ハイブリッド型 FRP の強度と船体への応用

吹 上 紀 夫

ガラス、カーボン、アラミドの各繊維の FRP ならびに、これらを混合積層した FRP 板の力学特性を紹介するとともに、得られたデータや知見を 3 胴型漁船に応用した場合についても紹介する。

1. まえがき

ガラス繊維を強化材とした強化プラスチック (GFRP) は比強度が高く、耐食性に優れていることから、船体の主要構造材として多く使用されてきた。しかし、GFRP は剛性が低いため、船体のような大きな構造体に使用すると、波浪等外力を受けたとき大きな変形を生じ、推進軸やパイプラインなどに支障を来すことがある。このような現象を防ぐ一手段として船体を FRP サンドイッチ材で製作する方法が用いられてきた。

近年、FRP 船の高速化（主としてプレジャーボート）が進むにつれて、さらに船体の剛性を上げることが要求されるようになり、カーボン繊維等新素材を取り入れたハイブリッド型 FRP (HFRP) が注目されるようになってきた。また、これら新素材は、ガラス繊維に比べ強度特性がよいだけでなく比重も小さいため、比強度や比弾性率を向上させ、FRP 船の高速化および省エネのための重量軽減にも役立つようになる。このようなことから、従来の GFRP に新素材を取り入れた HFRP について、積層構成の違いと強度特性の関係を求めた。

また、そこで得られたデータや知見を船体設計に取り入れた 3 胴型漁船（スーパーマリン）を製作する機会を得たので、その概要と HFRP の実船への応用方法などについても紹介する。

2. 原 材 料

使用した強化材は、ガラス繊維 (GF)、カーボン繊維 (CF) およびアラミド繊維 (AF) の 3 種類で、いずれも織り方は 1 方向に引き揃えた“縦スダレ織”とした。その他、必要に応じガラス繊維チョップドストランドマット (MF) も使用した。これら繊維の記号、目付等明細を表 1 に示す。CF、AF は船体に使用することを目的に、目付の大きいものを特注で製作した。ただし、AF は GF の $600\text{g}/\text{m}^2$ と同等の厚さに成形できる目付に製作したが、CF はロービング太さの関係で、目付の小さなものとなった。

樹脂はイソ系不飽和ポリエステル（記号：UP：RIGOLAC-259BQTN）およびビニルエステル（記号：VE：RIPOXY M-760BT）を使用した（ともに昭和高分子 KK 製）。

3. 試 験 材

試験材は、GF、CF、AF のうち同一の繊維を積層した「積層材(1)」および GF、CF、AF、MF を適宜組合せ積層した「積層材(2)」(HFRP) とした。記号、積層構成等詳細を表 2 に示す。

積層材(1)は、HFRP としたときに必要な各層の強度特性を求めるための試験材である。積層数を 8 層としたのは、直角 2 方向で上下対称に成形する場合にこの積層数が必要となるためである。なお、ここ

表1 繊維の記号, 織り構造, 目付等明細

記号	繊維構成	繊維径	目付	製造者
CF	縦スタレ織カーボン繊維	7.0μ	390g/m ²	東邦レーヨン KK
AF	縦スタレ織アラミド繊維	12.0	350	テイジン KK
GF	縦スタレ織ガラス繊維	13.3	660	ユニチカ ユーエムグラス KK
MF	チョップドマット ガラス繊維	11.0	450	〃

表2 積層材の記号と積層構成

積層材(1)		積層材(2)	
記号	繊維構成	記号	繊維構成
GUO	0°×8層 (GF)	GCM	(GF+CF+MF) sym. (6層)
CUO	0°×8層 (CF)	GAM	(GF+AF+MF) sym. (6層)
AUO	0°×8層 (AF)	CAM	(CF+AF+MF) sym. (6層)

図1 積層構成概念図

では直角2方向に積層したものは省略した。

積層材(2)はGF, CF, AFのうち2つを最外層と2層目に上下対称に配置し, MFは中央部に2層配置したハイブリッド型FRP (HFRP) である。一例として, 図1にGCM, GAM, ACMの積層構成を示す。この記号は, 例えばGCMは1層目にGF, 2層目にCF, 中央層にMFを配置(上下対称)していることを示す。

