

新素材によるプレストレストコンクリート部材の開発（その1）

——炭素繊維を緊張材に用いたはりの曲げ実験——

岡野素之 木村耕三
小嶋克朗

Development of Prestressed Concrete Members with New Fiber Materials (Part 1)

——Flexural Tests on Prestressed Concrete Beams with Carbon Fiber Tendons——

Motoyuki Okano Kohzo Kimura
Yoshiro Kobatake

Abstract

A new type of wedge anchorage was invented using carbon fiber tendons with the objective of developing prestressed concrete members, and flexural tests were carried out to investigate the strengths and structural behaviors of the prestressed concrete beams. The following results were obtained: ① Carbon fiber rods appeared to be useful as tendons of prestressed concrete members. ② Prestressed concrete beams with carbon fiber tendons have good performance. ③ In case of no grout, there were no marked differences between carbon fiber beams and prestressing steel beams. ④ In case of using grout there were no marked differences between the two before yielding of reinforcing bars, but after yielding, specimens with carbon fibers were close to specimens with no grout.

概要

炭素繊維からなる緊張材を使用したプレストレストコンクリート部材の開発を目的とし、新たに炭素繊維用の定着体を開発し、プレストレストコンクリートはりの曲げ実験を行ない、構造性能を検討した。その結果次のことがわかった。① 炭素繊維ロッドは、プレストレストコンクリート用緊張材として適用できる感触を得た。② 炭素繊維ロッドを緊張材に使用したプレストレストコンクリートはりは良好な構造性能を示す。③ グラウトをしない場合にはPC鋼より線を使用したはりとほぼ同等である。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ほぼ同等であるが、降伏の後にはグラウトをしない場合に近い。

1. 序

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部材（以下PC部材と呼ぶ）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プレストレストコンクリート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。

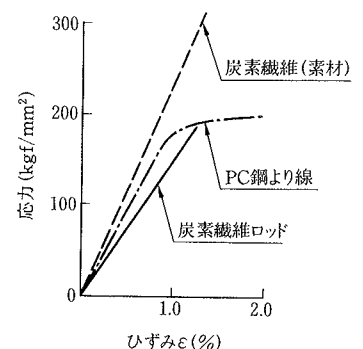


図-1 緊張材の応力-ひずみ関係

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、素材の強度が十分に発揮されない。小林ら¹⁾は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。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する形式である。くさびとロッドの間に樹脂を塗布し両者を一体化させた後、外とう管を引張り緊張する。定着は、外とう管の外にねじを設け、ロックナットで締めつけて行なう。樹脂は、ヤング係数の比較的高い種類を用い、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、平均で181 kgf/mm²の強度を示しロッドの保証強度の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体とした。実験パラメーターは、次の4項目である。

- 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
0.5 Pu (保証値の60%に相当)
0.65 Pu (保証値の75%に相当)
Pu：炭素繊維ロッドの引張荷重 (実測値、=9.02 tf)
- ④引張鉄筋の量 (径)
D10・D13・D19・D25

試験体は全て高さ30 cm、幅20 cm、長さ280 cm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 (実測値)をそろえて決めた。主筋は試験体の両端で支圧板に溶接して定着し、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、その中心をはり断面の図心から5 cm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。なおグラウトをしない試験体も、実質断面をそろえるためシースを配置した。

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300 kgf/cm²、スランプ18 cm、最大粗骨材

表-1 緊張材の諸元

項目	炭素繊維ロッド	PC鋼より線 SWPR19
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* (kgf/mm ²)	実測値	187
	保証値	161
引張強度 (kgf/mm ²)	実測値	201
	保証値	157
ヤング係数 (kgf/mm ²)	1.5×10 ⁴	1.96×10 ⁴
破断時伸び (%)	1.21	7.0

④* 0.2%永久伸びに対する荷重から計算。

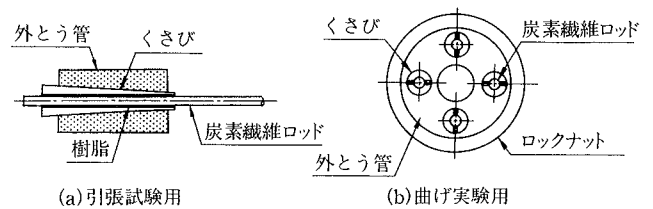


図-2 定着体 (引張試験用)

