

# 高靱性繊維補強モルタルで断面積層補強を施した鉄筋コンクリート梁に 対する連続繊維シートの曲げ補強効果の改善 に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVEMENT OF FLEXURAL REINFORCEMENT BY CONTINUOUS FIBER SHEET FOR REINFORCED CONCRETE BEAM WITH CLADDING OF FIBER REINFORCED MORTAR

角野嘉則\*, 村上 聖\*\*, 下田誠也\*\*\*, 武田浩二\*\*\*\*  
Yoshinori KAKUNO, Kiyoshi MURAKAMI, Seiya SHIMODA  
and Koji TAKEDA

In this study, analytical and experimental investigations were conducted to clarify the effect of clad reinforcement by polyethylene fiber reinforced mortar (PEFRM) on flexural characteristics of reinforced concrete (RC) beams strengthened with polyethylene fiber sheets. High-performance polyethylene fibers (PEF) were used for making the PEFRM with high tensile strength. The PEFRM-cladding was performed on the tensile side of the RC beam. The RC beams strengthened with the PEFRM-cladding and the sheets were tested under pure bending. As a result, it was shown that the PEFRM-cladding has a remarkable effect on an improvement of flexural reinforcement by the sheets of the RC beam.

**Keywords :** *Clad reinforcement, Reinforced concrete beam, Flexural reinforcement, Continuous fiber sheet, Fiber reinforced mortar*  
積層補強, 鉄筋コンクリート梁, 曲げ補強, 連続繊維シート, 繊維補強モルタル

### 1. はじめに

炭素繊維, 合成繊維等の連続繊維シートによる鉄筋コンクリート(以下, RC と略記)構造物の耐震補強は, 最近では特に部材の靱性向上をはかるための一般的な補強工法として実用化されている。一方, 本研究で対象とする連続繊維シートによる RC 梁の曲げ補強に関しても, これまでに多くの研究報告がなされている<sup>1)~35)</sup>が, シートで曲げ補強された RC 梁の終局的破壊は, かぶりコンクリートでの斜め引張りひび割れの発生からシート界面の付着剥離あるいはかぶりコンクリートの剥落で決まるのが一般的である。これは, 通常の RC 梁では, せん断力の作用区間において曲げひび割れ発生後のかぶりコンクリート部分にはせん断応力が生じないが, 引張縁にシートで曲げ補強された場合には, かぶりコンクリートにはシートの付着応力に相当するせん断応力が生じるためである。すなわち, シートの付着剥離は, この斜張力による斜めひび割れの発生と曲げひび割れのために荷重点近傍の下縁かぶり部に形成される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発生することが知られている<sup>例えば, 28)</sup>。

このようなシートの剥離状況を考えると, かぶりコンクリート部分に生じる斜めひび割れの発生を抑制することによって, シートの

付着耐力が改善される可能性がある。

ところで, RC 構造物のリハビリテーションの一貫として RC 梁の曲げ補強が施される場合, 劣化したかぶりコンクリート部分をはつり取って, ポリマーセメントモルタル等で断面修復を行うのが一般的であると考えられるが, その際に高引張強度の繊維補強モルタルを断面修復材として用いれば, シートの曲げ補強においてかぶりコンクリートの斜めひび割れを抑え, シートの付着耐力を改善することができるものと考えられる。

そこで, 本研究では, かぶりコンクリートに生じる斜めひび割れを抑えることを目的に, 劣化したかぶりコンクリートの断面修復を想定して, RC 梁の曲げ引張側に高引張強度の繊維補強モルタルで断面積層補強を施した場合の連続繊維シートによる曲げ補強効果について実験的検討を行った。

### 2. 解析的検討

前報<sup>20)</sup>では, 上記のようなシートの剥離で終局耐力が決まる場合の連続繊維シートによる RC 梁の曲げ補強設計方法の確立を目的に, 部材におけるシートの局所的有効付着応力と平面保持の仮定に基づく断面解析によるシートの曲げ付着応力とを関連づけ, 部材におけ

\* 熊本大学大学院自然科学研究科 大学院生・工修

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, M. Eng.

\*\* 熊本大学大学院自然科学研究科 教授・工博

Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Dr. Eng.

\*\*\* 有明工業高等専門学校専攻科建築学専攻 准教授・工博

Assoc. Prof., Ariake National College of Technology, Dr. Eng.

\*\*\*\* 熊本大学大学院自然科学研究科 助教・工博

Assistant Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Dr. Eng.

るシートの付着耐力を算定する方法を提案した。本解析方法の詳細については、前報<sup>20)</sup>に示すとおりであるが、本報では論旨の展開を損なわない程度に以下に記述し、かぶりコンクリートの引張強度がシートの曲げ補強効果に及ぼす影響について解析的検討を行った。

### 2.1 平面保持の仮定に基づく断面解析

#### 1) 解析の仮定

- ①平面保持が成り立つ。
- ②コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係には、次式に示す Popovics 式を用いる。なお、曲げに対するコンクリートの引張強度は無視する。

$$\sigma = F_c \frac{n(\varepsilon/\varepsilon_{co})}{n-1+(\varepsilon/\varepsilon_{co})^n} \quad (1)$$

ここに、 $F_c$ : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon_{co}$ : 圧縮強度時のひずみ  
 $n$ : 実験定数

なお、式中のパラメータには、測定値を用いた。

- ③鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性とし、ひずみ硬化は無視する。

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ \sigma_y & (\varepsilon > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 $E_s$ : 鉄筋のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_y$ : 鉄筋の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon_y$ : 鉄筋の降伏ひずみ

