

論文 袋練混ぜ方法により作製した HPFRCC の配合と力学特性

近藤 遊^{*1}・浅野 幸男^{*2}・前田 徳一^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 少量の HPFRCC をミキサなどの特別の装置を用いることなく、簡便に練り混ぜる方法を提案した。HPFRCC のプレミクスされた粉体混合物を容量 10 程度のポリエチレン製の袋に入れ、水を投入後に袋の外部から手揉みにより練り混ぜる方法で HPFRCC を作製し、練混ぜ易い HPFRCC の配合や力学特性について検討した。提案法による HPFRCC は、ひずみ硬化特性や複数微細ひび割れの特性を有し、HPFRCC としての性能を発揮することを確認した。石灰石粉や粒径 200 μm 程度の粒状発泡スチロールの本方法への有効性を明らかにした。

キーワード: HPFRCC, 袋練混ぜ, 石灰石粉, 粒状発泡スチロール

1. はじめに

コンクリート構造物の補修・補強分野の拡大や長寿命化することの必要性の増大から、この用途に対する新材料・新工法の提言や指針類^{1),2)}の整備が進められている。

補修・補強の分野では、大断面修復や橋梁の床板増厚のような比較的規模の大きなものから、プレキャスト製農業用水路の目地補修のような、1箇所の補修材量が 0.1 0 に満たないものまでである。農業用水路の場合では、建設投資抑制等の影響で地権者自らが、セメントや砂を調達して少量のモルタルを練り混ぜ、漏水補修する場合も多い。型枠緊結用セパレーターのコーンの跡埋めや後施工アンカーの充填材なども同様に、大半が少量のモルタルを練混ぜ施工されている。いずれの場合も、手間が掛かるばかりではなく、材料計量や練混ぜが不十分となりがちで、所要の性能を発揮できない場合も多い。本格的な補修時代を迎え、ミキサや電源などの設備が不要で、品質の安定した少量のモルタルを容易に製造できる技術へのニーズが高い。

このことから、セメント、骨材、混和剤などのプレミクス材料を、練混ぜ容量 10 程度のポリエチレン製の袋に入れ、水を投入して袋の外部から手揉みにより練り混ぜる方法(以下、袋練混ぜ方法という)を考案した。プレミクス材料として、補修材料としての効果が高い、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composite with Multiple Fine Cracks)を本研究の対象とした。HPFRCC は、一軸引張応力下において疑似ひずみ硬化特性を示し、複数の微細なひび割れを形成しながら変形するという靱性に富む材料である。ひび割れが微細であることから、水分や塩分などに対する物質の透過抑制性能にも優れ

ている。

袋練混ぜ方法により練り混ぜた HPFRCC(以下、袋練 HPFRCC という)について、練り混ぜ易い材料・配合の選定や力学特性についての検討を行った。

2. 実験概要

2.1 材料および配合

表-1 使用材料

材 料		物 性
高強度ポリエチレン繊維 (PE)		繊維径 12 μm , 繊維長 12mm, 密度 0.98g/cm ³ , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa
セメント		早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
細骨材		7号珪砂, 密度 2.60g/cm ³
膨張材		エトリンガイト・石灰複合系, 密度 3.05g/cm ³
混和剤	粉末状高性能減水剤	ポリカルボン酸系
	増粘剤	水溶性メチルセルロース系
混和材	フライアッシュ	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 3640cm ² /g
	石灰石粉	密度 2.71g/cm ³ , 比表面積 3050cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 4210cm ² /g
空気量調整材	粉末状空気連行剤	直鎖オレフィンスルホン酸系
	中空骨材	シラスパルーン, 平均粒径 50 μm , 密度 0.6g/cm ³
	粒状発泡スチロール	平均粒径 200 μm
練混ぜ用袋		ポリエチレン製, 厚さ0.08mm, 寸法外形300×450mm

