

論文 FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動に及ぼす補強筋の剛性の影響

岸 徳光*1・三上 浩*2・田村 富雄*3・栗橋 祐介*4

要旨: 本研究では、FRP シートで曲げ補強した RC 梁の合理的な曲げ補強設計法を確立するための基礎資料の収集を目的に、曲げ補強シートの剥離性状に与える主筋降伏の影響について実験的に検討を行った。検討は、主筋に鉄筋の他、降伏強度の高い PC 鋼棒および降伏点の無い AFRP ロッドを用いた RC 梁に曲げ補強シートを接着して静的 4 点曲げ載荷実験により行った。検討の結果、曲げ補強シートのピーリング作用に伴う剥離には主筋降伏の有無が大きな影響を与えることが明らかになった。

キーワード: RC 梁, FRP シート, 曲げ補強, 主筋降伏領域, ピーリング作用

1. はじめに

既往の研究¹⁾より、RC 梁の底面にシートを接着して曲げ補強する場合、曲げ補強シートの剥離は、1) 計算終局時における主筋降伏領域内の下縁かぶりコンクリートに斜めひび割れが発生し、2) その斜めひび割れ先端部がせん断ずれによって下方に押し出されるピーリング作用により部分剥離が顕在化し、3) その部分剥離がシート接着端部まで進展して全面剥離に至ること、等が明らかになっている。そのため、シートの剥離には主筋の降伏が大きな影響を与えているものと考えられる。そこで、本研究では、シートの剥離に与える主筋降伏の影響を検討するために、下端の補強筋(以後、単に主筋)に降伏強度の高い PC 鋼棒や、降伏点の無いアラミド繊維製ロッド(以後、AFRP ロッド)を用いた場合の RC 梁の静的 4 点曲げ載荷実験を実施した。

2. 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体の主筋は、径の異なる鉄筋 2 種類、降伏強度の高い PC 鋼棒および降伏点の無い AFRP ロッドの 4 種類である。試験体数は、主筋 4 種類に対してそれぞれシート補強層

数を 0~2 層の 3 種類とした全 12 体である。表中、試験体名の第一項目は主筋の種類を示しており、RC が鉄筋 (RC1 : D16, RC2 : D19), PC が PC 鋼棒, ARC が AFRP ロッドを示している。第二項目はシート補強の有無と補強層数を示しており、N は無補強, S はシート補強試験体を示している。また、S に付随する数値はシートの補強層数を示している。なお、各試験体の断面

表-1 試験体の一覧

試験体名	主筋材料	シート補強層数 (層)	主筋の伸び剛性 $E \cdot A$ (kN)
RC1-N	鉄筋 (D16)	-	81.8
RC1-S1		1	
RC1-S2		2	
RC2-N	鉄筋 (D19)	-	118.0
RC2-S1		1	
RC2-S2		2	
PC-N	PC 鋼棒	-	39.2
PC-S1		1	
PC-S2		2	
ARC-N	AFRP ロッド	-	20.2
ARC-S1		1	
ARC-S2		2	

*1 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)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*3 ファイベックス(株) 代表取締役 博(工) (正会員)

*4 北海道開発土木研究所 構造部 材料研究室 研究員 博(工) (正会員)

