

# 論文 ASRの膨張を有効利用したHPFRCCのひび割れ性状と長さ変化挙動

高田 浩夫\*1・田邊 幸佑\*2・浅野 幸男\*3・六郷 恵哲\*4

**要旨:**従来のセメントコンクリートと配合やひび割れ抵抗性が大きく異なるHPFRCCにASRが発生した場合の性能の変化を確認するため、マトリクスのASRによる膨張条件の確認を行い、促進養生でASRを発生させたHPFRCCについて、ダンベル型供試体の一軸引張試験におけるひび割れ性状と角柱供試体の長さ変化挙動を確認した。ASRを伴うHPFRCCはASRによる膨張率に関わりなく一様に終局ひずみが小さくなったが、ひび割れ性状に変化はなかった。角柱供試体のASRによる膨張は105°Cで自由水を乾燥させた後も残存していた。このことから、ASRを伴うHPFRCCに鉄筋を配置した高水密な容器などへの有効利用が考えられた。  
**キーワード:** ASR, アルカリシリカ反応, HPFRCC, ひび割れ性状, 長さ変化

## 1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下、HPFRCC）は、一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を示し、微細で高密度のひび割れを形成する高靱性材料である<sup>1)</sup>。この材料は、セメントの多い富配合で粗骨材を含まず、砂結合材比が1以下のペースト量が多いマトリクスに補強用繊維を1~2%混合することを配合の特徴とする。

アルカリシリカ反応（以下、ASR）は、コンクリートの劣化機構の一つとして挙げられ、抑制対策が取られているが、それが有効に機能しない場合があり抑制対策の限界<sup>2)</sup>が指摘されている。

またRILEMにおいてHPFRCCは、国際的にStrain Hardening Cementitious Composites(SHCC)として研究されており、筆者らが参画するTC FDSにはASRによるHPFRCCの劣化機構と特性変化に関する作業部会が設置されている。HPFRCCには、フライアッシュが混和材として使用される例も多く、一般にフライアッシュはASRの抑制対策に用いられるが、国際的にその品質は異なりフライアッシュ中のCa量やアルカリ量が多い場合にはその効果が低くなる<sup>2)</sup>ことが指摘されている。

本研究では、HPFRCCにASRが発生した場合の性能の変化について明らかにすることを目的としている。さらに、ASRによる膨張を有効利用し、長期にわたって膨張性能をもつHPFRCCの開発を目指している。そこで、本研究では、マトリクスのASRによる膨張条件の確認を行い、促進養生によりASRを発生させたダンベル型供試体を用いて、一軸引張試験によりASRの応力-ひずみ関係ならびにひび割れ性状への影響を確認した。さらに、既往の研究<sup>3)</sup>において種々のASR反応性骨材により

膨張したモルタル供試体の自由水を乾燥させた場合、ASR膨張に応じた乾燥後の残存膨張が報告されていることから、ASRによるHPFRCCの収縮補償について検討した。HPFRCCにASRが発生する場合の組成ペシマムや粒径ペシマムについての検討も行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 マトリクスのASR膨張条件の確認

#### (1) 使用材料および配合

実験に用いた材料を表-1に示す。ASR反応性骨材には、川砂を用いた。細骨材のJIS A 1145 化学法（以下、JIS化学法）によるASR反応性を図-1に示す。川砂は、火山群を源流とする河川の上流部で採取されたものである。配合は表-2に示すNo.0: W/C30%, 繊維混入率1.5%の高強度ポリエチレン繊維を用いたHPFRCCの配合を基本として、繊維を除いたマトリクスのASRによる膨張

表-1 使用材料

材料	記号	仕様, 物性
高強度ポリエチレン繊維	PE	繊維径 12 $\mu$ m, 繊維長 12mm, 密度 0.97g/cm <sup>3</sup> , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa
セメント	C	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm <sup>3</sup>
石灰石粉	LP	密度 2.71g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3050cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S6	6号珪砂, 密度 2.63g/cm <sup>3</sup>
	S7	7号珪砂, 密度 2.63g/cm <sup>3</sup>
	SA	ASR反応性骨材(川砂), FM=2.90 密度 2.55g/cm <sup>3</sup>
高性能AE減水剤	SPV	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	SPU	ポリカルボン酸エーテル系化合物
増粘剤	MC	水溶性セルロースエーテル, 粘度グレード 4000mPa·s
	HMC	水溶性セルロースエーテル, 粘度グレード 10000mPa·s

