

デジタル画像解析による変位計測精度向上の検討

Study on the precision improvement of displacement measurement in digital image analysis

北海道大学工学部

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

○学生員

正員

フェロー

正員

境 俊宏 (Toshihiro Sakai)

松本高志 (Takashi Matsumoto)

林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

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、炭素繊維に樹脂材料を含浸した後、硬化させて形成する複合材料である。強度に優れ軽量であることから航空機や自動車等に用途を拡大してきた。土木分野でも好条件の材料として橋脚や桁の補修・補強などに使われ始めており、高耐久化・維持管理コスト削減の観点から橋梁の梁などの主要部材としても期待されている¹⁾。

CFRP は積層複合材料であることから異方性を有し、脆性的であるために、損傷と破壊の挙動を把握することが容易ではない。合理的な設計を行うためには積層構成による異方性の影響を考慮して、脆性的な損傷と破壊のメカニズムを把握する必要がある。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とらえることが、有効であると示されている²⁾。

しかしながら、既往の研究³⁾で、デジタル画像解析により得られた CFRP 梁供試体の表面変位などの分布傾向は概ね妥当なもの、理論的な分布と比較して局所的な差異がみられることが報告されている。

よって、本研究では、局所的な差異を低減し精度の高い分布を得ることを目的として、画像の二値化に用いる閾値の設定と変位分布の平滑化を検討することとした。

2. CFRP梁の曲げ載荷実験

2.1 供試体

曲げ載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 成形で作られており、クロスプライと呼ばれる積層構成を用いた。クロスプライ (以下、CP) の一例として、 $[0/90]_5$ と表記される積層構成は、繊維の向きが 0 度方向、90 度方向の層を積み重ねて 1 組の多軸連続繊維シートがあり、それが 5 組積層されていることを示している。供試体は $[0/90]_5[0/90]_5$ と表記される積層構成であり、梁軸方向 (0°) 10 枚、梁周方向 (90°) 10 枚の合計 20 枚の炭素繊維層を有している。

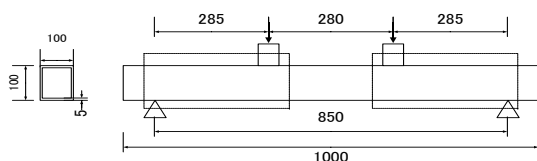


図-1 供試体寸法、載荷条件と撮影範囲 (点線枠内)

2.2 載荷方法

載荷は 4 点曲げ載荷により行い、支間長 850mm、せん断スパン 285mm、曲げスパン 28mm とした (図-1)。以下では CP285 と呼ぶ。計測は画像解析以外に、ひずみゲージと変位計による計測も行っている。載荷は荷重制御により行い、約 5kN ごとに載荷を停止して、ひずみゲージと変位計の値の計測と画像撮影を行った。

3. デジタル画像解析手法

3.1 二値化

載荷前後に撮影した供試体の写真は、RGB256 階調の画像を白と黒の二値化画像に変換する。二値化とは、濃度変換の特殊な例であり、ある濃度値を閾値として背景領域と対象領域に分割する。二値化された画像は、一般に背景を 0、対象を 1 の二値で表現する。

本研究では JPEG 形式で保存された撮影画像を 256 階調グレースケール画像に変換し、さらに大津の方法⁴⁾を用いて二値化画像に変換している。大津の方法は判別分析により閾値を決める方法である。グレースケール画像の輝度値ヒストグラムにおいて、各輝度値を閾値としたときに分けられる二つのクラスのクラス間分散を計算し、それが最大となる輝度値を最適な閾値とする方法である。一例として、決定された閾値を用いて二値化された画像を、グレースケール画像と共に示す。(図-2)

本研究では高精度化検討の一つとして、一つの閾値を載荷前後の画像に使用するのではなく、各画像に最適な閾値を使用することを試みた。詳細は後述する。

3.2 画像相関

CFRP 表面は一律な黒色でありそのままでは載荷前後の画像間で相関を得ることが困難であるため、対象領域を含んだ供試体側面に金色のラメスプレーによるランダム模様を付与したうえで撮影を行っている。

