

FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に与えるシート材料特性の影響

Effects of material property of FRP sheets on flexural bending behavior of RC beams strengthened with FRP sheet

室蘭工業大学 正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
北海道開発土木研究所 正員 田口 史雄 (Fumio Taguchi)
室蘭工業大学 ○学生員 一瀬 将吾 (Syogo Ichinose)

1. はじめに

近年、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強工法として軽量かつ高引張強度を有する連続繊維シート (以後、FRP シート) を用いた接着工法が数多く採用されるようになってきた。著者らは、これまで FRP シートを用いた RC 部材の合理的な曲げ補強設計手法の確立を目的として、FRP シート曲げ補強 RC 梁を用いた静載荷実験を多数実施し、シートの曲げ耐力向上効果やその剝離挙動に関する検討を行ってきた¹⁾。その結果、1) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、断面分割法に基づいて算出した計算終局耐力や変位を下回る状態でシートが剝離し終局に至る場合 (以後、剝離破壊型) と、計算終局変位を上回った後上縁コンクリートが圧壊し、計算終局耐力とほぼ同等の荷重レベルでシートが剝離する場合 (以後、曲げ圧壊型) に分類されること、2) シートの剝離は、梁下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロックがシートを下方に押し出して引き剝がすピーリング作用によって発生すること、等を明らかにしている。しかしながら、これらの結果は主にアラミド繊維 (ケブラーAK) シートを用いて曲げ補強した RC 梁の静載荷実験により得られたものである。FRP シートを用いた RC 梁の曲げ補強設計手法を確立するためにはシートの材料特性の異なる場合の補強効果を検討することが肝要である。

このような観点から、本研究では、市販の4種類のFRP シートを取り上げ、曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に与えるシート材料の影響について検討を行った。

2. 実験概要

本実験に用いた試験体は、断面タイプを2種類、シ

ト材料を4種類に変化させた全7体の矩形 RC 梁である。表-1には、試験体の一覧を示している。試験体名の第一項目は RC 梁の種類 (A : 梁高 25 cm, B : 梁高 40 cm) を、第二項目は曲げ補強材として用いた FRP シートの種類 (AT, AK : アラミド繊維, C1, C2 : 炭素繊維) を示している。表-2には、各シートの材料特性値の一覧を示している。シート補強量は、市販されているシートを用いることとし、シートの引張軸剛性 $E_f t$ (E_f : 弾性係数, t : シート厚さ) が極力等しくなるように決定した。表-1には、各試験体に接着したシートの $E_f t$ を記している。なお、A-AK, B-AK 試験体は同一諸元の試験体を用いた過去の実験より、それぞれ曲げ圧壊型、剝離破壊型を示すことを確認している。

図-1には、試験体の概要を示している。試験体は主鉄筋に D16(SD345) を用いた複鉄筋矩形 RC 梁であり、せん断補強筋には D10 (SD295) を用い 10 cm 間隔で配筋している。断面寸法 (幅 × 高さ) は A, B 梁でそれぞれ 15 × 25 cm, 15 × 40 cm である。実験は等曲げ区間を 50 cm とした静的二点載荷で行った。いずれの場合

表-1 試験体の一覧

試験体名	RC 梁の種類	シート材料	補強層数	$E_f t$ (kN/mm)
A-AT	A 梁	AT	1層	29.7
A-AK		AK		33.7
A-C1		C1		38.4
B-AT	B 梁	AT	2層	59.3
B-AK		AK		67.3
B-C1		C1		76.8
B-C2		C2	1層	81.4

表-2 各種 FRP シートの材料特性値一覧

シート材料	目付量 (g/m ²)	厚さ t (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 E_f (GPa)	破断歪 (%)
アラミド繊維 AT-90 (AT)	525	0.378	2.35	78.5	2.99
アラミド繊維 AK-60 (AK)	415	0.286	2.06	118	1.96
炭素繊維 UT70-30 (C1)	300	0.167	3.40	230	1.77
炭素繊維 FTS-EA82-2 (C2)	340	0.185	2.40	440	0.55

