

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

Study on the deformation behavior of CFRP box beams with lamina of 45 degrees under flexure

北海道大学大学院工学研究科	学生員	櫻庭浩樹	(Hiroki Sakuraba)
北海道大学大学院工学研究科	正会員	松本高志	(Takashi Matsumoto)
北海道大学工学部	学生員	木戸英伍	(Eigo Kido)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	真砂純一	(Junichi Masago)
北海道大学大学院工学研究科	F 会員	林川俊郎	(Toshiro Hayashikawa)

1. はじめに

沿岸地域などの腐食環境の厳しい橋梁では、鋼材の腐食が重大な劣化要因であり、定期的な塗装の塗り替えなどによる維持管理費の増大が問題になっている。近年では、構造物のライフサイクルコストの削減が求められており、腐食に対する耐久性の向上が必要になっている。

このような背景から、軽量・高強度かつ耐腐食性の材料である炭素繊維強化ポリマー（CFRP）の橋梁への適用が近年研究されている¹⁾。しかし、土木分野においては比較的新しい材料であり、構造部材へ適用するためには、積層材料である CFRP の異方性を考慮した変形や耐荷力の算定手法の構築が必要になっている。

既往の研究²⁾では、梁軸方向：梁周方向の繊維配向の比率が異なる箱形断面 CFRP 供試体を作成し、梁の曲げ载荷実験を行っている。その結果、積層構成が構造部材の変形、破壊性状に及ぼす影響が大きいことが確認されている。またこれらの実験結果について著者らは、有限要素解析を用いて実験梁の卓越応力と変形特性を把握し、それに基づいた耐荷力とたわみの検討を行ってきた^{3),4),5)}。その結果、変形挙動については、CFRP のせん断変形の影響が大きいことを明らかにした。耐荷力に関しては、せん断応力の寄与が大きく、せん断強度を向上させることで梁の耐荷力が増加する可能性を示した。

そこで著者らは、せん断強度を向上させる 45°方向の繊維配向を導入した梁を作成し、4 点曲げ载荷実験を行った^{6),7)}。本報では、積層型の複合材料の剛性評価に用いられる積層理論を用いて材料特性を算定し、実験結果と比較することで、梁の変形挙動を把握することを目的としている。

2. 実験供試体

2.1 積層板座標系と単層板座標系

積層板全体の座標系を 1, 2, および 3 軸とする。1-2 は面内座標軸であり、1 軸は構造の主要な軸である。1-2 平面と直交する 3 軸は平板の厚さ方向の軸である。一方で、単層板座標系では、その繊維方向を x 軸、それと直角の方向を y 軸とする。そして、1 軸と x 軸のなす角を繊維配向角 θ とする（反時計回りが正方向）。以上より、面内の積層板と単層板座標系は図-1 に示される⁸⁾。

2.2 積層構成

実験では配向角 0°（梁軸方向）、配向角 90°（梁周方

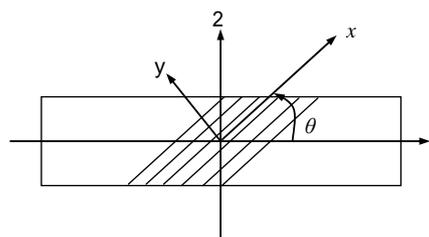


図-1 積層板座標系と単層板座標系

向) および配向角 $\pm 45^\circ$ 方向の繊維比率を変化させ、合計 4 供試体を作成した。以下に 4 供試体の積層構成を示す。

- 1) $[0/90]_6 / 0/[90/0]_6$
- 2) $[0/45/-45]_4 / 0/[-45/45/0]_4$
- 3) $[0/45/-45/0]_3 / 0/[0/-45/45/0]_3$
- 4) $[0/45/-45/90]_3 / 0/[90/-45/45/0]_3$

各供試体のスラッシュで区切られた数字は単層板の配向角を示す。括弧は同じ単層板のセットが続くことを示し、括弧の後の下付の数字はセットの数を示す。例えば 1) では、積層板の上面から (0°, 90°) の単層板が 6 セット、層の中心に 0° の単層板、そして (90°, 0°) の単層板が 6 セットの合計 25 層となっている。他のケースも同様に読み取れる。なお 1) は既往の実験²⁾でも採用されているが、参照用として作成した。4 供試体の積層数は全て 25 層であり、中央面に対して対称である対称積層としている。

