炭素繊維補強セメントの性能と応用*

三 好 彰**・白 川 潔**
古 市 潤 二**・中 川 憲 一***
片 平 富二夫***

Properties and Applications of Carbon Fibre Reinforced Cement Composites

Akira Miyoshi, Kiyoshi Shirakawa
Junji Furuichi, Ken'ichi Nakagawa and
Fujio Katahira

1. 緒 言

過去数十年にわたり建材の主流の一つであった石棉セメント製品は、石棉が発癌物質であるとの理由から、最近世界的に使用規制の動きがある。そこで、建材メーカーでは代替製品の研究開発に積極的に取り組んだ結果、代替繊維としてビニロン、ガラス繊維を用いて一部実用化に成功している。ただし、これらの繊維はオートクレープ養生により劣化することから代替製品には蒸気養生が用いられており製品の寸法安定性にやや不安がある。一方、鉄鋼の副産品であるコークピッチを原料とする低弾性炭素繊維 LMCF（以下 CF と略称）は化学的に安定で、オートクレープ養生による強度劣化もないことから、石棉代替として有望な繊維の一つと考えられる。この CF は引張強度 60~80 kg/mm²、弾性係数 3.2~3.5 t/mm²で、高強度、高弾性の HPCF と比較して、引張強度および弾性係数は低いが価格が数分の 1 と安価である。

ここ数年、我が国ではこの CF を混入した炭素繊維補強セメント (Carbon Fibre Reinforced Cement, 以下 CFRC と略称) の製造法の研究および基本的性質に関する研究が鉄鋼メーカーをはじめ、ゼネコン、大学等で活発に行なわれるようになり¹⁻³⁾、既に実用化された建材製品が世に出ている⁴⁾。

ここでは、長さ 3 mm、10 mm の CF 短繊維をセメントマトリックス中に 3 次元ランダムに混入した CFRC の基本性能と、建材への適用性を検討したので、その結

果につき報告する。

2. 基本性能

2.1. CF の均一分散

互いに絡み合った綿状の短繊維をマトリックス中に均一に分散させるには、鋼繊維 (SF)、石棉のように分散機、解繊機により繊維をほぐしながらマトリックス中に分散させる方法、あるいはガラス繊維のように集束繊維を特殊なオムニキサーを用いて分散させる方法が推奨されている。ここでは短時間に大量混練可能な後者を採用した。

用いた LMCF の物性を表 1 に、CFRC の配合および実験結果を表 2 にそれぞれ示す。

試料は 30 l オムニキサーを用いてセメントペーストを作成後、長さ 10 mm の CF を一括ミキサーに投入した後 6 分間混練した。ここで、CF の均一分散性の指標としては比較的簡便な表 2 に示す分散係数 β を用いた。この β は CFRC 供試体の切断面の任意な位置の拡大顕微鏡写真を 0.5 mm×0.5 mm の要素に区切り、各要素中の繊維本数 X_i を数えて CF の分散性を定量的に評価したものである。

$$\beta = e^{-\varphi(X)}, \varphi(X) = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}} / \bar{X} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{X}$: 繊維数の算術平均値

表 1. LMCF の 物 性

比 重	直 径 (μm)	引張強度 (kg/mm ²)	弾性係数 (t/mm ²)	伸 度 (%)
1.6	18	60~75	3.0~3.2	2.0~2.4

* 平成元年11月15日本会第83回例会において発表

** 住友金属工業(株)事業開発本部 FRC 部

*** 住友金属工業(株)研究開発本部 未来技術研究所
平成元年10月18日受理

表2. CFRC の 配 合 と 分 散 性

記 号	配 合				実 験 結 果		
	W/C (%)	V _f (%)	MC/C (%)	A _f /C (%)	空気量 (%)	曲げ強度 (kg/cm ²)	分散係数 β
Case-1	50	3	0	0	0.24	67	0.45
Case-2	//	//	0.5	0	9.32	121	0.87
Case-3	//	//	//	0.03	2.02	149	0.85

W/C: 水セメント比, V_f: CF 容積混入率, MC: メチルセルロース, A_f: 消泡剤

n: 要素数

Xi: 各要素に含まれる繊維数

表2より以下のことが判明した。

(1) オムニミキサーにセメントと水を入れた後, CFを一括投入して機械的に攪拌する Case-1 の方法では β が小さく CF の分散性が悪い。これが原因で CFRC の曲げ強度が低い。

