

# 論文 手練りで少量使用できる HPFRCC のフレッシュ性状と力学性能

森井 直治<sup>\*1</sup>・新家 一秀<sup>\*2</sup>・平井 英章<sup>\*3</sup>・六郷 恵哲<sup>\*4</sup>

要旨：現場で手練りにより簡単に少量作製できる HPFRCC について、練混ぜ方法と関連させて、練混ぜ直後のフレッシュ性状、硬化後の力学性能、透気係数について評価を行った。その結果、手練り時間が 2 分半程度の場合、流動性、圧縮強度および付着強度は、ミキサ練りと同程度、曲げ強度および引張強度はミキサ練りの 90%程度であった。また、引張終局ひずみは 2%程度の大きさであったが、ミキサ練りの 60%程度であった。透気係数においては、ミキサ練りに比べバラツキが大きかったが、練混ぜ時間を増やすと透気係数の値は小さくなり、バラツキも小さくなった。

キーワード：HPFRCC, 擬似ひずみ硬化, 複数微細ひび割れ, 手練り, 引張終局ひずみ, 透気係数

## 1. はじめに

小規模な断面補修や穴埋め等に、数リットル程度の少量の高性能なセメント系材料を現場で手軽に練り混ぜて使用できれば、セメント系材料の利便性が高まる。

セメント系材料に高強度ポリエチレン (PE) 繊維や高強度ポリビニルアルコール (PVA) 繊維を混入した複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) は、一軸引張力下において擬似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特性を示す点に特徴がある。HPFRCC の設計・施工指針(案)<sup>1)</sup> が、土木学会から 2007 年に出版されている。HPFRCC は道路、鉄道、ダム、農業用水利施設等の幅広い分野において、断面修復や表面被覆等の補修材料として、利用が拡がりつつある。

しかしながら、通常のコンクリートと異なり、HPFRCC には長さ 10mm 程度の細い短繊維を 1~2% 混入するため、練混ぜにあたっては特別な技術やミキサが必要であると考えられてきた。

著者らは、現場でミキサや発電機を用いることなく、手練りにより簡単に少量作製できる HPFRCC を開発した。本研究においては、手練りにより作製した HPFRCC について、練混ぜ直後のフレッシュ性状、硬化後の力学性能、耐久性に関連する透気係数を評価し、ミキサで練混ぜた HPFRCC に近い品質と性能が得られることを確認することを目的としている。

## 2. 実験概要

### 2.1 HPFRCC の配合と材料

試験に用いた HPFRCC は、ブレミックスされた短繊維入りポリマーセメントモルタルであり、配合を表 - 1 に示す。セメントには、普通ポルトランドセメントを使用した。短繊維には、長さ 8mm、直径 0.04mm の高強

度 PVA 繊維の集束タイプのもを使用し、混入率を 1.6vol%とした。

### 2.2 HPFRCC の作製

HPFRCC の練混ぜ方法は、次に示すように、手練りによる方法 2 種類と比較のためのミキサ練りの合計 3 種類とした。

- ・「手練り 1」：繊維の固まりを手触り感触により確認できなくなった時点で手揉み(約 90 秒間)を終了した。
- ・「手練り 2」：「手練り 1」の状態から、さらに 1 分間手揉みした。
- ・「ミキサ練り」：ホバートミキサにより 2 分間練混ぜた後、消泡剤を加え、手練りとほぼ同程度の単位容積質量が得られた時点で練混ぜを終了した。

HPFRCC (約 1.5 リットル)を手練り(手振りと手揉み)により作製する際の手順を下記に示す。

透明なポリエチレン製袋に、短繊維入りポリマーセメントモルタル 2.5kg を入れる。

例えば容積 500ml のペットボトルで計量した 0.5kg の水を加える。

ポリエチレン製袋の中に空気を十分入れた状態で、開口部を片手でしっかり閉じる。

モルタルが濡れ色になるまで(約 20~30 秒間)、両手で袋を振る。

「手練り 1」では、袋の中の繊維の固まり(分散

表 - 1 HPFRCC の配合

W (kg/m <sup>3</sup> )	W/B (%)	P/C (%)	Ad (wt%)	PVA 繊維 混入量
325	37	6	0.12	1.6vol%

B:セメント+フライアッシュ+シリカフューム

P:粉末ポリマー, Ad:高性能減水剤(wt%=Ad/B)

