HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	松本, 高志; 岡松, 広忠; 櫻庭, 浩樹
Citation	土木学会論文集A2（応用力学）, 68(2), I_691-I_702
Issue Date	2012
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/53723
Type	article
File Information	15-0691.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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.

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

Image analysis on flexural behaviors of CFRP box beams with different laminate structures

松本　高志*・岡松　広忠**・櫻庭　浩樹**

Takashi Matsumoto, Hirotada Okamatsu and Hiroki Sakuraba

*Ph.D. 北海道大学准教授 大学院工学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）
**修士（工学） 北海道大学 大学院工学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）

This paper presents an image analysis on the flexural behaviors of CFRP box beams with two different CFRP laminate structures: quasi isotropic (QI) and cross ply (CP) 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 index are calculated consequently. QI and CP showed a different flexural response due to their laminate structures, but both showed a final brittle failure in upper flange and web. Strains, principal strains, and principal stresses clearly show characteristic distributions around the center span, and some of them indicate local concentrations near loading points. Tsai-Wu index explains fracture origin location possibly for QI, but it does not for CP.

Key Words: *CFRP, box beam, flexure, laminate structure, image analysis*
キーワード：CFRP，箱形断面梁，曲げ，積層構成，画像解析

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー（CFRP）は，軽量かつ高い強度を有し耐食性も高い複合材料である．CFRP は，その材料特性を利点として，航空宇宙産業，自動車，スポーツ製品などで用いられている．社会基盤用途においても，安全性と耐久性を確保できる構造材料として有望であり，海外では高速道路のオーバーブリッジとして建設された事例もある[1)]．

CFRP 構造物は薄肉部材により構成されることになるが，繊維積層構成の違いによる CFRP の剛性と強度が梁部材の変形と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[2)-7)]．また，等方性材料とは損傷・破壊挙動が異なることが実験において観察されているが，これは積層複合材料である CFRP の異方性によることが FEM 解析により示されている[5), 8)-13)]．

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．既往の研究では，画像解析と FEM を合わせたハイブリッド手法により混合モード破壊の応力拡大係数の評価や CFRP 積層板の応力解析が行われている[14)15)]．また，CFRP 梁部材については，破壊前のひずみ分布の特徴を捉えられることが示されている[16)17)]．

しかしながら既往の研究[17)]では画像解析の範囲は約 30×20mm の領域に限られており，以前の実験的知見より破壊の可能性の高い箇所に撮影範囲を設定せざるを得なかった．終局的な破壊は局所的であるものの，梁の曲げに伴う変形挙動をより広範囲にとらえて損傷・破壊過程との関係を理解するために，より広範囲の領域を対象とする必要がある．

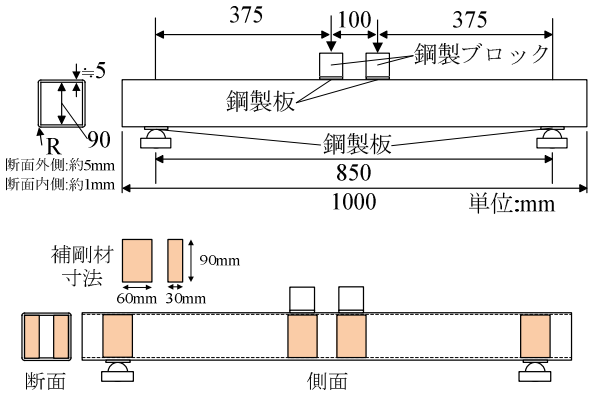
本研究では，積層構成の異なる 2 種類の CFRP により箱形断面梁供試体を 3 体ずつ作成し，4 点曲げ載荷実験を行った．箱形断面の CFRP 梁は既往の研究により橋梁への適用が検討されている[1)7)18)]．ここでは，中空箱形断面の基本的な挙動の把握として，ひずみゲージと変位計による計測に加えて，曲げ支間と一部せん断支間を含む約 100×200mm の広範囲の領域に対して，画像解析による変位計測を行い，ひずみと主ひずみの算出を行った．また，別途実施した材料試験の結果を用いて応力と主応力の算出を行い，Tsai-Wu による破壊指標値の算出も行った．これらにより，変形・損傷過程の面的な観察を行い，画像解析により積層構成が曲げ挙動に及ぼす影響を詳細に把握することを本研究の目的とした．

2. CFRP 梁の曲げ載荷実験

2.1. 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．繊維シートを成形型に所定の構成で設置し，真空バックを被せて密閉状態として減圧し，その後樹脂を含浸させて硬化成形している．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 2 種類の積層構成の供試体を 3 体ずつ作製した．

積層構成を表－1 に示す．2 種類の供試体を QI（Quasi-Isotropic）と CP（Cross-Ply）と称し，3 体を①，②，③と呼ぶこととする．QI において，$[0/45/-45/90]_5$ 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．表－2に各供試体の方向別積層数を示す．QI と CP で各層の目付量を変えているために，合計積層数が異なっている．QI では，梁軸方向（Longitudinal），梁周方向（Transverse），斜行方向（Diagonal）の繊維比率が 1:1:2 であり疑似等方性となり，CP では L:T が 1:1 であり直交積層となるように積層構成を定めた．



図－1　供試体寸法と載荷条件

表－1　供試体の積層構成

供試体種類	積層構成
QI	$[0/45/-45/90]_5/[90/-45/45/0]_5$
CP	$[0/90]_5/[90/0]_5$

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
QI	10	10	20	40
CP	10	10	0	20

