

論文 軸方向プレストレスを有する RC 巻立て補強部材の曲げ変形特性

山本 貴士^{*1}・今井 拓也^{*2}・服部 篤史^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨:代表的な耐震補強工法の一つである RC 巻立て工法において、巻立て補強部軸方向にプレストレスを導入することにより、補強部材の復元特性の改善が期待できる。本研究では、軸方向プレストレスを有する RC 巻立て補強部材について、軸方向プレストレス量、補強部軸方向筋の機械的性質が、補強部材の曲げ変形特性、特に靱性および復元特性に与える影響を検討した。その結果、補強部材の曲げ変形特性は、補強部緊張材の機械的性質に大きく依存していることが判明した。

キーワード:軸方向プレストレス、緊張材の機械的性質、靱性、復元特性

1. はじめに

コンクリート橋脚に対する耐震補強は、これまで曲げ、せん断耐力あるいは靱性の向上を目的に行われてきた。一方で、地震後の迅速な復旧、供用性の回復を考慮した場合、補強部材のひび割れの制限あるいは復元力の向上も重要となる。これに対して、耐震補強工法の一つである RC 巻立て工法において、補強部軸方向にプレストレスを導入することが有効であると考えられるが、軸方向プレストレスが復元特性改善に与える影響については定量的な検討が必要である。また、この工法では、プレストレスによ

る圧縮領域コンクリートへの負担増大や緊張材の機械的性質から、補強部材の靱性低下の可能性があるため、軸方向プレストレスと補強部材の靱性、復元特性の関係も検討しておく必要がある。

そこで本研究では、軸方向プレストレスを有する RC 巻立て補強部材に対して、対称 2 点載荷による正負交番曲げ試験を行うことにより、軸方向プレストレス導入量および緊張材の機械的性質が補強部材の曲げ変形形状に与える影響を検討した。

表1 供試体一覧

供試体名	載荷時 軸力比 (%)	既存部	補強部		軸方向プレストレス		
		f'_c N/mm ²	軸方向	横方向	f'_c N/mm ²	緊張力 (kN)	プレストレス (N/mm ²)
無補強	12.6	45.9	—	—	—	—	—
RC	9.7	40.3	D13	D6	50.0	—	—
PC-0.0	10.5	33.1	PC鋼棒(φ11)	D6	45.9	0.0	0.00
PC-26.5	10.7	33.1	PC鋼棒(φ11)	D6	45.9	26.5	1.03
PC-53.0	11.5	45.1	PC鋼棒(φ11)	D6	45.4	53.0	2.60
CFPC-26.5	10.5	35.5	CFRP(φ11)	CFRP(φ6)	46.9	26.5	1.22
CFPC-53.0	11.1	38.3	CFRP(φ11)	CFRP(φ6)	45.5	53.0	2.83
AFPC-26.5	10.9	35.5	AFRP(φ11)	AFRP(φ6)	46.9	26.5	0.94
AFPC-53.0	11.3	38.3	AFRP(φ11)	AFRP(φ6)	45.5	53.0	3.03

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*2 京都大学 工学部交通土木工学科

*3 京都大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

表2 補強部補強筋の機械的性質

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	伸び (%)
CFRP φ11	-	2100	156800	1.3 ¹⁾
AFRP φ11	-	1493	68600	2.2 ¹⁾
PC鋼棒 φ11	1347	1410	199900	9.0
D13	356	517	210000	26.8
CFRP φ6	-	2100	156800	1.3 ¹⁾
AFRP φ6	-	1493	68600	2.2 ¹⁾
D6フープ筋	310	533	181400	29.4

1)伸び=引張強度/弾性係数

2. 実験概要

2.1 実験要因

補強部緊張材に与える緊張力は一本あたり 0, 26.5, 53.0kN であり, 軸方向プレストレスは補強部断面のみに口型定着版を用いて与えた。補強部緊張材には, PC 鋼棒(φ11), CFRP(φ11), AFRP(φ11)を, また通常の RC 巻立てとして D13 を用いた。供試体一覧および補強部緊張材の機械的性質をそれぞれ表 1, 表 2 に示す。

