

せん断変形を考慮した断面分割法による CFRP 梁の非線形曲げ挙動の解析

Analysis on nonlinear bending behaviors of CFRP beams by section partition method with shear deformation

北海道大学大学院工学院 ○学生員 那須桃香 (Momoka Nasu)

北海道大学大学院工学研究院 正員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー(以下, CFRP)は, 高強度かつ軽量で, 耐腐食性に優れた材料である。その特性から, 近年, 橋梁の梁部材への適用が期待されている¹⁾。

CFRP を橋梁の梁部材として用いる場合, 単層板を積層させた積層板と呼ばれるものの耐荷力および変形を考える必要がある。これまでは, 積層板の材料特性から, それらの検討が行われてきた。この場合において, 耐荷力については概ね算定できる方法が提案されており, 変形については積層板を弾性材料とみなして算定する方法のみが提案されているのが現状である^{1)~7)}。

しかし, 実際の CFRP 梁は弾性材料ではない。直方向の挙動について, 単層板が破壊することにより, 梁の破壊に至るまでに徐々に剛性が低下し, 若干の非線形性を示すことが分かっている。また, せん断方向の剛性が低く, 比較的早期に非線形挙動を示す。このため, CFRP 梁のたわみ変位を, 曲げ変形の成分とせん断変形の成分の両方を考慮して求める方法が必要とされている。

そこで, 本研究では, 既往の実験結果について, 断面分割法による解析を行い, その有効性を検証することを目的とする。断面分割法は, 断面を分割し, 要素ごとに変形を計算する方法である。直方向の非線形挙動を梁の曲げにおいて簡易に考慮でき, せん断方向の非線形挙動も足し合わせることができるという特徴を持つ。

2. 実験方法

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 1000 mm, 高さ 100 mm, 幅 100 mm, 板厚 5 mm, 隅角部外側 R 約 5 mm, 隅角部内側 R 約 1 mm)である。供試体は VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) 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, 真空パックをかぶ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た。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。また, 積層板の材料特性を得るために, 要素試験を行った。

炭素繊維と樹脂の材料特性を表-1 に, 積層構成と平均繊維堆積含有率を表-2 に示す。2 種類の供試体を QI (Quasi-Isotropic) と CP (Cross-Ply) 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-3 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。

表-1 炭素繊維および樹脂の材料特性

	Property	Value	Remarks
Carbon fiber	Elastic modulus E_f (GPa)	240	Normal value
	Poisson's ratio ν_f	0.20	Assumed value ⁶⁾
	Shear modulus G_f (GPa)	100	$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)}$
Epoxy resin	Elastic modulus E_m (GPa)	4.20	Assumed value ⁴⁾
	Poisson's ratio ν_m	0.38	Assumed value ⁷⁾
	Shear modulus G_m (GPa)	1.52	$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$

表-2 供試体の構成

Name	Laminate structure	Fiber volume fraction
QI	$[0/45/-45/90]_5/[90/-45/45/0]_5$	46.1 %
CP	$[0/90]_5/[90/0]_5$	48.0 %

表-3 方向別積層数

Name	0°	90°	±45°	Total
QI	10	10	20	40
CP	10	10	0	20

QI では, 梁軸方向 (Longitudinal), 梁周方向 (Transverse), 斜行方向 (Diagonal) の繊維比率 L:T:D 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。

2.2 載荷方法と計測項目

載荷は 4 点曲げにより行い, QI は支間長 850 mm, せん断支間 375 mm, 曲げ支間 100 mm とした。CP は支間長 850 mm に対して, せん断支間 375, 285, 185 mm, それぞれ曲げ支間 100, 280, 480 mm とした。以降それぞれを CP375, CP285, CP185 と呼ぶ。図-1 に供試体寸法と載荷条件(QI)を示す。

載荷点と支点には幅 50 mm, 高さ 5 mm, 奥行き 120 mm の銅製板を用いた。銅製板と供試体の隙間は石膏により埋めた。載荷点では幅 50 mm, 高さ 55 mm, 奥行き 200 mm の銅製ブロックを介して載荷した。また, 補剛材として幅 60 mm, 高さ 90 mm, 奥行き 30 mm 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、加えてせん断支点中央にも配置した。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い、約 5 kN 毎に荷重を停止して計測を行った。

