

# 論文 コンクリートのひび割れ自己治癒材料の造粒技術に関する基礎的研究

小出 貴夫\*1・岸 利治\*2・安 台浩\*3・森田 卓\*4

**要旨：**ジオマテリアル（粘土鉱物）を含むひび割れ自己治癒材料は、ひび割れに対する良好な自己治癒性能を有するが、水との反応性・吸水性が高い微粉末材料であり、コンクリートに混和するとフレッシュ性状が低下する課題があった。この課題を解決するため、ひび割れ自己治癒材料にバインダとして低熱セメントおよび水を加えて転動造粒し、粒径および嵩密度を増大させた造粒物を得た。そして、この造粒物を細骨材置換で  $40\text{kg/m}^3$  混和した  $\text{W/C}=56.5\%$  の繊維補強コンクリートの物性を検討した。その結果、造粒物を使用することでコンクリートのフレッシュ性状の改善が可能であり、また自己治癒性能を有することを確認した。

**キーワード：**ひび割れ, 自己治癒, ジオマテリアル, 造粒, バインダ, 繊維補強コンクリート, 通水試験

## 1. はじめに

ひび割れからの漏水防止を目的とした自己治癒材料（以下、SH 材料と略記）に関しては、これまでに膨張材、炭酸塩、ジオマテリアル等を含む材料を用いた報告がなされている<sup>1),2)</sup>。ジオマテリアル(Geo-Materials)は、砂・粘土・岩あるいはガスハイドレード等の自然界で堆積・形成された地盤材料の総称である。ジオマテリアルを含む無機系 SH 材料のひび割れ自己治癒機構は、SH 材料と水との反応による膨張・膨潤作用・ポゾラン反応等、水中に溶存する  $\text{CO}_2$  との炭酸化反応等の複合作用と考えられている<sup>3)</sup>。なお、筆者らが使用しているジオマテリアルは、アルミノシリケート等の粘土鉱物である。

粘土鉱物を含む SH 材料は、比較的少ない混和量かつ水セメント比の高いコンクリート（セメント置換で  $22\text{kg/m}^3$  混和した  $\text{W/C}=47\%$ ）においても、通水状態で良好なひび割れ自己治癒性能を発現するが<sup>2),3)</sup>、粘土鉱物を含む SH 材料は、水との反応性・吸水性が高い微粉末材料であるため、コンクリートのフレッシュ性状（スランプ）が著しく低下するという課題があった。この課題を解決するため、粉体表面に熱可塑性・撥水性・遮水性等の機能を有するコーティング膜を形成させるマイクロカプセル化技術<sup>4)</sup>、あるいは製薬等で用いられている流動層式造粒技術、噴霧乾燥式造粒技術<sup>5)</sup>等を適用することは技術的に可能であるが、これらは高価な装置を必要とし、また装置の処理能力が低いため、コンクリートのひび割れ自己治癒材料の改質技術としては不向きであると考えられた。

そこで本研究では、装置が単純かつ低コストで処理可能な転動式造粒技術を用いて、粘土鉱物を含む SH 材料にバインダ材料を加えて造粒することによって、粒径お

よび嵩密度を増大させ、コンクリートに混和した際のフレッシュ性状の低下を防ぐことを目的とした。また、得られた SH 材料造粒物を細骨材置換で繊維補強コンクリート（以下、FRC と略記）に混和し、FRC の物性やひび割れ自己治癒能力について基礎的な検討を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験概要および項目

シリーズ 1 では、粘土鉱物を含む SH 材料の転動式造粒方法について検討を行った。粉体工学において造粒(Granulation)とは、粉体・熔融液・水溶液等から、所望の粒径・形状の粒状物・粉体成形物を作る操作と定義され、造粒の基本的メカニズムは、①成長様式による造粒、②圧密様式による造粒・成形、③液滴発生様式等による造粒があり、いずれもバインダ（液体・粉体）を必要とする<sup>6)</sup>。そのため、転動式造粒装置に対する材料の仕込み量、バインダの添加量、装置の回転数、装置ドラム（パン）の角度、造粒時間等のパラメータは、予備造粒試験を行って決定した。得られた SH 材料造粒物の物性として、粒度、密度、圧壊荷重を測定した。

