解説

炭素繊維補強セメント複合材 (CFRC) について

秋 浜 繁 幸*

1. はじめに

セメント系マトリックス（ペースト，モルタル，コンクリート）を繊維で補強することにより，この材料の固有の欠点である脆性の性質を改善しようとする試みは古くから行なわれてきており，鉄筋コンクリートや石綿セメント系材料はこの代表例である．また近年になり鋼繊維，耐アルカリ性ガラス繊維，ポリエチレン繊維で補強したセメント系複合材（SFRC，GRC，PFRC）も実際に使用されはじめており，それらの力学的性質や繊維の強化機構に関しても実験および理論の両面からの研究報告が多数発表されている．

また炭素繊維に関しては，1970年代の初めから，Ali¹⁾，Waller²⁾，Majumdar³⁾，Aveston⁴⁾らによって，PAN系繊維を使用した炭素繊維補強セメント複合材（CFRC）の研究が報告されている．しかし，これら一連のCFRCに関する研究では，繊維の補強方法として，連続繊維を一軸配向させたシートか，または2次元ランダムマットとセメントマトリックスとを交互に積層するハンドレイアップ法によって製作したCFRCの特性に関する研究が主で，短繊維をミキサー内でセメントマトリックス中に均等に3次元ランダムに配向させたCFRCに関しては研究報告がなく，また材料の物性研究の域にとどまっており，また，同繊維が現在まだかなり高価なため，経済性の面からも建築材料への実際の応用には，かなり時間を要すると考えられる．

一方，国内で開発された石油ピッチを原料としたピッチ系炭素繊維は，PAN系炭素繊維に比べて強度や弾性係数はかなり低いが，それでも引張り強度で7,800 kgf/cm²（コンクリートは20~40 kgf/cm²），弾性係数で3.8×10⁵ kgf/cm²（コンクリート2~3×10⁵ kgf/cm²）と，セメント・コンクリート補強用繊維としては十分な機械的性質を有しており，かつコストがPAN系に比べ

て安価なことや，セメントマトリックスの強アルカリ中でも強度劣化のないこと，およびセメント・コンクリート2次製品の養生に使用されて，同製品の寸法安定性に有効なオートクレープ養生（180℃，10気圧）に同繊維が耐えることなど，今後のセメント・コンクリート用補強繊維としては非常に有望な性質を多々有している．

このため，本稿では，既往のPAN系繊維を使用したCFRCの特性について若干紹介した後，おもにピッチ系繊維を使用したCFRCの特性とその実用化例について述べることにする．

2. PAN系繊維で一軸補強したCFRCの特性

前述したAliやWallerによって発表された，PAN系繊維をおもにセメントマトリックス中に一軸配向させた場合のCFRCの力学的特性を図1~3に示す．図1は高弾性繊維と高強度繊維を使用したCFRCの引張り応力-歪曲線の比較であるが，両者の繊維の引張り強度が，かなり大幅に相違しているにもかかわらず，複合材としてのCFRCの引張り強度にはそれほどの差が生じていないことがわかる．また図2，3は一軸配向繊維を使用したCFRCの引張り強度と繊維混入率の関係，および曲げ強度と繊維混入率の関係を示す．一般に繊維無混入のセメントペーストやモルタルの引張り強度は前述したごとく，大略20~40 kgf/cm²，伸び歪能力100~400×10⁻⁶，曲げ強度で40~80 kgf/cm²であるから，炭素繊維の混入により著しくその性能が向上することがわかる．

3. ピッチ系繊維で一軸補強したCFRCの特性

前記，AliやWallerによる高弾性・高強度繊維を使用したCFRCの特性と，ピッチ系繊維を使用したCFRCの特性を比較する意味で，筆者ら^{5),6)}の行なったピッチ系炭素繊維（表1参照）を使用した一軸補強CFRCの引張り，曲げ試験結果の一例を図4~8に示す．

ただし，Aliらの実験と筆者らの実験では，セメントマトリックスの性質や，供試体の形状寸法，試験方法などが同一ではないから，正確な比較にはならないが，織

* Shigeyuki AKIHAMA：鹿島建設技術研究所（182 調布市飛田給 2-19）

維の特性の相違によってCFRCの特性がどの程度相違するかの大まかな推定は可能と考えられる。

なお、実験に使用した供試体の製作は、セメントペーストと、1層当りの繊維密度約 1,000 本/cm の連続繊維のシートとを交互に積層するハンドレイアップ法によった。

供試体の形状寸法は、純引張り供試体が厚さ 6 mm, 幅 30 mm, 長さ 330 mm であり、曲げ供試体は厚さ 10 mm, 幅 40 mm, 長さ 160 mm (スパン 100 mm, 中

