

## 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

Study on the image acquisition and strain field measurement by digital image correlation

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 峯村 貴江(Takae Minemura)  
 北海道大学工学部土木工学科 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 敏郎(Toshiro Hayashikawa)

## 1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber reinforced polymer : CFRP) は、高い耐力、強度、剛性を持っていることから、航空宇宙などの分野だけでなく、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、CFRP を主要な部材として使用した構造物はまだ少ない。CFRP は異方性であり脆性素材であることなどから、その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、CFRP の変形・損傷の把握をすることは必要であると考えられる。

また、既存の研究では CFRP の矩形の外殻にコンクリートをつめたものに荷重をかけ、強度実験を行ったところ、曲げ引張破壊ではなく、載荷点付近で圧縮破壊とみられる破壊形態となった。こうした実験の破壊箇所の特定をするためにも、広い範囲での変位について知ることが必要とされている。

以上より、本研究では CFRP の変形と損傷の把握を対象として、デジタル画像相関法による画像解析法の構築と画像撮影条件の検討を行った。

## 2. 画像解析方法

本研究では、既往の論文<sup>1)</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。そのため、物体表面の写真の撮るだけで計測できる。本研究では、CFRP の供試体の表面にインクでランダム状に模様をうち、載荷後適当な間隔でデジタルカメラによる撮影を行い、その後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、供試体表面上の複数の点に

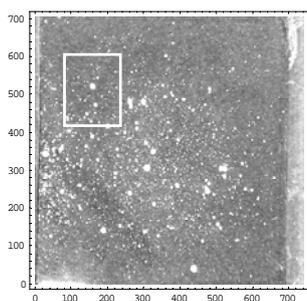


図1 変形前の画像

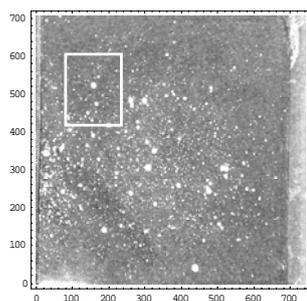


図2 変形後の画像

ついで移動量を算出し、その求めた移動量から計算により供試体表面のひずみを求める。

## 3. 画像解析プログラムの手順

## 3.1 画像相関法

まず、図1のような変形前の画像から任意の点を中心としたマスク画像を、図2のような変形後の画像からマッチングを行う領域であるリージョンの画像を取り出す。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、変形後の画像から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。これを解析対象画像内の複数の点について行っている。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、それぞれの関数が離散値の場合を式で表すと

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

となり、フーリエ変換を行うと

$$F(f * g) = F(f) \cdot F(g) \quad (2)$$

となる。そしてこの結果を逆フーリエ変換することにより、式(1)の結果が求められる。

具体的に今回のケースでは、リージョンの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、最大相関係数を持つ点を探す。図1、2の白い四角で囲まれた部分を含むマスク画像とリージョンの画像を畳み込みした結果を図に表すと、図4のようになり、図3のような移動をしたことで、相関がある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、この画像での解析結果の最大相関係数をもつ点が(14, 511)である。またこの研究で使われた画像から、変形前の画像である図1の四角で囲まれた2点と、図2のリージョン画像の四角で囲まれた2点は似ていることが、目で見て明らかである。この2点の移動からも、図4に表された最大相関係数をもつ点の位置については理解ができ、左に14ピクセル、上に1ピクセルの移動量が得られていることになる。このようにして求めた最大相関係数をもつ点からマスク画像の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。

