

報 告

[1188] CFRP緊張材を用いて製作したプレストレストコンクリート桁の製作試験

正会員 ○ 片脇 清士 (建設省土木研究所)  
 正会員 西崎 到 ( " )

まえがき

カーボン繊維は、その優れた耐食性と力学的特性を有することから土木分野への幅広い利用が検討されている。現在、プレストレストコンクリート分野においても、カーボン繊維を緊張材として利用するための多くの研究がなされている。

本試験では、緊張材をコンクリート中にアウトケーブルの形で埋設せずに露出した状態で使用することを検討した。アウトケーブルを適用した場合の利点は、ウェブの厚さを薄くすることができ、より経済的な断面が可能となったり、ウェブ内にPCケーブルを配置しなくてすむため、施工の簡略化、省力化に貢献できると期待される。また、PCケーブルの再緊張、取り替えも可能である。

アウトケーブルとして望ましい緊張材は、PCケーブルの大容量化に対応できる緊張材であること、折れ線配置に対応できる可撓性を有すること、耐食性を有することなどである。

今回の試験はCFRPそのものの優れた耐食性を利用し、CFRPを用いたアウトケーブルによるPC桁を実際に製作することによって、製作の可能性と、その後の追跡調査によって、耐久性を検証しようとするものであり、以下の内容を含む。

- ① CFRP緊張材に関する試験
- ② 試験PC桁の構造と製作
- ③ CFRPケーブルの摩擦試験
- ④ アウトケーブルの緊張作業と管理

1. CFRP緊張材に関する試験

製作試験で使用したCFRPケーブルは、φ12.5mmのCFRP 7本より線6本を1組としたマルチプルケーブル(6-φ12.5CFRPケーブル)である。

(1) φ12.5CFRP 7本より線

まず、φ12.5mm CFRP 7本より線の強度、弾性係数などを破断試験によって求めた。試験は3本行ったが、弾性係数についてはそのうちの2本に歪ゲージを貼付して求めた。試験は万能引張試験機を使用し、試験体のグリップには後述のPS社製の定着具を使用した。この結果を表-1に示す。図及び表中の保証値(荷重、強度)は実験値より、

表-1 φ12.5mm CFRP 7本より線の性質

項目	単位	品質	摘要
マトリックス	—	熱硬化性エポキシ系樹脂	
繊維混入率	%	65%	
呼び径	mm	12.5	
断面	—		
公称断面積	cm <sup>2</sup>	0.76	
公称単位重量	g/m	158	
破断荷重	kg	11,390	n=3 平均値
(引張強度)	kg/mm <sup>2</sup>	(150)	
保証荷重	kg	10,560	下廻る確率
(保証強度)	kg/mm <sup>2</sup>	(139)	0.13%
弾性係数	kg/mm <sup>2</sup>	13,700	n=2 平均値
破断時の伸び	%	1.1	n=2 平均値

$\bar{X} = X - 3\sigma$  ここで  $X$  : 保証値 (これを下廻る確率は0.13%)

$\bar{X}$  : 平均値

$\sigma$  : 標準偏差

により求めた。

(2) 6-φ12.5mmCFRPより線マルチケーブル

使用するマルチケーブルについて破断試験を実施した。破断試験は、最初に予備試験を行い (NO.1及びNO.1')、その結果を参考にして改良した新たな定着具6組を用いて3本のマルチケーブル (NO.2, NO.3, NO.5) について行った。その結果を表-2に示す。

この試験では、6-φ12.5mmCFRPマルチケーブルの破断荷重は、φ12.5mmの単線 (シングルワイヤー) の破断荷重の6倍 (計算破断荷重) より大分小かった。即ち、6-φ12.5mmCFRPマルチケーブルの保証荷重 (43,602kg) は、計算破断保証荷重 (6×10,560=63,360kg) の約69%である。マルチケーブルの破断荷重が小さい主要な原因は、マルチケーブル用定着具の形状の問題であり、定着具にまだ改良・開発の余地が残されていることを示すものである。しかし、緊張荷重の点ではこの定着具は現在、我が国で実際に使用できる最大クラスのものである。

表-2 マルチケーブル破断試験結果

番号	仕様	破断荷重	摘要
NO.1	6-φ12.5CFRPより線	44,000kg	予備試験用 6本のうち1本が抜け出し破断
NO.1	5-φ12.5CFRPより線	39,960kg	予備試験 NO.1と同一の定着体使用
NO.2	6-φ12.5CFRPより線	50,960kg	
NO.3	6-φ12.5CFRPより線	56,500kg	
NO.4	6-φ12.5CFRPより線	繰返し試験用	緊張荷重0↔40tの15回の繰返しに対して異状なし
NO.5	6-φ12.5CFRPより線	58,500kg	
NO.2 NO.3 NO.5より n=3 X=55,320kg σ=3906kg 保証荷重 P <sub>u</sub> =X-3σ=55,320-3×3906=43,602kg/本			

