

AFRP シート緊張接着 RC 梁の耐荷性状に及ぼすシート導入緊張率の影響

Effect of pre-tensioning ratio of AFRP sheet on load-carrying behavior of flexural reinforced RC beams with pre-tensioned AFRP sheet

室蘭工業大学大学院
三井住友建設（株）
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
○ 学生会員 AbdelAziz Mohamed Ali
学生会員 青坂 真也 (Shin-ya Aosaka)

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) シートを接着する方法が数多く採用されている。著者らはこれまで、FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状やシートの剥離性状を検討するため、数多くの静載荷実験を行ってきた¹⁾。その結果、1) FRP シート曲げ補強 RC 梁のシート剥離する場合の破壊性状は、計算耐力到達後、上縁コンクリートが圧壊した後にはシートが剥離する「曲げ圧壊型」と、計算耐力到達前にシートが剥離する「剥離破壊型」に分類できる、2) シートの剥離は等せん断力区間における載荷点近傍の下縁かぶりコンクリート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り生じる、3) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は計算終局曲げモーメント M_u に対する計算降伏曲げモーメント M_y の比 M_y/M_u を用いることにより推定可能であることを明らかにしている。

一方、最近では、FRP シートの補強効果をより効率的に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) する工法が提案されている。著者らは、これまで、緊張接着用シート端部にアンカー等の定着治具を用いずに施工可能なアラミド繊維製 FRP (AFRP) シート緊張接着工法を開発し、その補強効果を確認している。また、緊張接着することでピーリング作用によるシートの部分剥離が抑制される傾向にあることを明らかにしている。

表-1 試験体一覧

試験体名	目標導入緊張率*	実測導入緊張率*	実測初期導入ひずみ (μ)	M_y/M_u
N	無補強	-	-	-
T0	0 %	0 %	0	0.55
T20	20 % (51.7)	22.2 % (57.5)	3,892	0.65
T40	40 % (104)	40.1 % (104)	7,009	0.72
T50	50 % (129)	50.8 % (131)	8,883	0.76

* () 内は導入緊張力 (kN)
 M_y は計算降伏モーメント
 M_u は計算終局モーメント

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)	設計厚 (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75
435/435	588/588	0.286			

しかしながら、AFRP シート緊張接着 RC 梁のシートの剥離性状に関する検討は十分でなく、特に導入緊張率とピーリング作用の抑制効果との関係は明確にな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 AFRP シート緊張接着 RC 梁のシート剥離性状を含めた曲げ耐荷性状に及ぼすシート導入緊張率の影響を検討することを目的として、AFRP シートの導入緊張率を変化させた AFRP シート緊張接着 RC 梁の静載荷実験を実施した。

