

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

Study on the strength and deformation behaviors of CFRP box beams under flexure

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科

○学生員 木戸英伍 (Eigo Kido)
正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)
学生員 櫻庭浩樹 (Hiroki Sakuraba)
学生員 真砂純一 (Junichi Masago)
F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

1.はじめに

炭素繊維強化ポリマー（Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP）は軽量・高強度かつ耐腐食性の材料であり、航空宇宙分野において先進的に使用されてきた。近年ではその耐腐食性に着目し、腐食環境の厳しい土木構造物への活用が研究されている¹⁾。土木構造物を対象とした設計をさらに進めるには、損傷・破壊過程の把握に基づいたモデル構築と解析による再現が必要である。さらに CFRP は積層複合材料であり、積層構成などの適切な材料設計も必要である。

そこで本実験では積層構成を変えた 4 本の CFRP 梁の曲げ載荷実験を行い、強度・変形特性を把握することを目的とする。

2.実験概要

2.1 載荷方法と計測

載荷は 4 点曲げとし、荷重制御により行った。図-1 に供試体寸法と載荷方法を示す。変位とひずみの計測点は図-2 のとおりとし、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。なお後に述べる L1T1D2 供試体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。

2.2 供試体

以下の検討では、供試体 4 体をそれぞれ、L1T1、L1D2、L1D1、L1T1D2 と称する。L、T、D はそれぞれ、配向角 0°、配向角 90°、配向角 ±45°を意味し、繊維比率をそれらの後に表示している。例えば、L1T1 は軸方向と周方向の繊維比率が 1:1 である供試体である。各供試体の積層数を表-1 に示す。各供試体とも合計積層数は 25 層である。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表-1 で示し

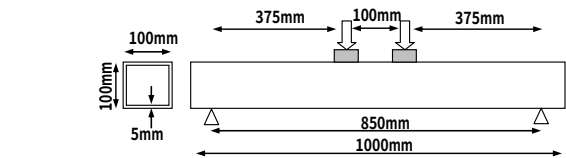


図-1 供試体寸法と載荷方法

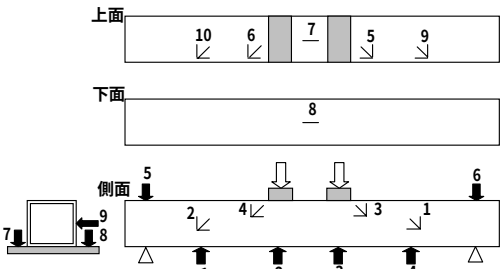


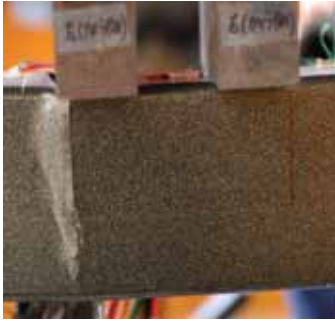
図-2 変位とひずみの計測点

表-1 各供試体積層構成

供試体名	0°積層数	45°積層数	90°積層数
L1T1	13	0	12
L1D2	9	16	0
L1D1	13	12	0
L1T1D2	7	12	6

た積層構成となるようにプリプレグを巻きつける。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。以上の方法で下記の 4 供試体は作成された。

- ・軸方向：周方向の繊維配向が 1:1（L1T1）
- ・軸方向：45°方向の繊維配向が 1:2（L1D2）
- ・軸方向：45°方向の繊維配向が 1:1（L1D1）
- ・軸方向：周方向：45°方向の繊維配向が 1:1:2（L1T1D2）