2.3 供試体の名称と作成方法

以下の検討では、供試体 1), 2), 3), 4) をそれぞれ、LIT1, L1D2, L1D1, LIT1D2 と称する。L, T, D はそれぞれ、配向角 0°, 配向角 90°, 配向角 $\pm 45^\circ$ を表す文字であり、繊維比率をそれらの文字の後に表示している。

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状のもの（単層板）を重ねて作成される。まず、核となる角柱状の心材に 2.2 節で示した積層構成となるようプリプレグを順に巻きつける。その後、熱硬化処理を施すことで母材であるエポキシ樹脂が硬化し、各層は接着される。以上の方法で 4 供試体は作成された。

3. 積層理論による材料特性の算定⁸⁾

3.1 任意の配向角を有する単層板の応力-ひずみ関係

直交異方性弾性体の平面応力状態における単層板の応

力 - ひずみ関係は (1) 式により求められる. s は x, y 軸におけるせん断を表す.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ & Q_{yy} & 0 \\ \text{Sym.} & & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに, Q_{ij} : 単層板の面内弾性定数 ($i, j=x, y, s$)

次に, 図 - 1 のように, 積層板座標系から単層板座標系へ応力およびひずみを変換するためには, 回転の変換行列 $[T]$ を用いることによりそれぞれ式 (2.a), (2.b) のように表される. 最終的に求める式は, 積層板座標系の応力-ひずみ関係であるので, (2.a) 式を逆に解き, (1) 式, (2.b) 式を代入することにより (3) 式が得られる. よって, 積層板座標系の応力-ひずみ関係は式(4)のように表される.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (2.a) \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_s \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2.b)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_s \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ & Q_{22} & Q_{26} \\ \text{Sym.} & & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに, Q_{ij} : 積層板の面内弾性定数 ($i, j=1, 2, 6$)

(4) 式では, (1) 式にはなかったせん断ひずみから直応力 (直ひずみからせん断応力) が生じることを意味する, Q_{16}, Q_{26} の項が現れている. 本実験で採用した配向角では, $\pm 45^\circ$ のみ, Q_{16}, Q_{26} が現れる.

3.2 材料特性の算定

任意の配向角の応力-ひずみ関係が得られ, 積層構成が対称積層板であれば, 面内剛性 A_{ij} は (5) 式を用いて求められる. 図 - 2 に対称積層板の断面図を示す. (5) 式の k は層番号, z は中央面からの距離を表す.

$$A_{ij} = 2 \sum_{k=1}^N Q_{ij}^{(k)} (z_k - z_{k-1}) \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (5)$$

上式より, 各層の面内弾性定数 Q_{ij} にその層の厚さをかけ, 足し合わせることで A_{ij} が求められる. 各層の材料が同じであれば積層板の平均面内応力 - ひずみ関係は (6) 式で表される.

$$\bar{\sigma} = A^* \varepsilon \quad (6)$$

ここに, $\bar{\sigma}$: 厚み方向に平均した面内応力, $A^* = A_{ij}/h$ (h : 積層板厚さ).

(6) 式を ε について解くと (7) 式ようになる.

$$\varepsilon = [A^*]^{-1} \bar{\sigma} = a^* \bar{\sigma}$$

$$a^* = \begin{bmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & a_{16}^* \\ & a_{22}^* & a_{26}^* \\ \text{Sym.} & & a_{66}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

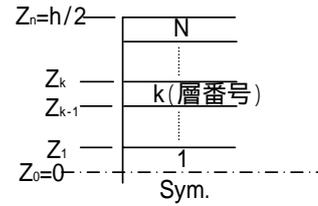


図 - 2 対称積層板の断面

表 - 1 CFRP 単層板の材料特性

材料特性	方向	E (MPa)	G (MPa)	ν
CFRP 単層板	x	128000	5600	0.32
	y	15200	-	-

表 - 2 材料特性算定結果

供試体名	L1T1	L1D2	L1D1	L1T1D2
0°単層板数	13	9	13	7
±45°単層板数	0	16	12	12
90°単層板数	12	0	0	6
E_1 (MPa)	74420	59450	77014	55233
E_2 (MPa)	69874	26865	25427	51113
E_6 (MPa)	5600	23634	19126	19126
ν_{12}	0.070	0.677	0.630	0.326

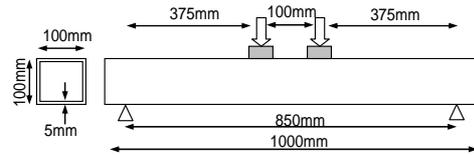


図 - 3 供試体寸法と載荷方法

(7) 式より対称積層板に面内荷重が作用したときの有効工学的弾性定数は (8) 式で与えられる.

