

78 新しい FRP ブロックの接合法

材料加工部 *松岡 一祥、岩田 知明、勝又 健一、林 慎也

1. はじめに

1.1 リユースとパーツ化

循環型社会を実現するためには、製品のリサイクル、リユースおよびリデュースの 3R が重要である。すなわち、最終廃棄量を減らす(Reduce)ことを目標にして、資源としての再利用(リサイクル)あるいはパーツ等としての再使用(リユース)を押し進めることが求められる。

自動車、家電等では容易なパーツ化が、一体成形される FRP 船体では困難であり、FRP 船はリユースには不向きと考えられている。しかし、FRP 船の最終的な廃棄量を減らすためには、リユースを容易にするためのパーツ化を実現する必要がある。

1.2 着脱性と強度および重量

FRP 船体が一体成形され、パーツ化されていない理由は以下のように要約される。

パーツ化とは、着脱可能な要素への分解である。しかし、FRP 船では二次接着部の強度に信頼性が無く、主要構造に二次接着を認める規準が存在しない。また、規準上認められたとしても、在来に着脱可能な FRP 継手は強度/重量比が著しく劣り、航走中の大きな荷重変動にさらされ、かつ、軽量化が必要な船体構造には適用しがたい。

上記のように、着脱性と強度の信頼性および重量増加が FRP 船体のパーツ化の障害となっている。

1.3 問題の整理と解決法

FRP 船リユースのための船体パーツ化の問題点、解決すべき課題は以下になる。

- ・ 着脱容易で、軽量、高強度な接合法の開発
- ・ 接合部強度の信頼性の確保
- ・ 異種素材の使用を極力抑えること

上記の3番目は、リサイクルの観点からの要求である。例えば、継手強度を増大させるために、金属等の異種素材を用いると、リサイクル時の分別に手間がかかる。

以上の3つの課題を満足する FRP 部材の接合法を開発することが目標であり、本報はその開発の途中経過を示すものである。

2. 新しい FRP ブロック接合法

2.1 問題の解決法

3節の目標を具体化して行く。

まず、「着脱容易で、軽量、高強度な接合法」では、以下が排除される

- ① 一般的な積層による二次継手
- ② 強固な接着による継手
- ③ 継手効率の悪い接合法

次に「接合部強度の信頼性」では以下が排除される。

- ④ 接合用材料あるいは接合部強度のばらつきの大きい継手
- ⑤ FRP 母材強度のばらつきを拡大する継手

最後に、「異種素材の使用を極力抑える」では、以下が求められる。

継手を構成する材料は、

- ⑥ ハロゲン元素(特に塩素)を含まない有機物、
- ⑦ ガラス等 FRP を構成する繊維、あるいは、
- ⑧ それらの複合物

が望ましい。しかし、スチールタイヤがセメント焼成で大量に用いられていることから、

- ⑨ 破碎しやすい形態の鉄、アルミニウム等

は使用できると考えられる。

以上の条件のもとで、材料、継手形式、強度評価法等について検討して行く。

2.2 ブロック接合法

船体主要部材をパーツ化して、ブロック接合する場合、接合部の荷重伝達能力を向上させるためには、継手部断面積、構造重量の増加が避けられない。図1は水タンク等でよく用いられるボルト・ナット・フランジシステムの継手である。

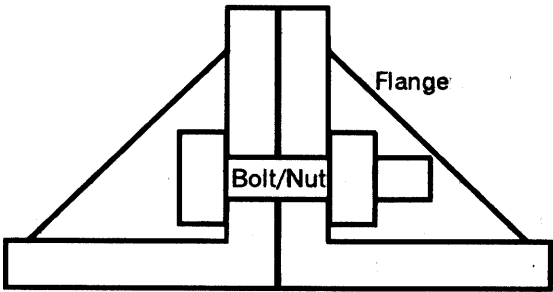


図1 ボルト・ナット・フランジ接合法

この接合法は、大量の鋼製のボルト、ナットを用いる必要があるのに加えて、接合面の圧縮応力を低減するための大面積のフランジ、および、フランジ等の弾性変形を抑えるためのブラケットの配置等が必要であり、断面積、重量共に大きくなる。

