【一般論文／Transaction】

ピッチ系，PAN 系カーボン繊維を用いた ハイブリッド CFRP の構造設計とその力学特性

橋詰 拓勇^{*1}・竹村 振一^{*2}・倪 慶清^{*3,#}

^{*1}信州大学大学院総合工学系研究科

^{*2}ENEOS 株式会社 機能材カンパニー 機能材研究開発部

^{*3}信州大学船影領域隔合研究群 国際ファイバー工学研究拠点

Structural Design of Hybrid CFRP Using Pitch-Based and PAN-Based Carbon Fibers and Their Mechanical Properties

Takuo Hashidume^{*1}, Shinichi Takemura^{*2}, and Qing-Qing Ni^{*3,#}

^{*1}Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University 3-15-1, Tokida, Ueda City, 386-8567, Japan

^{*2}ENEOS Corporation, High Performance Materials Company, HPM Research & Development Dept., 3-390,
Koyasudori, Kanagawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 221-0021, Japan

^{*3}Institute for Fiber Engineering, Shinshu University, 3-15-1, Tokida, Ueda City 386-8567, Japan

Abstract: The purpose of this study is to design a hybrid CFRP structure using pitch-based carbon fiber and PAN-based carbon fiber, and to develop an optimal hybrid CFRP structure. Various cross-laminated hybrid CFRP structures were fabricated, and the composition and arrangement of pitch-based and PAN-based carbon fibers were changed. The developed CFRP structures were investigated by bending and impact measurements. As a result, the following findings were obtained.

The results of the mechanical properties of three-point bending showed that it was possible to obtain higher bending strength than the individual pitch-based or PAN-based CFRP structure by hybridizing. The hybrid CFRP structure with 20% pitch-based carbon fiber in the outermost layer and 80% PAN-based carbon fiber in the core layer shows higher flexural strength, flexure and fracture initiation energy than PAN-based 100% CFRP. It was confirmed that the reinforcement effect of the hybrid of pitch type and PAN type CFRP was remarkable with the synergistic effect of both carbon fibers.

From the dynamic mechanical properties by the impact test, a hybrid CFRP structural material with PAN-based carbon fiber 60% in the outermost layer and pitch-based carbon fiber 40% in the core layer, the residual strength after maximum load and the total absorbed energy are greatly improved. Ultrasonic testing shows that pitch-based carbon fibers are arranged in the outermost layer, which reduces delamination and improves internal damage resistance, and supports the hybrid reinforcing effect of pitch-based and PAN-based CFRP. All of these results indicated it is possible to improve the static and dynamic mechanical performance and optimize the material structure by designing the ratio of the pitch-based carbon fiber and the PAN-based carbon fiber and the arrangement in the thickness direction of CFRP structures, which may help in the future CFRP structural design.

(Received 22 March, 2020; Accepted 11 May, 2020)

1. 緒 言

近年，地球温暖化および資源の枯渇などの地球環境問題が深刻となっており，地球環境問題への取り組みが世界的に行われている．特に航空宇宙および自動車

産業を代表とする輸送機器からの排気ガスが問題となっており，省エネルギーの観点から軽量化が必要とされている．そこで，軽量高強度の複合材料が期待されている．その中でも，カーボン繊維強化プラスチック (Carbon Fiber reinforced Plastics: CFRP) は，金属

corresponding author: Qing-Qing Ni (E-mail: niqq@shinshu-u.ac.jp)

材料と比較して低比重、高比強度、高比剛性および高比弾性率を持つ材料であるため、軽量化が容易に可能である。そのため、軽量化が重要である航空機および人工衛星などの航空宇宙分野および自動車への使用が広がっている[1-3]。

CFRP が、何らかの外的要因によって衝撃を受けた場合、繊維および母材の破壊、繊維および母材との境界面はく離、繊維の引き抜き、積層界面における層間剥離などによって損傷が生じ、構造が破壊される可能性がある。このように構造が損傷・破壊された場合、構造物の強度が急激に低下し、大事故につながる。しかし、CFRP 内の衝撃損傷は、目視検査によって検出されない場合が多い。よって、これらの構造材の衝撃特性を把握し、構造物に対して十分な衝撃特性を持つ CFRP を使用することが重要である。衝撃損傷による問題を未然に防ぐためには、事前に衝撃特性を把握し、適切な CFRP を使用する必要がある。しかし CFRP は、構成する繊維、母材ともに高ひずみ速度では低ひずみ速度と異なる力学的性質を持つことが多く、構造因子による異方性および不均一性を持つため、繊維方向や負荷方向により異なる力学的挙動を示す。