なお、降伏強度には測定値、ヤング係数には RC 構造計算規準式の値を用いた。

- ④連続繊維シートの引張応力-ひずみ関係は、シートの引張強度時点まで線形弾性とし、シートとコンクリートは完全に付着しているものと仮定する。

$$\sigma = E_f \varepsilon \leq \sigma_f \quad (3)$$

ここに、 $E_f$ : シートの引張弾性率 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_f$ : シートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

なお、シートの引張弾性率および引張強度には、公称値を用いた。

#### 2) 解析方法

- ①軸方向の力のつり合いより、次式が得られる。

$$\begin{aligned} C_c + C_s &= T_s + T_f \\ C_c &= \frac{b}{\phi} \int_0^{\varepsilon_c} \sigma d\varepsilon, \quad C_s = a_{cs} \sigma_c \\ T_s &= a_{ts} \sigma_t, \quad T_f = a_{ff} \sigma_t \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $C_c$ : コンクリートの圧縮合力 (N)  
 $C_s$ : 圧縮鉄筋の合力 (N)  
 $T_s$ : 引張鉄筋の合力 (N)  
 $T_f$ : シートの引張合力 (N)  
 $b$ : 梁幅 (mm)  
 $\phi$ : 曲率 (1/mm)  
 $\varepsilon_c$ : コンクリートの圧縮縁ひずみ  
 $\sigma_c$ : 圧縮鉄筋応力 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_t$ : 引張鉄筋応力 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_t$ : シート引張応力 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $a_c$ : 圧縮鉄筋断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $a_s$ : 引張鉄筋断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $a_f$ : シート断面積 (mm<sup>2</sup>)

- ②中立軸に関するモーメントのつり合いより、次式が得られる。

$$M = \frac{b}{\phi^2} \int_0^{\varepsilon_c} \sigma \varepsilon d\varepsilon + C_s(x_n - d_c) + T_s(d - x_n) + T_f(D - x_n) \quad (5)$$

ここに、 $M$ : 曲げモーメント (Nmm)  
 $d_c$ : 圧縮縁から圧縮鉄筋重心までの距離 (mm)  
 $x_n$ : 中立軸高さ (mm)  
 $d$ : 有効せい (mm)  
 $D$ : 梁せい (mm)

- ③シートの曲げ付着応力の算定

シートの付着剥離は、引張鉄筋降伏以降に発生するものとするれば、シートの曲げ付着応力は、次式により得られる。

$$\begin{aligned} \tau_{fb} b dx &= dT_f \quad \therefore \tau_{fb} = \frac{1}{b} \frac{dT_f}{dx} \\ dM &= dT_f j \quad \therefore \frac{dM}{dx} = \frac{dT_f}{dx} j \\ \therefore \frac{dM}{dx} &= Q = \frac{M}{L} \\ \therefore \frac{dT_f}{dx} &= \frac{M}{Lj} \\ \therefore j &= \frac{M}{a_f \sigma_y + T_f} \\ \therefore \tau_{fb} &= \frac{M}{bLj} = \frac{a_f \sigma_y + T_f}{bL} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $\tau_{fb}$ : シートの曲げ付着応力 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $j$ : 応力中心距離 (mm)  
 $L$ : せん断スパン長さ (mm)  
 $Q$ : せん断力 (N)

### 2.2 部材におけるシートの付着耐力の算定

#### 1) 解析の仮定

部材全体では平面保持の仮定がマクロ的に成立し、前報<sup>20)</sup>に示すように、曲げひび割れを起点とするシートの付着切れおよび有効付着領域区間の曲げ付着合力は、図1に示すトラス機構によるかぶり

コンクリートに斜めひび割れが発生する時点での有効付着合力に等しいものと仮定すると、次式が得られる。なお、シート貼付幅は、梁幅と同一とする。

$$\tau_{fb} + \frac{L - (d_t + l_{ef})}{L} \tau_{fb} b(d_t + l_{ef}) = F_t b l_{ef} \quad (7)$$

$$\therefore \tau_{fb} = \frac{2l_{ef}}{\left(2 - \frac{d_t + l_{ef}}{L}\right)(d_t + l_{ef})} F_t$$

ここに、 $d_t$ : 引張縁から引張鉄筋重心までの距離 (mm)

$l_{ef}$ : 有効付着長さ (mm)

$F_t$ : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

従って、平面保持の仮定に基づいて断面解析により求められるシートの曲げ付着応力が、式(7)の右辺の値に達したときに、かぶりコンクリートに斜めひび割れが発生し、この斜めひび割れと曲げひび割れのために荷点近傍の下縁かぶり部に形成される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、シートの付着剥離が生じるものとする。

なお、前報<sup>20)</sup>では、普通コンクリートの引張強度  $F_t$  として、引張強度に及ばず部材の寸法効果やシートの付着剥離がかぶりコンクリート部の斜めひび割れに起因することから、靱性保証型耐震設計指針<sup>36)</sup>のせん断ひび割れ強度を用いると、シートの付着耐力に関する実験結果と計算結果との間に良い対応が得られることを示した。

## 2) 解析方法

①シートの有効付着長さは、前報<sup>20)</sup>に示すように、シートの曲げ付着試験結果に基づいてトラスモデル解析により得られた次式の回帰式を用いて求める。

$$l_{ef} = 2.2t_f^{0.4} E_f^{0.7} F_t^{-0.3} \quad (8)$$

ここに、 $l_{ef}$ : 有効付着長さ (mm)

$t_f$ : シート貼付層厚 (mm)

$E_f$ : シートの引張弾性率 (kN/mm<sup>2</sup>)

$F_t$ : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

②式(7)より、部材におけるシートの付着剥離時点での曲げ付着応力を求め、前述の平面保持の仮定に基づく断面解析により得られる荷重と式(6)によるシートの曲げ付着応力との関係から、部材におけるシートの付着耐力を算定する。

