

FRP シートの貼り付け範囲が RC 梁の曲げ付着性状に与える影響

三井建設(株) ○フェロー 三 上 浩
 室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
 北海道開発局 正 員 佐 藤 昌 志
 室蘭工業大学 学生員 栗 橋 祐 介

1. はじめに

平成7年1月に発生した阪神・淡路大地震以後、道路・鉄道橋脚などの既存鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐震補強工事が盛んに行われている。また、道路橋床版の新活荷重対応策として床版底面の補強工事も推進されている。近年ではこれらの補強工事に、軽量で耐食性、施工性に優れた FRP シートによる補強工法が多く用いられるようになった。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断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剥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、必要定着長や付着強度および剥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、曲げ補強した場合の FRP シート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に関して実験的に検討した。また、せん断補強筋を有しシート目付量の多い試験体を合わせて製作し、シートの曲げ付着性状および剥離挙動の違いを比較検討した。なお、実験は FRP シートの付着性状を詳細に検討するため、シートにひずみゲージを 10 cm もしくは 5 cm 間隔で貼り付け、動的測定システムを用いて測定している。

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: AFRP シート、C: CFRP シート、CT: 目付量の多い CFRP シート、N: 無補強)であり、第2項は載荷点からの補強範囲(以後、補強範囲と称する。)である。図-1に試験体の概要を示す。試験体はスパン 3 m、断面寸法 25×15 cm の複鉄筋 RC 梁であり、両端単純支持の一点載荷により実験を行っている。主筋には D13(SD295)を用い、スターラップは CT-140 試験体にもみ D6(SD295)を 15 cm 間隔で配筋している。

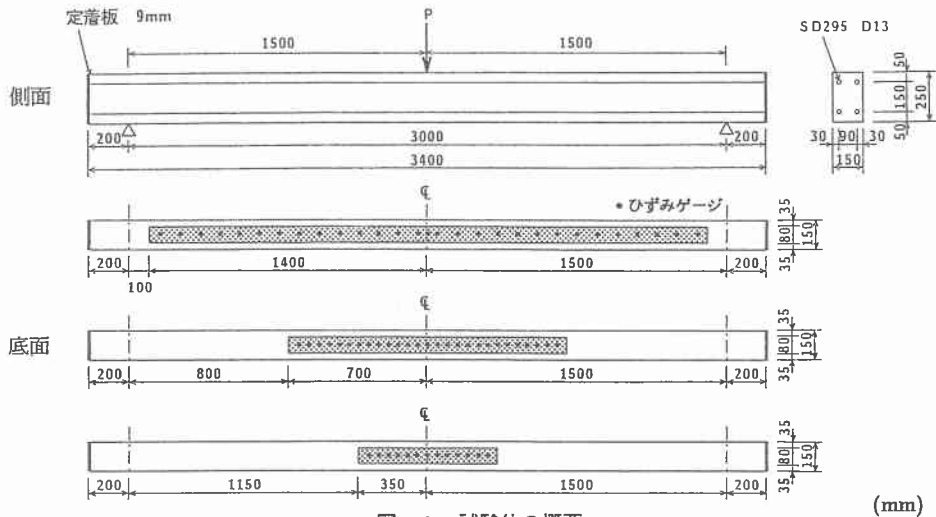
本実験では、FRP シートの曲げ付着性状の検討を容易にするため、試験体が斜めひびわれを伴わない曲げ破壊モードとなるようにせん断スパン比を

7.5、せん断余裕度を表-1のように設定している。実験時のコンクリートは材令: 65 日、平均圧縮強度: 24.88 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 378.8 MPa、ス

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材	目付量 (g/m ²)	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	140	2.65

AFRP: アラミド繊維 CFRP: カーボン繊維



図－1 試験体の概要

ターラップに用いた D6 が 402.8 MPa である。RC 梁の裏面には幅 8 cm の FRP シートを貼り付けて曲げ補強し、その補強範囲を 3 種類に変化させている。なお、著者らは既往の研究成果より FRP シートとコンクリート界面の付着性能を向上させるためにはコンクリート表面処理方法として深い

チッピング処理が最も有効であることを確認していることから、FRP シートを接着するコンクリート表面には深さ 2.5 mm 程度のチッピング処理を施すこととした。図中の ● 印はシートのひずみ測定位置であり、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 間隔の位置および載荷点に、その他の試験体には 5 cm 間隔でゲージ長 10 mm の箔ひずみ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 シートのひずみであり、シート剝離時の挙動を詳細に検討するために動的測定方法を用いて計測している。表－2 に本実験で用いた補強材の力学的特性を示す。

表－2 FRP シートの力学的特性

シートの種類	目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
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			