一方で、CFRP の特性改善の手法として異なる特性の繊維から成るハイブリッド CFRP の設計が重要である。物性の大きく異なる特性の繊維を使用することで、ハイブリッド FRP は各繊維の欠点を補い合った材料の開発が可能となる[4-8]。ハイブリッド CFRP はカーボン繊維とガラス繊維(CF-GF)やカーボン繊維とアラミド繊維(CF-AF)のように原料となる材料が異なる繊維による特性の違いを利用するケースが多い[9-13]。また、カーボン繊維(CF)は原料および製造方法の違いにより、ピッチ系、ポリアクリロニトリル(PAN)系があり、特性の異なる CF を製造することが可能である[14-17]。PAN 系 CF はポリアクリロニトリルを前駆体とし、高強度で知られる汎用的な CF である。一方で、ピッチ系 CF は石油の精製時に生じるピッチを前駆体とし、幅広い力学特性を有する CF を作製することができる。ピッチ系 CF は使用するピッチの結晶状態により、900 GPa にもおよぶ高い弾性率を有するメソフェーズピッチ系 CF から、50 GPa 程度という低引張弾性率でありながら 2.8% ほどの破断ひずみを有する等方性ピッチ系 CF を生産することが可能である[14]。等方性ピッチ系 CF は、炭素としての摺動性や耐薬品性を活かす分野を中心に用途開発が進んでおり、コスト面においても優れており、より広範囲への応用が期待される。

Naito らは、PAN 系およびピッチ系を使用したハイブリッド CFRP の引張特性を調査した[18-20]。高弾性ピッチ系 CF と PAN 系 CF のハイブリッド CFRP では、初期破断ひずみがピッチ系 CF よりも大きくなり、ハイブリッド CFRP は単独のピッチ系 CF

よりもじん性が向上した[18]。ピッチ系 CFRP と PAN 系 CFRP のハイブリッドはピッチ系に高弾性ピッチ系 CF を用いたハイブリッドが主流であったが、前述のとおりピッチ系 CF には高弾性のものだけでなく、低弾性であるが延性の高い CF も存在する。上記の延性ピッチ系 CF は大きな破断たわみだけでなく圧縮特性に優れるという特徴がある。一般的に使用されている PAN 系 CFRP は引張強度に優れるが、圧縮特性に劣る。曲げ荷重を受けた際荷重面には圧縮特性が生じるため、曲げ強度を向上させるためには引張強度のみならず圧縮特性に優れることも重要となる。荷重面には圧縮荷重により微小座屈が生じるため、PAN 系 CFRP は引張強度にいたる前に圧縮支配の曲げ破壊が生じ、CFRP の曲げ強度向上を妨げる要因のひとつとして考えられ、ピッチ系 CF の優れた圧縮特性を生かして、PAN 系とピッチ系 CFRP をハイブリッドすることで曲げ強度の向上を図ることができる。竹村らにより、高い圧縮特性を有する等方性ピッチ系 CF を使用した一方向ハイブリッド CFRP の衝撃特性向上が示された[21, 22]。

本研究では、等方性ピッチ系 CFRP の構造材への広範囲な応用を展開するため、ピッチ系 CFRP と PAN 系 CFRP によるハイブリッド設計を行い、そのハイブリッド CFRP の力学特性を明らかにし、最適なハイブリッド CFRP 構造を提案したい。調査には、直交積層ハイブリッド CFRP に対し 3 点曲げによる準静的力学試験および落錘衝撃試験による動的力学試験を行った。ハイブリッド CFRP の構造として、ピッチ系 CFRP のコア層を PAN 系 CFRP に置き換えた構造と、ピッチ系 CFRP の外層を PAN 系 CFRP に置き換えた構造等について調査を行った。さらに、各ハイブリッド構造におけるピッチ系と PAN 系 CFRP の割合を変化させ最適構造も調査した。破壊過程による内部損傷に対しては超音波探傷評価を行い[23, 24]、力学的特性と破壊挙動との対応を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片作製

