

論文 溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの長期性状

川上 勝弥*1・依田 彰彦*2・横室 隆*3・吉崎 芳郎*4

要旨：一般廃棄物および下水汚泥に由来する溶融スラグを細骨材または粗骨材としたコンクリートに関する，材齢4年までの性状について考察した。溶融スラグを骨材としたコンクリートは，スランプ，空気量およびブリーディング量が増大する。圧縮強度は，天然骨材を用いたコンクリートと同程度のもの，あるいは低下するものがあるが，材齢の経過に伴う強度発現が溶融スラグ骨材により阻害されることはない。一方，溶融スラグ骨材のアルカリシリカ反応性は，JISに規定されるモルタルバー法および化学法では無害と判定されるが，ある溶融スラグ骨材は長期材齢における潜在的な反応性を示唆した。

キーワード：溶融スラグ骨材，圧縮強度，静ヤング係数，長期性状，ポップアウト

1. はじめに

一般廃棄物，下水汚泥等を1200℃以上の高温で処理する溶融固化は，ダイオキシン類の分解・削減を目的とする「ダイオキシン類対策特別措置法（2000年1月15日施行）」の制定を受け，急速に普及することとなった。また，溶融固化により得られる固化物（以下，溶融スラグと記す）は，廃棄物の減容化，安定化に加え，有効かつ適正な再生利用への方策が検討されている。これより先，溶融スラグの再生利用において遵守することが望ましい事項として，旧厚生省により「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用に関する指針（1998年3月）」（以下，再生利用指針と記す）が通知された。再生利用指針では，溶融スラグの用途として，路盤材，コンクリートおよびアスファルト混合物用骨材，埋め戻し材，コンクリート製品用材料等が示され，2001年度における有効利用実績は，質量で70%程度であるものと推察されている¹⁾。

この様な状況を背景に，溶融スラグのコンクリート用骨材としての有効利用を促進するもの

として，2002年7月にTR A 0016（一般廃棄物，下水汚泥等の溶融固化物を用いたコンクリート用細骨材）が公示された。さらに，溶融スラグの有効利用を促進するものとして，一部の都県において，溶融スラグの有効利用に関する指針やガイドライン等が制定されている。さらに，溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品が，リサイクル資材を積極的に活用する制度である「リサイクル資材評価制度」の資材認定を受けているところもある。

本研究は，溶融スラグをコンクリート用骨材として有効利用することを目的として実施しているコンクリート試験における，材齢4年までの諸性状について報告するものである。

2. 実験計画

2.1 使用材料

(1) 溶融スラグ骨材および天然骨材

本研究で使用した，一般廃棄物および下水汚泥由来の溶融スラグの細骨材および粗骨材，並びに比較用として用いた細骨材（川砂）および

*1 独立行政法人国立高等専門学校機構 小山工業高等専門学校助教授（正会員）

*2 足利工業大学工学部建築学科教授 工学博士（正会員）

*3 足利工業大学工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

*4 湘南ライナス学園 ライナス教育研究所（正会員）

粗骨材（碎石）の区分，記号等は，表－１に示すとおりである。

なお，本研究に使用した熔融スラグ骨材は，生活環境保全の観点から再生利用指針に示されている，有効利用に望まれる重金属類の溶出に対する目標基準（表－２）を満足している。

(2) セメント

セメントは，三銘柄の普通ポルトランドセメントを等量混合し，その品質は表－３に示すとおりである。

(3) 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AE減水剤標準形を使用した。

(4) 混練ぜ水

練混ぜ水は，イオン交換水を使用した。

2.2 コンクリートの配合および作製

コンクリートにおける骨材の組合せおよび配合は，表－４に示すとおりである。配合は，川砂（S3）と碎石（G3）を骨材としたコンクリートを比較用コンクリートとし，比較用コンクリートにおいてスランプ18cm，空気量4.5%となるように試し練りにより調整し，骨材の単位量を決定した。熔融スラグ骨材を用いたコンクリート（以下，熔融スラグ骨材コンクリートと記す）における骨材の組合せは，熔融スラグ細骨材（S1またはS2）と碎石（G3），川砂（S3）と熔融スラグ粗骨材（G1またはG2）の組合せとした。ただし，熔融スラグ骨材コンクリートは，熔融スラグ骨材の特性がコンクリートの性状に明確に反映されるように，スランプおよび空気量の調整を行わないこととした。コンクリートは，(財) 建材試験センター中央試験所（埼玉県草加市）において練混ぜおよび打込みを行い，所定の場所に搬送した。

