

論文 宇部市産ごみ溶融スラグの細骨材としての材料特性

中須賀 大樹^{*1}・石倉 雄治^{*2}・東 芳樹^{*3}・高海 克彦^{*4}

要旨: 本研究では、宇部市産ごみ溶融スラグの材料特性を確認し、コンクリート用細骨材として大量代替が可能かを検討した。本実験より、宇部市産ごみ溶融スラグの細骨材としての品質に問題はなく、また、細骨材として置換した場合においてワーカビリティ、強度発現に大きな影響を与えないことが確認でき、高置換率の配合においても同様の結果が確認された。溶融スラグ物性の季節変動確認試験においても、その材料特性にばらつきはあるものの、各規定値を満たし物性的に安定していることがわかった。

キーワード: ごみ溶融スラグ、圧縮強度、ワーカビリティ、安定調達

1. はじめに

近年、家庭などから排出される一般廃棄物の多くは、焼却された後最終処分場で埋立て処分されている。しかし、埋立て地や最終処分場の確保が困難になってきている現状であり、処分場の延命化が課題となっている。また、建設業界では高度経済成長期においてコンクリート細骨材として、膨大な海砂の採取を行ってきたことにより、生態系への悪影響などの環境問題が深刻化してきた。それにより、海砂に対し採取の規制や禁止が行われるようになり、細骨材の枯渇が問題となっている¹⁾。そのため、代替材として副産物の有効利用の必要性が高まっている。これらの2つの解決策として、ごみ溶融スラグの利用が期待されている。ごみ溶融スラグとは一般廃棄物または下水汚泥を焼却し、その焼却残さを溶融処理した結果、副産したガラス質固形物のことである。図-1にごみ溶融スラグの生産量を示す。下水汚泥溶融スラグは大きな生産量の変化はないが一般廃棄物ごみ溶融スラグに関しては年々生産量が増加していることが確認で

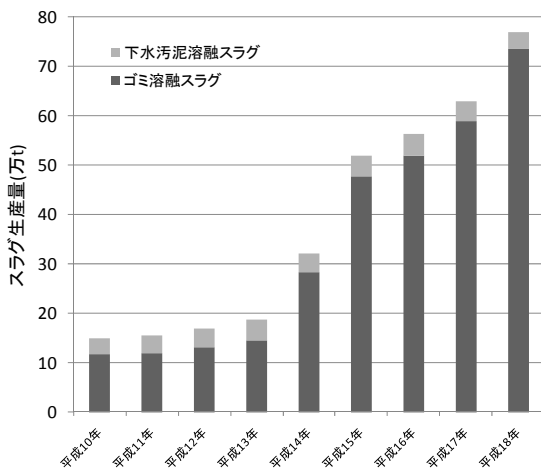


図-1 全国のごみ溶融スラグの生産量²⁾

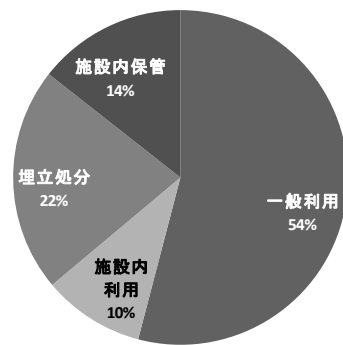


図-2 ごみ溶融スラグの利用状況²⁾

きる。現在のごみ溶融スラグの利用用途としては、道路用骨材、コンクリート用骨材、地盤・土質改良材などに使用されている。図-2にごみ溶融スラグの利用状況を示す。60%程度有効利用されているが、埋立処分されている分をさらに利用することが必要である。ごみ溶融スラグのコンクリート用細骨材としての使用に関し、既にJIS A 5031に規定されているが、使用実績や長期安定性に関するデータが十分にそろっていないことから、実務において広くは使用されていないのが現状である。また、他論文³⁾においてごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの圧縮強度が、天然骨材を用いた場合に比べ60~80%程度であることが多いことが確認されている。さらに、混合率に関しては、0~50%の範囲内であるならフレッシュコンクリートの性状に大きな差はないとされているが、50%を超える混合率のコンクリートではスランプ値が低下する傾向が確認されている。