(2) これを改良するには増粘剤のメチルセルロースを添加することが有効で, Case-2 は β が Case-1 よりも大きく, CFRC の曲げ強度も80%上昇している。ただし, メチルセルロース添加により気泡が9.32%と多量に含まれ, マトリックスの強度低下を引き起こす。

(3) 気泡を除去するため消泡剤を添加した Case-3 は CF の分散性が低下することなく, CFRC の曲げ強度が高くなる。

このように, CF の分散性向上にはオムニミキサーの使用とメチルセルロースの添加が非常に有効なことが, またメチルセルロース添加による気泡を除去するには消泡剤添加が有効なことが判明した。

2.2. CFRC の強度におよぼす諸因子

CFRC の曲げ, 引張, 衝撃強度は CF の混入率, 長さ, 引張強度および骨材寸法, マトリックスの強度など多くの要因に支配される。このうち, CF の混入率, マトリックスの強度の影響については既に筆者および秋浜らにより報告されている^{1,2)}。ここでは CFRC の曲げ強度におよぼす CF の物性および骨材寸法の影響を実験により明らかにした。

2.2.1. CF の物性の影響

○実験概要

製造条件を変えて試作した8種類のCFは, 表3に示すように引張強度が45~78 kg/mm², 弾性係数が2.9~3.3 t/mm² で, 直径および長さはそれぞれ 18 μ m, 10 mm である。

CFRC の配合は W/C=50%, 8号珪砂/C=0.5, CF容積混入率=3%, MC/C=0.5%, Af/C=0.1% である。

なお, CF を混入しないプレーン材を比較のため供試

表3. 供試 CF の 物 性 値

織 維	引張強度 (kg/mm ²)	弾性係数 (t/mm ²)	伸 度 (%)
Fibre-A	44.9	2.90	1.65
Fibre-B	58.7	3.11	1.89
Fibre-C	65.9	2.98	2.22
Fibre-D	68.1	3.15	2.17
Fibre-E	69.1	3.13	2.19
Fibre-F	69.5	3.02	2.33
Fibre-G	75.0	3.14	2.38
Fibre-H	77.9	3.30	2.36

した。供試体は 30 ϕ オムニミキサーを用いて混練した CFRC を 160 ϕ ×40b×10t mm の型枠に 2, 3 回に分けて流込み, コテにより表面仕上げをしたものを同一条件で6体製作した。打設後24時間で脱型し24~48時間の20°C水中養生後, オートクレーブ養生(180°C, 5時間保持)を実施した。曲げ強度試験は 2.5 ton インストロン試験機を用いて図1に示すように曲げスパン100 mm の中央集中載荷 (載荷スピード 0.5 mm/min) で実施した。

○実験結果と考察

図2に曲げ応力~たわみ曲線 (σ - δ) の代表例を示す。図より σ - δ 曲線が比例関係でなくなる点, すなわち曲げひび割れ強度 σ_{cr} は CF の引張強度にあまり影響されず, プレーン材の曲げ強度を約10%上まわることが判る。これに対して最大荷重時の曲げ強度 σ_b とその時のたわみ量 δ_{max} は CF の引張強度に大きく影響される。すなわち, CF の引張強度が高いほど σ_b が高くなる傾向が認

図1 曲げ試験方法

図2 CFRCの曲げ応力～たわみ曲線

められる。そこでCFの引張強度 σ_f とCFRCの曲げ強度 σ_b との関係およびCFの引張強度と最大荷重時のたわみ δ_{max} との関係をそれぞれ図3、図4に示す。なお、図3の理論値はCFRCの曲げ強度がCFの引張破断により決定されるとして混合則より求めた値である。図3より、実験値は理論値より大きく下回るものが数点ある。この主な原因はCFの長さが混練後も変化しないと仮定しているためである。図5は混練後のCF 300~400本の長さ分布を示したものであるが、Fibre-Aは6mm以上のCFが存在せず、平均長さは初期長さ10mmの1/4であり、またFibre-Fの平均長さは1/2である。そこで、混練後のCFの平均長さでデータを整理した。図6は

