

下水汚泥焼却灰の骨材としての有効利用 INCINERATION WITH STEP GRATE SLUDGE INCINERATION AND UTILIZATION OF ASH

吉田恵男*・神尾恵一**

By Tokuo YOSHIDA, Keiichi KAMIO

1. はじめに

下水道の普及に伴い、下水処理場から発生する汚泥は年々増加の一途をたどっている。これらの汚泥は脱水ケーキの状態では処分されるか焼却灰として処分されるかである。

しかし、処分地の確保が困難となるにつれて、焼却灰についてもただ単に焼却する時代から、灰の有効利用が求められる時代となっている。

一方、骨材は枯渇へと向かい、しかもその採取が自然環境を破壊することから、末利用資源の骨材化が求められている。

このような社会的ニーズの中で(株)タクマでは階段式ストーカ炉で焼却した際に発生する焼却灰の特性に着目し、これらを骨材として有効利用すると共に環境保全を図る調査、研究を進めてきた。

今回は階段式ストーカ炉焼却灰の物性と各種利用状況を概括した上で、特に骨材としての利用例を報告する。

2. 階段式ストーカ炉の燃焼特性

階段式ストーカ炉は図-1に示すような階段状に構成された火床を有している。水分40～45%に乾燥されたケーキは炉ホッパーより供給され、順次下段へと送られて乾燥、着火、燃焼する。

燃焼排ガスは廃熱ボイラで蒸気として熱回収され、排ガス処理設備へ送られる。発生した蒸気は脱水ケーキの乾燥やその他の加温熱源に利用される。

ストーカ炉の燃焼の特性は、ストーカ（火床）面をケーキがゆるやかに攪拌、反転しながら下部から送入される空気と接触し、静的で旺盛な燃焼を起こす点にある。流動炉に見られる流動砂層中での動的な燃焼とは異なり、むしろ、ストーカ上でケーキは静的な状態で燃焼していると言える。このため、燃焼しているケーキの一部では、1100～1300℃前後の高温に達し、粒子径0.5～50mmの半熔融スラグ状の灰となる。

このように半熔融スラグ状の焼却灰の生成は、主として階段状のストーカ面での静的な燃焼特性によるもので

あり、特にほとんどの脱水ケーキに対して自燃状態で達成できる点が重要である。

写真-1に炉内の燃焼状態を写真-2に燃焼灰を示す。

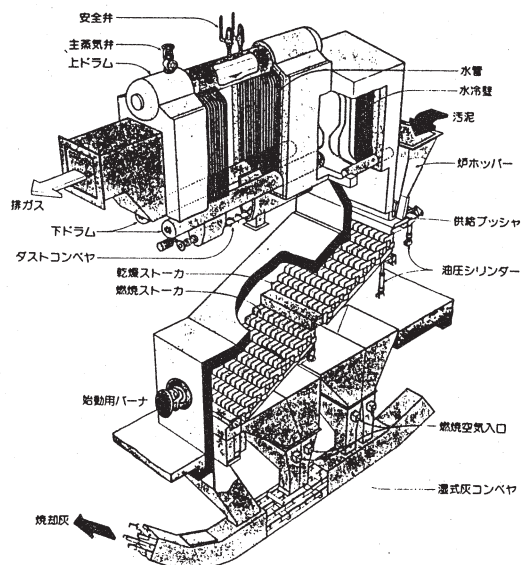


図-1 階段式ストーカ炉の構造

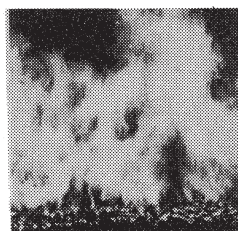


写真-1 炉内燃焼状態

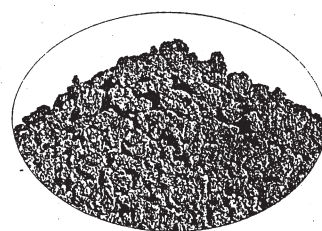


写真-2 焼却灰

3. 階段式ストーカ炉焼却灰の特性

(1) 化学・物理的性状

1) 焼却灰の化学的組成

表-1 灰の組成（重量割合）

組成 種類	SiO ₂ (A)	CaO (A1)	Al ₂ O ₃ (B)	Fe ₂ O ₃ (B)	MgO (A1)	Na ₂ O (A1)	K ₂ O (A1)	MnO (A1)	P ₂ O ₅ (A)
石灰系	12～34	32～60	4～6	7～21	1～2	0.3～1.0	1～2	0.5～1.5	10～11
高分子系	40～55	2～7	7～10	5～10	1～3	0.2～1.0	1～3	0.2～1.0	7～11