解決すべき問題は3つである。1つは、離散的な締結による局所的な応力集中を避けることで、これにより、接合面の面積を減らすことができる。

次に、継手部の応力流れをできるだけ対称にすることである。これにより、曲げによる応力の偏りを無くし、弾性変形に対する補強を省略できる。

最後に、上記の2つの対策を施しても、どうしても避けられない継手部の断面積の増加を構造強度の向上に有効に活用することである。

2.3 新しい接合法の提案

図2に FRP 船の概形を示した。図右の破線の断面が図の左側に示されている。

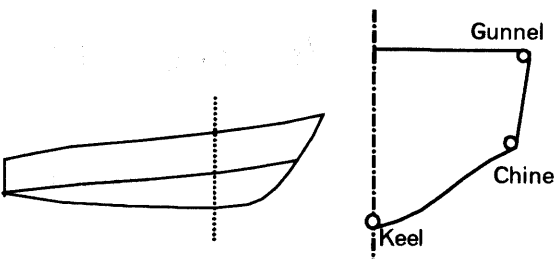


図2 FRP 船体の概念図

断面に注目すると、ガネル、チャイン、キールで外板が折れ曲がる。この部分の断面積が増加しても、その増加による縦強度への寄与を考慮する設計を行えば、経済的な損失はない。即ち、継手のシーム(船長方向の継手)箇所として、ガネル、チャインおよびキールを選定する。

バット(船長方向に垂直な継手)箇所としては隔壁等の内部横強度部材設置箇所を選定する。

次に、接合用の材料について考える。使用できる材料は、鋼製ピアノ線、有機繊維製ロープ等の鉄、アルミニウムおよびハロゲン元素を含まない有機繊維あるいはFRP製の線材である。

線材を締結材とするブロック接合法には、プレストレストコンクリートの鋼製緊張材等による接合法があるが、図2に示したような箇所には適用できない。ここでは、継手部を線材で螺旋状に縫い、線材の張力で接合部を圧接する方法を採用する。図3にその概略を示した。

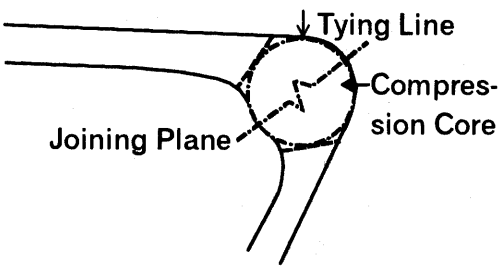


図3 新しい接合法

図はガネルを想定している。すなわち、甲板および船側パネルの接合箇所に半円筒形のコアを持ち、スパイラルの穴をこのコアに接するように施

工し、このコアを接した後に、スパイラルの穴にアラミド繊維の紐材を通し、紐材を緊張して継手を作成する。

本方法では、

- ・ アラミド繊維の紐材を端部で固定する
- ・ 紐材を通した穴を塞いで止水する

必要がある。紐材の固定にはアルミニウムの圧着端子を用い、止水には熱可塑性樹脂を含浸したガラス繊維織物を用いることとした。

本方法による解体方法は簡単である。すなわち、アイロン等で加熱して熱可塑性樹脂を塗布した止水シートをはずし、締結用紐材を切断すると、解体できる。

2.4 開発計画

ここに提案した接合方法を、FRP 船で実現するために、以下の計画を立てた。

(第一段階)

- ・ 基礎継手の製作と基礎強度試験
- ・ 特許申請

(第二段階)

- ・ 箱梁模型による構造体試験
- ・ 船舶以外への適用の検討

(第三段階)

- ・ 船体構造模型による強度確認

本報告では、第一段階の基礎強度試験の結果を取り扱う。

3. 基礎継手の試験

3.1 基礎継手の製造

3.1.1 FRP継手試験体用FRP板

(1) 材料

マトリックスとしては、不飽和ポリエステル(イソ系ポリエステル)樹脂を使用し、メチルエチルケトンパーオキサイドを主成分とする硬化材を用いた。

ガラス繊維の構成は、

S//MRMRM//MMM//MRMRM//S

である。ここに、Sはサーフェスマット、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である。// は硬化の工程であり、// と // に挟まれた範囲は、連続積層を行った。ガラス含有率等を表1に示す。

