CFRP 梁の耐荷力推定式の検討と変形特性の把握

Development of failure load estimation method and study of deformation behavior of CFRP beams

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	F会員	林川俊郎	(Toshiro Hayashikawa)
(株) 清水建設	正会員	稲田 裕	(Hiroshi Inada)
(株) 清水建設	正会員	吉武謙二	(Kenji Yoshitake)
(株) 清水建設	正会員	杉山博一	(Hirokazu Sugiyama)
(株) 清水建設	F会員	後藤 茂	(Shigeru Goto)
(株) 清水建設	F会員	石塚与志雄	(Yoshio Ishizuka)
(株) 東レ	正会員	鈴川研二	(Kenji Suzukawa)
(株) 東レ	正会員	松井孝洋	(Takahiro Matsui)

1.はじめに

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) は軽量・高 強度であり、耐候性に優れているなど、近年土木分野に おいて適用が研究されている材料である。これらの性質 は、構造物の耐久性の向上や長寿命化に重要な役割を果 たす。しかし、比較的新しくまた異方性材料であること から土木分野において主要部材として設計された例は少 なく、現状では修復や補強材料としての利用がほとんど である。よって土木構造物を対象とした設計を可能にす るためには、CFRP の異方性を考慮した耐荷力や変位の 算出方法の構築が必要になっている。

(((

(

そこで、土木構造物への CFRP の適用を目的とした実 験的検討¹⁾が行われてきた。本研究では、実験梁の破壊、 変形機構を検討することで CFRP の部材設計の基礎を構 築することを目的としている。既往の研究²⁾では、実験 と解析結果から CFRP の材料特性値と梁理論の応力を用 いた簡便な CFRP 梁の耐荷力推定式を検討したが、推定 式における着目点は破壊部に限られていた。また耐荷力 だけでなく、どのような変形特性を持つのかを知ること も必要である。よって本報では、破壊部以外の着目点を 考慮した耐荷力推定手法の検討および CFRP 梁の変形特 性の把握を行った。

2. CFRP 梁の曲げ載荷実験

実験は箱形断面の CFRP 梁を対象としている。図1に 曲げ実験の側面図および断面図を示す。CFRP は積層材 料であり、薄いシートを積層して作られる。実験で使用 された CFRP も、一方向材のプリプレグと呼ばれるシー トを 25 層重ねることで製作されている。プリプレグは 母材としてエポキシ樹脂を含んでおり、各層は熱硬化処 理することで接着される。このことから同じ繊維量を用 いても、各層のプリプレグの積層配向角を変化させるこ とにより、様々な強度、弾性係数を設計することができ る。実験では繊維配向の違いによる影響を確認するため、 梁軸方向と周方向の繊維比率が異なる4種類の繊維配向 が用いられた4つの供試体で曲げ載荷実験が行われた。 表-1 に強度と弾性係数を示す。また σ_1^{C} 、 σ_1^{T} 、 τ_{12}^{u} 、

τ₃₁"はそれぞれ、梁軸方向圧縮強度、引張強度、面内 せん断強度および面外せん断強度である。繊維配向は、 L9T1、L1T1、L1T2、L1T9の4種類であり、Lが梁軸方 向、Tが梁周方向の繊維比率を示す。梁軸方向の繊維比 率が大きいほど、強度、弾性係数も大きくなっている。 せん断弾性係数がほぼ同じ値なのは、繊維ではなく母材 の強度に依存しているためおよびせん断に抵抗する斜め 方向の繊維が入っていないためである。表-1の網かけ 部に示すLIT2、LIT9のせん断強度は材料実験が行われ ていないが、せん断弾性係数と同様に繊維ではなく母材 の性質に依存するためL1T1の値を仮定した。

実験では、CFRP が優れた引張強度を持つことから、 スパン中央での曲げ引張破壊が想定されていた。しかし 4供試体では曲げ引張破壊は発生せず、上フランジ載荷 板端部せん断スパン側の CFRP(図-1○) が面外に折 れたような破壊性状であった。写真-1 に破壊部の拡大 写真を示す。耐荷力を推定する際には、この破壊性状に 着目し、耐荷力推定の検討を行った。



図-1 側面図および断面図(単位:mm)

