

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

茨城大学 正会員 呉 智深 茨城大学 正会員 ○岩下健太郎
茨城大学 非会員 朱 海堂 茨城大学 非会員 石田 英靖

1. 研究背景と目的

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問題が深刻であり、高度な引張特性や耐腐食性を有する FRP を構造材として用いた複合構造の高度化に対する期待が高まっている。本研究では、繊維材の種類ごとに異なる引張特性に注目し、各種繊維材を適材適所に配置することで、曲げ構造物の曲げ・せん断耐力や使用性（鉄筋降伏荷重やひび割れ抑制）、終局破壊靱性などを効果的に高度化する構造形式を考案するとともに、ウェットボンディングを応用して完全付着を確保することで成立する FRP とコンクリートのハイブリッド (HB) 構造を提案する。そして、T 型断面 HBRC 梁（支点間距離 1.7m）を作製し、4 点曲げ試験により各種構造性能を初歩的に検証する。

2. FRP-コンクリートハイブリッド曲げ構造の提案

本研究では、図-1 に示すように、鉄筋コンクリート構造物内部の鉄筋量を大幅に減少する代わりに、引張縁および側面に FRP シートを配置し、減少した引張鉄筋とせん断補強筋が負担していた引張応力を FRP に受け持たせる構造形式を提案する。ここで、コンクリートの周囲が FRP で囲われる構造となるため、ひび割れを起点とする腐食要素の侵入が防止されることから、耐腐食性の向上効果にも期待できる。ただし、FRP に引張力を負担させるためには、打設時のフレッシュコンクリートと FRP 間に完全付着を確保することが必要

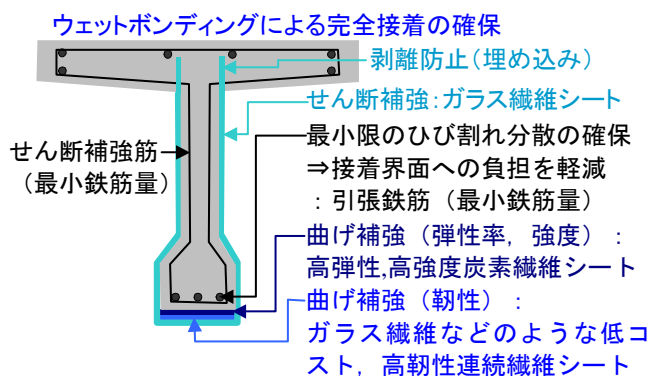


図-1 HB 曲げ構造と各種構造材の適材適所配置

である。そこで、湿潤面への接着を可能にするウェットボンディングを応用する。この手法は、湿潤面と FRP を通常のエポキシ樹脂で接着する方法であり、1) エポキシ樹脂の吸水率には限界がある、2) 含水率は硬化特性にほとんど影響しないという知見を基に考案し、著者らの初歩的な研究¹⁾により、標準的な接着性が確保されることを実証するデータが得られている。

3. FRP シート構造材の適材適所の構造形式

炭素繊維材は、最高級の引張強度と弾性率を有する上、製作時の熱処理工程における熱量を調整することで、弾性率及び強度を自在に設定することができる（本研究では、高弾性率タイプの炭素繊維シート (C7) を用いる）。一方、ガラス繊維材は、比較的安価で優れた破断伸度を有している（本研究では、E ガラス繊維シート (EG) を用いる）（表-1）。

以上の特徴を踏まえて、主な構造性能に適すると考えられる連続繊維材の種類は、以下の通りである。

- ひび割れ発生荷重, 剛性, 鉄筋降伏荷重, ひび割れ抑制などの使用性, 最大荷重 ⇒ C7
- 終局破壊靱性 ⇒ EG
- ひび割れ分散: 接着界面の負担軽減 ⇒ 鉄筋 (最小量)
- せん断耐力 ⇒ EG (端部埋め込みにより剥離防止)

ここで、最高級の引張強度を有する高強度タイプの炭素繊維シート (C1) を引張縁に配置すれば、最大荷重がより向上すると考えられるが、C7 でも通常の RC 構造物と同程度の最大荷重は再現できると考えられたため、本研究では C7 のみを使用した。

表-1 各種 FRP シートの引張特性一覧

各種指標	高弾性炭素繊維シート (C7)	Eガラス繊維シート (EG)
設計引張強度 (N/mm ²)	1900	1500
設計引張弾性率 (kN/mm ²)	540	80
設計破断伸度 (%)	0.35	1.88
単位面積重量 (g/m ²)	200	300
公称厚さ (mm)	0.143	0.118

