

論文 品質の異なるフライアッシュのプレキャストコンクリート製品への利用

小林 忠司*1・遠藤 孝夫*2・北辻 政文*3・俵谷 祐吉*4

要旨: 主に強熱減量 5%を境にして分別され、大量に発生する JIS 規格外のフライアッシュをプレキャストコンクリート製品に利用するため、混和剤の種類およびフライアッシュの品質がフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの特性に及ぼす影響、蒸気養生までの前置時間が強度に及ぼす影響、凍結融解抵抗性などを検討した。その結果、品質のばらつくフライアッシュを用いても、適切な混和剤を選定したうえでフライアッシュの品質に応じて添加量を管理することによって、強度、耐久性などを満足したプレキャストコンクリート製品の製造が可能であることを明らかにした。

キーワード: フライアッシュ, プレキャストコンクリート製品, 空気量, AE 剤, メチレンブルー吸着量

1. はじめに

石炭火力発電所から発生するフライアッシュ（以下 FA）は、炭種および燃焼方法の多様化から、近年、品質に大きなばらつきが生じている。この FA を JIS の規格品と規格外品に分別するには、先ず強熱減量の試験が行われる。一般的には、強熱減量が 5%を超える FA は JIS 規格外品として扱われ、国内外のセメント原料として使用されるか、埋立処分されている。

従って、コンクリート用として使用する JIS 規格の FA の量は限られており、大量に発生する JIS 規格外の FA の活用が望まれている。山形県内の石炭火力発電所における FA の発生状況を表-1 に示す。この表より 2011 年度の JIS 規格品は僅か 1.7%に留まっていることが分かる。

2009 年 8 月に「フライアッシュを用いたプレキャストコンクリート製品のガイドライン試案」¹⁾が示されたものの、東北地方ではこれまでプレキャストコンクリート製品への FA の活用はほとんどなされていない状況であり、その活用技術の確立が課題であった。

そこで本研究では、強熱減量 5%で分別される JIS 規格外の FA を有効活用することを目的として、混和剤および FA の種類がフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの特性に及ぼす影響、蒸気養生までの前置時間が強度に及ぼす影響、また使用地を想定した凍結融解抵抗性や環境安全面からの有害物質の溶出量等を把握し、

表-1 山形県内火力発電所の FA 発生状況(千 t)

種類		2009年度	2010年度	2011年度
フライアッシュ	JIS規格品	4	5	4
	JIS規格外品	145	145	231
	JIS規格品の割合	2.7%	3.3%	1.7%
クリンカーアッシュ		17	18	27

品質の異なる FA のプレキャストコンクリート製品への利用を検討したものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料

(1) セメント (C)

セメントには、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³, 比表面積 3310g/cm²）を使用した。

(2) フライアッシュ (FA)

FA は、約 4 箇月間で無作為に 3 回採取した 3 種類の乾灰（FA1, FA2 および FA3）を使用した。これらの品質を表-2 に示す。本実験で使用した FA の強熱減量は 2.6 ~ 6.6%であった。

(3) 骨材

細骨材(S)には、山形県鶴岡市関根産砕砂と酒田市黒森産砕砂を質量比で 8 : 2 に混合（表乾密度 2.64 g/cm³, F.M.2.78）したものを、粗骨材(G)には鶴岡市関根産砕石 2005（表乾密度 2.67 g/cm³, 実積率 59.9%）を使用した。

(4) 減水剤 (SP)

減水剤には、プレキャストコンクリート製品用として汎用されているナフタレン系（Na 系）とポリカルボン

表-2 FA の品質

項目	FA1	FA2	FA3	JIS II 種規定値
二酸化けい素 (%)	60.0	52.4	55.9	45.0以上
湿分 (%)	0.36	0.27	0.10	1.0以下
強熱減量 (%)	6.6	2.6	4.8	5.0以下
密度(g/cm ³)	2.16	2.38	2.23	1.95以上
ブレン比表面積 (cm ² /g)	4710	5190	4160	2500以上
メチレンブルー吸着量 (g/mg)	0.85	0.95	0.55	—
フロー値比 (%)	92	102	92	95以上
活性度指数 (%) 材齢28日	82	94	87	80以上

