

## 高密度化による画像解析の精度向上の検討

Study on the high density displacement measurement in digital image analysis

北海道大学工学部 学生員 ○林 浩毅 (Koki Hayashi)  
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)  
 北海道大学大学院工学研究院 F会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)  
 北海道大学大学院工学研究院 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, 以下 CFRP) は、軽量かつ高強度で耐腐食性の高い複合材料である。その材料特性を活かし、航空機、自動車、スポーツ製品など幅広い分野で用いられている。土木分野においては、橋脚や桁の補修・補強材として用いられている。また、高耐久化・維持管理のコスト削減の観点から橋梁の梁部材などの主要部材としても期待されている<sup>1)</sup>。

CFRP 構造物は薄肉部材により構成されることになるが、繊維積層構成の違いによる CFRP の強度が梁部材の強度特性に大きく影響を及ぼすことが実験により確認されている。また、異方性を有し、破壊が脆性的であることから、その損傷・破壊過程の実験的な把握は容易ではない。このような場合には、画像解析を用いることで、破壊前のひずみ分布の特徴を捉えられることが示されている<sup>2)</sup>。

本研究では、箱形断面 CFRP 梁を作製し、4 点曲げ载荷において、損傷・破壊過程の詳細な観察を画像解析により行う。また、既往の研究より着目点をより密にし、既往の研究との比較を行うことで解析精度向上の検討を行うこととした。

## 2. CFRP 梁の曲げ载荷実験

曲げ载荷実験に用いた供試体は、CFRP の箱形断面梁 (長さ 1000mm、高さ 100mm、幅 100mm、板厚 5mm) である (図-1)。供試体は、VaRTM 成形で作られた。繊維シートを成形型に所定の構成で設置し、真空バックを被せて密閉状態として減圧し、その後樹脂を含侵させて硬化成形している。繊維シートは多軸の複数層を 1 組とするもので構成しており、繊維が織られていないため屈曲していない。

本研究で使用した供試体の積層構成は CP (クロスプライ) (表-1) とする。CP の積層構成は  $[0/90]_5/[90/0]_5$  となっており、繊維の向きが 0 度方向、90 度方向の層を積み重ねて 1 組の繊維シートとしており、それらが

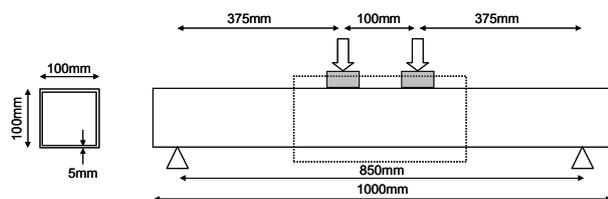


図-1 供試体寸法と撮影範囲 (点線枠内)

5 組積層されていることを示している。

载荷は 4 点曲げ载荷により行い、支間長 850mm、せん断スパン 375mm、曲げスパン 100mm とした (図-1)。

## 3. 画像解析手法

## 3.1 画像撮影・二値化

画像撮影には Nikon のデジタルカメラ D3100 を使用した。画素数は  $4608 \times 3072$  ピクセル (約 1400 万画素) である。撮影は供試体の側面の図-1 に示す点線枠内について行う。まず、载荷前 (変形前) に撮影を行い、载荷開始後 (変形後) に約 5kN ごとに载荷を停止し画像撮影を行った。

なお、CFRP 表面は一樣な色であり、そのままでは解析を行うことができないため、供試体の撮影表面にはラメスプレーによるランダム模様を付与した上で撮影を行っている。また、ランダム模様以外の部分は解析できないため、ランダム模様部分のみ解析できるように画像のトリミングを行い、プログラムに適した大きさに拡大を行っている。この加工した画像を二値化することで、後述する画像相関を適用できるようにした。

## 3.2 画像相関

二値化画像において、100 ピクセル間隔で格子状に着目点を設定する。着目点は梁軸方向に 68 点、梁周方向に 24 点の合計 1632 点とした (図-4)。既往の研究では 200 ピクセル間隔に着目点が配置されており、梁軸方向に 34 点、梁周方向に 12 点の合計 408 点であった。これにより、供試体の解析をより密に行うことができ、画像解析の精度が向上することが期待できる。