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ごとに示した。計算結果は ○ 印を付した線で示しており、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て断面分割法によって算出した。なお、断面方向の分割数は 5 mm 間隔の 50 分割である。計算は梁上縁のコンクリートのひずみが 3,500 μ に至った時点で破壊（上縁圧縮破壊）すると仮定して行った。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 2 勾配が大きいが、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よ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 試験体は他の試験体とは異なった性状を示しているが、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先にシート端部の無補強部分が終局モーメントに達し、破壊に至ったためと考えられる。すなわち、

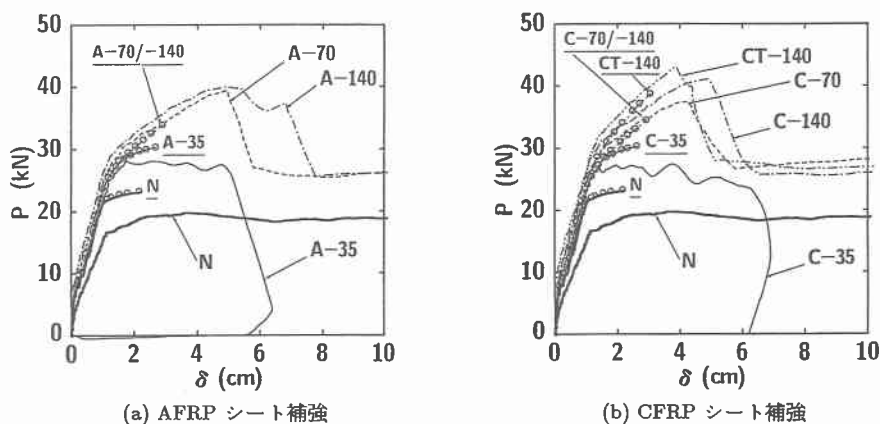


図-2 荷重-変位関係

表-3 実験結果の一覧

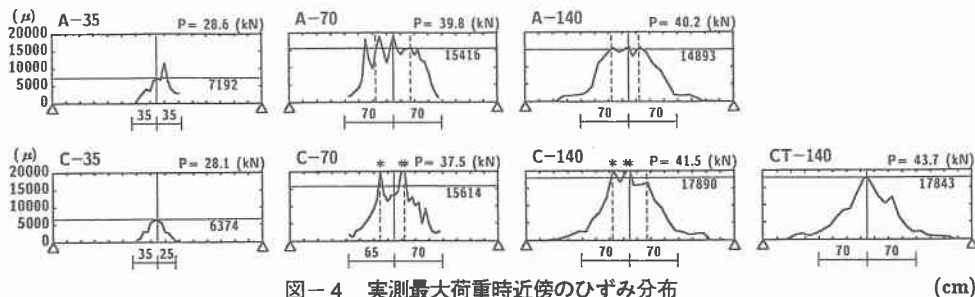
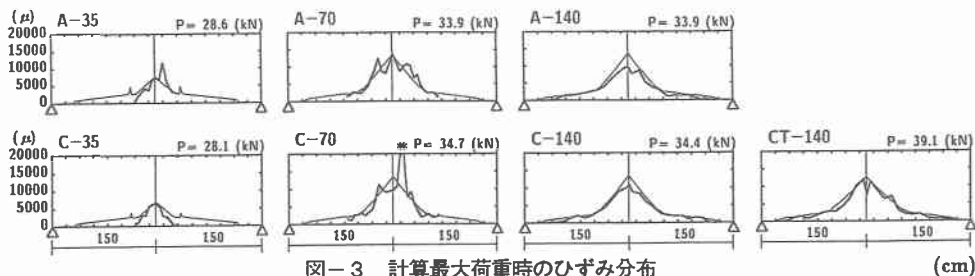
試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時 変位 (cm)	計算最大荷重 (kN)	計算最大変位 (cm)	破壊形式
N	19.83	3.74	23.17	2.36	主筋降伏後圧壊
A-35	28.54	2.64	30.23	2.70	付着割裂
A-70	39.81	4.93	33.81	2.92	シート破断
A-140	40.21	4.99 (7.02)			付着破壊
C-35	28.15	3.76	30.23	2.64	付着割裂
C-70	37.56	4.09	34.38	2.94	シート破断
C-140	41.48	4.88			シート破断
CT-140	43.74	3.88 (4.37)	38.61	3.07	付着破壊

計算結果と実験結果は主鉄筋降伏時までは良く対応しているが、その後は計算と異なり変位量は増加するものの荷重の増加は見られない。実験ではシート端部位置からアーチ状のひびわれが進展し最終的には主鉄筋に沿った付着割裂ひびわ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ことは鉄筋の断落しと同様な性状を引き起こすことを示している。