* シートの力学的特性はカタログ値

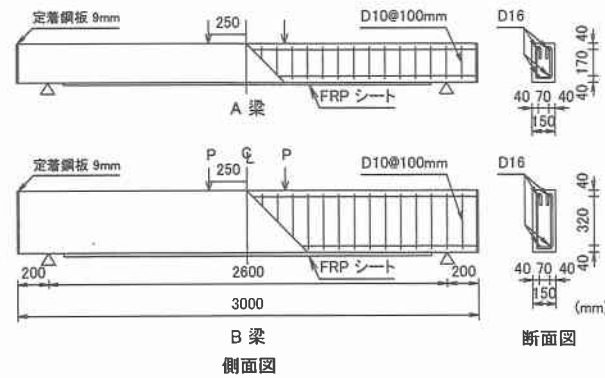


図-1 試験体の形状寸法及び補強概要

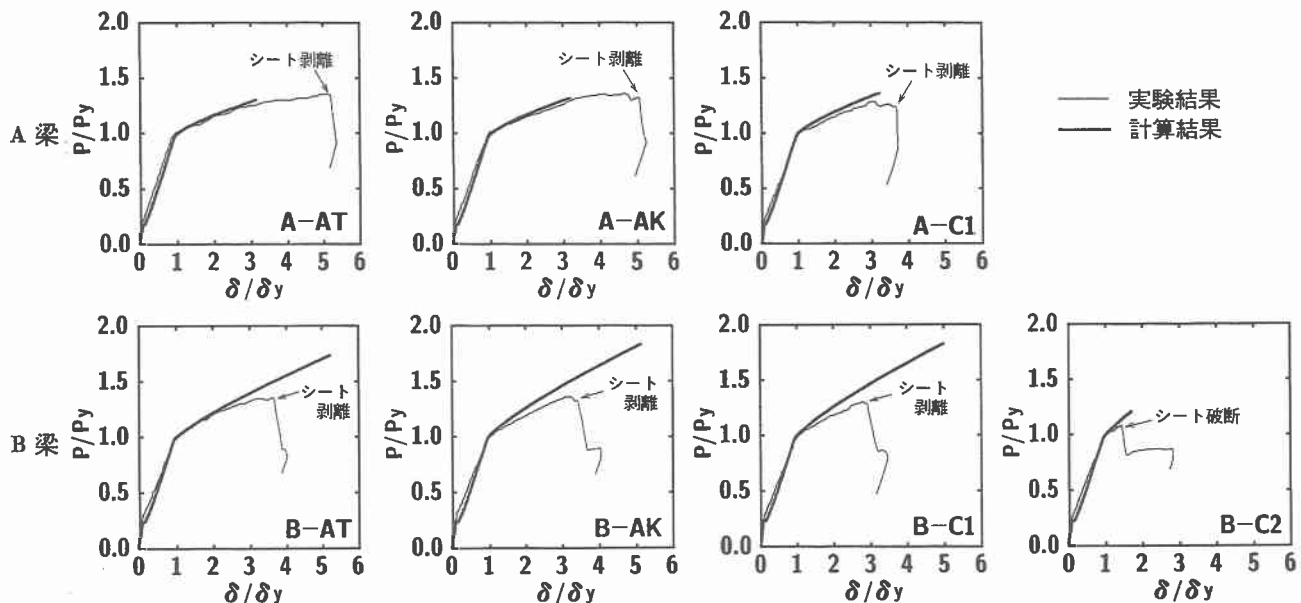


図-2 無次元荷重一変位曲線に関する実験および計算結果の比較

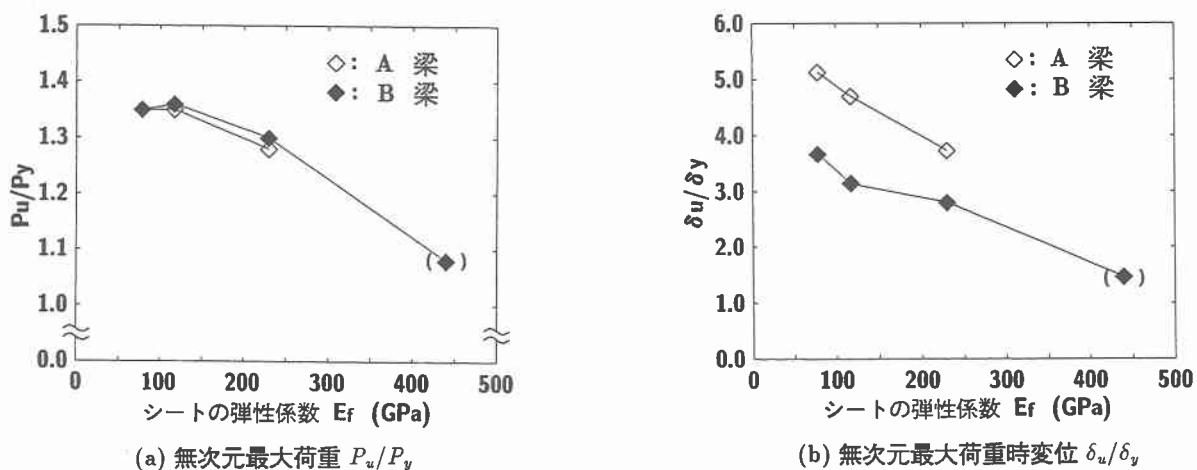


図-3 無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位とシートの弾性係数との関係

も試験体の底面には幅 13 cm の FRP シートを梁中央部から両側支点の 10 cm 手前までの範囲に貼り付けている。また、シートの剥離挙動を把握するためにシート上にはゲージ長 10 mm の歪ゲージを 10 cm 間隔および載荷点直下に貼付している。なお、シート接着部のコンクリート表面はシートの付着性能を向上させるために、ショットブラスト処理を施すこととした。

実験時のコンクリートは、材齢が 128 日、平均圧縮強度 $f'_c = 31.5$ MPa、弾性係数 $E_c = 21.5$ GPa、ポアソン比 $\nu = 0.21$ であった。また、材料試験により得られた主鉄筋の降伏強度は 407 MPa であった。本実験における測定項目は載荷荷重、スパン中央部変位および FRP シート各点の歪である。

3. 実験結果および考察

3.1 無次元荷重一変位関係