積層材(1)および積層材(2)はともに, 常温でハンドレイアップ法により成形し, 成形硬化後は40℃で24時間後硬化した。

4. 試験要領とHFRPの強度

FRPの強度特性は強化繊維の特性や樹脂の特性に大きく影響されるため, 積層材の強度だけでなく, 強化材に用いた縦スタレ織布のみの引張強度, 樹脂のみの引張および圧縮強度特性も求めた。繊維, 樹脂, 積層材(1)(2)の試験方法はほぼJISに準じて行ったが, 圧縮試験は, 著者らが考案した両端部を治具で固定する方法(BEF法)で行った。試験機は定速度型材料試験機(容量10Ton, テンシロンUTM-10T)を用い, 環境温度は23±2℃とした。

HERPの引張強度および圧縮強度を求める場合, 各層の強度特性が異なりそれぞれの層の受け持つ応

力が異なるため, 1つの層が破壊したときをその試験材の破壊点とした。また, 曲げを受ける場合においても各層の引張と圧縮の強度特性が異なることから, 積層構成によって中立軸が移動する場合もあり, これらを考慮して強度を求めることとした。

HFRP試験材の強度を求めるための計算式は次の通りである。

引張・圧縮強度： $\sigma=\Sigma(E_i \cdot A_i)\varepsilon/A$ (1)

曲げ強度： $\sigma_b=M\Sigma(E_i \cdot \eta_i)/[EI]$ (2)

曲げ剛性： $[EI]=\Sigma E_i(I_i+A_i \cdot \eta_i)$ (3)

中立軸： $\eta=\Sigma(E_i \cdot A_i \cdot \eta_i)/\Sigma(E_i \cdot A_i)$ (4)

ただし, E_i : 各層の引張または圧縮弾性係数

- ε : 試験材が破壊したときの歪
- I_i : 各層の断面2次モーメント
- A : 全体の断面積
- A_i : 各層の断面積
- M : 曲げモーメント
- η_i : 各層から中立軸までの距離
- EI : 曲げ剛性
- Σ : i=1からnまで合計

5. 試験結果および考察

5.1 縦スタレ織繊維および樹脂の強度特性

強度試験はFRPを構成している強化繊維および樹脂についても行った。表3は使用した縦スタレ織布の引張試験結果である。表中, フィラメントの引張強度は各社のカタログより引用したもので, フィラメントの引張強度に対しロービングの引張強度の低いのは, ロービングを構成している各フィラメン

表3 繊維の引張試験結果

記号	織構式	ロービング特性		フィラメント特性	
		σ	E	σ	E
GF	縦スタレ織	95	7700	350	7500
CF	縦スタレ織	155	22700	400	24000
AF	縦スタレ織	240	7590	350	7400

σ : 引張強度 kg/mm², E: 引張弾性係数 kg/mm²

表 4 樹脂の引張および圧縮試験結果

樹脂	引張特性		圧縮特性	
	σ_T	E_T	σ_C	E_C
UP	3.3	370	13.6	460
VE	5.4	410	9.7	410

σ : 強度 kg/mm², E : 弾性係数 kg/mm²

図 2 繊維および樹脂の試験結果 1

トに力が均等にかからないことと、フィラメントの引張強度にバラツキがあるためと思われる。

表 4 は樹脂のみの引張試験および圧縮試験結果である。ポリエステル樹脂 (UP) とビニルエステル樹脂 (VE) を比較すると、破壊までの引張歪みが、UP は0.9%、VE は1.8%となった。また、引張強度では $UP < VE$ となるのに対し、圧縮強度では $UP > VE$ となった。伸びの大きい樹脂は圧縮強度が低いようである。

図 2 は繊維および樹脂の引張試験による応力と歪みの関係を示したもので、積層材(1)の GUO, CUO, AUO の結果も併記した。AF は強度、伸び共に大きい、成形材 AUO では樹脂 (UP, VE とも) の方が追従できないため、破壊点の伸びが繊維のみの伸びより小さくなった。逆に CF を成形した CUO で

図 3 積層材(1)の試験結果 1 (強度)

図 4 積層材(1)の試験結果 2 (弾性係数)

は樹脂 (UP, VE とも) よりも繊維の方が先に破壊することがわかった。

5.2 積層材(1)の強度特性

ハイブリット型にした場合の強度を求めるには各層の強度特性が必要となるため、同一繊維を積層した積層材(1)について、引張試験、圧縮試験および曲げ試験を行ったが、その結果を図 3 (強度) および図 4 (弾性係数) に示す。

