

FRP 船劣化診断のための実用機開発

環境・エネルギー研究領域 * 勝又健一、松岡一祥
田中義照、林 慎也
輸送高度化研究領域 秋山 繁

1. まえがき

国土交通省海事局船用工業課からの受託研究「FRP 廃船の発生抑制に係わるリサイクル・リユース技術確立のための調査研究」の中で、平成 14 年度に開発した FRP 劣化診断装置（プロトタイプ）は、船体 FRP の剥離検出とその評価に対して、実験室的にも実際のドック現場においても十分満足できる機能があることが分かった。ただし、大きさ、重量及び操作性の点では不十分であった。平成 15 年度では装置の小型軽量化を図り、操作性が格段に向上した携帯型 FRP 劣化診断装置（実用機）が開発できた。本報告はその装置の内容及び、実際のドックで行った FRP 船の劣化診断実証実験の結果を述べたものである。

FRP 劣化診断実用装置の開発は次のような経過を辿ってきた。

- 1) 破壊試験等で損傷した FRP 材料において、剥離部等の探傷によるデータ集積⁽¹⁾
- 2) 超音波伝播と剥離面積に関する理論的検討と、模擬剥離試験片による詳細な実験⁽²⁾
- 3) 剥離診断のアルゴリズム構築から、FRP 劣化診断装置プロトタイプの開発^{(3),(4)}
- 4) プロトタイプによる現場での FRP 船の劣化診断実証実験⁽³⁾及び、装置の問題点抽出
- 5) 問題点を改良して本実用機への開発着手

2. 携帯型 FRP 劣化診断装置

開発の目標とした実用劣化診断装置は、プロトタイプよりも大幅な小型軽量化とともに操作性の向上が図られた。小型軽量化のため、電子回路のモジュール化及び評価プログラムの ROM 化を図った。新たなキーの導入により、確実な片手操作が可能となり、操作性が向上した。図 1 は本装置の外観図である。



図 1 . 携帯型 FRP 劣化診断装置外観

装置の大きさと重さ等は次に示す。

大きさ：縦×横×奥行、200 × 100 × 40mm

重量：560g（内バッテリー 85g）

バッテリー動作：16 時間、充電：2 時間

本装置では、診断する FRP の厚さに応じて用いる超音波探触子を選択できるようにした。例えば、板厚 6mm 以下では周波数 4MHz 探触子、6mm 以上は 2MHz 探触子を用いる。4MHz 探触子を使用すれば、剥離深さ 1.6mm 以上で検出可能となる。剥離評価のアルゴリズムは 14 年度に開発した劣化診断装置と同様であるが、新たに以下に示すルーチンを加えた。

健全部には剥離がないものとし、初期データ（界面エコーと底面エコー高さの比）が健全面積率が 100% 近辺に、基準化することである。これは、FRP 材による界面反射率等の影響を見かけ上補正している。すなわち、異なる FRP に対して健全部の超音波特性値（初期値）を持たせることである。

したがって、FRP 積層による層間（界面）からの反射特性が変わっても、補正可能なので剥離診断の信頼性は向上する。

測定前には基本として診断対象 FRP の板厚を設定する。板厚の設定にはカーソルによる数値入力が原則である。ただし、自動設定方式が可能な場合がある。自動設定方式はボタンの操作により板厚が自動的に設定される（2MHz 探触子使用時のみ）。

FRP 劣化診断時の測定データから得られる情報は、界面を含む剥離の深さ、底面の距離、界面と底面両者のエコー高さ及び、剥離判定結果（○健全、×剥離）である。これらのデータは、100点まで本体に記憶され、必要に応じて外部 PC に転送できる。

3．開発装置の機能

板厚の自動設定は 2MHz において、健全部の底面エコーが明瞭の場合に適用できる。これは FRP からのエコー群が特徴ある波形パターンであることからアルゴリズムに採用可能となった。ただし、4MHz では超音波の減衰が大きいため自動設定は出来ず、底面エコーを選択して厚さを設定する。

底面エコーが不明瞭の場合は板厚を入力する。設計図面などを利用して情報を得、厚さを数値で入力する。これは適用周波数に関わりなく、拡張手動の設定方法である。

健全部が存在しない、測定箇所が剥離となっているような場合には、FRP の音響定数等により、底面エコー範囲を自動設定する方式は拡張の機能として追加した。この設定方式では測定の信頼性は良いとは言えない面はあるが、ロング部等への適用が可能である。

ちなみに 14 年度に開発した装置では、健全部の底面エコーが明瞭であっても板厚の設定は入力方式のみであった。15 年度に開発した FRP 劣化診断装置のアルゴリズムには、板厚の自動設定及び、拡張自動が加えられている。

携帯型 FRP 劣化診断装置の画面は 3 種類、音速の数値を入力する入力画面、診断測定をする測定画面及び、測定したデータを表示するデータ画面がある。電源を入れると測定画面となり、前回