図-2 には、各試験体に関する無次元荷重一変位曲線の実験結果および計算結果を示している。図中、縦軸には荷重、横軸にはスパン中央部変位を取って整理している。実験結果、計算結果ともに各々の主鉄筋降伏荷重

P_{ye} 、 P_{yc} および降伏変位 δ_{ye} 、 δ_{yc} で無次元化し整理することとしている。これは、各試験体の主鉄筋降伏後におけるシートの曲げ補強効果を同一の尺度で比較検討するためである。なお、計算結果は各材料の力学的特性を考慮して断面分割法により算出したものである。計算はシートとコンクリートの完全付着を仮定し、B-C2 試験体を除いて、梁上縁コンクリートの歪が $3,500 \mu$ に達する状態を終局と仮定して実施している。なお、B-C2 試験体の場合にはシート破断で終局に至っている。

結果を概観すると計算結果の無次元最大荷重 P_{uc}/P_{yc} および無次元最大荷重時変位 δ_{uc}/δ_{yc} は、A 梁の場合にはそれぞれ、1.3、3.2 程度、B 梁の場合には B-C2 試験体を除き、それぞれ 1.8、5.0 程度となっており、各断面タイプでほぼ同等であることがわかる。なお、B-C2 試験体は、前述のようにシート破断によって終局に至っているため P_{uc}/P_{yc} 、 δ_{uc}/δ_{yc} は小さい。このように、各試験体の計算結果はシートが破断する場合を除き、シートの引張軸剛性 E_{ft} を同程度とすることによりほぼ同様となるがわかる。

