



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	松本, 高志; 何, 興文; 林川, 俊郎
Citation	土木学会論文集A2 (応用力学), 70(2), I_909-I_919 https://doi.org/10.2208/jscejam.70.I_909
Issue Date	2014
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61055
Type	journal article
File Information	70_I_909.pdf



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

松本 高志¹・何 興文²・林川 俊郎³

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 13 条西 8 丁目)

E-mail:takashim@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学助教 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 13 条西 8 丁目)

³フェロー会員 北海道大学教授 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 13 条西 8 丁目)

直交積層の CFRP 箱形断面梁について 4 点曲げ載荷を行い、画像解析により曲げ支間周辺の変位場計測を行った。画像解析では、変位計測点の高密度化を行うとともに、計測領域を拡張することで破壊起点により近接させた。変位より、ひずみ、主ひずみ、主応力、破壊指標値の算出を行い、変形・損傷過程の面的な観察をより詳細に行った。直交積層の梁は、曲げ支間とせん断支間で特徴的なひずみおよび応力分布を呈することを明らかにした。CFRP 梁は脆性的に上フランジとウェブに亀裂を生じて破壊したが、破壊直前の画像解析より載荷板周辺の局所的な分布を捉えることができ、破壊指標値により実験で観察された破壊起点を説明することが概ね可能であった。

Key Words: CFRP, box beam, damage, image analysis

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下 CFRP) は、軽量かつ高強度で耐腐食性の高い複合材料である。土木分野においては、橋脚や桁の補修・補強材としての利用が進んでおり、また、高耐久化・維持管理コスト削減の観点から橋梁の桁などの主要部材としても期待されており、海外では道路橋の建設事例がある¹⁾。

CFRP 部材の終局状態についてメカニズムを理解して合理的な設計を行うためには、積層構成と異方性の影響²⁾¹³⁾を把握する必要があるが、CFRP 部材の終局破壊は脆性的であることにより、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、面的に変位を計測できる画像解析を用いることが有効である¹⁴⁾¹⁶⁾。

既往の研究¹⁶⁾では、積層構成の異なる 2 種類の CFRP による箱形断面梁供試体について 4 点曲げ載荷実験を行い、曲げ支間と一部せん断支間を含む約 100×200mm のウェブ表面に対して、画像解析による変位計測を行い、ひずみと主ひずみの算出を行っている。また、別途実施した材料試験の結果と合わせて、主応力と Tsai-Wu による破壊指標値の算出を行っている。これにより、破壊前のせん断ひずみの局所的な分布が捉えられ、積層構成により主ひずみと主応力の方向に明瞭な違いが出ることが示されている。

しかしながら、実験において 2 種類の積層構成共に、破壊がせん断支間側の載荷板端部で発生したのに対して、破壊指標値は他の部位も含めて高い値を示し、画像解析による破壊指標値により破壊起点を説明することは困難であった。これは、破壊が局所的な現象であり、画像解析の変位計測点密度が不十分であった可能性がある。

本研究では、既往の研究¹⁶⁾と比較して、変位計測点の高密度化を行うとともに、計測領域を拡張することで破壊起点である載荷板周辺により近接させた。この上で同様に、ひずみ、主ひずみ、主応力、破壊指標値の算出を行い、変形・損傷過程の面的な観察をより詳細に行い、破壊機構を明らかにすることを目的とした。

2. CFRP 梁の曲げ載荷実験

曲げ載荷実験の概要を参考文献¹⁶⁾に基づき以下に述べる。

(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 1,000mm, 高さ 100mm, 幅 100mm, 板厚 5mm, 隅角部外側 R 約 5mm, 隅角部内側 R 約 1mm) である (図-1)。

供試体は、VaRTM（Vacuum assisted Resin Transfer Molding）成形により作られた。また、繊維シートは複数の軸が異なる層をステッチにより1組とするもので、繊維が織られていないため屈曲していない1枚の連続基材である。今回の実験では供試体を3体作製した。これらの3体を①、②、③と呼ぶこととする。

積層構成を表-1に示す。供試体は直交積層（Cross-ply, CP）であり、CPにおいて、 $[0/90]_5$ で表される。 $[0/90]_5$ は繊維の向きが0度方向と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。

表-2に供試体の方向別積層数を示す。CPでは、梁軸方向（Longitudinal）と梁周方向（Transverse）の繊維比率が1:1であり直交積層となるように積層構成を定めた。

(2) 荷重方法と計測項目

荷重は4点曲げにより行い、支間長850mm、せん断支間375mm、曲げ支間100mmとした。図-1に荷重条件を示す。荷重点と支点には幅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と周辺は石膏により埋めた。荷重を安定的に上昇させるために、加力経路には剛性の高い石膏を用いている。荷重点では幅50mm、高さ55mm、奥行き200mmの荷重ブロックを用いて荷重した。

また、補剛材として幅60mm、高さ90mm、奥行き30mmの杉材を荷重点と支点の位置に、ゴム系接着剤を用いて接着した。補剛材設置により、既往の実験¹⁵⁾で観察された上フランジ隅角部の損傷が、梁が終局に至るまでに生じないようにするためである。

図-2には変位とひずみの計測位置を示す。変位計9点（図中矢印1～9）、三軸ひずみゲージ8点（図中1s～6s, 9s, 10s）、ひずみゲージ9点（図中7s, 8s, 11s～17s）により計測を行った。既往の実験結果¹⁵⁾に基づき、破壊が予測される荷重板近傍にひずみゲージを配置し、加えてせん断支間中央にも配置した。また、梁軸方向直ひずみを計測するために曲げ支間に7点配置した。

