

# 論文 FRP シートを巻き付けた単純支持 RC 梁の曲げ耐荷性状

今野久志\*1・佐藤昌志\*2・三上 浩\*3・岸 徳光\*4

要旨：既設橋脚の段落とし部周辺をFRPシート巻き付け工法によってせん断補強あるいは靱性補強する場合を想定し、その横拘束効果を両端単純支持 RC 梁を用いて曲げ載荷状態で検討した。用いた繊維シートは炭素繊維またはアラミド繊維製とし、補強割合を3種類、補強方法を2種類に変化させて巻き付けた。横拘束効果は主として荷重-変位関係（ひびわれ発生荷重、降伏荷重、計測上の最大荷重およびそれらを結ぶ直線の勾配など）に着目して検討した。その結果、同じ補強量でも全面補強の方が等間隔に巻き付けたゼブラ補強よりも横拘束効果が高く、この傾向は炭素繊維シートよりもアラミド繊維シートの方が顕著であることなどが分かった。

キーワード：段落とし、FRPシート、靱性補強、横拘束効果

## 1. はじめに

平成7年1月の阪神・淡路大地震以後、道路・鉄道橋脚などの既設コンクリート構造物の耐震補強が盛んに行われている。最近では、施工性に優れたFRPシート巻き付け工法によるせん断補強や靱性補強が実構造物に対して適用されるようになった。FRPシートの巻き付けによる横拘束効果は、特に橋脚基部の靱性を改善する上で重要である。この場合の横拘束効果は、一般的に一軸圧縮応力状態での実験によって検討されている。一方、段落とし部周辺に対してせん断補強や靱性補強を行う場合には、基部靱性補強と異なり、その横拘束効果は曲げ圧縮応力状態下で検討すべきものと考えられる。

本研究は、段落とし部周辺をFRPシート巻き付け工法でせん断補強あるいは靱性補強する場合を想定し、その横拘束効果をFRPシートを巻き付けた単純支持RC梁を用いて曲げ載荷状態で検討したものである。なお、FRPシート巻き付けによる横拘束効果はシートの材料特性や補強量および補強方法によって変化すると考えられるため、炭素およびアラミド繊維製のシートを用い、体積補

強割合を3種類 ( $\rho=0.15\%$ ,  $0.3\%$ ,  $0.6\%$ )、補強方法を2種類（ゼブラ補強、全面補強）として検討を行った。なお、ゼブラ補強はFRPシートを等間隔に巻き付けて補強することを意味している。

## 2. 実験の概要

表-1に試験体の一覧を示す。試験体は、補強

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材	補強方法	体積補強割合 $\rho$ (%)
N	無補強	-	-
C-A-1	カーボン	全面補強	0.33
C-A-2		ゼブラ補強 17本	0.16
C-17	アラミド	全面補強	0.59
A-A-1		ゼブラ補強 9本	0.15
A-A-2			
A-9		ゼブラ補強 17本	0.29
A-17-1			
A-17-2		ゼブラ補強 17本 (2層)	0.59
A-17(2)-1			
A-17(2)-2			

\*1 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室 工修 (正会員)  
 \*2 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室長 工博 (正会員)  
 \*3 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)  
 \*4 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

