

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

Analytical study on the effects of in-filled concrete in CFRP box beams

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***

Hiroki Sakuraba, Takashi Matsumoto, Toshiro Hayashikawa, Hiroshi Inada, Kenji Yoshitake
Hirokazu Sugiyama, Shigeru Goto, Yoshio Ishizuka, Kenji Suzukawa, Takahiro Matsui

*北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

**清水建設 (株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

***東レ (株) (〒455-8502 愛知県名古屋市中区大津町 9-1)

In this study, effects of in-filled concrete in CFRP box beams under four point bending are investigated. Various parameters such as fiber volume proportion and concrete strength were examined in the past experiment. A finite element analysis is conducted to clarify the effects of in-filled concrete. It is shown that the stiffness is significantly low because of the slip between CFRP and concrete. Due to the slip, concrete does not contribute to shear stiffness effectively and high shear stress in CFRP web is caused. Using the results of the analysis, the effects of in-filled concrete are examined in terms of the stiffness and the failure load.

Key Words: CFRP box beam, in-filled concrete, stiffness, failure load

キーワード: 箱形断面 CFRP 梁, 中詰めコンクリート, 剛性, 耐荷力

1. はじめに

CFRP は軽量性, 高強度性などの優れた性質を持ち, 航空宇宙分野, レジャー産業において広く使用されている。また耐腐食性の材料でもあることから, 近年土木分野において適用が研究されており, 構造物の耐久性の向上や長寿命化が期待されている。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⁾と解析での検討²⁾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³⁾では, 実験と FEM 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, 中詰めをしていない梁の解析結果に基づくものであった。よってコンクリートにより中詰めをした梁についても同様の検討を行い, その効果を確認する必要がある。そのため本報では, FEM 解析, 実験梁の剛性, および耐荷力から, 箱形断面 CFRP 梁の中詰めコン

クリートによる効果の検討を行った。

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, 4 点曲げで行われた。図-1 に曲げ実験の側面図および断面図を示す。実験は, 梁の繊維配向, 中詰めコンクリートの強度をパラメータとして, 合計 7 供試体で行われた。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 5 種類の繊維配向が用いられた。表-1 に強度と弾性係数を示す。また σ_1^T , σ_1^C , τ_{31}^u , τ_{12}^u はそれぞれ, 梁軸方向引張強度, 梁軸方向圧縮強度, 面外せん断強度および面内せん断強度である。繊維配向は, L9T1, L2T1, L1T1, L1T2, L1T9 の 5 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

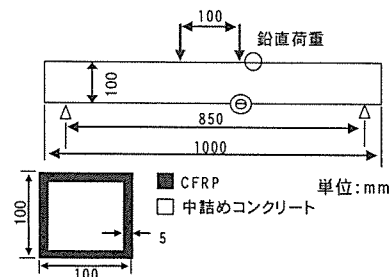


図-1 実験梁の側面図および断面図

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、せん断に抵抗する斜め方向の繊維が入っておらず、繊維ではなく母材の剛性に依存しているためである。表-1 の*が付いている L1T2, L1T9 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特性に依存するため L1T1 の値を仮定した。

次に、中詰めコンクリートの強度と弾性係数を表-2 に示す。強度の異なるコンクリートを用いたのは、コンクリート圧壊後の梁挙動の把握を図るためである。2 種類の普通強度コンクリートは実験時期が異なる。以下の検討では、実験パラメータを 'L9T1-N' のように 繊維配向-中詰め として示す。(N: 前期普通強度コンクリート, N2: 後期普通強度コンクリート, L: 低強度コンクリート)

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 7 試体で曲げ引張破壊 (図-1 ◎部) が発生したのは、L1T9-N2 の供試体のみであり、それ以外の供試体では上フランジ載荷板端部せん断スパン側の CFRP (図-1 ○部) 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。

