

# 常願寺川改修工事におけるフライアッシュコンクリートの試験施工について（中間報告）

二俣 秀<sup>1</sup>・内堀 伸吾<sup>2</sup>・伊藤 始<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北陸地方整備局 富山河川国道事務所 副所長（河）（〒930-8537 富山市奥田新町2-1）

<sup>2</sup>北陸地方整備局 富山河川国道事務所 上滝出張所（〒930-1312 富山市上滝203）

<sup>3</sup>富山県立大学 工学部環境工学科 准教授（〒939-0398 射水市黒河5180）

（論文要旨）フライアッシュコンクリートはアルカリシリカ反応の抑制等に効果があるとされているが、施工事例が少なく一般的な材料となっていない。今回、元付工の製作等において、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混和したコンクリートで試験施工を実施した。本試験施工に至るまでの産官学連携による取り組みとその結果について中間報告を行う。

キーワード 地元産フライアッシュの活用、ASR・塩害の抑制、環境負荷低減

## 1. はじめに

北陸地方では、コンクリート構造物の維持管理に関して、冬期における日本海からの季節風や道路に散布される凍結防止剤による塩害並びに主に河川産骨材によるアルカリシリカ反応（以下「ASR」という）への対応が課題となっている。これらに対しては、フライアッシュを混和材やフライアッシュセメントとして使用することが有効であると言われている。フライアッシュとは、石炭火力発電所で石炭を燃やした後に排出される石炭灰の一部で、石炭使用量の約10%がフライアッシュとして産出される。現在、北陸地方でコンクリート構造物に使用されているのは、北九州地区から輸送される高炉スラグを用いた高炉セメントによるものが一般的である。フライアッシュは、北陸の石炭火力発電所から副産物として大量に産出されることから、これを有効に活用すれば環境負荷を低減し、サステナブルな社会作りにも貢献することが可能となる。今回、これらに鑑み、「構造物の長寿命化」「環境負荷低減」を目指し、フライアッシュを用いたコンクリートを標準化する試みについて中間報告を行う。

## 2. フライアッシュを取りまく現状

フライアッシュを有効に活用するための課題として次の3点が挙げられる。

- ①フライアッシュの供給体制や品質管理体制の確保
- ②フライアッシュコンクリートが汎用品として製造・供給されるために必要な技術基準の確立
- ③この地域の公共工事等での標準化

これらの課題克服に向け、大学（金沢大学、富山県立大学、金沢工業大学、福井大学）、生コンクリート工業組合（富山県、石川県、福井県）、北陸電力（株）、及びオブザーバーとして国（北陸地方整備局）、県（富山県、石川県、福井県）の産官学連携による「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」（以下「フライアッシュ委員会」という）を2011年1月に設立した。産官学の連携により技術的な信頼と社会的信用を確保しながら、フライアッシュを有効に活用する検討を進めている。

次章からは、前述した課題に対する取り組み状況を述べる。

## 3. 供給体制並びに品質管理体制

### （1）フライアッシュの供給体制

現在、富山、石川、福井の各県には各々1箇所ずつ石炭火力発電所が稼働している。これらの石炭火力発電所から副産物として産出されるフライアッシュは、2010年度の実績では年間約6.2万tであり、セメント原材料（粘土代替）を中心に宅地造成材や土木資材等に利用されている。

この中から、コンクリートに混和することにより、コ

ンクリートの施工性・耐久性を向上させることが知られている J I S 規格 ( J I S A 6 2 0 1 ) に適合するフライアッシュ ( J I S 灰 ) を供給する体制が、2 箇所で既に整えられている。七尾大田火力発電所では 2 0 0 9 年 8 月に、敦賀火力発電所では平成 2 0 1 2 年 9 月に、それぞれ分級装置を稼働させ、これにより年間約 6 万 t の従来よりも高品質なフライアッシュを安定的に供給できる体制を構築した。この供給量は 2 0 0 9 年度の北陸 3 県の公共工事 ( 国、県、市町村 ) での生コンクリート出荷量のうち、セメントの 1 5 % をフライアッシュで置換した場合のフライアッシュ使用量約 8 万 6 千 t のおよそ 7 割に相当する。

