

(14) 下水汚泥の建設資材化に関する実証的研究

“Application of Sewage Sludge to Construction Works”

櫻井 克 信*，塚 田 幸 広*

Katsunobu SAKURAI, Yukihiro TSUKADA

河 野 広 隆*，吉 兼 秀 典*

Hiroataka KAWANO, Hidenori YOSHIKANE

ABSTRACT: Utilization of incinerated ash and smelted slag from sewage sludge as construction materials were put into field experiments. Results are as follows;

a. Incinerated ash of dewatered sludge conditioned by lime can be utilized as an embankment material, a fill material, a subbase course material, and as a soil improvement material for the hardening of soft ground. b. Air-cooled smelted slag can be applied to the base course material and the concrete material. c. The properties of smelted slag can be greatly improved by crystallization. d. It is also confirmed that plate slag, cubic slag and lemon-shaped slag can be made.

KEYWORDS: sewage sludge utilization, construction material, incinerated ash, smelted slag.

1. はじめに

下水処理において、発生する下水汚泥の処分は必要不可欠である。現在、汚泥処分としては埋立処分が中心であり、処分汚泥総量の約 80 %はこの方法によっている。¹⁾ 今後は、下水道の普及に伴い汚泥発生量が増大する一方で、埋立処分用地が不足する傾向にあり、埋立処分以外の処分、汚泥の有効利用が模索されている。このうち、建設資材利用は、現在では少ないが、下水道事業においても多くの建設資材を消費していることから、利用方法、基準が明確になれば利用量は拡大すると考えられる。このため、建設省土木研究所では、下水汚泥を建設資材として利用するにあたっての質的評価を中心に、下水汚泥の建設資材化の拡大を目的とした研究を行っている。

本論文では、盛土材、埋戻材、土質改良材、路盤材、コンクリート骨材として、焼却灰、熔融スラグを利用するにあたっての質的な適用性について、室内実験、実施工実験により検討し、下水汚泥毎の建設資材利用方法を提案する。

2. 試験概要及び材料の特徴

本研究で検討した下水汚泥とその用途、及び試験内容を表 1 に示す。対象とした下水汚泥は、焼却灰と熔融スラグである。下水汚泥の利用方法により分類すると、①焼却灰の単味での利用、②焼却灰の土質改良材としての利用、③熔融スラグのコンクリート骨材への利用、④熔融スラグの路盤材への利用、⑤熔融スラグ結晶成形材への利用となる。

Table 1 Used Sewage Sludge and Application

	Sludge	Application
Incinerated Ash	○ Ash (conditioned by lime)	Embankment material
	○ “ (“)	Back filling material
	○ “ (“)	Base course material
	○ Ash (conditioned by polymer)	Back filling material
	○ Ash (lime)	Soil improvement material
Smelted Slag	○ Slag	Concrete aggregate
	○ Slag (Air - cooled)	Base course material
	○ Shaped and Crystallized Slag	

* 建設省土木研究所 Public Works Research Institute, Ministry of Construction

＜焼却灰＞には石灰が含まれている。この石灰には、①水和による吸水作用及び発熱作用－生石灰の場合－、②サクシオンによる吸水作用、③ボゾラン反応による硬化作用等がある。これらは、焼却灰を単体あるいは軟弱地盤の土質改良材として用いたときに、強度を増す原動力となる。焼却灰は、石灰の含有量に着目し、脱水時の調質材として石灰を用いた焼却灰（以下、石灰系焼却灰という）と有機凝集剤等を用いた焼却灰で石灰含有の少ないもの（同、高分子系焼却灰）に分類できる。調質材として消石灰と塩化第二鉄等を用いた下水汚泥は、一般に 800℃ 前後で焼却されるため、脱水ケーキの石灰分はすべて生石灰に変化すると考えられる。

焼却灰粒子の真比重 G_s は、2.5～3.0 であり、一般の土（ $G_s = 2.3 \sim 2.8$ ）に比べて大きい。しかし、締固め後の乾燥密度は 1g/cm^3 前後と一般の土に比べ低い。これは、焼却灰の粒径、形状などが複雑な影響を与えるためと考えられる。また、焼却灰の粒度は、焼却方式、焼却温度、加湿の有無等により礫分を主体とするものから砂、シルトを主体とするものまで大きく変化している。²⁾一般的に焼却灰中の礫分等は破碎されやすく、締固め等による外力が加われば容易に細粒化する傾向にある。

＜熔融スラグ＞は、下水汚泥（乾燥ケーキ又は焼却灰）を 1300℃ 以上に熱し、汚泥中の無機物を一旦融解した後、その融液を冷却、凝固させたものである。熔融スラグの強度や表面の特性等は、汚泥の成分や熔融方式、冷却方式等によって大きく異なる。³⁾スラグの形状は主に冷却方式により決定され、熔融炉からの融液を水で急速に冷却すると細粒となり、空气中で冷却すると塊状となる。以下、前者を水砕スラグ、後者を空冷スラグという。空冷スラグを骨材として利用するには、破碎した後、粒度調整を行う。スラグの強度は、含有される成分が結晶を形成しているかによって大きく影響を受ける。非晶質なスラグの表面は、一般的には光沢があり滑らかであるが、結晶質のスラグは、表面も光沢がなく滑らかさなくなる。結晶化を工業的に実現する方法には、①冷却温度を制御する方法⁴⁾と②一旦固定化したスラグを熱処理する方法⁵⁾がある。

＜検討方法＞は、熔融スラグのコンクリート骨材への利用及び結晶成板材は室内試験にとどまった以外は、試験施工を実施した。

3. 試験施工条件及び結果

3.1 焼却灰単体での盛土材・埋戻材・路盤材への利用

埋戻材としては石灰系、高分子系の両焼却灰を、盛土材、下層路盤材としては石灰系焼却灰を対象として検討した。下層路盤材には「アスファルト舗装要綱」に材料基準が定められているが、他の用途には数字で定められた一般的な基準はない。