\*1 岐阜県生コンクリート工業組合 技術センター所長 博士(工学) (正会員)

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

\*3 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)

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表-2 HPFRCC とマトリクスの配合

No.	W/C (%)	W/P (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			W	Powder		S7	SA	SPV	MC	PE
				C	LP					
0	30	30	379*	1264	0	395	—	37.9	0.9	14.6
1	30			1264	0	395	6.3	—	—	
2	45	842		352						
3	50	758		425						
4	55	689		485						
5	55	36		689	373	500				
6	55	40	689	267	600					

\*W は SPV を含んだ水溶液の質量を表す

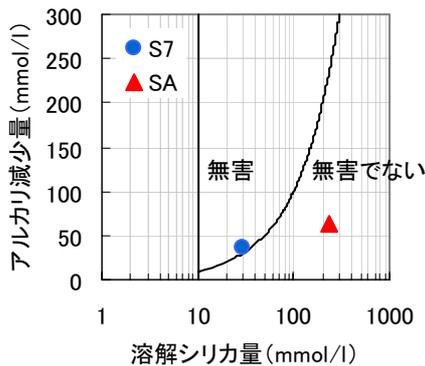


図-1 骨材の化学法による ASR 反応性

性を確認した。このとき増粘剤は用いず、高性能 AE 減水剤はフローが同程度によるよう使用量を 1/6 に減じた。セメントからのアルカリ量 (Na<sub>2</sub>O 換算) は 0.5% とした。また、マトリクスの粉体量を等しくして水セメント比を変化させる場合は、石灰石粉をセメントと置換して用いた。ASR による膨張は、JIS A 1804 迅速法 (以下、JIS 迅速法) のオートクレーブによる長さ変化率を試験した。

### (2) 水セメント比と膨張率の関係

ASR 反応性骨材を用いて表-2 に示す No.1 の水セメント比 30% のマトリクスと単位水量、単位細骨材量、粉体体積が同じになるよう、セメントを石灰石粉で置換して同表 No.2, No.3, No.4 に示すように水セメント比を 30% から 45%, 50%, 55% と変化させた。

### (3) アルカリ量と膨張率の関係

(2) で膨張の大きかった No.4 の水セメント比 55% の配合に対して、このときのセメントからのアルカリ量 (Na<sub>2</sub>O 換算) を 3.5kg とし、練混ぜ水の一部に 2mol/l の水酸化ナトリウム (NaOH) 溶液を用いてマトリクスの全アルカリ量が 10kg/m<sup>3</sup>, 15kg/m<sup>3</sup> となるよう調整した。

### (4) 反応性細骨材量と膨張率の関係

アルカリ量を変化させた(3)の配合に対して、単位水量、水セメント比を一定として石灰石粉を反応性細骨材と置換し、表-2 の No.4, No.5, No.6 に示すよう、反応性細骨材量を 395kg/m<sup>3</sup> から 500kg/m<sup>3</sup>, 600kg/m<sup>3</sup> と変化させた。

表-3 ASR を伴う HPFRCC の配合

配合	W/C (%)	W/P (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	Powder		SA (S6+S7)	SPU	HMC	PE
				C	LP				
HP FRCC PE:1.25% (Control)	50	38	390*	780	234	550 (558)	9.1	1.0	12.1

\*W は SPU を含んだ水溶液の質量を表す



写真-1 ダンベル型供試体と角柱供試体

### (5) 反応性細骨材粒径と膨張率の関係

(4) で膨張率の大きかった全アルカリ量を 15kg/m<sup>3</sup> とした No.6 の配合に対して、JIS 迅速法に規定する標準粒度と 4.75~2.36mm, 2.36~1.18mm, 1.18mm~600 μm, 600~300 μm, 300~150 μm, 150~75 μm にふるい分けた単一粒径の細骨材を用いた。

## 2.2 ASR を伴う HPFRCC の一軸引張性状と長さ変化挙動の確認

2.1 の結果から ASR を伴う HPFRCC の配合を表-3 とした。コントロール供試体は、骨材粒径を同等とするため 6 号珪砂と 7 号珪砂を 4:6 で混合した細骨材を用いた HPFRCC とした。

