

[112] 炭素繊維補強セメント複合材 (CFRC) の力学的性質

正会員 秋 浜 繁 幸 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 末 永 龍 夫 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 中 川 裕 章 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 ○ 鈴 木 清 孝 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

炭素繊維補強セメント複合材 (CFRC) は、長さ 3~10mm の炭素短繊維を、ペーストあるいはモルタルマトリックス中に容積比で数%均等に分散・混入したセメント系複合材料の一種であり、ユニークな諸特性を有する新しい土木・建築用材料として、近年注目を集めている。

CFRC に使用される炭素繊維の種類に関しては、これまで、物性値では PAN 系炭素繊維に比べ若干劣るもののコスト面で有利なピッチ系炭素繊維を中心に、開発と実用化を進めてきた¹⁾。しかし、炭素繊維の製造技術における最近の伸展にはめざましいものがあり、近い将来、現在の PAN 系に匹敵する程の性能を有する炭素繊維が、かなり安価に供給される可能性もある。CFRC のような短繊維強化型の複合材料では、強度や弾性率など繊維そのものの物性はもとより、繊維の配向効果、あるいは繊維~マトリックス間の界面付着特性といった要因も、その複合材料の力学的特性を大きく左右する。したがって、これらの各種要因が CFRC の力学的特性に及ぼす影響を明らかにしておくことは、将来予測される高強度・高弾性タイプの炭素繊維を利用した CFRC の実用化に際しても極めて有効であると考えられる。

このような状況を背景に、本研究は、繊維やマトリックスおよびその界面で作用する各種要因が CFRC の力学的特性に及ぼす効果について、実験的検討を行ったものである。

2. 実験計画

前述の各種要因が CFRC の力学的特性に及ぼす効果を明らかにするため、実験要因として①炭素繊維の種類、②繊維混入率、③養生・硬化法、の3者を取上げ、これらを種々変化させて実施した CFRC の純引張試験結果および破壊面からの繊維の突出長さの測定結果から、その影響を検討した。実験計画の概要を表-1に示す。

2-1 炭素繊維の種類・混入率

実験に使用した炭素繊維は、ピッチ系および PAN 系各1種類ずつである。その性質を表-2に示す。両タイプ共繊維長 3mm の短繊維であるが、PAN 系の方が、ピッチ系に比べ、よりアスペクト比が高く、高強度、高弾性である。

繊維の容積混入率は、0、2.1、4.2、5.3% の4水準とした。ただし、破壊面からの繊維突出長さの測定は、2.1、4.2% の2水準に対してのみ実施した。

2-2 調 合

表-3にマトリックスの調合を示す。

2-3 供試体の成型方法

容量 10ℓ のオムニキサーを用いて CFRC を練り混ぜ、鋼製型枠に流込んで供試体を成型した。

表-1 実験計画の概要

繊維 種別	繊維容積 混入率 (%)	供試体の養生・硬化法		
		20°C・65%RH	オートクレープ養生	オートクレープ養生後 樹脂 含 浸
ピッチ系	0	○	○	○
	2.1	●	●	●
	4.2	●	●	●
	5.3	○	○	○
PAN系	0	○	○	○
	2.1	●	●	●
	4.2	●	●	●
	5.3	○	○	○

注) ●: 純引張試験および繊維の突出長さ測定を実施
 ○: 純引張試験のみ実施

表-2 炭素繊維の性質

繊維 種別	繊維形状			比重	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸度 (%)
	直径(d) (μm)	長さ(ℓ) (mm)	アスペクト比 (ℓ/d)				
ピッチ系	14.5	3	207	1.63	78	3.8×10 ³	2.1
PAN系	7.0	3	429	1.90	320	23.0×10 ³	1.4

表-3 練り混ぜ時のマトリックスの調合

水・セメント比 W/C (%)	骨材・セメント比 S/C	重量調合 (kg/m ³)			
		水	セメント	粉末珪石	増粘剤
47.3	0.25	512	1,082	274	10.8