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

(3) 実験結果

CP①、②、③の耐力は、74.4kN、78.5kN、82.4kN、平均78.4kNであった。供試体の破壊形態は、亀裂が観察され、いずれの供試体もせん断支間側の荷重板端部の上フランジとウェブで脆性的に破壊が生じた。CP①、②、③の順に左側、左側、右側の荷重板のせん断支間側で、上フランジとウェブに周方向の亀裂が生じた。破壊した供試体の写真を図-3に示す。

図-4にCP①供試体の荷重－変位関係を示す。変位はせん断支間中央と荷重点位置のものであり、それぞれ変位計1と4の平均及び変位計2と3の平均から、変位計7と8の平均を引くことで、支点沈下の影響を差し引いている。

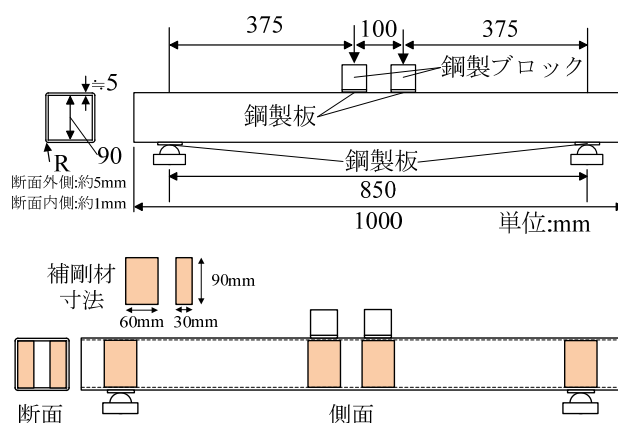


図-1 供試体寸法と荷重条件

表-1 供試体の積層構成

供試体種類	積層構成
CP	$[0/90]_5$

表-2 方向別積層数

供試体種類	梁軸方向 (0°)	梁周方向 (90°)	斜行方向 (±45°)	合計
CP	10	10	0	20

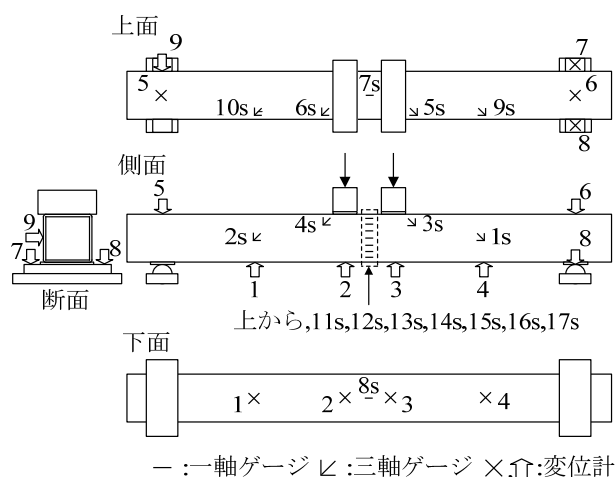
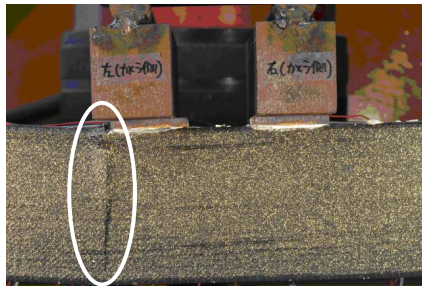


図-2 変位とひずみの計測位置

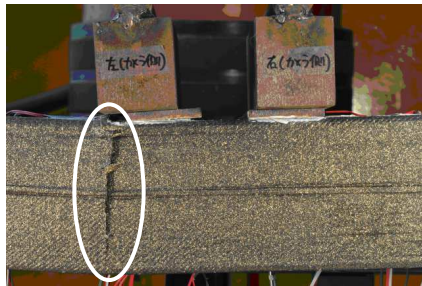
約55kNまで線形挙動を示しているが、これを超えると剛性の低下が観察された。終局に近づくにつれて断続的な亀裂発生音が生じ始め、進行的に損傷が進んでいたと考えられるが、目視では損傷は確認できず、最終的には耐力時点で上フランジとウェブに脆性的に破壊が生じた。

3. 画像解析手順

画像解析手順について、概要と相違点を参考文献¹⁶⁾に基づき以下に示す。



(a) CP①



(b) CP②



(c) CP③

図-3 破壊形態（楕円内が破壊部）

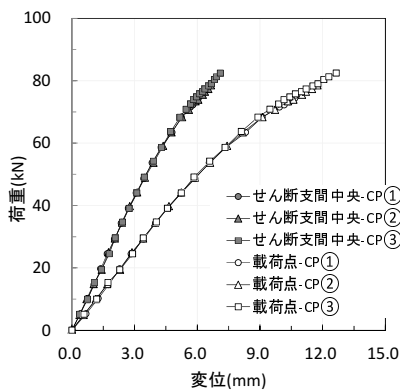


図-4 荷重－変位関係

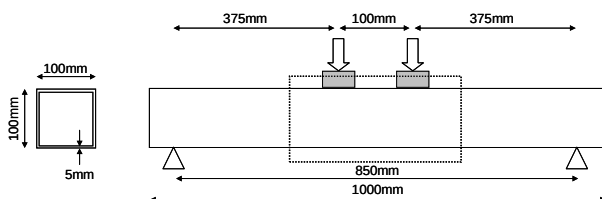


図-5 撮影領域（点線枠内）

(1) 画像撮影

画像撮影は市販のデジタル一眼レフカメラ（Nikon D3100）を用いた。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 CFRP 梁供試体側面の曲げ支間を含むように、図-5に示す点線枠内の約 100×200mm の領域の画像を取得した。まず、載荷前に撮影を行い、載荷開始後に約 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、CFRP 表面は一律な黒色であるため、対象領域を含んだ供試体側面にランダム模様をあらかじめ付与し、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¹⁷⁾を用いて二値化画像に変換した。大津の方法による閾値は変形前画像と変形後画像のそれぞれに設定している。