シリーズ 2 では、シリーズ 1 で得られた SH 材料造粒物を細骨材とみなし、 $\text{W/C}=56.5\%$  のベースコンクリートに対して、細骨材置換で  $40\text{kg/m}^3$  混和した自己治癒コンクリートを生コン工場において実機製造した。その後、アジテータ車にビニロン繊維を手投入して自己治癒 FRC とした。この自己治癒 FRC のフレッシュ性状および圧縮強度について、SH 材料無添加の FRC および SH 材料を粉体添加した FRC と比較検討した。また、桁形試験体および  $\phi 100\text{mm} \times \text{h}200\text{mm}$  円柱供試体を作製し、材齢 3~4 ヶ月で通水試験を行い、ひび割れの自己治癒性

\*1 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所（正会員）

\*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博（工）（正会員）

\*3 東京大学 生産技術研究所 助教 博（工）（正会員）

\*4 （元）東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 修士課程（正会員）

能についても比較検討した。

## 2.2 使用材料および配合

シリーズ1の造粒用材料を表-1に示す。SH材料は、これまで検討してきたジオマテリアル（粘土鉱物）<sup>2),3)</sup>を含む改良型を使用した。造粒用の粉体バインダには、水和反応の遅いC<sub>2</sub>Sを多く含有する低熱セメントを、液体バインダには、上水道水を使用した。また、ひび割れ部における水和物析出量を増大させ、自己治癒性能を高める目的でφ27μm×長さ6mmのビニロン短繊維<sup>6)</sup>を使用し、造粒時に0.08kg/m<sup>3</sup>外割添加した。さらに、転動式造粒時の二次造粒（仕上げ）工程において、造粒物の表層に緻密なバインダ層を形成させるため、シリカフェームを低熱セメントに混合して使用した。

シリーズ2のFRC用材料を表-1に示す。SH材料は、粉体およびシリーズ1で得られた造粒物を使用した。セメントは普通セメント、細骨材は陸砂および砕砂の混合砂、粗骨材は硬質砂岩砕石および石灰石砕石の混合砕石を使用した。FRC用繊維は、φ660μm×長さ30mmのビニロン繊維を使用した。FRC配合を表-2に示す。FRCのベースコンクリートは、W/C=56.5%、呼び強度27N/mm<sup>2</sup>、目標スランプ21cm、目標空気量4.5%の配合とした。SH材料は、粉体および造粒物のいずれも細骨材とみなし、40kg/m<sup>3</sup>置換した。この際、SH材料の密度も細骨材と同一とみなして配合修正は行わなかった。高性能AE減水剤は、実機製造試験が夏期であったため遅延形を使用し、固形分も含め練混ぜ水の一部とみなした。ビニロン繊維の混合量は、ベースコンクリートに対して外割りで0.5vol%=6.5kg/m<sup>3</sup>とし、荷卸直前にアジテータ車に手投入し、60秒間高速攪拌してFRCとした。

## 2.3 造粒方法および試験方法

シリーズ1において、転動式造粒装置は、パンペレタイザに代表される専用装置を使用せず、写真-1に示す

コンクリート用傾胴式ミキサ（容量100L、モータ出力2.2kW）を使用した。事前に行った予備造粒試験の結果より、造粒時のミキサ胴体の角度は、水平状態から約15度上げ、回転数は40rpmで行うこととした。

造粒物の材料構成を表-3に示す。液体バインダ（水）量は、粉体（SH材料+粉体バインダ）に対して21.0%（造粒物全体の材料構成では17.7%）とした。

転動式造粒のフローを図-1に示す。造粒操作1バッチあたりの仕込み量は、約18.2kgとした。転動式造粒は、傾胴式ミキサにSH材料・ビニロン短繊維・低熱セメント（粉体バインダ所要量の68.3%）を投入し、転動しながら水（液体バインダ所要量の87.3%）を手動式スプレッドで噴霧し、約15分間転動して一次造粒物とした。一次造粒物は、最大粒径を5mm以下とするため目開き4.75mmのふるい（JIS Z 8801）を用いて分級し、ふるいの上に残った粒径の大きな造粒物は、粉碎後、再度転動式造粒を行って4.75mmふるいを全通させた。ふるいを通じた一次造粒物は、傾胴式ミキサに戻し、低熱セメントおよびシリカフェーム（粉体バインダ所要量の31.7%）を加え、水（液体バインダ所要量の12.7%）を噴霧しながら約5分間転動し、二次造粒物を得た。二次造



