

## 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

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

呉 智深\*, 岩下健太郎\*\*, 李 文曉\*\*\*

Zhishen Wu, Kentaro Iwashita, Wenxiao Li

\* 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)

\*\* 工博, 茨城大学研究員, 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, 同済大学副教授, 航空宇宙航行力学学院 (〒200092 上海市四平路 1239 号)

A novel hybrid FRP-concrete structural system was proposed in past study. In the study, high strength type of CFRP sheets is axially bonded on the bottom surface of the concrete core to carry tensile load while GFRP sheets with higher rupture strains are hoop-directionally wrapped to bear the shear load. The GFRP sheets also provide confinement to concrete core and delay the debonding of CFRP sheets. A minimum reinforcement ratio of steel rebars is used to control the localization and propagation of flexural cracks. In this study, a series of 4-point bending experiments were carried out to study the performances of the hybrid FRP with high modulus type of CFRP sheets, T grass fiber sheets and Dyneema fiber sheets and concrete hybrid beams. Based on the principles of strain compatibility and equilibrium, an iterative analytical model is developed to evaluate the flexural behavior of the hybrid beam specimens.

**Key Words:** hybrid continuous fiber sheets, bond RC beam, novel reinforcing

キーワード: FRP, 接着, RC 構造物, FRP-RC ハイブリッド構造, 適材適所

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物に関して塩害やコンクリートの中酸化などを原因とする鉄筋の腐食が深刻である。最近では、先進材料で耐腐食性に優れる連続繊維複合材 (Fiber reinforced polymers, 以後 FRP と呼称) を RC 構造物の表面にエポキシ樹脂を始めとする接着材で接着・巻き立てることで被覆し、構造物表面を外的環境から遮断することで鉄筋を防食する技術が考案され、既に適用事例もある。また、連続繊維シートの優れた比強度や比剛性を活用して、ひび割れ抑制効果や鉄筋降伏荷重といった使用性指標や、最大荷重や靱性といった終局状態における各種性能指標の高度化にも期待できる<sup>一例として1), 2)</sup>。著者らは、より高度な引張強度や引張弾性率を有する炭素繊維シートと、より高度な伸度を有し、低コスト材料であるEガラス繊維シートを適材適所に用いた FRP 主体のハイブリッド構造物を提案し、曲げ構造性能を初歩的に検討した<sup>3)</sup>。そして、FRP で被覆することによる防食構造、高度な曲げ構造性能、そして十分なせん断構造性能を実現できていることを確認した。このとき、FRP を主体とすることで主鉄筋量を減らすことができるため、より耐腐食性が向上することも示唆された。しかし、一般に使用される連続繊維シートの引張弾性率は

鋼材とほぼ同程度であるため、引張鉄筋の降伏以前における剛性を 2.0%程度の引張鉄筋比を有する通常の RC 構造物のレベルに引き上げるためには、多くの FRP を必要とするために高コストとなってしまうことがわかった。また、近年の耐震設計基準の改変に伴い、引張構造材にはより高度な伸度 (2~3%程度以上) が必要とされてきているが、現在使用されている補強材の伸度は最大でも 1~2%程度であり、コンクリートの延性を活かしきれていないのが現状である。そこで、曲げ補強に最高レベルの引張弾性率を有する超高弾性 FRP を用いることで、FRP の使用量を最小限に抑えたとともに、2%を超える超高伸度 FRP を曲げ構造材に用いることで構造物の靱性を高度化させた、適材適所の構想に基づく新構造形式として FRP-鉄筋コンクリートハイブリッド (FRP-RC) 構造を提案する。

## 2. 適材適所に FRP を接着したハイブリッド構造の提案と想定される曲げ挙動

ここでは、既発表論文<sup>3)</sup>において提案した防食・高性能化ハイブリッド構造を剛性や材料コスト、そして靱性について改善した新たな FRP 主体の構造形式を提案する。これまでの研究において、鉄筋の 5~10 倍の引張強

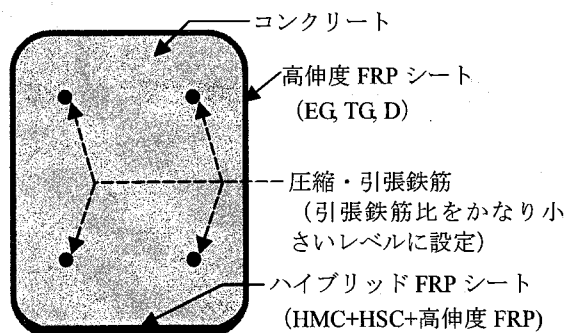


図-1 FRP-RC ハイブリッド構造梁の断面構成

度を有する高強度タイプの炭素 FRP (HSC) を用いた場合には主要な曲げ構造性能のうち最大荷重のみが過剰に達成されるが、鉄筋降伏前の剛性や靱性は引張鉄筋比を 1% に設定した RC 梁におけるレベルも達成できないことが明らかになった。そこで、図-1 に示すように高弾性炭素 FRP (HMC) と高伸度 FRP (E ガラス (EG), T ガラス (TG), ダイニーマ (D)) を曲げ構造材として用いて FRP-RC 構造物の剛性や靱性を改善する。一方、せん断 FRP については、必要なせん断耐力を見極めてせん断 FRP の使用量を決定する。なお、曲げ構造性能に限って検討するためにかなり多量のせん断 FRP を用いた。本研究では、FRP-RC 梁の曲げ構造性能を評価するために以下の指標を考慮する (図-2)。

