

## 論文 炭素繊維複合パネル接着による RC 部材の曲げ補強効果の検証

河村 圭亮\*1・松岡 康訓\*2・菅野 道昭\*3・池山 正一\*4

**要旨**：従来工法より施工時間を短縮可能な鉄筋コンクリート構造物の補強材として、炭素繊維シートを2枚のフレキシブルボードで挟み込んだ三層構造の複合パネルを開発してきた。本研究では、これを曲げ補強の用途で適用した場合の補強効果について、梁試験体の載荷実験により検証した。その結果、複数のパネル形状と充填材種類の組合せの中で、コンクリート面からの剥離に対する抵抗が大きい仕様とした場合には、従来の炭素繊維シート接着による補強よりも高い曲げ補強効果が得られることを明らかにした。

**キーワード**：曲げ補強、炭素繊維シート、複合パネル、充填材、剥離、付着

## 1. はじめに

老朽化した構造物の補修・補強や、部材の追加などによって設計荷重が増加したことに対応するための補強として、鉄筋コンクリート（以下、RC）部材の曲げ耐力向上が求められる場合がある。これを実現させる工法の一つには RC 増厚<sup>1)</sup>があるが、自重や部材断面が大きく増加することが許容できない施工条件の場合には適用が難しい。このような場合でも適用できる補強技術の一つとして、炭素繊維シート接着<sup>2)</sup>が挙げられる。しかし、炭素繊維シート接着は、現場での作業工程が多いため施工時間に制約を受ける場合には不向きである。また、現場での炭素繊維シートへの樹脂含浸作業は、品質が環境条件や作業員の技量による影響を受けやすいという課題もある。

そこで、これらの課題解決を目的として、図-1に示す炭素繊維シートを2枚のフレキシブルボード（繊維強化セメント板）で挟み込んだ三層構造の複合パネル（炭素繊維複合パネル：以下、CFP）を開発してきた<sup>3)</sup>。CFPは温度と湿度が管理された工場内の机上で、下向きの作業で樹脂含浸を行うため、現場作業よりも品質が安定する。プレキャスト品である CFP をコンクリート表面にアンカーで固定した後、既設躯体との間に充填材を注入して一体化させる方法で補強を行うことができる。CFPの接合部には接合用のパネルを用い、所定の継手長を設けて炭素繊維シートを重ね合わせることで連続性を確保している<sup>4)</sup>。ここで、フレキシブルボードは施工性向上のために用いているものであり、補強材として強度を期待するのは炭素繊維シートのみである。

炭素繊維シート接着による曲げ補強効果に関する既往の研究では、炭素繊維シートが引張強度に達して破断する前にコンクリート面からの剥離が生じる事例が報告されている<sup>5)6)</sup>。そのため、土木学会の指針<sup>2)</sup>では剥離が生

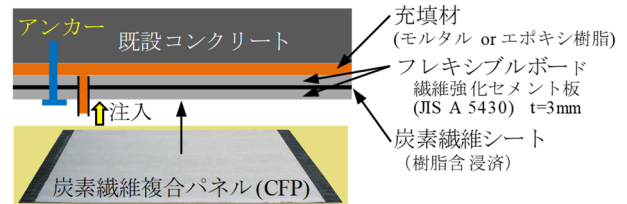


図-1 炭素繊維複合パネルによる補強

じない範囲で設計する体系となっている。CFP 接着による曲げ補強も同様にコンクリートとの十分な付着性能を確保し、剥離に対する抵抗を大きくすることが高い補強効果を得るためには重要な点になる。

既報<sup>7)</sup>にて CFP 接着による RC 部材の曲げ補強効果について一部の実験結果を報告しているが、本研究では、さらに CFP とコンクリートの付着性能に着目したケースで RC 梁試験体の載荷実験を追加で実施した。実験結果より、CFP の形状や充填材の種類が曲げ補強効果に及ぼす影響を主に剥離に対する抵抗の観点から検討した結果について述べる。

## 2. 実験概要

## 2.1 RC 梁試験体の概要

RC 梁試験体は、図-2に示すように幅 300mm×高さ 250mm×全長 2,500mm で、せん断スパン比  $a/d=4.3$  のものである。引張鉄筋比  $p_v=0.45\%$ 、せん断補強鉄筋比  $p_w=0.56\%$  であり、曲げ破壊が生じる諸元とした。本実験では、コンクリートの圧壊よりも炭素繊維シートの破断もしくは CFP の剥離が先に生じるようにするため、呼び強度 56 (N/mm<sup>2</sup>) の高強度コンクリートを使用した。コンクリートの配合は表-1に示す通りである。コンクリート強度を高くすると付着強度が増加することも想定されるが、本研究では異なる接着方法とした場合の違いを直接的に比較可能な条件とした。

