北陸産分級フライアッシュを使用した
コンクリートの性能評価と実用化に関する研究

橋　本　　徹

平成26年6月

博　　士　　論　　文

北陸産分級フライアッシュを使用した
コンクリートの性能評価と実用化に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科
環境科学専攻
環境創成講座

学　籍　番　号　1323142012

氏　　名　橋本　徹

主任指導教員名　鳥居　和之

北陸産分級フライアッシュを使用した
コンクリートの性能評価と実用化に関する研究

－目　　次－

第１章　序　論

1.1 研究の背景 ……1
1.1.1 北陸地方が抱える深刻な ASR 問題 ……1
1.1.2 北陸地方の再生資源としてのフライアッシュ ……4
1.1.3 東日本大震災以降の北陸地方のエネルギー事情 ……6
1.1.4 北陸地方のコンクリート構造物の長寿命化 ……12
1.1.5 北陸の地域特性を反映した対策の現状 ……13
1.2 研究の目的 ……14
1.2.1 フライアッシュの品質管理体制の強化と分級装置の導入 ……14
1.2.2 フライアッシュ委員会における本研究の役割と目的 ……15
1.3 本論文の構成 ……17
【参考文献】 ……19

第２章　北陸産分級フライアッシュの品質の検証

2.1 概　説 ……22
2.2 北陸産分級フライアッシュの製造 ……24
2.3 北陸産分級フライアッシュの品質管理データ ……27
2.3.1 北陸産分級フライアッシュの JIS 規格 ……27
2.3.2 七尾大田火力発電所の品質管理データ ……28
2.3.3 敦賀火力発電所の品質管理データ ……32
2.4 北陸産分級フライアッシュの分級効果確認試験 ……36
2.4.1 分級効果確認試験の概要 ……36
2.4.2 物理的性質および化学的性質の変化 ……37
2.4.3 北陸産分級フライアッシュの分級効果 ……43
2.5 まとめ ……45
【参考文献】 ……46

第３章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質の検証

3.1 概　説 ……47
3.2 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造 ……48
3.2.1 室内試験による配合検討 ……48
3.2.2 実機試験による配合検討 ……72
3.3 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質 ……79
3.3.1 施工性についての検討 ……79
3.3.2 強度発現性についての検討 ……82

3.4 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善メカニズム ……86
3.4.1 実験概要 ……86
3.4.2 実験結果 ……87
3.4.3 強度改善メカニズムの考察 ……96
3.5 まとめ ……97
【参考文献】 ……99

第４章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性の検証

4.1 概　説 ……101
4.2 使用材料および配合 ……102
4.2.1 使用材料 ……102
4.2.2 配合 ……103
4.3 収縮性能に関する汎用コンクリートとの比較試験 ……105
4.3.1 乾燥収縮試験 ……105
4.3.2 自己収縮試験 ……106
4.3.3 収縮性能に関する評価 ……107
4.4 水和発熱性能に関する汎用コンクリートとの比較試験 ……108
4.4.1 簡易断熱温度上昇試験 ……108
4.4.2 完全断熱温度上昇試験 ……112
4.4.3 水和発熱性能に関する評価 ……113
4.5 ASR 抑制性能に関する汎用コンクリートとの比較試験 ……114
4.5.1 化学法（JIS A1145） ……114
4.5.2 モルタルバー法（JIS A1146） ……116
4.5.3 モルタルバー法（デンマーク法） ……119
4.5.4 ASR 抑制性能に関する評価 ……123
4.6 遮塩性能に関する汎用コンクリートとの比較試験 ……125
4.6.1 塩化物イオン浸透深さの測定 ……125
4.6.2 電気泳動試験 ……126
4.6.3 鉄筋腐食試験 ……127
4.6.4 遮塩性能に関する評価 ……129
4.7 中性化抑制性能に関する汎用コンクリートとの比較試験 ……130
4.7.1 中性化深さの測定 ……130
4.7.2 中性化抑制性能に関する評価 ……131
4.8 凍害抵抗性能に関する汎用コンクリートとの比較試験 ……132
4.7.1 凍結融解試験 ……132
4.7.2 凍結抵抗性能に関する評価 ……135
4.9 まとめ ……136
【参考文献】 ……137

第５章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証

5.1 概　説 …… 139
5.2 北陸 3 県の代表的骨材を用いた試験施工による比較検討 …… 140
5.2.1 試験施工の実施概要および試験項目 …… 140
5.2.2 富山県の試験施工による比較 …… 142
5.2.3 石川県の試験施工による比較 …… 146
5.2.4 福井県の試験施工による比較 …… 150
5.2.5 国交省の試験施工による比較 …… 154
5.2.6 試験施工の温度応力解析 …… 161
5.3 モデル工事による各種構造物への適用検討 …… 173
5.3.1 富山県のモデル工事への適用 …… 173
5.3.2 石川県のモデル工事への適用 …… 185
5.3.3 モデル工事の施工性と強度発現性 …… 192
5.3.4 夏期施工工事への適用 …… 195
5.4 まとめ …… 197
【参考文献】 …… 198

第６章　結　論

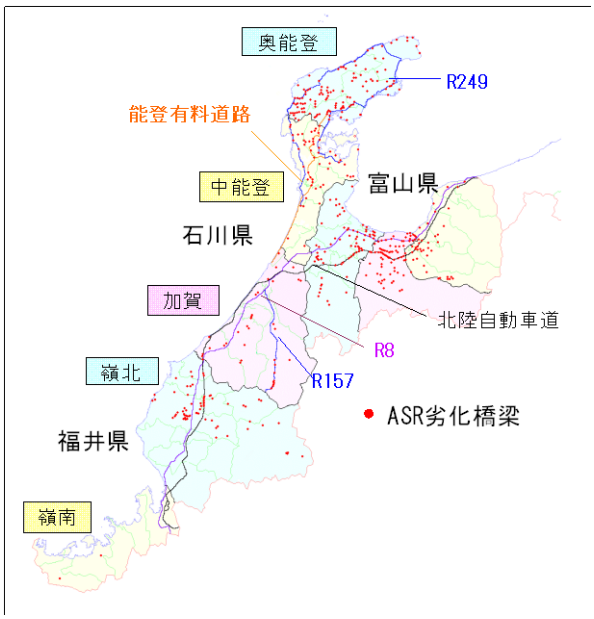
6.1 本研究のまとめ …… 199
6.2 今後の課題と展望 …… 201
6.2.1 今後の課題 …… 201
6.2.2 今後の展望 …… 203
【参考文献】 …… 205

第１章　序　論

1.1 研究の背景

1.1.1 北陸地方が抱える深刻な ASR 問題 [1)～6)]

北陸地方では，北陸 3 県（富山県，石川県，福井県）の橋梁長寿命化修繕計画 [7)～10)] の策定が進むなか，アルカリシリカ反応（ASR：Alkali Silica Reaction，以下，ASR）が発生したコンクリート構造物の実態が徐々に明らかになってきている [11),12)]。金沢大学で調査した北陸 3 県における ASR 劣化橋梁の分布図を**図－1.1**[13)] に示す。北陸地方の反応性骨材としては，能登半島で産出する安山岩砕石が広く知られているが，北陸 3 県でコンクリート用骨材として一般に使用されてきた河川産骨材（川砂，川砂利）にも火山岩起源（安山岩，流紋岩）や堆積岩起源（凝灰岩，チャート）の反応性骨材を含んでいる。このため，北陸地方の ASR は，富山県の常願寺川流域，石川県の手取川上流域や奥能登地域，福井県の九頭竜川流域を中心に，北陸 3 県のほぼ全域にわたり発生しているのが特徴である。また，北陸地方では，能登半島全域で安山岩砕石が使用された経緯があり，旧能登有料道路や国道 249 号などで，鉄筋破断をともなう深刻な ASR が発生している [14)]。金沢大学から提供頂いた鉄筋破断状況の写真を**写真－1.1** に示す。この鉄筋破断は，鉄筋の曲げ加工によるひずみ時効硬化などに起因する破壊靭性値の低下や ASR による鉄筋への引張応力の増加などによる脆性破壊であると既に解明されているが [15)]，構造物の耐荷性や耐震性の低下に直結する大変憂慮される事象である。このように，北陸地方の抱える ASR 問題は，北陸 3 県全域にわたる広範囲な問題であるとともに，構造物の要求性能に関わる重大な問題でもあるといえる。ところが，冒頭の北陸 3 県の橋梁長寿命化修繕計画では，ASR が発生している既設構造物の補修・補強をどうするかの課題については言及しているが，これ



図－1.1 北陸 3 県における ASR 劣化橋梁の分布状況[13)]（金沢大学より提供）

写真－1.1 RC 橋脚の鉄筋破断状況（上段：ハツリ前，下段：ハツリ後）

から新設する構造物に対して，ASR そのものを発生させない，本質的な，予防的対策をどうするかについては全く議論されていない。実際，現在の ASR 抑制対策に不備はないのであろうか。

わが国で ASR によるコンクリート構造物の劣化が本格的に問題となったのは，1982 年（昭和 57 年）に阪神高速道路・大阪松原線の T 形橋脚における劣化事例が最初で，その後，1985 年（昭和 60 年）に建設省総合技術開発プロジェクトの一環として設立された「コンクリート構造物の耐久性向上技術の開発」[16]の成果などが，1986 年（昭和 61 年）の JIS A5308（レディミクストコンクリート）の ASR 抑制対策の原型といわれている[17]。この対策は，(1) コンクリートのアルカリ総量を 3kg/m³ 以下にする，(2) 化学法（JIS A1145）またはモルタルバー法（JIS A1146）で「無害」と判定された骨材を使用する，(3)ASR 抑制効果が認められる混合セメントなどを使用する，の 3 つの対策のうち，少なくとも 1 つを選択することを基本としている。これにより，わが国のコンクリート構造物に対する ASR の発生を大きく減少させてきたのは事実であるが，全国一律の基準であり，地域特性を十分に反映した対策にはなっていないと考えられる。何故なら，(1)に関しては，富山県の河川産骨材には，ASR に対して高い反応性を示すクリストバライトやオパールなどの鉱物を含有する骨材が混入しており[18),19)]，この場合にはアルカリ総量値を遵守しても ASR が発生する可能性がある[20),21)]。また，(2)に関しては，北陸地方の河川産骨材の多くは化学法によって「無害」と「無害でない」の境界線上に分布している[22)]。このことは，骨材の岩種構成率のわずかな違いによって判定結果が相違することを意味しており，北陸地方の河川産骨材は河川水系ごとに反応性鉱物の種類とその量が相違していることから判断すると，化学法の判定結果のみで骨材のアルカリシリカ反応性を正確に評価することは困難である[20)]。さらに，独立行政法人 土木研究所がとりまとめた「骨材のアルカリシリカ反応性に関する長期屋外暴露試験結果」では，20 年以上暴露された ASR 供試体の調査結果を踏まえ，ペシマムを有すると考えられる骨材の反応性をモルタルなどの膨張量から評価するにあたっては，評価する骨材の使用割合を 50%以下程度にした供試体も製作するなど，ペシマムについて十分な留意が必要としている[23)]。従って，(1)，(2)の対策の不確かさ（あるいは不備）を考慮すると，北陸地方においては，(3)の混合セメントなどを使用する対策が最も有効であると考えられる。

このような状況を踏まえ，JR 東日本では，ASR 抑制対策として抑制効果の高い混合セメントなどを主体とした方法で実施することとした独自の対策を策定し，2011 年（平成 23 年）2 月より自社の土木工事標準仕様書に反映している[24),25)]。JIS A5308 と JR 東日本の ASR 抑制対策の比較を**図－1.2** に示す。JR 東日本が今回の仕様書の改訂に踏み切った理由は，現在の ASR 抑制対策（JIS A5308）を満足したコンクリートで建設された構造物において，ASR によるひび割れ，剥離・剥落が生じた事例がいくつか確認されたため，コンクリートの骨材調査を実施し，JIS A5308 の判定では「無害」となるものの「無害でない」領域に限りなく近い骨材が多数存在していることが明らかとなったためである[24)]。これは，前述の北陸地方の状況と同じである。JR 東日本では，これらの調査結果から，骨材の ASR 判定区分を JIS A5308 で定められている「無害」または「無害でない」の 2 区分から，現行の骨材の ASR 試験方法（化学法，モルタルバー法）に独自の上乗せ基準を設けることにより，「E 有害」・「準有害」・「E 無害」の 3 区分に変更している。また，それ

ぞれの ASR 判定区分に対応する対策は，「E 有害」と判定された場合は混合セメントなどによる対策，「準有害」と判定された場合はアルカリ総量を 2.2kg/m³ 以下にする対策もしくは混合セメントなどによる対策，「E 無害」と判定された場合は対策無しとしている。特徴的なのは，JIS A5308 では前述の(1)から(3) の 3 つの対策から任意に対策を選択するのに対し，JR 東日本の ASR 抑制対策は，(3) の混合セメントなどを使用する対策を原則指定していることである。従って，JR 東日本の ASR 抑制対策は，実際に，新潟駅付近連続立体交差化工事に適用されており [26]，現在の ASR 抑制対策の不確かさ（あるいは不備）を補った先駆的な事例であるといえる。

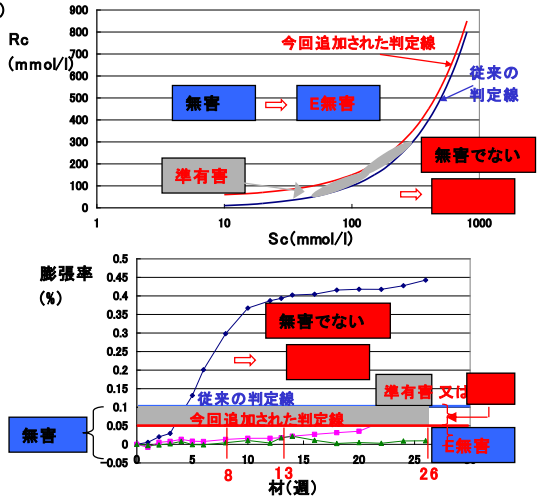
それでは，北陸地方においてはどのような ASR 抑制対策をとるべきであろうか。JR 東日本では，現在の骨材の ASR 試験方法を変更することなく，上乗せ基準により，混合セメントなどを使用する対策を原則指定している。これは，JR 東日本の管轄エリアには，ASR の発生を心配しなくてもよいエリア（例えば，関東地方などの石灰石骨材を主に使用するエリア）があることも関係していると考えられる。一方，北陸地方においては，北陸 3 県全域にわたり ASR が発生しており，骨材の ASR 試験方法の信頼性や骨材に含まれる反応性鉱物混入のばらつきを考慮すると，ASR に対して高い反応性を示すクリストバライトやオパールなどの鉱物を含有する骨材が混入することを前提とした対策が必要である。すなわち，北陸地方の ASR 抑制対策は，JR 東日本の ASR 抑制対策を更に一歩進めた，コンクリートへの混合セメントなどの使用を標準化することが効果的である。

［JIS A1145(化学法)］　※Sc：溶解シリカ量、Rc：アルカリ濃度減少量(mmol/l)

JIS判定		JRの判定	
Sc＜Rc	「無害」	Sc＋50＜Rc	「E無害」
		Sc＜Rc≦Sc＋50	「準有害」
Sc ≧Rc	「無害でない」	Sc ≧Rc	「E有害」

［JIS A1146(モルタルバー法)：6か月の膨張率］

JIS判定		JRの判定		
0.1%未満	「無害」	0.05%未満		「E無害」
		0.05～0.1%	膨張率の傾き 8～13週＞13～26週	「準有害」
			膨張率の傾き 8～13週＜13～26週	「E有害」
0.1%以上	「無害でない」	0.1%以上		



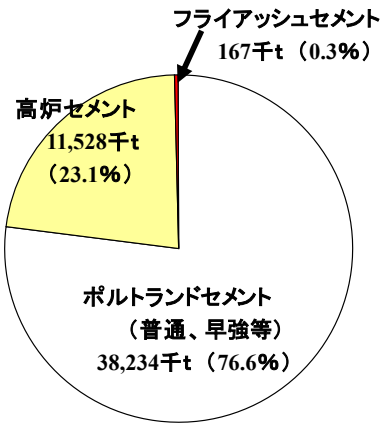
［対策方法の比較］

JIS抑制対策		JR抑制対策		備考（北陸地方への影響）
「無害」	対策不要	「E無害」	対策不要	・北陸地方の骨材は多くが従来の「無害」から「準有害」または「E有害」に判定されることになる。 ・PCやPCa製品は、総量規制をクリアーできないので、混合セメントの使用に変更せざるをえない。 ・従来の「無害でない」は、「E有害」となり、「混合セメントの使用」のみがASR抑制対策として認められる。
		「準有害」	・アルカリ総量規制 (2.2kg/m³) ・混合セメントなど使用	
「無害でない」	・アルカリ総量規制(3kg/m³) ・混合セメントなど使用 ・安全と認められる骨材の使用	「E有害」	混合セメントなど使用	

