

AFRP シートで曲げ補強した PC 梁の静載荷実験

Static loading test of flexure reinforced PC beams with AFRP sheet

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)
(株) ケイジーエンジニアリング 正会員 巽 治 (Osamu Tatsumi)
室蘭工業大学 ○ 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。既往の研究より^{1),2)}、1) FRP シート下面接着 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 梁下面に接着した FRP シートは、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剥離すること、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の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従来から行われている。PC 梁の場合、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、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。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少なく、未解明な部分が残るのが現状である。そこで、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、緊張力を導入しない FRP シート曲げ補強 PC 梁に関する静的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、下端鋼材を2種類、シート補強量を無補強を含めた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、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、曲げ補強に用いたシートの総目付量を英文字 S に付して示している。なお、下端鋼材の PC 鋼より線の有効緊張力は引張強度 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。

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

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 (0.6 f_u)	-	-
PC9-S280			22.8	280
PC9-S415			33.7	415
PC9-S830			67.5	830 (415 $\times$ 2)
PC9-S1245			101.2	1245 (415 $\times$ 3)
PC12-N	ϕ 12.4	103.0 (0.6 f_u)	-	-
PC12-S280			22.8	280
PC12-S415			33.7	415
PC12-S830			67.5	830 (415 $\times$ 2)
PC12-S1245			101.2	1245 (415 $\times$ 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	389	580	206
ϕ 9.3	SWPR7AN	1,579	1,879	191
ϕ 12.4		1,555	1,851	193