キーワード FRP-コンクリートハイブリッド曲げ構造, ウェットボンディング, 適材適所, 曲げ・せん断

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部都市システム工学科 TEL 0294-38-5247

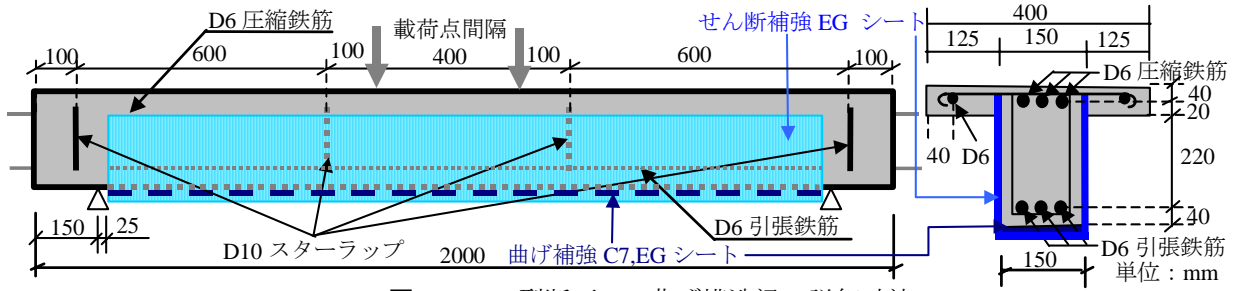


図-2 T型断面 HB 曲げ構造梁の詳細寸法

4. T型断面ハイブリッドRC梁の4点曲げ試験による各種曲げ性能の初歩的検討

(1) T型断面 HBRC 梁の製作と4点曲げ試験方法

連続繊維シートを 500g/m^2 の樹脂含有率で所定の形状に成型し、T型の型枠（本研究では木枠）に設置する。そして、FRPの内側に樹脂を塗布し、配筋した上で、樹脂未硬化の状態でコンクリートを打設して完成となる。HBRC梁を構成する各種繊維シートの層数と配置を表-2に示す。また、曲げ性能の比較対象として、鉄筋比 $p=1.73\%$ 、 1.20% の RC 梁も作製した（それぞれ $1.73\% \text{RC}$ 梁、 $1.20\% \text{RC}$ 梁と呼称する）。4点曲げ試験は、支点、荷重点の間隔をそれぞれ 1700mm と 400mm とし、 2000kN 加圧試験機で行った（図-2）。ここで、コンクリートの設計圧縮強度は 30MPa とし、28日経過時の強度は 36.4MPa であった。また、早強ポルトランドセメントを使用し、28日経過後に荷重した。

(2) 4点曲げ試験結果と考察

4点曲げ試験における荷重-変位の関係（図-3）より、HBRC梁の C7 破断開始前の剛性は、 $1.20\% \text{RC}$ 梁よりやや低く、高度な C7 破断開始前の剛性は得られなかった。ただし、C7 の段階的な部分破断に伴う変曲（剛性低下）開始荷重と $1.73\% \text{RC}$ 梁の鉄筋降伏荷重は、同程度のレベルであり、通常の RC 梁では鉄筋降伏荷重に相当する変曲点荷重が得られることが明確に示された。また、少々荷重低下を伴っているものの、変曲後も C7 の段階的な破断現象により、徐々に荷重が上昇する現象（二次剛性）も示された。一方、最大荷重に関しては、 $1.73\% \text{RC}$ 梁の最大荷重を達成した。また、靱性に関しては、EG の層数が多い場合に、終局破壊時の変位量（終局破壊靱性）がより大きくなることが実験的に明確となった。ここで、梁側面に配置した EG にはまったく剥離が見られず、端部の埋め込みにより十分な定着強さを確保できたことがわかる。また、せん断破壊は生じず、十分なせん断耐力が確保できたことがわかる。一方、図-4に示したひび割れ分布状況から、

表-2 HBRC 梁を構成する各種繊維シートの層数と配置

供試体名	曲げ補強繊維シート	曲げ補強材(ひび割れ分散のため)	せん断補強繊維シート
HBRC梁-1	2層C7, 5層EG	引張鉄筋 ($p=0.26\%$)	4層EG
HBRC梁-2	2層C7, 6層EG	引張鉄筋 ($p=0.26\%$)	4層EG

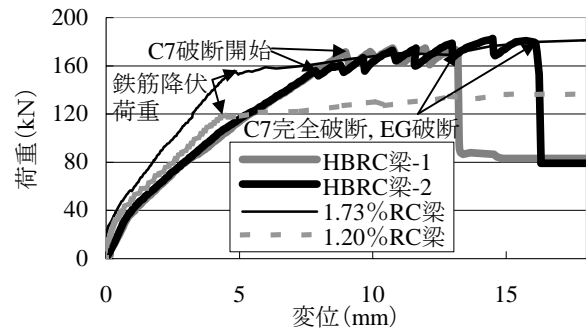


図-3 荷重-変位の関係

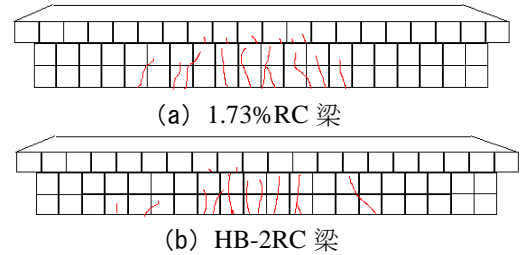


図-4 ひび割れ分布状況

ある程度のひび割れ分散効果が確認できる。よって、ウェットボンディングにより、かなりの付着強さが得られることが示唆された。

5. まとめと今後の開発

ウェットボンディングにより完全付着を確保した FRP-コンクリートハイブリッド RC 梁を作製し、初歩的に各種構造性能を検討した。その結果、変曲点荷重（通常の RC 梁では鉄筋降伏荷重）や最大荷重、靱性に関しては通常の RC 梁と同程度の性能が得られた。今後、鉄筋比をより増加させることにより、ひび割れ分散効果をより向上させることを考えている。

参考文献

1. Y. Shao, Z.S. Wu, H. Zhu: FRP-Concrete Composite Beams Using Wet-Bonding Tech., 9th Japan Int. SAMPE Symp., Tokyo, pp.1024-1029, 2005.