

コンクリート用短繊維CFの開発とCFRCの基礎的性状

Development of Chopped Carbon Fiber For Concrete and Research on Fundamental Properties of Carbon Fiber Reinforced Concrete

水越睦視^{*}、松井繁之^{**}、手塚光晴^{***}、内田美生^{****}、粟田 満^{*****}

Mutsumi Mizukoshi, Shigeyuki Matsui, Mitsuharu Tezuka, Yoshio Uchida and Mitsuru Awata

^{*}工修 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 (〒551 大阪市大正区南恩加島7-1-55)^{**}工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)^{***} 三菱化学(株) 横浜総合研究所 (〒227 横浜市青葉区鴨志田町1000)^{****}工博 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 副主任研究員 (〒274 船橋市豊富町585)^{*****} 三菱化学(株) 横浜総合研究所 副主席研究員 (〒227 横浜市青葉区鴨志田町1000)

Chopped carbon fiber as construction material has been investigated as substitutes for asbestos with mortar or cement paste and its cement composite has advantages of reinforcement effects and durability. However, when its fiber is used for concrete, the reinforcement effects are not gained because of its low stiffness. Therefore carbon fiber has not been directly applied to structural members. This paper describes the application of CFRC(carbon fiber reinforced concrete) to structural members. For the time being, our target of CFRC application is substitution for SFRC (steel fiber reinforced concrete) overlay to reinforce the damaged RC slab of highway bridges. The first approach of developing structural CFRC was to show the optimum range of dosage of binder and number of filament in order to gain both practical workability and favorable mechanical properties. Secondly the properties of fresh and hardened concrete were searched experimentally. Finally based on these data a mix design method was proposed for the design and construction of CFRC.

Key Words: carbon fiber, carbon fiber reinforced concrete, dosage of binder, strength and toughness

1. はじめに

炭素繊維(CF)は、主にアスベスト代替用のモノフィラメント繊維としてセメントモルタル複合体に使用されているが、現在までのところ永久型枠やカーテンウォールなど二次部材、製品への適用が主となっている。しかしながら、低比重かつ高強度・高弾性といった物理的性質を考えると、複合体としてのコンクリート構造部材への適用に期待が持てる。さらに、CFはほとんどの化学薬品に対して不活性であり、耐熱性、耐衝撃性などにも優れている。

このような観点から、これら炭素繊維の高強度、高弾性、高耐久性、軽量性を有効に活用したチョップドストランド状の短繊維CFを用いた炭素繊維補強コンクリート(CFRC)を開発・実用化し、構造部材への用途展開を図ることを目的として検討を実施した。当面は、コンクリート補強用短繊維の中でも既に実用的な域に達している鋼繊維(SF)の代替としての適用性を考え、道路橋床版増厚工法の増厚コンクリートへの適用を目指すこととした。

床版上面増厚工法は、近年の車両の大型化、交通量の増加に伴う道路橋RC床版の損傷に対する代表的な補強工法であり、既設床版上面に新たに鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を打ち足すものである。同工法は、床版厚の増加により曲げ及びせん断耐力が増加し、さらに鋼繊維がひび割れの進展を抑制するため、疲労耐久性が向上することが知られている^{1),2)}。しかし、寒冷地の道路橋RC床版では凍結防止材の散布による鋼材腐食が問題となる。今回、SF代替繊維としてのCFの使用は外観上の問題も含めた耐腐食性の面からも有効と考え、CFRCの実用化について研究を進めることとした。

本研究は、現行の増厚コンクリート用SFRCと同等の曲げ及びせん断性能を有するCFRCの開発実験の前半(第2,3章)と開発したCFRCの諸性状と配合設計に関する後半(第4章)に分けられる。第2章で、まずCFRCの補強概念を構築し、短繊維CFストランドの集束度が曲げ強度・タフネス向上のポイントであると考え、性能評価のための目標と指標を決定した。また集束度はCFストランドの製造上にも必要となるため定量方法を定義した。第3

章では、まず実用的なCFRCを得るためのCFのフィラメント数を決定し、次に集束度とコンシステンシー及び曲げ・せん断強度特性の関係を明らかにした。後半の第4章では、前章で特定した最適CFについてその他の各種要因がCFRCの諸性状に及ぼす影響を検討し、これらの検討結果に基づきCFRCの実用化に際し設計施工上最も基本となる配合設計法を提案した。

2. CFRCの開発のポイント

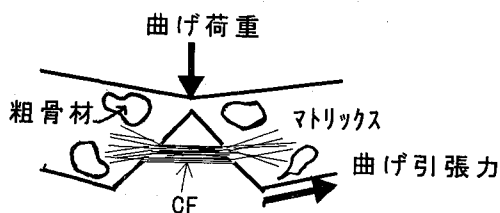
2.1 CFRCの現状と課題

建設材料としての短繊維CFは主にアスベスト代替材料として検討されてきたものであり、これまではフィラメント状の極細径繊維でかつ長さも短いものが使用されてきた。よって、セメント系材料の補強用短繊維として用いる場合、モルタルやセメントペーストと組み合わせられてきたのみで、構造部材への適用例はみられなかった。コンクリートに使用した場合、練混ぜ時におけるCFの破損や変形が大きく、長さも短いため粗骨材を取り巻くことができず、十分な補強効果が得られないためである。この他、フィラメント状の極細径繊維間にマトリックス中の水分、モルタルが吸収され、実用的なワーカビリティが確保できず、CFRCの製造にも特別な工夫が必要となっていた。さらに、所要のワーカビリティを得るには、単位水量及びセメント量が増大し、コンクリートの収縮量の増大を招くこととなり、実用的なCFRCを得ることは困難であった。

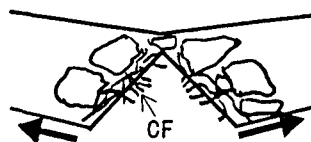
2.2 CFRCの補強機構の概念

ガラス繊維に代表されるモノフィラメント状繊維では、水溶性の適切な集束(サイジング)剤を用い、数百～数万本のオーダーで単繊維を集束させたストランド加工がなされている。今回、検討の対象としたCFにおいても、この種の加工技術は既に実用化されているが、コンクリートの補強材に使用されるには至っていない。そこで、CFの解繊の程度(ばらけ易さ)を示す集束度(2.4参照)の決定に際し、次のような補強機構を考えた。

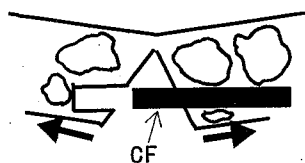
適切な集束を施されたチョップドストランド状のCFを一般的な設備にてSFRCと同様な方法で練り混ぜると、コンクリートの練混ぜ水と練混ぜ時にCFが受けるせん断力により、CFの集束は端部から中心へと適度に破壊される。この状態を概念的に示せば、図-1(a)のようである。この図のように、CFの集束が理想的に破壊されていれば、適当に分散した繊維間にマトリックスが入り込み、マトリックスとCFの付着が確保される。しかもCFはある程度の剛性を有したストランド状のまま存在するため、ひび割れ発生後も有効に引張力を分担できる。しかし、CFの集束度が適切でない場合には図-1(b), (c)のようになる。すなわち、CFの集束度が小さすぎると、(b)のようにCFストランドは過度に解繊され、その結果、ストランド1本当りのCFとマトリックスとの付着面積が増加し付着力は(a)以上に大きくなる。しか



(a) 集束度: 適度, 付着力: 大, 補強効果: 大



(b) 集束度: 小, 付着力: 大, 補強効果: 小
(水量: 大)



