

# 論文 高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた曲げ補強効果

藤原 資也<sup>\*1</sup>・畠 宏樹<sup>\*2</sup>・角掛 久雄<sup>\*3</sup>・小笠原 哲也<sup>\*4</sup>

**要旨：**RC 梁の下面増し厚による曲げ補強に高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC）を用い、さらに鉄筋やFRPなどの5種類の補強材を組み合わせた場合の補強効果およびDFRCCの挙動特性を実験およびFEM解析により検討した。その結果、様々な補強材を用いても補強時耐力は平面保持の仮定による算定で安全側に評価できた。また、DFRCCのひび割れ分散性を確保するためには補強材の伸び剛性が影響し、降伏後も有用に活用するためには鉄筋の様に降伏後の2次剛性の小さな材料を用いるよりFRPの様な弾性域の大きな材料と組み合わせる方がより効果が高いことを明らかにした。

**キーワード：**DFRCC, 曲げ補強, 下面増厚, FRP

## 1. はじめに

港湾構造物は設計基準<sup>1)</sup>の改訂により、補強の必要性が生じており、かつ高度経済成長期以降に建設された港湾構造物の高齢化に加え、海面付近に位置する栈橋の上部工では、塩害による劣化が生じやすく、補修・補強による長寿命化が求められている。しかし、既存の補強方法では耐久性、自重の増大といった問題が存在している。

このような背景のもと、高靱性繊維補強セメント複合材料（以後、DFRCCと呼ぶ）に着目した。DFRCCとは、モルタル中に繊維（本研究ではポリビニルアルコール（PVA）繊維を使用）を練り込むことで高い引張靱性、マルチプルクラック効果による優れた遮塩性を有する材料である。そのため、著者らは栈橋上部工の補修・補強への適用を踏まえた研究を行って来た。既往研究の成果として、塩害劣化に対するDFRCC巻き立ての劣化抑制効果を示し<sup>2)</sup>、DFRCC単体での部分巻き立てによるせん断補強の有用性を示し、耐力算式の提案を行った<sup>3,4)</sup>。曲げ補強に関しては強度増加という点では単体補強でも有用であるが、ひび割れ分散性が確保できないため、CFRPグリッドと合わせた補強について検討を行った<sup>5)</sup>。しかし、DFRCCと組み合わせる補強材によってはDFRCCで巻き立てる有用性が十分に発揮できないことも考えられる。DFRCCを用いた巻き立て補強を見据えた場合、曲げおよびせん断それぞれに対する補強に関する提言を行う必要がある。

そこで、DFRCCで巻き立てることによる有用性を確保できる適切な補強材を明確にする必要があり、様々な補強材と組み合わせた場合の補強効果およびDFRCCの挙動を明らかにするため、RC梁への下面増厚による曲げ補強実験およびFEM解析により検討を行った。

