

AFRP シート緊張接着曲げ補強 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 ○ 学生会員 土佐 亮允 (Ryosuke Tosa)
室蘭工業大学大学院 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)
室蘭工業大学大学院 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
室蘭工業大学大学院 学生会員 AbdelAziz Mohamed Ali

1. はじめに

連続繊維 (FRP) シートは、耐食性に優れ軽量かつ高い引張性能を有する補強材料である。近年では既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強工法として、FRP シートをを用いた接着工法が数多く採用されている。一方、一般的な FRP シートの引張強度は、異形棒鋼の降伏強度よりも 5~10 倍程度大きいものの、弾性係数は異形棒鋼と同程度かそれ以下である。そのため、RC 部材の曲げ補強に限定すると、FRP シート接着による部材の曲げ補強効果は、主として主鉄筋降伏後に大きく発揮される傾向にある。

そのため、最近では、FRP シートの曲げ補強効果を、より低い荷重レベルから発揮させる方法として、FRP シートに緊張力を与えた状態で接着する方法 (以後、緊張接着工法) が考案され、国内外で研究開発が進められている¹⁾。著者らも、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²⁾。これまでの研究では、適切な施工方法を確立するとともに、提案の緊張接着工法により RC 梁の曲げ耐荷性能を大きく向上可能であることを確認している。しかしながら、緊張接着した AFRP シートの剥離性状については、十分に検討されていないのが現状である。提案工法による既設 RC 構造物の合理的な補強設計手法を確立するためには、シートの剥離性状を含めた曲げ耐荷性能を把握することが重要であると考えられる。

このような背景より、本研究では AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁のシート剥離性状を含めた曲げ耐荷性状を検討することを目的に、シートの目付量や導入緊張率を変化させた AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の静載荷実験を行った。

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 シートの目付量を 2 種類として、各シートへの導入緊張率を変化させた全 6 体である。表中、試験体名の第 1 項目は AFRP シートの種類 (A1: 目付量 830 (g/m²), A2: 目付量 1,245 (g/m²)), 第 2 項目の英文字 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。ここで、A1 試験体に関する AFRP シートの計算終局時ひずみを見ると、導入緊張率が 40 % の場合には、公称破断ひずみ (17,500 μ 、表-2 参照)

に極めて近い値を示していることが分かる。そのため、本実験では、緊張接着による補強効果を低減することなく、終局時におけるシート破断を回避することを目的に、目付量の大きい AFRP シートを用いる場合 (A2-T27) についても検討を行うこととした。すなわち、導入緊張力を一定の条件下で、シートの引張耐力を大きく設定して導入緊張率を低減することにより、シート破断を抑制するものである。

表-2 には、本実験で用いた 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 39.2 MPa、主鉄筋の降伏強度は 382.0 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 × 30 cm、純スパン長 3.2 m の矩形 RC 梁である。上端鉄筋および下端鉄筋には D22 を 2 本ずつ配置した。緊張接着用シートには、幅 300 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緊張接着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。

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

表-1 試験体一覧

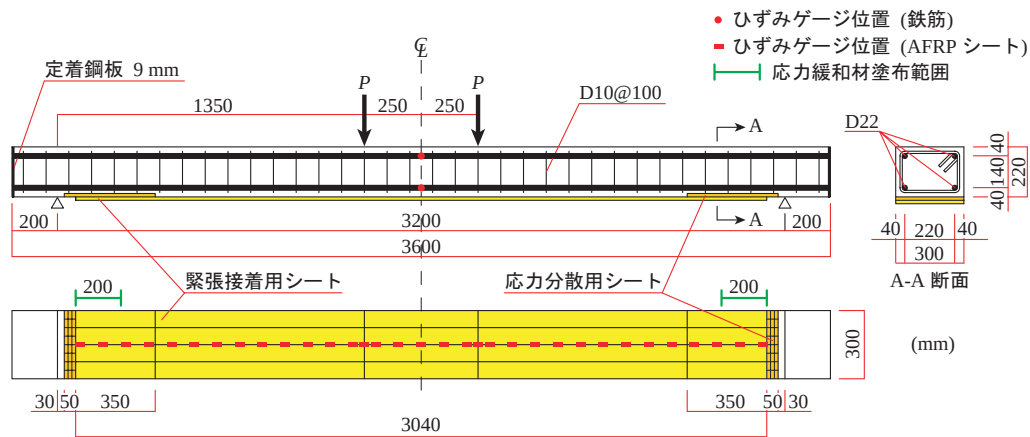
試験体名	シート目付量 (g/m ²)	目標導入緊張率 *	実測導入緊張率 *	実測初期導入ひずみ (μ)	計算終局時ひずみ (μ)
N	-	無補強	-	-	-
A1-T0	830	0 %	0 %	0	11,589
A1-T20		20 % (71)	20.8 % (73)	3,640	14,293
A1-T40		40 % (141)	40.2 % (142)	7,035	16,853
A2-T0	1,245	0 %	0 %	0	10,264
A2-T27		27 % (141)	27.3 % (145)	4,778	13,539

