

## 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の構築に関する研究

Development of externally bonded FRP/concrete hybrid members with hybrid FRP sheets

岩下健太郎\*, 呉 智深\*\*, 三島勇人\*\*\*, 尾崎春平\*\*\*, 朱海堂\*\*\*\*

Kentaro Iwashita, Zhishen Wu, Hayato Mishima, Shunpei Ozaki, Haitang Zhu

\* 工博, 名城大学助教, 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

\*\* 工博, 茨城大学教授, 工学部都市システム工学科 (〒316-0033 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

\*\*\* 茨城大学教授, 工学部都市システム工学科 (〒316-0033 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

\*\*\*\* 工博, Zhengzhou University (〒450001 No.100 of Science Road, Zhengzhou, Henan, China)

A novel type of fiber reinforced polymer (FRP)-steel-concrete hybrid structure is proposed as a type of new construction. The hybrid structure is composed of an externally bonded hybrid FRP shell and a concrete core reinforced with internal steel reinforcements. The FRP shell includes high modulus type and high strength type of carbon FRP (MC and SC) sheets and glass FRP (EG) sheets with high ductility. Hybrid FRP sheets were axially and wetly bonded to the bottom surface of the concrete core to carry tensile load; while additional EG sheets were hoop-directionally wrapped to bear the shear load. The external FRP shell also provided the concrete core and steel rebars with an effective potential protection against corrosion. A series of 4-point bending experiments were carried out to confirm the structural performances of the proposed structures. Furthermore, the effectiveness of the wet-bonding method was also verified.

**Key Words:** FRP sheets, wet bonding, RC beam, FRP-RC hybrid system

キーワード: FRP シート, ウェットボンディング, RC 梁, FRP-RC ハイブリッド構造

## 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<sup>1) 2) 3) 4)</sup>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たうえで, 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のせん断補強に対しては, 要求性能を考慮して比較的低価格な E ガラス FRP (以後, EG と呼称)

を用いることにして, 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な検討により, 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。さらに, EG によるせん断補強効果を実験的に明らかにし, EG の剥離も考慮した簡易評価手法の構築も行った<sup>5)</sup>。以上のように構築が進められてきた FRP-RC 構造形式に対するこれまでの研究状況について取り纏めたものである。

## 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

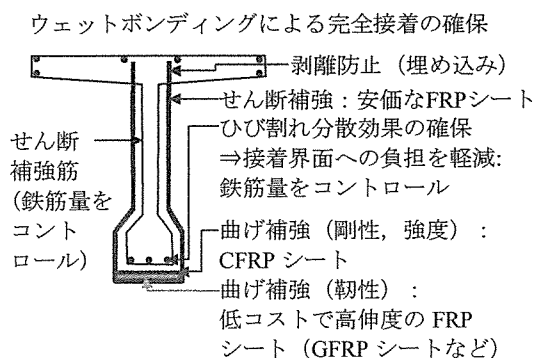


図-1 適材適所の概念に基づき提案したFRP-RC構造

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                 | MC    | SC    | EG    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
| 平均引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )   | 2613  | 4232  | 1793  |
| 平均引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 571   | 243   | 80    |
| 平均破断伸度 (%)                    | 0.46  | 1.74  | 2.24  |
| 単位面積重量 (g/m <sup>2</sup> )    | 300   | 300   | 300   |
| 公称厚さ (mm)                     | 0.143 | 0.167 | 0.118 |

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EG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を有する高弾性率タイプの炭素繊維FRP（以後、MCと呼称）、最高級の引張強度や一定の弾性率、伸度を有する高強度タ

イプの炭素繊維FRP（以後、SCと呼称）と高レベルな伸度を有しているEG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<sup>9)</sup>。

