

# [39] 炭素繊維補強セメントの曲げ強度におよぼす諸因子

正会員 白川 潔 (住友金属工業 中央技術研究所)

正会員 ○ 中川 憲一 (住友金属工業 中央技術研究所)

## 1. まえがき

炭素繊維補強セメント(CFRC)の研究は、1972年にAliらが高弾性型炭素繊維(PAN系)について<sup>1)</sup> また1981年に秋浜らが低弾性型炭素繊維(ビッチ系)について<sup>2)</sup> それぞれ報告している。これらはいずれも一方向連続繊維で補強したCFRCに関するものであり、短繊維に関するものはほとんど見当たらない。

PAN系繊維は高強度高弾性の性質を有し補強用繊維としてはビッチ系繊維よりも優れているが、高価なため建築材料には経済性の面で適用が困難である。これに対して短繊維で用いたビッチ系繊維(CF)は比較的安価で、しかもセメント補強用として十分な機械的性質を有するので、流込み、押出成型品など広い用途に適用可能である。ここでは、ビッチ系短繊維を用い、流込み成型したCFRCの曲げ強度におよぼす繊維の長さ、容積混入率、分散性、骨材の種類、粒径等の影響を実験的に明らかにしたのでその結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合

使用材料と配合条件を表1にとりまとめ示す。繊維Ⅰはミキサー投入前から若干のファイバボールが存在していたもの、繊維Ⅱは繊維Ⅰを2.5mmフルイに通し、完全にファイバボールを除去したものである。また、供試CF、骨材の物理的性質をそれぞれ表2、3に示す。

### 2.2 実験の種類と目的

**実験A** : 表1に示すように、ミキサーの種類、混和剤の種類、ミキサーへの投入前の繊維の状態をそれぞれ変化させて混練したCFRCの曲げ強度を調べ、CFの分散が強度におよぼす影響を明らかにするとともにCFRCの最適混練方法を見出す。

**実験B** : CFの長さ $l = 3, 6, 10$  mm, 容積混入率 $V_f = 0, 3, 5, 7, 10$  %と変化させ、繊維の長さ、混入率がCFRCの曲げ強度および変形能におよぼす影響を明らかにする。

**実験C** : 表3に示す6種類の骨材を用いて、骨材の種類、粒径がそれぞれCFRCの曲げ強度におよぼす影響を明らかにし、CFRCに適した骨材を見出す。なお、CFRCのフロー値は160mmとした。

### 2.3 供試体の養生

供試体の養生は全てオートクレーブ養生とし、実験Cのみ比較のため水中養生も行なった。オートクレーブ養生は昇温速度 $50^\circ\text{C/hr}$ , 最高温度 $183^\circ\text{C}$ , 最高圧力 $10\text{ atm}$  で5時間保持後自然放冷とした。

表1. 使用材料および配合

実験種類	使用材料				ミキサー投入時の繊維状態	ミキサーの種類	配合条件				
	セメント	繊維長さ(mm)	混和剤	骨材			W/C(%)	V <sub>f</sub> (%)	MC/C(%)	A/C(%)	
A		3			繊維Ⅰ 繊維Ⅱ	オムニミキサー ハンドミキサー*2	50	3	0	0	0.03
B	早強ポルトランドセメント	3 6 10	メチルセルローズ(MC) *1 消泡剤(Af)	シリカブルー 川砂 川砂利 2号硅砂 5号硅砂 8号硅砂	繊維Ⅱ	オムニミキサー*3		0.1 3.5 7.10	0.5		0.03
C		3			繊維Ⅰ		40 50 60 80 100 120	3			

\*1. 酸化エチレン酸化プロピレン系      \*2. 羽根の直径100φmm, 回転数1000rpm  
\*3. 容量30L

表2. 炭素繊維の物理的性質

比重	直径 μm	引張強度 ×10 <sup>3</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	弾性係数 ×10 <sup>5</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	伸び %	電気比抵抗 Ω·cm	熱膨張率 10 <sup>-5</sup> /°C	熱伝導率 Kcal/m·hr·°C
1.6	14.5	8.5~10	3.8~4.2	2.2~2.4	5.5~15×10 <sup>3</sup>	1.7~5	15

