

論文 加熱すりもみ法により回収した高品質再生骨材コンクリートの性状

立屋敷 久志*1・島 裕和*2・松本 義弘*3・古賀 康男*4

要旨：良質な骨材を含有するコンクリート塊を対象に、「加熱すりもみ法」のパイロットプラントを使って、普通骨材と同等品質の再生骨材を回収できることを実証するとともに、回収時の消費エネルギーを試算した。さらに、回収した高品質再生骨材を使用したコンクリートの物性値を普通骨材を使用したコンクリートと比較検討して、再生骨材コンクリートの構造躯体への適用性を評価した。

キーワード：解体コンクリート、熱すりもみ法、再生骨材、凍結融解抵抗性

1. はじめに

現在、資源循環型社会への転換に向け、建設業界としては、建設資材リサイクル法やグリーン購入法等の法整備が進んでいる。過去、大量に製造されてきたコンクリートは、特定建設資材に指定され、2005年までに公共の直轄工事から発生したものは全てリサイクルすることや、2010年には95%のリサイクル率を達成すること等、具体的な目標が設定されている¹⁾。

解体コンクリートは、コンクリート塊単身のものから、解体時に多量の夾雑物を含んだものまで多岐に渡っている。コンクリート塊単身を優先的に路盤材に再利用していくと、夾雑物等を含んだ路盤材としての再利用しきれないものが行き場を失ってしまうことになる。そこで、コンクリートを全量リサイクルするためには、解体コンクリートの一部をコンクリート用骨材として再利用し、路盤材の需要を確保することが、重要な方策となる。

コンクリート塊の再利用として、再生骨材の研究が行われ、品質に応じて部位を限定した利用方法の実用化を図られたが、耐久性への懸念と生コン製造や施工における品質管理の負荷が

大きいことから、普及しなかった。

最近、再生骨材コンクリートの耐久性を担保するために、再生骨材を普通骨材と同等の品質まで高度化する技術開発が進んでいる²⁾。その中で、筆者らは、コンクリート塊を300℃程度で加熱して、セメントペースト部分を脆弱化した後、骨材を破碎しない程度の摩砕作用で骨材に付着したモルタルやセメントペーストを選択的に除去する「加熱すりもみ法」の実用化に取り組んでいる³⁾。

ここでは、「加熱すりもみ法」のパイロットプラントを使って、実際に解体されたコンクリート塊から、普通骨材と同等品質の再生骨材を回収できることを実証するとともに、回収時の消費エネルギーを試算した。また、回収した高品質再生骨材を使用したコンクリートの物性試験を行い、構造躯体用のコンクリートとしての適用性を評価した。

2. 骨材回収試験

2.1 設備概要及び回収方法

当該設備のプロセスフローを図-1に、設備全景を写真-1に示す。この設備は、加熱すりもみ

*1 三菱マテリアル(株) 環境リサイクル事業センター事業化推進部部长補佐(正会員)

*2 三菱マテリアル(株) 環境リサイクル事業センター事業化推進部副技術主幹(正会員)

*3 三菱マテリアル(株) 環境リサイクル事業センター事業化推進部技師

*4 宇部三菱セメント研究所(株) 埼玉センターコンクリートグループリーダー(正会員)