写真-1 傾胴式ミキサを用いた転動式造粒の様子

表-1 材料

シリーズ	材料	種類	その他の物性等	記号
1 (造粒用)	SH材料	ジオマテリアル(粘土鉱物)含有材料粉体	嵩密度:約0.7g/cm <sup>3</sup> , 密度:2.64g/cm <sup>3</sup> , BET比表面積:約20~30m <sup>2</sup> /g	SH-P
	バインダ	低熱ポルトランドセメント	密度:3.24g/cm <sup>3</sup> , C <sub>2</sub> S:53%, プレーン比表面積:3400cm <sup>2</sup> /g	LC
		シリカフェーム	密度:2.21g/cm <sup>3</sup> , SiO <sub>2</sub> :92%, BET比表面積:17.1m <sup>2</sup> /g, 中国産	SF
	繊維	ビニロン短繊維	密度:1.3g/cm <sup>3</sup> , φ27μm×長さ6mm	W PVA-f1
2 (FRC用)	セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm <sup>3</sup> , C <sub>2</sub> S:52%, プレーン比表面積:3400cm <sup>2</sup> /g	LC
	水	上水道水	千葉県産	W
	細骨材	茨城県産陸砂+栃木県産砕砂	混合砂の表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.3%, FM:2.50	S
	粗骨材	茨城県産硬質砂岩砕石+栃木県産石灰石砕石	混合砕石の表乾密度:2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.6%, FM:6.60, Gmax=20mm	G
	SH材料	ジオマテリアル(粘土鉱物)含有材料粉体	嵩密度:約0.7g/cm <sup>3</sup> , 密度:2.64g/cm <sup>3</sup> , BET比表面積:約20~30m <sup>2</sup> /g	SH-P
		ジオマテリアル(粘土鉱物)含有材料造粒物	嵩密度:約1.0g/cm <sup>3</sup> , 密度:2.41g/cm <sup>3</sup> , FM:3.97	SH-G
	繊維	ビニロン繊維	密度:1.3g/cm <sup>3</sup> , φ660μm×長さ30mm	PVA-f2
化学混和剤	高性能AE減水剤	JIS A 6201 遅延形I種	SP	

表-2 配合

コンクリート種類	W/C (%)	s/a (%)	目標スランプ(cm)	目標空気量(%)	単位数(kg/m <sup>3</sup> )					PVA-f2 外割添加(kg/m <sup>3</sup> )
					W	C	SH材料	S	G	
FRC(プレーン)	56.5	52.3	21±3	4.5±1.5	175	310	-	934	869	6.5
FRC-SH粉体							SH-P 40	894		
FRC-SH造粒							SH-G 40	894		

粒物は、20℃で7日間密封養生し、FRCに混和した。

SH材料粉体の粒度分布は、エタノールを分散溶媒としてレーザー回折・散乱式粒子径粒度分布測定装置で測定した。SH材料造粒物の粒度分布は、JIS A 1102に準じてふるい分けによって測定した。SH材料の嵩密度（見掛け密度）は、JIS K 7365に準じて測定し、密度はHeガスを用いた気相置換法によって測定した。SH材料造粒物の圧壊荷重は、二次造粒直後および材齢7日に目開き3.35mmふるいを用いて分級し、ふるい上に残った造粒物を20個無作為抽出し、JIS Z 8841に準じて測定した。

シリーズ2において、FRCの実機製造は、2010年8月に生コン工場の容量3m<sup>3</sup>の二軸強制練りミキサを使用し、1バッチの練混ぜ量を1.5~2.0m<sup>3</sup>として行った。練混ぜは、全材料を投入後、ミキサの負荷電力値が安定するまで120秒間練り混ぜた。練混ぜ後、アジテータ車に積み込み、生コン工場から約60分間かけて実験場所に輸送した。荷卸直前にビニロン繊維を手投入してFRCとし、荷卸直後のコンクリート温度・スランプ・空気量を測定した。その後、写真-2に示す桁形試験体（外部寸法0.9m×0.75m×h1.0m、溜水部内寸法0.5m×0.5m×h0.8m、桁壁厚0.1~0.2m、有筋、コンクリート量0.48m<sup>3</sup>）およびφ100mm×h200mm円柱供試体（無筋）を作製した。桁試験体は材齢7日で脱型し、桁試験体上部に蓋をして雨水が溜まらないように屋外気中養生した。