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 岐阜大学 社会資本アセットマネジメントセンター 博士(工学) (正会員)

*3 東洋紡績株式会社 スーパー繊維事業部 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表-2 基本とする HPFRCC の配合

配合	水セメント比 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
		水	セメント	7号珪砂	高性能AE減水剤 (液体)	増粘剤	PE繊維
HPFRCC	30	380	1264	395	37.92	0.9	14.6(1.5vol%)

表-1 に実験に用いた材料を示す。HPFRCC の繊維は高強度ポリエチレン繊維(PE)、高性能減水剤や空気連行剤は粉末状のものを用いた。粒状発泡スチロールは平均粒径 200 μ m、発泡倍率 50 倍、粒子内部の空間率 98%程度のもので、HPFRCC の空気量調整材として用いた。

表-2 に基本とする HPFRCC の配合を示す。この配合は筆者らが、HPFRCC 関連の研究^{3),4),5)}に用いてきた標準的な配合である。袋練方法に適した材料・配合の実験では、混和材および膨張材はセメントの内割置換(質量)、空気量調整材として用いた中空骨材および粒状発泡スチロールは細骨材の内割置換(容積)とした。繊維混入率(容積)は、基本配合を参考として実験により求めた。粉末状高性能減水剤及び増粘剤の添加率は、粉体(セメント+混和材)質量に対する割合である。

2.2 評価試験方法

(1) フレッシュ性状

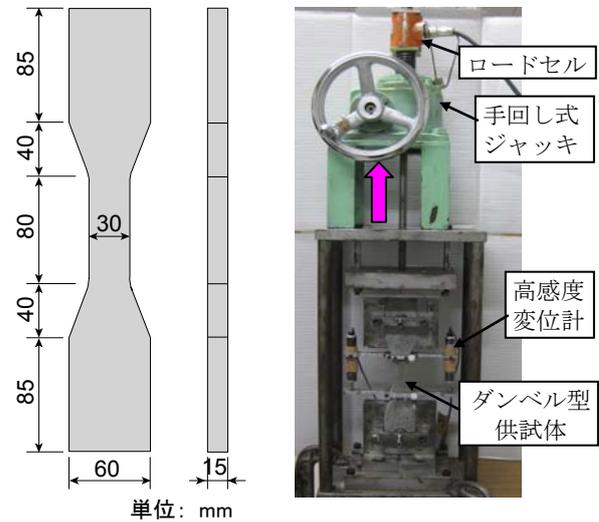
材料および配合に関する実験では、混和材の種類や置換割合によるモルタルの流動性評価を、フロー試験によるフロー値で行った。フロー試験には JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定するフローコーンを用いた。一部の試験では、フローコーンを引き上げ、拡がり静止するまでの時間を計測してフロー速度を求め、粘性の評価指標とした。繊維を混入した HPFRCC の実験では、上記と同様のフローコーンを用い、フローコーンを引き上げたときの拡がり(0 打フロー値)と、その後 15 回フローテーブルを落下させたときの拡がり(15 打フロー値)を測定した。

HPFRCC の空気量は、空気量を 0 とした仮定した配合上の理論密度と、練混ぜ完了直後の実測単位容積質量の差から算出した。単位容積質量は $\phi 5 \times 10$ cm のプラスチック製型枠に、練混ぜ直後の HPFRCC を 1/2 層ずつに分けて詰め、各層ごとにタンピングして成形した後、質量を計測して求めた。

(2) 硬化特性

圧縮強度試験用供試体は、 $\phi 5 \times 10$ cm のプラスチック製型枠を用いて成形した。供試体は 1 配合ごとに 3 本作製した。成形後 20 $^{\circ}$ C の恒温室で翌日まで養生した後脱型し、その後 6 日間水中養生を行い、材齢 7 日で圧縮強度試験を行った。各配合の代表値は 3 本の平均値で表すこととした。

