

画像解析による積層構成の異なる CFRP 梁の曲げ破壊機構の検討

Image analysis of flexural fracture mechanism of CFRP beams with different laminate structures

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 ○横山 朋弘 (Tomohiro Yokoyama)
正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)
F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
正会員 何 興文 (Xingwen He)

1. まえがき

炭素繊維強化ポリマー(Carbon Fiber Reinforced Polymer、CFRP)は、軽量、高強度、耐久性が高いといった特性を有する複合材料であり、航空宇宙産業、自動車、スポーツ製品などの幅広い分野で用いられている。土木分野では、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・維持管理コスト削減の観点から橋梁の梁部材のような主要部材としての利用も期待されている¹⁾。

CFRP 構造物は薄肉部材により構成され、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より、その損傷・破壊過程を実験的に把握することは容易でない。このような場合には画像解析を用いることで、破壊前の特徴的なひずみ分布を捉えられることが示されている²⁾。

先行研究³⁾においては、積層構成の異なる 3 種類の箱形断面 CFRP 梁を 3 体ずつ作製し、4 点曲げ载荷において、曲げ破壊に至るまでの過程を観察し、画像解析が行われている。しかしながら、解析の際の計測点が 408 点と比較的少なく、供試体が損傷し破壊に至るまでの局所的な挙動を十分に捉えていない可能性があった。

本研究では計測点を 4 倍の 1632 点に増やし、CFRP 梁供試体の表面変位を計測し、ひずみや応力、破壊指標値を算出することで、積層構成の違いが破壊機構に及ぼす影響を画像解析により詳細に検討することを目的とする。

2. CFRP 梁の曲げ载荷実験

2.1 供試体

曲げ载荷実験に用いた供試体は、CFRP 梁の箱形断面梁(長さ 1000mm、高さ 100mm、幅 100mm、板厚 5mm)である(図-1)。供試体は VaRTM(Vacuum assist Resin Transfer molding)成形で作られた。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。実験に用いられた 2 種類の供試体の積層構成は表-1 に示す。

供試体種類の積層構成ごとに QI(Quasi-Isotropic)、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/[90/-45/45/0]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

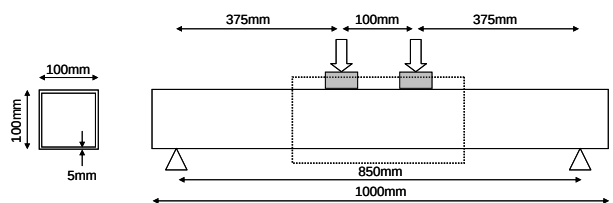


図-1 供試体寸法と撮影範囲(点線枠内)

表-1 供試体の積層構成

供試体種類		QI	CP
積層構成		[0/45/-45/90] ₅ /[90/-45/45/0] ₅	[0/90] ₅ /[90/0] ₅
積層数	梁軸方向 (0 度)	10	10
	梁周方向 (90 度)	10	10
	斜行方向 (±45 度)	20	0
	合計	40	20

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。

2.2 载荷方法

载荷は 4 点曲げ载荷により行われ、支間長 850mm、せん断スパン 375mm、曲げスパン 100mm としている(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われている。载荷は荷重制御により約 5kN ごとに载荷を停止してひずみゲージと変位計の値の計測を行い、画像撮影も行われた。

2.3 実験結果

QI①、②、③の耐力は、97.0kN、98.2kN、92.9kN、CP①、②、③の耐力は 74.4kN、78.5kN、82.4kN であった。耐力の平均はそれぞれ QI : 96.0kN、CP : 78.4kN となり、QI は CP に比べて耐力が大きいことが分かる。

破壊箇所は、QI では、①、②、③の順に左側、左側、右側、CP では、①、②、③の順に左側、左側、右側であった。いずれの供試体もせん断スパン側の载荷板端部の上フランジとウェブで破壊が生じた(図-2)。

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われた。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、供試体の撮影表面にはラメスプレーによるランダムパターンを付与している。

3.2 画像相関

撮影した画像は二値化画像に変換している。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。

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 256×650 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-3)。

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。変形前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-4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、