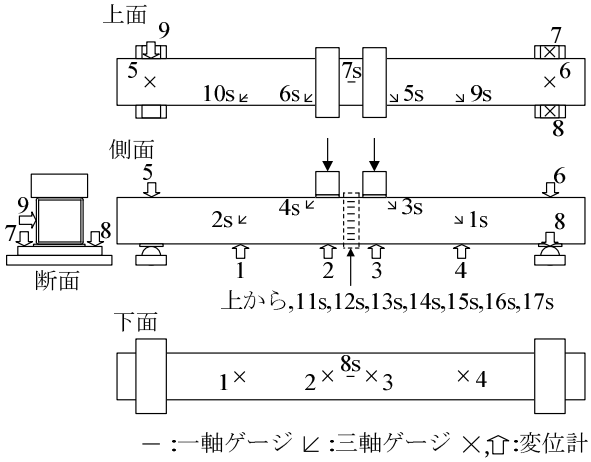
2.2. 載荷方法と計測項目

載荷は 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 の載荷ブロックを用いて載荷した．

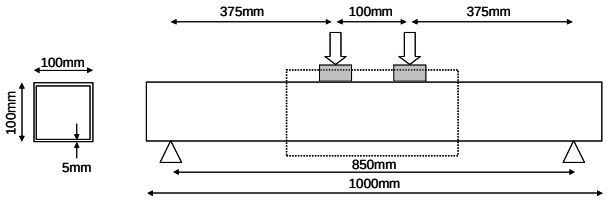
また，補剛材として幅 60mm，高さ 90mm，奥行き 30mm の杉材を載荷点と支点の位置に，ゴム系接着剤を用いて接着した．補剛材設置により，既往の実験[17]で観察された上フランジ隅角部の損傷が，梁が終局に至るまでに生じないようにするためである．

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～4s，5s，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[1]に基づき，破壊が予測される載荷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．

載荷は荷重制御により行った．約 5kN 毎に載荷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．



図－2　変位とひずみの計測位置



図－3　撮影領域（点線枠内）

3. 画像解析手順

3.1. 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．レンズは焦点距離 90mm の単焦点マクロレンズ（TAMRON　SP AF90mmF/2.8 Di MACRO1:1）を用いた．撮影は，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－3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 表面は一様な黒色であるため，対象領域を含んだ供試体側面に金色のラメを吹き付けるスプレーにより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．既往の研究[17]では約 30×20mm の領域を対象としたが，本研究では画素数の高いカメラを用いるとともに撮影領域の見直しをすることで，約 100×200mm の領域を対象としている．変位の計測精度は画素数と撮影領域により変わるが，その関係式などについては検討しておらず，今後の課題である．

3.2. 二値化

JPEG 形式で保存された撮影画像を 256 階調グレースケール画像に変換し，さらに大津の方法[19]を用いて二値化画像に変換した．大津の方法は判別分析により閾値を決める方法である．グレースケール画像の輝度値ヒストグラムにおいて，各輝度値を閾値としたときに分けられる二つのクラスのクラス間分散を計算し，それが最大となる輝度値を最適な閾値とする方法である．変形前画像について大津の方法により閾値を決定し，照明条件などに大きな変化がないことから，変形後画像についても同じ閾値を用いた．以下に手順を簡潔に示す．

入力画像のピクセル数が N で階調が m であり，輝度値 i のピクセル数が n_i であるとき，

$$N = \sum_{i=0}^{m} n_i \tag{1}$$

である．輝度値 i の画素の出現確率は，

$$p(i) = \frac{n_i}{N} \tag{2}$$

である．

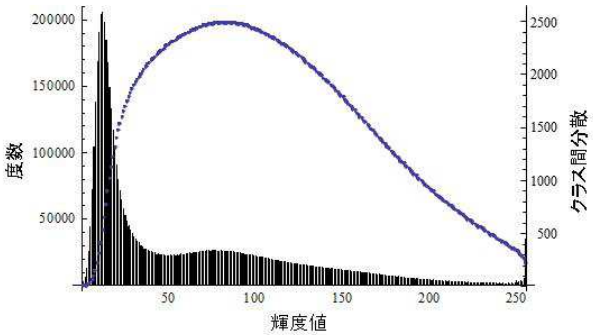
今，輝度値ヒストグラムを輝度値 k で二つのクラス C_0 と C_1 に分けると，それぞれのクラスの発生確率 ω_0 と ω_1 は，

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{k} p(i) = \omega(k) \tag{3}$$

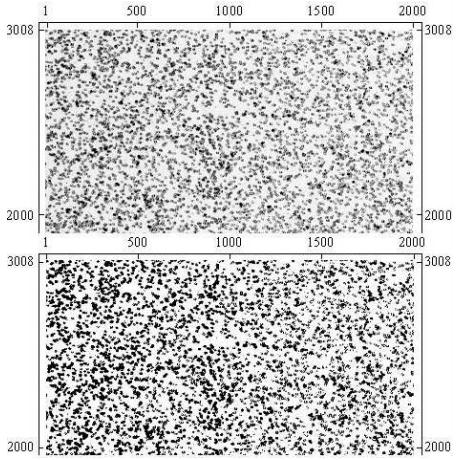
$$\omega_1 = \sum_{i=k+1}^{m} p(i) = 1 - \omega(k) \tag{4}$$

となり，平均値 μ_0 と μ_1 は，

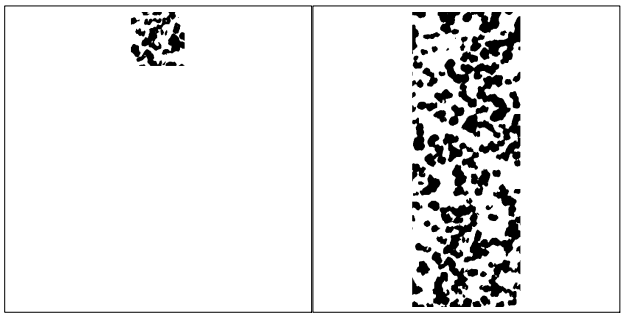
$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{k} ip(i|C_0) = \sum_{i=0}^{k} \frac{ip(i)}{\omega_0} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)} \tag{5}$$



図－4　輝度値の度数（左縦軸）と
クラス間分散（右縦軸）



図－5　グレースケール画像（上）と
二値化画像（下）（いずれも階調反転画像）



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）

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^{m} ip(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^{m} \frac{ip(i)}{\omega_1} = \frac{\mu - \mu(k)}{1-\omega(k)} \qquad (6)$$