### (1) 促進養生条件の検討

2.1 では JIS 迅速法により ASR 膨張を試験したが、オートクレーブによる高温 (127℃) の繊維への影響を考慮して、HPFRCC の ASR 促進養生条件は、既往の文献<sup>4)</sup> を参考に練混ぜ時にアルカリを添加し 60℃ の 1mol/l NaOH 溶液に浸漬することとした。また添加アルカリとして NaOH を用いた場合、コンクリートの圧縮強度低下が指摘されている<sup>5)</sup>ことから、マトリクス強度への影響を考慮して、既往の文献<sup>6)</sup>を参考に添加アルカリには NaCl を用いて等価アルカリ量を 12kg/m<sup>3</sup> とした。

ここでは、JIS A 1146 モルタルバー法 (以下、JIS モルタルバー法) に規定するゲージプラグを埋め込んだ 40×40×160mm の角柱供試体を用いて、60℃, 1mol/l NaOH 溶液に浸漬した HPFRCC の NaCl 添加による ASR 促進について、ASTM C1260 (以下、ASTM モルタルバー法) の試験手順に準拠して供試体を取扱い、JIS A 1129-3 (ダイヤルケージ法) により試験した。

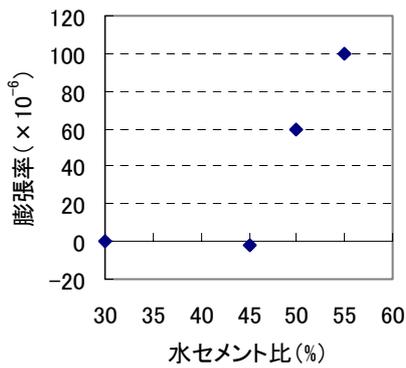


図-2 水セメント比と膨張率の関係

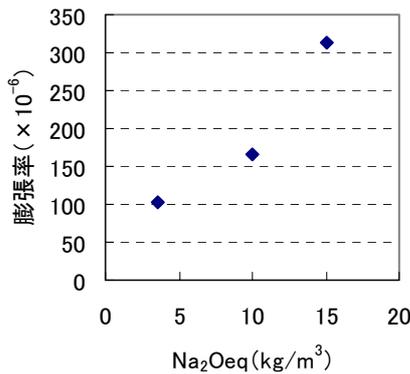


図-3 全アルカリ量と膨張率の関係

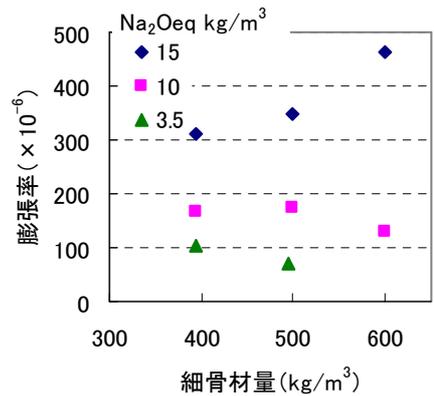


図-4 細骨材量と膨張率の関係

## (2) 一軸引張試験によるひび割れ性状と長さ変化挙動の確認

供試体は 20℃湿空養生を行い、材齢 10 日で一軸引張試験により ASR 反応前の HPRCC としての性能を確認した後、促進養生に供した。ASR による膨張は、写真-1 に示すよう、JIS モルタルバー法に規定するモルタル用供試体成形用型にスペーサーを用いてダンベル型供試体検長区間と等断面になるよう作製した 30×30×160mm の角柱供試体の長さ変化により確認した。ダンベル型供試体の一軸引張試験は、角柱供試体の膨張率が 0.05%、0.15%、0.22%、0.30%のとき実施した。同時に作製した φ50mm 円柱供試体の圧縮強度、ヤング係数もこのとき試験した。コントロール供試体についても同時期に同じ内容の試験を行い、ASR による膨張や ASR 促進養生環境による影響を確かめた。また、角柱供試体について 20℃における ASR 促進養生前を基長として、ASR 膨張後に 36 時間 105℃で自由水を散逸させたときの長さ変化を試験した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 マトリクスの ASR 膨張性