CFの平均長さとCFRCの曲げ強度との関係を、図7はCFの平均長さと最大荷重時のたわみ量との関係を示したものであるが、曲げ強度、たわみ量ともCFの平均長さと良い相関を示している。また混練後のCFの長さ分布から判断すると、限界長さより短いと思われるCFも存在することからCFRCの曲げ破壊はCFの引張破断とCFのセメントマトリックスからの引き抜けによりもたらされ、鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊のような単純な繊維の引き抜け破壊とは異なる。

以上の結果より、CFRCの曲げ強度は次式のように表わせる。

図3 CFの引張強度がCFRCの曲げ強度におよぼす影響

図4 CFの引張強度がCFRCのたわみにおよぼす影響

図5 混練後の CF 長さ度数分布

図6 CF の長さが CFRC 曲げ強度におよぼす影響

図7 CF の長さが CFRC のたわみ量におよぼす影響

表4 CFRC 曲げ強度の計算値と実験値の比較

繊維	実験値 σ_1 (kg/cm ²)	計算値 σ_2 (kg/cm ²)	σ_2/σ_1
Fibre-A	152	143	0.94
Fibre-B	139	157	1.13
Fibre-C	203	203	1.00
Fibre-D	235	226	0.96
Fibre-E	231	224	0.97
Fibre-F	247	225	0.91
Fibre-G	264	246	0.93
Fibre-H	216	238	1.10

$$\sigma_b = 1.22 \left(1 - \frac{l_c}{2l_1} \right) \sigma_f \cdot V_{f1} + 1.22 \left(\frac{l_2}{2l_c} \right) \sigma_f \cdot V_{f2} \quad (2)$$

ここに、 l_c : CF の限界長さ

l_1, V_{f1} : l_c より長い CF の平均長さとお容積混入率

l_2, V_{f2} : l_c より短い CF の平均長さとお容積混入率

また、限界長さは各供試体破断面の CF の長さにより推定できる。すなわち、観察される CF の長さの最大値は 0.4~0.7 mm であり、このことから限界長さは 0.8~1.4 mm と仮定できる。(2)式の他の数値は図5に示す混練後の CF の長さ分布から求められる。(2)式による計算値を実験値と比較して表4に示すが、それらは比較的良く一致している。なお、図3より CF の引張強度が 65 kg/mm² 以上の場合の曲げ強度はプレーン材の1.8~2.2倍高い値を示すが、引張強度が 60 kg/mm² 以下の場合の曲げ強度はプレーン材の1.1~1.3倍と低く、セメント補強用繊維としては望ましくないと判断される。

以上の結果より(1)流込成型材に対して十分な補強効果を得るのに必要な LMCFC の引張強度は 65 kg/mm² 以上である。(2) LMCFC は混練中に折損して短くなり、ある長さ分布を示すので、CFRC の破壊形態は一般に CF の破断と引き抜けが同時に生じる複合破壊となっていることなどが判明した。

2.2.2. 骨材寸法の影響

○実験概要

供試 CF の物性を表1に示す。長さは 3 mm である。CFRC の配合は表5に示すように W/C=50%, CF 容積混入率 $V_f=3\%$, MC/C=0.5%, Af/C=0.05% と一定にし、骨材セメント比 S/C を変化した3種類である。この各々につき、粒径の異なる人造砂3種、すなわち粒度範囲が 0.018~0.15 mm の 8号砂 (平均粒径 0.05 mm), 0.3~1.2 mm の 5号砂 (平均粒径 0.5 mm) および 0.6~2.5 mm の 2号砂 (平均粒径 1.2 mm) を使用した。なお、3種類の配合は JIS 規格によるフロー

表 5. CFRC の 場 合

記 号	W/C (%)	S/C (%)	V _f (%)	MC/C (%)	A _f /C (%)	単 位 骨材容積 (l/m ³)
Case-1	50	0.1	3	0.5	0.05	42
Case-2	//	0.4	//	//	//	150
Case-3	//	0.8	//	//	//	259

値が 130, 160, 190 mm となるように 8 号珪砂について定め、他の骨材も同一の S/C とした。

○実験結果と考察

図 8 に曲げ応力～たわみ曲線の代表例を示す。図より骨材粒径が小さくなるほど、ひび割れ強度 σ_{cr} 、曲げ強度が高くなることが判る。そこで、骨材の平均粒径をパラメータにして、ひび割れ強度 σ_{cr} 、曲げ強度 σ_b および最大荷重時のたわみ量 δ_{max} との関係をそれぞれ図 9、図 10 にまとめて示す。これらの図より σ_{cr} 、 σ_b におよぼす骨材寸法の影響につき若干の考察を行なう。

