含浸不良の FRP の非破壊検査法*

石 根 公 雄** 野 口 祐 成** 古 江 治 美***
鳥 阪 泰 憲** 島 村 昭 治***

Non-Destructive Inspection of Fiber Reinforced Plastics with a Defective Infiltrated Layer

by

Kimio ISHINE, Yusei NOGUCHI, Harumi FURUE,
Yasunori TORISAKA and Shoji SHIMAMURA
(Mechanical Engineering Laboratory, Ibaraki)

By using Fokker's Bond Tester (FBT, a resonance-impedance method) and the Image Analyzer System (IAS), the resonance characteristics and areas of defects of fiber reinforced plastic (FRP) sheets with a defective infiltrated layer were experimentally studied. The shear strength was also measured to compare with the values obtained by FBT and IAS.

One type of defect in a layer was found to be wide-spread crowd voids and the other was locally distributed crowd voids. Although the wide-spread microscopic defects varied in size, quantity and configuration, three experimental values measured by FBT, IAS and shear tests on an arbitrarily selected place in FRP sheets were closely related each other. In the case of local defects, the values by IAS could be related differently to the shear strength. But more detailed examinations about the local defects are needed to prove FBT and IAS to be useful devices to inspect FRP with defective infiltrated layers.

(Received May 14, 1982)

キー・ワード：非破壊検査，超音波，複合材料，含浸，せん断強度

1 ま え が き

繊維強化プラスチック（以下 FRP と略記する）を手積み法で成形したり，2 枚の FRP 板を重ねて接着したりすると，気泡や気孔を多く含んだ含浸不良部および接着不良部の生じる場合がある。これと類似の欠陥を非破壊的に検査した例としては，ガラス板を接着した場合¹⁾に生じる欠陥（気孔）を超音波共振法で検出した例，FRP を表面材，ハニカム材を芯材にしたサンドイッチ板に造った人工の接着欠陥（気孔とみなせる欠陥）を超音波共振法とホログラフィを用いた方法²⁾で検出し，検出可能な最小欠陥の大きさを示した例，2 枚のアクリル板の間に挟んだ人工欠陥（ほぼ気孔とみなせる欠陥）を超音波共振法で測定し，欠陥の大きさおよびアクリル板の厚さの影響を調べた例^{3,4)}などがある。また Al 板およびハニカムサンドイッチ板の接着部を超音波共振法で測定し，強度との関係を示した例^{5,6)}もあるが，これは用いた接着剤の層の厚さを変化さ

せた場合のものと考えられ，気泡あるいは気孔を層状に多数含んだ試料を非破壊的に検査し，機械的強度と対比させたものは見当らない。

そこで，①まず，気泡や気孔を多く含んだガラスマット 1 層を板厚中心部に含んだ FRP 板を作製し，②次に非破壊検査として，ボンドテスタ（オランダフォッカー社製超音波共振型の検査器）で試験板各部による共振周波数の変化を測定し，さらに画像処理装置で気泡等の像の面積を測定した。③さらに試験板各部の気泡等の密度が異った箇所（それぞれのせん断強度が異ると考えられる箇所）から試験片を切り出して引張せん断試験を行い，せん断強度を求め，④上記で得られた 2 種類の非破壊検査結果ならびにせん断強度の 3 者の関係を求めた。

その結果，3 者の測定結果の間により相関があったので報告する。

2 試験板および試験片

所定の板厚の所定の場所⁷⁾に含浸不良部をもった試験板を通常の手積み法で得ることは非常に困難であるため，Fig. 1 に示すような方法で試験板を作製した。すなわ

* 原稿受理 昭和57年5月14日

** 機械技術研究所 茨城県新治郡桜村並木

*** 正 会 員 機械技術研究所 茨城県新治郡桜村並木

Fig. 1. Schematics on how to make two kinds of FRP sheet (No.1 and No.2) with a defective infiltrated layer.

