

# 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実用化に向けた検証

田端 辰伍<sup>\*1</sup>・宮里 心一<sup>\*2</sup>・橋本 徹<sup>\*3</sup>・渡辺 将之<sup>\*4</sup>

**要旨:** フライアッシュを混和材としてコンクリートに用いた場合、性能向上が見込まれている。ここで近年七尾大田火力発電所に分級装置が設置され、高品質なフライアッシュが安定供給できる体制が整った。そこで本研究では、環境負荷低減や地産地消の観点から七尾産分級フライアッシュの利用促進を図るため、北陸地方における代表的な骨材を用いた屋内試験および防潮堤建設に際して実機試験を行い、フライアッシュを用いたコンクリートの実用化に向けた検証を行った。その結果、七尾産分級フライアッシュを混和させた場合、骨材産地に拘らず良質なコンクリートを製造できたことを確認した。

**キーワード:** 分級フライアッシュ, 地産地消, 実用配合, フレッシュ性状, 初期ひび割れ抵抗性

## 1. 序論

電力の安定供給に大きな役割を果たしている石炭火力発電所では、石炭燃焼に伴う副産物として大量の石炭灰（フライアッシュ）が産出される。また、北陸地方に製鉄所はなく、石炭火力発電所のみが存在する。そのため、北陸地方においては、地産地消・環境負荷低減の観点および循環型社会推進のため、フライアッシュは有効な資源<sup>1)</sup>として注目されている。

さて、石川県の七尾大田火力発電所で、平成 21 年 8 月より分級装置が設置された。その結果、従来よりも高品質なフライアッシュの安定供給が可能となった。また、副産されるフライアッシュは、平成 22 年度の実績で年間約 29.4 万 t であり、このうち JIS A 6201 に適合するフライアッシュ（JIS II 種灰）は約 3 万 t であった。

分級フライアッシュを混和材としてコンクリートに使用した場合、単位水量の減少、ワーカビリティの向上、長期強度の増進および温度ひび割れの抑制等の効果が見込まれている<sup>2),3),4)</sup>。そこで、地産地消の観点から、石川県と富山県の代表的な骨材と、七尾産分級フライアッシュを併用させたコンクリートを実用化して、環境負荷低減を図ることにした。そのためには、製造されたフライアッシュコンクリートのフレッシュ性状、強度および乾燥収縮特性を検証する必要がある。

以上の背景を踏まえ本研究では、石川県と富山県で流通する代表的な骨材を用いて、普通ポルトランドセメント（N）および高炉セメント B 種（BB）を用いたコンクリート、N に分級フライアッシュを混和したコンクリート（FA）を製造した。そして、北陸地方の石炭火力発電所におけるフライアッシュの利用促進を図るための検証

実験として、七尾産分級フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響を評価した。

研究のフローは次のとおりである。①シリーズ I においては、石川県と富山県内の 4 産地の骨材に対して、七尾産分級フライアッシュを混和させたコンクリートのフレッシュ性状（ワーカビリティ、ブリーディング、凝結時間、水和熱）および硬化性状（圧縮強度、乾燥収縮、自己収縮）の把握を目的とし、屋内試験にて検証実験を行った。②シリーズ II においては、能登産の骨材に対して、七尾産分級フライアッシュで製造されたフライアッシュセメントを用いたコンクリートを JIS 認証工場から出荷し、実構造物の建設可能性の把握を目的とし、モデル工事に検証実験を行った。これらの①と②により、北陸産の骨材および分級フライアッシュを併用したコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に関するデータを収集した。

## 2. 屋内試験（シリーズ I）

### 2.1 使用材料

骨材の物理的特性を表-1 に示す。また、フライアッシュの品質を表-2 に示す。

### 2.2 実験ケース

実験ケースを表-3 に示す。骨材の種類は、手取川産（石川県）、能登産（石川県）、早月川産（富山県）および庄川産（富山県）の 4 水準を設けた。また、結合材種類は、普通ポルトランドセメント（N）、高炉セメント B 種（BB）および N に分級フライアッシュを混和させたケース（FA）の 3 水準を設け、計 12 ケースとした。

