

論文 AFRP ロッドを埋設した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究

岸 徳光^{*1}・三上 浩^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・田村 富雄^{*4}

要旨：本研究では，AFRP ロッドを埋設した RC 梁の曲げ耐力向上効果および破壊性状を把握することを目的として，引張剛性を同程度とした AFRP シート曲げ補強 RC 梁との比較により実験的に検討を行った。実験はロッド径およびシート補強量をそれぞれ 3 種類に変化させた全 6 体の RC 梁を用いて静載荷実験を行った。検討の結果，引張剛性 $E \cdot A$ 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こと等が明らかとなった。

キーワード：RC 梁，AFRP ロッド，AFRP シート，引張剛性

1. はじめに

平成 5 年度版道路橋示方書¹⁾により規定された新活荷重の対応策や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²⁾。しかしながら，このような補強工法の場合には，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可能になること，2) コンクリートからの排水が困難であり床版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，本研究では上述のような欠点を改善できるような簡易で合理的な既設 RC 構造物の補強工法を開発することを目的に，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を行った。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 梁および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 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い順に 1, 2, 3 と示している。R 試験体にはそれぞれ直径の異なる 3 種類の AFRP ロッドを用いている。また，S 試験体のシート補強量はシートの引張剛性 $E \cdot A$ が対応する R 試験体のロッドと極力等しくなるように決定した。なお，各試験体の破壊形式は，いずれもロッド

表-1 試験体の一覧

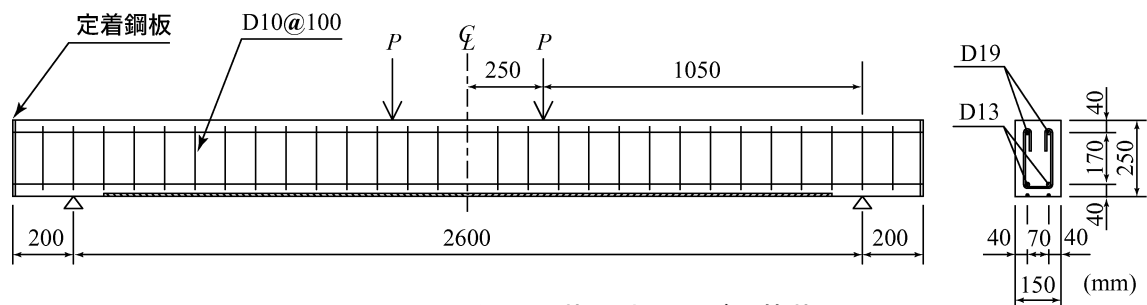
試験体名	補強材料	補強量	引張剛性 $E \cdot A$ (MN)
R-1	RA5	2 本	2.45
R-2	RA7	2 本	5.25
R-3	RA9	2 本	7.88
S-1	A200	幅: 13.6 cm	2.46
S-2	A415	幅: 14.0 cm	5.25
S-3	A415 + A200	幅: 14.2 cm	7.89

*1 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)

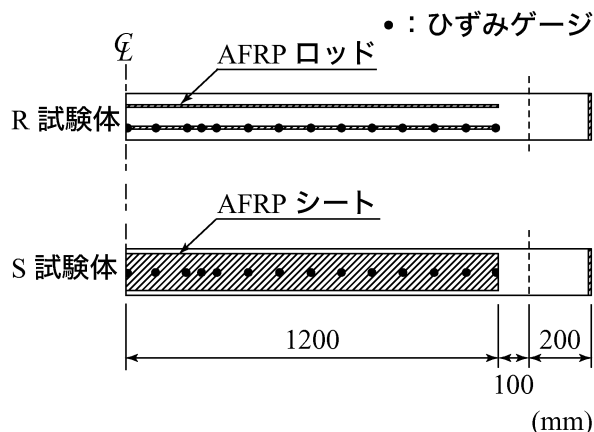
*2 三井住友建設(株) 室長 技術研究所土木構造研究室 博(工) (正会員)

*3 (独)北海道開発土木研究所 研究員 材料研究室 博(工) (正会員)

*4 ファイベックス(株) 代表取締役 博(工) (正会員)



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

表－２ AFRP ロッドの力学的特性値

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			

* 公称値

表－３ AFRP シートの力学的特性値

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			

* 引張試験値

およびシートが計算最大耐力および計算最大変位に到達する前に剥離して終局に至る剥離破壊型³⁾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剥離破壊型にするためである。

