

断面形状を変化させた AFRP シート曲げ補強 PC 梁の静載荷実験

Static loading test having different cross section PC beams reinforced with AFRP sheet

室蘭工業大学
三井住友建設 (株)
室蘭工業大学
室蘭工業大学 大学院

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
正会員 澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)
○ 学生員 富田 祐輔 (Yusuke Tomita)

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法は連続繊維 (FRP) シートを接着する工法が多く採用されており、種々の機関でも盛んに研究が行われている。著者らも、AFRP シート曲げ補強 RC 梁に関する数多くの研究を実施してきた^{1),2)}。既往の研究成果より、1) AFRP シート補強量が大きいほど耐力は増加するものの、小さな変位で終局に至る傾向にあること、2) AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、コンクリート標準示方書に準拠した断面分割法による計算耐力を満足した後に終局に至る曲げ圧壊型と、計算耐力を満足する前にシート剥離により終局に至る剥離破壊型に分類されること、3) これら2つの破壊形式は、断面分割法によって算出される降伏曲げモーメント M_y と終局曲げモーメント M_u との比によって予測可能であること、を明らかにしている。

また、主鋼材が降伏しにくいプレストレストコンクリート (PC) 梁を対象とした FRP シート接着補強に関する研究も実施し、PC 梁の場合も RC 梁と同様の破壊性状を示し、破壊形式は断面分割法によって算出される曲げひび割れ発生モーメント M_{cr} もしくは PC 鋼より線の1次降伏モーメント M_{y1} と終局曲げモーメント M_u との比によって予測可能と思われることを明らかにしている。しかしながら、FRP シートを用いた PC 梁の補強に関する研究例は未だ少なく、破壊形式予測法は確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、せん断スパン比が大きく比較的曲げ剛性の小さい断面形状の異なる PC 梁を対象に静的4点曲げ載荷実験を実施し、耐荷性状や破壊形式予測式の妥当性に関する検討を行った。

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。試験体数は、2種類の断面形状を有する試験体に対してシート補強量を無補強を含め5種類に変化させた全10体である。曲げ補強シートには保証耐力が392 kN/m (目付量: 280 g/m²) と 588 kN/m (目付量: 415 g/m²) の2種類のアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用い、シートの組み合わせを変えることにより補強量を変化させている。表中、試験体名の第1項目は断面形状を示しており、第2項

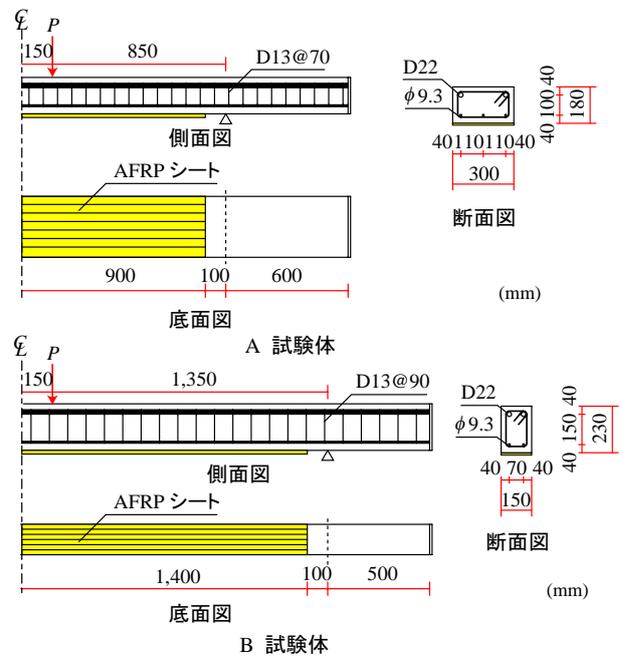


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

表-1 試験体一覧

試験体名	断面寸法	純スパン長 (mm)	せん断スパン比	引張剛性 (MN/m)	シート目付量 (g/m ²)
A-N	梁幅: 300 梁高: 180	2,000	6.1	-	-
A-S280				22.8	280
A-S415				33.7	415
A-S830				67.5	830 (415×2)
A-S1245				101.2	1245 (415×3)
B-N	梁幅: 150 梁高: 230	3,000	7.1	-	-
B-S280				22.8	280
B-S415				33.7	415
B-S830				67.5	830 (415×2)
B-S1245				101.2	1245 (415×3)

