

せん断スパン長が異なる箱形断面 CFRP 梁の曲げ耐力の検討

Study on the ultimate bending moment of CFRP beams under flexure with different shear spans

北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)
 北海道大学工学部 〇学生員 榎本洸太郎 (Kotaro Enomoto)
 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 正会員 何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 炭素繊維強化ポリマー) は軽量かつ高強度であり、耐腐食性も高いことから、航空宇宙構造物、自動車、土木構造物への展開が広がられている¹⁾。CFRP の特徴的な材料特性を活用することで、構造物の耐久性向上や長寿命化において CFRP が重要な役割を果たすことが期待できる。現在、土木分野において CFRP は橋脚や桁の補修・補強材として幅広く用いられている²⁾。一方で、比較的新しい材料であることから、主要部材として設計された事例は限られている。これは、CFRP が異方性材料であるためである。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、CFRP の異方性を考慮した耐力や変位の算出方法の構築が必要になっている。

既往の研究³⁾では、CFRP を梁部材として適用するために、CFRP 梁の 4 点曲げ載荷実験が行われてきた。また CFRP 梁の破壊機構の検討が行われており、梁軸方向直応力と面内せん断応力の相互作用による材料破壊であったことが示されている。

しかしながら、曲げ載荷実験の載荷条件は、1 種類であり、載荷条件下が異なる場合においても梁の破壊機構を検討することが必要とされていた。

そこで本研究では、せん断スパン長を変化させた条件で箱形断面 CFRP 梁の 4 点曲げ載荷実験を行い、CFRP 梁の破壊機構を検討することを目的とした。具体的には、実験で観察される CFRP 梁の曲げ耐力と既往の研究³⁾で開発された曲げ耐力の算定式から得られる算定値との比較・検討を行う。

2. 箱形断面 CFRP 梁の曲げ載荷実験方法

本章では、箱形断面 CFRP 梁の曲げ載荷実験方法を説明する。以下では、既往の実験³⁾で行われた曲げ載荷実験方法も合わせて、載荷条件、供試体の構成、補剛材の位置、および計測器の配置を示す。

図-1 に載荷条件を示す。既往の実験³⁾においては、載荷条件はスパン 850mm、せん断スパン長 375mm、曲げスパン長 100mm とした 4 点曲げであった。本研究では、せん断スパン長の違いによる影響を確認するため、スパンを 850mm とし既往の実験のものと同しくし、せん断スパン長および曲げスパン長をそれぞれ、285mm および 280mm とする。

供試体は、炭素繊維とエポキシ樹脂から構成される箱

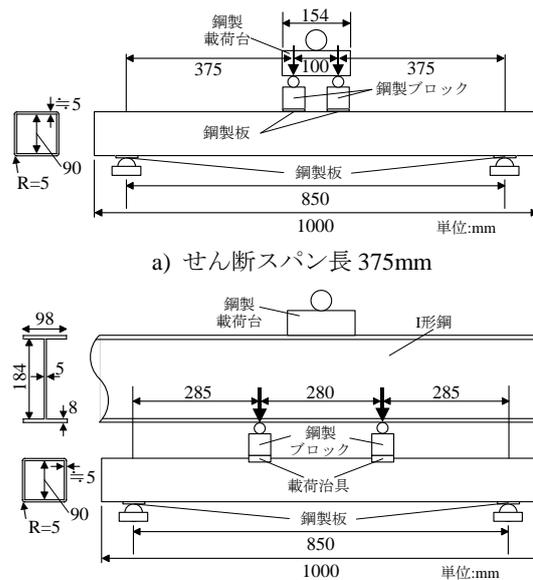


図-1 供試体寸法と載荷条件

表-1 供試体の材料特性

構成名	σ_x^T (MPa)	σ_x^C (MPa)	τ_{xy}^U (MPa)	E_x (GPa)	G_{xy} (GPa)
CP	1006	352	67.9	61.7	4.20

形断面 CFRP 梁である。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 1000mm、幅および高さ約 100mm、厚さ約 5mm である。既往の実験³⁾では、せん断スパン長 375mm とした条件下で、供試体 3 体を用意した。本実験においても、せん断スパン長 285mm とした条件下で、同様に供試体 3 体を用意する。