表1 FRPの構成

ガラス構成	ガラス重量	ガラス積層数	ガラス含有率	FRP重量	FRP厚さ
	kg/m ²		wt. %	kg/m ²	mm
M	0.45	9	35	11.6	7.695
R	0.57	4	60	3.8	2.212
S	0.03	2	5	1.2	0.600
合計	-	-	38.5	16.6	10.507

(2) 試験体形状

FRP継手試験体用FRP板の概形を図4に示す。図の中央は継手部であり、この部分で左右に分かれたものを製造した。

主板の板厚 10 mm、幅 200 mm、全長 1,200 mm のFRP継手試験体を作るための幅 200 mm、長さ 600 mm のFRP板である。

継手部のせん断コアの半径 r(図4 参照)は、10、15 および 20 mm の3種類である。

継手部せん断コアから主板への移行部分の曲率半径 R はコア部半径 r と等しい。

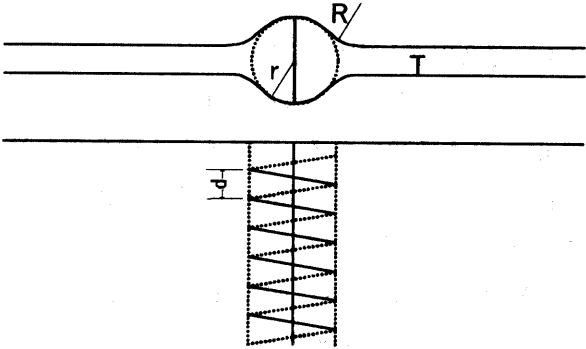


図4 基礎継手の形状、パラメータ

(3) 試験体の成型方法

ハンドレイアップで以下の工程で成型した。

- (1) FRP型の準備
- (2) FRP型の清掃、離型剤の塗布
- (3) サーフェスマットの積層

着色用トナーを 3 %混合した積層用不飽和ポリエステル樹脂に、硬化剤を 1 % 添加、着色し、サーフェスマット 1 層を積層し硬化させた。

- (4) マット、ロービングクロスの積層

積層用不飽和ポリエステル樹脂に、硬化剤を 1 %添加し、MRMRM の順番で積層し、硬化させた。

- (5) 反対側の型の積層

もう一方の型に上記(1)から(2)の積層を行った。

- (6) 中間層の形成、加圧

一方の積層物の上に、MMM の積層を行い、硬化する前にもう一方の型の積層物側を合わせ、重量を加えて、圧着、硬化させた。重量は完成品の主板厚が 10 mm となるように選定した。

- (7) 加熱硬化

上記積層物を硬化炉中で、50℃、1 時間で硬化させた。

- (8) 脱型、仕上げ

積層物を型からはずし、所定寸法になるように、4 周を切断した。

- (4) 縫合用溝と穴の施工

スパイラル縫合の間隔 d は 15、25、35 および 45 mm の 4 種類である。スパイラル縫合のための穴および溝は、直径 3 mm のアラミド繊維製ロープが通るように設定した。

溝と穴の施工には NC 加工機を使用した。

せん断コア半径 3 種類、スパイラル縫合間隔 4 種類、合計 1 2 種類の継手試験体を各 4 本ずつ組み立てることができる数量の FRP 板を製作した。

- (5) FRP板の強度

FRP 板の強度試験は、引張試験については JIS K 7054 の A 形、曲げ試験については JIS K 7055 の短冊状試験片幅 30 mm とした。

試験結果を表 2 に示した。

表 2 FRP 母材強度試験結果

引張試験			曲げ試験		
番号	引張強さ	ヤング率	番号	曲げ強さ	ヤング率
	MPa	MPa		MPa	MPa
T1	144	10790	B1	186	11388
T2	126	12583	B2	218	11290
T3	155	11388	B3	230	11290
T4	156	10388	B4	251	10986
T5	145	11486	B5	216	10486
平均	145	11327	平均	220	11088

