炭素繊維帯状緊張材を用いたプレストレストコンクリート部材の開発

岡 野 素 之　　大 内 一

概 要

断面が偏平で表面に凹凸を持つ炭素繊維緊張材を開発し，その緊張材としての性能評価を行い，プレテンションプレストレストコンクリートはりの曲げ試験により構造性能を検討した。その結果，炭素繊維帯状緊張材は緊張材として使える性能を有すること，これを用いたプレストレストコンクリート部材の構造性能は既往の方法で評価・設計できることなどが分かった。

1. はじめに

高強度の連続繊維を用いたプレストレストコンクリート（以下，PCと呼ぶ）用緊張材は，大容量化すると，剛性が高く巻き取りが難しく，また定着が困難になるなど適用上問題がある。そこで緊張材の断面を偏平にすると，1)付着面積が増え付着定着が容易，2)くさびでの定着が可能，3)運搬時の巻き取りが可能，など大容量化への利点がある。今回，Photo 1に示す偏平な断面（40×3.6mm）を持つ炭素繊維帯状緊張材（以下，帯状CFロッドと呼ぶ）を開発した。これはＰＡＮ系の炭素繊維を用い，エポキシ系樹脂をマトリックスとしてPultrusion法で製造した棒材で，表面には凹凸がありコンクリートとの付着を図っている。なお繊維含有率は60%である。

本報告は，引張試験，レラクセーション試験，線膨張係数試験および付着試験による帯状CFロッドの性能評価と，T型断面プレテンションPCはりの曲げ実験による構造性能の検討結果について概要を述べる。

2. 炭素繊維帯状緊張材の性能

2.1 引張特性

アムスラー型試験機で帯状CFロッドの引張試験を実施した。試験片は試験部50～75cm，合計10体で，定着部は静的破砕材を充填した鋼管を用いた。結果のまとめをTable 1に示す。断面積は厚さと幅（外寸法）の積で評価した。引張強度は1,697～1,851（平均1,784）N/mm²であり，PC鋼材と同程度であった。変動係数は，引張強度：2.5％，ヤング係数：1.5％であった。一般の炭素繊維緊張材（Pultrusion法で製造され断面が円形なもの）の変動係数として，引張強度：4％，ヤング係数：2％程度との報告[1]があり，これに比較しより均一な品質と判断できる。応力とひずみの関係ををFig. 1に示す。図中，参考のためPC鋼より線の結果も示した。FRP特有である破断に至るまでのリニアな関係が分かる。

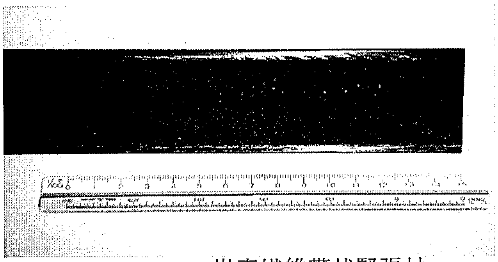

Photo 1　炭素繊維帯状緊張材
Carbon Fiber Rectangular Tendon

Table 1　引張試験結果
Results of Tensile Test

項目		最大荷重 (kN)	引張強度 (N/mm²)	最大ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm²)
最小値	Min	247.8	1697	15163	109337
最大値	Max	270.2	1851	16863	114410
平均値	$\overline{x}$	260.4	1784	16109	111545
標準偏差	σ	6.6	45	535	1632
変動係数	$\sigma/\overline{x}$	2.5%	2.5%	3.3%	1.5%
特性値	$\overline{x}$-3σ	240.7	1649	−	−

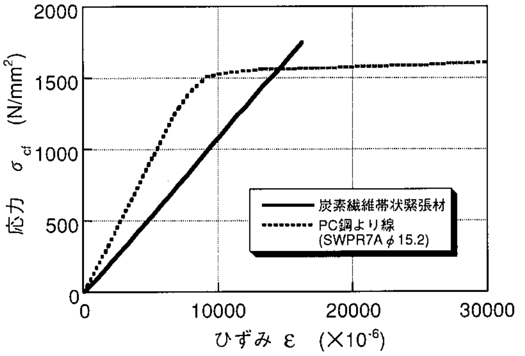

Fig. 1　応力とひずみの関係
Stress-Strain Relationship

2.2 レラクセーション

緊張材として用いる場合，レラクセーション性能が重要となる。ここでは鋼製の反力台を用い3,800時間までのレラクセーション試験を実施した。初期導入力は平均強度の68％に相当する176kNとした。測定中の気温は21～