法を工業的規模で実用化したものである。また、この設備は、約 20 個のユニットで構成された移設可能な構造となっている。高品質再生骨材の回収方法を以下に示す。

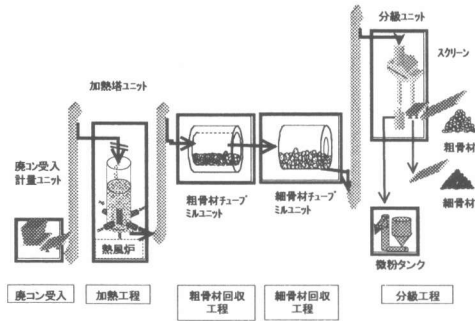


図-1 高品質骨材回収設備のプロセスフロー

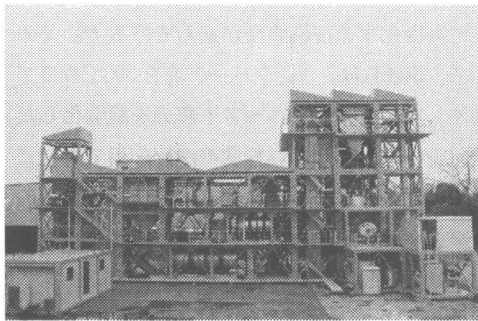


写真-1 パイロットプラントの全景

受入工程

コンクリート塊を約50mm以下に粗砕して、ホッパーに投入した。

加熱工程

充填型の加熱設備の上部からコンクリート塊を投入し、下部から熱風 (Max450℃) を吹き込み、コンクリート塊を 300℃まで加熱した。

粗骨材回収工程

セメントペースト部分を脱水脆弱化させたコンクリート塊を、最大 60mm の鋼球媒体を入れたチューブミルに、連続的に投入した。この設備は、内筒に 5mm メッシュを施した二重円筒構造で、5mm 以下のモルタル分を素早く排出することで、すりもみ効率を高めている。

細骨材回収工程

この装置は、上記工程で排出された 5mm 以下

のモルタル分から、細骨材を回収する際、細骨材が破碎しないように、鋼球より低比重の媒体として、回収粗骨材を利用している。また、すりもみ効率を高めるために、ミル内通風で微粉分を排出した。

分級工程

細骨材回収設備から出てくる、粗骨材と細骨材の混合物を5mmメッシュの振動篩で分級して、粗骨材と細骨材を各ストレージに搬送した。微粉は、専用タンクに貯蔵した。運転が安定した状態で、30分～1時間毎に分取した試料を用いて、骨材試験を実施した。

2.2 コンクリート試験体の種類

実際の解体コンクリートを3種類(表-1)と、表-2に示す砂利、川砂の組合せで、60cm厚の平板を所定期間養生後、重機で破碎したコンクリート塊の合計4種類を試験体として使用した。

表-1 解体コンクリート試験体の概要

種類	記号	採取地	対象構造物	施工時期	使用骨材
解体 コンクリート	解体コン1	東京都保谷市	集合住宅	昭和30年頃	砂利・砂
	解体コン2	同上	同上	同上	同上
	解体コン3	福岡北九州市	倉庫	平成元年頃	碎石・海砂

表-2 打設コンクリート試験体の概要

	産地	使用骨材の品質		コンクリートの調合		強度性状		
		絶対乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	養生期間 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
粗骨材 (砂利)	静岡県大井川	2.62	0.96	57	42	115	33.6	2.92 × 10 ⁴
細骨材 (川砂)		2.60	1.65					

2.3 試験結果及び考察

(1)再生骨材の品質

処理速度 3t/h～7t/h で回収した再生粗・細骨材の品質を図-2, 3に示す。4種類いずれのコンクリート塊においても、粗骨材は、JIS A 5308の規格値である絶対乾密度 2.5g/cm³以上、吸水率 3.0%以下を十分満足する品質であった。細骨材も、ミルの回転速度を増大することで、骨材品質を高めることができた。