央集中載荷) である。

3.1 引張り応力(σ_t)-歪(ϵ)曲線の形状

繊維混入率の異なる σ_t - ϵ と曲線の一例を図4に示す。同図から明らかなように CFRC の σ_t - ϵ 曲線の形状は繊維混入率の増加に伴い徐々に変化するが、この曲線形状の変化は繊維量の小さいほうから順に、漸次下記の a から d の四つのモデル化した形態をたどって変化していくとみなすことができる。なお、このモデル化した σ_t - ϵ 曲線を図5に示す。

a) 引張り強度はセメントマトリックスより若干増大するが、 σ_t と ϵ の関係はいまだ直線関係にある段階 (図5のA~Bの範囲)。

b) σ_t - ϵ 曲線が非弾性的性質に変わり、強度、伸び歪ともに、セメントマトリックスより若干増大するが、歪能力がセメントマトリックスのたかだか 2~6 倍程度の段階 (図5のB~Cの範囲)。

c) 引張り破壊時の歪度がセメントマトリックスの約 35~45 倍 ($9,000 \sim 12,000 \times 10^{-6}$) 程度と延性的性質を示すようになり、 σ_t - ϵ 曲線は2直線 (bi-linear) で近似できるようになる (図5のC~Dの範囲)。

d) 歪能力はCの段階とあまり変わらないが、 σ_t - ϵ 曲線の非弾性部分に反曲点が現われ、3直線 (tri-linear) による近似が必要になる段階 (図5のB→E→Fの範囲)。

なお、このB、E、Fの各点をCFRCの破壊モードと

図1 炭素繊維補強セメント複合材 (CFRC) の引張り応力-歪曲線¹⁾

図2 CFRC の純引張り強度と繊維混入率の関係²⁾

図3 曲げ強度と繊維混入率の関係²⁾

表1 炭素繊維の性質

繊維			比重	引張り強度 (kg/cm²)	弾性係数 (kg/cm²)	伸度 (%)
直径 (d) (μm)	長さ (l) (mm)	アスペクト 比 (l/d)				
14.5	10	690	1.63	7,800	3.8×10^5	2.1

図 4 引張り応力度-歪度曲線

図 5 理想化した σ_t - ϵ 曲線

図 6 連続繊維CFRCの引張り強度と繊維混入率の関係

の関係でみると、B点は初亀裂点でありB～E間は応力の増加に伴い、亀裂本数が漸次増加し、亀裂間隔が減少

していく段階であり、またE～F間では、もはや亀裂本数の増加はなく、たんに繊維のみの耐力、剛性に依存している段階に相当する。

3.2 引張り強度について

CFRCの引張り強度($\sigma_{t,max}$)と繊維混入率(V_f)の関係を図6に示す。引張り強度は、ある範囲の V_f 値まではセメントマトリックスの引張り強度を若干上回る程度であるが、この限界値を越えると以後、 V_f の増加につれて急激にその値が増大していく。この $\sigma_{t,max}$ と V_f の関係を回帰式で同図中に示す。また V_f の値が、ある一定の限界値($V_{f(crit)}$)を越えた領域では、CFRCの引張り強度がマトリックスの強度には無関係に、繊維のみの耐力によって決定されたとすると、 $\sigma_{t,max}$ と V_f は下記(1)式で示される。

$$\sigma_{t,max} = \alpha \cdot \sigma_{fu} \cdot V_f \quad (V_f > V_{f(crit)}) \quad (1)$$

ここに、 σ_{fu} ：繊維の引張り強度、 α ：実験定数(混入した繊維の有効率を表す)。

この(1)式中の実験定数の値を $\alpha=1$ として、同式と本実験結果とを比較してみると、 V_f の値が大きくなるにつれて、(1)式と実験値との差は徐々に大きくなる傾向にあることがわかる。そこで、実験結果を(1)式に当てはめて α の値を計算し、この α 値と V_f の関係を示したのが図7である。同図から明らかのように、繊維有効係数 α の値は V_f の増加につれて、ほぼ直線的に減少していく傾向にあることがわかる。

3.3 曲げ強度と繊維混入率の関係

曲げ強度と繊維混入率の関係を図8に示す。同図に示すごとく、曲げ強度は繊維量の増加に比例してその値は

増大した。またマトリックス別にこの増加傾向を比較してみると、水セメント比 (W/C) が小さく、曲げ強度の高いマトリックスのほうが若干高い増大率を示している。

なお、前記の Waller の発表した図3とこの図8を比較してみると、前者は後者に比べて使用繊維の強度が太略3倍であるのに対して、CFRCの曲げ強度は同一の混

図7 連続繊維 CFRC の V_f と α の関係

図8 繊維混入率と曲げ強度の関係

表2 セメントマトリックスの調査

No.	水セメント比 (W/C) (%)	骨材セメント比 (S/C)	重量調査 (kg/m³)			
			水	セメント	細骨材	混和剤*
1	42	—	544	1,294	—	13.0
2	113	0.71	504	446	318	4.5