となる．ここで，

$$\mu = \sum_{i=0}^{m} ip(i) = \omega_0\mu_0 + \omega_1\mu_1 \qquad (7)$$

$$\mu(k) = \sum_{i=0}^{k} ip(i) \qquad (8)$$

である．

二つのクラス間の分散は以下のとおりになる．

$$\sigma^2(k) = \frac{(\mu\omega(k) - \mu(k))^2}{\omega(k)(1-\omega(k))} \qquad (9)$$

ここで，$\sigma^2(k)$が最大となる k を閾値として決定する．

以上の手順を用いて求めた輝度値の度数（ヒストグラム）とクラス間分散の一例を図－4に示す．また，決定された閾値を用いて二値化された画像を，グレースケール画像とともに一例を図－5に示す．

3.3. 画像相関

二値化画像において，200 ピクセル間隔で格子状に着目点を設定する．着目点は，x 方向に 34 点，y 方向に 12 点を設けて，合計 408 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．これは領域を変形後画像全体とすると計算コストがかかるためである．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）．

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

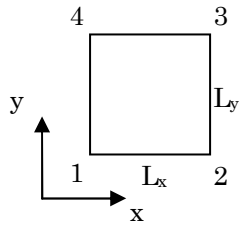
$$(f * g)(k,l) = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} \overline{f(i,j)}\, g(i+k, j+l) \qquad (10)$$

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

$$g(i+p, j+p) = g(i,j) \qquad (11)$$

のように循環するとする．

相関定理により，式(10)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－7　座標系

3.4. サブピクセル推定

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．

サブピクセル推定は，最大相関値が得られた位置（a, b）と，隣接する（a-1, b-1），（a-1, b），（a-1, b+1），（a, b-1），（a, b+1），（a+1, b-1），（a+1, b），（a+1, b+1）の位置を合わせた合計 9 箇所での相関値について，楕円放物面で近似を行い，最小点となる位置（a', b'）をサブピクセル単位で求め，これより変位量を求めた．

3.5. ひずみ算出

得られた変位量より，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，

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{L_x}\left(\frac{u_2+u_3}{2} - \frac{u_1+u_4}{2}\right), \qquad (12)$$

y 方向（梁周方向）ひずみは，

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{L_y}\left(\frac{v_3+v_4}{2} - \frac{v_1+v_2}{2}\right), \qquad (13)$$

xy 方向せん断ひずみは，

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2L_y}\left(\frac{u_3+u_4}{2} - \frac{u_1+u_2}{2}\right) + \frac{1}{2L_x}\left(\frac{v_2+v_3}{2} - \frac{v_1+v_4}{2}\right), \qquad (14)$$

最大せん断ひずみは，

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{xy}^2}\ , \qquad (15)$$

であらわされる．

3.6. 応力算出

ひずみより応力を求めるにあたっては，供試体の材料試験結果[20]を用いた．平面応力状態における直交異方性弾性

体の応力ーひずみ関係は,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ Q_{xy} & Q_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{16}$$

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

$$Q_{xx} = \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \tag{17}$$

$$Q_{yy} = \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \tag{18}$$

$$Q_{xy} = \frac{\nu_{yx}E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} = \frac{\nu_{xy}E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} = Q_{yx} \tag{19}$$

$$Q_{ss} = G_{xy} \tag{20}$$

である．最大主応力は,

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau^2_{xy}} \tag{21}$$

最小主応力は,

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau^2_{xy}} \tag{22}$$

である.

3.7. Tsai-Wu の破壊指標値

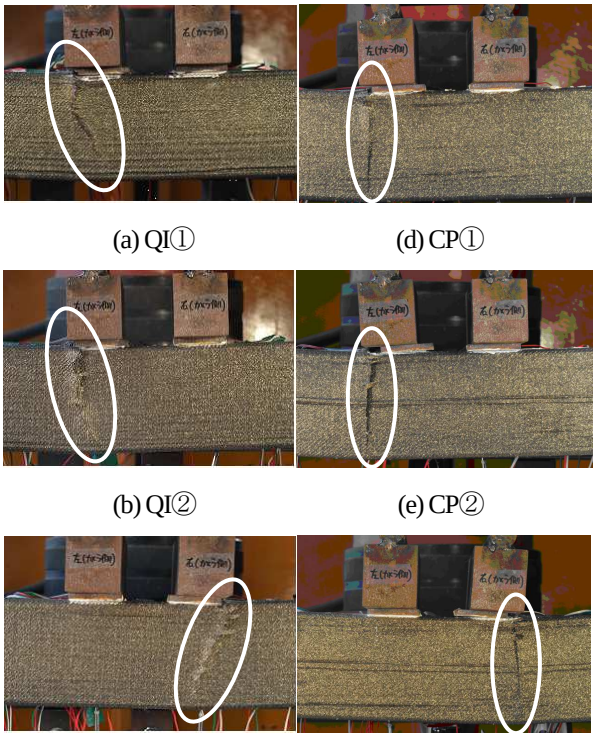
梁軸方向直応力，梁周方向直応力，面内せん断応力を考慮したTsai-Wuの破壊指標値Fは以下に示す式で表される.

$$F = F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_2\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \tag{23}$$

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

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \cdot \sigma_2^C}, \quad F_{66} = \frac{1}{(\sigma_{12}^U)^2}, \quad F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11}F_{22}} \tag{24}$$

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_{66}，およびF_{12}：Tsai-Wu の異方性係数，$\sigma_1{}^T$：梁軸方向引張強度，$\sigma_1{}^C$：