さらに各発電所では図 3 - 1 に示すとおり、供給拠点となる中継サイロを設け、供給体制の強化を図っている。

## (2) フライアッシュの品質

各発電所で製造される北陸産分級フライアッシュの品質管理は図 3 - 2 に示す J I S 灰製造・品質管理フローに従って行っており、J I S 灰候補炭の選定、電気集塵器での品質確認、J I S 灰製品サイロでの品質確認の 3 段階のチェックを行い万全を期している。

これにより北陸産分級フライアッシュの品質は、「J I S A 6 2 0 1 コンクリート用フライアッシュ」表 3 - 1 に示す J I S II 種 ( 市場で標準的に使用 ) の規格を保証している。

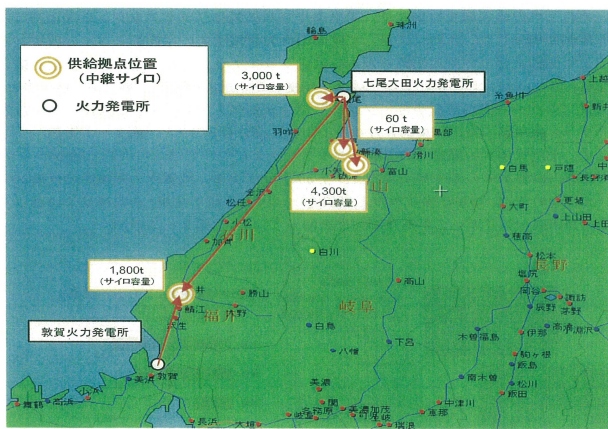


図 3 - 1 フライアッシュの供給体制

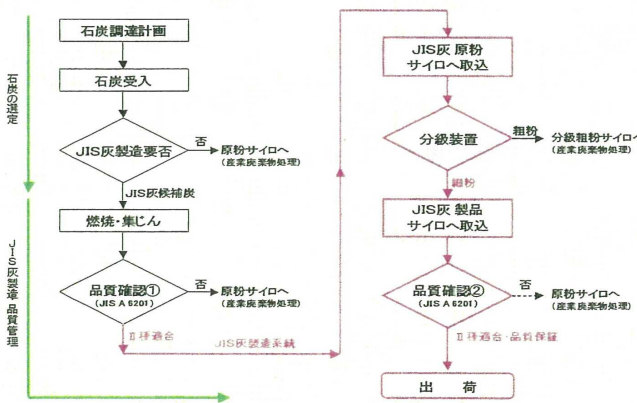


図 3 - 2 J I S 灰製造・品質管理フロー

また、分級の効果を確認するため、蛍光 X 線法による化学組成分析やレーザー回折法による粒度分布計測等を実施した結果、分級によりフライアッシュの粒子が細くなる上に、S i O<sub>2</sub> (シリカ) に富んだガラス質成分が増えることにより、ポズラン反応性が向上することが確認されている。ポズラン反応の向上により、より多くの水和物が生成され、コンクリートが緻密となり、長期耐久性が増すこととなる。

## 4. 技術基準の確立

北陸 3 県における代表的な骨材を用いた室内試験・実機試験及び各種比較試験を行い、フライアッシュを活用する技術基準を確立すべく、実用化検討を行った。

### (1) 室内試験結果

室内試験は、スランプ、空気量、圧縮強度を計測し、配合設計の基礎資料を得ることを目的として実施した。

室内試験に使用したフライアッシュの品質を表 3 - 2 に示す。使用骨材としては、北陸 3 県で広く流通している骨材を選定し、富山県は早月川・庄川産、石川県は手取川・能登産、福井県は九頭竜川・南条・滋賀県今津産とした。フライアッシュは、普通ポルトランドセメントの内割りで 1 5 % の置換率とした。これは、J I S A 5 3 0 8 レディミクストコンクリートでは A S R 抑制対策の最低値として 1 5 % が示されていること、フライアッシュを内割り置換した場合の初期強度の低下を抑えること等を勘案して決定した。また、セメント、混和剤は、室内試験を実施した生コンクリート工場で通常使用されているものとした。

この試験では、同一条件の配合においては、骨材として河川砂利を用いた場合、フライアッシュを混和することで、単位水量を 1 ~ 1 2 kg/m<sup>3</sup> 減らすことができた。一方、碎石を用いている骨材については、単位水量の減