\*1 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻（学生会員）

\*2 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻教授（正会員）

\*3 北陸電力（株） 土木部 土木技術チーム（正会員）

\*4 太平洋マテリアル 開発研究所 環境材料グループ(元金沢工業大学大学院)

### 2.3 配合

コンクリートの配合を表-4 に示す。全てが、生コンクリート工業組合で設計された実用的な配合である。また、練上がり直後のフレッシュ性状として、スランブが $8.0 \pm 2.0 \text{cm}$ 、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ となる様に、混和剤量を調整した。さらに、材齢 28 日目の呼び強度を 27 とした。すなわち、目標圧縮強度は呼び強度の 1.1 倍の  $30 \text{N/mm}^2$  である。なお、フライアッシュは結合材に対して 15% 内割置換とした。

### 2.4 測定概要

測定項目は、①スランブと空気量、②ワーカビリティ（12 打フロー）、③ブリーディング、④凝結時間、⑤簡易断熱温度上昇量、⑥圧縮強度、⑦乾燥収縮および⑧自己収縮である。ここで、①スランブと空気量は、JIS A 1101 と JIS A 1128 に準じて練上がり直後に測定した。その際、スランブおよび空気量の規定値を満足したことを確認した。②ワーカビリティ（12 打フロー）は、モルタルフローの試験方法を基に、スランブ測定後に平板の四隅を 3 回ずつ計 12 回打撃し、ノギスによりコンクリートの平面的な広がりを測定した。③ブリーディングは、練上がり直後のフレッシュコンクリートを使用して、JIS A 1123 に準拠して測定した。④凝結時間は練上がり直後のフレッシュコンクリートにウェットスクリーニングを施した試料を使用し、プロクター貫入抵抗試験器により始発時間および終結時間を JIS A 1147 に準じて測定した。⑤簡易断熱温度上昇量は、図-1 に示す発泡スチロール製断熱容器を約  $20^\circ\text{C}$  の実験室内に設置し、1 時間毎に 7 日間に亘り供試体中心の温度を T 型熱電対を用いて測定した。⑥圧縮強度は、JIS A 1108 に準じて、材齢 3, 5, 7, 14, 28, 56 および 91 日に測定した。⑦乾燥収縮は JIS A 1129-2 に準じて、材齢 91 日までの供試体の側面の長さをコンタクトゲージ法により測定した。⑧自己収縮は、JCI-SAS-2 に準じて、鉄筋中心部のリブを除去した部分（30cm 程度）にひずみゲージを付着させ、コンクリート打設を行った後、アルミ箔で密封養生を行い、材齢 91 日までのひずみをデータロガーにより測定した。

表-1 骨材の物理的特性

骨材産地	項目	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)		粗粒率
				材齢 28 日	材齢 91 日	
手取川	S	2.57	2.09	1.20	2.60	
	G	2.60	1.84	0.20	6.84	
能登	S1	2.53	2.05	1.50	2.46	
	S2	2.61	2.19	1.40	3.42	
能登	G	2.64	1.43	0.40	6.89	
	S	2.65	1.03	1.60	2.67	
早月川	G	2.69	0.74	0.10	6.90	
	S	2.59	1.58	1.40	2.70	
庄川	S	2.59	1.58	1.40	2.70	
	G	2.61	1.19	0.10	6.88	

表-2 フライアッシュの品質

試料	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	活性度指数		フロー値比 (%)
			材齢 28 日	材齢 91 日	
原粉	2.36	3390	83	95	100
分級品	2.43	4780	91	104	106