図－1.2 JIS A5308 と JR 東日本の ASR 抑制対策の比較

1.1.2 北陸地方の再生資源としてのフライアッシュ

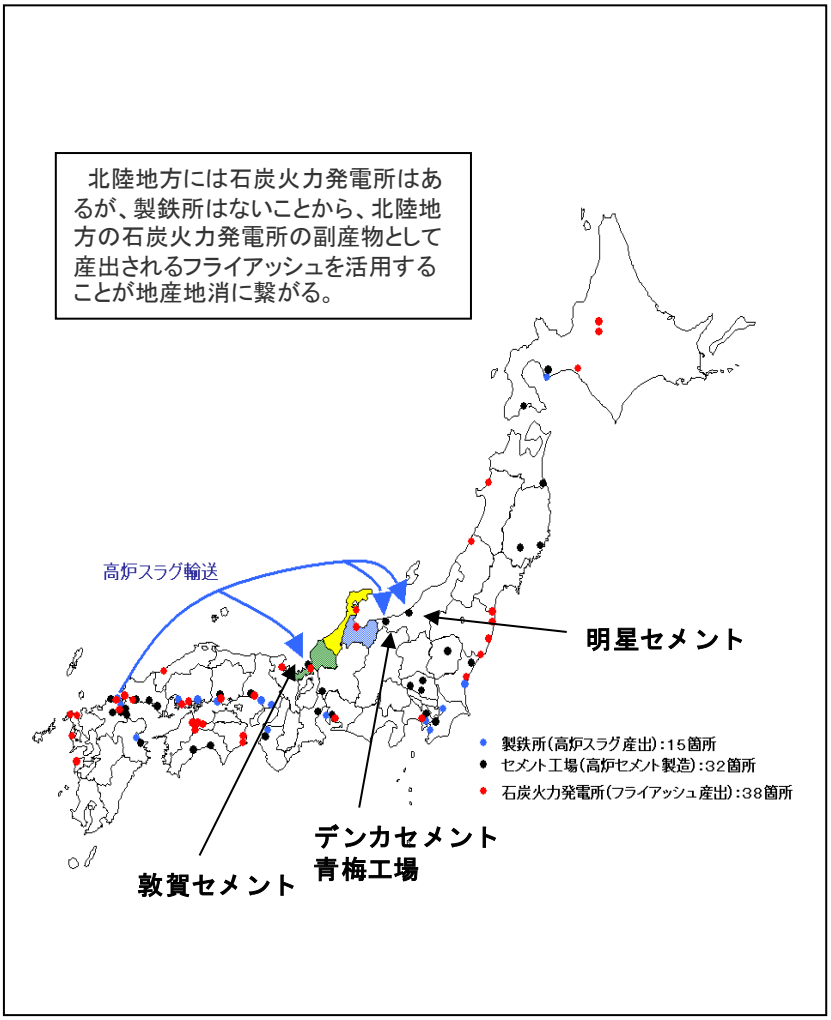
現在，わが国で流通している混合セメントには，高炉セメントとフライアッシュセメントの 2 種類がある。高炉セメントは製鉄所からの副産物である高炉スラグ微粉末（Blast Furnace Slag powder：溶高炉の底から分離された高炉スラグを細かく粉砕したもの）を，フライアッシュセメントは石炭火力発電所からの副産物であるフライアッシュ（Fly Ash：石炭灰のうちボイラーから飛来して電気集塵器に捕集されたもの）を，それぞれ普通ポルトランドセメントに一定の割合で混和したものである。平成 22 年度の全国種類別セメント生産量（**図－1.3**）では，高炉セメントが全体の約 23%を占めているのに対し，フライアッシュセメントは全体の約 0.3%に過ぎない。国や県・市町村が実施する公共工事に至っては，高炉セメントを使用したコンクリートが全体の 9 割以上のシェアを占めているのに対し，フライアッシュセメントを使用したコンクリートはほとんど使用されていないのが現状である。これは，2000 年（平成 12 年）5 月に施行された「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」[27]（いわゆる，グリーン購入法）に基づき，国土交通省が「環境物品等の調達の推進を図るための方針」[28]を公表し，高炉セメントは一般構造物などへの使用，フライアッシュセメントはダムなどへの使用といった方針が示されたことなどが背景にある。



図－1.3 平成 22 年度の全国種類別セメント生産量

それでは，北陸地方で標準化する混合セメントなどは，どちらがよいのであろうか。全国の石炭火力発電所，製鉄所およびセメント工場の位置図を**図－1.4** に示す。高炉セメントの原料である高炉スラグ微粉末は，製鉄会社の産業構造上，首都圏近郊や大阪，名古屋，北九州などの太平洋ベルト地帯に集中しているのに対し，フライアッシュセメントの原料であるフライアッシュは，電力会社の供給エリア内での立地条件を反映して，全国に分散している。北陸地方に目を移すと，北陸 3 県に 1 箇所ずつ赤丸で示された石炭火力発電所があるのに対し，北陸地方を含めた日本海側の地域には青丸で示された製鉄所がないことがわかる。また，北陸地方に供給される高炉セメントは，新潟県の明星セメント（糸魚川市）とデンカセメント青海工場（青海市）および福井県の敦賀セメント（敦賀市）の 3 工場で製造されているが，その原料である高炉スラグ微粉末は，実は遠く九州地方から輸送されてきたものである。このような現状を踏まえると，「地産地消」や「未利用資源の有効

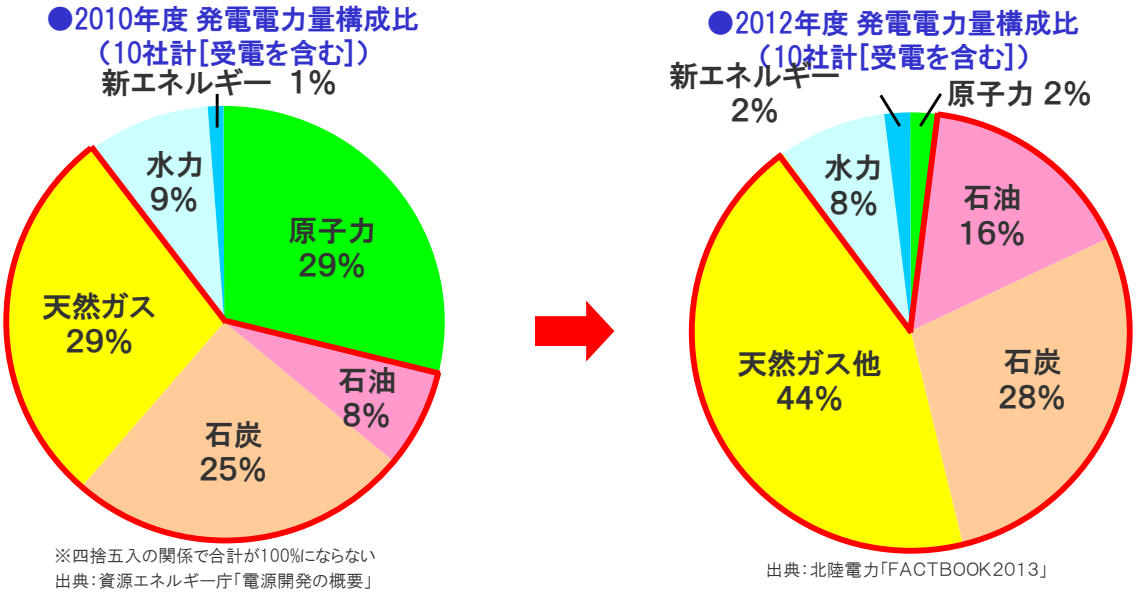
利用」の観点から，北陸地方で標準化する混合セメントなどは，フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュを使用すべきであると考える。実際に，北陸地方と同じ日本海側の地域である秋田県の能代・山本地域では，高炉セメントを使用したコンクリートに代わり，秋田県内にある能代火力発電所のフライアッシュを混和材として混合したコンクリートが秋田県の公共工事の標準仕様となり，その「地産地消」の流通体系が評価され，平成 22 年度「リデュース・リユース・リサイクル推進功労者等表彰」において国土交通大臣賞を受賞している[29]。両者に共通するキーワードは，環境負荷の低減を目指した「地産地消」である。従って，北陸地方においては，「地産地消」の観点から，「北陸地方のコンクリートに，フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュの使用を標準化する」という対策が推奨される。



図－1.4 全国の石炭火力発電所、製鉄所およびセメント工場の位置図

1.1.3 東日本大震災以降の北陸地方のエネルギー事情

2011 年（平成 23 年）3 月 11 日に東日本大震災が発生し，多くの方々が亡くなられるとともに，海岸付近の橋梁や建築物が津波により跡形もなく流失した。これまでの土木・防災技術に対する限界を感じるとともに，自然の脅威に対する畏敬の念を抱かせられる出来事であった。その後，東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響で，国内の原子力発電所の運転が停止し，今なお再開のめどが立たっていない。まさに，東日本大震災前後で，わが国のエネルギー事情が一変した。2010 年度および 2012 年度の電力 10 社の発電電力量構成比を**図－1.5**[30),31)]に示す。2010 年度における発電電力量構成比では，原子力が約 3 割を占めていたが，2012 年度以降は，原子力発電の大幅な減少を火力発電でカバーしていることがわかる。これは，火力発電や水力発電の定期点検時期の調整などにより，何とか供給力を確保しているという状況である。かつて，民主党政権時代（2009 年 9 月から 2012 年 12 月）には，2020 年までには 1990 年比 25％の CO_2 削減目標が掲げられ，そのベース電源として，CO_2 の発生が少ない原子力発電が位置づけられていた。この原子力発電の分を，同様に CO_2 の発生が少ない再生可能エネルギー（水力発電，太陽光発電，風力発電，地熱発電など）で補うことができればいいのだが，現実的には困難である。何故なら，水力発電では残された開発の適地が山間奥地または小規模になること，風力発電では風況や景観などの問題，地熱発電では開発適地が自然公園や温泉地域になる，といった立地的な制約があり，立地そのものが困難であるうえに，調査から建設に相当の年数を要するからである。また，残りの太陽光発電では，発電コストが高いうえに設備利用率が低く，安定的な電源になりにくいため，結局，バックアップ電源を必要とする。これらのことから，原子力発電に見合う再生可能エネルギーを，早期に大量導入することは現実的に不可能である。従って，東日本大震災以降，わが国のエネルギーの主役は，火力発電にならざるを得ないのである。

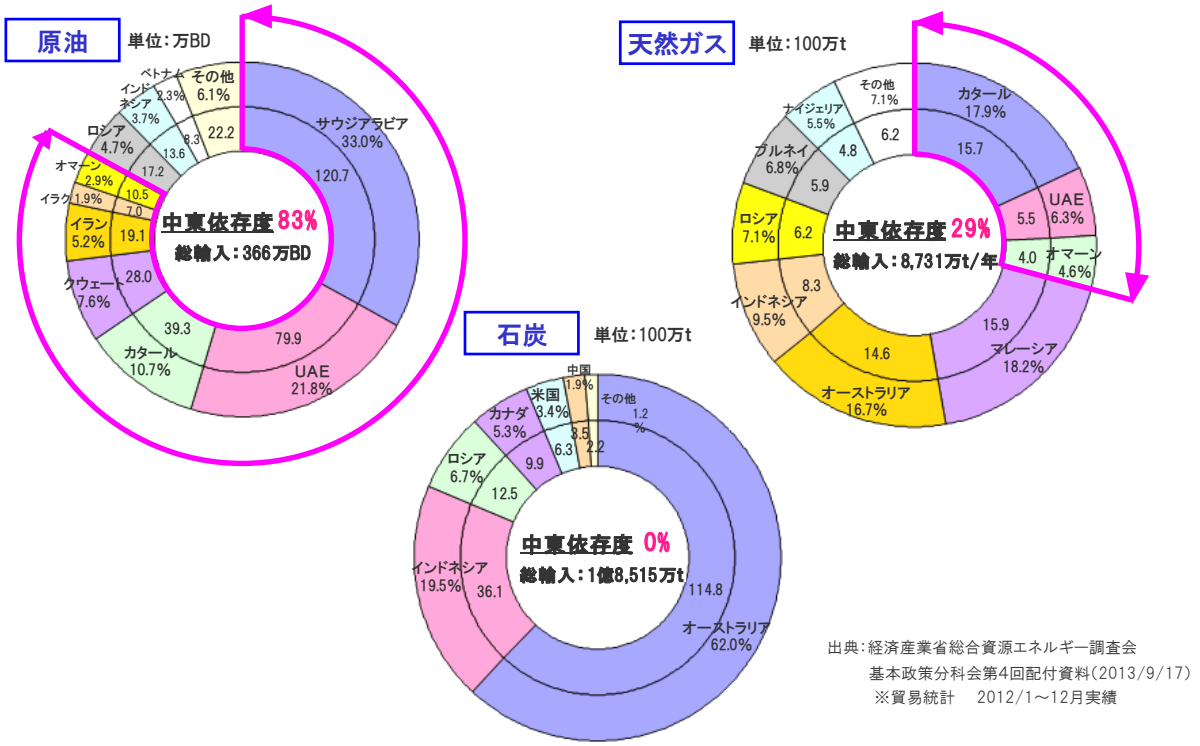


図－1.5 電力 10 社の発電電力量構成比 [30),31)]

東日本大震災以降のエネルギー問題を考えるうえで，「S+3E」という概念（**図－1.6**）がある。これは，エネルギー自給率の低いわが国では，安全（Safety）を大前提として，安定供給（Energy Security），経済性（Economy），環境保全（Environmental Conservation）の３つの観点を考慮したエネルギーミックスが重要ということである。東日本大震災以降のエネルギーの主役である火力発電について，そのエネルギー資源別に，中東依存度を**図－1.7**に，燃料価格の推移を**図－1.8**に，CO_2排出量を**図－1.9**に示す。火力発電の主要エネルギー資源である，石炭，石油，天然ガスの３種類を比較すると，石炭は他の２つのエネルギー資源に比べ，比較的政情の安定した地域から輸入し，かつ，燃料価格は低位安定で推移しているが，CO_2排出量は多いことがわかる。前述の３つの観点で言い換えると，石炭はエネルギーの安定供給と経済性の観点では優れているが，環境保全の観点では劣っているといえる。これら３つの観点のうち，何を優先していくかは，その時代背景によるところが大きいが，東日本大震災以降の逼迫したエネルギー事情を考慮すると，火力発電の中でも石炭火力発電は，特に「エネルギーセキュリティー」の観点から，今後ともわが国の中核エネルギーであり続けるものと考えられる。

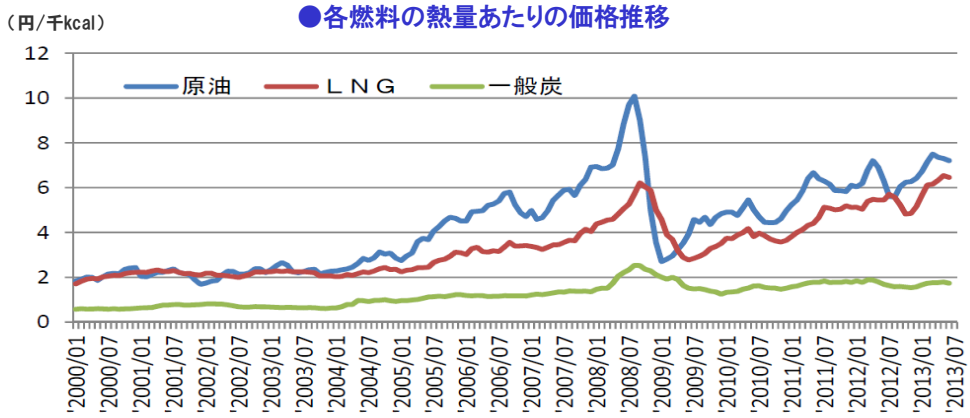
それでは，北陸地方のエネルギー事情はどうであろうか。2010年度および2012年度の北陸電力の発電電力量構成比を**図－1.10**に示す。東日本大震災前の発電電力量構成（2010年度）をみると，全国平均に比べ，再生可能エネルギーの１つである水力発電の比率が全体の約1/4と高く，かつ，石炭火力発電のウエートがかなり大きいことがわかる。これは，富山県を中心とした北陸地方の包蔵水力を背景に，当初は水力発電を中心に電源開発し，電源の多様化を進めるなかで，火力発電や原子力発電などの電源を着実に導入し供給力を確保してきた，北陸電力の電減開発の歴史（**図－1.11**）による結果である。一方，東日本

図－1.6　「S+3E」を考慮したエネルギーミックスの概念図



出典：経済産業省総合資源エネルギー調査会
基本政策分科会第4回配付資料(2013/9/17)
※貿易統計　2012/1～12月実績

図－1.7 エネルギー資源別の中東依存度



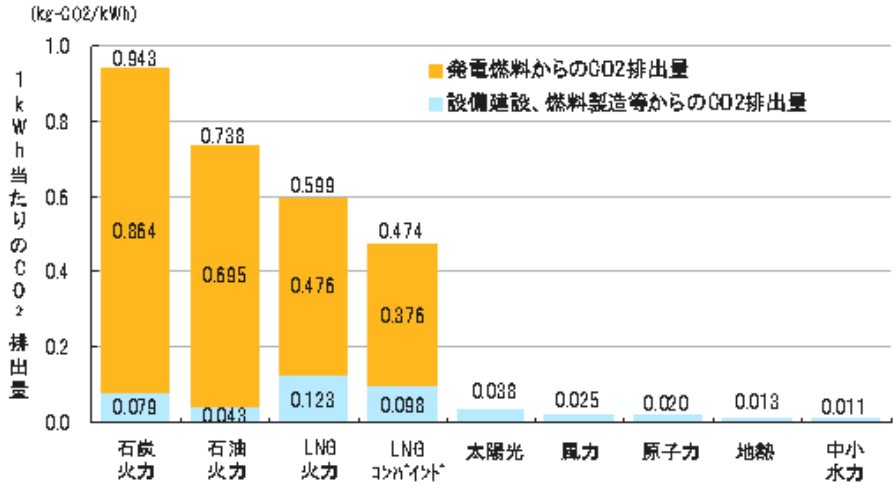
出典：経済産業省総合資源エネルギー調査会基本政策分科会第2回配付資料(2013/8/27)

