HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	箱形断面CFRP梁の曲げ挙動と画像解析によるひずみ計測
Author(s)	松本, 高志; 櫻庭, 浩樹
Citation	土木学会論文集A2（応用力学）, 67(2), I.793-I.800
Issue Date	2011-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/53668
Type	journal article
File Information	14-0793.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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.

箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動と画像解析によるひずみ計測

Flexural behavior of CFRP box beams and strain measurement by image analysis

松本　高志*・櫻庭　浩樹**
Takashi Matsumoto 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 experimental investigation on the flexural behavior of CFRP box beams with four different CFRP laminate structures. Those four laminates have 25 laminas, and they have the proportion of longitudinal, transverse, and diagonal lamina as 1:1:0 (L1T1), 1:0:1 (L1D1), 1:0:2 (L1D2), and 1:1:2 (L1T1D2). In addition to the displacement and strain gauge measurements, image analysis was employed to observe the deformation and strain field near a failure location. Flexural tests showed that L1D1 exhibited the highest flexural strength, followed by L1D2, L1T1D2, and L1T1, where diagonal laminas clearly contributed to the flexural strength more than transverse laminas. All the beams were observed to have a premature damage near a loading plate, and finally they exhibited a brittle failure in upper flange and web. Different failure modes were observed due to the laminate structures. Among them, image analysis clarified the development of shear strain in the web of L1T1 even before the final brittle failure.

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

1. はじめに

繊維強化ポリマー（FRP）は，軽量かつ強度を有し耐食性も高い複合材料である．その材料特性を活かして近年一層の利用が図られてきており，社会基盤用途においても，交通関連，水関連，エネルギー関連，通信関連，腐食環境，海洋環境の施設において応用分野が広がってきている．

本研究では，FRP の中でも炭素繊維を用いた炭素繊維補強ポリマー（CFRP）を対象としている．CFRP は，その高強度性，軽量性，高耐食性を利点として，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．社会基盤用途における腐食・海洋環境下でも，安全性と耐久性を確保できる構造材料として有望である．

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[1)2)3)4)5)6)]．また，積層複合材料である CFRP は異方性を有し，等方性材料とは損傷・破壊挙動が異なることが，FEM 解析により示されているが[4)7)8)9)10)11)12)]，破壊が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で，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[13)]．

本研究では，積層構成の異なる 4 種類の CFRP により箱形断面梁を作成し，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，画像解析を用いて破壊近傍の変位計測とひずみ算出をすることで，積層構成が曲げ耐力と破壊形態に及ぼす影響の検討を行い，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）である（図－1）．供試体は，プリプレグと呼ばれる炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させたシート（単層板）を 25 層積層した積層板により作られている．プリプレグの炭素繊維は単一方向に整列しており，積層構成に基づいて 1 層ずつ角度を変えながら直方体の金型に巻きつけた後に，加熱硬化させることで成型された．

単層板の材料特性を表－1に示す．積層構成は下記の 4 種類とした．

① $[0/90]_6/0/[90/0]_6$

② $[0/45/-45/0]_3/0/[0/-45/45/0]_3$

③ $[0/45/-45]_4/0/[-45/45/0]_4$

④ $[0/45/-45/90]_3/0/[90/-45/45/0]_3$

①において，[0/90]は 0 度方向（梁軸方向）の層に 90 度方向（梁周方向）の層を積み重ねることを意味し，下付きの添え字である 6 は，[ ]内のセットを 6 回繰り返すことを意味する．よって①は 0 度層と 90 度層を交互に積み重ねる積層構成であり，また中心の 0 度層について対称な積層構成となっている．②～④も同様に読み取れる．

表－2に，各供試体の方向別積層数を示す．①では，梁軸方向（Longitudinal）と梁周方向（Transverse）の繊維比率が約 1:1 であり，②では梁軸方向（Longitudinal）と対角方向（Diagonal）の繊維比率が約 1:1 となるように積層構成を決めた．同様に，③は L:D が約 1:2，④は L:T:D が約 1:1:2 である．以後，それぞれの供試体を L1T1，L1D1，L1D2，L1T1D2 と呼ぶことにする．