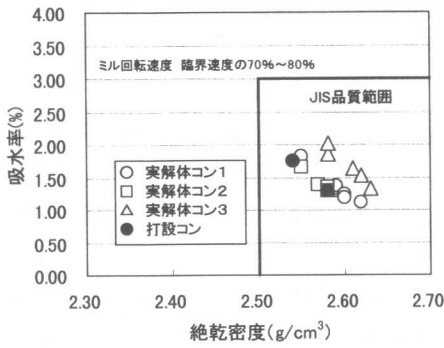


図-2 再生粗骨材の品質

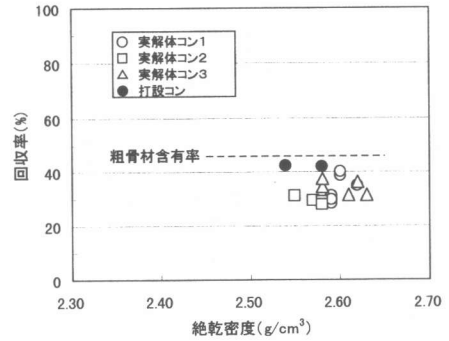


図-4 粗骨材の品質と回収率

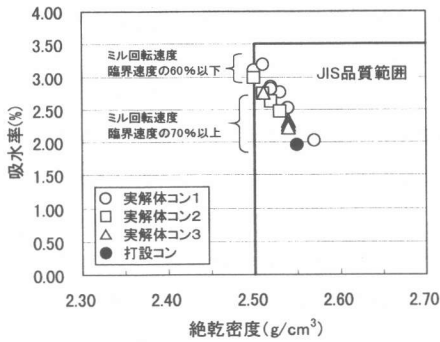


図-3 再生細骨材の品質

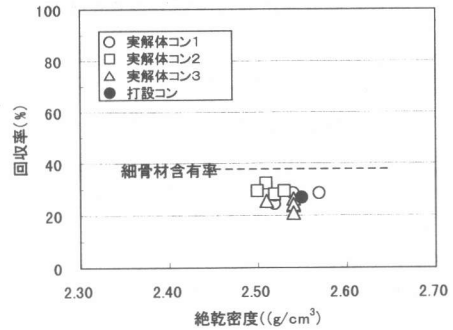


図-5 細骨材の品質と回収率

(2)品質と回収率の関係

回収した再生粗・細骨材の品質と回収率の関係を図-4, 5 に示す。ここに示す回収率は、コンクリート塊に対する再生骨材の回収割合である。

粗骨材の場合、絶対乾密度 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上の品質で、約 30~40%回収できた。これは、粗骨材含有量に対して 80%程度の回収率に相当する。また、絶対乾密度が高なくても、回収率は極端に低下することはなかった。

細骨材の場合、20~30%の回収率となり、これは細骨材含有量に対する割合に換算すると 80%程度になる。

(3)処理速度と品質及び回収率の関係

コンクリート塊の処理速度と再生粗・細骨材の絶対乾密度及び回収率の関係を図-6, 7 に示す。粗骨材の場合、処理速度を $3\text{t}/\text{h} \sim 7\text{t}/\text{h}$ まで上げていくと、骨材品質には若干の低下傾向が認められ、それに伴い、回収率は増大した。絶対乾密

度 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上の粗骨材を回収する条件では、当該設備は $10\text{t}/\text{h}$ 近くまで処理速度を高めることが可能と考えられる。

一方、細骨材の場合、今回の結果では、処理速度と絶対乾密度や回収率との関係が明確に現れていないが、再生細骨材の絶対乾密度が規格値と僅差であることから、現状、今回の実績結果である $7\text{t}/\text{h}$ 程度の処理速度が上限と考えられる。

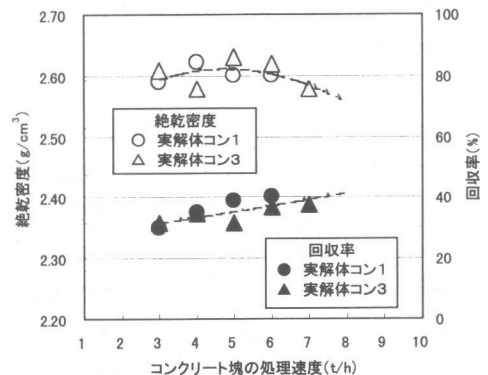


図-6 品質と回収率に及ぼす処理速度の影響

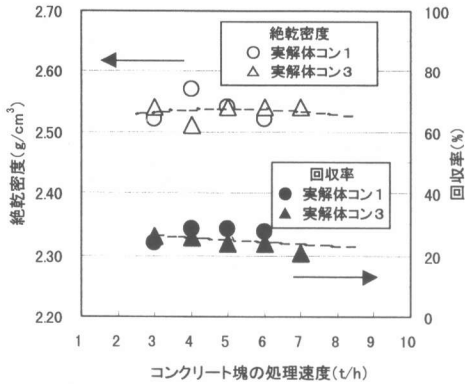


図-7 品質と回収率に及ぼす処理速度の影響

(4)消費エネルギーとユーティリティ

コンクリート塊の処理速度7t/h時の消費燃料と電力量から、当設備の消費エネルギーを試算した。加熱工程での消費エネルギーが8割程度である。

消費燃料エネルギー：333MJ/㏄t

消費電力エネルギー：97MJ/㏄t

総消費エネルギー：430MJ/㏄t

加熱方法は、熱による骨材品質の低下を避けるために、冷却空気と混合して、450°C以下に調整した熱風を吹き込む機構となっており、焼却炉等の廃熱を冷却空気へ利用することができれば、燃焼エネルギーの削減が期待できる。

また、処理速度7t/h時の消費燃料と電力量から、燃料としてA重油を使用した場合の燃料と電力のユーティリティを試算すると、約900円/㏄tとなる。

燃料費：101/㏄t * @27円/L=270円/㏄t

電力料：30kwh/㏄t * @20円/kwh=600円/㏄t

3. 再生骨材コンクリートの評価試験

打設コンクリート試験体から回収した高品質再生骨材を使用したコンクリートの基礎物性を検討した。ここでは、現在、関東地区で広範囲に普通骨材として流通している砕石と山砂を使用したコンクリートを標準的なものと考え（以後、普通骨材コンクリートと称す）、両者のコンクリートの基礎物性を比較し、高品質再生骨材