2.2 供試体

無補強供試体は幅×高さ×全長(スパン長)=200×200×2000(1800)mm で主筋として 8-D16 を有する RC はりで, 横補強筋には平成 3 年度コンクリート標準示方書設計編¹⁾の最小配筋量に相当する間隔 200mm で D6 フープ筋を配筋した。この場合, 曲げせん断耐力比($V_u \cdot a/M_u$)は 1.15 となる。また, 柱部材を想定し, 断面中心に配置したアンボンド PC 鋼棒(φ17mm)を用いて圧縮軸力 108kN(軸力比 $\sigma_c/f_{cr}=10\%$)を目標に導入した。なお, コンクリートの目標強度 f_{cr} は 27N/mm²とした。

補強供試体は, 図 1 に示すように幅×高さ×全長(スパン長)=300×300×2000(1800)mm で補

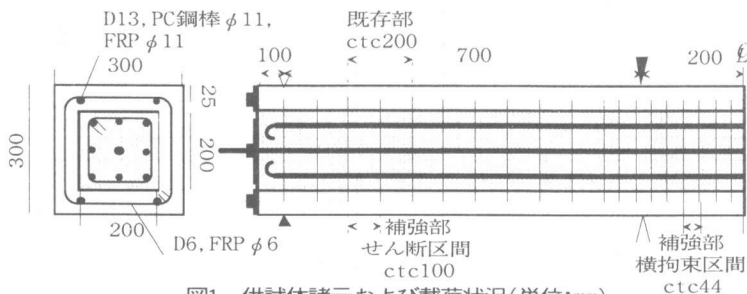


図1 供試体諸元および荷重状況(単位:mm)

強厚は 50mm とした。補強部の横拘束筋配筋間隔は 44mm で, 体積比は既存部を含めたコアコンクリートに対して 0.918%, またせん断補強筋配筋間隔は 100mm で, せん断補強筋比は既存部を含めた b_w に対して, D6 フープ筋を用いたもので 0.211%, CFRP および AFRP を用いたもので 0.141%である。なお, 補強部コンクリートの目標強度 f_{cr} は 45N/mm²とした。また, 既存部と補強部コンクリートの打継面は, 既存部表面への凝結遅延剤使用による骨材洗出し処理を行った。

2.3 荷重方法

荷重はスパン 1800mm に対し, 曲げスパン 400mm, せん断スパン 700mm の対称 2 点漸増繰返し型($(2n-1)\delta_y \times 3$)とし, δ_y は各供試体荷重時の荷重-変位曲線の屈曲点から求めた。また, 終局時は, 最大荷重以降の荷重低下領域で荷重が降伏荷重を下回った点として定義した。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位曲線, ひび割れ・破壊性状

表 3 に各供試体の終局時破壊原因を, 図 2 に各供試体の荷重-変位曲線を, ファイバー法による一方向荷重の曲げモーメント-曲率解析により得られた荷重-変位曲線とともに示す。コンクリートの応力-ひずみモデルには横拘束筋による拘束効果を考慮した藤井-松本モデル²⁾を用い, 既存部コンクリートは補強部横拘束コンクリートのコアコンクリートとして取扱った。鉄筋および PC 鋼棒には平成 8 年度コンクリート標準示方書設計編³⁾の応力-ひずみモデルを, また FRP には文献⁴⁾の引張力-ひずみモデルを用い, 各材料の強度および弾性係数は強度試験値を用いた。なお, 本解析では既存部と補強部コンクリートの付着を完全である一体化部材として取扱った。

無補強供試体ではせん

表3 終局時破壊原因

供試体名	終局時破壊原因
無補強	コンクリート圧潰
RC	補強部横拘束筋フック破損
PC-0.0	補強部コンクリート圧潰
PC-26.5	補強部コンクリート圧潰
PC-53.0	補強部緊張材破断
CFPC-26.5	せん断圧縮破壊
CFPC-53.0	補強部緊張材破断
AFPC-26.5	補強部コンクリート圧潰
AFPC-53.0	補強部緊張材破断

断スパン内に多くのせん断あるいは曲げせん断ひび割れが発生したものの、 $3\delta_y$ の繰返し载荷中に曲げ圧縮部コンクリートの圧潰が進行し、曲げ破壊を生じた。RC 供試体では $5\delta_y$ の繰返

