

論文 AFRP シート下面接着 PC 梁の耐荷性状に関する実験的研究

鈴木 健太郎*1・岸 徳光*2・三上 浩*3・澤田 純之*4

要旨: 本研究では, FRP シート曲げ補強 PC 梁の合理的な曲げ補強設計法確立のための基礎資料収集を目的に, せん断スパン比が比較的大きく曲げ剛性の小さい 2 種類の PC 梁を対象に FRP シート曲げ補強に関する実験的検討を実施した。本研究では, 2 種類の PC 梁を対象にシート補強量を変化させ, それらの静的 4 点曲げ載荷実験を実施した。本研究の結果, 曲げ剛性が比較的小さい PC 梁を AFRP シートで曲げ補強する場合においても, 1) 耐荷性状は RC 梁の場合と概ね同様であること, 2) 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実験結果を安全側に評価可能であること, 等を明らかにした。

キーワード: PC 梁, AFRP シート, 曲げ補強, 耐荷性状

1. はじめに

近年, 既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法に連続繊維 (FRP) シートを接着する工法が多く採用されており, 各種研究機関で盛んに研究が行われている。著者らも, アラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用いて曲げ補強した RC 梁に関する数多くの研究を実施している^{1),2)}。既往の研究より, AFRP シートで曲げ補強した RC 梁では, 1) AFRP シートの曲げ補強効果は主鉄筋降伏後に発揮されること, 2) AFRP シートの補強量が大きいく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, 3) 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³⁾ (以後, 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, 4) 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, 等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⁴⁾ 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であることを明らかにしている。しかしながら, FRP シートを用いて PC 梁を曲げ補強する研究例は未だ少なく, 合理的な曲げ補強設計法の確立には至っていないのが現状である。

そこで本研究では, FRP シート曲げ補強 PC 梁の合理的な曲げ補強設計法確立のための基礎資料収集を目的に, せん断スパン比が大きく比較的小さい 2 種類の PC 梁を対象にシート補強量を変化させ, それらの静的 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は無補強を含め 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 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

表-1 試験体一覧

試験体名	断面寸法 (mm)	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)
A0	梁幅: 300 梁高: 180	2,000	6.1	-	-
A280				22.8	280
A415				33.7	415
A830				67.5	830 (415×2)
A1245				101.2	1245 (415×3)
B0	梁幅: 150 梁高: 230	3,000	7.1	-	-
B280				22.8	280
B415				33.7	415
B830				67.5	830 (415×2)
B1245				101.2	1245 (415×3)

*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 修 (工) (正会員)

*2 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)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究所 主席研究員 博 (工) (正会員)

*4 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 博士研究員 博 (工) (正会員)