- 1) ひび割れ発生荷重
- 2) 鉄筋降伏荷重
- 3) 2) 荷重到達前の P- $\delta$  曲線の傾き (一次剛性)
- 4) 高弾性繊維破断開始に伴う変曲荷重
- 5) 4) 荷重到達前の P- $\delta$  曲線の傾き (二次剛性)
- 6) 最大荷重 (高強度繊維の破断開始荷重)
- 7) 高伸度繊維破断時の変位

表-1 連続繊維シート物性値一覧

| 繊維シートの種類          | 指標      | 特性値                    |
|-------------------|---------|------------------------|
| 高弾性炭素 (HMC) 繊維シート | 設計厚さ    | 0.143(mm)              |
|                   | 繊維目付量   | 300(g/m <sup>2</sup> ) |
|                   | 設計引張弾性率 | 540(GPa)               |
|                   | 設計引張強度  | 1.9(GPa)               |
| 高強度炭素 (HSC) 繊維シート | 設計厚さ    | 0.111(mm)              |
|                   | 繊維目付量   | 200(g/m <sup>2</sup> ) |
|                   | 設計引張弾性率 | 230(GPa)               |
|                   | 設計引張強度  | 3.4(GPa)               |
| E ガラス (EG) 繊維シート  | 設計厚さ    | 0.118(mm)              |
|                   | 繊維目付量   | 300(g/m <sup>2</sup> ) |
|                   | 設計引張弾性率 | 80(GPa)                |
|                   | 設計引張強度  | 1.5(GPa)               |
| T ガラス (TG) 繊維シート  | 設計厚さ    | 0.118(mm)              |
|                   | 繊維目付量   | 300(g/m <sup>2</sup> ) |
|                   | 設計引張弾性率 | 86(GPa)                |
|                   | 設計引張強度  | 2.7(GPa)               |
| ダイニーマ (D) 繊維シート   | 設計厚さ    | 0.248(mm)              |
|                   | 繊維目付量   | 250(g/m <sup>2</sup> ) |
|                   | 設計引張弾性率 | 60(GPa)                |
|                   | 設計引張強度  | 1.85(GPa)              |

