

論文 産業廃棄物溶融スラグを用いたコンクリートのフライアッシュによる性能向上

浅野 伸隆^{*1}・堺 孝司^{*2}・山本 真也^{*3}・中川 一美^{*4}

要旨: 産業廃棄物溶融スラグの利用はブリーディング量の増加および圧縮強度の低下を引き起こす。本研究は、このような問題点を解決するために、フライアッシュを細骨材代替材として併用し、産業廃棄物溶融スラグを用いたコンクリートの性能向上を目的として、コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状を検討した。その結果、産業廃棄物溶融スラグコンクリートにフライアッシュを用いることにより、条件によって効果は異なるが、ブリーディングの増加と圧縮強度の低下の抑制が可能であることが明らかとなった。

キーワード: 産業廃棄物溶融スラグ, フライアッシュ, ブリーディング, 圧縮強度, 細孔径分布

1. はじめに

近年、あらゆる分野において環境問題に対する取り組みへの重要性が増している。コンクリートの分野も例外ではない。コンクリートに関連する環境問題には、様々なものがあるが、最近では、資源の保存や一般廃棄物および産業廃棄物処理物である廃棄物溶融スラグの適切な利用などが求められている。

香川県豊島では、1970年代から20年近くに亘って産業廃棄物が不法に投棄されてきた。平成15年度から、これらは豊島の西側に位置する直島の中間処理施設において約1340°Cの高温溶融による無害化処理が行われている。溶融は回転式表面溶融炉で行われ、処理能力は約200トン/日あるが、産業廃棄物等の総量が約60万トンにも上ることから、溶融処理には10年の歳月を要する。この間、年間約3万トンの産業廃棄物溶融スラグが生産される。このスラグは、現在、無筋コンクリートやコンクリート二次製品に用いられている。

一方、2006年7月に、JIS A 5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」が制定された¹⁾。しかし、産業廃棄物溶融スラグに関しては、JISの適用範囲から除外された。これは、溶融スラグの品質や溶融スラグを用いたコンクリートの強度および耐久性等の十分なデータが得られていないことによるものである。今後、産業廃棄物溶融スラグの標準化に向けて、基本的な情報を蓄積することが重要となる。溶融スラグをコンクリート用細骨材として用いる場合、単位水量、エントラップトエアおよびブリーディングの増加や強度低下などの問題が指摘されている^{2),3)}。

また、石炭火力発電所では、燃焼の効率化のため、石炭を微粉碎し燃焼させている。その際発生させる石炭灰は、燃焼後に回収されるが、回収される場所により、ボトムアッシュやシンダアッシュ、フライアッシュとなる。この内、最も多く、粒形の最も小さい石炭灰が電気集塵機で回収されるフライアッシュである⁴⁾。石炭灰は、平成17年度には年間約1120万トンが副産されている⁵⁾。その約9割は有効利用されているが、残りは埋め立て処分等がなされており、処分地の確保と処分コスト増などが問題となっている⁴⁾。石炭灰の発生量は年々増加しているため、今後も、更なる有効利用の拡大が望まれる。フライアッシュをコンクリート用細骨材として用いる場合、ボールベアリング効果による流動性改善や普通コンクリートと比べて同等程度以上の圧縮強度を有することが報告されている⁶⁾。

上記のことを背景に、本研究では、資源保存と産業副産物の有効利用の観点から、産業廃棄物溶融スラグ（以後、スラグと略）とフライアッシュを細骨材代替材として併用し、溶融スラグを用いたコンクリートのフライアッシュによる性能向上を目的として、コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³, 比表面積3400cm²/g)を使用した。

粗骨材は、香川県内の砕石 2015(最大寸法 20mm,

*1 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (正会員)

*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科 工博 (正会員)

*3 香川大学 工学部安全システム建設工学科 (非会員)

*4 香川県 環境森林部廃棄物対策課 (非会員)

表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 1.16%, F.M.7.22, 実積率 58.6%), 砕石 1505(最大寸法 15mm, 表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.50%, F.M.6.35, 実積率 58.6%) を 1:1 の割合で混合したものを使用した。