二値化画像において、200 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 34 点、梁周方向に 12 点の合計 408 点とした。

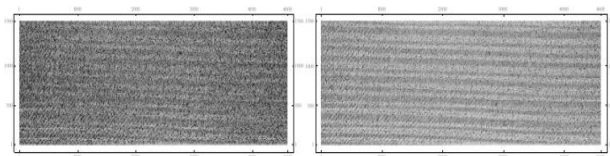


図-2 グレースケール画像(左側)と二値化画像(右側)

変形前画像において、 128×128 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 256×700 ピクセルの長方形領域を切り出した。長方形領域は、変形後画像において変位した着目点を含むように、変位方向に長辺をとっている。

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。画像相関で得られた変位量はピクセル単位であり、より細かく変位量を求めるためサブピクセル単位に変換して推定を行った⁹⁾。得られた変位量よりひずみ、応力、Tsai-Wu の破壊指標値の分布を求めた。

4. 高精度化の検討

4.1 閾値の設定

使用する画像は CP285 の左側範囲を撮影したものである。載荷前画像と 78.4kN 載荷時の画像を画像解析に用いた。

既往の研究では、どの載荷前後の画像に対しても、載荷前画像の閾値を載荷前後の画像に使用して二値化していた。しかし照明による光の揺らめき等の極微細なずれにより、載荷後画像の最適な閾値と載荷前画像の閾値が一致しないことがある。二値化画像がずれて、結果的に変位・ひずみ算出にも影響を及ぼす可能性があった。

本研究では閾値を載荷前後の画像に使用するのではなく、載荷後画像に対しても個別に大津の方法を用いて最適な閾値を求め、画像相関法を適用した。図-3 の(a)、(b)にそれぞれ、載荷前閾値を載荷前後の画像に使用してひずみまで算出する際の流れと、各画像に最適な閾値を使用することでひずみまで算出する際の流れを示す。どの画像においても最適な閾値を得ることで、二値化画像のずれを補正し、算出される変位・ひずみ等の精度向上を図った。

4.2 変位分布の平滑化

画像相関によって算出される変位には、隣接点の変位と比べ外れた値が算出される場合がある。これはラメのむらや光の揺らめき等により、誤った相関を得ていると考えられる。これを補正しないままひずみ分布を算出すると、値が飛び地や、凹凸状のように表示されることになる。ここでは変位分布を多項式により近似し、外れた変位を、周辺の変位と滑らかにつながる値に補正した。変位分布の平滑化は図-3 に示されているように

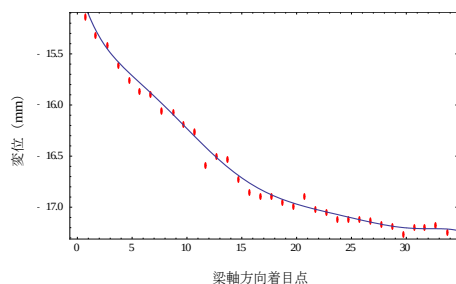


図-4 画像相関による変位(赤点)と近似曲線(青線)

画像相関で得られた変位に対してひずみ算出前に行った。一例として図-4 に上フランジ付近の梁軸方向の変位とその近似曲線を示す。近似曲線から得られる変位を用いてひずみを求めることで、ひずみ分布の平滑化を目指した。

5. 検討結果

5.1 梁軸方向直ひずみ

図-5 の(a)、(b)にそれぞれ、載荷前画像の閾値に統一して出したひずみ分布図と、載荷前後の画像に対して個別に閾値を与えて出したひずみ分布図を示す。(c)には変位を平滑化補正して出したひずみ分布図を示す。

(a)と(b)を比べると梁軸方向のウェブ中央部に若干の違いを見ることができるが、全体としてみるとほとんど違いは表れていない。また(a)、(b)のいずれも等値線は凹凸状となっている。

