

# 炭素繊維織物複合材料の繊維ハイブリッド構造が力学的特性に及ぼす影響

田茂井 勇人 (京都工芸繊維大学 先端ファイブ科学専攻, info@tayuh.jp)  
 迫田 健太郎 (京都工芸繊維大学 先端ファイブ科学専攻, kentaro\_sakoda@yahoo.co.jp)  
 魚住 忠司 (岐阜大学 複合材料研究センター, uozumi@gifu-u.ac.jp)  
 大谷 章夫 (岐阜大学 複合材料研究センター, a\_ohtani@gifu-u.ac.jp)  
 仲井 朝美 (岐阜大学 工学部, nakai@gifu-u.ac.jp)

## Effect of fiber hybrid structure on mechanical properties of carbon fiber reinforced woven fabric composite

Hayato Tamoi (Graduate School of Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of Technology, Japan)  
 Kentaro Sakoda (Graduate School of Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of Technology, Japan)  
 Tadashi Uozumi (Composite Materials Center, Gifu University, Japan)  
 Akio Ohtani (Composite Materials Center, Gifu University, Japan)  
 Asami Nakai (Faculty of Engineering, Gifu University, Japan)

### 要約

繊維強化プラスチック (FRP) は強化繊維、樹脂、界面の要素より構成されているが、単一の繊維および樹脂からなる複合材料では発現し得ない物性を材料に付与するため、特にハイブリッド複合材料に関して多くの研究がなされている。繊維ハイブリッド複合材料は、一般には2種類以上の繊維を組み合わせた材料のことを示している。同じ繊維材料を使用しているが、織度や撚糸状態等、構造が異なる繊維材料を1つの強化形態内で併用するハイブリッド構造を、本研究では“繊維ハイブリッド”の一種と考えた。テキスタイル技術には撚糸と無撚糸を組み合わせた「ちりめん」がある。この「ちりめん」を強化基材に用いることで、繊維構造ハイブリッドによる新たな特性や機能が期待できる。本研究では、ちりめんの構造を適用した炭素繊維織物複合材料のたて糸方向に対する引張方向および撚り数が、初期破壊発生応力に及ぼす影響を検討し明らかにした。次に、上記複合材料の強化形態のよこ糸を変更し、よこ糸に撚糸と無撚糸の交互配置とした場合、さらに、ガラス繊維を用いた場合の2種類の繊維ハイブリッド複合材料において、撚り数の初期破壊発生応力に及ぼす影響を明らかにした。また、初期破壊発生時のよこ糸撚糸の見かけの繊維束内界面強度を算出し、よこ糸撚糸の撚り数との関係を明らかにした。

### キーワード

繊維ハイブリッド, 炭素繊維強化複合材料, 織物構造, 初期破壊発生応力, 引張特性

### 1. 緒言

繊維強化プラスチック (FRP) は強化繊維、樹脂、界面の要素より構成されているが、単一の繊維および樹脂からなる複合材料では発現し得ない物性を材料に付与するため、ハイブリッド複合材料に関して多くの研究がなされている。ハイブリッド複合材料は、一般には2種類以上の繊維を組み合わせた材料のことを示している。ハイブリッド化により、相互に短所を補い、それぞれの長所を生かすことによる高機能化が期待される。ハイブリッド複合材料の中でも、最も一般的なハイブリッド複合材料は、異なる特性を有する繊維を一つの複合材料中に用いたものであり、強化繊維にはガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維などが使用される。この繊維ハイブリッド複合材料におけるハイブリッド化技術に関しては、炭素繊維とバサルト繊維のハイブリッド積層板により力学的特性と材料コストの低減の両立を検討している (Subagiaa et al., 2014)。炭素繊維と天然繊維のハイブリッド積層板により、環境負荷への低減と力学的特性の両立を検討している (Sapiai et al., 2014)。その他にも数多くの研究例が報告されている (Isa et al., 2013; Mansol et al., 2013; Eduardo et al., 2012; Venkateshwaran et al., 2012; Sha et al., 2012)。繊維ハイブリッドの概念をさらに拡張し、同じ繊維材料を使用しているが、織度や撚

糸状態等、構造が異なる繊維材料を1つの強化形態内で併用するハイブリッド構造を本研究では“繊維構造ハイブリッド”と定義する。テキスタイル技術には撚糸と無撚糸を組み合わせた「ちりめん」がある。この「ちりめん」を強化基材に用いることで、繊維構造ハイブリッドによる新たな特性や機能が期待できる。

