

報告

[1194] 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

正会員 ○岡野 素之 (大林組技術研究所)

正会員 小島 克朗 (大林組技術研究所)

正会員 木村 耕三 (大林組技術研究所)

1. まえがき

長繊維系新素材の中には、『高強度、軽量、高耐久性』等の優れた特長を有するものがあり、主に橋梁を対象としてプレストレストコンクリート（以下PCと呼ぶ）部材の緊張材への利用についての研究が行なわれている。しかし、新素材は種類が多く、引張特性、付着性能等に違いがあるため、これらを緊張材に使用したPC部材の曲げ性能も新素材により違いがある。今回、付着力の小さい、炭素繊維からなる緊張材（以下炭素繊維ロッドと呼ぶ）を同時に4本定着するマルチストランド定着体を新しく開発し、炭素繊維ロッドを緊張材に用いたPCはりの曲げ実験を実施した。本報告は同実験の概要と結果について検討を加えたものである。

2. 炭素繊維ロッド

炭素繊維ロッドは、ピッチ系の炭素繊維（長繊維）を素材として、Pultrusion方法で製造した棒材である。断面は円形であり表面は平滑でコンクリートとの付着力は小さい。炭素繊維ロッドとPC鋼線の応力とひずみの関係を図-1に、両者の諸元を表-1にそれぞれ示す。

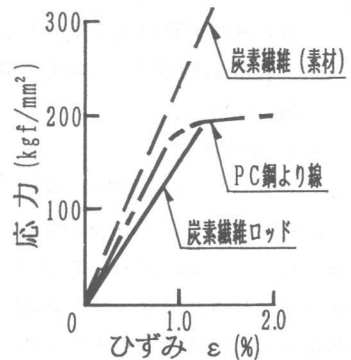


図-1 緊張材の応力-ひずみ関係

3. 定着体

一般に、炭素繊維ロッドのような一方向強化材をくさびで定着すると、くさびとの接触面でロッドに局部的な圧縮力が働きここで破断するため、素材自身の強度が十分に発揮されない。小林らは、くさびの外とう管からくさびの先端を突出させることにより、滑らかな応力の伝達を計りこの問題に解決策を見出している[1]。今回開発した定着体は、図-2に示すようにくさびと樹脂を併用した形式である。くさびとロッドの間に樹脂を塗布し、硬化後外とう管

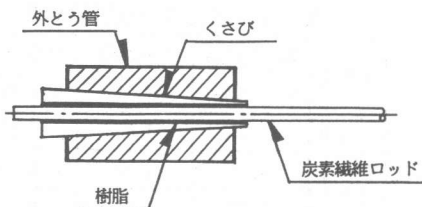


図-2 定着体（引張試験用）

表-1 緊張材の諸元

項目	炭素繊維ロッド	PC鋼より線 SWPR 19
公称径 (mm)	8	17.8
公称断面積 (mm ²)	49	208.4
樹脂	エポキシ	—
繊維含有率 (%)	65	—
降伏強度*1 (kgf/mm ²)	実測	187
	保証*2	161
引張強度 (kgf/mm ²)	実測	201
	保証*2	189
ヤング係数 (kgf/mm ²)	1.5 × 10 ⁴	1.96 × 10 ⁴
破断時伸度 (%)	1.21	7.0

① *1. 0.2%永久伸びに対する荷重から計算。

*2. PC鋼より線では JIS規格、炭素繊維ロッドでは製造者保証の値を示す。

を引張り緊張する。樹脂は、エポキシ系でヤング係数の比較的高い種類を使用し、ロッドとくさびの微細な間隙を充填し、滑らかで均一な応力の伝達を可能にする。この形式の定着体を使用した引張試験では、ロッドはばらばらに飛散して破断し、引張強度は平均 181kgf/mm² でロッドの保証引張強度の1.15倍の定着性能を発揮した。

4. 実験概要

4.1 試験体

試験体の一覧を表-2に示す。試験体数は合計8体とし、実験パラメータは、次の4項目とした。

①緊張材の種類

炭素繊維ロッド・PC鋼より線

②グラウトの有・無

③プレストレスの初期導入レベル

0.5Pu・0.65Pu (Pu:炭素繊維ロッドの実測引張荷重=9.02tf、それぞれ保証引張強度の60・75%に相当)