ここで、一次剛性の範囲内にひび割れ発生に伴ってやや剛性低下する点が含まれるが、他の指標に比べて変化の度合いがかなり小さいことから本研究では考慮しないことにした。

### 3. 実験方法

#### 3.1 RC 梁の製作と連続繊維シートによる補強方法

200mm×150mm の長方形断面を有する全長 2m の RC 梁を新たに 8 体作成した。これらの RC 梁の形状や鉄筋

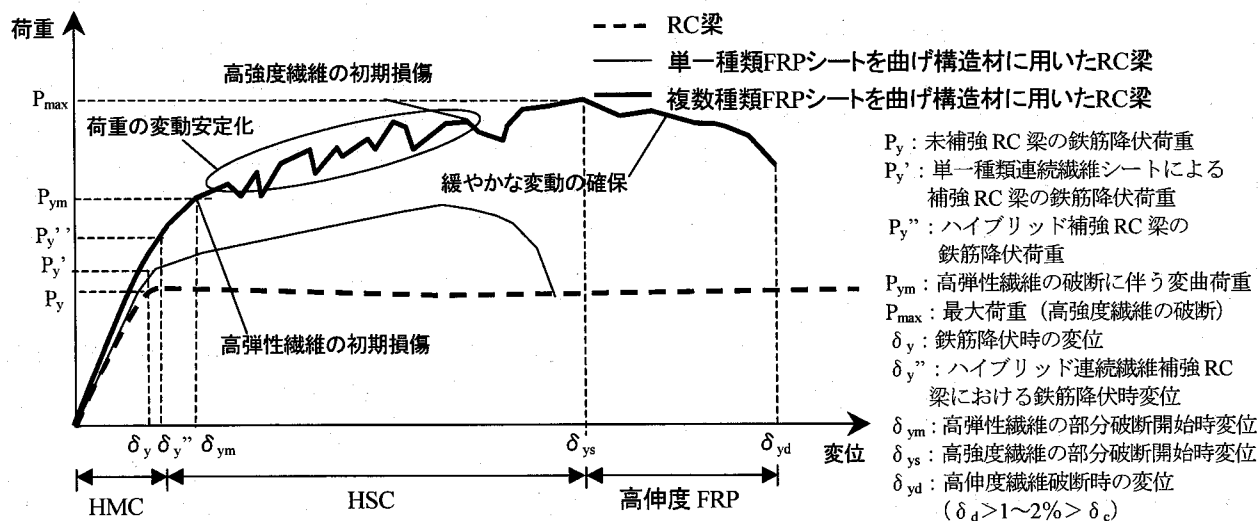


図-2 ハイブリッド補強梁の曲げ挙動

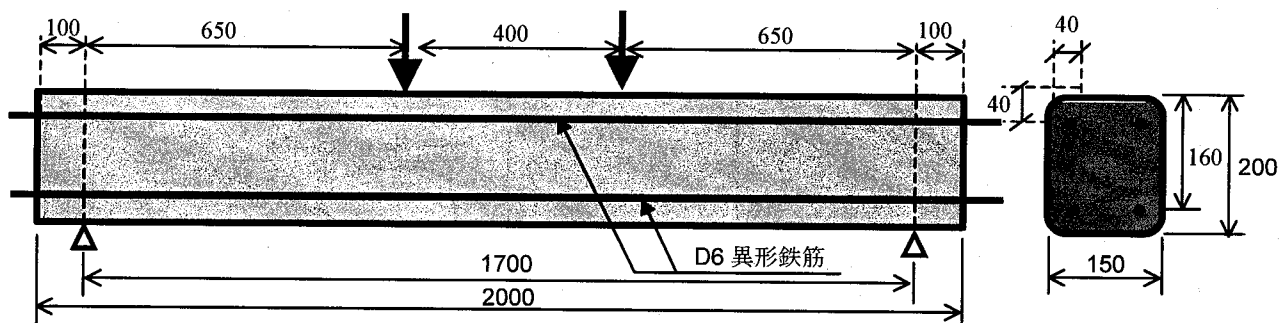


図-3 RC梁の詳細寸法

配置は既報<sup>3)</sup>に示したものと同様であり、D6の異形鉄筋(SD295)を2本配置した(引張鉄筋比は鉄筋のみで0.27%)。図-3に示したように、内部に帯鉄筋は配置せず、RC梁の周囲に接着するガラス繊維シートにせん断耐力を全て受け持たせるFRP主体の構造形式とした。使用したコンクリートについて、設計圧縮強度は30.0MPaとし、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱テストピースの圧縮試験を3体行った結果、平均圧縮強度35.0MPaで平均圧縮弾性率33.5GPaであった。FRP-RC供試体の作成方法としては、まず、コンクリートの表面処理をダイヤモンドサンダーによりケレンした上でエポキシプライマーを塗布する方法で行った。次に、前述したように梁の長手方向に高弾性FRP、高強度FRP、高伸度FRPの順に含浸・接着し、その外側に直交方向にせん断EGを接着した。なお、せん断FRPとして4層のEGを用いた。

作成するFRP-RC梁に考慮するパラメータは以下の通りである(表-2)。

- 1) HSCの層数(0層, 1層)
- 2) HMCの層数(0層, 1層, 1.5層)
- 3) 高伸度FRPの種類(EG, TG, D)

また、比較対象として、理想的なRC構造物の引張鉄筋比を2%程度と考えて、引張鉄筋比1.7%(D16異形鉄筋2本を引張鉄筋に使用)、2.4%(D19異形鉄筋2本を使用)のRC梁も作製した。なお、本研究では曲げ構造性能のみを検討対象としているため、これらのRC梁にはFRPによるせん断補強は行わなかった。ここで、表-2に示した供試体名について、FRPのないNo.1,2ではRCの後に鉄筋比を、連続繊維シート補強したNo.3~10ではHMCをM、HSCをS、その他のシートについては略称を示し、それらの直前に補強層数をそれぞれ示す。

### 3.2 4点曲げ試験方法と測定の詳細

図-3に示すように、支点間距離1700mm、載荷点間距離400mmの4点曲げ試験を行った。載荷速度は1kN/minを基準とした。梁のスパン中央にあたる箇所の引張鉄筋の表面に設置したひずみゲージにより引張鉄筋のひずみを計測した。そして、引張鉄筋の設計引張降伏ひずみ到達後、ひずみが急激に増加し始める変曲点荷重を鉄筋降伏荷重とした。また、変位計をRC梁スパン

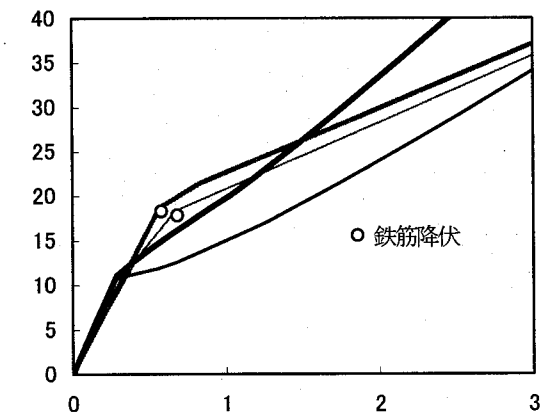
表-2 曲げ補強仕様一覧

| No. | 供試体名    | 補強シート種類と層数 |       |      |
|-----|---------|------------|-------|------|
|     |         | 高弾性        | 高強度   | 高伸度  |
| 1   | RC1.7%  | なし         | なし    | なし   |
| 2   | RC2.4%  | なし         | なし    | なし   |
| 3   | 4S      | なし         | HSC4層 | なし   |
| 4   | 3TG1S1M | HMC1層      | HSC1層 | TG3層 |
| 5   | 5TG1S1M | HMC1層      | HSC1層 | TG5層 |
| 6   | 3D1S1M  | HMC1層      | HSC1層 | D3層  |
| 7   | 4EG1M   | HMC1層      | なし    | EG4層 |
| 8   | 3TG1M   | HMC1層      | なし    | TG3層 |
| 9   | 4EG1.5M | HMC1.5層    | なし    | EG4層 |
| 10  | 3TG1.5M | HMC1.5層    | なし    | TG3層 |