(c) 集束度: 大, 付着力: 小, 補強効果: 小

図-1 CFRCの補強機構の概念

し、CFはモノフィラメント状態に分散する傾向も大きくなるため、CFが破断しやすくなり補強効果が低下する。さらに粗骨材を取り巻くようにCFが存在できないことも補強効果を縮減させているものと考えられる。一方、CFの集束度が大きすぎると、(c)のようにCFの解繊が小さくなり、CFのフィラメント間にマトリックスが入り込めず、CFとマトリックスとの付着力不足のためCFの引きぬけが生じ補強効果が低下することになるものと考えられる。

2.3 CFRCの目標性能と評価指標

CFRCの開発で重要項目となるフィラメント数や集束度の検討に際し、床版上面増厚工法に一般的に用いられているSFRCの仕様(鋼繊維長さ30mm、混入率1.27 vol. %)で得られた種々の性能をCFRCの目標性能とした。

評価指標は、繊維補強コンクリートと床版増厚工法の特徴(変形性能や押抜きせん断疲労耐力の向上)を考慮し、コンシステンシー(スランプ、沈下度)と曲げ強度、換算曲げ強度(曲げタフネス)及びせん断強度、せん断タフネスとした。曲げタフネスは、3等分点2点載荷におけるスパン中央たわみを測定し、設定された限界点(δ_{ls} =スパンの1/150のたわみ)に至るまでの荷重-たわみ曲線から算出した。さらに、曲げタフネスから式(1)で定義される換算曲げ強度も算出した。

$$\sigma_s = (T_s / \delta_{ls}) \cdot (L / bh^2) \quad (1)$$

ここに、 σ_s : 換算曲げ強度(N/mm²),

表-1 CFストランドのフィラメント数と集束度の組み合わせ

集束度*	A 0.5	B 1.0	C 3.4	D 7.1	E 45	F 120
フィラメント本数						
12K(12000)	○	○	○	○	○	○
6K(6000)		○	○			
3K(3000)		○				

※2. 4 参照

CF種類: CF-3K-Bと記号表示(本文中)

表-4 試験項目及び方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
振動式コンシステンシー	土木学会規準
曲げ強度, 曲げタフネス	JCI-SF4
せん断強度, せん断タフネス*	JCI-SF6

注) *: 既往研究³⁾を参考に実施

表-2 繊維補強コンクリートの配合

繊維 の 種類	繊維 の 混入率 (vol.%)	目標 スランプ (空気量)	Gmax W/(C+EX) (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						(C+EX) × (%)	
					W	C	EX	S	G	繊維		SP
CF	0.5	5.0cm		70	200	404	40	1127	505	9.5	1.5	
SF	1.27	(3.0%)	13	45	62	180	360	40	1041	667	100	1.5

表-3 使用材料

セメント(C)	早強ポルトランドセメント, 比重=3.13
水(W)	水道水
膨張材(EX)	CSA系, 比重=2.93
細骨材(S)	川砂, 比重=2.59, FM=2.90%, 吸水率=1.39%
粗骨材(G)	砕石, Gmax=13mm, 比重=2.70, FM=6.18, 吸水率=0.60%
炭素繊維(CF)	フィラメント寸法: 繊維径7μm, 繊維長40mm, 比重=1.90
(表-1参照)	引張強度=4710 N/mm ² , ヤング率235 kN/mm ²
鋼繊維(SF)	波形せん断品, 0.5×0.5×30mm, 比重=7.85
	引張強度736 N/mm ² , ヤング率206 kN/mm ²
高性能AE減水剤(SP)	ポリカルボン酸系

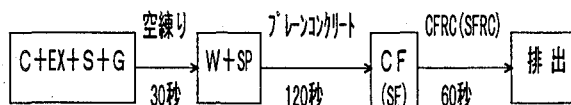


図-2 CFRCの練混ぜ方法

 T_s : 曲げタフネス(J), L : スパン(mm), δ_u : 限界点たわみ=L/150(mm),

せん断タフネスについては直接二面せん断試験におけるせん断面の鉛直方向ずれを3mmまで測定し、曲げタフネスと同様に算出した³⁾。

2.4 集束度の定量化

CFの集束度は以下のような方法で定量化した。すなわち、粘度1000cp程度のモルタル(セメント, 砂, 水=400g, 400g, 156g, 減水剤/水=2/100)にストランド状のCFを3本投入し、半径3cmの攪拌翼を用い500rpmで1分間攪拌した後、250μmメッシュ上に1分間静置したときのCFの重量増分、すなわちモルタル吸収量を測定した。この値を用いて集束度を式(2)より算出した。

$$P=(L/\delta_u) \times 100 \quad (2)$$

ここに、 P : 集束度, δ_u : モルタル吸収量

したがって、集束度の値が大きいほどモルタル吸収量が少なく単繊維間の集束が強いことを表している。

表-1にフィラメント数と集束度を組み合わせたCFス

トランドの分類分けを示した。なお、表中の集束度はAが最も小さいものであり、B<C<D<E<Fの順に集束度を徐々に大きくし、コンクリート練混ぜ時の解繊を生じにくくした。また、フィラメント数を変化させる場合は、集束度を12Kで測定し、集束剤の重合度を12Kと同じとしフィラメント数を6K, 3Kと減少させた。

3. CFRCの開発実験

3.1 実験概要

コンクリート中のCFストランドの集束度が適当である場合、CFRCのコンシステンシーや曲げ、せん断強度が向上すると考えられる。このため、集束度とフレッシュ及び強度特性との関係について実験的に求めた。また、集束度に先立ちフィラメント数についても同様に検討した。

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

本実験に用いた繊維補強コンクリートの配合を表-2に、使用材料を表-3に示す。CFRCの配合はCFの集束度が0.5の場合の試験結果を基に決定したものであり、SFRCに比べ単位水量、細骨材率(s/a)ともに大きくなっているが、全ての集束度のCFに対して同一とした。

全ての実験において、コンクリート(CFRC, SFRC)の練混ぜは20℃恒温室にて二軸強制練りミキサ(容量55 l)を用い、1バッチ当たりの練混ぜ量は40 lとした。繊維補強コンクリートの練混ぜ方法を図-2に示す。なお、コンクリートは十分に練混ぜられた均質なものであることを目視と圧縮強度により確認した。また、繊維の分散状態もファイバーボールが生じることもなく良好であった。

(2) 測定項目及び方法

試験項目及び方法を表-4に示す。曲げ強度試験およびせん断強度試験は材齢7日(気中養生)で実施し、曲げ、せん断強度試験とも各配合で4体の供試体の平均値を求め、強度、タフネスを算出した。なお、本試験における各強度試験における変動係数は平均で曲げ強度で8.8%、せん断強度で4.7%、換算曲げ強度の場合20.5%、せん断タフネスでは24.7%であった。また、曲げ強度試験はJCI SF-4「繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準; 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に、せん断強度試験は、JCI SF-6「繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準; 繊維補強コンクリートのせん断試験方法」に従った。

