

論文 都市ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの諸特性

松山哲也*1・堺孝司*2・吉田秀典*3・高木茂*4

要旨: 都市ごみを溶融・水砕した溶融スラグはコンクリート用骨材として再利用されている。しかし、スラグおよびそれを用いたコンクリートの基本的特性や安全性などに関しては依然不明な点が多い。本研究は、都市ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートのフレッシュおよび硬化コンクリートの基礎的な特性ならびの硬化コンクリートからの有害物質の溶出について検討したものである。その結果、溶融スラグは一定の条件下においてコンクリート用細骨材として利用できること、および一般的な使用状態においては溶出に対する安全性は確保されることなどが明らかとなった。

キーワード: 溶融スラグ, コンクリート用骨材, 乾燥収縮, 中性化, 凍結融解, 溶出

1. はじめに

近年、都市部を中心としてごみが多様化、増加している。そのごみの適正な処理を進めてゆくにあたっては、焼却設備の整備と同時に処理時に発生する副生成物の有効利用¹⁾を進めて行かなければならない。都市ごみ溶融スラグは、一部のコンクリート製品用骨材として再利用されている。しかし、コンクリート用骨材として本格的な使用には至っていない。これは、その安全性や耐久性などに関して^{2,3)}の研究はあるが²⁾³⁾、溶融スラグを用いたコンクリートの一般化のために十分な情報が得られていないことによる。そこで、本研究では溶融スラグのコンクリート用骨材として多面的な評価を行い、溶融スラグを安全かつ大量に使用できる利用技術開発に向けての基礎的な検討を行った。

2. 溶融スラグの性状

本研究で用いた溶融スラグは一般都市ごみを高温により溶融し、水砕・磁選処理されたものである。この溶融スラグの主成分は、シリカが40~42%、石灰が32~34%、アルミナが16~

19%である。このスラグの塩基度(CaO/SiO₂質量比)は、0.8程度に調整されており、スラグとメタルは分離されて凝固し、磁選工程でメタル分は良好に取除かれているため、スラグ中に含まれる金属鉄は0.3%以下と少ない。色調は灰白色、或いは黒色を呈し、表面は滑らかで光沢がある。スラグの形状は角張っており、粒径は概ね5mm以下で少量の針状物を含んでいる。

コンクリート細骨材としての物性は、絶乾比重が2.4~2.7程度、吸水率が1.0~2.7%程度であり、化学法によるアルカリシリカ反応性は無害と判定されている。

本研究でコンクリート用骨材として用いる溶融スラグの組成および有害物質含有量を表-1、スラグおよびセメントの溶出試験結果を表-2に示す。なお、表-2には一般廃棄物の溶融固化物に係る環境目標基準をあわせて示した。

3. コンクリートの配合

3.1 使用材料

本研究で用いたコンクリート材料を表-3に示す。

*1 日本興業(株)開発部 (正会員)

*2 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博(正会員)

*3 香川大学助教授 工学部安全システム建設工学科 工博(正会員)

*4 香川県生活環境部

表-1 熔融スラグの組成および有害物質含有量

項目	(%)
FeO	0.71
Fe ₂ O ₃	0.23
SiO ₂	42.05
CaO	33.86
MgO	1.67
M-Fe	0.25
Al ₂ O ₃	18.52
Na ₂ O	2.40
K ₂ O	0.76
項目	(mg/kg)
Cd	< 0.05
Pb	13.5
Cr ⁺⁶	< 2.00
As	< 0.50
T-Hg	< 0.01

表-2 スラグおよびセメントの溶出試験結果

項目	溶出量 (mg/l)		
	スラグ	セメント	環境基準 ⁴⁾
Cd	< 0.001	< 0.001	< 0.01
Pb	< 0.005	0.009	< 0.01
Cr ⁺⁶	< 0.04	1.41	< 0.05
As	< 0.005	0.001	< 0.01
T-Hg	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005
Se	< 0.002	0.005	< 0.01

