

論文 湿式選別法によるコンクリート廃材の全量リサイクル

松村 宇¹・佐川孝広²・平島 剛³・桂 修⁴

要旨:著者らが開発してきた湿式選別法により製造した再生粗骨材及び再生細骨材を用いて再生コンクリートを製作し,圧縮強度,耐久性状は十分な性能を持つことを確認した。また,同時に製造した再生微粉末をセメント原料中に25%程度用いてクリンカーを電気炉焼成し,それに石こうを加え微粉碎しセメントを試製した。基準クリンカーと再生微粉末を混和したクリンカーの鉱物組成はほぼ等しく,試製したセメントのモルタル圧縮強さもほぼ等しかった。これらにより,コンクリート廃材のゼロエミッション化の可能性が示された。

キーワード:湿式選別法,再生骨材,再生コンクリート,再生微粉末,ゼロエミッション

1. はじめに

現在,コンクリート廃材の大半は路盤材等に再利用されている。しかし今後,高度成長期に建設されたストックが更新期を迎え,コンクリート廃材の発生量が増加することが予測されており,それに対応した新たな用途が必要と考えられる。

本研究では湿式選別法を用い,コンクリート廃材を高度処理することで,建築構造体へ使用可能な再生骨材を製造することと,同時に得られる再生微粉末をセメント原料とすることにより,天然資源の保護とコンクリート廃材のゼロエミッション化を目的とした検討を行っている。

本報では実証プラントで製造した再生粗骨材及び再生細骨材を用いた再生コンクリートの製作と再生微粉末を原料としたセメントの試製を行い,各々の性状について検討を行った。

2. 湿式選別法によるコンクリート廃材の再生処理

著者らが開発してきた湿式選別法はアトリックションミル,ジグ,ハイドロサイクロンを組み合わせ,コンクリート廃材より再生骨材及び再生

微粉末を製造するものである¹⁾²⁾³⁾。前報²⁾では市販されている再生碎石(40~0mm)を原材料とし,実証プラントによる製造実験を行った。製造実験では約13tのコンクリート廃材を処理し,粒径5mm以上のジグ高比重産物試料を再生粗骨材,粒径5mm未満のジグ高比重産物試料と4インチハイドロサイクロンアンダーフロー産物を再生細骨材,2インチサイクロンオーバーフロー産物を再生微粉末として回収した。

3. 湿式選別法により製造した再生粗骨材,再生細骨材を用いた再生コンクリートの性状

3.1 実験方法

実証プラントにて製造した再生粗骨材及び再生細骨材は,製造直後の状態ではJIS A5308附属書に規定する砂利及び砂の標準粒度を満たさなかったため²⁾,本実験に使用した再生骨材は標準粒度範囲に収まるよう粒度調整を行った。再生粗骨材と再生細骨材の粒度調整前後の粒度分布をそれぞれ図-1,図-2に示す。また,粒度調整後の再生粗骨材及び再生細骨材の密度及び吸水率を表-1に示す。密度及び吸水率はどちらも共にJIS A5308規格値を満たしている。

¹ 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 (正会員)

² 日鐵セメント(株) 研究開発部研究開発グループ(正会員)

³ 九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 工博

⁴ 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部 博士(工学)(正会員)

コンクリートの調合は、単位粗骨材かさ容積を0.63と一定とし、空気量 $4.5 \pm 1.0\%$ 、スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ を目標とした。水セメント比は40%、50%、60%の3水準とした。混和剤は変成リグニンスルホン酸系のAE減水剤とアルキルエーテル系のAE助剤を使用した。コンクリートの調合及びフレッシュ時の性状を表 - 2 に示す。

試験項目は圧縮強度(JIS A1108)、静弾性係数(JIS A1109)、凍結融解抵抗性(JIS A1148 A法)、気

表 - 1 使用骨材の密度及び吸水率

	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率
再生粗骨材	2.60	2.01	62.2	6.59
再生細骨材	2.56	3.08	70.8	2.67