$$E_1 = \frac{1}{a_{11}^*}, E_2 = \frac{1}{a_{22}^*}, E_6 = \frac{1}{a_{66}^*}, \nu_{12} = -\frac{a_{12}^*}{a_{22}^*} \quad (8)$$

ここに, E_1 : 梁軸方向弾性係数, E_2 : 梁周方向弾性係数, E_6 : 面内せん断弾性係数, ν_{12} : ポアソン比 ($= |\varepsilon_2/\varepsilon_1|$).

(8) 式から表 - 1 の CFRP 単層板の材料特性を用いて, 2.2 節で示した各供試体の材料特性を算定した. 結果を表 - 2 に示す. 表 - 2 より $\pm 45^\circ$ 方向の繊維配向を増やすほど, E_6 が増加していることが分かる. L1T1 では直交方向の繊維配向しか使用していないため, せん断弾性係数は単層板のそれと同じ値になった. L1D1 では梁軸方向弾性係数 E_1 が最も高くなっているが, 同時に最小の E_2 となった. L1D2 と L1D1 を L1T1 と比較すると, 90° 方向の繊維配向がないことから梁周方向弾性係数が小さくなり, ポアソン比が比較的大きい.

4. 箱形断面 CFRP 梁の曲げ載荷実験

4.1 実験方法と計測点位置

載荷は 4 点曲げとし, 荷重制御により行った. 図 - 3 に供試体寸法と載荷条件を示す. 変位とひずみの計測点

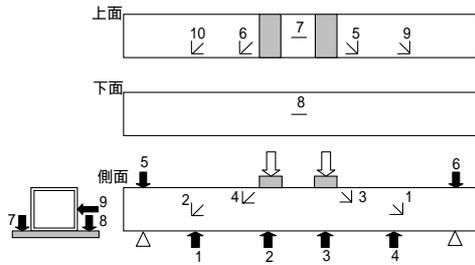


図 - 4 変位とひずみの計測点

表 - 3 梁の耐荷力と破壊性状

供試体名	耐荷力 (tf)	破壊性状
L1T1	5.03	載荷板端部のウェブに直線の亀裂 (ひずみゲージ 4 側)
L1D2	6.59	載荷板端部のウェブに斜め方向の層間剥離 (ひずみゲージ 4 側)
L1D1	7.16	載荷板端部のウェブに斜め方向の層間剥離 (ひずみゲージ 3 側)
L1T1D2	6.38	載荷板端部のウェブに直線の亀裂と層間剥離 (ひずみゲージ 3 側)

は図 - 4 のようにし、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)、一軸ひずみゲージ 2 点 (図中 7, 8) とした。なお L1T1D2 のみ三軸ひずみゲージを 2 点追加した (図中 9, 10)。ひずみゲージは、既往の実験結果²⁾に基づいて載荷点近傍に配置し、加えてせん断スパン中央にも配置した。ひずみゲージ 9, 10 は、載荷板から離れた上フランジの挙動を計測するため、せん断スパン中央の上フランジ隅角部近傍に配置した。

4.2 耐荷力と破壊性状

実験梁の耐荷力と破壊性状を表 - 3 に示す。耐荷力は L1D1, L1D2, L1T1D2, L1T1 の順に大きく、45°方向の繊維配向を導入すると耐荷力が増加した。本実験方法と断面の場合では、周方向よりも 45°方向の繊維を用いた方が材料を有効に活用できると言える。しかし、本実験では積層構成が限られているため、より効率的な積層構成を求めるためには、梁軸方向と 45°方向の繊維配向の比率を変化させた供試体を作成し、実験を行う必要がある。

4.3 実験結果と積層理論の比較

本節では、3 章で算出した材料特性を用いてひずみと変位の理論値を算出し、実験結果との比較を行う。

(1) 荷重 - ひずみ関係の比較

図 - 5 にひずみゲージ 1 の荷重 - せん断ひずみ関係を示す。図の理論値は、供試体名に t を付けて区別し、点線と中空の凡例で表示している。実験では、積層理論の順序どおりにひずみが得られており、L1T1 を除いて理論値と良く一致している。L1T1 のひずみが理論値より大きい原因は、せん断に抵抗する 45°方向の繊維が入っていないため、繊維でなく母材の剛性に依存しているためだと考えられる。よって積層理論では、L1T1 のせん断弾性