### 3. FRP-RC梁の曲げ構造性能に関する実験的検討

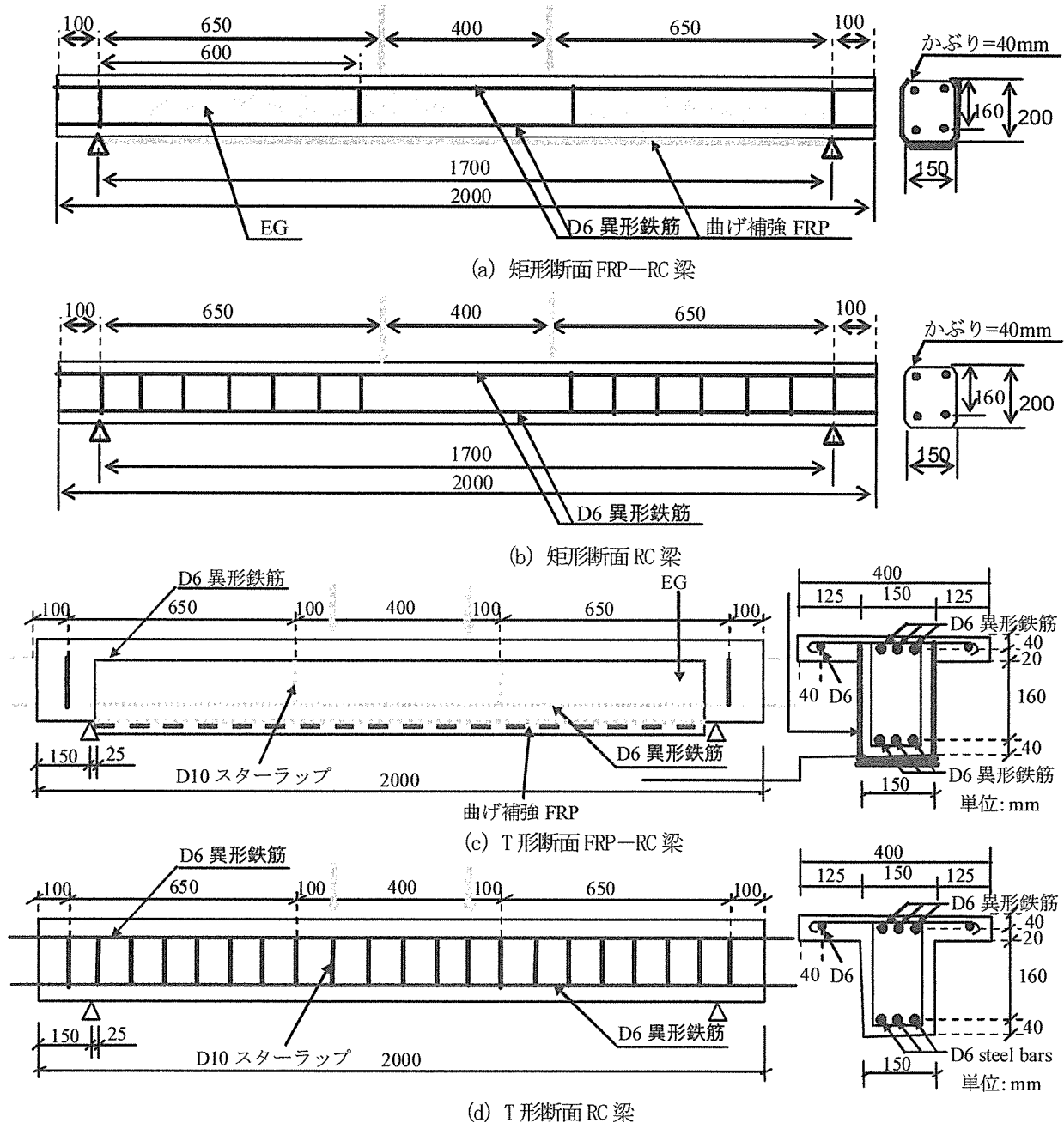
#### 3.1 FRP-RC梁の製作

矩形梁3体とT形梁4体（曲げ補強FRPの種類と補強量、接着工程（ウェットボンディングと普通接着）、そして引張鉄筋量を考慮）、比較対象として主鉄筋比が異なる矩形梁2体とT形梁2体の、全長2mのRC梁およびFRP-RC梁を作製した（図-2）。ここで、ウェットボンディングによる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<sub>f</sub>）相当量の常温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させたうえで、樹脂が未硬化のうちに150mm×300mmの型枠に密着させ、室温環境下（16±5℃）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

