

溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの強度特性に関する基礎的研究

Fundamental study on the Strength properties of melted slag aggregate concrete

川上勝弥・森 孝光*

Katsuya KAWAKAMI and Takamitsu MORI

1. はじめに

ごみ処理場に収集される一般廃棄物（都市ごみ）の大部分は、焼却により安全化・減量化された後、焼却残渣を埋め立て処分する方法が一般的である。しかし、最近では最終処分場の確保が非常に困難になり、その対策のひとつとしてごみの排出抑制やリサイクルを進めつつ、焼却残渣を高温で溶融処理し減容化するとともに、道路用骨材などとして有効利用する動きがある。このような高温で溶融処理されたものを「溶融固化物」あるいは「溶融スラグ」と称してしている。溶融処理により、焼却灰や焼却飛灰に含有される重金属類および高濃度のダイオキシンを低減することができ、処分に伴う環境汚染の防止を図ることができる。

しかし、溶融処理は、焼却灰の容量の減容化や重金属類の低減に効果があるが、多量のエネルギーを消費し施設の建設および維持管理に多額の費用が必要とされている。また、溶融・焼成処理物の安定度や環境への影響、それらの原料として備えるべき物性、並びに再利用するための拠り所となる考え方が確立されていないのが現状である。溶融施設を設置している自治体においては、溶融スラグをコンクリート用骨材や建築資材等として有効利用する事を検討しているが、確立されたシステムとして構築されるには至っていない。

このような状況のもと、旧厚生省では「一般廃棄物の溶融固化物の再利用の実施の促進について（平成 10 年 3 月）」という通達を出し、溶融スラグの再利用の促進を図っている。さらに、東京都、千葉県、埼玉県、神奈川県、千葉市、横浜市、川崎市の首長で構成する七都県市首脳会議では溶融スラグの再資源化に対する積極的な取り組みを展

開している。加えて、旧建設省土木研究所では「公共事業における試験実施のための他産業再生資材試験評価案」をまとめ、都市ごみや下水汚泥を再生資材のひとつとして検討している。

2. 研究目的

都市ごみおよび下水汚泥の溶融処理は、最終処分量を減少することができ最終処分場の延命化を図るための役割を果たす。また、処理の過程で概ね 1200℃以上の高温条件下に置くことで有機物を分解し焼却残渣と比べ重金属類を低減することができる。さらに、都市ごみの広域処理化に伴い、

表 1 溶融スラグの目標基準

項 目	溶 出 基 準
カ ド ミ ウ ム	0.01 以下
鉛	0.01 以下
六 価 ク ロ ム	0.05 以下
砒 素	0.01 以下
総 水 銀	0.0005 以下
セ レ ン	0.01 以下

(単位：mg/l)

表 2 使用したセメントの品質

材 齢	圧縮強度
3 日	31.8
7 日	49.6
28 日	66.5

(単位：N/mm²)

*小山工業高等専門学校 専攻科・建築学専攻 2 年 (2001 年度)

熔融炉の稼働施設数が増加することから熔融スラグ骨材は、今後生産量が増加すると推測されている。

しかし、熔融スラグをコンクリート用骨材として利用するための基準がないため、積極的に有効利用されていないのが現状である。一方、各方面において熔融スラグを骨材としての有効利用に関する基準作成に向けた熔融スラグ骨材の化学的、物理的および力学的性質に関する調査研究が進められている。そこで、本研究は、熔融スラグを骨材として用いたコンクリートの強度特性等に関する実験を行い、考察する。

3. 熔融スラグについて

3.1 熔融スラグとは

熔融スラグは、「熔融固化物」とも呼ばれる。熔融スラグは、燃焼熱や電気から得られた熱エネルギー等により、焼却残渣等の一般廃棄物を概ね1200℃以上の高温条件下で無機物を熔融した後、冷却した固化物をいう¹⁾。一般廃棄物の焼却時に生産される焼却灰には、金属類の中で低沸点の重金属類（例えば水銀、鉛、カドミウム、亜鉛等）が含有されることがある。熔融スラグでは、これらの重金属類を加熱・熔融時に揮散することで熔融スラグ中の含有量を低減することができる。

都市ごみ熔融スラグの含有化学成分の平均値は、 SiO_2 ・39.3%、 CaO ・26.2%、 Al_2O_3 ・18.6%、 FeO ・4.2%、 P_2O_5 ・1.8%であり、 SiO_2 、 CaO および Al_2O_3 の三成分で全体の約80%を占めている。