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した。着目点は、水平方向に 68 点、鉛直方向に 24 点を設けて、合計 1632 点とした。既往の研究¹⁶⁾では、水平方向に 34 点、鉛直方向に 12 点、合計 408 点であった。これにより計測領域は水平及び鉛直方向に 100 ピクセル拡張されている。高密度化における相違点は着目点の数を上記のように設定したことのみである。

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-6）。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、右辺は $\overline{f}$ 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。

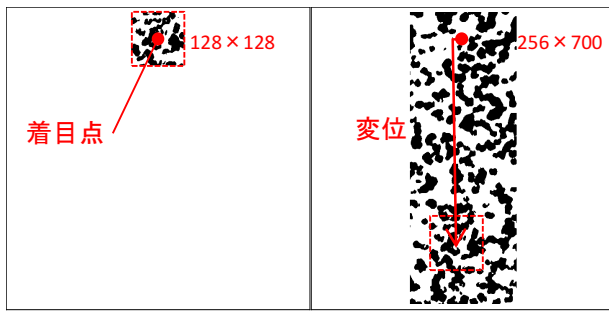


図-6 変形前(左)と変形後(右)の着目領域画像
(いずれも階調反転画像)

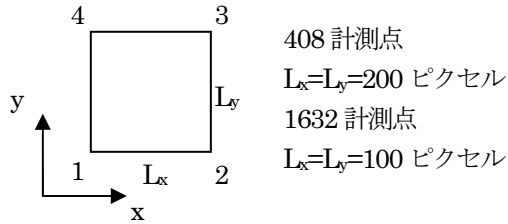


図-7 座標系

表-3 材料特性

梁軸方向 弾性係数 E_x (GPa)	梁周方向 弾性係数 E_y (GPa)	せん断 弾性係数 G_{xy} (GPa)	ポアソン比 ν_{xy}	ポアソン比 ν_{yx}
61.7	60.8	4.2	0.05	0.049
梁軸方向 引張強度 σ_x^T (MPa)	梁軸方向 圧縮強度 σ_x^C (MPa)	梁周方向 引張強度 σ_y^T (MPa)	梁周方向 圧縮強度 σ_y^C (MPa)	せん断強度 σ_{xy}^U (MPa)
1006	352	946	281	67.9

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¹⁶⁾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、供試体の補剛材が中空部を充満してはおらず、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。既往の研究では、

反対面のひずみゲージ値と同様の中立軸位置になることを基準として、画像を等方拡大もしくは縮小させることで、供試体の面外変位を相殺する画像補正を行って、変位算出している。ただし、この拡大もしくは縮小はピクセル単位で行われるため、正確に同様の中立軸位置にすることが難しい場合もあった。本研究では、同様の基準だが変位算出前ではなく後に、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、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-7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、

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

y方向(梁周方向)ひずみは、

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

xy方向せん断ひずみは、

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

最大せん断ひずみは、

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

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-3に示す供試体の材料試験結果¹⁸⁾を用いた。

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、

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

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。以下に文献19)に基づき説明する。

画像を画素数 N 次元のベクトルとする。原画像 x の観測画像を y とすると y の観測モデルは

$$y = Bx + n \quad (16)$$

で与えられる。 B はボケの作用を表す行列、 n は雑音画像を示し、 n と x は無相関であると仮定する。Wiener フィルターは x と次式により与えられる線形推定

$$\hat{x} = Ay \quad (17)$$

の間の平均二乗誤差を最小とするフィルターである。

ここでは、変位、ひずみ、応力、指標値の分布図に用いており、既往の研究¹⁰⁾との相違点となっている。

4. 画像解析の結果

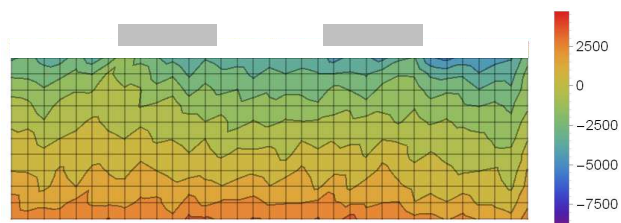
CP①～③は同様の結果を示したため、以下では主に CP①の結果について述べる。

(1) 直ひずみ

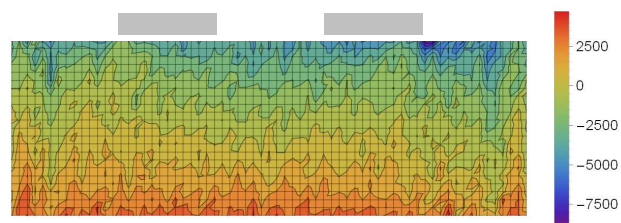
図-8に、CP①の破壊直前の梁軸方向直ひずみ分布について、408 計測点 (既往の研究¹⁰⁾, Wiener フィルターなし)、1632 計測点 (Wiener フィルターなし)、1632 計測点 (Wiener フィルターあり) の場合と、1632 計測点の右側載荷板周辺を示す。408 点から 1632 点に計測点を増加させるに伴い、凹凸状もしくは飛び地状の分布が多く見られるようになる。前述したような要因によりこうした分布が生じているものと考えられるが、Wiener フィルターを使用することでこのような不自然な分布がある程度解消されつつ、右側載荷板のせん断支間側に生じている局所的に大きな圧縮ひずみの特徴は保持されている。ここでは 408 計測点は既往の研究¹⁰⁾であり Wiener フィルターは適用していない。

