

# 繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究（その4）

——炭素繊維およびアラミド繊維を緊張材としたPC板の曲げ実験——

木村 耕三 小島 克朗  
岡野 素之

## Research and Development on Structural Members Using New and Advanced Fiber Materials (Part 4)

——Experiments on Flexural Behaviors of Prestressed Concrete Plates with Carbon or Aramid Fiber Strands——

Kohzo Kimura Yoshiro Kobatake  
Motoyuki Okano

### Abstract

Carbon fibers (CF) have excellent characteristics such as high strength, high modulus of elasticity, and high durability. Because of these characteristics, carbon fibers have been used in civil engineering and building construction. An aim of this study is to comprehend what the characteristics are like, and make them applicable for practical use. This paper describes the results of experiments on flexural behaviors of prestressed concrete (PC) plates with CF or aramid fiber strands. The following results were obtained with these experiments. ① CF twisted cord can be used as strands for PC plates 4 cm in thickness. ② The flexural cracking load of plates 4 cm or more in thickness, and the flexural strength of PC plates 7 cm in thickness are calculated in the same manner as for PC members. ③ The maximum load of 4 cm in thickness is slightly less than the calculated load.

### 概要

炭素繊維等の高弾性で比強度が高く、耐久性に優れた繊維系新素材は、過酷な環境下にある土木建築物の構造材としてその利用が検討されている。本研究の目的は、繊維系新素材を構造部材に適用するための諸性状の把握とその実用化の検討である。本報告は、炭素繊維あるいはアラミド繊維を緊張材としたプレストレストコンクリート板の曲げ実験結果について述べたものである。実験の結果、以下のことが分かった。① 炭素繊維より線は厚さ4 cmの薄板の緊張材として利用出来る。② 厚さ4 cm以上のPC板の曲げびびわれ荷重と、厚さ7 cmのPC板の曲げ耐力は通常のPC部材と同様の方法で求めることができる。③ 厚さ4 cmのPC板の曲げ耐力は既往の方法による計算値より若干小さい。

## 1. はじめに

炭素繊維、パラ系芳香族ポリアミド繊維（アラミド繊維）をはじめとする高強度、高弾性で耐久性に優れた繊維系新素材は、土木建築分野で構造材としての利用が検討され、一部の構造物では試験的に用いられている<sup>1)</sup>。

本研究の目的は、連続繊維にエポキシ樹脂を含浸硬化させた繊維強化プラスチックを鉄筋代替やプレストレストコンクリートの緊張材として用いた補強コンクリート部材の構造性能を把握し、新素材による新補強材の構造物への適用を検討することである<sup>2),3),4)</sup>。

本報告は、炭素繊維（以下、CFと記す）ストランドあるいは、アラミド繊維（以下、AF）ストランドにエポキシ樹脂を含浸させ、所定本数束ねてループ状に加工した

補強筋（以下、ループ筋）と、CFストランドに樹脂を含浸、収束させた棒材を7本より合わせた炭素繊維複合材料ケーブル（以下、CFより線）を緊張材としたプレテンション方式によるプレストレストコンクリート板（以下、PC板）の曲げ実験について述べたものである。

## 2. ループ筋を緊張材としたPC板の曲げ実験

実験の目的は、ループ筋によるPS導入の可否と、これを用いたPC板の曲げ性状を把握することである。

### 2.1 試験体

試験体は、図-1に示す幅50 cm、厚さ7 cm、長さ130 cmのPC板4体で、そのパラメータは、繊維の種類（炭素繊維：C、アラミド繊維：A）とプレストレス（以下、PS）の導入量（目標値：30, 50 kgf/cm<sup>2</sup>）である（表-1）。

なお、試験体名は、各試験体のパラメータが分かるように [(繊維の種類)(PSの目標導入量)] で表示した。

使用した繊維は、石炭ピッチ系炭素繊維(12,000 モノフィラメント：三菱化成)とパラ系アラミド繊維(7,500 デニール：帝人)で、繊維およびモルタルの材料特性を表-2に示す。