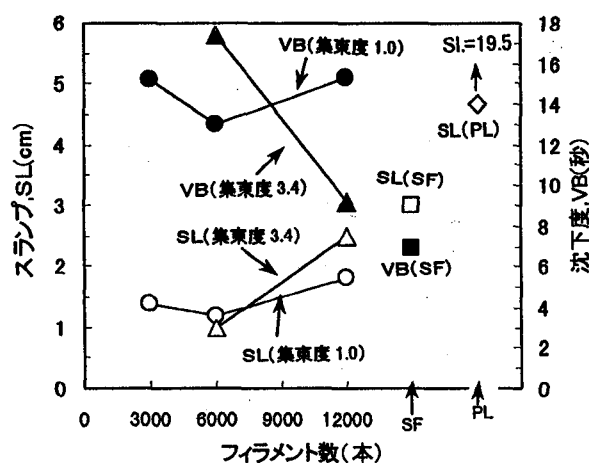


図-3 スランプ・沈下度とフィラメント数の関係

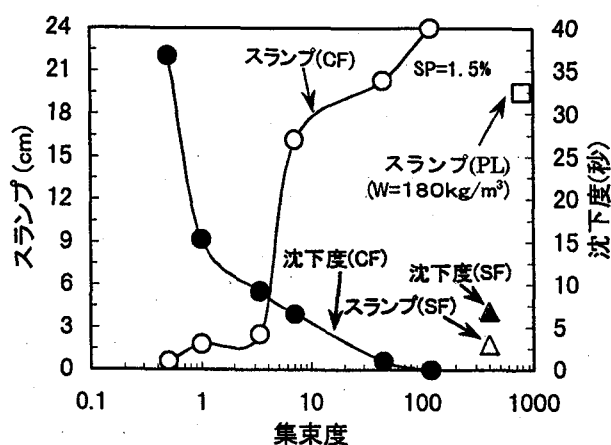


図-5 スランプ・沈下度と集束度の関係

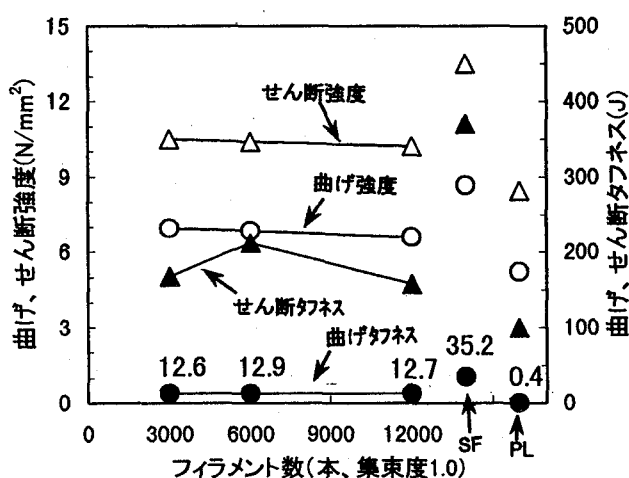


図-4 曲げ、せん断性状とフィラメント数の関係

3.2 フィラメント数に関する検討結果と考察

(1) フィラメント数とフレッシュ性状の関係

CFRCのスランプ、沈下度とフィラメント数の関係を図-3に示す。図より、CFの集束度が1.0の場合は明確な差はないが、CFの集束度が3.4の場合、フィラメント数が多いほどコンシステンシーはわずかに向上する傾向にある。

(2) フィラメント数と曲げ、せん断性状の関係

CFRCの曲げ、せん断強度並びにタフネスとフィラメント数の関係を図-4に示す。図より、曲げ、せん断強度およびタフネスに及ぼすフィラメント数の影響はほとんど認められない。

フレッシュコンクリートの試験結果さらにはCFの製造効率を考えた場合、ストランド1本あたりのフィラメント数は、製造効率が最も高い12,000本(12K)を選んで良いと考えられる。

3.3 集束度に関する検討結果と考察

(1) 集束度とフレッシュ性状の関係

CFRCのスランプ、沈下度と集束度の関係を図-5に示す。図より明らかに、CFの集束度を大きくするほど

コンシステンシーは良好となる。しかし、集束度が0.5～3.4までの範囲ではコンシステンシーの違いはスランプでは顕著に認められないが、沈下度からは集束度が大きくなるほどコンシステンシーがより向上していることが認められる。また、CFの集束度が7.1の場合、スランプでも顕著な流動性の向上が認められ、さらに集束度を45と大きくした場合では、高性能AE減水剤の過剰添加による材料分離の傾向が窺われた。よって、CFの集束度が45以上の場合には高性能AE減水剤の使用量を1.5%から0.5%に減じたCFRCにて以降の曲げ及びせん断試験を実施することとした。これら集束度とCFRCのコンシステンシーの関係から、CFの集束度が7.1以上の場合、目標スランプ5.0cmを得るのに必要な単位水量をSFRCと同程度まで低減できることが確認できた。

(2) 集束度と曲げ性状の関係

曲げ試験時の荷重-たわみ曲線の例を図-6に示す。図より、CFの集束度が大きくなるにつれ、ひび割れ発生以降の残存耐力が向上していることがわかる。ただし、集束度が120となると残存耐力はむしろ低下する傾向にあり、集束度の適正な範囲が存在することがわかった。このような試験結果を曲げ強度、換算曲げ強度と集束度の関係で示すと図-7のようになる。図より、曲げ強度は集束度が45までの範囲内では差は認められないが、CFの集束度が120の場合、曲げ強度は繊維無混入のプレーンコンクリート(PL)と同程度にまで低下していることがわかる。一方、換算曲げ強度は、集束度3.4までは顕著な差は認められないが、それ以降、集束度が大きくなるに伴い増加し、CFの集束度が45で換算曲げ強度は最大値を示し、集束度を120まで大きくすると低下した。

以上の強度性状と、図-6に例を示した荷重-たわみ曲線及び破壊面の観察結果から、CFRCの集束度と曲げ破壊性状の関係は以下のように説明できる。すなわち、CFの集束度が0.5～3.4と小さい場合は、コンクリート練混ぜ時に繊維の集束が過度に破壊され、繊維が単独で存在する傾向が大きくマトリックスと繊維との付着は強

