

FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの必要接着長算定に関する実験的研究

Experimental Study on Required Bonding Length of FRP Sheet Bonded to RC beams

室蘭工業大学	正 員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設(株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	フェロー	松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)
室蘭工業大学	○ 学生員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

近年、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物を対象とした連続繊維シート (以後、FRP シート) による補修・補強工事が各地で盛んに行われている。また、諸研究機関では FRP シートを用いた曲げ補強、せん断補強および靱性能向上に関する研究が数多く実施されている。RC 部材を FRP シートを用いて曲げ補強する場合には、シートの破断のみならず剝離によって部材が終局に至ることが想定されることより、シートの剝離特性を考慮した合理的な FRP シート曲げ補強設計手法の確立が強く求められている。

著者らはこれまで実挙動に即したシートの曲げ付着特性を検討するため、FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象とした静載荷実験を数多く実施してきた。その結果、1) 曲げ補強を目的として RC 梁底面に接着した FRP シートの剝離挙動は、シートとコンクリート間における相対変位 (すべり量) や局部付着応力に依存する一面せん断的な剝離挙動と大きく異なる、2) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、断面分割法に基づいて算出した計算終局時の変位よりも小さな変位でシートが剝離し終局に至る場合 (以後、剝離破壊型と呼ぶ) と、計算終局時の変位を上回り上縁コンクリートが圧壊した後にシートが剝離もしくは破断する場合 (以後、曲げ圧壊型と呼ぶ) に分類される、3) これらの破壊形式は主に等せん断力区間における計算終局時の主鉄筋降伏領域 (以後、単に主鉄筋降伏領域 L_y) とせん断スパン長 a を用いて推定可能であること、等を明らかにしている。また、1) 前者の剝離破壊型の場合には計算終局耐力よりも低い荷重レベルで終局に至ることより、断面分割法に基づいた補強設計は危険側の設計となること、2) 後者の曲げ圧壊型の場合には実測終局耐力が計算終局耐力とほぼ同程度となることより、断面分割法による数値計算によって最大耐力を算定可能であることを明らかにしている。

従って、FRP シートを用いて RC 梁を曲げ補強する場合には、まず補強後の破壊形式を推定し、各破壊形式に対応して効率的な補強方法を検討しなければならない。また、合理的な FRP シート曲げ補強設計手法確立のためには、シートが有効に曲げ補強効果を発揮する領域を的確に把握し、効率的なシートの接着範囲の算定法を確立することが肝要であるものと判断される。

このような観点より、本研究では効率的なシートの接着長算定手法の確立を目的として、せん断スパン比、主

鉄筋比および連続繊維の体積補強割合の異なる RC 梁に関して、シートの接着長をそれぞれ3種類に変化させ静載荷実験を行った。なお、本研究では、シートの必要接着範囲に着目して実験を行うこととしていることより、各試験体はシートを全面接着 (スパン中央部から両支点の 10 cm 手前までの範囲に接着) した場合に計算終局時までシートの剝離が生じない曲げ圧壊型試験体に限定している。

2. 効率的なシート接着範囲の考え方

著者らによるこれまでの研究成果により、RC 梁を FRP シートで曲げ補強した場合、シートの曲げ補強効果は主に主鉄筋降伏後顕著に発揮されることが明らかとなっている。図-1 には断面分割法によって求めた主鉄筋降伏時および圧壊を想定した計算終局時における FRP シートの軸方向歪分布の一例を示している。計算終局時の歪分布図において、主鉄筋降伏領域では発生歪が主鉄筋降伏時よりも大きく示されていることより、曲げ補強効果は主にこの領域のシートによって発揮されているものと考えられる。一方、主鉄筋が降伏に達しない支点側の領域では、主鉄筋降伏領域に比較して歪値も 2,000 μ 以下と小さいことよりその補強効果は常に小さいものとなる。しかしながら、シートの接着長を主鉄筋降伏領域に限定すると主鉄筋の段落と同様の性状が現れ十分な耐力向上を期待できない。ここでは、このような段落