## 2. 実験概要

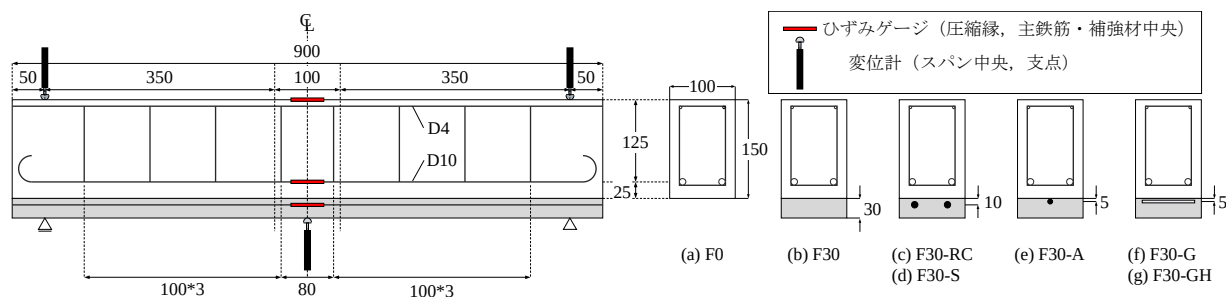
図－1、表－1に示すように本実験では全長900mm、幅100mm、梁高150mm、せん断スパン比2.80、純曲げスパン100mmとしたRC梁にDFRCCを下面増厚補強したものを基準とし、DFRCC補強部に組み合わせる補強材をパラメータとして4点曲げ載荷により実験を行った。補強時のDFRCCとRC梁下面のコンクリート界面の定着は目荒らしのみとした。対象とするDFRCC補強厚は材料試験において繊維長の2倍以上とすることで厚さの影響が小さいこと<sup>6)</sup>、また、想定時においてDFRCC単体での耐力増分が15%程度となることを仮定して30mmとした。そのため、他の補強材と組み合わせると、コアとなるRC梁に対して耐力増分が大きなものは100%以上となる過大な補強効果（耐力増分比率）を得ることになるが、単純にDFRCCによる補強効果を考察することとした。表に示す様に無補強およびDFRCC単体補強、DFRCCに5種の補強材それぞれを組み合わせた7タイプの供試体を作製した。補強材は塩害補修・補強、自重低減（かぶり厚の低減）を踏まえて耐腐食性に優れ、かつ材料特性の異なるものを選定することとし、弾塑性材料（鋼材系）として鉄筋（エポキシ鉄筋を想定）およびステンレス（2次剛性を有する）、を選定し、また、弾性－破断材料（FRP）としてアラミドロッド、カーボングリッド、高弾性カーボングリッドを選定した。また、補強材の伸び剛性による影響も見ることとして、補強材そのものの引張耐力が出来るだけ同じになるように補強量を決定した。ただし、アラミドロッドは耐力を合せられず、カーボングリッドと伸び剛性を合わせた。表－2、3にDFRCCにおけるPVA繊維の物性と配合を示す。さらに、RC梁のコンクリートおよびDFRCCの材料特性を表－4に、補強材の材料特性を表－5に示す。

\*1 大阪市立大学大学院 工学研究科 (学生会員)

\*2 東京都 下水道局 (研究時：大阪市立大学大学院) 修(工)

\*3 大阪市立大学大学院 工学研究科 博(工) (正会員)

\*4 五洋建設(株) 技術研究所 博(工) (正会員)



図－１ 供試体側面図及び断面図

表－１ 供試体一覧表

| 種類                | 供試体名称  | DFRCC補強厚 (mm) | 補強材      |                          |           |            |
|-------------------|--------|---------------|----------|--------------------------|-----------|------------|
|                   |        |               | 種類       | 補強断面積 (mm <sup>2</sup> ) | 伸び剛性 (kN) | 純引張耐力 (kN) |
| 無補強               | F0     | 0             | -        | -                        | -         | -          |
| 単体補強              | F30    | 30            | -        | -                        | -         | -          |
| DFRCC<br>+<br>補強材 | F30-RC | 30            | 鉄筋(D10)  | 71.3*2=142.7             | 27443     | 52.3※      |
|                   | F30-S  | 30            | ステンレス    | 71.3*2=142.7             | 28477     | 50.3※      |
|                   | F30-A  | 30            | アラミドロッド  | 48*1=48                  | 2544      | 92.2       |
|                   | F30-G  | 30            | カーボングリッド | 13.2*2=26.4              | 2812      | 51.7       |
|                   | F30-GH | 30            | 高弾性グリッド  | 13.2*2=26.4              | 5555      | 52.5       |

※ 降伏強度基準

表－２ PVA 繊維物性

| 直径 (μm) | 長さ (mm) | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 破断伸び (%) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|---------|-------------------------|---------------------------|----------|----------------------------|
| 40      | 12      | 1.3                     | 1600                      | 6        | 40                         |

表－３ DFRCC 配合表

| 水結合材比 W/(C+FA)          |             | 繊維混入率      | 細骨材率 S/C |
|-------------------------|-------------|------------|----------|
| (%)                     |             | (%)        | (%)      |
| 45                      |             | 2          | 50       |
| 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |             |            |          |
| 水 W                     | 早強セメント C    | フライアッシュ FA | 細骨材 S    |
| 458                     | 815         | 204        | 407      |
| 繊維 PVA                  | 高性能AE減水剤 SP | 増粘剤 VA     | 消泡材 EB   |
| 26                      | 10          | 0.4        | 0.82     |

表－４ コンクリート、DFRCC 材料特性

| コンクリート                    |                            |                           | DFRCC                     |                            |                           |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |
| 28.4                      | 25.0                       | 2.44                      | 46.3                      | 13.9                       | 3.29                      |

