

論文 ウェットボンディングによるFRP-RCハイブリッドT型梁のせん断性能に関する実験的検討

岩下 健太郎*1・呉 智深*2・尾崎 春平*3・三島 勇人*3

要旨：著者らは、高度な耐腐食性と総合的に高度な構造性能を兼備した新たな RC 構造物の創出を目的として、複数種類の連続繊維複合材 (FRP) を適材適所に用いた FRP-鉄筋コンクリート (RC) ハイブリッド構造形式を提案し、既報ではウェットボンディングにより実現した FRP-RC 梁の曲げ構造性能を、引張鉄筋比を考慮して実験的に究明した。本研究では、せん断補強 FRP とせん断補強鉄筋量を考慮して作製した T 型梁の曲げ試験を行い、せん断耐力を評価するとともに、既存の算定方法により実験結果を評価した。さらに、せん断補強 FRP の両端部を T 型梁の上フランジ下面に埋め込み、接着することでせん断耐力の向上を図った。
キーワード：FRP-RC ハイブリッド構造, ウェットボンディング, 適材適所, せん断, 端部埋め込み, T 型梁

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の性能や寿命を損なう鉄筋やコンクリートの腐食・損傷が深刻な問題となっており、高度な耐腐食性、耐薬品性を有する連続繊維複合材 (Fiber reinforced polymers, 以後 FRP と呼称) を応用した RC 構造物の防食性の向上が期待されている。また、FRP の高度な引張強度の活用により、RC 構造物の大規模震災時における損傷の軽減や復旧性の高度化を図った技術の開発が大いに推進されている。著者らは過去の研究^{1) 2) 3) 4)}において、複数種類の FRP を適材適所に用い、0.29% 程度の小さな引張鉄筋比でも構造体として成り立つ FRP 主体の FRP-鉄筋コンクリート (FRP-RC) ハイブリッド構造を提案した。この構造では、RC 構造物の周囲を FRP で覆うことにより鉄筋の防食性を向上させうえて、構造材の種類ごとに要求される性能を考慮して複数種類の FRP を適材適所に適用することにより、曲げ構造性能を総合的に高度化させた。また、大量の FRP を必要とする梁側面を被覆する FRP に要求性能を考慮して比較的低価格な E ガラス FRP (GFRP) を用いることにより低コスト化を図った。さらに、引張鉄筋量を考慮した実験的検討により、鉄筋主体の構造にすることで、剛性や引張鉄筋降伏荷重、ひび割れ幅といった使用性指標や最大荷重をコントロールできることを明らかにした。また、引張鉄筋の増量により、引張側 FRP 使用量が抑えられるため、材料面での低コスト化が図られた。本研究では、FRP-RC 梁のせん断耐力を実験的に検討するとともに、既存の算定方法により実験結果を評価した。さらに、せん断補強 FRP の両端部を T 型梁の上フランジ下面に埋め込み、接着することでせん断耐力の向上を図り、その効果を実験的に究明した。

2. ウェットボンディングによる FRP-RC ハイブリッド構造形式とは

著者らが提案した FRP-RC 構造形式では、図-1 に示すように RC 構造物の側表面を全面的に FRP で覆った防食構造とした。ただし、桁の側面に用いるせん断補強 FRP は曲げ補強 FRP に比べて接着面積がかなり大きくなることやせん断補強材の要求性能を考慮して、比較的低価格で高伸度性状を有する E ガラス FRP (GFRP) を用いることにした。また、曲げ補強効果が効果的に得られる引張縁のコンクリート表面には、表-1 に示すように最高級の引張弾性率と引張強度を有している炭素繊維 FRP (CFRP) と高レベルな伸度を有している GFRP を積層して配置し、ひび割れ発生荷重や剛性、鉄筋降伏荷重といった使用性、最大荷重、そして靱性といった曲げ構造性能指標の総合的な高度化を図った。さらに、事前にエポキシ樹脂で含浸、積層、硬化させた FRP の内側表面に常温硬化型のエポキシ樹脂を塗布した上で型枠内に設置して、フレッシュコンクリートを打設する方法により、FRP とコンクリート間の付着を確保する。この方法は過去の研究でウェットボンデ