図-1 に HPFRCC の一軸引張試験に用いた供試体と試



(1) ダンベル供試体 (2) 一軸引張試験装置

図-1 供試体及び試験装置

験装置を示す。引張試験部の断面寸法 30 \times 15mm、長さ 80mm のダンベル型供試体を一軸引張試験装置に取り付けて試験を行った。HPFRCC の一軸引張試験用供試体は 1 配合ごとに 5 体作製し、供試体成形後の養生や試験材齢は圧縮強度試験と同一にした。各配合の代表値は 5 体の平均値で表すこととした。

2.3 材料・配合の選定

(1) マトリクス材料

混和材はフライアッシュ、石灰石粉、高炉スラグ微粉末の 3 種類とした。各混和材の置換率を基本配合におけるセメント量の 30%とし、石灰石粉については 15%も加えてフロー試験を行った。基本配合における液状高性能 AE 減水剤を粉末状高性能減水剤(添加率 0.4%)に置き換え、繊維を混入しないモルタルで試験をした。練混ぜには JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定するホバートミキサを用いた。練混ぜ方法は、空練 30 秒(低速)、水投入後 1 分練混ぜ(低速)、掻き落とし、2 分練混ぜ(高速)とした。

石灰石粉 30%配合に、粉末状高性能減水剤の添加率を 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4%とした場合のフロー値とフロー速度(0, 0.1%は除く)を測定し、粉末状高性能減水剤の最適な添加率を検討した。

(2) 袋練混ぜ方法

図-2 に HPFRCC の袋練混ぜ方法を示す。HPFRCC の各材料を秤量し、ポリエチレン製の袋に入れた後の手順

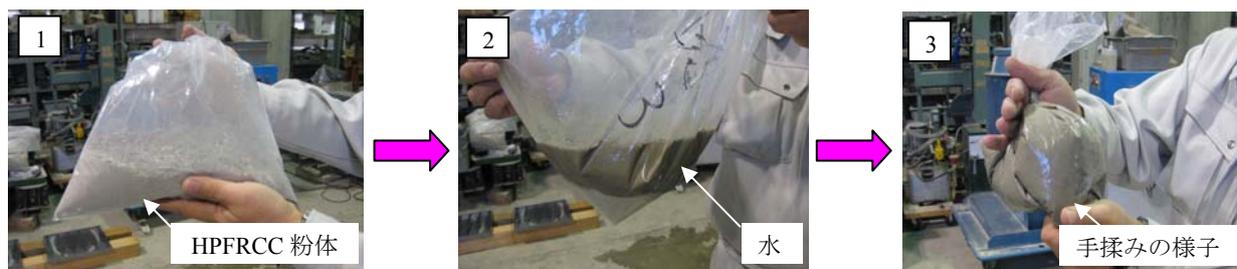


図-2 HPFRCC の袋練混ぜ方法

は次のとおりとした。(1)袋内に空気を入れて膨らませ、袋上部を絞り込み、袋ごと振とうさせて粉体混合する。(2)粉体物を袋底部の片側に寄せて円錐状とし、水を投入して浸透させる。(3)袋内の空気を追い出して上部を絞り込み、手揉みにより練り混ぜる(2秒に1揉み程度)。

(3) 繊維混入率

PE 繊維の混入率を 0, 0.75, 1.0, 1.5vol%, マトリクスモルタルを石灰石粉 30%置換配合(粉末状高性能減水剤の添加率 0.3%, 増粘剤の添加率 0.08%)とし、繊維の分散性や練混ぜに要する時間を調べた。練混ぜ量を 10とした HPFRCC の粉体を外寸 300×450mm, 厚さ 0.08mm のポリエチレン製の袋に入れ、手揉み開始から軟度が変化しなくなるまでの時間を、練混ぜ完了時間とした。練混ぜ完了直後の HPFRCC を袋から排出し、指触で繊維の分散性を調べた。