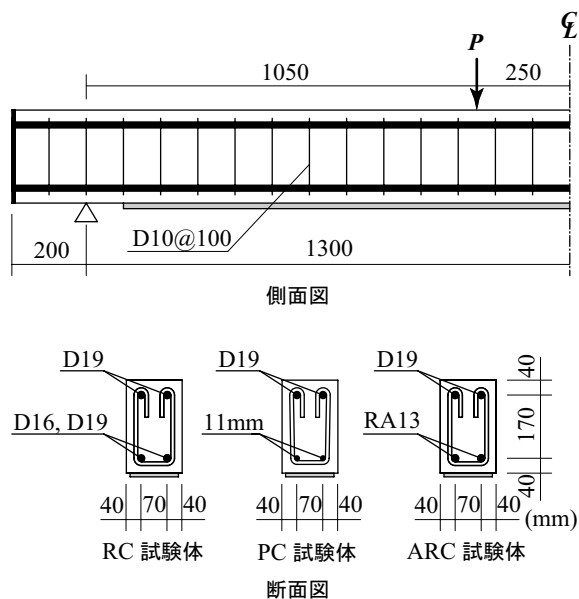


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

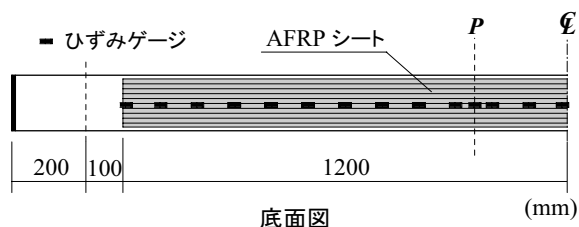


図-2 補強概要

設計は、シート補強後の計算曲げ耐力（後述の表-3を参照）がRC1, PC, ARC間で類似の値になるように行っている。また、RC2試験体はRC1試験体との比較のために用意した。表中には、主筋の伸び剛性 $E \cdot A$ も併せて示している。

図-1には、本実験に用いた試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体はいずれも梁幅×梁高が15×25cm、純スパン長が2.6mである。軸方向筋は、上端にはD19を2本配置し、下端には表-1に示す主筋を芯かぶり40mmの位置に2本ずつ配置している。

なお、主筋の端部は、鉄筋の場合には端部鋼板に溶接、PC鋼棒の場合には端部をねじ切りしてナット締めした。また、AFRPロッドの場合には、外径26mm、長さ20cmの鋼製定着管を作製し管内にロッドを挿入した後隙間をエポキシ樹脂で充填固定し、それを端部鋼板に溶接して定着を確保することとした。

表-2 主筋の材料特性値一覧

主筋材料	呼び名	断面積 A (mm ²)	弾性係数 E (GPa)	降伏強度 (MPa)
鉄筋	D16	198.6	206	379
	D19	286.5		394
PC鋼棒	11mm	95.0	204	1365
AFRP ロッド	RA13	147.0	68.6	1372*

*: 破断強度

図-2には、シートの補強概要を示している。曲げ補強シートには、アラミド繊維製のFRPシート（以後、AFRPシート：目付量；415g/m²、シート厚；0.286mm、弾性係数；118GPa、引張強度；2.06GPa）を用い、1層もしくは2層接着している。補強範囲は、梁幅方向に130mm、梁軸方向には梁中央部より両支点の100mm手前までとした。なお、シート上には梁中央より100mm間隔および載荷点直下にひずみゲージを貼付し、梁軸方向のひずみを測定している。

表-2には、本実験に用いた主筋の材料特性値を一覧にして示している。また、実験時のコンクリートの圧縮強度は $f_c = 26.1$ MPaであった。

なお、断面分割法に基づいた数値計算に用いる材料構成則に関しては、コンクリート、鉄筋、PC鋼棒第1号に関する材料構成則はコンクリート標準示方書²⁾に準拠して決定している。また、AFRPロッドに関しては、軸方向応力が破断ひずみまで線形に増加するものとし、破断ひずみに達した段階で零応力にカットオフされるものと仮定している。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-3には、本実験より得られた各試験体の荷重-スパン中央点変位（以下、単に変位）関係を計算結果と比較して示している。計算結果は、平面保持を仮定した断面分割法により、上縁コンクリートの圧壊(0.35%)までシートはコ

