

論文 溶融スラグのコンクリート用骨材への利用研究

川上 勝弥^{*1}・依田 彰彦^{*2}・横室 隆^{*3}

要旨：一般廃棄物および下水汚泥の溶融固化物を溶融スラグと称し，コンクリート用骨材等への有効利用が検討されている。溶融スラグ骨材は，密度および吸水率の品質基準を満足し，モルタルバー法によるアルカリシリカ反応性は6か月後の膨張率の規定値以下である。溶融スラグ骨材コンクリートは，スランプ低下，空気量やブリーディング量の増加，凝結の遅延を示すが，強度特性は，短期材齢で川砂・砕石・AE減水剤を用いたコンクリートより低下するが長期材齢では同程度となり，耐熱性および耐硫酸性は高い傾向を示す。

キーワード：溶融スラグ，コンクリート用骨材，コンクリート強度，屋外自然暴露

1. はじめに

大量生産，大量消費，大量廃棄の風潮は，都市ごみ等の一般廃棄物の増大をもたらした。また，都市化の進展と衛生社会の構築は，下水道の普及率を高め，多量の下水汚泥を発生させている。大量に発生する一般廃棄物や下水汚泥の多くは焼却により処分されるが，各自治体において焼却灰の適正な取扱いに苦慮しているのが現状である。その解決策のひとつとして焼却灰を1,200℃以上の高温で溶融固化する手法があり，生成された溶融固化物（以下，溶融スラグと記す）の有効利用が広く検討されている。さらに，一般廃棄物等を焼却せずに，直接1,200℃以上の高温状態で溶融固化する直接溶融方式も開発され，溶融スラグの発生量は今後ますます増大するものと推計されている¹⁾。

本研究は，溶融スラグをコンクリート用骨材として有効に利用することを目的として計画・実施したもので，溶融スラグの骨材としての標準化を念頭においたものである。なお，本実験の一部は，（財）建材試験センター「溶融スラグ標準化部会（部会長，依田彰彦・足利工業大学教授）」において実施したものである。

2. 使用材料

2.1 溶融スラグ

本研究で使用した14種類の溶融スラグの区分，由来および記号等は，表－1に示すとおりである。また，本研究で使用した溶融スラグは，表－2に示す旧厚生省「一般廃棄物の溶融固化

表－1 溶融スラグの種類および記号

区 分		由来・産地等		記号
溶 融 スラグ	細骨材	下水汚泥	水砕	S1
			空冷	S11
			水砕	S12
			水砕	S13
			空冷	S14
		都市ごみ	水砕	S2
			水砕	S21
			水砕	S22
			水砕	S23
			空冷	S24
			水砕	S25 [※]
			水砕	S26 [※]
	粗骨材	都市ごみ	空冷	G1
		下水汚泥	空冷	G2
天 然	細骨材	大井川水系砂		S3
	粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石		G3

※は，アルカリシリカ反応性試験のみ実施

*1 小山工業高等専門学校助教授 建築学科（正会員）

*2 足利工業大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

*3 足利工業大学助教授 工学部建築学科 博士（工学）（正会員）

物の再生利用に関する指針（生衛発 508 号，平成 10 年 3 月）」の環境基準¹⁾を，溶融施設からの出荷時において満足している。

2.2 セメント

セメントは，3 銘柄の普通ポルトランドセメントを等量混合したものとし，その性状は表－3 に示すとおりである。

2.3 天然骨材

比較用の天然骨材として，大井川水系川砂および青梅産硬質砂岩碎石を用いた。

2.4 化学混和剤

化学混和剤は，主成分がリグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体の A E 減水剤標準形を用いた。

