

# 論文 下水汚泥焼却灰の建設材料への利用法に関する一検討

楠田匡彦<sup>\*1</sup>・水口裕之<sup>\*2</sup>・上月康則<sup>\*3</sup>・上田隆雄<sup>\*4</sup>

**要旨:** 各種の産業副産物や廃棄物など未利用資材の有効利用が求められている。本研究は、下水汚泥の焼却灰を建設材料に利用するための基礎的な検討を行ったものである。焼却灰をセメントを用いて固めその圧縮および曲げ強度に及ぼす配合の影響およびこの固化体からの重金属の溶出量について調べた。その結果、配合によって異なるが材齢28日で圧縮強度は30MPa、曲げ強度は4MPa程度の固化体を作成することができ、6種の重金属の溶出量も環境庁の基準値以内となり、建設材料への利用の可能性が示された。

**キーワード:** 下水汚泥焼却灰, セメント固化体, 強度, 重金属, 溶出試験

## 1. はじめに

1995年度の全国の下水処理の普及率は人口比率で55%程度であった。その後の下水道の普及向上や下水処理の高度化に伴い、発生する下水汚泥の量は増加の一途をたどっている。従来、下水汚泥は農地への肥料や土壌改良材として緑農地での利用<sup>1)</sup>が大きな比重を占めてきた。しかし、1995年度ではその67%が埋め立てられ、大都市などでは埋立地が不足してきている<sup>2)</sup>。また、地球の環境問題の観点から産業副産物や廃棄物の再資源化<sup>3)</sup>に対する社会的要請が高まり、その有効利用が課題となっている。その一方法として建設材料への利用がある。

本研究は、下水汚泥焼却灰をより多量に使用した建設用資材を開発するための基礎的研究として、配合を変えた焼却灰・セメント・水からなるセメント固化体を作製し、その圧縮および曲げ強度を調査したものである。また、このセメント固化体からの重金属すなわちカドミウム、鉛、水銀、ヒ素、セレンおよび六価クロムの溶出量を調べ、環境庁告示第13号<sup>4)</sup>の基準値と比較した。

## 2. 1 使用材料

セメントは密度3.16g/cm<sup>3</sup>の普通ポルトランドセメントを用いた。下水汚泥焼却灰(以下焼却灰という)はK処理場から産出される比表面積3,962cm<sup>2</sup>/gで密度2.69g/cm<sup>3</sup>のものを用いた。その成分分析結果を表-1に示す。また、比較用とし

表-1 焼却灰の成分分析結果

項目	単位	分析結果	
SiO <sub>2</sub>	%dry	34.99	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		21.06	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		12.75	
Na <sub>2</sub> O		0.97	
K <sub>2</sub> O		1.90	
CaO		5.45	
MgO		1.74	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		16.98	
カドミウム		mg/kg-dry	7.9
シアン			<0.1
鉛	33		
ヒ素	8.0		
水銀	0.03		
全クロム	1500		
六価クロム	<2		
亜鉛	6500		
セレン	3		

## 2. 実験概要

- \*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学科専攻 (正会員)
- \*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)
- \*3 徳島大学大学院助教授 工学研究科エコシステム工学専攻 工博
- \*4 徳島大学助手 工学部建設工学科 工博 (正会員)

表-2 焼却灰を用いた作製砂の混合割合

作製砂記号	セメント焼却灰比	水セメント比(%)	水粉体率(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
				水	セメント	焼却灰
A	1/1.0	86	43	555	645	645
B	1/1.5	120	48	578	482	723
C	1/2.0	163	54	606	372	744

て、密度 2.56g/cm<sup>3</sup> の JIS R 5201 に規定する標準砂を用いた。混和剤はナフタレン系高性能 AE 減水剤をセメント量に対して 0 あるいは 1% 用いた。

## 2.2 作製砂の作製および物理的性質の測定

焼却灰を用いたセメント固化体を作製するため、前述したように今回用いた焼却灰は比表面積が約 4000cm<sup>2</sup>/g と大きいため、まず焼却灰をセメントを用いて砂状の固化体（以下作製砂という）とし、これに更にセメントと水を加えて固化体とした。作製砂は、表-2に示すように、セメント焼却灰比を1/1～1/2の3種に変え、砂状になるように水量を求めて作製した。

練混ぜは容量 5 l のモルタルミキサを用いて行い、1回の練混ぜで 2 l の作製砂を作製した。所定量の水、セメントおよび焼却灰を練り鉢に入れ、直ちに低速で 60 秒間練り混ぜた。次に、30 秒間休止し、この間にさじで練り鉢およびパドルに付着した試料をかき落とし、その後高速で 90 秒間練り混ぜた。練混ぜ終了後 3 日間 20 ± 2 °C の恒温室内で湿

