

都市型廃棄物溶融材のコンクリート骨材 へのリサイクル技術

佐々木 肇¹ 喜多達夫²

¹ 正会員（株）間組技術研究所技術研究部先端研究室（〒305-0822 茨城県つくば市荻間515-1）

² フェロー会員（株）間組技術研究所技術研究部（〒305-0822 茨城県つくば市荻間515-1）

都市ごみや下水汚泥などの焼却灰溶融物をコンクリート細骨材として使用する場合の技術的課題として、コンクリートの初期性状、強度、耐久性の低下、一部の溶融スラグにみられる膨張などがある。その解決方法について検討を行った結果、下水汚泥焼却灰の溶融パウダーを溶融スラグの一部に置換する方法や、膨張抑制剤の使用により、解決できることが判明した。また、徐冷溶融スラグを粗骨材に使用したコンクリートについて検討を行い、実構造物への適用試験を行った結果、天然骨材とほぼ同等のコンクリートが得られることを確認した。

キーワード：ごみ焼却灰，下水汚泥，溶融スラグ，有効利用，骨材

1. はじめに

近年、廃棄物の最終処分場の確保の困難さから、処分場の延命化が大きな課題となっている。このため、ごみ焼却灰を溶融処理する自治体が増加しつつある。さらに資源循環型社会の構築の機運の高まりなどを背景にして、溶融処理により生成したスラグ（以下、溶融スラグ）の有効利用方法の確立が大きな課題とされている。建設分野は、大量の副産物を有効利用することが可能であるため、溶融スラグの有効利用の受け入れ先として期待されている。溶融スラグの有効利用用途としては、埋戻し材などの土質材料のほか、アスファルト骨材、コンクリート骨材、コンクリート二次製品用骨材などの岩石資源としても使用されつつある。

現在産出されている溶融スラグは、ほとんどが急冷（水砕）スラグである。溶融急冷スラグにはその製法上、砂状のものしか得られないため、埋戻し材や盛り土材等の土質材料として利用されている。また、一部ではコンクリートの細骨材への適用も行われているが、針状粒子を多く含み、粒子内部に微細なひび割れがあるため、コンクリート用細骨材として使用する場合に以下の問題が発生することが報告

されている¹⁾。

- 1) コンシステンシーを確保するのに必要な単位水量が増加する。
- 2) 硬化コンクリートの強度が低下する。
- 3) 耐久性、特に耐凍結融解性が低下する。
- 4) 金属類特に金属アルミニウムを含有している場合、コンクリートが膨張する。

このため、天然骨材との混合使用と溶融スラグの磨砕加工などによる粒子形状の改善が必要になることが、コスト増加や使用量の低下、分別の困難さなどの問題が生じる。また、金属アルミニウムによる膨張に対しては、含有量の制限が提案されている。

また、溶融徐冷スラグは、大きな岩石状の塊が得られるため、これを破砕処理することにより路盤材やコンクリート粗・細骨材など幅広い用途が期待でき、路盤材として試験施工が行われている。

一方、下水道普及率の増加にともない下水汚泥発生量も年々増加しており、1995年度には、1,691千t・DSであり、その67%が埋立処分されているが、埋立処分地が不足してきている自治体も発生しているのが現状である。このため、下水汚泥の処分方法として、溶融処理による減容化処理技術が注目されつ

つある。

本報告は、ごみや下水汚泥など都市殻廃棄物溶融物をコンクリート骨材として有効利用する場合の問題点の把握とその対策について検討した結果を取りまとめるとともに、実構造物への適用を行った試験について報告する。

2. 溶融急冷スラグの検討

2.1 溶融パウダーによるコンクリート性状改善

2.1.1 概要

溶融急冷スラグには、前記のように、コンシステンシー・強度・耐久性の低下の問題がある。一方、下水汚泥焼却灰を図 - 1 に示すようなフレイム溶融炉で球状化微粉末にする方法が、東

