

## 建設汚泥の溶融処理による土木建築資材への適用 UTILIZATION FOR CIVIL MATERIAL AND CONCRETE AGGREGATE OF SLAG BY CONSTRUCTION SLUDGE MELTING

溝上芳史\*1・原昌弘\*2・柴田泰典\*3・藤井健一\*4  
By Fusanobu MIZOGAMI, Masahiro HARA,  
Yasunori SHIBATA and Kenichi FUJII

### 1. まえがき

昭和62年度の大型補正予算にて景気が刺激され、建設工事が年々増大し、特に首都圏（1都3県）では全国の30%近くの2100万t/年（1988年度）の建設廃棄物が発生している。なかでも建設汚泥は500万t/年と多いにもかかわらず、再利用率が2%と非常に低い状況にある<sup>1)</sup>。建設汚泥の再資源化研究として、石灰、セメントを添加して土砂並に改良する研究、乾燥処理にて園芸用土に改良する研究、焼成処理にて人工軽量骨材やタイルにする研究等が実施されている。

我々は、下水汚泥、都市ごみ等の廃棄物の減容化、安定化、再資源化技術として注目されている溶融処理の建設汚泥への適用について検討した。

本報では、骨材のなかでも枯渇化がより進行しており、かつ需要量が約2億t/年の市場を形成している細骨材への適用を目指し、スラグ品質、溶融技術の経済性等の検討結果について述べる。

### 2. 建設汚泥の性状

建設汚泥は泥水式シールド工法、場所打ち杭工法等の建設工事で使用する泥水（ベントナイト系、ポリマ系）に、掘削現場の粒径の小さい土（シルト～粘土）の一部が入り込んで発生した廃泥水を、石灰、PAC等を加えて凝集させ、機械脱水したのちの残渣物である。

建設汚泥の性状を溶融の観点より検討すると、含水率は溶融熱原単位（汚泥を乾燥・溶融処理するのに必要な燃料量）に影響を及ぼし、固形分性状は溶融温度、スラグ性状等に影響を及ぼす。含水率は建設汚泥の粒度、脱水方法等により異なるが、50～70%程度が多い。固形分はベントナイト、及び掘削土で95%以上を占め、その主成分はシリカ（55～65%）、アルミナ（10～20%）、及び酸化鉄（3～6%）である。固形分成分の変化が小さいため、溶融温度、スラグ性状への影響が小さいと想定される。

### 3 建設汚泥の溶融処理の特徴

建設汚泥の溶融処理は、減容化（スラグとすることにより、単位容積重量基準で1/3の容積となる）、安定化（溶出液において、pHが約8であり、有害物が検出限界以下である）に優れていることを確認している。

また、天然砂等の細骨材市場は建設汚泥発生量の10倍以上の市場を有し、かつ、スラグ細骨材の品質が後述するように土木建築資材として用いられている天然砂相当であるので、スラグの細骨材用途への利用が期待できる。

さらに、溶融処理を特徴づけるためには、廃棄処分方法と比べた経済性であり、それには溶融処理における排ガス処理対策程度と溶融熱原単位等が重要となる。

排ガス処理において、建設汚泥はS、Cl、N、有機物の含有量が非常に少なく、SO<sub>x</sub>、HCl、NO<sub>x</sub>処理、及び臭気処理が不要である。したがって、下水汚泥等と比べて排ガス処理装置の簡素化ができるとともに、排ガスをを用いて汚泥を直接加熱できる乾燥機が適用できる。一方、溶融熱原単位において、建設汚泥は有機分をほとんど含まず熱源を全量外部熱源に頼らざるをえないので、下水汚泥等と比べて大きくなる。したがって、いかにして熱を効率的に利用するかが重要となる。

### 4 熱の効率的な利用方法

熱の効率的な利用方法として、図1に示す④乾粉を溶融炉排ガスで高温まで予熱して溶融炉に投入する乾粉高温予熱方式、⑤溶融炉排ガスで燃焼空気を高温に予熱した後、溶融炉に導く空気高温予熱方式、という2ケースが考えられる。本報告では、熱の効率的な利用で優れている④の方法について述べることにする。乾燥処理はいくつかの方式が考えられるが、建設汚泥では乾燥排ガスの処理が不要であるので直接熱交換で熱効率が高く、コンパクトである気流乾燥方式を採用した。気流乾燥における熱効率の向上は、①ガスと汚泥の温度差を大きくするために入口ガス温度を高める、②適当な滞留時間を確保する、③結果的には乾燥排ガス量を低減する、ことで達成される。溶融処理を組み込んだ系において、装置からの放熱ゼロの理想条件下で、汚泥含水率60%で計算した乾燥及び溶融処理に必要な理論熱量を表1に示す。さらに表1と同様な方法で計算した汚泥含水率50%、70%