本研究では、ごみ溶融スラグが溶融方式や地域格差により材料特性が異なること⁴⁾、また輸送コストの面から地産地消することが必要であることから、山口県宇部市

*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻

*3 山口大学 工学部社会建設工学科

*4 山口大学大学院 理工学研究科准教授 (正会員)

の一般廃棄物ごみ処理施設から産出されたごみ熔融スラグの材料特性を把握することを第一の目的とした。またこのごみ熔融スラグの細骨材としての多量使用の可能性を検証するため、置換率を高くしたモルタルおよびコンクリートの特性評価を行い、実務への資料の提供を第二の目的とした。

2. 実験項目および概要

2.1 ごみ熔融スラグの物性試験

(1) 対象としたごみ熔融スラグ

本実験で対象としたごみ熔融スラグは、人口約 20 万の宇部市において、平成 15 年から稼働している流動床式ガス化熔融炉により生産されたものであり、約 1350℃で熔融した融液を水中に流下させて製造した水砕スラグである。近年の産出量とその内の利用量(引き取り量)を図-3に示す。産出量は平成 15 年の稼働以来、同等または増加していること、および利用量は平成 15 年度を除き生産量の 40～60%であることがわかる。

(2) 採取時期

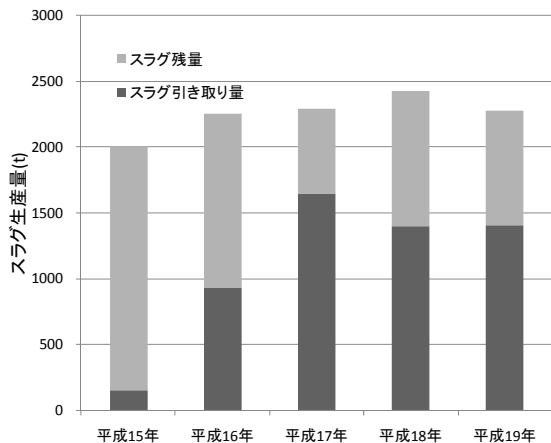


図-3 宇部市産出のごみ熔融スラグの生産利用状況

下記の(3)で示す材料試験のために、2007年9月にごみ熔融スラグ貯蔵ヤードより、試料を採取した。この試料を Sg0709 と記す。また、ごみ熔融スラグは、一般廃棄物を原料としていることから、場所だけでなく時期によっても細骨材としての材料特性に違いが生じることが懸念される。そこで、本研究で採取時期の異なるごみ熔融スラグの材料特性の把握を行うため、2008年の4月から12月まで2ヵ月ごとに採取を行い、それぞれの試料を Sg0804, Sg0806, Sg0808, Sg0810, Sg0812 とする。

(3) 試験項目および方法

細骨材の試験項目と方法は以下の通りである。

- ・密度および吸水率試験 (JIS A 1109 に準じ)。
- ・ふるい分け試験 (JIS A 1102 に準じ)。

- ・アルカリシリカ反応試験 (JIS A 1145 に準じ)。
- ・有害物質溶出試験 (JISK0120 等に準じ)。

また熔融スラグの粒子形状を非接触三次元画像測定機で、含有化学成分をガラスビード法による蛍光エックス線分析装置を用いて測定した。なお、2008年に採取した試料では、アルカリシリカ反応試験と含有成分分析は行わなかった。

2.2 モルタル実験

モルタル試験に使用する材料は、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)と、細骨材として熔融スラグ Sg0709 と海砂、および水であり、配合比は水:セメント:細骨材を 1:2:6 で一定とした。

配合パラメータは、海砂の熔融スラグへの体積置換で

表-1 モルタル試験項目とパラメータ

試験項目	置換率(%)					
	0	10	30	50	70	100
ブリーディング試験	○	○	○	○	○	○
フロー試験	○	○	○	○	○	○
膨張試験	○	—	—	○	—	○
強度試験	○	○	○	○	○	○