●今後の燃料価格見通し(IEA World Energy Outlook 2011)

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	'10→'35
原油(千円/bbl)	6.7	8.7	9.3	9.7	10.1	10.3	1.5倍
LNG(千円/t)	48.8	54.1	57.2	59.4	61.7	63.4	1.3倍
石炭(千円/t)	8.5	8.9	9.1	9.3	9.4	9.4	1.1倍

出典：経済産業省総合資源エネルギー調査会　第19回基本問題委員会配付資料

図－1.8 エネルギー資源別の燃料価格の推移



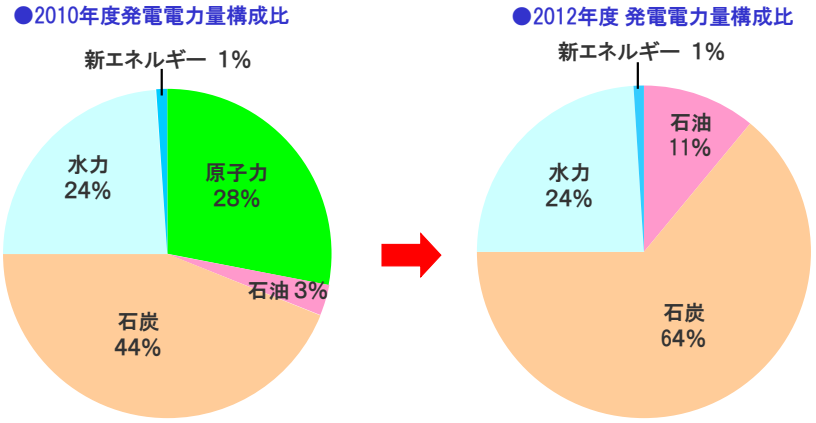
出典：電力中央研究所報告書(2010.7)

※ 2009年に得られたデータに基づく推計

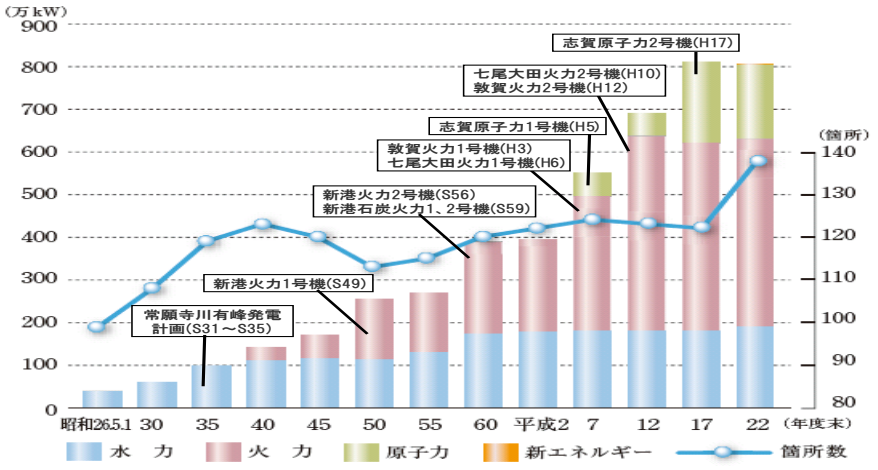
※ 発電燃料の燃焼に加え、原料の採掘から発電設備等の建設・燃料輸送・精製・運用・保守等のために消費される全てのエネルギーを対象として二酸化炭素排出量を算出

※ 原子力については、現在計画中の使用済燃料国内再処理・プルサーマル利用(1回リサイクルを前提)・高レベル放射性廃棄物処分等を含めて算出

図－1.9　エネルギー資源別の CO_2 排出量



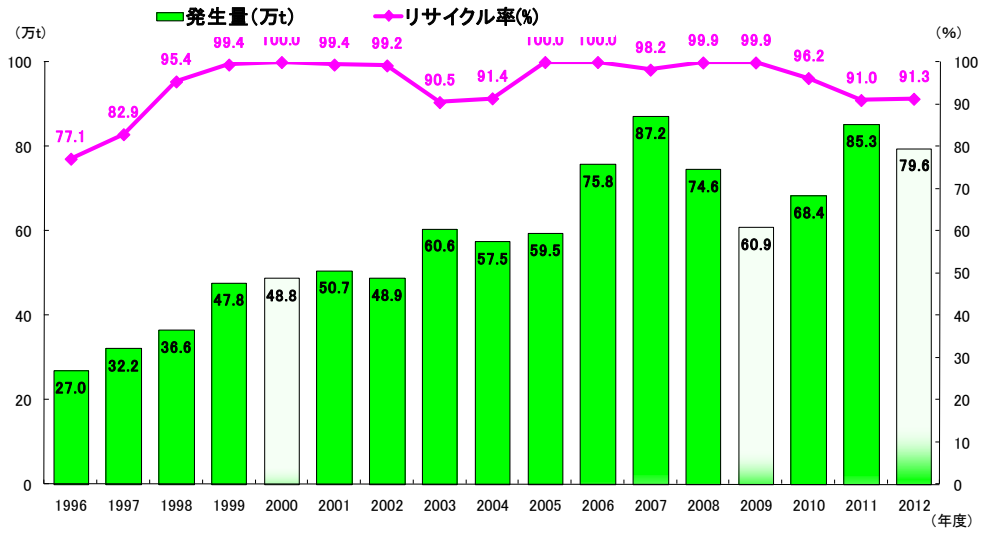
図－1.10　北陸電力の発電電力量構成比



図－1.11 北陸電力の発電開発の推移

大震災以降の発電電力量構成（2012 年度）をみると，石炭火力発電が全体の約 6 割を占めていることがわかる。従って，北陸地方においては，東日本大震災以降，石炭火力発電が全国以上に重要なエネルギーとして位置づけられると同時に，石炭火力発電の運転に伴い発生する石炭灰の処理やその有効利用が今まで以上に切迫した課題となってきている。北陸地方の石炭灰発生量とそのリサイクル率を**図－1.12**[32]に，2012 年度の石炭灰のリサイクル用途を**表－1.1**[32),33)]に示す。北陸地方の石炭灰発生量は，敦賀発電所 2 号機が運転開始し現有設備が整った 2000 年以降では約 60 万ｔ前後での推移であったが，志賀原子力発電所の停止の影響を受けた 2006 年度から 2008 年および 2011 年以降では，一気に 80 万ｔから 90 万ｔに跳ね上がっている。また，石炭灰のリサイクル用途は，約 80%がセメント原料（粘土代替）として，セメント会社に受け入れてもらっているのが現状である。このことは，原子力発電の大幅な減少を火力発電でカバーすると，北陸地方では通常の 1.3 倍から 1.5 倍の石炭灰の処理が必要となることを意味しており，従来の石炭灰の処理計画の大幅な修正を余儀なくされている。また，最大のリサイクル用途先であるセメント会社では，北陸だけでなく全国の石炭灰を受け入れているため，今後の社会情勢によっては，安定的な受け入れが困難になるリスクを抱えている。

このように，東日本大震災以降のエネルギー事情を考えた場合，全国的に石炭火力発電がエネルギー供給の中心とならざるを得ない状況である。そして，発電電力量構成上，北陸地方ではその傾向が顕著であると同時に，石炭火力発電の運転に伴い発生する石炭灰の処理やその有効利用が今まで以上に切迫した課題となってきている。従って，前述の「北陸地方のコンクリートに，フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュの使用を標準化する」という対策は，主要エネルギーである石炭火力発電の安定運転に繋がることから，この地域の「エネルギーセキュリティー」の観点からも推奨される。



図－1.12 北陸地方の石炭灰発生量とそのリサイクル率 [32)]

表－1.1 2012年度の石炭灰のリサイクル用途[32),33)]

用途		比　率
セメント原料（粘土代替）		79.7%
	国内	47.5%
	国外	32.2%
セメント分野（粘土代替以外）		7.8%
土地造成材*		2.2%
再生路盤材		3.9%
建築分野		1.4%
地盤改良材（グラウント・水田などの排水材等）		2.3%
土木分野		2.7%
その他		0.0%

＊「港湾法上の重要港湾及び地方港湾の湾港計画に基づいて行われる公有水面埋立（廃棄物最終処分場の埋立工事を含む）において電気業に属する事業者が供給する石炭灰は、土地造成材に該当される」との経済産業省の解釈（2004年11月22日）を受け、富山新港火力発電所および七尾大田火力発電所において埋立処分されている石炭灰を2005年度より有効利用として取り扱っている。

1.1.4 北陸地方のコンクリート構造物の長寿命化

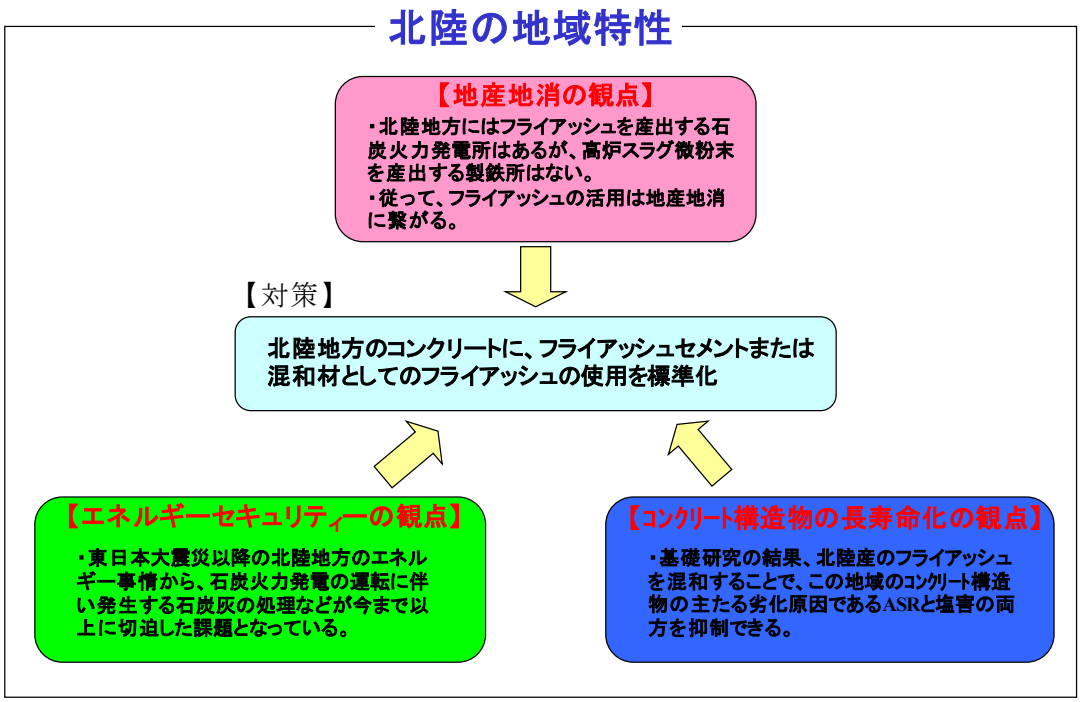
北陸地方のコンクリート構造物の特徴は，前述した全国的にみても ASR の発生が多いことに加え，塩害による被害についても多いことである。金沢工業大学から提供頂いた石川県および福井県での塩害による劣化橋梁の写真を**写真－1.2** に示す。北陸地方の塩害の特徴は，川砂，川砂利がコンクリート用骨材として使用されてきたことから，西日本の各地のような，海砂，海砂利による塩害（内在塩分による被害）は発生していないが，冬期における日本海からの北西の季節風や道路に散布される凍結防止剤による塩害（外来塩分による被害）が多いことである。また，塩害は表面に錆汁を伴うひび割れが見つかった時点では，鉄筋位置ではかなり高濃度の塩化物イオン量が観測され，こうした構造物を放置すると鉄筋の腐食が加速し，構造物は危険な状態となる。このことから，塩害はガンに相当する劣化であるともいわれている[34]。従って，北陸地方のコンクリート構造物は，構造物に深刻な被害を生じさせる ASR と塩害のいずれか，または，両方の劣化により，大変厳しい環境に曝されているといえる。

このような状況を踏まえ，金沢大学と北陸電力とが共同で，北陸産のフライアッシュ（七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所より産出されるフライアッシュ）による ASR と塩害に対する抑制効果を確認するため，2004 年（平成 16 年）から約 6 年間にわたり，コンクリート試験体（50cm×50cm×20cm）による長期暴露試験を実施した。その結果，北陸産のフライアッシュをコンクリートにセメント質量比で 15%混和することにより，ASR と塩害に対する抑制効果が認められることを確認している[35),36)]。従って，前述の「北陸地方のコンクリートに，フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュの使用を標準化する」という対策は，北陸地方のコンクリート構造物の主たる劣化原因である ASR と塩害の両方を抑制できることから，この地域の「コンクリート構造物の長寿命化」の観点からも推奨される。

写真－1.2 塩害による劣化橋梁

1.1.5 北陸の地域特性を反映した対策の現状

これまで，北陸地方が抱える深刻な ASR 問題を取り上げ，現在の全国一律の ASR 抑制対策ではこの地域の ASR の抑制は困難であり，JR 東日本での ASR 抑制対策を更に一歩進めた，コンクリートへの混合セメントなどの使用を標準化することが効果的であることを述べ，加えて，北陸地方にはフライアッシュを産出する石炭火力発電所はあるが，高炉スラグ微粉末を産出する製鉄所はないという「地産地消」の観点，東日本大震災以降の北陸地方のエネルギー事情から，石炭火力発電の運転に伴い発生する石炭灰の処理などが今まで以上に切迫した課題となるという「エネルギーセキュリティー」の観点，および，金沢大学と北陸電力とが共同で実施した基礎研究の結果，北陸産のフライアッシュをコンクリートに混和することで，この地域のコンクリート構造物の主たる劣化原因である ASR と塩害の両方を抑制できるという「コンクリート構造物の長寿命化」の観点，の 3 つの観点から，「北陸地方のコンクリートに，フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュの使用を標準化する」という対策の必要性についても述べてきた。これら「地産地消」，「エネルギーセキュリティー」，「コンクリート構造物の長寿命化」の 3 つの観点は，いずれも北陸の地域特性を反映したものであり，**図－1.13** に示すように，この対策はこの地域にとって極めて有効な対策であるといえる。この対策を実現させるためには，電力会社をはじめ，国・地方自治体，生コンクリート工業組合などの理解と協力が不可欠であり，関係者が一体となり，地域の問題を地域で解決するためのプロジェクトとして，2011 年（平成 23 年）1 月に産学官連携による「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：金沢大学　鳥居教授）」（以下，フライアッシュ委員会）が設立された [37),38)]。本研究は，このフライアッシュ委員会の活動の一環として実施したものである。



図－1.13 北陸の地域特性を反映した対策のイメージ

1.2 研究の目的

1.2.1 フライアッシュの品質管理体制の強化と分級装置の導入

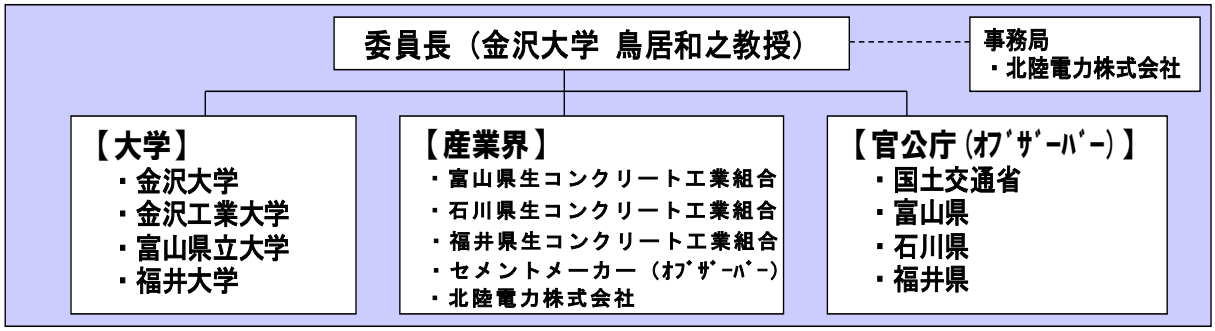
フライアッシュは，コンクリートに混和することで，施工性能の改善，長期強度増進，耐久性の向上，乾燥収縮減少，発熱の低減，ASR 抑制などの効果があるといわれ[39]，これまで日本建築学会や土木学会において指針類[40)～42)]の整備がなされてきたにも関わらず，現在，何故に使われていないのであろうか。この答えは明確であり，フライアッシュの品質（強熱減量など）が，石炭の種類やボイラー形式，燃焼温度の影響により，大きくばらつくことが理由である。コンクリート製造者からは，特に強熱減量値の変動が大きい影響で，コンクリートの空気量が安定せず，「暴れるフライアッシュ」として敬遠されてきた。この問題を解決するためには，まず，フライアッシュの品質を安定させ，コンクリート製造者の「トラウマ」をなくすことが必要である。

