

# 論文 廃コンクリートの低環境負荷完全リサイクルに関する研究

河村 景史\*1・堺 孝司\*2・錦織 和紀郎\*3・北垣 亮馬\*4

**要旨:** 廃コンクリート塊の排出量は年間 3000 万 t 以上で推移し、再生骨材としてコンクリートへの資源循環が求められている。既往の研究では再生粗骨材の高品質化に主眼が置かれ、環境に与える負荷の大きい装置が使用されることが多かった。再生細骨材や製造時に発生する再生微粉の利用については、一部実用化に向けた取り組みがなされているが<sup>1)</sup>、一般化された技術には至っていない。本研究では低環境負荷の乾式堅型ロッドすりもみ装置を使用し、骨材の改質を併用する技術を考案し、再生細骨材および再生微粉も含めた完全リサイクルを目標に強度発現および乾燥収縮等再生コンクリートの主要な技術的課題について検討した。

**キーワード:** 再生骨材, 炭酸化による骨材の改質, 再生コンクリート, 圧縮強度, ヤング係数, 乾燥収縮

## 1. はじめに

近年建設副産物の排出量は減少傾向にあるが、廃コンクリート塊の排出量は年間 3000 万 t 以上で推移し、建設副産物の中で占める割合は増加傾向にある。コンクリート塊の再資源化率は、100%に近い高い値を示しているが、その利用先の大半を路盤材等の道路建設需要に依存してきている。最近では、道路建設の縮小による需要の減少傾向が見られ、コンクリートからコンクリートへの資源循環が求められている。また、2011 年 3 月の東日本大震災により、膨大ながれきの処理が急務になっている。これらを有効利用するためにも、コンクリート用再生骨材製造・利用技術の開発を急がなければならない。

一方、わが国は、地球温暖化対策に関する中期目標として 2020 年までに 1990 年比で温室効果ガス排出量を 25%削減することを目標として掲げており<sup>1)</sup>、建設分野、特にその主材料をなすコンクリートに関わる CO<sub>2</sub>の排出の管理は今後重要になってくると考えられる。そのため、低環境負荷で廃コンクリートを処理し、コンクリート構造物へ利用していくことが重要である。

しかしながら、再生コンクリートは普通コンクリートに比べて強度が小さくなることや乾燥収縮が大きくなる傾向がある。これらの技術的課題を解決するために、これまでのコンクリート用再生骨材に関する研究は再生粗骨材の高品質化に主眼が置かれ、環境に高い負荷を与える技術が主であった。また、再生細骨材や製造時に発生する再生微粉の利用については実用化に至っていない。

これらの細粒分の有効利用を実現しなければ、廃コンクリート塊の資源循環は難しいと言わざるを得ない。

以上のような背景により、本研究では、低環境負荷で再生骨材を製造するため、乾式堅型ロッドすりもみ装置（以下、すりもみ装置）を使用した。また、製造時のみで再生骨材を高品質化するのではなく製造後の改質も併用する技術を考案し、再生細骨材および再生微粉も含めた完全リサイクルを目標に、強度発現および乾燥収縮等再生コンクリートの主要な技術的課題について検討した。

## 2. 再生骨材の製造

### 2.1 原コンクリート

再生骨材の製造に用いた原コンクリートの使用材料および配合を表-1 および表-2 に示す。

表-1 原コンクリートの使用材料

材料(記号)	種類	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3200cm <sup>2</sup> /g
細骨材 (S)	安山岩砕砂	表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.2%, 粗粒率 2.75
粗骨材 (G1, G2)	安山岩碎石	表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.1%, 粗粒率 6.70
混和剤	高機能 AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩・ オキシカルボン酸塩・ ポリカルボン酸系化合物
	AE 剤	アニオン系

### 2.2 乾式堅型ロッドすりもみ装置の概要

本研究で使用したすりもみ装置の外観を写真-1 に、内

表-2 原コンクリートの配合とフレッシュ性状

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					C × %		スランブ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G1	G2	高性能 AE 減水剤	AE 剤		
65	49	185	285	855	405	495	1.35	0.2	18.5	4.9

\*1 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (正会員)

\*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

\*3 ㈱不動産テラ ブロック環境事業本部 技術統轄部 工修 (正会員)