2-4 CFRCの養生・硬化法

供試体は成型の翌日脱型し、その後図-1に示す手順にて、空中養生、オートクレープ養生、およびオートクレープ養生後樹脂含浸の3種類の養生・硬化を行った。このように3種類の養生・硬化法を適用したのは、繊維～マトリックス界面での付着特性を変化させるためである。

2-5 純引張試験方法

図-2に供試体の形状・寸法および試験方法を示す。

2-6 破壊面からの繊維突出長さ測定方法

前記の純引張試験に類似の方法（ただし、供試体厚さ1mm、中央のストレート部は幅10、長さ30mmで、ひずみゲージの貼付けなし）で試験した後、試験片破壊面から突出している繊維の長さを、倍率20倍又は60倍の光学顕微鏡を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3-1 引張応力度（ σ_t ）-ひずみ度（ ϵ ）曲線

純引張試験から得られた $\sigma_t - \epsilon$ 曲線の代表例を図-3に示す。同図によると、ピッチ系CFRCおよびPAN系CFRC共に、樹脂含浸した場合の $\sigma_t - \epsilon$ 曲線は、最大引張応力の90~95%までは直線的であり、そこで折れて、わずかではあるが剛性の低い第2直線部が現れた。ただし、繊維混入率2.1%の樹脂含浸ピッチ系CFRCだけは、その $\sigma_t - \epsilon$ 関係が最後まで直線的であり、限界繊維混入率³⁾以下の状態にあったものと判断される。

一方、オートクレープ養生のみの場合には、ピッチ系、PAN系共に、樹脂含浸の場合に比べ、より延性的な $\sigma_t - \epsilon$ 関係を示した。ただし、ピッチ系の $\sigma_t - \epsilon$ 曲線が、第1直線部と、それより剛性の大きく低下した第2直線部から成る明確なbi-linearの性状を示したのに対し、PAN系の $\sigma_t - \epsilon$ 関係は、初期剛性からの剛性低下が、かなり漸進的に生じた。

なお、空中養生の場合には、ピッチ系、PAN系の両タイプ共に、オートクレープ養生のみの場合の $\sigma_t - \epsilon$ 関係に類似の挙動を示した。

3-2 引張強度

図-4に、引張強度と繊維混入率の関係を示す。同図によると、養生・硬化法の違いで比較を行えば、ピッチ系、PAN系の両タイプ共に、樹脂含浸>オートクレープ養生>空中養生の順に高い引張強度を示した。