すでに SFRC については、曲げ強度は骨材の最大寸法が大きくなるにつれて低下することが Swamy らにより報告されている⁵⁾。CFRC の場合も本質的には SFRC の場合と同じと考えてよい。ただし、CF の断面寸法および長さが SF のそれらの 1/25, 1/3～1/10 と小さいので使用する骨材もそれに見合うように幾何学的に小さくすることが必要となる。

本実験に用いた骨材の最大寸法は、平均繊維間隔の計算値 0.08 mm よりもいずれも大きい。この繊維間隔よ

図 8 曲げ応力～たわみ曲線

図 9 CFRC の曲げ強度におよぼす骨材寸法の影響

り大きい骨材は CF の均一分散を疎外する要因となり、骨材寸法が大きいほど、またその混入量が多いほど繊維による補強効果を低下させるものと考えられる。

なお、粒径が小さい 8 号珪砂を用いた CFRC は、それより大きい骨材を使用した場合に比して S/C の増大に伴う曲げひび割れ強度 σ_{cr} の増加率が高い。これは骨

図 10 CFRC の最大荷重時たわみにおよぼす骨材寸法の影響

材粒径がセメント粒径並に小さくなると、オートクレーブ養生時にセメントの CaO と珪砂中の SiO_2 の反応が促進され、トベルモライトがより多く生成し、これが結合材として働くために高強度になったと推定される⁶⁾。

また、図10より最大荷重時のたわみ量は骨材量が少ない $S/C=0.1, 0.4$ の場合、ほとんど骨材の粒径の影響を受けないが、 $S/C=0.8$ の場合は骨材の粒径が大きくなるとたわみ量が減少していること、また骨材の粒径を一定とした場合、骨材量が多くなるにつれてたわみ量が減少していることがわかる。この S/C が大きくなるとたわみ量が減少する原因としては以下の2点が考えられる。すなわち、平均繊維間隔より大きい骨材が多くセメントマトリックス中に存在すると、曲げ剛性の小さいCFは容易に骨材により曲げられ、みかけ上CFの長さが減少してCFRC破壊面で引き抜けるCFの確率が高くなり、補強効果が減少する。また、2.2.1では混練後のCFの長さとなわみ量との間に良い相関関係があったが、本実験では角ばりのある骨材を用いているため、その混入量が多いほどCFの折損度が大きくなり混練後のCFの平均長さは短くなったと推察される。

以上より、SFの場合と同様に、骨材寸法が小さくなればなるほどCFの補強効果は高くなるのでCFRCの場合は粒径が 0.15 mm 以下の微細骨材の使用が適当であるといえる。

3. 建材製品への適用例：フリーアクセスフロア

CFRCの特徴を活かした建材製品としてフリーアクセスフロアを開発・実用化した。

フリーアクセスフロアは配線や配管が集中していて、それらの交換や点検を頻繁に実施する必要があるコンピュータ室やOA室などに適した二重床である。

これまでのフリーアクセスフロアの主流はアルミダイカスト製である。これは軽量、高強度、寸法精度が良い

図12 フリーアクセスフロアの荷重～たわみ曲線

等の長所を有しているが、一方では歩行音が大い、断熱性が悪いという居住性の欠点が指摘されている。

CFRC製フリーアクセスフロアはアルミダイカスト製の欠点を補い、かつ軽量、高強度および高寸法精度という従来の無機材料には見られない性能を兼ね備えている。すなわち、CFによる補強、軽量骨材の適用、オートクレーブ養生による寸法精度向上および鋼板とCFRC板との接着複合構造が前述の優れた性能を生み出している。図11にフリーアクセスフロアの断面形状寸法を示す。この強度特性と居住性をアルミダイカスト製と比較した結果を以下に示す。

