(昭和 44 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

FRP 救命艇の実艇強度試験

正員 寺 田 泰 治* 正員 渡 辺 敏 夫**

Strength Tests of the FRP Life Boat

By Yasuharu Terada, *Member* Toshio Watanabe, *Member*

Summary

In order to study the fundamental problems on the strength of life boat made of Fiberglass Reinforced Plastic, Statical strength test and drop test were carried out on a 7.5 meter life boat constructed with longitudinal frames of "open hat section".

In the statical test, 5 tons distributed load was applied to the life boat and were measured longitudinal bending stresses, transverse stresses, local stresses as well as the deflections of the boat. In the drop test, on the other hand, the boat carried with loads of about 4 tons was dropped from a height of 0.5 m to 3 m above the surface of the water, and the stresses and hydraulic pressures on the bottom shell plate due to the impact were measured.

As a result of these tests, it was found that the maximum longitudinal stress was 0.5 kg/mm^2 , corresponding to about one-eighth of the proportional limit of the material, but the local deflections of the bottom shell plate was considerably large due to its transverse floor less construction. It was also found that the stresses in the bottom shell plate caused by impact force at the dropping reached two-third of the tensile strength of the material.

It was confirmed from these tests that, if a carefull consideration is paid to the increase of the local deflection, the FRP life boat with soft construction has the sufficient strength for both the statical load and the impact force.

1 緒 言

プラスチック工業はあらゆる面で日進月歩の発展を遂げ、FRP (Fiberglass Reinforced Plastic) もわが国ではすでに 10 年の歴史を経て、軽構造材料として広範囲に使用されるようになった。これに伴って小型舟艇は木材あるいは軽金属に代り FRP が多く利用されるようになった。FRP 救命艇はわが国では未だ一部で利用されているにすぎないが、諸外国ではすでに広く用いられている。耐火性の問題や関連法規の問題が解決されれば今後益々増加するものと予想される。

FRP 救命艇の強度に関する研究は余り行なわれていないようであるので、今度函館ドック株式会社にて建造せられた救命艇を利用して日本海事協会と共同でその静的強度試験、落下試験および模型試験などを行ない、FRP 救命艇の強度に関する基礎的な調査研究を行なつた。

2 供試救命艇の概要

本艇は長さ 7.5m, 幅 2.5m, 深さ 1.1m で定員 42 人の発動機付救命艇であり、その概略は第 1 図に示すとおりである。本艇の FRP 材の積層は 2 層のロービングが主体となっており、外板面にはゲルコート仕上りが施されている。

艇の構造は縦強度部材としては外板、縦通隔壁およびサイドベンチより成っており、横強度部材としては中央部の横隔壁のみで船底横部材は存在しない。船底外板の防撓構造はキールおよび縦フレームから成っているが、

* 日本海事協会技術研究所

** 函館ドック株式会社深谷製作所

これらはいずれも第1図に見られるように open hat section でありこれが本艇の特徴の一つである。

3 静的強度試験

3.1 計測項目および計測位置

静的強度試験では艇の撓みおよび歪を計測した。撓みは第1図に示すように、艇全体の撓み計測用としてキール下面で長さ方向に7点、また局部撓みの計測用として船体中央部より1m前方で5点計測した。歪は第1図A, B, B', C および D の各断面において計測した。またキールおよび縦フレームの変形を調べるためアクリライト製のブリッジ型変位計を製作し、これを用いて変形状態を調査した。

第1図 歪および撓み計測位置

3.2 負荷方法および載貨状態

負荷方法は艇の前後のフック直下のキール下面の位置で艇を支持し、1個 20kg の重さの砂袋を船底およびサイドベンチに積込んだ。ただし船底にはグレーティングを敷いた。載貨状態は第1表に示す4種類である。ただし Exp. No.1 は中央部横隔壁および主機台が未だ取付けられていない状態であり、オール艇の場合に相当する。Exp. No.2 ないし No.4 は完成状態である。

第1表 載 貨 状 態

実験番号	載貨重量	載 貨 位 置
No.1	5.08 トン	船底 (3 トン), ベンチおよびスオート (2.08 トン)
No.2	5 トン	船底およびスオート
No.3	3 トン	船底
No.4	5 トン	ベンチおよびスオート

