

# 論文 AFRP シートを緊張して接着した RC/PC 梁の耐荷性状に関する実験的研究

澤田 純之<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・藤田 学<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では, AFRP シートに緊張力を導入して接着した場合の RC および PC 梁の曲げ耐力向上効果やシートの剥離性状を検討することを目的として 4 点曲げ載荷実験を行った。本実験では, 鉄筋比の異なる 2 種類の RC 梁と 1 種類の PC 梁試験体に対して, シートの導入緊張率を 0 および 25% とし, 無補強試験体を含む全 9 体により検討を行った。その結果, シート緊張接着によって RC/PC 梁の曲げひび割れ発生荷重を大幅に向上可能であること, 著者らが提案した FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測式は, シートを緊張して曲げ補強する RC 梁にも適用可能であること, などが明らかとなった。

**キーワード:** RC/PC 梁, AFRP シート, 曲げ補強, 緊張接着

## 1. はじめに

近年, 既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法として連続繊維 (FRP) シートを接着する工法が多く採用されている。しかしながら, FRP シートを RC 部材の引張り作用面に接着して曲げ補強を行う場合, シートの補強効果は主として主鉄筋降伏後に発揮されることが明らかになっている。従って, 引張側鋼材が降伏しにくいプレストレストコンクリート (PC) 部材では, FRP シートを単に接着するのみではひび割れ発生荷重の向上など, 曲げ耐荷性能を改善することは困難であると考えられる。

そのため, 最近では FRP シートの補強効果を初期段階より発揮させる方法としてシートに緊張力を導入して接着 (以後, 緊張接着) する工法<sup>1),2)</sup> が提案され, 一部で実用化されている。しかしながら, FRP シートを緊張接着した RC/PC 梁の耐荷性状やシートの剥離性状については未だ十分に検討されておらず, 合理的な補強設計手法の確立には至っていないのが現状である。

このような背景より, 本研究では FRP シート緊張接着による RC および PC 梁の曲げ耐荷性

能向上効果やシートの剥離性状の検討を目的として, FRP シートを緊張接着して曲げ補強した RC および PC 梁の静載荷実験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

表-1 には, 本実験に用いた試験体の一覧を

表-1 試験体一覧

試験体名	下端筋の種類	シートの保証耐力 (kN/m)	目標導入緊張率*	実測導入緊張率*
RC1-N	D13	-	-	-
RC1-T0		1,200	0 %	0 %
RC1-T25			25 % (53.2)	26 % (55.1)
RC2-N	D19	-	-	-
RC2-T0		1,200	0 %	0 %
RC2-T25			25 % (53.2)	27 % (58.2)
PC-N	φ 9.3 (60 %)	-	-	-
PC-T0		1,200	0 %	0 %
PC-T25			25 % (53.2)	25 % (53.2)

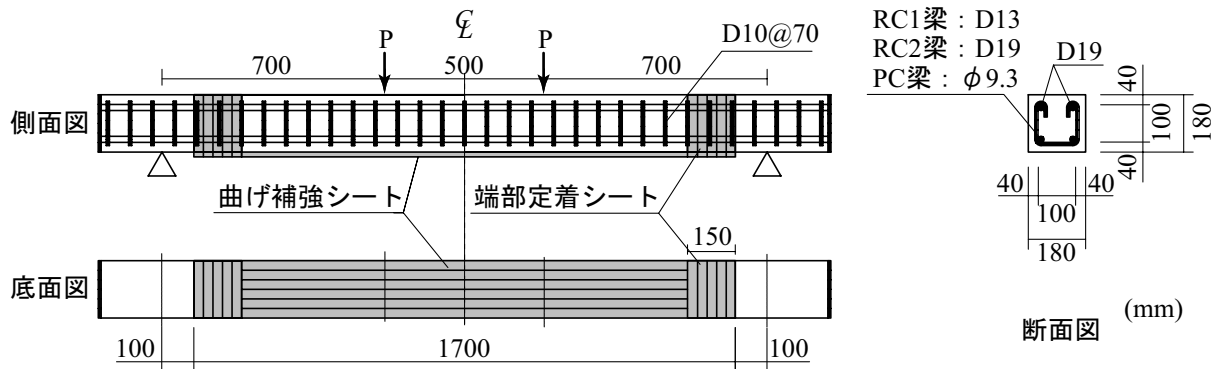
\* ( ) 内は導入緊張力 (kN)