図－２には、R/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

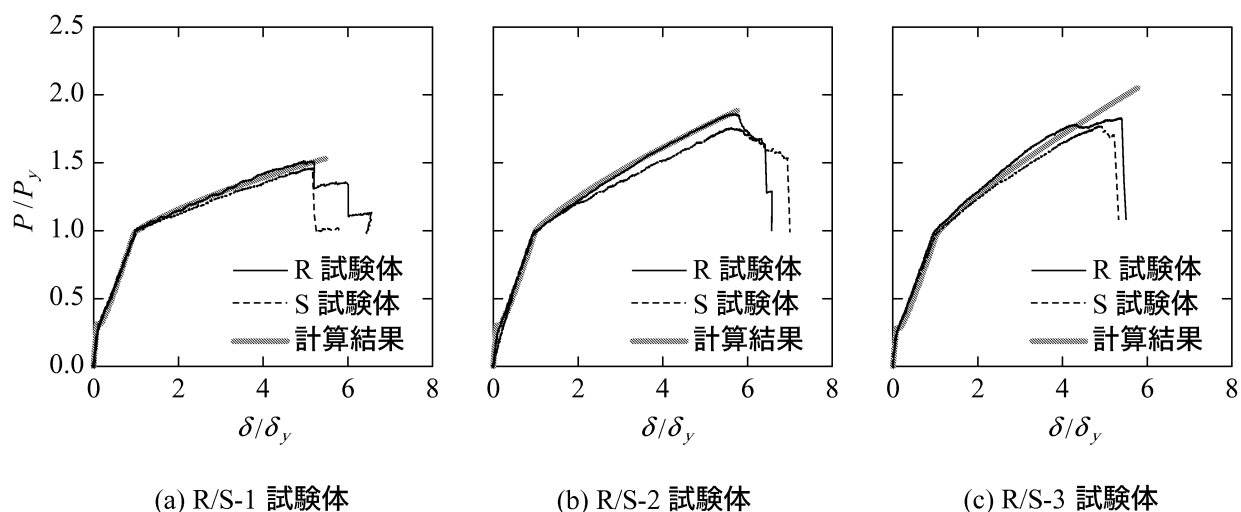
いてシートを接着している。シートの接着範囲は，表－１に示した幅で R 試験体と同様に梁中央部から両支点の 10 cm 手前までとしている。

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，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。なお，前者は公称値，後者は引張試験値である。本実験における測定項目は，載荷荷重，スパン中央点変位，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