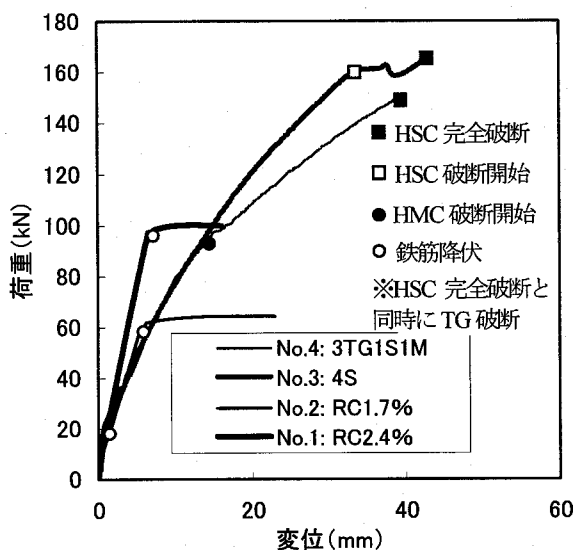
表-3 断面剛性(引張弾性率×断面積)一覧

| No. | 供試体名    | 補強量(kN) |
|-----|---------|---------|
| 1   | RC1.7%  | 834     |
| 2   | RC2.4%  | 1203    |
| 3   | 4S      | 290     |
| 4   | 3TG1S1M | 334     |
| 5   | 5TG1S1M | 364     |
| 6   | 3D1S1M  | 353     |
| 7   | 4EG1M   | 306     |
| 8   | 3TG1M   | 295     |
| 9   | 4EG1.5M | 363     |
| 10  | 3TG1.5M | 352     |

中央部の両側面に設置して0.2kNごとに1回のペースで変位を測定し、それらの平均値をその荷重状態における梁の最大変位とした。ここで、FRP-RC梁に使用するFRP量を評価する際に引張強度や引張弾性率に注目した様々な指標が用いられているが、本研究では既発表論文<sup>2)</sup>と同様に引張弾性率に断面積を乗じた値(断面剛性と呼称する)を用いる(算出結果を表-3に示す)。なお、No.1, No.2の供試体において断面剛性が極めて大きい、FRPは梁の下面近くにあり曲げ構造性能により直接的に寄与すると考え、No.1, No.2とNo.3~No.10の比較に際しては、断面剛性に基づいては評価しないこととする。



(a) 拡大図



(b) 全体図

図-4 荷重-変位曲線 (HSC の効果)

## 4. 実験結果

### 4.1 HSC による FRP-RC 梁の曲げ構造性能の向上効果

No.1~No.4 供試体に関する荷重と変位の関係を図-4 に示す。まず、ハイブリッド FRP を接着した供試体 (No.4) における曲げ挙動は、2 章において事前に想定された曲げ挙動と同様であった。すなわち、荷重を掛け始めてから鉄筋降伏→HMC 破断→HSC 破断→高伸度 FRP 破断の順にそれぞれの損傷が生じた。なお、高伸度 FRP 破断後に除荷して FRP を切り開き、FRP の接着界面を確認したところほとんど FRP の剥離は確認されなかった。その要因の一つとして既報<sup>3)</sup>で述べたせん断 FRP による拘束効果による FRP の付着力の向上が挙げられる。次に、各種曲げ構造性能指標に関しては、単一種類の FRP を用いた FRP-RC 梁である 4S 供試体 (No.3) においては、RC 梁の場合 (No.1, No.2) より最大荷重のみ卓越して大きく、この指標に関してのみは過剰に

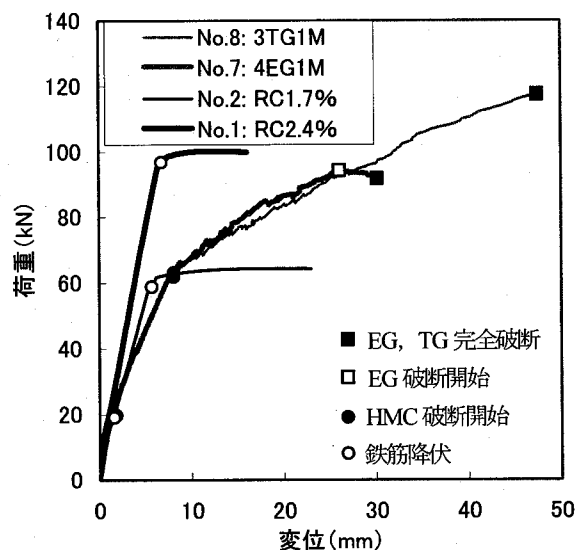


図-5 荷重-変位曲線 (HMC と高伸度 FRP の効果)

