

報告 一般ゴミ焼却灰溶融スラグを用いた高流動コンクリートの特性

山瀬一博*¹・山岡紘*²・森本博昭*³・島崎磐*⁴

要旨：一般ゴミの焼却灰をプラズマ方式で溶融して排出される焼却灰溶融スラグ（以下溶融スラグ）を高流動コンクリートの細骨材の一部として利用し、コンクリート2次製品（有筋のL型擁壁，ボックスカルバート）を製造した。コンクリート2次製品の製造にあたり、溶融スラグの置換割合を検討した結果、高流動コンクリートへの利用可能な割合を導き出した。その結果、自己充填性、高強度、低ブリーディング、高耐久性に優れた高流動コンクリートの特性を損ねることはなかった。フレッシュ状態や硬化後の各種試験を行ったが、耐久性・安全性に関して従来の高流動コンクリートと差異が無いことを確認した。

キーワード：焼却灰溶融スラグ，高流動コンクリート，力学的性質，耐久性，安全性

1. はじめに

ゴミ焼却炉でゴミが焼却された後に残る焼却灰は、環境保全の声が高まっている今、その処理が重要な問題となっている。近年、焼却灰を高温溶融して無機質等からなるガラス質様の溶融スラグに変化させる処理が行われてきている。この溶融スラグの再利用策として、コンクリートの細骨材としての適用が検討されている¹⁾。しかし、溶融スラグを高流動コンクリートで再利用した例はあまり見られない。

そこで、本研究の目的は、高流動コンクリートの特性を活かし、溶融スラグを安全かつ実用的に細骨材として用い、コンクリート2次製品の製造について検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

結合材は、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³ 粉末度：3,150cm²/g）及び高炉スラグ微粉末（密度：2.88 g/cm³ 粉末度4,000cm²/g）である。粗骨材は川砂利（最大

寸法 15mm 表乾密度：2.62 g/cm³），細骨材は川砂（表乾密度：2.57 g/cm³ F.M：2.85）を使用した。混和剤は高性能A E減水剤（ポリカルボン酸系）を用いた。また、溶融スラグ（表乾密度：2.82 g/cm³ F.M：3.30）を使用した。溶融スラグは塩分を含んでいるが²⁾、溶融スラグ自体を水で洗浄することにより塩分除去が可能である。実際、2次製品製造にあたり、スラグの入荷毎に簡易塩分測定器により塩分濃度を測定し、コンクリートに影響を及ぼさない程度まで洗浄を行った。

2.2 配合

溶融スラグの最大混入率を求めるために、細骨材に対する溶融スラグの置換率Xを変化させて試験練りを行った。配合決定にあたり、溶融スラグ無混入の高流動コンクリート配合を基準にした。最初に、高炉スラグと混和剤の量を一定とし、単純に砂と置き換えて試験練りを行った。その結果を表-1に示す。これによると、置換率 10%の場合は分離もなく、コンクリート状態は良好であった。しかし、20%wt→50%wt と置換率を上げるに従い、コ

*1 昭和コンクリート工業(株) 製造部生産管理課 (正会員)

*2 昭和コンクリート工業(株) 製造本部長

*3 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*4 岐阜工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (正会員)

表-1 試験練り結果（高炉スラグ、混和剤一定）

配合 No.	置換率 X	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)		スランブフロー値 (mm)	フローTime (s)		Air (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	考察
				砂	溶融スラグ		500mm	最終			
①	0wt%	33.4	51.5	854	0	750×710	4.5	43.6	0.9	76.0	良好
②	10wt%			776	86	720×670	5.6	42.2	1.4	-	粗骨材が目立つ。やや粘性有り
③	20wt%			696	174	810×750	5.0	51.7	1.0	-	分離限界
④	30wt%			615	263	790×740	4.8	52.6	1.3	70.7	練り後、すぐは良好 時間経過後分離
⑤	50wt%			447	448	分離	4.4	-	0.5	-	完全分離 中央部に粗骨材が密集

※C は高炉スラグを含む s/a は細骨材に溶融スラグを含む

単位量 (kg/m³) は水=175, セメント=360, 高炉スラグ=164, 砂利=804 及び混和剤=8.12 (添加量 1.55%) である。

ンクリートの分離が大きくなり良好な状態とはいえなかった。置換率 10wt% では、溶融スラグの単位量は 86kg、相対重量比で 3.7% であり、量的に有効利用とは言えない。そこで、高炉スラグと混和剤の添加量(%)を調整し、置換率を変えた場合の試験練りを行った。その結果を表-2 に示す。各配合共に高炉スラグは、溶融スラグの 10wt% を基準配合の高炉スラグ量(164kg)に追加した。これは、今回使用した細骨材の川砂が 0.15mm 以下の微粒分を 10~12% 含有しており、この 0.15mm 以下の砂がフロー値を伸ばし、コンクリートの状態を良くしていると考えられる。しかし、溶融ス

