

## 論文 引張剛性の等しい各種 FRP シートを接着した RC 梁の曲げ耐荷性状

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

要旨：本研究では，FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼすシートの材料特性の影響を検討するため，引張剛性のほぼ等しい各種 FRP シートを接着した RC 梁の静載荷実験を行った。その結果，1) シートの弾性係数が大きい場合には，ピーリング作用によるシート剥離開始後にシート接着部の界面付着せん断応力が増大し，早期にシートの全面剥離に至る傾向にあること，2) 弾性係数の小さいシートを用いる場合には，シートの引張耐力が十分発揮される前に剥離する傾向にあること，等が明らかになった。

キーワード：RC 梁，曲げ補強，FRP シート，材料特性値，ピーリング作用

## 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 梁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実施し，シートの曲げ耐力向上効果や剥離挙動に関する検討を行ってきた<sup>1)</sup>。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耐力や計算終局変位を下回る状態でシートが剥離し終局に至る場合 (以後，剥離破壊型) 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，計算耐力とほぼ同等の荷重でシートが剥離する場合 (以後，曲げ圧壊型) に分類されること，2) シートの剥離は，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剥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，上記の知見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 梁の統一的な

曲げ補強設計手法を確立するためには，シートの材料特性が異なる場合に対してもその補強効果を明らかにしておくことが必要である。

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，シートの引張剛性 (本文では  $E_f \cdot A_f$ ， $E_f$ : 弾性係数， $A_f$ : シートの断面積) を極力等しくして曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼすシート材料特性の影響について検討を行った。なお，本研究ではシートの引張剛性一定の下，シート幅を変化させた場合についても併せて検討を行っている。

## 2. 実験概要

表 - 1 には，試験体の一覧を示している。本実験に用いた試験体は，断面タイプを 2 種類，シート材料を 3 もしくは 4 種類，シート幅を 2 種類に変化させた全 9 体の矩形 RC 梁である。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)，第二項目は 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。また，第三項目に -S を付した試験体は，AK シートを用いる場合においてシートの引張剛性一定の下，シート幅を 1/2，その層数を 2 倍とした試験体である。シートの引張剛性  $E_f \cdot A_f$  は，各シートの材料特性値 (表

\*1 (独)北海道開発土木研究所 研究員 博(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 工博 (正会員)

\*3 三井建設(株) 主席研究員 技術研究所 博(工) (正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻 修(工)