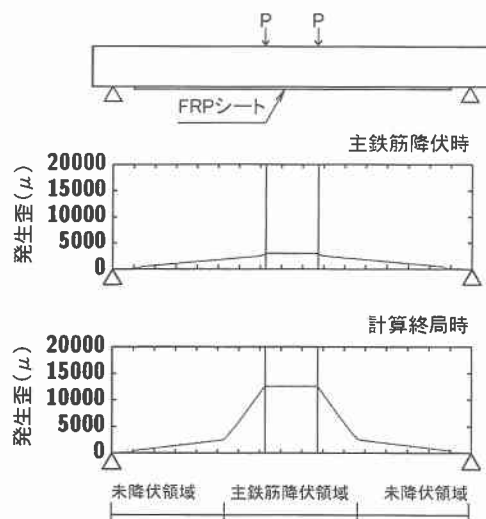
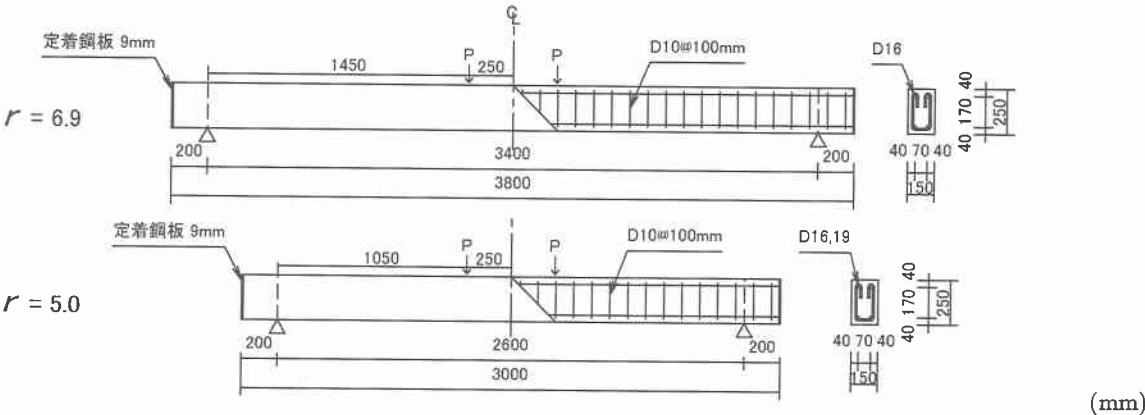


図-1 シートの軸方向歪分布の一例 (計算結果)

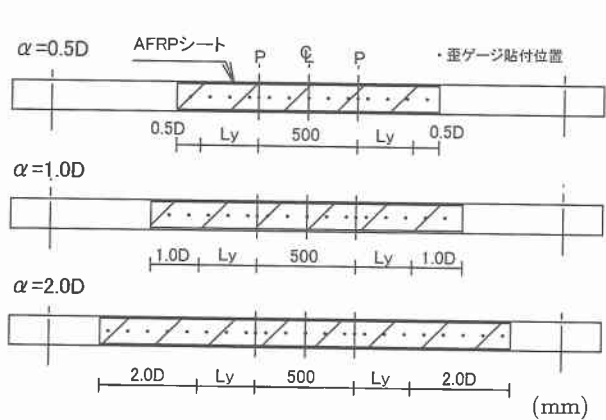
表－１ 試験体の一覧

試験体名	主鉄筋比 p (%)	せん断スパン比 r	繊維目付量 (g/m^2)	繊維の体積 補強割合 (%)	主鉄筋降伏 領域 L_y * (cm)	シートの端部 接着長 α (cm)
S1-R5-1-0.5D	1.26	5.0	415	1.0	29	0.5D
S1-R5-1-1.0D						1.0D
S1-R5-1-2.0D						2.0D
S1-R7-1-0.5D	1.26	6.9	415	1.0	40	0.5D
S1-R7-1-1.0D						1.0D
S1-R7-1-2.0D						2.0D
S2-R5-1-0.5D	1.82	5.0	415	1.0	21	0.5D
S2-R5-1-1.0D						1.0D
S2-R5-1-2.0D						2.0D
S1-R5-0.5-0.5D	1.26	5.0	200	0.5	20	0.5D
S1-R5-0.5-1.0D						1.0D
S1-R5-0.5-2.0D						2.0D

*計算終局時における片側等せん断力区間の値



図－２ 試験体の配筋概要



図－３ AFRP シートの接着概要とゲージ貼付位置の例

し的な性状を防ぐことと、計算終局時までの耐力を保証するためのシートの接着長を算定するために主鉄筋降伏領域 L_y の外側に接着領域（以後、端部定着長）を設定し、その最適長について実験的に検討することとした。