25.5℃であった。温度変化などによるひずみの変動分を補正した純レラクセーション率と測定時間の関係をFig. 2に示す。10時間以降ではほぼ対数直線上に近似され，測定終了時（約3,800時間）ではγ_0=6.4％であった。また図中10～3,800時間の間を対数で近似し約100年後の値を推定すると10.1％となる。一般の炭素繊維緊張材のレラクセーション率は2,000時間で約6％と報告[2]されており，ほぼ同様の結果であった。

2.3　線膨張係数

レーザー干渉法により線膨張係数を測定した。温度範囲25～100℃で平均0.58×10^{-6}/℃，同じく25～200℃で平均0.33×10^{-6}/℃，の結果であり，一般の炭素繊維緊張材と同様に非常に小さな値であった。

2.4　付着強度

引抜き型の付着試験を実施し，PC鋼材と付着強度を比較した。試験体と試験方法をFig. 3に示す。試験体は一辺10cmの立方体で，中央に試験用緊張材を配置し，引き抜き側に36mmの非付着区間を設けた。緊張材には，PC鋼より線ϕ15.2（SWPR7A）と帯状CFロッドを使用した。ただし両者の付着面積を合わせるため帯状CFロッドは幅を25mmに成形した。コンクリートは粗骨材最大寸法20mmで，帯状C F ロッドの断面の長辺が縦になる方向で打設した。付着試験時のコンクリートの圧縮強度は33.6N/mm^{2}であった。試験結果をTable 2に示す。付着強度は，PC鋼より線で平均4.63N/mm^{2}であるのに対し，帯状CFロッドは平均10.25N/mm^{2}であり，2倍以上の強度を発揮し，プレテンション部材へ適用するのに十分な付着強度を有することが分かった。

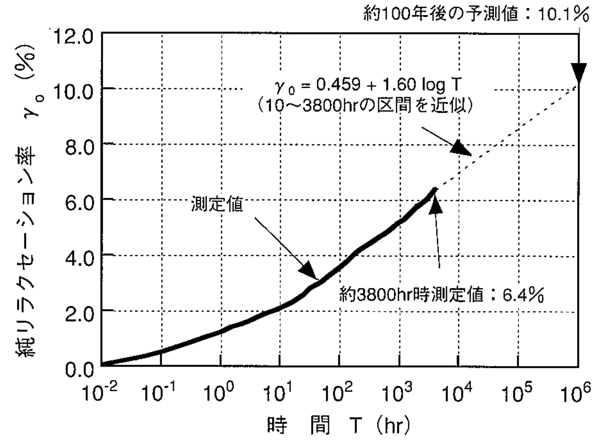

Fig. 2　純リラクセーション率と時間の関係
Relaxation - Time Relationship

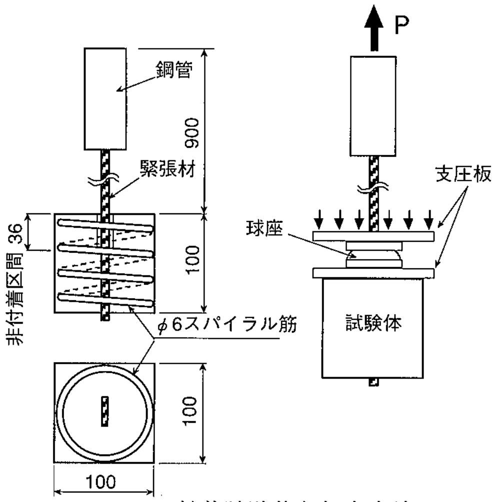

Fig. 3　付着試験体と加力方法
Specimen and Loading Method of Bond Test

Table 2　付着試験結果
Results of Bond Test

緊張材の種類	試験体	幅または直径 (mm)	最大荷重 (kN)	付着強度 (N/mm^2)
炭素繊維帯状緊張材 25×3.6	CF1	25.0	32.06	10.02
	CF2	25.0	33.26	10.39
	CF3	25.0	33.10	10.34
	平均	－	32.81	10.25
PC鋼より線 ϕ15.2	PC1	15.20	15.12	4.95
	PC2	15.20	16.66	5.45
	PC3	15.20	10.68	3.49
	平均	－	14.15	4.63