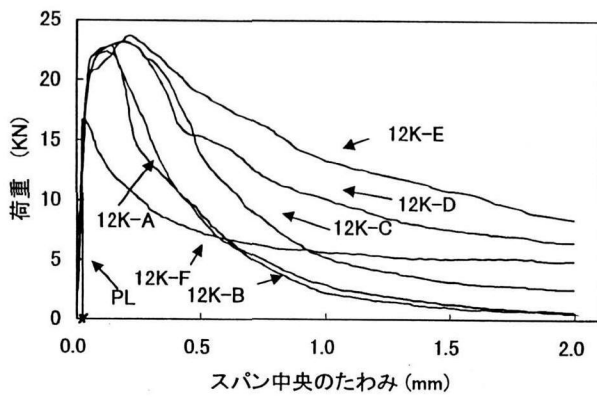


図-6 荷重～スパン中央たわみの関係

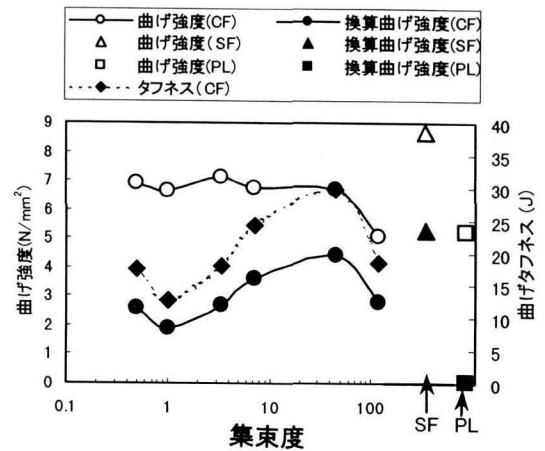


図-7 曲げ性状と集束度の関係

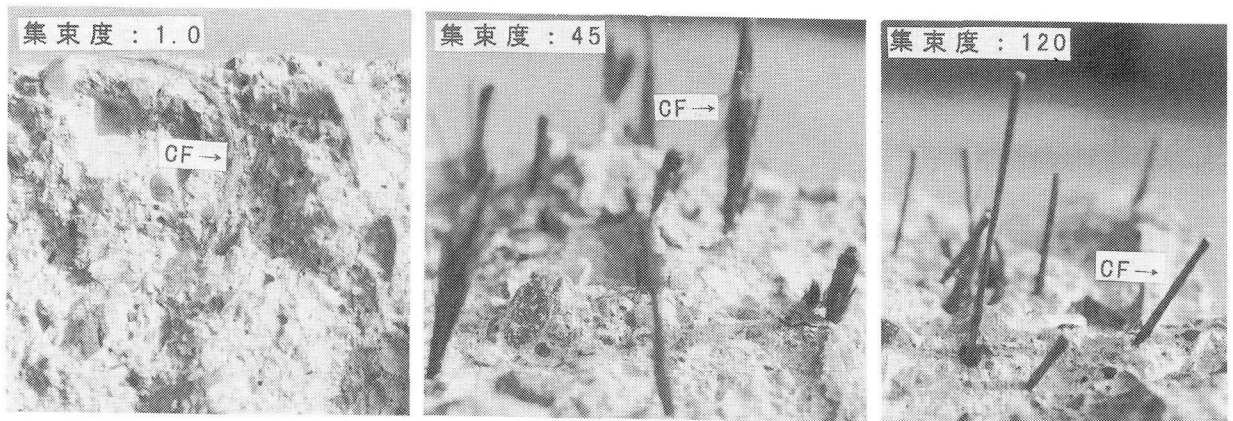


写真-1 CFRCの曲げ破壊面

いが、繊維が折れ曲がり曲げ引張応力に有効に働くように配向せず、最大荷重後、繊維の破断により急激に荷重が低下する。CFの集束度が最適値に近い範囲(7.1～45)のCFでは、繊維が破壊面に対して有効に働き、かつある程度の付着力を有しているため、変形が進むにつれ繊維が徐々に引き抜ける。しかし、集束度が120程度と過大となると、曲げひび割れ発生と同時に繊維の引き抜けが生じ、以降の荷重分担は期待できない。これらのことは、図-1で述べたCFRCの補強機構を裏づける結果である。

また、写真-1はCFRCの曲げ破壊面(集束度1.0, 45, 120)を示したものである。写真-1において、集束度が1.0の場合、コンクリート中にCFが単体で存在する傾向が強くなるため破壊面にCFはほとんど認められない。一方、集束度が120と過大である場合、CFはほとんど解繊せずストランド状の形状を保ったまま存在している。当然ながら集束度が適切な範囲内にあれば中庸の状態を示している。

写真-2は練混ぜ前のCF及び曲げ破壊面から突出したCF(集束度45)の電子顕微鏡写真を示したものである。この写真から、練混ぜにより適度に解繊が生じたCFの

フィラメント間にモルタルが入り込んでいることが確認でき、マトリックスとの付着力が大きいものと考えられる。

(3) 集束度とせん断性状の関係

CFRCのせん断強度、せん断タフネスと集束度の関係を図-8に示す。図より明らかなように、曲げ試験同様、せん断試験においても集束度の影響は、強度よりもタフネスにおいて顕著であり、やはりCFの集束度が45程度の場合に最大のせん断性能が得られた。

荷重とせん断変形量との関係を図-9に示す。せん断試験においても、曲げ性状同様、集束度が1.0と小さい場合、脆的な破壊を呈したが、集束度を適度に大きくした場合、せん断ひび割れ発生後も繊維がせん断力を受け持ち再度、荷重が向上した。その後、繊維のせん断強度あるいはマトリックスとの付着力が限界に達すると破断及び抜けが生じ荷重の低下が起きる。これらの現象が繰返され最終的に破壊に至った。集束度が120と大きい場合、せん断ひび割れ発生と同時にCFの付着抜けが生じ荷重は低下した。この場合の破壊状況は、集束度1.0の場合ほど脆的なものではないが、再度、荷重が向上することはなかった。

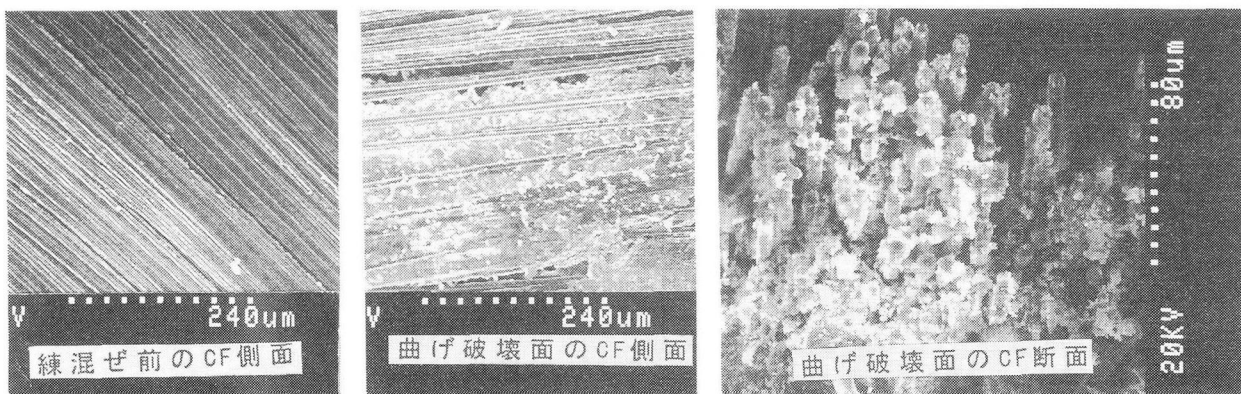


写真-2 電子顕微鏡写真(CF-12K-E)

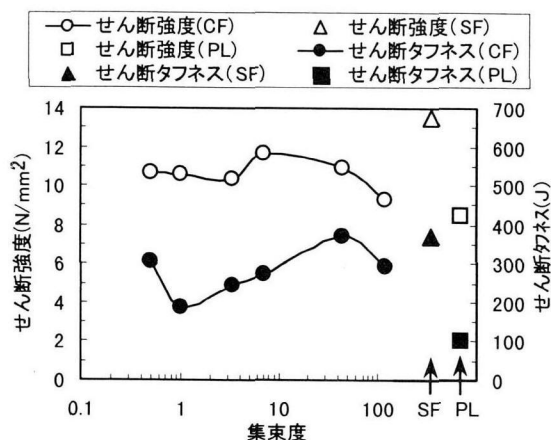


図-8 せん断性状と集束度の関係

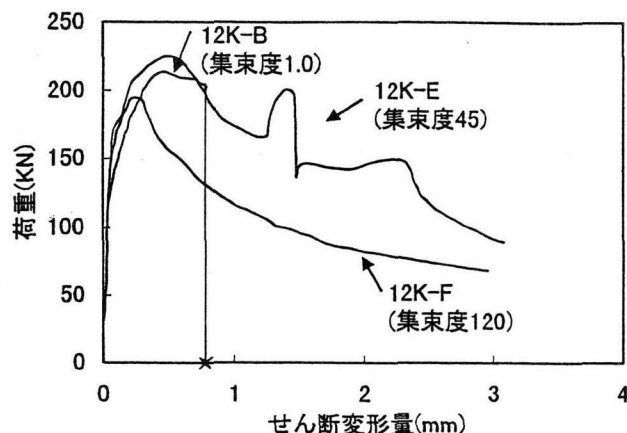


図-9 荷重～せん断変形量の関係

以上の検討により、集束度が0.5～120までの範囲では、集束度が45程度のCFストランドを用いたCFRCで最大の補強効果が得られた。よって、SF代替として検討すべきCFは45程度の集束度を有することが必要であると判断した。