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	0.50P ₀ ¹⁾	60	2-D10 (0.28%)
C-2				78	
C-3				78	
C-4		無し	0.50P ₀	60	2-D13 (0.51%)
C-5				60	2-D19 (1.15%)
C-6				60	2-D25 (2.03%)
S-1	PC鋼より線	有り			2-D10 (0.28%)
S-2	1-φ17.8	無し			

④* 1. P₀:炭素繊維ロッドの引張荷重 (実測値)

*2. プレストレスによるコンクリートの下縁圧縮応力度 (kgf/cm²)

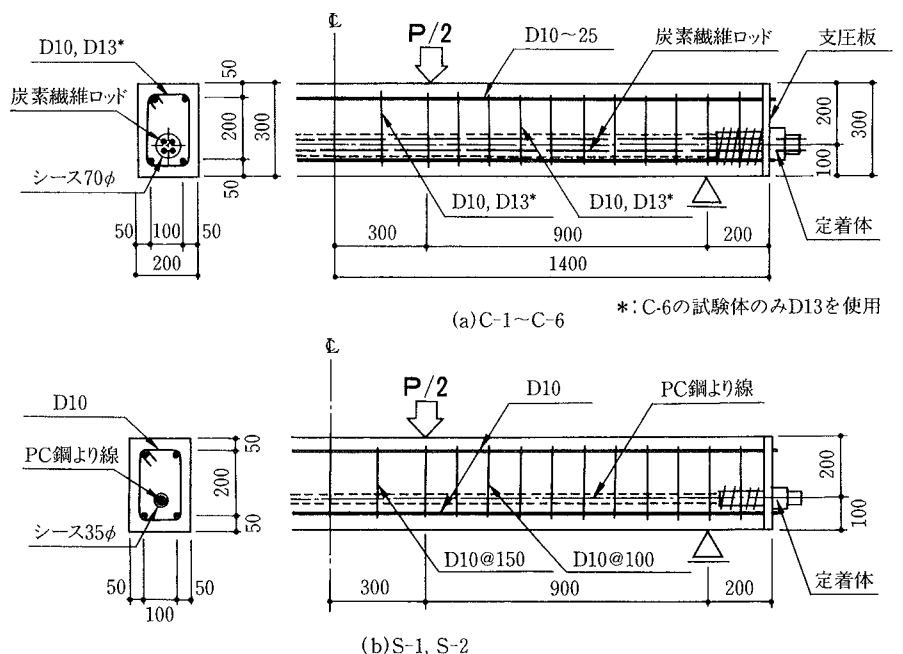


図-3 試験体の形状・寸法と配筋

寸法 10 mm のレデーミクストコンクリート (普通) を使用した。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 214 kgf/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 240 cm, 純曲げ区間 60 cm 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 (δy) を基準とし, δy 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。

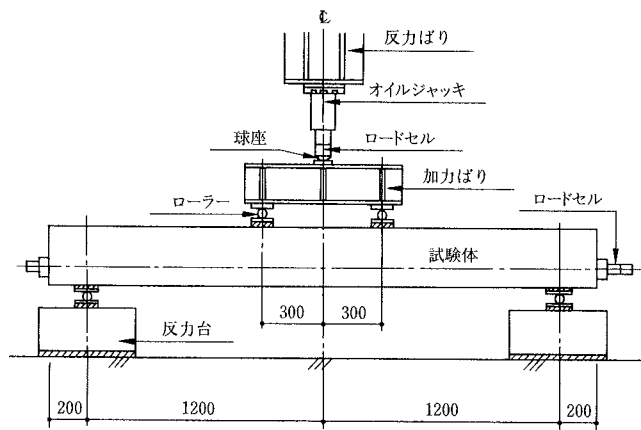


図-4 加力装置

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。実験終了に至るまで, 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 (C-1, S-1) は, グラウトをしない場合 (C-2, S-2) に比較し, 緊張材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。プレストレスの初期導入レベルの低い試験体 (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, これが多くなるほど (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

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 $E_s \times 10^5$ (kgf/cm ²)	引張強度 f_u (kgf/cm ²)
D10	3,680	1.82	5,180
D13	3,720	1.92	5,450
D19	4,470	1.86	6,240
D25	3,740	1.92	5,510

