

沖縄講演会(その2)

北陸地方でのフライアッシュの有効利用促進策とコンクリートのASR及び塩害対策への活用

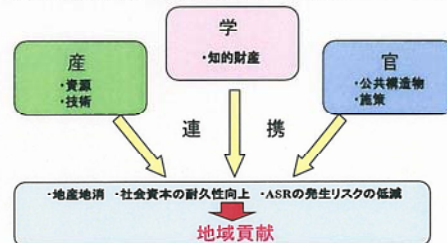
産学官連携による「北陸地方におけるFAコンクリートの有効利用促進検討委員会」の活動報告

H24.9.10 金沢大学理工研究域環境デザイン学系
教授 鳥居 和之
(於 琉球大学)

1. FA有効利用促進委員会の目的

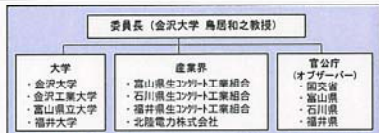
「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」
—構造物の長寿命化と環境負荷低減を目指して—

【目的】
委員会は、産学官が連携することによる技術的な信頼と社会的信用を確保しながら、コンクリートの耐久性の向上によるコンクリート構造物の長寿命化と建設資材の地域的な活用による環境負荷低減を目指し、コンクリートへのフライアッシュの有効利用を促進することを目的とする。



2. FA有効利用促進委員会の構成

・産学官が連携することによる技術的な信頼と社会的信用を確保しながら、活動を行ってまいります。
・委員会の構成及び委員名簿は右図及び下表のとおりです。



委員名簿 (H23.8時点)

委員名	委員会構成
委員長: 鳥居和之 金沢大学教授	委員: 柴田俊治 北陸電力株式会社執行役員土木部長
委員: 宮里心一 金沢工業大学教授	委員: 多田政之 北陸電力株式会社電力部長
委員: 伊藤 隆 富山県立大学准教授	(オブザーバー)
委員: 本間礼人 福井大学講師	委員: 高島和夫 国土交通省北陸地方整備局企画課管理課長
委員: 大石守仁 富山県生コンクリート工業組合専務理事	委員: 柴田 聡 富山県土木部次長
委員: 中島敏秋 石川県生コンクリート工業組合専務理事	委員: 山岸 勇 石川県土木部道路建設課長
委員: 藤岡文夫 福井県生コンクリート工業組合主幹研究員	委員: 幸澤隆治 福井県土木部長
委員: 金井 豊 北陸電力株式会社常務取締役	



第1回委員会(H23. 1. 24)の様子



第1回作業部会(H23. 3. 22)の様子

3. FA有効利用促進委員会での検討内容

(1) フライアッシュを用いたコンクリートの実用化のための各種試験
⇒生コン工場で品質の良いフライアッシュコンクリートを製造できることを確認



(2) フライアッシュを用いたコンクリートの工学的性質の確認

★各種試験比較(主にフライアッシュと高炉スラグの効果と比較)
①強度、②フレッシュ性、③ひび割れ、④ASR、⑤水密性について、試験の充実を図り、フライアッシュの長所および短所を確認する。