ち, 600 mm×600 mm の大きさで, 約 2.4 mm 厚の 2 枚の FRP 板 (以下母材と呼ぶ) を用意し, その各片面に樹脂を一樣に塗付し, ガラスマット 1 プライを間に挟んでプレスで軽く加圧した。2 枚の FRP 板に塗付した樹脂の総量は, 間に挟んだガラスマットの重量パーセントが約 30% となるよりも少し小量とした (この試験板を No.1 と呼ぶ)。

No.1 の試験板から採取した引張せん断試験片でせん断試験した結果, 50% 弱の試験片において, 母材と塗付した樹脂との間で層間せん断した。このようなせん断を防止するため, また異った含浸方法での影響を検討するため, Fig.1 の No.2 に示す方法でさらにもう一枚の試験板を作製した。すなわち, 母材となる 2 枚の FRP 板の各片面の表面をエメリー紙 (AA-60) で削り落とし, それぞれの面にガラスマット 1 プライを良く含浸させながら貼りつけ, ただちにガラスマット 1 プライを間に挟んで軽くプレスした (この試験板を No.2 とよぶ)。No.2 の試験板から切り出した引張せん断試験片については No.1 の試験板の場合のような母材と塗付した樹脂の間に層間でせん断するようなことはなかった。

なお, 母材の強化材としてマット材を使用したのは, 母材の透明度を良くして画像処理装置の適用を容易にするためである (ボンドテストの場合には強化材に影響されない)。また, 欠陥層にマット材を使用したのは機械的強度に方向性をもたせなかったためと, 大きなせん断強度をもたせたかったためである。

Fig.2 に No.1 の試験板の写真を示す。写真中央部の黒く見える部分は完全に含浸した部分であり, 周辺の白く見える部分は気泡や気孔の密集した含浸不良部分である。なお, 図中の四角で囲んだ部分は切り出したせん断試験片のせん断面に相当する箇所である。

Fig.3 に No.1 の試験板の中央の黒い部分とその周辺の白い部分との境界付近の写真を示す。図の上部の白い部分の中には黒い複雑な形状をした小さな点が散

Fig. 2. Photograph of 600mm×600mm FRP sheet No.1 (Oblong areas in the figure are wide-spread defects of crowd void areas on which three kinds of experimental values were measured and compared with each other).

Fig. 3. Photograph of defects near center of FRP sheet No.1 (Oblong areas show local defects of crowd voids on which two kinds of experimental values were compared with each other).

在している。図の右下部分には実際の手積作業あるいは接着作業で生じると考えられる島状の欠陥が見られる。なお, 図中の四角で囲んだ部分は島状の欠陥の測定例として切り出し引張せん断試験片のせん断面に相当する箇所である。

No.2 の試験板は気泡あるいは気孔が試験板全面に密集して白く見え, No.1 の試験板の中央部分に見られるような黒い部分が見られず, 単調な写真であったので省略する。

Fig.4 に試験板から切り出した引張せん断試験片の形状寸法を示す。Fig.4 のせん断面積は, JISK 6850 に示されているせん断面積よりも 2 倍強大きくしてある。それは, 広範囲にほぼ均一に分布した欠陥の部分から切り出した試験片のせん断強度が小さくて, 十分な力の検出が得られない恐れがあったためと同時に, せん断面積を大きくした方がより平均的なせん断強度の測定が可能となると考えたためである。

*1 気泡等が密集してほぼ連続して存在するときにはその部分が白く見える。この白く見える部分を陸地とみなし, その陸地の四角が黒い部分に囲まれた状態の小陸地を島, その四辺の黒い部分を海と原則として呼ぶ。ここでは, 引張せん断試験片のせん断面に海の部分が少しでも含まれるときにはすべて島状の欠陥とよぶ。

Fig. 4. Configuration for shear test specimen.

3 試験装置

Fig.5 にボンドテスタの写真を示す。本装置を用い、試験板を縦18、横18総計 324 の小部分に区画し、各部分による共振周波数の変化を測定した。用いたトランスデューサは1012 (直径 1 インチ、厚さ 1/2 インチ)、1010 (直径 1 インチ、厚さ 1 インチ) および 1510 (直径 1.5 インチ、厚さ 1 インチ) であった。それらの固有共振周波数はそれぞれ、119 kHz、91 kHz および 76 kHz³⁴⁾ であった。

Fig. 5. Photograph of Fokker's Bond Tester (FBT).

