

(59) 補強部軸方向プレストレスを有する PC 巻立て補強部材の復元特性

京都大学大学院 ○山本貴士  
 同 上 服部篤史  
 同 上 正会員 宮川豊章

1. はじめに

コンクリート構造物の代表的な補強工法の1つである RC 巻立て工法において、巻立て補強部コンクリートの軸方向にプレストレスを導入(以下、PC 巻立て)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。これにより、従来の耐震補強目的である「曲げ補強」「せん断補強」「靱性補強」に、地震後の供用性向上を目的とした「復元力補強」を追加することができると考えられるが、補強部軸方向プレストレスが補強部材の復元特性改善に与える影響は定量的な検討が必要である。また、RC 巻立て工法では、通常既存部材表面に対してチッピング等による打継目処理を行い、巻立て補強部コンクリートとの付着を確保しているが、この付着の有無が補強部材の耐荷性状に与える影響は、これまであまり検討されていないのが現状である。

一方、鋼材の腐食・劣化にともなうコンクリート構造物の劣化・損傷が問題となってきたことから、RC・PC 巻立て補強部材においても既存部および補強部の耐久性、また補強部の環境遮断性に留意しておく必要がある。

そこで本研究では、巻立て補強部軸方向プレストレスを有する PC 巻立て工法を、曲げせん断耐力比1程度の既存柱部材を想定した RC はりに適用し、対称2点載荷による正負交番曲げ試験を行った。得られた結果から、補強部軸方向プレストレスがひび割れ性状および復元特性に与える影響を検討するとともに、RC・PC 巻立て補強部の耐久性および環境遮断性を考慮して、巻立て補強部補強筋に高耐久性材料の連続繊維補強材を使用した FRP PC 巻立て補強部材の耐荷性状を、無補強および炭素繊維シート巻立て補強部材と比較することにより検討した。さらに、既存部材と巻立て補強部コンクリートの付着の有無が RC 巻立て補強部材の耐荷性状に与える影響もあわせて検討した。

2. 実験概要

2.1 実験要因

巻立て補強部に使用した補強筋の機械的性質および実験要因をそれぞれ表1、表2に示す。補強部緊張材に与える緊張力は一本あたり 53.0kN であり、図1に示すように、補強部軸方向プレストレスは巻立て補強部断面のみに口型定着版を

表1 巻立て補強部用補強筋の機械的性質

種類	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び <sup>1)</sup> (%)
CFRP φ11	10.4	84.00	-	2100	156800	1.3 <sup>1)</sup>
AFRP φ11	10.4	84.00	-	1493	68600	2.2 <sup>1)</sup>
PC鋼棒 φ11	11.0	95.03	1347	1410	199900	9.0
D13	12.7	126.70	356	517	21000	26.8
CFS <sup>2)</sup>	250 <sup>3)</sup>	27.75	-	3479	230300	1.5 <sup>1)</sup>
CFRP φ6	5.2	21.00	-	2100	156800	1.3 <sup>1)</sup>
AFRP φ6	5.2	21.00	-	1493	68600	2.2 <sup>1)</sup>
D67° <sup>3)</sup> 筋	6.35	31.67	310	533	181400	29.4

1)伸び=引張強度/弾性係数 2)目付量200g/m<sup>2</sup> 3)シート幅

表2 実験要因

供試体名	載荷時 軸力比 (%)	既存部			補強部				付着	軸方向プレストレス			
		軸方向筋	横補強筋	f <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	軸方向 <sup>1)</sup> 種類	横拘束 種類 間隔	せん断補強 種類 間隔	f <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>		緊張力 (kN)	プレストレス (N/mm <sup>2</sup> )		
無補強	12.6			45.9									
CFシート巻立て	12.1			44.8	CFS	CFS 197	CFS 197						
RC巻立て	9.2	8-D16	D6 ctc 200	40.7	D13	D6 <sup>2)</sup> ctc 44	D6 <sup>2)</sup> ctc 100	52.4	無	0.0	—		
RC巻立て	9.7			40.3									
PC巻立て	11.5			45.1	PC鋼棒								
CFRP PC巻立て	11.1			38.3	CFRP							CFRP	45.4
AFRP PC巻立て	11.3			38.3	AFRP							AFRP	45.5

1)4-D13 or 4-φ11の対称複配筋 2)135°フック付き

用いて与えた。また、既存部と巻立て補強部コンクリートの付着の有無は、それぞれ既存部材表面への凝結遅延剤使用による骨材洗出し、および既存部材表面へのビニルシート(厚さ0.2mm)の巻付けにより確保した。