繊維の種類で比較すると、同一の繊維混入率で

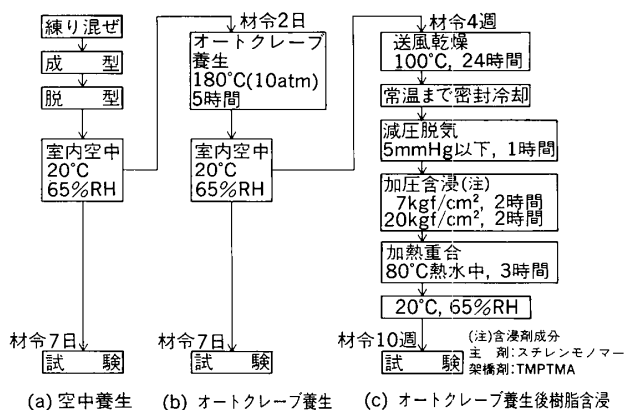


図-1 CFRCの養生・硬化法

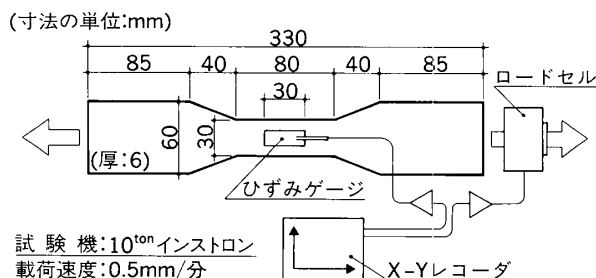


図-2 純引張試験方法

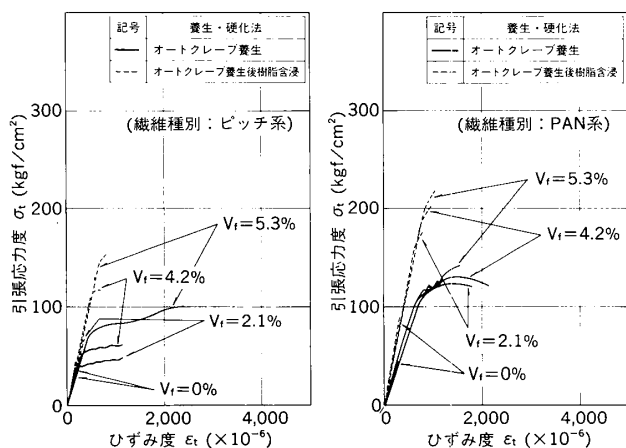


図-3 CFRCの引張応力度-ひずみ度曲線

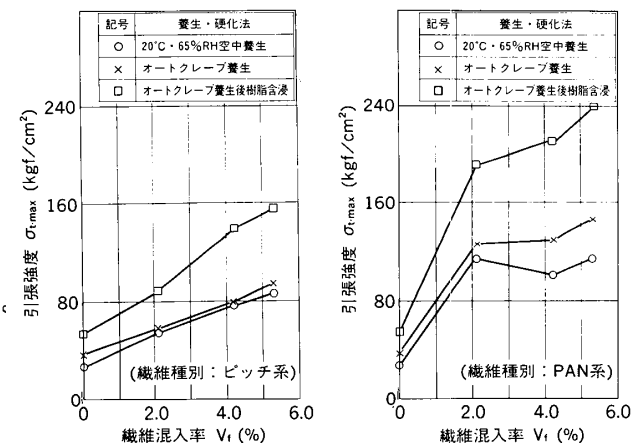


図-4 CFRCの引張強度と繊維混入率の関係

同一の養生・硬化法を行った場合には、より高強度な繊維を用いているPAN系CFRCの方がピッチ系CFRCよりも常に高い引張強度を示した。

また、繊維混入率の増加に伴う引張強度の増加傾向を両タイプの繊維で比較すると、ピッチ系では繊維量の増加につれてCFRCの引張強度も着実に増していくのに対し、PAN系では混入率 2.1～5.3%の範囲での引張強度の増加傾向がさほど顕著ではない。これは、おそらく、ピッチ系に比べてPAN系炭素繊維のアスペクト比が大きい（表-2 参照）ために、高い繊維混入率では繊維の均等分散が不十分であったことによると考えられる。

3-3 破断面からの繊維突出長さと繊維～マトリックス界面付着強度の関係

図-5は、CFRC試験片破断面からの繊維突出長さを測定した結果の例である。同図によると、同一のPAN系繊維を使用したCFRCでも、樹脂含浸を行った場合には、オートクレープ養生のみの場合に比べ、繊維突出長さがかなり小さい側に分布している。この場合、両者の差異は、繊維～マトリックス間の付着強度の違いが原因であると考えられるが、これは以下のように説明できる。

いま、複合材中の短繊維が、限界繊維長さ ℓ_c 以上の繊維長さ（＝繊維～マトリックス間の界面付着応力を通じてマトリックスから伝達される応力が、繊維を破断せしめるに十分な大きさにまでなり得る繊維長さ）を有しているものと仮定する。すると、破断寸前の繊維における繊維応力の分布は、図-6(c)のようにモデル化できる²⁾。

$\ell > \ell_c$ であるから繊維の大半は破断するであろうが、端部から $\ell_c/2$ 以内の箇所に複合材の破断面が生じた場合には、そこでの繊維応力は繊維の引張強度 σ_{fu} に達していないので引抜けが起きる。すなわち、試験片破断面からの繊維突出長さは、 $0 \sim \ell_c/2$ の範囲にあり、繊維突出長さの平均値 ℓ_p がほぼ $\ell_c/4$ に等しいと考えてよい。

また、図-6(b)において、繊維の中央部で、繊維断面に作用する引張力と繊維表面の半分に作用する界面付着力との釣り合いを考えれば、

$$\sigma_{fu} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \pi d \cdot \frac{\ell_c}{2} \cdot \bar{\tau}$$