2.5 水

練混ぜ水は，イオン交換水を用いた。

3. 実験計画

3.1 コンクリートの調査

骨材の組合せは，溶融スラグの特性を把握し易いように，溶融スラグ細骨材と碎石，川砂と溶融スラグ粗骨材とし，比較用コンクリート（以下，基準コンクリートと記す）は，川砂と碎石の組合せた。基準コンクリートの調査条件は，表－4 に示すとおりである。また，溶融スラグを骨材として用いたコンクリート（以下，溶融スラグ骨材コンクリートと記す）の調査は，水セメント比 50 %，細骨材率 46.5 %，単位水量 175kg/m³ および単位セメント量 350kg/m³ とし，スランプおよび空気量の調整は行わない。使用骨材の組合せおよびコンクリートの調査は，表－5 に示すとおりである。

3.2 供試体の作製

骨材試験並びにコンクリートの試し練り・練混ぜ・打込みおよびフレッシュコンクリートの試験は，（財）建材試験センター中央試験所において行った。

表－2 溶融スラグの目標基準

項 目	溶出基準
カドミウム	≦ 0.01
鉛	≦ 0.01
六価クロム	≦ 0.05
砒 素	≦ 0.01
総水銀	≦ 0.0005
セ レ ン	≦ 0.01

単位：mg/l

表－3 使用セメントの品質

項 目		測定値
密 度 g/cm ³		3.15
比 表 面 積 cm ² /g		3,450
凝 結	標準軟度水量 %	27.8
	始 発 時一分	2－19
	終 結 時一分	3－33
安 定 性 (パ ッ ト)		良
圧縮強さ N/mm ²	材齡 3日	31.8
	材齡 7日	49.6
	材齡28日	66.5
全アルカリ %		0.55
塩 化 物 イ オ ン %		0.008

表－4 基準コンクリートの調査条件

項 目	条 件
水セメント比 %	50
細骨材率 %	46.5
単位水量 kg/m ³	175
目標スランプ cm	18
目標空気量 %	4.5

表－5 骨材の組合せおよびコンクリートの調査

コンクリート 記号	使用骨材	水セメント比 %	細骨材率 %	単位量 kg/m ³			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
1	S1+G3	50	46.5	175	350	896	949
2	S2+G3					865	949
3	S3+G3					802	949
4	S3+G1					802	945
5	S3+G2					802	952

3.3 試験項目および試験方法

(1) セメントおよび骨材試験

セメントおよび骨材に関する試験は、全て JIS に規定される方法によった。

(2) コンクリート試験

次に示す試験以外は、JIS に規定される方法によった。

a. ヤング係数試験：所定材齢の圧縮強度試験時に行い、標準養生供試体はコンプレッソメーターにより、自然暴露供試体はワイヤーストレインゲージによりひずみを測定した。

b. 耐熱性および耐硫酸性試験：円柱供試体（100 φ × 200mm）を、材齢 7 日まで標準養生、7 日から 28 日まで 20 °C ・ 80 % の恒温恒湿槽内で養生した。耐熱性試験は、200 °C の恒温槽に 26 週間静置した。耐硫酸性試験は、建材試験センター・JSTM C 7401「溶液浸せきによるコンクリートの耐薬品性試験方法」により、濃度 5 % の硫酸溶液中に 26 週間静置した。なお、硫酸溶液は、1 週間毎に新規のものと入替えた。耐熱性および耐硫酸性の判定は、同一材齢の標準養生コンクリートに対する圧縮強度比で示す。

(3) 屋外自然暴露試験

b : h : d = 200 : 300 : 500mm の直方体を、栃木県西那須野町にある研究施設内のコンクリート打ちの地面上に静置した。圧縮強度試験は、円柱コア供試体（100 φ × 200mm）によった。なお、暴露期間は、最長 15 年を予定している。

(4) 溶融スラグ骨材の化学成分分析

溶融スラグの化学成分分析^りは、ICP（誘導結合形プラズマ）発光分光分析法により行った。

4. 骨材試験の結果と考察

4.1 溶融スラグの化学成分

溶融スラグの化学成分は、表－6 に示すとおりで、主成分は SiO₂、Al₂O₃ および CaO であり、加えて下水汚泥溶融スラグには Fe₂O₃ と P₂O₅ も多く含まれていることが確認される。

