

リユース可能な FRP 船の開発

海上安全研究領域	構造安全性研究 G	* 田中 義照
〃	〃	佐久間正明
輸送高度化研究領域	インテリジェント加工法研究 G	安藤 孝弘
国土交通省	海事局 技術課	岩田 知明
	研究統括主幹	松岡 一祥

1. まえがき

数年後には、廃棄処理が必要な経年 FRP 船は年間 1 万隻にもなると考えられており、FRP 船の廃棄・リサイクル技術の確立が求められている。一方、環境に優しい循環型社会を目指して、FRP の廃棄量自体を減少させるためのリユース（再利用）技術の確立も求められている。

本研究の目的は、FRP 船の船体構造をブロック化・ユニット化し、劣化・損傷箇所のみを取り替え可能とするリユース技術を確立しようとするものである。この目的を達成するために、リユース可能な FRP 船のプロトタイプを 2 種建造した。1 つは、ハルを従来より薄い FRP で二重化し、その間にウレタンを発泡させる不沈の発泡構造船であり、もう 1 つは、船体をブロックに分割し、アラミド製ロープで縫合・緊張するブロック接合船である。本報では、後者のブロック接合船の設計・建造、並びに安全性確認試験等を行った結果について報告する。

2. ブロック接合船の建造

2.1 詳細設計

2.1.1 全体形状

ブロック接合船の全体形状を図-1 に示す。本船の主要目は全長 6.00m、全幅 1.79m、全深さ 0.725m、喫水 0.300m である。

2.1.2 接合箇所の選定

ブロック接合船のハルを図-2 に示すように甲板、船首、船尾、両舷の船側、及び船底の 6 ブロックに分割し、縫合・緊張することとした。すなわち、シーム（船長方向の継手）箇所として、ガネル部及び

チェーン部（船首尾部分を除く）を選定し、バット（船長方向に垂直な継手）箇所として、船首及び船尾ブロックと船側及び船底ブロックとの接合部を選定した。

2.1.3 接合方法

アラミド繊維製ロープによるスパイラル締結法を採用した。すなわち、ブロック周縁に半円柱形の剪断コアを持たせ、スパイラル状の穴をこのコアに接するように施工し、隣り合うブロック端部のコア同士を合わせた後に、スパイラル状の穴にアラミド繊維製ロープを通し、ロープを緊張してブロック継手を作成する（特許出願中）。

2.1.4 偏心継手の強度検討

ブロック接合船のバット方向の継手においては、船底及び船側部の外面を平滑にするため、継手部剪断コアを内側に偏心させる必要がある。偏心させたブロック継手では、1 軸の引張または圧縮荷重に対しても面外曲げが発生し、ある程度強度低下が予想

