単層板の破壊を考慮した CFRP 梁の耐荷力と変形に関する検討

Study on the failure load and deformation of CFRP beams based on the fracture of individual laminae

北海道大学大学院工学院	○学生員	三重野嵩之	(Takayuki Mieno)
北海道大学大学院工学研究院	正員	松本高志	(Takashi Matsumoto)
北海道大学大学院工学院	学生員	櫻庭浩樹	(Hiroki Sakuraba)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	林川俊郎	(Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	何 興文	(Xingwen He)

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、および耐腐食性に優れた材料であり、近年では、 特に橋梁の梁部材への適用が期待されている¹⁾。CFRP を梁部材のような構造材料として適用する場合、単層板 と呼ばれる個々の層を積層させた、CFRP 積層板として 用いられる。そのため、積層構成と呼ばれる単層板を積 層させる枚数と角度が CFRP 積層板を設計する上で重要 となる。これは、積層構成が CFRP 積層板から構成され る梁(以下、CFRP 梁)の曲げ挙動に影響を与えるため であり、そのような影響を把握することは、CFRP 梁を 部材として活用していくために重要である。

以上のような背景から、既往の研究²⁾では、積層構成 が異なる CFRP 梁を対象とした曲げ載荷実験を行い、積 層構成が CFRP 梁の曲げ挙動に与える影響を検討してい る。その結果、積層構成の違いは、CFRP 梁の耐荷力と 変形に影響を与えることが示されている。

しかしながら、既往の研究では、CFRP 梁における単 層板の破壊を考慮しておらず、積層板としての耐荷力と 変形の検討に留まっていた。

そこで本研究では、上述した既往の研究における CFRP 梁を対象とし、CFRP 梁の単層板の破壊を考慮し た耐荷力と変形に関する検討を行うことを目的とした。 具体的には、単層板の破壊を考慮して CFRP 梁の構成則 を導出し、その構成則に基づいて、CFRP 梁の耐荷力と 変形に関する解析を行う。

2. CFRP 梁の曲げ載荷実験方法

本章では、既往の研究²⁾で行われた CFRP 梁の曲げ載 荷実験方法について述べる。以下では、供試体の構成、 載荷条件、補剛材位置、および計測器の配置を示す。

供試体は、炭素繊維とエポキシ樹脂から構成されてい る。表-1 にそれらの材料特性を示す。図-1 に実験に 使用された供試体の寸法を示す。供試体は、長さ 1000 mm、幅および高さ約 100mm、厚さ約 5mm の中空箱形 断面である。

表-2 に供試体の構成を示す。積層構成は 2 種類が採 用され、1 種類の積層構成につき 3 本の供試体を作製し、 合計 6 本の供試体を用意した。表-1 に示す積層構成の スラッシュで区切られた数字は、繊維配向角と呼ばれる 単層板を配向させる角度(degree)を表す。0、90、±45 はそれぞれ、梁軸方向、梁周方向、対角方向を表す。ま

表-1 炭素繊維とエポキシ樹脂の材料特性

炭素繊維		備考	
E_f (GPa)	240	公称值	
v_f	0.20	文献 3)の高強度炭素繊 維の値を仮定	
$G_f(\text{GPa})$	100	$G_f = E_f/2(1+v_f)$	
エポキシ樹脂		備考	
E_m (GPa)	4.20	CFRP 積層板の材料試験 結果 ²⁾ から仮定	
v_m	0.38	文献 4)の下限のポアソ ン比を仮定	
G_m (GPa)	1.52	$G_m = E_m/2(1+v_m)$	
375 375			
↑ 新面外側:約5mm 新面内側:約1mm		- 鋼製板	

図-1 供試体寸法と載荷条件

表-2 供試体の構成

供試体名	積層構成	積層数
QI	$[0/+45/-45/90]_5/[90/-45/+45/0]_5$	40
СР	$[0/90]_5/[90/0]_5$	20