下水汚泥熔融スラグの化学成分の平均値は、 SiO_2 ・33.5%、 CaO ・20.6%、 Al_2O_3 ・16.0%、 FeO ・9.2%、 P_2O_5 ・12.4%である。 SiO_2 、 CaO および Al_2O_3 の三成分が主成分をなし、それらは都市ごみ熔融スラグと近い値を示すが、 FeO および P_2O_5 の含有量が都市ごみ熔融スラグより大きい傾向を示している。

3.2 熔融スラグの有効利用に関する基準

熔融スラグの有効利用するにあたっては、土壤汚染、地下水汚染等を引き起こさないよう、環境に対する安全性を確保するための目標基準を規定している。具体的に示すと表1のとおりである。

この目標基準は、「土壤の汚染に係る環境基準」（平成3年環境庁告示第46号）と同じレベルであり、「土壤の汚染に係る環境基準について」に掲げ

る25項目の基準値のうち有機物並びに農地を対象としているCuを取り除いた、特に人体に悪影響を及ぼす6項目についてのみ基準が示されている。

3.3 熔融スラグの発生量

全国の都市ごみの総排出量は、平成9年度には5115万tで、1人1日当たりの排出量は1114gである。また、ごみの直接焼却率は平成9年度には78.0%で、前年度の76.9%に比べ増加している。

このような状況における都市ごみ熔融スラグの発生状況は、1993年では6.7万t、1997年には10.6万tである。将来の発生量の推移は、2014年には105万tになると試算されている。一方、下水汚泥熔融スラグの発生状況は、1994年では2.3万t、1997年には2.9万tである。将来の発生量の推移は、2014年には約2倍の6万tのレベルに達するものと試算されている。²⁾

4. 実験計画

本研究は、次に示す使用材料、コンクリート配合、日程および実験方法により遂行する。

4.1 使用材料

使用したセメントの品質、試料用熔融スラグ骨材の産地、種類、物理試験結果および粒度曲線³⁾は、表2、3および4、図1および2に示すとおりである。

本研究では、住友大阪セメント、太平洋セメントおよび宇部三菱セメントの三種等量を混合し使用する。

化学混和剤はポゾリスNo70、空気量調整剤はポゾリス303Aを使用する。

4.2 コンクリートの配合

本研究における骨材の組合せおよび配合条件は表5に示すとおりである。コンクリートの配合は表6に示すとおりである。なお、コンクリート記

表3 使用骨材

種別	記号	骨材の種類・産地
細骨材	S1	下水汚泥熔融スラグ(水砕)
	S2	都市ごみ熔融スラグ(水砕)
	S3	大井川水系砂
粗骨材	G1	下水汚泥熔融スラグ(空冷)
	G2	都市ごみ熔融スラグ(空冷)
	G3	奥多摩産硬質砂岩

号は、使用骨材の組合せを示す。

4.3 試験日程

溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの実験は、以下の日程に従って実施した。

- ① 試し練り (2000 年 10 月 16 日)
- ② フレッシュコンクリート試験 (2000 年 10 月 17 日)
- ③ 試験体の作製 (2000 年 10 月 24 日)
- ④ 1 週試験 (2000 年 10 月 31 日)
- ⑤ 4 週試験 (2000 年 11 月 21 日)
- ⑥ 13 週試験 (2001 年 1 月 23 日)

なお、コンクリートの試し練り、フレッシュコンクリート試験および強度試験用試験体の作製は、(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・教授足利工業大学) が行った。

4.4 実験方法

1) フレッシュコンクリート試験

- ① スランプ試験は、JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」による。
- ② コンクリートの空気量試験は、JIS A 1116

「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の試験による試験方法(質量方法)」、並びに JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法(空気室圧力方法)」による。

- ③ コンクリートのブリーディング試験は、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」による。

2) 硬化コンクリート試験

- ① 圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」による。
- ② 引張強度試験は、JIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」による。
- ③ 静弾性係数試験は、圧縮試験時に JSTM C7103「コンクリートの静弾性係数試験方法」による。
- ④ 細孔特性試験は、水銀圧入式ポロシメーター (Micromeritics 社) により、細孔径分布を測定する。細孔特性試験用試料は、試験材齢時に粒径 3~5mm に砕き、その後アセトンに 24 時間浸し真空乾燥させたものである。

