

編物複合材の強度特性(第一報)

大阪支所 材料研究グループ

* 小野 正夫、櫻井 昭男

海上安全研究領域

危険物輸送・防災研究グループ

前田 利雄

1. まえがき

プレジャーボートを始めとして、小型船舶の高出力、高速力化の要求が高まっており、それに伴って船体等の高強度化が望まれている。しかし、小型船舶に最も多く使用されているガラス繊維強化複合材(GFRP)のさらなる高強度化に対し、従来の基材を用いて強度を高めることは難しい。また、カーボン繊維に代表される先進複合材料(ACM)を使用して強度を高める方法もあるが、価格が数十倍にもなり経済的に不向きである。これらのことから新しい技術の開発が望まれている。

一般にGFRP小型船舶に用いられる基材は、一方向に引き揃えたガラス繊維束を平織りにしたガラスローピングクロス(クロス)と、短繊維に結合材を加えてマット状にしたガラスチョップドストランドマット(マット)とを交互に重ね合わせて積層した材料(MR)が使用されている。成形方法については、水上バイク等の小型の船舶で、大量生産が要求される場合は、シートモールディングコンパウンド法(SMC)等が用いられているが、それ以外のプレジャーボートや漁船等は、主にハンドレイアップ法(HLU)で行われる。HLUについては、手作業によるため、製品の品質安定を維持するためにはある程度の技能を要する。しかも、HLU作業は手間が掛かり、作業環境や人材の確保が問題となっている。

そこで、新しい基材として、一方向に揃えたガラス繊維等を重ね合わせ、ポリエステル製の細い糸で編んで止めたニットファブリック基材(ニット)を用いた編物複合材が開発され、アメリカやヨーロッパを中心に、構造材、風力発電のブレード及び船舶等に、その使用実績が増えている¹⁾。我が国においても数年前からニットに対する関心が高まっており、ニットに関する報告書や、その使用実績も徐々に増えている^{2)~10)}。しかし、特に船舶において

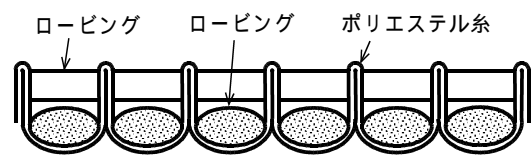
は、法的基準等の問題もあり、まだ普及には時間が掛かると予想される。そこで、当所においてもニットに着目し、その材料特性等について把握するために、各静的強度試験等を行った。また、その結果を基に船舶への適応性について検討した。

2. 試験材料および試験方法

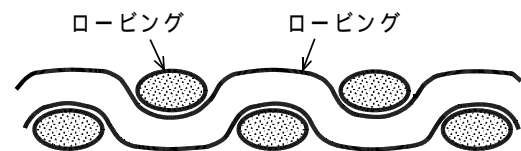
2.1. 試験材料

2.1.1. 基材

図-1に、ニットとクロスの構造を比較した概略図を示す。ニットの構造とクロスの構造の大きな違いは、ニットは一方向に揃えた繊維束(ローピング)を細いポリエステルの糸で編んで止めてあるのに対し、クロスはローピングを平織りにしたものである。このため、ニットは従来型のクロスと比較して繊維含有率を高くできることが分かる。また、クロスは構造上繊維が蛇行した状態になるので、積層時にズレてネスティングが発生するなどの問題も指摘されている¹¹⁾。今回試験用に作製したニットの積層構成は、最外層にマットを配置し、 0° ・ 90° ・ $\pm 45^{\circ}$ 方向のローピングを組み合わせた3種類のものを使用し



(a) ニットの構造



(b) クロスの構造

図-1 クロスとニットの比較

た。従来のクロスを用いた積層構成は、層間せん断強度を補うためにクロス層の間にマットを挟み込むことが常識的に行われてきたが、ニットの場合には一方向に揃えた繊維を編み止めていることを考慮して、各層間にマットを挿入しなかった。図 - 2 にニットの積層構成例に示す。ニットについては自由な組合わせの積層構成が可能であるが、一度に編める積層枚数が編機の性能によって制限されるため、今回は5層を上限とし、ニットを使用した試験材の積層構成は、マットを挟んだ対象な構成とした。試験材の積層構成を表 - 1 に示す。試験材は、3種類のニットで構成したGFRP材(タイプA~C)と、比較のために用意した、従来の船舶に使用されているMR構成のGFRP材(タイプM)である。試験材は、大阪支所にて成形した。

