

# 論文 せん断スパン比および導入緊張率の異なる AFRP シート緊張接着 曲げ補強 RC 梁の静載荷実験

小崎 大樹<sup>\*1</sup>・栗橋 祐介<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では, AFRP シート緊張接着による RC 梁の曲げ耐力向上効果に及ぼす導入緊張率の影響を検討することを目的に, せん断スパン比の異なる RC 梁に対して種々の導入緊張率の下で AFRP シート接着補強した RC 梁の静載荷実験を行った。その結果, 本実験の範囲内では, 1) せん断スパン比によらず AFRP シート緊張接着により RC 梁の曲げ耐荷性能を向上可能である, 2) せん断スパン比が小さく導入緊張率が低い場合には, 実測耐力が計算耐力を下回る傾向が顕著になる, 3) せん断スパン比が小さい場合には, 破壊形式が変化する時の終局曲げに対する主鉄筋降伏曲げの比が大きくなる可能性がある, 等が明らかになった。

**キーワード:** AFRP シート緊張接着, RC 梁, せん断スパン比, 曲げ耐荷性能

## 1. はじめに

近年, 経年劣化した既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工事が盛んに行われている。補修・補強工法の一つとして, 連続繊維 (FRP) シートを用いた補強工法が提案されており, 一部で実用化されている。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, FRP シートに緊張力を与えて接着する工法 (以後, 緊張接着工法) が提案され, 国内外で研究開発が進められている。著者らも, これまでに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緊張接着工法を開発し, アラミド繊維製 FRP シート (以後, AFRP シート) を用いて, その補強効果を確認している。

また, 既往の研究成果<sup>1)~5)</sup>より, 緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式は, 上縁コンクリート圧壊後シートの剥離もしくは破断により終局に至る「曲げ圧壊型」と, 圧壊に先行してシートの剥離により終局に至る「剥離破壊型」に分類されることを明らかにした。また, 限られた実験結果の範囲では, 緊張接着曲げ補強 RC 梁の場合におい

ても既往の FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する破壊形式予測式がある程度適用可能であることが示されている。

しかしながら, 既往の研究では, 主にせん断スパン比  $a/d$  ( $a$ : せん断スパン長,  $d$ : 有効高さ) が 7.0 程度以上の RC 梁を対象に断面形状やシート目付量を変化させた場合について検討を行っており, せん断スパン比が 7.0 以下の RC 梁に関する検討例は少ない。特に, 同一断面を有する RC 梁においてせん断スパン比を変化させると, 終局曲げ耐力やたわみ量および作用せん断力が異なるため, 本工法の補強効果に及ぼすせん断スパン比の影響が大きいことも予想される。

このような観点より, 本研究では, 曲げ破壊で終局に至る場合を前提に, AFRP シートの導入緊張率 (導入緊張力/保証耐力) が RC 梁の耐荷性状や破壊形式およびシートの剥離性状に及ぼす影響を検討することを目的に, 7.0 以下になるようなせん断スパン比を 2 種類設定し, 導入緊張率を種々変化させた AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁に関する静載荷実験を実施した。

表-1 試験体一覧

試験体名	せん断スパン長 (mm)	せん断スパン比 $a/d$	目標導入緊張率* (%)	実測導入緊張率* (%)	実測初期導入ひずみ ( $\mu$ )	計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断耐力 (kN)	せん断余裕度	$M_y/M_u$
A-T0	1,150	5.48	0	0	0	139.7	292.5	2.09	0.58
A-T20			20 (51.7)	15.1 (39.0)	2,508	149.7	307.4	2.05	0.64
A-T40			40 (103.5)	38.9 (100.6)	5,407	165.4	323.2	1.95	0.71
B-T0	1,350	6.43	0	0	0	119.0	292.5	2.48	0.58
B-T20			20 (51.7)	19.0 (49.2)	3,741	129.8	310.9	2.40	0.65
B-T40			40 (103.5)	33.3 (86.1)	5,366	138.0	322.8	2.34	0.69