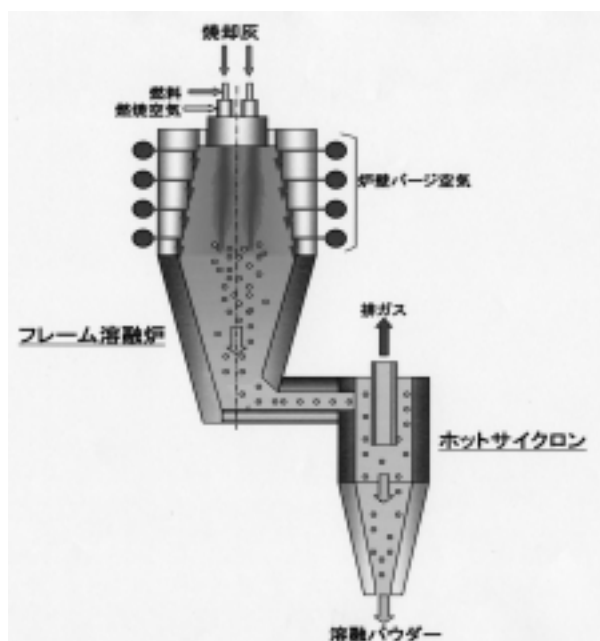


図 - 1 フレイム溶融炉の概要

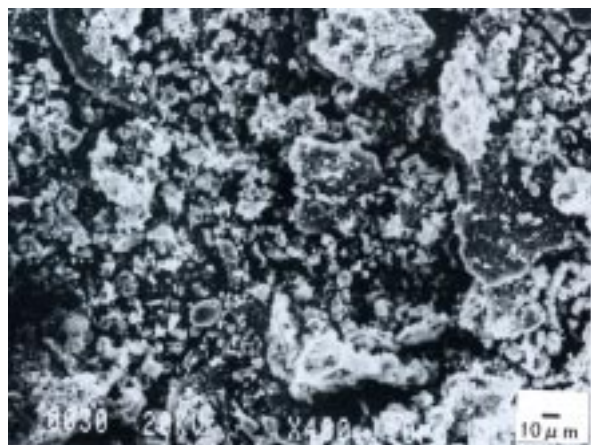


写真 - 1 焼却灰の走査型電子顕微鏡写真

京都下水道局と中外炉工業(株)との共同研究により開発されている²⁾。この方法により製造される下水汚泥焼却灰溶融パウダー(以下、溶融パウダー)を、溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートに生じる問題解決のために溶融パウダーを添加することを検討した。

2.1.2 試験方法

使用材料の一覧を表 - 1 に示す。

また、使用した溶融スラグを表 - 2 に示す。溶融スラグは、磨砕などの粒子形状の加工や、金属類の除去などの二次加工は行っていないもの

表 - 1 使用材料

材 料	仕 様
水	つくば市水道水
セメント	普通ポルトランドセメント、密度：3.16g / cm ³
細骨材	大井川産川砂、 密度：2.62g / cm ³ 、吸水率：1.07%
混和材	下水汚泥焼却灰溶融パウダー 密度：2.55g / cm ³ 、 平均粒径：20 μm
粗骨材	秩父産砕石(硬質砂岩) 密度：2.69g / cm ³ 、吸水率：0.79%
混和剤	A E 減水剤(リグニンスルホン酸系) 空気量調整剤(アルキルアルコール系)

表 - 2 試験に用いた溶融スラグ

スラグの種類	溶融方式
T	交流アーク式
S	交流アーク式
C	プラズマ式
K	コークスベッド式

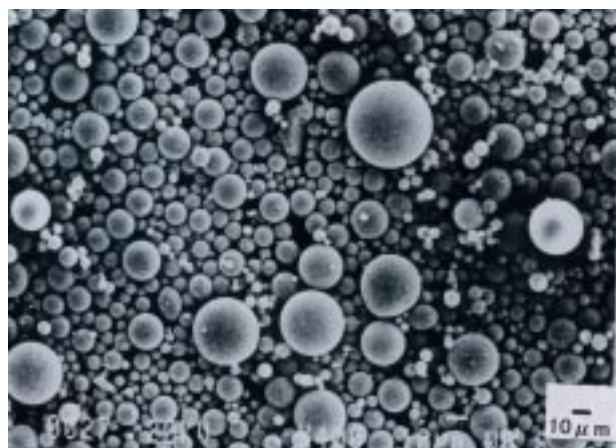


写真 - 2 溶融パウダーの走査型電子顕微鏡写真

を用いた。

溶融パウダーの原料となった脱水汚泥の流動焼却炉灰と、これをフレイム溶融炉により球状化させた溶融パウダーの電子顕微鏡写真を写真 - 1 および写真 - 2 に示す。