表－５ 補強材材料特性

| 種類        | 降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 降伏ひずみ (μ) | 破断ひずみ (μ) |
|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------|-----------|
| 圧縮鉄筋 (D4) | 295                       | 490                       | 200                        | 1475      | -         |
| 鉄筋 (D10)  | 367                       | 514                       | 192                        | 1904      | -         |
| ステンレス     | 353                       | 702                       | 200 (3.6)※                 | 1766      | -         |
| アラミドロッド   | -                         | 1920                      | 53                         | -         | 36226     |
| カーボングリッド  | -                         | 1959                      | 107                        | -         | 18394     |
| 高弾性グリッド   | -                         | 1989                      | 210                        | -         | 9453      |

※ ( ) 内は 2 次剛性

### 3. 実験結果

#### 3.1 耐力

破壊性状に関して全供試体で曲げ降伏後に RC 梁部の圧壊が確認された。単体補強および弾塑性材料は最大荷重後、圧壊の進展に伴い、荷重の低下が見られたが、弾性－破断材料に関しては補強材破断に至るまで荷重は上昇し続け、圧壊荷重が明確にできなかった。そのため、全ての供試体で圧壊荷重を統一できないので、実験により得られた最大荷重および RC 梁部の終局ひずみ到達時の荷重（純曲げ区間の圧縮縁ひずみが終局ひずみ  $\epsilon_{cu}=3500\mu$  に達した時とし、以後、終局ひずみ荷重とする）で比較を行う。それぞれの値を表－６に示す。

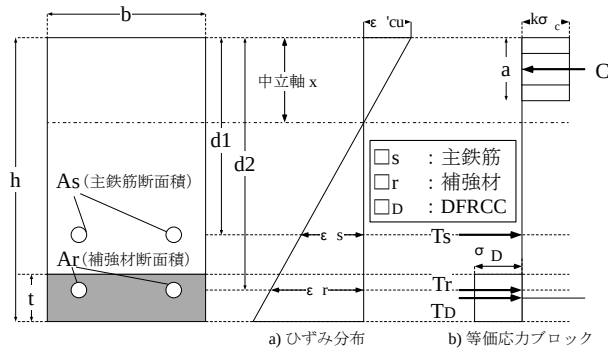
補強材ごとの最大荷重を比較すると、F30-RC（鉄筋）、F30-S（ステンレス）および F30-GH（高弾性グリッド）は近似した値となっており、F30-A（アラミドロッド）、F30-G（カーボングリッド）の順で低くなった。しかし、1 割程度の違いであり引張耐力を統一したことの影響と考えられる。ただし、アラミドロッドやカーボングリッドが低くなったのは、補強材の破断時の実験供試体のス

パン中央ひずみが、材料試験結果に比べ、小さくなっており、実験では破断ひずみが小さくなっていた可能性がある。終局ひずみ荷重を比較すると最大荷重と比べて大きく異なり、補強材の伸び剛性の違いと同様な傾向が得られた。また、弾塑性材料である鉄筋・ステンレスは終局ひずみ荷重と最大荷重に大きな差はないが、今回の補強量の場合は弾性－破断材料である FRP 材を用いた場合は終局ひずみ到達後にも大きく荷重が増加することがわかる。

また、表には終局ひずみ到達時の算定耐力を示す。耐力算定法に関しては、図－２に示す様に増厚部も含めて平面保持の仮定が成り立つものとして RC 梁に一般的に用いられる等価応力ブロック法を準用した。DFRCC の応力分布は単体補強および補強材と組み合わせた場合ともに、耐力時は引張強度が保持されている区間のひずみであるとして引張強度で一定として算定している。なお、圧縮鉄筋は無視した。表に示す実験時の終局ひずみ荷重値／算定値の比率を見ると、DFRCC 単体補強のみ 1.0 未満となり、補強材と組み合わせた場合は 1.06～1.15 と近

表－6 実験結果一覧

| パラメータ          | F0   | F30  | F30-RC | F30-S | F30-A | F30-G | F30-GH |
|----------------|------|------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 終局ひずみ荷重(kN)    | 36.5 | 40.2 | 90.5   | 88.9  | 62.5  | 62.6  | 76.8   |
| 最大荷重(kN)       | 40.9 | 47.5 | 92.6   | 92.5  | 88.0  | 80.6  | 92.3   |
| 算定値(kN) 終局ひずみ時 | 34.1 | 42.1 | 79.0   | 77.7  | 58.1  | 59.3  | 68.7   |
| 終局ひずみ荷重値／算定値   | 1.07 | 0.96 | 1.15   | 1.14  | 1.08  | 1.06  | 1.12   |