\*1 (株)デーロス・ジャパン 工修 (正会員)

\*2 トーヨーマテラン(株) 工修

\*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 技術開発部 技術開発担当部長

\*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

が不十分で繊維が絡まったもの)が  
無くなるまで、袋の外から手揉みにより練り混ぜる。

「手練り 2」では、さらに 1 分間手揉みする。

ミキサ練りの場合においても、練混ぜ初期には繊維の固まりが多く観察されるが、練混ぜ時間の経過とともに繊維はモルタル中に分散する。ミキサ練りにおいては、ミキサの回転速度および練混ぜ時間を一定にすることにより、毎回ほぼ同程度の練混ぜの程度となる。しかし、手練りによる練混ぜにおいては、手振り方法、揉む速度と圧力、練混ぜ時間、熟練度(揉み順番、手感触の認知度、揉み方等)等により、練混ぜの程度が大きく異なる。そこで「手練り 1」においては、繊維の固まりを手触り感触により確認できなくなった時点(練混ぜ終了)を目安とした。

表 - 2 試験概要と結果

練混ぜ方法	手練り 1	手練り 2	ミキサ練り
練混ぜ時間 (秒)	78	138	140
フロー試験 (mm)	0 打フロー値	121	136
	15 打フロー値	171	186
単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )	1961	1954	1974
圧縮試験 (N/mm <sup>2</sup> )	3 日圧縮強度	23.2	23.9
	7 日圧縮強度	32.0	34.4
	21 日圧縮強度	43.6	45.7
曲げ試験 (N/mm <sup>2</sup> )	3 日曲げ強度	9.6	8.7
	7 日曲げ強度	12.2	12.2
	21 日曲げ強度	16.6	15.7
引張試験	初期ひび割れ発生強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.2	3.3
	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.7	3.8
	引張終局ひずみ (%)	1.69	2.09
付着試験 (N/mm <sup>2</sup> )	7 日付着強度	2.0	1.9
	21 日付着強度	2.6	2.3
透気係数(10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	2.63	2.09	1.22
比抵抗(kΩ・cm)	15	18	14

### 3. 試験内容と供試体

練混ぜ方法と試験内容およびその結果を表 - 2 に示す。

#### 3.1 供試体作製

「手練り 1」と「手練り 2」の場合、練混ぜ後にポリエチレン製袋の底部の角に直径 30 mm 程度の穴を開け、その穴から HPCRCC を押し出す方法により、型枠の中に HPCRCC を充填して供試体を作製した。「ミキサ練り」の場合においても、練混ぜ後の HPCRCC をポリエチレン製袋に入れ、手練りの場合と同じ方法により、供試体を作製した。

#### 3.2 フロー試験および単位容積質量試験

練混ぜ後の流動性については、JIS R 5201 のモルタルフロー試験法により、フローコーンを取り外した直後と 15 回落下運動を行った後のモルタルの広がり、をそれぞれ測定した。

単位容積質量については、JIS A 1171 のポリマーセメントモルタルの単位容積質量試験法に準拠して行い、空気量の推定に用いた。

#### 3.3 曲げ・圧縮強度試験

曲げ・圧縮供試体の寸法は 40×40×160mm とし、JIS A 1171 のポリマーセメントモルタルの曲げ・圧縮試験法に準拠して試験を行った。曲げ試験は、支点間距離を 100mm とし、3 点曲げにより行った。圧縮試験は、曲げ試験後の折片を用い JIS A 1171 に準拠して行った。試験材齢を、3、7、21 日とした。

#### 3.4 一軸引張試験

引張供試体の形状は、図 - 1 に示すダンベル型供試体

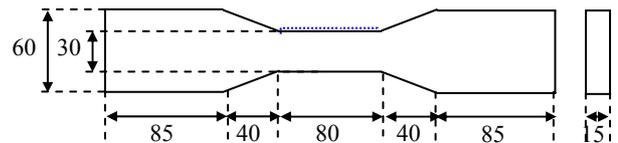


図 - 1 ダンベル型供試体 (単位: mm)