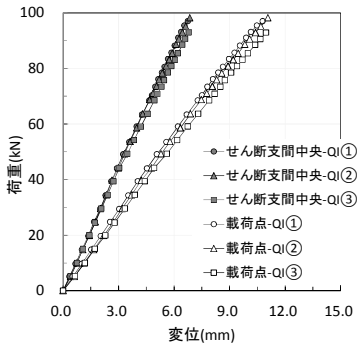


(a) QI①　(d) CP①

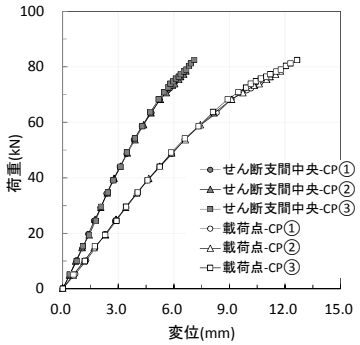
(b) QI②　(e) CP②

(c) QI③　(f) CP③

図ー8　破壊形態（楕円内が破壊部）

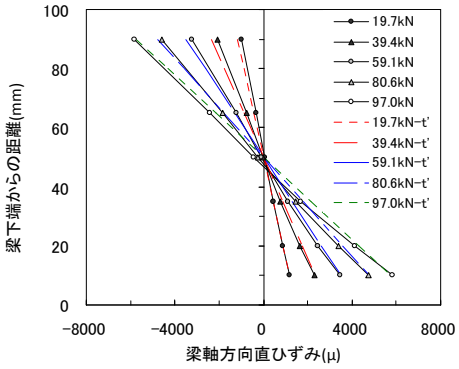


(a) QI

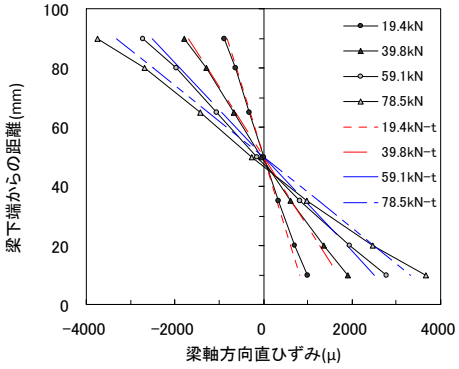


(b) CP

図ー9　荷重ー変位関係

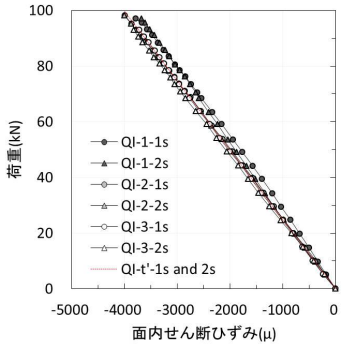


(a)QI①

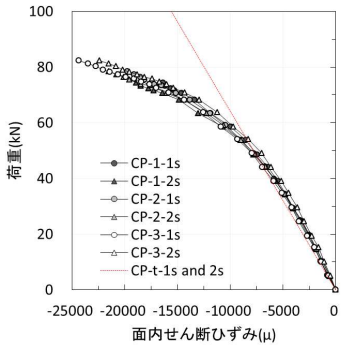


(g)CP①

図－10　梁軸方向直ひずみ（曲げ支間）



(a)QI



(c)CP

図－11　ウェブせん断ひずみ（せん断支間中央）

梁軸方向圧縮強度，$\sigma_2{}^T$：梁周方向引張強度，$\sigma_2{}^C$：梁周方向圧縮強度，$\sigma_{12}{}^U$：面内せん断強度，である．

4. 曲げ載荷実験の結果

4.1. 曲げ耐力と破壊形態

QI①，②，③の耐力は，97.0kN，98.2kN，92.9kN，平均96.0kN，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，亀裂と圧壊が観察され，いずれの供試体もせん断支間側の載荷板端部の上フランジとウェブで脆性的に破壊が生じた．QI では，①，②，③の順に撮影面で左側，左側，右側の載荷板のせん断支間側で，上フランジに亀裂が生じ，かつウェブが圧壊した．CP では，①，②，③の順に左側，左側，右側の載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た．破壊した供試体の写真を図－8に示す．

4.2. 変位とひずみ

図－9に各供試体の荷重－変位関係を示す．変位はせん断支間中央と載荷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．曲げ剛性は QI が高く，斜行方向の繊維層を積層することで剛性の向上が見られる．QI においては終局までほぼ線形挙動を示している．一方で，CP は約 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．これは後述する荷重－面内せん断ひずみ関係が非線形となっているためと考えられる．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，最終的には耐荷力時点で上述のように上フランジとウェブに脆性的に破壊が生じた

図－10にQI①とCP①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）．合わせて梁軸方向直ひずみの理論値（図中 t'と t）も示している．図では，約 20kN 毎の分布を示しており，QI①の 97.0kN 時，CP①の 78.5kN 時は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，CP①においては圧縮縁と引張縁において差異が生じている．なお QI と CP のそれぞれにおいて，供試体②と③も同様の傾向を示している．

図－11に QI と CP のせん断支間での荷重－面内せん断ひずみの関係を示す（ひずみゲージ 1s と 2s）合わせて面内せん断ひずみの理論値も示している．

QI では，実験値は理論値 t'と概ね一致しており，終局時までほぼ線形挙動を示している．また，QI は斜行方向に繊維層を有しているため，終局時まで CP のような非線形挙動は見られず，終局時の面内せん断ひずみは 4,000 μ 程度になっている．

CP では約 55kN まで実験値と算定値 t は概ね一致している．しかしながら，その値を超えると非線形な挙動になっており，終局時には面内せん断ひずみは CP では 20,000 μ 程度を示している．これは，CP ではせん断に抵抗する対角方向に繊維層を有していないため，積層板のせん断変形における応力－ひずみ関係が非線形になるためと考えられる．

5. 画像解析

5.1. 梁軸方向直ひずみの精度検証と画像補正

まず，梁軸方向直ひずみについて精度の検証を行った．精度は曲げ支間に配置した梁軸方向のひずみゲージ（ひずみゲージ 11s～17s）と比較を行うことで検証した．本研究ではカメラを 1 台用いて，供試体側面と撮像面を平行として撮影を行っている．このため，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を算出してしまう．

図－12はその一例であり，画像解析によるひずみの傾きはほぼ同じものの，約 3000 μ のずれを生じている（図中の画像補正前）．圧縮側へのずれであるため供試体側面がカメラより離遠する方向に変位したと考えられる．供試体の補剛材は中空部を充腹してはおらず，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ある．