#### (1) 水セメント比と膨張率の関係

水セメント比と JIS 迅速法による膨張率の関係を図-2 に示す。ここでは、単位水量を一定としセメントを石灰石粉で置換して水セメント比を変化させたことで、水セメント比の上昇によりセメント量が減少し、即ちアルカリ量が 6.3kg/m<sup>3</sup> から 4.2 kg/m<sup>3</sup>、3.8 kg/m<sup>3</sup>、3.4 kg/m<sup>3</sup> と減少しているにもかかわらず、水セメント比が 45%、50%、55%と大きくなるに従って膨張率が大きくなった。このことは、ASR 膨張がセメントペーストの強度やポロシティーなどの硬化体の物性にも影響される<sup>9)</sup>ことによると考えられる。

#### (2) 全アルカリ量と膨張率の関係

全アルカリ量と膨張率の関係を図-3 に示す。本実験で用いた ASR 反応性骨材を水セメント比 55%で 395kg/m<sup>3</sup> 配合した場合、全アルカリ量が 3.5kg/m<sup>3</sup>、10

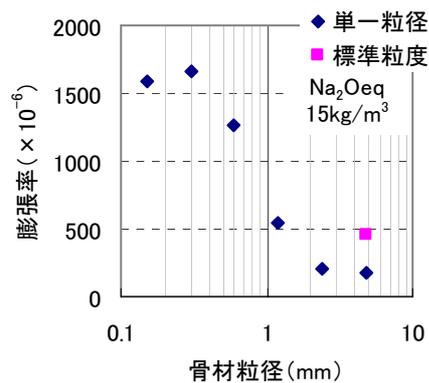


図-5 細骨材粒径と膨張率の関係

kg/m<sup>3</sup>、15 kg/m<sup>3</sup> と増えるに従い膨張率が大きくなった。ASR によって生成されたゲルのシリカ量 (SiO<sub>2</sub>) とアルカリ量 (Na<sub>2</sub>O 当量) のモル比によって生成するゲルの粘性や剛性が異なり、膨張量に変化が現れるとされている<sup>9)</sup>が、本実験で用いた反応条件、反応性骨材の量に対して全アルカリ量 15kg/m<sup>3</sup> は膨張量に変化を現す量ではなかった。

#### (3) 反応性細骨材量と膨張率の関係

全アルカリ量の異なるマトリクスの細骨材量と膨張率の関係を図-4 に示す。全アルカリ量 10kg/m<sup>3</sup> では細骨材量を増しても膨張率は大きくならず、細骨材量が 600kg/m<sup>3</sup> のとき膨張率は減少したが、全アルカリ量が 15kg/m<sup>3</sup> では細骨材量の増加に従い膨張率が増加した。本実験で用いた反応性骨材は、全アルカリ量を 15kg/m<sup>3</sup> として HPRCC に配合する場合、細骨材量 600kg/m<sup>3</sup> 以下の範囲で細骨材量が多いほど膨張率が大きくなると考えられる。

#### (4) 反応性細骨材粒径と膨張率の関係

反応性細骨材の粒径と膨張率の関係を図-5 に示す。グラフの骨材粒径は、2.1(5)で示したふるいの組合せで目開きの大きい方の値をプロットしている。本実験で用いた配合、反応条件、反応性骨材では、粒径が小さくなるほど膨張率が大きくなり 300~150 μm でベシマムが確認された。本実験で用いた反応性骨材は、600 μm を

超える粒径を除いて配合すると ASR 膨張が顕著に現れると考えられる。

### 3.2 ASR を伴う HPFRCC のひび割れ性状と長さ変化挙動の確認

2.1 の結果から本実験で HPFRCC に ASR を発生させる条件として、基本配合の水セメント比を大きくし、細骨材量を増して反応性骨材中の  $600\mu\text{m}$  以下の粒径を用いることが見出された。予備実験でこの条件に基づく多くの配合について一軸引張によるひずみ硬化挙動、複数微細ひび割れ性状を試験して表-3 の配合を決定した。配合に際して W/P 増加によるマトリクスの粘性低下を補うため、増粘剤は粘度グレードの高いものに変更した。ASR を伴う HPFRCC (以下、ASR-HPFRCC) の ASR 反応前の応力-ひずみ関係について珪砂を用いたコントロール供試体と共に図-6 に示す。川砂、珪砂いずれを用

