

論文 北陸産分級フライアッシュを用いたコンクリートの配合と強度

橋本徹*1・参納千夏男*2・江田明孝*3・鳥居和之*4

要旨：本研究では、フライアッシュの分級効果を定量的に確認するとともに、分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合試験を実施し、そのフレッシュおよび硬化コンクリートの特性に関して検討した。その結果、分級フライアッシュでは、平均粒径が小さくなり、かつ、ガラス質成分の割合が増加することなどから、コンクリートの流動性やポズラン反応性の向上が期待できることが判明した。また、分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合の特徴として、北陸地方産の河川砂利を骨材とする場合には、単位水量の低減効果や初期・長期強度の発現性の改善効果が認められた。

キーワード：分級フライアッシュ, ガラス質成分, 配合, 単位水量, 圧縮強度

1. はじめに

フライアッシュをコンクリートに混和した場合、球形微粒子の形状をしたフライアッシュのベアリング作用などによりフレッシュコンクリートの流動性が改善され、コンクリートの配合検討において単位水量が低減されることや、フライアッシュのポズラン反応性により硬化コンクリートの強度、耐久性が向上することなどが知られている^{1~4)}。これらの特性は、フライアッシュの品質に依るところが大きく、コンクリート用にフライアッシュを使用する場合は JIS A6201 により I 種~IV 種の品質規格に分類されている。

一方、北陸電力(株)七尾大田火力発電所(石川県七尾市大田町)では、社内で定めている JIS 灰製造・品質管理フローに従い、従来から JIS II 種の規格を満足するフライアッシュを製造していたが、平成 21 年 8 月よりフライアッシュの分級装置を新たに稼働させ、平成 22 年 1 月から分級フライアッシュ(JIS A 6201 II 種品)の製造を本格的に運用している。分級フライアッシュの品質

については、これまで得られた JIS 項目データの分級前後での比較により、フライアッシュの顕著な品質改善が認められているものの、今後とも炭種や燃焼条件の違いが分級フライアッシュの物理・化学的性質に及ぼす影響を明らかにすることが必要である。

本研究では、フライアッシュの分級効果を、炭種や燃焼条件が同じである試験用サンプルを用いた分級前後での比較試験により定量的に確認するとともに、北陸地方(富山県, 石川県)の生コンクリートプラントで実際に使用されている代表的な骨材 4 種類について、分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合試験を実施し、フレッシュ時および硬化時のコンクリートの特性に関して検討した。

2. 分級フライアッシュの品質

表-1 に、コンクリート用フライアッシュ JIS A 6201 の規格値を七尾大田火力発電所で製造された分級フライアッシュの品質に関する実測値(測定期間: H22.1~

表-1 コンクリート用フライアッシュの規格値(JIS A6201)と分級フライアッシュの性質

種類	I 種	II 種	III 種	IV 種	分級フライアッシュのデータ				
					最大	最小	平均	標準偏差	
二酸化けい素(%)	45.0 以上				63.6	51.9	57.8	3.6	
湿分(%)	1.0 以下				0.4	<0.1	-	-	
強熱減量(%)	3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下	2.4	1.3	1.9	0.3	
密度(g/cm ³)	1.95 以上				2.48	2.30	2.40	0.04	
粉末度	45 μm ふるい残分(%)	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下	1.3	0.1	0.5	0.3
	比表面積(cm ² /g)	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上	5130	4330	4794	173
フロー値比(%)	105 以上	95 以上	85 以上	75 以上	111	103	107	2.0	
活性度指数(%)	材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上	96	82	89	4.1
	材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上	110	96	103	3.5

*1 北陸電力(株) 土木部 土木技術チーム 統括(正会員)

