

せん断スパン長の異なる CFRP 梁の曲げ破壊の画像解析

Image analysis on flexural fracture of CFRP beams with different shear spans

北海道大学工学部

学生員

○築館 雪花 (Yukika Tsukidate)

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

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) は、高い強度と軽さを併せ持ち、耐食性にも優れた複合材料である。この材料特性から CFRP は航空宇宙産業やスポーツ製品などで用いられ、土木分野の社会基盤施設においても安全性や耐久性に優れた構造材料として有望視されている¹⁾。

CFRP を土木構造物の部材として適用する際に合理的な設計を行うためには、部材の終局状態について詳細に把握する必要がある。しかし、CFRP 部材の終局状態は脆性的であり、異方性を有することと合わせて実験による挙動の把握が困難である。

このような場合には、面的に変位を計測できる手法として画像解析を用いるのが有効であることが示されている^{2), 3), 4)}。これまでに、積層構成の異なる CFRP について変位を計測し、ひずみ、応力、破壊指標値の面的な分布を得ており、CFRP の曲げ損傷と破壊の過程が明らかにされてきた。

これらの供試体はせん断スパン長が比較的長く、曲げが卓越する荷重条件で画像解析が行われた^{3), 4)}。本研究では、せん断スパン長を変えることで、曲げとせん断の組み合わせ条件を変えた荷重条件で画像解析を行う。これにより、繊維を乖離させる方向に働く圧縮力とせん断力が損傷と破壊の過程に及ぼす影響を検討することが本研究の目的である。

2. 曲げ荷重実験

2.1 供試体

実験に用いられた供試体は、VaRTM 法 (真空樹脂含浸製造法) で成形された CFRP の箱形断面梁 (長さ 1000mm、高さ 100mm、幅 100mm、板厚 5mm) である。積層構成は直交積層 $[(0/90)_5/[90/0]_5]$ で、繊維の向きが 0 度 (梁軸方向) と 90 度 (梁周方向) のみで構成され、0 度と 90 度がそれぞれ 10 層ずつの計 20 層からなる。6 体成形し、後述する 2 種類の荷重条件で 3 体ずつ曲げ荷重に供した。

2.2 荷重方法

荷重は 4 点曲げで行われた。支間長を 850mm とし、せん断スパン長は 375mm と 285mm の 2 種類とした。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。荷重は荷重制御により約 5kN ごとに荷重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。

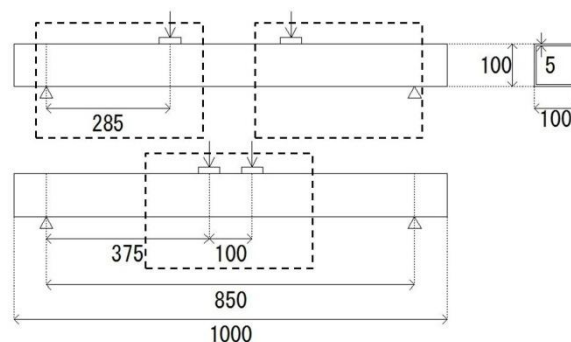
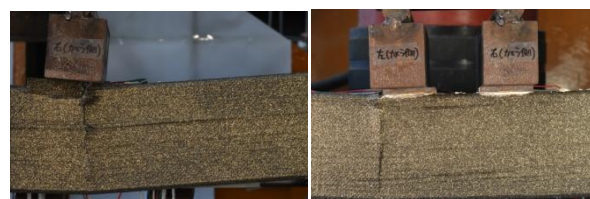


図 - 1 供試体寸法と撮影範囲

(上からせん断スパン長 285mm, 375mm)