このような状況を踏まえ，北陸電力では，フライアッシュの「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」を決定した。「品質管理体制の強化」としては，JIS 灰の生産が可能な石炭（JIS 灰候補炭）をこれまでの各炭種の品質管理データに基づいて選定し，年度の石炭調達計画に反映するとともに，JIS 灰候補炭を燃焼した際に発生したフライアッシュは，分級装置にかける前と後の 2 回，JIS 規格の品質管理項目についての品質確認を実施することとした。また，「分級装置の導入」については，富山県と石川県にフライアッシュの供給を予定している七尾大田火力発電所では 2009 年（平成 21 年）8 月に，福井県にフライアッシュの供給を予定している敦賀火力発電所では 2012 年（平成 24 年）9 月に，それぞれ分級装置を稼動させ，従来よりも高品質なフライアッシュ（以下，北陸産分級フライアッシュ）を安定的に供給できる体制を構築した。フライアッシュ委員会では，この北陸産分級フライアッシュを用いることにより，前述のコンクリート製造者の「トラウマ」をなくすことができた。敦賀火力発電所に設置した分級装置の概観写真を**写真－1.3** に示す。

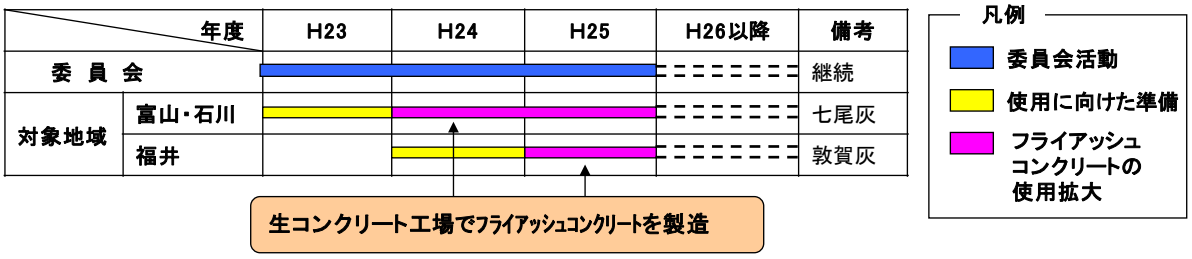
写真－1.3 敦賀火力発電所に設置された分級装置の概観

1.2.2 フライアッシュ委員会における本研究の役割と目的

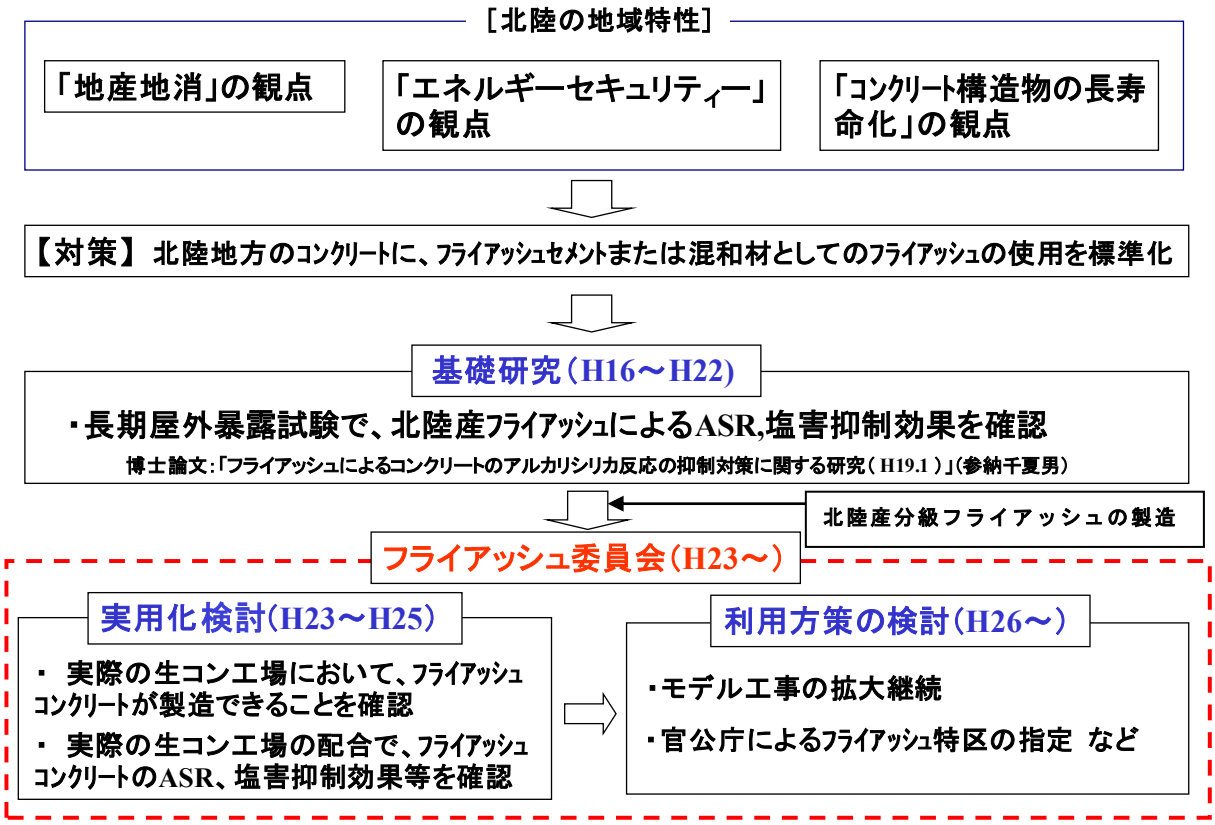
フライアッシュ委員会（2011 年 1 月設立）は，産学官が連携することによる技術的な信頼と社会的信用を確保しながら，コンクリートの耐久性向上によるコンクリート構造物の長寿命化と建設資材の地域的な活用（地産地消）による環境負荷低減を目指し，コンクリートへのフライアッシュの有効利用を促進することを目的としている。フライアッシュ委員会の構成を**図－1.14** に，概略工程を**図－1.15** に示す。フライアッシュ委員会の構成は，金沢大学の鳥居教授を委員長として，大学からは金沢大学，金沢工業大学，富山県立大学，福井大学の各々のコンクリート工学の専門家，産業界からは北陸 3 県の生コンクリート工業組合，セメントメーカー（オブザーバー）および北陸電力，官公庁からはオブザーバーとして，国土交通省北陸地整と北陸 3 県の土木部から構成されている。概略工程は，前述の分級装置の稼動計画を反映し，富山県・石川県での検討を 2011 年度（平成 23 年度）から，福井県は 1 年遅れの 2012 年度（平成 24 年度）から開始し，これまで約 3 年間にわたり活動している。フライアッシュ委員会での検討内容は，**図－1.16** に示すように，大きく 2 つある。1 つは北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートに関する実用化検討であり，もう 1 つは実用化検討の成果を踏まえた利用方策の検討である。本研究の役割は，前者の実用化検討に相当する。また，本研究の目的は，「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実用化」に関して，フライアッシュ委員会で蓄積された膨大なデータによる多面的な検証を行うことである。具体的には，北陸産分級フライアッシュの品質の検証，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質の検証，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性の検証，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証，および，これらの検証結果を踏まえた総合評価である。



図－1.14 フライアッシュ委員会の構成



図－1.15 フライアッシュ委員会の概略工程



図－1.16　これまでの基礎研究からフライアッシュ委員会に至るフロー図

1.3 本論文の構成

本論文の題目は,「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの性能評価と実用化に関する研究」である。本論文の構成を**図－1.17** に示す。論文は，第 1 章から第 6 章までの 6 章で構成されており，各章の概要は以下のとおりである。

「第 1 章 序　論」では，北陸地方が抱える深刻な ASR 問題を提起し，北陸の地域特性を反映した「地産地消」,「エネルギーセキュリティー」,「コンクリート構造物の長寿命化」，の 3 つの観点から，「北陸地方のコンクリートに，フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュの使用を標準化する」という対策が推奨されることについて述べた。また，本研究の目的と本論文の構成を示した。

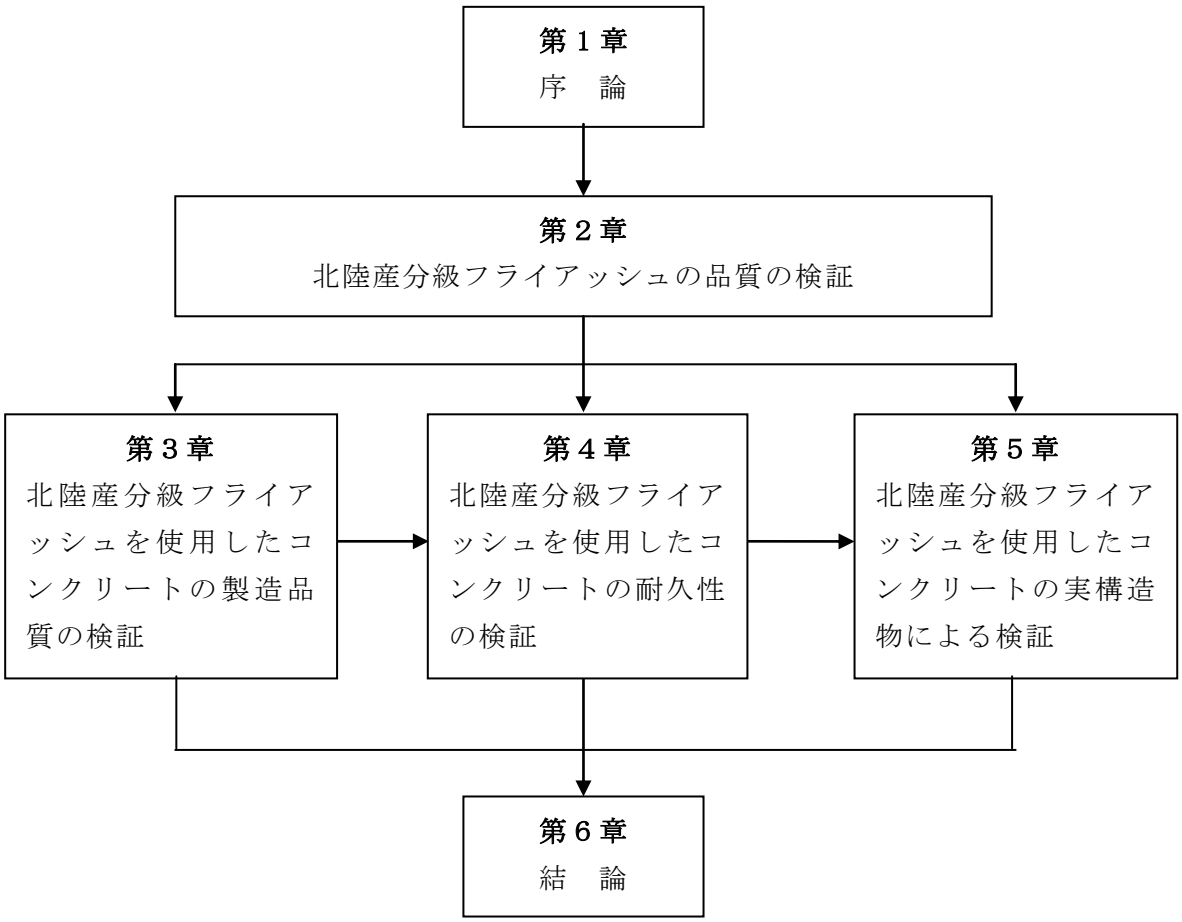
「第 2 章 北陸産分級フライアッシュの品質の検証」では，北陸産分級フライアッシュの製造技術を紹介し，その技術により得られた北陸産分級フライアッシュの品質管理データの分析と同一サンプルを用いた分級効果確認試験の結果により，北陸産分級フライアッシュの品質について検証した。

「第 3 章 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質の検証」では，北陸産分級フライアッシュと北陸 3 県の代表的骨材を用いた室内試験および実機試験により配合を決定し，その配合によるコンクリートと汎用コンクリートとの比較試験（室内試験）により，施工性と強度発現性の観点から，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品質について検証するとともに，強度発現性に関しては，さらに，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善メカニズムについても考察した。

「第 4 章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性の検証」では，コンクリートの耐久性に対する影響が大きい，収縮性能，水和発熱性能，ASR 抑制性能，遮塩性能，中性化抑制性能，凍害抵抗性能の 6 項目について，汎用コンクリートとの比較試験（室内試験）を行い，それぞれの性能評価により，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性について検証した。

「第 5 章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証」では，北陸 3 県および国交省から提供を受けた試験施工により，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートと汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）との比較試験（実構造物）を実施した。また，富山県と石川県より提供を受けたモデル工事により，様々な構造物や異なる施工時期において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの適用性を検討した。これらの結果により，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートが，実際のコンクリート構造物に適用できるかどうかを検証した。

「第 6 章　結　論」では，本研究で得られた結論を総括するとともに，今後の課題と展望について述べた。



図－1.17 本論文の構成図

【参考文献】

1) T. Hashimoto and K. Torii: The development of highly durable concrete using classified fine fly ash in Hokuriku District, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.312-321, 2013.
2) T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh and K. Torii :A Development of Environmentally-friendly and Highly-durable concrete Using Classified Fly Ash, Concrete Innovation Conference CIC2014,CD-R12pages,2014.
3) K. Torii, T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh : The effective utilization of classified fine fly ashes for production of highly-durable concrete mixtures, 3rd Inter. Conf. on Sustainable Construction Materials & Technologies, SCMT3 Prof.Hamada sessions, pp.109-118, 2013.
4) 参納千夏男，橋本徹，長山明：電力土木コンクリート構造物の劣化実態調査，電力土木，No.333，pp.47-51，2008.
5) 参納千夏男，橋本徹，長山明：コンクリート劣化診断カルテを利用した水力発電設備の維持管理，電力土木，No.350，pp.77-81，2010.
6) 参納千夏男，久保哲司，橋本徹：コンクリートの ASR 簡易診断手法「ゲルフルオレッセンス法」の開発，電力土木，No.368，pp.95-99，2013.
7) 富山県土木部道路課：富山県橋梁長寿命化修繕計画，2011.2，http://www.pref.toyama.jp/cms_pfile/00010308/00390524.pdf
8) 石川県土木部道路整備課：石川県の橋梁長寿命化修繕計画，2009.3，http://www.pref.ishikawa.lg.jp/michi/documents/hashi203.pdf
9) 福井県土木部道路保全課：福井県橋梁の長寿命化に向けて，2013.3，https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/hozen/kyouryou_d/fil/003.pdf
10) 大代武志:河川産骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の維持管理に関する研究，金沢大学博士論文，pp.22-33，2009.
11) 鳥居和之：コンクリートの長寿命化への提言，橋梁と基礎，Vol.42，No.8，pp.82-84，2008.
12) 鳥居和之，大代武志，山戸博晃，平野貴宣：石川県の反応性骨材と ASR 劣化構造物のデータベース化，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1017-1022，2008.
13) 大代武志:河川産骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の維持管理に関する研究，金沢大学博士論文，p.34，2009.
14) 鳥居和之，宮村雅之，湊俊彦，西川元気：能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策，コンクリート工学，Vol.46，No.4，pp.27-33，2008.
15) 樽井敏三,鳥居和之:アルカリシリカ反応による鉄筋の破断機構,材料と環境,Vol.59，pp.143-150，2010.
16) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書（第一編），1988.11.
17) 湊俊彦：能登有料道路におけるアルカリシリカ反応が発生した橋梁の実態調査と維持管理に関する研究，金沢大学博士論文，pp.6-12，2013.
18) 大代武志，平野貴宣，鳥居和之：富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1251-1256，2007.
19) 大代武志，鳥居和之，平野貴宣：川砂・川砂利を使用したコンクリートの ASR 劣化の