* メチルセルロース。

入率で約2倍強にしかっていないことがわかる。

4. ピッチ系炭素短繊維で補強した CFRC の特性

短繊維をセメントマトリックス中に3次元ランダムに配向した CFRC の場合は、繊維配向や繊維長さの効果(繊維とマトリックスの付着力の効果)の影響を受けるため、混入した繊維の有効性は、前述した連続繊維による一軸補強 CFRC の場合に比べてかなり低くなる。

しかし、現状では、連続繊維補強 CFRC を用いた建築部材の量産技術がいまだ確立されていないのに対して、短繊維をミキサー内で均等に分散配向し、かつ、これを従来のコンクリートと同様に型枠に流し込み成形することが可能ならば、力学的特性の多少の低下は生産性の向上効果や、その他の物理的特性の向上効果(乾燥収縮に起因する亀裂発生抑制効果等)によって十分補いうる。

ここでは、以上述べた考え方に基づいて開発された短繊維補強 CFRC の特性の一例として、繊維長さ 10 mm、アスペクト比 690 の短繊維を表2に示すマトリックス中に特殊ミキサーを用いてランダムに分散配向した場合の CFRC の力学的特性について概説する^{7,8)}。なお、引張り試験、曲げ試験の状況を図9, 10に示す。

4.1 引張り応力(σ_t)-歪(ϵ)曲線の形状と破壊モード

繊維混入率の異なる CFRC の σ_t - ϵ 曲線の一例を図11に示す。同図に示すごとくマトリックスの調査を適当にコントロールすることにより短繊維補強 CFRC の σ_t - ϵ も、繊維混入率 2% 前後から2直線 (bi-linear) の形状を示し始め、3% 以上では安定した bi-linear の形状が得られるようになる。また引張り試験後の供試体破断面の顕微鏡写真の一例を図12に示す。この破断面の観測結果によると、破断面から突出している繊維の長さは、おおよそ 1 mm 以下の範囲に分布しており、0.3 ~ 0.6 mm の長さのものが最も多く観察された。一方、この実験で使用した繊維の長さ (l) は 10 mm であるから、もし CFRC の破断が繊維の引抜けによって起きるな

図 9 短繊維補強 CFRC の引張り試験状況

図 10 短繊維補強 CFRC の曲げ試験状況

図 11 引張り応力-歪曲線

ら、繊維の破断面からの平均突出長さ $l/4=2.5\text{mm}$ になる。しかし、破断面からの突出長さは前述したごとく、大略 $0.3\sim 0.6\text{mm}$ であったところから、引張り破壊時には大半の繊維が引き抜けることなく、破壊したものと考えられる。

図 12 引張り供試体破断面の顕微鏡写真

また、気乾比重 1.0 の軽量モルタル（調合は表 2 の No. 2, オートクレープ養生）を用いた短繊維補強 CFRC に関して、これに通常の引張り試験を行った場合と、繰返し引張り応力を载荷した場合の σ_t - ϵ 曲線の一例を図 13, 14 にそれぞれ示す。これらの図から明かなように、繰返し応力を载荷した場合の σ_t - ϵ 曲線も、その包絡線は単調増加载荷の場合と類似した形状を示し、かつ良好な復元力特性を有していることがわかる。

4.2 曲げを受けた場合の特性

中央集中载荷曲げ試験によって、繊維混入率の増加に伴う、荷重-撓み曲線の形状の変化を調べた結果の一例を図 15 に示す。同図からも明かなように、繊維量の増加に伴い、曲げ強度のみならずダフネス（吸収エネルギー）も著しく向上することがわかる。

5. CFRC の応用例

CFRC の力学的特性に関する実験的研究に引き続き、これの実際の建築構造物への適用事例を紹介する。

その応用例の一つがイラク国バクダッド市に建設されたモニュメントとしての大型ドームの外装用タイル打込みプレキャストコンクリートパネル ($10,000\text{m}^2$) への短繊維補強軽量 CFRC（比重 1.0, オートクレープ養生）の適用である⁹⁾。

一般に、タイル打込みプレキャストコンクリートカーテンウォールの重量は 400kg/m^2 以上となるのがふつうである。しかし、このイラクドームの外装用パネルに関しては、重量が 60kg/m^2 以下（タイルの重量 33kg/m^2 を含む）で曲げ耐力が 300kgf/m^2 以上という非常に厳しい要求条件を満たす必要があった。この要求条件を満足できる材料として種々のコンクリート材料を検討

