

(27) GFRP製箱形断面梁における 変形・損傷の画像解析

松本 高志¹・小林 周史²

¹正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)
E-mail:takashim@eng.hokudai.ac.jp

²北海道大学 工学部環境社会工学科 (研究当時)
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

本研究では、GFRP製箱形断面梁の曲げ載荷実験を行い、供試体のせん断スパン側面を対象にした画像解析により変形・損傷過程について検討した。実験では、上フランジに座屈が生じた後に隅角部に破壊が観察された。画像解析により、せん断支間内の主ひずみベクトルが一様な斜め方向にあり、せん断ひずみと最小主ひずみは載荷板端部において局所的な集中を起こしていることが示された。組合せ応力状態を考慮する破壊指標値の算出も行い、特に載荷板端部において局所的に高いことを確認した。

Key Words : GFRP, flexure, deformation, damage, image analysis

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。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に耐食性に優れるという特長がある。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 GFRP 歩道橋が架設された事例があり¹⁾、FRP 歩道橋設計・施工指針 (案)²⁾も刊行されている。

GFRP を構造材料として使用するためには、その変形・損傷・破壊過程を詳しく把握する必要があるが、GFRP の変形は異方性であり破壊は脆性的であるため、これらの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によって、破壊に至るひずみ分布や応力状態の特徴を面的に捉えることにより変形・損傷・破壊過程の把握が可能である³⁾。

本研究では、GFRP 製箱形断面梁に対して 4 点曲げ載荷実験を実施し、供試体のせん断スパン側面を対象に画像解析による変位計測を行った。変位分布よりひずみと主ひずみの算出を行い、別途実施された材料試験の結果

⁴⁾と合わせて、主応力と Tsai-Wu の破壊指標値の算出を行っている。これらにより、面的な変形と損傷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

(1) 供試体

曲げ載荷実験に用いた供試体は、GFRP 製箱形断面梁 (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ている。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。本供試体では補剛材は用いていない。

(2) 載荷方法と計測項目

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 280mm とした。図-1に載荷条件を示す。載荷点と支点には幅 50mm, 高さ 5mm, 奥行き 120mm の鋼製板を用いた。鋼製板と供試体の隙間は石膏により埋めた。載荷点では幅 50mm, 高さ 55mm, 奥行き 200mm の鋼製ブロックを介して載荷を行った。

図-2には変位とひずみの計測位置を示す。変位計 6 点

(図中 L1, L2, D1, D2, D4, D5), 三軸ひずみゲージ 2 点 (図中 1s, 2s), ひずみゲージ 8 点 (図中 3s~10s) により計測を行った。

供試体 3 体の荷重は荷重制御により行い, 約 5kN 毎に荷重を停止して計測を行った。また, 後述する画像撮影も同時に行った。

(3) 実験結果

供試体 No.1, 2, 3 の耐荷力は, 55.4, 50.7, 51.0kN であり, 平均 52.4kN であった。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。破壊した供試体の写真を図-3に示す。

図-4に供試体の荷重-変位関係を示す。変位は載荷点位置のものであり, 変位計 L1 と L2 の平均から変位計 D4 と D5 が示した支点沈下量を案分して差し引いている。終局まで概ね線形挙動を示しているが, 終局近くにおいて剛性の低下が観察された。終局に近づくにつれて断続的な亀裂発音が生じ始め, 進行的に損傷が進んでいたと考えられるが, 目視では損傷は確認できていない。最終的には上記の順序で座屈と破壊が生じた。

3. 画像解析手順

(1) 画像撮影

画像撮影にはデジタル一眼レフカメラ (Nikon D3100) を使用した。画素数は約 1400 万画素 (4608×3072 ピクセル) である。撮影は, ひずみゲージが画像解析に干渉するため, ひずみゲージ貼付面とは反対側の GFRP 梁供試体側面のせん断支間を対象とし, 図-1に示す点線枠内を含むように画像を取得した。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 毎に載荷を停止して画像撮影を行った。以後, 前者を変形前画像と呼び, 後者を変形後画像と呼ぶ。

なお, GFRP 表面は一様な白色であるため, まず黒色のスプレーによって着色し, ラメスプレーによるランダム模様を付与することで, 後述するデジタル画像相関法が適用できるように供試体の準備を行った。