ゆえに、

$$\bar{\tau} = \sigma_{fu} \cdot \frac{d}{2\ell_c} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、

$\bar{\tau}$: 平均付着強度
 σ_{fu} : 繊維の引張強度
 d : 繊維直径

となって、繊維突出長さの平均値 ℓ_p （ $= \ell_c/4$ ）と平均付着強度 $\bar{\tau}$ の関係が得られる。

3-4 CFRCの引張強度推定式

繊維補強セメント・コンクリートの強度則によれば、限界繊維混入率以上の繊維量を有し（＝マトリックス破壊後も繊維のみで応力を負担し得る）、その破壊において繊維の大半が引抜けることなく破断を生じる（＝繊維長さが限界繊維長さ ℓ_c 以上）ならば、複合材の引張強度は次式で表される³⁾。

$$\sigma_{t \cdot \max} = \eta_1 \eta_2 \sigma_{fu} V_f \quad (\text{ただし、} V_f \geq V_{f \cdot \text{crit}}) \quad \dots\dots (2)$$

ここに、

$\sigma_{t \cdot \max}$: 複合材の引張強度
 V_f : 繊維混入率
 $V_{f \cdot \text{crit}}$: 限界繊維混入率

η_1 : 繊維配向係数 (< 1)
 η_2 : 繊維有効長さ係数 (< 1)

したがって、何らかの方法で式(2)中の η_1 、 η_2 が求められれば、例えば図-4のような引張強度

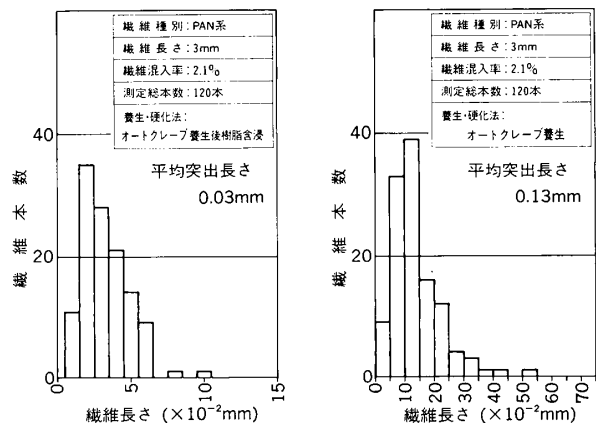


図-5 CFRC破断面からの繊維突出長さの分布

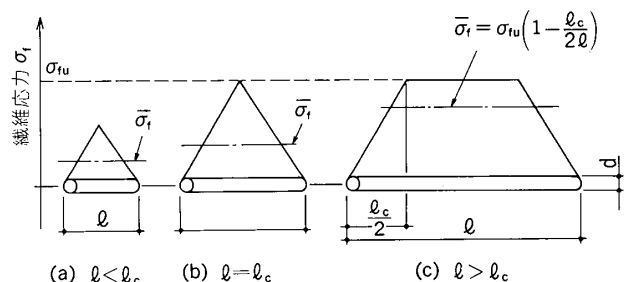


図-6 種々の長さを持つ、複合材中の短繊維の応力分布

が示す傾向に対して、繊維の配向や長さが及ぼしている効果を、定量的に評価できるであろう。以下では、この η_1 、 η_2 を実験結果から求める手順を述べる。

繊維量が限界繊維混入率以上 ($V_f \geq V_{f, \text{crit}}$)、繊維長さが限界繊維長さ以上 ($\ell \geq \ell_c$) であれば、複合材の破壊時に破断する繊維の平均引張応力は、図-6(c)中に示す通り、(3)式で表され、同式における σ_{fu} の係数が、(2)式中の繊維有効長さ係数 η_2 である。すなわち、

$$\overline{\sigma_f} = \left(1 - \frac{\ell_c}{2\ell}\right) \sigma_{fu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{\ell_c}{2\ell} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$\overline{\sigma_f}$: 繊維の平均引張応力

ℓ : 繊維長さ

となって、破壊面での繊維突出長さの平均値 ℓ_p ($= \ell_c / 4$) から繊維有効長さ係数 η_2 が算出される。

さらに、この η_2 と純引張試験結果から得られた複合材の引張強度 $\sigma_{t, \text{max}}$ を用いて、式(1)より、繊維配向係数 η_1 を求めることができる。

