

GFRP 箱形断面梁の有限要素解析

松本 高志¹・中村 知美²

¹正会員 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十三条西8丁目）

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

²北海道大学 大学院工学院北方圏環境政策工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目）

本研究では、引抜成形のGFRP箱形断面梁供試体における4点曲げ載荷実験の結果について、有限要素解析による変形・破壊挙動の検討を行った。解析においてはGFRPの異方性を考慮したモデルを作成し、梁において生じる卓越的なひずみと応力の把握を行った。載荷実験との比較を行い、さらには別途実施された画像解析との比較も行い、妥当性を確認した。解析では、非線形性を考慮していないものの、変形挙動は実験を概ね再現する結果であった。また、画像解析との比較において、ひずみ、応力、破壊指標値の分布の傾向が一致していることを確認した。破壊過程は断面つぶれの後に隅角部割れが生じるものであり、隅角部割れ発生耐力を検討し実験値との比較考察を行った。

Key Words : GFRP, flexure, finite element analysis, image analysis

1. はじめに

ガラス繊維強化ポリマー（Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP）は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。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視されている。また、軽量ゆえに大きな重機を必要とせず施工性が高いことも利点である。

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 歩道橋が架設されてきている¹⁾。また、FRP 歩道橋設計・施工指針（案）²⁾、土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ³⁾が刊行され、活用の促進が図られてきている。

GFRP はその繊維積層構成により変形は異方性を呈し、線形弾性的挙動の後に脆性的な破壊を示す。ゆえに変形・損傷・破壊機構の実験的な把握は容易ではない。これまでに GFRP を含む FRP について曲げ載荷実験を対象に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て、変形・損傷・破壊過程を検討されてきた⁴⁾。

本研究では、引抜成形の GFRP 箱形断面梁供試体における 4 点曲げ載荷実験の結果について、有限要素解析による変形・破壊挙動の検討を目的としている。GFRP の異方性を考慮したモデルを作成して線形解析を行い、梁において生じる卓越的なひずみと応力を検討し、別途実

施された載荷実験と画像解析⁵⁾との比較を行い、妥当性を確認する。

2. 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（SP75：長さ 1000mm、高さ 75mm、幅 75mm、板厚 5mm、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て切断されている。内部の繊維は主に引抜方向の一方向となっており、基材はビニルエステル樹脂である。隅角部の内面および外面には半径が板厚程度のアールが付いている。供試体は SP75 および SP100 のそれぞれに 5 体ずつある。以下では、SP75 供試体 5 体を SP75-1～5、SP100 供試体 5 体を SP100-1～5 と呼ぶこととする。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、SP75 と SP100 の共に支間長 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。載荷点の鋼製板の上に、幅 50mm, 高さ 55mm, 奥行き 200mm の鋼製ブロックを設置し、さらにその鋼製ブロックの上に図-1に示す断面を有する長さ 1635mm の I 形鋼（鋼種は SS400）と鋼製載荷台を設置することで 4 点曲げ載荷とした。

載荷においては荷重制御により、SP75 では、約 5.0kN 毎に計測を行い、約 30.0kN からは約 2.0kN 毎に計測を行い破壊まで載荷を行った。SP100 においては、約 5.0kN 毎に計測を行い、約 50kN からは約 2.0kN 毎に計測を行い破壊まで載荷を行った。また、計測の際には、後述する画像撮影も同時に行った。

図-2には変位とひずみの計測位置を示す。計測器は SP75 と SP100 共に同様の位置に設置する。変位計測点は 6 点、ひずみ計測点は 10 点とした。変位計 L1 と L2 および D1 と D2 は、それぞれ載荷点およびせん断スパン中央の変位を計測する。変位計 D4 と D5 は支点沈下量を計測する。

三軸ひずみゲージ 1s と 2s は、せん断スパン中央かつウェブ中央に配置し、せん断ひずみを計測とする。一軸ひずみゲージ 3s と 4s は曲げスパン中央の梁上端から 10mm の位置と下端から 10mm の位置にそれぞれ貼付し、曲げスパン中央における梁軸方向直ひずみを計測する。一軸ひずみゲージ 5s, 6s, 7s, 8s はせん断スパン中央の梁上端から 10mm の位置と下端から 10mm の位置にそれぞれ貼付し、せん断スパン中央における梁軸方向直ひずみを計測する。一軸ひずみゲージ 9s と 10s は、それぞれ梁上フランジと下フランジの曲げスパン中央に貼付し、梁軸方向直ひずみを計測する。

(3) 実験結果

供試体全 10 体の耐荷力を表-1に示す。SP75 の平均耐荷力は 39.91kN であり、SP100 は 54.74kN であった。供試体の荷重－変位関係については解析結果と合わせて後述する。

供試体は、載荷板のせん断スパン側上フランジにおいて断面のつぶれ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。これは本研究で用いた供試体が無補剛であり、箱形断面のつぶれによって生じたと考えられる。断面がつぶれたフランジの写真を図-3、上フランジとウェブが分離して破壊した供試体の写真を図-4に示す。

