

コンクリート廃材から発生する微粉のリサイクルに関する研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON REUSE OF POWDER DERIVED FROM WASTE CONCRETE

井上敏克*・立屋敷久志**・田中久順***・岸本幸尚***

by Toshikatsu INOUE, Hisashi TATEYASHIKI, Hisanobu TANAKA and Yukinao KISHIMOTO

1. はじめに

近年、建設副産物の発生量は増加の一途をたどり、平成5年度には7600万トン、その内コンクリート塊は2600万トンに達している。一方、受け皿である最終処分場は逼迫しており、不法投棄等の不適性処理による環境破壊問題が顕在化している。

平成2年度の警察白書によれば、平成元年の廃棄物処理法違反の検挙件数の内約70%が不法投棄であり、その約90%が建設副産物である。要因の一つとして、コンクリート塊等の再利用率が低く、最終処分場の容量を圧迫していること、処分地の遠隔化による運搬費・処分費の高騰が指摘されている。また、新規処分場の立地も困難さを増し、外部からの廃棄物の搬入に対する自治体の規制も年々厳しくなっていることから、建設副産物の再利用は緊急を要する重要な課題である。

このような背景のもとで、平成3年10月に「再生資源の利用の促進に関する法律」および平成4年7月に「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」が施行され、限りある資源を有効に利用するとともに廃棄物の発生の抑制、環境の保全に資するために、建設廃棄物のリサイクルを官民一体となって推進するための措置が定められている。

限りある資源を大切に利用し、また環境の保全を図ることは現在のみならず将来の社会に対する責務であることを認識し、まず「使い捨て」から「大切に」・「繰り返し」使用することへの意識の変革を個人から事業者、行政にいたる社会の様々なレベルで進め、リサイクルのシステムを定着させることが必要と思われる。

2. 目的

近年、コンクリート塊をクラッシャー等で破砕

し、分級することにより粒度分布を調整して再生骨材とする研究が盛んに行われてきた。しかしながら、再生骨材を用いたコンクリートの性能は、概してヴァージン骨材を用いたものより劣ることから、実用化はそれほど進んでいない¹⁻⁹⁾。実用化を推進するための方策の一つは、セメント水和物の付着量が少なく、バージン骨材と同等の性能を有する高品質な再生骨材を製造する方法を開発することであると考えられる。