(2) 変位算出

JPEG 形式で保存されたカラー撮影画像の赤成分を 256 階調グレースケール画像に変換し, さらに大津の方法⁹⁾を用いて二値化画像に変換した。

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した。着目点は, 水平方向に 68 点, 鉛直方向に 21 点を設けて, 合計 1428 点とした。

変形前画像の着目点において, 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。切り出し

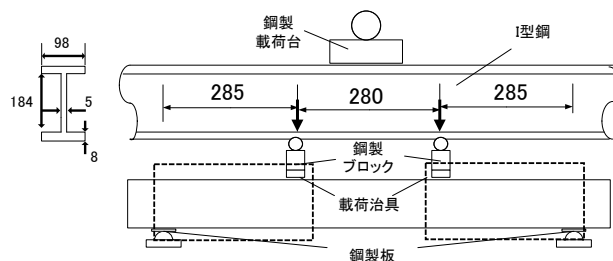


図-1 載荷条件と撮影範囲

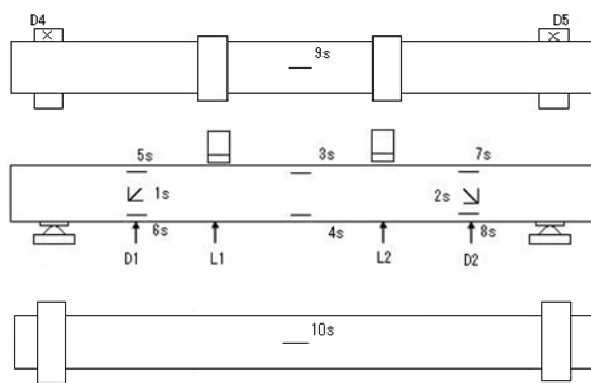


図-2 変位とひずみの計測位置



図-3 破壊状況

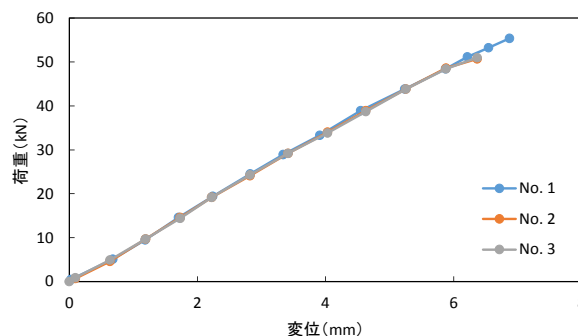


図-4 荷重-変位曲線

た領域の外の値を 0（黒）とし、それぞれ切り出し画像を含む 700×700 ピクセルの画像を作成した（図-5）。ランダム模様の付与においては、変形前後の着目領域画像の合致が複数出ないように行う必要がある。

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。変形前後の着目点の位置より変位量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。ここに、 p ：縦及び横のピクセル数、 $\overline{f(i, j)}$ は $f(i, j)$ の複素共役である。また、 g は

$$g(i+p, j+p) = g(i, j) \quad (2)$$

のように循環するものとする。

相関定理により、式(1)をフーリエ変換すると、右边

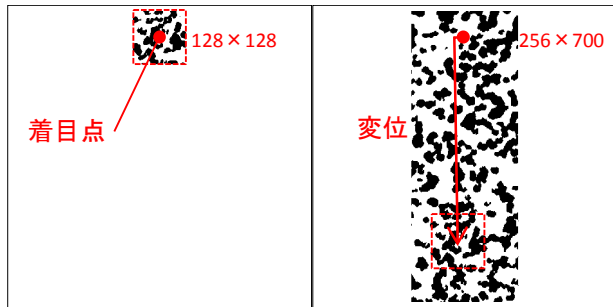


図5 変形前（左）と変形後（右）の着目領域画像
(いずれも階調反転画像)