2.4 袋練 HPFRCC の特性

表-3 に袋練 HPFRCC の特性を調べるための実験因子・水準を示す。空気量調整材による実験では、調整材なし、粉末状空気連行剤、中空骨材、粒状発泡スチロールの 4 水準、石灰石粉を多量添加した場合の影響を調べる実験では、置換率 30%, 45%, 60%の 3 水準、膨張材を用いた実験では、添加率 0, 3, 6, 9%の 4 水準について行った。

配合は石灰石粉 30%置換配合(粉末状高性能減水剤の添加率 0.3%, 増粘剤の添加率 0.08%, PE 繊維の混入率 1.0 vol %)をベース配合とした。空気量調整材による実験では、目標空気量が 10%となるよう各々の添加量を決めた。水準(配合)ごとに練混ぜ量 10の袋練を 4 袋行った。練混ぜ後、各袋の HPFRCC を 50l のポリビーカーに排出してひとつにまとめ、練さじで混合した。混合後の HPFRCC を用いて、フロー値、空気量、圧縮強度および一軸引張試験を行った。一部の供試体では一軸引張試験時におけるひび割れの発生状況をマイクロスコープ(倍率 50 倍)で調べた。また、膨張材による実験では、4×4×16cm の供試体を作製し、膨張材の添加による膨張特性も調べた。膨張特性は JIS A 1129-3「ダイヤルゲージ方法」に規定する長さ変化試験方法により行い、脱型時の測長を基準とした。供試体は材齢 7 日まで 20℃水中養生、そ

表-3 実験因子及び水準

実験因子	水準
空気量調整材	調整材なし, 粉末状空気連行剤, 中空骨材, 粒状発泡スチロール
石灰石粉置換	30, 45, 60(セメント量の内割置換, %)
膨張材添加	0, 3, 6, 9(セメント量の内割置換, %)

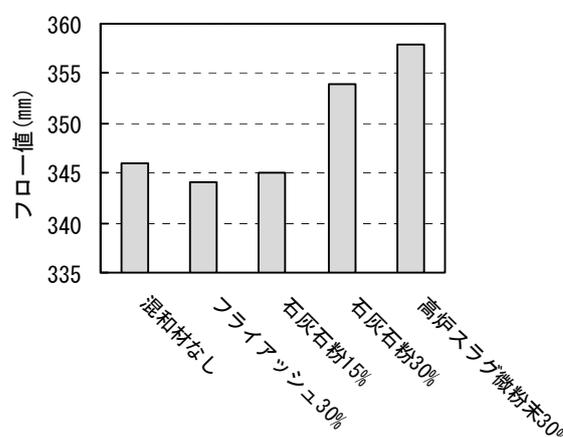


図-3 混和材の種類とフロー値

の後材齢 28 日まで 20℃, 湿度 60%の気中で養生した。

3. 実験結果および考察

3.1 材料・配合の選定

(1) 混和材

図-3 に混和材がフロー値に及ぼす影響を示す。マトリクスモルタルの流動性向上の効果が見受けられたものは高炉スラグ微粉末 30%, 石灰石粉 30%であった。フライアッシュ 30%, 石灰石粉 15%は混和材を用いないものと殆ど変らなかった。フロー値の差は、実験に用いた混和材の粉末度や粒形・粒度分布の違いが影響したものと思われる。

改質効果が最も高かった混和材は高炉スラグ微粉末であったが、水和熱、自己収縮、経済性の面から石灰石粉(置換率 30%)を袋練 HPFRCC の混和材として選定し、以降の実験を進めた。

(2) 粉末状高性能減水剤の添加率

図-4 に粉末状高性能減水剤の添加率とフロー値、フロー速度の関係を示す。フロー値は添加率 0.2%~0.3%

の間で急激に大きくなり、0.3%でほぼ頭打ちとなった。フロー速度は添加率が大きくなるほど遅くなり、フロー値と同様に0.3%でほぼ頭打ちとなった。

HPFRCCの繊維の分散性は、マトリクスモルタルの流動性(粘性、軟度)の影響を強く受ける。本試験結果からは、流動性がピーク付近となった0.3%が粉末状高性能減水剤の最適な添加率となった。