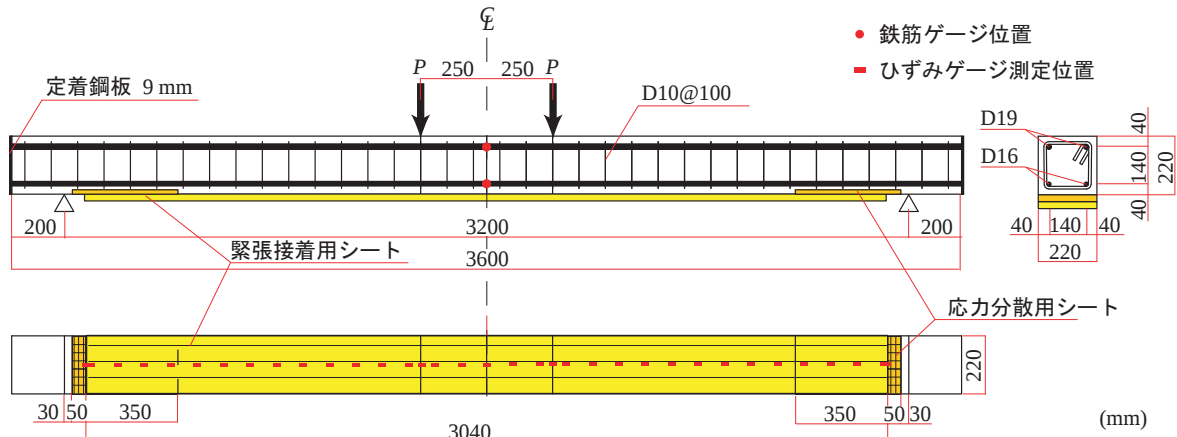
2. 実験概要

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、無補強試験体の他、AFRP シートを無緊張および緊張接着した全 5 体である。

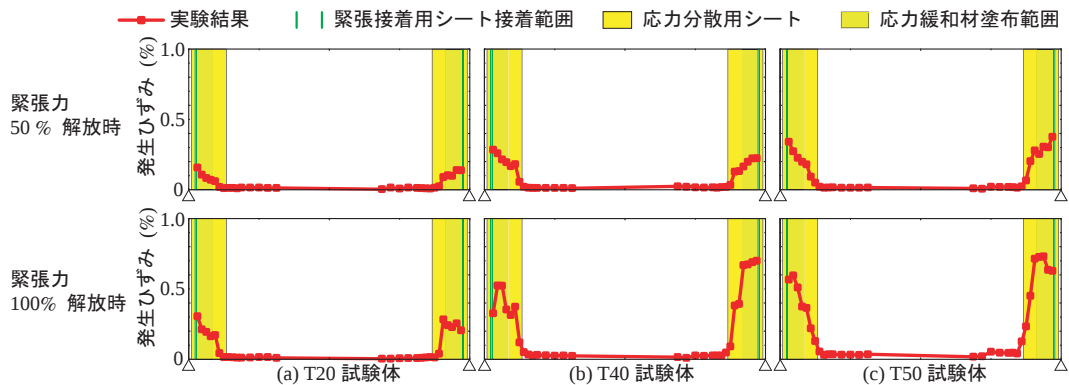
表中、試験体名の英文字 T に付随する数値は AFRP シートの目標導入緊張率 (%) を示している。なお、導入緊張率は、シートの保証引張耐力に対する導入緊張力の割合である。表中の実測導入緊張率および実測初期導入ひずみは、緊張力解放時におけるロードセルからの出力結果に基づいた値である。また、 M_y/M_u は断面分割法によって求めた計算降伏曲げモーメント M_y と計算終局曲げモーメント M_u の比であり、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式の予測に用いる値である。著者らによる既往の無緊張 FRP シート曲げ補強 RC 梁の静載荷実験の結果¹⁾では、 $M_y/M_u < 0.65$ の場合には剥離破壊型、 $M_y/M_u \geq 0.70$ の場合には曲げ圧壊型となることを明らかにしている。また、 $0.65 \leq M_y/M_u < 0.70$ の場合には、破壊形式を特定できないため境界型となる。

従って、表-1 より無緊張の T0 試験体は、剥離破壊型で終局に至ることが予想される。また、緊張接着する場合においても提案の破壊形式予測式が適用できるものと仮定すると、T20 試験体は境界型、T40 試験体は曲げ圧壊型、T50 試験体は計算上シート破断により終局に至るシート破断型に分類することができる。表-2 には AFRP シートの力学的特性値を示している。実験時のコンクリートの圧縮強度は 29.4 MPa、主鉄筋の降伏強度は 383 MPa であった。

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、断面寸法が 22 × 22 cm、純スパン長 3.2 m の矩形 RC 梁である。上端鉄筋には D19 を 2 本用い、下端鉄筋には D16 を 2 本配置した。緊張接着用シートには、幅 220 mm のシートを用い、梁中央部から両支点の 80 mm 手前までの範囲に接着した。なお、緊張接着した補強試験体は後述するように緊張接着



