

## 論文 ごみ溶融スラグの細骨材としての利用がコンクリートの調合および品質に及ぼす影響

斉藤 丈士<sup>\*1</sup>・菅田 雅裕<sup>\*2</sup>・谷山 教幸<sup>\*3</sup>・池永 博威<sup>\*4</sup>

要旨：一般廃棄物であるごみの処理は，従来の焼却処理および埋め立て最終処分からごみ溶融スラグの有効利用へと移り変わろうとしている。本研究は，ごみ溶融スラグを，建設資材として大きなボリュームを占めるコンクリートに細骨材として適用するために，ごみ溶融スラグを使用したコンクリートの配合(調合)に関する検討を行ったものである。この結果，AE減水剤を用いる場合と高性能AE減水剤を用いる場合で傾向が異なり，配合(調合)設計上，注意が必要であることを示した。また，ごみ溶融スラグを用いたコンクリートは，材齢による強度の発現傾向が普通コンクリートと異なることを示した。

キーワード：ごみ溶融スラグ，配合(調合)，ブリーディング，圧縮強度

### 1. はじめに

一般廃棄物(ごみ)の処理は，従来の焼却処理および焼却残渣(焼却灰)の埋め立て最終処分からごみあるいは焼却灰を溶融・固化しスラグとした骨材(以下，ごみ溶融スラグと称する)の有効利用を進める方向にシフトしつつある。

ごみ溶融スラグは，一般に水砕された細粒のため，アスファルト合材やコンクリートの細骨材として使用することが可能<sup>1)</sup>である。中でも，受け入れ可能なプラントが全国に4,500以上も点在するレディーミクストコンクリート<sup>2)</sup>に有効利用できれば，輸送コストの面から有利であるため，流通システム構築の実現が期待できる。一方，コンクリート用細骨材は，良質な天然資源が枯渇する傾向にあり，ごみ溶融スラグを代替品として利用できれば，資源保護の観点からも有意義である。

ごみ溶融スラグをコンクリート用細骨材に適用するためには，これを用いたコンクリートの性状を明らかとし，この利用技術を普及させることが必要である。この問題に対し，北辻らは，

ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの性状を調べ<sup>3)</sup>，さらに，これを用いた鉄筋コンクリート部材の力学的性状が普通コンクリートに遜色ないことを明らかとした<sup>4)</sup>。また，筆者らは，ごみ溶融スラグを用いたコンクリートを実大構造物試験体に適用し，構造体コンクリートに使用可能であることを示した<sup>5)</sup>。しかし，ごみ溶融スラグの普及にあたり不可欠な技術である配合(調合)の調整方法に関して検討した事例は，非常に少ない。

そこで，本研究は，ごみ溶融スラグがコンクリートの配合(調合)に与える影響を検討するために，細骨材に使用のごみ溶融スラグの容積による使用割合(以下，置換率と称する)の変化と一定品質のコンクリートの配合(調合)の関係を調べたものである。ここでは，置換率がAE減水剤を用いたコンクリートの単位水量，高性能AE減水剤を用いたコンクリートの高性能AE減水剤使用量および空気量調整剤の使用量に及ぼす影響について述べる。さらに，ごみ溶融スラグがブリーディングおよび圧縮強度に与える影響

\*1 (株)内山アドバンス 中央技術研究所 研究員 (正会員)

\*2 川崎重工業(株) プラント・環境・鉄構カンパニー 技術開発部 主事

\*3 川崎重工業(株) 技術研究所 化学技術研究部 環境・リサイクルグループ

\*4 千葉工業大学 建築都市環境学科 教授 工博 (正会員)

について述べる。

表 - 1 ごみ溶融スラグの品質

密度(g/cm <sup>3</sup> )		吸水率 (%)	微粒分量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	通過率 (%)						粗粒率
絶乾	表乾					5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.81	2.82	0.4	3.2	1.77	63.2	100	99	80	45	21	9	2.46

## 2. 実験概要

ごみ溶融スラグの置換率および水

セメント比を変化させたコンクリートを作製し，所要のスランブおよび空気量を得るための配合(調合)の変化を調べた。また，置換率とブリーディングの関係および置換率とセメント水比が圧縮強度に与える影響を調べた。