表-3 造粒物の材料構成 (%)

SH材料	粉体バインダ	液体バインダ(水)
49.4	32.9	17.7

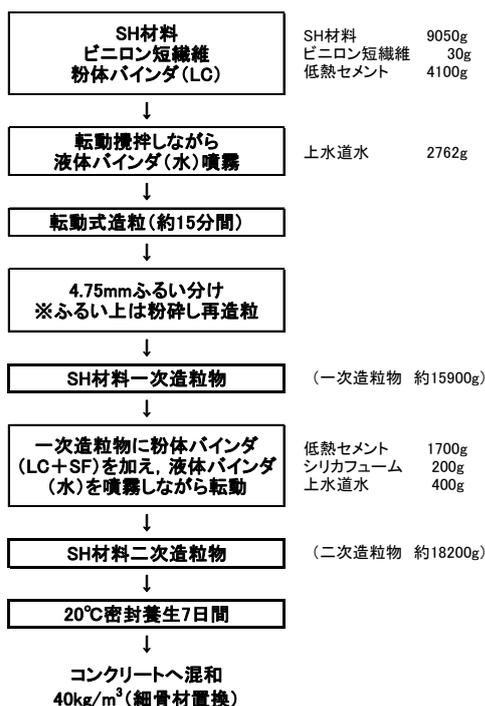


図-1 転動式造粒のフロー

なお、通水試験用供試体にはひび割れ導入を容易にするために型枠内面に2本のプラスチック製アングル(10mm×10mm×14mm)を対極するように敷設し、切欠部を設けた。円柱供試体は、材齢7日で脱型し、圧縮強度試験用は標準養生とし、通水試験用は20℃封かん養生とした。圧縮強度の試験材齢は、7日・28日・91日とした。

桁形試験体の通水試験は、材齢86日で油圧ジャッキを用いて桁内部から荷重をかけ、桁壁2面(厚さ100mm・150mm)にひび割れを導入し、ひび割れ間隔の保持を目的として部分的にφ0.2mmの針金を挿入した。ひび割れの幅は、マイクロスコープを用いて桁形試験体外側の上端面から100mm間隔で測定した。この後、材齢91日から上水道水を溜水し、漏水量の経時変化を測定した。

写真-3に示す円柱供試体の通水試験は、材齢120日で脱型後、耐圧試験機を用いて供試体の切欠部に2本の三角形鋼棒を敷設して割裂し、ひび割れを導入した。ひび割れ幅は、3本の鋼製ホースクランプを用いて表面部のひび割れが約0.2~0.4mmとなるように調整した。ひび割れ幅は、マイクロスコープを用いて円柱供試体の上下面各3点(計6点)を測定した。また、円柱供試体上面に溜水用のφ100mm×h100mmの塩ビ管を接続し、通水試験時の水頭が約80mm(水圧:約0.8kPa)となるように調整した。供試体側面および塩ビ管との接続部分は、シリコーンゴムを用いて止水した。この後、20℃室内において、上水道水を用いて塩ビ管に常時溜水させる連続通水条件および1日に1回断続的に溜水させて乾湿を繰り返す条件とし、それぞれ漏水量の経時変化を測定した。なお、円柱供試体は全てn=3とした。



写真-2 桁形試験体打設の様子



写真-3 円柱供試体を用いた通水試験の様子

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 シリーズ1 (造粒物の物性)

SH 材料の粉体および造粒物を写真-4 に示す。SH 材料粉体の粒度頻度分布を図-2 に示す。SH 材料造粒物の粒度分布を図-3 に示す。SH 材料の粉体および造粒物 (材齢 7 日) の物性を表-4 に示す。