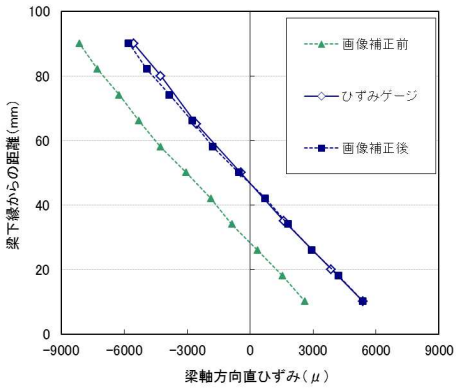
面外変位の測定にはカメラを 2 台用いたステレオ画像法を用いて画像解析を行う必要があるが，本研究では画像を等方拡大もしくは縮小させることで画像補正を行い，以後のひずみ，応力，指標値の計算を行った．図－12は画像補正後の画像解析値とひずみゲージの値の比較を示しており，良好な一致が示されている．また，図－13は同供試体の梁軸方向直ひずみの分布を示しており，画像補正に伴い中立軸（値 0 の等高線）が上昇しているのが見られる．

5.2. せん断ひずみ

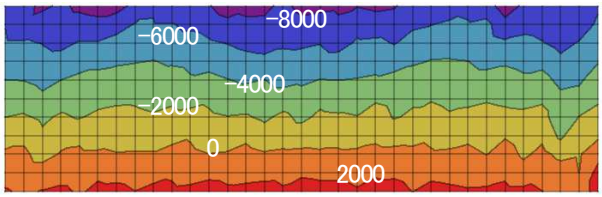
図－14にQI①とCP①の破壊直前のせん断ひずみを示す．これらの供試体において，曲げ支間中央部ではせん断ひずみが生じておらず，せん断支間側のウェブ中央高さ付近に大きなせん断ひずみが生じている結果を示している．

QI では，左右両方でせん断支間側の載荷板端部に局所的なひずみ集中を見ることができる．また，その箇所からウェブ中央高さ付近へと高いせん断ひずみの領域を観察できる．破壊箇所について，QI では，①，②，③の順に左側，左側，右側の載荷板のせん断支間側で，上フランジに亀裂が生じ，かつウェブに圧壊が生じ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係性が考えられる．局所的なせん断ひずみは左右の載荷板で見られたが，実際に破壊した側に卓越的な特徴を見ることはできなかった．