2.1.2. 樹脂

樹脂は、成形時の流動性、脱泡性等が優れている方が適している。また、経済的な面を考慮すると、一般的に使用されている不飽和ポリエステルを用いることが最適と考えられる。さらに、環境性及び作業性を考慮して、低臭気性(スチレン)、脱泡性の良いものを3種類用意して、特にニットとの適応性を調べた。試験材に使用した樹脂の種類を表 - 2 に示す。

2.1.3. 成形法

試験材を成形する場合の成形法は、用途に合わせていろいろな方法があるが、ニットを用いた場合の基本的な特性を調べるためにHLUにて行った。また、成形作業の簡便性と省力化、ニット成形品の品質安定化を考慮して、真空成形法についても検討した。真空成形法は、図 - 3 に示すように型内に所定の大きさに切り取った基材を配置し、真空発生装置で型内を負圧の状態にしてから樹脂を吸引し、繊維シートの端部から中央部へ均一に含浸させて成形する方法である。このことから、真空成形法は、HLUと比較して、簡単に成形することができ、あまり技能を要せず短時間に精度良く作業が行えると予想される。但し、今回真空成形法に使用した型の大きさは、一辺40cmの正方形である。

2.2. 試験方法

試験は、JIS-K シリーズにあるGFRP試験方法に準じて、引張、圧縮、曲げ(3点曲げ)、層間せん断

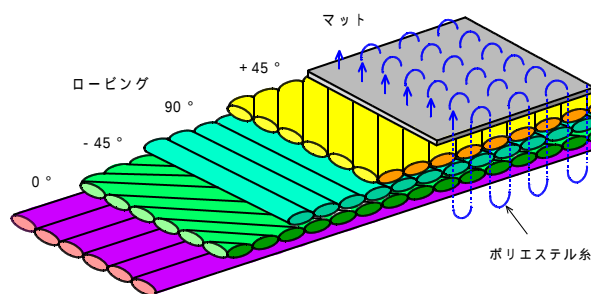


図 - 2 ニットの積層構成例

表 - 1 試験材の積層構成

種 類	ニットタイプの積層構成
タイプ A	M+R(90)+R(0) M R(0)+R(90)+M
タイプ B	M+R(90)+R(0)+R(90)+R(0) M R(0)+R(90)+R(0)+R(90)+M
タイプ C	M+R(+45)+R(90)+R(-45)+R(0) M R(0)+R(-45)+R(90)+R(+45)+M
単位重量	M : 450g/m ² , R(0°)(90°) : 433g/m ² , R(±45°) : 444g/m ²

種 類	MRタイプの積層構成
タイプ M	M + R + M + R + M + R + M + R + M
単位重量	M : 450g/m ² , R : 580g/m ²

表 - 2 樹脂の種類

不飽和ポリエステル種類	粘度 (dPa・s)	常温ゲル化時間 (min)
昭和興分子 : リゴラック (KN-5370BQT-2)	3.5	10.3
大日本インキ : ポリライト (LP-921-NW)	2.1	11.0
日本触媒 : エボラック (SD-2100PTW)	2.6	16.1
* 硬化剤 日本油脂 : パーメック N		

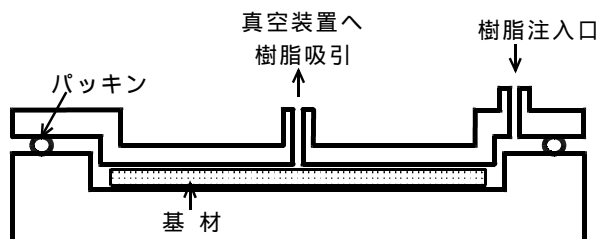


図 - 3 真空成形法

(ショートビーム法)の各静的試験を行った。圧縮試験についてはBEF法で行った¹²⁾。各試験片の形状は短冊形で、寸法は、引張試験が幅25mm・スパン150mm、圧縮試験は幅20mm・スパン20mm、曲げ試験は幅20mm・スパン80mm、層間せん断試験は、幅10mm・スパン20~25mmとした。板厚は、各タイプの試験材厚さ3~6mmである。実験に使用した試験機は、インストロン型万能試験機(ボールドウィン製)である。試験時のヘッドスピードは、引張試験と曲