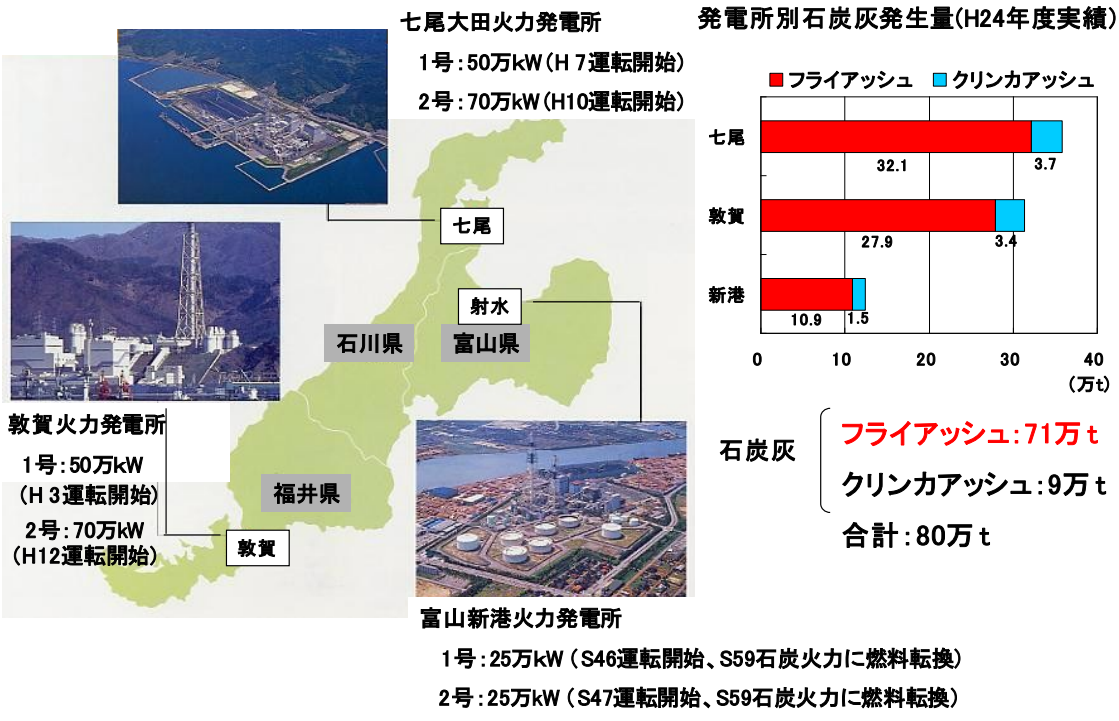
岩石・鉱物学的調査，セメント・コンクリート論文集，Vol.61，pp.310-317，2007.
20）鳥居和之，参納千夏男：骨材資源の活用を目指したアルカリシリカ反応抑制対策の提案，コンクリート工学，Vol.48，No.1，pp.44-47，2010.
21）鳥居和之:フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化－北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信－，電力土木，No.357，pp.11-15，2012.
22）鳥居和之，野村昌弘，本田貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性，土木学会論文集，No.767／Ⅴ-64，pp.185-197，2004.
23）独立行政法人 土木研究所:骨材のアルカリシリカ反応性に関する長期屋外暴露試験結果，土木研究所資料 第 4281 号，2014.3.
24）松田芳範，隈部佳，木野淳一，岩田道敏：アルカリ骨材反応の JR 東日本版抑制策の制定について，コンクリート工学，Vol.50，No.8，pp.669-675，2012.
25）松田芳範：JR 東日本における混和材使用の現状と課題，コンクリート工学, Vol.52, No.5，pp.459-463，2014.
26）井口重信，今井俊一郎：新潟駅付近連続立体交差化工事 フライアッシュを用いたアルカリシリカ反応抑制対策，セメント・コンクリート，No.805，pp.43-48，2014.3.
27）環境省：国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律，2000.5，
https://www.env.go.jp/policy/hozen/green/g-law/archive/law/law.pdf
28）国土交通省：環境物品等の調達の推進を図るための方針，
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/pdf/recyclehou/recycle_rule/000426.pdf#search='%E7%92%B0%E5%A2%83%E7%89%A9%E5%93%81%E7%AD%89%E3%81%AE%E8%AA%BF%E9%81%94%E3%81%AE%E6%8E%A8%E9%80%B2%E3%82%92%E5%9B%B3%E3%82%8B%E3%81%9F%E3%82%81%E3%81%AE%E6%96%B9%E9%87%9D'
29）リデ゛ュース・リユース・リサイクル推進協議会：リデ゛ュース・リユース・リサイクル推進功労者等表彰，過去の表彰実績，
http://www.3r-suishinkyogikai.jp/commend/jisseki.html
30）経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部：電源開発の概要，2010.1.
31）北陸電力株式会社：FACTBOOK 2013，2013.
32）北陸電力株式会社：北陸電力グループ CSR レポート 2013，2013.
33）橋本徹，伊藤始，水上隆司：石炭灰を利用した再生路盤材（造粒物）の研究，電力土木，No.356，pp.35-38，2011.
34）日経 BP 社:これから始めるコンクリート補修講座,日経コンストラクション, pp.20-25, 2002.
35）参納千夏男：フライアッシュによるコンクリートのアルカリシリカ反応の抑制対策に関する研究，金沢大学博士論文，2007.
36）参納千夏男，橋本徹，稲垣崇秀，鳥居和之：RC 試験体の長期屋外暴露試験におけるフライアッシュの ASR 抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1037-1042，2011.
37）橋本徹，久保哲司，参納千夏男：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に向けた取組み, 電力土木, No.361, pp.56-60, 2012.

38) 矢島典明：最近のフライアッシュ事情について，コンクリート工学, Vol.52，No.5, pp.393-398，2014.
39) 日本フライアッシュ協会：フライアッシュコンクリートの特長, http://www.japan-flyash.com/fconcrete.html
40) （社）日本建築学会：フライアッシュセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2007.
41) （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.
42) （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.

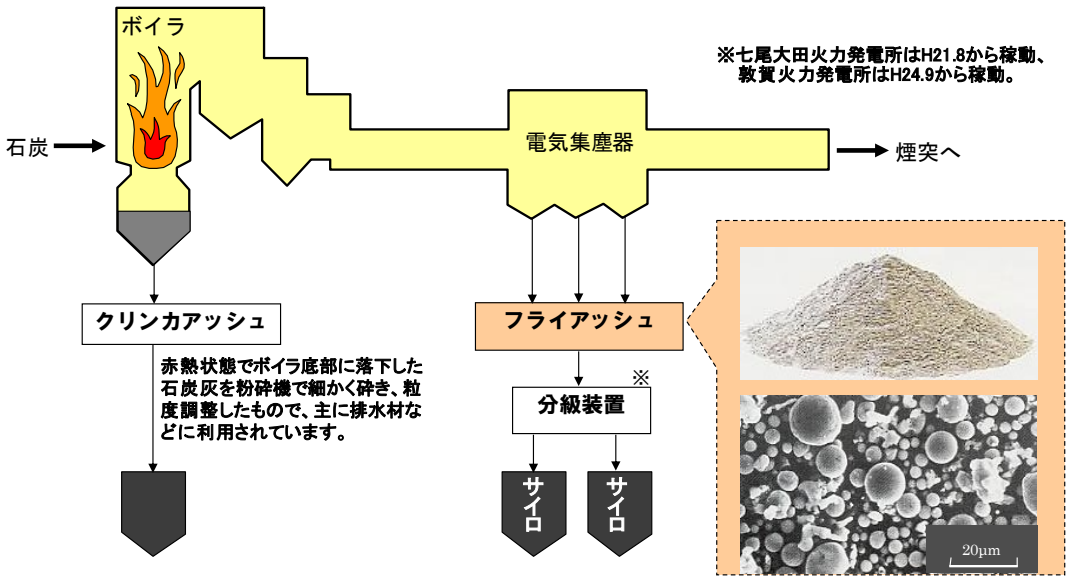
第２章　北陸産分級フライアッシュの品質の検証

2.1 概　説

北陸地方には，**図-2.1** に示すように，富山県に富山新港火力発電所（1 号機：25 万 kW，2 号機：25 万 kW），石川県に七尾大田火力発電所（1 号機：50 万 kW，2 号機：70 万 kW），福井県に敦賀火力発電所（1 号機：50 万 kW，2 号機：70 万 kW）といった石炭火力発電所が北陸 3 県に 1 箇所ずつある。これらの発電所から発生する石炭灰発生量は，2012 年度（平成 24 年度）の実績で合計約 80 万 t に達しており，そのうちの約 9 割がフライアッシュ（Fly Ash）である。フライアッシュは，**図-2.2** に示すように，石炭火力発電所において石炭をボイラーで燃焼したときに産出される石炭灰のうち，ボイラーから飛来して電気集塵器に捕集されたものであり，その特性としては，写真にみられるように形状が球形微粒子であることと，主成分が二酸化けい素（SiO_2：以下，シリカ）と酸化アルミニウム（Al_2O_3：以下，アルミナ）であることが挙げられる。これらの特性により，フライアッシュをコンクリートに混和した場合，コンクリートの施工性や耐久性が向上すると言われている[1)]。これは，フライアッシュが球形微粒子であることで，そのボールベアリング効果により，フレッシュコンクリートの流動性などが向上することと，フライアッシュの主成分であるシリカ・アルミナと，セメントの水和反応で生成する水酸化カルシウムとの反応（ポゾラン反応）により，硬化コンクリートの蜜実性などが増加するためである。フライアッシュのこれらの特性を踏まえ，北陸地方では，地域の問題の解決策として，コンクリートへのフライアッシュの有効活用が求められている。



図－2.1 北陸地方の石炭火力発電所の状況



図－2.2 フライアッシュの生成概念図

このような状況を踏まえ，北陸地方では，地域にある七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所のフライアッシュを対象とし，北陸産分級フライアッシュの製造が始まっている。ここで，富山新港火力発電所のフライアッシュを対象から外したのは，発電所の年式が古く，過去に石油から石炭に燃料転換した経緯があり，高品質なフライアッシュの製造が望めないためである。従って，北陸産分級フライアッシュは，既に品質が安定している七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所のフライアッシュを用いて，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」という 2 つの対策により，従来よりも高品質なフライアッシュが製造されていると想定される。しかしながら，実際に，北陸産分級フライアッシュの品質が向上しているかどうかについては，まだ，十分な検証がなされていない。今後，北陸地方のコンクリートにフライアッシュが有効活用されるためには，これまでの品質管理データの分析や新たな試験の実施により，北陸産分級フライアッシュの品質を検証していく必要がある。

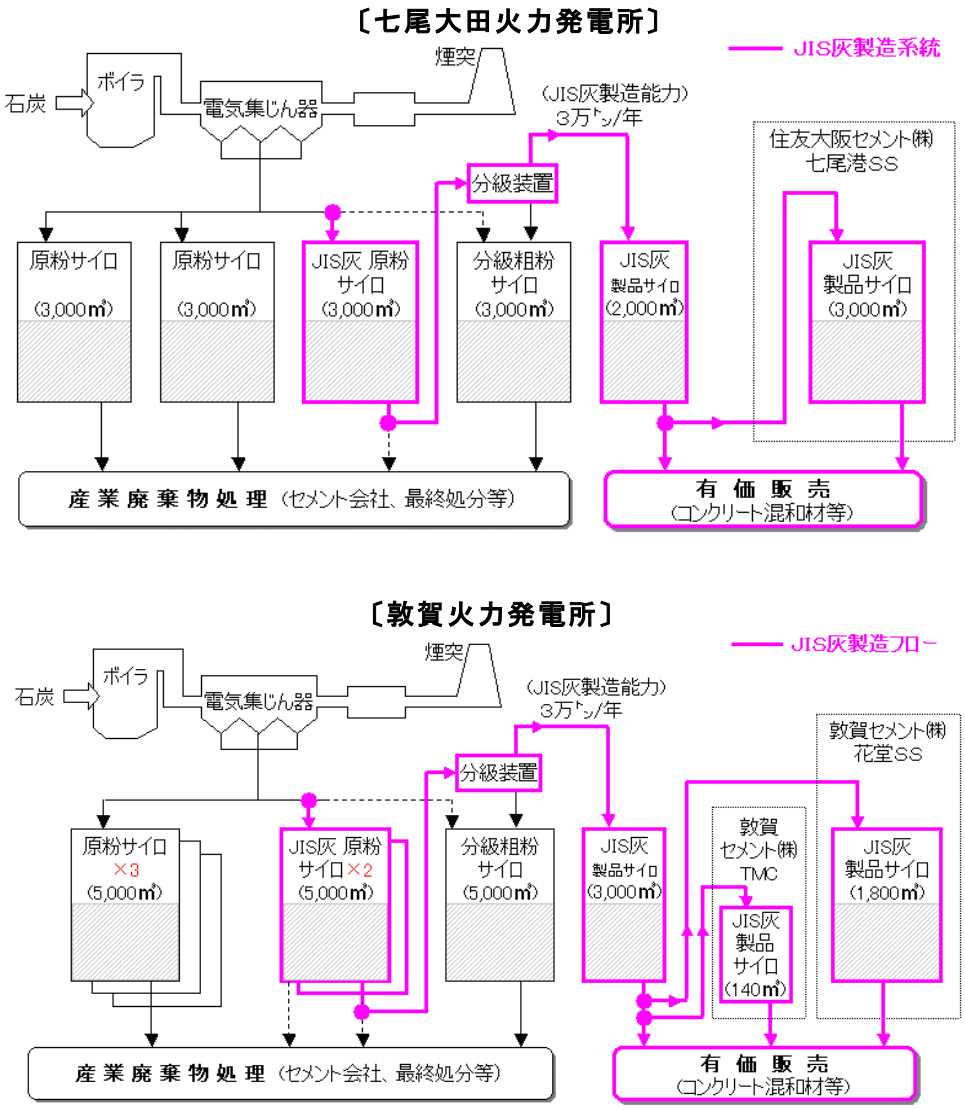
そこで本章では，まず，北陸産分級フライアッシュの製造のポイントとなる，2 つの対策の詳細を説明し，次に，コンクリート用フライアッシュの JIS 規格項目（JIS A6201）について，七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所の品質管理データの分析を行うとともに，炭種や燃焼条件が同じになるように，同一サンプルを用いた分級効果確認試験を実施し，これらの結果を総合的に評価することにより，北陸産分級フライアッシュの品質を検証する。

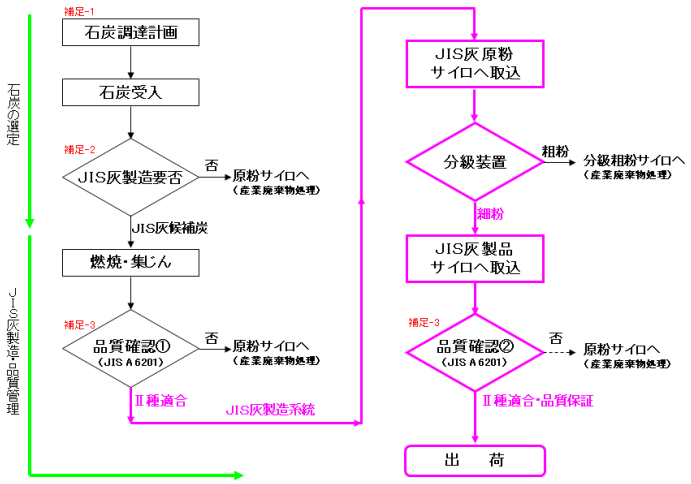
2.2 北陸産分級フライアッシュの製造

北陸産分級フライアッシュは，前述のように「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」という 2 つの対策により，従来よりも高品質なフライアッシュになっていると想定される。ここでは，北陸産分級フライアッシュの製造に欠かせない，これら 2 つの対策の詳細について説明する。

最初に，「品質管理体制の強化」について，JIS 灰製造・品質管理フローを**図-2.3** に示す。このフローに従い品質管理体制を説明すると，まず，これまでの各炭種の品質管理データに基づき，JIS 灰の生産が可能な石炭（以下，JIS 灰候補炭）を選定し，年度の石炭調達計画に反映する。現在，オーストラリア産の石炭のうち，主力の 2 から 3 炭種が JIS 灰候補炭に該当している。この JIS 灰候補炭を燃焼した際に発生するフライアッシュは，電気集塵器の出口のサンプルにより品質管理①のチェックを受ける。ここで，所定の品質管理項目について基準を満足する場合にのみ，フライアッシュは JIS 灰原粉サイロに取り込まれる。JIS 灰原粉サイロに取込まれたフライアッシュ原粉は，その後，分級装置にかけられ，粗粉は分級粗粉サイロに，細粉は JIS 灰製品サイロに取り込まれる。この JIS 灰製品サイロに取込まれた細粉は，品質確認②のチェックを受け，全品質管理項目が基準を満足することを確認した後，北陸産分級フライアッシュとして出荷される。このように，北陸産分級フライアッシュの品質については，オーストラリア産を主体とした JIS 灰候補炭による絞込みと，分級装置にかける前と後の 2 回の品質確認により万全を期している。

次に，「分級装置の導入」について説明する。七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所に導入された分級装置は，いずれも，強制渦遠心分級に分類される方式が採用されている。一般的に，分級とは，流体中を重力，遠心力，または，慣性力で運動する粉体粒子が，粒子径により移動速度に差が生じることを利用して，粉体粒子を粒子の大きさで分別することであり，流体の種類に応じて大きく乾式分級と湿式分級の 2 種類に分けられる[2)]。また，乾式分級は，さらに，その分級原理の違いにより，重力分級，慣性分級，自由渦遠心分級，強制渦遠心分級の 4 種類に分類される[3)]。今回，七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所に導入された分級装置は，比較検討の結果，フライアッシュの取扱いが容易で，分級粒子径領域が比較的細かく，かつ，精密な分級が可能である強制渦遠心分級とした。この方式の分級原理は，**図-2.4** に示すように，分級装置の内部に旋回流を発生させることにより，投入されたフライアッシュ原粉に遠心力を作用させ，遠心力による外向きの力が大きい粗粉は外側に，遠心力による外向きの力が小さい細粉が内側に分けられる。そして，内側に残った細粉は気流とともに分離され，フィルターで捕集し回収される仕組みである。また，分級装置の性能は，分級品の粒子径で 20μ以下の粒子比率が 95%以上となるフライアッシュを，年間 30,000 t 以上生産できることを条件とした。ここで重要となるのは，分級装置の運用であるが，運用はブレーン比表面積を指標とし，フライアッシュ分級品のブレーン比表面積が，フライアッシュ原粉の値より 1,000cm²/g 程度高くなるように調整している。ブレーン比表面積は，活性度指数に影響を与え，さらに，コンクリートの耐久性に関わる重要な指標であるとともに，JIS A6201 において，「品質の均一性」を唯一規定（ブレーン比表面積：提出見本±450cm²/g）されている項目である。従って，分級装置の運用において，ブレーン比表面積を指標とすることは，合理的かつ効率的な運用であるといえる。

