

複合材サンドウィッチパネルへのシェアログラフィ法の適用

Applying Shearography to Composite Sandwich Panels

滝 沢 真 実 株式会社 IHI 検査計測 検査事業部技術部
前 田 朝 樹 株式会社 IHI 検査計測 計測事業部計測技術部 次長
藤 原 貢 株式会社 IHI 検査計測 検査事業部技術部 部長
細 谷 昌 厚 元 株式会社 IHI 検査計測 技師長

本稿では、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）試験体に対してシェアログラフィ法を適用したのでその適用事例を紹介する。剥離模擬欠陥を付与した GFRP サンドウィッチパネル試験体を製作し、シェアログラフィ法によって剥離模擬欠陥の検出性能を評価した。また、シェアログラフィ法と微小面外変形解析結果を比較し、本試験条件における検出可能な最小面外変形量を算出した。本結果は、複合材大型構造物の非破壊検査手法として、広範囲を高速に探傷できる点でシェアログラフィ法が有効であることを示している。

This paper presents a case of shearography we conducted on samples made with Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP). The performance of the method was evaluated by conducting shearography to detect simulated sub-surface defects in respective samples of GFRP sandwich panels. The results of shearography were compared with those of out-of-plane micro-deformation analysis to calculate the smallest size of detectable deformation under the testing conditions. The findings indicate that shearography is an effective non-destructive testing method for large structures made of composite materials which provides the advantage quickly detecting defects in an extensive area.

1. 緒 言

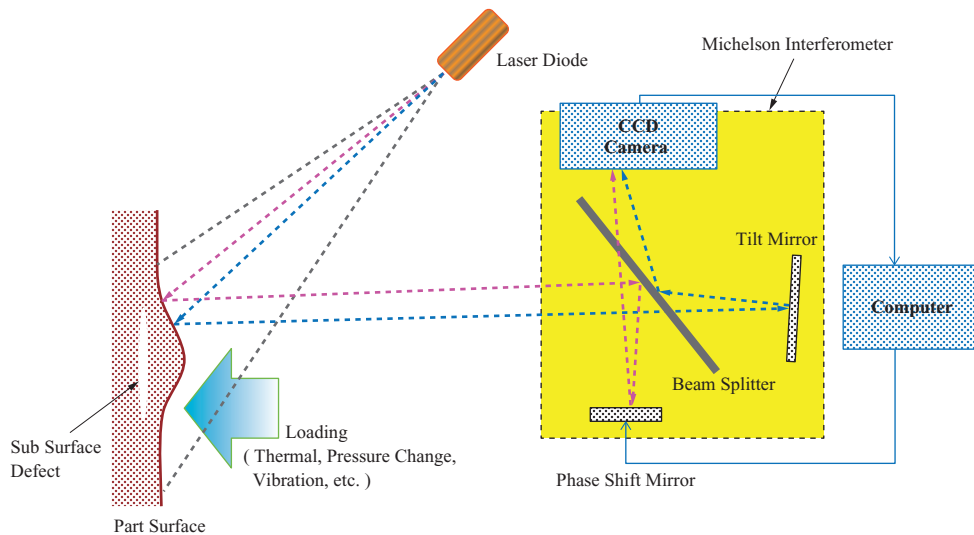
比強度や軽量性に優れた複合材は航空宇宙、船舶などの分野に多く適用されるようになってきた。一般に、複合材の非破壊検査には打音検査や超音波法、放射線法などが用いられている。しかしながら、大型複合材構造物の非破壊検査では広範囲を高速に検査できる技術が求められるため、従来の手法では効率が良いとは言いがたい。そこで、著者らは高速で非破壊検査が可能なシェアログラフィ法に着目した。欧米では、航空機や宇宙機器、船舶の FRP（繊維強化プラスチック）部品やウィンドタービンブレードなどの非破壊検査手法として、幅広い分野での適用が始まっている。しかし日本国内においては未だ適用が始まっていないのが現状である。そのため、著者らは剥離を模擬した欠陥を付与した GFRP 試験体を製作し、シェアログラフィ法の適用性を確認した⁽¹⁾。