A：酸性 A1：塩基性 B：両性

表-1に示した分析結果に見られるように高分子系の場合、全体の組成の中でSiO₂が40～55%、Al₂O₃が7～19%を占め、この2成分で70%近くを占めている。逆に石灰系の場合CaOが32～60%、SiO₂が12～34%の割合を占めているのが一般的である。

* (株)タクマ 水処理技術部第1課長（〒530 大阪市北区堂島浜1-3-23）、** (株)タクマ 水処理技術部第1課計画担当課長

2) 焼却灰の物理的性状

① 比重 (J I S A 1202)

焼却灰の比重を測定した結果は表-2に示すように、高分子(熱処理ケーキを含む)系で2.4~2.6、石灰系で2.9~3.0という値を示す。

また表-3には、一般に骨材として利用されている材料の比重を示す。

表-2 ストーカ焼却灰の比重

組成 種類	処理場名	比重
高分子系	Sz	2.47~2.51
"	To	2.34~2.36
石灰系	Te	2.91~3.00
熱処理ケーキ	N	2.54~2.55
"	Sz	2.42~2.43

表-3 骨材の比重

種類	表 乾 比 重	
	平均	範囲
砂 岩	2.5	2.0~2.6
砂および砂利	2.65	2.5~2.8
石灰岩	2.65	2.6~2.7
花崗岩	2.65	2.6~2.7
暗黒色の火山岩	2.9	2.7~3.0

② 粒度特性 (J I S A 1102)

自然状態および解砕機通過後のふるい分け試験結果と粒度特性を表-4に示す。

試験結果から自然状態では礫分(粒度2mm以上)は63~73%、砂分(粒径74~2000 μ m)23~30%、細粒分(粒径74 μ m以下)は5~14%となり、日本統一土質分類での「G-Mシルト混り礫」に近く、解砕した場合には礫分と砂分がほぼ相当となる。また最大粒径は自然状態で38.1~50.8mmである。

③ 焼却灰の土質試験およびその他の試験

奈良県浄化センタ発表の土質試験データおよび弊社のデータを表-5に示す。

修正CBRを見ると29.3~52.2%であり、路床材、下層

表-4 ふるい分け試験

試料 粒径mm	高分子Sz 湿式自然	高分子To 湿式自然	高分子To 湿式解砕	石灰Te 乾式自然	石灰Te 湿式自然	熱処理Sz 湿式解砕	熱処理Sz 湿式解砕	熱処理Sz 乾式解砕
	湿式自然	湿式自然	湿式解砕	乾式自然	湿式自然	湿式解砕	湿式解砕	乾式解砕
50.1	100	100	-	-	-	-	-	-
38.1	91.3	84.5	-	-	100	100	-	-
25.4	80.1	72.0	100	-	93.7	95.9	-	100
19.1	74.7	66.3	92.4	100	88.2	93.1	100	71.1
14.7	63.9	55.4	71.2	96.3	78.5	84.7	98.5	46.2
10.0	53.8	46.3	57.4	71.6	64.7	75.1	84.1	31.0
7.5	37.3	29.5	36.1	27.0	35.3	52.3	56.3	13.7
4.75	26.3	18.4	20.4	10.8	16.0	30.6	40.3	5.9
2.0	21.1	11.3	13.9	6.8	10.1	17.8	33.7	4.1
0.85	18.4	8.8	10.8	4.7	7.6	14.8	29.2	3.2
0.425	15.0	5.9	7.2	3.0	5.0	10.2	21.4	2.4
0.075	13.5	5.1	6.2	2.7	4.6	8.4	17.3	1.8
ふるい分け								
礫分	63	70	64	73	65	48	44	86
砂分	23	25	30	24	30	43	39	12
シルト分	14	5	6	3	5	9	17	2
粘土分								
最大粒径	50.8	50.8	25.4	19.1	38.1	31.7	19.1	25.4

