# 積層構造が異なる CFRP 梁の有限要素解析による耐荷機構に関する検討

A study on the failure mechanism of CFRP box beams with different laminate structures by using finite element analysis

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	正会員	松本高志	(Takashi Matsumoto)
北海道大学大学院工学研究院	F 会員	林川俊郎	(Toshiro Hayashikawa)

## 1. はじめに

繊維強化ポリマー(Fiber Reinforced Polymer,以下 FRP)は,高強度・軽量の材料であることから航空宇宙 分野において先進的に適用されてきた.また FRP は非 鉄繊維と樹脂の複合材料であるため,耐腐食性の性質を 持つ.そのため土木分野においては,腐食環境の厳しい 条件下にある橋梁の梁部材を対象とし,鋼材とコンクリ ートに加わる新しい構造材料の1つとして研究が進めら れている<sup>1)</sup>.また FRP の中でも,高い強度と剛性を持 つ炭素繊維強化ポリマー(以下,CFRP)が着目されて おり,梁部材に適用するための研究がなされている<sup>2).3)</sup>.

しかしながら, 土木分野においては CFRP は比較的新 しい材料であるため, その梁部材の設計手法はよく確立 されていない.また CFRP は単層板と呼ばれる薄い板を 様々な角度に配向させながら厚さ方向に積層し,積層板 として製造される.よって,梁部材に適した合理的な CFRP 積層板の設計手法が求められている.

CFRP 積層板を設計する上では,積層構造と呼ばれる ものが重要な要素になる.積層構造とは,単層板を配向 させる角度(以下,繊維配向角)と積層する順序のこと を指す.積層板の材料特性は,積層構造を変化させるこ とによって設計できるため,梁部材に適した積層構造の 設計手法の構築が必要である.

以上の背景より著者らは, CFRP 梁の合理的な積層構 造の設計手法を構築するために,積層構造が異なる CFRP 梁を対象として耐荷力推定式を検討してきた.こ れまでの研究では,梁の軸方向に対して直交方向に単層 板を配向させた CFRP 積層板から成る箱形断面 CFRP 梁 を対象として有限要素解析を行ってきた.その解析では, 梁の破壊に寄与する支配的な応力成分を明らかし,その 結果に基づいて耐荷力推定式を構築している<sup>4)</sup>.またそ の結果を踏まえ,梁軸方向に対して±45°方向に配向さ せた単層板を有する箱形断面 CFRP 梁を作成し,曲げ載 荷実験を行っている<sup>5),6)</sup>.しかしながら,それらの梁に 対しては2章で後述するように,これまで構築した手法 が適用できないため有限要素解析を行っていなかった.

そこで著者らは,上述した梁を対象として有限要素解 析を行うための手法を構築してきた.本報では,その手 法を用いて解析を行い,それらの梁の耐荷機構を検討す ることを目的とする.

## 2. 解析の概要

これまでの研究の有限要素解析<sup>4)</sup>では, CFRP 積層板 を厚さ方向に均一な板とみなし,3次元の固体要素を用



図1:積層板座標系と単層板座標系

表1:単層板の材料特性<sup>7)</sup>

弾性定数	と強度	備考		
$E_x$ (MPa)	125,000	TORAYCA, T700S,		
$E_y$ (MPa)	7,800	semi-toughened 350°F		
$G_{xy}$ (MPa)	4,400	epoxy resin		
	0.24	TORAYCA,T700S,250°F		
$v_{xy}$	0.34	epoxy resin の値を仮定		
$f_x^T$ (MPa)	2,450			
$f_x^{C}$ (MPa)	1,570	IORAYCA, 1700S,		
$\tau_{xy}^{U}$ (MPa)	98	semi-toughened 550°F		
$f_y^T$ (MPa)	70	epoxy resin		
$f_{v}^{C}$ (MPa)	70	f <sub>w</sub> Tと同じと仮定		

#### 表2:供試体の積層構造

供試体名	積層構造
L1T1	[0/90] <sub>6</sub> /0/[90/0] <sub>6</sub>
L1D1	[0/45/-45/0] <sub>3</sub> /0/[0/-45/45/0] <sub>3</sub>

いて解析を行ってきた.しかしながら,その手法は材料 試験から得られる積層板としての弾性定数と強度が必要 になる.梁軸方向に対して±45°方向に配向させた単層 板を有する箱形断面 CFRP 梁の曲げ載荷実験<sup>5),6)</sup>の供試 体に関しては材料試験を行っていないため,これまでの 手法は適用できていない.