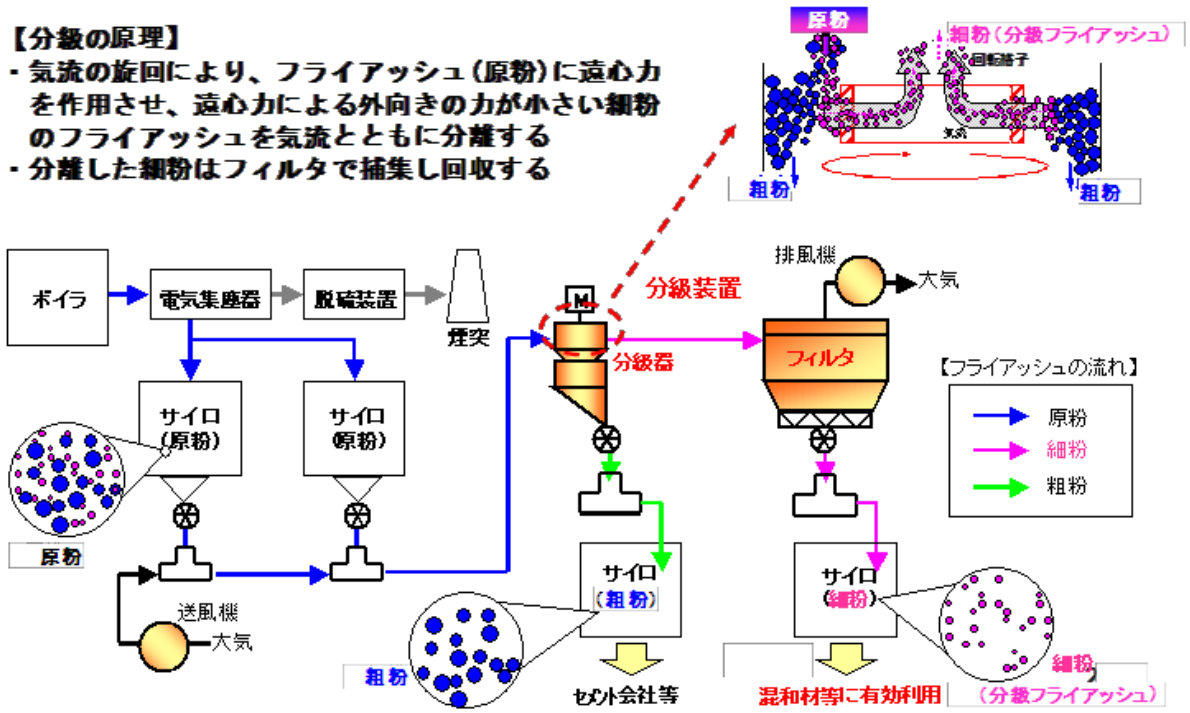




JIS 灰製造フロー

		品質確認 ①	品質確認 ②
採取箇所		電気集じん器出口	JIS灰製品サイロ出口
頻　度		JIS灰製造時、炭種切替毎	1回/月
確認項目（JIS A 6201）	二酸化けい素	○	○
	湿分	○	○
	強熱減量	○	○
	密度	○	○
	粉末度 45μ ふるい残分	○	○
	粉末度 比表面積	○	○
	フロー値比	－	○
	活性度指数 材齢28日	－	○
	活性度指数 材齢91日	－	○
メチレンブルー吸着量		○	○
サンプル保管		－	○

図－2.3 JIS 灰製造・品質管理フロー



図－2.4 強制渦遠心分級の原理

2.3 北陸産分級フライアッシュの品質管理データ [4)～8)]

2.3.1 北陸産分級フライアッシュの JIS 規格

北陸産分級フライアッシュの品質は，「JIS A6201 コンクリート用フライアッシュ」[9)]で規定された規格のうち，JIS Ⅱ種の規格を保証している。JIS Ⅱ種の規格は，コンクリート用フライアッシュとして，市場で標準的に使用される規格であり，コンクリートに混和した場合に，流動性の向上や耐久性の向上などが十分に期待できる規格である [10),11)]。コンクリート用フライアッシュの JIS 規格を**表－2.1**[9)]に，用途・性能等を**表－2.2**[10)]に示す。

表－2.1 JIS A6201 コンクリート用フライアッシュの規格 [9)]

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/cm³)		1.95以上	1.95以上	1.95以上	1.95以上
粉末度	45μ mふるい残分(%)	10以下	40以下	40以下	70以下
	比表面積(cm²/g)	5000以上	2500以上	2500以上	1500以上
フロー値比(%)		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	60以上
	材齢91日	100以上	90以上	90以上	70以上

表－2.2 コンクリート用フライアッシュの用途・性能等 [10)]

種　別	用　途　・　性　能　等
フライアッシュⅠ種	混入することにより、特にコンクリートの高強度、流動性付与、アルカリシリカ反応抑制に効果があるもの。また、初期強度発現性も無混入の場合と遜色ないもの。
フライアッシュⅡ種	標準的なフライアッシュで、混入することにより、特にコンクリートの水和発熱抑制、長期強度の改善効果があるもの。また、コンクリートへの流動性付与、アルカリシリカ反応抑制について、無混入の場合と比較して十分に効果が発揮されるもの。
フライアッシュⅢ種	混入することにより、特にコンクリートの水和発熱抑制、アルカリシリカ反応抑制、長期強度の改善に、Ⅱ種と同等の効果があるもの。ただし、練り混ぜ時に、コンクリートの流動性、空気連行性に関して配慮が必要。
フライアッシュⅣ種	水和発熱抑制に対しⅡ種と同等の効果があり、アルカリシリカ反応抑制も期待出来るもの。強度発現の点で低強度コンクリート、工場製品等に使用可能なもので、鉄筋コンクリート用の普通コンクリートに使用する場合は、事前に強度の発現を確認して使用するもの。

2.3.2 七尾大田火力発電所の品質管理データ

七尾大田火力発電所から産出されるフライアッシュの品質管理データについて，分級前（H19.4 から H21.7 の約 2 年間のデータ）と分級後（H22.1 から H25.12 の約 4 年間のデータ）の平均値と標準偏差を**表-2.3** に，JIS 規格項目ごとの品質管理データの推移（H19.4 から H25.12 のデータ）を**図-2.5** から**図-2.11** に示す。表より，分級後において，明らかな品質の向上が確認された JIS 規格項目は，密度，粉末度，フロー値比，活性度指数の 4 項目である。このうち，粉末度（ブレーン比表面積）は，分級の運用条件どおりにフライアッシュ原粉の値より 1,000cm²/g 程度高くなっており，分級の運用が良好であることを示している。また，残りの 3 項目は，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる重要な指標である。一方，分級後において，明らかな品質の低下が確認された JIS 規格項目は，二酸化けい素の 1 項目である。これは，分級後に炭種が変更となったことが影響したと考えられるが，分級後においても JIS I 種の規格を満足しており，品質上の問題はない。なお，後述する「2.4 北陸産分級フライアッシュの分級効果確認試験」において，炭種や燃焼条件を同じにした場合には，分級後の二酸化けい素の割合が増加していることを確認している。また，分級前後において，明らかな品質の変化が確認されなかった JIS 規格項目は，湿分，強熱減量の 2 項目である。これらの項目は，分級前から既に JIS I 種の規格を満足している。これらのことから，七尾大田火力発電所から産出されるフライアッシュを用いた北陸産分級フライアッシュは，対策により，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる重要な指標が向上し，その他の指標への悪影響がないことが確認されたことから，従来よりも高品質なフライアッシュになっていると考えられる。

表－2.3 分級前後における JIS 規格項目の比較

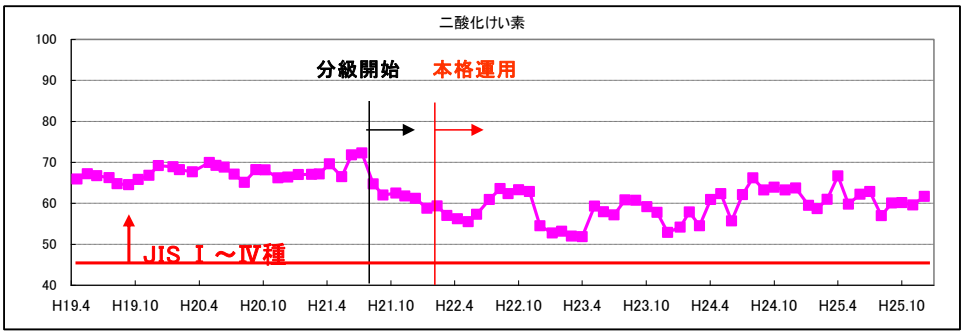
JIS項目		分級後（H22.1～H25.12）		分級前（H19.4～H21.7）		※ 判　定
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
二酸化けい素(%)		59．3	3．7	67．6	1．9	×
湿分(%)		（＜0．2）	－	（＜0．1）	－	△
強熱減量(%)		2．0	0．3	2．1	0．4	△
密度(g/cm³)		2．38	0．04	2．24	0．05	○
粉末度	45μ mふるい残分(%)	0．6	0．4	16．2	4．2	○
	比表面積(cm²/g)	4，717	189	3，725	204	
フロー値比(%)		107	2	100	1	○
活性度指数	材齢28日	93	6	83	2	○
	材齢91日	105	4	95	3	

※　【判定の凡例】

○：分級後に標準偏差以上に品質が向上

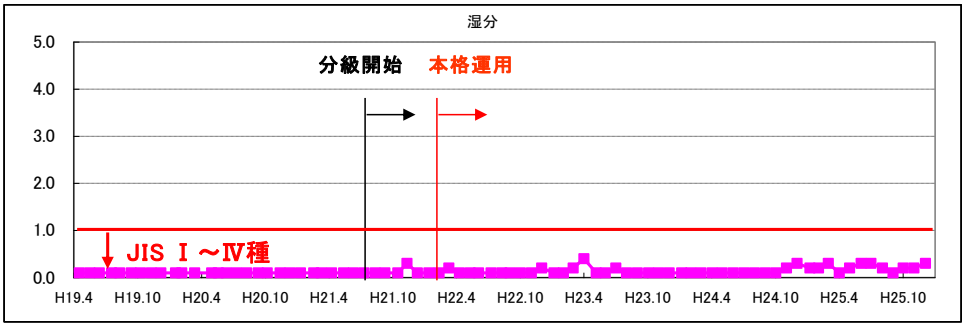
△：分級前後での変化が標準偏差以内

×：分級後に標準偏差以上に品質が低下



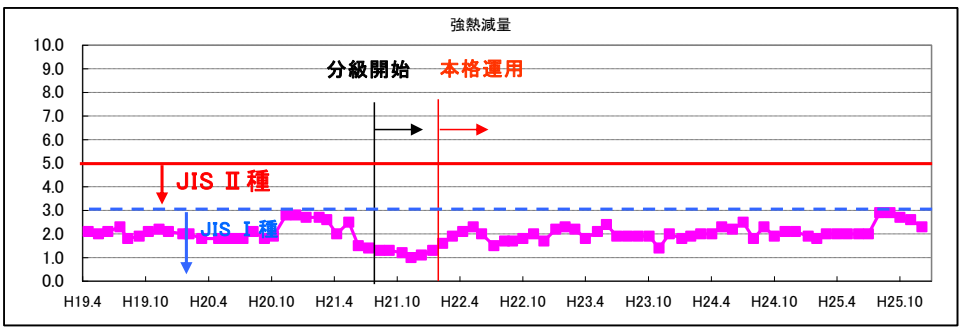
	七尾	
	分級前（～H21.7）	分級後（H22.1～）
max	72.3	66.7
min	64.6	51.9
ave	67.6	59.3
標準偏差	*1.9*	*3.7*
JIS Ⅱ種	45.0以上	

図－2.5 二酸化けい素の推移データ



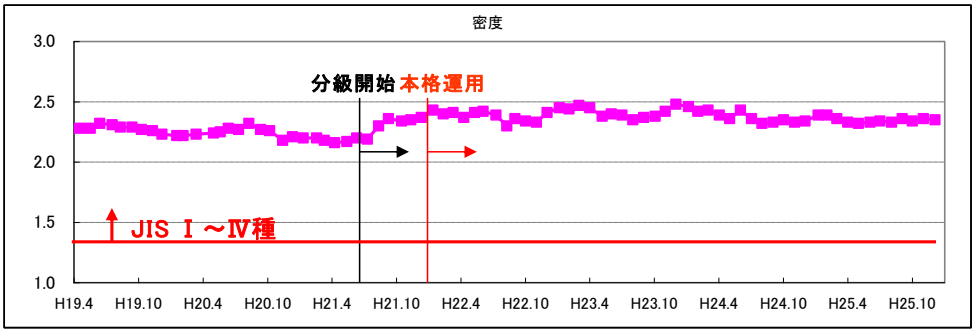
	七尾	
	分級前（～H21.7）	分級後（H22.1～）
max	0.1	0.4
min	<0.1	<0.1
ave	<0.1	<0.2
標準偏差	－	－
JIS Ⅱ種	1.0%以下	

図－2.6 湿分の推移データ



	七尾	
	分級前（～H21.7）	分級後（H22.1～）
max	2.8	2.9
min	1.4	1.3
ave	2.1	2.0
標準偏差	*0.4*	*0.3*
JIS Ⅱ種	5.0%以下	

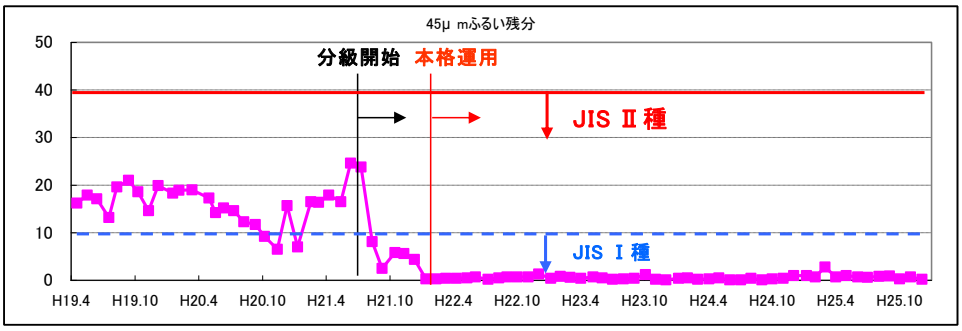
図－2.7 強熱減量の推移データ



	七尾	
	分級前（～H21.7）	分級後（H22.1～）
max	2.32	2.48
min	2.16	2.30
ave	2.24	2.38
標準偏差	*0.05*	*0.04*
JIS Ⅱ種	1.95以上	

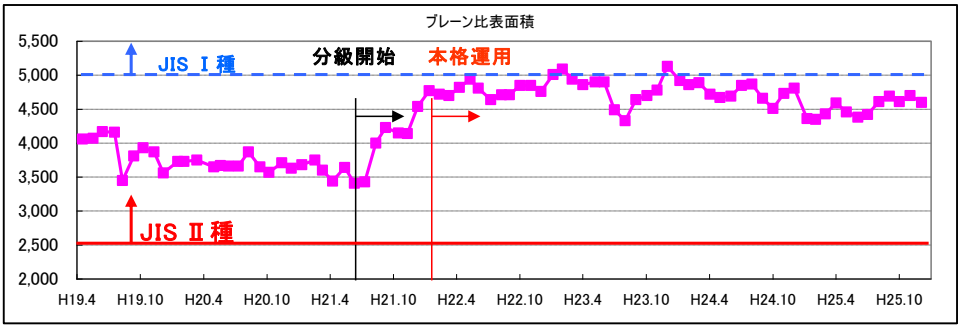
図－2.8 密度の推移データ

【45μ mふるい残分(%)】



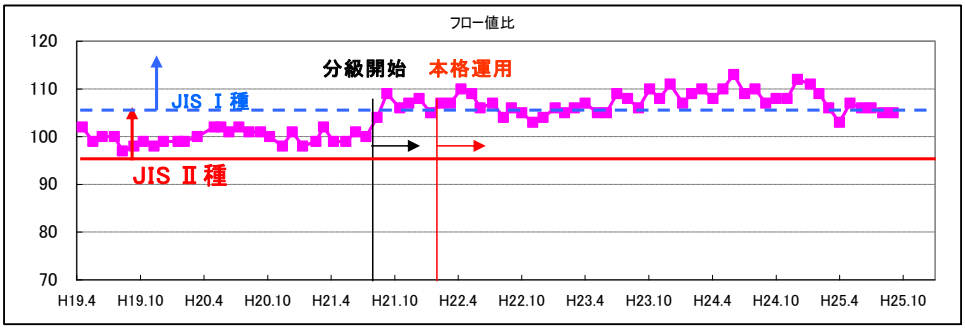
	七尾	
	分級前（～H21.7）	分級後（H22.1～）
max	24.6	2.8
min	6.5	0.1
ave	16.2	0.6
標準偏差	*4.2*	*0.4*
JIS Ⅱ種	40以下	

【比表面積(cm²/g)】



	七尾	
	分級前（～H21.7）	分級後（H22.1～）
max	4,170	5,130
min	3,410	4,330
ave	3,725	4,717
標準偏差	*204*	*189*
JIS Ⅱ種	2,500以上	

