

# 「耐波浪型FRP製灯塔の開発に関する調査研究」

**研究期間** 平成18年度～19年度（2年計画）  
**研究機関** 海上保安試験研究センター 航行援助技術課  
**研究者** 高品 幸次

## I 研究の目的

FRPは1970年代後半から航路標識等へ広く採用されているが、近年まれにみる大型台風等の異常気象によりFRP製灯塔の倒壊・破損といった被害が発生していることから、高強度でかつ軽量、低コストのFRP製灯塔の開発が求められている。

このような背景から、強度レベルを向上させ、かつ軽量のFRP製灯塔の開発に必要な構造材料の基礎資料を得ることを目的とした。

平成18年度は、灯台に採用されているFRP材料である樹脂及びガラス繊維補強材料のほか、新たに繊維補強材としてカーボン繊維、三次元中空構造ガラス織物（以下「パラビーム3D」）を使用した場合（新素材）の強度特性について試験を行ったものである。

この結果、新素材については、いくつかの技術的問題から所要強度を得ることが難しいことが判明したこと、並びにFRP製灯塔に採用しているフィラメントワインディング成形法（以下FW法）による強度評価法に問題があることが明らかとなったことから、急遽、継続して評価試験を行うこととした。

前年度の結果を踏まえ平成19年度は、FW法により成形したFRPの引張試験方法とその特性について重点を置き試験を行ったものである。

## II 研究の内容

### 1 平成18年度研究概要

ア ハンドレイアップ(HL)法により成形したFRPの強度について

新素材(炭素繊維及びパラビーム3D)を補強材として使用したCFRP、3DFRP及び現在FRP製灯塔に使用しているガラス繊維を補強材としたFRP(以下FRP)の強度試験結果は、以下のとおりであった。

[曲げ強さ]

FRP 314.5MPa > CFRP 296.4MPa > 3DFRP 85.9MPa

[引張強さ]

FRP 209.1MPa > CFRP 177.3MPa > 3DFRP 49.3MPa

このように、現在の灯塔に使用しているFRP強度以上の結果が得られなかった。

ここに、中空構造のガラス織物を補強材とする3DFRPは、樹脂—パラビーム3D—樹脂というサンドイ

ッチ状に成形され、脆弱な構造であり灯塔用の繊維補強材料として不相当であるものと考えられる。

また、炭素繊維を補強材とするCFRPは、曲げ、引張強度がともに界面せん断破壊(剥離)が生じ、十分な強度が得られなかったが、炭素繊維に前処理として界面接着剤を加えた結果、曲げ強さ402.6MPa、引張強さ285.9MPaでNDS1級相当の強度向上が図れることがわかった。 ※NDS:防衛省規格フィラメントワインディング(FW)法により成形したFRPの強度について

灯塔に必要な設計強度は、塔軸方向強度(パイプ軸に平行)が必要であることから、パイプ軸に対して平行する部分から長方形に切り出し、JISに準拠して試験を行った。

この結果、すべての試験片(FRP、CFRP、3DFRP)について、曲げ強さ及び引張強さともにNDS規格の等級外で、耐波浪型灯塔に必要なNDS1級相当の強度が得られなかった。

ここに、JISに準拠して製作した試験片は、補強繊維が短辺方向で切断されているため十分に繊維に荷重が作用しないことから、その強度は低く、繊維と樹脂の界面強度が支配的であるものと推定された。

### 2 平成19年度研究概要

18年度の結果概要のとおりJIS試験片ではガラス繊維等が切断され、その試験方法としては適切ではないものと推定された。

斜交異方性積層材(FW法によるFRP)は、直交異方性積層材(HL法によるFRP(ガラスクロス等使用))に比べ、その破壊は複雑で積層角(ロービング巻き角度)に依存するほか、破壊過程における自由端部の効果でさらに複雑であり、層間せん断による応力が自由端部に生じ、その応力のため斜交異方性積層材の強度は試験片の幅方向の寸法に依存する。