2.3 コンクリートの養生および屋外自然暴露

コンクリートの20℃・水中養生および20℃・60%RH養生は，足利工業大学において行った。また，屋外自然暴露は，栃木県の気候区の異なる2箇所とし，「足利市」は足利工業大学建築学

科屋外暴露場，「旧西那須野町（現，那須塩原市）」は五洋建設株式会社技術研究所内に静置した。屋外自然暴露地点に近い消防署において記録された気象記録は，表－５に示すとおりである。

表－１ 骨材の種類及び記号等

区 分	由 来 ・ 産 地 等	記 号	
細骨材	熔融スラグ	下水汚泥（水砕） 一般廃棄物（水砕）	S1 S2
	川砂	大井川水系砂	S3
	粗骨材	熔融スラグ	下水汚泥（空冷） 一般廃棄物（空冷）
碎石		青梅産硬質砂岩碎石	G3

表－２ 熔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 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	始 発 時一分	2-19
	終 結 時一分	3-33
圧縮強さ	3日 N/mm ²	31.8
	7日 N/mm ²	49.6
	28日 N/mm ²	66.5
全アルカリ	% 0.55	
塩化物イオン	% 0.008	

表－４ コンクリートの配合表

コンクリート記号	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
S1+G3	50	46.5	175	350	896	949
S2+G3					865	949
S3+G3					802	949
S3+G1					802	945
S3+G2					802	952

2.4 試験方法

(1) 骨材試験

熔融スラグ骨材，川砂および砕石の物理試験は，(財) 建材試験センター・中央試験所においてJISに規定される試験方法により行った。

熔融スラグ細骨材に関するアルカリシリカ反応性試験は，足利工業大学において，JISに規定されるモルタルバー法および化学法により行った。また，熔融スラグの化学成分分析は，(株) 八洋コンサルタント・技術センターにおいて，誘導結合型プラズマ (ICP) 発光分光分析法により行った。

(2) コンクリートの試験

フレッシュコンクリートに関する試験は，(財) 建材試験センター・中央試験所において，JISに規定される試験方法により行った。

コンクリートの強度試験は，材齢4年の屋外暴露供試体は (財) 建材試験センター・中央試験所において，それ以外は，「足利市」は足利工業大学，「西那須野町」は小山工業高等専門学校において，JISに規定される試験方法によ

り行った。ただし，圧縮強度試験用供試体は，厚さ200mmの暴露用供試体から採取した，直径100mm高さ200mmのコア供試体である。

長さ変化率試験および凍結融解試験は，足利工業大学においてJISに規定される試験方法により行った。

偏光顕微鏡による硬化コンクリートの組織の観察は，(株) 八洋コンサルタント・技術センターにおいて行った。

3. 骨材試験結果

骨材の物理試験結果は，表-6に示すとおりである。熔融スラグ骨材は，密度が大きく吸水率の小さい，強硬な骨材であると推察される。また，熔融スラグ細骨材の化学成分分析結果は，表-7に示すとおりで，主要三成分は SiO_2 ， Al_2O_3 及び CaO であり，一般廃棄物に由来するものは SiO_2 及び CaO の比率が高く，下水汚泥に由来するものは三成分以外に Fe_2O_3 及び P_2O_5 を多く含む傾向にあり，熔融原料による相異が認められる。アルカリシリカ反応性試験結果は，表-8に示すとおりでモルタルバー法および化学法ともに「無害」と判定された。また，本研究で使用した熔融スラグは，表-2に示す再生利用指針の目標基準を，熔融施設からの出荷時において満足している。

