

# 論文 シリカフェームを混和した高強度コンクリートの長期性状とリサイクル

坂井悦郎<sup>\*1</sup>・李 琮<sup>\*2</sup>・小菅啓一<sup>\*3</sup>・大門正機<sup>\*4</sup>

**要旨:** シリカフェームを混和した高強度コンクリートの長期性状を明らかにするとともに、そのリサイクル性について検討を加えた。高強度コンクリートはその全量をリサイクルできる可能性があること、および強度の高いコンクリートをリサイクルするほど、再生細骨材を用いたモルタルの流動性や力学的性状が改善されることを明らかにした。また、再生細骨材を用いたモルタルに膨張材の適用が可能であることも明らかにした。

**キーワード:** 高強度コンクリート, リサイクル, 膨張材, 力学性状

## 1. はじめに

コンクリートのリサイクルについては多くの検討がなされ、その成果をもとに路盤材や低強度のコンクリートへの利用も始まっている<sup>1) 2)</sup>。しかしながら、今後、想定される環境負荷低減や資源の有効利用の要求を満足するためには、さらに新たなコンクリートのリサイクル方法の提案も必要である。また、従来のコンクリートのリサイクルにおいては、粗骨材は再利用が可能であるものの、同時に発生する細骨材や微粉などについては、セメント工場の近くで原料などへの利用が可能な場合を除いて、その利用は難しく、新たな廃棄物の発生にもなるなどの問題点も指摘されている。

ここでは、細骨材としてコンクリートを再利用できれば、上記問題点の解決につながると考え、高強度コンクリートの細骨材として再利用について検討を加えた。また、膨張材の併用についても併せて検討を加えた。高強度コンクリートであれば、モルタル混入率が高いものでも、細骨材として再利用で

き、コンクリートの全量を再利用することが可能であるかどうかを明らかにすることを目的としている。また、再利用する際の要求される強度を考えて、それより強度の高いコンクリートを最初に用いるようなリサイクルシステム確立のための基礎的データの収集も目的とした。

## 2. 実験方法

### 2.1 原コンクリートの調整

シリカフェームを用いた原高強度コンクリートの

表-1 原高強度コンクリート用材料

記号	種類	密度
HS	早強ポルトランドセメント	3.13
SF	シリカフェーム	2.16
S1	川砂・山砂混合砂(F.M : 2.77)	2.54
S2	セラミックス系細骨材	3.06
G1	粗骨材 (硬質砂岩)	2.61
G2	粗骨材 (セラミックス系)	3.06
SP	高性能減水剤 (ナフタレン系)	

表-2 原高強度コンクリートの配合

記号	骨材種類	G <sub>max</sub> (mm)	W/B (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							SP (Bx%)
					W	HC	SF	S1	S2	G1	G2	
SF-1	S1/G1	20	25.6	37.6	130	423	85	665	-	1133	-	2.0
SF-2	S2/G1	13	21.5	34.4	140	542	108	-	672	1091	-	2.0
SF-3	S2/G2	13	21.5	33.5	137	533	107	-	660	-	1308	2.0

\*1 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科 材料工学専攻 工博 (正会員)

\*2 新潟大学 工学部建設学科 工博 (正会員)

\*3 電気化学工業 (株) 特殊混和材事業部町田研究所 (正会員)

\*4 東京工業大学大学院教授 理工学研究科 材料工学専攻 工博 (正会員)

材料および配合を表-1 と 2 に示す。なお、セラミックス系骨材はスピネルである。

コンクリートを練り混ぜ後、 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$  の供試体を成形し、水中養生 28 日および屋外養生を 1 年と 10 年後の圧縮強度およびヤング係数を測定した。

また、比較のために、細骨材として川砂(比重 2.62, F.M.2.87), 粗骨材として硬質砂岩砕石(比重 2.65, F.M.6.48,  $G_{\max} : 20 \text{mm}$ ), 普通ポルトランドセメントおよびポリカルボン酸塩系高性能 AE 減水剤を用いて、表-3 の配合のコンクリートを製造した。なお、スランプは D-1 では 20cm, D-2 では 10.0cm, 空気量は、それぞれ 4.4 と 4.0%とした。供試体の養生は水中養生(28 日)と屋外養生とした。