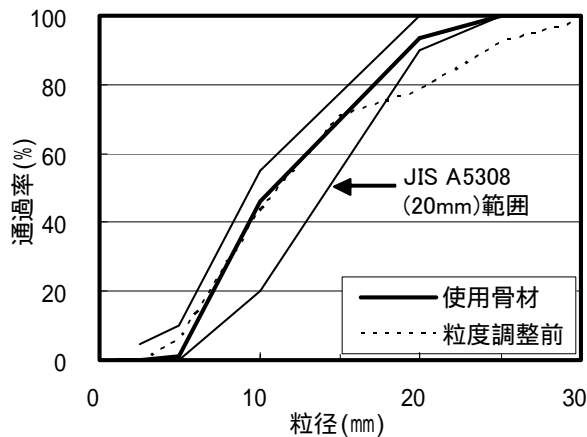


図 - 1 使用骨材粒度分布 (再生粗骨材)

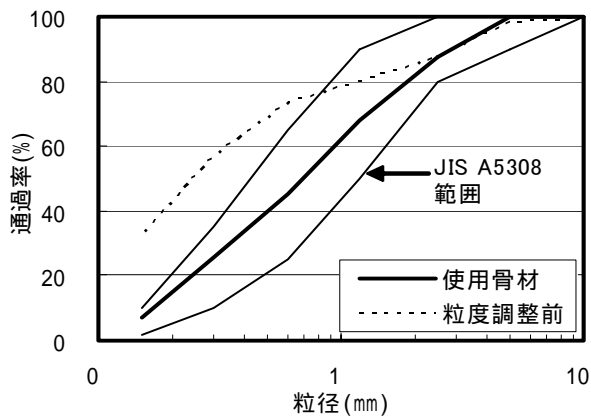


図 - 2 使用骨材粒度分布 (再生細骨材)

泡間隔係数 (ASTM C457)、乾燥収縮 (試験体寸法 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 、材齢1週まで水中養生後、測定材齢まで温度 20°C 、湿度 60% にて養生、長さ変化測定は同温湿度下にてJIS A1129-3による)、促進中性化 (JIS A1153) とした。

3.2 実験結果及び考察

コンクリートの調合では、単位水量はJASS5上限値 ($185\text{kg}/\text{m}^3$) を大きく下回る。湿式選別法による再生骨材は骨材自体が丸みを帯びており、このことが単位水量の低減に繋がったと考えられる。

また、所定の空気量を確保するためのAE助剤量は標準使用量の約4倍となった。これは再生細骨材の微粒分に含まれる硬化セメント分がAE剤を吸着していることが考えられるが、本検討の範囲では明確ではない。

各材齢でのセメント水比と圧縮強度の関係について図 - 3 に示す。圧縮強度は天然骨材を用いたコンクリートと同様にセメント水比と関係し、セメント水比が増加するにつれ、圧縮強度は増加する。

圧縮強度と静弾性係数の関係について図 - 4 に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、建築学会式、NewRC式とほぼ一致する。このことから、圧

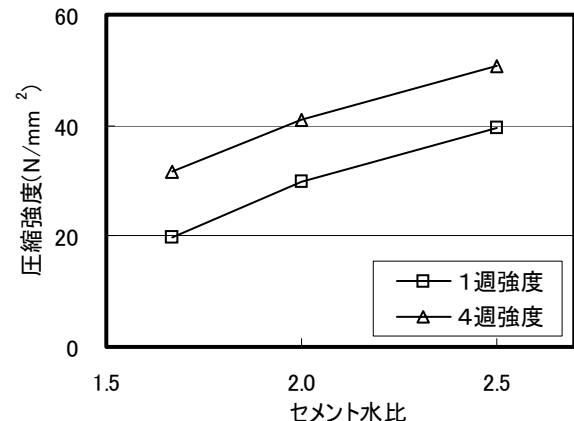


図 - 3 セメント水比と圧縮強度の関係

表 - 2 コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの試験結果

試験体名	W/C (%)	単位水量 (kg/m^3)	質量(kg/m^3)			AE減水剤	AE助剤	スランプ (cm)	空気量(%)	
			セメント	細骨材	粗骨材				空気法	重量法
S1a40	40	162	405	718	1038	C×1%	C×0.016%	19.5	5.6	6.9
S1a50	50	162	324	785	1038			20.0	4.2	5.5
S1a60	60	162	270	830	1038			19.0	4.5	6.8

縮強度と静弾性係数の関係は、天然骨材を用いたコンクリートと同様であると考えられる。

凍結融解抵抗性試験結果のうち、相対動弾性係数とサイクル数の関係を図 - 5 に、気泡間隔係数測定結果を表 - 3 に示す。どの水セメント比においても凍結融解300サイクル終了後の相対動弾性係数は60%以上であった。また、気泡間隔係数は0.34以下であり、連行空気が導入されたものでは十分な凍結融解抵抗性を持つと考えられる。