\*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻講師 工博 (正会員)

部の機構を写真-2に示す。内部は円筒鋼板で2つのレーンに仕切られており、径24mmの鋼製のねじ切りロッドが鉛直に配置されている。ロッドを回転させると、投入した個々の粒子は回転しながらロッドの隙間を通過し、全体としてはレーンに沿って流動する。この際、骨材表面の付着モルタルは、骨材同士およびロッドとのすりもみによって剥離される。



写真-1 すりもみ装置の外観

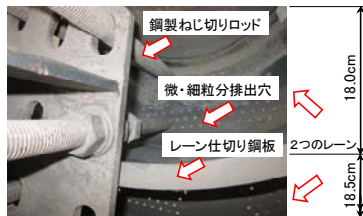


写真-2 すりもみ装置の内部

表-3 再生骨材製造装置の処理条件

		処理条件	
乾式堅型ロッド すりもみ装置	ロッド間隔	26.5mm	
	処理時間	20分	
	1回の投入量	50kg	
卓上型 ボールミル	処理時間	15分	
	回転数	40rpm	
	1回の投入量	10kg	

ボールミル 試料の質量:ボールの質量=1:1

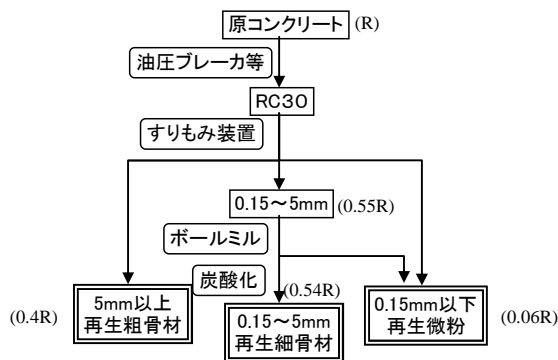


図-1 再生骨材製造フロー

### 2.3 再生骨材製造フロー

表-2に原コンクリートの配合を示す。原コンクリートはレディーミクストコンクリートであり、コンクリートブロックの大きさは50cm×100cm×50cmである。図-1に、再生骨材の製造フローを示す。まず、材齢56日に原コンクリートブロックを油圧ブレイカーおよび小割圧砕機を

用いて粗破碎した後、インペラブレイカーに投入して中破碎することによりRC30を製造した。

次に、RC30をすりもみ装置に投入してすりもみを行い、粒径5mm以上を分級して再生粗骨材とした。図-2に、再生粗骨材の粒度分布を示す。再生粗骨材2005の粒度の範囲(JIS A 5022)にある。一方、粒径5mm以下は、更に0.15mm以下を分級して再生微粉とした。0.15~5mmについては卓上型ボールミルによる処理を行い、0.15mm以上を再生細骨材、0.15mm以下を再生微粉(先に分級した再生微粉と混合)とした。

本研究でのすりもみ装置による処理条件を表-3に示す。これは、荻田ら<sup>2)</sup>の試験結果から最も低環境負荷で品質の良い骨材を製造できる条件である。

### 2.4 再生細骨材の粒度の改善

すりもみにより得られた粒径0.15~5mmの粒子の粒度分布は図-3の通りで(未処理)、細骨材の標準粒度よりもやや粗かった。そこで、表-3の条件にて卓上型ボールミルによる処理を行った。すなわち、再生細骨材についてはすりもみ装置のみで粒度を整えるのではなく、ボールミルを併用して粒度を調整した。図-3には、処理後の粒度分布も併せて示す。図より、再生細骨材も標準粒度の範囲(JIS A 5022)にあることが確認できる。