### 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<sup>1)</sup>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( $\phi 17$ mm)を用いて圧縮軸力108kN(軸力比 $\eta = \sigma / f_{cr} = 10\%$ )を導入した。なお、コンクリートの目標配合強度 $f_{cr}$ は27N/mm<sup>2</sup>とした。

(FRP)PCおよびRC巻立て補強供試体は図1に示すように、幅×高さ×全長(スパン長)=300×300×2000(1800)mmで巻立て補強厚は50mmとした。巻立て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

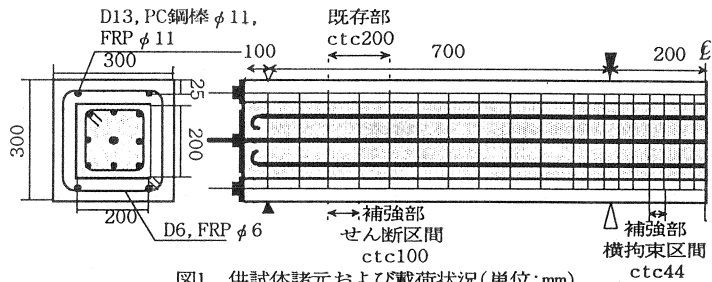


図1 供試体諸元および載荷状況(単位:mm)

て、CFRPおよびAFRPを用いたもので0.141%、D6フープ筋を用いたもので0.211%である。なお、巻立て補強部コンクリートの目標配合強度 $f_{cr}$ は45N/mm<sup>2</sup>とした。

炭素繊維シート巻立て補強供試体は、無補強供試体に対し、軸方向補強量がCFRP PC巻立て補強供試体の引張側補強繊維断面積比( $p_r = A_r / (b \cdot d)$ ,  $A_r$ :繊維断面積,  $b$ :はり幅,  $d$ :引張側補強繊維の有効高さ)と同一の2.5層を貼付け、横方向にはCFRP PC巻立て補強供試体のせん断補強筋比と等しくなる配筋量(CFシート中心線間隔197mm)でスパン全長にわたりスパイラル状に巻付けた。

### 2.3 載荷方法

載荷はスパン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、 $\delta_y$ は各供試体載荷時の荷重-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

表3に載荷実験結果を示す。ここで、諸荷重の計算値は、ファイバー法による一方向載荷の曲げモーメント-曲率解析により得られた荷重-変位曲線より求めたものである。コンクリートの応力-ひずみモデルは平成8年度コンクリート標準示方書設計編<sup>2)</sup>に示されたモデルに曲げ強度まで引張側を考慮したものを、鉄筋

表3 実験結果(値はすべて正方向載荷時のもの)

供試体名	$P_{cr}$			$P_y$			$P_u$ (最大荷重)			$\mu$	終局時破壊原因
	計(kN)	実(kN)	実/計	計(kN)	実(kN)	実/計	計(kN)	実(kN)	実/計		
無補強	42.6	39.8	0.93	114.0	115.5	1.01	135.7	160.0	1.18	4.2	コンクリート圧潰
CFシート巻立て	44.4	—	—	127.8	142.4	1.11	197.2	208.3	1.06	6.0	コンクリート圧潰
RC(付着無)	96.2	69.2	0.72	247.9	209.3	0.84	297.4	281.2	0.95	6.4	曲げせん断破壊
RC(付着有)	98.4	79.0	0.80	246.3	230.6	0.94	293.6	300.5	1.02	6.0	補強部横拘束筋フック破損
PC巻立て	127.5	93.7	0.73	281.3	283.1	1.01	361.7	402.4	1.11	7.0	補強部PC鋼材破断
CFRP PC巻立て	107.1	98.6	0.92	264.1	295.3	1.12	393.1	426.2	1.08	4.6	補強部緊張材破断
AFRP PC巻立て	105.0	89.1	0.85	250.4	280.5	1.12	328.1	380.1	1.16	4.3	補強部緊張材破断

および PC 鋼棒には同書<sup>[2]</sup>の応力-ひずみモデルを、また FRP ロッドには文献<sup>[3]</sup>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、本解析は既存部材と巻立て補強部のコンクリート付着は完全である一体化部材として取扱うものである。