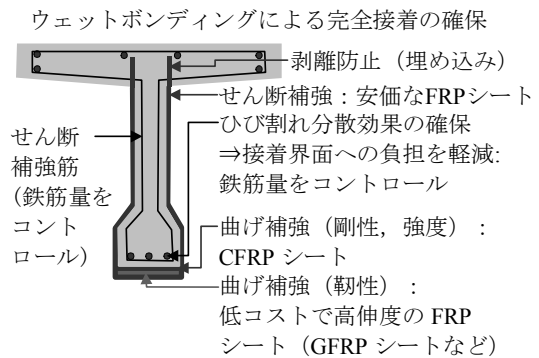


図-1 適材適所の概念に基づき提案した FRP-RC 構造

*1 茨城大学 大学院理工学研究科 VBL 非常勤研究員 工博 (正会員)

*2 茨城大学 工学部都市システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 茨城大学 工学部都市システム工学科

ィングと呼称されており、エポキシ樹脂とコンクリートの養生後には通常の後接着補強の場合と同程度の付着強さが得られることが実験的に示されている⁵⁾。

3. FRP-RC 梁のせん断構造性能に関する実験的検討

3.1 T 型断面 FRP-RC 梁の製作

せん断 GFRP シート層数、スターラップ間隔、そしてせん断 GFRP シート接着端部の埋め込みの有無および深さを表-2に示すように変化させることで、せん断耐力を変化させた全長 2m の FRP-RC 梁を新たに 5 体作製した(詳細寸法を図-2に示す)。ここで、接着端部の埋め込み深さは帯鉄筋の配筋作業に影響しないように、かぶり深さ程度と考えて 30mm とした。これらの梁には 2 層の CFRP シートと 5 層の GFRP シートを引張縁に配置して、かなり大きな曲げ耐力を確保した。また、SF2-ST80-E30 については既報の梁の結果を参照した。一方、埋め込み深さを考慮した SF2-ST200-E0 と SF2-ST200-E30 については、実験の再現性を考慮してそれぞれ 2 体の実験を行った。また、性能の比較対照として FRP 構造材の無い RC 梁も 1 体作製した。次に、FRP-RC 梁の作製方法を以下に説明する。まず、連続繊維シートに 50% の繊維含有率 (V_f) 相当量の常温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させうえて、樹脂が未硬化のうちに 150mm×300 mm の型枠に密着させ、室温環境下 (16°C ±5°C) で硬化・成形した。ここで、上記の連続繊維材は 1 層ずつ手作業により樹脂で含浸し、コンクリートに近い方から順に、すなわち、曲げ補強炭素繊維材、ガラス繊維材、せん断補強ガラス繊維材の順に積層した。そして、T 型断面の型枠を組み、成形された FRP と所定の鉄筋比となるように径と本数を設定した異形鉄筋をその内側に設置し、FRP の内側表面に 0.5kg/m² 相当量のエポキシ樹脂を塗布したうえて、その樹脂が硬化する前にフレッシュコンクリートを打設して作製した。ここで、コンクリートの設計圧縮強度 30MPa、スランブ 80mm として配合し、セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。また、100mm×200mm 円柱コンクリート供試体の圧縮試験において、28 日経過時の圧縮強度は表-2に示す通りである。

表-1 各種 FRP シートの引張特性一覧

各種指標	繊維材の種類	
	CFRPシート	GFRPシート
設計引張強度 (N/mm ²)	3400	1500
設計引張弾性率 (kN/mm ²)	230	80
設計破断伸度 (%)	1.48	1.88
単位面積重量 (g/m ²)	200	300
公称厚さ (mm)	0.111	0.118