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

せん断ひずみは、

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

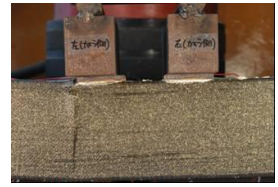
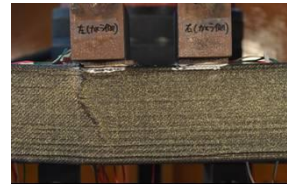


図-2 QI①(左)と CP①(右)の破壊形態

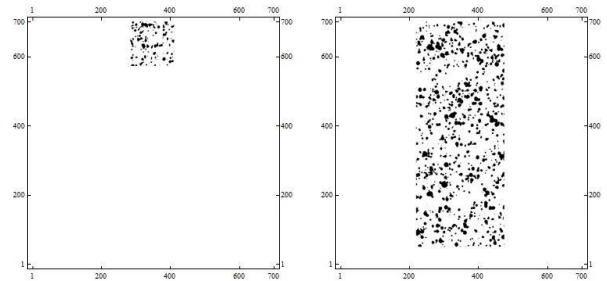


図-3 変形前(左)と変形後(右)の着目領域

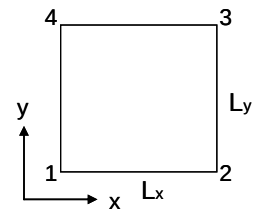


図-4 座標系

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、

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

最小主ひずみは、

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

で表される。

3.4 面外変形の補正

本解析では格子状の着目点で変位を求め、それを二次元平面上の移動のみと仮定してひずみを求めているが、実際の実験では三次元の変形が生じていることが分かっている⁵⁾。それにより、供試体の手前方向に変位している場合は着目点間隔が広く撮影されることにより、見かけの引張りひずみが算出される。

ひずみゲージによる計測より、中立軸が梁高さ中央に位置することは確認されている。それに合わせて面外変形の補正を行う。図-5は CP③において変位補正を行わずに求めた梁軸方向ひずみの分布と、見かけ上発生した 2000μ の圧縮ひずみを補正した梁軸方向ひずみの分布である。

3.5 破壊指標値の算出

破壊指標値は Tsai-Wu 則を用いて算定する。この破壊基準は CFRP のような直交異方性の積層板において、6つの応力状態を考慮する式である⁶⁾。破壊指標値を F とすると、

$$F = F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_2\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \quad (9)$$

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} - \frac{1}{\sigma_1^C}, \quad F_{11} = \frac{1}{\sigma_1^T \cdot \sigma_1^C}, \quad F_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} - \frac{1}{\sigma_2^C},$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \cdot \sigma_2^C}, \quad F_{66} = \frac{1}{(\sigma_{12}^U)^2}, \quad F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad (10)$$

なお、 σ_1 ：梁軸方向直応力、 σ_2 ：梁周方向直応力、 σ_{12} ：面内せん断応力である。上記の式に別途実施した材料試験の結果(表-2)を用いる。

4. 画像解析結果

画像解析は破壊直前の撮影画像に対して行った。解析により水平方向変位と鉛直方向変位を求め、そこから梁軸方向ひずみを算出し、必要に応じて面外変形の補正を行った。補正後の変位から、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を算出した。また、材料試験の結果(表-2)を用いることにより、破壊指標値、最大及び最小主応力も算出した。ここでは、梁軸方向ひずみ、せん断ひずみ、最小主ひずみ、破壊指標値についてのみ述べる。

4.1 梁軸方向ひずみ

図-6、図-7に QI①、CP①の梁軸方向ひずみを示す。両供試体において上フランジで圧縮ひずみ、下フランジで引張ひずみが生じている。また、中立軸は梁高さ中央にきている。QI は CP に比べ、より大きいひずみが生じている。

4.2 せん断ひずみ

図-8、図-9に QI①、CP①のせん断ひずみを示す。

解析結果より、両供試体においてスパン中央部ではひずみが小さく、せん断スパンの梁高さ中央部に大きなひずみが生じている様子がみられる。

QI の左右のせん断スパン側載荷板端部には、局所的なひずみを見ることができる。この局所的なひずみでは、この後破壊に至る側とそうでない側に特徴的な差を見出すことはできなかった。