★フライアッシュ分級効果の確認(分級灰と原粉を比較)
ガラス化率、粒度分布、SEMにより分級効果を確認する。

(3) フライアッシュを用いたコンクリートの利用方策の検討

★生産者側および発注者側の課題の抽出
★課題解決に向けた対策方針の検討

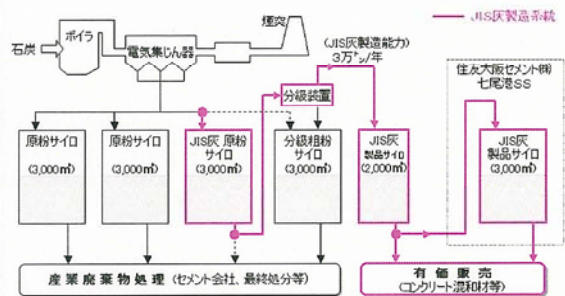
【フライアッシュをコンクリートに用いる場合の規格】

フライアッシュには、1958年(S34)制定(最新2008年3月改正)のJIS規格「JIS A6201コンクリート用フライアッシュ」があり、下表に示す。

種類	I種	II種	III種	IV種	分級により改善が見込まれる項目
二酸化けい素(%)	45.0以上	45.0以上	45.0以上	45.0以上	—
水分(%)	1.0以下	1.0以下	1.0以下	1.0以下	—
油酸減量(%)	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下	—
密度(g/cm ³)	1.95以上	1.95以上	1.95以上	1.95以上	○
粉末度	45μmをふるい残分(%)	10以下	40以下	40以下	○
比表面積(m ² /g)	5000以上	2500以上	2500以上	1500以上	○
フロー値(%)	105以上	95以上	85以上	75以上	○
活性度	材料28日	90以上	80以上	80以上	○
指数(%)	材料91日	100以上	90以上	70以上	○

今回供給予定の七尾産フライアッシュは、市場で標準的に使用されているJIS II種の規格を保障するとともに、分級装置を稼働させ、従来より高品質なJIS灰となっております。

6. 七尾大田火力発電所のJIS規格フライアッシュの製造工程



※JIS灰安定供給量の確保を図るため、射水市および福井市で新たな供給拠点(JIS灰製品サイロ)を確保

7. フライアッシュの分級による効果(物理的・化学的性質の改善)

1) 化学的効果(ボゾラン活性の増大)

(1) 強熱減量および蛍光X線法による化学組成分析結果

試料名	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	Na	K	Ti	P	B	Total
フライアッシュ原料	1.8	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	98.76
フライアッシュ分級品	2.0	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	98.94

(2) 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	石英	ムライト	マグネサイト	ライム	赤色炭素	合計
フライアッシュ原料	5.4	24.7	2.0	0.0	66.1	100.0
フライアッシュ分級品	5.0	20.4	1.0	0.2	72.2	100.0

※ 蛍光X線分析による化学組成と、粉末X線回折/リートベルト解析による鉱物組成とを比較すると、原料と分級品とでは、石英、ムライト、マグネサイトの含有率が異なることがわかる。これは、原料と分級品とでは、石英、ムライト、マグネサイトの含有率が異なることがわかる。これは、原料と分級品とでは、石英、ムライト、マグネサイトの含有率が異なることがわかる。

分級により、化学組成ではシリカの成分比率が増えるとともに、鉱物組成ではボゾラン反応を起こさない石英、ムライト、マグネサイトが減り、非晶質が増えていることから、シリカに富んだガラス質が増えていることが分かる。

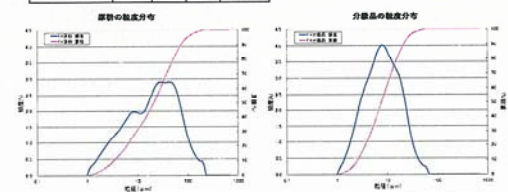
2) 物理的な効果(粒子径、粒子形状の改善)

(1) 物理的性質

試料名	密度(g/cm ³)	比表面積(m ² /g)	活性度指数(%)
フライアッシュ原料	2.34	2300	83
フライアッシュ分級品	2.43	4700	91