2. シェアログラフィ法

シェアログラフィ法は、試験体表面にレーザー光を照射し、CCD カメラで捉えた反射光の位相を検出して微小な面外変形の変化を捉える方法である。試験体にレーザー光

を照射した状態で加熱や局所的な減圧、振動などを加え、試験範囲内に面外変形を引き起こす。これによって反射したレーザー光を CCD カメラで捉え、形成した干渉縞から試験視野内の位相分布をスペックル像から位相シフト法を用いて算出する。面外変形前と変形後の位相分布を比較することで、表面きずや剥離の有無を位相差像として捉える手法である⁽²⁾。シェアログラフィ装置の基本原理を第 1 図に示す。フェーズシフトミラーはコンピュータで角度を変え、位相を制御できる。これにより、ビームスプリッターから反射して CCD カメラに到達したレーザー光と干渉しあい干渉縞を形成することができる。フィールドで用いられるシェアログラフィ装置は、レーザーダイオードや CCD カメラ、ミラーさらにはコンピュータまでが一体型となり、持ち運びに適した構造になっているものが多い。

本手法は、レーザーホログラフィ干渉法や電子スペックル干渉法とは異なり、参照光を使用しないため、耐震テーブルが不要であるという大きなメリットがある。また基本的に非接触で検査を行うため、フィールド上で大型構造物を高速で探傷するのに適している。しかし、検出できる欠陥は、表面および表層部では比較的容易であるが、深い内部の欠陥は検出が難しいと言われている。また、微小な欠



第 1 図 シェアログラフィ装置の基本原理
 Fig. 1 Basic principles of a shearography system

陥の検出や、欠陥サイズの精度良い定量化には適さないとも言われている⁽³⁾。

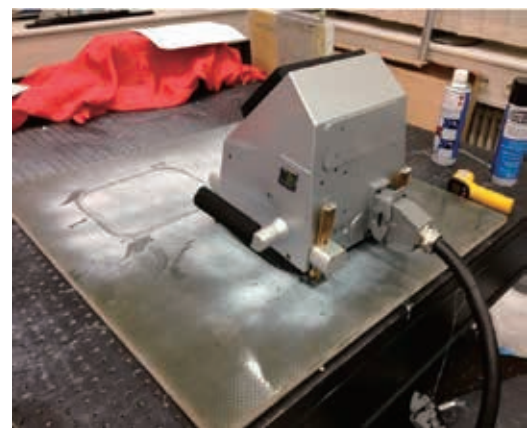
3. 試験内容

3.1 試験体の製作

厚さの異なる 2 枚の GFRP パネルでバルサ材を挟んで接着したサンドウィッチ構造の試験体を 2 体製作した。バルサ材には、界面剥離を模擬した深さ約 1 mm の人工欠陥を付与した。付与した人工欠陥の表面寸法は、30 × 30 mm, 50 × 50 mm, 70 × 70 mm の 3 種類とし、バルサ材の両面に 3 種類ずつ付与した。GFRP パネルの厚さおよび積層数を第 1 表に示す。なお、GFRP パネル 1-1 と 1-2, 2-1 と 2-2 をそれぞれペアとしてバルサ材と接着させ、試験体を製作した。

3.2 試験装置

シェアログラフィ装置は、Dantec Dynamics GmbH 社（ドイツ）の Q810 を使用した。減圧フードとレーザー光源、CCD カメラが一体となり、持ち運びが容易な形状の装置である。本試験で用いた減圧フードの試験範囲は約 300 × 300 mm である。試験装置の外観を、第 2 図および第 3 図に示す。



第 2 図 試験装置（減圧フード）
 Fig. 2 Testing unit (decompression hood)



第 3 図 試験装置（制御用 PC）
 Fig. 3 Testing unit (controlling PC)

第 1 表 GFRP パネルの厚さ
 Table 1 Thicknesses of GFRP panels

項目	単位	GFRP パネル 1-1	GFRP パネル 1-2	GFRP パネル 2-1	GFRP パネル 2-2
板厚	mm	5.6	3.0	2.8	1.5
積層数	ply	15	9	8	4

3.3 試験方法および条件

(1) シェアログラフィ試験

試験は、携帯型装置を用いて減圧法で行った。試験範囲を減圧することにより試験面に微小な面外変形を引き起こし、変形の変化を位相差像として PC 上に表示し、記録した。小型の真空ポンプに繋がれているフードを試験片面に -5 kPa で固定し、 0.2 kPa ステップで減圧した。パネル 1-1 は最大 -8 kPa 、それ以外のパネルは最大 -7 kPa まで減圧し、最適な画像を取得した。