\*1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 副主任研究員 修(工) (正会員)

\*2 成和リニューアルワークス(株) 特別顧問 工博 (名誉会員)

\*3 成和リニューアルワークス(株) 工事統轄部 営業部 新規技術開発室 室長

\*4 成和リニューアルワークス(株) 工事統轄部 営業部 新規技術開発室 次長 (正会員)

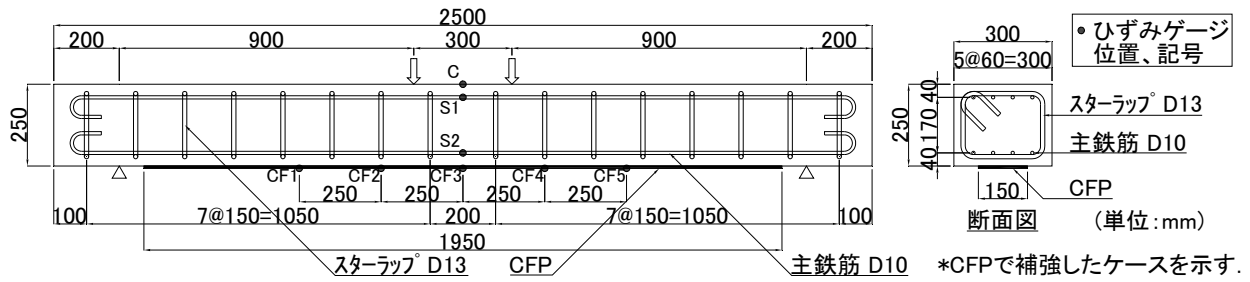


図-2 RC 梁試験体の概要

表-1 コンクリートの配合

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	37.0	46.9	170	460	804	920	5.98

## 2.2 実験に用いた CFP

実験に用いた CFP は、標準 CFP、高付着 CFP1、高付着 CFP2 の計 3 種類である。

標準 CFP は、図-1 に示した三層構造のものである。

高付着 CFP1 は、コンクリートと炭素繊維シートとの間に配置されるフレキシブルボードを周囲のみに設けたものである。これは、引張補強材である炭素繊維シートが充填材のみを介してコンクリートと接着する面積を大きく確保することによって、両者の付着力向上を図ったものである。

高付着 CFP2 は、高付着 CFP1 と形状は同じであるが、炭素繊維シートが露出した部分の表面に珪砂を付着させたものである。これは、充填材にモルタルを使用した場合でも樹脂含浸済の炭素繊維シートとの接着強さが 1.5N/mm<sup>2</sup> 以上となるようにしたものである。

CFP 接着による補強範囲は、支点の内側である中央部の底面で、幅 150mm、長さ 1,950mm とした。いずれも接着作業は、コンクリート打込み時の底面を上面側に向け、ディスクサンダーによるケレンとプライマー塗布を行った後に下向きの施工で行った。なお、本実験では CFP の接着に際して、アンカーは使用していない。

## 2.3 実験に用いた充填材

実験に用いた充填材は、モルタル、硬質形エポキシ樹脂、軟質形エポキシ樹脂の計 3 種類である。

モルタルは、注入に適した流動性が高い無収縮タイプのものである。

エポキシ樹脂は JIS A 6024 の通り、硬質形は引張破壊時伸びが 10% 以下のもの、軟質形は引張破壊時伸びが 50% 以上のものである。櫻井らの研究<sup>8)</sup>では接着面に柔軟層を設けると付着性能が向上することが報告されている。そこで、2 種類のエポキシ樹脂の場合で補強効果を比較することで、充填材の伸び性能の違いによる影響を検討した。

今回の実験では、充填材の厚さは事前の検討より、いずれも空隙なく充填可能な厚さ(3~4mm)とした。なお、充填材として使用する場合のモルタルとエポキシ樹脂を比較した場合、モルタルは安価で不燃材である点、エポキシ樹脂は接着力が高い点にそれぞれの特長がある。

