

# 論文 コンクリート用溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの材齢10年における性状

川上 勝弥\*1・横室 隆\*2・宮澤祐介\*3

**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て用いたコンクリートの材齢10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、天然骨材を用いたコンクリートに比べ、圧縮強度は同程度か若干低下するが強度発現を阻害されることはなく、静弾性係数は大きく、長さ変化率は小さく、中性化の進行は遅延する。また、溶融スラグには潜在的な反応性を有するものがあり材齢4年までの期間にポップアウトの発生を確認した。

**キーワード:** 溶融スラグ骨材, 圧縮強度, 静弾性係数, 長さ変化率, 中性化, ポップアウト

## 1. はじめに

溶融スラグとは溶融固化物とも称され、自治体等において処理される都市ごみなどの一般廃棄物、下水汚泥またはそれらの焼却灰を1200℃以上の高温で溶融し冷却固化されたものである。溶融スラグは、1998年3月に旧厚生省の通知「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用に関する指針（以下、再生利用指針と記す）」により、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施策的に推進されている。さらに、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）」の制定が、溶融固化処理の急速な普及をもたらした。一方、我が国における溶融スラグの生産量は年々増加する傾向にあり、2008年度における溶融固化の現状は、一般廃棄物等を対象とする施設が197施設、下水汚泥を対象とする施設が18施設稼働し、その生産量は一般廃棄物由来のものが82.8万トン、下水汚泥由来のものが3.8万トンである<sup>1)</sup>。このような現状を背景に、溶融スラグのコンクリート用骨材としての標準化が審議され、2002年7月にTR A0016（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）、2006年7月にはJIS A5031（一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材）が制定された。

また、溶融スラグの環境安全基準に関するものとして、JIS K0058-1（スラグ類の化学物質試験方法、第1部：溶出量試験方法）およびJIS K0058-2（スラグ類の化学物質試験方法、第2部：含有量試験方法）が2005年3月制定され。さらに、溶融スラグの有効利用を促進するものとして、一部の都県では、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」等における資材として認定されている。

本研究は、溶融スラグのコンクリート用骨材（以下、溶融スラグ骨材と記す）としての標準化に先行して作製した溶融スラグ骨材を使用したコンクリート（以下、溶融スラグ骨材コンクリートと記す）に関する<sup>2)</sup>、材齢10年までの諸性状に関する報告である。

## 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

骨材として、一般廃棄物および下水汚泥に由来する溶融スラグの細骨材および粗骨材、並びに比較用として細骨材は大井川水系川砂および粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石を使用し、その種類および記号は、表-1に示すとおりである。また、溶融スラグを製造する溶融炉の形式および冷却固化方式は、表-2に示すとおりである。

なお、本研究に使用した溶融スラグ骨材は、再生利用指針において生活環境保全の観点から示されている、溶融スラグの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-3）以下である。

表-1 骨材の種類および記号

区 分		由来・産地等	記号
細骨材	溶融スラグ	下水汚泥（水砕）	S1
		一般廃棄物（水砕）	S2
	川砂	大井川水系川砂	S3
粗骨材	溶融スラグ	下水汚泥（空冷）	G1
		一般廃棄物（空冷）	G2
	砕石	青梅産硬質砂岩砕石	G3

\*1（独）小山工業高等専門学校 建築学科准教授（正会員）

\*2 足利工業大学 工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

\*3 足利工業大学 工学部建築学科非常勤講師

## (2) セメント

セメントとして、市販3社の普通ポルトランドセメントを等量ずつ混合したものを使用し、その品質は表-4に示すとおりである。

## (3) 化学混和剤

化学混和剤として、JIS A6204（コンクリート用化学混和剤）に適合する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) 練混ぜ水

練混ぜ水として、上水道水を原水とする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

コンクリートに使用する骨材の組合せおよび配合は、表-5に示すとおりである。溶融スラグ骨材コンクリートにおける骨材の組合せは、溶融スラグ細骨材（S1又はS2）と砕石（G3）、溶融スラグ粗骨材（G1又はG2）と川砂（S3）との組合せとした。配合は、細骨材に川砂（S3）、粗骨材に砕石（G3）を用いたコンクリート（以下、比較用コンクリートと記す）において水セメント比50%、単位水量175kg、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、骨材の単位使用量を決定した。ただし、溶融スラグ骨材コンクリートは、溶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、2000年10月に（財）建材試験センター中央試験所（以下、建材試験センターと記す）において練混ぜおよび打込みを行い、所定の養生又は屋外自然暴露場に搬送・静置した。