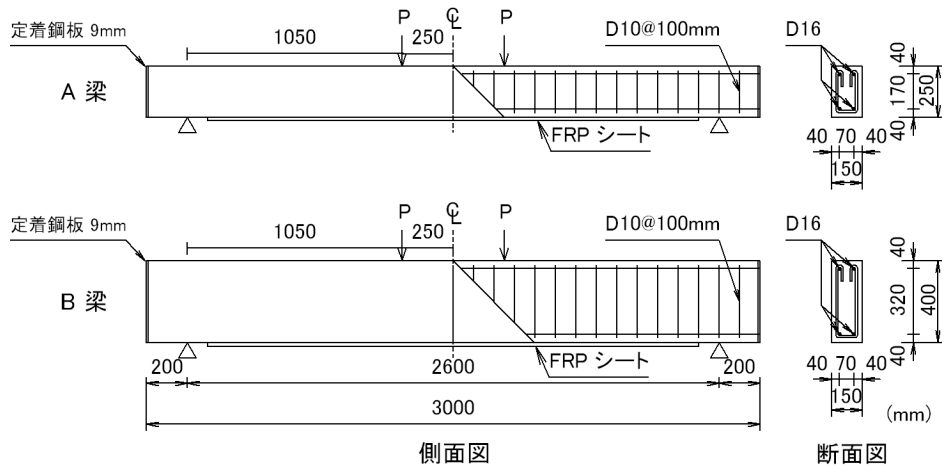


図 - 1 試験体の概要

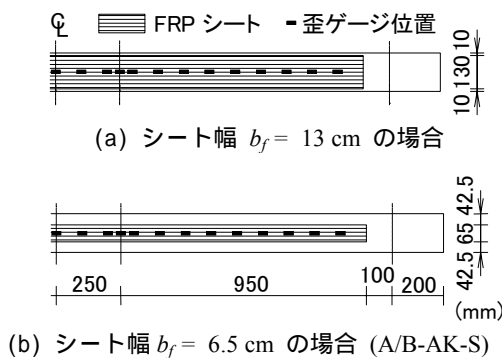


図 - 2 梁底面における補強概要

- 2 参照) に基づいて極力等しくなるように設定した。なお, A 梁および B 梁は, 過去に実施したこれらと同一諸元でかつ AK シートを接着した RC 梁の実験結果より, それぞれ曲げ圧壊型, 剥離破壊型を示すことが予想される。

図- 1 には試験体の概要を, 図- 2 には梁底面における補強概要を示している。試験体は, いずれも主鉄筋に D16 (SD345) を用いた複鉄筋矩形 RC 梁であり, 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。試験体の底面には幅 13 cm もしくは 6.5 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の材齢は

表 - 1 試験体の一覧

試験体名	梁の種類	シート材料	補強層数	シート幅 $b_f$ (cm)	$E_f \cdot A_f^*$ (MN)
A-AT	A 梁	AT	1 層	13	3.86
A-AK		AK	1 層	13	4.39
A-AK-S			2 層	6.5	
A-C1		C1	1 層	13	4.99
B-AT	B 梁	AT	2 層	13	7.71
B-AK		AK	2 層	13	8.77
B-AK-S			4 層	6.5	
B-C1		C1	2 層	13	9.99
B-C2		C2	1 層	13	10.6

\*  $A_f = b_f \times t_f$

表 - 2 各種 FRP シートの材料特性値

シート材料	目付量 ( $g/m^2$ )	厚さ $t_f$ (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	1.75
炭素繊維(C1) UT70-30	300	0.167	3.40	230	1.48
炭素繊維(C2) FTS-EA82-2	340	0.185	2.40	440	0.55

\* ( ) 内は本論文で用いる呼称

128 日, 平均圧縮強度は 31.5 MPa であった。また, 主鉄筋の降伏強度は 407 MPa であった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 荷重 - 変位関係