そこで本研究では、たて糸が無撚糸、よこ糸が撚糸で構成された繊維構造ハイブリッド複合材料である炭素繊維織物複合材料を作製した。試験片長手方向とたて糸方向の異なる試験片を切り出し、炭素繊維織物のたて糸方向と引張方向とが異なる場合の撚り数の違いが、初期破壊発生応力に及ぼす影響を検討した。また、よこ糸を撚糸と無撚糸の交互配置とした炭素繊維織物複合材料、および、よこ糸にガラス繊維を用いたガラス繊維-炭素繊維ハイブリッド織物複合材料の撚り数が、初期破壊発生応力に及ぼす影響について検討した。さらに、撚り数を考慮した解析方法を提案し、見かけの界面強度を算出することにより初期破壊発生箇所および初期破壊発生応力の同定を行い、炭素繊維織物複合材料の初期破壊メカニズムについて検討した。

### 2. 材料および試験方法

強化基材には炭素繊維 (三菱レーヨン(株)製, PYROFIL TR 30S 3L A1 size SLA) を用いて作製した平織物を用いた。図1に強化基材の模式図を示す。

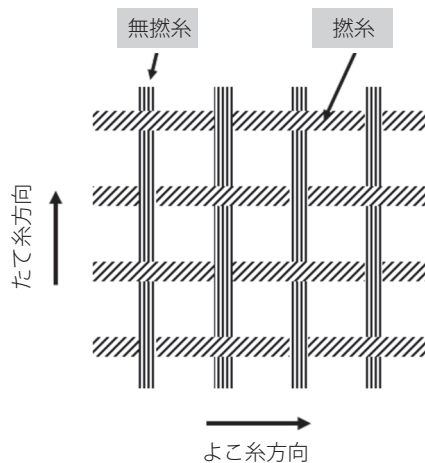


図1：織構造模式図

たて糸に無撚糸、よこ糸に撚り数の異なる撚糸を用いた6種類の強化基材を作製した。試験片名称およびそれぞれの仕様を表1に示す。撚り回数は0、10、30、50、100、200回/mの6種類とした。マトリックス樹脂にはビニルエステル樹脂(リポキシR-806；昭和高分子(株))を用いて成形を行った。硬化剤としてメチルエチルケトンパーオキサイド・ジメチルフタレート(パーメックN, 日本油脂(株))を樹脂に対して0.7 phr添加、攪拌し、ハンドレイアップ法にて、繊維構造ハイブリッド複合材料単層板を作製した。樹脂の硬化条件は、常温で24時間、後硬化として、100℃の恒温雰囲気下で2時間とした。

表1：試験片リスト(タイプA00, A05, A15)

たて糸	よこ糸	撚り数(回/m)	材料
A-0S	無撚糸	0	炭素繊維
A-10S	撚糸	10	
A-30S	撚糸	30	
A-50S	撚糸	50	
A-100S	撚糸	100	
A-200S	撚糸	200	

試験片 (Type A00) はたて糸方向に沿って長さ250 mm、幅25 mm、スパン間距離を150 mmとした。また、たて糸方向と試験片長手方向が5°と15°となる試験片 (Type A05, Type A15) も作製した。さらに、よこ糸を撚糸と無撚糸の交互配置とした炭素繊維織物複合材料 (Type CN)、および、よこ糸にガラス繊維を用いたガラス繊維-炭素繊維ハイブリッド織物複合材料 (Type GN) についても、撚り数の異なる繊維束を用いて作製し、たて糸方向に沿って切り出し試験片とした。試験片名称およびそれぞれの仕様を表2、表3に示す。

引張試験はインストロン万能試験機 (INSTRON社製、Type 55R4206) を用いて、クロスヘッドスピード1 mm/minで行った。ひずみは試験片中央部にゲージ長10 mmのひずみゲージ (KFG-5-120-C1-11, 共和電業(株)) を貼り付け測定した。

表2：試験片リスト(タイプCN)

たて糸	よこ糸	撚り数(回/m)	材料
A-0S	無撚糸	0	炭素繊維
A-10S	撚糸	10	
A-30S	撚糸	30	
A-50S	撚糸	50	
A-100S	撚糸	100	
A-200S	撚糸	200	

表3：試験片リスト(タイプGN)