本研究では、既往の実験³⁾で採用された供試体の構成と同じものを用いて供試体を作製した。供試体は、単層板と呼ばれる個々の薄い層を積層して構成される。供試体は、直交積層となるように梁軸方向と梁周方向の単層板の比率を 1:1 とし、合計 20 層となっている。この供試体の構成名を CP とする。また、せん断スパン長の違いを区別できるように、構成名の後にせん断スパン長を付与する。さらに、各 3 体の供試体は、せん断スパン長の後にハイフンと番号を付けて区別する。最終的に、供試体の名称は、「CP375-1, CP285-2」のようになる。

表-1 に既往の研究で行われた材料試験結果³⁾から得

られた材料強度と弾性係数である梁軸方向引張強度 σ_x^T 、梁軸方向圧縮強度 σ_x^C 、面内せん断強度 τ_{xy}^U 、梁軸方向弾性係数 E_x 、面内せん断弾性係数 G_{xy} を示す。

図-2 に補剛材の位置を示す。各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 の杉材を設置し、計 8 箇所としている。

図-3 に変位計とひずみゲージの配置を示す。本論文では、実験結果として載荷点位置における荷重-変位関係を示すため、計測器の配置はせん断スパン長 285mm とした場合のみ示し、ほぼ同様の配置である 375mm とした場合³⁾の説明は割愛する。実験では、1 軸ひずみゲージ、3 軸ひずみゲージ、および変位計を配置した。

3. CFRP 梁の耐荷力と曲げ耐力の算定式

CFRP 梁の耐荷力は、梁理論による梁軸方向直応力と面内せん断応力が Tsai-Wu の破壊規準⁴⁾を満たした時と定義する。なお、それらの応力は、既往の実験を対象とした FEM 解析において、箱形断面 CFRP 梁の破壊に対して支配的な応力であることが確認されている⁵⁾。

積層板は各単層板で剛性が異なるため、厳密には板内の応力は不連続な分布となるが、本手法では積層板としての剛性を用い、板内の応力は連続であると仮定して積層板を 1 枚の板と見なす。また、耐荷力を算定するためには、着目断面を決定する必要がある。図-4 に示す位置とした理由は、4 点曲げ載荷において、曲げモーメントが最大となり、かつせん断力が生じる断面で CFRP 梁の破壊が生じると考えられることが既往の研究で示されているためである³⁾。以下では、梁の座標系を x - y 座標系とし、上述した条件の下、耐荷力と曲げ耐力の算定式を導く。

梁軸方向直応力と面内せん断応力のみを考慮した Tsai-Wu の破壊規準は式(1)で表される。

$$\left(\frac{1}{\sigma_x^T} - \frac{1}{\sigma_x^C}\right)\sigma_x + \frac{1}{\sigma_x^T\sigma_x^C}\sigma_x^2 + \frac{1}{(\tau_{xy}^U)^2}\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

ここに、 σ_x は梁軸方向直応力、 τ_{xy} は面内せん断応力である。材料強度は、表-1 に示した値を用いる。

次に、梁理論による梁軸方向直応力と面内せん断応力を式(1)に代入し、荷重 P について解けば、

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

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\sigma_x^T\sigma_x^C}\left(\frac{ay}{2I}\right)^2 + \frac{1}{(\tau_{xy}^U)^2}\left[\frac{1}{2I}\left\{hs - \left(\frac{y^2}{2} - \frac{h^2}{8}\right)\right\}\right]^2} \quad (3)$$

$$\beta = \left(\frac{1}{\sigma_x^T} - \frac{1}{\sigma_x^C}\right)\left(\frac{ay}{2I}\right) \quad (4)$$

となる。ここに、 P_{TW} は Tsai-Wu の破壊規準を満たす応力が生じた際の梁全体に作用する鉛直荷重、 a はせん断スパン長、 y は中立軸からの距離、 I は断面 2 次モーメント、 h は梁の高さ、 s は箱形断面の幅方向対称面からの距離である。