CP の載荷板端部にも局所的なひずみは見られたが、それ以上にせん断スパン側でせん断ひずみが大きく見られた。これは斜行方向の繊維が含まれないことからせん断剛性が低く、せん断スパン全体がせん断変形したと考えられる。

また、破壊直前のせん断スパンの最大値においても QI は約 7000 μ 、CP は約 20000 μ となっており、斜行方向の繊維によるせん断剛性への影響が見て取れる。

4.3 最小主ひずみ

図-10、図-11に QI①、CP①の最小主ひずみを示している。矢印の傾きで方向を、長さで大きさを表す。

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。どの供試体も圧縮側で

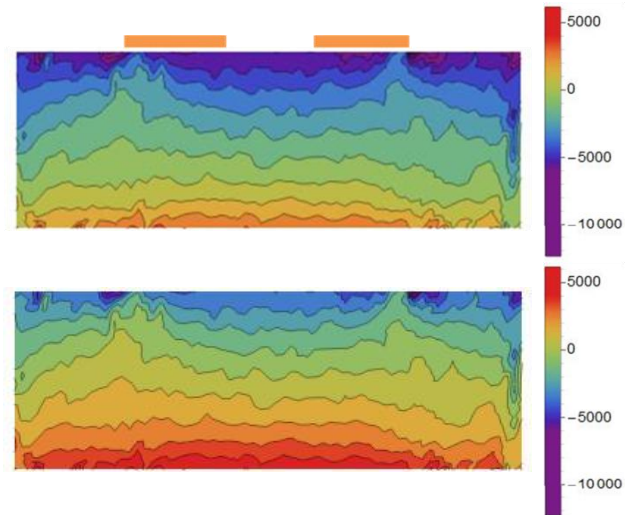


図-5 補正前(上)と補正後(下)の梁軸方向ひずみ分布図

表-2 材料試験値

積層構成		QI	CP
弾性率(梁軸方向)(MPa)		41000	61700
弾性率(梁周方向)(MPa)		37500	60800
せん断剛性(MPa)		14700	4200
引張強さ(梁軸方向)(MPa)	σ_1^T	645	1006
圧縮強さ(梁軸方向)(MPa)	σ_1^C	272	352
引張強さ(梁周方向)(MPa)	σ_2^T	498	946
圧縮強さ(梁周方向)(MPa)	σ_2^C	248	281
せん断強さ(MPa)	σ_{12}^U	251.7	67.9
ポアソン比(梁軸方向)		0.310	0.050
ポアソン比(梁周方向)		0.284	0.049

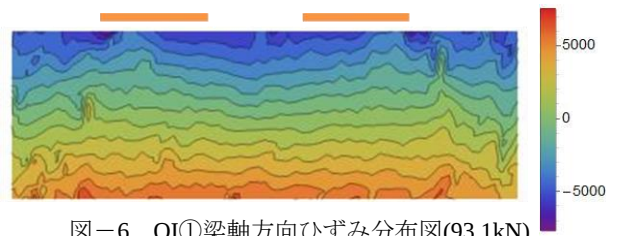


図-6 QI①梁軸方向ひずみ分布図(93.1kN)

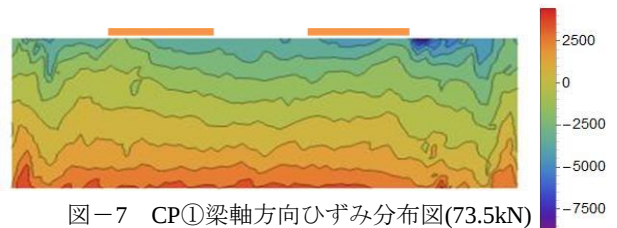


図-7 CP①梁軸方向ひずみ分布図(73.5kN)

ベクトルの向きが梁軸方向を示している。

一方でせん断スパン内ではせん断ひずみが生じる。斜行方向繊維が入っておらずせん断に弱いと考えられる CP において、ウェブ全体がせん断変形している様子が観察できる。