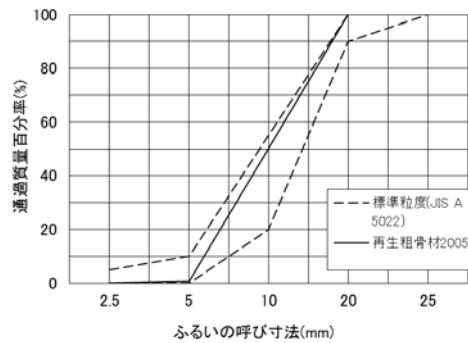


図-2 再生粗骨材の粒度分布

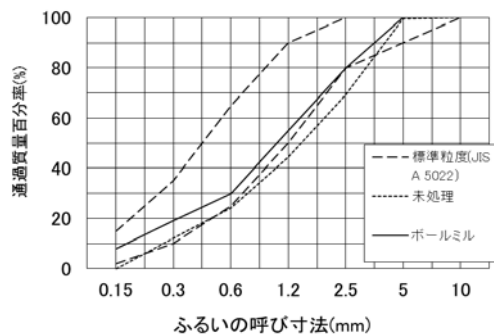


図-3 再生細骨材の粒度分布

### 2.5 再生細骨材の密度、吸水率の改善

再生細骨材の製造・利用は未だ実用化に至っていない。

それは粒径が小さいため、物理的な処理が困難であるためである。つまり、細骨材表面のセメントペーストの除去がしにくい。したがって、再生細骨材の吸水率は、一般に高い。これは、再生細骨材表面に付着するセメントペーストの品質およびマイクロクラックの影響によるものであると考えられる。本研究ではボールミルによる処理を行ったが、密度、吸水率の大きな改善は見られなかった。

そこで、本研究では、物理的な加工だけではなく、炭酸化による密度、吸水率の改善を試みることにした。再生細骨材の表面に付着しているセメントペーストにCO<sub>2</sub>を炭酸化により固定させ、マイクロクラックを埋めて改質するものである。

再生細骨材の炭酸化は、温度 20℃、湿度 60%、CO<sub>2</sub>濃度 5%の環境下で促進中性化装置により行い、炭酸化の時間については試験により定めることとした。再生細骨材の試料を容器にできるだけ薄く敷き、1日1回均一になるようにかき混ぜた。炭酸化による質量増加率を図-4に、絶乾密度および吸水率の変化を各々図-5および図-6に示す。炭酸化による質量増加は炭酸化4日目までにほぼ終わり、それ以降は横ばいになっている。絶乾密度および吸水率は炭酸化2日目まで各々急増、急減し、それ以降の変化は緩くなっている。

JIS に規定される再生細骨材の絶乾密度および吸水率を表-4に示す。図-5および図-6より、すりもみ装置のみでは再生細骨材L (JIS A 5023) に相当する品質であったが、炭酸化により絶乾密度および吸水率は再生細骨材M (JIS A 5022) の範囲まで改善されたことが確認できる。したがって、本研究による炭酸化は再生細骨材の改質に有効な方法であると考えられる。

表-4 再生細骨材の規格 (JIS A 5021~JIS A 5023)

項目	L	M	H
絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	—	2.2以上	2.5以上
吸水率 (%)	13.0以下	7.0以下	3.5以下