の構造躯体コンクリートへの適用性を評価した。

3.1 材料及び調合

使用した高品質再生骨材の品質結果を表-3に示す。モルタル・セメント付着率は、5%塩酸溶液に浸漬後の重量減少率とした。また、比較用の普通骨材としては、八王子産の砕石 (Gmax20mm, 絶対乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.95%), 君津産山砂 (絶対乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 1.82%) を使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和剤はAE減水剤と空気連行助剤を使用した。

コンクリートの調合は、スランプ18±1.5cm, 空気量4.5±1%, 調合強度32N/mm²となるように、予めW/C=40, 50, 60%での強度試験を実施して設定した。コンクリートの調合を表-4に示す。高品質再生骨材の場合、砂利起源であり、骨材を破碎しないで回収できたことから、砕石コンクリートである普通骨材コンクリートより、単位水量は9kg/m³少なかった。

表-3 骨材試験結果

試験項目	再生粗骨材	再生細骨材
絶対乾密度(g/cm³)	2.58	2.54
吸水率(%)	1.29	1.94
粒形判定実積率(%)	63.6	62.2
実積率(%)	64.7	
粒度[粗粒率]	範囲内[6.72]	範囲内[2.95]
微粉分量(%)	0.08	0.58
安定性(%)	3.0	1.9
すりへり減量(%)	10.2	
アルカリ骨材反応性 (化学法 mmol/l)	無害 Sc 27 Rc 104	無害 Sc 30 Rc 131
モルタル・セメント付着率	6.85	7.23

表-4 コンクリートの調合

種類	W/C (%)	s/a (%)	1m³当たりの単位量(kg)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
再生骨材コンクリート	60.4	46.3	258	156	860	1009	C×0.25% (0.5A)
普通骨材コンクリート	59.1	47.9	279	165	877	979	C×0.25% (1.65A)

3.2 試験結果及び考察

(1)フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を表-5に示す。

ブリーディング量は、再生骨材が若干少ないものの、著しい差は無かった。

表-5 フレッシュコンクリート性状

種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
再生骨材コンクリート	18.6	4.6	0.17
普通骨材コンクリート	18.0	4.0	0.21

(2)強度性状

圧縮強度、引張強度、ヤング係数の結果を図-8～10に示す。材齢91日までの結果では、再生骨材コンクリートは、普通骨材コンクリートと同等の強度発現性が認められた。

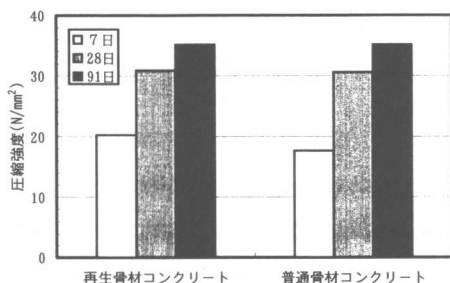


図-8 圧縮強度の比較

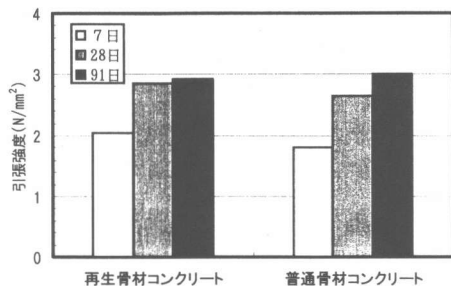


図-9 引張強度の比較

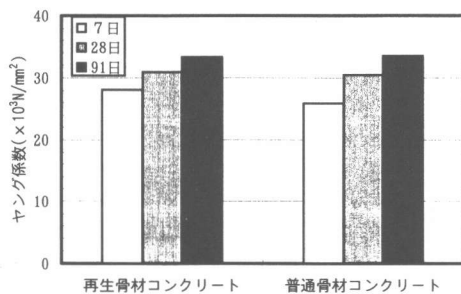


図-10 ヤング係数の比較

(3)耐久性状

乾燥収縮の結果を図-11に示す。再生骨材コンクリートの乾燥収縮は、普通骨材の場合と比べ、約 0.5×10^{-4} 少なかった。この理由は、単位水量の低減が影響しているものと考えられる。