(a)せん断スパン長 285mm (b)せん断スパン長 375mm

図 - 2 破壊形態

2.3 実験結果

各供試体の破壊箇所は以下のものであった (図 - 2)。供試体はすべて荷重板せん断スパン側の上フランジとウェブで破壊した。供試体の破壊荷重は、せん断スパン長 285mm では供試体番号 1,2,3 でそれぞれ 102.9kN, 98kN, 100kN であり、せん断スパン長 375mm では 1,2,3 でそれぞれ 74.4kN, 78.5kN, 82.4kN であった。

3. 画像解析手法

3.1 画像撮影・加工

供試体の表面色は一律な黒色であり変形前後の特徴点追跡が困難であるため、供試体表面に金色のラメスプレーを塗布することでランダム模様をつけた。せん断スパン長 285mm の撮影範囲は荷重板から支点の範囲とし、カメラ 2 台を用いて右側と左側をそれぞれ撮影した。せん断スパン長 375mm の撮影範囲は両荷重板を含む範囲とし、カメラ 1 台で撮影した。

撮影した画像より背景など不要な部分をトリミングし、予め設定されたピクセル数に合わせて拡大処理を行った。このようにして得られた画像を 256 階調のグレースケール画像に変換し、さらに二値化画像に変換した。

3.2 画像相関

今回の画像解析では、載荷前の画像と破壊の直前に撮影された画像の二枚を比較している。画像加工で得られた二値化画像上に、縦と横それぞれ 100 ピクセルごとに観測点を設定した。画像中の供試体の大きさが一定でないため、観測点の数を増減することで観測点が供試体ウェブ側面を覆うように調整した。よって、観測点は 1 枚の画像の供試体上に 1584～1700 点設定している。

載荷前と破壊直前の画像相関は以下のように行う。載荷前の二値化画像から 128×128 ピクセルの正方形を切り出し、破壊直前の画像からは変位した観測点を含むように 256×450 ピクセルの長方形を切り出す。(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。

3.3 ひずみと破壊指標値の算出

前節の方法で得られた変位量からひずみを求めた。格子状に設定した観測点を図 - 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 方向変位を u_i 、 y

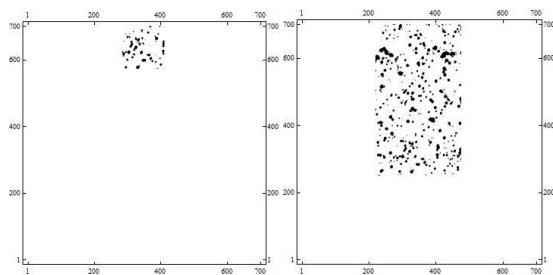


図 - 3 変形前 (左) と変形後 (右) の着目領域画像

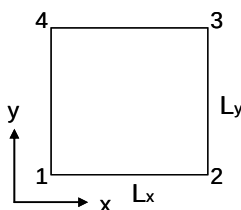


図 - 4 座標系

方向変位を v_i としたときのひずみは次のように算出される。

x 方向ひずみ (梁軸方向直ひずみ)

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

y 方向ひずみ (梁周方向直ひずみ)

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

xy 方向せん断ひずみ (せん断ひずみ)

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

最大せん断ひずみ

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

最大主ひずみ

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

最小主ひずみ

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

Tsai-Wu の破壊指標値は次式により算出した。この際用いる応力と強度は、別途実施した材料試験によって得られた弾性係数と強度を用いて計算されている。(表 - 1)

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

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} - \frac{1}{\sigma_1^C}, F_{11} = \frac{1}{\sigma_1^T \cdot \sigma_1^C}, F_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} - \frac{1}{\sigma_2^C}, F_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \cdot \sigma_2^C}$$

$$F_{ss} = \frac{1}{(\tau_{12}^U)^2}, F_{12} = -0.5 \sqrt{F_{11} F_{22}} \quad (10)$$

ここに、 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、 $F_1, F_{11}, F_2, F_{22}, F_{ss}$, および F_{12} : Tsai-Wu の異方性係数、 σ_1^T : 梁軸方向引張強度、 σ_1^C : 梁軸方向圧縮強度、 σ_2^T : 梁周方向引張強度、 σ_2^C : 梁周方向圧縮強度、 τ_{12}^U : 面内せん断強度。