表-3 作製砂の物理的性質

作製砂の種類	作製砂A	作製砂B	作製砂C
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.83	1.75	1.70
吸水率(%)	39	44	51
表面水率(%)	3.2	2.9	3.4
実績率(%)	42.7	43.4	41.8
単位容積質量(kg/l)	0.78	0.76	0.71

布養生し、5mmふるいでふるったものを作製砂(As)として使用した。

また、作製砂の粒度、密度、吸水率、表面水率、単位容積質量および実績率は JIS に従って測定した。なお、密度は湿潤養生終了直後のままで測定した。その結果を表-3および図-1に示す。

## 2.3 セメント固化体の配合

セメント固化体の配合を表-4に示す。セメントと作製砂の比を 1/1、1/2 および 1/3 の 3 種に変え、水セメント比を 40、45、50 および 60% の 4 種とした計 14 種の配合とした。また、比較用に標準砂を用いたモルタルも用いた。

表-4 セメント固化体の配合

配合記号	作製砂の種類	セメント作製砂比	水セメント比(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				高性能AE減水剤(%)
				水	セメント	作製砂	標準砂	
AsA 1/1, 40, 0	作製砂 A	1/1	40	317	792	792	0	0
AsA 1/2, 40, 0		1/2		221	553	1105		
AsA 1/3, 40, 0				172	430	1290		
AsA 1/3, 45, 1		1/3	45	187	416	1247		1
AsA 1/3, 50, 0			50	204	407	1222		0
AsA 1/3, 60, 0			60	235	391	1174		
AsB 1/3, 40, 0	作製砂 B		1/3	40	165	411	1234	0
AsB 1/3, 45, 1		45		181	403	1209	1	
AsB 1/3, 50, 0		50		198	395	1185	0	
AsB 1/3, 60, 0		60		228	380	1140		
AsC 1/3, 40, 0	作製砂 C	1/3	40	161	403	1209	0	
AsC 1/3, 45, 1			45	178	395	1185		1
AsC 1/3, 50, 0			50	194	387	1162		0
AsC 1/3, 60, 0			60	224	373	1119		
SS 1/2, 65, 0	標準砂	1/2	65	510	332	0	1020	

## 2. 4 セメント固化体の作製および強度試験

セメント固化体は、標準砂を用いたものを含め表-4の配合のものをJIS R 5201のモルタル供試体の作製法に従って作製した。なお、これらのフローは104~224の範囲にあり、硬めのものもあったが、JISの規定に従って作製した。供試体寸法は40×40×160mmのはり供試体とし、翌日脱型し、所定材齢まで標準養生した。はり供試体は材齢7日および28日で、JIS R 5201に従って各条件について3体のはり供試体の曲げ強度および圧縮強度を測定した。

## 2. 5 セメント固化体の溶出試験

作製したセメント固化体の安全性を検討するため、有毒な重金属6種すなわちカドミウム、鉛、水銀、ヒ素、セレンおよび六価クロムの溶出試験を行った。現在、重金属の溶出については統一的な安全性評価手法が確立されていないため、今回は、環境庁告示第13号「産業廃棄物に含まれる重金属等の検定方法」に基づく方法を採用し、この方法に規定されている溶出試験を行った。

試料は、材齢7日のセメント固化体をハンマーで粉砕し、それを2mmふるいにかけ、粒径が2mm以下としたものを使用した。試料は、約20℃の溶出試験開始前の初期pHが5.8~6.3の脱イオン水に試料/溶媒比で1/10に混合し、その溶液を、常温、常圧で振幅約40mm、1分間に200回の水平振とうを6時間連続で行い、分析用抽出液を作製した。なお、振とう中のpHは未調整とした。振とう完了後、1.0μmのろ紙を用いてろ過したものを試験液とし、カドミウム、鉛、水銀、ヒ素、セレンおよび六価クロムの溶出量を1配合について、1検体ずつ測定した。その結果を表-6に示す。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 作製砂の物理的性質

作製砂の密度は表-3に示されているように、普通細骨材の密度より、小さい値となっている。したがって、この作製砂を用いたセメント固化体は、普通砂を用いたものと比べると軽量となることが予想される。