図－１ 試験体の形状寸法，配筋状況および補強概要



図－２ 緊張力解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

用シートの定着を確保するため，同シートの両端部に応力分散用の２方向 AFRP シートおよび応力緩和材を使用している．その他の詳細な緊張接着作業工程については文献²⁾を参照されたい．

静荷重実験は，容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて行った．本実験の測定項目は，載荷荷重，スパン中央点変位（以後，変位）および緊張接着用シート各点の軸方向ひずみである．また，実験時には，RC 梁のひび割れやシートの剥離および破断状況を撮影している．

3. 実験結果および考察

3.1 緊張力解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

本研究では，油圧ジャッキにより所定の緊張力を作用させた緊張接着用シートを RC 梁に接着し，接着樹脂が十分に硬化した後ジャッキを解放して RC 梁に緊張力を導入している．図－２には，ジャッキ解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布を示している．ここでは，緊張力を 50 および 100 % 解放したときの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ジャッキ解放率の増加に伴って緊張接着用シートのひずみが增大していることが分かる．また，これらのひずみは緊張接着用シートの端部において最も大きな値を示し，応力分散用シート接着範囲内においては，スパン中央部に近いほど小さくなり徐々にスパン中央部の一定値にすり付いている．また，ひずみ勾配は応力緩和剤の塗布範囲において低減される傾向にあ

る．これらのことより，前述の面内応力は，主として応力分散用シート内に発生し，応力緩和剤塗布範囲において低減されていることが分かる．

3.2 荷重－変位関係

図－３には，各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果および計算結果を示している．計算結果は，コンクリート標準示方書³⁾に準拠して断面分割法により算出したものである．なお，計算では表－１に示した実測導入緊張率を適用するとともに，シートとコンクリートの完全付着を仮定している．また，表－３には参考のため，曲げひび割れ発生時，降伏時および終局時における実験および計算結果と破壊性状を示している．図－３および表－３より，計算結果は載荷初期から終局まで実験結果と比較的良好に対応していることから，完全付着していることが分かる．

図－４には，曲げひび割れ発生荷重および降伏荷重に関する実験結果を計算結果と比較して示している．図より，AFRP シート緊張接着補強により曲げひび割れ発生荷重や降伏荷重が増大し，その効果は導入緊張力が高いほど大きいことが分かる．導入緊張率を 20～50 % とすることにより，曲げひび割れ発生荷重は無緊張と比較して 2～4 倍程度に増大している．また，降伏荷重は無緊張と比較して 35～75 % 程度増大している．なお，曲げひび割れ発生荷重の実験結果は計算結果とほぼ同程度であるのに対して，降伏荷重は，いずれの試験体も実験結果が計算結果を 1 割程度上回っている．

図－５には，荷重－変位関係に関する実験および計算結果の比較図を試験体ごとに示している．図より，T0 試験

表-3 計算結果および実験結果の一覧

	曲げひび割れ発生時					降伏時					終局時					破壊性状
試験 体名	計算結果		実験結果		荷重比 P_{ce} / P_{cc}	計算結果		実験結果		荷重比 P_{ye} / P_{yc}	計算結果		実験結果		荷重比 P_{ue} / P_{uc}	実験結果
	荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		
	P_{cc} (kN)	δ_{cc} (mm)	P_{ce} (kN)	δ_{ce} (mm)		P_{yc} (kN)	δ_{yc} (mm)	P_{ye} (kN)	δ_{ye} (mm)		P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)	P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)		
N	6.63	0.71	5.98	0.80	0.90	34.8	15.2	32.8	16.0	0.94	37.7	47.9	43.2	64.8	1.15	上縁コンクリート圧壊
T0	6.63	0.71	8.25	1.24	1.24	45.8	16.1	50.6	20.9	1.10	83.2	56.6	76.8	55.0	0.92	シート剥離
T20	19.5	2.05	17.3	2.53	0.89	61.5	17.0	68.6	21.1	1.12	94.2	50.6	95.5	48.6	1.01	圧壊後、シート剥離
T40	30.1	31.9	25.6	4.11	0.85	74.0	17.8	81.1	23.1	1.10	103	46.7	107	46.8	1.04	圧壊後、シート剥離
T50	35.8	3.86	33.4	6.42	0.93	81.5	18.5	88.8	27.5	1.09	107	42.5	109	45.4	1.02	シート破断

