

## デジタル画像相関法の開発と GFRP 梁の局所ひずみ場計測

Development of Digital Image Correlation Method and Strain Field Measurement of a GFRP Beam

北海道大学大学院工学研究科学生員 ○峯村 貴江 (Takae Minemura)  
 北海道大学大学院工学研究科正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)  
 北海道大学大学院工学研究科学生員 真砂 純一 (Junichi Masago)  
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)  
 北海道大学大学院工学研究科正会員 何 興文 (Xingwen He)

## 1. はじめに

複合材料である繊維強化ポリマー (Fiber Reinforced Polymer : FRP) は、土木工学の分野で従来使われてきた鉄、コンクリートなどの材料に比べ、高い耐食性と軽量性、実用的な耐力、強度、剛性を持つことから、近年土木工学の分野でも、好条件の材料として修復などに使われ始めている。しかし、FRP は材料設計の自由度が高く、また異方性であることなどから、耐荷・変形挙動の把握は容易ではなく、構造設計においてはその知見が十分ではない。よって今後、土木工学の分野で使用していくためにも、FRP の変形・損傷の把握をすることが必要であると考えられる。

また、FRP のような異方性材料は、変形・損傷過程が等方性材料に比べると複雑で変位計やひずみゲージによる把握が困難である。

以上より本研究ではデジタル画像相関法を用い、異方性材料の変形と損傷の過程を把握することを目的として、せん断剛性が低く、せん断ひずみが多い材料として、ガラス繊維強化ポリマー (Glass Fiber Reinforced Polymer : GFRP) を用い、局所ひずみ場計測、検討を行った。<sup>1)-3)</sup>

## 2. デジタル画像相関法

本研究では、既往の論文<sup>4)</sup>で行われた画像解析手法を参考にマッチング法を用いて画像解析を行う。

マッチング法とは画像解析の手法であるパターンマッチングを用いて、2次元変位場を計測する方法であ

り、これは画像解析手法の一つであるテンプレートマッチングを拡張した非接触の2次元変位場解析手法である。つまり、物体表面の写真を撮るだけで計測できる。本研究では、供試体の表面にランダム状に模様をうち、荷重前と荷重後適当な間隔でデジタルカメラによる撮影を行う。その後撮影したランダム模様の画像に関して、パターンマッチング法を用いて、供試体表面上の移動量を算出する。この作業を複数の点で行うことで、供試体表面の変位場を求め、変位場から計算により供試体表面のひずみ分布を求める。

## 2.1 画像解析プログラムの手順

まず、変形前の画像から図1のような任意の点を中心としたマスク画像を、変形後の画像から図2のようなマッチングを行う領域であるリージョン画像を取り出す。プログラムでは、これら2つの画像を畳み込むことにより、最大相関係数をもつ点を求め、その任意の点に対する変位を求める。畳み込みとはある関数を平行移動しながらもうひとつの関数と重ね足し合わせる二項演算であり、離散値の関数  $f$ 、 $g$  の畳み込みを式で表すと

$$(f * g)(m) = \sum_n f(n)g(m-n) \quad (1)$$

となる。

具体的に今回のケースでは、リージョン画像とマスク画像で畳み込みをする際に、図3のようにマスク画像を動かすことにより、相互相関係数を計算し、最大

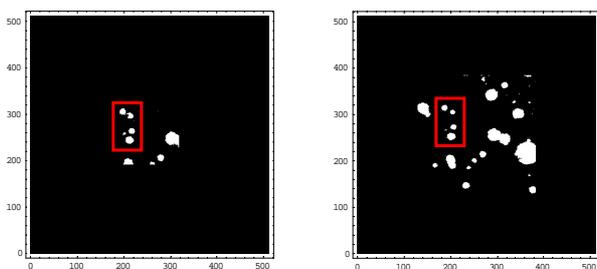


図1 マスク画像 (荷重前) 図2 リージョン画像 (荷重後)