(1) 試験施工内容

概要を表－2 に示す。埋戻し材、路盤材の適用に関する検討では、比較のため通常用いられている山砂、碎石を用いた対照工区を設けた。盛土、埋戻し試験においては、地下水への影響を把握するため浸透水を採取し、pH、重金属を測定した。路盤材の試験においては、下層路盤材への適用性の検討を目的とするが、下部の地盤が軟弱なため、20cm のクラッシャーラン層を設けワーキングテーブルとし、その上部に焼却灰の路盤を設けた。

(2) 供試材料

試験に用いた焼却灰及び山砂、碎石の物性を表－3 に示す。焼却灰 a は、ストーカ炉によって焼却されたもので、細粒分（2mm 未満）が非常に少ない。焼却灰 b, c, d は流動炉からのもので、b と d は同一炉からのものである。埋戻し試験に用いた高分子系焼却灰 c は、硫黄酸化物発生抑制のためカーバイトスラリーが焼却時に添加されているので、高分子系としては石灰が多く含まれている。

石灰の強度発現を左右すると考えられる貯蔵条件を同表に示す。施工に要する数量を確保するための貯蔵が必要なこと、通常のトラックでの運搬にあたっては飛散防止のため加湿が必要なこと、ストーカ炉では乾灰は採取できないことなどから、貯蔵条件は様々なものとなった。いずれの石灰系焼却灰も、修正 CBR 20

％以上であり、これは下層路盤材としての基準を超えるものである。

(3) 試験結果

施工直後の強度に関する項目の測定結果を表-4に、それ以降の経時変化の代表として、盛土についてはK値の変化、埋戻しでは沈下量、路盤ではベンケルマンたわみを、それぞれ図-1, 2, 3に示す。

盛土についての具体的な数値による判定基準がないので評価が難しいが、締固め度93％、K値が施工直後で11kgf/cm²、2週間で20kgf/cm²を超えている。埋戻し材の試験施工及び路盤材の試験において石灰系焼却灰は、それぞれの対照工区と比べ遜色ないものとなっている。

高分子系焼却灰は、ランマーが沈下してしまい転圧ができなかったため、強度も低く、沈下棒により測定した沈下量が大きくなっている。しかし、路盤面の沈下量は、これに比べ少ないことから沈下棒が単独で沈下していることが考えられる。

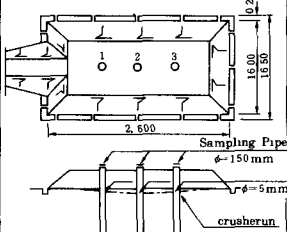
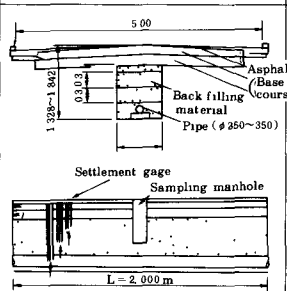
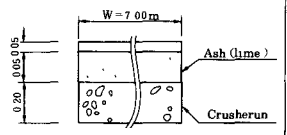
施工性については、作業に従事した人々へのアンケートによって把握した。以下、代表的なものを示す。

1) <転圧> 山砂に比べ焼却灰は転圧しにくい。ただし、石灰系焼却灰は転圧回数を増やすことで対応が可能である。しかし、高分子系焼却灰は何度繰り返してもランマーが沈んでしまい転圧ができなかった(埋戻)。マカダムローラへの付着、転圧クラックの発生があった(路盤)。ストーカ炉からの灰については、これらの現象は見られなかった(盛土)。

2) <敷均し> (前日に加水してあったからか)施工時には数十cmの塊状となっていたものがあり、敷均し作業性が悪かった。なお、転圧時にはこれらは砕けた(路盤)。直前に加水した場合この現象は見られなかった(埋戻)。

3) <飛散> いずれの施工においても、加湿してあったので灰の飛散は見られなかった。

Table 2 Outline of Field Experiments

Application	Spec unit (m)	Testing materials, site, date and compaction method
Embankment		○ Ash (1) ○ Toyohira TP, Sapporo ○ Nov. '83 ○ Tire roller 6 pass more - Spreading thickness approx. 30cm
Back fill		○ Ash (1), Ash (p), Sandy soil ○ Hokubu 2nd TP, ○ Sept. '84 ○ Plate compactor 2 pass ○ Rammer " 5 pass - Spreading thickness approx. 40cm
Base course		○ Ash (1), Crushed stone ○ Kanazawa, Yokohama ○ Jan. '84 ○ Macadam roller - Tire roller

l : lime p : polymer

Table 3 Properties of Used Materials

	Embankment	Back filling			Base course	
	Ash (1), a	Ash (1), b	Ash (p),c	Sandy soil	Ash (1), d	Crushed stone
Incinerator	Stoker	Fluid Bed	F. B.		F. B.	—
pH	—	12.6	8.6	—	(0)	—
Moisture Content (%)	55.5	48.5	35.3	18.3	(2.72)	5.2
Bulk specific gravity	2.91	2.86	2.69	2.75	2.81	2.70
Gradation						
2mm more	91.0	0	0	1.8	(0)	—
74μ ~ 2mm	5.3	52.6	14.3	60.7	(5.7)	—
74μ less	3.2	47.4	85.7	37.5	(94.3)	—
Soil Type	Sand	Sandy Soil	Fine grained soil	Sandy soil	—	—
Modified CBR (%)	58.0	89.0	13.6	44.0	(36) 58	128
Optimum moisture content %	59.4	59.4	44.3	18.1	(26.9) 59.9	5.1
Maximum dry density (g/cm ³)	0.98	0.98	1.07	1.76	(1.37) 0.87	2.22
Lime content %	35 *	29	10	—	29 *	—
Store condition	exposure to weather for 3 months after moistened	moistened just before application	ditto	—	moistened at loading as well as a day before application	—

* : reported

() : sampled before moistening

盛土体から採取した浸透水の水質は、
「金属等を含む産業廃棄物に係わる判定基準を定める総理府令」（昭和48年環境庁告示）に定められている項目について定量限界以下であり基準値を大きく下回っていた。ただし、pHは10を超えていた。埋戻工区も同様な結果となっている。