表-1 各繊維配向の材料特性値

材料特性値	玉字	繊維配向				
	甲位	L9T1	L1T1	L1T2	L1T9	
σ_1^{T}	MPa	1790	1759	715	295	
σ_1^{c}		674	612	247	173	
τ ₃₁ "		49.5	46.1	46.1	46.1	
τ ₁₂ "		71.1	67.7	67.7	67.7	
E ₁		98100	81000	39000	20900	
G12		3500	3560	3530	3500	

3.CFRP 梁の耐荷力推定式

3.1.推定方法

既往の研究²⁾では実験の破壊を詳細に検討するため、 実験梁を再現した FEM 解析を行った。解析において実 験梁が破壊した箇所(上フランジ、載荷板端部せん断ス パン側)の応力状態を調べると、梁軸方向圧縮応力、面 内せん断応力に加え、面外せん断応力が生じており、こ の3つの応力が梁の破壊に大きく寄与していた。よって これら3つの応力を算出することで簡便な耐荷力推定式 を検討することができることを示した。

推定式においては、梁理論における曲げ直応力、曲げ に伴う面内せん断応力および仮定に基づいた面外せん断 応力を算出した。面外せん断応力は、解析において上フ ランジ載荷板付近にのみ生じていたため(1)式に示す ように仮定した。

$$\tau_{31} = \frac{V}{A} \tag{1}$$

ここに、V: せん断力、A: 断面積。

次に、決定した 3 つの応力を積層材の破壊規準である Tsai-Wu の破壊規準³⁾に代入する。3 つの応力 のみを考慮しているため(2)式のように表される。(2) 式の異方性係数Fは表-1に示す強度から決定される。

$$F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{55}\tau_{31}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 = 1$$
(2)

$$F_{1} = \frac{1}{\sigma_{1}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{1}^{C}} \qquad F_{11} = -\frac{1}{\sigma_{1}^{T} \cdot \sigma_{1}^{C}} \qquad F_{55} = \frac{1}{(\tau_{31}^{u})^{2}} \qquad F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^{u})^{2}}$$

ここに、F:異方性係数、σ₁:梁軸方向直応力、τ₁₂: 面内せん断応力、τ₃₁:面外せん断応力。

また耐荷力を算定するための応力を求めるためには、着 目点を決定する必要があり、図-2、図-3のように決定し た。既往の研究²⁾では上フランジ着目点のみであり、ウ ェブ中央および下フランジ着目点も考慮することでどこ に破壊が生じるか決定できる。これらの着目点の中で最 小の耐荷力が CFRP 梁の耐荷力と判断される。上フラン ジ着目点と下フランジ着目点の位置は、梁軸方向直応力 および面内せん断応力が最大となる鉛直荷重作用位置の 隅角部とした。ウェブ中央着目点は、面内せん断応力が 最大となるウェブの中央の線上とした。FEM 解析にお いて面外せん断応力は上フランジ載荷板端部にのみ生じ ていたことから、推定式では面外せん断応力は上フラン ジ着目点にのみ作用させた。よって上フランジ着目点で は3応力、ウェブ中央着目点では、面内せん断応力のみ、 下フランジ着目点では梁軸方向引張応力および面内せん 断応力を考慮した。以上から、推定式は(3)式のよう に決定された。

$$P_{max} = -\frac{\beta}{2\alpha^2} + \frac{1}{\alpha}\sqrt{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2}$$

(3)

ここに、P_{max}:各着目点での耐荷力、α、β:異方性係 数、断面諸量および着目点位置から決定される係数。

3.2.推定結果

耐荷力推定結果を表-2 に示す。結果として、すべて のケースで上フランジ着目点が最小の耐荷力となり、上 フランジでの破壊が推定された。実験の破壊荷重と比較 すると L9T1、L1T1、L1T2 および L1T9 において、実 験値に対してそれぞれ 18、14、10、2%の誤差となった。 ウェブ中央着目点において、L9T1 以外で同じ値が得ら れているのは、面内せん断強度が同じためである。下フ ランジ着目点では、L1T9 ケース以外では最も大きな耐 荷力が推定され、曲げ引張破壊は発生しないと考えられ る。よって直応力、面内せん断応力および面外せん断応 力のみを算定することで、実験の破壊性状および耐荷力 を概ね把握できた。