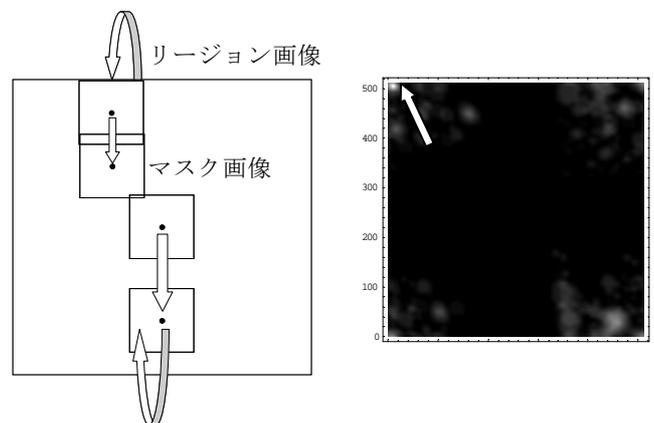


図3 マスク画像の移動手順

図4 畳み込みの結果

相関点を探す。図1のマスク画像と図2のリージョン画像を畳み込みした結果を図4に示した。図3のような移動をしたことで、相関が高い点である白い点が四隅に集中していることが分かる。

また、図4で左上の矢印が指している部分が白く濃くなっているのが分かるが、これがこの画像での解析により求められた最大相関点で座標は(11, 505)であり、左に11ピクセル、上に7(512-505)ピクセルの移動量が求められた。またこの解析に使われた変形前の画像である図1の四角で囲われた4点と、変形後の図2の四角で囲われた4点は似ていることが、目で見ても明らかであるが、この4点の移動からも、解析によって求められた移動量が確認できる。このようにして求めた最大相関点からマスク画像で中心とした任意の点の変位が求められる。この作業を、解析対象画像内の複数の点で行うことにより、与えた荷重ごとの面全体の変位場を知ることができる。そして、その変位から面全体のひずみ分布を求める。

### 2.2 サブピクセル計測

上述の方法では解析により取得可能な最小変位が1ピクセルであるため、1ピクセル未満の変位が求められない。図5に示したように、解析により取得可能な最小変位を  $m$  とし、間隔  $n$  で  $m$  だけ変位に差があると仮定した場合、左図のように変位を求める間隔を  $n$

とした場合には  $m/n$  という正しいひずみが求められるが、中央図のように変位を求める間隔を  $n/2$  とした場合には、 $0n - n/2$  間のひずみが  $0$ 、 $n/2 - n$  間のひずみが  $2m/n$  となる。また同様に右図のように変位を求める間隔を  $n/4$  とした場合には  $0 - 3m/n$  間のひずみが  $0$ 、 $3m/n - n$  間のひずみが  $4m/n$  となり、正しいひずみが得られない。よって上述の方法で求めた最大相関点と周囲の座標と相関係数を用いて1ピクセル未満の変位も求められるようにした。

まず、画像相関法により整数単位の最大相関点の座標と相関係数を求める。次にその周りの8点について相関係数を求める。そしてこれらの数値を用い、次式

$$ax^2 + bx + cy^2 + dy + e = 0 \quad (1)$$

を用いて、楕円放物面に近似する。放物面の頂点をサブピクセルレベルでの最大相関点とし、この座標を求めることにより小数点未満の変位が求められる。

### 3. ランダム模様の検討

FRPの表面色は一様であり、そのままでは明瞭な相関が得られない。よって人工的にランダム模様を表面につけることにした。最適なランダム模様を検討するために、黒いゴムの供試体に3種類の方法でランダム模様をつけて載荷を行う簡単な予備実験を行った。ひずみ分布を明瞭に得るため、ゴムの供試体を鋼板で挟