また、本研究では既往の研究よりも 100 ピクセル上部まで計測しているため、破壊の前兆がより顕著に現れることが予測される。

変形前画像において、 $128 \times 128$  ピクセルの正方形領域を二値化画像から切り出した。一方で、変形後画像からは  $256 \times 700$  ピクセルの長方形領域を切り出した。長方形領域は、変形した着目点を含むように、変位方向に長辺を取っている。切り出した領域の外の値を 0 (黒) とし、それぞれ切り出した画像を含む  $700 \times 700$  ピクセルの画像を作成した (図-2)。

変形前後の着目領域画像について相互相関を求め、最大値を得る位置が変形後の着目点である。変形後の着目点の位置により変位を求めることができる。

表-1 供試体の積層構成

供試体種類	積層構成	積層数			
		梁軸方向 (0°)	梁周方向 (90°)	斜交方向 (±45°)	合計
CP	[0/90] <sub>5</sub> /[90/0] <sub>5</sub>	10	10	0	20

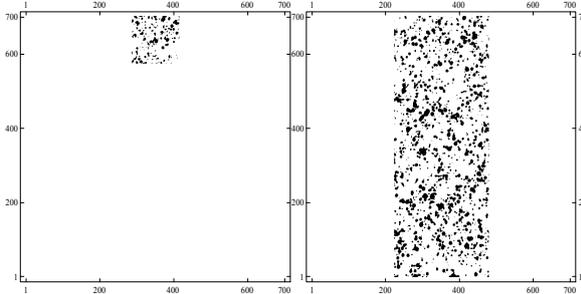


図-2 変形前(左)と変形後(右)の着目領域

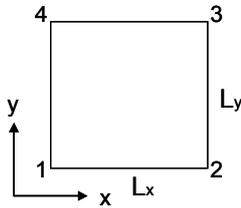


図-3 座標系

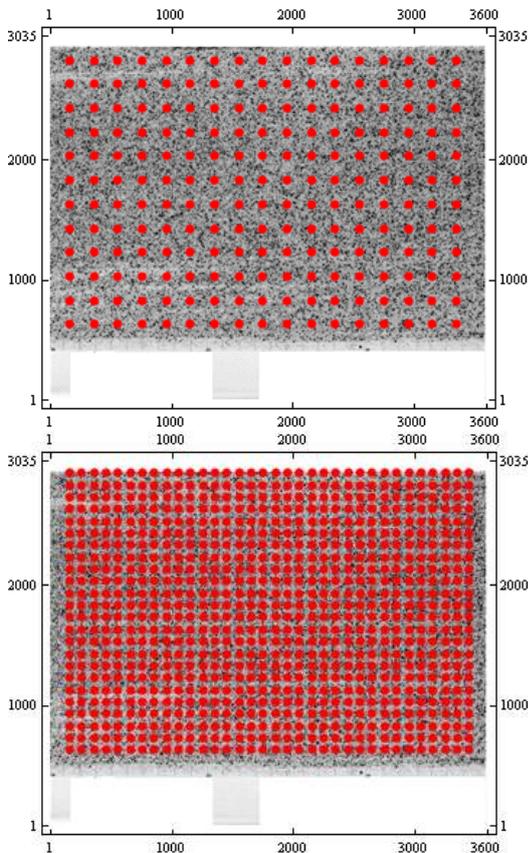


図-4 既往の研究(上)と本研究(下)の着目点

変形前の着目領域画像を  $g(i, j)$ 、変形後を  $f(i, j)$  としたとき、相互相関関数は

$$(f * g)(k, l) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \overline{f(i, j)g(i+k, j+l)} \quad (1)$$

である。また、 $g$  は

$$g(i+p, j+p) = g(i, j) \quad (2)$$

のように循環するとする。

相関定理より、式(1)をフーリエ変換すると、右辺は  $f$  と  $g$  のフーリエ変換の積となる。この積を求めた後に、逆フーリエ変換をすることで、相互相関係数を求めた。画像相関により得られた変位量はピクセル単位である。より細かく変位量を求めるために、サブピクセル単位で推定を行った<sup>3)4)</sup>。

### 3.3 ひずみの算出

得られた変位量より、ひずみを求める。格子状にある4つの着目点を図-3のように定義し、 $x$ 方向の辺長を  $L_x$ 、 $y$ 方向の辺長を  $L_y$ 、点  $i$  の  $x$ 軸方向変位を  $u_i$ 、 $y$ 軸方向変位を  $v_i$  としたとき  $x$ 方向ひずみ(梁軸方向ひずみ)は、

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{L_x} \left( \frac{u_2 + u_3}{2} - \frac{u_1 + u_4}{2} \right) \quad (3)$$

