

論文

[1132] 短繊維CFRCの強度に及ぼす混練諸条件の影響について

正会員○高野 良広（新日本製鐵 設備技術本部）

正会員 山田 寛次（新日本製鐵 第一技術研究所）

1. はじめに

短繊維を用いた繊維強化モルタルの強度物性を支配する主要な要因の一つとして材料中の繊維長が挙げられる。炭素繊維（以下CFと略す）は強度・弾性率に優れる反面、繊維径が細く伸びが小さいため、混練時にミキサーやモルタルより加わる外力により繊維が折損することが予想される。しかし炭素繊維強化モルタル（以下CFRCと略す）に関する既往の研究でこの現象を検討した例は少なく[1]、繊維切損を支配する要因や繊維折損の度合とCFRC強度との関係等不明確な点が多い。本論ではCF折損の度合がCFRCの混練諸条件すなわち混練条件（混練速度、総回転数、初期繊維長）やCFの物理的性状（繊維径、繊維強度、弾性率）に依存すると考え、CFの切損状況やその支配因子、さらにそれがCFRC強度へ及ぼす影響について論述する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したセメントモルタルの材料・配合条件を表-1に示す。CFはセメントモルタルとの付着性の観点から[2][3]、表面酸化処理を施した無サイジング糸の中から、ピッチ系汎用品1種類（GP-1）、高性能品4種類（HP-1～4）およびPAN系1種類（PAN-1）の6種類を選択し、これらをモルタルに対する容積比で3%混入した。CFの種類および物理的性状を表-2に示す。なお、表-2にはX線光電子分光法（XPS法）により測定したCF表面の酸化量を酸素と炭素の比率（O/C）で併せて記載した。

表-1 セメントモルタルの材料・配合

セメント	細骨材	水セメント比	砂セメント比	増粘剤
普通ポルトランドセメント	粉末珪砂 (20.4 μ m)	50%	0.5	0.7%

表-2 CFの種類および物理性状

繊維種	繊維径 (μ m)	引張強度 (kg/mm ²)	弾性率 (t/mm ²)	伸び (%)	O/C (%)
GP-1	13.3	85	5.5	1.62	26.8
HP-1	10.0	142	14.0	1.01	22.3
HP-2	10.0	230	19.0	1.18	12.4
HP-3	10.0	288	20.5	1.41	18.2
HP-4	10.0	357	40.8	0.86	6.2
PAN-1	7.0	285	21.5	1.32	7.8

表-3 混練諸条件

実験目的	使用繊維	速度 (rpm)	時間 (min)	繊維長 (mm)
混練速度の影響把握	HP-1	29	25.0	9
		57	12.3	
		93	7.8	
		145	5.0	
混練時間の影響把握	HP-1	93	1.5	9
	HP-1, 2		3.0	
	HP-2		5.0	
投入繊維長の影響把握	HP-2	93	3.0	9
				18
				36
使用繊維の影響把握	GP-1	93	3.0	9
	HP-1			
	HP-2			
	HP-3			
	HP-4			
	PAN-1			

2. 2 混練・成形および養生方法

混練には容量5ℓのホバート型ミキサー（愛工舎製作所製、KPAD-005）を用い、まずセメントモルタルのみを2分間混練したのちCFを投入し、表-3の条件で混練した。混練完了後モルタル成形用3連枠に厚さ10mmで成形し、材令7日まで20℃-80%RHの条件で養生した。

2. 3 評価方法

混練に伴う繊維の折損状況を定量化するため、混練直後の試料の一部を篩上で静かに洗浄したのちCFを濾紙上に分散させ、その拡大写真から混練後の繊維長さ（以後残存繊維長と呼称）を測定した。また硬化後の成形体は密度測定後、スパン100mm、載荷速度0.5mm/minの中央載荷による曲げ試験を行ない、曲げ強度および破壊エネルギーを測定した。尚、破壊エネルギーは荷重・変位関係のほぼ終局状態となる変位3mmまで（3mm以内で破壊した場合は破壊時の変位まで）の積分値で求めた。