最終的に、Tsai-Wu の破壊規準に基づいた曲げ耐力は、着目断面における曲げモーメントを算定する際の梁部材

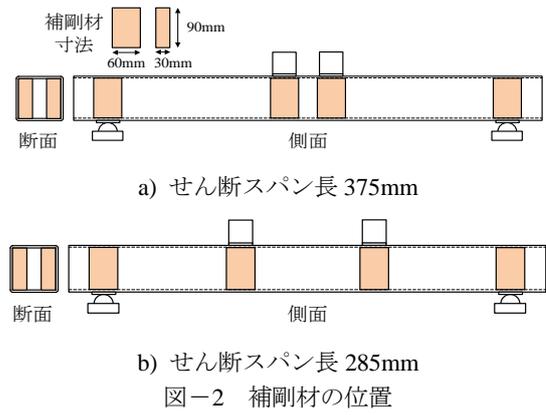


図-2 補剛材の位置

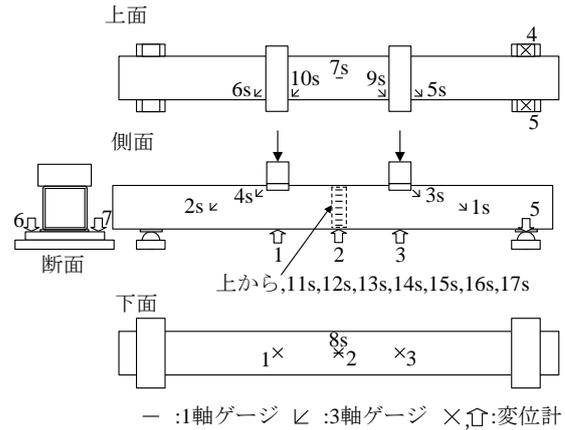


図-3 せん断スパン長 285mm とした載荷条件における計測器の配置

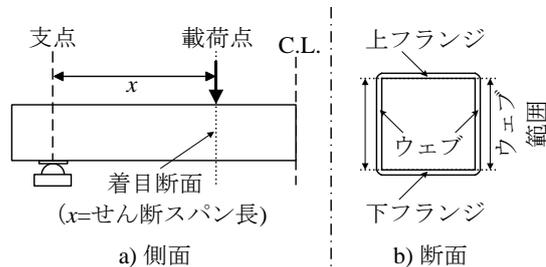


図-4 耐荷力の算定における着目断面

に作用する全体の荷重 P を P_{TW} とおけば、

$$M_u^{TW} = P_{TW} \frac{a}{2} \quad (5)$$

と表される。ここに、 M_u^{TW} は Tsai-Wu の破壊規準により梁軸方向直応力と面内せん断応力の相互作用を考慮した曲げ耐力である。

4. CFRP 梁の変位の算定式

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比較的小さく、一般的な鋼材やコンクリートに比べると、せん断による変位が曲げによる変位に対して寄与率が大きくなる。既往の研究³⁾では、CFRP 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必要があることが示されている。したがって、せん断を考慮した変位を算定するために、Timoshenko 梁理論⁶⁾に基づいて検討を行う。

せん断変形を考慮した荷点位置での変位は、

$$\delta = \frac{P}{2E_x I} \left\{ \frac{a^3}{3} + \frac{a^2 b}{2} \right\} + \frac{Pa}{2G_{xy} kA} \quad (6)$$

で表される。ここに、 P は全体の鉛直荷重、 E_x は梁軸方向弾性係数、 b は曲げスパン長、 G_{xy} は面内せん断弾性係数、 A は全断面積、 k はせん断補正係数 ($=A_w/A$, A_w はウェブ断面積) である。式(6)の第2項におけるせん断補正係数 k は断面形状によって決まる係数である。箱形断面では、ウェブの断面積の全断面積に対する比により、せん断補正係数が得られる⁶⁾。本実験で用いる供試体の断面では、0.474となる。

5. 結果と考察

5.1 耐荷力の比較

式(2)による耐荷力の算定結果を表-2に示す。実験では、供試体の破壊位置は CP375 と CP285 の両方で荷点位置であった。なお、表-2における実験値は、3体の供試体の平均値である。

結果として、CP375 と CP285 は、上フランジが最小の耐荷力となり、供試体は上フランジで破壊したと考える結果を示している。上フランジにおける算定値と実験値を比較すると、算定値は実験値に対して CP375 と CP285 の場合でそれぞれ、9.4%と 1.5%の差となっている。ウェブの算定値は、上フランジの算定値よりも大きい値である。一方で、下フランジの算定値は他の2つと比較して高い値を示している。

以上より、せん断スパン長が異なる場合においても、式(2)を用いて耐荷力を算定することで、供試体の耐荷力を概ね把握できると考えられる。

5.2 曲げ耐力の比較

CP375 および CP285 の式(5)による曲げ耐力算定値の上フランジ、ウェブ、および下フランジにおける分布をそれぞれ、図-5、図-6、および図-7に示す。

図-5と図-7より、CP375 と CP285 は共に、フランジ幅中央から離れて隅角部に近づく程、曲げ耐力は小さい値を示すことから、隅角部付近で破壊が生じると考えられる。