\*1 室蘭工業大学 建設システム工学科 研究員 博(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学 建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

\*4 三井住友建設(株) 技術研究所 土木研究開発部長 博(工) (正会員)



図－1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

示している。試験体数は、下端筋を3種類とし、それぞれ無補強、シート緊張率を0、25%の3種類とした全9体である。曲げ補強シートには保証耐力1,200 kN/mのアラミド繊維製FRP (AFRP) シートを用い、導入緊張力の有無を変化させて検討を行った。表中、試験体名の第1項目は下端筋の種類 (RC1 : D13, RC2 : D19, PC : PC 鋼より線 φ 9.3), 第2項目は曲げ補強の有無 (N : 無補強, T : 補強) を示し, T に付随する数値は導入緊張率を示している。なお, 導入緊張率とはシートの引張耐力に対する導入緊張力の割合を示している。表にはロードセルより得られた導入緊張力を基にした各試験体の導入緊張率の実測値も併せて示している。また, PC 試験体では, PC 鋼より線の有効緊張率が引張強度の60%となるように緊張力を導入している。表-2, 3には, AFRP シートおよび下端筋の力学的特性値を示している。

図-1には、本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。試験体は、断面寸法 (梁幅 × 梁高) が 18 × 18 cm, 純スパン長 1.9 m の複鉄筋矩形 RC 梁である。下端筋には前述の通り3種類の鋼材を用い、上端筋にはいずれの梁においても D19 を用いた。曲げ補強シートは、幅 180 mm で梁中央部から両支点の 100 mm 手前までの範囲に接着している。なお、シートを緊張接着した試験体では、緊張力解放時におけるシート端部からの引き剥がれを防止するため、シートの両端部分に幅 15 cm のシートを U 字形に接着している。

表－2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
830	1,200	0.572	2.06	118	1.75

表－3 下端筋の力学的特性値

鋼材名称	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D13	SD345	373	565	206
D19	SD345	370	605	206
φ 9.3	PC 鋼より線	1,879	1,996	192.8

## 2.2 シート緊張力の導入方法

本実験では、油圧式の緊張力導入装置を製作し、曲げ補強シートの緊張力を以下の手順により導入した。すなわち、

- (1) AFRP シートに含浸接着樹脂 (以後、単に樹脂) を部分的に塗布して硬化させる、
- (2) AFRP シートと梁に樹脂を塗布し、シートを所定の位置にセットした後、装置により緊張力を導入し、その後梁に接着する、
- (3) 緊張力導入後、シートの浮き上がりを防止するため、シート上に形鋼を載せる、
- (4) 樹脂の硬化を確認した後、形鋼を撤去し、引き剥がれ防止のためにシート端部に U 字形シートを接着する、
- (5) U 字形シートの樹脂の硬化を確認した後、緊張力を解放して補強範囲外のシートを切断・除去する、