表-3 試験に用いたコンクリート材料

材料・主成分		区分(産地)	比重	粗粒率	
セメント		普通ポルトランド	3.16	-	
練混ぜ水		上水道水	1.00	-	
細骨材	細砂	海砂	2.58	1.72	2.72
	粗砂	(香川県坂出市産)	2.53	2.76	
	熔融スラグ	水砕・磁選スラグ (香川東部溶融センター)	2.68	3.41	
粗骨材	1505	碎石(香川県仲多度郡産)	2.59	5.95	6.55
	2015		2.62	7.00	
混和剤	ポリカルボン酸系 エーテル系複合体	高性能AE減水剤	-	-	
	変性ロジン酸化 化合物系陰イオン 界面活性剤	AE助剤	-	-	

表-4 コンクリートの配合および性状

スラグ置換率 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										コンクリート性状			
			セメント C	水 W	細骨材 s				粗骨材 G			高性能AE減水剤	AE助剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
					全体質量	細砂	粗砂	熔融スラグ	全体質量	碎石 1505	碎石 2015					
0	35	41.1	486	170	657	33	624	0	970	388	582	2.19	0.000	6.9	3.5	18.1
	45	44.1	378	170	743	37	706	0	970	388	582	1.89	0.000	8.7	5.5	18.1
	55	45.9	309	170	799	40	759	0	970	388	582	1.39	0.000	6.5	4.4	18.2
	65	47.0	262	170	836	42	794	0	970	388	582	1.70	0.000	7.4	5.7	18.2
20	35	41.1	486	170	666	100	433	133	970	388	582	2.43	0.194	8.3	4.6	18.2
	45	44.1	378	170	754	113	490	151	970	388	582	1.51	0.000	9.8	4.5	18.0
	55	45.9	309	170	809	121	526	162	970	388	582	1.39	0.000	6.7	4.9	18.0
	65	47.0	262	170	847	127	551	169	970	388	582	1.83	0.000	7.4	5.7	18.9
40	35	41.1	486	170	676	203	203	270	970	388	582	2.19	0.494	6.2	4.4	19.1
	45	44.1	378	170	764	229	229	306	970	388	582	1.89	0.000	6.2	4.2	18.0
	55	45.9	309	170	820	246	246	328	970	388	582	1.85	0.000	7.7	5.3	18.6
	65	47.0	262	170	860	258	258	344	970	388	582	1.96	0.002	6.7	5.1	18.7
60	35	41.1	486	170	685	274	0	411	970	388	582	2.67	0.588	8.3	4.8	19.0
	45	44.1	378	170	775	310	0	465	970	388	582	1.89	0.347	9.5	5.6	18.2
	55	45.9	309	170	832	333	0	499	970	388	582	1.70	0.000	8.2	4.7	18.4
	65	47.0	262	170	871	348	0	523	970	388	582	1.96	0.000	6.4	4.9	19.0