## 2.4 実験ケース

試験体は計 8 体で、実験ケースの一覧を表-2 に、各ケースの補強仕様を図-3 にそれぞれ示す。表中には実験で使用したコンクリート、モルタル、炭素繊維シート、鉄筋の材料試験結果を併せて示す。また、欄外に使用したモルタルのフレッシュ性状に関する物性値とエポキシ樹脂の物性値を示す。

N は、無補強の試験体で RC 梁試験体の曲げ耐力および破壊性状を確認するものである。

CFS は、炭素繊維シート接着で補強した試験体であり、CFP による曲げ補強効果を従来工法と比較するために実施したケースである。補強範囲と施工時の向きは CFP の場合と同じとし、繊維目付量 300g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートをエポキシ樹脂含浸により接着させた。なお、以降に示す CFP で補強したケースも補強範囲はすべて同じであり、特記のない限り使用した炭素繊維シートの繊維目付量は同じ 300g/m<sup>2</sup> である。

CFP-N(2)-M と CFP-N-M は、充填材にモルタルを用いて標準 CFP を接着させた試験体である。CFP-N(2)-M のみ使用した炭素繊維シートの繊維目付量は 200g/m<sup>2</sup> で、繊維目付量の違いが曲げ補強効果に及ぼす影響を確認するためのものである。

CFP-N-EH と CFP-N-ES は、充填材にエポキシ樹脂を用いて標準 CFP を接着させた試験体であり、使用したエポキシ樹脂は、前者が硬質形、後者が軟質形である。

CFP-H1-EH は、充填材に硬質形エポキシ樹脂を用いて高付着 CFP1 を接着させた試験体である。また、CFP-H2-M は、充填材にモルタルを用いて高付着 CFP2 を接着させた試験体である。本実験では、高付着 CFP1 と高付着 CFP2 のコンクリートと炭素繊維シートとの間に配置するフレキシブルボードは、CFP の幅 150mm に対して両端 20mm ずつの幅とした。これは、CFP 全体の 73% は炭素繊維シートが露出している状態である。

表-2 実験ケースの一覧

試験体 ケース名	補強仕様	繊維 目付量	充填材種類	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f'_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{cf}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_y$ -D10 (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ -D10 (kN/mm <sup>2</sup> )	$f_y$ -D13 (N/mm <sup>2</sup> )
N	無補強	-	-	69.1	-	-	391	178	397
CFS	炭素繊維シート接着	300g/m <sup>2</sup>	-	79.5	-	4,310	389	187	360
CFP-N(2)-M	標準CFP接着	200g/m <sup>2</sup>	モルタル*	64.4	83.4	4,229	387	186	389
CFP-N-M	標準CFP接着	300g/m <sup>2</sup>	モルタル	65.1	74.8	4,297	373	187	382
CFP-N-EH	標準CFP接着	300g/m <sup>2</sup>	硬質形エポキシ樹脂**	66.9	-	4,297	387	186	389
CFP-N-ES	標準CFP接着	300g/m <sup>2</sup>	軟質形エポキシ樹脂***	81.4	-	4,310	389	187	360
CFP-H1-EH	高付着CFP1接着	300g/m <sup>2</sup>	硬質形エポキシ樹脂	69.1	-	4,297	391	178	397
CFP-H2-M	高付着CFP2接着	300g/m <sup>2</sup>	モルタル	80.8	69.0	4,310	389	187	360

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度(現場封緘養生, 載荷試験時),  $f'_m$  : モルタルの圧縮強度(現場封緘養生, 載荷試験時)

$f_{cf}$  : 炭素繊維シートの引張強度,  $f_y$  : 鉄筋の降伏強度,  $E_s$  : 鉄筋の弾性係数

\*モルタル プリーディング率:0.0%[JSCE-F522], コンシステンシー(J14ロート):4.0秒[JSCE-F541] (カタログ値)

\*\*硬質形エポキシ樹脂 粘度:1.40Pa・s[JIS K 6833], 引張強さ:72N/mm<sup>2</sup>[JIS K 7161] (実測値)

\*\*\*軟質形エポキシ樹脂 粘度:0.35Pa・s[JIS K 6833], 引張強さ:3.2N/mm<sup>2</sup>[JIS K 7161] (カタログ値)