乾燥収縮試験結果について図 - 6 に示す。乾燥期間26週時点での水セメント比の違いによる長さ変化の違いに明確な差は見られない。また、乾燥収縮率は全ての水セメント比において、乾燥期間26週の時点で800 μ以下であった。これは、高度処理により再生骨材に付着する硬化セメント分が少ないことと、前述のとおり単位水量が少ないことが影響を及ぼしていると考えられる。

促進中性化試験結果について図 - 7 に示す。天然骨材を用いたコンクリートと同様に水セメ

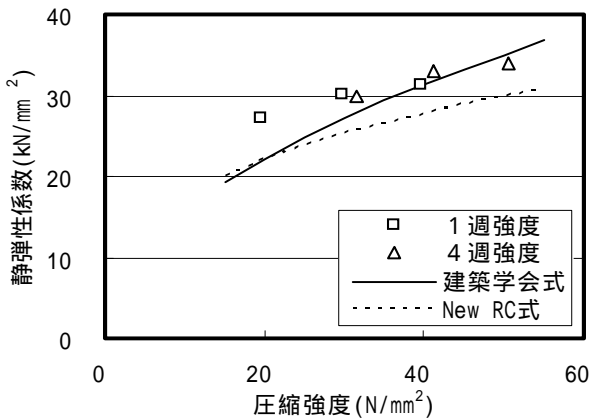


図 - 4 圧縮強度と静弾性係数の関係

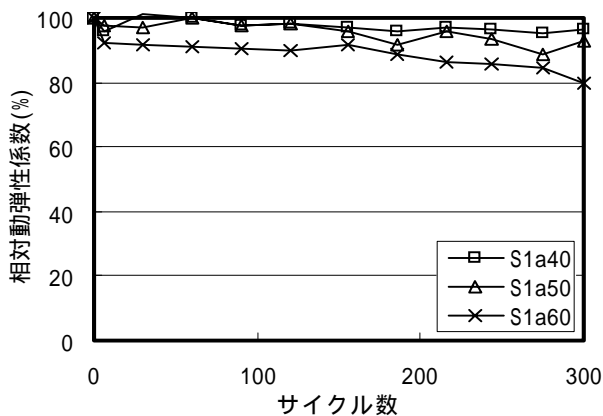


図 - 5 相対動弾性係数測定結果

ント比の増加に伴い、中性化深さも深くなる傾向を示した。中性化深さ自体は促進材齢26週の時点で、どの水セメント比でも20mm未満であった。

以上により、湿式選別法により製造した再生粗骨材及び再生細骨材を用いた再生コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係は既存式とほぼ一致し、また、今回行った凍結融解抵抗性試験、乾燥収縮試験、促進中性化試験の結果より、十分な耐久性状を有していることが明らかとなった。

4. 再生微粉末の製造とリサイクルセメントの試験

4.1 実験方法

再生微粉末は、前報²⁾の実証プラントによる

表 - 3 気泡間隔係数測定結果(mm)