3.1.2 アラミドロープ

FRP 継手試験体の締結に用いるアラミドロープとして 2 mm 径、破断強度 2 kN 程度のものを用いた。

3.1.3 防水用シール材

シール材の構成は、ガラス繊維織物を表面材、ガラス繊維不織布を中間材とし、不織布に熱可塑性樹脂を含浸したものである。

熱可塑性樹脂は軟化点が 100℃以上のポリエステル系を用いた。

3.1.4 継手の製作

直径 2 mm のアラミド繊維製ロープを緊張材として継手の製作を行った。

以下に継手製造の手順を示す。

(1) 継手の縫合

試験体を縫合用緊張装置に固定し、端部固定ジグ(圧着端子)をかしめたアラミド繊維製ロープを端部穴に通す。

緊張装置にアラミド繊維製ロープを固定し、140 kgf の張力を与え、70 kgf まで緊張力を緩和して、アイスピックでロープを固定

する。

ロープを次の穴に通し、緊張力を与えた後固定する。

最後の穴では、緊張後、端部をかしめる。

(2) 穴と溝への熱可塑性樹脂の充填

(3) 止水シートの貼付

3.2 曲げ強度

各スパン 300 mm の 4 点曲げを実施した。結果を表 3 に示す。

表には、最大荷重、最大モーメントおよび破断箇所が示されている。FRP が破断箇所の場合の破壊機構は、層間剥離である。

表 3 継手曲げ試験の結果

試験片 番号	ヒッチ (mm)	引張側緊 張材本数	コア半径 (mm)	最大荷重 (N)	最大モーメント (N-mm)	破断箇所
P15R10	15	12	10	1627	244020	FRP
P15R15	15	12	15	2127	318990	FRP
P15R20	15	12	20	実施せず		
P25R10-1	25	7	10	1411	211680	緊張材
P25R10-2	25	8	15	1264	189630	緊張材
P25R15-1	25	7	15	1950	292530	FRP
P25R15-2	25	8	15	1764	264600	FRP
P25R20	25	7	20	1901	285180	FRP
P35R10-1	35	5	10	755	113190	緊張材
P35R10-2	35	6	10	1196	179340	緊張材
P35R15-1	35	5	15	1813	271950	緊張材
P35R15-2	35	6	15	1637	245490	緊張材
P35R20-1	35	5	20	1970	295470	FRP
P35R20-2	35	6	20	2087	313110	FRP
P45R10-1	45	3	10	1166	174930	緊張材
P45R10-2	45	4	10	1264	189630	緊張材
P45R15-1	45	3	15	1637	245490	緊張材
P45R15-2	45	4	15	1597	239610	緊張材
P45R20-1	45	3	20	1852	277830	緊張材
P45R20-2	45	4	20	1940	291060	緊張材

緊張材が破断する場合の強度評価式は比較的簡単で、

$$M = N \lambda R T_b \quad (1)$$

が成立する。ここに、 M はモーメント(N・mm)、 N は引張側の緊張材の本数、 λ は 2.0 以下の係数で本試験の範囲では 1.92、 R は圧縮コアの半径(mm)、

T_b は緊張材 1 本当たりの抗張力(N)である。設計用には、 λ を安全率で除して設計用継手強度を設定できる。

FRP が層間剥離する破壊機構の最大モーメントは本試験の範囲では 265 N・m から 319 N・m の範囲でばらつきは小さい。

以上の結果を整理すると図 5 が得られる。図では、横軸を NR (巻き数と圧縮コア半径の積)とし、縦軸を最大モーメントとしている。図中の記号○が層間剥離、●が緊張材の破断、◎は、圧縮コアで FRP に層間剥離が生じたものである。本試験の範囲では、図 5 により、最大モーメントを上昇させるには、層間剥離強度の改善が有効であると考えられる。しかし、層間剥離により最大モーメントが制約される破壊の機構が明白ではない。これについては今後の検討が必要である。