表-2 骨材の種類および記号

区分	記号	溶融炉の分類(JIS)	冷却固化方式
細骨材	S1	回転式表面溶融炉	水砕
	S2	シャフト炉式ガス化溶融炉	水砕
粗骨材	G1	コークスベッド式溶融炉	空冷
	G2	交流電気抵抗式溶融炉	空冷

## 2.3 コンクリートの養生および屋外自然暴露

コンクリートの養生は、20℃・水中養生（標準養生）および20℃・60%RHの気中養生は足利工業大学建築学科（以下、足工大と記す）において、屋外自然暴露は、栃木県内の気候区の異なる2箇所とし、「足利市」は足利市大前町の足工大、「那須塩原市」は現在の那須塩原市（旧、栃木県那須郡西那須野町）四区町の五洋建設（株）技術研究所内の屋外に静置した。屋外自然暴露地点の気象条件は、暴露場に近い消防署において記録された気象記録より把握し、その気象条件は表-6に示すとおりである<sup>3)</sup>。

表-3 溶融スラグの安全性の目標基準

項目	溶出量基準
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-4 セメントの品質

項目	測定値	
密度	g/cm <sup>3</sup> 3.15	
比表面積	cm <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup>	31.8
	7日 N/mm <sup>2</sup>	49.6
	28日 N/mm <sup>2</sup>	66.5
全アルカリ	% 0.55	
塩化物イオン	% 0.008	

表-5 コンクリートの骨材の組合せおよび配合

コンクリート記号	使用骨材（記号）		水セメント比 %	細骨材率 %	スランプ cm	空気量 %	単位量 kg/m <sup>3</sup>			
	細骨材	粗骨材					水	セメント	細骨材	粗骨材
S1+G3	S1	G3	50	46.5	18	4.5	175	350	896	949
S2+G3	S2	G3							865	949
S3+G3	S3	G3							802	949
S3+G1	S3	G1							802	945
S3+G2	S3	G2							802	952

## 2.4 試験方法

### (1) 骨材試験

溶融スラグ骨材、川砂および砕石の物理試験は、JISに規定される方法により行った。

溶融スラグ細骨材の化学成分分析は、誘導結合型プラズマ（ICP）発光分光分析法により行った。

### (2) コンクリート試験

フレッシュコンクリートの試験は、それぞれのJISに規定される方法により行った。

強度試験は、標準養生および屋外自然暴露「足利市」は足工大、屋外自然暴露「那須塩原市」は、材齢1年は小山工業高等専門学校建築学科、それ以外の材齢は建材試験センターにおいて、JISに規定される方法により行った。ただし、強度試験用供試体は、標準養生および自然暴露「足利市」は100φ×200mmの円柱供試体、「那須塩原市」は厚さ200mmの直方体の供試体（写真－1）から採取した100φ×200mmのコア供試体である。

長さ変化率試験および中性化試験は、JISに規定される方法により行った。

ポップアウトの原因物質の推定は、粉末X線回折により行った。

## 3. 骨材試験の結果および考察

溶融スラグ骨材等の物理試験結果は、表－7に示すとおりである。溶融スラグ骨材は、絶乾密度が2.60g/cm<sup>3</sup>以上、吸水率が1.00%以下であり、川砂および砕石と比較して密度が大きく吸水率が小さく、400kN破砕値が大きい、強硬な骨材であると推察される。しかし、針状突起や角張りおよび鋭い稜線をもつ粒子があるため、密度が大きい割には単位容積質量が小さく実積率も小さい傾向を示す。溶融スラグ骨材の品質向上のためには、冷却固化処理技術および粒形の改善等を検討する必要がある。

また、溶融スラグ細骨材の化学成分分析結果は、表－8に示すとおりで、主要三成分はSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびCaO



写真－1 那須塩原市の屋外自然暴露状況

表－6 屋外自然暴露地点の気候

項 目		足利市	那須塩原市
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－8 溶融スラグ細骨材の化学成分

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

単位：%

表－7 溶融スラグ骨材等の物理試験結果

区 分	骨材記号	密度 g/cm <sup>3</sup>		吸水率 %	実積率 %	粗粒率	400kN 破砕値 %
		表乾	絶乾				
細骨材	S1	2.88	2.87	0.32	55.7	3.66	—
	S2	2.78	2.77	0.30	58.0	2.80	—
	S3	2.58	2.52	2.19	64.3	2.70	—
粗骨材	G1	2.64	2.63	0.50	59.5	6.07	29.6
	G2	2.66	2.66	0.07	60.9	6.46	33.5
	G3	2.65	2.64	1.62	64.4	6.70	11.8

であり、一般廃棄物に由来するものはSiO<sub>2</sub>および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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を多く含むのが特徴であり、熔融固化の由来物による相異が認められる<sup>9)</sup>。

#### 4. コンクリート試験の結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果は、表-9に示すとおりである。既報において、比較用コンクリートに対する熔融スラグ骨材コンクリートの特性として、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<sup>9)</sup>。本報告では、それらの結果を踏まえ、材齢10年を経過した硬化コンクリートの諸性状に関する試験結果について考察する。

##### (1) 圧縮強度および静弾性係数

標準養生したコンクリートの圧縮強度の推移は、図-1に示すとおりである。屋外に自然暴露したコンクリートの圧縮強度の推移は、足利市については図-2、那須塩原市については図-3に示すとおりである。熔融スラグ骨材コンクリートの圧縮強度は、S3+G2コンクリートを除き比較用コンクリートとほぼ同程度か90%を下回らない程度の強度を発現している。

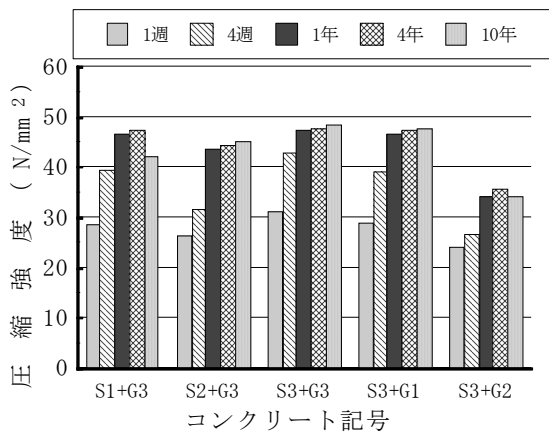


図-1 標準養生コンクリートの圧縮強度

一方、S3+G2コンクリートの圧縮強度は、比較用コンクリートの70%程度であり、G2骨材の性状として表面が非常に平滑かつ角張りと鋭角な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<sup>9)</sup>。