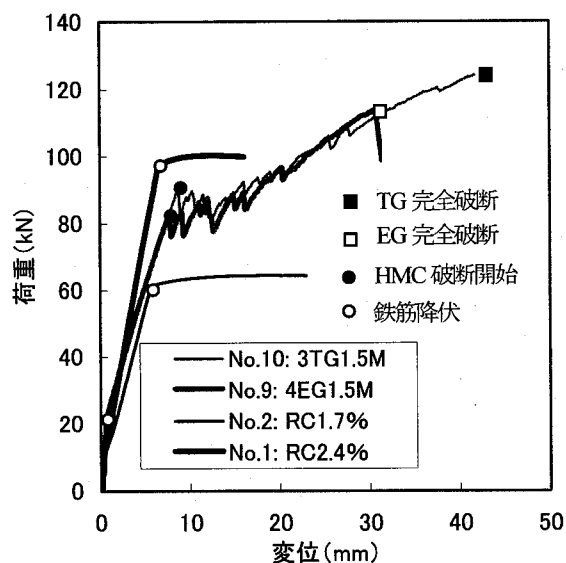


図-6 荷重-変位曲線 (HMC 補強量増加の効果)

達成できるが、鉄筋降伏荷重 (18kN) や一次剛性は RC 梁 (No.1, No.2) のレベルにまったく到達していない。これは、HSC と鉄筋の引張弾性率が同程度である上、4S 供試体の引張鉄筋比が 0.27% と小さいためである。一方、複数種類の FRP を用いた FRP-RC 梁である 3TG1S1M 供試体 (No.3) のラインは、HMC の部分破断開始まで 4S 供試体のラインとほとんど重なっており、最大荷重のみが過剰に達成されるのみで一次剛性や靱性は達成されていない。よって、HSC を用いた場合には飛躍的に大きな最大荷重が得られるが、HSC の引張弾性率は鉄筋と同程度であるため、最大荷重以外の一次剛性や鉄筋降伏荷重といった指標に関して 1.7% 以上の引張鉄筋比を有する RC 梁のレベルに到達しなかった。

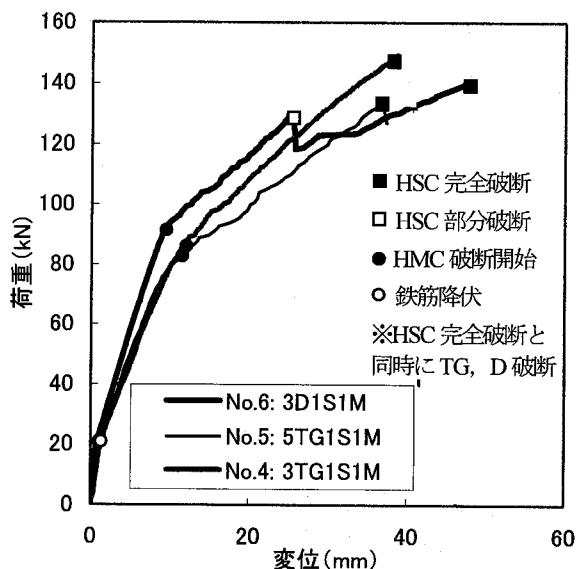


図-7 荷重-変位曲線（高伸度FRPによる効果）

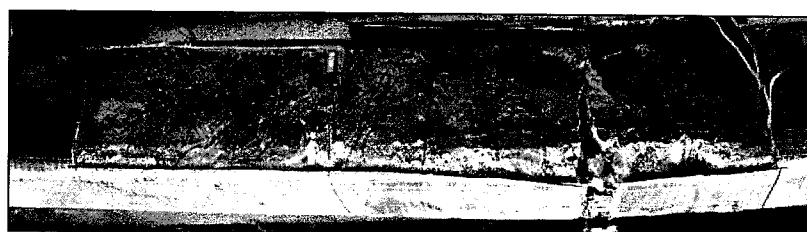
#### 4.2 HMCによるFRP-RC梁の曲げ構造性能の向上効果

No.7, No.8のFRP-RC梁およびRC供試体（No.1, No.2）に関する荷重-変位関係を図-5に示す。また、HMC使用量を増したNo.9とNo.10供試体に関する荷重-変位関係を図-6に示す。まず、EGとTの引張弾性率は類似しており、No.7供試体とNo.8供試体およびNo.9供試体とNo.10供試体の断面剛性は近い値であることから荷重-変位関係は類似することが推測される。

そして、両者は実際にほぼ一致していることから、曲げ補強効果に対する指標としての断面剛性の有意性が確認された。次に、曲げ構造性能については、卓越した引張弾性率を有するHMCの効果によりひび割れ発生前における一次剛性がRC2.4%の場合と同程度のレベルにまで高められたが、ひび割れ発生後の一次剛性については達成されなかった。また、HMC使用量が多いほど剛性がより大きく向上されることが実験的に明確となった。次に、荷重-変位関係におけるHMCの段階的な部分破断により発生する荷重が横違いになる区域はRC梁における鉄筋の降伏棚と同程度のレベルにあるため、両者を同一の指標として比較すると、No.7, No.8供試体におけるHMC破断開始荷重はRC1.7%の鉄筋降伏荷重を越えたが、RC2.4%のレベルには到達しなかった。また、No.9, No.10供試体においてはHMC破断荷重がNo.7, No.8供試体の場合よりかなり向上しており、HMCの補強量が大きいほどHMC破断荷重が大きくなることが示された。よって、HMC使用量の増加によりHMC破断荷重が効果的に向上されることが示された。