表-3に実験結果および破壊形式の一覧を示す。なお、括弧内の数字は付着破壊した試験体のシート剥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とから、シート破断もしくは付着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。また、補強範囲が70 cm以上でCFRPシート補強した場合は、AFRPシート補強した場合と最大荷重がほぼ同等であるにも関わらずシートが破断しており、最大荷重時の変位はAFRPシート補強した場合と比較して小さなものとなっている。このことから、CFRPシートはAFRPシートよりも破断しやすく、靱性能に関して若干劣る傾向にあることがわかる。なお、付着破壊した試験体(A-140, CT-140)で最大荷重時とシート剥離時の変位に差があるのはシートの剥離が徐々に進展したためと考えられる。

3.2 ひずみ分布性状

図-3に計算最大荷重時の実験および計算による梁下縁のひずみ分布を示す。なお、ひずみが $20,000 \mu$ を越えた場合にはそのひずみを $20,000 \mu$ とし、その位置に*印を付している。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、実測最大荷重時のひずみ分布を示すこととした。断面の下縁ひずみは前述の断面分割法による結果に基づき梁軸方向 10 cm 間隔で算出したが、実験結果とは全般的に良く対応しているようである。このように、断面分割法による計算結果を用いて FRP シートのひずみ分布が精度よく推定できるものと考えられる。

補強範囲の狭い A-35, C-35 試験体の計算結果では、シート端部位置でひずみが局所的に 5,000 μ 程度となっているが、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、実験時に試験体が生じ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はシートの定着長のみならず、シートが期待される耐力の向上効果を発揮し得るための最小補強範囲を検討する必要がある。最小補強範囲は想定した荷重が作用する場合の作用モーメントが無補強断面の抵抗モーメントを上回る範囲として求められる。なお、本実験に用いた試験体の最小補強範囲は想定荷重を計算最大荷重とすると A 試験体で 47 cm、C 試験体で 49 cm、CT 試験体で 60 cm である。

図-4 に実測最大荷重時における FRP シートのひずみ分布性状を示した。図には、付着強度を算定するためにひずみがほぼ一定値を示している区間を破線で示し、その区間のひずみの平均値(以後、平均ひずみ)およびひずみが支点側に向かってほぼ 0 に収束する位置を示している。A-35, C-35 試験体は他の試験体と比較して極めてひずみレベルが小さく、ひずみ分布は三角形で他の試験体に見られる一定ひずみを示す区間が見られない。A-70, A-140, C-70 および C-140 試験体は材料特性および補強範囲がそれぞれ異なるにも関わらず、ほぼ同様のひずみ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付着破壊する場合、FRP シートの補強範囲の違いはひずみ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載荷に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載荷時に示されるような台形分布を呈している。これは、載荷点直下近傍でアーチ状のひびわれが発生・進展したためであると考えられる。なお、目付量が厚くスターラップを配置している CT-140 試験体のひずみ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、CT-140 試験体はシート目付量が多いため曲げ剛性が高く、他の試験体よりも最大荷重時変位が小さいことおよびスターラップを配置していることから、アーチ状ひびわれが発生・進展する前にシートが剝離したためであると考えられる。

表－４ FRP シートの付着性状

試験体名	実測最大荷重 (kN)	平均ひずみ (μ)	単位幅当りの平均 引張力 (kN/cm)	平均付着抵抗 長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)
A-35	28.54	7,192	2.60	35.0	0.77
A-70 [▲]	39.81	15,416	5.58	70.0	0.83
A-140 [※]	40.21	14,893	5.39	70.0	0.80
C-35	28.15	6,374	2.45	30.0	0.85
C-70 [▲]	37.56	15,613	6.01	67.5	0.93
C-140 [▲]	41.48	17,890	6.89	70.0	1.02
CT-140 [※]	43.74	17,843	10.20	70.0	1.51