表-3 6-φ12.5mmCFRPより線マルチケーブルの性質

項目	単位	品質	摘要
呼び名	—	6-φ12.5mmCFRPより線	
公称断面積	cm <sup>2</sup>	4.56	
公称単位重量	g/m	948	
破断荷重	kg	55,320	n=3 平均値
(引張強度)	kg/mm <sup>2</sup>	(121)	
保証荷重	kg	43,600	
(保証強度)	kg/mm <sup>2</sup>	(96)	
弾性係数	kg/mm <sup>2</sup>	13,700	φ12.5mmシングルワイヤーの値
破断時の伸び	%	0.9	平均値

またNo.4のマルチケーブルについては、繰返し緊張作業に対する安全性を確認するために、緊張荷重を40,000kgに設定して、緊張・除荷の作業を15回繰返したが、外観的にはPCケーブルには、ひびわれ、はくり、ばらけ等は認められなかった。従ってこのマルチケーブルは通常の使用（通常は緊張・再緊張が多くても2～3回程度）に対して十分安全であると考えられる。

試験結果をもとにCFRPより線マルチケーブルの性質を表-3にまとめた。表中の保証荷重・強度とは、前節の(1)と同様にこれを下廻る確率が0.13%である荷重・強度である。

## 2. 試験PC桁の構造と製作

### (1) 試験PC桁の構造

アウトケーブルを用いる場合、PC橋の断面は、アウトケーブルを外的損傷から保護するために桁の内部にケーブルを収納できる箱形（ボックス）断面が基本となる。

試験PC桁は、建設省の制定による標準ホロー桁（プレテンション方式）がボックス断面であるため、これを基にしてその構造を定めた。

今回、スパン13mの一等橋を対象としたため、試験PC桁は桁高50cm、緊張力200ton、横桁5ヶ所（支点上とその中間3ヶ所）が必要となった（図-1）。

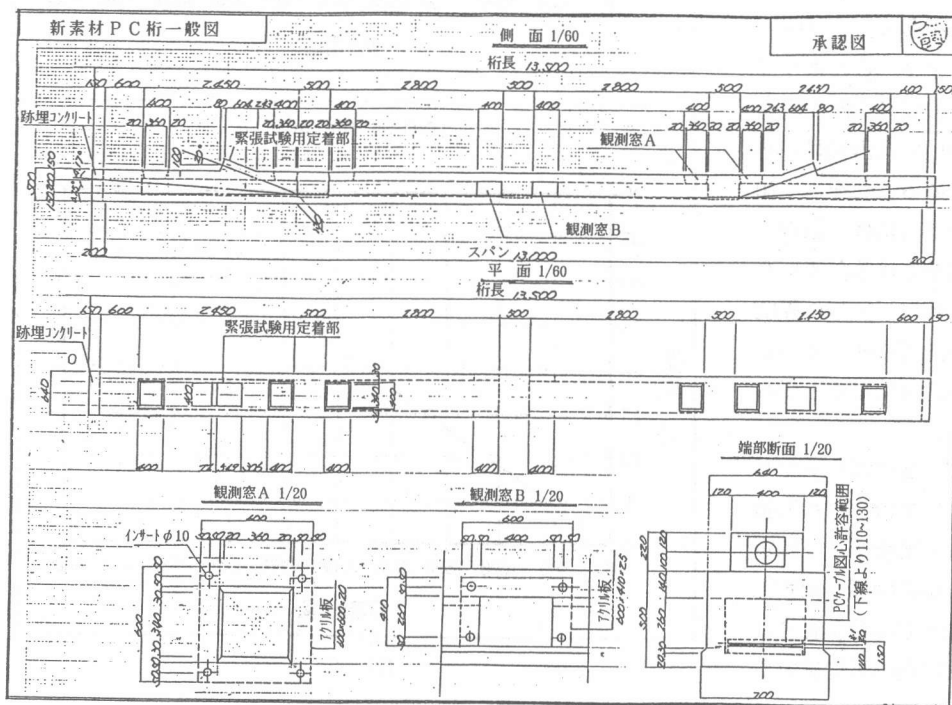


図-1 試験PC桁

PCケーブルは、6-φ12.5mmCFRPストランドマルチケーブル5本を支点側中間横桁で変向させ折れ線状に配置し、支点横桁に定着するようにした。この結果ケーブルの折れ角度（曲げ上げ角度）は下段の3ケーブル（C<sub>1</sub> C<sub>2</sub> C<sub>3</sub> ケーブル）が0.75°、上段の2ケーブル（C<sub>4</sub> C<sub>5</sub>）が4.17°となった。

