

論文 AFRP シートで曲げ補強した PC 梁の静載荷実験

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 シートを用いて PC 梁を曲げ補強した場合の耐荷性状に関する基礎資料の収集を目的に、下端鋼材の径およびシート補強量を変化させた FRP シート曲げ補強 PC 梁を用いて実験的検討を実施した。本研究の結果、FRP シート曲げ補強 PC 梁のシート剥離性状は RC 梁の場合と大略同様であるが、その要因となるピーリングの発生領域は計算結果の曲げひび割れ発生領域にまで及ぶこと、FRP シート曲げ補強 PC 梁の破壊形式の予測はひび割れ発生モーメントもしくは PC 鋼より線の 1 次降伏モーメントと終局曲げモーメントとの比を用いて予測可能であること、等が明らかになった。

キーワード：PC 梁, AFRP シート, 曲げ補強, ピーリング作用

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法として連続繊維 (FRP) シートを接着する方法が多く採用されている。著者らは、既往の研究^{1),2)}において、1) FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ補強効果は主に主鉄筋降伏後に発揮されること、2) RC 梁に接着した曲げ補強シートの剥離は、載荷点近傍下縁かぶり部における斜めひび割れの開口を起因とするピーリング作用によって発生すること、3) FRP 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⁾に準拠した断面分割法による計算結果を基準に、計算終局時に曲げ補強シートの定着が確保されてい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できること、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、を明らかにしている。一方、主緊張材の降伏棚が明確に現れな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従来から行われている。PC 梁の場合には、曲げ

補強シートの補強効果を初期段階より発揮させるためにシートを緊張させた状態で接着する工法が提案され、一部で実用化されている⁴⁾。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比較的少なく、補強設計法が確立されるに至っていない。このような観点より、本研究では FRP シートで曲げ補強した PC 梁の耐荷性状に関する基礎資料の収集を目的として、各種 FRP シート曲げ補強 PC 梁の静的 4 点曲げ載荷実験を実施した。

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、下端鋼材を 2 種類、シート補強量が無補強を含めた 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 と 588 kN/m の 2 種類のアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用い、これらの層数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 項目は下端鋼材の種類 (PC9: ϕ 9.3, PC12: ϕ 12.4), 第 2 項目はシート補強量を示しており、曲げ補強シートの総目付量 (g/m^2) を英文字 S に付して示してい

*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)

表-1 試験体一覧

試験体名	使用鋼材	PC鋼より線有効緊張力 (kN)	引張剛性 $E \cdot t$ (MN/m)	シート目付量 (g/m ²)
PC9-N	φ 9.3	58.6 (0.6σ _{pu})	-	-
PC9-S280			22.8	280
PC9-S415			33.7	415
PC9-S830			67.5	830 (415×2)
PC9-S1245			101.2	1245 (415×3)
PC12-N	φ 12.4	103.0 (0.6σ _{pu})	-	-
PC12-S280			22.8	280
PC12-S415			33.7	415
PC12-S830			67.5	830 (415×2)
PC12-S1245			101.2	1245 (415×3)

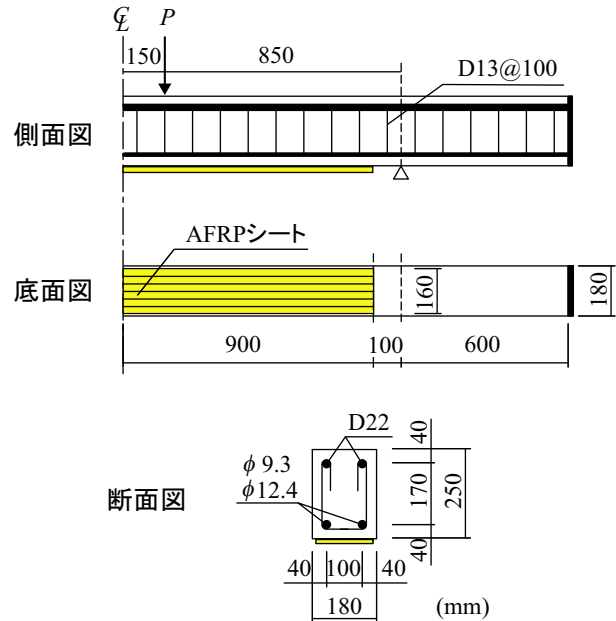


図-1 試験体概要

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	降伏応力 σ _y (MPa)	引張応力 σ _{pu} (MPa)	弾性係数 (GPa)
D22	SD345	389	580	206
φ 9.3	SWPR7AN	1,579*	1,879	191
φ 12.4		1,555*	1,851	193