* () 内は導入緊張力 (kN)

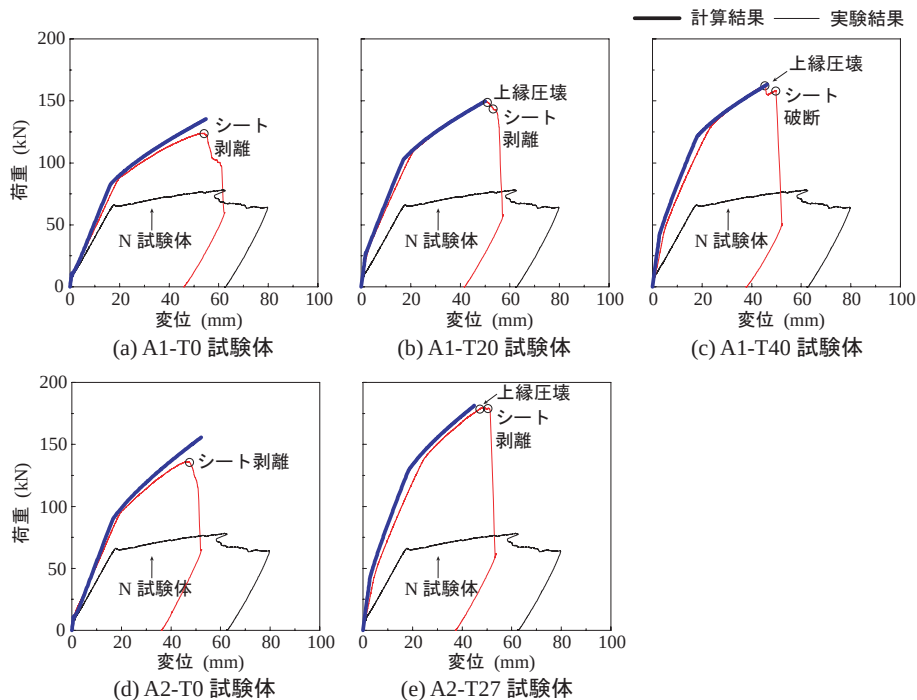
表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

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
1,245*	1,764	0.858			
435/435**	588/588	0.286			

*: 緊張接着用シート, **: 応力分散用シート



図－1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要



図－2 各試験体ごとの荷重－変位関係

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 荷重－変位関係

図－2には、各補強試験体の荷重－変位関係の実験結果を計算結果と比較して示している。また、無補強のN試験体の実験結果も併せて示している。計算結果は、コンクリート標準示方書³⁾に準拠した断面分割法により、コンクリートと緊張接着用シートの完全付着を仮定して算出している。

実験結果より、AFRPシート曲げ補強によって各RC梁の曲げ耐荷性能が向上していることが分かる。また、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増大している。

各試験体の破壊性状に着目すると、AFRPシートを無緊張接着したA1/2-T0試験体の場合には、いずれもシート剥離により終局に至っていることが分かる。また、緊張接着した試験体のうち、A1-T20試験体の場合には、上縁コンクリートの圧壊とほぼ同時にシート剥離が発生している。