図-5 から図-7 の曲げ耐力を比較すると、最小の曲げ耐力は上フランジで算定されていることがわかる。したがって、梁の終局に至った部位は、着目断面における上フランジ隅角部付近であったと考えられる。また、CP375 と CP285 の値を比較することで、せん断スパン長が短くなることにより曲げ耐力は小さくなることわかる。

次に、式(5)を用いて、梁のせん断スパン長を変化させた場合の曲げ耐力を算定する。図-8にその算定結果と実験値を示している。結果として、せん断スパン長が短くなることで曲げ耐力は小さくなることわかる。また、せん断スパン長がある程度短くなれば、ウェブの算定値が最小値となることから、梁の終局に至る部位が上フランジからウェブへ遷移することが推測される。ただし、最小の曲げ耐力について、ウェブにおける曲げ耐力と、上フランジにおける曲げ耐力とがほぼ等しい値であ

表-2 耐荷力の算定結果

供試体名	実験値(kN)	算定値(kN)		
		上フランジ	ウェブ	下フランジ
CP375	78.4	86.5	90.7	181
CP285	101	102	105	192

注：表中の太字は、3つの部位の算定値における最小値を示す。

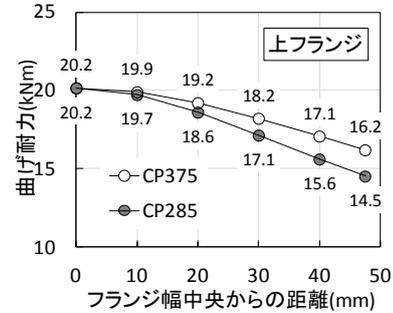


図-5 上フランジにおける曲げ耐力分布

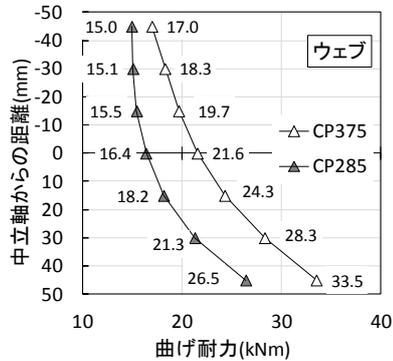


図-6 ウェブにおける曲げ耐力分布

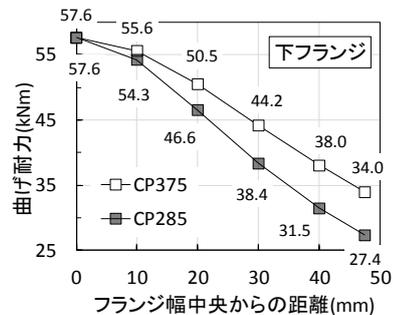


図-7 下フランジにおける曲げ耐力分布

る場合、どちらの部位で終局に至るかは本算定結果から明確には判断できないと考えられる。

5.3 荷重-変位関係

図-9と図-10にそれぞれ、CP375とCP285における耐荷力に至るまでの荷点位置の荷重-変位関係を示す。実験値は2つの荷点位置における変位の平均値である。算定値は、式(6)より算出した。

荷点位置の変位は、CP375とCP285ではそれぞれ、約50kNと約70kNまで算定値とほぼ一致し、線形な挙動を示しているが、それらの荷重を超えた場合、荷重の増加と共に徐々に算定値に対して変位が大きくなり、非

線形な挙動を示している。これは、供試体が直交方向の単層板から構成され、せん断に抵抗する対角方向の単層板を有していないためと考えられる。実際に、既往の実験結果³⁾において、せん断変形に抵抗する対角方向単層板を有さない場合、樹脂の特性に依存して荷重一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。

5.4 終局変位の比較

5.1節では、CFRP 梁の耐荷力を算出した。ここでは、その耐荷力と式(6)を用いて、梁の耐荷力時の終局変位を求め、実験における最大荷重時の変位と比較する。

図-11 に終局変位算定値と実験値との比較を示す。結果として、算定値の実験値に対する差が CP375 と CP285 においてそれぞれ、11.9%と 15.0%となり、実験値よりも小さい値が算出される結果となった。これは、5.3 節で上述したせん断変形の非線形な挙動に起因するものと考えられる。

6. まとめ

本論文では、せん断スパン長が異なる CFRP 梁の 4 点曲げ載荷実験における耐荷力、曲げ耐力、および変位に関する検討を行った。以下に、本論文で得られた知見をまとめる。