表-2 試験体一覧

| 試験体名            | 断面形状 | 主鉄筋量<br>(主鉄筋比) | 曲げ補強FRPの種類と補強量                 | せん断補強鉄筋量 | せん断補強FRPの種類と補強量 |
|-----------------|------|----------------|--------------------------------|----------|-----------------|
| NF-1.66%        | 矩形断面 | 2-D16 (1.66%)  | None                           | 21-D10   | None            |
| NF-2.39%        | 矩形断面 | 2-D19 (2.39%)  | None                           | 21-D10   | None            |
| 1.5MC-4EG-W     | 矩形断面 | 3-D6 (0.29%)   | 1.5 layers MC<br>+ 4 layers EG | 4-D10    | 4 layers EG     |
| 1.5MC-4EG-E*    | 矩形断面 | 3-D6 (0.29%)   | 1.5 layers MC<br>+ 4 layers EG | 4-D10    | 4 layers EG     |
| 2MC-5EG         | 矩形断面 | 3-D6 (0.29%)   | 2 layers MC<br>+ 5 layers EG   | 4-D10    | 4 layers EG     |
| T-NF-1.20%      | T形断面 | 2-D16 (1.20%)  | None                           | 24-D10   | None            |
| T-NF-1.73%      | T形断面 | 2-D19 (1.73%)  | None                           | 24-D10   | None            |
| T-2MC-5EG-0.29% | T形断面 | 3-D6 (0.29%)   | 2 layers MC<br>+ 5 layers EG   | 4-D10    | 4 layers EG     |
| T-2MC-6EG-0.29% | T形断面 | 3-D6 (0.29%)   | 2 layers MC<br>+ 6 layers EG   | 4-D10    | 4 layers EG     |
| T-2SC-5EG-W     | T形断面 | 2-D13 (0.77%)  | 2 layers SC<br>+ 5 layers EG   | 4-D10    | 4 layers EG     |
| T-2SC-5EG-E*    | T形断面 | 2-D13 (0.77%)  | 2 layers SC<br>+ 5 layers EG   | 4-D10    | 4 layers EG     |

\* 該当する試験体に対しては、コンクリートの養生後に表面処理を行い、FRPの接着を行った。



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  $0.5\text{kg/m}^2$  相当量のエポキシ樹脂を塗布したうえで、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  $30\text{MPa}$ 、スランプ  $80\text{mm}$  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、 $100\text{mm}\times 200\text{mm}$  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矩形断面試験体で  $29.0\text{MPa}$ 、T 型断面試験体で  $35.8\text{MPa}$  であった。

### 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  $1700\text{mm}$ 、 $400\text{mm}$  に設定し、 $2000\text{kN}$  加圧試験機を用いて  $2\text{kN/分}$  の速度で載荷した。たわみ計測は  $50\text{mm}$  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 表面に設置した検長  $5\text{mm}$  のひずみゲージで測定した。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における 1 本の引張鉄筋に設置した検長  $5\text{mm}$  のひずみゲージで測定した。

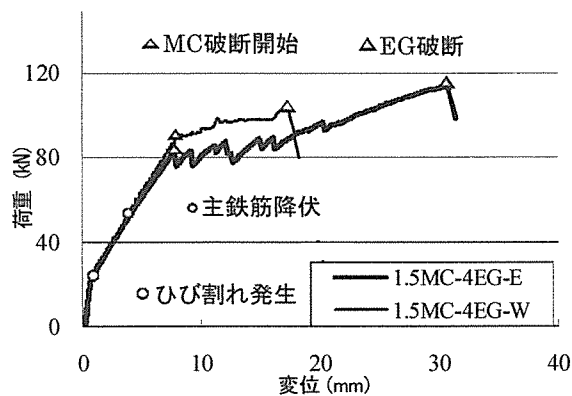


図-3 荷重-変位の関係 (矩形断面, MC 使用)

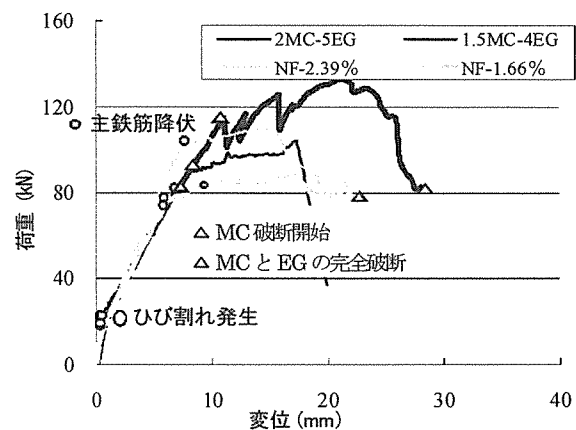


図-5 荷重-変位の関係 (矩形断面)