たて糸	よこ糸	撚り数(回/m)	材料
GN-0S	無撚糸	0	ガラス繊維
	無撚糸	0	炭素繊維
GN-10S	無撚糸	0	ガラス繊維
	撚糸	10	炭素繊維
GN-30S	無撚糸	0	ガラス繊維
	撚糸	30	炭素繊維
GN-50S	無撚糸	0	ガラス繊維
	撚糸	50	炭素繊維
GN-100S	無撚糸	0	ガラス繊維
	撚糸	100	炭素繊維
GN-200S	無撚糸	0	ガラス繊維
	撚糸	200	炭素繊維

### 3. 試験結果

本研究では、応力-ひずみ線図におけるKnee pointにおいて初期破壊が発生したとみなし、その点における応力を初期破壊発生応力と定義した。試験片タイプA00、A05、A15の引張試験による、初期破壊発生応力と撚り数の関係を図2に示す。タイプA00が全体的に他のタイプよりも高い値を示し、撚り数の増加に伴い初期破壊発生応力が低下した。タイプA05、A15では撚り数が変化しても初期破壊発生応力はあまり変化せず、おおよそ20 MPaの値を示した。このことより、

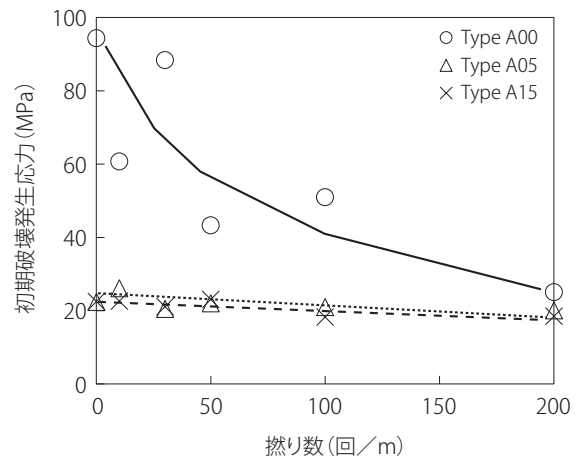


図2：初期破壊発生応力と撚り数の関係 (タイプA00, A05, A15)

たて糸方向に対する引張方向の影響が大きいことが明らかとなった。

次に、試験片タイプCNとGNの引張試験による初期破壊発生応力と撚り数の関係を図3に示す。タイプCNは撚り数0から50回までの範囲では、撚り数の増加に従い初期破壊発生応力は低下し、その後、撚り数が増加しても初期破壊発生応力の低下は見られなかった。タイプGNの場合は、撚り数50以上の範囲で撚り数が増加すると初期破壊発生応力は低下した。

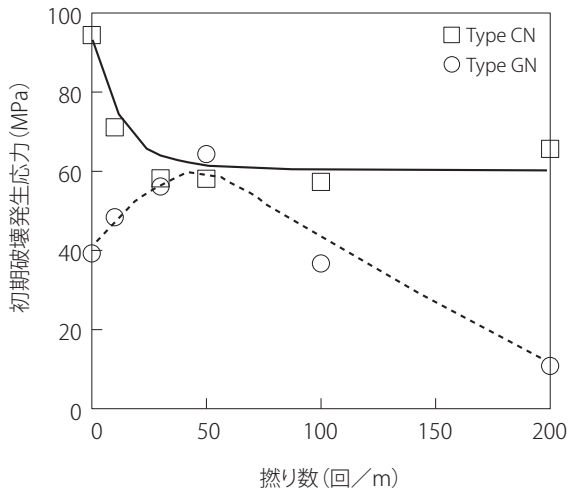


図3：初期破壊発生応力と撚り数の関係(タイプCN, GN)

#### 4. 有限要素解析

各試験結果より初期破壊発生応力を明らかにした。ここではよこ糸の撚り数が、初期破壊発生応力に与える影響について考察するため、断面観察により得られた内部構造を反映した有限要素モデルを用いて解析を行い、撚りの初期破壊発生応力への影響を検討した。

織物複合材料における初期破壊であるトランスバースクラックは、よこ繊維束内の繊維—樹脂間の界面における破壊であることが明らかとなり、繊維束内界面の特性に大きく依存することが分かっている。

本研究では、界面を扱うモデルを作製した。本解析モデルにおいては、よこ繊維束内に発生するトランスバースクラックを表現するため、繊維束内に界面要素を設けている。三次元はり要素を使用しており、引張応力によるトランスバースクラック発生のみを考慮する。これにより、独立した界面の材料定数として取り扱うことが可能である。