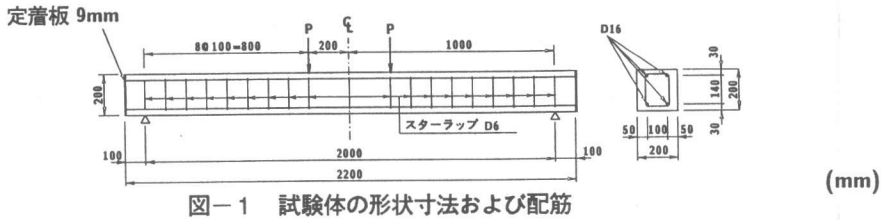


図-1 試験体の形状寸法および配筋

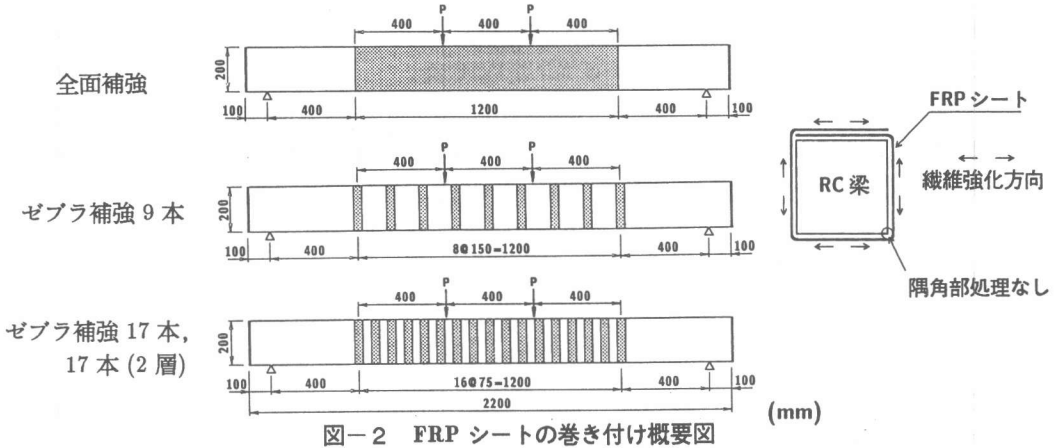


図-2 FRP シートの巻き付け概要図

表-2 FRP シートの力学的特性

補強材	目付け量 ( $g/m^2$ )	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)
炭素シート	300	0.167	230.46	4.07
アラミドシート	415	0.286	126.51	2.48

材の種類、補強方法、補強割合を変化させた全7種類、11体である。なお、補強したもののうち4種類については各2体の実験を行い、実験結果のばらつきを検討している。試験体名のうち、第1項は使用した繊維シートの種類(C:炭素、A:アラミド)を示し、第2項は補強方法と本数(A:全面補強、9または17および17(2):ゼブラ補強9本または17本および17本を2層)、第3項は試験体数(1:1体目、2:2体目)を示す。なお、ゼブラ補強17本(2層)における体積補強割合と全面補強のそれは同一である。

図-1に試験体の形状寸法と配筋を示す。使用したコンクリートの実験時(材令35日)における平均圧縮強度は24.91MPa、弾性係数は19.61GPa、ポアソン比は0.21である。また、鉄筋は主筋がD16、スターラップがD6であり、ともにSD345を使用した。等曲げ区間の長さは40cmで、せん断スパン比(a/d)は4.7である。図-2にFRPシートの巻き付け概要を示している。シートの巻き付け範囲は梁中央部の120cmとした。なお、ゼブラ補強に用いたシートの幅はいずれも3.75cmである。また、全面補強の場合は幅20cm

または25cmのシートを突き合わせて巻き付けている。表-2にFRPシートの繊維強化方向の力学的特性を示す。なお、非強化方向の計算上の引張耐力は、強化方向に対してアラミド繊維シートでは約1/40、炭素繊維シートでは約1/200である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

図-3に、各2体の実験を行った4種類の補強方法における荷重-変位関係を示す。これより、ゼブラ補強を行ったA-17において若干のばらつきがみられるものの、他はばらつきが少なく、本実験結果の再現性は高いものと判断される。なお、本実験ではすべての試験体が載荷装置の制約変位16cmに達したことより、その時点で加力を中止している。

