

## 論文 ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC の流動性に関する実験的研究

小川 敦久\*1・末森 寿志\*2・斉藤 忠\*3・Victor C. Li\*4

**要旨：**ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC のワーカビリティ確保及び繊維の均一な分散を目的として、繊維の前処理、球状微粉末と化学混和剤の適用について検討を行った。その結果、1) 繊維を飽和吸水状態で用いる、2) 増粘剤を水溶液として添加する、3) 球状微粉末として分級フライアッシュを添加することにより、繊維の均一分散を達成し、なおかつフロー値 200 mm を越える良好な流動性を有する調査を実現した。

**キーワード：**PVA 短繊維、高靱性セメント系複合材、流動性

## 1. はじめに

高靱性セメント系複合材（高靱性 FRC、以下 ECC と略す）は従来の短繊維補強セメント系複合材（以下 FRC）と比較して著しく高い応力変形能を有する材料として位置づけられる。その特徴は、引張応力下における微細なひび割れ分散と、Strain-hardening による終局破壊時の応力上昇であり、ECC のような高靱性な材料を適用することにより、建築構造物や土木構造物の高性能化、あるいは補修、補強などへの利用が期待されている<sup>1)</sup>。しかしながら、ECC においても 1～2 体積%程度の短繊維が FRC と同様に添加され、用いられる短繊維はセメント、砂などの無機粒子に比べて著しくアスペクト比が大きいことから、フレッシュ状態での流動性の低下を引き起こしやすい。またこのような短繊維の分散は不均一になりやすく、施工方法が著しく制約されるなどの問題がある。ECC を実用化するためにはこれらの課題を解決する必要がある。本研究は、適度なワーカビリティを確保し、複合材中における短繊維の均一な分散を達成するための、ECC の練混ぜ方法に関する。

短繊維を添加したセメント系複合材の練混ぜ

においては、練り上がり時の流動性の確保と、短繊維の均一な分散の両立が不可欠である。一般的には、短繊維添加したセメント系複合材において短繊維の均一分散を達成するには、フレッシュマトリックスの高い粘性が必要である。フレッシュマトリックスの粘性を高くするには単位水量の低減、セルロース系化合物などの増粘剤の添加などが知られている。しかしながら、粘性が上がることによって流動性の低下が避けられず、また増粘剤の添加量によっては硬化遅延を引き起こすなどの問題がある。一方、フレッシュマトリックスの流動性を高める方法としては、高性能減水剤の併用が有効である。しかしながら、フレッシュマトリックスの粘度が低すぎると材料分離を生じやすくなり、特に短繊維はフロック状に再凝集しやすくなる。

以上述べたように、短繊維の均一分散とフレッシュマトリックスの高流動を両立させるには複雑な要因が多いため、繊維、混和剤の分割添加を行ったり<sup>2)</sup>、施工現場での練混ぜ担当者の経験にたよって施工したりしているのが実状である。本研究では実験を通じて各種混和剤の使用によりワーカビリティに優れた ECC の調合

\*1 (株)クラレ 産資開発部部員 (正会員)

\*2 (株)クラレ 産資開発部部員

\*3 (株)クラレ 東京産資開発部部員 工修 (正会員)

\*4 Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Prof.

を検討した。

## 2. 実験の概要

当実験の研究では、まず ECC としての性能を発揮する基本的な調合を決め、1) 繊維の前処理、2) 混和材の適正使用に関する検討を行って、良好なワーカビリティを持ち、かつ均一で安定した繊維分散を得られる方法について検討した。なお水溶液として添加する混和剤類は有効成分(乾燥固形分)を記し、水分は計算上練水に加えた。

