

# 論文 炭素繊維強化プラスチック 3 軸メッシュ筋による鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断補強効果

村上 聖<sup>\*1</sup>・山口 信<sup>\*2</sup>・武田 浩二<sup>\*3</sup>・久部 修弘<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、新たに開発され、まだ使用実績のない炭素繊維強化プラスチック(CFRP)3 軸メッシュ筋を用いた RC 梁の曲げおよびせん断補強効果について実験および解析的検討を行った。その結果として、CFRP メッシュ筋を曲げ引張側底面に接着補強を施した RC 梁およびメッシュ筋をせん断補強筋として埋設した連続繊維補強コンクリート梁の曲げ荷重試験結果より、無補強と比べて終局曲げ耐力およびせん断耐力の向上がみられた。また、CFRP メッシュ接着補強 RC 梁について、CFRP メッシュ筋の一軸引張試験結果に基づく曲げ解析を行い、実験結果との対応について解析的検討を行った。

**キーワード**：炭素繊維強化プラスチック, 3 軸メッシュ筋, RC 梁, 曲げ補強, せん断補強

## 1. はじめに

連続繊維シートおよびプレート接着工法による鉄筋コンクリート（以下、RC と略記する）部材の曲げあるいはせん断補強工法については、これまでにその補強効果が実証され、一般的な補強工法として実用化されている。

本研究では、新たに開発され、まだ使用実績のない炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP と略記する）3 軸メッシュ筋を用いた RC 梁の曲げおよびせん断補強効果について実験的検討を行うとともに、平面保持を仮定した断面解析により CFRP メッシュ筋接着補強 RC 梁の曲げ解析結果と実験結果との比較検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。コンクリートには、呼び強度 30、指定スランプ 18cm のレディーミクストコンクリート、主筋およびあばら筋には、曲げ試験シリーズではそれぞれ異形鉄筋 SD295A、D10 およびみがき棒鋼φ5 を、せん断試験シリーズではそれぞれ CFRP ロッド (D10 相当) およびみがき棒鋼φ5 (ただし、CFRP メッシュ筋を配置する中央せん断スパン領域を除く両側せん断スパン領域内に配筋) を用いた。また、CFRP メッシュ筋には、写真-1 に示すように 3 軸メッシュ形状でエポキシ樹脂含浸を施したもの (ハードタイプ) および未含浸のもの (ソフトタイプ) の 2 種類を用い、梁表面にエポキシ樹脂により接着貼付する場合にはソフトタイプ、せん断補強筋としてコンクリート中に埋設する場合はハードタイプをそれぞれ使用した。

### 2.2 梁試験体作製および荷重試験方法

図-1 および図-2 に、それぞれ曲げ試験およびせん断試験シリーズにおける試験体形状寸法、配筋および荷重形式を示す。曲げ試験シリーズでは、無補強 (記号 B-1) および曲げ引張側底面に CFRP メッシュ筋 (ソフトタイプ) を梁幅の 1 層で接着補強したもの (記号 B-2) の 2 水準で、スパン長さ 2000mm、荷重点間隔 500mm の単純曲げ荷重とした。なお、メッシュ筋は、写真-1 に示す上下方向が材軸方向になるように配置した。また、せん断試験シリーズでは、無補強 (記号 S-1)、上端・下端筋をまたぐように CFRP メッシュ筋 (ハードタイプ) を結束し、せん断補強筋としてコンクリート中に埋設したもの (記号 S-2)、および中央せん断スパン内の梁両側面に CFRP メッシュ筋 (ソフトタイプ) を各 1 層で接着補強したもの (記号 S-3) の 3 水準で、せん断スパン長さ 700mm の逆対称曲げ荷重とした。なお、メッシュ筋は、写真-1 に示す上下方向が材軸と垂直方向 (あばら筋方向) になるように配置した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 素材試験結果

表-2 および表-3 に、それぞれコンクリートおよび鉄筋の素材試験結果を示す。なお、コンクリートの圧縮強度および引張強度試験には、標準養生材齢 28 日および RC 梁試験体と同一養生の現場湿布養生材齢 28 日後気中養生についてφ100×200mm 円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、JIS に準拠して強度試験を行った。後述の曲げ解析では、コンクリートおよび鉄筋の素材試験結果を用いた。