C:コンクリート M:モルタル ( )内の数字は厚さ[単位:mm]  
 FB:フレキシブルボード EH:硬質形エポキシ樹脂 CFSの数字は繊維目付量[単位:g/m<sup>2</sup>]  
 CFS:炭素繊維シート ES:軟質形エポキシ樹脂 ---付着破壊が生じた面

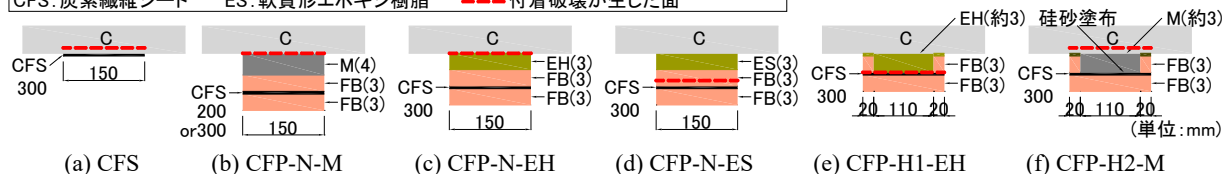


図-3 各ケースの補強仕様

## 2.5 載荷方法および測定項目

載荷方法は中央2点での静的単調載荷とした。実験では、試験体スパン中央における鉛直変位とコンクリート(C), 主鉄筋(S1,S2), 炭素繊維シート(CF1~CF5)のひずみを測定した。載荷位置とひずみゲージの貼付位置は図-2に示す通りである。

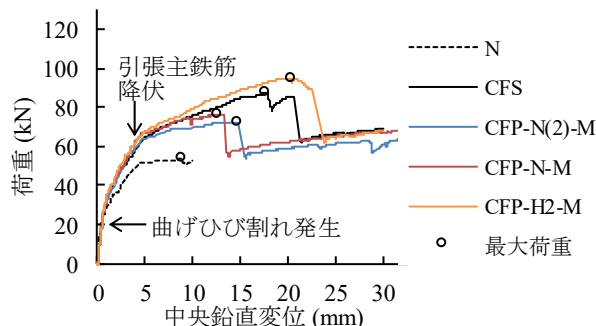
## 3. 実験結果および曲げ補強効果についての考察

### 3.1 最大荷重

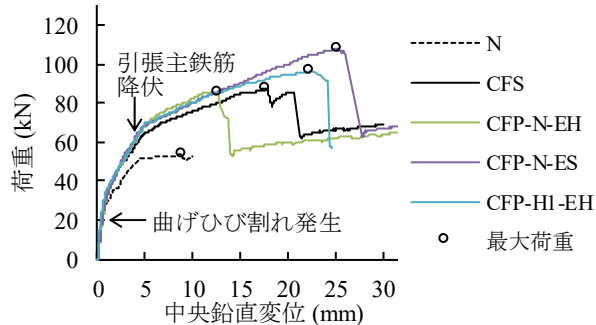
各ケースの荷重とスパン中央における鉛直変位の関係を図-4に示す。なお、CFP接着のケースは充填材の種類で分けて示している。

無補強のNは、曲げひび割れ発生後に部材剛性が低下し、引張主鉄筋の降伏によって荷重がほぼ一定のまま鉛直変位が増加していく曲げ降伏挙動となった。

これに対して、曲げ補強した試験体はいずれも曲げひび割れ発生後の部材剛性がNより増加した。その結果、引張主鉄筋降伏時の鉛直変位はNと大差ないが、その時の荷重は増加した。引張主鉄筋の降伏後は、部材剛性がさらに低下したものの、鉛直変位の増加に伴って荷重が増加し続けた。この荷重増加は接着させた補強材の効果によるものと言える。繊維目付量が異なるCFP-N(2)-MとCFP-N-Mと比較すると、繊維目付量が多く炭素繊維シートの断面積が大きいCFP-N-Mの方が部材剛性は大きくなった。これは炭素繊維シートの剛性の違いによるものと考えられる。



(a) 充填材にモルタルを用いたケース



(b) 充填材にエポキシ樹脂を用いたケース

図-4 荷重-中央鉛直変位関係

いずれのケースも接着させた補強材がコンクリート面から剥離した時点が最大荷重となり、これに伴って急激な荷重低下が生じた。その後は再び鉛直変位の増加に伴って荷重が緩やかに増加し続けたが、接着させた補強材が剥離して効果を発揮していないため、これはNと同じ条件のRC梁の曲げ降伏後挙動である。