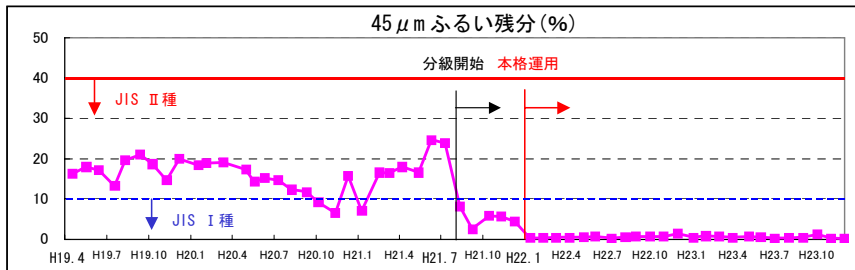
*2 北陸電力(株) 土木部 土木技術チーム 博(工)(正会員)

*3 北陸電力(株) 火力部 火力発電環境チーム 統括副部長

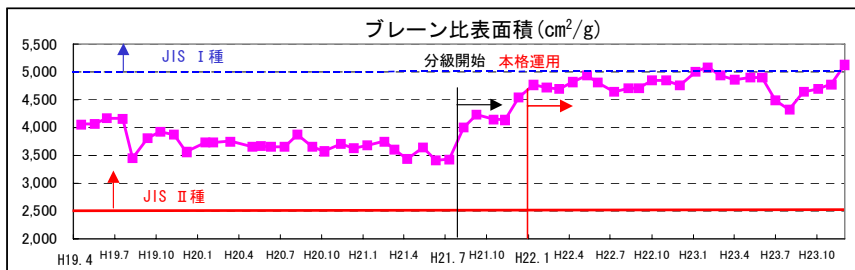
*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系教授 工博(正会員)

H23.12の2年間)と併せて示す。また、図-1~図-3に、コンクリートの配合特性に大きな影響を与えると考えられるJIS項目値(粉末度、フロー値比、活性度指数)について、分級前後の推移(分級前:H19.4~H21.7, 分級後:H22.1~H23.12)を示す。なお、分級開始から本格運用までの期間は、分級装置の調整期間である。図-1

より、コンクリートの流動性やポズラン反応性に影響を与える粉末度は、分級により顕著な改善がみられ、45 μ mふるい残分は平均で16.2%から0.5%に、ブレン比表面積も平均で3,725cm²/gから4,794cm²/gに改善されている。図-2より、コンクリートの流動性を示す一つの指標であるフロー値比は、分級により平均で100%から

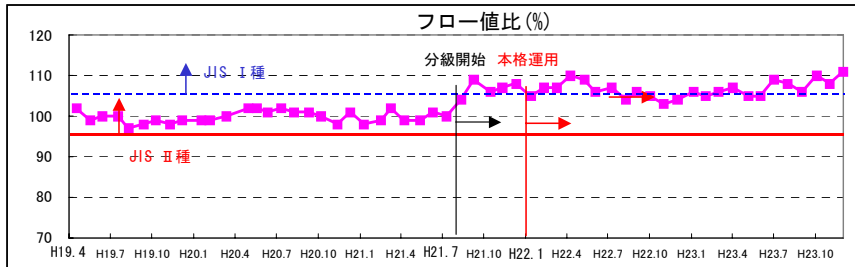


	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	24.6	1.3
Min	6.5	0.1
Ave	16.2	0.5
標準偏差	4.2	0.3
JIS II種	40以下	



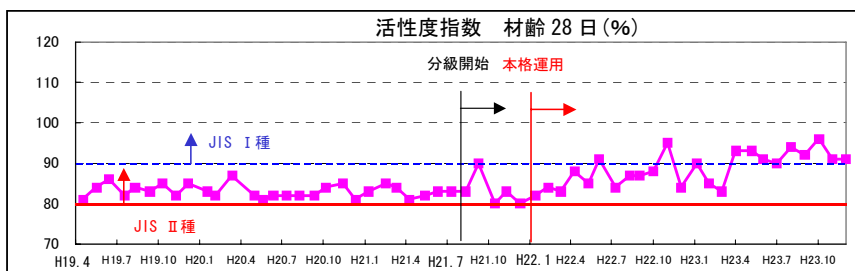
	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	4170	5130
Min	3410	4330
Ave	3725	4794
標準偏差	204	173
JIS II種	2500以上	