*1 前田製管 (株) 品質・安全管理部 (正会員)

*2 東北学院大学 工学部環境建設工学科 教授 博 (工) (正会員)

*3 宮城大学 食産業部環境システム学科 教授 博 (農) (正会員)

*4 元国土交通省 酒田河川国道事務所長

酸系 (Po 系) の高性能減水剤 (I 種) を使用した。

(5) AE 剤 (AE)

AE 剤には、次の 4 タイプを用いた。

- a) ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウムを主成分とした一般用の AE 剤 (AE0)
- b) 機能性有機リン酸エステルを主成分とした FA 用の AE 剤と上記 AE0 を質量比で 5:1 に混合したもの (AE12)
- c) 高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体からなる FA 用の AE 剤 (AE3)
- d) エーテル型アニオン活性剤を主成分とし、あらかじめムース状にした微細な空気泡を練混ぜ時に投入するプレフォーム型²⁾の AE 剤 (PAE)

2.2 混和剤の種類に関する実験 (実験ケース 1)

実験ケース 1 では、混和剤の種類が空気量、スランプおよび圧縮強度に及ぼす影響を検討し、一部の配合については気泡間隔係数の測定、凍結融解ならびに微量有害成分溶出の実験を行った。コンクリートの配合を表-3 に示す。ここで FA を混和しない普通コンクリート (以下 N コンクリート) の配合は、材齢 14 日で設計基準強度 30N/mm² を保証するプレキャストコンクリート製品用のものである。FA を 50L/m³ 混和したコンクリート (以下 FA コンクリート) の水セメント比 51.3% は、材齢 14 日で N コンクリートと同等の強度になるよう、予備試験

を行って決定した。

(1) 練混ぜ

容量 50L のパン型強制練りミキサーを用いてコンクリートを練り混ぜた。N コンクリートでは空練り 15 秒+本練り 90 秒とした。FA コンクリートの場合は、FA の分散を考慮して、練混ぜ時間を長くした。水に混合するタイプの AE 剤では空練り 15 秒+本練り 180 秒、あらかじめムース状の泡を作る PAE では、モルタル先練りとして、空練り 15 秒+モルタル練り 120 秒+PAE 投入後 20 秒+粗骨材投入後 90 秒の練混ぜ時間とした。

(2) スランプおよび空気量

JIS A 1101 および JIS A 1128 に準じてスランプと空気量を測定した。測定は、コンクリート排出直後と排出から 10、20 および 30 分後に行った。

(3) 供試体の養生

最後に練ったコンクリートの注水から 4 時間前置きし、蒸気養生 (1 時間で 20℃ 上昇, 60℃ で 2 時間保持, その後自然冷却) を行い所定材齢まで室内養生するものと、標準養生 (20℃ 水中) するもので 2 種類の養生を行った。

(4) 圧縮強度

JIS A 1108 に準じて、φ10×20cm 円柱供試体の圧縮強度試験を行った。

(5) 気泡間隔係数

表-3 混和剤の種類を変えたコンクリートの配合と排出直後の空気量およびスランプの結果

記号	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤添加量 (P×%)						空気量 (%)	スランプ (cm)		
					W	P			S	G	SP		AE					
						C	FA1	FA2			Na系	Po系	AE0	AE12			AE3	PAE
N	12	4.5	45.2	43.9	155	343	-	802	1035	0.80	-	0.026	-	-	-	6.0	17.5	
Na系-AE12	12	4.5	51.3	40.8	155	302	108	704	1035	1.40	-	-	0.55	-	-	5.1	12.0	
Na系-AE3										1.20	-	-	-	0.50	-	-	4.2	12.5
Na系-PAE										1.30	-	-	-	-	0.73*	-	-	1.8
Po系-AE12	21	4.5	51.3	40.8	155	302	108	704	1035	-	1.10	-	0.24	-	-	5.2	20.0	
Po系-AE3										-	1.10	-	-	0.20	-	-	5.3	22.5
Po系-PAE										-	0.95	-	-	-	0.61	-	-	5.6