④引張鉄筋の量

D10・D13・D19・D25

試験体は全て高さ30cm、幅20cm、長さ280cmの長方形断面のはり型とした。形状・寸法と配筋を図-3に示す。緊張材の断面は、炭素繊維ロッドとPC鋼より線の引張荷重をそろえて決めた。主筋は試験体の両端で支圧板に溶接で定着し、またせん断破壊を防ぐため十分なせん断補強筋を配置した。緊張材は、その中心を断面の図心から5cm下側に直線状に配置し、プレストレス導入時の断面上縁のコンクリートの圧縮応力度がゼロになるようにした。

4.2 使用材料

鉄筋は異形棒鋼を使用した。引張試験結果を表-3に示す。コンクリートは、呼び強度300kgf/cm²、スランプ18cm、最大粗骨材寸法10mmのレデーミクストコンクリート(普通)を使用した。

表-2 試験体の一覧

試験体 No.	緊張材の種類と本数	グラウトの有無	プレストレスの初期導入レベル		引張鉄筋の量 (鉄筋比%)	
			緊張材	コンクリート*2		
C-1	炭素繊維ロッド 4-φ8	有り	0.50Pu*1	60	2-D10 (0.28)	
C-2			無し	0.65Pu		78
C-3				60		0.50Pu
C-4					0.50Pu	2-D19 (1.15)
C-5			0.50Pu		2-D25 (2.03)	
C-6			0.50Pu	60	2-D10 (0.28)	
S-1	PC鋼より線	有り	0.50Pu		2-D10 (0.28)	
S-2	1-φ17.8	無し				

*1. Pu:炭素繊維ロッドの実測引張荷重

*2. カスレスによるコンクリートの下縁圧縮応力度(kgf/cm²)

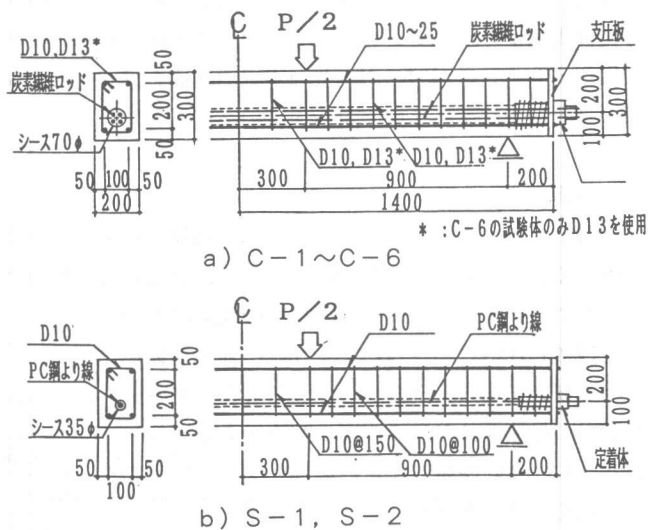


図-3 試験体の形状・寸法と配筋

表-3 鉄筋の引張試験結果

公称径	降伏強度 f _y (kgf/cm ²)	ヤング係数 E _s × 10 ⁶ (kgf/cm ²)	引張強度 f _u (kgf/cm ²)
D 10	3,680	1.82	5,180
D 13	3,720	1.92	5,450
D 19	4,470	1.86	6,240
D 25	3,740	1.92	5,510

材料試験結果（実験前と後の平均）を表-4に示す。グラウトは無収縮、早強の製品を使用した。実験時の圧縮強度は214kgf/cm²であった。

4.3 実験方法

加力方法は、単純ばり形式の2点载荷とし、支間 240cm、純曲げ区間60cmで、一方向で行なった。加力装置を図-4に示す。加力パターンは、S-2の試験体の鉄筋降伏時のはり中央のたわみ(δ_y)を基準とし、これとその2倍、4倍及び8倍のたわみでそれぞれ一旦除荷し、その後破壊まで加力した。加力パターンを図-5に示す。測定項目は荷重、部材端の緊張力、はり中央のたわみ、鉄筋のひずみ、炭素繊維ロッドのひずみ及びコンクリートのひずみとした。