4. コンクリートの試験結果および考察

フレッシュコンクリートの試験²⁾および凍結融解試験³⁾の結果は，表-9に示すとおりである。既報⁴⁾において，比較用コンクリートに対

表-5 屋外自然暴露地点の気候

項目		足利	旧西那須野
気温 (°C)	年平均	16.4	13.1
	年最低	-5.1	-7.0
	年最高	38.8	34.5
相対湿度 (%)	年平均	68	74
	年最低	31	21
	年最高	100	100
平均風速 (m/s)	2.2	1.2	
年降雨量 (mm)	1,260	—	

表-6 細骨材及び粗骨材の物理特性

区分	骨材記号	密度 g/cm^3		吸水率 %	単位容積質量 kg/l	実積率 %	粗粒率	400kN 破砕値 %
		表乾	絶乾					
細骨材	S1	2.88	2.87	0.32	1.66	55.7	3.66	—
	S2	2.78	2.77	0.30	1.60	58.0	2.80	—
	S3	2.58	2.52	2.19	1.70	64.3	2.70	—
粗骨材	G1	2.64	2.63	0.50	1.56	59.5	6.07	29.6
	G2	2.66	2.66	0.07	1.62	60.9	6.46	33.5
	G3	2.65	2.64	1.62	1.62	64.4	6.70	11.8

する溶融スラグ骨材コンクリートの特性値として、スランプの低下、空気量およびブリーディングの増大、凝結遅延等を確認している。本報告では、それらの結果を踏まえ、長期間養生したコンクリートの性状について考察する。

(1) 圧縮強度および静ヤング係数

20℃水中養生したコンクリートの材齢4年までの圧縮強度は図-1に、足利市および旧西那須野町の屋外に自然暴露したコンクリートの材齢1年および4年の圧縮強度は、図-2および図-3に示すとおりである。溶融スラグ骨材コンクリートの圧縮強度は、S3およびG2骨材を用いたコンクリートを除き比較用コンクリートと同程度である。一方、S3およびG2骨材を用いたコンクリートは、G2骨材の性状として表面が非常に平滑、かつ角ばりと鋭い稜線を持つ形状などの理由から、比較用コンクリートと強度特性が異なったものと思われる。また、コンクリートの強度発現が、溶融スラグ骨材により阻害される傾向は認められない。

20℃水中養生および屋外自然暴露供試体に関する圧縮強度と静ヤング係数との関係は、図-

4に示すとおりで、溶融スラグ骨材は密度が高く吸水率が低く物理的に強硬であるため、溶融スラグ骨材コンクリートの静ヤング係数が、比較用コンクリートより大きくなる傾向を示すものと思われる。

表-7 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-8 アルカリシリカ反応性試験結果

項目		S1	S2	
モルタルバー法	3か月	%	0.017	0.032
	6か月	%	0.029	0.050
	判定		無害	無害
化学法	アルカリ濃度減少量	mmol/l	268.62	66.09
	溶解シリカ量	mmol/l	35.06	11.45
	判定		無害	無害

表-9 コンクリートの試験結果

コンクリート記号	スランプ cm	空気量		ブリーディング量 cm ³ /cm ²	凝結		単位容積質量 kg/m ³	相対動弾性係数 %
		質量法 %	圧力法 %		始発時一分	終結時一分		
S1+G3	11.5	9.7	9.2	0.42	7-00	9-45	2,241	94
S2+G3	7.0	9.2	8.8	0.27	6-20	8-45	2,223	95
S3+G3	18.5	4.5	4.5	0.14	4-40	6-35	2,276	97
S3+G1	10.8	6.6	7.4	0.16	4-50	6-50	2,221	95
S3+G2	19.0	6.0	5.6	0.14	5-00	7-00	2,243	93

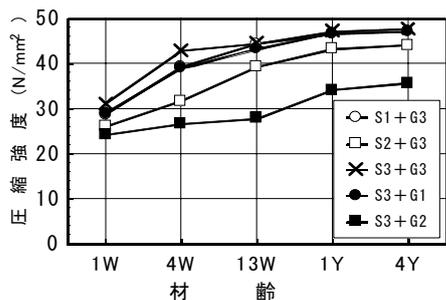


図-1 20℃水中養生供試体の圧縮強度

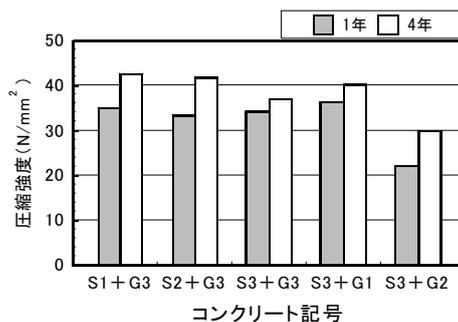


図-2 暴露供試体の圧縮強度 (足利)