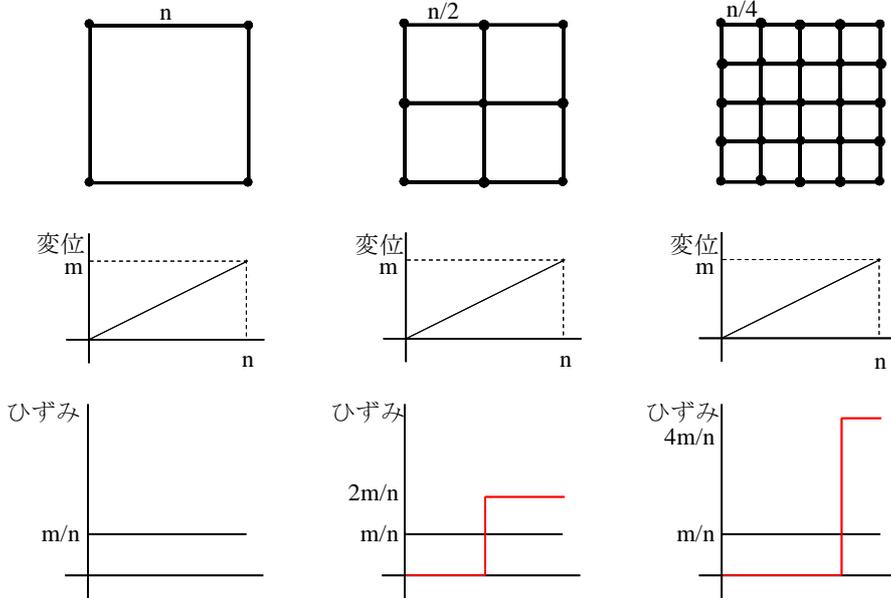


図5 変位を求める間隔とひずみの関係

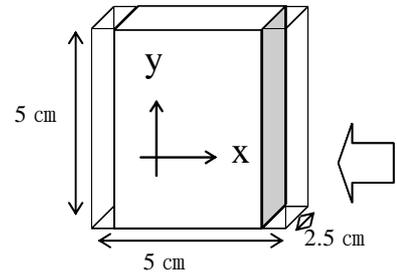


図6 載荷方法



(a) 変位が取得可能なランダム模様



(b) 変位が取得困難なランダム模様

図7 白色スプレーによるランダム模様

み、図6のような偏心载荷を実施した。载荷前後で供試体を撮影し、それらの画像の解析を行った。

### 3.1 白色スプレーによるランダム模様

まずは、図7のように白色のスプレーでランダム模様を作成した。この場合、図7の(a)(b)に見られるように、供試体表面全体に同じような密度と大きさの点をつけるという点で、同じようなランダム模様を再現することは難しかった。解析結果をみるとこの白色スプレーのランダム模様では、点が小さい部分や密度が疎な部分では最大相関点が求められず、供試体表面のひずみ分布を得ることはできなかった。

### 3.2 2次元バーコード状ランダム模様

次に、一様なランダム模様の大きさや密度などについて、同じような模様を再現することを目指して、図8のように2次元バーコード状の模様を作成し、転写シートを用いて供試体に転写した。x軸方向ひずみの分布を図9に示す。(b)では変位を求める間隔を200ピクセルとした。ひずみは、下端で圧縮が最も大きく、上部にいくにつれて圧縮が小さくなり、上端では引張となっており、正しいひずみ分布が求められていると考えられる。一方、(a)では変位を求める間隔を50ピクセルとしたが、ひずみの分布には変動があり、正しいひずみ分布が得られていないと考えられる。転写シートでランダム模様をつけた場合において、変位を求める間隔を小さくした(a)で、正しいひずみ分布が得られない理由として、供試体と転写シートの動きが連動

しているかどうか定かではなく、しわがよっている可能性も考えられる。

### 3.3 ラメスプレーによるランダム模様

転写シートの場合では、供試体と転写シートの動きが連動しているかが定かではなかったため、ラメスプレーで図10のようにランダム模様を作成し、同様の実験と解析を行った。x軸方向のひずみ分布を図11に示す。変位を求める間隔を50ピクセルとした(b)では、変位を求める間隔を100ピクセルとした(a)よりもひずみ分布に多少の変動が見られるが、どちらも下端で圧縮が最大、上部にいくにつれて圧縮が小さくなり、上端で引張になっており、正しいひずみ分布が得られたと考えられる。また、ラメスプレーのランダム模様の場合、点の大きさはスプレー中に含まれるラメの大きさであるため、全体でほぼ同じであり、かつ白色スプレーと比べて適度な密度の模様も作りやすいため、今後の実験では、ラメスプレーによりランダム模様を作成することとした。

