再生骨材製造副産微粉の混和材 利用に関する研究

STUDY ON UTILIZATION OF BY- PRODUCT POWDER GENERATED DURING RECYCLED AGGREGATE PRODUCTION FOR CONCRETE ADMIXTURE

小川秀夫 — *1 嵩 英雄 — *2
石倉 武 — *3 渋谷和俊 — *4

Hideo OGAWA — *1 Hideo KASAMI — *2
Takeshi ISHIKURA — *3 Kazutoshi SHIBUYA — *4

キーワード：
再生骨材, 副産微粉, 混和材, 流動性, 圧縮強度, 乾燥収縮

Keywords:
Recycled aggregate, By-product powder, Admixture, Flowability,
Compressive strength, Drying shrinkage

Recently progress on high quality recycled aggregate production techniques has been made rapidly. This paper deals with utilization of by-product powder generated during high quality recycled aggregate production for concrete admixture. Compressive strength and drying shrinkage of mortar containing large amount of the powder as a part of fine aggregate or cement were investigated experimentally.

1. はじめに

近年、解体コンクリートから高品質な骨材を回収してコンクリートに再利用する研究が盛んである。再生骨材を実構造物に利用した報告も増えている。再生骨材は、2003年に建築工事標準仕様書・同解説（JASS5）において品質基準が定められ、また2005年3月にはJIS規格（JIS A 5021）が制定された。

再生骨材製造時に多量の微粉が副産する（以下、「副産微粉」という）ため、この副産微粉の利用も併せて検討する必要がある、重要な課題である。副産微粉の利用法は、主にコンクリート材料^{1)~4)}、地盤改良材¹⁾、セメント原料¹⁾の3種類に分類される。これらの利用法のうち、副産微粉をコンクリート材料として再利用する方法に着目すると、副産微粉をセメントや骨材の一部と単純に置換し、モルタル・コンクリートの強度や乾燥収縮が低下する試験結果を報告している研究が多い。

著者らは、副産微粉の特性について再生骨材の製造法と関連付けて評価した。また、副産微粉を段階的にセメントまたは細骨材と置換したモルタルを対象とし、同一フローを得るための減水剤添加率、流動性の経時変化、圧縮強度、乾燥収縮の結果を体系的に整理した。

2. 副産微粉の特性評価実験

2.1 実験概要

同じ原コンクリートから異なる製造方法で再生骨材を回収した副産微粉について、物性及び化学組成等を調べた。原コンクリートは、製造後約36年経過した東海発電所のコンクリートで、粗骨材には砂

利が用いられ、コアの圧縮強度は23.8N/mm²である。

再生骨材の製造方法は、スクリー磨砕法及び全体加熱法とした。スクリー磨砕法⁵⁾は、スクリーによる圧密作用により高品質粗骨材を回収する非加熱・乾式方法であり、細骨材粒度を含む副産微粉が60%程度発生する。再生粗骨材と副産微粉を5mm篩で分級しているため、副産微粉は最大径が5mmの砂状の細粒となる。そこで細粒の特性評価は、0.15mm篩で砂分(>0.15mm)と微粉(<0.15mm)に分級して調べた。一方、全体加熱法^{5), 6)}は、約300℃の熱風でコンクリート塊を加熱してセメントペースト分を脆弱化させた後にすみもみ処理する方法であり、高品質な再生骨材（粗骨材と細骨材）が製造でき、副産微粉は30~40%程度発生する。副産微粉は、ミル内通風により排出して、集塵装置で捕集したものを利用した。試料はばらつきを考察するため、同一プラントから異なる運転日に3回採取した。

2.2 実験結果

副産微粉の物性を表1に示す。

表1 副産微粉の物性

製造法	品目	骨材試験結果				微粉試験結果	
						密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
		最大径 (mm)	0.15mmふるい分級(%) 残留 通過	粗粒率 (%)			
スクリー磨砕法	細粒	5.0	85	15	2.76	—	—
	微粉 <0.15mm	0.15	—	100	—	2.38	2840
全体加熱法	微粉-1	0.2	14	86	—	2.42	4920
	微粉-2	0.2	13	87	—	2.42	5020
	微粉-3	0.2	16	84	—	2.45	4600

*1 ㈱太平洋コンサルタントソリューション事業部 グループリーダー
(〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

*2 工学院大学建築学科 教授・博士(工学)

*3 ㈱原子力発電技術機構技術部 調査役・博士(工学)

*4 ㈱太平洋コンサルタントソリューション事業部

*1 Group Leader, Taiheiyo Consultant Corporation, Solution Department

*2 Prof., Dept. of Arch., Kogakuin Univ., Dr. Eng.