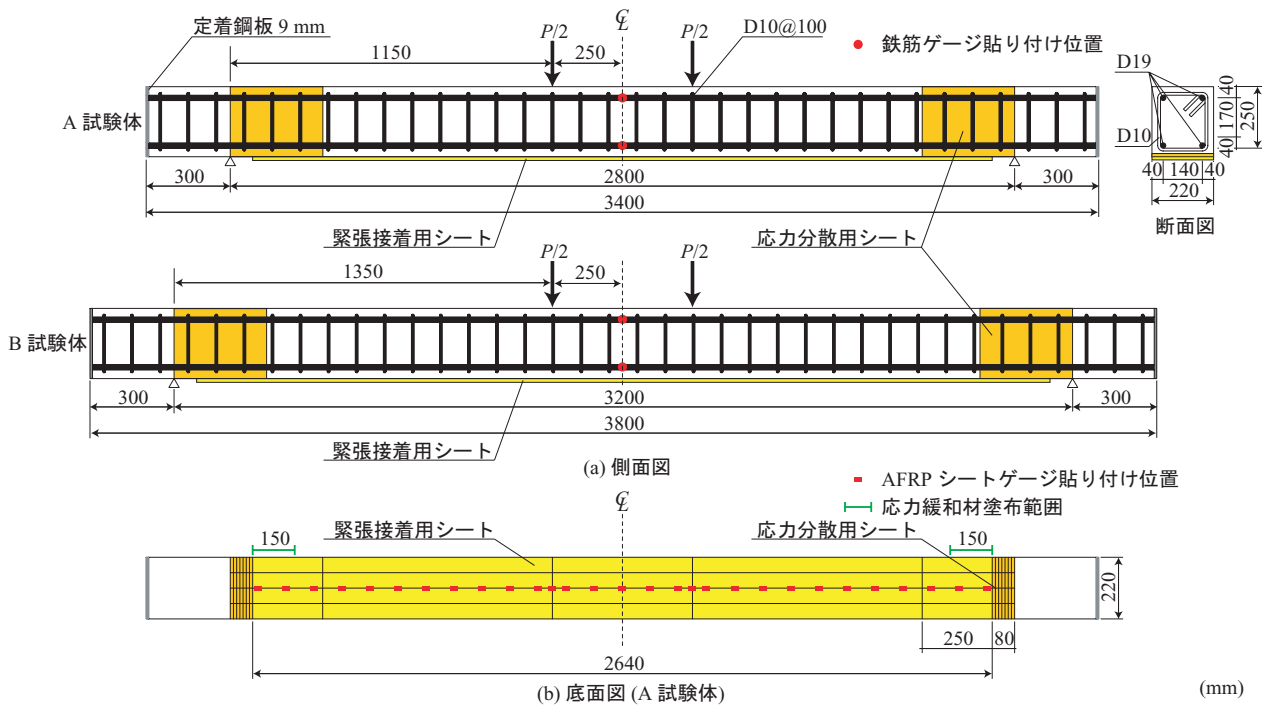
\*: ( ) 内は導入緊張力 (kN)

\*1 ショーボンド建設 (株) (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博 (工) (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 上席研究員 博 (工) (正会員)

\*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)



図－1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強状況

なお、後述するように緊張接着用シート端部の定着領域には応力緩和材を用いており、この領域では所定の曲げ補強効果が期待できない。せん断スパン比が過小の場合には、この領域に大きな曲げモーメントが作用することや斜めひび割れが発生・進展する可能性があることから、本実験においてはせん断スパン比の下限値を5.5程度とした。

## 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。表中、試験体名の第1項目はせん断スパン比(A:  $a/d = 5.48$ , B:  $a/d = 6.43$ )を示している。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。また、荷重測定用ロードセルから得られた緊張力を基に算出した各試験体の実測導入緊張率も併せて示している。試験体数は、せん断スパン比を2種類として、各試験体への導入緊張率を3種類に変化させた全6体である。