\*1 (財) エンゾーリング振興協会 技術部部長 (〒105 東京都港区西新橋1-7-2), \*2川崎重工業(株) 技術総括本部開発部主査, \*3川崎重工業(株) 明石技術研究所化学技術研究部部員 (〒673 兵庫県明石市川崎町1-1), \*4川崎重工業(株) 明石技術研究所熱技術研究部主査

の場合の理論熱量を図2に示す。

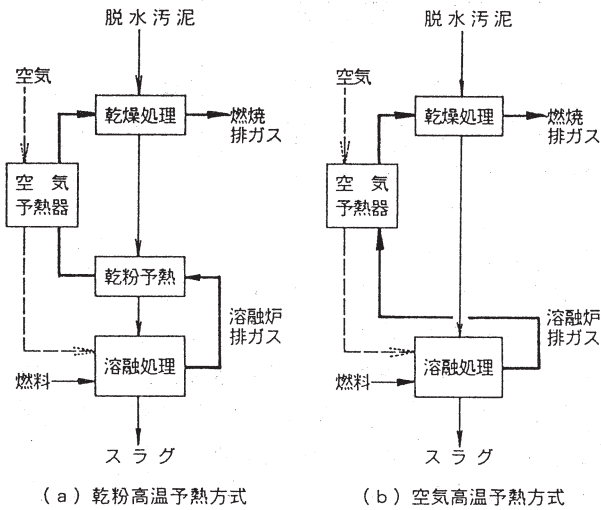


図1 建設汚泥の熱利用フロー

表1 乾燥及び溶融処理に必要な理論熱量

処理工程	処理量 (kg)	温度変化 (°C)	エンタルピー差 (kcal/kg)	必要熱量	
				(Mcal)	(%)
乾燥	水分蒸発	20 → 100	20 → 639	371	68
	固形分昇温	20 → 100	6 → 30	10	2
	小計	1000	—	—	381
溶融	乾粉予熱	100 → 800	30 → 240	84	15
	乾粉溶融	800 → 1500	240 → 450	84	15
	小計	400	—	—	168
合計	—	—	—	549	100

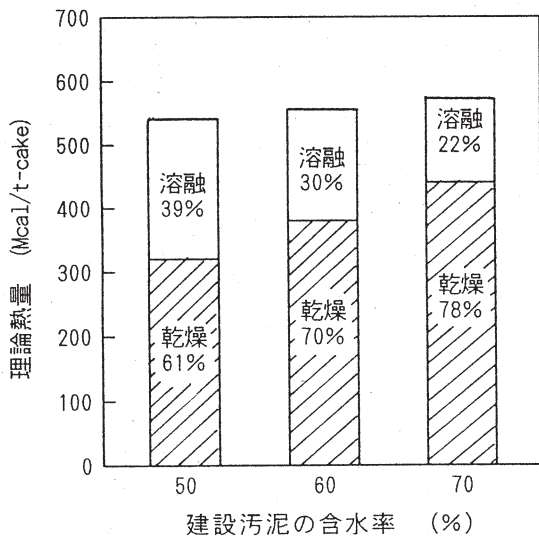


図2 乾燥及び溶融処理に必要な理論熱量

建設汚泥の含水率が50%では、乾燥処理で61%、溶融処理で39%の熱量を消費し、合計で約532Mcal/t-cakeとなる。含水率が70%となると、乾燥処理で78%、溶融処理で22%の熱量を消費し、合計で約567Mcal/t-cakeとなる。したがって、建設汚泥では、溶融処理の熱効率を高める運用をすれば、乾燥処理に必要な燃料量に若干の燃料を付加するだけで、溶融処理が可能となる。

5. スラグ細骨材の製造装置及び製造方法

5.1 スラグ細骨材の製造装置

スラグ細骨材の製造装置の概略を図3に示す。製造装置はスラグ製造能力が0.1t/Hである横型旋回式溶融炉(溶融炉寸法:0.3φ×1.3mL、定格熱負荷:50万kcal/H)を主体とし、原料供給機、空気搬送機、エアヒータ、クーラ、バグフィルター、破碎机(インパクトクラッシャ処理能力:1t/H)、冷却槽等より構成されている。