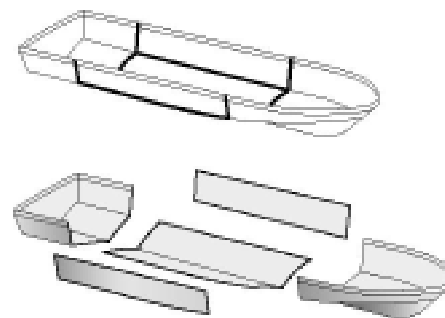


図-2 ブロック接合船の接合箇所

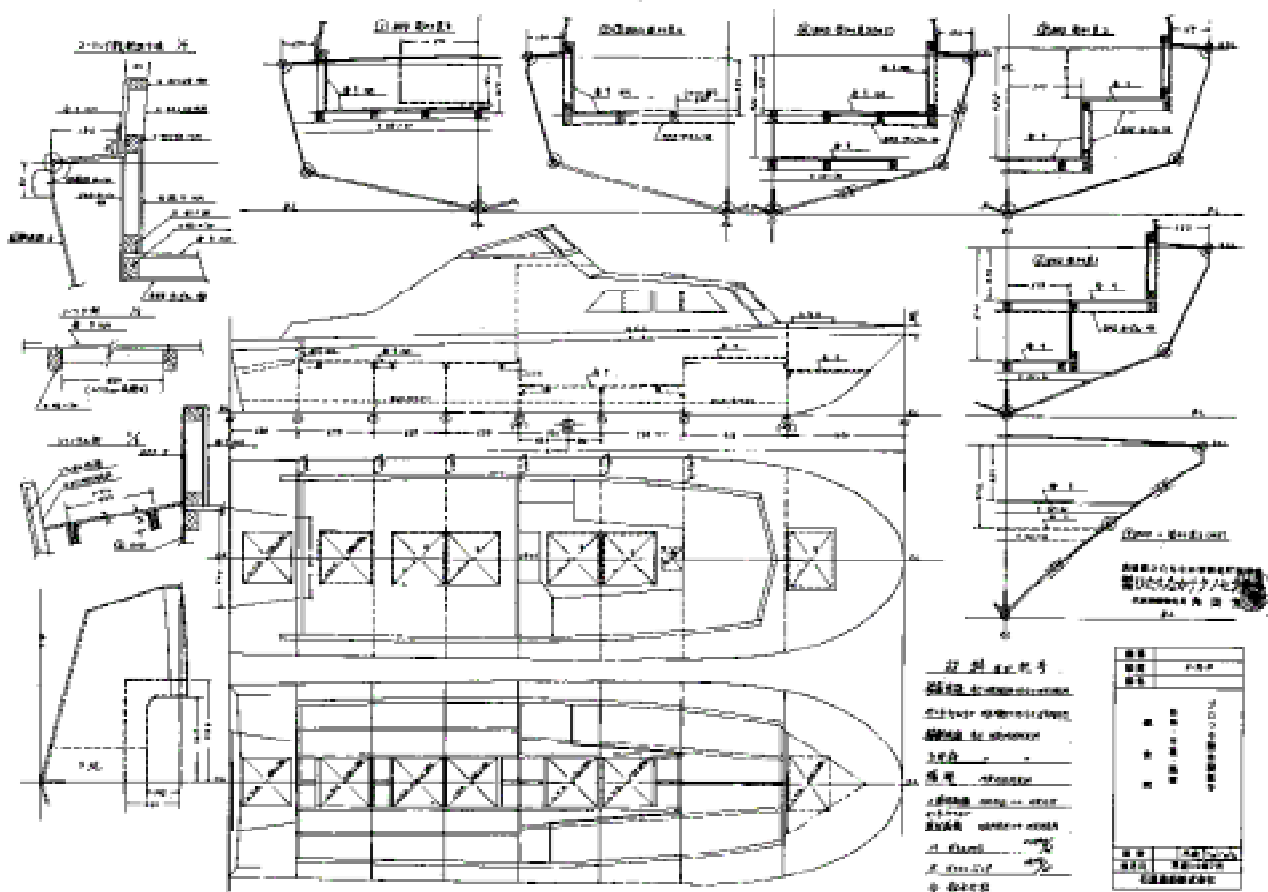


図-1 ブロック接合船の全体形状

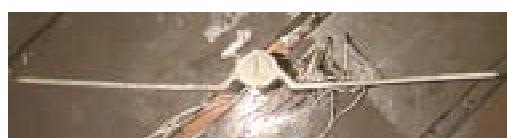


図-3 偏心継手試験片



図-5 継手部のナイロン型

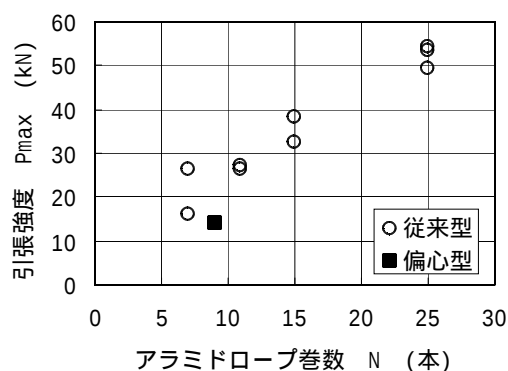


図-4 偏心継手試験片による引張試験結果

されることから、図-3 に示す偏心継手試験片を作成し、引張試験を行い強度を確認した。試験結果を従来の偏心のない試験片による引張試験結果¹⁾と併

せて図-4 に示す。本試験片を用いた試験結果によると、剪断コアの偏心による強度低下率は約 22%であったため、実船の継手部は、剪断コアに接続する FRP 板の厚さを 10mm (試験片は 5mm) として強度低下分を補うこととした。