表-2 FRP-RC 梁の FRP シートの種類と層数

供試体名	せん断 GFRP シート層数	スターラップ間隔	せん断 GFRP シート端部埋め込み長さ	曲げ FRP シート	コンクリート圧縮強度
SF2-ST200-E0-1	2層	200mm	0mm	CFRP シート2層 + GFRP シート5層	28.2MPa
SF2-ST200-E0-2	2層	200mm	0mm		35.8MPa
SF2-ST200-E30-1	2層	200mm	30mm		28.2MPa
SF2-ST200-E30-2	2層	200mm	30mm		28.2MPa
SF2-ST80-E30	2層	80mm	30mm		35.8MPa
SF1-ST200-E30	1層	200mm	30mm		28.2MPa
SF0-ST200	*	200mm	*		*

*SF0-ST200 には曲げ、せん断 FRP シートは無い。

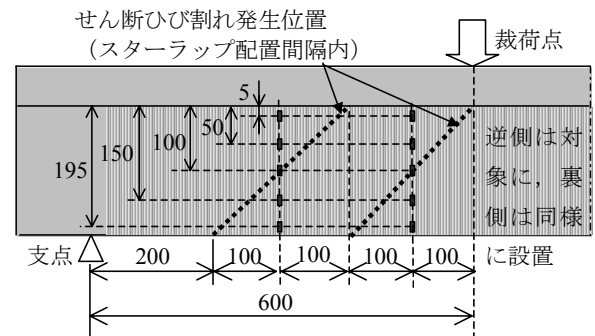


図-3 せん断 GFRP シートひずみゲージの設置位置

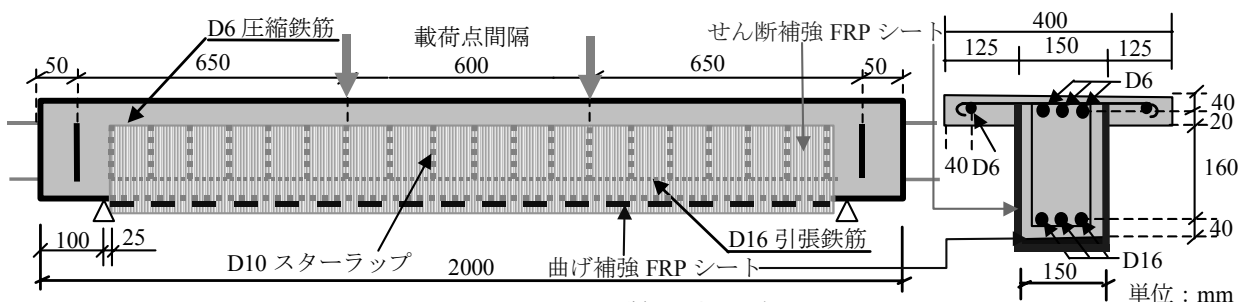
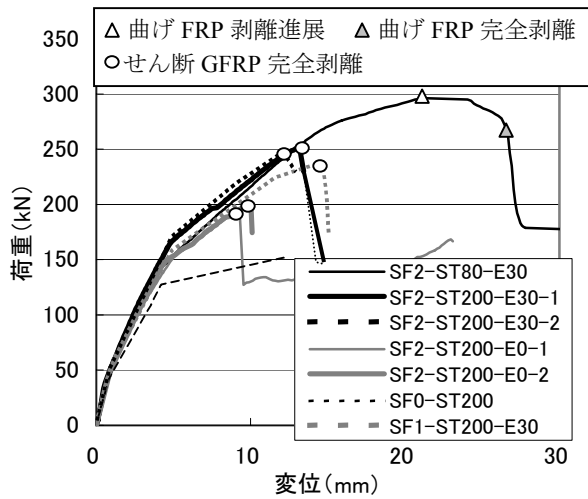
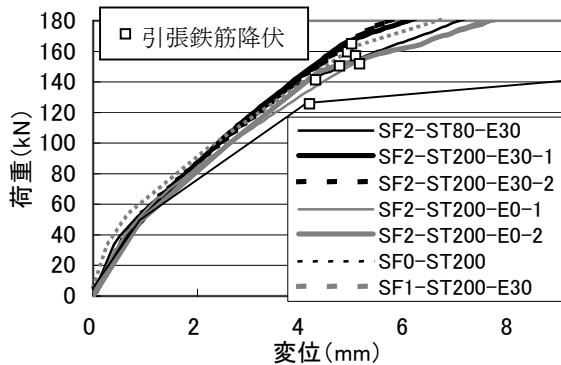