* PC鋼より線の1次降伏応力 (MPa)

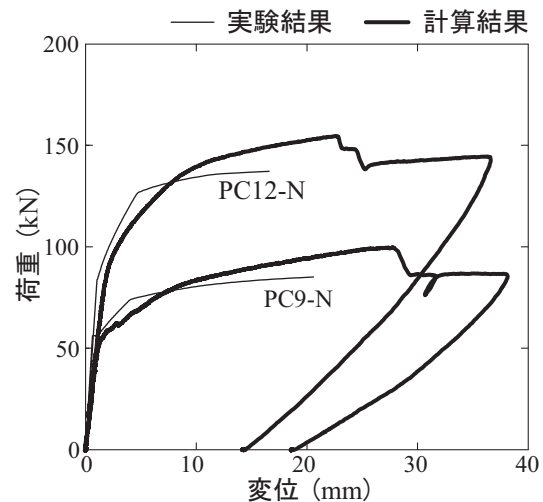


図-2 無補強 PC 梁の荷重-変位関係

る。なお、下端に配置された PC 鋼より線には有効緊張率が引張強度の 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。

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。なお、実験時のコンクリートの材齢は 28 日、平均圧縮強度は $f'_c = 65.4$ MPa であった。

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。本実験に用いた試験体は、断面寸法(梁幅×梁高)が 18×25 cm、下端鋼材に PC 鋼より線を配置し、上端筋にはいずれの梁も D22 を用いてい

る。試験体の純スパン長は 2.0 m、載荷点間隔は 30 cm であり、せん断スパン比は 4.0 である。また、せん断破壊で終局に至らないように帯鉄筋として D13 を 100 mm 間隔で配置した。

曲げ補強シートは、幅 160 mm で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⁵⁾に示されている PC 鋼より線の定着長が計算終局時の主鋼材降伏領域 (L_{yu}) に及ばないようにするために、支点からの張り出し長さを拡張し、PC 鋼より線の定着長端部と L_{yu} との間を約 20 cm 確保することとした。