いた材料も HPFRCC に特有なひずみ硬化型の引張特性を示すことを確認した。

#### (1) 促進養生条件の検討

$60^\circ\text{C}$ 、 $1\text{mol/l}$  NaOH 溶液に浸漬した ASR-HPFRCC の NaCl 添加による ASR 促進状況を図-7 に示す。NaCl を添加することで材齢初期の段階から膨張が確認でき、この場合材齢 20 日で NaCl を添加しないものに比べて約 2 倍の 0.2% 程度の膨張が得られることから、NaCl によりアルカリを添加して促進養生をすることとした。

#### (2) ASR-HPFRCC の膨張と一軸引張試験によるひび割れ性状と長さ変化挙動の確認

ダンベル型供試体の検長区間と等断面の  $30\times 30\times 160\text{mm}$  角柱供試体の ASR 促進養生における膨張率の推移を図-8 に示す。この角柱供試体は、体積表面積比 (V/S):  $6.9\text{mm}$  が(1)の実験で用いた JIS モルタルバー法の

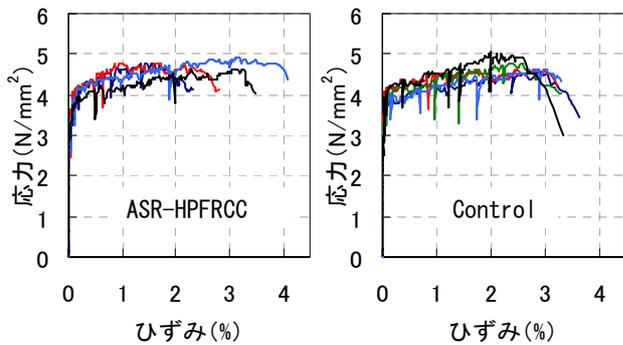


図-6 ASR 促進養生前の応力-ひずみ関係

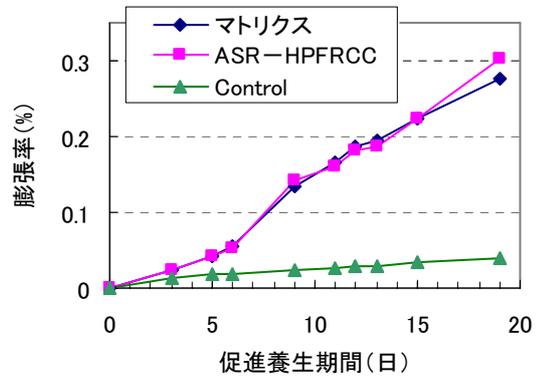


図-8 角柱供試体の ASR 膨張率

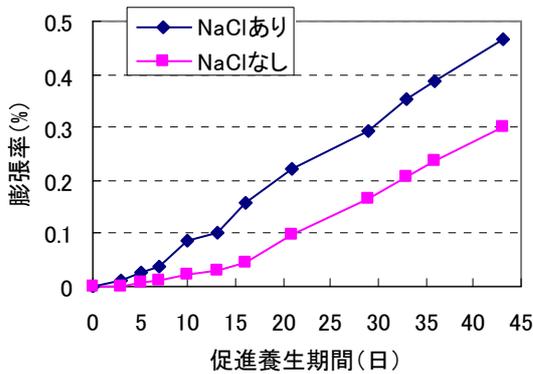


図-7 NaCl 添加による ASR 促進状況

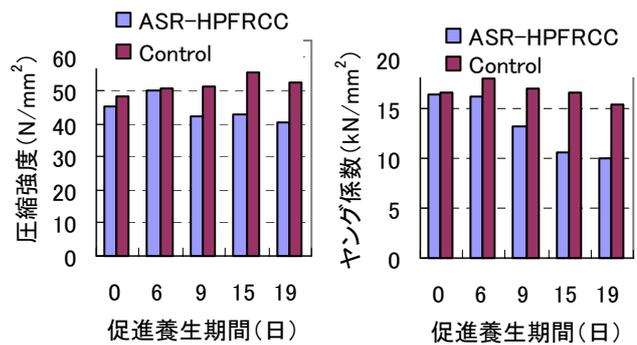


図-9 促進養生期間と圧縮強度、ヤング係数

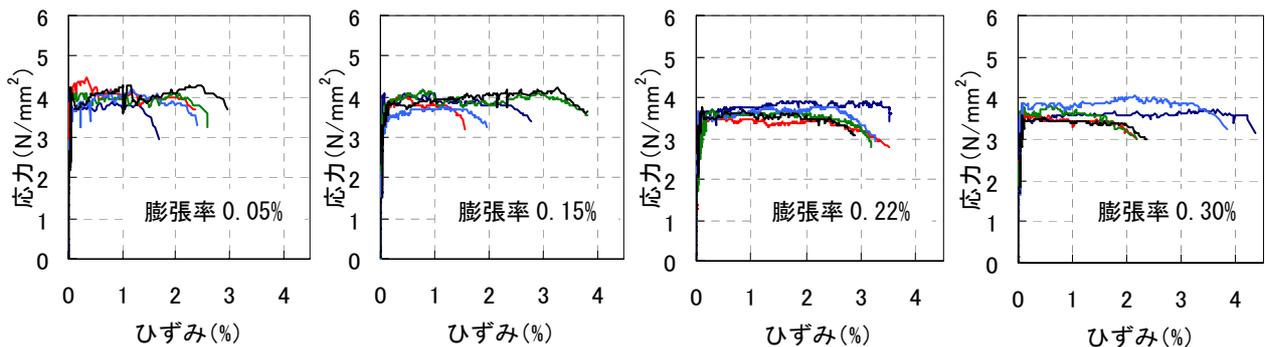


図-10 各 ASR 膨張段階での応力-ひずみ関係