げ試験が2mm/min、圧縮試験と層間せん断試験は1mm/minで行った。

3. 試験結果及び考察

3.1. HLU成形作業

従来からFRPの成形時に微小な気泡(ボイド)等の欠陥の発生が問題にされているが、成形後の試験材にはボイドはほとんど見られず、問題ない程度であった。また、用意した3種類の樹脂による作業性、脱泡性等についても違いはなかった。

HLU成形時のローラー掛け作業は、表-1の積層構成から分かるように、タイプA~Cが3回、タイプMは9回行うことになる。このことから、作業時間はニットを使用した方が従来のMRを使用した場合と比較して、作業が半分以下であり大幅に作業時間を短縮できることが分かる。

3.2. 繊維体積含有率

試験材の繊維体積含有率は、比重法により計算で求めた。結果を表-3に示す。繊維体積含有率は、ニットの方が約10%程度高くなっている。

試験材に使用した繊維量は、タイプによって異なるが、成形後の単位重量は、ニットが約1.7g/cm³、MRが1.6g/cm³で、板厚は積層構成によってほぼ決まってくる。

表-3 繊維体積含有率

種 類	試験材繊維体積含有率 Vf (%)	成形後の試験材平均板厚 t (mm)
タイプA	38.7	2.8
タイプB	35.9	4.7
タイプC	39.2	4.4
タイプM	27.5	5.4

3.3. 引張試験

それぞれの試験片の引張破壊様相については、繊維がブラシ状に破断し、ニットとMRの違いは見られなかった。引張強度は、試験時の荷重の最大値より求めた。試験の結果を図-4に示す。引張強度は、タイプBが最も高く、タイプMの約1.5倍近い値を示した。両試験材に用いた基材が全く同じではないが、強度に大きな差が現れた理由については、ニットタイプの繊維構造が直線的になっているため、引張負荷に対し繊維が有効に作用していると考えられる。しかし、タイプMでは繊維構造が蛇行してお

り、引張負荷に対し繊維が十分に効果を発揮していないためと考えられる。また、タイプAはタイプMと比較して繊維量も少なく板厚も薄い、体積含有率及び引張強度が高いことから、軽量化に十分効果があるものと考えられる。試験材の弾性率について、図-5に示す。引張弾性率については、各試験片とも大きな差が見られないが、タイプMが最も低い傾向を示した。この理由についても引張強度と同様に、基材の構造による違いの影響と考えられる。

3.4. 圧縮試験

圧縮試験後の各試験片の破壊様相には違いが見られなかった。図-4より、圧縮強度は引張強度より高くなる傾向を示した。タイプA~CはタイプMより圧縮強度が高い。この理由については、引張試験結果と同様に、ニットの繊維構造が直線的で、負荷に対して有効に作用しているが、タイプMは繊維が蛇行しており座屈しやすい構造になるためと考えられる。圧縮弾性率に関しては、各試験片とも大きな差は見られないが、タイプMがやや低い傾向を示しており、基材の構造の違いによる影響と思われる。

3.5. 曲げ試験

曲げ試験後の各試験片の破壊様相は、それぞれ引張側より繊維が破断しており、ニットとMRの違いは見られなかった。図-4に示す曲げ強度は、タイプBが最も高い値を示し、タイプMの1.5倍以上の値を示した。曲げ強度の違いは、先の試験結果と同様

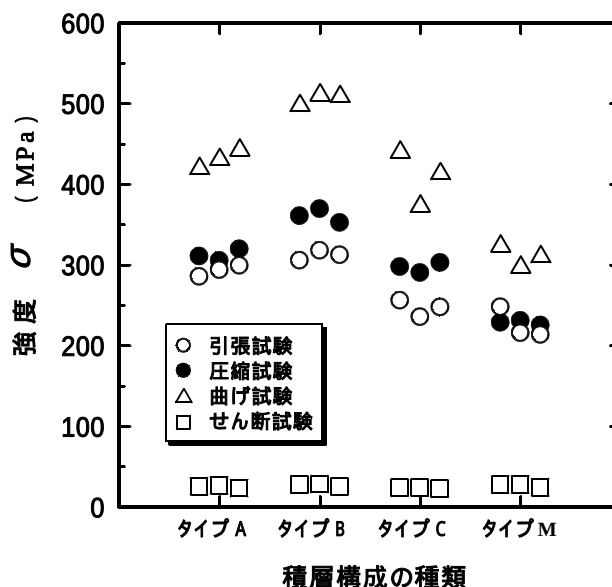


図-4 試験材の強度

に、基材の構造によるものと考えられる。曲げ弾性率についてもタイプMはニットタイプより低い値を示しており、負荷に対する基材の構造による影響が現れたものと考えられる。