### 2.5 実験結果

#### (1) ワーカビリティ（12 打フロー）

図-2 および図-3 に N または BB に対する FA の 12 打フローを示す。なお、全ケースにおいて試験時のフレ

表-3 実験ケース

結合材種類		N	BB	FA
石川	手取川	●	●	●
	能登	●	●	●
富山	早月川	●	●	●
	庄川	●	●	●

表-4 コンクリートの配合

ケース	W/B (%)	s/a (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )							
			W	C	FA	S	G	Ad	AE	
手取川	N	54.7	44.0	156	285	-	802	1036	2.85	-
	BB	53.7	43.4	154	287	-	789	1044	2.87	-
	FA	53.3	45.8	144	230	40	851	1021	2.43	0.0027
能登	N	52.3	42.7	173	331	-	732	1024	3.64	-
	BB	51.5	41.5	168	326	-	714	1051	3.59	-
	FA	51.2	70.8	171	284	50	725	1024	3.34	0.0330
早月川	N	54.5	44.8	159	292	-	831	1044	2.92	-
	BB	53.9	44.4	158	293	-	821	1050	4.40	-
	FA	54.5	44.8	157	245	43	828	1044	2.78	-
庄川	N	53.8	44.2	154	286	-	814	1034	1.14	-
	BB	51.5	42.8	153	297	-	782	1052	1.19	-
	FA	50.0	43.5	150	255	45	795	1038	1.20	0.0030

注)  $W/B=W/(C+FA)$

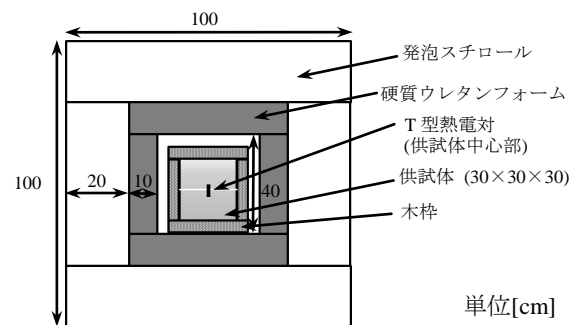


図-1 簡易断熱温度上昇試験の模式図（断面図）

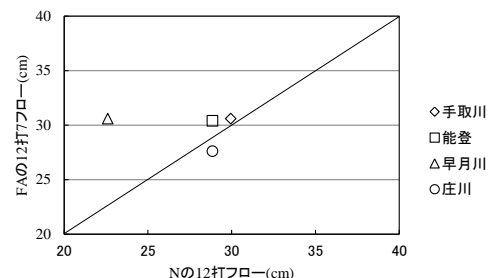


図-2 12 打フロー（対象基準：N）

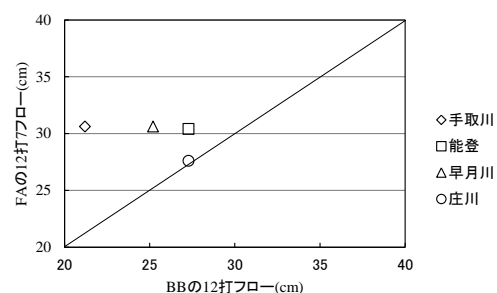


図-3 12 打フロー（対象基準：BB）

ッシュコンクリートには粘性があり、材料分離していないことを確認した。これらによれば、FAの流動性は、NおよびBBを使用したコンクリートと比較して、同等または良好であることが認められた。これは、分級フライアッシュが微細な球形をしているため、セメントの代替材として内割置換した場合、材料分離せずに、流動性が顕著に改善される<sup>1)</sup>。したがって、NおよびBBと比較して、ワーカビリティが同等または良好であったと考えられた。