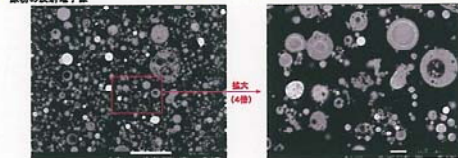
(2) 粒度分布測定結果

試料名	累積中位径(μm)	比表面積(m ² /g)
フライアッシュ原料	3.27	20.85
フライアッシュ分級品	2.55	7.43

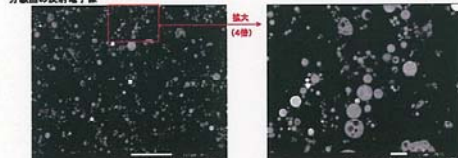


(3) 反射電子像観察

原料の反射電子像



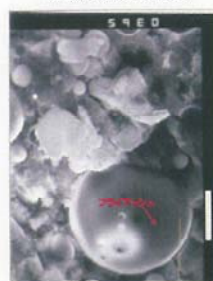
分級品の反射電子像



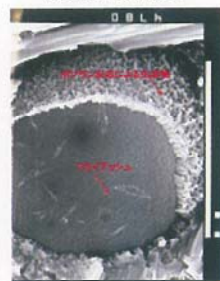
分級により、粒子の大きなものがなくなるとともに、角張った粒子、中空の粒子が少なくなり、細かく均等な球形の粒子が多くなっている。その結果、密度、比表面積も大きくなっている。

<コンクリート中のフライアッシュ粒子の2次電子像>

材齢28日のフライアッシュ



材齢1年のフライアッシュ



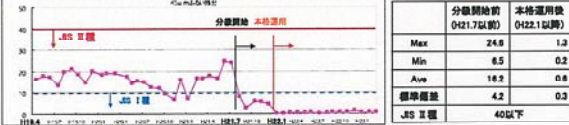
8. 七尾大田産分級フライアッシュの品質確認

七尾産フライアッシュのJIS項目について、分級開始前のデータ(0118.4~0121.7)と分級後本格運用後のデータ(0122.1以降)を示す。

(1) 分級により改善が見込まれるJIS項目

① 粉末度：ポゾラン反応性や流動性に影響

1) 45μmふるい残分(%)



2) 比表面積(cm²/g)

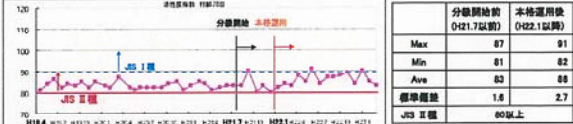


・45μmふるい残分は、分級開始前から減り、本格運用後はJIS I 値の規格を満足している。
・比表面積は、分級開始前から増え、本格運用後は、JIS I 値の規格に近い値を示すようになっている。

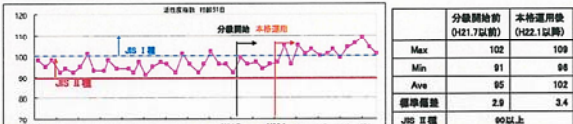
19

② 活性度指数：強度増進を示す指標

1) 材齢28日(%)



2) 材齢91日(%)



・活性度指数は、材齢28日、材齢91日ともに、本格運用後、改善傾向を示している。
・特に材齢91日については、JIS I 値の規格に近い値を示すようになっている。

20

【活性度指数の試験方法】(参考)

活性度指数とは、基準モルタルの圧縮強度に対する試験モルタルの圧縮強度の比を百分率で表したものである。

$$\text{材齢28日の活性度指数}(\%) = \frac{\text{材齢28日の試験モルタルの圧縮強度}}{\text{材齢28日の基準モルタルの圧縮強度}} \times 100$$

$$\text{材齢91日の活性度指数}(\%) = \frac{\text{材齢91日の試験モルタルの圧縮強度}}{\text{材齢91日の基準モルタルの圧縮強度}} \times 100$$

【基準モルタルおよび試験モルタルの配合表】

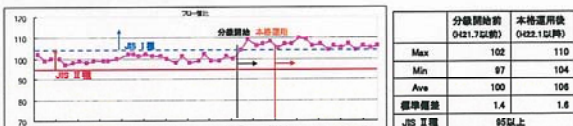
(単位:g)

	普通ポルトランドセメント (C)	フライアッシュ (F)	結合材 (B = C + F)	標準砂 (S)	水 (W)	備考
基準モルタル	450.0	0.0	450.0	1350	225	水セメント比 W/C = 50%
試験モルタル	337.5	112.5	450.0	1350	225	置換率 F/(C+F) = 25% 水セメント比 W/C = 67% 水結合材比 W/B = 50%