備考) *この添加量で空気量は最大となったが、空気量は1.8%であった。

表-4 FA の種類を変えたコンクリートの配合と排出直後の空気量およびスランプの結果

記号	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加量 (P×%)			空気量 (%)	スランプ (cm)		
					W	P				S	G	SP			AE	
						C	FA1	FA2	FA3			Po系			AE12	PAE
FA1-1	21	4.5	51.3	46.2	160	312	108	-	-	789	928	1.10	0.18	-	5.7	21.5
FA1-2												0.85	-	0.42	5.2	22.5
FA2-1	21	4.5	51.3	46.2	160	312	-	119	-	789	928	0.70	0.18	-	5.4	19.5
FA2-2												0.60	-	0.42	5.1	20.0
FA3-1	21	4.5	51.3	46.2	160	312	-	-	112	789	928	0.90	0.18	-	9.6	22.5
FA3-2												0.70	-	0.42	10.0	21.5
FA3-3												0.90	0.012	-	6.0	21.0

表-5 前置時間の検討に用いたコンクリートの配合と排出直後の空気量およびスランプの結果

記号	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤添加量 (P×%)		空気量 (%)	スランプ (cm)		
					W	P			S	G			SP	AE
						C	FA3	FA3					Po系	AE12
FA3-4	21	5.0	51.3	45.8	160	312	112	775	928	0.70	0.012	6.2	19.5	

蒸気養生したφ10×20cm 円柱供試体を、上部（打設面から1cm）・中部（打設面から10cm）・下部（底面から1cm）に切断した。それぞれの断面について、画像解析装置を使用して面積法による気泡間隔係数(La)を求め、式(1)からリニアトラバース法による気泡間隔係数(LI)に換算した。

$$LI = La \times 2.2194 - 107.99 \quad (1)$$

(6) 凍結融解試験

記号 Po 系-AE12 で示す配合では、蒸気養生した材齢14日の10×10×40cm 角柱供試体について、JIS A 1148のA法に準じて凍結融解試験を行った。

(7) 微量有害成分溶出試験

記号 Po 系-AE12 で示す配合では、蒸気養生した材齢14日のφ10×20cm 円柱供試体について、JSCE-G 575-2005に準じて微量成分の溶出試験を行った。

2.3 FAの種類に関する実験（実験ケース2）

実験ケース2では、FAの発生時期による品質の違いが空気量、スランブおよび圧縮強度に及ぼす影響を検討した。コンクリートの配合を表-4に示す。Po系減水剤を使用し、更に空気連行性を改善するために、実験ケース1よりも細骨材率および単位水量を増大させた。

(1) スランブおよび空気量

実験ケース1と同様に、FAコンクリートを練り混ぜ、スランブおよび空気量を測定した。なお、経時測定は空気量のみとした。

(2) 圧縮強度

実験ケース1と同様に、蒸気および標準養生したφ10×20cm 円柱供試体の圧縮強度試験を行った。

2.4 前置時間に関する実験（実験ケース3）

実験ケース3では、蒸気養生までの前置時間がFAコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を検討した。コンクリートの配合を表-5に示す。空気量の経時低下が若干認められることを考慮し、空気量は4.5%設定から5.0%設定に変更した。

実験ケース1と同様に、FAコンクリートを練り混ぜ、蒸気および標準養生を行ったφ10×20cm 円柱供試体について、圧縮強度試験を行った。なお、蒸気養生までの前置時間は、1, 3, 5 および7時間とした。