(2) 摩擦試験の結果

C<sub>1</sub>、C<sub>4</sub> ケーブルの摩擦試験においては、緊張材は破断することなく40ton まで荷重を加えることができたが、曲げ上げ角度20°、C<sub>6</sub> ケーブルは 39ton で破断した。

使用したCFRPマルチケーブルについて破断試験から得られた保証荷重は 43ton であるが、これは直線の場合であって曲げ上げ角度が大きい場合には保証荷重をもっと小さくする必要がある。それと同時に破断荷重の低下は曲げ角度20° で急激に変向させたことに問題があることは明らかであり、このような場合の変向点部の構造については再検討の必要がある。おそらく20° の場合には、急激な変向を避けるために変向点部に半径10m程度の円曲線を挿入することが必要になると思われる。

図-2 に各ケーブルについて得られた緊張荷重と緊張側及び固定側の歪の関係を示す。歪は6本のCFRPより線の歪の平均値である。

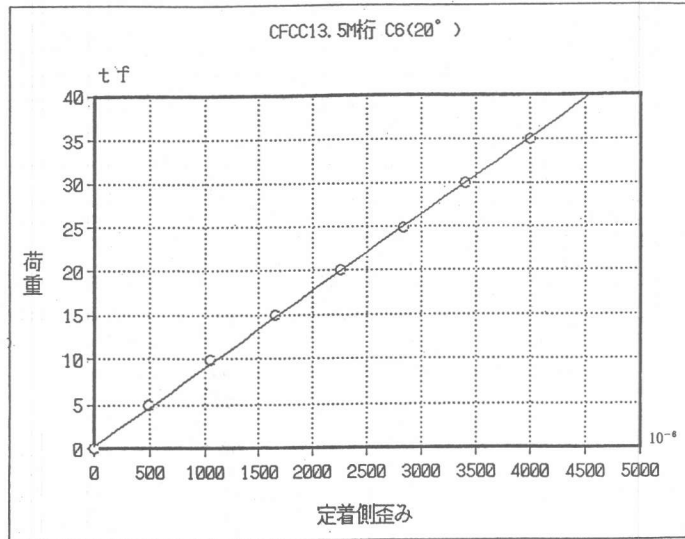
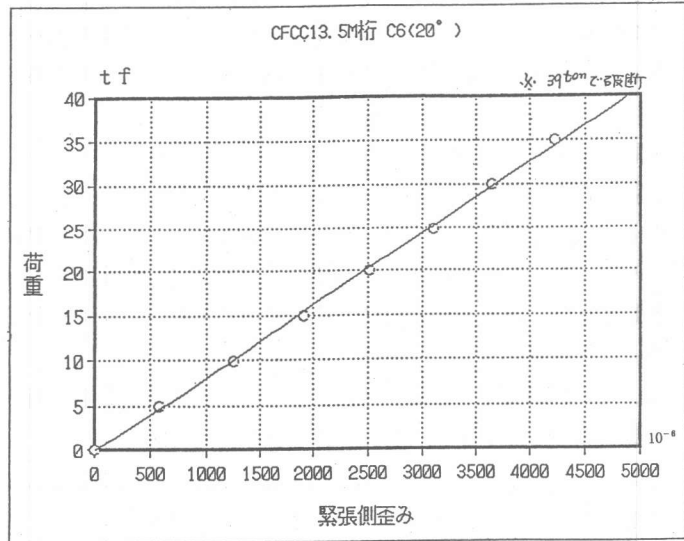


図-2

これらの図より緊張荷重と歪量は、緊張側、固定側とも直線的な比例関係にあることがわかる。

C<sub>1</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>6</sub> ケーブルについて歪分布の測定からは、各ケーブルとも固定側の歪量は緊張側より小さく、緊張側の歪量の89%~96%であり、摩擦によって緊張力が損失することが確かめられた。ケーブルの長さが10m位の場合のアウトケーブルの摩擦は従来のインナーケーブルと同程度とみなすことができるようである。

尚、このように、試験PC桁の設計上の曲げ上げ角度は小さくてすむが、更に大きい角度の場合についても調査できるように曲げ上げ角度が20°となる調査用の定着部を上縁に設けた。(C<sub>6</sub>ケーブル)