活性度指数が100を超えることは、セメントの25%をフライアッシュに置換すると強度が大きくなることを示す。

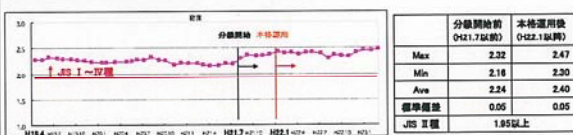
21

③ フロー値比(%)：流動性を示す指標



・フロー値比は、本格運用後、JIS I 値の規格に近い値を示すようになっている。

④ 密度(g/cm³)：製造に必要な条件でコンクリート量に影響

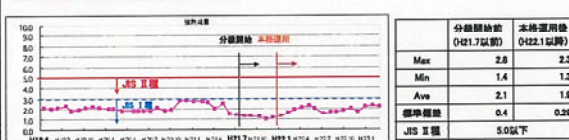


・密度は、本格運用後、平均で約 0.1g/cm³ 上昇している。

22

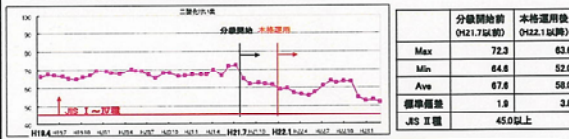
(2) その他のJIS項目

① 強熱減量(%)：湿和剤の必要量に影響



・強熱減量は、平均で2%前後と小さく、JIS I 値の規格を満足している。

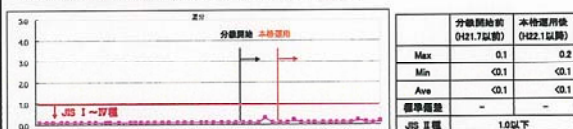
② 二酸化けい素(%)：ポゾラン反応性に関するひとつの目安



・二酸化けい素は、平均で58%程度であり、JISの規格を十分満足している。

23

③ 湿分(%)：製造に必要な条件(コンクリートの全体の水分量に影響)



・湿分は、平均で0.1%以下であり、JISの規格を十分満足している。

24

9. コンクリート構造物の長寿命化(耐久性向上)を目指して

フライアッシュコンクリートのフレッシュ・硬化性状の特徴

- A. 長期強度の増進 (ポゾラン反応の進行)
 - ⇒ 試験練り、実機練りによる圧縮強度の確認等
- B. 乾燥収縮の減少 (単位水量の減少)
 - ⇒ コンタクトゲージ法による確認等
- C. アルカリシリカ反応の抑制
 - ⇒ モルタルバー法による確認等
- D. 水和熱の減少 (単位セメント量の減少)
 - ⇒ 簡易断熱温度上昇試験による確認等
- E. 水密性の向上 (緻密な内部組織の形成)
 - ⇒ 透水試験、塩化物イオン浸透性試験による確認等
- F. ワーカビリティの向上および単位水量の減少
 - ⇒ 試験練り (標準配合表の作成) による確認等

25

(1) 長期強度の増進 (ポゾラン反応)

フライアッシュを用いたコンクリート(内割の場合)は、水・セメント・骨材・混和剤からなる普通コンクリートのセメントの一部を良質なフライアッシュに置換したものである。



<混和方法>

フライアッシュの混和方法には、以下の2通りある。

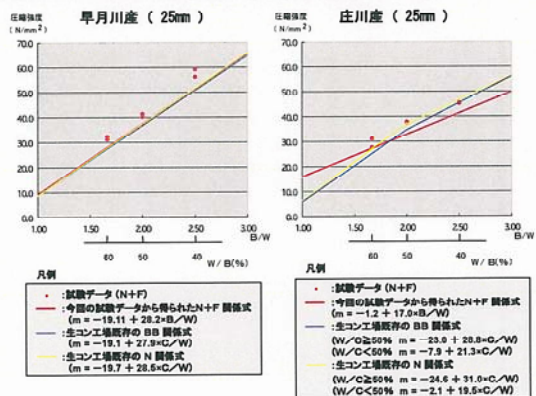
- ① セメント会社でセメントにフライアッシュを混合(ダム等の市場規模の大きい工事で採用)
- ② 生コンクリート工場で水・セメント・骨材・混和剤と混合(小規模の工事でも採用可能)