し载荷中に補強部軸方向筋の座屈が顕著になり、横拘束筋のフックが破損し終局に至った。PC-0.0 および PC-26.5 供試体は、 $7\delta_y$ 繰返し载荷中に曲げ圧縮部コンクリートの圧潰が進行したことによる曲げ破壊を生じ、PC-53.0 供試体は $7\delta_y$ 繰返し载荷中の引張側補強部緊張材破断により終局に至った。また、CFPC-26.5 供試体は、降伏後 $3\delta_y$ 繰返し载荷中に一方のせん断スパン内の曲げせん断ひび割れが顕著となり、その後せん断圧縮破壊を生じた。計算せん断耐力(571kN)は曲げ耐力を上回っており、せん断ひび割れが進展したスパンのウェブ領域において局所的に既存部と補強部コンクリートの付着が

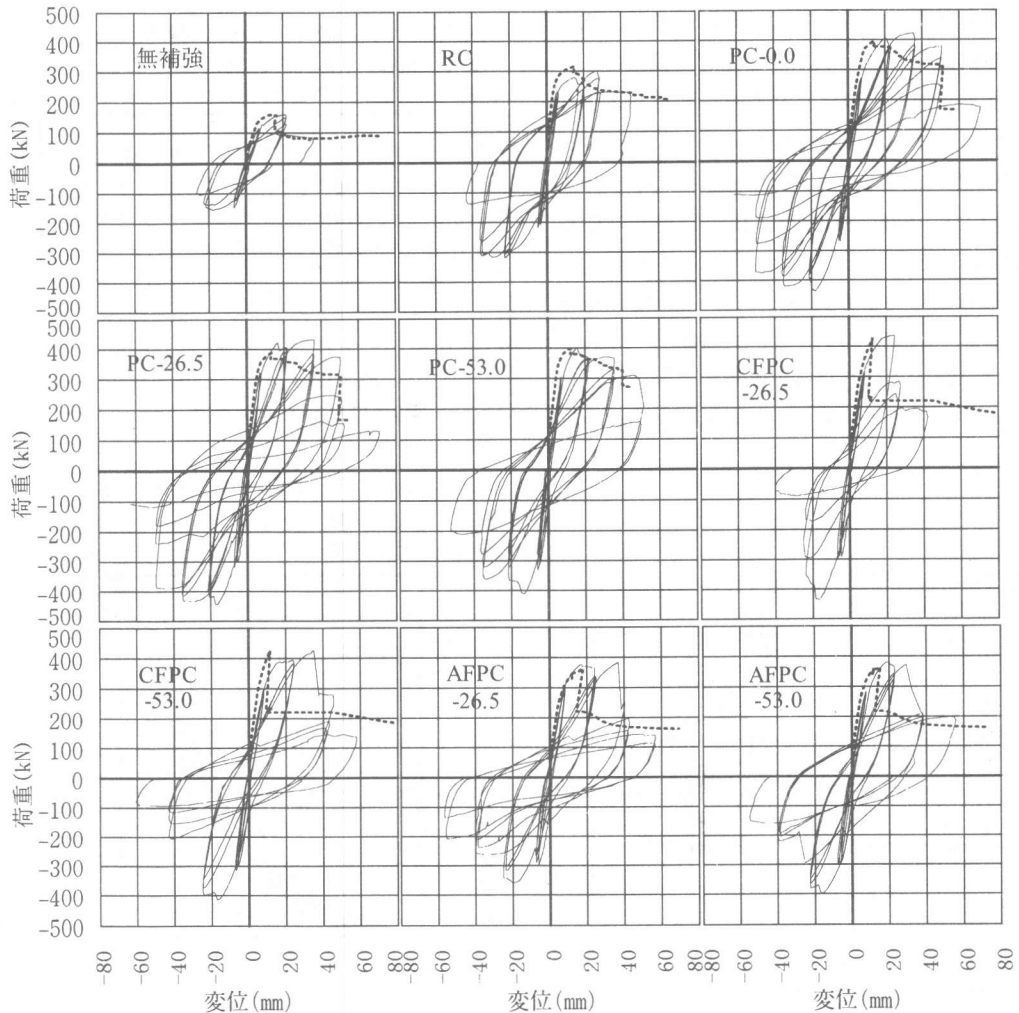


図2 荷重-変位曲線 実験値 ----- 計算値

劣悪であり、補強部のコンクリートおよびせん断補強筋への負担が大きくなった可能性がある⁵⁾。CFPC-53.0 供試体は、 $5\delta_y$ の繰返し載荷中に引張側補強部緊張材の破断が生じ終局に至った。一方、AFPC-26.5 供試体は、 $7\delta_y$ 繰返し載荷中に曲げ圧縮部コンクリートの圧潰が進行したことによる曲げ破壊、AFPC-53.0 供試体はCFPC-53.0 供試体と同様に引張側補強部緊張材の破断により終局に至った。

曲げモーメント-曲率解析では、既存部と補強部コンクリートの付着を完全として取扱うことにより、降伏荷重あるいは最大荷重は比較的精度良く表現することができた。しかし、すべての補強供試体において、初期剛性が計算値よりも実験値の方が小さくなる傾向にあり、既存部と補強部コンクリートの付着面の存在によって、部在剛性が一体化部材として取扱うよりも若干小さくなっているものと考えられる。