また、スラグ表面の改質のため、マッフル炉(容量:50ℓ、最高温度:1100℃)、水熱処理機(容量:50ℓ、攪拌回転数:100rpm)を用いた。

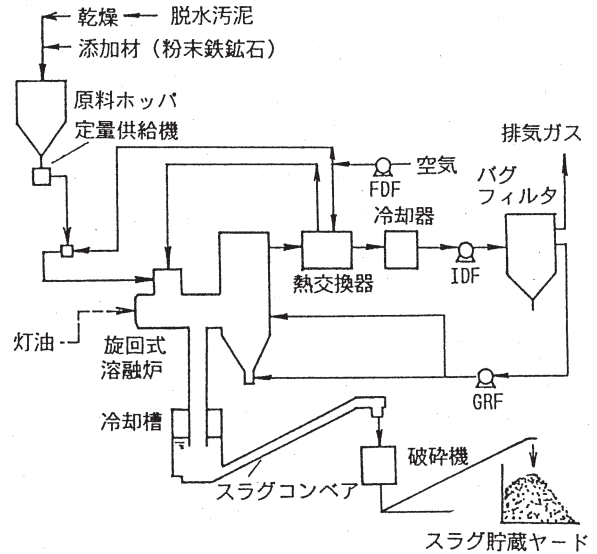


図3 スラグ細骨材の製造装置のフロー

5.2 スラグ細骨材の製造方法

表1に示す乾燥汚泥に対し、溶融炉安定運転とスラグ品質向上を目的とし、粉末鉄鉱石を15%添加したものを原料とした。原料100kg/Hを約1500℃に保持された旋回式溶融炉に連続供給を行い、融液を約100℃の熱水中に投入し、固液分離を行ったのち、インパクトクラッシャで破碎してスラグ細骨材を製造した。

また、スラグ細骨材の表面改質を行う目的で、同一条件で破碎したスラグ細骨材を用い800~1050℃の酸化雰囲気中で30分の高熱処理、またはpH 8~12、温度約100℃の熱水中で5時間の水熱処理を行った。

表1 建設汚泥の性状

化学組成 (%)						溶流点 (°C)
Ig. Loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	
5.21	63.6	13.1	4.65	5.21	0.43	1370

6 スラグ細骨材の評価実験方法

スラグ細骨材の基本特性評価実験は、JIS A 1109による絶乾比重、吸水率、JIS A 1104による実績率、JIS A 1121によるすりへり減量（スラグ粒度 2.5-5mmで試験）及び JIS A 5308 の附属書3に準拠して作製したモルタル（水セメント比50%、フロー値190 ±5mm）による材令7日強度（JIS R 5201に準拠）、フリージング率（土木学会、プレパックドコンクリートの注入モルタルのフリージング率試験方法に準拠、3時間経過後の数値）について行った。なお、スラグ細骨材表面の改質効果の確認のため、X線回折、EPMA、IR分析を行った。

土工事材としての評価実験は、表面改質処理を行っていないスラグ細骨材を用い、JIS A 1210に準拠して突き固めを行って最適含水比を求めたのち、日本道路協会の修正CBR試験方法に準拠して行った。さらに、土質学会JSF T 524-1990に準拠して三軸圧縮試験を行った。

コンクリート細骨材としての評価実験は、細骨材として表面改質処理を行っていないスラグ細骨材、川砂を、粗骨材として碎石（2005）を用い、所定条件でコンクリートを作製し、フレッシュコンクリート試験（JIS A 1101によるスランブ試験、JIA A 1116による単位容積重量試験、JIA A 1123によるフリージング率試験）、及び硬化コンクリート試験（JIS A 1108による圧縮強度試験）を行った。

7 スラグ細骨材の評価実験結果および考察

7. 1 基本特性

表面改質処理を行っていないスラグ細骨材の評価実験結果を表2に示す。スラグ細骨材はコンクリート細骨材の規格、土工事材の基準を満足する。また、代表的な細骨材である川砂A、B、海砂と比較し、吸水率が低く、すりへり減量が多い特徴を有する。

なお、モルタル試験結果において、天然細骨材と比較し、フリージング率が4倍程度高く、強度が10%程度低くなっている。

モルタル試験において、スラグ細骨材が天然細骨材よりも品質が劣る原因は、スラグ細骨材と天然細骨材の表面状態の違いに起因すると想定し、高温処理、及び水熱処理にて表面改質したスラグ細骨材を用い、モルタル試験を行い、図4、5の結果を得た。これより、高温処理したスラグ細骨材では、モルタル強度は向上するが、フリージング率が大きくなる結果となった。一方、水熱処理したスラグ細骨材では、処理時の熱水pHが高いスラグほどモルタル強度が向上し、フリージング率が低下し、天然細骨材相当のモルタル品質となった。