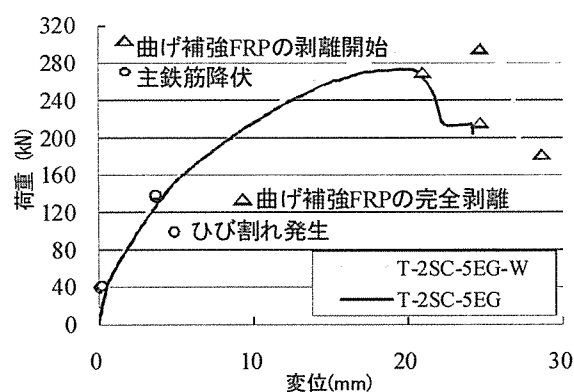


図-4 荷重-変位の関係 (T 形断面, SC 使用)

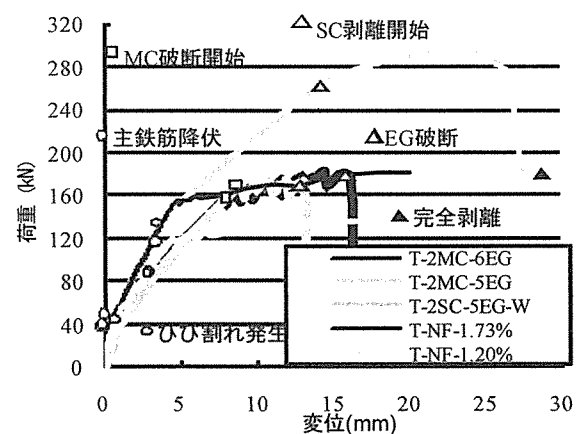


図-6 荷重-変位の関係 (T 形断面)

## 4. 実験結果

### 4.1 FRP - RC 梁の曲げ挙動と EG のハイブリッド化による靱性向上効果

4 点曲げ試験において得られた荷重と変位の関係を図-3, 図-4に示す。まず, 荷重をかけ始めてから破壊に至るまでの過程を説明すると, 荷重を増加させ始めてから後しばらくして, 剛性がやや低下する変曲点がある。ここでは, 1 本目のひび割れが発生したものと推測される。その後, 急激に剛性が低下する変曲点があるが, 鉄筋の計測ひずみが降伏ひずみとほぼ一致するため, この変曲点は鉄筋降伏を意味していると考えられる。そして, MC を使用した試験体では, MC の破断ひずみ程度まで到達すると, 部分的な破断が開始して荷重が上昇しにくくなり, その後は EG も完全に破断するまでたわみのみが増加する傾向が見られた。このような状況は通常の RC 構造物における主鉄筋の降伏状況と類似しており, EG のハイブリッド化により終局状態での靱性が向上していることがわかる。また, SC を用いた試験体では, 載荷点直下の FRP ひずみが  $7000\mu\epsilon$  程度まで到達すると載荷点直下付近から剥離音が生じ始め, その後は剥離音が継続するとともにほとんど荷重が増加しなくなり,

たわみだけが増加した。このとき, 梁の側面は FRP で覆われているために曲げ FRP の剥離を外から確認できないが, 側面のせん断補強 FRP が載荷点直下から支点方向に剥離していく様子が樹脂の変色と打音検査によって確認され, 曲げ FRP の剥離進展が推測された。最後に, FRP が接着端部まで完全に剥離するとともに荷重が急激に低下し, その直後に支間中央付近の梁上縁部に圧縮破壊も生じたため, 除荷して実験を終了した。この場合には, FRP が剥離してしまったため, EG のハイブリッド化による靱性向上効果はあまり明確に得られていないことから, FRP 定着・固定の重要性が再認識された。

### 4.2 ウェットボンディングによる接着性向上効果について

ウェットボンディングによる効果については, 図-3 において, MC の部分破断開始が遅くなっていることや, 図-4 において, 曲げ FRP の剥離に伴う剛性低下がウェットボンディング試験体に対してより遅く発生していることから, ウェットボンディングにより FRP の付着力が向上していることが示唆された。

