

# 論文 CFRP メッシュ筋の一軸引張特性とそれで曲げ補強した鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊挙動

佐藤 あゆみ<sup>\*1</sup>・村上 聖<sup>\*2</sup>・武田 浩二<sup>\*3</sup>・山口 信<sup>\*1</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 3 軸メッシュ筋(CFRP メッシュ筋)の一軸引張特性を実験から求めた。また CFRP メッシュ筋を用いて補強した RC 梁の曲げ破壊挙動について実験による検討を行った。その結果として、CFRP メッシュ筋によって曲げ補強された RC 梁試験体は、無補強と比べて終局曲げ耐力が向上することが実験的に確認できた。さらに、CFRP メッシュ筋の一軸引張特性を基に CFRP メッシュ筋の構成則を求め有限要素解析を行った結果、解析結果は実験結果と良い対応を示し、CFRP メッシュ筋による RC 梁の曲げ補強効果を確認できた。

**キーワード:** 炭素繊維強化プラスチック, CFRP メッシュ筋, RC 梁, 曲げ補強, 有限要素解析

## 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既に実用化されている。

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 3 軸メッシュ筋(以下、CFRP メッシュ筋)に着目し、その一軸引張特性の評価を行うとともに、CFRP メッシュ筋を用いて補強した鉄筋コンクリート梁(以下、RC 梁)の曲げ補強効果について実験的に検討した。さらに CFRP メッシュ筋の実験値を基にした構成則を用いた有限要素解析により、CFRP メッシュ筋を用いて補強した RC 梁の曲げ挙動を検討し、CFRP メッシュ筋をコンクリート部材の補強に用いる有効性と課題を明確にした。

ために試験片の両端の表裏面に、厚さ 2mm のアルミ板をエポキシ樹脂により接着した。また、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。

表-1 CFRP メッシュ筋の物性

目付量 (g/m <sup>2</sup> )	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
430	0.435	4900	230

\*ストランド (1軸単味) の物性値



写真-1 CFRP メッシュ筋の形状

## 2. CFRP メッシュ筋積層板の一軸引張特性

### 2.1 実験方法

本研究で使用した CFRP メッシュ筋は写真-1に示す形状のもので、60° ずつ角度の異なる 3 軸のストランドから成る。また CFRP メッシュ筋およびストランド一軸単味の物性は表-1に示す通りである。

CFRP メッシュ筋の一軸引張特性を調べるために、写真-2(a)に示すように構造用合板上でエポキシ樹脂接着剤を用い、CFRP メッシュ筋積層板(試験片)を作製した。なお、CFRP メッシュ筋は、材軸方向のストランドが 9 本(ストランド間隔が 6mm、積層板の幅は約 50mm)になるように裁断した。写真-2(b)に CFRP メッシュ筋積層板の一軸引張試験の様子を示す。一軸引張試験では万能試験機で行い、万能試験機のチャックに試験片を噛ませる

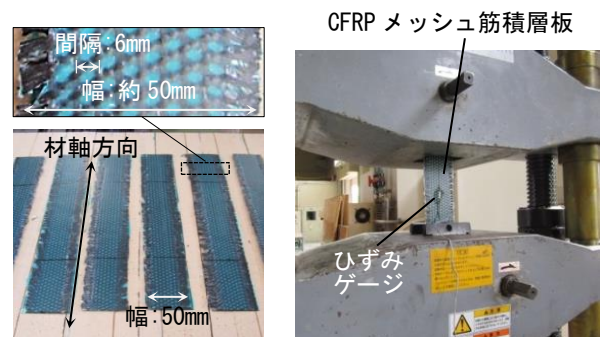


写真-2 CFRP メッシュ筋積層板の作製と一軸引張試験

\*1 熊本大学 自然科学研究科環境共生工学専攻 助教 工博 (正会員)

\*2 熊本大学 自然科学研究科環境共生工学専攻 教授 工博 (正会員)