導入緊張力が最も大きいA1-T40試験体の場合には、上

縁コンクリート圧壊後、シート破断に至っている。これに対し、導入緊張力一定の下、シート目付量を大きくして導入緊張率を低減させたA2-T27試験体の場合には、上縁コンクリート圧壊後、シート剥離に至っている。両試験体の結果より、導入緊張力一定の条件下で、シート目付量を増加させることにより、終局時におけるシート破断を抑制できることが明らかになった。

図－3には、図－2の実験および計算結果に基づき、曲げひび割れ発生時、主鉄筋降伏時および終局時の各荷重と導入緊張率との関係を示している。図－3(a)より、無緊張AFRPシートを接着する場合には、曲げひび割れ発生荷重はほとんど向上しないことが分かる。一方、AFRPシートを緊張接着する場合には、曲げひび割れ発生荷重が無補強の場合の4倍程度まで向上している。なお、A2-T27試験体はA1-T40試験体よりも導入緊張率が小さいものの、両者の曲げひび割れ発生荷重はほぼ同等である。これは両試験体のAFRPシートの導入緊張力が同等であるためである。実験および計算結果を比較すると、各試験体の曲げひび割

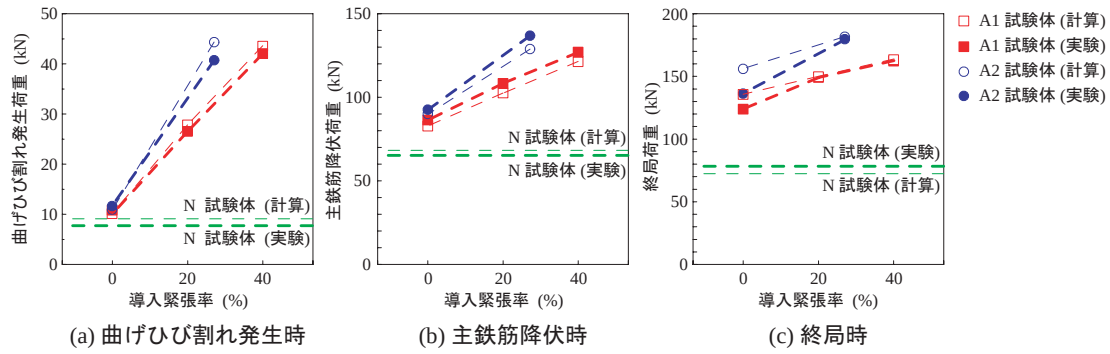


図-3 各時点の荷重に関する実験および計算結果とシート導入緊張率との関係

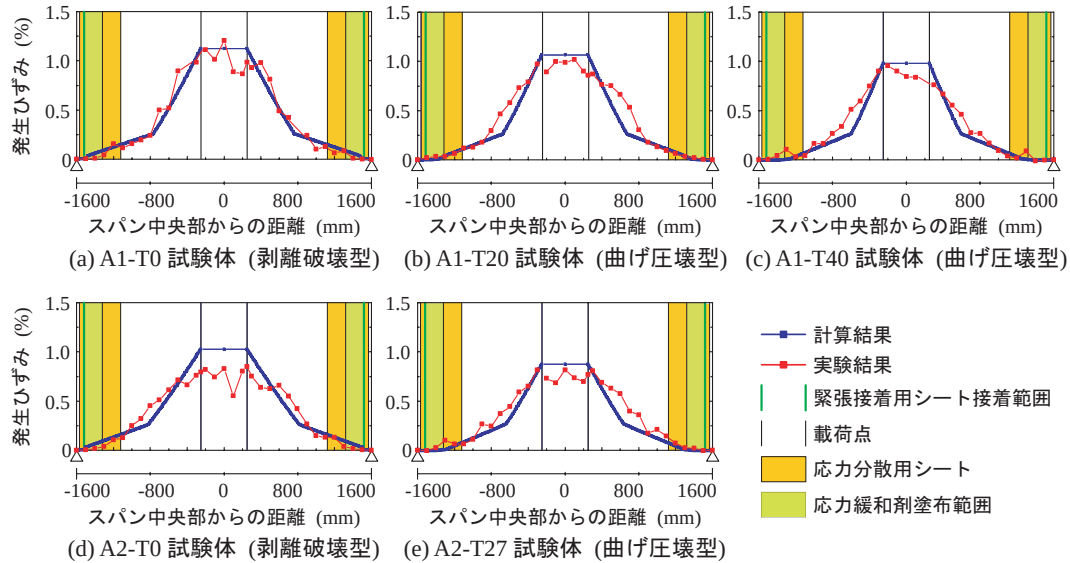


図-4 終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

れ発生荷重はほぼ対応していることが分かる。

図-3(b)より、主鉄筋降伏荷重は、無緊張のAFRPシートを接着することにより20kN程度向上していることが分かる。また、緊張接着することにより、主鉄筋降伏荷重はさらに向上している。これらの実験および計算結果を比較すると、実験結果の方が数kN大きく示されているものの、両者はほぼ対応していることが分かる。

図-3(c)より、終局荷重もAFRPシート緊張接着により向上していることが分かる。しかしながら、実験および計算結果を比較すると、緊張接着する場合には両者ほぼ対応するものの、無緊張接着の場合には、実験結果が計算結果を下回っていることが分かる。

