

ステレオ画像法による面外変形計測手法の開発

Out of plane deformation measurement method with stereo image analysis method

北海道大学工学部

北海道大学大学院工学研究科

北海道大学大学院工学研究科

北海道大学大学院工学研究科

北海道大学大学院工学研究科

学生員 ○岡松 広忠 (Hirotsada Okamatsu)

正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

学生員 真砂 純一 (Junichi Masago)

F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

正会員 何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー(carbon fiber reinforced polymer: CFRP)は、鉄・アルミなどの金属材料に比べ、比強度や比剛性が大きな材料であることから、航空宇宙などの分野だけでなく、土木工学の分野でも、補修・補強材料として使われている。しかし、CFRP 部材の挙動は異方性を示し、脆性的であるため、その把握は容易ではない。今後、土木工学の分野で活用を図っていくためにも、CFRP の変形・損傷の把握を進めることが、解析方法の構築や設計手法の確立において必要であると考えられる。

著者らの研究室では、曲げ载荷を受ける CFRP 梁の損傷・破壊過程の詳細な観察を画像解析によって行っている。ここでは、非接触の 2 次元変位場解析手法であるマッチング法を用いて画像解析を行い、CFRP 梁供試体の表面変位を求め、そこからせん断ひずみの分布を得ることで、損傷・破壊過程の観察を行っている。

しかしながら、せん断ひずみの値はひずみゲージによる値と比較すると小さい値となっており、これは CFRP 供試体の面外への変形が影響しているものと考えられる。より精度の高い画像解析を行い、損傷・破壊過程を詳細に把握するためには、CFRP の面外への変形を計測することが必要となる。

本研究では、ステレオ画像法を用いて、面外方向の変形を計測できる手法の開発を目的としている。

2. ステレオ画像法

ステレオ画像とは、景色や物などを 2 つの視点から撮った画像を左右に並べた 2 枚 1 組の画像のことである。

り、裸眼立体視によって物体を立体的に見ることができる。ステレオ画像法では、図 1 のようにカメラを平行に一定の距離だけ離して計測点を撮影することにより、三角測量を行うことができ、計測点の三次元座標を得ることができる。

本研究ではステレオ画像法の中でもシステム構成が単純で近距離の計測において精度が高い両眼視差法を採用した。

3. 画像解析プログラムの手順

3.1 画像内変位の測定

対象物を左右のカメラで撮影した上で、右側のカメラの画像から図 2 のような任意の点を中心としたマスク画像(256×256 ピクセル)、左側のカメラの画像から図 3 のようなマッチングを行う領域であるリージョン画像(512×512 ピクセル)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、こ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

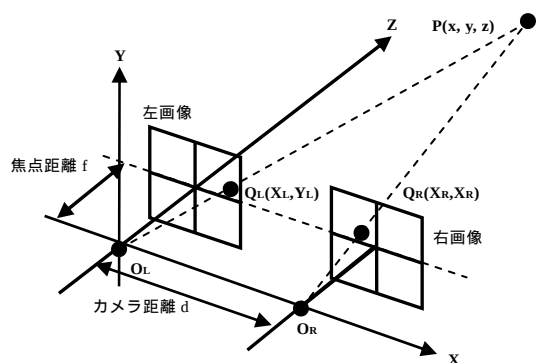


図 1 三次元計測の仕組み

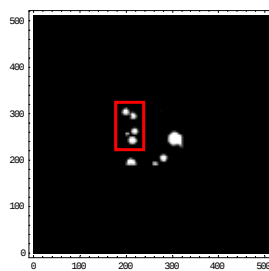


図 2 マスク画像(右側)

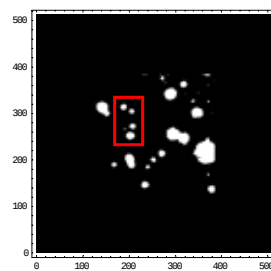


図 3 リージョン画像(左側)