表 3 - 1 J I S A 6 2 0 1 コンクリート用フライアッシュ

種類	I 種	II 種	III 種	IV 種
二酸化けい素(%)	45.0以上	45.0以上	45.0以上	45.0以上
湿分(%)	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下
強熱減量(%)	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.95以上	1.95以上	1.95以上	1.95以上
粉末度	45 μmふるい残分(%)	10以下	40以下	70以下
	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	5000以上	2500以上	2500以上
フロ一値比(%)	105以上	95以上	85以上	75以上
活性度指数(%)	材齢28日	90以上	80以上	80以上
	材齢91日	100以上	90以上	90以上

表 3 - 2 フライアッシュの品質

	J I S A 6 2 0 1 項目							備考		
	二酸化けい素(%)	湿分(%)	強熱減量(%)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	粉末度		フロ一値比(%)		活性度指数(%)	
					45 μmふるい残分(%)	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)			材齢28日	材齢91日
七尾産	53.35	0.10	2.0	2.44	0.8	4,870	106	91	99	H23年4月F→
敦賀産	67.23	<0.1	3.3	2.26	1.7	4,740	100	84	99	H24年7月F→

水効果は見られなかった。これは、碎石の骨材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ブ値に影響したものと推察される。

**(2) 実機試験結果**

実機試験は、室内試験から得られた配合を基に、実際の生コンクリート工場で生コンクリートを製造し、コンクリート圧縮強度の増進及びフレッシュコンクリート性状（スランブ、空気量）の経時変化を確認した。使用材料は室内試験時と同様である。

配合は呼び強度 24、スランブ 8cm、粗骨材の最大寸法 25mm かつ W/B 5.5% 以下を満足する配合とし、W/B 5.5% を満足しない場合には、呼び強度を 27 とした。空気量は 4.5% とした。それぞれの骨材毎に、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したコンクリート（以下 N+F という）、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（以下 N という）、高炉セメント B 種を使用したコンクリート（以下 BB という）を製造した。

**a) 材齢と圧縮強度の関係**

N+F の材齢と圧縮強度の関係を表 4-1 に示す。材齢 28 日に対する材齢 5 日の強度の増加率は平均で約 15%、材齢 28 日に対する材齢 9 日の強度の増加率は平均で約 21% となった。また、材齢 3 日の強度はいずれの骨材においても 10 N/mm<sup>2</sup> を超え、土木学会コンクリート標準示方書における柱・壁・はりの側面の型枠を外してよい時期の参考値 5 N/mm<sup>2</sup> を満足している。

**b) スランブロス並びに空気量ロス**

スランブロス並びに空気量ロスについては、同様な結果が得られている。N+F は、N・BB と比較すると、スランブロス・空気量ロスとも同程度であったが、経過 1 時間以降に両方とも若干ロスが大きい傾向にあった。

これら室内試験・実機試験の結果から、いずれの骨材においても実際の生コンクリート工場で品質の良いコンクリートを製造でき、実用化が十分可能であることが確認できた。

**(3) 各種比較試験結果**

各種比較試験もこれまでの試験同様、北陸 3 県の代表的な骨材を用いて、実際の生コンクリート工場で製造されるコンクリートの配合により実施した。その結果を表 4-2 に示す。

表 4-1 N+F の材齢と圧縮強度の関係 (N/mm<sup>2</sup>)

骨材の種類	3日強度	5日強度	7日強度	14日強度	28日強度	56日強度	91日強度	28日-56日の伸び率	28日-91日の伸び率
早月川産(27-8-25) <sup>※</sup>	17.5	21.5	24.7	26.8	33.7	38.2	39.9	13.4%	18.4%
手取川産(27-8-25) <sup>※</sup>	14.4	19.1	20.9	25.6	30.3	34.0	36.9	12.2%	21.8%
能登産(24-8-25) <sup>※</sup>	10.8	15.2	17.9	22.8	26.2	31.7	31.6	21%	20.6%
九頭竜川産(24-8-25) <sup>※</sup>	15.6	21.2	24.8	29.5	35.7	39.0	41.0	9.2%	14.8%
南条産(24-8-20) <sup>※</sup>	15.5	18.2	20.1	24.8	30.7	36.2	39.8	17.9%	29.6%
平均	14.8	19.0	21.7	25.9	31.3	35.8	37.8	14.7%	21.0%