*3 Technical Manager, Nuclear Power Engineering Corporation, Engineering Dep., Dr. Eng.

*4 Taiheiyo Consultant Corporation, Solution Department

スクリー磨砕法の副産微粉（細粒）は、原コンクリートの約 60% 発生し、表 1 より、その 85% が砂分（ $>0.15\text{mm}$ ）である。よって原コンクリートの約 51% が砂分として回収される。砂分は、吸水率 8.79%、絶乾密度 $2.13\text{g}/\text{cm}^3$ であり、標準情報 TR A 0006「再生骨材を用いたコンクリート」の再生細骨材の基準（吸水率 10% 以下）を満足し、再生細骨材として低品位コンクリートへの利用が期待できる。微粉（ $<0.15\text{mm}$ ）は、副産微粉（細粒）中の 15%、原コンクリートの約 9% に相当する。本報では、この微粉をコンクリート用混和材として利用するための基礎情報をモルタル試験により調べた。また、走査型電子顕微鏡による形態観察では、写真 1 のとおり、角張った形状であることがわかった。

また、全体加熱法の副産微粉は、 0.15mm で篩分けられた微粉であり、比表面積は $4600\sim 5020\text{cm}^2/\text{g}$ で普通ポルトランドセメントより細かな粉体であった。既往の再生骨材製造の場合、副産微粉の比表面積は $1000\sim 2000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度のものが多かった¹⁾²⁾。再生骨材の高品質化により、すりもみ工程が長くなることから、副産微粉の微細化が進むためだと考えられる。また、粒子の形状は、スクリー磨砕法の微粉と同様に角張っていて、再生骨材の製造方法による相違は認められなかった。

スクリー磨砕法の微粉

全体加熱法の微粉

写真 1 副産微粉の電子顕微鏡写真

副産微粉の化学組成等を表 2 に示す。

スクリー磨砕法の微粉（ $<0.15\text{mm}$ ）は、骨材に由来する不溶残分が 38.1% であり、セメント成分が多く含まれていることがわかった。全体加熱法の微粉は、不溶残分が 48.7% であり、骨材成分が多い。これは、すりもみ工程で骨材の一部が破碎して微粉分として回収されているためと考えられる。

表 2 副産微粉の化学組成等（単位：%）

製造法	品目	不溶残分	強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Cl
スクリー磨砕法	$<0.15\text{mm}$	38.1	15.4	12.1	3.62	2.78	25.4	0.016
全体加熱法	微粉-1	48.7	9.46	9.80	3.06	2.47	24.2	0.014

また、全体加熱法の微粉は、セメント水和物に起因する強熱減量が少ない。これは、骨材の回収過程で加熱されているので、自由水の逸脱、セメント水和物の分解が進んでいるためと推察される。水和物の相違を比較するため、副産微粉の示差熱分析を行った。結果を図 1 に示す。全体加熱法の微粉は、 300°C 以下では吸熱ピークは認められず重量減量は少ないが、約 460°C で水酸化カルシウムの分解と考え

られる吸熱ピークが認められる。これは、全体加熱法の骨材製造工程で 300°C 程度の熱風を与えていることと一致する。スクリー磨砕法の微粉（ $<0.15\text{mm}$ ）は、 400°C 以下でも重量が減少した。これはエトリングサイトやモノサルフェートの脱水、自由水の揮発によるものと推察される。

図 1 副産微粉の TG-DTA

3. 副産微粉の混和材利用モルタル実験

3.1 実験概要

W/C が 40%、50%、60% で、セメント：細骨材が 1:2 のモルタルを基準とし、微粉をセメントまたは細骨材の一部と置換したモルタルの性状について調べた。

使用したセメント、細骨材、減水剤を表 3 に示す。微粉は、スクリー磨砕法の副産微粉（細粒）の微粉（ $<0.15\text{mm}$ ）及び全体加熱法の微粉（表 1 の微粉-1）を用いた。

表 3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
C	密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3410\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	茨城県産の陸砂
S	絶乾密度 $2.54\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 1.93%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 A E 減水剤
SP	