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

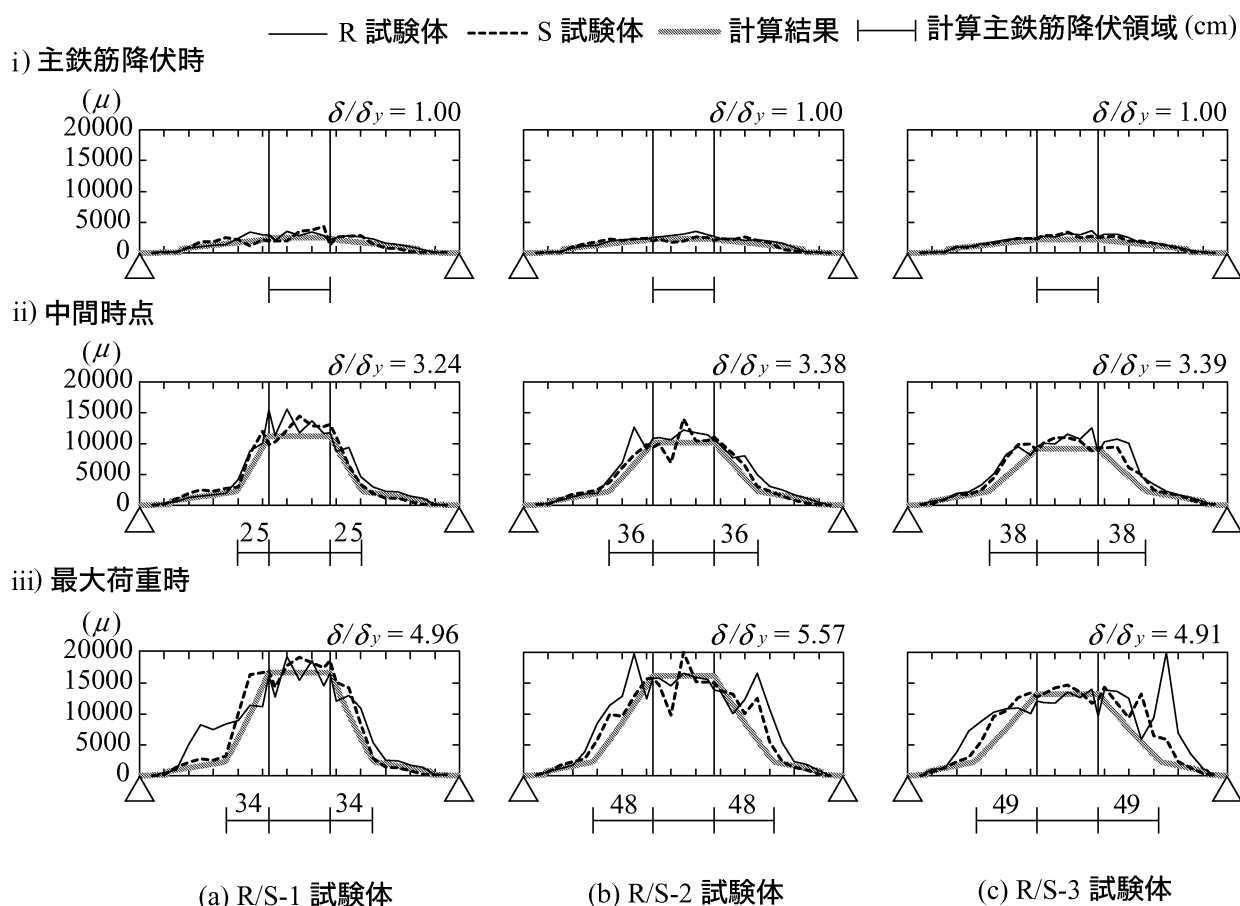
表－４ 実験および計算結果の一覧

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	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値		実験値	計算値		
	P_{ye}	P_{yc}	δ_{ye}	δ_{yc}	P_{ue}/P_{ye}	P_{uc}/P_{yc}	(i) / (ii)	δ_{ue}/δ_{ye}	δ_{uc}/δ_{yc}	(iii) / (iv)	
	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)	(i)	(ii)		(iii)	(iv)		
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	5.69	0.98	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

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、各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、最大圧縮ひずみが $3,500\mu$ に達した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。なお、計算に用いられるコンクリートの応力－ひずみ曲線は土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に準拠しており、ロッド、シートは表－2, 3に示されている弾性係数、破断ひずみを有する線形弾性体と仮定している。また、1要素の最大の大きさは5mmとしている。図中、補強材の引張剛性が類似の場合には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試験体のみの結果を示している。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、各試験体に関する実験および計算結果の降伏荷重、降伏変位、無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位を一覧にして示している。

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点まで両者ほぼ対応していることがわかる。従って、 $E \cdot A$



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

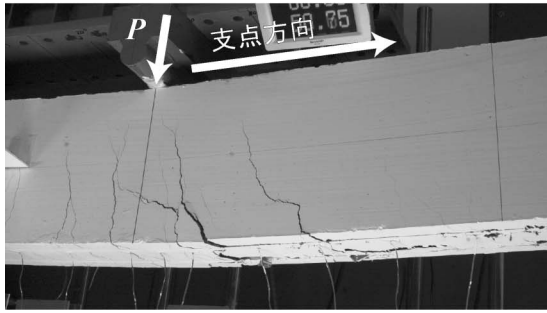
が同程度の場合には、AFRP ロッドを用いることにより AFRP シートを用いる場合と同程度の曲げ補強効果を期待できることがわかる。なお、S 試験体の場合において主鉄筋降伏後の剛性勾配が計算結果を若干下回る傾向にあるが、補強材料の種類にかかわらず各試験体の剛性勾配は計算結果とほぼ対応している。以上から、ロッドおよびシートは終局点までコンクリートとの付着を十分保持しているものと考えられる。

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わかる。前述のように、著者らによる FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式の予測式に基づくと、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

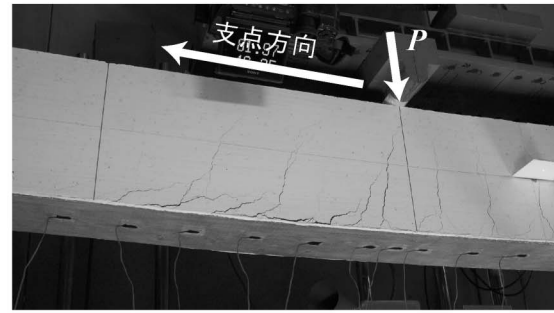
断される。なお、S-1 試験体が剥離前にシート破断に至ったのは、R-1 試験体と引張剛性 $E \cdot A$ を対応させるために市販のシートよりも薄いシートで補強したため、ブラスト処理によるコンクリート表面の凹凸や曲げひび割れの影響をより顕著に受けたためと考えられる。