3. FEM 解析

解析対象は L9T1-N とし、CFRP とコンクリートの界面付着の影響を把握するため、界面のずれを考慮した場合と、完全付着とした場合の 2 ケースにおいて比較を行った。また中詰めコンクリートの効果を把握するため、中詰めをなしとした場合との比較も行い、合計 3 ケースの解析を行った。解析ソフトには MSC.Marc を用いた。

3.1 解析条件

解析は梁の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。モデルでは実験梁を再現するため、載荷板と支点到幅 50mm, 厚さ 15mm の鋼板をモデル化した。CFRP には直行異方性のソリッド要素を用い、CFRP の破壊規準として Tsai-Wu の破壊規準⁴⁾を用いた。中詰めコンクリートには、ソリッド要素を用い、コンクリートの応力-ひずみ関係を図-2 に示すように決定した。圧縮側では CFRP (L9T1) による拘束効果を Samaan 式^{5,6)}によって考慮した。圧縮強度の半分までは線形挙動とし、断面形状と CFRP の周方向強度から得られる拘束圧 32.8 MPa によって、100.7 MPa まで硬化するものとした。引張側においては、主応力がコンクリートの引張強度に達した後にコンクリートのひび割れを考慮し、5000 μ まで線形に軟化するものとした。コンクリートと CFRP の界面については、ずれを考慮した場合と完全付着とした場合の 2 ケースにおいて解析を行った。界面のずれを再現するために接触解析機能を用いて解析を行い、CFRP とコンクリートの摩擦係

表-1 CFRP 材料特性

材料特性	単位	繊維配向				
		L9T1	L2T1	L1T1	L1T2	L1T9
σ_1^T	MPa	1790	1759	1759	715	295
σ_1^C		-674	-713	-612	-247	-173
τ_{31}^u		49.5	46.9	46.1	46.1*	46.1*
τ_{12}^u		71.1	68.1	67.7	67.7*	67.7*
E_1		98100	88800	81000	39000	20900
G_{12}		3500	3530	3560	3500	3500

表-2 コンクリート材料特性

材料特性	単位	中詰めコンクリート		
		普通強度		低強度
		前期(N)	後期(N2)	L
f'_c	MPa	31.7	28.9	19.4
E_c		28480	31820	26710
G_c		12129	13552	11405
ν		0.174	0.174	0.171



写真-1 CFRP 破壊部

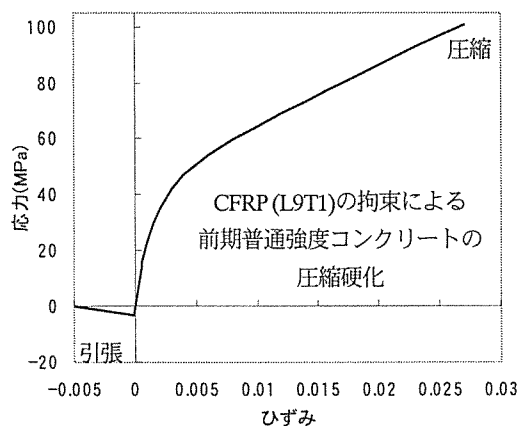


図-2 CFRP の拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係

数は 0.4 を用いた⁷⁾。以下の検討では、界面のずれを考慮した場合、完全付着とした場合、中詰めをなしとした場合をそれぞれ、接触解析、完全付着、中詰めなしと称す。

3.2 解析結果

梁の破壊は、CFRP に破壊が見られ、梁の剛性が大きく変化した点とした。図-3 に 3 ケースおよび実験の載荷点位置での荷重-たわみ曲線を示す。接触解析、完全付着、中詰めなし、実験梁の破壊荷重はそれぞれ、117.8, 125.9, 83.4, 119.3 kN となり、接触解析で実験値に近い値

が得られた。コンクリートの中詰めすることで、接触解析、完全付着において中詰めなしと比較して、それぞれ 34.4, 42.5 KN 耐力が増加した。しかし、実験梁の剛性は、中詰めなしの梁とほぼ同じ剛性を示し、完全付着とした場合は、実験値の 190% 程度の剛性が得られた。接触解析においても、実験値の約 110% の剛性を示した。