モルタルへのPS導入は、ループ筋の両側に配した定着用治具を外側に押し広げた状態で、モルタルを打設、2週間現場養生(1週間湿潤養生)した後、定着具を開放することにより行なった。いずれの試験体においてもPS導入時に板のねじれ、面外方向たわみは生じなかった。

緊張時のループ筋の引張応力およびPS導入後のモルタルの圧縮応力は、両端の定着用治具によってほぼ所定の値が得られた。

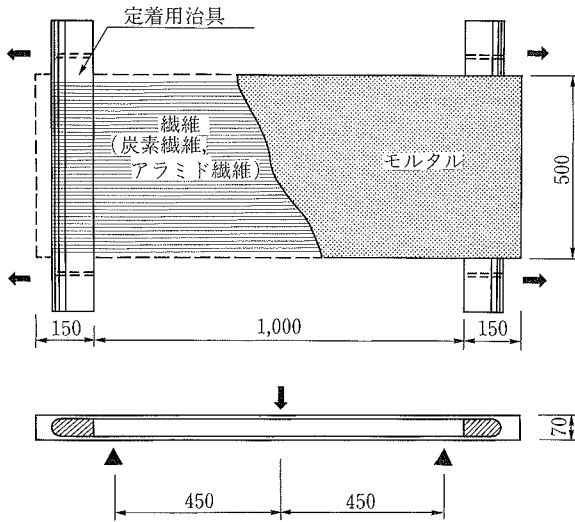


図-1 試験体の形状寸法

表-1 試験体一覧

試験体名	繊維の種類	PS導入量	補強筋量	断面積*1	補強筋比*2
A50	アラミド繊維 (7,500de)	53kgf/cm <sup>2</sup>	105本(3-@13)×2段	0.89cm <sup>2</sup>	0.25(%)
A30		32	64本(2-@15)×2段	0.54	0.15
C50	炭素繊維 (12K)	58	132本(3-@10.5)×2段	0.61	0.17
C30		35	80本(2-@12)×2段	0.38	0.11

\*1) 引張補強筋の繊維のみの実断面積, \*2) 引張補強筋の実断面積による値

表-2 使用材料の特性

使用材料	引張強度 $\sigma_u$ (tf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数E (tf/cm <sup>2</sup> )	使用材料	引張強度 $\sigma_u$ (tf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数E (tf/cm <sup>2</sup> )
アラミド繊維	18.1	747	炭素繊維	30.5	2,460

モルタルの調合と材料特性						圧縮強度 $F_m$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_m$ (tf/cm <sup>2</sup> )
W/C (%)	S/C	調合 (kg/m <sup>3</sup> )					
		セメント	水	S	添加剤		
85	4	351	299	1,404	I	201	130

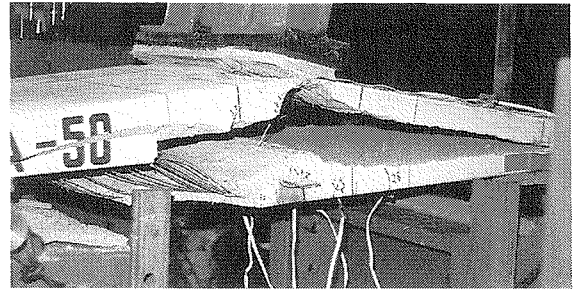
## 2.2 実験方法

曲げ実験は、図-1に示すようにスパン 90 cm の単純支持で中央集中荷重による一方向単調載荷で行なった。

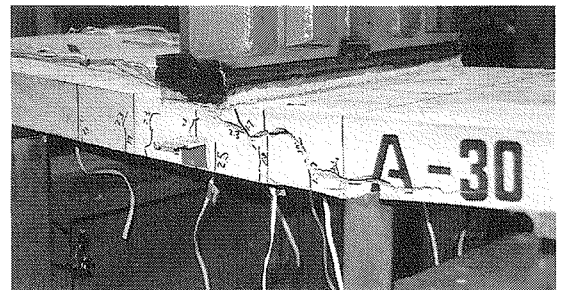
引張および圧縮補強筋とコンクリート表面ひずみの測定はストレインゲージで、変位の測定はスパン中央の鉛直方向変位を高感度型変位計で行なった。