3. 実験結果および考察

3.1 混和剤の種類の影響

表-3に示したとおり、Po系減水剤では、いずれのAE剤においても比較的少ない添加量で十分な空気を連行できたが、Na系減水剤ではAE剤の添加量は多くなった。なお、Na系減水剤とPAEの組合せでは、2%以上の空気を連行することはできなかった。これは、PAEに含まれる増粘成分がNa系減水剤の組成とは適合しにくい

ことに起因しているものと推察される。

(1) 空気量の経時変化

空気量の経時変化を図-1に示す。いずれのFAコンクリートにおいても、時間の経過と共に空気量は減少する傾向にある。その傾向はNa系減水剤を用いたコンクリートで顕著であった。なお、Na系減水剤における減少傾向はNコンクリートと同程度と判断できる。

Po系減水剤では、いずれのAE剤においても空気量の経時低下は小さく、30分経過後においても減少量は1.7%以下である。

(2) スランブの経時変化

スランブの経時変化を図-2に示す。プレキャストコンクリート製品用の高性能減水剤を使用したため、一般的な現場打設のコンクリートと比較して、スランブは時間の経過に伴って大きく低下した。初期のスランブに違いはあるが、Po系減水剤に比べNa系減水剤を用いたFAコンクリートでスランブの低下傾向は大きい。ただし、Na系減水剤におけるスランブの低下割合は、本実験の限りではNコンクリートよりも小さい傾向にあった。排出から20分経過した時のスランブは5cm程度であるが、締固めは十分に可能である。

表-3のPo系減水剤を用いた配合において、その減水

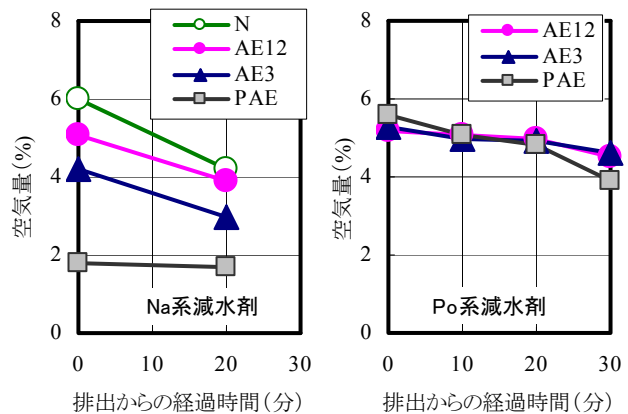


図-1 空気量の経時変化

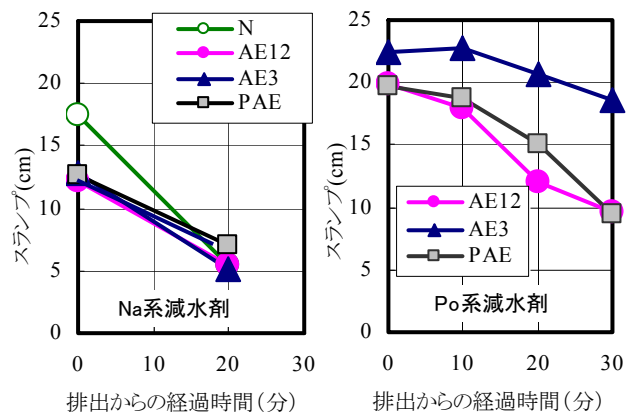


図-2 スランブの経時変化

剤の添加量が最も少なくなる AE 剤は PAE である。AE12 および AE3 のときの減水剤添加量は 1.10% であるのに対し、PAE の場合 0.95% (約 86% の割合) で同程度のスランプとなる。これは、均一な径の連行空気によるボールベアリング作用、また PAE に含まれる増粘成分が関係しているものと考えられる。

