

# 論文 FRP シートを接着した RC 梁の耐荷性状に与える接着範囲の影響

三上 浩<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・佐藤昌志<sup>\*3</sup>・栗橋祐介<sup>\*4</sup>

**要旨:**本研究では FRP シートを用いて RC 梁の曲げ補強を行う場合の補強範囲が RC 梁の耐荷性状やシートの付着性状に与える影響に着目して実験的に検討を行った。実験の変数として、補強材料 (アラミド繊維, 炭素繊維), 載荷点からの補強範囲 (35, 70, 140cm) を取り、無補強の場合も含め合計 8 体の試験体を用いて実験を行った。実験結果より、1) シートの接着範囲が狭い場合には見かけ上の段落としが形成されて脆性的な破壊を示す場合があること、2) 剝離破壊時にピーリング (シートの引き剝がれ) 現象が顕著に現れる場合には付着強度は小さく評価されること、などが明らかになった。

**キーワード:** RC 梁, FRP シート, 曲げ補強, 接着範囲, 耐荷性状

## 1. はじめに

近年、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐震補強工事や道路橋床版の新活荷重対応策としての補強工事が盛んに行われている。補強工法としては、従来の鋼板補強工法に加えて繊維強化プラスチック (FRP) シートを用いた補強工法も広く用いられるようになってきた。著者らはこれまで FRP シートによるせん断補強および靱性補強工法について検討し、その補強効果を確認している。一方、FRP シートを曲げ補強材として橋脚の段落とし部や床版底面に用いることも考えられ、一部で実用化されている。しかしながら、FRP シートで曲げ補強した場合のシートの曲げ付着性状や剝離挙動を詳細に検討した研究例は比較的少ない。特にシートを曲げ補強材として用いる場合には、付着抵抗長さや付着強度および剝離のメカニズムなどの付着性状を明らかにし、効率的な補強設計法を確立することが必要であるものと考えられる。

本研究は、せん断補強筋を有しない RC 梁に FRP シートを接着して曲げ補強した場合の、補強材料および補強範囲が RC 梁の耐荷性状やシートの付着性状に与える影響を明らかにすることを

目的として実験的な検討を行った。合わせて、せん断補強筋を有し、目付量の多いシートを用いる場合の試験体を製作し、せん断補強筋の有無によるシートの曲げ付着性状および剝離挙動の違いについて比較検討を行った。

## 2. 実験の概要

本研究に用いた試験体は表-1 に示す全 8 体である。試験体名のうち第 1 項は補強材の種類 (A : アラミド繊維 以後 AFRP, C : 炭素繊維 以後 CFRP, N : 無補強) であり、第 2 項は載荷点からの補強範囲 (単位: cm, 以後、補強範囲) である。CFRP シートを用いせん断補強筋を配筋した場合の試験体名は特に CT- と呼ぶこととする。図-1 に試験体の概要を示す。主筋には D13 (SD 295) を用い、せん断補強筋は CT-140 試験体のみ D6 (SD295) を 15 cm 間隔で配筋している。

本実験では、FRP シートの曲げ付着性状の検討を容易にするため、試験体が斜めひび割れを伴わない曲げ破壊モードとなるようにせん断スパン比を 7.5、せん断余裕度 (せん断耐力 / 曲げ耐力) を表-1 のように設定している。なお、曲げ耐力

\*1 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

\*2 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

\*3 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長 工博 (正会員)