再生骨材の品質を高めようとすれば、再生時に多量の微粉が副産し新たな廃棄物となることが予想される。そこでその再利用方法を検討することとした。

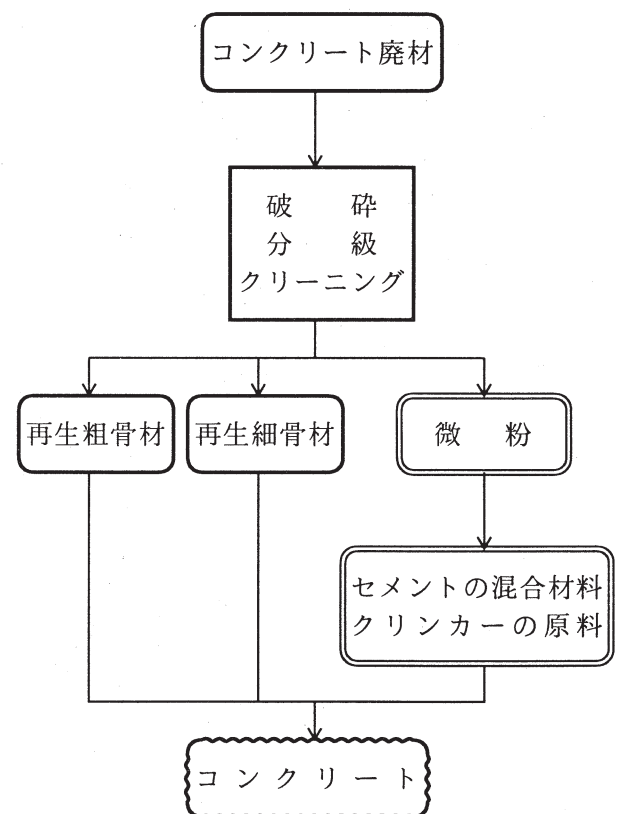


図1 コンクリート廃材のリサイクル概念図

* 三菱マテリアル(株) セメント研究所 セメント研究部 部長 (〒330埼玉県大宮市北袋町1-297)、

** 同 地球事業センター リサイクル部 課長代理、

*** 同 セメント研究所 セメント研究部 研究員

3. 実験概要

ここでは、2種類の利用方法について検討した。

実験Ⅰ セメントの混合材料としての利用

実験Ⅱ セメントクリンカーの原料としての利用

3.1 実験材料

(1) 実験Ⅰ セメントの混合材料としての利用

a) 微粉

再生骨材製造工場で購入したコンクリート廃材を篩い分けし粒径0.6mm以下の微粉を回収した。これをボールミルで所定の粉末度(ブレン値=3200、

5000、8000cm²/g)に粉碎して混合材料とした。

微粉は、セメント水和物の他に骨材粉末を含有している。コンクリート廃材中の骨材種がその微粉を混合したセメントの性能に影響を及ぼすことが予想できることから、実験には、骨材種が異なる、①石灰石骨材を使用していない、②全粗骨材量の50%に石灰石骨材を使用、の2種類のコンクリート廃材から発生した微粉を使用した。微粉の化学組成を表1に示す。

粉末X線回折により含有鉱物を調べたところ、処理工程で微粉として回収された骨材の回折線が明確に現れており、①では石英、長石、②では石英、長石、石灰石が同定された。

表1 微粉①および②の化学組成(%)

	ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	total
①	5.84	75.62	3.20	3.37	2.85	7.49	0.73	0.24	0.13	0.29	0.05	0.08	0.06	99.95
②	10.35	60.83	4.00	2.67	2.73	17.39	0.93	0.36	0.14	0.30	0.08	0.09	0.11	99.98

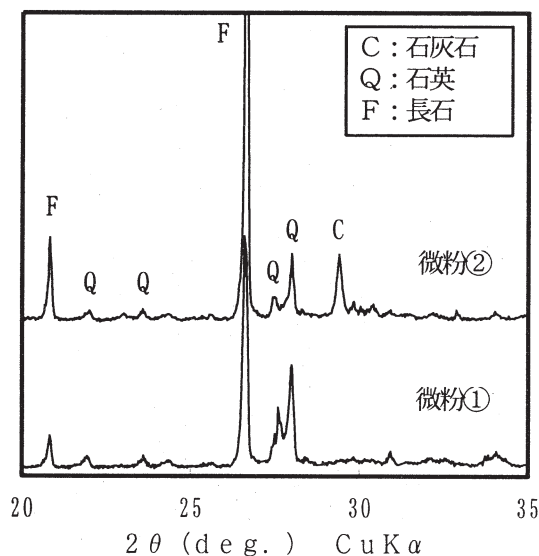


図2 微粉の粉末X線回折図

b) 基準セメント

基準セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。

(2) 実験Ⅱ セメントクリンカーの原料としての利用

コンクリート廃材から、ロッドミルと攪拌ミルによる磨砕で骨材を回収した際に発生した微粉③と純薬を原料としてセメントクリンカーを試製した。その際、十分な焼成反応性を確保するため、微粉は回収された状態の粉末度(ブレン値=2590 cm²/g)からさらに粉碎して、ブレン値=6530 cm²/gとして使用した。

a) 微粉

実験に使用した微粉の化学組成を表2に示す。

表2 微粉③の化学組成(%)

ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	total
9.20	48.72	10.08	5.25	20.84	2.16	0.67	1.33	1.00	0.44	0.11	0.11	99.91

b) 純薬

使用した純薬は、CaCO₃、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃であり、これらをブレン値=5000cm²/g以上の粉末度に粉碎して補正用の原料とした。

