

論文 都市型廃棄物溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートの特性

佐々木 肇^{*1}・寺谷俊明^{*2}・榎原純一^{*3}・喜多達夫^{*4}

要旨: ごみ焼却灰溶融急冷スラグをコンクリート用細骨材として使用した場合、フレッシュ性状においては、必要なワーカビリティが確保できず、硬化後の性状としては、強度の低下、耐凍結融解性の低下などの問題が生じる。このため、天然骨材との混合使用が一般的である。

本研究においては、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ことにより、これらの問題を解決した。

キーワード: ごみ焼却灰、下水汚泥、溶融スラグ、溶融パウダー、有効利用、細骨材

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。

しかし、現在産出される溶融スラグは、ほとんどが急冷（水碎）スラグであり、針状粒子が多く含まれているため、コンクリート用細骨材として使用する場合には、コンシスティンシーを確保するのに必要な単位水量が増加する、硬化コンクリートの強度が低下する、耐久性、特に耐凍結融解性が低下するなどの問題がある¹⁾。このため、溶融スラグの磨碎などによる粒子形状の改善が必要になることが報告されている²⁾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。

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。下水汚泥焼却灰の溶融処理方法の一つに図-1に示すようなフレーム溶融炉で球状化微粉末にする方法が、東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³⁾。この方法により生成される下水汚泥焼

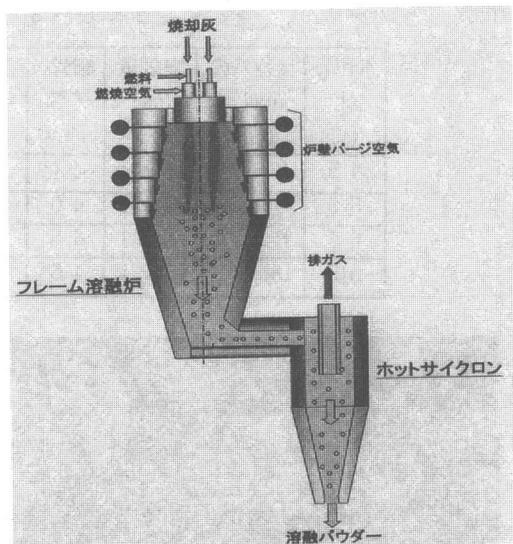


図-1 フレーム溶融炉の概要

*1 (株)間組技術研究所技術研究部先端研究室主任研究員

*2 中外炉工業（株）上下水道事業部技術部設計課課長

*3 中外炉工業（株）上下水道事業部営業部次長

*4 (株)間組技術研究所技術研究部長

却灰溶融パウダー（以下、溶融パウダー）は、建設分野での有効利用が期待されている⁴⁾。

筆者らは、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てきた⁵⁾。

本研究は、未加工の溶融スラグと溶融パウダーを細骨材として使用したコンクリートの特性について検討した結果を取りまとめたものである。

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、磨碎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、これをフレー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。

溶融スラグの性状確認試験は、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

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% ごみ焼却灰溶融スラグ（表-2）
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	秩父産碎石（硬質砂岩） 密度：2.69g/cm ³ 、吸水率：0.79%
混和剤	AE減水剤（リグニンスルホン酸系） 空気量調整剤（アルカリカルボン酸系）

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

表-3 基本配合

水セメント比（%）	スランプの範囲（cm）	空気量（%）	細骨材率（%）	単位量（kg/m ³ ）				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
4.5	8 ± 2	4.5 ± 1	4.4	163	362	781	1020	1.448
5.5	8 ± 2	4.5 ± 1	4.6	160	291	874	1021	0.873
6.5	8 ± 2	4.5 ± 1	4.8	170	262	883	982	1.048
5.5	18 ± 2	4.5 ± 1	4.6	175	318	819	987	1.272