海事協会の救命艇内規 (案) による撓み試験の方法は

$$(\text{人員を含む総重量}) \times 1.25 = \text{船体重量}$$

に相当する重量をそれぞれ所定の位置に分布することになっており、Exp. No.4 の状態がこれに相当する。

載貨状態の一例を第2図上段に示し、またこのときの曲げモーメント曲線を下段に示した。各載貨状態に対する最大曲げモーメント値および曲げモーメント係数 $c (= WL/M_{\max}, W = \text{載貨重量}, L = \text{艇長}, M_{\max} = \text{最大曲げモーメント})$ の値を第2表に示した。 c の値は一般には W として満載排水量で表わすのが普通であるが、今の場合曲げモーメントの値は砂袋搭載前後の差であるから、 W を載貨重量で表わした。普通小型船では $c=6$ をとっているが、救命艇では波浪中よりも上に示した撓み試験時の方が苛酷な条件であり、この結果から 7m ないし 8m の救命艇では $c=8$ として設計して良いように思われる。

第2図 載貨状態および曲げモーメント曲線

第2表 最大曲げモーメントと曲げモーメント係数

実験番号	No.1	No.1	No.2	No.3	No.4
載貨重量 (トン)	3	5.08	5	3	5
最大曲げモーメント (t-m)	3.10	4.75	4.75	2.90	4.40
<i>c</i>	7.3	8.0	7.9	7.8	8.5

4 静的強度試験結果

4.1 艇体の撓み

キール下面における撓みの計測例を第3図ないし第5図に示す。計測値は hull girder としての撓みと船底の局部撓みの和である。第1表に示すように、荷重は船底およびサイドベンチに積まれているが、船底に積んだ場合は船底横部材が無く剛性が小さいので局部撓みが非常に大きくなる。例えば第3図において船底に2トン、3トンと積み、さらにサイドベンチに2.08トン積んだ場合、中央部キール下面の撓みはそれぞれ13.4mm, 16.5mm, 19.6mmであるが、5.08トンの撓みから3トンの撓みを差引いたものは hull girder としての撓み、すなわち船底の局部撓みを含まないものであり中央部で3.1mmである。従つて同じ2トンの荷重に対して局部撓みは $13.4 - 3.1 = 10.3\text{mm}$ となる。

Exp. No.1 は横部材が全くない場合であるが、No.2 ないし No.4 の場合は中央に横隔壁があり、且つこれより後方には主機台およびこれと直角にブラケットがあるため船底の曲げ剛性はかなり大きく、横隔壁より前部に比し局部撓みは小さくなつてゐる。

第6図は中央横隔壁と船首隔壁のほぼ中間の断面で船底撓みの横方向の分布を示したものである。縦隔壁直下

第3図 キールの撓み曲線

第4図 キールの撓み曲線

第5図 キールの撓み曲線

慮した正確な E および I_x の値を求めることは困難であるので、 E の値は引張試験結果の値 1000 kg/mm^2 を用い、 I_x はガンネルを含まない断面の計算値を用い、全体の曲げ剛性の低下率を表わす係数 η を用いて有効曲げ剛性 $(EI_x)_e$ を

$$(EI_x)_e = \eta EI_x$$

として撓みを計算することとする。Exp. No.2 および No.3 の局部撓みを差引いた実験値から η を求めると $\eta = 0.8$ となる。そこで $\eta = 0.8$ とした計算値を第3図ないし第5図に示した。船底の局部撓みが極めて小さい Exp. No.4 の実測値と計算値は全長にわたってかなり良く一致する。また Exp. No.2 および No.3 の場合でも横隔壁より後部では局部撓みが小さいので両者の値はかなり近い。Exp. No.1 の (5.08-3) トンの計測値は局部撓みを含まないにもかかわらず計算値と差があるのはこの場合は η の値がさらに小さくなっているためと思われる。すなわち横隔壁および主機台の有無が曲げ剛性に影響を及ぼすことを示している。

4.2 縦 応 力

艇体各部で計測した歪より縦応力を求めた。その一例として中央部断面における外板の応力分布を第7図に示す。この図は基線からの垂直距離に対して実験値をプロットしたものである。また同図に示されている計算値は第2図で得られた断面の曲げモーメントを断面係数で割つたものである。ただしこの場合の断面係数はガンネル