\*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

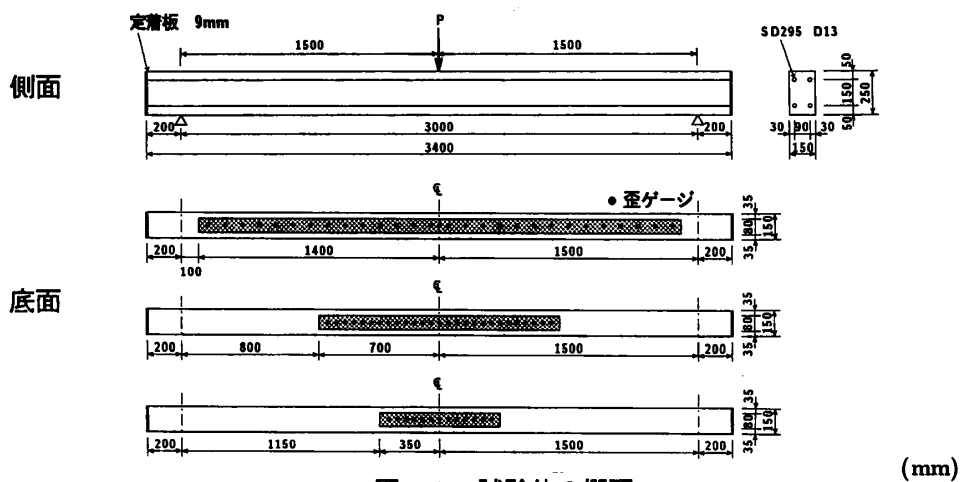


図-1 試験体の概要

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	載荷点からの補強範囲 (cm)	せん断余裕度
N	無補強	-	-	2.02
A-35	AFRP	415	35	1.55
A-70			70	1.38
A-140			140	
C-35	CFRP	300	35	1.55
C-70			70	1.36
C-140			140	
CT-140			445	

表-2 FRP シートの力学的特性

シートの種類	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
AFRP シート	415	0.286	126.51	2.48	1.96
CFRP シート	300	0.167	230.46	4.07	1.77
	445	0.248			

は後述するように断面分割法を用いて、また、せん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書に準拠して算定した。実験時のコンクリートは、材齢：65日、平均圧縮強度：23.93 MPa、弾性係数：21.95 GPa、ポアソン比 0.19 であった。鉄筋の降伏強度は D13 が 364.3 MPa、せん断補強筋に用いた D6 が 387.4 MPa である。RC 梁の裏面中央部には幅 8 cm の FRP シートを設定補強範囲だけ接着している。なお、コンクリート表面には FRP シートの付着性能向上のため深さ 2.5 mm のチップングを施している。

図中の ● 印はシートの歪測定位置であり、補強範囲が 140 cm の試験体はシート端部 5 cm の位置から 10 cm 間隔および載荷点に、その他の試験体には 5 cm 間隔で、ゲージ長 10 mm の歪ゲージを貼り付けている。なお、測定項目は荷重、中央点変位および FRP シートの軸方向歪であり、シ

ート剥離時の挙動を詳細に検討するためにデータレコーダを用いて時間的な変動状況を記録している。表-2には本実験で用いた FRP シートの力学的特性を示している。

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

図-2に荷重-変位関係の実験および計算結果を補強材料別に整理している。計算結果は○印を付した線で示しているが、前述のコンクリート、主鉄筋および FRP シートの力学的特性を用い断面分割法によって算出している。断面の分割数は 5 mm 間隔の 50 分割であり、スパン方向には 10 cm 間隔で分割している。計算は梁上縁のコンクリート歪が 3,500 μ に至った時点で破壊するものと仮定して行った。

FRP シート補強した試験体の荷重と変位は A-35、C-35 試験体を除き、無補強の試験体とは異なり主鉄筋降伏後もほぼ一定の第 2 勾配で増加していることがわかる。また、目付量が最も多い CT-140 試験体は他の試験体よりも最大荷重および第