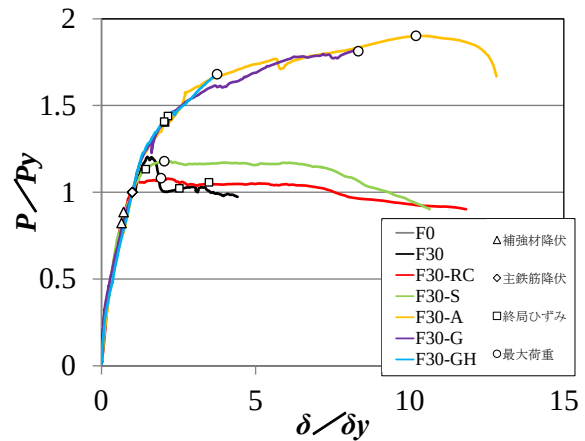
図－2 耐力算定概念図

似して安全側の値を得ることが出来た。このことは、DFRCC 単体補強の場合は RC 梁側のひび割れに併せて DFRCC のひび割れも局所化しやすく、分散性能が低下するため、ピーク応力の保持機能が低下し、RC 梁の圧縮側ひずみが終局ひずみに達する前に応力の低下が始まっていることが考えられる。それに対して補強材と組み合わせることで、ひび割れの局所化に対して抵抗性を有し、ピーク応力の保持が十分に可能となる相乗効果が発揮されるためと考えられる。

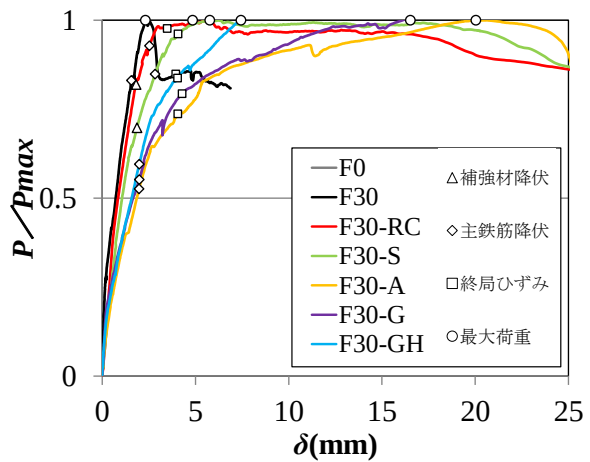
### 3.2 荷重－変位関係

補強材の違いによる挙動特性の違いを確認するため、図－3 に各パラメータの実験値を RC 梁部の主鉄筋降伏時の降伏荷重、降伏変位で無次元化した  $P/P_y - \delta/\delta_y$  関係を、図－4 に各パラメータの実験値を最大耐力で無次元化した  $P/P_{max} - \delta$  関係を示す。なお、図中の凡例の補強材降伏は DFRCC 補強部の補強材が降伏ひずみに達した点、主鉄筋降伏は RC 梁部の主鉄筋が降伏ひずみに達した点、終局ひずみは前節同様、圧縮縁ひずみが終局ひずみに達した点、最大荷重は最大荷重に達した点を示している。

図－3 を見ると、各パラメータで降伏以降の挙動や靱性率の差異が大きいことがわかる。弾塑性材料である F30-RC、F30-S は降伏後の荷重増加は小さく、最大耐力以降緩やかに荷重が低下する傾向が見られた。当然、RC 梁部の主鉄筋より先に補強部の鉄筋が先に降伏していることが要因である。しかし、弾性－破断材料である F30-A、F30-G、F30-GH は補強材破断に至るまで荷重が上がり続け、材質に関わらず、降伏を基準にすると同様な挙動であった。しかし、弾性係数と破断ひずみの違いにより変位に差が生じ、F30-GH だと靱性率が小さくなることがわかる。DFRCC 単体である F30 に関してはコア RC の降伏に対して、1.2 倍程度まで、最大荷重は増加しているが、