の撓みは局部撓みを含まないものと考え、この点の撓みと船底各部の撓みの差が局部撓みである。Exp. No.2 および No.3 ではかなり大きな局部撓みのあることがわかる。Exp. No.4 は船底荷重がないので局部撓みは見られない。第4図に縦隔壁直下の撓みを△印で記入してある。中央部横隔壁より前部では大きな局部撓みがあるが後部では小さいことがわかる。

前節で得られた曲げモーメント (M_x) と各断面の断面二次モーメント (I_x) から、艇の撓みは M_x/EI_x 曲線を描きこれを図式積分することによって求められる。ここで問題となるのは E および I_x の値である。 E は付録に示すように引張試験では約 1000 kg/mm^2 であるが、板曲げ試験結果では約 750 kg/mm^2 となる。また付録に示す梁の曲げ試験結果ではキールあるいは縦フレームは断面形状の変化によって縦曲げ剛性が低下することが示されている。さらに艇全体の横断面の変形などによって見掛けの断面二次モーメントの値は計算値より小さくなることは明らかである。しかしこれらを考

第6図 D-5断面における船底撓みの横方向分布

第7図 中央断面の縦応力分布

を含まない。

これらの実験結果を見ると、外板の応力はいずれも直線分布をなし計算値とほぼ一致する。ただしガンネル頂部およびキール下面ではこの直線より離れており、これはガンネルが一体梁として有効に働いていないこと、またキールでは局部変形の影響のあることを示している。

中央部断面における最大応力は載貨重量5トンの場合約 0.5 kg/mm^2 で、この値は材料の比例限度の約 $1/8$ であり十分な安全率をもつものと考えられる。

4.3 船底横応力

船底外板の中央断面における横方向応力の分布を第8図および第9図に示した。第8図は中央に横隔壁がない

第8図 中央断面の船底横応力

第9図 中央断面の船底横応力

場合に船底に3トン載貨したもので、船底外板にかなり大きな曲げ応力が生じている。そしてキールあるいは縦フレームの頂部にピークが存在し、最大応力は約 2 kg/mm^2 に達する。第9図は計測断面の500mm 後方に横隔壁のある場合で、このため船底の局部撓みが押えられ応力は前者に比してはるかに小さく、また Exp. No.4 では船底に直接荷重が作用しないので No.2 あるいは No.3 に比しさらに応力は小さい。中央部横隔壁と船首との中間断面での応力は中央断面の応力の約2倍弱である。

横応力を縦応力と比較すると、横隔壁のない場合は縦応力の4ないし5倍にもなるが、横隔壁を設けると約1.6倍程度にすぎない。従つて横隔壁を設けない場合船底に直接荷重がかかると局部応力が大きくなるので、フローアなどを設けて横強度を増す対策が必要である。

4.4 キールおよび縦フレームの変形量

中央部断面におけるキールおよび縦フレームの hat の開閉量の計測結果を第3表に示す。キールおよび No.2 縦フレームは常に hat が開く方向に変形し、No.2 縦フレームは閉じる方向に変形する。従つて第8図あるいは第9図に示した船底横応力の符号と一致する。ここでも横隔壁の存在が変形を大きく拘束していることを示している。

第3表 キールおよび縦フレームの断面変形量

実験番号	No.1 (3トン)	No.1 (5.08トン)	No.2 (5トン)	No.3 (3トン)	No.4 (5トン)
キール	3.10	3.72	—	0.52	0.15
No.1 ロンジ	2.90	3.28	0.69	0.65	0.18
No.2 ロンジ	-0.94	-1.05	-0.16	-0.19	0.09

数字は hat の開き量 (負符号は閉じ量) を示す。(mm)

5 落下試験

5.1 落下試験方法

落下試験はデリックブームによつて船首尾のフックで艇を吊上げ、水面上キール下面までの高さを順次 0.5m ないし 3m にした後、フックの一斉離脱装置を遠隔操作して落下せしめた。

落下試験時における載貨重量は、機関重量、定員分重量およびぎ装品重量の合計として 3.925 トンの砂袋をそれぞれ所定の位置に搭載した。落下試験時の写真を第10図に示す。