S1a40	S1a50	S1a60
0.28	0.29	0.34

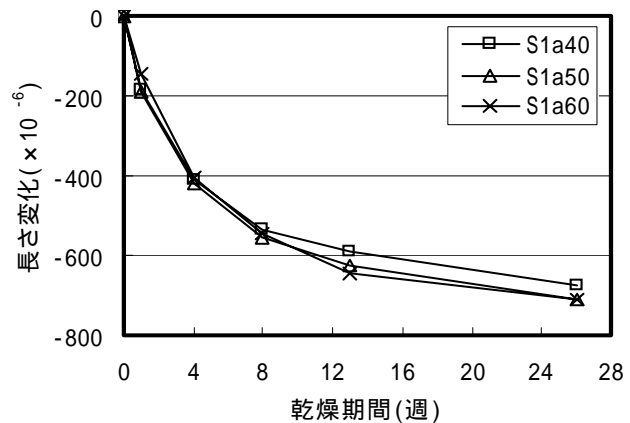


図 - 6 乾燥収縮試験結果

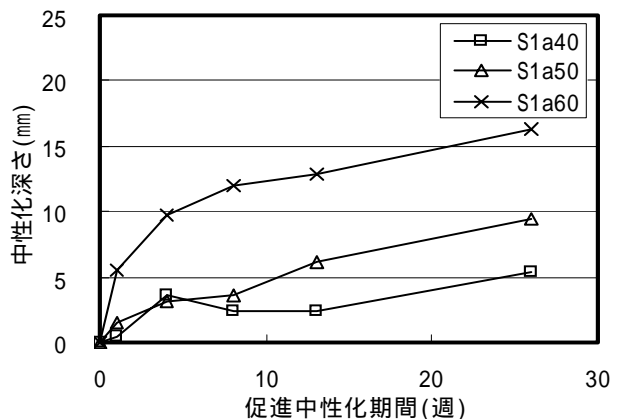


図 - 7 促進中性化試験結果

再生骨材製造実験で得られた4インチハイドロサイクロンオーバーフロー産物を用い製造した。この4インチハイドロサイクロンオーバーフロー産物はセメント分の割合が少なかったため、2インチハイドロサイクロンでさらに分級を行い、このオーバーフロー産物をリサイクルセメントの試製に用いる再生微粉末とした。

ハイドロサイクロンプロセス中の試料はいずれも105℃乾燥、秤量後、蛍光X線にて化学組成分析を行った。またセメント原料に用いた再生微粉末は、セメント協会標準試験方法CAJS I-11に準拠した分析もあわせて行った。

クリンカーの焼成は、工場調合原料及び再生微粉末を用いた。調合条件(率係数)は、水硬率(HM=2.21)、珪酸率(SM= $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)=2.80$)、鉄率(IM= $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3=1.64$)とし、再生微粉末を用いない基準調合及び計算上混和し得る最大量の再生微粉末を混和した調合のクリンカーを焼成した。クリンカーの焼成は、調合原料を湿式成型し、電気炉で図-8に示すプログラムで行った。得られたクリンカーは、JIS R5202及びJCAS I-01に準じた化学組成分析を行った。また、X線回折リートベルト法によりセメント鉱物を定量した。リートベルト解析にはsietronics社のSIROQUANT Ver.2.5を用いた。解析の対象とした鉱物は、 C_3S (M型)、 C_2S (型)、 C_3A (立方晶及び斜方晶)、 C_4AF 、Lime、Periclase、 K_2SO_4 、 $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$ とした。

セメントは、得られたクリンカーに SO_3 換算で2.5%の石こうを二水石こう:半水石こう=1:1で添加し、ブレン比表面積 $3400 \pm 20\text{cm}^2/\text{g}$ となるように粉砕して作製した。試製したセメントは、レーザー回折式粒度分布測定装置により粒度分布を求めた。また、JIS R5201に準拠してモルタル圧縮強さを測定した。

4.2 実験結果及び考察

(1) 再生微粉末の製造

蛍光X線分析結果から、ハイドロサイクロン分級プロセスにおける微粉末中のセメント分と骨材分の割合を算出した。ここで、微粉末中の

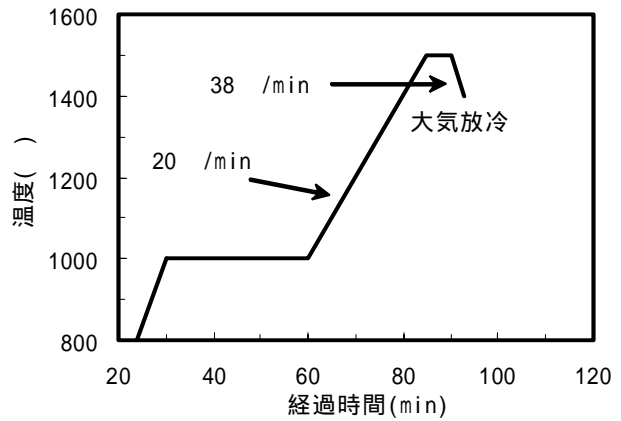


図-8 クリンカー焼成プログラム

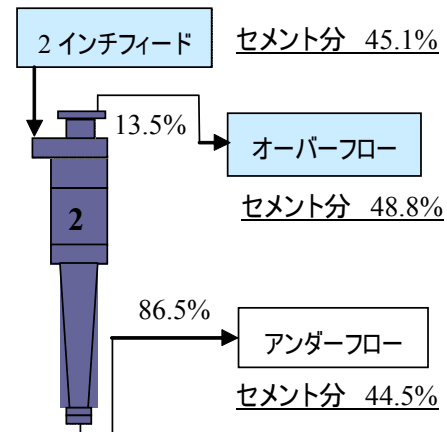


図-9 プロセス中のセメント分の割合と歩留まり

CaOは硬化セメントのみに由来し、セメントのCaOを65%、セメント質量の20%の水が反応したと仮定して分級プロセス中のセメント分の割合と歩留まりを計算した結果を図-9に示す。