#### 4.3 高伸度FRPによるFRP-RC梁の曲げ構造性能の向上効果

図-5, 図-6において、No.7とNo.8, およびNo.9とNo.10を比較して、より大きな破断ひずみを有するTG（破断ひずみは3.14%）を用いた場合にはEG（破断ひずみは1.79%）を用いた場合よりFRPの完全破断時の変



(a) No.3



(b) No.4



(c) No.5

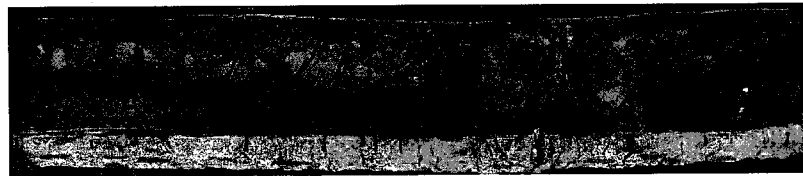
図-8 連続繊維シート剥離後のコンクリート表面の状況とひび割れ分布（No.3～No.5）



(d) No.6

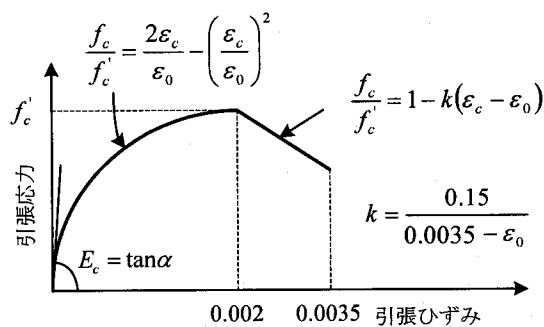


(e) No.7

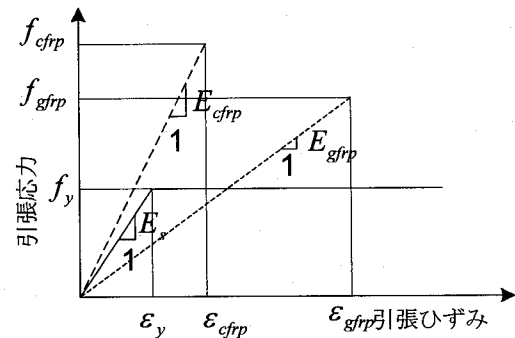


(f) No.8

図-9 連続繊維シート剥離後のコンクリート表面の状況とひび割れ分布 (No.6～No.8)



(a) コンクリートの引張、圧縮挙動



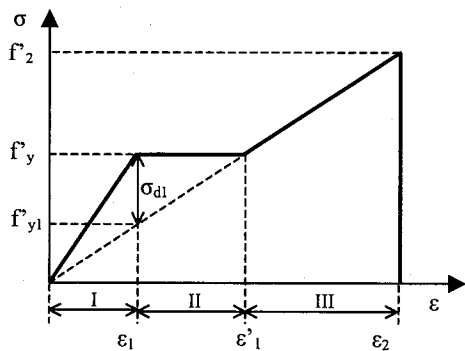
(b) 異形鉄筋とFRPの引張挙動

図-10 使用材料の応力-ひずみ曲線

位が大きく向上していることがわかる。また、TG の使用量を増加させた場合と、同程度の破断ひずみを有し、有機繊維材で衝撃エネルギー吸収性能に優れる D (破断ひずみは 3.08%) を用いた場合に関する荷重変位曲線を図-7 に示す。まず、TG の使用量については 3 層の場合と 5 層の場合で FRP の完全破断時の変位はほぼ同様であることから、FRP の完全破断時の変位に対しては高伸度 FRP の破断ひずみが大きく寄与することが実験的に示唆された。一方、D を用いた場合には、途中で HSC の部分的な破断に伴う荷重低下があるものの、FRP の完全破断時の変位が大きく向上された。これは、HMC の破断やひび割れにおける FRP の折り曲げによる影響を D の衝撃エネルギー吸収性能により緩和され、より大きな変形を可能にしたと考えられる。

#### 4.4 ひび割れ分布と連続繊維シートの付着剥離性状

載荷試験中は、せん断補強用の連続繊維シートにより全体を覆っているため、コンクリートに生じるひび割れの発生・進展状況を観察することができない。そこで、高伸度 FRP が破断して除荷した上で、FRP を切断・引き剥がしてコンクリートの表面を観察した。図-8、図-9 に FRP-RC 供試体に関して引き剥がし後のコンクリート表面の写真を示す。50mm 以内の間隔で密にひび割れが発生しており、FRP-コンクリート間の付着強さはかなり大きいことが確認された。また、既報<sup>3)</sup>において、せん断 FRP が曲げ FRP を拘束することにより、曲げ補強シートの剥離が抑制され、破断モードとなりやすくなる傾向を報告したが、本研究における実験でも、全ての供試体で破断破壊モードであった。



$f_y$ : HMC か HSC の破断応力  
 $f_2$ : EG, TG, あるいは D の破断応力  
 $\sigma_d$ : HMC か HSC の破断に伴う引張応力低下  
 $\varepsilon_1$ : HMC の破断ひずみ  
 $\varepsilon'_1$ : HMC か HSC の破断に伴うひずみ硬化後の引張ひずみ  
 $\varepsilon_2$ : EG, TG, あるいは D の破断ひずみ