表-3 比較用原コンクリートの配合

記号	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				SP (C x%)
			W	C	S	G	
D-1	35.0	41.0	170	486	679	986	0.9
D-2	45.0	43.0	170	378	749	1004	0.9

## 2.2 再生細骨材の製造と性質

高強度コンクリートの場合には、表-2 の配合により製造し 10 年間屋外養生した試験体を粗粉碎後、ジョークラッシュャにより粉碎し、そのすべてを、ふるいにより分級し、JIS A 5308 の附属書「レディーミクストコンクリート用骨材」の標準粒度となるように混合した。得られた再生細骨材の性質は表-4 のようである。なお、SF-1, SF-2 と SF-3 それぞれのペースト混入率を算出すると、22.7, 26.7 および 24.4%となる。

比較用として調整したコンクリートでは、製造し

た試験体をクラッシュャにより粉碎し、さらに、圧縮磨砕により骨材の表面からモルタルの除去が可能になる装置を組み合わせ、粗骨材を製造し、残りの部分から細骨材を採取し、試料とした。なお、この再生骨材の製造方法においては、細骨材部分は約 50% 程度となる。このことから細骨材や微粉部分も含めた再生骨材の利用方法の提案が重要であることが明らかとなっている。配合を基に D-1 と D-2 のペースト混入率を算出すると、それぞれ 28%と 23.8%となる。なお、実測した酸化カルシウム量から計算すると 36.6%と 27.4%となる。

## 2.3 モルタル試験

調整した再生細骨材および、比較用コンクリートを製造する際に用いた川砂を用い、モルタルを製造した。その際、砂セメント比は 2, 水セメント比は 40%とし、化学混和剤は使用していない。また、CSA 系膨張材は、セメントの 10%を置き換え使用した。

モルタルフローは JIS R 5201 に準じて測定し、 $\phi 5 \times 10 \text{cm}$  の供試体を作製し、材齢 1 日まで 20°C 80%RH で、型枠内で養生し、脱型後標準養生を材齢 91 日まで実施し、圧縮強度とヤング係数を材齢 7, 28 および 91 日で測定した。また、長さ変化は JIS A 6202 に準拠した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 原高強度コンクリートの長期性状

図-1 と図-2 にシリカフェームを混和して、低水結合材比で作製した原高強度コンクリートの長期材齢での力学的性質を示した。比較用として製造したコンクリートの場合も併せて示した。水結合材比および骨材の種類の影響を受け、水結合材比が低下す

表-4 高強度コンクリートを用いた再生細骨材の性質

記号	使用骨材	粉碎時コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> )	表乾比重	F.M.	吸水率 (%)
SF-1	S1/G1	134	2.42	2.90	7.64
SF-2	S2/G1	156	2.55	2.91	6.43
SF-3	S2/G2	185	2.69	2.85	5.77

表-5 比較用コンクリートを用いた再生細骨材の性質

記号	使用骨材	粉碎時コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> )	表乾比重	F.M.	吸水率 (%)
D-1	川砂/硬質砂岩	56.1	2.36	2.85	7.54
D-2	川砂/硬質砂岩	40.5	2.35	3.40	8.73