図-1 分級フライアッシュの粉末度の推移

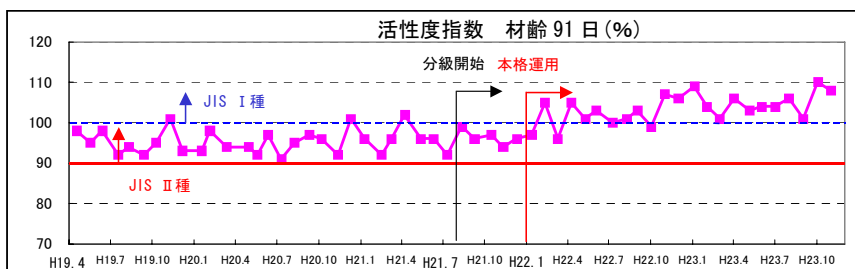


	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	102	111
Min	97	103
Ave	100	107
標準偏差	1.4	2.0
JIS II種	95以上	

図-2 分級フライアッシュを使用したモルタルのフロー値比の推移



	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	87	96
Min	81	82
Ave	83	89
標準偏差	1.6	4.1
JIS II種	80以上	



	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	102	110
Min	91	96
Ave	95	103
標準偏差	2.9	3.5
JIS II種	90以上	

図-3 分級フライアッシュを使用したモルタルの活性度指数の推移

107%に改善されている。これは、分級により粒径の細かいものが多くなり、より流動性が増加したためと考えられる。図-3より、ポゾラン反応性を示す一つの指標である活性度指数は、材齢28日、材齢91日ともに改善傾向を示している。特に材齢91日については分級後の平均が103%と100%を超える値となっている。これは、分級フライアッシュをセメントと25%置換したモルタルが、セメントのみの基準モルタル以上に長期強度の発現性があることを示している。

これらの結果より、分級フライアッシュの物理・化学的性質は、従来より顕著な品質改善が認められ、コンクリートの流動性やポゾラン反応性の向上が期待できると考えられる。

3. 試験概要および測定方法

分級フライアッシュの品質が向上した理由をより詳細に確認するため、炭種や燃焼条件が同じである試験用サンプルを用いた分級前後での比較試験（フライアッシュの分級効果確認試験）を実施した。また、分級フライアッシュはコンクリートの流動性やポゾラン反応性が向上し、コンクリートの配合特性として、単位水量の低減効果や強度発現性の向上が期待できることから、北陸地方（富山県、石川県）の生コンクリートプラントで実際に使用されている代表的な骨材4種類について、分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合試験を実施した。

3.1 フライアッシュの分級効果の確認試験

試験用サンプル（フライアッシュ原粉）を試験室で分級装置により分級し、分級前後の化学的性質および物理

的性質を比較した。分級は、ブレーン比表面積が実機と同程度（平均4800cm²/g程度）になるように、分級装置の回転数を調整した。化学的性質の比較として、蛍光X線による化学組成分析、粉末X線回折/リートベルト法⁵⁾により、それぞれ分級前後の化学成分、結晶質成分とガラス質成分の割合を算出した。また、物理的性質の比較として、レーザー回折法による粒度分布の計測を行った。