2.3 結果概要

破壊した供試体の写真を図-3 に示す。各供試体の耐荷力は、QI の 3 体では 97.0, 98.2, 92.9 kN (平均 96.0), CP375 の 3 体では 74.4, 78.5, 82.4 kN (平均 78.4), CP285 の 3 体では 103.1, 98.2, 100.1 kN (平均 100.47), CP185 の 2 体では 126.2, 127.4 kN (平均 126.8)であった。

いずれの供試体もせん断支点側の荷重板端部の上フランジとウェブで脆性的に鉛直方向の破壊が生じた。

3. CFRP 梁の変位の算出方法

3.1 曲げ変形による変位の算出方法

断面分割法により曲げ変位を算出した。ここでは、スパンを 10 分割、断面を高さ方向に 20 分割して解析を行った。

まず、断面に圧縮縁ひずみを付与し、CFRP の構成則から求めた弾性係数を用いてひずみ分布と応力分布を計

算する。ここで断面の力が釣り合うように、中立軸の位置を決定する。中立軸の位置を決定後、曲げモーメントの計算をする。圧縮縁ひずみを漸増させて繰り返し計算し、 $M-\Phi$ の近似式を求める。 Φ は以下の式で表される。

$$\frac{1}{\rho} = \Phi = \frac{d\theta}{dx} = \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{h} \quad (1)$$

ここに、 ρ は曲率半径、 θ はたわみ角、 ε' は圧縮縁ひずみ、 ε は引張縁ひずみ、 h は高さである。

$M-\Phi$ の式から、 $\Phi-x$ の式を求め、 x で積分することで $\theta-x$ 図を作成する。図-4 に示すように、BMD から、各要素の Wx と Xg を計算する。

面積モーメント法を用いて、各要素のたわみを求め、それらを合わせてたわみ曲線を描く。

3.2 せん断変形による変位の算出方法

せん断変位は Timoshenko 梁において以下の式で表される、せん断変位の項を用いて求めた。

$$y_s = \frac{Pa}{2GA_w} \quad (2)$$

ここで y_s は荷重点位置のせん断変位、 P は全体の鉛直荷重、 G はせん断弾性係数、 A_w はウェブの断面積、 a はせん断スパン長である。図-5 に供試体 QI と CP375-1 のひずみゲージ 1s, 2s における荷重-面内せん断ひずみ関係をそれぞれ示す。

まず、部材計測による G の算出方法を記す。実験において、QI は荷重の増加に伴いせん断剛性の低下がほとんど起きず、CP は徐々にせん断剛性が低下していることが

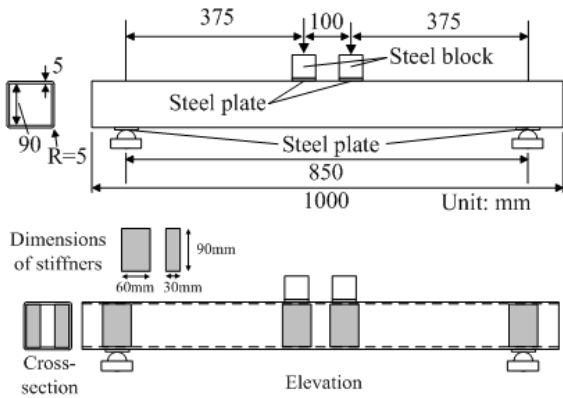


図-1 供試体寸法と荷重条件

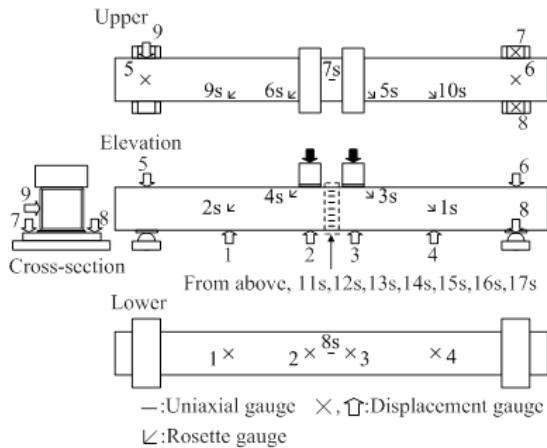
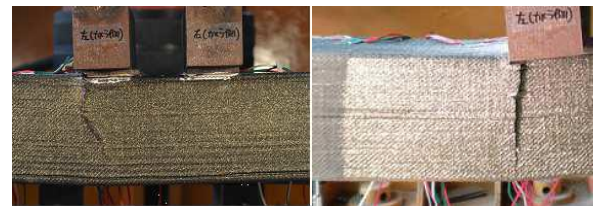