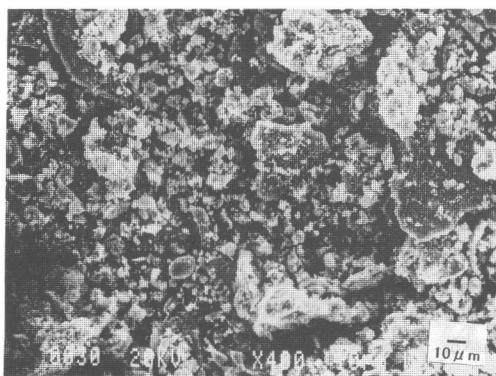


写真-1 焼却灰の走査型電子顕微鏡写真

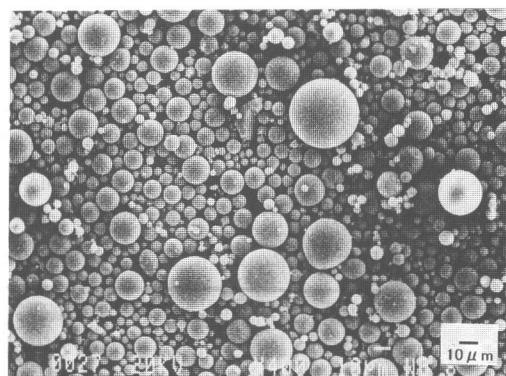


写真-2 溶融パウダーの走査型電子顕微鏡写真

分分析を行った。骨材試験方法は、JISの試験方法に準じて行った。

また、試験を行った基本配合を表-3に示す。

この配合に対して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プの変化を確認した。さらに、溶融スラグの一部を溶融パウダーに置換し、コンクリートのスランプの変化を確認した。スランプの範囲が、目標範囲に入った配合について供試体を作製し、20℃一定の湿潤養生1日後脱型し、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。

また耐久性の確認試験として凍結融解試験と暴露試験を行った。凍結融解試験方法は、土木学会規準(JSCE-G501)に準じて行った。暴露試験は、茨城県つくば市にて、定期的に動弾性係数を測定中である。

3. 試験結果と考察

3.1 溶融スラグの性状

溶融スラグの骨材試験結果を表-4に、化学分析結果を表-5に示す。

電気式溶融スラグに分類されるT, S, Cスラグと燃料式溶融スラグに分類されるKスラ

グとでは、性状がやや異なっていた。すなわち、電気式溶融スラグは、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。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、燃料式溶融スラグの場合、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たため、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。

表-4 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	2.68	2.62
吸水率 (%)	0.95	0.20	0.78	1.30	1.05
単位容積質量 (kg/ℓ)	1.722	1.589	1.538	1.402	1.714
実積率 (%)	59.5	57.3	56.5	52.9	66.02

表-5 溶融スラグの化学分析結果

試験項目	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
T	5.12	2.64	20.57	39.74	0.39	0.66	1.41	22.78	1.51	3.94
S	2.84	3.60	18.60	40.78	1.68	0.20	1.12	21.54	2.24	6.71
C	3.41	3.67	19.42	40.74	1.34	0.30	1.46	23.51	1.89	3.76
K	2.49	2.07	14.75	36.19	0.40	0.86	0.45	38.40	0.96	2.78

単位: %

3.2 溶融スラグを用いたコンクリートのフレッシュ性状

細骨材を無加工の溶融スラグに置換した場合

のスランプは、目標に対して著しく小さくなる。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る。

表-6 各配合における溶融パウダーの置換率とスランプ

水セメント比(%)	スラグの種類	スランプ(cm)							
		川砂	溶融スラグ	溶融パウダーの置換率(%)					
				3	5	10	15	18	20
45	—	7.9	—	—	—	—	—	—	—
	T	—	3.7	—	4.8	7.4	—	—	7.0
55	—	7.0	—	—	—	—	—	—	—
	T	—	1.3	—	—	3.7	—	6.1	5.4
	—	17.0	—	—	—	—	—	—	—
	T	—	1.8	—	—	14.6	—	—	16.0
	S	—	0.4	—	2.1	7.2	9.2	—	9.5
	C	—	0.4	3.8	8.5	13.8	—	—	—
65	K	—	0.2	—	—	2.5	—	—	8.2
	T	8.6	—	—	—	—	—	—	—