\*1 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

\*2 熊本大学大学院 自然科学研究科助教 工博 (正会員)

\*3 熊本大学大学院 自然科学研究科准教授 工博 (正会員)

\*4 三菱樹脂 (株) 環境・住宅資材事業部 工博 (正会員)

表-1 使用材料

コンクリート	レディーミクストコンクリート(30-18-20-N) 実測スランプ 18.8cm, 実測空気量 4.3%
主筋	(1)曲げ試験シリーズ SD295A, D10 (2)せん断試験シリーズ CFRP ロッド(D10 相当) 溝深さ 0.25mm, 溝間隔 10mm 公称断面積 73.3mm <sup>2</sup> 引張強度 2450N/mm <sup>2</sup> 引張弾性率 147kN/mm <sup>2</sup>
あばら筋	みがき棒鋼, φ5 *せん断試験シリーズでは, 中央せん断スパンを除く両側せん断スパン区間に配筋
CFRP メッシュ筋	目付量 430g/m <sup>2</sup> 一定 (1)ハードタイプ: 樹脂含浸 (2)ソフトタイプ: 樹脂未含浸 (3)ストランド単独の物性値 公称断面積 0.435mm <sup>2</sup> 引張強度 4900N/mm <sup>2</sup> 引張弾性率 230kN/mm <sup>2</sup>
接着剤等	エポキシ系プライマー, 含浸接着剤