これに対して、実験結果はシートの材料特性によって

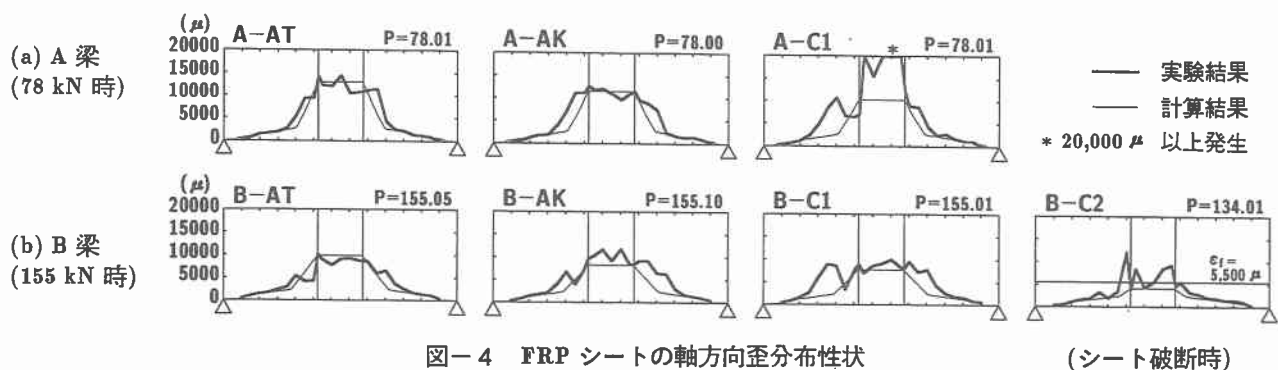


図-4 FRP シートの軸方向歪分布性状 (シート破断時)

表-3 シートの軸方向引張耐力一覧

試験体名	シートの引張耐力 (kN)	シートの軸方向発生引張力 (kN)	発生引張力比
A-AT	115.48	66.64	0.58
A-AK	76.59	60.50	0.79
A-C1	73.81	74.77	1.01
B-AT	230.96	81.05	0.35
B-AK	153.18	93.98	0.61
B-C1	147.63	88.80	0.60
B-C2	57.72	58.20	1.01

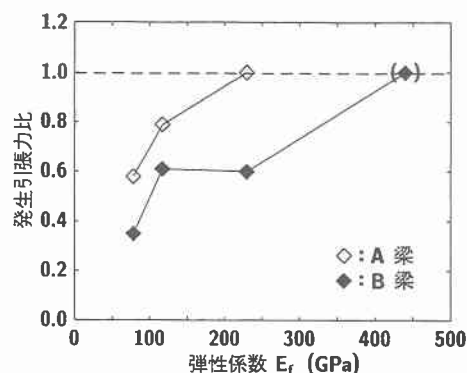


図-5 シートの軸方向引張耐力と弾性係数との関係

大きく異なっていることがわかる。すなわち、A 梁のうち、シート材料として AT, AK を用いる場合には実験結果が計算結果の最大変位に到達した後シートが剝離する曲げ圧壊型となっている。なお、C1 シートを用いる場合には、実験結果が計算最大変位に到達した後シートが剝離するものの、この時点ではすでに荷重が若干低下し剝離が進行している。一方、B 梁の場合には、いずれの実験結果も計算結果の無次元最大荷重や無次元最大変位よりも小さな段階でシートが剝離する剝離破壊型を示している。なお、各試験体でシート剝離時の荷重値および変位値は異なっている。