表2 スラグ細骨材の基本特性実験結果

特性	項目	スラグ				コンクリート用	サドルン材
		細骨材	川砂A	川砂B	海砂	砕砂 JIS A 5004	サドルン材 サドルン材 日本道路協会
粒 度 (mm)	10	100	100	100	100	100	74μmふるい 通過量<3%
	5	100	100	100	100	90-100	
	2.5	94	82	83	87	80-100	
	1.2	73	58	61	58	50-90	D <sub>85</sub> = 1-5mm
	0.6	45	39	41	32	25-65	(85%通過粒度)
	0.3	23	21	20	14	10-35	
	0.15	10	6	5	3	2-15	D <sub>15</sub> = 0.1mm- 75μm
	<0.075	4	—	1	1	—	(15%通過粒度)
絶乾比重 (-)		2.62	2.67	2.64	2.55	2.5以上	—
吸水率 (%)		0.32	1.22	0.84	2.00	3以下	—
実績率 (%)		62	67	70	65	—	—
すりへり減量 (%)		41	8	11	19	—	—
フレッシュコンクリート試験 フリージング率 (%)		0.78	0.18	0.10	0.26	—	3時間後
硬化モルタル試験	かさ比重 (-)	2.24	2.25	2.33	2.24	—	材令7日
	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	64	76	76	73	—	
	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	410	456	480	445	—	

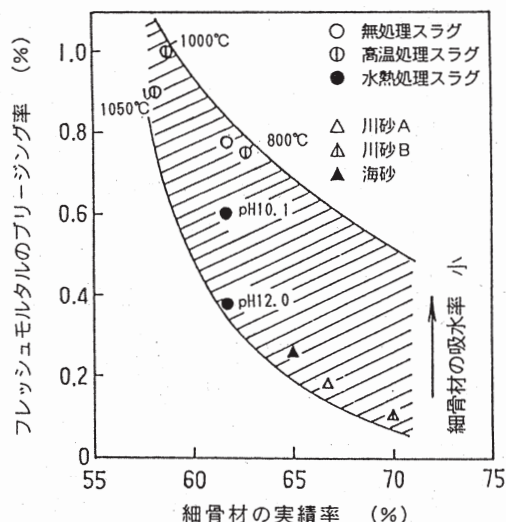


図4 スラグ細骨材の実績率とモルタルのフリージング率の関係

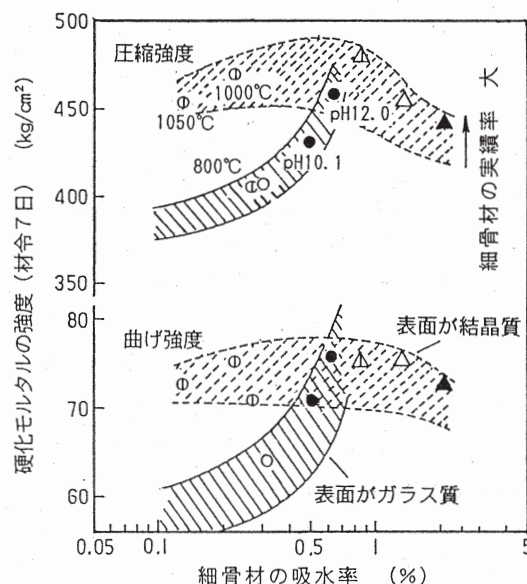


図5 スラグ細骨材の吸水率とモルタルの強度の関係

表面改質によるモルタル品質の違いを検討するため、表面改質したスラグ細骨材のX線回折、EPMA分析、IR分析を行った。

高温処理では、図6に示すようにスラグ表面の鉄濃度が高くなっており、X線回折結果より、ヘママグネタイトが生成していることが判明した。なお、高温処理ではIR分析結果には明瞭な違いは認められず、図5に示すようにスラグの吸水率が低下した。一方、熱水処理ではX線回折結果、EPMA分析結果には違いが認められず、図7に示すようにIR分析結果に違いが認められた。すなわち高pHで処理したスラグ細骨材ほど、波数 $3500\text{cm}^{-1}$ 付近(OH基による振動吸収)の透過ピークが大きくなり、図5に示すように吸水率が大きくなっていることより、親水性の向上が考えられる。なお、天然砂においても、波数 $3500\text{cm}^{-1}$ 付近に同様な透過ピークが認められた。