実験梁は、荷板端部せん断スパン側の CFRP が面外に折れるような破壊性状を示したが、接触解析においても同様の位置で、Tsai-Wu の破壊指標値が高い値を示した。またコンクリートの引張りひ割れは、接触解析、完全付着の両ケースにおいて、初期荷重時(4.5KN)に発生した。Samaan 式による圧縮限界ひずみは、最大で 26600μ であるが、解析において 26600μ を超えることはなかった。

3.3 考察

本節では、図-3 において見られた、接触解析と完全付着の剛性の差の原因とコンクリートの中詰めすることによる耐力力の増加の要因を考察する。

(1) 接触解析と完全付着の比較

図-4 に 4.5KN 時でのせん断スパン中央の断面中央部（凡例：接触解析 ◇ 完全付着 □）と CFRP ウェブ（凡例：接触解析 ◆ 完全付着 ■）の面内せん断応力分布の比較を示す。断面中央において、接触解析と完全付着を比較すると、接触解析のコンクリートがせん断応力を負担している分は少なく、特に引張側コンクリートではほぼ 0 になっている。CFRP ウェブにおいては、完全付着のせん断応力は大きく低減されており、コンクリートのひび割れが生じていない圧縮側で低減効果が大きい。よって、完全付着とすることで梁の剛性が実験値の 190% 程度になったのは、コンクリートのせん断剛性によるものだと考えられる。このことから、実験梁のコンクリートと CFRP の付着は弱く、コンクリートのせん断剛性への寄与は小さかったことが推測される。また付着を向上させることにより、梁のせん断スパン内でのせん断耐力の増加が考えられる。

(2) 接触解析と中詰めなしの比較

図-3 において、接触解析と中詰めなしとの結果を比較すると、剛性の増加は少ないが、耐力力では 34.4 KN 増加している。図-4 において、接触解析、完全付着、および中詰めなしの CFRP ウェブ（凡例：接触解析 ◆ 完全付着 ■ 中詰めなし ▲）の面内せん断応力分布を比較する。図より、接触解析では中詰めなしと比較するとせん断応力は 90% 程度に低減されているが、完全付着と比較するとその効果は小さい。次に、図-5 にせん断スパン中央の 4.5KN 時の接触解析と中詰めなしの CFRP ウェブ（凡例：接触解析 ◆ 中詰めなし ▲）および接触解析の断面中央部（凡例：接触解析 ◇）の梁軸方向直応力の分布を示す。接触解析の場合では、中立軸の位置が梁下端から 55mm 程度であり、圧縮縁において中詰めなしの応力