\*3 熊本大学 自然科学研究科環境共生工学専攻 准教授 工博 (正会員)

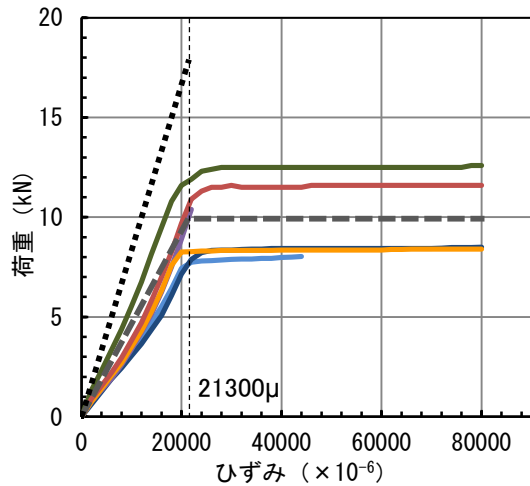


図-1 各試験片の荷重-引張ひずみ関係の測定値



写真-3 CFRP メッシュ筋積層板の破断例

表-2 使用材料

コンクリート	レディーミクストコンクリート 水セメント比：48.2% 単位水量：183kg/m <sup>3</sup> 、細骨材率：47.9% スランプ：18.8cm、空気量：4.3%
主筋	SD295A, D10
あばら筋	みがき棒鋼φ5

表-3 使用材料の物性

(a) コンクリート

養生方法	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> )
標準養生	37.2	—	2.18
現場湿布養生	42.0	31.5	2.39

(b) 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

## 2.2 一軸引張試験結果

図-1 に総数 6 体の試験片(No.1~6)の荷重-引張ひずみ関係の測定値を示す。ひずみはひずみゲージで測定した結果である。また図-1 には 6 体の試験結果の平均値から求めた荷重-引張ひずみ関係を示す。図-1 よりこれら試験片はほぼ完全弾塑性に近い疑似降伏域を生じたことが分かる。凡例には試験片の名前、疑似降伏した折点の荷重とゲージの測定範囲外で達した各試験片の最大荷重も併記した。なお、CFRP メッシュ筋積層板の破断はひずみゲージの測定可能な範囲を越えて生じたが、破断時の荷重は測定できた。図-1 の凡例に示した折点の荷重と最大荷重とを比較することで、CFRP メッシュ筋積層板のひずみ硬化挙動を確認できる。なお、CFRP メッシュ

筋積層板が完全弾塑性に近い挙動を示す理由の解明は今後の課題である。

写真-3 に、CFRP メッシュ筋積層板の一軸引張試験後の破断した状態を示す。荷重-引張ひずみ関係の疑似降伏した折点付近では、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た。

