

GFRP 製箱形断面梁の曲げ破壊の画像解析

Image analysis on the fracture of GFRP box beams under flexural loading

北海道大学工学部 学生員 ○小林 周史 (Chikashi Kobayashi)
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

ガラス繊維強化ポリマー (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) はガラス繊維と樹脂の複合材料である。コンクリートに比べて高強度かつ軽量であり、非鉄繊維と樹脂の複合材料であるため耐食性に優れるという特徴がある。土木分野においては、軽量ゆえに大きな重機を必要とせず施工性が高いことや高強度で耐食性に優れる材料であることを理由に、橋梁の床版、桁、橋脚等の補修・補強材料として主に用いられている。近年では、耐久性の向上・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¹⁾、沖縄県に GFRP 歩道橋が架設された事例もある。

GFRP を構造材料として使用するためには、その損傷・破壊過程を詳しく把握する必要があるが、破壊が脆性的であり、損傷・破壊過程の実験的な把握は難しい。このような場合には画像解析を用いることによって、破壊に至るひずみ分布、応力状態の特徴を捉えることにより損傷・破壊過程の把握が可能である²⁾。

本研究では、箱形断面 GFRP 梁 3 体に対して 4 点曲げ載荷実験を実施し、画像解析を行った。ひずみ分布と破壊指標値分布を通して、損傷・破壊過程の詳細な観察を行うことを本研究の目的としている。

2. GFRP 梁の曲げ載荷実験

2.1 供試体

曲げ載荷実験に用いる供試体は、GFRP 箱形断面梁 (SP100: 長さ 1000mm, 高さ 100mm, 幅 100mm, 板厚 5mm) である。供試体は引抜成形で作られた。ガラス繊維に樹脂を含浸させ金型に引き込み、型内で箱形断面形状に硬化させ、引抜装置で引抜いて所定の長さに切断されている。今回の実験には 3 体の供試体を実験に供した。供試体寸法を表-1 に示す。

表-1 SP100 の標準寸法

形状記号	高さ・幅(mm)	板厚(mm)
SP100	100.00	5.00

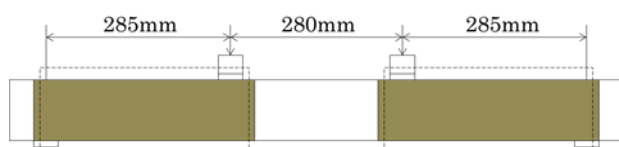


図-1 載荷条件と撮影範囲 (点線枠内)

2.2 載荷方法

載荷は 4 点曲げ載荷により行い、支間長 850mm, セン断スパン 285mm, 曲げスパン 280mm 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。

2.3 実験結果

SP100①, ②, ③の耐力は、51.6kN, 56.6kN, 56.3kN であった。これらは同様の破壊形態を示し、破壊耐力の差も小さいことから、品質によるばらつきは小さいものと考えられる。SP100①, ②, ③の荷重-変位曲線を図-2 に示す。

供試体は、載荷板のせん断スパン側上フランジにおいて座屈が生じて一度荷重減が生じた後に、最終的には載荷板直下の隅角部より破壊が生じて上フランジとウェブの間を分離する割れが起こった。(図-3)。

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、GFRP 表面は一律な白色であり、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まず黒色のスプレーによって着色後、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