## 2.3 解析結果

ここでは、後述のポリエチレン繊維シートで曲げ補強された RC 梁に関して、コンクリートの引張強度がシートの付着耐力に及ばず影響について解析的検討を行った。表1に、解析に用いた諸定数を示す。なお、コンクリートの引張強度は、 $F_t=1.5\sim 5.0$  (N/mm<sup>2</sup>) の範囲で変化させている。

表2および図2に解析結果を示す。その結果として、コンクリートの引張強度が増加すると、シートの付着耐力がほぼ比例的に増大し、ある値以上になると、シートの付着剥離が発生する以前にシ-

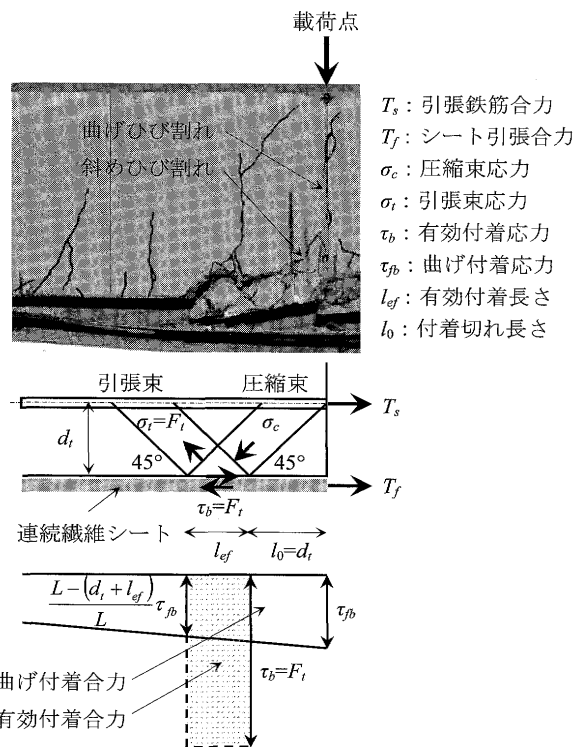


図1 トラス機構によるシートの付着剥離メカニズム

表1 解析に用いた諸定数

梁断面寸法・配筋						
$b$ mm	$D$ mm	$d_c$ mm	$d$ mm	$L$ mm	$a_c$ mm <sup>2</sup>	$a_t$ mm <sup>2</sup>
150	250	30	220	750	214	143
主筋			コンクリート			
種類	$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	$E_s$ N/mm <sup>2</sup>	$F_c$ N/mm <sup>2</sup>	$E_c$ N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{co}$ $\mu$	$n$
SD295	381	205000	37.9	30600	2320	2.15
ポリエチレン繊維シート						
記号	$t_f$ mm	$a_f$ mm <sup>2</sup>	$E_f$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_f$ N/mm <sup>2</sup>		
PEF-1	0.258	38.7	70000	1850		
PEF-2	0.516	77.4	70000	1850		
PEF-3	0.774	116	70000	1850		

表2 解析結果

記号	$F_t$ N/mm <sup>2</sup>	$l_{ef}$ mm	$\tau_{fb}$ N/mm <sup>2</sup>	$P_{beal}$ kN	$P_{feal}$ kN	$P_{beal} / P_{feal}$
PEF-1	1.5	22.2	0.660	42.8	75.6	0.566
	2.0	20.3	0.836	56.0		0.741
	2.5	19.0	1.00	67.8		0.897
	3.0	18.0	1.16	75.6		1.00
PEF-2	1.5	29.3	0.771	50.2	117	0.428
	2.0	26.8	0.982	65.5		0.559
	2.5	25.1	1.18	79.5		0.678
	3.0	23.8	1.38	92.7		0.791
	3.5	22.7	1.56	105		0.897
PEF-3	4.0	21.8	1.74	117	156	0.997
	1.5	34.4	0.837	54.5		0.350
	2.0	31.6	1.07	71.0		0.455
	2.5	29.5	1.29	86.6		0.555
	3.0	27.9	1.51	101		0.649
	3.5	26.7	1.71	115		0.738
	4.0	25.6	1.91	128		0.823
4.5	24.7	2.11	141	0.904		
5.0	24.0	2.30	156	1.00		

\*  $P_{beal}$ : シート付着耐力計算値,  $P_{feal}$ : シート破断耐力計算値

トの破断あるいは曲げ圧縮破壊を生じることが予想される。また、この値は、シート貼付層数が多くなるほど、大きくなること分かる。

以上の解析結果より、本研究の目的である、かぶりコンクリート部を高引張強度の繊維補強モルタルで断面積層補強することによりシートの付着耐力を改善できることが解析的に予測された。

### 3. 実験方法

表 3 に使用材料を示す。ここで、PEFRM で断面積層補強を施さずポリエチレン繊維シートのみを引張縁に1~3層貼付した RC 梁の試験シリーズ I と PEFRM で断面積層補強を施した後にポリエチレン繊維シートを1~3層貼付した RC 梁の試験シリーズ II では、打設時期が異なり、コンクリートおよび鉄筋の材料特性も若干異なっているが、コンクリートには、呼び強度が 30 のレディーミクストコンクリート、主筋には SD295A, D10, あばら筋には  $\phi 5$  のみがき棒鋼を使用した。また、連続繊維シートには、目付量が  $250\text{g/m}^2$ , 1層の公称厚さが  $0.258\text{mm}$  のポリエチレン繊維シート (以下、PEF シートと略記) を使用した。

