# 論文 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 目付量および導入緊張率の影響

土佐 亮允\*1・岸 徳光\*2・三上 浩\*3・栗橋 祐介\*4

要旨: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。その結果、1) 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、その効果 は導入緊張率が大きい場合ほど大きいこと、2) 緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、計算主鉄筋降伏曲げ モーメント  $M_y$ と計算終局曲げモーメント  $M_u$ を用いて、 $M_y/M_u \ge 0.65$ の場合には曲げ圧壊型、 $M_y/M_u < 0.65$ の場合には剥離破壊型と予測可能であること、等が明らかになった。 キーワード: AFRPシート緊張接着、曲げ補強、破壊形式予測式

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 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。

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<sup>1)</sup>。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機 械式定着治具を用いずに施工可能なアラミド繊維製FRP (AFRP)シートを用いた緊張接着工法を開発し,その補強 効果を確認している<sup>2),3)</sup>。

既往の研究では,提案の緊張接着工法により, RC 梁の 曲げ耐力が向上し,かつピーリング作用に起因するシー ト剥離を抑制可能であることなどを明らかにしている。 また,緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式は,上縁コンク リートの圧壊により終局に至る「曲げ圧壊型」と圧壊に 先行してシート剥離により終局に至る「剥離破壊型」に 分類され,これらの破壊形式は既往の無緊張 AFRP シー ト曲げ補強 RC 梁に関する破壊形式予測式を用いて安全 側に評価可能であることを明らかにしている<sup>3)</sup>。しかし ながら,緊張接着曲げ補強 RC 梁の適切な破壊形式予測 式を提案するためには,さらにシート目付量や断面諸元 等が異なる場合に関する実験を行い,提案工法による曲 げ補強効果やシートの剥離性状に関する実験結果を蓄積 する必要があるものと考えられる。

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 梁のシート剥離を含めた曲げ耐荷性状や その破壊形式予測法の妥当性を検討することを目的に, シートの目付量や導入緊張率(導入緊張力/保証耐力)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。なお,本論文では,緊張接着曲げ補強 RC 梁のシート破断に対する安全性向上のため,汎用品より も目付量の大きいシートを用い導入緊張率を低減する場 合についても併せて検討している。

試験	シート目付量	目標導入	実測導入	実測初期導入	計算終局時における	計算終局時			
体名	(g/m <sup>2</sup> )	緊張率*(%)	緊張率*(%)	ひずみ(μ)	載荷による増分ひずみ(μ)	ひずみ(μ)			
Ν	-	無補強	-	-	-	-			
A1-T0		0 %	0 %	0	11,589	11,589			
A1-T20	830	20 % (71)	20.8 % (73)	3,640	10,653	14,293			
A1-T40		40 % (141)	40.2 % (142)	7,035	9,818	16,853			
A2-T0	1.245	0 %	0 %	0	10,264	10,264			
A2-T27	1,245	27 % (141)	27.3 % (145)	4,778	8,761	13,539			

表-1 試験体と AFRP シートへの導入緊張率及び導入ひずみ一覧

\*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (正会員)

\*3 三井住友建設(株)技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)





試験 体名	計算 曲げ耐力 (kN)	計算 せん断耐力 (kN)	せん断 余裕度
Ν	72.4	293.8	4.06
A1-T0	135.4	293.8	2.17
A1-T20	149.7	319.9	2.14
A1-T40	163.2	341.0	2.09
A2-T0	155.7	293.8	1.89
A2-T27	181.3	337.3	1.86

#### 表-2 各試験体の計算耐力の一覧

#### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

表-1には、本実験に用いた試験体とAFRPシートへ の導入緊張率及び導入ひずみの一覧を示している。なお, 表中の計算終局時ひずみは,後述の計算曲げ耐力算定時 において、コンクリートが計算終局ひずみに達したとき の AFRP シートに発生するひずみに実測初期導入ひずみ を加算したものである。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/m<sup>2</sup>),A2: 目付量 1,245 (g/m<sup>2</sup>)), 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 梁の AFRP シート計算終局時ひずみに着目する と、導入緊張率が40%の場合には、計算終局時ひずみが 16,853 µ であり,公称破断ひずみ(17,500 µ, 表-3 参照) に極めて近い値であることが分かる。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 試験体) に ついても検討を行うこととした。すなわち, 導入緊張力 一定の条件下で,目付量が大きいシートを用いて導入緊 張率を低減することにより,シート破断を抑制するもの

耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	岐町 ひずみ (%)
1,176	0.572		118	1.75
1,764	0.858	2.06		
588/588	0.286			
	耐力 (kN/m) 1,176 1,764 588/588	耐力 (kN/m)     設計厚 (mm)       1,176     0.572       1,764     0.858       588/588     0.286	耐力 (kN/m) (mm) (GPa) 1,176 1,764 1,764 1,764 1,764 1,764 1,764 1,764 1,764 1,764 1,764 1,764 1,275 1,764 1,275 1,276 1	耐力 (kN/m) (kN/m) 1,176 388/588 588/588 (法) (mm) (mm) (GPa) (GPa) (GPa) (GPa) 1.18 588/588 (CBA) (CB

#### 表 - 3 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

\*: 緊張接着用シート, \*\*: 応力分散用シート

## である。

## 2.2 補強概要

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。下端 鉄筋には D22 を 2 本配置した。なお、主鉄筋比および帯 鉄筋比はそれぞれ 1.43,0.48% である。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、シートの定着 を確保するために、接着両端部には応力分散用の 2 方向 AFRP シートを予め接着し、その上に緊張力を導入した シートを接着することとした。また、応力分散用シート 部への接着には応力緩和材を用いている。

AFRP シートの緊張接着は、プレテンション方式による プレストレストコンクリート (PC) 梁の製作と同様に、梁 とは独立してシート緊張用架台を設置し、シートに緊張 力を導入した状態で RC 梁に接着する方式で行った。ま た、接着樹脂の硬化に必要な一週間程度の養生期間を経 過した後、緊張力を解放し、RC 梁にプレストレスを導入 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<sup>2</sup>) を参照されたい。

#### 2.3 計算耐力

**表-2**には,各試験体の計算耐力の一覧を示している。 計算曲げ耐力は,土木学会コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>(以 後,示方書)に準拠し,かつシートとコンクリートの完



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(解放前を零レベルに設定)

全付着を仮定して断面分割法により算出した。計算では いずれの試験体も上縁コンクリートの圧壊により終局に 至っている。なお,緊張接着曲げ補強 RC 梁の場合には, 表-1 に示す実測導入緊張力を考慮して断面計算を行っ ている。そのため,初期状態において断面には負モーメ ントが作用することとなり,断面の上・下縁にはそれぞ れ引張および圧縮応力が作用した状態となる。

また,計算せん断耐力は,示方書<sup>4)</sup>に準拠して算出した。緊張接着曲げ補強 RC 梁の場合には,デコンプレッションモーメントによるせん断耐力向上効果を考慮している。なお,これらの計算耐力の算定においては,試験体製作後時間を経過せずに実験を行うこととしていることより,各材料の収縮やクリープなどによる緊張力の減少は考慮していない。

表より,シートへの導入緊張力が大きい場合ほど計算 曲げ耐力および計算せん断耐力が大きくなる傾向にある ことが分かる。また,計算せん断耐力を計算曲げ耐力で 除したせん断余裕度は,いずれの試験体においても1.0を 上回っていることより,曲げ破壊により終局に至る設計 となっていることが分かる。

表-3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。実験時における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 MPa であった。 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 緊張力解放時の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,油圧ジャッキを解放して RC 梁にプレ ストレスを導入している。 図-2 には,ジャッキ解放前 にひずみ測定用増幅器の零バランスを取った状態下での, 油圧ジャッキ解放時の緊張接着用シートに関する測定結 果の軸方向ひずみ分布を示している。上下段はそれぞれ 緊張力を 50 %,100 % 解放した時点のひずみ分布である。

図より,各試験体共に緊張力の解放率の増大に伴って, 緊張接着用シート端部周辺のひずみが増加していること が分かる。また,シート端部において最も大きなひずみ が発生するものの,応力緩和材塗布範囲においてひずみ 勾配が緩やかになっていることが分かる。以上のことよ り,緊張力の解放に伴い端部に集中する応力は応力緩和 材塗布範囲において低減され,シートとコンクリートの 付着が確保されていることが分かる。

#### 3.2 荷重-変位関係

図-3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。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、主鉄筋降伏荷重および終局 荷重が増加している。

各試験体の破壊性状に着目すると、AFRPシートを無緊 張の状態で接着した A1/2-T0 試験体は、いずれもシート 剥離により終局に至っている。また、緊張接着した試験 体のうち A1-T20 試験体は、上縁コンクリートの圧壊と ほぼ同時にシート剥離が生じている。導入緊張力が最も 大きい A1-T40 試験体は、上縁コンクリート圧壊後、シー ト破断に至っている。これに対して、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 試験体では、上縁コンクリート圧壊後にシート剥



図-4 各時点の載荷荷重とシート導入緊張率との関係

離に至っている。両試験体の結果より,導入緊張力一定の 条件下では,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。