図－3  $P/P_y - \delta/\delta_y$  関係



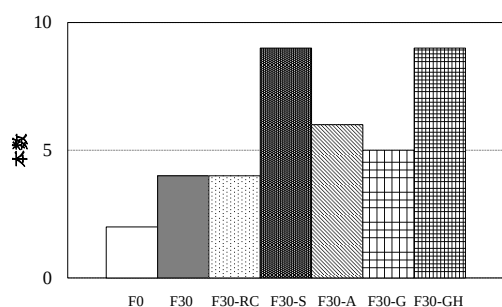
図－4  $P/P_{max} - \delta$  関係

明らかに DFRCC による補強効果が無くなった後で、終局ひずみに達している。

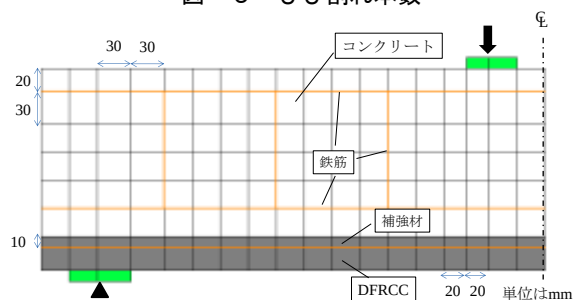
次に図－4 を見ると最大荷重に到達するまでの変位が大きく異なることがわかる。コア RC 梁の降伏や終局ひずみに達する変位は補強材による影響が小さいが、最大荷重に到達する変位は補強材の特性による影響を受けている。また、DFRCC 単体補強である F30 はひび割れの局所化により荷重は急激に低下しており、DFRCC 補強効果が終了する変位は 3mm 程度と小さいことがわかる。補強材を入れたパラメータに関しては F30 同様の急激な荷重の低下はなく、DFRCC 補強効果継続の変位は大きくなり、終局ひずみ到達以降も DFRCC 補強効果を継続していると考えられ、次章での解析により検討を行う。降伏棚を有する F30-RC を見ると、6～7mm で補強効果が小さくなっていると推定できる。しかし、補強材が 2 次剛性をもつ F30-S、弾性－破断材料である F30-G、F30-GH、F30-A は補強材の特性上、DFRCC 補強効果の持続区間は判断出来ない。よって、補強効果の一つであるひび割れ分散性や次章での解析的検討により、比較を行う。

### 3.3 ひび割れ性状

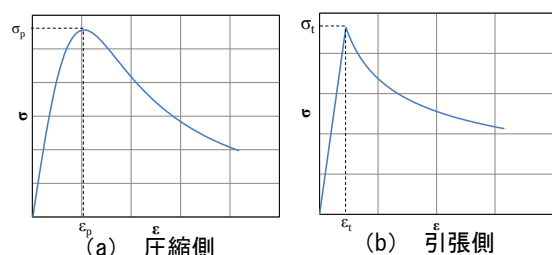
ひび割れ分散性状の検討を行うため、RC 梁部の主鉄



図－５ ひび割れ本数



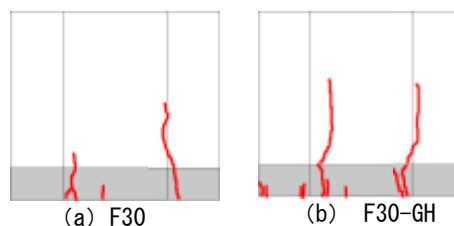
図－７ 要素分割例



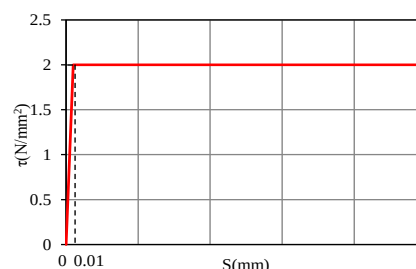
図－９ コンクリート構成則

筋降伏時付近のひび割れ本数を図－５に示す。DFRCCを栈橋上部工に適用する際は降伏以前（使用時）のひび割れが重要であるが、補強材の特性による影響も検討するため、主鉄筋降伏時付近の比較をする。測定範囲は供試体寸法に対して、純曲げスパンが小さく、載荷点直下付近にひび割れが集中していたため、純曲げ区間の両側+5cmとした。図－６にRC梁部主鉄筋降伏時におけるひび割れ性状の一例を示す。