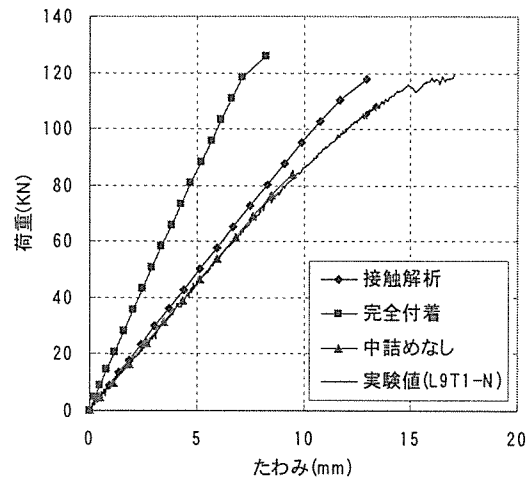


図-3 荷重-たわみ曲線

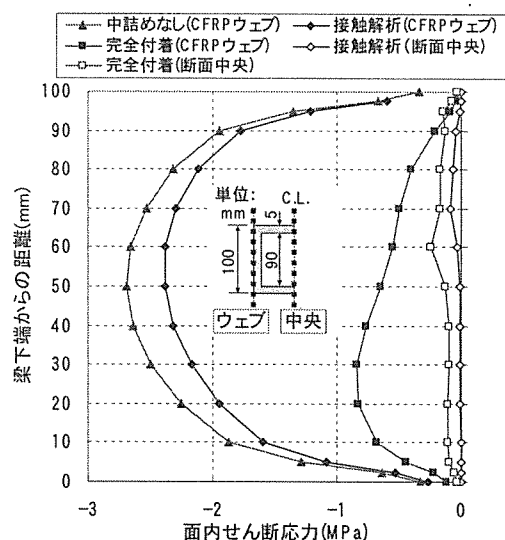


図-4 面内せん断応力分布の比較

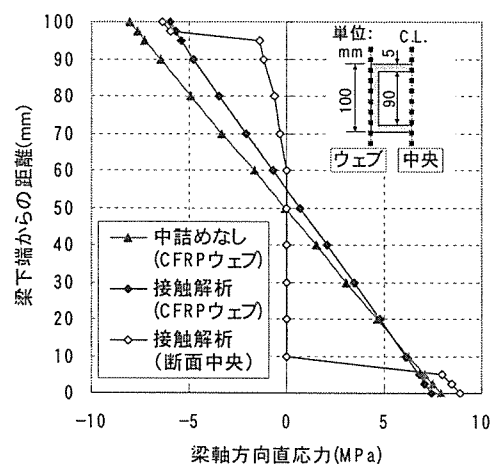


図-5 梁軸方向直応力の比較

の 74% に減少している。また断面中央部の接触解析では、コンクリートの圧縮側に応力が生じていることから、曲げ剛性には寄与していると考えられる。よって中詰めコンクリートによる耐力力の増加は、コンクリートが圧縮

応力を負担することで中立軸が上がり、CFRP の縁圧縮応力を低減させることが要因であると考えられる。

4. CFRP 梁の変形特性

梁の変形特性を把握するために、FEM 解析の結果も踏まえ、下記の4つの局面を想定した。

- 1) 全断面有効: コンクリートが健全である状態。
- 2) ひび割れ断面: コンクリートのひび割れを想定し、引張側コンクリートを無視する。コンクリートと CFRP の付着は剛結とし、圧縮側のコンクリートは、曲げとせん断の剛性に寄与する。
- 3) せん断非合成断面: ひび割れ断面において、コンクリートと CFRP の界面にずれが生じるものとし、圧縮側のコンクリートは曲げ剛性にのみ寄与する。
- 4) CFRP 断面: コンクリートが圧壊し、剛性に全く寄与していない状態を想定し、CFRP のみの断面とする。

4.1 たわみの算定手法

せん断を考慮した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-1 の鉛直荷重作用位置でのたわみを、(1) 式により決定した。

$$w = \frac{P}{2(E_1 I_{cf} + E_c I_c)} \left\{ \frac{a^3}{3} + \frac{a^2 b}{2} \right\} + \frac{Pa}{2(G_{12} k_{cf} A_{cf} + G_c k_c A_c)} \quad (1)$$

ここに、P: 鉛直荷重、 E_1 : CFRP 梁軸方向弾性係数、 I_{cf} : CFRP 断面 2 次モーメント、 E_c : コンクリート弾性係数、 I_c : コンクリート断面 2 次モーメント、 a : せん断スパン長、 b : 曲げスパン長、 G_{12} : CFRP 面内せん断弾性係数、 k_{cf} : CFRP せん断補正係数、 A_{cf} : CFRP 断面積、 G_c : コンクリートせん断弾性係数、 k_c : コンクリートせん断補正係数、 A_c : コンクリート断面積。