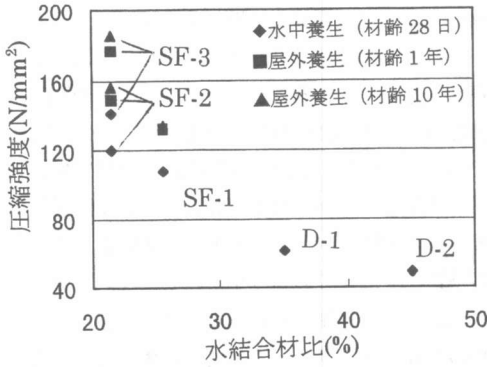


図-1 原コンクリートの水結合材比と圧縮強度

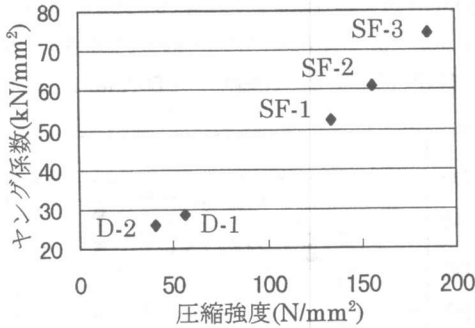


図-2 再生細骨材製造時の原コンクリートの圧縮強度とヤング係数

るほど強度は高い値を示す。しかし、同一水結合材比のものでは、細骨材および粗骨材にセラミックス系骨材を用いたものが  $185\text{N/mm}^2$  と大きな値を示している。なお、川砂と硬質砂岩を用いた場合には材齢 1 年と 10 年で圧縮強度はほぼ同様な値を示しており、骨材強度の限界に到達している可能性が高い。また、ヤング係数もセラミックス系骨材を用いた場合には、 $74.3\text{kN/mm}^2$  の値を示し、良質の硬質骨材を選定することにより、高強度でもヤング係数が必ずしも低くならないことを表わしている。

### 3.1 再生細骨材の微細組織

高強度コンクリートからの再生細骨材と比較のために用いたコンクリートから作製した再生細骨材の微細組織について検討を加えた。図-3 はコンクリートから採取したモルタル部分の水銀圧入法により測定した細孔径分布である。サンプリング誤差やペースト部分の混入率が同一でないで、単純な比較はできないが、D-1 に比べてサンプリング誤差やペ

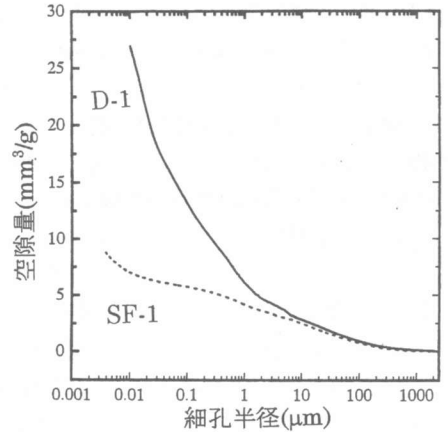
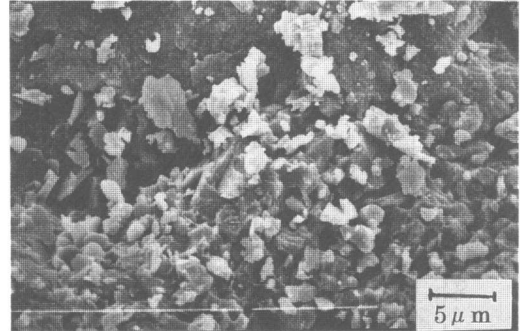
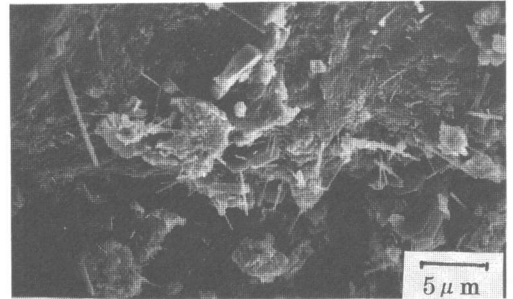


図-3 モルタル部分の細孔径分布



(シリカフュームを混和した高強度コンクリート)



(比較用コンクリート)

図-4 骨材界面の SEM 写真

ースト部分の混入率が同一でないで、単純な比較はできないが、D-1 に比べて SF-1 の方が  $1\mu\text{m}$  以下の細孔が少なくなっており、約 1/3 程度になっている。

また、細骨材界面近傍の SEM 写真を図-4 に示した。D-1 では骨材界面に水酸化カルシウムや針状結晶が観察されているのに対し、SF-1 では、界面に大きな水和物の生成は観察されない。シリカフェ