３．実験概要

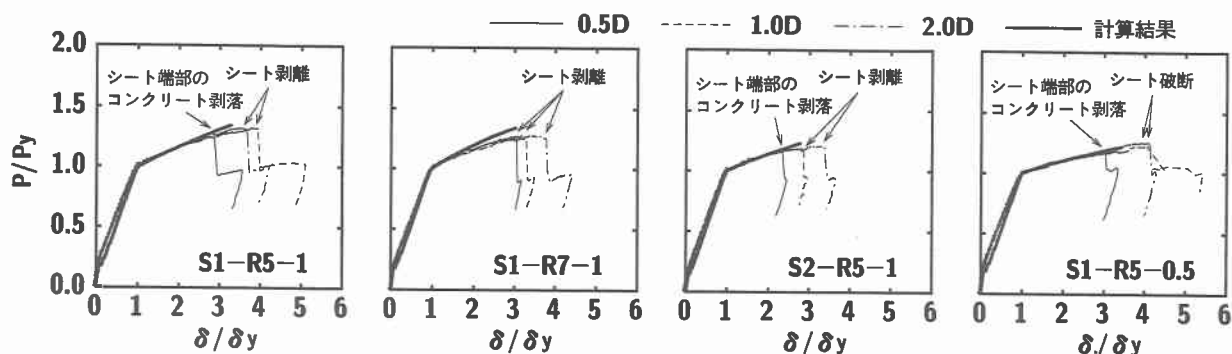
表－１には本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、せん断スパン比、主鉄筋比および繊維の体積補強割合を変化させた４種類の RC 梁に対して、シートの端部接着長を３種類に変化させた全 12 体である。試験体名の第 1 項目は用いた軸方向筋（S1：D16，S2：

表－２ AFRP シートの力学的特性

繊維目付量 (g/m^2)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
200	0.138	2.48	131	1.89
415	0.286			

D19)、第 2 項目の R に付随する数値はせん断スパン比 r の概略値、第 3 項目はシートの体積補強割合 (%) を意味している。また、第 4 項目はシートの端部接着長 α を示しており、梁の断面高さ D ($= 25 \text{ cm}$) の 0.5, 1.0, 2.0 倍として設定している。表中の主鉄筋降伏領域 L_y は断面分割法に基づいて算出されたものであり、計算終局時における片側等せん断力区間での値として示している。各試験体の等せん断力区間におけるシートの接着長は $L_y + \alpha$ となる。

図－２には本実験に用いた試験体の配筋図を示している。試験体は断面寸法 $25 \times 15 \text{ cm}$ 、軸方向筋に D16 もしくは D19 を用いた複鉄筋 RC 梁である。梁の純スパンはせん断スパン比 $r = 5.0$ の場合は 2.6 m 、 $r = 6.9$ の場合は 3.4 m となっている。実験は荷点間隔を一律 50 cm として静的 2 点荷重により行っている。図－３には RC 梁底面における AFRP シートの補強概要を例示している。全試験体において、等せん断力区間におけるシートの接着範囲は、断面分割法に基づいて算出した主鉄筋降伏領域 L_y と各試験体毎に設定した端部接着



図－４ 無次元荷重－変位曲線



(a) $\alpha = 0.5D$



(b) $\alpha = 1.0D$

写真－１ 終局時におけるシートの剥離状況 (S1-R5-1 試験体)

長 α の和としている。曲げ補強に用いた FRP シートは幅 13 cm, 繊維目付量 200 もしくは 415 g/m² のアラミド繊維製 FRP (以後, AFRP) シートであり, シート上には検長 10 mm の歪ゲージをスパン中央部から支点に向かって 10 cm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。実験時におけるコンクリートの材齢は 40 日, 平均圧縮強度は 25.2 MPa であった。鉄筋の降伏強度はスターラップに用いた D10(SD295) で 381 MPa, 主鉄筋に用いた D16, D19(SD345) でそれぞれ 386, 389 MPa であった。表－２には材料試験により得られた AFRP シートの力学的特性を示している。本実験における測定項目は載荷荷重, 載荷点変位および AFRP シート各点の軸方向歪である。