そこで本解析では,積層板ではなく単層板の材料特性 のみでモデル化をすることができるシェル要素を用いて 解析を行うこととした.単層板の弾性定数と強度は,製 造元が材料試験を行っており,表1に示すように公開さ れている<sup>70</sup>.よって以下では,CFRP をシェル要素でモ デル化する解析について述べる.

#### 2.1 解析対象

解析対象とする供試体は,繊維配向角0°と90°の単層 板の層数の比が1:1 であるL1T1と繊維配向角0°と±45° の単層板の層数の比が1:1 であるL1D1の2体とする. 繊維配向角の定義を図1に示す.単層板座標系をx-y座 標系,積層板座標系を1-2座標系とし,積層板座標系と 単層板座標系の回転角0を繊維配向角とする.両供試体 の積層構造を表2に示す.L1T1の積層構造の左側の最 初の数字は1層目(断面内側から積層)の単層板の繊維 配向角を示す.添え字の6は,[0/90]の組が6組連続し て積層されていることを示す.L1D1 も同様に読み取れ る.なお両供試体は,対称積層板と呼ばれる基準面(13 層目の 0°層)に対して対称に積層された積層板であり, 層数は25である.

曲げ載荷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.供試体の断面は,幅 100mm, 高さ 100mm, 厚さ 5mm の正方形中空断面である.載荷 点には幅 50mm,高さ 55mm,奥行き 200mm の載荷板 を設置し,支点と供試体の間には,幅 50mm,高さ 5mm, 奥行き 120mm の支持板を挿入している. 2.2 解析方法

解析モデルを図 2 に示す.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, 奥行き方向とする.解析では, CFRP を4節点複合材積 層薄肉シェル要素,載荷板と支持板を8節点固体要素を 用いてモデル化する.解析ソフトは Marc を用いる.

2.2.1 複合材積層薄肉シェル要素

複合材積層薄肉シェル要素とは,積層理論に基づいて 積層板の各層の挙動を再現できるシェル要素である.こ の要素では,各層の材料特性(表1),繊維配向角(表 2)および各層の厚さ(5mm/25=0.2mm)から,積層板 としての材料特性を算出することができる.また積層板 としての材料特性を求めるためには,式(1)に示す積層 板座標系における各層の剛性係数が必要になる.式(1) を用いれば,積層板各層の応力も算定することができる.  $\rho(k) = \rho(k) \overline{1} \overline{1}$ 

$\sigma_{_{11}}^{_{(\kappa)}}$		$Q_{11}^{(x)}$	$Q_{12}^{(x)}$	$Q_{16}^{(\kappa)}$	$\mathcal{E}_{11}$	
$\sigma_{\scriptscriptstyle 22}^{\scriptscriptstyle (k)}$	=	$Q_{\scriptscriptstyle 12}^{\scriptscriptstyle (k)}$	$Q_{\scriptscriptstyle 22}^{\scriptscriptstyle (k)}$	$Q_{_{26}}^{_{(k)}}$	$\cdot   \varepsilon_{22}$	(1)
$\tau_{12}^{(k)}$		$Q_{_{16}}^{_{(k)}}$	$Q_{_{26}}^{_{_{(k)}}}$	$Q_{\scriptscriptstyle 66}^{\scriptscriptstyle (k)}$	Y12	

ここに, σ<sub>11</sub><sup>(k)</sup>,σ<sub>22</sub><sup>(k)</sup>,τ<sub>12</sub><sup>(k)</sup>:積層板座標系における各層の1 方向直応力,2方向直応力及び面内せん断応力

(k=1,2,...,n,n:積層数), Q<sub>ii</sub><sup>(k)</sup>:積層板座標系におけ る各層の剛性係数(*i*,*j*=1,2,6), ε<sub>11</sub>, ε<sub>22</sub>, y<sub>12</sub>:積層板座標 系における1方向直ひずみ,2方向直ひずみ及び面内せ ん断ひずみ.

2.2.2 CFRP の破壊規準

CFRP の材料破壊の規準には,式(2)に示す Tsai-Wuの 破壊規準<sup>8)</sup>を用いる.式(2)の右辺が1となった時に単層 板が材料破壊することを意味する.なお式(2)の応力は 単層板座標系であり,式(1)の応力を式(3)によってテン ソル変換をして式(2)に代入する.