※呼び強度-スランブ-粗骨材の最大寸法

この結果から、BB が N+F に替わった場合、全ての比較項目において同等もしくは効果あり、N が N+F に替わった場合、初期強度発現以外の全ての比較項目において同等もしくは効果ありであることが確認された。特に BB に対しては初期強度発現・発熱量抑制の比較項目で、N に対しては長期強度増進・発熱量抑制・ASR 抑制・塩化物イオン浸透抑止性の比較項目において、顕著な効果が確認された。各種比較試験のうち、北陸地方で懸案となっている ASR、塩害の抑制について、以下に詳細に述べる。

**a) ASR 抑制効果**

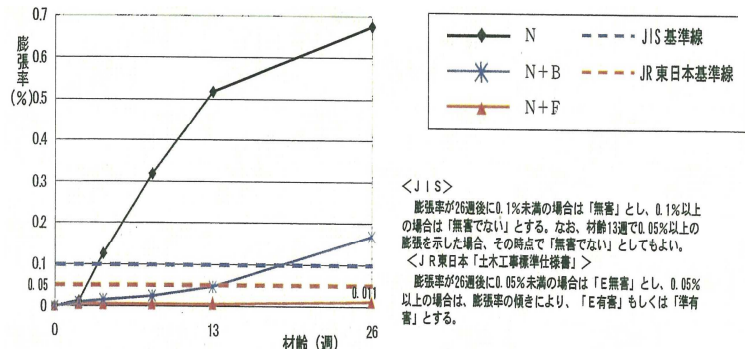
ASR 抑制試験においては、これまでの試験で使用しなかった常願寺川産の骨材（特に反応性の高い材料）も採用した。常願寺川産骨材は、今回実施した JIS A1145 に準拠した化学法の試験結果において、「無害でない」との ASR に関して反応性が高いと考えられる骨材であったが、図 4-1 に示したように、モルタルバー法（JIS A1146）の結果では、N+F において「無害」の判定となった。これは他の「無害でない」骨材も同様であり、ASR 抑制に極めて有効であるとの結果となった。

表 4-2 N+F の品質比較試験結果一覧表

(N:普通ポルトランドセメント, BB:高炉セメントB種, N+F:フライアッシュ 15%置換)

比較項目	富山・石川県		福井県		試験項目	
	BB	N	BB	N		
(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) 乾燥収縮抑制	◎	◎	◎	◎	・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	
(6) ASR 抑制	◎	☆	○	◎	・モルタルバー法 (JIS A1146 およびデンマーク法)	
(7) 耐久性向上	a. 透水抑止性	○	○	○	・透水量の測定	
	b. 塩化物イオン浸透抑止性	◎	☆	○	◎	・塩化物イオン浸透深さ ・見かけの拡散係数の測定
	c. 鉄筋腐食抑止性	○	○	○	○	・鉄筋の腐食状況
	d. 凍害抵抗性	○	○	○	○	・相対動弾性係数の測定 ・質量減少率の測定
	e. 中性化抑止性	◎	○	○	○	・中性化深さの測定
	f. 細孔率	○	○	○	○	・細孔率

(凡例: BB又はNがN+Fに替わった場合、  
☆: 顕著な効果有 ◎: 効果有 (一部同等) ○: 同等 △: 効果減 (一部同等) ×: 顕著な効果減)



<JIS>  
膨張率が26週後に0.1%未満の場合は「無害」とし、0.1%以上の場合は「無害でない」とする。なお、材齢13週で0.05%以上の膨張を示した場合、その時点で「無害でない」としてもよい。  
<JR東日本「土木工事標準仕様書」>  
膨張率が26週後に0.05%未満の場合は「E無害」とし、0.05%以上の場合は、膨張率の横きにより、「E有害」もしくは「準有害」とする。

## b) 塩害抑制効果

塩水に浸漬した供試体の $\text{Cl}^-$ を測定した、塩化物イオン浸透深さの試験結果について述べる。材齢91日以降の供試体を使用し、暴露面以外はエポキシ樹脂で被覆し、3% $\text{NaCl}$ 溶液に91日間浸漬する。暴露後、エポキシ樹脂をはがし、断面に0.1N硝酸銀溶液を噴霧し、発色法により測定を行った。

試験結果を図4-2に示す。図より、N+Fの塩化物イオン浸透深さは、Nよりも小さく、BBと同等であった。

## 5. 試験施工（公共工事での標準化に向けて）

これまでの検討結果から、実際の生コンクリート工場において品質の良いフライアッシュコンクリートを製造出来ることを確認したことから、各県及び北陸地方整備局において試験施工を行い、実構造物での施工性等の調査を行った。