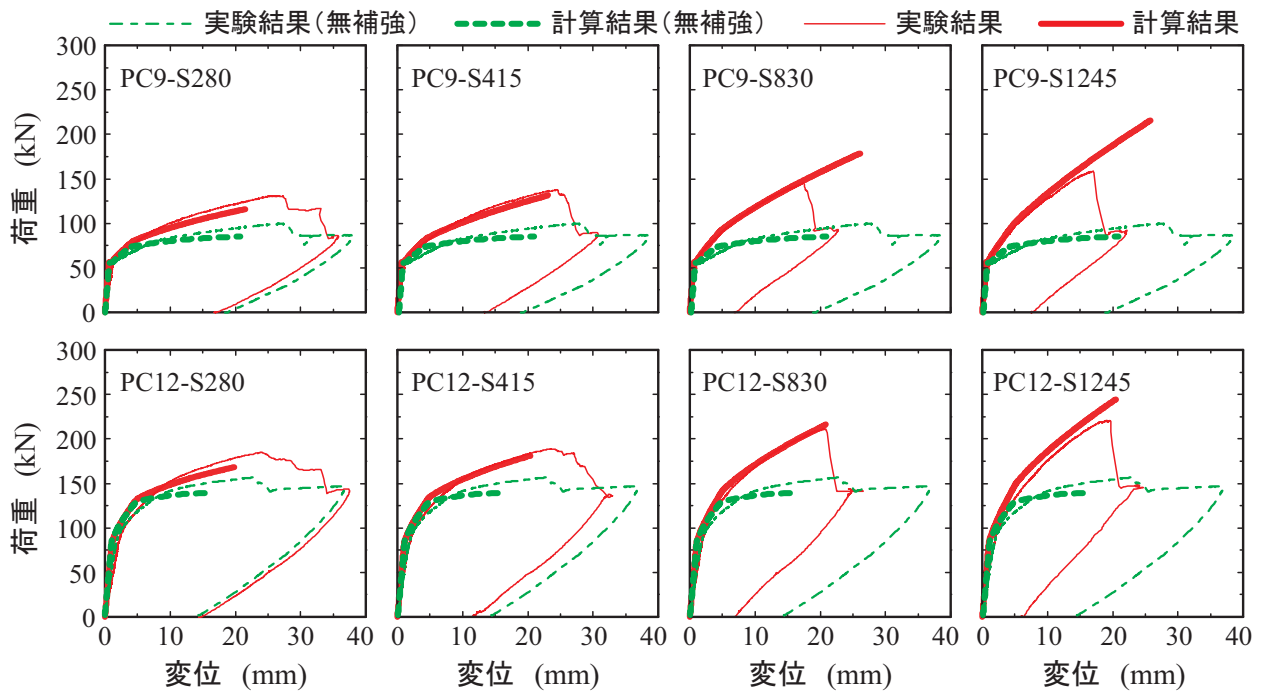


図-3 AFRP シート曲げ補強 PC 梁の荷重－変位関係

3. 実験結果および考察

3.1 荷重－変位関係

(1) 無補強 PC 梁

図-2には、無補強の PC9-N, PC12-N 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。なお、計算結果はコンクリート標準示方書に準拠した断面分割法に基づき、上縁コンクリートの圧壊ひずみを $3,500 \mu$ と設定して得られたものである。ここで、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あり、2箇所まで勾配が変化している。これより、本論文では各降伏応力点をより小さい方から順に、1次降伏点、2次降伏点と呼ぶこととする。計算結果より、PC9-N 試験体は曲げひび割れ発生時および PC 鋼より線の 1次降伏点で剛性勾配の変化の大きいことが分かる。また、PC12-N 試験体の計算結果からも同様の時点で剛性勾配の変化が確認できる。なお、PC9-N, PC12-N 試験体ともに 2次降伏点が剛性勾配の変化に与える影響は顕著でないことが分かる。

実験結果より、PC 鋼材量にかかわらず、曲げひび割れ発生時点までは同様な剛性勾配を示していることが分かる。その後、PC9-N 試験体では、約 60 kN で曲げひび割れが発生して勾配が

表-4 実験結果および計算結果の一覧

試験体名	実験結果		計算結果		破壊形式
	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	
PC9-N	99.7	27.7	85.1	20.6	-
PC9-S280	131.2	25.6	116.0	21.5	曲げ 圧壊型
PC9-S415	137.7	24.5	131.4	24.0	
PC9-S830	145.3	17.5	178.7	26.1	剥離
PC9-S1245	158.8	17.0	215.6	25.8	破壊型
PC12-N	154.6	22.7	137.2	16.6	-
PC12-S280	185.0	23.7	168.1	19.8	曲げ 圧壊型
PC12-S415	188.8	23.4	181.2	20.4	
PC12-S830	211.0	20.4	216.0	20.9	剥離
PC12-S1245	220.5	19.0	244.6	20.5	破壊型

低下し、変位約 8 mm で 1次降伏点が見受けられる。また、PC12-N 試験体の場合には、PC9-N 試験体に比較して曲げひび割れの発生および 1次降伏による曲げ剛性の変化が明確でないものの、これらに対応する変化点の存在は確認できる。しかしながら、2次降伏点はいずれの試験体も確認することができない。このことから、PC 梁の曲げ剛性の変化点としては、曲げひび割れ発生時点および PC 鋼材の 1次降伏点に着目することが妥当であるものと考えられる。