Table 4 Results of Experiments

	Embankment	Back filling			Base course	
	Ash (1), a	Ash (1), b	Ash (p), c	Sandy soil	Ash (1), d	Crushed stone
Degree of Compaction (%)	93.1	101.8	78.1	87.7	90.1	97.0
CBR value in situ (%)	15.2	91.8	6.7	8.7	—	—
Plate bearing test k ₃₀ (kgf/cm ²)	11.1	91.0	6.0	11.6	27.2	29.7
Measuring data (CBR (since construction))	0	5 days	2 days	1 day	0	0
plate	0	5 "	5 "	0 "	0	0

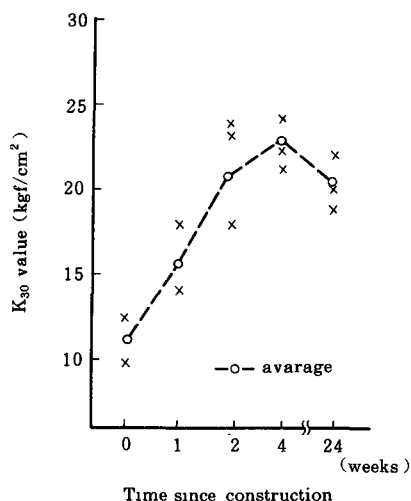


Fig. 1 Results of Plate bearing test (Embankment)

3.2 焼却灰の土質改良材としての利用

石灰系焼却灰（以下、焼却灰と略す）の潜在的自硬性に着目して、焼却灰の有機質土または高含水比粘性土における土質改良材としての適用性を室内配合試験及び深層混合処理試験施工によって検討した。

(A) 室内配合試験による検討

(1) 試験方法

本配合試験では、表-5に示す焼却灰を粉粒体の状態でピート質土（含水比＝600％）及び粘性土（含水比＝60％）に添加・混合し、強度試験用の供試体を作成した。なお、供試体の作成方法は、「締固めを伴わない安定処理土の試

験方法」（土質工学会基準案）に準拠した。また基本的な配合条件としては、「焼却灰単体」、「焼却灰＋セメント」を設定し、比較の見地から「砂＋セメント」の配合についても実施している。

Table 5 Characteristics of incinerated ash

items sample	gravity Gs	ignition loss Lig (%)	inorganic matter content (%)						water content (%)	application
			CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃		
ash e	2.86	2.2	34.50	1.57	21.70	13.90	15.10	3.78	0.2	lab-test, field test
ash f	3.04	1.0	38.30	4.87	17.10	12.70	15.40	3.31	0.1	lab-test
ash g	3.18	2.5	35.50	2.14	26.0	7.65	17.4	2.4	1.5	field test

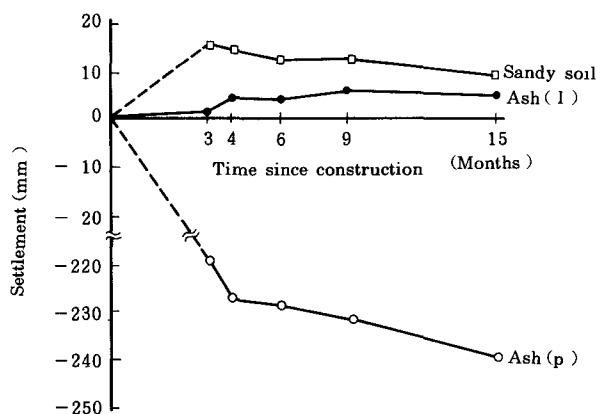


Fig. 2 Settlement in Back Filling

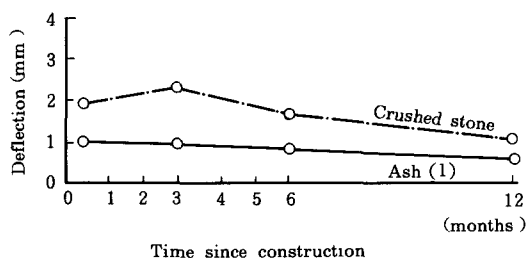


Fig. 3 Deflections measured by Benkelman beam (Base course)

(2) 試験結果

図-4, 図-5 は、ピート質土(含水比=600%)及び粘性土(含水比=60%)に対して行った室内配合試験結果から焼却灰の混合率と混合処理土の材令28日における一軸圧縮強さ q_u の関係を示す。図-4よりピート質土に対しては、セメント混合率が一定の条件で焼却灰の混合率を増加させることによる q_u の増加が顕著に現れており、特に「焼却灰単体」で混合した場合でも混合率の増加に伴う q_u の増加が認められる。さらに、「焼却灰+セメント」の配合では、セメント混合率の増加に伴い q_u が増加し

ており、その増加割合はセメントの混合率とほぼ比例関係にあることがうかがえる。また、「砂+セメント」の配合と比較すると大きな強度発現が得られており、焼却灰の潜在的自硬性の効果が認められる。

また、図-5より粘性土に対しては、「焼却灰単体、焼却灰f+セメント5%」の条件を除いてピート質土と同様に焼却灰の混合率が増加するに伴い q_u が増加していることが認められる。また、その強度発現は「砂+セメント」の配合条件より大きくなっている。「焼却灰単体」の条件に着目するピート質土の場合と異なり、混合率が25%になると q_u が減少する傾向が見られる。また、同様の結果が「焼却灰+セメント」の一部の配合においても認められる。これは、焼却灰中に含有されているCaO成分による吸水作用のため含水比の低下割合が大きく混合直後に土の塑性限界以下の含水比となったためと考えられる。すなわち、焼却灰混合率が多くなると土の含水比が低下するばかりではなく土自体の粘着力も低下し、拘束状態にない一軸圧縮試験で調べる限り強度が小さく評価されるものと考えられる。

(B) 深層混合処理試験施工による検討

(1) 試験施工の概要

本試験施工は、上記室内配合試験の結果を踏まえて、「焼却灰単体」または「焼却灰+セメント」を粉粒体の状態で空気搬送により軟弱地盤中に供給し、攪拌翼にて攪拌・混合することによって得られる土質改良効果を原地盤において検討したものである(図-6参照)。ここでは、試験対照の軟弱地盤として含水比80%程度のシルト質粘性土地盤、含水比600%程度のピート質地盤の2箇所を選定した。