図-2 変位とひずみの計測位置



(a) QI

(b) CP375



(c) CP275

(d) CP185

図-3 破壊状況

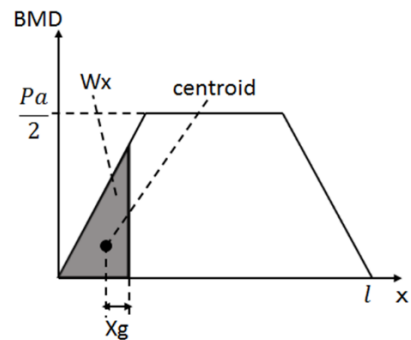


図-4 面積モーメント法

分かった。CP はせん断に抵抗する斜行方向の単層板を有していないため、せん断変形が非線形になるものと考えられる。そこで、CP については、ウェブのせん断スパン中央のせん断応力-面内ひずみ関係を 5 次の近似曲線で表して、非線形挙動を考慮したせん断変位を求めた。

まず、ひずみゲージ 1s と 2s の貼り付け位置であるウェブ中央におけるせん断応力 τ を求めると、

$$\tau = \frac{P}{2I} \left(\frac{BH}{4} + \frac{H^2}{8} \right) \quad (3)$$

ここに、 I は断面 2 次モーメント、 B はフランジ幅、 H は梁の高さである。

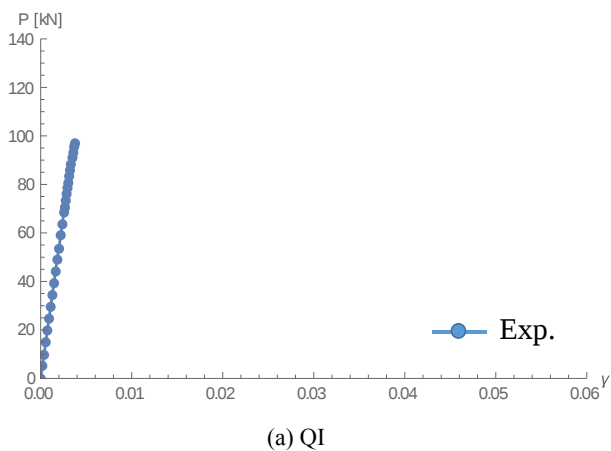
次に、実験における荷重-せん断ひずみ関係を 3 次式で近似すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \gamma(P) &= 0.0536P^3 - 3.2271P^2 + 181.1P \quad (\text{CP375}) \\ \gamma(P) &= 0.0265P^3 - 1.4055P^2 + 157.28P \quad (\text{CP285}) \\ \gamma(P) &= 0.0277P^3 - 2.3758P^2 + 199.27P \quad (\text{CP185}) \end{aligned} \quad (4)$$

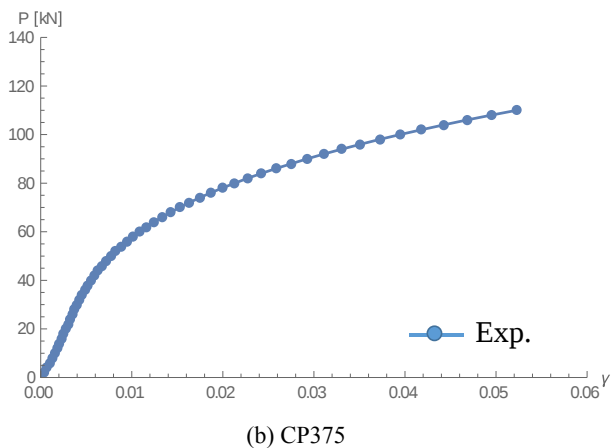
ここに、 $\gamma(P)$ は面内せん断ひずみ、 P は載荷荷重(kN)である。なお、この式の適用範囲は積層構成と荷重条件によるため、本論文の範囲内に限られる。

(3)、(4)よりせん断応力-面内ひずみ関係を 5 次式で近似し、各点ごとの接線の傾きを求め、それを各点におけるせん断弾性係数 G (部材計測)とする。

次に、材料特性を得るために行われた要素試験から G を求める方法を記す。試験では、引張応力-引張ひずみ関係が得られている。部材計測と同様に、これを 5 次式で近似し、その各点ごとの接線の傾きをせん断弾性係数 G (要素試験)とする。



(a) QI



(b) CP375

図ー5 荷重-ひずみ曲線(ひずみゲージ 1s と 2s の平均値)