図-11 ハイブリッドFRPの引張応力-ひずみ曲線

## 5. 実験値と解析値の比較

### 5.1 解析プログラムの作製

既発表論文において、下記の条件に基づく解析プログラムをプログラミング言語 FORTRAN を用いて作成した。解析モデルの作製条件は以下の5項目とした。

- 1) オイラー-ベルヌーイの梁理論を基本とする
- 2) 全断面でひずみ分布は線形とする
- 3) 鉄筋とコンクリート間ですべりは生じない
- 4) FRP とコンクリート間のすべりは生じない
- 5) FRP の剥離やせん断破壊は生じない

一方、使用材料の物性としては、まず、コンクリートに関してコンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会編)<sup>4)</sup>より、圧縮領域においてはひずみが0.02に達するまでは二次曲線に沿って応力は増加するが、その後はひずみが0.0035に達するまで直線状に減少していくと仮定した(図-10(a))。次に、鉄筋は降伏応力度 $f_y$ 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 $\varepsilon_s$ まで $f_y$ を維持するものとした(図-10(b))。さらに、FRPに関しては完全弾性体と考え、複数種類のFRPを同時に曲げFRPとして用いる場合には、既報<sup>2)</sup>と同様に、材料の複合則に基づき引張弾性率 $E_h$ は(1)式より求めることとした。

$$E_h = (E_{GFRP}A_{GFRP} + E_{CFRP}A_{CFRP})/A \quad (1)$$

ここで、 $A_{GFRP}$ と $A_{CFRP}$ はそれぞれCFRPとGFRPの断面積、 $A$ は両者を合計した総断面積である。なお、図-11に示すように、破断ひずみが小さいCFRPが先に破断するものと考え、破断後は残されたGFRPのみを考慮する。また、CFRP破断直後に応力低下が想定されるが、本研究ではHMCやHSCの破断が部分的かつ段階的なものとなっているため、

あまり大きな荷重低下は見られなかった。そこで、HMCやHSCの破断直後の応力低下は考慮せず、応力が一定のままEG, TG, あるいはDの曲線に乗るまでひずみのみが増加するものとした。

以上のように仮定した各種使用材料の物性を踏まえて、以下の流れに基づくプログラムを作成した。

- ① 変位を仮定
- ② 載荷点における曲げモーメントを算出(算出には微分方程式を用いたたわみと曲げモーメントの関係式を用いた)
- ③ 圧縮縁、引張縁における応力、鉄筋の引張応力、そして荷重を算出
- ④ 鉄筋の引張応力と鉄筋の降伏応力を比較(鉄筋の引張応力が鉄筋の降伏応力を超えた後、鉄筋の引張応力=鉄筋の降伏応力に固定する)
- ⑤ 圧縮縁応力とコンクリートの圧縮強度を比較(圧縮縁応力がコンクリートの圧縮強度を越えた時点で解析終了)
- ⑥ 引張縁応力とFRPの引張強度を比較(FRPの応力は図-11の引張応力-ひずみ曲線に基づく。引張縁応力がEG, TG, あるいはDの破断応力に達した時点で解析終了)
- ⑦ ⑤⑥の比較において解析が終了しなかった場合には、解析終了となるまで①~⑥の手順を繰り返す。

次に、この解析プログラムを用いてFRP-RC供試体の曲げ構造性能を評価する。

### 5.2 解析結果

No.6, No.7, No.9, No.10の荷重-変位関係に関して、実験値と解析値の比較を行う。それぞれの荷重-変位関係を図-12~図-15に示す。図-12, 図-14, 図-15において、実験値ラインの途中で急激な荷重低下が見られ、解析値ラインとの相違が見られる。これらの荷重低下は、No.6ではHSCの部分的な破断から、その他の2つ

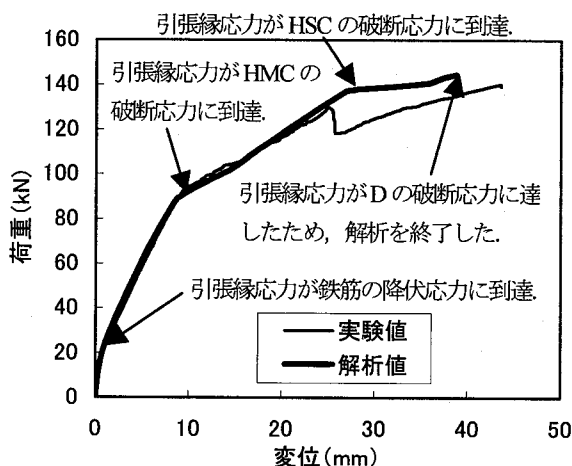


図-12 荷重-変位曲線 (No.6: 実験値と解析値の比較)