3.　プレテンションPCはりの曲げ実験

3.1　試験概要

3.1.1　試験体　試験体の一覧をTable 3に，形状・寸法と配筋をFig.4にそれぞれ示す。試験体は，高さ40cm，幅40cm，ウェブ幅15cmのT型断面，長さ4.4mのはりで，PC鋼より線と帯状CFロッドの比較をするPC70・CF70，および導入緊張力レベルで比較するCF70・CF35・CF00で合計4体とした。試験体名の下2桁は緊張材の破断荷重に対する緊張力の比率を表している。なおPC70,CF70ではプレストレスによるコンクリートの圧縮応力度を合わせ，上縁でゼロ，下縁で14N/mm^{2}とした。

3.1.2使用材料　緊張材はPC鋼より線は7本より15.2mm（SWPR7A）と帯状CFロッドを，また鉄筋は異形棒鋼SD295Aをそれぞれ使用した。コンクリートはレデーミクストコンクリート（早強）を使用した。コンクリートと補強筋の性質をTable 4,5にそれぞれ示す。

3.1.3　載荷と測定方法　加力の形式は支間4.0m，純曲げ区間0.8mの2点載荷単純ばり型とした。加力は静的アクチエーターを用い，変位制御一方向漸増で，曲げひび

Table 3　試験体の一覧
Test Specimens

試験体名	緊張材の種類と構成	導入緊張力レベル*
PC70	SWPR7A　3本-ϕ15.2	70%
CF70	炭素繊維帯状緊張材 3本- 40×3.6mm	70%
CF35		35%
CF00		0%

*：緊張材の破断強度に対する緊張荷重の比

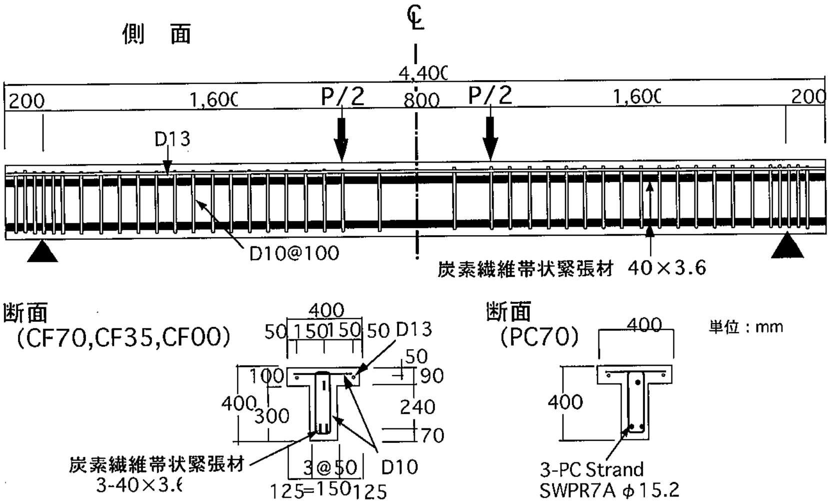

Fig. 4　試験体
Test Specimens

Table 4　コンクリートの性質
Properties of Concrete

圧縮強度 f'_c (N/mm²)	ヤング係数 1/3割線勾配 E_c (N/mm²)	引張強度 f_t (N/mm²)
41.4	30280	3.39

Table 5　補強筋の性質
Properties of Re-bar

種　類	公称断面積 (mm²)	降伏強度 f_y (N/mm²)	引張強度 f_u (N/mm²)	破断時伸び (%)	ヤング係数 E (kN/mm²)
PC鋼より線 φ15.2	138.7	1612	1820	7.0	195.8
帯状緊張材 40×3.6mm	146	－	1784	1.61	111.5
SD295A D10	71.3	341	511	22.7	190.1
SD295A D13	126.7	341	529	22.6	200.9

割れ発生後いったん除荷しその後破壊まで変位させた。

測定は，荷重をロードセルで，変位を高感度型変位計で，また緊張材のひずみをワイヤーストレインゲージでそれぞれ測定した。

3.2　実験結果と考察

3.2.1　破壊状況　PC鋼より線を用いたPC70は，ひび割れ発生後ＰＣ鋼より線が降伏し，コンクリートが圧壊し破壊した。一方帯状CFロッドを用いたCF70，CF35，及びCF00はひび割れ発生後引張側緊張材の破断により破壊した。破壊時のひび割れ発生状況をFig.5に示す。全般に帯状ＣＦロッドを用いた試験体は付着性能が高いためひび割れの発生が多いこと，またプレストレスが低いとひび割れが多いことがわかる。