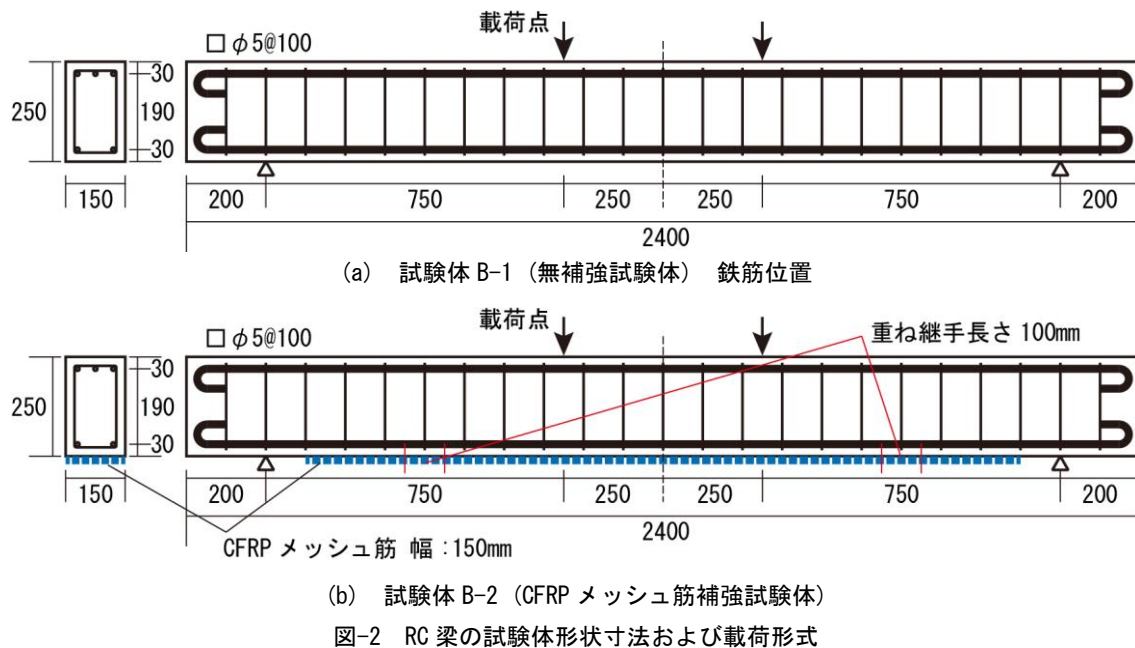
ここで図-1 中に、一軸当たりのストランドの公称値(表-1)に基づいて計算した CFRP メッシュ筋積層板(公称値)の荷重-引張ひずみ関係を示す。この CFRP メッシュ筋積層板(公称値)は、写真-1 に示す上下方向のストランドのみを考慮して計算した結果である。なお、本研究ではストランド本数を、CFRP メッシュ筋積層板の幅(50mm)/ストランド間隔(6mm)=8.33 本として計算に用いた。8.33 本のストランドから構成される幅 50mm の CFRP メッシュ筋積層板(公称値)は、図-1 に示すように荷重が 17.8kN、ひずみが 21300μ に達したとき破断すると計算された。

このとき、実験結果を見ると完全弾塑性に近い疑似降伏域が、CFRP メッシュ筋積層板(公称値)の破断ひずみである 21300μ 付近から生じることが分かる。また、実験結果の平均値の弾性係数は 128.5kN/mm<sup>2</sup> であり公称値の 230kN/mm<sup>2</sup> より小さい結果となった。

## 3. RC 梁の曲げ載荷試験

### 3.1 使用材料

表-2 に RC 梁に使用した材料を示す。コンクリートにはレディーミクストコンクリート(30-18-20-N)を使用した。主筋には異形鉄筋(SD295A, D10)、あばら筋にはみがき棒鋼φ5 を用いた。また CFRP メッシュ筋には、前掲の表-1 に示したものを使用した。表-3 に、コンクリートと鉄筋の素材試験の結果を示す。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  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  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。

### 3.2 RC 梁作製および曲げ荷試験

図-2 に、RC 梁の形状寸法、配筋および曲げ荷形式を示す。図-2(a) は無補強試験体の B-1 であり、図-2(b) は曲げ引張側に CFRP メッシュ筋を 1 層で接着補強した補強試験体の B-2 である。なお、CFRP メッシュ筋は、写真-1 に示す上下方向が部材軸方向になるように貼付した。CFRP メッシュ筋の接着は、RC 梁の表面を研磨した後、研磨面にプライマーと下塗りエポキシ樹脂を塗布した後に、CFRP メッシュ筋を敷設、最後に上塗りエポキシ樹脂を塗布する手順で行った。重ね継手長の位置は最大モーメントの約 1/2 となる位置とした。

荷試験では、スパン長さ 2000mm、荷点間隔 500mm の単純曲げ荷とした。荷試験時の測定は、荷重、スパン中央変位(容量 100mm の変位計使用)、CFRP メッシュ筋ひずみ(スパン中央位置から @250mm でゲージ長 10mm のひずみゲージ貼付)とした。

