

V-37

FRP シート補強RC梁における補強量がシート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 池 田 憲 二
室蘭工業大学 学生員 栗 橋 祐 介

1. はじめに

近年、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物を対象として耐震性能の向上および新活荷重対策を目的とした補強工事が盛んに行われている。これらの補強工事には従来の鋼板を用いた接着工法に加え、繊維強化プラスチック (FRP) シートを用いた接着工法も多く採用されるようになってきた¹⁾。一方で、FRP シートを用いた RC 構造物の補強設計法が種々提案されているが、未解明な部分も残されているのが現状である。特に、RC 部材を FRP シートで曲げ補強する場合には、シートとコンクリートの接着界面で剝離破壊が生じることがあり、シートの接着界面に着目した曲げ付着性能の評価・検討が重要となる。著者らはこれまで FRP シートで曲げ補強した RC 梁を用いて種々の曲げ載荷実験を行い、FRP シートの曲げ補強効果および剝離性状に関する詳細な検討を行ってきた。その結果、FRP シート補強による曲げ耐力の向上効果、シートの付着特性および剝離進展メカニズム等を大略把握することができた²⁾。

本研究ではさらに FRP シートによる曲げ補強効果および曲げ付着性状を定量的に把握するため、RC 梁のせん断スパン比および FRP シート補強量をパラメータとした実験研究を行っている。本実験の検討項目は荷重一変位関係、最大荷重時近傍における曲げモーメント、曲率およびシートの歪分布性状である。

2. 実験概要

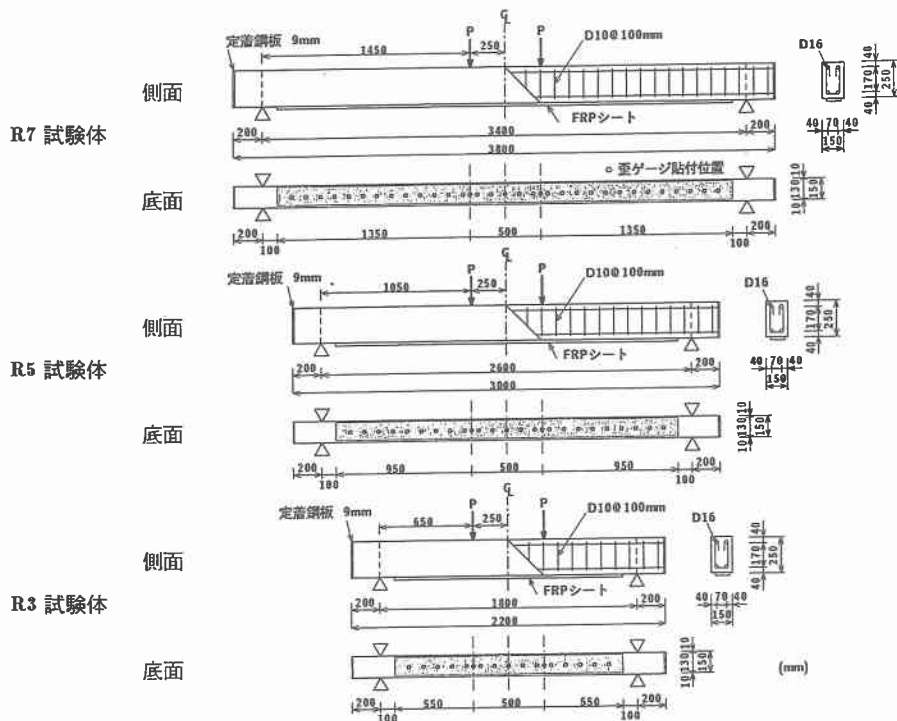
本実験に用いた試験体の総数はせん断スパン比を5種類、シート補強量を2種類に変化させた全10体である。表-1には試験体の一覧を示している。試験体名はせん断スパン比 a/d の概略値 (R3 ~ R7) およびアラミド繊維製 FRP (以後、AFRP) シートの貼り付け層数の組み合わせで示している。なお、本実験では全試験体において、曲げ補強後もせん断耐力が曲げ耐力よりも十分大きく、終局時にせん断破壊を生じないように断面設計を行った。表には設計時におけるせん断余裕度 (せん断耐力/曲げ耐力) を示している。