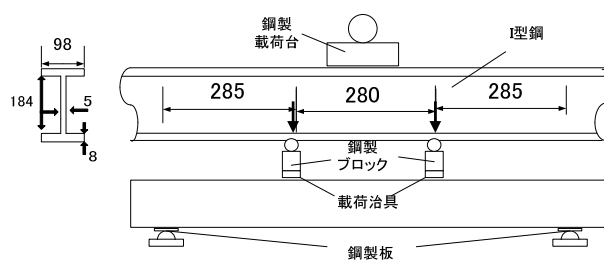


図-1 載荷条件

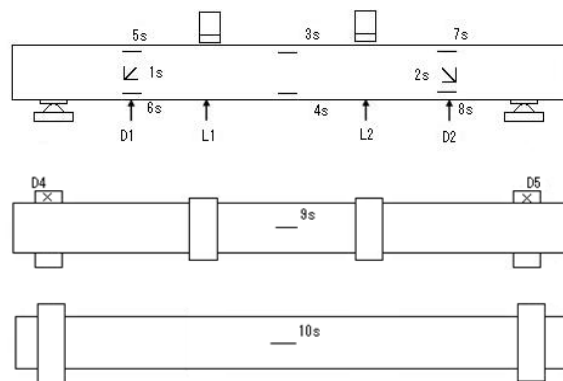


図-2 変位とひずみの計測位置

表-1 各供試体の耐荷力

供試体名	耐荷力 (kN)	供試体名	耐荷力 (kN)
SP75-1	36.85	SP100-1	56.25
SP75-2	44.88	SP100-2	55.37
SP75-3	42.83	SP100-3	54.19
SP75-4	39.10	SP100-4	51.65
SP75-5	35.87	SP100-5	56.25
平均	39.91	平均	54.74



図-3 断面のつぶれ

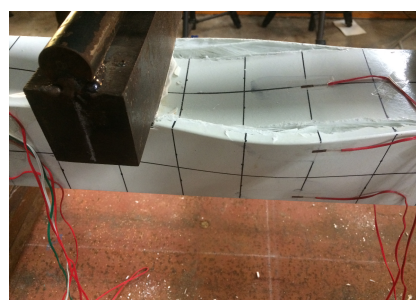


図-4 破壊形態

3. 画像解析

FRP は異方性で脆性的な挙動を示すため、画像解析により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が有効である。以下では本論文で用いた画像解析の概要を述べる。

(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-5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）の変位・ひずみ計測時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 表面は一般的な白色であるため、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¹⁰⁾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。SP75 の着目点は、水平方向に 68 点、鉛直方向に 16 点を設けて、合計 1088 点とした。SP100 は鉛直方向に 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。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（図-6）。

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。また、面外変形による変位を補正するにあたって、ここでは変位算出後に、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。

(3) ひずみ・応力・破壊指標値算出

格子状にある 4 つの着目点の変位量より、梁軸方向直ひずみ、梁周方向直ひずみ、面内せん断ひずみ、最大せ

ん断ひずみを求めた。

ひずみより応力を求めるにあたっては、表-2に示す GFRP の材料試験結果⁹⁾を参考にして行った。梁軸方向応力、梁周方向応力、面内せん断応力、最大主応力、最小主応力を求めている。

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。

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

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

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

(2)

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。

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るが、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。誤差の低減は Wiener フィルターを使用すること図り、変位、ひずみ、応力、破壊指標値の分布図に用いている。

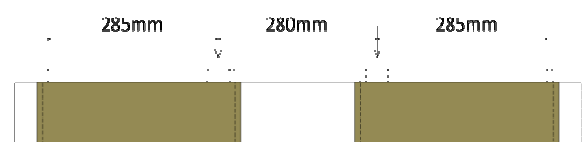


図-5 画像撮影範囲 (点線枠内)

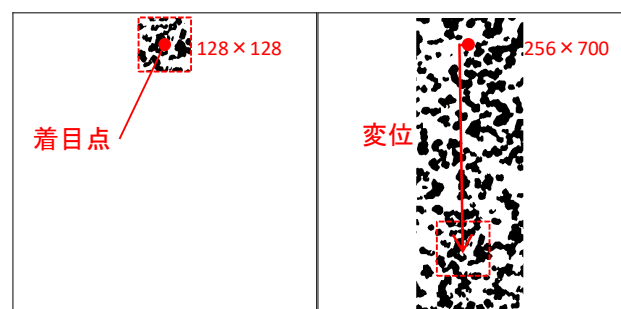


図-6 変形前 (左) と変形後 (右) の着目領域画像
(いずれも階調反転画像)

4. 有限要素解析

(1) 解析モデル

図-7に GFRP 梁の有限要素モデルを示す。梁の全体座標系を X-Y-Z 座標系とし、X、Y、Z をそれぞれ、梁軸方向、鉛直方向、積層方向とする。解析では、GFRP を 4 節点薄肉シェル要素、載荷板と支持板は 8 節点固体要素とし、剛結させてモデル化した。要素数は SP75 で 8,172 要素、SP100 で 10,852 要素であり、要素寸法は全要素が 5×5×5mm である。梁の対称性を考慮して 1/2 モデルとして、対称面節点の X 方向を拘束した。支点は支点上の節点の Y 方向変位を拘束し、鉛直荷重は面に作用する圧力として与えている。