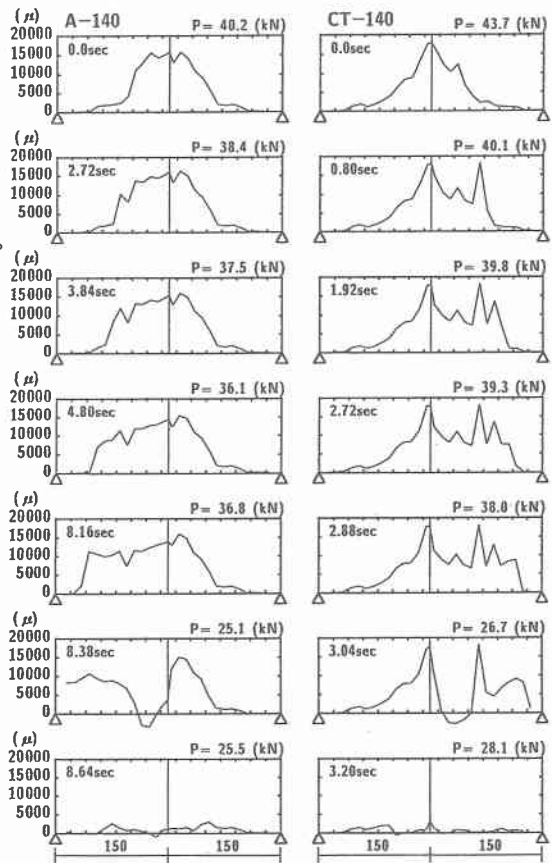
※：付着破壊、 ▲：シート破断

表－４に図－４より得られる付着性状に関する実験結果の一覧を取りまとめた。単位幅当たりの平均引張力（以後、平均引張力）は、平均ひずみに 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したものである。また、平均付着強度は単位幅当た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目付量が大きいのに関わらず他の試験体と同レベルもしくはそれ以上の平均ひずみが発生しており、平均引張力が他の試験体より大幅に大きくなっている。これは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アーチ状ひびわれが発生してピーリング（引き剥がれ）による剥離が生じたのに対して、CT-140 試験体はアーチ状ひびわれが発生せず、そこを起点としたピーリングが生じ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形成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 1.51 MPa 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われを起点としたピーリング現象が原因となる剥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 A-140 および CT-140 試験体のシート剥離時におけるひずみ分布について動的に計測した結果を示した。ひずみ分布は最大荷重時を時刻 0 とし、シートの剥離が終了してひずみがほぼ 0 に開放される時点までについて示している。A-140 試験体では最大荷重時以後、アーチ状ひびわれの形成された位置が



図－５ FRP シート剥離挙動 (cm)

ら支点側において大きなひずみの発生する領域が時間経過とともに支点方向に向かって徐々に拡大していることがわかる。これは、アーチ状ひびわ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 試験体では載荷点より 60 cm 程度の位置のひずみが急増し始め、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ひずみの発生する領域が拡大していることがわかる。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ひずみが生じている。なお、CT-140 試験体で載荷点より 60 cm 程度離れた位置から支点側に向かってピーリングが生じたのは、この部分で変位曲率が変化したためと推察される。

3.3 ひびわれ性状

図-6 に実験終了後のひびわれ性状を示す。図には、各試験体について下線で補強範囲を示している。A-35、C-35 を除く FRP シート補強した試験体のひびわれ性状はほぼ同様であり、補強範囲や材料特性がひびわれ性状に与える影響は少ないようである。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、ひずみ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のアーチ状ひびわれが少ないようである。

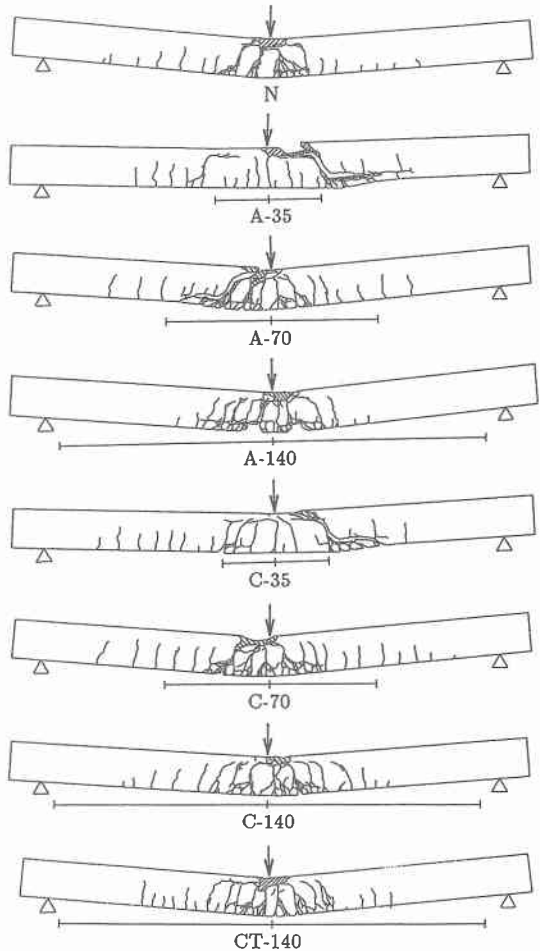


図-6 ひびわれ性状

4. まとめ

本研究は 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検討した。また、シートの目付量の違いが付着性状に与える影響も合わせて検討した。本研究において明らかとなっ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靱性能に関して若干劣る傾向にあるものと考えられる。
- (2) 作用モーメントと抵抗モーメントとの関係から求められる最小補強範囲よりも補強範囲が狭い場合には、見かけ上の断落としが形成されて脆性的な破壊性状を示す。
- (3) シート破断もしくは付着破壊する場合には、シートの補強範囲の違いは終局耐力およびシートのひずみ分布性状に大きな影響を与えない。
- (4) 平均付着強度はシートの目付量が多く、スターラップを配置した試験体で 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たため 0.75 ~ 1.0 MPa 程度と小さかった。