

論文 衝撃波処理した生コンスラッジの基本物性について

森重沢男^{*1}・高海克彦^{*2}，竹田憲夫^{*3}・村上力也^{*3}

要旨：管理型廃棄物として処理しなければならない生コンスラッジの再利用を目指し，スラッジケーキに加熱衝撃波を照射して短時間で微粉碎乾燥スラッジを製造する処理システムを採用した。生コン工場で排出されるスラッジケーキをほぼ1ヶ月間毎日乾燥処理し，製造した乾燥スラッジの基本物性を調べた。さらに，このスラッジをセメント部分置換し，ペースト・モルタルフロー試験および硬化モルタルの強度試験から，本処理をした乾燥スラッジの材料評価を行った。

キーワード：スラッジ，加熱衝撃波処理，粉体粒径，ペーストフロー，モルタル

1. はじめに

生コンクリート工場では，戻りコンクリートおよびコンクリートミキサーやアジテーター車の洗い水から，脱水機により多量のスラッジケーキが作られている。このスラッジケーキは，多くは管理型の産業廃棄物として埋め立て処理などされているが，廃棄処理コスト低減の問題や，さらに循環型社会の構築に向けては，再利用が望まれている^{1), 2)}。

これまでもスラッジの再利用に関して，乾燥スラッジの製造方法が紹介され，そのスラッジを使用したコンクリートの特性についての一連の研究^{3), 4)}がなされている。

本研究では，スラッジの処理に新たに加熱衝撃波を使用する方法を採用し，先ずこの方法により製造した乾燥スラッジの基本物性を検討した。次に，この乾燥スラッジを生コンクリートへの再利用を目指して，セメント部分置換によるペーストおよびモルタルフロー試験ならびにモルタル強度試験を行った。本論文は，この方式によって製造される乾燥スラッジの物性とそれを用いたペーストとモルタルの特性を明らかにし，利用方法の資料を提供しようとするものである。

2. 実験概要

2.1 スラッジの製造装置および方法

本研究で使用する乾燥スラッジ製造機械を写真-1，その製造過程模式図を図-1に示す。この製造機を用いた乾燥スラッジの製造手順は，次のようである。生コン工場で発生するスラッジケーキを，製造機に投入できる硬さになるよう1日天日乾燥させる。これを5～8cm角の立体に砕き，製造機中央に示す，原料スラッジ塊投入口に順次入れる。このスラッジ塊に製造機右手のジェットバーナーで加熱された衝撃波（加熱衝撃波）を当て粉碎する。これを円筒状の経路



写真 - 1 サイクロン乾燥スラッジ製造機

*1 萩森興産株式会社 技術部（正会員）

*2 山口大学 工学部社会建設工学科 工博（正会員）

*3 山口大学 工学部社会建設工学科（学生会員）

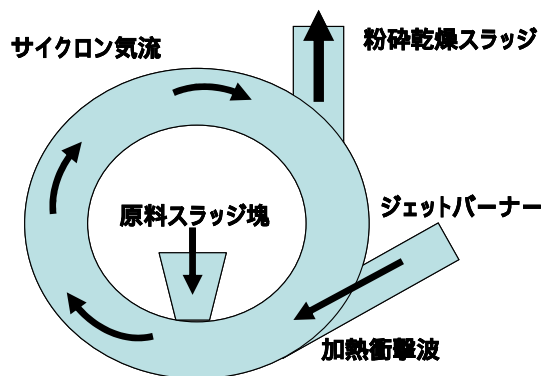


図 - 1 乾燥スラッジ製造過程模式図

に沿ってサイクロンの高速気流で通過させ、装置上方へ吸引すると微粉碎された乾燥スラッジが得られる。この加熱衝撃波とサイクロン気流によりスラッジ塊の粉碎・乾燥処理は極めて高速に行われるため、試験的に処理される 15kg のスラッジ塊の投入開始から、乾燥スラッジ粉体 that 得られるまでの処理時間は約 7 分である。本研究では、乾燥スラッジの安定製造・供給が可能かを調査するため、生コン工場から排出される実際のスラッジケーキを 1 日 1 サンプル、1 ヶ月にわたり毎日処理して試験サンプルとした。製造される乾燥スラッジの品質は、スラッジ塊の投入量・速度および処理機の運転操作の差異により異なると思われるが、本研究では乾燥スラッジの製造条件は全て同一にした。