図-1に試験体の概要を示す。図には紙面の都合上 R7、R5 および R3 試験体の概要を示している。試験体は断面寸法 25 × 15 cm で軸方向筋に D16 (SD345) を用いた複鉄筋 RC 梁であり、せん断補強筋として D10 (SD295A) を 10 cm 間隔で配筋している。本研究では等曲げモーメント区間を 50 cm とした静的曲げ載荷実験により検討を行っている。また、梁のせん断スパン長 a を変化させて a/d を 3~7 程度に設定しているため、梁の純スパンは 1.8 m ~ 3.4 m と異なっている。本実験に用いたコンクリートは材令：45~57 日、平均圧縮強度 f_c : 28.2 MPa、弾性係数 E_c : 23.4 GPa、ポアソン比 ν_c : 0.22 であった。また、軸方向筋 (D16) およびせん断補強筋 (D10) の降伏強度はそれぞれ 378.2、

表-1 試験体一覧

試験体名	せん断スパン比 a/d	シート 補強量	せん断 余裕度
R7-1	6.9	1層	4.31
R7-2		2層	3.53
R6-1	6.0	1層	3.71
R6-2		2層	3.04
R5-1	5.0	1層	3.12
R5-2		2層	2.56
R4-1	4.0	1層	2.53
R4-2		2層	2.07
R3-1	3.1	1層	1.93
R3-2		2層	1.88

Effects of Strengthening Volume on Flexural Bonding Property of FRP Sheet Glued on RC Beams
by Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Kenji IKEDA, and Yusuke KURIHASHI



図ー１ 試験体の概要

392.0 MPa であった。

試験体底面に接着した AFRP シートは梁中央部から両支点の 10 cm 手前で貼り止め、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り付けた。なお、梁底面のシート接着領域にはシートとコンクリートの付着性能を向上させるため、ショットブラスト処理を施している。また、シート貼り付け施工時には、ショットブラスト処理面において下地用プライマーの吸収性が高いため、プライマー塗布工を二度行うこととした。表ー２には AFRP シートの力学的特性の公称値を示している。本実験における測定項目は載荷荷重、スパン中央部の変位と上側鉄筋歪および AFRP シート各点の歪である。

3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

図ー２に荷重－変位関係の実験および計算結果を示す。計算結果は RC 梁の各構成材料の力学的特性を用いて、断面分割法により算出したものである。計算では AFRP シートとコンクリートの完全付着を仮定し、梁上縁のコンクリートが終局圧縮歪 $\epsilon'_{cu} = 3,500 \mu$ に達するまで演算を行っている。また、本実験では無補強試験体に関する実験を実施していないため無補強の場合には計算結果のみを図示している。

AFRP シート補強した試験体の荷重は主鉄筋の降伏後も顕著に増大し、最大荷重近傍においてシート剥離を生じて急激に低下している。ここで、主鉄筋降伏後の荷重－変位関係を詳細に検討すると、最大荷重近傍において荷重の増加勾配が若干低下していることがわかる。これは、シートとコンクリートの接着界面の劣化が進行したためと考えられる。また、この勾配低下は 1 層貼りの場合には計算最大荷重到達後、2 層貼りの場合には計算最大荷重到達前に発生しているケースが多い。従って、シート補強量が多い場合には計算

表ー２ AFRP シートの力学的特性 (公称値)

目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
415	0.286	126.51	2.48	1.96