## 2.3 実験結果と考察

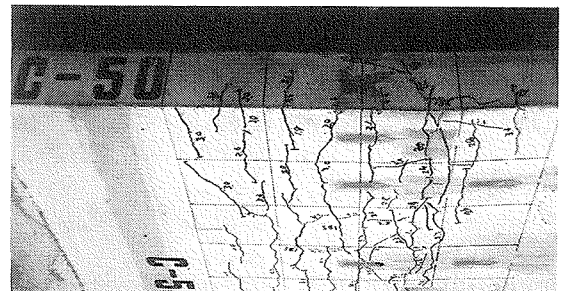
2.3.1 破壊状況 各試験体の破壊状況を写真-1に示す。



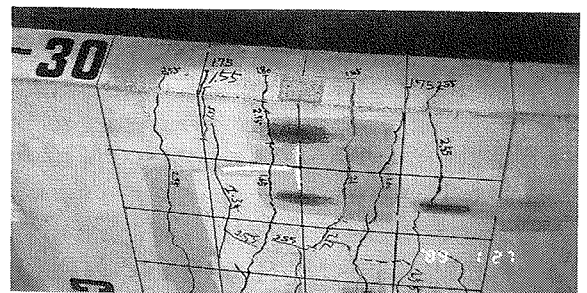
A-50試験体



A-30試験体



C-50試験体



C-30試験体

写真-1 破壊状況

いずれの試験体においても曲げひびわれは分散して生じた。AF を多く配した A50試験体では、側面で繊維に沿ったひびわれが進行後、急激なモルタルの破壊（コンクリートの剝離）により、また、他の試験体では、補強筋の破断により最大荷重に至った。

ひびわれの状態を見ると、AF、CF とも繊維本数が多いほど、ひびわれ間隔は小さく、また、AF 繊維を用いた試験体では、曲げひびわれのほか、側面の繊維に沿ったひびわれが生じた。A50試験体では、このひびわれが破壊につながっている。

2.3.2 荷重～変位性状 図-2 は、試験体中央での鉛直方向変位と荷重の関係である。

いずれの試験体も曲げひびわれによる急激な荷重の低下はなく、ひびわれ後も荷重の増大が見られる。

最大荷重時のたわみは、スパンの約1/100以上、曲げひびわれ発生時の7倍以上あり、十分な変形能を有していると考えられる。また、補強筋の引張剛性の違いにより、同一耐力を有する試験体での最大変位は、AF 試験体の方が CF 試験体より大きい。

2.3.3 諸荷重 各試験体の曲げひびわれ荷重と最大荷重の実験値と計算値をそれぞれ表-3 に示す。

曲げひびわれ荷重 ( $P_{cr}$ ) の計算値はモルタルのみの断面係数 ( $Z_c$ ) を用いて、また、最大荷重は e 関数法を用いて、それぞれプレストレスを考慮して求めた値である。

$$P_{cr} = (5/3 \times \sigma_t + \sigma_p) Z_c \times (2/\ell) \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $\sigma_t$  : モルタルの引張強度 (=0.1  $F_m$ )  
 $\sigma_p$  : PS による圧縮応力度  
 $\ell$  : 曲げせん断スパン

C30 試験体の曲げひびわれ荷重が計算値の1.24倍と若干大きい、曲げひびわれ荷重 (計算値に対する実験値の比1.01~1.24, 平均1.10倍)、最大荷重 (同、0.94~1.07, 平均1.0倍)とも実験値と計算値は近似している。

### 3. CFより線を緊張材としたPC板の曲げ実験

実験の目的は、CFより線を緊張材とした薄板の製作の可否と、同一耐力を有する鉄筋コンクリート板との曲げ性状を比較することである。

#### 3.1 試験体

試験体は、図-3 に示す幅 120 cm×長さ 350 cm、板厚 4, 7, 10 cm の3体で、その詳細と使用材料の特性をそれぞれ表-4、表-5 に示す。

緊張は、センターホールジャッキを用いて1本ずつ所定の張力の2/3まで与えた後、再び所定の張力まで緊張する方法で行なった。PSの導入は、コンクリートの打設2週間後 (圧縮強度 314 kgf/cm<sup>2</sup>)、反力フレームに挿入した2台のジャッキの油圧を同時に下げて一斉に緊張力を開放し、緊張材表面の凹凸による付着でコンクリートに圧縮力を導入する方法で行なった。