(a) L1T1D2



(b) L1D2



(c) L1T1 剥離後

写真-1 破壊部写真

表-2 各供試体の耐荷力と破壊性状

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

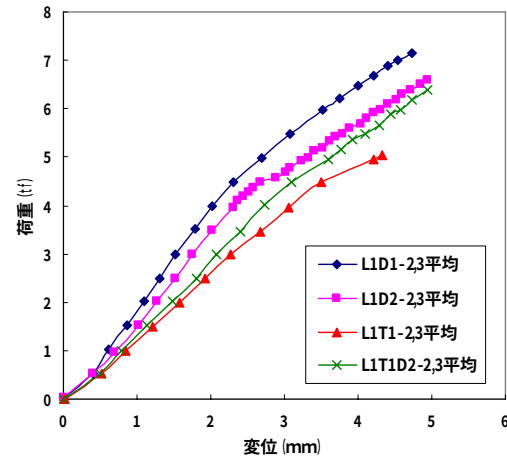


図-3 荷重点位置の荷重－変位関係

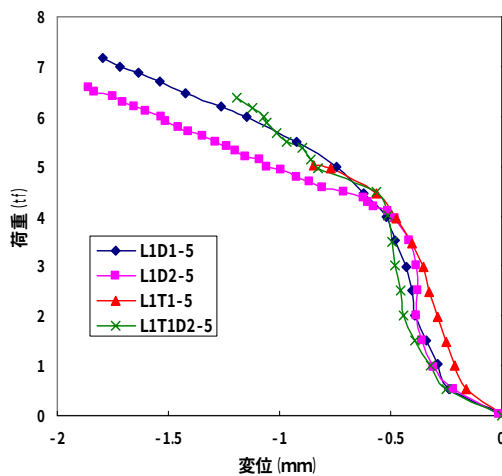


図-4 変位計5の荷重－変位関係

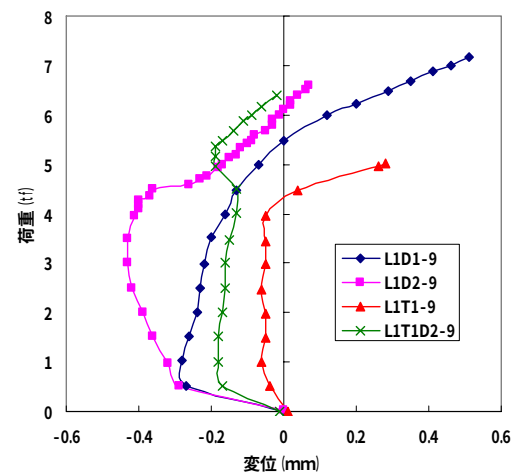


図-5 変位計9の荷重－変位関係

3 実験結果

3.1 耐荷力と破壊性状

耐荷力と破壊性状を表-2にまとめる。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ことで耐荷力が増加した。

写真-1 (a) (b) にL1T1D2とL1D2の破壊部の写真を示す。45°方向の繊維が含まれていないL1T1では周方向に直線の亀裂が生じ、周方向の繊維が含まれていないL1D1, L1D2では、斜め方向に層間剥離が生じ破壊に至った。すべての方向の繊維が含まれているL1T1D2では、直線の亀裂と層間剥離の両方が生じ破壊に至った。また

L1D2のみ4tf付近において、上フランジとウェブの隅角部に梁軸方向の角割れが確認された。

破壊後、各供試体の表面の層を剥がし、内部の破壊状態を確認した。写真-2 (c) にL1T1の剥離後の写真を示す。L1T1では内部の層にまで直線の亀裂が生じていた。L1T1以外の供試体では、各層に小さな亀裂や層間剥離による変形が生じた程度であった。

以上より本実験では、周方向よりも45°方向の繊維を用いた供試体の耐荷力が向上した。しかし、本実験の積層構成は限られているため、より効率的な積層構成を求めるためには、軸方向と45°方向の繊維配向の比率を変えた供試体について検討を行う必要がある。