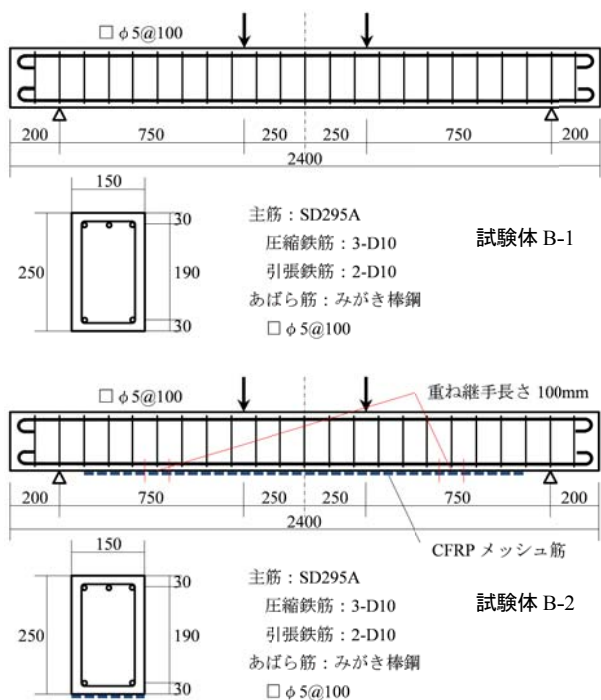


図-1 曲げ試験シリーズにおける試験体形状寸法, 配筋および荷形式



写真-1 CFRP メッシュ筋

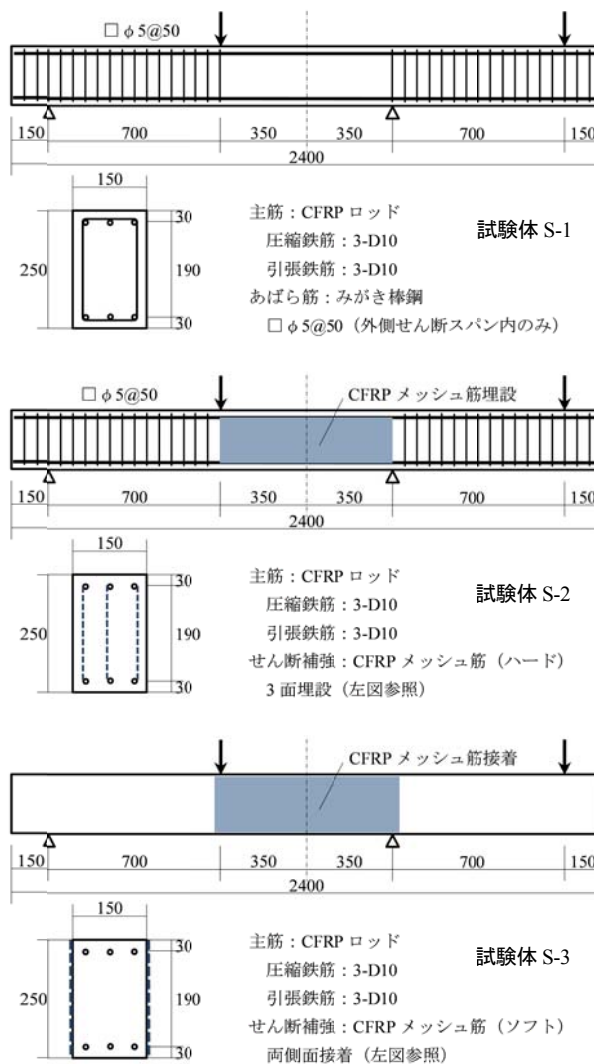


図-2 せん断試験シリーズにおける試験体形状寸法, 配筋および荷形式

表-2 コンクリートの素材試験結果(両シリーズ)

標準養生材齢 28 日			
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度時 ひずみ	引張強度 (kN/mm <sup>2</sup> )
37.2	—	—	2.18
現場湿布養生材齢 28 日後気中養生			
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度時 ひずみ	引張強度 (kN/mm <sup>2</sup> )
42.0	31.5	2.28 × 10 <sup>-3</sup>	2.39

表-3 鉄筋の素材試験結果(曲げ試験シリーズ)

鉄筋	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
主筋(SD295A,D10)	385	546	24.4
あばら筋(φ5)	604	677	10.3

\*試験片は, 各 5 体ずつ作製

\*あばら筋の降伏強度は, 0.2%耐力

### 3.2 曲げ試験シリーズ

#### (1) ひび割れおよび終局的破壊性状

無補強の試験体 B-1 については、純曲げ区間での曲げひび割れの分散的発生から引張鉄筋降伏後に圧縮側コンクリートの圧壊に至る典型的な曲げ圧縮破壊を生じた。また、試験体 B-2 については、引張鉄筋降伏後に荷重点近傍の引張側かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れと曲げひび割れのために下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロックの押し出しによるピーリング作用によってメッシュ筋の付着剥離が生じ、メカニズムとしては連続繊維シートと同様の付着破壊性状を示した。

#### (2) 曲げ耐力および変形性状

図-3 に荷重-スパン中央変位曲線、図-4 に曲げモーメント-曲率関係、および図-5 に試験体 B-2 におけるメッシュ筋ひずみ分布の測定値を示す。降伏および終局曲げモーメントについて、無補強試験体との比較で CFRP メッシュ補強により約 2~3 割の増加が認められた。また、終局破壊時点でのメッシュ筋ひずみの測定値は 15000 $\mu$  以下であり、ストランドの物性値から求められる破断ひずみが約 21000 $\mu$  なので、メッシュ筋が破断する前にメッシュ筋の付着剥離が生じていることが分かる。なお、実験結果と解析結果との比較については後述する。

### 3.3 せん断試験シリーズ

#### (1) ひび割れおよび終局的破壊性状

写真-2 に各試験体のひび割れおよび終局的破壊性状を

示す。すべての試験体について、中央せん断スパン内での主筋による付着割裂破壊を伴うせん断破壊が生じた。試験体 S-2 では、側面のかぶりコンクリートが局部的に剥落し、埋設メッシュ筋が露出しており、主筋とメッシュ筋との結束線が破断している様相が観察された。また、試験体 S-3 では、樹脂含浸されたメッシュ筋の剥離が生じているが、含浸樹脂量がシートの場合よりも多くなるために、メッシュプレートに斜めせん断ひび割れ方向に圧縮皺が生じ、プレート端部より剥離している様相が観察される。

#### (2) せん断耐力および変形性状

図-6 に各試験体のせん断力-荷重点変位曲線の測定値を示す。終局せん断耐力については、CFRP メッシュ筋(ハードタイプ)を上端・下端筋をまたぐように3面で埋設した試験体 S-2 の場合は、無補強の場合と比べて約 2 割程度の増加が認められ、埋設メッシュ筋のせん断補強効果が確認された。一方、CFRP メッシュ筋(ソフトタイプ)を梁両側面に接着貼付した試験体 S-3 の場合には、無補強の場