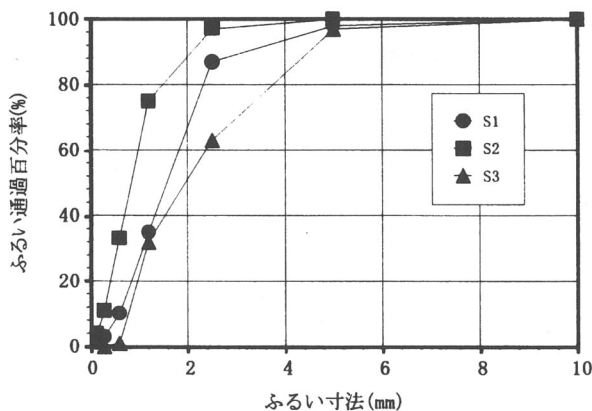


図1 細骨材のふるい分け試験結果

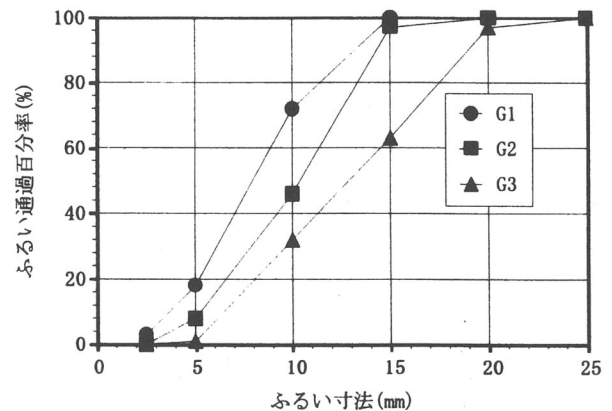


図2 粗骨材のふるい分け試験結果

表4 骨材の物理的性質

骨材種別		細 骨 材			粗 骨 材		
記 号		S1	S2	S3	G1	G2	G3
密度 (g/cm ³)	絶 乾	2.87	2.77	2.52	2.63	2.66	2.64
	表 乾	2.88	2.78	2.58	2.64	2.66	2.65
吸水率 (%)		0.32	0.30	2.19	0.50	0.07	0.43
単位容積質量 (kg/l)		1.60	1.60	1.70	1.56	1.62	1.62
実積率 (%)		55.70	58.00	—	59.50	60.90	—
粗 粒 率		3.66	2.80	2.72	6.07	6.46	6.70

5. 結果

5.1 フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリート試験の結果は、表7に示すとおりである。

5.2 硬化コンクリート強度試験結果

圧縮強度試験、引張強度試験および静弾性係数試験の結果は、表8に示すとおりであり、細孔特性試験結果による総細孔容積は表9に示すとおりである。

表5 骨材の組合せおよび配合条件

コンクリート記号	配合条件
S1+G3	水セメント比 50% 細骨材率 46.5% 単位水量 175kg/m ³ 目標スランプ 18 ± 1.5cm 目標空気量 4~5%
S2+G3	
S3+G3	
S3+G1	
S3+G2	

表6 コンクリートの配合

コンクリート記号	W/C	s/a	単位水量	絶対容積 (l/m ³)			単位量 (kg/m ³)						
	(%)		(kg/m ³)	C	S	G	C	S1	S2	S3	G1	G2	G3
S1+G3	50	46.5	175	111	311	358	350	896					949
S2+G3									865				949
S3+G3										802			949
S3+G1										802	945		
S3+G2										802		952	

表7 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 (%)		単位容積質量 (kg/l)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
		質量	圧力		
S1+G3	11.5	9.7	9.2	2.241	0.42
S2+G3	7.0	9.2	8.8	2.223	0.27
S3+G3	18.5	4.5	4.5	2.276	0.14
S3+G1	10.8	6.6	7.4	2.221	0.16
S3+G2	19.0	6.0	5.6	2.243	0.14

表8 コンクリートの圧縮強度、引張強度および静弾性係数

単位 N/mm²

コンクリート記号	圧縮強度			引張強度	静弾性係数 (×10 ³)	
	1週	4週	13週	4週	4週	13週
S1+G3	20.6	32.9	34.2	3.2	33.7	34.5
S2+G3	23.0	30.1	38.2	2.8	35.5	36.0
S3+G3	20.8	37.5	44.4	3.4	29.4	36.1
S3+G1	26.3	36.0	45.0	3.0	34.0	33.3
S3+G2	20.8	21.7	22.4	2.0	30.5	37.3