(2) 微小面外変形解析

減圧法による試験体表面の面外変形量を静応力解析によって算出した。解析に使用した GFRP 材は積層角度 $0/90^\circ$ 、ビニルエステル樹脂のものを想定し、物性値は公表値および GFRP 製造業者から提供された値を用いた。また、解析モデルとして GFRP 平板の中心に剥離が付与された試験体を想定した。剥離の寸法や板厚、解析条件を第 2 表に示す。

第 2 表 解析条件
Table 2 Analysis conditions

項目	単位	条件
剥離寸法	mm	30×30
		50×50
		70×70
試験体の板厚	mm	2.6
		3.0
		4.6
		5.4
解析ソフト	-	ABAQUS
解析エリアの中心 (剥離部)	メッシュ	$1.0 \times 1.0 \times (1/6)T$
中心以外		$12.5 \times 12.5 \times (1/3)T$
減圧フード内圧	MPa	21.0

(注) T: GFRP 平板の板厚

4. 試験結果

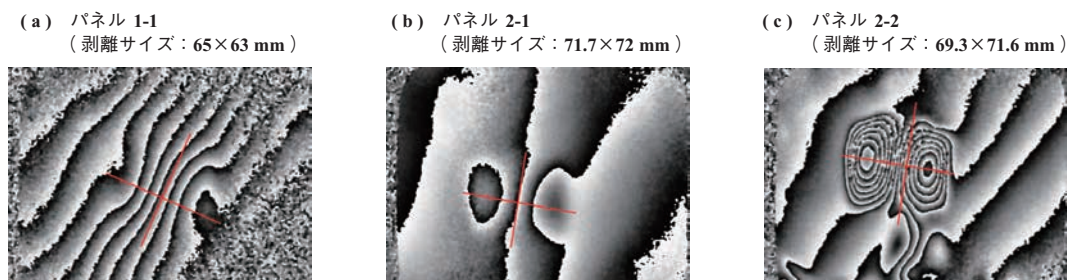
(1) 剥離の検出とサイジング

シェアログラフィ検出結果例を第 4 図に示す。第 4 図 - (a) にパネル 1-1 (厚さ 5.6 mm)、- (b) にパネル 2-1 (厚さ 2.8 mm)、- (c) にパネル 2-2 (厚さ 1.5 mm) の $70 \times 70 \text{ mm}$ 欠陥に対して、シェアログラフィ法を適用し剥離サイズを計測した結果である。パネルが薄くなるごとに指示模様の識別性が向上しているのがわかる。これは薄いパネルの方が、変形導入時の変形量が大きくなったためである。また、剥離欠陥のサイジング評価については、薄いパネル (2-1 および 2-2) では良い一致を示したが、厚いパネル (1-1) では面外変形量が小さいため、剥離サイズは過小気味で算出された。

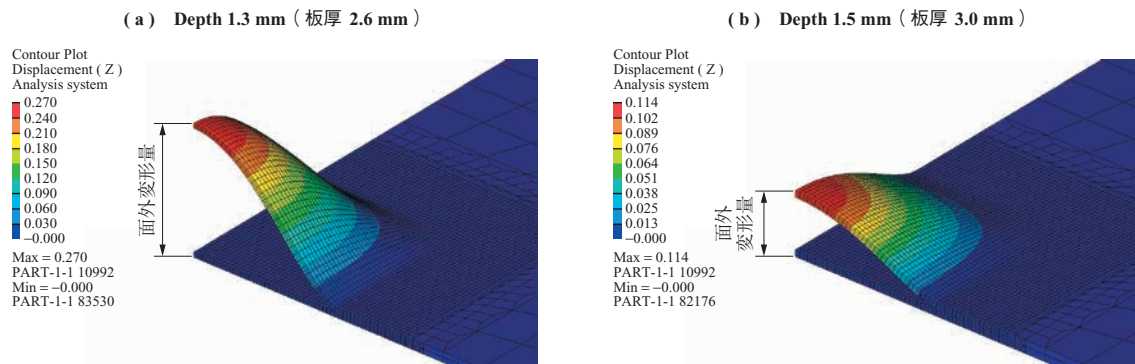
また、人工欠陥サイズ $30 \times 30 \text{ mm}$ の剥離については、パネル 1-1 以外で $\pm 1 \text{ mm}$ のサイジング誤差で検出され、比較的精度の良い検査が可能であった。