40×40×160mm 角柱供試体の V/S : 8.9mm と比べて小さいので ASR の進行が早く、0.3%の膨張率に 10 日早い促進養生期間 20 日で到達した。筆者らの膨張材を用いた HPRC の研究<sup>10)</sup>では、膨張材の膨張に対してはマトリクスの膨張率が 0.3%のとき HPRC では膨張率が 0.2%と低かったが、ASR の膨張に対してはマトリクスと ASR-HPRC は同等の値を示した。このことは前者のセメントペーストの膨張と後者のアルカリシリカゲルの吸水膨張では、膨張メカニズムの違いにより内部応力が異なることや ASR によるヤング係数の低下によるものと考えられる。また、JIS 化学法による ASR 反応性試験の結果が、 $R_c=37\text{mmol/l}$ 、 $S_c=30\text{mmol/l}$  で図-1 の判定図において境界線付近の無害の領域にプロットされるコントロール供試体に用いた珪砂は、HPRC に配合した場合も、JIS モルタルバー法や ASTM モルタルバー法における無害の閾値：膨張率 0.10%を越えなかった。

角柱供試体の ASR 反応前、膨張率 0.05%、0.15%、0.22%、0.30%の各段階に対応する促進養生期間 0 日、6 日、9 日、15 日、19 日における ASR-HPRC の圧縮強度、ヤング係数を図-9 に、その時点の一軸引張試験における応力-ひずみ関係を図-10 に示す。コンクリートに関する既往の研究<sup>11)</sup>では、膨張率 0.3%程度までは圧縮強度の低下は顕著でないが、ヤング係数は膨張率が 0.1%までの範囲で 33%程度まで急激に低下することが報告されている。本研究においては、圧縮強度の低下はコンクリート同様に顕著ではなかったが、ヤング係数の低下は膨張率が 0.3%の範囲で緩やかに直線的に 63%まで低下した。HPRC の場合、コンクリートと異なり ASR の膨張によるマトリクス内部のひび割れを繊維が架橋し変形を制

御することによるものと考えられる。同時に 60℃、1mol/l NaOH 溶液に浸漬したコントロール供試体の圧縮強度、ヤング係数に顕著な変化は見られないことから、離散的に配置する骨材の ASR による変化が及ばない健全なマトリクスが HPRC の機能を維持するものと考えられる。これらの理由により、図-10 に示すよう ASR による膨張率が 0.3%までの各段階における応力-ひずみ曲線は同等の軌跡を示すものと考えられる。