図-3 には、梁の曲げ耐荷性状に及ぼす FRP シートの材料特性の影響を検討するため、実験結果の無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位とシートの弾性係数との関係を示している。図中、A 梁の結果は ◇ 印、B 梁の結果は ◆ 印で示している。なお、シートの破断によって終局に至った B-C2 試験体の結果は () を付して示している。(a)図より、A、B 梁の結果はともに類似の傾向を示していることがわかる。すなわち、AT, AK シートを用いる場合には、いずれも P_{ue}/P_{ye} が 1.35 程度で、これらのシートの曲げ耐力向上効果はほぼ同等であると云える。一方、AT, AK よりも弾性係数の大きい C1 シートを用いる場合には P_{ue}/P_{ye} が若干低下している。なお、B 梁のうち最も弾性係数の大きい C2 シートを用いる場合には、さらに P_{ue}/P_{ye} が低下している。(b)図より、A 梁の δ_{ue}/δ_{ye} は、弾性係数の増加とともに、ほぼ線形に低下する傾向にあることがわかる。B 梁の場合には、同様の傾向を示すものの、A 梁よりも小さい。

以上より、FRP シート曲げ補強 RC 梁の最大荷重や最大荷重時変位は FRP シートの弾性係数が大きいほど低下する傾向にあることが明らかになった。

3.2 FRP シートの歪分布性状

図-4 には、A、B 梁に適用した各種 FRP シートの歪分布性状を比較検討するため、同一荷重時における FRP シートの軸方向歪分布の実験結果を計算結果と比較して示している。ここでは、A 梁の場合には各試験体の計算最大荷重時近傍として $P = 78$ kN 時、B 梁の場合には B-C1 試験体のシート剝離時として $P = 155$ kN 時の結果について検討することとした。なお、B-C2 試験体は、他の B 梁よりも小さな荷重レベルでシートが破断して終局に至っているためシート破断時の結果を示している。

図-4(a)より、A-AT, AK 試験体は等曲げ区間において実測歪が計算歪とほぼ対応していることがわかる。しかしながら、等せん断力区間の実測歪は主鉄筋降伏領域近傍において計算歪よりも大きく示されていることがわかる。これは、等せん断力区間における主鉄筋降伏領域内の下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によってシートが下方に押し出されているためと考えられる。一方、A-C1 試験体は、等曲げ区間および左側等せん断力区間の一部で実測歪が計算歪よりも大きく示されている。特に等曲げ区間では 20,000 μ を越えた歪値を示している。これは、C1 シートがひびわれ発生部における応力集中によって、局部的に破断に近い状態になっているためと推察される。

一方、図-4(b)の内 AT, AK および C1 シートを用いる場合の結果を見ると、実測歪が計算歪を上回る領域が B-C1 試験体で最も広範囲に渡っている。これは、C1 シートの弾性係数が大きいことにより、コンクリートブロックのピーリング作用によるシート剥離が促進されることを暗示している。一方、シート破断により終局に至った B-C2 試験体は、用いたシートの弾性係数が最も大きく、等曲げ区間および左側載荷点近傍においてひびわれ等起因する応力集中が発生し、シート歪が公称破断歪である $5,500 \mu$ を越えていることがわかる。以上より、弾性係数の大きい FRP シートを用いる場合にはひびわれに起因する応力集中が発生しやすく、結果的に早期にシート剥離やシート破断を生じる可能性のあることが明らかとなった。

図-5には、各 FRP シートの有する引張耐力に対するシートの発生引張力の割合を検討するため、シートの引張耐力に対する発生引張力の比（以下、発生引張力比）に着目し、各梁に適用したシートの発生引張力比と弾性係数との関係を整理している。なお、シートの発生引張力は各試験体の終局時における等曲げ区間のシート歪の平均値に弾性係数および断面積を乗ずることにより算出している。表-3には、各試験体のシートの引張耐力一覧を示している。図-5より、A, B 梁ともに弾性係数が大きいほど、発生引張力比が大きくなる傾向にあることがわかったと云える。しかしながら、C2 および C1 を用いる場合には、前述のような応力集中や早期のシート剥離が懸念される。一方、弾性係数の最も小さい AT を用いる場合には、発生引張力比が $0.35 \sim 0.60$ 程度と AK を用いた場合の $0.6 \sim 0.8$ に比較して小さい値を示している。従って、AT を用いる場合には AK を用いる場合に比較してシートの有する引張耐力が効率的に発揮されていないと云える。