$y$ 方向(梁周方向)ひずみは、

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{L_y} \left( \frac{v_3 + v_4}{2} - \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (4)$$

$xy$ 方向せん断ひずみは、

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2L_y} \left( \frac{u_3 + u_4}{2} - \frac{u_1 + u_2}{2} \right) + \frac{1}{2L_x} \left( \frac{v_3 + v_4}{2} - \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (5)$$

で表される。

### 3.4 破壊指標値の算出

本供試体の破壊規準として Tsai-Wu の破壊規準を用いた。この破壊規準は CFRP のような直交異方性の積層板において3つの応力状態を考慮する式であり、材料強度から異方性を考慮した係数を得ることができる。式(6)に Tsai-Wu の破壊規準を示す。ここでは  $x$  を梁軸方向、 $y$  を梁周方向としており、式(6)の係数は材料特性値を含む式(7)により定まる。

$$F_x \sigma_x + F_y \sigma_y + F_{xx} \sigma_x^2 + F_{yy} \sigma_y^2 + 2F_{xy} \sigma_x \sigma_y + F_{ss} \sigma_{xy}^2 = 1 \quad (6)$$

$$F_x = \frac{1}{\sigma_x^T} - \frac{1}{\sigma_x^C} \quad F_{xx} = \frac{1}{\sigma_x^T \cdot \sigma_x^C} \quad F_y = \frac{1}{\sigma_y^T} - \frac{1}{\sigma_y^C}$$

$$F_{yy} = \frac{1}{\sigma_y^T \cdot \sigma_y^C}$$

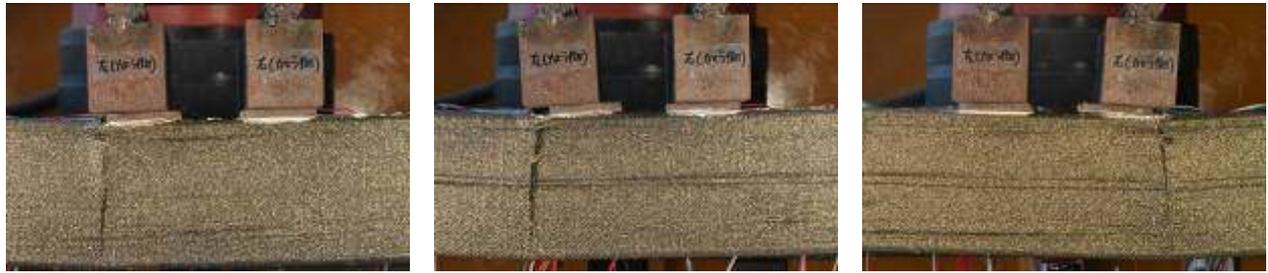
$$F_{ss} = \frac{1}{(\sigma_{xy}^U)^2} \quad F_{xy} = -0.5\sqrt{F_{xx} \cdot F_{yy}} \quad (7)$$

$\sigma_x$  : 梁軸方向直応力、 $\sigma_y$  : 梁周方向直応力、 $\sigma_{xy}$  : 面内せん断応力、 $F_x, F_{xx}, F_y, F_{yy}, F_{ss}$  および  $F_{xy}$  : Tsai-Wu の異方性係数、 $\sigma_x^T$  : 梁軸方向引張強度、 $\sigma_x^C$  : 梁軸方向圧縮強度、 $\sigma_y^T$  : 梁周方向引張強度、 $\sigma_y^C$  : 梁周方向圧縮強度、 $\sigma_{xy}^U$  : 面内せん断強度

Tsai-Wu の破壊規準では左辺の破壊指標値が右辺の 1 と等しくなったとき破壊が生じると考える。

#### 4. 試験結果

CP①、②、③の耐力は、74.4kN、78.5kN、82.4kN、



(a)CP①

(b)CP②

(c)CP③

図-5 破壊形態

であった。

供試体の破壊形態は、亀裂と剥離が観察され、いずれの供試体もせん断スパン側の載荷板端部の上フランジとウェブで生じた。CP①、②、③の順に左側、左側、右側の載荷板のせん断スパン側で、上フランジとウェブに亀裂が生じた。