3.2 分級フライアッシュを使用したコンクリートの生コンクリートプラントでの配合試験

(1) 室内配合試験

北陸地方における代表的な骨材を使用している生コンクリートプラントを選定し、各生コンクリートプラントの配合設計の方法に従って室内配合試験を実施した。室内配合試験は、スランプ、空気量、圧縮強度を計測し、圧縮強度とB/W（B=C+F：ここにCはセメント量、Fはフライアッシュ量、Bは結合材量、Wは単位水量）の関係式およびスランプと単位水量の関係式を得ることにより、配合表を作成した。試験の実施ケースは、W/B：60、50、40%、スランプ：8、12、15、18cm、粗骨材の最大寸法25mm、空気量：4.5%を基本とした。フライアッシュの置換率は、ASR抑制効果を考慮し、JIS A 5308で規定されている最低値の15%（内割り）とした。骨材は、そこで実際に使用している骨材を使用した。また、セメントは、各生コンクリートプラントで使用されている普通ポルトランドセメントを使用した。室内配合試験に使用した分級フライアッシュの化学成分および物理的性質を表-2に、実機による試験を実施した生コンクリートプラントの一覧表を骨材特性と併せて表-3に示す。

表-2 分級フライアッシュの化学成分および物理的性質(JIS A6201)

二酸化 けい素 (%)	湿分 (%)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm ³)	粉末度		フロー値比(%)	活性度指数(%)	
				45μmふるい 残分(%)	比表面積 (cm ² /g)		材齢28日	材齢91日
53.35	0.10	2.0	2.44	0.8	4,870	106	91	99

表-3 生コンクリートプラント一覧表

プラント	プラントの場所	骨材の種類		密度(g/cm ³)	粗粒率	吸水率(%)
A	富山県東部	粗骨材	早月川産川砂利	2.69	6.90	0.74
		細骨材	早月川産川砂	2.65	2.67	1.03
B	富山県西部	粗骨材	庄川産陸砂利	2.61	6.88	1.19
		細骨材	庄川産陸砂	2.59	2.70	1.58
C	石川県加賀地区	粗骨材	手取川産陸砂利	2.60	6.84	1.84
		細骨材	手取川産陸砂5mm(粗砂)	2.57	2.60 (G1:G2=80:20)	2.09
			高松産陸砂0.3mm(細砂)			
D	石川県能登地区	粗骨材	能登産碎石	2.64	6.89	1.43
		細骨材	能登産山砂:2.5mm以下	2.53	2.46	2.05
			能登産砕砂:5mm以下	2.61	3.42	2.19

(2) 圧縮強度の確認試験

室内配合試験で得られた配合により、実際の生コンクリートプラントにてコンクリートを製造し、JIS A1108に基づき圧縮強度試験を実施した。試験は、富山県、石川県ともに各1プラント(A, Cプラント)を代表して実施した。圧縮強度試験用供試体は、JIS A1132に基づき、直径100mm、高さ200mmの供試体を作製した。実施したケースは、呼び強度27、スランプ8cm±2.5cm、粗骨材の最大寸法25mmとした。なお、コンクリートの空気量は4.5%±1.5%とした。

4. 試験結果および考察

4.1 フライアッシュの分級効果の確認試験

分級前後のブレン比表面積、密度および活性度指数を表-4に示す。表-4より、ポゾラン反応性を示す一つの指標である活性度指数が分級前後で大きく改善さ

れている。また、その改善の程度は、図-3に示す実機での分級前後の活性度指数と同程度である。以下、フライアッシュの物理・化学的性質の変化からポゾラン反応性の向上要因をより詳細に検討する。

(1) 分級による化学的性質の変化

蛍光X線法による化学組成分析結果および強熱減量(Ig.loss)を表-5に、粉末X線回折/リートベルト解析による鉱物組成分析結果を表-6に示す。表-5および表-6より、分級フライアッシュの方がフライアッシュ原粉よりもSiO₂(シリカ)量とAl₂O₃(アルミナ)量の合計割合およびガラス質成分の割合が高くなっている。このことは、化学組成ではSiO₂(シリカ)、Al₂O₃(アルミナ)量の多い方が、鉱物組成ではシリカ質のガラス成分が多い方が一般的にポゾラン反応性が高いと言われていることから^{6,7)}、分級によりフライアッシュのポゾラン反応性に関与する化学的性質が大きく向上したと考え