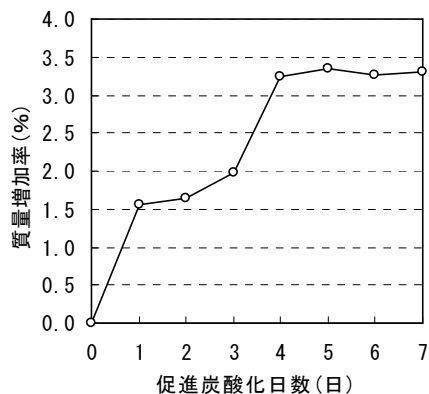


図-4 炭酸化による質量増加率

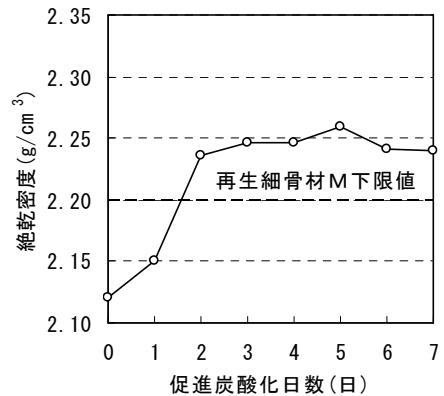


図-5 炭酸化による絶乾密度

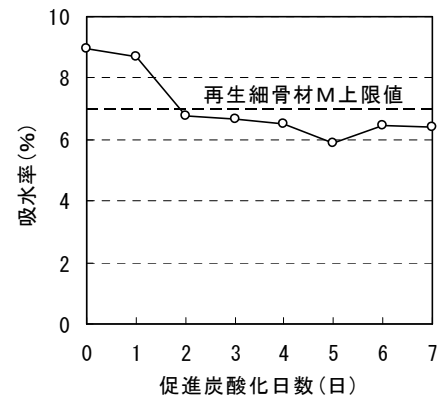


図-6 炭酸化による吸水率

### 3. 再生コンクリートの試験

#### 3.1 使用材料

表-5に、コンクリート試験に使用した材料と品質を示す。再生粗骨材は、再生粗骨材M (JIS A 5022) の規格を満足している。一方、再生細骨材は厚さ3cmで容器に敷き、1日3回かき混ぜて均一化しながら3日間炭酸化を行ったが、図-6ほどの改善には至らず、再生細骨材M (JIS A 5022) の物理的性質のうち、吸水率のみが僅かに規格を満足しなかった。

再生微粉についても1時間の炭酸化を行ったが、質量に変化は見られなかった。これは、再生微粉保存中にほぼ炭酸化が終了していたと判断される。

なお、再生細骨材および再生微粉を対象に、塩酸にてペーストを溶解してペーストの含有割合 (質量割合) を測定した結果、再生細骨材で約22%、再生微粉で約48%であった。

#### 3.2 試験配合およびコンクリートの製造

試験配合を、表-6に示す。目標スランプは8±1.5cm、目標空気量は5±1%とし、水セメント比=55%、単位水量一定の条件で、混和剤の種類および添加量によりスランプおよび空気量を調整した。

使用材料は、細・粗骨材とも安山岩砕砂・碎石および

再生骨材（RS：再生細骨材，RG：再生粗骨材）の2種類ずつとし，再生微粉（RP）は細骨材置換により混入した。なお，1m<sup>3</sup>の原コンクリートから再生骨材を製造した際に発生した再生微粉の量が約60kgであったことから，再生微粉の混入量は60kg/m<sup>3</sup>を上限とし，その1/2にあたる30kg/m<sup>3</sup>についても試験を実施した。

コンクリートの製造は，温度20℃，相対湿度60%の試験室において，容量50リットルの強制二軸ミキサを用いて1バッチの練混ぜ量を30リットルとして行った。コンクリートは，最初にセメント，再生微粉，細骨材，粗骨材を15秒間空練りし，次に水，混和剤を加え105秒間練混ぜを行い製造した。

表-5 使用材料

材料(記号)	種類	品質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度3.15g/cm <sup>3</sup> 比表面積3470cm <sup>2</sup> /g
コンクリート微粉末(RP)	0.15mm under	密度2.40g/cm <sup>3</sup> 吸水率5.3% ペースト含有割合47.5%
細骨材(S)	安山岩砕砂	表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> 吸水率1.84% 粗粒率2.85
再生細骨材(RS)	0.15-5mm	表乾密度2.36g/cm <sup>3</sup> 吸水率7.74% 実積率67.2% 微粒分量2.77% 粗粒率3.45 ペースト含有割合22.1%
粗骨材(G1)	安山岩砕石(1505)	表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> 吸水率1.89% 実積率57.4% 粗粒率6.54
粗骨材(G2)	安山岩砕石(2015)	表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> 吸水率1.60% 実積率57.1% 粗粒率7.00
再生粗骨材(RG)	2005	表乾密度2.57g/cm <sup>3</sup> 吸水率3.4% 実積率59.9% 微粒分量1.35% 粗粒率6.37 ペースト含有割合4.7%
混和剤	AE減水剤	リグニルスルホン酸化合物
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE剤	ポリカルボン酸エーテルの複合体 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

### 3.3 試験項目および試験方法

本研究では，以下のコンクリート試験を実施した。

#### (1) スランプおよび空気量試験

スランプおよび空気量試験は，それぞれ JIS A 1101 および JIS A 1128 に準拠して行った。

#### (2) 圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度および静弾性係数試験は，打設後1日で供試

体を脱型し，所定の期間まで20℃水中養生を行い，JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠して実施した。

#### (3) 長さ変化試験

コンクリートの長さ変化試験は，JIS A 1129-3 に準拠して行った。打設翌日に型枠を脱型し，水温20℃の養生槽にて材齢7日まで水中養生を行い，基長を測定した。その後，温度20℃，湿度60%の恒温恒湿室で所定の期間気中養生を実施した。なお，試験材齢は，基長測定時からの日数で示す。