2.2 ブロック接合船の建造

2.2.1 型製作

継手部形状を 3 次元 CAD システムを用いて作り、ナイロン粉体を CO₂ レーザー焼結させる立体成形法により、図-5 に示すナイロン型を作成した。剪断コアの直径は 34mm である。このナイロン型を含めて図-6 に示す FRP 雌型を作成した。



図-6 雌型の全景

2.2.2 FRP 船体の製作

船体の板厚は上甲板及び船側外板が 5mm、船底外板が 10mm である。各部材の材料構成を表-1 に示す。ここに、GC はゲルコート、M はチョップドストランドマット、R はロービングクロスを示す。

養生、脱型後の船体を図-7 に示す。この後、接合ブロックの所定の位置に直径 4mm の貫通孔をスパイラル状に開けた。

2.2.3 切断

船首、船側、船底、及び船尾ブロックの継手部にあたる剪断コアを隣り合うブロックの対称面で切断した。

表-1 各部材の材料構成

部材名	材料構成
船底外板	GC MRMRM+MMM+MRMRM
センターキールソン	MRMRM+MMM+MRMRM
船側外板	GC MRMMRM
上甲板	GC MRMMRM
隔壁	MRMMRM



図-7 脱型後の船体

2.2.4 縫合・緊張

切断した各ブロックを組み合わせる仮止めした後、直径 3mm のアラミド繊維製ロープで継手を縫合・緊張した。緊張作業の様子を図-8 に示す。

2.2.5 止水処理

締結用の孔は外板の内外面を貫通しているため止水の必要がある。そこで、アラミド繊維製ロープを縫合・緊張した後、継手部貫通孔に接着剤（日本シーカ株式会社製シーカレックス SF-291）を流し込み、乾燥後に継手外側をプライマー（日立化成ポリマー株式会社製 Hi-Bon プライマー NEW80）を施工した。1 号艇については、ここまでの作業とし、ハル模型として強度試験（載荷試験）に供した。

2.2.6 艀装

2 号艇ハルを 1 号艇と全く同様に建造した後、上部構造物を及び必要な装備品を艀装し、図-9 に示すように、ブロック接合船が完成した。

2.2.7 射水試験

小型船舶検査規則²⁾に準じ、射水試験を実施した結果、ブロック接合部等からの漏水もなく、規則に適合することが確認された。



図-8 縫合・緊張作業



図-9 竣工艇

3. ブロック接合船の強度・性能評価

3.1 衝撃荷重解析

ブロック接合船の安全性を検証するために、外板模型を用いた強度試験を実施するとともに、実海域における航走試験も実施したが、これらの試験結果を総合的に評価し、安全性を検証するためには、航走時に船首船底部に作用する衝撃荷重を精度よく解析しておく必要がある。

3.1.1 解析方法

波浪中を航行する船舶は船首船底部に非常に大きい衝撃荷重を受けることが知られている。これは船体運動と波の相対運動に船の前進速度に起因する衝撃速度が重畳するためと考えられる。このような現象を考慮して導かれた 3 次元衝撃圧計算法³⁻⁶⁾により、本船に作用する衝撃荷重を推定する。

3 次元水面衝撃水圧簡易計算法は、船体表面及び水面の向き、速度を用いて衝撃角、衝撃速度を求める、これらから衝撃水圧を求める。さらに、衝撃水圧の分布から、対象とする物体表面にかかる平均水圧を求めるという手順をとった。

3.1.2 解析結果

Section 5 ～ 7 における船速と衝撃荷重の関係を図-10 に示す。図から trim 角が大きいほど衝撃荷重が大きいこと、船首に近いほど衝撃荷重が大きいことが分かる。この衝撃荷重を基に航走時に船体に作用する縦曲げモーメント推定し、船体の強度を評価することができる。