(2) 長さ変化率

材齢4年までの長さ変化率は、**図-5**に示すとおりである。溶融スラグ骨材コンクリートは、比較用コンクリートより乾燥による長さ変化率が小さい傾向を示す。この傾向は、溶融スラグ骨材が天然骨材と比較して吸水率が小さいためと推察される。

(3) 偏光顕微鏡による硬化組織の観察結果

屋外自然暴露（旧西那須野）材齢約4年のコンクリート（S3+G1）において、**写真-1**に示すようなポップアウト現象が認められたので、この溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの硬化組織を偏光顕微鏡により観察した。

20℃水中養生したコンクリートの硬化組織は、**写真-2**に示すとおりであり、写真上部分（2A）にポップアウト現象が認められる。ただし、ポップアウトによる剥落境界（2D）には生成物の存在が認められるが、その種類は特定不能である。また、気泡中（2B）には針状物質が認められ、SEMの解析によりエトリンガイトであることを確認している。硬化組織中には、金属鉄（2C）の存在も認められる。

20℃60%RHの雰囲気中に静置したコンクリートの硬化組織は、**写真-3**に示すとおりであり、球形のガラス質溶融スラグ粗骨材（3A）とセメントペースト（3B）との境界面に隙間（3C）が認められる。この現象が、コンクリートのポップアウトを誘引したものと推察される。また、金属粒（3D）が、球形の状態で存在していることが認められる。



写真-1 ポップアウトの状況 (S3+G1)

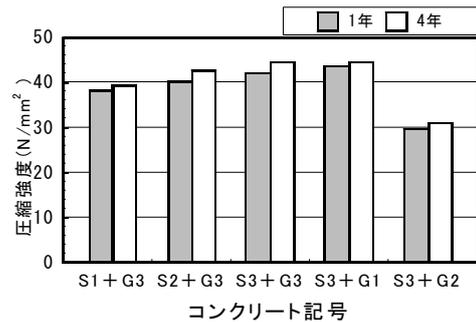


図-3 暴露供試体の圧縮強度 (西那須野)