Wiener フィルターを必要とする計測点の密度については今後の課題である。以降の 1632 計測点の結果では Wiener フィルターを使用した分布を示す。

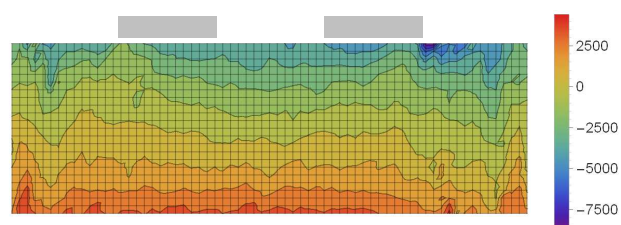
図-9には、CP①～③の曲げ支間での梁軸方向直ひずみを示す (ひずみゲージ 11s～17s)。合わせて、工学的梁理論による箱形断面梁の梁軸方向直ひずみの理論値 (図中 t) と画像解析による値も示している。図では、約 20kN 毎の分布を示しており、それぞれ、74.4kN (CP①)、78.5kN (CP②)、82.4kN (CP③) 時は耐荷力時の分布であり、画像解析も耐荷力時の分布である。それぞれの供試体のほぼ全ての載荷時で、実験値と理論値はよく一致し、耐荷力時まで概ね線形なひずみの分布になっており、平面保持の仮定が成り立っていることがわかるが、圧縮縁と引張縁に



(a)408 計測点



(b)1632 計測点 (Wiener フィルターなし)



(c)1632 計測点 (Wiener フィルターあり)



(Wiener フィルターあり Wiener フィルターなし)

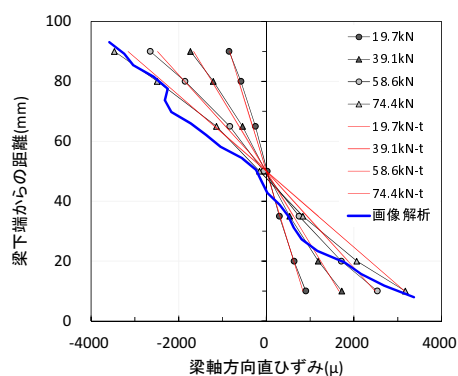
(d)1632 計測点 右側荷板周辺

図-8 破壊直前の梁軸方向直ひずみ分布

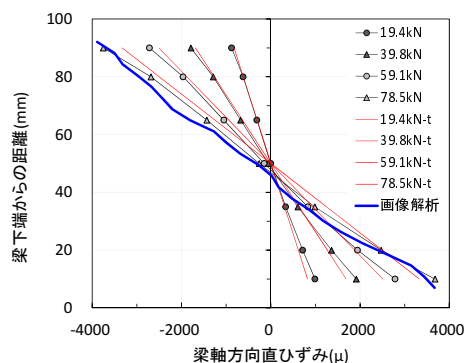
において若干の差異が生じている。画像解析によるひずみ分布は、CP①において差異が生じているものの、CP②とCP③では概ね良好な一致が見られる。CP①の差異は、図-8(c)の曲げ支間中央線で見られるように局所的な凹凸が影響していると考えられる。

(2) せん断ひずみ

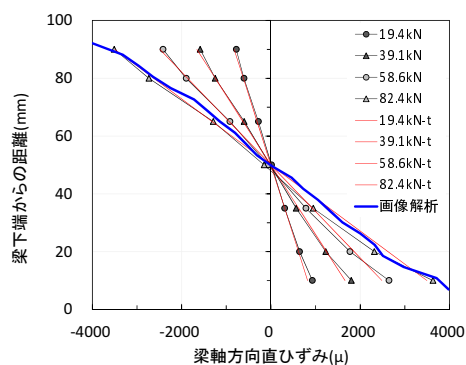
図-10に、408 計測点と 1632 計測点の破壊直前のせん断ひずみを示す。全体的な傾向は同様であり、曲げ支間中央部ではせん断ひずみが生じておらず、せん断支間側のウェブ中央高さ付近に大きなせん断ひずみが生じている。ここより、荷板端部に連なってせん断ひずみの大きい領域が広がっている。計測領域が荷板近くまで拡張されたため、荷板端部で細く局所的に生じているせん断ひずみが明瞭になっている。CP の破壊箇所については、①、②、③の順に左側、左側、右側の荷板のせん断支間側で、上フランジとウェブに亀裂が生じて破壊したが、分布において、左右いずれかに卓越的な特徴は見られなかった。せん断ひずみは、最大で約 20000 μ の値がせん断支間のウェブ中央



(a)CP①



(b)CP②



(c)CP③

図-9 梁軸方向直ひずみ (曲げ支間)

高さ付近で観察されているが、これは材料試験により確認されているせん断破断ひずみを下回っている。

(3) 最大主ひずみ

図-11に、408 計測点と 1632 計測点の CP①の最大主ひずみ分布図・ベクトル図を示す。ベクトル図は、矢印の傾きで方向を示し、長さで大きさを示している。なお、すべて破壊直前の図であり、以下に述べる最小主ひずみ、最大主応力、最小主応力、破壊指標値でも同様の载荷荷重での結果を示している。

分布図は概ね同様の分布を示しているが、荷板近くまで計測領域を広げたことで、局所化した分布がより明瞭に捉えられている。ベクトル図において、曲げ支間内での最大主ひずみは、圧縮側で梁周方向、引張側で梁軸方向とな

り、値は大きくない。一方、せん断支間側では、斜め方向に大きな値が生じており、載荷板端部のせん断支間側を境に明瞭に傾きが変化している。この挙動は、CP が斜行方向繊維を有しないことより生じていると考えられる。