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
280	392	0.193	2.06	118	1.75
415	588	0.286			

表-3 鋼材の力学的特性値

鋼材名称	材質	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)	弾性係数 (GPa)
D22	SD345	393	548	206
φ 9.3	SWPR7AL	1,708 *	1,938	192

* 0.2% 永久伸びに対する応力

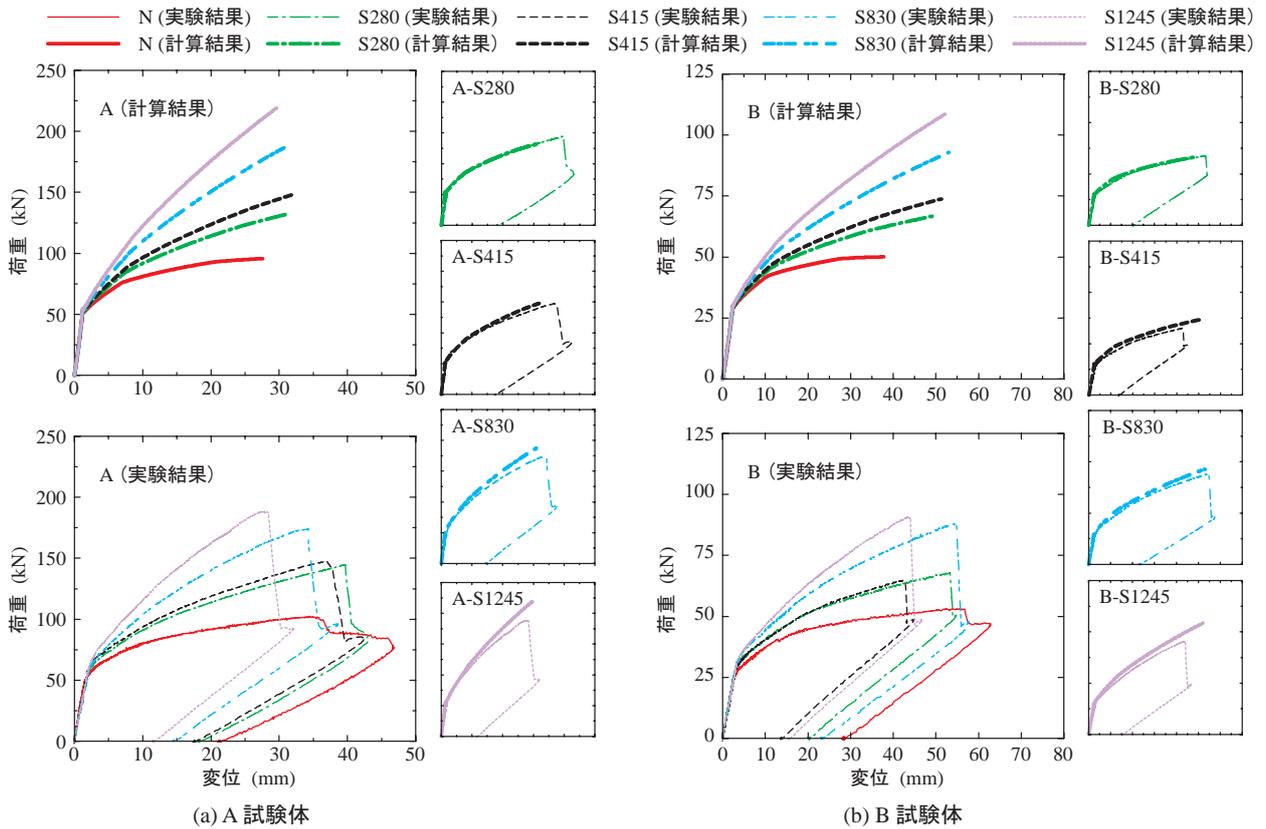


図-2 AFRPシート曲げ補強PC梁の荷重-変位関係

表-4 実験結果および計算結果の一覧

試験体名	計算結果						実験結果				耐力比 P_{ue}/P_{uc}	変位比 δ_{ue}/δ_{uc}	破壊形式 上段：計算 下段：実験
	ひび割れ発生		1次降伏荷重		最大荷重		ひび割れ発生		最大荷重				
	荷重 P_{cc} (kN)	変位 δ_{cc} (mm)	荷重 P_{y1c} (kN)	変位 δ_{y1c} (mm)	荷重 P_{uc} (kN)	変位 δ_{uc} (mm)	荷重 P_{ce} (kN)	変位 δ_{ce} (mm)	荷重 P_{ue} (kN)	変位 δ_{ue} (mm)			
A-N	53.6	1.3	76.1	7.1	95.6	27.6	49.2	2.0	102.4	34.4	-	-	-
A-S280	54.0	1.6	85.0	7.7	132.5	31.4	57.2	1.9	144.7	39.6	1.09	1.26	曲げ圧壊型
A-S415	54.1	1.3	88.9	7.8	147.9	31.8	57.2	1.9	147.6	37.0	1.00	1.16	〃
A-S830	54.6	1.3	101.8	8.3	187.4	31.0	56.8	2.1	173.8	34.0	0.93	1.10	剥離破壊型
A-S1245	55.1	1.4	114.3	8.7	219.2	29.6	58.2	2.0	188.3	27.8	0.86	0.94	〃