溶融スラグの骨材試験試験は、JISの試験方法に準じて、ふるい分け試験、密度・吸水率試験、実積率試験および化学成分分析を行った。

また、コンクリートの配合は細骨材の全量を溶融スラグに置換し、コンクリートのスランブの変化を確認し供試体を作成した。さらに、溶融スラグの一部を溶融パウダーに置換した。コンクリートのスランブの変化を確認し、スランブの範囲が、目標範囲に入った配合について供試体を作製した。供試体の大きさは、圧縮強度試験用はφ10×20cm、凍結融解試験用は10×10×40cmとし、20 一定の湿潤養生1日後脱型、所定の材齢に達するまで20 一定の標準水中養生を行い、圧縮強度を測定した。耐久性の確認試験として土木学会規準（JSCE-G501）に準じた凍結融解試験を行った。

2.1.3 試験結果

溶融スラグの骨材試験結果を表 - 3 に示す。

電気式溶融スラグに分類されるT、S、Cスラグは、色調は黒色でその表面はガラス質であった。また、川砂と比較して密度は大きく吸水率は小さくなっていた。化学成分は、ケイ素、アルミニウム、カルシウムが多く、またチタンや鉄などの金属類も多く含まれていた。一方、燃料式溶融スラグに分類されるKスラグでは、色調がやや白色であり、表面はガラス質の部分が少なかった。

表 - 3 溶融スラグの骨材試験結果

スラグの種類 試験項目	T	S	C	K	大井川 産川砂
絶乾密度 (g / cm ³)	2.89	2.78	2.72	2.65	2.60
表乾密度 (g / cm ³)	2.92	2.79	2.74	2.58	2.62
吸水率(%)	0.95	0.20	0.78	1.30	1.05
単位容積質量 (kg / ℓ)	1.72	1.59	1.54	1.40	1.71
実積率(%)	59.5	57.3	56.5	52.9	66.0

表 - 4 供試体を作製した配合

配合名	水セメント 比 (%)	目標 スランブ (cm)	スラグ 種類	バグ 置換率 (%)	単位量(g / m ³)					実測 スランブ (cm)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	バグ	
川砂 45-8			—	—	163	362	781	1020	—	1.448 7.9
T 45-8- P 0	45	8	T	0	163	362	870	1021	—	1.448 3.7
T 45-8- P 10				10	163	362	783	1021	87	1.448 7.4
川砂 55-8			—	—	160	291	874	1021	—	0.873 8.0
T 55-8- P 0		8	T	0	160	291	941	1022	—	0.873 1.3
T 55-8- P 18				18	160	291	772	1022	169	0.873 7.5
S 55-8- P 0	55	8	S	0	160	291	942	975	—	0.873 0.4
S 55-8- P 10				10	160	291	895	975	47	0.873 7.2
C 55-8- P 0		8	C	0	160	291	925	975	—	0.873 0.4
C 55-8- P 5				5	160	291	897	975	28	0.873 8.5
K 55-8- P 0		8	K	0	160	291	904	992	—	0.873 0.2
K 55-8- P 20				20	160	291	817	992	90	0.873 8.2
川砂 55-18			—	—	175	318	819	987	—	1.272 17.0
T 55-18- P 0		18	T	0	175	318	913	986	—	1.272 1.8
T 55-18- P 20				20	175	318	730	986	18	1.272 16.0
川砂 65-8			—	—	170	262	883	982	—	1.048 8.6
T 65-8- P 0	65	8	T	0	170	262	984	982	—	1.048 0.3
T 65-8- P 10				10	170	262	886	982	98	1.048 9.5

単位：N / mm²

また、密度は川砂とほぼ同等であり、吸水率は電気式溶融スラグと比較してやや大きかった。化学成分では、電気式溶融スラグと比較してカルシウムの含有量が大きく、アルミニウム、チタン、鉄などの金属類の含有は小さくなっていた。これは、塩基度調整のため石灰石を添加することによりカルシウムの含有量が高くなっていると考えられる。いずれの溶融スラグも実積率は、川砂よりも小さくなっていた。これは、急冷スラグの場合、溶融状態のスラグが急激に冷却されるため、針状の粒子が多く含まれており、またその粒形は、角張っているためと考えられる。