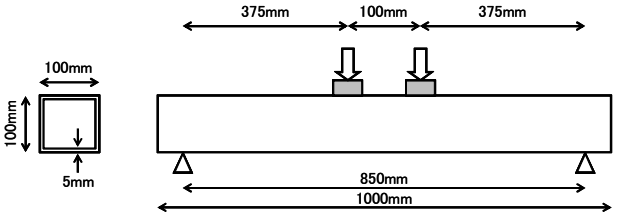
プリプレグの加熱成型はハンドレイアップと比較して品質が安定し，寸法精度も向上するため，各積層構成について 1 体ずつ作成した．

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，せん断スパン 375mm，曲げスパン 100mm とした．図－1に載荷条件を示す. 載荷点には幅 50mm, 高さ 55mm, 奥行き 200mm の載荷板を用い，支点には幅 50mm，高さ 5mm，奥行き 120mm の支持板を用いた．いずれも鋼製である．載荷板と供試体の間にはテフロンシートを挟み, 載荷板による拘束を軽減した.

図－2には変位とひずみの計測位置を示す．変位計 9 点（図中黒矢印 1～9），三軸ひずみゲージ 6 点（図中 1～6, 9，10），ひずみゲージ 2 点（図中 7，8）により計測を行った．既往の実験結果[1)]に基づき載荷板近傍にひずみゲージを配置し，加えてせん断スパン中央にも配置した.

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－1　供試体寸法と載荷条件

表－1　単層板の材料特性

	E (MPa)	G (MPa)	ν
繊維方向	128000	5600	0.32
直角方向	15200	-	-

表－2　方向別積層数

	梁軸方向	梁周方向	対角方向
① L1T1	13	12	0
② L1D1	13	0	12
③ L1D2	9	0	16
④ L1T1D2	7	6	12

3. 画像解析手順

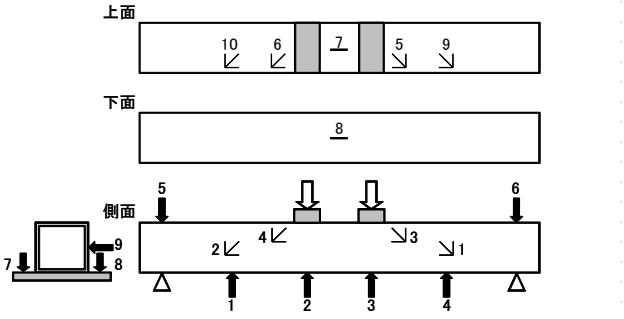
3.1. 画像撮影

画像撮影は市販のデジタル一眼レフカメラ（Nikon D70 及び D100）を用いた．いずれのカメラにおいても，画素数は約 600 万画素（3008×2000 ピクセル）である．撮影は, ひずみゲージ貼付面とは反対側の CFRP 梁供試体側面の載荷板近傍について行い，図－3に示す灰色部分 2 箇所（①，②）の約 20×30mm 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.

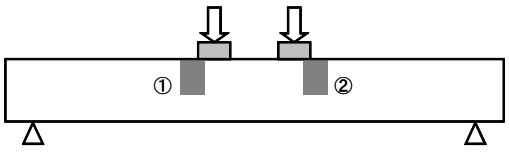
なお，CFRP 表面は一様な黒色であるため，対象領域を含んだ供試体側面にあらかじめスプレーによりランダム模様を付与した．ランダム模様は画素よりは大きくなるように, また局所的に模様が疎とならないようにすることで, 後述するデジタル画像相関法が適用できるように供試体の準備を行った.

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[14)]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