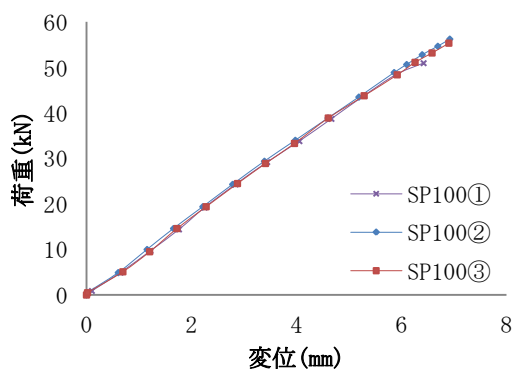


図-2 荷重-変位曲線

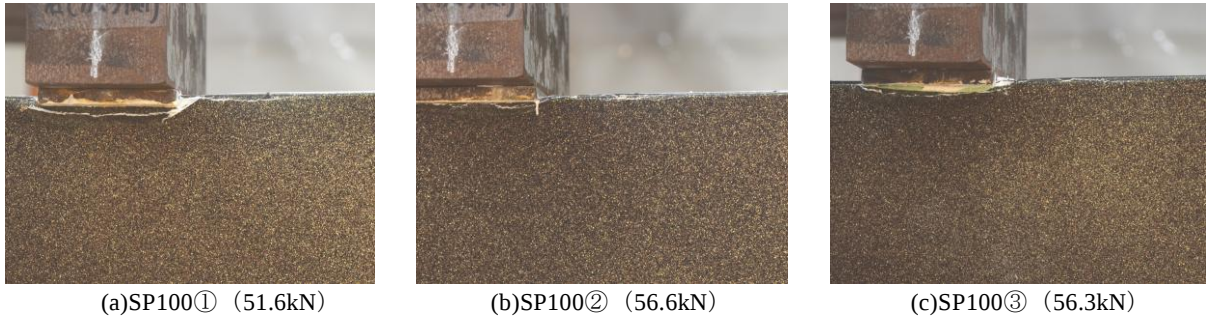


図-3 破壊形態

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 21 点の合計 1428 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 256×600 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-4)。

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⁾。

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-5 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、

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

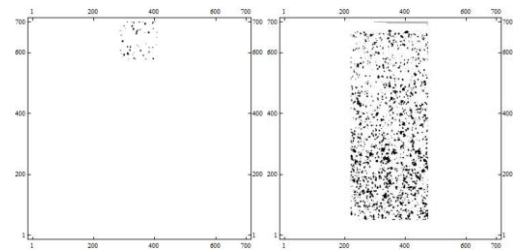


図-4 変形前と変形後の着目領域

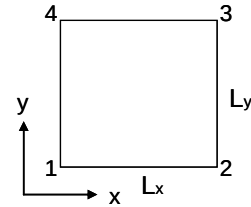


図-5 座標系

xy 方向せん断ひずみは、

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

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。

4. 画像解析結果

画像解析は、載荷前 (変形前) と破壊直前 (変形後) の二画像で行った。ひずみの算出は、梁軸方向直ひずみ、梁周方向直ひずみ、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、損傷・破壊についての特徴が見られた梁軸方向直ひずみ、せん断ひずみ、最小主ひずみ及び破壊箇所 の推定に用いる破壊指標値についてのみ述べる。

4.1 梁軸方向直ひずみ

図-6 は SP100 の梁軸方向直ひずみを表している。梁は曲げを受けると、梁上部で圧縮、梁下部で引張の応力が生じる。それに応じて梁上部では圧縮ひずみ、梁

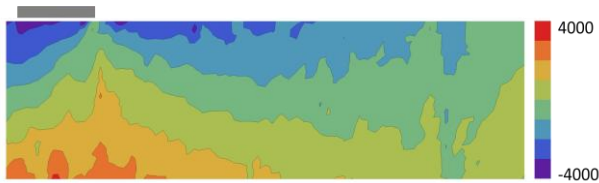


図-6 SP100①の梁軸方向直ひずみ (49.6kN)

下部では引張ひずみを生じる。図-6を見ると、概ね理論通りのひずみとなっていることが分かる。しかし、中立軸となる直ひずみが0の値を示す部分は必ずしもウェブの中央付近にはなく、梁軸方向とも水平ではない。これは、断面のつぶれによる面外変位の影響が考えられるが、詳細な検討が今後必要である。

4.2 セン断ひずみ

図-7に SP100①のせん断ひずみ分布を示す。

せん断スパンのウェブ中央高さ付近に大きなせん断ひずみが生じ、左右両方の載荷板端部に局所的なひずみ集中が見られる。また、載荷板端部よりウェブ中央高さ付近へと高いせん断ひずみの領域が確認できる。破壊箇所について、右側載荷板のせん断スパン側端部で上フランジが座屈し、上フランジとウェブの境目が分離して破壊する形態が見られたことから、載荷板端部に生じた局所的なひずみ集中と破壊箇所との関連性が考えられる。しかし、局所的なせん断ひずみは左右両方の載荷板で見られたが、実際に破壊した側に突出した特徴を見ることはできなかった。そのため、左右どちらから破壊が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。

4.3 最小主ひずみ

図-8に SP100①の最小主ひずみ分布を示す。

せん断スパンにおいて-4000~-5000 μ 程度の最小主ひずみ(圧縮)が生じ、特に載荷板端部には局所的なひ

ずみ集中が見られる。

図-9に SP100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。

梁理論によると、梁部材のせん断スパンにおいて最小主ひずみベクトルは斜め方向を向くことが示されている。これは、せん断スパンにおいては梁軸方向ひずみに加え、せん断ひずみが生じるためである。図-9を見ると確かに最小主ひずみベクトルは載荷板端部から支点に向けて斜め方向を向いていることが分かる。また、図-9より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と考えられる。

