

CFRP 梁の曲げ載荷実験における損傷・破壊過程の画像解析

Image analysis of damage and fracture process of CFRP beams under flexural loading

北海道大学大学院工学院 学生員 ○岡松 広忠 (Hirokata Okamatsu)
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 : CFRP) は、軽量かつ高強度で耐食性の高い複合材料である。その材料特性を活かし、航空宇宙産業、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¹⁾。

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²⁾。

本研究では、積層構成の異なる 3 種類の箱型断面 CFRP 梁を 3 体ずつ作製し、4 点曲げ載荷において、損傷・破壊過程の詳細な観察を画像解析により行う。CFRP 梁供試体の表面変位を計測し、ひずみの算出を行うことで、破壊形態・破壊箇所に及ぼす積層構成の影響の検討を行うことを目的とした。

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)

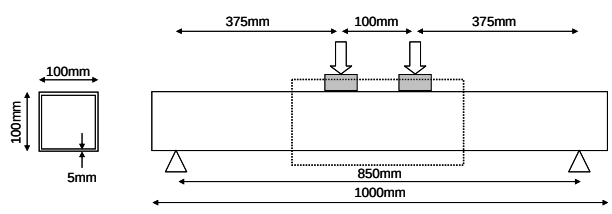


図-1 供試体寸法と撮影範囲 (点線枠内)

である (図-1)。供試体は、VaRTM 成形で作られた。繊維シートを成型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。今回の実験には 3 種類の積層構成の供試体を 3 体ずつ作製した。積層構成を表-1 に示す。

供試体種類を積層構成ごとに QI (Quasi-Isotropic)、HB (Hybrid)、CP (Cross-Ply) とし、3 体を①, ②, ③と呼ぶこととする。QI において、[0/45/-45/90]₅ は繊維の向きが 0 度方向、45 度方向、-45 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としており、それらが 5 組積層されていることを示している。供試体の種類で合計積層数が異なっているのは、板厚を同じにするためである。なお、HB の斜行方向のみ高強度ポリエチレン繊維を使用しており、他の方向と他の供試体は炭素繊維を使用している。

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 375mm、曲げスパン 100mm とした (図-1)。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を行い、画像撮影も行った。

3. 画像解析手法

3.1 画像撮影・加工

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 4608×3072 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、載荷前 (変形前) に撮影を行い、載荷開始後 (変形後) に約 5kN ごとに載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

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
QI	[0/45/-45/90] ₅ /[90/-45/45/0] ₅	10	10	20	40
HB	[0/45/-45/90] ₄ /[90/-45/45/0] ₄	8	8	16	32
CP	[0/90] ₅ /[90/0] ₅	10	10	0	20

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、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。

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 700×700 ピクセルの画像を作成した(図-2)。

変形前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。

変形前の着目領域画像を $g(i,j)$ 、変形前後を $f(i,j)$ 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³⁾⁴⁾。

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、

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

y 方向 (梁周方向) ひずみは、

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

xy 方向せん断ひずみは、

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

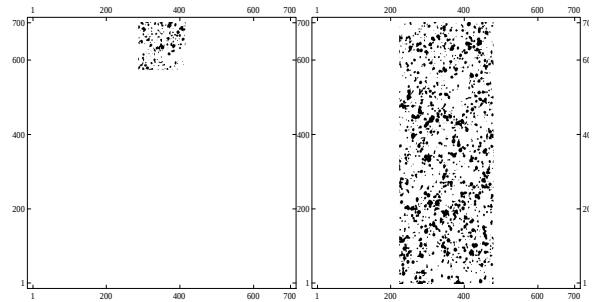


図-2 変形前 (左) と変形後 (右) の着目領域

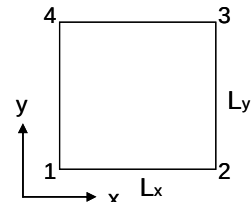


図-3 座標系

最大せん断ひずみは、

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{xy}^2} \quad (6)$$

最大主ひずみは、

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}}{2} \right)^2 + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{4}} \quad (7)$$