##### 4.1 有限要素解析モデル

織物複合材料の内部構造（繊維束間距離、繊維束断面積、繊維束断面形状の長径、短径およびアスペクト比）を試験片の断面観察により定量的に把握し、解析モデルを構築した。試験片タイプA00とCNとGNに対して各試験片のたて糸方向とよこ糸方向の断面観察を行った。

作製した織構造モデルの各要素について図4に示す。三次

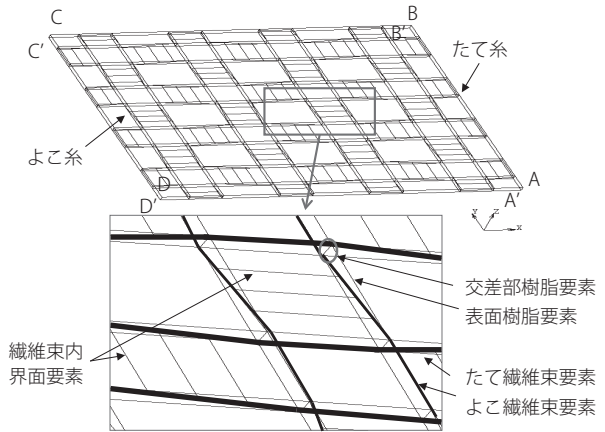


図4：織構造モデル

元はり要素を用いて織構造を表現した。太線で示した要素はたて繊維束要素を、点線で示した要素はよこ繊維束要素を示している。細線で示した要素は樹脂要素を表している。樹脂要素については、繊維束間の力の伝達を考慮し、繊維束交差部に要素(交差部樹脂要素)を設け、表面に存在する樹脂を考慮し、モデル表面にも要素(表面樹脂要素)を設けた。

##### 4.2 解析条件

繊維束要素の形状は、断面観察結果から得られた断面積とアスペクト比を用いて、矩形近似した。矩形近似する断面は、繊維束を二分割して表現している。樹脂要素についてはモデルにおいて幅と厚さから矩形近似し、断面積と断面二次モーメントを断面形状として示している。

繊維束要素の材料定数は、弾性率および繊維束内Vfから複合則を用いて算出した。まず、繊維束を一方向材と見なし、断面観察において測定した繊維束面積、フィラメント径およびフィラメント数から繊維束内Vfを算出した。

本解析で用いた境界条件を図5に示す。図中の面CDD' C'上の繊維束要素上の1点の節点のX、Y、Z軸方向の変位および各軸まわりの回転を拘束し、CDD' C'面上の全ての節点のX、Z軸方向の変位およびZ軸まわりの回転を拘束した。面ABB'A'上のすべての節点に対して、X軸方向へ一様な強制変位を付与した。さらに、モデルの連続性を考慮するために、面ADD'A'

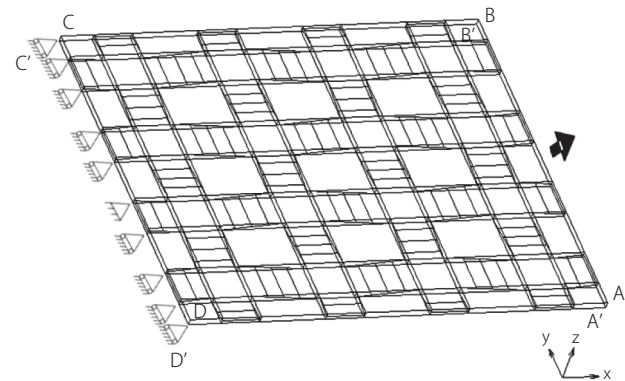


図5：境界条件



および面BCC' B'は平面を保ったまま幅方向にポアソン効果により変形すると仮定し、面ADD' A'上および面BCC' B'上の全ての節点は、変位量が同じになるようにした。

#### 4.3 界面強度の同定

本解析は、初期破壊発生メカニズムを検討することを目的とするため、初期破壊を弾性限界とみなし、線形弾性解析を行った。見かけの界面強度の算出は、実験結果と解析結果を組み合わせることにより界面強度を同定した。すなわち、実験より得られた初期破壊発生応力を解析モデルに与えた際に界面要素に発生する応力を、見かけの界面強度とした。