試験を行ったコンクリートの配合を表 - 4 に示す。細骨材を無加工の溶融スラグに置換した場合のスランブは、目標に対して著しく小さくなる。これは、溶融スラグが針状粒子を多く含んでおり、粒子表面で練混ぜ水の一部と物理的吸着を起こし、見掛け上の練混ぜ水の単位量が少なくなるためと考えられる。しかし、溶融スラグの一部を溶融パウダーに置換することにより流動性を改善できた。この置換率は溶融スラグの種類によって異なるが最適の値があり、今回の試験に用いた材料では、溶融スラグの10～20%であった。これは、溶融パウダーの置換率が小さい場合、溶融パウダーの持つベアリング効果が

スランブの改善まで達せず、大きい場合、粉体間隙に練混ぜ水が吸着し、スランブが小さくなるためと考えられる。

各配合の圧縮強度試験結果を表 - 5 に示す。細骨材を溶融スラグに置換した場合、初期材齢

表 - 5 各配合の圧縮強度試験結果

配合名	材 齢		
	7 日	28 日	91 日
川砂 45-8	44.3	55.1	60.9
T 45-8- P 0	36.2	39.7	49.5
T 45-8- P 10	37.2	42.1	53.9
川砂 55-8	34.6	45.5	52.5
T 55-8- P 0	27.4	31.2	43.6
T 55-8- P 18	24.9	33.0	44.4
S 55-8- P 0	21.6	27.0	34.8
S 55-8- P 10	28.9	33.1	43.7
C 55-8- P 0	18.3	23.1	29.1
C 55-8- P 5	20.5	25.1	35.7
K 55-8- P 0	22.1	18.6	35.0
K 55-8- P 20	28.5	40.3	53.2
川砂 55-18	34.0	43.8	50.4
T 55-18- P 0	28.8	32.5	41.4
T 55-18- P 20	32.6	39.8	48.7
川砂 65-8	25.2	35.5	38.7
T 65-8- P 0	20.4	23.6	31.1
T 65-8- P 10	24.6	34.3	41.8