(2) 検出可能な最小面外変形量

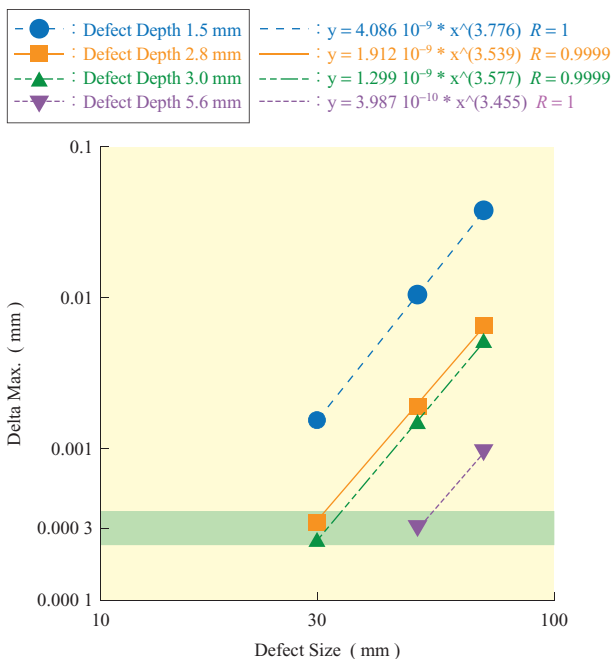
微小面外変形解析結果として、コンタ図の例を第 5 図に示す。図に示すように剥離欠陥中心点の最大面外変形量を解析から算出した。また、面外変形量と剥離サイズの関係を表すグラフを第 6 図に示す。縦軸は、解析によって算出した最大面外変形量で、試験体表面から剥離までの深さごとにプロットした (図中の青、橙、緑、紫線)。横軸はシェアログラフィ法で検出可能であった剥離サイズである。この結果より、シェアログラフィ法で検出が可能であった最小の剥離サイズは $30 \times 30 \text{ mm}$ で、その際の最大面外変形量は約 $3.0 \times 10^{-4} \text{ mm}$ であることがわかる。すなわち、 $3.0 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 以上の面外変形が起きる剥離欠陥であれば、本条件においてシェアログラフィ法での検出が可能であるということがわかった。



第 4 図 シェアログラフィ検出結果例
Fig. 4 Examples of detection results of shearography



第 5 図 微小面外変形解析結果 コンタ図の例
 Fig. 5 Results from analysis of out-of-plane micro-deformation : Examples of contour maps



第 6 図 最小面外変形量の算出
 Fig. 6 Calculation of the minimum size of out-of-plane micro-deformation

5. 結 言

本稿では、GFRP 試験体に対してシェアログラフィ法を適用し、本手法の有効性を確認した。本試験では、30 × 30 mm サイズの剥離の検出が可能であったが、GFRP 複合材は大型の構造物に使用されることが多いため、30 × 30 mm の剥離が検出できれば、実際の試験でも十分適用可能であると考えられる。また、試験時間については、条件検討に要する時間を除けば一回の試験範囲を 1 分以下で検

査可能であるため、試験対象物が大型であっても、短時間で検査が可能であると予想される。さらに、微小面外変形解析結果と比較することにより本条件における検出可能な最小欠陥の最大面外変形量を算出した。これにより、ターゲットとなる欠陥の大きさを想定し、最大面外変形量を算出すれば、シェアログラフィ法で検出が可能かどうかを事前に数値解析で推定することが可能であると示唆された。

今後は、実機品を視野に入れたシェアログラフィ試験の最適条件を検討する。また、CFRP 複合材についても同様の検討を行い、有効性を確認する予定である。

参 考 文 献

- (1) 滝沢真実, 前田朝樹, 藤原 貢, 細谷昌厚: 複合材へのシェアログラフィ法の適用事例 第 17 回表面探傷シンポジウム講演論文集 一般社団法人日本非破壊検査協会 2014 年 3 月 pp. 1 - 4
- (2) Wolfgang Steinchen and Lianxiang Yang : Digital Shearography SPIE PRESS (2003. 2) pp. 73 - 84
- (3) ASTM E 2581-07 : Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications ASTM International (2007) pp. 1 - 11
 (IIC REVIEW No. 52 2014/10 pp. 29 - 33 より転載)