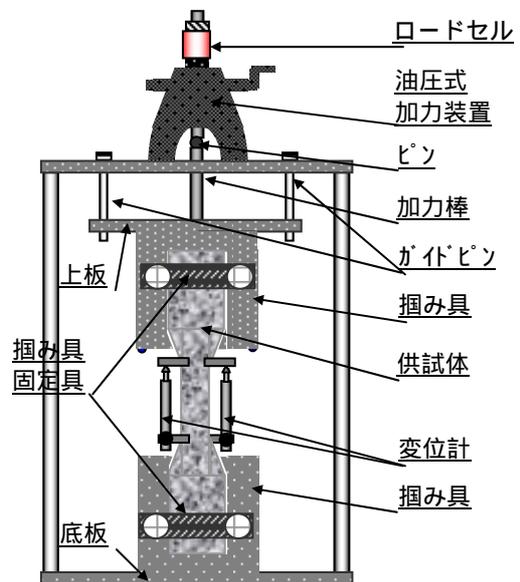


図 - 2 引張試験装置

とした。中央部の検長区間の寸法は、長さ 80mm、幅 30mm、厚さ 15mm とした。

一軸引張試験装置を図 - 2 に示す。供試体の端部の固定条件については、下端を固定支持、上端を回転支持とし、検長区間の変位は試験体両側に取り付けた高感度変位計で計測した。引張応力 - ひずみ関係から、初期ひび