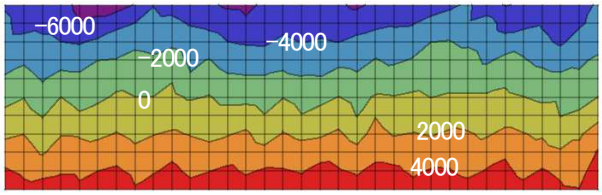
CP の破壊箇所については，①，②，③の順に左側，左



図－12　QI②92.9kN 載荷時の補正結果

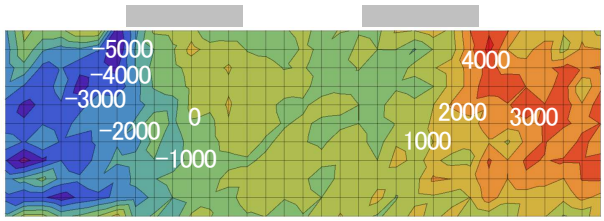


(a)補正前

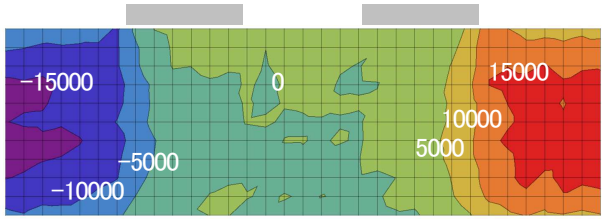


(b)補正後

図－13　QI②梁軸方向直ひずみ分布（92.9kN 載荷時）

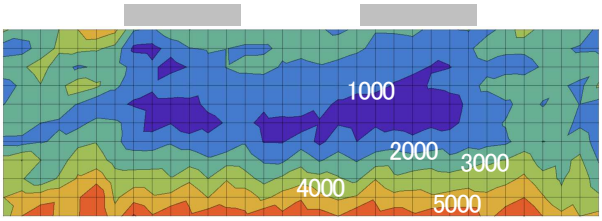


(a)QI①せん断ひずみ分布（93.1kN 載荷時）

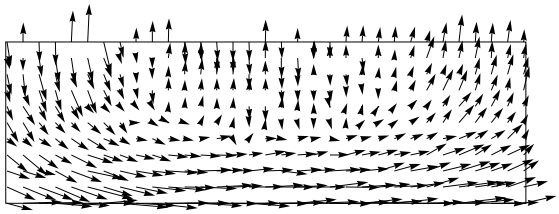


(b)CP①せん断ひずみ分布（73.2kN 載荷時）

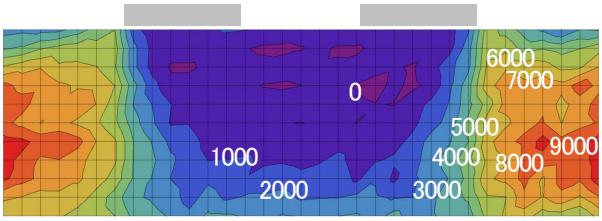
図－14　破壊直前のせん断ひずみ分布



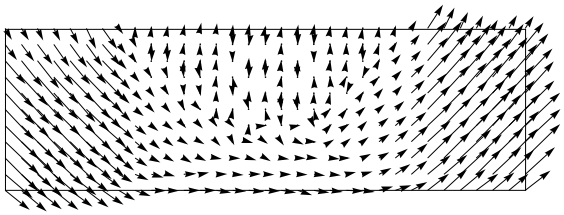
(a)QI①分布



(b)QI①ベクトル

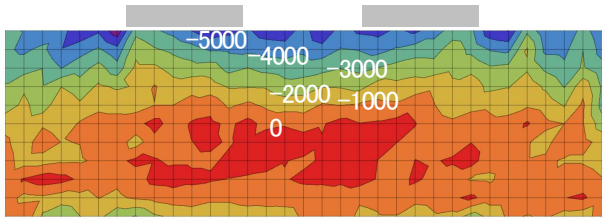


(c)CP①分布

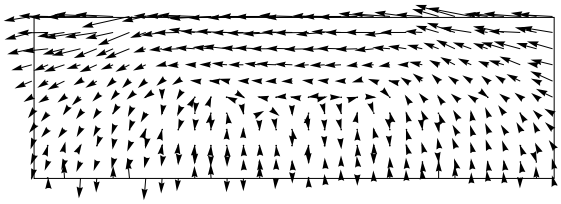


(d)CP①ベクトル

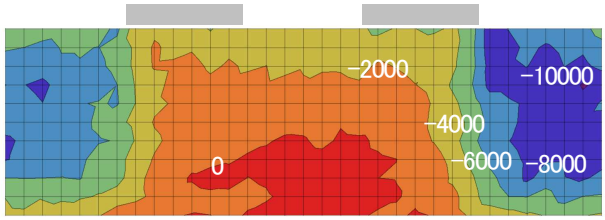
図－15　最大主ひずみ分布図・ベクトル図（破壊直前）



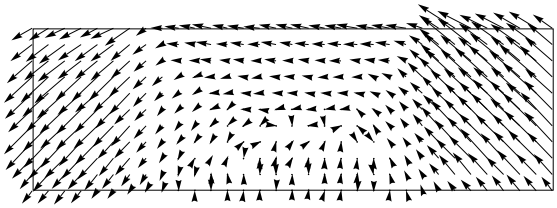
(a)QI①分布



(b)QI①ベクトル



(c)CP①分布



(d)CP①ベクトル

図－16　最小主ひずみ分布図・ベクトル図（破壊直前）

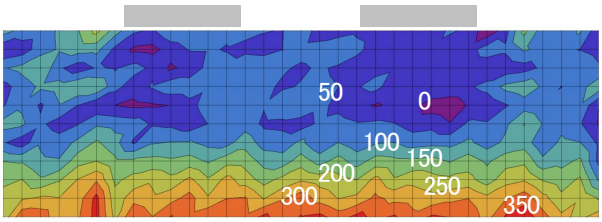
側，右側の載荷板のせん断支間側で，上フランジとウェブに亀裂が生じて破壊した．載荷板端部より高いせん断ひずみ領域がウェブ中央高さ付近に分布していることは確認できるが，左右いずれかに卓越的な特徴は見られなかった．CP は QI と異なり，斜行方向の繊維が含まれていないことから，せん断剛性が低く，載荷板に作用する力により局所的なひずみを生じるよりは，せん断支間全体がせん断変形したと考えられる．また，破壊直前のせん断ひずみの最大値においても，QI，CP の順に約 5000μ，15000μ と大きくなっていることから，斜行方向の繊維によるせん断剛性への影響が見てとれる．

5.3. 最大主ひずみ

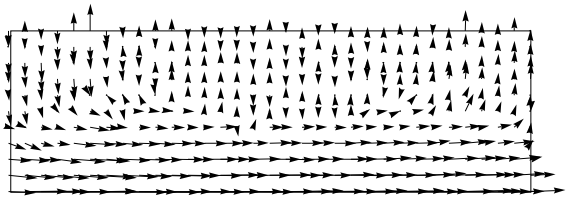
図－15の(a)，(b)にそれぞれ QI①の最大主ひずみ分布図・ベクトル図，(c)，(d)にそれぞれ CP①の最大主ひずみ分布図・ベクトル図を示す．ベクトル図は，矢印の傾きで方向を示し，長さで大きさを示している．なお，すべて破壊直前の図であり，載荷荷重は QI①が 93.1kN，　CP①が 73.2kN で，以下に述べる最小主ひずみ，最大主応力，最小主応力，破壊指標値でも同様の載荷荷重での結果を示している．

4 点曲げでは，曲げ支間内では梁軸方向直ひずみは生じるが，せん断ひずみは生じない．曲げ支間内での最大主ひずみベクトルの向きは，圧縮側では梁周方向，引張側では梁軸方向となる．一方でせん断支間側では，梁軸方向ひずみに加えてせん断ひずみも生じるため，最大主ひずみベクトルの方向が斜め方向に向く．画像解析の結果を見てみると，概ね理論通りの結果を示していることがわかる．

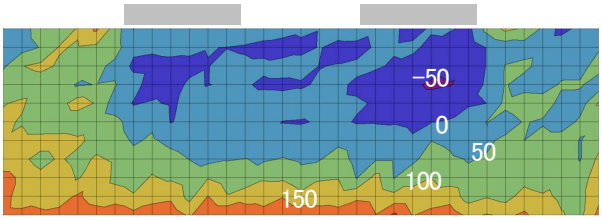
分布図をそれぞれの供試体種類ごとに比較すると，図－15(a)に示す QI の最大主ひずみでは，せん断支間側より曲げ支間の下フランジ側にかけて大きな値を示しているのに対し，図－15(c)に示す CP ではせん断支間側と曲げ支間内で明瞭に分かれている．また，ベクトル図では QI，CP の順にせん断支間の主ひずみの値が大きくなっており，QI が，せん断支間側から曲げ支間内に近づくにつれてベクトルの傾きが滑らかな曲線を描いているのに対し，CP