表-7 供試体を作製した配合

配合名	水セメント比(%)	スランプ(cm)	スラグ種類	パウダー置換率(%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	パウダー	AE剤
川砂45-8	45	8	T	—	163	362	781	1020	—	1.448
T 45-8-P0				0	163	362	870	1021	—	1.448
T 45-8-P10				10	163	362	783	1021	87	1.448
川砂55-8	55	8	T	—	160	291	874	1021	—	0.873
T 55-8-P0				0	160	291	941	1022	—	0.873
T 55-8-P18				18	160	291	772	1022	169	0.873
S 55-8-P0				0	160	291	942	975	—	0.873
S 55-8-P10				10	160	291	895	975	47	0.873
C 55-8-P0				0	160	291	925	975	—	0.873
C 55-8-P5				5	160	291	897	975	28	0.873
K 55-8-P0				0	160	291	904	992	—	0.873
K 55-8-P20				20	160	291	817	992	90	0.873
川砂55-18	18	T	T	—	175	318	819	987	—	1.272
T 55-18-P0				0	175	318	913	986	—	1.272
T 55-18-P20				20	175	318	730	986	183	1.272
川砂65-8	65	8	T	—	170	262	883	982	—	1.048
T 65-8-P0				0	170	262	984	982	—	1.048
T 65-8-P10				10	170	262	886	982	98	1.048

単位:N/mm²

また、各配合におけるスランプと溶融パウダーの置換率の一覧を表-6に示す。いずれの配合においても、細骨材を溶融スラグに置換することにより、スランプは著しく低下した。これは、溶融スラグが針状粒子を多く含んでいたため粒子表面に練混ぜ水の一部を物理的吸着を起こすため、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。この置換率は配合によって異なるが、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ペアリング効果がスランプの改善まで達しない。大きい場合、粉体間隙に練混ぜ水が吸着するため、スランプが小さくなると考えられる。

硬化コンクリートの試験を行うため供試体を作製した。供試体を作製した配合を表-7に示す。

3.3 溶融スラグを用いたコンクリートの 硬化性状

各配合の圧縮強度試験結果を表-8に示す。細骨材を溶融スラグに置き換えた場合、初期材齢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った。また、溶融パウダーを用いた場合、配合によっては長期材齢の圧縮強度は、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³⁾、溶融スラグが高炉スラグのように潜在水硬性を持つが、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。この結果、溶融スラグを細骨材の全量使用したコンクリートでは、スラグの種類によっては、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ているが、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。このことから、パウダーを添加す

表-8 各配合のフレッシュコンクリート試験と圧縮強度試験結果

配合名	フレッシュコンクリート試験結果			圧縮強度 (N/mm ²)		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	材齢		
				7日	28日	91日
川砂 45-8	7. 9	4. 4	20. 5	44. 3	55. 1	60. 9
T 45-8-P 0	3. 7	5. 9	20. 0	36. 2	39. 7	49. 5
T 45-8-P 10	7. 4	4. 7	20. 0	37. 2	42. 1	53. 9
川砂 55-8	7. 1	4. 0	22. 0	34. 6	45. 5	52. 5
T 55-8-P 0	1. 3	4. 3	22. 0	27. 4	31. 2	43. 6
T 55-8-P 18	6. 1	2. 3	22. 0	24. 9	33. 0	44. 4
S 55-8-P 0	0. 4	7. 2	22. 0	21. 6	27. 0	34. 8
S 55-8-P 10	7. 2	8. 4	21. 0	28. 9	33. 1	43. 7
C 55-8-P 0	0. 4	8. 0	21. 0	18. 3	23. 1	29. 1
C 55-8-P 5	8. 5	7. 9	21. 0	20. 5	25. 1	35. 7
K 55-8-P 0	0. 2	7. 2	22. 0	22. 1	18. 6	35. 0
K 55-8-P 20	8. 2	6. 1	22. 0	28. 5	40. 3	53. 2
川砂 55-18	17. 0	5. 3	19. 0	34. 0	43. 8	50. 4
T 55-18-P 0	1. 8	6. 0	19. 0	28. 8	32. 5	41. 4
T 55-18-P 20	16. 0	3. 4	19. 5	32. 6	39. 8	48. 7
川砂 65-8	8. 4	5. 5	20. 0	25. 2	35. 5	38. 7
T 65-8-P 0	0. 3	5. 5	19. 5	20. 4	23. 6	31. 1
T 65-8-P 10	9. 5	3. 9	20. 0	24. 6	34. 3	41. 8

