられる Non-crimp fabric (NCF) (図 1)について、賦形過程における縫合箇所での目開きなどの形状不整合を FEM で解析するためのモデルをこれまでに提案している¹⁾。従来このモデルは繊維部分に対して異方性を有するゴム材の構成則²⁾が用いられていたが、形状不整合をより正確に表現するため新たにこの部分を繊維束専用の構成則に改良した。本報告は改良されたモデルを示すとともに、必要な材料定数の同定方法および過去の結果と比較して精度が向上した点を明らかにする。

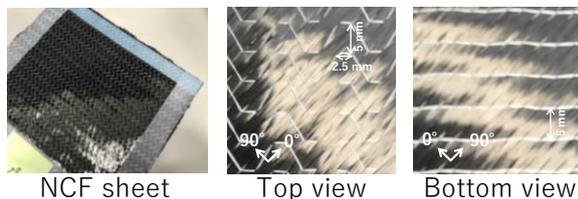


Figure 1 NCF sheet

2. モデル

2-1. 形状

図 2 は有限要素形状を示す。形状は過去のモデル¹⁾と差異はない。繊維束および縫合糸はソリッド要素およびトラス要素で構成されている。繊維束の繊維方向は 0 度および 90 度の 2 積層である。またこれらには縫合糸により縫われる箇所においてそれぞれの繊維方向に沿う隙間が存在する。

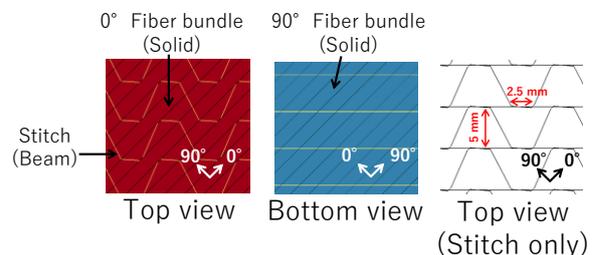


Figure 2 Geometry of non-crimp fabric with stitch

2-2. 材料特性

モデルの繊維束および縫合糸の要素に設定する物性値等については以下の通りである。

繊維束の構成則は以下のエネルギー関数 w で表される繊維方向を特異方向とする横等方性の超弾性体³⁾とする：

$$w = w_{elong}(I_{elong}) + w_{comp}(I_{comp}) + w_{dist}(I_{dist}) + w_{sh}(I_{sh}).$$

ここで w_{elong} , w_{comp} , w_{dist} および w_{sh} はそれぞれ引張、断面圧縮、横せん断および縦せん断変形に関するエネルギー関数である。また I_{elong} , I_{comp} , I_{dist} および I_{sh} はそれぞれの変形モードの量である。なお引張の関数 w_{elong} には $I_{elong} < 0$ において生じるエネルギーを追加した。これが本手法の特徴である。各エネルギー関数はそれぞれ次の定数を有する。引張 w_{elong} は定数として初期引張剛性 K_{elong}^0 , 引張剛性 K_{elong} , 初期引張領域 I_{elong}^0 および繊維束断面積 S_0 を有する。また断面圧縮 w_{comp} は圧縮剛性 K_{comp} および次数 p を有する。また横せん断 w_{dist} は横せん断剛性 K_{dist} を有する。また縦せん断 w_{sh} は縦せん断剛性 K_{sh} を有する。上記の 8 定数が繊維束に設定される。

縫合糸は線形弾性体として縦弾性率 E が設定される。

繊維束間および繊維束と縫合糸間の摩擦はそれぞれ係数 μ_{TP} および μ_S が設定される。

*Takuya Yamamoto

Science & Engineering Analysis Department,
ITOCHU Techno-Solutions Corporation
North Gate Bldg., 3-1-3, Umeda, Kita-ku, Osaka-shi,
Osaka 530-0001 Japan