### 3. 1 ひび割れ性状および破壊性状

図 2 に各供試体の荷重-変位曲線を計算結果とともに示す。既存部と巻立て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、RC 巻立て、PC 巻立て、FRP PC 巻立て補強供試体では、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、既存部と巻立て補強部コンクリートの付着面の存在によって、部材剛性が一体化部材として取扱うよりも小さくなっているものと考えられる。

無補強供試体ではせん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、 $3\delta_y$ の繰返し載荷中に圧縮部コンクリート圧潰が進行し、破壊形式は曲げ破壊となった。炭素繊維シート巻立て補強供試体では  $3\delta_y$  の繰返し載荷中に軸方向および横方向シートが破断し、荷重低下が生じたものの、その後の圧縮部コンクリートの圧潰により終局を迎えた。RC 巻立ての付着無供試体では、曲げ降伏以降のせん断ひび割れの進展とともに部材変形のひとつがせん断変形によるものとなり、破壊形式は曲げせん断破壊となった。一方、付着有では、 $5\delta_y$  の繰返し載荷中に巻立て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となった。また、PC および FRP PC 巻立て補強供試体では、まず  $3\delta_y$  正負 1 回目の載荷中に圧縮部コンクリートの圧潰が生じ、その後 PC 巻立て補強供試体で  $7\delta_y$ 、FRP PC