表3. 骨材の物理的性質

骨材の種類	粒度範囲	比重
シリカブルー	10~200 μm	*0.4
川砂	5mm以下 (FM=2.52)	2.57
川砂利	10mm以下	2.60
2号硅砂	0.6~2.5mm	2.68
5号硅砂	0.3~1.2mm	2.64
8号硅砂	0.15mm以下	2.68

\*見掛比重

## 2.4. 実験方法

曲げ供試体の寸法は  $40^b \times 10^t \times 160^l$  mm で、試験はスパン100 mmの中央集中荷重とした。なお、荷重と同時にスパン中央における供試体のたわみを計測した。引張供試体は図1に示す形状寸法のもので、供試体中央部に貼付した長さ30 mm のストレインゲージにより、荷重時の引張ひずみを計測した。なお、実験AではCFRC破面の顕微鏡写真を利用し、0.1 mm メッシュ中の繊維本数を数え、(1)式で得られる分散係数  $\beta$  にてCFの分散性を定量化した<sup>3)</sup>。なお、要素数は各条件とも225個とした。

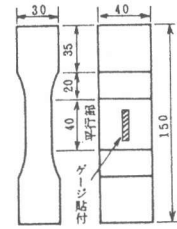


図1. 引張供試体

$$\beta = e^{-\varphi(x)}$$

$$\varphi(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} / \mu \quad (1)$$

$\mu$  : 繊維数の平均値,  $n$  : 要素数,  $X_i$  : 各要素の繊維数

## 3. 実験結果と考察

### 3.1. CFの分散の影響(実験A)

表4に示すように容積混入率一定(3%)のCFRCの曲げ強度はミキサーへ投入する繊維の状態、ミキサーの種類、メチルセルローズ(MC)添加の有無により異なった値を示す。これは混練条件によりCFの分散状態が著しく異なっているためであり、図2のCFの分散係数と曲げ強度との関係からも明らかである。このCFの分散性を向上させる混練方法については、(1)オムニミキサーの機械的攪拌だけでは、混練前から若干のファイバーボールのあるCFを十分に分散混練することは難しいが、MCを添加するとその増粘効果でCFの分散性が向上すること、(2)CFを混練前に十分ほぐして使用するとMCを添加しなくてもオムニミキサー、ハンドミキサーでの分散混練が可能であること等が明らかとなった(表4)。図3はCFRCの曲げ試験における荷重とたわみとの関係を示したものでCFRCの曲げ変形状は次の3段階に分けられる。すなわち、初期勾配が直線的な第1段階、初期ひびわれが発生した後最大荷重に至るまでの第2段階、最大荷重到達後荷重が低下する第3段階である。第1段階はCFとマトリックスとの付着が完全とみなし得る弾性領域、第2段階はひびわれが発生することによる応力再配分でさらにひびわれ本数が増加する領域で、最大荷重は後述のように引張下縁が引張破壊ひずみに達した時点と推定される。第3段階はCFのマトリックスからの引抜けによる破壊が進行する領域と考えられる。なお、図3よりMCを添加するとCFRCの曲げ変形状が著しく向上することが認められる。これはMCの接着効果によりCFとセメントマトリックスとの付着応力が向上したためと推定される。ただ、MCを添加すると表4のNo.2, No.5のように多量の空気(7.4~9.3%)を巻き込み十分な曲げ強度が得られない。しかし、これに消泡剤を併用することによって空気量を約2%に低減させることが可能となり、その結果曲げ強度は20~25%向上する。

表4. 実験結果(実験A)

No.	混練条件			実験結果			
	繊維	MC/C (%)	Af/C (%)	空気量 (%)	曲げ強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	分散係数 $\beta$	
1	I	オムニミキサー	0	0	0.24	67.4	0.32
2			0.5	9.32	121.2	0.41	
3			0.03	2.02	148.9	—	
4	II	ミキサー	0	0	0.10	123.8	0.37
5			0.5	7.42	121.8	0.40	
6			0.03	2.38	153.6	—	
7			0	0	0.10	138.9	0.45

