

論文 FRP シートを接着した RC 梁の曲げ付着性状

岸 徳光*¹・三上 浩*²・佐藤昌志*³・松岡健一*⁴

要旨：既存 RC 橋脚などの曲げ補強工法の一つとして FRP シートを貼り付ける工法に着目し、RC 梁にシートを貼り付けて曲げ付着性状を実験的に検討した。本研究では特にシートの材料特性（アラミドおよび炭素繊維シートの 2 種類）および目付け量（3 種類）が曲げ付着性状に与える影響に着目して検討を行った。その結果、シートが剝離する場合は、シートの材料特性に関わらず目付け量が大きいほど付着抵抗長さが長くなること、シートに発生するひずみが小さくなることおよびこれらを基に算出した平均付着強度はほぼ一定値を示すこと、などが明らかとなった。

キーワード：曲げ補強、FRP シート、目付け量、付着抵抗長さ、付着強度

1. はじめに

近年、道路・鉄道橋脚など既存鉄筋コンクリート構造物の耐震補強工事が盛んに行われており、FRP シートを橋脚の段落し部周辺に縦貼りして曲げ補強する方法が一部で実用化されている。しかしながら、FRP シートの曲げ付着性状や曲げ耐力向上効果などに関する研究例は比較的少ない。

特に、曲げ付着問題は局所の問題でもあることから、その現象は極めて複雑であり、シートのひずみ分布性状など詳細な検討が必要であるものと考えられる。

本研究は、RC 梁に FRP シートを貼り付けた場合の曲げ付着性状を実験的に検討したものである。特に、本研究ではシートの材料特性および目付け量に着目して検討を行った。用いた FRP シートはアラミド繊維および炭素繊維シートとし、目付け量を各々 3 種類に変化させて検討を行った。検討は主として FRP シートのひずみ分布性状に着目して行っている。また、試験体を各 2 体製作し、曲げ補強方法による試験結果のばらつき度合いを合わせて検討している。なお、FRP シートの曲げ付着性状はコンクリート表面の処理

方法によっても影響されると考えられるため、事前にサンダー処理とチップング処理に関する比較実験を行い、深いチップング処理が最も有効であることを確認¹⁾の後、本研究を遂行した。そのため、本研究でのコンクリートの表面にはすべて深いチップング処理を施している。

2. 実験の概要

試験体の一覧を表-1 に示す。試験体は無補強の梁を含めシート材料が 2 種類、シート目付け量が 3 種類の合計 7 種、13 体である。なお、A415 のみは、試験体製作上の都合により 1 体とした。

図-1 に試験体の形状寸法と FRP シートの貼り付け状況および配筋とシートに取り付けたひずみゲージの位置を示す。用いたコンクリートの実験時の材令は 32 日で、平均圧縮強度は 24.81 MPa、弾性係数は 22.36 GPa、ポアソン比は 0.22 である。なお、主筋は D16 (SD 345) でスターラップには D10 (SD 295) を 15 cm 間隔に配筋した。

シートは支点から 5 cm 手前で貼り止め、梁幅

*1 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)

*2 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

*3 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室長 工博 (正会員)

*4 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)

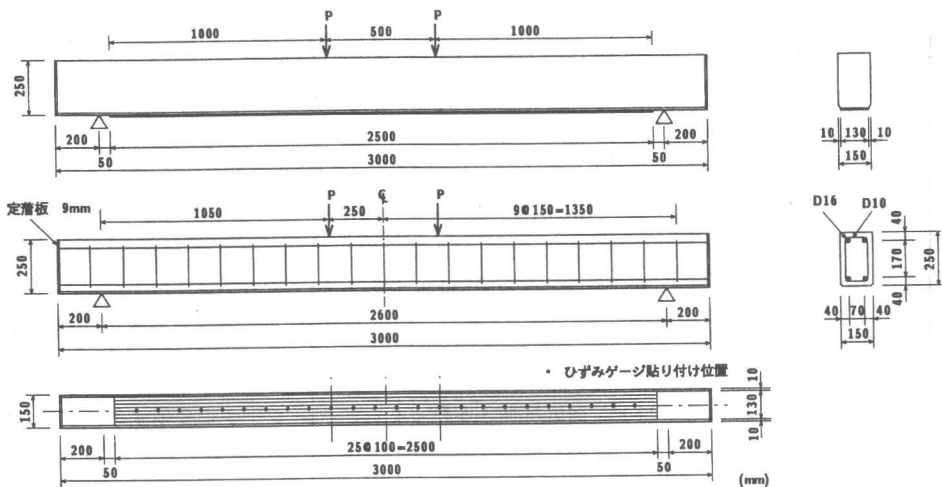


図-1 試験体の形状寸法および配筋とゲージの位置

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材料	シート目付け量 (g/m^2)	シート厚さ (mm)
N-1	-	-	-
N-2	-	-	-
A200-1	アラミドシート	200	0.138
A200-2			
A415-1			
A623-1			
A623-2	623	0.429	
C145-1	炭素シート	145	0.081
C145-2			
C300-1			
C300-2			
C445-1			
C445-2			
	300	0.167	
	445	0.248	