2

単位：N /

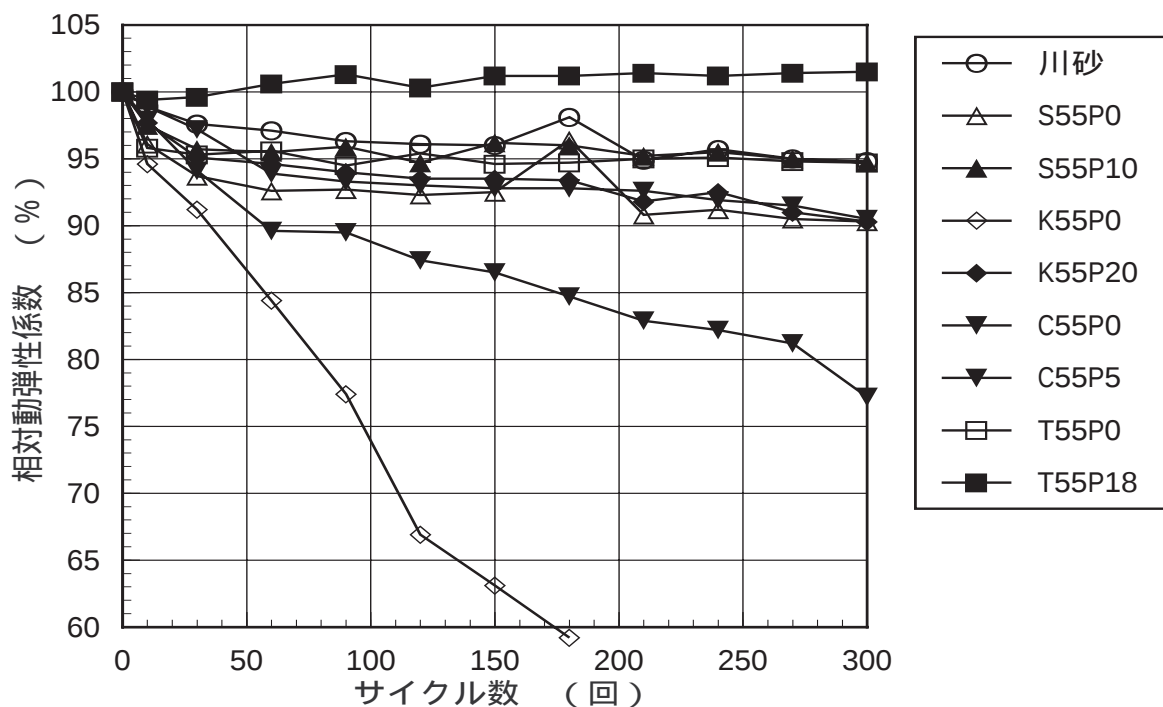


図 - 2 凍結融解試験結果

の圧縮強度は低下するが、溶融スラグの一部を溶融パウダーに置換することにより改善することが可能であり、配合によっては長期材齢の圧縮強度が、川砂を用いたコンクリートよりも増加することも判明した。これは、北辻らが報告しているように溶融スラグは潜在水硬性を持つが³⁾溶融パウダーによりセメントが分散されたため、その効果が顕著に現れたと推定される。

図 - 2 に各配合の試験体の凍結融解試験結果を示す。溶融スラグを細骨材の全量使用したコンクリートでは、凍結融解のサイクル数の増加にともない相対動弾性係数が低下し、スラグの種類によってはサイクル途中で相対動弾性係数が60%以下になるものもみられたが、溶融パウダーを添加したコンクリートでは、スラグの種類に係わらず300サイクル終了後の相対動弾性係数は90%以上あり大きな変化は見られなかった。

以上のことから、溶融パウダーを添加することにより、耐久性を向上させる効果も期待できると考えられる。

2.2 膨張抑制剤の効果確認

2.2.1 概要

一部の急冷スラグでは、金属アルミニウムの含有のためコンクリートのアルカリ環境下では水素ガスを発生し膨張性を有することがある。このため、膨張抑制剤を開発しその効果を確認した。

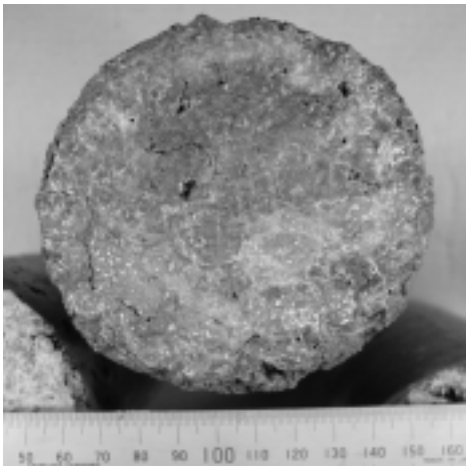
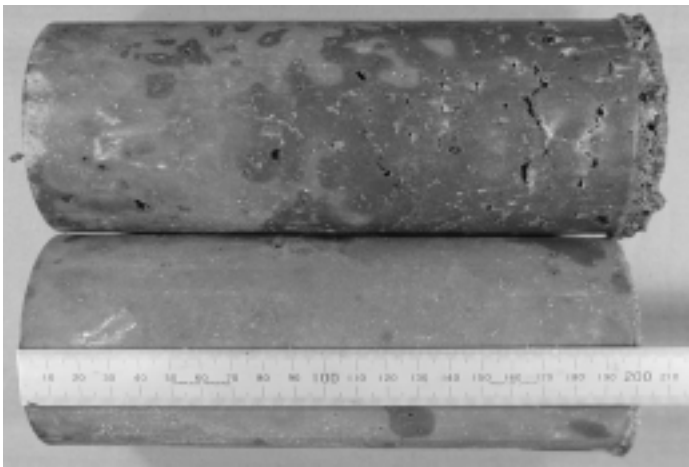
2.2.2 試験方法

試験に用いた材料は表 - 1 と同じであるが、膨張性溶融スラグは、粒度調整、金属除去などの二次加工は行っていないバーナー式表面溶融スラグを用いた。膨張抑制剤の添加量は事前の試験結果から、溶融スラグ重量の0.5%とした。