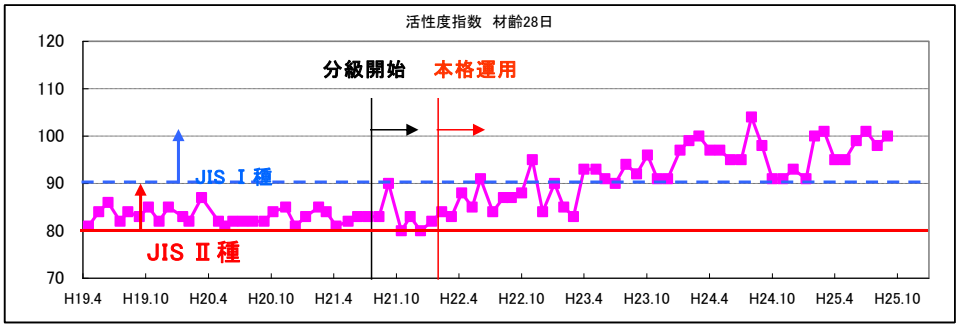
図－2.9 粉末度の推移データ



	七 尾	
	分級前 (～H21.7)	分級後 (H22.1～)
max	102	113
min	97	103
ave	100	107
標準偏差	*1*	*2*
JIS Ⅱ種	95以上	

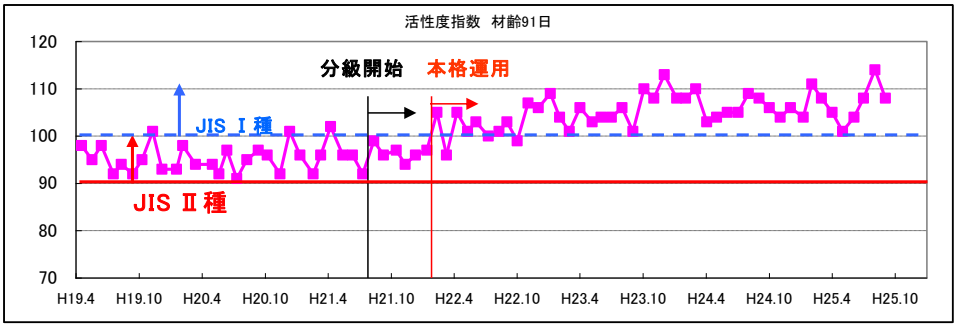
図－2.10 フロー値比の推移データ

【材齢28日(%)】



	七 尾	
	分級前 (～H21.7)	分級後 (H22.1～)
max	87	104
min	81	82
ave	83	93
標準偏差	*2*	*6*
JIS Ⅱ種	80以上	

【材齢91日(%)】



	七 尾	
	分級前 (～H21.7)	分級後 (H22.1～)
max	102	114
min	91	96
ave	95	105
標準偏差	*3*	*4*
JIS Ⅱ種	90以上	

図－2.11 活性度指数の推移データ

2.3.3 敦賀火力発電所の品質管理データ

敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュの JIS 規格項目の品質管理データに関して，分級前（H19.4 から H24.11 の約 5 年間のデータ）と分級後（H24.12 から H25.12 の約 1 年間のデータ）の平均値と標準偏差を**表-2.4** に，JIS 規格項目ごとの品質管理データの推移（H19.4 から H25.12 のデータ）を**図-2.12** から**図-2.18** に示す。表より，分級後において，明らかな品質の向上が確認された JIS 規格項目は，密度，粉末度，フロー値比，活性度指数の 4 項目である。このうち，粉末度（ブレーン比表面積）は，分級の運用条件どおりにフライアッシュ原粉の値より 1,000cm²/g 程度高くなっており，分級の運用が良好であることを示している。また，残りの 3 項目は，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる重要な指標である。一方，分級後において，明らかな品質の低下が確認された JIS 規格項目はない。また，分級前後において，明らかな品質の変化が確認されなかった JIS 規格項目は，二酸化けい素，湿分，強熱減量の 3 項目である。これらの項目は，分級前から既に JIS Ⅰ種の規格に近い値を満足している。これらのことから，敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュを用いた北陸産分級フライアッシュは，対策により，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる重要な指標が向上し，その他の指標への悪影響がないことが確認され，従来よりも高品質なフライアッシュになっていると考えられる。

表－2.4 分級前後における JIS 規格項目の比較

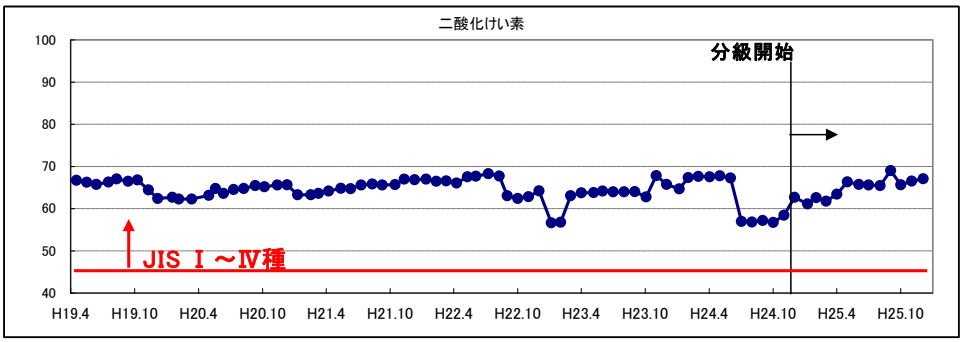
JIS項目		分級後（H24.12～H25.12）		分級前（～H24.11）		※ 判　定
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
二酸化けい素(%)		64．8	2．2	64．4	3．0	△
湿分(%)		（＜0．1）	－	（＜0．1）	－	△
強熱減量(%)		3．2	0．1	3．6	0．5	△
密度（g/cm³）		2．29	0．01	2．22	0．02	○
粉末度	45μ mふるい残分(%)	1．4	0．3	17．4	4．9	○
	比表面積(cm²/g)	4，635	180	3，780	225	
フロー値比(%)		104	3	101	2	○
活性度指数	材齢28日	86	1	82	2	○
	材齢91日	100	2	96	2	

※　【判定の凡例】

○：分級後に標準偏差以上に品質が向上

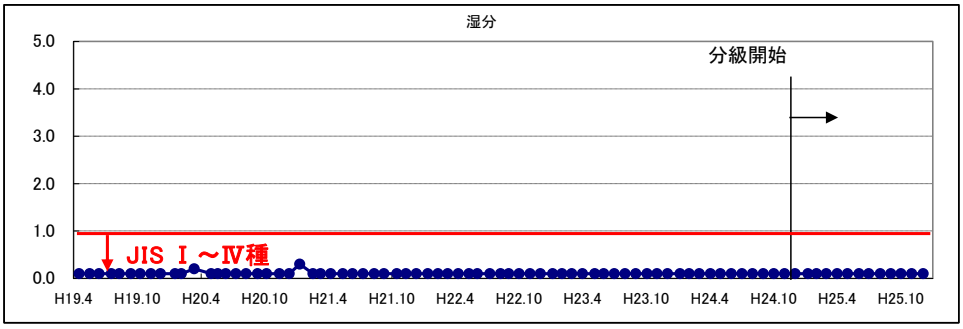
△：分級前後での変化が標準偏差以内

×：分級後に標準偏差以上に品質が低下



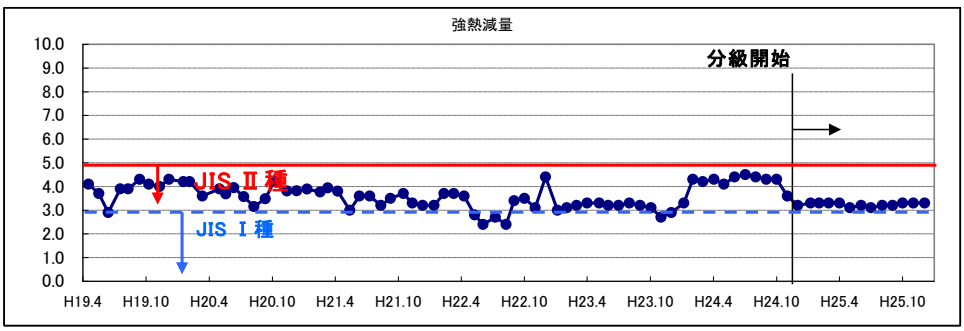
	敦賀	
	分級前 (～H24.11)	分級後 (H24.12～)
max	68.3	69.0
min	56.6	61.1
ave	64.4	64.8
標準偏差	*3.0*	*2.2*
JIS Ⅱ種	45.0以上	

図－2.12 二酸化けい素の推移データ



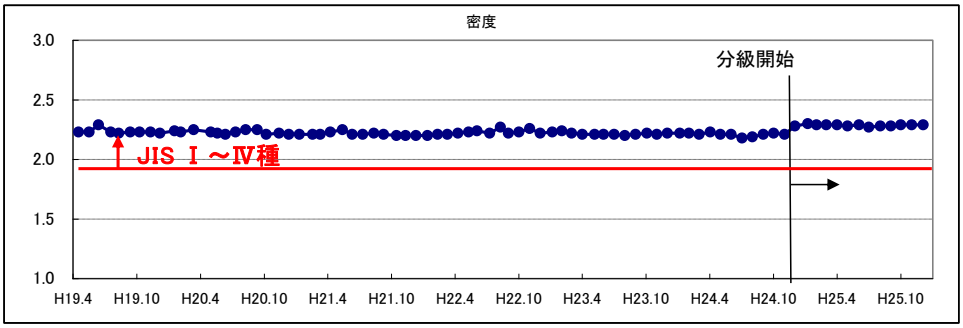
	敦賀	
	分級前 (～H24.11)	分級後 (H24.12～)
max	0.3	0.1
min	<0.1	<0.1
ave	<0.1	<0.1
標準偏差	－	－
JIS Ⅱ種	1.0%以下	

図－2.13 湿分の推移データ



	敦賀	
	分級前 (～H24.11)	分級後 (H24.12～)
max	4.5	3.3
min	2.4	3.1
ave	3.6	3.2
標準偏差	*0.5*	*0.1*
JIS Ⅱ種	5.0%以下	

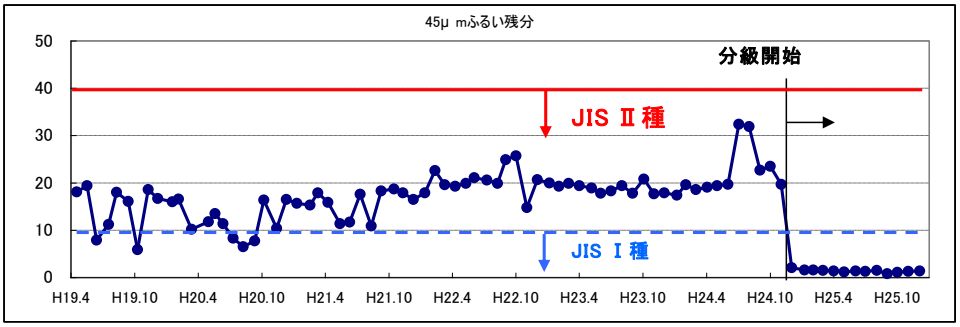
図－2.14 強熱減量の推移データ



	敦賀	
	分級前（～H24.11）	分級後（H24.12～）
max	2.29	2.30
min	2.18	2.27
ave	2.22	2.29
標準偏差	*0.02*	*0.01*
JIS Ⅱ種	1.95以上	

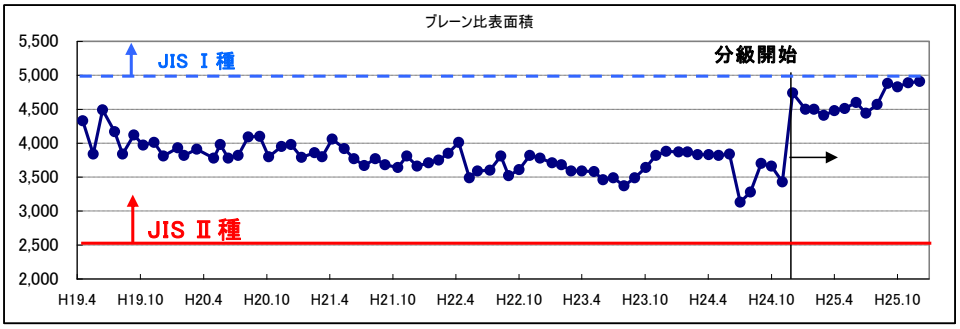
図－2.15 密度の推移データ

【45μ mふるい残分（%）】



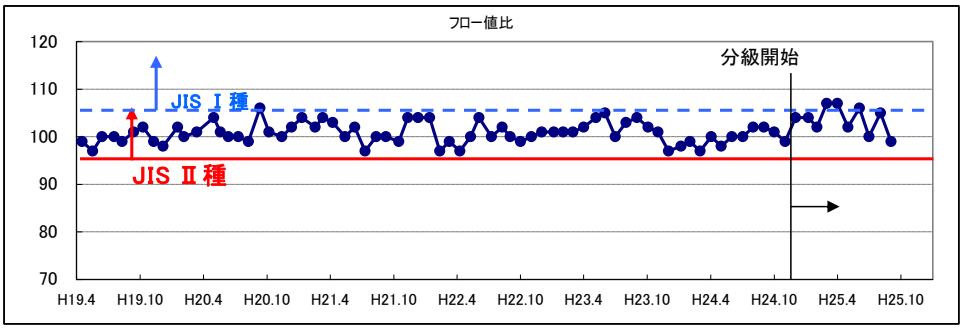
	敦賀	
	分級前（～H24.11）	分級後（H24.12～）
max	32.4	2.1
min	5.9	0.8
ave	17.4	1.4
標準偏差	*4.9*	*0.3*
JIS Ⅱ種	40以下	

【比表面積（cm^2/g）】



	敦賀	
	分級前（～H24.11）	分級後（H24.12～）
max	4,490	4,910
min	3,130	4,410
ave	3,780	4,635
標準偏差	*225*	*180*
JIS Ⅱ種	2,500以上	

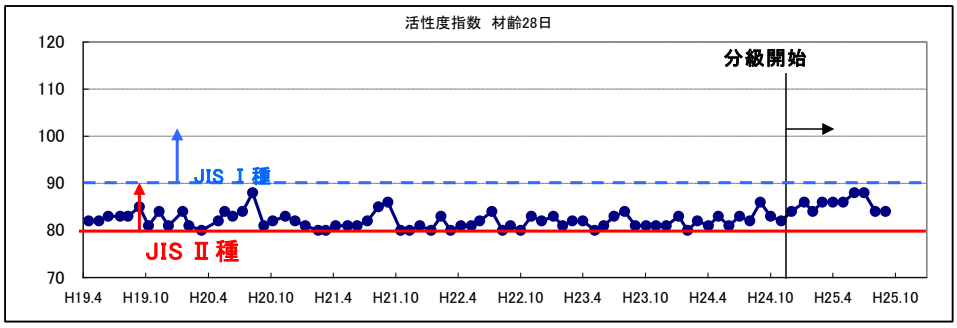
図－2.16 粉末度の推移データ



	敦賀	
	分級前（～H24.11）	分級後（H24.12～）
max	106	107
min	97	99
ave	101	104
標準偏差	*2*	*3*
JIS Ⅱ種	95以上	

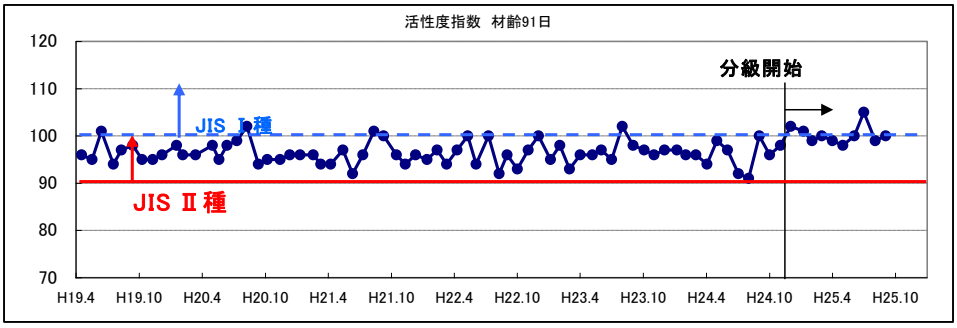
図－2.17 フロー値比の推移データ

【材齢28日(%)】



	敦賀	
	分級前（～H24.11）	分級後（H24.12～）
max	88	88
min	80	84
ave	82	86
標準偏差	*2*	*1*
JIS Ⅱ種	80以上	

【材齢91日(%)】



	敦賀	
	分級前（～H24.11）	分級後（H24.12～）
max	102	105
min	91	98
ave	96	100
標準偏差	*2*	*2*
JIS Ⅱ種	90以上	

図－2.18 活性度指数の推移データ

2.4 北陸産分級フライアッシュの分級効果確認試験 [4)～8)]