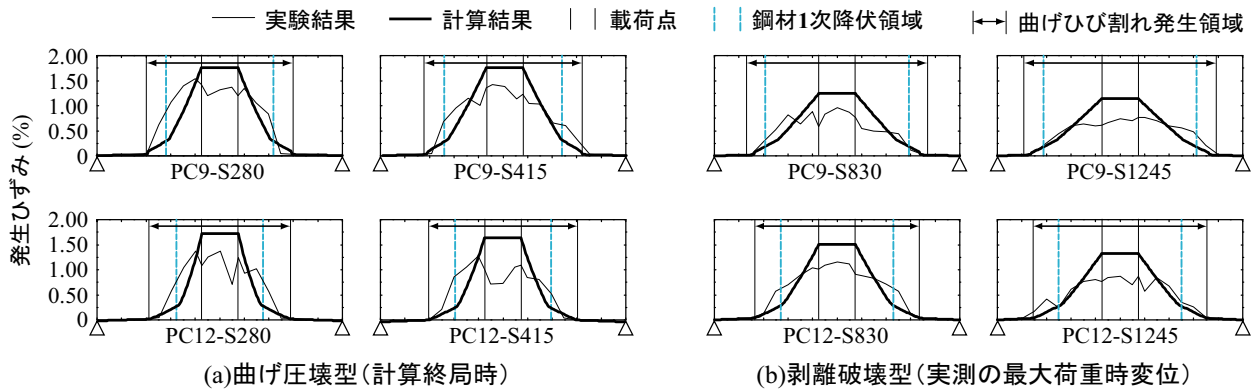


図-4 各試験体に関する曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状

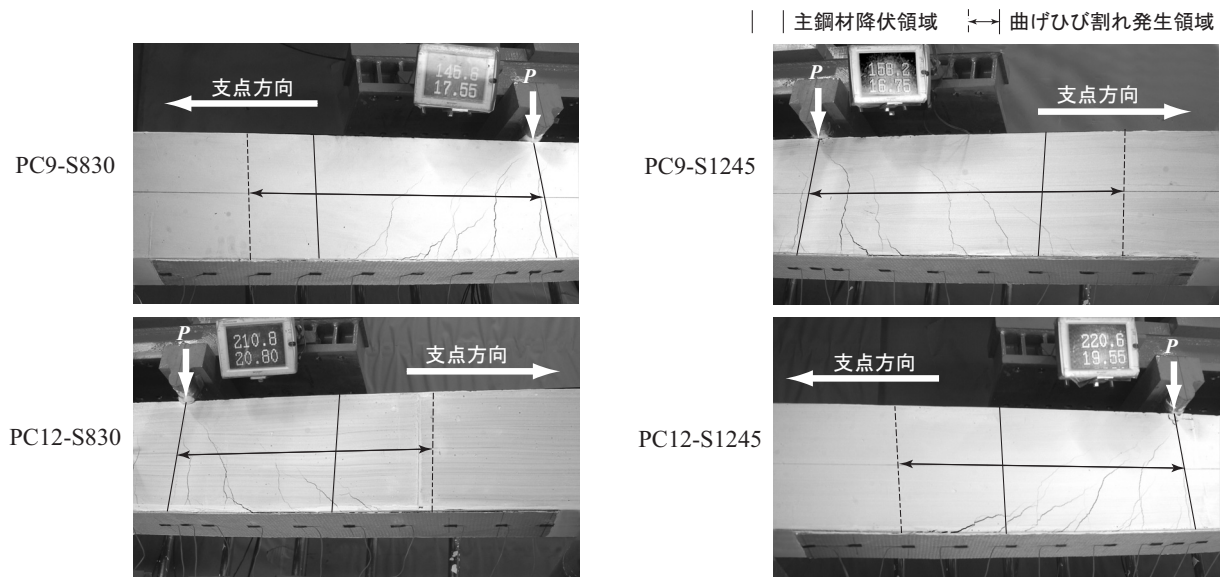


写真-1 シート剥離直前のひび割れ性状（剥離破壊型）

(2) AFRP シート曲げ補強 PC 梁

図-3 には、AFRP シートで曲げ補強した各 PC 梁の荷重-変位関係を計算結果と比較して示している。また、表-4 には、図-3 より得られた実験および計算結果の最大荷重、最大荷重時変位、破壊形式を一覧にして示している。なお、破壊形式は実験結果が計算耐力および計算終局変位よりも上回っている場合を曲げ圧壊型、その他の場合を剥離破壊型とした。