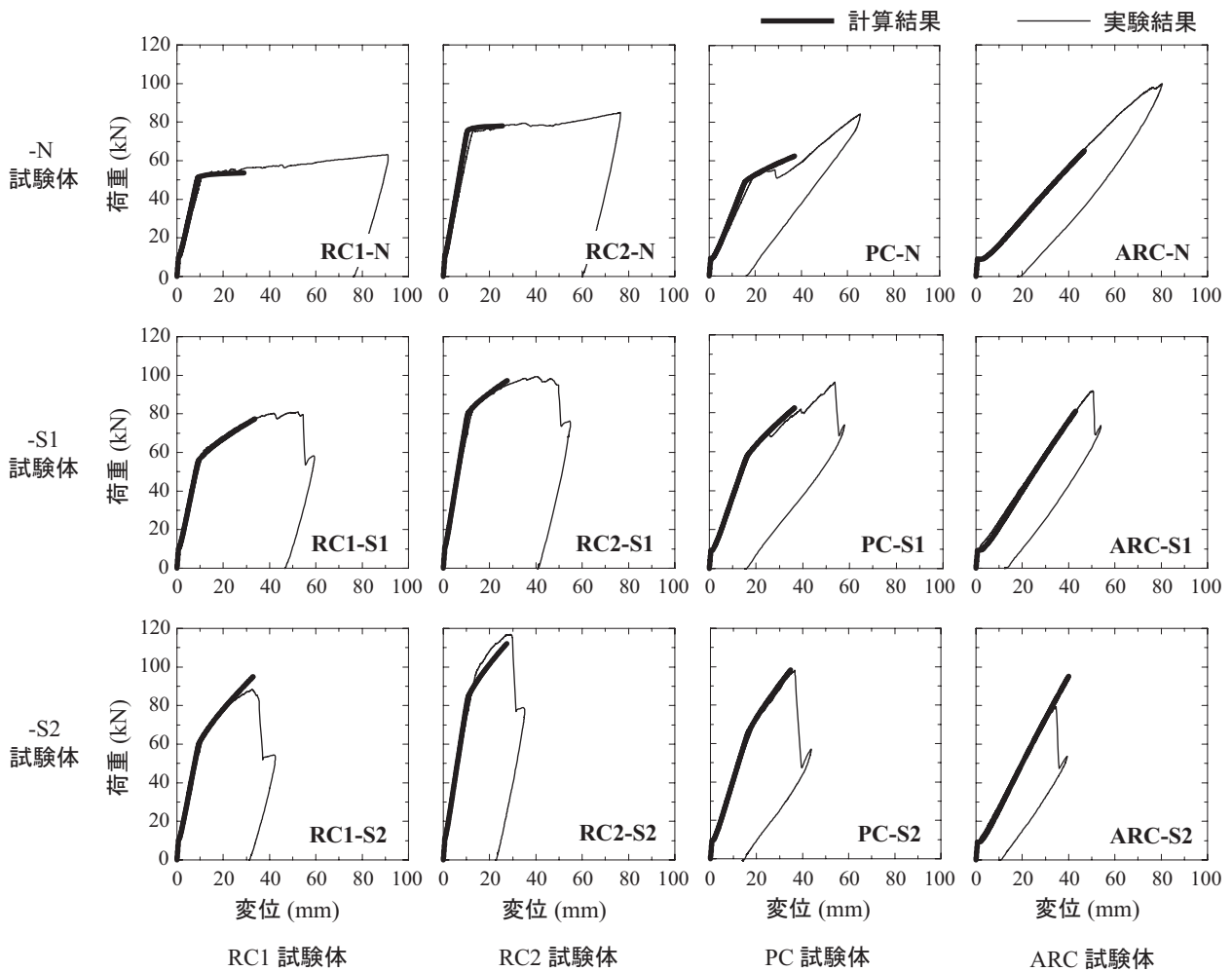


図-3 荷重-変位関係

ンクリートと完全付着の状態にあるものとして算出している。なお、表-3には図-3より得られた実験および計算結果の主筋降伏時の荷重 P_{ye} , P_{yc} , 変位 δ_{ye} , δ_{yc} および最大荷重時の荷重 P_{ue} , P_{uc} , 変位 δ_{ue} , δ_{uc} を一覧にして示している。

無補強の -N 試験体の計算結果から、主筋種類にかかわらず 10 kN 程度で曲げひび割れの開口に伴って剛性勾配が低下していることが分かる。その後、RC1/RC2/PC-N 試験体では、計算上の終局であるコンクリート圧壊前に剛性勾配が大きく変化しており、主筋が降伏していることが確認できる。一方、AFRP ロッドを用いた ARC-N 試験体の計算結果は、曲げひび割れの発生に伴う剛性勾配の低下後、計算終局時までほぼ線形に荷重および変位が増加している。これは、AFRP ロッドには降伏点無く破断するま

で線形に変形するためであると推察される。なお、本試験体の場合には上縁コンクリート圧壊時までロッドの破断は生じていない。

-N 試験体の実験結果より、いずれの試験体も計算終局時まで両者が良く対応していることが分かる。なお、PC-N 試験体では載荷途中で荷重の低下が認められるものの、その後荷重および変位が再度増加傾向にあることから、この荷重低下は丸鋼である PC 鋼棒とコンクリートとの付着が部分的に切れたことによるものと推察される。

次に、シート補強した RC1/RC2/PC-S1/S2 試験体の計算結果から、主筋降伏時の荷重および変位がシート補強層数の増加とともに増大する傾向にあることが分かる。また、主筋降伏後の