図-2 T 型断面 FRP-RC 梁の詳細寸法 (一例として SF2-ST80-E30)



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-4 荷重-変位曲線

3.2 実験方法

載荷試験の方法は4点曲げとし、支点、載荷点の間隔をそれぞれ1800mm、600mmに設定し、2000kN加圧試験機を用いて2kN/分の速度で載荷した。たわみ計測は50mm変位計を支間中央の梁両側面に設置して、両者の値を平均化した値を梁の最大たわみとして採用した。また、FRPひずみは、梁作製前に支間中央及び両載荷点に相当する位置のCFRP表面および図-3に示す位置のせん断GFRPシート表面に設置した検長5mmのひずみゲージで測定した。せん断FRPのひずみゲージはせん断ひび割れがせん断補強筋の間隔(200mm)内に斜めに生じると考えて、せん断補強筋から100mmの位置に、せん断FRPシートの繊維方向に沿って設置した。さらに、鉄筋ひずみは支間中央及び両載荷点に相当する位置の引張鉄筋に設置した検長5mmのひずみゲージで測定した。

3.3 実験結果

4点曲げ試験において得られた荷重と変位の関係を図-4に示す。まず、SF0-ST200では曲げひび割れが図-5に示すように発生してから引張鉄筋の降伏を迎え、その後はせん断補強筋が不足しているため、図-3に示し

