# 論文 シート厚および導入緊張率を変化させた AFRP シート緊張接着 曲げ補強 PC 梁の静載荷実験

栗橋 祐介<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・AbdelAziz Mohamed Ali<sup>\*4</sup>

要旨:本研究では,実構造物に適用可能なAFRPシート緊張接着工法を確立することを目的に,梁の両端部 に反力を受ける治具を設置する方式で緊張接着曲げ補強する場合における PC 梁の曲げ耐荷性状について実 験的に検討を行った。その結果,1)提案の緊張接着工法により PC 梁の曲げ耐荷性能を向上可能であること, 2)同一導入緊張力の条件下では,シート厚(目付量)を大きく設定し導入緊張率を低減しても、シート厚が小 さい場合と同等以上の曲げ耐荷性能を期待できること,3)AFRPシート緊張接着曲げ補強することにより, ピーリング作用によるシート剥離を抑制する効果が期待できること,等が明らかとなった。 **キーワード**: AFRPシート緊張接着,曲げ補強,曲げひび割れ発生荷重,ピーリング作用

# 1. はじめに

近年,既設鉄筋コンクリート(RC)/プレストレストコン クリート(PC)構造物の補強工法として,連続繊維(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,その弾性係数は異形 棒鋼と同程度かそれ以下である。また,弾性係数が鋼材の 数倍高い炭素繊維製 FRP シート等が補強材として製品化 されているものの,破断ひずみが数千μと小さく脆性的 であることや,材料コストが割高になる等の課題がある。

そのため、一般的な FRP シートを用いた接着工法によ る RC/PC 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。このことから、最近で は、FRP シートの曲げ補強効果を効率的に発揮させる方 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 発するとともに、その補強効果を確認している<sup>2),3)</sup>。

既往の実験では,梁と独立したシート緊張用の鋼製架 台を設置し,シートに緊張力を導入した状態で梁に接着 している。しかしながら,この方法を既設の橋梁等に適 用することは困難である。

このような背景より、本研究では、梁端部に反力を受ける一時的な治具を設置して油圧ジャッキによりシート に緊張力を導入し接着する手法を提案し、実構造物への 適用性と緊張接着曲げ補強 PC 梁の耐荷性状を検討する ために静載荷実験を実施した。本研究では、特に、緊張 用の AFRP シート厚(目付量)やシートに導入する緊張 力を変化させた場合について実験的に検討を行っている。

#### 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の一覧を示してい る。ここで、表中のシートの導入緊張率は、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。また、実測 初期導入ひずみは、実測導入緊張力に基づき AFRP シー

| 試験<br>体名 | AFRP シート |        | 初期断面内    |       | シートの       | シートの      | 実測     | 計算      | 計算       |
|----------|----------|--------|----------|-------|------------|-----------|--------|---------|----------|
|          | 設計厚      | 保証引張耐力 | 応力 (MPa) |       | 目標導入       | 実測導入      | 初期導入   | 曲げ耐力    | せん断耐力    |
|          | (mm)     | (kN/m) | 上縁       | 下縁    | 緊張率*(%)    | 緊張率*(%)   | ひずみ(μ) | (kN)    | (kN)     |
| A1-T0    | 0.572    | 1,176  | -4.30    | -4.30 | 0          | 0         | 0      | 192.4   | 505.4    |
| A1-T20   |          |        | -1.87    | -5.76 | 20 (70)    | 21.5 (71) | 3,763  | 213.9   | 528.1    |
| A1-T40   |          |        | -0.55    | -8.41 | 40 (140)   | 34 (120)  | 5,950  | 225.6   | 539.4    |
| A2-T0    | 0.858    | 1,764  | -4.30    | -4.30 | 0          | 0         | 0      | 215.0   | 502.9    |
| A2-T13   |          |        | -1.87    | -5.76 | 13.3 (70)  | 12 (64)   | 2,135  | 231.9   | 520.5    |
| A2-T27   |          |        | -0.55    | -8.41 | 26.7 (140) | 24 (129)  | 4,270  | 248.2   | 536.9    |
|          |          |        |          |       |            |           | k      | *()内は導入 | 入緊張力(kN) |

表-1 試験体一覧

\*1 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)

\*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 博士後期課程 建設環境工学専攻 (正会員)