緊張力およびコンクリートへの導入力は、固定端および反力フレームに挿入したロードセルあるいは緊張材、

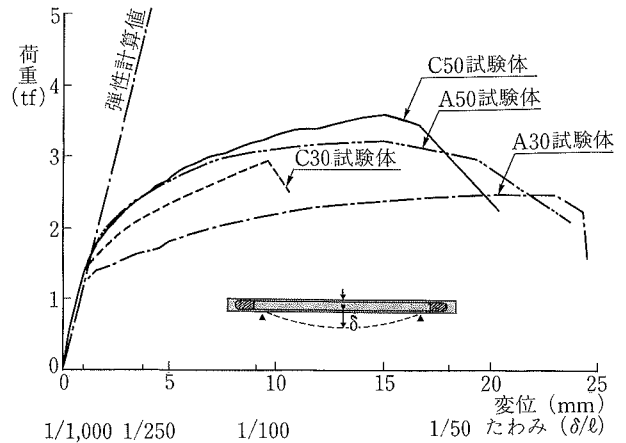


図-2 荷重～変位関係

表-3 諸荷重一覧

試験体名	曲げひびわれ荷重(tf)			最大荷重(tf)			破壊状況
	実験値	計算値	比*1	実験値	計算値	比*1	
A50	1.60	1.58	1.01	3.21	3.01	1.07	付着割裂破壊
A30	1.30	1.20	1.08	2.47	2.50	0.99	曲げ破壊(補強筋破断)
C50	1.75	1.67	1.05	3.58	3.82	0.94	曲げ破壊( " )
C30	1.55	1.10	1.24	2.93	2.96	0.99	曲げ破壊( " )

\*1) 計算値に対する実験値の比

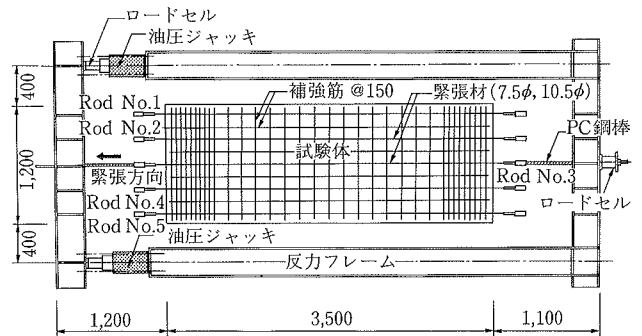


図-3 PSの導入方法と試験体の形状寸法

表-4 試験体一覧

試験体名	板厚(cm)	PS導入量 (kgf/cm <sup>2</sup> )	補強筋量	断面積*2	補強筋比*3
PS1	4	46.9 *1	4- 7.5φ 5- 7.5φ (緊張材)	1.22 cm <sup>2</sup> 1.52	0.57 (%)
PS2	7	43.8 *1	4- 5.0φ 5- 10.5φ (緊張材)	0.40 2.79	0.38
R C	10	0.0	11-D10	7.81	0.65