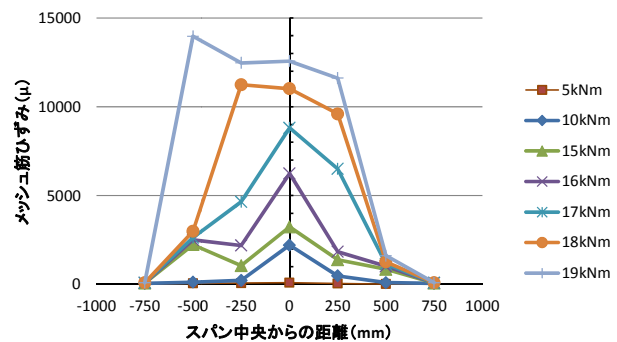


図-5 試験体 B-2 におけるメッシュ筋ひずみ分布

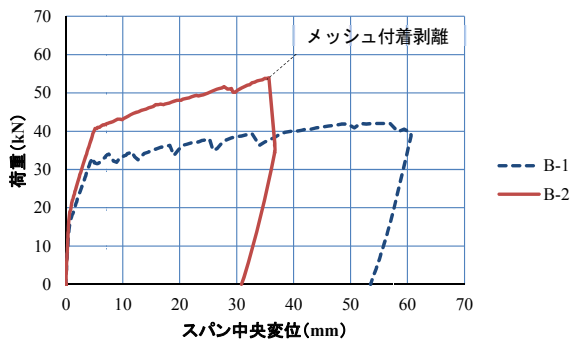


図-3 荷重-スパン中央変位曲線の測定値

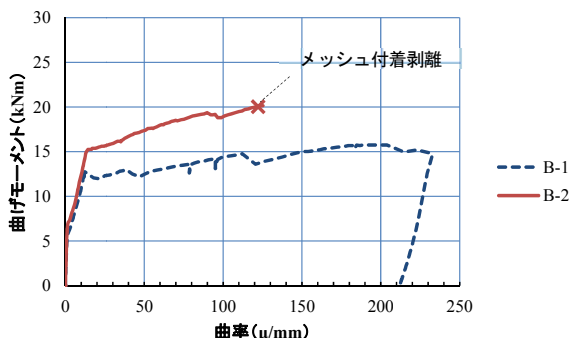


図-4 曲げモーメント-曲率関係の測定値

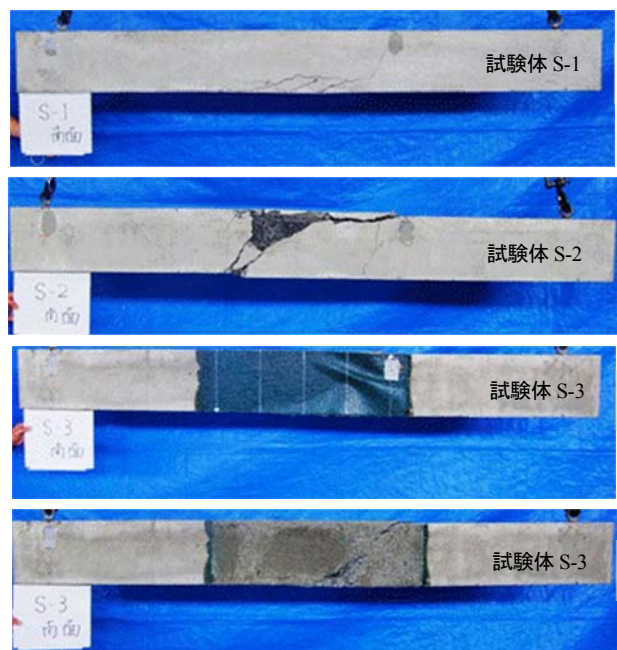


写真-2 各試験体のひび割れおよび終局的破壊性状

合と比べて約 1 割程度の終局せん断耐力の低下がみられ、せん断補強に関して逆効果の結果となった。CFRP シートの場合には、一般に梁両側面に接着貼付するだけでもせん断補強効果がみられるが、CFRP メッシュ筋の場合は網目の隙間まで樹脂が充填されるため含浸樹脂量がシートの場合と比べてかなり多くなり、その結果剛直したメッシュプレートにせん断ひび割れ方向の圧縮主応力による圧縮皺が早期に発生し、メッシュプレートの付着剥離が生じやすくなったためではないかと考えられる。今後は、この要因についてさらに実験的検討を行う必要がある。