あり、表-1の○印の置換割合のモルタルに対して掲載項目の試験を行った。各配合で試験に要すモルタル総量が多いので、コンクリート用2軸ミキサを用い、練り混ぜ方法は同一条件で練った。ブリーディング試験、フロー試験、膨張率試験および4cm x 4cm x 16cmの硬化モルタル供試体に対する強度試験を、それぞれ JIS A 1123, JIS R 5201, JISA5031 付属書 1 および JIS R 5201 に準じて行った。強度試験における試験材齢は材齢 7 日、材齢 28 日とした。また、膨張率試験については、参考文献 5) のようにプラスチック型枠を用いた方法と同様の方法でも行うこととした。

2.3 コンクリート実験

セメントと細骨材についてはモルタル実験と同様に、普通ポルトランドセメント、細骨材は Sg0709 と海砂を使用し、粗骨材は安山岩系砕石(表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 0.61%)を使用した。

配合は表-2に示すように W/C=60%で一定とし、細骨材は海砂に対して Sg0709 を 0, 25, 50, 75, 100%の割合で体積置換したものである。骨材はすべて表乾である。なお、粗骨材は粒径 5~12mm のものを G1, 12~20mm のものを G2 としている。また、表中 Ad は AE 減水剤, AE は AE 助剤を表す。

コンクリート用 2 軸ミキサを用いて練り、ブリーディング試験、スランブ試験、空気量試験および強度試験を JIS A 1123, JIS A 1101, JIS A 1128 および JIS A 1108 に準じて行った。強度試験における試験材齢は材齢 7 日、28 日で、試験までは水中養生とした。コンクリートの膨張

表—2 コンクリート配合表

置換率	単位量 (kg/m ³)							
	W	C	S		G1	G2	Ad(g)	AE(g)
			SI	Sg0709				
Sg0%	175	292	735	0	542	542	3160	750
Sg25%	175	292	551	194	542	542	3160	750
Sg50%	175	292	368	389	542	542	3160	750
Sg75%	175	292	184	583	542	542	3160	750
Sg100%	175	292	0	778	542	542	3160	750

試験は、モルタルでの試験と同様、参考文献 5) による方法で行った。

溶融スラグ Sg0804 , Sg0806 , Sg0808, Sg0810, Sg0812 に対しては、体積置換率を 100%としたコンクリートのスランブ試験、空気量試験、膨張試験および強度試験を、試料 Sg0709 を使用した場合と同様に行った。

3. 実験結果

3.1 ごみ溶融スラグの物性試験結果

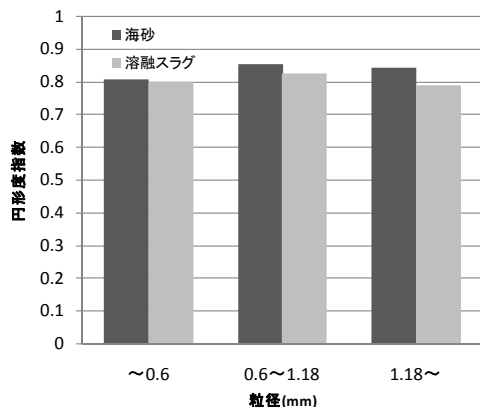
表—3 に Sg0709 の密度、吸水率および粗粒率の試験結果を示す。

表—3 密度、吸水率および粗粒率

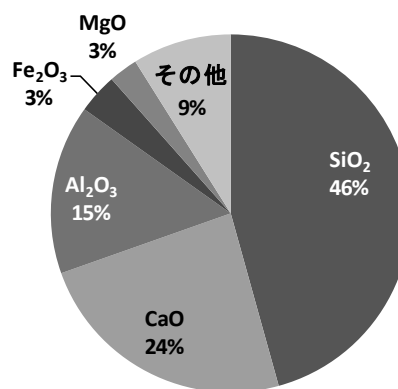
細骨材種類	Sg0709	海砂
絶乾密度 (g/cm ³)	2.74	2.60
吸水率 (%)	0.11	1.19
粗粒率	3.06	2.48

絶乾密度は 2.74g/cm³ となり海砂と比べてやや大きいという程度である。吸水率は 0.11%とほとんど吸水がないということが確認できた。いずれも JIS A 5031 における規定値を満足するものである。