図-1 に、砕砂およびスラグの粒度分布を示す。なお、同図には砕砂とスラグを混合した粒度分布も示す。

細骨材は、香川県産の砕砂(表乾密度 2.55g/cm³, 吸水率 1.23%, F.M.2.68, 実積率 62.9%, 微粒分量 2.31%, 粒形判定実積率 53.6%) を使用した。

スラグは、豊島の産業廃棄物を約 1340℃で熔融し、水砕処理された後、破碎加工により粒度調整がなされているもの(表乾密度 2.85g/cm³, 吸水率 0.12%, F.M.2.97, 実積率 58.3%, 微粒分量 0.45%, 粒形判定実率 58.2%) を細骨材として使用した。

フライアッシュは、JIS A 6201 に適合するフライアッシュ II 種(密度 2.28g/cm³, 比表面積 3750cm²/g, 強熱減量 2.1%) を細骨材として使用した。

混和剤は、リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体を主成分とした高機能 AE 減水剤、ポリオール複合体を主成分とした減水剤および変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とした AE 剤を使用した。

2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの製造は、温度 20℃, 相対湿度 60% の試験室で行い、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いて、所定の練混ぜ量を製造した。練混ぜは、最初にセメント、粗骨材および細骨材を 30 秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて 90 秒間行った。

コンクリートの配合は、水セメント比を 40, 50 およ

び 60% の 3 種類とし、スラグ置換率を細骨材の質量の 0, 30, 60 および 90% の 4 種類(ただし、水セメント比が 40 および 60% のスラグ置換率は 60% のみ)、フライアッシュの置換率は細骨材の質量の 0, 5, 10% の 3 種類の計 18 配合である。配合の決定は、単位水量を一定とし、スランプおよび空気量は混和剤の添加量によって調整した。コンクリートの配合の一覧を表-1 に示す。なお、目標スランプおよび目標空気量は、8-1.0-8+2.0cm および 4.5±1.0% とした。

2.3 試験項目

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートに対して、スランプ試験、空気量試験およびブリーディング試験を行った。各試験は、それぞれ JIS A 1101, JIS A 1128 および JIS A 1123 に準拠して行った。

(2) 硬化コンクリート

硬化コンクリートに対して、圧縮強度試験および細孔径分布の測定を行った。圧縮強度試験は、φ10×20cm の供試体を用い、試験材齢を 3, 7 および 28 日とし、