図 13 引張り応力-歪曲線

図 14 繰返し引張り応力を各応力レベルで荷重した場合の引張り応力-歪曲線

図 15 荷重-撓み曲線

した結果、新規に開発中のオートクレープ養生軽量CFRCを用いる以外に方法がないとの結論に至り、この軽量CFRCに関して、前記の力学的特性に加えて、75°C熱水中への浸漬試験や凍結融解試験によって、CFRCの

図 16 建設中のイラクアルジャヒー ドモニュメント

耐久性の確認を行なった。

その他 CFRC の乾燥収縮特性や、CFRC タイルパネルの静的および動的曲げ耐力試験、および CFRC とタイルの付着力試験などの一連の実用化研究を行なって、このCFRCを使用したタイルパネルがバクダッド市の厳しい気象条件下でも十分な耐力と耐久性のあることを確認したうえで、同ドームへの適用に踏み切った。

5.1 大型ドームおよび CFRC 外装タイルパネルの概要

イラクアルジャヒードモニュメントは二つの同一形の半球ドームで構成されており、このドームの規模は高さ40m、底辺部の直径45mである。ドームの構造体は亜鉛メッキされた鉄骨造であり、ドームの表面はターキッシュブルーの磁器タイル貼りとなっている（建設中の同ドームの外観を図16に示す）。

また、このドームの水平断面の曲率は、高さ方向に連続的に変化している。このため、タイルパネルの裏打ちコンクリートであるCERCの乾燥収縮が大きくなるとパネルの曲率が変化して、初期には所定の位置への取付けが不可能になること、また長期的には脱落や美観上の問題が発生する。さらに、同パネルは日本国内で生産、 SHIPPING し、バクダッドの現地では重機なしで鉄骨構造体に取り付けることが前提条件となっていた。

このため、同パネルの寸性は、この運搬、取付け、寸法安定性の問題を考慮して、できる限り小型化することとし、標準寸法を長さ1,000mm、幅500mm、総厚25mm（タイル15mm（33kg/m²）、CFRC 25mm（25kg/m²））とし、1枚のパネル重量が30kg/枚以内に収まるように設計した（図17参照）。このためパネルの総数は約2万枚となった。

図 17 標準タイルパネル立面図

図 18 曲げ強度と 75°C 熱水養生材齢の関係

図 19 凍結融解試験結果 (1) (相対動弾性係数の変化)

5.2 CFRC の耐久性および寸法安定性試験

CFRC の耐久性試験の一環として行なった 75°C 熱水中への浸漬試験結果を図 18 に、また、凍結融解試験結果を図 19 に示す。またオートクレープ養生法によって製作した CFRC と、他の養生条件で製作した CFRC の寸法変化比較試験の結果を図 20 に示す。

5.3 現状での評価

CFRC タイルパネルの取付け施工後、現在までに 2 夏

図 20 軽量 CFRC の長さ変化率

を経過したが、外装タイルパネルに関するクレームは 1 件もなく、バクダッド市の高温低湿条件下でも同パネルはすぐれた強度特性と寸法安定性を有しているとの評価を得ている。

6. あとがき

CFRC の力学特性と、これの応用例について概説した。現在では CFRC の特性研究が国内でも活発に行なわれるようになってきており、また実用化例も徐々に増大してきている。しかし、いまだ品質管理技術や量産技術など未解決の問題も多く残されており、今後はこれらの残された問題点の一つずつ地道に解決していく努力が必要である。

参考文献

- 1) M.A. Ali, J. Majumdar & D.L. Rayment: *Cem. Concr. Res.*, 2 (1972), 201-212.
- 2) J.A. Waller: *Fiber Reinforced Concrete*, ACI Special Publication SP-44 (1974), pp. 143-161.
- 3) A.J. Majumdar: *Fiber-reinforced Cement and Concrete*, RILEM Symposium (1975), pp. 279-313.
- 4) J. Aveston, R.A. Mercer & J.M. Sillwood: National Physical Laboratory Report SI, No. 90/11/98, January (1975).
- 5) 秋浜繁幸: 日本建築学会論文報告集, 第 316 号 (1982), 1-8.
- 6) 末永龍夫, 秋浜繁幸: 日本建築学会大会学術講演梗概集, No. 1008 (1982), pp. 15-16.
- 7) 秋浜繁幸, 末永龍夫, 坂野 正: コンクリート工学, 20, 8 (1982), pp. 75-84.
- 8) 秋浜繁幸, 末永龍夫, 坂野 正: 繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会 (1984), pp. 117-124.
- 9) 秋浜繁幸, 末永龍夫, 坂野 正: 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集 (1984), pp. 329-332.