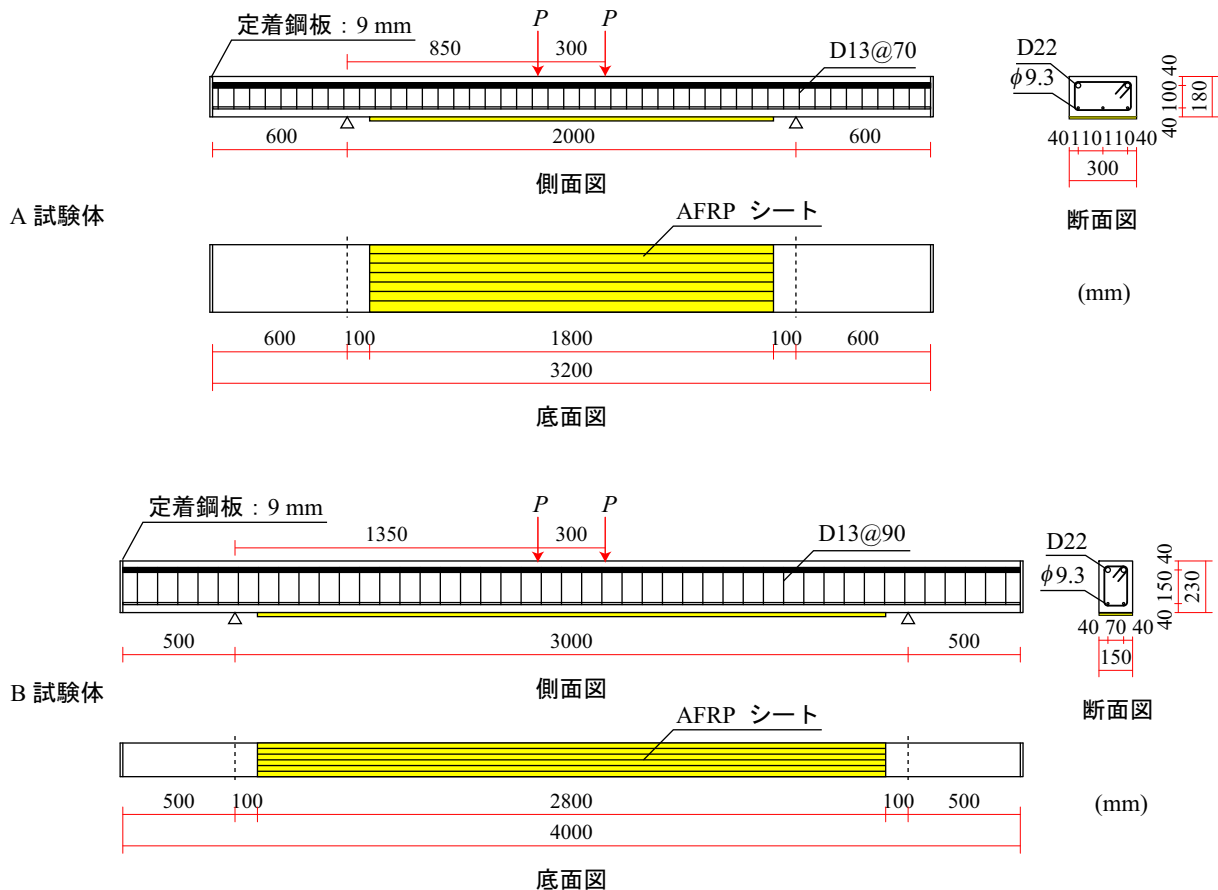


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

中、試験体名の英文字は断面形状を示しており、それに付随する数値はシート目付量 (g/m^2) を示している。

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 $300 \times 180 \text{ mm}$ 、純スパン長が 2.0 m であり、B試験体は梁幅×梁高が $150 \times 230 \text{ mm}$ 、純スパン長が 3.0 m である。また、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鋼より線を用いており、A試験体で3本、B試験体で2本配置している。そのため、本試験体の主鋼材比はA、B試験体で 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た。

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。曲げ補強シート接着面には、シートの付着性能の向上に有効なショットブラスト処理($1 \sim 2 \text{ mm}$ 程度)を施している。なお、本研究では、道路橋示方書⁵⁾に準拠したPC鋼より線の定着長が計算終局時の曲げ

表-2 AFRPシートの力学的特性(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

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
$\phi 9.3$	SWPR7AL	1,708 *	1,938	192

* 0.2% 永久伸びに対する応力

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鋼より線の定着長端部と L_{cu} との間を約 200 mm 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の一覧を示している。実験時のコンクリートの材齢は35日、圧縮強度は $f'_c = 69.1 \text{ MPa}$ であった。