3.2 実験方法

(1) 実験Ⅰ セメントの混合材料としての利用

a) 微粉混合セメントの調製

基準セメントと微粉(ブレン値=3200、5000、8000 cm^2/g)を、所定の割合(内割混合量=5、10、20%)に配合して、振とう混合機で充分混合して微粉混合セメントとした。なお、微粉①と②のシリーズでは基準セメントのロットが異なる。

b)セメントの物理試験

セメントの物性をモルタル強さと凝結時間で評価した。試験方法は、JIS R 5201-1992「セメントの物理試験方法」である。

(2)実験Ⅱ セメントクリンカーの原料としての利用

a)クリンカーの配合計算

微粉を原料としてセメントクリンカーを試製した。目標とする主成分比のクリンカー(表3)を焼成するための補正は純薬で行うこととした。

微粉の使用可能量の最大値は全アルカリ($\text{Na}_2\text{O eq}=\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)量で決まり、JIS R 5210-1992「ポルトランドセメント」に規定されている上限値、即ち、0.75%が目安となる。また、微粉の使用量が異なるとクリンカーの焼成反応性やセメントの物性の評価が複雑になるので一定とすることにし、本実験では、微粉の原単位を360.42 $\text{kg}/\text{t}\cdot\text{cli}$ とした。なお、このときのクリンカー中の R_2Oeq 量は、0.72%である。

クリンカーの主成分比と微粉および純薬の原単位を表2に示す。

表3 クリンカーの主成分比と微粉および純薬の原単位

種 類	記号	主成分比*			原単位($\text{kg}/\text{t}\cdot\text{cli}$)				
		HM	SM	IM	微粉	CaCO_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
普通ポルトランドセメント	N	2.14	2.60	1.80	360.42	1056.96	49.51	19.33	12.00
早強ポルトランドセメント	H	2.29	2.88	1.92	360.42	1082.34	45.21	14.08	7.33
中庸熱ポルトランドセメント	M	2.00	3.12	1.00	360.42	1030.99	71.45	3.26	20.67

* $\text{HM}=\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $\text{SM}=\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $\text{IM}=\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$

b)再生セメントの調製

微粉と純薬振とう混合機を用いて30分間混合し、調合原料とした。クリンカー中の SO_3 量は、焼成中の揮発率(40%)を考慮し、焼成後に0.55%となるように硫酸で添加した。

水で混練りした調合原料(水粉体比=21%)を、ホバート型ミキサーで充分混合した後、プレス機で一辺が2cmの立方体に成形し、100℃で乾燥した。

乾燥後の調合原料は、1000℃に調節した電気炉中で90分間仮焼したのち、1450℃に調節した電気炉で90分間焼成、直ちに空冷してクリンカーとした。

これをジョークラッシャーで3.4mm以下に粗砕したのち、セメント中の SO_3 量が、NとMは2.0%、Hは3.0%となるように二水せっこうを加え、さらにボールミルで微粉碎して再生セメントとした。セメントの目標ブレン値は $\text{N}=3200\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $\text{H}=4000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $\text{M}=3200\text{cm}^2/\text{g}$ とした。

c)クリンカーの焼成反応性

焼成反応性はクリンカー中のf. CaO量で評価した。f. CaOの定量は、JCAS I-1「遊離酸化カルシウムの定量方法」に基づいて行った。

d)セメントの物理試験

実験Ⅰと同様、凝結および強さ試験を行なった。

4. 実験結果と考察

4.1 実験Ⅰ セメントの混合材料としての利用

微粉を混合したセメントの圧縮強さを図3および図4に、凝結時間を図5および図6に示す。

微粉を混合したセメントの圧縮強さは、微粉の混合量が多いほど、また、微粉のブレン値が小さいほど低かった。微粉の種類に着目すると、石灰石を含有しない微粉(①)を混合したセメントの強さの低下は、石灰石を含有する微粉(②)を混合したセメントより小さかった。基準セメントとの比較では、微粉①を5%混合したセメントの強さは全材齢において基準セメントを上回っていた。混合量が10%ではブレン値を5000 cm^2/g 以上にした場合に、初期材齢の強さが基準セメントを若干上回っていた。微粉②ではブレン値を8000 cm^2/g にした場合、同様の傾向が認められた。