(2) 材料特性

GFRP は異方性とし、材料特性は表-2に示す値を用いた。添え字 1, 2, 3, T, C, U はそれぞれ梁軸方向、梁周方向、板厚方向、引張強度、圧縮強度、せん断強度を示す。

三次元の異方性要素には 9 つの独立な弾性定数が必要である。式(3)にひずみ-応力関係を示す。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\nu_{12} & -\nu_{13} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{21} & \frac{1}{E_2} & -\nu_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_3} & -\nu_{31} & -\nu_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 E_1 ：梁軸方向弾性係数、 E_2 ：梁周方向弾性係数、 E_3 ：積層方向弾性係数、 G_{12} ：面内せん断弾性係数、 G_{23} 、 G_{31} ：面外せん断弾性係数、 ν_{12} 、 ν_{21} 、 ν_{13} 、 ν_{31} 、 ν_{23} 、 ν_{32} ：ポアソン比である。

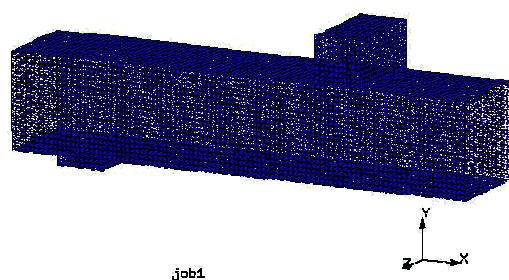


図-7 有限要素モデル

本研究における解析対象の GFRP 梁では、材料試験により面内に関する 4 つの工学的弾性定数 (E_1 , E_2 , G_{12} および ν_{12}) は既に得られている。残りの面外に関する工学的弾性定数は計算により算出あるいは、既往の研究⁴⁾を参考に仮定する。

載荷板と支持板の材料特性は $E=200\text{GPa}$, $\nu=0.3$ とし、弾性体としてモデル化した。解析モデルでは、載荷板の寸法を、幅 50mm、高さ 50mm、奥行き 100mm、支持板の寸法を、幅 50mm、高さ 10mm、奥行き 100mm とした。

(3) 破壊規準

FRP の材料破壊の規準には、Tsai-Wu の破壊規準を用いる。画像解析で用いた二次元で 3 つの応力による Tsai-Wu の破壊規準 (式(1)) に対して、ここでは三次元の規準を用いており、異方性材料における 6 つの応力を考慮する。材料強度 (圧縮と引張の破壊強度を区別) から異方性を考慮した係数を得ることができるため、直応力間の破壊に与える相互作用および直応力とせん断応力間の破壊に与える相互作用を考慮することができる。Tsai-Wu の異方性係数は表-2の材料特性より定めることができる。いずれかの節点が破壊規準を満たすまで GFRP は線形挙動とし、破壊規準を満たした時の荷重を梁の解析耐力力とする。

5. 解析結果

有限要素解析と画像解析の結果を図-2の主な計測結果と合わせて示す。また、SP75 は SP100 と概ね同様の挙動を示していたため異なる挙動についてのみ述べる。

表-2 GFRP の材料特性値

材料特性		備考
E_1 (MPa)	9100	クーポン試験値
E_2 (MPa)	32100	クーポン試験値
E_3 (MPa)	8500	文献より仮定 ¹⁰⁾
G_{12} (MPa)	3320	±45 度引張試験値
G_{23} (MPa)	3320	文献より仮定 ¹²⁾
G_{31} (MPa)	3320	文献より仮定 ¹²⁾
ν_{12}	0.279	引張試験値
ν_{23}	0.37	文献より仮定 ¹²⁾
ν_{31}	0.261	ベッチの相反定理より算出
σ_1^T (MPa)	225	引張試験値
σ_1^C (MPa)	101	圧縮試験値
σ_2^T (MPa)	397	引張試験値
σ_2^C (MPa)	609	圧縮試験値
σ_3^T (MPa)	62	文献より仮定 ¹²⁾
σ_3^C (MPa)	173	文献より仮定 ¹²⁾
τ_{12}^U (MPa)	25.2	±45 度引張試験値
τ_{23}^U (MPa)	33.2	G23 の限界ひずみ 1% と仮定
τ_{31}^U (MPa)	38.7	層間せん断試験値

(1) 荷重－変位関係

図-8に SP75, 図-9に SP100 供試体の荷重点位置の荷重－変位関係および有限要素解析結果を示す。これらの変位量は、変位計 D4 と D5 の測定値を用いて支点沈下量を差し引いている。梁は概ね線形挙動を示しているが、SP75においては約 30kN より剛性の低下が見られる。後述するせん断ひずみの非線形性と、亀裂発聲音が生じていることから、進行的に損傷が進んだ結果だと考えられる。実験において、SP75 の平均耐荷力は 39.91kN, SP100 は 54.74kN であった(表-1)。一方で、Tsai-Wu の破壊指標値が 1 となる SP75 および SP100 の解析による耐荷力はそれぞれ、26.5kN と 36kN (図中赤点)であり、実験で観察された耐荷力より小さい荷重で生じる結果となった。一つの理由として、解析で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っていることが考えられる。