### (2) ブリーディング

図-4および図-5にNまたはBBに対するFAのブリーディング量を示す。これらによれば、FAのブリーディング量は、NおよびBBを使用したコンクリートと比較して、同等または抑制していることが認められた。この理由として、七尾大田火力発電所産分級フライアッシュを細骨材の一部として使用した場合、コンクリート中の単位フライアッシュ量の増加に伴い、ブリーディング量が少なくなる傾向を確認した研究<sup>5)</sup>を踏まえて、次のとおりで考察する。特に文献<sup>5)</sup>では、フライアッシュの置換率が10%および15%ではブリーディング量が1/2程度まで抑制されたことが明らかになっている。したがって、フライアッシュを混和した場合、NおよびBBを使用したコンクリートと比較して、微粉量の増加に伴い保水性が増大する。そのため、FAのブリーディング量は、NおよびBBを使用したコンクリートと比較して、同等または抑制したと考えられた。

### (3) 凝結時間

図-6および図-7にNまたはBBに対するFAの始発時間および終結時間を示す。これらによれば、FAの始発時間および終結時間は、NおよびBBを使用したコンクリートと比較して、同等または早いことが認められた。

### (4) 簡易断熱温度上昇量

図-8に各骨材産地別の最高温度上昇量を示す。これによれば、何れの骨材産地においてもFAはNおよびBBと比較すると、最高温度上昇量が同等または低かった。これは、フライアッシュをセメントに対して内割置換した場合、コンクリート中のフライアッシュ置換率の増加

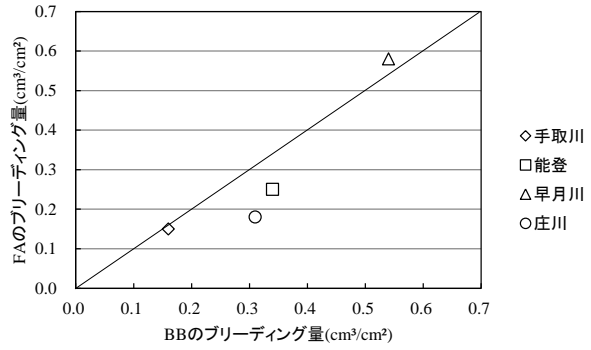


図-5 ブリーディング (対象基準: BB)

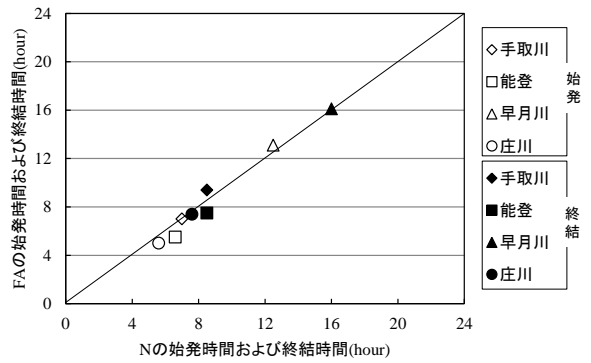


図-6 凝結時間 (対象基準: N)

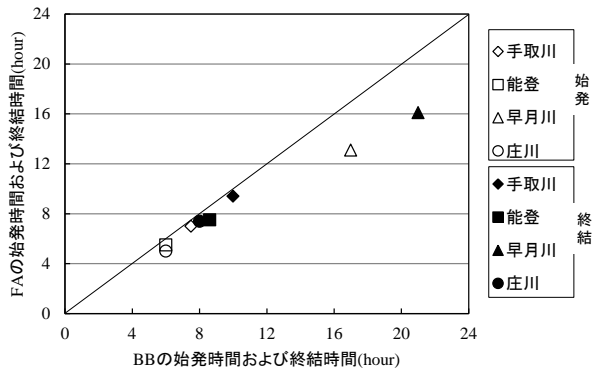


図-7 凝結時間 (対象基準: BB)

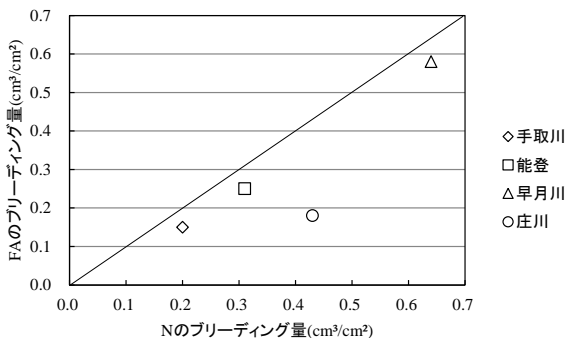


図-4 ブリーディング (対象基準: N)