#### 5. 画像解析結果

画像解析は CP①の破壊直前の 73.2kN について行った。ひずみの算出は、梁軸方向ひずみ、梁周方向ひずみ、せん断ひずみ、最大せん断ひずみ、最大及び最小主ひずみについて行ったが、着目点を増やしたことにより違いが現れた梁軸方向ひずみ、梁周方向ひずみ、せん断ひずみについて述べる。なお以下に示す解析結果の図は、左側が既往の研究である着目点 408 点で解析を行ったものであり、右側が本研究で新たにを行った着目点 1632 点で行ったものである。

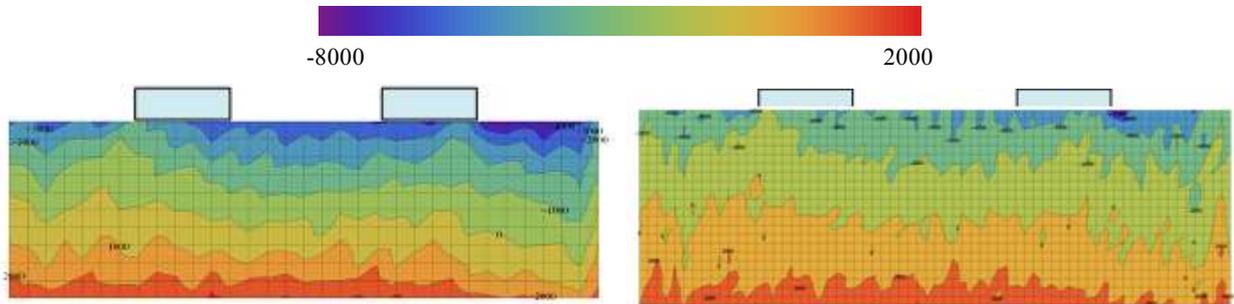


図-7 CP①梁軸方向ひずみ 従来 408 点(左)、本研究 1632 点(右)

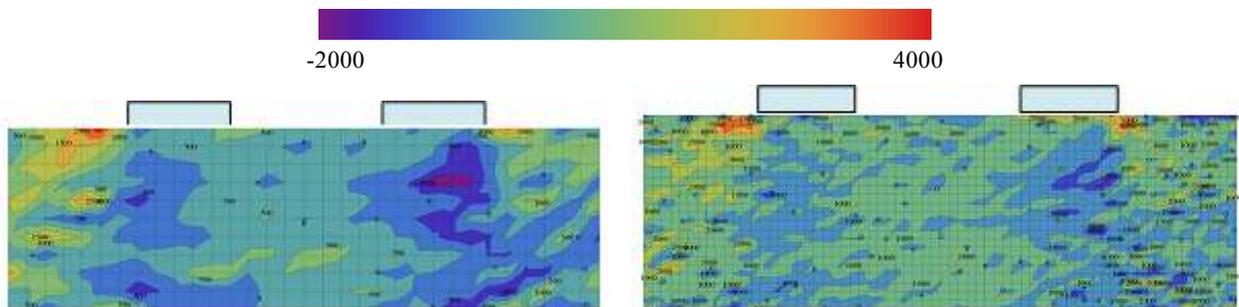


図-8 CP①梁周方向ひずみ 従来 408 点(左)、本研究 1632 点(右)

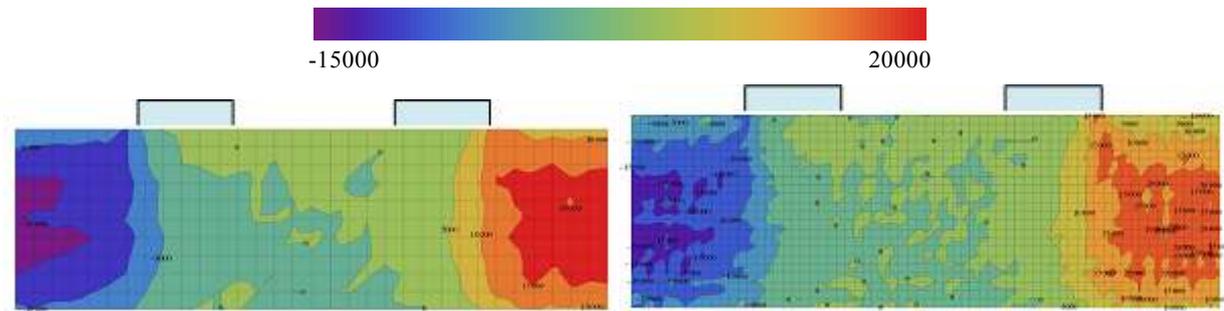


図-9 CP①せん断ひずみ 従来 408点(左)、本研究 1632点(右)