2.2 実験方法

(1) 乾燥スラッジの物性試験

製造された乾燥スラッジに対して、化学分析、SEM 観察を行い、密度、比表面積、粒度分布、真円度ならびに平均粒径を求めた。密度および比表面積は、JIS R 5201 に準拠し、粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定器で計測した。真円度および平均粒径は粉体工学でよく用いられる次式で定義される各式で算出した。

真円度：

$$CI = \frac{l^2}{4\pi a} \quad (1)$$

ここに、 l は粒子投影図の周囲長、 a は粒子の投影面積である。真円度は、真円形するとき 1 を取り数値が大きいほど角ばっていることを表す。

なお、観察粒子数は一回につき 700 個以上とした。

平均粒径⁵⁾：

$$d = \frac{K}{\rho \times S} \quad (2)$$

ここに、 K は形状係数 ($= 6$)、 ρ は密度、 S は比表面積である。

(2) ペーストフロー試験

ペーストフロー試験および以下の(3)に述べるモルタル試験は、(1)で分析した 30 サンプルのうちから、比表面積の大きいものから小さいものまでにわたり、6 試料について行った。

ペーストフロー試験では、JIS R 5201「セメントの物理試験法」に規定されている方法で行い、ペーストに振動を与えない水平な広がりフロー値とした。ペーストの作製では、粉体質量により乾燥スラッジでセメント置換を行った。セメント質量の置換率は 0、5、10 および 15% である。ペーストフロー試験において水粉体容積比を変化させ、得られたペーストフロー面積比と水粉体容積比との関係から粉体の形状係数と拘束水比⁶⁾を算出した。

この粉体の拘束水比と形状係数は、ペーストの流動性に対する粉体の特性を表す指標である。拘束水比は、ペーストの相対フロー面積比が 0 となる最大の水粉体容積比、すなわちペーストが変形し始めるときの水粉体容積比であり、変形係数は相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水粉体容積比、すなわちペーストが変形する際のペーストの変形のしやすさの程度を表している⁷⁾。従って、これらの数値が小さいほど、ペーストの流動性が大きいことを表している。

(3) モルタル試験

モルタルフロー試験は、JIS R 5201 に準拠し、モルタルの作製では、乾燥スラッジを、セメント質量の内割り度で 0、5、10 および 15% 置換した場合を実施した。練り混ぜの終わった試料で、通常モルタルフロー試験を行った。一部試料については、30 分、60 分後にフロー試験を行い

表-1 乾燥スラッジの化学分析結果の一例

項目	本スラッジ	比較試料*	OPC*)
化学成分 (%)	ig.loss	16.4	17.9
	CaO	56.36	37
	SiO ₂	14.93	30.4
	Al ₂ O ₃	2.98	7.1
	Fe ₂ O ₃	5.48	3.6
	MgO	0.45	1.7
	SO ₃	1.78	1.2
	K ₂ O	0.6	0.59
	Na ₂ O	0.04	0.48
	TiO	0.58	—
	MnO	0.28	—
	P ₂ O ₅	0.11	—
Total (%)	99.99	99.97	99.68

*)：参考文献4)より

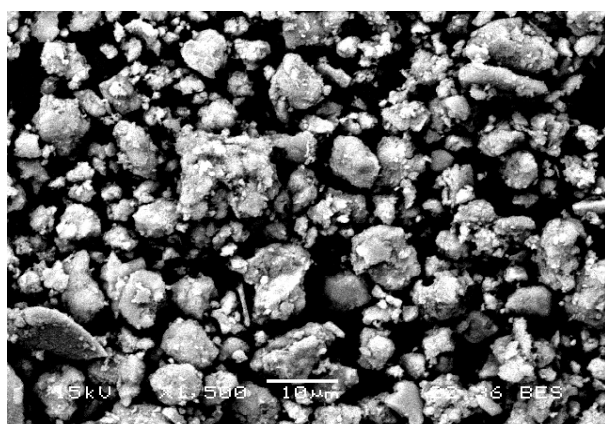


写真-2 乾燥スラッジ (x1500)

