

補強筋の降伏強度が異なる FRP シート曲げ補強 RC 梁のシート剥離性状

Influence of rebar yield stress on debonding behavior of flexural strengthened RC beams with AFRPs

三井住友建設(株) ○フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設(株) 正会員 藤田 学 (Manabu Fujita)
ファイベックス(株) 正会員 田村 富雄 (Tomio Tamura)

1. はじめに

既往の研究¹⁾より、RC 部材の引張側面にシートを接着する曲げ補強を想定した場合、曲げ補強シートの剥離は、1) 計算終局時における主鉄筋降伏領域 L_{yu} 内の下縁かぶり部に斜めひび割れが発生し、2) そのひび割れが作用せん断力の増加と共に開口してピーリング作用に伴う部分剥離が顕在化し、3) 部分剥離がシート端部まで進展して全面剥離に至る、ことが明らかになっている。そのため、シートの剥離には斜めひび割れが発生する主鉄筋降伏領域 L_{yu} の形成が大きく影響していると考えられる。そこで本研究では、下端の補強筋(以後、単に補強筋)に降伏荷重の大きい PC 鋼棒や、降伏点の無い AFRP ロッドを使用した RC 梁を用いて静載荷実験を実施し、主鉄筋降伏領域の形成がシートの剥離性状に与える影響を検討した。

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。本実験に用いた補強筋は、鉄筋を 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、補強筋 4 種類、曲げ補強量 3 種類の計 12 体である。表中、試験体名の第一項目は補強筋種類を示しており、RC が鉄筋(RC1 : D16, RC2 : D19)、PC が PC 鋼棒、A が AFRP ロッドを示している。第二項目は補強の有無とシートの補強層数を示しており、N は無補強、S は補強試験体を示し、付随する数値は補強層数を示している。なお、表-1 には参考のため、試験体に用いた補強筋の引張剛性 $E \cdot A$ も示している。

図-1 には、本実験に用いた試験体の配筋概要を示している。試験体はいずれも梁幅 $\times$ 梁高が 15×25 cm、純スパン長が 2.6 m である。軸方向筋は、上側には D19 を 2 本

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強筋材料	補強筋の引張剛性 $E \cdot A$ (kN)	補強層数 (層)
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
A-N	AFRP ロッド	20.2	-
A-S1			1
A-S2			2

表-2 材料特性値一覧

補強筋材料	呼び名	断面積 A (mm ²)	弾性係数 E (GPa)	降伏強度 (MPa)	破断強度 (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