### 2.1 実験材料及び混練機

セメント(C)は普通ポルトランドセメントを用い、細骨材(S)は7号硅砂を用いた。増粘剤(V)は市販の非イオン系水溶性セルロース、減水剤はポリカルボン酸エーテル系1種類(PC)とメラミンスルホン酸系1種類(MS)を用いた。混和材として分級フライアッシュ(I種適合品)を2種類(FA-I-1:最大粒径10 $\mu$ m以下およびFA-I-2:20 $\mu$ m以下)およびフライアッシュII種(FA-II)を1種類用いた。PVA繊維は繊維径40 $\mu$ m、繊維長12mmのものを使用した。練混ぜには2Lモルタルミキサーを使用した。実験に供した調合を以下表-1~3にまとめる。

### 2.2 フレッシュモルタルのワーカビリティ評価

フレッシュモルタルの流動性は主にフロー試験(JIS R-5201 準拠)にて行い、この他に土木学会高流動コンクリート施工指針に準じ、漏斗を用いた流下試験方法によってV型ロートの流下時間の測定と下部開口の閉塞について観察を

行った。また同じく土木学会高流動コンクリート施工指針に準じ、充填装置を用いた間引き通過試験方法によってボックス型容器を用いて充填試験を行った。充填試験では、モルタルマトリックスであることから D13 の異型棒鋼を12mm 間隔で8本配したものをを用い、B室への充填が停止するまでの時間の測定と、充填が停止した時のB室の充填高さを測定した。

### 2.3 短繊維の分散性評価

短繊維の分散性は、主にフレッシュモルタル中のファイバーボールの発生について目視観察にて評価した。

### 2.4 複合材の力学的物性評価

繊維分散性と複合材の力学物性との相関を調べるために、主にダンベル型試験片による直接引張試験で評価した。圧縮強度は50mm $\phi$ ×100mmの円柱試験体を用いて測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 繊維の前処理の影響

流動性を確保する目的から、表-1に示すよ

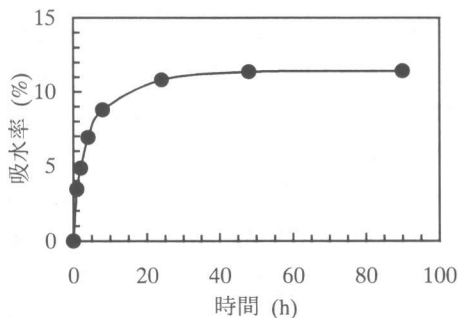


図-1 PVA繊維の吸水率の経時変化

表-1 調合表1

	水セメント比 W/C	砂セメント比 S/C	単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	増粘剤 V (kg/m <sup>3</sup> )	減水剤 PC (kg/m <sup>3</sup> )	繊維体積率 V <sub>f</sub> (%)	繊維吸水率 (%)	フロー値 (分離状態) (mm)	ファイバーボール
調合 1-1	0.35	0.5	376	2.15	2.64	2.0	0.4	144(分離)	あり
調合 1-2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	3.2	131	なし
調合 1-3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	6.8	137	なし
調合 1-4	↑	↑	↑	↑	↑	↑	10.9	142	なし
調合 1-5	↑	↑	↑	↑	↑	↑	26.6	135(分離)	あり

繊維吸水率は、水中に一定時間浸漬後に遠心脱水によって乾燥状態との重量変化から求めた。

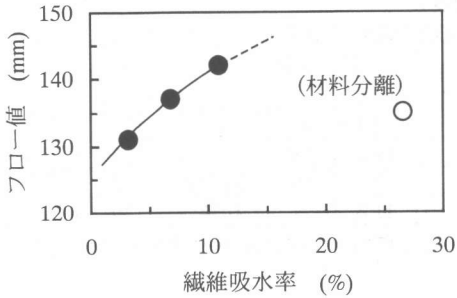


図-2 繊維吸水率によるフロー値の変化

うな、比較的単位水量の多いフレッシュモルタルを基本調合とした。これに2体積%のPVA繊維を投入すると、調合1-1において若干の材料分離が生じ、また、ファイバーボールが観察された。一方、PVA繊維の表面に飽和水を持たせた状態で投入すると、材料分離を生じることなく練混ぜが可能であり、ファイバーボールの発生も見られなかった。なお、吸水分は練混ぜ量から差し引いて調合を変更した。