ラグには 0.15mm 以下はほとんど含有していない為、置換率を上げると流動化に必要な微粒分が不足し、結果、コンクリートの状態が分離傾向へと変化したと考えられる。そこで溶融スラグに不足している 0.15mm 以下の微粒分を高炉スラグによって補い、調整を行った。その結果、置換率 30wt% までは分離もなく、良好な状態のコンクリートを得ることができた。

置換率 42wt% は分離傾向にあり 50wt% では完全分離だった。42wt% は混和剤の添加量(%)を下げ、高炉スラグを若干増すことで、良好なコンクリート状態を得ることができる。し

表-2 試験練り結果（高炉スラグ、混和剤調整）

配合 No.	置換率 X	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤	
				水	セメント	高炉スラグ	砂	溶融スラグ	砂利	使用量 (kg)	添加量 (%)
①	0wt%	33.4	51.5	175	360	164	854	0	804	8.12	1.55
②	10wt%	32.8	51.5			173	768	85		8.00	1.50
③	20wt%	32.3	51.4			181	681	171		7.84	1.45
④	30wt%	31.9	51.4			190	596	256		7.29	1.35
⑤	42wt%	31.3	51.5			199	499	354		7.27	1.30
⑥	50wt%	30.9	51.7			207	434	427		7.37	1.30

※C は高炉スラグを含む、s/a は細骨材に溶融スラグを含む

配合 No.	置換率 X	スランブフロー値 (mm)	フローTime (s)		Air (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	考察
			500mm	最終			
①	0wt%	750×710	4.5	43.6	0.9	76.0	良好
②	10wt%	755×720	5.2	52.1	1.2	76.7	良好
③	20wt%	760×735	4.9	45.9	1.2	75.6	良好
④	30wt%	670×660	6.6	44.3	1.5	77.8	良好
⑤	42wt%	795×800	4.6	48.7	0.9	71.3	分離傾向 添加量を下げれば分離は防げる感じ
⑥	50wt%	790×780	4.3	45.5	0.8	71.7	分離

かし、一方で 50wt%では高炉スラグを大幅に増量し、配合の見直しなどが必要となることから、コストアップにつながる可能性が大きくなり、実用的な置換率とはいえなくなる。

この試験練りの結果より、実用的観点からの置換率 X の上限は、 $30\text{wt}\% \leq X < 42\text{wt}\%$ の範囲に有ると考えられる。そこで、さらに細かく置換率を変化させて試験練りを行った。その結果を表-3 に示す。配合計算上、置換率は 30, 33, 35, 39, 42wt%とした。これによると、置換率 33wt%までは良好な状態のコンクリートを得ることができた。35wt%以上では、混和剤の添加量(%)を下げたり、高炉スラグ量を増しても分離傾向にあった。添加量(%)をさらに下げ、高炉スラグ量を増せば分離は抑えられるが、逆に型枠無振動でコンクリート 2 次製品を製造する際の良好なフローを得られなくなる可能性がある。高流動コンクリートは自己充てん性が高いという特性があり、これを活かした型枠無振動による 2 次製品の製造を第一の目標とするためには、良好

なフローは必須条件である。無振動による打設は練り混ぜ時に均一分散した熔融スラグがその状態のまま製品化することを可能にする。熔融スラグを均一に分散させることがコンクリート 2 次製品の安全性を確保する。このためには、無振動による打設は絶対条件であり、必然的に良好なフローが要求される。

全ての試験練りの結果(表-1~表-3)によると、良好な状態のコンクリートを得るには、基準配合に対し、置換率が 10wt%までは、高炉スラグ・混和剤の添加量(%)の調整は必要としない。20~33wt%では、混和剤の添加量(%)を下げて熔融スラグの 10wt%の分だけ高炉スラグを補う。置換率 35~42wt%範囲では、混和剤の添加量(%)をさらに低くし、高炉スラグの補足量を熔融スラグの 10wt%以上補う。置換率が 50wt%以上になると、高炉スラグの補足量だけでは難しいので、基準となる配合の見直しが必要となる。ところが、置換率 35~42wt%では、混和剤の添加量(%)を減らしても高炉スラグ量が増すため、結果的にコストア