試験を行ったコンクリートの配合を表 - 6 に示す。天然骨材（川砂）を用いた配合を基本配合とした（配合名：天然骨材）。この配合に対して細骨材の全量を溶融スラグに置換えた配合（配合名：溶融スラグ）、さらに、膨張抑制剤を溶融スラグ重量の0.5%添加した配合（配合名：抑制剤使用）について膨張抑制効果の確認を行った。

表 - 6 試験を行った配合の一覧

水セメント比 (%)	スラブの範囲 (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg / m ³)						備考
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	膨張抑制剤	
55	8 ± 2	4.5 ± 1	46	163	296	842	1014	1.18	-	天然骨材
55	8 ± 2	4.5 ± 1	46	163	296	874	1014	1.18	-	膨張性溶融スラグ
55	8 ± 2	4.5 ± 1	46	1096		874	1014	1.18	4.37	膨張抑制剤使用



上：溶融スラグにより膨張した供試体
下：膨張抑制剤を添加した供試体

水セメント比：55%、目標スラブ：8 ± 2 cm

写真 - 3 膨張溶融スラグによるコンクリートの膨張と抑制剤の効果

また、これらの3種類の配合について供試体を作製し、20 一定の湿潤養生1日後、膨張量を測定し、脱型後、所定の材齢に達するまで20 一定の標準水中養生を行い、圧縮強度を測定した。圧縮強度の測定材齢は、7日、28日および91日とした。なお、圧縮強度測定は、直径10cm×高さ20cmの円柱供試体を用いて行った。

膨張率は、打設直後に表面をならした供試体を1日湿潤養生し、最高部の高さをノギスを用いて測定した。

2.2.3 試験結果

膨張性溶融スラグを用いたコンクリート供試体の側面および上面部には、写真-3に示すように空隙やひび割れが多数見られた。

表-7に膨張量と膨張率の測定結果と圧縮強度の一覧を示す。膨張性溶融スラグを用いたコンクリートでは、約10mm近く膨張していたが、膨張抑制剤を添加することにより、ほとんど問題のない程度に膨張を抑制することが可能となり、この混和剤の効果が確認された。

また、圧縮強度でも、膨張性溶融スラグを用いたコンクリートでは、コンクリート内部の空隙やひび割れの存在による強度の著しい低下が見られたのに対して、膨張抑制剤を添加したコンクリートでは、膨張しないことが確認されている他の溶融スラグ（非膨張溶融スラグ）とほぼ同等の圧縮強度を得ることができた。

このことから、金属アルミニウムを含有する膨張性溶融スラグであっても、膨張抑制剤の使用によりアルミニウムの腐食、水素ガス発生を抑制できるため、通常の溶融スラグと同等の使用が可能と考えられる。

3. 溶融徐冷スラグの検討

3.1 概要

現在産出している溶融スラグは、ほとんどが急冷スラグである。しかし、徐冷スラグにすることで粗骨材、路盤材などの岩石材料として利用できるため、溶融スラグの用途拡大が期待できる。

このため、溶融徐冷スラグのコンクリート粗骨材としての適用性を検討した。

3.2 試験方法

試験に用いた材料の一覧を表-8に示す。今回試験に用いた溶融徐冷スラグを写真-4に示す。

また、コンクリートの配合を表-9に示す。溶融スラグを用いた配合は、基本配合に対して粗骨材の全量を溶融スラグに置き換えて、スランプが同等になるように決定した。なお、粗骨材の最大粒径は40mmとした。コンクリート試験は、フレッシュ性状確認試験として、スランプ試験と空気量の測定を行った。また、硬化コンクリート試験と

表-8 試験に用いた材料

材 料	仕 様
セメント	高炉セメントB種 密度：3.04 g / cm ³
細骨材	栃木市尻内産山砂 密度：2.61 g / cm ³ 吸水率：1.45%
粗骨材	栃木市尻内産砂利 密度：2.63 g / cm ³ 吸水率：0.53%
溶融スラグ	溶融徐冷スラグ 密度：2.83 g / cm ³ 吸水率：0.79%
混和剤	A E 減水剤 ポリオキシエチレン系および 特殊アニオン界面活性剤

