

論文 下水汚泥焼却灰のコンクリートへの有効利用について

野尻拓男*1・小柳洽*2・野崎眞司*3・徳田進一郎*4

要旨：用いた下水汚泥焼却灰は、フライアッシュと粒子形状は異なるが粒度分布は近く、含有する有害物質の溶出量は問題がないことを確認した。さらに、高流動コンクリートと汎用コンクリートへ混和材として使用した場合に、結合材として有効なSiO₂やCaOなどを含有しており、焼却温度によっては一部が非結晶質となっているものもあり、ポズラン反応によると考えられる圧縮強度の伸びが認められた。また、汚泥焼却灰のリン含有量と添加量により決定されるコンクリート中のリンの量がコンクリートの凝結時間に影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：下水汚泥焼却灰, 高流動コンクリート, リン, 凝結, 圧縮強度

1. はじめに

下水汚泥は下水道整備の進展および高度処理の採用等に伴い、年々大幅に増加すると考えられ、有効利用法の確立は急務である。下水汚泥焼却灰（以下、焼却灰という）は、コンクリートの凝結や強度発現に悪影響を及ぼすリン化合物を含んでいる反面、結合材として有効な SiO₂ や CaO などとも含有しており、しかも微粉であるためコンクリート用混和材として資源化の可能性を有している。

本研究は焼却灰の物性を調査すると共に、汎用コンクリートと高流動コンクリートに焼却灰を混入して、フレッシュコンクリートの性状を調査した後、圧縮強度試験等を実施し、硬化コンクリートの物性を比較して、焼却灰のコンクリート用混和材としての使用の可能性について検討した。

2. 材料試験

2.1 試料

岐阜県下の異なる下水処理場の焼却灰A, B の2種類とした。

2.2 化学分析

化学分析結果を表-1 に示す。

いずれの焼却灰も SiO₂, Al₂O₃, CaO を主成分とし、フライアッシュに近い組成を示しており、混和材としての可能性は認められる。ただし、化学分析の結果のみでは、フライアッシュのようなポズラン反応性を示す可能性は明らかではない。また、下水汚泥処理に高分子系凝集剤を用いているため、石灰系凝集剤を用いたものに比べて、CaO の含有量は少ない。さらに、これらの焼却灰で注目されるのは、P₂O₅ の含有量である。リンは、化合物の種類や含有量によ

表-1 化学分析結果

	化 学 成 分 (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl ⁻
焼却灰A	40.2	25.3	7.4	0.0	0.42	1.03	9.4	0.0
焼却灰B	33.0	20.0	9.6	0.0	0.91	2.47	24.9	0.0

*1 ㈱中研コンサルタント 工修（正会員）

*2 岐阜大学 工博（正会員）

*3 岐阜県基盤整備部上下水道課

*4 (財)岐阜県建設技術センター

りセメント・コンクリートの硬化・強度発現に悪影響を及ぼすことが知られており、季節変動等、試料毎の含有量のばらつきもあるが、このようなレベルの量が含まれていることは、コンクリート混和材として使用する場合には、特に注意が必要である。さらに、今回用いた焼却灰は、Clが検出されていないことから、鉄筋コンクリートへの適用も問題ないと考えられる。

2.3 有害物質溶出試験

焼却灰に含まれている有害物質（重金属）が溶出するかどうか、環境庁告示第13号に準拠した方法（環告法）と同法より厳しい方法で建設省土木研究所で実施されているCO₂飽和法で試験を行った。結果を表-2に示す。

いずれの物質の溶出量も、産業廃棄物の基準値を満足する値であった。したがって、コンクリートへの添加による希釈効果と固定化から、有害物質の溶出は問題ないと考えられる。

表-2 有害物質溶出試験結果 (ppm)

有害物質	焼却灰 A		焼却灰 B	
	環告法	CO ₂ 飽和法	環告法	CO ₂ 飽和法
Pb	ND	ND	ND	ND
Cd	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND
As	0.055	0.135	0.014	0.067
Se	0.056	0.094	0.002	0.004
Cr(VI)	ND	ND	ND	ND

注) ND: 定量限界以下

2.4 粉末X線回折分析

表-1に示した焼却灰の化学成分が、どのような化合物の形態で存在しているかを把握するために、粉末X線回折分析により結晶構造を調査し、同定することを試みた。分析結果を、図-1, 2に示す。

焼却灰 A と B は、化学成分が比較的類似しているにもかかわらず、異なる回折パターンを示した。特に、セメントの水和反応で問題となるリンについて化合物形態の解析を行ったが、複数のリン化合物の回折パターンに一致することや、他の化合物の主要ピークと重なることも