しかし、表-2 に示した結果だけでは、各着目点がどのような状態になっているのか判断できない。そこでL1T1 と L1T9 の耐荷力時の荷重(それぞれ 90.2、47.2KN)の各応力を式(2)の左辺に代入し、Tsai-Wuの破壊指標値を求めた。この指標値が 100%になった時に梁の破壊が生ずる。また各着目点の高さ方向の位置は



写真-1 CFRP 梁破壊部



図-2 側面の着目点位置



図-3 断面の着目点位置

変えず、梁軸方向の位置を 0 から 425mm まで変化させ、 梁全体の破壊指標値の分布を確認した。

図-4 に L1T1 の耐荷力 90.2KN 時の破壊指標値の分布 を示す。図より上フランジの鉛直荷重作用位置で破壊指 標値が 100%になっていることがわかる。その位置のみ 指標値が急増しているのは、面外せん断応力を作用させ ているためである。またせん断スパン内のウェブ中央で は、鉛直荷重作用位置以外で上フランジより高い破壊指 標値を示している。下フランジにおいては、支点からの 距離が増加するに従って破壊指標値が低下している。こ れは表-1 に示すように、梁軸方向の引張強度と圧縮強 度の差が約 1100MPa あることによる Tsai-Wu の破壊規 準の特性が原因である。また曲げスパン内では破壊指標 値が負となり、荷重が作用していない場合より破壊しに くい応力状態になっていると考えられる。以上の結果か ら下フランジにおいて破壊は生じないことが推測される。

次に図-5 に L1T9 の耐荷力 47.2KN 時の破壊指標値の 分布を示す。L1T1 と同様に上フランジでの破壊が推定 されているが、ウェブ中央の破壊指標値はせん断スパン 内で 20%と低くなっている。これは、梁軸方向の強度 が L1T1 と比較して非常に小さく、曲げ応力が支配的に なっていることが原因である。また下フランジ着目点で は、梁軸方向の引張強度と圧縮強度の差が約 120MPa で あることにより、支点からの距離が増加するに従って破 壊指標値の傾きが負から正となり、曲げスパン内におい ても指標値が負となることはなかった。これにより、 L1T9 のみウェブ中央着目点より下フランジ着目点の破 壊推定値が小さくなったと考えられる。

4.CFRP 梁の変形特性

4.1.たわみの算定手法

CFRP は異方性材料であることから、梁軸方向の弾性 係数と比較するとせん断弾性係数は非常に小さく CFEP 梁の変位を求めるためには、曲げによる変形だけでなく せん断変形を考慮することが不可欠であることがわかっ ている⁴⁾。よってせん断によるたわみを算定するために チモシェンコ梁理論を用いて検討を行った。せん断変形 を考慮した図-2 の鉛直荷重作用位置でのたわみは、 (4) 式により求められる。

$$w_{b} + w_{s} = \frac{P}{2E_{1}I} \left\{ \frac{a^{3}}{3} + \frac{a^{2}b}{2} \right\} + \frac{Pa}{2G_{12}kA}$$
 (4)

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2次モーメント、A:断面積、k:せん断補正係数、a:せん断スパン長、b:曲げスパン長。

第2項のせん断補正係数kは、断面形状によって決まる 係数であり、チモシェンコ梁のせん断応力分布を補正す る。箱形断面のように、ウェブとフランジが明確に区別 される断面では、(2)式に示すウェブの断面積の全断 面積に対する比により、補正係数が得られる⁵。実験梁 の断面では、0.474となった。

$$\mathbf{k} = \mathbf{A}_{w} / \mathbf{A} \tag{5}$$

ここに、A_w:ウェブ断面積。

4.2.曲げとせん断たわみの寄与率

図-6 に(4) 式から得られる CFRP 梁の曲げによるた わみとせん断によるたわみの全体のたわみへの寄与率を 示す。材料特性値は表-1 に示した通りである。梁の高 さに対するスパンの比は 8.5 であるが、L9T1、L1T1 の ケースではせん断成分の方が曲げ成分よりも卓越し、 50%以上を示している。梁軸方向の繊維比率が少ない L1T2、L1T9 のケースでは曲げによる成分が卓越した。 これは L1T2、L1T9 の弾性係数が小さいためである。せ ん断弾性係数は各ケースでほぼ等しいため、同じ荷重レ ベルにおいては、弾性係数が減少すると曲げによるたわ みが増加し、せん断たわみの変形量はほぼ同じだが相対 的にせん断たわみの寄与率は低下する。