3.6. 層間せん断試験

層間せん断試験後の各試験片の破壊様相に大きな違いは見られなかった。図 - 4より、ニットとMRの層間せん断強度は、ほとんど同様な値を示した。しかし、層間せん断強度は他の試験結果と比較すると1/6程度の低い値になる。層間せん断強度については、各層にマットを配置していないニットとMRに大きな差が現れるものと考えていたが、各試験材の中間層にマットを配置しているため、同様な結果になったものと推測される。

3.7. 真空成形法

真空成形法の検討においては、繊維強化材の積層枚数(厚さ)、樹脂の吸引速度、硬化時間(硬化剤の量)を調整しながら行った。その結果、成形後の試験材の内部にボイドが多く残ってしまい、良い結果が得られなかった。その理由としては、方向の違う繊維が重なっている箇所における樹脂の流動性が悪く、吸引力も弱いためではないかと考えている。これは、ニットもMRの場合も同じである。今後の対策として、ある程度樹脂に圧力を掛けて強制的に型内に注入したいと考えている。また、樹脂の流動性を考慮した繊維の積層構成及び樹脂の選択の見直し等も検討している。

4. まとめ

新しい基材であるニットを使用したGFRP材の強度特性を把握するために、各静的強度試験等を行い、従来のMR構成のGFRP材と比較した。その結果について検討し、次のような結論を得た。

- (1) ニットは、従来のMRと比較して、繊維含有率を高めることが可能である。
- (2) ニットの強度特性は、MRより優れていることが分かった。また、軽量化についても有効である。
- (3) ニットを使用した場合は、HLUによる成形作業等の簡便化が可能である。
- (4) 真空成形法では、今回良い結果が得られなかった。今後問題点を解明し、最適な方法を検討していく考えである。

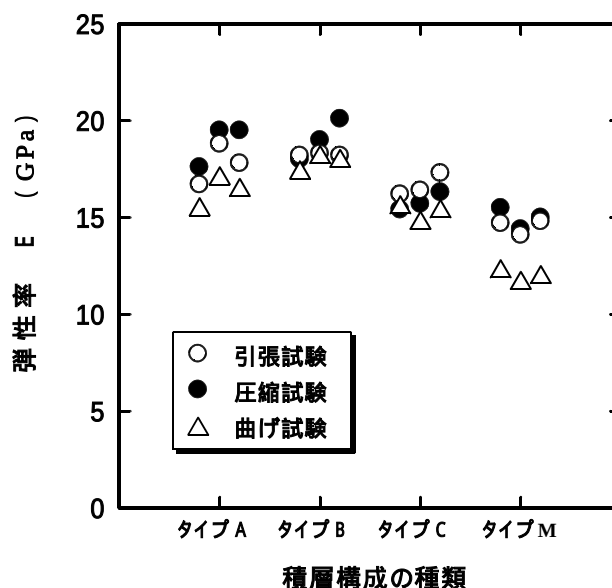


図 - 5 試験材の弾性率

参考文献

- 1) 石田, 強化プラスチック, Vol.42 No.4, PP.142-150, 1996.8
- 2) 石田, FRP漁船 第191号, PP.13-24, 1996.8
- 3) 石田, FRP漁船 第248号, PP.19-29, 2001.2
- 4) 石田, 41th FRP CON-EX'96講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.29-30, 1996.9
- 5) 大島ら, 45th FRP CON-EX2000講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.68-70, 2000.9
- 6) 大谷ら, 46th FRP CON-EX2001講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.68-70, 2001.9
- 7) 土屋ら, 46th FRP CON-EX2001講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.71-72, 2001.9
- 8) 土屋ら, 47th FRP CON-EX2002講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.115-116, 2002.9
- 9) 中村ら, 47th FRP CON-EX2002講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.117-118, 2002.9
- 10) 浅野ら, 強化プラスチック Vol.46 No.7, PP.278-283, 2000.7
- 11) 林ら, 47th FRP CON-EX2002講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.113-114, 2002.9
- 12) 吹上ら, 41th FRP CON-EX'96講演要旨集, 強化プラスチック協会, PP.56-60, 1996.9