図- 3 には, 各試験体に関する荷重 - 変位曲線の実験および計算結果を示している。なお, A/B-AK の結果には, シート幅の狭い A/B-AK-S

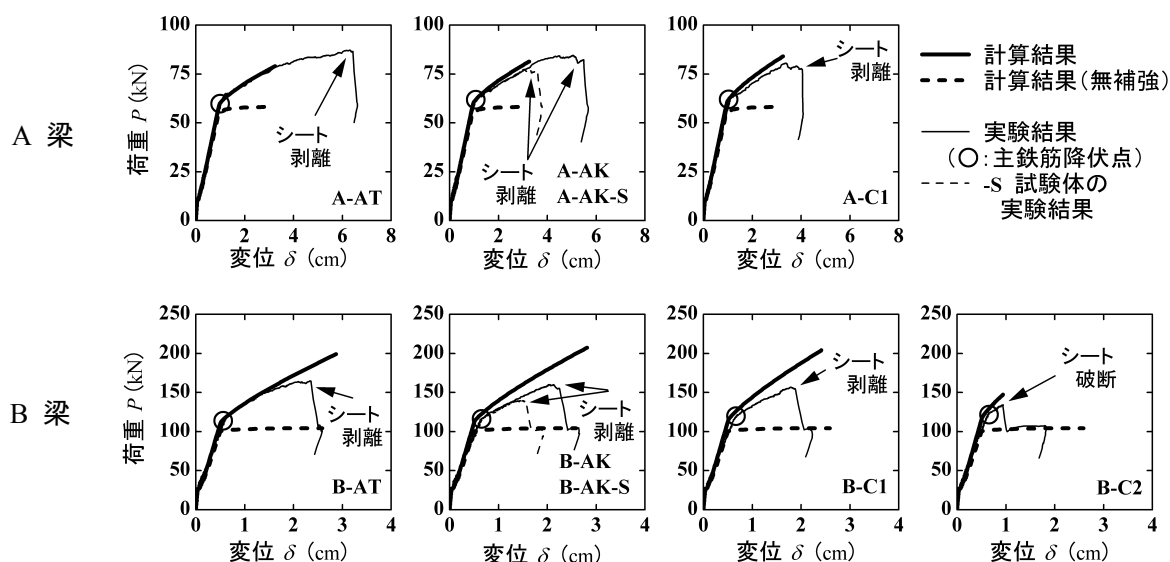


図 - 3 荷重 - 変位関係に関する実験および計算結果の比較

の結果をそれぞれ併記している。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。計算はシートとコンクリートの完全付着を仮定し、B-C1/C2 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-C1/C2 の場合にはシート破断により計算を終了している。また、シート幅の狭い A/B-AK-S の計算結果はそれぞれ A/B-AK とほぼ同等であったため図中には示していない。

図より、計算結果の最大荷重および最大荷重時変位は、A 梁の場合においてそれぞれ 80 kN、3.2 cm 程度、B 梁の場合において B-C1/C2 を除き、それぞれ 210 kN、2.8 cm 程度となっており、各梁の試験体間でほぼ同等であることが分かる。ここで、B-C2 の計算結果は、主鉄筋降伏直後のシート破断によって終局に至っているため最大荷重および最大荷重時変位が他に比べて小さい。また、B-C1 の計算結果は、上縁コンクリート圧壊の直前にシート破断で終局に至っているため、大略 B-AT/AK と同様である。このように、各梁の計算結果は、シートが早期に破断する場合を除き、引張剛性  $E_f \cdot A_f$  を同程度とすることによりほぼ同様となることが分かる。

これに対して、実験結果はシートの材料特性やシート幅によって大きく異なっている。すな

わち、A 梁の場合は曲げ圧壊型、B 梁の場合は B-C2 を除いて剥離破壊型の性状を示しているものの、両梁ともに弾性係数  $E_f$  の大きいシートを用いる場合ほど最大荷重および最大荷重時変位が小さくなる傾向にある。なお、この傾向は、特に A 梁の場合で顕著である。また、B-C2 試験体は、シート破断を想定した計算終局耐力を下回る荷重でシートが破断して終局に至っている。一方、シート幅の狭い A/B-AK-S の最大荷重、最大荷重時変位は A/B-AK のそれに比較して著しく小さいことが分かる。

以上より、引張剛性  $E_f \cdot A_f$  がほぼ同等の FRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の耐力および変形能は、 $E_f$  が大きい場合やシート幅が狭い場合ほど小さくなる傾向にあり、特にシート幅の影響が顕著であることが明らかとなった。

### 3.2 FRP シートの歪分布性状

図 - 4 には、FRP シートの歪分布性状に及ぼすシートの材料特性の影響を検討するため、シート幅 13 cm の場合について同一荷重時におけるシートの歪分布性状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  $P = 78 \text{ kN}$  時、B 梁の場合には B-C1 のシート剥離時として  $P = 155 \text{ kN}$  時の結果について検討することとした。なお、B-C2 は、他の B 梁より