#### 4.4 解析結果

本解析により試験片タイプA00とCN、GNの弾性率を得た。その代表例として試験片タイプA00の解析により得られた弾性率と実験結果より得られた弾性率を比較した。それぞれの弾性率は実験結果と良い一致を示しており、解析手法の妥当性を確認した。界面強度の同定手法により求めた試験片タイプA00とCN、GNのよこ糸燃糸の繊維束内界面強度と撚り数の関係を表4に示す。見かけの界面強度は、どのタイプにおいても、撚り数が増加するに伴い減少することが明らかとなった。撚り数が増加すると、繊維束のアスペクト比が小さくなり、より低い応力で初期破壊が発生したと考えられる。

表4：よこ糸燃糸の見かけの繊維束内界面強度と撚り数の関係

	見かけの界面強度 (MPa)		
	Type A00	Type CN	Type GN
0S	22.9	22.9	21.8
10S	22.1	20.8	19.1
30S	21.8	18.3	18.6
50S	15.6	17.9	17.1
100S	14.9	17.6	13.5
200S	10.5	16.8	8.6

#### 5. 結言

本研究では、炭素繊維織物複合材料の撚り数と引張方向の初期破壊発生応力に及ぼす影響を検討した。たて糸方向と引張方向とが一致する場合、撚り数が増すと初期破壊発生応力が低下する傾向を示した。たて糸方向と引張方向とがずれると、その値は低下し、撚り数に関係なく一定の値を示すことを明らかにした。

次に、たて糸には無撚糸を用い、よこ糸には撚糸と無撚糸による繊維構造ハイブリッドにより構成された繊維構造ハイブリッド複合材料と、さらに、よこ糸に関して、炭素繊維とガラス繊維による繊維物性ハイブリッドの適用を考案した。これらの強化基材に対し撚り数の異なる繊維ハイブリッド複合材料を作製し、撚り数の違いが初期破壊発生応力に及ぼす影響を検討した。タイプCNは撚り数0から50回までの範囲では、撚り数の増加に従い初期破壊発生応力は低下し、タイプGNの場合は、撚り数50回以上の範囲で撚り数が増加する

と初期破壊発生応力は低下することを明らかにした。また、要素解析を用いた界面強度の同定手法により求めた見かけの繊維束内界面強度は、撚り数が増加するに伴い減少することが明らかとなった。撚り数が増加すると、繊維束のアスペクト比が小さくなり、より低い応力で初期破壊が発生したと考えられる。有限要素解析により、界面相の材料定数を定量的に求めることが可能となった。

以上より、撚り数の違いにより、よこ繊維束内の見かけの界面強度が異なることが明らかとなった。つまり、よこ繊維束内における繊維-樹脂間界面の初期破壊は、異なる撚り数を有する繊維構造ハイブリッドの概念を炭素繊維織物複合材料に適用することで、制御することができることが明らかとなった。繊維束の撚り数をコントロールすることにより、初期破壊発生を設計できることが示唆されたため、例えば初期破壊発生をモニタリングするセンサとして強撚糸を利用することが可能であると考えられる。また、炭素繊維織物複合材料において、よこ繊維束に異なる初期破壊応力を有する繊維を使うことにより、複合材料の初期破壊箇所を特定することが可能となることから、安全な複合材料構造部材の開発にもつながると言える。

#### 引用文献

- Isa, M. T., Ahmed, A. S., Aderemi, B. O., Taib, R. M. and Mohammed-Dabo, I. A. (2013). Effect of fiber type and combinations on the mechanical, physical and thermal stability properties of polyester hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 52, 217-223.
- Mansor, M. R., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., Nuraini, A. A. and Hambali, A. (2013). Hybrid natural and glass fibers reinforced polymer composites material selection using Analytical Hierarchy Process for automotive brake lever design. *Materials & Design*, Vol. 51, 484-492.
- Pereira, E. B., Fischer, G. and Joaquim Barros, A. O. (2012). Effect of hybrid fiber reinforcement on the cracking process in fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, 1114-1123.
- Sapiai, N., Jumahat, A. and Hakim, R. N. (2014). Tensile and compressive properties of hybrid carbon fiber/kenaf polymer. *Composite Advances in Environmental Biology*, Vol. 8, No. 8, 2655-2661.
- Subagiaa, A., Kim, Y. L., Tijing, D., Kim, C. S. and Shon, H. K. (2014). Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, 251-258.
- Venkateshwaran, N., Elayaperumal, A. and Sathiyaa, G. K. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, 793-796.
- Yin, S., Wu, L., Ma, L. and Nutt, S. (2012). Hybrid truss concepts for carbon fiber composite pyramidal lattice structures. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, 1749-1755.

(受稿：2014年12月25日 受理：2015年2月23日)