また、実験結果では緊張力の最も大きい PC-53.0、CFPC-53.0、AFPC-53.0 供試体が緊張材破断型の破壊形式となったが、コンクリートに横拘束効果を考慮した応力-ひずみモデルを用いた本解析では、圧縮縁コンクリートの終局ひずみが増大し、無補強および RC を除くすべての供試体において、補強部緊張材破断型の破壊形式となった。

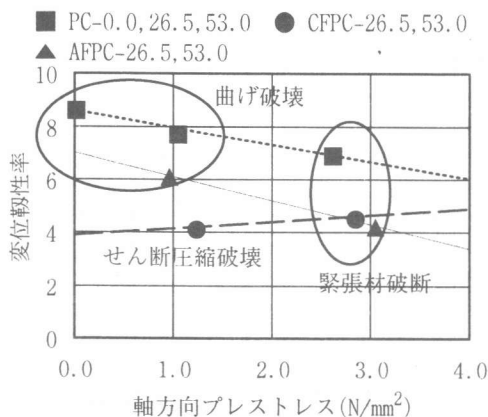


図4 軸方向プレストレスが変位靱性率に与える影響

3.2 ひび割れ発生荷重

図3に軸方向プレストレスがひび割れ発生荷重に与える影響を示す。軸方向のプレストレスの増加に伴いひび割れ発生荷重が増加している。また、曲げ破壊あるいは補強部緊張材破断により終局に至った供試体では、RC 供試体よりもせん断スパンに発生するひび割れが少なく、曲げスパン付近に限定されていた。

3.3 変位靱性率

図4に軸方向プレストレスが変位靱性率に与える影響を示す。せん断圧縮破壊を生じたCFPC-26.5 供試体以外は、軸方向プレストレスの増加に伴い破壊形式が緊張材破断型になり、変位靱性率が低下する傾向にあった。また、緊

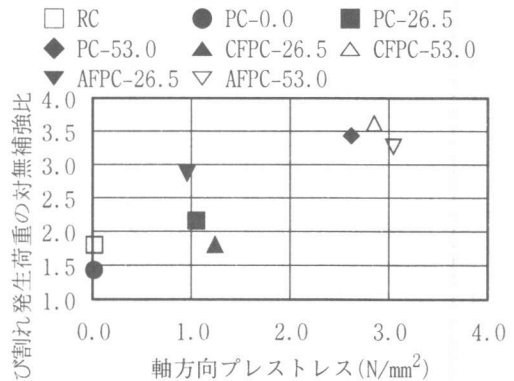


図3 ひび割れ発生荷重

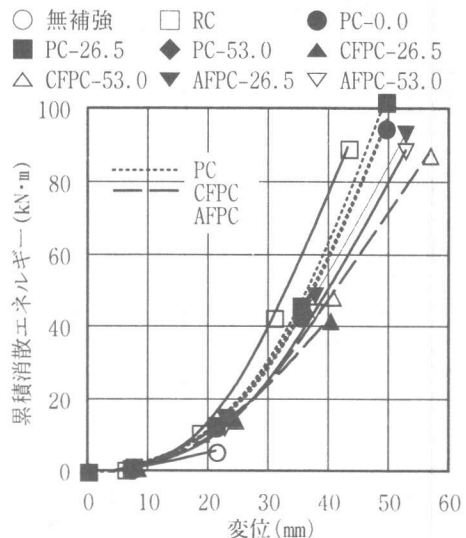


図5 累積消散エネルギー

張材として FRP よりも PC 鋼棒を用いた方が変位靱性率が大きくなっている。したがって、変位靱性率の観点からは、軸方向プレストレスの上限値を制限し、緊張材として伸び能力の大きな材料を使用することが望ましいといえる。