(2) 試験施工結果

1) 焼却灰の粘性土地盤への適用結果

図-7には、焼却灰(表-5 焼却灰g)を用いた粘性土地盤

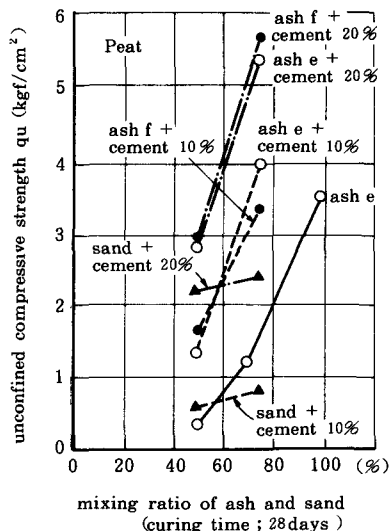


Fig. 4 Relationship between mixing ratio of ash and unconfined compressive strength for laboratory-improved soil (peat)
(remark) Mixing ratio is defined the ratio wet weight of soil to weight of mixed materials.

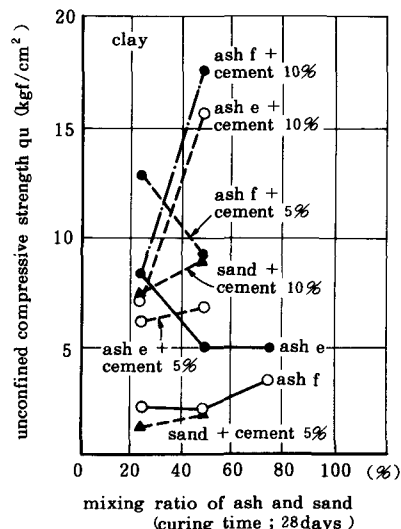


Fig. 5 Relationship between mixing ratio of ash and sand unconfined compressive strength for laboratory-improved soil (clay)
(remark) Mixing ratio is defined same as Fig. 4.

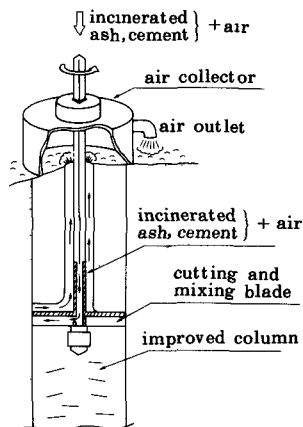


Fig. 6 Outline of improvement on field test

(自然含水比 80 % 程度)における深層混合処理試験施工結果を示す。この図より、「焼却灰単体」の場合、混合率 25 %, 50 % の順に、またセメント 5 % を添加した配合では、焼却灰混合率 20 %, 35 % の順に q_u の増大が認められた。例えば「焼却灰 35 % + セメント 5 %」の配合では、一軸圧縮強さ 20 kgf/cm^2 以上の高強度の土質改良効果が得られている。また、「焼却灰 50 % 単体」の配合においても、一軸圧縮強さ 5 kgf/cm^2 程度の改良強度が得られている。この試験施工から焼却灰は粘性土地盤の深層混合処理改良材として適用性が高いことが確認された。

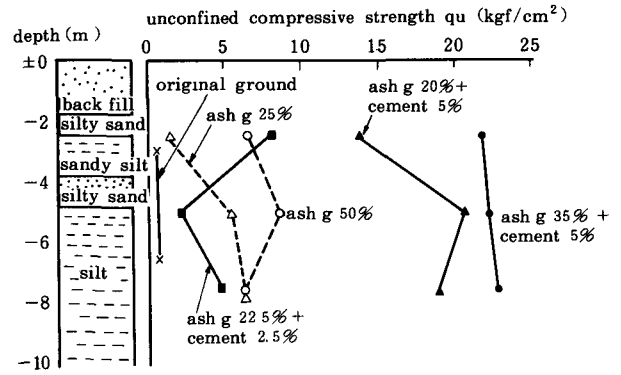


Fig. 7 Results of field improvement tests using incinerated ash on clay soil (Nagoya)

2) 焼却灰のピート質地盤への適用結果

図-8には、焼却灰(表-5 焼却灰e)を用いたピート質地盤(自然含水比 600 % 程度)における試験施工結果から、改良施工後 28 日でのオランダ式二重管コーン貫入試験の結果を示す。図より原位置土では静的コーン貫入抵抗 q_c が 3 kgf/cm^2 程度であるのに対して、「焼却灰単体 600 kgf/m^3 」の条件では q_c 約 10 kgf/cm^2 以上と原位置土の 3 倍程度の強度を発現しており、焼却灰単体であっても比較的良好な改良効果が得られていることが確認された。さらに、セメントを添加した配合条件においては、原位置地盤の 10 ~ 20 倍の強度が得られている。図-9には、焼却灰添加量(またはセメント添加量)と一軸圧縮強さ、含水比の関係を現場試験施工と室内配合試験の 28 日材令において比較して示す。図より、改良材添加量が一定である場合、焼却灰添加量の増大とともに一軸圧縮強さが減少しており、含水比が高いピート質地盤においては土質改良効果は主にセメントによる割合が高いことがうかがえる。しかし、「焼却灰単体」であっても含水比 81 % と大幅に減少し、さらに一軸圧縮強さが 2 kgf/cm^2 程度発現している。この試験施工から、焼却灰はピート質地盤の深層混合処理改良材としても適用性が高いことが確認された。

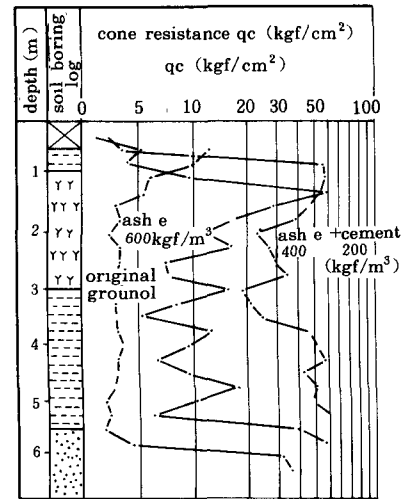


Fig. 8 Results of cone penetration tests for improved ground (peat soil : Yono)