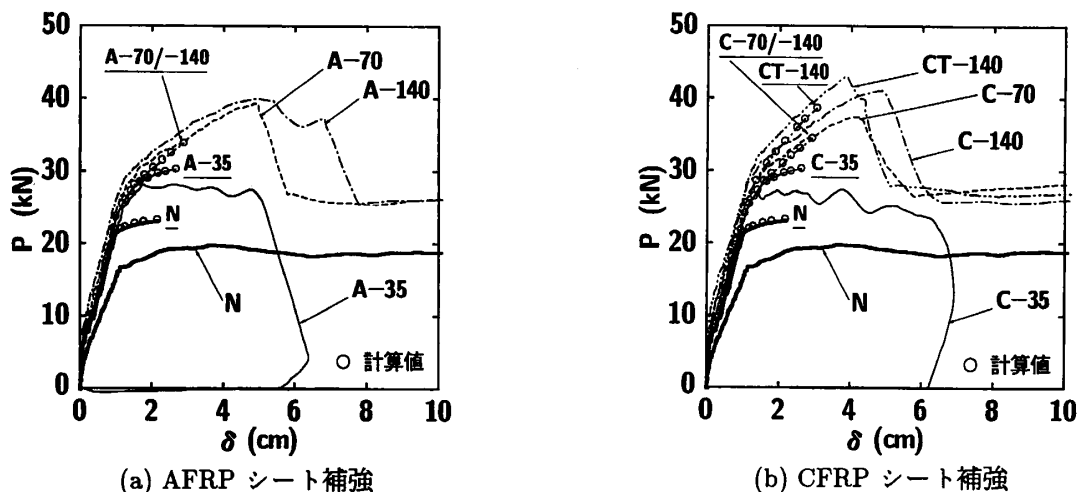


図-2 荷重-変位関係

表-3 実験結果の一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (cm)	破壊形式
N	19.83	3.74	主筋降伏後圧壊
A-35	28.54	2.64	付着割裂
A-70	39.81	4.93	シート破断
A-140	40.21	4.99 (7.02)	シート剝離
C-35	28.15	3.76	付着割裂
C-70	37.56	4.09	シート破断
C-140	41.48	4.88	シート破断
CT-140	43.74	3.88 (4.37)	シート剝離

( ) 内はシート剝離時の変位

2勾配が大きい、最大荷重時の変位は最も小さくなっている。無補強試験体および A-35、C-35 試験体を除いて、計算結果は実験結果と良く対応していることから、FRP シートの接着状況は良好であり、シートが効果的に作用していることがわかる。

A-35、C-35 試験体の荷重-変位関係は他の試験体とは異なった性状を示している。すなわち、実験結果は計算結果と主鉄筋降伏時までは良く対応しているが、その後は計算結果と異なり変位量が増加するものの荷重の増加は見られない。これは、シートの補強範囲が狭いため補強している中央部付近よりもシート端部近傍における無補強部分の主鉄筋が先に降伏し、破壊に至ったためと考えられる。実験ではシート端部近傍からアーチ状のひび割れが進展して最終的には主鉄筋に沿った付着

割裂ひび割れが大きく開口することによって破壊に至っている。これは、シートによる曲げ補強範囲が狭い場合にはシート端部が鉄筋の段落として同様な挙動を引き起こす可能性があることを示している。

表-3 に実験結果および破壊形式の一覧を示す。なお、括弧内の数字は剝離破壊した試験体のシート剝離時における変位である。表より、目付量が同等の場合、補強範囲が広いほど最大荷重時変位が増加する傾向にあるが、補強範囲が 35 cm の場合以外は最大荷重に大きな差異は見られない。これより、シート破断もしくは剝離破壊する場合には補強範囲の違いが曲げ耐力に与える影響は少ないものと考えられる。

シートの補強範囲が 70 cm の場合、補強材料に関わらずシートは破断しているが、最大荷重時変位は AFRP シート補強した場合の方が CFRP シート補強した場合よりも大きい。また、補強範囲が 140 cm の場合、最大荷重および最大荷重時変位がほぼ同等であるに関わらず、CFRP シート補強した場合はシートが破断している。このことから、CFRP シートは AFRP シートよりも破断しやすく、変形能が若干劣る傾向にあると考えられる。