また、表－1には各試験体の計算耐力およびせん断余裕度についても併せて示している。なお、計算耐力はすべて実測導入緊張力を基にして算定している。計算曲げ耐力は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>(以後、示方書)に準拠して、AFRP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により算出している。計算せん断耐力は示方書に準拠し、デコンプレッションモーメ

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
435/435**	588/588	0.286			

\*: 緊張接着用シート, \*\*: 応力分散用シート

ントによるせん断耐力向上効果を考慮して算出している。いずれの試験体においても、せん断余裕度(計算せん断耐力/計算曲げ耐力)が1.0を大きく上回り曲げ破壊で終局に至るように設計している。

### 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状況を、側面図はA/B試験体、底面図はA試験体の場合について示している。試験体は断面寸法が $22 \times 25$  cm、純スパン長がA/B試験体でそれぞれ2.8 m、3.2 mの複鉄筋矩形RC梁である。上下端鉄筋にはそれぞれD19を各2本ずつ配置した。また、せん断補強筋にはD10を100 mm間隔で配置している。緊張接着用シートには幅22 cmのAFRPシートを用い、スパン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、緊張接着用シートの定着を確保するために、事前に定着両端部には応力分散用の2方向AFRPシートを接着し、接着樹脂が含浸硬化したのを確認した後、緊張力を導入した