た、積層構成の下付き文字は[]内の組み合せがその数 だけ繰り返し積層されていることを意味する。供試体の 名称は、QI と CP とした。QI は、梁軸方向、梁周方向、 対角方向の単層板の比率が、1:1:2 になっている。CP は、 梁軸方向と梁周方向の単層板の比率が 1:1 になっている。 また、QI と CP の 3 体の平均繊維体積含有率はそれぞ れ、46.1%と 48.0%である。なお、QI と CP は 3 体ずつ 供試体を用意しているが、供試体名の後にハイフンと番 号を付け、"QI-1"、"CP-2"として各供試体を識別できる ようにする。

図-1 に載荷条件を示す。実験は荷重制御下で 4 点曲 げにより行われた。載荷条件はスパン 850mm、せん断 スパン 375mm、曲げスパン 100mm である。載荷点と支 点には、幅 50mm、板厚 5mm、奥行き 120mm の鋼製板 を設置し、石膏を用いて供試体に付着させている

図-2 に補剛材の位置を示す。供試体の載荷点と支点 には、補剛材として幅 60mm、高さ 90mm、奥行き 30mm の杉材を図-2 に示すように計 8 箇所に設置した。 図-3 に計測器の配置を示す。実験では、一軸ひずみ ゲージ、三軸ひずみゲージ、および変位計を図-3 に示 すように配置した。図では、ひずみゲージの番号にsを 付け、変位計の番号と区別できるようにしている。

3. 単層板の破壊を考慮した CFRP 梁の構成則の導出

第4章で詳細を後述するが、本研究ではファイバーモ デルを用いて CFRP 梁の曲げ変形と耐荷力を解析するた め、CFRP 梁の構成則が必要となる。本章では、その解 析を行うために、単層板の破壊を考慮した CFRP 梁の構 成則を導出する。ここでは、CFRP 梁および単層板の座 標系をそれぞれ、座標系 x-y および座標系 1-2 とする。

3.1 CFRP 梁の構成則の導出方法

梁理論とプライ・ディスカウント法⁵⁾と呼ばれる単層 板の破壊による弾性定数を低減させる方法を組み合わせ、 単層板の破壊を考慮した CFRP 梁の構成則を導出する。

まず、梁理論に基づいて梁軸方向直ひずみ ε_x と面内 せん断ひずみ γ_{xy} を図-4 に示す代表点で算定する。そ れらのひずみを算定する代表点は、既往の研究結果 ²⁾を 参考に、図-4 に示す 3 点とした。これは、本論文でも 第 5 章で後述するが、QI と CP は載荷点位置で破壊し たことを考慮している。代表点 1)と 2)はそれぞれ、圧 縮と引張の構成則を導くためのものである。代表点 3) は、第 4 章で説明するせん断変形を検討するために設け た。

次に、梁理論によるひずみを単層板座標系のひずみに 以下のように変換する。

$$\begin{cases} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} l^2 & m^2 & lm \\ m^2 & l^2 & -lm \\ -2lm & 2lm & l^2 - m^2 \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_x \\ 0 \\ \gamma_{xy} \end{cases}$$
(1)

ここに、 ε_1 は単層板軸方向直ひずみ、 ε_2 は単層板軸直角 方向直ひずみ、 γ_{12} は単層板せん断ひずみ、l は $\cos\theta$ 、m は $\sin\theta$ 、 θ は繊維配向角である。

その後、単層板座標系のひずみから、単層板座標系の 応力を以下の式で算定する。

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{cases}$$
(2)

ここに、 σ_1 は単層板軸方向直応力、 σ_2 は単層板軸直角方 向直応力、 τ_{12} は単層板せん断応力、 Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{22} 、お よび Q_{66} は単層板の面内弾性定数である。単層板の面内 弾性定数の算定方法に関しては、文献 2)に詳細な方法 が示されているため、本論文では割愛するが、繊維体積 含有率と表-1に示した材料特性より算定できる。