4.2 骨材の物理的性質

骨材の物理的性質は、表－7 および表－8 に

示すとおりである。本研究に使用した溶融スラグ細骨材の絶乾密度は、2.87 ～ 2.44g/cm³ の範囲に分布し、2 種類を除き高いレベルでコンクリート用骨材としての使用基準を満足する。

表－6 溶融スラグ細骨材の化学成分

化学成分	S1	S2
SiO ₂	20.09	41.20
Al ₂ O ₃	14.12	15.43
Fe ₂ O ₃	10.51	1.76
MgO	3.08	2.15
CaO	24.43	33.77
Na ₂ O	1.07	3.22
K ₂ O	0.90	0.51
P ₂ O ₅	15.45	0.61

単位：%

表－7 骨材の密度および吸水率

区 分	記号	密度 g/cm ³		吸水率 %
		表乾	絶乾	
細骨材	S1	2.88	2.87	0.32
	S11	2.81	2.78	1.05
	S12	2.53	2.50	1.26
	S13	2.77	2.74	1.07
	S14	2.73	2.69	1.46
	S2	2.78	2.77	0.30
	S21	2.65	2.58	2.73
	S22	2.65	2.61	1.67
	S23	2.51	2.44	2.91
	S24	2.69	2.68	0.54
	S3	2.58	2.52	2.19
	G1	2.64	2.63	0.50
粗骨材	G2	2.66	2.66	0.07
	G3	2.65	2.64	1.62

表－8 骨材の単位容積質量、粗粒率

記号	区分	単位容積質量 kg/l	実積率 %	粗粒率 f.m.
S1	細骨材	1.60	55.7	3.66
S2		1.60	58.0	2.80
S3		1.62	64.3	2.72
G1	粗骨材	1.56	59.5	6.07
G2		1.62	60.9	6.46
G3		1.70	64.4	6.70

4.3 アルカリシリカ反応性

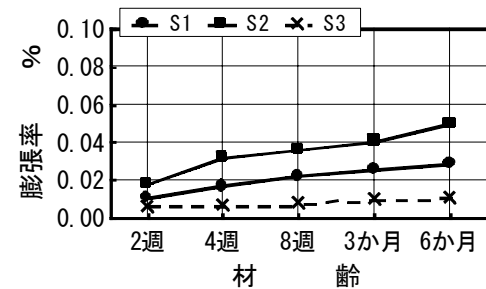
モルタルバー法によるアルカリシリカ反応性試験結果は、図－１に示すとおりである。溶融スラグ骨材の６か月の膨張率は、全ての骨材において規定値の 0.100 %未満であり、無害と判定される。また、溶融スラグ骨材のアルカリシ