 $f_{index}^{(k)} = F_{xx}^{(k)} \sigma_{xx}^{(k)2} + 2F_{xy}^{(k)} \sigma_{xx}^{(k)} \sigma_{yy}^{(k)} + F_{yy}^{(k)} \sigma_{yy}^{(k)2}$ (2) $+F_{xx}^{(k)}\tau_{yy}^{(k)2}+F_{x}^{(k)}\sigma_{yx}^{(k)}+F_{y}^{(k)}\sigma_{yy}^{(k)}$ 

ここに , ƒ<sup>(k)</sup><sub>index</sub>:単層板座標系における各層の Tsai-Wu の 破壊指標値, F<sub>i</sub><sup>(k)</sup>, F<sub>ij</sub><sup>(k)</sup>: 単層板座標系における各層の Tsai-Wu の異方性係数(i, j=x,y,s) ,  $\sigma_{xx}^{(k)}, \sigma_{yy}^{(k)}, \tau_{xy}^{(k)}$ :単層 座標系における各層の x 方向直応力, y 方向直応力及び 面内せん断応力.

$\sigma_{xx}^{\scriptscriptstyle (k)}$		$\cos^2 \theta$	$sin^2 \theta$	$2\cos\theta\sin\theta$	$\sigma_{\scriptscriptstyle 11}^{\scriptscriptstyle (k)}$	
$\sigma_{_{yy}}^{_{(k)}}$	=	$sin^2 \theta$	$\cos^2 \theta$	$-2\cos\theta\sin\theta$	$\sigma_{\scriptscriptstyle 22}^{\scriptscriptstyle (k)}$	(3)
$ au_{xy}^{(k)}$		$-\cos\theta\sin\theta$	$\cos\theta\sin\theta$	$\cos^2\theta - \sin^2\theta$	$ au_{_{12}}^{_{(k)}}$	

ここに, $\theta$ :繊維配向角.

また本解析では,最弱層破損則<sup>8)</sup>を用いて積層板の破



壊と梁の耐荷力を定義する.つまり,いずれかの層が破 壊規準を満たすまで CFRP は線形挙動とし,破壊規準を 満たした時の荷重を積層板の破壊かつ梁の耐荷力とする. 2.2.3 載荷板と支持板のモデル化および固体要素と シェル要素の結合方法

載荷板と支持板の材料特性は E=200GPa, v=0.3 とし, 弾性体としてモデル化する.解析モデルでは,載荷板の 寸法を,幅 50mm,高さ 55mm,奥行き 95mm,支持板 の寸法を,幅 50mm,高さ 5mm,奥行き 95mm とした.

載荷板と支持板を固体要素, CFRP を複合材積層薄肉 シェル要素でモデル化するため,両要素の節点は直接結 合できない.そこで本解析では,GLUEと呼ばれる手法 で両要素を結合する.GLUE は Marc の接触解析の特別 な形式であり,両要素の接触面に生じる摩擦力の合力が 0 となるように摩擦力を節点に生じさせるものである. つまり,X.Y.Z 方向の摩擦力が式(4)の条件を満たすよう に接触面に摩擦力が生じる.

 $\sum_{i=1}^{N} f_{t,X}^{(i)} = \sum_{i=1}^{N} f_{t,Y}^{(i)} = \sum_{i=1}^{N} f_{t,Z}^{(i)} = 0$ (4)

ここに,N:接触面に存在する節点の数, $f_{tx}^{(i)}, f_{ty}^{(i)}$ f<sub>tZ</sub><sup>(i)</sup>:接触面に存在する各節点のX,Y,Z方向の摩擦力.

結果として,本解析の条件に GLUE を適用すると, 接触面の法線方向の変位は結合状態を維持するために連 続になるが,接線方向の変位は固体要素とシェル要素の 1 節点当たりの自由度が異なるために連続にはならない.