## 4. 有限要素解析

### 4.1 解析モデルの概要

#### (1) 要素の分割と種類

図-3 に解析モデルの要素分割図を示す。解析モデルは 2 次元モデルであり、RC 梁のスパン方向に 2 等分した 1/2 モデルとした。コンクリートは 8 節点の平面応力要素で統一し、要素間隔 25mm でモデル化した。主筋およびあばら筋は、鉄筋要素と周囲のコンクリート要素との完全付着を仮定している埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化した。また、CFRP メッシュ筋には 1 次元の梁要素

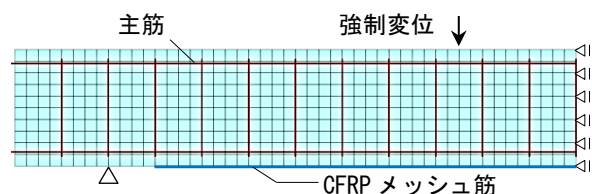


図-3 解析モデルの要素分割図

を適用した。なお、連続繊維シートにより補強した RC 梁の有限要素解析に関する既往の研究では、シートとコンクリートとの間に界面要素を設けることが多いが、本稿の範囲では CFRP メッシュ筋とコンクリートは完全に付着したモデルを用いた。今後、CFRP メッシュ筋の剥離を解析するために、界面要素と離散ひび割れモデルも用いた解析を行う予定である。

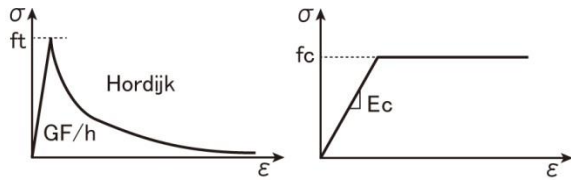
#### (2) 境界条件と荷手法

境界条件は、1/2 モデルであることを考慮して、対称切断面に対してはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部の節点は鉛直方向および法線方向変位成分を拘束した。荷は、図-3 に示す矢印の位置に最終的に 50mm の強制変位を与える手法とした。

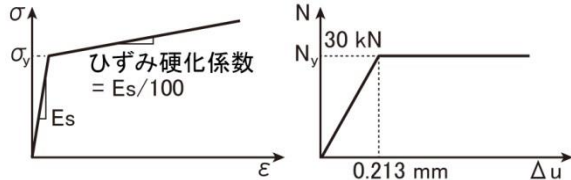
#### (3) 解析条件

有限要素解析の計算には汎用非線形構造解析ソフト DIANA を利用した。ひび割れ軟化特性として要素の応力-ひずみ関係を用いる分散ひび割れモデルに、ひび割れ面の剪断の影響を加味しなくても良い回転ひび割れモデル、ひび割れ面の剪断の影響を考慮する必要のある固定ひび割れモデルの 2 種類を適用して解析を行った。なお、固定ひび割れモデルではひび割れ面の剪断の影響を考慮するために、ひび割れ直交方向のひずみに従ってせん断剛性係数を低減させるせん断保有係数(shear retention





(a) コンクリート(左：引張側，右：圧縮側)