表-3 最大荷重と破壊モード

ケース名	最大荷重 $P_{max}$ (kN)	$P_{max}$ 時の中央 鉛直変位 (mm)	破壊 モード
N	53.7	8.9	
CFS	87.6	17.8	A (F)
CFP-N(2)-M	72.4	14.7	B
CFP-N-M	76.6	12.4	B (C)
CFP-N-EH	85.4	12.6	B
CFP-N-ES	107.7	25.2	D
CFP-H1-EH	96.3	22.4	E
CFP-H2-M	95	20.4	A

\*破壊モード, ()内は全長の一部

- A: コンクリート表層での破壊
- B: コンクリートと充填材の界面での付着破壊
- C: 充填材とフレキシブルボードの界面での付着破壊
- D: フレキシブルボード内での破壊
- E: 充填材と炭素繊維シートの界面での付着破壊
- F: コンクリートと炭素繊維シートの界面での付着破壊

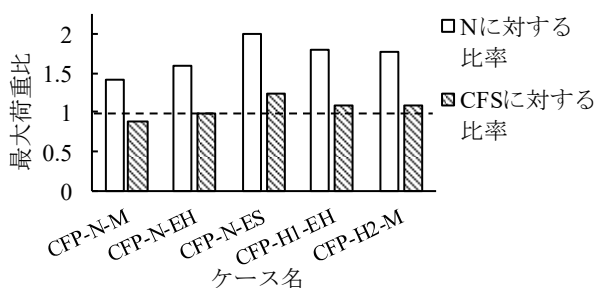


図-5 N および CFS に対する最大荷重の比率

各ケースの最大荷重およびその時の鉛直変位を表-3に示すが、補強した試験体の最大荷重はいずれもNより増加しており、曲げ補強効果が発揮されたことが確認できる。最大荷重はいずれも補強材の剥離により決定しているため、その大小関係にはそれぞれの接着仕様に応じた剥離に対する抵抗の大きさが大きく影響していると言える。

CFP 接着のケースの内、繊維目付量  $300\text{g/m}^2$  である5ケースについて、N（無補強）およびCFS（炭素繊維シート接着）に対する最大荷重の比率を図-5に示す。繊維目付量は同一であるが、その接着仕様の違いにより、Nに対する比率は1.35~2.01の範囲で異なる。CFSと比較すると、CFP-N-Mは約10%低下、CFP-N-EHは同程度、CFP-H1-EHとCFP-H2-Mは約10%増加、CFP-N-ESは約20%増加となった。

### 3.2 破壊状況

N, CFS, CFP-N-ES, CFP-H2-Mの4ケースについて、最大荷重時のひび割れ状況を図-6に示す。

曲げひび割れの発生間隔は、補強の有無や補強仕様によって明瞭な差がないが、補強したケースでは補強材を接着させた下端付近で曲げひび割れが複数に分岐している状況が見られた。これは、接着させた補強材とコンク