４．実験結果

４．１ 荷重－変位曲線

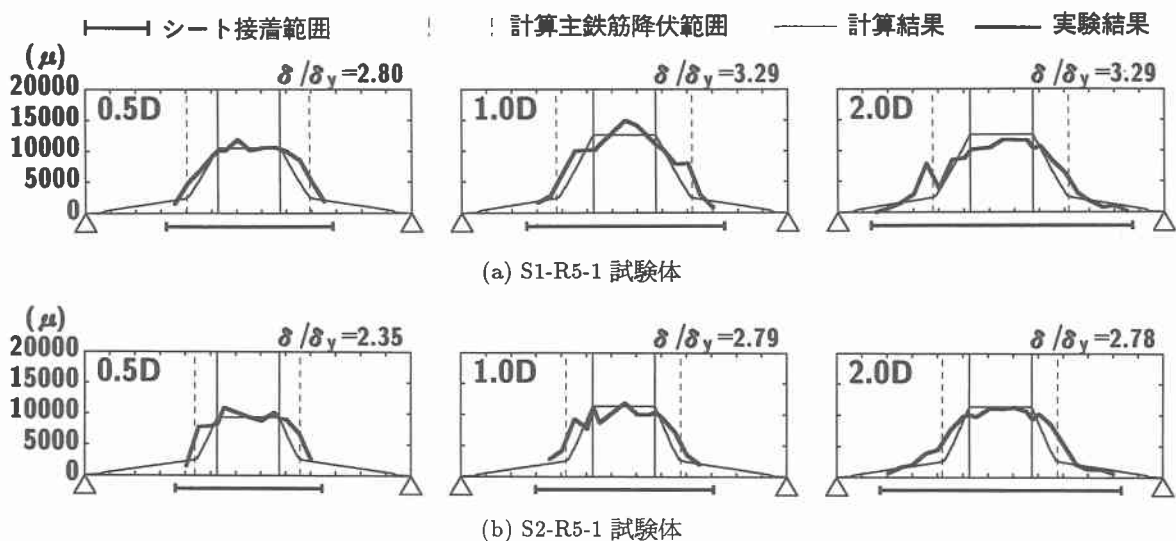
図－４には各 RC 梁毎に荷重－変位曲線の実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は断面分割法を用いて上縁コンクリート歪が終局圧縮歪 3,500 μ に至るまで計算し算出している。図中, 実験および計算結果は主鉄筋降伏後の FRP シートの曲げ補強効果を同一の尺度で検討するため, 主鉄筋降伏時の荷重 P_y および変位 δ_y で無次元化して整理している。表－３には実験および計算結果の降伏荷重 P_{ye} , P_{yc} および降伏変位 δ_{ye} , δ_{yc} の一覧を示している。表より, いずれの試験体においても実測の降伏荷重 P_{ye} , 降伏変位 δ_{ye} は計算の P_{yc} , δ_{yc} を上回っていることが分かる。図より, 各 RC 梁において端部接着長 α が 0.5D の場合の実験結果

表－３ 降伏荷重および降伏変位の一覧

試験体名	実験結果		計算結果	
	降伏荷重 P_{ye} (kN)	降伏変位 δ_{ye} (kN)	降伏荷重 P_{yc} (kN)	降伏変位 δ_{yc} (kN)
S1-R5-1-0.5D	60.6	1.14	58.1	0.97
S1-R5-1-1.0D	59.5	1.03	58.1	0.97
S1-R5-1-2.0D	60.3	1.06	58.1	0.97
S1-R7-1-0.5D	43.0	1.82	42.1	1.65
S1-R7-1-1.0D	43.6	1.67	42.1	1.65
S1-R7-1-2.0D	45.0	1.71	42.1	1.65
S2-R5-1-0.5D	83.4	1.21	80.0	1.05
S2-R5-1-1.0D	82.0	1.13	80.0	1.05
S2-R5-1-2.0D	82.1	1.20	80.0	1.05
S1-R5-0.5-0.5D	59.3	1.12	55.0	0.96
S1-R5-0.5-1.0D	59.3	1.02	55.0	0.96
S1-R5-0.5-2.0D	59.0	1.04	55.0	0.96

は計算終局耐力および変位に到達する前に終局に至っていることがわかる。これに対し, 端部接着長 α が 1.0D, 2.0D の場合の実験結果は計算終局変位と同程度かもしくはそれを上回る変位値を示した後終局に至っていることが分かる。また, この場合の実測最大耐力は計算最大耐力とほぼ同程度となっている。