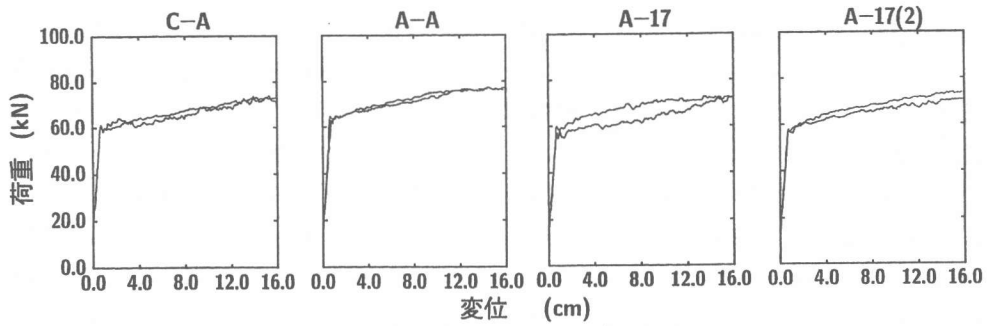


図-3 荷重-変位関係のばらつき

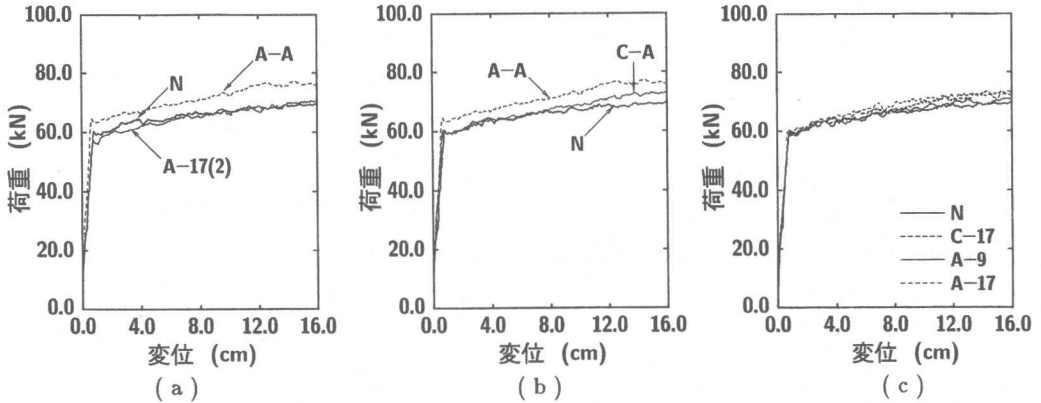


図-4 各試験体の荷重-変位関係

図-4に、各試験体(2体目)の荷重-変位関係を示す。(a)図はアラミドシート補強した場合の補強方法の違いに着目して整理したもので、体積補強割合は両者で同等の $\rho \approx 0.6\%$ である。これより、同一補強割合でも、全面を巻き付け補強したA-Aがゼブラ補強したA-17(2)よりも初期勾配、降伏荷重、降伏後の第2勾配および計測上の最大荷重が大きいことが分かる。なお、A-17(2)の荷重-変位関係は無補強の場合とほぼ同様である。(b)図は、炭素繊維シートとアラミド繊維シートを全面補強した場合の荷重-変位関係を比較したものである。A-Aの体積補強割合はC-Aの1.8倍程度大きい、シートの繊維強化方向の引張耐力および軸剛性 $E \cdot A$ (弾性係数 $\times$ 断面積)はほぼ同等である。しかし、初期勾配、降伏荷重および最大荷重はA-Aの方が大きく、降伏後の第2勾配は両者でほぼ同等である。(c)図は、ゼブラ補強した試験体の荷重-変位関係を比較したものであるが、繊維シートの種類や補強割合に

よる明瞭な横拘束効果は表れず、無補強の試験体と類似な荷重-変位関係を示している。

### 3.2 横拘束効果

表-3に実験結果の一覧を示す。ここで、 $P_{cr}$ は曲げひびわれ発生荷重、 $P_y$ は下端筋の降伏荷重、 $P_{max}$ は最大荷重、 $\phi_1$ は初期勾配、 $\phi_2$ は主筋降伏後の第2勾配である。なお、 $P_{cr}$ 、 $P_y$ は荷重-変位曲線の変曲点を基に定めた。以下に、各項目を2種類の体積補強割合 $\rho_a$ 、 $\rho_b$ について整理した。 $\rho_a$ は実体積補強割合であり、 $\rho_b$ は下式によって求められる換算体積補強割合である。

$$\rho_b = \rho_a \times E_f / E_s \quad (E_s: 206 \text{ GPa})$$

ここで、 $E_f$ 、 $E_s$ はそれぞれFRPシートおよび鋼材の弾性係数である。

図-5に $P_{cr}$ と $\rho_a$ 、 $\rho_b$ の関係を示す。図中、破線はA-A2体の平均値と無補強における値を結んだ直線である(以後、図-6~9で同様)。 $P_{cr}$ と $\rho_a$ の関係から、繊維シートの違いに関わ

らず全面補強の場合は無補強 (図中点線, 以後図-6~9で同様) の場合よりも  $P_{cr}$  が大きいことが分かる。また, アラミドシートをゼブラ補強した場合は, 補強量が大きくなるにつれて  $P_{cr}$  は低下し,  $\rho_a \approx 0.6\%$  では無補強よりも小さくなっている。なお, この傾向は炭素シートのゼブラ補強にも表れている。一方,  $P_{cr}$  と  $\rho_b$  の関係から, アラミド繊維および炭素繊維で全面補強した場合の  $P_{cr}$  はほぼ同等となり,  $P_{cr}$  は FRP シートの軸剛性 ( $E \cdot A$ ) に強く影響されることが分かる。