3. 実験結果および考察

3. 1 混練諸条件による残存繊維長の変化

(1) 混練条件による残存繊維長の変化

図-1～図-3に各々の混練条件における残存繊維長の測定結果を示す。図中の分布率は各繊維長の測定本数の全体本数に対する比率である。これらの図から次のことがいえる。

- ①総回転数一定（図-1）では、分布のピークが若干変動しているが、概ね混練速度とは無関係に一定の残存繊維長分布を示している。
- ②混練速度一定（図-2）では、混練時間が短いほど残存繊維長は長くなる。またHP-1を図-1、2と比較しても同様なことがいえ、残存繊維長は総回転数の大小に依存するものとする。なお混練時間1.5minでは混練時間が短かすぎ、未分散の繊維が確認された。
- ③同一混練条件（図-3）のもとでは、初期繊維長が長いほど残存繊維長は長くなる。しかし初期繊維長36mmでは、繊維の絡み合いが顕著となり良好な開繊ができなかった。

以上から、混練条件による残存繊維長は、混練総回転数及び初期繊維長に依存するといえ、混練機器によって、残存繊維長を最大にできるこれらの適正値が存在するものと考えられる。

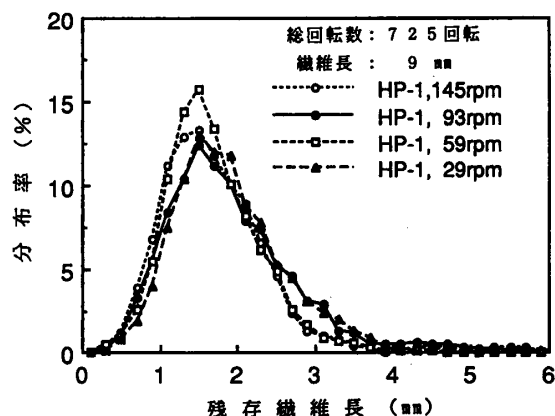


図-1 混練速度の残存繊維長への影響

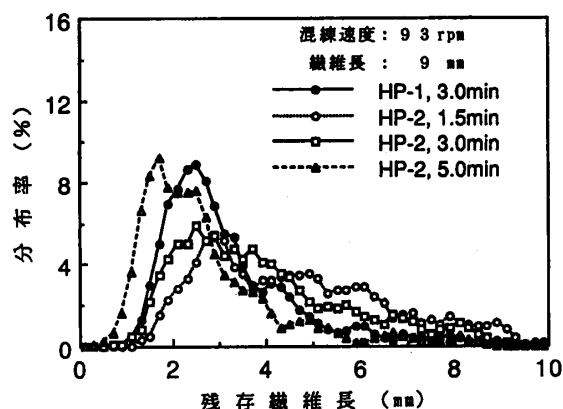


図-2 混練時間の残存繊維長への影響

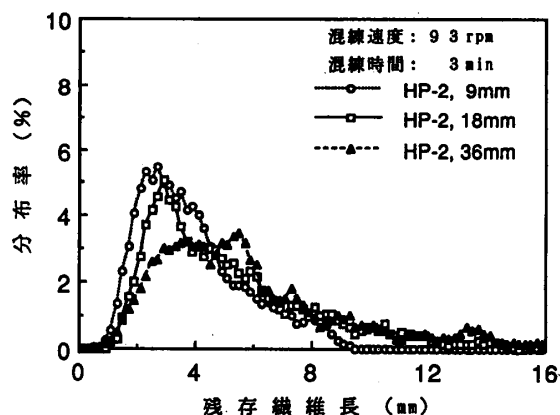


図-3 初期繊維長の残存繊維長への影響

(2) 使用繊維による残存繊維長の変化とそれを規定する要因の考察

図-4、図-5に繊維強度および繊維弾性率と平均残存繊維長の関係を示す。双方とも顕著な相関は見られず、繊維切損の難易性を表す指標としては適切でないことを示している。