(2) 梁軸方向ひずみ

図-10および図-11に SP100 の曲げスパン中央上フランジおよび下フランジ荷重－梁軸方向直ひずみ関係を、図-12および図-13に SP100 の曲げスパン中央ウェブ上部および下部の荷重－梁軸方向直ひずみ関係を示す。また、有限要素解析結果も合わせて示している。各供試体は終局まで引張と圧縮共にほぼ線形挙動を示しており、解析結果と一致している。

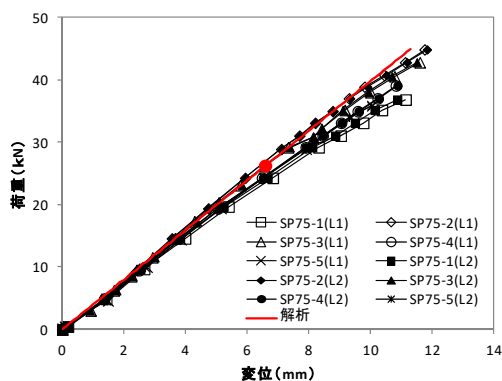


図-8 SP75の荷重－変位関係 (L1, L2)

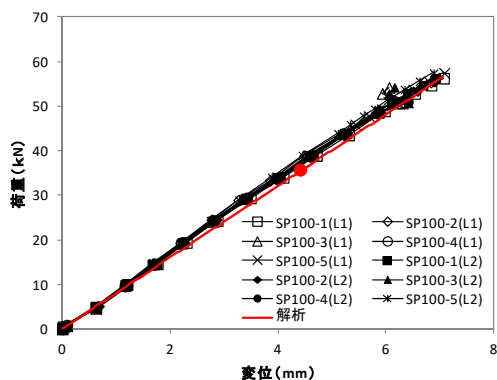


図-9 SP100の荷重－変位関係 (L1, L2)

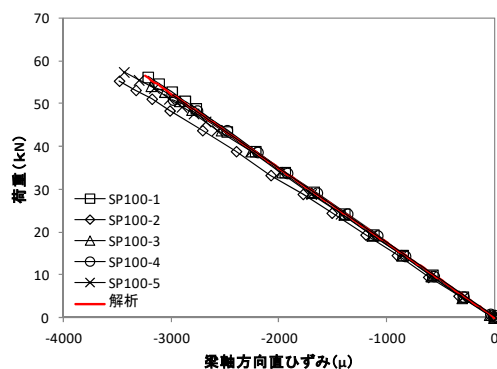


図-10 SP100の上フランジにおける梁軸方向直ひずみ (9s)

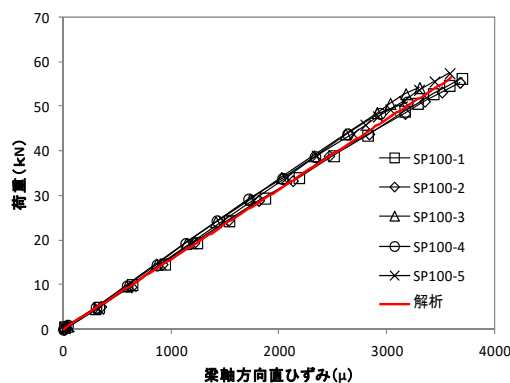


図-11 SP100の下フランジにおける梁軸方向直ひずみ (10s)

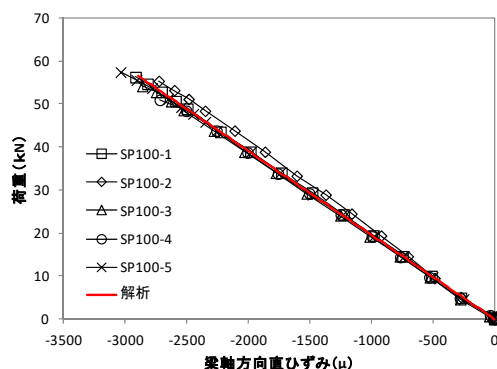


図-12 SP100の曲げスパン中央ウェブ上部における荷重－梁軸方向直ひずみ (3s)

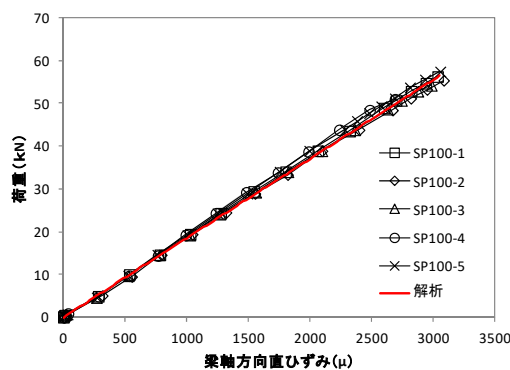


図-13 SP100の曲げスパン中央ウェブ下部における荷重－梁軸方向直ひずみ (4s)

図-14および図-15に SP100 のせん断スパン中央ウェブ上部および下部における荷重－梁軸方向直ひずみ関係を解析結果と合わせて示す。これらの関係は、引張と圧縮共に荷重早期よりばらつきと非線形挙動がみられる。解析結果はこれらの平均的な挙動と一致している。