写真-4, 図-2 および表-4 より, SH 材料粉体は, 密度=2.64g/cm<sup>3</sup> とコンクリート用細骨材とほぼ同じ値であるが, 嵩密度は約 0.7g/cm<sup>3</sup> と非常に小さい。また粒径は, 約 1~600 μm の範囲内で, BET 比表面積が 20~30m<sup>2</sup>/g に達する。これは, 多孔質の材料あるいは層状構造を有する材料を含有するためであり, これらが, SH 材料粉体をコンクリートに混和した際にフレッシュ性状を低下させる一因と考えられる。一方, SH 材料造粒物は, 粒径 0.6~5mm のものを多く含有する球状粗大粒子である。造粒物の密度は 2.41g/cm<sup>3</sup> であり, 造粒前の粉体より約 10% 小さくなっているが, これは造粒時に添加した水およびシリカフューム等の影響と考えられる。また, 造粒物の嵩密度は約 1.0g/cm<sup>3</sup> であり, 造粒前の粉体より約 40% 大きくなっている。以上より, SH 材料を造粒物とすることにより, 粒径および嵩密度を増大させ



写真-4 SH 材料粉体 (左) および SH 材料造粒物 (右)

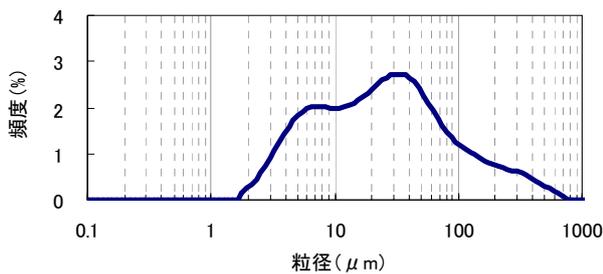


図-2 SH 材料粉体の粒径頻度分布

表-4 SH 材料粉体およびSH 材料造粒物 (材齢 7 日) の物性

SH 材料種類	最大粒径 (mm)	最小粒径 (μm)	BET 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	FM (粗粒率)	嵩密度 (g/cm <sup>3</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
粉体 (SH-P)	約 0.7	1~2	約 20~30	—	約 0.7	2.64
造粒物 (SH-G)	約 5	約 75	—	3.97	約 1.0	2.41

ることが可能であることを確認した。SH 材料造粒物の圧壊荷重を表-5 に示す。造粒物の圧壊荷重は, 二次造粒終了直後では, 平均 2N 程度と非常に小さかったが, FRC に混和した材齢 7 日においては, 平均 34N まで増大した。今回, 圧壊荷重の測定は, 粒径 5mm 前後の造粒物を 20 個無作為に抽出して行ったが, 材齢 7 日で標準偏差 10N, 変動係数 28% とかなりのバラツキが見られた。なお, 粒径 3mm 未満の造粒物の圧壊荷重は, 装置の性能上, 測定することができなかった。

#### 3.2 シリーズ 2 (FRC のフレッシュ性状および強度)

FRC のフレッシュ性状および圧縮強度を表-6 に示す。今回の実機製造は, 高温期 (気温 32°C) であり, また荷卸直前にビニロン繊維を加えて FRC としたため, スランプロス対策として, ベースコンクリートの高性能 AE 減水剤 (以下, SP と略記) を若干過剰添加した。プレーン FRC の場合, SP 添加量=C×1.3% において荷卸時スランプが 20.5cm であり, ほぼ目標値であった。FRC-SH 粉体の場合, SP 添加量は C×2.75% とプレーンの 2 倍以上であり, 荷卸時スランプが 17.5cm とやや小さかった。一方, FRC-SH 造粒の場合, SP 添加量は C×2.5% であり, 荷卸時スランプが 23.5cm で若干材料分離気味であった。SH 造粒物を混和した場合, SH 粉体を混和した場合より, 少ない SP 添加量で大きなスランプが得られていることから, 造粒によりフレッシュ性状が改善されたと考えられる。空気量は, 出荷時にはいずれの配合もやや低めであったが, 荷卸時には目標値前後であり, 問題はなかった。圧縮強度は, いずれの配合も材齢に伴って増大しているが, SH 材料を混和した場合は, プレーンより圧縮強度が高くなった。材齢 91 日強度に関して, SH 材料粉体を用いた場合はプレーンより 22% 高く, SH 材料造粒物を