粗粒率は海砂に比べ大きく、一般的な細骨材の粗粒率 2.3~3.4 に照らし合わせると、粗い分類に属する。



図—4 円形度指数



図—5 Sg0709 の含有成分

粒径範囲を 3 つに区分し、粒径区分ごとの円形度指数の測定結果を図—4 に示す。円形度指数とは粒子の表面投影画像面積 A を、その内接円半径 R から求められる $4\pi R$ で除したもので定義される。円形度指数はその粒子が真円形であれば値が 1 に近づくものである。図より各粒径で、Sg0709 の粒子は海砂の粒子より若干いびつな形であるがほぼ同程度であるといえる。

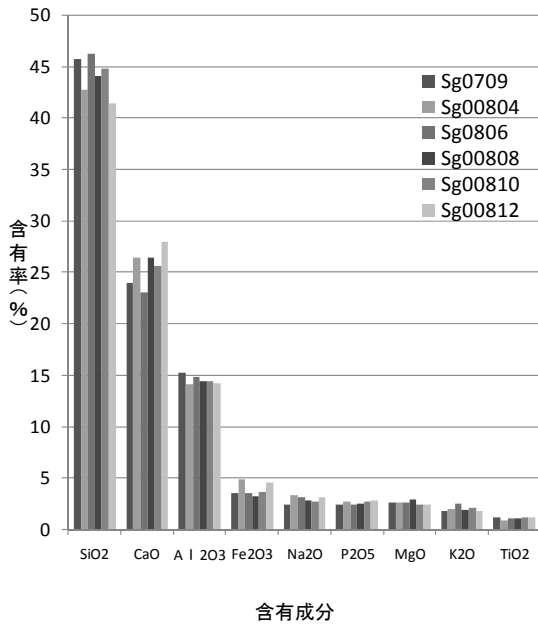
Sg0709 の含有化学成分を図—5 に示す。Sg0709 を形成する化学組成は主にシリカ成分、カルシウム成分、アルミニウム成分で形成されていることが分かった。また、土壤汚染に係る環境基準に関する計量項目とその定量下限値、基準値(JIS A 5031 の有害物質の溶融基準)を表

表—4 重金属溶出試験結果

計量項目	Sg0709	定量下限値	基準値
カドミウム mg/l	ND	0.001	0.01以下
鉛 mg/l	ND	0.005	0.01以下
六価クロム mg/l	ND	0.02	0.05以下
ヒ素 mg/l	ND	0.005	0.01以下
総水銀 mg/l	ND	0.0005	0.0005以下
セレン mg/l	ND	0.002	0.01以下
フッ素 mg/l	ND	0.1	0.8以下
ホウ素 mg/l	ND	0.1	1以下

表—5 各試料の密度, 吸水率および粗粒率

細骨材	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
Sg0709	2.74	0.11	3.06
Sg0804	2.73	0.16	3.17
Sg0806	2.64	0.09	3.05
Sg0808	2.59	0.23	3.21
Sg0810	2.75	0.19	3.03
Sg0812	2.82	0.29	3.39



図—6 各試料の含有化学成分

—4に示す。NDは定量下限値未満を示すため、Sg0709から溶出される重金属の溶出値は基準値以下であり規定を満足する。

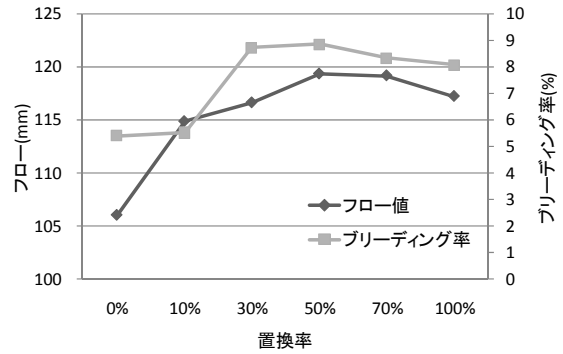
アルカリシリカ反応試験ではアルカリ濃度減少量が77(m mol/l)、溶解シリカ量が19(m mol/l)となり、反応性の判定は無害の結果を得た。

採取時期の異なるごみ熔融スラグの密度, 吸水率および粗粒率を表—5に示す。試料ごとにかんがりの変動は見られるが、各項目において、極端な値を取るものはなかった。絶乾密度においてはいずれも規定値である2.5以上を満たした。