(3) 圧縮強度

Na 系減水剤を使用したコンクリートの圧縮強度を図-3 に示す。AE 剤の種類によって 14 日強度に若干差異は認められるものの、FA コンクリートの圧縮強度は N コンクリートと同等の結果が得られた。

Po 系減水剤を使用した FA コンクリートの圧縮強度を図-4 に示す。AE 剤の種類にかかわらず、材齢の経過に伴って、蒸気養生した FA コンクリートの圧縮強度は増大する。標準養生に対する蒸気養生した FA コンクリートの圧縮強度の割合は、材齢 14 日で 79~81%、材齢 28 日で 83~85% である。この割合は、一般的な普通コンクリート³⁾と同等かそれ以上である。前述の Na 系減水剤に比べて、Po 系減水剤を用いた FA コンクリートの 14 日強度は若干高い傾向が認められる。

ここで、表-6 に硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数を示す。いずれの混和剤においても硬化コンクリートの空気量に大きな差異は無いが、気泡間隔係数は Po 系減水剤を用いた FA コンクリートで小さい傾向にある。すなわち、Na 系減水剤に比べて Po 系減水剤の方が、特

に PAE において、強度に影響を及ぼしにくい微細で均一な気泡組織になっていることが考えられる。Na 系減水剤よりも、Po 系減水剤、さらに PAE において FA コンクリートの圧縮強度が増大しているのは、この気泡組織が一因になっているものと推察される。また、PAE では円柱供試体の上部、中部、下部のいずれの断面においても、気泡間隔係数に大きな差異は無かった。

(4) 凍結融解抵抗性

FA コンクリートの 300 サイクル終了時の相対動弾性係数は 97%、質量減少率は 0.1% であった。また、前述の気泡間隔係数は最大で 247 μm であり、一般に十分な耐凍害性があるといわれる 250 μm 以下である。このことから、いずれの混和剤を用いたコンクリートにおいても、凍結融解抵抗性は問題ないものと推察される。

(5) 微量有害成分の溶出

溶出試験結果を表-7 に示す。FA 単独からの溶出試験では、六価クロム、砒素、セレン、ふっ素、ほう素が検出され、六価クロムおよびほう素で基準値を超えている。一方、硬化後の FA コンクリートからの溶出はいずれも定量下限値未満であり、FA コンクリートが土壤環境に及ぼす悪影響は極めて少ないものと判断される。

3.2 FA の種類の影響

(1) 空気量

AE 剤添加量を一定とし、FA の種類を変えたときの空気量を図-5 に示す。FA1 および FA2 においては同一の AE 剤添加量で空気量 5% 前後のコンクリートが得られた。その反面、FA3 では FA1 と FA2 の中間の強熱減量にもかかわらず、10% 前後の多量の空気を連行した。この傾向は、AE12 および PAE においても同じである。

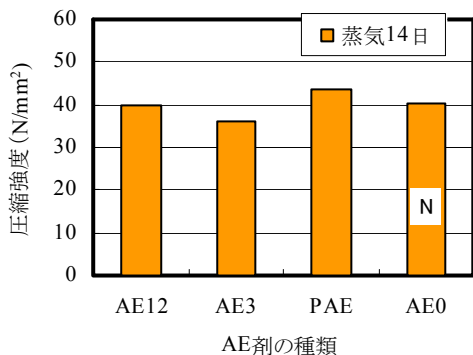


図-3 AE 剤の種類と圧縮強度 (Na 系減水剤)

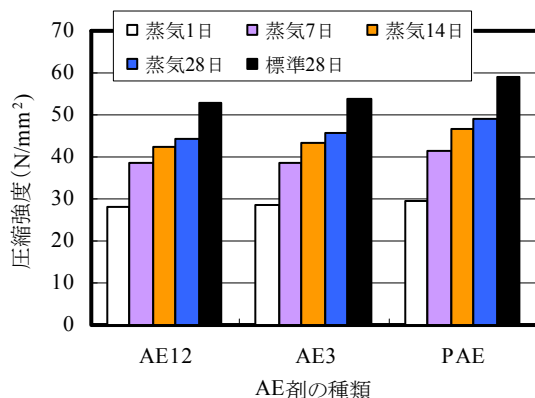


図-4 AE 剤の種類と圧縮強度 (Po 系減水剤)