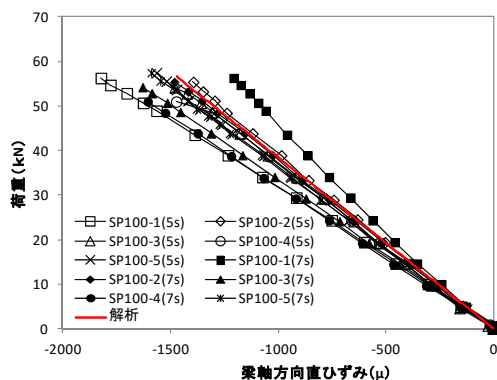


図-14 SP100のせん断スパン中央ウェブ上部における荷重－梁軸方向直ひずみ関係 (5s, 7s)

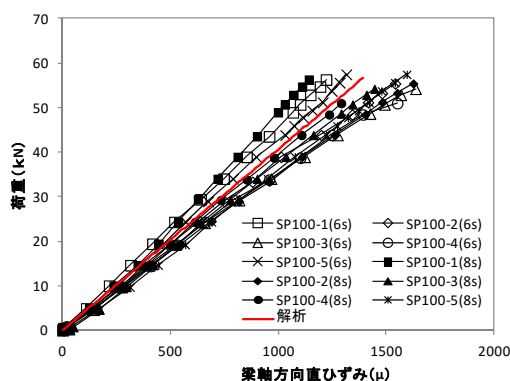


図-15 SP100のせん断スパン中央ウェブ下部における荷重－梁軸方向直ひずみ (6s, 8s)

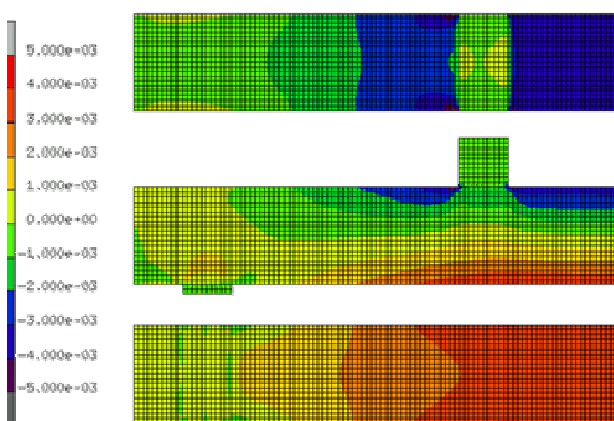


図-16 SP100の梁軸方向直ひずみ分布 (有限要素解析)

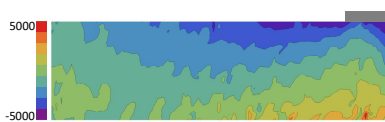


図-17 SP100の梁軸方向直ひずみ分布 (画像解析)

図-16および図-17に SP100 の有限要素解析による実験耐力時の梁軸方向直ひずみ分布と画像解析による破壊直前の梁軸方向直ひずみ分布を示す。共に、曲げスパンにおいて中立軸が梁高さ中央にあり、荷重点と支点付近での分布の変化も同様の結果が得られている。

(3) せん断ひずみ

図-18と図-19に、SP75 と SP100 のせん断スパン中央ウェブ中央における荷重－面内せん断ひずみ関係を有限要素解析結果と合わせて示す。実験では非線形な挙動を示しており、終局時には面内せん断ひずみはそれぞれ 10,000μ, 8,000μ程度を示している。これは、斜行方向に繊維を有していないため、樹脂のせん断変形における非線形性に起因するものと考えられる。線形の有限要素解析は表-2の値を用いており、SP75 では概ね平均的な結果となっているが、一方で SP100 は下限側の結果となっている。

図-20と図-21に SP100 の有限要素解析による実験耐力時のせん断ひずみ分布および画像解析による破壊直前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ている。荷重板端部に局所的なひずみ集中が見られ、15,000μを超えている。また、荷重板端部よりウェブ中央高さ付近へと高い

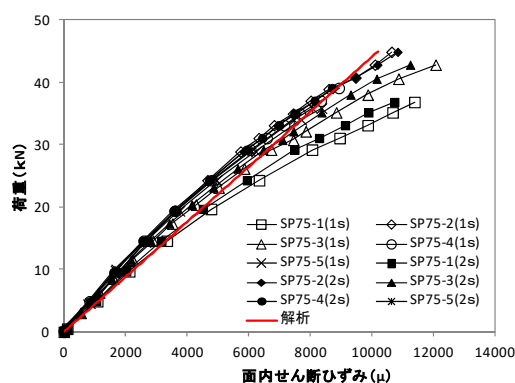


図-18 SP75のせん断スパン中央ウェブ中央における荷重－面内せん断ひずみ (1s, 2s)

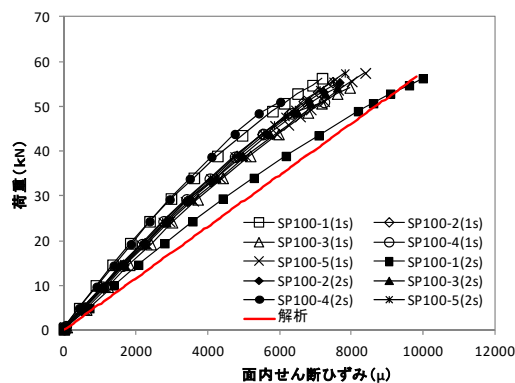


図-19 SP100のせん断スパン中央ウェブ中央における荷重－面内せん断ひずみ (1s, 2s)