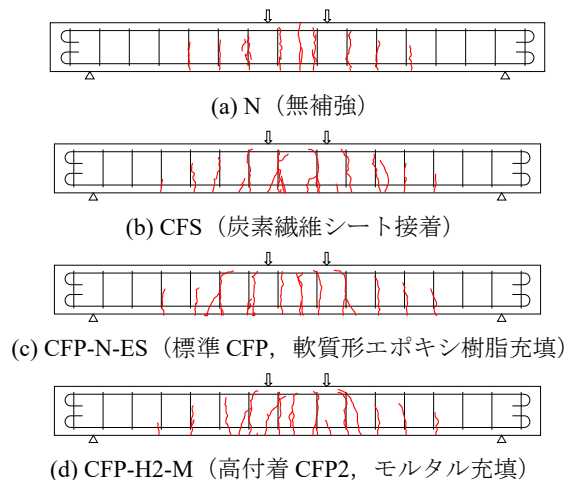


図-6 最大荷重時のひび割れ状況

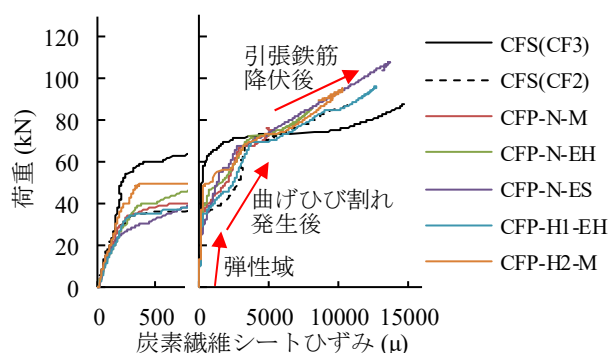


図-7 炭素繊維シートひずみの変化

リートの付着による影響であると考えられる。

最大荷重時に剥離が生じた界面は、図-3および表-3に示す通りである。炭素繊維シート接着のCFSと高付着CFP2でモルタル充填のCFP-H2-Mは、コンクリート表層での破壊が生じたため、接着面の付着強度がコンクリート表層の強度よりも高かったと言える。標準CFPでモルタル充填のCFP-N(2)-M, CFP-N-M, および硬質形エポキシ樹脂充填のCFP-N-EHは、コンクリートと充填材の界面での付着破壊が生じた。軟質形エポキシ樹脂充填のCFP-N-ESは、充填材と炭素繊維シートの両者の表面にフレキシブルボードが付着した破壊面の状態であった。高付着CFP1で硬質形エポキシ樹脂充填のCFP-H1-EHは、充填材と炭素繊維シートの界面での付着破壊が生じた。このように接着仕様の違いにより、付着破壊が生じる界面が異なる結果となった。

### 3.3 炭素繊維シートひずみ

繊維目付量  $300\text{g/m}^2$  で補強した計6ケースについて、スパン中央のCF3の位置で測定した炭素繊維シートひずみの変化を図-7に示す。CFSはこの付近に曲げひび割れが生じなかったため、曲げひび割れ発生位置付近のデータとしてCF2の位置の結果も示している。