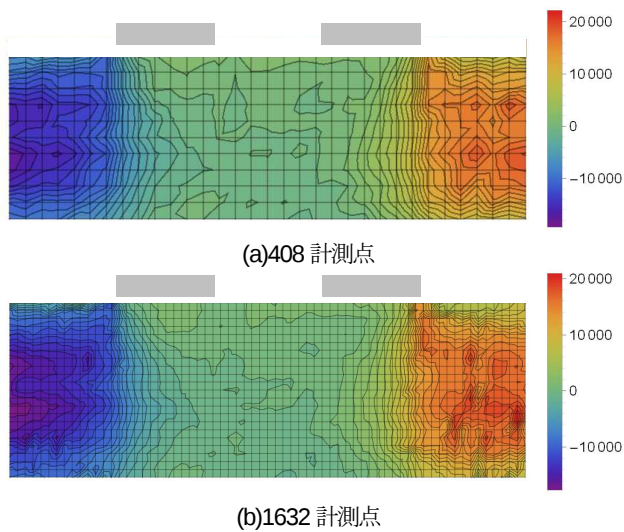


図-10 破壊直前のせん断ひずみ分布

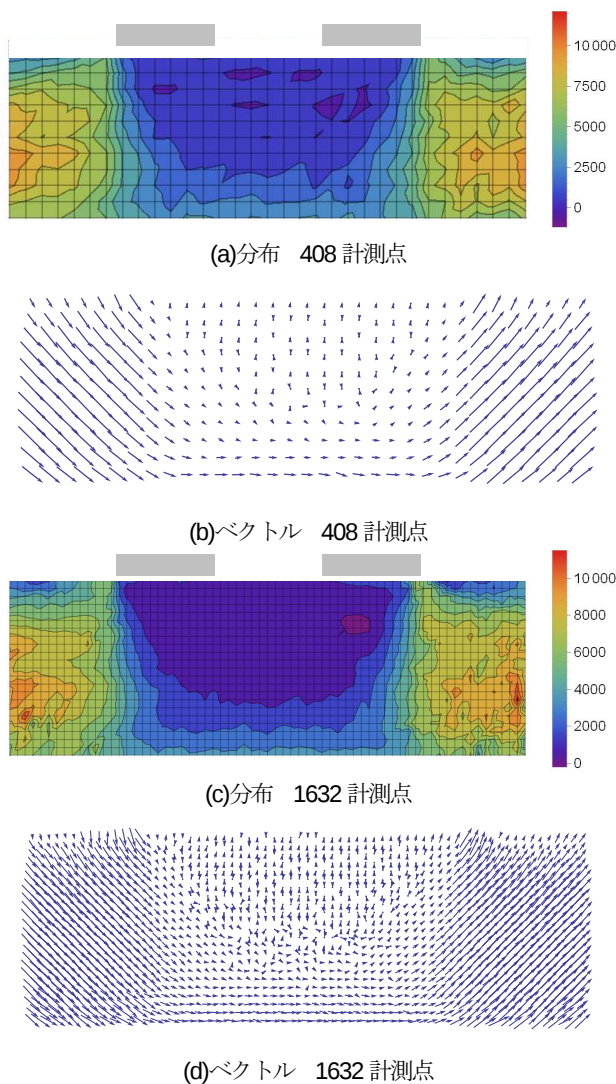


図-11 最大主ひずみ分布図・ベクトル図（破壊直前）

(4) 最小主ひずみ

図-12に、408 計測点と 1632 計測点の CP①の最小主ひずみ分布図・ベクトル図を示す。分布図は全体的に同様の分布だが、右載荷板のせん断支間側端部に局所的に大きな値が明瞭に捉えられている。

最小主ひずみは最大主ひずみと直交する方向にあり、曲げ支間では、圧縮側で梁軸方向、引張側で梁周方向となっているが、値は大きくない。一方で、せん断支間では、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。

(5) 最大主応力

図-13に、408 計測点と 1632 計測点の CP①の最大主応力分布図・ベクトル図を示す。

図-11に示した最大主ひずみの結果と比較すると、最大主ひずみのベクトル図では載荷板のせん断支間側を境に明瞭に傾きが変化しているのに対し、最大主応力のベクトル図ではせん断支間側から曲げ支間内に近づくにつれてベクトルの傾きが滑らかな変化を示している。