### 3.2 FRP シートの軸歪分布性状

図-3 には計算最大荷重時の実験結果および断面分割法に基づいて算出した梁下縁の軸歪分布を

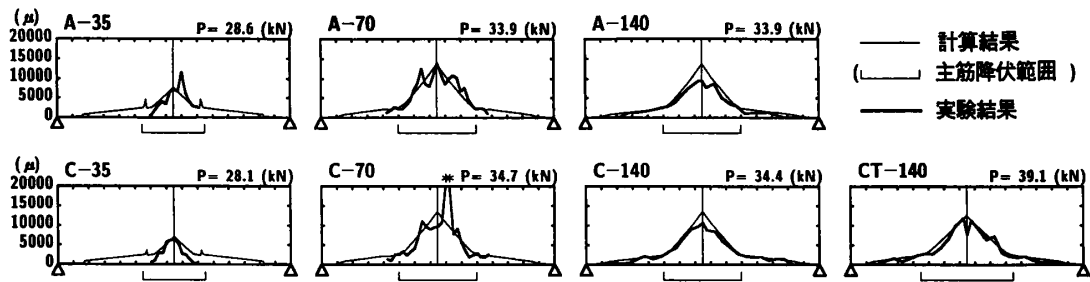


図-3 計算最大荷重時の梁下縁の軸歪分布

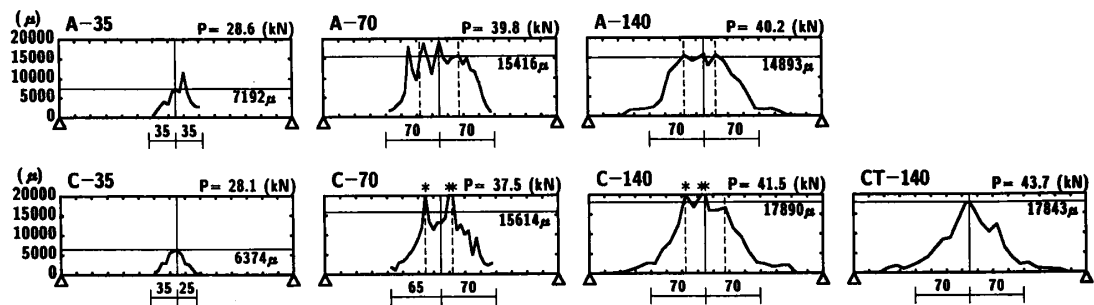


図-4 実測最大荷重時近傍におけるシートの軸歪分布 (cm)

示している。なお、実験結果は歪が  $20,000\mu$  を越えた場合にはその歪を  $20,000\mu$  として整理し、以後の検討を行った。なお、その位置を図中 \* 印にて示している。図中、A-35、C-35 試験体の場合は計算最大荷重が実測最大荷重を大きく上回ったため、実測最大荷重時の歪分布を示すこととした。図より、いずれの試験体に関しても実験結果と計算結果は一般的に良く対応していることから、断面分割法を用いることにより FRP シートの歪分布を比較的精度良く推定できるものと判断される。

補強範囲の狭い A-35、C-35 試験体の計算結果は、シート端部位置で歪が局所的に  $5,000\mu$  程度となっている。これは実測最大荷重時近傍において梁中央部よりも先にシート端部の無補強断面の主筋が降伏していることを示しており、実験時に試験体が示した挙動と合致しているものと考えられる。このことから、RC 梁を FRP シートで曲げ補強する場合の補強範囲は実測最大荷重時に主鉄筋が降伏に至っている範囲以上でなければならないものと考えられる。

図-4 に実測最大荷重時における FRP シートの軸歪分布を示した。図には、付着強度を算定するために歪がほぼ一定値を示している区間を破線で示し、その区間の歪の平均値 (以後、平均歪)

および歪が載荷点から支点側に向かってほぼ 0 に収束する位置までの距離 (以後、付着抵抗長さ) を示している。なお、付着抵抗長さは主鉄筋が降伏に至っている範囲にほぼ対応しており、FRP シートで曲げ補強する場合の最小補強範囲に相当するものであると考えられる。

A-35、C-35 試験体は他の試験体と比較して極めて歪レベルが小さいものとなっている。また、A-70、A-140 および C-70、C-140 試験体は補強範囲および材料特性がそれぞれ異なるにも関わらず、ほぼ同様の歪分布性状を示している。このことから、シートが破断もしくは剝離破壊する場合、シートの補強範囲や材料特性の違いは歪分布性状に大きな影響を与えないものと考えられる。なお、本実験は中央部一点荷重にて行っているにも関わらず、上述の試験体は中央部を頂点とする三角形分布ではなく二点荷重時に示されるような台形分布を呈している。これは、載荷点直下近傍でのアーチ状ひび割れの発生に伴い、コンクリートが押し抜け、その部分のシートの歪が均等化したためと考えられる。

一方、CT-140 試験体の歪分布は台形分布ではなく三角形分布となっている。これは、せん断補強筋を配置していることからアーチ状ひび割れが

表-4 FRP シートの付着性状

試験体名	実測最大荷重 (kN)	平均歪 ( $\mu$ )	単位幅当りの平均引張力 (kN/m)	平均付着抵抗長さ (m)	平均付着強度 (MPa)
A-35	28.54	7,192	260.0	0.35	0.74
A-70 <sup>▲</sup>	39.81	15,416	558.0	0.70	0.80
A-140 <sup>*</sup>	40.21	14,893	539.0	0.70	0.77
C-35	28.15	6,374	245.0	0.30	0.82
C-70 <sup>▲</sup>	37.56	15,614	601.0	0.68	0.89
C-140 <sup>▲</sup>	41.48	17,890	689.0	0.70	0.98
CT-140 <sup>*</sup>	43.74	17,843	1020.0	0.70	1.47