4. 開発したCFを用いたCFRCの諸性状と配合設計法

4.1 実験概要

CFRCの諸性状は、SFRCの既往の試験結果⁴⁾同様、単位水量、細骨材率や繊維混入率等の諸要因の影響を受けると考えられる。本章では、前章の検討より選定したCFの集束度が45の場合のCFRCについて、これら諸要因とフレッシュ及び曲げ・せん断性状の関係を求め基本性能を確認した。また、SFが1本の棒状で等方・等質材料であるのに対し、CFはモノフィラメントを集束させた複合材料であることに注目する必要がある。すなわち、CFでは、①集束度のみならずコンクリートの練混ぜ条件(ミキサ種類、CF投入後の練混ぜ時間など)によっても解繊の程度が変化すること、②CFの剛性が低く折れ曲がりやすいこと、の2点をCFRC固有の性状であると判断して以下のように実験を計画した。

①はCFRC中のCFへのモルタルの吸収量、CFとマトリッ

クスとの付着性状さらにはCFの配向に影響するため、当然CFRCのコンシステンシー、力学性状に影響を及ぼすものと考えられる。よって、本実験ではミキサ種類を二軸強制練りミキサで一定とし、CF投入後の練混ぜ時間に着目し、CFRCの諸性状について検討することとした。

②より、粗骨材の最大寸法に対する繊維長さの比が硬化後の力学性状に及ぼす影響は、SFRCと必ずしも同様の傾向を示すとは断定できない。このため、繊維長さと粗骨材の最大寸法との関係がCFRCの力学性状に及ぼす影響についても検討を加えることとした。

最後に、これらの試験結果をとりまとめ、CFRCの配合と条件が変化した場合の補正值を示した。

(1) 使用材料およびCFRCの配合

本実験に用いた材料は、CFの集束度が全て45(12K-E)であること、粗骨材の最大寸法を20mm (FM=6.73)としたこと以外は表-3に示した実験と同じである。

本実験に用いたCFRCの基本配合を表-5に示す。全ての実験において、CFRCの練混ぜ条件及び方法は、基本的に図-2に示す実験と同じであるが、CF投入後の練混ぜ時間の影響を検討する場合は、CF投入後の練混ぜ時間のみ変化させた。

表-5 CFRCの基本配合

目標 スランプ	目標 空気量	Gmax (mm)	繊維長Lf (mm)	CF混入量 (vol%)	W/(C+EX) (%)	s/a [*] (%)	W (kg/m ³)	SP (C+EX) x(%)
5.0cm	4.5%	13	30	0.5	45	60	171	1.0
			40			65	175	
			50			70	183	
		20	30	0.5	45	54	168	1.0
			40			58	172	
			50			62	177	
		20	40	0.5	40	35	160	1.0
						57	166	
						60	176	
		20	40	0.625	45	62	180	1.0
						66	185	
						66	185	

注) *最適細骨材率

表-6 実験変数

Lf (mm) \ Gmax (mm)				
	5	13	20	40
30	—	○	●	—
40	○	○	●	○
50	—	○	●	—

注) ● : Lf毎に供試体寸法を変化させた曲げ試験も実施

(2) 実験要因と測定項目及び方法

CFRCの諸性状に及ぼすCF投入後の練混ぜ時間の影響を検討するために、CF投入後の練混ぜ時間を基本の1分に対して、30秒から5分の間で7水準に変化させた。

また、表-6に示す実験変数を要因として、CFRCの曲げ、せん断性状に及ぼす粗骨材の最大寸法(Gmax)に対する繊維長さ(Lf)の影響を検討した。

その他、CFRCの基本性状として、細骨材率とスランプの関係、繊維混入率(Vf=0.5~1.0%)または水セメント比(W/C=35, 40, 45%)とスランプ及び曲げ、せん断性状との関係、単位水量、空気量がスランプに及ぼす影響についても検討を加えた。

4.2 フレッシュコンクリートの諸性状に関する

実験結果と考察

(1) CF投入後の練混ぜ時間とスランプの関係

CF投入後の練混ぜ時間とスランプの関係を図-10に示す。図より明らかなように、CF混入後の練混ぜ時間が長くなるほど、スランプは低下する傾向を示した。これは、練混ぜ時間が長くなるにつれてCFストランドの解繊が進みフィラメント間へのモルタルの吸収量が増加しているためである。スランプは練混ぜ時間30秒から1分にかけて大きく低下し、その後徐々に低下し2分30秒でスランプは2.0cmとなった。ただし、1~2分までの間では5±1.5cmの目標範囲内のスランプを満足しており、増厚コンクリートとしては十分に施工可能と考えられる。しかしながら、CFRC製造に関しては、練混ぜ時間、ミキサ種類、運搬方法及び運搬時間等を考慮に入れる必要があると思われる。

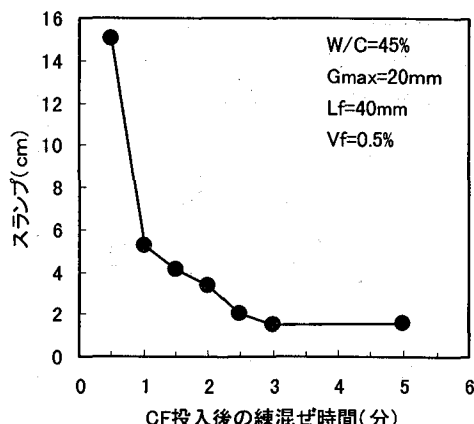


図-10 CF投入後の練混ぜ時間とスランプの関係

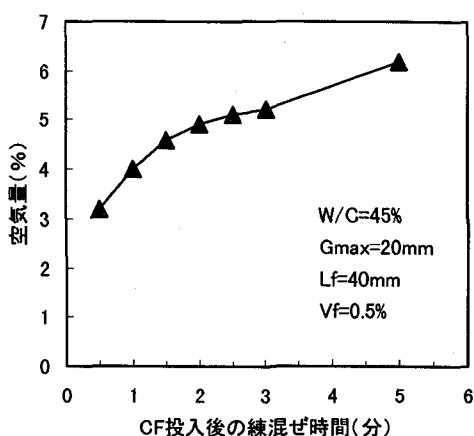


図-11 CF投入後の練混ぜ時間と空気量の関係

(2) CF投入後の練混ぜ時間と空気量の関係

CF投入後の練混ぜ時間と空気量の関係を図-11に示す。図より明らかなように、CF混入後の練混ぜ時間が長くなるほど、空気量は増加する傾向を示し、30秒~5分間で約3%増加した。これは、練混ぜによりCFストランドの解繊が進行し、CFRCのエントラップドエアーが増大したためと考えられる。ただし、練混ぜ時間が1~3分の範囲では空気量の増加は1%程度であり、さほど顕著ではなかった。なお、空気量が練混ぜ時間の影響を受けることに対しては、スランプと同様に、注意を払う必要がある。

(3) 細骨材率とスランプの関係

図-12は繊維混入率Vf=0.5%、Gmax=20mm、繊維長さLf=40mmのCFRCについて、細骨材率とスランプ及び沈下度の関係を求めたものである。これより、単位水量、単位セメント量および繊維混入率を一定とし細骨材率のみを変化させると、CFRCの場合にもSFRC同様、スランプが最大で沈下度が最小となる最適細骨材率が存在することが明らかである。