表-2 補強材の力学的特性

補強材	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)
アラミドシート	126.51	2.48
炭素シート	230.46	4.07

15 cm に対して各 1 cm の角落とし部を除き、13 cm 幅に貼り付けている。また、シートを中心線上にはひずみゲージを 10 cm 間隔に合計 24 点添付している。なお、 a/d (せん断スパン比) は 5.0 とした。表-2 には補強材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 に各試験体に関する荷重-変位関係の実

測値と計算値を示す。計算値は前述したコンクリートおよび補強材の力学的特性を用い、鉄筋の降伏荷重を材料試験結果の平均値である 0.39 GPa として断面分割法を用いて算出している。分割数は 5 mm 間隔の 50 分割である。

図より、補強した梁はいずれも無補強の梁と異なり主筋降伏後も顕著に荷重が増加し、最大荷重近傍でシートが破断 (C145 のみ) もしくはシートとコンクリート面に剝離が生じて荷重が急激に低下していることが分かる。その後はほぼ無補強の梁の荷重-変位関係にすりついている。なお、A200, C300 試験体においてシート剝離時の変位量に若干の差がみられるものの、各ケース 2 体の実験結果は両者比較的良好に対応している。

荷重-変位関係の実測値と計算値を比較すると、A623 の場合における主筋降伏後の第 2 勾配に差がみられるものの両者はほぼ良好に対応していることが分かる。

図-3 に各シリーズの荷重-変位関係を示す。また、表-3 に実験結果を要約して示している。

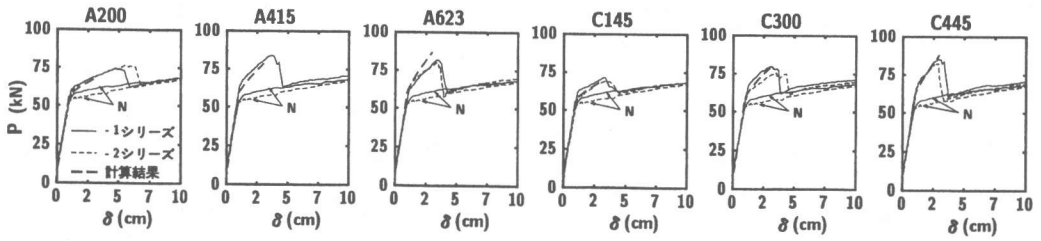


図-2 荷重-変位関係

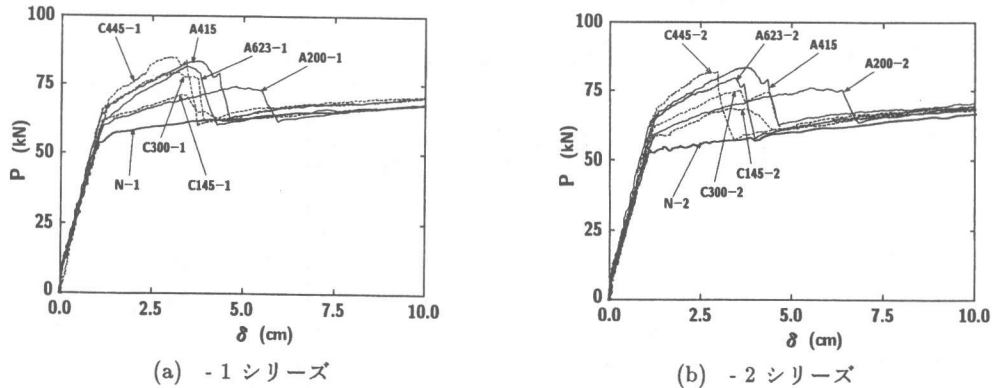


図-3 荷重-変位関係の比較

表-3 実験結果の一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時の変位 (cm)	シート剥離 (破断) 時の変位 (cm)	実測第2勾配 (kN/cm)	シートの状況
N	67.3	10.00	-	1.51	-
A200	75.1	5.17	5.94	3.92	シート剥離
A415	83.4	3.72	4.33	7.35	
A623	80.4	3.45	3.76	7.65	
C145	69.7	3.34	3.58	4.56	シート破断
C300	77.1	3.39	4.07	6.03	シート剥離
C445	83.4	2.98	3.19	8.63	