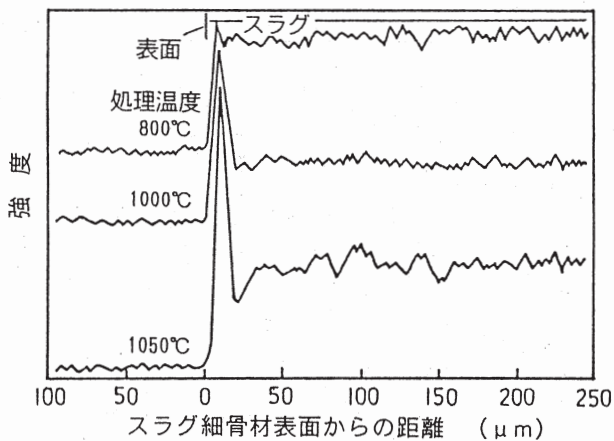


図6 高温処理したスラグ細骨材のEPMA分析(Fe)結果

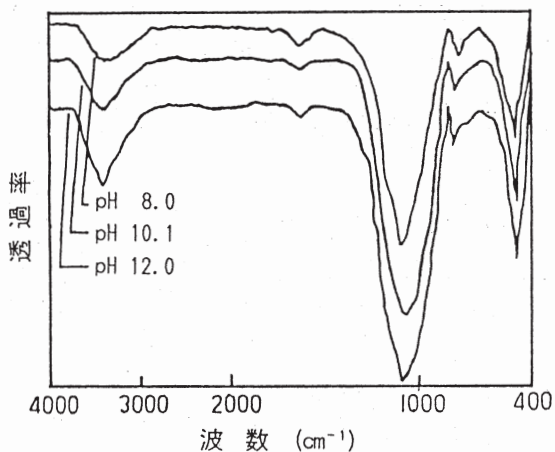


図7 水熱処理したスラグ細骨材のIR分析結果

以上より、モルタル品質において、スラグ細骨材が天然細骨材よりも劣る原因は、スラグ表面が親水性に欠けるためではないかと考えられ、ガラス質、結晶質の違いが直接影響していないと判断できる。したがって、天然細骨材相当の強度が要求されるコンクリートにおいては高pHの熱水で水熱処理し、親水性を向上させたスラグの適用が考えられる。

## 7. 2 土工事材

スラグの土工事材への適用性を評価するため、修正CBR試験、三軸圧縮試験を実施した。試験結果を図8、9に示す。締め固め後の表面は良く締まっており、修正CBRは51%と砂よりもかなり大きく、かつ下層路盤材規格の20%、埋戻し材品質の3-20%（施工場所、自治体等により異なる）を上廻っている。また剪断抵抗角は約40度であり、砂の30-35度を上廻っており、サンドコンパクション材、ドレーン材等への適用が期待できる。

したがって、土工事材品質としては砂相当以上と考えられるが、すりへり減量が砂よりも多いので、転圧により一部が砕けることも考えられるので、試験施工による確認が必要である。