(b) 鉄筋

(c) CFRP メッシュ筋

図-4 材料構成則

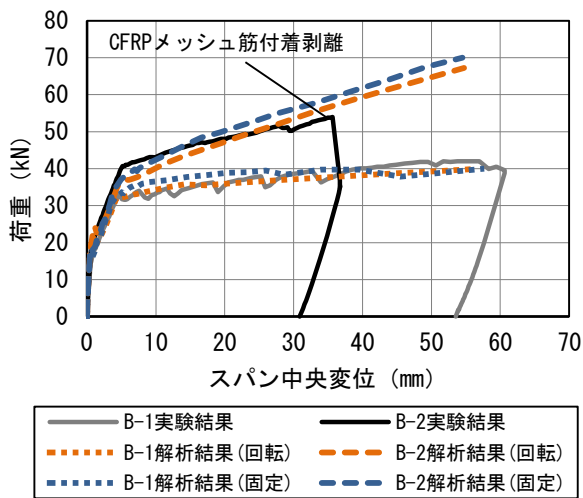


図-5 荷重ースパン中央変位関係

factor)を 0.01 として計算した。解析ステップは変位増分とし、収束計算はエネルギーをノルムとしたニュートン・ラフソン法を用いた。

#### 4.2 材料構成則

##### (1) コンクリートおよび鉄筋の構成則

図-4(a)はコンクリートの要素に適用した構成則であり、引張側には表-3(a)の引張強度( $f_t$ )と Hordijk ら<sup>1)</sup>により定式化された軟化モデルを適用しており、図中で  $h$  は要素の等価長さ、 $GF$  はコンクリートの引張破壊エネルギーを意味する。 $GF$  は CEB-FIP Model Code<sup>2)</sup>に基づいて、次式から計算した。

$$GF = \alpha_F(f_c / f_{c0})^{0.7} \quad (1)$$

ここで、 $f_{c0} = 10 \text{ N/mm}^2$ 、 $\alpha_F$ は粗骨材径に対応して決定される定数である。本研究の実験で使用した粗骨材径は 20mm であり、 $GF = 0.0956 \text{ N/mm}$  と仮定した。また、圧縮側の構成則に関しては、表-3(a)の圧縮強度( $f_c$ )を用い、 $f_c$ に達するまでは線形弾性、 $f_c$ に到達した後は応力が一

定値となるモデルとした。

図-4(b)に主筋およびあばら筋に用いた構成則を示す。図中で  $E_s$  は鉄筋の弾性係数であり、塑性領域のひずみ硬化係数は  $E_s/100$  と設定し、鉄筋の降伏は von Mises の降伏条件に従うものとした。降伏強度  $\sigma_y$  には表-3(b)の値を適用した。

##### (2) CFRP メッシュ筋の構成則

CFRP メッシュ筋の一軸引張構成則は、2章の CFRP メッシュ筋積層板の一軸引張試験結果に基づいて仮定し、完全弾塑性を示す軸方向力ー軸方向伸び関係を採用した。引張降伏荷重は、図-1 より各試験片(試験片幅 50mm)の降伏荷重の平均値が約 10kN であることから、RC 梁に接着貼付した CFRP メッシュ筋(梁幅 150mm)の降伏荷重は試験片の 3 倍である 30kN と仮定した。さらに図-1 の実験結果では、CFRP メッシュ筋の降伏点(折点)のひずみがストランドの破断ひずみの公称値に近いことから、CFRP メッシュ筋の降伏伸びはストランドの公称値のひずみをもとに計算した。すなわち、表-1 よりストランドの公称値の破断ひずみは  $21300\mu(0.0213)$  と計算されるため、2章のようにひずみゲージ長が 10mm の場合、CFRP メッシュ筋の降伏伸びは 0.213mm と計算される。以上より CFRP メッシュ筋には、図-4(c)に示すように軸方向力 30kN、軸方向伸び 0.213mm に達した時に降伏し、その後、軸方向力を維持する完全弾塑性モデルと仮定した。

#### 5. CFRP メッシュ筋を用いた RC 梁の曲げ補強に関する考察

##### 5.1 実験結果と解析結果との比較

##### (1) 荷重ースパン中央変位関係

図-5 に、各 RC 梁試験体の荷重ースパン中央変位関係について実験結果と解析結果を示す。実験結果より、無補強試験体 B-1 に比べて補強試験体 B-2 は、CFRP メッシュ筋の効果により降伏および終局耐力ともに向上することが確認された。図-5 の回転ひび割れモデルによる B-1 の解析結果は、実験結果を精度良く再現した。B-2 の解析結果は、鉄筋降伏時の荷重が 10%ほど低いが、その後の荷重増加はほぼ適切に評価した。固定ひび割れモデルによる解析結果では、B-1 の場合は鉄筋降伏時の荷重が実験結果よりも僅かに高いものの、実験結果を再現できた。B-2 は、鉄筋降伏時の荷重が実験値に近い結果となったが、CFRP メッシュ筋の剥離時点では実験結果より高い結果となった。いずれのモデルにせよ、最大荷重時まで CFRP メッシュ筋の付着剥離を再現できなかったことから、CFRP メッシュ筋剥離のモデル化を考慮する必要がある。