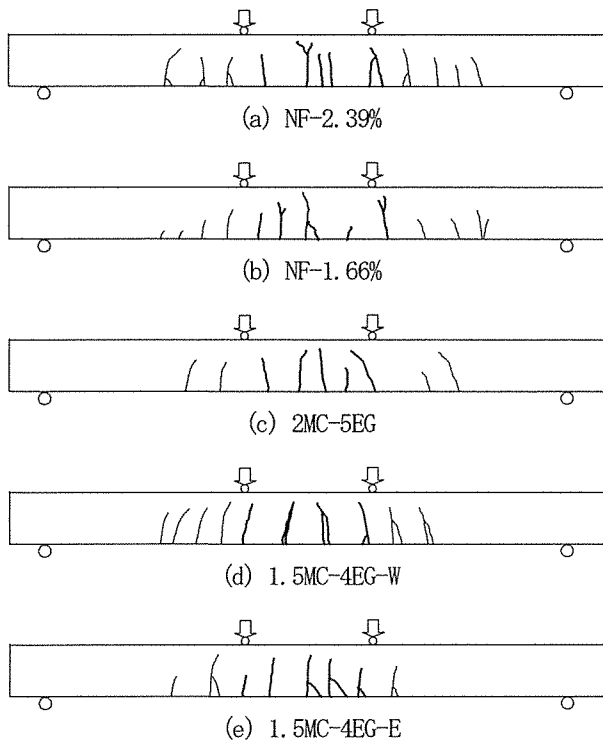


図-7 ひび割れの分散状況 (矩形断面)

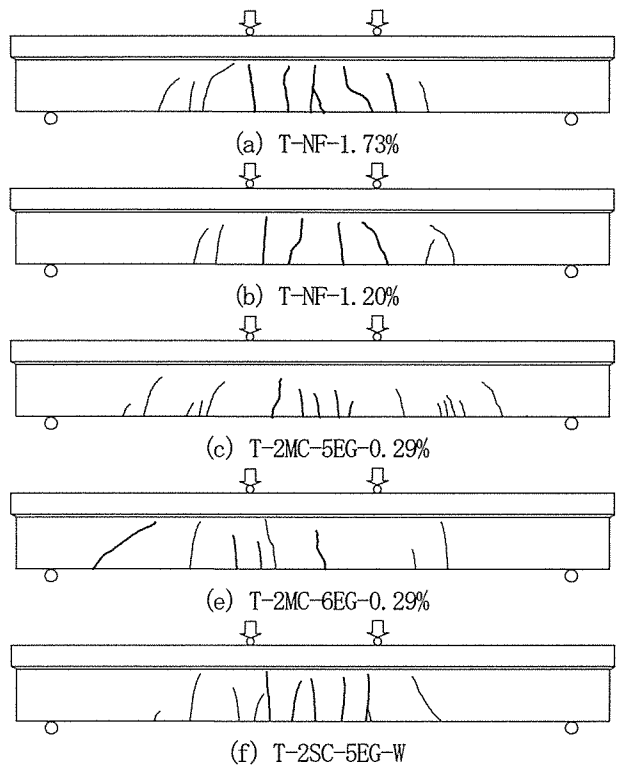


図-8 ひび割れの分散状況 (T形断面)

#### 4.3 通常のRC梁との比較

図-5, 図-6において, 主鉄筋比を1~2%に設定した通常のRC梁とFRP-RC梁を比較して, いずれのFRP-RC梁においても, 曲げFRPの補強量の調整により, 通常のRC梁の剛性を満たすことができることが明確になった。また, MCの段階的な破断が生じている箇所は, 通常のRC梁における主鉄筋降伏に伴う挙動と同様の挙動が得られることが明らかになった。

#### 4.4 ひび割れ分散状況について

図-7, 図-8にひび割れ発生状況を示す。FRP-RC梁に対しても, 通常のRC梁のケースと同程度にひび割れが分散することが実験的に示された。ただし, T形断面の試験体については, ひび割れの発生場所に若干のムラがあり, ウェットボンディング施工時のエポキシ樹脂塗布量のムラがひび割れ分散に若干ながら影響することが明確になった。

#### 4.5 各種曲げ構造性能に対する簡易算定手法の構築

鉄筋およびコンクリートの圧縮, 引張挙動に対しては, コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会編)<sup>7)</sup>に示されている挙動を用いた。また, FRPシートに関しては, 完全弾性体と考え, ハイブリッド化シートに含まれるFRPシートそれぞれの引張弾性率を考慮する。破断ひずみが小さいFRPシートから順に破断していき, 残されたFRPシートのみで補強されているものとして考える。

まず, 各種材料の弾性係数をコンクリートの弾性係数

$E_c$ で除した値(弾性係数比)を各種材料の断面積に乘じ, コンクリートとして断面積を換算する。なお, 弾性係数比は異形鉄筋では  $n_s = E_s/E_c$ , そして, FRPでは  $n_f = E_f/E_c$  である。次に, 式(1)から中立軸位置  $h_c$  を求める。

$$h_c = \frac{A_c d_c + A_s d_s (n_s - 1) + A_f d_f (n_f - 1)}{A_{total}} \quad (1)$$