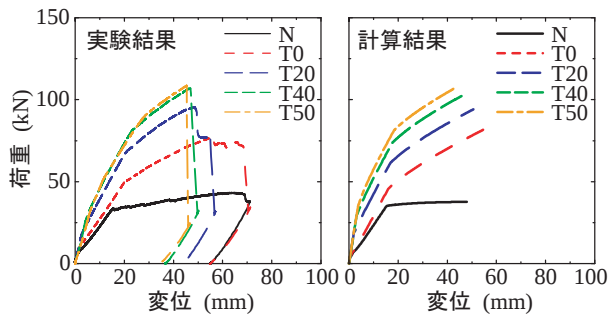


図-3 荷重-変位関係

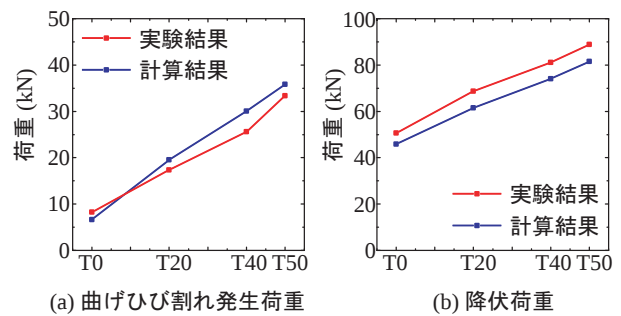


図-4 曲げひび割れ発生荷重および降伏荷重

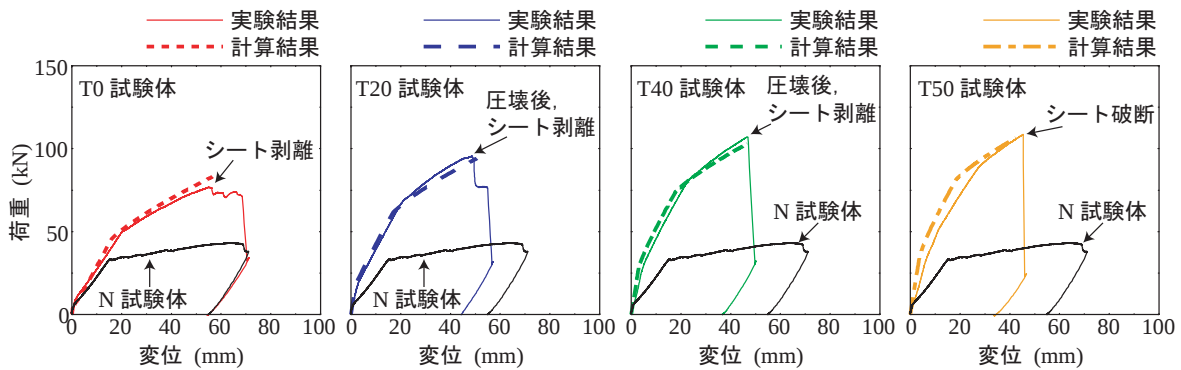


図-5 各試験体ごとの荷重-変位関係

体の場合には、主鉄筋降伏後、実験結果の剛性勾配が計算結果のそれを下回り、最終的には実測耐力が計算耐力を下回る状態でシート剥離により終局に至っている。従って、T0 試験体は剥離破壊型で終局に至ったといえる。