B-N	29.9	2.8	42.3	10.6	50.1	37.8	24.1	2.7	53.2	53.9	-	-	-
B-S280	30.0	2.7	45.5	11.3	66.7	49.3	26.7	2.8	67.9	53.1	1.02	1.08	曲げ圧壊型 〃
B-S415	30.1	2.7	47.0	11.5	73.8	51.3	27.9	3.1	65.0	42.8	0.88	0.83	剥離破壊型 シート破断
B-S830	30.0	2.4	51.7	12.3	92.8	53.0	31.3	3.4	87.9	53.4	0.95	1.01	剥離破壊型
B-S1245	30.2	2.5	56.4	12.9	108.5	52.1	31.6	3.4	90.7	43.6	0.84	0.84	〃

目は英文字 (N: 無補強, S: シート補強) にシート目付量 (g/m^2) を付して示している。

図-1 には、本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。試験体の寸法は、A 試験体は梁幅×梁高が 300×180 、純スパン長が $2,000$ mm であり、B 試験体は梁幅×梁高が 150×230 、純スパン長が $3,000$ mm である。また、載荷点間隔はいずれも 300 mm であり、せん断スパン比が $6 \sim 7$ 程度となっている。下端鋼材にはいずれの試験体も $\phi 9.3$ の PC 鋼より線を用い、A 試験体で 3 本、B 試験体で 2 本配置しているため、主鋼材

比が 0.25% 、 0.36% となっている。試験体には、PC 鋼より線の有効緊張力が引張強度 f_u の 60% となるようにプレテンション方式で緊張力を導入している。なお、せん断ひび割れが発生しないように、帯鉄筋として D13 を所定の間隔に配置している。

曲げ補強シートには、梁幅と同じ幅の AFRP シートを梁中央部から両支点の 100 mm 手前までの範囲に接着している。なお、本研究では、道路橋示方書³⁾に準拠した PC 鋼より線の定着長が計算終局時の曲げひび割れ発生領域 (L_{cu}) に及ばないように、支点外側の張出し長さを拡張し、PC