各膨張段階での一軸引張試験値を図-11 に示す。ASR による膨張が発生した場合、引張降伏強度、引張強度に顕著な変化は見られないが、軟化開始点で計測される引張終局ひずみの一様な低下が見られる。図-10 の応力-ひずみ曲線ではそのことが明確に確認できないのは、応力を保ちながら軟化が緩やかに進むことによるもので、ASR-HPRC の特徴的な挙動と考える。またそのときのひび割れ本数の平均値は、図-11 の棒グラフの上に斜体で示すよう、ASR による変化は見られなかった。各膨張段階の一軸引張試験で終局ひずみが中央値を示した供試

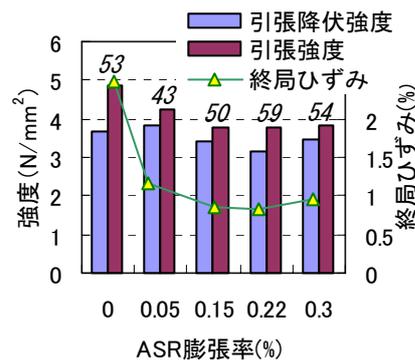


図-11 各 ASR 膨張段階での一軸引張試験値

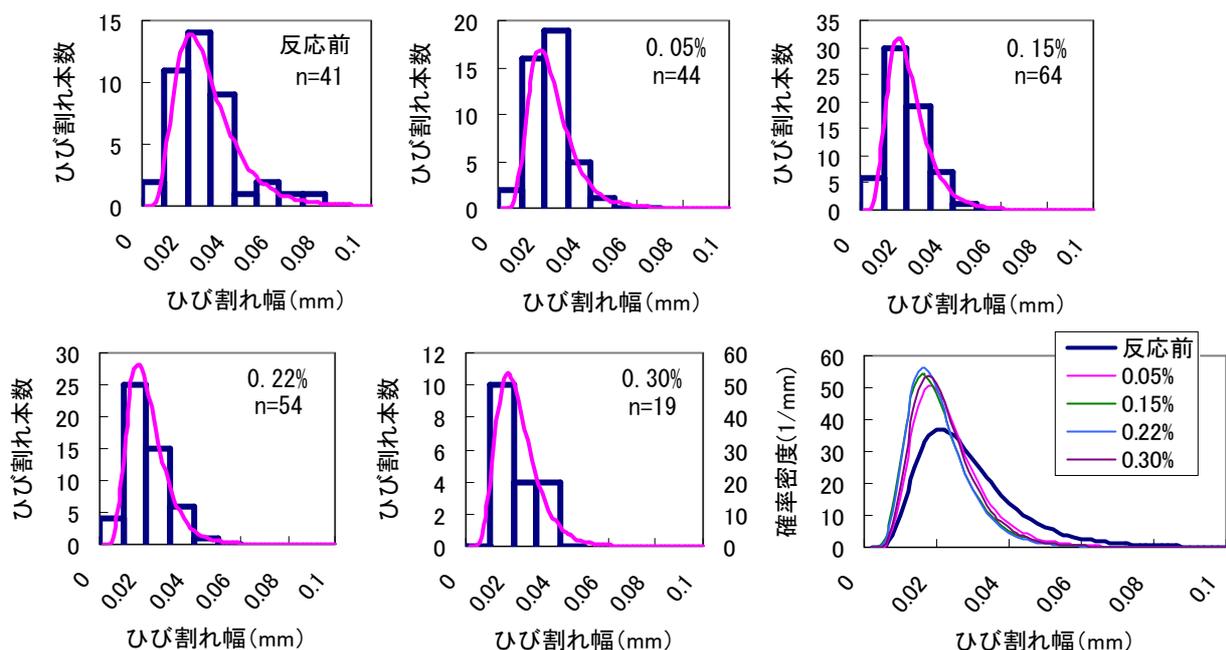


図-12 各 ASR 膨張段階における一軸引張試験後の残留ひび割れの幅のヒストグラムと確率分布曲線の推移

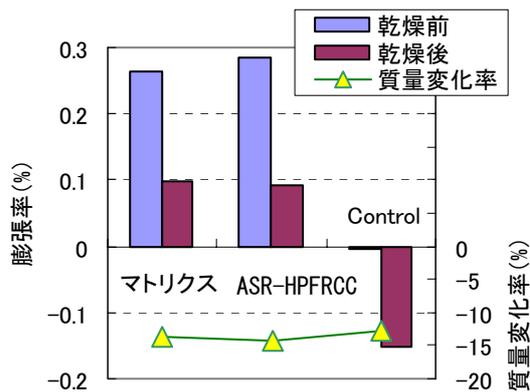


図-13 ASR 試験後の乾燥前後の膨張率と質量変化率

体のひび割れ幅のヒストグラムと確率密度曲線を図-12に示す。供試体表面には一軸引張試験前に地図状のひび割れが確認されたが、析出物で塞がり幅の計測が困難であったため、引張試験後の検長区間に貼付したゲージ位置での残留ひび割れを顕微鏡で計測した。筆者らが既往の研究<sup>12)</sup>で示したよう、ひび割れ幅の分布は対数正規分布に従い、また反応後の確率密度曲線は膨張率に関わらず同等の形を示した。このことはASRによる膨張が0.3%以内では、ひび割れ幅の平均や標準偏差に変化がないことを表し、本実験の範囲では、ASRのHPFRCCのひび割れ性状への影響は認められなかった。

次に角柱供試体をASR膨張試験後に105℃で乾燥する前と後の膨張率と質量変化率を図-13に示す。ASRで膨張したマトリクス、ASR-HPFRCCは、乾燥後も0.1%の膨張率を示し、コントロール供試体では0.15%の収縮率を示した。このとき、いずれの供試体も同程度の質量減少変化率を示していることから、ASRでアルカリシリカゲルの吸水膨張に関わった水は、自由水と異なりその構造の中に取り込まれ乾燥により散逸し難いことでASRによる膨張が残存したと考える。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) HPFRCCにASRが発生する条件として、本実験で用いた細骨材の場合、水セメント比を50%に大きくし、 $600\mu\text{m}$ 以下の粒径を用いて単位量を $550\text{kg/m}^3$ に増すことで膨張が大きくなった。
- (2) ASRの発生したHPFRCCは、本研究の範囲においてASRによるひび割れ性状に変化はなく、複数微細ひび割れを形成し高靱性で延性を示す挙動を維持した。
- (3) ASRの発生したHPFRCCは、ASR膨張後に自由水を散逸させても膨張率が残存した。