一方、緊張力を導入した T20 / T40 試験体の場合には、主鉄筋降伏後においてもその剛性勾配が計算結果より大きく、かつ実測荷重が計算耐力に到達し、上縁コンクリートが圧壊した後シート剥離により終局に至っている。従って、T20 / T40 試験体は曲げ圧壊型で終局に至ったものと判断できる。また、T50 試験体は計算上シート破断により終局に至る試験体であり、実験においても実測荷重が計算荷重を上回った後シート破断により終局に至っている。以上から、耐荷性能および破壊性状に関する計算結果は実験結果と良好に対応しているといえる。

表-4 には、各試験体の M_y/M_u 、予想される破壊形式および実験による破壊形式を一覧にして整理している。なお、予想される破壊形式は、著者らの既往の無緊張 FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する静荷重実験の結果に基づいた提案式より判定したものである。表-4 より、導入緊張力の有無やその大きさによらず、予想される破壊形式は実験結果と対応していることがわかる。このことから、既往

表-4 破壊形式

試験体名	M_y/M_u	予想される破壊形式	実験結果における破壊形式
T0	0.55	剥離破壊型	剥離破壊型
T20	0.65	境界型	曲げ圧壊型
T40	0.72	曲げ圧壊型	曲げ圧壊型
T50	0.76	シート破断型	シート破断型

の破壊形式予測式は AFRP シート緊張接着 RC 梁にも適応可能であるものと考えられる。

3.3 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

図-6 には、計算終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布の実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は、緊張接着用シートとコンクリートの完全付着を仮定して算出した断面分割法の結果に基づいて求めている。なお、ここでは、前述の図-5を参考にして、実験結果の終局変位が計算結果よりも小さい場合には、実測終局変位時の結果を用いて比較している。

図より、T0 / T20 試験体の場合には、等曲げ区間の実験および計算結果がほぼ対応しているものの、等せん断力区間においては、実験結果が計算結果を大きく上回っている箇所が見受けられる。これは、載荷点近傍の等せん断スパン