セメントにフライアッシュを混和した場合、ポゾラン反応(セメントの水和により生成したCa(OH)₂とフライアッシュ中のSiO₂、Al₂O₃のゆっくりと反応し、安定な水和物を生成)が長期間継続するため、長期強度が増進する。

七尾火力発電所で産出されるフライアッシュは、分級後の活性度指数が28日材齢で平均86%、91日材齢で102%となっている。

26

【試験練りから得られた強度(材齢28日)とB/Wの関係式の一例】

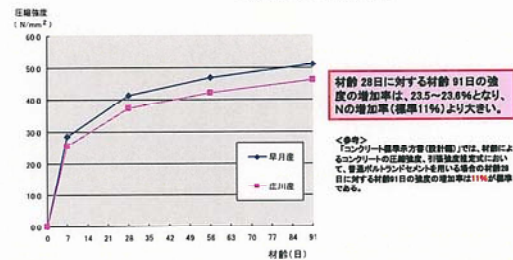


27

【試験練りでの材齢と圧縮強度の関係の一例】

	7日強度	28日強度	56日強度	91日強度	伸び率(28日→91日)
早月産(50-8-25) ^b	28.4	41.3	46.9	51.0	23.5%
庄川産(50-8-25) ^b	25.4	37.3	42.2	46.1	23.6%

※ 水結合材比→スランパー・粗骨材の最大寸法



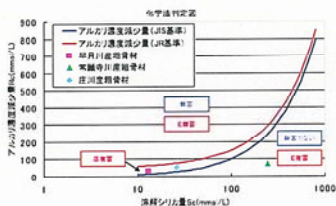
28

(2) アルカリシリカ反応の抑制効果

川砂利(早月川産、常願寺川産、庄川産)のASR試験結果

化学法 (JIS A1145)

	アルカリ濃度減少量:Ro (mmol/L)	溶解シリカ量:So (mmol/L)
早月川産	29	13
常願寺川産	72	242
庄川産	54	26



判定方法

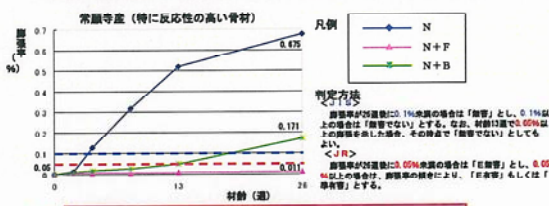
<JIS>
溶解シリカ量 (So) がアルカリ濃度減少量 (Ro) 未満の場合は「無害」とし、 $So \geq Ro$ の場合は「有害」とし、その中間を「準有害」とする。

29

モルタルバー法 (JIS A1146) の結果

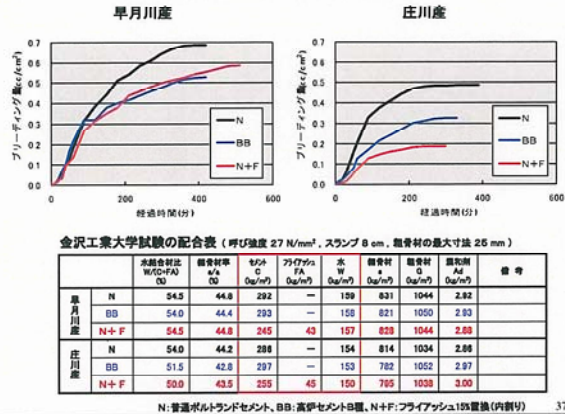
モルタルバー法 (JIS A1146) においては、セメントの全アルカリ量がNa₂Oeqで1.2%となるようにNaOH水溶液を添加する。今回の試験では、混和材に含まれるアルカリ量を考慮して、以下の通りアルカリ量を調整した。