ムを用いて、低水結合材比とすることで、欠陥となる遷移帯が骨材界面に形成していないものと考えることができる。以上のようにシリカフェームを混和した高強度コンクリートを再生細骨材として利用した場合には、混入しているペースト部分の微細組織の緻密化と骨材界面の改質が期待される。

### 3.2 流動性

図-5 にモルタルのフローを示す。川砂に比べていずれの場合もモルタルフローは低い値を示し、形状や吸水率の影響を受けているものと思われる。しかし、高強度コンクリートの再生細骨材を用いた方が良好な流動性を示している。これは吸水率が低くなることと、高強度の方が粉砕された際に形状が良好になるためと考えることができる。

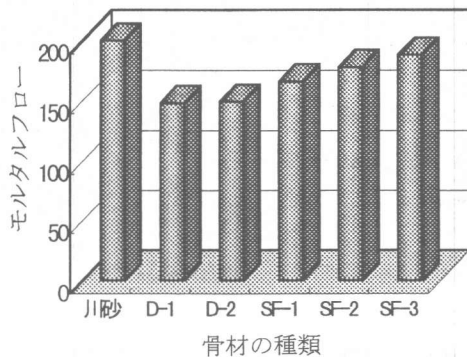


図-5 モルタルの流動性

### 3.4 再生細骨材を用いたモルタルの力学的性状

図-6 に再生細骨材を用いたモルタルの圧縮強度を示した。図-7 と図-8 は原コンクリートの強度と再生細骨材を用いたモルタルの圧縮強度およびヤング係数の関係を示した。

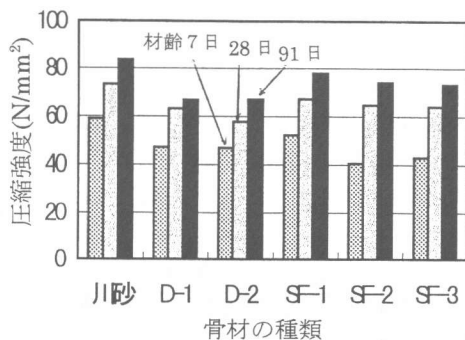


図-6 各材齢における圧縮強度の変化

グ係数の関係である。

材齢とともに圧縮強度は増加するが、原コンクリートの強度の影響を受け、高強度のものを用いた方が高い値を示している。シリカフェームを混和して低水結合材比とした再生細骨材を用いると同様な圧縮強度を示している。これは圧縮強度については、骨材界面の遷移帯やペーストの強度が大きく影響しており、DとSFグループでの差は大きいですが、D内およびSFグループでの差は小さいものと想定される。これに対して、再生細骨材を用いたモルタルのヤング係数は原コンクリートの強度の影響を受けており、再生細骨材としての強度やヤング係数が効いているものと思われる。

図-9 に再生細骨材を用いたモルタルの圧縮強度とヤング係数の関係を、川砂を用いたモルタルの場合と比較して示した。圧縮強度が  $50\text{N/mm}^2$  を超え