実験時において端部接着長 α が 0.5D の場合はシートの接着端部においてひび割れが開口し, その後主鉄筋に沿う形でスパン中央部方向に進展して, 設定した端部接着長部分のかぶりコンクリートが剥落する傾向にあった。また, 端部接着長 が 1.0D, 2.0D の場合には過去に実施した全面接着の場合の結果と同様, 主鉄筋降伏領域 L_y の下縁かぶりコンクリート部に発生した曲げおよび斜め



図－５ 終局変位時における歪分布性状

ひび割れが交差して形成されたコンクリートブロックがシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用によって剝離している。

写真－１には S1-R5-1 試験体を例に接着長が 0.5D、1.0D の場合の終局時におけるシートの剝離状況を示している。写真より、計算終局変位到達前に終局に至った 0.5D 試験体と計算終局変位到達後に終局に至った 1.0D 試験体では、破壊性状が大きく異なっていることがわかる。以上より、曲げ圧壊型の FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの曲げ補強効果を、断面分割法による計算終局耐力程度まで発揮させるためには等せん断力区間におけるシートの接着長を $L_y + 1.0D$ 以上に設定しなければならないものと推察される。

４．２ 歪分布性状

図－５には S1-R5-1 および S2-R5-1 試験体の終局変位時の軸方向歪分布の実験結果を断面分割法に基づいて算出した計算結果と比較して示している。計算結果は断面分割法による結果を基にスパン方向に 1 cm 間隔で算出したものである。また、図中の破線は断面分割法結果を参考にした主鉄筋降伏端部位置を示している。1.0D および 2.0D 試験体に関しては計算終局変位時の歪分布を整理しているが、0.5D 試験体は計算終局時変位到達前に終局に至っていることより、実測の終局変位時の歪分布を示している。図より、0.5D 試験体のシートの歪分布は 1.0D および 2.0D 試験体の場合に比べて、載荷点近傍の歪値や歪の大きく示されている範囲が若干小さいことがわかる。従って、0.5D 試験体に貼り付けた AFRP シートの曲げ補強効果は 1.0D 試験体や 2.0D 試験体に比較して効率的に発揮されていないものと考えられる。1.0D および 2.0D 試験体の実験結果はともに計算終局時においてもほぼ同様な歪分布性状を示している。これより、これらの試験体は端部接着長に関わらず計算終局時においてほぼ同等の補強効果を発揮しているものと推察される。

これらの歪分布図より、等曲げ区間の実測歪と計算歪はほぼ同程度であるが、等せん断力区間では実測歪が計算歪よりも大きく示されていることが分かる。特に、主鉄筋降伏端部において実測歪と計算歪の差が最も大きく示される傾向にある。このことより、主鉄筋降伏端部よりも支点側の降伏に至っていない領域のシートには計算よりも大きな引張力が作用しているものと考えられる。従って、端部接着長の短い場合にはこの作用引張力がシートの接着端部にひび割れの開口を励起させ、さらにこの部分のかぶりコンクリートを剥ぎ取るものと推察される。本実験では、このようなシート接着端部のひび割れに起因する下縁かぶりコンクリートの剝落は、端部接着長を 1.0D 以上とすることにより抑制されることが明らかとなった。従って、曲げ圧壊型の FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの曲げ補強効果を効率的に発揮させるために必要なシートの接着長は、等せん断力区間に対して $L_y + 1.0D$ 以上であるものと考えられる。

５．まとめ

本研究では、AFRP シート曲げ補強 RC 梁に関する効率的なシート接着長を検討するため、せん断スパン比、主鉄筋比および連続繊維の体積補強割合の異なる RC 梁を用い、静的 2 点載荷実験を行なった。本実験で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 端部接着長が短い場合には、シートの接着端部にひび割れの開口を生じこの部分近傍の下縁かぶりコンクリートが剝落する場合がある。
- 2) RC 梁の主鉄筋比、せん断スパン比およびシート補強量に関わらず端部接着長 α を 1.0D 以上とすることによりシート端部におけるひび割れの開口が現われず、FRP シート接着による曲げ補強効果を十分期待できる。
- 3) 曲げ圧壊型の FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する効率的なシート必要接着長は、等せん断力区間に対して $L_y + 1.0D$ 程度以上である。