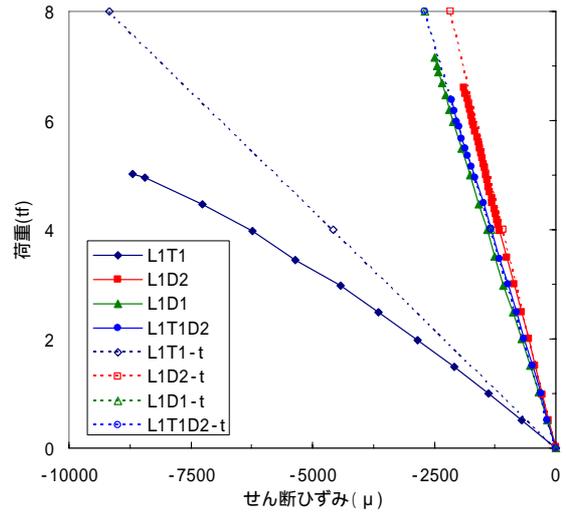


図 - 5 ひずみゲージ 1 の荷重 - せん断ひずみ関係

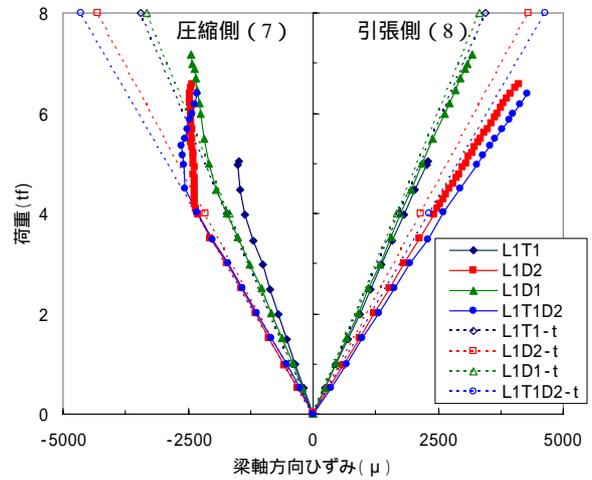


図 - 6 ひずみゲージ 7, 8 の荷重 - 梁軸方向ひずみ関係

係数を大きく算出したと推測できる。また L1D1 と L1T1D2 は、45°方向の繊維配向数が同じため、実験においてもほぼ同じひずみになった。

図 - 6 に、ひずみゲージ 7, 8 の荷重 - 梁軸方向ひずみ関係を示す。下フランジのひずみゲージ 8 においては、積層理論の順序どおりにひずみが得られているが、全供試体で実験値は積層理論より大きいひずみになった。よって積層理論では梁軸方向弾性係数を大きく算出したと考えられる。上フランジのひずみゲージ 7 では、下フランジと比較して、ひずみが小さくなっている。これは、載荷板に近い側圧縮ひずみが拘束されたためだと考えられる。

(2) 荷重 - 変位関係の比較

図 - 7 に載荷点位置での荷重 - 変位関係を示す。載荷点の変位は変位計 2, 3 の平均から支点沈下量である 7, 8 の平均を差し引いて算出した。また (9) 式のチモシェンコ梁理論⁹⁾で変位を求め、実験値と比較している。

$$w = w_b + w_s = \frac{P}{2E_1I} \left\{ \frac{a^3}{3} + \frac{a^2b}{2} \right\} + \frac{Pa}{2E_0kA} \quad (9)$$

ここに、 w_b : 曲げによるたわみ、 w_s : せん断によるたわみ、 P : 鉛直荷重、 I : 断面二次モーメント、 A : 断面積、 k : せん断補正係数 ($=A_w/A$, A_w : ウェブ断面積)、 a : せん断スパン長、 b : 曲げスパン長。

図より、実験梁の剛性は L1D1, L1D2, L1T1D2, L1T1 の順で大きく、積層理論で算出した変位と順序は一致している。しかし、積層理論で求めた変位は実験よりも全ての供試体で小さくなった。これは前項で示したように、梁軸方向の弾性係数を積層理論では大きく算出したためであると考えられる。また L1T1 は理論値の剛性の 80% 程の剛性 (3.5tf 時) になり、差が比較的大きい。