図-9より、2インチハイドロサイクロン処理により微粉末中のセメント分の割合は高くなった。しかし、既報³⁾で得られた再生微粉末中のセメント分の割合が76~77%程度であったことと比較すると、本実験での再生微粉末はセメント分の割合が少ない。これは実証プラントの運転条件が再生骨材の品質を優先した条件であったため、アトリションミルによる剥離処理過程で骨材が過粉碎され、微細な骨材片が再生微粉末に多く混入したものと考えられる。

(2) リサイクルセメントの試製

再生微粉末のCAJS I-11による化学組成分析結果を表-4に、クリンカーの調合割合を表-5に示す。既報³⁾での再生微粉末と比較するとセメント分の割合が少ないため、再生微粉末の化

表 - 4 再生微粉末の化学組成(%)

Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
19.02	41.35	10.00	4.96	20.56	2.63	0.50	0.79	0.77	1.24	0.85	0.0194

表 - 5 クリンカーの調合割合(%)

調合	石灰石	珪石	スラグ	鉄さい	微粉末
Base	72.65	5.71	17.02	4.61	-
リサイクル	72.19	-	1.87	1.22	24.72

学組成はCaO量が少なく、SiO₂量が多くなった。また、クリンカー調合原料中に混和できる再生微粉末の割合は25%程度であった。既報³⁾では再生微粉末の混和により調合原料中の石灰石量を削減することができたが、本実験では石灰石の割合はほとんど増減せず、珪石、スラグ、鉄さいといった石灰石以外の原料代替として混和されていた。したがって調合原料中に混和できる再生微粉末の量及び代替原料は、再生微粉末の化学組成に依存するといえる。

焼成したクリンカーの化学組成を表 - 6 に示す。率係数を同一とした場合、再生微粉末をセメント原料中の25%程度用いても、クリンカーの鉱物組成が基準クリンカーと同程度となる化学組成であった。また、f-CaO、Ig.lossはほぼ等しく、再生微粉末を用いてもクリンカーの焼成状態に大きな変化はなかったといえる。

クリンカー中の少量化学成分については、再生微粉末を混和したクリンカーはMgO量が低くなった。これは調合原料中のスラグの割合が減少したためと考えられるが、MgO含有量は原骨材の岩種等によっても変動すると考えられる。S

O₃量については、両クリンカーで同程度であった。

また、再生微粉末を混和したクリンカーのアルカリ量はやや増加するが、JIS規格値(0.75%以下)を満たすものであった。

塩化物イオン量については、電気炉焼成の条件では塩化物イオンは揮発するため、検出されなかった。

表 - 7 にリートベルト法⁴⁾、ボーグ式法によるセメント鉱物の定量結果を示す。再生微粉末を混和したクリンカーは、基準クリンカーとほぼ同程度の鉱物組成であったが、C₃S、C₃Aの増加、C₂S、C₄AFの減少が認められた。しかし、実機クリンカーの鉱物組成をリートベルト法にて定量した研究⁴⁾から、この鉱物組成の変動は通常想定し得る変動幅であると考えられる。鉱物組成の変動は、少量、微量成分、特にMgO、SO₃やアルカリ量の影響が考えられる。本実験では両調合で同一の率係数としたが、これら少量成分の変動を考慮し率係数を変更することで、再生微粉末を混和したクリンカーは、基準クリンカーにさらに近い鉱物組成とすることが可能であると考えられる。

表 - 8 に試製セメントのモルタル圧縮強さ試験結果を、表 - 9 に試製セメントの粒度とロジン-ラムラー式のn値(8-34 μmで計算)を示す。再生微粉末をセメント原料としたリサイクルセ

表 - 6 クリンカーの化学組成(%)