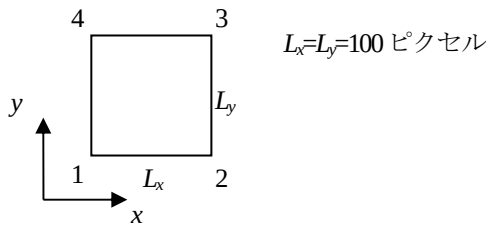


図6 座標系

表1 材料特性

梁軸方向 弾性係数	梁周方向 弾性係数	せん断 弾性係数	ポアソン比 ν_y	ポアソン比 ν_x
E_x (GPa)	E_y (GPa)	G_{xy} (GPa)		
321	901	332	0.279	0.214
梁軸方向 引張強度	梁周方向 圧縮強度	梁周方向 引張強度	梁周方向 圧縮強度	せん断強度
σ_x^T (MPa)	σ_y^C (MPa)	σ_y^T (MPa)	σ_y^C (MPa)	σ_y^U (MPa)
397	609	225	101	252

は $\overline{f}$ 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、相互相関関数を求めた。

さらに、求めた変位量はピクセル単位（整数）であるため、サブピクセル推定によりサブピクセル単位（小数）の変位量を推定している。サブピクセル推定は、周辺を含めた 9 点の相関値に対して楕円放物面近似を行い、最大値を与える座標をあらたな変形後の着目点とした。

(3) 変位補正

既往の研究⁹⁾では、梁軸方向直ひずみについてひずみゲージ値と比較することで精度の検証を行っている。カメラ 1 台を用いて供試体側面と撮像面を平行として撮影を行っているため、供試体に面外の変位が生じた場合に、画像解析では実際とは異なる面内の変位が算出されることを述べている。これには、中空箱形の断面形状とあいまって偏載により、反対側側面のひずみゲージ値と差異が生じた可能性も指摘されている。

面外変位の測定にはカメラを 2 台用いたステレオ画像法を用いて画像解析を行う必要があるが、本研究では変位算出後に、等方拡大もしくは縮小を与える付加変位量を変位量に足し合わせることで補正を行い、以後のひずみ、応力、破壊指標値の計算を行った。

(4) ひずみ算出

得られた補正変位量より、ひずみを求めた。格子状にある 4 つの着目点を図-6 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 方向変位を v_i としたとき、 x 方向（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、

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

最大せん断ひずみは、

$$\varepsilon_{max} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \right)^2 + \frac{\gamma_{xy}^2}{4}} \quad (6)$$

であらわされる。

(5) 応力算出

ひずみより応力を求めるにあたっては、表-1に示す GFRP の材料試験結果⁹⁾を参考にして行った。

平面応力状態における直交異方性弾性体の応力-ひずみ関係は、

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ Q_{xy} & Q_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

であらわされる。ここに、 Q_{ij} ：弾性定数 ($i, j = x, y, s$) であり、

$$Q_{xx} = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \quad (8)$$

$$Q_{yy} = \frac{E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \quad (9)$$

$$Q_{xy} = \frac{\nu_{yx}E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} = \frac{\nu_{xy}E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} = Q_{yx} \quad (10)$$

$$Q_{ss} = G_{xy} \quad (11)$$

である。最大主応力は、

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (12)$$

最小主応力は、

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (13)$$

である。

(6) Tsai-Wu の破壊指標値

梁軸方向直応力、梁周方向直応力、面内せん断応力を考慮した Tsai-Wu の破壊指標値 F は以下に示す式で表される。

$$F = F_1\sigma_x + F_{11}\sigma_x^2 + F_2\sigma_y + F_{22}\sigma_y^2 + F_{66}\sigma_{xy}^2 + 2F_{12}\sigma_x\sigma_y \quad (14)$$

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

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_y^T \cdot \sigma_y^C}, \quad F_{66} = \frac{1}{(\sigma_{xy}^U)^2}, \quad F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11}F_{22}} \quad (15)$$

ここに、 σ_x ：梁軸方向直応力、 σ_y ：梁周方向直応力、 σ_{xy} ：面内せん断応力、 F_1 、 F_{11} 、 F_2 、 F_{22} 、 F_{66} 、および F_{12} ：Tsai-Wu の異方性係数、 σ_x^T ：梁軸方向引張強度、 σ_x^C ：梁軸方向圧縮強度、 σ_y^T ：梁周方向引張強度、 σ_y^C ：梁周方向圧縮強度、 σ_{xy}^U ：面内せん断強度、である。