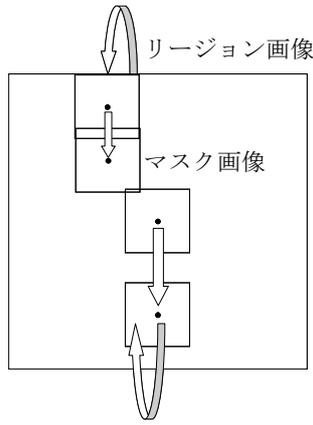


図3 マスク画像の移動の手順

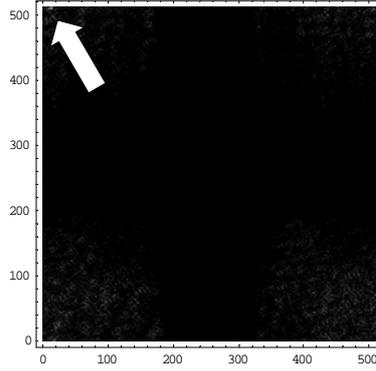


図4 畳み込みの結果

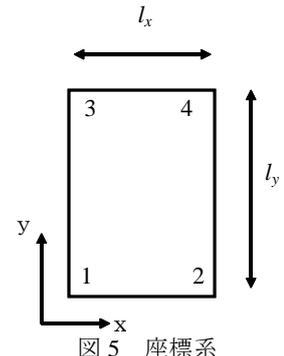


図5 座標系

### 3.2 ひずみの計算

次に、これらの変位場が得られた後、ひずみを求める。図5のような平面上の4点1、2、3、4で囲まれた長方形領域の平面ひずみは以下のような方法で求められる。ある体積Vにおける平均ひずみは

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV = \frac{1}{2V} \int_V (u_{i,j} + u_{j,i}) dV \quad (3)$$

と表される。ここでガウスの発散定理を用いると

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2V} \int_S (u_i n_j + u_j n_i) dS \quad (4)$$

となり、これを2次元問題として直すと

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2S} \int_C (u_i n_j + u_j n_i) dS \quad (5)$$

となる。

ここで、図6のように座標をとると長方形領域における平均ひずみはそれぞれ

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{2S} \int_C (u_x n_x + u_x n_x) dC \\ &= \frac{1}{l_x} \left( \frac{u_2 + u_4}{2} - \frac{u_1 + u_3}{2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{22} &= \frac{1}{2S} \int_C (u_y n_y + u_y n_y) dC \\ &= \frac{1}{l_y} \left( \frac{u_3 + u_4}{2} - \frac{u_1 + u_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{12} &= \frac{1}{2S} \int_C (u_x n_y + u_y n_x) dC \\ &= \frac{1}{2l_y} \left( \frac{u_3 + u_4}{2} - \frac{u_1 + u_2}{2} \right) + \frac{1}{2l_x} \left( \frac{v_2 + v_4}{2} - \frac{v_1 + v_3}{2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

以上を用いると最大せん断ひずみは、

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\left( \frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{12}^2} \quad (9)$$

となる。

このようにして、解析したい画像全体のひずみを求め、変形を把握する。

### 4. 撮影条件

画像の撮影条件を検討した。黒いゴムの供試体の表面に白いインクでランダム模様をつけたもの、画像解析のプログラム中でRGB分解をする際に赤色を切り出していることを考慮して赤いインクでランダム模様をつけたもの、光の反射による影響を考慮して供試体表面に黒いつや消しのインクを塗りその上から白いインクでランダム模様をつけたものを撮影し、その画像をプログラムで解析した。

その結果、黒いつや消しの上から白いインクでランダム模様をつけたものは、供試体表面に設定したすべての点の移動量を読み取ることができた。それに対して残りの2つに関しては、ランダム模様の位置により、点の移動量を読み取ることができない部分と、読み取ることができない部分が現れた。これらより、解析に使用した画像で移動量を読み取ることができない位置、できない位置を比較したところ、ランダム模様の点の大きさが小さすぎる部分や点の密度が低い部分では移動量が読み取れないことが分かった。以上より、つや消しによる光の影響、ランダム模様の色はそれほど問題ではなく、ランダム模様の分布、点の大きさが問題であり、その最適化が必要である。

### 5. あとがき

本研究では、CFRPの変形と損傷の把握を対象として、デジタル画像相関法を用いて供試体表面の荷重前と荷重後の画像に対して解析をすることにより、供試体表面上の複数の点についての移動量を算出し、その移動量から供試体表面のひずみを求めた。

今後は、予備実験と解析を行い、再現性と解像度の十分な撮影条件等を把握し、その後CFRPでの実験、解析を行いたい。

### 参考文献

- 1) 山崎 卓哉: 岩盤の変形と透水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.