ここで、著者らの既往の研究では、FRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式を以下のように分類している⁴⁾。すなわち、1)主鉄筋降伏後、剛性勾配が計算結果のそれを下回り、計算耐力を下回る荷重レベルでシートが剥離して終局に至る場合を「剥離破壊型」、2)主鉄筋降伏後も剛性勾配が計算結果と対応し、計算耐力(計算上、上縁コンクリート圧壊時)を上回った後にシートが剥離もしくは破断する場合を「曲げ圧壊型」としている。

従って、図-3(c)および図-2の荷重-変位関係に関する実験および計算結果を見ると、無緊張接着したA1/2-T0試験体は剥離破壊型、緊張接着したA1-T20/40およびA2-T27試験体は曲げ圧壊型に分類される。以後の検討では、本実

験結果に基づきシート目付量や導入緊張率がシートの剥離性状に及ぼす影響について検討する。

3.2 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

図-4には、計算終局変位時における緊張接着用シート軸方向ひずみ分布性状を示している。なお、A1/2-T0試験体は、計算終局変位に到達する前にシート剥離により終局に至っているため、実験による終局変位時の結果を示している。計算結果はシートとコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法の結果に基づいて算出している。

図より、剥離破壊型に分類されたA1-T0試験体の場合には、両側の等せん断力区間の実測ひずみ分布が乱れており、計算結果とは異なった性状を示していることが分かる。また、A2-T0試験体は、等曲げ区間における実測ひずみが計算ひずみを2,500 μ 程度下回り、かつ両側の等せん断力区間では実測値が計算値を上回る傾向にある。これらの実験結果は、後述するように下縁かぶり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下方に押し下げて引き剥がすピーリング作用によりシート剥離が発生・進展したことによるものと考えられる。

一方、曲げ圧壊型に分類されたA1-T20/40、A2-T27試験体は、両側等せん断力区間において実測ひずみが計算ひずみを上回る傾向が見られるものの、大きな乱れはなく両結果がほぼ対応している。従って、これらの試験体の場合には計算終局時までAFRPシートとコンクリート表面との付