表 4 および表 5 には、断面積層補強に用いた PEFRM の使用材料および調合を示す。セメントには早強ポルトランドセメント、細骨材には豊浦珪砂、混和材料には高炉スラグ微粉末および高性能 AE 減水剤、また短繊維には、繊維長さが  $18\text{mm}$  の原系カットタイプのポリエチレン繊維を使用した。なお、使用調合は、既報<sup>37)</sup>の調合に準拠して定めた。また、混練には容量  $55\text{l}$  の強制 2 軸攪拌型ミキサーを使用し、まずセメント、高炉スラグ微粉末、珪砂を 15 秒間空練りし、次に繊維を投入し、30 秒間空練りした後に、水および高性能 AE 減水剤を投入し、3 分間練り混ぜた。

図 3 に、RC 梁試験体の形状寸法、配筋および荷重方法を示す。荷重形式は、スパン長さが  $2000\text{mm}$ 、荷重点間隔が  $500\text{mm}$  の 4 点曲げ荷重とした。表 6 に RC 梁試験体の仕様を示す。シリーズ I の PEF-1~3 試験体は、RC 梁の引張縁に PEF シートのみを 1~3 層で接着貼付したもの、シリーズ II の PEFRM60-1~3 試験体は、RC 梁の引張縁から深さ  $60\text{mm}$  まで PEFRM で積層補強し、その後 PEF シートを 1~3 層で接着貼付したもの、また PEFRM60-0 試験体は、比較のために PEF シートを貼付していないものである。

シリーズ II の RC 梁試験体の作製方法は、荷重方向と逆向きにまずレディーミクストコンクリートを引張縁となる上面から深さ  $60\text{mm}$  の位置まで打ち込み、1 週間現場湿布養生後、コンクリート表面のレイタンスを金属ブラシで除去し、その上から PEFRM を打設した。その後、3 週間現場湿布養生後気中養生を行い、PEFRM 表面をディスクサンダーで研磨した後にプライマーを塗布し、PEF シートをエポキシ樹脂により接着貼付した。また、シリーズ I の RC 梁試験体は、コンクリートを打設し、4 週間現場湿布養生後気中養生を行い、PEF シートを上記と同様の手順で貼り付けた。

RC 梁試験体の曲げ試験における測定方法は、容量  $100\text{mm}$  の高感度変位計によりスパン中央変位を、またスパン中央断面の主筋位置で容量  $5\text{mm}$ 、標点距離が  $300\text{mm}$  のパイ型変位計により主筋ひずみおよび曲率をそれぞれ計測した。

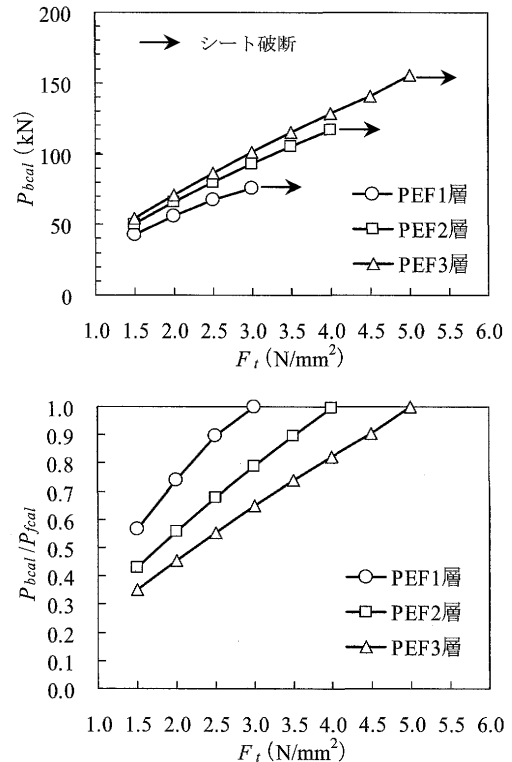


図 2 コンクリートの引張強度がシートの付着耐力に及ぼす影響

表 3 使用材料

	シリーズ I	シリーズ II
コンクリート	レディーミクストコンクリート 呼び強度=30 (N/mm <sup>2</sup> ) 指定スランブ=18 (cm)	
	実測スランブ=20.5cm 実測空気量=5.5%	実測スランブ=16.1cm 実測空気量=4.3%
主筋	SD295A, D10	
	降伏強度=381N/mm <sup>2</sup> 引張強度=599N/mm <sup>2</sup> 破断伸び=18.9%	降伏強度=363N/mm <sup>2</sup> 引張強度=512N/mm <sup>2</sup> 破断伸び=25.1%
あばら筋	$\phi 5$ みがき棒鋼	
	引張強度=766N/mm <sup>2</sup>	引張強度=593N/mm <sup>2</sup>
連続繊維シート	ポリエチレン繊維シート 目付量=250g/m <sup>2</sup> 公称厚さ=0.258mm 引張強度=1850N/mm <sup>2</sup> 引張弾性率=70kN/mm <sup>2</sup>	

表 4 PEFRM の使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 密度=3.13g/cm <sup>3</sup>
細骨材	豊浦珪砂 絶乾密度=2.7g/cm <sup>3</sup>
混和材	高炉スラグ微粉末 密度=2.89g/cm <sup>3</sup> , 比表面積=6140cm <sup>2</sup> /g
混和剤	高性能 AE 減水剤
短繊維	ポリエチレン繊維 (原系カットタイプ) 密度=0.97g/cm <sup>3</sup> , 寸法=12 $\mu$ m $\times$ 18mm 引張強度=2580N/mm <sup>2</sup> , 引張弾性率=73kN/mm <sup>2</sup>