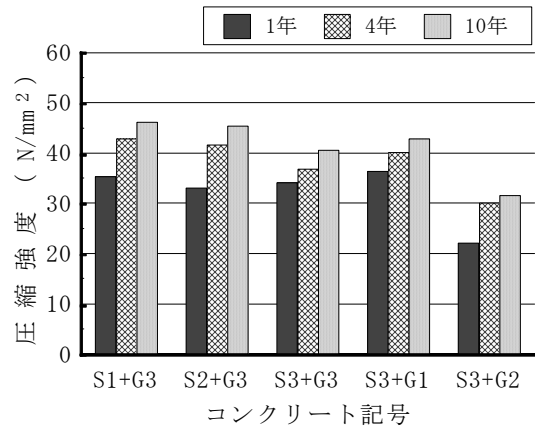


図-2 暴露コンクリートの圧縮強度（足利）

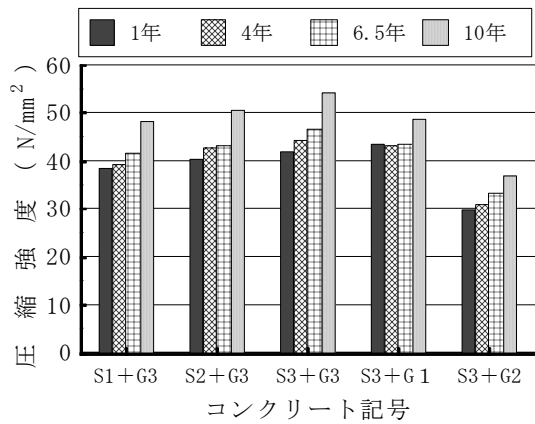


図-3 暴露コンクリートの圧縮強度（那須塩原）

表-9 フレッシュ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 cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup>	凝結		単位容積質量 kg/L
		質量法 %	圧力法 %		始発 (時-分)	終結 (時-分)	
S1+G3	11.5	9.7	9.2	0.42	7-00	9-45	2.24
S2+G3	7.0	9.2	8.8	0.27	6-20	8-45	2.22
S3+G3	18.5	4.5	4.5	0.14	4-40	6-35	2.28
S3+G1	10.8	6.6	7.4	0.16	4-50	6-50	2.22
S3+G2	19.0	6.0	5.6	0.14	5-00	7-00	2.24

圧縮強度の材齢10年までの経過において、溶融スラグ骨材コンクリートの圧縮強度の発現状況を概観し、同じ配合のコンクリートの圧縮強度について自然暴露と標準養生とを比較すると、材齢4年までは標準養生の圧縮強度が大きい、材齢10年においては約7割の配合の自然暴露の圧縮強度が大きい傾向を示す。また、材齢1年以降の材齢における圧縮強度は、概ね材齢1年の圧縮強度以上であり、溶融スラグがコンクリートの長期にわたる強度増進を阻害する傾向は認められない。

那須塩原市に自然暴露したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係は、図-4に示すとおりである。溶融スラグ骨材コンクリートの静弾性係数は、比較用コンクリートより若干大きくなる傾向を示す。この傾向は、溶融スラグ骨材は密度が大きく物理的に強硬であるためと推察される。

### (2) 中性化

足利市に自然暴露した供試体の材齢10年までの中性化の進行状況は、図-5に示すとおりである。溶融スラグ

骨材コンクリートの中性化の進行は、S3+G2コンクリートが比較用より遅延する傾向を示すがそれ以外はほぼ同程度である。従って、溶融スラグ骨材コンクリートの使用に際して、かぶり厚さなど断面設計上の配慮は必要はないものと思われる。

### (3) 長さ変化率

材齢10年までの長さ変化率の推移は、図-6に示すとおりである。溶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材齢1年までは小さくそれ以降の材齢では相似して推移している。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が、フレッシュコンクリートの性状の差異等の配合上の要因とも考えられる。

### (4) 外観観察

那須塩原市に自然暴露した供試体の外観の経時変化を観察したところ、S3+G1コンクリートにおいて、材齢4年までの時期に写真-2に示すようなポップアウト現象が認められた<sup>3)</sup>。ポップアウトの中心部には、膨張の原

図-4 圧縮強度と静弾性係数との関係

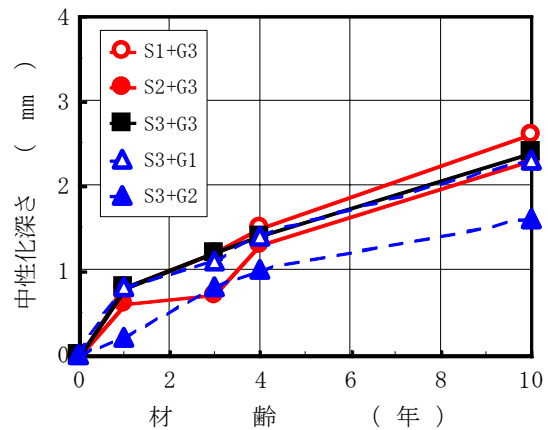
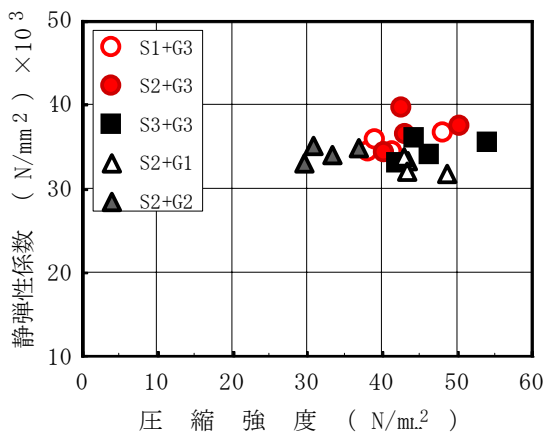