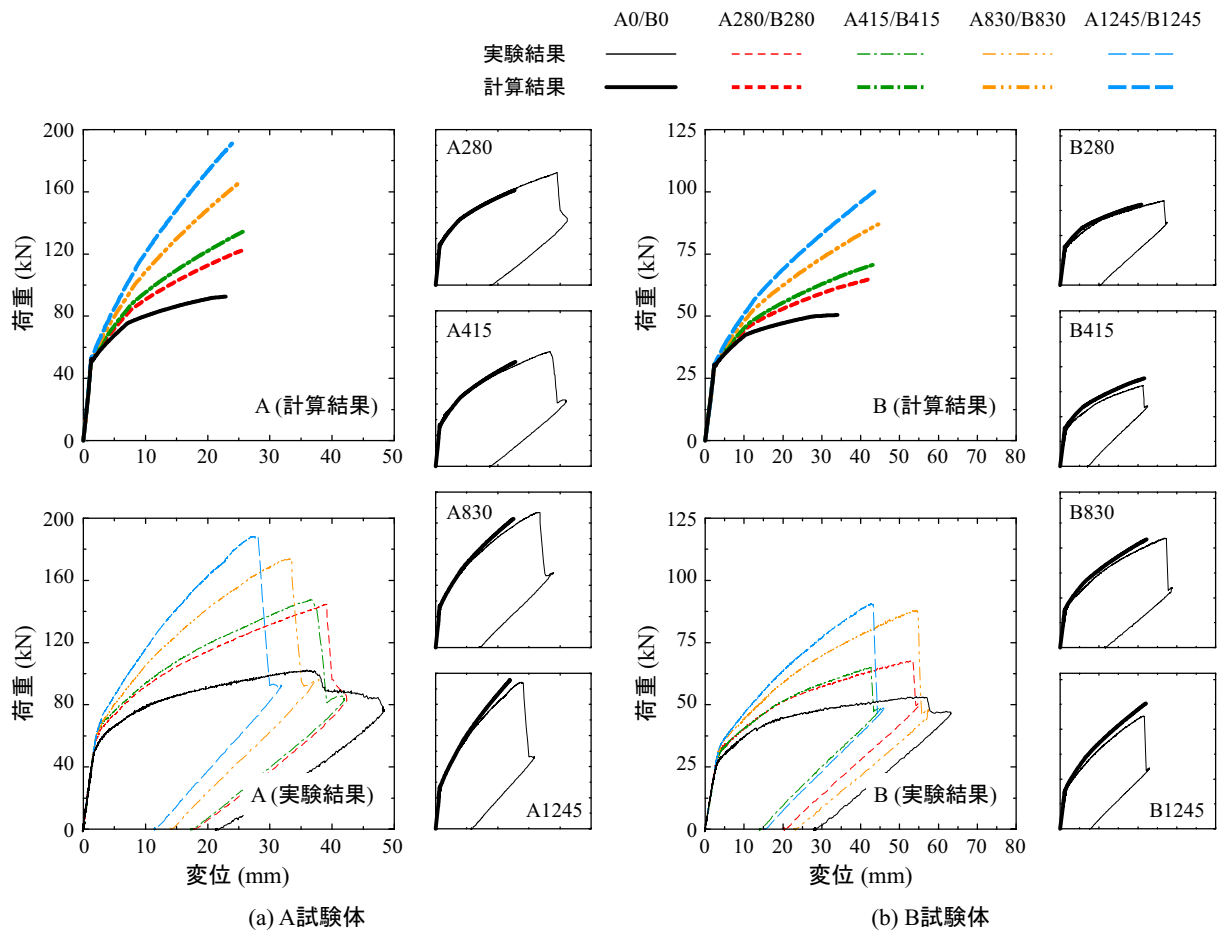


図-2 各試験体の荷重-変位関係

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-2には、各試験体の荷重-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および実験結果ごとに比較した図、および各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。計算結果は断面分割法に基づいて算出し、計算の終局は示方書³⁾に準拠して上縁のコンクリートひずみが圧壊ひずみ(2,863 μ)に達した時としている。なお、示方書におけるPC鋼より線の応力-ひずみ関係はトリリニア型で仮定されており、剛性勾配の変化点が2箇所ある。これより、本論文ではPC鋼材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より得られる実験および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、最大荷重時における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一覧にして示している。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、それ以外の場合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、無補強のA0試験体は約50kN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75kN、7mm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、曲げ補強した試験体は、いずれもひび割れ発生時まではA0試験体と同様であるものの、その後の勾配はA0試験体より大きく、補強量の増加とともに勾配が大きくなること分かる。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いずれの試験体も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。次に、各補強試験体の実験および計算結果を比較した図より、載荷初期から1次降伏点までは両結果が概ね一致していることが分かる。また、実験結果の終局時には、補強量が多いほど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