3.4 エネルギー消散能

図 5 に累積消散エネルギーの $(2n-1)\delta_y$ サイクル時の値と変位の関係を示す。軸方向プレストレスを導入したものよりも RC 供試体の方が同一変位でのエネルギー消散能に優れている。また、 $5\delta_y$ 以降において $CFRP < AFRP < PC$ 鋼棒の順にエネルギー消散能が大きくなっている。これは、緊張材として FRP を用いたものでは、破壊形式によらず、耐力低下が $5\delta_y$ の繰返し载荷中に集中していたのに対し、PC 鋼棒を用いたものでは $7\delta_y$ までほぼ耐力を維持していたためである。一方、軸方向プレストレスが大きいものほど緊張材破断型の破壊形式となったため、エネルギー消散能が若干小さくなっている。

3.5 復元特性

図 6 に $(2n-1)\delta_y$ サイクル目正方向载荷時の残留変位率と変位の関係を示す。残留変位率は、各ループの残留変位をそのループの最大変位で除したものである。また、図 7 に $(2n-1)\delta_y-1$ サイクル目正方向载荷時の弾性エネルギー(=吸収エネルギー-消散エネルギー)と変位の関係を示す。

いずれの指標においても、無補強、RC 供試体に比べ PC、CFPC、AFPC 供試体の方が復元特性に優れていることがわかる。また、 $1\delta_y$ では緊張材の種類によらずほぼ同程度の残留変位率および弾性エネルギーとなっているが、 $3\delta_y$ では PC、AFPC 供試体よりも CFPC 供試体が若干大きな復元特性を有している。逆に、 $5\delta_y$ 以降では AFPC、CFPC 供試体よりも PC 供試体が大きな復元特性を有している。曲げ降伏以降 $3\delta_y$ の間では緊張材の機械的性質からその負担力が $AFRP < PC$ 鋼棒 $< CFRP$ の順に大きくなり、緊張材の有する弾性エネルギーは弾性係数

- 無補強 □ RC ● PC-0.0
- PC-26.5 ◆ PC-53.0 ▲ CFPC-26.5
- △ CFPC-53.0 ▼ AFPC-26.5 ▽ AFPC-53.0

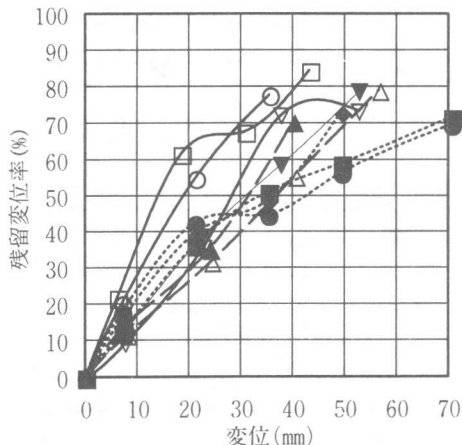


図6 残留変位率

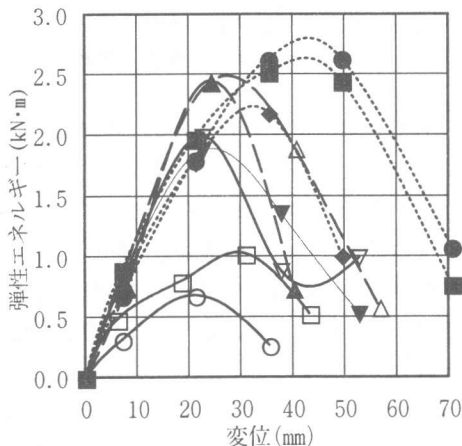


図7 弾性エネルギー

が大きく降伏現象の無い CFRP が一番大きくなる。したがって、 $3\delta_y$ までは緊張材として CFRP を用いたものの復元特性が大きくなるものと考えられる。一方、 $5\delta_y$ 以降では、PC-53.0、CFPC および AFPC 供試体の曲げ圧縮部コンクリート圧潰の進行あるいは緊張材の破断により緊張材負担力が減少し、復元特性は低下している。