図-5 中性化試験結果

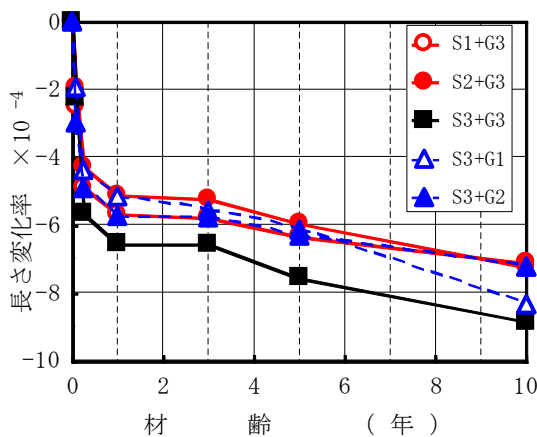


図-6 長さ変化率試験結果



写真-2 屋外暴露供試体のポップアウト

因と推定される黄褐色の物質が存在し、この物質を採取して粉末X線回折により分析したところ、生石灰の反応により生成するカルサイトの存在が推定された<sup>9)</sup>。この結果から、ポップアウトの原因として、溶融助材として使用された生石灰が未溶融状態で残存し、それがコンクリート中で消石灰に変化する際の体積膨張によるものと推察される。

自然暴露しているS3+G1コンクリートの材齢10年時の外観を観察したところ、供試体の打込み面およびその対面である静置している底面を除く側面(面積は2.1m<sup>2</sup>)に13箇所のポップアウトが確認された。最も大きなポップアウトの形状は、長辺が45mmで深さが8.8mmである。また、これらのポップアウトは、表層のみの現象であり内部へのひび割れは認められないことから、強度への影響は少ないものと思われる。

## 5. まとめ

本研究は、都市ごみなどの一般廃棄物および下水汚泥を高温で溶融し冷却固化した溶融スラグを、コンクリート用骨材として使用するための標準化に先行して作製したコンクリートの材齢10年を経過するまでの諸性状について、川砂および砕石を使用した比較用コンクリートとの対比において考察したもので、その結果をまとめると次のとおりである。

- 1)標準養生および屋外に自然暴露した溶融スラグ骨材コンクリートの圧縮強度は、表面形態の異なる粗骨材を除き比較用コンクリートと同程度である。
- 2)溶融スラグは、コンクリートの圧縮強度の発現を阻害しない。
- 3)溶融スラグ骨材コンクリートの静弾性係数は、比較用コンクリートより大きい。
- 4)溶融スラグ骨材コンクリートの長期性状は、比較用コ

ンクリートより長さ変化率は小さく、中性化の進行はほぼ同程度である。

5)溶融スラグ骨材を使用したS3+G1コンクリートコンクリートの表面に、ポップアウトが確認された。

本研究は、平成12年度の(財)建材試験センター・溶融スラグ標準化部会において実施した試験の一部を継続しているものであることを付記するとともに、長期間にわたりご協力を賜っている関係各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) (社)日本産業機械工業会・エコスラグ利用普及センター：2009年度版エコスラグ有効利用の現状とデータ，pp1-18，2010.7
- 2) (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
- 3) 川上勝弥，依田彰彦，横室 隆，吉崎芳郎：溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの長期性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp103-108，2005.6
- 4) 川上勝弥，依田彰彦，横室 隆：溶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
- 5) 川上勝弥，依田彰彦，横山昌寛：溶融スラグのコンクリート用骨材への利用研究(その2 材齢1年までのコンクリートの性状性質，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp713-714，2002.8
- 6) (財)建材試験センター：「溶融スラグ骨材コンクリート利用マニュアル」「コンクリート用溶融スラグ骨材の標準化の現状と展望」梗概集，pp77-82，2006.9