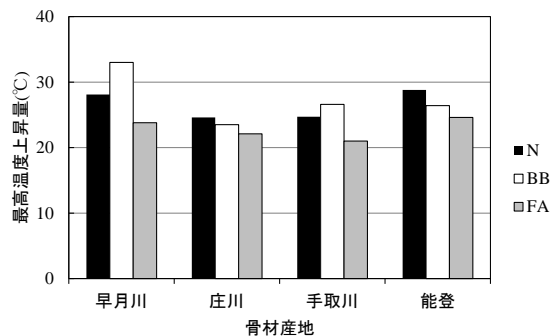


図-8 最高温度上昇量

に応じて、すなわちセメント量の減少に応じて、断熱温度上昇量が小さくなっていることを明らかにした研究<sup>6)</sup>を踏まえて、次のとおりに考察する。すなわち、NおよびBBを使用したコンクリートと比較して、フライアッシュを混和した場合、本研究において単位セメント量は $31\sim 57\text{kg/m}^3$ 減少した配合となるため、既往の研究と同様に単位セメント量に依存して水和熱を抑制したと判断された。

### (5) 圧縮強度

図-9に各骨材産地における圧縮強度と経過日数の関係を示す。また、図-10および図-11にNまたはBBに対するFAの圧縮強度を示す。これらによれば、各骨材産地においてFAの初期(材齢5日強度)の強度発現性は、Nを使用したコンクリートと比較した場合、同等または小さく、BBを使用したコンクリートより大きいことが確認された。また、各骨材産地においてFAの長期(材齢91日強度)の強度発現性は、NおよびBBと比較して、同等または大きいことが認められた。これは、フライアッシュを使用した場合、長期材齢に伴い圧縮強度が通常コンクリートより大きくなることを明らかにした研究<sup>3)4)</sup>を踏まえて、次のとおりに考察する。すなわち、フライアッシュを混和した場合、長期に亘り継続するポズラン反応の効果により、NおよびBBと比較して、同等または大きくなったと判断された。

### (6) 乾燥収縮

図-12および図-13に材齢91日におけるNまたはBBに対するFAの乾燥収縮を示す。これらによれば、FAの乾燥収縮は、NおよびBBを使用したコンクリートと比較して、同等または小さいことが認められた。これは、セメントの代替材としてフライアッシュを混和させ、単位水量を普通コンクリートと同じとする条件下で実験を行い、普通コンクリートの収縮性状と大差ないことを明らかにした研究<sup>7)</sup>を踏まえて、次の通りに考察する。すなわち、実際にはフライアッシュの減水効果により単位水量を減少させることができるため、本研究においては

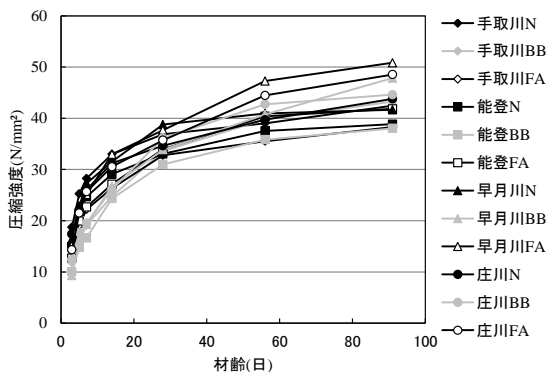


図-9 圧縮強度

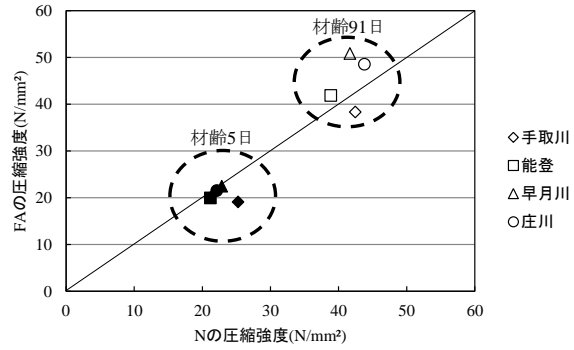


図-10 圧縮強度 (対象基準 : N)