図-1に示すように、本研究に用いたPVA繊維は24時間以上水中に浸漬することによって吸水量がほぼ飽和に達する。次に吸水率の違いによるモルタルフロー値の変化を図-2に示す。この結果から、PVA繊維の吸水率が飽和に達した場合に高い流動性が得られやすく、さらに飽和状態よりも多くの水を持ち込むと、材料分離が生じやすくなっていることがわかる。このことから、以下の現象が推測される。

1) 表面に持つ水が少ないPVA繊維をフレッシュモルタルに添加すると、PVA繊維自体の親水性によってフレッシュモルタル中の自由水が繊維表面に移動、吸着し、フレッシュマトリックスの流動性が損なわれる。その結果繊維同士の絡み合いが生じやすくなり、場合によってはファイバーボールが生じ、材料分離が進行する。

2) 一方、飽和状態の表面水を持つPVA繊維を用いることにより、フレッシュモルタル中の自由水は保持されて潤滑作用を維持することができる。

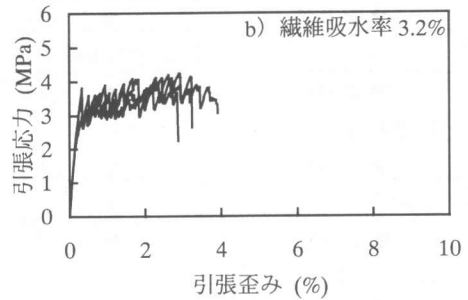
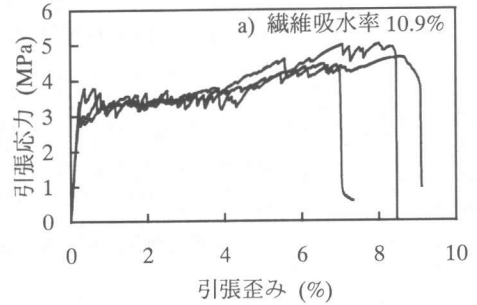


図-3 直接引張試験の応力-歪み曲線

3) 飽和状態よりも多くの水を持つPVA繊維を用いた場合は、フレッシュモルタル中の自由水が増加し、その結果自由水中に存在する増粘剤の効果が低下するために分散を保持することができなくなり、繊維同士の絡み合いを解くことができずにファイバーボールを生じて最後には材料分離が発生する。

また、繊維の分散状態が複合材の物性に与える影響について、ダンベル型引張試験片を用いて直接引張試験により比較した。図-3に応力歪み曲線を示す。このように、飽和状態の表面水を有する繊維を使用したことによって、大きな終局歪みを得ることができた。

以上の結果と推測を元に、これ以降の試験は飽和吸水状態の繊維を用いて検討を行った。

### 3.2 増粘剤および高性能減水剤の影響

短繊維の分散安定化とフレッシュモルタルの流動性とを両立させるために、化学混和剤として用いられる増粘剤と高性能減水剤の種類、添加方法について検討した。試験調合を表-2に示す。またこれらの混和剤の添加方法について

表-2 調査表 2

	水セメント比 W/C	砂セメント比 S/C	単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	増粘剤 V (kg/m <sup>3</sup> )	減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )	繊維体積率 V <sub>f</sub> (%)	繊維吸水率 (%)	減水剤種類	増粘剤適用	フロー値 (mm)	ファイバー
調査 2-1	0.35	0.5	376	(2.15)	(2.64)	2.0	12.1	PC	粉体	175	なし
調査 2-2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	11.3	MS	↑	136	なし
調査 2-3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	12.1	PC	水溶液	202	なし
調査 2-4	↑	↑	↑	↑	↑	↑	11.8	↑	粉体	179	なし