右辺第 2 項のせん断補正係数 k_{cf} 、 k_c は、断面形状によって決まる係数であり、 k_{cf} は (2) 式に示すようにウェブの断面積の全断面積に対する比により補正係数を決定した⁸⁾。 k_c は、矩形断面として 5/6 を用いた。

$$k_{cf} = A_w / A_{cf} \quad (2)$$

ここに、 A_w : CFRP ウェブ断面積。

4.2 たわみの算出結果

図-6 に L9T1-N の各局面と実験および接触解析、完全付着の荷重-たわみ曲線の比較を示す。実験値は載荷初期においても、全断面有効、ひび割れ断面と差が見られ、ひび割れが初期段階において発生し、界面にずれが生じていたと考えられる。実験梁の剛性は 50KN 程度までせん断非剛性断面に近く、その後 CFRP 断面に移行してい

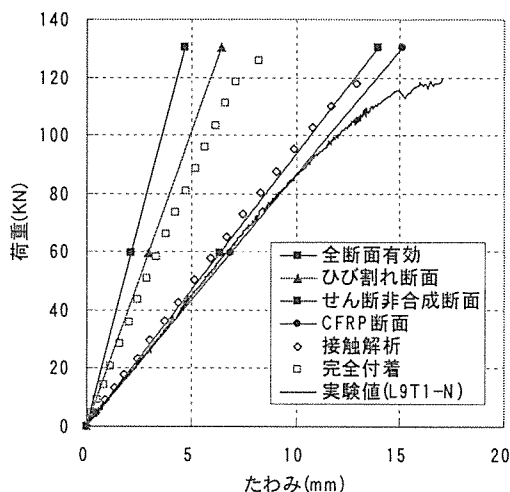


図-6 荷重-たわみ曲線 (L9T1-N)

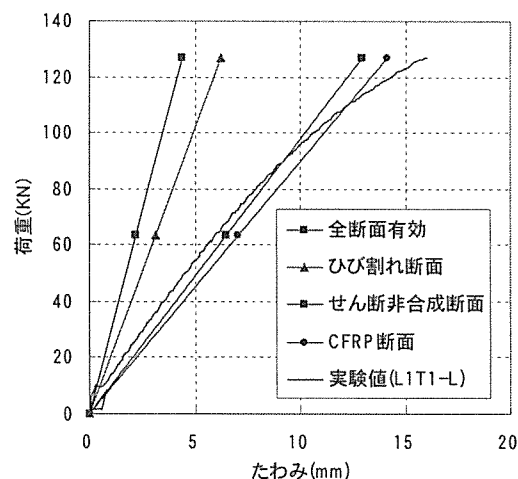


図-7 荷重-たわみ曲線 (L1T1-L)

る。85KN を超えると CFRP 断面より剛性が低下し、破壊に至っている。FEM 解析結果と比較すると、せん断非合成断面と接触解析が良く一致しており、せん断非合成断面の仮定は妥当であると考えられる。また完全付着とした場合は、ひび割れ断面に近い値が得られ、コンクリートがせん断剛性に寄与していることが示されている。

図-7 に L1T1-L の各局面と実験の比較を示す。L1T1-L では、10 KN 程度まで全断面有効の剛性を保ち、その後徐々にせん断非合成断面へ移行している。90 から 110KN では CFRP 断面へ移行している。最終的には CFRP 断面より剛性が低下し破壊に至っている。L1T1-L では L9T1-N より各局面への移行が明瞭になっているが、破壊時において CFRP 断面より剛性が低下していることは L9T1-N と同様に再現できていない。

4.3 曲げとせん断たわみの寄与率

図-8 に (1) 式から得られるとせん断非合成断面とひび割れ断面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。せん断非合成断面では、梁軸方向の繊維配向が少ない L1T2-N, L1T9-N2 以外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-N, L1T9-N2 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。

次に、ひび割れ断面としてコンクリートのせん断剛性を考慮すると、曲げによる寄与率がすべてのケースにおいて80%以上を示している。L1T2-N, L1T9-Nでは、95%以上になった。よってコンクリートと CFRP の付着を確保することにより、せん断たわみが大幅に減少することが示された。