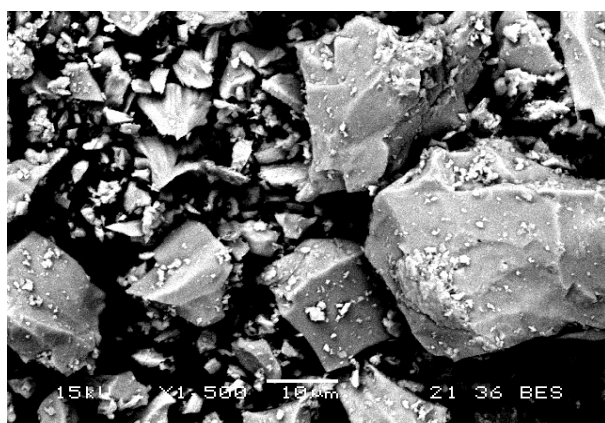


写真-3 普通ポルトランドセメント (x1500)

フローロスを測定した。

モルタルフロー試験とは別にモルタルを練り、モルタルバー供試体を作製し、材齢 7 日および 28 日で圧縮強さと曲げ強さ試験を行った。

3. 実験結果

3.1 粒子物性

表 - 1 に乾燥スラッジの化学分析結果の一例を示す。表中には、他の方法で製造された乾燥スラッジ (比較試料) ⁴⁾ および普通ポルトランドセメントの諸量 ⁴⁾ も示す。本スラッジは、比較試料同様、普通ポルトランドセメントに比べて ig.loss が大きい。比較試料と比べると CaO が多く SiO₂ が若干少ないようである。

写真 - 2 に本装置で製造した乾燥スラッジ、写真 - 3 にポルトランドセメントの SEM 写真を示す。乾燥スラッジ粒子はポルトランドセメント粒子と比べると、粒子径はかなり小さく丸みを帯びていることが分かる。この傾向は、他の方法で製造された乾燥スラッジが丸みを帯びている特性 ⁴⁾ とも類似している。

図 - 2 に乾燥スラッジの粒度分布の一例を示す。実線が累積分布、点線が粒径区間分布である。本計測では 1 μm 以下は細分析できなかったため、累積分布の指数近似曲線を求め、1 μm 以下にも延伸させた。分布図から分かるように 1 μm 以下が約 20% を占めるなど、写真 - 2 で観

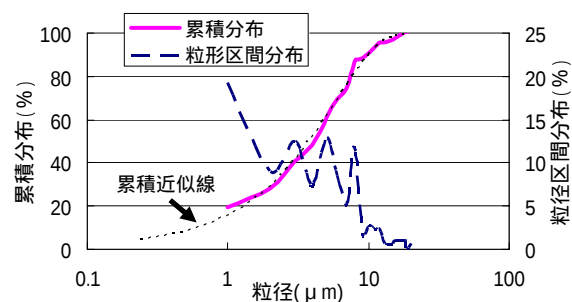


図 - 2 乾燥スラッジ粒度分布の一例

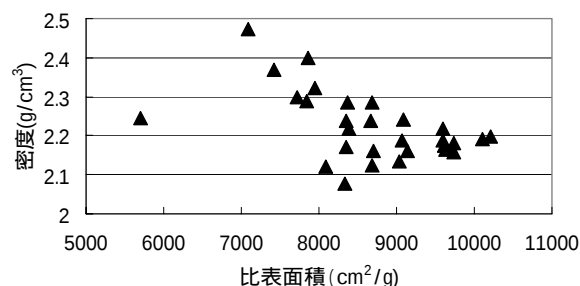
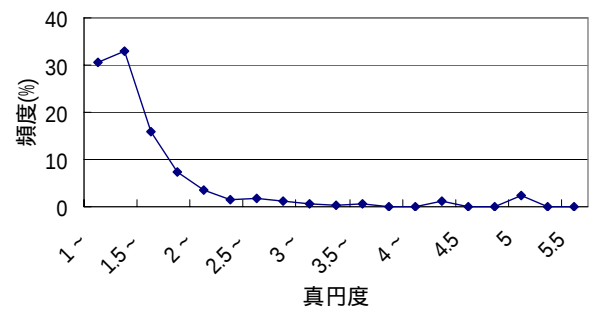