実験結果と計算結果を比較すると、A1/2-T0 試験体は、 計算耐力よりも小さな荷重レベルで上縁コンクリートの 圧壊に先行してシート剥離を生じて終局に至っているこ とより「剥離破壊型」に分類される。一方、A1/2-T20/40 および A2-T27 試験体は、計算耐力と同等以上の荷重レベ ルで上縁コンクリートの圧壊により終局に至っているこ とより「曲げ圧壊型」に分類されることが分かる。

図-4には、図-3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 と単位幅当たりの実測導入緊張力(kN/mm)(以後、実測単 位緊張力)との関係を整理して示している。図より,シートの実測単位緊張力が同等の場合には,A2梁の各荷重レベルはA1梁よりも大きくなる傾向にあることが分かる。 これは、シート目付量が大きい場合には軸剛性も大きくなることより、対応して補強効果も大きくなることによるものと考えられる。

図-4(a)より,曲げひび割れ発生荷重は,無緊張の AFRPシートを接着しても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最大で無補強の4倍程度にまで向上 している。また,実験結果と計算結果を比較すると,各 試験体の曲げひび割れ発生荷重はほぼ対応している。

図-4(b)より,主鉄筋降伏荷重は,無緊張のAFRPシー



図-5 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

トを接着することにより 20 kN 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。実験結果と計算結果を比較す ると,実験結果が数 kN 程度大きいものの,両者はほぼ対 応していることが分かる。

図-4(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。実験と計算結果を比較す ると,無緊張接着の場合には実験結果が計算結果を下回っ ているが,緊張接着の場合には両者はほぼ対応している。 これは,実験では無緊張接着の場合には,コンクリート の圧壊前にシート剥離で終局に至ったためである。

#### 3.3 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

図-5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、実験におけ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。なお、各ひずみ値は荷重載荷に伴って発生した増分ひずみであり、緊張接着時のひずみは含まれていない。

図より,剥離破壊型に分類された A1-T0 試験体では, 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 試験体の場合には,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,後述の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



#### 写真-1 A1梁の終局時近傍におけるひび割れ分布

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試験体のうち,A1-T20/40 試験体の場合には,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



図-6 M<sub>v</sub>/M<sub>u</sub> 値と実測単位緊張力との関係

乱れはなく両結果がほぼ対応している。また, A2-T27 試 験体の場合には,実測ひずみの分布が多少乱れているも のの計算ひずみと大略対応している。このことより,曲 げ圧壊型の試験体の場合には計算終局時までシートとコ ンクリート間の付着が確保されているものと判断される。

#### 3.4 ひび割れ性状

写真-1には、A1梁の終局時近傍における梁側面の 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 試験体では、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 の傾向が認められるものの、A1-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 合には載荷荷重が最も大きいにもかかわらず、シート剥 離の兆候はほとんど見られない。これは、シートに緊張 力を導入することによって斜めひび割れの開口が抑制さ れ、同時にひび割れ先端部のピーリング作用も抑制され ることによるものと考えられる。

以上のことより、AFRP シートを緊張接着することに よって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。

3.5 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<sup>5)</sup>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。

曲げ圧壊型  $M_v/M_u \ge 0.70$  (1)

剥離破壞型 
$$M_y/M_u < 0.70$$
 (2)

ここに, *M<sub>y</sub>*:計算主鉄筋降伏曲げモーメント, *M<sub>u</sub>*: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<sup>2),3)</sup>を用いて検証する。 図-6には、各試験体の $M_y/M_u$ 値と実測単位緊張力との関係をプロットし、実験結果の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、緊張接着曲げ補強 RC 梁に関する実験結果の破壊形式に着目すると、 $M_y/M_u \ge 0.65$ の場合にはいずれの試験体も曲げ圧壊型に分類されていることが分かる。従って、本論文の範囲内においては、緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、以下のように提案できるものと考えられる。

曲げ圧壊型  $M_y/M_u \ge 0.65$  (3)

剥離破壞型 
$$M_y/M_u < 0.65$$
 (4)

#### 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 量および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。

- 導入緊張力一定の条件下の場合には、シートの目付 量を増加させることにより導入緊張率を低減可能な ため、AFRPシートの破断破壊を抑制可能である。
- 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 緊張力が大きいほど大きい。
- 3) 緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、計算主鉄筋 降伏曲げモーメント  $M_y$ と計算終局曲げモーメント  $M_u$ を用いることにより、 $M_y/M_u \ge 0.65$ の場合には曲 げ圧壊型、 $M_y/M_u < 0.65$ の場合には剥離破壊型と予 測可能である。

# 参考文献

- 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
  に関する実験的字研究,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) 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.
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書(設計編),2007.
- 5) 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.