5. CFRP 梁の耐荷力推定式

既往の研究³⁾では実験の破壊を詳細に検討するため、中詰めなし実験梁を再現した 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、荷重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寄与していた。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できることを示した。本報においては、3 章と 4 章の結果を踏まえ、CFRP 梁の耐荷力推定を行う。

5.1 推定方法

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荷重板付近にのみ生じていたため (3) 式に示すように仮定した。

$$\tau_{31} = \frac{V}{A} \quad (3)$$

ここに、V：せん断力、A：換算断面積。

次に、決定した 3 つの応力を Tsai-Wu の破壊規準⁴⁾に代入する。3 つの応力のみを考慮しているため (4) 式のように表される。(4) 式の異方性係数 F は表-1 に示す強度から決定される。

$$F_1 \sigma_1 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{55} \tau_{31}^2 + F_{66} \tau_{12}^2 = 1 \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} + \frac{1}{\sigma_1^C} \quad F_{11} = -\frac{1}{\sigma_1^T \cdot \sigma_1^C} \quad F_{55} = \frac{1}{(\tau_{31}^u)^2} \quad F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^u)^2}$$

ここに、F：異方性係数、 σ_1 ：梁軸方向直応力、 τ_{12} ：面内せん断応力、 τ_{31} ：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、

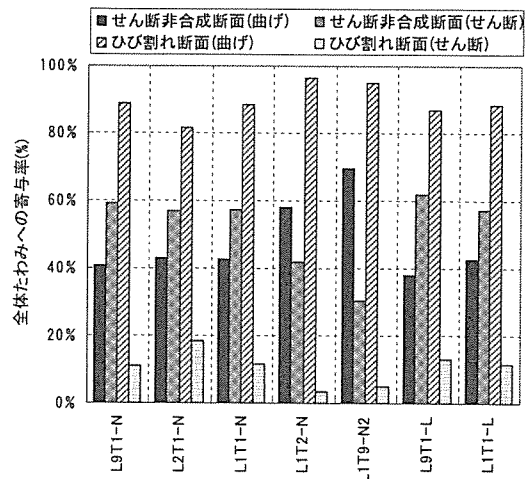


図-8 曲げとせん断たわみの寄与率

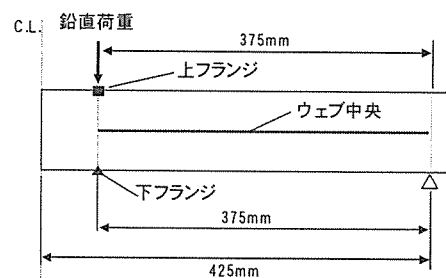


図-9 側面の着目点位置

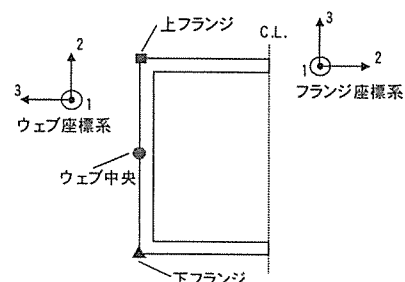


図-10 断面の着目点位置

着目点を決定する必要がある。図-9, 10 のように決定した。上フランジ着目点だけでなく、ウェブ中央および下フランジ着目点も含めることで想定される破壊点を考慮する。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。既往の FEM 解析において面外せん断応力は上フランジ荷重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 (5) 式のように決定された。

$$P_{\max} = -\frac{\beta}{2\alpha^2} + \frac{1}{\alpha} \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2} \quad (5)$$

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。

5.2 推定結果

本検討では、4章で想定した4局面の断面すべてにおいて、耐荷力の推定を行った。耐荷力推定結果を図-11に示す。結果として、L1T9-N2のひび割れ断面のみで下フランジ着目点での破壊が推定され、それ以外ではすべて上フランジ着目点が最小の耐荷力となった。