なお、表中の実験結果は各ケース 2 体の平均値とした。これより、A623 の場合を除いてシートの目付け量が多くなるほど最大荷重が大きくなる事が分かる。一方、最大荷重時の変位やシートが剥離するときの変位はシートの材料特性に関わらず、目付け量が多くなるほど小さくなる傾向にある事が分かる。また、主筋降伏後の第 2 勾配は A623-2 の場合を除いて目付け量の多い方が大きくなっている。これらは、シートの材料特

性に関わらず、目付け量を多くすることで主筋降伏後の第 2 勾配が増加するため最大荷重は大きくなる傾向にあるが、同時にシートとコンクリートの界面にはより大きなせん断力が作用するため、小さな変位量でシートが剥離しやすくなることを示している。

3.2 シート厚さと最大荷重および最大荷重時変位の関係

図-4, 5には全ての実験結果を用い、シート

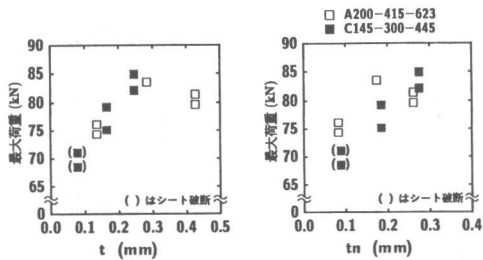


図-4 最大荷重

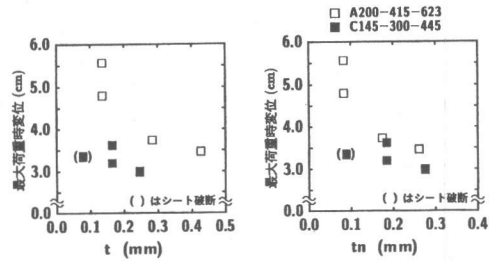


図-5 最大荷重時変位

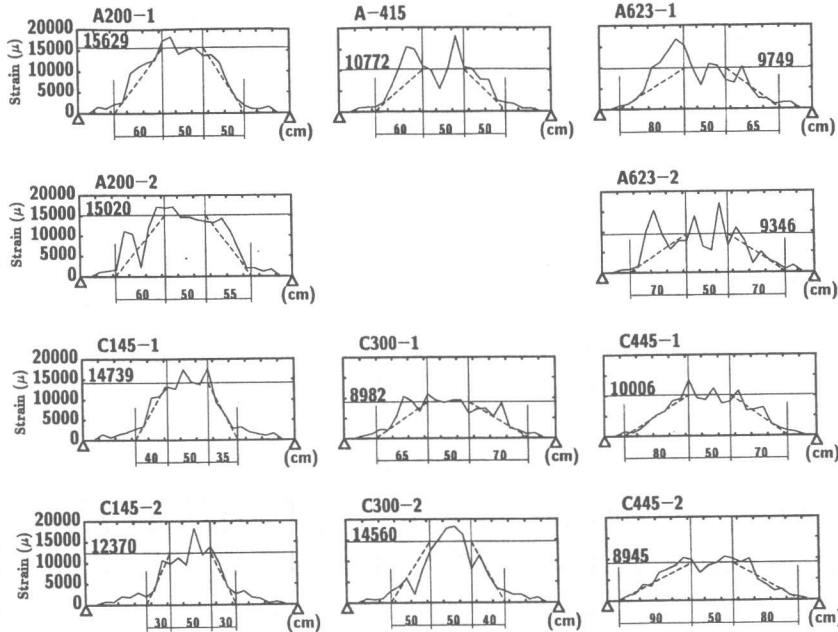


図-6 FRP シートのひずみ分布

厚さと最大荷重および最大荷重時変位の関係を示している。ここで、厚さ t は各 FRP シートの実厚さであり、 t_n は次式のように鋼材との弾性係数比を考慮した換算厚さである。なお、鋼材の弾性係数は公称値である 205.8 GPa を用いている。

$$t_n = t \times \frac{\text{FRPシートの弾性係数}}{\text{鋼材の弾性係数}} \quad (1)$$

ここで、図中の (■) は C145 のシート破断を示し、括弧なしはシートが剝離したことに留意する必要がある。図より、厚さ t が 0.3 mm 程度まではシートの材料特性によらず、厚さ t が増加することで最大荷重もほぼ線形に増加することが分かる。ただし、アラミドシートを用いた場合は 0.3 mm 以上に厚くしても最大荷重は増加しない。