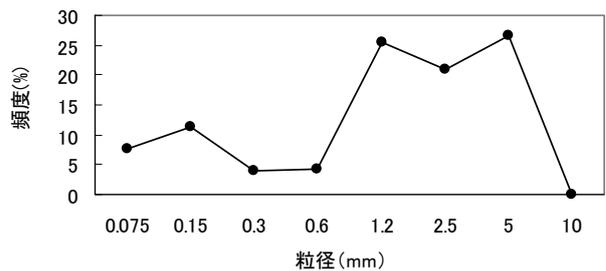


図-3 SH 材料造粒物の粒度分布

表-5 SH 材料造粒物 (3.35mm ふるい上) の圧壊荷重

	二次造粒完了直後	材齢 7 日
圧壊荷重 (N)	2	34
標準偏差 (N)	1	10
変動係数 (%)	32	28

表-6 フレッシュ性状および圧縮強度

コンクリート種類	製造量 (m <sup>3</sup> )	SP (C×%)	スランプ (cm)		空気量 (%)		温度 (°C)		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
			出荷	荷卸	出荷	荷卸	出荷	荷卸	7 日	28 日	91 日
FRC (プレーン)	2.0	1.30	24.5	20.5	3.7	5.3	30	32	20.0	25.2	47.6
FRC-SH 粉体	1.5	2.75	20.5	17.5	4.2	6.2	31	32	20.6	27.3	58.1
FRC-SH 造粒	1.5	2.50	23.0	23.5	2.0	4.5	30	34	25.3	32.1	61.8

用いた場合はプレーンより30%高くなった。プレーンより強度が高くなった原因は、SH材料をセメント置換ではなく、細骨材置換で40kg/m<sup>3</sup>混和したためと考えられる。特にSH材料造粒物の場合、造粒時のバインダとして用いた低熱セメントおよびシリカフェームが未水和のまま残存し、強度増進に寄与した可能性が考えられる。荷卸後のフレッシュコンクリート中および円柱供試体上端研磨面に確認されたSH材料造粒物を写真-5に示す。今回使用したSH材料造粒物は、コンクリートの実機製造時に崩壊せず、残存することが確認された。

### 3.3 シリーズ2 (FRCの通水試験)

枅形試験体に導入したひび割れ幅の測定結果を表-7に示す。枅の南北に面した外壁2面に関して、枅の上端面から100mm間隔でひび割れ幅を測定した。ひび割れの幅は、いずれの配合も上端面に近いほど大きく、枅底面に近くなるほど小さくなった。また、プレーンおよびSH粉体の枅形試験体の平均値は約0.2mmであったが、SH造粒枅形試験体の平均値は0.4~0.5mmと大きかった。これは、側面の中央付近にひび割れ幅制御目的で横方向に設置した埋込み鉄筋の長さが短かったため、鉄筋の定着長が足りずに付着切れが生じ、ひび割れ幅の制御が不可能になったためである。枅形試験体の通水試験結果を図-4および表-8に示す。枅に溜水を開始し、満水となった直後の水面低下深さを10分間隔で90分後まで測定した。その結果、SH造粒枅形試験体は漏水が激しく水面が大きく低下した。SH造粒枅形試験体は、ひび割れ幅の修正が困難であったため測定を行わなかった。

SH粉体枅形試験体は、経時に伴って水面の低下速度がプレーン枅形試験体よりも遅くなり、止水性が確認された。枅形試験体を用いた通水試験では、SH粉体の止水効果はプレーンより高いと考えられた。

φ100mm×h200mm 円柱供試体を用いた連続通水試験の結果を図-5に示す。同じく乾湿繰返し通水試験の結果を図-6に示す。これら通水試験は、円柱供試体下面のひび割れから流出する漏水量を5分間計測したものであり、供試体3本の平均値を使用した。その結果、連続通水の場合は、配合に関係なく通水直後から漏水量が大きく減少したが、6日以降はほとんど変化せず、完全に



写真-5 コンクリート中に確認されたSH材料造粒物

は止水されなかった。また、連続通水開始から21日目の止水性は、配合の違いによる差異は認められなかった。繰返し通水の場合は、連続通水の場合と同様に通水直後から漏水量が減少し、乾湿を繰り返すのに伴って徐々に漏水量が減少した。なお、造粒物を混和した配合が、最も漏水量が少なく、ある程度の止水性（自己治癒能力）を有することがわかった。