図 - 3 比表面積と密度

表—2 密度と比表面積

項目	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
平均値	2.19	8970
変動係数(%)	3.2	7.8
最大値	2.47	10205
最小値	1.99	5710



図—5 真円度分布

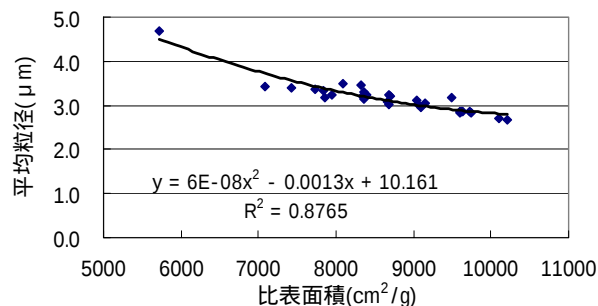


図 - 4 比表面積と平均粒径

察したように極めて小さな粒径で，最大でも約 20 μm である。乾燥スラッジの粒径区間別の分布には凹凸があり，滑らかな区間分布とはなっていない。

図 - 3 に 30 サンプルの比表面積と密度の関係を示す。ばらつきはあるものの，乾燥スラッジは比表面積が大きくなるとは密度は若干減る傾向にある。

図 - 3 に示すスラッジサンプルの密度と比表面積の平均値，変動係数および最大値，最小値を表—2 に示す。普通ポルトランドセメントの標準的な密度 3.16g/cm³および比表面積 3600cm²/g と比べると，平均密度は 2/3，比表面積は 2～3 倍であり，ポーラスで，粒子径が小さいことが

表 - 3 フロー試験試料

No.	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
1	2.22	10205
2	2.24	5710
3	2.24	8663
4	2.29	8685
5	2.19	10108
6	2.47	7086

推測できる。表—2 から比表面積のばらつきは密度のばらつきより，変動係数で約 2 倍である。

図—4 には比表面積と式 (2) で求めた平均粒径の関係を示す。平均粒径は 2.5 μm～3.5 μm で細かく，比表面積が増えると平均粒径は小さくなっている。

図—5 に真円度の分布を示す。前述したように 1 に近いほど円形であることを示すので，真円度が 1.5 以下がほぼ 60% を占め，本処理した乾燥スラッジが丸いことを表している。

3.2 ペーストフロー試験

ペーストフロー試験は，30 サンプルの試料が

表—4 ペーストフロー試験による変形係数と拘束水比

NO.	変形係数 E_p			拘束水比 β_p		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
1	0.138	0.150	0.187	1.06	1.07	1.10
2	0.139	0.155	0.194	1.06	1.08	1.09
3	0.166	0.194	0.228	1.07	1.09	1.10
4	0.145	0.152	0.220	1.09	1.08	1.10
5	0.134	0.143	0.173	1.07	1.10	1.10
6	0.140	0.130	0.156	1.07	1.08	1.08
平均	0.144	0.154	0.193	1.07	1.08	1.09
変動係数(%)	8	14	14	1	1	1
OPC (平均)	0.136			1.03		