図-6 に  $P_y$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係を示す。 $P_y$  と

$\rho_a$  の関係から, ゼブラ補強した試験体の  $P_y$  は, FRP シートの種類や補強量に関わらず無補強と同程度あるいはそれ以下であることが分かる。一方, 全面補強した場合でも, 炭素シートの  $P_y$  向上効果は少ない。なお, 体積補強割合が最大のアラミドシート補強で, 無補強の 1 割程度弱の増加量となっている。また,  $P_y$  と  $\rho_b$  の関係から,  $\rho_b$  がほぼ同等のアラミドおよび炭素シート全面補強の場合, アラミドシート補強の方が  $P_y$  を増加させる効果が高いことが分かる。すなわち,  $P_y$  はゼブラ補強では向上せず, また, 同程度の  $\rho_b$  でもアラミドシート全面補強の方が炭素シート補強よりも高いことから,  $P_y$  にはシートの繊維強化方向軸剛性以外の因子が影響を与えている可能性が考えられる。

図-7 に  $P_{max}$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係を示す。 $P_{max}$  と  $\rho_a$  の関係から, 炭素シート補強の場合は, シートの補強量や補強方法の違いに関わらず耐力増加は 5% 程度であることが分かる。一方, アラミドシート補強の場合, ゼブラ補強では補強量が増加しても耐力の向上は炭素シート補強と同様に顕著ではないが, 全面補強した場合には明確な耐力向上効果がうかがえる。 $P_{max}$  と  $\rho_b$  の関係から, 同等な  $\rho_b$  および補強方法でも, アラミドシ

表-3 実験結果の一覧

試験体名	$P_{cr}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$\phi_1$ (kN/cm)	$\phi_2$ (kN/cm)
N	15.69	60.31	69.63	58.84	0.49
C-A-1	23.05	61.29	73.75	63.74	1.07
C-A-2	21.57	60.80	72.86	68.16	1.01
C-17	8.83	59.82	73.35	64.04	0.95
A-A-1	22.06	62.76	77.57	65.21	1.23
A-A-2	25.50	64.72	77.28	63.74	1.07
A-9	25.50	58.84	70.80	60.31	0.74
A-17-1	14.71	56.88	72.47	63.74	0.98
A-17-2	14.22	59.82	72.57	68.16	1.07
A-17(2)-1	8.83	57.37	73.45	66.69	0.95
A-17(2)-2	7.35	57.86	70.71	64.72	0.98

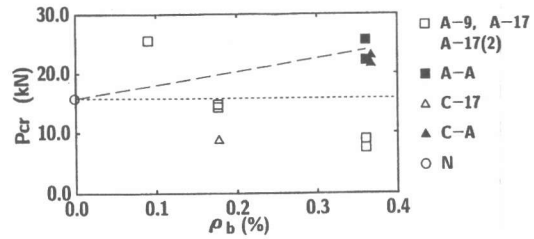
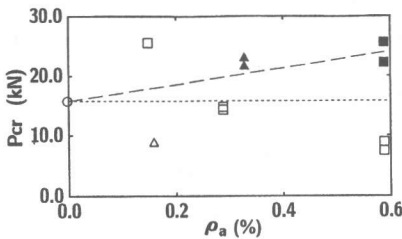


図-5  $P_{cr}$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係

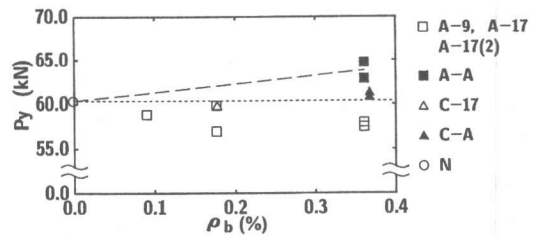
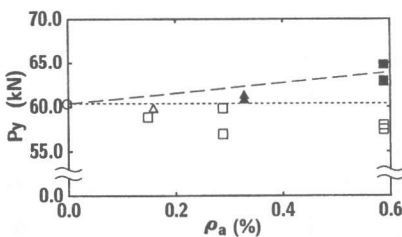