リカ反応性は、都市ごみより下水汚泥の方が低く、粗骨材より細骨材の方が低い傾向を示す。

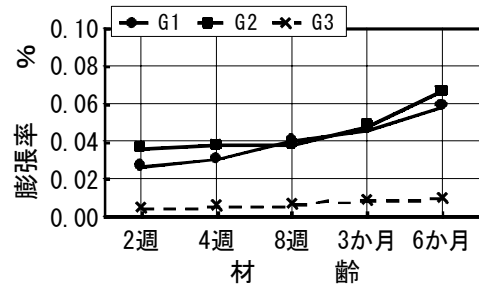
5. コンクリート試験の結果と考察

5.1 フレッシュコンクリートの性状

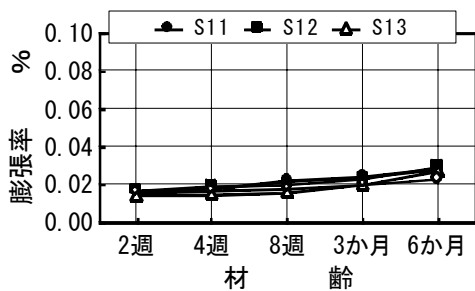
フレッシュコンクリート試験結果は、図－２



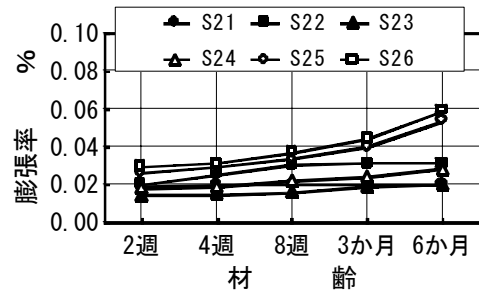
a. コンクリートの作製に用いた細骨材



b. コンクリートの作製に用いた粗骨材

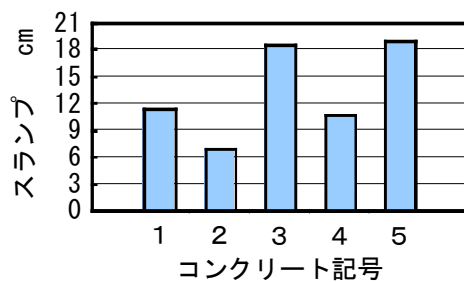


c. 下水汚泥溶融スラグ細骨材

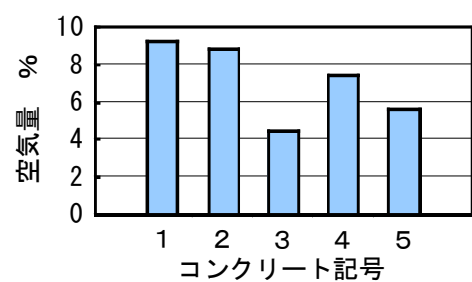


d. 都市ごみ溶融スラグ細骨材

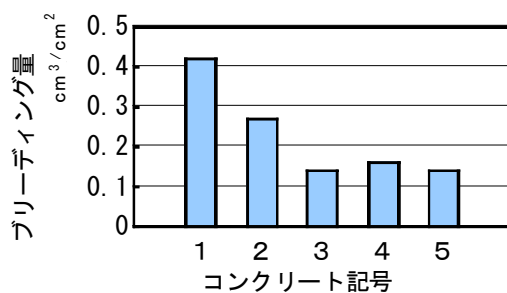
図－１ アルカリシリカ反応性



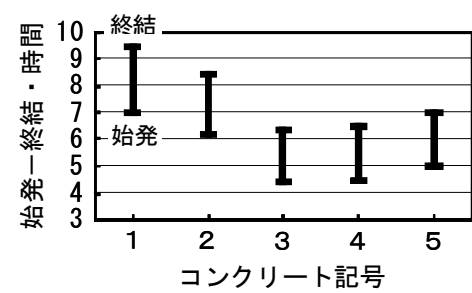
a. スランプ



b. 空気量（圧力法）



c. ブリーディング量



d. 凝結時間

図－２ フレッシュコンクリートの特性

に示すとおりである。

スランプは、粒度調整した都市ごみ熔融スラグを粗骨材として用いたコンクリートを除き、著しく低下する。熔融スラグ骨材コンクリートの空気量は増大し、その傾向は熔融スラグを細骨材として用いたものほど著しい。ブリーディング量は、熔融スラグを細骨材として用いたコンクリートにおいて基準コンクリートの2～3倍の量を示す。この理由として、熔融スラグ骨材表面の平滑性や針状突起および鋭角な稜線の存在等に起因すると思われる²⁾。

一方、本研究では、熔融スラグの置換率が100%であるため熔融スラグの影響が顕著に現れているが、50%以下の置換率では基準コンクリートの性状に近似すると考えられる³⁾。熔融スラグ骨材コンクリートの凝結時間は、基準コンクリートと比較して遅延する傾向を示し、熔融スラグを細骨材として用いたコンクリートでは、2～3時間遅延する。