5. 実験結果とその検討

5.1 破壊性状

各試験体のひびわれ発生と破壊状況を図-6に示す。各試験体とも、純曲げ区間に曲げひびわれが発生した後引張鉄筋が降伏した。さらに加力すると、ひびわれが増加、伸展し、コンクリートの圧壊により最大荷重に達した。最大荷重に至るまで、定着部では緊張材の抜け出し、破断等の変状は見られなかった。緊張材の種類の違いで見ると、炭素繊維ロッドの場合(C-1、C-2)とPC鋼より線の場合(S-1、S-2)の両者にはひびわれ発生と破壊状況の顕著な差は見られない。グラウトの有無で比較すると、グラウトをした場合

表-4 コンクリートの材料試験結果

試験体 No.	圧縮強度 f_c (kgf/cm ²)	引張強度*1 f_t (kgf/cm ²)	ヤング係数*2 $E_c \times 10^5$ (kgf/cm ²)
C-1~6	349	33.6	1.93
S-1, 2	345	33.4	1.92

① *1. $f_t = 1.8\sqrt{f_c}$ で計算。
*2. 1/3 割線勾配で計算。

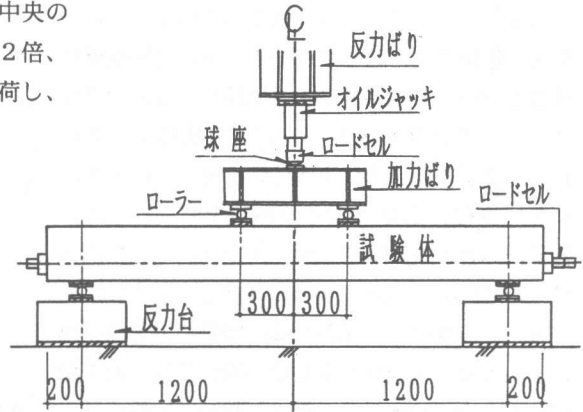


図-4 加力装置

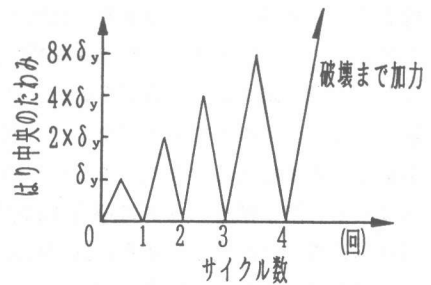


図-5 加力パターン

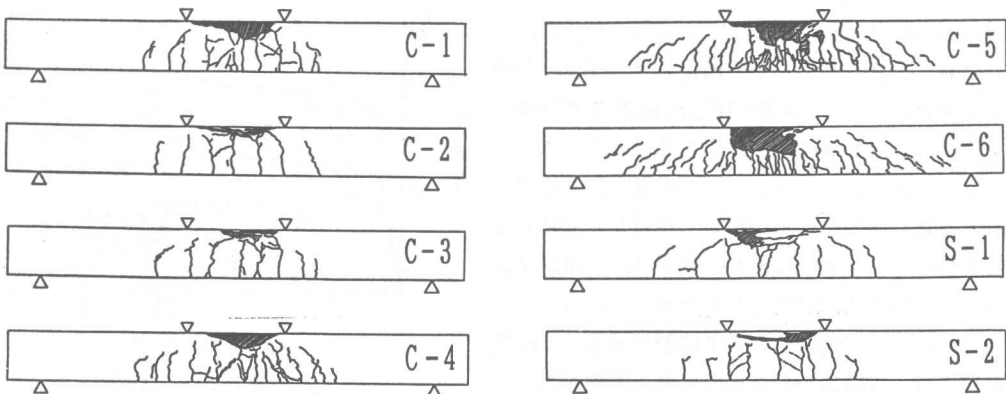


図-6 ひびわれ発生と破壊状況

(C-1、S-1)は、グラウトをしない場合(C-2、S-2)に比較し、ロッドの種類にかかわらず、ひびわれがやや分散する傾向にある。プレストレス初期導入レベルが低い試験体(C-2)と高い試験体(C-3)を比較すると両者に顕著な差はない引張鉄筋の量で比較すると、これが大きくなるほど(C-2→C-4→C-5→C-6)ひびわれが多くなる。