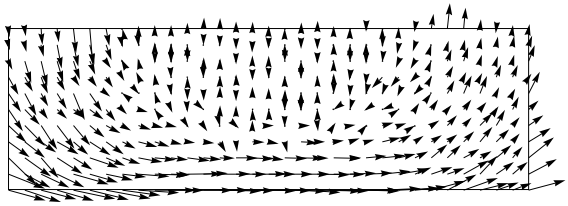
(a)QI①分布



(b)QI①ベクトル

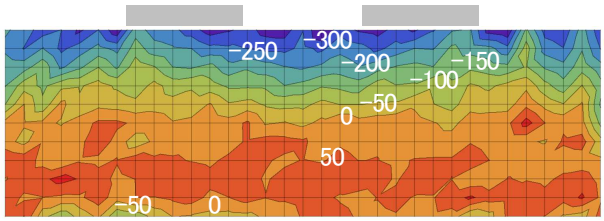


(c)CP①分布

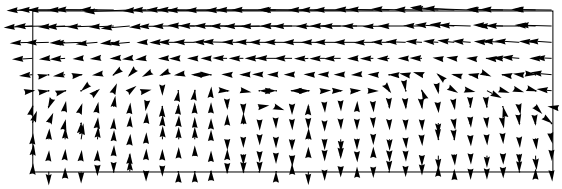


(d)CP①ベクトル

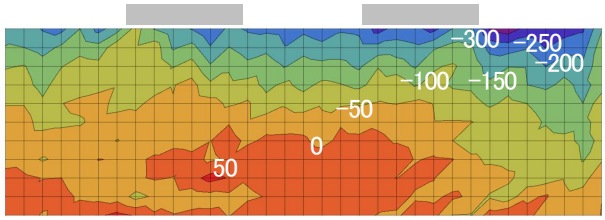
図－17　最大主応力分布図・ベクトル図（破壊直前）



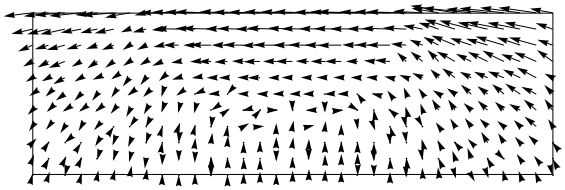
(a)QI①分布



(b)QI①ベクトル



(c)CP①分布



(d)CP①ベクトル

図－18　最小主応力分布図・ベクトル図（破壊直前）

では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．

他の供試体でも同じ種類では同様の結果が得られ，供試体ごとに大きな差異はない．また，破壊箇所である左右の載荷板端部のせん断支間側での違いも見られなかった．

5.4. 最小主ひずみ

図－16の(a)，(b)に QI①の最小主ひずみ分布図・ベクトル図，(c)，(d)に CP①の最小主ひずみ分布図・ベクトル図を示す．

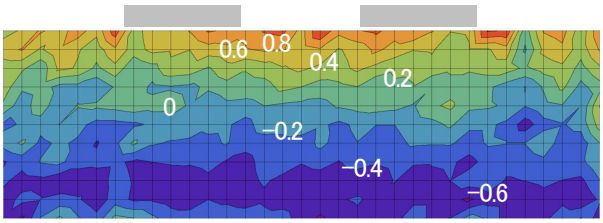
ベクトル図の最小主ひずみを供試体の種類ごとに比較すると，最大主ひずみと同様に QI，CP の順にせん断支間の主ひずみの値が大きくなっており，せん断ひずみの大きさに合わせて傾きも大きくなっていることが観察できる．曲げ支間では，どの供試体も圧縮側でベクトルの向きが梁軸方向を示している．一方で，せん断支間では，CP においてウェブ全体がせん断変形をしている様子が観察できる．最大主ひずみの結果と同様に，画像解析の結果を見てみると，概ね理論通りの結果を示していることがわかる．分布図及びベクトル図を供試体ごとに比較すると，QI では，せん断支間側の載荷板端部で近傍のベクトルより大きなひずみが生じていることが観察できる．CP では左右のせん断支間において全体的に大きなひずみが見られる．いずれも左右いずれかに卓越的な特徴は見られなかった．

5.5. 最大主応力

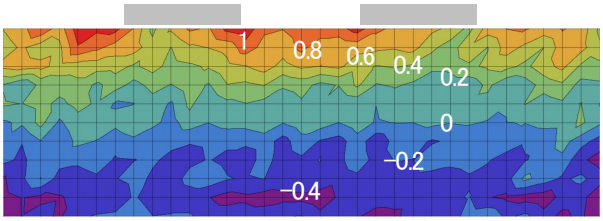
図－17(a)，(b)に QI①の最大主応力分布図・ベクトル図，(c)，(d)に CP①の最大主応力分布図・ベクトル図を示す．

図－17(a)，(b)に示す QI を最大主ひずみの結果と比較すると，分布図では引張側で大きな値をとる点で同様の結果を示している．ベクトル図ではせん断支間において相違が見られ，最大主応力はせん断支間においても梁軸方向を向いている．

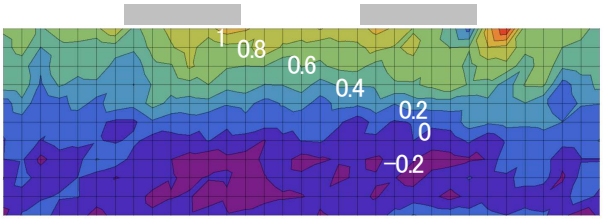
図－17(c)，(d)に示す CP を最大主ひずみの結果と比較すると，最大主ひずみのベクトル図では載荷板のせん断支間側を境に明瞭に傾きが変化しているのに対し，最大主応力のベクトル図ではせん断支間側から曲げ支間内に近づくにつれてベクトルの傾きが滑らかな変化を示している．分布図においても，最大主ひずみに見られるようなせん断支間側の梁高さ中央部に大きな値が集中するような分布は