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
	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	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位			
	P_{cc} (kN)	δ_{cc} (mm)	P_{y1c} (kN)	δ_{y1c} (mm)	P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)	P_{ce} (kN)	δ_{ce} (mm)	P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)			
A0	52.5	1.3	75.8	7.3	92.6	22.9	49.2	2.0	102.4	34.4	-	-	-
A280	52.8	1.3	84.4	7.7	122.1	25.4	57.2	1.9	144.7	39.6	1.19	1.56	曲げ圧壊型
A415	53.0	1.3	88.3	7.9	134.3	25.6	57.2	1.9	147.6	37.0	1.10	1.45	曲げ圧壊型
A830	53.5	1.3	101.0	8.4	165.7	25.0	56.8	2.1	173.8	34.0	1.05	1.36	曲げ圧壊型
A1245	53.8	1.3	114.1	8.9	191.2	23.9	58.2	2.0	188.3	27.8	0.98	1.16	剥離破壊型
B0	30.6	2.4	42.6	10.4	50.5	34.0	24.1	2.7	53.2	53.9	-	-	-
B280	30.7	2.4	45.8	11.2	64.7	41.8	26.7	2.8	67.9	53.1	1.05	1.27	曲げ圧壊型
B415	30.8	2.4	47.3	11.4	70.7	43.3	27.9	3.1	65.0	42.8	0.92	0.99	剥離破壊型 (シート破断)
B830	31.0	2.4	51.9	12.1	87.0	44.6	31.3	3.4	87.9	53.4	1.01	1.20	曲げ圧壊型
B1245	30.9	2.4	56.7	12.7	100.8	44.2	31.6	3.4	90.7	43.6	0.83	0.99	剥離破壊型

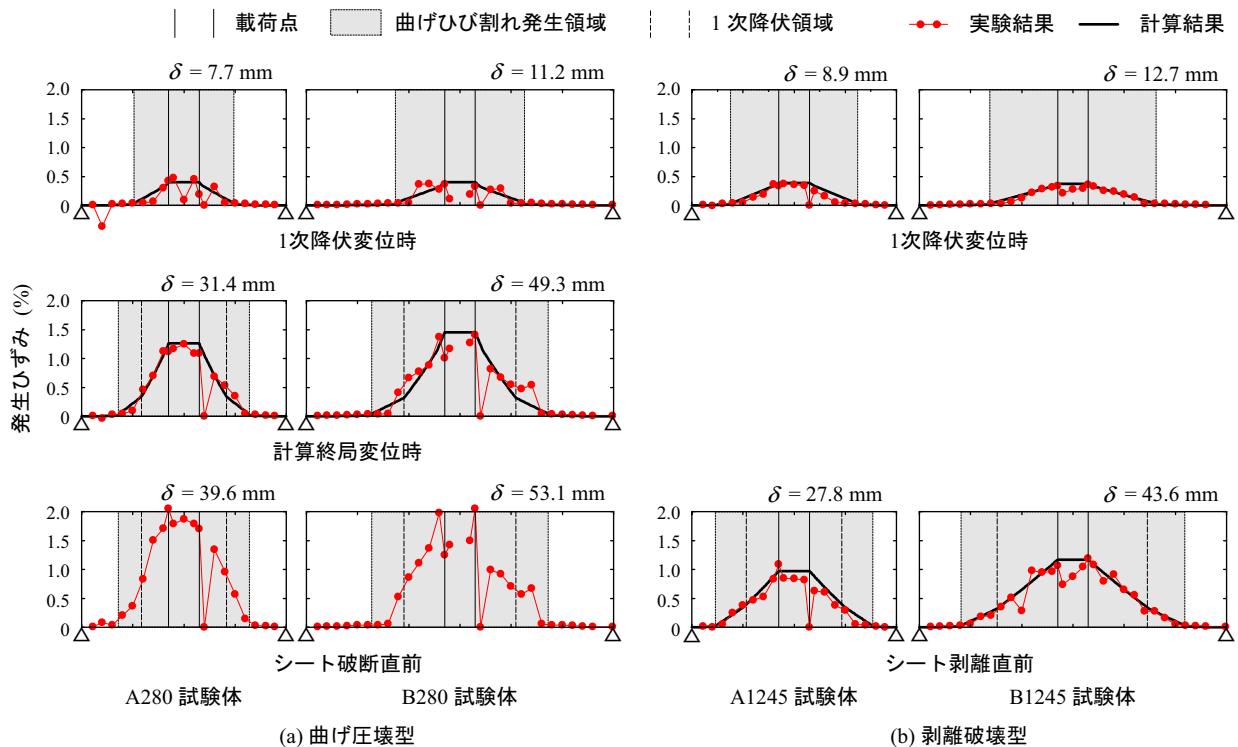


図-3 各試験体の実験及び計算結果の曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布の比較

ている。

図-2(b)のB試験体の計算結果から、A試験体とほぼ同様の性状が認められる。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、B415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B280試験体を下回っている。

