

AFRP シートの緊張接着により曲げ補強した RC/PC 梁の静載荷実験

Static loading test of RC/PC beams reinforced in flexure with prestressed AFRP sheet

室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 三井住友建設 (株) 正会員 藤田 学 (Manabu Fujita)
 室蘭工業大学 ○ 学生員 池田 聡 (Satoshi Ikeda)

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、ひび割れの発生を許容しないプレストレストコンクリート (PC) 部材等において、ひび割れ発生荷重を向上させることは、通常の FRP シート接着工法で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^{1),2)}が提案されており、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 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に、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示している。試験体数は、下端筋を 3 種類、補強方法を 3 種類に変化させた全 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

表-1 試験体一覧

試験体名	下端筋の種類	AFRP シートの保証耐力 (kN/m)	シートへの導入緊張率*
A-N	D13	-	-
A-T0		1,200	0
A-T25			25 % (53.2)
B-N	D19	-	-
B-T0		1,200	0
B-T25			25 % (53.2)
C-N	φ 9.3	-	-
C-T0		1,200	0
C-T25			25 % (53.2)

* () 内はシート緊張力 (kN)

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 (A : D13, B : D19, C : PC 鋼より線 φ 9.3), 第 2 項目は曲げ補強の有無もしくは導入緊張率 (N : 無補強, T0 : 0%, T25 : 25%) 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緊張力の割合を示している。また、C 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 シートおよび主鉄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 種類の鋼材を用いており、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、シートに緊張力を導入した試験体の場合には、緊張力解放後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。

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) あらかじめ、アラミド繊維シートに含浸接着樹脂を部分的に塗布して硬化させ FRP 化する、
- (2) AFRP シートと RC 梁に含浸接着樹脂を塗布し、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する、
- (3) 緊張力導入確認後、AFRP シートの浮き上がり防止のためシート上に形鋼を載せる、

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	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 主鉄筋の力学的特性値