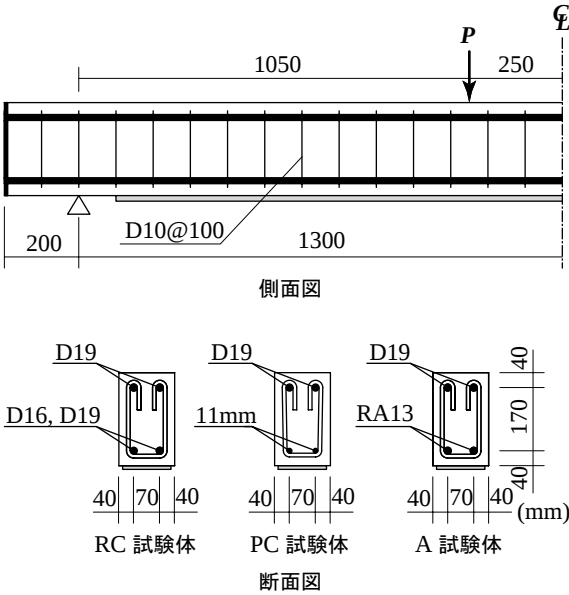


図-1 配筋状況

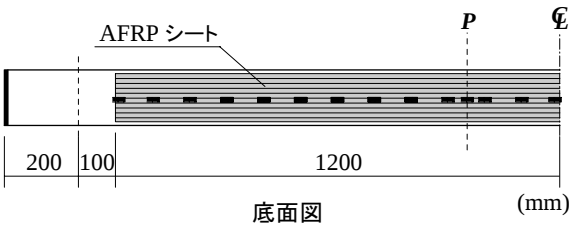


図-2 補強概要

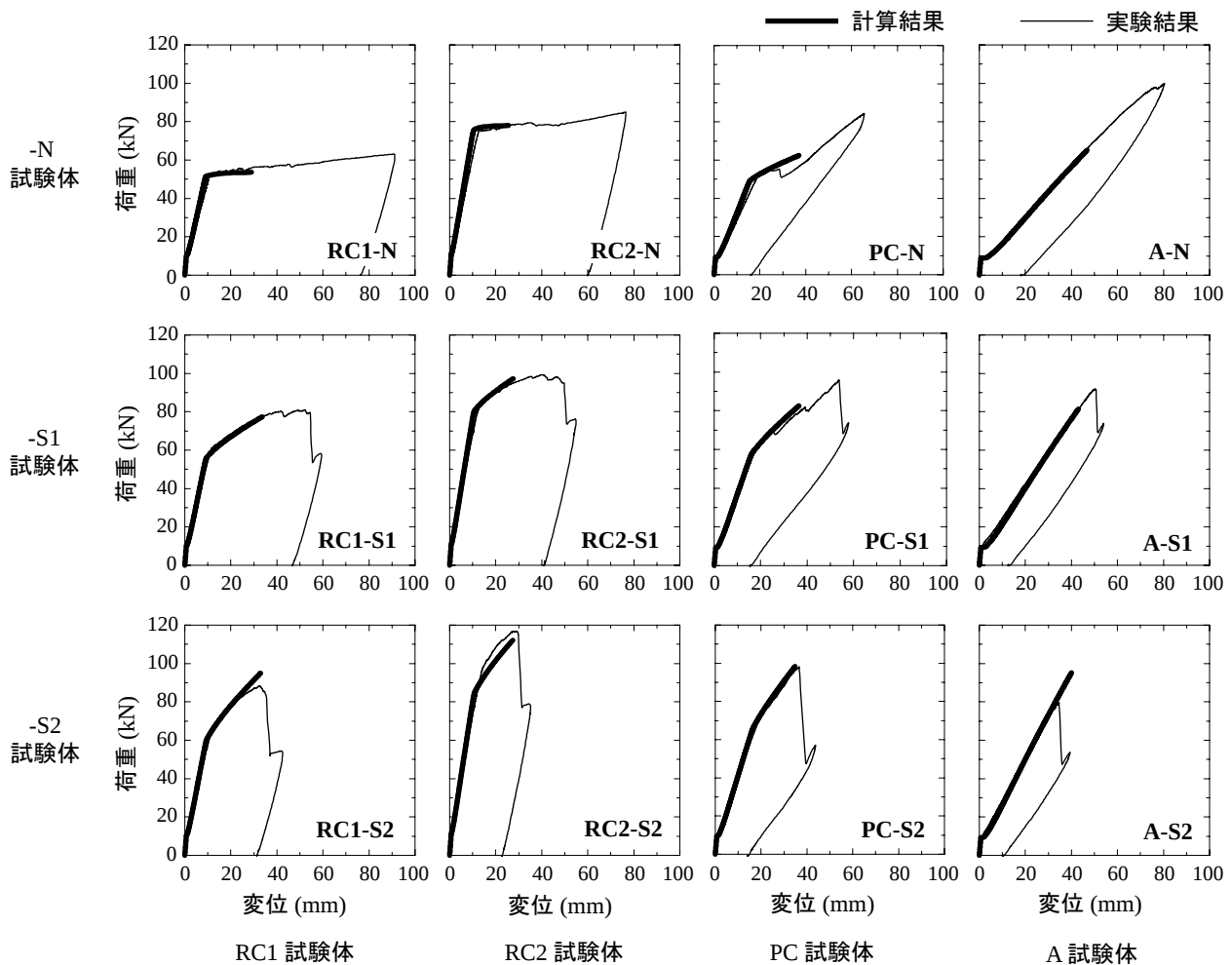


図-3 荷重-変位関係

配置し、下側には表-1に示す補強筋を芯かぶり40 mmの位置に2本ずつ配置している。

図-2には、曲げ補強シートの補強概要図を示している。曲げ補強シートには、AFRPシート(目付量; 415 g/m², シート厚; 0.286 mm, 弾性係数; 118 GPa, 引張強度; 2.06 GPa)を1層もしくは2層用いている。補強範囲は、梁幅方向に130 mm, 梁軸方向には梁中央部より両支点の100 mm手前までとした。