表-7 膨張量、膨張率と圧縮強度の一覧

配合名	膨張量 (mm)	膨張率 (%)	圧縮強度(N / mm ²)			備 考
			材齢7日	材齢28日	材齢91日	
天然骨材	0.4	0.2	34.1	40.1	43.5	
膨張性溶融スラグ	10.5	5.2	13.9	18.4	26.9	
抑制剤使用	1.4	0.7	27.6	33.6	45.9	膨張性溶融スラグの0.5%
非膨張性溶融スラグ	—	—	27.4	31.2	34.1	



写真 - 4 徐冷スラグの形状

しては、圧縮強度試験を行った。

3.3 試験結果

熔融徐冷スラグを粗骨材に用いたコンクリートの圧縮強度は、表 - 10 に示すように天然骨材を使用のものとはほぼ同等の強度であり、実用上問題はないと考えられた。

このため、実構造物の施工試験を行った。施工試験を行った実構造物の概要を図 - 3 に示す。この構造物は、一般道から国道へのオンランプと側

道の境界に設置される小型重力式擁壁の一部である。擁壁の下には、基礎材が設置されるが、この基礎材にも熔融スラグから作製した R C - 40 相当の砕石を使用した。

擁壁コンクリートの打込みは、ポンプ車を用いて行った。打込みに使用したコンクリートのスランプロスは、大型供試体作製時と同様に見られなかった(プラント出荷時時:7.0cm に対して現場荷降し時:8.0cm)。コンクリートの施工性は、天然砕石骨材使用のコンクリートとほぼ同等であり、特に問題は生じなかったが、打込み終了後のブリーディングによる浮き水の発生がやや見られた。基礎材の施工状況、コンクリートの打込み状況および完成した擁壁の写真を写真 - 5, 6 に示す。脱型後のコンクリートの仕上がりは、大型供試体の製造で確認したように、天然骨材使用のコンク

表 - 10 コンクリートの圧縮強度の一覧

配合名	材 齢		
	7 日	28 日	91 日
基本配合	1 5 . 4	2 3 . 3	2 7 . 9
熔融スラグ	1 3 . 6	2 1 . 7	2 6 . 7

単位: N / mm²

表 - 9 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 (%)	スランプリート (cm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg / m ³)						備考
				水	セメント	細骨材	粗骨材	熔融スラグ	混和剤	
基本配合	63.5	8 ± 2	44.1	1 5 3	2 4 1	8 3 3	1 0 5 8	—	0.108	基本配合
熔融スラグ	63.5	8 ± 2	44.1	1 6 0	2 5 2	8 2 0	—	1 1 2 6	0.113	スラグ使用