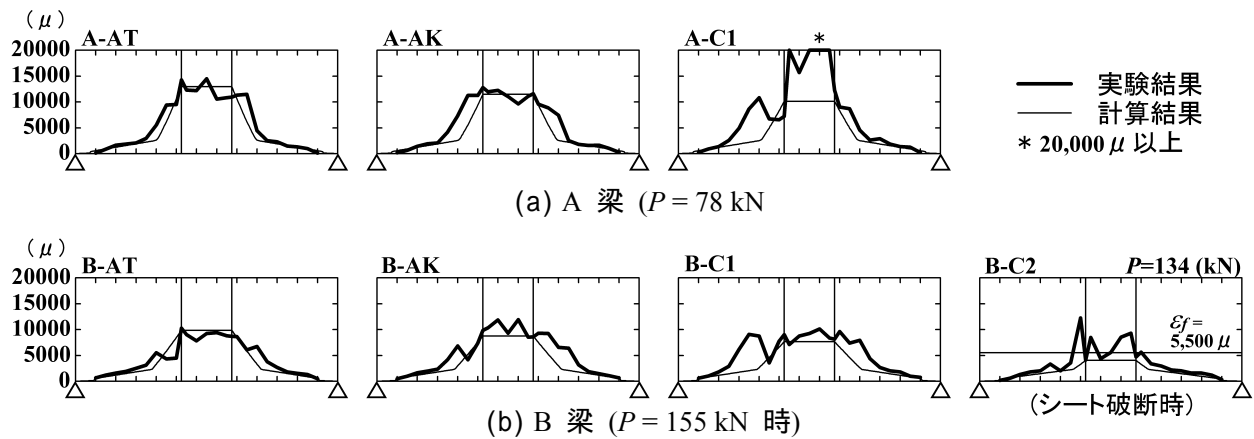


図 - 4 FRP シートの軸方向歪分布 ( $E_f$  の影響)

も小さな荷重段階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 の等曲げ区間における実測歪は計算歪とほぼ対応しているものの, 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いことが分かる。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 の等曲げ区間および等せん断力区間における実測歪は計算歪よりも著しく大きい。特に, 等曲げ区間では  $20,000 \mu$  を越える歪が発生している。これは, C1 シートの公称破断歪が AK, AT シートのそれに比較して小さいため, 曲げひび割れ発生時に, 歪ゲージ貼付位置近傍のシートが局部的に破断したためと考えられる。また, 左側等せん断力区間では実測歪が計算歪を越える領域が A-AT/AK の場合よりもさらに支点側に拡大し, シートの部分剥離の進展が伺える。これは, 以下のような現象によるものと推察される。すなわち, ピーリング作用によるシート剥離開始後において, 1) シート剥離先端部には局所的に軸引張と共に曲げが作用する, 2) その時のシートの引張側 (接着界面側) 縁応力は弾性梁理論からシート厚  $t_f$  の薄いほど大きな値を示すものと推察される, 3) シート接着界面にはこの引張応力に対応するせん断応力が発生することにより,  $t_f$  の減少によって大きなせん断

応力が発生することとなる, 4) 従って,  $t_f$  の最も小さい C1 シートを用いる場合には, 他のシートを用いる場合よりも早期に剥離する傾向を示すものと考えられる, である。

一方, 図-4 (b)の B-AT/AK/C1 の等せん断力区間の歪分布性状を比較すると, 実測歪が計算歪を上回る領域が B-C1 で最も広範囲である。これは, A-C1 の場合と同様 C1 シートの厚さ  $t_f$  が AT, AK シートのそれに比べて小さいため, ピーリング作用発生後にシート接着部の界面付着せん断応力が増加し, 早期にシートが剥離する傾向にあったためと推察される。一方, シート破断により終局に至った B-C2 は, 実測歪が計算歪よりも大きく, 特に載荷点近傍では公称破断歪 ( $\epsilon_f = 5,500 \mu$ ) を越える実測歪が発生していることが分かる。これは, C2 シートの公称破断歪が他のシートの  $1/3$  程度以下であるため, 早期に曲げひび割れ発生部のシートが局所的に破断したためと考えられる。

以上より, ピーリング作用によるシート剥離開始後, 弾性係数  $E_f$  の大きい FRP シートを用いる場合には, 設定により同時にシート厚  $t_f$  が小さいため, シート接着部に大きな界面付着せん断応力が生ずることとなり, 早期に全面剥離に至ることが推察された。また, 公称破断歪が小さい FRP シートを用いる場合には, 曲げひび割れ発生による局所的な歪の増大に対応できず早期にシート破断に至ることも明らかとなった。