3.2 ひずみ分布性状

図－４には、各試験体の AFRP ロッドおよびシートのひずみ分布に関する実験および計算結果の比較図を荷重レベル毎に示している。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。

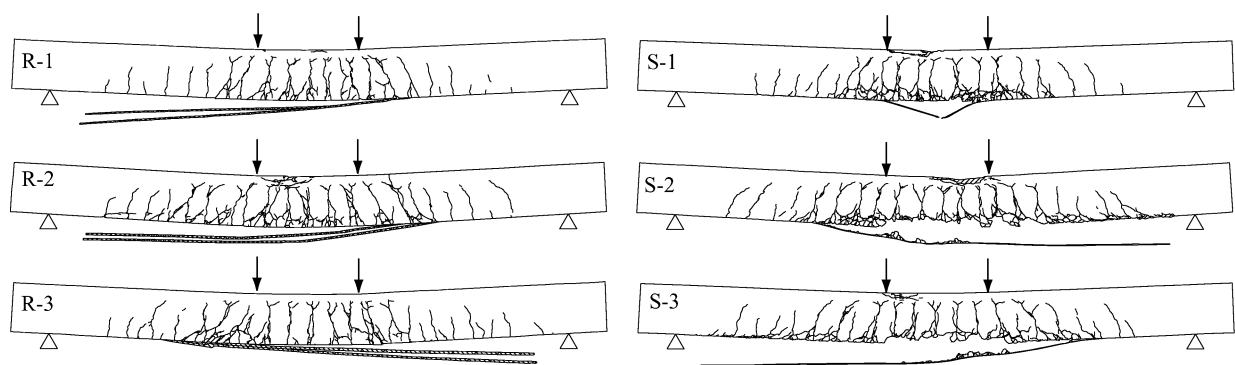


(a) R-3 試験体



(b) S-3 試験体

写真-1 ロッドおよびシート剥離時のひび割れ進展状況（R/S-3 試験体）



(a) R 試験体

(b) S 試験体

図-5 ひび割れ分布性状

図より、各試験体ともに主鉄筋降伏時には実験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、等曲げ区間では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、等せん断力区間の大ひずみ発生領域が主鉄筋降伏領域の拡大ととも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の場合と異なり、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。写真-1には、R/S-3 試験体におけるロッドおよびシート剥離時のひび割れ進展状況を示している。写真より、ロッド補強およびシート補強した場合、ともに梁下縁かぶり部にコンクリートブロックが形成され、ロッドおよびシートを下方に押し出していることがわかる。

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

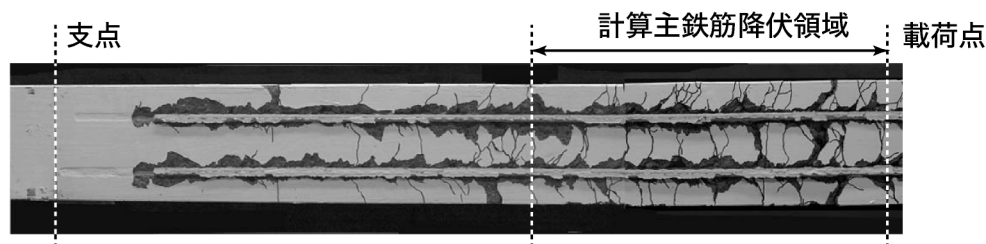


写真-2 R-2 試験体の実験終了時における底面の状況（左側せん断スパン）

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 梁の破壊形式の予測式を適用可能であることから類推される。

3.3 破壊性状

図-5 には、実験終了後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 試験体の場合に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が剥落する等の損傷は見られない。

写真-2 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法を提案し、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、提案の補強法に関する妥当性の検討を行った。本研究で得られた知見を整理すると、

- 1) 引張剛性 $E \cdot A$ 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、著者らが先に提案している FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式の予測式が適用可能である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：平成 5 年度版道路橋示方書・同解説
- 2) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー 101，2000
- 3) 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. 47-64，2001.8
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002