あり、化合物を断定することはできなかった。

主要な成分であるSiO₂については、2θ=27°付近に現れる石英(Quartz)の主ピークを比較すると、焼却灰 Aの方が小さかった。これは、焼却温度の違いによる影響が大きいと考えられ、焼却灰 Aの方が約850℃と焼却灰 Bの約800℃よりも高温で焼却されたため結晶性が低下し、わずかであるが、SiO₂がフライアッシュに近い結晶形態をしているものと推定された。

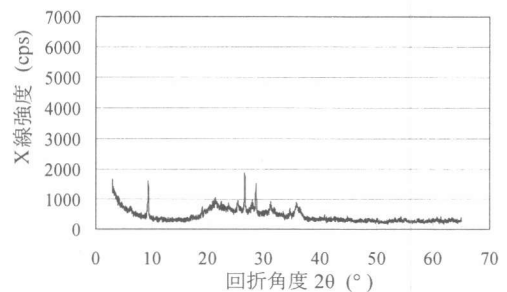


図-1 焼却灰 A の X 線回折図

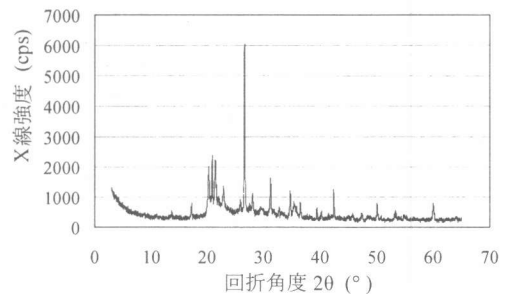


図-2 焼却灰 B の X 線回折図

2.5 粒度分布

メタノールに試料を分散させ、レーザー回折式粒度分析計により測定した結果を図-3, 4に示す。

測定の結果、焼却灰 A は、粉体として連続粒度を示しており、また、粒度としては、普通ポルトランドセメントより若干粗い程度で、フライアッシュに近いものであった。一方、焼却灰 B は、粒度分布が全体的に焼却灰 A よりも粗粒側にあることがわかった。ただし、粒度分

布試験結果では、粒子個々の形状を表現していないことから、フライアッシュに近い粒度分布をしているが、粒子形状が類似であるかどうかは判断できない。

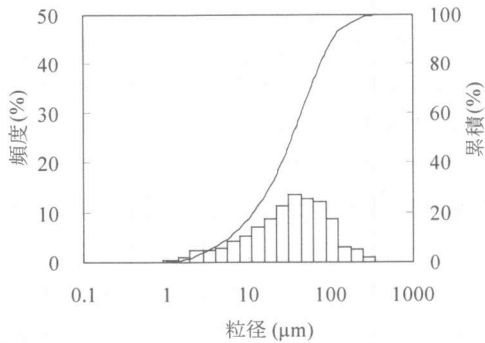


図-3 焼却灰 A の粒度分布

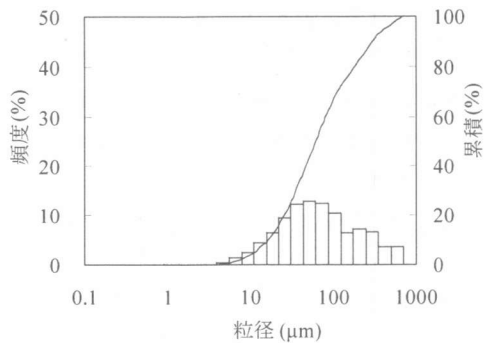


図-4 焼却灰 B の粒度分布

2.6 粒子形状

焼却灰 A および B の走査電子顕微鏡 (SEM)