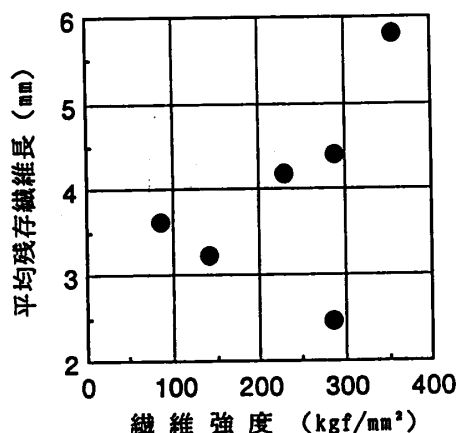


図-4 繊維強度と平均残存繊維長の関係

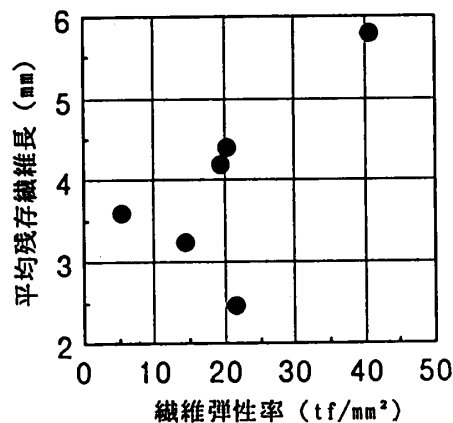
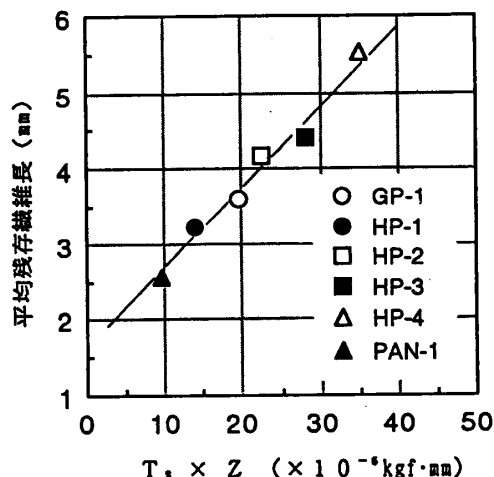


図-5 繊維弾性率と平均残存繊維長の関係

ここで、混練時にミキサー回転翼あるいはセメントモルタルからCFに加えられる力を不均一な荷重分布をした一種の曲げ荷重と考えれば、切損の難易性はそれに対する抵抗性の大小、すなわちCFの強度に繊維径より求まる断面性能の影響を加味することによって表現できると考えられる。図-6はCF1本あたりの繊維強度(T_s)と断面係数(Z)の積すなわち断面の曲げ耐力と平均残存繊維長の関係を示したものであるが、両者はよい相関を示しており、先の仮定がほぼ妥当であることを示していると考えられる。

図-6 $T_s \times Z$ と平均残存繊維長の関係

3. 2 混練諸条件の強度に及ぼす影響

(1) 混練条件の影響

図-7～図-9に各混練条件と曲げ強度及び破壊エネルギーの測定結果を示す。これらより、

- ① 総回転数一定の条件で混練速度の影響を示した図-7では、93 rpmで曲げ強度が最大となっている。しかし、ばらつきも勘案すれば明瞭な差があるとはいえない。
- ② 図-8の混練時間の影響をみると、混練時間 3 minにおいて曲げ強度が最大となっている。また繊維分散不良であった混練時間 1.5 minの場合、曲げ強度は最も小さい。尚、HP-1の混練時間 3 minでの曲げ強度、破壊エネルギーの平均値は261 kgf/cm²、47 kgf・mmであった。