記憶された条件等が表示される。

入力画面では減衰係数、層間の反射率、音速等の音響定数、測定範囲、健全部初期値の有効・無効及び良否のしきい値等が表示される。測定画面は波形、良否及び測定値などの各種の条件が表示される。データ画面では、測定したデータが測定数とともに表示される。

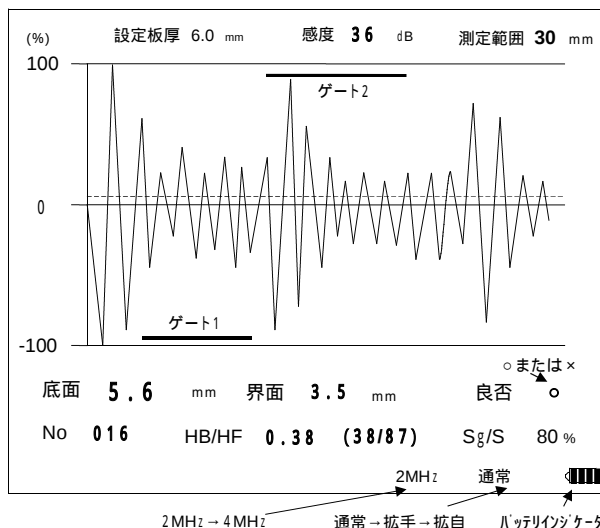


図 2．測定画面

図 2 は測定画面を示す。図において、ゲート 1 は界面（剥離）エコーの監視範囲、ゲート 2 が底面エコーの監視範囲であり、設定板厚等を含めて再設定しなければ有効である。底面及び界面エコーの高さ及び距離は測定中、常に表示する。両エコーの測定は各ゲート内の最大高さがデータとなる。なお、使用周波数、通常及び拡張、バッテリー状態が分かるように表示される。

4．剥離診断のアルゴリズム

超音波の平面音場内に FRP の層間剥離が存在する場合、剥離の大きさと底面エコー / 剥離界面エコー高さ比との関係は次式で表される。

$$\frac{H_B}{H_f} = \frac{S_g e^{-2\alpha t}}{S_g C r e^{-2\alpha x} + S_f e^{-2\alpha x}} \quad (1)$$

ただし、 H_B は底面エコー高さ、 H_f は剥離を有する界面エコー高さ、 S_g は探触子の有効面積 S における健全面積、 S_f はその剥離面積 ($S - S_g$)

である。また、 t は底面エコーの距離、 x は表面から剥離までの距離であり、 α は減衰係数 N_p 、 r_{IF} はガラス繊維（平面として扱う）と樹脂との反射率、 C は係数である。

式(1)において、 C は反射率を見かけ上補正する係数として扱う。すなわち、健全面積比100%におけるエコー高さの測定値から C が得られる。したがって、診断時には測定データ、底面と界面とのエコー高さの比 H_B / H_F および両エコーの伝播距離 (t, x) から健全面積比 $S_g / (S_g + S_f)$ を演算して、設定したしきい値にしたがって良否が判定される（図3参照）。

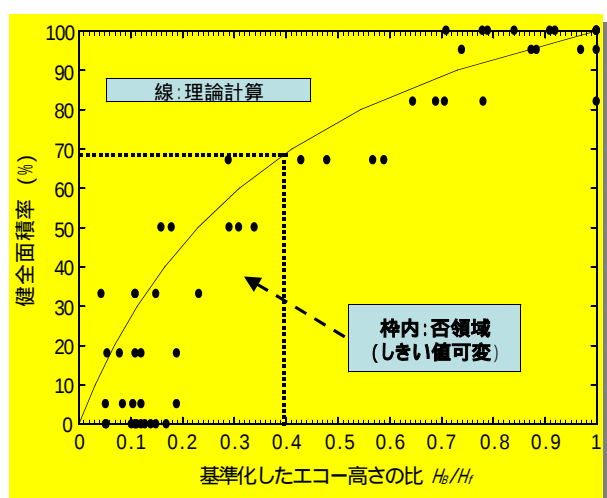


図3．しきい値による良否判定基準

図3において、横軸は基準化したエコー高さの比であり、縦軸は超音波探触子の素子と同面積におけるFRPの健全面積率である。健全面積率0%は全面剥離を意味する。FRP板の健全面積比を変えた詳細な実験（実験値●）はばらついてはいるものの、理論計算（曲線）と対応している。

剥離の評価は測定データ及び予め設定してある音響定数から計算して健全面積率を求める。良否判定は設定したしきい値（例：健全面積率70%弱）枠内が図2の測定画面において否（×）が表示される。

5．FRP船劣化診断の実証実験

FRP劣化診断装置によるFRP船への実証実験は、プロトタイプで平成14年度に行った。ドック入りしたFRP船に対して、損傷部付近を主に

調べた。そこでは、目に見えた破損部の周辺に剥離の存在が確かめられた。ただし、プロトタイプの場合には装置の寸法と重量が大、タッチペンの操作性等に難点があり、1人で操作することが困難であった。

プロトタイプに改良を加えた本実用機によるFRP船劣化診断の実証実験は寒冷地を含めて数カ所で行った。剥離診断測定は喫水線・船首とるように予め場所を決めて調べた。特に装置の操作性確認及び1人で測定する際、問題があるか等について調べた。