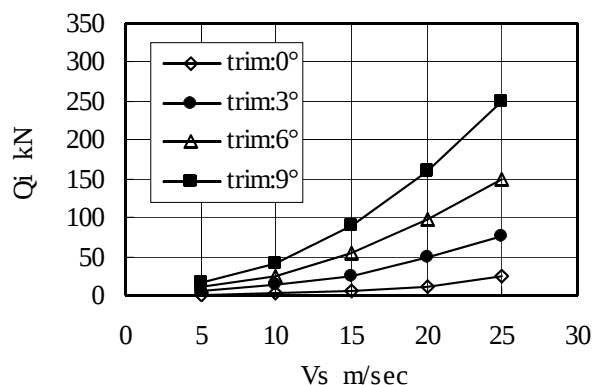
3.2 外板模型による三点曲げ試験

実艇（2 号艇）と同寸法のハル模型（1 号艇）を用いた三点曲げ試験を行い、荷重 - 変位関係、及び荷重 - ひずみ関係を計測した。

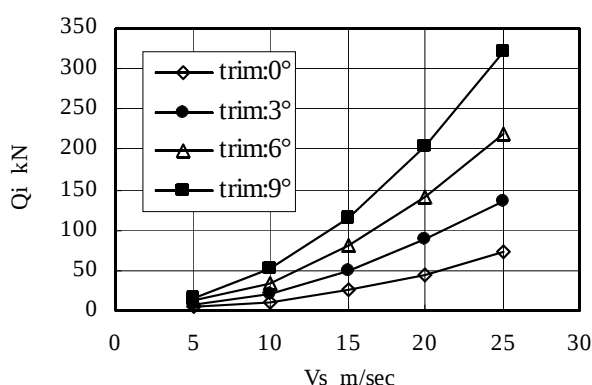
3.2.1 試験方法

外板模型の隔壁 - 、 - 、 - 、 - 間（図-1 参照）の中央位置に当たるハル外面上にひずみゲージを計 26 点貼付した（図-11 参照）。また、中央断面位置においてガンネル部の深さ方向及び幅方向の変位を計 4 点計測した。

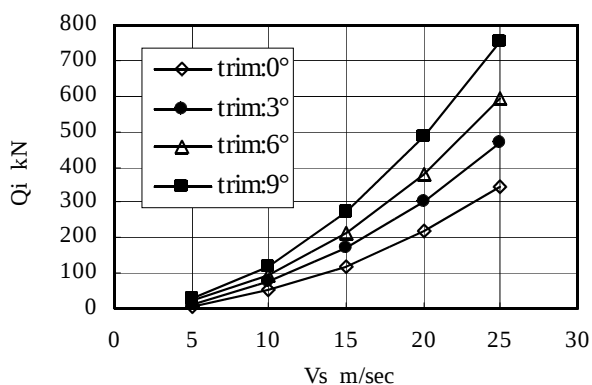
外板模型の設置方法を図-11 に示す。船首尾の支



(a) Section 5



(b) Section 6



(c) Section 7

図-10 船速と衝撃荷重の関係

持点間距離は 5,580mm で、荷重点は支持点間中央より 205mm 後方である。

3.2.2 試験結果

荷重は最大 10 kN まで準静的に負荷した。荷重と

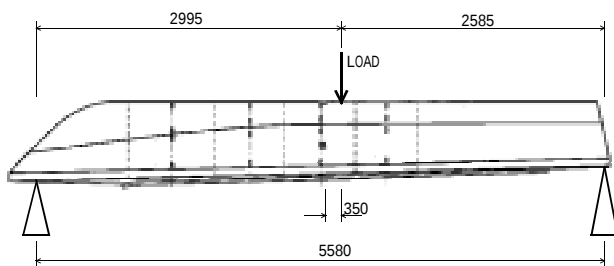


図-11 外板模型の設置方法(単位：mm)