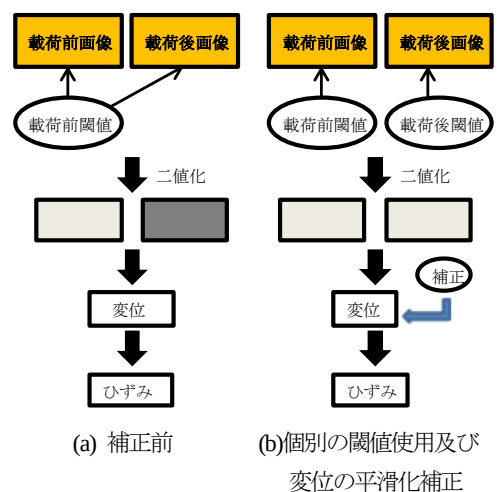
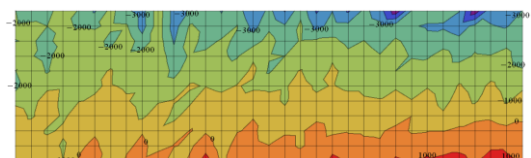
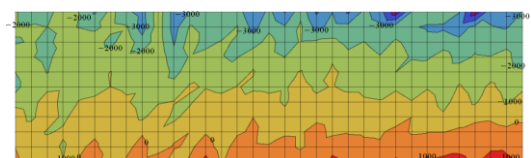


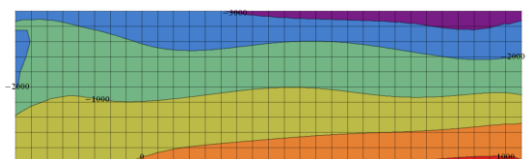
図-3 補正方法の流れ



(a)補正前



(b)個別の閾値使用



(c)変位を平滑化して補正

図-5 補正前後の梁軸方向直ひずみ分布図

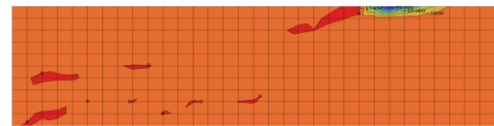
(c)を見ると等値線が平滑化されていることが分かる。周辺から外れた変位を補正することで、いびつな分布となっていないと考えられる。

5.2 梁周方向直ひずみ

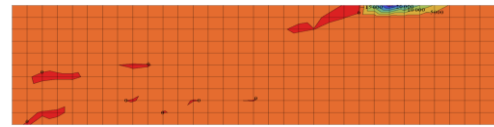
図-6 の(a)、(b)にそれぞれ載荷前画像の閾値に統一して出したひずみ分布図と、載荷前後の画像に対して個別に閾値を与えて出したひずみ分布図を示す。(c)には変位を平滑化補正して出したひずみ分布図を示す。

(b)は(a)に比べ、値の飛び地の一部が小さくなっている。しかし、梁軸方向直ひずみの時と同様に全体でみると大きな違いを見ることはできなかった。

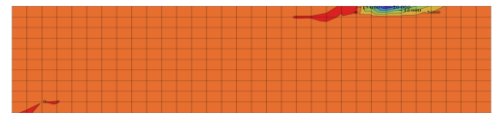
(c)ではほとんどの飛び地部分が消え、ほぼ一般的な分布図となった。飛び地部分が消えただけであって載荷板付近の分布は変わっていないことが確認できた。



(a)補正前



(b)個別の閾値使用



(c)変位を平滑化して補正

図-6 補正前後の梁周方向直ひずみ分布図

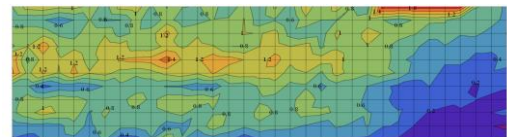
5.3 破壊指標値

Tsai-Wu 則を用いて破壊指標値を算出する。この破壊規準はCFRPのような直交異方性の積層版において、3つの応力状態を考慮した破壊規準の式であり、材料強度から異方性を考慮した係数を得る。本研究は破壊指標値が1となるときに破壊規準を満たすとして算出を行った⁷⁾。