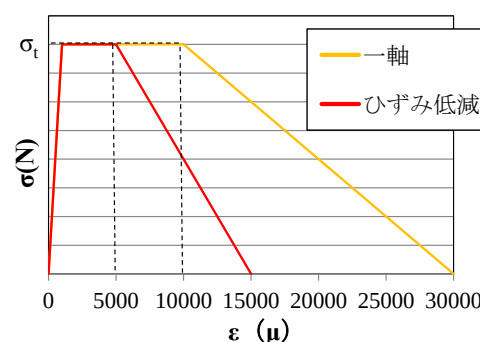
図－５より、補強材と併用することでひび割れは増加傾向となった。これは補強材が変形に対して抵抗することで、ひび割れの局所化を遅らせ、その間にDFRCCがひび割れ分散させるためであると考えられる。F30-Sに比べてF30-RCのひび割れ本数が少ない理由はF30-Sの降伏変位がやや大きいことが一つの要因と考えられるが、主鉄筋降伏時において補強材としての鉄筋およびステンレスは既に降伏しており、2次剛性を有するステンレスと降伏棚を有する鉄筋との降伏後の剛性の違いも一つの要因と考えられる。載荷終了時のひび割れ本数においてF30-RCは4本で降伏時と変わらず、F30-Sは11本と降伏時から増加しており、そのことから補強材の降伏後の剛性による影響があるものと考えられる。補強材が降伏してからの違いであり、設計上補強材が降伏する前が



図－６ ひび割れ性状の一例



図－８ DFRCC部－コアRC部界面付着特性



図－１０ DFRCC引張構成則

使用状態であるため、使用状態においては鉄筋と同等のひび割れ分散性を有すると考えられる。また、ひび割れ分散性は鉄筋より伸び剛性の小さな弾性－破断材料の方が良くなっている。F30-GHが特に高い。弾性係数だけを考えれば高弾性グリッドは鉄筋と同様であるが、傾向は異なった。補強材の形状による付着抵抗性の違いはあるが、補強材の伸び剛性が同等であるF30-GとF30-Aによるひび割れが類似していることから、DFRCCに補強する補強材の伸び剛性がひび割れ分散性に影響があるものと考えられる。

## 4. 解析

### 4.1 解析モデル

解析時の要素分割例を図－７に示す。部材軸方向を1/2モデルとした2次元FEM解析により行う。DFRCC部とRC部の界面は文献7)を参考に弾塑性モデルとした（図－８参照）。また、他の部材の界面は剛結合とした。各材料の特性に関しては、表－５、６に示す材料試験結果を適用した。コンクリート構成則については圧縮側を修正Ahmadモデルとし、引張側は上昇域を線形弾性として、軟化域を出雲モデルとした（図－９参照）。鉄筋構成則については完全弾塑性モデルを使用している。DFRCC構

成則について引張側に関して一軸引張試験による応力 - ひずみ関係をモデル化した引張特性（一軸モデル）に加え、F30の実験結果より強度保持の低減が想定されるため、一軸モデルの強度到達以降ひずみを半分に低減したモデル（低減モデル）の2種類を想定した（図-10参照）。補強材に関しては鉄筋をRC梁の主鉄筋同様に完全弾塑性モデル、ステンレスは材料試験結果を参考に2次剛性を有する増分型バイリニアモデル、アラミドロッド、カーボングリッドおよび高弾性グリッドは弾性-破断モデルとしている。

#### 4.2 解析結果

図-11にDFRCC単体補強およびDFRCCと補強材を併用した供試体の荷重-変位関係の解析結果並びに実験結果を示す。なお、解析においてはDFRCCの効果を明確にするため、DFRCCを普通コンクリートで置き換え、増厚補強した場合の解析を実施しており、凡例に示すConがそれにあたる。ただし、引張強度はDFRCCに合わせ、軟化モデルはコアRCのコンクリートと同様としている。また、凡例中のDFRCC終局とは解析においてDFRCC下縁ひずみが終局ひずみ（ $30000\mu$ （一軸）または $15000\mu$ （低減））に達した点であり、DFRCC終局に達するまでの変位をDFRCCの補強効果持続区間とする。