3.2.2　変位性状　各試験体の荷重とはりの中央のたわみをFig. 6に示す。緊張材の種類で（PC70 vs. CF70）比較すると，ＰＣ鋼より線が0.2％耐力に至るまでは両者の荷重とたわみの関係はほぼ同じであるが，この後CF70は荷重がさらに増大するのに対し，PC70は鋼材が降伏するため荷重の上昇が緩やかになった。

プレストレス導入量で（CF70，CF35およびCF00）比較すると，曲げひび割れの発生荷重が違うため，プレストレスの低い試験体ほどたわみが大きい。また曲げひび割れ発生後の勾配は３者とも同じ傾向である。

またＲＣ理論による解析結果をＦｉｇ．6に合わせて示した。たわみの解析値は，平面保持の仮定の下で断面の曲げモーメントと曲率の関係を算出し，部材軸方向に積分して求めた。補強筋の応力とひずみの関係を，帯状ＣＦロッドはリニア，鋼材はバイリニアにモデル化し，コンクリートの軟化と引張強度を考慮した。全体に解析値が実験値よりもひび割れ発生後の剛性が高いが，コンクリートの引張強度を考慮したためと考えられる。おおよそ荷重と変位の関係は解析値と実験値は近似しており，実用上十分なレベルで計算できるといえよう。