引張強度に対する圧縮強度は、UP を使った場合、CF を積層した CUO では 53%、AF を積層した

AUO では23%と極端に低い値を示した。従って、CUO と AUO の曲げ試験では、すべて圧縮側で破壊し、曲げ強度も引張強度より低い値となった。VE を使った場合も同様の現象を示した。GUO の圧縮強度 / 引張強度は UP 使った場合が70%、VE を使った場合は122% (圧縮>引張) となった。AUO の弾性係数では、AUO の圧縮弾性係数の方が低いにもかかわらず高い値を示した。CUO では強度と同様引張弾性係数よりも圧縮弾性係数の方が小さくなった。この現象は樹脂が UP または VE と違っても同じ現象となった。

船体に使用している MR 構成 (MF とロービングクロスを交互に積層) の GFRP では引張強度よりも圧縮強度の方が大きく、船体の設計値や材料の強度基準には引張強度が使用されているが、新素材を用いた FRP では、設計値あるいは強度基準として圧縮強度も考慮しなければならないことがわかった。

5.3 積層材(2)の強度特性

積層材(2)の引張試験、圧縮試験および曲げ試験結

図5 積層材(2)の試験結果1 (強度)

図6 積層材(2)の試験結果2 (弾性係数)

果を図5 (強度) および図6 (弾性係数) に示す。

図5において、全般に圧縮強度は引張強度の半分程度となっている。これは積層材(1)における現象がハイブリッドにした場合にも現れたものと思われる。一方、曲げ強度はMR構成のGFRPと同様、引張強度および圧縮強度よりも高い値を示した。特に、最外層にGF、2層目にCFを配置したGCMでは各層に働く曲げ応力のバランスが良いため100 kg/mm²以上の値を示した。

図6において、CF層を表面に配置したCGMやCAMでは曲げ弾性係数は高い値を示した。この値はCFのみを積層したCUOに近い値であったことから、剛性を上げる手段として、全層をCFにする必要がなく、表面にのみ配置する方法もあることがわかった。しかし、この構成を用いる場合は、曲げ強度を優先した形で設計値を決めなければならない。また、引張強度および圧縮強度の関係からHFRPを使用する場合の設計値および基準値については積層材(1)の場合と同様圧縮強度も考慮する必要がある。

(1) GCM

(2) ACM

(3) GAM

図7 ハイブリッド比と引張強度

(1) GCM

(2) ACM

(3) CGM

図8 ハイブリッド比と圧縮強度

5.4 ハイブリッド比と引張強度および圧縮強度

GCM, GAM, ACMを構成している各層GF, AF, CF, MFの積層厚さ比(使用割合:ハイブリッド比)を変化させた場合の引張強度および圧縮強度を計算で求めた。

計算するに当たって、実験値より各層の破壊歪み ε を、引張ではCF層が0.85%, MF層が1.51% (UP, VE共), 圧縮では各層とも0.5% (UP), 0.55% (VE)とした。これらの破壊歪みを(1)式に入れて計算した結果が図7である。

図中、 α は全厚さに対するMF層が占める割合(厚さ比)で、90%, 50%, 10%の場合を示し、横軸 β は、GF, AF, CFのうちの2つの層の割合($\beta = GF / (GF + CF)$)で、95%から5%まで変化させた場合を示す。例えば、図7(1)GCMでは、MF層(α)を90%とし、 β を90%とすると、引張強度は10.1 kg/mm²となる。同条件で圧縮強度を求めると6.2 kg/mm²となる。このことから、CFが含まれてい

るHFRPでは、CF層が最初に破壊するため、CF層の占める割合が小さい場合はMFのみで積層した場合よりも低い強度となる。HFRPを用いる場合に特に注意を要するところである。

5.5 曲げによる応力分布

図9はGCMとCGMに曲げモーメント1750 kg-mm²を負荷したときの断面の各層に発生する応力分布(実線)である。なお、破線は各層単体の強度を示す。中立軸(NA)より上が圧縮側、下が引張側である。2つの図は、表面2層のGF層とCF層を入れ替えただけであるが、GCMでは圧縮側2層目のCF層に若干の破壊(実線が破線を越える)がみられるのに対し、CGMでは圧縮側最外層のCF層が完全に圧縮破壊を起こしている現象がわかる。図5において、曲げ強度が100 kg/mm²と高い値を示したのは、このように各層の応力が効率良く受け持たれるためと思われる。