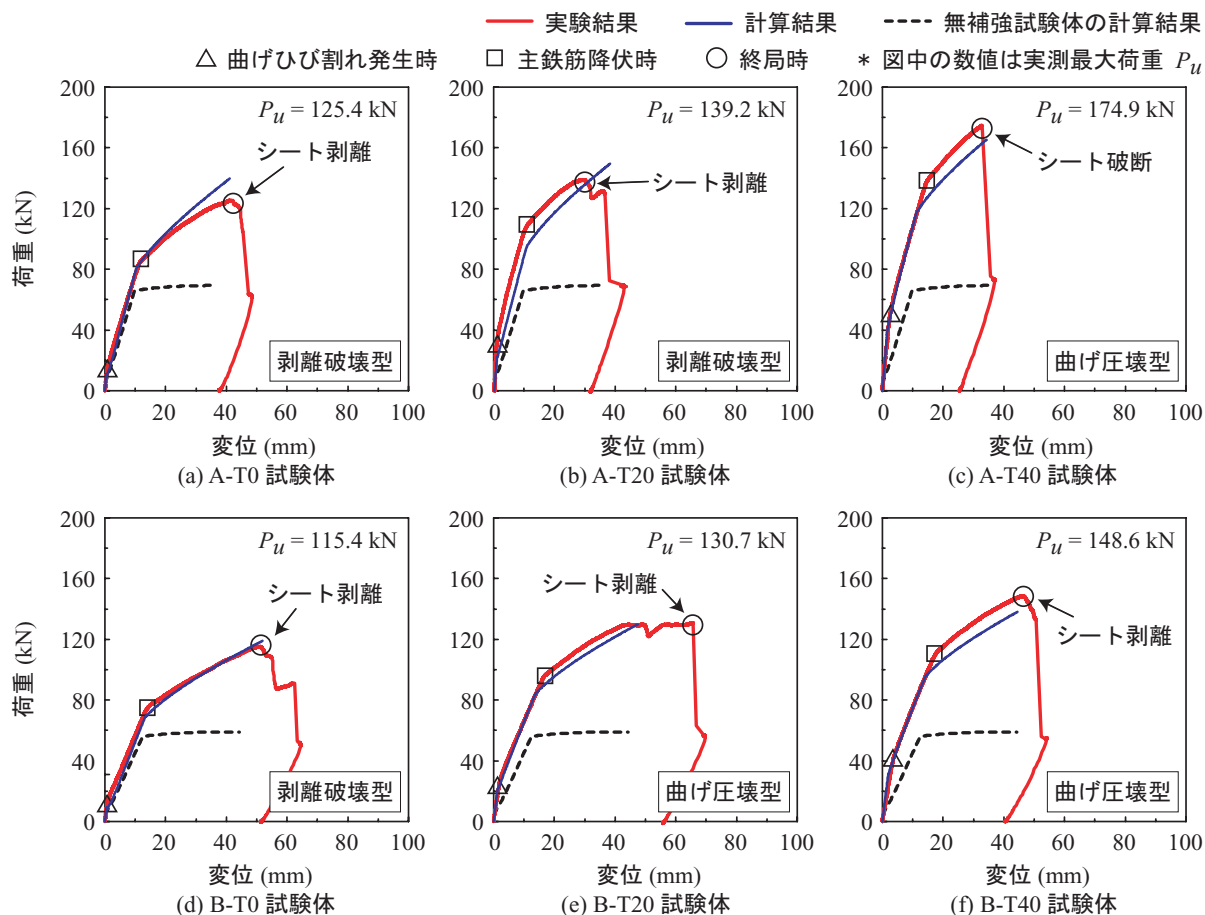


図-2 各試験体の荷重-変位関係

シートの接着を行っている。また、緊張接着用シート端部とその端部から 150 mm の範囲の接着には応力緩和材を用いている。応力緩和材は、弾性係数が汎用含浸接着樹脂の 1/60 程度のエポキシ系接着樹脂である。なお、本論文では、梁底面に接着している AFRP シートを緊張力導入の有無によらず便宜的に緊張接着用シートと呼ぶこととする。

AFRP シートの緊張接着は、梁とは独立した鋼製架台を用い、油圧ジャッキにより AFRP シートに緊張力を導入した状態で接着を行うプレテンション方式で実施している。接着樹脂の硬化に必要な 1 週間程度の養生期間が経過した後、油圧ジャッキを解放して RC 梁に緊張力を導入している。その他の詳細な緊張接着作業工程については文献<sup>5)</sup>を参照されたい。なお、接着表面の品質については、土木学会連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針<sup>7)</sup>における「連続繊維シートとコンクリートの接着試験方法(案)」に準拠して評価している。その結果、接着強度は母材コンクリートの引張強度(2.5 MPa)を上回っていることを確認している。

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。実験時におけるコンクリートの圧縮強

表-3 実験結果一覧

試験体名	実測最大荷重 $P_{ue}$ (kN)	計算最大荷重 $P_{uc}$ (kN)	荷重比 $P_{ue}/P_{uc}$	実験結果における破壊形式
A-T0	125.4	139.7	0.90	剥離破壊型
A-T20	139.2	149.7	0.93	剥離破壊型
A-T40	174.9	165.4	1.06	曲げ圧壊型
B-T0	115.4	119.0	0.97	剥離破壊型
B-T20	130.7	129.8	1.01	曲げ圧壊型
B-T40	148.6	138.0	1.08	曲げ圧壊型

度は 35.6 MPa、主鉄筋の降伏強度は 369 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 AFRP シートの剥離および破断状況を連続的に撮影している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 荷重-変位関係