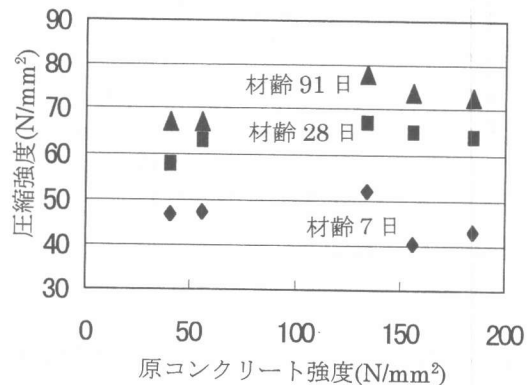


図-7 原コンクリート強度と再生細骨材モルタルの強度

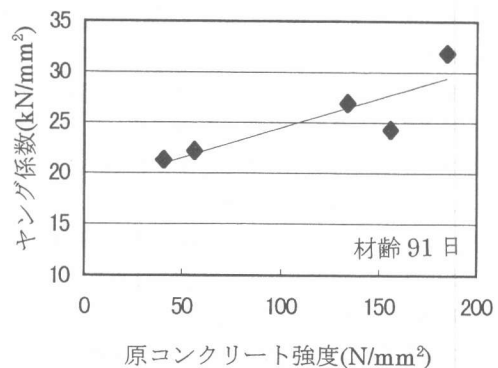


図-8 原コンクリートの圧縮強度と再生骨材モルタルのヤング係数

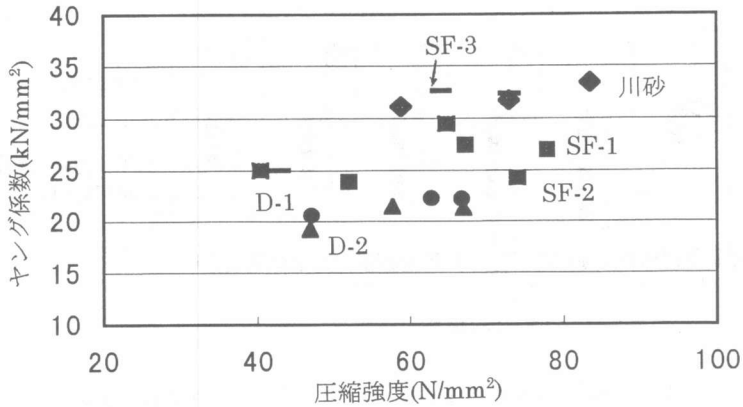


図-9 再生細骨材を用いたモルタルの圧縮強度とヤング係数の関係

ると、比較用の原コンクリートを用いた再生細骨材では、かなり低い値を示すようになる。しかし、シリカフェームを混和した高強度コンクリートを再生細骨材として用いた場合には、大きなヤング係数を示すものも現れている。製造方法などの検討により品質のバラツキの少ない再生骨材が製造できれば、もとの川砂を利用した場合と同様な力学性状が得られるものと推定される。

### 3.6 モルタルの長さ変化

図-10 は 20°C水中養生 7 日後、20°C、60%RH で、13 週養生した場合のモルタルの長さ変化である。D-1 および D-2 の再生骨材を用いた場合の乾燥収縮は、川砂を用いたモルタルより大きな値を示

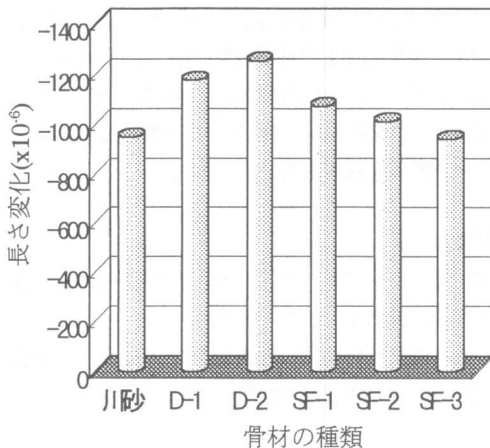


図-10 再生細骨材を用いたモルタルの長さ変化 (20°C水中養生 7 日後、20°C、60%RH で、13 週養生)

している。しかし、高強度コンクリートを利用した再生細骨材を用いた場合には、乾燥収縮は減少し、185N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度を示した高強度コンクリートを用いた場合には、ほぼ川砂を用いたモルタルと同じ長さ変化となっている。なお、経過時間に伴う長さ変化も同様であった。

以上より、通常の強度レベルのコンクリートから再生骨材を製造した場合には、混入するペーストが緻密でなく、それを利用したモルタルの長さ変化を大きくする可能性がある。しかし、高強度コンクリートを骨材として使用すると、ペーストが緻密となり、ほぼ川砂などを用いた場合と同様の長さ変化を示すようになるものと考えられる。なお、長期間経過した高強度コンクリートを再利用するような場合の自己収縮の影響については、さらに詳細な検討を行う必要がある。

### 3.7 膨張材を混和したモルタルの長さ変化

図-11 に示すように高強度コンクリートを利用した場合を除いて、再生細骨材を用いたモルタルでは、乾燥に伴う長さ変化が、川砂など通常の細骨材を用いた場合より大きな値を示した。そこで、再生細骨材を用いた場合に、膨張材により乾燥収縮を減らすことができるかを合わせて検討した。