次に、軸方向プレストレスが $3\delta_y$ および $5\delta_y$ サイクル目正方向载荷時の弾性エネルギーに与える影響を図 8 に示す。 $3\delta_y$ では、軸方向プレストレスの導入量が弾性エネルギーに与える影響は見られない。 $5\delta_y$ では、軸方向プレストレスの増加に伴い、弾性エネルギーがわず

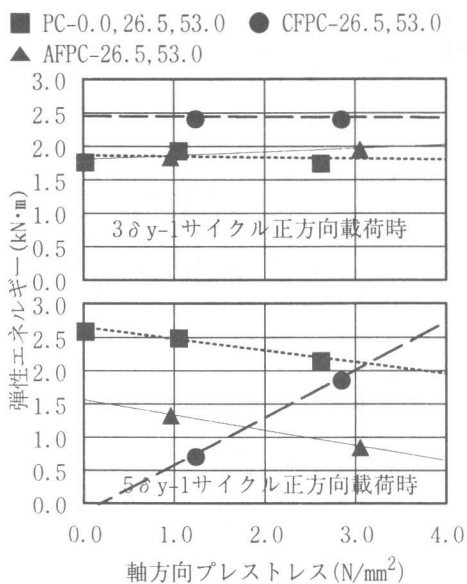


図8 軸方向プレストレスが
弾性エネルギーに与える影響

かに低下していることがわかる。軸方向プレストレスの導入により、曲げ圧縮部コンクリートの圧潰が進行しやすくなったためと考えられる。

以上のことから、補強部軸方向筋として高い引張強度を有する材料を用い、その負担力を増加させることによって、RC 巻立て補強部材の復元特性を改善することができると考えられる。したがって、緊張材の緊張率 $\lambda (=A_p \cdot f_{py} / (A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_{sy}))$ A_p :緊張材断面積, A_s :鉄筋断面積, f_{py} :緊張材降伏強度(引張強度), f_{sy} :鉄筋降伏強度)を大きくすることによってさらに復元特性の改善を行うことができる可能性がある。

また、復元特性の改善効果を塑性変形領域においても持続させるためには、PC 鋼材のようなある程度の塑性変形を生じる材料を用いることによって圧縮縁コンクリートの負担力を持続させる必要がある。このことから、軸方向プレストレスの導入はせん断ひび割れの制御には効果があるものの、過度の導入は曲げ圧縮部コンクリートの早期圧潰あるいは緊張材の早期破断による補強部材の靱性低下につながるため注意が必要である。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて結論とする。

変位靱性率、エネルギー消散能を靱性指標、残留変位率、弾性エネルギーを復元特性指標とした場合、

(1) 補強部緊張材として高引張強度の材料を用いることによって、通常の RC 巻立て補強部材よりも靱性は劣るものの、最大耐力の向上および復元特性の改善が可能である。

(2) 補強部緊張材として伸び能力の大きな材料を用いることにより靱性を得ることができると同時に、塑性変形領域における復元特性の持続が可能である。

(3) 軸方向プレストレスの導入は、曲げひび割れ発生荷重の増加およびせん断スパン内に発生するひび割れの制御には有効であるものの、補強部材の靱性低下とそれに伴う復元特性の低下につながるため、ある程度以下に抑える必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[平成 3 年版]設計編, pp.165~166, 1991.9
- 2) 藤井 学, 小林 和夫, 宮川 豊章, 井上 晋, 松本 利彦:横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の適用に関する検討, セメント技術年報第 42 巻, pp.311~314, 1988.
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書[平成 8 年版]設計編, pp.36~37, 1996.3
- 4) 土木学会:連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー 88, pp.10, 1996.9
- 5) 山本 貴士, 服部 篤史, 宮川 豊章:連続繊維補強材を用いた RC・PC 巻立て補強部材の耐荷性状, 連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集, pp.81~86, 1998.5