全断面有効とした場合は、コンクリートにひび割れが生じていないことを想定しているため、実験値との差が大きい。ひび割れ断面とした場合は、梁の剛性では実験値の200%程であったが、耐荷力推定値では実験値と最もよく対応した。せん断非合成断面とした場合では、L1T9-N2以外において耐荷力が大きく減少し、耐荷力を低く見積もっている。コンクリートが全く寄与していないことを想定したCFRP断面においては、耐荷力がさらに低下し、実験値との差が増大した。

5.3 考察

実験梁の剛性には、せん断非合成断面およびCFRP断面が対応していたが、耐荷力推定式ではひび割れ断面で実験値と最もよく対応した。剛性と耐荷力の局面が一致していないのは、せん断応力の算定手法に問題があると考えられる。せん断非合成断面における破壊時(Tsai-Wuの破壊指標値=100%)の面外、面内せん断応力の寄与分はL9T1, L2T1, L1T1では70%, L1T2, L1T9では50%程度あり、推定値への影響が大きい。よって仮定をした面外せん断応力の改善等が必要だと考えられる。

また以上の推定式の結果からは、CFRPのせん断強度を増加させれば、梁の耐荷力が向上することが示されている。よって現在の梁では、梁軸方向の繊維よりも、斜め方向の繊維量を増やし、せん断強度を増加させる方がCFRPを有効に活用できると考えられる。

6. まとめ

本報では、土木構造物へのCFRPの適用を目的とした箱形断面CFRP梁の曲げ載荷実験の中詰めコンクリートの効果の把握をFEM解析、梁の剛性、耐荷力の面から行った。以下に得られた結果のまとめを示す。

- 1) CFRPとコンクリートの界面のずれを考慮したFEM解析において、コンクリートのせん断剛性への寄与は少なく、CFRPウェブでせん断力を負担していたことが確認された。
- 2) 中詰めをしたことによる梁の耐荷力の増加の主要因は、圧縮側コンクリートが圧縮応力を負担すること

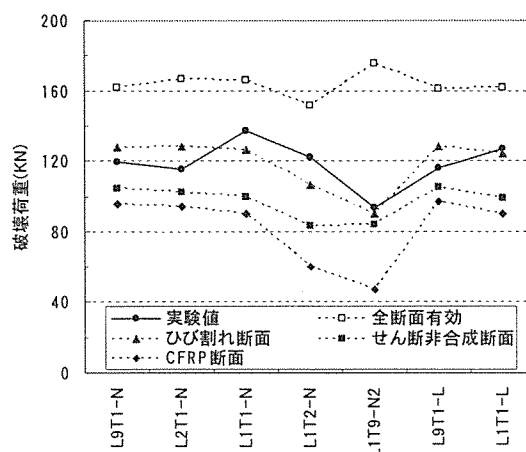


図-11 耐荷力推定結果

で中立軸が上がり、CFRPの縁圧縮応力を低減させることによるものと考えられる。

- 3) 実験梁の剛性は、コンクリートのせん断剛性を無視し、曲げ剛性のみを考慮することで再現できた。しかし終局時においてCFRPのみの剛性より小さくなることは明らかにできなかった。
- 4) 耐荷力推定式では、実験梁の剛性と対応が見られたせん断非合成断面において梁の耐荷力を小さく見積もる結果となり、せん断応力の算定手法の改善が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 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) Bishnu Prasad Gautam 他: Shear behavior of concrete-filled CFRP box beam, 土木学会第62回年次学術講演会, CS15-008, 2007.
- 3) 松本高志他: 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.
- 4) 邊吾一, 石川隆司: 先進複合材料工学, 培風館, pp.25-41, 2005.
- 5) Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of concrete confined by fiber composites." Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(9), 1025-1031, 1998.
- 6) Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., El Echary, H., Mastrapa, J. C., and Pico, O. "Effect of column parameters on FRP-confined concrete." Journal of Composites for Construction, ASCE, 2(4), 175-185, 1998.
- 7) Iscimen, M., "Shearing behavior of curved interfaces." MS thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2004.
- 8) 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.