4. 荷重-変位関係の解析結果

面積モーメント法により求めた曲げ変位と Timoshenko 梁理論により求めたせん断変位の算出結果を足し合わせて得られた、載荷点位置における荷重-変位関係について実験結果との比較を示す。図中、(部材計測)と(要素試験)は、3.2 に示した方法でそれぞれ求めた G を用いて、算出していることを示す。

図ー6(a)に QI の荷重-変位関係と供試体 3 体による実験結果との比較を示す。QI-1, 2, 3 それぞれにおいて、耐荷力は 97.0, 98.2, 92.9 kN, 平均値 96.0 kN であり、耐荷力時の載荷点位置変位は 10.79, 11.08, 10.97 mm, 平均値 10.94 mm であった。解析結果は、耐荷力の平均値において、載荷点位置変位 11.65 mm であった。曲げ変形とせん断変形による変位はそれぞれ、10.40 mm, 1.244 mm であり、曲げ変形による変位がせん断変形による変位の 8.36 倍である。QI の場合は、せん断変形の影響が小さいことが分かる。グラフの形は概ね一致しており、特に荷重 40 kN 前後まではよく一致している。

図ー6(b)に CP375 の荷重-変位関係と供試体 3 体による実験結果との比較を示す。CP375-1, 2, 3 それぞれにおいて、耐荷力は 74.4, 78.5, 82.4 kN, 平均値 78.4 kN であり、載荷点位置変位は 10.67, 11.76, 12.65 mm, 平均値 11.69 mm であった。解析結果は、耐荷力の平均値において、載荷点位置変位 12.85 mm であった。曲げ変形とせん断変形による変位はそれぞれ、5.540 mm, 7.315 mm であり、せん断変形による変位が曲げ変形による変位の 1.32 倍である。解析(部材計測)の方が剛性の値が小さくなっているものの、グラフの形は概ね一致している。

図ー6(c)に CP285 の荷重-変位関係と供試体 3 体による実験結果との比較を示す。CP285-1, 2, 3 それぞれにおいて、耐荷力は 103.1, 98.2, 100.1 kN, 平均値 100.47 kN であり、載荷点位置変位は 11.21, 10.89, 10.90 mm, 平均値 11.00 mm であった。解析結果は、耐荷力の平均値において、載荷点位置変位 13.44 mm であった。曲げ変形とせん断変形による変位はそれぞれ、5.507 mm, 7.936 mm であり、せん断変形による変位が曲げ変形による変位の 1.44 倍である。50 kN 前後まではグラフの形は概ね一致しているものの、それ以降、解析(部材計測)の方が剛性は小さく計算されている。

図ー6(d)に CP185 の荷重-変位関係と供試体 2 体による実験結果との比較を示す。CP185-1, 2 それぞれにおいて、耐荷力は 126.2, 127.4 kN, 平均値 126.8 kN であり、載荷点位置変位は 10.35, 9.65 mm, 平均値 10.02 mm であった。解析結果は、耐荷力の平均値において、載荷点位置変位 11.71 mm であった。曲げ変形とせん断変形による変位はそれぞれ、3.756 mm, 7.953 mm であり、せん断変形による変位が曲げ変形による変位の 2.12 倍である。CP の 3 種類で比較すると、せん断スパンが小さくなるにつれて、せん断変形の影響が大きくなることが分かる。実験結果との比較では、解析(部材計測)の方が剛性は低くなっているが、グラフの形は概ね一致している。

CP285 と CP185 では、解析(要素試験)で求めた剛性が、実験や解析(部材計測)の剛性より大幅に低くなっている。要素試験では、CP が繊維を持たない方向($\pm 45^\circ$ 方向)に

切り出した試験体を用いているので、部材計測の結果と差異が出た可能性がある。さらに、せん断スパンが小さいとせん断変形の影響が大きくなるので、CP285、CP185の解析(要素試験)結果は差異がより大きくなったと考えられる。