図－2　変位・ひずみ計測位置



図－3　撮影領域（灰色部分）

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，

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

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

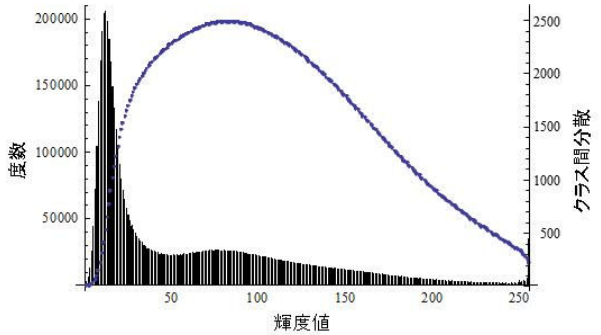
となる．ここで，

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

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

である．

二つのクラス間の分散は以下のとおりになる．



図－4　輝度値の度数（左縦軸）と
クラス間分散（右縦軸）

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

ここで，$\sigma^2(k)$ が最大となる k を閾値として決定する．

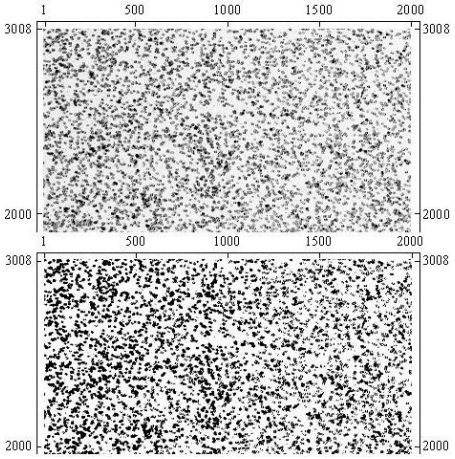
以上の手順を用いて求めた輝度値の度数（ヒストグラム）とクラス間分散の一例を図－4に示す．また，決定された閾値を用いて二値化された画像を，グレースケール画像とともに一例を図－5に示す．

3.3. 画像相関

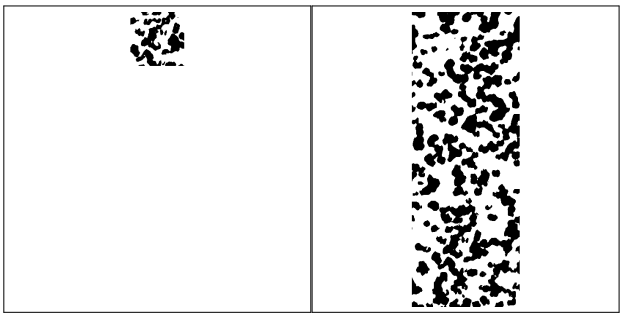
二値化画像において，200 ピクセル間隔で格子状に着目点を設定する．着目点は，x 方向に 9 点，y 方向に 12 点を設けて，合計 108 点とした．

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



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）

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

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

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.

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

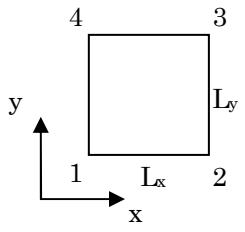
得られた変位量より，ひずみを求めた．格子状にある 4 つの着目点を図−7のように定義し，x 方向の辺長を L_x，y 方向の辺長を L_y，点 i の x 方向変位を u_i，y 方向変位を v_i としたとき，x 方向（梁軸方向）ひずみは,

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

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,



図−7　座標系

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

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.

4. 実験結果

4.1. 曲げ耐力と破壊形態

L1T1，L1D1，L1D2，L1T1D2 の曲げ耐力は，それぞれ 49.3kN，70.2kN，64.6kN，62.5kN であった．対角方向の繊維層を有しない L1T1 が最も耐力が低く，対角方向の層を有する他の供試体は L1T1 より耐力が高い結果となった．最も耐力が高い供試体は L1D1 であった（以下表−2も参照）.

L1D1 と L1T1 の積層構成は，梁軸方向の繊維量が等しく（13 層），残り 12 層を対角方向に積層したか，周方向に積層したかという点で異なる．耐力においては，L1D1 が高く，対角方向に積層するほうが有利であったと言える.

L1D1 は L1T1D2 と比較して，対角方向の繊維量は等しいが，L1T1D2 で梁周方向と梁軸方向に等分していた繊維を，全て梁軸方向に積層している．耐力は L1D1 が高く，梁軸方向に積層するほうが有利であった.