※：シート剝離 ▲：シート破断

最大荷重時まで発生しなかったためと考えられる。

### 3.3 FRP シートの付着性状

表-4 に図-4 より得られる付着性状に関する実験結果を整理した。単位幅当りの平均引張力 (以後、平均引張力) は、平均歪に FRP シートの弾性係数とシートの厚さを乗じたものであり、平均付着抵抗長さは載荷点両側の付着抵抗長さを平均化したものである。また、平均付着強度は単位幅当りの平均引張力を平均付着抵抗長さで除したものである。

表より、A-35、C-35 試験体の平均引張力が他の試験体に比較して小さいことから、FRP シートの引張性能が十分に発揮されていないことがわかる。CT-140 試験体では他の試験体よりもシートの目付量が大きいにも関わらず、他の試験体と同程度の平均歪が発生しており、平均引張力は他の試験体よりも大幅に大きくなっている。これは CT-140 以外の試験体ではシートの引張性能を十分に発揮する前にアーチ状ひび割れが発生してピーリングによる剝離もしくはシートの破断が生じたのに対して、CT-140 試験体はアーチ状ひび割れが発生せず、ピーリング現象が最大荷重時まで発生しなかったためと考えられる。また、平均付着抵抗長さは A-35、C-35 試験体を除きほぼ同様であるが、CT-140 試験体以外の場合はアーチ状ひび割れの発生区間を含んでいることに留意しなければならない。平均付着強度は CT-140 試験体で 1.47MPa と最大であり、他の試験体は付着割裂もしくはアーチ状ひび割れを起点としたピーリング

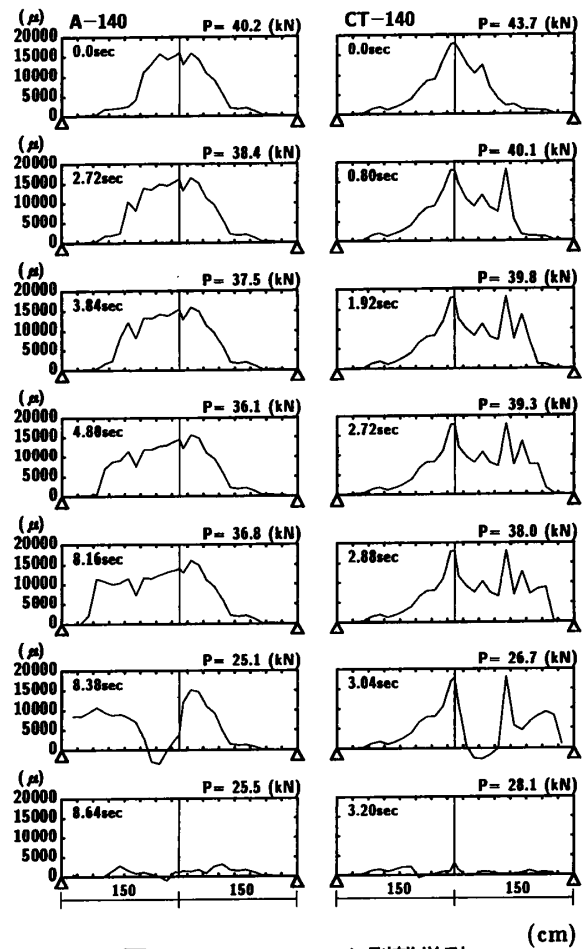


図-5 FRP シート剝離挙動

現象が原因となる剝離やシート破断が生じているために 0.75~1.0MPa 程度と小さくなっている。

図-5 には A-140 および CT-140 試験体のシート剝離時における歪分布について動的に計測した結果を示している。シートの軸歪分布は最大荷重時を時刻 0 として、シートの剝離が終了して歪がほぼ 0 に開放される時点までを示している。A-140 試験体では、最大荷重時以後アーチ状ひび割

れの発生した位置から大きな歪の発生する領域が時間経過とともに支点側に向かって徐々に拡大していることがわかる。これは、アーチ状ひび割れ部分でのせん断ずれが起因となってシートにピーリング現象が発生したことを示すものと考えられる。一方、CT-140 試験体では付着抵抗長さ区間の端部位置の歪が急増し始め、時間経過とともにその部分より支点側に向かって大きな歪の発生する領域が拡大していることがわかる。これは付着抵抗長さ区間の端部位置で変位曲率が大きく変化し、この位置を起点としてシートが剝離したためと推察される。最終的には端部までのシートが剝離して中央に引き戻されるため両試験体の中央部付近のシートには圧縮歪が生じている。