\*1) 緊張材の保証荷重の75%相当、\*2) 樹脂を含めた公称断面積  
 \*3) 樹脂を含めた公称断面積による値

コンクリートの表面に貼りつけたひずみゲージにより把握した。なお、PS導入時において、PC板のそり、ねじれ、あるいは緊張材に沿ったひびわれ等は見られなかった。

PS導入から実験時までのコンクリートの導入ひずみ

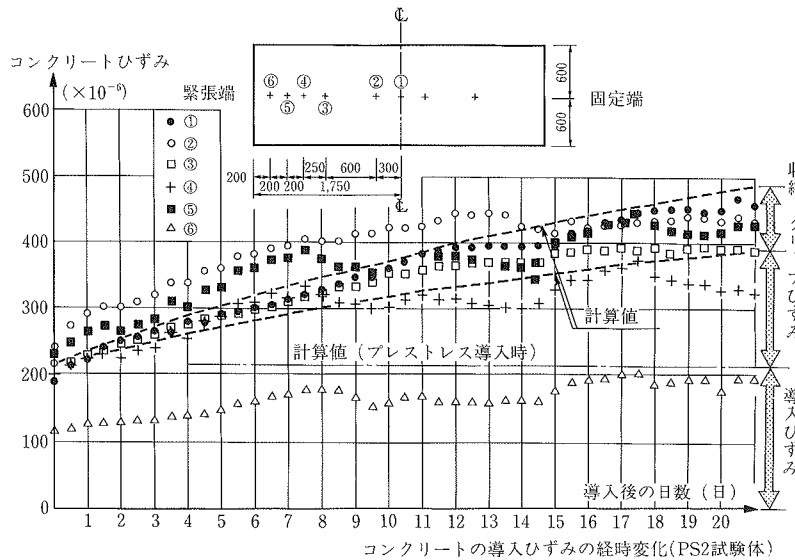


図-4 導入ひずみの経時変化

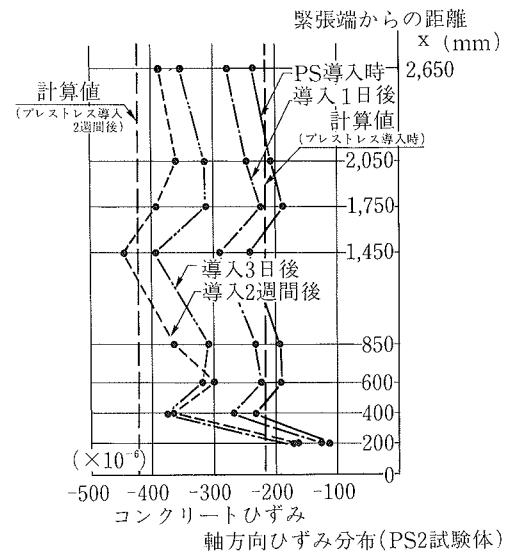


図-5 導入ひずみ分布

表-5 使用材料の特性

使用材料	形状 (外径)	断面積 (mm <sup>2</sup> )*1	降伏強度 $\sigma_y$ (tf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_u$ (tf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 E(tf/cm <sup>2</sup> )	伸び (%)
炭素繊維 (より線)	5φ	10.5	—	22.7	1,430	1.6
	7.5φ	30.4	—	21.6	1,400	1.6
	10.5φ	55.7	—	20.9	1,460	1.5
異形鉄筋	D10	71.0	3.63	5.03	1,940	—

コンクリートの調査と材料特性									
設計基準	スランプ	W/C	調合 (kg/m <sup>3</sup> )			コンクリート強度*2	弾性係数 (tf/cm <sup>2</sup> )		
強度	(cm)	(%)	セメント	水	S G	混和材		圧縮	割裂
300	18	45.0	444	200	806 821	1.11	337	24.2	206

\* 1)樹脂を含めた公称断面積, \* 2)単位 kgf/cm<sup>2</sup>

の経時変化と、軸方向の導入ひずみ分布の例 (PS 2 試験体) を図-4, 図-5 に示す。

これらの結果、緊張端から 40 cm 以上内側では所定の PS が導入されていることが分かる。なお、図-4 には、建築学会規準<sup>9)</sup>で求めた計算値を合わせて示した。

### 3.2 実験方法

実験は、スパン 300 cm で純曲げ区間 60 cm の2点集中荷重による単純支持一方向加力で行なった。

測定は、コンクリートおよび補強筋のひずみと、加力点位置と試験体中央の鉛直方向変位について行なった。また、代表的な曲げひびわれの幅をクリップゲージで測定した。

### 3.3 実験結果と考察

**3.3.1 破壊状況** PS 1 試験体では、試験体中央で曲げモーメント (自重を考慮) 28.2 tf・cm 時に曲げひびわれが発生し、その後、荷重の増大に伴ってひびわれが分散して生じた。曲げひびわれは、板厚の中ほど (緊張材の位置) まで急激に進展するが、その後の進展は見られなかった。以降、荷重と変位の増大に伴い、加力点位置でのコンクリートの圧壊により終局状態に至った。終局時