L1D2 は，梁軸方向よりも多くの繊維量を対角方向に積層しており，L1D1 に次ぐ耐力であった．梁の曲げにおい

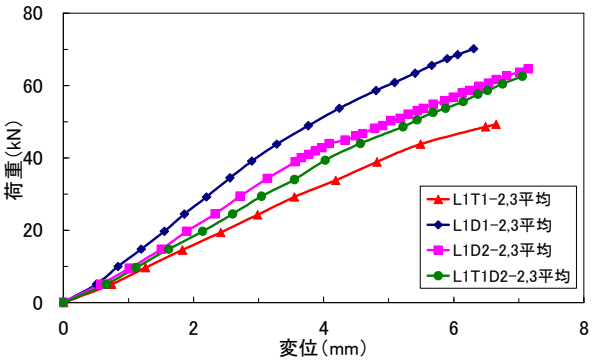


(a) L1T1　　(b) L1D1

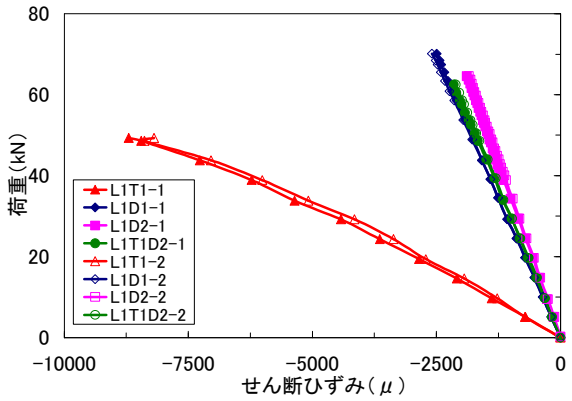


(c) L1D2　　(d) L1T1D2

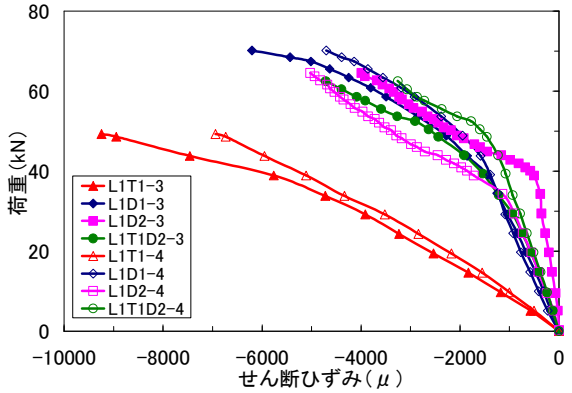
図−8　破壊形態



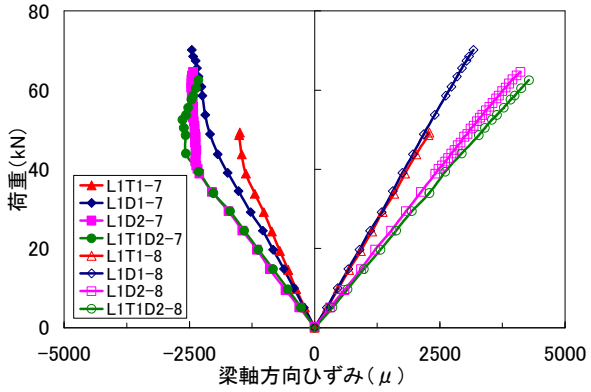
図－9　荷重－変位関係



図－10　ウェブせん断ひずみ（せん断スパン中央）



図－11　ウェブせん断ひずみ（載荷板近傍）



図－12　上下フランジひずみ

ては，曲げによる直応力に抵抗する梁軸方向の繊維層と，せん断応力に抵抗する対角方向の繊維層の比率が重要であり，その比率の最適値があると考えられる．

供試体の最終破壊形態は，亀裂，剥離，もしくは亀裂と剥離の混合が観察され，いずれの供試体も載荷板近傍において生じた（図－8）．L1T1 は，右側載荷板のせん断スパン側で，上フランジとウェブに亀裂が発生した．L1D1 と L1D2 は，それぞれ左と右の載荷板のせん断スパン側で，上フランジに亀裂が生じ，ウェブには剥離によると思われる面外変形が見られた．L1T1D2 は，左側載荷板のせん断スパン側で，上フランジに亀裂が生じ，ウェブでは亀裂と剥離によると思われる面外変形が同時に生じた．既往の実験では亀裂のみが観察されたものの，破壊の位置は同様の載荷板近傍であった[1)]．

これらの破壊形態の違いは，対角方向と周方向の繊維層の有無に関係付けられる．載荷板近傍のウェブにおいては，曲げによる直応力とせん断応力が生じていると考えられる．L1T1 は軸方向と周方向にしか繊維がない直交積層板であるためせん断抵抗が弱く，周方向に亀裂が進んだものと考えられる．一方で，対角方向に繊維層を有する L1D1 と L1D2 はせん断抵抗が L1T1 より高いため，載荷板近傍のウェブにおいて，圧縮方向の主応力に屈する形で剥離と面外変形が生じたと考えられる．周方向と対角方向に繊維層を有する L1T1D2 では，これらの亀裂と剥離が同時に起こったと考えられる．