ら，比表面積の数値により 6 試料を取り上げて行った。6 試料の試料番号とその密度および比表面積を表 - 3 に示す。

表—4 に各試料によりセメント置換した粉体から求めた変形係数と拘束水比，およびその平均値と変動係数を示す。なお比較のため，普通ポルトランドセメント（OPC）の平均値も記した。普通ポルトランドセメント単体，即ち置換率 0% の場合に比べ，スラッジを混入したペーストは，変形係数および拘束水比が増加し，流動性が低下することが分かる。ただし，置換率が 5%，10% および 15% となっても，拘束水比の増加は僅か，即ちペーストが変形し始めるときの水粉体容積比はほとんど変わらないのに対し，変形係数は置換率増加と共に，大きくなり流動性が低下することを示している。また，その流動性低下の程度も，置換率が 10% から 15% に増加すると急に大きくなる。

また，拘束水比の置換率による変動係数は 1% と小さいが，変形係数の変動係数は，置換率 10% および 15% で 14% にも達している。

図—6 に各試料のセメント置換別のモルタル

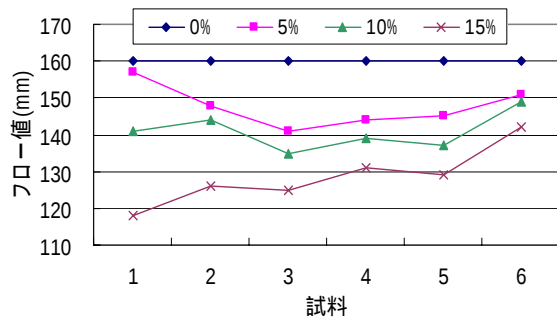
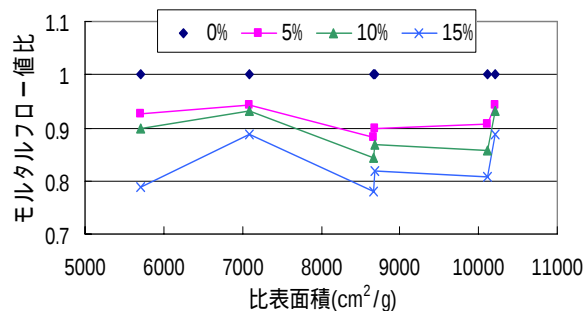


図 - 6 セメント置換別モルタルフロー値

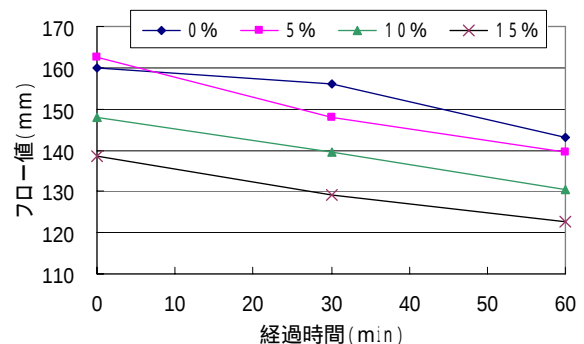


図—7 比表面積とモルタルフロー値比

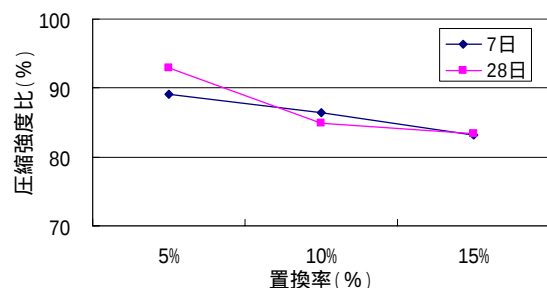
フロー値を示す。セメント置換率が大きくなると相対的にモルタルフロー値は小さくなる。ただし，各試料では同一置換率でもフロー値に差異が生じている。例えば，試料 1 と試料 6 を比較すると，試料 1 ではセメント置換率の差異がモルタルフロー値の差異に大きく影響を受けていることが分かるが，試料 6 ではその傾向が顕著ではない。そこで，試料の特性である比表面積に対して，各セメント置換別に置換率 0% に対するモルタルフロー値比を図—7 に示す。この図からモルタルフロー値比はセメント置換率に影響を受けるが，乾燥スラッジの比表面積にはほとんど関係していないと考えられる。