表-3 実験および計算結果一覧

試験体名	実験結果				計算結果			
	主筋降伏時		最大荷重時		主筋降伏時		最大荷重時	
	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位
	P_{ye} (kN)	δ_{ye} (mm)	P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)	P_{yc} (kN)	δ_{yc} (mm)	P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)
RC1-N	52.6	11.2	63.4	91.4	51.1	9.0	53.7	29.0
RC1-S1	61.1	11.9	81.1	52.3	55.1	9.1	77.4	33.7
RC1-S2	66.7	12.3	88.6	32.6	59.7	9.3	95.0	33.0
RC2-N	74.7	12.5	85.1	76.5	74.5	10.2	78.1	25.6
RC2-S1	83.7	12.9	99.4	40.2	78.9	10.4	97.3	27.7
RC2-S2	97.8	14.4	117.1	28.9	83.5	10.6	112.0	27.4
PC-N	52.2	19.4	84.5	65.6	49.4	15.8	62.4	37.0
PC-S1	60.9	18.4	95.6	53.7	58.2	16.4	82.6	36.5
PC-S2	75.5	20.9	98.3	36.7	67.0	16.5	98.3	34.8
ARC-N	-	-	100.0	80.4	-	-	65.2	46.8
ARC-S1	-	-	90.5	48.9	-	-	81.4	43.0
ARC-S2	-	-	79.4	34.8	-	-	95.2	40.0

剛性勾配および最大荷重も、シート補強層数の増加に伴い増大している。なお、全ての試験体におけるシート補強による最大荷重の増加量は、降伏荷重の増加量よりも大きく示されていることより、シートの補強効果は数値解析的には主として主筋降伏後に発揮されることが分かる。一方、降伏点の無い ARC 試験体の計算結果から、曲げひび割れ発生後の剛性勾配や最大荷重は、シート補強層数に対応して増大する傾向にあることが分かる。

シート補強した試験体に関する実験結果から、主筋の降伏を伴う RC1/RC2/PC 試験体の場合には、計算結果と同様にシート補強層数の増加に伴い降伏荷重および最大荷重が増加する傾向にあることが分かる。しかしながら、主筋が降伏しない ARC 試験体では、シート補強層数の増加に伴って最大荷重が小さくなる傾向にある。