表 - 1 材料試験値

梁軸方向弾性率	MPa	61700
梁軸方向引張強度 (σ_1^T)	MPa	1006
梁軸方向圧縮強度 (σ_1^C)	MPa	352
梁軸方向ポアソン比		0.050
梁周方向弾性率	MPa	60800
梁周方向引張強度 (σ_2^T)	MPa	946
梁周方向圧縮強度 (σ_2^C)	MPa	281
梁周方向ポアソン比		0.049
せん断剛性	MPa	4200
せん断強度 (τ_{12}^U)	MPa	67.9

4. 解析結果

図 - 5 から 16 に画像解析によって得られた結果を示す。なお、せん断スパン長 285mm の荷重実験では、荷重板の一部がウェブ表面に重なっているため、CFRP の変位、荷重板の変位、CFRP と荷重板のずれ変位が混在した結果となり、ひずみ算出において特にずれ変位に起因する大きなひずみ値が算出される。無論、この大きなひずみは CFRP のひずみではないため、本論文ではウェブ表面に重なっている荷重板の領域を結果の分布図からは除外している。図中では荷重板下の白い領域である。

4.1 梁軸方向直ひずみ

図 - 5 と図 - 6 に梁軸方向直ひずみの分布を示す。上フランジ側に圧縮ひずみが生じ、下フランジ側には引張ひずみが生じている。中立軸は概ね梁高さ中央にある。せん断スパン長 375mm では曲げ支間において概ね線形分布が得られており、右側荷重板のせん断スパン側は局所的な圧縮ひずみが生じている。

4.2 せん断ひずみ

図 - 7 と図 - 8 にせん断ひずみの分布を示す。曲げスパンにおいてはせん断力が作用しないため、せん断ひずみ値は小さい。せん断スパンにおいては、せん断スパン長 285mm では約 30000 μ のせん断ひずみが生じており、せん断スパン長 375mm の約 15000 μ よりも大きなひずみを生じている。これは荷重条件の違いにより、前者のせん断力が大きいことによる。また、せん断スパン長 375mm ではせん断スパン側荷重板端部において、局所的に大きいひずみ領域が見られる。せん断スパン長 285mm では荷重板と重なっているため局所的ひずみ領域は見られない。

4.4 最小主ひずみ

図 - 9 と図 - 10 に最小主ひずみをベクトル図で示す。矢印の傾きで方向を、長さで大きさを表している。曲げスパンでは曲げによる圧縮ひずみが梁軸方向に生じている様子が表れている。せん断スパンでは曲げとせん断の組み合わせにより圧縮ひずみは一樣な斜め方向を向いている。

4.3 破壊指標値

図 - 11～16 に破壊指標値の分布を示す。

せん断スパン長 375mm においては、せん断スパン側荷重板端部において局所的に破壊指標値の高い領域が見られる。375-1, 2, 3 において、右, 左, 右の荷重板で破壊指標値が大きい。実験においては、左, 左, 右で破壊が生じており、概ね一致している。この箇所では、圧縮ひずみに加えてせん断ひずみも大きく、組み合わせとして Tsai-Wu の破壊指標値が大きくなり破壊に至ったものと考えられる。

一方で、せん断スパン長 285mm は 285-1 の荷重板端部において破壊指標値が大きい領域があるが、他の 2 体では見られない。また、分布で最も破壊指標値の大きい場所はせん断スパンのウェブ高さ中央付近である。これは、図 - 7 で見られた約 30000 μ のせん断ひずみにより、破壊指標値が大きく算出されたことによる。