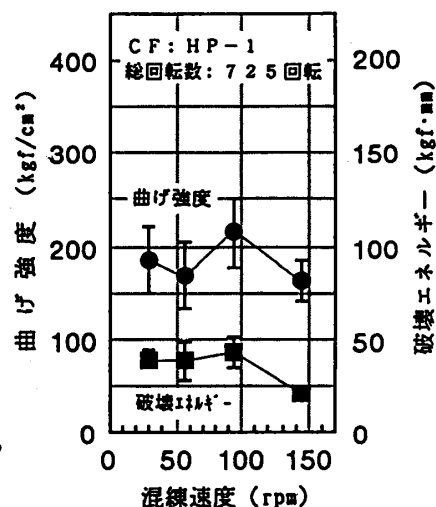


図-7 混練速度の影響

- ③同一混練条件で初期繊維長を変化させた図-9の場合、初期繊維長18mmで曲げ強度が最大となる。理論的には繊維が長いほど強度は大きくなると考えられるが、初期繊維長36mmでは分散が悪いため最小となっている。
- ④破壊エネルギーは今回の評価法においては、曲げ強度の変動とほぼ同一の挙動を示しており、同一繊維では破壊エネルギーは曲げ強度に依存することがわかる。

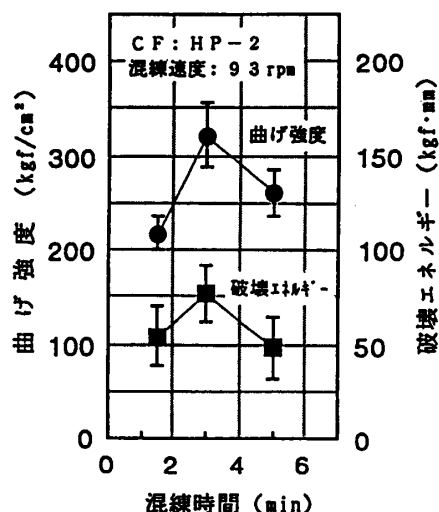


図-8 混練時間の影響

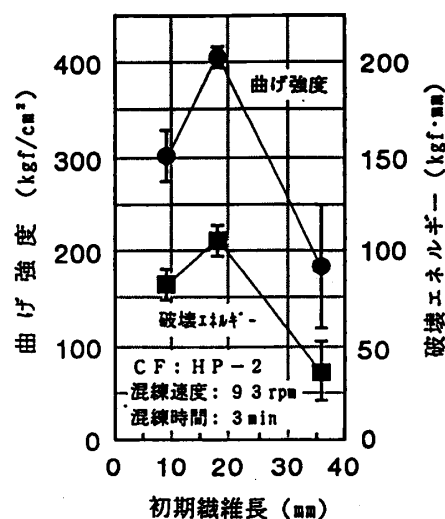


図-9 初期繊維長の影響

(2)使用繊維の影響

図-10に繊維強度と曲げ強度の関係を示す。繊維強度230kgf/mm² (HP-2)までは、曲げ強度はほぼ直線的に増大するが、それ以上の高強度のCF (HP-4、PAN-1)では、横ばいもしくは減少しており、曲げ強度が必ずしも繊維強度に依存しないことがわかる。

また、図-11に各繊維の曲げ応力と変位の関係を示す。プレーンの曲げ強度の60~70kgf/cm²までは同一で、それ以降は繊維物理性状の違いの影響によって異なった履歴を示す。