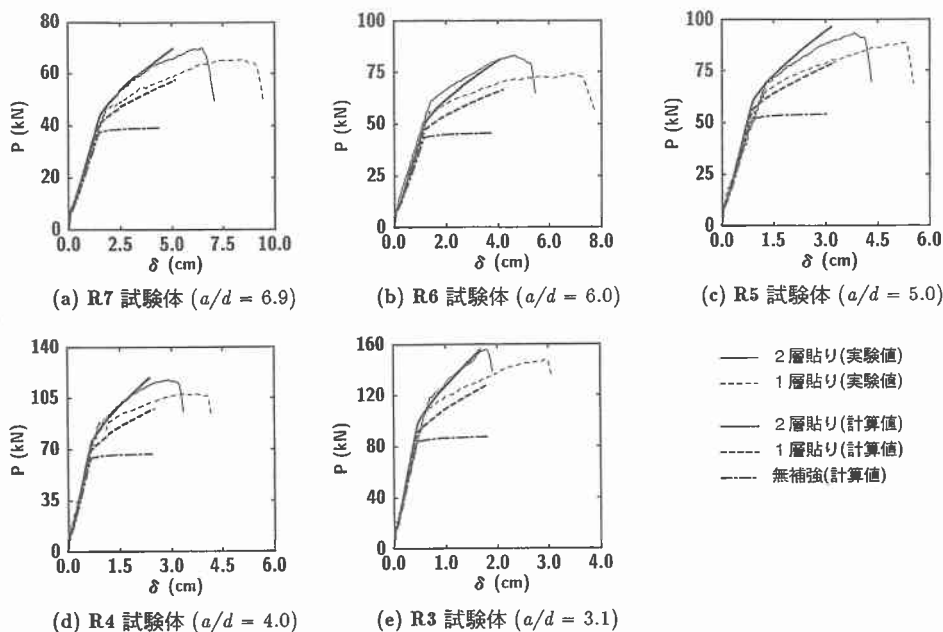


図-2 荷重-変位関係

最大荷重到達前にシートが部分的に剝離しているものと推察される。

表-3に荷重-変位関係の実験および計算結果の一覧を示す。表より、 a/d にかかわらず貼り付け層数を多くすると最大荷重が大きくなっていることがわかる。また、実測の最大荷重と計算最大荷重の比 P_u/P_c は1層貼りの場合には全て1.1以上であるが、2層貼りの場合にはR6-2試験体が最大で1.02である。従って、1層貼り試験体の最大荷重は断面分割法で安全側に算定可能であるが、2層貼りの場合には計算値が実験値を過大評価する可能性がある。このことから、シート貼り付け層数が多い場合には、特にシートの剝離挙動等に留意する必要があると考えられる。

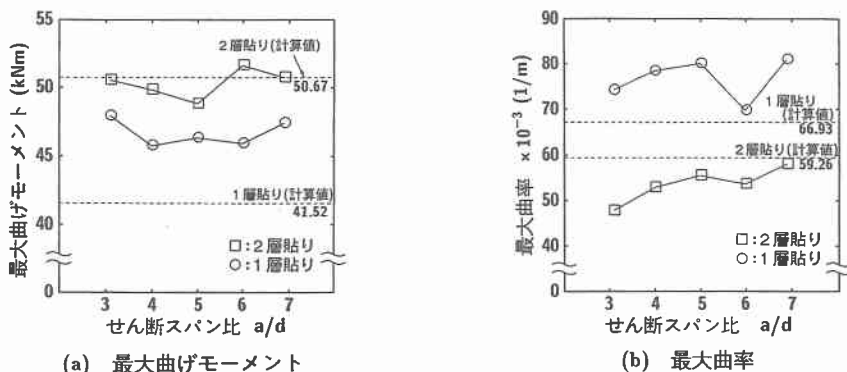
3.2 最大曲げモーメントおよび最大曲率

図-3に最大曲げモーメントおよび最大曲率とせん断スパン比 a/d との関係を示す。ここで、最大曲げモーメントは表-3で示した最大荷重と各試験体のせん断スパン長 a から算出している。また、最大曲率はスパン中央部の上側鉄筋歪および等曲げモーメント区間におけるシート歪の平均値（以下、平均歪）より算出したものである。また、図には断面分割法より得られた最大曲げモーメントおよび最大曲率の計算結果を1層貼り、2層貼りに関してそれぞれ示している。

(a)図より、最大曲げモーメントはシートの貼り付け層数が同等であれば、 a/d にかかわらずほぼ同程度であることがわかる。また、シートの貼り付け層数を増加させると最大曲げモーメントも大きくなっている。