最小主ひずみは、

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}}{2} \right)^2 + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{4}} \quad (8)$$

で表される。

4. 実験結果

QI①, ②, ③の耐力は、97.0kN, 98.2kN, 92.9kN, HB①, ②, ③の耐力は、49.1kN, 48.6kN, 47.0kN, CP①, ②, ③の耐力は、74.4kN, 78.5kN, 82.4kN, であった。同じ種類の供試体では、同様の破壊形態を示し、破壊耐力の差も約 5%程度に収まっていることから、繊維品質によるばらつきは小さいものと考えられる。

繊維方向及び材料に着目してみると、高強度ポリエチレン繊維を斜行方向に用いた HB が最も耐力が低く、同じ斜行方向に炭素繊維を用いた QI が最も耐力が高い結果となった。また、QI と HB の積層構成は、各軸方向の繊維量が等しい。よって耐力においては、斜行方向に用いる繊維としては高強度ポリエチレン繊維よりも炭素繊維の方が有利であったといえる。

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(図-4)。QI では、①, ②, ③の順に左側、左側、右側の載荷板のせん断スパン側で、上フランジに亀裂が生じ、かつウェブに層間剥離が生じ破壊した。HB では、①, ②, ③の順に左側、右側、

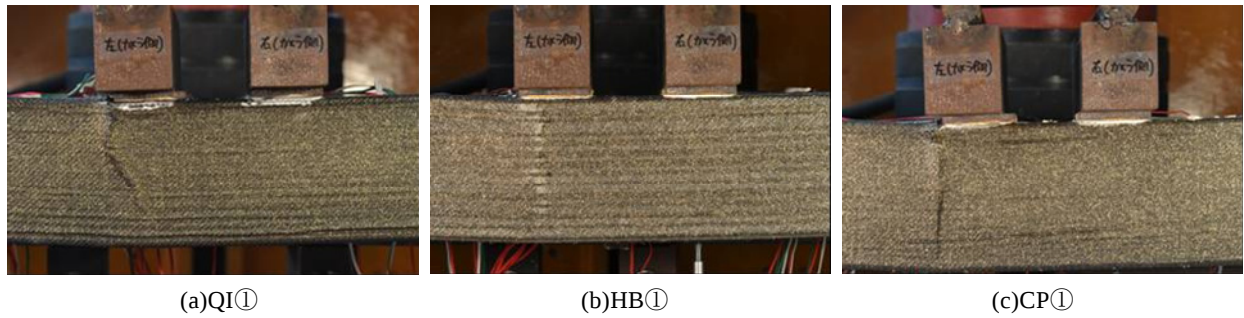


図-4 破壊形態

左側の荷荷板のせん断スパン側で、QI と同様の破壊形態が見られた。CP では、①、②、③の順に左側、左側、右側の荷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、QI と CP では 19.6kN 間隔で、HB では 9.8kN 間隔で破壊直前まで行った。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、画像解析の精度の検討ができる梁軸方向ひずみと、損傷・破壊についての影響が見られたせん断ひずみ及び最小主ひずみについてのみ述べる。

5.1 梁軸方向ひずみによる精度検証

画像解析の精度検証のため、スパン中央部梁軸方向ひずみのひずみゲージとの比較を行った。全ての供試体の全ての荷荷重で、梁の下縁から上縁まで線形性を示しており、傾きはひずみゲージによる計測値と一致していた。一方、中立軸が上フランジ側もしくは下フランジ側に平行移動する結果が見られた。これは、荷荷重や供試体による規則性がなく、方向もランダムに生じた。傾きに変化がないことから、撮影を行っている供試体表面全体の面外への変位が生じたと考えられる。他のひずみの結果に影響を与えるため、撮影画像で拡大もしくは縮小されたと思われる量の補正を行った。

図-5 に破壊直前 (92.9kN) の QI②スパン中央部梁軸方向ひずみについて画像補正前後の解析及びひずみゲージの結果を示す。補正後の解析結果は、概ねひずみゲージの計測結果と一致していることから、後述する画像解析結果にも妥当性を認めることができる。よって以下では、この影響を補正したせん断ひずみと最小主ひずみの解析結果を示している。