式(2)により算定された応力を次式に示す Tsai-Wu の 破壊規準^{4,5)}に代入し、単層板の破壊を判定する。

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{1}^{T}} - \frac{1}{\sigma_{1}^{C}} \end{pmatrix} \sigma_{1} + \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{2}^{T}} - \frac{1}{\sigma_{2}^{C}} \end{pmatrix} \sigma_{2} + \frac{1}{\sigma_{1}^{T} \sigma_{1}^{C}} \sigma_{1}^{2} + \frac{1}{\sigma_{2}^{T} \sigma_{2}^{C}} \sigma_{2}^{2}$$

$$+ \frac{1}{\left(\tau_{12}^{U}\right)^{2}} \tau_{12}^{2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\sigma_{1}^{T} \sigma_{1}^{C}}\right) \left(\frac{1}{\sigma_{2}^{T} \sigma_{2}^{C}}\right)} \sigma_{1} \sigma_{2} = 1$$

$$(3)$$



表-3 単層板の強度

	1.		JA/X	
σ_1^{T}	$\sigma_1^{\ C}$	σ_2^{T}	$\sigma_2^{\ C}$	τ_{12}^{U}
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
2240	908	26.7	19.8	67.9

ここに、 σ_1^{T} は単層板軸方向引張強度、 σ_1^{C} は単層板軸方 向圧縮強度、 σ_2^{T} は単層板軸直角方向引張強度、 σ_2^{C} は単 層板軸直角方向圧縮強度、 τ_{12}^{U} は単層板せん断強度であ る。式(3)の左辺が 1 になった時に単層板が破壊するこ とを意味する。既往の研究における材料試験結果²⁾に基 づいて推定された単層板強度を表-3 に示す。

式(3)より破壊と判定された単層板の弾性定数には、 上述したようにプライ・ディスカウント法を用いて単層 板の破壊を考慮する。単層板の破壊を考慮するために、 破壊前の単層板の弾性定数に、剛性低減係数と呼ばれる 係数を乗じて単層板の弾性定数を低減させる。剛性低減 係数は,文献 5),6)を参考に 0.25 とした。

最終的に、弾性定数が低減された単層板と既往の研究 ²⁾で開発された積層理論⁴⁾に基づいた方法により、単層 板の破壊を考慮した CFRP 梁の弾性係数を算定できる。

3.2 CFRP 梁の構成則

表-4 に各繊維配向角を有する単層板が破壊した場合 の弾性係数およびひずみを示す。表における上付きの文 字の(R90)、(R90,45)、c、t、およびuはそれぞれ、繊維 配向角 90°層の破壊、繊維配向角 90°層と±45°層の破壊、 圧縮、引張、および終局を意味する。また、 $E_x \ge G_{xy}$ は 弾性時の弾性係数である。 結果として、単層板の破壊を考慮することで、QI と CP の梁軸方向弾性係数は小さくなることがわかる。な お、代表点 3)に関しては、代表点 1)と 2)が終局に至る まで、単層板が破壊しない結果であった。また、構成則 の代表例として、図-5 に QI の圧縮側の構成則を示す。 結果として、表-4 に示すひずみに対応して弾性係数が 段階的に変化することが示されている。

4. CFRP 梁の耐荷力と変形の算出方法

本章では、ファイバーモデルと Timoshenko 梁理論に 基づいた CFRP 梁の耐荷力と変形の解析方法を述べる。 4.1 ファイバーモデルによる耐荷力と曲げ変形の算出

ファイバーモデルは、材料の非線形挙動を考慮できる 曲げ変形の解析方法として一般的な方法である⁷⁾。本論 文では、ファイバーモデルの詳細は説明せず、本解析の 概要と条件を述べる。

第5章では、実験結果として載荷点位置の荷重-変位 関係を示す。したがって、載荷点位置の断面を対象とし て、曲げモーメントー曲率関係を算定し、その曲率に基 づいて支点までの梁軸方向の曲率分布を求める。算定さ れた曲率分布を2回積分することで、載荷点位置の変位 を得る。また、CFRP 梁の耐荷力は、表-4 に示した終 局ひずみに達した時とする。