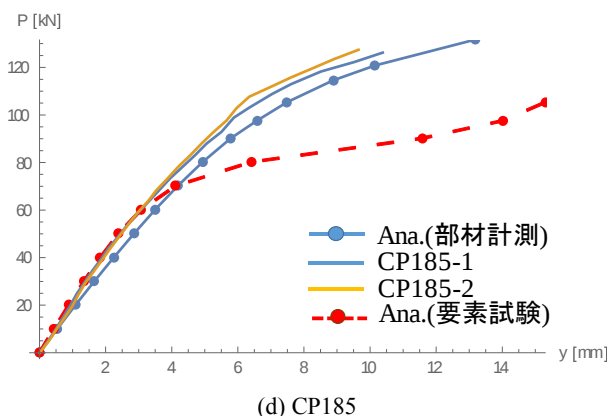
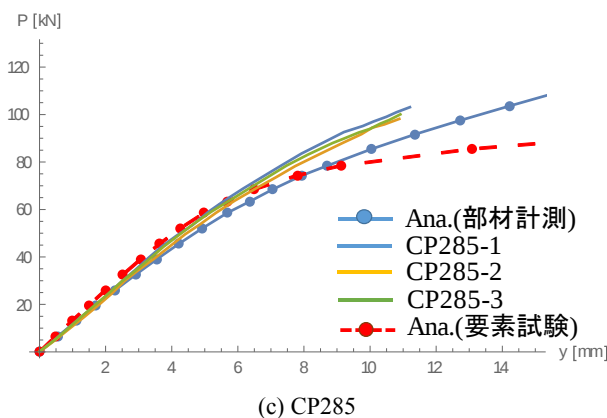
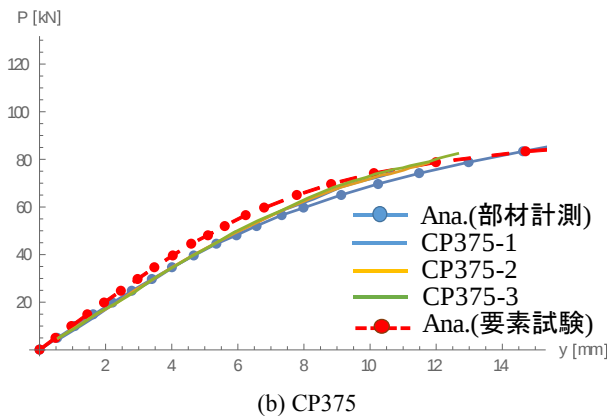
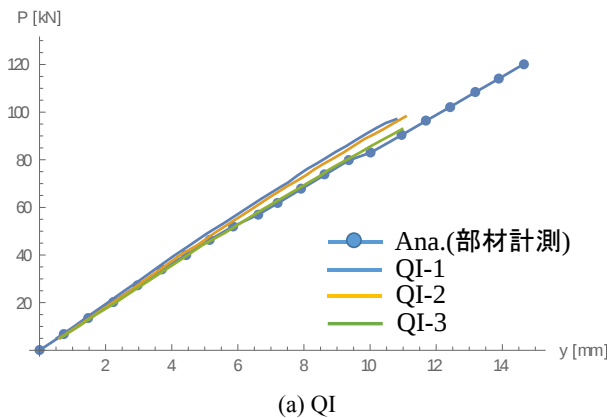


図-6 荷重-変位関係

全体的には、荷重-変位関係は概ね傾向を再現できており、断面分割法による解析の有効性を検証することができた。

5. 結論

本研究では、2種類の異なる積層構成と、3種類の異なるせん断スパン長のもと行った、箱形断面 CFRP 梁供試体 4 点曲げ載荷実験を対象とし、断面分割法を用いた変位の検討を行った。積層構成は疑似等方性(QI)と直交異方性(CP)の2種類、せん断スパン長は 375 mm, 285 mm, 185 mm の3種類とした。

変位は、曲げ変形による変位とせん断変形による変位をそれぞれ求め、後から足し合わせることで算出した。曲げ変位は、CFRP の構成則から求めた弾性係数を使い、面積モーメント法で算出した。せん断変位は、実験時に計測された荷重-せん断ひずみ関係の近似式から、せん断応力-せん断ひずみ関係の近似式を求め、そのグラフの傾きをせん断弾性係数とし、Timoshenko 梁のせん断変位の項を用いることで算出した。

算出した荷重-変位関係と、実験で得られた荷重-変位関係を、各供試体それぞれで比較すると、全体的にグラフの形は一致していた。CFRP 梁の荷重-変位を概ね再現できていると言え、断面分割法による解析の有効性を検証することができた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 櫻庭浩樹, 松本高志, 林川俊郎: 積層構成が異なる箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 1, pp.73-87, 2012.
- 6) D. ハル, T. W. クライン (宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲共訳): 複合材料入門, 培風館, pp. 1-65, 2003.
- 7) 三木光範, 福田武人, 元木信弥, 北篠正樹: 複合材料, 共立出版, pp.1-157, 1997.