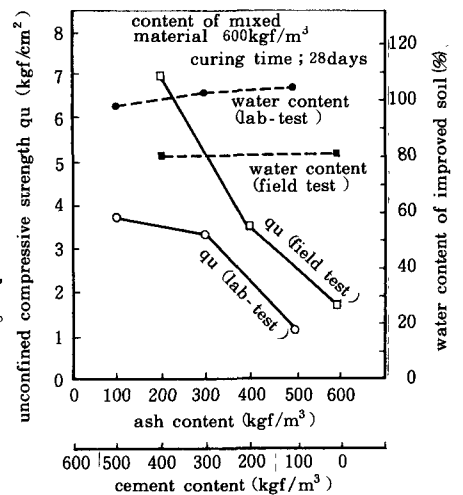


Fig. 9 Relationship between mixing ratio, unconfined compressive strength and water content for field-improved soil (Yono)

3 3 溶融スラグの路盤材料としての利用

コークスベット式溶融炉から発生する空冷汚泥スラグを用い、材料実験及び試験舗装を行い、路盤材料としての評価を行った。

(1) 試験舗装概要

試験施工を実施した 3 箇所の概要を図-10 に示す。試験施工 1, 2 は路盤一層, 3 は上層路盤に用いたものである。

(2) 材料試験結果

施工に用いたスラグ碎石の室内試験結果を表-6 に示す。スラグ碎石は、すりへり減量については、アスファルト舗装要綱の基準値内であるが、修正 CBR は大きく変動している。いず

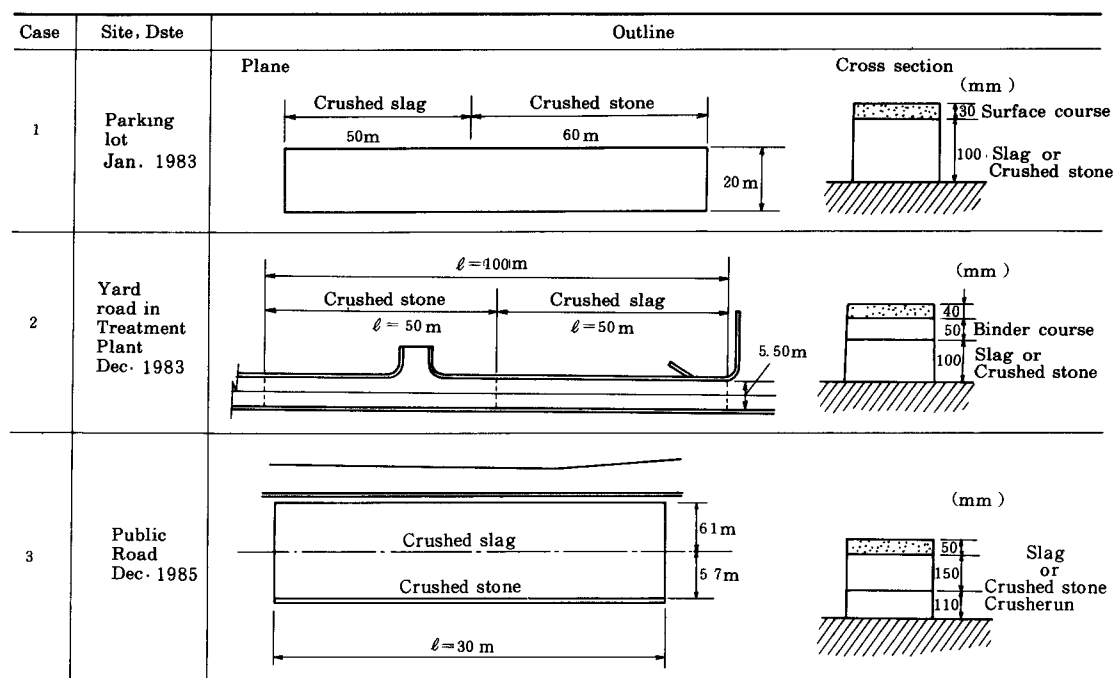


Fig. 10 Outline of Trial Pavings (Oosaka Prefecture)

れも下層路盤の基準値の20を超えており、一部のものでは上層路盤の基準値80を超えている。

スラグ碎石が大きく強度が異なる要因としては①粒度、②スラグ製造条件（スラグの組成、冷却速度）が考えられる。粒度の影響を見るため、試験施工3に用いたと同じロットのスラグを粒度調整し（モデル1、2）試験を行った。その粒度及び修正CBRを図-11に示す。同一製造条件のスラグでも細粒分の多いもの（モデル1＞モデル2＞試験施工3）

Table 6 Physical Characteristics of Air-cooled Slag as Base Coarse Materials

Trial Paving No.		1	2	3	Specified value
Gradation	30	100	100	100	95 ~ 100
	25	100	100	100	
	20				
	13	83	64	89.9	55 ~ 85
	5	58	37	56.7	30 ~ 65
	2.5	44	28	34.7	20 ~ 50
	0.4	20	13	8.1	10 ~ 30
0.074		9	4	2.1	2 ~ 10
Bulk specific gravity in saturated surface-dry (%)		2.790	2.820	2.511	
Specific gravity under over dry condition (%)		2.780	2.810	2.493	
Coefficient of water absorption (%)		0.357	0.398	0.680	
Unit weight (gf/cm ³)		—	1.970	1.683	
Solid volume percentage (%)		—	70.2	67.1	
Abrasion loss (%)		32.1	32.7	36.9	Under 50 %
Plasticity index		NP	NP	NP	under 4
Modified CBR	Optimum moisture content (%)	4.8	5.0	5.5	Manual for design and construction of asphalt pavement
	Maximum dry density (gf/cm ³)	2.381	2.321	1.937	
	Degree of compaction (%)	95	95	95	
	Modified CBR (%)	106.0	83	42.0	
					base 80 more subbase 20 more