ハイブリッド CFRP 構造は、ピッチ系 CF および PAN 系 CF を使用した一方向プリプレグを用いて作製した。PAN 系 CF は、高い繊維引張弾性率を有し、ピッチ系 CF は、低弾性率だが大きな破断たわみを持ち、圧縮破壊にくい特性を有する。使用したピッチ系および PAN 系カーボン繊維およびそれぞれのプリプレグの諸物性を Table 1 に示す。ピッチ系 CF には日本グラファイトファイバ(株)製グラノック XN-05 を使用し、PAN 系 CF には東レ(株)製 T700S を使用した。各プリプレグを積層し、オートクレープ法を用いて成形し、ハイブリッド CFRP を作製した。成形手順は

以下のようになる。プリプレグを切り出し直交積層となるように積層し、鉄板で挟んだプリプレグを真空パックに入れ、パック内を真空にした。その後、オートクレーブ(DL-2010, 羽生田鉄工所株)を用いて、積層した試料を加熱圧縮して樹脂を硬化させ、複合材料を作製した。プリプレグの繊維配向は、0°層および90°層の直交積層とし、対称積層構造とした。ハイブリッドCFRPは大きく分けて2種類作製し、ピッチ系CFRPを最外層としたピッチ/PANハイブリッド材及びPAN系CFRPを最外層としたPAN/ピッチハイブリッド材とした。また、ハイブリッドCFRPとの比較のために、ピッチ系およびPAN系単一材の積層板も作製した。作製したCFRPの一覧をTable 2に示す。ハイブリッド材はA1, A2, A3, B1, B2及びB3であり、ピッチ系CFRPを最外層に配置したハイブリッド材はA1, A2, A3とし、PAN系を最外層としたハイブリッド材はB1, B2及びB3とした。また、各ハイブリッドCFRPにおけるPAN系及びピッチ系の割合は各層の厚みより体積比として算出し、各層の厚みは層数×1層の厚みで算出した。

2.2 評価方法

2.2.1 3点曲げ試験

試験機は、オートグラフ(AG-20 kND, 島津製作所株)を用い、荷重およびたわみを測定した。試験片サ

イズは、100×15 mmとした。試験条件は、試験速度を5 mm/minとし、支点間距離を80 mmとし、3回行った。また、得られた結果から、式(1), (2)および(3)を用いて曲げ破壊強さおよび等価曲げ弾性率を求め、最大荷重までの荷重及びたわみを積分して破壊開始までのエネルギーを計算した。

$\frac{\delta}{L} \leq 0.1$ の場合

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \quad (1)$$

$\frac{\delta}{L} > 0.1$ の場合

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \left[1 + 4 \left(\frac{\delta}{L} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$E_b = \frac{L^3 P}{4bh^3 \delta} \quad (3)$$

δ : たわみ[mm]

σ_b : 曲げ破壊強さまたは曲げ強さ[MPa]

P_b : 破壊時荷重または最大荷重[N]

L : 支点間距離[mm]

b : 試験片の幅[mm]

h : 試験片の厚さ[mm]

E_b : 曲げ弾性率[MPa]

P/δ : 荷重-たわみ曲線の直線部の勾配[N/mm]

Table 1 Carbon fibers and prepreg properties.

Carbon fiber properties	XN-05	T700S
	(pitch based carbon fiber)	(PAN based carbon fiber)
Tensile strength (MPa)	1180	4900
Elastic modulus (GPa)	55	230
Density (g/cm ³)	1.65	1.80
Prepreg properties		
CF weight (g/m ²)	100	125
Resin content (wt. %)	37	35
Thickness (mm)	0.11	0.12
Matrix resin	130°C Epoxy	130°C Epoxy

Table 2 List of hybrid CFRP.

Sample name	Type of fibers used	Number of laminated layers	Ratio of pitch CF (vol. %)	Ratio of PAN CF (vol. %)
pitch	pitch	[pitch] ₁₂ s	100	
PAN	PAN	[PAN] ₁₀ s		100
A1	pitch/PAN	[pitch] ₂ /[PAN] ₈ s	19	81
A2		[pitch] ₄ /[PAN] ₆ s	38	62
A3		[pitch] ₆ /[PAN] ₄ s	58	42
B1		[PAN] ₂ /[pitch] ₈ s	79	21
B2	PAN/pitch	[PAN] ₄ /[pitch] ₆ s	58	42
B3		[PAN] ₆ /[pitch] ₄ s	38	62

Fig. 1 Schematic diagram of the impact testing equipment.