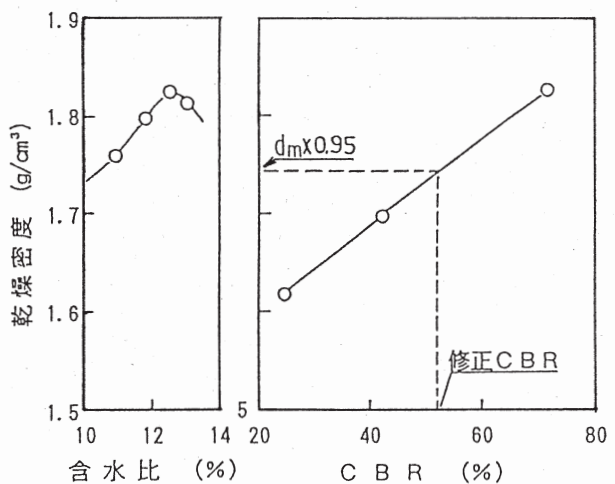


図8 スラグ細骨材の修正CBR試験結果

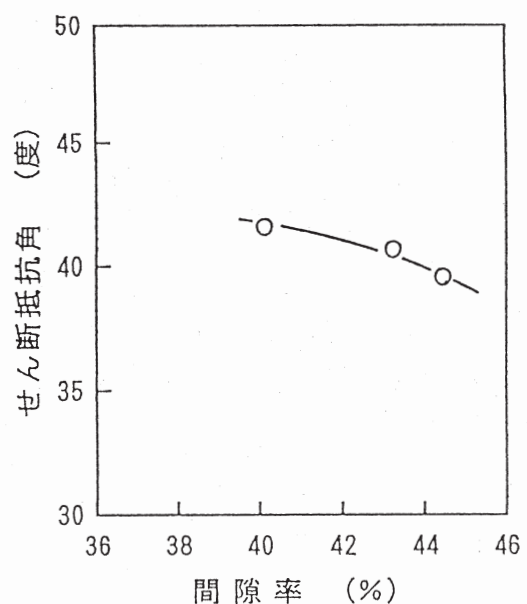


図9 スラグ細骨材の三軸圧縮試験結果

7. 3 コンクリート細骨材

スラグ細骨材のコンクリート細骨材への適用性を評価するため、表3に示す配合でフレッシュコンクリート試験、硬化コンクリート試験を実施した。

表3 コンクリートの配合条件

供試骨材	混和材	配合	試験条件
細骨材 スラグ 川砂	AE減水剤 AE剤	水セメント比 40、50、60%	フレッシュ コンクリート 単位水量 ブリージング率
粗骨材 碎石(2005)		スランブ 8 ± 1.5cm 15 ± 2.5cm	硬化コンクリート 圧縮強度 寸法 10φ×20cm 材令 7、28、91日
		空気量 4 ± 1.0%	
		細骨材/全骨材 の容量比 60%	

フレッシュコンクリート試験結果を図10、11に示す。単位水量において、スラグコンクリートは、川砂コンクリートよりも大きく、かつスランブが増すに伴ない差が拡大する傾向が認められる。また、ブリージング量において、スラグコンクリートは、砂コンクリートよりも大きく、かつ、長く継続する傾向が認められる。これらは、骨材の保水性の違い等によるものと考えられる。

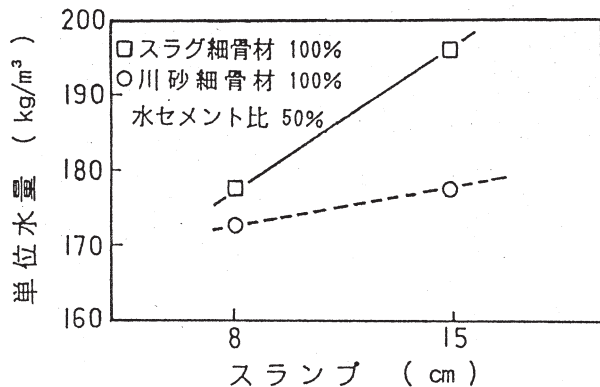


図10 フレッシュコンクリートのスランブと単位水量の関係

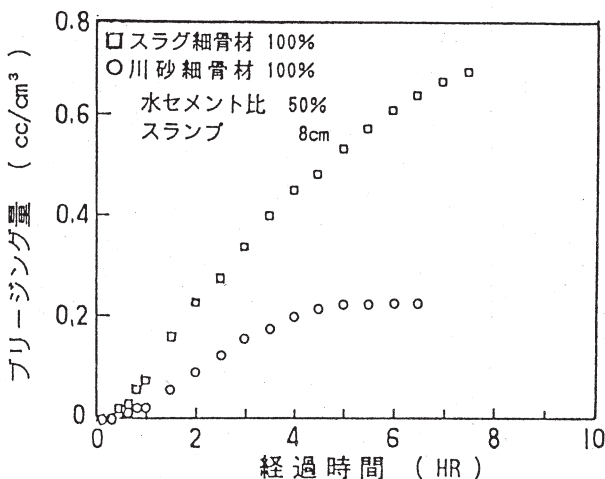


図11 フレッシュコンクリートの経過時間とブリージング率の関係

硬化コンクリートの試験結果を図12、13に示す。水セメント比による強度において、スラグコンクリートは、川砂コンクリートよりも水セメント比が小さいところでは大きくなっている。これは、高炉スラグ細骨材でも同様の結果であり<sup>2)</sup>、骨材の保水性の違い等によるものと考えられる。材令による強度において、スラグコンクリートは、川砂コンクリート相当の強度増大であり、高炉スラグのような水硬性による長期強度の増大は期待できないようである。

したがって、コンクリート細骨材としてのスラグは、施工上問題とならない範囲で、小さい水セメント比、小さいスランブのコンクリートとすれば、天然細骨材相当のコンクリート品質が期待できる。大きい水セメント比、大きいスランブのコンクリートが要求される際には、水熱処理で表面の改質を行ったスラグ細骨材の適用が考えられる。