以下に上記の定数および係数を決定する手順を示す。始めに縫合糸の縦弾性率 E を決定する。次に繊維束の断面積 S_0 を計測から決定する。次にシートの引張試験で得られる応力—ひずみ曲線と、モデルによる引張解析の結果が一致するように引張の定数 K_{elong} , K_{elong}^0 および I_{elong}^0 を同定する。次にシートのせん断試験で得られるせん断応力—ひずみ曲線と、せん断解析の結果が一致するように定数 K_{sh} を同定する。次にシートの曲げ試験で得られるモーメント—角度曲線と、曲げ解析の結果が一致するように定数 K_{dist} , 摩擦係数 μ_{TP} および μ_s を同定する。このとき同時に定数 K_{comp} および p を、調整する K_{dist} に合わせてシートの圧縮試験で得られる圧縮応力—ひずみ曲線と一致するように同定する。これらの手順によりシート特性が全て定まる。

3. 材料試験より決定された材料特性

表 1 は図 1 の NCF シートについて行われた材料試験の結果から、前述の手続きにより定めた材料特性である。ここで縦せん断の定数 K_{sh} は変形初期の線形領域で合わせた。また縫合糸の剛性 E は PET (ポリエチレンテレフタレート) のカタログ値とした。なおシートの引張とせん断試験および曲げ試験はそれぞれ試験機 KES-FB1-A および KES-FB2-A (両方ともカトーテック製) で行われた。圧縮試験はオートグラフ AG-X 10kN (島津製) で実施した。またモデルによる各試験の計算には有限要素解析ソルバ LS-DYNA を用いた。

図 3 は決定された材料特性を用いて解析した各試験の曲線である。また図中には比較のため試験の結果も示す。各曲線とも計算は試験を再現できていると考える。

Table 1 Material properties for the NCF

Fiber bundle								
K_{elong}	K_{elong}^0	I_{elong}^0	S_0	K_{comp}	p	K_{dist}	K_{sh}	
[N]	[N]		[mm ²]	[MPa]		[MPa]	[MPa]	
230.03	115.11	0.0023	0.2549	1.00E+06	6.7395	5	100	
Stitch		Friction coefficient						
E		μ_{TP}		μ_s				
[MPa]								
1.00E+04		0.1		0.1				

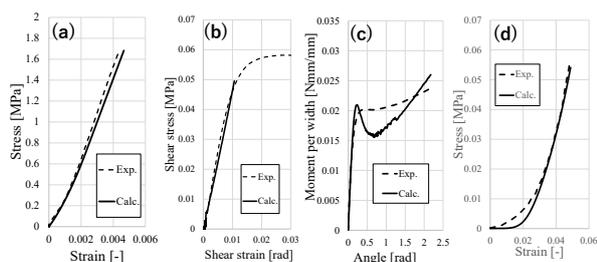


Figure 3 Mechanical properties of the NCF. ((a) tension, (b) shear, (c) bending and (d) compaction)

4. 検証と比較

モデルの検証のため図 4 に示すような賦形試験 (球形圧子による押し込み) を行い、その結果とモデルによる解析結果を比較した。図 5 はシートの注目箇所に生じた変形状態である。表面で確認される広範囲の目開き (図中 a において表側の繊維に沿う方向に広がる) が改良のモデルではより明瞭に再現できている (図中 b)。また裏面で確認される縫合糸の蛇行がより顕著になり、試験の結果に近づいた。以上のような改善が確認された。

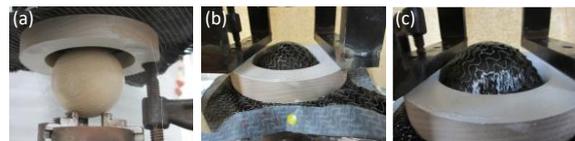


Figure 4 Conditions at experiment of a forming

	Experiment	Calculation (new)	Calculation (prev.)
Top view			
Bottom view			

Figure 5 Comparison between the experimental results and the numerical results with/without improved model

5. 結言

提案する NCF シートの有限要素モデルについて繊維部分の構成則を修正した。このモデルを、材料特性を決定した上で賦形の解析に用いたところ、過去のモデルより精密に形状不整合が再現されることを確認した。従って今回の修正により賦形解析で必要とされる再現能力が向上したものと考える。

参考文献

- 山本, 榊原, 今奥, 座古, 李, 小林: プラスチック成形加工学会 第 28 回秋季大会 成形加工シンポジウム '20
- Weiss, Schauer, Gardiner: Proc ASME Winter Annual Meeting, (1996) BED-33:347-348
- Charmetant, Vidal-Sallé, Boisse: Composites Science and Technology 71 (2011) 1623-1631