(3) 繊維混入率

表-4にPE繊維の混入率と繊維の分散性、練混ぜ時間の結果を示す。混入率0.75、1.0%の場合は、繊維のダマは見受けられず分散性は良好であった。1.25%では極微量のダマが、1.5%ではややダマが目立つようになった。練混ぜ時間は混入率1.0%以下の場合には2.5分以内、1.25%以上になると3.5分以上となった。練混ぜ開始から軟らかさが出始めるまでを、「練混ぜ易さ」として感覚的な相対評価をした。「練混ぜ易さ」は繊維混入率1.0%以下の場合には良好となり、マトリクスモルタルの流動特性が同一であれば「練混ぜ易さ」は繊維混入率の影響を受けることが分かった。ひび割れ発生後の繊維の架橋応力の面からは、ある限度以上の繊維量は必要となることや、これまでの実績(1.5vol%)から、袋練HPFRCCのPE繊維混入率は1.0%程度が適当と思われた。

3.2 袋練HPFRCCの特性

表-5に空気量調整材、石灰石粉、膨張材による実験結果を示す。

(1) フロー値、空気量

フロー値の分布を全体でみると、0打は135~151mm、15打は161~178mmとなり、材料や配合の違いによる差はわずかであった。マトリクスモルタルの水量や水粉体比が同一であることや、フロー試験時には繊維がモルタルの変形を拘束していることも原因として考えられた。

全配合共に練混ぜ易く繊維の分散性は良好であった。

空気量調整材を用いた実験の空気量は、調整材なしの場合は2.4%、粉末状空気連行剤は8.3%、中空骨材は11.7%、粒状発泡スチロールは10.7%となった。空気量調整材を用いない配合の空気量は1.6~2.6%(n=6個)となり、袋練混ぜ方法の場合、空気泡が入りにくいことが分かった。粉末状高性能減水剤には空気連行性がないことや、袋練混ぜ方法では「練り」の要素が殆どで、機械練のように「混ぜる」要素が殆どないため、空気泡が入りにくいと思われた。

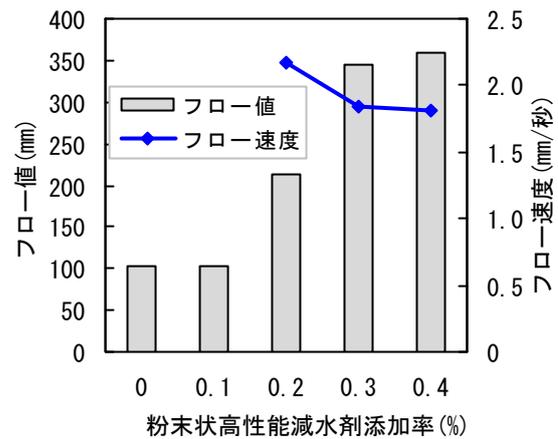


図-4 粉末状高性能減水剤添加率とフロー値

表-4 繊維の混入率と分散性

PE繊維混入率 (%)	繊維の分散性	練混ぜ完了時間	練混ぜ易さ
0.75	良好	2分	◎
1.00	良好	2分30秒	○
1.25	極微量のダマ	3分30秒	△
1.50	微量のダマ	4分	×