連続通水試験のひび割れ幅指数の変化を図-7に示す。同じく乾湿繰返し通水試験のひび割れ幅指数の変化を図-8に示す。前述の漏水量による評価は、ひび割れ幅やひび割れの凹凸等の違いにより、漏水量（流量）の初期値が大きくばらついていた。そのため、初期のばらつきを排除するため、式(1)に示す二次元ポアズイユ式における漏水量（流量）qは、ひび割れ幅wの3乗に比例するという関係を用いて、漏水量qの三乗根をとることで、式(2)に示すひび割れ幅指数とした。また、自己治癒の進行によって変化するひび割れ幅を相対的に評価するため、初期のひび割れ幅指数からの変化量をひび割れ幅指数の変化として算出し、ひび割れ幅の変化の相対的な評価の検討を行った。

$$q = C \cdot \frac{b \cdot \Delta P}{12 \cdot \mu \cdot L} w^3 \quad (1)$$

ここに、q：漏水量（mm<sup>3</sup>/s）、C：ひび割れの凹凸を考慮した係数、  
b：ひび割れの長さ（mm）、ΔP：水圧差（N/mm<sup>2</sup>）、  
μ：水の粘性係数、L：水路長（mm）、w：ひび割れ幅（mm）

$$w' = \sqrt[3]{q} \\ W = w' - w'_0 = \sqrt[3]{q} - \sqrt[3]{q_0} \quad (2)$$

ここに、w'：ひび割れ幅指数（mm）、q：流量（mm<sup>3</sup>/s）  
W：ひび割れ幅変化指数（mm）、  
w'\_0：初期のひび割れ幅指数（mm）、√[3]{q}\_0：初期流量（mm<sup>3</sup>/s）

表-7 枅形試験体に導入したひび割れ幅の測定結果(通水前)

枅上端部からの距離 (mm)	プレーン(mm)		SH粉体(mm)		SH造粒(mm)	
	北面	南面	北面	南面	北面	南面
100	0.43	0.36	0.30	0.33	0.59	0.65
200	0.39	0.24	0.26	0.27	0.68	0.71
300	0.23	0.36	0.47	0.40	0.71	0.62
400	0.29	0.40	0.16	0.26	0.65	0.44
500	0.12	0.21	0.21	0.18	0.58	0.30
600	0.08	0.12	0.13	0.12	0.26	0.25
700	0.11	0.10	0.08	0.10	0.30	0.14
800	0.07	0.07	0.05	0.04	0.20	0.14
平均	0.22	0.23	0.21	0.21	0.50	0.41

※枅壁のコンクリート厚さ：北面=150mm、南面=100mm

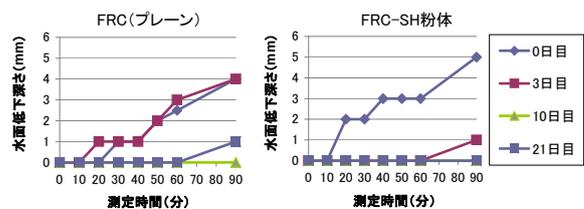


図-4 枅形試験体の通水試験結果

表-8 枅形試験体の通水試験結果(水面低下深さの変化)

	水面低下深さ(cm)			
	0-3日間 73時間経過	3-10日間 160時間経過	10-21日間 263時間経過	21-32日間 256.5時間経過
プレーン	6.8	11	5.5	3.6
SH粉体	7.1	8.2	3.5	2.5

図-5 および図-7 より、連続通水した場合、初期漏水量が最も多かった SH 粉体は、ひび割れ幅指数の低下量が大きいため、止水効果も高くなっていると考えられた。プレーンおよび SH 造粒のひび割れ幅指数の低下量は同程度であるため、止水性は同程度と考えられた。図-6 および図-8 より、乾湿繰返し通水した場合、ひび割れ幅指数は、いずれの配合も通水 1 日目に増大するが、その後、徐々に低下した。21 日目において SH 粉体および SH 造粒の止水効果はプレーンより高いと考えられた。

今回検討した造粒技術により、粘土鉱物を含む SH 材料を用いたフレッシュコンクリートのハンドリングを改善し、長期材齢を経たコンクリートに自己治癒性能を担保する効果を期待しているが、造粒物の組成・粒度等が、ひび割れの自己治癒性能に及ぼす影響、造粒物によるひび割れ自己治癒のメカニズムの検証、造粒条件の最適化等は今後の課題である。また、コンクリート硬化体中に残存する造粒物が、コンクリートの長期耐久性に及ぼす影響の検証も必要であると考えられる。一方、通水試験方法に関して、試験体の形状、ひび割れの導入方法、