各ケースともに曲げひび割れが発生した約20kNまで

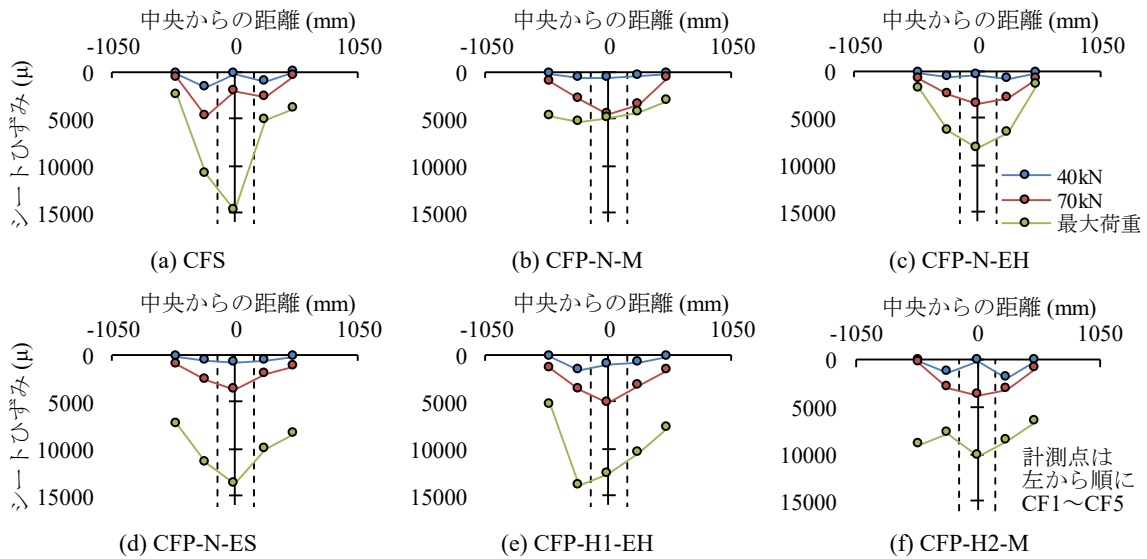


図-8 軸方向の炭素繊維シートひずみ分布

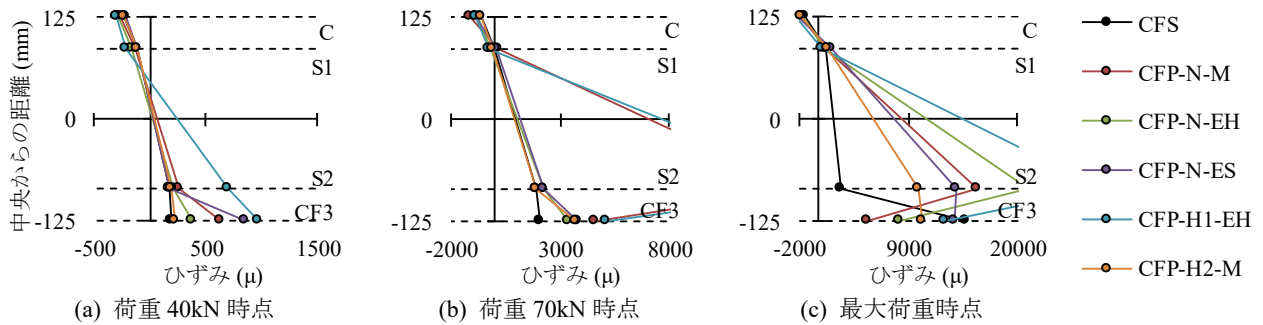


図-9 スパン中央での高さ方向のひずみ分布

は荷重増加に伴ってひずみがほぼ線形に増加した。曲げひび割れ発生後は、引張鉄筋と炭素繊維シートの引張力分担が増加するため、荷重増加に伴うひずみ増分が大きくなった。引張鉄筋が降伏した約 65kN 以降は、炭素繊維シートのみ引張力分担が増加する領域であるため、荷重増加に伴うひずみ増分がさらに大きくなった。このように炭素繊維シートのひずみの変化は、荷重-変位関係と概ね対応した傾向となった。

軸方向の炭素繊維シートひずみ分布を図-8 に示す。ひずみ分布は引張鉄筋降伏前の荷重 40kN 時点、引張鉄筋降伏後の荷重 70kN 時点、最大荷重時点の 3 つを示している。

40kN 時点では、いずれも中央付近の CF2~CF4 の中で曲げひび割れ発生位置付近のひずみが相対的に大きい分布となった。

70kN 時点では、CFS 以外はいずれもスパン中央のひずみが最大となる凸型の分布となり、ケースによる大きなひずみの差はない。

最大荷重時点では、炭素繊維シート接着の CFS は、スパン中央で最大約 15,000 $\mu$  と最も大きいひずみが生じており、隣接する計測点との差が最も大きい。炭素繊維シ

ートをエポキシ樹脂含浸にて直接コンクリート面に接着させているため、最も付着力が大きいことが伺える。

充填材にエポキシ樹脂を用いた CFP-N-ES と CFP-H1-EH も最大約 14,000 $\mu$  で、炭素繊維シートが大きい引張力を負担している。特に軟質形エポキシ樹脂を用いた CFP-N-ES は、左右のスパンともに中央から支点に向かう直線的なひずみ変化の形状であることから、伸び性能が大きい充填材を介することで炭素繊維シートの負担応力を軸方向に分散できていることが考えられる。炭素繊維シート接着の CFS の方が付着力は強いものの、そのために炭素繊維シートの応力負担は局所的になる。これに対して、CFP-N-ES では炭素繊維シートの応力負担を広範囲に分散できたことが、最大荷重が全ケースの中で一番高くなった理由の一つとして考えられる。

充填材にモルタルを用いた CFP-N-M と CFP-H2-M は、スパン中央から左右 500mm の範囲でのひずみ差がほとんどない。これは、付着切れが生じた時に見られる分布の傾向<sup>9)</sup>で、これらのケースでは最大荷重到達前から CFP の剥離が徐々に進行し、スパン中央付近での付着力が喪失していたことが推察される。なお、最大ひずみは、標準 CFP を用いた CFP-N-M は約 5,000 $\mu$  であったが、高



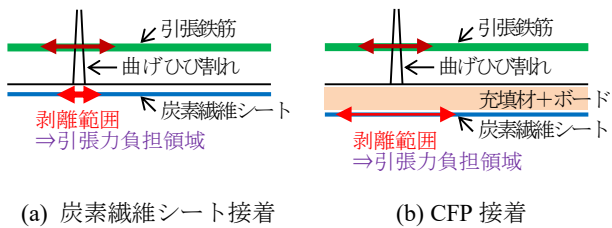


図-10 剥離領域のイメージ図

付着 CFP2 を用いた CFP-H2-M は約 10,000 $\mu$  で違いが見られた。高付着 CFP2 では、充填材とフレキシブルボードおよびフレキシブルボードと炭素繊維シートの界面を少なくしたことで、この仕様の狙い通りに付着力が向上した効果が現れていると考えられる。