試験項目は、フロー及びその経時変化（JIS R 5201）、圧縮強度（JSCE-G 505-1999）、長さ変化（JISA1129）、細孔径分布（水銀圧入法）とした。

モルタルの練混ぜは、微粉、セメント、水及び混和剤を 30 秒間低速で練り混ぜ、次いでミキサや羽の付着物をかき落とした後に細骨材を投入して低速で 60 秒、続けて高速で 120 間混練した。モルタルのフローは $220\pm 20\text{mm}$ を標準とし、減水剤の添加率を変えて調整した。ただし、無添加で標準以上のフロー値になった場合は、それを試験に供した。

実験条件及び実験項目を次頁の表 4 に示す。

表4 試験条件及び試験項目

	副産微粉	試験条件			試験項目				
		W/C (%)	微粉置換率 (%)		フロー	フロー経時変化	圧縮強度	乾燥収縮	細孔分布
			Cの内割	Sの内割					
1	無混合	40			○		○		
2		50	0	0	○	○	○	○	○
3		60			○		○		
4	スクリー磨砕法の微粉	40	10	0	○		○		
5			20	0	○		○		
6			0	20	○		○		
7			0	40	○		○		
8		50	10	0	○		○		
9			20	0	○		○		
10			0	20	○		○		
11			0	40	○		○		
12		60	10	0	○		○		
13			20	0	○		○		
14			0	20	○		○		
15			0	40	○		○		
16	全体加熱法の微粉	40	10	0	○		○		
17			20	0	○		○		
18			0	20	○		○		
19			0	40	○		○		
20		50	10	0	○	○	○	○	
21			20	0	○	○	○	○	
22			0	20	○	○	○	○	
23			0	40	○	○	○	○	
24		60	10	0	○		○		
25			20	0	○		○		
26			0	20	○		○		
27			0	40	○		○		
28		60	10	0	○		○		
29			20	0	○		○		
30			0	20	○		○		
31			0	40	○		○		
32			10	40	○		○		
33									

表5 微粉混合モルタルのSP添加率、フロー、圧縮強度

	副産 微粉	試験条件				試験結果				
		W/C (%)	微粉置換 率 (%)		S P 添加率		フロー	圧縮強度 (N/mm ²)		
			C の 内割	S の 内割	C 正味 ×%	(C+微粉) ×%		7日	28日	91日
1	無混合	40			0.71	0.71	208	41.6	58.3	66.2
2		50	0	0	0.14	0.14	227	33.0	51.0	58.0
3		60			0.00	0.00	262	20.9	38.8	49.6
4	スクリー 磨砕法 の微粉	40	10	0	0.48	0.43	204	36.6	47.9	55.7
5			20	0	0.43	0.35	210	30.0	36.8	41.7
6			0	20	1.71	1.22	212	55.3	65.9	71.9
7			0	40	7.08	3.94	210	50.0	60.0	66.0
8		50	10	0	9.76	4.88	202	43.7	46.8	55.8
9			20	0	0.12	0.11	233	32.3	45.0	50.2
10			0	20	0.11	0.09	222	28.5	37.4	43.0
11			0	40	0.69	0.49	210	41.0	53.0	60.0
12		60	10	0	2.37	1.32	206	48.7	56.1	62.2
13			20	0	3.32	1.66	238	41.8	49.2	52.4
14			0	20	0.00	0.00	269	19.4	30.9	37.9
15			0	40	0.00	0.00	255	17.5	25.8	32.4
16	全体 加熱法 の微粉	40	10	0	0.08	0.05	222	31.9	43.1	50.7
17			20	0	0.61	0.34	202	35.0	47.0	50.7
18			0	20	1.07	0.53	206	35.5	44.8	48.4
19			0	40	0.79	0.71	208	34.3	46.0	51.0
20		50	10	0	0.88	0.71	202	33.1	42.8	46.7
21			20	0	2.59	1.85	204	37.0	53.2	60.0
22			0	20	11.89	6.60	202	35.5	50.3	50.8
23			0	40	17.36	8.68	201	32.7	48.0	49.2
24		60	10	0	0.16	0.14	224	31.8	45.0	53.0
25			20	0	0.18	0.14	220	28.6	37.9	45.0
26			0	20	0.96	0.73	220	41.9	52.8	59.5
27			0	40	3.95	2.19	209	46.1	56.6	61.0
28		60	10	0	6.77	3.39	238	44.8	54.8	57.0
29			20	0	0.00	0.00	254	21.0	34.5	40.9
30			0	20	0.00	0.00	258	20.8	29.9	36.4
31			0	20	0.27	0.19	240	34.0	45.4	51.0
32			0	40	1.27	0.71	203	40.7	50.0	55.2
33			10	0	2.11	1.06	225	39.8	48.1	50.8