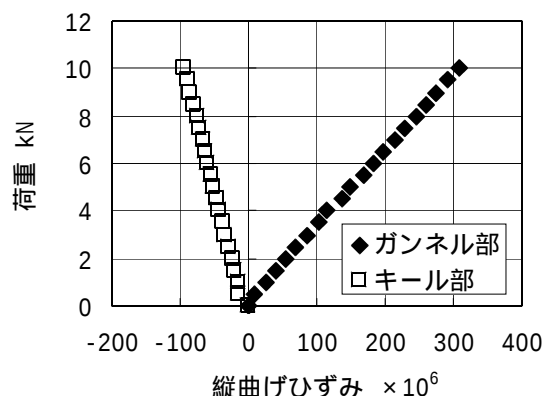


図-12 荷重 - 縦曲げひずみ関係

中央断面位置における長さ方向のひずみ（縦曲げひずみ）の関係を図-12 に示す。

図-12 より荷重 - ひずみ関係はほぼ直線関係にあり、10kN までの負荷では船体は弾性変形していることがわかる。しかしながら、試験中にはゲルコートの破損あるいは隔壁板の剥離と思われる音がたびたび聞こえた。

10kN 負荷時の縦曲げモーメント最大値 M_{max} は、

$$M_{max} = 10 \cdot 2.995 \cdot 2.585 / 5.58 = 13.88 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

であり、荷重点より 350mm 前方の断面に作用する曲げモーメント M は、

$$M = 13.88 \cdot (2.995 - 0.350) / 2.995 = 12.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

となる。この断面におけるガンネル部とキール部の垂直距離は 0.715m であり、10kN 負荷時のそれぞれの縦曲げひずみが 307.5×10^6 及び -94×10^6 であったので、中立軸の位置は、キール上方 0.167m であることがわかる。したがって、本船の上部構造物を除くハルのみの縦曲げ剛性 EI は、

$$94 \times 10^{-6} \times E = \frac{12.26 \times 0.167}{I}$$

より $EI = 2.178 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ であり、Steel に置き換え

ると 1 辺 190mm の中実角柱の曲げ剛性とほぼ等しい。10kN 載荷時の垂直方向の撓み量は 3.9mm、水平方向の撓み量は 0.0mm で JCI 検査基準の許容値内であった。

3.3 航走試験

ブロック接合船の航走性能を確認するため、2 号艇（図-9）による航走試験を実施した。目視波高 1m 以下の海域で船外機の出力（最大 5,500rpm）を変えて航走し、船首、船体中央、及び船尾の上下方向加速度を計測した。最大加速度は、斜め 45 度向かい波の 3/4 出力時に発生した。その際の船首上下加速度の時系列計測結果を一例として図-13 に示す。最大加速度は約 4G であったが、安定した航走が得られ、試験終了後の点検においても破損、漏水等は全く見られなかった。

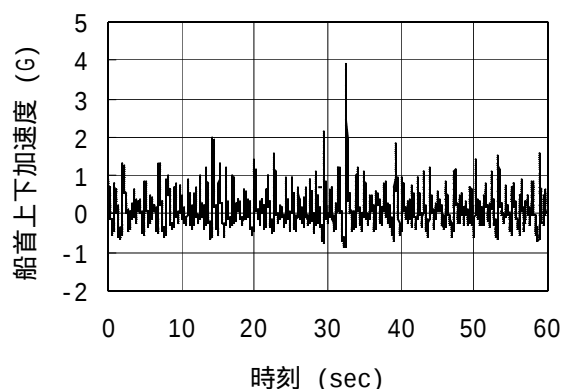


図-13 航走試験における加速度計測例

4 . まとめ

平成 14 年度は、FRP 船体のブロック化、及びその接合技術の開発研究の応用段階として、これまでに行ってきた基礎継手や箱桁構造の強度試験結果を踏まえ、FRP ブロック接合船を設計・建造し、安全性評価試験を行った。以下に研究のまとめを示す。

- (1)全長 6m、幅 1.79m、深さ 0.725m の標準的なプレジャーボートを基に、船体のブロック化を検討した結果、建造（船体の切断、縫合、緊張作業）及び補修（損傷ブロックの分離、代替ブロックの縫合、緊張作業）の容易さを考慮して、甲板、船首、船尾、船底、船側ブロックに分割することとした。