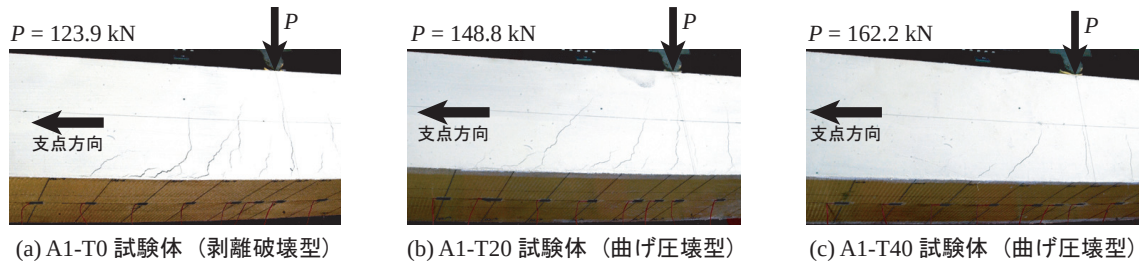


写真-1 各試験体の終局時近傍におけるひび割れ性状

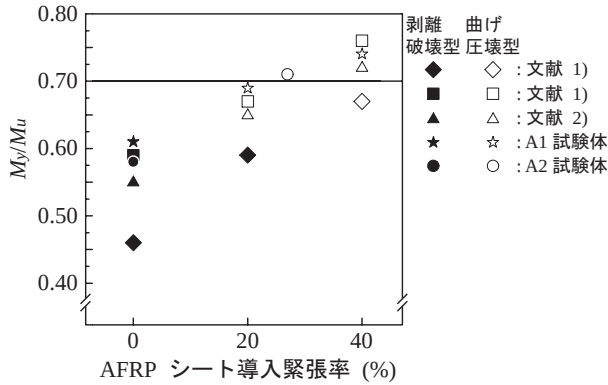


図-5 M_y/M_u 値と導入緊張率との関係

着が確保されているものと判断される。

3.3 ひび割れ性状

写真-1には、A1試験体の終局変位時における梁側面のひび割れ性状を示している。写真より、無緊張接着したA1-T0試験体の場合には、下縁かぶりコンクリートに斜めひび割れが発生し、そ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が顕在化していることが分かる。緊張接着したA1-T20/40試験体においてもピーリング作用の傾向が見られるがA1/2-T0試験体よりもひび割れ開口幅や剥離範囲は小さい。特に、A1-T40試験体の場合には、シート剥離はほとんど見られない。

以上のことより、AFRPシートを緊張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、その効果は導入緊張率が大きい場合ほど大きいことが明らかとなった。

3.4 FRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式予測式の適用性

著者らの既往の研究⁴⁾では、無緊張のFRPシート曲げ補強RC梁を対象とした破壊形式予測式を式(1)、(2)のように提案している。

$$\text{曲げ圧壊型} \quad M_y/M_u \geq 0.70 \quad (1)$$

$$\text{剥離破壊型} \quad M_y/M_u < 0.70 \quad (2)$$

ここに、 M_y : 計算主鉄筋降伏曲げモーメント、 M_u : 計算終局曲げモーメントである。ここでは、上記の破壊形式予測式のAFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁への適用性を本実験および既往の実験結果^{2),5)}を用いて検証する。

図-5には各試験体の M_y/M_u 値と導入緊張率との関係をプロットし、実験結果による破壊形式が曲げ圧壊型の場合には白抜き印、剥離破壊型の場合には黒塗り印で示している。図より、 M_y/M_u 値は導入緊張率の増加に伴って大きくなる傾向にあることが分かる。また、各試験体の実験結果による破壊形式に着目すると、 $M_y/M_u \geq 0.70$ の場合の他、

それを若干下回る場合においても曲げ圧壊型に分類されていることが分かる。

以上のことより、著者らが提案した無緊張AFRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式予測式は、AFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁の破壊形式を安全側に予測可能であることが明らかになった。

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シートの目付量や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。

- 1) 導入緊張力一定の条件下においては、シートの引張耐力を増加させることにより導入緊張率を低減可能となるため、RC梁終局時におけるAFRPシートの破断を抑制可能である。
- 2) AFRPシート緊張接着により、ピーリング作用によるシート剥離が抑制される。また、この効果は導入緊張率が大きい場合ほど大きい。
- 3) 著者らが提案した無緊張AFRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式予測式は、AFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁の破壊形式を安全側に予測可能である。

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検証研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000.
- 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.
- 4) 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.
- 5) 栗橋祐介, A. M. Ali, 岸 徳光, 三上 浩: AFRPシート緊張接着RC梁のシート剥離性状に及ぼすシート導入緊張率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1315-1320, 2010.