ほど修正CBRの値が大きくなっており、粒度が強度に大きく寄与している。一方、試験施工2の場合、細粒分が少なくとも修正CBRは80を超えることや、試験1とモデルNo.1とはほぼ粒度が同じであるのに、修

正CBR値は異なるなど、粒度だけでは説明できない部分も多く、スラグそのものの特性にCBRが大きく依存することを示している。

(3) 施工試験結果

試験施工2, 3の施工管理試験結果を表-7に示す。両実験とも十分な締固めとなった。施工においてスラグ碎石は、転圧機械(タイヤローラ, マカダムローラ)のわだちの跡が最後まで残った。これは、材料のかみあわせが十分でないということであり、使用したスラグが非晶質で表面がなめらかであることに起因すると考えられる。このことは、平板載荷試験結果とCBR試験結果を比較すると、前者では、粒調碎石とは

ほぼ同じ強度を示すのに対して、後者ではスラグ碎石の値が2分の1～3分の1と小さなものとなっていることから推測される。

試験施工1, 2においては、交通量が少ないこともあり、1985年末現在において、ひび割れ、平坦性等について粒調碎石とスラグ碎石の工区には差は生じていない。

3.4 溶融スラグのコンクリート骨材としての利用

溶融スラグを、コンクリート用の粗骨材として用いたコンクリート材料試験を行い、汚泥スラグ骨材の特性を把握した。

(1) 供試材料

調査対象とした6種類のスラグ骨材の製造条件を表-8に示す。粗骨材B, D, 細骨材Bは、結晶化を進めたものである。粗骨材の場合、結晶化のための最適な熱処理温度は、

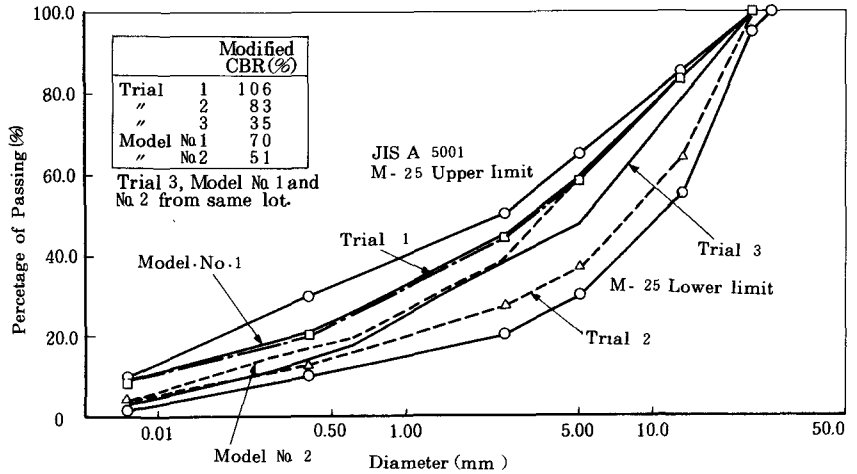


Fig. 11 Grading Curve of Crushed Slag

Table 7 Results of Trial Pavings

Base materials	Degree of compaction (%)	CBR value in situ (%)	Plate bearing test K 30 (kgf/cm ²)	Deflection measured by Benkelman beam (mm)	Subbase coarse	
					CBR value in situ	Plate bearing test (kgf/cm ²)
2	Graded crushed slag	98.1	26.8	27.2	1.73	
	Graded crushed stone	99.3	58.4	37.3	1.12	
3	Graded crushed slag	102.4	10.8	24.9	2.7	12.2
	Graded crushed stone	99.1	28.1	27.7	1.8	66.5

Table 8 Slag Aggregate Used as Concrete Aggregate

Slag aggregate	Slag production process
Coarse aggregate (A)	Coke bed type smelter → Air-cooling → Crushing
" (B)	Coarse aggregate A → Heat treatment (at 1100°C for 40 min)
" (C)	Coke bed type smelter → Air-cooling → Crushing → Heat treatment (at 750°C for 4 hours)
" (D)	Coarse aggregate C → Heat treatment (at 880°C for 4 hours)
Fine aggregate (A)	Electric arc melting furnace → Water granulating
" (B)	Cyclone melting furnace → Water granulating → Heat treatment (at 920°C for 25 min)

1100 ～ 1150 ℃ と報告されている。しかし、粗骨材CとDの場合 900 ℃ 以上の高温にさらすと再熔融することから、880 ℃ と 750 ℃ で熱処理を行った。後者では、X 線回折結果結晶の成長が確認できなかった。粗骨材Aの表面は、ガラス質で非常に滑らかであるが、結晶化したBは、滑らかさがなくなっている（図-12 参照）。

また、粗骨材はすべてコンクリート碎石（JIS A 5005）の碎石 2005 の粒度に調整した。スラグ細骨 2 種の粒度を図-13

に示す。細骨材 B は、細粒分が不足していた。

骨材試験結果を表-9 に示す。これに併せて、コンクリート粗骨材に関する日本工業規格

（JIS）の値を示す。スラグ粗骨

材 4 種は、JIS の規格値に適合する。粗骨材 A、B を比較すると、結晶化の効果が明確にあらわれており、B の方が A に比べ、安定性やすりへり抵抗等が大幅に改善されている。細骨材 2 種については、汚泥成分及び製造方法が異なるので、結晶化の効果を単純に比較できない。しかし、結晶化を進めた B は、安定性が大幅に向上している。