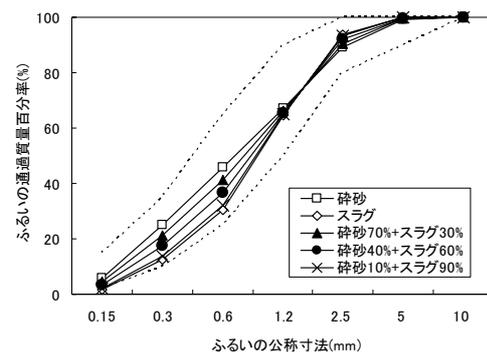


図-1 細骨材の粒度分布

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	スラグ置換率 (%)	FA置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)												結果	
				水	セメント	細骨材			粗骨材		高機能AE減水剤		減水剤		AE剤		
						砕砂	豊島スラグ	FA	砕石		C>%	(kg/m ³)	C>%	(kg/m ³)	C>%	(kg/m ³)	
									2015	1505							
40	60	0	395	433	260	435	—	499	507	0.35	1.51	—	—	0.10	0.43	75	37
		5	38.5	433	222	424	29	508	515	0.30	1.30	—	—	0.20	0.87	70	35
		10	37.5	433	185	413	56	516	524	0.30	1.30	—	—	0.30	1.30	100	50
50	0	0	40.5	346	694	—	—	512	520	—	—	1.80	6.23	0.50	1.73	85	50
		5	39.5	346	643	—	31	521	529	—	—	1.60	5.54	0.65	2.25	80	40
		10	38.5	346	594	—	60	529	537	—	—	1.40	4.84	0.70	2.42	75	35
	30	0	40.5	346	486	233	—	512	520	—	—	1.45	5.02	0.35	1.21	85	52
		5	39.5	346	440	227	31	521	529	—	—	1.20	4.15	0.60	2.08	90	46
		10	38.5	346	396	221	60	529	537	—	—	1.00	3.46	0.85	2.94	95	50
	60	0	40.5	346	279	466	—	512	520	—	—	1.40	4.84	0.30	1.04	85	47
		5	39.5	346	237	454	31	521	529	—	—	1.05	3.63	0.60	2.08	95	51
		10	38.5	346	198	443	60	529	537	—	—	0.70	2.42	0.85	2.94	90	40
	90	0	40.5	346	69	698	—	512	520	—	—	1.25	4.33	0.10	0.35	80	36
		5	39.5	346	34	681	31	521	529	—	—	0.60	2.08	0.55	1.90	95	48
		10	38.5	346	—	664	60	529	537	—	—	—	—	0.85	2.94	95	40
60	60	0	42.5	288	299	502	—	508	516	—	—	1.60	4.61	0.20	0.58	95	40
		5	41.5	288	256	490	33	517	525	—	—	0.75	2.16	0.65	1.87	90	51
		10	40.5	288	214	478	65	526	534	—	—	—	—	1.00	2.88	90	36

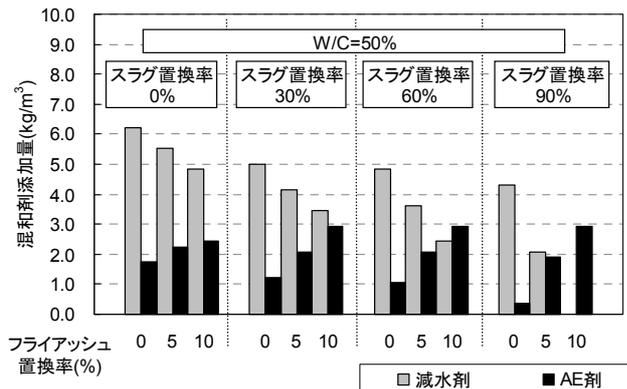


図-2 混和剤添加量 (W/C=50%)

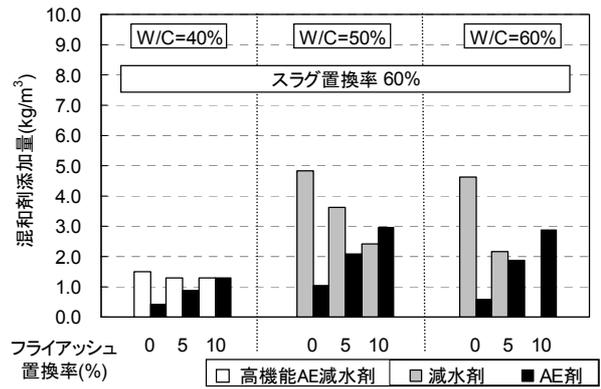


図-3 混和剤添加量 (スラグ置換率 60%)

JIS A 1108 に準拠して行った。養生は、供試体作製後 1 日湿気養生し、脱型した後、所定の材齢まで 20℃で水中養生を行った。細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシメーターを用いて行った。試料は、4 週間の水中養生を行い、コンクリートカッターで切断した後破砕し、粒度調整により粗骨材を取り除いた 2.5~5 mm のモルタル部を取り出し、ドライアイスの水蒸気圧下の真空凍結乾燥装置で 14 日間の D-Dry 乾燥を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 混和剤添加量

図-2 に、スラグおよびフライアッシュ置換率と、所定のスランブおよび空気量を得るために要した混和剤量との関係を示す。

フライアッシュを混入しない場合、スラグ置換率の増加は、AE 剤の添加量を減少させている。これは、スラグ表面の微細なひび割れがエントラップトエアを巻き込みやすいことに起因すると考えられる。