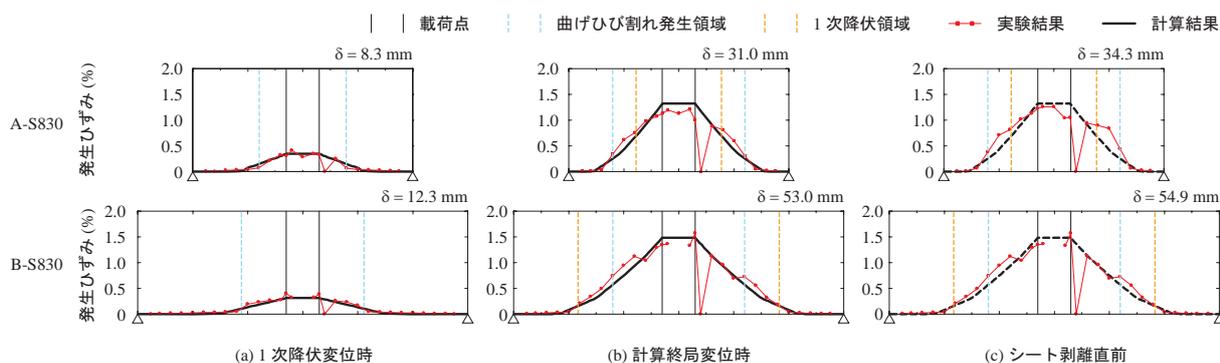
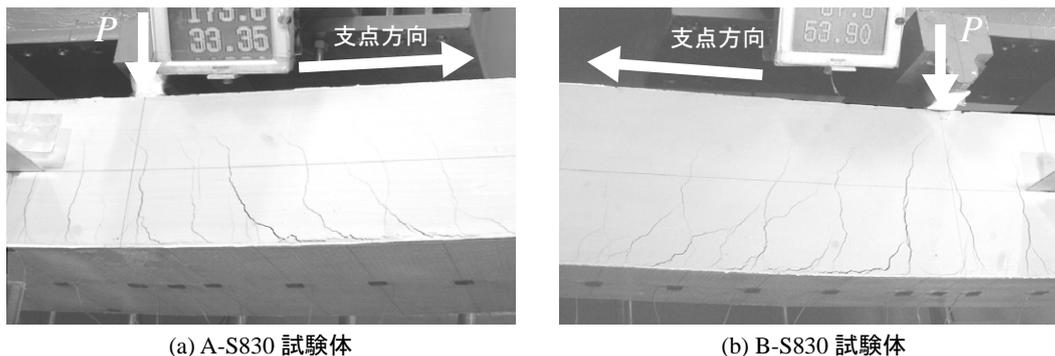


図-3 A-S830, B-S830 試験体の各変位時におけるシートの軸方向ひずみ分布



(a) A-S830 試験体

(b) B-S830 試験体

写真-1 シート剥離直前のひび割れ性状

鋼より線の定着長端部と L_{cu} との間を約 20 cm 確保することとした。

表-2, 3 には AFRP シートおよび鋼材の力学的特性値を示している。実験時のコンクリートの材齢は 35 日、平均圧縮強度は $f'_c = 69.1 \text{ MPa}$ であった。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-2 には、各 PC 梁の荷重-変位関係を比較して示している。図には、各試験体の計算結果あるいは実験結果同士を比較した図、および補強試験体ごとに実験結果と計算結果を比較した図を示している。計算結果は、コンクリート標準示方書⁵⁾(以後、示方書)に準拠した断面分割法に基づいて算出し、計算の終局は上縁コンクリートひずみが圧壊ひずみ ($3,500 \mu$) に達した時と設定している。なお、示方書における PC 鋼より線の応力-ひずみ関係はトリニア型と仮定しており、剛性勾配の変化点が 2 箇所ある。これより、本論文では鉄筋の剛性勾配変化点を小さい方から順に、1 次降伏点、2 次降伏点と呼ぶ。表-4 には、図-2 より得られる実験、計算結果を一覧にして示している。表には、曲げひび割れ発生時、1 次降伏時、最大荷重時の荷重および変位、最大荷重時の実験値を計算値で除した耐力比、変位比および破壊形式を示している。なお、表中の破壊形式は耐力比および変位比がともに 1.0 以上の場合を曲げ圧壊型、それ以外を剥離破壊型とした。