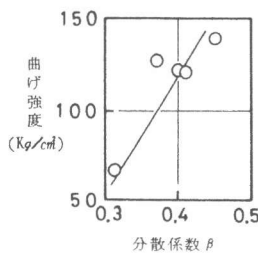


図2. 分散係数と曲げ強度との関係

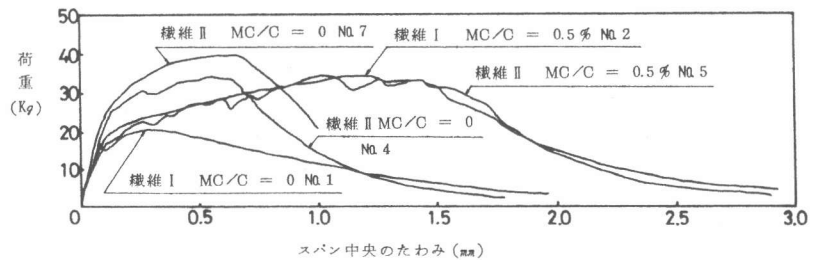


図3. CFRCの荷重たわみ線図

### 3.2. CFの長さ，容積混入率の影響（実験B）

CF長さ $l$ ，容積混入率 $V_f$ がCFRCの曲げ，引張強度におよぼす影響を図4，5，6に示す。また図7は曲げ変形能をCFRCの最大荷重時におけるたわみ量をブレン材の最大荷重時のたわみ量で除した塑性率で示したものである。これらの図より(1) $V_f$ が大きくなる程，曲げ，引張強度とも向上するが $V_f=7\%$ を境に再び強度が低下する傾向にあること，(2)CF長さは強度面ではあまり明確な差異が認められないものの，変形能では長さの影響が認められ $l=10\text{mm}$ が最も優れていること等が判明した。

なお長さの影響を調査するため未硬化状態のCFRCからセメントペーストを洗出しCFを顕微鏡にて観察したところ， $l=3\text{mm}$ のCFは直線的にランダム配向しているのに対し， $l=10\text{mm}$ のCFは曲線的に配向している傾向にあった。すなわち $l=10\text{mm}$ のCFは $l=3\text{mm}$ のCFより引抜抵抗が大きく変形能が向上したものと推定される。ただ $l=6\text{mm}$ を用いたCFRCの変形能が他の長さのものより劣る原因についてはCFの分散性が悪いこと等が考えられるが現在のところ明らかではない。また，曲げ破断後のCFは繊維長さに関係なく付着破壊していることが電子顕微鏡の観察から認められており，CFの引張強度は十分であったといえる。一方，CFRCは図8の引張応力ひずみ線図から，金属材料と同様な疑似延性領域を有する特徴のあることが判る。そこでこの引張応力ひずみ線図を図9のように完全弾塑性と仮定し，実験値との比で表わしたのが図10である。