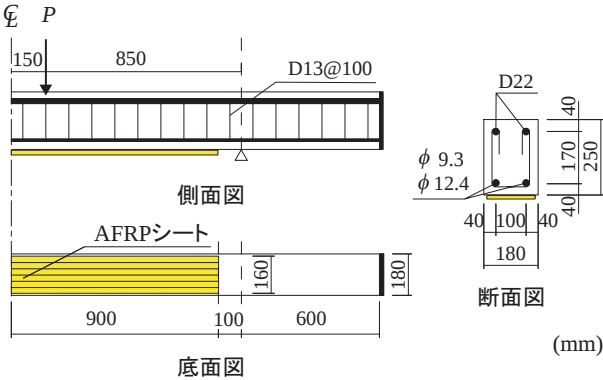


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

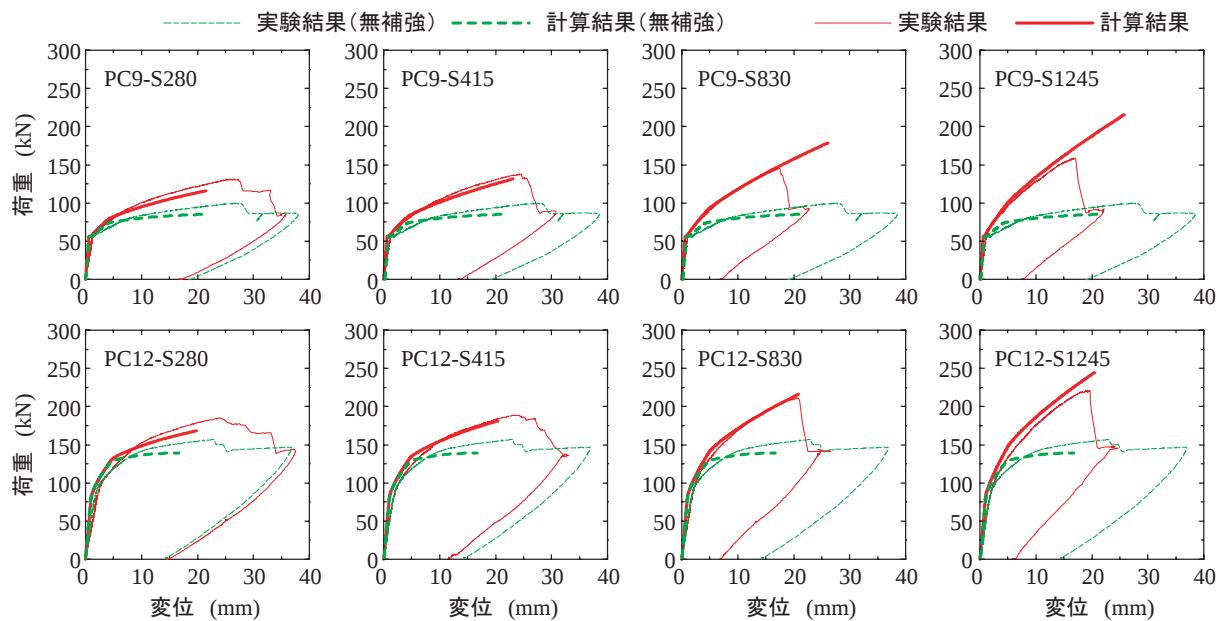


図-3 AFRP シート曲げ補強 PC 梁の荷重-変位関係

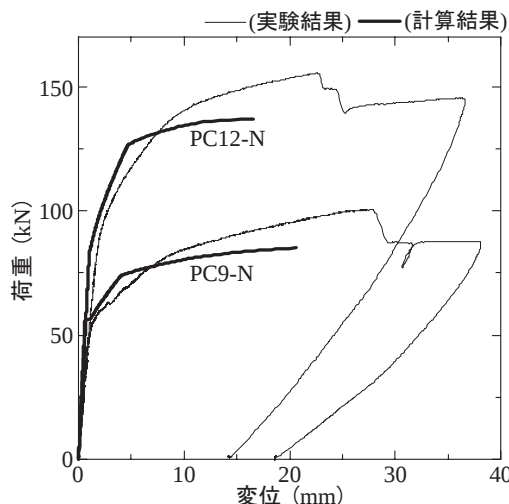


図-2 無補強 PC 梁の荷重-変位関係

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, セン断スパン比は 4.0 である。また, セン断ひび割れが発生し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⁴⁾に準拠した 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, 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_{yu} との間を約 20 cm 確保することとした。

3. 実験結果および考察

3.1 無補強 PC 梁の荷重-変位関係

図-2 には, 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, 計算はコンクリート標準示方書に準拠した断面分割法により上縁コンクリートのひずみが圧壊ひずみ(3500μ)に達するまで行った。

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 P_{ue} (kN)	変位 δ_{ue} (mm)	荷重 P_{uc} (kN)	変位 δ_{uc} (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	
PC9-S1245	158.8	17.0	215.6	25.8	
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	剥離破壊型
PC12-S1245	220.5	19.0	244.6	20.5	

計算結果を見ると, PC9-N 試験体は曲げひび割れ発生荷重時および PC 鋼より線の 1 次降伏点で剛性勾配の変化が大きいことが分かる。また, PC12-N 試験体の計算結果も同様に各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はない。

実験結果を見ると, PC 鋼材量にかかわらず, 曲げひび割れ発生荷重時までは同様な剛性勾配を示していることが分かる。PC9-N 試験体では, 曲げひび割れ発生荷重で急激に勾配が低下し, その後, 変位約 8 mm で 1 次降伏点が見られるものの, 2 次降伏点は明確には見られない。PC12-N 試験体では, PC9-N 試験体ほど明確な曲げひび割れ発生荷重および 1 次降伏点は見られないものの, これらに対応する変化点の存在は確認できる。一方, 2 次降伏点は PC9-N 試験体と同様に確認することができない。このことから, PC 梁の曲率変化点としては曲げひび割れ発生荷重および PC 鋼材の 1 次降伏点に着目すれば良いと考えられる。