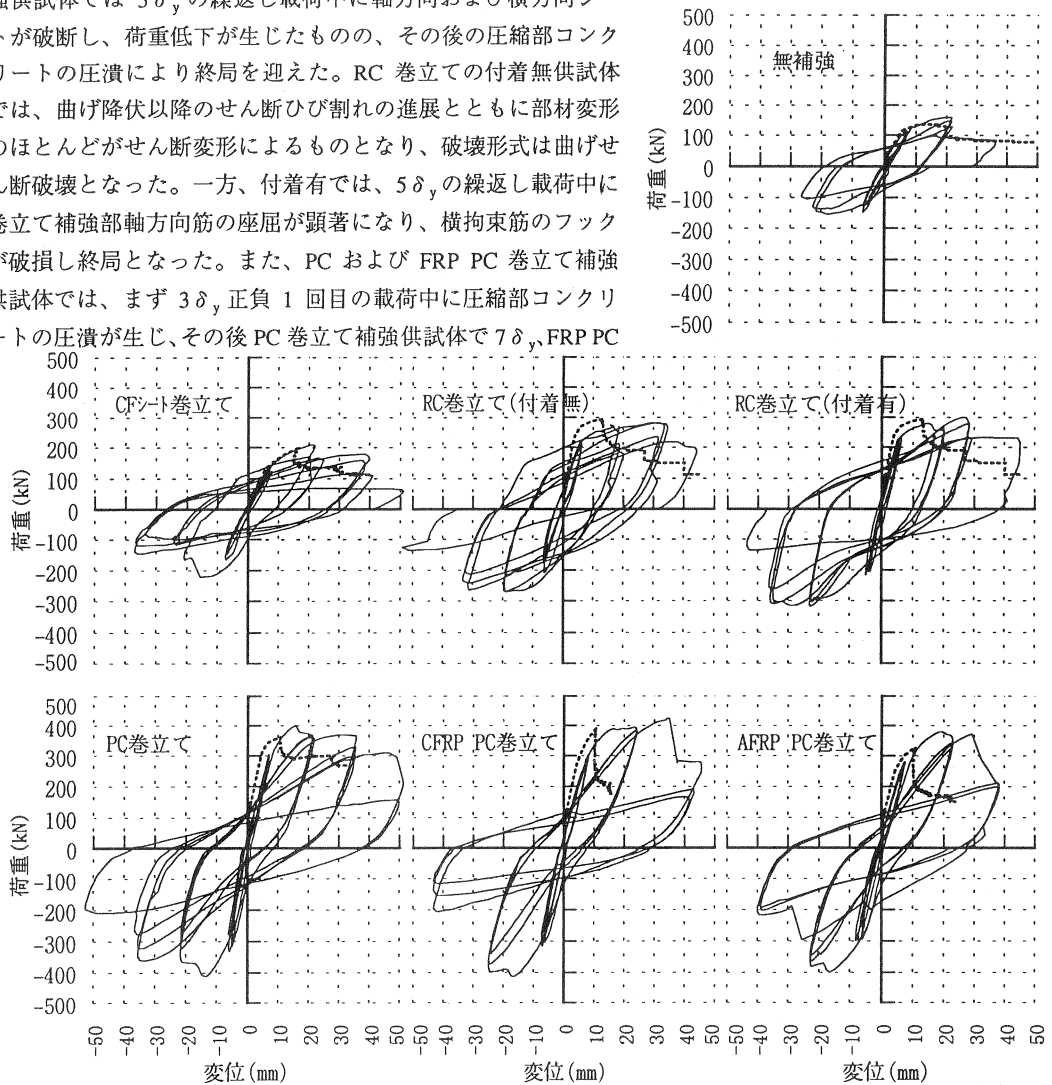


図2 荷重-変位曲線 — 実験値 - - - 計算値

巻立て補強供試体で  $5\delta_y$  の繰返し载荷中に巻立て補強部引張側緊張材の破断が生じ、終局となった。PCあるいはFRP PC巻立て補強供試体の曲げモーメント-曲率解析では、最大荷重時に緊張材は破断ひずみに達しておらず、破断が生じない結果となったが、コンクリートの応力-ひずみ関係に横拘束効果を考慮し、コンクリートの終局ひずみが増大した場合、緊張材破断型の破壊形式と考えられる。

### 3.2 ひび割れ発生荷重

図3に巻立て補強部プレストレスがひび割れ発生荷重に与える影響を示す。PCおよびFRP PC巻立て補強供試体は、RC巻立て補強供試体と比較して、プレストレスによりひび割れ発生荷重が約2倍程度増加していると同時に、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。このことは、地震などの外力を受け損傷した場合の補修が簡便で済むこと示していると思われる。さらに、このようなプレストレスによるひび割れの制御は、耐久性あるいは美観・安心感に対しても有効である。

### 3.3 最大荷重

図4に巻立て補強部軸方向筋種類が最大荷重に与える影響を示す。各工法とも最大荷重の増加が得られたが、その増加率は、ほぼ補強部軸方向筋の引張強度  $f_u$  とその断面積  $A$  の積に比例している。また、同一の引張側補強繊維断面積比で炭素繊維を用いた炭素繊維シート巻立て補強とCFRP PC巻立て補強では、後者の方が巻立て補強コンクリートを有する分、圧縮領域コンクリート断面積が増加するため最大荷重の増加が大きくなっている。したがって、同量の繊維量を用いて補強を行う場合には、CFRP PC巻立て補強の方が「曲げ補強」に対し有利であると考えられる。

### 3.4 変位靱性率

図5に補強部軸方向筋の伸びが変位靱性率に与える影響を示す。炭素繊維シート、RCおよびPC巻立て補強供試体では、無補強供試体に対し1.5倍程度の変位靱性率の増加が得られたが、FRP PC巻立て補強供試体では変位靱性率の改善は見られなかった。また、巻立て補強部緊張材の破断で終局を迎えたPCおよびFRP PC巻立て補強供試体では、巻立て補強部軸方向筋の伸び能力に比例して変位靱性率が大きくなっている。このことから、PC巻立て補強の巻立て補強部軸方向筋は、変位靱性率の観点からは、ある程度の伸び能力を有する材料を使用することが望ましい。

### 3.5 エネルギー消散能

図6に  $(2n-1)\delta_y-1$  サイクル目の消散エネルギーと変位の関係を示す。無補強供試体あるいは炭素繊維シート巻立て補強供試体に比べ、RC、PCおよびFRP PC巻立て補強供試体では、補強による曲げ耐力の増加に伴いエネルギーの消散能が向上している。一方、RC巻立て補強供試体は、巻立て補強部軸方向筋の座