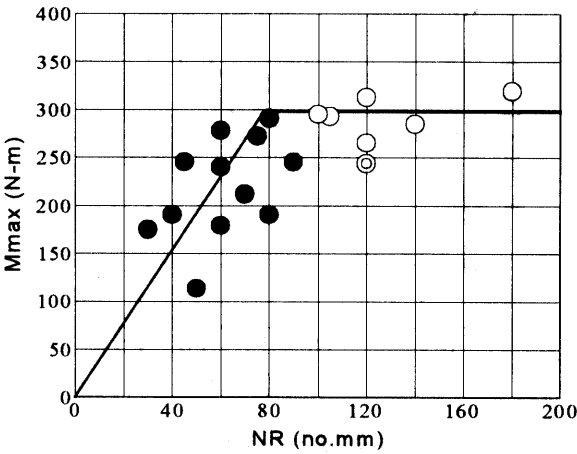


図 5 曲げ試験結果

3.3 引張強度

継手の引張試験を実施した。結果を表 4 および図 6 に示す。

実施した試験の範囲では破壊機構は緊張材の破断であった。この機構に関しては、強度評価式は(2)式で表される。

$$P = N \lambda T_b + S \quad (2)$$

ここに、 P は継手の引張強度、 N は緊張材の本数、 λ は 1.0 程度の係数、 T_b は緊張材 1 本当たりの抗

張力(N)、Sは防水シートの強度寄与量(N)である。
 直径 2 mm のアラミド繊維製ロープの T_b は 2 kN
 程度であり、本試験の範囲では防水シートの強度
 寄与量 S は平均 5 kN 程度であった。

表 4 継手の引張試験結果

試験片 番号	ピッチ (mm)	緊張材 本数	コア半径 (mm)	最大荷重 (N)
P15R10-2	15	25	10	49196
P15R15-2	15	25	15	54341
P15R20-2	15	25	20	53479
P25R15-3	25	15	15	32634
P25R20-2	25	15	20	38416
P35R15-3	35	11	15	27313
P35R20-3	35	11	20	26480
P45R15-3	45	7	15	26313
P45R20-2	45	7	20	16121

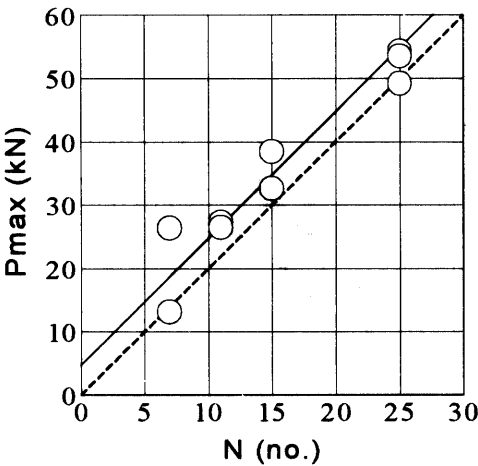


図 6 継手強度と緊張材本数の関係

本試験の範囲では、継手の引張強度は十分でない。しかし、直径 3 mm のアラミド繊維製ロープの強度は、直径 2 mm のそのの 3 倍程度であり、改善の余地はある。

4. 構造化へ向けて

4.1 開発計画

- 前節までの検討により、ここで提案した継手は
- ・ 曲げ強度については、FRP の層間剥離で上限が設定できる。

- ・ 引張についてはアラミド繊維ロープの強度以上の強度がある。
- ことがわかった。

しかし、構造物に適用して、図 2，3 に示したような、折れ曲がり部にこの継手を用いる場合、継手部の面内せん断強度の確認が必要である。この面内せん断に関しては、接合面の凹凸をせん断キーとする方法などが考えられる。

このせん断荷重伝達能力については、箱形模型等で確認を行って行く計画である。

4.2 船舶以外への適用

FRP 構造で、現地接合が必要な製品に、水タンク、プール等がある。それらにはおおむね、図 1 に示したボルト・ナット・フランジシステムの継手が用いられている。

ここに提案した接合方式は、これらの製品にも適用可能である。この接合方法を用いることにより、確実な止水、および、解体、リサイクル時の分別の容易さなど利点がある。また、水タンク、プール等は部材の統一が容易であるため、船舶以上にブロック化、ユニット化に適している。

5. おわりに

以上、FRP 船舶に適用できるブロック接合方式の提案を行った。また、基礎継手を用いた試験結果を示した。

提案した接合方式は、軽量かつ着脱容易なものであり、FRP 船体のパーツ化により、リユースを促進するものである。また、大型の水タンク、プール等の現地接合が必要な FRP 構造にも適用できる。

今後、この接合法の実用化に向けて、構造化の研究を推進して行く計画である。

最後に、ここに示した新接合法の実現に協力いただいた、ひたちなかテクノセンター、日立製作所、日立化成工材、日立化成ポリマーの各社に謝意を表します。