第10図 落下試験

5.2 計測項目および計測方法

落下時における船底の衝撃水圧および船底と横隔壁に生ずる衝撃応力を計測するため、第11図に示す位置に水圧計および歪計を取り付けた。水圧計は

第11図 落下試験における歪計および圧力計の位置

受圧面直径 6mm の超小型のもので定格容量は 10 kg/cm^2 である。

5.3 落下試験結果

第 1 次の落下試験で衝撃圧力と応力を計測する予定であつたが第 1 回目の試験で落下後艇内が冠水し歪計の絶縁が低下して計測が不能となつたので水圧計の記録のみに止めた。

またフックの一斉離脱装置の調整が不備であつたため、前後のフックが同時にはずれず船尾に傾斜して落下した。この時の角度は落下高さ 0.5m で約 3 度であつたが 3m の場合は 30 度近くは大傾斜して落ちた。このため船底水圧は水平に落下した場合に比してかなり低い値となつている。また各高さともそれぞれ傾斜角が異なるため、水圧の大きさと落下高さの関係は正確なものが得られなかつた。ただし水圧の横方向分布の傾向は水平に落下した場合と同じであると考えられるので、水圧の最高値を第 12 図に示した。

第 2 次落下試験では応力の計測のみを行なつた。オシログラフの記録を見ると各点の歪の最大値には少しづつ時間差があり必ずしも同一時刻に生じていない。この歪の最高値を応力に換算して落下高

第 12 図 船底衝撃水圧の分布

第 13 図 落下高さと最大応力

第 14 図 落下時における船底外板の応力分布

さとの関係を示したものが第 13 図である。落下高さに対してほぼ直線的に増加している。これから船底の縦方向応力 σ_L 、横方向応力 σ_T の分布を示すと第 14 図のとおりである。 σ_L 、 σ_T とも分布の傾向は同じであり、平板部より縦フレーム頂部に特に大きな応力となつてゐる。しかも落下高さ 2m の場合で最大応力が約 8 kg/mm^2 となり、これは材料の引張強さの約 $2/3$ である。

第 15 図 落下時における横隔壁の歪分布

横隔壁板は第 11 図に示すように水平波板であるが、これは落下時の衝撃力を吸収緩和するのがねらいである。第 15 図は横隔壁の垂直方向の歪分布を示すものであるが、上部に行くに従つてその値は小さくなつてゐる。しかし $H=2\text{m}$ の場合中央部での応力は第 13 図にも示すように約 7 kg/mm^2 となつてゐる。

衝撃力の吸収については常識的に言つて剛構造より柔構造の方が優れているが、FRP 材のように特に伸びの小さい材料ではこの考え方が重要である。今回は特に衝撃力に対する系統的な模型試験を行なつていないが、付録にも示すように静的試験でもこの傾向を知ることができる。すなわち本艇のような open hat section では見掛けの剛性が非常に小さく大きな変形に耐え得ることができる。

6 結 言

本研究において FRP 救命艇の静的強度試験ならびに落下試験の結果について考察した。その結論を要約すると次のとおりである。

(1) 静的強度試験における縦曲げ応力は、最も苛酷な状態においても最大約 0.5 kg/mm^2 であり、十分な縦強度をもつてゐる。

(2) 艇全体の縦曲げに対する有効曲げ剛性は、計算上の曲げ剛性の約 80% である。この理由は板曲げにおけるヤング係数の低下あるいは曲げによる断面形状の変化などが原因と考えられる。

(3) 本艇はロンジシステムで船底横部材が無く且つキールあるいは縦フレームは open hat section となつてゐるため、局部変形が極めて大きい。そのため船底に直接荷重が加わつた場合船底外板の局部撓み、横応力、局部応力は大きくなる。特にキールあるいは縦フレームの hat 頂部の応力は縦応力より大きい。しかし横隔壁は横強度に対して十分な効果があり、横隔壁を設けない場合にはフローアを設けるなどの対策が必要である。すなわちフローアなどの横部材を設けることによつて縦曲げに対する有効剛性も向上し、局部応力もかなり減少する。

(4) 本艇の特徴の一つである open section と closed section との優劣は静的強度に関する限り closed section の方が優れており、このことは付録に示す模型試験の結果からも明らかである。しかし落下時の衝撃力に対してはむしろ open section の方が有利と考えられ今後の研究課題である。

