

論文 構造物の高性能化に向けた高靱性繊維補強セメント複合材料の開発

諏訪田 晴彦*1・福山 洋*2・磯 雅人*3

要旨：本論文では、構造物の高性能化に向け、ひび割れ発生後も強度低下せず、高い靱性を示すような高靱性繊維補強セメント複合材料について、その目標力学特性を実現し、かつフレッシュ時の適度なワーカビリティを確保し得るための調合と練り混ぜ方法に関する基本的考え方を示した上で、繊維の種類、繊維長、繊維の混入率および水セメント比を因子として練り混ぜ実験および円柱供試体の引張、圧縮試験を行い、施工性と力学特性を検討した。その結果、各因子が施工性および力学特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、今後の開発における方向性を示した。

キーワード：靱性、繊維補強セメント複合材料、力学特性、施工性、練り混ぜ、調合

1. はじめに

近年、高い靱性能と微小ひび割れの分散による自己損傷低減性を兼ね備えた高靱性繊維補強セメント複合材料(以下、HPFRCC:High Performance Fiber Reinforced Cement Composite)が開発されてきた^{1),2)}。HPFRCCとは、従来の短繊維補強セメント材料(以下、FRC)の変形能力を大きく高めたもので、その特徴は、図-1に示すように引張応力下において、最初のひび割れが発生した後もひび割れ面を繊維が架橋し、次々に多数の微細なひび割れ(以下、マルチプルクラッキング)を発生させることにより、数%のひずみ度まで最初のひび割れ発生時の応力度を維持、もしくは、応力上昇する(以下、ひずみ硬化挙動)というものである。著者らは、この材料を地震時のエネルギー吸収デバイス等の構造要素として利用し、より高い安全性、修復性および耐久性を有する構造物の実現を目指しているが、そのための第一段階として、各種の短繊維を用いてHPFRCCの開発を行っている。

本論では、HPFRCCの目標力学特性(マルチプルクラッキング、ひずみ硬化挙動)とワーカビリティを確保するための、調合および練り混ぜ方法に関

する基本的考え方を示した上で、これに基づき、練り混ぜ実験および力学特性試験を行い、施工性と力学特性を検討した結果を報告する。

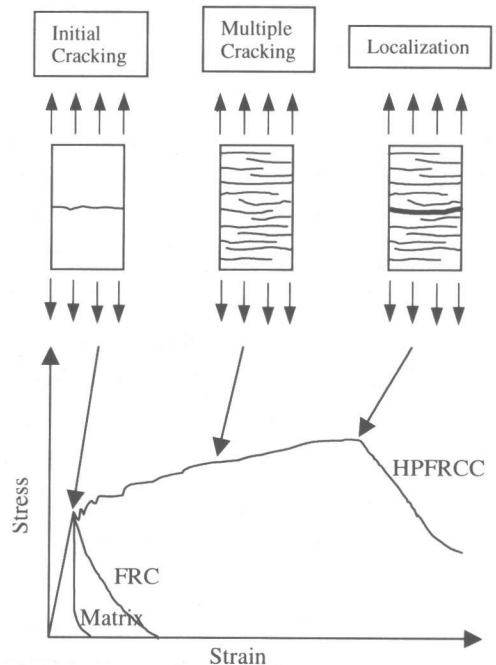


図-1 HPFRCCの引張特性概念図¹⁾

*1 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部構造基準研究室研究官 (正会員)

*2 独立行政法人建築研究所建築構造グループ上席研究員 工博 (正会員)

*3 東急建設(株)技術研究所 工修 (正会員)

2. 調合および練り混ぜに関する基本的考え方

HPFRCCのひずみ硬化挙動を実現するための必要条件は、ひび割れ面で繊維により架橋される力が、マトリックスのひび割れ時の引張力を上回ることであり、この比が大きいほど多くのひび割れが発生しやすくなり、靱性能が向上する。これには繊維の強度、マトリックスの強度、繊維とマトリックスの付着強度、繊維の混入量、マトリックスの空気量などの多くの要因が影響するが、これらは同時に繊維の分散性やHPFRCCの施工性にも関係する。一般に、HPFRCCの調合に対する条件は、力学特性の観点と施工性や繊維の分散性の観点からでは相反する場合が多く、これがHPFRCCの実現を難しくしている。しかし、これは逆に考えると、多くの影響因子を適切にコントロールできれば、様々な種類のHPFRCCを実現できることを意味している。そこで、本研究では、上記の必要条件に対し主たる影響を及ぼすと思われる因子として、繊維の種類、繊維の混入率(Vf)、繊維長(Lf)および水セメント比(W/C)を取り上げた。