したがって、円筒型試験片あるいは、強度評価点の幅に対し試験片全体幅の広い特殊試験片(微小断面)を用い試験を実施した。また、この結果をもとに耐波浪型FRP製灯塔の設計基準の安全率と設計繊維配向角(FW巻き角度)について提案した。

#### ア 試験材料

樹脂は、オルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂とし、補強材にガラスロービングFW361(旭ファイバー)繊維(FW)を使用し、試験片を製作した。

## イ 試験方法

計測機器は、島津オートグラフ(AG-50KNG 島津製作所(株):写真1)を使用し、引張試験速度は、ISK6911熱硬化プラスチック一般試験方法の規定に準じ5mm/minとした。



写真1

また、引張強さの計算は、次式により算出した。  
円筒型試験片(写真2)

$$\sigma_A = 4P / \pi(D^2 - d^2)$$

$\sigma$  : 引張強さ(MPa) {kgf/mm<sup>2</sup>}

P : 試験片が破断したときの荷重(N) {kgf}

D : 円筒外形(mm)

d : 円筒内径(mm)

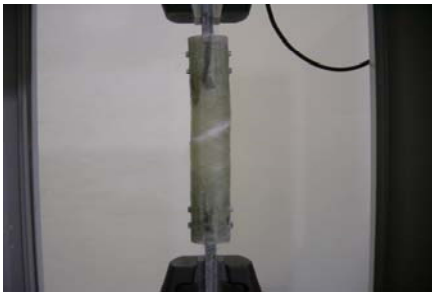


写真2

特殊試験片(写真3)

$$\sigma_B = P / A = P / t \times W$$

$\sigma_{tB}$  : 引張強さ(MPa) {kgf/mm<sup>2</sup>}

P : 試験片が破断したときの荷重(N) {kgf}

A : 試験片の最小断面積(mm<sup>2</sup>)

t : 試験片の厚さ(mm)

W : 試験片の中央部の幅(mm)

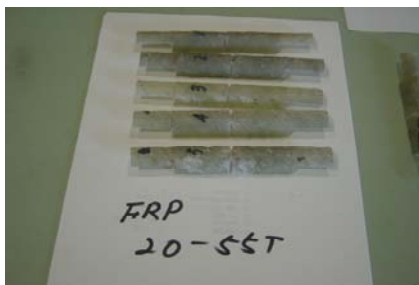


写真3

## III 結果

### 1 繊維配向角度と強度の結果

#### ア 円筒型試験片のパイプ径による影響

円筒型試験片(FW)による繊維配向角度と強度の関係は、パイプ外形φ50~20mm、巻き角度60度~30度の試験片で実施した結果は表1に示すとおりで、

その関係は、図1に示す強度線形近似式

$$y = -7.2X + 490 \quad \text{で表せる。}$$

ここに、巻き角度40, 30度の試験片については、使用試験機の荷重負荷の関係でパイプ断面を縮小して試験を行なったものである。

表1 FW円筒(φ50, 30, 20)強度

FRP円筒型引張試験結果(規格55~30度) H19.3

記号	試験片内容	測定巻き角度(°)	ラミネート構成	引張強さ	
				(MPa)	(kgf/mm <sup>2</sup> )
FRP20-55T	ガラス繊維強化プラスチック	62	OT+FW+OT	42	4.3
FRP30-55T	#	60	#	65	6.7
FRP50-55T	#	65	#	52	5.3
FRP20-40T	#	47	#	100	10.2
FRP30-40T	#	40	#	204	19
FRP30-30T	#	30	#	303	30.9