これは、最大荷重が高くなり曲げせん断区間でひびわれが多く発生するためである。

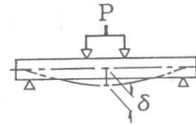
5.2 変位性状

荷重(P)と変位(δ :はり中央のたわみ)の関係を包絡線で、図-7に示す。a)は緊張材の種類とグラウトの有無による比較を、b)はプレストレスの初期導入レベルによる比較を、またc)は引張鉄筋の量による比較をそれぞれ示す。なお、変位は曲げ実験の開始時をゼロとした。各試験体とも鉄筋降伏の後、荷重は徐々に増加し最大荷重時の変位は降伏時の3倍以上に達した。

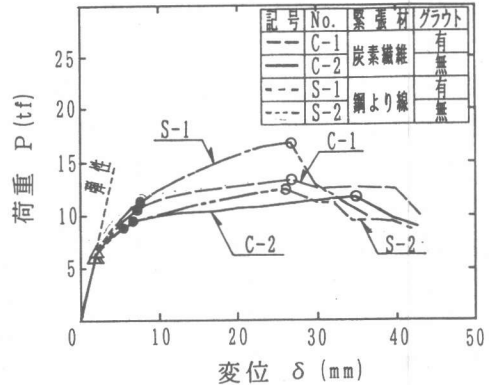
a) から次のことがわかる。緊張材の種類の違いを見ると、グラウトをしない場合では、炭素繊維ロッドの試験体とPC鋼より線の試験体には大きな差はないが、鉄筋降伏後の剛性がPC鋼より線の方がやや高い。グラウトをした場合では、炭素繊維ロッドの試験体はPC鋼より線の試験体に比較し、鉄筋降伏後の剛性が低い。これは、PC鋼より線と炭素繊維ロッドのグラウト材との付着力の差と考えられる。また、グラウトの有無で比較すると、炭素繊維ロッドの場合は鉄筋降伏後の両者の剛性はほぼ同じである。強度に差があるのは、グラウトをしない場合、加力に従いロッドがシース内で上方へ移動し、有効高さが減少することと、炭素繊維ロッドとグラウト材間で小さいながらも付着力が働くことによると考えられる。それに対し、PC鋼より線の場合では、グラウト材との付着力のため、鉄筋降伏後の剛性はグラウトをした場合の方が明らかに大きくなっている。

b) によりプレストレスの初期導入レベルで比較すると、導入レベルが高い方が最大荷重時の変位が小さくなる傾向にある。これは、破壊がコンクリートの圧壊で決まるためと考えられる。

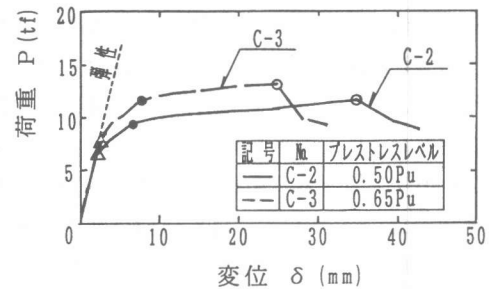
c) により引張鉄筋の量で比較すると、ひび割れ発生後、鉄筋量が多くなるほど、剛性が大きく、最大荷重が高くなるのがわかる。