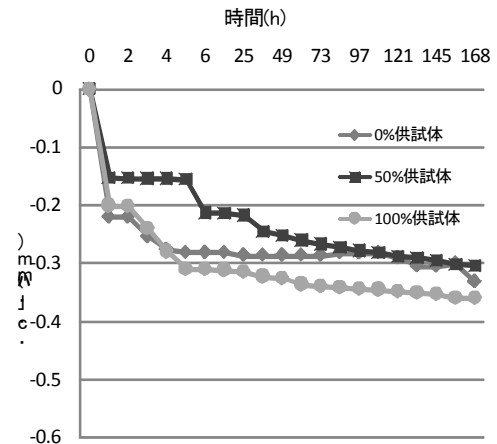
各試料の含有化学成分を図—6に示す。全スラグにおいて構成する化学組成は主にシリカ成分, カルシウム成分, アルミニウム成分で形成されていることが確認できた。含有成分においても各試料で大きな差異は見られなかった。

3.2 モルタル実験結果

Sg0709の置換率を変えたモルタルのフロー試験およ



図—7 モルタルのフロー, ブリーディング試験結果



図—8 Sg0709置換別モルタル膨張試験経時変化

表—6 試料別モルタルの膨張試験結果

スラグの種類	膨張率(%)
Sg0709	-2.41
Sg0804	-1.16
Sg0806	-1.14
Sg0808	-2.35
Sg0810	-2.33
Sg0812	-2.22

びブリーディング試験の結果を図—7に示す。フロー試験結果より熔融スラグに置換すると、フロー値は増加することが分かる。これはスラグ表面のガラス質形状によるものと考えられる。ただし、置換率が70%を超えると骨材の噛み合わせによるためか若干減少する。同様に、ブリーディング試験結果も、Sg0709置換率の増加に伴いブリーディング率は増加する傾向があり、これもスラグ表面が滑らかで、密度の差異による水分移動が容易になるためと考えられる。ただし、ブリーディング率も置換率70%から減少している。