表-3 実験および計算結果の一覧

試験体名	実験結果		計算結果		P_u/P_c
	最大荷重 P_u (kN)	最大荷重時 変位 δ_u (cm)	最大荷重 P_c (kN)	最大荷重時 変位 δ_c (cm)	
R7-1	65.4	8.48	57.3	5.19	1.14
R6-1	73.5	6.91	66.4	4.18	1.11
R5-1	88.2	5.32	79.1	3.26	1.11
R4-1	107.5	3.68	97.7	2.49	1.10
R3-1	147.5	2.97	127.8	1.79	1.15
R7-2	69.9	6.52	69.9	5.07	1.00
R6-2	82.6	4.64	81.1	4.06	1.02
R5-2	93.0	3.85	96.5	3.17	0.96
R4-2	117.2	2.93	119.2	2.36	0.98
R3-2	155.1	1.80	155.9	1.68	0.99



図一三 最大曲げモーメントおよび最大曲率とせん断スパン比 a/d との関係

(b)図より、最大曲率は $a/d = 3.1, 6.0$ の場合で小さい傾向にあるが、全般的にはシート層数が同等であれば a/d にかかわらずほぼ同程度である。また、シート層数を増加させると最大曲率は小さくなる傾向にある。

ここで、最大曲げモーメントおよび最大曲率の実験および計算結果を比較すると、1層貼りの場合には両者ともに実験結果は計算結果を上回っていることがわかる。計算結果は理論上、上縁コンクリート圧壊時の値であることから、1層貼り試験体はコンクリートの圧壊に伴う変位曲率の増加によりシート剥離を生じたものと考えられる。これに対し、2層貼りの場合には両者ともに実験結果が計算結果を下回る傾向にある。従って、2層貼りの場合には上縁コンクリートの圧壊ではなく、後述のピーリング現象によるシートの引き剥がれがシート剥離に大きく影響しているものと考えられる。

3.3 AFRP シートの歪分布性状

前述の 3.1 および 3.2 の検討より、AFRP シートの剥離破壊は1層貼りの場合では上縁コンクリートの圧壊後、2層貼りの場合には圧壊前において発生していることが明かとなった。従って、以後の考察ではこれらの剥離破壊過程の異なる試験体を同一基準で検討するため、計算最大変位 δ_c 時および計算最大荷重 P_c 時におけるシートの歪分布性状に着目して検討する。

図一4には計算最大変位 δ_c 時における AFRP シート歪分布の実験および計算結果を R7, 5, 3 試験体に関して示している。図には、実験結果において等曲げモーメント区間に発生した平均歪が支点側に線形に減少すると仮定した場合の零歪位置までの距離（以下、付着抵抗長さ）と平均歪値を明記している。なお本研究において、付着抵抗長さは後述のピーリング現象による剥離発生範囲を含めたものとして評価することとしている。また、計算結果は前述の断面分割法によってスパン方向に1cm間隔で算出し、細線で示している。

R3 試験体の場合において1, 2層貼りともに実測歪は計算歪よりも小さいが、他の場合には実験結果と計算結果は比較的良く対応している。計算結果はコンクリートと AFRP シートの完全付着を仮定していることから、R3 試験体を除いて δ_c 時においてシートの剥離は生じていないものと判断される。

図一5に計算最大荷重 P_c 時におけるシート歪分布の実験および計算結果を示す。なお、2層貼り試験体において実測最大荷重 P_u が P_c よりも小さい場合には P_u 時のものを示すこととした。図中には図一4と同様、実験結果に関する平均歪および付着抵抗長さを明記し、計算結果も併せて示している。図より、1層貼りの場合には δ_c 時の歪分布と同様、R3 試験体を除いて実験結果と計算結果は比較的良く対応していることがわかる。しかしながら、2層貼りの場合には実験結果と計算結果は異なった歪分布性状を示している。すなわち、計算結果は等曲げモーメント区間で最も大きな歪を生じる台形分布を示しているのに対し、実験結果は等曲げモーメント区間よりも左右に20～30cm程度広い範囲に平均歪レベルの歪が生じている。また、実験時には載荷点近傍の下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れが載荷荷重の増加とともに開口してシートが引き剥がれるピーリング現象の発生を確認している。これらのことから、2層貼りした試験