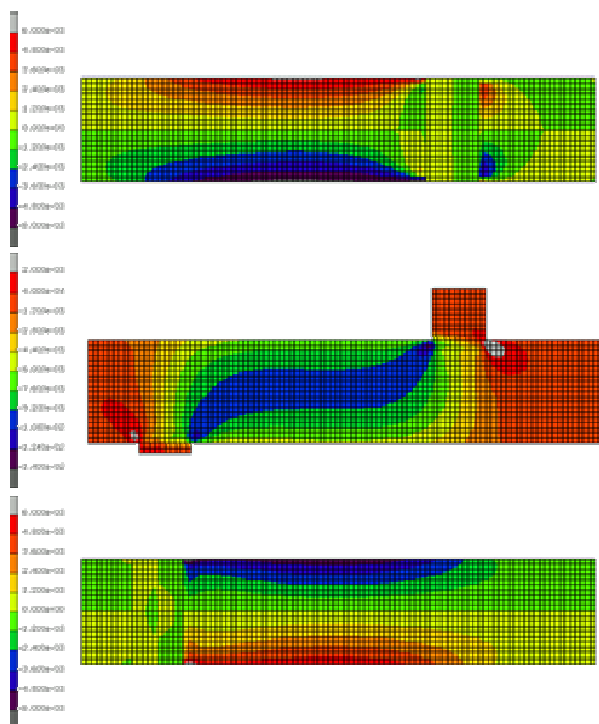


図-20 SP100のせん断ひずみ分布（有限要素解析）

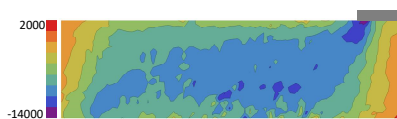


図-21 SP100のせん断ひずみ分布（画像解析）

せん断ひずみの領域がそれぞれの解析結果において確認できる。

(4) 主ひずみ

図-22と図-23に、SP100の有限要素解析による実験耐荷力時の最大主ひずみ分布と画像解析による最大主ひずみ分布を示す。せん断スパンでは斜め方向に高い最大主ひずみ（引張）の領域が広く確認できる。最大値は載荷板端部で見られるが局所的に集中しているというほどではない。

同様に、図-24と図-25に SP100の有限要素解析による実験耐荷力時の最小主ひずみ分布と画像解析による最小主ひずみ分布を示す。最小主ひずみは最大主ひずみと直交する方向にある。せん断スパンにおいて最小主ひずみ（圧縮）が生じ、特に載荷板端部には局所的なひずみ集中が観察できる。最大値は載荷板端部で確認できる。

(5) 主応力

図-26と図-27に SP100の有限要素解析による実験耐荷力時の最大主応力分布と画像解析による最大主応力分布を示す。最大主応力分布を最大主ひずみ分布と比較すると、最大主ひずみは載荷板端部からウェブ中央付近高さ付近にかけて高いひずみの領域が確認できるのに対し、

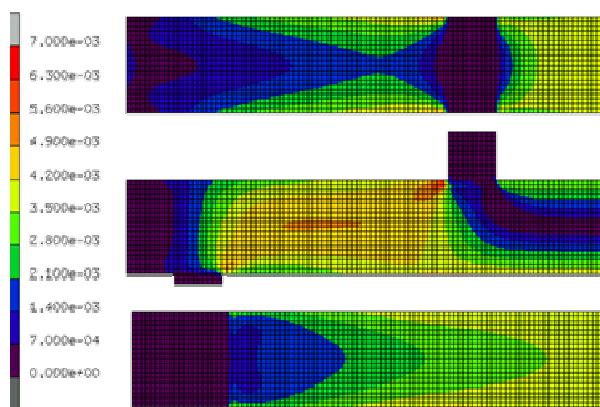


図-22 SP100の最大主ひずみ分布（有限要素解析）

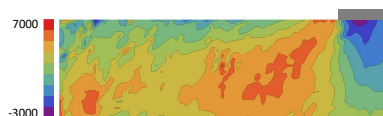


図-23 SP100の最大主ひずみ分布（画像解析）

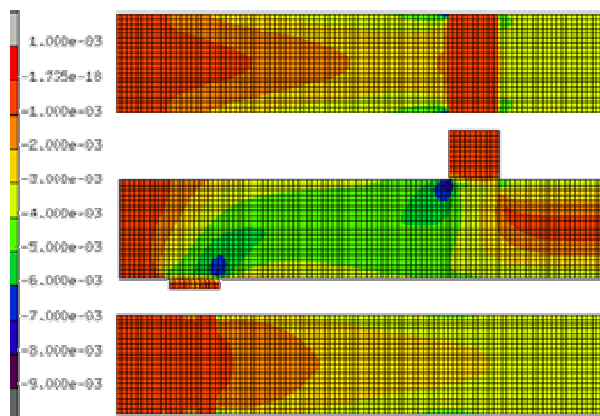


図-24 SP100の最小主ひずみ分布（有限要素解析）



図-25 SP100の最小主ひずみ分布（画像解析）

最大主応力では上フランジ側から下フランジ側に進むにつれて主応力の値が大きくなり、梁中央部の下フランジ側で特に大きな値を示している。画像解析は載荷点断面付近のせん断支間から曲げ支間への分布は同様であることが認められるが、せん断支間において相違がある。