4.2 せん断変形の算出

本実験で用いた供試体の変位を算出するためには、せん断変形の考慮が必要であることが既往の研究で示されている²⁾。そこで、上述したファイバーモデルによる曲 げ変形に、ここで述べるせん断変形を重ね合わせることで、供試体の変形を求める。

載荷点位置のせん断変位は、以下に示す Timoshenko 梁理論⁸における変位のせん断変位の項から算定する。

$$y_s = \frac{P \cdot a}{2G_w A_w} \tag{4}$$

ここに、y_sは載荷点位置のせん断変位、P は全体の鉛直 荷重、G_{xy}はせん断弾性係数、A はウェブの断面積、a はせん断スパン長である。なお、3.2 節で述べたように、 代表点 3)の単層板は、代表点 1)と 2)の単層板が終局に 至っても、破壊しなかったことを考慮して、式(4)を用 いることとした。

ただし、CP については、既往の実験結果²⁰において、 せん断変形に抵抗する対角方向単層板を有していないた め、樹脂の特性に依存して面内せん断応力-面内せん断 ひずみ関係が非線形となることが示されている。図-6 は、スパン中央ウェブ中央における荷重-面内せん断ひ ずみ関係である(図-3の1sと2sの平均値)。図より、 上述した理由により、荷重が約50kNを超えると顕著に 非線形性が見られる。そこで、CPの面内せん断ひずみ に関しては、図-6の荷重-面内せん断ひずみ関係を3 次関数によりフィッティングして、面内せん断ひずみを 鉛直荷重の関数として扱えるようにした。よって、CP のせん断変位を次式により求めることとした。

$$y_s = a \cdot \gamma(P)$$

(5)

表-4 単層板の破壊を考慮した弾性係数と各単層板破壊 時のひずみ

表記	QI	СР
E_x (GPa)	44.5	64.8
$E_{x}^{(R90)}$ (GPa)	42.8	60.6
$E_x^{(R90,45)}$ (GPa)	41.0	-
G_{xy} (GPa)	16.8	4.17
$\varepsilon_x^{c(R90)}$	0.00269	0.00219
$\varepsilon_x^{c(R90,45)}$	0.00403	-
ε_x^{cu}	0.00818	0.00431
$\mathcal{E}_{x}^{t(R90)}$	0.00353	0.00302
$\varepsilon_x^{t(R90,45)}$	0.00603	-
\mathcal{E}_{x}^{tu}	0.0172	0.00784



図-6 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





図-7 QIの破壊時写真

図-8 CPの破壊時写真

ここに、 y (P)は近似曲線の関数から得られる面内せん断 ひずみである。

5. 実験結果と考察

5.1 耐荷力と終局変位の比較

QI と CP の破壊時の写真をそれぞれ、図-7 と図-8 に示す。結果として、QI と CP は載荷板下で破壊が生 じた。QI の実験における耐荷力は、97.0kN、98.2kN、 92.9kN であり、3 体の平均値は 96.0kN となった。CP の 実験における耐荷力は 74.4kN、78.5kN、82.4kN であり、 3体の平均値は78.4kNであった。

図-10 と図-11 にそれぞれ、QI の荷重-変位関係と CP の荷重-変位関係示す。なお、図-10 と図-11 の Timoshenko 梁理論による算出値は、式(5)に示す面内せ ん断ひずみの非線形性を考慮していない。

最終的に、QI と CP の解析結果は共に圧縮ひずみ ε_x^{cu} に達して終局に至った。

QI の実験における耐荷力の平均値は 96.0kN、解析結 果は 102kN であり、CP の実験における耐荷力の平均値 は 78.4kN、解析結果は 79.7kN であった。終局変位に関 しては、QI の実験における平均値が 10.9mm であり、 解析結果は 11.9mm であった。また、CP の実験結果と 解析結果はそれぞれ、11.7mm と 13.5mm であった。QI と CP の耐荷力と終局変位の実験結果と解析結果は比較 的近い値となった。