6. 考察

6.1 強度発現について

溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの材齢と圧縮強度との関係は、図3に示すとおりである。コンクリートの圧縮強度は、各配合とも材齢の経過とともに増加が見られる。しかし、細骨材に川砂、粗骨材に都市ごみ溶融スラグ骨材を用いたコンクリート（S3+G2）では、材齢が経過しても圧縮強度の大きな増加が認められない。この傾向は、溶融スラグ骨材（G2）の表面が平滑であり、骨材とペーストとの付着力が弱いためと推察される。

6.2 圧縮強度と引張強度との関係について

溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの材齢4週時における圧縮強度と引張強度との関係は、図4に示すとおりである。圧縮強度と引張強度との関係には、相関関係が認められる。

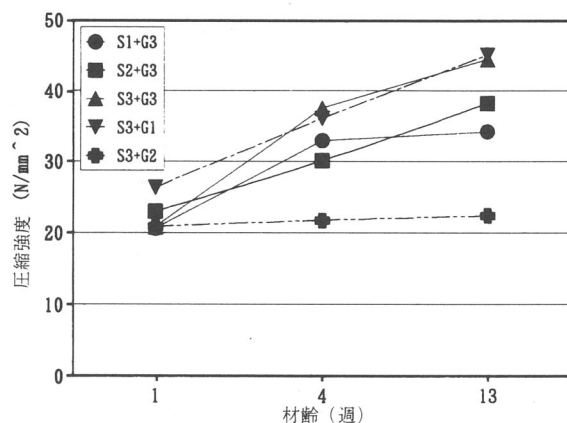


図3 コンクリートの材齢と圧縮強度との関係

6.3 静弾性係数について

溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの材齢と静弾性係数との関係は、図5に示すとおりである。また、圧縮強度と静弾性係数との関係は、図6に示すとおりである。各配合とも材齢の経過とともに静弾性係数の増大が認められるが、溶融スラグを骨材として用いたコンクリート（S1+G3、S2+G3、S3+G1 および S3+G2）では、川砂・碎石を用いたコンクリート（S3+G3）よりもその傾向は緩慢である。一方、圧縮強度と静弾性係数との関係においても、川砂・碎石を用いたコンクリート（S3+G3）は大きな増加が認められるが、溶融スラグを骨材として用いたコンクリート（S1+G3、S2+G3、S3+G1 および S3+G2）では、圧縮強度の増加に伴う静弾性係数の著しい増加は認められない。その理由は、材令に関与しない強剛な溶融スラグ骨材により、コンクリートの変形が拘束さ