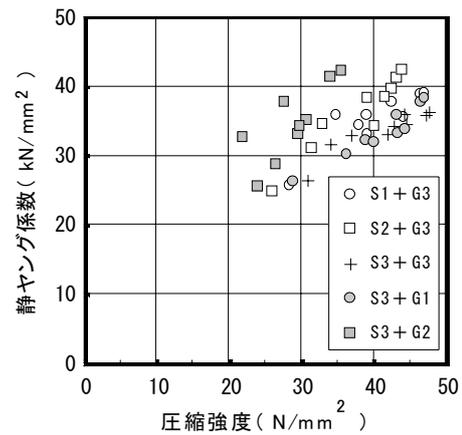


図-4 圧縮強度と静ヤング係数との関係

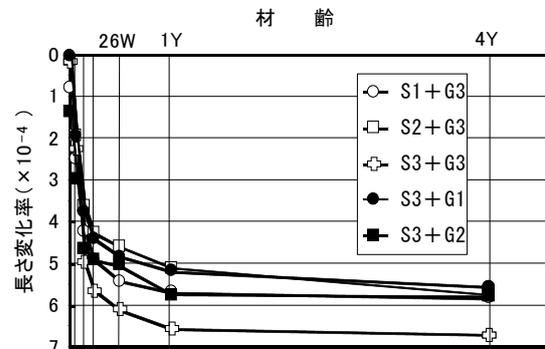


図-5 長さ変化率

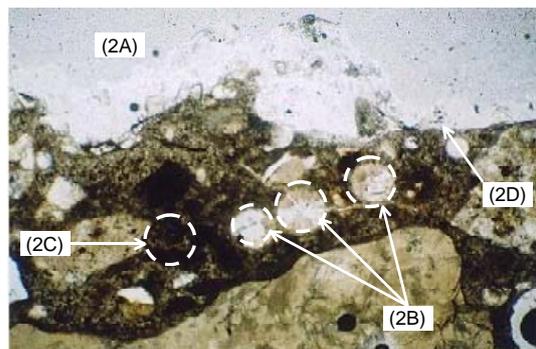


写真-2 20℃水中養生供試体の組織

屋外に自然暴露したコンクリートの硬化組織は、写真-4に示すとおりで、写真左下(4A)の部分がポップアウトによる欠落で、剥落した境界(4C)には、アルカリシリカ反応により生成されたとと思われるアルカリシリカ生成物の存在が認められる。この粗骨材は、モルタルバー法によるアルカリシリカ反応性試験において、6か月後の膨張率が無害と判定する規定値以下であることから、熔融スラグ骨材における潜在的なアルカリシリカ反応性を示唆するものと思われ、現行のアルカリシリカ反応性試験のみで熔融スラグ骨材を用いたコンクリートの長期性状を判定することの是非を検討する必要がある。また、骨材(4B)と硬化体との境界面には、熔融スラグ骨材とセメントペーストとの付着を阻害し強度等に悪影響を与えられと思われる隙間(4D)が認められる。

5. まとめ

本研究は、熔融スラグをコンクリート用骨材として有効利用することを目的として実施したもので、結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 熔融スラグ骨材コンクリートの圧縮強度は、比較用コンクリートと同程度か、骨材の性状によっては低い傾向を示すものがある。
- 2) 熔融スラグ骨材コンクリートの静ヤング係数は、比較用コンクリートより大きい。
- 3) 熔融スラグ骨材コンクリートの長さ変化率は、比較用コンクリートより小さい。
- 4) 下水汚泥に由来する熔融スラグを粗骨材として用いたコンクリートの材齢約4年で、ポップアウト現象を確認した。ポップアウトが生じた硬化組織には、アルカリシリカ生成物や骨材とセメントペーストとの境界面に生じた隙間が認められ、熔融スラグ骨材における潜在的なアルカリシリカ反応性を示唆する結果となった。

本研究の一部は、平成12年度(財)建材試験センター熔融スラグ標準化部会において、計画

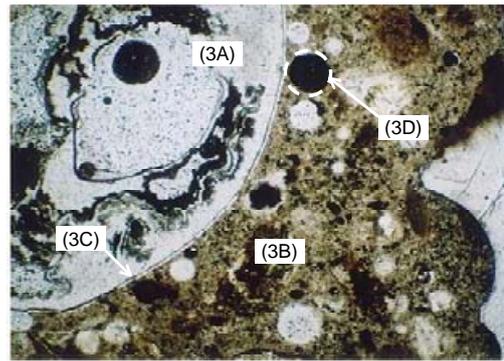


写真-3 20°C・60%RH養生供試体の組織

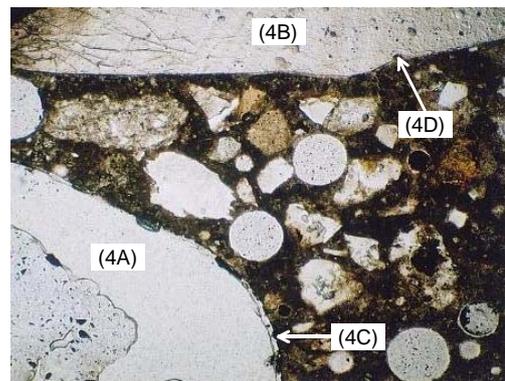


写真-4 屋外自然暴露供試体の組織

・実施されたものであることを付記するとともに、研究の実施に当たりご協力を賜った関係各位に、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人・国立環境研究所：平成14年度環境省受託業務調査結果報告書・スラグ等再生利用調査，2003.3
- 2) (財)建材試験センター・熔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
- 3) 依田彰彦，川上勝弥：熔融スラグのコンクリート用骨材への利用研究(その1 硬化したコンクリートの性質，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp711-712，2002.8
- 4) 川上勝弥，依田彰彦，横室 隆：熔融スラグのコンクリート用骨材への利用研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp89-94，2003.7