(a)QI①破壊指標値

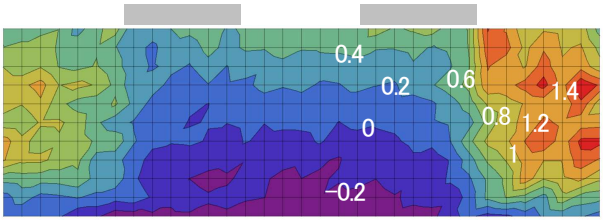


(b)QI②破壊指標値

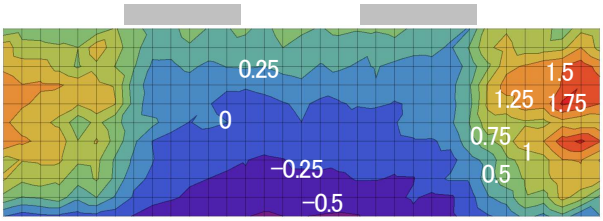


(c)QI③破壊指標値

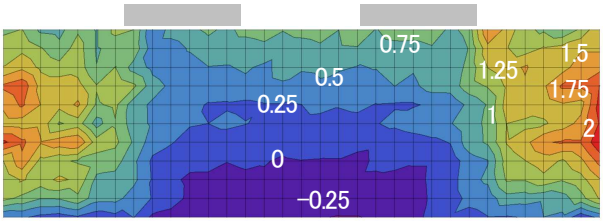
図－19　QI 供試体の破壊指標値（破壊直前）



(a)CP①破壊指標値



(b)CP②破壊指標値



(c)CP③破壊指標値

図－20　CP 供試体の破壊指標値（破壊直前）

見られず，曲げ支間内を中心に波紋状に値が大きくなっている．

QI と CP のいずれにおいても，載荷板端部せん断支間側に周辺より大きな値（150MPa 程度）を示す供試体もあったが，局所的といえるほどの値ではなく，また左右に特徴的な差も見られなかった．

5.6. 最小主応力

図－18(a), (b)に QI①の最小主応力分布図･ベクトル図，(c)，(d)に CP①の最小主応力分布図・ベクトル図を示す．

図－18(a)，(b)に示す QI において，分布図では上フランジからウェブ中央高さにかけて値が減少し，下フランジ側ではほぼ 0 となっており，ベクトル図ではウェブ中央高さ付近を境に傾きがはっきり分かれており，最小主ひずみの結果と概ね同じ結果となった．一方，最小主ひずみのベクトル図でせん断支間側の載荷板端部に見られていた大きさと傾きの異なる部分については，大きさのみ異なり傾きは周辺と同様であった．

図－18(c), (d)に示す CP①の分布図では明瞭ではないが，CP②と③では曲げ支間中央部の下フランジ部分を中心に波紋状に大きくなっている．CP では最小主ひずみ分布図で見られたせん断支間と曲げ支間で明瞭に分かれた分布図とは全く違う傾向が観察できる．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．

QI と CP のいずれにおいても，載荷板端部に大きな値（300MPa 程度）を示す供試体もあったが，局所的といえるほどの値ではなく，左右の差異についても少なかった．

5.7. 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．

破壊直前の載荷時について，図－19に QI 供試体①，②，③の破壊指標値を，図－20に CP 供試体①，②，③の破壊指標値を示す．各供試体種類で指標値分布の特徴は概ね同様である．また，破壊指標値の値も，破壊直前で 1 に近い数値を示している．一部の領域で 1 を超える値が生じているのは，式(23)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，強度値，応力算出の際の弾性定数の値とひずみの値に誤差があるためと考えられる．

図－19に示す QI では，破壊箇所である載荷板端部のせん断支間側に局所的に値の高い領域が見られる．①と②では曲げ支間側にも存在するため，今回の結果からは破壊指標値が破壊起点を説明するとは断定できないが，その可能性を有していると考えられる．また，図－8に示す破壊形態では，圧壊の尾根線が載荷板端部より曲げ支間側へ斜めに走っており，斜行方向の繊維層の影響と考えられる．これについては，図－19により議論をすることはできず，今後進行的な破壊の検討が必要である．

一方，図－20に示す CP で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，破壊起点としての可能性は破壊指標値の点からは弱い．また，図－8に示す破壊形態では，亀裂が載荷板端部より鉛直方向に走っており，図－20から破壊の進行を推測するのは困難と言える．

6. 結論

本研究では，積層構成の異なる 2 種類の箱形断面 CFRP 梁について，4 点曲げ載荷実験を行った．ひずみゲージと変位計による計測に加えて，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．計測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．

2 種類の供試体は，梁軸方向（L），梁周方向（T），斜行方向（D）の繊維層比率を 1:1:2 とした疑似等方性の QI（Quasi-Isotropic）と，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，QI が平均 96.0kN，CP が平均 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．QI においては，上フランジに亀裂が生じ，かつウェブが圧壊した．CP においては，上フランジとウェブに亀裂が生じた．曲げ剛性においては，QI が終局までほぼ線形挙動を示すのに対して，CP は約 55kN 以降に剛性の低下を示しており，斜行方向の繊維層が影響したものと考えられる．

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することで精度を検証し，画像を補正した上でひずみ，応力，指標値の算出を行った．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いるが，せん断ひずみは載荷板端部に局所的に大きな値がみられた．

QI の主ひずみと主応力は圧縮縁と引張縁で大きく，主ひずみはせん断支間から曲げ支間へと滑らかに方向を変えるのに対して，主応力は両支間で概ね梁軸方向を向いていることが確認された．一方で，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，QI と異なり，主応力の方向に滑らかな変化が見られた．

Tsai-Wu の破壊指標値は，QI で載荷板端部の曲げ支間側かせん断支間側で最も高い値を示し，CP で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，載荷板端部へ高い値が分布していた．QI については破壊指標値により破壊起点を説明できる可能性があるが，CP については破壊起点を説明することが困難であると考えられる．

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，本研究は鹿島財団により一部実施された．ここに謝意を示す．

参考文献

1) E. Gutiérrez, S. Primi, J. M. Mieres and I. Calvo, 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) H. Sakuraba, T. Matsumoto and T. Hayashikawa, 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：ブ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) 町田賢司，山田英明：デジタル画像相関法とインテリジェントハイブリッド法による混合モード応力拡大係数の評価，実験力学，Vol. 5，No. 2，pp. 40-45，2005.
15) 町田賢司，佐藤充，荻原慎二：デジタル画像相関法と非線形インテリジェントハイブリッド法による CFRP 積層板の応力解析，日本実験力学会講演論文集，Vol. 7，pp. 116-121，2007.
16) 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.
17) 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.
18) L. Zhao, R. Burgueiio, H. L. Rovere, F. Seible and V. Karbhari, Preliminary Evaluation of the Hybrid Tube Bridge System, University of California, San Diego, Department of Structural Engineering, Structural Systems Research Project, Report No. TR-2000/04, 2000.
19) 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.
20) 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.

(2012 年 3 月 8 日　受付)