路盤材としての利用に問題のない数値である。

(2) 焼却灰の重金属溶出試験データ

環境庁告示に基づく溶出データを表-6に示す。灰中には重金属が濃縮して含有されているにもかかわらず、いずれの物質も基準値に対しても全く問題のない値であった。

更に実際の処分に近い状態での挙動を見るために、長期浸漬および長期暴露後の溶出試験を実施した。これらのデータを表-7、表-8に示す。表-9は環境庁告示に準拠し、中性域とPH4の酸性域で実施したものである。長期浸漬あるいは長期暴露後でも環境庁告示に基づく溶出試験データ(6時間振とう)との間には差が全く見られず、また酸性域での浸漬でも明らかな差はないと考えられる。

環境庁告示による供試資料は粒子径0.5~5mmとされているが、粒度による使い分けを考慮して、採取した焼却灰をフルイにより粒子径毎に分別し、ランク毎の溶出試験(告示に準拠)を行った。このデータを表-10に示す。粒子径による溶出量の差はほとんどないといえ、解砕・分級後の粒度別の利用に際しても問題は生じない。

このようにストーカ炉の半熔融スラグ状焼却灰は一部がガラス質化し、このガラス質化によって重金属が封じ込められると推測される。このため、重金属の溶出がほとんど見られず、長期の浸漬および暴露あるいは酸性域に対しても安定していますので、安心した処分が行えるだけでなく、有効利用を図る場合にもその用途は拡がることとなる。

表-5 焼却灰の材料試験

試料	高分子 Sz (自然)	高分子 To (自然)	高分子 To (解砕)	石灰 Te (自然)	奈良県浄化センタ (熱処理解砕)
試験項目	(自然)	(自然)	(解砕)	(自然)	(熱処理解砕)
液性限界(X) JISA 1205	—	—	NP	—	NP
塑性限界(X) JISA 1206	—	—	NP	—	NP
PH JSP-T-7	—	—	—	—	6.5
揮発量(X) JISA 1121	—	—	—	—	85
単位容積重量 JISA 1104 (t/m ³)	—	棒突き 0.731	棒突き 0.778	棒突き 0.913	25回×3層 1.369
設計 CBR (X) JISA 1211	34.0	23.3	30.0	—	32.4
修正 CBR (X)	—	—	29.3	31.5 (最大乾燥密度 1.064 t/m ³)	52.2 (最大乾燥密度 1.067 t/m ³)
突固め試験 JISA 1210 最適含水比、最大乾燥密度	47.6% 0.916 t/m ³	—	46.4% 0.982 t/m ³	35.3% 1.116 t/m ³	—
透水係数(定水位) (cm/sec) (変水位)	— 4.09×10 ⁻⁴	—	2.22×10 ⁻¹ 1.15×10 ⁻¹	—	1.25×10 ⁻¹
三軸圧縮 JISA 1216 粘着力、内部摩擦角	1.10Kgf/cm ² 21° 30'	—	0.75Kgf/cm ² 30° 45'	0.89Kgf/cm ² 31° 15'	—
圧密試験 JISA 1217 圧縮指数、降伏応力	0.46 10.09 Kgf/cm ²	—	0.34 5.35Kgf/cm ²	—	—
粗間隙量(ml/100ml)	—	—	—	—	31
					(文献)による

表-6 焼却灰中の重金属などの含有量
および溶出試験データ

単位: 含有量(mg/kg), 溶出試験(mg/ℓ)

対象物質	消石灰注入汚泥(Te)		高分子注入汚泥(To)		熱処理汚泥(O)		溶出試験 における 定量下限	基準値 (水面埋立として)
	灰中の 含有量	溶出試験	灰中の 含有量	溶出試験	灰中の 含有量	溶出試験		
アルキル水銀化合物	<0.005	ND	<0.005	ND	<0.01	ND	0.0005	不検出
水銀又はその化合物	0.032	ND	<0.03	ND	<0.01	ND	0.0005	0.005
鉛又はその化合物	<0.05	ND	<0.48	ND	<0.05	ND	0.001	0.1
鉛又はその化合物	16.2	ND	187	ND	23	ND	0.02	1
有機リン化合物	<0.1	ND	<0.1	ND	<0.1	ND	0.005	1
6価クロム化合物	0.57	ND	<0.1	ND	2.1	ND	0.05	0.5
ヒ素又はその化合物	343	ND	40.6	ND	4.3	ND	0.01	0.5
シアン化合物	1.0	ND	0.3	ND	<0.1	—	0.01	1
P. C. B	<0.05	ND	<0.01	ND	<0.01	ND	0.0005	0.003
全クロム化合物	444	ND	430	ND	—	—	0.05	—
亜鉛又はその化合物	—	—	2330	0.02	760	0.006	0.001	—
強熱減量	0.72%		0.52%		1.02%		—	—