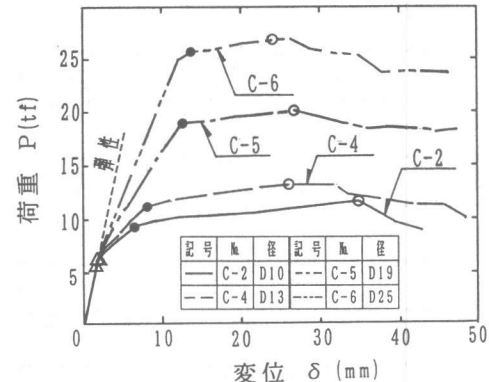
- △: ひびわれ発生
- : 鉄筋降伏
- : 最大荷重



a) 緊張材の種類とグラウトの有無による比較



b) プレストレスの初期導入レベルによる比較



c) 引張鉄筋の量による比較

図-7 荷重-変位関係

5.3 定着部での緊張力の変動

荷重と定着部での緊張力との関係を、C-1、C-2、S-1及びS-2の試験体について図-8に示す。緊張力は部材端の定着部でロードセルにより測定した。グラウトをしない場合(C-2、S-2)は緊張材の種類にかかわらず、同様なループを描いており両者に顕著な差は見られない。これに対し、グラウトをした場合は、PC鋼より線の試験体(S-1)では緊張力の変動はほとんどないが、炭素繊維ロッドの試験体(C-1)は鉄筋降伏の後緊張力が変動している。これは鉄筋降伏まではロッドとグラウト材間に付着力は働いているが、鉄筋降伏後は付着力は低下することを示している。しかしこれをグラウトをしない試験体(C-2)と比較すると、グラウトをした試験体は、鉄筋降伏後は除荷後の緊張力の戻りが阻止される傾向が見られる。

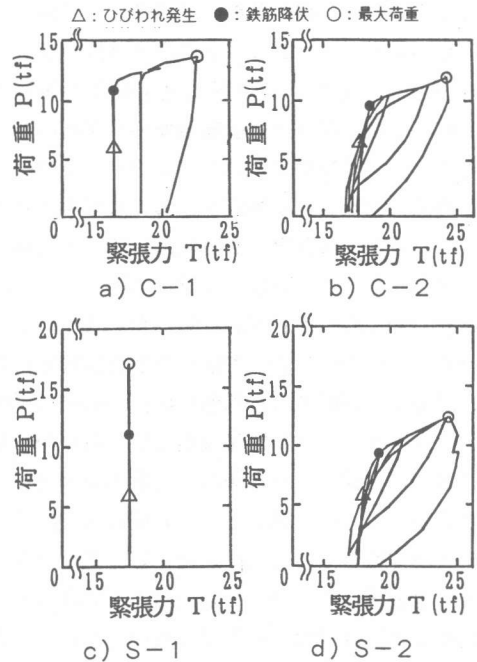


図-8 荷重-緊張力関係

5.4 諸荷重とその計算値との比較

実験結果の一覧を表-5に示す。

表-5 実験結果の一覧

試験体 No.	ひびわれ発生荷重 (tf)			鉄筋降伏荷重 (tf)			最大荷重 (tf)			最大荷重時部材角	破壊状況
	実験値 P_{cr}	計算値 P_{crc}^{*1}	$\frac{P_{cr}}{P_{crc}}$	実験値 P_y	計算値 P_{yc}^{*2}	$\frac{P_y}{P_{yc}}$	実験値 P_{max}	計算値 P_{uc}^{*3}	$\frac{P_{max}}{P_{uc}}$		
C-1 ^{*4}	6.00	6.29	0.95	10.52	8.78	1.20	13.41	11.51	1.17	1/46	曲げ圧壊
					10.18	1.03		19.08	0.70		
C-2	6.50	6.42	1.01	9.49	9.40	1.01	11.67	10.52	1.11	1/34	曲げ圧壊
C-3	7.51	7.76	0.97	11.50	11.29	1.02	13.26	12.08	1.10	1/48	曲げ圧壊
C-4	6.52	6.78	0.96	11.20	11.48	0.98	13.25	12.49	1.06	1/37	曲げ圧壊
C-5	6.52	7.60	0.86	18.03	19.02	0.95	20.15	19.64	1.03	1/45	曲げ圧壊
C-6	-	8.69	-	25.77	24.27	1.06	26.93	25.09	1.07	1/45	曲げ圧壊
S-1 ^{*4}	6.00	6.53	0.92	11.52	11.04	1.04	16.92	17.00	1.00	1/45	曲げ圧壊
S-2	6.01	6.40	0.94	9.52	9.50	1.00	12.47	11.58	1.08	1/48	曲げ圧壊