同様に、図-28と図-29に最小主応力分布を示す。最小主ひずみでは載荷板のせん断スパン側端部に局所的なひずみ集中が見られ、載荷板端部からせん断スパンのウェブ中央高さ付近にかけて高い主ひずみの領域が確認できるのに対し、最小主応力では下フランジ側から上フランジ側へと値が大きくなっていき、載荷板付近で特に大きな主応力が確認できる。画像解析では同様の分布がみら

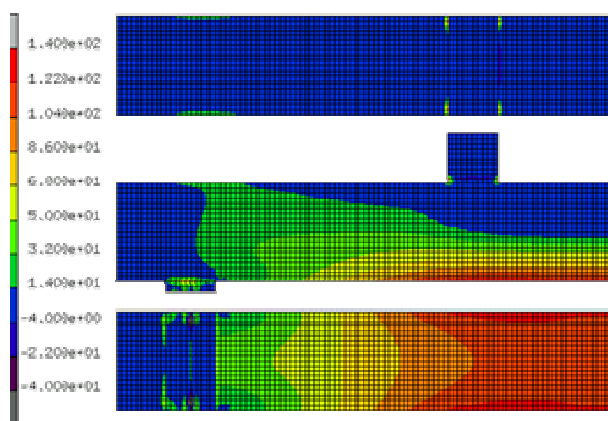


図-26 SP100の最大主応力分布（有限要素解析）

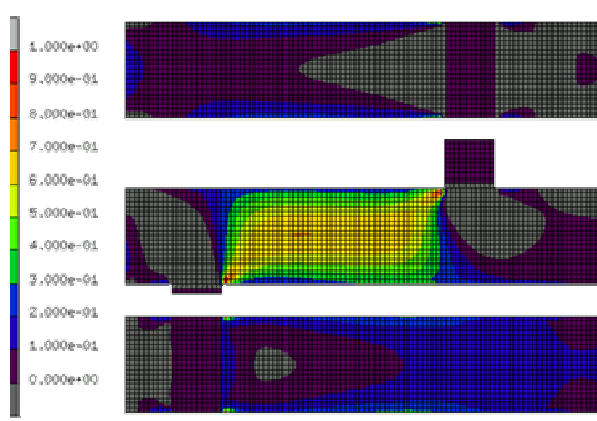


図-30 SP100の破壊指標値分布（有限要素解析）



図-27 SP100の最大主応力分布（画像解析）

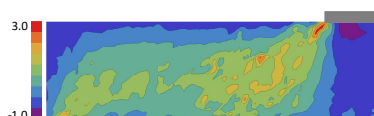


図-31 SP100の破壊指標値分布（画像解析）

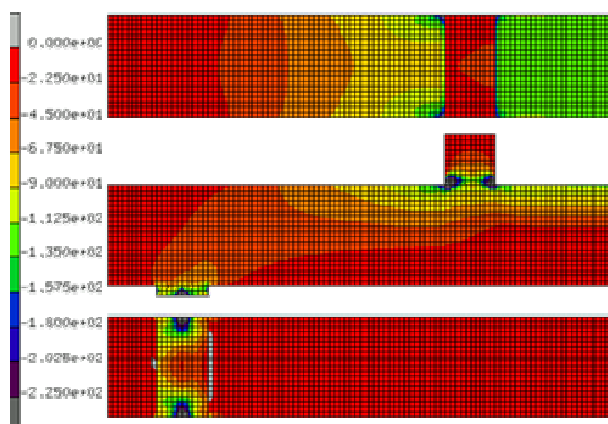


図-28 SP100の最小主応力分布（有限要素解析）



図-29 SP100の最小主応力分布（画像解析）

れる部分もあるが、全体傾向が同様とは言い難い。

画像解析での応力の計算は線形性を仮定してひずみ計測値より計算しているため、最大と最小主応力の分布の相違が生じていることが考えられる。

(6) 破壊指標値

図-30と図-31に SP100 の有限要素解析による解析耐力時（Tsai-Wu の破壊規準=1）の破壊指標値分布と画像解析による実験耐力時の破壊指標値分布を示す。共に、せん断スパンのウェブ中央高さ付近から載荷板と支点に向かって値の高い領域が広がっている。特に、載荷板のせん断スパン側端部において高い値を示しており、有限

要素解析と画像解析の結果は一致している。しかしながら、有限要素解析は実験耐力力より小さな荷重で規準である 1 に達しており、画像解析では実験耐力力時は 1 を超え 3 に近い値に達している。これは、画像解析での応力の算出は線形性を仮定してひずみ計測値より計算していることと、材料試験による強度値が実部材中の強度値と異なることが理由であると考えられる。