調査 2-1、2-2 については増粘剤の添加量を、調査 2-3、2-4 については減水剤の量を一定とした。

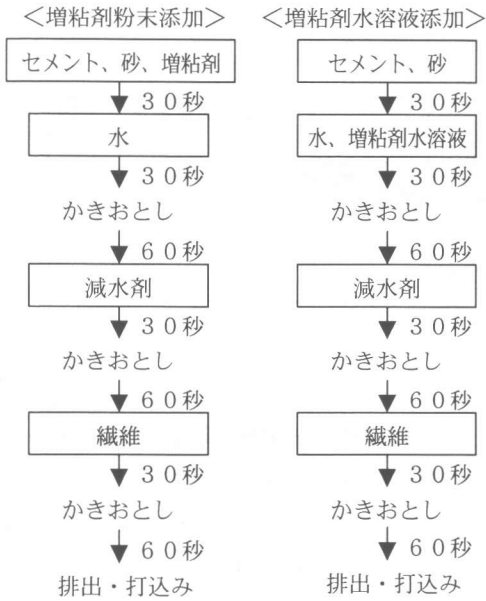


図-4 練混ぜ手順の検討

も検討した。検討した練混ぜの手順を図-4に示す。これらの有機化合物は、セメント懸濁液中の固体表面に吸着し、吸着の形態によって現れる効果に違いが生じる。まず高性能減水剤の影響について検討した。高性能減水剤として選択したのはポリカルボン酸エーテル系化合物であるが、静電気的な反発だけでなく、立体障害による排除体積効果によって高い減水効果が得られるとされている<sup>3)</sup>。また比較として、静電気的な反発による効果が支配的であるメラミンスルホン酸系減水剤を選び、吸着形態による流動性への影響についても検討した。その結果、図-5に示すとおりポリカルボン酸エーテル系減水剤を用いることによって、フロー値180以上の流動性を得ることができた。逆にメラミンスルホン酸系減水剤では同程度のフロー値を

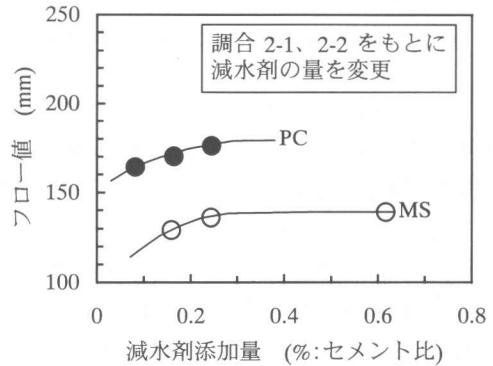


図-5 減水剤添加量によるフロー値の変化

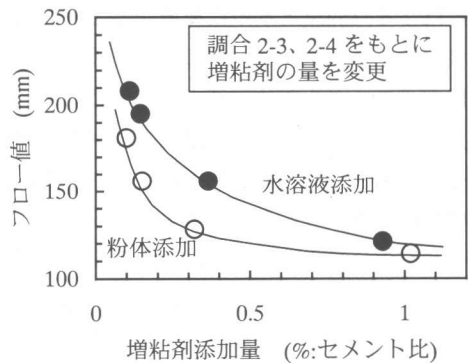


図-6 増粘剤添加量がフロー値に与える影響

得るには至らず、また、多量の添加により若干の材料分離が観察された。これによればポリカルボン酸エーテル系減水剤はメラミンスルホン酸系減水剤よりも効果が高い。ポリカルボン酸エーテル系減水剤の吸着による立体障害効果が流動性向上において良好な効果を示している。