せん断ひずみの結果と同様、主ひずみの結果でもせん断スパン側の載荷板端部で突出して大きなひずみを生じているが、左右に特徴的な差は見られず、破壊箇所の特定は困難であった。

4.4 破壊指標値

Tsai-Wuの破壊指標値は、

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

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

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

で表される。ここで、 σ_1 : 梁軸方向直応力、 σ_2 : 梁周方向直応力、 τ_{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の異方性係数である。図-10に SP100①, ②, ③の破壊指標値分布を示す。また、表-2に破壊指標値を求める際に使用した GFRP の材料定数を示す。

本研究のプログラムでは破壊規準値を1と設定して

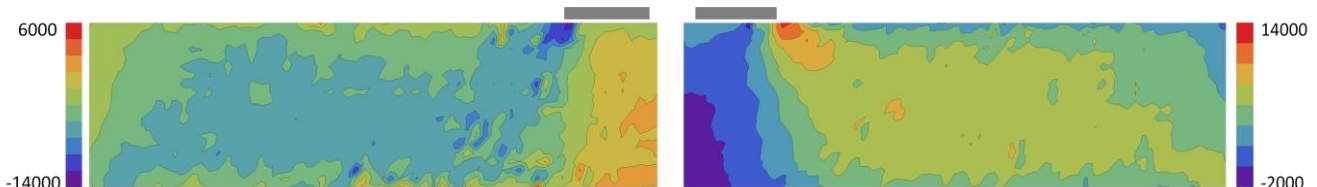


図-7 SP100①のせん断ひずみ (49.6kN)

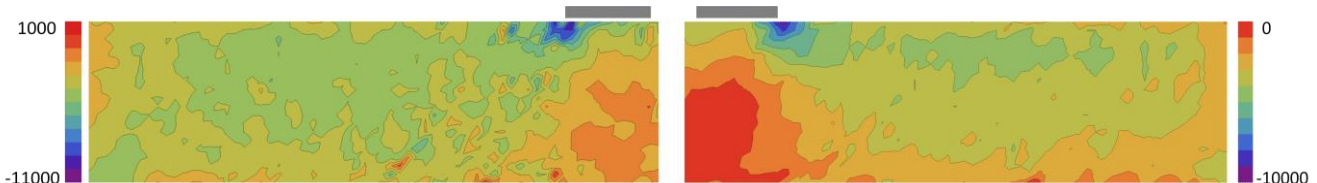


図-8 SP100①の最小主ひずみ (49.6kN)

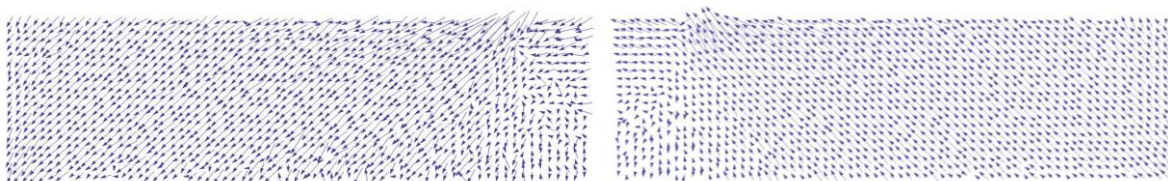


図-9 SP100①の最小主ひずみベクトル (49.6kN)