表-3 試験練り結果(高炉スラグ、混和剤調整 置換率 30~42wt%)

配合 No.	置換率 X	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤		
				水	セメント	高炉 スラグ	砂	熔融 スラグ	砂利	使用量 (kg)	添加量 (%)
①	30wt%	31.9	51.4	175	360	190	596	256	804	8.12	1.55
②	33wt%	31.7	51.5			192	571	282		7.73	1.40
③	35wt%	31.6	51.5			194	555	300		7.76	1.40
④	35wt%	31.6	51.5			194	555	300		7.48	1.35
⑤	39wt%	31.4	51.4			198	514	337		7.53	1.35
⑥	39wt%	31.0	51.2			204	506	337		7.61	1.35
⑦	42wt%	31.3	51.5			199	499	354		7.27	1.30

※C は高炉スラグを含む、s/a は細骨材に熔融スラグを含む

配合 No.	置換率 X	スランブフロー値 (mm)	フローTime (s)		Air (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	考察
			500mm	最終			
①	30wt%	720×715	5.7	50.9	2.0	75.4	良好
②	33wt%	780×750	5.6	52.3	1.5	76.2	良好
③	35wt%	745×775	5.4	51.6	1.8	70.4	分離ざみ 添加量を 0.05 下げて練り直し→No.4
④	35wt%	755×760	4.5	49.2	1.7	-	分離ざみ 中心に砂利の残り有り
⑤	39wt%	775×755	4.3	46.8	1.9	-	分離ざみ 高炉スラグの増加量を 10→12wt%に変更→No.6
⑥	39wt%	840×810	3.9	46.1	1.2	-	分離ざみ
⑦	42wt%	770×765	4.3	51.5	1.6	73.8	分離ざみ

ップにつながる。したがって、コンクリートの状態や強度面を考慮すると、最適且つ有効な置換率Xは、33wt%程度であると判断することができる。

2.3 2次製品製造

熔融スラグの置換率33wt%の場合に、パッチャープラントにより練混ぜてコンクリート2次製品を製造した。このとき、熔融スラグ無混入高流動コンクリートより、型枠の充てん性が悪かった為、粗骨材量を減らし、細骨材量（川砂，熔融スラグ共に）を増やす配合修正を行った。その配合を表-4に示す。この配合に従った場合，充てん性は無混入コンクリートとほぼ同等となったので，この配合で2次製品の製造を行うことにした。図-1～図-5に熔融スラグ混入高流動コンクリートの一定期間内におけるコンクリート試験【圧縮強度（標準養生），スランプフロー，空気量，塩化物量】の結果を示す。圧縮強度は，無混入のものに比べると平均値で約4N/mm²低下していた。これは，上記のように試験練り配合より粗骨材を減らしたためだと思われる。図-1の圧縮強度によると，強度は62～72N/mm²の範囲にある。一般的にコンク

リート2次製品の設計基準強度は30～40N/mm²であることから，若干の強度低下は問題ないと考える。スランプフロー，空気量は共に安定していた。塩化物量は，変動は大きいものの基準値0.3kg/m³以下であった。

3. 試験結果および考察

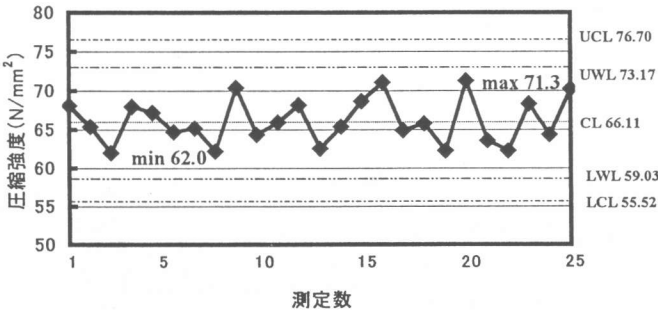
3.1 溶出結果

熔融スラグを混入させたコンクリートを砕

表-4 配合

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤	
			水	セメント	高炉スラグ	砂	熔融スラグ	砂利	使用量 (kg)	添加量 (%)
試験練り配合	31.7	51.5	175	360	192	571	282	804	7.73	1.40
修正配合	31.6	52.4	175	360	193	578	287	786	7.74	1.40
修正後の差	-1	+0.9	0	0	+1	+7	+5	-18	0.01	0