3.2 AFRP シート曲げ補強 PC 梁の荷重-変位関係

図-3 には, FRP シートで曲げ補強した各 PC 梁の荷重-

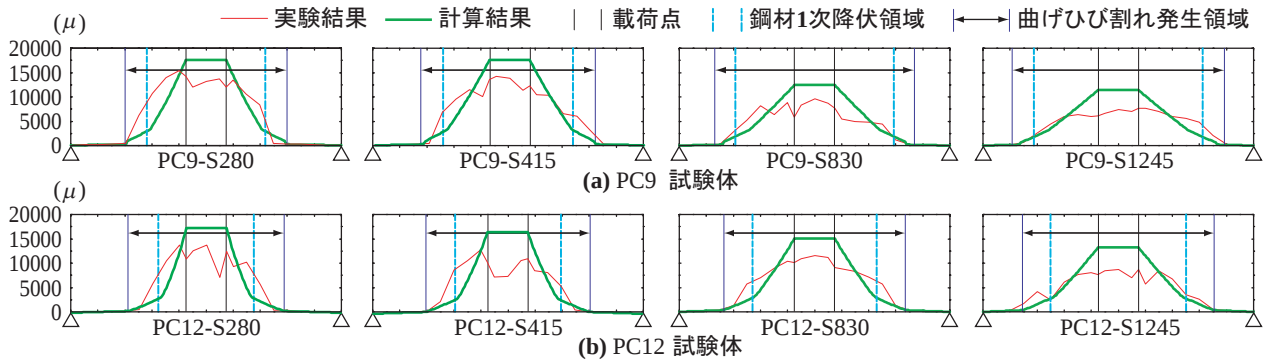


図-4 曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状

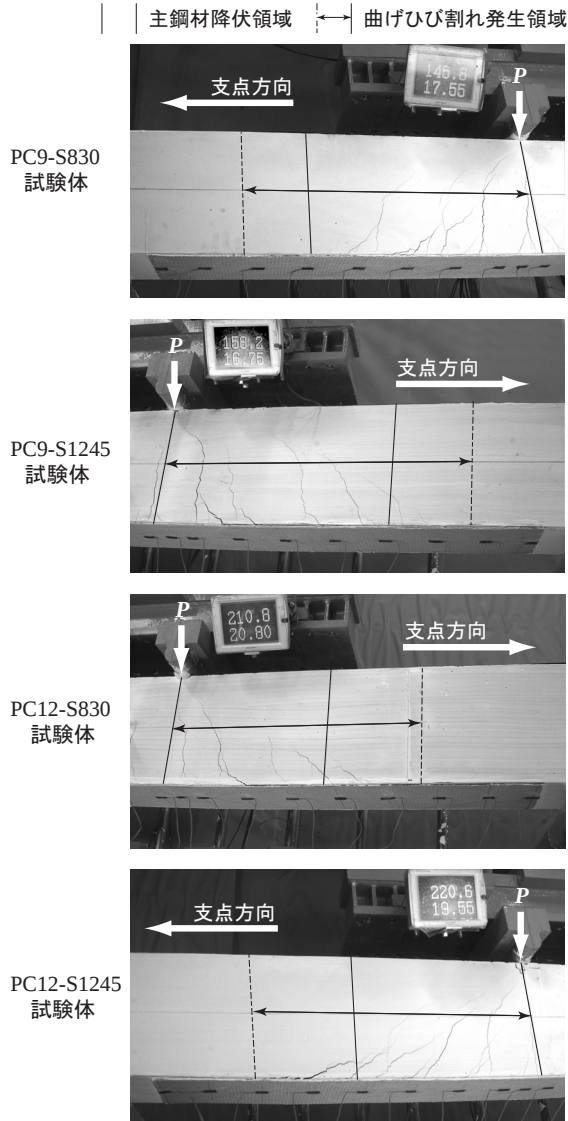


写真-1 シート剥離直前のひび割れ性状

変位関係を計算結果と比較して示している。表-4には、図-3より得られる実験結果の最大荷重、最大荷重時変位、計算結果の最大荷重、最大荷重時変位および破壊形式を一覧にして示している。ここでは、破壊形式は実験結果が計算耐力および計算終局変位をいずれ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。

図より、計算結果はひび割れ発生荷重時から終局近傍まで実験結果と概ね対応していることが分かる。破壊形式に

着目すると、PC9試験体において、-S280、-S415試験体の実測最大荷重および最大荷重時変位はともに計算結果を上回っていることから曲げ圧壊型を示していることが分かる。しかしながら、補強量の増加とともにシート剥離時の変位が小さくなり、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。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していることが分かる。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、既往の研究におけるFRPシート曲げ補強RC梁の傾向と同様である。

3.3 ひずみ分布性状およびひび割れ性状

図-4には、曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状を試験体ごとに示している。図には、曲げ圧壊型を示したPC9/PC12-S280、-S415試験体は計算終局変位時の実測ひずみと計算ひずみを、剥離破壊型を示したPC9/PC12-S830、-S1245試験体は実測最大荷重時変位と同一変位時の計算ひずみを実測値と比較して示している。