図-11(a)より、DFRCC単体補強であるF30は実験値の荷重が最大荷重以降、急激に低下しており、解析における一軸モデルのDFRCCの補強効果の持続が明らかに長くなっており、過大評価である。しかし、低減モデルの解析結果は補強効果の持続が類似した傾向となり、単体補強に関しては補強効果が低減されることは文献5)の結果でも同様の結果が得られている。以降の解析結果はDFRCCについては一軸モデルを使用したものだけを示す。図-11(b), (c)より、弾塑性材料に関しては実験結果と比べDFRCCの補強効果が小さな変位で低減しており、補強材とDFRCCの接合において、剛接合としたことが一つの要因とも考えられる。補強材の付着を考慮すると補強効果がもっと大きな変位まで持続している可能性がある。DFRCCを一軸モデルとして解析しても効果の持続については過大な評価をしていないと考えられ、補強材と併用することでDFRCCの材料特性を十分発揮すると考えられる。図-11(d)～(f)より、弾性破断材料を用いた場合は、荷重-変位曲線からはDFRCCの補強効果（荷重）の低減が解析値と実験値ともに明確にならなかった。

また、すべての補強タイプにおいて、明らかにコンクリートに置き換えた場合と比べてDFRCCを用いて増し厚したことによって、RC部の主鉄筋降伏荷重が増加し、かつ、最大荷重も増加することが確認できた。解析におけるRC梁部の主鉄筋降伏荷重、最大荷重は実験値に近

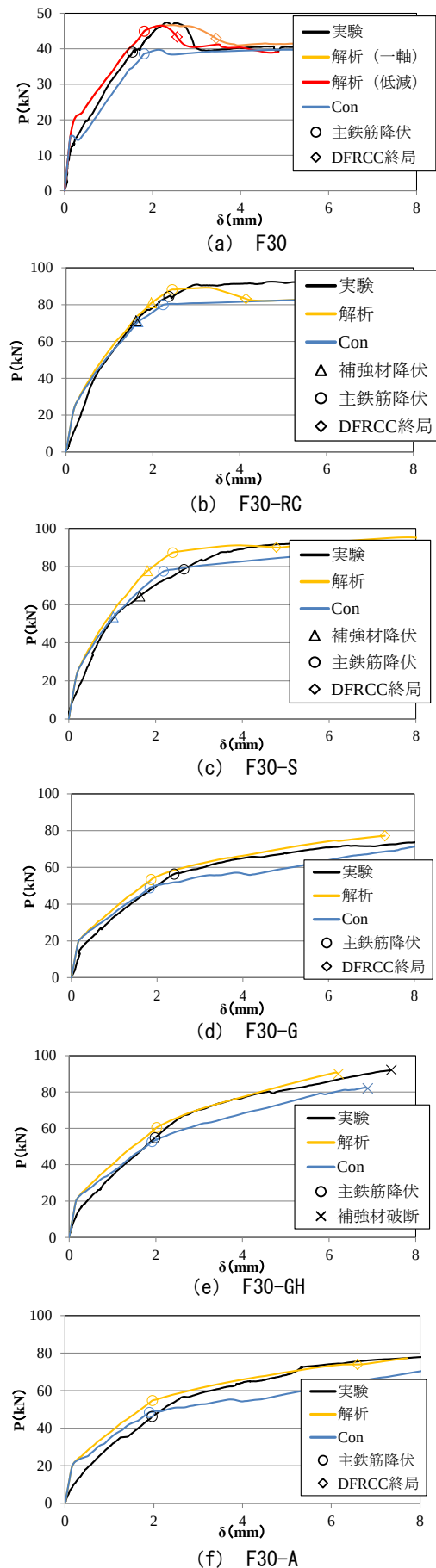
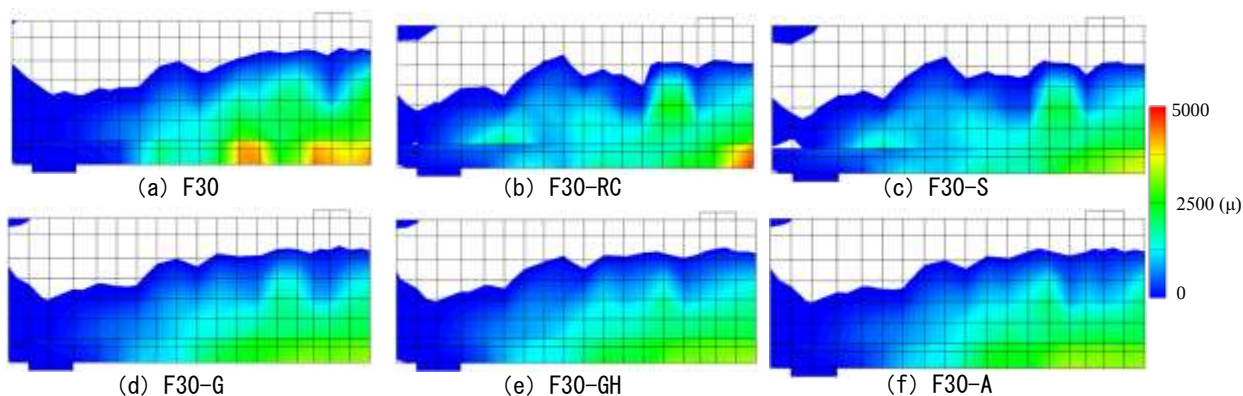