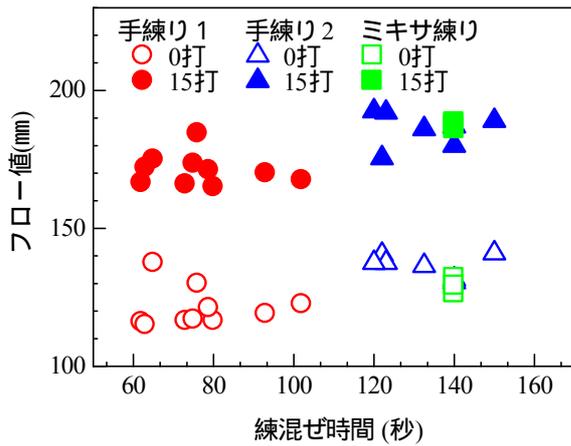


図 - 3 練混ぜ時間とフロー値

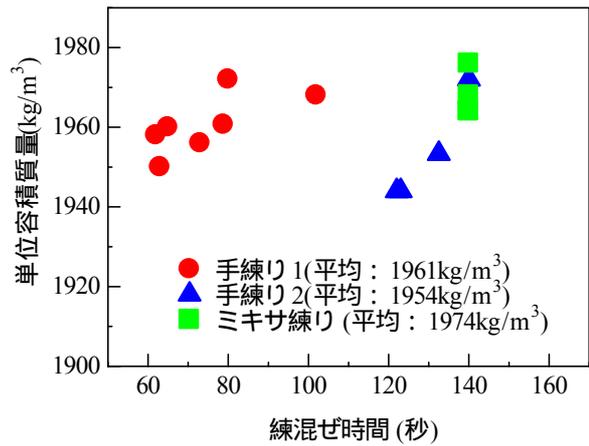


図 - 4 練混ぜ時間と単位容積質量

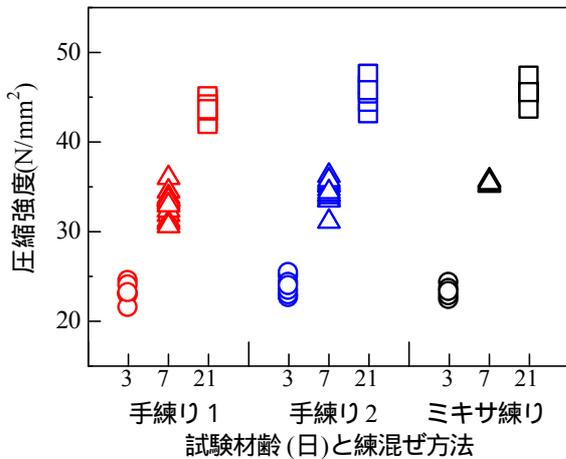


図 - 5 練混ぜ方法と圧縮強度

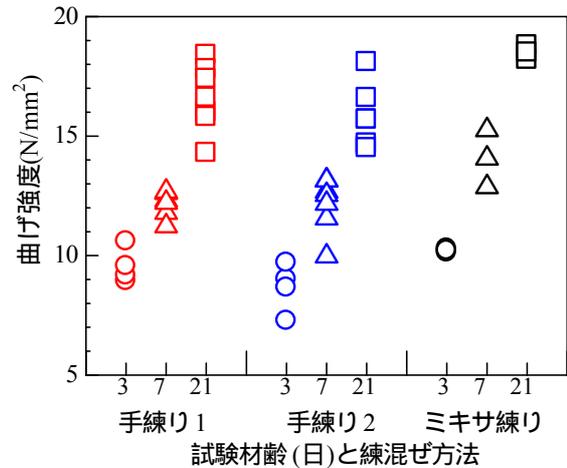


図 - 6 練混ぜ方法と曲げ強度

割れ発生強度，引張強度（最大応力），終局ひずみ（軟化開始点のひずみ）を求めた。一軸引張試験は，材齢21日で行った。

### 3.5 附着試験

サンダケレン法により脆弱層を除去したコンクリート板に，厚さ約5mmのHPFRCCで，左官工法により表面被覆を行った。室内で気中養生後，附着試験の2日前にHPFRCC表面に鋼製の引張用ジグ(横40×縦40×厚み20mm)をエポキシ樹脂で接着させた。エポキシ樹脂が硬化後に，引張用ジグの側面に沿って10mm程度の深さで切り込みを入れ，材齢7日と21日目に建研式附着試験法により附着試験を行った。

### 3.6 透気試験および比抵抗試験

コンクリートの耐久性を評価する際に用いられる透気係数と比抵抗をHPFRCCについて求めた。すなわち，HPFRCC表層部の緻密さの度合を評価するため，チャンバー，計測器，計測センサーおよび真空ポンプで構成される試験装置(TPT: Torrent Permeability Tester)を用いて透気試験を行い，透気係数を求めた<sup>2,3)</sup>。コンクリートの比抵抗は，四点電極法(Wenner法)によって計測した。透気試験および比抵抗試験は，材齢14日で行った。

## 4. 試験結果

### 4.1 練混ぜ時間とフローおよび単位容積質量

図-3と図-4に，練混ぜ時間とフロー値および単位容積質量との関係を示す。

手練りによる練混ぜ時間については，「手練り1」(繊維の固まりを確認できなくなった時点で練混ぜを終了)の場合，練混ぜ時間は約60~100秒であり，40秒程度の幅がみられた。「手練り1」の材料をさらに1分間手揉みした「手練り2」においても，同程度の練混ぜ時間の幅がみられた。練混ぜ時間に幅が生じた理由としては，手練り時の手振り方法，揉む速度と圧力および熟練度の違いが挙げられる。

フロー値については，「ミキサ練り」に比べ，「手練り1」(平均練混ぜ時間：78秒)の場合，約15mm小さくなったが，「手練り2」(平均練混ぜ時間：138秒)の場合は，同程度であった。これより，手触り感覚で繊維の固まりが無くなったことを確認後，さらに1分程度手揉みを行うことで，ミキサ練りとほぼ同程度の流動性が確保できることがわかる。

「ミキサ練り」の場合，2分程度の練混ぜ時間で，繊維を分散させることができたが，単位容積質量が1750

kg/m<sup>3</sup>と小さく、空気量が非常に大きくなった。これは、モルタル中の粉体ポリマーの空気連行性によるものと判断し、手練りと同程度の単位容積質量（空気量）を得るため、消泡剤を加えた。すなわち、「ミキサ練り」では、2分間ミキサで練り混ぜた後に、消泡剤を加え、さらに20秒間練混ぜを行った。その結果、3種類の練混ぜ方法で作製したHPFRCCの単位容積質量は、いずれも1960 kg/m<sup>3</sup>（単位容積質量による換算空気量：5.5%に相当）前後となった。

HPFRCCの単位容積質量については、「手練り1」と「手練り2」の差は10kg/m<sup>3</sup>程度（空気量で0.5%程度の差）であり、練混ぜ時間の違いが単位容積質量（空気量）に及ぼす影響はほとんど認められなかった。これより、手練りの場合、手振り方法、揉む速度と圧力、練混ぜ時間ならびに熟練度が異なる場合においても、空気量の差はほとんど生じないことを確認できた。