1632 計測点の分布図において、曲げ支間引張縁におい

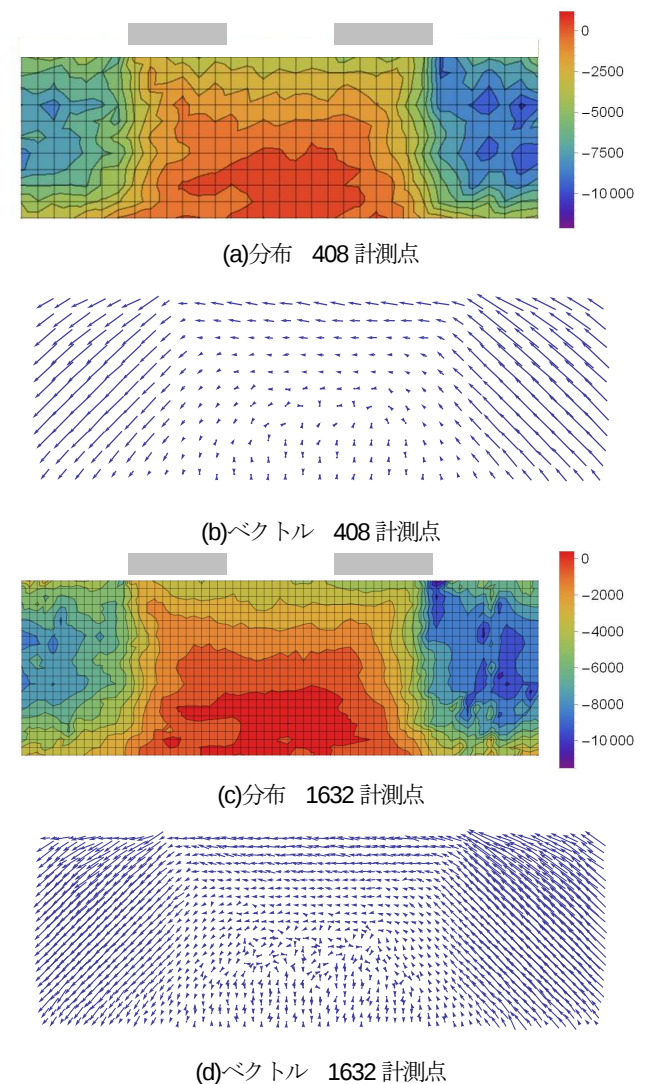


図-12 最小主ひずみ分布図・ベクトル図（破壊直前）

て生じている梁軸方向の主応力は200MPa程度であり、表-3に示した梁軸方向引張強度1006MPaを大きく下回っている。また、両載荷板のせん断支間側端部に梁周方向に大きな最大主応力が生じているが、408計測点の分布図では見られない。左側では250MPa程度に達しているが、これも表-3に示した梁周方向引張強度946MPaを大きく下回っている。

(6) 最小主応力

図-14に、408計測点と1632計測点のCP①の最小主応力分布図・ベクトル図を示す。

図-12に示した最小主ひずみの結果と比較すると、最小主ひずみベクトル図では、載荷板のせん断支間側を境に明瞭に傾きが変化していたが、最小主応力ベクトル図では滑らかな変化を示している。これは、最大主応力と同様である。

1632計測点の分布図において、曲げ支間圧縮縁において生じている梁軸方向の主応力は250MPa程度であった。これは、表-3に示す梁軸方向圧縮強度の352MPaを下回っ

ている。同分布図で、右載荷板のせん断支間側端部に400MPa程度の梁軸方向圧縮主応力が生じている。これは408計測点の分布図では捉えられていない。計測点を増やして計測領域を拡張したことで見えてきたものと考えられる。この局所的な応力は強度を上回っているが、梁の全体的な破壊はまだ生じていない。

(7) 破壊指標値

Tsai-Wu則を用いて破壊指標値を算出する。この破壊規準は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-15に、408点と1632点の破壊直前の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(15)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、応力算出の際に、画像解析の変位よりひずみを算出し、別途実施された材料試験による弾性定数を用いることで

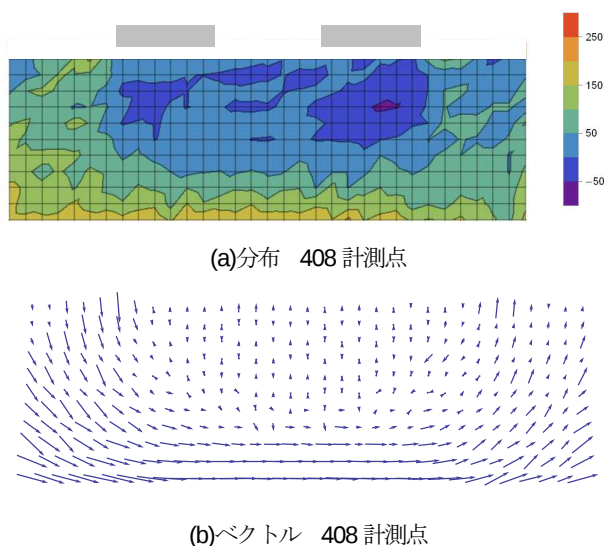


図-13 最大主応力分布図・ベクトル図 (破壊直前)

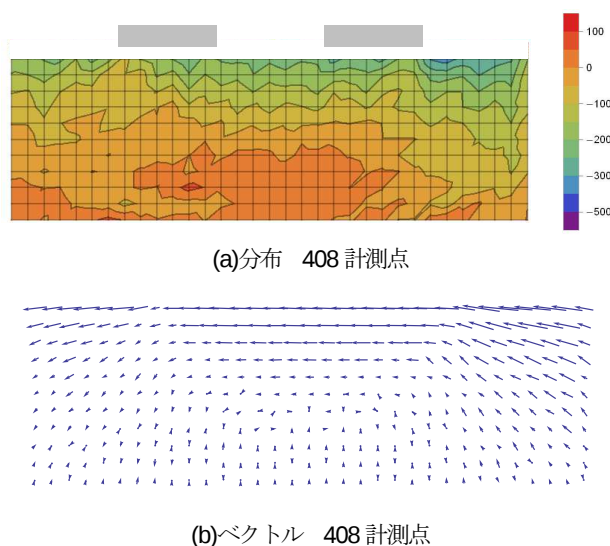


図-14 最小主応力分布図・ベクトル図 (破壊直前)