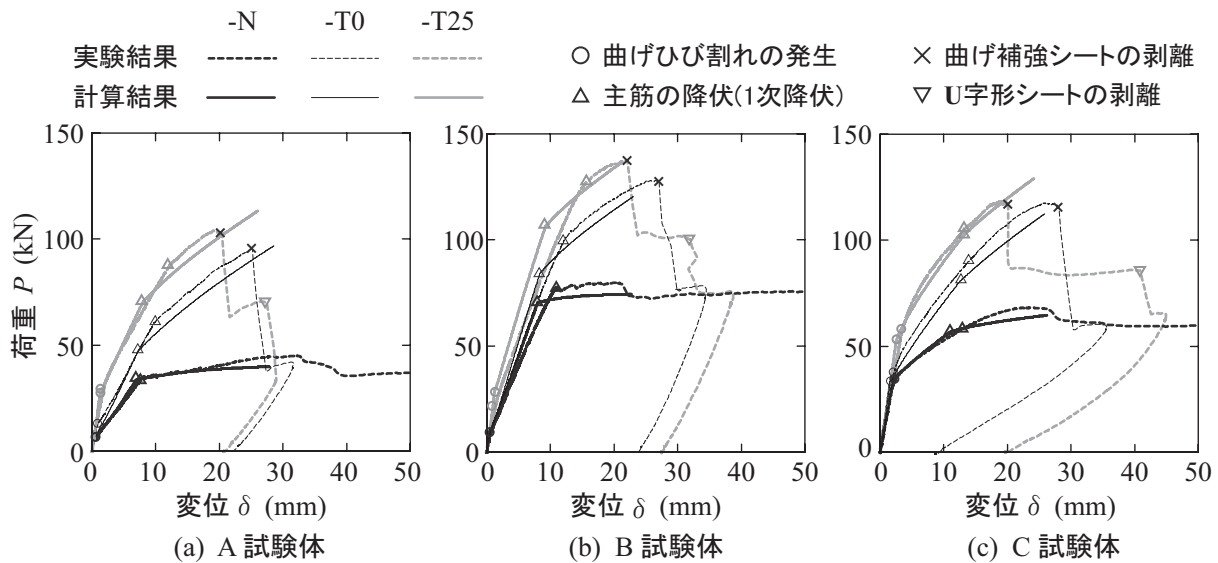


図-2 荷重-変位曲線の実験および計算結果の比較

である。

なお、本実験では緊張力導入から解放までロードセルによって張力を管理し、シートの導入緊張率を算出している。その結果、表-1に示すように所定の緊張率が確保されていることを確認している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 荷重-変位関係

図-2には、荷重-梁中央変位曲線の実験および計算結果を試験体の種類ごとに比較して示している。計算結果は完全付着(平面保持)を仮定した断面分割法(以後、単に計算結果)により算出している。なお、各種材料特性値は前述の試験値および示方書に準拠して算出した値を用いている。計算結果は、いずれの試験体も上縁コンクリートのひずみが圧縮破壊ひずみ(3,500 $\mu$ )に到達して終局に至っている。

図-2(a)より、シートを接着したRC1-T0、RC1-T25試験体の場合には、緊張力導入の有無にかかわらず、無補強のRC1-N試験体よりもひび割れ発生後の剛性勾配、降伏荷重および最大荷重が増大していることが分かる。また、シートを緊張接着したRC1-T25試験体の場合には、緊張力を導入していないRC1-T0試験体よりもひび割れ発生荷重、降伏荷重および最大荷重が

増大していることが分かる。

図-2(b)より、RC1試験体と同様に、シートを緊張接着したRC2-T25試験体の場合には、緊張せずに接着したRC2-T0試験体と比較して、ひび割れ発生荷重、降伏荷重および最大荷重が増大していることが分かる。ただし、無補強試験体に対する各荷重の増加割合は、RC1試験体よりも小さい。これは、RC2試験体の方が下端鉄筋比が大きいため、AFRPシートが分担する引張力の割合が小さくなることによるものと考えられる。

図-2(c)より、PC試験体ではAFRPシートを接着することでひび割れ発生荷重は無補強試験体と同等であるものの、ひび割れ発生後の剛性勾配が増大していることが分かる。また、シートを緊張接着したPC-T25試験体では、ひび割れ発生荷重が大きく増大していることが分かる。しかしながら、最大荷重に関しては、緊張力導入の有無にかかわらず、ほぼ同程度の値を示している。

各試験体ごとの実験結果と計算結果を比較すると、全般的に実測最大荷重時まで両者は比較的良好に対応していることが分かる。このことより、RCおよびPC梁にAFRPシートを緊張接着して曲げ補強する場合においても、シートがピーリング作用により剥離するまでは、断面分

表－４ 実験結果および計算結果の一覧

試験体名	降伏モーメント $M_y$ (kNm)	終局モーメント $M_u$ (kNm)	$M_y / M_u$	予測される破壊形式	実測値		計算値		$P_{ue} / P_{uc}$	$\delta_{ue} / \delta_{uc}$	実験による破壊形式
					荷重 $P_{ue}$ (kN)	変位 $\delta_{ue}$ (mm)	荷重 $P_{uc}$ (kN)	変位 $\delta_{uc}$ (mm)			
					RC1-N	11.8	13.9	0.85			
RC1-T0	16.6	33.9	0.49	剥離破壊型	95.4	25.1	96.8	28.6	0.99	0.88	剥離破壊型
RC1-T25	24.6	39.8	0.62	剥離破壊型	104.1	19.1	113.7	26.3	0.92	0.73	剥離破壊型
RC2-N	24.7	26.0	0.95	-	79.8	19.8	74.3	22.7	1.07	0.87	-
RC2-T0	29.5	42.2	0.70	曲げ圧壊型	127.9	25.8	120.4	23.0	1.06	1.12	曲げ圧壊型
RC2-T25	37.2	48.0	0.78	曲げ圧壊型	137.6	22.0	136.8	21.3	1.01	1.03	曲げ圧壊型