### 2.1 使用材料

#### (1) ごみ溶融スラグの品質

本報告で用いたごみ溶融スラグは，一般的な地方自治体から排出されたごみ焼却灰をプラズマ式溶融炉<sup>6)</sup>で溶融し，溶融炉から排出した融液を水中に投入し固化させた水砕スラグであり，金属鉄除去のための磁選処理および脆弱粒子および針状粒子除去のための破碎処理を行ったものである。ごみ溶融スラグの品質を表 - 1 に示す。

#### (2) その他の使用材料

本報告で用いたごみ溶融スラグ以外の材料は，セメントが普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm<sup>3</sup>)，水が上水道水(浦安市)，ベースとした細骨材が砂(山砂，君津市産，表乾密度：2.59g/cm<sup>3</sup>，粗粒率：2.49，実積率：66.4%)，粗骨材が砕石2005(硬質砂岩，栃木市産，表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>，実積率：59.1%)，化学混和剤がAE減水剤(リグニンスルホン酸系)あるいは高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)および空気量調整剤(アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤，以下，AE助剤と称する)である。

### 2.2 配合(調合)条件

配合(調合)条件および変化要因を表 - 2 に示す。配合(調合)の設計方法は，用いた化学混和剤の種類により異なっている。なお，化学混和剤の種類にかかわらず置換率を0,10,30,50,75

表 - 2 配合(調合)条件および変化要因

化学混和剤の種類	AE 減水剤	高性能 AE 減水剤
スランブ	18.0 ± 1.0 cm	21.0 ± 1.0 cm
単位水量	変化	165 kg/m <sup>3</sup>
化学混和剤の使用量	セメント質量 × 0.25 %	変化
細骨材率	状態により変化	-
単位粗骨材(かさ)容積	-	0.600m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
水セメント比(置換率 0,50 %)	60.0,55.0,50.0 %	45.0,40.0,35.0 %
置換率(水セメント比 55.0,40.0 %)	0,10,30,50,75,100 %	
空気量	4.5 ± 1.0 %	
コンクリート温度	20 ± 1.5	

および100%と変化させ，空気量を4.5 ± 1.0%，コンクリート温度を20.0 ± 1.5 とした。

#### (1) AE減水剤を用いたコンクリート

AE減水剤を用いたコンクリートは，スランブを18.0 ± 1.0cmと定め，AE減水剤の使用量をセメント質量に対し一定とし単位水量を変化させて所要のスランブを得た。また，フレッシュコンクリートの状態により，細骨材率を適宜調整した。なお，置換率50%では，水セメント比を60.0,55.0および50.0%と変化させた。

#### (2) 高性能AE減水剤を用いたコンクリート

高性能AE減水剤を用いたコンクリートは，スランブを21.0 ± 1.0cmと定め，単位水量を一定とし高性能AE減水剤の使用量を変化させて所要のスランブを得た。また，単位粗骨材(かさ)容積は，0.600m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>一定とした。なお，置換率50%では，水セメント比を45.0,40.0および35.0%と変化させた。

### 2.3 試験項目および方法

試験項目は，フレッシュコンクリートのスランブ，空気量，コンクリート温度，ブリーディング(水セメント比55.0および40.0%)および標準養生(水中)した供試体の圧縮強度である。ま

表 - 3 コンクリートの配合(調合)およびフレッシュコンクリートの試験結果

水セメント比 (%)	置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						フレッシュコンクリートの試験結果		
		水	セメント	砂	ごみ溶融スラグ	砕石	化学混和剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ( )
60.0	0	174	290	875	0	928	0.725	19.0	4.8	21.0
	50	174	290	422	466	946	0.725	19.0	5.3	21.0
55.0	0	174	316	855	0	926	0.790	19.0	5.1	21.5
	10	174	316	767	93	929	0.790	18.5	4.5	21.5
	30	174	316	591	276	937	0.790	18.0	4.2	21.0
	50	174	316	419	456	944	0.790	18.5	5.2	21.0
	75	180	327	206	672	934	0.818	18.5	4.8	21.5
	100	187	340	0	879	921	0.850	19.0	4.7	21.0
50.0	0	174	348	834	0	921	0.870	18.5	4.6	21.0
	50	174	348	408	445	939	0.870	18.5	5.1	21.0
45.0	0	165	367	827	0	936	2.386	21.5	4.2	21.5
	50	165	367	413	450	936	2.386	21.0	5.3	21.5
40.0	0	165	413	789	0	936	2.685	21.5	5.1	21.0
	10	165	413	710	86	936	2.685	21.5	4.0	21.5
	30	165	413	552	258	936	2.891	21.5	4.3	21.5
	50	165	413	395	430	936	2.891	22.0	4.7	21.5
	75	165	413	197	644	936	3.304	22.0	3.6	21.5
	100	165	413	0	859	936	3.304	21.5	3.6	21.5
35.0	0	165	471	742	0	936	3.062	22.0	4.0	21.5
	50	165	471	371	404	936	3.533	22.0	4.4	21.5