種類	材料のアルカリ量	材料の添加量	全体Na ₂ Oeq量 (g)	セメント含有率 (%)	7日強度 (N/mm²)	28日強度 (N/mm²)	56日強度 (N/mm²)	91日強度 (N/mm²)
N	セメント 0.55%	セメント 600g	Na ₂ Oeq量 (g) 7.2	3.3	—	—	—	3.9
N+F	セメント 0.55%	セメント 510g	Na ₂ Oeq量 (g) 7.2	2.8	1.0	—	—	3.4
N+B	セメント 0.55%	セメント 244g	Na ₂ Oeq量 (g) 7.2	1.9	—	1.1	4.2	—



30

(5) プリーディング量の減少(骨材との組合わせ)



37

10. 環境負荷低減と地産地消

【CO₂排出量の削減効果】

仮に、フライアッシュ6万t(敦賀火力発電所に分級装置を設置後の供給能力)をコンクリートに使用した場合、セメント量の低減により、約4.5万tのCO₂排出量の削減効果となる。

供給能力6万tをコンクリートに使用した場合、
約4.5[=6×(766.6-19.6)÷1000]万tのCO₂排出量の削減効果
(普通セメント1t製造につきCO₂の発生量は766.6kg
フライアッシュ1t製造につき分級等によるCO₂の発生量は19.6kg
(土木学会「普通型セメント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」による))

【参考】北陸地方の公共工事(国・県・市町村)でのフライアッシュの需要想定

	富山県	石川県	福井県	北陸(合計)
公共工事(国・県・市町村)での生コンクリート出荷量(平成21年度実績)	約722,000 m ³	約510,000 m ³	約671,000 m ³	約1,912,000 m ³
普通セメントとした場合	セメント使用量 約216,600 t	セメント使用量 約155,700 t	セメント使用量 約201,300 t	セメント使用量 約573,600 t
フライアッシュ(15%)を用いた場合	セメント使用量 約184,110 t	セメント使用量 約132,345 t	セメント使用量 約171,105 t	セメント使用量 約487,560 t
	フライアッシュ使用量 約32,490 t	フライアッシュ使用量 約23,355 t	フライアッシュ使用量 約30,195 t	フライアッシュ使用量 約86,040 t

※コンクリートの単位セメント量を300kg、フライアッシュは内割り割合15%と仮定し計算

38

【地産地消】

北陸地方には石炭火力発電所はあるが、製鉄所はないことから、北陸地方の石炭火力発電所の副産物として産出されるフライアッシュをコンクリート用骨材としてリサイクルし、その特性を利用した建設資材(骨材等)の地域的な活用を推進することが地産地消につながる。



39

12. 北陸地方におけるフライアッシュの供給体制の構築



七尾産フライアッシュの供給体制は現在3万t/年であり、平成24年度には、敦賀産フライアッシュと合わせて6万t/年の供給体制を構築する予定です。

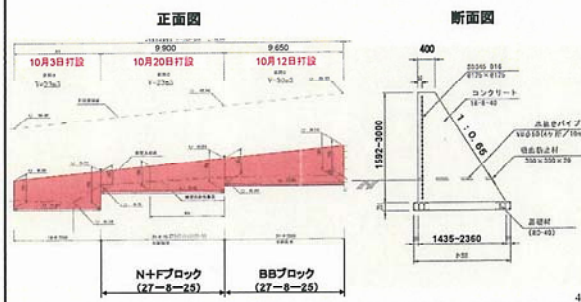
40

13. 石川県工事での試験施工の事例

試験施工(石川県)の概要

重力式擁壁工(小原清水水線道路改良工事)

BBブロック(高炉セメントB型) L=9.650m, H=2.065~3.000m, B=1.733~2.350m
N+Fブロック(フライアッシュ15%置換) L=9.900m, H=1.592~2.615m, B=1.435~2.100m



41

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 (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)	
BBブロック 27 N/mm ² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	10月12日 9:20~12:05	晴れ	19 ~21 ℃	合計	製造時	8:50	9.5	5.5	19
				荷卸時	9:20	8.5	5.1	20	
				製造時	11:35	9.5	5.5	20	
				荷卸時	11:45	9.5	5.1	21	
				終了時	12:05	8.5	4.5	21	
N+Fブロック 27 N/mm ² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	10月20日 9:15~11:10	晴れ	19 ~24 ℃	合計	製造時	8:50	9.0	5.1	19
				荷卸時	9:15	8.5	4.8	21	
				製造時	10:35	10.0	5.4	20	
				荷卸時	10:50	7.5	4.5	21	
				終了時	11:10	7.0	4.0	22	