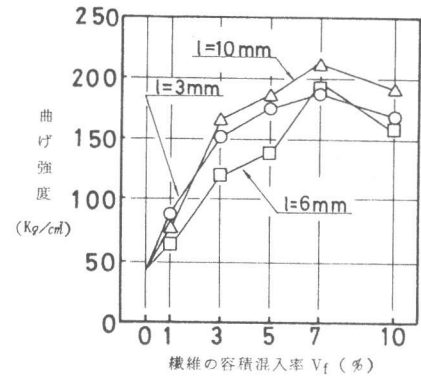


図4. 曲げ強度と繊維の混入率との関係

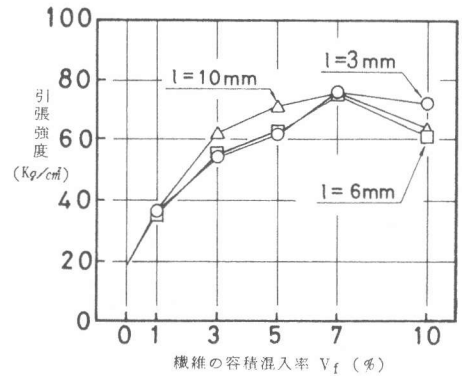


図5. 引張強度と繊維の容積混入率との関係

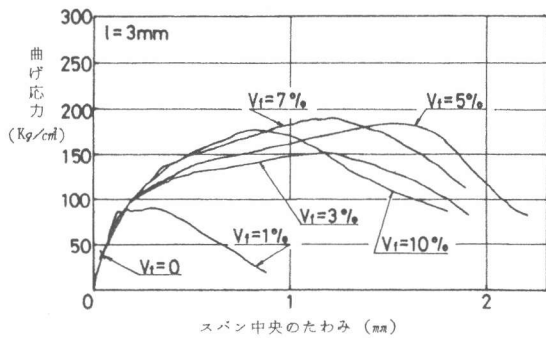


図6. 曲げ応力とたわみとの関係

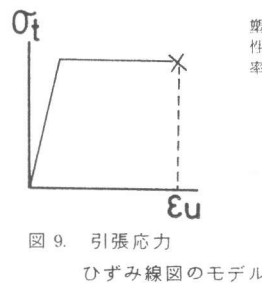


図9. 引張応力ひずみ線図のモデル

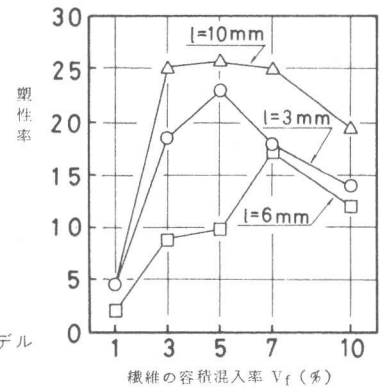


図7. CFRCの曲げ変形能

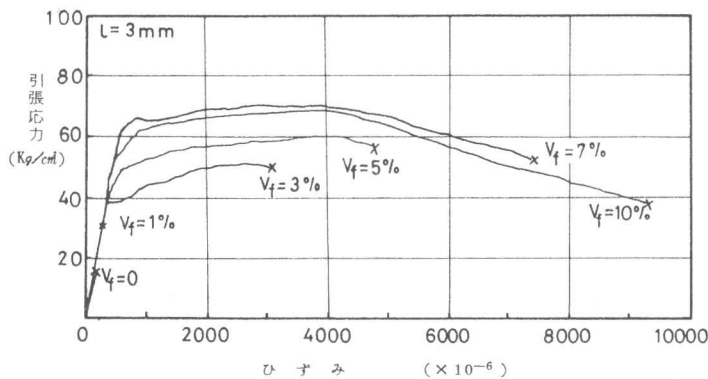


図8. 引張応力ひずみ線図

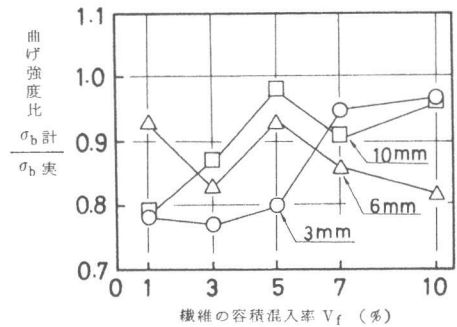


図10. 計算値と実験値との比較

なお、最大抵抗モーメントは引張線ひずみが引張試験で得られた破壊ひずみに達した時点で求めた。図10より計算値は実験値よりやや小さいものの、引張試験で得られた応力ひずみ線図を完全弾塑性体と仮定することによりCFRCの曲げ強度が計算出来ることが判る。

### 3.3. 骨材の種類と粒径の影響 (実験C)

ブレンモルタルに対するCFRCの曲げ強度倍率を表5に示す。CFRCの曲げ強度と水セメント比W/Cとの関係を図11に示す。図11、表5より、(1)骨材の種類にかかわらずW/Cが小さくなるにつれて曲げ強度が増大すること、(2)W/C一定のCFRCの曲げ強度は骨材粒径が大きくなるにつれて低下する、(3)川砂、川砂利を用いたCFRCはブレンモルタルに対する曲げ強度倍率が他の骨材使用の場合に比べ低いことなどが判る。これは $V_f = 3\%$ のCFが均一に分散すると仮定すると繊維平均間隔は約 $80\mu m$ となり、この繊維間に数ミリメートルの粒径を持つ骨材が存在すると、この骨材が弱点となり低応力で破壊するためと考えられる。一方、8号珪砂、シラスバルーンを用いたCFRCの曲げ強度はセメントペーストにCFを混入したCFRCのそれより大きくなる。これはSFRCの場合に繊維の分散性を向上させるための最適骨材粒径があるといわれている<sup>4)</sup>のと同様に、CFを均一に分散させる役割を果たす最適粒径があり、CFRCの場合にはこれが8号珪砂やシラスバルーンの粒径に相当する数 $10\mu m \sim 200\mu m$ ではなかろうかと推定される。