表-2には、本実験に用いた補強筋の材料特性値を一覧にして示している。鉄筋の降伏強度は379, 394 MPa, PC鋼棒の降伏強度は1365 MPaであった。なお、本実験に用いたコンクリートの圧縮強度は26.1 MPaであった。

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-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(3,500 μ)まで完全付着しているものとして算出している。なお、表-3には図-3より得られる実験および計算結果の降伏時の荷重, 変位, および最大荷重時の荷重, 変位を一覧にして示している。

図より、曲げ補強していない-N試験体の計算結果には、

いずれの試験体も10 kN程度において曲げひび割れの開口に伴う勾配の低下が見られる。その後、RC1/RC2/PC-N試験体の場合には、計算上のコンクリート圧壊前において勾配が変化していることから補強筋が降伏していることが分かる。一方、AFRPロッドを補強筋としたA-N試験体では、曲げひび割れに伴う勾配の低下後は、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、補強筋であるAFRPロッドが破断するまで線形に変形するためであり、上縁コンクリート圧壊時まで破断が生じないことを示している。

無補強試験体の実験結果と計算結果を比較すると、いずれも途中まで良く対応していることより、断面分割法の計算仮定がほぼ成立していることが分かる。なお、PC-N試験体では荷重途中で荷重の低下が見られるが、これはPC鋼棒が丸鋼であるため、コンクリートとの付着が部分的に切れたためと考えられる。

曲げ補強した-S1/S2試験体の計算結果に着目すると、RC1/RC2/PC試験体では、表-3からも分かるように、補強筋降伏荷重および変位がシート補強量の増加と共に大きくなる傾向にあり、また、補強筋降伏後の勾配も補強量の増加に従い大きくなる傾向にある。曲げ補強による荷重増分は降伏時よりも最大荷重時の方が大きいことより、シートの補強効果が補強筋降伏後に大きく発揮されることが分

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			
	降伏時		最大荷重時		降伏時		最大荷重時	
	荷重 P_{ye} (kN)	変位 δ_{ye} (mm)	荷重 P_{ue} (kN)	変位 δ_{ue} (mm)	荷重 P_{yc} (kN)	変位 δ_{yc} (mm)	荷重 P_{uc} (kN)	変位 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
A-N	-	-	100.0	80.4	-	-	65.2	46.8
A-S1	-	-	90.5	48.9	-	-	81.4	43.0
A-S2	-	-	79.4	34.8	-	-	95.2	40.0

かる。一方、降伏点の無いA試験体では、曲げひび割れ発生後の第二勾配がシート補強量に対応して顕著に増加していることが分かる。

次に、曲げ補強した試験体の実験結果に着目すると、A試験体を除いて、計算結果と同様に補強層数の増加と共に降伏荷重および最大荷重が大きくなる傾向にあることが分かる。しかしながら、最大荷重時変位は、補強層数の増加と共に減少している。一方、A試験体は、補強量の増加と共に最大荷重および最大荷重時変位が小さくなる傾向にある。

これらのことより、補強筋が降伏する場合には補強量の増加に対応してシート剥離時耐力が増大するものの、降伏しない場合には早期にシート剥離して耐力が小さくなることが明らかになった。また、補強筋にかかわらず、シート補強量が増大すると終局変位は小さくなることが明らかになった。

3.2 シートの剥離性状

図-4には、補強筋の違いによるシートの剥離性状を検討するため、RC1-S1/S2、PC-S1/S2 および A-S1/S2 試験体のシートのひずみ分布性状および梁下縁部のひび割れ進展状況を示している。図には計算終局変位に到達しなかったA-S2試験体のみ実測最大荷重時の結果を示し、その他の試験体は、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側の状況を示している。