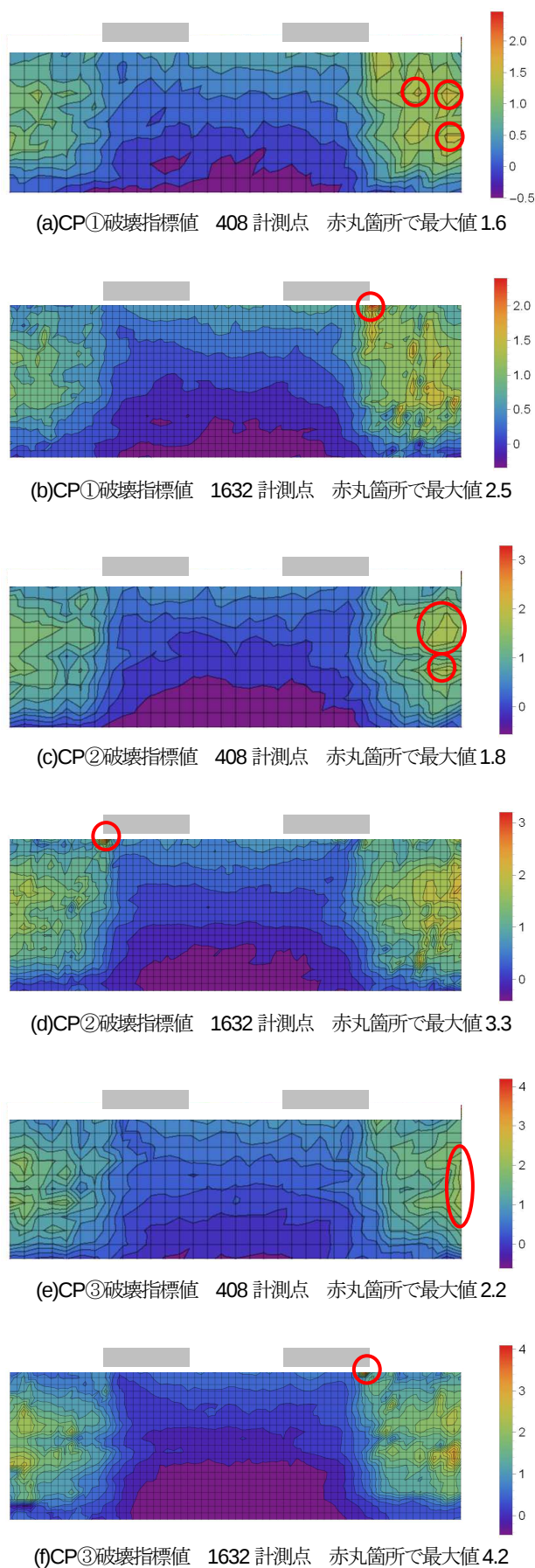


図-15 CP 供試体の破壊指標値（破壊直前）

応力を算出しているため、材料非線形性により応力が過大になっているためと考えられる。最大破壊指標値が CP① < CP② < CP③ となるのは、耐荷力の差異に伴い特にせん断ひずみの非線形性の影響が強く表れていると考えられる。

また、材料試験による強度と部材中の強度に相違がある可能性も避けられない。材料試験では一軸載荷状態であり、部材中は組み合わせ載荷状態であるが、組み合わせ負荷の影響は Tsai-Wu の破壊規準により考慮されているものの、抵抗である強度は材料試験の小寸法試験体において繊維の切断や方向不整により小さくなる可能性もある。

408 計測点においては、最も高い値をせん断支間のウェブ中央高さ付近に見ることができ、載荷板端部へとつながっていく分布が見られる。しかしながら、載荷板端部での値は少し低いため、実験で観察された載荷板端部を破壊起点とすることは困難である。

一方で、1632 計測点においては、せん断支間のウェブ中央高さ付近に同様に高い値の分布が見られるが、最も高い値は左か右のいずれかの載荷板のせん断支間側端部に局所的に生じている。ここでは破壊起点が載荷板端部であることが明瞭であり、ウェブ中央高さ付近が起点である可能性は低いと言える。

CP①では、右側載荷板せん断支間側端部において、梁周方向引張応力（図-13）および梁軸方向圧縮応力（図-14）の組み合わせにより、Tsai-Wu の破壊指標値が高くなっていることが分かる。

実験において、CP①、②、③の破壊は左、左、右で生じているのに対して、図-15は右、左、右で破壊指標値が高い。CP①は異なる結果となったが、強度の局所的なばらつきなどによることも考えられる。今回は、3体のうち、過半の供試体について破壊起点が説明できたことから、破壊直前の画像解析から破壊起点を予測できる可能性があることを示している。

5. 結論

本研究では、直交積層 CFRP で作られた箱形断面梁供試体の 4 点曲げ載荷実験を対象に画像解析を行った。

梁供試体は、梁軸方向（L）、梁周方向（T）、斜行方向（D）の繊維層比率を 1:1:0 とした直交積層の CP（Cross Ply）として製作した。曲げ耐力は平均 78.4kN であった。最終的な破壊はせん断支間側の載荷板端部で発生し、上フランジとウェブの脆性的な破壊が観察された。

曲げ支間と一部せん断支間を含む広範囲のウェブ表面に対して画像解析により変位計測を行った。既往の研究より変位計測点の高密度化を行うとともに、計測領域を拡張することで破壊起点となる載荷板周辺に近接させた。

画像解析により得られた梁軸方向直ひずみについて、ひずみゲージと比較し、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、変位を補正した。

また、ひずみ等の分布に生じる凹凸状もしくは飛び地状の等高線を生じさせる誤差を低減するために Wiener フィルターを用いた。以上を踏まえて、計測された変位に基づきひずみと主ひずみを算出し、材料試験結果と合わせて主応力と Tsai-Wu の破壊指標値を算出した。

梁軸方向直ひずみは対象領域内で梁理論通りの線形分布をしており、ひずみゲージと良好な一致が見られた。せん断ひずみにおいては、載荷板端部に局所的に大きな値を明瞭に捉えることができた。

CP は斜行方向の繊維層を有しないため、せん断支間での主ひずみが大きく、主ひずみの方向がせん断支間と曲げ支間で明瞭に異なった。主応力は圧縮縁と引張縁で大きく、主応力の方向に滑らかな変化が見られた。主応力は載荷板端部において局所的に大きな値を捉えた。