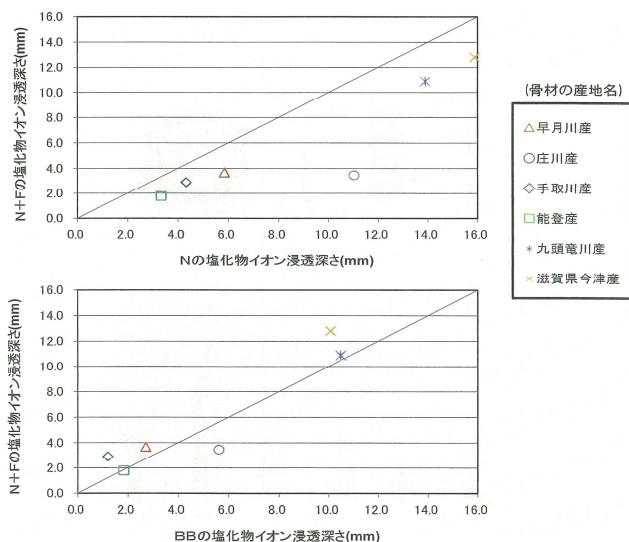


図4-2 塩化物イオン浸透深さの測定

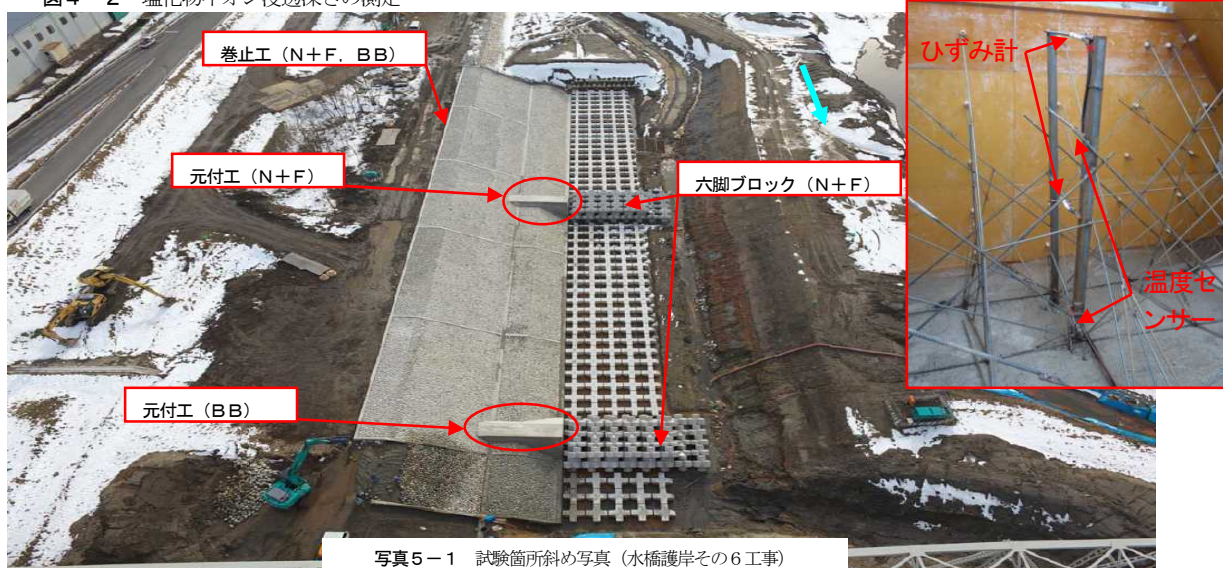


写真5-1 試験箇所斜め写真（水橋護岸その6工事）

ここでは富山河川国道事務所管内の常願寺川において、「水橋護岸その6工事」で行った試験施工について紹介する。

試験箇所の概要は写真5-1に示したとおりであり、六脚ブロック・元付工・巻止工において、フライアッシュを活用したコンクリートを使用した。また、全ての工種において、ひずみ計、温度センサーを設置し、計測を行った。

これらについては、ほぼ同様の結果が得られていることから、ここでは元付工について試験施工結果を報告する。

### (1) 試験施工の概要

元付工の平面・断面図を図5-1に示す。本工事における元付工は根固水制部において2箇所あり、比較のため、1箇所をBB（以下「BBブロック」という）、1箇所をN+F（以下N+Fブロックという）による施工とし、2箇所を同日に並行して施工した。