微粉①を混合したセメントの凝結は、終結が基準セメントより10~30分遅れる傾向が認められ、20%では始発も10~20分遅れた。一方、微粉②を混合したセメントは始発が遅れる傾向が認められ、10%では20~30分、20%では50~60分遅れた。また、

20%では終結も40～60分の遅れが認められた。なお、微粉のブレン値が凝結に及ぼす影響は小さい。

コンクリート廃材の骨材種が異なると、その微粉をセメントの混合材料として使用する際に、セメントの性能に異なる影響を与えることがわかった。

コンクリート廃材のリサイクルにおいて、処理するコンクリートの種類を予め限定することは困難であり、微粉を混合したセメントが微粉を混合していないセメントと同程度以上の性能を保持するための条件は、ここでの実験範囲から判断すれば、微粉のブレン値が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上でかつ混合量が5%以下であることになる。

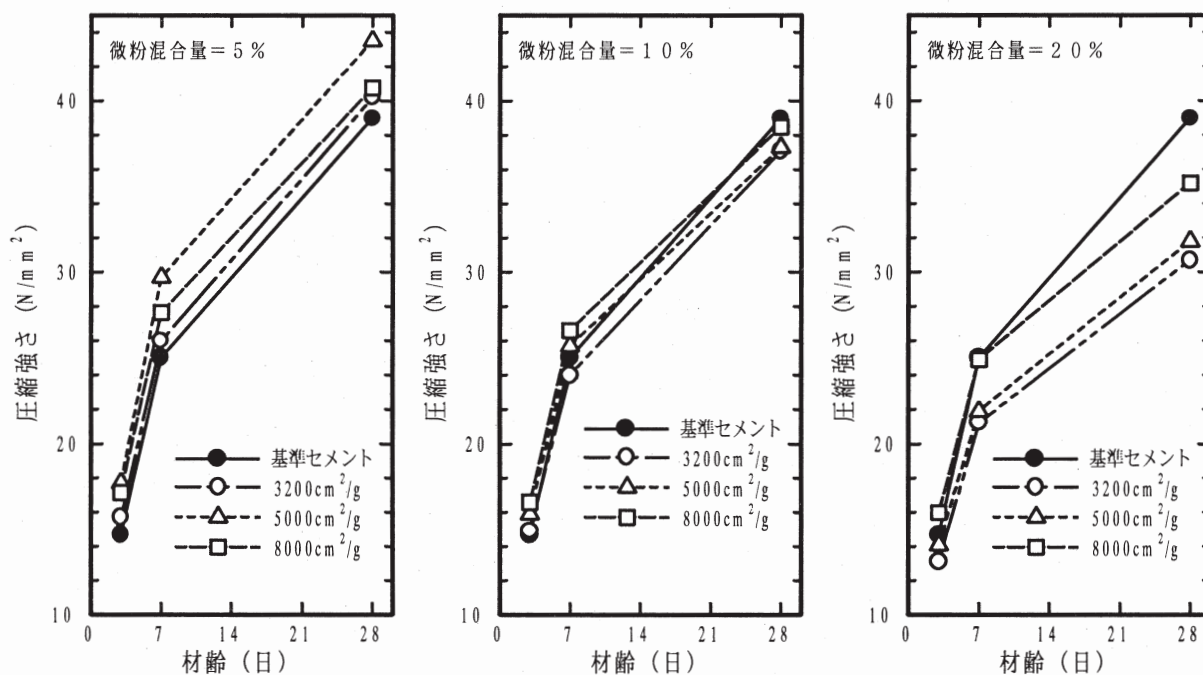


図3 微粉①を混合したセメントの圧縮強さ

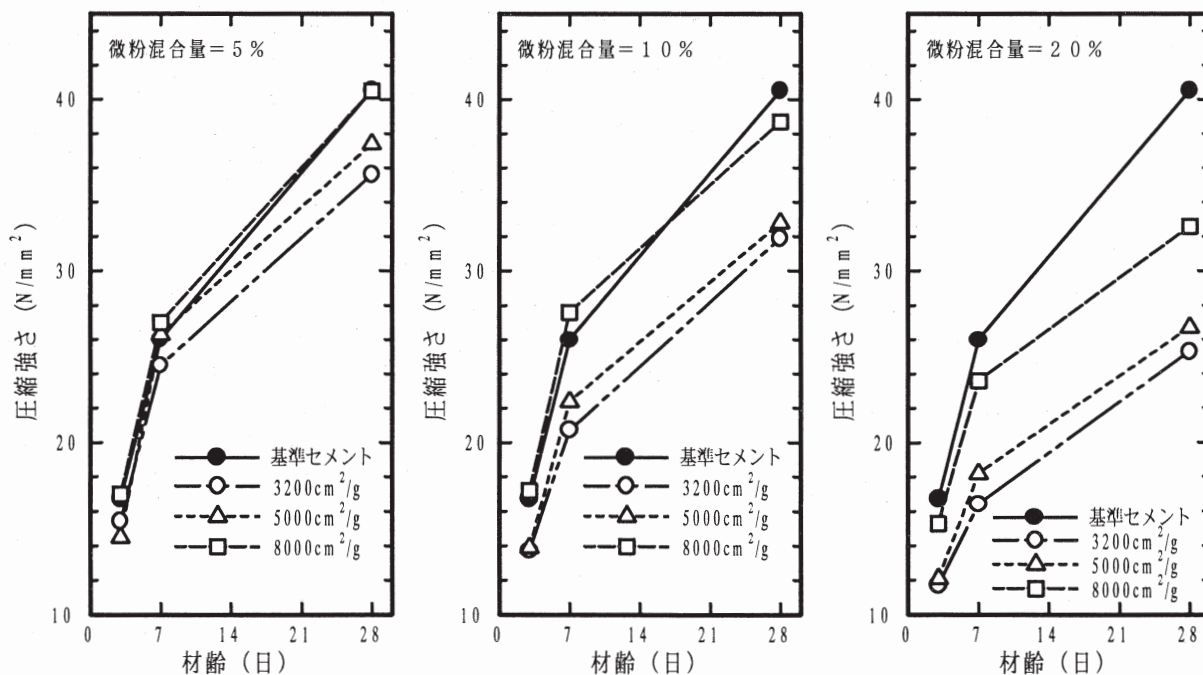


図4 微粉②を混合したセメントの圧縮強さ

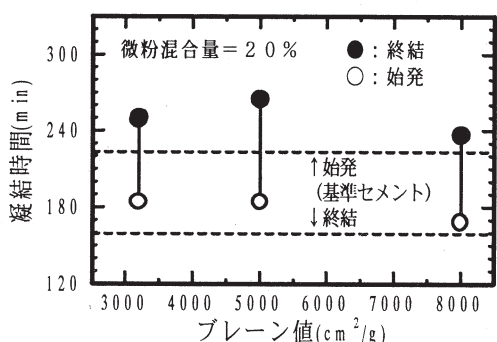
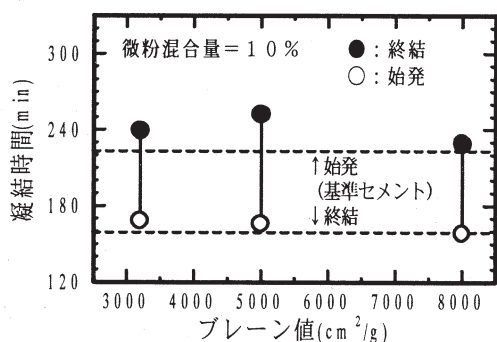
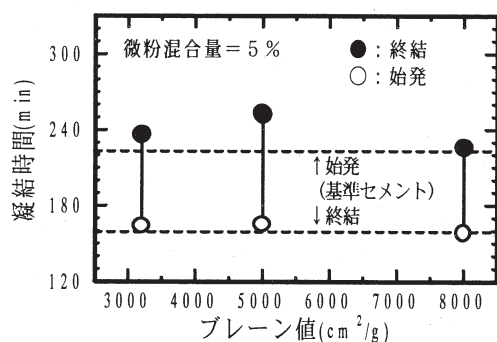