図-3 より、いずれの補強試験体においてもひび割れ発生時点から終局点近傍まで実験結果は計算結果と概ね対応していることが分かる。ここで、破壊形式に着目すると、PC9 試験体では、-S280/S415 試験体で曲げ圧壊型を示しているものの、補強量の増加とともにシート剥離時の変位が減少し、実験結果が計算結果を下回る剥

離破壊型を示す傾向にあることが分かる。PC12 試験体においても -S280/S415 試験体で曲げ圧壊型を示し、補強量の増加とともに剥離破壊型に移行する傾向にあることが分かる。シート補強量の増加とともに剥離破壊型に移行する傾向は、RC 梁の場合と同様である。

3.2 ひずみ分布性状およびひび割れ性状

図-4 には、各試験体の曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状を示している。図には、曲げ圧壊型を示した PC9-S280/S415、PC12-S280/S415 試験体の場合には計算終局変位時の結果を、剥離破壊型を示した PC9-S830/S1245、PC12-S830/S1245 試験体の場合には実測最大荷重時変位と同一変位時の結果を比較して示している。

図より、曲げ圧壊型を示した PC9-S280/S415、PC12-S280/S415 試験体は、いずれも等せん断区

表-5 各種モーメントの一覧

試験体名	ひび割れ発生 モーメント M_{cr} (kNm)	1次降伏 モーメント M_{y1} (kNm)	終局曲げ モーメント M_u (kNm)	M_{cr}/M_u	M_{y1}/M_u
PC9-N	23.1	30.4	36.2	0.64	0.84
PC9-S280	23.2	32.7	49.3	0.47	0.66
PC9-S415	23.3	34.0	55.9	0.42	0.61
PC9-S830	23.3	37.0	76.0	0.31	0.49
PC9-S1245	23.4	40.7	91.6	0.26	0.44
PC12-N	35.7	52.3	58.3	0.61	0.90
PC12-S280	35.5	54.4	71.4	0.50	0.76
PC12-S415	35.5	55.1	77.0	0.46	0.72
PC12-S830	35.7	58.6	91.8	0.39	0.64
PC12-S1245	35.6	61.1	104.0	0.34	0.59

間の曲げひび割れ発生領域における発生ひずみが一部で計算結果を大きく上回っており、ピーリング作用によるシート剥離が進展していることが推察される。しかしながら、シート接着端部では未だ発生ひずみが零レベルであり、十分な定着を確保した状態で計算終局変位に達していることが分かる。

一方、剥離破壊型を示した PC9-S830/S1245, PC12-S830/S1245 試験体では、計算終局変位到達前にもかかわらず、等せん断力区間の曲げひび割れ発生領域では均一なひずみ分布箇所が示されており、ピーリング作用に伴うシート剥離の傾向が見られる。また、その範囲はシート接着端部近傍にまで進展している。

写真-1には、剥離破壊型を示した4試験体のシート剥離直前におけるひび割れ進展状況を示している。写真より、いずれの試験体もピーリング作用の起因となる下縁かぶり部の斜めひび割れが、載荷点から曲げひび割れ発生領域内で確認され、その斜めひび割れの1つが大きく開口してシート剥離が顕在化していることが分かる。このことより、FRPシート曲げ補強PC梁においても、ピーリング作用による曲げ補強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。また、剥離の発生領域はRC梁と異なり、主鋼材降伏領域よりも広い曲げひび割れ発生領域に及ぶことが明らかになった。

3.3 破壊形式予測式の検討

3.1, 3.2節の結果より、FRPシート曲げ補強PC梁の耐荷性状やシートの剥離挙動は、FRPシート曲げ補強RC梁のそれと類似していることが明らかになった。このことから、FRPシート曲げ補強PC梁に関する破壊形式の予測もRC梁と同様に可能であるものと考えられる。

既往の研究結果より、FRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式の予測は、断面分割法により算出される降伏曲げモーメント M_y および終局曲げモーメント M_u の比によって可能であることが明らかになっている。すなわち、

$$\text{曲げ圧壊型の場合： } M_y/M_u > 0.70$$

$$\text{剥離破壊型の場合： } M_y/M_u < 0.65$$

である。この考え方にに基づき、RC梁における降伏曲げモーメントに対応する梁の曲げ剛性が変化する時点の曲げモーメントとして、ひび割れ発生モーメント M_{cr} とPC鋼より線の1次降伏モーメント M_{y1} に着目し、それぞれを適用する場合の予測式の妥当性について検討を行うものとする。