2.2.2 衝撃試験

本研究では衝撃特性を評価するために、落錘式衝撃試験を行った。試験機は、落錘衝撃試験機(9250 HV, INSTRON(社))を用い、荷重、エネルギーおよびたわみより衝撃特性を評価した。測定システムの概略図をFig. 1に示す。試験片サイズは、100×100 mmの正方形とした。使用した試験装置のタップは、直径13.0 mmである。試験条件は、エネルギーを160 Jとし、質量を20 kgとした。自由落下による落下高さを0.813 mとし、衝撃時のタップ速度は3.99 m/sである。測定は各サンプルにおいて4回行った。

2.2.3 超音波探傷

衝撃後の外部及び内部損傷の確認のため、目視および超音波探傷装置を用いて衝撃損傷後の損傷状態を評価するために観察した。超音波探傷装置は、超音波映像装置(FS100S, 日立エンジニアリング・アンド・サービス(株))を用いた。プローブは、PTI-15-17(中心周波数15 MHz)を使用し、内部損傷の評価を行った。評価の際には、衝撃面反対側から超音波を入射し観察を行った。

3. 実験結果

3.1 3点曲げ試験結果

Fig. 2 (a)にピッチ系CFRP, PAN系CFRP及びハイブリッドCFRPであるA1の荷重-たわみ曲線を示す。Fig. 2 (a)よりPAN系CFRPは高い最大荷重を示し、ピッチ系CFRPは最大荷重時のたわみが大きいことがわかる。ピッチ系CFRPは引張弾性率が低いものの柔軟な構造材としての使用が可能であることが示された。A1とピッチ系CFRPを比較するとA1はコア層にPAN系による補強層が存在するため、最大荷重および破断たわみが増加した。さらにA1と

PAN系CFRPを比較すると、最大荷重は940 Nから820 Nに13%低下したが、破断たわみは7 mmから12.5 mmに78%大幅に増加した。また、式(1)もしくは(2)より算出される曲げ強度を比較するとPAN系CFRPは1140 MPa, A1は1160 MPaであり、ピッチ系を最外層に配置するハイブリッド化によりPAN系CFRPよりも曲げ強度が向上した。破壊開始エネルギーを比較すると、PAN系CFRPは3.4 Jであり、ピッチ系を最外層に配置したA1材は5.8 Jと70%の増加を示した。ピッチ系を最外層に約20%配置することで、曲げ強度、破断たわみ、破壊開始エネルギーにおいてPAN系CFRPよりも高い値を示し、準静的力学特性が向上したことが明らかとなった。最外層に配置したピッチ系により圧縮特性が改善され、ハイブリッドCFRPの強度向上につながったものと考えられる。Fig. 2 (b)にピッチ系を最外層に配置し、コア層にPAN系を配置したA1, A2およびA3の荷重-たわみ曲線を示す。PAN系の割合はA1>A2>A3である。PAN系の割合を増加させることで最大荷重が増加し、A1の最大荷重は820 NでありA3の420 Nと比較して95%増加したが、破断たわみは11~12 mm付近で大きく変化しなかった。また、最大荷重後に残存強度を示している。これは、最外層のピッチ系が破断した後PAN系が荷重を受け持ち、ハイブリッドCFRP構造材は残存強度を有していることが示された。サンプル断面からも外層が破壊され、コア層が残ったことが確認できた。最外層にピッチ系を約20%、コア層にPAN系を約80%配置したA1では、ピッチ系とPAN系のハイブリッド化による補強効果が著しいことが確認できた。Fig. 2 (c)にPAN系を最外層に配置し、ピッチ系をコア層に配置したハイブリッドCFRPの荷重-たわみ曲線を示す。最外層に使用したPAN系の割合はB3>B2>B1である。Fig. 2 (c)より最外層に

Fig. 2 Load-deflection curve of PAN, pitch and hybrid CFRP (a) pitch based CFRP, PAN based CFRP and pitch/PAN hybrid (b) pitch/PAN hybrid CFRP, (c) PAN/pitch hybrid CFRP.