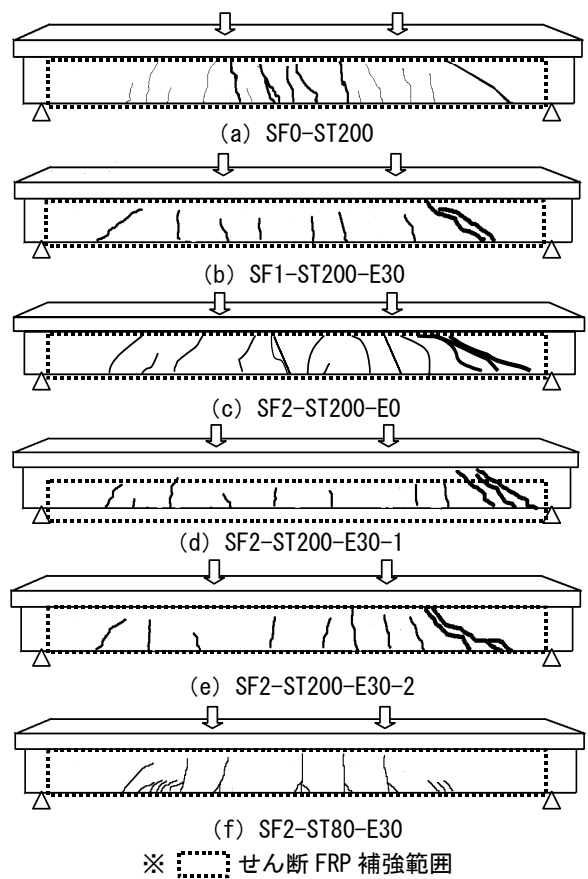


図-5 ひび割れ分布

たせん断ひび割れ発生の際位置に斜めひび割れが発生して荷重が急激に低下したため、実験を終了した。次に、SF2-ST200-E0では、引張鉄筋降伏まではSF0-ST200のケースと同様の挙動だが、最大荷重到達直後にFRPシートの斜めひび割れから上部は全て剥離し、急激に荷重が低下したため、実験を終了した。最大荷重は向上されており、せん断GFRPシートによるせん断耐力の向上効果が見られたが、剥離による向上効果の限界も確認された。そして、せん断GFRPシートの接着端部をフランジまで延長し、両端部を30mm埋め込んだSF2-ST200-E30では、SF2-ST200-E0の場合と同様にFRPシートの斜めひび割れから上部の剥離進展は生じるが、せん断FRPシート端部の埋め込み部の手前で剥離が停止し、その後も荷重が上昇した。その後、埋め込み部が引き抜けるとともに急激に荷重が低下しており、せん断FRP接着端部埋め込みによってもせん断耐力向上効果に限界が見られた。ただし、接着端部を埋め込んでいないSF2-ST200-E0-2のケースより21%のせん断耐力の向上効果が検証された。また、図-4(b)に示した拡大図において、SF2-ST200-E30ではSF2-ST200-E0の場合よりひび割れ発生後のグラフの傾き、すなわち剛性が若干大きく、せん断補強筋を密に配置したSF2-ST80-E30と同程度となっており、接着端部を埋め込んだことによりせ

表-3 FRP-RC 梁のせん断耐力の算定結果一覧

供試体名	コンクリートが受け持つせん断耐力 V_c (算定値)	せん断補強筋が受け持つせん断耐力 V_s (算定値)	せん断GFRPシートが受け持つせん断耐力 V_{frp} (算定値)	最大せん断耐力 $V_c + V_s + V_{frp}$ (算定値)	最大せん断耐力 S_{max} (実験値)
SF2-ST200-E0-1	39.4kN	45.7kN	78.5kN	163.6kN	96.4kN
SF2-ST200-E0-2	42.6kN	45.7kN	89.9kN	178.2kN	100.5kN
SF2-ST200-E30-1	39.4kN	45.7kN	78.5kN	163.6kN	125.7kN
SF2-ST200-E30-2	39.4kN	45.7kN	78.5kN	163.6kN	123.0kN
SF2-ST80-E30	42.6kN	114.3kN	89.9kN	246.8kN	148.1kN
SF1-ST200-E30	39.4kN	45.7kN	51.1kN	136.2kN	117.8kN
SF0-ST200	39.4kN	45.7kN	せん断GFRPシートなし	85.1kN	84.0kN

ん断変形が若干ながら抑制されたことがわかった。一方、せん断補強筋をかなり密に入れた SF2-ST80-E30 (既報¹⁾ より参照) では、鉄筋降伏後にせん断破壊は生じず、裁荷点付近から曲げ FRP シートの剥離が進展し、その直後に圧縮側コンクリートが圧縮破壊したため、実験を終了した。よって、内部のせん断補強筋とせん断 GFRP シートの補強量をコントロールすることで、せん断破壊が防止されることを実験的に示した。

4. 簡易算定手法による FRP-RC 梁のせん断構造性能評価

4.1 各種材料特性と引張・圧縮挙動の設定

コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会編)⁶⁾ に示されている各種材料の引張挙動より、鉄筋は降伏応力度 f_{sy} までは傾き E_s で応力は増加し、降伏点を越えてからは破断ひずみ ϵ_s まで f_{su} を維持するものと仮定した。ここで、本研究で用いた鉄筋の f_{sy} は 3 本の引張試験結果の平均値を採用して 335MPa とした。また、FRP シートに関しては、完全弾性体と考える。

4.2 せん断破壊荷重の算定とせん断 GFRP シート付着強さの評価に関する検討

ここでは、コンクリート、せん断補強筋、そしてせん断 GFRP シートが受け持つせん断耐力をそれぞれ求めて加算することで、T 型梁のせん断耐力を算定する。

まず、コンクリートが受け持つせん断耐力は、コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会編)⁶⁾ に示されている式 (1) より求める。

$$V_c = 0.2 \cdot (P_w \cdot f'_c)^{1/3} \cdot (d/1000)^{-1/4} \cdot [0.75 + (1.4/(a/d))] \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

ここで、 f'_c はコンクリートの圧縮強度、 P_w は軸方向鉄筋比 (%), a はせん断スパン (mm), d は有効高さ (mm), そして b_w は腹部の幅 (mm) である。