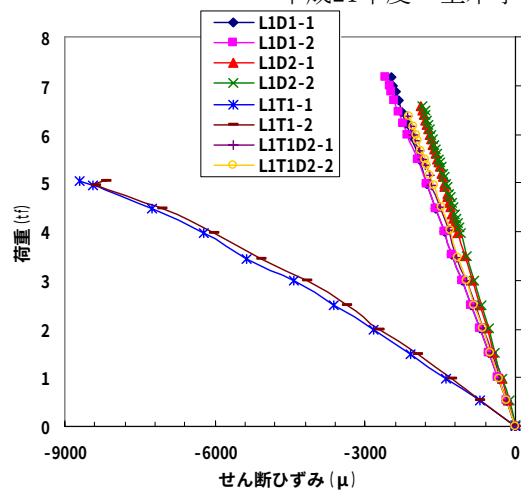


図-6 ひずみゲージ 1, 2 の荷重－せん断ひずみ関係

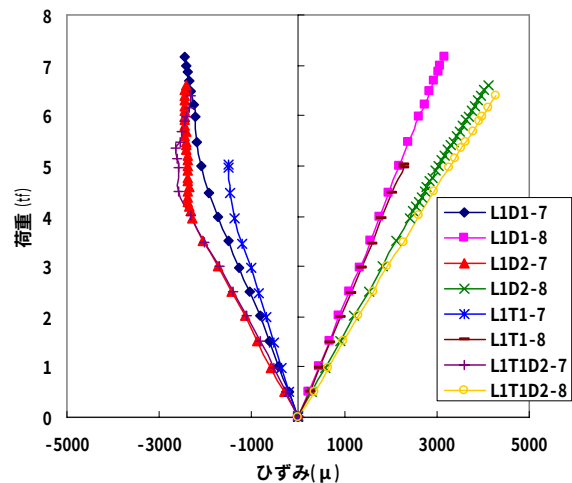


図-7 ひずみゲージ 7, 8 の荷重－梁軸方向ひずみ関係

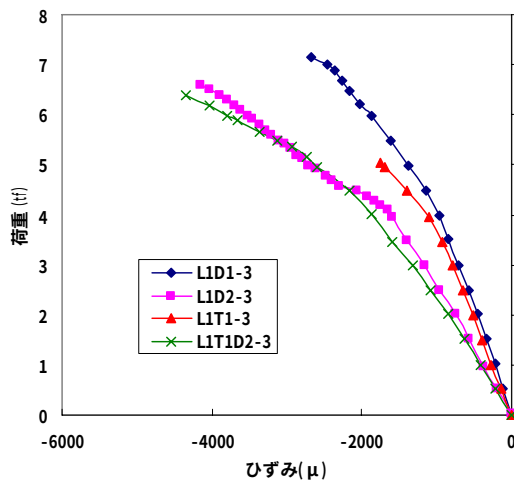


図-8 ひずみゲージ 3 の荷重－梁軸方向ひずみ関係

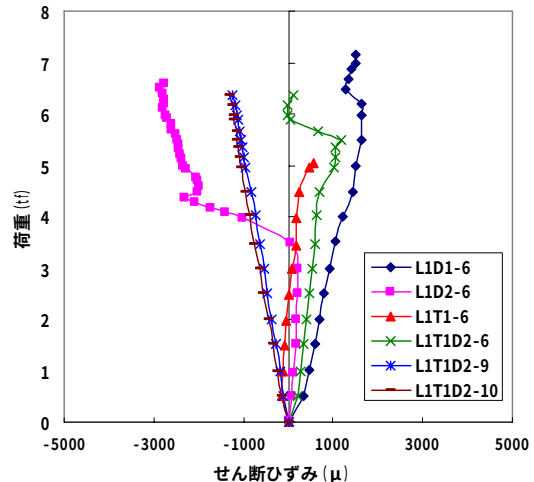


図-9 ひずみゲージ 6, 9, 10 の荷重－せん断ひずみ関係

3.2 荷重－変位関係の比較

図-3に載荷点位置での荷重－変位関係、図-4に変位計5の荷重－変位関係、図-5に変位計9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。

図-3 では耐荷力の大きいものほど剛性は大きくなっている。図-4 は供試体が潰れる方向の変位を示しているが、角割れが発生した 4tf を過ぎたあたりから傾きが減少し、剛性が小さくなっていることが確認できる。変位計 9 ではすべての供試体で載荷と同時にウェブがへこむ方向の変位が見られ、反転した後に、変位ゼロもしくは膨らむ方向の変位が生じて破壊した。

3.3 荷重－ひずみ関係の比較

図-6 にひずみゲージ 1, 2 の荷重－せん断ひずみ関係を示す。どの供試体もほぼ線形に変化し、45° 方向の積層数が多い供試体ほどひずみは小さい。L1D1 と L1T1D2 は 45° 方向の積層数が一緒のためほぼ等しいひずみとなっている。

図-7 にひずみゲージ 7, 8 の荷重－梁軸方向ひずみ関係、図-8 にひずみゲージ 3 の荷重－梁軸方向ひずみ関係を示す。ひずみゲージ 8 では破壊まで線形に変化しているが、ひずみゲージ 7 では 4tf 付近からひずみが一定に

なっている。これは隅角部の角割れにより、上フランジとウェブが分離し、それ以上上フランジ応力が伝達されなくなったためと考えられる。この伝達されなくなった応力はウェブで負担したため、ひずみゲージ 3 で傾きが変化したと考えられる。

図-9 にひずみゲージ 6, 9, 10 の荷重－せん断ひずみ関係を示す。ひずみゲージ 9, 10 では、箱型断面のせん断応力の分布通りに負の値をとり、線形に変化しているが、ひずみゲージ 6 では不規則に変化し、正の値をとる部分もある。これは載荷台によって拘束されていることにより、梁理論の変形ができていないものと思われる。L1D2 においては目視できるほどの角割れが発生したため、拘束から開放されたと考えられる。