Fig.6 に画像処理装置 (ナック製) の写真を示す。本装置の主な構成は画像情報をコンピュータへ送るビデオカメラ、測定面積等を規定するための表示装置 (テレビジョン) および画像情報を処理するコンピュータである。今回の場合、気泡等の面積の測定の様子を Fig.7 に示す。

Fig. 6. Photograph of the Image Analyzer System (IAS).

Fig. 7. Schematics on how to measure areas of defects of crowd voids by IAS.

そして、

$$\frac{S_1}{S_0} \times 100, \quad S = S_0 - S_1$$

S_0 : 規定した範囲の面積

$\cong l \times b$ (Fig.4 参照)

S_1 : S_0 内の明るさ $(A+B)/2$ よりも
明るい部分の面積 (Fig.7 参照)

をそのせん断面における画像処理によって特定した値とした。

引張せん断試験は島津製 オートグラフ IS-20 で行い、せん断強度は次式で求めた。

$$\tau = P/S_0, \quad P: \text{せん断最大荷重} \\ S_0: \text{せん断面積} (=l \times b)$$

4 実験結果

4.1 均一な欠陥の場合

Fig.8 は No.1 の試験板の欠陥が広範囲に比較的均一に分布していると見られる場所および正常に含浸している部分 (試験板中央部分) をボンドテスタで測定した結果である。トランスデューサは1012を使用した。図中の数字は負荷なしのトランスデューサの固有共振周波数を f_0 (kHz)、試料を測定したときの共振周波数を f_1 (kHz)^{*2} とした場合の

$$4f = f_1 - f_0$$

である。なお、図中の長方形は後述の引張せん断試験片を切り取った箇所であり、長方形中央の数字をその試験片のせん断面の性質を代表するボンドテスタの特定値とした。

Fig.9 は Fig.8 で示したと同じ箇所をトランスデューサ1010で測定し、トランスデューサ1012の測定結果と比較したものである。多重の丸は同点の値を示す測定箇所が多数あったことを示す。これより両者はほぼ直線的な関係にあることがわかる。

Fig.10 は Fig.8 の長方形で示した箇所を引張せん断試験片として切り出し、試験片中央部分のせん断強度を求め、トランスデューサ1010および

*2 後述の(1)式における f に相当する。

Fig. 8. Δf of FRP sheet No.1 measured by transducer 1012 of FBT (Each real number in the figure shows the location of Δf . Afterwards oblong areas will be cut off for specimens for shear tests).

Fig. 9. Δf of wide-spread defects of FRP sheet No.1 measured by transducer 1012 and 1010 of FBT.

1012で測定した結果との関係を示したものである。図をみると、両者の間に線形の相関関係があることがわかる。

Fig. 10 および Fig. 11 において、図中の各直線をせん断強度の予想値とするならば、この直線から予想されるせん断強度よりも約 1 MPa 低目に見積れば、たいていの場合安全といえるようである。なお、引張せん断試験した時、母材と塗付した樹脂との間での層間せん断した場合と正常にせん断した場合とがあったことを前述したが、Fig. 10 のようにまとめると両者の間に大差がなかった。したがって、Fig. 10 ならびに以下の各図において両者は混在させて描いてある。

Fig. 11 は No. 2 の試験板について No. 1 の試験板の場合と同様にせん断試片を切り出して試験した結果

Fig. 10. Shear strength of specimens with wide-spread defects of FRP sheet No.1 (Transducers are 1010 and 1012).

Fig. 11. Shear strength of specimens with wide-spread defects of FRP sheet No.2 (transducers are 1510 and 1012).

得られたせん断強度とトランスデューサ 1510 および 1012 で測定した結果との関係を示すものである。両者の間に線形の関係のあるのがわかる。この場合も、予想されるせん断強度よりも約 1 MPa 低目に見積ればほぼ安全であると言える。

Fig. 12 は No. 1 の試験片から切り出した引張せん断試験片のせん断断面を画像処理装置で測定した面積率 ($s/s_0 \times 100$) とトランスデューサ 1010 で測定した結果との関係を示す。図中の 3 本の曲線は、各測定点を

$$\log(s/s_0 \times 100) - \log(\Delta f - \Delta f_0)^{*3}$$

の関係で描き直した時に、各測定点が 3 個のグループに分れ、それぞれのグループがほぼ 3 本の直線状に分布したことから、その 3 本の直線を再び Fig. 14 に描き直したものである。これらの点の分布状態は単なるばらつきと見なすこともできるが、ここでは同じ Δf の値に対して面積率の大きい危険側の点を●印、面積率の小さい安全側の点を○印、その中間の点を●印で