図9 曲げモーメントによる断面各層の応力分布

6. HFRP の強度特性のまとめ

カーボン繊維、アラミド繊維等新素材を使ったHFRPの引張試験、圧縮試験および曲げ試験結果をまとめると次のようになる。

- ①カーボン繊維およびアラミド繊維を使用すると剛性は向上するが、強度が必ずしも向上しない。
- ②アラミド繊維は圧縮強度が低いためガラス繊維のような圧縮強度の高い材料で補助するような積層構成とすることが望ましい。
- ③ガラス繊維の使用量に対しカーボン繊維の使用量を少なくすると強度低下を起こす場合がある。
- ④新素材を取り入れたHFRPの強度評価は、引張強度および曲げ強度だけでなく圧縮強度も必要である。

⑤HFRPの積層構成を最適にすることにより高い曲げ強度を得ることができる。

7. HFRP の船体への応用例

7.1 HFRP 船の目的と概要

平成3年12月函館市に地域産業振興を目的に、漁業および関連企業6社が「スーパーマリン開発協同組合」を結成し、漁村の過疎化を防ぐことを目的に若者にも受け入れられるような新しい感覚を持った漁船「スーパーマリン」が試作されることになった。この船の設計条件にはCFを使用することになったため、筆者らが行ったハイブリッド型FRPの研究資料が利用されることになった。

7.2 設計条件

- ①トリマラン(3胴)型：高速性、安定性(広い作業面積)、居住性の向上を目的とする。
- ②ウォータージェット推進：定置網、養殖網等の上を自由に航行できる。
- ③カーボン繊維の使用：「カーボンシティ函館」(函館市のキャンペーン)に併せ、船体にCFを使用する。

7.3 HFRP 船の主要目

全長×幅×深さ：9.2×3.26×0.78m

総トン数/排水量：3.4/5トン

速力：28.6ノット(航走試験結果より)

7.4 船体のHFRP 積層構成と強度特性

船体に使用した原材料の記号と明細を表5に、各部の積層構成を表6に示す。外板の構成が11層となったのは直角方向にUGFを3層と両表面にM450を用いたためである。また、UCFとUGFが直交する層には層間強度を上げるためSMを配した。

以上のような構成に対し、UP樹脂とVE樹脂を用いて積層し、それぞれ主方向および直角方向について、引張試験、圧縮試験および曲げ試験を行った。その結果を表7に示す。これらの結果とCFを使用していることなど考慮し、船体にはVE樹脂を用いた。

7.5 船体への応用

船体の設計方針として、船体の補強は前後方向とし、HFRPの強度主方向は横方向に持ってきた。こ

表 5 船体に使用した繊維の明細

強化繊維	織り方	記 号	目 付 (g/m ²)	成厚 (mm)	含有率 (V%)	製造者
カーボン繊維 ガラス繊維	タテスグレ織	UCF	270	0.37	35	東 レ
	タテスグレ織	UGF	450	0.54	35	ユニチカ
	ロービング クロス	R580	580	0.70	35	〃
	チョップドストランドマット	M450	450	1.06	16.5	〃
	サーフェーシングマット	SM	30	0.07	16.5	日硝織

表 6 船体各部の積層構成

	積層構成	積層数	板 厚
外 板	M450+UGF+UCF+SM+UGF+UGF+UGF+SM+UCF+UGF+M450	11	5.56
補強材	M450+M450+R580+M450+R580+M450	6	4.58
甲 板	M450+R580+M450+コアマット (3mm) +M450+R580+450	7	8.64
隔 壁	M450+R580+M450+コアマット (3mm) +M450+R580+450	7	8.64

アンダーライン：90°方向，板厚単位 mm

表 7 船体用 HFRP の強度特性

樹脂 方向	引 張		圧 縮		曲 げ	
	σ_T	E_T	σ_c	E_c	σ_b	E_b
VE	0°	35.58 3180	27.70 2530	57.23 1980	17.08 825	
	90°	18.22 1700	29.28 1860			
UP	0°	31.80 3100	29.24 2460	46.68 1550	15.22 800	
	90°	19.96 1820	29.45 1660			

但し， σ ：強度 (kg/mm²)， E ：弾性係数 (kg/mm²)

