

AFRP ロッド埋め込み工法による RC 梁の曲げ補強効果

Flexural Strengthening Effect on RC Beams Mounted AFRP Rods near Surface

室蘭工業大学
三井建設（株）
（株）KGE
室蘭工業大学

フェロー
フェロー
正 員
○学生員

岸 徳光
三上 浩
巽 治
笠井和俊

(Norimitsu Kishi)
(Hiroshi Mikami)
(Osamu Tatsumi)
(Kazutoshi Kasai)

1. はじめに

平成5年度版道路橋示方書により規定された新活荷重の対応策および劣化部補強対策として、FRPシート接着工法や下面増厚工法などによる鉄筋コンクリート(RC)床版の補強工事が盛んに行われている。しかしながら、FRPシート接着工法や下面増厚工法では、コンクリート表面を完全に被覆してしまうため、1)コンクリートの劣化損傷によるひび割れ進展状況の目視点検が不能になること、2)コンクリートからの排水が困難であり部材内部に滞水して耐疲労性能が低下すること、等の問題点を有している。

このような背景より、本研究では既設RC構造物の新しい補強方法として、アラミド繊維製ロッド(以後、AFRPロッド)をRC部材のかぶりコンクリート部に埋設する工法を提案し、その曲げ補強効果をRC梁の静載荷実験によって検討した。本実験では、直径が異なる3種類のAFRPロッドを各々2本配置したRC梁と引張剛性が同

程度のAFRPシートで曲げ補強したRC梁の静載荷実験を行い、AFRPロッドおよびシートの曲げ耐力向上効果や剥離性状に関する検討を行った。

2. 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、AFRPロッドおよびシート補強する場合に対して補強量をそれぞれ3種類に変化させた全6体である。表中、試験体名の第一項目は補強材料の種類(R:ロッド、S:シート)を示し、第二項目は補強材料の引張剛性の小さな順に1,2,3と示している。また、R試

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材料	補強量	引張剛性 $E \cdot A$ (GN)
R-1	RA5	2本	2.45
R-2	RA7	2本	5.25
R-3	RA9	2本	7.88
S-1	A200	幅：13.6 cm	2.46
S-2	A415	幅：14.0 cm	5.25
S-3	A415 + A200	幅：14.2 cm	7.89

表-2 AFRP ロッドの材料特性値

補強材料	ロッド径 (mm)	公称 断面積 A (mm ²)	弾性 係数 E (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 ひずみ ϵ (%)
RA5	5.0	19.6	62.5	1.45	2.00
RA7	7.3	42.0			
RA9	9.0	63.0			

表-3 AFRP シートの材料特性値

補強材料	シート 目付量 (g/m ²)	シート 厚さ t (mm)	弾性 係数 E (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 ひずみ ϵ (%)
A200	200	0.138	131	2.48	1.89
A415	415	0.286			