##### (2) CFRP メッシュ筋のひずみ分布

図-6 に補強試験体 B-2 における CFRP メッシュ筋のひ

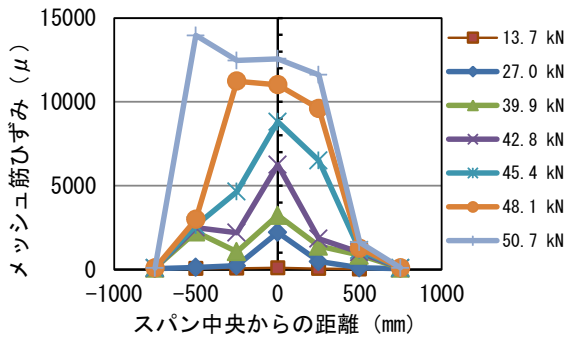
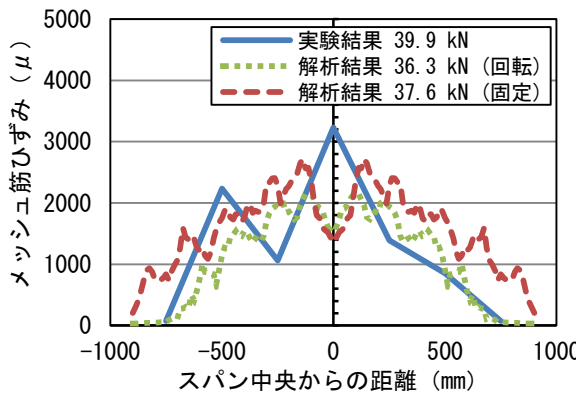
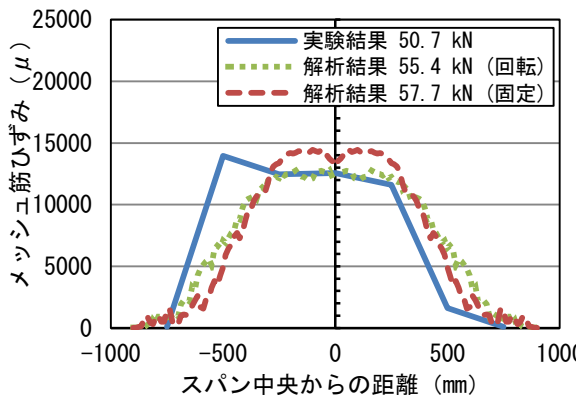


図-6 実験から得られた CFRP メッシュ筋の軸方向ひずみ分布 (B-2 試験体)



(a) 鉄筋降伏時



(b) 実験の CFRP メッシュ筋剥離変位時

図-7 CFRP メッシュ筋の軸方向ひずみ分布の実験値と解析値との比較 (B-2 試験体)

ずみ分布の測定値を示す。終局破壊時の CFRP メッシュ筋のひずみ測定値は 15000 $\mu$  以下であり、ストランドの公称値から求められる破断ひずみ(約 21300 $\mu$ )より小さいことから、CFRP メッシュ筋が破断する前に CFRP メッシュ筋の付着剥離が生じたことが分かる。

図-7(a)に鉄筋降伏時の CFRP メッシュ筋の軸方向ひずみ分布における、実験結果と解析結果との比較を示す。図よりスパン中央部を除いて、解析結果は、実験結果の CFRP メッシュ筋のひずみをほぼ適切に評価しているこ