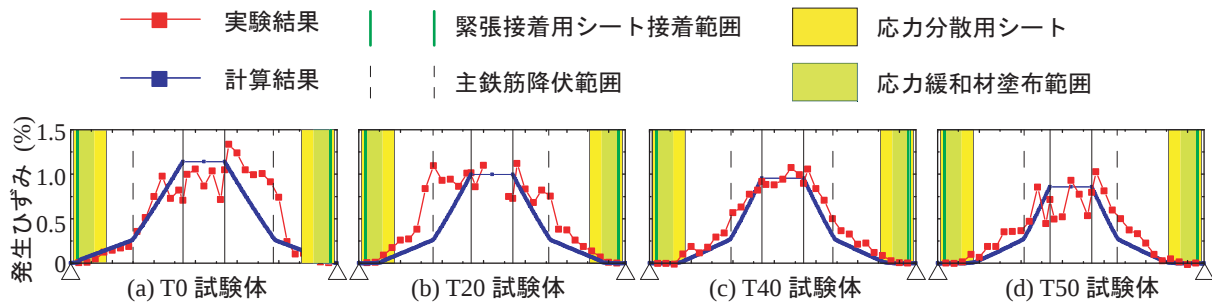


図-6 終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

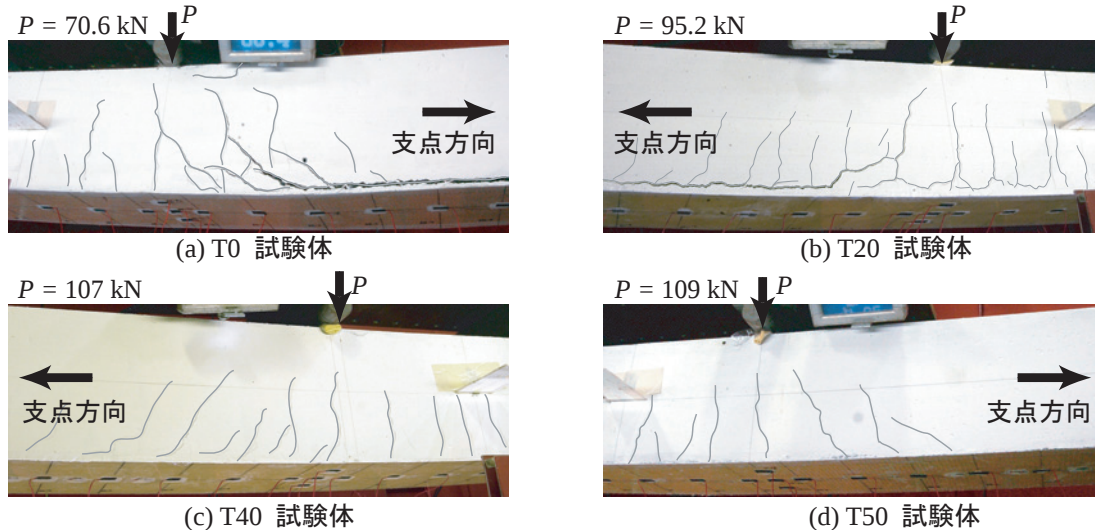


写真-1 各試験体の終局時近傍におけるひび割れ性状

における下縁コンクリートに発生した斜めひび割れの先端部がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用により部分剥離が発生していることを示すものである。なお、T20 試験体は、前述の荷重-変位関係に関する実験結果では曲げ圧壊型と判定されているにもかかわらず、ピーリング作用による部分剥離の傾向が現れており、曲げ圧壊型と剥離破壊型の性状が混在する性状を示している。このことは、T20 試験体が破壊予測式では境界型と予測されていることと対応している。

一方、T40/50 試験体の実験結果は計算結果とほぼ対応していることが分かる。このことより、T40/T50 試験体における緊張接着用シートとコンクリートとの付着は、終局時まで十分に確保され、ピーリングが抑制されていることが分かる。

3.4 ひび割れ性状

写真-1 には、各試験体の終局時近傍のひび割れ進展状況を示している。写真より、T0/20 試験体の場合には、ピーリング作用による AFRP シートの部分剥離が発生していることが分かる。このことは、前述の AFRP シートのひずみ分布性状に関する実験結果と対応している。また、T0 試験体は T20 試験体よりひび割れの開口や部分剥離が著しいことが分かる。一方、T40/50 試験体の場合には、曲げおよび斜めひび割れの発生が見られるものの、T0/T20 試験体に見られたピーリング作用による部分剥離の兆候はほとんど見られず、この直後に圧壊後のシート剥離もしくはシート破断に至っている。

以上のことより、シートの導入緊張力が高い場合ほど、ひび割れの開口やピーリング作用による AFRP シートの部

分剥離が抑制される傾向にあることがわかる。

4. まとめ

本研究では、AFRP シート緊張接着 RC 梁のシート剥離性状を含めた曲げ耐荷性状に及ぼす緊張率の影響を検討することを目的として、AFRP シートの導入緊張率を変化させた AFRP シート緊張接着 RC 梁の静荷重実験を実施した。

- 1) シートの導入緊張率が大きい場合ほど曲げひび割れ発生荷重、降伏荷重および終局荷重が大きくなる。
- 2) AFRP シートに緊張力を導入して接着することにより、ピーリング作用によるシート剥離が抑制される。本実験では無緊張接着時に剥離破壊型を示した AFRP シート曲げ補強 RC 梁が、緊張接着することにより曲げ圧壊型に移行した。
- 3) 無緊張の FRP シート曲げ補強 RC 梁の実験結果に基づいて提案した破壊形式予測式は、AFRP シート緊張接着 RC 梁にも適用可能である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 澤田純之, 岸 徳光, 三上 浩, 藤田 学: AFRP シート緊張接着による RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.1543-1548, 2008.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2007