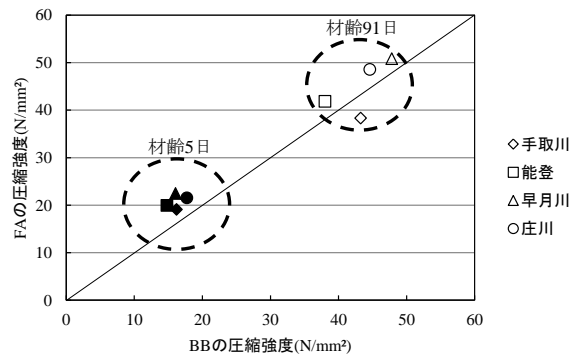


図-11 圧縮強度 (対象基準 : BB)

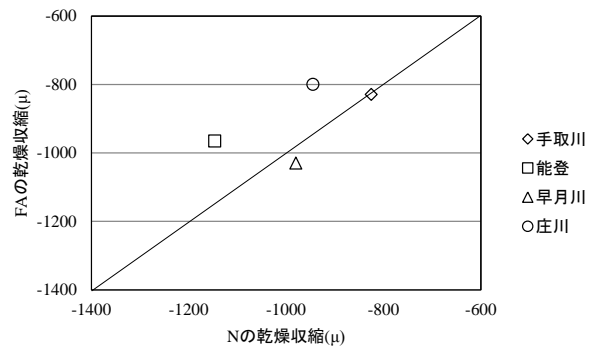


図-12 乾燥収縮 (対象基準 : N)

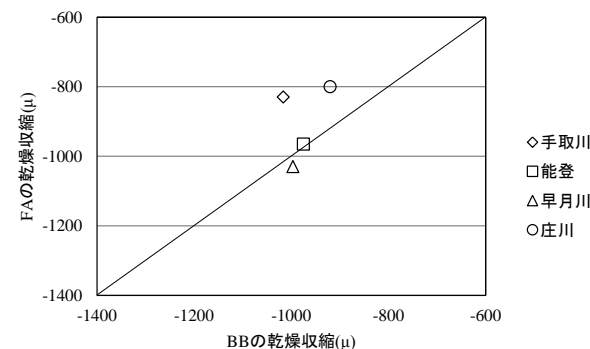


図-13 乾燥収縮 (対象基準 : BB)

収縮量が N および BB と比較して、同等または小さくなったと考えられた。

(7) 自己収縮

図-14 および図-15 に材齢 91 日における N または BB に対する FA の自己収縮を示す。これらによれば、FA の自己収縮は、N および BB を使用したコンクリートと比較して、小さいことが認められた。これは、フライアッシュセメント B 種を使用した場合、自己収縮によるひび割れ発生時期は普通コンクリートより遅いため、フライアッシュはひび割れ抑制効果を有することを明らかにした研究<sup>8)</sup>と同様に、FA を使用したコンクリートは N および BB より収縮量が小さく、ひび割れ抵抗性が向上する傾向が確認された。

2.6 総合評価（屋内試験）

屋内試験における総合評価を表-5 に示す。これによれば、FA の品質は N と比較して、初期強度発現を除く全ての比較項目において同等もしくは効果大であることが確認された。また、BB と比較して、全ての比較項目において、同等もしくは効果大であることが確認された。特に、BB に対しては簡易断熱温度上昇試験で顕著な発熱量抑制効果が認められた。