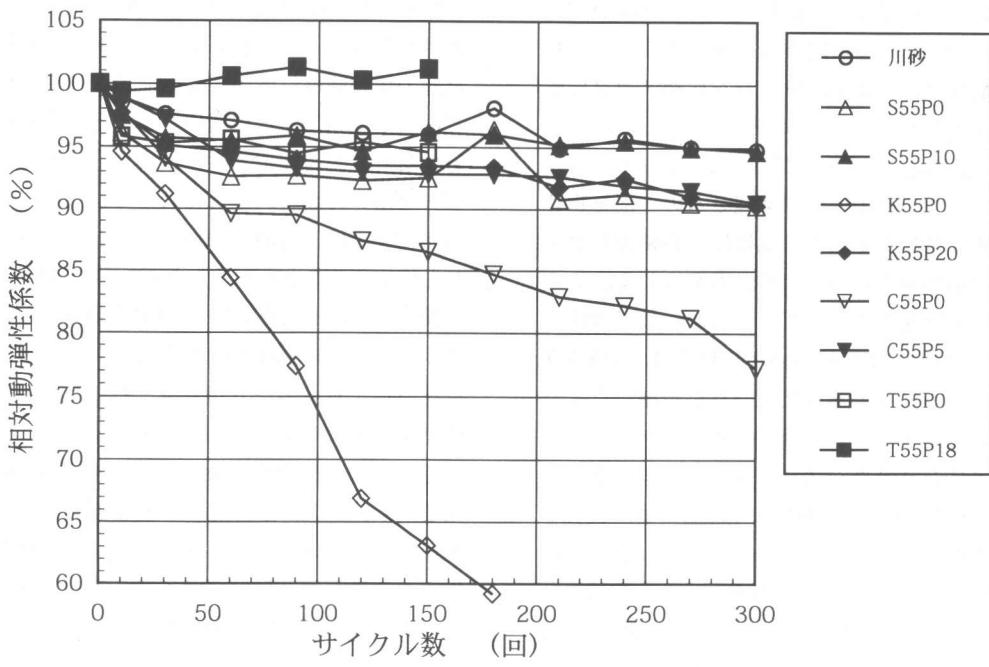


図-2 凍結融解試験結果

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。

4.まとめ

ごみ焼却灰溶融スラグ細骨材として用いた場合に生じるスランプの低下を防止するため、下水汚泥焼却灰溶融パウダーを流動性改善材として用いたコンクリートの特性を検討した結果、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することが可能となり、また、硬化コンクリートの長期材齢における圧縮強度は、川砂よりも大きくなる場合もあることが判明した。さらに、凍結融解試験による耐久性試験からも、パウダーを添加することにより、耐久性が向上することが確認された。今後は、溶出試験などを実施し、実用化に向けた検討を進めていきたい。

【謝辞】 本実験を実施するにあたり、溶融スラグのご提供を頂いた自治体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) 堀健治他：焼却灰溶融スラグのコンクリート細骨材への適用、土木学会第49回年次学術講演会、第6部門、pp.186～187、1994年
- 3) 寺田武生他：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
- 4) 清水洋治他：下水汚泥溶融パウダーの有効利用調査、第37回下水道研究発表会講演集、pp.900～902、2000年
- 5) 佐々木肇他：都市型廃棄物溶融スラグを用いたコンクリートの特性、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集、第7部門、pp.344～345、2000年