鉄筋名称	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

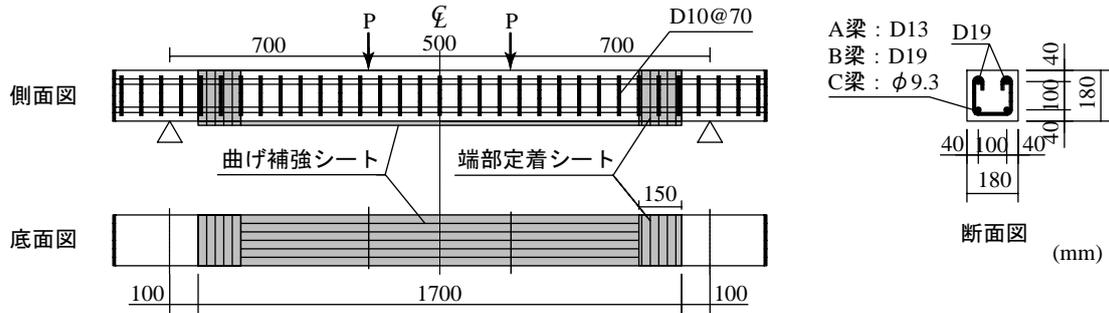


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

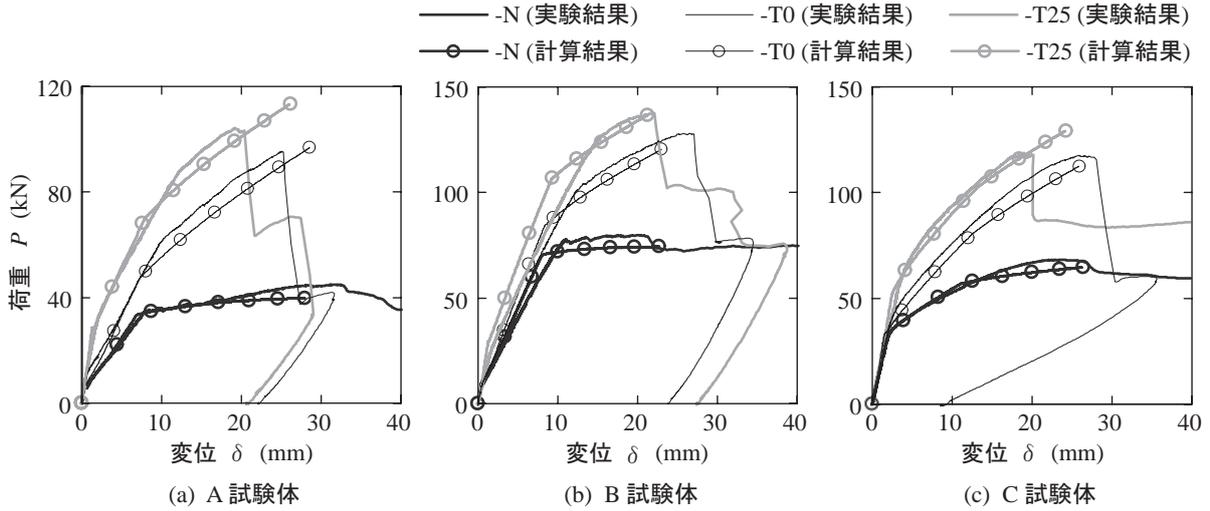


図-2 荷重-変位曲線の実験および計算結果の比較

- (4) 含浸接着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AFRPシート端部の所定の範囲にU字形シートを接着する、
 - (5) 端部に接着したU字形シートの樹脂の硬化を確認した後、緊張力を解放し曲げ補強範囲外のシートを切断・除去する、
- である。

なお、本実験では緊張力解放後におけるAFRPシートのひずみの変化を測定している。その結果、接着後においてもシートのひずみに大きな変動はなく、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、下端筋の異なる各試験体に関する荷重-変位曲線の実験結果を計算結果と比較して示している。なお、計算結果は、前述の各材料物性値を用い断面分割法により算出したものである。計算結果では、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 μ)に到達して終局に至っている。

図-2(a)より、緊張力を導入せずにシートを接着したA-T0試験体の場合には、無補強のA-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大きくなっていることが分かる。一方、緊張力を導入してシートを接着したA-T25試験体の場合には、A-T0試験体よりもひび割れ発生荷重が大きくなっていることが分かる。ま

た、主鉄筋降伏時および終局時の荷重も、A-T25試験体の方がA-T0試験体よりも大きいことが分かる。

図-2(b)より、シートを緊張接着したB-T25試験体の場合には、緊張せずに接着したB-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大きくなっていることが分かる。ただし、AFRPシート接着による荷重の増加割合は、B試験体の方がA試験体よりも小さい。これは、B試験体の方が主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いことによるものと考えられる。

図-2(c)より、PC鋼より線を用いてプレストレスを導入したPC梁の場合には、緊張力を導入せずにシートを接着することでひび割れ発生後の剛性勾配が大きく改善されていることが分かる。また、緊張力を導入して接着することにより、ひび割れ発生荷重が大きく増大することが分かる。ただし、最大荷重は、緊張力導入の有無によらずほぼ同程度である。

実験結果と計算結果を比較すると、B-T25試験体の場合には、実験結果の剛性勾配が計算結果のそれよりも多少小さく示されているものの、他の試験体に関しては全般的に実測最大荷重時まで実験および計算結果はほぼ対応している。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、断面分割法によって耐荷性状を概ね評価可能であることが分かる。このピーリング作用の発生は、AおよびB試験体では主鉄筋が降伏し、C試