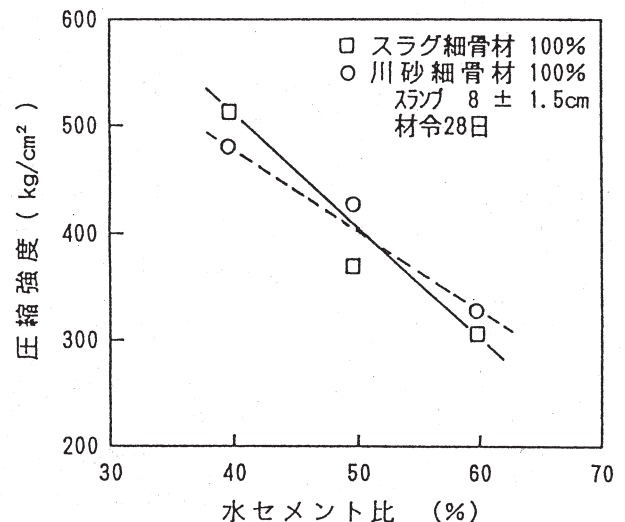


図12 水セメント比とコンクリート強度の関係

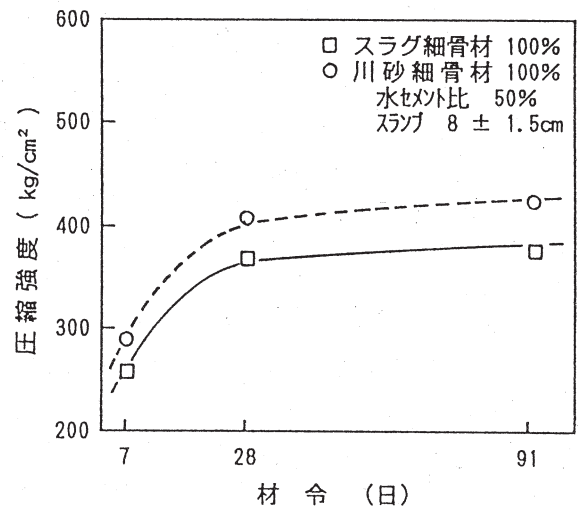


図13 材令とコンクリート強度の関係

以上より、スラグ細骨材は土木建築資材としての利用が期待でき、今後、試験施工、耐久性試験等により、品質をより明確化していきたいと考えている。

8 建設汚泥溶融技術の経済性

8. 1 溶融処理システムフロー

熱効率の高い溶融プラントとするため、次の方策を講じた。

- ・溶融炉排ガスを流動床炉に導き汚泥を800℃に予熱
- ・流動床炉排ガスを600℃としを加熱して気流乾燥用ガスとして使用
- ・流動床炉排ガスで空気を加熱して300℃とし、溶融炉供給空気として利用

これらを取り入れた溶融処理システムフローを図14に示す。このシステムフローにて、プラント規模が200t-汚泥/日~1000t-汚泥/日において、可燃物のない含水率60%の建設汚泥1tに対して灯油70~65kgを用いることで90~450t/日のスラグ細骨材を得ることができる。

表4 建設汚泥の溶融処理費の試算結果

項目	前提条件	費用 (円/t汚泥)	
		200t/D	1000t/D
設備償却費	建設費は基礎杭打ち工事、土木建設工事、プラント工事、試運転調整の積算とする。プラントの耐用年数は10年とする。償却は定額法で行う。	4,410	2,860
運転経費	灯油: 30円/ℓ 水: 200円/m <sup>3</sup> 汚泥: 0円/m <sup>3</sup> 添加材: 5000円/t 運転要員: 200t/D 15人工 1000t/D 21人工	5,130	3,850
定期点検補修費	建設費の0.5%	270	170
溶融処理費		9,810	6,880
		12,740円/m <sup>3</sup>	8,940円/m <sup>3</sup>