た、試験は、全てJISの試験規格に準じた方法により行った。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 配合(調合)とスランプおよび空気量

練り混ぜたコンクリートのスランプおよび空気量が配合(調合)条件に適合するように、適宜、単位水量あるいは高性能AE減水剤使用量およびAE助剤使用量の調整を行ったところ、全ての配合(調合)において、スランプ、空気量およびコンクリート温度について所要の品質を得ることができた。これより、本研究に用いたごみ溶融スラグは、通常の細骨材と同様に、単位水量あるいは高性能AE減水剤使用量の増減によりスランプの調整が可能であること、また、AE助剤使用量の増減により空気量の調整が可能であることがわかった。なお、AE減水剤を用いた配合(調合)では置換率の増大に伴い細骨材率を若干低下させ、高性能AE減水剤を用いた配合(調合)では一定の単位粗骨材(かさ)容積を用い、良好なワーカビリティを得ることができた。コンクリートの配合(調合)およびフレッシュコンクリ

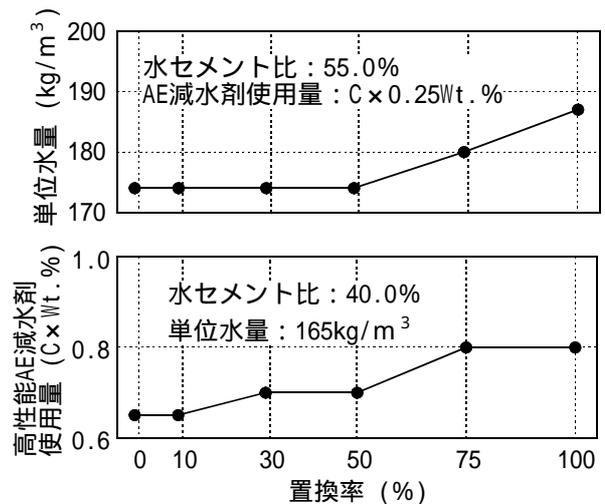


図 - 1 所要のスランプを得るのに必要な単位水量および高性能 AE 減水剤使用量

ートの試験結果を表 - 3 に示す。

#### 3.2 所要のスランプを得るのに必要な単位水量および高性能AE減水剤使用量

所要のスランプを得るのに必要な単位水量および高性能AE減水剤使用量を図 - 1 に示す。AE減水剤のセメントに対する使用量を一定とした場合(水セメント比55.0%)、単位水量は、置換率が50%まで一定であったが75%以上となると増大し、置換率100%ではさらに直線的に増大した。また、単位水量を一定とした場合(水セ

メント比40.0%)、高性能AE減水剤の使用量は、置換率の増大に伴い増大する傾向を示した。これは、ごみ溶融スラグの実積率が砂より低いことが影響していると考えられる。一方で、ごみ溶融スラグは、粒子表面が平滑なガラス質でセメントペーストの保持性が低い<sup>7)</sup>ことから、骨材に吸着する水量が少なくなり、スランプに寄与する水量が増大すると考えられる。AE減水剤を用いた配合(調合)では、これにより実積率の影響が相殺されたため、置換率50%まで単位水量が変化しなかったと推察される。しかし、高性能AE減水剤を用いた配合(調合)は、水セメント比が小さくセメントペーストの粘性が大きいため、この限りではない。なお、高性能AE減水剤使用量の増大傾向は、置換率に対し直線的でなかったが、これは、高性能AE減水剤使用量をセメントに対し0.05%単位で調整したことが影響していると思われる。