ここで,  $A_c$ は梁の断面積,  $d_c$ は梁上縁から梁断面の図心までの距離,  $A_s$ は引張鉄筋の断面積,  $d_s$ は梁上縁から引張鉄筋までの距離,  $A_f$ は曲げFRPの断面積,  $d_f$ は梁上縁から曲げFRPまでの距離を意味する。また, 換算総面積  $A_{total}$  は式(2)から算出される。

$$A_{total} = A_c + A_s (n_s - 1) + A_f (n_f - 1) \quad (2)$$

そして, 梁下縁での引張応力に関するつり合い条件により, ひび割れ発生荷重  $P_{cr}$  は式(3)から算出される。

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot I_g \cdot f_t}{L_2 \cdot h_c} \quad (3)$$

ここで,  $I_g$ は中立軸に対する断面2次モーメント,  $f_t$ はコンクリートの引張強度,  $L_2$ は支点-載荷点間距離である。

表－3 各種曲げ構造性能指標の算定値一覧

| 試験体名        | 荷重(実験値) $P_{exp}$ (kN) |       |          | 荷重(算定値) $P_{cal}$ (kN) |       |          |
|-------------|------------------------|-------|----------|------------------------|-------|----------|
|             | ひび割れ発生                 | 主鉄筋降伏 | HM破断開始荷重 | ひび割れ発生                 | 主鉄筋降伏 | HM破断開始荷重 |
| 1.5MC-4EG-W | 14.0                   | 76.3  | 90.4     | 9.5                    | 68.6  | 82.2     |
| 2MC-5EG     | 14.9                   | 84.0  | 114.9    | 9.6                    | 81.9  | 100.4    |
| 1.5M-4EG-E  | 14.2                   | 74.1  | 83.3     | 9.5                    | 68.6  | 82.2     |
| T-2MC-5EG   | 21.7                   | 120.7 | 160.7    | 20.3                   | 125.5 | 152.3    |
| T-2MC-6EG   | 19.8                   | 125.8 | 155.8    | 20.3                   | 121.9 | 157.1    |
| T-2SC-5EG-W | 24.4                   | 132.9 | 273.0    | 24.1                   | 120.8 | *        |
| T-2SC-5EG-E | 24.4                   | 133.4 | 296.2    | 24.1                   | 120.8 | *        |

\* 該当試験体ではFRP 剥離直前のひずみを測定できなかった。

鉄筋降伏荷重を算定するうえで、まず、梁上縁のコンクリートが受け持つ圧縮応力と梁下部の引張鉄筋およびFRP が受け持つ引張応力のつり合い条件に基づき中立軸を算定する。このとき、コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会編)<sup>7)</sup>に基づき圧縮鉄筋は無視する。そして、中立軸に対する引張鉄筋およびFRP の曲げモーメントを算出し、これを荷重に変換する。このとき、引張鉄筋が受け持つ引張応力には、別途、鉄筋径ごとに行った3本の引張試験から得られた引張降伏強度の平均値を入力した。また、FRP が受け持つ引張応力には、断面保持の条件に基づき引張鉄筋の降伏強度から梁下縁部における応力に換算した引張応力を入力することで鉄筋降伏荷重が算出される。さらに、FRP に生じるひずみにHM の破断ひずみを入力して、鉄筋降伏荷重の算定方法と同様の方法で、HM 破断開始荷重を算定できる。なお、FRP のひずみにFRP の剥離直前のひずみを入力することで、FRP 剥離モードに対しても算定は可能となるが、本研究ではひずみゲージの損傷によりうまく測定できなかった。以上の方法により求めた算出結果を実験値とともに表－3に示す。計算値と実験値はよく一致したことから、実験の再現性が確認された。

## 5. 結論

本研究の実施により、ウェットボンディングによるFRP-RC 構造形式の構築がかなり進められ、各種曲げ構造性能に対する検討や簡易評価手法の構築なども行われてきた。今後、曲げ補強FRP の剥離モードにも対応した簡易算定手法の構築や、補強材や接着材の最適化などを進め、FRP-RC 構造形式の確立を進めていく。

## 謝辞

日鉄コンポジット株式会社には炭素繊維材および接着材をご提供いただいた。ここに記して感謝申し上げる。

## 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) Z.S. Wu, K. Iwashita, H. Zhu: FRP-steel-concrete hybrid member using wet-bonding technique, 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan, 2007.7 (Keynote paper)
- 5) 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.30, No.3, pp.1747-1752, 2008
- 6) 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
- 7) コンクリート標準示方書〔設計編〕, 土木学会, 1996.