3.2 配合

表-4 に各コンクリートの配合を示す。全配

合とも単位水量を一定とし、高性能 AE 減水剤の添加量により、所定のスランプに調整した。

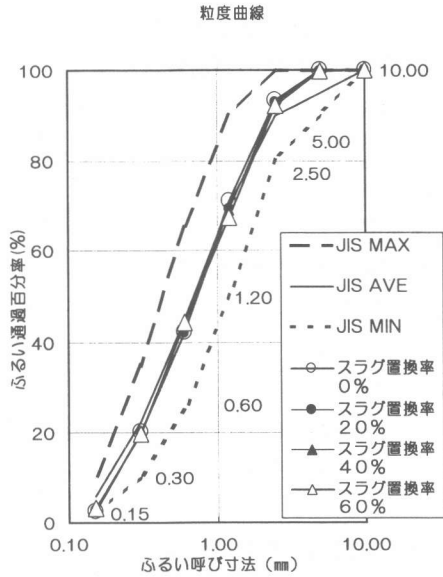


図-1 細骨材合成粒度曲線

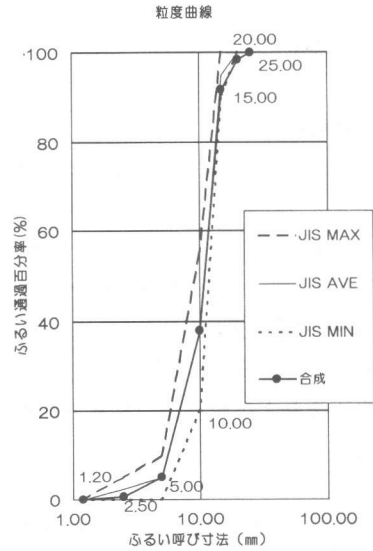


図-2 粗骨材合成粒度曲線

これは、単位水量を調整した場合、セメント量等各材料が変化し、スラグ置換率によるコンクリート性状の変化が明確にならないと考えたためである。スラグ混入の影響を明確に把握するため、全配合とも粗骨材容積が一定となるように細骨材率を決定した。

減水剤として、高性能 AE 減水剤を用いた。また、所定の空気量が確保されない場合は、AE 助剤の添加により目標空気量を確保した。空気量は耐凍害性に著しく影響するため、その許容範囲（標準許容差 $\pm 1.5\%$ ）については、上限値（ $+1.5\%$ ）よりも下限値（ -1.0% ）を厳しく設定した。

骨材粒度は JIS で決められている粒度範囲の中央付近となるように、各骨材の混合率を決定した。骨材の合成粒度曲線を図-1、図-2 に示す。

スラグ置換率は、最大値を 60%、最小値を 0% として、その間を 20% 間隔とした。

水セメント比については、最大値を 65%、最小値を 35% として、その間を 10% 間隔とした。

3.3 練混ぜ

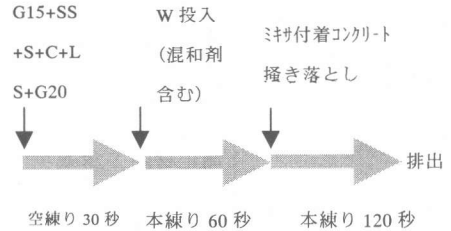
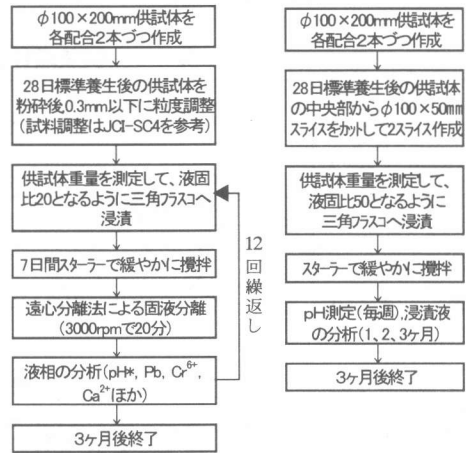


図-3 コンクリートの練混ぜ方法



(a) 溶解法

(b) 浸漬法

図-4 溶出試験

コンクリートの練混ぜは、2軸強制練りミキサ（公称容量 60 リットル）により行った。練混ぜ方法を図-3 に示す。

4. 試験項目と方法

4.1 フレッシュおよび硬化コンクリート

本研究で行ったフレッシュおよび硬化コンクリートの試験項目およびその方法を表-5 に示す。各配合で行った試験項目を表-6 に示す。

4.2 有害物質の溶出

表-7 に有害物質の溶出試験方法を示す。図-4 に溶解法および浸漬法の試験方法を示す。

5. 試験結果

5.1 フレッシュおよび硬化コンクリート

(1) 高性能 AE 減水剤の添加量

表-4 に示すように高性能 AE 減水剤の添加量は全体としてスラグ置換率の増加とともに増加する傾向にあった。

(2) 圧縮強度

材齢 28 日における圧縮強度を図-5 に示す。スラグ置換率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向にある。

(3) 引張強度

水セメント比 45% におけるスラグ置換率と材齢 28 日における引張強度の関係を図-6 に示す。

表-5 フレッシュおよび硬化コンクリートの試験項目および方法

試験項目	試験方法	記号
スランプ, 空気量	JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法による 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による	○
圧縮強度試験	JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法による 測定材齢：7 日、28 日、91 日	○
引張強度試験	JIS A 1113 コンクリートの引張強度試験方法による 測定材齢：28 日	△
静弾性係数試験	試験供試体へのひずみゲージ張り付けによる 測定材齢：28 日	□
乾燥収縮試験（長さ変化）	JIS A 1129 モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法による 測定材齢：6 ヶ月まで	▼
凍結融解試験	JSCE-G501-1986 コンクリートの凍結融解試験方法による 測定材齢：300 サイクルまで	▲
促進中性化試験	日本建築学会 コンクリートの促進中性化試験方法(案)による 測定材齢：6 ヶ月まで	●