実験では、SP75 と SP100 共に載荷板のせん断スパン側上フランジが断面つぶれをして荷重減が生じた後に、さらに荷重を増加させると載荷板直下の隅角部より亀裂が生じて、ウェブと上フランジの間が分離する破壊形態となったことから、破壊箇所の一致はしていない。これは本研究に用いた供試体は無補剛であり、箱形断面のつぶれによって破壊に至ったと考えられるためである。断面中空部の載荷点と支点到に補剛材を設置した場合には、断面つぶれは抑制されて破壊指標値が局部的に高い値を示しているせん断スパン側載荷板端部において破壊する可能性もあると考えられる。

(7) 隅角部割れに関する検討

実験では、SP75 は約 30kN、SP100 は約 45kN で上フランジのつぶれが生じ、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。供試体は無補剛であるため生じた箱形断面のつぶれにより、載荷板からの荷重伝達がウェブ直上で集中的に生じた。その結果、図-32に示す位置に yz 方向せん断応力が生じ、この応力が隅角部割れに対して支配的であったと考えられる。ここでは、箱形断面 GFRP 梁の圧縮側フランジとウェブの隅角部における載荷点近傍の面外方向せん断応力に起因した材料破壊による隅角部

割れ発生耐力を考える。

当該位置における平均 yz 方向せん断応力は

$$\tau_{yz} = \frac{V_y}{2t_f d} \quad (4)$$

であり、ここに d は載荷板の奥行きである。分母の 2 は載荷板直下の 2 つの隅角部への作用を考慮している。せん断強度 τ_{yz}^U を代入して、せん断力について解けば、

$$V_u^R = 2\tau_{yz}^U t_f d \quad (5)$$

となる。ここに、 V_u^R は隅角部割れ発生耐力である。

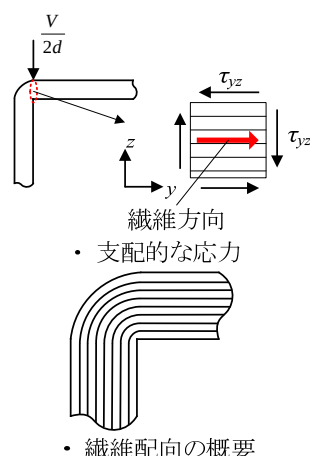


図-32 隅角部割れに対して支配的な応力

本実験での隅角部割れ発生耐力を算定すると 16.6kN となり、実験値は荷重－梁軸方向直ひずみ関係（図-10 から図-13）における接線剛性変化点を隅角部割れ耐力と定義すると 20kN となる。算定値の方がやや小さい原因としては、面外方向せん断強度を仮定していることが考えられる。また、最終的な隅角部の分離はより大きい荷重で発生しており、割れは進行的に起こると考えられる。

6. 結論

本研究では、GFRP を用いた引抜成形の箱形断面梁供試体における 4 点曲げ載荷実験の結果について、有限要素解析による変形・破壊挙動の検討を行った。

有限要素解析においては、GFRP に三次元異方性要素を用いたモデルを作成し線形解析を行った。荷重－変位関係は実験において概ね線形的であり、傾向は解析結果と一致するものの、終局に向けての若干の非線形性により乖離がみられた。これは、載荷初期よりせん断ひずみでみられる非線形性と進行的な損傷によるものと考えら

れる。破壊規準に基づく耐荷力は実験よりも小さく、その理由として材料試験値が実部材中の強度より過小になっていることが考えられる。

画像解析との比較では、ひずみにおいて同様の分布と局所的な集中が見られ妥当性が得られる結果となった。主応力は分布において一部相違がみられた。これは応力算出にひずみとの線形関係を仮定したことによると考えられる。さらに、破壊指標値は分布が同様であるものの、有限要素解析も画像解析も実験耐荷力との相違があった。これは応力算出に加えて、材料試験による強度値が実部材中の強度値と異なるためであると考えられる。

実験での破壊過程は、断面つぶれの後に上フランジとウェブの隅角部割れが生じるものであり、解析でも断面のつぶれが起きることを確認した。隅角部割れに対して支配的な応力に基づき隅角部割れ耐力の検討を行い、その値が実験値におおよそ近いことを確認した。

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) 土木学会：複合構造レポート 11 土木構造物 FRP 部材の設計基礎データ，土木学会，2014.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 松本高志，小林周史：GFRP 製箱形断面梁における

- 変形・損傷の画像解析，第 11 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，pp. 221-228，2015.
- 10) 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.
- 11) 小川俊夫：工学技術者の高分子材料入門，共立出版，p44，2003.
- 12) 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.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF GFRP BOX BEAMS

Takashi MATSUMOTO and Tomomi NAKAMURA

This paper presents finite element analysis on the deformation and fracture behaviors of GFRP box beams which are loaded under four-point flexure. Three dimensional orthotropic elements are used in finite element analysis for modelling GFRP which is produced by protrusion molding method, and dominant strains and stresses are examined for fracture. The results of finite element analysis are compared with experimental measurements and the results of image analysis. Although finite element analysis is linear, it shows a general agreement with the experiment and image analysis, except for principal stresses and failure index. The ultimate failure is the corner fracture between upper flange and web, following the collapse of box section. Based on these failure processes, corner cracking load is calculated and compared with experimental observation.