図-1 試験体の形状寸法, 配筋状況および補強概要



図-2 緊張接着方法の概要

| 口母星       | 保証      | 凯玉盾      | 引張    | 弾性    | 破断   |  |
|-----------|---------|----------|-------|-------|------|--|
| 日17] 里    | 耐力      | <b> </b> | 強度    | 係数    | ひずみ  |  |
| (g/m²)    | (kN/m)  | (mm)     | (GPa) | (GPa) | (%)  |  |
| 830*      | 1,176   | 0.572    |       |       |      |  |
| 1,245*    | 1,764   | 0.858    | 2.06  | 118   | 1.75 |  |
| 435/435** | 588/588 | 0.286    |       |       |      |  |

表-2 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

トの材料特性値(後述の **表**-2)を用いて算出したもの である。試験体数は、AFRP シートの厚さを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:設 計厚 0.572 (mm), A2:設計厚 0.858 (mm)),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, A2 梁のAFRP シートの導入 緊張率は、導入緊張力がA1 梁と同等となるように設定し ている。すなわち, A2 梁のAFRP シートの厚さはA1 梁 よりも1.5 倍大きいことより, A2 梁の導入緊張率はA1 梁の 1/1.5 倍となっている。

表中の計算曲げ耐力は、土木学会コンクリート標準示 方書<sup>4)</sup> (以後,示方書) に準拠してコンクリートおよび鋼 材の応力-ひずみ関係を設定し、コンクリートとシート の完全付着を仮定して断面分割法により算出したもので ある。なお、AFRPシートは、応力が引張強度に到達した 時点で破断する弾性体と仮定している。なお、計算終局 ひずみは、示方書に準拠し後述のコンクリート圧縮強度 を用いて 3,023 µ としている。計算せん断耐力は示方書 に準拠して算出した。PC 鋼材のみならず AFRPシート緊 張接着に伴って生じるデコンプレッションモーメントも 考慮しているため、計算せん断耐力は AFRP シートへの 導入緊張力が大きいほど大きい。 **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。また、 実験時のコンクリートの圧縮強度は 64.3 MPa、主鉄筋の 降伏強度は 380.2 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 25×30 cm,純スパン長 2.8 mの複鉄筋矩形 PC 梁である。 上下端鉄筋には D13 を 3 本ずつ用い、中央部には ¢ 12.7 mmの PC 鋼より線を 3 本配置している。なお、PC 鋼よ り線の導入緊張率(導入緊張力/引張耐力)は 60% として いる。このときの PC 梁断面に作用する圧縮応力度は 4.3 MPa である。なお、本実験では、PC 鋼材を断面図心位置 に配置することとした。それは、以下の理由による。す



図-3 各試験体の荷重-変位関係

なわち, 実桁の場合には PC 鋼材を下縁配置する場合にお いても自重等により上そりが大きくならない。一方,本 試験体は小型断面であることより,緊張力に比較して自 重が小さく上そりが大きくなるため,シート接着の精度 も悪化することが懸念される。シートに緊張力を導入し た後においても実桁を想定した状態での実験を実施する ためには,断面図心位置に PC 鋼材を配置し上そりが大き くならない状態にすることが肝要であると判断した。

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)および鉄筋と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 PC 梁のひび割れやシート の剥離状況を撮影している。

# 2.2 補強方法

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,本論文では無緊張接着の場合においても緊張接着 用シートと呼ぶこととする。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 端部に予め応力分散用の 2 方向 AFRP シートを接着し, その上に応力緩和材を用いて接着している。なお,含浸 接着樹脂には,汎用の 2 液混合型エポキシ樹脂を用いて いる。また,応力緩和材は弾性係数が上述の含浸接着樹 脂の 1/60 程度のエポキシ系接着樹脂であり,緊張接着用 シート端部における応力集中を緩和するために用いてい る。その他,詳細については文献<sup>2)</sup>を参照されたい。 図-2には,緊張接着方法の概要図を示している。本実 験において AFRP シート緊張接着は以下の手順で行った。 すなわち,