- 1) 耐荷力の算定結果では、CP375 と CP285 で共に上フランジでの破壊が推測され、実験の破壊荷重と概ね一致する耐荷力が得られた。
- 2) 曲げ耐力の算定結果では、せん断スパン長が短くなることで曲げ耐力は小さくなること、およびせん断スパン長がある程度短くなることで梁の終局に至る部位が上フランジからウェブへ遷移すると思われることが示された。
- 3) 耐荷力算定式から得られた耐荷力を用いて算定した終局変位は、CP375 と CP285 の両方の場合において、せん断変形の非線形挙動に起因して、実験値よりも小さい値が算出される結果となった。

参考文献

- 1) 土木学会：FRP 橋梁，土木学会，pp.1-93, 177-208, 2004.
- 2) 土木学会：複合構造技術の最先端，pp.1-13, 土木学会，2007.
- 3) 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.
- 4) 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) 櫻庭浩樹，松本高志，林川俊郎，稲田裕，吉武謙二，杉山博一，後藤茂，石塚与志雄，鈴木研二，松井孝洋：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.
- 6) 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.

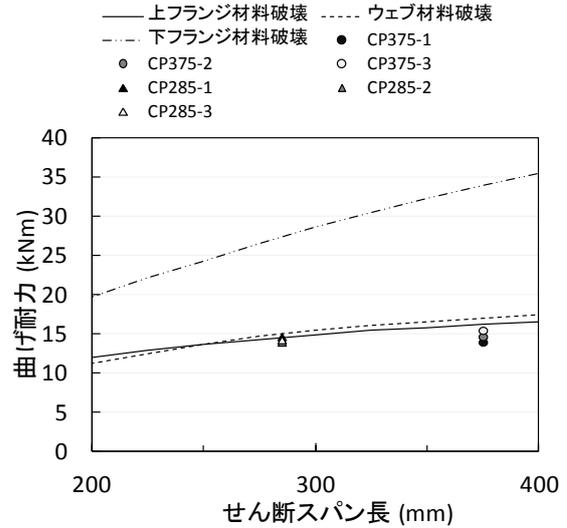


図-8 せん断スパン長が異なる場合の曲げ耐力

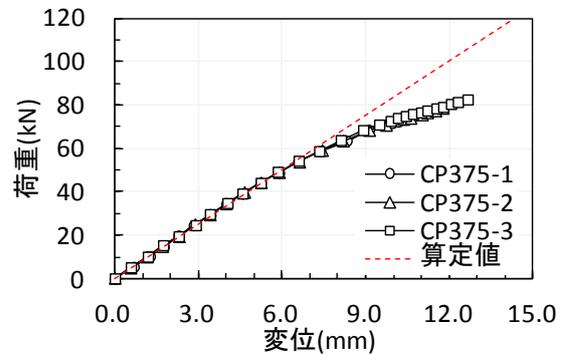


図-9 CP375 の載荷点位置における荷重-変位関係

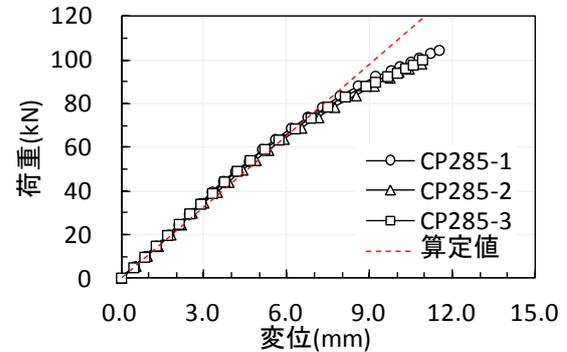


図-10 CP285 の載荷点位置における荷重-変位関係

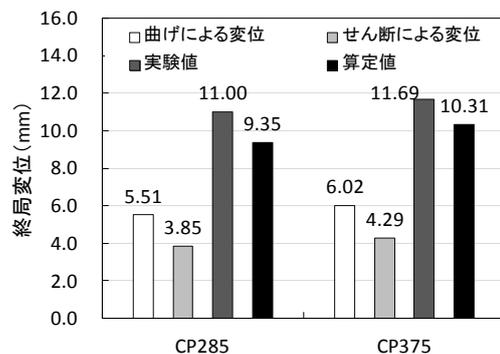


図-11 終局変位の比較