実証実験を行った場所とFRP船は次に記す。

実習船 4.9t、船齢10年（下関、気温13℃）

底引き網漁船 4.9t、船齢30年（新潟、気温5℃）

実習船の劣化診断実証実験

船首から2.5m、喫水線上部30点、喫水線下部20点測定した。これらは格子間隔25mmのジグ（測定30点）を用いて行った。本船のFRP船体外部には目立ったキズは存在してはいなかった。

測定データの例は表1、2に示す。測定部のFRP外板は6mm以上あり、探触子は2MHzである。

表1．実習船の測定例（喫水線上）

2列目		喫水線上		
No.	エコー高さ	ビーム路程	H_B / H_F	良 否
11	42.00	3.10	1.21	○
12	19.00	4.00	0.73	○
13	36.00	4.00	0.72	○
14	31.00	4.00	0.32	×
15	48.00	6.00	0.29	×
16	100.00	5.70	0.16	×
17	88.00	5.60	0.15	×
18	38.00	3.30	0.55	○
19	40.00	3.80	0.72	○
20	46.00	3.60	0.78	○

表2．実習船の測定例（喫水線下）

2段目		喫水線下		
No.	エコー高さ	ビーム路程	H_B / H_F	良 否
11	24.00	2.90	1.20	○
12	22.00	4.60	1.77	○
13	39.00	4.20	0.74	○
14	40.00	4.10	0.72	○
15	40.00	4.10	0.72	○
16	31.00	5.40	0.22	×
17	11.00	3.30	1.45	○
18	9.00	3.30	1.44	○
19	9.00	3.30	1.44	○
20	8.00	3.50	1.62	○

測定結果は、喫水線の下部では健全状態で占められているが、上部に剥離の判定がされた場所が存在した。

天候は雨で測定には決して良い状態ではなかったが、FRP 劣化診断装置は濡れながらも正常に動作した。その様子は図4に示す。

図4で分かるように、本装置は軽量小型、操作性が改良されたことから1人で容易に測定することが可能となった。



図4．測定中の様子

30年経過の廃漁船

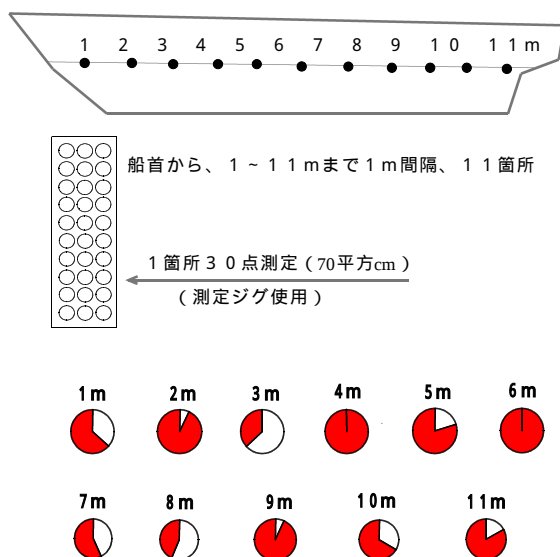


図5．漁船の測定箇所と結果

底引き網漁船の実証実験

底引き網漁船は廃船とするため、1年以上陸上に

放置されていた。塗装も見た目も古くキズが多い状態であった。測定は喫水線付近を船首から1～11mまで1m置きに30点ずつ行った。

図5は測定位置の概略と診断測定結果を示したものである。各円グラフの反時計回り(黒)は剥離の存在を表しており、50%～75%以上となっている。これら1箇所30点の測定面積は70cm²であり、剥離は喫水線上、船の全長に渡っている。

6．まとめ

FRPの剥離損傷を評価する携帯型FRP劣化診断装置を開発した。本装置はA5サイズ弱、500g強と小型軽量であること及び、キー操作による方式を採用して操作性が良好である。剥離の評価は理論的根拠と、実験的な裏付けからアルゴリズムが構築されている。剥離評価の測定結果は設定した健全面積率のしきい値内が否(×)と表示される。これは装置が自動で判定する機能のため、結果に客観性がある。

本装置によるFRP船での実証実験は、補修のためにドック入りした小型漁船などに対して行った。船体には喫水線付近に剥離と判断できる個所がいくつかの測定によって得られた。剥離診断は1人で容易に行えることが分かった。

7．謝辞

本研究は国土交通省技術研究開発委託費(海事局船用工業課)により実施しました。ご援助に感謝いたします。

8．参考文献

- (1)勝又健一、FRPの剥離損傷の検出について、非破壊検査協会第8回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、pp.17-22(2001)。
- (2)勝又、他3名、FRP船の劣化診断技術の検討、第1回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.363-366(2001)。
- (3)国土交通省船用工業課、FRP廃船高度リサイクルシステム構築プロジェクト報告書、(2003)。
- (4)勝又、他4名、FRP船の劣化診断装置の開発、第3回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.13-16(2003)。