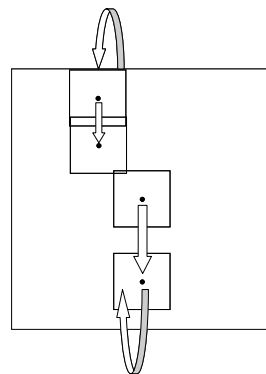


図 4 マスク画像の移動手順

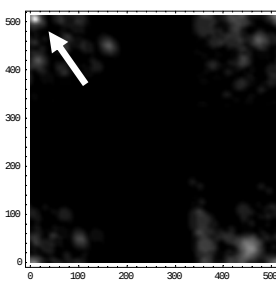


図 5 畳み込みの結果

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4のようにマスク画像を動かすことにより、相関係数を計算し、最大相関点を探す。図2のマスク画像と図3のリージョン画像を畳み込みした結果を図5に示した。図4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5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右カメラの画像である図2の四角で囲われた4点と左カメラの図3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。ここで得られた x 座標の変位が、図1において最大相関点を P としたときの画像内での移動距離である $X_R - X_L$ である。

3.2 サブピクセル計測

前節の手法で算出される移動距離は、ピクセル単位である。しかし一般に相関点はピクセル間に存在するため、精度向上のためにピクセル以下のサブピクセル単位での相関点探索を行い、1ピクセル未満の変位も求められるようにする。

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

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

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以下の変位が求められる。

3.3 三角測量

図1, 6に示した図において、点 P までの距離である z を求めるための式が三角測量により以下のように得られる。

$$z = \frac{2df}{X_L - X_R} \quad (3)$$

焦点距離 f は両眼視差法では左右の撮影で等しくする必要があるのでカメラ間の距離である d は任意に決められるので既知である。この式を3.1節で求められた複数の点の変位について解くと、撮影した画像全体でカメラからの距離を求めることができ、撮影対象表面の立体形状が得られる。

4. プラスチック板を用いた実験

4.1 実験概要

撮影対象は、本来の撮影対象である箱型断面 CFRP

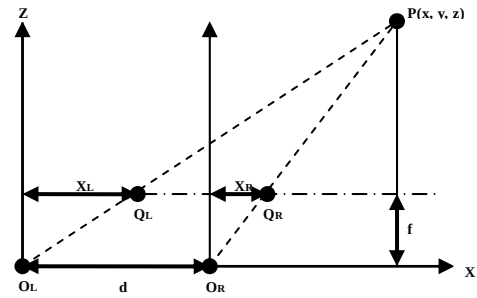


図6 三角測量の仕組み

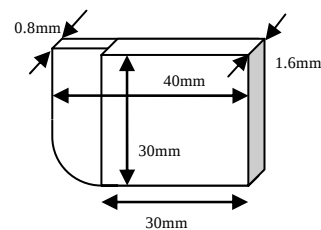


図7 撮影したプラスチック板

表-1 撮影条件

	カメラ間距離	撮影距離
	10mm	350mm
	10mm	400mm
	10mm	500mm
	20mm	350mm
	20mm	400mm
	20mm	500mm

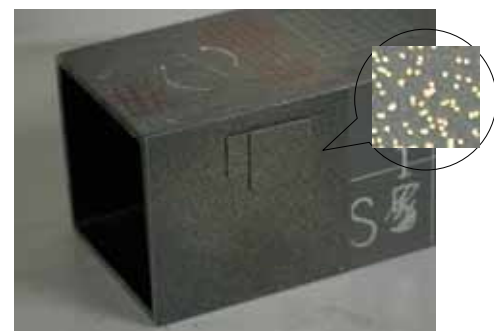


図8 撮影対象とランダム模様

梁の側面に図7のようなプラスチック板を面外変形に見立てて貼り付けたものを使用する。プラスチック板の大きさは図7に示す。この計測ではカメラを平行移動させることにより、二地点での画像を取得した。

この実験では精度に影響のあると考えられるカメラ間距離と撮影距離をいくつかの条件に分けて撮影し、画像解析を行った。この条件を表-1に示す。使用するデジタルカメラはニコンのD100であり、解析に使用する画像は約600万ピクセルである。レンズは焦点距離が $f=90\text{mm}$ のものを使用した。また、CFRP梁の表



(a)左カメラ

(b)右カメラ

図 10 撮影距離 400mm,カメラ間距離 10mm の撮影画像

面色は一樣であり, そのままでは明瞭な相関が得られず画像相関が行えないため, 既往の研究で行われているラメスプレーによるランダム模様を付与を行った.