図 - 5 には, シート幅の狭い A/B-AK-S の最

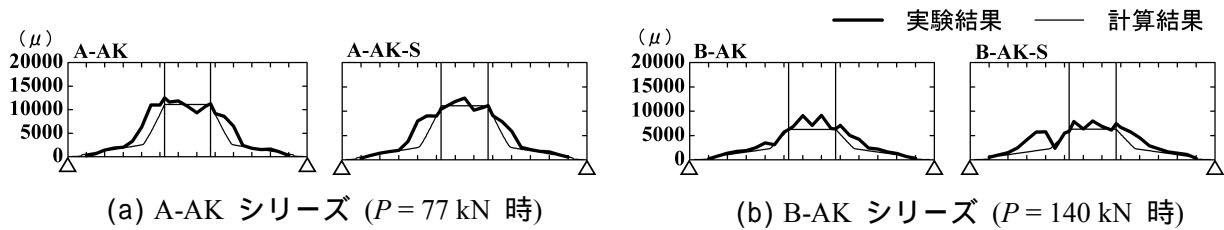


図 - 5 FRP シートの軸方向歪分布 (シート幅の影響)

大荷重時におけるシートの歪分布性状を A/B-AK のそれと比較して示している。等せん断力区間の歪分布性状を比較すると、A、B 梁ともに -S 試験体の場合において実測歪が計算歪を上回る領域が大きくなる傾向にあることが分かる。この傾向は、特に B 梁の場合で顕著である。これは、A/B-AK および A/B-AK-S のシート引張剛性が同等であるものの、後者は前者に比してシートの幅が半分であるため、シートの接着面積が小さいことによって接着界面の付着耐力が減少し、早期に剥離が進行するためと考えられる。

### 3.3 シートの有効率 $R_e$

表 - 3 には、各試験体の最大荷重、シートの引張耐力、シート剥離時の発生引張力および各シートの引張耐力に対する発生引張力の比 (以後、有効率  $R_e$ ) の一覧を示している。ここで、発生引張力はシート剥離時の等曲げ区間における実測シート歪の平均値に弾性係数  $E_f$  および厚さ  $t_f$  と幅  $b_f$  を乗ずることにより算出している。なお、B-C2 はシート破断により終局に至っていることより、検討から除外している。

表より、梁のタイプに拘わらず AT シートを用いる場合に有効率  $R_e$  が最も小さいことが分かる。これは、AT シートの  $E_f$  が最も小さいため、シートの引張耐力が有効に作用する前にピーリング作用によってシートが剥離することを暗示している。また、AT および AK シートを用いる場合の結果を比較すると、A、B 梁ともに  $E_f$  の大きい AK シートを用いる場合に  $R_e$  が大きくなる傾向にあることが分かる。

A-C1 の場合には、 $R_e$  が 1.0 以上に評価されている。これは、図 - 4 に示されているように、

表 - 3 シートの有効率

試験体名	最大荷重 (kN)	シートの引張耐力 (1) (kN)	シートの発生引張力 (2) (kN)	有効率 $R_e$ (2)/(1)
A-AT	87.2	115.5	66.6	0.58
A-AK	84.6	76.6	60.6	0.79
A-AK-S	77.3	76.6	49.0	0.64
A-C1	80.6	73.8	81.3*	1.10*
B-AT	164.6	231.0	81.3	0.35
B-AK	160.1	153.2	94.2	0.61
B-AK-S	139.8	153.2	60.8	0.40
B-C1	156.9	147.6	88.9	0.60

\* 参考値

C1 シートの公称破断歪が他のシートのそれよりも小さいため曲げひび割れ発生時に歪ゲージ貼付位置近傍のシートが局部的に破断し、歪の測定値が 20,000  $\mu$  以上となっているためである。ここでは、本実験における測定限界 (20,000  $\mu$ ) 以上の歪値は全て 20,000  $\mu$  として発生引張力を算出することとしているが、真のシートの発生引張力および有効率を示すものではないことに留意する必要がある。

一方、B-C1 の  $R_e$  は、B-AK のそれよりも小さく、これに対応して最大荷重も小さいことが分かる。これは、前述のように C1 シートは  $E_f$  が大きいと同時に設定によりシート厚  $t_f$  が小さいため、ピーリング作用によるシート剥離開始後に、シート接着部の界面付着せん断応力が増加し、早期に全面剥離に至るためと推察される。以上より、 $E_f$  の大きいシートの場合には、 $R_e$  が大きくなる傾向にあるものの同時にシート厚  $t_f$  が小さくなるため、ピーリング作用によるシート剥離開始後の付着せん断応力の増加により早期に全面的なシート剥離に至るため、結果的には B-AK の  $R_e$  が最も大きくなったものと考えられる。