とが分かる。また図-7(b)の実験において CFRP メッシュ筋が剥離した変位におけるひずみ分布を示す。この図より、荷重点間の等曲げ区間および等曲げ区間外において、解析結果は実験結果の CFRP メッシュ筋のひずみ分布を再現していることが分かる。特に、回転ひび割れモデルを用いた場合、スパン中央部のひずみはほぼ同等であった。以上のひずみ分布の結果より、本研究で用いた解析手法は、CFRP メッシュ筋の剥離時までを適切に再現しているものと判断できる。

### (3) 試験体のひび割れ状態

図-8 に曲げ荷重試験によって生じた RC 梁のひび割れ図を示す。無補強試験体 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。また補強試験体 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 CFRP 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性状を示した。

図-9 は RC 梁のひび割れ図を示しており、0.01mm 以上のひび割れを黒色で、それ以下のものを灰色で表している。図-9(a), (b)の B-1 の解析結果では、曲げひび割れが分散的に発生しており、図-9(c), (d)の B-2 の解析結果では、コンクリートに発生した 0.01mm 以下の斜めひび割れが多数見られる。このように、解析結果は下縁かぶり部に形成されるひび割れを適切に再現した。また解析結果にある多数のひび割れは、肉眼では確認できない微細なひび割れを表していると考えられる。

### 5.2 CFRP メッシュ筋による曲げ補強の有効性

前節の実験結果と解析結果との比較より、本研究の解析手法の妥当性が確認された。これは 2 章の CFRP メッシュ筋の一軸引張特性を基に仮定した CFRP メッシュ筋の構成則が、実験に合致しているためだと判断される。

写真-1 に見るように、主軸に 60° で交わってくる斜め方向ストランドは 2 本あり、3 本それぞれが引張に抵抗すると仮定すれば、主軸方向は 1.0、さらに斜め方向ストランドは一軸あたり 0.866 本( $\cos 60^\circ$ )となり、3 本の合計は 2.73 本分と計算される。2 章の試験片は 50mm であり、中に 9 本の主軸方向筋があることから、 $9 \times 2.73 = 24.6$  本と計算される。しかし、2.2 節で計算したように  $50\text{mm} / 6\text{mm} = 8.33$  本として計算して求めた公称値の弾性係数や破断荷重より、実験結果は一様に低かった。これは、主軸方向のストランドが織られたことにより湾曲して強度や剛性が低下したこと、さらに斜め方向ストランドが梁軸方向に連続ではないため、斜め方向ストランドが主