### 3.3 所要の空気量を得るのに必要なAE助剤量

所要の空気量を得るのに必要なAE助剤量を図-2に示す。AE減水剤を用いた配合(調合)では、置換率の増大に伴いAE助剤量が減少し、置換率100%では、AE助剤を使用せずに所要の空気量を得ることができた。これは、既往の研究と同様の傾向であり、ごみ溶融スラグが砂と比較してエンラップトエアを増加させる<sup>8)</sup>ことを表している。高性能AE減水剤を用いた配合(調合)は、AE減水剤を用いた配合(調合)と比較してAE助剤量が全体に大きかった。これは、高性能AE減水剤を用いた配合(調合)はセメント粒子に吸着するAE助剤量が多くなるためと考えられる。また、AE助剤量は、置換率50%まで緩やかに減少するが、置換率75%で50%と同等となり、100%では若干増大した。この原因は不明であるが、セメントペーストの粘性の増大が影響している可能性がある。

### 3.4 プリーディング

プリーディング試験結果を図-3に示す。プリーディング率は、AE減水剤を用いた配合(調合)では置換率に伴い直線的に増大し、高性能AE

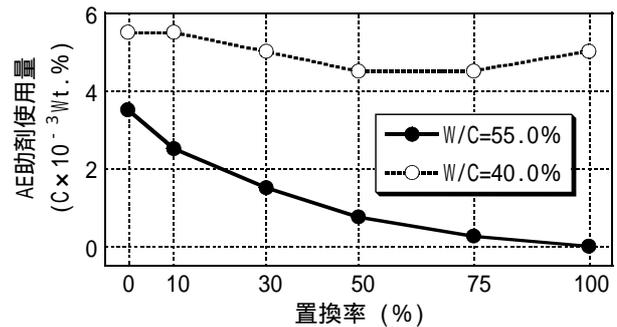


図-2 所要の空気量を得るのに必要なAE助剤使用量

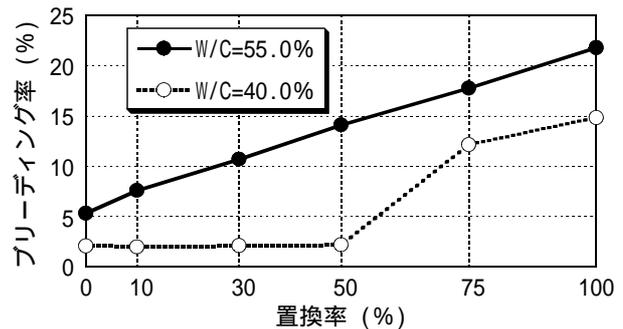


図-3 プリーディング試験結果

減水剤を用いた配合(調合)では、置換率が75%以上で置換率に伴い増大した。プリーディング率の増大は、既往の研究と同様の傾向<sup>9)</sup>であり、ごみ溶融スラグの粒子表面が平滑なガラス質でセメントペーストの保持性が低い<sup>7)</sup>ことが影響していると考えられるが、高性能AE減水剤を用いた配合(調合)の場合、単位水量が少ないことおよび水セメント比の低下に伴うセメントペーストの粘性の増大が影響し、置換率50%まではプリーディングが抑制されたと考えられる。

### 3.5 圧縮強度

#### (1) 置換率と圧縮強度の関係

置換率と圧縮強度の関係を図-4に示す。ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの圧縮強度は、AE減水剤を用いた配合(調合)で材齢7日および28日においては置換率による傾向が明確でなく、置換率にかかわらずごみ溶融スラグを用いないコンクリート(置換率0%)とほぼ同等で推移していた。材齢91日圧縮強度は、置換率100%で若干低下する傾向を示した。高性能AE減水剤を用いた配合(調合)では、材齢7日および28日においてごみ溶融スラグを用いないコンクリ

ート(置換率0%)とほぼ同等, 材齢91日では, 置換率の増大に対し緩やかに増大する傾向を示した。ただし, 置換率100%は, 材齢にかかわらず低下する傾向を示し, とともにごみ溶融スラグを用いないコンクリート(置換率0%)よりも小さかった。これは, ごみ溶融スラグの粒子表面が平滑なガラス質でありセメントペーストとの付着強度が小さい<sup>10)</sup>と考えられること, また, ガラス質であることから骨材粒子が通常の結晶質の骨材と比較して脆弱であると推察されることが複合的に作用し, ペーストマトリクスの強度が高い高性能AE減水剤を用いた配合(調合)で置換率が最大の際に顕著な傾向を示したと思われる。また, 材齢91日において高性能AE減水剤を用いた配合(調合)で置換率の増大に伴い圧縮強度が増大する傾向は, ごみ溶融スラグの有する比較的強度発現の遅い潜在水硬性と思われる水硬性<sup>11)</sup>が影響している可能性がある。