表-5 試験結果

実験項目	W/C (%)	W/B (%)	W/P (%)	W (kg/m ³)	フレッシュ性状			硬化特性				
					フロー値(mm)		空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	一軸引張試験			
					0打	15打			ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張終局ひずみ (%)	
空気量調整材	なし	43		30	380	151	174	2.4	65.2	5.3	6.4	0.4
	AE	43		30	380	149	178	8.3	48.7	4.8	6.1	0.7
	BA	43		30	380	142	170	11.7	53.9	4.6	6.3	0.9
	EPS	43		30	380	135	161	10.7	40.1	3.1	4.3	2.4
石灰石粉置換	30%	43		30	380	151	174	2.4	65.2	5.3	6.4	0.4
	45%	55		30	380	142	171	2.5	47.8	4.6	7.0	0.7
	60%	75		30	380	140	170	2.6	31.3	3.8	4.6	1.8
膨張材添加	0%		43	30	380	151	174	2.4	65.2	5.3	6.4	0.4
	3%		44	30	380	149	175	2.5	63.8	5.1	6.1	0.6
	6%		46	30	380	147	169	1.9	60.9	5.4	6.4	2.4
	9%		47	30	380	146	174	1.6	56.7	3.3	5.7	2.7

W/C ; 水セメント比, W/B ; 水結合材比, W/P ; 水粉体比, AE ; 粉末状空気連行剤, BA ; 中空骨材, EPS ; 粒状発泡スチロール

(2) 圧縮強度

圧縮強度は、空気量調整材の実験では、最大値は調整材なしの場合で 65.2N/mm^2 、最小値は粒状発泡スチロールの場合で 40.1N/mm^2 となった。中空骨材を用いた圧縮強度は 53.9N/mm^2 となり空気量が最大(11.7%)となったにも関わらず圧縮強度は大きくなった。他の空気量調整材と比較して圧縮強度が大きくなったのは、中空骨材自体の外殻が強度に寄与したものであると思われる。石灰石粉の実験では、置換率が大きくなるほど圧縮強度は低下し、置換率60%の場合の強度は置換率30%の約48%となった。置換率30%, 45%, 60%における水セメントは43%, 55%, 75%となっているため、この影響が現れたものと思われる。膨張材の実験では、膨張材の添加率が大きくなるに従い、圧縮強度は徐々に低下する傾向を示した。添加率3%, 6%, 9%における強度低下率(添加率0%を基準)は、2%, 7%, 13%となった。

(3) 膨張材の添加による膨張特性

図-5 に膨張材の添加率と長さ変化の関係を示す。添加率3%では膨張材の効果は殆ど見られず、添加率9%では7日で 6300×10^{-6} 、28日で 4800×10^{-6} となり7日以降の気中養生後も大きな膨張を維持していた。添加率6%では7日で 1600×10^{-6} 、28日では 50×10^{-6} となり、 1400×10^{-6} 程度収縮が低減されていた。HPFRCCを補修材として用いる場合、穴状の箇所か、鉄筋を配置するかといった拘束の程度によって、望ましい膨張・収縮挙動は異なると考えられる。適用箇所を限定しない場合には、膨張ひずみができるだけ小さく、収縮ひずみがゼロに近いことが望ましい。したがって、本研究の範囲では、無収縮性が必要とされる場合の膨張材の添加率は6%程度が良いと思われる。

(4) 一軸引張特性

ここでは、表-5 に示す実験結果と図-6 に示す一軸引張試験時の応力-ひずみ曲線から述べる。応力-ひずみ曲線は、1水準ごとの引張終局ひずみが5体中の中央(順位3位)となった供試体について示している。

空気量調整材の場合では、空気量調整材を用いることにより、ひび割れ発生強度は低下するものの引張終局ひずみは大きくなった。粒状発泡スチロールによる引張終局ひずみ(2.4%)は、調整材なし(0.4%)との比較では6倍となった。顕微鏡によるひび割れの観察では、一軸引張試験時のひずみ2.0%付近における検長区間内(80mm)のひび割れ本数は31本、ひび割れ幅は最大0.035mm、最小0.01mm、平均0.022mmであった。ひび割れ発生強度は 3.1N/mm^2 、引張強度は 4.3N/mm^2 と低目になったもののHPFRCCとしての特徴は顕著に現れた。