以上より最小主ひずみにおいて解析結果は梁理論に合致しているといえる。

また、QI では、せん断ひずみの傾向と同様に、せん

断スパン側の荷板端部で近傍よりも大きいひずみベクトルが生じていることも観察できる。

4.4 破壊指標値

図-12、図-13 に QI①、CP①の破壊指標値を示している。破壊指標値が1となるときに破壊基準を満たすとして算出を行った。

荷板端部のせん断スパン側で数字が1に近づき、確かにこの後破壊に至るところを予測できてはいるが、左右の荷板端部の両方に出ることがあり、結局左右のどちらが破壊に至るのかという予測に用いるには不十分である。

なお、一部領域で1を超える値が生じているのは、式(9)において強度値を超える応力となっていることによる。これは主として、非線形なせん断応力-ひずみ関係を線形として破壊指標値を算出していることによる。

5. まとめ

本研究では、積層構成の異なる2種類の供試体を3体ずつ作製し、合計6体についての曲げ荷重実験を行い、その際撮影された画像の解析を行った。

画像解析において計測点を先行研究の4倍として詳細に行なったことにより、以下の三つが確認された。

一つ目は供試体の破壊箇所であるせん断スパン側の荷板端部に局所的なせん断ひずみを生じること。

二つ目は斜行方向に繊維を有さない CP はせん断剛性が低く、せん断スパン全体がせん断変形したこと。

三つ目は、破壊指標値により破壊起点の断定には至らないものの、その可能性は示せるということである。

これは、先行研究の内容に一致する。

謝辞

CFRP の供試体作製や材料試験はクラブウ(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) 岡松広忠、松本高志、林川俊郎、何興文：CFRP 梁の曲げ荷重実験における損傷・破壊過程の画像解析、土木学会北海道支部論文報告集、Vol.68、A-22、2012
- 4) 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、土木学会北海道支部論文報告集、Vol.66、A-2、2010
- 5) 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
- 6) 松本高志、岡松広忠、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、2012



図-8 QI①せん断ひずみ分布図(93.1kN)

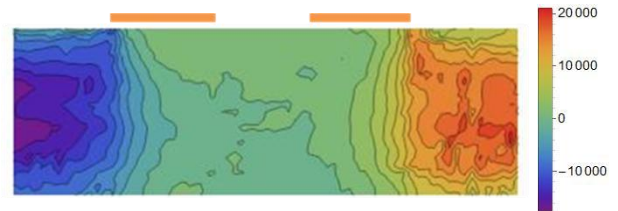


図-9 CP①せん断ひずみ分布図(73.5kN)

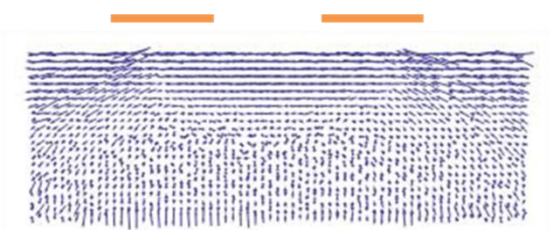


図-10 QI①最小主ひずみベクトル図(93.1kN)

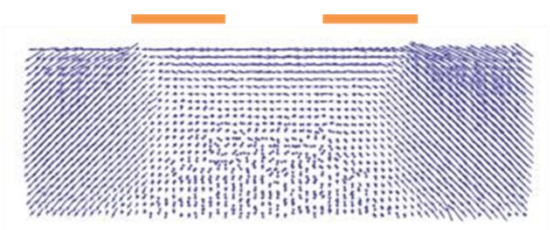


図-11 CP①最小主ひずみベクトル図(73.5kN)

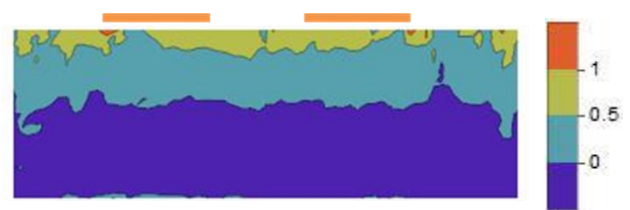


図-12 QI①破壊指標値分布図(93.1kN)



図-13 CP①破壊指標値分布図(73.5kN)