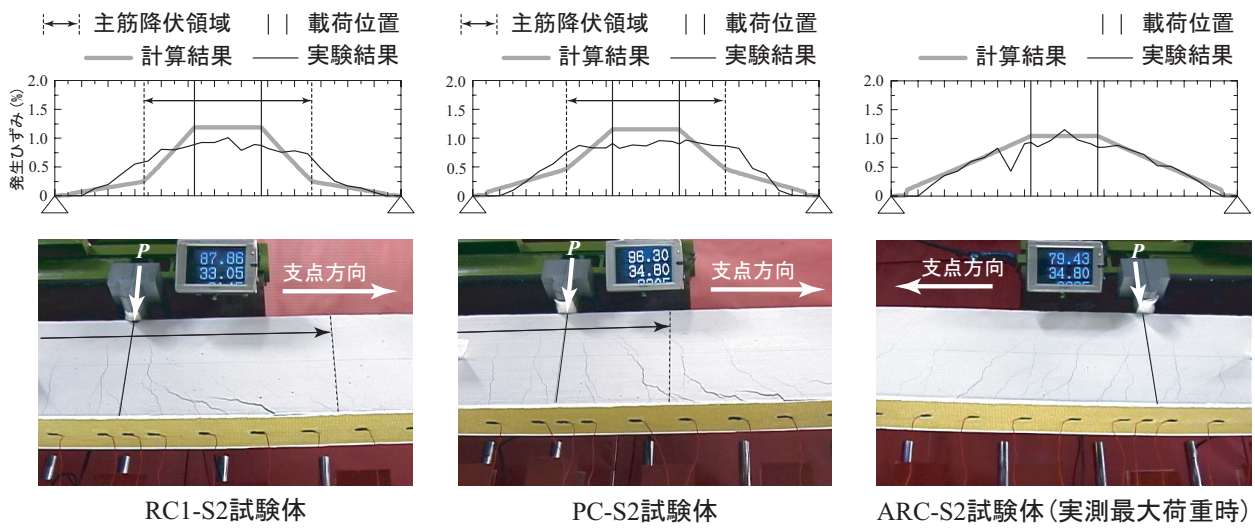
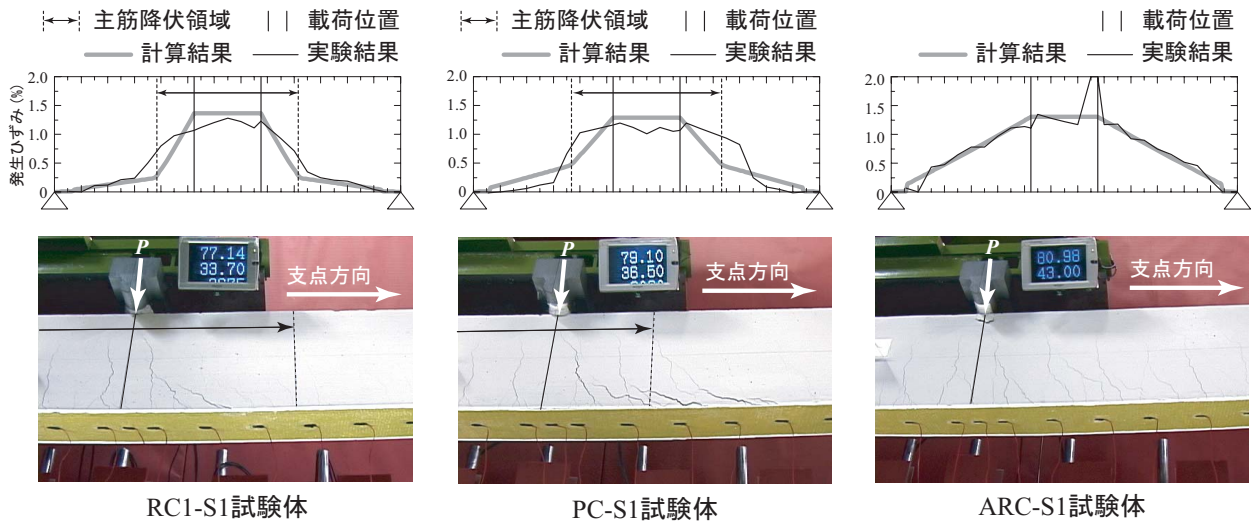
これより、主筋が降伏する場合にはシート補強層数の増加に対応して補強効果が増大するものの、主筋が降伏しない場合には逆効果になる

可能性があることが明らかになった。これは、後述のように、主筋が降伏しない場合には載荷点近傍におけるピーリング作用によるシート剥離が抑制されるものの、シート端部の下縁かぶり部に発生する斜めひび割れと主筋に沿う割れひび割れが連成することにより、早期に下縁かぶりが剥離して終局に至るためと推察される。また、このような現象は補強層数の増加とともに顕在化する傾向にあるものと考えられる。

3.2 シートの剥離性状

図-4には、主筋の違いによるシートの剥離性状を検討するため、RC1/PC/ARC-S1/S2 試験体のシートのひずみ分布性状および載荷点近傍のひび割れ状況を示している。図には計算終局変位に到達していない ARC-S2 試験体の場合のみ実測最大荷重時の結果を示し、その他の試験体に関しては計算終局変位時の結果を示している。

なお、写真には曲げ補強シートの剥離発生側の状況を示している。写真より、RC/PC 試験体の場合にはいずれも載荷点近傍下縁かぶり部の



(a) 鉄筋を使用した試験体 (b) PC鋼棒を使用した試験体 (c) AFRPロッドを使用した試験体

図-4 計算終局時のシートの剥離性状およびシートの軸方向ひずみ分布

ピーリング作用による部分的なシート剥離が確認できる。一方、ARC試験体の場合には、いずれの場合も曲げひび割れが梁全体に分散分布しているものの、荷重点近傍下縁かぶり部におけるシート剥離の傾向は確認できない。

(1) 主筋に鉄筋を使用した場合

図-4(a)に示すRC1-S1/S2試験体のひずみ分布性状から、いずれも等せん断力区間内の主筋降伏領域内に、計算結果よりも大きなひずみが発生していることが確認できる。また、ひび割れ状況から、主筋降伏領域内の下縁かぶりに斜めひび割れの発生および開口が確認できる。このことより、既往の研究結果¹⁾と同様に下縁か