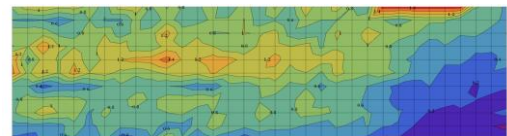
図-7 の(a)、(b)には載荷前画像の閾値に統一して出した場合と、載荷前後の画像に対し個別に閾値を与えた場合の破壊指標値分布図を示す。(c)には変位を平滑化補正した場合の破壊指標値分布図を示す。

(a)、(b)を比較してみると、局所的に若干の違いを確認できた。しかし梁軸方向直ひずみや梁周方向直ひずみの時と同じように全体でみるとほぼ変化がないことがわかった。

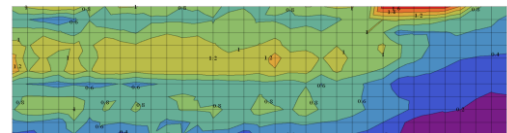
(c)をみると、梁軸方向のウェブ中央部で飛び地状の分布の解消が顕著であった。またそれ以外の場所でも、飛び地状の分布の解消は確認された。ウェブの上フランジ側では(a)、(b)と比べ等値線がより明瞭に示されており、そのほかの等値線を見ても全体的に滑らかになっていることが確認できた。また載荷板付近の分布は変わっていないことが確認できた。



(a)補正前



(b)個別の閾値使用



(c)変位を平滑化して補正

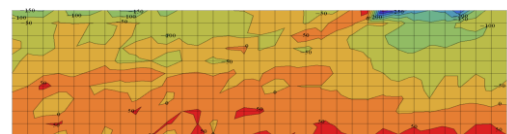
図-7 補正前後の破壊指標値分布図

5.4 最大主応力

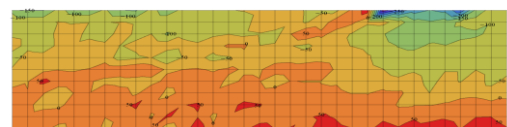
図-8 の(a)、(b)にそれぞれ載荷前画像の閾値に統一して出した最大主応力分布図と、載荷前後の画像に対して個別に閾値を与えて出した最大主応力分布図を示す。(c)には変位を平滑化補正して出した最大主応力分布図を示す。

(a)と(b)を比べると、赤く表示された飛び地状分布において若干の違いを確認することはできたが、そのほかの部分では違いがなかった。

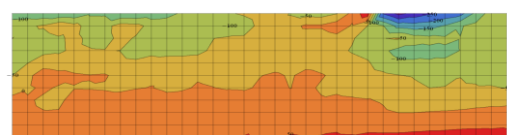
(c)を見ると、飛び地状の分布はほとんど解消され、等値線が平滑化されていることがわかった。そのため(a)、(b)と比べ等値線がはっきり確認できるようになり、また載荷板付近の分布がより明瞭に表れた。



(a)補正前

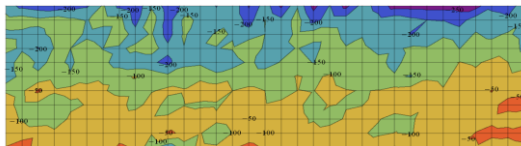


(b)個別の閾値使用

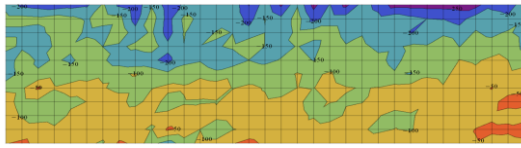


(c)変位を平滑化して補正

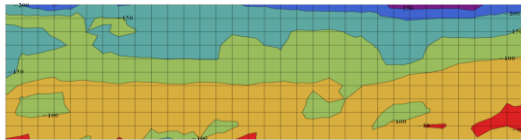
図-8 補正前後の最大主応力分布図



(a)補正前



(b)個別の閾値使用



(c)変位を平滑化して補正

図-9 補正前後の最小主応力分布図

5.5 最小主応力

図-9 の(a)、(b)にそれぞれ载荷前画像の閾値に統一して出した最小主応力分布図と、载荷前後の画像に対して個別に閾値を与えて出した最小主応力分布図を示す。(c)には変位を平滑化補正して出した最小主応力分布図を示す。