HPFRCCの調合および練り混ぜにおいて施工性の観点から考慮すべき点は、マトリックス中での繊維の十分な分散と良好なワーカビリティの確保である。一般にマトリックス中での繊維の分散性を確保するためにはマトリックスに適度な粘性が必要であるが、一方、ワーカビリティを確保するためにはマトリックスの粘性は低い方が好ましい。著者らがこれまでに行っていた練り混ぜは、セメント、砂、シロカフュームおよび増粘剤を空練りした後、所定の水と高性能AE減水剤を投入してマトリックスを練り混ぜ、そこへ繊維を投入する方法であった。しかし、

この方法は、マトリックスの粘性を増粘剤、ワーカビリティを高性能AE減水剤によってコントロールするため、水セメント比を変化させること(マトリックスの強度を変化させること)が容易ではなかった。そこで、分散性とワーカビリティを両立させるため、次のような練り混ぜ方法を考えた。すなわち、まず繊維を分散させるために必要な粘性を持った比較的水セメント比の小さなマトリックスを練り混ぜ、そのマトリックスによって繊維の十分な分散を図る。その後、所定の水セメント比となるように水を投入し、また必要に応じて高性能AE減水剤(以下、SP)を投入することにより流動性も確保するというものである。

3. 実験計画

3.1 練り混ぜ実験

練り混ぜ実験では、前章に示した方法に基づき、繊維の種類、Vf、LfおよびW/Cをパラメータとして、繊維の分散性および適度なワーカビリティを確保し得る最適な調合を検討した。表-1に使用材料一覧を、表-2に使用繊維一覧をそれぞれ示す。表-1中のPVA①、②およびPEは合成繊維の単繊維(素線)、SCは、150 μ mのスチール単繊維の5本より線である。なお、練り混ぜには、容量20リットルのモルタルミキサーを使用した。

3.2 力学特性試験

引張試験は、円柱供試体(直径100mm、高さ

表-1 使用材料一覧

使用材料(記号)	種類
セメント(C)	普通ポルトランドセメント
細骨材(S)	接着剤用硅砂7号
混和剤(SP)	高性能AE減水剤

表-2 使用繊維一覧

使用繊維	比重 (g/m ³)	繊維径 (μ m)	繊維長 (mm)	破断強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (Gpa)
ビニロン(PVA)①	1.30	40.8	15.0	1850	43.9
ビニロン(PVA)②	1.30	39.0	12.0	1600	40.0
ポリエチレン(PE)	0.97	12.0	10.0	2500	75.0
			12.5		
			15.0		
スチールコード(SC)	7.85	405.0	32.0	1835	206.0

200mm)を用いた引張・圧縮繰返し試験方法³⁾(図-2)によって行った。この方法は、繊維が3次元配向されたHPFRCCの平均的な挙動を調べるために開発されたものである。なお、圧縮試験もこの試験方法で可能であるが、供試体端部にチャックが取り付けくことによる拘束効果により、最大圧縮応力度以降の下り勾配がJIS A 1108に準拠した圧縮強度試験に比べ緩くなるのがわかっているため、圧縮試験は、JIS A 1108の方法に準拠して行った。

4. 実験結果

4.1 練り混ぜ実験結果

表-3に練り混ぜ実験を行った調合および観察結果(フロー値、繊維の分散性および施工性)一覧を示す。なお、観察結果の内、フロー値はJIS R 5201のフロー試験によったが、繊維の施工性および分散性の評価は、目視(フロー試験時にマトリックスと繊維が一体で流動しているかの確認)および手触り(マトリックス中での繊維の固まりの確認)によった。なお、W/C=30としたPVA①-1、PVA②-1およびS/Cが比較的大きいSC-1、SC-2の練り混ぜは、粉体投入(40秒間練り混ぜ)→全量の水