3. 実機試験（シリーズ II）

3.1 実機試験実施概要

実機試験は、石川県羽咋郡志賀町にある 2 つの生コン工場で実施した。両工場から写真-1 に示す構造物の建設現場までの運搬時間、生コンの種類およびミキサの種類を表-6 に示す。

3.2 使用材料

使用材料を表-7 に示す。

3.3 配合

コンクリートの配合を表-8 に示す。生コンクリート工業組合で設計された実用的な配合を基に、各工場で補正した。また、打設時のフレッシュ性状として、スランブが 12.0±2.5cm、空気量が 4.5±1.5% となる様に、混和剤量を調整した。

3.4 測定概要

測定項目は、①スランブと空気量、②ブリーディングと凝結および③圧縮強度である。ここで、①スランブと空気量は、JIS A 1101 と JIS A 1128 に準じて測定した。そのタイミングは、練上がり直後から 0 分後、30 分後、60 分後、90 分後とした。②ブリーディングと凝結状況は、目視により確認した。③圧縮強度は、JIS A 1108 に準じて、材齢 91 日に測定した。

3.5 実機試験結果

図-16 にスランブおよび空気量の経時変化と圧縮強度（材齢 91 日）を示す。これらによれば、スランブおよ

び空気量では、練上がりから 30 分後の打ち込み時において規定値を満足し、圧縮強度では各工場では差はあるが、目標強度を満足していることが確認された。したがって、

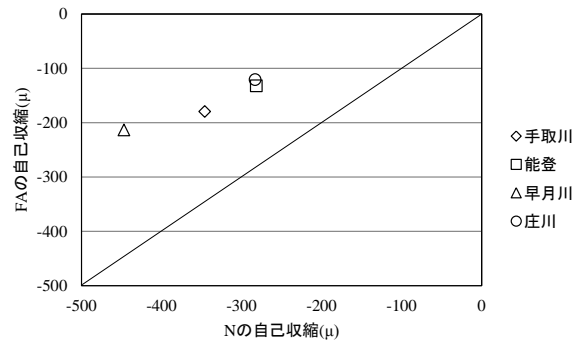


図-14 自己収縮（対象基準：N）

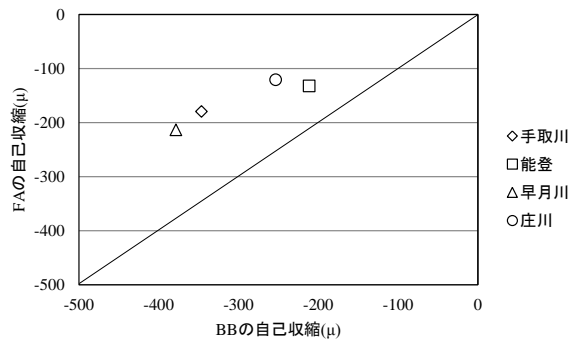


図-15 自己収縮（対象基準：BB）



写真-1 構造物全景

表-5 総合評価（屋内試験）

比較項目	比較対象		試験項目
	N	BB	
(1)施工性向上	◎	◎	12 打フロー試験 ブリーディング試験
(2)初期強度発現	△	◎	圧縮強度試験
(3)長期強度増進	◎	○	
(4)収縮抑制	◎	◎	乾燥収縮試験 自己収縮試験
(5)発熱量抑制	◎	☆	簡易断熱温度上昇試験

☆：効果大，◎：同等または効果大，○：同等，△：効果小

表-6 実機試験実施概要

	A 工場	B 工場
場所	石川県羽咋郡志賀町	石川県羽咋郡志賀町
運搬時間	約 30 分	約 25 分
実験ケース	呼び強度：24 目標スランブ：12cm Gmax：20mm	呼び強度：27 目標スランブ：12cm Gmax：25mm
ミキサ	タイプ：強制二軸式 容量：1.0m <sup>3</sup> ×1 基 能力：50m <sup>3</sup> /h (トラックジテータ 5 台)	タイプ：傾胴式 容量：1.0m <sup>3</sup> ×1 基 能力：50m <sup>3</sup> /h (トラックジテータ 6 台)