- 緊張接着用と応力分散用シートを準備する。緊張接着用シートに関しては、補強範囲と同程度の範囲のみを接着樹脂を用いて含浸硬化 (FRP化)する。
- 2) PC 梁を反転し、梁底面を上向きにする。
- 3) PC 梁の補強範囲に処理深さ1mm 程度のブラスト処理を施す。このとき、応力分散用シートの接着範囲は、他の部分よりも2mm 程度(シートと樹脂の厚さ分)低くなるように処理する。
- 4)補強範囲にプライマーを塗布し,指触乾燥後に応力 分散用シートを接着する。
- 5) PC 梁の両端に 図-2 に示す定着用プレート,シート緊張用プレートおよびジャッキ反力用治具を設置 する。
- 6)緊張接着用シートを図-2のように設置し、両端部 を折り返して含浸接着樹脂を用いて貼り合わせる。
- 7) 6)の接着部が十分に硬化の後,緊張接着用シートの ゆるみを除去するため予緊張力を導入し、2日程度 保持する。
- 7) でシートに導入した緊張力を解放し、PC 梁の補強 範囲に接着樹脂を塗布する。
- 9) 緊張接着用シートに所定の緊張力を導入した状態で, シートを PC 梁に圧着する。



図-4 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

10) 樹脂が十分に硬化したことを確認した後,ジャッキ を解放して PC 梁にプレストレスを導入する。

また,シートによるプレストレス導入時の PC 梁断面高 さ方向のひずみ分布は,各断面位置で計算結果とほぼ対 応していることを確認している。これは,著者らによる 既往の研究<sup>3)</sup>と同様である。

#### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 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。また,無補強の場 合の計算結果も併せて示している。

図より,補強試験体の計算結果は無補強の場合と異な り,曲げひび割れ発生荷重および主鉄筋降伏荷重が向上 し,かつその後の剛性勾配および終局荷重も増大してい ることが分かる。一方,実験結果は計算終局時まで計算 結果とよく対応しており,計算終局耐力到達後も荷重が 増加している。なお,最終的にはシート剥離もしくは上 縁コンクリート圧壊後にシート剥離に伴って荷重が急激 に低下し,終局に至っている。

ここで、各試験体の終局時の性状に着目すると、A2-T0 試験体は上縁コンクリート圧壊前にシート剥離を生じて いることが分かる。これは、A2-T0 試験体の場合には、 シート厚が大きいため曲げ補強効果が大きいものの、無 緊張接着であるため斜めひび割れの開口が大きく、緊張 接着の場合よりもピーリング作用に起因するシート剥離 の抑制効果が期待できないことによるものと考えられる。 なお、緊張接着によるシート剥離抑制効果については 3.4 節にて述べることとする。なお、A1 試験体で緊張接着に よる剥離抑制効果が明瞭に出現しないのは、無緊張接着 でも上縁コンクリートの圧壊が先行する試験体のためと 考えられる。

# 3.2 各荷重とシート導入緊張率との関係

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(以後、実測単位緊張 力)(kN/mm)との関係を示している。なお、実測の曲げひ び割れ発生荷重は、荷重-変位関係の剛性勾配変化点の 荷重として評価した。図より、実測単位緊張力が同等の 場合には、A2梁の各実測耐力がA1梁よりも大きい。こ れは、シート厚が大きい場合には、シートの曲げ補強効 果も大きくなることによるものと考えられる。

(a) 図より, 無緊張 AFRP シート接着した A1/A2-T0 試 験体では, 無補強試験体と比較してひび割れ発生荷重が ほとんど増加していないことが分かる。一方で, 緊張接 着することにより, ひび割れ発生荷重は無補強試験体と 比較して最大で2倍程度に増大している。また, 各試験 体の実験結果と計算結果を比較すると実験結果が計算結 果を1割程度上回っている。

(b) 図より,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 25 kN 程度向上していることが分 かる。また,導入緊張力の増加に伴って主鉄筋降伏荷重 も増大している。なお,実験結果は計算結果よりも1割 程度大きい。

(c) 図より,終局荷重に関する実験結果および計算結果 は共に導入緊張率の増加に伴って増大していることが分 かる。また,いずれの実験結果も計算結果を上回ってい る。ただし,A2-T0 試験体では両者の差異は小さく,実 験結果が若干大きい程度である。これは,前述の荷重-変位関係からも明らかなように,A2-T0 試験体が上縁コ ンクリートの圧壊前にシートが剥離して終局に至ったた めである。