(1) 補強筋に鉄筋を使用した場合

図-4(a)には、計算終局変位時のRC1-S1/S2試験体のひずみ分布性状およびひび割れ進展状況を示している。ひずみ分布図から、いずれの試験体も等せん断力区間内の主鉄筋降伏領域 L_{yu} 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される。また、ひび割れ状況より、 L_{yu} 内の下縁かぶり部には斜めひび割れが発生し開口していることが確認できる。このことより、既往の研究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最終的に全面剥離に至ったものと考えられる。

(2) 補強筋にPC鋼棒を使用した場合

図-4(b)には、PC-S1/S2試験体の計算終局変位時の結果を示している。ひずみ分布性状から、シート補強層数にかかわらず計算終局時にはRC試験体と同様にPC鋼棒が降伏し、等せん断力区間内の補強筋降伏領域 L_{yu} で計算結果を越えるひずみが発生していることが分かる。また、ひび割れ進展状況より、補強筋降伏領域内の下縁かぶり部には斜めひび割れの発生・開口および曲げ補強シートの部分剥離が確認できる。このことより、降伏点の高い補強筋を用いた場合においても、補強筋が降伏する場合にはピーリング作用が顕在化してシートの剥離によって終局に至ることが明らかになった。

(3) 補強筋にAFRPロッドを使用した場合

図-4(c)には、補強筋にAFRPロッドを用いたA-S1/S2試験体の状況を示している。なお、図にはA-S1試験体の場合には計算終局変位時、A-S2試験体の場合は実測最大荷重時の結果を示している。ひずみ分布図から、図-4(a)、(b)とは異なり補強筋が降伏しないため、計算のひずみ分布は載荷点から支点まで線形な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から、曲げ補強シートは完全付着に近い状態にあることが分かる。また、ひび割れ状況から、梁下縁全体に曲げひび割れが発生しているものの、下縁かぶり部におけるピーリングの要因となる斜めひび割れの発生は認められない。このことより、補強筋が降伏しない場合には、ピーリング作用は発生しないものと考えられる。

なお、A-S2試験体で早期にシート剥離が発生したのは、写真-1の様に、曲げ補強シート接着端部においてシートの引張りによる斜めひび割れが大きく開口したためである。このひび割れは補強量が多いほど早期に発生する傾向にあり、A-S2試験体では上縁コンクリートの圧壊を想定した計算終局時到達前に全面剥離に至ったものと考えられる。なお、A試験体のシートは、いずれも曲げ補強シート接着面全体が接着端部から引張られ、下縁かぶりコンクリートを伴って剥離している。