## 4. 試験結果

### 4.1 混和剤使用量

表-6 に示すように，目標スランプおよび空気量を満足するための混和剤使用量は，粗骨材のみおよび細・粗骨材ともに再生骨材を用いても，細・粗骨材ともに普通骨材を使用した普通コンクリートと同等であった。これは，細・粗骨材とも再生骨材の方が実積率が大きく（表-5 参照），粒子形状の効果が現れたものと考えられる。

一方，再生微粉を用いた場合，AE 減水剤では目標スランプを得ることはできず，高性能 AE 減水剤が必要であった。また，その使用量は，再生微粉を多量に混入するほど多くなった。

### 4.2 圧縮強度

#### (1) 試験結果

材齢7日および28日における圧縮強度の測定結果を図-7 に示す。

#### (2) 再生骨材使用の影響

図-7 より再生骨材の使用が圧縮強度に及ぼす影響を見ると，材齢7日では粗骨材に再生骨材使用，細・粗骨材とも再生骨材使用の順に若干強度が低下するが，普通コンクリートとの差は数%に過ぎなかった。一方，材齢28日においては顕著な差異が確認され，普通コンクリートの圧縮強度に対して，粗骨材に再生骨材を使用した場合の圧縮強度は7%低下し，細・粗骨材とも再生骨材を使用したケースの低下割合は20%にもなった。

再生粗骨材を使用したことによる強度低下については，表面の付着ペーストの影響と考えられる。一方，再生細骨材の使用による強度低下については，再生粗骨材に比べて付着ペーストが多いことに加え，先述のようなマイクロクラックが影響し，強度低下を増大させた可能性も

表-6 再生コンクリートの配合とフレッシュ性状

W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								C×%			スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	RS	RP	G1	G2	RG	AE 減水剤	高性能 AE減水剤	AE剤		
55	46	171	311	823	-	-	481	481	-	1.1	-	0.05	8.5	5.7
		171	311	823	-	-	-	-	944	1.0	-	0.05	9.5	5.8
		171	311	-	739	-	-	-	944	1.0	-	0.05	7.9	5.9
		171	311	-	709	30	-	-	944	-	0.3	0.05	7.5	5.8
		171	311	-	680	60	-	-	944	-	0.6	0.05	8.2	5.5

ある。すなわち、炭酸化によりマイクロクラックを埋めて密度や吸水率を改善することはできたが、強度的な改善までは至らなかったと言える。

また、このような骨材の影響による強度低下は、強度が高い条件にて顕著になるものと考えられる。

### (3) 再生微粉使用の影響

図-7より、再生微粉を混入したケースでは、圧縮強度の増大が確認できる。そこで、細・粗骨材に再生骨材を用いた場合の、再生微粉混入量と圧縮強度の関係を図-8に示す。図より、再生微粉の混入量の増加に伴い圧縮強度が増大し、再生微粉を 60kg/m<sup>3</sup> 混入したケースの圧縮強度はほぼ普通コンクリート(図中点線)と同等である。これは、再生微粉によるマイクロフィラー効果によるものと推定される。再生骨材の使用による強度低下は避け難いが、この結果は、再生微粉を有効に使用することにより、強度発現を補うことができる可能性を示唆するものである。