図-3 に、水セメント比およびフライアッシュ置換率と、所定のスランブおよび空気量を得るために要した混和剤量との関係を示す。

水セメント比 40% の場合、減水剤を所定の使用可能範囲の上限まで用いたが、所定のスランブが得られな

かったため、高機能 AE 減水剤を用いた。

いずれのスラグ置換率および水セメント比においても、フライアッシュ置換率の増加に伴い、減水剤の添加量は減少し、AE 剤の添加量は増加する傾向にある。減水剤の減少は、フライアッシュのボールベアリング効果によるもの、また、AE 剤の増加は、フライアッシュ量の増大に伴い、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素分が AE 剤中の空気連行成分を吸着する割合が増加したためであると考えられる⁷⁾。

3.2 ブリーディング

図-4 に、ブリーディング量に及ぼすスラグおよびフライアッシュ置換率の影響の経時変化を示す。

スラグ置換率が増加するに伴い、ブリーディング量が増加すると共に終了時間は遅くなる傾向にある。スラグの混入は、細骨材の相対的な密度の増加⁸⁾、スラグの表面がガラス質であることによる保水性の低下⁹⁾、および吸水率の低下¹⁰⁾を惹起させるが、スラグ置換率が増加することでその影響が大きくなると考えられる。また、フライアッシュの利用により、いずれのスラグ置換率においても、ブリーディング量は減少すると共に終了時間は早くなる傾向にある。これらは、フライアッシュの混入により、微粉量の増加に伴う保水性が増大したことによるものと考えられる。ただし、フラ

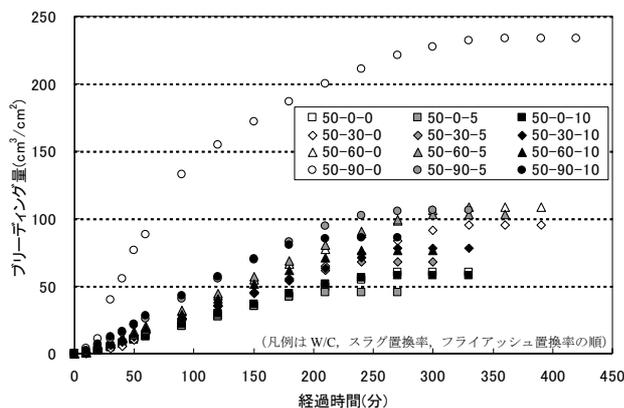


図-4 ブリーディング率 (W/C=50%)

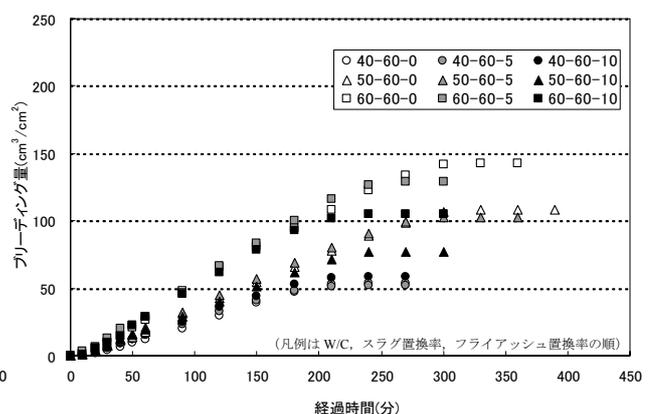


図-5 ブリーディング率 (スラグ置換率 60%)

イアッシュのブリーディング抑制の効果は、条件により異なる。

図-5に、ブリーディング量に及ぼす水セメント比とフライアッシュ置換率の影響の経時変化を示す。

水セメント比の増加に伴い、ブリーディング率は増加する傾向にある。これは、水セメント比の増加に伴うセメント量の減少に起因するものと考えられる。また、水セメント比が40%の場合には、フライアッシュによるブリーディングの抑制効果はあまりないが、水セメント比が50および60%の場合では、フライアッシュの効果が大きくなっている。