ぶり部に発生した斜めひび割れが要因となり、ピーリング作用が顕在化してシートの全面剥離に至ったものと考えられる。

(2) 主筋にPC鋼棒を使用した場合

図-4(b)のPC-S1/S2試験体のひずみ分布性状より、PC試験体もRC試験体と同様に主筋が降伏し、計算結果よりも大きなひずみが発生していることが分かる。また、その範囲はRC試験体に比べてより広く、等せん断力区間内の主筋降伏領域よりも支点側に拡大していることが分かる。ひび割れ状況からも、主筋降伏領域を超える範囲の下縁かぶり部に斜めひび割れが発生し、曲げ補強シートの部分剥離が確認できる。

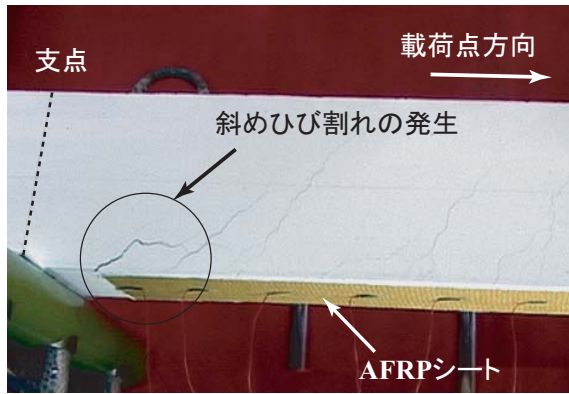


写真-1 シートの剥離性状 (ARC-S2 試験体)

これは、PC 鋼棒が丸鋼であるためコンクリートとの付着力が低下したことによるものと推察される。このことより、降伏強度の高い PC 鋼棒を用いる場合においても、主筋が降伏する場合には載荷点近傍下縁かぶり部に斜めひび割れが発生し、ピーリング作用が顕在化してシートが全面剥離に至ることが明らかになった。

(3) 主筋に AFRP ロッドを使用した場合

図-4(c)の主筋に AFRP ロッドを用いた ARC-S1/S2 試験体のひずみ分布は、主筋が降伏しないために載荷点から支点まで線形分布を示していることが分かる。また、実験結果も計算結果とほぼ対応していることより、曲げ補強シートはこの時点まで完全付着に近い状態にあることが分かる。ひび割れ状況からも、梁下縁全体に曲げひび割れが発生しているものの、斜めひび割れの発生やシート剥離の現象は認められない。このことより、主筋が降伏しない場合には、載荷点近傍下縁かぶり部におけるピーリング作用は発生しないことが明らかになった。

なお、ARC-S2 試験体が計算値に比べて小さな荷重で終局に至ったのは、写真-1 に示すように、曲げ補強シート接着端部に発生した斜めひび割れが大きく開口し、主筋に沿う割裂ひび割れと連成して下縁かぶり部の剥離が載荷点側に進展したためである。なお、この斜めひび割れは ARC-S1/S2 両試験体で同様に見られたが、シートの補強層数が多い ARC-S2 試験体の場合において早期に発生し、下縁かぶり部が全面剥離

に至っている。このようなシート接着端部における斜めひび割れの開口は、シートの補強層数が多いほどより低荷重で生じていることやシート接着端部から支点までが無補強となっていることから、試験体軸方向の曲げ剛性の変化と密接に関連して生じたものと推察される。

4. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離性状に与える主筋降伏の影響を検討するため、主筋に鉄筋、PC 鋼棒および AFRP ロッドを用いた RC 梁の静的 4 点曲げ載荷実験を実施した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると以下の通りである。

- (1) 主筋の種類にかかわらず、主筋が降伏する場合にはシート補強層数の増加に対応して補強効果が発現する。一方、主筋が降伏しない場合には、補強効果が発現する前にシートはかぶりと共に接着端部から剥離する。
- (2) 主筋に降伏強度の高い PC 鋼棒を用いる場合にも、シートの剥離は、下縁かぶり部に発生する斜めひび割れの開口に伴うピーリング作用によって発生する。
- (3) 主筋に降伏点の無い AFRP ロッドを用いる場合には、梁下縁かぶり部に斜めひび割れは発生せず、ピーリング作用によるシート剥離は生じない。しかしながら、シートの補強効果が十分に出現する前にシート接着端部において斜めひび割れが発生・開口し、主筋に沿う割裂ひび割れと連成してシートが全面剥離に至るため、その時点で補強効果は完全に消失する。

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.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書【構造型性能照査編】, 2002.