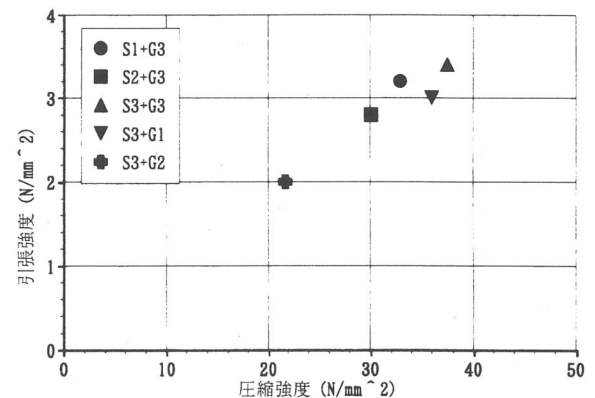


図4 コンクリートの圧縮強度と引張強度との関係

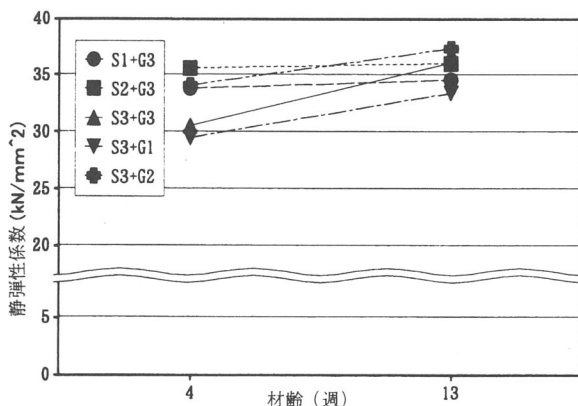


図5 コンクリートの材齢と静弾性係数との関係

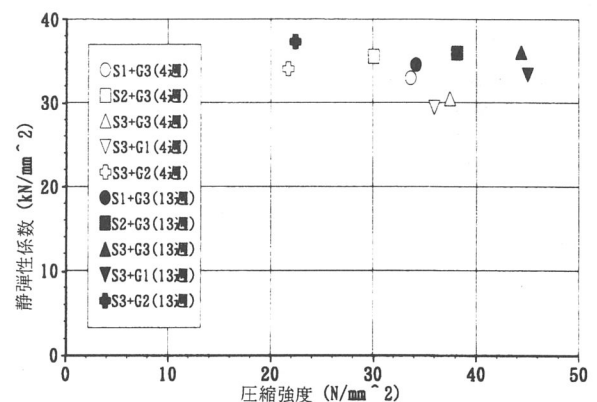


図6 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数

れるため、圧縮強度の差異が明確に反映されていないものと思われる。

6.4 圧縮強度と総細孔容積との関係について

溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの圧縮強度と総細孔容積との関係は、図7および図8に示すとおりである。都市ごみ溶融スラグを粗骨材として用いたコンクリート (S3+G2) は、材齢に伴い総細孔容積の減少が見られるが、圧縮強度の増加は見られない。これは、都市ごみ溶融スラグを粗骨材として用いたコンクリートのブリー

ディング量が多くコンクリート中の骨材下面にブリーディング水が停留し骨材とペーストとの付着を弱めることに起因する現象と推察される。

7. まとめ

都市ごみおよび下水汚泥に由来する溶融スラグを骨材として用いたコンクリートに関する実験を行なった。その結果をまとめると、次のように示される。

- 1) 溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートは、ブリーディング量が多い割に強度が高い。
- 2) セメントとの付着の悪い溶融スラグ骨材を用いると、圧縮強度が低い。
- 3) 圧縮強度と引張強度との相関は高いが、静弾性係数は圧縮強度の増加に比例しない。

さらに、溶融スラグの有効利用に関しては、強度特性だけでなく、重金属類の溶出特性などの環境面での安全性についても充分検討しなければならない。

8. 謝辞

本研究は、(財) 建材試験センター・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・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) の一環として行われた成果の一部である。関係各位に対し厚く御礼申し上げます。

9. 参考文献

- 1 スラグの有効利用マニュアル、(財) 廃棄物研究財団、平成 11 年 11 月
- 2 都市ごみ溶融スラグの 1993～1995 は (財) 廃棄物研究財団調べ、下水汚泥溶融スラグの 1993～1994 は、「下水道情報」
- 3 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成果報告書、(財) 建材試験センター、平成 13 年 3 月

〔受理年月日 2001 年 9 月 25 日〕

表9 水銀圧入試験による総細孔容積

コンクリート記号	単位 cc/g	
	4 週	13 週
S1+G3	0.0472	0.0404
S2+G3	0.0485	0.0473
S3+G3	0.0690	0.0636
S3+G1	0.0483	0.0519
S3+G2	0.0669	0.0673

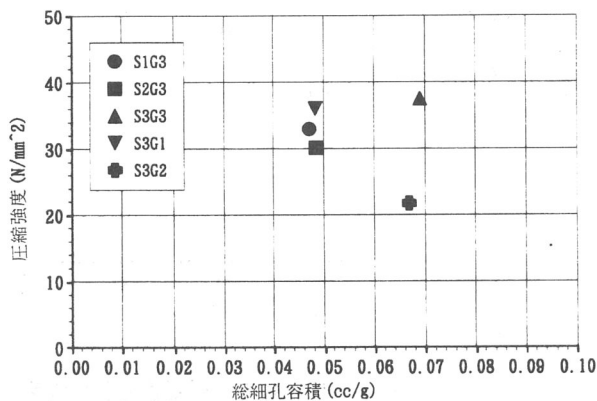


図7 コンクリートの総細孔容積と圧縮強度との関係(4週)

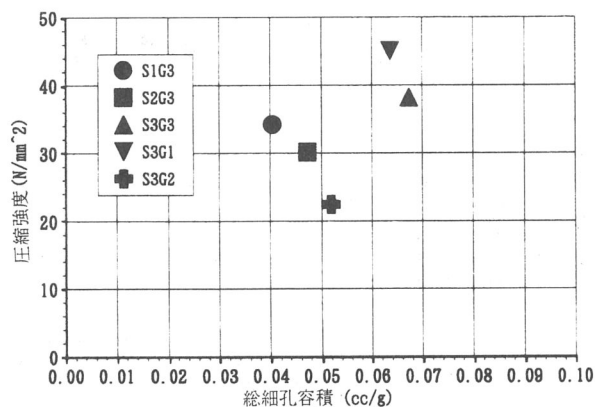


図8 コンクリートの総細孔容積と圧縮強度との関係(13週)