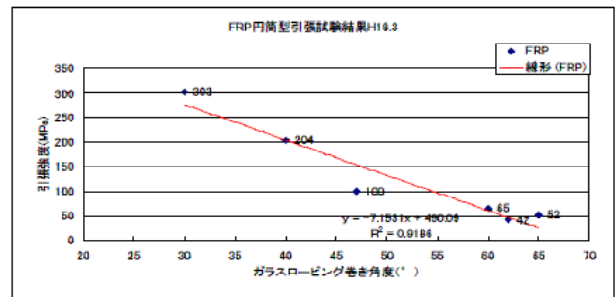


図1 FW円筒(φ50, 30, 20) 繊維配向角度と引張強度の関係

また、平成19年8月、パイプ外径をφ20mmに限定し、巻き角度55度~35度のものについて実施した結果は表2に示すとおりで、その関係は、図2に示す強度線形近似式

$$y = -7.2X + 479 \quad \text{で表せる。}$$

この2回の試験における強度線形近似式から、パイプ径に関係なくよい一致を示し、パイプ径による強度差は少ない。

つまり、その強度はパイプ径にほとんど関係なく繊維配向角度に依存することが分る。

表2 FW円筒(20φ)強度 端部樹脂モールド

FRP円筒型引張試験結果(規格55~30度) H19.8 モールド

記号	試験片内容	測定巻き角度(°)	ラミネート構成	引張強さ	
				(MPa)	(kgf/mm <sup>2</sup> )
FRP20-55T	ガラス繊維強化プラスチック	55	CT+FW+CT	82	8.4
FRP20-40T	#	40	#	189	19.1
FRP20-35T	#	35	#	227	23.2

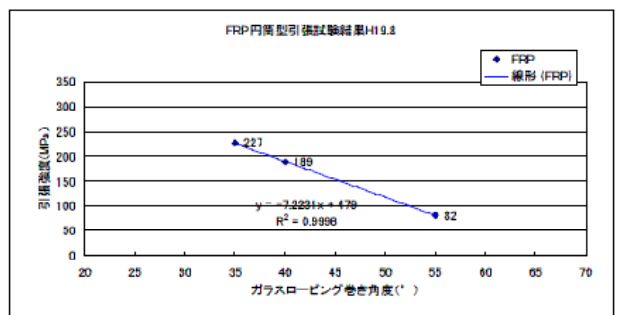


図2 パイプ外径20mm基準としたときの繊維配向角度と引張強度の関係

イ 切出し特殊試験片と円筒型試験片の結果比較

外形50, 30, 20mmのFRPパイプから前者に倣って切出した特殊試験片(写真3)を製作した。

その試験結果は表3に示す。

本試験結果のうち外形20mmのFRPパイプから切出した試験片の結果と先の円筒型試験片(φ20)の結果について比較したものを図3に示す。

表3 切出し特殊試験片(外形50, 30, 20mm)強度

FRP引張試験結果(特殊片) H19.8~10

記号	試験片内容	測定巻き角度(°)	ラミネート構成	引張強さ	
				(MPa)	(kgf/mm <sup>2</sup> )
FRP50-55T	ガラス繊維強化プラスチック	55	GT+FW+GT	73	7.4
FRP30-55T	"	55	"	97	9.9
FRP20-55T	"	55	"	87	8.9
FRP20-40T	"	40	"	154	15.7
FRP20-30T	"	30	"	266	27.2