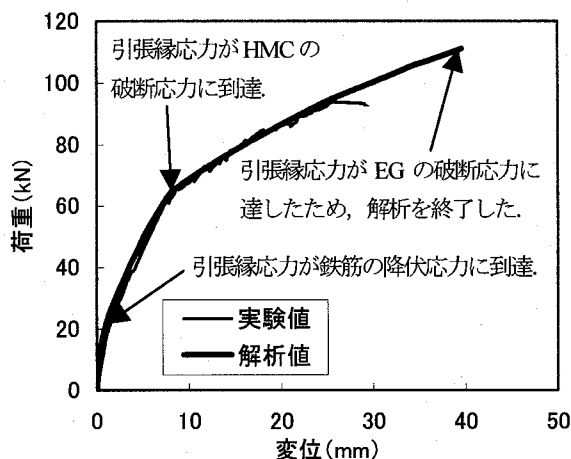


図-13 荷重-変位曲線 (No.7: 実験値と解析値の比較)

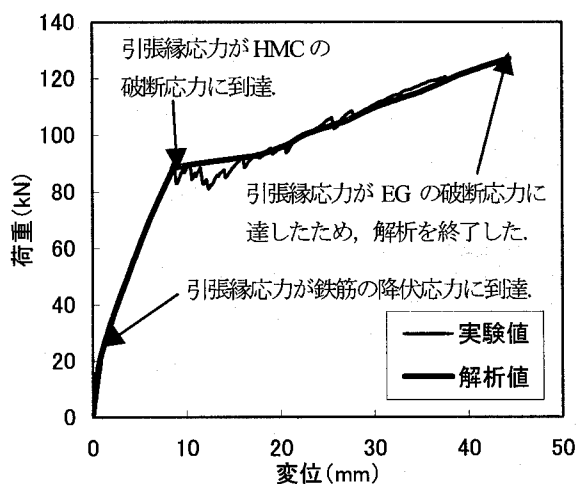


図-14 荷重-変位曲線 (No.9: 実験値と解析値の比較)

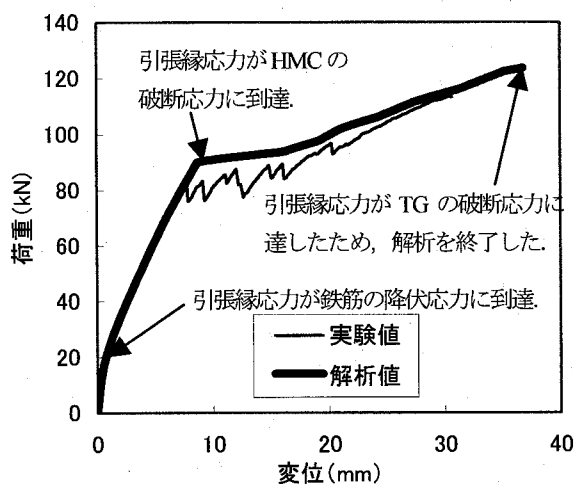


図-15 荷重-変位曲線 (No.10: 実験値と解析値の比較)

の供試体では HMC の段階的な部分破断から散逸される衝撃により生じており、提案した解析モデルでは、各種

連続繊維シートの部分的な破断に伴い生じる荷重低下を表すことはできないことがわかった。また、図-13において、最大荷重以前の剛性はよく一致しているが、実験値における最大荷重が解析値より低いことがわかる。その理由として、HMC 破断に伴い散逸する衝撃の影響で、EG に微視的な損傷が蓄積し、破断が早期化したと推測される。よって、HMC や HSC の部分破断の影響による最大荷重の低減に関する評価が今後重要な課題になると考えられる。その他の一次、二次剛性、鉄筋降伏荷重、そして、最大荷重は提案した解析モデルにより、うまく評価できることが明確となった。

## 6. 結論

- 1) 重要な曲げ構造性能指標の内、最大荷重を達成することは比較的容易であり、HSC を用いると最大荷重のみが過剰に達成される。このとき、HSC と鉄筋の引張弾性率は同程度のため、HSC のみでは剛性を始めとする他の指標を達成することができないことを明確に示した。そこで、引張弾性率に優れる HMC を曲げ構造材に用いて剛性や鉄筋降伏荷重の改善を図った。そして、本研究では、高弾性、高強度、そして高伸度の繊維材を適材適所に接着することで、剛性、強度、靱性の観点で引張鉄筋比 1.7% の RC 梁を上回る性能を実現した。
- 2) 既発表論文において提案した解析モデルにより、FRP-RC 梁の曲げ挙動をうまく再現できることが明確となった。しかし、HMC や HSC の部分破断の影響により最大荷重の実験値が解析値を下回る傾向が確認されたため、その評価が今後重要な課題になると考えられる。

## 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、東洋紡績株式会社にはダイニーマ繊維材をそれぞれご提供いただいた。ここに記して感謝申し上げる。

## 参考文献

- 1) 上原子晶久, 下村匠, 丸山久一: 連続繊維シート補強コンクリート部材のせん断耐力の評価法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.648, V-47, pp. 217-226, 2000
- 2) 呉智深, 坂本宏司, 岩下健太郎, 小林朗: 高弾性炭素繊維シートのハイブリッド化による RC 梁の曲げ性能向上に関する研究, 応用力学論文集, Vol.8, 土木学会, pp.987-997, 2005
- 3) Wu, Z.S., Li, W., Sakuma, N.: Innovative externally bonded FRP/concrete hybrid flexural members, Composite Structures, Vol. 72, Iss. 3, pp. 289-300, 2006
- 4) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 1996 (2007 年 4 月 12 日 受付)