れにより横方向の補強材をなくすことができ、その分重量軽減となった。

この設計方針では、隔壁と外板が交わる点が弱点となるため、その部分は次のような方法でカバーした。すなわち、隔壁と外板が接する部分（外板の内側）に MR 構成で 5 層を配し、水圧がかかった場合、圧縮応力（内側）は MR 層で受け持ち、HFRP 層（外側）には主方向、直角方向ともに引張応力が働くようにした。そのときの応力分布を図10(1)（主方向）および(2)（直角方向）に示す。

直角方向（隔壁との交点）では、図 9(2)に示すように、圧縮側（上）に MR を配した状態で曲げを受けると、中立軸が HFRP 表面の M 層の位置となり HFRP 層には引張応力が働くようになる。そして引張応力は主として中央 UGF3 層が受け持つ。

一方、図10(1)では主方向の UGF、UCF でバランスよく引張応力を受け持つようになっている。スー

パーマリンへの HFRP の使用はこのような考え方で行った。

7.6 スーパーマリンに関するまとめ

FRP 船には一般に MR 構成の GFRP が用いられることになっており、強度的には等方性に近い特性の材料である。しかし、繊維は 1 方向に使用するのが最も効率よく、その分板厚を落として軽量化することが可能となる。「スーパーマリン」の外板に使用した HFRP は方向性の強い構成とし、主方向には十分な曲げ強度が得られるため補強材を省略し、直角方向の低曲げ強度は補強材でカバーする方法を採った。このような方針で製作した船体について、縦曲げ試験や航走試験を実施して強度を確認したところ、良好な結果を得た。今後、カーボン繊維を効果的に用いる一手段としての指針が得られたことから、一応の成果があったものと考えている。

図10 曲げモーメントによる断面各層の応力分布 (船体積層構成)

参考文献

- 1) 吹上, 津島, 小野; ハイブリッドFRPの積層構成と強度: 船舶技術研究所発表会講演集, '93, 6
- 2) R. F. Pinzelli; Fatigue Performance of Marine Laminates Reinforced with Kevlar Aramid Fiber: International Conference and Exhibition, '92, 4
- 3) 吹上, 津島, 小野; ハイブリッドFRPの積層構成と強度: 38th FRP CON-EX'93講演集 '93, 10
- 4) 吹上, 津島, 小野; ハイブリッドFRPの積層構成と強度 (第2報): 39th FRP CON-EX'94講演集 '94, 10
- 5) 吹上, 津島, 小野; ハイブリッドFRPの積層構成と強度について: 24th FRP シンポジウム講演集 '95, 3
- 6) Karasuno, Fukiage, Yamakoshi, Gocho: A Trimaran High-speed Fishing Boat with Water-jet Propulsion and CFRP Hull; SAMPE'95'96, 9
- 7) 吹上, 津島, 小野; ハイブリッドFRPの新規船体への応用; 第5回ポリマー材料フォーラム (高分子学会) '96, 11
- 8) 吹上: ハイブリッド型FRPの強度と船体への応用について; 吹上紀夫退官記念講演会要旨集 '97, 3, 4

吹上 紀夫 (ふきあげのりお)
昭和34年近畿大学理工学部機械工学科卒, 運輸省船舶技術研究所を経て, 現在, IMETEC FUKIAGE 代表. 業務内容はFRP船の設計・製作から廃棄処理に関する技術, 一般ごみ等廃棄物処理と有効利用に関する技術, 超音波など音響波を使った非破壊検査技術など, (IMETEC FUKIAGE 〒576-0052 交野市私部 2-17-24, TEL & FAX. 0720-91-8272)

繊維産業に携わる研究者・技術者は日本繊維機械学会の会員に!

日本繊維機械学会は, 繊維産業 (繊維製造~アパレル~流通) に携わる研究者・技術者の結集体として昭和23年創立以来, 50年にわたって産学協同を基調に絶やまざる活動を続けております。

また, 本学会内に設置された研究会 (不織布研究会, 生活環境と繊維の研究会, 産業資材研究会, 被服心理学研究会, アパレル問題研究会, 織機研究会, 染色仕上研究会, 繊維産業のシステム化研究会, コンポジテックス研究会, R&D フォーラムほか) にもそれぞれの分野の専門会員各位が参加されています。

学会活動の活発化や会員の相互啓発は会員が多数であればあるほど, より高まり深くなります。会員各位におかれましてもお知り合いの方でまだ未入会の方がおられましたら, ぜひご入会をおすすめいたしますようお願い致します。