3.3 圧縮強度

図-6に、スラグおよびフライアッシュ置換率と、圧縮強度との関係を示す。

スラグを用いた場合の圧縮強度は、材齢28日において、スラグを用いない場合と比べて、3.7~12.5%の低下がある。これは、スラグ自体の強度の低さおよびセメント硬化体とスラグの付着の弱さに起因していると考えられる。

また、フライアッシュを混入した場合の圧縮強度は、フライアッシュ無混入の場合と比較して、材齢3, 7および28日で、それぞれ-25.5~8.3%, -30.0~5.1%および-8.3~8.6%の強度変化がある。一般に、フライアッシュの細骨材代替材としての利用は、初期材齢では微粉末充填効果、長期材齢ではポズラン反応により、普通コンクリートと比べて、圧縮強度が増加する効果があるとされている。しかし、本研究において、材齢28日程度ではポズラン反応はほとんどないと考えられる。また、材齢7日から28日までの強度増加は、フライアッシュの充填効果によるものと考えられる。

このように、フライアッシュの充填効果による強度増加はあるが、材齢28日までではスラグによる圧縮強度のマイナス作用を十分に補完することはできていない。材齢91日になると、フライアッシュを用いた場合

はポズラン反応による強度発現が現れ、スラグによる圧縮強度の低下をさらに改善できると推定される。

図-7に、水セメント比およびフライアッシュ置換率と、圧縮強度との関係を示す。

いずれの場合も、フライアッシュを用いることにより、材齢3日の圧縮強度は低下しているが、これは、フライアッシュの保水効果により見かけ上水セメント比が増加したことによるものと考えられる。また、水セメント比40%の場合、材齢3~7日にかけてフライアッシュの充填効果による著しい強度増加が見られる。これに対して、水セメント比50および60%の場合では、材齢7~28日の間で、セメントの水和に伴うフライアッシュの充填効果が得られていることが分かる。

3.4 細孔径分布

図-8に、細孔径分布におよぼすスラグおよびフライアッシュ置換率の影響を示す。

図-8 a)に示すように、フライアッシュを混入していない場合は、スラグの置換率に関わらず、細孔容量が最大となる細孔直径は0.02~0.024 μm となっており、スラグ置換率による影響は見られない。また、細孔容量の最大値も、同様に、スラグ置換率による影響は見られない。図-8 b)に示すように、フライアッシュを10%置換した場合、細孔容量が最大となる細孔直径は0.024~0.03 μm となっており、スラグによる影響はあまり見られないが、細孔容量の最大値は、スラグ置換率60%の場合に、他の場合と比べて著しく大きなものとなっている。しかし、これらの細孔分布の結果と、図-6に示す圧縮強度とは対応していない。つまり、本研究におけるスラグを用いたコンクリートの圧縮強度の支配要因は、セメント硬化体ではなく、セメント硬化体とスラグおよび骨材との界面およびスラグ自体の強度であることを意味する。このように考えることにより、スラグ置換率0%とその他の場合の強度発現を合理的に説明することができる。また、図-8 c)から、フラ

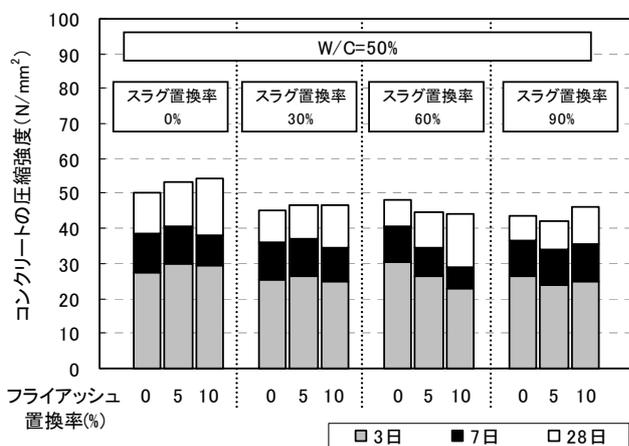


図-6 圧縮強度 (W/C=50%)