#### 4. 解析結果および考察

ここでは、曲げ試験シリーズにおける CFRP メッシュ筋接着補強 RC 梁について、平面保持を仮定した断面解析による計算結果と実験結果との比較検討を行う。なお、メッシュ筋については、素材特性としてストランドの物性値は表一に示すように与えられているが、このストランドを写真一に示すように 3 軸にメッシュ加工した全体についての一軸引張特性は得られていないので、まず CFRP メッシュ筋全体の一軸引張試験を行い、その引張構成則を定量化した。

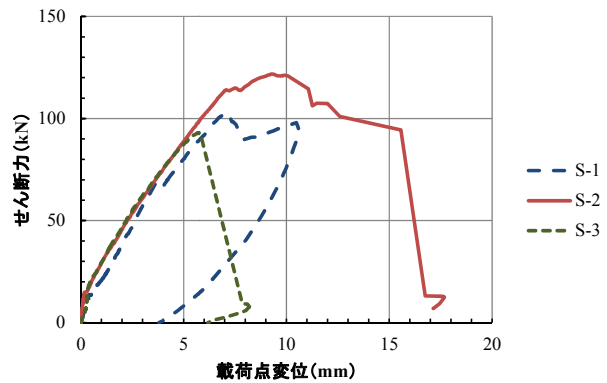
##### 4.1 CFRP メッシュ筋の一軸引張特性

###### (1) 試験方法

写真一に示すように、エポキシ樹脂を用いて CFRP メッシュ筋を RC 梁に接着補強すると同様の実施工により、樹脂の離型用にクラフトテープを全面に貼付した構造用合板上で CFRP メッシュ積層板を作製した。なお、CFRP メッシュ積層板の幅は 50mm とした。また、CFRP メッシュ積層板両端の表裏面に荷重試験機のチャック歯に積層板をかませるために厚さが 2mm のアルミ板をエポキシ樹脂により接着し、長さ 10mm のひずみゲージを試験片中央の片側平滑面に貼付した。写真二に CFRP メッシュ積層板の一軸引張試験状況と試験後の破断片の一例を示す。破断の特徴として材軸方向のストランドが順次破断しながら斜め方向のストランドがほつれていく様相が観察される。

###### (2) 試験結果および考察

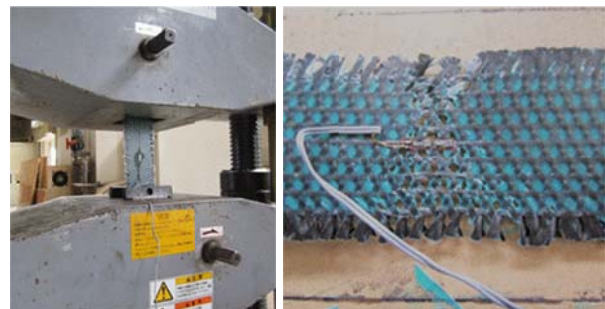
図一に 6 体の試験片の荷重-引張ひずみ曲線の測定値を示す。なお、図中には、1 本当たりのストランドの物性値（公称断面積  $0.435\text{mm}^2$ 、引張強度  $4900\text{N/mm}^2$ 、引張弾性率  $230\text{kN/mm}^2$ ）に基づいて、材軸方向のストランドのみを考慮して計算された結果を併記している。なお、材軸方向のストランド本数は、試験片幅 50mm、ストランド間隔 6mm なので、50/6 本とみなした。その結果として、すべての試験片の終局的破壊が材軸方向のストランドの破断により生じた。また、ストランドの破断ひずみの公称値  $21300\mu$  付近でほぼ完全弾塑性に近い疑似降伏域を生じ、