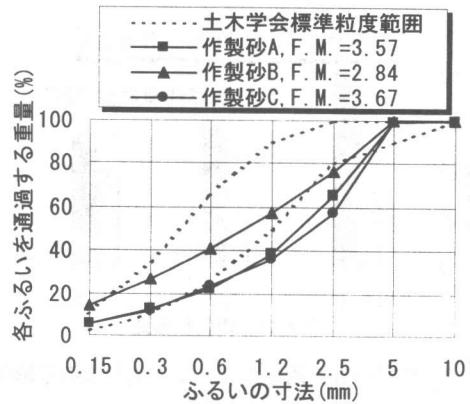


図-1 作製砂の粒度分布

吸水率は表-3に示されているように40~50%とかなり大きくなっている。これは、今回の作製砂は、単に焼却灰とセメントに水を加えてモルタルミキサーで練混ぜて湿った土状のものを作製し、3日間湿布養生したものであり、かなりの空隙を含んでいることが考えられる。また、水セメント比も86~163%と大きく、余剰水や材齢3日の時点では未水和の水分があり、このような大きな吸水率となったと考えられる。

表面水率は、3種の作製砂とも3%前後でありほぼ同じ値となっている。なお、本研究では従来法による作製砂の表乾状態の判定はその形状から判断して不適当と考え、湿布養生したものをそのまま用い、この作製砂を用いた配合においても表面水に関する補正を行わなかった。

単位容積質量は0.71~0.78kg/lと標準砂の1.5kg/lの約半分となり、実績率も3種の作製砂間の違いは大きくないが41.8~43.4%程度となり、普通砂に比べてかなり小さくなっている。これは、作製砂の粒形が悪く表面に凹凸があり、表面部分の空隙が多いことによると考えられる。

また、作製砂の粒度分布は図-1に見られるように、3種類とも土木学会の細骨材の標準粒度範囲内には入っていない。試験に用いた試料は何回かに分けて作製したため、作製回ごとに若干異なっていることも考えられるが、作製砂Bの粗粒率は2.84と比較的標準粒度範囲内に近いものと

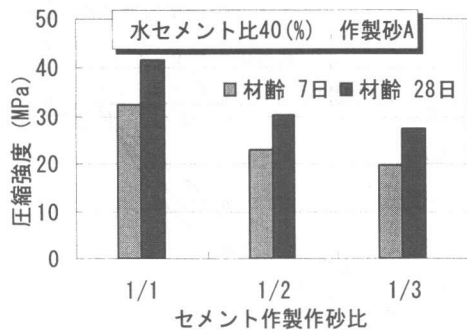


図-2 作製砂Aを用いたセメント固化体の圧縮強度

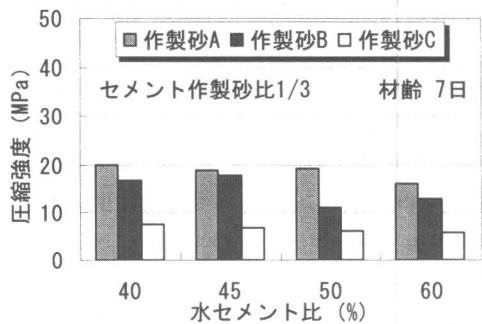


図-3 材齢7日のセメント固化体の圧縮強度

なっている。作製砂Aおよび作製砂Cは粗粒率がそれぞれ3.57および3.67となっており、標準粒度に比べ粗めの粒度となっている。

このように、今回の作製砂は、普通砂に比べて密度や実積率が小さく、吸水率が大きいものの粒度はほぼ標準粒度に近いものとなり、これを用いて固化体を作製できる可能性があると考えられる。

### 3.2 セメント固化体の圧縮および曲げ強度

#### (1) 圧縮強度

作製砂Aを用い水セメント比40%で、セメント作製砂比を変化させたセメント固化体の材齢7日および28日の圧縮強度を図-2に示す。この図に見られるように、材齢7日および28日ともセメント作製砂比が1/1, 1/2, 1/3になるにつれて強度は低下している。すなわち、セメント固化体中のセメント量に対する作製砂量が増加するにつれて強度は小さくなっている。

作製砂を用いたセメント固化体の材齢7日および28日の圧縮強度をそれぞれ図-3および図-4に示す。これらの図に見られるように、同一水セメント比においては、作製砂の種類が異なると材齢7日および28日とも強度は異なっており、作製砂A, B, Cの順に強度は小さくなっている。これらの配合は、セメント作製砂比を1/3の一定とした場合であるので、各水セメント比においては、作製砂の強度の大小によってセメント固化体の強度に違いが生じているものと考えられる。すなわち、作製砂中の焼却灰の量が多いほど強度は小さくなっている。