石灰石粉の場合では、置換率が大きくなるとひび割れ発生強度は小さくなり、引張終局ひずみは大きくなる傾

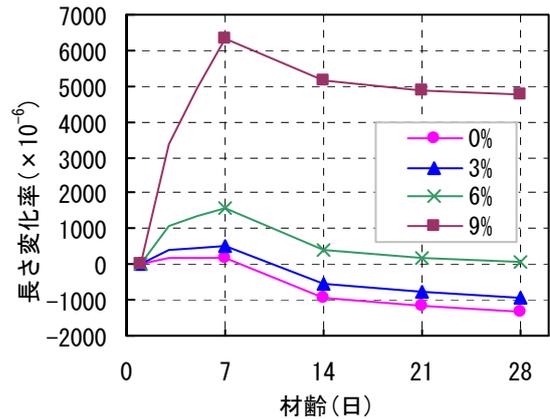


図-5 膨張材添加による長さ変化率

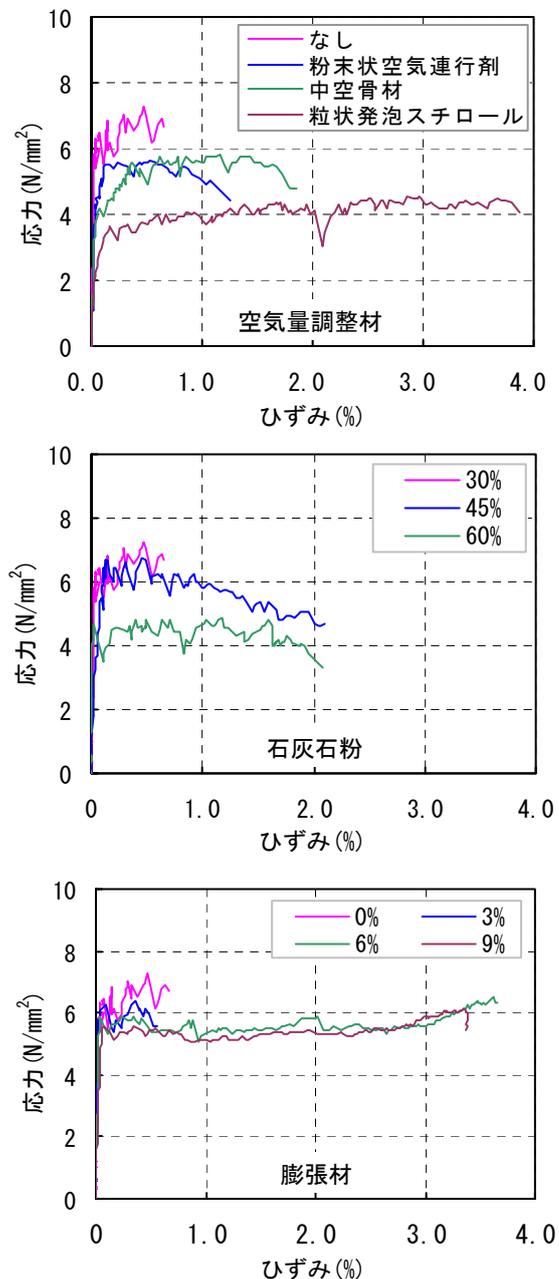


図-6 応力-ひずみ曲線

向を示した。置換率 60% の場合の圧縮強度は 31.3N/mm^2 と極端に低かったが、引張終局ひずみは 1.8% となり、ひずみ硬化挙動と複数の微細なひび割れが確認できた。低強度の場合でも HPFRCC の挙動が現れた理由として、マトリクスの引張強度はひび割れ発生後の繊維の架橋応力を若干下回る程度で、そのため、ひずみ硬化の傾きは小さい(図-6)ながらも HPFRCC の特性を示したものと考えられる。