には、緊張材に沿ったひびわれが上端コンクリート表面に生じ、破壊位置では一部の緊張材が折損した。また、終局時の鉛直方向変位は、試験体厚さの 6.3 倍に相当する 253 mm (スパンの約 1/12) であった。

PS 2 試験体では、試験体中央で曲げモーメント 96.3 tf・cm 時に曲げひびわれが生じ、その後の破壊状況は PS 1 試験体と同様で、終局時の変位は、172 mm (スパンの約 1/17,  $\delta/t=2.46$ ,  $t$ : 板厚) であった。なお、両試験体とも緊張材の抜け出しは終局時においても見られなかった。

RC 試験体では、試験体中央で曲げモーメント 53.9 tf・cm 時に曲げひびわれが発生し、以降、荷重の増大とともにひびわれが分散した。試験体中央での曲げモーメント 105.9 tf・cm 時に鉄筋の降伏、同 116.1tf・cm 時に試験体側面で鉄筋に沿った水平方向のひびわれが見られた。曲げモーメント 125.4 tf・cm で加力点位置でコンクリートが圧壊し、終局状態に至った。この時の変位は、183 mm (スパンの約 1/16) で、PS 2 試験体とほぼ同等であった。

**3.3.2 変位性状** 図-6~図-8 は、試験体中央でのモーメントと鉛直方向変位の関係である。

RC 試験体では、曲げひびわれによる剛性の低下と、それ以降の曲げひびわれ発生毎に若干の荷重の低下が見られる。鉄筋の降伏後は、変位が急激に増大する。

PS 1 試験体のモーメント~変位関係を見ると、曲げひびわれ発生から緊張材に沿ったひびわれが発生 (変位約 30 mm,  $\delta/t=0.75$ ) するまでは、モーメントと共に変位が増大し、この間での残留変位は小さい。しかし、その後、モーメントに対する変位の増分は大きく、また、残留変形も大きい。

PS 2 試験体では、曲げひびわれ後もモーメントとともに変位の増大が見られる。しかし、変位 60 mm 近傍 ( $\delta/t=0.75$ ) からモーメントの増大に対する変位の増加が大

きくなるとともに、残留変位が若干大きくなっている。なお、大変位時まで除荷時の変位性状は、曲げひびわれモーメント近傍まで急激に、その後は緩やかに減少するプレストレス部材特有の変位性状を示している。

PS 2 試験体とこれと同等の耐力を有する RC 試験体で、たわみがスパンの1/60の時の残留変位を比較すると、それぞれ 8 mm, 29 mm で、後者の残留変位は前者の3.5倍と大きい。

次に、各試験体の曲げひびわれ幅とモーメントの関係(図-9)を見ると、RC 試験体では降伏荷重の約2/3の荷重時のひびわれ幅が 0.58 mm であるのに対し、PS 1 試験体では、最大荷重の2/3の荷重時のひびわれ幅が 0.3 mm と RC 試験体の約半分、さらに最大荷重時の85%に相当する荷重載荷後の残留ひびわれ幅は 0.16 mm となっている。また、PS 2 試験体では、最大荷重の85%に相当する荷重時に 1.02 mm であったひびわれ幅は、除荷時に 0.10 mm と小さくなっている。

**3.3.3 ひずみ性状** 図-10, 図-11は PS 1, PS 2 試験体中央の緊張材(CFより線)とコンクリート上端のモーメント～ひずみ関係である。図中には e 関数法で求めた計算値(破線)を合わせて示した。

PS 2 試験体のひずみは、実験値と計算値がよく近似している。

**3.3.4 諸荷重** 曲げひびわれ荷重  $P_{cr}$ , 最大荷重  $P_u$

と、この時の自重を考慮したスパン中央のモーメント(曲げおよび終局モーメント)とその計算値を表-6に示す。

PS 1, PS 2 試験体の曲げひびわれモーメントは、前述した(1)式で、また、終局モーメントはプレストレスを考慮して e 関数法で求めた。RC 試験体の曲げひびわれモーメント、終局モーメントは、コンクリートの曲げ引張強度を  $1.5\sqrt{F_c}$ ,  $\sigma_p=0$  として求めた。