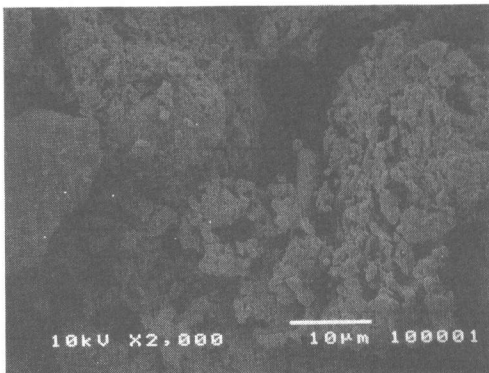


写真-1 焼却灰 A の SEM 写真

写真を写真-1, 2 に示す。

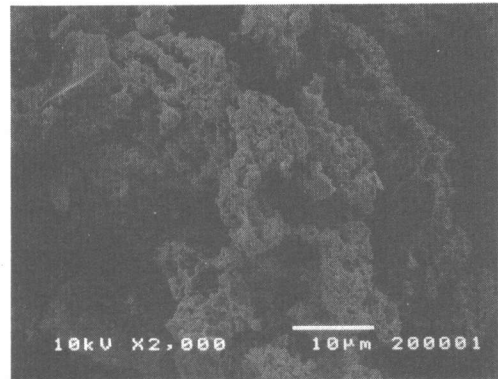


写真-2 焼却灰 B の SEM 写真

SEM 写真に見られるように、焼却灰の粒子形状は不定形粒子であり、焼却灰 A と B に大きな違いは見られなかった。また、粒度分布は、フライアッシュに類似していたが、粒子形状は全く異なることを確認した。

3. コンクリート試験

3.1 コンクリートの配合条件

焼却灰の添加量は、モルタルによる予備試験として強さ試験を行い、材齢 28 日の圧縮強さを無添加と比較検討し、圧縮強さに悪影響を及ぼさない添加率としてセメント量の内割りで、

表-3 フレッシュコンクリートの目標値

	試験項目	目標値
汎	スランブ	8.0 ± 1.0cm
	空気量	4.5 ± 1.0%
用	コンクリート 温度	20.0 ± 3.0 °C
	スランブフロー	60 ± 5cm
高	空気量	4.5 ± 1.0%
	V ロート 流下時間	練混ぜ直後：3 ~ 25 秒 5 分間静置後：40 秒以内
動	U 型充填高さ	30cm 以上
	コンクリート 温度	20.0 ± 3.0 °C

焼却灰 A を 10%，焼却灰 B を 5%置換することとした。コンクリートの配合決定は、表-3 に示すフレッシュコンクリートの物性値を目標とした。

3.2 コンクリートの練混ぜ

水平二軸強制練りミキサを用い、表-3 に示すフレッシュ性状が得られるよう配合試験を行った。なお、1 バッチの練混ぜは、汎用コンクリートは細骨材、粗骨材、セメント、焼却灰の順で投入して、15 秒間ドライミキシングを行った後、水（AE 減水剤・AE 助剤）を加えて 120 秒間練り混ぜた。また、高流動コンクリートの場合、材料は細骨材、粗骨材、セメント、焼却灰、増粘剤の順で投入して、20 秒間ドライミキシングを行った後、水（高性能 AE 減水剤・AE 助剤）を加えて 180 秒間練り混ぜた。

3.3 コンクリートの示方配合

圧縮強度は、汎用コンクリートで呼び強度 18 と 24 の 2 水準、高流動コンクリートで呼び強度 24、40、60 の 3 水準を設定した。配合試験で決定した示方配合を表-4 に示す。

示方配合における単位水量・混和剤量は、汎用コンクリートでは、焼却灰の置換率の増加に伴って単位水量が漸増した。これは AE 減水剤の使用率が粉体量に対して一定であるため、焼

却灰置換量の増加により、吸水の影響がそのまま現れたためと思われる。一方、高流動コンクリートでは、プレーンおよび焼却灰 5%置換のものは、呼び強度 24 では単位水量、高性能 AE 減水剤の使用量とも同一であり、呼び強度 40 および 60 のものについては、高性能 AE 減水剤の使用量がやや増加した。また、焼却灰 10%置換のものは、すべて単位水量が大幅に増加し、呼び強度 40 および 60 のものについては、高性能 AE 減水剤の使用量がやや増加した。一般に高性能 AE 減水剤の場合、粉体量が増加すれば減水率も向上するが、この場合、呼び強度 40 および 60 のものは、粉体量の増加による減水率の向上よりも、焼却灰の増加による吸水の影響の方が大きく現れたと考えられる。

3.4 凝結試験

凝結試験結果を図-5、6 に示す。

汎用コンクリートでは、焼却灰を添加すると始発が遅れる傾向があった。また、始発から終結までの時間は、無添加で約 2 時間であるのに対して、置換率が B5%、A10%のものについては強度区分に関係なく約 2 時間 30 分と差はなかった。

