

論文 AFRP ロッド下面埋設 RC 梁の耐荷性状に及ぼすロッド本数の影響

鈴木 健太郎*¹・三上 浩*²・岸 徳光*³・田村 富雄*⁴

要旨：本研究では、AFRP ロッドの下面埋設による RC 梁の曲げ耐力向上法に関する補強設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的に、曲げ補強用 AFRP ロッドの引張剛性を同程度とし補強本数を変化させた RC 梁の静載荷実験を実施した。その結果、1) いずれの試験体も載荷点近傍下縁かぶりコンクリートのピーリング作用によりロッドが剥離し終局に至ること、2) ロッド径が大きい場合には、ロッドの曲げ剛性が大きくなるためと、コンクリートとの付着面積が減少することにより、ピーリングによる剥離が早期に生じる傾向にあること、等が明らかとなった。

キーワード：RC 梁、アラミド繊維製ロッド、曲げ補強、ピーリング作用

1. はじめに

平成 5 年度版道路橋示方書¹⁾より規定された新活荷重の対応策や劣化部補強及び耐震補強対策として、鋼板接着やコンクリート増し厚工法の他、連続繊維シート (FRP シート) 接着工法による鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工事が盛んに行われている。そのため、FRP シートを用いた合理的な補強法の確立のための研究が諸研究機関において実施されている。著者らも FRP シートを用いた補強法に関する実験的・解析的研究を継続的に実施している。その結果、1) FRP シート曲げ補強 RC 梁は、鉛直荷重載荷によって曲げとせん断が作用する場合には、載荷点近傍における下縁かぶり部に曲げと斜めひび割れが交叉することにより小さなコンクリートブロックが形成され、そのブロックが下方に押し出されることによるピーリング作用によってシートが剥離し終局に至ること、2) 設計的な視点から分類した RC 梁の破壊形式には、断面分割法による計算結果の終局耐力、変位を超えた後に終局に至る曲げ圧壊型と、計算終局耐力や変形量に到達する前に終局に至る剥離破

壊型があり、それらの予測も破壊形式予測法により可能であること²⁾、等を明らかにしている。

しかしながら、RC 版等の面部材をシート補強する場合には、シートで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となり、構造物内部に滞水して耐疲労性能が低下すること、等の問題点が指摘されている。

このような FRP シートを用いる場合の欠点を改善できる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、連続繊維を組紐状に編み込み、樹脂を含浸硬化させたロッド (以後、FRP ロッド) を RC 部材の下縁かぶりコンクリート部に埋設する工法を提案し実験を行った³⁾。本研究では、FRP ロッド埋設による RC 梁の曲げ耐力向上法に関する補強設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的に、RC 梁を対象としてロッドの全軸剛性を等しくした条件下で RC 梁の補強筋量や AFRP ロッド本数が曲げ耐荷性状に及ぼす影響について検討を行うための静載荷実験を実施した。

*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 修(工) (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*4 ファイベックス(株) 代表取締役 博(工) (正会員)

表-1 試験体の一覧

試験体名	主鉄筋	補強材料	補強本数	引張剛性 $E \cdot A$ (MN)
A-5	D13	RA5	4本	78.5
A-7		RA7	2本	83.7
A-11		RA11	1本	84.9
B-5	D19	RA5	4本	78.5
B-7		RA7	2本	83.7
B-11		RA11	1本	84.9

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	41.8			
RA11	10.4	84.9			

2. 試験体の概要

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、主鉄筋比を2種類、ロッド径を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、下端主鉄筋の種類(A梁; D13, B梁; D19)を示し、第二項目にはAFRPロッドの直径を示している。本実験では、ロッドの全引張剛性 $E \cdot A$ を極力等しくなるように、A/B-5で4本、A/B-7で2本、A/B-11で1本のロッドを埋設している。なお、FRPシート補強した場合の破壊形式予測法²⁾を適用すると、A梁では剥離破壊型、B梁では曲げ圧壊型を示すことが予想される。表-2には、本実験に使用したAFRPロッドの材料特性値の一覧を示している。