#### 4.2 圧縮および曲げ強度

3種類の練混ぜ方法で作製したHPFRCCについて、材齢と圧縮強度および曲げ強度との関係を、図-5と図-6に示す。

圧縮強度については、練混ぜ方法の違いの影響は認められず、材齢の増加に伴う圧縮強度の増加の程度もほぼ同じであった。いずれの条件においても、圧縮強度のパラッキは小さく、変動係数は5%以下であった。

曲げ強度については、「ミキサ練り」で作製したHPFRCCに比べ、「手練り1,2」で作製したHPFRCCでは、材齢7日と21日における曲げ強度は10~15%程度小さく、材齢21日の曲げ強度の変動係数は9%程度（ミキサ練りの7倍程度）と大きくなった。

いずれの練混ぜ方法と材齢においても、曲げ強度は圧縮強度の35~40%程度であり、圧縮強度に対する曲げ強度の比が大きかった。これは、曲げ供試体の寸法が小さいことと、繊維の架橋効果の影響であると考えられる。

#### 4.3 引張性能

一軸引張試験で得られた練混ぜ方法と引張性能との関係を図-7に、練混ぜ方法ごとの引張応力-ひずみ関係を図-8に示す。いずれの練混ぜ方法で作製したHPFRCCにおいても、初期ひび割れ発生後に、複数微細ひび割れの発生を伴いながら引張応力が増加する擬似ひずみ硬化特性が観察された。

表-2と図-7からわかるように、「手練り1」と「手練り2」で作製したHPFRCCの初期ひび割れ発生強度は同程度であり、引張強度も同程度であった。初期ひび割れ発生強度および引張強度は、「ミキサ練り」で作製したHPFRCCに比べ、「手練り1,2」で作製したものが15%程度小さかった。一般に、初期ひび割れ発生強度はマトリックスの引張強度に大きく依存する。「ミキサ練り」