焼却灰を添加したコンクリートの凝結が遅延する原因として、焼却灰中に含まれるリン化合

表-4 コンクリートの示方配合

配合	呼び強度	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
					水	セメント	焼却灰	細骨材	粗骨材	増粘剤	混和剤 [*]	
汎用	18	N18-0	70.0	70.0	49.9	168	240	—	923	961	—	0.600
		N18-5B	73.6	70.0	49.9	170	231	12	918	956	—	0.608
		N18-10A	76.1	68.6	49.6	172	226	25	905	953	—	0.628
	24	N24-0	63.0	63.0	48.5	163	259	—	894	988	—	0.648
		N24-5B	65.6	62.3	48.4	166	253	13	887	980	—	0.665
		N24-10A	67.6	60.8	48.1	171	253	28	866	972	—	0.703
高流動	24	H24-0	60.0	60.0	56.6	190	317	—	974	778	0.570	10.144
		H24-5B	63.1	60.0	56.0	190	301	16	961	786	0.494	10.144
		H24-10A	66.7	60.0	54.6	200	300	33	914	794	0.440	10.656
	40	H40-0	49.1	49.1	53.8	185	377	—	907	810	0.407	9.425
		H40-5B	50.4	47.9	53.0	185	367	19	886	818	0.370	9.650
		H40-10A	54.4	49.0	51.4	195	358	40	839	826	0.312	11.940
	60	H60-0	31.9	31.9	49.5	175	549	—	777	826	—	6.863
		H60-5B	35.6	33.8	50.1	175	492	26	795	826	—	9.842
		H60-10A	39.5	35.6	47.1	190	481	53	720	842	—	12.816

*1 汎用コンクリートは AE 減水剤、高流動コンクリートは高性能 AE 減水剤

物のセメント水和反応への影響が考えられる。表-1 に示すように、焼却灰中のリンの含有量は、 P_2O_5 として焼却灰 A の 9.4%に対して B は 24.9%であるが、焼却灰のセメントに対する置換率は焼却灰 A が 10%、B が 5%であるため、セメント量に対する P_2O_5 量は大差がなくなる。従って、本研究においては強度区分や焼却灰の 5%、10%置換に関係なく、凝結遅延の程度が同等となったと考えられる。

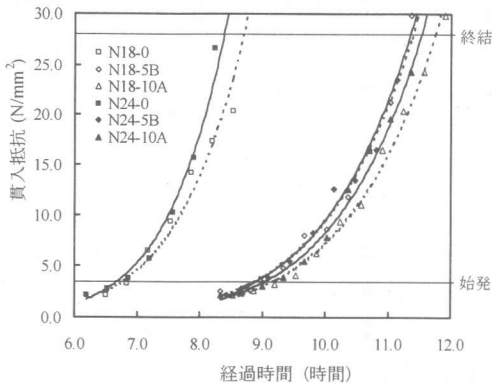


図-5 汎用コンクリートの凝結

高流動コンクリートでは、始発時間は、プレーン、焼却灰置換率 B の 5%、A の 10%の順に遅延し、同一置換率のものであっても、水粉体比又は水セメント比が大きいほど始発の到来は遅かった。

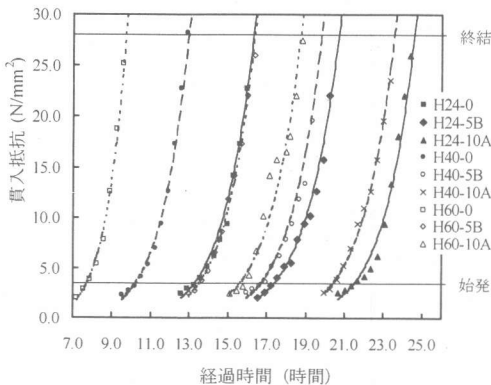


図-6 高流動コンクリートの凝結

また、始発から終結までの時間は、これらの配合において、汎用コンクリートよりやや遅く約 3 時間であり、焼却灰を添加しないものが、わずかではあるが短くなる傾向があった。さらに、終結時間は、同一の置換率であっても、水粉体比が小さくなるほど短くなる傾向がみられたが、約 10 時間から約 24 時間と大きくばらついた。焼却灰を添加した高流動コンクリートの場合、凝結遅延を起こす要因は焼却灰中のリン化合物の他にも高性能 AE 減水剤、増粘剤があり、単位水量の増加も含め、これらの影響が複雑に絡み合って汎用コンクリートと異なった挙動を示したものと考えられた。

3.5 圧縮強度

汎用コンクリートの圧縮強度試験結果を図-7 に示す。

汎用コンクリートの圧縮強度特性は、同一の呼び強度グループでは、材齢 7 日の場合、焼却灰の置換率が多くなるに従って、水セメント比が大きくなるため強度が低くなった。しかし、材齢 28 日では、各強度グループ毎に、ほぼ同一強度に収束し、材齢 91 日では材齢 7 日とは逆に焼却灰 A を 10%置換したものの強度が一番高くなった。