(5) 落下時の船底衝撃応力は大きく、特にキールあるいは縦フレームの頂部において最も大きな応力が生じ 2m 高さで約 8 kg/mm^2 となり材料の引張強さの約 $2/3$ である。また波板横隔壁で約 7 kg/mm^2 の応力となり平板の場合にはさらに大きく破壊の恐れがある。しかし通常の使用状態ではかかる苛酷な衝撃力は考えられないので、強度試験における応力としては極めて妥当な値と考えられる。

以上の結論は本艇の試験結果より得られたものであるが、これから一般の FRP 救命艇がどの程度の強度をもつてゐるか大体的見当をつけることができる。FRP は小型舟艇に止まらず既に漁船などにも利用され始めており、今後益々発展するものと思われるが、本研究が何らかの参考になれば幸甚である。

付録 (1) 材 料 試 験

本艇に用いられた FRP 板の諸性質を調べるため、本艇と同一条件で積層した板を用い、引張および曲げ試験を行なつた。これらの試験結果を A-1 表に示す。

引張試験では試験片の採取方向による有意な差は認められない。比例限度は引張強さの約 $1/3$ である、ゲルコ

A-1 表 試験の種類

試験の種類	比例限度 (kg/mm ²)	ゲルコートにクラック発生時の応力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	ヤング係数 (kg/mm ²)	ポアソン比
引張試験	4.61	8.58	11.91	1060	0.223
曲げ試験 (板曲げ)	—	—	12.07*)	748	—
曲げ試験 (面内曲げ)	—	—	—	1070	—

*) 破断応力

ート処理のものは比例限度を越えると間もなくゲルコートにクラックが入る。この時の応力は引張強さの約 1/4 ないし 2/3 である。一方破断に到るまでの伸びは極めて小さく、破断時の伸びはせいぜい 1.2% 程度である。

曲げ試験は面内曲げと板曲げの二種類とした。これはそれぞれの曲げに対するガラス繊維の効果が異なると考えられるからである。試験の結果、板曲げにおけるヤング係数と面内曲げにおけるそれとはかなり差があり、板曲げにおける方が約 20% 低い値を示している。また面内曲げにおけるヤング係数は引張試験結果にはほぼ等しい。このように板曲げにおけるヤング係数の低い理由としては、層間剪断の影響もあるが、さらに最も補強効果の著るロービングクロスが板厚の中心部近くにあり、従つて曲げの中立軸近くにあるためと考えられる。

付録 (2) 局部模型試験

本艇の船底外板のキールおよび縦フレームは open hat section である。従つて曲げあるいは引張荷重を受けると断面形状が変化し、剛性の低下も大きいと考えられる。このため本艇と同一寸法の局部模型を作りその強度および剛性を調査した。

(1) 引張試験

試験片は厚さ 10mm の鋼板の両側にキールあるいは縦フレームの hat 部をボルトにて取りつけた (A-1 区参照)。そして鋼板を試験機に取りつけ断面の軸と直角方向の引張荷重を加えた。

試験片の伸びは両側にとりつけた 2 つのダイヤルゲージにて計測しまた抵抗線歪計にて歪を計測した。ここでダイヤルゲージに示される伸びは、鋼板の伸びと FRP 板の軸力による伸びと断面の幅の広がりとの 3 つの和で表

A-1 図 局部模型の引張試験結果

A-2 表 模型の引張試験結果

		キ　　ール	縦フレーム	
幅×厚さ　（mm）		50×9	50×6.3	
l （mm）		50	76	
見掛けの引張剛性 $E^*=\frac{Pl}{A \cdot \Delta l}$ （kg/mm ² ）	実　　験		0.80	2.24
	計　算	$\alpha=0.5$	0.91	2.78
		$\alpha=0$	0.36	1.14
最　大　荷　重　（kg）		135	260	
破　断　時　の　応　力　（kg/mm ² ）		9.10	16.0	
クラック発生荷重　（kg）		60	100	
クラック発生時の応力　（kg/mm ² ）		4.04	6.18	