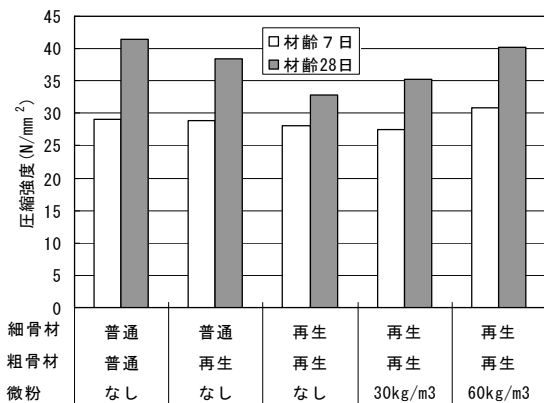


図-7 圧縮強度試験結果

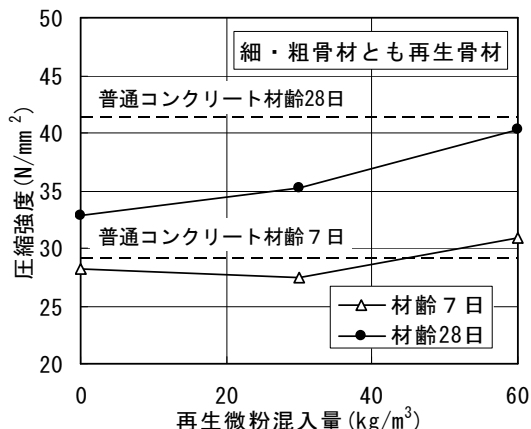


図-8 再生微粉混入量と圧縮強度の関係

### 4.3 静弾性係数

材齢 7 日および 28 日における静弾性係数の測定結果を図-9に、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-10に示す。図-10には、コンクリート標準示方書設計編<sup>3)</sup>(以下、示方書)に記載される圧縮強度と静弾性係数の関係も併

せて示している。

図-9より、静弾性係数の場合にも圧縮強度と同様の傾向が見られ、粗骨材に再生骨材使用、細・粗骨材とも再生骨材使用の順に静弾性係数が低下する。また、圧縮強度の場合とは異なり、再生微粉の混入による静弾性係数の増加割合は小さい。

図-10より圧縮強度と静弾性係数の関係に注目すると、普通コンクリートおよび粗骨材に再生骨材を用いたケースでは、圧縮強度と静弾性係数の関係は概ね示方書に示される関係と同等である。一方、細・粗骨材に再生骨材を使用したケースは、圧縮強度に対する静弾性係数の値が小さい。これは、セメントペースト粒子を含む再生細骨材の脆弱性に起因したものと思われる。

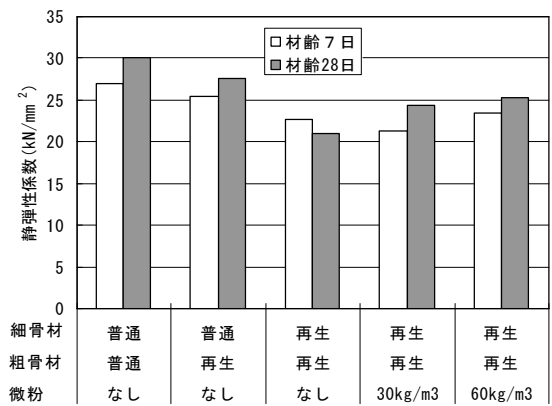


図-9 静弾性係数試験結果

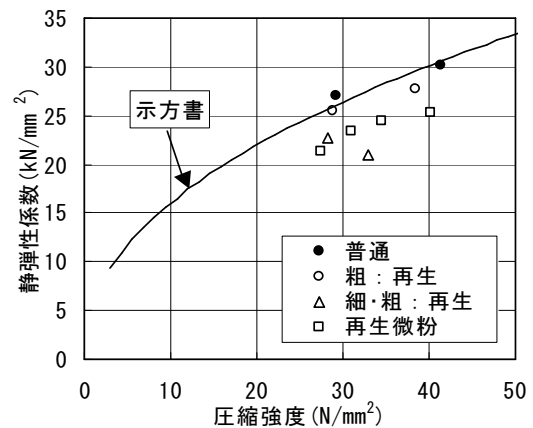


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係

### 4.4 長さ変化試験結果

図-11に、長さ変化試験の結果を示す。

再生コンクリートは普通コンクリートに比べて長さ変化が大きい。再生骨材を使用した場合を比較すると、材齢 7 日では、粗骨材に再生骨材使用、細・粗骨材に再生骨材使用および再生微粉を 30kg/m<sup>3</sup> 混入の 3 配合は長さ変化が同程度である。材齢 28 日では、細・粗骨材に再生骨材使用の配合で長さ変化が最大になっており、粗骨材に再生骨材使用および再生微粉を 30kg/m<sup>3</sup> 混入の 2 配合