図5 微粉①を混合したセメントの凝結時間

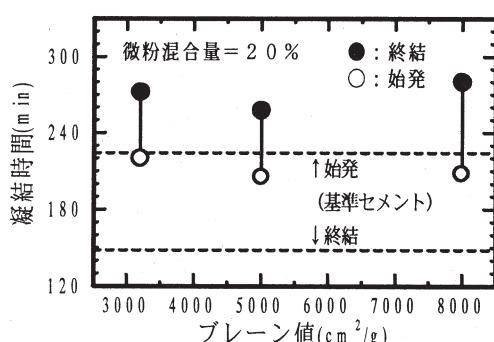
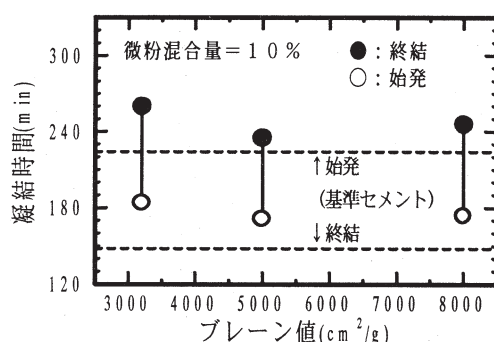
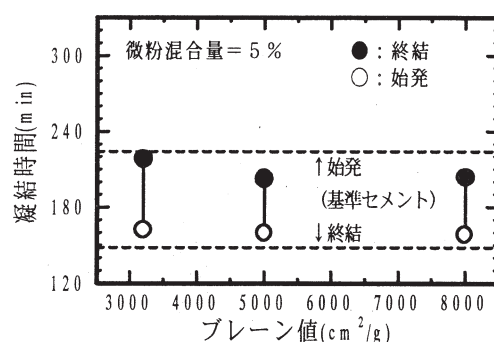


図6 微粉②を混合したセメントの凝結時間

4.2 実験Ⅱ セメントクリンカーの原料としての利用

(1) クリンカーの焼成反応性

試製したクリンカーの遊離酸化カルシウム(f. CaO)量を表4に示す。

微粉③をそのままの粒度で使ったN、Hクリンカーはf. CaO量が多いことから、焼成反応が充分に行われていないことが推測される。この原因は、微

粉中にSiO₂を主成分とする粗い粒子が多く存在しているためであると考えられる(表5)。そこで、反応性を上げるために微粉中の45μmふるい残分の塩酸不溶残分量(45μm残 HCl insol.)が約20%少なくなるまでボールミルで粉碎して、クリンカーを焼成したところ、f. CaO量は減少し、十分に焼成反応が進んだことを確認することができた(表4)。

表4 作製したクリンカーのf. CaO量(%)

	Nクリンカー	Hクリンカー	Mクリンカー
未粉碎の微粉	2.26	6.14	0.90
粉碎した微粉	0.13	0.66	0.05

表5 微粉③の粉末度と45μm残 HCl insol.