次に、せん断補強筋が受け持つせん断耐力は、同示方書⁶⁾ に示されている式 (2) より求める。

$$V_s = A_w \cdot f_{wy} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot z / s \quad (2)$$

ここで、 A_w は区間 s (配置間隔) におけるせん断補強筋の総断面積 (mm^2), f_{wy} はせん断補強筋の設計降伏強度 (N/mm^2), z は $j \cdot d$ ($d/1.15$) (mm), そして α はせん断補強鉄筋が部材軸となす角度である。

さらに、せん断 GFRP シートが受け持つせん断耐力 V_{frp} は、同示方書⁶⁾ に示されている式 (3) より求める。なお、同示方書⁶⁾ に示されている FRP シートの付着構成則に基づき応力分布を評価し、 V_{frp} を評価する方法は、せん断 GFRP シートを T 型桁の全周に巻き立てた場合や完全な定着効果が期待できる機械定着で接着端部を定着した場合に限定されるため、本研究の T 型梁には適用できない。

$$V_f = K \cdot [f_{fr} \cdot (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f] \cdot z \quad (3)$$

ここで、 K は FRP シートのせん断補強効率で、式 (4) により求められる。

$$K = 1.68 - 0.67R \quad \text{ただし、} 0.4 \leq K \leq 0.8 \quad (4)$$

$$R = (\rho_f \cdot E_f)^{1/4} \left(\frac{f_{fr}}{E_f} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{f'_c} \right)^{1/3} \quad \text{ただし } 0.5 \leq R \leq 2.0$$

$$\rho_f = A_f / (b_w s_f)$$

また、 A_f は区間 s_f (同示方書⁶⁾ では FRP シートの配置間隔と記述。本研究ではひび割れ発生位置はスターラップの間隔内であることから、スターラップの配置間隔とする) における FRP シートの総断面積 (mm^2), f_{fr} は FRP シートの設計引張強度 (N/mm^2), そして、 α_f は FRP シ

ートが部材軸となす角度である。

以上の式 (1), (2), (3) から求めたコンクリート, せん断補強筋, そしてせん断 GFRP シートが受け持つせん断耐力の一覧を表-3に示す。裁荷試験は4点曲げ試験で行われたため, 最大せん断耐力 S_{max} は $P_{max}/2$ となる。そこで, $P_{max}/2$ とコンクリートが受け持つせん断耐力 V_c +せん断補強筋が受け持つせん断耐力 V_s +せん断 GFRP シートが受け持つせん断耐力 V_{frp} を比較する。まず, せん断 GFRP シートの無い SF0-ST200 では, 最大荷重 $P_{all}/2$ (=84.0kN) と V_c+V_s (=85.1kN) がかなり良く一致しており, 本研究で作製した T 型 RC 梁の再現性が確認された。しかし, せん断 GFRP シートを有している T 型梁では, 実験値より算定値の方がかなり大きくなっており, うまく算定できなかった。その理由としては, せん断補強効率 K の設定時に参照した論文ではほとんどのケースでせん断 FRP シートを閉鎖的に巻き立てているのに対し, 本研究では U 字型に巻いているのみで, 接着端部を埋め込んだ梁についても, せん断補強筋が密に入っていない梁では接着端部が引き抜けて実験が終了しており, 定着は不十分であったためと考えられる。そこで, 接着端部の定着が不十分であった場合の評価式を提案する。