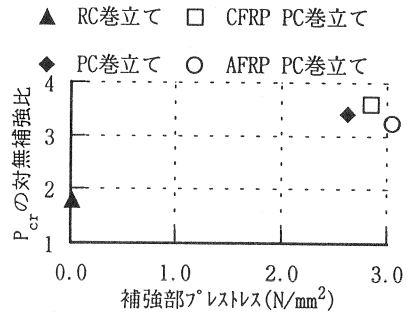


図3 プレストレスが  $P_{cr}$  に与える影響

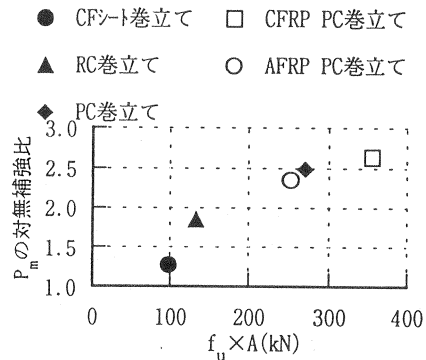


図4 補強部軸方向筋種類が  $P_m$  に与える影響

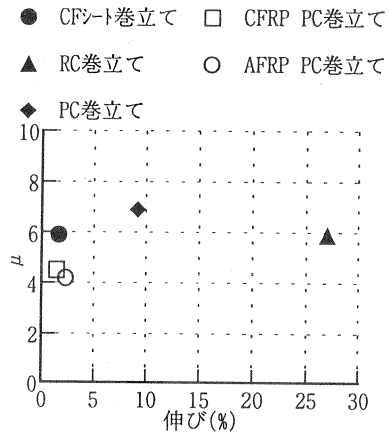


図5 補強部軸方向筋種類が  $\mu$  に与える影響

屈による横拘束筋フックの破損が生じ、横拘束効果が持続しなかったため、エネルギー消散能の PC および FRP PC 巻立て補強に対する優位性は認められなかった。また、FRP PC 巻立て補強供試体は、 $5\delta_y-1$  サイクル目載荷時に巻立て補強部引張側の緊張材が破断し、エネルギー消散能が顕著に低下している。

### 3.6 復元特性

図7に $(2n-1)\delta_y-1$  サイクル目正方向載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。補強部軸方向プレストレスによって残留変位率が小さくなっており、特に $3\sim 5\delta_y$ では10%以上の差が見られる。

本研究では、復元特性指標の一つとして弾性エネルギー  $E_e$ (=吸収エネルギー-消散エネルギー)を用いた。図8に $(2n-1)\delta_y-1$  サイクル目正方向載荷時の弾性エネルギーと変位の関係を示す。PC および FRP PC 巻立て補強は、無補強、炭素繊維シート巻立て補強と比べると、同変位で2倍以上の弾性エネルギーを有していることが分かる。

また、PC 巻立て、FRP PC 巻立て補強供試体では、補強部緊張材の破断により、残留変位率および弾性エネルギーともに終局時には他の供試体と同程度の値となっている。一方、今回の PC 巻立て、CFRP PC 巻立て、AFRP PC 巻立て補強供試体で適用した補強部緊張材の引張剛性 EA の範囲では、同変位における残留変位率および弾性エネルギーにそれほど差が見られなかった。

以上から、今回適用した緊張材の種類、配筋量あるいは緊張力により補強部材の復元特性を改善することができるものと考えられる。しかし、本研究では、緊張力あるいは巻立て補強部軸方向プレストレスのレベルが1種類のみであり、配筋量、緊張力が復元特性に与える影響を今後さらに検討し定量化していく必要がある。

### 3.7 既存部と巻立て補強部コンクリート付着の有無の影響

RC 巻立て補強供試体において、既存部と巻立て補強部コンクリートの付着が無い場合、表3に示すように、各荷重は計算値および付着有のものより小さくなっており、また破壊形式が曲げせん断破壊となった。図9に $1\delta_y-1$  サイクル目正方向載荷における降伏時の断面高さ方向のひずみ分布を示す。付着無ではその付着面でのひずみの不連続性が顕著になっており、巻立て補強部でのひずみが小さい傾向にある。したがって、同変位での荷重が小さくなった