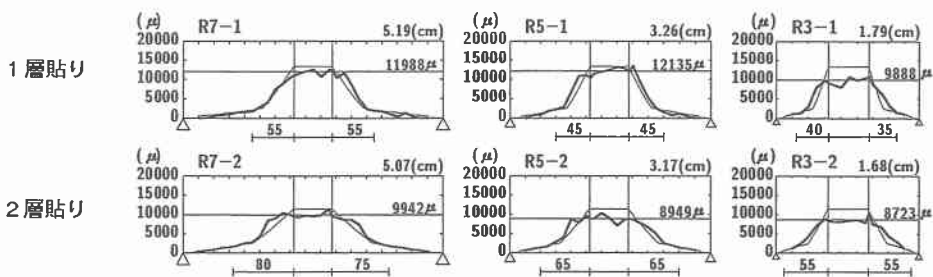


図-4 計算最大変位 δ_c 時におけるシートの歪分布性状

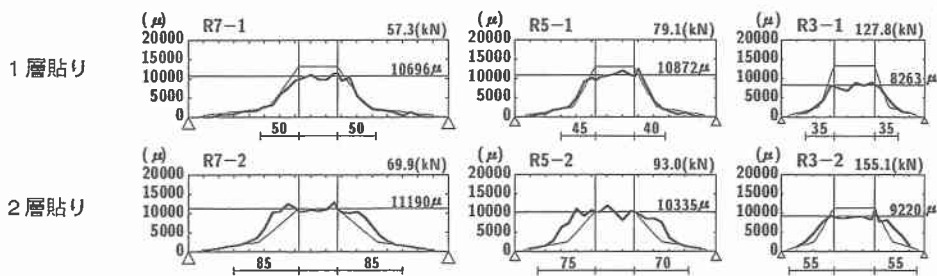


図-5 計算最大荷重 P_c 時におけるシートの歪分布性状

表-4 AFRP シートの付着特性

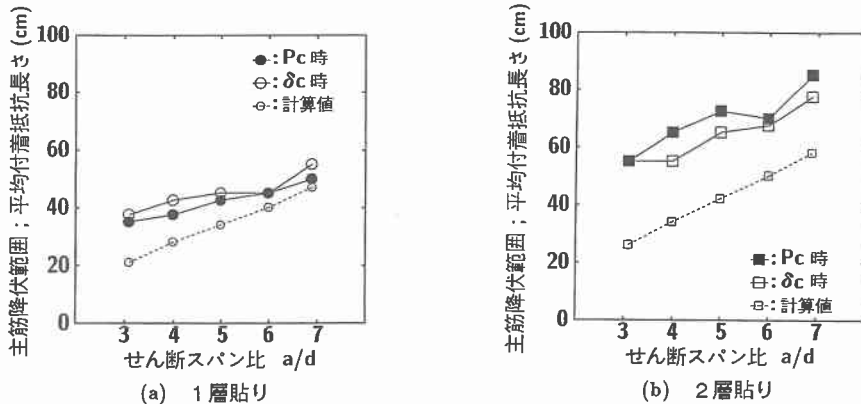
試験体名	計算最大変位 δ_c 時		計算最大荷重 P_c 時		主筋降伏範囲 (計算値) (cm)
	平均付着抵抗 長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)	平均付着抵抗 長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)	
R7-1	55.0	0.79	50.0	0.77	47.0
R6-1	45.0	0.90	45.0	0.72	40.0
R5-1	45.0	0.98	42.5	0.93	34.0
R4-1	42.5	1.04	37.5	1.00	28.0
R3-1	37.5	0.95	35.0	0.85	21.0
R7-2	77.5	0.93	85.0*	0.95*	58.0
R6-2	60.0	1.21	60.0	1.18	50.0
R5-2	65.0	1.00	72.5*	1.03*	42.0
R4-2	55.0	1.14	65.0*	1.10*	34.0
R3-2	55.0	1.15	55.0*	1.21*	26.0