表-6 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数

混和剤の種類 (配合の記号)	測定位置	硬化コンクリートの空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
Na系 -AE12	上	4.10	201
	中	3.60	227
	下	3.12	247
Po系 -AE12	上	4.28	161
	中	3.26	201
	下	3.01	212
Po系 -PAE	上	3.81	172
	中	3.88	183
	下	3.01	189

表-7 微量有害成分溶出試験結果

成分	基準値	試験結果		定量下限値
		1~4回目	FA単独の試験結果	
総水銀	0.0005以下	<0.0005	<0.0005	0.0005
カドミウム	0.01以下	<0.001	<0.001	0.001
鉛	0.01以下	<0.005	<0.005	0.005
六価クロム	0.05以下	<0.005	0.12	0.005
砒素	0.01以下	<0.005	0.007	0.005
セレン	0.01以下	<0.002	0.009	0.002
ふっ素	0.8以下	<0.08	0.64	0.08
ほう素	1.0以下	<0.02	1.8	0.02

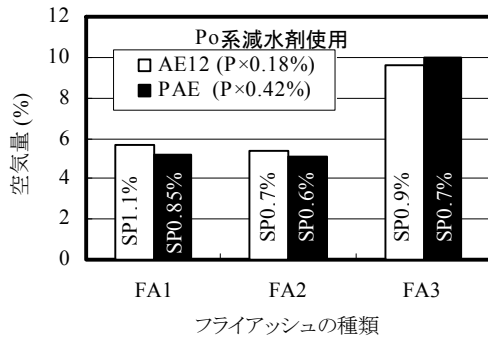


図-5 FAの種類が空気量に及ぼす影響

AE12を用いた配合において、スランプ21cm、空気量4.5%を得るための混和剤添加量は表-8に示すようになり、FAの品質によっては、AE剤の添加量が10倍以上も変化することが分かる。

このときの空気量の経時変化を図-6に示す。FA2を用いたコンクリートで若干空気量の低下割合が大きくなっている。FA2はメチレンブルー（以下MB）吸着量が大きいため、AE剤を多量に吸着するFA2の性質が、空気量低下の割合を大きくしたと推察される。

(2) 圧縮強度

FAの種類が圧縮強度に及ぼす影響を図-7に示す。蒸気養生14日の圧縮強度では、FA2において低い傾向を示しているが、標準養生では強度差はほとんど認められない。蒸気養生における強度差は、後述する前置時間の差異に起因しているものと考えられる。全体的には、本実験の範囲では、FAの品質が強度に与える影響は小さいと言える。なお、空気を連行しやすくするために、細骨材率を5~6%程度増加しているが、図-4と比較しても圧縮強度に大きな差異は認められなかった。

3.3 圧縮強度に及ぼす前置時間の影響

圧縮強度に及ぼす前置時間の影響を図-8に示す。前置時間が長いものほど圧縮強度は増大する傾向にあるが、前置時間3時間以上ではその差は小さくなる。前置時間1時間では、材齢28日でも設計基準強度の30N/mm²に達していない。これは、コンクリート中の空気泡が蒸気の熱により急激に膨張することで、組織が損傷を受けたためと推察される。本実験のFAコンクリートでは、前置時間は3時間以上が推奨される。

4. プレキャストコンクリート製品への利用

山形県内の高速道トンネルの側溝として、FAを50L/m³混和したプレキャストコンクリート製品が使用された。製品総質量で14,700t、FAの使用量は740tである。その製品の一例と施工後のトンネルを写真-1および写真-2に示す。