2.2.4 境界条件

荷重は載荷板の上面に作用する圧力として与え、 CFRP の最弱層破損が生じるまで作用させた.支持条件 としては,図2の左側の支持板の下端中央の節点の X,Y,Z 方向の変位を拘束し,右側の支持板の下端中央の 節点のY方向変位を拘束した。

- 3. 解析結果と考察
- 3.1 荷重 - 変位関係

図 3 と図 4 にそれぞれ, L1T1 と L1D1 の載荷点位置 における実験と解析の荷重 - 変位関係を示す.解析によ る結果は,最弱層破損が生じた荷重時までを示している. またそれらの図には,式(5)に示す Timoshenco 梁理論に よる荷重 - 変位関係も合わせて示している.またその変 位の算定には,表3に示す有効工学的弾性係数を用いた。

$$w = w_b + w_s = \frac{P}{2E_l I} \left\{ \frac{a^3}{3} + \frac{a^2 b}{2} \right\} + \frac{Pa}{2G_{12}kA}$$
(5)

ここに, w<sub>b</sub>:曲げによる変位, w<sub>s</sub>:せん断による変位, 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.

## 3.1.1 梁の耐荷力

結果として, L1T1 と L1D1 の解析による耐荷力はそ れぞれ, 51.4kN と 96.5kN であった.また L1T1 と L1D1 の実験における耐荷力はそれぞれ, 49.3kN と 70.2kN で ある.よって解析における最弱層の破損は,L1T1と L1D1 共に,実験の梁の耐荷力より大きい荷重で生じる 結果であった.

3.1.2 梁の剛性

L1T1の解析結果の剛性は Timoshenco 梁理論によるも のとよく一致しているが,実験の梁の約 30kN 時の剛性 よりは 9.6%大きい.実験では, 38.9kN 時に載荷板端部 の上フランジとウェブの隅角部において,梁軸方向の割 れ(以下,角割れ)が肉眼で観察されており,その後は 剛性の低下が見られる.

L1D1 の解析結果の剛性は, Timoshenco 梁理論による 結果より 8.2%大きい結果であった.解析結果と実験の 梁の約 30kN 時の剛性を比較すると,解析の剛性の方が 10.9%大きい.また L1D1 の実験においても,約 40kN を超えると剛性の低下が見られる.L1D1 に関しては, 角割れは肉眼で観察されていないが,これまでの研究の により,角割れが生じていたと思われる結果が得られて いる.

3.2 最弱層破損が生じた層とその位置

図 5 に L1T1 と L1D1 で最弱層破損が生じた層とその 位置を示す.図では,最弱層破損が生じた層の Tsai-Wu の破壊指標値の分布を示している.なおこの値は積分点 で算定されたものであり,赤実線の四角で破壊規準を満 たした積分点を持つ要素の大まかな位置を示す.

L1T1 では, 51.4kN 時に繊維配向角 90°の 24 層目で Tsai-Wu の破壊規準を満たした.(以下では,24<sup>(90°)</sup>の ようにして,各層の繊維配向角を上付き文字で示す.) 破壊規準を満たした積分点を有する要素は,載荷板端部 せん断スパン側の上フランジ隅角部にある4要素であっ た.その破壊規準を満たした積分点の値は 102.3%であ る.また破壊指標値の分布は,スパン中央とフランジ幅 の中央に対して線対称になっている.

L1D1 では, 96.5kN 時に 24<sup>(+45°)</sup>層目で Tsai-Wu の破壊 規準を満たした.破壊規準を満たした積分点を有する要 素は,載荷板端部せん断スパン側の上フランジ隅角部に ある2要素であった.その破壊規準を満たした積分点の 値は 102.2% である.破壊指標値の分布に関しては L1T1 のものと異なり,線対称になっていない.(c)の場合は, スパン中央・フランジ幅の中央の点に対して, 点対称に なっている.また(d)と(e)は,スパン中央・ウェブ中央 の点に対して, 点対称の関係(鉛直方向軸回りの回転) になっている.

次に,上記の結果を図6に示す実験の梁の破壊性状と 比較する.図 6(a)と(b)より,実験の L1D1 と L1T1 はと もに,載荷板端部のせん断スパン側で破壊が生じている ことがわかる.よって,解析で最弱層破損が生じた位置 と一致している.ただし実験では,片側の載荷板端部の みで破壊が生じており,その点は解析の結果と異なる. 3.3 破壊規準を満たした積分点の各層の破壊指標値

図 7(a)と(b)にそれぞれ, L1T1 と L1D1 の破壊規準を



3	•	積屋	标σ	う右対	コエビ	的弾	性係数
.,			11/X U.	7 H X/	—		

淄性侅数	供試体名			
	L1T1	L1D1		
E <sub>1</sub> (MPa)	69,133	73,135		
G <sub>12</sub> (MPa)	4,400	17,699		