*3 Δf_0 については Fig. 12 を参照のこと。

Fig. 12. Amount of Δf and area of adhesion of selected areas of FRP sheet No.1 as shown in Fig. 2 measured by IAS (FBT transducer 1010). Three curves are derived from three straight lines in a figure in which both axes are $\log (s/s_0)$ and $\log (\Delta f \text{ minus } \Delta f_0)$.

Fig. 13. Amount of Δf and area of adhesion of selected areas of FRP sheet No.1 as shown in Fig. 2 measured by IAS (FBT transducer 1012). The curves show three experimental values).

示した。

Fig. 13 は Fig. 12 と同じ箇所をトランスデューサ 1012で測定した値と画像処理装置による測定値との関係を示す。図中の3本の曲線は Fig. 12 の場合と同様にして描いた。Fig. 13 の●印、●印、○印の各点はそれぞれ Fig. 12 の対応する印と同じ測定箇所である。この図をみると、Fig. 12 の場合と同様に●印は左上側に、○印は右下に分布しており、Fig. 12 および Fig. 13 の各点の分布状態は単なるばらつきではないことがわかる。

Fig. 14 は No. 1 の試験板についてのせん断強度と画像処理装置で求めた面積率の関係を示した図である。図中の●印、●印、○印は Fig. 12 および Fig. 13 の対応する記号と同じ測定点である。この図においても概して●印は危険側の右下方に分布し、○印は安全側の左上方に、●印はその中間に分布しているといえる。図中の2本の曲線は、Fig. 12 および Fig. 13 の場合と同様にして得たものであり、右下の2点を例外とみなせばこれらの測定点はこれら2本の

Fig. 14. Shear strength of selected areas of FRP sheet No.1 as shown in Fig. 2 and 3 measured by IAS (The three experimental values shown as triangles are those of local defects in Fig. 3).

曲線の間に分布しているといえる。なお、△印の測定点は島状の欠陥の場合のものであり、次節において述べる。

4・2 島状の欠陥の場合

4・1節で広範囲に均一に分布した欠陥についてそのせん断強度とボンダテストおよび画像処理装置による測定結果との関係を示した。その結果、欠陥内にある黒点の形状、寸法ならびに個数がまちまちであったにもかかわらず、それらの影響は小さく、上記3者の間により相関があった。

そこで、島状の欠陥においても、せん断面における島の位置、島の形状および寸法によってせん断強度はそれほど影響をうけないのではないかと考え、Fig. 3 に示した長方形のせん断面をもつ引張せん断試験片を No. 1 の試験板より切り出し、せん断強度を求めた。そして、4・1節の場合と同様に画像処理装置でせん断面における黒い部分の面積率を求めた。その結果を Fig. 14 の△印によって示す。測定点は少いが、これらの点は原点と正常試験片の測定点（右上の点）とを結ぶ一点鎖線の周辺に分布しているとみられる。

5 考 察

5・1 均一な欠陥の場合

Fig. 15 のようにトランスデューサを試料にくっつけた場合、これらの振動系が2次のモードで共振しているとして、その共振周波数 (f) を求めると次式と

Fig. 15. Schematics of vibrational wave transmission through a transducer and FRP sheet by FBT.