表-4 実験結果および計算結果の一覧

試験体名	M_y (kNm)	M_u (kNm)	M_y / M_u	予測される 破壊形式	P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)	P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)	P_{ue} / P_{uc}	$\delta_{ue} / \delta_{uc}$	実験による 破壊形式
A-N	11.8	13.9	0.85	-	45.0	31.8	39.8	28.0	1.13	1.14	-
A-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
A-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
B-N	24.7	26.0	0.95	-	79.8	19.8	74.3	22.7	1.07	0.87	-
B-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
B-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

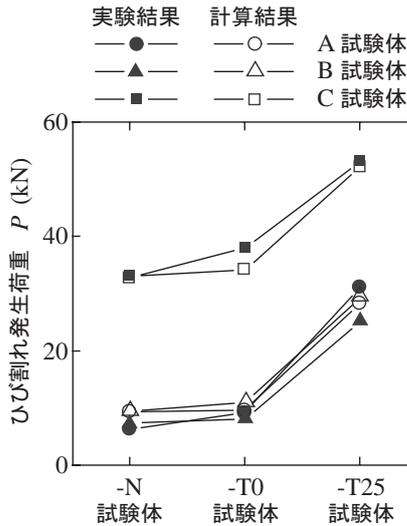


図-3 ひび割れ発生荷重に関する実験および計算結果

験体ではPC鋼より線が1次降伏点を越えたことによるものと考えられる。

3.2 ひび割れ発生荷重

図-3には、各試験体の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、下端筋の種類にかかわらず、AFRPシートに緊張力を導入せずに接着する場合には、ひび割れ発生荷重が多少増加するものの、その増分は小さいことが分かる。これに比較して、緊張力を導入して接着した場合には、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シートを緊張して接着することによって、RC梁のみならずPC梁の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、実験結果は計算結果とほぼ対応していることより、AFRPシートの緊張接着による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、既往の研究において、FRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式を、断面分割法により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 を用いて推定可能であることを明らかにしている³⁾。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。本節では、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、AおよびB試験体の実験および計算結果の一覧を示している。表には、各試験体の M_y, M_u および M_y / M_u を整理し、上式に基づいて予想される破壊形式を示している。なお、計算結果の破壊形式では安全側で評価するため、 $M_y / M_u > 0.70$ を曲げ圧壊型、その他を剥離破壊型とした。また、実験結果による破壊形式は、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 δ_{ue} が計算最大荷重時変位 δ_{uc} よりも大きい場合を曲げ圧壊型、それ以外の場合を剥離破壊型と判定することとした。表より、いずれのRC梁試験体においても、提案式により予測された破壊形式は、実験結果による破壊形式と対応していることが分かる。このことより、AFRPシートに緊張力を導入して曲げ補強する場合においても前述の破壊形式予測法は適用可能であるものと判断される。

なお、FRPシートにより曲げ補強されたPC梁に関する破壊形式の予測については、未だ十分に検討されていないため、C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梁に関する実験データを蓄積し、破壊形式予測に関する検討を行う必要がある。

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、B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シートひずみ分布を示した。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で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を見ると、いずれの試験体も等せん断力区間において載荷点近傍の下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れ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が剥離していることが分かる。

これらのことより、梁の引張り作用面に接着した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C試験体も実測最大荷重時にはPC鋼より線