### 3.4 ひび割れ性状

図-6に実験終了後のひび割れ性状を示す。図には、各試験体について下線で補強範囲を示した。A-35, C-35 および CT-140 試験体を除く FRP シート補強した試験体のひび割れ性状はほぼ同様であり、補強範囲や材料特性がひび割れ性状に与える影響は少ないことがわかる。なお、A-35, C-35 試験体はシート端部でせん断ずれ量が大きくなり、その位置から支点側に主筋に沿った付着割裂ひび割れが進行していることがわかる。また、歪分布が他の試験体と異なり三角形分布を示した CT-140 試験体は、他の試験体と比べて載荷点直下近傍部のアーチ状ひび割れが少ないようである。

### 4. まとめ

本研究はせん断補強筋のない RC 梁に FRP シートを貼り付け、FRP シートの材料特性、補強範囲をそれぞれ変化させた場合の RC 梁の耐荷性状およびシートの付着性状について実験的に検討したものである。また、せん断補強筋を有する RC 梁についても実験を試み、その影響について比較検討を行った。本実験の範囲で得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) CFRP シートは AFRP シートと比較して破断しやすい傾向にあり、最大荷重時の変位も小さいことから、変形能が若干劣る傾向にあ

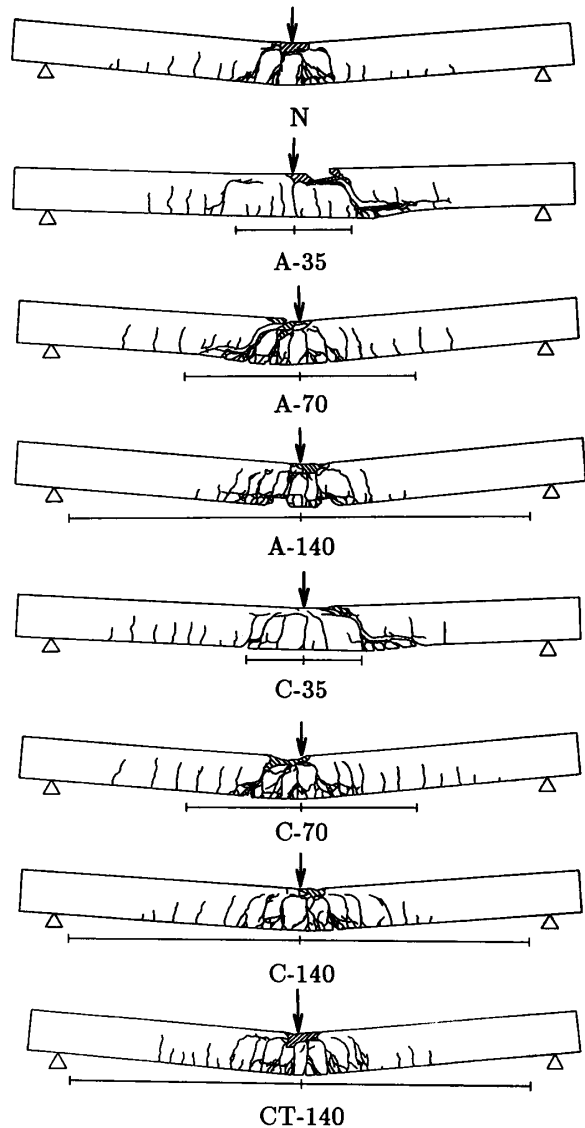


図-6 ひび割れ性状

るものと考えられる。

- (2) 最大荷重時において、主筋降伏範囲よりも補強範囲が狭い場合には、見かけ上の鉄筋の段落としが形成され脆性的な破壊性状を示す。
- (3) シート破断もしくは剝離破壊する場合には、シートの補強範囲の違いは耐荷性状およびシートの歪分布性状に大きな影響を与えない。
- (4) 平均付着強度は、せん断補強筋を有し、シートの目付量が多い試験体で 1.5 MPa 程度と大きく、その他の試験体ではシートの引張性能を十分に発揮する前に付着割裂やピーリング現象が起因となるシート剝離あるいはシート破断が生じるため 0.75 ~ 1.0 MPa 程度と小さい。