(7) 誤差の低減

画像解析により得られたひずみ等の分布を等高線図にすると、凹凸状もしくは飛び地状の分布が一部見られ、例えば有限要素解析などで得られる分布図と様相が異なっている。これは、画像解析により得られた変位に誤差が含まれているためと考えられる。誤差の要因として、カメラの画素数による分解能、二値化画像間の誤差、サブピクセル近似の誤差、変形前後の着目領域相関時の回転変位不考慮、着目領域自体の変形不考慮、などが挙げられる。それぞれの要因の影響度の大小については、ここでは検討していない。その代りに Wiener フィルターを使用することで誤差の低減を図った。Wiener フィルターは復元した画像と原画像の平均二乗誤差を最小にするものである。

ここでは、変位、ひずみ、応力、破壊指標値の分布図に用いている。

4. 画像解析の結果

2 章の実験結果に述べたとおり、供試体は補剛材を有していないため、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ている。一方で画像解析はせん断支間のウェブを対象としており、供試体の損傷と破壊機構を必ずしも捉えている訳ではない。この点を踏まえて、以下ではせん断支間ウェブの変形と損傷挙動について画像解析の結果を述べる。

(1) 直ひずみとせん断ひずみ

図-7に破壊直前の梁軸方向ひずみ分布を示す。図中には曲げ支間は含まれていないが、曲げ支間側において中立軸が概ね梁高さ中央にあるのが見て取れる。この中立軸は載荷板位置において上フランジ側に偏り、せん断支間では下フランジ側に徐々に偏って来ている。

図-8は破壊直前のせん断ひずみ分布を示している。せ

せん断支間全体が大きくせん断変形しており、梁高さ中央から載荷板及び支点にせん断ひずみの大きい領域が広がっている。特に局所的に値が大きいのは載荷板のせん断支間側端部であり、 $14,000\mu$ を超えている。画像解析は左右のせん断支間について行っているが、左右いずれかに卓越的な特徴は見られなかった。

(2) 主ひずみ

図-9には最大主ひずみの分布とベクトルを示し、図-10には最小主ひずみの分布とベクトルを示している。ベクトル図は、矢印の傾きで方向を示し、長さで大きさを表している。

最大主ひずみのベクトル図において、曲げ支間内の下フランジ側で梁軸方向となるのが認められるが値は大きくない。一方、せん断支間側では、一様な斜め方向に大きな値が生じており、載荷板のせん断支間側端部を境に明瞭に傾きが変化している。最大値は載荷板端部に近い箇所と、支点端部直上にみられる。

最小主ひずみは最大主ひずみと直交する方向にある。せん断支間から載荷板直下において、最大主ひずみと直交する方向の圧縮が大きく、ウェブ全体がせん断変形をしている様子が観察できる。最大値は載荷板のせん断支間側端部において見られる。