3.2 実験結果

①流動性及びSP添加率

SP添加率、フロー、圧縮強度の試験結果を表5に示す。SP添加率は、標準フロー(220±20mm)を得られるように調整しているため、混合する副産微粉の種類及び量、調合方法が流動性に及ぼす影響をSP添加率より考察することができる。

W/Cが40%及び50%の場合、副産微粉をセメントの内割で置換すると、スクリー磨砕法の微粉では添加率が低減、全体加熱法の微粉では増大した。これは、混合した副産微粉の粒度が影響していると推察される。スクリー磨砕法の微粉の比表面積は2180cm²/gでセメント(3410cm²/g)より小さいが、全体加熱法の微粉は4920²/gである。

一方、副産微粉を細骨材の内割で置換した場合、どちらの副産微粉を混合してもSP添加率は増大し、細骨材及びセメントの両者を微粉と置換した場合も同様であった。これは、副産微粉が細骨材より小さ

いことに起因するもので、同一置換率で比較すると全体加熱法の微粉のほうがSP添加率が高いことから説明できる。

副産微粉を混合すると、強度低下や長さ変化の増大が報告されている¹⁾。モルタル・コンクリートの品質を低下させることなく、副産微粉を多量混合するには、SP添加率を増大してW/Cまたは水/(セメント+微粉)を低減する調合方法が考えられる^{3), 4)}。しかし、SP添加率は、図2に示すとおり水/(セメント+微粉)との相関が認められる。つまり副産微粉の混合量を増やす、または副産微粉の粒度が細かくなるとSP添加率が増大するため、凝結遅延、材料分離等の問題を生じる可能性がある。SP添加率(SP/(セメント+微粉))の上限をメーカー推奨の4%と設定すると、水/(セメント+微粉)の下限値は、スクリー磨砕法微粉では25%、全体加熱法微粉では30%程度と推定できる。

また、モルタルフローの経時変化を図3に示す。相対フロー値とは、

図2 同一フローを得るための減水剤添加率

図3 モルタルフローの経時変化

練混ぜ直後のフローに対する値である。全体加熱法微粉をセメントの20%置換したモルタルの相対フローは、微粉無混合とほぼ同値であり、また細骨材40%置換では時間の経過による低下が少なく、いずれもフロー保持性能が良好であった。

②圧縮強度

スクリー磨砕法微粉をセメントの内割で混合したモルタルの圧縮強度を図4に、また細骨材置換の圧縮強度を図5に示す。

図4 スクリー磨砕法微粉セメント置換モルタルの圧縮強度

図5 スクリー磨砕法微粉細骨材置換モルタルの圧縮強度

スクリー磨砕法微粉をセメント置換したモルタルは、無混合と比べて、図4より材齢7日の強度が若干小さく、材齢が進んでも強度の増進が小さい特徴があり、材齢91日では10%置換で76~87%、20%置換では63~74%であった。細骨材置換したモルタルは、図5より、材齢7日では微粉無混合より顕著に増大するものの、材齢の進行による強度増進は小さく、材齢91日では微粉無混合とほぼ同じ圧縮強度となった。

つまり、微粉混合モルタルの圧縮強度は、材齢7日では相対的に高いが、その後の伸びが小さい結果であった。これは、副産微粉の存在がセメントの水和速度に影響したと推察した。セメント粒子間では互いの水和物が出現し、拘束・抑制し合いながら重なるように空隙を埋めていく。しかし、セメント粒子と副産微粉が隣り合う場合、セメン

ト粒子の水和物は抑制されないで水和速度が速くなる。その結果、初期の強度は比較的高いが、長期強度は伸びないと考えられる。石灰石粉末を混合したコンクリートにおいて、同様の結果と考察が述べられている⁷⁾。