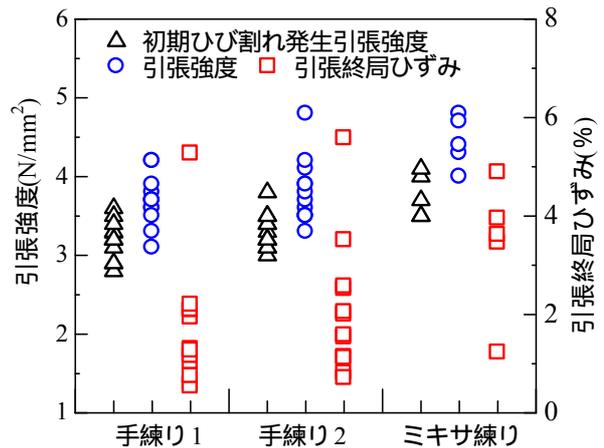


図-7 練混ぜ方法と引張性能

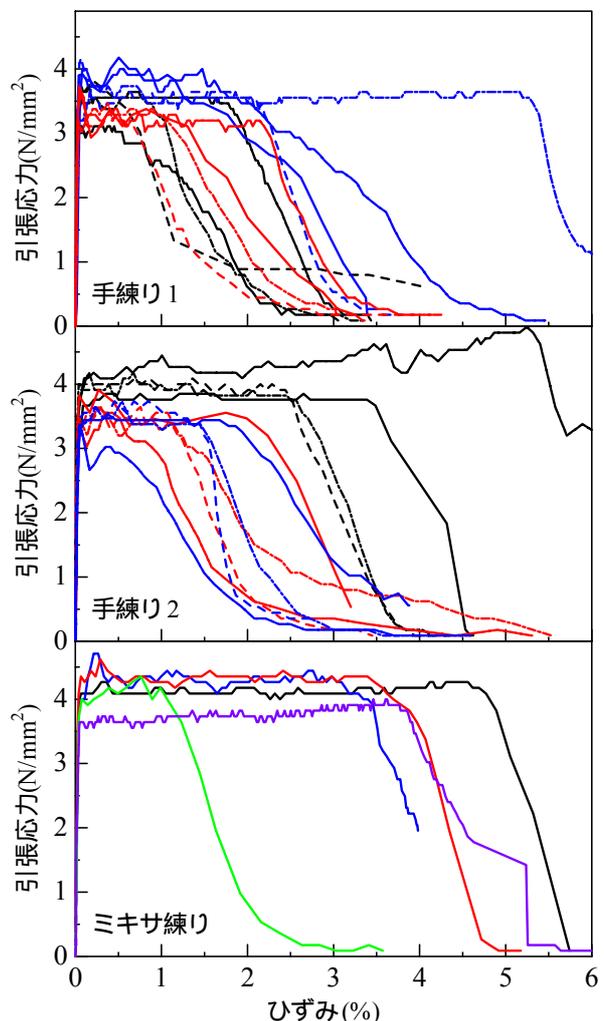


図-8 引張応力-ひずみ関係

に比べ、「手練り」の初期ひび割れ発生強度が若干小さい理由として、後述のようにマトリックスの練混ぜの程度や繊維の分散の程度が劣ることが挙げられる。

図-8からわかるように、引張終局ひずみについては、「ミキサ練り」の場合、5体のうち4体の供試体において4~5%程度の大きな値が得られ、「手練り1,2」に比べ、安定した大きな擬似ひずみ硬化特性が得られた。し

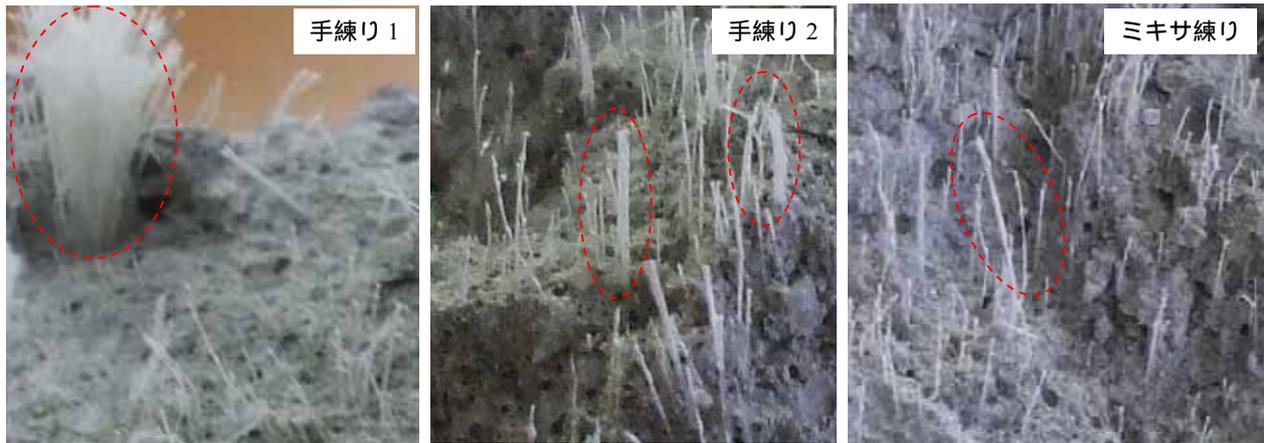


写真 1 練混ぜ方法ごとの引張試験後の破断面の繊維の分散状況

しかし、「手練り 1, 2」においては、引張終局ひずみが 0.5 ~ 5% となり、変動係数が 65%（ミキサ練りの約 2 倍）となった。「手練り 1」の場合、供試体の 9 割程度が 0.5 ~ 2% の引張終局ひずみを示し、表 - 2 に示すように引張終局ひずみの平均値は 1.69% であった。「手練り 2」の場合には、引張終局ひずみは 0.5 ~ 3.5% となり、引張終局ひずみの平均値は 2.09% であり、「手練り 1」に比べ、20% 程度大きかった。

本研究で用いている PVA 繊維は、繊維が数百本ごとに集束されており、練混ぜ中に徐々に解れて、繊維がマトリックス中に分散しやすく工夫されている。一般に、繊維の分散は、モルタルの粘性、練混ぜ時間およびミキサの練混ぜ性能（回転速度、回転方法、振動の伝え方等）に大きく依存する<sup>4)</sup>。