①計算は次の方法によった。

- *1. $P_{crc} = 2 \cdot M_{crc} / \ell$, 但し, M_{crc} : ひびわれ発生モーメント, ℓ : 曲げ軸, Z : はりの断面係数
 $M_{crc} = Z \cdot (\sigma_{ps} + f_c)$ σ_{ps} : フラストによるはり下縁圧縮応力度, f_c : コンクリートの引張強度
- *2. 緊張力(実測値)を軸力とし、e関数法で計算。
- *3. 竹本[2]による回帰直線から次式で緊張力(T)を求めこれを軸力として、e関数法で計算。
 $T = T_0 + A_e \cdot \Delta \sigma_p$, 但し, T_0 : 初期緊張力, A_e : 緊張材の断面積,
 $\Delta \sigma_p = 3700 - 2.5 \times 10^{-5} \cdot P_p$ (kgf/cm²) $\Delta \sigma_p$: 最大荷重時の緊張力の増分, P_p : 緊張材の鋼材比
- *4. C-1の下段とS-1は緊張材とグラウト材の付着力を考慮してe関数法で計算。

(1) ひびわれ発生荷重：計算値は、断面の鉄筋と緊張材を考慮し、弾性理論により断面下縁の引張応力度とコンクリートの引張強度が等しくなる荷重とした。なお C-6 試験体は、乾燥収縮ひびわれがあり、ひびわれ発生荷重が明確でなかった。実験値は計算値の0.86~1.01(平均0.94)倍で、実験値は計算値をやや下回った。この理由には、乾燥収縮による初期応力が存在することと、計算値に用いたコンクリートの引張強度 ($f_t = 1.8 \sqrt{f_c}$) が、高強度コンクリートのため過大に評価する傾向があることが考えられる。

(2) 鉄筋降伏荷重：計算値は定着部の緊張力(実測値)を軸力として、e関数法で計算した。ただし、グラウトをした試験体の内、C-1は付着力を考慮した場合としない場合を、S-1は付着力を考慮しそれぞれ計算した。C-1試験体では、実験値の計算値に対する比は、付着力を考慮しない場合1.20、考慮した場合1.03で付着力を考慮した方が実験値とよく近似する。その他の試験体も実験値は計算値の0.95~1.06(平均1.01)倍で各試験体とも両者はよく近似し、実験パラメーターによる顕著な差は見られなかった。

(3) 最大荷重：計算値は、付着力を考慮しない場合は、最大荷重時の緊張力を既往の実験式から仮定し、これを軸力としてe関数法で計算した。使用した実験式は、竹本の実験結果から示された回帰直線である[2]。ただし、グラウトをした試験体の内、C-1は付着力を考慮した場合としない場合を、S-1は付着力を考慮しそれぞれ計算した。C-1試験体では実験値の計算値に対する比は付着力を考慮しない場合1.17、考慮した場合0.70であり、付着力を考慮しない方が実験値とよく近似する。その他の試験体は実験値は計算値の1.00~1.11(平均1.06)倍で各試験体とも両者はほぼ近似し実験パラメーターによる顕著な差は見られなかった。

6. まとめ

コンクリートとの付着力の小さい炭素繊維ロッドを緊張材に使用した、PCはりの曲げ実験の結果次のことがわかった。

- (1) 炭素繊維ロッドは、PC鋼より線と同様にPC用緊張材として使用できる。
- (2) 炭素繊維ロッドを緊張材に使用し、その保証引張強度の60または75%の緊張力を導入したPCはりには、良好な構造性能を示し、定着部も健全である。
- (3) グラウトをしない場合は、緊張材にPC鋼より線を使用したはりと構造性能はほぼ同等であり、諸荷重も既往の計算方法で評価できる。
- (4) グラウトをした場合は、引張鉄筋の降伏まではPC鋼より線を使用したはりと構造性能はほぼ同等であるが、降伏の後はグラウトをしない場合に近く、最大荷重も付着力を考慮しない方法で評価する方が妥当である。

謝 辞

炭素繊維ロッドを御提供頂きました三菱化成㈱の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 小林一輔、趙 力采：繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究(そのI)、生産研究36巻 8号、1984、pp.24~27
- [2] 竹本 靖：アンボンドPRC部材の曲げ終局時 tendon 応力について、大林組技術研究所報 No.28、1984、pp.49~54