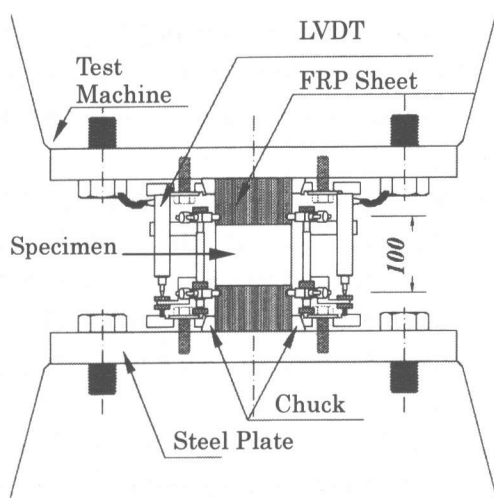


図-2 HPFRCCの引張・圧縮繰返し試験方法

(W/C=30%)とSP(SP/C=1.0%)を投入(2分30秒間練り混ぜ)→繊維を3回に分けて投入(それぞれ30秒間練り混ぜ)→かき落とし→練り混ぜ(3分30秒)→排出という手順で行い、その他の練り混ぜは、粉体投入(40秒間練り混ぜ)→W/C=40%の水を投入(2分30秒間練り混ぜ)→繊維を3回に分けて投入(それぞれ30秒間練り混ぜ)→かき落とし→練り混ぜ(1分30秒)→残りの水を投入(2分間練り混ぜ)→排出という手順で行った。繊維分散のためのモ

表-3 練り混ぜ実験の調合および観察結果一覧

調合番号	W/C (%)	S/C (%)	SP/C (%)	Vf (vol%)	Lf (mm)	フロー平均値 (mm)	分散性	施工性	備考
PVA①-1	30	40	1.0	1.50	15.0	157	○	△	
PVA①-2	45	40	0.0	1.50	15.0	174	○	○	
PVA①-3	60	40	0.0	1.50	15.0	178	○	◎	分離気味
PVA②-1	30	40	1.0	1.50	12.0	181	◎	○	
PVA②-2	45	40	0.0	1.50	12.0	188	◎	◎	
PE-1	45	40	0.0	1.00	15.0	170	○	○	
PE-2	45	40	0.0	1.25	15.0	167	△	○	
PE-3	45	40	0.0	1.50	15.0	153	△	△	
PE-4	45	40	0.0	1.50	10.0	159	△	○	
PE-5	45	40	0.0	1.50	12.5	158	△	○	
PE-6	60	40	0.0	1.50	15.0	179	△	◎	分離気味
SC-1	30	70	1.0	2.00	32.0	168	◎	△	
SC-2	45	150	1.0	2.00	32.0	167	◎	△	

分散性◎:マトリックス中に繊維の固まりが全くない状態

分散性○:マトリックス中に繊維の固まりがわずかにある状態

分散性△:マトリックス中に繊維の固まりがある状態

施工性◎:マトリックスと繊維の絡みが良く、かつ非常に軟らかい状態

施工性○:マトリックスと繊維の絡みは良いが、若干硬い状態

施工性△:マトリックスと繊維の絡みが若干悪く、かなり硬い状態

W/C:水セメント比(重量比)

S/C:砂セメント比(重量比)