まず, 式 (5) を用いてせん断破壊時の最大せん断 GFRP シートひずみ ε_f を求める。

$$\varepsilon_f = \frac{V'_{frp}}{E_f A_f} \quad (5)$$

ここで, せん断 FRP シートの無い SF0-ST200 で理論値と実験値がかなり良く一致したことを利用して, 最大せん断耐力 V'_{frp} を S_{max} , V_c , そして V_s から算出する。すなわち, $V'_{frp}=S_{max}-V_c-V_s$ とする。また, E_f はせん断 GFRP シートの引張弾性率 (N/mm²), そして A_f は有効幅 b_f におけるせん断 GFRP シートの断面積 (mm²) であり, せん断 GFRP シートの有効幅 b_f と GFRP シートの厚み t_f (2面分) を乗じたものである。 b_f は図-6に示すように有効付着長が確保される範囲の GFRP シートが有効であると考え。また, せん断ひび割れの生じる角度はスターラップの間隔に依存するものと考えた。ここで, 呉ら⁷⁾ は式 (6) に示したせん断耐力 τ_f とコンクリート圧縮強度 f'_c の関係を式 (7) に示した L_e と P_{max} の関係に代入して, L_e と f'_c の関係に変換した L_e の算定式を提案した。各 T 型梁における b_f の値を表-4に示す。ただし, 接着端部を埋め込んだ SF2-ST200-E30 については算出された値に埋め込み長さ 30mm を加算した。

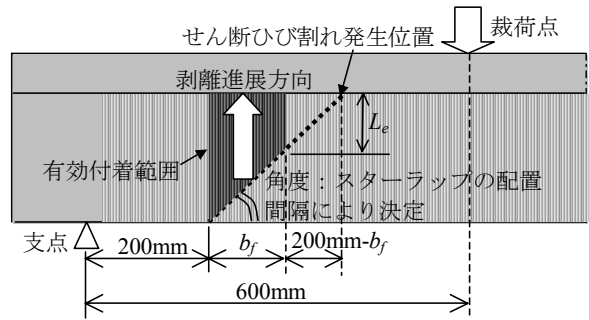


図-6 せん断 GFRP シートの有効付着幅 b_f

表-4 せん断 GFRP シートの有効付着長 L_e の算定結果一覧

供試体名	有効付着長 L_e (算定値)	有効付着幅 b_f (算定値)
SF2-ST200-E0-1	64.9mm	135.1mm
SF2-ST200-E0-2	63.5mm	136.5mm
SF2-ST200-E30-1	64.9mm	165.1mm
SF2-ST200-E30-2	64.9mm	165.1mm
SF1-ST200-E30	45.9mm	184.1mm

$$\tau_f = 3.50 f'_c{}^{0.19} \quad (6)$$

$$L_e \approx \frac{P_{max}}{\left(\frac{b \tau_f}{2}\right)} = \frac{2b \sqrt{2G_f E_f t_f}}{b \tau_f} \quad (7)$$

$$= \frac{0.649 \sqrt{E_f t_f}}{f'_c{}^{0.095}}$$

上記のように算出した b_f から得られる ε_f を用いて連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針 (土木学会編)⁸⁾ に示されている式 (8) に $P_{max} = \varepsilon_f E_f A_f$ を代入して整理した式より剥離破壊エネルギー G_f を算出した。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{2b^2 E_f t_f} = \frac{\varepsilon^2 E_f t_f}{2} \quad (8)$$

ε_f の算定値, 実験値, そして G_f の算定値の一覧を表-5に示す。まず, ε_f の算定値と実験値を比較して, 両者はかなり良く一致しており, 提案式の有意性が実証された。次に, G_f によりせん断 GFRP シートの付着強さを検討する。 G_f とは, 連続繊維シートとコンクリートの接着界面の付着強さを表しており, 値が大きいほど付着が強いことを意味する。同指針では 0.5N/mm が標準値とさ

れている。表より、接着端部の埋め込みの無い T 型梁では G_f は 0.05~0.08N/mm であり、標準値よりかなり小さく、早期に完全剥離してしまうが、接着端部を埋め込むことにより 0.35~0.42N/mm の G_f が確保されることが明らかになった。よって、FRP-RC 桁構造物において、せん断 FRP シートの接着端部埋め込みが重要であることが明確に示された。

一方、式 (5) および式 (8) より得られる式 (9) をせん断 FRP シートが受け持つせん断耐力の算定式として提案する。

$$V'_{fp} = \sqrt{2G_f b_f^2 E_f t_f} \quad (9)$$

5. まとめ

本研究では、FRP-RC 梁のせん断耐力を実験的に検討するとともに、既存の算定方法により実験結果を評価した。その上で、U字型に巻き立てたせん断 FRP シートが受け持つせん断耐力の算定式を新たに提案した。さらに、せん断補強 FRP の両端部を T 型梁の上フランジ下面に埋め込み、接着することでせん断耐力の向上を図り、その効果を実験的に究明した。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