調合	Ig.loss	f-CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ Oeq	Cl
Base	0.19	0.29	22.00	5.20	2.95	64.95	3.05	0.17	0.33	0.28	0.13	0.25	-
リサイクル	0.22	0.38	21.97	5.65	2.88	64.83	2.65	0.08	0.31	0.26	0.11	0.70	-

表 - 7 クリンカー鉱物の定量結果

試料	リートベルト法(%)								ボーグ式法(%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Lime	Pericrace	K ₂ SO ₄	NaK ₃ (SO ₄) ₂	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Base	60.9	18.2	5.9	11.5	0.0	2.5	0.8	0.2	57.0	20.1	8.8	9.0
リサイクル	62.7	12.5	11.8	9.6	0.0	2.2	0.9	0.3	53.9	22.4	10.1	8.8

メントのモルタル圧縮強さを評価した研究例は少ない⁵⁾⁶⁾。本実験でのリサイクルセメントのモルタル圧縮強さは、再生微粉末を用いない基準セメントとほぼ同等であった。実機セメントの材齢28日モルタル圧縮強さは通常60N/mm²程度であるが、これと比較すると若干強度は低かった。これは電気炉と実機ではクリンカーの焼成状態が異なることや、粒度分布の均一性を表すロジン-ラムラー式のn値が実機セメントでは1程度であるのに対し、0.8程度と低いこと等が原因と考えられる⁷⁾。

5. まとめ

湿式選別法による再生粗骨材、再生細骨材を用いた再生コンクリートの製造及び、再生微粉末を原材料としたリサイクルセメントの試製を行った結果は以下に要約される。

- (1) 圧縮強度と静弾性係数の関係は天然骨材を用いたコンクリートと同様に、建築学会式、New RC式とほぼ一致した。
- (2) 凍結融解抵抗性、乾燥収縮、中性化の耐久性は十分な性能を有していることが明らかとなった。
- (3) 再生微粉末をセメント原料の約25%と置換し焼成したクリンカーは、基準クリンカーとほぼ等しい鉱物組成であり、アルカリ量もJIS規格値を満足した。
- (4) 本研究で焼成したクリンカーから試製したセメントのモルタル圧縮強さは、基準セメント、リサイクルセメントで同程度であった。

本検討の結果、コンクリート廃材から再生骨材及び再生微粉末を取り出し、それぞれコンクリート用骨材とセメント原料とすることでコンクリート廃材のゼロエミッション化の可能性が示された。

但し、再生微粉末をセメント原料とする場合、品質及び量の安定供給やセメント工場までの輸送に関する点が実用化への課題として考えられる。

本研究は北海道立北方建築総合研究所、アグ

表 - 8 モルタル圧縮強さ

試料	圧縮強さ(N/mm ²)		
	σ3	σ7	σ28
Base	24.6	36.5	52.4
リサイクル	23.2	37.6	52.5

表 - 9 試製セメントの粒度

試料	Blaine (cm ² /g)	平均粒径 (μm)	n値
Base	3380	16.7	0.83
リサイクル	3420	15.4	0.88

ロ技術株式会社、日鐵セメント株式会社、九州大学による共同研究「コンクリート廃材の全量リサイクル技術に関する研究」の成果の一部である。なお、本研究で使用した再生骨材及び再生微粉末はアグロ技術株式会社に製造されたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松村宇ほか：湿式選別法による高品質再生細骨材の製造、Vol.25 No.1 pp.1475-1480 2003
- 2) 松村宇ほか：湿式選別法による再生骨材及び再生微粉末の製造、コンクリート工学年次論文集、Vol.26 No.1 pp.1533-1538 2004
- 3) 佐川孝広ほか：湿式選別法による再生微粉末のセメント原料化、コンクリート工学年次論文集、Vol.25 No.1 pp.1481-1486 2003
- 4) 吉野亮悦ほか：セメントクリンカーの鉱物組成と製造条件の関係、セメント・コンクリート論文集、No.56 pp.2-8 2002
- 5) 小嶋芳行ほか：コンクリート廃材から再生セメントの試製、石膏と石灰、No.244、pp.21-31、1993
- 6) 石倉武ほか：再生骨材製造副産微粉の利用技術、コンクリート工学、Vol.41、No.6、pp.26-35、2003
- 7) 深谷泰文ほか：セメントの粒度分布が硬化体組織と強度に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.45 pp.92-97、1991