配合表については表5-1に示したとおりである。

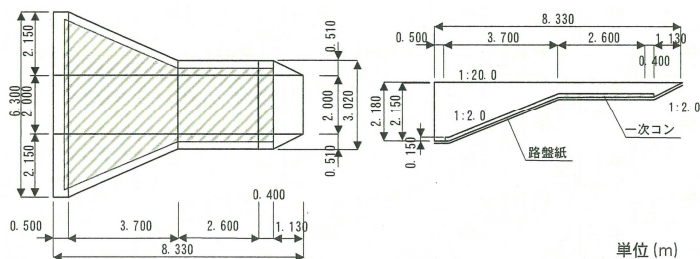


図5-1 元付工の平面・断面図

表5-1 試験施工時の配合表

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m <sup>3</sup> )	7/77 シリ FA (kg/m <sup>3</sup> )	水 W (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 s (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 G (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤 Ad (kg/m <sup>3</sup> )	備考
BB	57.5	40.4	254	—	146	768	1145	2.54	21 N/mm <sup>2</sup> 配合
N+F	57.0	41.2	219	39	147	781	1129	2.06	21 N/mm <sup>2</sup> 配合

## (2) 試験施工の結果

調査項目毎の試験結果を次のとおり報告する。

### a) フレッシュコンクリートの性状

表5-2にフレッシュコンクリートの性状を示す。表より、N+Fブロック、BBブロックともに、所定のスランプ、空気量を確保できた。

### b) コンクリートの圧縮強度

表5-3にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。表より、N+Fブロックの初期強度発現（材齢3日、7日）は、BBブロックに比べて大きいことが確認できた。

### c) コンクリートの打設状況

N+Fブロック、BBブロックともに、打設が効率的に行われ、流動性も良く、型枠の隅々や鉄筋等の周囲に密実なコンクリートを行き渡らせることができた。

また、ブリーディングの発生状況を表5-4に示す。表より、N+FブロックはBBブロックと比べてブリーディングが少なく、仕上げ作業時間の短縮につながった。

### d) 構造物の外観状況

両ブロックとも収縮等によるひび割れは見られなかった。表面の状況も両ブロックとも良好であるが、N+Fブロックでは表面気泡が比較的多く見られた。

### e) コンクリートの温度特性

コンクリート温度とひずみ量を図5-2に示す。図より、中心部コンクリート温度は、N+Fブロックの方がBBブロックと比べて1.2℃高く、擁壁軸方向水平ひずみは、N+Fブロックの方がBBブロックと比べて25.6μ小さかった。冬期における強度発現（発熱量）の違いが影響したと思われる。

これら本試験施工の結果においても、N+Fは、施工面・品質面での問題はなく、特に初期強度発現において、BBより優れていることが確認できた。

表5-2 フレッシュコンクリートの性状

	打設日時	天候	気温	試験時期	時刻	スランプ	空気量	コンクリート	
						(cm)	(%)	温度(°C)	
BBブロック ・呼び強度 21 N/mm <sup>2</sup> ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	1月9日 9:05~12:34	曇り	3~4℃		製造時	8:15	8.0	4.9	8
					荷卸時	9:05	7.0	4.1	7
					製造時	12:55	7.5	4.8	8
					荷卸時	12:34	7.5	4.1	8
					終了時	13:00	6.5	3.6	8
N+Fブロック ・呼び強度 21 N/mm <sup>2</sup> ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	1月9日 8:55~12:42	曇り	3~4℃		製造時	8:10	7.5	5.5	8
					荷卸時	8:55	6.5	5.0	8
					製造時	12:50	9.0	5.9	8
					荷卸時	12:15	8.5	4.9	8
					終了時	12:42	7.0	4.0	8
						(基準)	5.5~10.5	3.0~6.0	

表5-3 コンクリートの圧縮強度 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

	3日	7日	28日	56日	91日
BBブロック	5.5	17.3	31.8	36.9	42.5
N+Fブロック	8.4	23.6	35.1	41.1	45.5

表5-4 ブリーディングの発生状況

	ブリーディング水採集量(l)	打設量(m <sup>3</sup> )	1m <sup>3</sup> 当りのブリーディング量(l/m <sup>3</sup> )
BBブロック	12.5	26.0	0.48
N+Fブロック	8.5	26.0	0.33