## (2) 試験PC桁の製作

型枠を組立ててから、カゴ状に組み立てた鉄筋を型枠内に設置した。桁端部のトランペットシース、中間横桁部の変向用ステンレス板を取付けた後、表-4に示す配合のコンクリートを打設した。

打設後、約半日間蒸気養生(最高温度60℃)を行い、その後脱型した。脱型後コンクリート桁を製作アバットから安全にとり出し移動させるために、マルチケーブル用の支圧板を利用してPC鋼より線φ12.4mmによって仮緊張した。

緊張作業の前に、6-φ12.5CFRPより線マルチケーブルC<sub>1</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>6</sub>について、ケーブルの摩擦などを調査するための摩擦試験を行い、その後本緊張を行った。

表-4 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプの 範 囲 (cm)	空気量の 範 囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)	
20	6 ± 1.5	5 ± 1	33.7	42	
単位量 kg/m <sup>3</sup>					
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 kg/m <sup>3</sup>	AE剤 kg/m <sup>3</sup>
145	430	723	1062	0.215	5.16

セメント : 早強ポルトランドセメント 比重 3.14

粗骨材 : 砕石 比重 2.70

細骨材 : 川砂 比重 2.54

## 3. CFRPケーブルの摩擦試験

試験PC桁で使用されている長さ、曲げ上げ角度の異なる3種類のケーブル(C<sub>1</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>6</sub>ケーブル)の摩擦試験を行った。

### (1) 摩擦試験の方法

摩擦試験は片引き緊張で行った。即ち、試験桁の一端に緊張ジャッキをセットし、他端を固定しておき、40tonまで緊張してその時の緊張材の歪と伸び量を測定した。

歪は、各ケーブルとも、緊張端及び固定端から1.5mの位置のCFRPより線6本に貼付した歪ゲージから求めた。C<sub>1</sub>ケーブルについては、そのうちの1本のCFRPより線の間数ヶ所にも歪ゲージを貼付した。

伸びはスケールを用いて測定した。

#### 4. アウトケーブルの緊張作業と管理

試験桁の緊張作業は、両端に各々 50tonの油圧ジャッキとロードセルをセットし、片側ずつ緊張を行った。即ち、一端にジャッキをセットして所定の荷重で緊張し、定着した後、反対側で同様の作業を行った。摩擦試験から推測できるように、ケーブルの長さが13mの場合の摩擦はそれほど大きくないから、反対側のジャッキによる緊張力の追加はわずかであった。

下段に配置した曲げ上げ角度 $0.75^\circ$ の $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ケーブルでは 40tonの緊張力を導入できたが、上段の曲げ上げ角度 $4.17^\circ$ の $C_4$ 、 $C_5$ ケーブルでは 40tonの計画緊張力に対し導入できたのは 25tonであった。これは緊張力の増加とともにアンカヘッドが上方に移動していき、緊張材が支圧板と接触したため破断する危険が生じ、緊張作業を中止せざる得なかったからである。このアンカヘッドの上方への移動は、PCケーブルとアンカヘッドの軸のズレによるものと考えられる。

試験PC桁に導入された全緊張力は170tonで、計画量200tonの85%にとどまった。

製作したPC桁の外観について調査した。ウェブ内に十分コンクリートがゆき渡り、締め固めも十分できたため、コンクリートの表面は、ジャンカなどが無く、きれいな状態であった。製作したPC桁はスパン中央部の左右各2ヶ所計4ヶ所のウェブに観測窓が設けられている。この観測窓より、PC桁内部のPCケーブルを常時観察することができる。

観測窓からの観察によると、CFRPより線は横桁部のケーブル変向点で並行的に正しく配置されており、また挿入・緊張作業などによる表面のキズなども見られず良好な状態であった。

#### 5. まとめ

ケーブルの配置形状が直線に近い場合、 $6-\phi 12.4\text{mm}$ CFRPケーブルは緊張力 40tonのアウトケーブルとして使用できる。しかし、曲げ角度が大きい場合（例えば $20^\circ$ ）においては変向点の構造を更に検討し、実験的な確認が必要である。

#### あとがき

アウトケーブルによる長さ13mクラスのPC桁の製作は、おそらく日本で最初の経験であると考えられる。今後、本試験桁は暴露試験に使用するなど長期に観測する予定である。

本製作にあたっては、ピースコンクリート株式会社技術研究所の御尽力を得た。謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) 土木研究所資料 コンクリート防食材料に関する研究—繊維系複合材料のプレストレストコンクリート緊張材への利用に関する研究— 建設省土木研究所
- (2) 土木研究所資料 コンクリート防食材料に関する研究—CFRP緊張材を用いて製作したプレストレストコンクリート桁の製作試験— 建設省土木研究所