Sg0709の置換率別モルタルの参考文献5)による膨張試験の経時変化を図—8に示す。全ての置換率でモルタ

ルが収縮する結果となった。モルタル実験においては、アルミニウムによる膨張はないものと考えられる。

また、各試料の JISA5031 付属書 1 による膨張試験の結果を表-6 に示す。いずれの試料においても膨張率は負であり、JIS の規定を十分満たしている。

材齢 7 日、材齢 28 日の置換率別モルタルの圧縮強度

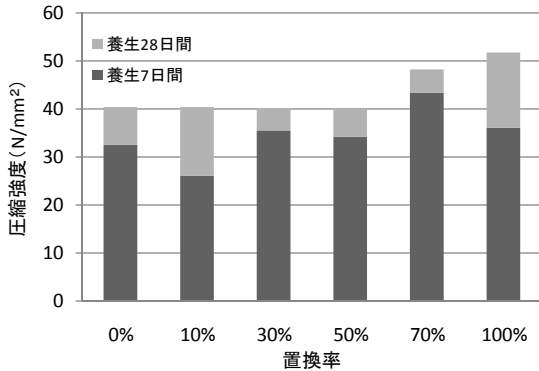


図-9 モルタルの圧縮強度試験結果

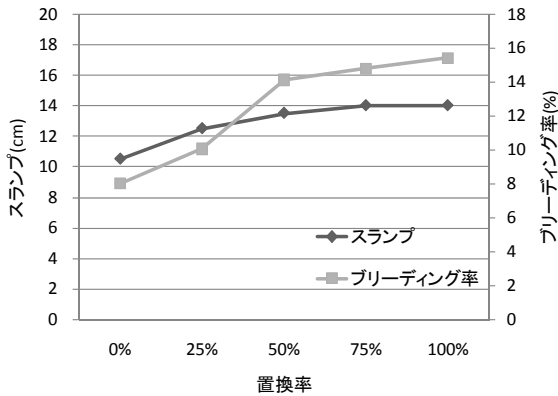


図-10 コンクリートのスランプ、ブリーディング試験結果

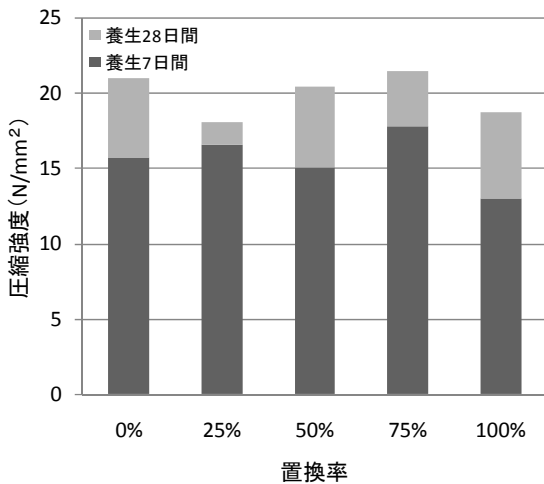


図-11 コンクリート圧縮強度試験結果

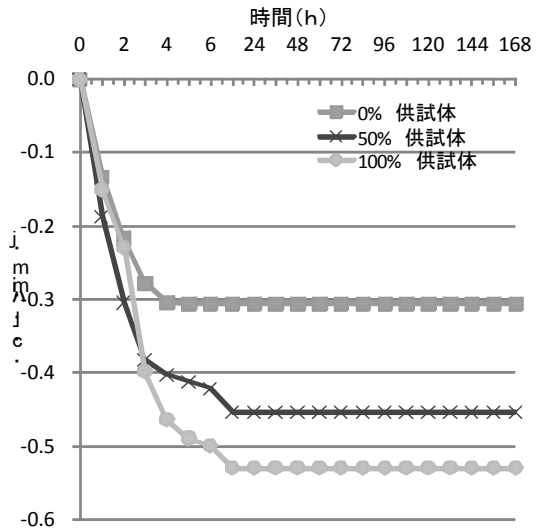


図-12 置換率別コンクリート膨張量試験経時変化

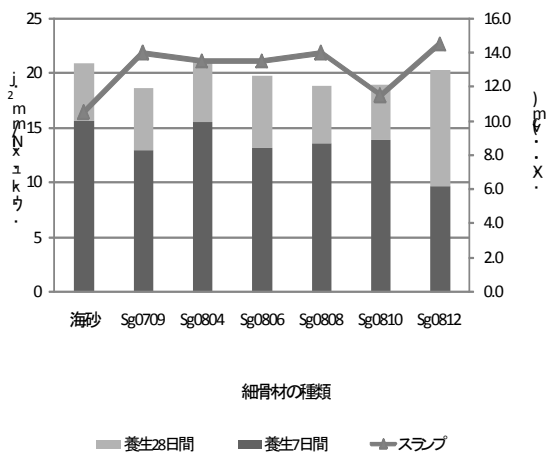
結果を図-9 に示す。試験結果より、材齢 7 日では、置換率別に強度の発現にばらつきはあるが、材齢 28 日の強度は置換率 0% の場合と同程度、また置換率が高くなればそれ以上発現する結果となった。

3.3 コンクリート実験結果

試料 Sg0709 の置換率別コンクリートのスランブ試験およびブリーディング試験の結果を図-10 に示す。モルタルと同様にスランブ試験より置換率の増加に伴いスランブ値は徐々に増加する傾向があることが確認できた。これもスラグ表面のガラス質形状によるものと考えられる。同様に、ブリーディング試験結果も、Sg0709 置換率の増加に伴いブリーディング率は増加する傾向がある。これもスラグ表面が滑らかで、密度の差異による水分移動が容易になるためと考えられる。コンクリートでは、置換率が 70% を超えても、スランブ、ブリーディング率の低下は生じていない。この傾向から溶融スラグの多量使用において、所定のスランブを得るための単位水量の低減およびブリーディング率の低下への可能性があると考えられる。

材齢 7 日、材齢 28 日の Sg0709 の置換率別コンクリートの圧縮強度結果を図-11 に示す。試験結果より、材齢 7、28 日の強度は実験誤差などを考慮すると置換率 0% の強度と同程度と考えられる。ただし、置換率にかかわらず、相対的に一般的な W/C 対する強度発現が小さく、これについての原因は不明である。