表-7 長期浸漬による溶出試験

	含有量	6Hr	24Hr	5日	10日	15日	20日	30日	3ヶ月	6ヶ月	1年	備考	定量下限値 (mg/ℓ)
R-Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		0.0005
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		
Hg	1.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		0.0005
	0.03	ND	ND	—	ND	—	—	—	ND	ND	ND		
Cd	1.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		0.001
	<0.05	0.01	0.01	—	0.01	—	—	—	0.01	0.01	0.01		
Pb	87	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		0.02
	16.2	0.04	0.04	—	0.04	—	—	—	0.04	0.04	0.04		
Cr ⁺⁺	<0.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		0.05
	0.57	ND	ND	—	ND	—	—	—	ND	ND	ND		
As	—	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		0.01
	—	ND	ND	—	ND	—	—	—	0.01	0.01	0.01		
PCB	<0.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		0.0005
	<0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
T-Cr	98	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		0.05
	444	ND	ND	—	ND	—	—	—	ND	ND	ND		
Zn	1290	0.07	0.05	0.11	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10		0.001
	760	0.01	0.01	—	0.01	—	—	—	0.07	0.07	0.07		

含有量(mg/kg), 溶出試験(mg/ℓ)

上段: 高分子系ケーキ

下段: 石灰系ケーキ

表-8 長期暴露後の溶出試験

溶出試験(mg/ℓ)

上段: 高分子系ケーキ
下段: 石灰系ケーキ

	1ヶ月後	3ヶ月後	6ヶ月後	1年後	備考
R-Hg	ND	ND	ND	ND	
	ND	ND	ND	ND	
Hg	ND	ND	ND	ND	
	ND	ND	ND	ND	
Cd	0.01	0.01	0.01	0.01	
	0.01	0.01	0.01	0.01	
Pb	ND	ND	ND	ND	
	ND	ND	ND	ND	
Cr ⁺⁺	ND	ND	ND	ND	
	ND	ND	ND	ND	
As	ND	ND	ND	ND	
	ND	ND	0.01	0.01	
PCB	ND	ND	ND	ND	
	ND	ND	ND	ND	
T-Cr	ND	ND	ND	ND	
	ND	ND	ND	ND	
Zn	0.06	0.06	0.07	0.07	
	0.01	0.01	0.01	0.01	

※ 溶出試験における定量下限値は表-6に同じ。

表-9 酸性域での溶出試験

単位: 含有量(mg/kg), 溶出試験(mg/ℓ)

対象物質	試験内容	
	中性域	酸性域
アルキル水銀化合物	ND	ND
水銀又はその化合物	ND	ND
カドミウム	0.01	0.01
又はその化合物		
鉛又はその化合物	ND	ND
6価クロム化合物	ND	ND
シアン化合物	ND	ND
全クロム化合物	ND	ND
亜鉛又はその化合物	0.06	0.08

※ 溶出試験における定量下限値は表-6に同じ。

表-10 粒子径毎の溶出試験

単位: 含有量(mg/kg), 溶出試験(mg/ℓ)

対象物質	含有量	溶出試験			
		粒子径 10mm 以上	粒子径 5 ~ 10mm	粒子径 0.5 ~ 5mm	粒子径 0.5mm 以下
アルキル水銀化合物	<0.005	ND	ND	ND	ND
水銀又はその化合物	<0.005	ND	ND	ND	ND
カドミウム	12	0.005	0.005	0.005	0.005
又はその化合物					
鉛又はその化合物	470	ND	0.03	0.03	0.04
6価クロム化合物	<0.1	ND	ND	ND	ND
シアン化合物	<0.1	ND	ND	ND	ND
全クロム化合物	102	ND	ND	ND	ND
亜鉛又はその化合物	3590	0.07	0.05	0.04	0.04