図—8 にモルタル練り後 30 分と 60 分後に行ったフロー試験の結果を示す。経過時間とともにフロー値の低下量は，セメント置換率に関係なくほとんど同じである。

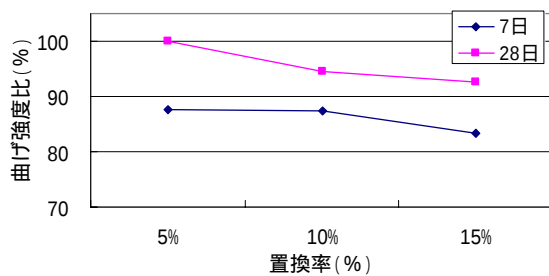
図—9 に各試料のセメント置換率別のセメント置換率 0% に対する圧縮強度比の平均値，および図—10 にその曲げ強度比の平均値を示す。圧縮強度比は，材齢 7 日，28 日とも置換率が 5%



図—8 モルタルフローロス



図—9 圧縮強度比



図—10 曲げ強度比

でほぼ 90%に、置換率が 15%で強度比は 85%に低下している。一方、曲げ強度比は、材齢 7 日で圧縮強度比と同様に 80%代に低下するが、材齢 28 日では、低下比が抑えられていることが分かる。

4. まとめ

本研究では、加熱衝撃波を用いた装置により、乾燥スラッジ粉体を製造し、その特性を調べた。この乾燥スラッジをセメント部分置換し、ペースト性状およびモルタル試験から、利用方法の資料を提供しようとしたものである。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 本研究に用いた加熱衝撃波装置は、15Kg のスラッジケーキから約 7 分で微粉碎乾燥スラッジを製造することができる。

(2) ほぼ 1 ヶ月間サンプリングされた乾燥スラッジの密度および比表面積の平均値は 2.19g/cm^3 および $8970\text{cm}^2/\text{g}$ 、その変動係数は 3.2%と 7.8%であった。

(3) 本装置で製造した乾燥スラッジは、形状が丸く、粒径が $2\mu\text{m}$ 以下でかなり小さい。

(4) セメント置換によるペーストフロー試験から、粉体特性として変形係数と拘束水比を求めることが出来た。セメントをスラッジ置換した粉体の拘束水比および変形係数は、いずれも普通ポルトランドセメントのそれ以上である。置換率が大きくなると、拘束水比は、置換率 5%～15%ではほとんど変わらないが、変形係数は置

換率 10%から 15%の間で、急に大きくなる。

(5) モルタルフロー値は、スラッジの置換率が大きくなると低下するが、スラッジの比表面積とはほとんど相関はない。

(6) モルタルフローの経過時間による低下量は、セメント置換率に拘らずほぼ等しい。

(7) モルタル強度は、圧縮および曲げとも置換率が大きくなると低下するが、28 日強度比では置換率が 15%程度でも、圧縮強度比は 85%、曲げ強度比は 93%まで発現する。

参考文献

- 1) 畑中重光，谷川恭雄：生コンスラッジに関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.33，No.6，pp.14-25，1995.6
- 2) 畑中重光，鈴木一雄：技術フォーラム 生コンスラッジの現状と利用の可能性，コンクリート工学，Vol.34，No.8，pp.49-58，1996.8
- 3) 佐藤嘉昭，劉嘉銘，清原千鶴，末本千廣：微粉碎乾燥スラッジ (PDS) を用いた高流動コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.217-222，2001.6
- 4) 佐藤嘉昭，劉嘉銘，清原千鶴，田口茂久：微粉碎乾燥スラッジ (PDS) のコンクリート材料としての開発に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.1，pp.63-76，2002.6
- 5) 緑川猛彦，丸山久一：ペーストの流動性に及ぼす微粉末物性の影響，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.1，pp.71-76，1994.6
- 6) 松枝良展，下川浩児，岡村甫：モルタルフローに及ぼす粉体特性の影響，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.1，pp.77-82，1994.6
- 7) 松枝良展，下川浩児，岡村甫：粉体の特性とペーストフロー値との関係，土木学会論文集，No.544/V-32，pp.65-75，1996.8