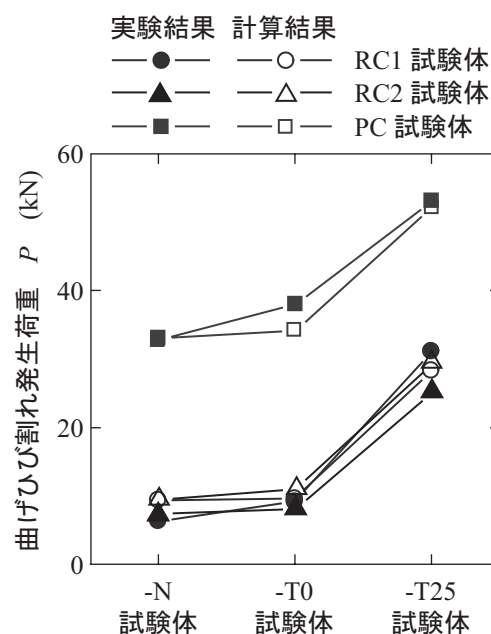
割法によって耐荷性状を概ね評価可能であると言える。なお、このピーリング作用の発生は、RC1/RC2 試験体では下端鉄筋の降伏、PC 試験体では PC 鋼より線の 1 次降伏による曲率の急激な増加によるものと考えられる。

### 3.2 曲げひび割れ発生荷重

図－3 には、各試験体の曲げひび割れ発生荷重に関する実験および計算結果を示している。図より、いずれの試験体においても、シートに緊張力を導入せずに接着した試験体の曲げひび割れ発生荷重は、無補強試験体と大差がないことが分かる。これに対して、シートを緊張接着した試験体では、各試験体ともに曲げひび割れ発生荷重が大きく向上していることが分かる。このことより、AFRP シートを緊張接着することによって、RC 梁のみならず PC 梁の曲げひび割れ発生荷重も向上可能であることが明らかになった。また、実験および計算結果はほぼ対応していることより、AFRP シートを緊張接着することによる曲げひび割れ発生荷重の向上効果は、断面分割法により比較的精度良く推定可能であるものと判断される。

### 3.3 破壊形式の予測

著者らは既往の研究より、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は計算結果到達後にシート剥離によって終局に至る曲げ圧壊型および計算結果到達前にシート剥離に至る剥離破壊型に分類されることを明らかにしている。また、その破壊形式は断面分割法から算出される降伏モーメント  $M_y$  および終局モーメント  $M_u$  を用いて



図－3 曲げひび割れ発生荷重に関する実験および計算結果

予測可能であることを明らかにしている<sup>3)</sup>。すなわち、

$$\text{曲げ圧壊型の場合： } M_y / M_u > 0.70 \quad (1)$$

$$\text{剥離破壊型の場合： } M_y / M_u < 0.65 \quad (2)$$

である。ここでは、AFRP シートを緊張接着して曲げ補強した RC 梁に対する本破壊形式予測法の適用性を検討することとする。

表－4 には、RC 梁試験体の実験および計算結果の一覧を示している。また、表中には各試験体の  $M_y$ ,  $M_u$  および  $M_y / M_u$  と上式により予測される破壊形式を併せて示している。なお、計算結果による破壊形式は安全側で評価するため、 $M_y / M_u > 0.70$  を曲げ圧壊型、その他を剥離破壊