図-2には、各試験体における荷重-変位関係の実験結

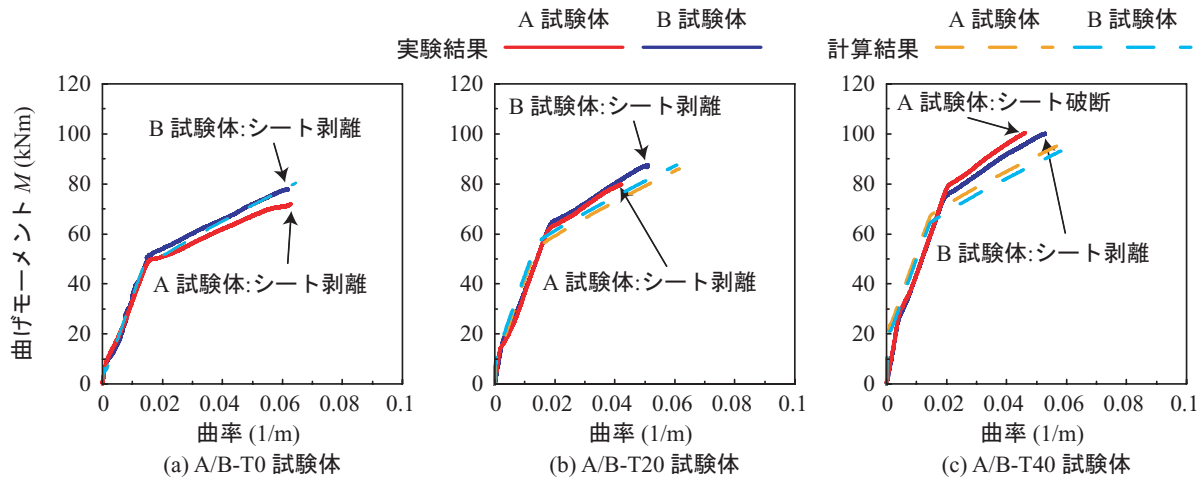


図-3 等曲げ区間における各試験体の曲げモーメント-曲率関係

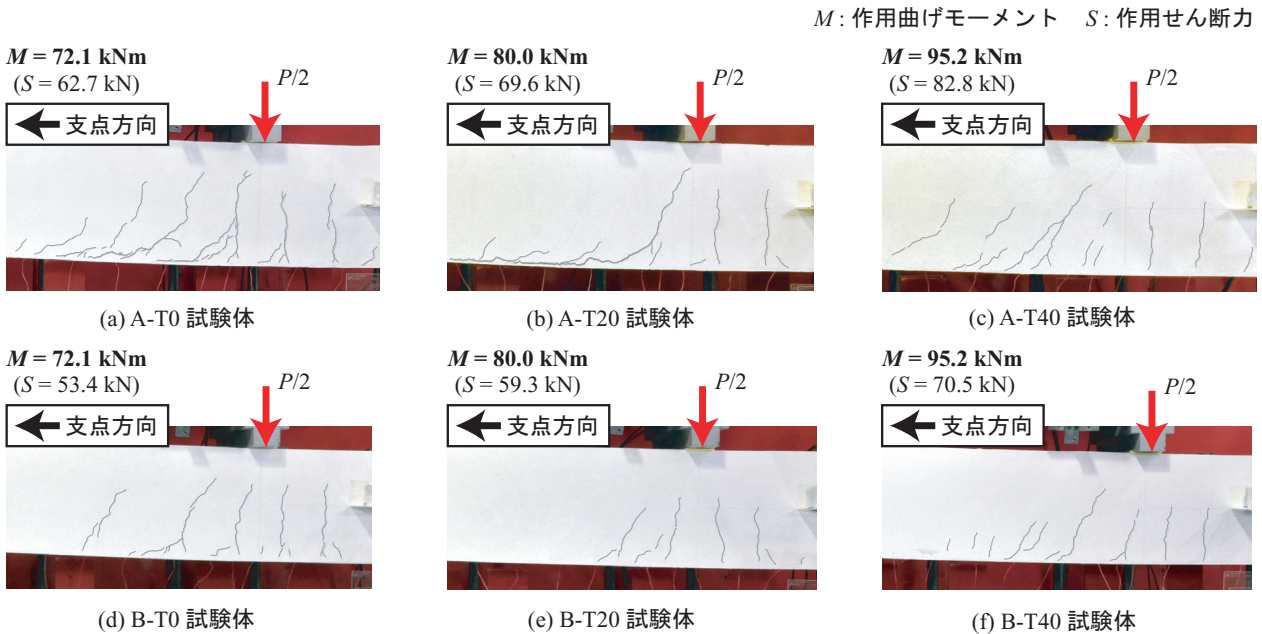


写真-1 同一作用曲げモーメント時におけるひび割れ性状

果と計算結果を比較して示している。なお、無補強試験体の計算結果についても併せて示した。計算では A-T40 試験体のみがシート破断により終局に至っており、その他の試験体は上縁コンクリートの圧壊により終局に至っている。また、表-3 には、各試験体の実験結果一覧を示している。

図-2 より、いずれの試験体においても導入緊張率の増加に伴って各種曲げ耐力（ひび割れ、主鉄筋降伏、終局）が向上していることが分かる。実験結果と計算結果を比較すると、主鉄筋降伏時までは両者ほぼ対応していることが分かる。主鉄筋降伏以降において、A/B-T0 および A-T20 試験体の場合には、計算耐力を下回る荷重でシートが剥離して終局に至っている。一方、A-T40 および B-T20/40

試験体の場合には、計算耐力を上回る荷重で、それぞれシート破断もしくはシート剥離により終局に至っている。また、A-T40 試験体においては上縁コンクリート圧壊後、シート破断により終局に至っていることを確認している。これらのことから、A/B-T0 および A-T20 試験体は剥離破壊型、A-T40 および B-T20/40 試験体は曲げ圧壊型に分類できる。なお、表-3 から、荷重比  $P_{ue}/P_{uc}$ （実測耐力/計算耐力）は B 試験体よりもせん断スパン比の小さい A 試験体の方が小さくなる傾向にあることが分かる。