写真 - 1 に、引張試験後の破壊断面の写真を示す。3 種類の練混ぜ方法で作製した HPRCC の破断面のいずれにも、繊維が絡まった大きな固まりは観察されなかった。しかし、練混ぜ時間が短い「手練り 1」では、解れる前の集束状態の繊維（赤い点線の中）が観察された。「手練り 2」や「ミキサ練り」の場合にも、十分には解れていない繊維の束が数箇所で見られた。「手練り」の場合、手の感触により、繊維の絡みによる大きな固まりを確認でき、揉むことによりこれをモルタル中に分散させることができた。解けきれていない繊維の有無を手の感触により確認することは困難であったが、手揉み時間を長くすることにより減らすことが可能なことを確認できた。

先に述べたように、「ミキサ練り」で作製した HPRCC では、「手練り 1, 2」のものに比べ、引張終局ひずみが大きく、安定したひずみ硬化特性が得られるとともに、「手練り 1」よりも練混ぜ時間が長い「手練り 2」では引張終局ひずみが大きくなったが、これは、集束された繊維がより多く解れているためと考えられる。「ミキサ練り」に比べ「手練り 1, 2」の場合、マトリックスの練

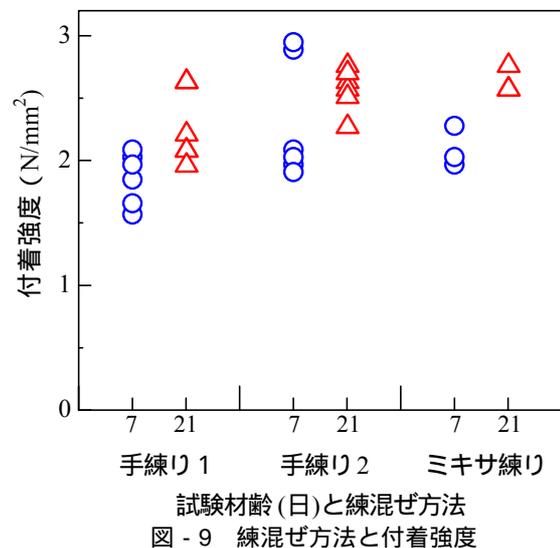


図 - 9 練混ぜ方法と付着強度

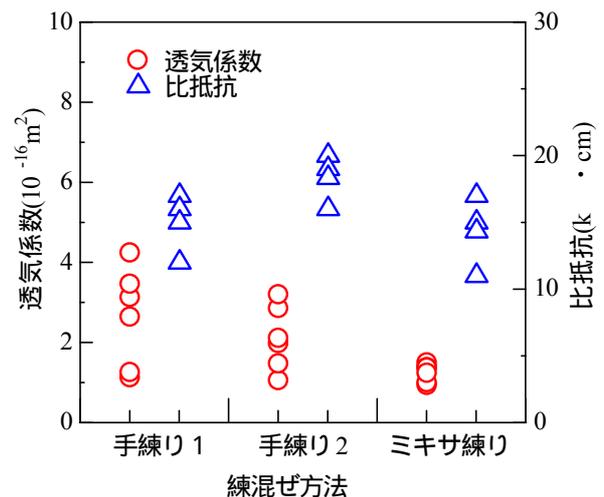


図 - 10 練混ぜ方法と透気係数および比抵抗

混ぜの程度が低いためにマトリックスの引張強度（初期ひび割れ強度）が低くなるとともに、繊維の分散の程度が低いために繊維の架橋性能が低くなり、曲げ強度ならびに引張強度と引張終局ひずみが低下したものと考えられる。

本研究で用いた手練り HPFRCC の 1 回分の練混ぜ量は、3kg / 袋(短繊維入りポリマーセメントモルタル:2.5kg, 水:0.5kg)であった。1 回分の練混ぜ量を少なくすれば練混ぜ性能を改善できる可能性がある。

#### 4.4 付着強度

表面処理を行ったコンクリート版に、3 種類の練混ぜ方法により作製した HPFRCC を 5mm 程度の厚さで被覆した後、材齢 7 日と 21 日に、建研式付着試験法により付着試験を行った。図 - 9 に付着試験結果を示す。

付着強度については、「手練り 2」と「ミキサ練り」で作製した HPFRCC の付着強度の差はほとんど認められなかったが、「手練り 1」のものは他と比べ若干小さい結果となった。