プレキャストコンクリート製品製造時の混和剤は、性能および経済性の観点から、Po系減水剤と、AE12また

表-8 FAの種類と混和剤添加量

FAの種類	Po系減水剤 (P×%)	AE12 (P×%)
FA1	1.10	0.180
FA2	0.70	0.180
FA3	0.90	0.012

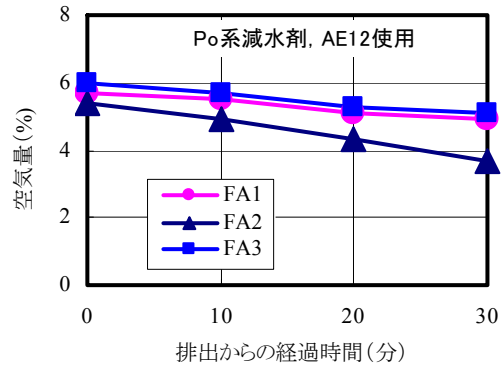


図-6 FAの種類と空気量の経時変化

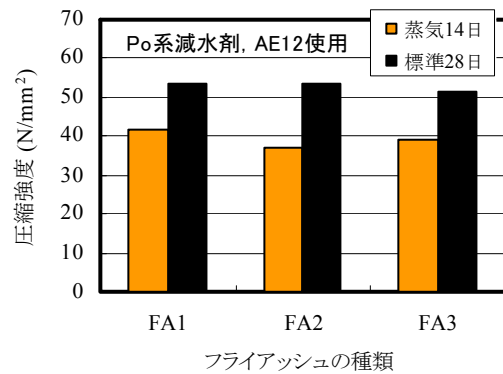


図-7 FAの種類が圧縮強度に及ぼす影響

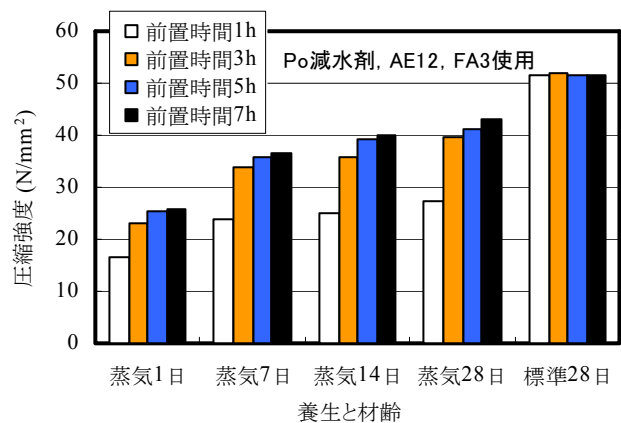


図-8 圧縮強度に及ぼす前置時間の影響



写真-1 製品の一例

写真-2 施工完了後

はPAEの2種類のAE剤を使用した。スランブは製品試作を経て18cmに設定したが、FAを50L/m³混和したフレッシュコンクリートは適度な粘性があり、テーブル振動機の締固めでも材料分離は無く、打込みやすいコンクリートであった。なお、製品にはAE剤の識別マークを刻印しており、今後両者の耐久性の差異を調査していく予定である。

FAの品質は納入ごとにばらつくため、空気量5±1.5%を得るために必要なAE12の添加量は図-9に示すように変化した。最小の添加量は0.012%、最大は0.204%で17倍もの差がある。PAEについても同様であり、FAの納入都度PAEの濃度を変更することによって空気量の調整を行った。これを管理するため、FAと水を混合したペーストのフロー、更にモルタル試験を実施してプラントによる製造へと反映させた。まず、FAペーストのフローにより減水剤添加量を推定し、その後、モルタル試験でフロー200mm、空気量10%となる混和剤添加量を室内実験により選定した。その結果からプレキャストコンクリート製品製造時の混和剤添加量を決定している。