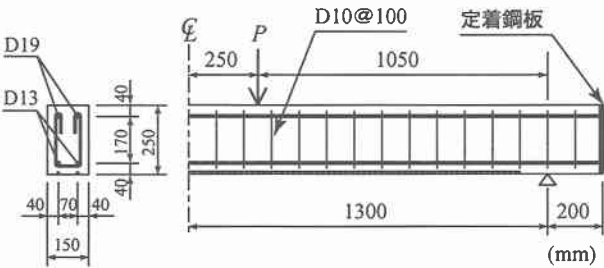


図-1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

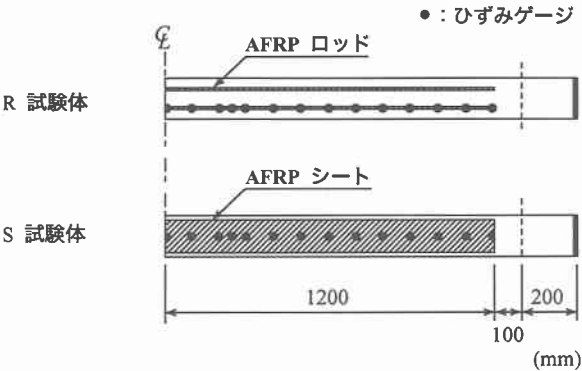
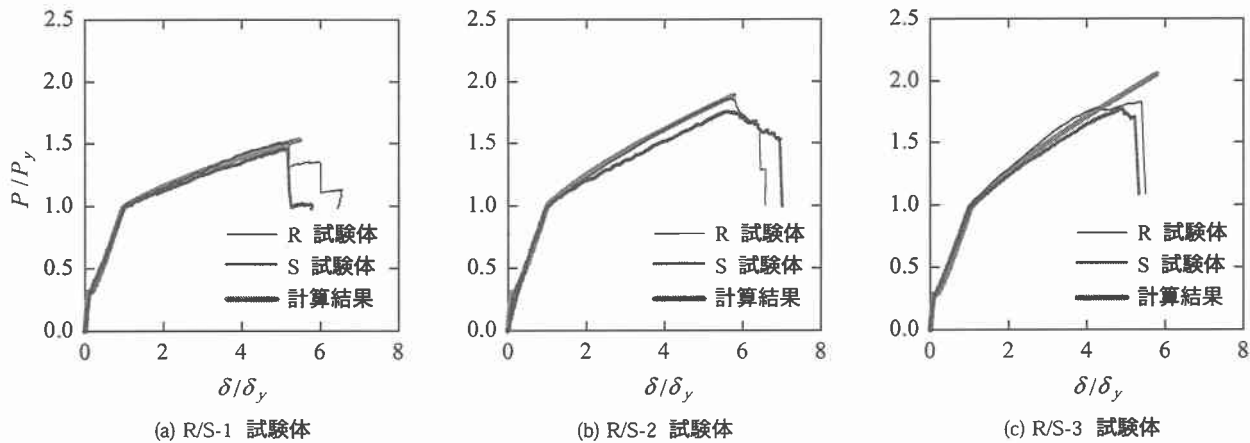


図-2 RC 梁底面の補強概要図



図－3 無次元荷重－変位曲線に関する実験および計算結果の比較図

表－4 実験および計算結果の一覧

試験体名	降伏荷重		降伏変位		無次元最大荷重			無次元最大荷重時変位			破壊形式
	実験値 P_{ye} (kN)	計算値 P_{yc} (kN)	実験値 δ_{ye} (mm)	計算値 δ_{yc} (mm)	実験値① P_{ue}/P_{ye}	計算値② P_{uc}/P_{yc}	①/②	実験値③ δ_{ue}/δ_{ye}	計算値④ δ_{uc}/δ_{yc}	③/④	
R-1	39.0	35.5	9.6	7.9	1.51	1.53	0.97	4.96	5.47	0.91	ロッド剥離
R-2	44.2	37.3	10.6	7.6	1.86	1.89	0.98	5.57	5.76	0.97	ロッド剥離
R-3	47.5	40.5	11.1	7.4	1.83	2.05	0.89	5.38	5.77	0.93	ロッド剥離
S-1	38.1	35.7	9.6	7.9	1.47	1.53	0.96	5.11	5.48	0.93	シート破断
S-2	41.7	38.0	9.3	7.7	1.76	1.88	0.94	5.66	5.69	0.99	シート剥離
S-3	46.9	40.1	9.4	7.4	1.77	2.12	0.84	4.91	5.77	0.85	シート剥離

験体の補強量は、直径の異なる3種類のAFRPロッドを各試験体で2本ずつ配置し、S試験体の補強量はR試験体に用いたロッドの引張剛性 $E \cdot A$ とシートのそれが極力等しくなるように決定した。なお、著者らが提案した破壊形式予測式¹⁾に基づく、いずれの試験体も計算最大耐力および計算最大変位に到達する前にロッドおよびシートが剥離して終局に至る剥離破壊型と予想される。

図－1には、本実験に用いたRC梁の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、断面寸法（梁幅×梁高）15×25 cm、純スパン長2.6 m、下端および上端鉄筋にそれぞれD13、D19を2本ずつ配置した複鉄筋RC梁である。なお、上端鉄筋にD19を用いたのは、上縁コンクリートの圧壊がシート剥離に先行して生じないようにするためである。

図－2には、RおよびS試験体の補強概要を示している。R試験体の場合にはロッド径を多少上回る幅および深さの溝を掘削し、エポキシ樹脂系パテを充填した後にロッドを埋設している。ロッドの梁幅方向の配置位置は軸方向鉄筋の位置と同様とし、梁軸方向の補強範囲は梁中央部から両支点の10 cm手前までとしている。S試験体の場合にはシート接着部のコンクリート表面に付着性能の向上に有効であるショットブラスト処理を施した後、エポキシ系含浸樹脂を用いてシートを接着している。シートの接着範囲は、表－1に示した幅でR試験体と同様に梁中央部から両支点の10 cm手前までとしている。