推定結果 実験 下フランジ 破壊荷重 上フランシ 繊維配向 ウェブ(KN) 破壊着目点 (KN) (KN) (KN)L9T1 82 97.1 108.6 182.6 上フラ 78.9 90.2 103.5 L1T1 177.3 上フラコ L1T2 66.3 59.8 103.5 150.1 L1T9 47 2 103.5 80.6 48.4

表-2 耐荷力推定結果



図-4 L1T1 の破壊指標値の分布



図-5 L1T9 の破壊指標値の分布



図-6 曲げとせん断たわみの寄与率



図-7 終局変位推定結果

4.3.終局変位の推定

3.2 節において CFRP 梁の耐荷力が得られたことから、 その荷重を用いて CFRP 梁破壊時の終局変位を求め、実 験値と比較した。図-7 に各ケースの終局変位推定結果 を示す。終局変位時の荷重は表-2 に示した上フランジ 着目点を用いた。実験値は最大荷重時の変位をプロット している。結果として、L9T1 および L1T1 では実験値 に対する誤差がそれぞれ 19、16%となった。これは、 L9T1、L1T1 の実験結果では破壊荷重付近においても非 線形な挙動は強くないことから、この手法でも対応でき たと思われる。しかし、L1T2、L1T9 においては、それ ぞれ 29、33%の誤差があり変形を過小評価する結果と なった。これは実験において、梁軸方向の繊維量が多い L9T1、L1T1 と比較すると L1T2、L1T9 は延性的な挙動 を示しており、線形挙動のみを用いたこの手法では誤差 が増加したと考えられる。 次に、曲げとせん断成分を分けてプロットすると、図 -6 で示したように L9T1、L1T1 ではせん断成分が曲げ 成分を上回っている。L1T2、L1T9 では耐荷力の荷重レ ベルが L9T1、L1T1 より低いにもかかわらず、梁軸方向 の弾性係数が減少することから曲げ成分が卓越している。 また破壊荷重が低下することから、せん断弾性係数は各 ケースでほぼ同じであるが L1T2、L1T9 においてはせん 断成分が減少する。このことから L1T2、L1T9 の実験値 との誤差が大きい原因は、曲げ成分の影響によるものと 推測される。以上より、梁軸方向の繊維比率が高い L9T1、L1T1 では概ねの値を推定できるが、梁軸方向の 繊維比率が少ない L1T2、L1T9 では、たわみが過小評価 される結果となった。

5.まとめ

本報では、土木構造物への適用を目的とした CFRP 梁 の実験を3つの応力を考慮した耐荷力推定手法で検討す るとともに、繊維配向の違いによる曲げとせん断変形の 全たわみ量へ寄与率および終局変位の推定を行った。 以下に得られた結果のまとめを示す。

- 耐荷力推定結果では、4 ケースすべてで上フランジ での破壊が推測され、実験の破壊性状と一致した。 また梁軸方向の破壊指標値の分布を確認することで、 下フランジ着目点の破壊は生じにくいことが明確に なった。
- 2) 梁軸方向の繊維配向が多いケースでは、せん断変形 が全たわみの 50%以上であることが推測され、せん断変形の考慮が不可欠であることが示された。
- 3) 耐荷力推定式で算定した荷重を用いた終局変位は、 梁軸方向の繊維配向が多い L9T1、L1T1 のケースに おいては実験値とそれぞれ 19、16%の誤差であり、 概ねの値が得られた。

参考文献

- 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.
- 2) 松本他: 箱形断面 CFRP 梁の FEM 解析と耐荷力推 定、土木学会北海道支部第 64 回年次技術研究発表 会、A-48、2008.
- 3) 邊吾一、石川隆司:先進複合材料工学、培風館、 pp.25-41、2005.
- Bishnu Prasad Gautam 他: Shear behavior of concretefilled CFRP box beam、土木学会第 62 回年次学術講 演会、CS15-008、2007.
- 5) 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、1983.