なる。

$$f = \frac{1}{\frac{l_0}{c_0} + \frac{l_1}{c_1} + \frac{l_2}{c_2} + \frac{l_3}{c_3}} \quad (1)$$

(l_0, l_1, l_2, l_3 および c_0, c_1, c_2, c_3 はそれぞれトランスデューサ, 上板, 接着層, 下板の厚さおよび波の伝ば速度)

他の諸元が同じで, 接着層内の気泡等の欠陥の程度が異った2箇所を測定したとき, (1)式より

$$\frac{f_1 - f_2}{f_0^2} = \frac{l_{22}}{c_{22}} - \frac{l_{21}}{c_{21}} \quad (2)$$

($f_1, f_2, l_{21}, l_{22}, c_{21}, c_{22}$: 測定箇所1および2における共振周波数, 接着層の厚さ, 接着層内の波の伝ば速度)

が導かれる。(2)式の右辺は欠陥の性状のみによって定まる値であり, 左辺はトランスデューサを替えて測定したときにどうなるかを示すものである。

No.2の試験板において, $\tau=5\text{MPa}$ と $\tau=0.5\text{MPa}$ のせん断力を与える箇所におけるトランスデューサ1510の $4f$ をFig.11より求め, (2)式の左辺を求めると $4.50 \times 10^{-4}/\text{sec}$ となる。また, 同じ箇所におけるトランスデューサ1010の $4f$ をFig.11およびFig.9より求め, (2)式の左辺を計算すると $4.45 \times 10^{-4}/\text{sec}$ となる。これら二つの数字はほぼ等しいと考えられ, (2)式およびFig.10, 11と考え合わせると, 「ボンドテストは欠陥のもっている性状の一面しか測定していないが, このような欠陥のせん断強度の測定に利用できる。」といえる。

また, (2)式の右辺には上板および下板の厚さの影響が入っていないことにより, Fig.9~11のデータは欠陥の製作方法が同じならば, 上板および下板の厚さが多少変った試料についても利用できることがわかる。

Fig.12およびFig.13において, 同じ面積率の値に対して, $4f$ の値が多価の値をとっているが, これは面積率が欠陥を2次的にしかとらえてないのに対し, $4f$ は3次的に欠陥の厚さ方向の特性をもとらえているからであると考ええる。

5・2 島状の欠陥の場合

島状の欠陥の場合, その測定点はFig.14の△印で示すように, 健全な試料の測定点と原点を結ぶ直線に沿って分布している。これは, ほぼ均一に分布しているとみなせる欠陥の場合に, その欠陥内部の微小な欠陥の形状, 大きさ, 個数等がまちまちであったのにもかかわらずある曲線に沿った傾向を示したことから判

断して, 有りうることだと考える。

また, 均一に分布した欠陥の傾向と島状の欠陥の傾向がFig.16に示すように異ったのは島状の欠陥には海に相当する部分との境界があり, この境界におけるせん断応力集中の影響と考える。

6 ま と め

細かな気泡あるいは気孔を層状に含んだいわゆる含浸不良のFRP板をボンドテストおよび画像処理装置で非破壊的に検査し, さらにせん断強度を測定して, 3者の対応関係を調べた結果, 以下の結論を得た。

A. 均一に分布した欠陥の場合

(1) ボンドテストによる測定結果とせん断強度の間には線形の関係があった。

(2) しかし, 用いるトランスデューサによってはばらつきが大きくなることがあった。

(3) 試料の製作方法が異なると, ちがった線形関係になった。

(4) 画像処理によって得た測定値はボンドテストの測定値およびせん断強度と相関があった。

(5) 各測定値は内部の微小な欠陥の形状寸法および個数による影響はあまり受けなかった。

B. 島状の欠陥の場合

この場合, 測定点数が少なくて更に多くの実験を重ねる必要があるが, 得られた測定点のみから判断すると

(1) 画像処理装置で測定した結果とせん断強度の間には比例関係があるようである。

(2) 島状の欠陥の場合も島の形状寸法による影響は小さかったようである。

(3) 均一に分布した欠陥との違いは島の周におけるせん断応力集中によると考える。

(昭和57年3月26日 第11回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 五十嵐高, 近藤信吾, 奥泉 力, 第1回構造接着シンポジウム講演論文集, p.53 (1979).
- 2) Endberg, N. P., Contractor Report, ESACR-478.
- 3) 石根公雄, 野口祐成, 第10回 FRP シンポジウム前刷, p.93 (1981).
- 4) 石根公雄, 野口祐成, 島村昭治, 材料, **30**, 1196(1981).
- 5) Fokker Bond Tester Instruction Manual.
- 6) Schliekelman, R. J., Fokker-VFW Technical Report (The Resonance-Impedance Method as a Means for Quality Control of Advanced Plastic Structures).