シート幅の狭い A/B-AK-S の最大荷重および  $R_e$  は、ともに A/B-AK のそれよりも小さい。これは、前述のように A/B-AK-S のシート幅が狭いことにより、接着面積も小さいために、ピーリング作用に対する付着界面の鉛直方向力およびせん断抵抗力が小さくなるため、図 - 5 に示すように小さな荷重レベルでシートの剥離が進展したためと考えられる。

### 3.4 破壊性状

図 - 6 には、実験終了後におけるひび割れ分布性状の一例を AK および CI シートを用いた場合について示している。図より、A/B-AK では、下縁かぶり部の損傷が著しく等曲げ区間および載荷点直下近傍ではかぶりコンクリートの剥落が見られる。これは、A/B-AK はともにピーリング作用発生後もシートの部分剥離が急激には進展せず、シート剥離時の変位量が他の試験体よりも大きいことに関連するものと考えられる。これに対して、A/B-AK-S および A/B-CI では、コンクリートブロックの形成が見られるものの、下縁かぶりコンクリート剥落等の著しい損傷は見られない。これは、上記試験体は A/B-AK よりも小さな荷重でピーリング作用が発生し、その後シートの剥離が急激に進展して終局に至っているためと推察される。

### 4. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼすシート材料特性の影響を検討することを目的として、引張剛性がほぼ同等となるように FRP シートの材料特性を 4 種類、シート幅を 2 種類に変化させて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) 最大荷重や最大荷重時変位は、シートの弾性係数  $E_f$  が大きいほど、また破断歪が小さいほど小さくなる傾向にある。これは、 $E_f$  が大きい場合には同時にシート厚  $t_f$  が小さいため、シート剥離開始後の剥離先端部近傍におけるシートの曲げ応力に起因する付着せん断応力も大きくなり、早期に付着強度に達

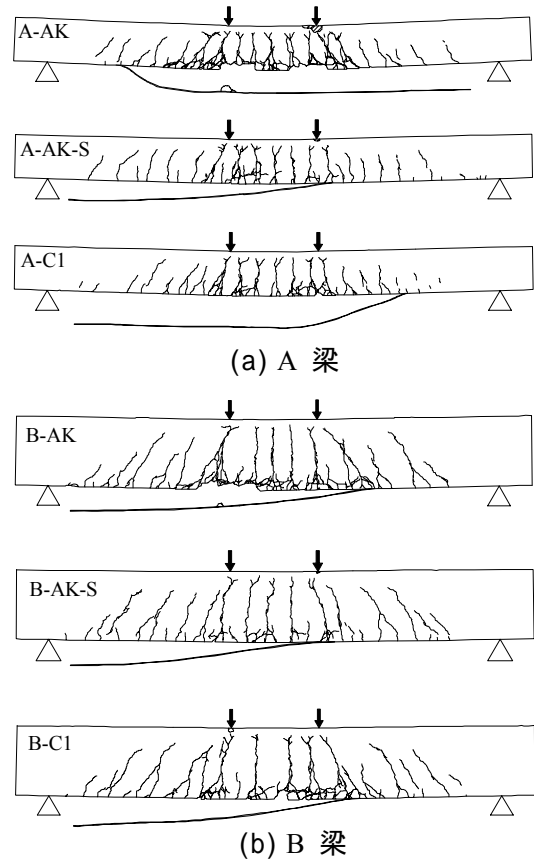


図 - 6 ひび割れ分布性状の一例

するためと推察される。また、破断歪が小さい場合には、曲げひび割れ発生部のシートが局部的に破断すると、発生歪が早期に破断歪に達するためと考えられる。

- 2)  $E_f$  が最も小さい AT シートを用いる場合の有効率  $R_e$  は、他のシートを用いる場合に比べて小さい。これは、シートの引張耐力が十分に発揮される前に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剥離するためである。
- 3) シート幅が狭い場合には、シートの接着面積が小さくなるため、ピーリング作用に対する付着界面の鉛直方向力およびせん断抵抗力が減少し、早期に剥離する傾向を示す。

### 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