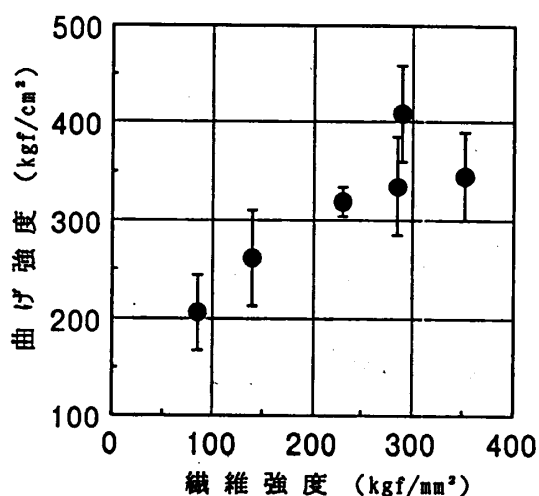


図-10 繊維強度と曲げ強度の関係

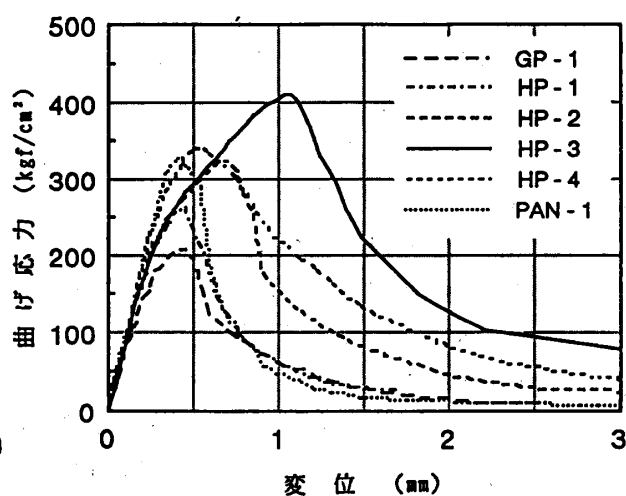


図-11 曲げ応力と変位の関係

(3) 強度を支配する要因の考察

一般に、セメントモルタルのような脆性マトリックスを用いた複合材の強度は、マトリックスから繊維に伝達される応力で決定されると考えられている[4][5]。すなわち、

$$\eta \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \tau / 4 = \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_f / 4 \quad \text{より}$$

$$\sigma_f = \eta \cdot \tau \cdot l / d \quad (1)$$

$$\sigma_c = V_f \cdot \sigma_f = V_f \cdot \eta \cdot \tau \cdot l / d \quad (2)$$

ここに、 σ_f ；繊維に作用する引張応力 σ_c ；複合材の強度
 V_f ；CFの体積混入量 η ；繊維の配向係数
 τ ；界面付着強度 l/d ；アスペクト比
 l ；繊維長 d ；繊維径

ここで、繊維混入量 V_f を一定とし、同様な成形法で成形されたCFRCを考えれば、式(1)、式(2)中で混練諸条件によって変動するのは、混練時の繊維切損によるアスペクト比 l/d および使用繊維の違いによる界面付着強度 τ と考えられる。以下にそれらの影響を考察する。

① アスペクト比 l/d の影響

式(1)、式(2)はアスペクト比が臨界的な大きさ、すなわち σ_f が繊維強度に達する以前のアスペクト比であれば、複合材の強度は繊維強度に依存せず、かつ1次比例の関係で表されることを示している。図-12、図-13は本実験において測定した平均残存繊維長から平均アスペクト比を求め、各繊維ごとに曲げ強度および破壊エネルギーとの関係を示したものである。これらより曲げ強度や破壊エネルギーは、ほぼアスペクト比と1次比例の相関関係を示していることがわかり、曲げ強度や破壊エネルギーが混練後の残存繊維長で統一的に評価できることを示唆している。また、本実験に関する限り、どの繊維も混練後のアスペクト比は臨界値以下であることがわかる。

② 付着強度の影響

CFに関する界面付着の良否の一因として、CF表面の親水性すなわちCF表面に付着した酸素量の多少が挙げられる[2][3]。本実験に用いたCFの表面酸素量は表-2に示したとおりであるが、この中で図-12、13中アスペクト比に対する曲げ強度、破壊エネルギーの逆転現象（アスペクト比は小さいが曲げ強度、破壊エネルギーが大きい）が顕著なHP-3、HP-4の表面酸素量は各々18.2%、6.2%であり、HP-4が親