### 3.4 断面内のひずみ分布

繊維目付量 300g/m<sup>2</sup> で補強した計 6 ケースについて、スパン中央での高さ方向のひずみ分布を図-9 に示す。ひずみ分布はそれぞれ、コンクリート上縁、圧縮鉄筋、引張鉄筋、炭素繊維シートの 4 点で示し、引張鉄筋降伏前の荷重 40kN 時点、引張鉄筋降伏後の荷重 70kN 時点、最大荷重時点の 3 つを示している。

荷重 40kN 時点では、いずれも直線的な分布であるが、スパン中央で曲げひび割れが発生したケースは、直線分布に対して炭素繊維シートのひずみが大きくなっている。

炭素繊維シート接着の CFS は、荷重 70kN から最大荷重までの間で炭素繊維シートのひずみのみが急増した。これはコンクリートとの付着力が強く、図-10(a)に示すように炭素繊維シートが引張鉄筋よりも短い範囲で引張力を負担していると考えられる。

CFP-N-M、CFP-N-EH、CFP-H1-EH は、最大荷重時に引張鉄筋に大きなひずみが生じているのに対して炭素繊維シートのひずみは小さい。これは、図-10(b)に示すように炭素繊維シート接着よりも広範囲で CFP の剥離が生じており、その範囲に応じた引張力負担となっていることが考えられる。

CFP-N-ES と CFP-H2-M は、最大荷重時の炭素繊維シートのひずみが引張鉄筋に近い値になっており、同程度の範囲で引張力負担していると推察される。即ち、最大荷重時点で比較すると、CFS よりは少し広い範囲で CFP の剥離が生じていると思われる。これらの 2 ケースは CFS よりも最大荷重が大きい。これより、軟質形エポキシ樹脂やモルタルの充填材を介することで、炭素繊維シートの引張応力負担領域が適度に分散され、全体として剥離に対して大きく抵抗できる状態となった可能性が考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、CFP の接着による曲げ補強効果について

明らかにするため、RC 梁試験体の載荷実験を実施した。得られた知見は以下に示す通りである。

- (1) CFP 接着でも従来の炭素繊維シート接着と同様に曲げ補強効果があり、補強後の最大荷重が増加することが確認された。
- (2) いずれの仕様でも CFP の剥離により最大荷重となったが、CFP の形状と充填材種類の組合せによってコンクリートとの付着性能は異なり、補強効果の違いに影響を及ぼすこと明らかになった。
- (3) CFP 接着による曲げ補強では、炭素繊維シートの引張力負担を適度に分散させることで CFP の剥離に対する抵抗を大きくすることができ、効果的となる可能性が示された。

## 参考文献

- 1) (社)土木学会、コンクリートライブラリー150号 セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針、2018.
- 2) (社)土木学会：複合構造シリーズ09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)、2018.
- 3) 河村圭亮ほか：CF パネル工法®による鉄筋コンクリート柱の耐震補強効果、大成建設技術センター報、第52号、23、2019.
- 4) 河村圭亮ほか：炭素繊維複合パネルを用いたトンネル覆工コンクリートの表面保護工法における剥落防止効果、土木学会第74回年次学術講演会、V-403、2019.
- 5) Kim J. Y., Hmidan A., and Yazdani S. : Variable Shear Span-Depth Ratios for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Various Carbon Fiber-Reinforced Polymer Configurations, ACI Structural Journal, Vol.112, No.5, pp.635-643, 2015.
- 6) 吉田隆浩、森川英典、鴨谷知繁、小林秀惠：接着界面条件を考慮した連続繊維シート補強 RC 部材の性能評価、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第2巻、pp.73-80、2002.
- 7) 高倉克彦、新藤竹文、河村圭亮、池山正一：炭素繊維シート複合パネルによる梁の曲げ補強効果に関する研究、土木学会第73回年次学術講演会、VI-309、2018.
- 8) 櫻井俊太、小林朗、小森篤也、日野伸一：RC はりの曲げ試験によるポリウレア樹脂を用いたプレハブ式 CFRP プレート接着補強工法の曲げ補強効果に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.41, No.2, pp.1459-1464, 2019.
- 9) 河村圭亮、畑明仁、新藤竹文、細谷学：炭素繊維複合パネル巻立てによる RC 部材のせん断補強効果の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.41, No.2, pp.907-912, 2019.