表-4 分級前後のブレン比表面積、密度および活性度指数の比較

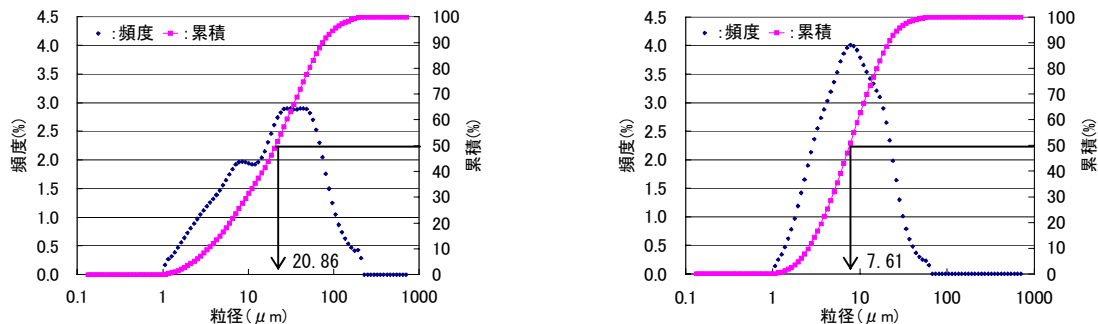
試料名	ブレン比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	活性度指数 (%)	
			材齢 28 日	材齢 91 日
フライアッシュ原粉	3390	2.36	83	95
分級フライアッシュ	4780	2.43	91	104

表-5 蛍光X線法による化学成分分析結果

試料名	化学成分 (%)											
	Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
フライアッシュ原粉	1.8	50.93	29.53	8.01	4.36	0.82	0.15	0.25	0.55	1.38	0.86	0.12
分級フライアッシュ	2.0	53.60	28.93	6.74	3.20	0.77	0.22	0.30	0.72	1.39	0.98	0.09

表-6 粉末X線回折/リートベルト解析による鉱物組成分析結果

試料名	結晶質成分 (%)					ガラス質成分 (%)	計 (%)
	石英	ムライト	マグネタイト	ライム	小計		
フライアッシュ原粉	5.4	26.7	2.0	0.8	34.9	65.1	100.0
分級フライアッシュ	5.0	20.6	1.0	0.2	26.8	73.2	100.0



粒径 (μm)		
累積 10%	累積 50%	累積 90%
3.37	20.86	73.84

フライアッシュ原粉

粒径 (μm)		
累積 10%	累積 50%	累積 90%
2.55	7.61	21.29

分級フライアッシュ

図-4 レーザー回折法による粒度分布の測定結果

られる。

(2) 分級による物理的性質の変化

分級前後のレーザー回折法による粒度分布測定結果を図-4に、分級前後のフライアッシュの走査電子顕微鏡による反射電子像を写真-1に示す。図-4より、累積50%の粒径はフライアッシュ原粉で20.86μm、分級フライアッシュで7.61μmと分級フライアッシュの粒径はフライアッシュ原粉の粒径の約1/3となっている。また、反射電子像では、分級により粒子の大きなものがなくなり、細かく均等な球形の粒子が多くなっている。一般的に、粒子が細かく均等になれば化学反応は促進されるため、分級によりフライアッシュのポゾラン反応性に関与する物理的性質が向上したと考えられる。

4.2 分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合試験

(1) 室内配合試験

表-7に室内配合試験により作成したフライアッシュを混和した場合の配合(N+F)一覧を、各生コンクリートプラントで使用している普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの配合(N)および高炉セメントを使用したコンクリートの配合(BB)と併せて示す。

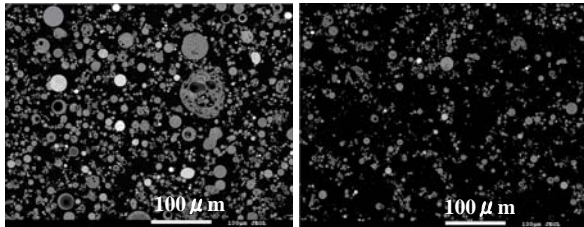


写真-1 フライアッシュのSEM画像(反射電子像)