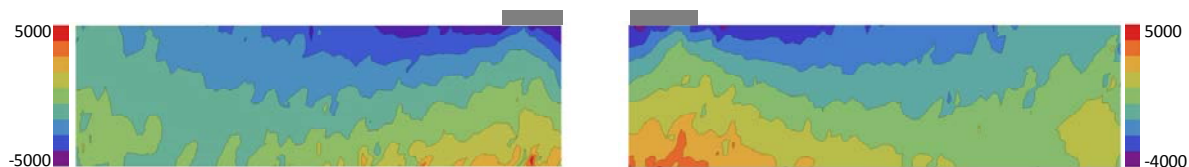


図7 梁軸方向直ひずみ分布

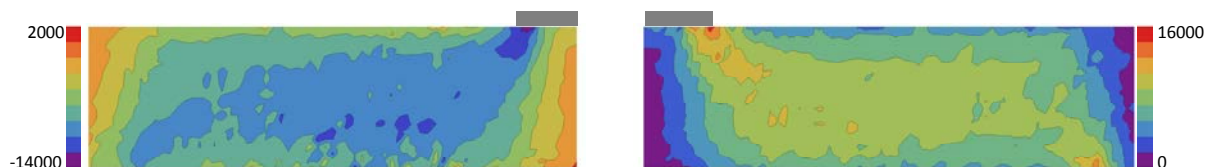


図8 せん断ひずみ分布

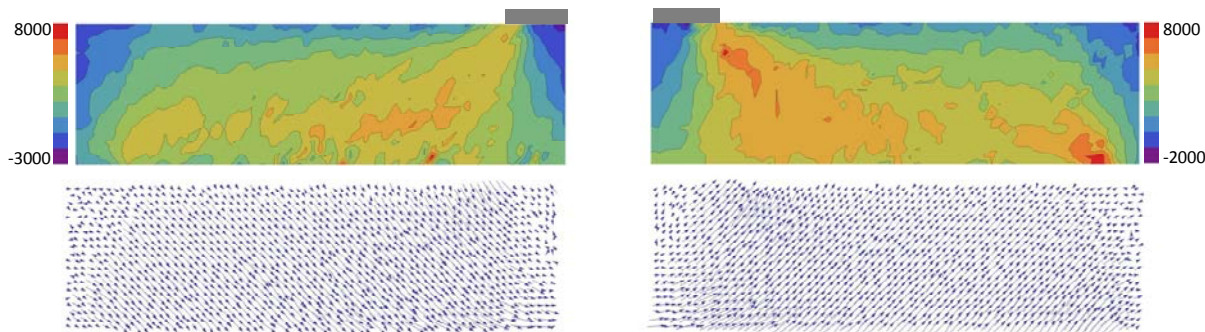


図9 最大主ひずみ分布とベクトル

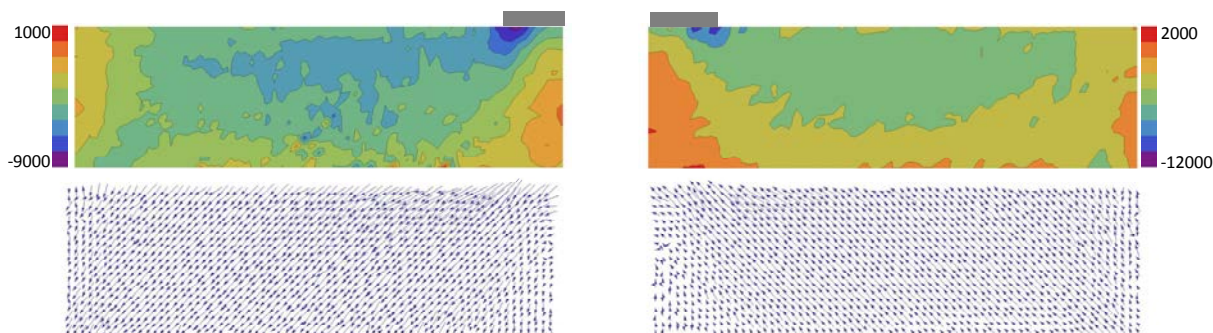


図10 最小主ひずみ分布とベクトル

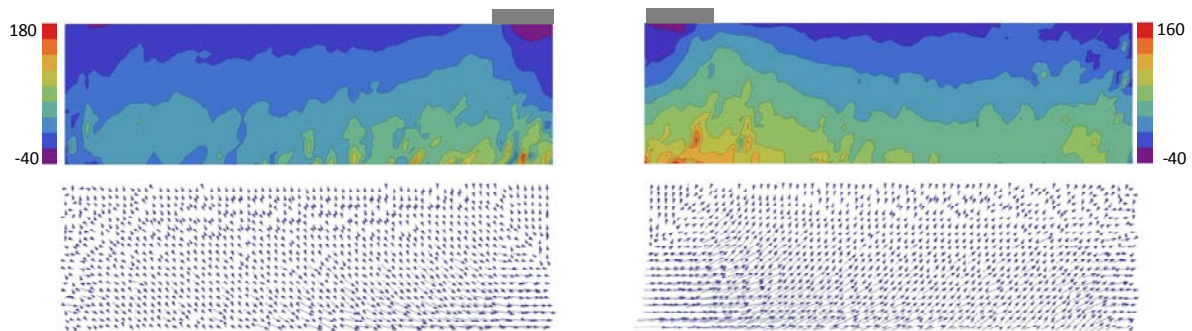


図-11 最大主応力とベクトル

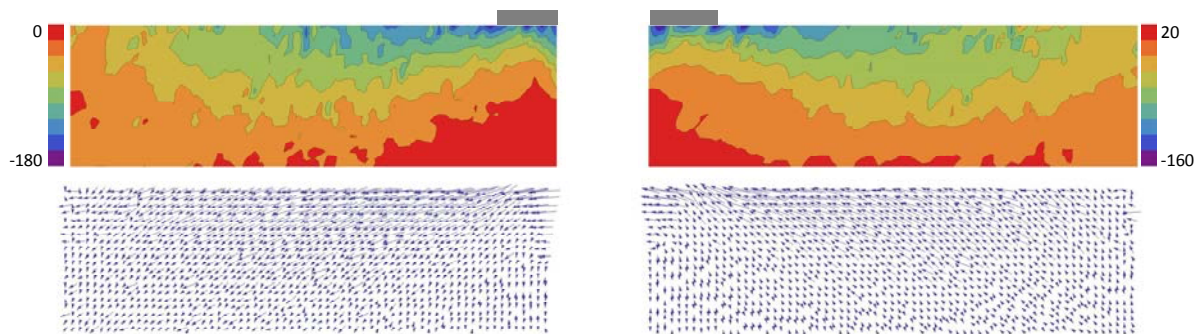


図-12 最小主応力とベクトル