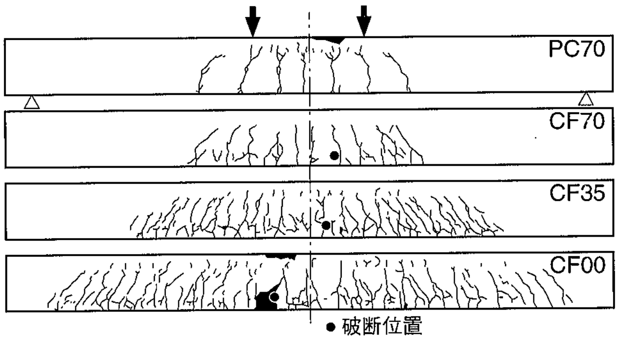

Fig. 5　ひび割れ発生状況
Cracking Patterns

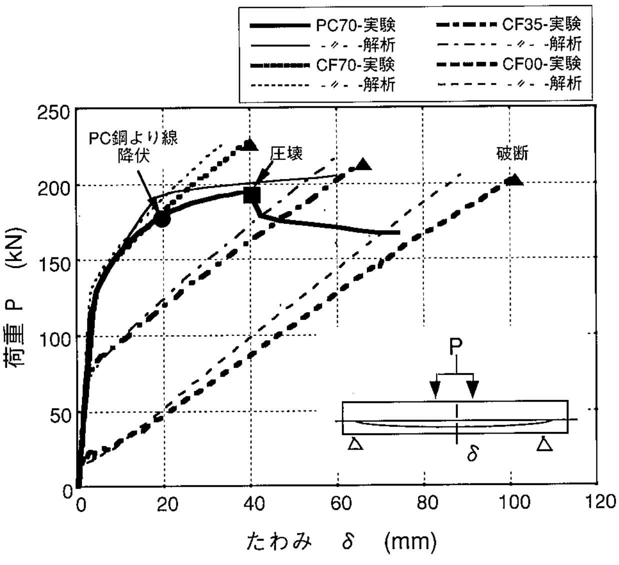

Fig. 6　荷重と変位の関係
Load-Displacement Relationship

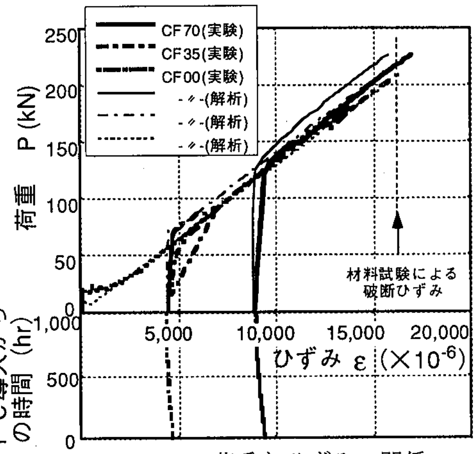

Fig. 7　荷重とひずみの関係
Load-Strain Relationship

Table 6　実験結果の一覧
Test Results

試験体 No.	ひびわれ発生荷重（kN）		最大荷重（kN） 解析		最大荷重（kN） 指針（案）[3]		破壊形式
	実験値 / 計算値	比	実験値 / 解析値	比	実験値 / 計算値	比	
PC70	129 / 88	1.47	199 / 205	0.97	199 / 182	1.09	Conc. 圧壊
CF70	125 / 96	1.31	232 / 227	1.02	232 / 203	1.12	緊張材破断
CF35	74 / 58	1.27	218 / 216	1.01	218 / 203	1.08	緊張材破断
CF00	25 / 21	1.19	207 / 205	1.01	207 / 203	1.02	緊張材破断

実験値には自重を考慮した

3.2.3　ひずみ性状　　荷重とひずみの関係（緊張力の比較）をFig. 7に示す。同図のひずみはプレストレス導入から曲げ実験終了までの純曲げ区間での引張側緊張材の各測定点の平均を示す。プレストレス導入から実験時までに，コンクリートのクリープと乾燥収縮によりひずみが低下するのがわかる。ひび割れ発生以降は３者とも近似した荷重とひずみの関係を示している。また，曲げ実験による最大ひずみの平均はほぼ引張試験による破断ひずみに達しており，部材中に埋め込むことによる強度の低下は無いことが分かる。

3.2.4　強度　　実験結果の一覧をTable 6に示す。

（1）　ひび割れ発生荷重とプレストレスの導入量

計算値は，曲げによるコンクリートの引張応力度が，プレストレスによる圧縮応力度とコンクリートの引張強度の和と等しくなる値とした。プレストレスの導入量の計算は土木学会の標準示方書にしたがった。プレストレスの損失として，弾性変形，リラクセーション（５％），コンクリートのクリープ（クリープ係数：２．３）と乾燥収縮（ひずみ：180×10^{-6}）を考慮した。全体にひび割れ発生荷重は実験値の方が計算値よりも高いが，導入プレストレスはＰＣ鋼より線と同様に安全側に計算できるといえよう。

（2）　最大荷重　　帯状CFロッド試験体の計算値は，緊張材のひずみが破断ひずみ（16,100μ）に達した荷重とした。帯状ＣＦロッドの場合，プレストレスが高くなると最大荷重が大きくなる傾向があるが，この理由としては，帯状ロッドの破断時における中立軸位置が圧縮側から離れることが考えられる。また前述した解析結果と比較すると，実験値の解析値に対する比は0.97～1.02の間であり，精度よく評価できる。また指針（案）[3]による計算値は，建設省土木研究所から提案されたもので，緊張材破断型において，安全率 1.0で計算した値である。PC70試験体の場合，実験値は計算値を９％上回ったが，ほぼ整合したといえる。帯状ＣＦロッドを用いた試験体の場合，実験値は計算値をすべて上回り，また両者はほぼ整合している。したがって実用上最大荷重は既往の方法で計算できる。

4.　まとめ

炭素繊維帯状緊張材を開発し，その性能評価とプレテンションＰＣはりの曲げ実験を実施した結果以下のことがわかった。

1）炭素繊維帯状緊張材は，引張特性，レラクセーション率，線膨張率および付着強度の点でPC緊張材としての性能を満足する。

2）炭素繊維を用いた帯状緊張材で，実用レベルのプレストレスの導入が可能であり，既往の計算方法で安全側に設計できる。

3）帯状緊張材はプレストレストコンクリートはりの中に埋め込まれた状態で，素材の引張試験で得られる平均引張強度を発揮する。

4）はり部材の曲げ終局耐力は，PC鋼より線の場合と同様に，計算でき，安全側に設計できる。

謝　辞

本研究は，東レ（株）からロッドの提供をうけて実施しました。ロッドの開発ならびに一部データを御提供戴きました複合材料研究所，京野哲幸主任研究員に深謝いたします。

参考文献

1）木村，白鳥，高木：コンクリート補強用炭素繊維複合材ケーブルの基本的特性,コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，(1990)

2）建設省土木研究所総合技術開発プロジェクト「PC橋の緊張材への新素材の利用に関する共同研究報告書（その２）」，(1992)

3）建設省土木研究所総合技術開発プロジェクト「FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計・施工指針（案）」，(1994)