表-7 生コンクリートプラントでの配合一覧(呼び強度27, スランプ8cm, 最大骨材寸法25mm)

プラント	種類	W/B (%)	細骨材率 (%)	セメント (kg/m ³)	フライアッシュ (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	AE減水剤 (kg/m ³)
A	N	54.5	44.8	292	—	159	831	1044	2.92
	BB	53.9	44.4	293	—	158	821	1050	2.93
	N+F	54.5	44.8	245	43	157	828	1044	2.88
B	N	53.8	44.2	286	—	154	814	1034	2.86
	BB	51.5	42.8	297	—	153	782	1052	2.97
	N+F	50.0	43.5	255	45	150	795	1038	3.00
C	N	54.7	44.0	285	—	156	802	1036	2.85
	BB	53.7	43.4	287	—	154	789	1044	2.87
	N+F	53.3	45.8	230	40	144	851	1021	2.43
D	N	52.3	42.7	331	—	173	732	1024	3.31
	BB	51.5	41.5	326	—	168	714	1051	3.59
	N+F	51.2	42.4	284	50	171	725	1024	3.34

また、図-5にN, BB, N+Fの単位水量の比較図を示す。図-5より、河川砂利を使用したプラントA~Cでは、N+Fの単位水量は、N, BBよりも小さい結果となった。また、骨材特性との関係を見ると、比較的吸水率が高い骨材を使用しているB, Cプラントでは、単位水量の低減効果がより大きい傾向があった。これは、フライアッシュを混和した場合に、骨材表面の保水性やブリーディングが改善されたことによるものと推察される。

一方、砕石を使用したプラントDでは、元々の単位水量が河川砂利を使用したものよりも多く、N+Fの単位水量は、Nよりも小さくBBよりも大きい結果となった。これは、砕石では、骨材の形状が角張っており、骨材同士のかみ合わせ効果がスランプ値に大きく影響したためと推察される。