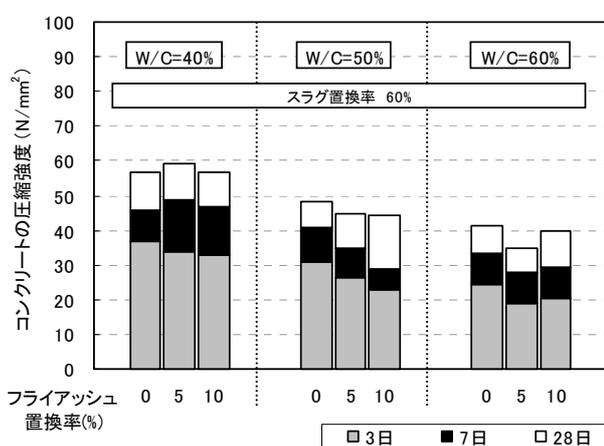


図-7 圧縮強度 (スラグ置換率 60%)

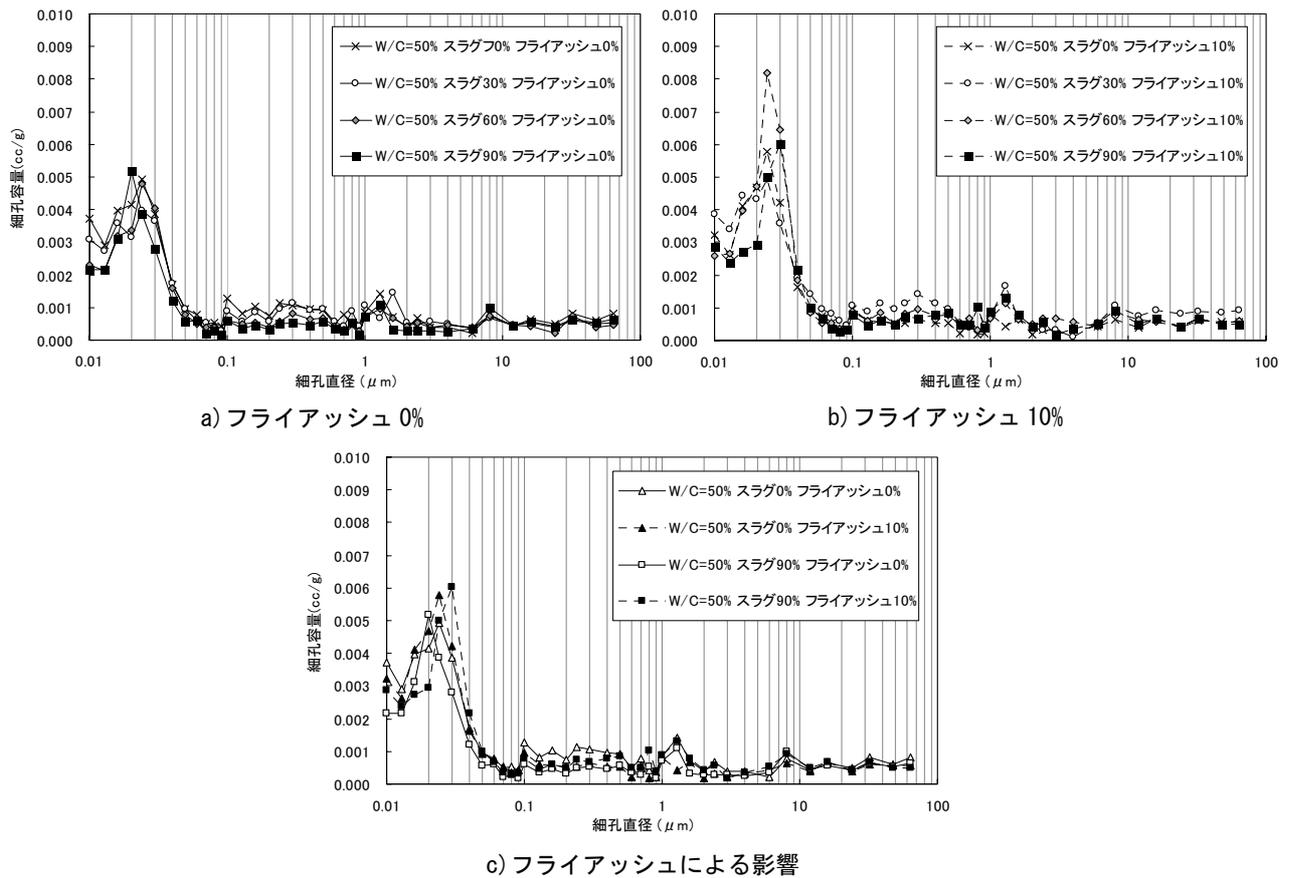


図-8 細孔径分布 (W/C=50%)

イアッシュを用いると、保水効果により細孔構造が粗くなる傾向となっていることが分かる。しかし、図-6に示すスラグ置換率 60%以外の圧縮強度は、フライアッシュを用いたほうが大きなものとなっている。これは、セメント硬化体とスラグとの界面の細孔構造が改善されたことに起因すると考えられる。なお、スラグ置換率 60%の場合の挙動については他の場合と統一的に説明できない結果となっているが、その原因については不明である。今後、さらに検討を進める。

図-9 に、細孔径分布におよぼす水セメント比およびフライアッシュ置換率の影響を示す。

図-9 a) および b) から、水セメント比が増加するに伴い、フライアッシュの有無に関わらず、細孔容量が最大となる細孔直径および細孔容量の最大値は増加している。つまり、水セメント比の増加は、細孔構造を粗くしている。これは、圧縮強度の結果と対応している。つまり、この場合、細孔構造に対する水セメント比の影響がスラグによる影響よりも卓越していることを意味する。

また、図-9 c) から、水セメント比が 40%の場合も 60%の場合も、フライアッシュを用いた場合の細孔構造が粗くなっている。一方、図-7 に示す圧縮強度は、フライアッシュを用いた場合、若干の強度低下を示すに

止まっている。このことは、フライアッシュによって界面の細孔構造が改善され、最終的な圧縮強度が界面性状に大きく影響されたことを意味する。このように、スラグとフライアッシュを用いたコンクリートの強度発現は、極めて複雑な挙動となっていることが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) スラグ置換率の増加は、減水剤および AE 剤の添加量を減少させるが、フライアッシュの置換率の増加は、減水剤の添加量を減少させ、AE 剤の添加量を増加させる。
- (2) ブリーディング率は、スラグ置換率の増加に伴い増加するが、スラグとフライアッシュの併用により、スラグの利用に伴うブリーディングを抑制することができる。
- (3) スラグ置換率の増加に伴い、コンクリートの圧縮強度は減少するが、スラグとフライアッシュを併用することにより、材齢 28 日ではスラグを利用した場合と同等程度の圧縮強度が得られる。
- (4) スラグの利用による細孔径分布への影響はほとんどないが、フライアッシュの利用は、細孔構造