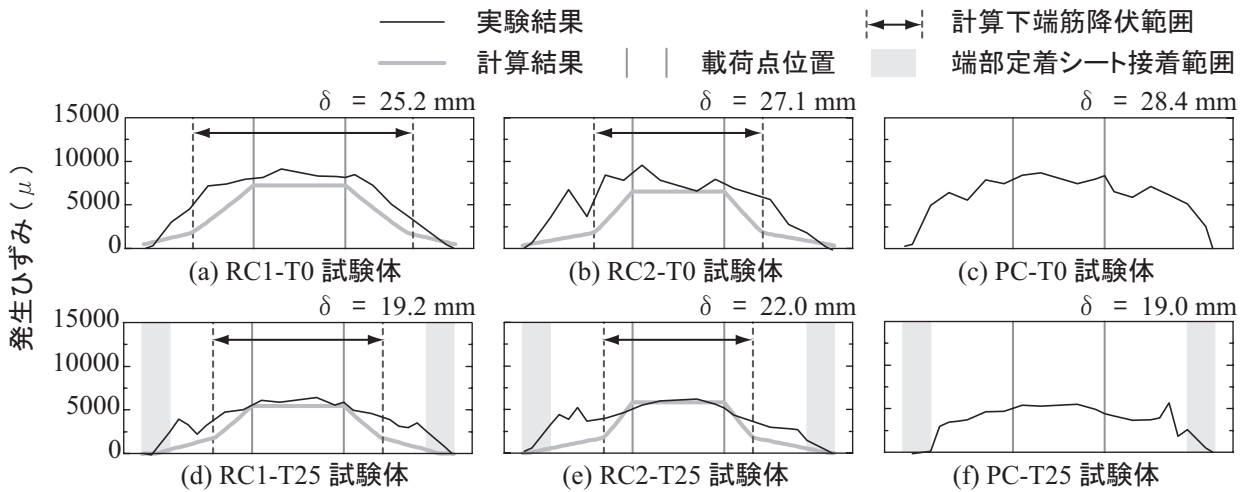


図-4 実測最大荷重時近傍におけるシートのひずみ分布

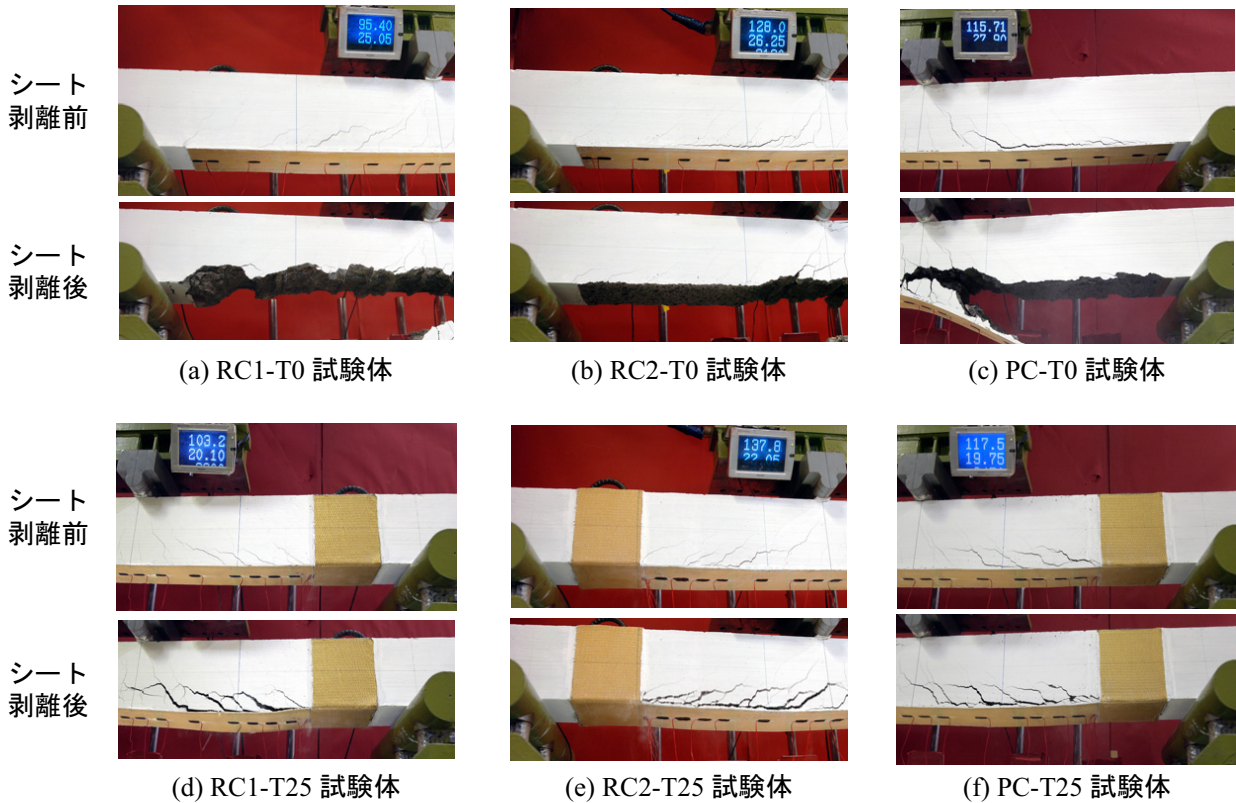


写真-1 シート剥離前後のひび割れ状況

型とした。また、実験による破壊形式は、実測最大荷重  $P_{ue}$  が計算最大荷重  $P_{uc}$  よりも大きく、かつ実測最大荷重時変位  $\delta_{ue}$  が計算最大荷重時変位  $\delta_{uc}$  よりも大きい場合を曲げ圧壊型、その他を剥離破壊型とした。表-4より、いずれの試験体においても、上式により予測される破壊形式と実験の破壊形式は対応していることが分かる。このことより、AFRPシートを緊張接着

して曲げ補強したRC梁においても前述の破壊形式予測法は適用可能であると判断される。

なお、FRPシートにより曲げ補強されたPC梁に関する実験データは少なく、破壊形式の予測方法が未だ十分には検討されていないため、PC試験体については破壊形式の予測を行っていない。今後は、FRPシート曲げ補強PC梁の破壊形式予測に関する検討も併せて行う予定で

ある。

### 3.4 シートの剥離性状

図-4には、各試験体の実測最大荷重時近傍におけるAFRPシートの軸方向ひずみ分布を示している。なお、RC2試験体では実測最大荷重が計算最大荷重を上回っているため、計算最大荷重時におけるひずみ分布を示している。また、写真-1には、シート剥離直前および直後におけるひび割れ状況を示している。

図-4より、いずれの試験体においても、等曲げ区間よりも広範囲に同一レベルのひずみが生じており、シートの部分剥離によりひずみの均等化が生じていることが分かる。また、写真-1のシート剥離前より、いずれの試験体も等せん断力区間の載荷点近傍下縁かぶりコンクリートに斜めひび割れが発生しており、その先端部からシートの剥離が進展していることが確認できる。このことより、既往の研究<sup>3)</sup>と同様に、斜めひび割れの先端部がシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用によってシート剥離が顕在化し、最終的に全面剥離に至ったものと考えられる。