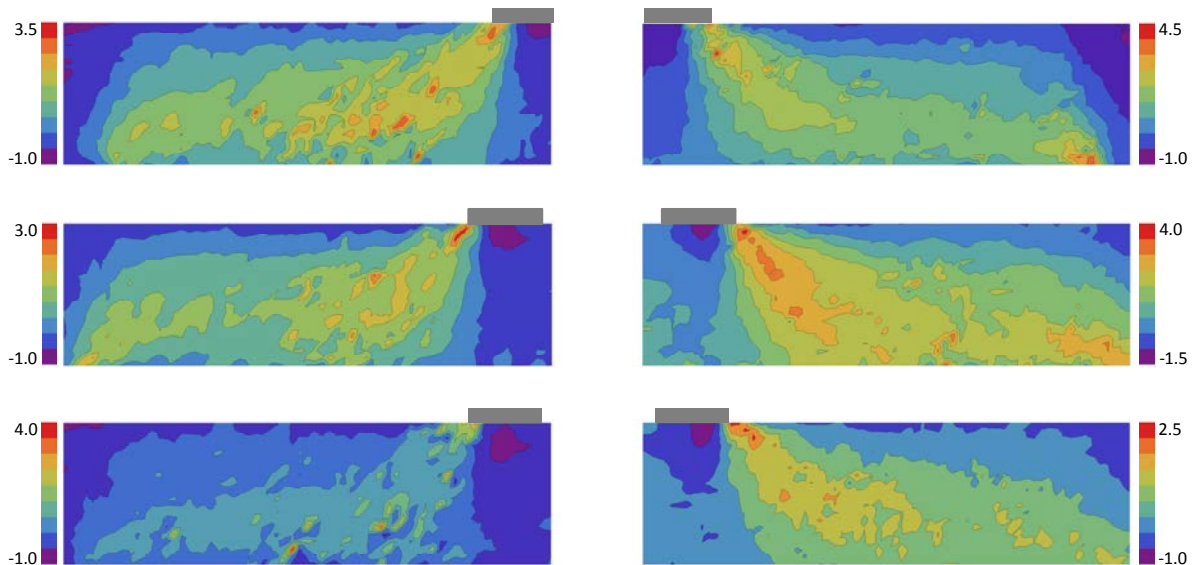


図-13 Tsai-Wuの破壊指標値（上からNo.1, 2, 3）

(3) 主応力

図-11は最大主応力分布とベクトルを、図-12は最小主応力分布とベクトルを示している。

最大主ひずみのベクトルは載荷版端部の付近で傾きが明瞭に変化しているのに対して、最大主応力のベクトルは載荷版とせん断支間との間で徐々に変化している。また、その値は載荷版端部の下フランジ側で大きく、最大

主ひずみと異なりせん断支間では大きくない。

最小主応力は最大主応力と直交する方向にあり、最大主応力と同様に載荷版よりせん断支間にかけて傾きが徐々に変化している。その値は概ね最大主応力値の小さいところで大きく、補完するような分布となっている。