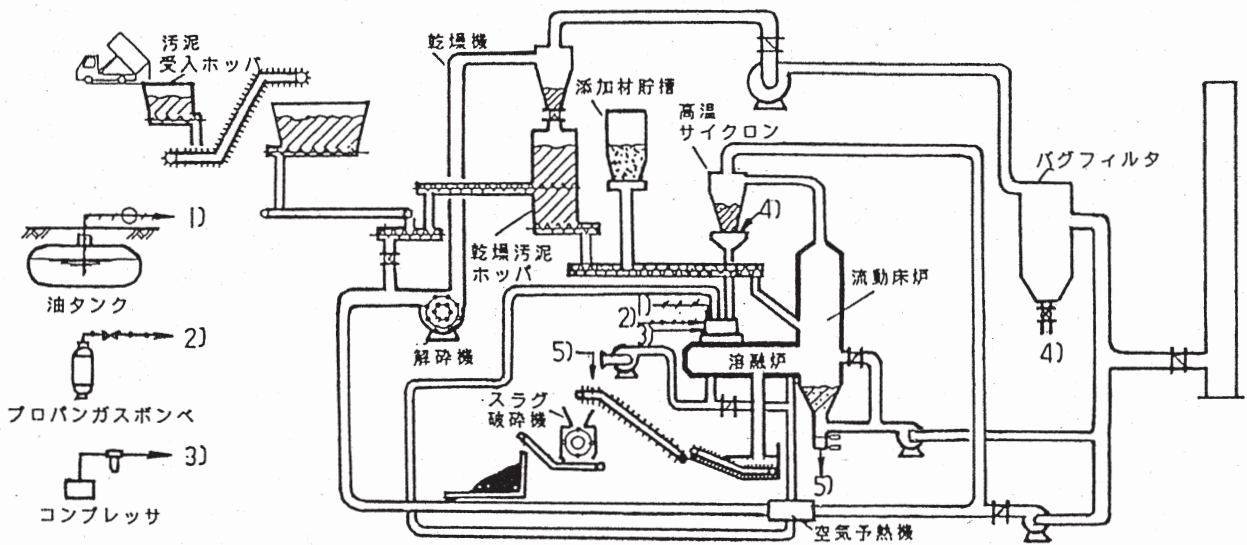


図14 建設汚泥の溶融処理システムフロー

8. 2 経済性の検討

プラント規模として単一建設工事の発生量に相当する200t-汚泥/日と広域地区の建設工事の発生量に相当する1000t-汚泥/日で経済性の検討を行った。溶融処理費の試算結果を表4に示す。処理規模が大きくなるとかなりのコスト低減を図ることができる。現行の廃棄処分費は、首都圏において自治体により異なり、中間処理~最終処分地までの費用が6500~10000円/m<sup>3</sup>(1990.12月)であり、この費用が溶融処理技術の経済性検討のためのベースとなる。一方、スラグ細骨材は首都圏産地の砂の工場渡し価格2000円/m<sup>3</sup>(1990.12月)と同じ価格で販売できるとし、溶融処理費に汚泥基準の価格に換算した600円/m<sup>3</sup>を加味したものを廃棄処分費と比較を行うと図15に示す結果となる。これより、200t/日のプラントでの溶融処理費は12100円/m<sup>3</sup>、1000t/日のプラントでは8300円/m<sup>3</sup>となる。溶融処理技術の経済的なメリットが生じるのは、1990.12月基準では、プラント規模を大きくする必要があるが、最近の廃棄処分費、骨材

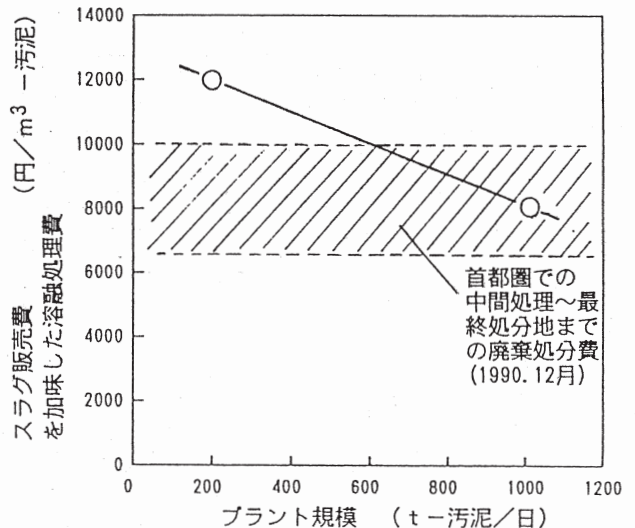


図15 溶融処理技術の経済性検討結果

価格等の上昇率を考えると数年先には処理規模が比較的小さいプラントにおいても可能と考えられる。

## 9 まとめ

建設汚泥を溶融処理し、水冷にて得られたスラグ細骨材の土木建築資材への適用について検討を行い、次のことが判明した。

- (1) 建設汚泥は含水率が高いため、溶融炉の排ガス等の有する熱を効率よく利用することで、乾燥処理に必要な燃料量に若干の燃料を加えることにより、溶融処理ができる。
- (2) スラグ細骨材は、天然細骨材と比較して性状が異なるが、スラグ細骨材性状に応じた施工、配合を行うことにより、土木建築資材への適用が期待できる。
- (3) スラグ細骨材の表面を高pHの熱水中で水熱処理を行うことにより、天然細骨材を用いたコンクリート相当の品質となる。
- (4) 溶融処理の経済性において、現時点では、プラント規模を大きくしないと廃棄処分よりもコスト高となるが、最近の廃棄処分費、細骨材費等の上昇を考えると、近い将来、比較的小規模のプラントでも成り立つと考えられ、リーズナブルな位置にある。

なお、本研究は、鹿島建設㈱の田中益弘氏（技術研究所 主幹研究員）、㈱竹中工務店の斉藤聡（技術研究所 主任研究員）及び川崎重工業㈱の永原克二氏（エネルギープラント事業部 課長）との共同のもとで実施した。

### [参考文献]

- 1) 渡邊泰也：建設廃棄物への取り組み クリーンジャパン、Vol. 88  
67(1991)
- 2) 土木学会：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針（案）(1983)