### (2)セメント水比と圧縮強度の関係

セメント水比と圧縮強度の関係を図 - 5 に示す。図 - 5 は, AE減水剤を用いた配合(調合)と高性能AE減水剤を用いた配合(調合)の試験結果を併せて作図したものである。置換率50%におけるセメント水比と圧縮強度の関係は, 置換率0%と比較すると, 材齢7日および28日でやや下回り, 材齢91日でやや上回る傾向となった。しかし, その差は小さく, 全体にほぼ同等と言える。また, セメント水比と圧縮強度の関係は, 置換率に関わりなく相関の大きな直線関係にあり, 本実験の範囲では, ごみ溶融スラグを用いたコンクリートは, これを用いないコンクリートと同様に水セメント比を変化させることにより所要の強度を得ることができる。

### (3)圧縮強度の増進率

圧縮強度の増進率を図 - 6 に示す。材齢7日から材齢28日にかけての圧縮強度の増進率は, セメント水比が小さい場合には置換率0%が大きくなる傾向にあり, セメント水比が大きくなると置換率0%と50%がほぼ同等となっていた。また, 材齢28日から材齢91日にかけての圧縮強

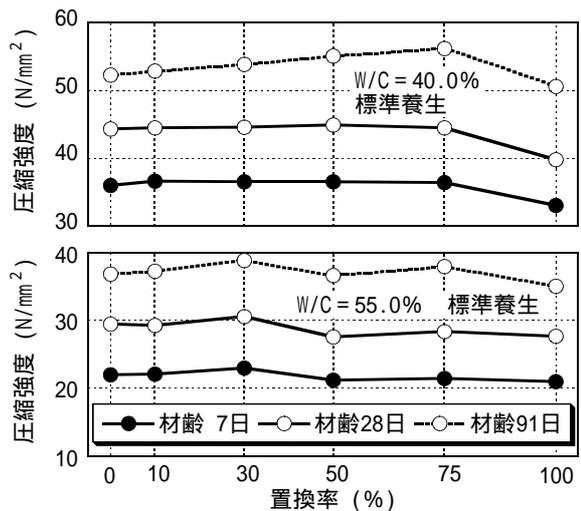


図 - 4 置換率と圧縮強度の関係

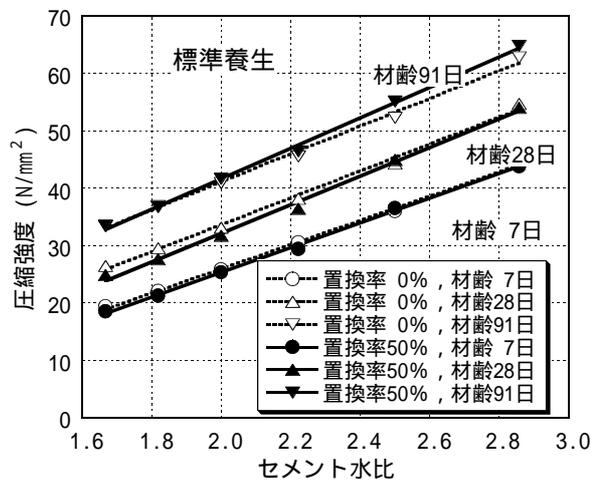


図 - 5 セメント水比と圧縮強度の関係

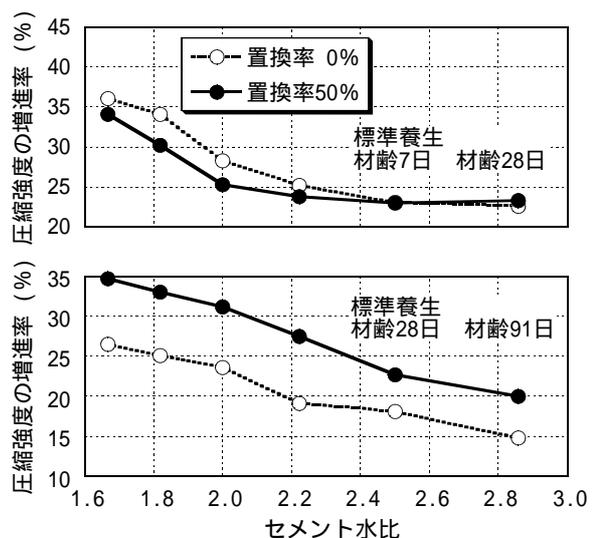


図 - 6 圧縮強度の増進率

度の増進率は, 全体に置換率50%が大きくなる傾向を示した。これは, 前述のごみ溶融スラグ

が有する潜在水硬性と思われる比較的強度発現の緩やかな水硬性<sup>11)</sup>が影響していると考えられる。これより、ごみ溶融スラグを用いたコンクリートは、これを用いないコンクリートと比較してポテンシャルの圧縮強度を発現する材齢が遅くなる可能性があると思われる。

#### 4. まとめ

細骨材に使用のごみ溶融スラグの置換率がコンクリートの配合(調合)に与える影響を検討するために、置換率がAE減水剤コンクリートの単位水量、高性能AE減水剤コンクリートの高性能AE減水剤使用量、AE助剤使用量およびブリーディングに及ぼす影響を調べた。また、ごみ溶融スラグの使用が圧縮強度に与える影響を検討した。この結果、本研究の範囲では、AE減水剤を用いた配合(調合)と高性能AE減水剤を用いた配合(調合)で、単位水量あるいは高性能AE減水剤の使用量の増大傾向が異なること、置換率の増大に伴うエントラップトエアおよびブリーディング率の増大傾向が異なることが明らかとなり、ごみ溶融スラグをコンクリート細骨材に用いるにあたり、配合(調合)設計上注意を要することがわかった。また、ごみ溶融スラグを用いたコンクリートは、材齢28日以降の圧縮強度の増進に優れていた。