図 - 8 に (9) 式より算出した載荷点位置変位の曲げとせん断の全体変位への寄与率を示す。図より、L1T1 のせん断寄与率は全体変位の 40% に達しており、他の供試体に比べ、せん断変形の影響が大きい。よって図 - 7 において L1T1 の差が大きいのは、積層理論でせん断弾性係数を大きく算出した影響によるものだと考えられる。L1T1 以外の供試体では、せん断寄与率は 20% より小さく、曲げによる変形が卓越した。

5. まとめ

本報では、45°方向の繊維配向を有する箱形断面 CFRP 梁の曲げ載荷実験の結果を述べた。また積層理論による理論値と実験結果を比較し、積層構成の違いによる梁の変形挙動の把握を図った。以下にまとめを示す。

- 1) 本実験方法と断面の場合では、周方向よりも±45°方向の繊維配向を用いた方が耐荷力は増加した。
- 2) 積層理論により、0°方向の繊維配向が増加すれば梁軸方向弾性係数が大きくなり、±45°方向繊維配向が増加すれば、せん断弾性係数が大きくなることを確認した。
- 3) 実験梁の剛性は、積層理論による材料特性で算出した剛性より小さく、積層理論で梁軸方向弾性係数を大きく算出した影響が見られた。特に L1T1 では、せん断弾性係数を大きく算出した影響もあり、実験値との差が大きくなった。
- 4) 45°方向の繊維配向を導入した供試体では、せん断変形の寄与率は小さくなり、曲げ変形が卓越した。

今後は材料実験を行って弾性係数と強度を実測し、変形挙動および耐荷力について、さらに検討していく予定である。

謝辞

本実験で用いた供試体の材料提供と作成支援については、東レ(株)のご厚意によりなされた。また、本研究は北海道ガス大学助成制度助成金により一部実施された。ここに記して、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会: 構造工学シリーズ 14, FRP 橋梁, pp.1-12, 2004.
- 2) 稲田裕他: 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, CS15-009, 2007.

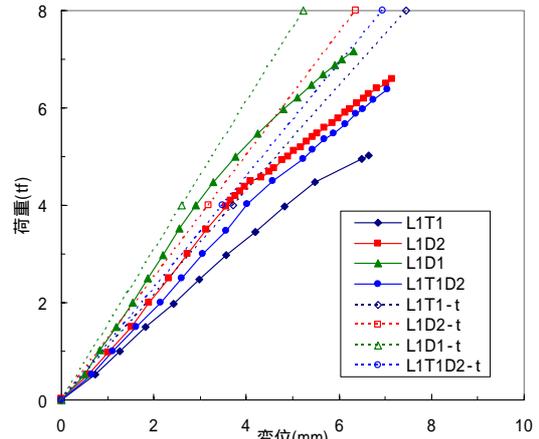


図 - 7 載荷点位置の荷重 - 変位関係

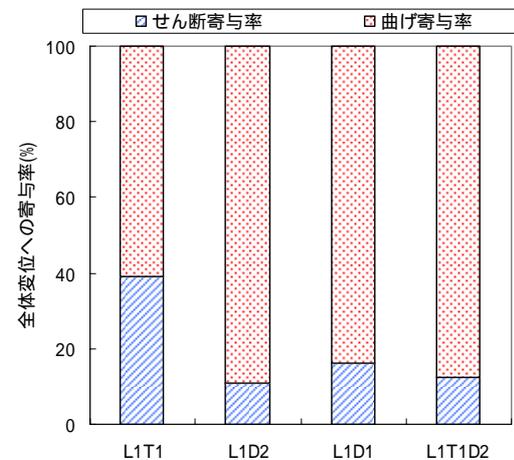


図 - 8 載荷点位置変位への曲げとせん断変位寄与率

- 3) 松本高志他: 箱形断面 CFRP 梁の FEM 解析と耐荷力推定式の検討、土木学会第 63 回年次学術講演会, CS02-43, 2008.
- 4) 松本高志他: 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第 65 回年次技術研究発表会, A-50, 2009.
- 5) 櫻庭浩樹他: 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, A5, 2009.
- 6) 木戸英伍他: 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第 66 回年次技術研究発表会, 2010.
- 7) 真砂純一他: 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第 66 回年次技術研究発表会, 2010.
- 8) 三木光範, 福田武人, 元木信弥, 北篠正樹: 複合材料, 機械システム入門シリーズ 8, 共立出版, pp.117-140.
- 9) 長谷川彰夫, 西野文雄: 土木学会編 新体系土木工学 7 構造物の弾性解析, pp.82-127, 技報堂出版, 1983.