### 3.2 曲げモーメント-曲率関係

図-3 には、各試験体の耐荷性状を比較するため、等曲げ区間における曲げモーメント-曲率関係の実験結果と計算結果を導入緊張率ごとに示している。

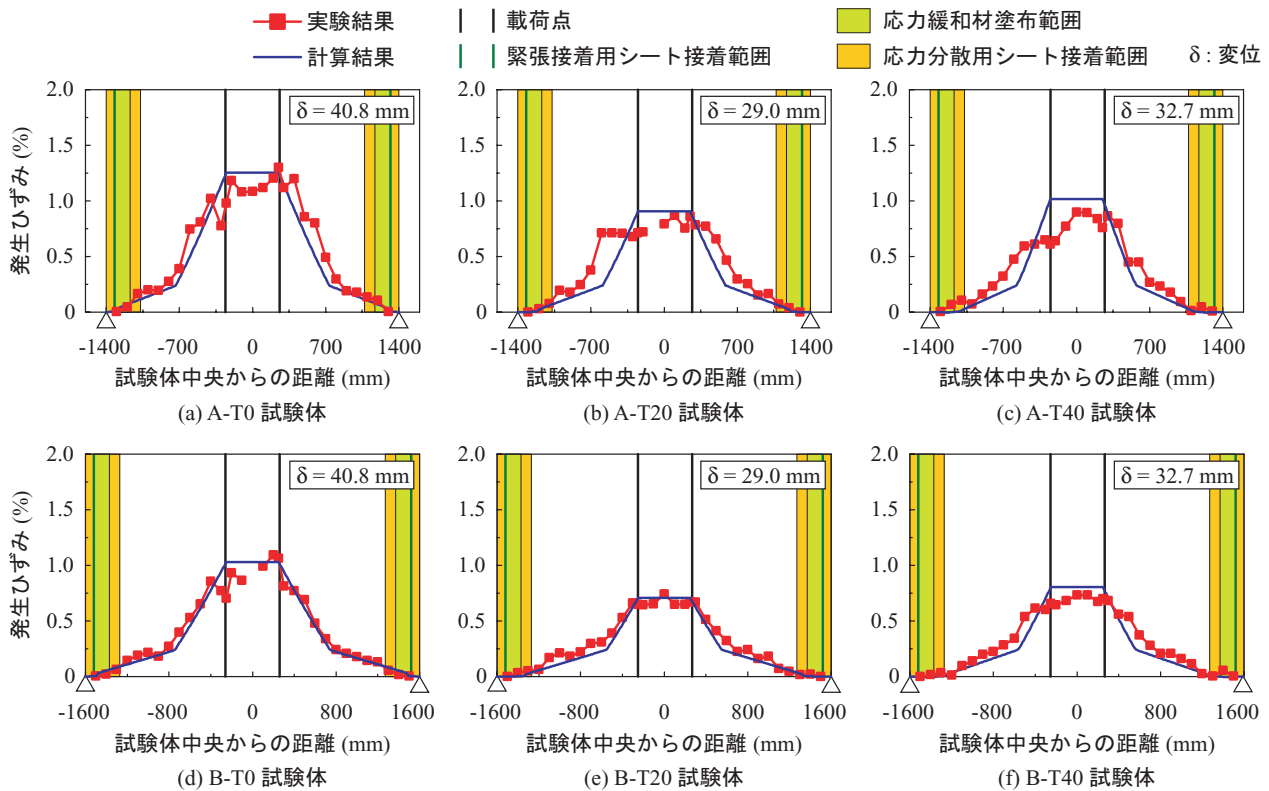


図-4 同一変位時におけるシート軸方向ひずみ分布性状

図より、導入緊張率が同等の場合には、せん断スパン比によらず、曲げモーメント-曲率関係の実験結果は計算結果と概ね対応していることが分かる。ただし、せん断スパン比が小さいA試験体の場合には、曲げモーメントおよび曲率が小さい状態でシートが剥離する傾向にある。

この要因を検討するために、写真-1には、A/B試験体の同一曲げモーメント作用時におけるひび割れ分布を導入緊張率ごとに示している。ここで、着目する作用曲げモーメント $M$ は、両試験体の実験結果および計算結果における終局時の値を比較して最も小さい値とした。なお、参考までに各導入緊張率における同一曲げモーメント作用時の作用せん断力 $S$ も併記している。

写真より、せん断スパン比が小さいA試験体の場合には、斜めひび割れが大きく開口し、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が顕在化する傾向にあることが分かる。これは、同一断面かつ同一作用曲げモーメントの条件下では、せん断スパン比が小さいほど作用せん断力が大きくなることより、このことが図-3のようなピーリング作用によってシートが早期に剥離することの要因であるものと推察される。なお、導入緊張率が大きいA/B-T40試験体の場合には、このような傾向は顕著ではない。これは、デコンプレッションモーメントによるせん断耐力増分が大きいことによるものと考えられる。

### 3.3 緊張接着用AFRPシートの軸方向ひずみ分布性状

図-4には、A/B試験体の同一変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布について示している。ここで、変位は、両試験体の実験結果および計算結果における終局時の値を比較し、最も小さい値とした。なお、各発生ひずみは荷重荷重に伴って発生した増分ひずみであり、緊張接着時における導入ひずみは含まれていない。

図より、A/B試験体についてそれぞれ比較すると、A試験体の場合には、ピーリング作用によって等せん断力区間においてひずみ分布の乱れが顕在化していることが分かる。これは、前述のようにA試験体の場合にはせん断スパン比が小さいため、同一作用曲げで考えると作用せん断力が大きくなることから、斜めひび割れの発生や開口に起因するピーリング作用が生じやすいためと考えられる。一方、せん断スパン比の大きいB試験体では、作用せん断力が小さいため、斜めひび割れの発生や開口が十分に進展せずピーリング作用が励起されるに至っていないことから、等せん断力区間における大きなひずみの乱れもなく、実験結果と計算結果の対応は概ね良好である。