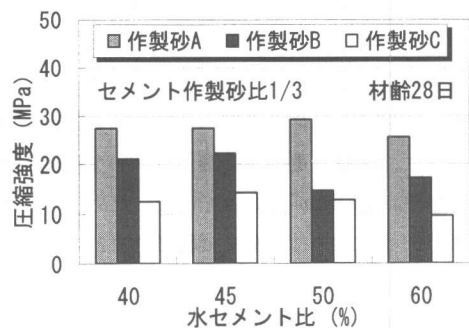


図-4 材齢28日のセメント固化体の圧縮強度

また、セメント固化体の水セメント比を変えても作製砂の種類が同じならば、強度はほとんど同じとなり、作製砂の強度によってセメント固化体の強度が決められていると考えられる。ただし、作製砂Bを用いた配合は、水セメント比の増加とともにやや強度が低下する傾向にある。

一方、圧縮強度は、材齢28日で作製砂Aでは25~40MPa、作製砂Bでは15~20MPa、作製砂Cでは10~13MPaとなり、作製砂の種類によっては、建設材料として十分な圧縮強度を得られると考えられる。

#### (2) 曲げ強度

作製砂Aを用い水セメント比40%で、セメント作製砂比を変化させたセメント固化体の材齢7日および28日の曲げ強度を図-5に示す。曲げ強度に及ぼすセメント作製砂比の影響は圧縮強度に対するものと同様となり、材齢7日から28日への強度増加はほとんど見られず、ほぼ同じである。

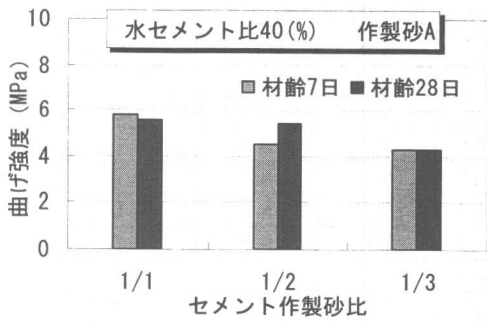


図-5 作製砂Aを用いたセメント固化体の曲げ強度

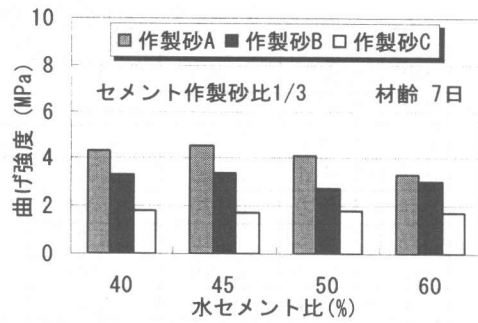


図-6 材齢7日のセメント固化体の曲げ強度

セメント作製砂比1/3の場合の材齢7日および28日の曲げ強度をそれぞれ図-6および図-7に示す。これらの図に見られるように、曲げ強度に及ぼす作製砂の種類および水セメント比の影響は、圧縮強度に対するものとほぼ同様となり、作製砂の種類によって強度は異なり、水セメント比が違っていても強度は大差ない結果となっている。材齢の違いによる影響は、圧縮強度に比べて、曲げ強度の場合の方が小さくなっており、水セメント比が60%の配合を除くと、同じ配合では材齢28日になっても、材齢7日の曲げ強度より数%程度しか増大していない。

また、材齢28日の曲げ強度は、作製砂Aを用いた配合で4~5.8MPa、作製砂Bを用いた配合で2.7~3.4MPa、作製砂Cを用いた配合で1.8~2.1MPa程度となっている。

これらの結果から、曲げ強度面からも、今回作製したセメント固化体は建設材料として使用できる可能性が考えられる。

### 3.3 セメント固化体からの重金属の溶出量

重金属の溶出試験結果を表-5に示す。

鉛の溶出量は、N.D（検出されない）~0.09mg/lの範囲となっており、最も濃度が高かったのはAsA 1/1,40,0の配合となっている。これは焼却灰の混合割合が小さく、セメントの使用量が最も多い配合である。また、セメントの使用量が少なくなるにつれて濃度が小さくなってることから、鉛は焼却灰よりもセメントから溶出していると推測されるが、いずれの配合においても環境庁