5.2 硬化コンクリートの性状

標準養生したコンクリートの圧縮強度およびヤング係数は、図-3および図-4に示すとおりで、材齢の経過とともにいずれも増大する傾向を示す。また、都市ごみ熔融スラグを粗骨材として用いたコンクリート以外の圧縮強度は、材齢4週までは明確な差異が認められるが、材齢1年ではほぼ同程度の40N/mm²以上を示す。一方、記号G2の粗骨材は、極度に平滑な表面性状と鋭い稜線を有するため、強度発現が阻害されたものと推察される。

材齢4週時の引張強度と曲げ強度は、図-5および図-6に示すとおりで、熔融スラグを粗骨材として用いたコンクリートでは、基準コンクリートに比べて引張強度の低下傾向が認められる。この傾向は、熔融スラグ骨材の表面性状とセメントペーストとの付着力の差によるものと思われる。

標準養生したコンクリートに対する屋外自然暴露したコンクリートの材齢1年における圧縮

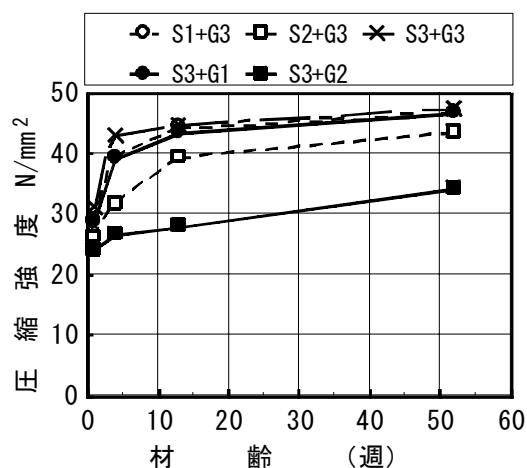


図-3 圧縮強度（標準養生）

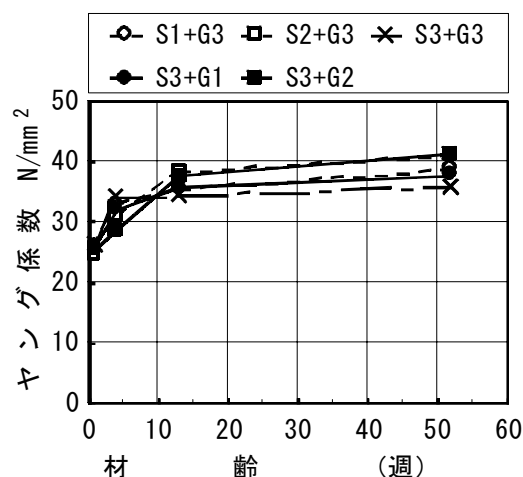


図-4 ヤング係数（標準養生）

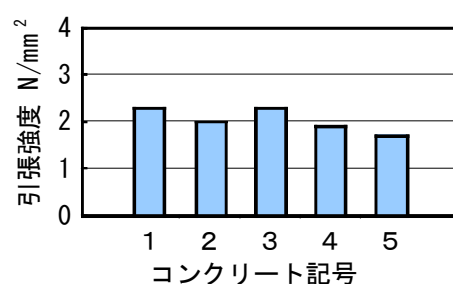


図-5 引張強度（標準・4週）

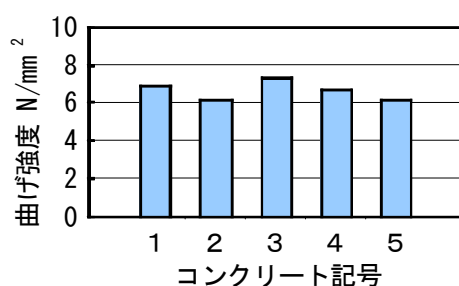


図-6 曲げ強度（標準・4週）

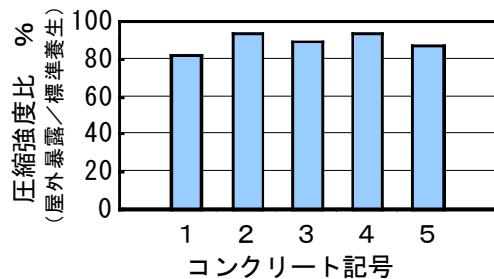


図-7 圧縮強度（屋外暴露・1年）

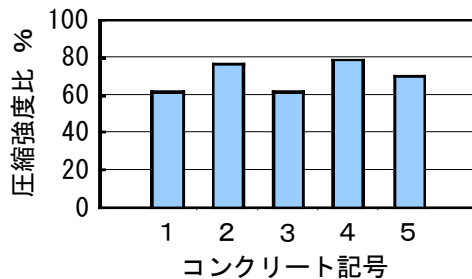


図-8 耐熱性

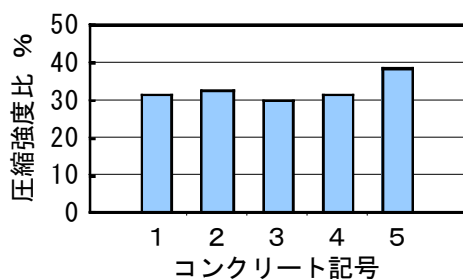


図-9 耐硫酸性

強度比は、図-7に示すとおりである。溶融スラグ骨材コンクリートは、標準養生コンクリートの 82.0 ～ 93.1 % の圧縮強度を発現し、その割合は基準コンクリートと同程度である。