その他フレッシュ状態におけるCFRCの基礎的な性状について検討した結果、以下の諸点が明らかとなった。

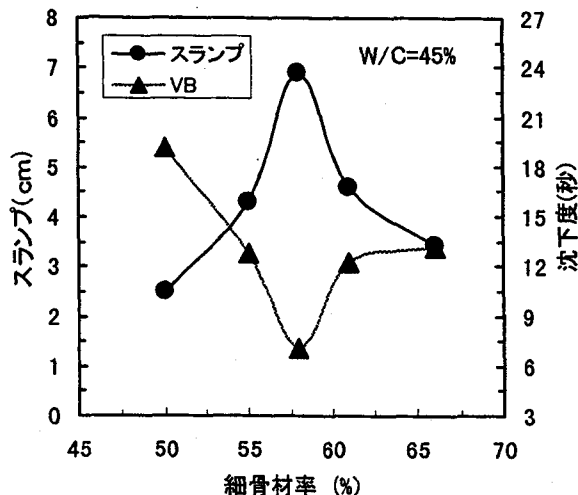


図-12 コンシステンシーと細骨材率の関係

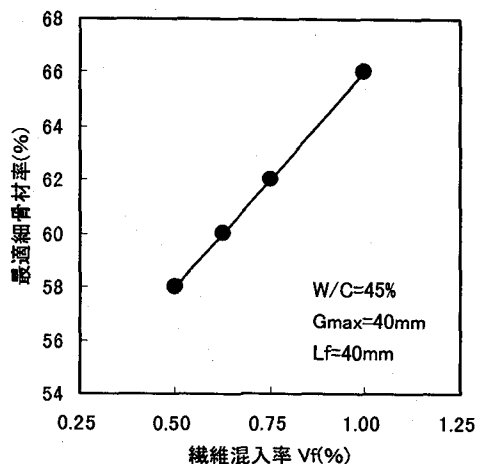


図-13 繊維混入率と最適細骨材率の関係

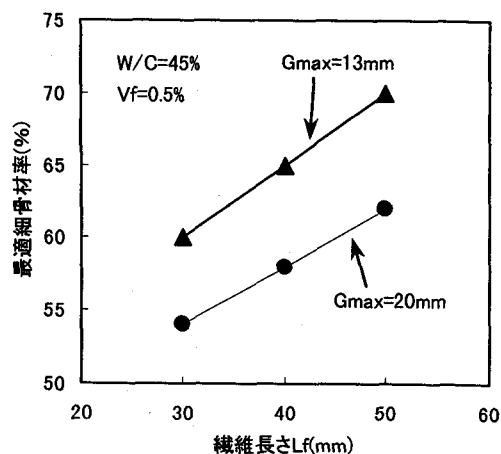


図-14 繊維長さと最適細骨材率の関係

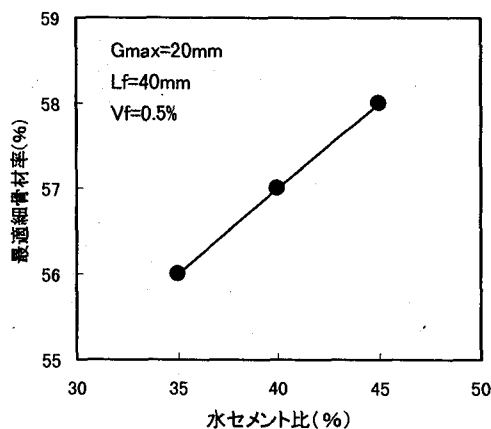


図-15 水セメント比と最適細骨材率の関係

- ① 最適細骨材率は、繊維混入率、繊維長さ及び水セメント比が大きくなるほど、粗骨材の最大寸法が小さくなるほど増加する(図-13～16)。
- ② 単位水量が増加するに従ってスランプは直線的に大きくなり、 $V_f=0.5\%$ の場合、CFRCのスランプを1cm変化させるために必要な単位水量の補正量は1.5kgである(図-17)。
- ③ 所要のスランプを得るのに必要な単位水量は、繊維混入率、繊維長さが大きくなるほど、粗骨材の最大寸法が小さくなるほど増加する(図-18～20)。
- ④ 所要のスランプを得るのに必要な単位水量は、水セメント比の増大に伴いほぼ直線的に増加する。これは、 W/C が増加するほどコンクリート中の微粒部分が減少し繊維の分散性能を低下させるためと考えられる(図-21)。
- ⑤ 空気量の増大に伴いスランプは直線的に大きくなり、空気量1%に対するスランプの変化量は約2cmである