3.1. フリーアクセスフロアの強度と耐久性

フロアの強度特性を4隅で支持し中央に $50\phi\text{ mm}$ の集中載荷を作用させて評価した結果を図12に示す。

CFRC製フロアは $1900\sim 2000\text{ kg}$ で中央部載荷点直下にせん断破壊を生じるが、その後も耐力は上昇し約

図11 CFRC製フリーアクセスフロアの断面図

表6. CFRC製フリーアクセスフロアの耐久性試験結果

項目	試験条件	試験後の破壊強度* (kg)
繰返し荷重	荷重範囲: $0\sim 1200\text{ kg}$ 繰返し数: 10回	2330
衝撃荷重	砂袋の重量: 30 kg 落下高さ: 2 m 落下回数: 3回	2200
熱サイクル	温度範囲: $-20\sim 80^\circ\text{C}$ 熱サイクル数: 10回 (8時間/1サイクル)	2170

* 3体の平均値

2400 kg で最終曲げ破壊した。この最大荷重はフロアの許容荷重 600 kg に対して、4 倍の安全率となる。

しかしながら、CFRC 製フリーアクセスフロアは前述の通り、接着による複合構造であるので、樹脂の接着耐久性に関する検討が必要で、繰り返し荷重、衝撃荷重、温度による影響を調査した。それぞれの試験条件と試験後の破壊強度を表 6 にまとめて示す。フリーアクセスフロアはいずれの試験においても初期の強度を維持しており、耐久性が良好であることが判る。

なお、長期的な耐久性として、300 kg, 600 kg の荷重を加えた場合のクリープ特性を調査中であるが 4 年経過した時点でもクリープ破壊は生じていない。

3.2. フリーアクセスフロアの居住性

居住性の指標として、CFRC 製フリーアクセスフロアの断熱性と歩行時の発生音をアルミダイカスト製と比較して調査した。

まず、熱抵抗値は「JISA 1420：住宅用断熱材の断熱性能試験方法」にもとづいて、熱貫流率を実測した。

実験結果を表 7 に示すが、アルミダイカスト製に比較して CFRC 製は熱貫流率が 30% 以上低く、断熱性に優

表 7. フリーアクセスフロアの熱抵抗試験結果

	CFRC 製	アルミダイカスト製
熱貫流率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)	2.70	3.98
比 率	0.68	1.00

図13 フリーアクセスフロアの歩行による発生音
(測定条件：15.5°C, 53%)

れていることが判る。

歩行時の発生音は24枚のフリーアクセスフロアを敷いた床上を人が歩行し、その発生音をマイクロホンで記録した。結果を図13に示す。図より 63~4000 Hz の周波数で、CFRC 製フリーアクセスフロアはアルミダイカスト製より 3~10 dB 音圧が低く、したがって発生音が小さいことが判る。

以上のように、CFRC 製フリーアクセスフロアは強度特性および居住性に優れており、コンピュータ室、OA 室用に最適であることがわかる。

4. 結 言

以上、CFRC の基本性能に関する実験研究により、セメントマトリックス中に CF を均一に分散させる方法を確立するとともに、CFRC の力学的性質におよぼす CF の引張強度、骨材寸法および骨材混入量の影響を明らかにした。

さらに、これらの結果をもとに CFRC の特徴を生かした建材への適用性を検討し、アルミダイカスト製よりも居住性に優れた CFRC 製フリーアクセスフロアを開発、実用化した。

参 考 文 献

- 1) 白川 潔, 中川憲一:「CFRC の曲げ強度におよぼす諸因子」第 4 回コンクリート工学年次学術講演会論文集, 1982 年 pp 153~157
- 2) 秋浜繁幸, 末永龍夫, 板野 正:「炭素繊維を用いた CFRC の力学的性質に関する実験的研究」コンクリート工学, Vol. 20, No. 8, Aug. 1982 年 pp 75~84
- 3) 大浜嘉彦, 矢野幹夫:「短繊維を用いた炭素繊維補強セメントの製造と性状」繊維補強コンクリートに関するシンポジウム (日本コンクリート工学協会) 1984 年 2 月, pp 111~116
- 4) 秋浜繁幸, 末永龍夫, 板野 正:「CFRC の建築構造物への適用 (その 1: 大型ドーム用外装タイルパネルの開発と実用化)」鹿島建設技術研究所年報, No. 31, 1983, pp 57~66
- 5) Swamy, R. N., and Stavrides, H. "Some properties of high workability steel fibre concrete" Fibre-reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, 1975, pp 197~202, Construction Press Ltd.
- 6) Neville, A. M. "Properties of Concrete" Pitman Publishing Ltd. 1979