3-5 純引張応力を受けるCFRCの力学的特性に及ぼす、 ℓ_c 、 $\overline{\sigma_f}$ 、 η_1 、 η_2 の要因効果

以上のような手順により、純引張試験結果および破壊面の繊維突出長さの測定結果から算出した、 ℓ_c 、 $\overline{\sigma_f}$ 、 η_1 、 η_2 の値を表-4にまとめて示す。ただし、 $V_f = 2.1\%$ の樹脂含浸ピッチ系CFRCについては、前述した $\sigma_t - \varepsilon$ 曲線の形状から、限界繊維混入率以下の繊維量になっていたと判断されたため、 η_1 と η_2 の値は算出しなかった。

表-4 破断面からの繊維突出長さの測定結果および純引張試験結果を基に算出した、 ℓ_c 、 η_1 、 η_2 、 $\overline{\sigma_f}$ の値

繊維 種別	実 験 条 件		実 験 値			計 算 値			
	養生・硬化法	繊維 混入率 (%)	繊維突出長さ の平均値 ℓ_p (mm)	ℓ_p の標 準偏差 (mm)	ℓ_p d	限 界 繊維長 ℓ_c (mm)	η_2 ($=1 - \frac{\ell_c}{2\ell}$)	η_1	平均付着 強度 $\overline{\sigma}$ (kgf/cm ²)
ピ ツ チ 系	20°C・65%RH	2.1	0.39	0.23	26.9	1.56	0.74	0.31	37
	空中養生	4.2	0.36	0.26	24.8	1.44	0.76	0.45	40
	オートクレーブ養生	2.1	0.21	0.07	14.5	0.84	0.86	0.42	69
		4.2	0.31	0.17	21.4	1.24	0.79	0.30	47
	オートクレーブ養生後 樹脂含浸	2.1	0.11	0.07	7.6	0.44	—	—	132
		4.2	0.12	0.13	8.3	0.48	0.92	0.45	121
P A N 系	20°C・65%RH	2.1	0.15	0.11	21.4	0.60	0.90	0.19	187
	空中養生	4.2	0.34	0.26	48.6	1.36	0.77	0.09	82
	オートクレーブ養生	2.1	0.13	0.08	18.6	0.52	0.91	0.21	215
		4.2	0.16	0.12	22.9	0.64	0.89	0.11	175
	オートクレーブ養生後 樹脂含浸	2.1	0.03	0.02	4.3	0.12	0.98	0.29	933
		4.2	0.04	0.03	5.7	0.16	0.97	0.16	700

注) $\ell_c = 4\ell_p$ 、 $\ell = 3\text{mm}$

さらに、繊維配向係数 η_1 は、ピッチ系の 0.30 ~ 0.45 に対し、PAN系では 0.09 ~ 0.29 しかなく、ピッチ系に比べてPAN系は配向効果が低いという結果になった。これは、おそらく、繊維の均等分散が不十分であったためと考えられる。

4. ま と め

CFRCの力学的性質に及ぼす各種要因の影響を明らかにするため、純引張試験および破壊面からの繊維突出長さ測定を行った。その実験結果を基にして、繊維の引張強度、長さ、付着強度、配向性といった諸要因の効果を定量的に明らかにすることができた。

謝 辞 本研究を実施するにあたり、御指導いただいた亀田泰弘博士（鹿島建設顧問）、ならびにCFRCの含浸重合処理を行っていただいた大濱嘉彦博士（日本大学教授）に感謝の意を表します。なお、本研究のPAN系CFRCのデータの一部は、日本材料学会学術講演会（昭和60年3月）に発表済みである事を付記する。

- 文 献 1) 秋浜；炭素繊維補強コンクリート（CFRC），建築技術，No.412，pp.139-148，昭和60年12月
2) 藤井，座古；複合材料の破壊と力学，実教出版（株），pp.100-102
3) Hannant, D. J.; Fibre cements and fibre concretes, pp.12-29, John Willey & Sons, 1975