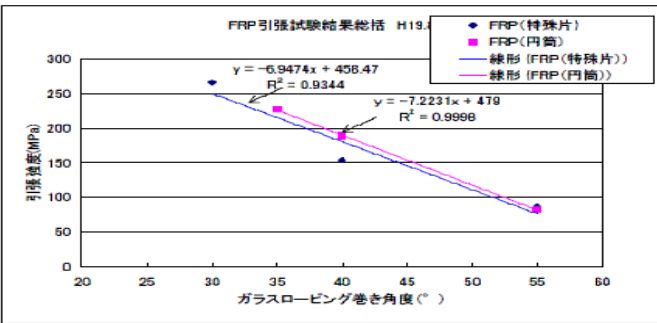


図3 外形φ20mmFRPパイプ切出し特殊試験片と円筒型試験片(φ20)の強度比較  
これによれば、

切出し特殊試験片の強度線形近似式は、

$$y = -6.9X + 458$$

円筒型試験片(φ20mm)の強度線形近似式は、

$$y = -7.2X + 479$$

であり、良い一致を示している。

このことから、切出し試験片は、本形状による試験を行うことで、強度評価が可能であると考えられる。

#### ウ FRP灯台の切出し特殊試験片による強度結果

実際に製作し、灯台から切出した特殊試験片(図4、写真4)により強度試験を行った結果を表4及び図5に示す

図5から、切出し特殊試験片の強度線形近似式

$$y \approx -19X + 990 \text{ を得た。}$$

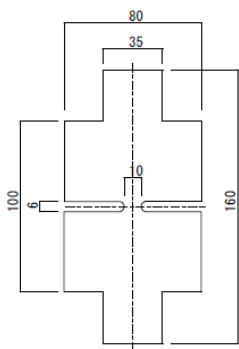


写真4

図4 FRP製灯台(FW)切出し特殊試験片(例)

表4 灯台から切出した特殊試験片の強度

FRP引張試験結果(灯台特殊片)

記号	試験片内容	測定巻き角度(°)	ラミネート構成	引張強さ	
				(MPa)	(kgf/mm <sup>2</sup> )
灯塔FRP1	ガラス繊維強化プラスチック	43	GT+FW+GT	175.8	17.9
灯塔FRP2-1	"	33	"	385	39.3
灯塔FRP2-2	"	34	"	346	35.3

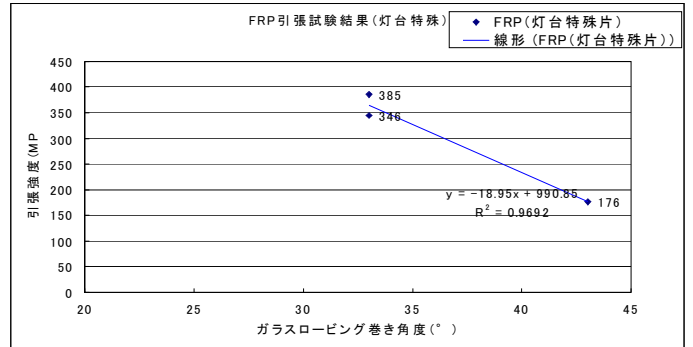


図5 灯台から切出した特殊試験片の繊維配向角度と引張強度の関係

## 2 耐波浪型FRP製灯塔の設計に係る検討

海上保安庁が制定するFRP(強化プラスチック)製灯塔設計基準(以下は基準という)並びに本調査研究成果をもとに、耐波浪型FRP製灯塔の設計に係る安全率F、並びに設計限界強度に必要な繊維配向角度を検討する。

ここに、「FRP構造設計便覧」の安全性のための設計基準によれば、材料の許容応力は、限界値/安全率により求められ、設計許容応力を決めるときの安全率(>1)は、それに影響する下記の事項を考慮し、その各々に対応する各係数Lnの相乗により次式から求められる。

$$\text{安全率} F = F_0 \times L_1 \times L_2 \times \dots \times L_n$$

ここに、F<sub>0</sub>は基本安全率で、材料の破壊強さが基準となる場合、F<sub>0</sub>=1.3の値をとる。

以下に各係数Lnの値について述べる。

### ア 材料特性値の信頼度係数L1

基準におけるこの係数は、静的短期試験を全く行わないで、実際の運用環境での材料特性値を、既存データを参照して推定した場合のL<sub>1</sub>=1.2が採用されている。このたび、本調査研究の成果から、灯塔材料の破壊強さを製作後の材料によって、構造物と同一条件で照査することが可能と考えられることからL<sub>1</sub>=1.0を適用する。