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。

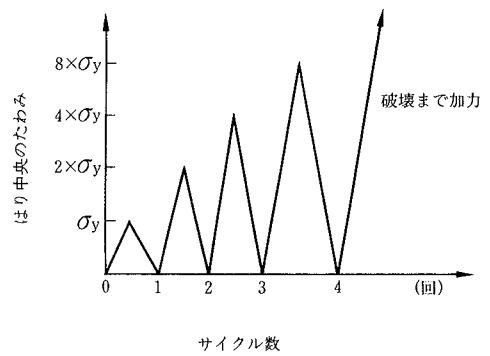


図-5 加力パターン

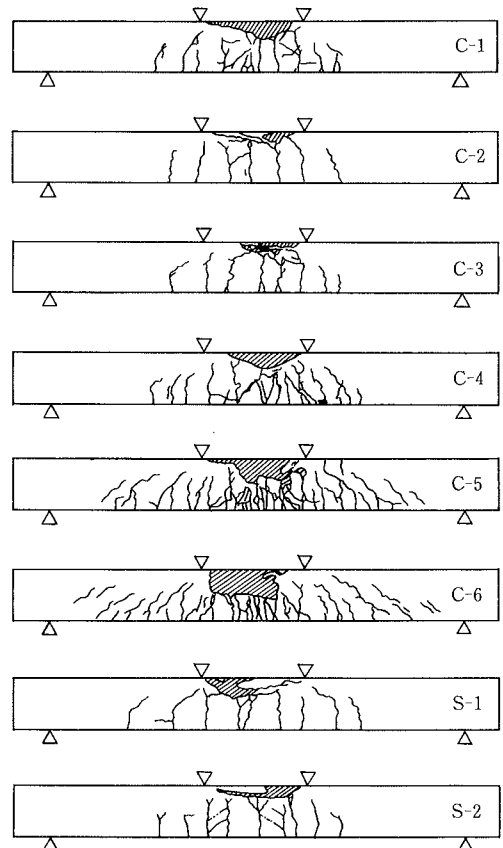
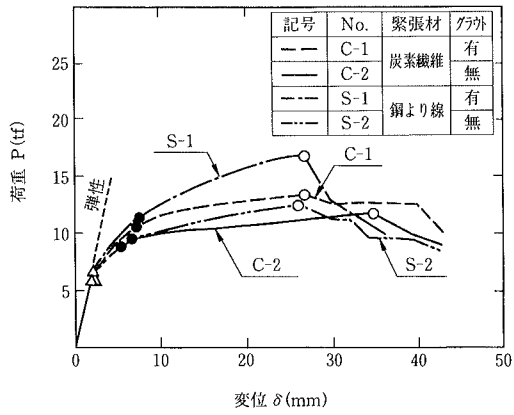
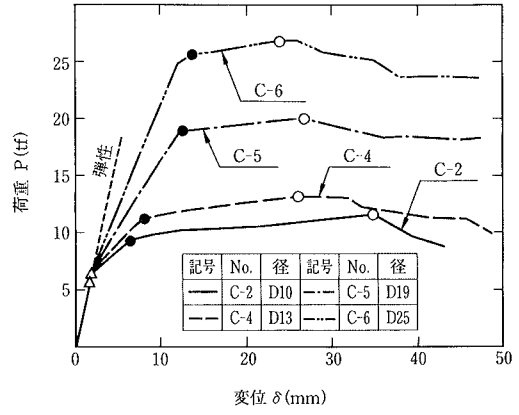


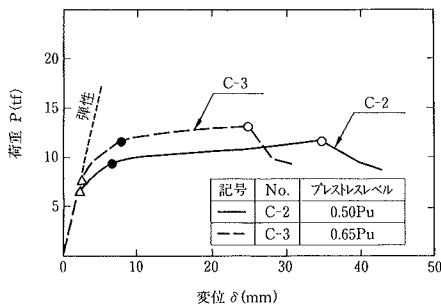
図-6 ひびわれ発生と破壊状況



① 緊張材の種類とグラウトの有無による比較



③ 引張鉄筋の量による比較



② プレストレスの初期導入レベルによる比較

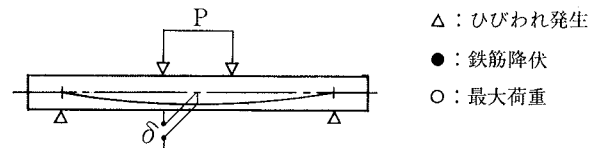


図-7 荷重-変位関係

線で図-7に示す。①は緊張材の種類とグラウトの有無による比較を、②はプレストレスの初期導入レベルによる比較を、また、③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後も荷重を保持し、変位は鉄筋降伏時の3倍以上に達した。①から次のことがわかる。緊張材の違いを見ると、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顕著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大きい。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小さい。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、グラウトの有無の違いを見ると、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。荷重に差があるのは、グラウトをしない場合、加力に従い緊張材がシーす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の間で小さいながらも付着力がある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が高いため、鉄筋降伏後の剛性はグラウトをした方が明らかに大きくなっている。②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によるためと考えられる。荷重に差があるのは、プレストレス導入による初期の曲げモーメントの違いによるも