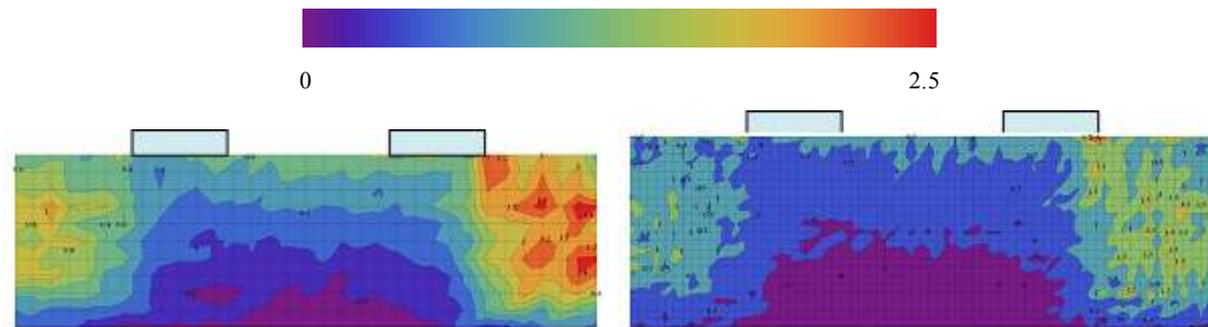


図-10 破壊指標値 従来 408点(左)、本研究 1632点(右)

### 5.1 破壊指標値の特徴

本研究に使用した供試体では供試体左側の荷板のせん断スパン側で破壊がおきている。図-10において着目点を増やしたことにより、本研究の画像の左右の荷板のせん断スパン側では、ウェブ部より顕著に高い値を示した。しかし本研究において左右どちらかが破壊を生じるかをこの分布の差異から特定することは困難であった。

### 5.2 せん断ひずみの特徴

スパン中央部ではひずみが生じておらず、せん断スパン側の梁周方向中央部に大きなせん断ひずみが生じている結果を示している。

せん断スパン側の荷板端部には、局所的なひずみを見ることができる。また、その箇所から伸びたひずみ分布がウェブ中央高さのせん断ひずみと繋がったような分布を観察できる。局所的なせん断ひずみは左右の荷板で見られるが、破壊側に特徴的な差を見ることができなかった。

しかし図-7 から図-9 において着目点を増やしたことにより荷板端部の局所的なひずみが顕著に現れている。この変化が前述した破壊指標値の特徴につながっていると考えられる。

また、本研究では着目点の左下を既往の研究と同一とし、着目点を2倍にしているため、ウェブ部右方向、上方向に100ピクセル広く解析を行った。荷板により近い着目点を設定したことにより、局所的なひずみがより顕著に現れていると考えられる。

### 6. まとめ

本研究では、クロスプライ CFRP 梁供試体の曲げ荷重実験を行った。供試体表面の撮影と画像解析を行い、

破壊箇所の特定をすることを目的に着目点を増やして既往の研究との比較検討を行った。

画像解析で得られたせん断ひずみ・破壊指標値の結果から、せん断スパン側の荷板端部に局所的なひずみを観察することができた。しかし左右の荷板で明確な違いを捉えることができず、破壊箇所を特定することはできなかった。しかしせん断スパン側の荷板端部での局所的なひずみが顕著になっており、着目点を増やしたことにより破壊の前兆は捉えやすくなったといえる。これらのことから、破壊の前兆を捉えるために着目点を増やすことは有効性があるといえる。

今後積層構成の異なる供試体で同様の手順で画像解析を行い、比較検討することで画像解析の精度向上を検討する予定である。

### 参考文献

- 1) 土木学会：FRP 橋梁 - 技術とその展望 -、2004。
- 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 Vol.64、A-1、2008。
- 3) 真砂純一、松本高志、櫻庭浩樹、木戸英伍、林川俊郎：箱型断面 CFRP 梁の曲げ荷重実験とデジタル画像相関法によるひずみ分布計測、土木学会支部論文報告集 Vol.66、A-2、2010。
- 4) 松本高志、櫻庭浩樹：箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動と画像解析によるひずみ計測、土木学会論文集 A2 (応用力学)、Vol.67、No.2(応用力学論文集 Vol.14)、pp.I\_793-800、2011。
- 5) 岡松広忠：CFRP 梁の曲げ荷重試験における損傷・破壊過程の画像解析 (北海道大学工学院修士論文、2011)