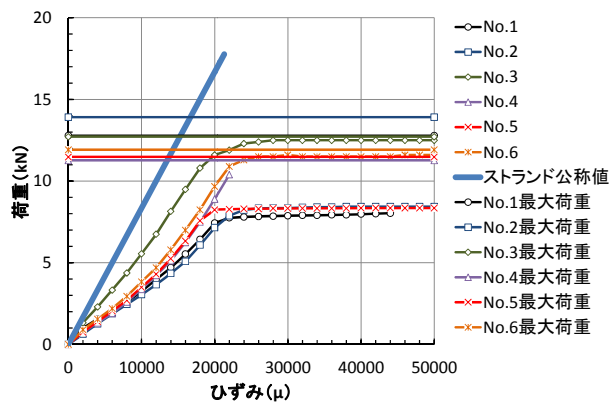
図一 各試験体のせん断力-荷重点変位曲線の測定値



写真一 CFRP 積層板の作製



写真二 一軸引張試験状況および破断片の一例



図二 各試験片の荷重-引張ひずみ曲線の測定値

ひずみゲージで計測不可能なひずみ範囲でひずみ硬化を経て最大荷重に達する様相が実験的に確認された。また、材軸方向のストランドのみを考慮し、公称値に基づいて計

算された荷重-引張ひずみ関係に対して、試験片全体のヤング係数や引張強度の測定値は、計算値よりも一様に小さくなっている。

### (3) CFRP メッシュ筋の一軸引張構成則

上記の引張試験結果に基づいて、CFRP メッシュ筋の一軸引張構成則を完全弾塑性とみなし、メッシュ筋降伏ひずみをストランドの破断ひずみの公称値 (21300 $\mu$ ) とした。また、引張降伏荷重は、図-7 に示す各試験片の降伏ひずみ時点での荷重の測定値の平均値とし、6 体の試験片の引張降伏荷重の平均値が 10kN (材軸方向ストランド本数 50/6 当たり) なので、RC 梁に接着貼付した CFRP メッシュ筋 (梁幅 150mm) の引張降伏荷重は、 $10 \times (150/6) / (50/6) = 30\text{kN}$  とした。従って、RC 梁接着補強 CFRP メッシュ筋の一軸引張構成則 (引張力-引張ひずみ関係) を式(1)に示すように仮定した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fy} &\Rightarrow T_f = K_f \varepsilon_f \\ \varepsilon_f \geq \varepsilon_{fy} &\Rightarrow T_f = T_{fy} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $T_f$ : 引張力 (kN)

$\varepsilon_f$ : 引張ひずみ

$T_{fy}$ : 引張降伏荷重 (=30kN)

$\varepsilon_{fy}$ : 降伏ひずみ (=2.13 $\times 10^{-2}$ )

$K_f$ : 軸方向剛性 (=1410kN)

## 4.2 CFRP メッシュ筋接着補強 RC 梁の曲げ解析結果

### (1) 解析の仮定

表-4 に平面保持を仮定した断面解析の諸定数を示す。

コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係には、高強度コンクリートの範囲まで実験結果との対応が良い Popovics 式を用いた。なお、圧縮強度、ヤング係数、圧縮強度時のひずみには測定値を用い、式中の実験定数  $n$  値は、式(2)により求めた<sup>1)</sup>。

$$\varepsilon_{co} = \frac{F_c}{E \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{co}$ : 圧縮強度時のひずみ

$F_c$ : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$E$ : ヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

また、コンクリートの引張強度は、これを無視した場合とコンクリートの引張軟化曲線を考慮した場合について計算した。本実験の RC 梁は、CFRP メッシュ筋による曲げ補強効果を際立たせるために、圧縮鉄筋は 3-D10 に対して