なお、試験に用いたスラグ骨材は、化学法によってアルカリ骨材反応は無害域に入ることが確認された。

(2) 試験条件

試験は、表-10 に示す条件で行った。これらの配合は、スラン プ 8 cm、空気量 5 % を目指したものである。スラグ細骨材を用



Fig. 12 Effects for Slog Aggregate by Crystallization

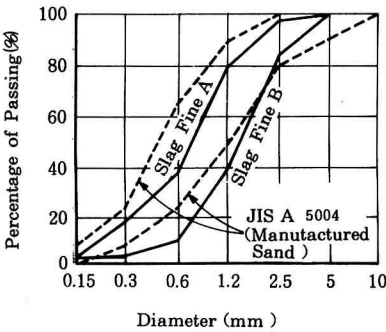


Fig. 13 Grading curve of Slog Fine Aggregate

Table 9 Physical Properries of Aggregate

	Specific gravity surface dry ¹⁾	Absorption (%)	Soundness (%)	Abrasion (%)	Decantation less (%)	Unit weight (kgf/ℓ)	Solid volume (%)	Crushing vane (%)	Chloride content (%)
Slag coarse aggregate A	2.86	0.19	8.5	33.7	0.15	1.72	60.3	27.7	—
" B	2.88	0.79	3.9	21.3	0.16	1.69	59.1	18.1	—
" C	—	0.5	0.49	38.5	—	1.51	58.7	—	—
" D	—	1.1	1.08	34.3	—	1.46	59.7	—	—
Crushed stone	2.68	0.6	0.8	10.1	—	1.60	60.0	9.4	—
JIS 5005	2.5 more	3.0 below	12.0 below	40 below	1.0 below	—	—	—	—
Slag fine aggregate A	2.27	15.05	32.7	—	2.65	1.07	54.2	—	0.059
" B	—	2.4	4.73	—	0.53	—	—	—	—
River sand	2.60	2.23	5.9	—	1.85	1.59	62.5	—	0.003

1) Under saturated

いた場合(配合8)

の粒形、粒度がよくなかったため、エントラップトエアが多く、目標の空気量に抑えるため、A E 剤を使用しなかった。

(3) 試験結果

28 日後の圧縮強度及び曲げ強度を表-10 に示す。両実験を通じて次のことがいえる。

1) 粗骨材のAとB、CとDを比較すると、熱処理(結晶化)した骨材を使用したコンクリートの方が強度がでており、結晶化の効果がある。

2) 熱処理(結晶化)した粗骨材Bを用いた配合のコンクリート強度は、普通碎石を用いたものに比べ、遜色ないものとなっている。

3) 細骨材については、熱処理したBを用いた場合でも、圧縮強度が標準配合5に比べ劣っており、結晶化の効果が表れていない。

非晶質のスラグ粗骨材を用いた場合、強度が低いのは、供試体の破壊状況から骨材表面が滑らかであるためモルタルとの付着力が低下していることが大きな要因と考えられる。結晶化したスラグ細骨材Bを用いたコンクリートの強度が低い、この原因はエントラップトエアが多いことなどが影響していると考えられる。

コンクリートの耐久性を把握するため、凍結融解試験を行った。結果を図-14 に示す。動弾性係数の低下の著しいものは、結晶化の程度の低いスラグ粗骨材を用いたものであった。スラグ細骨材及び結晶化程度の高いスラグ粗骨材を用いたものは、標準配合(1, 5)に比べ大きな差はない。

3 5 溶融スラグ結晶成形材の製造

下水汚泥溶融の資材化については、碎石、砂の代替品としての各種骨材への利用が中心となっているが、より付加価値の高い建設資材の開発について検討を加えた。

(1) 成形実験内容

本実験では150 mm×10 mmの板材、一辺25～50 mmの立方体及びレモン形(長径35 mm, 短径20 mm)を試作した。板材、立方体とも、ダイヤモンドカッターによって形状を整えた。実験作業フローを図-15 に示す。

(2) 実験結果

供試材料から低粘性の融液が得られ、成形性並びにカーボン成形型からの離型性は良好であった。また、

Table 10 Used Aggregate and Strengths of Concrete

Sample No	Aggregate Coarse : Fine	Unit Weighth (kg/m ³)				Compressive strength (kgf/cm ²)	Bending strength (kgf/cm ²)
		Water	Cement	Coarse Aggregate	Fine Aggregate		
I	1 Crushed stone : river sand	167	334	1,103	689	355	44
	2 Slag A : river sand	166	332	1,161	720	270	37
	3 Slag B : river sand	167	334	1,161	715	370	47
	4 Crushed stone : slag A	174	348	1,049	620	289	39
II	5 Crushed stone : river sand	172	344	954	810	428	53
	6 Slag C : river sand	172	344	925	810	375	46
	7 Slag D : river sand	172	344	886	810	409	54
	8 Crushed stone : slag B	206	412	792	884	313	44

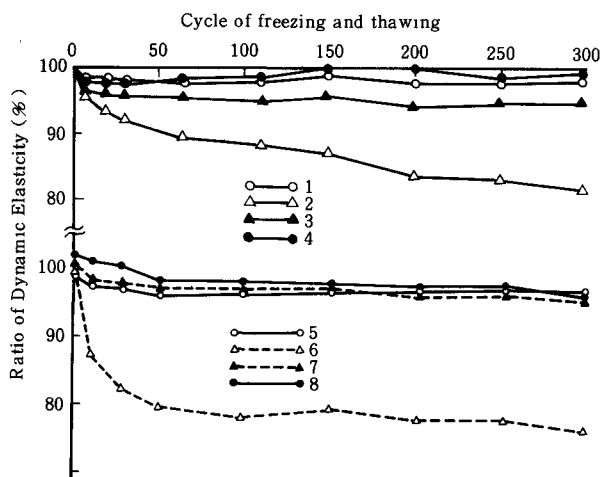


Fig. 14 Results of Tests for Freezing and Thawing

結晶化の進んだ各形態の
スラグが得られた。
成形スラグの抗折強度は、
約 1000kgf/cm²
以上、圧縮強度は、
4500kgf/cm² となった。
両者ともコンクリート
等に比べ非常に高い値
となっている。マイク
ロビッカース硬度は、各サンプルとも約 800kgf/cm²
とかなりの高硬度であった。

ここで製造された板材とコンクリートとの複合材
料の特性を把握するため、図-16のようなブロック
を製作し、強度試験を行った。スラグの付着面には、
コンクリートとの付着をよくするため波形を付けた。
歩道ブロックの付着強度及び圧縮強度の測定を行っ
た。せん断強度は 44kgf/cm²、引張強度は 10kgf/cm²
であり、破壊面は結晶化板材とコンクリートの境界
面である。圧縮強度は 590kgf/cm² と同時に行った標
準コンクリート供試体の強度 350kgf/cm² と比べ、か
なり高い数値が得られた。このとき、結晶化板材は
破壊されず、コンクリート部分が破壊された。