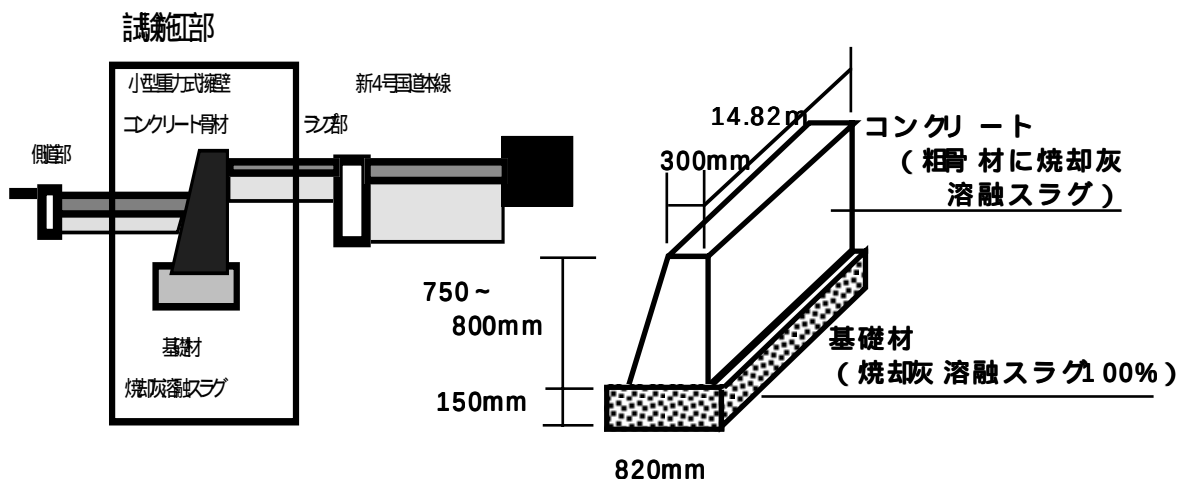


図 - 3 施工試験を行った実構造物の概要



写真 - 5 コンクリートの打込み状況



写真 - 6 完成した擁壁

リートとほぼ同等であり、良好な結果が得られた。
4. まとめ

ごみ焼却灰や下水汚泥など都市型廃棄物を有効利用するために、溶融スラグ化した場合の技術的課題とその対策について検討してきた結果、溶融急冷スラグに対しては、下水汚泥焼却灰溶融パウダーの併用や、膨張抑制剤の使用により有効利用が可能であることが明らかとなった。また、溶融スラグを徐冷スラグとすることで用途拡大が期待できる。

資源循環型社会の形成のためには、一つの自治体だけでは、製造したスラグの利用に関して困難な問題もある。しかし、図 - 4 に示すように隣接した自治体が協力することにより問題の解決も可能と思われる。今後は、安全性の確認のため溶出試験などを実施し、実用化に向けた検討を進めて行きたい。

【謝辞】 本実験を実施するにあたり、溶融パウダー

は中外炉工業(株)、溶融スラグは自治体、新明和工業(株)よりご提供を頂きました。また、施工試験では国土交通省宇都宮国道事務所の御指導を頂きました。関係者の皆様方に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 北辻政文, 藤居宏一: ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質, 農業土木学会論文集, 第 200 号, pp.223 ~ 231, 1999 年
- 2) 寺田武生, 清水洋治, 野々廣正夫, 寺谷俊明, 伊藤新治: 下水汚泥焼却灰球状化法による溶融パウダー製造に関する研究, 第35回下水道研究発表会講演集, pp.933 ~ 995, 1998 年
- 3) 北辻政文, 富田道久, 藤原幸彦, 藤居宏一: ごみ溶融スラグ微粉末のセメント代替材料としての利用の可能性, 農業土木学会論文集, 第 195 号, pp.203 ~ 204, 1998 年

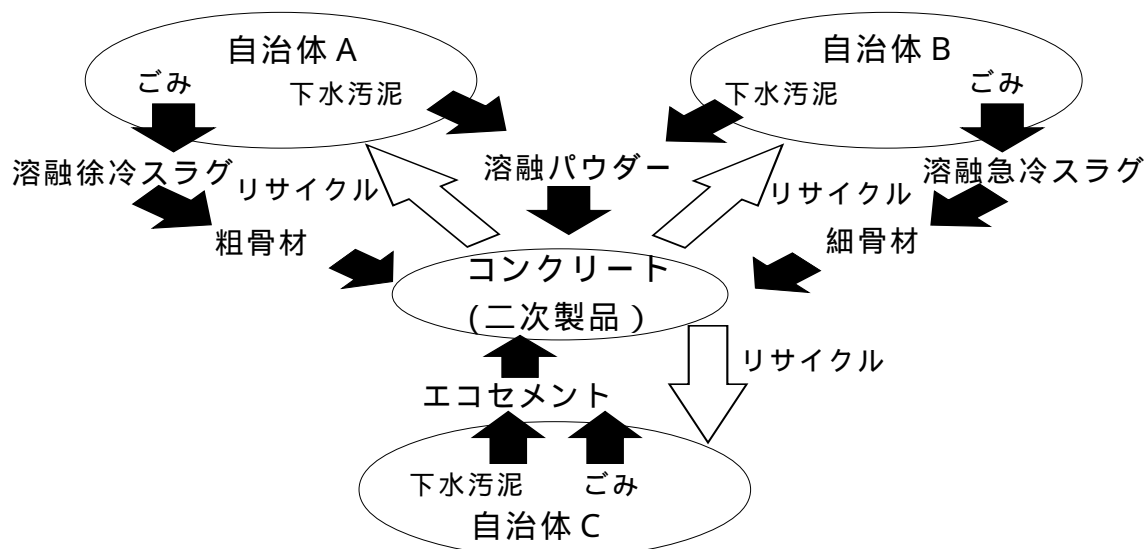


図 - 4 広域協力型資源循環社会のイメージ図