(2)船体のバット方向の継手においては、継手部が外表面に突出しないよう剪断コアを偏心させる必要がある。そのため、偏心継手試験片による引張試験を実施した。その結果、引張強度は偏心のない継手の強度と比較して約 22%低下することが明らかになったため、剪断コア近傍の FRP 板を増厚することで対処した。

(3)FRP ブロック接合船の建造工程は以下の通りである。

船体各ブロックの継手部の型は、3D-CAD で形状を作成し、CO₂ 立体成形法によりナイロン雌型を造形した。この雌型を基に船体ハルの雌型を製作した。

製作した雌型を用いて通常の手法により FRP 船体を積層した。養生、脱型後に継手部に縫合用の貫通孔をスパイラル状に開け、船体を各ブロックに切断した。

アラミド繊維製ロープにより各ブロックを縫合し、新たに開発した緊張装置を用いてロープを緊張した。緊張に要した作業工数は、1 隻あたり約 25 人日であった。

接着剤及びプライマーにより継手部の止水処理を行った（1 号艇の作業はここまでとし、外板模型として、強度試験に供した）。

別途製作した隔壁及び上部構造物を二次接合した。

船外機及び必要な装備品を取り付けた。

(4)ブロック接合船の衝撃荷重解析を行った結果、船首船体部(Section 7)に作用する衝撃荷重は、20 ノット航走時で約 45 kN(トリム角 9 ° を設定) であることが明らかになった。

(5)ブロック接合船の外板模型により載荷（三点曲げ）試験を行った結果、上部構造物を除く船体外板のみの曲げ剛性が $2.178 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ であることがわかった。

次に、残された今後の課題をまとめて示す。

平成 14 年度は、FRP ブロック接合船を設計・建造し、実用化に向けた実証試験を実施し、建造工数、強度、航行性能等を確認した。しかしながら、「FRP 船のリユース技術の確立」というプロジェクト・テーマから見ると残されている課題も多い。

例えば、建造したブロック接合船では、船体ハル

（上甲板、船側、船底）は開発された継手によりブロック化されているものの、隔壁及び上部構造物の接合は二次接合であり、損傷ブロックの取り替えによるリユース化は完全に満足されていない。

また、設計船速 20 ノットでの航走時に船底部に作用する衝撃荷重を推定し、載荷試験の結果を踏まえて強度が確認されたが、長期間の波浪中航行試験を実施して安全性を実証する必要もある。

以上の観点から平成 15 年度は、

・ブロック接合技術の確立

・ブロック接合船の検査方法の確立

を目標として、建造したブロック接合船を用いた各種試験、並びに、ブロック継手接合部構造解析モデル構築を実施する予定である。

最後に、本研究は国土交通省海事局船用工業課からの受託研究として実施され、金原勲委員長をはじめとする「FRP 廃船高度リサイクルシステム構築推進委員会」の先生方に貴重なご意見等をいただきました。事務局としてご尽力いただきました船用工業課の皆様とともに御礼申し上げます。また、FRP 艇の設計、建造に多大なご協力をいただきました(株) ひたちなかテクノセンター及び石黒造船(株)にも重ねて御礼申し上げます。

参考文献

- 1)松岡一祥、岩田知明、勝又健一、林慎也：新しい FRP ブロックの接合法、平成 13 年度海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.357-362、(2001)。
- 2)日本小型船舶検査機構監修：第 2 編、検査の実施方法に関する「細則 2-1-4(1)()圧力試験又は水密試験」
- 3)竹本博安他：船舶の波浪衝撃水圧簡易計算法について、西部造船会会報、第 101 号（2001）。
- 4)竹本博安他：高速域における三次元水面衝撃水圧簡易計算法の検証、西部造船会会報、第 105 号（2002）。
- 5)竹本博安：水面衝撃水圧に関する一考察、日本造船学会論文集、第 156 号、（1984）。
- 6)Wagner, H., " Über Stosse und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten ", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechnik, Vol.12, No.4 (1932)。