(1) せん断 FRP シートの接着端部をフランジ内部まで延長し、埋め込んだことにより、せん断耐力が飛躍的に向上されることが実験的に明確となった。また、せん断 FRP シートの接着端部を埋め込んだことによりせん断変形が若干ながら抑制され、剛性がやや向上することが実験的に明確となった。

(2) 内部のせん断補強筋とせん断 GFRP シートの補強量をコントロールすることで、せん断破壊が防止されることを実験的に示した。

(3) FRP シートの有効付着長を算定するための既存の評価式はせん断 FRP シートを閉鎖的に巻き立てた場合を想定しており、U字型に巻き立てた場合など、接着端部の定着が完全でない場合の算定式は示されていない。そこで、FRP シートの有効付着長の算定式を活用して、せん断 FRP シートの有効付着範囲を求める算定式を提案した上で、U字型に設置されたせん断 FRP シートが受け持つせん断耐力の算定式を新たに提案した。

(4) 接着端部を埋め込まない T 型梁では G_f は 0.05~0.08N/mm であり、標準値よりかなり小さく、早期に完全剥離してしまうが、接着端部を埋め込むことにより、0.34~0.42N/mm の G_f が確保されることが明らかになった。そして、FRP-RC 桁構造物において、せん断 FRP シートの接着端部埋め込みが重要であることが明確に示された。

表-5 せん断 FRP シートの最大ひずみおよび界面剥離破壊エネルギー G_f の算定結果一覧

供試体名	せん断GFRPの最大ひずみ ϵ_f (算定値)	せん断GFRPの最大ひずみ ϵ_f (実験値)	剥離破壊エネルギー G_f (算定値)
SF2-ST200-E0-1	2215 $\mu\epsilon$	2352 $\mu\epsilon$	0.05N/mm
SF2-ST200-E0-2	2988 $\mu\epsilon$	3062 $\mu\epsilon$	0.08N/mm
SF2-ST200-E30-1	6513 $\mu\epsilon$	5498 $\mu\epsilon$	0.40N/mm
SF2-ST200-E30-2	6079 $\mu\epsilon$	6113 $\mu\epsilon$	0.35N/mm
SF1-ST200-E30	9408 $\mu\epsilon$	11382 $\mu\epsilon$	0.42N/mm

謝辞

日鉄コンポジット株式会社より連続繊維シートおよびエポキシ樹脂をご提供いただいた。ここに記して深く感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 岩下健太郎、呉智深、三島勇人：ウェットボンディングによる FRP-RC ハイブリッド T 型梁の曲げ性能に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.3, pp.1747-1752, 2007
- 2) Wu, Z.S., Li, W., Sakuma, N.: Innovative externally bonded FRP/concrete hybrid flexural members, Composite Structures, Elsevier, Vol. 72, Iss. 3, pp. 289-300, 2006.3
- 3) 呉智深、岩下健太郎、李文曉：FRP シートの適材適所接着による FRP-RC ハイブリッド構造物の曲げ構造性能に関する研究，応用力学論文集，土木学会，Vol.10, pp.995-1002, 2007.8
- 4) 岩下健太郎、呉智深、朱海堂、石田英靖：ウェットボンディングによる FRP-コンクリートハイブリッド曲げ構造の創出，土木学会第 61 回年次学術講演概要集，京都，CS02-045, pp.157-158, 2006.9
- 5) Y. Shao, Z.S. Wu, H. Zhu: FRP-Concrete Composite Beams Using Wet-Bonding Technology, 9th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, Tokyo, pp.1024-1029, 2005.11
- 6) コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，1996.
- 7) Wu, Z.S., Niu, H.D., Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites, JSCE Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.63, No.4, pp.620-639, 2007
- 8) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリート委員会，土木学会，2000