加えて、破壊指標値として用いている Tsai-Wu 則は、直交異方性材料の積層板において、6 つの応力状態を考慮し

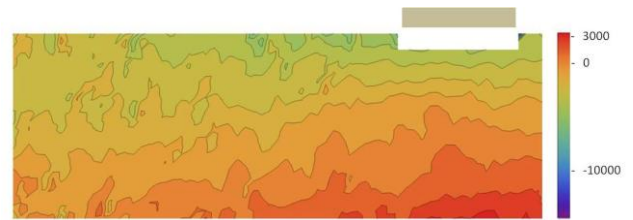


図 - 5 梁軸方向直ひずみ (せん断スパン長 285mm)

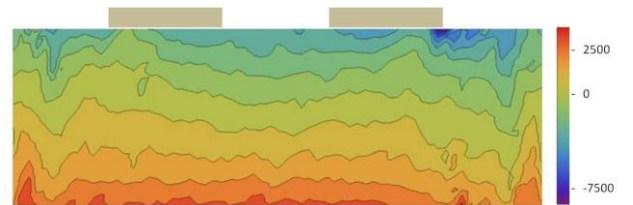


図 - 6 梁軸方向直ひずみ (せん断スパン長 375mm)

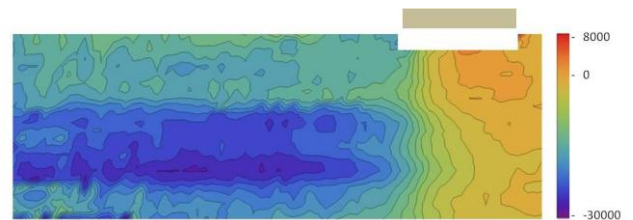


図 - 7 せん断ひずみ (せん断スパン長 285mm)

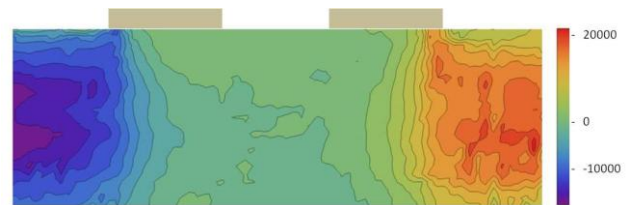


図 - 8 せん断ひずみ (せん断スパン長 375mm)

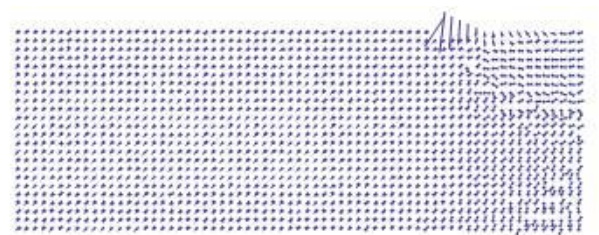


図 - 9 最小主ひずみベクトル (せん断スパン長 285mm)

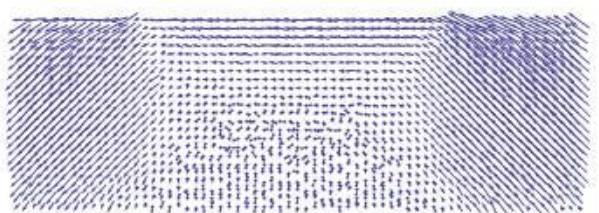


図 - 10 最小主ひずみベクトル (せん断スパン長 375mm)

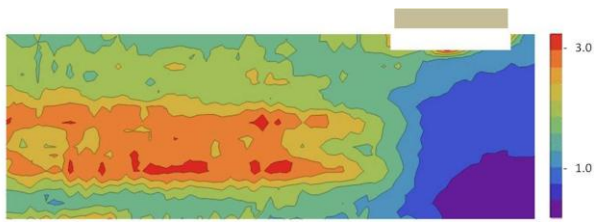


図 - 11 破壊指標値 (285-1)