図-8および図-9は、溶融スラグ骨材コンクリートの耐熱性および耐硫酸性の結果を圧縮強度比で示した。この結果より、基準コンクリートが最も低く、溶融スラグ骨材コンクリートは化学的には安定していることが推察される。

コンクリートの乾燥収縮率は、図-10に示すとおりで、溶融スラグ骨材コンクリートは乾燥収縮率が小さく、組織が緻密で堅固な溶融スラグ骨材の特長のひとつと考えられる。

6. おわりに

溶融スラグをコンクリート用骨材として利用できるかを検討した。その結果をまとめると、

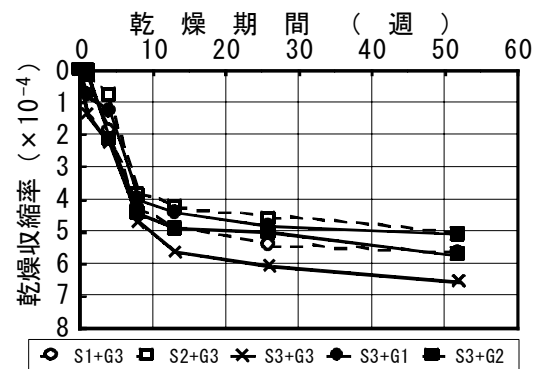


図-10 乾燥収縮率

次のようになる。

- (1) 溶融スラグ骨材は、密度および吸水率の品質基準、並びにモルタルバー法によるアルカリシリカ反応性に関する膨張率の規定値の 0.100 %未満を満足する。
- (2) 溶融スラグ骨材コンクリートは、スランプの低下、空気量およびブリーディング量の増大、凝結遅延の傾向がある。
- (3) 溶融スラグ骨材コンクリートの強度およびヤング係数は、基準コンクリートより短期材齢では小さいが、長期材齢では同程度になる。
- (4) 溶融スラグ骨材コンクリートは、乾燥収縮率が小さく、耐熱性および耐硫酸性が高い。

本研究に際し、ご助言を賜ったワイエスエンジニアリング代表取締役・横山昌寛氏並びにご協力いただいた皆様にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) (財) 建材試験センター・溶融スラグ標準化部会：建設資材関連のリサイクルシステムに関する標準化調査報告書，2000.3
- 2) 依田彰彦，川上勝弥：溶融スラグのコンクリート用骨材への有効利用（その1 硬化コンクリートの性質），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）A-1，pp.711-712，2002.8
- 3) 鈴木澄江，中村則清：溶融スラグ骨材を使用したコンクリートの基礎物性に関する実験研究，建材試験情報，Vol.38，No.4，pp.13-18，2002.4