表-5には、各試験体の M_{cr} , M_{y1} , M_u , M_{cr}/M_u および M_{y1}/M_u を一覧にして示している。また、図-5(a), (b)には、縦軸に M_{cr}/M_u , M_{y1}/M_u を取った場合における結果を示している。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。なお、表-4で剥離破

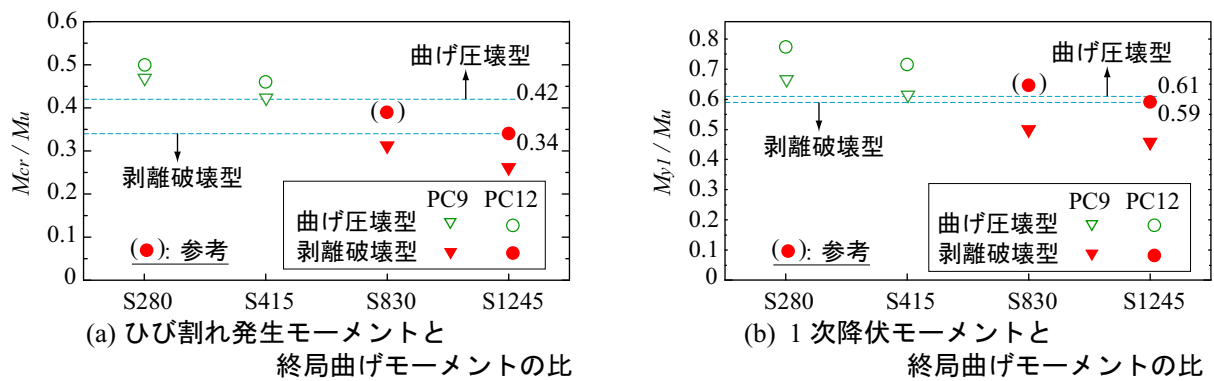


図-5 各予測式による破壊形式の予測と実験結果との比較図

壊型と判定した PC12-S830 試験体の場合には、実験結果の最大荷重および最大変位と計算終局時における荷重および変位との差が 5 kN, 0.5 mm であり、曲げ圧壊型に非常に近いため、本検討では参考値とすることとした。

図-5(a)より、縦軸をひび割れ発生モーメントと終局曲げモーメントとの比とする M_{cr}/M_u の場合には 0.42 以上で曲げ圧壊型を示し、0.34 以下で剥離破壊型を示している。また、図-5(b)より、縦軸を 1 次降伏モーメントと終局曲げモーメントとの比とする M_{y1}/M_u の場合には、0.61 以上で曲げ圧壊型、0.59 以下で剥離破壊型を示していることが分かる。

以上のことから、FRP シート曲げ補強 PC 梁の破壊形式予測は、ひび割れ発生モーメント M_{cr} もしくは 1 次降伏モーメント M_{y1} と終局曲げモーメント M_u との比を用いることにより可能であるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、FRP シートで曲げ補強した PC 梁の耐荷性状やシートの剥離性状に関する基礎資料の収集を目的に、AFRP シート曲げ補強 PC 梁の静載荷実験を実施した。本実験の範囲内で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) AFRP シート曲げ補強 PC 梁の耐荷性状およびシートの剥離性状は、AFRP シート曲げ補強 RC 梁と大略同様である。しかしながら、PC 梁の場合にはピーリング発生領域

が曲げひび割れ発生領域にまで拡大する。

- 2) AFRP シート曲げ補強 PC 梁の破壊形式予測は、曲げ剛性が変化する時点の曲げモーメント (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 との比によって可能であるものと考えられる。

今後、AFRP シート曲げ補強 PC 梁に関するより多くのデータを収集し、破壊形式予測式の精度を向上させる予定である。

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 (構造性能照査編), 2002
- 4) 呉 智深, 松崎 智優, 福沢 公夫, 神口 建: CFRP シート緊張接着した鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000.2
- 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