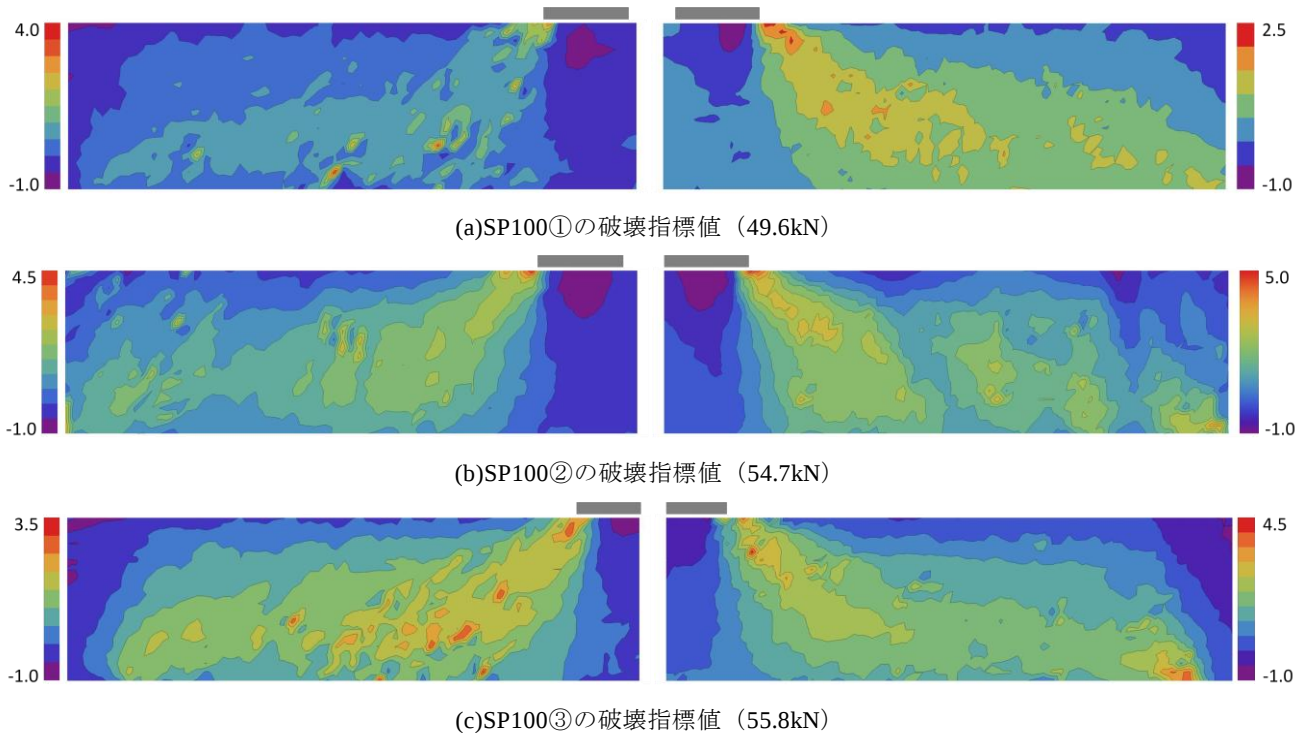


図-10 各供試体の破壊指標値

表-2 GFRP の材料定数⁴⁾

梁軸方向 引張強度 σ_1^T (MPa)	梁軸方向 圧縮強度 σ_1^C (MPa)	梁軸方向 弾性係数 (GPa)	梁軸方向 ポアソン 比	梁周方向 引張強度 σ_2^T (MPa)
397	609	32.1	0.279	22.5
梁周方向 圧縮強度 σ_2^C (MPa)	梁周方向 弾性係数 (GPa)	梁周方向 ポアソン 比	せん断強 度 τ_{12}^U (MPa)	せん断弾 性係数 (GPa)
101	9.10	0.214	25.2	3.32

算定を行った。しかし、図-10 では破壊指標値が 1 より大きな値が破壊箇所に限らず見受けられる。これは、Tsai-Wu 則では応力-ひずみ関係を直線と仮定しているのに対し、実際の GFRP の応力-ひずみ関係は完全な直線にはならないため、荷重が大きくなるほどに理論値から離れていくためではないかと考えられる。この問題は今後改善策を検討していく必要がある。今回の解析結果では値そのものではなく、値の大小を比較・検討する。

図-10 に示されているように、各供試体の載荷板端部において突出した値が出ている。実際に SP100①、②、③の全てで右側載荷板端部より破壊しており、破壊指標値が高い値を示すところから破壊が生じるといえる。しかし左右の値に大きな差は見られず、せん断ひずみ、最小主ひずみと同様に破壊指標値より左右のどちらから破壊するかを特定することは難しい。

5. まとめ

本研究では、GFRP 箱形断面梁 3 体において、曲げ載荷実験を行った。それに伴い載荷板より支点を含む供試体側面の画像解析を行い、損傷・破壊過程につい

て検討した。

画像解析で得られたせん断ひずみ、最小主ひずみの結果より、載荷板端部において局所的なひずみを観察することができ、破壊箇所との関連性が得られた。また破壊指標値の比較・検討から、破壊指標値が高い値を示す箇所から破壊を生じることが明らかとなった。しかしながら、左右の明確な違いは見い出せず、実験で観察された破壊箇所との合致は困難であった。

今後は、今回検討した梁軸方向直ひずみ、せん断ひずみ、最小主ひずみ及び破壊指標値に加え、梁の応力状態についても検討し、画像解析による損傷と破壊過程の検討をさらに進めていく。

謝辞

本研究は、土木学会複合構造委員会 FRP 複合構造研究小委員会の活動の一環としてなされたものである。関係各位に謝意を示す。

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) 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。
- 4) 土木学会：土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ (複合構造レポート 11)，2014。