今後は、これらの結果を踏まえ、ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの配合(調合)設計方法を確立していく必要がある。

#### 謝辞

本実験を行うにあたり、千葉工業大学建築学科池永研究室卒業研究生の栗原陽介君、金子雅人君、松本直軌君、林剛之君ならびにものづくり大学建設技能工芸学科中田研究室の鈴木大介君、辻村純一君の学生諸君より多大な協力を得ました。ここに記し、感謝の意を表します。なお、本研究は、前(株)内山アドバンス中央技術研究所長 故 奈良禧徳氏の指導により行ったものであります。

#### 参考文献

- 1) 千葉県環境部：千葉県溶融スラグ有効利用研究会報告-骨材としての溶融スラグ-、1998.3
- 2) 竹内龍三：生コンクリート産業の回顧と展望、生コン年鑑 平成15年度版、(株)セメントジャーナル社、pp.8~15、2003.5
- 3) 北辻政文、藤居宏一：ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質、農業土木学会論文集 No.200、pp.59~67、1999.4
- 4) 田中礼治、北辻政文ほか：鉄筋コンクリート構造における都市ごみ溶融スラグの使用の可能性に関する実験研究、コンクリート工学論文集 第13巻第2号、pp.109~116、2002.5
- 5) 佐藤宏紀、斉藤丈士ほか：ごみ焼却灰溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートの実大施工実験(その1~その7)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.383~396、2003.9
- 6) (株)エヌ・ティー・エス：廃棄物の溶融処理技術とスラグの有効利用、pp.129-134、1996.2
- 7) 千葉県廃棄物情報技術センター：溶融スラグ利用コンクリート研究グループ報告書、2001.3
- 8) 越川茂雄、伊藤義也ほか：焼却灰溶融スラグのコンクリート用細骨材への利用に関する研究、コンクリート工学論文集 第11巻第2号、pp.39~47、2000.5
- 9) 戸田勝弥、池谷眞也ほか：溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1、2003.7
- 10) 国府勝郎、飛坂基夫：高強度コンクリートと骨材、コンクリート工学 Vol.28 No.2、1990.2
- 11) 岡本豊重、石田泰之：各種溶融スラグを用いた混合ポルトランドセメントの水和硬化特性に関する研究、セメント・コンクリート論文集 No.52、pp.28~35、1998