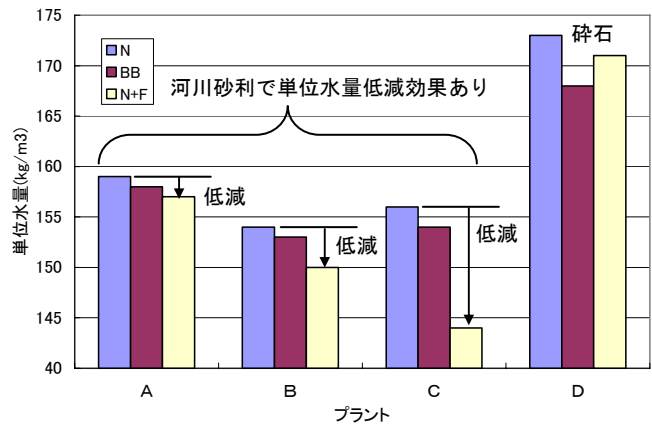


図-5 コンクリートの単位水量の比較

(2) 圧縮強度の確認試験

図-6に実際の生コンクリートプラントで製造したコンクリートの圧縮強度(呼び強度27)の経時変化を、

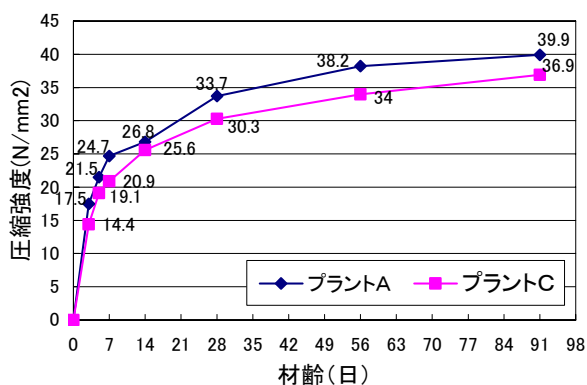


図-6 コンクリートの圧縮強度の経時変化

表-8 に材齢 28 日に対する材齢 7 日と材齢 91 日強度比率を (社) セメント協会でもとめられた N と BB の W/C55% の試験値と併せて示す⁷⁾。分級フライアッシュを使用したコンクリートの初期強度発現 (7 日材齢/28 日材齢) は平均 71.2% であり, BB の 52% より大きく N とほぼ同等の値である。また, 分級フライアッシュを使用したコンクリートの長期強度増進 (91 日材齢/28 日材齢) は平均 120.1% であり, N より大きく, BB より小さい。このように, 初期強度発現が BB より大きく, N と同程度であった理由としては, フライアッシュ粒子の反応相の厚さは 1~2 μ m 程度と小さいことが指摘されており⁸⁾, 分級により細くなったフライアッシュ粒子が均等にセメントペースト相に分散することにより, 全体としてポゾラン反応に寄与できるフライアッシュの表面積が多くなった効果であると推察される。一般的に, フライアッシュコンクリートはポゾラン反応性による長期強度増進が知られているが, 分級フライアッシュでは初期強度発現がより期待できるものと考えられる。

5. 結論

本研究で得られた主な結果は以下に示す通りである。

- (1) 分級フライアッシュでは, 粉末度やフロー値, 活性度指数が顕著に改善され, コンクリートの流動性やポゾラン反応性の向上が期待できた。
- (2) 分級フライアッシュのポゾラン反応性が向上した理由として, 分級フライアッシュの方がフライアッシュ原粉よりも平均粒径が 1/3 程度と細くなり, また, SiO₂ (シリカ) 量の割合およびガラス質成分の割合が高くなったことが寄与していた。
- (3) 分級フライアッシュをコンクリートに使用した場合, 北陸地方産の河川砂利を骨材とするケースでは, 単位水量の低減効果が認められた。
- (4) 分級フライアッシュをコンクリートに使用した場合, 一般的に言われているポゾラン反応性による長期強度の増進のみならず, 初期強度の発現についても良好であった。

表-8 コンクリートの圧縮強度の増進比率

	7日/28日 (%)	91日/28日 (%)
プラントA	73.3	118.4
プラントC	69.0	121.8
プラントAとCの平均値	71.2	120.1
N (セメント協会値) ⁷⁾	74	116
BB (セメント協会値) ⁷⁾	52	135

【謝辞】本研究は, 産学官連携による「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」(委員長 鳥居和之 金沢大学教授)の活動において実施したものである。ここに, 関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) V.M.Malhotra, P.K.Mehta: High-Performance High-Volume FlyAsh Concrete, Second Edition, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., pp13-pp24, 2005
- 2) (社) 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), コンクリートライブラリー, No. 94, 1999
- 3) (社) 土木学会: 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術-利用拡大に向けた設計施工指針案-, コンクリートライブラリー, No. 132, 2009
- 4) 山本武志, 金津努: フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol. 63, No. 1, pp. 52-65, 2007
- 5) 星野清一, 平尾宙, 山田一夫: 非晶質混和材を含むセメントの鉱物の定量における X線回折/リートベルト法の適用, セメントコンクリート論文集, No. 59, pp. 14-21, 2005
- 6) 内川浩, 宇智田俊一郎, 羽原俊祐: セメント用混和材(スラグ, フライアッシュ, シリカフェーム, もみ殻灰)中の非晶質相の構造とその水和反応性, セメント技年報, No. 39, pp. 36-pp. 40, 1985
- 7) (社) セメント協会: コンクリート専門委員会報告 F-55 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究, pp. 2-pp. 12, 2008
- 8) 広野真一, 鳥居和之: ASTM C1260 によるフライアッシュ含有モルタルの ASR 抑制効果, 材料, 2013