図-6  $P_y$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係

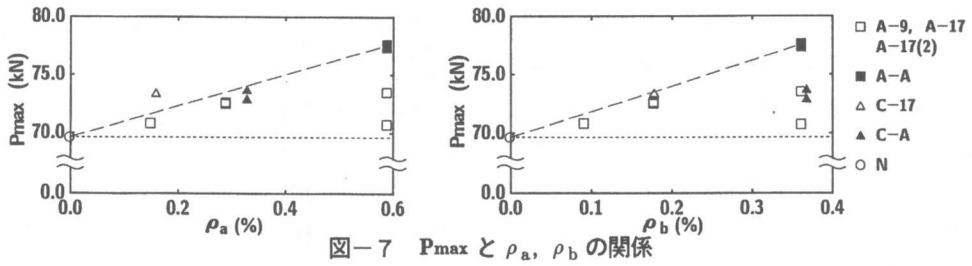


図-7  $P_{max}$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係

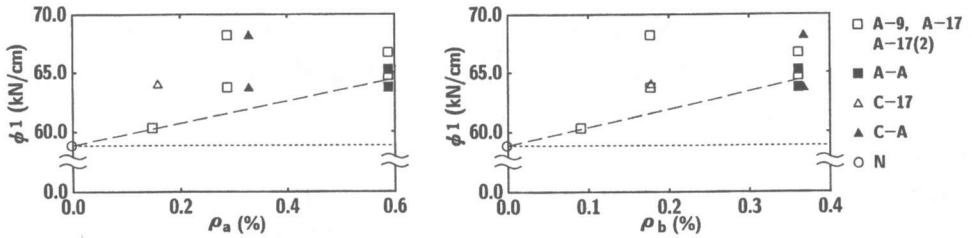


図-8  $\phi_1$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係

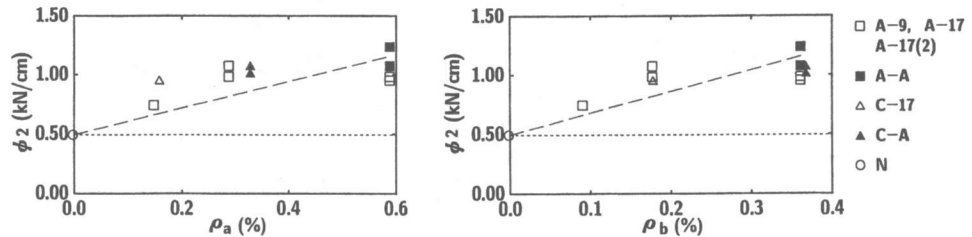


図-9  $\phi_2$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係

ートを全面補強した場合の耐力向上効果が著しいことが分かる。すなわち、FRP シートを巻き付けて補強する場合、曲げ圧縮状態の横拘束効果には、シートの繊維強化方向の軸剛性や引張耐力以外に支配的な要因があるものと推察される。

図-8 に主筋降伏前の荷重-変位曲線の勾配  $\phi_1$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係を示す。 $\phi_1$  と  $\rho_a$  の関係から、補強割合が増加することで  $\phi_1$  は無補強の試験体よりも増大する。しかしながら、 $\rho_a \geq 0.3\%$  ではシートの種類や補強方法の違いに関わらずほぼ一定値を示すことが分かる。また、 $\phi_1$  と  $\rho_b$  の関係も  $\phi_1$  と  $\rho_a$  の関係と同様であり、 $\phi_1$  はシートの種類や補強方法に関わらず、シート補強によって最大10~15%程度増加するものと考えられる。

図-9 に主筋降伏後の荷重-変位曲線の勾配  $\phi_2$  と  $\rho_a, \rho_b$  の関係を示す。 $\rho_a$  と  $\phi_2$  の関係から、 $\phi_1$  と同様にシート補強によって無補強よりも  $\phi_2$  は向上するが、 $\rho_a \geq 0.3\%$  ではシートの種

類や補強方法の違いに関わらずほぼ一定値を示すことが分かる。一方、 $\phi_2$  と  $\rho_b$  の関係から、シートの種類や補強方法に関わらず、同等な  $\rho_b$  であれば同等程度の  $\phi_2$  の向上効果を期待できることが分かる。

このように、FRP シートの巻き付けが梁の荷重-変位関係に影響を与えるのは、シートによる横拘束効果と梁側面のシートが曲率に応じて引張力を負担することや非強化方向でも多少の引張力を負担できることに関連するものと考えられる。

### 3.3 ひびわれ性状

図-10 に各試験体(2体目)全7体の実験終了後のひびわれ性状を示す。炭素繊維シートを全面に巻き付けた C-A では、シートの突き合わせ位置には曲げひびわれは発生せず、8ヶ所においてシートが非強化方向(繊維強化方向と直交する方向)に破断している。破断間隔は10~15cm程度である。シート破断後、荷重の増加とともにそ