はほぼ同程度の長さ変化率を示している。再生微粉を  $60\text{kg/m}^3$  混入した配合については再生コンクリートの中では長さ変化は最も小さくなっている。すなわち、再生粗骨材および再生細骨材の使用により長さ変化は大きくなるが、再生微粉を使用することで長さ変化を抑制することが可能であることを示している。これは、再生微粉を使用することによる充填効果が影響していると思われるが、そのメカニズム等に関しては今後詳細な検討が必要である。また、材齢 56 日までの傾向とその後 91 日目までの傾向に大きな違いが生じた。この原因については今後詳細に検討する必要がある。

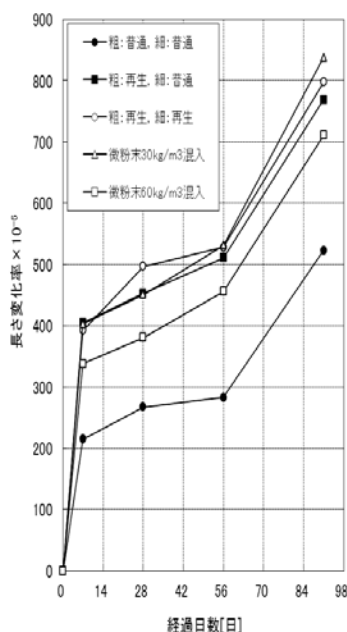


図-11 長さ変化率

## 5. まとめ

本研究では、再生骨材の製造に低環境負荷型のすりもみ装置を使用し、再生細骨材の品質向上については、ボールミルによる処理（粒度調整）および炭酸化（密度、吸水率改善）を実施した。また、再生細・粗骨材を全量使用するのは勿論のこと、再生微粉の全量使用も前提に完全リサイクルを目標として、コンクリート試験を実施した。主な結果をまとめると以下の通りである。

### (1) 再生骨材の製造

低環境負荷型のすりもみ装置により、再生粗骨材 M の規格を満足する再生粗骨材の製造が可能であった。

再生細骨材については、すりもみ装置だけでは再生細骨材 M の規格を満足する製造は困難であった。

### (2) 再生細骨材の改質

すりもみ装置を通した後の粒径  $0.15\sim 5\text{mm}$  の粒子を

対象にボールミルによる処理を行うことにより、粒度を細骨材の標準粒度の範囲内とすることができた。また、炭酸化による改質により、密度や吸水率に関して再生細骨材 M の規格を満足させる可能性があることが分かった。

### (3) 再生コンクリートの配合

本研究で製造した再生細・粗骨材を骨材の全量に使用しても、目標スランプおよび空気量を満足させるための混和剤の量は普通コンクリートと変わらなかった。

再生微粉を混入した場合には高性能 AE 減水剤を使用する必要があり、その使用量は再生微粉の混入量の増加に伴い増加した。

### (4) 再生コンクリートの品質

圧縮強度は、粗骨材に再生骨材使用、細・粗骨材とも再生骨材使用の順に低下した。再生微粉を混入したケースでは、混入量の増加に伴い圧縮強度が増大した。再生微粉を  $60\text{kg/m}^3$  混入したケースの圧縮強度はほぼ普通コンクリートと同等であった。

静弾性係数は圧縮強度と同様の傾向が見られ、粗骨材に再生骨材使用、細・粗骨材とも再生骨材使用の順に静弾性係数が低下した。また、圧縮強度の場合とは異なり、再生微粉の混入による静弾性係数の増加割合は小さかった。

長さ変化については、再生コンクリートは普通コンクリートに比べて大きい。長さ変化は、再生骨材を使用することで増大するが、再生微粉の混入量の増加に伴い抑制される。

本研究により、廃コンクリート塊のコンクリートへの完全リサイクルの目処が立ったものと考えられる。

## 謝辞

本研究は、平成 23 年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業（課題名「廃コンクリート・石系廃棄物の低炭素・完全循環利用技術の開発（代表者：香川大学教授 堺孝司）」）の補助金を受けて行ったものである。

## 参考文献

- 1) 黒田 泰弘, 森 健治, 宮地 義明: 建築工事へのコンクリート資源循環システムの適用, 2002.2, コンクリート工学
- 2) 環境省: チャレンジ 25  
<http://www.challenge25.go.jp/about/index.html>
- 3) 荻田 家久, 藤戸 幹大: 廃コンクリートからの再生粗骨材の効率的製造に関する基礎的研究, 第 38 回碎石フォーラム, 2011.10
- 4) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書設計編, p.44, 2008