以上のことより,本研究で提案の梁両端部にシート緊 張用治具を設置する方式で緊張接着曲げ補強する場合に おいても, PC 梁の曲げ耐荷性能が向上可能であり,その







図-6 実験終了後における各試験体のひび割れ分布性状

効果は前述の断面分割法により安全側に評価可能である ことが明らかになった。

# 3.3 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

図-5には、A2 梁に関する主鉄筋降伏時、中間変位時 および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。ここ で、中間変位時とは主鉄筋降伏時と計算終局変位時の中 間の変位時点である。また、緊張接着用シートのひずみ には初期導入ひずみは考慮されていない。

図より,主鉄筋降伏時および中間変位時における各試 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。従って,載荷初期から中間変位時まではシートと コンクリートの付着が確保されていることが分かる。

計算終局変位時では,等曲げ区間の実験結果と計算結 果はよく対応していることが分かる。一方,等せん断力 区間では全般的に実験結果が計算結果を3,000 µ 程度上回 る傾向にある。特に,A2-T0 試験体は,他の試験体より もひずみ分布が乱れている。これは,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 がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用による ものと推察される。

#### 3.4 ひび割れ性状

図-6には、実験終了後における各試験体のひび割れ 分布性状を示している。図には、シートの剥離開始位置



(a) A2-T0 試験体



(b) A2-T13 試験体



(c) A2-T27 試験体

# 写真-1 A2梁のひび割れ性状

を○印で示している。図より,いずれの試験体も上縁コ ンクリートが著しく圧壊していることが分かる。ただし, A2-T0 試験体の場合にはシートが完全に剥離した後に上 縁コンクリートの圧壊に至っている。また,シート厚に よらず導入緊張力が大きいほど,ひび割れの発生範囲が 広くかつ下縁かぶりコンクリートの剥落が顕在化する傾 向にあることが分かる。これは,導入緊張力が大きいほ ど,終局時における載荷荷重やシートへの作用引張力が 大きくなり,特に引張側のコンクリートの損傷が著しく なることによるものと考えられる。

また、シートの剥離は、いずれの場合も等せん断力区間 における載荷点近傍の下縁かぶりコンクリート部に生じ た斜めひび割れの先端部が、シートを押し出して引き剥 がすピーリング作用により発生したことを確認している。

**写真-1**には,A2-T0 試験体の最大荷重時 (*P* = 226 kN) における A2-T0/13/27 試験体の載荷点近傍のひび割れ性 状を示している。写真より, A2-T0 試験体の場合には,下 縁かぶりコンクリート部において斜めひび割れが発生・ 開口し,その先端部のピーリング作用によってシートが 部分的に剥離していることが分かる。一方,A2-T13/27 試 験体の場合には,シートの剥離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り,斜めひ び割れの開口が抑制され,従って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。

# 4. まとめ

本研究では、実構造物に適用可能な AFRP シート緊張 接着工法を確立することを目的に、梁の両端部に反力を 受ける治具を設置する方式で緊張接着曲げ補強する場合 における PC 梁の曲げ耐荷性状について実験的に検討を 行った。本研究により得られた知見をまとめると、以下 のとおりである。

- 梁の両端部にシート緊張用装置を設置する方式で緊 張接着曲げ補強する場合においても、PC 梁の曲げ耐 荷性能を向上可能であり、その効果は断面分割法に より安全側に評価可能である。
- 2)シートの導入緊張力が大きい場合ほど,緊張接着曲 げ補強 PC 梁の耐荷性能は向上する。また、シートの 導入緊張力が同一の場合における梁の曲げ耐荷性能 は、シート厚が大きいほど向上する傾向にある。
- AFRPシート緊張接着曲げ補強することにより、ピー リング作用によるシート剥離を抑制する効果も期待 できる。

#### 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)岸 徳光,三上 浩,栗橋祐介,A.A.M.Ali:断面 図心にプレストレスを導入した PC 梁の AFRP シー ト緊張接着による曲げ補強効果,コンクリート工学 年次論文集, Vol.31, No.2, pp. 1369-1374, 2009.6.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2007.
- 5) 三方康弘,井上 晋,小林和夫,仁枝 保:PC梁部 材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果,土木 学会論文集,No669/V-50, pp.149-159, 2001.2.