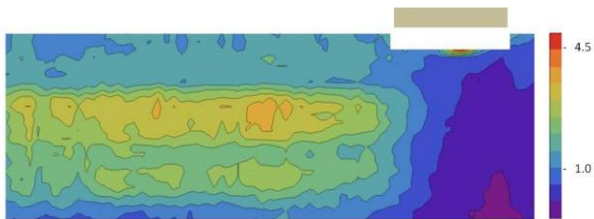


図 - 12 破壊指標値 (285-2)

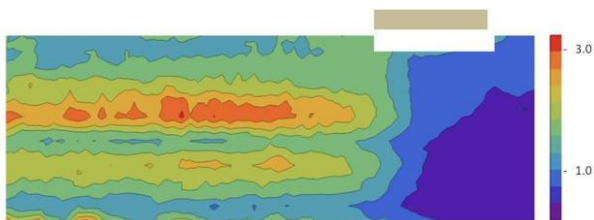


図 - 13 破壊指標値 (285-3)

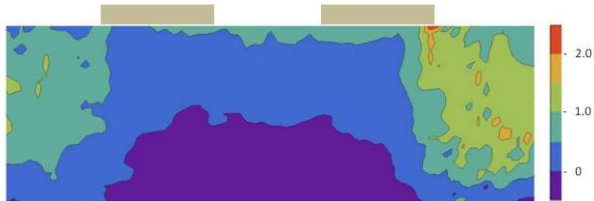


図 - 14 破壊指標値 (375-1)

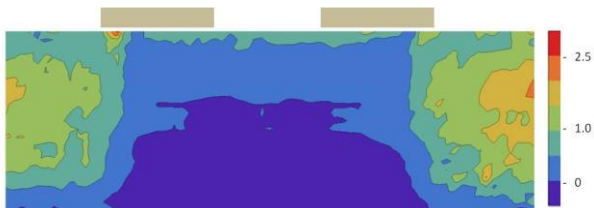


図 - 15 破壊指標値 (375-2)



図 - 16 破壊指標値 (375-3)

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ている。破壊指標値は、本来はこの値が1となる時に破壊が生じることを意味している。しかし、応力-ひずみ関係を線形で仮定しているTsai-Wu則に対して、実際のCFRPの応力-ひずみ関係、特にせん断は非線形であるため、荷重が大きくなるほどにTsai-Wu則の破壊指標値が大きく表示されることになる。したがって、いずれの画像も破壊指標値は1を超えて算出されているが、せん断スパンのせん断ひずみが非常に大きくなっているせん断スパン長285mmの場合には、最も破壊指標値の大きい場所がせん断スパンのウェブ高さ中央付近になったものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、CFRP 箱形断面梁の曲げ荷重において、せん断スパン長を変えることで、曲げとせん断の組み合わせ条件を変えた荷重条件で画像解析を行った。

梁軸方向直ひずみではせん断スパン長 375mm においてせん断スパン側荷重板端部に局所的な圧縮ひずみの周長が見られた。

せん断ひずみは、せん断スパン長 285mm で約 30000 μ 、375mm で約 15000 μ の大きな値が見られた。後者ではせん断スパン側荷重板端部においてもせん断ひずみの大きな領域が生じていた。

最小主ひずみは、曲げスパンでは圧縮ひずみが梁軸方向に、せん断スパンでは斜め方向に生じている様子が見られた。

破壊指標値は、せん断スパン長 375mm において実験で観察された箇所では値が高い結果が得られたものの、285mm ではせん断スパンにおいて Tsai-Wu 則の限界値を超える値が算出される結果となった。これは、Tsai-Wu 則が線形の応力-ひずみ関係を仮定しているのに対して、特に実際のせん断の応力-ひずみ関係が非線形であることに起因していると考えられる。

謝辞

供試体作成と材料試験に関してはクラボウ（株）様のご厚意によりなされた。ここに謝意を表す。

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, 2011.
- 4) 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, I_691-I_702, 2012.