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、いずれも断面寸法(梁幅×梁高)15×25cm、純スパン長2.6mである。軸方向鉄筋に関しては、A梁の場合には梁がロッドを埋設する前の状態で曲げ引張破壊型となるように上端、下端にそれぞれD19, D13を2本ずつ配置した。また、B梁の場合には曲げ圧縮破壊型となるように上端、

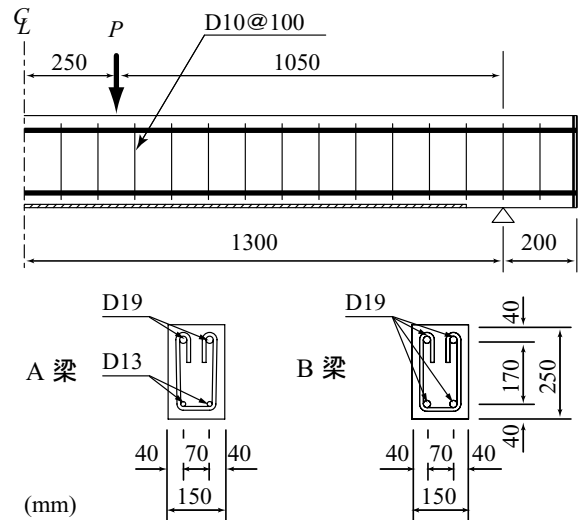


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

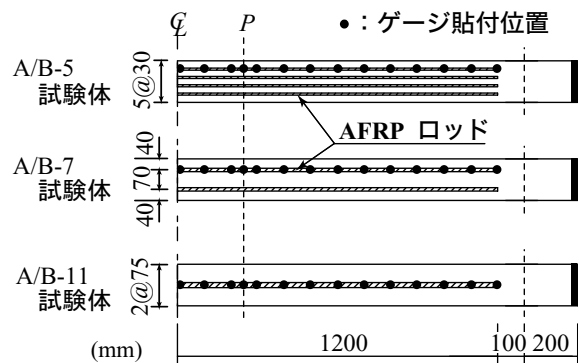


図-2 AFRPロッドの埋設状況

下端ともにD19を2本ずつ配置している。

図-2には、AFRPロッドの埋設状況を示している。各試験体の底面にはロッド埋設位置にロッド径を多少上回る幅および深さの溝を切削し、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ロッド本数が4本の場合は梁幅を等間隔に分割する位置、2本の場合は主鉄筋と同様の位置、1本の場合は梁幅の中央位置としている。また、梁軸方向の補強範囲は梁中央部から両支点の10cm手前までとしている。なお、曲げ補強ロッド上には、検長10mmのひずみゲージをスパン中央部から両支点側に10cm間隔および載荷点直下に貼り付けている。

実験時のコンクリートは材齢が106日、平均圧縮強度は $f'_c = 31.6$ MPaであった。また、主鉄筋の降伏強度はD13, D19でそれぞれ377, 383