Tsai-Wu の破壊指標値は、主応力の局所的に高い値と相まって、載荷板端部で高い値を示した。一方で、計測点の密度が低い場合には、せん断支間のウェブ中央高さ付近で最も高い値を示しており、実験で見られた破壊とは異なる。指標値が示す破壊起点は概ね実験結果と一致しており、破壊直前の画像解析から予測できる可能性があることを示している。

謝辞：供試体作成についてはクラボウ（株）のご厚意によりなされた。また、本研究は JSPS 科研費 24560575（基盤研究（C）、CFRP の変形・耐荷メカニズム解明に向けた材料と構造の統合的アプローチ）の助成を受けて実施された。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) Gutiérrez, E., Primi, S., Mieres, J. M. and Calvo, I. : Structural testing of a vehicular carbon fiber bridge: quasi-Static and short-term behavior, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 13, No. 3, pp. 271-281, 2008.
- 2) 稲田裕, 吉武謙二, 杉山博一, 後藤茂, 石塚与志雄, 松本高志, 鈴川研二, 松井孝洋 : CFRP を用いた合成セグメントの強度特性に関する実験的検討, 土木学会, 第 62 回年次学術講演会講演概要集, CS15-009, 2007.
- 3) 木戸英伍, 松本高志, 櫻庭浩樹, 真砂純一, 林川俊郎 : 曲げ載荷実験における箱形断面 CFRP 梁の強度・変形特性の把握, 土木学会北海道支部論文報告集, 土木学会, Vol. 66, A-3, 2010.
- 4) 櫻庭浩樹, 松本高志, 木戸英伍, 真砂純一, 林川俊郎 : 45° 方向の繊維配向を有した箱形断面 CFRP 梁の変形挙動の把握, 土木学会北海道支部論文報告集, 土木学会, Vol. 66, A-4, 2010.
- 5) Sakuraba, H., Matsumoto, T. and Hayashikawa, T. : A study on the flexural behavior of CFRP box beams with different laminate structures, *Keynote Lectures and Extended Abstracts of the Twelfth East Asia-Pacific Conferences on Structural Engineering and Construction (EASEC-12)*, Hong Kong SAR, China, EASEC12-38, pp. 539-540, 2011.

- 6) 小野紘一, 杉浦邦征, 北川淳一, 小牧秀之, 林誠 : プレーディング成形法による H 形断面 CFRP 部材の圧縮・曲げ強度特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 49A, pp. 105-113, 2003.
- 7) 杉浦邦征, 北川淳一, 大島義信, 小野紘一, 小牧秀之, 北根安雄 : CFRP-コンクリート合成桁の曲げ挙動特性に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 51A, pp. 1397-1404, 2005.
- 8) 松本高志, 櫻庭浩樹, 林川俊郎, 稲田裕, 吉武謙二, 杉山博一, 後藤茂, 石塚与志雄, 鈴川研二, 松井孝洋 : 箱形断面 CFRP 梁の FEM 解析と耐荷力推定, 土木学会北海道支部論文報告集, 土木学会, Vol. 64, A-48, 2007.
- 9) 松本高志, 櫻庭浩樹, 林川俊郎, 稲田裕, 吉武謙二, 杉山博一, 後藤茂, 石塚与志雄, 鈴川研二, 松井孝洋 : CFRP 梁の耐荷力推定式の検討と変形特性の把握, 土木学会北海道支部論文報告集, 土木学会, Vol. 65, A-50, 2009.
- 10) 櫻庭浩樹, 松本高志, 林川俊郎, 稲田裕, 吉武謙二, 杉山博一, 後藤茂, 石塚与志雄, 鈴川研二, 松井孝洋 : 箱形断面 CFRP 梁の曲げ載荷における中詰めコンクリートの効果の解析的検討, 第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 37-42, 2009.
- 11) 櫻庭浩樹, 松本高志, 林川俊郎, 稲田裕, 吉武謙二, 杉山博一, 後藤茂, 石塚与志雄, 鈴川研二, 松井孝洋 : 曲げと軸力作用下におけるコンクリート充填箱形断面 CFRP 梁の変形および耐荷特性の解析的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 56A, pp. 979-990, 2010.
- 12) 櫻庭浩樹, 松本高志, 稲田裕, 松井孝洋 : CFRP・コンクリート合成梁の軸力作用下の曲げ挙動に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 32, No. 2, pp. 1297-1302, 2010.
- 13) 杉浦邦征, 三木亮二, 小野紘一, 小牧秀之 : 炭素繊維強化複合材料からなる構造部材の強度特性に関する解析的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 50A, pp. 17-23, 2004.
- 14) 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, 土木学会, Vol. 66, A-2, 2010.
- 15) 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), 土木学会, Vol. 67, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 14), I_793-I_800, 2011.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 櫻庭浩樹, 松本高志, 堀本歴, 林川俊郎 : VaRTM 成形による箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動に及ぼす積層構成の影響, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 58A, pp. 946-958, 2012.
- 19) 電子情報通信学会 : 知識ベース, 1 群 5 編 5 章, 電気情報通信学会, 2011.

(2014.6.20 受付)

STUDY ON THE DAMAGE PROCESSES OF CFRP BOX BEAMS WITH HIGH DENSITY IMAGE ANALYSIS

Takashi MATSUMOTO, Xingwen HE and Toshiro HAYASHIKAWA

This paper presents an image analysis on the flexural behaviors of CFRP box beams made of cross ply laminate. Image analysis is conducted in order to measure the deformation field around the center span of CFRP box beams, and strains, principal strains, principal stresses, and Tsai-Wu failure index are calculated consequently. In the present study, four times more measurement points are employed, and measurement area is enlarged, compared to a previous study. This high density image analysis leads to a clear picture of localized features of strains and stresses around a fracture origin. It is successfully shown that Tsai-Wu failure index obtained through image analysis explains possible fracture origins that mostly match with the origins observed experimentally.