図-2(a) より、A 試験体の計算結果の比較図を見ると、A-N 試験体は約 50 kN で曲げひび割れ発生に伴う剛性勾配の低下が見られる。また、約 75 kN、7 mm 程度で 1 次降伏に伴う剛性勾配の低下が見られ、その後、一定の剛性を保って終局に至っている。一方、A-S 試験体は、いずれも

ひび割れ発生時までは A-N 試験体と同様であるものの、その後の勾配は A-N 試験体より大きく、補強量の増加とともに大きくなるのが分かる。また、終局時に着目すると、シート補強量が多いほど終局荷重は大きくなるものの、終局変位はほぼ同様もしくは多少小さくなる傾向にある。

実験結果に着目すると、補強の有無に関わらず曲げひび割れ発生時まで同程度の剛性勾配を示している。また、曲げひび割れ発生荷重およびその後の剛性勾配は補強量の増加に伴い大きく示されている。終局時は RC 梁の場合と同様、シート補強量の増加に伴って荷重は増加するものの、終局変位は小さく示される傾向にある。ここで、各補強試験体の実験および計算結果を比較した図を見ると、荷重初期から 1 次降伏点までは概ね一致しているのが分かる。また、終局時には、補強量が多いほど実験結果は小さい変位でシート剥離に至るため、計算結果との乖離が大きくなっている。

図-2(b) より、B 試験体の計算結果を見ると、A 試験体とほぼ同様の性状が見られる。ただし、補強量の増加に対応して最大荷重時の変位が小さくなる傾向は認められない。また、実験結果においても、A 試験体とほぼ同様の性状が見られる。なお、B-S415 試験体は計算終局到達前にシート破断により終局に至ったため、荷重が B-S280 試験体を下回っている。

3.2 シートのひずみ分布性状

図-3 には、実測耐力が計算耐力を超えずに剥離破壊型で終局に至った A/B-S830 試験体の各変位時における曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布を同一変位時の計算結果と比較して示している。図には、各試験体の (a) 計算 1 次降伏変位時、(b) 計算終局変位時、(c) シート剥離直前、のひずみ分布を示している。なお、(c) シート剥離直前の図に