PAN系を約60%配置したB3は最大荷重で860Nを示し、PAN系の割合が多いほど高い最大荷重を示した。荷重を最も受け持つ最外層に補強層であるPAN系を配置したため、補強層の割合が高くなるほど最大荷重が高くなった。またB2およびB3において、PAN系をコア層に用いたA2およびA3と同様に最大荷重後にハイブリッド材は残存強度を示し、たわみが15mmから25mmまで高い荷重を維持していることがわかる。各ハイブリッドCFRPにおける15~25mmにおける荷重は370N~470Nであり、ピッチ系CFRP単体の最大荷重と近く、最外層のPAN系の破壊後にコア層のピッチ系が荷重を受け持ったものと考えられる。PAN系を最外層に、ピッチ系をコア層に配置することで、残存強度の荷重ピークが増加し、最大荷重後の大きい変形領域にも高い負荷に耐えることが示された。

Fig. 3に各ハイブリッドCFRPにおける曲げ強度、破壊開始エネルギーおよび破断たわみについてPAN系の割合による変化を示す。ハイブリッドCFRPはピッチ系をコア層に使用した場合と最外層に使用した構造で分けて評価した。Fig. 3(a)に各ハイブリッドCFRPの曲げ強度を示す。ピッチ系が最外層のハイブリッドCFRP(A1, A2およびA3)では、コア層のPAN系の割合が増加するにつれ曲げ強度が増加した。PAN系が約80%のA1が最も曲げ強度が高くなり、PAN系が約40%のA3と比較して110%の曲げ強度の向上が見られた。PAN系を最外層に使用したB1, B2およびB3でも、PAN系の割合が多くなると曲げ強度

は増加した。また、ピッチ系とPAN系の割合を同じにした場合では、最外層にPAN系を約40%と約60%をそれぞれ配置したB2およびB3の曲げ強度は、コア層に配置したA3およびA2に比べ、それぞれ約65%および22%と著しく向上し、適材適所に材料配置する効果が明白に示された。Fig. 3(b)に各ハイブリッドCFRPの破断たわみを示す。破断たわみはピッチ系を最外層に配置したA1, A2およびA3が高い値を示す。PAN系を約60%配置したA2およびB3において、コア層に使用したA2は11.9mmであり、最外層に使用したB3の7.5mmと比較して58%高い破断たわみを示した。破断ひずみの大きいピッチ系をひずみの大きくなる最外層に配置したため、ハイブリッドCFRP全体の変形能が大きくなり、破断ひずみが大きくなったものと考えられる。Fig. 3(c)に各ハイブリッドCFRPの破断開始エネルギーを示す。破断開始エネルギーでは、ピッチ系を最外層にしたA1, A2およびA3の方が高い値を示し、同じ約40%のA3に対し最外層にPAN系を使用したB2と比較して20%高いエネルギーを示す。ピッチ系を最外層に配置することで、破壊に要するエネルギーが増加した。最外層にピッチ系を配置することで、破断たわみが増加し破断開始エネルギーの向上に寄与したものと考えられる。ピッチ系を最外層、PAN系をコア層に配置することで、破断開始エネルギーおよび破断たわみが増加し、より変形能力の高いハイブリッドCFRPとすることができた。一方、ピッチ系とPAN系の割合が変化しても破断たわみは大きく変化しない。

Fig. 3 Hybrid CFRP bending test results, (a) bending strength, (b) deflection at maximum load and (c) energy. Error bar is standard error. (N = 3)

3.2 点曲げ試験後の損傷確認

Fig. 4 に pitch, PAN, A1 および B3 の 3 点曲げ試験後の断面写真を示す。Fig. 4 の各断面写真において Y 方向に荷重を加えた。Fig. 4 (a) よりピッチ系 CFRP 単一材では圧縮側の最外層は破断せず、引張側の破壊が生じた。繊維の破断が多く見られた。ピッチ系は圧縮強度に優れているため、圧縮側は引張側に比べ繊維破断が遅れたものと考えられる。Fig. 4 (b) より PAN 系 CFRP は圧縮側および引張側において破断が生じ、引張側において層間剥離が多く見られた。PAN 系は圧縮強度が低く引張強度に優れるため、圧縮側では繊維が破断し、引張側では層間の接着強度を超えて層間剥離が引張破壊により先に生じたものと考えられる。Fig. 4 (c) より A1 は圧縮側および引張側の両側において破断が見られ、ピッチ系単一材の際には見られなかった圧縮破壊が生じたことがわかる。竹村らの調査と同様にハイブリッド化することにより圧縮破壊が生じ、破壊開始エネルギーが増加したものと考えられる [21]。Fig. 4 (d) より B3 は PAN 系 CFRP 単一材と同様に圧縮破壊が生じているが、引張破壊および引張破壊側の層間剥離が減少した。PAN 系をコア層に配置した場合破壊が大きくなり、PAN 系を最外層に使用した場合、破壊が減少した。Fig. 3 (c) において A1 の破壊開始エネルギーが高いのは、構造物全体が負荷に耐えられ、破壊損傷領域が大きくなったためであると考えられる。