図-11 荷重-変位関係





図－１２ RC 梁主鉄筋降伏時の部材軸方向ひずみコンター図

似しており、補強材と併用した場合において DFRCC 引張構成則は一軸モデルを適用できると考える。

DFRCC 終局ひずみに達した変位を比較すると、解析においても補強材なし、弾塑性モデル、弾性破断材料の順で、DFRCC 終局までの変位が大きくなっている。特に、F30-GH は補強材の破断まで、DFRCC の効果が発揮していたと考えられる。補強材の伸び剛性（弾塑性モデルは降伏後の剛性）による影響によって DFRCC が機能する範囲が変わってくるものと考えられる。そこで、図－１２にコア RC 部の主鉄筋降伏時（弾塑性材料の補強材も降伏した状態）における部材軸方向ひずみコンター図を示す。図より主鉄筋降伏時の補強材の伸び剛性が小さいものは局所的にひずみが大きくなっており、弾性－破断材料においては緩やかにスパン中央に向けてひずみが増大している。このことは実験時におけるひび割れ分散性が弾性－破断材料の方が良好であったことにつながるものと考えられる。降伏後もある程度ひび割れ分散性を確保し、DFRCC の補強効果を確保する場合は、弾塑性材料より弾性－破断材料の方が好ましいと考えられる。

## 5. まとめ

本研究は RC 梁を対象に下面増し厚による曲げ補強を DFRCC に加えて 5 種類の補強材を組み合わせた場合の補強効果を実験および FEM 解析により検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) DFRCC と補強材を組み合わせる場合において、終局荷重は平面保持の仮定のもとに簡易的な算定法を適用しても安全側に耐力を評価できた。
- (2) DFRCC のひび割れ分散性を確保するには、補強材の弾性係数より伸び剛性の方がより影響があるものと考えられる。
- (3) 解析において DFRCC と補強材を併用する際は DFRCC 引張構成則に一軸引張試験モデル、DFRCC 単体補強の場合は低減モデルを使用することで、実験結果を概ね再現できた。
- (4) 降伏耐力以降も DFRCC の特性を発揮する補強材は

変形に対して抵抗性を持ち続け、ある程度の伸び剛性を確保した補強材を適用することでより DFRCC との相乗効果を発揮するものと考えられる。

## 謝辞

本研究において、新日鉄住金マテリアルズ(株)様、愛知製鋼(株)様および帝人(株)様より各種補強材をご提供頂き、実験を行うことが出来ました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、2007.7
- 2) 角掛久雄，小笠原哲也，大内一，鬼頭宏明：塩害劣化を受けた RC-DFRCC 合成部材の曲げ載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 32，pp.1387-1392，2010
- 3) 大内一，小笠原哲也，角掛久雄：DFRCC による U 字巻き立てのよるせん断補強，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，pp.251-270，2012
- 4) 野崎佑太，角掛久雄，久保英之，大内一：DFRCC によるせん断破壊型 RC 梁のウェブ補強効果に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol. 35，pp.1405-1410，2013
- 5) 小笠原哲也，猪木勇至，角掛久雄，大内一：高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC）による栈橋梁部への増厚曲げ補強効果に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol. 33，pp.1255-1260，2011
- 6) 畝宏樹，猪木勇至，角掛久雄，鬼頭宏明：短繊維モルタルの引張強度に対する板厚の影響，第 67 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，pp. 431-432，2012
- 7) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，2007