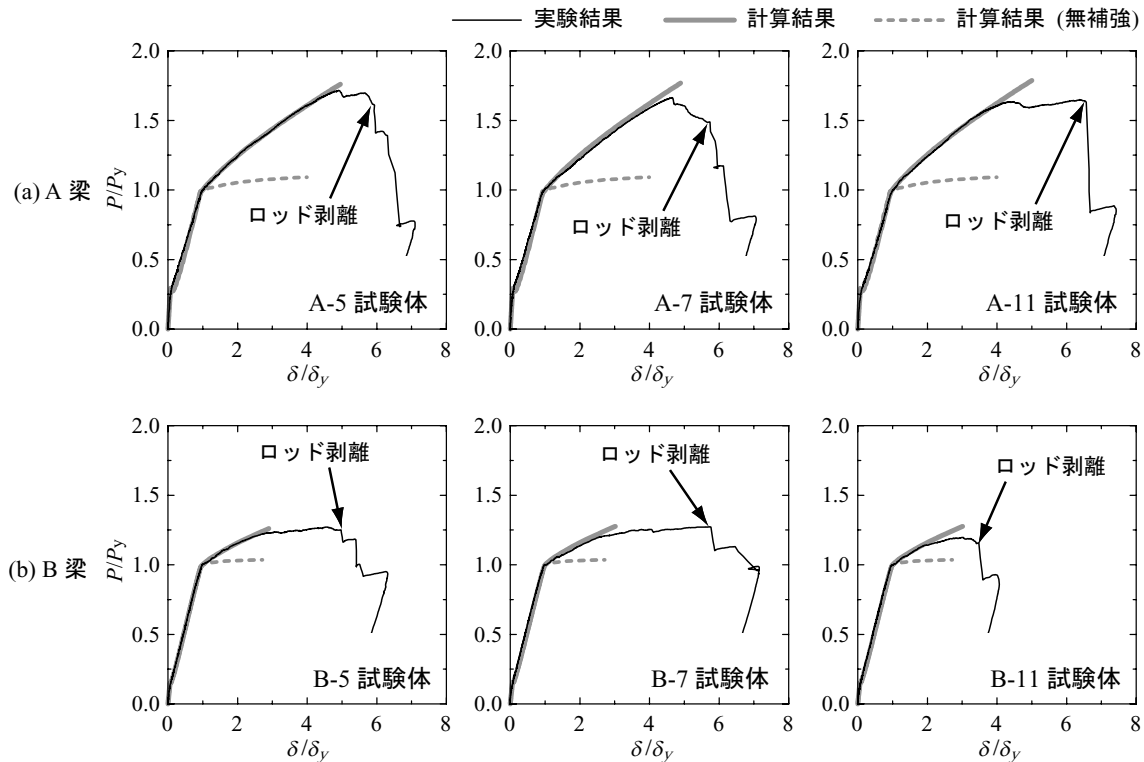


図-3 無次元荷重-変位曲線に関する実験および計算結果の比較図

MPaであった。なお、本実験における測定項目は、載荷荷重、スパン中央変位(以後、単に変位)およびAFRPロッドのひずみである。

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、各試験体の無次元荷重-変位曲線に関する実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は既往の研究²⁾と同様に、AFRPロッドとコンクリートの完全付着を仮定し、上縁コンクリートひずみが $3,500\mu$ 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。なお、図中の実験および計算結果は、各試験体の主鉄筋降伏後におけるAFRPロッドの曲げ補強効果を同一の尺度で比較検討するため、各々の降伏荷重 P_{ye} 、 P_{yc} 、および降伏変位 δ_{ye} 、 δ_{yc} で除し、無次元化して整理している。表-3には、参考のため各試験体の降伏荷重、降伏変位、無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位の実験および計算結果に関する一覧を示している。

図-3(a)より、A梁の実験結果はいずれの試験体も計算終局時の荷重および変位に到達す

る前にロッドが剥離して終局に至っていることより、剥離破壊型の性状を示していることが分かる。

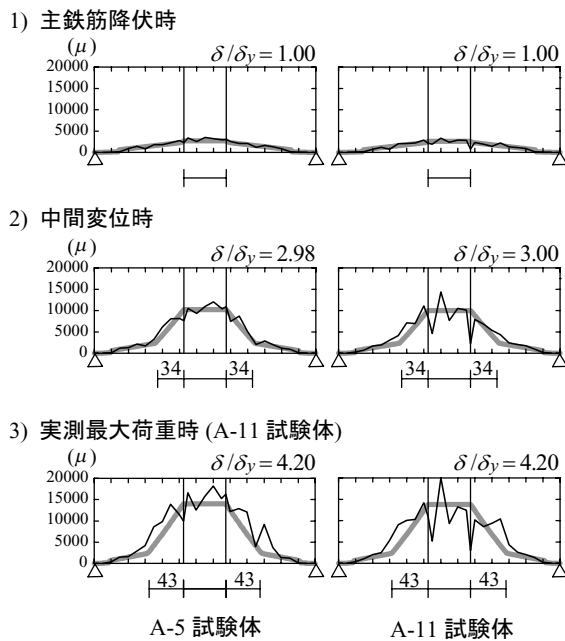
図-3(b)より、B梁の実験結果はB-11試験体を除き計算結果と同様の性状を示し、計算終局変位到達後に計算耐力と同程度の荷重レベルでロッドが剥離して終局に至っている。このことより、B-5/7試験体は曲げ圧壊型の性状を示していることが分かる。一方、B-11試験体の場合には、無次元変位が2.0程度までは計算結果と同様の性状を示し、その後剛性勾配が低下して計算終局変位到達後に計算結果よりも若干低い荷重レベルで終局に至っている。