* は P_u 時の実験結果

体は P_c 時において載荷点から支点側に 20 ～ 30 cm の範囲でシートの部分剝離を生じているものと推察される。また、これは図-2 の荷重-変位関係において 2 層貼り試験体の荷重の増加勾配が計算最大荷重到達前に低下することの要因であるものと考えられる。なお、R3 試験体において実測歪が計算歪に合致しないのは、R3 試験体のせん断変形量が大きくなるためと推察される。

3.4 AFRP シートの曲げ付着特性

表-4 に図-4, 5 より算出した δ_c 時および P_c 時における AFRP シートの曲げ付着特性値の一覧を示す。表中、平均付着抵抗長さは試験体左右の付着抵抗長さの平均値、平均付着強度は等曲げモーメント区間に発生した引張力を平均歪より算出し、それを平均付着抵抗長さおよびシート幅で除したものである。また、



図一六 付着抵抗長さおよび主筋降伏範囲とせん断スパン比との関係

表には断面分割法により得られた主鉄筋の降伏範囲（以下、主筋降伏範囲）もあわせて示している。図一六には表一四に示した平均付着抵抗長さおよび主筋降伏範囲とせん断スパン比との関係を整理して示している。

平均付着抵抗長さは (a) 図の 1 層貼りの場合、 δ_c 時と P_c 時ではほぼ同程度となっていることがわかる。また、これらの平均付着抵抗長さ主筋降伏範囲は a/d の小さい試験体ほど対応しない傾向にあり、その差は最大で 15 cm 程度である。一方、(b) 図の 2 層貼りの場合、1 層貼りと異なり P_c 時の方が δ_c 時よりも一般的に平均付着抵抗長さが長い。また、平均付着抵抗長さ主筋降伏範囲は 1 層貼りと同様に a/d が小さい場合ほど対応しない傾向にあり、その差は最大 30 cm 程度と 1 層貼りに比べて大きくなっている。これらのことから、平均付着抵抗長さ主筋降伏範囲の対応は a/d が小さいほど、またシート補強量が多いほど低いことがわかる。これらは、 a/d が小さい場合にはせん断補強量が大きくなり図一四、五に示したようにシートの実測歪が計算歪よりも小さくなることや、補強量が多い場合には等曲げモーメント区間の歪と同程度の歪を生じる領域が支点側に進展することなどに関連しているものと推察される。

表一四より、全試験体の平均付着強度は 1 層貼りで a/d が大きな場合を除いて、 δ_c 時と P_c 時ではほぼ対応していることがわかる。また、1 層貼りの平均付着強度は 0.7~1.0 MPa 程度、2 層貼りの場合で 0.9~1.2 MPa 程度であり、一般的に 2 層貼りの場合が大きい。すなわち、1 層貼りの場合はこの程度の付着強度でシートは梁上縁コンクリートの圧壊まで付着を保つが、2 層貼りの場合はコンクリートの圧壊する計算最大荷重到達前に剝離破壊する点に留意する必要がある。

4. まとめ

本研究では、RC 梁に接着した AFRP シートの曲げ付着性状を検討するため、RC 梁のせん断スパン比およびシート補強量を変化させて静的曲げ載荷実験を行った。本実験結果より得られた知見を以下に要約する。

- (1) 1 層貼りの場合は a/d にかかわらず上縁コンクリートの圧壊を伴うシート剝離で破壊し、2 層貼りで計算耐力以下で剝離破壊する傾向にある。
- (2) a/d が小さな試験体では、計算で予想されるほど歪がシートに発生しない。これは、 a/d が小さい場合せん断変形量が大きくなることに関連すると考えられる。
- (3) シート補強量の多い場合、シートの歪はピーリング現象によって等曲げモーメント区間の両側に大きく進展し、この部分を含めた付着抵抗長さは長くなる。しかし、シートが負担する引張力が大きいため、総じて平均付着強度は 1 層貼りよりも大きく評価される。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像 一性能照査補強設計指針（試案）一，1998。
- 2) 岸 徳光，三上 浩，佐藤昌志，栗橋祐介：FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 1399-1410，1999。