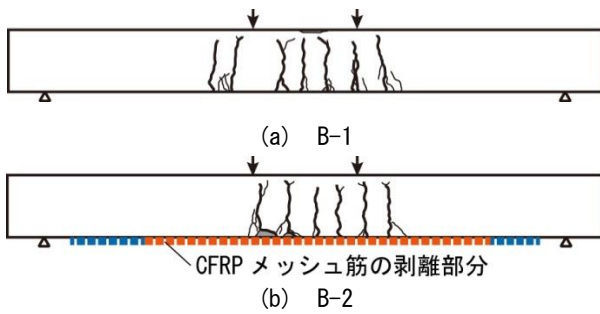


図-8 試験後のひび割れ状態

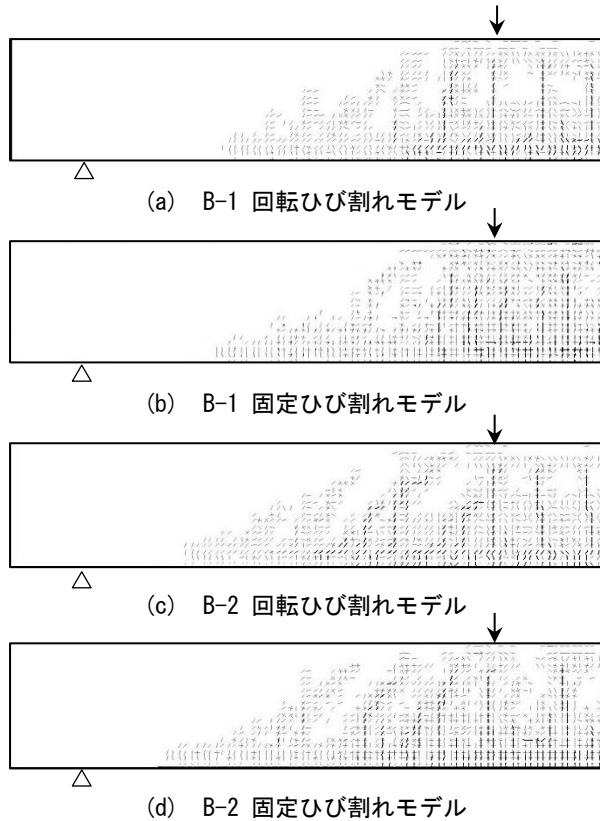


図-9 解析結果のひび割れ図

軸ストランドの破断まで引張抵抗に寄与しなかったことなどが推測されるが、理論的な説明は今後の課題である。

一方で、図-1のCFRPメッシュ筋の引張挙動から、斜め方向ストランドが極めて有効に主軸方向筋を補助して、擬似降伏挙動およびひずみ硬化挙動を示すことが、3軸のCFRPメッシュ筋の特徴であると考えられる。炭素繊維は一般に脆性的な破壊を示すため、このように擬似降伏挙動およびひずみ硬化挙動を示す特性は安全性向上に貢献する可能性がある。さらに、炭素繊維の弾性率は800kN/mm<sup>2</sup>を越えるものもあり、これを用いて擬似降伏挙動が出せれば極めて有効な補強材となると考えられる。つまり、800kN/mm<sup>2</sup>の炭素繊維の公称破断ひずみは3750 $\mu$ 程度<sup>3)</sup>で、鉄筋の降伏(1800 $\mu$ 程度)後ではあるが、かぶりが崩落して耐力を失う(13000 $\mu$ 程度)前の時期であるため、本研究で用いた3軸メッシュのような擬似降伏

挙動を表すことにより、コンクリート部材の耐力を安全に高めることが可能になる。その他にもCFRPメッシュ筋を用いたRC部材補強のメリットは、3軸メッシュ筋の編目の隙間を利用したアンカー定着の容易性などが想定される。

以上のように、CFRP3軸メッシュ筋が擬似降伏挙動を有することにより、メッシュ筋の付着や定着が十分に確保できた場合にRC部材の靱性確保が容易になることなどが期待できる。

## 6. まとめ

本研究では、新たに開発され、まだ使用実績のないCFRP3軸メッシュ筋を用いたRC梁の曲げ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メッシュ筋の一軸引張試験を行った結果、荷重-引張ひずみ関係は擬似降伏挙動およびひずみ硬化挙動を示した。さらに実験結果よりCFRPメッシュ筋の一軸引張構成則を完全弾塑性としてモデル化した。
- 2) 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CFRP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。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、付着解析について今後の検討課題である。
- 3) CFRPメッシュ筋で補強したRC梁の破壊に至るまでの曲げ挙動を対象に、CFRPメッシュ筋の一軸引張構成則を導入した有限要素解析を行った。解析結果と実験結果との比較検討を行った結果、CFRPメッシュ筋の引張構成則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一致が得られることを確認した。

## 謝辞

本実験にあたっては、熊本大学工学部の戸田善統技術専門職員、池崎智美技術職員、同大学建築材料・施工研究室の協力をいただいた。また三菱樹脂(株)からは資材および技術支援の提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Cornelissen, H.A.W., Hordijk, D.A. and Reinhardt, H.W.: Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete, HERON, Vol. 31, No. 2, pp.45-56, 1986
- 2) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford
- 3) [http://www.ngfworld.com/fiber/high\\_modulus.html](http://www.ngfworld.com/fiber/high_modulus.html)