※ 溶出試験における定量下限値は表-6に同じ。

4. ストーカ炉焼却灰の有効利用

(1) 焼却灰の利用用途

ストーカ炉焼却灰の特性と現時点での利用可能な用途をまとめると図-2のようになる。

(2) 焼却灰有効利用の実施例

1)

空胴コンクリートブロック

空胴コンクリートブロックおよび化粧ブロックの試作を図-3に示すシステムで行った。

半熔融スラグ状の焼却灰(写真-2)はシングルロータタイプの解砕機で解砕され、図-4に示すブロック製造プラントの骨材ホッパ③へ送られる。ミキサー⑤でセメントと混合され(必要に応じて砂を配合する)。振動圧縮成形機⑦で7 kg/cm²で10~15秒間圧縮成形する。脱型後のブロックは連続養生装置で60℃程度で12~24時間加湿養生される。この熱源には焼却炉廃熱ボイラからの蒸気が利用できる。養生されたブロックはキュービングマシンでパレットに積まれ、ストックされる。

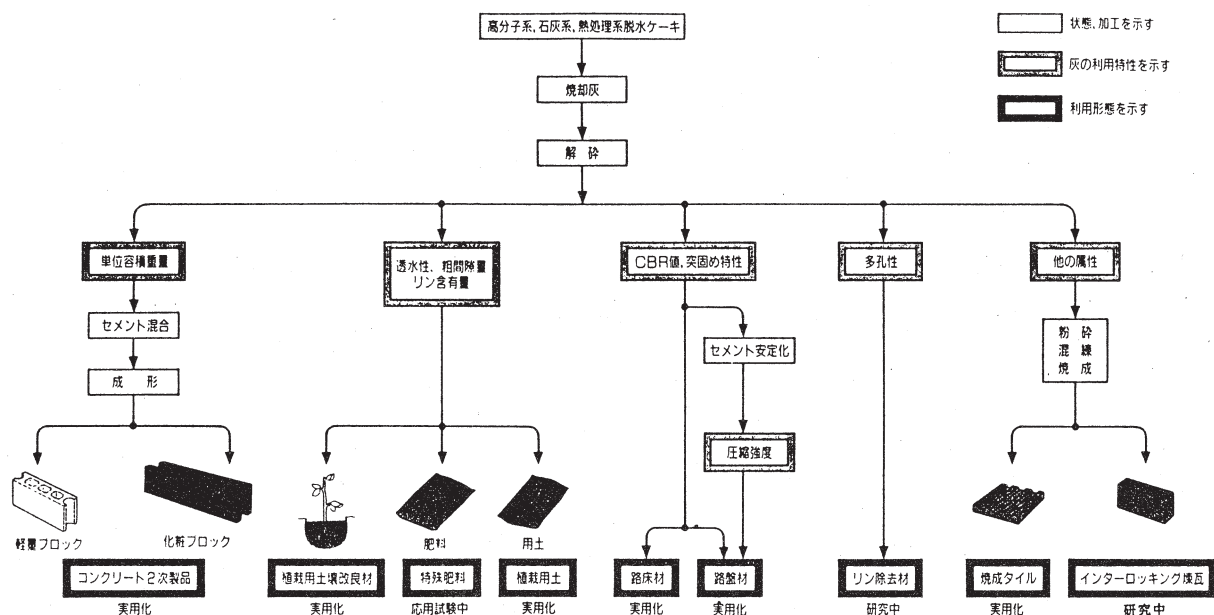


図-2 ストーカ炉焼却灰の利用用途

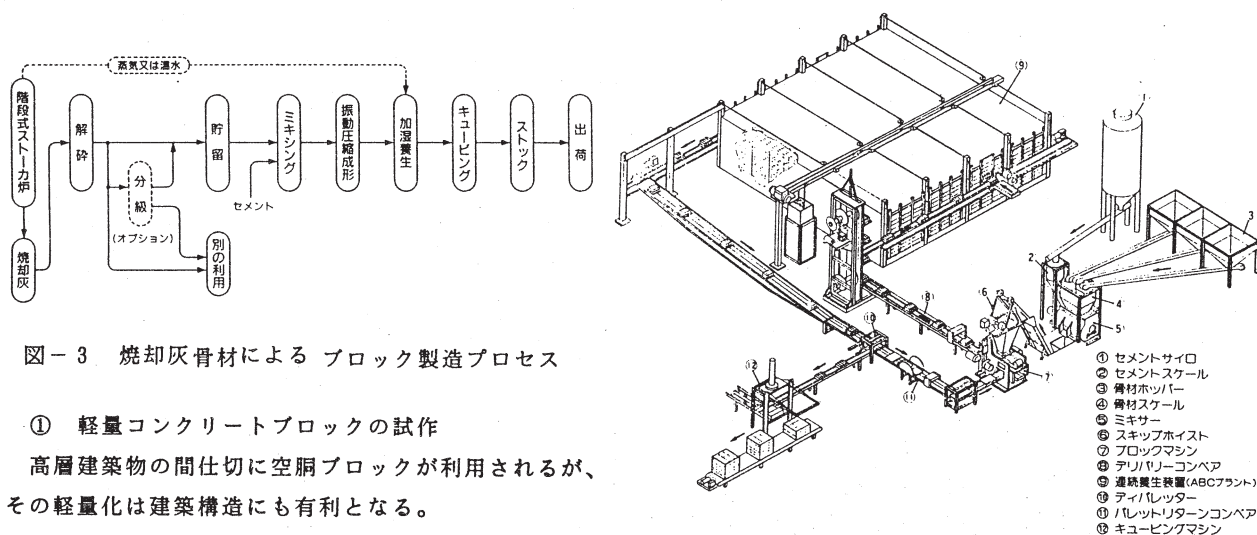


図-3 焼却灰骨材によるブロック製造プロセス

① 軽量コンクリートブロックの試作

高層建築物の間仕切に空胴ブロックが利用されるが、その軽量化は建築構造にも有利となる。

供試試料は高分子系半熔融スラグ状焼却灰で解砕後のものを使用した。その粒度分布を表-11に示す。

表-11 高分子系半熔融スラグ状
焼却灰の粒度分布

焼却灰粒度分布 フルイ寸法	残留率 (%)
10 mm	0.61
5	21.04
2.5	43.44
1.2	57.35
0.6	66.93
0.3	71.33
0.15	75.68
粗粒率	3.36

表-12に試作ブロックのデータを示す。

焼却灰100%のブロックは圧縮強度32.5 kg/cm²とJIS A種より小さいが重量が7.7kgとJIS A種よりかなり軽量なものが得られた。

表-12 軽量コンクリートブロック試験データ

項目	RUN	RUN 1	RUN 2
骨材比(灰:砂)		6:4	10:0
セメント配合率		15%	15%
気乾かさ比重		1.74	1.37
圧縮強度		46.6 kg/cm ²	32.5 kg/cm ²
重量		10.5 kg/個	7.7 kg/個
一般ブロックの重量比		—	0.75 ~ 0.85