### 3.4 破壊形式と曲げモーメント比の関係

図-5には、各試験体の破壊形式を計算曲げモーメント比 $M_y/M_u$  (表-1参照)を縦軸に、せん断スパン比 $a/d$ を横軸に取って整理している。ここで、計算曲げモーメント比は、計算主鉄筋降伏曲げモーメント $M_y$ を計算終局

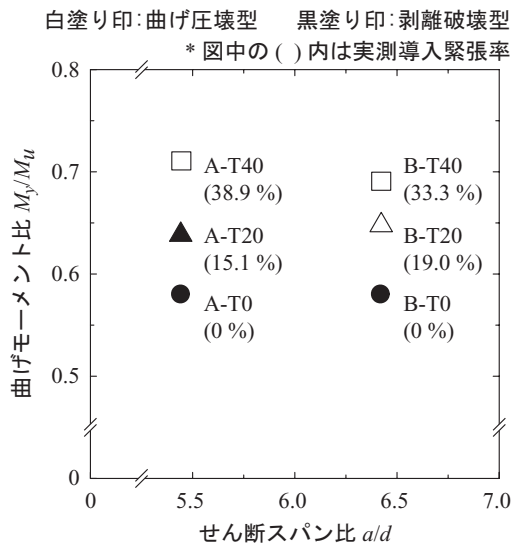


図-5 破壊形式と曲げモーメント比の関係

曲げモーメント  $M_u$  で除した値である。なお、計算終局曲げモーメントは破壊形式によらず梁上縁コンクリートの圧縮ひずみが  $3,500 \mu$  に到達した時点、もしくは梁下縁のAFRPシートが引張強度に到達した時点の値として評価している。また、実験結果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、せん断スパン比によらず計算曲げモーメント比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、破壊形式は導入緊張率が大きい場合ほど曲げ圧壊型になる傾向にあることが分かる。

また、A/B試験体の破壊形式を曲げモーメント比  $M_y/M_u$  で評価する場合には、せん断スパン比が小さい場合ほど、剥離破壊型から曲げ圧壊型に移行する閾値が高くなる可能性が示唆される。これは、前述したように、せん断スパン比が小さい場合には同程度の曲げに対して作用せん断力が大きくなり、ピーリング作用によるシート剥離の影響が顕著に現れるため、剥離破壊型で終局に至る傾向が強くなるためと推察される。

#### 4. まとめ

本研究では、AFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁において、比較的せん断スパン比が小さい条件下で、導入緊張率が梁の曲げ耐荷性状や破壊形式およびシートの剥離性状に及ぼす影響を検討することを目的に、断面形状が同一で2種類のせん断スパン比を設定し、導入緊張率を変化させた静荷重実験を実施した。本実験の範囲で得られた知見を整理すると、以下の通りである。

1) せん断スパン比によらず、AFRPシートを緊張接着

することによりRC梁の曲げ耐荷性能を向上可能である。

- 2) せん断スパン比が小さく導入緊張率が低い場合には、実測耐力が計算耐力を下回る傾向にある。これは断面曲げ耐力に対して作用せん断力が大きくなるため、ピーリング作用が顕在化しやすいためである。
- 3) RC梁の破壊形式は、せん断スパン比によらず導入緊張率を増加させることによって剥離破壊型から曲げ圧壊型に移行する。
- 4) RC梁の破壊形式を終局曲げに対する主鉄筋降伏曲げの比を用いて評価する場合には、せん断スパン比が小さい場合ほど剥離破壊型から曲げ圧壊型に移行する閾値が高くなる傾向にある。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 土佐亮允, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.1309-1314, 2011.
- 4) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 今野久志: 梁幅を変化させたAFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁のシート剥離性状に及ぼす導入緊張率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp.1315-1320, 2012.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介, A.M.Ali: AFRPシート緊張接着によるRC梁の曲げ補強効果および破壊形式予測法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.812-821, 2011.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2007.
- 7) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000.