通常の川砂を用いた場合より、乾燥に伴う長さ変化は著しく減少しており、膨張材を再生骨材に利用することは有効であると思われる。

なお、図-12 に再生細骨材を用いたモルタルにおける単位膨張材量とモルタルの膨張率の関係を示した。再生細骨材の表乾比重が異なるため、セメント

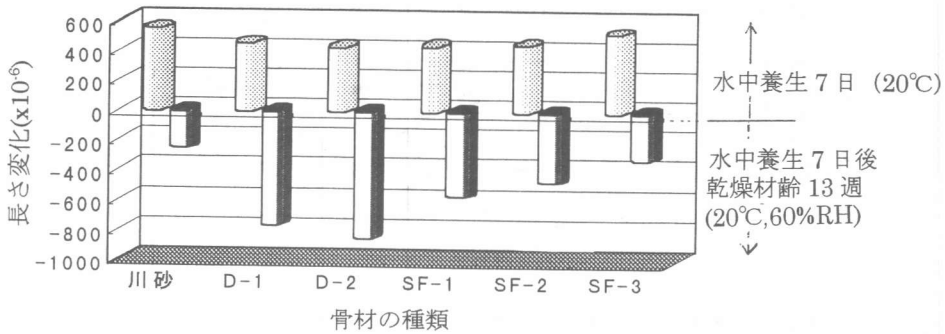


図-11 膨張材を混和した再生細骨材を用いたモルタルの長さ変化

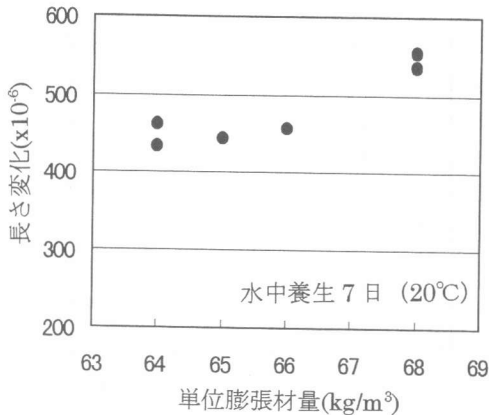


図-12 単位膨張材量と膨張率

量が異なることとなり、その 10mass%を膨張材で置換しているため、膨張率が異なったものと考えることができる。なお、SF-3 については、ほぼ川砂と乾比重が等しく、膨張材量も同じなためにモルタルの膨張率もほぼ等しくなったものと思われる。なお、骨材のヤング係数の相違が、膨張率にどのような影響を与えるのかについてはさらに詳細な検討が必要である。

#### 4. まとめ

高強度コンクリートを細骨材として、ほぼ全量を再利用することができるリサイクルシステムの可能性について検討を加えた。本研究の範囲で明らかになったことは以下のようなものである。

1)再生細骨材を用いたモルタルの流動性や力学的な性状は原コンクリートの強度の影響を受け、高強度

なものを利用するほど、向上する。

2)セラミックス (スピネル) 系骨材を用いた高強度コンクリートの全量を細骨材としてリサイクルしたモルタルは、川砂を用いたモルタルとほぼ同等の力学的性質を有する。

3)膨張材の利用により、再生細骨材を利用したモルタルの乾燥収縮による長さ変化を補償する事は可能である。

今後は、さらに耐凍害性などの耐久性を合わせて検討して行く必要がある。モルタルの混入は、特に死に石などを混入していることと同様になる可能性がある。それ故、欠陥を有するモルタルを発生させないような製造方法の確立も合わせて検討を行って行くことが重要であると思われる。

本研究は学術振興会未来開拓プロジェクト「ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発」(代表：新潟大学工学部建設工学科長 瀧重義教授)の研究の一環として実施したものであり、関係各位に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1)山田優, コンクリート・リサイクルについて, 骨材資源, No.113, 1-8, 1997
- 2)柳啓, 再生骨材の品質と再生コンクリート, 骨材資源, No.113, 9-19, 1997