図より、曲げ圧壊型を示したPC9/PC12-S280、-S415試験体は、いずれも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ものと推察される。しかしながら、シート接着端部では未だ発生ひずみは零レベルであり、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。

剥離破壊型を示したPC9/PC12-S830、-S1245試験体では、計算終局変位前にもかかわらず、等せん断力区間の曲げひび割れ発生領域内においてピーリング作用に伴うシート剥離の傾向が見られ、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、载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、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となった。

3.4 破壊形式予測式の検討

3.2, 3.3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

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
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

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、

曲げ圧壊型の場合： $M_y/M_u > 0.70$

剥離破壊型の場合： $M_y/M_u < 0.65$

である。この式は、終局曲げモーメント M_u と曲率変化点である M_y との比を用いていることより、PC梁に関しても同様に曲率変化点である曲げひび割れ発生モーメント M_{cr} およびPC鋼より線の1次降伏モーメント M_{y1} に着目することとした。

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、横軸に補強量を取り、縦軸をそれぞれ M_{cr}/M_u 、 M_{y1}/M_u として示している。なお、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を示している。ここでは、表-4で剥離破壊型と判定したPC12-S830試験体は、破壊形式の明確な規定が困難なため、本検討から除外することとした。図-5(a)より、 M_{cr}/M_u が0.42以上で曲げ圧壊型を示し、 M_{cr}/M_u が0.34以下の場合で剥離破壊型を示していることが分かる。一方、図-5(b)より、 M_{y1}/M_u が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曲げひび割れ発生モーメント M_{cr} およびPC鋼より線の一次降伏モーメント M_{y1} と終局モーメント M_u との比を用いることで可能となるものと考えられる。なお、本研究の範囲内では、 M_{cr}/M_u を用いた場合で、

曲げ圧壊型の場合： $M_{cr}/M_u > 0.42$

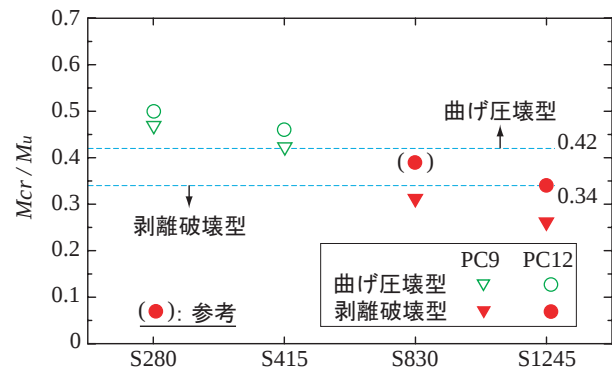
剥離破壊型の場合： $M_{cr}/M_u < 0.34$

また、 M_{y1}/M_u を用いた場合で、

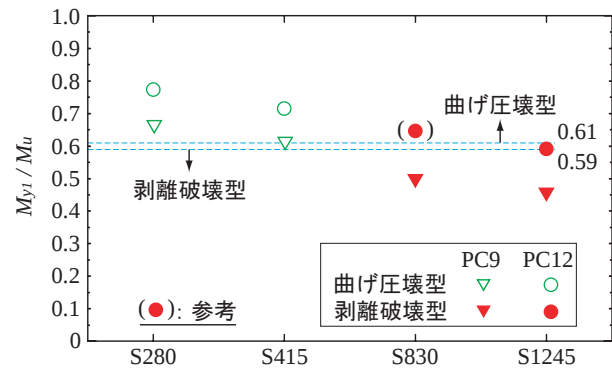
曲げ圧壊型の場合： $M_{y1}/M_u > 0.61$

剥離破壊型の場合： $M_{y1}/M_u < 0.59$

とすることにより予測可能である。



(a) 曲げひび割れ発生モーメントとの比



(b) 鋼材1次降伏モーメントとの比

図-5 破壊形式予測式の検討

4. まとめ

本研究では、緊張力を導入しない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梁の静荷重実験を実施した。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梁の性状と大略同様であるが、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、曲率の大きく変化する曲げひび割れ発生モーメント M_{cr} およびPC鋼より線の1次降伏モーメント M_{y1} と終局モーメント M_u との比によって可能であると考えられる。

今後、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(2002年制定) 構造性能照査編, 2002.
- 4) 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.