5.2 せん断ひずみの特徴

図-6 から図-8 には QI, HB, CP の破壊直前のせん断ひずみを示している。

全ての供試体において、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。

QI と HB では、せん断スパン側の荷荷板端部には、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

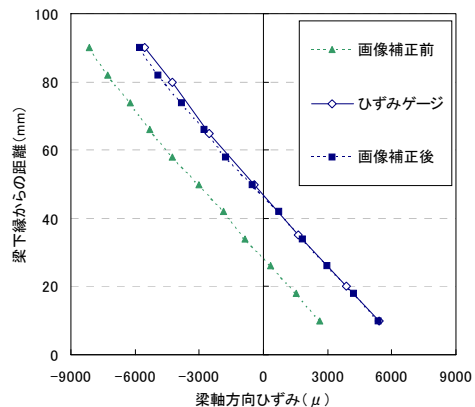


図-5 QI②スパン中央部梁軸方向ひずみ (92.9kN)

せん断ひずみは左右の荷荷板で見られるが、破壊側に特徴的な差を見ることはできなかった。そのため、左右どちら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。

図-8 に示す CP には荷荷板端部に局所的なひずみを観察することはできなかった。QI 及び CP と違い、斜行方向の繊維が含まれていないことから、せん断剛性が低く、荷荷板に作用する力により局所的なひずみを生じるよりは、せん断スパン全体がせん断変形したと考えられる。また、破壊直前のせん断ひずみの最大値においても、QI, HB, CP の順に約 2000 μ , 5000 μ , 8000 μ と大きくなっていることから、斜行方向の繊維によるせん断剛性への影響が見てとれる。

5.3 最小主ひずみの特徴

図-9 から図-11 に QI, HB, CP の破壊直前の最小主ひずみベクトルを示す。矢印の傾きで方向を示し、長さで大きさを示している。

梁理論においては、曲げスパン内でせん断ひずみは生じず、梁軸方向ひずみを生じるため、最小主ひずみベクトルの向きは梁軸方向と一致する。一方でせん断スパン側では、梁軸方向ひずみに加えてせん断ひずみも生じるため、最小主ひずみベクトルの方向が斜め方向に向く。図-9 から図-11 に示す最小主ひずみを比較すると、QI, HB, CP の順にせん断スパンの主ひずみの値が大きくなっており、せん断ひずみの大きさに合わせて傾きも大きくなっていることが観察できる。曲げスパンでは、どの供試体もベクトルの向きが梁軸方向を示している。これらの結果から、梁理論と合致する結果となっていることがわかる。一方で、せん断

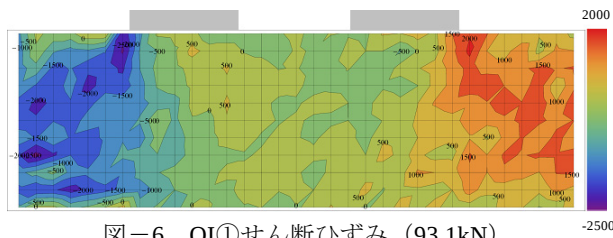


図-6 QI①せん断ひずみ (93.1kN)

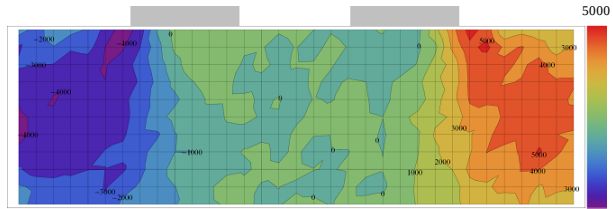


図-7 HB①せん断ひずみ (49.1kN)

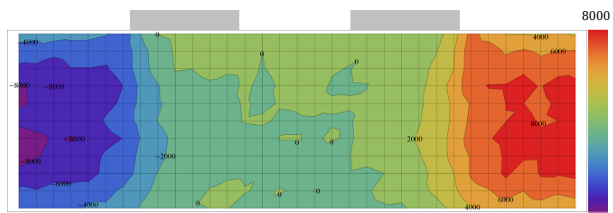


図-8 CP①せん断ひずみ (73.2kN)