### イ 用途・重要度係数L2

外力基準に用途・重要度が含まれない場合は、構造の破損が及ぼす影響に応じて次の値をとる。現在の基準では、多人数を殺傷する恐れのある場合のL<sub>2</sub>=1.2が採用しているが、防波堤上にある灯台であり人的被害は非常に少ないものとする。

したがって、L<sub>2</sub>=1.2に代え、公共性があり、

社会的影響が大きい場合の適用係数である1.1を適用する。

#### ウ 外力荷重の推定の不確定さ係数L3

灯塔の外力である波高等は、既に所管庁の使用する外力基準に準拠したものであることから、現基準のL3=1.3を1.1に低減し適用する。

#### エ 構造計算での精度係数L4

構造物を単純な構造形態にモデル化し、従来の構造力学・材料力学の比較的簡単な式で推定した場合は、その程度に応じてL4=1.15~1.3の範囲を適用することとしている。よって、現行基準のとおりL4=1.25を適用する。

#### オ 材料特性のばらつき係数L5

成形法による係数は、現基準のL5=1.1×L51×L52×L53を適用する。

ハンドレイアップ（手作業成形）：1.15

フィラメントワインディング（機械成形）

：L51=1.0

成形者の経験年数による係数（2年以上）

：L52=1.0

成形環境の整備状態による係数（空調なし）

：L53=1.05

ゆえに、L5=1.1×1.0×1.0×1.05=1.15(FW法)

=1.1×1.15×1.0×1.05=1.32(HL法)

#### カ 衝撃的負荷を受ける場合の係数L6

衝撃係数は現基準のとおりL6=1.2を適用する。

よって、設計に採用する安全率Fは、基本安全率および(1)~(6)の係数により、

$$\text{安全率}F = F_0 \times L_1 \times L_2 \times L_3 \times L_4 \times L_5 \times L_6$$

$$= 1.3 \times 1.0 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.25 \times 1.15 \times$$

$$1.2 \div 2.7 \text{ (FW法)}$$

$$(\text{=} 1.3 \times 1.0 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.25 \times 1.32 \times$$

$$1.2 \div 3.1 \text{ (HL法)})$$

を得る。

ここに、耐波浪型FRP製灯塔の設計要件は、積層厚6mm/1プライ×4プライ=24mm及び5プライ=30mmの2タイプのFW設計限界強度300MPaが提示されており、これを条件として、前述の灯台から切り出した特殊試験片の強度線形近似式（精度誤差分として安全率1.2を見む。）から設計繊維配向角度を求めると

$$y = (-19X + 990) / 1.2$$

$$X = (990 - 300 \times 1.2) / 19 = 33 \text{ (度)} \text{ を得る。}$$

## IV 成果・まとめ

1 パイプ径の混在するFW円筒型試験片とパイプ径を一定にした円筒型試験片の強度データによる強度線形近似式（繊維配向角度に対する強度）を比較した結果、その径の大きさによる強度への影響はないことが確認できた。

2 FW法により成形したFRP強度は、繊維配向角度に依存し一定の関係があることが分った。

3 円筒型FRP試料から切出した特殊試験片と円筒型試験片の強度がほぼ一致した関係を示すことが確認できた。

以上のことから、FW法により成形したFRP製灯塔の強度試験方法は、灯塔から切り出した図5に示すような特殊試験片によることが可能と思料する。

また、耐波浪型FRP製灯塔の設計において、安全率はF=2.7(FWの場合)を、製造に必要な設計繊維配向角度については33度を提案する。

最後に、この調査研究にあたり御助言等をいただいた本庁交通部整備課（土木・建築担当）、FRP製造メーカー担当者並びに関係各位に深く感謝申し上げます。

### 【参考文献】

・ 複合材料入門

D・ハル著／宮入裕夫・池上皓三・金原 勲 共訳  
（株）培風館 発行

・ FRP構造設計便覧

社団法人 強化プラスチック協会 発行