3.3 衝撃試験結果

Fig. 5 に衝撃試験による荷重-たわみ曲線の代表値を示す。Fig. 5 (a) にピッチ系 CFRP 及び PAN 系 CFRP の荷重-たわみ曲線を示す。PAN 系 CFRP は最大荷重までたわみの増加と共に荷重が増加し、その後荷重は急落しており最大荷重後に大きな損傷が生じたことがわかる。一方で、ピッチ系 CFRP は最大荷重が低いものの、PAN 系 CFRP のように最大荷重後に荷重が急激に減少することなく最大荷重の 70% の荷重を維持したままで 7.6 mm までたわみが増加している。ピッチ系 CFRP は最大荷重後にも破壊が段階的に進行しより大きなたわみにおいて荷重を保持できていることがわかる。Fig. 5 (b) にピッチ系を最外層に配置したハイブリッド CFRP である A1, A2 および A3 の荷重-たわみ曲線を示す。Fig. 5 (b) よりコア層の PAN 系の割合が増加すると最大荷重が増加するため、PAN 系が荷重を受け持っていることがわかる。さらに、最大荷重後に荷重が大きく低下するたわみが 4.3 mm~4.9 mm 付近であり、最外層のピッチ系がこのたわみ付近で破断していると考えられる。Fig. 5 (c) に PAN 系を最外層に使用したハイブリッド CFRP である B1, B2 および B3 の荷重-たわみ曲線を示す。Fig. 5 (c) より PAN 系を約 60% 最外層に配置した B3 が最も高い最大荷重を示した。荷重が最も加わる最外層に配置した補強層である PAN 系の割合が増加したため、最大荷重が増加した。一方で、PAN 系が約 20% の B1 は最大荷重が最も低く、PAN 系の

Fig. 4 Sample cross section after bending test, (a) pitch based CFRP, (b) PAN based CFRP (c) sample A1 and (d) sample B3.

Fig. 5 impact result load-deflection pitch-based CFRP, PAN based CFRP and hybrid CFRP. (a) pitch based CFRP and PAN based CFRP, (b) pitch/PAN hybrid CFRP, (c) PAN/pitch hybrid CFRP.

割合が増加すると最大荷重が増大することがわかった。また、B1、B2およびB3全てにおいて、最大荷重時のたわみ以外でも高い荷重を示しており、Fig. 5 (a)におけるピッチ系の荷重-たわみ曲線と同様の特徴を示している。衝撃試験では曲げ変形が生じるため最外層にあるCFRPに大きな荷重が加わるが、コア層に配置したピッチ系の特徴がFig. 5 (c)から見られる。Fig. 5 (b)においてもコア層のPAN系と似た形状のグラフとなり、ハイブリッドCFRPの衝撃特性においてコア層のCF種の影響が見られている。また、PAN

系を最外層に配置したハイブリッドCFRPでは、コア層に使用したピッチ系により破断後も高い荷重に耐えることができ、最終的な破壊が遅れていることがわかった。ピッチ系をコア層に配置したハイブリッドCFRPでは柔軟性が向上したものと考えられる。

Fig. 6に各ハイブリッドCFRPにおける最大荷重、破断たわみ、全吸収エネルギーについてPAN系の割合による変化を示す。Fig. 3同様、ピッチ系とPAN系CFをそれぞれコア層に使用した構造と最外層に使用した構造で分けて評価した。Fig. 6 (a)に各ハイブリッ

ドCFRPの最大荷重を示す。Fig. 6 (a)より、PAN系の割合が増加すると最大荷重は増加し、ピッチ系約20%を外層、PAN系約80%をコア層に配置したA1が最大荷重が最も高くなった。PAN系の配置をコア層もしくは最外層のどちらにしても、PAN系の割合増加とともに最大荷重は一定の割合で増加する。PAN系の割合が同一であれば、PAN系を最外層に配置したB1、B2およびB3の方が最大荷重が高くなり、良いハイブリッド効果が得られた。Fig. 6 (b)に各ハイブリッドCFRPの全吸収エネルギーを示す。Fig. 6 (b)より、全吸収エネルギーではPAN系を最外層にしたB1、B2およびB3の方が高い吸収エネルギーを示した。PAN系を約60%配置した場合、コア層に配置したA2は12.2Jの吸収エネルギーであり、最外層に配置したB3では21.5Jとなり、70%の差が生じた。PAN系の配置位置に関わらず、PAN系の割合が増加するほど全吸収エネルギーは増加し、PAN系が多い方が高い全吸収エネルギーを示した。Fig. 6 (c)に破断たわみを示す。PAN系をコア層に配置したA1、A2およびA3は、PAN系が約40%のA2の場合4.3mmの破断たわみであり、PAN系を約40%最外層に配置したB2の3.7mmと比較して14%の差が生じた。破断ひずみの大きなピッチ系が最も変形の大きな最外層に配置されたため、ハイブリッドCFRPの破断たわみが大きくなったものと考えられる。動的力学特性においても、破断たわみを増加させたい場合はPAN系はコア層に配置するのが良いことが分かった。Fig. 6より、PAN系をコア層に配置すると、破断たわみが高くなった。