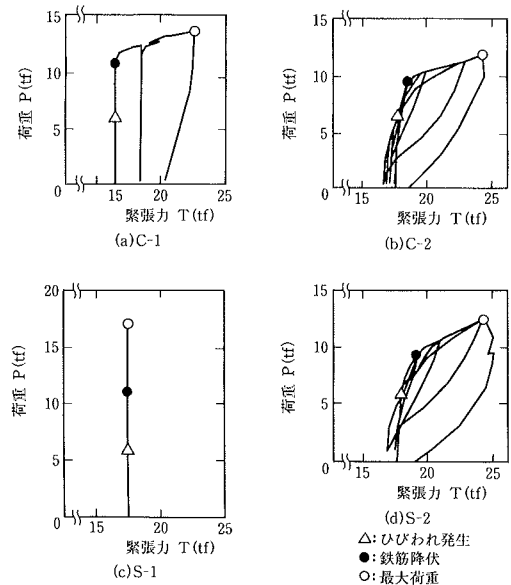


図-8 荷重と緊張力の関係

のである。③により引張鉄筋の量で比較すると、ひびわれ発生後、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。

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無いが、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の間に付着力が働いており、降伏の後にはこれが非常に低くな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。

5.4 諸荷重とその計算値との比較

実験結果の一覧を表一5に示す。

(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がコンクリートの引張強度に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、計算値に用いた引張強度($f_t=1.8\sqrt{f_c}$)が高強度コンクリートのためやや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。但し、グラウト有りの試験体内、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良く近似する。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。

(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²⁾の実験結果から示された回帰直線である。但し、グラウト有りの試験体内、C-1は付着力を考慮した場合としない場合を、S-1は付着力を考慮してそれぞれ計算した。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により近似する。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。

表一5 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 _{er}	計算値 P _{erc} *1	$\frac{P_{er}}{P_{erc}}$	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	曲げ破壊
					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	曲げ破壊
C-3	7.51	7.76	0.97	11.50	11.29	1.02	13.26	12.08	1.10	1/48	曲げ破壊
C-4	6.52	6.78	0.96	11.20	11.48	0.98	13.25	12.49	1.06	1/37	曲げ破壊
C-5	6.52	7.60	0.86	18.03	19.02	0.95	20.15	19.64	1.03	1/45	曲げ破壊
C-6	—	8.69	—	25.77	24.27	1.06	26.93	25.09	1.07	1/45	曲げ破壊
S-1*4	6.00	6.53	0.92	11.52	11.04	1.04	16.92	17.00	1.00	1/45	曲げ破壊
S-2	6.01	6.40	0.94	9.52	9.50	1.00	12.47	11.58	1.08	1/48	曲げ破壊

④計算は次の方法によった。

- *1. $P_{erc} = 2 \cdot M_{erc} / l$, 但し, M_{erc} : ひびわれ発生モーメント, l : 曲げスパン, Z : はりの断面係数
 $M_{erc} = Z \cdot (\sigma_{ps} + f_t)$ σ_{ps} : プレストレスによるはり下縁圧縮応力度, f_t : 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。
 $T = T_0 + A_t \cdot \Delta\sigma_p$, 但し, T_0 : 初期緊張力, A_t : 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。

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、プレストレストコンクリート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鋼より線と同様にプレストレストコンクリート用緊張材に適用できる感触を得た。
- (2) 炭素繊維ロッドを緊張材に使用し、保証強度の60または75%の緊張力を導入したプレストレストコンクリートはりは、良好な構造性能を示し、定着部も健全であった。
- (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、降伏の後に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

炭素繊維ロッドの提供を受けた三菱化成(株)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, vol. 36, No. 8, p. 24~27, (1984)
- 2) 竹本 靖: アンボンド PRC 部材の曲げ終局時テンドン応力について, 大林組技術研究所報, No. 28, p. 49~54, (1984)