表-4 平面保持を仮定した断面解析の諸定数

RC 梁断面	梁幅: $b=150(\text{mm})$ 梁せい: $D=250(\text{mm})$ 圧縮縁・圧縮鉄筋間距離: $d_c=30(\text{mm})$ 有効せい: $d=220(\text{mm})$
コンクリート	圧縮強度: $F_c=42.0(\text{N/mm}^2)$ ヤング係数: $E=3.15 \times 10^4(\text{N/mm}^2)$ 圧縮強度時ひずみ: $\varepsilon_{co}=2.28 \times 10^{-3}$ Popovics 式における実験定数: $n=2.42$ 圧縮応力-ひずみ関係: Popovics 式
主筋	圧縮鉄筋断面積: $a_c=213(\text{mm}^2)$ 引張鉄筋断面積: $a_f=142(\text{mm}^2)$ 降伏強度: $\sigma_y=385(\text{N/mm}^2)$ ヤング係数: $E=2.05 \times 10^5(\text{N/mm}^2)$ 応力-ひずみ関係: 完全弾塑性
あばら筋	□ $\phi 5@100\text{mm}$ 一組のあばら筋断面積: $a_w=39.3(\text{mm}^2)$ あばら筋間隔: $x=100(\text{mm})$ あばら筋比: $p_w=2.62 \times 10^{-3}$ 降伏強度: $\sigma_{wy}=604(\text{N/mm}^2)$
CFRP メッシュ筋	引張力-引張ひずみ関係: 完全弾塑性 [式(1)]

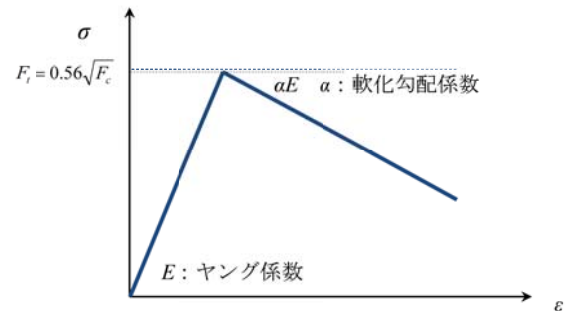


図-8 コンクリートの引張軟化曲線の仮定

引張鉄筋は 2-D10 と引張鉄筋量が少ない配筋としている。引張鉄筋量が少なくなると、曲げ引張側のコンクリートの引張抵抗によって、引張鉄筋降伏荷重がコンクリートの引張強度を無視した場合よりも増大することが知られている。そこで、本解析では、図-8 に示すように、コンクリートの引張応力-ひずみ関係を簡単のために引張強度時まで線形弾性、それ以降は直線軟化を仮定して、コンクリートの引張軟化曲線を解析に導入した。なお、コンクリートの引張ヤング係数は圧縮強度試験で測定した圧縮ヤング係数と同一とし、コンクリートの引張強度には、式(3)に示す RC 構造計算規準・同解説中の RC 部材における曲げ引張強度を用いた。

$$F_t = 0.56\sqrt{F_c} \quad (3)$$

ここに、 $F_t$ : コンクリート引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_c$ : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

また、引張強度時以降の軟化直線の勾配を  $\alpha E$  として、軟化勾配係数  $\alpha$  の値を適当に調整することによって実験結果との対応を調べた。

鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性とし、降伏強度には測定値を用い、ヤング係数は RC 構造計算規準に準拠し、 $2.05 \times 10^5$  (N/mm<sup>2</sup>) とした。また、CFRP メッシュ筋の引張力-引張ひずみ関係は、前述のように完全弾塑性とし、式(1)に示す引張構成則を仮定した。

## (2) 解析結果および考察

図-9 に曲げ試験シリーズの試験体 B-1 および B-2 に関する曲げモーメント-曲率関係の本解析結果と実験結果との比較を示す。なお、曲率は、スパン中央断面の圧縮および引張鉄筋直上に取り付けたパイ型変位計（標点距離 300mm）によるひずみの測定値から平面保持を仮定して求めた。また、同図中にはコンクリートの引張強度を無視した場合の解析結果も併記している。

無補強試験体 B-1 については、軟化勾配係数を  $\alpha=0.05$  とした場合に、また CFRP メッシュ筋接着補強試験体 B-2 については、軟化勾配係数を  $\alpha=0.01$  とした場合に実験結果と良い対応が得られている。ただし、両者で軟化勾配係数  $\alpha$  の取り方が違うことに対して明確な理由を提示するまでには至らないが、次のようなことが考えられる。すなわち、ここでいうコンクリートの引張軟化曲線は、単に無筋コンクリートのものではなく、コンクリートにひび割れが発生しても鉄筋とコンクリートの付着作用によりひび割れ間でコンクリートがある程度引張応力を分担し（テンションスティフニング効果）、この分担分も含んだ引張剛性曲線とみなされるものである。従って、鉄筋量や配筋に加え、メッシュ筋有無による付着特性などが引張剛性曲線に影響するものと考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、新たに開発され、まだ使用実績のない CFRP 3 軸メッシュ筋を用いた RC 梁の曲げおよびせん断補強効果について実験および解析的検討を行い、次のような結論が得られた。