表-3より、無次元最大荷重時変位に着目すると、計算結果はいずれの試験体も補強本数にかかわらずほぼ一定の値を示しているものの、実験結果はA梁ではロッド径の増大とともに減少傾向が見られ、B梁でもロッド径の最も大きいB-11試験体で最も小さな値を示している。これらは、ロッド径が大きい場合にはロッドの曲げ剛性が大きくなるためと、コンクリートとの全付着面積がロッド径が小さい場合に比して

表－3 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		
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値 (i)	計算値 (ii)	(i)/(ii)	実験値 (iii)	計算値 (iv)	(iii)/(iv)
	P_{ye} (kN)	P_{yc} (kN)	δ_{ye} (mm)	δ_{yc} (mm)	P_{ue}/P_{ye}	P_{uc}/P_{yc}		δ_{ue}/δ_{ye}	δ_{uc}/δ_{yc}	
A-5	42.7	39.4	9.4	8.6	1.72	1.76	0.98	4.90	4.96	0.99
A-7	42.2	39.8	9.7	8.7	1.66	1.77	0.94	4.62	4.89	0.94
A-11	41.1	39.3	9.1	8.5	1.65	1.79	0.92	4.20	5.00	0.84
B-5	86.1	80.5	13.2	10.3	1.27	1.26	1.01	4.60	2.92	1.58
B-7	87.0	80.1	13.3	9.9	1.27	1.28	0.99	5.74	3.04	1.89
B-11	83.0	80.0	12.3	9.9	1.22	1.28	0.95	3.20	3.04	1.05

— 実験結果 — 計算結果
 ┆┆┆ 計算主鉄筋降伏領域： L_y (cm)



図－4 AFRP ロッドの軸方向ひずみ分布性状 (A 梁)

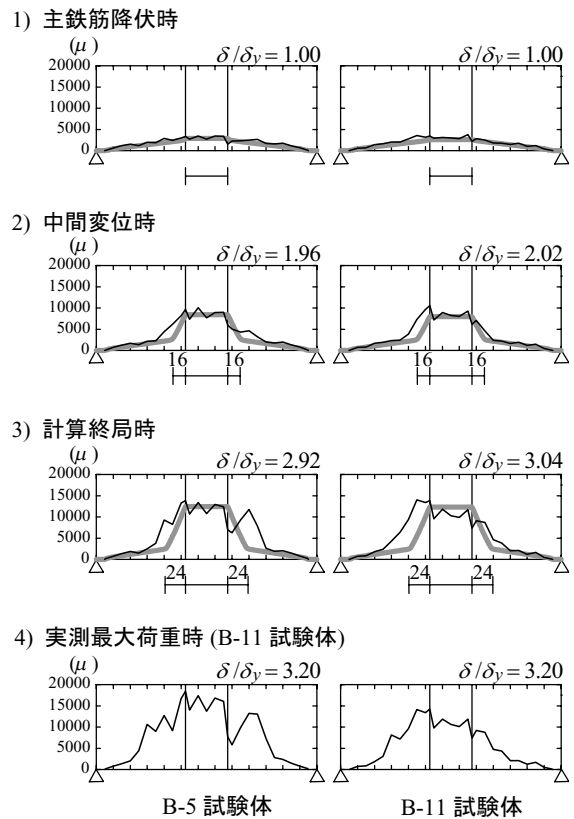
減少することによりピーリング作用による剥離が梁の変形曲率の小さい状態から早期に発生しやすくなるためと推察される。

以上のことから、本実験の範囲内では、引張剛性が同程度でロッドの補強本数を変化させる場合においても、著者らによる FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法²⁾が適用可能であることが明らかとなった。ただし、補強材料の曲げ剛性が特に大きい場合には、剥離が早期に進展しやすいことに留意する必要がある。

3.2 AFRP ロッドの軸方向ひずみ分布性状

図－4 には、A-5/11 試験体の AFRP ロッドのひずみ分布性状を、1) 主鉄筋降伏時、2) 主鉄筋

— 実験結果 — 計算結果
 ┆┆┆ 計算主鉄筋降伏領域： L_y (cm)