一方、換算厚さ t_n が 0.2 mm 程度まではシート材料の違いによらず線形的に最大荷重は増加し、アラミドシートの場合が炭素シートの場合より補強効果が高いものの、 t_n が 0.3 mm 程度では逆に炭素シートの場合が若干効果的となっている。図-5より、シート厚さ t が大きくなるとシート材料の違いに関わらず最大荷重時変位が小さくなる傾向にあることが分かる。また、換算厚さ t_n が同等であっても、アラミドシートを用いた方がより最大荷重時変位が大きくなっている。なお、図-4、5より、炭素繊維シートの換算厚さ t_n が 0.1 mm 程度と薄い場合は、アラミドシート補強時よりも小さな荷重および変位で破断していることが分かる。従って、炭素シートで曲げ補

表-4 FRP シートの付着性状

試験体名	平均付着抵抗長さ (cm)	平均ひずみ (μ)	平均引張応力 (MPa)	単位幅当たりの平均引張力 (kN/cm)	平均付着強度 (MPa)
A200	57	15,325	1939	2.62	0.46
A415	55	10,772	1363	3.91	0.71
A623	72	9,548	1208	5.11	0.71
C145	34	13,555	3124	2.57	0.76
C300	57	11,771	2713	4.44	0.78
C445	80	9,476	2184	5.38	0.67

強する場合、 t_n を 0.2 mm 程度以上とすることが望ましいものと判断される。なお、全般的にみて t_n が 0.2 mm 程度以上の場合、シート材料の違いに関わらずほぼ同様の曲げ耐力向上効果と変形性能が期待できると考えられる。

3.3 FRP シートのひずみ分布性状

図-6 に各試験体の最大荷重時近傍におけるシートのひずみ分布性状を示す。なお、図中には等曲げモーメント区間内の 6 点のひずみの平均値や、載荷点からひずみがほぼ 0 に収束する位置までの距離（以後、付着抵抗長さと呼ぶ）も示している。なお、付着抵抗長さは左右の対称性を考慮し、かつ、載荷点と等曲げ区間の平均ひずみのなす交点とひずみがほぼ 0 に収束する位置を結んだ直線の勾配が実測のひずみ勾配と極力一致するように決定した。図より、C300 の場合を除いて、各ケース 2 体のひずみ分布性状はほぼ同様であることが分かる。また、シートの材料特性によらず、目付け量の増加に対応して等曲げモーメント区間の平均ひずみは小さくなり、付着抵抗長さが増大する傾向にあることも分かる。

3.4 FRP シートの付着性状

表-4 に図-6 から得られる FRP シートの付着性状を一覧にして整理した。ここで、平均付着抵抗長さとは平均ひずみは、各試験体ごとに平均値を算出し、さらに各ケース 2 体の平均を取って整理している。平均引張応力は平均ひずみに各 FRP シートの弾性係数を乗じて求めた。また、平均付着強度は平均引張応力にシートの厚さを乗じて単位幅当たりの平均引張力を求め、それを平均付着