表 5 PEFRM の使用調合

V <sub>f</sub> (%)	W/B (%)	S <sub>g</sub> /B (%)	S/B (%)	フロー値
1.5	40	50	60	163

\* V<sub>f</sub>: 繊維体積率, W/B: 水結合材比, B: 結合材, S<sub>g</sub>: 高炉スラグ微粉末, S: 珪砂

\* 高性能 AE 減水剤使用量: B  $\times$  0.3%

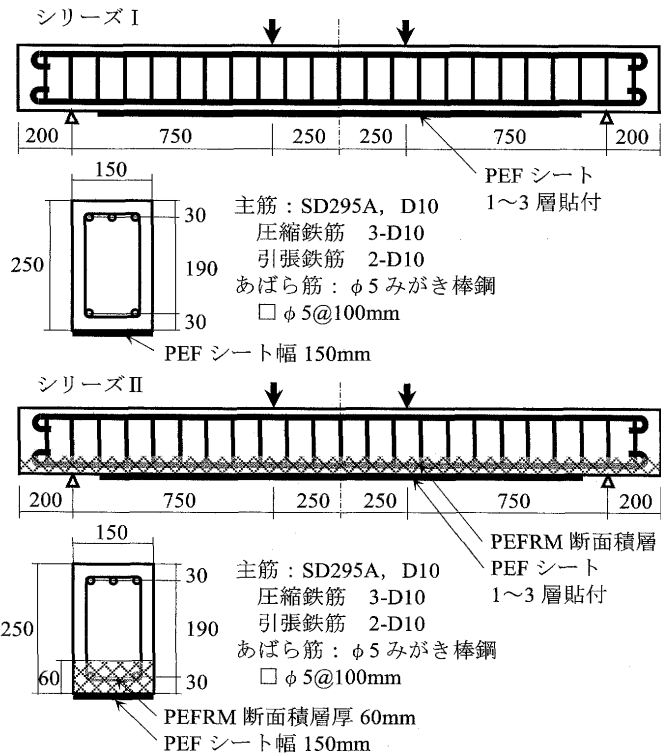


図3 RC梁試験体の形状寸法, 配筋および載荷方法

表6 RC梁試験体の仕様

試験	試験体記号	シート貼付層数 (枚)	PEFRM 積層厚 (mm)	個数
シリーズ I	PEF-1	1	0	1
	PEF-2	2		1
	PEF-3	3		1
シリーズ II	PEFRM60-0	0	60	1
	PEFRM60-1	1		1
	PEFRM60-2	2		1
	PEFRM60-3	3		1

4. 実験結果および考察

表7に, コンクリートおよび PEFRM の素材試験結果を示す。PEFRM の引張強度は, 普通コンクリートのそれに比べて, 供試体寸法は異なるが, 約4倍と大きな値を有していることが分かる。

図4に, RC梁試験体のひび割れおよび最終的破壊性状を示す。シリーズIのPEF-1~3試験体については, 純曲げ区間における曲げひび割れ, せん断スパン内での曲げせん断ひび割れの発生後, 片側の荷重点直下付近からかぶりコンクリートに生じた斜めひび割れがシート界面につながる形でシート端部に向かってシートが剥離し, 最終的破壊に至った。特にPEFシートを3層貼付したPEF-3試験体では, シートの剥離に伴うかぶりコンクリートの剥落が顕著であった。また, シートの付着剥離領域が純曲げ区間にまで及んでいるが, シート端部が剥離し, 耐力が一旦低下した後の継続荷重の段階で生じたものである。一方, シリーズIIのPEFRM60-0~3試験体のうち, シートを貼付していないPEFRM60-0試験体については, 純曲げ区間においてPEFRM積層部とコンクリートとの接合面でコンクリート側に曲げひび割れがまず発生し, PEFRM積層部の方にも複数の曲げひび割れが発生した後, 最終的には圧縮側コンクリートの圧壊により最終的破壊に至った。なお, PEFRM積層部とコンクリート

表7 コンクリートおよび PEFRM の素材試験結果

シリーズ I						
		$F_c$ N/mm <sup>2</sup>	$E$ N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{co}$ $\mu$	$F_t$ N/mm <sup>2</sup>	
コンクリート	標準 28 日	34.0	33400	—	—	
	現場 28 日	37.9	30600	2320	2.89	
シリーズ II						
		$F_c$ N/mm <sup>2</sup>	$E$ N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{co}$ $\mu$	$F_t$ N/mm <sup>2</sup>	$F_b$ N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	標準 28 日	32.7	31900	—	—	—
	現場 28 日	40.1	28700	2520	2.36	—
PEFRM	標準 28 日	52.7	12600	—	9.14	17.6
	現場 28 日	68.8	13900	5600	9.14	15.6

\*  $F_c$ : 圧縮強度,  $E$ : ヤング係数,  $\epsilon_{co}$ : 圧縮強度時のひずみ,  $F_t$ : 割裂引張強度 (コンクリート:  $\phi 100 \times 200$ mm 円柱供試体各3個, PEFRM:  $\phi 50 \times 100$ mm 円柱供試体各3個)

\*  $F_b$ : 曲げ強度 (PEFRM:  $40 \times 40 \times 160$ mm 角柱供試体3個)

との接合面におけるせん断ずれは特に観察されなかった。PEFRM60-1~3試験体については, 初期はPEFRM60-0試験体と同様のひび割れ性状を呈した後, 荷重の増加とともにPEFRM積層部とコンクリートとの接合面に沿ってひび割れが発生したが, PEFRMの積層中に含まれるあばら筋が接合部においてシアコネクタとして作用し, 接合面でのずれせん断破壊は生じなかった。最終的には, この場合もPEFRM積層部に斜めひび割れが発生し, それがシート界面につながる形でシートの付着剥離によって最終的破壊に至った。なお, 本論文では紙面の都合で割愛したが, かぶり部分のみをPEFRMで積層補強した場合には, 無積層に比べてシートの曲げ補強効果の改善が認められたものの, 接合面での全面的なずれせん断破壊により最終的な破壊を生じた<sup>15)</sup>。