破壊箇所については、材齢 7 日では、全ての練混ぜ方法で、HPFRCC あるいは HPFRCC とコンクリートとの境界面での破壊となった。しかし、材齢 21 日においては、「ミキサ練り」や「手練り 2」の場合、全ての付着試験箇所において、母材のコンクリートで破壊した。「手練り 1」の場合、コンクリートでの破壊よりも HPFRCC や HPFRCC とコンクリートとの境界面での破壊が多かった。

#### 4.5 透気係数および比抵抗

材齢 14 日における透気試験および比抵抗試験の結果を、図 - 10 に示す。いずれの練混ぜ方法で作製した HPFRCC においても、試験時の材齢が若く、供試体の厚みが 30mm と薄かったため、透気係数は若干大きい結果となった。いずれの練混ぜ方法においても、最も小さい透気係数の値は、 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  程度であった。「ミキサ練り」においては、透気係数の標準偏差が 0.21 と小さかったが、練混ぜ時間が短い「手練り 1」では、透気係数の標準偏差が 1.13 と大きく、透気係数の平均値も大きい結果となった。これは、「手練り 1」では練混ぜが不十分であったためと考えられる。練混ぜ時間が長い「手練り 2」では、「手練り 1」よりも透気係数の値は小さくなり、「ミキサ練り」と同程度の透気係数の値が得られた箇所が 5 割程度あった。このことから、練混ぜ時間を長くすれば、透気係数を小さくすることが可能であると判断される。なお、練混ぜ時間については、練混ぜ量と関連させて検討する必要があると考えている。

図 - 10 に示すように、3 種類の練混ぜ方法で作製した HPFRCC の比抵抗の値は、 $10 \sim 20 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}$  程度であった。「手練り 2」の値が、他よりも若干大きい、その差は小さいと判断される。

#### 5. まとめ

筆者らが開発した現場で手練りにより簡単に少量作製できる HPFRCC について、練混ぜ直後のフレッシュ性、硬化後の力学性能、耐久性に関連する透気係数と比

抵抗の評価を行った。その結果、手練りで作製した HPFRCC において、ミキサ練りのものに近い品質と性能が得られることを確認した。本研究で得られた結果を、以下にまとめる。

- (1) 「手練り」で作製した HPFRCC の場合、手振り方法、揉む速度と圧力、練混ぜ時間ならびに熟練度が単位容積質量(空気量)に及ぼす影響はほとんど無く、「ミキサ練り」で作製した HPFRCC と同程度の流動性が確保できた。
- (2) 「手練り」で作製した HPFRCC でも、「ミキサ練り」で作製したものと同程度の圧縮強度と付着強度を確保できた。
- (3) 「手練り」で作製した HPFRCC において、平均引張終局ひずみが 2% 程度の大きさの擬似ひずみ硬化特性が得られた。「手練り」で作製した HPFRCC では、「ミキサ練り」に比べ、マトリックスの練混ぜや繊維の分散の程度が劣るため、マトリックスの引張強度が若干低下するとともに、繊維の架橋性能の低下により、曲げ強度や引張終局ひずみが小さくなった。
- (4) 透気係数については、「ミキサ練り」で作製した HPFRCC の場合、いずれの測定箇所においても、同程度の値が得られた。「ミキサ練り」に比べ「手練り」の場合、透気係数の値の差は大きかった。「手練り 1」に比べて練混ぜ時間が長い「手練り 2」では、透気係数は小さくなり、5 割程度の測定値が「ミキサ練り」の場合と同程度であった。

以上の結果から、手練りによる練混ぜ方法としては、繊維の固まりを確認できなくなってからさらに 1 分間手揉みする「手練り 2」が推奨される。

#### 参考文献

- 1) 土木学会；複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.127，pp.1-4，2007
- 2) 国枝稔，Ahmed Kamal，中村光，Eugen Bruhwiler；超高強度ひずみ型セメント系材料の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.315-320，2007.6
- 3) Torrent, R: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. Materials and Structures, Vol.25, No.190, pp.358-365, 1992
- 4) 日本コンクリート工学協会；高靱性セメント複合材料の評価と構造利用研究委員会報告書( )，2004.5