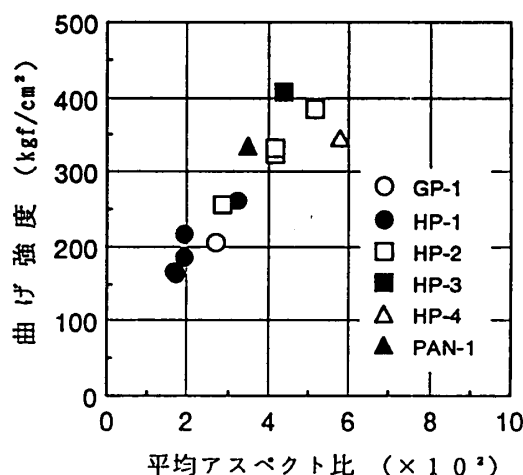


図-12 アスペクト比と曲げ強度の関係

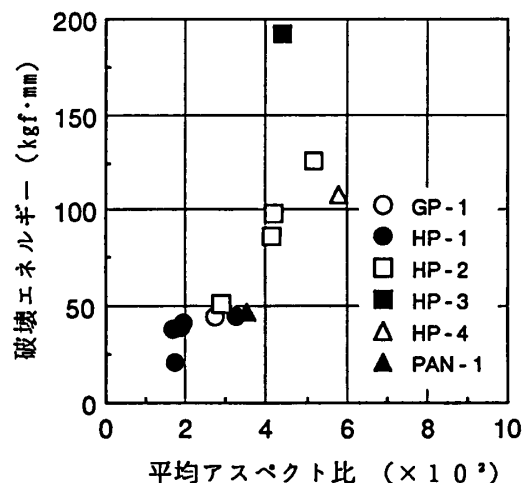


図-13 アスペクト比と破壊エネルギー

水性に欠けることがうかがわれる。このことは写真-1、写真-2に示すHP-3、4の破断面のSEM観察の比較から、HP-4の表面へのセメントマトリックスの付着が悪いことから説明できる。従って、CF表面の酸化状態はCFとセメントマトリックスとの付着強度に影響を与える因子の一つと考えられ、各々のCFに応じてその最適値が存在するものと推察する。



写真-1 HP-3の破断面SEM写真



写真-2 HP-4の破断面SEM写真

4. まとめと今後の課題

4.1 本研究で得られた知見

- ① CFの切損度合は混練条件により異なり、初期の繊維長が一定であれば混練総回転数が小さいほど、また混練総回転数が一定ならば初期の繊維長が長いほど残存繊維長は長くなる。
- ② 混練時間が短い場合あるいは初期の繊維長が長い場合、繊維の均一分散混練が困難となり、結果として強度に悪影響を及ぼす。従って、混練機器により均一分散可能でかつ残存繊維長を最も大きくできる混練総回転数や初期繊維長が存在するものと考えられる。
- ③ 混練条件一定では、繊維強度 T_s ×繊維断面係数 Z が大きいCFほど、残存繊維長は長くなる。
- ④ CFRCの強度は混練後のアスペクト比とよい相関があり、今回の実験の範囲においては使用繊維強度による相関よりも顕著であった。
- ⑤ CFRCの強度はCFの表面酸素量によっても影響を受ける傾向がうかがわれた。

4.2 今後の課題

- ① アスペクト比を最大にできる混練条件の究明
- ② CFの表面酸化量と強度物性との関係評価
- ③ セメントモルタルの配合組成がCFRCの強度へ与える影響の解明

*参考文献

- 1) 繊維補強コンクリート(FRC)技術資料集成、情報開発発行、1987.9、pp.262~263
- 2) 大谷杉郎ほか：低温プラズマで表面を改質した炭素繊維を用いる炭素繊維補強セメント複合材の作製、炭素、NO.131、pp.161~168、1987
- 3) 伊藤祐敏ほか：繊維補強セメント硬化体の強度におよぼす添加物と養生条件の効果、セメント技術年報、No.42、pp.459~462、1988
- 4) D. J. Hannant原著、槇谷訳：繊維コンクリート、森北出版、pp.13~32、1980
- 5) 小林一輔：繊維補強コンクリート—特性と応用—、オーム社、pp.33~39、1981