5.2 剛性の比較

QI と CP の実験と解析における剛性を比較する。な お、実験の剛性は 3 体の平均値である。図-10 におい て QI の Timoshenko 梁理論における結果と解析結果の 値を比較すると、解析結果は Timoshenko 梁理論におけ る結果と比べ、単層板の破壊が考慮されていることによ り、接線剛性が徐々に低下している。図の約 5kN から 20kN までの値から算出した初期剛性と、約 80kN から 破壊荷重までの値から算出した接線剛性を比較すると、 解析結果はそれぞれ、9.11kN/mm と 8.26kN/mm となり、 接線剛性は初期剛性の 90.7%まで低下した。実験結果は それぞれ 9.31kN/mm と 7.78kN/mm で、接線剛性は初期 剛性の 83.6%まで低下していた。初期剛性と接線剛性の 解析結果は実験結果と比較的よく一致した。

図-11 の CP の解析結果の変位は Timoshenko 梁理論 による変位より大きく算出されている。これは、式(5) によるせん断変形の影響が大きいためである。CPの E_x は表-4 に示したように単層板破壊後も比較的高く、曲 げによる荷重-変位の関係は、ほぼ線形を示すことが分 かっている。また、解析結果の終局変位における、せん 断と曲げによる変位はそれぞれ、7.89mm と 5.58mm で あり、せん断による変位が曲げによる変位の 1.4 倍であ る。50kN 以降では特にせん断変形の影響が大きい。図 の約 5kN から 20kN までの値から算出した初期剛性と、 約 65kN から破壊荷重までの値から算出した接線剛性を 比較すると、解析結果はそれぞれ、8.31kN/mm と 3.57kN/mm となり、接線剛性は初期剛性の 43.0% まで低 下した。実験結果はそれぞれ 8.59kN/mm と 3.75kN/mm で、接線剛性は初期剛性の 43.7%まで低下していた。こ こでも、初期剛性と接線剛性の解析結果は実験結果と比 較的よく一致した。

6. まとめ

本研究では、積層構成の異なる2種類のCFRP 梁を4 点曲げにより載荷実験し、単層板の破壊に着目した CFRP 梁の耐荷力および変形を求め、実験結果と比較、 検討した。CFRP 梁の構成則は、積層理論と単層板の材 料破壊規準に基づき、各繊維配向角を有する単層板が破 壊する際のひずみおよび弾性係数を算出し、各供試体の



図-11 CPの載荷点位置における荷重-変位関係

構成則を導出した。単層板の破壊により梁の剛性が低減 されることを考慮するため、導出した構成則を用いたフ ァイバーモデルにより曲げ変形を求め、せん断変形に関 しては Timoshenko 梁理論もしくは実験から得られた荷 重-面内せん断ひずみ関係を近似することで求めた。結 果として、単層板の破壊に着目し、CFRP 梁の構成則を 求めることで、積層構成の異なる CFRP 梁の耐荷力と変 形を概ね再現することができた。

参考文献

- 1) 土木学会: FRP 橋梁、土木学会、pp.1-93、177-208、 2004.
- 2) 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、Vol.58A、 pp.946-958、2012.
- 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、p.11、培風館、2003.
- 三木光範、福田武人、元木信弥、北篠正樹:複合 材料、pp.1-157、共立出版、1997.
- 5) Isaac M. Daniel and Ori Ishai: Engineering mechanics of composite materials, Oxford, pp. 234-298, 1994.
- Youngchan Kim, Julio F. Davalos, and Ever J. Barbero: Progressive failure analysis of laminated composite beams, Journal of Composite Materials, Vol.30, No.5, 1996.
- 7) 土木学会:基礎からわかる複合構造、土木学会、 pp.58-60、2012.
- 8) 長谷川彰夫、西野文雄:構造物の弾性解析、pp.65-98、117-127、技報堂出版、1984.