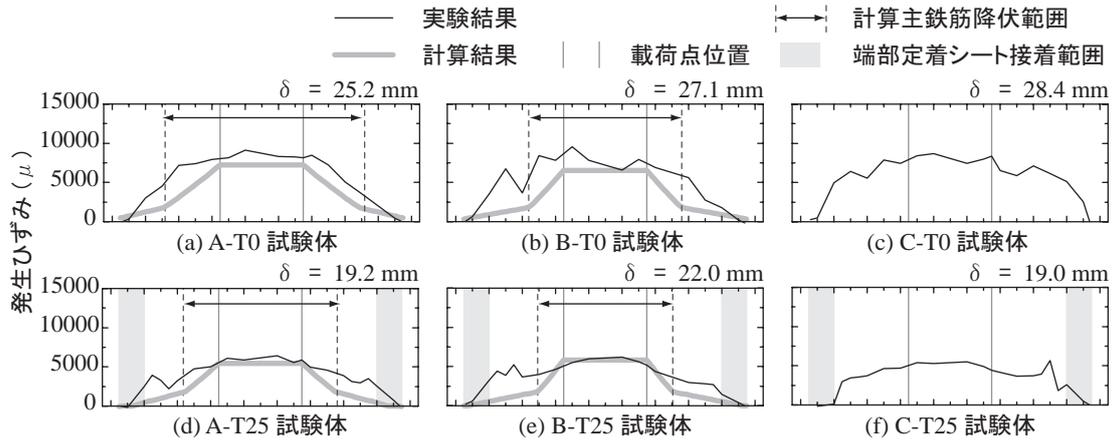


図-4 実測最大荷重時近傍におけるひずみ分布

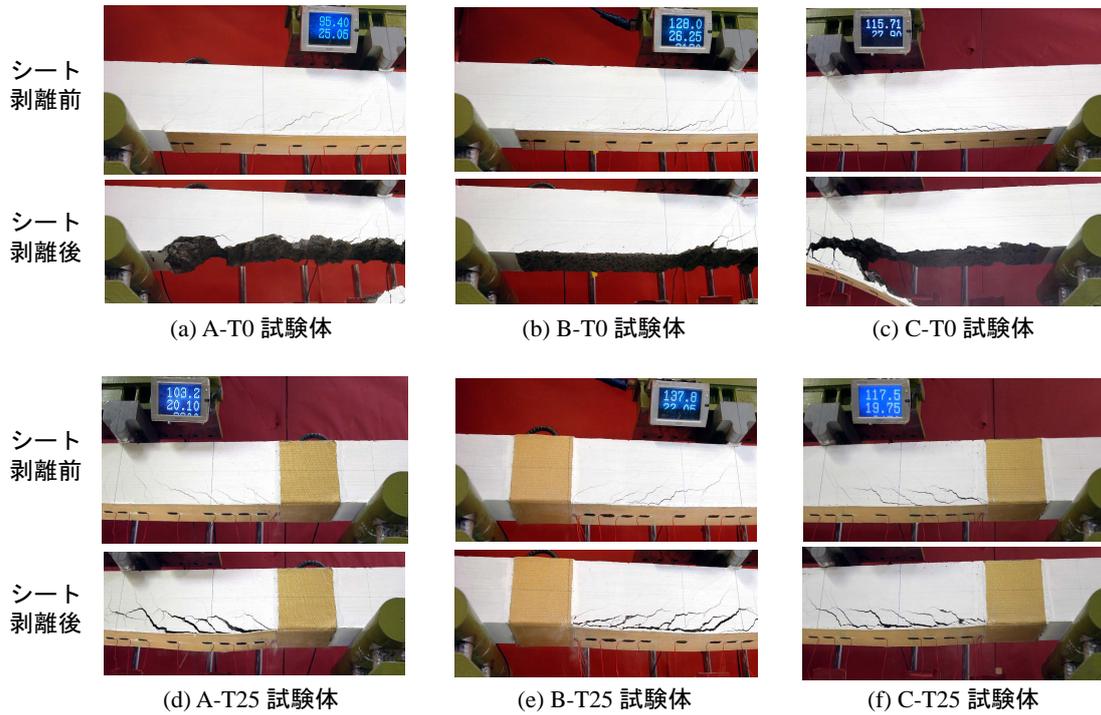


写真-1 シート剥離前後のひび割れ状況

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梁の引張り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向上する。また、RC梁では降伏荷重および最大荷重も向上するが、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する場合においても適用可能である。

- 3) RCおよびPC梁の引張り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, 神口 建: CFRPシート緊張接着した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梁の曲げ耐力性状, 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梁の曲げ耐力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