以上のことより、比較的剛性の小さいPC梁の場合にも曲げ補強シートの増加とともに耐力比、変位比が小さ

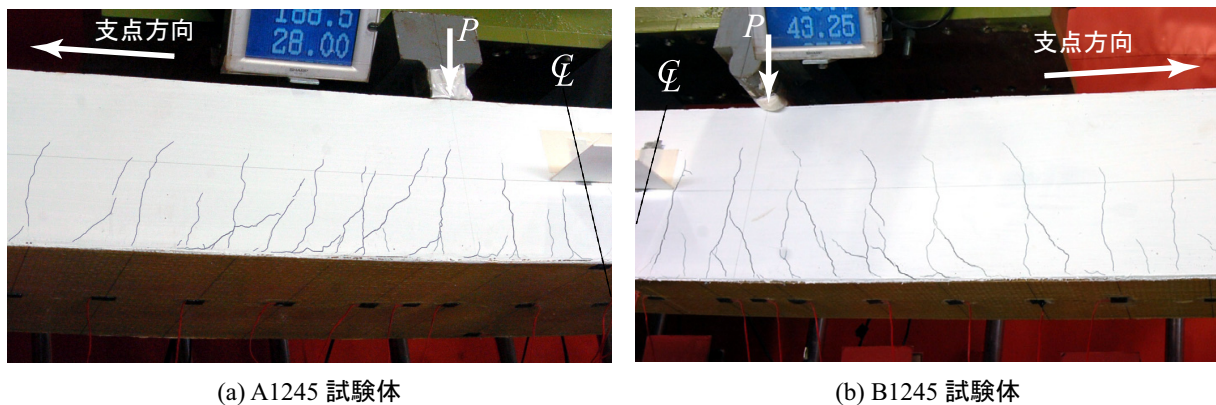


写真-1 シート剥離直前のひび割れ性状

くなる傾向にあり、剥離破壊型の破壊形式を示す傾向にあることが分かった。この性状は、既往の研究における RC 梁の結果と同様である。なお、B415 試験体では計算終局耐力到達前にシート破断により終局に至っているが、この原因は不明である。

3.2 シートのひずみ分布性状

図-3には、曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布を計算結果と比較して示している。図-3(a)には、曲げ圧壊型の破壊形式を示した A280/B280 試験体の 1 次降伏変位時、計算終局変位時および圧壊後におけるシート破断直前のひずみ分布を示しており、図-3(b)には、剥離破壊型の破壊形式を示した A1245/B1245 試験体の 1 次降伏変位時およびシート剥離直前のひずみ分布を示している。

図-3(a)より、1 次降伏変位時では、曲げひび割れ発生領域での発生ひずみにばらつきが認められるものの、発生ひずみは計算結果とほぼ対応している。計算終局変位時には、実験結果と計算結果で多少の発生ひずみの差はあるものの、概ね対応していることが分かる。また、圧壊後におけるシート破断直前の等曲げ区間内の発生ひずみは、破断ひずみと同程度であるものの、シート端部にひずみは発生しておらず、この時点においてもシートの定着は十分に確保されていることが分かる。

図-3(b)より、1 次降伏変位時ではいずれも実験結果と計算結果が一致しており、シートは完全附着に近い状態にあることがうかがえる。しかしながら、シート剥離直前には、いずれの試験体も等曲げ区間において計算結果より小さなひずみを示しており、荷重点近傍の等せん断力区間では計算結果を越えるひずみが生じている。これは後述するように、等せん断力区間の荷重点近傍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りシート剥離が進展するため、ひずみが均等化されたことによるものと考えられる。

写真-1には、A1245/B1245 試験体のシート剥離直

前における荷重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重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ひび割れが進展している。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ものと考えられる。なお、両試験体は写真-1の状態からシート剥離により終局に至ることから、RC 梁に比して一気に剥離が進展する傾向にある。この要因は、(1)シート補強量が多いこと、(2)曲げ補強シートを PC 梁のプレストレストによるそりに沿って接着したため、上方へのそりが荷重によって下方へのたわみに移行する際の影響があるため、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、本実験における PC 梁の耐荷性状や破壊性状は既往の研究における PC 梁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：