## 4. GFRPの曲げ载荷実験

異方性の素材であり、せん断剛性が低く、せん断ひずみが大きい材料としてGFRPを供試体として4点曲げ载荷実験を行った。

### 4.1 実験概要

図12のようなGFRPの供試体に、0tfから5tfまで0.5tf刻みで载荷を行った。既往の炭素繊維強化ポリマ

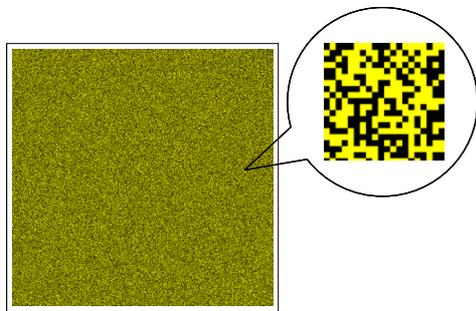


図8 2次元バーコード状ランダム模様

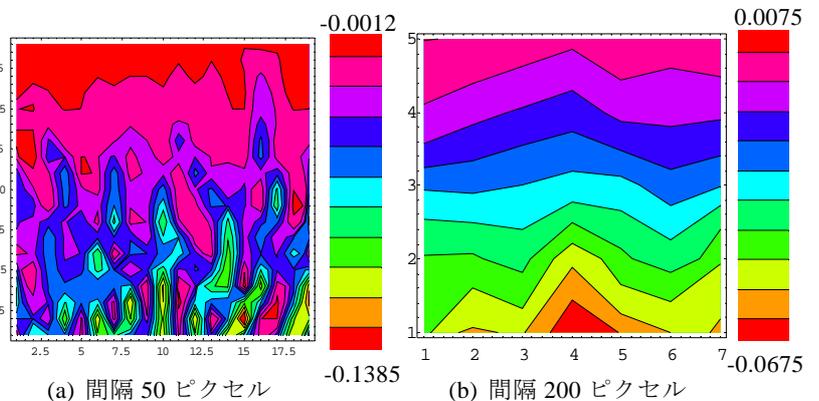


図9 転写シートランダム模様によるX軸方向ひずみの分布



図10 ラメスプレーによるランダム模様

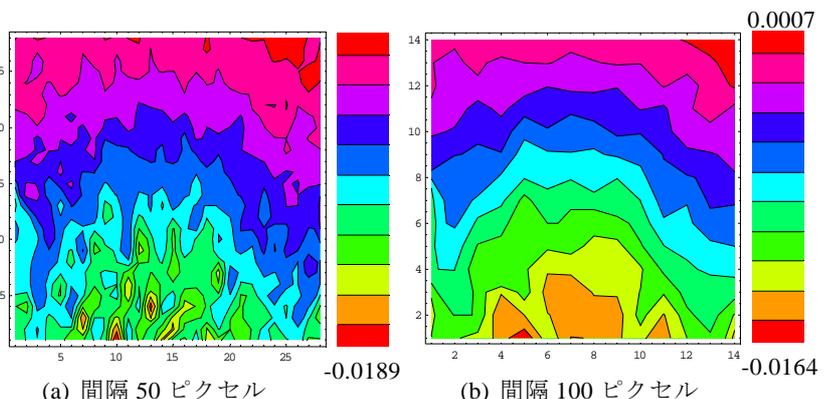


図11 ラメスプレーランダム模様によるX軸方向ひずみの分布

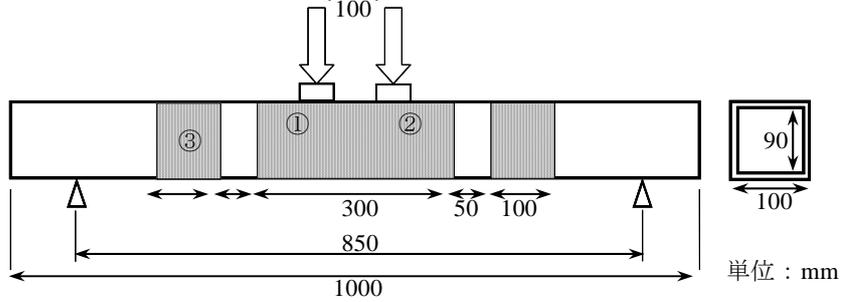
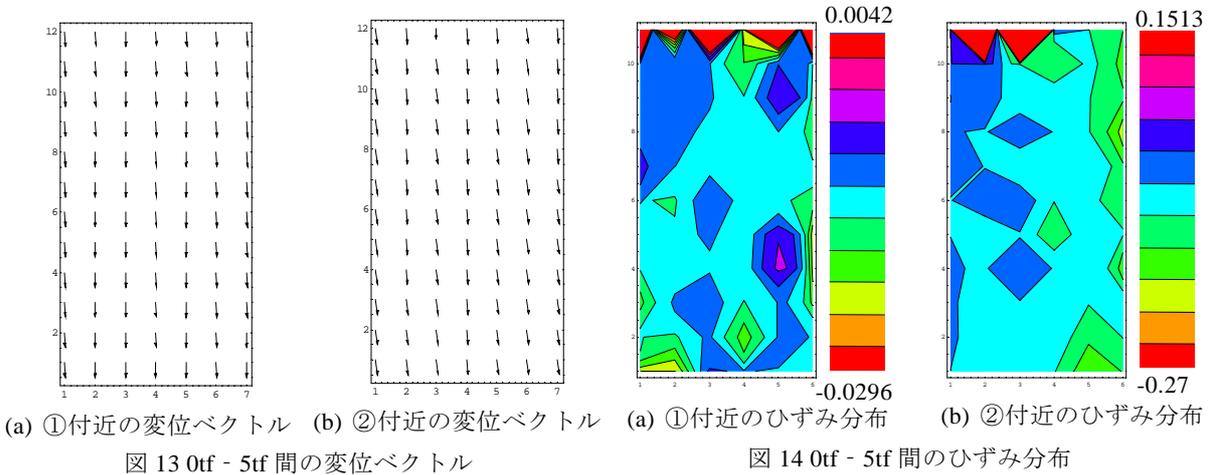