写真-2に原料灰、写真-3に振動圧縮成形機、写真-4に養生装置、写真-5に製品のキュービング状態を示す。

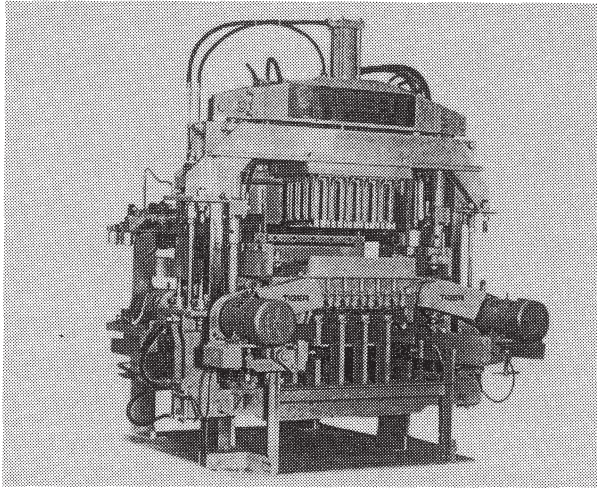


写真-3 振動圧縮成形機

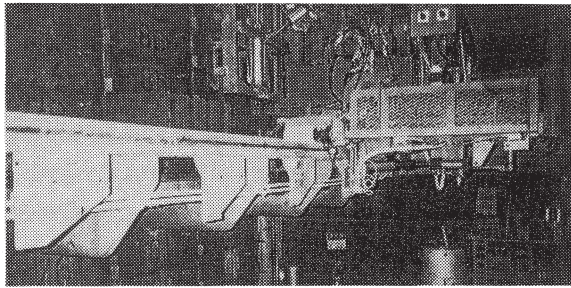


写真-4 養生装置

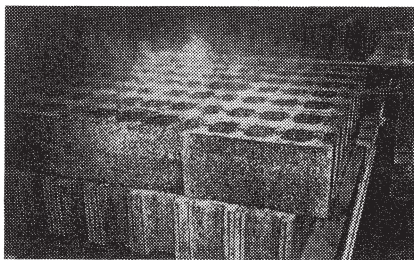


写真-5 キュービック状態

② JIS規格（A種、B種）相当品の試作

焼却灰に重量比20～40%の骨材（砂）配合してJIS 規格相当品を試作した。そのデータを表-13に示す。

砂20%の添加でJIS A種相当、40%添加でJIS B種相当品が得られた。

表-13 JIS 規格相当品の試験データ

項目	RUN 3	RUN 4	JIS規格	
			A種	B種
骨材比(灰:砂)	8:2	6:4		
セメント配合率	20%	20%		
気乾かさ比重	1.67	1.80	1.7 未満	1.9 未満
圧縮強度	41.6 kg/cm ²	72.3 kg/cm ²	40kg/cm ² 以上	60kg/cm ² 以上
JIS 規格との対比	A種相当	B種相当		

③ 断熱特性の調査

焼却灰を用いたブロックとJIS C種ブロックとを用いて断熱特性を調査した。そのデータを表-14に示す。

写真-6に焼却灰を使用した化粧ブロックの実施例、写真-7に軽量ブロックおよびJIS 規格相当品の製品例を示す。

表-14 断熱特性比較

ブロックの種類	項目	熱貫流率 (K) (kcal/m ² ・NC)	熱抵抗値 (R) (m ² ・NC・kcal)
アッシュブロック		2.1	0.47
一般JISブロック		3.1	0.32

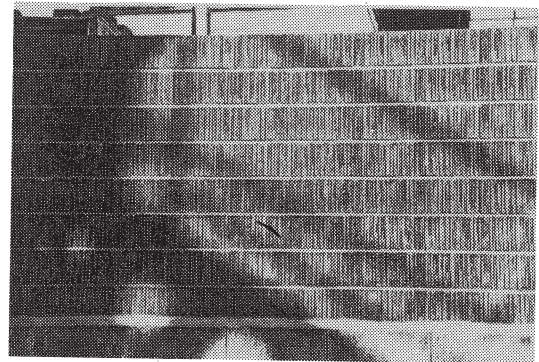


写真-6 化粧ブロック実施例

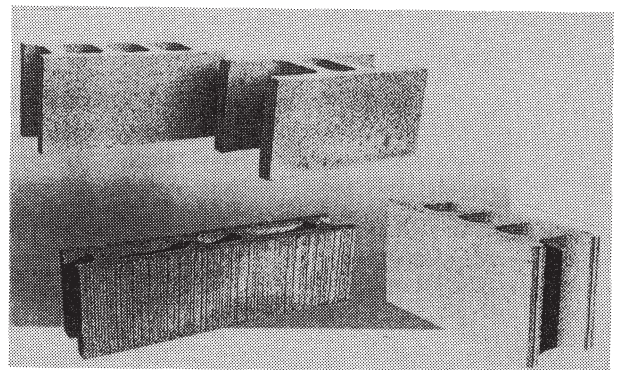


写真-7 軽量ブロック、JIS 規格相当品製作例

以上述べた通り、半熔融スラグ状焼却灰の特性（単位体積重量）を十分に生かした軽量コンクリートブロックの製造が可能であるとの知見が得られたと共に20～40%の砂（骨材）を混合することによりJIS 規格A、B種相当品の製造も可能であった。

軽量骨材は特に不足していると言われ、この意味からも焼却灰の骨材化は有効である。さらに軽量ブロックは作業性も良く、一般品と同一重量とすると1ヶ当たりの寸法を大きくすることが可能であり、強度を要しない間仕切りなどに対しては新しい製品の開発も考えられる。

2)