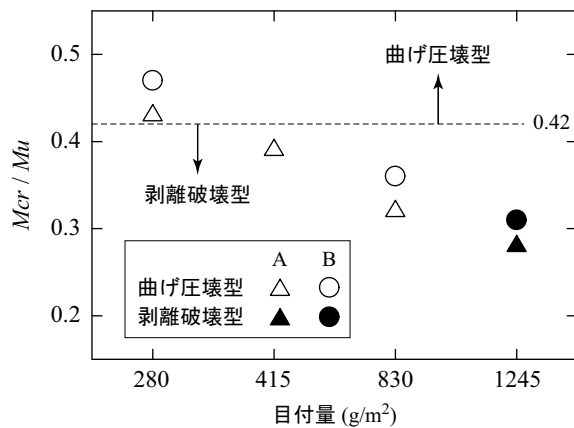
$$M_{cr}/M_u \geq 0.42, \quad M_{y1}/M_u \geq 0.61$$

剥離破壊型の場合：

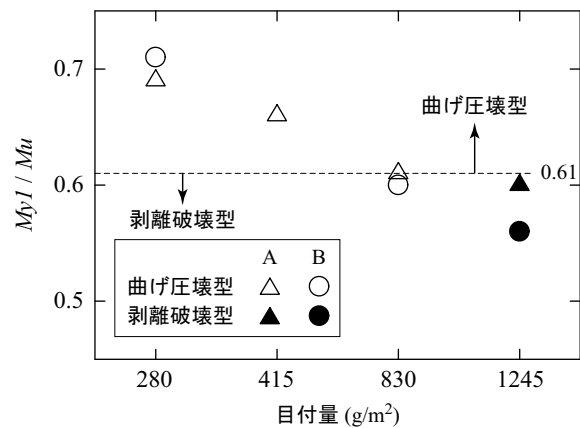
$$M_{cr}/M_u < 0.42, \quad M_{y1}/M_u < 0.61$$

図-4には、縦軸に破壊形式予測に用いる各曲げモーメントの比を示し、横軸を各試験体(目付量)として整理して示している。図中の白抜きの記号は曲げ圧壊型、黒塗りの記号は剥離破壊型で終局に至った試験体を示している。また表-5には、本検討に用いた各試験体の各種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 B415 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示されているものの、実験結果を



(a) 曲げひび割れ発生モーメント M_u との比



(b) 鋼材1次降伏モーメント M_{y1} との比

図-4 破壊形式予測式と実験結果との比較

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
A0	22.3	32.2	39.4	-	-
A280	22.5	35.9	51.9	0.43	0.69
A415	22.5	37.5	57.1	0.39	0.66
A830	22.7	42.9	70.4	0.32	0.61
A1245	22.9	48.5	81.3	0.28	0.60
B0	20.7	28.7	34.1	-	-
B280	20.7	30.9	43.6	0.47	0.71
B415	-	-	-	-	-
B830	20.9	35.1	58.7	0.36	0.60
B1245	20.8	38.3	68.1	0.31	0.56

安全側に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

本研究では、FRP シート曲げ補強 PC 梁の合理的な曲げ補強設計法確立のための基礎資料収集を目的に、せん断スパン比が大きく比較的曲げ剛性の小さい 2 種類の PC 梁を対象にシート補強量を変化させ、それらの静的 4 点曲げ載荷実験を実施した。本研究の範囲内で明らかになったことをまとめると以下の通りである。

- 1) AFRP シート曲げ補強 PC 梁の終局荷重は、曲げ剛性が小さい場合においてもシート補強量の増加に

ともなって増加する傾向にあるものの、剝離破壊型の傾向が強くなる。これは、既往の研究における AFRP シート曲げ補強 RC 梁の傾向と同様である。

- 2) 曲げ補強シートの剝離は、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、シート剝離は RC 梁に比べて急激に進展する傾向にある。
- 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、曲げ剛性の小さい PC 梁に対しても実験結果を安全側に評価可能である。

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) 土木学会: コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 構造性能照査編, 2002.
- 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 梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.3, 2007.6
- 5) 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