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 L1D1 が最も高く，次いで L1D2, L1T1D2, L1T1 の順となっており，対角方向の繊維層を積層することで剛性の向上が見られる．概ね 40kN までは各供試体共に線形挙動を示しているが，その後剛性の低下が観察された．実験中にも 40kN 前後より亀裂発生音が始まり，この際 L1T1 と L1D2 においては，それぞれ 38.9kN と 40.1kN 時に載荷板位置のフランジとウェブの隅角部に梁軸方向の亀裂が目視観察された．以降も亀裂発生音は継続したことから，進行的に損傷が進んでいたと考えられるが，他の部分に損傷は確認できず，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（以下表－2も参照）．

図－10にせん断スパン中央でのウェブせん断ひずみを示す（ひずみゲージ 1 と 2）．対角方向の繊維層を有しない直交積層板である L1T1 はせん断剛性が低く，ウェブにおけるせん断ひずみも 4 供試体の中で最も大きい．対角方向の繊維層が共に 12 層である L1D1 と L1T1D2 は，ほぼ同等のせん断剛性を示している．最も大きいせん断剛性を示しているのは，対角方向に 16 層積層している L1D2 であった．

一方で，載荷点近傍でのウェブせん断ひずみ（ひずみゲ

ージ3と4）を示す図−11では，せん断剛性の順序は変わらないが，荷重−変位関係と同じく40kN前後を境として挙動が大きく変化している．おそらく載荷板位置のフランジとウェブの隅角部に亀裂が生じることで，載荷板近傍にあるひずみゲージ3と4の位置に力の伝達経路が移り，各供試体共にひずみの増大が観察されたものと考えられる．

図−12は，曲げスパンにおける上下フランジの梁軸方向ひずみを示している．剛性の順序は，L1T1，L1D1，L1D2，L1T1D2であり，これは梁軸方向の繊維量の順序と同じである．下フランジの引張挙動は，L1D2，L1T1D2が40kNを超えたところで剛性の変化が少し見られるものの，各供試体共にほぼ線形関係を示している．一方で，上フランジの圧縮挙動は，40kNを超えたところで圧縮ひずみの増加が鈍化しており，L1T1D2においては減少に至っている．これは，前述の隅角部の亀裂により上フランジとウェブが一部分離し，上フランジの圧縮がウェブに移ったためと考えられる．

以上の変位とひずみについては，せん断変形を考慮したたわみと積層理論による材料剛性との比較がなされており，挙動を概ね再現できることが確認されている[4)]．

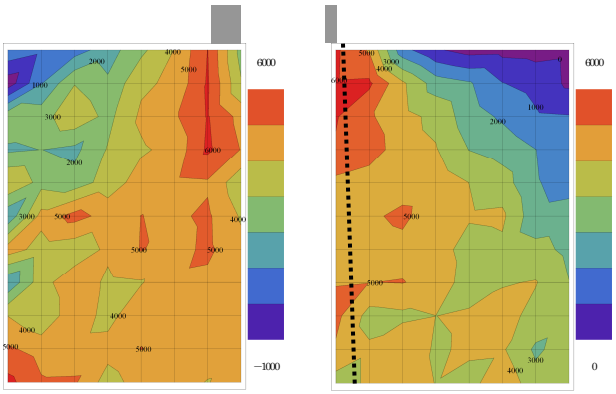
4.3. 画像解析

画像解析によるひずみの計測結果を以下に述べる．ひずみの算出は，梁軸方向，梁周方向，せん断ひずみ，最大せん断ひずみについて行った．梁軸方向と梁周方向については，画像範囲内で局所的な変化が見られなかった．ここでは，供試体による差異が見られたせん断ひずみについてのみ述べる．なお，せん断ひずみは左側と右側で向きが異なるが，ここでは右側の符号に揃えて統一した．

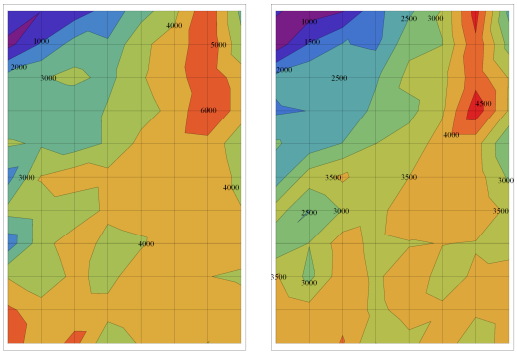
図−13は，L1T1の撮影対象領域でのせん断ひずみ分布である．図中の上に示している灰色の長方形は載荷板を示しており，黒の点線は最終的な亀裂の位置を示している．L1T1は，縦方向の亀裂の発生により脆性破壊を起こしたが，図では破壊前の荷重段階において載荷板近傍にせん断ひずみが卓越していることが明瞭に見てとれる．せん断ひずみの卓越は左右の載荷板で見られるが，最終的には右側の点線の位置で亀裂が生じた．