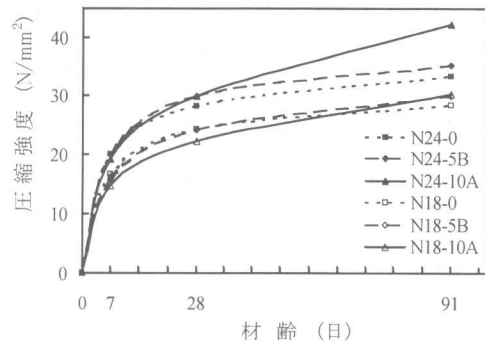


図-7 汎用コンクリートの圧縮強度発現

高流動コンクリートの圧縮強度試験結果を図-8 に示す。

高流動コンクリートの圧縮強度の発現と材齢の関係も汎用コンクリートと同様の傾向を示

し、同一の呼び強度グループでは、材齢 7 日の場合、焼却灰の置換率が多くなるに従って、強度が低くなったが、材齢 28 日では、これらの圧縮強度が呼び強度グループ毎に接近した後、各呼び強度グループ内で、材齢 91 日では材齢 7 日とは逆に焼却灰 A を 10%置換したものの圧縮強度が一番高くなった。焼却灰を置換したものは、材齢 7 日における圧縮強度が低くなったが、これは凝結時間が長くなったことと同様に水和の初期にリンの影響を受けたことと、焼却灰をセメント内割りで置換していることで、無添加よりセメント量の少ない B の 5%置換、A の 10%置換の順に圧縮強度が低くなったと考えられる。一方、汎用コンクリートならびに高流動コンクリートの両方において、焼却灰 A を 10%置換したものが、材齢 28 日以降の強度の伸び率が著しかったことは、焼却灰 A の場合、X線回折分析の結果で見られたフライアッシュに近い非結晶構造により、焼却灰中の SiO_2 がポゾラン反応性を有している可能性が考えられる。

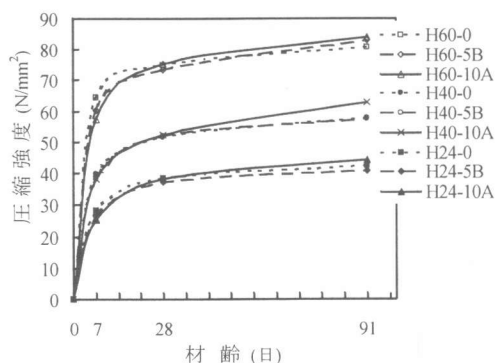


図-8 高流動コンクリートの圧縮強度発現

4. まとめ

- 1) 焼却灰は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO を主成分としており、混和材としての可能性を認めた。
- 2) 焼却灰からの有害物質溶出量は問題ないことが確認された。
- 3) 焼却灰は、焼却条件により結晶構造が異なる

場合があることが明らかとなった。

- 4) 焼却灰の粒度分布は、連続粒度を示した。
- 5) 焼却灰の粒子は不定形粒子であり、フライアッシュとは異なるものであった。
- 6) コンクリートの配合において、汎用コンクリート、高流動コンクリート共に焼却灰を添加した場合、焼却灰に吸水されることで単位水量が増加したが、この傾向は粉体量の多い高流動コンクリートで著しかった。
- 7) 汎用コンクリートの凝結時間は、強度区分および焼却灰の置換率による差が少なく、焼却灰の P_2O_5 含有量とセメントへの添加量により決定されるリンの量による影響が明確であった。
- 8) 高流動コンクリートの凝結時間も、焼却灰が持ち込むリン化合物により遅延するが、その影響度は明確でなく、強度区分および焼却灰の置換率だけでなく、単位水量、高性能 AE 減水剤量や増粘剤使用の影響も大きいと考えられた。
- 9) 焼却灰を混入したものの圧縮強度の発現状況は、初期材齢において無添加を下回っていたが、長期強度においては材齢 28 日から 91 日にかけての圧縮強度の伸びが大きく、無添加と同等以上であり、特に焼却灰 A の 10%置換のもので圧縮強度の伸びが顕著であった。

参考文献

- 1) 松下博通, 牧角龍憲, 岸田政彦: 下水汚泥焼却灰を混入したコンクリートの性質, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.436-441, 1997
- 2) 田野崎隆雄, 浅田信二, 落合寿昭, 尾崎正明: 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
- 3) 小柳治, 野崎眞司, 小澤満津雄, 本田恵祐: 下水汚泥焼却灰の溶出と焼却灰を混入したモルタルの諸性質, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.374-379, 1998