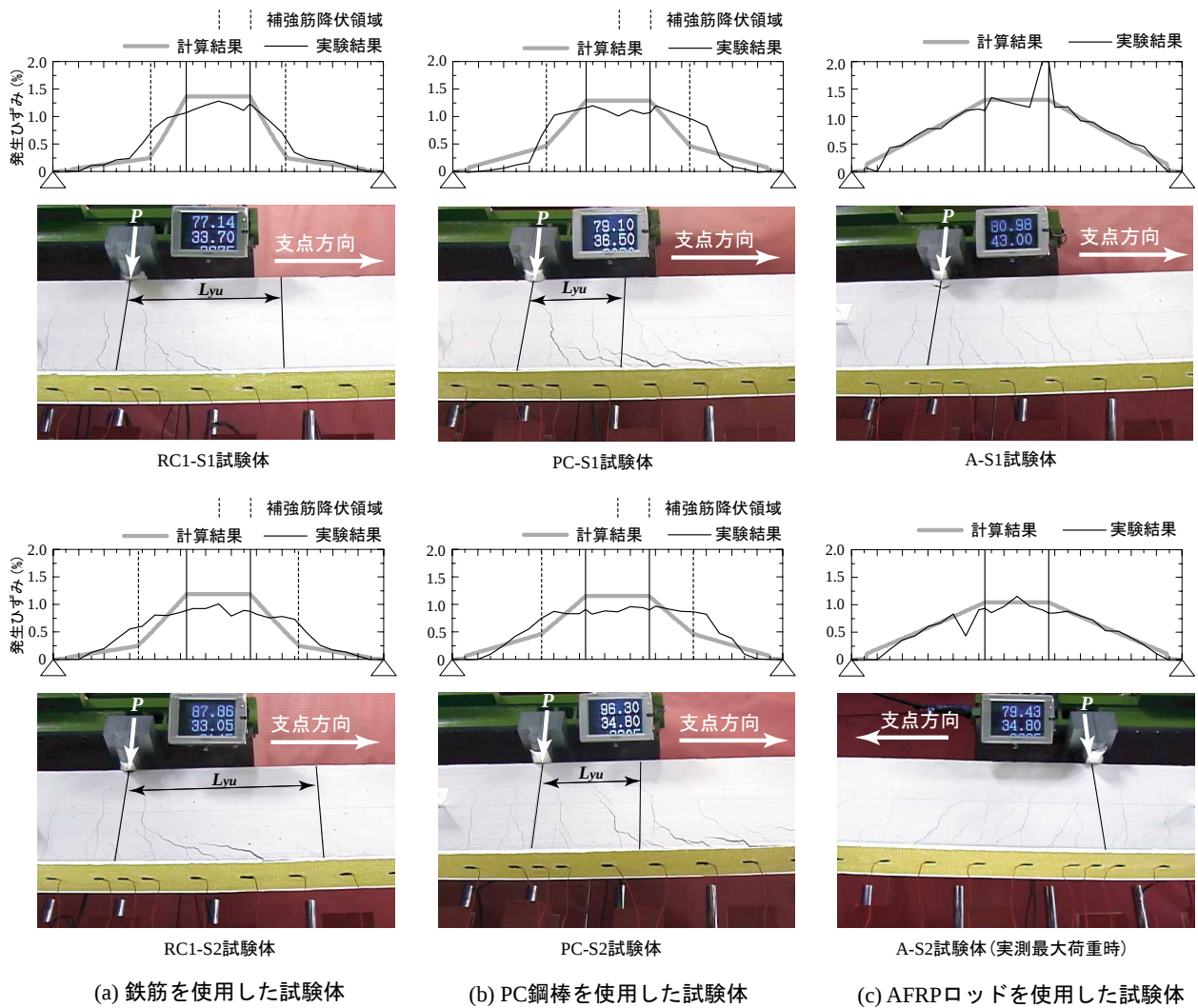


図-4 シートの剥離性状

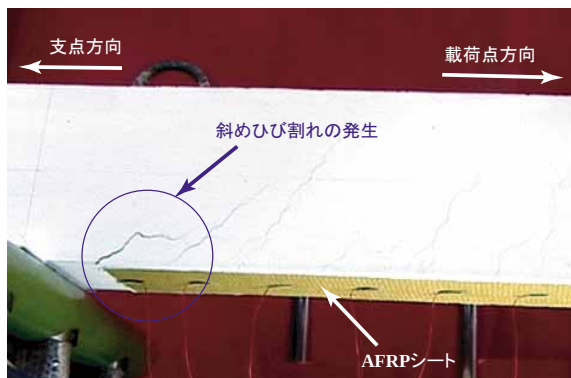


写真-1 シートの剥離性状 (A-S2 試験体)

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及ぼす補強筋の影響を検討するため、補強筋に鉄筋、PC鋼棒およびAFRPロッドを用いたRC梁を用いて静荷重実験を実施した。本研究より得られた結果を整理すると以下の通りである。

- (1) 補強筋の種類にかかわらず、曲げ補強シートの剥離はシート補強量の増大と共により小さな変位量で発生する傾向にある。
- (2) 補強筋が降伏する場合には、シート補強量の増大と共にシート剥離時耐力が増大する傾向にある。しかしながら、補強筋が降伏しない場合には、補強量の増加と共にシート剥離時耐力は小さくなる傾向にある。
- (3) 補強筋に降伏点の高い材料を用いた場合にも、補強筋降伏領域に発生する斜めひび割れの開口によるピーリング作用によってシート剥離に至る。
- (4) 補強筋に降伏点の無い材料を用いた場合には、ピーリング作用は発生せず、シート接着面全体のかぶりコンクリートを伴って接着端部からシート剥離する。

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【構造性能照査編】, 2002.