表-6 試験項目と配合条件の組み合わせ

スラグ置換率 水セメント比	0 %	20 %	40 %	60 %
35 %	○	○	○□	○
45 %	○△□▼▲●■	○△□	○△□▼▲●■	○△□▼▲●■◇◆
55 %	○	○	○	○
65 %	○■	○	○□	○●■

(備考) スラグ置換率 = {スラグ / (細骨材 + スラグ)} × 100 (質量比)

表-7 有害物質の溶出促進試験

溶解法 1	イオン交換水 pH≒6, 液固比 20	■
溶解法 2	イオン交換水 pH≒4, 液固比 20	◇
浸漬法	イオン交換水 pH≒6, 液固比 50	◆

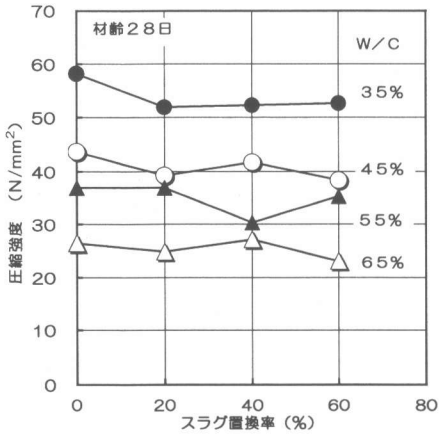


図-5 圧縮強度

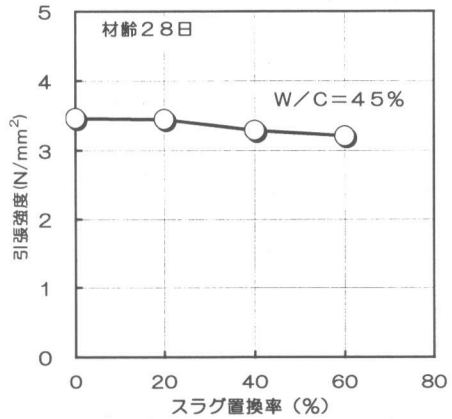


図-6 引張強度

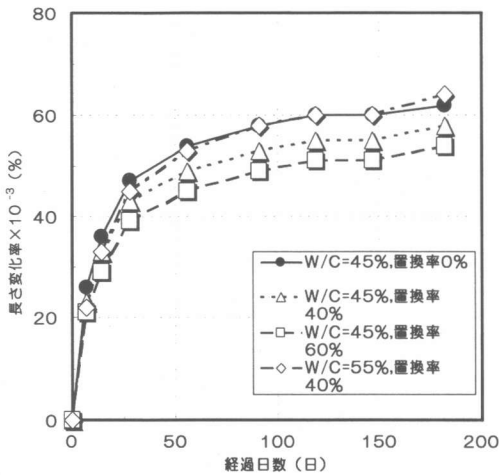


図-7 乾燥収縮

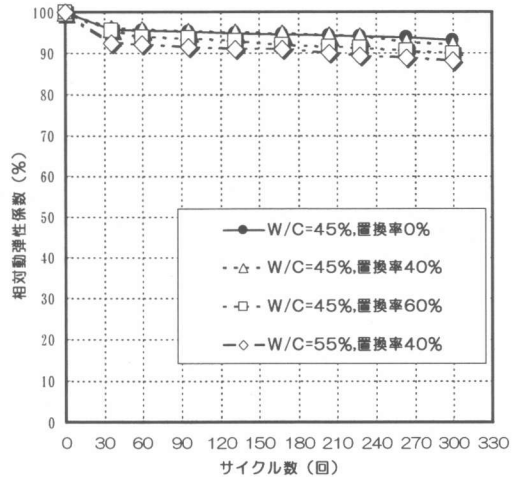


図-8 凍結融解サイクルと相対動弾性係数

す。

スラグ置換率の増加に伴い、引張強度は低下する傾向が見られる。

(4) 静弾性係数

静弾性係数はスラグ置換率には影響されず、ほぼ一定となった。また、静弾性係数は圧縮強度にほぼ比例する結果となった。

(5) 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮による長さ変化率の測定結果を図-7に示す。水セメント比45%の