	45μm残 HCl insol. (%)	ブレン値 (cm ² /g)
未粉碎の微粉	45.6	2590
粉碎した微粉	26.1	6530

(2)再生セメントの物性

(1)の結果をふまえ、粉碎した微粉③を用いて試製した再生セメントの物性値を表6に示す。

再生セメントは、いずれも市販されているポルトランドセメントと同程度の性能を有することが判明した。

表6 再生セメントおよび市販されているポルトランドセメントの物理試験結果

	種 類	ブレン値 (cm^2/g)	圧縮強さ (N/mm^2)				曲げ強さ (N/mm^2)				凝結 (h-m)	
			1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d	始発	終結
再生 セメント	N	3190	—	14.4	23.7	44.1	—	3.2	4.2	7.0	2-42	3-32
	H	3970	14.7	27.2	35.8	49.4	3.6	5.2	5.5	8.1	2-25	3-35
	M	3210	—	9.7	13.6	41.6	—	2.7	3.1	6.9	4-15	5-35
市販 セメント	N	3250	—	15.9	25.7	41.6	—	3.7	5.4	7.4	2-33	3-24
	H	4050	14.2	25.9	35.4	47.1	3.6	5.4	6.7	7.9	2-24	3-40
	M	3200	—	9.4	14.7	34.3	—	2.6	3.6	6.2	4-07	5-22

5.まとめ

コンクリート廃材中に含まれる骨材を再生する工程で発生する微粉の利用方法を検討したところ、以下のことが判明した。

実験Ⅰ セメントの混合材料としての利用

微粉をセメントの混合材料として利用する際、微粉のブレン値が小さく、混合量が多ければセメントの性能は低下するが、ブレン値が十分大きく、少量であれば低下は認められない。

コンクリート廃材中の骨材種が異なると、その微粉を混合したセメントの性能への影響は異なる。石灰石骨材を使用しているコンクリートから発生した微粉を混合したセメントは、石灰石骨材を使用していないコンクリートから発生した微粉を混合したセメントより、性能の低下が顕著である。

コンクリート廃材のリサイクルにおいて、処理するコンクリートの種類を予め限定することは困難であり、ここでの実験結果から判断すると、微粉を混合したセメントが元のセメントと同程度以上の性能を保持する条件は、微粉のブレン値=8000 cm^2/g 以上、混合量=5%以下であることになる。

実験Ⅱ セメントクリンカーの原料としての利用

微粉の原単位が最大となるようにそれぞれの配合を計算するとクリンカー中の全アルカリ量が、JIS R 5210で規定されている上限値0.75%を越える。従って、微粉の使用量の上限は、微粉中に含まれているアルカリ量によって決まる。

微粉は、 SiO_2 を主成分とする粗い粒子を多く含んでいるために、クリンカーの焼成反応性は悪い。反応性を上げるためには、これを粉碎する必要がある、ブレン値=6500 cm^2/g 程度にすれば十分な

反応性が確保できる。粉碎した微粉と純薬を用いて試製したクリンカーを用いたセメントの物性は、市販されているポルトランドセメントのそれと同等であった。

なお、本研究では微粉に含有される塩化物イオン量は考慮していない。セメント中の塩化物イオン量は、その上限値がJISで規定されている。コンクリート廃材から得られる微粉末の中には2%を上回る量が含有されているものもあり¹⁰⁾、利用に際しては注意を要する。

参考文献

- (1) 清治真人 他、月刊生コンクリート、vol.13、No.11、Nov、(1994)
- (2) 岩本博毅 他、月刊生コンクリート、vol.13、No.3、Mar、(1994)
- (3) 山田 優 他、コンクリート工学、vol.32、No.1、(1994)
- (4) 杉本正昭、建設用原材料、vol.13、No.2、15、(1993)
- (5) 毛見虎雄 他、日本建築学会学術講演概要集、1203、9月、(1993)
- (6) 中田善久 他、日本建築学会学術講演概要集、1204、9月、(1993)
- (7) 渡辺一弘 他、日本建築学会学術講演概要集、1621、9月、(1993)
- (8) 柳 啓 他、コンクリート工学、vol.29、No.7、(1991)
- (9) 西林新蔵 他、セメント技術年報、vol.36、31、(1982)
- (10) (社)セメント協会、建設副産物利用促進専門委員会報告、1996.10

(1997年11月5日受付 1998年2月12日受理)