また、PAN系を最外層に配置すると最大荷重及び全吸収エネルギーが高くなった。

3.4 衝撃荷重後の損傷確認

Fig. 7に超音波による内部損傷観察およびA1、B3の外部損傷観察の結果を示す。白色部分は内部剥離等の内部損傷が存在する部分であり、黒色の部分は外部からも確認できる損傷である。Fig. 7 (a)とFig. 7 (b)にピッチ系CFRPとPAN系CFRPの内部損傷をそれぞれ示す。Fig. 7 (a)及びFig. 7 (b)ともに中心に黒色の部分があり、損傷により超音波の反射がないことがわかる。つまり、Fig. 7 (a)及びFig. 7 (b)の中心部では繊維が破断し、完全に破壊されたものと考えられる。一方で、黒色部分周辺に白色の部分が存在するが、これは超音波が反射している部分であり白色部分に内部損傷が生じたためだと考えられる。Fig. 7 (a)およびFig. 7 (b)より単一材料のCFRPでは内部損傷が少なく、繊維破断により完全に破壊された領域が多いことが分かった。Fig. 7 (c)およびFig. 7 (d)にピッチ系CFRP及びPAN系CFRPからなるハイブリッドCFRPの内部損傷観察結果を示す。Fig. 7 (c)及びFig. 7 (d)より中心の黒色部分の周辺に白色部分が見られ、ハイブリッドCFRPはA1およびB3ともに内部剥離が生じていることが分かった。ハイブリッドCFRPに内部剥離が生じたのは、使用した2種類のカーボン繊維の力学特性が大きく異なるために、衝撃時変形能に差が生じ、その結果両者の層間において剥離が生じたものと考えられる。ハイブリッドCFRPを比較するとA1の方が内部剥離が小さいが黒色部分

Fig. 6 Impact properties of each hybrid CFRP, (a) maximum load, (b) total absorbed energy and (c) deflection at maximum load. Error bar is standard error. (N = 4)

Fig. 7 The internal damage to CFRP and hybrid CFRP, (a) pitch, (b) PAN, (c) A1, (d) B3 and surface of the hybrid CFRP, (e) A1, (f) B3.

が大きく完全に破壊している部分が大きく、外部損傷として目視できる範囲も大きいものと考えられる。ここで、Fig. 7 (e)およびFig. 7 (f)に衝撃試験後の外部損傷を示す。Fig. 7 (e)およびFig. 7 (f)ともに衝撃面反対側からの観察である。Fig. 7 (e)およびFig. 7 (f)より A1 と B3 を比較した場合に、A1 の方が目視できる外部損傷が大きいことがわかる。ピッチ系CFRPを最外層にすることで、ピッチ系カーボン繊維はエネルギー吸収に寄与し、内部剥離の減少につながったと推測される。

4. 結 論

本研究では、ピッチ系カーボン繊維とPAN系カーボン繊維によるハイブリッドCFRP構造設計を行い、最適なハイブリッドCFRP構造を発現することを目的としている。各種直交積層ハイブリッドCFRP構造を作製し、ピッチ系とPAN系カーボン繊維の配合と配置を変化させ、各種構造部材の3点曲げ力学試験および落錘衝撃による動的力学試験を行った。その力学的挙動を調査した結果、以下の知見を得た。

3点曲げの準静的力学特性から、ハイブリッド化することで、ピッチ系またはPAN系カーボン繊維単独構造材よりも高い曲げ強度を得ることができた。最外層にピッチ系カーボン繊維を約20%、コア層にPAN系カーボン繊維を約80%配置したハイブリッドCFRP構造は、曲げ強度、破断たわみ、破壊開始エネ