3.3 破壊性状

図-6には、実験終了後におけるひびわれ分布性状を示している。図より、A 梁、B 梁ともに弾性係数の小さい FRP シートを用いる場合ほど下縁かぶりコンクリート部におけるひびわれの発生および剥落等の損傷が著しいことがわかる。これは、弾性係数の小さい FRP シートを用いる場合ほど曲げおよび斜めひびわれの発生やそれに伴うピーリング作用の発生後もシートの部分剥離が急激には進展しないことによるものと考えられる。なお、弾性係数が最も大きい FRP シートを用いた B-C2 試験体は、ピーリング作用等によるシートの部分剥離が発生する前にシートが破断して終局に至るため、他の試験体と異なり等せん断力区間には、シート剥離の要因となるコンクリートブロックの形成が見られない。

4. まとめ

本研究では、各種 FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に与えるシート材料特性の影響を検討することを目的として、材料特性の異なる 4 種類の FRP シートを用

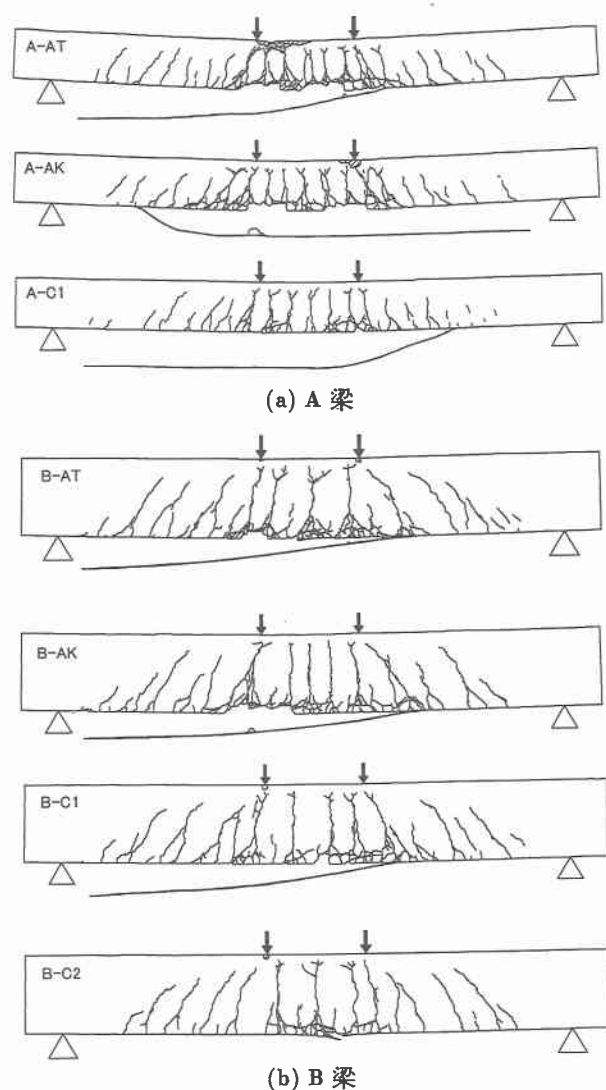


図-6 実験終了後におけるひびわれ分布性状

いて曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行った。本実験より得られた結論は以下の通りである。

- 1) FRP シート曲げ補強 RC 梁の最大荷重や最大荷重時変位は FRP シートの弾性係数が大きいほど低下する傾向にある。また、ひびわれ発生位置に応力が集中しやすく、結果的に早期にシート剥離やシート破断を生じる可能性がある。
- 2) 弾性係数の最も小さい AT を用いる場合には、発生引張力比が AK を用いた場合に比較して小さい値を示すことより、AT を用いる場合には AK を用いる場合に比較してシートの有する引張耐力が効率的に発揮されていないと云える。

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, 47-64, 2001.8.