4.2 実験結果

撮影画像例を図 10 に示す. 表-1 の ~ の条件はマッチング法における変位の計測において, 移動距離が大きくなりすぎることから解析が正常に行えなかった.

また, はプラ板の厚さによる凹凸に対する撮影距離が小さすぎるためピントがうまく合わず, プラ板がそれ以外のどちらかのランダム模様がぼやけた. では図 11 のように精度が悪く, 立体形状では凹凸の存在の確認は出来るが, 形状の精度が良くなかった. では図 12 に示すように良好な結果が得られた. 図 11,12 の撮影距離(z 軸)がマイナスになっているのは, 目視の向きに三次元形状を表示させているためである. また, 図 13 に条件 における z 座標の分布を示す. 解析画像の凹凸部分の側面が斜めになっているのは 3 章で記したマッチング法を行う上での設定した計測点の数の問題であると考えられる. プラスチック板の厚さに対する計測結果は, 図 13 に示すように $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の誤差が見られた. また, 解析画像全体に多少の傾きも見られた. カメラパラメータ等のキャリブレーションを行っていないため, 傾きなども含めた多少の誤差の影響が考えられる.

5. 破壊供試体を用いた実験

5.1 実験概要

曲げ載荷実験により面外変形を起こして破壊した箱型断面 CFRP 梁の破壊部を撮影して画像解析を行った. この供試体は著者らの研究室による載荷実験の際に, ラメスプレーによるランダム模様を付与し, 側面の画像解析を行って, ひずみ場を計測したものである(図 14). 4 章の実験を元に, 撮影距離 400mm, カメラ間距離 10mm として撮影した. カメラ, レンズは 4 章の実験と同様である.

5.2 実験結果

図 15 に供試体破壊部の立体形状を示す. 破壊部の変形形状が良好に取得された. これにより変形・破壊によるスプレーのランダム模様への影響は無いといえ, 実際の載荷実験の際に起こる面外変形計測にも応用できる可能性がある.

図 16 より破壊部は $0.8\text{mm}(\pm 0.1\text{mm})$ ということにな

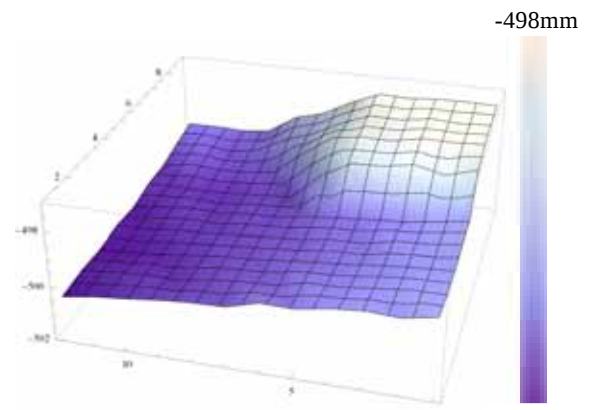


図 11 三次元形状(条件)

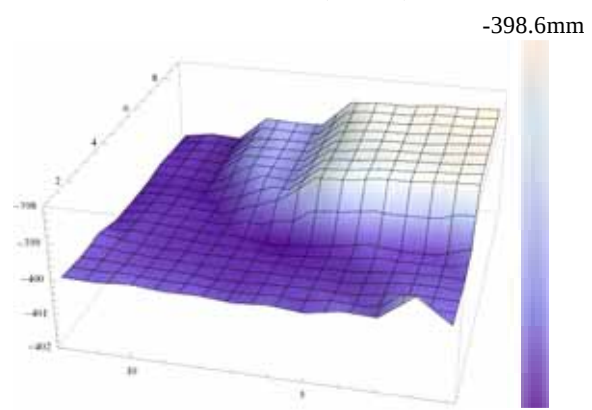


図 12 三次元形状(条件)