3.4 最大・最小主ひずみの比較

図-10, 11 に L1D2, L1T1D2 の各荷重での最大・最小主ひずみを示す。側面ではどちらも荷重が増加するのに比例して大きくなっており、角度はほぼ一定である。ひずみゲージ 3, 4 の位置では破壊が生じた方 (L1D2 はひずみゲージ 4, L1T1D2 はひずみゲージ 3 側) でのひずみがやや大きくなっている。上面においては、本来のひずみであるひずみゲージ 9, 10 の位置でのひずみと比べ、ひず

L1D2

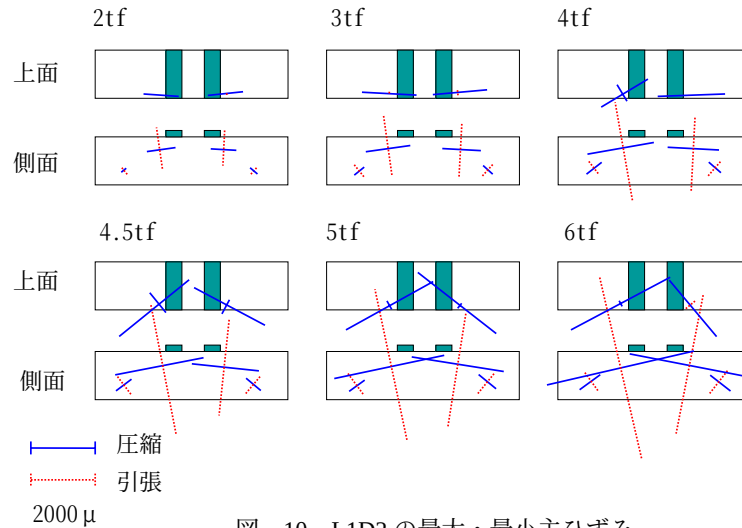


図-10 L1D2 の最大・最小主ひずみ

L1T1D2

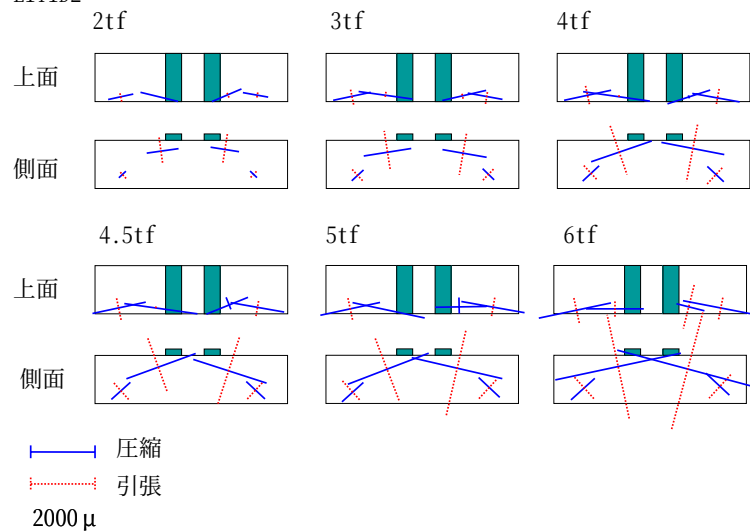


図-11 L1T1D2 の最大・最小主ひずみ

みゲージ 3, 4 の位置では異なるひずみが生じ、載荷台の影響が出ていることが確認できる。また、L1D2 では 4tf 付近から角度が大きく変化している。これは角割れによって載荷台の拘束から開放されたと考えられる。

4. まとめ

本報では、箱形断面 CFRP 梁の曲げ載荷実験を実施し、その結果を元に積層構成の違いによる梁の強度・変形特性の把握を図った。以下にまとめを示す。

- 1) 本実験の範囲では、周方向よりも $\pm 45^\circ$ 方向に繊維を配した方が耐荷力と剛性が向上し、直線状の亀裂から斜め方向の層間剥離への変化が観察された。
- 2) 変位とひずみの計測により、4tf 付近で上フランジからウェブへと力の伝達が移っていることが確認された。これは角割れの影響と考えられる。
- 3) ひずみの計測より本実験方法では、載荷台付近のひずみや、最大・最小主ひずみの挙動が不規則なことから載荷台による変形への影響が大きいことを確認した。

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) FRP 複合橋梁小委員会: 小委員会報告, 第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2009.
- 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.
- 3) 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.
- 4) 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 年次技術研究発表会, 2010.
- 5) 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.