なお、オートクレーブ養生材が水中養生材よりも高強度となっているのは、オートクレーブ養生の際に生成したトベルモライトの影響と考えられる。

### 4. まとめ

- (1) CFRCの曲げ強度にはCFの分散状態が大きく影響し、CFを均一分散させるためにはオムニミキサーとMCとの併用による混練方法が現在のところ最適である。
- (2) CF長さが3, 6, 10mm程度の範囲ではCFRCの曲げ強度への影響は少ない。但し、変形能の点からは10mm長さのものが優れている。
- (3) CFRCに用いる骨材は強度面から、シラスバルーンや8号珪砂のような粒径の細かいものが望ましい。

### 参考文献

- 1) MA Ali "Carbon Fibre Reinforcement of Cement," CEMENT and CONCRETE RESEARCH Vol.2 1972
- 2) 秋浜繁幸他 "炭素繊維補強コンクリート (CFRC) の実験的研究 (その1) - CFRCが引張応力を受けた場合の挙動について -" 鹿島建設技術研究所年報第29号 昭和56年
- 3) 小林一輔, "繊維補強コンクリート (3)," 土木施工19巻7号, 1978年6月
- 4) 小林一輔他 "鋼繊維補強コンクリートの配合に関する実験的検討について" 鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム発表報文集, 昭和52年

表5. CFRCの曲げ強度倍率\*

骨材の種類	W/C (%)	S/C	曲げ強度倍率	
			オートクレーブ	水中
シラスバルーン (10~200 $\mu m$ )	60	0.16	2.83	3.59
	80	0.34	2.69	2.67
	100	0.46	2.54	2.63
	120	0.55	2.03	2.88
川砂 (5mm以下)	40	0.50	1.95	2.34
	50	1.00	1.49	1.36
川砂利 (10mm以下)	40	1.00	1.33	1.53
	50	1.70	1.87	1.38
2号珪砂 (0.6~2.5mm)	60	3.40	1.24	1.06
	40	0.10	2.69	—
5号珪砂 (0.3~1.2mm)	50	0.30	2.35	—
	60	0.50	2.24	—
8号珪砂 (0.15mm以下)	40	0.20	2.46	—
	50	0.30	2.74	—
	60	0.60	2.05	—
	40	0.30	2.10	—
	50	0.50	2.15	—
	60	0.80	2.03	—

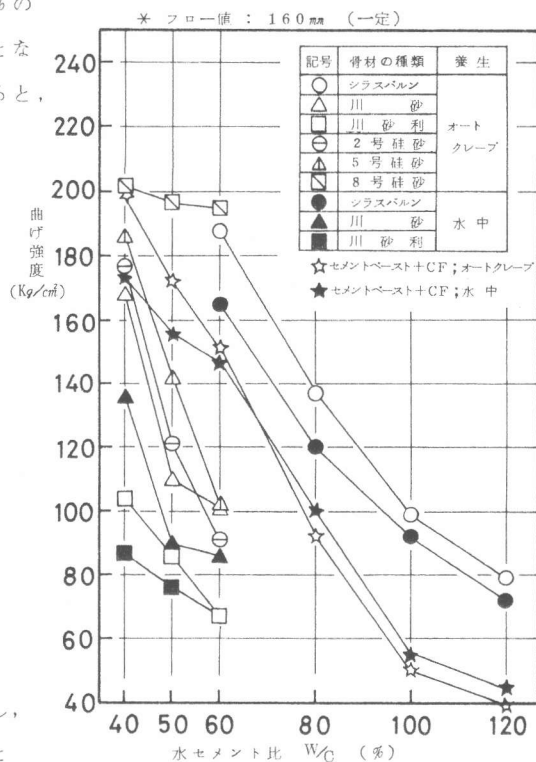


図11. 各種骨材を用いたCFRCの曲げ強度