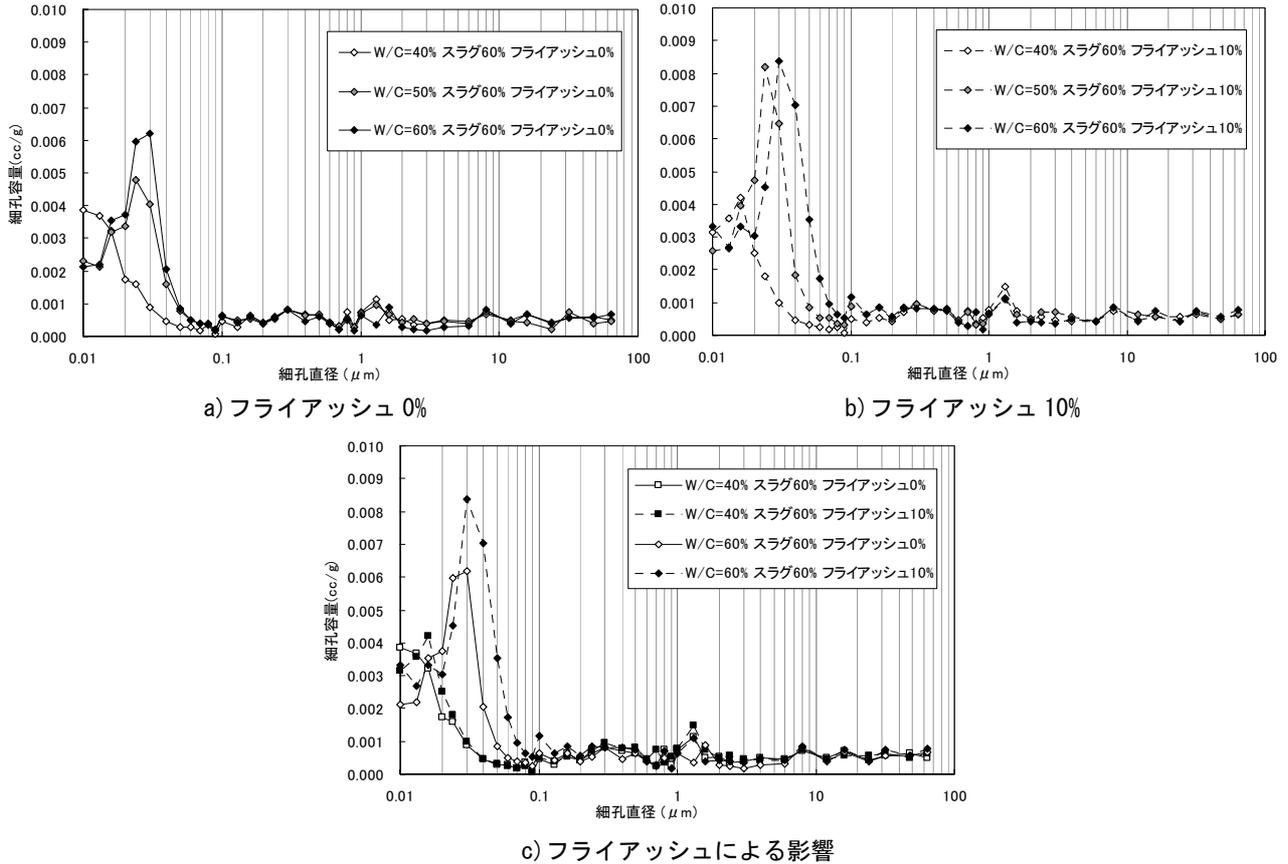


図-9 細孔径分布 (スラグ置換率 60%)

を粗くさせる傾向がある。

- (5) 細孔分布と圧縮強度の関係より、スラグを用いた場合およびスラグとフライアッシュを用いた場合の何れも、コンクリートの圧縮強度は、セメント硬化体とスラグおよび骨材との界面に支配される。
- (6) 以上のことから、水セメント比、スラグ置換率およびフライアッシュ置換率によってその効果は異なるが、フライアッシュの適切な利用は、スラグを用いたコンクリートのブリーディングや圧縮強度に関する性能を向上させる。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS A 5031 (一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材)，2006。
- 2) 北辻政文，藤井宏一：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，農業土木学会論文誌，No.200，pp.59-67，1997。
- 3) 松山哲也，堺孝司，吉田秀典，高木茂：都市ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.73-78，2001。
- 4) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針 (案)，2005。
- 5) 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書，平成 17 年度。
- 6) 芦田広喜，古賀善雄，藤本浩：フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性 (2)，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.511-516，2005。
- 7) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案)，1999。
- 8) 古田敦史，上野敦，國府勝郎，宇治公隆：スラグ細骨材を用いたコンクリートのブリーディング制御方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.97-102，2005。
- 9) 斉藤丈士，菅田雅裕，谷山教幸，池永博威：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.81-86，2004。
- 10) 北辻政文，田中礼治，遠藤孝夫，鳴海繁実：都市ごみガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.2，pp.89-98，2002。