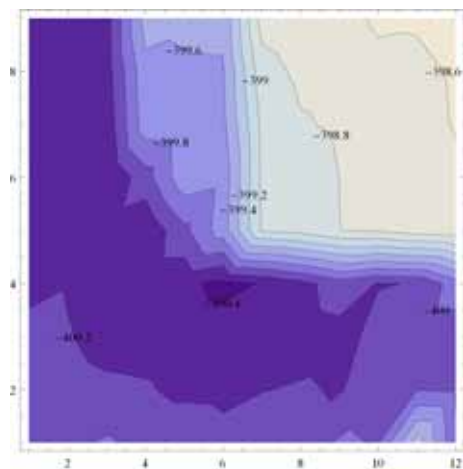


図 13 z 座標分布(条件)



図 14 供試体破壊部と解析範囲

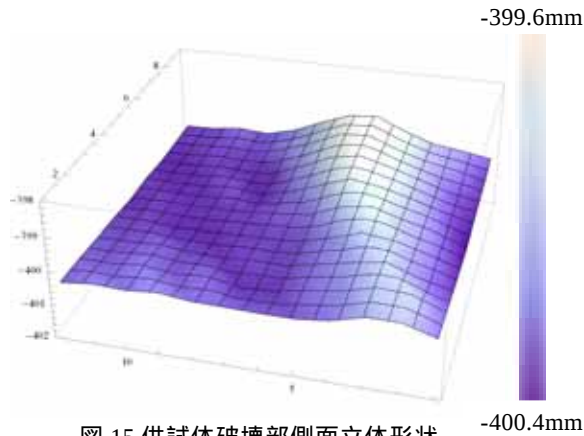


図 15 供試体破壊部側面立体形状

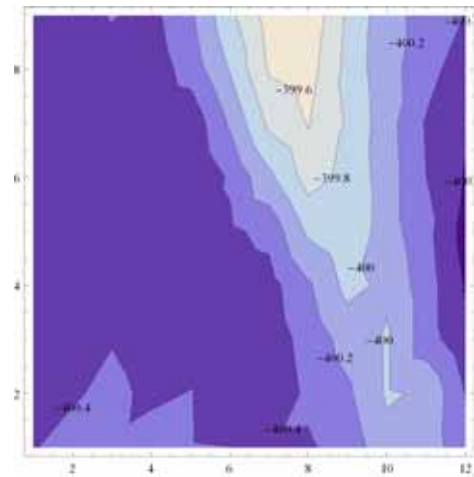


図 16 破壊部供試体 z 座標分布

るが、誤差については詳細な検討が必要である。原因としては、手作業による影響と 4.2 節で述べたカメラパラメータ等のキャリブレーションを行っていないことが考えられる。改善方法としては、解析を行う際にカメラの移動距離をさらに正確にする微動ステージの利用と解析にカメラパラメータ等のキャリブレーションを組み込むことを考えている。

6. まとめ

本研究では CFRP 梁の載荷実験における面外変形の計測を目的としてステレオ画像法を利用した三次元形状計測法を開発した。この手法を、面外変形に見立てたプラスチック板の凹凸を撮影することにより問題点の検討を行った。それを踏まえて載荷実験により面外変形を起こして破壊した箱型断面 CFRP 梁の破壊部の面外変形の立体形状を計測した。プラスチック板の解

析で得た三次元画像から z 方向変位には $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の誤差が確認できたが、変形の立体形状は良好に取得され、実際の載荷実験の際に起こる面外変形計測にも応用できる可能性がある。今後は、誤差について詳細な検討を行い、CFRP 梁の載荷実験において面外変形の計測を行う予定である。

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