なおここで注意すべきは、この試験では対称性を持たせるため2枚合せにしており、このため鋼板との取付け部の角変化はかなり拘束された状態である。しかし実艇では片側だけの open section であり偏心荷重となるのでその剛性はさらに低下すると考えられる。今 α をこの拘束度を表わす係数とし、 $\alpha=1$ の場合は完全に拘束された状態（リング状の場合）、 $\alpha=0$ の場合は片側のみの場合とする（本試験片の場合2枚の模型をボルト締めにしてあるため、必ずしも $\alpha=1$ とならない）。 α を導入してエネルギー法によつて伸びを計算しこの結果を A-2 表に示した。またこれから本実験の拘束度は $\alpha=0.5$ に近いことがわかる。この結果から実艇の場合 ($\alpha=0$) はさらに局部剛性の低いことがわかる。

つぎに引張荷重を加えた場合キールにおいては頂部内面よりむしろコーナ部に大きな応力集中が生じており、荷重の増加と共にまずこの部分が層間剥離を起こす。縦フレームでは頂部内面の応力が最も大きく、まずこの部分のゲルコートにクラックが生じ次いで層間剥離が起こる。最大荷重は縦フレームはキールの約2倍であるが、伸びは逆にキールの方が大きく全歪エネルギーは両者ほぼ等しい。なお A-2 表に示すクラック発生時の応力および破断応力はいずれも $\alpha=0.5$ の場合の計算値である。

(2) 横方向曲げ試験

A-2 図 局部模型の曲げ試験結果

るが、前二者は後者に比して小さいと考えられるのでこれを無視し計測された伸びをそのまま断面の幅の広がりを示すものと考えた。

A-1 図に伸びの計測値を示し、また A-2 表に試験結果を示す。ここで見掛けの引張剛性とは比例限度内における荷重と伸びの関係を示すもので、ヤング係数の約 1/1000 以下であり、この方向の引張荷重に対しては極めて大きく変形する。そしてキールの方が縦フレームに比して約 3 倍大きい。

キールおよび縦フレームの軸と直角方向の曲げ試験を行なった (A-2 図参照)。荷重は両端を支え hat 頂部に鋼製治具を介して集中荷重を加えた。試験結果を A-2 図および A-3 表に示す。A-2 図は破断までの荷重撓み曲線であり、比較のため平板の板曲げ試験結果をも書き入れた。比例限度内における荷重と撓みの関係から曲げ剛性を

求めた。ただし板厚がそれぞれ異なるのでこの影響を除くため相当ヤング係数 E^* として A-3 表に示した。キールの方が縦フレームよりやや大きいがいずれも平板の約 1/2 である。破断荷重については縦フレームが他の 2 つに比して低いが、これは hat 頂部の板厚が平均板厚より薄く 5.9mm であり、キールは逆に 9mm と厚くなっているためである。従つて破断部の板厚を用いて破断応力を計算するとキールと縦フレームはほぼ同じ値であり、平板より約 30% 低い。

(3) 梁の縦曲げ試験

A-3 図に示すようにスパン 1m、幅 160mm のキールおよび縦フレームの梁を作り、これに集中荷重を加えた。各モデルは断面変形を自由にしたもの、断面変形を拘束するため同材質のリブを 250mm の間隔に接着したもの 2 種類とした。また曲げの方向は実艇に対応するため、キールは頂部が引張側となるように、縦フレームは頂部が圧縮側となるようにした。頂部および底部の応力の長さ方向の分布、および撓み分布をそれぞれ A-4 図および A-5 図に示した。いずれもリブをつけて断面の変形を拘束したものは梁理論による計算値と良く一致するが、リブをつけないものの撓みはキールでは約 18%、縦フレームで約 10% 大きくなっている。したがってこれだけ剛性が低下したことになる。また底部の応力は計算値より小さく、とくに荷重点付近にて著しい。これは断面の幅が広がっているためと考えられる。

A-3 表 模型の横曲げ試験結果

	キール	縦フレーム	平板
幅×厚さ ¹⁾	50×7.5	50×7.2	50×7.3
曲げ剛性 E^* (kg/mm ²)	445	389	807
破断荷重 (kg)	130	70	125
破断応力 ²⁾ (kg/mm ²)	9.63	10.60	13.96

注 1) 平均板厚

2) 破断部の板厚を用いた計算値

A-3 図 縦曲げ試験模型

A-5 図 縦フレーム模型の縦曲げ試験結果

A-4 図 キール模型の縦曲げ試験結果