その製品製造時におけるFAの強熱減量およびMB吸着量とAE12添加量の関係を図-10に示す。既往の研究で示されている⁴⁾ように、MB吸着量とAE剤添加量には高い相関性が認められるが、強熱減量との相関性はほとんど認められなかった。このことから、AE剤の添加量の管理には、FAの品質のうちMB吸着量が指標になると再確認できた。

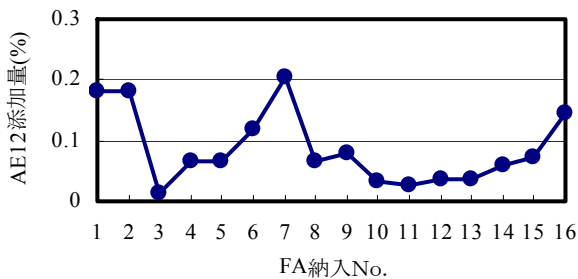


図-9 FA 納入ごとのAE12 添加量の推移

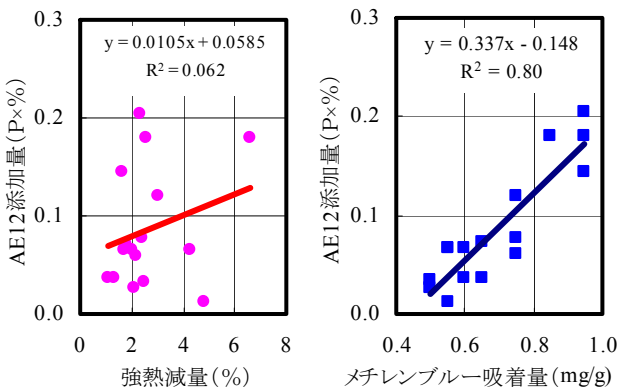


図-10 強熱減量、MB 吸着量と AE 剤添加量の関係

5. まとめ

FA50L/m³混和のプレキャストコンクリート製品を対象とした本実験において、得られた知見をまとめれば、次のようになる。

- (1) FA コンクリートの空気量およびスランブの経時変化はFAを混和しないコンクリートと同程度か小さい傾向にある。
- (2) 空気連行性は、FAの強熱減量ではなく、メチレンブルー吸着量と高い相関性があり、メチレンブルー吸着量が多いものほどAE剤添加量は多くなる。
- (3) FAの発生時期による品質の違いが圧縮強度に及ぼす影響は小さい。一方、蒸気養生までの前置時間が短いと圧縮強度は低下するため、FAコンクリートでは3時間以上の前置時間を確保することが推奨される。
- (4) 凍結融解および気泡間隔係数の結果から、空気量を5%程度確保すれば、FAコンクリートの凍結融解抵抗性は問題ないものと判断される。
- (5) FAコンクリートからの微量有害物質の溶出は極めて少なく、環境に及ぼす悪影響はほとんどない。
- (6) 混和剤として、ポリカルボン酸系減水剤とFA用またはプレフォーム型のAE剤を使用し、FAの品質に応じてそれらの添加量を管理することで、強度、耐久性などを満足したプレキャストコンクリート製品を製造することができた。

謝辞

本実験は、山形県庄内地区に設立された産学官で構成する「コンクリート二次製品への石炭灰活用検討委員会」の活動の一環として実施したものである。その間、ご指導いただいた委員の方々に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：フライアッシュを用いたプレキャストコンクリート製品のガイドライン試案，プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書，pp.366-373, 2009.8
- 2) 北辻政文，青山宏昭，小川誠一郎：FAコンクリートへのプレフォーム型AE剤の適用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.207-212, 2007.7
- 3) セメント協会コンクリート専門委員会：蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響，セメント・コンクリート，No.724, pp.5-14, 2007.6
- 4) 本田悟，椎葉大和：各種フライアッシュがコンクリートの諸特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.351-356, 1996.7