※Cは高炉スラグを含む，s/aは細骨材に熔融スラグを含む



混入：標準偏差σ=2.91 変動係数V=4.40 平均値 66.11
無混入：標準偏差σ=2.69 変動係数V=3.82 平均値 70.37

図-1 圧縮強度

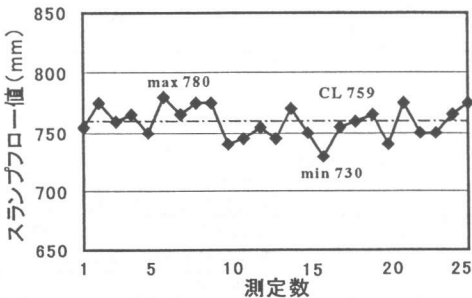


図-2 スランプフロー値

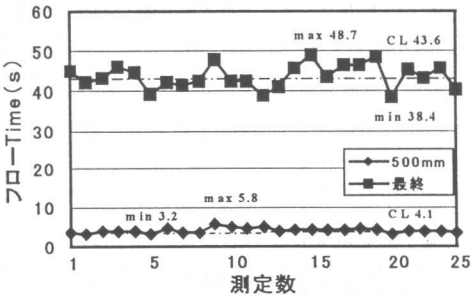


図-3 フローTime

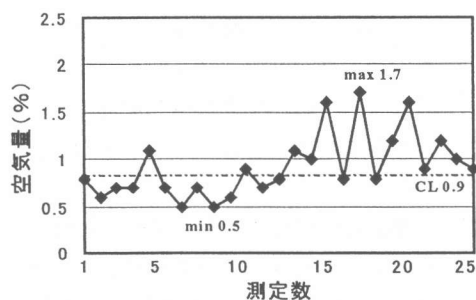


図-4 空気量

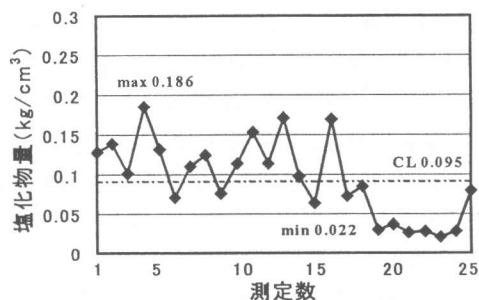


図-5 塩化物量

き,環境庁告示第46号に準拠し行った³⁾。溶出試験項目は,カドミウム,全シアン,鉛,六価クロム,砒素銀の6項目である。その結果を溶出スラグ単味のものも併せて表-5に示す。溶出濃度は,いずれも基準値を下回る結果となり,溶出による環境汚染の危険性は少ないと考えられる。

3.2 アルカリシリカ反応

JIS A 5308 付属書 8「骨材のアルカリシリカ反応試験(モルタルバー法)」に準拠し行った。その結果を図-6に示す。26週で膨張率の平均が0.006%で,反応性は少ないと考えられる。

3.3 耐凍結融解性

JIS A 6204 付属書 2「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し,凍結融解サイクルは300回とした。供試体を4週間水中養生した後に試験を行った。その結果を図-7に示す。サイクル数が300回で,相対動弾性係数99%,質量減少率0%で高い凍結融解抵抗性をもつと考えられる。

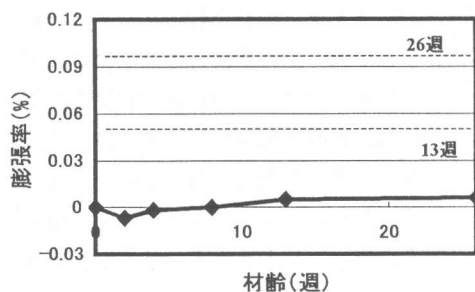


図-6 アルカリシリカ反応試験結果

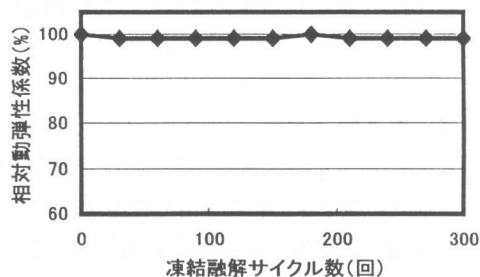


図-7 凍結融解試験結果

表-5 溶出試験結果

項目	計量結果		基準値
	コンクリート	スラグ単味	
カドミウム	0.001mg/L 未満	0.001mg/L 未満	0.01mg/L
全シアン	不検出	不検出	不検出
鉛	0.001mg/L 未満	0.002mg/L	0.01mg/L
六価クロム	0.024mg/L	0.005mg/L 未満	0.05mg/L
砒素	0.001mg/L 未満	0.001mg/L 未満	0.01mg/L
総水銀	0.00005mg/L 未満	0.00005mg/L 未満	0.0005mg/L