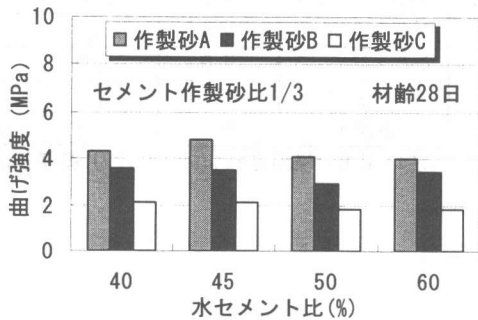


図-7 材齢28日のセメント固化体と曲げ強度

告示第13号の基準値の0.3mg/l以下となっている。カドミウムでは、N.D~0.001mg/lの溶出濃度となっているが、この検出濃度は微量であり基準値の0.3mg/lと比較すると十分範囲内に入っている。水銀では $32 \times 10^{-6}$ ~ $79 \times 10^{-6}$ mg/lの濃度となっており、最も濃度が高かったのはAsA 1/1,40,0の配合であるが、基準値の $5000 \times 10^{-6}$ mg/lの約1/60の値以下となっている。ヒ素およびセレンについては、今回用いた検査では15種類の全配合とも検出できず基準値の0.3mg/lの範囲内となっている。六価クロムはN.D~0.075mg/lの濃度となっており、検出されたのはAsC 1/3,60,0およびSS 1/2,65,0の配合となっている。六価クロムの検出法として、今回は簡易法で測定したことから、信頼度は他のものよりやや低い可能性があるが、基準値の1.5mg/lを大きく下回っている。

以上のことから今回作製したセメント固化体は、重金属の溶出に対しては安全性に問題はないと考

表-5 セメント固化体からの重金属の溶出試験結果 (単位: mg/l)

配合記号	鉛	カドミウム	水銀	ヒ素	セレン	六価クロム
AsA 1/1, 40, 0	0.090	N. D	$79 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsA 1/2, 40, 0	0.050	0.001	$58 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsA 1/3, 40, 0	0.030	0.001	$45 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsA 1/3, 45, 1	0.020	0.001	$40 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsA 1/3, 50, 0	0.020	0.001	$35 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsA 1/3, 60, 0	0.010	N. D	$40 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsB 1/3, 40, 0	0.010	0.001	$43 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsB 1/3, 45, 1	0.010	N. D	$38 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsB 1/3, 50, 0	N. D	N. D	$38 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsB 1/3, 60, 0	N. D	0.001	$33 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsC 1/3, 40, 0	N. D	N. D	$32 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsC 1/3, 45, 1	N. D	N. D	$33 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsC 1/3, 50, 0	N. D	0.001	$32 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	N. D
AsC 1/3, 60, 0	N. D	N. D	$34 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	0.075
SS 1/2, 65, 0	0.010	N. D	$34 \times 10^{-6}$	N. D	N. D	0.050
基準値	0.3	0.3	$5000 \times 10^{-6}$	0.3	0.3	1.5

(注1) N. D=検出されない。(注2) 基準値は環境庁告示第13号の埋立処分基準値を用いた。

えられる。

#### 4. 結論

(1) 焼却灰を用いて作製した作製砂の粒度分布は、ほぼ標準粒度に近いものとなり、普通砂に比べて密度、実績率が小さく、吸水率は大きいものの、これを用いて固化体を作製できる可能性がある。

(2) 圧縮強度は、材齢 28 日で作製砂 A では 25~40MPa, 作製砂 B では 15~20MPa, 作製砂 C では 10~13MPa となり、作製砂の種類によっては、建設材料として十分な圧縮強度得ることができる。曲げ強度も材齢 28 日で作製砂 A では 4~5.8MPa, 作製砂 B では 2.7~3.4MPa, 作製砂 C では 1.8~2.1MPa となり、圧縮強度と同様である。

(3) セメント固化体からの重金属である鉛、カドミウム、水銀、ヒ素、セレンおよび六価クロムの溶出量は環境庁告示第 13 号の基準値範囲内にあり、焼却灰を建設材料に利用することが可能と考えられる。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、溶出試験に關しましては、ご協力していただきました徳島市役

所の皆様方に深く感謝致します。また、焼却灰をご提供いただきました㈱クボタに感謝致します。

なお、本研究の一部は文部省科学研究学補助金の基礎研究(B)(2) (課題番号: 1058094, 研究代表: 村上仁士) によったことを付録する。

#### 参考文献

- 1) 田野崎隆雄ほか: 下水汚泥溶融球形粉体のモルタル・コンクリート用混和材料としての適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.283-288, 1997
- 2) 久保忠雄ほか: 下水汚泥を原料とする微粉末の、モルタルおよびコンクリートよう混和材としての利用, コンクリートと資源の有効利用, 第II編 シンポジウム論文集, pp.57-64, 1998
- 3) 原竜也ほか: 廃棄物汚泥溶融スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートのフレッシュおよび硬化性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.403-408, 1998
- 4) 山下洋正ほか: 下水汚泥の建設資材利用の高度化に関する調査, 下水道関係調査研究年次報告書集, pp.215-220, 1996