次に増粘剤の添加方法について検討を行った。添加方法は図-4に示すとおりである。増粘剤

表-3 調合表3

	水結合材 比 W/B	砂結合材 比 S/B	FA 種類	FA 比 FA/B	単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	増粘剤 V (kg/m <sup>3</sup> )	減水剤 PC (kg/m <sup>3</sup> )	繊維体積 率 V <sub>f</sub> (%)	繊維 吸水率 (%)	フロー値 (分離状態) (mm)	ファイバ- ボール
調合 3-1	0.39	0.5	FA-I-1	0.3	380	1.91	1.94	2.0	11.4	201	なし
調合 3-2	0.39	0.5	FA-I-2	0.3	380	1.91	1.94	2.0	10.7	204	なし
調合 3-3	0.39	0.5	FA-II	0.3	380	1.91	1.94	2.0	10.6	148(分離)	あり
調合 3-4	0.30	0.5	FA-I-2	0.3	320	1.91	2.15	2.0	11.6	127	なし
調合 3-5	0.34	0.5	FA-I-2	0.3	350	1.91	2.05	2.0	11.6	176	なし
調合 3-6	0.37	0.5	FA-I-2	0.3	365	1.91	1.99	2.0	11.6	195	なし
調合 3-7	0.38	0.33	FA-I-2	0.3	425	1.91	2.24	2.0	12.5	223	なし

いずれの調合においても増粘剤は5%水溶液として用いた。

として用いられるセルロースは、水溶性であるが完全溶解させるには一般的な練混ぜ時間では短く、効果を十分に発揮させるには不十分と予測されるので、5%の水溶液として添加した。なお溶解に用いた水分は練混ぜ量から差し引いた。その結果、図-6に示すように粉体として添加した結果と比べて高い流動性が得られた。これは、セルロースを前もって水溶液として添加したことにより、フレッシュモルタルが練混ぜ初期から十分に粘性を保ち、繊維の分散安定化が達成されたものと考えられる。さらに増粘剤分子鎖のセメント粒子への吸着により、初期水和によるセメント粒子同士の二次凝集が抑制され、その結果スラリーの流動性を保持したと考えられる<sup>4)</sup>。以下の試験は、減水剤としてPCを用い、増粘剤は5%水溶液として用いた。

### 3.3 無機微粒子粉体の影響

フレッシュモルタルはセメント、砂、水（及び短繊維）を含むスラリーである。このスラリーの流動性は、分散している固体間に存在する自由水量に影響されるが、過剰な自由水は複合材の強度を低下させ、ひび割れの原因となるほかに、場合によっては材料分離を引き起こす。なるべく少ない自由水の量で流動性を確保し、なおかつスラリーの安定性を保つには、水硬性の低い微粒子を添加することによってより密な充填状態とすることが有効であると考えられる。そこで混和材としてフライアッシュを選択し、その添加効果を検討した。調合表を表-3に示す。フライアッシュは表-4に示すような、分

表-4 フライアッシュの性状

		最大 粒子径 (μm)	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
分級フライアッシュ I種	FA-I-1	10	8650
分級フライアッシュ I種	FA-I-2	20	5600
フライアッシュII種	FA-II	≥100	3030

級したフライアッシュ(I種適合品)を2種類、II種を1種類選択した。

フライアッシュを添加することによってスラリー中の粒子表面積が増加、吸着すべき減水剤量が不足し、流動性の低下が生じることも危惧されたが実際には良好な流動性が確認された。微粒子が添加されたことによってスラリーの構造が密になったことや、さらに分級フライアッシュは球状粒子が多く、このボールベアリング効果などによって流動化効果が卓越したためと考えられる。

PVA短繊維の分散性に関しても良好であり、増粘剤の効果とフライアッシュによる粘性効果が相乗しているものと考えられる。そこで単位水量の変化に対して、スラリーの安定性を確保しつつ流動性を保持する効果について検討した結果(表-3の調合3-2、3-4~3-7)を図-7に示す。フライアッシュI種の添加によって、400kg/m<sup>3</sup>を越える単位水量でも材料分離を生じることなく、良好な流動性と繊維分散性を達成した。しかしながら単位水量320kg/m<sup>3</sup>以下では流動性が低く、今後混和剤の適用に関し