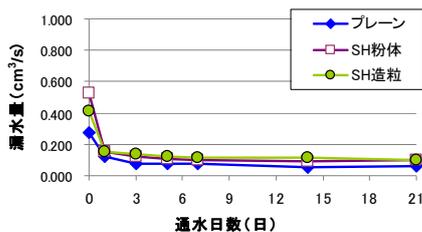


図-5 円柱供試体の連続通水試験結果

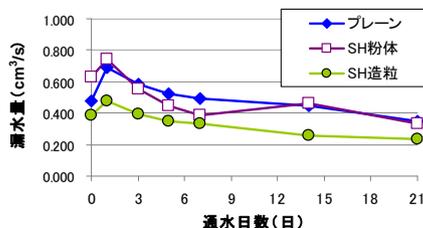


図-6 円柱供試体の乾湿繰返し通水試験結果

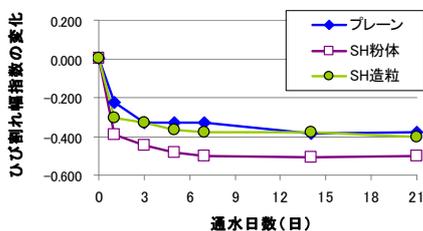


図-7 連続通水試験のひび割れ指数の変化

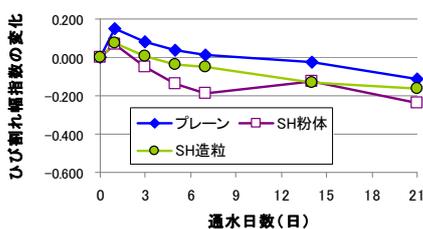


図-8 乾湿繰返し通水試験のひび割れ指数の変化

評価方法の更なる検討・改良が必要であると考えられるため、これらも今後の課題としたい。

#### 4. まとめ

以下、本研究によって得られた知見を示す。

- (1) 粘土鉱物を含む無機系ひび割れ自己治癒材料にバインダとして低熱セメントおよび水を加えて転動式造粒を行うことによって、粒度および嵩密度を増大させた造粒物が得られた。
- (2) 造粒物を細骨材置換で  $40\text{kg/m}^3$  混和した  $\text{W/C}=56.5\%$  の繊維補強コンクリートを夏期に実機製造した。その結果、造粒物を使用することでコンクリートのフレッシュ性状の改善が可能であることを確認した。
- (3)  $\phi 100\text{mm} \times \text{h}200\text{mm}$  円柱供試体を用いた通水試験によって、自己治癒材料の造粒物を混和した場合でも、自己治癒材料粉体と同程度の自己治癒性能があることを確認した。

#### 謝辞

本研究の遂行に際し、自己治癒コンクリートに関しては、小林 薫氏 (JR 東日本)、松田芳範氏 (JR 東日本)、細田 暁准教授 (横浜国立大学大学院) から貴重なご意見を頂きました。また、繊維補強コンクリートに関しては、閑田徹志氏 (鹿島建設) から貴重なご意見を頂きました。ここに、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 山田啓介, 細田暁, 在田浩之, 岸利治: 膨張材を用いたコンクリートのひび割れ自己治癒性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.261-266, 2007.7
- 2) 小松怜史, 細田彰, 安台浩, 池野誠司: ひび割れで通水する自己治癒コンクリートの治癒性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.117-122, 2008.7
- 3) Tae-Ho Ahn et al: Crack Self-Healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixture, ACT, Vol.8, No.2, pp.171-186, 2010.6
- 4) 小石眞純, 江藤桂, 日暮久乃: 造る+使うマイクロカプセル, 工業調査会, pp.202-271, 2005.10
- 5) 伊藤光弘: 図解粉体機器・装置の基礎, 工業調査会, pp.92-106, pp.314-338, 2005.2
- 6) 佐藤良恵, 小出貴夫, 小田部裕一, 岸利治: ひび割れの自己治癒機構に関する基礎的検討, 第 64 回セメント技術大会講演要旨, pp.160-161, 2010.5