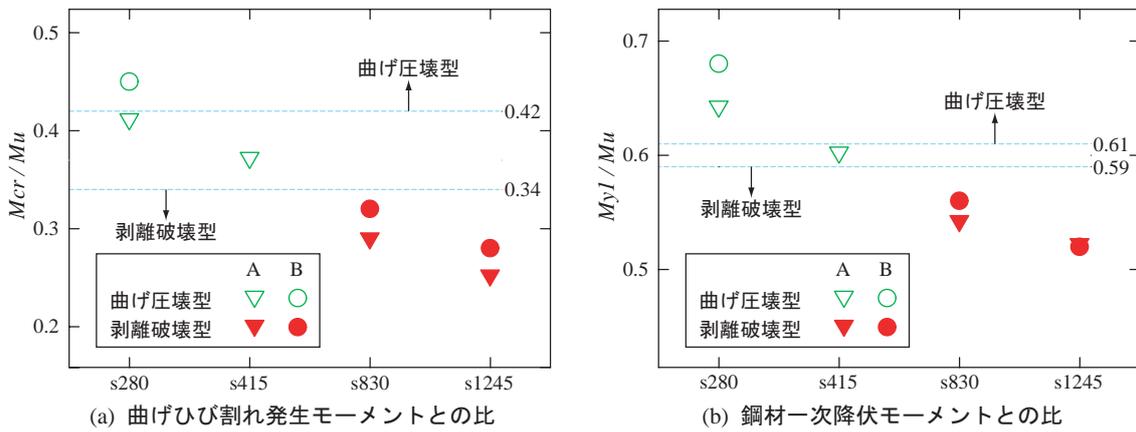


図-4 各予測式による破壊形式の予測と実験結果との比較図

表-5 各種曲げモーメントの一覧

試験体名	M_{cr} (kNm)	M_{y1} (kNm)	M_u (kNm)	M_{cr}/M_u	M_{y1}/M_u
A-N	22.8	32.4	40.6	-	-
A-S280	22.9	36.1	56.3	0.41	0.64
A-S415	23.0	37.8	62.9	0.37	0.60
A-S830	23.2	43.3	79.6	0.29	0.54
A-S1245	23.4	48.6	93.2	0.25	0.52
B-N	20.2	28.5	33.8	-	-
B-S280	20.3	30.7	45.0	0.45	0.68
B-S415	-	-	-	-	-
B-S830	20.3	34.9	62.7	0.32	0.56
B-S1245	20.4	38.1	73.2	0.28	0.52

は参考のため計算終局時のひずみ分布を示している。
 図より、(a) 計算1次降伏変位時はいずれも実験結果と計算結果が一致しており、シートは完全付着に近い状態であることがうかがえる。(b) 計算終局変位時には、いずれも等曲げ区間では計算値より $1,500 \mu$ 程度小さいひずみを示している。また、荷点近傍の等せん断区間では計算結果を越えるひずみが生じている。その後、(c) シート剥離直前においても等せん断区間内の実測ひずみが計算ひずみを大きく超えるとともにその領域も多少拡大してシート剥離に至っている。

写真-1には、A/B-S830試験体のシート剥離直前における荷点近傍のひび割れ発生状況を示している。写真-1より、いずれの試験体も荷点近傍下縁かぶり部に斜めひび割れが発生・開口していることが分かる。また、それに伴いコンクリートとシートの境界に剥離が見られる。このことから、シートの剥離はRC梁と同様にピーリング作用によって発生したと考えられる。なお、シート剥離はRC梁に比べて一気に剥離する傾向にあるが、これにはPC梁のそりが影響しているものと推察される。

3.3 破壊形式予測式の検討

前節までの結果より、PC梁に関する耐荷性状や破壊性状は既往の研究におけるPC梁のそれと類似していることが明らかになった。ここで、既往の研究で提案しているAFRPシート曲げ補強PC梁の破壊形式予測式の適用性を検討する。以下にその予測式を示す。

曲げ圧壊型の場合： $M_{cr}/M_u > 0.42$, $M_{y1}/M_u > 0.61$
 剥離破壊型の場合： $M_{cr}/M_u < 0.34$, $M_{y1}/M_u < 0.59$

図-4には、縦軸に各予測式を、横軸を目付量をとした比較図を示している。図中の白抜き記号は曲げ圧壊型、黒塗りの記号は剥離破壊型を示している。また表-5には、本検討に用いた試験体の各モーメントを一覧にして示している。なお、計算終局時よりも早期にシート破断により終局に至ったB-S415試験体は本検討より除いている。

図-4より、いずれの予測式も破壊形式の境界部分に曲げ圧壊型の試験体が見られているもの、安全側で評価していることが分かる。以上のことより、本研究における試験体を用いた場合にも、既提案の予測式によりFRPシート曲げ補強PC梁の破壊形式予測が可能であることが明らかになった。

4. まとめ

- 1) 断面形状に関わらずシート補強量の増加にともなう、終局荷重は増加する傾向にある。
- 2) 曲げ補強シートの剥離は、RC梁の場合と同様にピーリング作用が原因となって発生する。また、シート剥離はRC梁に比べて急激に増加する傾向にある。
- 3) 既往の研究におけるAFRPシート曲げ補強PC梁の破壊形式予測式は、断面形状の異なる試験体に関しても安全側に適用可能である。

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, 2001.8
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: FRPシート曲げ補強RC梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.91-108, 2002.8
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・III コンクリート橋編)・同解説, 2002.3
- 4) 鈴木 健太郎, 岸 徳光, 三上 浩, 澤田 純之: AFRPシートで曲げ補強したPC梁の静荷重実験, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.3, 2007.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 (2002年制定) 構造型性能照査編, 2002.