膨張材の場合では、添加率 6%、9% の場合、ひずみが 1.0% 付近までは緩やかなひずみ軟化挙動を示し、その後ひずみの増加と共に応力も漸増し、ひずみが 3.5% 付近で最大引張強度に達した。膨張材の添加によるひび割れ発生強度は、添加率 0%~6% と比較して、9% は大きく低下した。この原因として、一軸引張試験は膨張が最大となった時点(材齢 7 日)で実施したため、引張試験の前に供試体内部に微細なひび割れが生じ、ひび割れ発生強度を低下させたと思われるが、今後さらに検討する必要がある。

(5) マトリクス強度の選定

図-7 に空気量調整材、石灰石粉、膨張材の実験による圧縮強度と引張終局ひずみの関係を示す。この場合の圧縮強度は PE 繊維を混入したものであるが、繊維混入率が一定であるためマトリクス強度と対応している。膨張材添加の場合を除いて、圧縮強度が小さくなると引張終局ひずみが大きくなる傾向を示している。従って、目標とする引張終局ひずみは、マトリクス強度を選定することにより可能となることが分かった。マトリクス強度の調整には、マトリクス自体の流動性が確保でき、水和反応に殆ど寄与しない石灰石粉が良いと思われる。

4. まとめ

袋練混ぜ方法による HPFRCC の配合と力学特性についての検討を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 袋練混ぜ方法による HPFRCC は、ひずみ硬化特性や複数微細ひび割れの特性を有し、HPFRCC としての性能を発揮することを確認した。
- (2) 粒状発泡スチロールを袋練 HPFRCC の空気量調整材として用いることにより、引張終局ひずみが格段に向上することを確認した。
- (3) 石灰石粉を多量添加し圧縮強度が 31N/mm^2 程度となった場合でも、PE 繊維の混入率が 1.0vol% の場合には HPFRCC としての性能を発揮することを確認した。

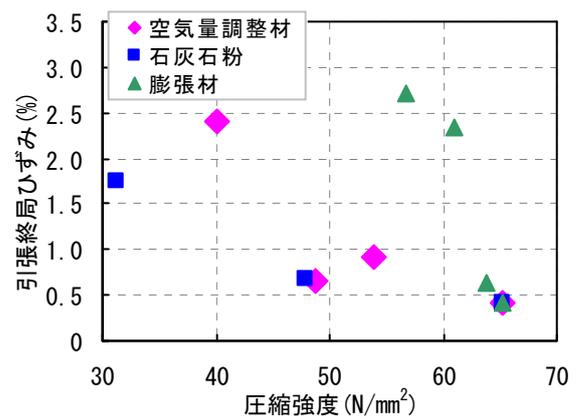


図-7 圧縮強度と引張終局ひずみ

- (4) マトリクス強度を選定することにより、袋練 HPFRCC の引張終局ひずみの増減の調整が可能となることが分かった。
- (5) 袋練 HPFRCC の混和材としては、マトリクスモルタルの流動性や強度コントロールの面からも、石灰石粉が良いと思われた。
- (6) 袋練 HPFRCC を無収縮モルタルの用途に使用する場合、HPFRCC の膨張材の添加率は 6% 程度が良いと思われた。

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119，2005.4
- 2) 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127，2007.3
- 3) 高橋祐二・浅野幸男・小林孝一・六郷恵哲：海藻ゲル物質を用いた HPFRCC 微細ひび割れ部の止水性の改善，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.261-266，2008
- 4) 高田治夫・高橋祐二・浅野幸男・六郷恵哲：膨張型 HPFRCC でケミカルプレストレスを導入した RC 梁のひび割れ特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.337-342，2009
- 5) 宮元智之・浅野翔也・浅野幸男・六郷恵哲：ひび割れを導入した円筒供試体を用いた止水性材料の性能評価方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1601-1606，2010