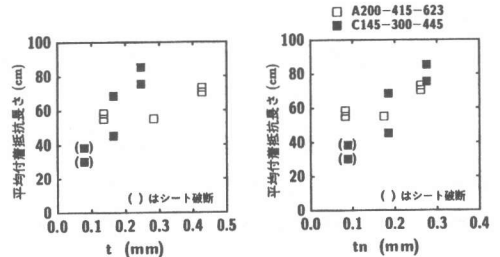


図-7 平均付着抵抗長さ

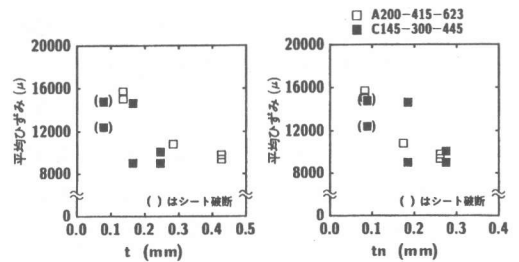


図-8 平均ひずみ

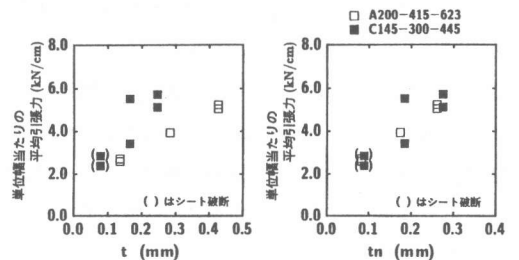


図-9 単位幅当たりの平均引張力

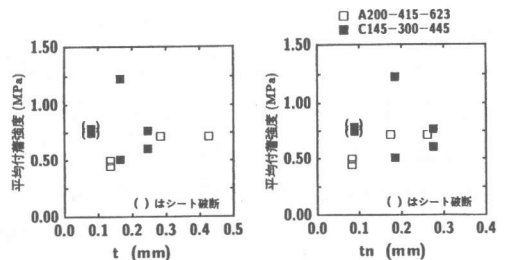


図-10 平均付着強度

抵抗長さで除した値である。

図-7に各試験体に関する実験結果の平均付着抵抗長さ s とシート厚さ t および換算厚さ t_n の関係を示す。これより、シートの材料特性に関わらずシート厚さ t が増加することで平均付着抵抗長さが増加することが分かる。また、 t_n が同等の場合、材料特性に関わらずほぼ同様な付着抵抗長さを示すことが分かる。これは、後述のようにシートの材料特性に関わらず同様な等曲げ部ひずみが発生していることを暗示している。

図-8には図-7と同様に平均ひずみと2種類のシートの厚さの関係を示している。これより、シート厚さ t が増加することで平均ひずみがほぼ線形に低下する傾向にあることが分かる。また、換算厚さ t_n が同等の場合、シート材料の違いに関わらずほぼ同等な等曲げ部ひずみが発生することが分かる。

図-9に単位幅当たりの平均引張力と2種類のシート厚さの関係を示す。平均引張力はシート材料の違いに関わらず、シート厚さ t の増加に対応してほぼ線形に増加している。また、換算厚さ t_n が同等の場合、シート材料の違いに関わらずシートが負担する平均引張力は同等程度であることが分かる。

図-10に平均付着強度と2種類のシート厚さの関係を示す。両シートともに、シート厚さ t がある程度以上になると平均付着強度が増加しにくくなることが分かる。また、 t_n が0.1 mm程度の薄い場合を除き、平均付着強度はシートの材料特性によらず0.7 ~ 0.8 MPa程度に収束することが分かる。

以上の結果を一枚のFRPシートの標準的な換算厚さである t_n が0.2 mm程度の場合について要約する。平均付着抵抗長さ、すなわち、必要定着長は約55 cmである。また、必要定着長55 cmが確保できれば、シートに10,000 ~ 12,000 μ 程度のひずみが発生するまでシートの剝離は生じない。また、このときの平均付着強度は0.7 ~ 0.8 MPaである。既存の文献²⁾では、アラミド繊維

シートを曲げ補強材として用いる場合のシートに発生する最大ひずみを10,000 μ に制限している。また、許容付着強度を0.44 MPaとしているが、本許容値は実用上十分に安全側であると考えられる。

4. まとめ

RC梁にFRPシートを貼り付けて曲げ付着性状を実験的に検討した。本研究では特にシートの材料特性および目付け量が曲げ付着性状に与える影響に着目して検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、以下のように示される。

- (1) シートの換算厚さが0.2 mm程度以上の場合、シートが剝離するときの荷重および変位にはシート材料の違いによる工学的に顕著な差は生じない。
- (2) 炭素繊維シートで補強した場合、換算厚さ t_n が0.1 mm程度の場合にはアラミドシート補強した場合よりも小さな荷重および変位でシートが破断する可能性がある。
- (3) シートの目付け量(換算厚さ)が増加することで、平均付着抵抗長さ(必要定着長)は増加し、シートに発生するひずみ(引張応力)は低下する。
- (4) 換算厚さ t_n が0.2 mm程度の場合には、必要定着長が55 cmのもとで、シート材料の違いに関わらず平均付着強度は0.7 ~ 0.8 MPaである。

参考文献

- 1) 岸 徳光・三上 浩・佐藤昌志・佐藤良一・佐藤 大：AFRPシートの曲げ付着性状に与えるコンクリート表面処理方法の影響、土木学会北海道支部論文報告集、第54号、pp. 492-497, 1998.2
- 2) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案), 1997