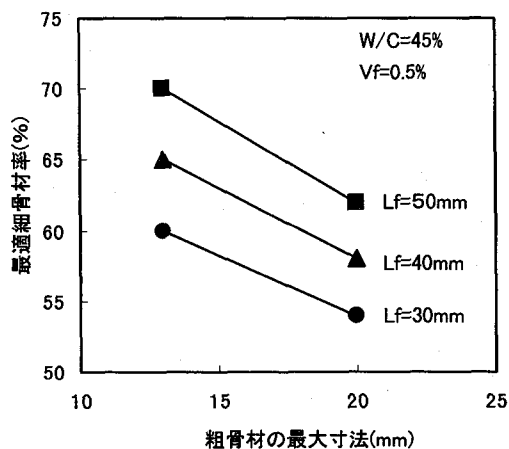


図-16 粗骨材の最大寸法と最適細骨材率の関係

る(図-22)。

これらの実験結果については、配合と各種補正值として表-7にとりまとめた。

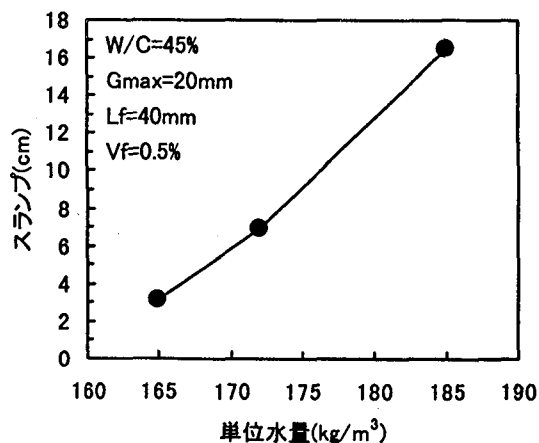


図-17 単位水量とスランプの関係

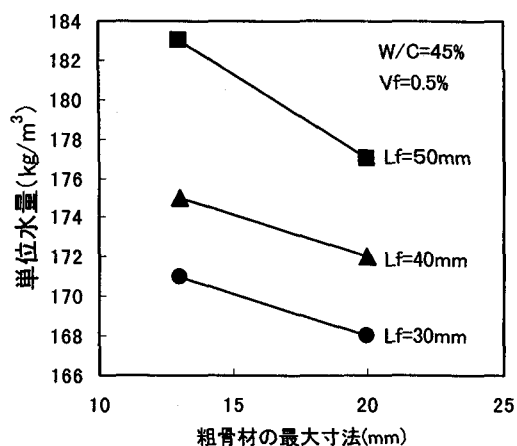


図-20 スランプ5cmを得るのに必要な単位水量とGmaxの関係

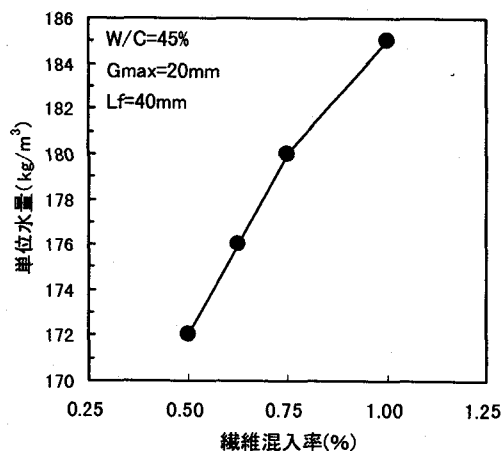


図-18 スランプ5cmを得るのに必要な単位水量とVfの関係

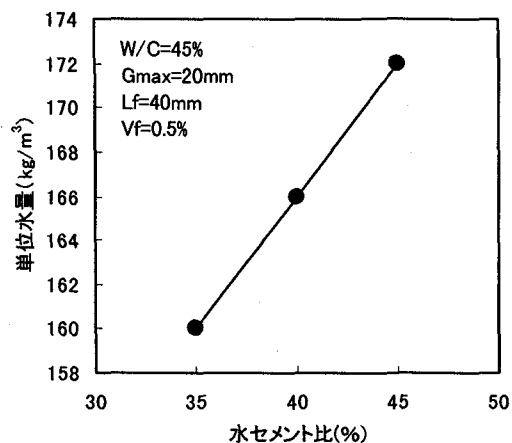


図-21 スランプ5cmを得るのに必要な単位水量とW/Cの関係

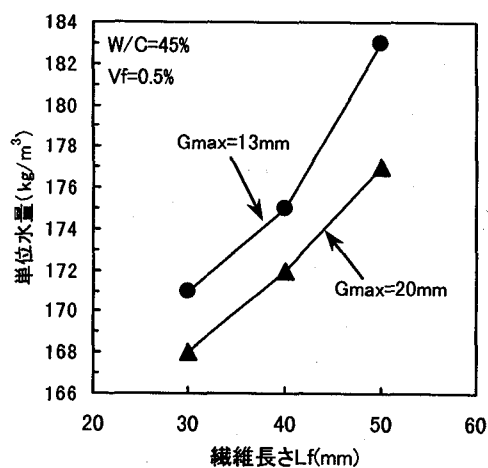


図-19 スランプ5cmを得るのに必要な単位水量とLfの関係

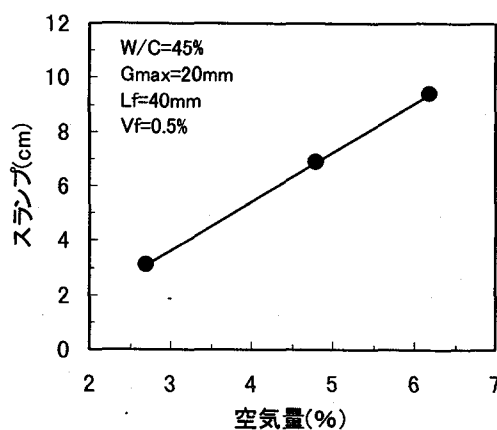


図-22 CFRCの空気量とスランプの関係

4.3 硬化コンクリートの諸性状に関する

実験結果と考察

(1) CF投入後の練混ぜ時間と曲げ性状の関係

CF投入後の練混ぜ時間と曲げ性状の関係を図-23に示す。図より明らかなように、曲げ強度は練混ぜ時間が1～5分の範囲では顕著な差は認められなかった。一方、換算曲げ強度は30秒では1分よりもやや小さく、1分で最大値となり、その後練混ぜ時間が長くなるほど低下する傾向を示した。この原因は、曲げ破壊面の観察から以下のように考えられる。すなわち、CFRCの練混ぜ時間が短かすぎる場合、CFの解繊が少なくマトリックスとの付着が小さくなるため、引き抜けが生じる。一方、練混ぜ時間が長くなるほどストランドの解繊が著しく繊維自身の剛性が低下し、粗骨材を介し破壊面に有効に繊維が配向せず、CFが引張力を有効に分担できなくなっている。したがって、CFRCの製造条件が異なる場合には、曲げ性状を最大限に引き出せるCF投入後の練混ぜ時間を検討する必要がある。

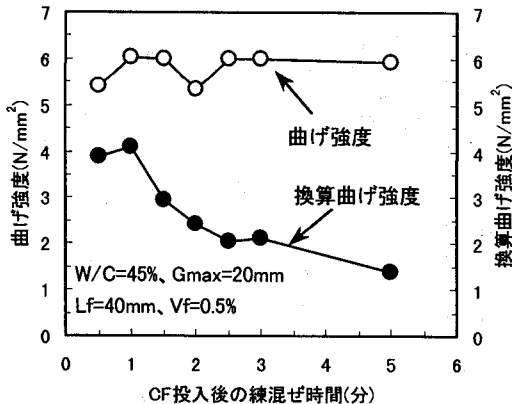


図-23 曲げ強度、換算曲げ強度とCF投入後の練混ぜ時間の関係

(2) 曲げ、せん断性状に及ぼす粗骨材の最大寸法に対する炭素繊維長さ(G_{max}/L_f)の影響

繊維長さを一定とし粗骨材の最大寸法を変化させた場合及び逆に繊維長さを変化させた場合の G_{max}/L_f と曲げ強度、換算曲げ強度の関係を図-24に示す。ここで、繊維長さを変化させた場合、繊維長さと供試体寸法の比が一定となるよう供試体寸法を変化させている。これは、幾何学的相似を確保することにより供試体中の繊維の配向状態を同等とすることを目的として実施したものである。また、繊維長さを40mmで一定とした場合のせん断強度、せん断タフネスと G_{max}/L_f の関係を図-25に示す。図より、CFRCの曲げ強度、換算曲げ強度、せん断強度・タフネスともSFRC同様 $G_{max}/L_f=0.5$ 、すなわち使用した繊維長さ $L_f=40mm$ の1/2に相当する $G_{max}=20mm$ で最大値を示すことが明らかである。

(3) 繊維混入率及び水セメント比と曲げ、せん断性状の関係

図-26に繊維混入率と曲げ強度、換算曲げ強度の関係

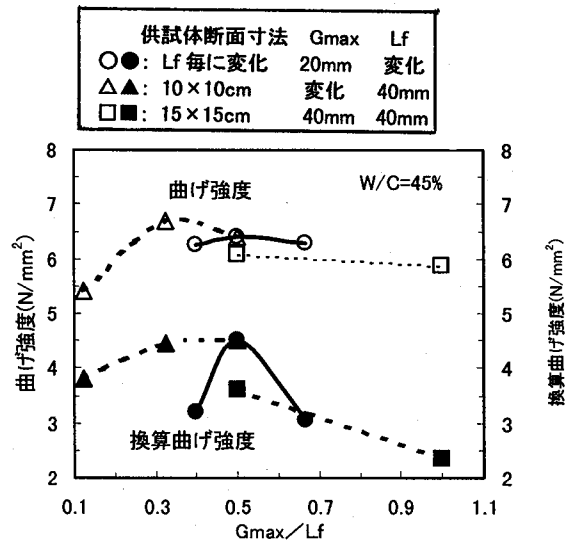


図-24 曲げ強度、換算曲げ強度と G_{max}/L_f の関係

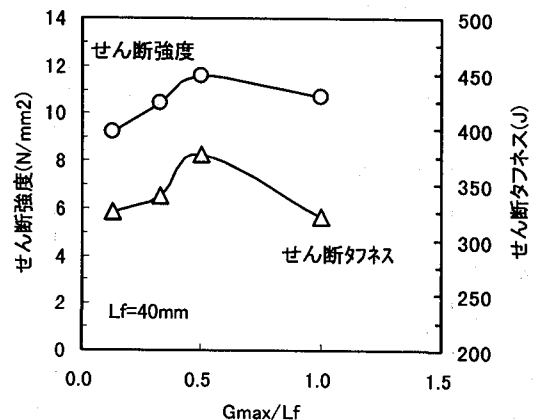


図-25 せん断強度・タフネスと G_{max}/L_f の関係

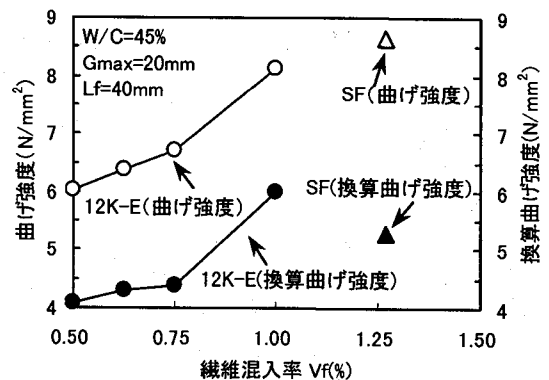


図-26 曲げ強度、換算曲げ強度と繊維混入率の関係

を、図-27に繊維混入率とせん断強度、せん断タフネスの関係を示す。これらの図より明らかなように、CFRCの場合、曲げ強度、換算曲げ強度、及びせん断強度・タフネスとも繊維混入率の増加に伴い向上した。CFRCとSFRCを同一の W/C で比較した場合、CF混入率が0.75～1.0%程度で、強度特性は若干及ばないもの、タフネスでは汎用品である波型せん断ファイバーを用いたSFRC