図5に, RC梁試験体の荷重-スパン中央変位曲線, 曲げモーメント-曲率関係および荷重-スパン中央シートひずみ曲線の測定値を示す。また, 図6には, RC梁試験体の引張鉄筋降伏荷重および最大荷重の測定値を示す。なお, シートを貼付したすべての試験体について, シートの付着剥離によって最大荷重に達したので, 最大荷重点がシートの付着耐力となっている。

シリーズIのPEF-1~3試験体に関して, シート貼付層数の増加に伴い, 引張鉄筋降伏荷重およびシート付着耐力(最大荷重)の増加が認められるが, シート剥離時点の変形能力は大きく低下すること, またシート剥離時点のシートひずみの測定値は, シートの破断ひずみの公称値(約26400 $\mu$ )の約0.3~0.5程度となっており, シートの引張性能が十分に発揮されないうちにシートの付着剥離が生じていることが分かる。また, 図7には, 前述の断面解析による荷重-シートひずみ関係の計算値と測定値との比較を示す。3層貼付の場合に, PEFRM積層部とコンクリートとの接合面でせん断ずれが局部的に拡大し, 引張鉄筋降伏以降で計算値と測定値との間に多少のずれを生じているが, シート剥離時点までの測定値と計算値との間に概ね良い対応が得られているものと考えられる。また, 図2の解析結果に示すシートの付着耐力の計算値 $P_{beal}$ についても, コンクリートの引張強度 $F_t$ に, 次式に示す靱性保証型耐震設計指針式のせん断ひび割れ強度の値を用いると, 測定値と良い対応が得られていることが分かる。

$$F_t = 0.33\sqrt{F_c} = 2.03 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (9)$$

ここに、 $F_c$ : コンクリートの圧縮強度 ( $N/mm^2$ )

シリーズIIのPEFRM60-0~3試験体に関しては、シート無貼付のPEFRM60-0試験体に対して、シートを貼付した場合(PEFRM60-1~3試験体)の最大荷重は、約2.0~2.7倍と大きく増加し、シートを1~2層貼付した場合(PEFRM60-1,2試験体)には、シート剥離時点のシートひずみの測定値は、ほぼシート破断ひずみの公称値(約26400 $\mu$ )に近い値となっており、シートの引張性能が十分に発揮さ

れていることが分かる。また、PEFRMで断面積層補強を施していないシリーズIのPEF-1~3試験体との比較では、シート付着耐力(最大荷重)は、約1.7~2.0倍と大きく増加し、PEFRMの断面積層補強によって、シートの曲げ補強効果が顕著に改善されることが分かる。また、図2の解析結果との比較では、PEFRMの素材試験による引張強度が $F_t=9.14N/mm^2$ (表7参照)であり、この値をそのまま採用すると、シート貼付層数が1~3層のすべてについてシート