図−14には，L1T1の左側撮影領域でのせん断ひずみ進展状況を示した．目視による隅角部の割れは38.9kNで観察され，ひずみゲージはこれに伴いせん断ひずみの増加が見られたが，画像解析により得られたせん断ひずみ分布では29.2kNで既にせん断ひずみの局所化が始まり，38.9kNでより明瞭になる様子が分かる．これらは最終的な脆性破壊以前であり，画像解析によりL1T1における破壊の前段階が把握できたことになる．

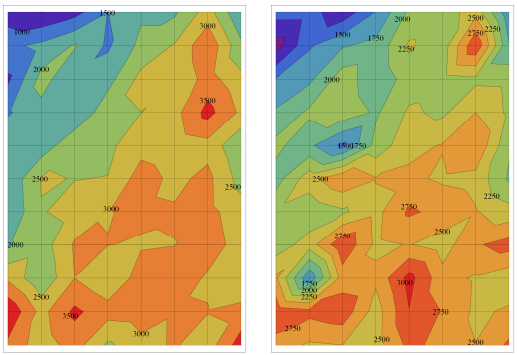
残りの供試体についてはL1T1と異なり，せん断ひずみ分布に破壊の前段階と考えられる特徴は見られなかった．図−15はL1D1のせん断ひずみ分布であり，点線は剥離により最終的に生じた面外変形による膨らみの尾根線を示している．L1T1で見られたような縦方向のせん断ひずみ