また、埋め戻しが行われていない巻止工においては、ひずみ計、温度センサーによる計測を今後も継続して行う予定であり、長期的な変動を確認予定である。

## 6. 今後の課題と対応策

これまでの検討により、現在、北陸で産出されている分級フライアッシュの品質は、従来のフライアッシュより高品質であること、実際の生コンクリート工場で施工面・品質面に優れたフライアッシュコンクリートを製造出来ること、また、フライアッシュを用いたコンクリートは、現在、市場で広く使用されている普通セメント・高炉セメントを用いたコンクリートに対して、品質面で同等以上であることが確認された。

今後、北陸地方においてフライアッシュコンクリートの利用を促進する上で、残された課題とその対応策を以下に述べる。

### (1) フライアッシュコンクリートの需要の創出

フライアッシュコンクリートの需要創出を図るため、2012年度は富山県・石川県によるモデル工事を実施した。いずれのモデル工事においても施工面、品質面で何ら問題は確認されていない。

従って、2013年度以降は、富山県・石川県での継続に加え、福井県・国交省でもモデル工事を実施し、こ

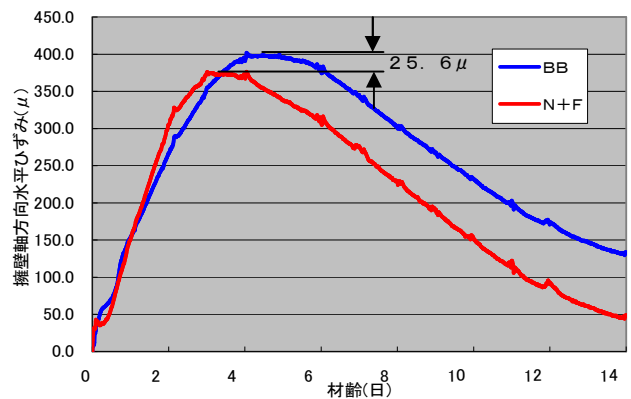
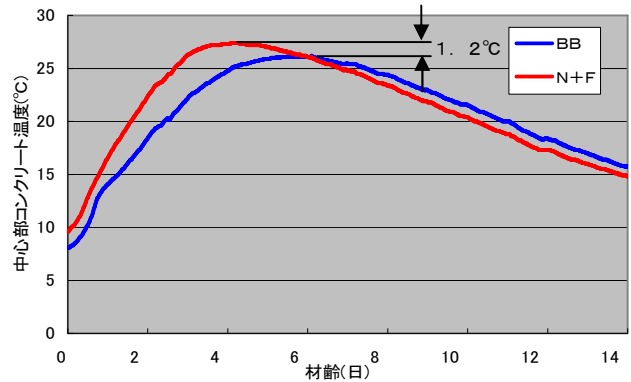


図5-2 コンクリート温度とひずみ量

これらの実績を踏まえ、公共工事等での標準使用を目指す。

## (2) J I S 認証工場の拡大

2012年度の富山県・石川県によるモデル工事の実施により、J I S 認証工場の拡大が確認された。富山県では全41工場のうち、2011年度末時点の3工場から、2013年度5月末時点で16工場に、同じく石川県では全44工場のうち、2工場から7工場に拡大した。今後も需要の創出と一体をなし、北陸地方におけるJ I S 認証工場の更なる拡大を目指す。

## (3) 施工面での課題

これまでの様々な試験等において確認された課題及びその対応策としては、以下が挙げられる。

- ・経過1時間以降のスランプロス、空気量ロスの改善が必要であり、このために北陸産フライアッシュに適合する混和剤の調査を行う。
- ・これに合わせて、モデル工事等、秋から冬にかけての工事が多く、夏季のスランプ、空気量の経時変化が懸念されることから、夏季での試験施工を実施する。

産官学の連携によるこれらの活動を通じ、今後、コンクリートへのフライアッシュの使用が北陸地方の公共工事等において標準化され、フライアッシュが有効に活用されることを目指すものである。

**謝辞：**常願寺川における試験施工にあたり、ご指導頂いた金沢大学 鳥居教授並びに金沢工業大学 宮里教授に深く感謝申し上げますとともに、本論文を作成するにあたり、多大なるご指導・ご協力頂きました「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」の各委員の皆様に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) 「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」報告書（富山・石川・福井版）平成25年6月
- (2) 北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造および施工マニュアル 平成25年6月  
「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」