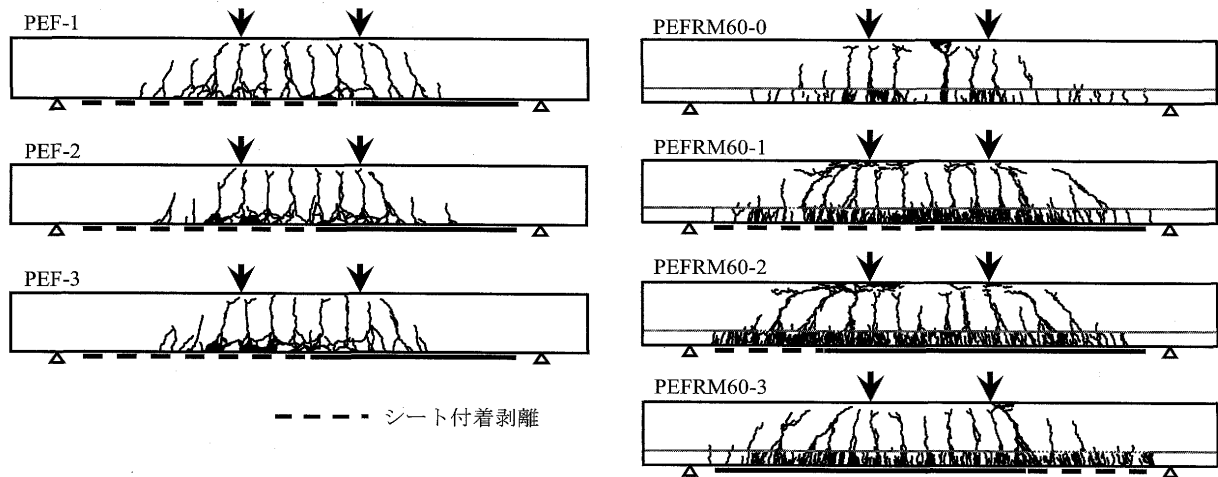


図4 RC梁試験体のひび割れおよび終局的破壊性状

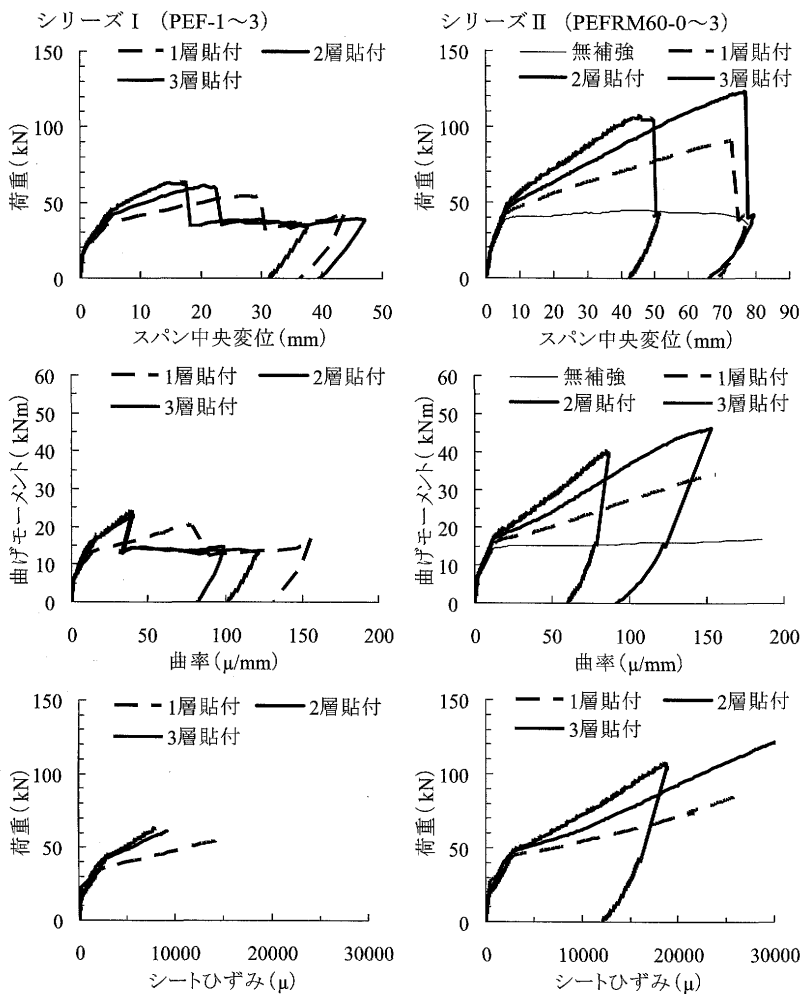


図5 荷重-変位、曲げモーメント-曲率および荷重-シートひずみ曲線

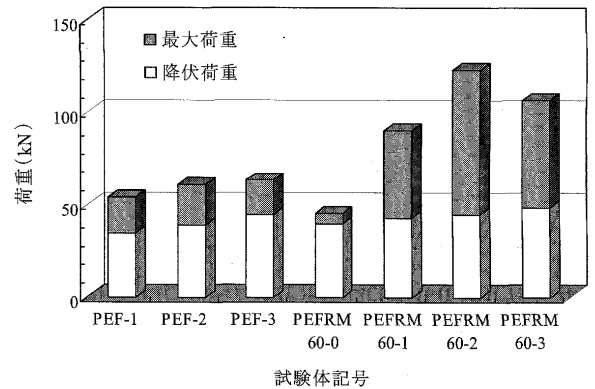


図6 試験体の引張鉄筋降伏および最大荷重の測定値

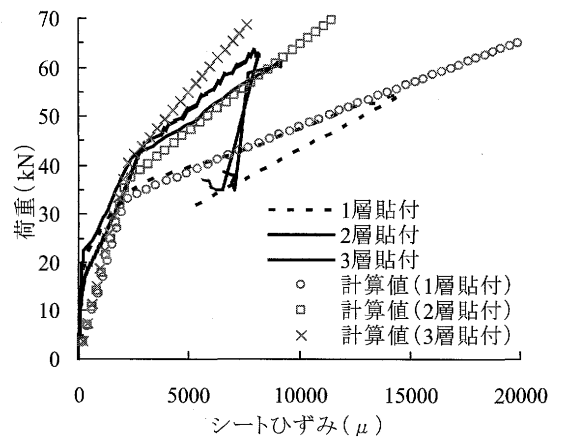


図7 荷重-シートひずみ曲線の測定値と計算値 (シリーズI: PEF-1~3試験体)

の破断により最大荷重に達することになる。実験結果では、シートを1~2層貼付したものは、シート剥離時点のシートひずみの測定値が、ほぼシート破断ひずみの公称値に近い値となっているが、シートを3層貼付したものでは、シート剥離時点のシートひずみの測定値は、シート破断ひずみの公称値の約7割程度となっている。この理由として、前述のように、3層貼付の場合には、PEFRM積層部とコンクリートとの接合面で局所的にせん断ずれが拡大したために、引張応力が十分にシートに伝達されなかったことやPEFRMの部材における引張強度が、強度の寸法効果により、素材試験による値よりも小さくなることなどが考えられる。従って、シートの付着耐力算定には、シート貼付層数が多くなった場合のPEFRM積層部とコンクリートとの接合面での局所的なせん断ずれの影響やPEFRMの引張強度の寸法効果の定量的評価が今後必要となる。ただし、普通コンクリートに比べて高引張強度のPEFRMで断面積層補強を施すことにより、かぶり部での斜めひび割れの発生が遅延され、シートの付着耐力が改善されるという解析的予測の妥当性が、本実験結果により十分に裏付けられたものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、RC梁に対する連続繊維シートによる曲げ補強効果の改善を目的に、シートの付着剥離の起点となるかぶりコンクリート部の斜め引張りひび割れを抑えるために、劣化したかぶりコンクリートの断面修復を想定し、RC梁の曲げ引張側を高引張強度の繊維補強モルタルで積層補強した場合のシートの曲げ補強効果について解析および実験的検討を行った。その結果として、高引張強度の繊維補強モルタルの積層補強は、かぶり部での斜めひび割れの発生を起点とするシートの付着剥離を抑制し、シートの曲げ補強効果を大幅に向上させることが解析および実験的に確認された。