(基準) 5.5~10.5 3.0~6.0

(基準) 5.5~10.5 3.0~6.0

コンクリートの圧縮強度試験

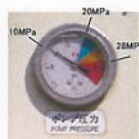
(単位:N/mm²)

	3日	7日	28日
BBブロック	11.4	19.8	32.0
N+Fブロック	15.8	24.1	(11/17試験)

42

ポンプ圧送性

(単位:MPa)		
ポンプ圧力		ポンプ能力
BBブロック	通常圧送時	7.5 ~ 10.1
	切替え瞬時	10.0 ~ 13.5
N+Fブロック	通常圧送時	8.9 ~ 10.3
	切替え瞬時	10.5 ~ 14.0
		最大圧力
		28.0



ポンプ圧力計

ブリーディングの発生状況

(単位:ℓ)	
	ブリーディング水採集量
BBブロック	21.8
N+Fブロック	0.0



BBブロックでの採取状況



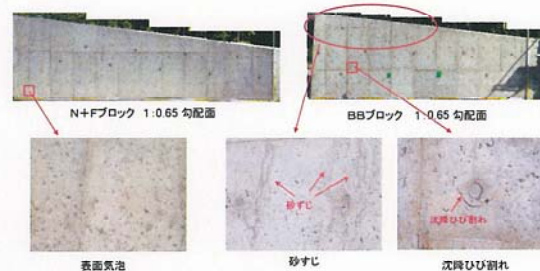
BBブロックのブリーディング水



N+Fブロックの打設状況

43

外観調査(脱型時)

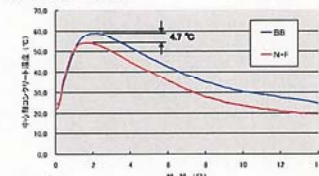


- ・両ブロック共に脱型時(11月2日)では、収縮ひび割れ等は見られない。
- ・両ブロック共に給置面に変状は見られない。
- ・N+Fブロックの勾配面では、表面気泡がBBブロックに比べ多い。
- ・BBブロックの勾配面では、Pコン下部に沈降ひび割れ、また上部の広い範囲で砂すじが見られる。

44

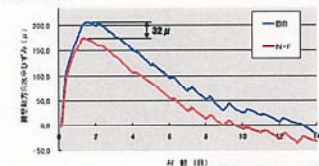
コンクリート温度とひずみ量(同断面 H=2.4m で計測)

(1)コンクリート温度



計測器設置状況

(2)ひずみ



※打設終了時のひずみを0とした。

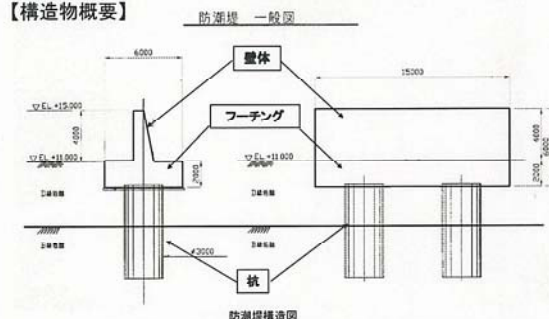
45

14. 志賀原子力発電所防潮堤コンクリートにフライアッシュを活用



46

【構造物概要】



○壁体	○フーチング	○杭(場所打ち杭)
高さ4m・幅0.8~1.5m	高さ2m・幅6m	直径3m
・コンクリート数量:約3200m ³	・コンクリート数量:約8500m ³	・コンクリート数量:約5100m ³
・配合:24-12-25(20)	・配合:24-12-25(20)	・配合:30-18-25(20)

47



さざれ石(角閃石石灰岩, 気多大社)

48