の部分のひびわれ幅が徐々に拡大した。すなわち、炭素繊維シート全面補強の場合は、載荷途中からあたかもゼブラ補強した試験体のような状況となっている。一方、アラミドシートを全面に巻き付けた A-A では、巻き付けたシートの非強化方向には破断がみられず、ひびわれはシートの突き合わせ位置に集中した。なお、硬化したエポキシ樹脂にはひびわれが密な間隔で多数発生し、試験体自身には C-A よりも密な間隔で多数のひびわれが入っていたと考えられる。ゼブラ補強した試験体の曲げひびわれはいずれも巻き付けたシートとシートとの間の無補強の部分に発生しており、ひび

われの性状は FRP シートの特性や補強量に顕著には影響されていない。

本実験においては、前述のとおり同等の  $\rho_b$  でもアラミドシートを全面補強した場合の横拘束効果が他に比べて優れていた。これは、ゼブラ補強の場合には無補強部であるシートとシートとの間に密な間隔で曲げひびわれを誘発することとなり横拘束効果が発揮されにくいのに対して、アラミドシート全面補強の場合には、曲げひびわれ間隔が突き合わせ間隔（シート幅）と同一で広いことより、横拘束効果が大きく出現したものと考えられる。一方、炭素繊維シートを全面補強した場合には、非強化方向に密な間隔でシートが破断し、結果としてゼブラ補強を行った場合と同様な状況になったものと考えられる。これより、炭素繊維シートで大きな曲率変化が生じる部分に巻き付け補強する場合には、シートを縦貼りして曲率変化を低下させるか、あるいは 2 方向強化繊維シートを用いることが有効であるものと考えられる。

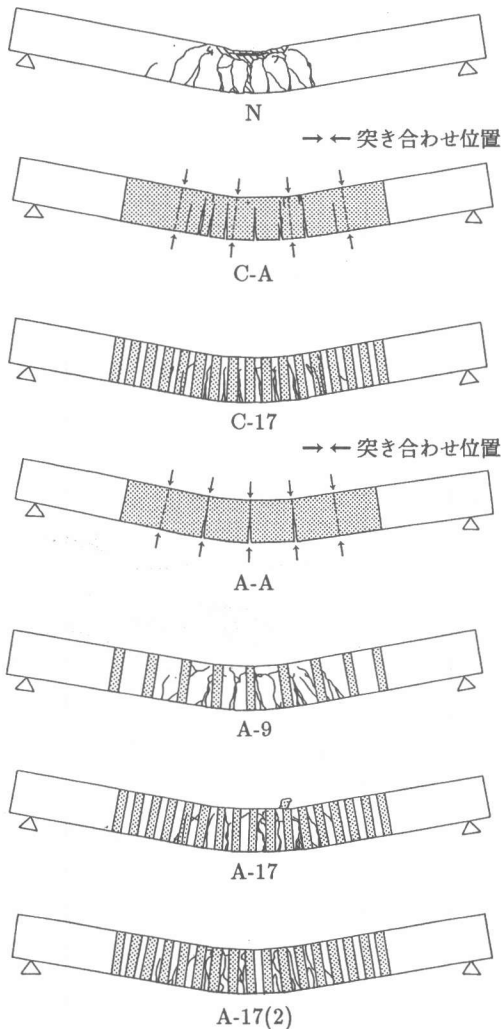


図-10 ひびわれ性状

#### 4. まとめ

橋脚の段落とし部周辺を FRP シート巻き付け工法によってせん断補強あるいは靱性補強する場合を想定し、その横拘束効果を両端単純支持 RC 梁を用い曲げ載荷状態で検討した。検討は主として FRP シートの材料特性、補強方法、補強量に着目して行った。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、以下のようである。

- (1) 同等の  $\rho_b$  では、アラミド繊維シートを全面補強した方が炭素繊維シートを全面補強した場合よりも横拘束効果が高い。
- (2) 体積補強割合が同じ場合、ゼブラ補強による横拘束効果は全面補強に比べて低い。
- (3) FRP シートによる曲げ圧縮状態での横拘束効果には、非強化方向にシートが破断するか否かが影響を与える。炭素シートはアラミドシートよりも非強化方向に破断しやすいため、2 方向強化繊維を用いることが有効であるものと考えられる。