前述の圧縮強度実験結果は、全体加熱法の微粉を混合したモルタルでも同様の結果であったが、全体加熱法微粉のほうが強度増進の効果が若干大きい。この傾向は、副産微粉の種類が圧縮強度に及ぼす影響を示した図6より読み取ることができる。圧縮強度比とは、微粉無混合モルタルの圧縮強度に対する割合である。これは、全体加熱法微粉が微粒子であるため、フィラー効果により強度発現に寄与したと考えられる。

図6 置換率と圧縮強度比の関係

③長さ変化

全体加熱法微粉を混合したモルタルの長さ変化を図7に、質量変化率と長さ変化率の関係を図8に示す。

微粉無混合、セメントの10%及び20%置換の3者は、長さ変化率がほぼ同値であり、図7上でプロットが重なっている。しかし、図8

図7 全体加熱法微粉を混合したモルタルの長さ変化

図8 質量変化率と長さ変化率

より、質量変化率は置換率につれて大きくなる傾向が認められた。細骨材置換の場合は置換率につれて長さ変化が増え、質量変化率は小さくなっていて、微粉混合の条件によって結果が異なった。この原因については、細孔径分布の結果により考察する。微粉無混合と細骨材40%置換モルタルの細孔径分布を図9に示す。

微粉を混合しても細孔累計容積は変わらないが、 $0.2 \sim 0.02 \mu\text{m}$ 径の細孔が減少し毛細管空隙である $0.02 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 径が増え、微細領域の細孔径に変化している。つまり、組織が緻密になり水分の飛散が抑制され質量変化率は低減したが、長さ変化に影響する毛細管空隙が増えたことにより、長さ変化率が増大したと推察できる。

図9 微粉混合モルタルの細孔径分布

4. まとめ

再生骨材の副産微粉の特性、及び副産微粉をセメントの一部または細骨材の一部と置換したモルタルの特性を調べ、以下の結論を得た。

- (1) スクリュー磨砕法の副産微粉(細粒)は、砂分 ($>0.15\text{mm}$) 85%、微粉 ($<0.15\text{mm}$) 15%の砂状であった。全体加熱法の副産微粉は、比表面積は $4600 \sim 5020\text{cm}^2/\text{g}$ で普通ポルトランドセメントより細かな粉体であった。
- (2) 副産微粉をセメント置換すると、同一フローを得るための高性能 AE 減水剤添加率は、スクリュー磨砕法の微粉では低減、全体加熱法の微粉では増大した。副産微粉の細かさが影響している。
- (3) セメント置換モルタルの圧縮強度は、無混合と比べて、材齢7日では若干小さく、材齢が進んでも強度の増進が小さい。細骨材置換モルタルは、材齢7日では微粉無混合より大きくなるが、強度増進は小さく、材齢91日では微粉無混合とほぼ同値となった。これは、副産微粉の存在がセメントの水和速度に影響したと推察される。
- (4) セメント置換モルタルの長さ変化は、微粉無混合とほぼ同値だが、細骨材置換では置換率につれて増大した。これは、 $0.02 \sim 0.01 \mu\text{m}$ の細孔径が増えたことに起因すると推察される。

なお、本実験は、経済産業省からの委託により行われた業務の一部である。

参考文献

- 1) (社)セメント協会:建設副産物利用促進専門委員会報告/コンクリート塊から発生する微粉末の有効利用,セメント協会,1996.10
- 2) 関野一男,小野義徳,和木晴彦:コンクリートガラの再生処理微粉末を混入したコンクリートの基礎性状,セメント技術大会講演集,pp.400~405,1995.5
- 3) 石倉武,大西一彦,小川秀夫,横山勝彦: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, 2003.4
- 4) 小川秀夫,嵩英雄,石倉武,助清満昭:副産コンクリート微粉の混和材利用,日本建築学会大会学術講演便覧集 A1, pp.1069~1070, 2000.9
- 5) 石倉武,大西一彦,小栗第一郎:高品質再生骨材の実用化のための実証実験,コンクリート工学,Vol.41, No.12, pp.44~52, 2003.12
- 6) 立屋敷久志,岡本雅道,西村祐介,黒田泰弘:解体コンクリートからの高品質再生骨材の回収実験,コンクリート工学年次論文集,Vol.22, No.2, pp.1099~1104, 2000
- 7) 山崎寛司:コンクリートライフ'ラリ第8号/鉱物質微粉末がコンクリートのワーカビリティおよび強度におよぼす効果に関する基礎研究,土木学会,1963

[2005年4月19日原稿受理 2005年7月22日採用決定]