・L1T1(24 層目,繊維配向角90°)

表



図 5: Tsai-Wu の破壊指標値の分布

満たした積分点における 18 層目から 25 層目の Tsai-Wu の破壊指標値を示す.図7(a)のL1T1では,24<sup>(90°)</sup>層目で 破壊指標値が100%に達していることがわかる.繊維配 向角0°の破壊指標値の最大値は,25 層目の58.0%であ った.図7(b)のL1D1においては,24<sup>(+45°)</sup>層目で破壊指 標値が100%に達している.繊維配向角0°と-45°の破壊 指標値の最大はそれぞれ,25 層目の93.2%と23 層目の 89.1%であった.

3.4 考察

L1T1 と L1D1 の解析の耐荷力はそれぞれ, 51.4kN と 96.5kN であり, L1D1 の最弱層破損は L1T1 の 1.88 倍の 荷重で生じることが示された.よって,繊維配向角 90° の単層板を用いるよりも,繊維配向角±45°の単層板を用 いた方が,本解析条件では耐荷力は大きくなると考えら れる.しかしながら,L1T1 と L1D1 の破壊規準を満た した積分点における各層の破壊指標値を見ると,L1T1 の方が破壊指標値は小さい.よって,特に L1T1 の場合 は,最弱層破損が積層板の終局破壊につながらない可能 性が考えられる.

L1T1 と L1D1 の実験の梁の耐荷力はそれぞれ, 49.3kN と 70.2kN であり,解析での L1T1 と L1D1 の耐 荷力 51.4kN と 96.5kN より小さい結果であった.このこ とより,実験の梁は最弱層破損が生じる前に破壊したと 考えられる.実際に実験では,L1T1 と L1D1 で約 40kN 時に角割れが生じている.よって,これらの梁の耐荷力 を再現するためにはその影響を考慮する必要があると思 われる.

## 4. まとめ

本報では,積層構造が異なる CFRP 梁の曲げ載荷実験 を対象として有限要素解析を行い,最弱層破損則によっ て梁の耐荷力を定義することにより,L1T1 と L1D1 の 耐荷機構を検討した.以下に本報のまとめを示す.

- 解析における L1D1 の耐荷力は,L1T1 のものより 大きく,繊維配向角 90°の単層板の代わりに繊維配 向角±45°の単層板を用いることで,耐荷力が大きく なることを示した.
- LIT1 と LID1 の実験の梁の耐荷力は,解析の耐荷 力より小さく,実験の梁は最弱層破損が生じる前に 破壊したと考えられる.
- L1T1 と L1D1 の実験の梁では,約 40kN 時に角割 れが生じており,それらの梁の耐荷力を再現するた めには,角割れによる影響を考慮する必要があると 思われる.

#### 参考文献

- 1) 土木学会:第3回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文報告集,2009.
- 2) Hiroshi Mutsuyoshi, Thiru Aravinthan, Shingo Asamoto and Kenji Suzukawa: Development of New Hybrid Composite Girders Consisting of Carbon and Glass Fibers, COBRAE conference 2007 Benefits of composites in civil engineering, 2, university of Stuttgart, Germany, 2007.
- 3) Kunitomo Sugiura and Yasuo Kitane: Static Bending Test



(a) L1D1(載荷板左側)(b) L1T1(載荷板右側) 図 6:実験の梁の破壊性状とその位置



図7:18 層目から25 層目のTsai-Wuの破壊指標値

of Hybrid CFRP-Concrete Bridge Superstructure, Proceedings of US-Japan Workshop on Life Cycle Assessment of Sustainable Infrastructure Materials, Hokkaido University, Japan, 2009.

- 4) 櫻庭浩樹他: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, Vol.56A, pp.979-990, 2010.
- 5) 櫻庭浩樹他: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第 66 回年次技術研究発表会,A-4,2010.
- 個庭浩樹他:積層構成が異なる箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動の把握,第 65 回年次学術講演会,CS2-001,2010.
- Toray Industries : Fundamentals of carbon fiber technology and their application to Torayca products, Functional and composite properties, http://www.torayca.com/techref/index.html, 2010.
- 8) 三木光範他: 複合材料,機械システム入門シリーズ 8, pp.140-157,共立出版,1997.