実験時におけるコンクリートは材令82日、平均圧縮強度が $f'_c = 34.3$ MPaであった。また、主鉄筋の降伏強度

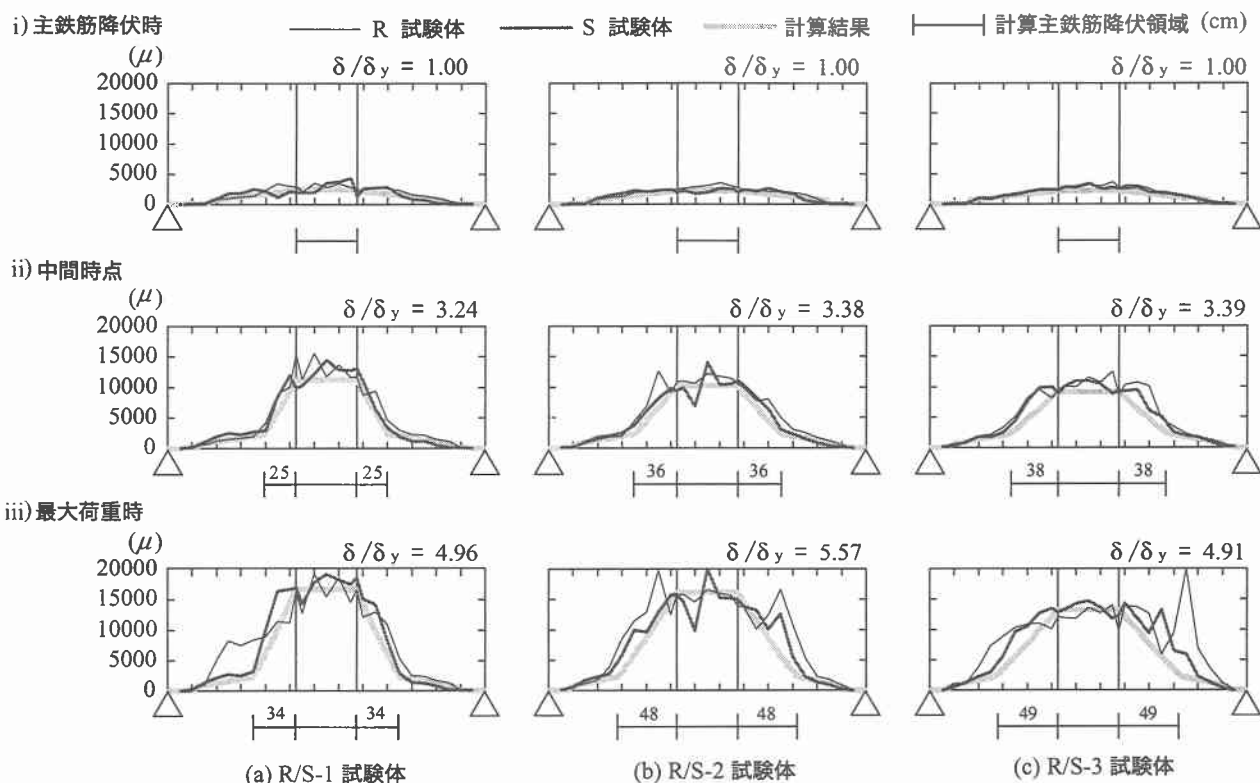
は362 MPaであった。表－2、3には、AFRPロッドおよびAFRPシートの力学的特性値の一覧を示している。本実験における測定項目は、載荷荷重、スパン中央部変位、ロッドおよびシート各点の軸方向ひずみである。

3. 実験結果および考察

3.1 無次元荷重－変位曲線

図－3には、補強材料の引張剛性がほぼ同等であるRおよびS試験体の無次元荷重－変位曲線に関する実験および計算結果を、補強レベル毎に整理して示している。計算結果は、ロッドもしくはシートとコンクリートとの完全付着を仮定し、上縁コンクリートひずみが終局圧縮ひずみ $3,500 \mu$ に至る時点を終局として断面分割法により算出したものである。ただし、引張剛性が同様の場合には、RおよびS試験体の計算結果がほぼ同様の性状を示すことより、ここではR試験体の計算結果のみを示している。また、図中の実験および計算結果は、主鉄筋降伏後における各試験体のロッドおよびシートの補強効果を同一の尺度で比較検討するため、各々の主鉄筋降伏荷重 P_{ye} 、 P_{yc} 、および降伏変位 δ_{ye} 、 δ_{yc} で無次元化して示している。表－4には、参考のため各試験体の実験および計算結果に関する主鉄筋降伏荷重、降伏変位、無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位の一覧を示している。