図-12 に Sg0709 の置換率別コンクリートの参考文献 5) による膨張試験の経時変化を示す。どの供試体も、計測開始後 6 時間までに急激に収縮し、なおかつその程度は、置換率に対応するブリーディング率の増加に似ていることがわかる。すなわち、ブリーディングによりコ



図—13 試料別コンクリートのスランプ，圧縮試験結果

ンクリートから排出された水量の分が，供試体の収縮量に結びついていると考えられる。

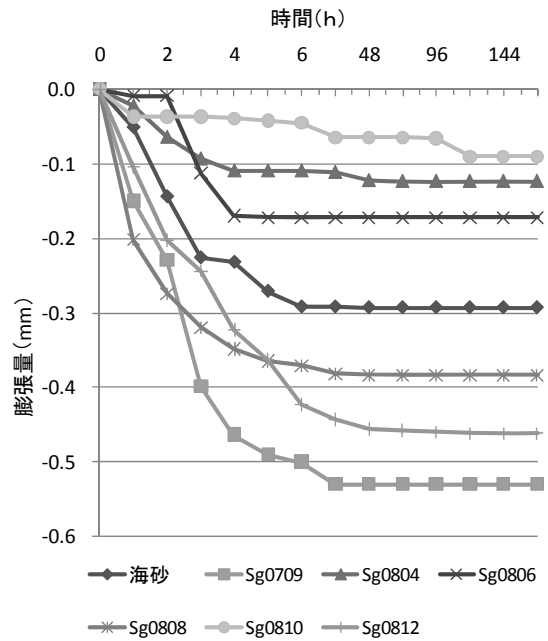
採取時期の異なるごみ溶融スラグを用いたスランプ試験，材齢7日，材齢28日の圧縮強度結果を図—13に示す。スランプ試験において，スラグを置換したすべての配合においてスランプが増加していることがわかる。材齢28日の圧縮強度結果から，各試料において大きなばらつきはないといえる。

各試料を用いたコンクリートの参考文献5)による膨張試験の経時変化を図—14に示す。いずれの試料を用いたコンクリートでも乾燥を主因とする収縮が生じていると思われる。ただし，この試験結果では，海砂を用いたコンクリートの経時変化を挟んで，各試料を用いたコンクリートの収縮量（負の膨張量）がかなりばらついており，その原因の特定には現在のところ至っていない。

4. まとめ

本研究は，宇部市産出のごみ溶融スラグの細骨材としての材料特性評価として，物性，モルタルおよびコンクリートにおける試験を実施した。さらに溶融スラグの安定調達の確認を行った。本研究で行った結論を以下に要約する。

- (1) 宇部市産出のごみ溶融スラグの物性，品質および重金属溶出において細骨材に対する各規定を満たし問題は見られないことが確認できた。
- (2) 置換率を高くしたモルタルおよびコンクリートにおいて，強度，ワーカビリティにおいて大きな低下や悪化は見られず，実務において単位水量の低減化の可能性がある。



図—14 試料別コンクリート膨張試験経時変化

- (3) 安定調達の確認のために行った実験から宇部市から産出されるごみ溶融スラグは，細骨材として季節的に極端な変動はみられず，通年使用可能といえる。ただし，各試料を用いたコンクリートの特性にはばらつきがあり，信頼性を高めるためにデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 大崎雅弘，待鳥日出男，大峠勇，栗延正成：海砂採取規制に伴う代替材の安定調達対策，第14回生コン技術大会研究発表論文集，pp.35-40，2007
- 2) エコスラグ利用普及センターHP：
<http://www.jsim.or.jp/ecoslag/index.html>
- 3) 鈴木澄江：溶融スラグ骨材を用いたコンクリート，アース&eco コンクリートマガジン 001，pp.70-77，2008年春号
- 4) (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細骨材の標準化の現状と展望，2006.9.15
- 5) 上原匠他：都市ごみ溶融スラグを混入したコンクリートに関する実験的研究，2001年廃棄資源のコンクリート材料への有効利用に関するシンポジウム論文集，JCI 中国・四国支部，pp.229-232，2001