以上よりHPFRCCにASRが発生した場合、ひずみ硬化型の引張特性の維持によりひび割れ幅が制御され、乾燥してもその膨張が残存することから、膨張の時期や量

をコントロールすることで、鉄筋を配置してケミカルプレストレスが作用する収縮補償された水密性の高いRC容器などへの有効利用が考えられる。このことは今後の研究課題としたい。

#### 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127，2007.3
- 2) 山田一夫：収まらないアルカリ骨材反応 何が足りないのか？[後編]，セメント・コンクリート，No.786，pp.35-43，2012.8
- 3) 中村秀三，森 大介，富田 治：アルカリ骨材反応性評価試験方法の比較研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.59-64，2006
- 4) 黒田 保，井上正一，吉野公，西林新蔵：NaOH溶液に浸漬したコンクリートのASR膨張特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.83-88，2006
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート法によるアルカリシリカ骨材反応判定試験方法研究委員会報告書，pp.5-6，1991
- 6) 中田正文，久保善司：骨材種類がASR劣化コンクリートの力学的性能および変形特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1055-1060，2011
- 7) 柴田都江，久保善司，栗原慎介，宮川豊章：ASRにより劣化したコンクリートにおける炭素繊維シートの補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.397-402，2001
- 8) 黒田 保，小谷憲司，高見新一，西林新蔵：各種試験環境下におけるモルタルのASR膨張特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.95-100，2003
- 9) 中部セメントコンクリート研究会：アルカリ骨材反応，理工学社，1990
- 10) 高田浩夫，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
- 11) 小池正俊，久保善司，上田隆雄，野村倫一：ASR膨張量にともなう劣化コンクリートの力学的性能の検討，土木学会第60回年次学術講演会，pp.39-40，2005.9
- 12) 高田浩夫，浅野幸男，小林孝一，六郷恵哲：HPFRCCに発生する複数微細ひび割れの確率分布によるキャラクター化，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.269-274，2011