## 謝辞

本研究にあたっては、熊本大学名誉教授の三井宜之先生、熊本大学工学部専門技術職員の甲斐定夫氏、当時の同大学建築材料・施工研究室の大学院生および卒研生諸氏の協力をいただきました。また、ポリエチレン繊維シートおよび短繊維は、アイサワ工業㈱および東洋紡績㈱から提供を受けました。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 武田浩二ほか：炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートはりの曲げ補強効果，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.886-891，1995
- 2) 李翰承ほか：炭素繊維シートによって曲げ補強したRC梁の有限要素解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1065-1070，1996
- 3) 野口貴文ほか：鉄筋腐食をモデル化したRC梁における炭素繊維シートの曲げ補強効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1077-1082，1996
- 4) 鹿毛忠継ほか：RCはりのCFRPシートによる曲げ補強効果に及ぼす浮きの影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.425-430，1998
- 5) 劉玉撃ほか：炭素繊維シートで補強されたRC部材の破壊挙動の有限要素解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.1-6，1998
- 6) 岸徳光ほか：FRPシートを接着したRC梁の曲げ付着性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.515-520，1998
- 7) 武田浩二ほか：炭素繊維シート補強における端部定着方法の検討，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.854-860，1999
- 8) 三上浩ほか：FRPシートを接着したRC梁の耐荷性状に与える接着範囲の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1549-1554，1999
- 9) 栗橋祐介ほか：RC梁における載荷点間隔がFRPシートの曲げ付着性状に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1555-1560，1999
- 10) 岳尾弘洋ほか：せん断スパン比を変化させたCFRP補強梁の曲げ載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.205-210，1999
- 11) 栗橋祐介ほか：RC梁に接着したFRPシートの曲げ付着性状に与えるシート補強量の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.1，pp.481-486，2000
- 12) 原田哲夫ほか：端部増貼り補強による炭素繊維シートの定着耐力向上に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.1，pp.469-474，2000
- 13) 下田誠也ほか：ポリエチレン繊維シートによる鉄筋コンクリート梁の曲げ補強，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.573-579，2001
- 14) 栗橋祐介ほか：FRPシートの必要接着長に着目した曲げ補強RC梁の静載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.835-840，2001
- 15) 下田誠也ほか：断面修復を施した鉄筋コンクリート梁に対するポリエチレン繊維シートの曲げ補強効果に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.670-677，2002
- 16) 佐藤靖彦ほか：緩衝材を用いた炭素繊維シート補強RCはりの曲げ挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1375-1380，2002
- 17) 高橋義裕ほか：炭素繊維で曲げ補強したRCはりの耐力及び変形に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1393-1398，2002
- 18) 澤田純之ほか：FRPシート曲げ補強RC梁のシートの剥離抑制に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1417-1422，2002
- 19) 栗橋祐介ほか：引張剛性の等しい各種FRPシートを接着したRC梁の曲げ耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1429-1434，2002
- 20) 村上聖ほか：連続繊維シートによる鉄筋コンクリート梁の曲げ補強設計に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.561，pp.185-192，2002
- 21) 下田誠也ほか：断面修復を施した鉄筋コンクリート梁に対するポリエチレン繊維シートの曲げ補強効果の改善に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.57，pp.485-492，2003
- 22) 栗橋祐介ほか：FRPシート曲げ補強RC梁のシートの剥離抑制法に関する一検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1771-1776，2003
- 23) 澤田純之ほか：FRPシート曲げ補強RC梁のシート必要接着長算定に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1789-1794，2003
- 24) 張徳鋒ほか：下縁かぶり厚さの異なるFRPシート曲げ補強RC梁の耐荷性状に関する数値解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1795-1800，2003
- 25) 前田敏也ほか：緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の開発，コンクリート工学，Vol.41，No.11，pp.24-30，2003
- 26) 小室雅人ほか：側面補強を有するFRPシート曲げ補強RC梁の破壊挙動に関する数値解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.1603-1608，2004
- 27) 張徳鋒ほか：FRPシート曲げ補強RC梁の破壊挙動に及ぼす各種ひび割れの影響に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.1621-1626，2004
- 28) 岸徳光ほか：AFRPシート曲げ補強RC梁の破壊性状に及ぼすシート接着長の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.1615-1620，2004
- 29) 藤田真実ほか：緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の道路橋床版補強への適用，コンクリート工学，Vol.43，No.3，pp.52-56，2005
- 30) 澤田純之ほか：側面接着を施したFRPシート曲げ補強RC梁の耐荷挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.2，pp.1399-1404，2005
- 31) 山田真司ほか：側面接着シートの繊維強化方向を変化させたFRPシート曲げ補強RC梁の耐荷性状に関する数値解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.2，pp.1405-1410，2005
- 32) 岸徳光ほか：FRPシート曲げ補強RC梁の耐荷挙動に及ぼす補強筋の剛性の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.2，pp.1417-1422，2005

- 2005
- 33) 彭丰ほか：断面修復を考慮した RC はりの連続繊維シート補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1489-1494，2007
- 34) 小林克巳：RC 部材の曲げ補強に用いる炭素繊維シートの CF アンカーによる定着方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1513-1518，2007
- 35) 小林朗ほか：FRP スtrandシートの材料特性と RC 梁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.30，No.3，pp.1561-1566，2008
- 36) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説，1997
- 37) 董偉光ほか：マトリックス強度が繊維補強モルタルの力学的特性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.57，pp.458-463，2003

(2008年9月1日原稿受理，2008年12月1日採用決定)