建設用資材

修正CBR 値(29~67%)、突固め特性(最大乾燥密度 $0.92\sim1.12\text{t/m}^3$)、最適含水比35.3~47.6%であり、湿式取出時の自然含水比(35~49%)が最適含水比にほぼ同じであることから、石灰系、高分子系のいずれに対しても資材化が無加工で可能である。

① 奈良県での実施例

修正CBR 52.2%のデータを基に熱処理ケーキの焼却灰を無加工で場内道路の路床材として使用している。また15%セメント添加による安定化(処理後一軸圧縮強度 10kg/cm^2 以上)を行って場内道路下層路盤に使用している。(文献1)(写真8、9)

② S市での実施例

熱処理ケーキの焼却灰を場内道路の路床材(山土+改良土+灰)および下層路盤材(クラッシュラン+灰+セメント)に利用している。

③ 社内テストの例

前項のブロック試作に使用した解砕灰を分級した細粒灰、粗粒灰について行った基礎テストデータを表-15に示す。

表-15 建設資材化の基礎テスト

	細 粒 灰	粗 粒 灰
単位容積重量 (kg/ℓ)	0.718	0.588
一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	1.707	0.901
最大乾燥密度 (t/m^3)	0.931	1.031
最適含水比 (%)	47.3	39.0
修正CBR (%)	42.7	66.5

本データから解砕・分級した場合には細粒灰をブロック用骨材、粗粒灰を路床材あるいは下層路盤材に分別使用も可能であると言える。

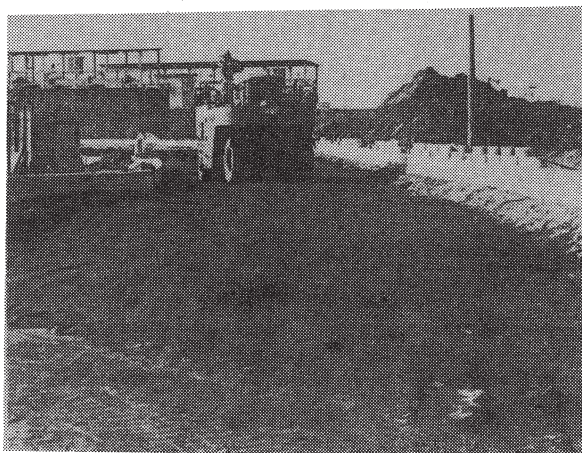


写真-8 奈良県の実施例（路床材）

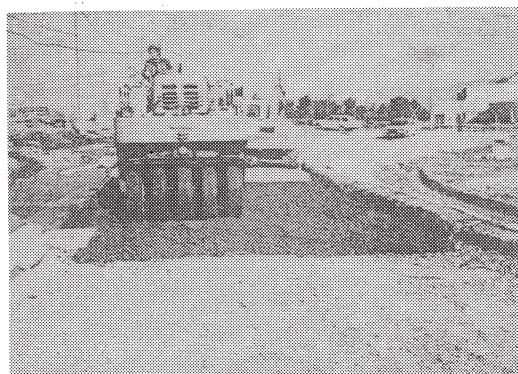


写真-9 奈良県の実施例（下層路盤材）

5. まとめ

下水処理場より発生する廃棄物のうちでも、階段式ストーカ炉の半溶融スラグ状焼却灰は解砕あるいは分級プロセスを加味することによって容易に骨材化が図れることが明らかとなった。特に焼却灰のポーラスな特性を生かした軽量コンクリートブロック用の骨材としての利用は有効と考えられる。

近年、軽量骨材の入手は困難さを増しており、廃棄物の骨材化が求められているが、その骨材化が多くの熱的・電氣的エネルギーをかけることなく果たせることが理想と言える。

今回報告した半溶融スラグ状焼却灰の骨材化は焼却プロセスを自然状態で維持した上で、最低限の加工(解砕・分級)で達成できた点が重要だと考える。

今後、軽量コンクリートブロックの間仕切用や断熱用への用途拡大を図ると共に他の廃棄物のブロック骨材化についても研究を進めたいと考えている。

なお、一連の研究、試作に際しては株式会社タイガーマシン製作所及び松尾洋瓦株式会社の方々の多大な協力を得た。ここに謝意を表します。

〔参考文献〕

1. 河合 浩「焼却灰の有効利用に関する報告」「再生と利用」Vol 10 No37, 1987