SP/C:高性能 AE 減水剤のセメントに対する重量比

Vf:繊維体積混入率

Lf:繊維長

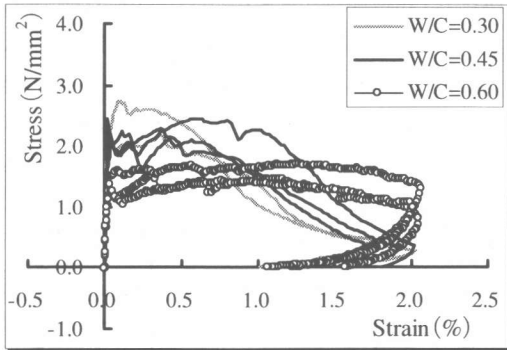
ルタルの適度な粘性の付与と、繊維投入後の複合材料の適度なワーカビリティの確保を目的として行った本練り混ぜ実験から得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 同一調合であっても、繊維の種類によって分散性や施工性は異なる。特に SC の場合、径が太く、比重が大きいので、PVA や PE と同じ調合にすると繊維がマトリックスの底に沈んでしまう。そのため、S/C を比較的大きくする必要がある。
- 2) Vf は分散性および施工性に大きく影響する。一方、Lf の影響は比較的小さい。これは、Lf を固定して Vf を小さくした場合には、混入される繊維の本数は減るが、Vf を固定して Lf を小さくしても、混入される繊維の本数は増えるためであると考えられる。
- 3) 水を2回に分けて投入する本方法は、分散性とワーカビリティを両立する上で有効であるこ

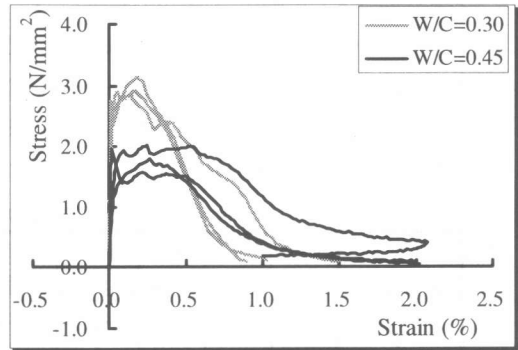
とが確認された。なお、W/C=30%の練り混ぜでは、繊維投入前のマトリックスに全量の水とともにSPを適量用いる必要がある。また、W/C=45%および60%の練り混ぜでは、繊維投入前のマトリックスとしてはW/C=40%程度が繊維の分散に必要な粘性を確保する上で適当であり、繊維の分散性は概ね良好であった。

4.2 力学特性試験結果

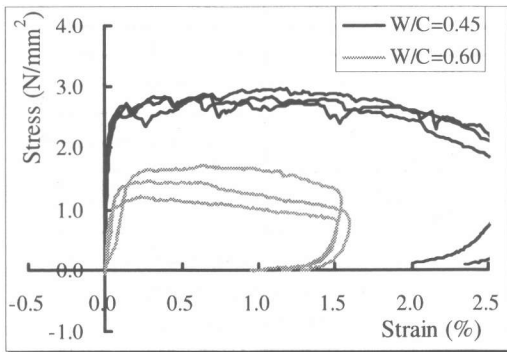
試験は練り混ぜ実験の各バッチについて、圧縮および引張をそれぞれ3体ずつ行った。図-3(a)~(d)に引張試験より得られたPVA①、PVA②、PEおよびSCを用いたHPFRCCの引張応力度—ひずみ度関係を示す。この図は、W/Cが一軸引張特性に及ぼす影響を使用繊維ごとに比較したものである。PVA①-HPFRCCおよびPVA②-HPFRCCでは、W/Cが大きいものはひび割れ強度は低い、大きなひずみ度までひずみ硬化挙動を示しており、W/Cが小さいものはひずみ度が小さい領域で応力