運搬時間および強度を考慮した適切な配合設計であることを確認した。

生コン工場から荷卸したコンクリートについて報告する。写真-2 に打設状況を示す。これによれば、厚み2～3m のフーチングに打設しているため、ブリーディングが若干生じているが、施工上問題なかったことを確認できた。なお、打設時には、目視により異常凝結等がないことを確認した。

#### 4. 結論

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 七尾産分級フライアッシュを使用した実用配合のコンクリートは、フレッシュ性状、強度、および初期ひび割れ抵抗性の面で、N と BB に比べて同等または優れることが確認された。
- (2) 防潮堤建設に際しての実機試験では、各工場の管理下で製造されたフライアッシュコンクリートを使用した場合、施工面および品質面ともに良好であることが確認された。

#### 謝辞

本研究に関して、前田建設工業（株）山田氏、ならびに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：金沢大学鳥居教授）のご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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，コンクリートライブラリー132，2009.12
- 2) 守屋健一，全 洪珠，嵩 英雄：コンクリートの単位水量と乾燥収縮に及ぼすフライアッシュおよび高性能 AE 減水剤の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.245-250，2006.7
- 3) 船本憲治，村上英治，黒羽健嗣，並木 哲：フライアッシュが高強度コンクリートの流動性および強度発現に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.357-362，1996.7
- 4) 大賀宏行，國府勝郎，坂井悦郎，大門正機：フライアッシュの潜在的品質とモルタルの諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.339-344，1996.7
- 5) 花岡大伸，福原義之，羽瀨貴士，参納千夏男：フラ

表-7 使用材料

種類	概要
セメント	フライアッシュセメント B 種(密度：2.97g/cm <sup>3</sup> )
A 工場	細骨材 岩屋産山砂(七尾市) 密度：2.54g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：2.56%，F.M.：2.56
	粗骨材 青海産石灰石砕石(糸魚川市) 密度：2.70g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：0.50%，F.M.：6.77
	水 地下水(10%)および上澄水(90%)
B 工場	細骨材 伊久留産山砂(七尾市) 密度：2.51g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：1.86%，F.M.：2.66
	粗骨材 庄川産陸砂利(小矢部市) 密度：2.64g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：1.53%，F.M.：6.87
	水 水道水
混和剤	AE 減水剤：リグニンスルホン酸系
	AE 剤：変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-8 コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
A 工場	51.6	44.4	159	309	780	1036	2.472
B 工場	52.0	40.4	165	318	690	1067	2.544

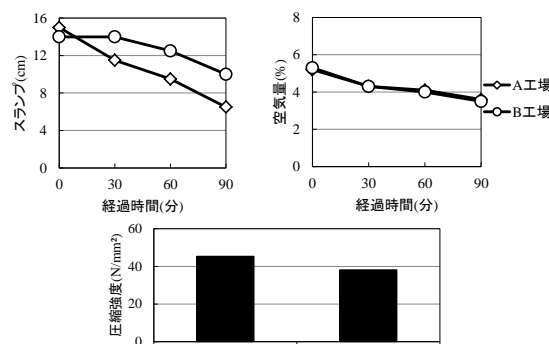


図-16 実機試験結果



写真-2 打設状況

アッシュによるコンクリートのブリーディング抑制効果について，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，V-450，pp.899-900，2010.9

- 6) 高橋昭裕，高橋和之，齊藤 直，吉武 勇：断熱温度上昇量と強度性状におよぼすフライアッシュの影響に関する基礎実験，セメント・コンクリート論文集，No.62，pp.262-267，2008.3
- 7) 白井裕規，下村 匠：各種粉体混和材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，V-430，pp.859-860，2008.9
- 8) 齋藤敏樹，山城洋一，名和豊春：フライアッシュコンクリートの収縮ひび割れに関する検討，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，V-429，pp.857-858，2008.9