ルギにおいてPAN系100%のCFRPよりも高い値を示し、曲げ挙動において最も良い特性が発現した。ピッチ系とPAN系CFRPのハイブリッドによる補強効果が著しいことが確認され、超音波探傷による内部損傷評価及び破断側面観察からも両カーボン繊維の相乗効果が裏付けられた。

衝撃試験による動的力学特性からも、最外層にピッチ系カーボン繊維を約20%、コア層にPAN系カーボン繊維を約80%配置したハイブリッドCFRP構造は、最大荷重、破断たわみが向上し、破壊開始までの動的力学特性が向上したことを明らかにした。また、最外層にPAN系カーボン繊維を約60%、コア層にピッチ系カーボン繊維を約40%配置したハイブリッドCFRP構造材では、最大負荷後の残存強度および全吸収エネルギーが大きく向上していることがわかった。ピッチ系カーボン繊維を最外層に配置したことで、層間剥離が少なくなり、内部損傷発生抵抗が向上していることが超音波探傷評価から伺えられ、ピッチ系とPAN系CFRPのハイブリッド補強効果が衝撃特性においても発現していることが確認できた。

これらの結果から、ピッチ系カーボン繊維とPAN系カーボン繊維の割合及び構造材の厚さ方向における配置を設計することにより、静的及び動的力学性能の向上及び材料構造の最適化が可能であることが明らかにされ、今後のCFRP構造設計の一助になるものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり，試料作製および測定にご協力いただいた久野宏哲氏に対し，深く感謝する。

参考文献

1. G. Marsh, *Reinforced Plastics*, **56**(6), 32 (2012).
2. S. Kumara and R. S. Bharja, *Materials Today: Proceedings*, **5**, 2946 (2018).
3. D. D. L. Chung, *Composites Part B: Engineering*, **160**, 644 (2019).
4. Y. Swolfs, L. Gorbatikh, and I. Verpoest, *Composites: Part A*, **67**, 181 (2014).
5. S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, and K. Jayakrishna, *Composites Part B*, **133**, 112 (2018).
6. Y. M. Kanitkar, A. P. Kulkarni, and K. S. Wangikar, *Materials Today: Proceedings*, **4**, 9627 (2017).
7. C. Thanomsilp and P. J. Hogg, *Composites Science and Technology*, **63**, 46 (2003).
8. B. Z. Jang, L. C. Chen, C. Z. Wang, H. T. Lin, and R. H. Zee, *Composites Science and Technology*, **34**(4), 305 (1989).
9. M. R. Wisnom, G. Czél, Y. Swolfs, M. Jalalvand, L. Gorbatikh, and I. Verpoest, *Composites: Part A*, **88**, 131 (2016).
10. C. Dong and I. J. Davies, *Materials and Design*, **54**, 955 (2014).
11. K. Naito and H. Oguma, *Composite Structures*, **161**, 23 (2017).
12. M. Sayer, N. B. Bektas, and O. Sayman, *Composite Structures*, **92**, 1256 (2010).
13. M. Sayer, N. B. Bektas, E. Demir, and H. Çallioğlu, *Composites: Part B*, **43**, 2152 (2012).
14. K. Naito, Y. Tanaka, J. M. Yang, and Y. Kagawa, *Carbon*, **46**, 189 (2008).
15. K. Naito, Y. Tanaka, and J. M. Yang, and *Carbon*, **118**, 168 (2017).
16. K. Naito, Y. Tanaka, J. M. Yang, and Y. Kagawa, *J. Am. Ceram. Soc.*, **92**(1), 186 (2009).
17. K. Naito, *Carbon*, **126**, 346 (2018).
18. K. Naito, J. M. Yang, and Y. Kagawa, *J. Mater. Sci.*, **47**, 2743 (2012).
19. K. Naito, *J. Mater. Sci.*, **48**, 4163 (2013).
20. K. Naito, J. M. Yang, and Y. Kagawa, *ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials*, **24** (2012).
21. S. Takemura, H. Mizuta, and A. S. Kobayashi, *The Japan Society of Mechanical Engineers*, **70**(699), 1658 (2004).
22. S. Takemura, H. Mizuta, A. S. Kobayashi, and T. Noguchi, *The Japan Society of Mechanical Engineers*, **71**(703), 559 (2005).
23. S. Gholizadeh, *Procedia Structural Integrity*, **1**, 50 (2016).
24. K. Komai, K. Minoshima, and H. Yamasaki, *The Japan Society of Mechanical Engineers*, **60**(579), 2511 (1994).