図 12 GFRP の供試体と荷重方法



(a) ①付近の変位ベクトル (b) ②付近の変位ベクトル

図 13 0tf - 5tf 間の変位ベクトル

(a) ①付近のひずみ分布 (b) ②付近のひずみ分布

図 14 0tf - 5tf 間のひずみ分布

一 (Carbon Fiber Reinforced Polymer : CFRP) の実験で荷重点付近が破壊したと、既往の GFRP の実験では荷重点と支点の中心付近が破壊したことを参考に、網掛け部にあたる部分をカメラ 3 台を用いて撮影し、画像解析を行った。また、供試体の反対側の側面には、確認のため画像解析と同じ位置にひずみゲージを貼付した。

#### 4.2 解析結果と考察

図 13 に 0tf - 5tf 間の図 12 の①、②の位置における変位ベクトルを示した。これらの変位ベクトルを見ると、変形前後で正しい変位が取得できていると考えられる。しかし、解析結果の x 軸方向ひずみ、y 軸方向ひずみの値を、反対側の側面のひずみゲージで得られた値と比較すると、全ての場合において解析結果の値の方が大きい値となった。この原因として、供試体が面外変形し、カメラ側に変位したことにより、見かけ上引張ひずみが大きく計算されたことが考えられる。また図 12 の①、②におけるせん断ひずみ分布を図 14 に、図 12 の①、②、③における荷重ごとのせん断ひずみを図 15 に示す。これらの値は共にひずみゲージの値に比べ小さい値だが、①、②、③とも符号は正しく、GFRP に生じるせん断ひずみは確認できた。

#### 5. まとめ

本研究では、デジタル画像相関法を用い、異方性材料の変形と損傷の過程を把握することを目的として、GFRP を用い、局所ひずみ場計測を行った。表面色が一樣である GFRP にラメスプレーにより人工的にランダム模様をつけ、4 点曲げ荷重実験を行い、荷重前後

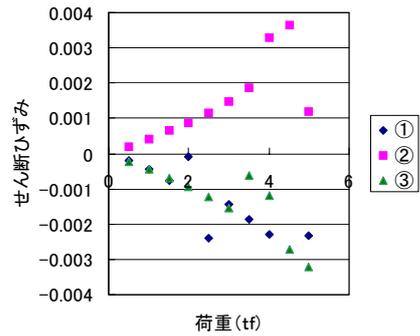


図 15 荷重ごとのせん断ひずみ

の写真を撮影し、画像間で相関係数を調べることで、変位を求め、ひずみ場を求めた。解析で得られた x 方向・y 方向ひずみの値は面外変形により、見かけ上大きい値が求められたが、せん断ひずみの符号は正しく GFRP に生じるせん断ひずみを確認することができた。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：FRP 橋梁 - 技術とその展望 -
- 2) 松本高志, 峯村貴江, 真砂純一, 林川俊郎：デジタル画像相関法によるひずみ場計測と撮影条件の検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 2008
- 3) 松本高志, 真砂純一, 峯村貴江, 林川俊郎：デジタル画像相関法によるひずみ場計測と精度の検討, 土木学会北海道支部論文集, 2008
- 4) 山崎 卓哉：岩盤の変形と透水性性能の変化に関する実験的研究, 香川大学工学研究科修士論文, 2007