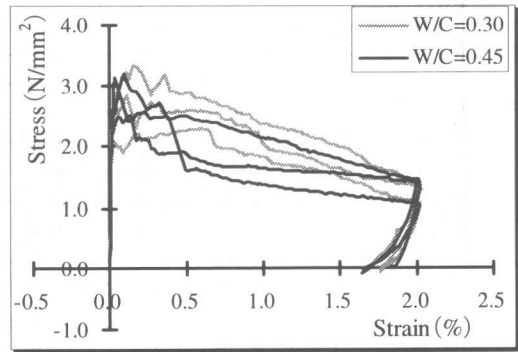
(a) PVA①-HPFRCC



(b) PVA②-HPFRCC



(c) PE-HPFRCC



(d) SC-HPFRCC

図-3 引張応力度—ひずみ度関係

低下を生じている。また、実験時の観察において、W/Cが大きいものは多数のひび割れが発生したが、W/Cが小さいものはひび割れが2, 3本発生した後、一本のひび割れが拡幅した。これは、PVAがマトリックスとの間に比較的高い化学的付着力を有していることに加え、W/Cが小さい場合、マトリックスが緻密になるため繊維とマトリックスの機械的付着力が高くなるが、その一方でマトリックスの引張強度も高くなるため、ひび割れ発生と同時に、より大きな解放力がひび割れをまたぐ繊維に作用し、これにより繊維が破断もしくは引き抜けているためだと考えられる。これに対し、PE-HPFRCCでは、W/C=0.45のものが、1.5%を上回る大きなひずみ度までひずみ硬化挙動を示すとともに、実験時の観察においても顕著なマルチプルクラッキングが見られた。一方、W/C=0.6では、著しい応力低下は見られないが、実験時の観察ではマルチプルクラッキングは見られなかった。これは、PEはPVAと異なりマトリックスとの化学的付着力をほとんど有していないこと、繊維の破断強度が高いためW/Cを小さくして繊維とマトリックスの機械的付着力をある程度まで高める必要があることを示唆している。SC-HPFRCCでは、ひずみ硬化挙動はあまり顕著ではなく、約0.2~0.7%程度のひずみ度から緩やかに応力低下しているが、実験時の観察において、マルチプルクラッキングは確認されている。W/C=0.30の方が0.45に比べ若干大きな靱性能を示しているが、他の繊維に比べ、顕著な差は見られない。

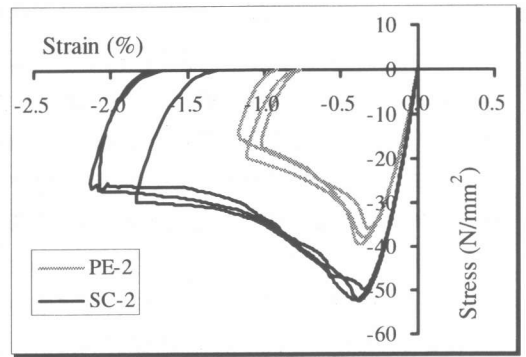
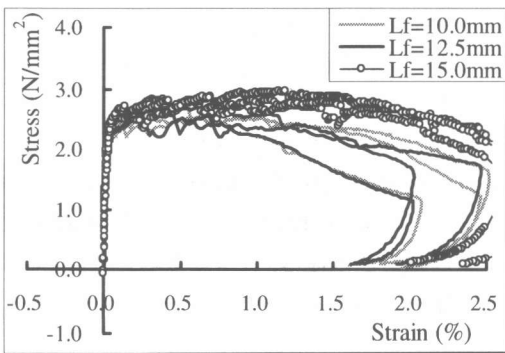


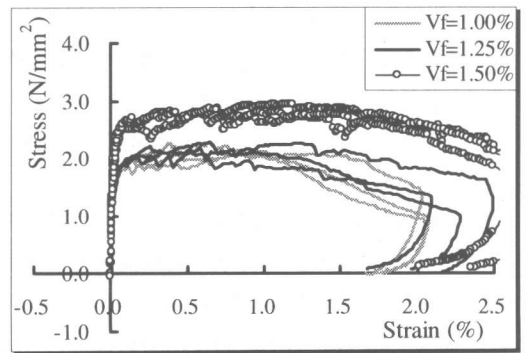
図-4 圧縮応力度—ひずみ度関係

一方、図-4は、W/C=0.45としたPE-HPFRCCとSC-HPFRCCの圧縮応力度—ひずみ度関係を比較したものであるが、PE-HPFRCCが最大圧縮応力度 37.8N/mm^2 (3体の平均値)を過ぎた後、ひずみ度1.0%程度で最大圧縮応力度の約半分に応力度が低下しているのに対し、SC-HPFRCCは、最大圧縮応力度が 51.5N/mm^2 (3体の平均値)と高いが、ひずみ度2.0%でも約 30N/mm^2 程度の応力を維持している。このように、用いる繊維によって特性が大きく異なることから、構造物へ適用する場合、適用部材の応力状態により適材を適所に使用していく必要があると考えられる。