実験による曲げひびわれモーメントは、いずれも計算値と近似している。

RC 試験体および PS 2 試験体の終局モーメントは、計算値と近似しているが、PS 1 試験体では終局モーメントが計算値の0.82倍と若干小さくなっている。

**4. まとめ**

炭素繊維あるいはアラミド繊維を緊張材とし、プレテ

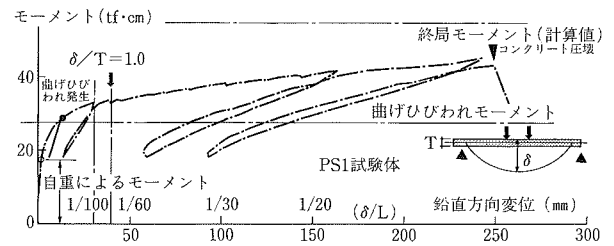


図-6 モーメント～変位関係

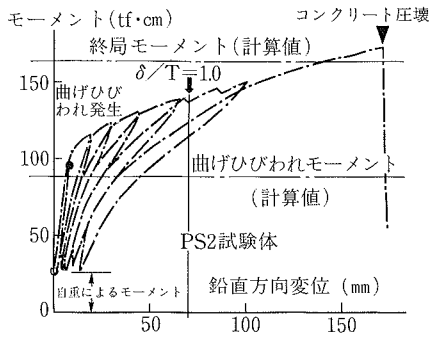


図-7 モーメント～変位関係

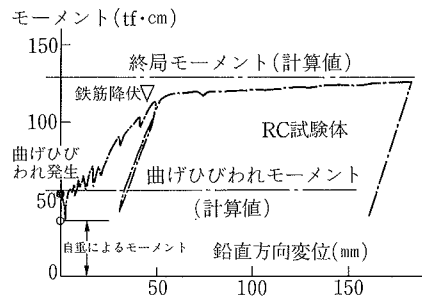


図-8 モーメント～変位関係

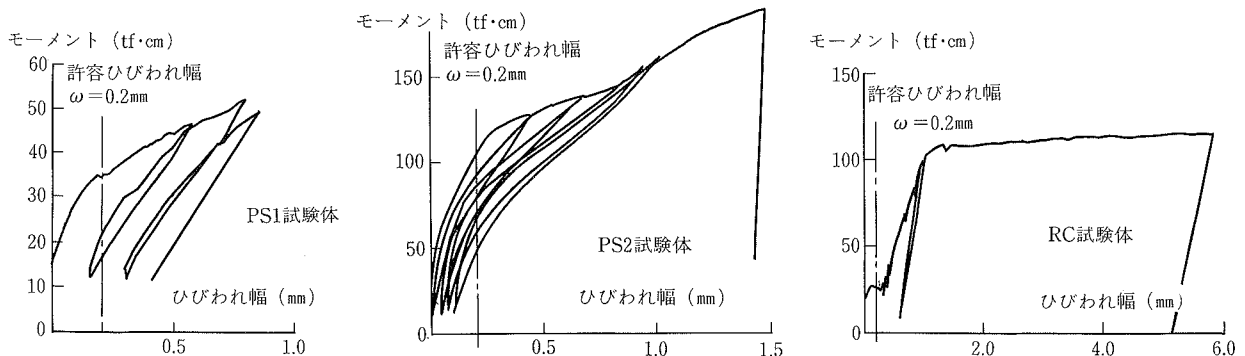


図-9 モーメント～ひびわれ幅の関係

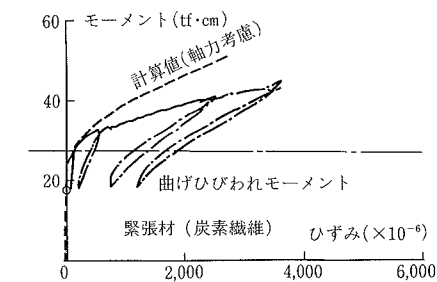


図-10 モーメント～ひずみ関係 (PS 1 試験体)