図－3より、引張剛性 $E \cdot A$ が同等の場合には、RおよびS試験体の実験結果は終局時までほぼ対応していることがわかる。従って、 $E \cdot A$ が同程度の場合には、AFRPロッドを用いることによりAFRPシートを用いる場合と



図－４ ひずみ分布性状に関する実験および計算結果の比較図

同程度の曲げ補強効果を期待できることがわかる。なお、S 試験体において主鉄筋降伏後の剛性勾配が計算結果のそれを若干下回る傾向にあるものの、補強材料の種類にかかわらず各試験体の剛性勾配は計算結果とほぼ対応している。以上から、ロッドおよびシートは終局時までコンクリートとの付着を十分保持しているものと考えられる。

表－４より、無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位の実験結果を計算結果と比較すると、いずれの試験体も実験結果が計算結果を下回り剥離破壊型を示していることが分かる。前述のように、著者らによる FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測式に基づくと、いずれの試験体も剥離破壊型と判定されることより、AFRP ロッドを曲げ補強材料として用いる場合においても本予測式は適用可能であるものと判断される。なお、S-1 試験体が剥離前にシート破断に至ったのは、R-1 試験体と E_A を対応させるために市販のシートよりも薄いシートで補強したため、プラスト処理によるコンクリート表面の凹凸や曲げひび割れの影響をより顕著に受けたためと考えられる。

3.2 ひずみ分布性状

図－４には、各試験体に関する AFRP ロッドおよびシートのひずみ分布の実験および計算結果の比較図を補強レベル毎に整理して示している。図には、i) 各試験体の主鉄筋降伏時、ii) 主鉄筋降伏時と計算終局時の中間変位時（以後、中間時点）、iii) 実験結果の最大荷重時（以後、最大荷重時）について示している。なお、最大荷重時の実験結果は、R および S 試験体のうち最大荷重時の変位レベルが小さい方の無次元変位時について示してい

る。また図中の計算結果は、前節と同様に R 試験体の計算結果を示している。

図より、各試験体ともに主鉄筋降伏時には実験結果と計算結果のひずみ分布がほぼ対応し、ロッドおよびシートがコンクリートと完全付着に近い状態にあることがわかる。中間時点の実験結果から、等曲げ区間において曲げひび割れの発生により局所的に大きなひずみが発生しているものの計算結果とほぼ対応していることがわかる。しかしながら、等せん断力区間では、主鉄筋降伏領域内において実験結果が計算結果よりも大きく示される傾向にあり、特に補強量が大きい場合ほどこの傾向は顕著である。これは、主鉄筋降伏領域内のかぶり部においてコンクリートブロックが形成され、その押し出しによるピーリング作用が顕在化しているためと考えられる。

最大荷重時のひずみ分布から、等せん断力区間における大きなひずみの分布領域が主鉄筋降伏領域の拡大とともにさらに支点側に進展していることがわかる。また、等せん断力区間の実測ひずみは、R 試験体の方が S 試験体よりも大きく示される傾向にある。これは、ロッド補強の場合はシート補強と異なり、2 本のロッドにコンクリートブロックの押し出しによるピーリング作用力が集中的に作用するためと推察される。

このように、AFRP ロッドを用いる場合も AFRP シートを用いる場合と同様、主鉄筋降伏領域内のかぶり部に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によりロッドが押し出されて剥離することが明らかとなった。これは、前述のように AFRP ロッドを用いる場合にも FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測式を適用可能であることから類推される。