図－5 AFRP ロッドの軸方向ひずみ分布性状 (B 梁)

降伏時と計算終局時の中間変位時、3) A-11 試験体の実測最大荷重時と同一変位時について、実験結果と計算結果を比較して示している。図の右上には無次元変位、図の下には、参考のため各時点における計算結果の主鉄筋降伏領域 L_y (cm) を併せて示している。

図より、1) 主鉄筋降伏時には、いずれの実験結果も計算結果のひずみ分布とほぼ対応しており、ロッドが完全付着に近い状態にあることが

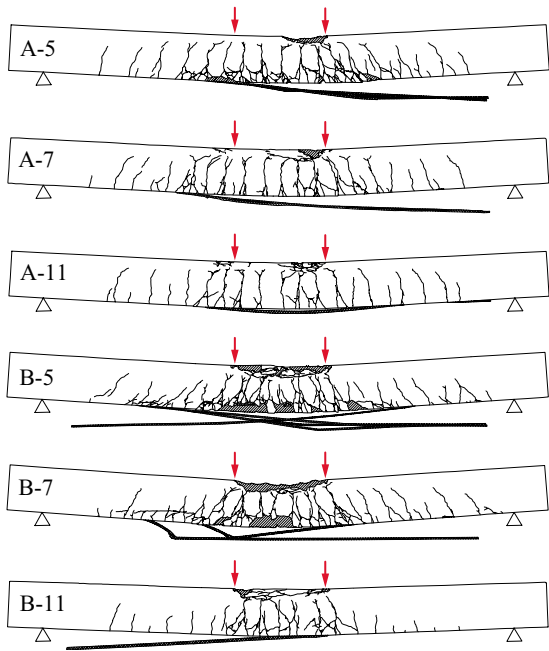


図-6 実験終了後のひび割れ分布性状

分かる。2) 中間変位時では、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分かる。しかしながら、等せん断力区間では、計算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る。これは、既往のシート補強の場合と同様に主鉄筋降伏領域内の下縁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により部分剥離が発生したためと考えられる。また、3) 実測最大荷重時には、大きなひずみ分布範囲が主鉄筋降伏領域の拡大とともに支点側へ進展していることが分かる。また、A-5 試験体の最大荷重時変位が $\delta_{ue} / \delta_{ye} = 4.90$ であることより、A-11 試験体の最大荷重時変位 ($\delta_{ue} / \delta_{ye} = 4.20$) の時点には、A-5 試験体は未だ最大荷重に至っていないことから、ロッド径が大きい場合ほど早期に剥離が進展していることが分かる。これは、全ロッドの $E \cdot A$ はほぼ同等であるものの、ロッド径が大きい場合ほどロッドの接着面積が小さいことや曲げ剛性が大きいことに起因しているものと考えられる。

図-5 には、B-5/11 試験体の AFRP ロッドの

ひずみ分布性状を、1) 主鉄筋降伏時、2) 主鉄筋降伏時と計算終局時の中間変位時、3) 計算終局時、4) B-11 試験体の実測最大荷重時と同一変位時について、実験結果と計算結果を比較して示している。また、図-4 と同様に各時点における無次元変位および計算結果の主鉄筋降伏領域 L_y (cm) を併せて示している。

図より、1) 主鉄筋降伏時では、いずれの実験結果も計算結果のひずみ分布とほぼ対応しており、ロッドがコンクリートと完全付着に近い状態にあることが分かる。2) 中間変位時では、いずれの試験体も等曲げ区間の実験結果は計算結果とほぼ対応しているのに対し、等せん断力区間では、計算主鉄筋降伏領域内における実験結果が計算結果よりも大きく示されていることが分かる。これは、A 梁と同様に下縁かぶりコンクリートのブロック化に起因するピーリング作用によるものと考えられる。3) 計算終局時では、ピーリング作用がより顕在化し、大きなひずみ分布範囲は計算主鉄筋降伏領域の拡大とともに支点側へ進展していることが分かる。その後、4) B-11 試験体の実測最大荷重時には、変位の増加とともに部分剥離がより支点側に進展している。また、ロッドのひずみレベルはロッド径の大きい場合で小さく示されている。これは、B-11 試験体はロッドの剛性が大きいため、ロッドの部分剥離が曲率の小さい状態で発生することにより、部分剥離領域が拡大したことによるものと考えられる。また、部分剥離領域が広いほどひずみの均等化が促進されるため、径が小さい場合よりもひずみ値が小さく示されたものと考えられる。