ンション方式でプレストレストコンクリート板を製作し、曲げ実験を行なった結果、以下のことが分かった。

① 炭素繊維あるいはアラミド繊維ストランドに樹脂を含浸させたループ筋と炭素繊維より線はそれぞれ厚さ7 cm, 4 cm 以上の PC 板の緊張材として利用できる。

② 同一耐力を有する PC 板では、アラミド繊維を補強筋とした方が、炭素繊維を補強筋とした場合より最大荷重時の変位は大きい。

③ 炭素繊維より線を緊張材とした PC 板のひびわれ幅は、同一耐力を有する RC 部材に比べて小さく、大変位後 (スパンの約1/30) の残留ひびわれ幅も小さい。

④ プレストレスの導入によって PC 板の曲げひびわれ荷重を高めることができ、その荷重は、建築学会規準<sup>5)</sup>によって求めることができる。

⑤ 厚さ4 cm の PC 板は十分な変形能を有するが、最大耐力は e 関数法で求めた計算値より若干小さくなっている。

⑥ 厚さ7 cm 以上の PC 板の最大耐力は、プレストレスを考慮して e 関数法で求めることができる。

### 謝 辞

本実験に当たり、炭素繊維ストランドおよびエポキシ樹脂を御提供頂きました三菱化成(株)に対し、感謝いたします。

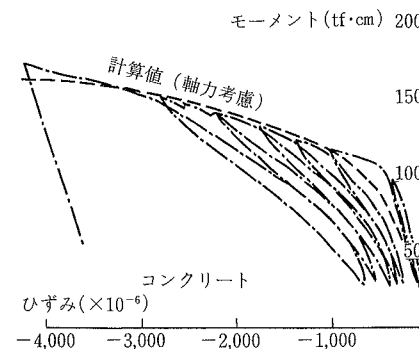
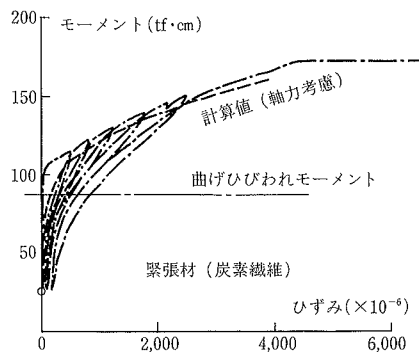


図-11 モーメント～ひずみ関係 (PS 2 試験体)

表-6 諸荷重一覧

試験体名	曲げひびわれ荷重 (kgf)	最大荷重 (kgf)	ひびわれモーメント (tf·cm)			終局モーメント (tf·cm)		
			実験値	計算値	比 <sup>1)</sup>	実験値	計算値	比 <sup>1)</sup>
P S 1	172	449	28.2	27.6	1.02	44.8	54.8	0.82
P S 2	1,158	2,420	96.3	88.1	1.09	172.0	162.9	1.06
R C	303	1,495	53.9	55.1	0.98	125.4	129.7	0.97

\* 1) (計算値)に対する(実験値)の比を示す

### 参考文献

- 1) 例えば、古賀、坂井、他：CFRP 製緊張材使用ポストテンション方式 PC げたのスラブ橋耳げたへの適用例、コンクリート工学, Vol. 28, No. 11, p. 14~24, (1990)
- 2) 木村、小島、岡野：繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究(その2) -炭素繊維, アラミド繊維をせん断補強筋とした曲げせん断実験一、大林組技術研究所報, No. 42, p. 55~60, (1991)
- 3) 岡野、小島、木村：炭素繊維を緊張材に用いたプレストレストコンクリートはりの曲げ実験、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, p. 1135~1140, (1990)
- 4) 木村、小島：新素材の構造部材への適用に関する研究(その4. 炭素繊維を曲げ補強筋とした部材の曲げせん断性状)、日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 853~854, (1991)
- 5) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, (1987)