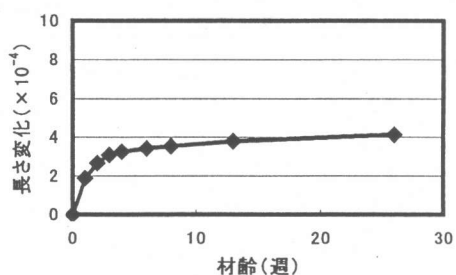


図-8 長さ変化試験結果

3.4 長さ変化

JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ試験」のコンパレータ方法で行った。その結果を図-8 に示す。乾燥材令 26 週で長さ変化率 4.16×10^{-4} で質量減少率は 0.86% で、通常範囲内の値を示した。

3.5 中性化

日本建築学会「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」に準拠し行った。26 週で、中性化深さは 0mm であった。

以上の結果をまとめると表-6 になる。比較対照として溶融スラグ無混入の高流動コンクリートと普通コンクリートの試験結果も併記した。無混入の高流動コンクリートは、普通コンクリートよりも全ての項目に於いてまさっていた。これは、高炉スラグ微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートの品質が、普通コンクリートの品質より高いことを意味する。

また、溶融スラグを混入させたものとそうでないものを比較すると、溶融スラグを混入した場合、高流動コンクリートの品質の劣化は極めて少ないと考えられる。

4 まとめ

- (1) アルカリシリカ反応、長さ変化、凍結融解、促進中性化および溶出の各試験から、溶融スラグ混入による高流動コンクリー

トの品質の劣化は認められなかった。品質の高い高流動コンクリートに混入することで、溶融スラグ自体を安全にコンクリート中に包み込むことができることがわかった。

- (2) 基準配合の高流動コンクリートに対し、混入した溶融スラグの 10wt%分だけ高炉スラグを増量し、かつ混和剤の添加量(%)を減らす補正を行った上で、容易に砂と溶融スラグを置換できる。この時の置換率は、コンクリートの状態(分離、充てん性等)を考えると最大で 33%であることがわかった。また、強度は若干低下するものの、無混入のコンクリートと何ら差異のないものであった。置換率を 35%以上にすると、強度は出るがコンクリートの分離が顕著になる。その上、溶融スラグを安全にコンクリート中に包むことが難しく、置換率を上げる場合には、高炉スラグの増量や基準配合の見直しが必要となり、コストアップ等の問題が生じ、実用的な置換ができなくなる。

謝辞

末筆ながら、実験材料をご提供頂きました可茂衛生施設利用組合(ささゆりクリーンパーク)、また、実験及び諸試験にご協力を頂いた竹本油脂株式会社に記して謝意を表します。

表-6 諸試験結果一覧

試験項目	溶融スラグ 混入高流動 コンクリート	無混入高流動 コンクリート	普通コン クリート (AE)
長さ変化試験 長さ変化率	0.0416%	0.0572%	0.0848%
質量変化率	0.86%	1.23%	2.42%
凍結融解試験 相対動弾性係数	99%	102%	98%
促進中性化試験 中性化深さ	0mm	0mm	9.2mm
溶出試験 カドミウム	0.001mg/L 未満	0.001mg/L 未満	—
全シアン	不検出	不検出	
鉛	0.001mg/L 未満	0.001mg/L 未満	
六価クロム	0.024mg/L	0.015mg/L	
砒素	0.001mg/L 未満	0.001mg/L 未満	
総水銀	0.00005mg/L 未満	0.00005mg/L 未満	

参考文献

- 1) 斉藤丈士, 西田克範, 望月淳, 奈良禰徳: ごみ焼却灰溶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, pp289-294, 2000.6
- 2) 中部セメントコンクリート研究会: 研究報告書“環境とコンクリートの新技術”, pp123-124, 2000.5
- 3) 社団法人 日本産業機械工業会: 平成11年度 エコスラグ利用普及に関する調査研究(その2. 普及システムの検討調査) 報告書, pp119-125, 2000.6