- 1) CFRP メッシュ筋を曲げ引張側底面に接着補強を施した RC 梁の曲げ載荷試験結果より、最終的な破壊性状は、シートと同様のメッシュ筋の付着剥離であり、無補強と比べて曲げ耐力の向上が確認された。
- 2) CFRP メッシュ筋をせん断補強筋として埋設した連続繊維補強コンクリート梁の曲げ載荷試験結果より、最終的な破壊性状は、主筋の付着割裂破壊を伴うせん断破壊であり、無補強と比べて終局せん断耐力の向上が確認された。ただし、せん断試験シリーズにおける各試験体の終局せん断強度の評価については、今後の重要な課題である。

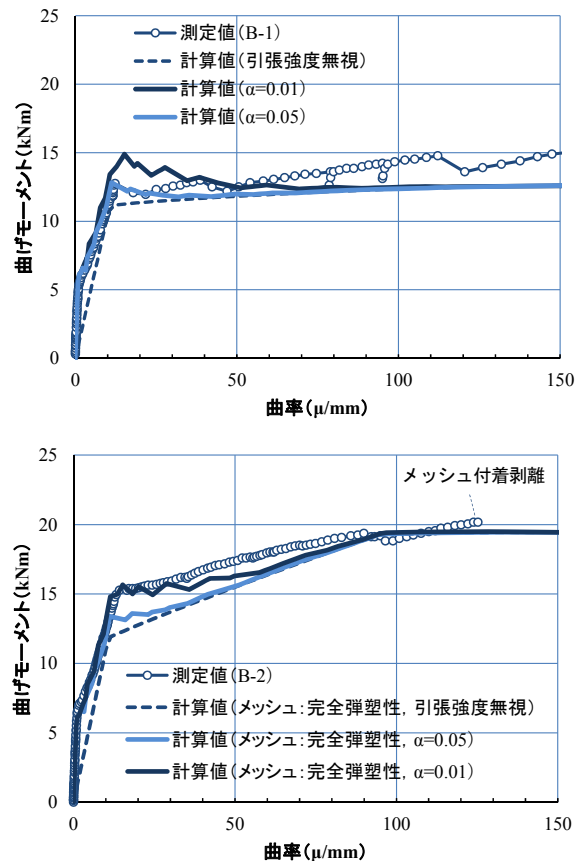


図-9 曲げモーメント-曲率関係の測定値と計算値

- 3) CFRP メッシュ筋接着補強 RC 梁の破壊に至るまでの曲げ性状について、CFRP メッシュ筋の一軸引張構成則を実験的に求め、その構成則を導入した断面解析による解析結果と実験結果との比較検討を行った。その結果として、CFRP メッシュ筋の引張構成則やコンクリートの引張軟化曲線を適切に解析に導入することによって、本解析結果と実験結果との間に良い対応が得られた。ただし、実験結果では終局的破壊がメッシュ筋の付着剥離で決まったが、付着解析については今後の検討課題としたい。

最後に、シートとの比較で3軸メッシュ筋のメリットは、網目の隙間を利用したアンカー定着の容易性や、シートと異なり、本実験の3軸メッシュ筋が疑似降伏性状を有することにより、メッシュ筋の付着確保や定着などにより部材の靱性確保が容易になることなどがあげられる。

## 謝辞

本実験にあたっては、熊本大学工学部技術職員の戸田善統氏、池崎智美氏、同大学大学院生のセイン・ソクンティ、目野主税、中尾嘉克、井形友彦、本山翔也、同大学工学部建築学科卒研究生諸氏の協力をいただきました。また、三菱樹脂㈱からは資材および技術支援の提供をいただきました。ここに記して謝意を表す。