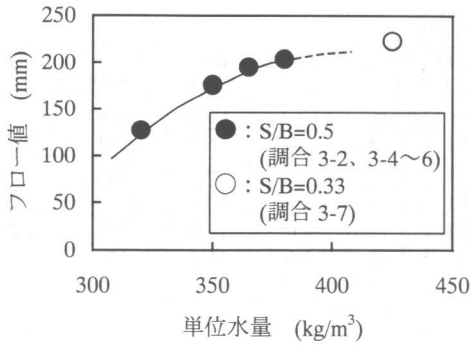


図-7 フロー値に対する単位水量の影響

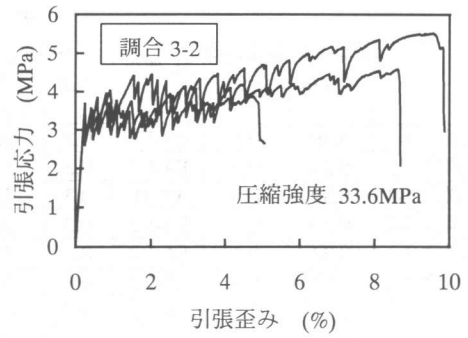


図-8 直接引張試験の応力-歪み曲線

てさらなる検討が必要である。このようにして得られた高流動 ECC(調合 3-2)について、V ロートによる流下試験を行ったところ、流下時間は 3.2 秒で閉塞も見られなかった。またボックス型容器による充填試験において充填時間 33.6 秒、充填高さは 312mm であった。

複合材の物性に関しては、調合 3-2 の直接引張試験による応力-歪み挙動を図-8 に示す。繊維の分散安定化によって非常に大きな靱性が得られている。

また、調合 3-2 および 3-3 の結果から、Ⅱ種フライアッシュに比べてⅠ種は良好な分離抑制作用を示した。これはⅠ種フライアッシュの粒子がⅡ種よりも微細であることによる充填効果であると考えられる。以上から、流動性を向上させるにはⅠ種を用いることが好適であると思われる。しかしながらⅠ種適合品 2 種類における粒子径の違いによる影響は、今回の検討においては明確な差としてみられなかった。

#### 4. まとめ

本研究では PVA 繊維を用いた高靱性 FRC の練混ぜにおける、繊維の状態の影響と各種混和剤の適正な使用について実験的に検討した。その結果、以下の点が明らかになった。

1) 親水性の PVA 繊維を添加する場合には、自由水の繊維への移行によるセメントスラリーの不安定化を避けるために、飽和吸水状態で添加することが好適であり、繊維の分散安定化に有

効である。

2) 増粘剤を水溶液として添加することで増粘作用の有効性が増し、繊維の良好な分散が得られることによって高い流動性を得ることができる。

3) 球状微粉末である分級フライアッシュを化学混和剤と併用することによって、さらにフレッシュモルタルの流動性が向上し、また繊維の分散安定化をもたらす効果が認められる。

フレッシュモルタル中における PVA 繊維表面状態が流動性、分散性に与える影響に関しては今後の検討課題である。

#### 参考文献

- 1) たとえば笠原美幸, 松崎育弘, 中野克彦, 福山 洋: 高靱性型セメント型複合材料を用いた柱部材の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次大会論文集, Vol.22, No.3, pp.358-390, 2000 など
- 2) 諏訪田晴彦, 嶋 大助, 磯 雅人, 福山 洋: 高靱性型セメント材料の構造物への利用に関する基礎研究(その 10), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.545-546, 2000
- 3) 坂井悦郎, 大門正機: 粒子間ポテンシャルの計算による高性能 AE 減水剤の作用機構, セメント・コンクリート, No.595, pp.13-22, 1996.9
- 4) Li, V. C., Kong, H. J., Chan, Y. W., "Development of Self-Compacting Engineered Cementitious Composite", Proc. Int'l Workshop on Self Compacting Concrete, Kochi, pp.46-59, 1998