スパンでは、CP が斜行方向に繊維を有しないことから、ウェブ全体がせん断変形をしている様子が観察でき、チモシェンコ梁理論の適用が必要であることが示されている。HB と QI においても、せん断変形によるたわみ成分の算定の必要が考えられる。

せん断ひずみの結果と同様に主ひずみの結果でも、QI と HB では、せん断スパン側の載荷板端部で近傍のベクトルより明らかに大きなひずみが生じていることが見てとれるが、左右に特徴的な差は見られず、せん断ひずみと同様に破壊箇所の特定は困難であった。

6. まとめ

本研究では、積層構成の異なる 3 種類の供試体を 3 体ずつ作製し、合計 9 体について曲げ載荷実験を行った。供試体表面の撮影と画像解析を行い、損傷・破壊過程について検討した。

画像解析の精度検証のため、スパン中央部の梁軸方向ひずみとひずみゲージの比較を行った。その結果、撮影画像には一様にひずみが拡大もしくは縮小される面外変位の影響と思われる成分が確認されたため、補正を行った。この成分を考慮するためには、カメラを 2 台用いたステレオ画像法による 3 次元の画像解析を行い、面外変形の検討を行う必要がある。

画像解析で得られたせん断ひずみ・最小主ひずみの結果から、斜行方向に繊維を有する QI と HB には破壊箇所であるせん断スパン側の載荷板端部に局所的なひずみを観察することができたが、左右の載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。破壊の前兆を捉えるため、梁軸方向ひずみ、梁周方向ひずみ、せん断ひずみに加えて、それらと積層板の弾性定数から算定される応力について

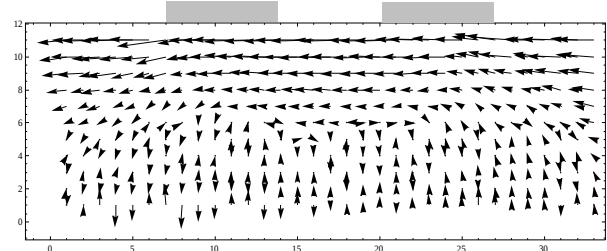


図-9 QI①最小主ひずみベクトル (93.1kN)

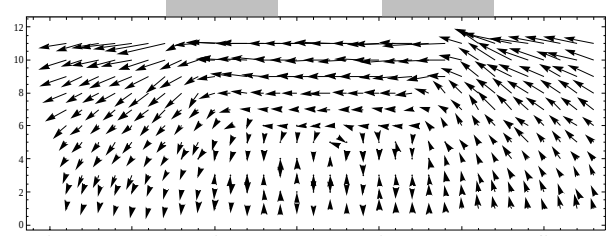


図-10 HB①最小主ひずみベクトル (49.1kN)

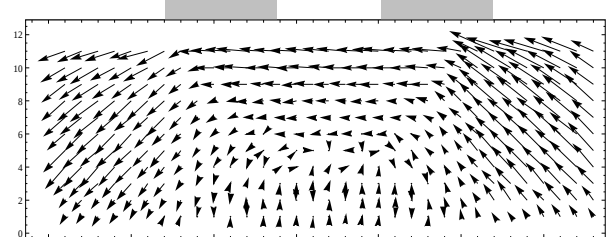


図-11 CP①最小主ひずみベクトル (73.2kN)

でも検討を行う予定である。

斜行方向に繊維を有しない CP では、局所的なひずみを観察することができなかったが、ウェブ全体がせん断変形をしている様子が観察できた。斜行方向に繊維を有しない供試体では、せん断剛性が低く、載荷板に作用する力により局所的なひずみを生じるよりは、せん断スパン全体がせん断変形したと考えられるため、チモシェンコ梁理論の適用が必要である。

謝辞

供試体作製についてはクラボウ（株）のご厚意によりなされた。ここに謝意を示す。

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 梁の曲げ載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.
- 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.