(4) Tsai-Wu の破壊指標値

Tsai-Wu 則を用いて破壊指標値を算出した。Tsai-Wu 則

は直交異方性の積層板において、6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。図-13に破壊直前のTsai-Wuの破壊指標値を示す。

一部の領域で1を超える値が生じているのは、式(14)において強度と比較して応力が過大となっていることによると考えられる。これは、画像解析で得られたひずみより応力を算出する際に、材料線形性を仮定しているために応力が過大になることと、用いている材料試験の強度が部材中の強度より過小になることの双方の可能性はある。

破壊指標値は、せん断支間のウェブ中央高さ付近から載荷版と支点に向かって値の高い領域が広がっている。最も高い値は左か右のいずれかの載荷版のせん断支間側端部に局所的に生じている。

ただし、実験では前述のとおり、載荷版のせん断スパン側上フランジにおいて座屈が生じた後に、最終的には載荷版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。これは、今回の供試体が無補剛であり、箱形断面の潰れによって生じたと考えられる。断面中空部の載荷点と支点に補剛材を設置した場合には、断面潰れは抑制されて図-13の破壊指標値が示す局所的に値の高い箇所から破壊する可能性も考えられる⁷⁾。

6. 結論

本研究では、GFRP製箱形断面梁に対して4点曲げ載荷実験を実施し、せん断スパンの供試体側面を対象に画像解析による変位計測を行った。変位分布よりひずみと主ひずみの算出を行い、別途実施した材料試験の結果と合わせて、主応力とTsai-Wuの破壊指標値の算出を行っている。これらにより、面的な変形と損傷過程の詳細な観察を行うことを本研究の目的とした。

実験では、載荷版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、最終的には載荷版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。3体の供試体は同様の挙動を示した。

画像解析により、せん断支間内の主ひずみベクトルが

一様な斜め方向にあり、せん断ひずみと最小主ひずみは載荷板端部において局所的な集中を示していることが示された。組合せ応力状態を考慮する破壊指標値の算出も行い、特に載荷板端部において局所的に高いことを確認した。

今回の実験供試体は無補剛であったため、画像解析の対象領域が実際の破壊箇所と異なった。今後は補剛もしくは3次元の画像解析を考慮する必要がある。

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における実験と合わせて実施され、同小委員会の委員より供試体および材料試験値を提供頂いた。また、本研究は一部 JSPS 科研費 15H04028 (基盤研究 (B))、材料と構造の統合的アプローチによる CFRP 部材の変形・耐荷性能の向上)の助成で実施された。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 山城和男：国内初 実用 FRP 橋 (横断歩道橋) の整備、しまたてい, No. 14, pp. 22-25, 2000.
- 2) 増淵文男, 澤本武博, 大窪力司, 村上幸一, 片山豊廣, 石井隆, 吉澤清三, 加藤博, 高橋辰雄：GFRP トラス橋の建設—第2連絡橋「野村東太橋」—, ものづくり大学紀要, No. 4, pp. 97-102, 2013.
- 3) 土木学会：複合構造シリーズ 04 FRP 歩道橋設計・施工指針 (案), 土木学会, 2011.
- 4) 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), I_793-I_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.
- 7) 松本高志, 何興文, 林川俊郎：画像解析の高密度化による箱形断面 CFRP 梁の損傷挙動の検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 70, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 17), I_909-I_919, 2014.
- 8) 土木学会：複合構造レポート 11 土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ, 土木学会, 2014.
- 9) 大津展之：判別および最小 2 乗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.

IMAGE ANALYSIS OF BOX SECTION GFRP BEAMS ON THE DEFORMATION AND DAMAGE PROCESSES

Takashi MATSUMOTO and Chikashi KOBAYASHI

This paper presents an image analysis study on the deformation and damage processes of GFRP box section beams under four-point flexure. Image analysis is conducted for the web surface in shear span to obtain displacements and to calculate strains, stresses, and failure index. It is observed that specimens fractured at the web-flange corner after buckling in the flange. Image analysis shows that principal strain vectors are in diagonal direction as a result of uniform shear deformation. It is also shown that shear strain, minor principal strain, and failure index are high locally around the loading plate.