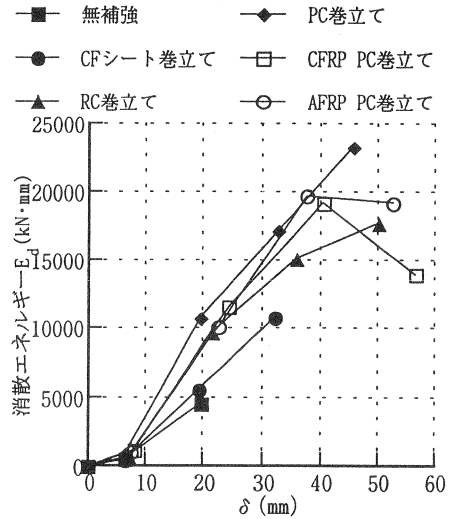


図6 消散エネルギー

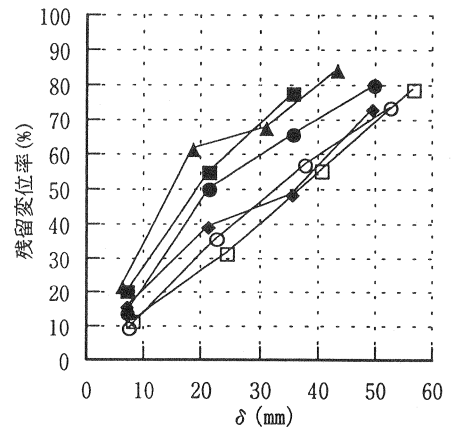


図7 残留変位

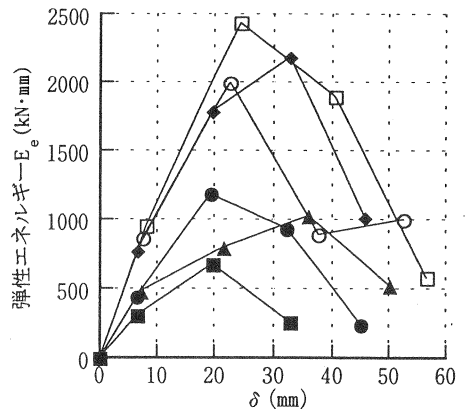


図8 弾性エネルギー

ものと考えられる。図10に荷重とせん断補強筋ひずみの関係を示す。破壊形式の相違からひずみの大きさは異なるが、既存部と巻立て補強部コンクリートの付着が無い場合、巻立て補強部せん断補強筋の負担が大きくなった。同様の傾向がコンクリート部分にも生じていた可能性がある。このように、付着面を介してせん断力の伝達が行われにくくなったことが、曲げせん断破壊を生じた原因と考えられる。したがって、既存部と巻立て補強部のウェブ部分での均等な応力負担を考える上で、既存部と巻立て補強部コンクリートの付着は重要である。

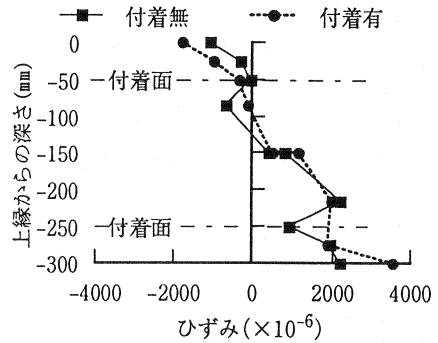


図9 断面高さ方向のひずみ分布(+1 delta y)

#### 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。

(1)「曲げ補強」「せん断補強」「靱性補強」に加え「復元力補強」を考慮した場合、巻立て補強部軸方向プレストレスを有するPC巻立て工法は有効な補強工法であることが示された。復元特性改善に有効なプレストレスの定量化には、今後更なる検討を要する。

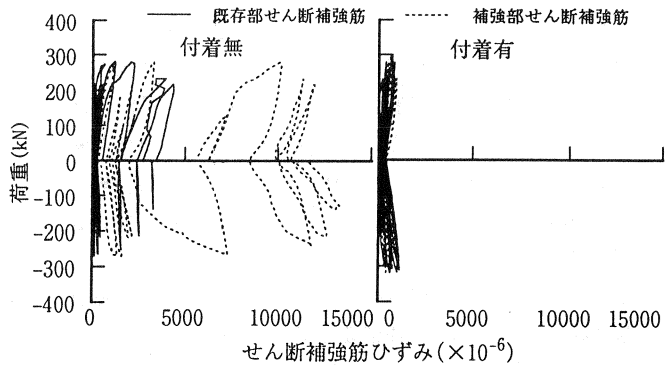


図10 荷重-せん断補強筋ひずみ

- (2) PC巻立て工法において、変位靱性率の増加を得るためには、巻立て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が望ましい。
- (3) エネルギー消散能を指標とすると、PCおよびFRP PC巻立て工法は、同一の引張側補強繊維断面積比で適用した炭素繊維シート巻立て工法以上の、またRC巻立て工法と同程度の靱性を得ることができる。
- (4) 既存部材に表面処理を行わず巻立てた場合でもある程度の付着が存在するため、今回の完全付着無のような諸断面耐力の低下や破壊形式の移行は考えにくいものの、既存部と巻立て補強部のひずみの連続性確保あるいは均等な応力負担を実現する上で既存部と巻立て補強部コンクリートの付着は重要である。

#### 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] 土木学会:コンクリート標準示方書[平成8年版]設計編、pp.23~24、36~37、1996.3
- [3] 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 - 88、pp.10、1996.9