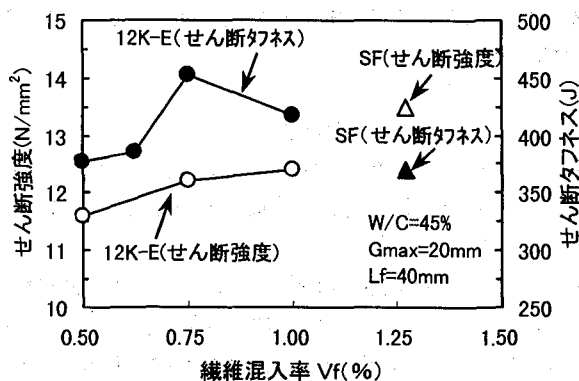


図-27 せん断強度・タフネスと繊維混入率の関係

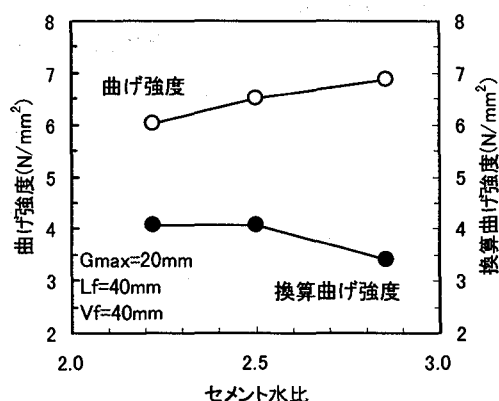


図-28 曲げ強度、換算曲げ強度とセメント水比の関係

($V_f=1.27\text{vol.}\%$) と同等以上のものが得られる。また、曲げ強度は、図-28に示すようにセメント水比が大きくなるに伴い直線的に増加するが、換算曲げ強度はセメント水比に一義的に支配されない。これは、曲げ強度は今回の検討範囲内の繊維混入率では、ほぼひび割れ発生荷重に相当し、当然本質的にマトリックスの強度に支配される傾向が強いが、換算曲げ強度は、マトリックスの強度よりも繊維の配向状態や引張力分担能の影響を大きく受けるためと考えられる。

4.4 CFRCの配合設計法の提案

ここでは、本章での試験結果をとりまとめ、既に確立されているSFRCの配合設計法を参考にCFRCの配合設計法を提案した。なお、配合目標は、道路橋床版増厚コンクリートを対象としたスランブが5cm程度のCFRCとした。

前提条件として、CFRCの配合設計では、CFRCのフレッシュ及び硬化時の性能がCFのコンクリート中での解繊状態に大きく依存するため、CF投入後の練混ぜ時間を使用するミキサ種類に応じて検討しておく必要がある。しかしながら、この点を除けば、SFRCと同様の手順で配合設計を行うことができる。

すなわち、最初に所要の強度性状、耐久性および

表-7 CFRCの配合と各種補正值

W/C (%)	Gmax (mm)	高性能AⅡ減水剤 (SP) を用いたコンクリート			
		スランブ (cm)	空気量 (%)	最適細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)
45	13	5.0	4.5	65	175
	20			58	172
SP添加率：結合材×1.0%, 繊維混入率：0.5%, 繊維長さ：40mm					
上記の条件が異なる場合に対する補正					
条件の変化			細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)	
炭素繊維混入率0.5%の増減に対して			±8	±10	
水セメント比0.05の増減に対して			±1	±6	
スランブ1cmの増減に対して			補正しない	±1.5	
空気量1%の増減に対して			±1	±3.0	
炭素繊維長さ10mmの増減に対して			±4	±5	
ただし、この表は以下の条件におけるものである。					
① 炭素繊維の形状寸法：フィラメント数12K、繊維長さ30～50mm					
② 繊維混入率：0.5～1.0%					
③ 細骨材はF _W =2.90のもの、粗骨材は砕石を使用し良質の高性能減水剤を用いる					
④ 水セメント比：35～45%程度、スランブ：約5cm					

水密性、気象作用などから、水セメント比、空気量、繊維混入量が選定され、部材寸法、使用材料などの施工条件から、スランブ、空気量及び粗骨材の最大寸法が選定される。そして、選定された粗骨材の最大寸法に応じて繊維長さが選定される(最大寸法の2倍程度が最適)。次に、試験練りにより、ミキサ種類に応じて練混ぜ時間の検討を行い、所要の力学性能を満足するかどうかを判断する。試験の結果、満足していれば、表-7の各種補正值を活用し、所要のコンシステンシーを得るための最適細骨材率と単位水量を決定する。

表-7は今回の試験結果をCFRCの配合設計の過程で必要となる基本配合と各種補正值として示したものである。この表より、SFRC同様、繊維混入率及び繊維長さ、水セメント比、空気量などの条件がCFRCのコンシステンシーに影響を及ぼすことがわかる。従って、これら条件の変化に応じ、表-7に示す値だけCFRCの細骨材率または単位水量を補正する。なお、補正值としてはスランブ1cmの増減に対する単位水量の補正值が、SFRCに比べて若干小さい以外は、ほとんど同程度であった。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) CFの集束度を45、フィラメント数を12000本としたチョップトストランド状のCFを用いることによりSFRC代替用途に適用可能なCFRCが製造できる。このCFRCでは、練混ぜの過程でCFが適当に解繊、CFとマトリックスとの付着が確保され、かつ適度な剛性を有したCFが粗骨材を取り巻くように配向し、優れた補強効果を発揮する。
- (2) $G_{\text{max}}/L_f=0.5$ の場合に、曲げ、せん断等の強度性状及びエネルギー吸収能は最大値を示すことから、

CF繊維長さは、SF同様、粗骨材最大寸法の2倍が最適である。

- (3) 同一W/Cの場合、CF混入率 $V_f=1.0\%$ 弱でSFRC ($V_f=1.27\%$)と同等の力学性能を有するCFRCが汎用的な方法にて製造できる。この場合のCFRCの単位水量、細骨材率等はほぼSFRCと同等であり、特に過大な水量等を必要としない。
- (4) CF投入後の練混ぜ時間は、CFRCのコンシステンシー、曲げ性能に大きく影響するため、CFRCを製造する場合、この点を事前に考慮する必要がある。しかしながら、この点を除けば、SFRCと同様の方法にて配合設計並びに製造を行うことができる。

以上の成果は、CFRCの構造部材への適用のための基礎的技術として有効に活用できるものと思われる。今後は、CFRCの凍結融解抵抗性、乾燥収縮及び耐腐食性な

どの環境耐久性、さらには道路橋床版や波浪を受ける海洋構造物に作用する繰返し荷重による疲労耐久性の評価が課題となる。

参考文献

- 1) 松井繁之、木村元哉、養毛 勉：増厚工法によるRC床版補強の耐久性評価、構造工学論文集Vol. 38A, pp. 1085-1096, 1992.
- 2) 水越睦視、鹿熊文博、松井繁之、島内洋年：鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労性状、コンクリート工学年次論文報告集Vol. 16, No. 1, pp. 1055-1060, 1994.
- 3) 峰松敏和：鋼繊維補強コンクリートのせん断性状に関する研究、日本大学学位論文, pp. 82-84, 1981.
- 4) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用一、オーム社, pp. 131-134, 1981.

(1997年9月26日受付)