(a)、(b)を比べると、局所的に若干の分布の違いを見ることができる。しかし最大主応力の時と同じで大きな違いはなかった。

(c)をみると、梁軸方向のウェブ上フランジ方向で飛び地状の分布の解消が顕著に表れていた。また(a)、(b)と比べ等値線がより明瞭に示されていることが確認できた。

6. 考察

载荷前画像の閾値を载荷前後の画像に使用することで変位・ひずみ等を算出した場合と、载荷前後の画像それぞれに最適な閾値を使用して変位・ひずみ等を算出した場合を比べると、後者の方法で算出した分布には、大きな補正効果を見ることはできなかった。これは、光の揺らめき等の極微細なずれが二値化画像に与える影響は、極小さなものであるからだと考えられる。

しかし画像相関法において変位を求める際、载荷前後の画像それぞれに最適な閾値を使用した場合だと、誤追跡が少なくなる傾向があった。算出した分布にはあまり反映されなかったが、载荷前後の画像それぞれに最適な閾値を使用したほうが、より厳密な変位を求めることができると考えられる。

変位を補正しない場合、周辺から外れた変位がひずみへ反映され、いびつな形状や飛び地状の分布となってしまった。

変位の補正によって、算出したひずみ等の分布は平滑化することが確認できた。分布にもその効果は表れており、平滑化されることで等値線がより明瞭に表され、分布精度の向上につながった。

以上のことから、使用する画像それぞれに最適な閾値を用いて変位を算出し、その変位を補正することによって局所的な差異を低減し精度の高い分布を得ることができたと考えられる。

7. まとめ

本研究では、局所的な差異を低減し精度の高い分布を得ることを目的として、画像の二値化に用いる閾値の設定と変位分布の平滑化を検討した。具体的には、载荷前後の画像それぞれに最適な閾値を用いて変位を算出し、その変位を補正することでひずみ等の分布の精度向上を図った。

载荷前後の画像にそれぞれ最適な閾値を使用することによる補正のみを行っても、大きな補正効果を得ることはできなかった。しかし载荷前後の画像それぞれに最適な閾値を使うことで、画像相関法での変位測定の誤追跡を減らせることを考えると、このようにして算出した変位はより厳密なものであることがいえる。

変位の補正を行うと、算出した分布に大きな補正効果を見ることができた。いずれの分布図でも飛び地や、いびつな形状の分布が解消され平滑化された。

以上の結果から载荷前後の画像それぞれに最適な閾値を用いて変位を算出し、その変位を補正することで、局所的な差異を低減した精度の高い分布を得ることができたと考えることができる。

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) 岡松宏忠：画像解析による CFRP 梁ウェブ部の変形・損傷過程に関する研究、北海道大学修士論文、2011.
- 4) 大津展之：判別および最小 2 条規準に基づく自動しきい値選定法、電子情報通信学会論文誌 D、Vol.J63-D、No.4、pp.349-356、1980.
- 5) 真砂純一、松本高志、櫻庭浩樹、木戸英伍、林川俊郎：箱形断面 CFRP 梁の曲げ载荷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.
- 6) 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)、I_793-I_800、2011.
- 7) 松本高志・岡松宏忠・櫻庭浩樹：積層構成の異なる箱形断面 CFRP 梁における曲げ挙動の画像解析、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.68、No.2(応用力学論文集 Vol.15)、I_691-I_702、2008.