図-5は、PEを用いて L_f および V_f を変化させ、引張試験を行った結果を示したものである。(a)は V_f を1.5%に固定し L_f を変化させた結果を、(b)は L_f を15mmに固定し V_f を変化させた結果を示したものである。(a)において、 $L_f=10\text{mm}$ と 12.5mm ではほとんど差は見られないが、 $L_f=15\text{mm}$ は、 10mm および



(a) L_f の影響 ($V_f=1.5\%$)



(b) V_f の影響 ($L_f=15\text{mm}$)

図-5 L_f および V_f が引張性状に及ぼす影響

12.5mmに比べ、ひび割れ発生時の応力度を保持できるひずみ度が大きい(ひずみ硬化挙動の領域が大きい)ことがわかる。一般に、 V_f を固定して、 L_f を小さくすると、ひび割れを架橋する繊維の本数は増えるため、付着応力度が同じであれば、付着長の影響は相殺され、引張性能は変わらないと考えられるが、ここでは明らかに差が見られる。これは、ひび割れ面を架橋する繊維が、全て均等に応力を負担しているわけではなく、各個撃破的に引き抜けていることによるものと推察される。ただし、 $L_f=10\text{mm}$ と 12.5mm では、ほとんど差が生じていないことから今後さらに検討する必要がある。(b)において、ひび割れ発生時の応力度を保持できるひずみ度を比較すると、若干の差であるが、 $V_f=1.0\% < 1.25\% < 1.5\%$ となる。さらに、 $V_f=1.0\%$ および 1.25% は、 $V_f=1.5\%$ に比べ、全体的に応力度が低いことがわかる。これは、 L_f を固定して V_f を大きくすると、マトリックス中に混入される繊維の本数が増大するため、繊維とマトリックスの付着応力度が一定であると仮定すると、 V_f が大きいほど(繊維の本数が多いほど)架橋力が増大し、より多くのひび割れを発生させることにより、高い靱性能が得られたと推察される。本実験では靱性能に及ぼす影響とともに、応力度に及ぼす影響も顕著であった。

5. まとめ

HPFRCC では、各繊維ごとに最適な調合と練り混ぜ方法が必要であることと、それらの調合により得られる引張靱性は、繊維の種類やその他の様々な因子によって、大きく変わってくることを示した。さらに、繊維によっては、引張のみならず圧縮に対しても靱性能の向上が見込まれることを示した。

以下に、本研究で得られた具体的な知見を示す。

- 1) HPFRCCの調合および練り混ぜ方法に関する基本的考え方を示し、練り混ぜ実験および力学特性試験の結果より概ねその妥当性は確認できた。しかし、ワーカビリティの確保のため、マトリックスの粘性をできる限り低く抑えた本方法は、マトリックスと繊維の絡みおよび分散性

に若干の不安を残す結果であった。これらを改善する方法としては、増粘剤を適量用いることが有効であると考えられるが、ワーカビリティを悪化させないようその使用量には注意する必要がある。

- 2) 最適な調合および練り混ぜは、繊維の種類により異なることが明らかとなった。
- 3) 同一の繊維を用いても W/C や V_f の違いにより施工性および力学特性は異なることを示した。
- 4) 本実験の範囲では、 V_f を固定して、 L_f を変化させた場合、力学特性には影響を及ぼすが、施工性にはほとんど影響しなかった。

謝辞

本研究は、日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」におけるセメント系複合材料WG(主査:松崎育弘東京理科大学教授)のもとで行われたものである。実験にご協力頂いた(社)建築業協会のメンバーならびに繊維をご提供いただいた株式会社クラレ、東洋紡績株式会社、東京製綱株式会社に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - Volume2 (HPFRCC-95) : Pre-Proceedings of the Second International Workshop on HPFRCC, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, 1995.6
- 2) 福山洋, 倉本洋: スマートコンクリート—高じん性コンクリート—, コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.104~109, 2001.1
- 3) 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性型セメント系複合材料の一軸引張—圧縮繰り返し試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.539, pp.7~12, 2001.1