3.3 破壊性状

図-6 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、いずれの試験体においても載荷点近傍の下縁かぶり部において、既往のシート補強の場合と同様に曲げおよび斜めひび割れの交叉によって、コンクリートブロックが形成されていることが分かる。これは、いずれの試験体もピーリング作用

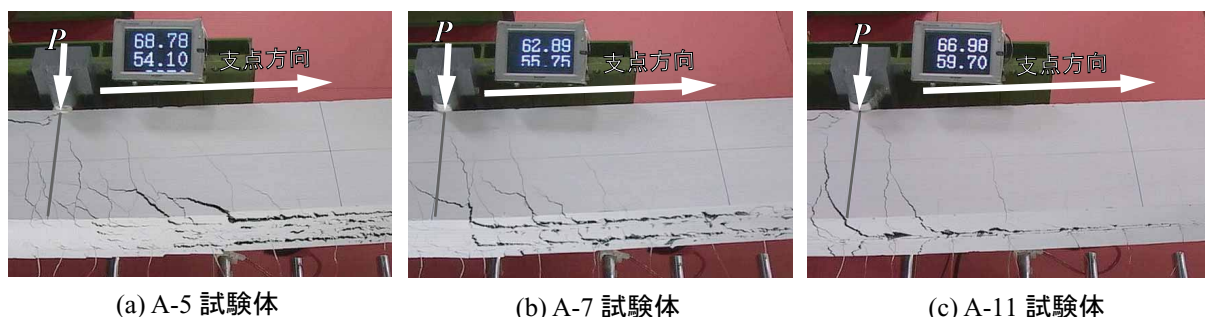


写真-1 ロッド剥離時におけるひび割れ進展状況 (A 梁)

によりロッドが剥離に至ったことを示している。また、ひび割れ分布性状を見ると、破壊形式にかかわらずロッドの補強本数が多い場合(ロッド径が小さい場合)ほど細かいひび割れが広範囲に分散して発生している。これは、ロッド本数が多いほどコンクリートとの接着面積が大きく付着性に優れ、ロッドが補強材として有効に機能しているためと考えられる。

写真-1には、上縁コンクリート圧壊前にロッドが剥離した A 梁に関する剥離直前のひび割れ進展状況を示している。写真より、ロッド本数が少ない場合ほど、荷重点に近い位置でコンクリートブロックが形成され、ピーリング作用による部分剥離が生じていることが分かる。これは、ロッド径が大きい場合ほど、曲率の小さい状態で部分剥離が発生することと対応している。

また、梁底面のひび割れ性状を見ると、ロッド周辺のコンクリートのみが引き剥がされており、ロッド本数が少ないほど付着性が乏しくなっていることが分かる。このことより、ロッド本数が少ないほど剥離に対する抵抗面積が小さく付着特性が乏しくなるため、かぶりコンクリート部を有効に活用できないことが分かる。

4. まとめ

本研究では、AFRP ロッドの下面埋設による RC 梁の曲げ耐力向上法による補強設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的に、補強ロッドの引張剛性を同程度とし補強本数を変化させた場合に関する RC 梁の静載荷実験を実

施した。また、著者らが既に提案した FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法²⁾の適用性に関する検討も行った。本実験より得られた知見は、以下の通りである。

- 1) ロッドを下面に埋設して曲げ補強した RC 梁の場合においても、等せん断力区間の荷重点近傍かぶり部のピーリング作用によってロッドが剥離し終局に至ることが確認された。
- 2) ロッド径が大きい場合ほど、ロッドの曲げ剛性が大きくコンクリートとの付着面積が小さくなることより、梁の曲率の増大に追随できずにピーリング作用による剥離が早期に発生する傾向にある。
- 3) 本実験の範囲内では、ロッドの補強本数が異なる場合においても著者らによる FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法²⁾が適用可能である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善株式会社，1994.2
- 2) 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
- 3) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介，田村富雄：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，コンクリート工学年次論文集，vol.25, No.2, pp1783-1788, 2003