場合、スラグ置換率の増加とともに乾燥収縮は減少する傾向がある。この原因については今後検討する必要がある。また、スラグ置換率40%の場合、水セメント比が45%よりも55%の方が乾燥収縮は大きくなる傾向がある。

(6) 凍結融解

コンクリートの凍結融解試験における凍結融解サイクルと相対動弾性係数との関係を図-8に示す。

何れの場合も300サイクル終了時において、

相対動弾性係数は90%程度確保されており、スラグ置換がなされてもコンクリートは十分な耐凍害性を有しているといえる。

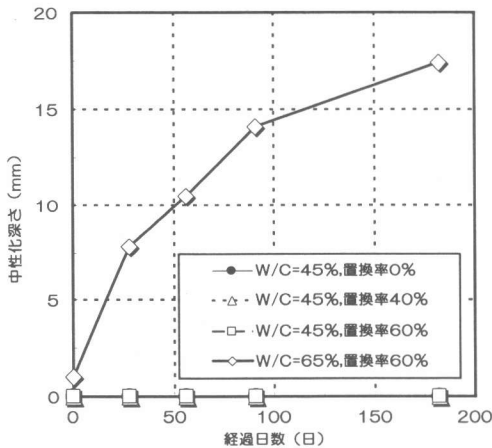


図-9 中性化

(7) 中性化

試験開始後の材齢と中性化深さとの関係を図-9に示す。材齢6ヶ月において、水セメント比45%の場合でスラグ置換率0~60%のコンクリートの中性化深さは0mmである。また、水セメント比65%でスラグ置換率60%のものについては、中性化深さが17.4mmとなり。水セメント比の影響が大きいことがわかる。しかし、置換の影響については更に検討が必要である。

5.2 有害物質の溶出

溶解法による試験の試験材齢1週間の場合、鉛(Pb)がすべての場合において検出され、その値は0.004~0.015mg/lの範囲にあった。その他の物質については検出限界以下であった。鉛に対する環境基準が0.01mg/l以下なることを考慮すれば一部の配合で鉛に関する基準を超えたことになる。しかしながら、浸漬法では鉛についても検出されなかった。したがって、コンクリートの一般的な使用状態を考慮すれば溶出に対する安全性は十分確保されると考えられる。なお、本研究で用いたスラグについては一般廃棄物の環境基準に定められているすべての有害

物質について検出されていない。

6. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 用いたスラグの粒度は、粗目の傾向にあり、天然の細骨材を混合して粒度調整を行う必要がある。
- (2) スラグの形状は角張っており、置換率の増加に伴って高性能 AE 減水剤の添加量が増える。
- (3) 圧縮強度および引張強度は、スラグ置換率の増加に伴い低下傾向にある。
- (4) 静弾性係数は、スラグ置換率には影響されない。
- (5) 十分な耐凍害性を有している。
- (6) 用いたスラグから有害物質の溶出はなかった。
- (7) コンクリートの溶解法による試験結果から環境基準以上の鉛が検出されたが、一般的な使用状態においては、コンクリートの溶出に対する安全性は確保される。

参考文献

- 1)環境庁：平成12年版環境白書，総説 第1章 第1節3，2000.6.5
- 2)錦織和紀郎ほか：焼却灰熔融スラグを用いたコンクリートの特性と実施工への適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.1, pp.169-174, 1999.6
- 3) 斉藤丈士ほか：ごみ焼却灰熔融スラグを結晶化させた骨材がコンクリートの性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.2, pp.289-294, 2000.6
- 4)厚生省生活衛生局水道環境部長：一般廃棄物の熔融固化物の再生利用の実施の促進について，1998.3.26