これらのことより、梁の引張力作用面に接着したAFRPシートの剥離は、下端筋の径やプレストレスの有無およびAFRPシートへの緊張力導入の有無にかかわらず、ピーリング作用によって発生することが明らかになった。なお、PC鋼より線にひずみゲージは貼り付けていないが、計算ではいずれのPC試験体も実測最大荷重時にPC鋼より線が1次降伏していることを確認している。

### 4. まとめ

本研究では、AFRPシート緊張接着によるRCおよびPC梁の曲げ耐力向上効果やシートの剥

離性状の検討を目的として、AFRPシートを緊張接着したRCおよびPC梁の静載荷実験を実施した。本実験により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) AFRPシートに緊張力を導入してRC梁やPC梁の引張力作用面に接着することにより、梁のひび割れ発生荷重が大きく増大する。また、RC梁では降伏荷重および最大荷重も増大するが、PC梁の最大荷重はシート剥離が先行したためほとんど増加していない。
- 2) 著者らにより提案されているFRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式予測式は、FRPシートを緊張して曲げ補強したRC梁にも適用可能である。
- 3) RCおよびPC梁の引張力作用面に接着されたAFRPシートは、緊張力導入の有無にかかわらずピーリング作用によって剥離する。

### 参考文献

- 1) 呉 智深, 松崎 智優, 福沢 公夫, 神田 建: CFRPシート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000.2
- 2) 中島 規道, 三上 浩, 藤田 学, 田村 富雄: アラミド繊維シートを緊張接着したRC梁の曲げ耐荷性状, 土木学会第59回年次学術講演会, pp.619-620, 2004.9
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.8