図−13　L1T1左側（左）と右側（右）のせん断ひずみ（49.3kN）．灰色は載荷板で，点線は亀裂．

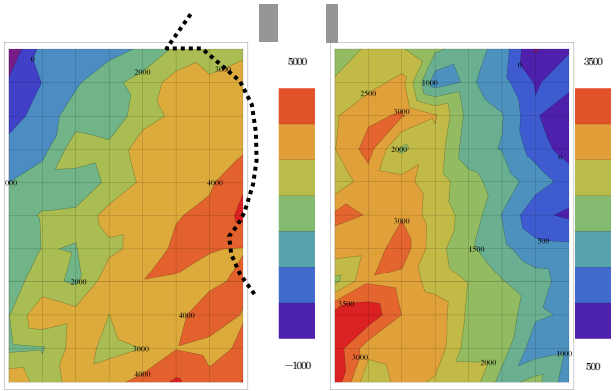


(a)43.8kN　(b)38.9kN

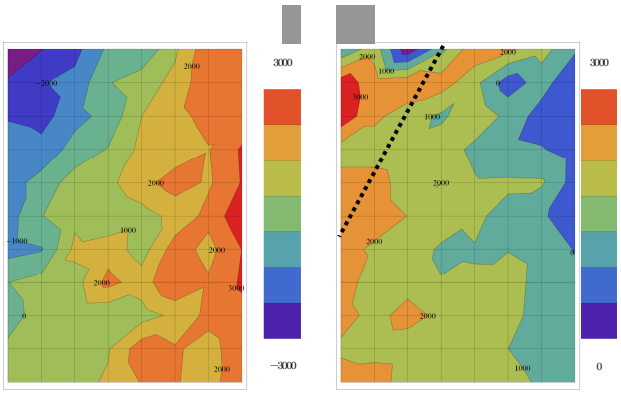


(c)33.8kN　(d)29.2kN

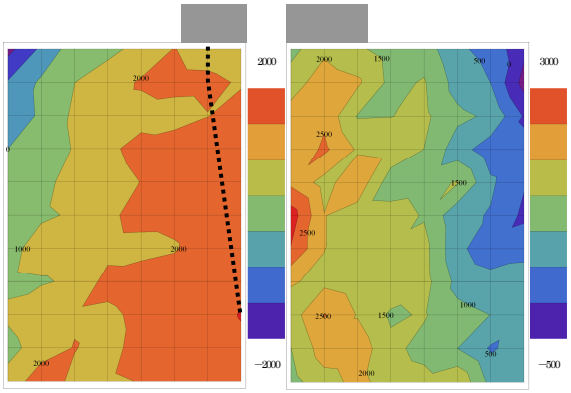
図−14　L1T1左側のせん断ひずみの進展



図−15　L1D1左側（左）と右側（右）のせん断ひずみ（70.2kN）．灰色は載荷板で，点線は剥離による面外変形の尾根線．



図－16　L1D2 左側（左，64.6kN）と右側（右，44.0kN）のせん断ひずみ．灰色は載荷板で，点線は剥離による面外変形の尾根線．



図－17　L1T1D2 左側（左）と右側（右）のせん断ひずみ（53.7kN）．灰色は載荷板で，点線は亀裂．

の局所化が見られず，載荷板近傍に特徴的な分布も見られないため剥離に関係づけることが困難である．図－16は L1D1 のせん断ひずみ分布であるが，左右の分布の差異も含めて関係付けはやはり困難であった．図－17は縦方向の亀裂と剥離による面外変形を生じた L1T1D2 のせん断分布であるが，L1T1 で見られたような特徴は得られず，左右の分布の差異も含めて関係付けは難しい．

これら 3 供試体は対角方向に繊維層を積層しているため，直交積層板である L1T1 のようなせん断変形は生じにくいものと考えられる．また，破壊形態は前述したように（図－8も参照）剥離による面外変形であり（L1T1D2 は亀裂も含む），破壊の前段階においても面外の変形が生じているとすれば，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．

なお，全ての画像解析において，ひずみゲージによるせん断ひずみの値とは相違が見られる．破壊時の最大ひずみをひずみゲージと比較すると，概ね 30%ほど小さい値が得られている．これについては，荷重条件を均一な圧縮とした要素実験において精度の確認を行い，5%程度の誤差に収まることを確認している．また，数千μレベルで供試体のひずみを観察するには，600 万画素のカメラでも特に不利とは言えない．しかしながら，実際の供試体においては変形状態が複雑であり，精密な校正が必要とされている．本研究におけるひずみ分布は定性的な特徴を捉えることにとどめるべきと考える．

5. 結論

本研究では，積層構成の異なる 4 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，破壊が生じた載荷板近傍のウェブに対して画像解析を行い，変位計測とひずみ算出を行った．

4 種類の供試体は，梁軸方向（L），梁周方向（T），対角方向（D）の繊維層比率を 1:1:0（L1T1），1:0:1（L1D1），1:0:2（L1D2），1:1:2（L1T1D2）として作成した．曲げ耐力は，L1D1，L1D2，L1T1D2，L1T1 の順に大きかった．対角方向の寄与は大きく，周方向の寄与が小さかったため，軸方向と対角方向の比率についてさらに検討が求められる．

最終的な破壊は載荷板近傍で発生し，上フランジの亀裂と，ウェブの亀裂，剥離，もしくは亀裂と剥離の混合が観察された．直交積層板である L1T1 は周方向に亀裂が進み，対角方向に繊維層を有する L1D1 と L1D2 は剥離が生じた．周方向と対角方向に繊維層を有する L1T1D2 では，亀裂と剥離が同時に起こった．

変位とひずみの計測により，載荷板位置での上フランジとウェブの隅角部割れに伴う剛性の変化と上フランジからウェブへの応力伝達経路の変化が，全ての供試体において認められ，その後最終的な破壊形態に移ったと考えられる．

画像解析を行い面的なひずみ分布を得ることで，L1T1 に生じた載荷板近傍でウェブに生じたせん断ひずみの局所化を，最終的な脆性破壊の前の荷重段階で把握することができた．一方で対角方向の繊維層を有する他の供試体では特徴的なひずみ分布を破壊に関連付けて得ることはできなかった．

謝辞

供試体作成については東レ(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．

追悼文

応用力学の発展に尽くされました故田村武先生に対し，ご生前のご厚情に深く感謝するとともに先生のご功績を偲び，慎んで哀悼の意を表します．

参考文献

1) 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.
2) 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.
3) 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.
4) Hiroki Sakuraba, Takashi Matsumoto and Toshiro 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.
5) 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.
6) 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.
7) 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.
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：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.
9) 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.
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：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.
11) 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.
12) 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.
13) 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.
14) 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.

(2011 年 3 月 8 日　受付)