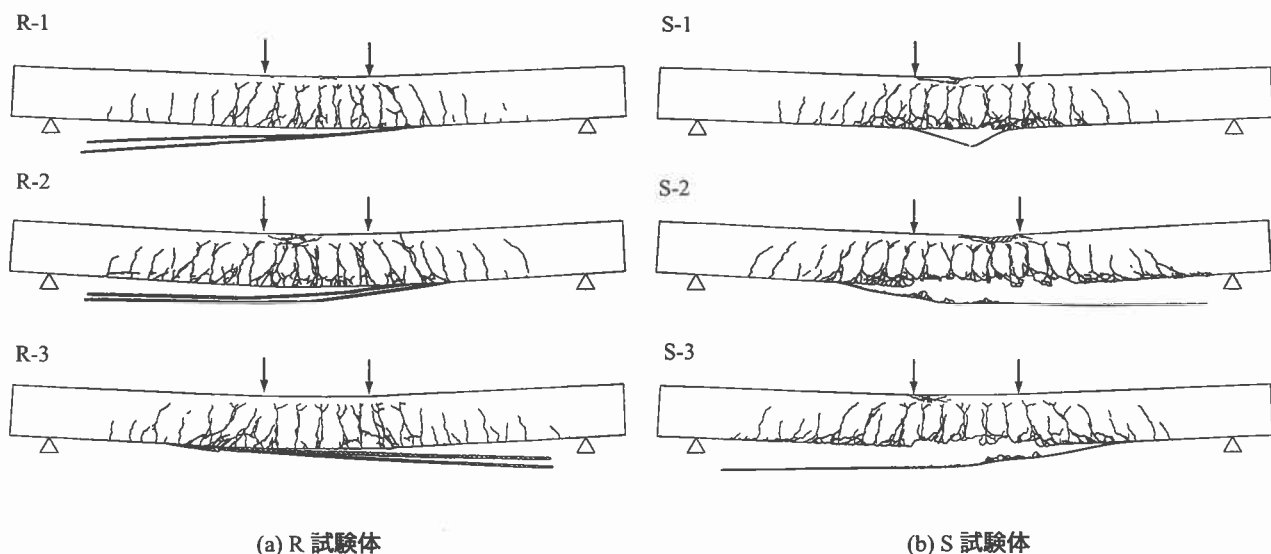


図-5 ひび割れ分布性状

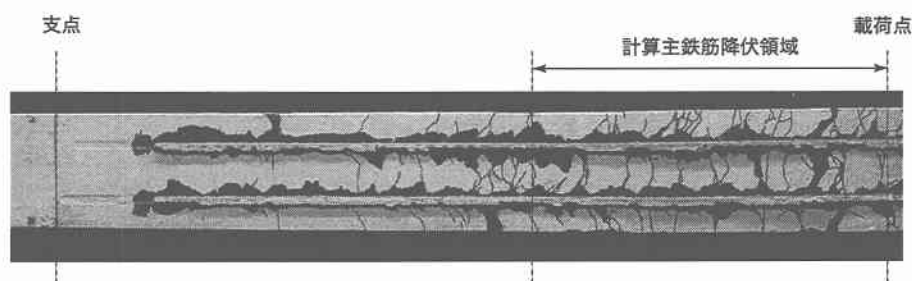


写真-1 R-2試験体の実験終了時における底面の状況（左側せん断スパン）

3.3 破壊性状

図-5には、実験終了時における各試験体のひび割れ分布性状を示している。図より、R試験体の場合には、等曲げ区間のかぶりコンクリート部に曲げおよび割裂ひび割れが見られるものの、かぶりコンクリートは剥落していないことがわかる。また、等せん断力区間では、コンクリートブロックの形成が見られることより、シート補強の場合と同様にロッド補強の場合においてもコンクリートの押し出しによるピーリング作用によって全面的な剥離に至っていることがわかる。

一方、S試験体の場合には、等曲げ区間のかぶり部に曲げひび割れの他、主鉄筋に沿う割裂ひび割れが発生し、かぶりコンクリートが大きく剥落していることがわかる。また、等せん断力区間のかぶり部にはコンクリートブロックが形成されていることより、ピーリング作用によってシートが全面的な剥離に至っていることがわかる。ただし、S-1試験体の場合はシート破断によって終局に至っているため、かぶりコンクリートの剥落等の著しい損傷は見られない。

写真-1には、実験終了後におけるR-2試験体の底面のひび割れ分布性状を示している。写真より、ロッドの剥離に伴ってロッド周辺のコンクリートが引き剥がされていることがわかる。従って、AFRPロッドとコンクリートとの付着強度は、コンクリートの引張強度と同程度以上に高いものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、AFRPロッドをコンクリート表面に埋め込む補強工法を提案し、引張剛性が同程度のAFRPシートで曲げ補強したRC梁とともに静載荷実験を行い、ロッドおよびシートの曲げ耐力向上効果や剥離性状に関する検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 引張剛性 EA が同程度の場合には、AFRPロッドを埋め込むことによりAFRPシートを接着する場合と同程度の曲げ補強効果を期待できる。
- 2) AFRPロッドを用いる場合もAFRPシートを用いる場合と同様、主鉄筋降伏領域内のかぶり部に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によりロッドが剥離して終局に至る。
- 3) AFRPロッド埋め込み補強RC梁のロッドの剥離性状は、AFRPシートのそれとほぼ同様であり、著者らが提案したFRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式予測式が適用可能である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683 / V-52, pp. 47-64, 2001.