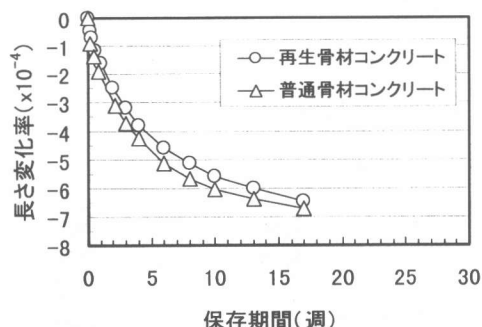


図-11 乾燥収縮の比較

凍結融解抵抗性の結果を図-12に示す。再生骨材コンクリートは、200サイクルまで相対動弾性係数60%以上を保持しており、JASS 5の「凍結融解作用を受けるコンクリート」における対凍害性は、B区分となる。200サイクル以降の相対動弾性係数は低下しているが、300サイクルでのスケーリングは少なく内部劣化が生じていたものと推定される。現時点では、この原因を断定することは難しいが、再生骨材の起源が砂利であったことと、再生骨材コンクリートのAE助剤添加量が若干少なかったために、有効なエントレインドエアが少ないことも要因の一つと考えている。

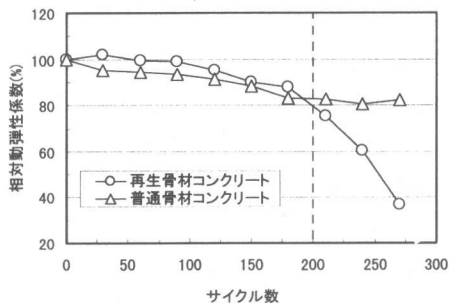


図-12 凍結融解抵抗性の比較

促進中性化の結果を図-13に示す。材齢8週までの再生骨材コンクリートの中性化深さは、普通骨材コンクリートと同等であった。今回の結果から、高品質再生骨材を使用した場合の中性化の進行程度は、普通骨材同様に、W/Cに依存していると考えられ、この傾向は、既報⁴⁾の結果とも一致する。

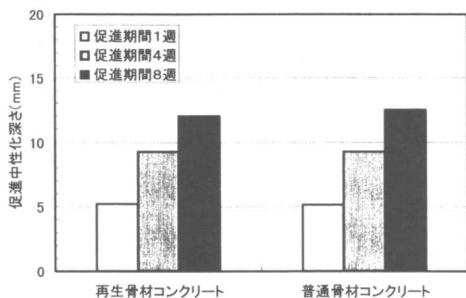


図-13 促進中性化の比較

4. まとめ

良質な骨材が含まれているコンクリート塊を対象にして、加熱すりもみ法のパイロットプラントを使用して、普通骨材と同等品質の高品質再生骨材の回収試験を行った。さらに、砂利と山砂起源の解体コンクリートから回収した高品質再生骨材の構造躯体用コンクリートとしての評価を行った。得られた知見を以下に述べる。

- ①複数のコンクリート塊から、普通骨材同等品質の粗骨材及び細骨材を、コンクリート塊に対して約70%の割合で回収できた。
- ②高品質再生骨材コンクリートは、普通骨材を使用したコンクリートのフレッシュ性状及び強度発現性と同等であった。
- ③乾燥収縮と中性化では、普通骨材コンクリートと同等の結果を得た。また、凍結融解抵抗性は、一般的なコンクリートである性能B区分であった。
- ④当該パイロットプラントの処理能力は、最大7t/h程度であり、その時の消費エネルギーは、約430MJ/コンtで、ユーティリティは約900円/コンtであった。

以上の結果から、加熱すりもみ法は、元々、良質な骨材を含むコンクリート塊から、普通骨材同等品質の再生粗・細骨材を歩留まり良く、回収することができることが分かった。さらに、高品質再生骨材を使用したコンクリートの基礎物性は普通骨材コンクリートと同等であり、構造躯体用のコンクリートに適用できると考えられる。

なお、本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構「廃コンクリート等建材リサイクル技術の開発」の成果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1)法律第四百四号 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律
- 2)清水昭之：構造物の高性能化を目指す21世紀のコンクリート技術,コンクリート工学,Vol.39,No.1,pp.55-60,2001.1
- 3)例えば、島裕和他：加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収技術,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.22,No.2,pp.1093-1098,2000
- 4)黒田泰弘他：高品質再生骨材を使用したコンクリートの性状,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.22,No.2,pp.1105-1110,2000