4. 結 論

以上述べた室内試験及び実験施工により、下水汚
泥焼却灰、及び熔融スラグの有効利用方法が提案で
きる(表-11)。なお、これらは、限られた期間及
び材料において検討されたものであり、今後の技術
開発により見直されるべきものもある。

(1) 焼却灰の利用方法

1) 盛土材、路盤材、埋戻し材……石灰系焼却灰

は、施工直後に十分な強度が得られ、それ以降も数週間にわたり、強度が増加していくので、強度の面から
みると盛土材、埋戻し材として十分使用できる。路盤材としては、単体では粒度などの点から上層路盤材に
は使用できないが、下層路盤材、自転車道、歩道などの路盤材には使用できる。ただし、石灰系焼却灰でも
特に粒度が細かいものについては、含水比調整に注意しないと、施工面で転圧がしづらいかか粉じん等の問
題が生じると考えられる。埋戻し材に要求される再掘削の容易さという観点からみると、単体で使用する
とあまりにも強度が高くなりすぎるきらいがあるので、埋戻し材として単体で使用するの
は好ましくない。むしろ、土質改良材として土と混ぜ改良土として使用することが望ましい。

高分子焼却灰は、自硬性もほとんどないことから、強度および施工の両面からこれらの材料としての使用
は好ましくない。

2) 土質改良材……石灰系焼却灰は、土との優れた反応性を有しているため、単味あるいは他の成分と組
み合わせて用いることにより、土質改良材として十分使用が可能である。「単味」で用いる場合は、軟弱粘

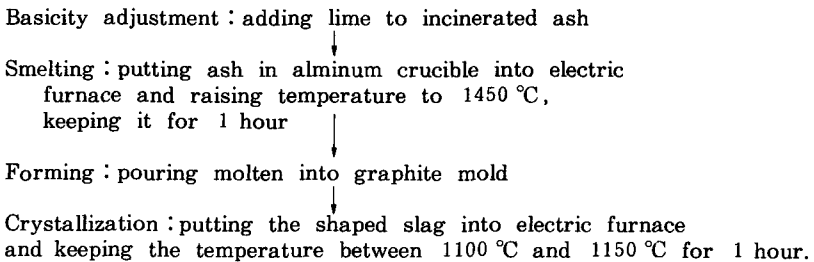


Fig. 15 Flow Chart of Producing Shaped Slag

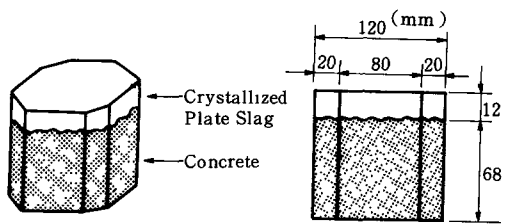


Fig. 16 Shape of Dauement Block

Table 11 Utilization of Sewage Sludge

Application Sludge						
	Embankment	Soil improvement	Back Filling	Base Course	Concrete Aggregate	Others
Ash (lime)	○	△	△	△		
Ash (Polymer)	×	×	×			
Slag (Air-cooled)				△	△	
" (Water-granulated)					△	
" (Crystallized)					○	
" (Shaped)						○

○ use
△ possible
× impossible

土等に混合することを前提とするが、一般に改良後の強度はそれほど高くないので、使用は低強度改良を目的としたものに限られる。

(2) 溶融スラグの利用方法

1) 路盤材……空冷汚泥スラグは天然の骨材と同程度の強度を有しており、所要粒度への調整も可能であるが、今回試験施工に用いたスラグにおいては、施工性及び締固め後の安定性が幾分碎石に比べて劣っていた。このため、単体では、下層路盤や自転車道、歩道、構内道路などの軽交通道路の路盤への利用に限られる。

2) コンクリート骨材……溶融したスラグを空冷または、水砕処理するとガラス質となり、これを用いたコンクリートは高い強度・耐久性を得にくく、RC部材には用いにくいと考えられる。このため、これらの骨材は、低強度のコンクリートへの利用が考えられる。一方、結晶化したスラグ骨材を用いたコンクリートの強度や耐久性は、普通骨材を用いたものに比較してもほとんど遜色のないものとすることができ、鉄筋コンクリートとして用いることができると考えられる。

3) 成形板材等……溶融状態のスラグを任意の形状のモールドに受け結晶化させると、いろいろな形をした高強度の“石”が製造できる。タイル、ブロック等への利用が考えられる。

5. 今後明らかにすべき点

下水汚泥焼却灰、溶融スラグの建設資材利用方法について試験施工により評価を行ったが、以下に述べるような点が未解明であり、今後検討を加えていくこととしている。

(1) 焼却灰の組成（特に、石灰）と強度の関係。

(2) 焼却灰中の石灰の水、大気との接触による変化及びこれによる強度特性、改良特性の変化。

謝 辞

この研究は、総合技術開発プロジェクト「建設事業への廃棄物利用技術の開発」（昭和56～60年度）の一貫で実施したものの一部である。本研究を進めるにあたって適切な助言をいただいた「委員会及び各分科会」のメンバーの方々、及び試験施工の実施及び実験材料の提供において、多大な協力を得た東京都、大阪府、札幌市、横浜市、名古屋市をはじめとする担当部局及び担当者に深く感謝の意を表す。

<参考文献>

- 1) 日本の下水道：昭和60年度、(社)日本下水道協会、P 235
- 2) 廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書：(財)国土開発技術研究センター、昭和57 3
- 3) 東京都下水道局：脱水汚泥の高温溶融と結晶スラグの生成、東京都下水道局技術調査年報、昭和59 3
- 4) 上田誠一郎など：下水汚泥溶融スラグの結晶化についての基礎実験、第19回下水道研究発表会講演集、昭和57
- 5) 市川治徳、笠倉忠夫：下水汚泥焼却灰の溶融骨材化、第35回年次学術講演会講演概要集、1980