2.4.1 分級効果確認試験の概要

「2.3 北陸産分級フライアッシュの品質管理データ」では，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」という 2 つの対策により，北陸産分級フライアッシュの品質が，従来よりも高品質になっていることを確認した。これは，実運用において，2 つの対策が功を奏していることを意味しているが，分級前後で炭種や燃焼条件が一定でないため，純粋な分級による効果はわからない。そこで，炭種や燃焼条件が同じになるように，同一サンプルを用いた分級効果確認試験を試験室レベルで実施した。これらのデータは，今後の製造技術の向上のためにも有益である。試験に用いたフライアッシュは，七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュである。また，試験用の分級機には，実際の分級装置と同じ強制渦遠心分級による方式のもの（クラッシール：N-20 タイプ）を用いた。さらに，実際の運用と同様，フライアッシュ分級品のブレーン比表面積が，フライアッシュ原粉より 1,000cm²/g 程度高くなるよう調整し，試験サンプルを分級した。試験サンプルの分級試験結果を**表-2.5** に示す。表より，分級後の細粉（フライアッシュ分級品）は，原粉（フライアッシュ原粉）より，ブレーン比表面積が 1,000cm²/g 程度高くなっており，実運用の分級条件を確保していることが確認できる。

表－2.5 試験サンプルの分級試験結果

試料名	分級条件				収率（%）		ブレーン比表面積（cm²/g）		
	風量 (m³/min)	回転数 (rpm)	粉体濃度 (kg/m³)	原料挿入量 (kg/hr)	粗粉	細粉	原粉 ①	細粉 ②	②－①
七尾産	22	950	0.2	264	50.5	49.5	3,390	4,380	1,080
敦賀産	20	1,600	0.2	240	47.3	52.7	3,740	4,810	1,070

分級効果を確認するための試験項目は，試験サンプルの分級により得られたフライアッシュ分級品と分級前のフライアッシュ原粉を対象として，物理的性質を確認する項目として，レーザー回折法による粒度分布測定と走査電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）による反射電子像観察，化学的性質を確認する項目として，蛍光 X 線法による化学組成分析（強熱減量を含む）と粉末 X 線回折/リートベルト解析 [12)]による鉱物組成分析，および，密度，フロー値比，活性度指数の 3 つの JIS 規格項目である。

以下，分級前後における物理的性質の変化と化学的性質の変化を考察し，これらの結果を踏まえ，さらに，フライアッシュの JIS 規格項目との関連性やこのフライアッシュを使用したコンクリートに与える影響などについて考察する。

2.4.2 物理的性質および化学的性質の変化

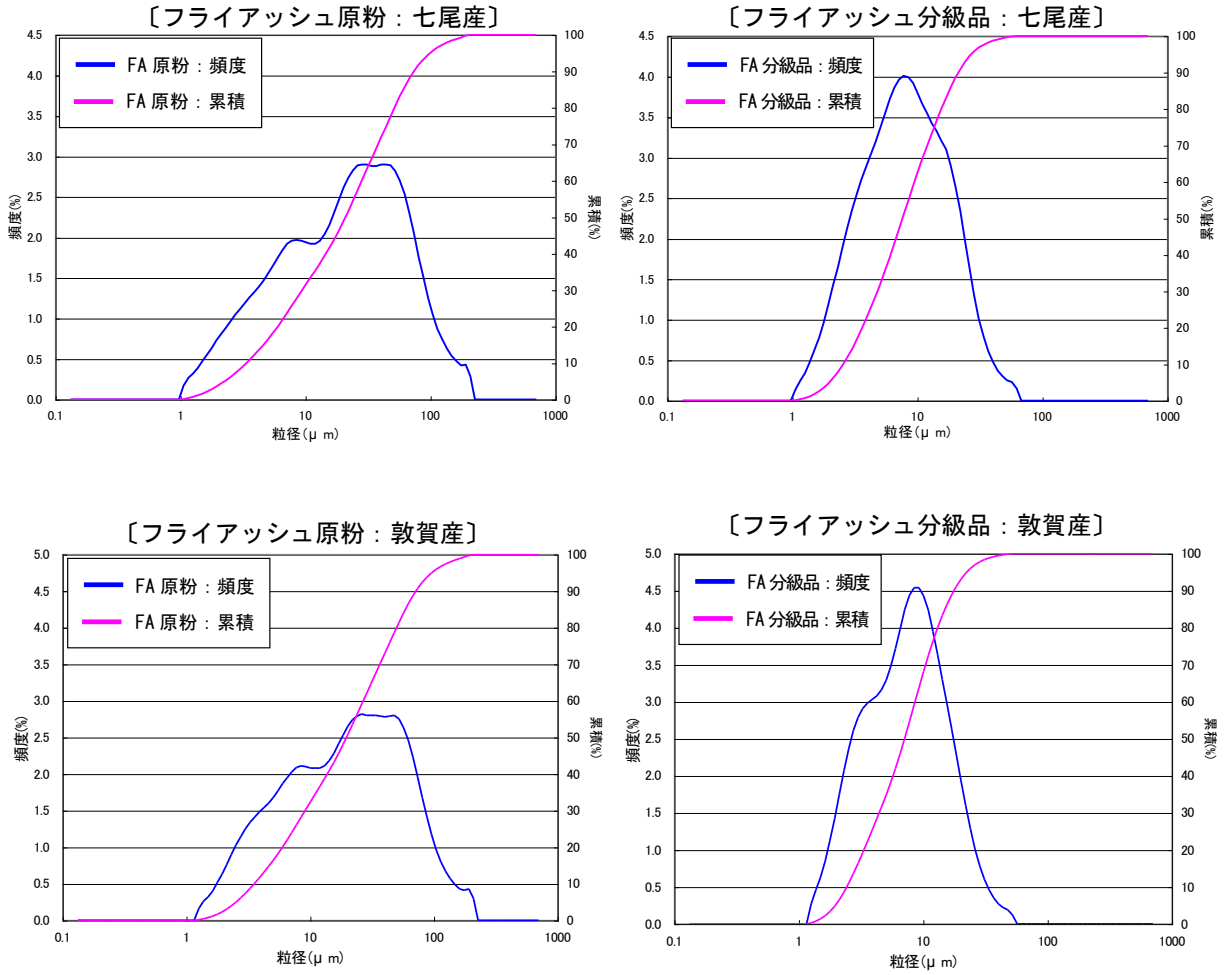
(1) 物理的性質の変化

フライアッシュ原粉とフライアッシュ分級品のレーザー回折法による粒度分布測定結果を**図-2.19** に，走査電子顕微鏡による反射電子像を**図-2.20** に示す。**図-2.19** より，累積 50%のフライアッシュの粒径は，七尾大田火力発電所から産出されるフライアッシュでは，フライアッシュ原粉で 20.86μm であったものがフライアッシュ分級品で 7.61μm に，敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュでは，フライアッシュ原粉で 19.70μm であったものがフライアッシュ分級品で 7.10μm に変化し，フライアッシュ分級品の平均粒径がフライアッシュ原粉の平均粒径の約 1/3 になっていることが確認できる。また，**図-2.20** に示す反射電子像を観察すると，フライアッシュ分級品はフライアッシュ原粉より，粒径の大きな粒子がなくなるとともに，角張った粒子や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。このことは，フライアッシュの密度やフロー値比の向上につながるといわれており [13]，北陸産分級フライアッシュは，分級による物理的性質の変化により，フライアッシュのボールベアリング効果などが向上していると推察される。

(2) 化学的性質の変化

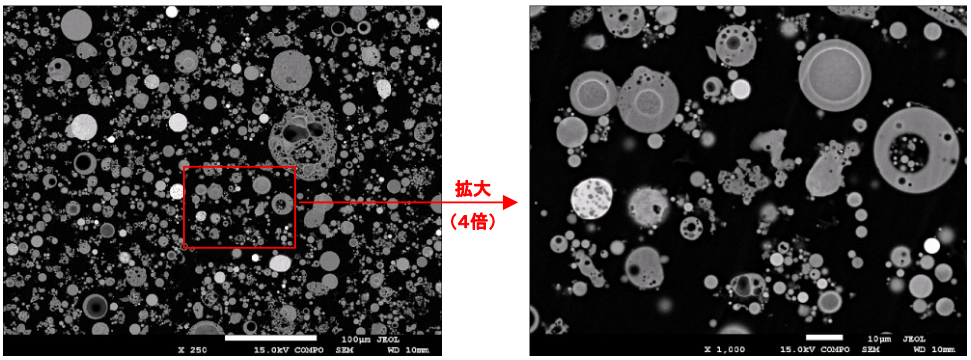
フライアッシュ原粉とフライアッシュ分級品の蛍光 X 線法による化学組成分析結果および強熱減量を**表-2.6** に，粉末 X 線回折/リートベルト解析による鉱物組成分析結果を**表－2.7** および**図-2.21** から**図-2.24** に示す。**表-2.6** より，七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュはともに，フライアッシュ分級品はフライアッシュ原粉より，二酸化けい素（SiO_2）の割合が 1 から 3%高くなっている。このことは，実際の七尾大田火力発電所の品質管理データでは，分級後に二酸化けい素の割合が低くなっていたが，それは炭種や燃焼条件の違いによる可能性が高いことの根拠となる。また，**表－2.7** より，七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュはともに，フライアッシュ分級品はフライアッシュ原粉より，ガラス質成分の割合が 5 から 8%高くなっている。これは，鉱物組成では結晶質成分よりガラス質成分の方がポゾラン反応性は高いといわれていることから [14]，北陸産分級フライアッシュは，分級による化学的性質の変化により，フライアッシュのポゾラン反応性が向上していると推察される。

試料名		粒径（μm）		
		累積 10%	累積 50%	累積 90%
七尾産	フライアッシュ原粉	3.37	20.86	73.84
	フライアッシュ分級品	2.55	7.61	21.29
敦賀産	フライアッシュ原粉	3.54	19.70	71.81
	フライアッシュ分級品	2.44	7.10	17.69



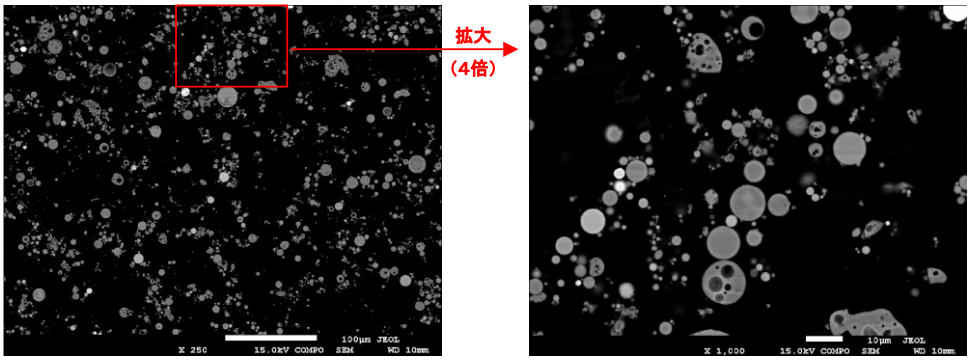
図－2.19 レーザー回折法による粒度分布測定結果

フライアッシュ原粉（七尾産）



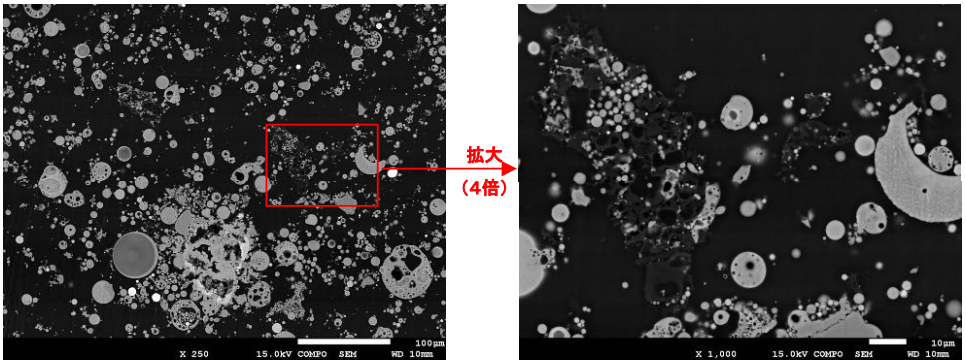
（倍率×250）　　（倍率×1000）

フライアッシュ分級品（七尾産）



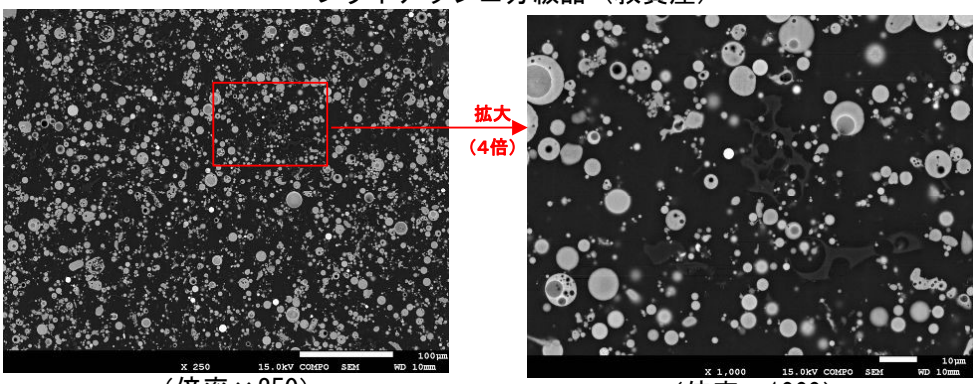
（倍率×250）　　（倍率×1000）

フライアッシュ原粉（敦賀産）



（倍率×250）　　（倍率×1000）

フライアッシュ分級品（敦賀産）



（倍率×250）　　（倍率×1000）

図－2.20 走査電子顕微鏡による反射電子像

表－2.6 蛍光 X 線法による化学組成分析結果および強熱減量

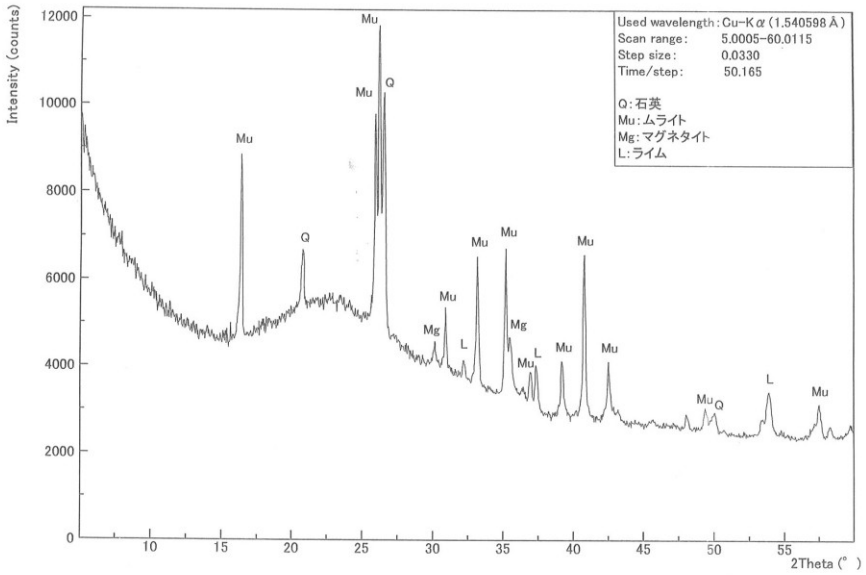
〔単位：%〕

試料名		化学組成分析											強熱減量
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	
七尾産	フライアッシュ原粉	50.93	29.53	8.01	4.36	0.82	0.15	0.25	0.55	1.38	0.86	0.12	1.8
	フライアッシュ分級品	53.60	28.93	6.74	3.20	0.77	0.22	0.30	0.72	1.39	0.98	0.09	2.0
敦賀産	フライアッシュ原粉	56.88	25.90	5.41	1.37	0.88	0.21	0.43	1.28	1.18	0.36	0.06	4.4
	フライアッシュ分級品	57.84	26.43	4.45	1.24	0.81	0.25	0.49	1.41	1.17	0.48	0.05	4.0

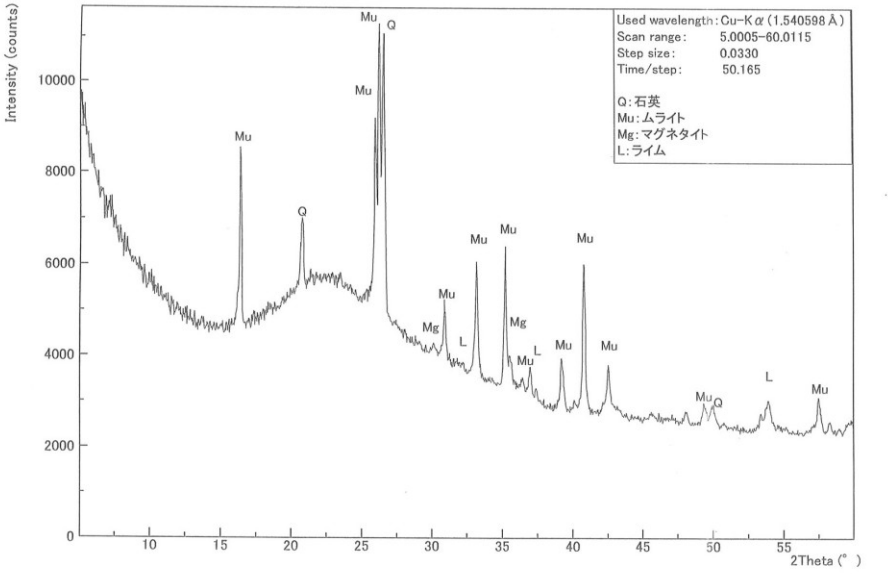
表－2.7 粉末 X 線回折/リートベルト解析[12)]による鉱物組成分析結果

〔単位：%〕

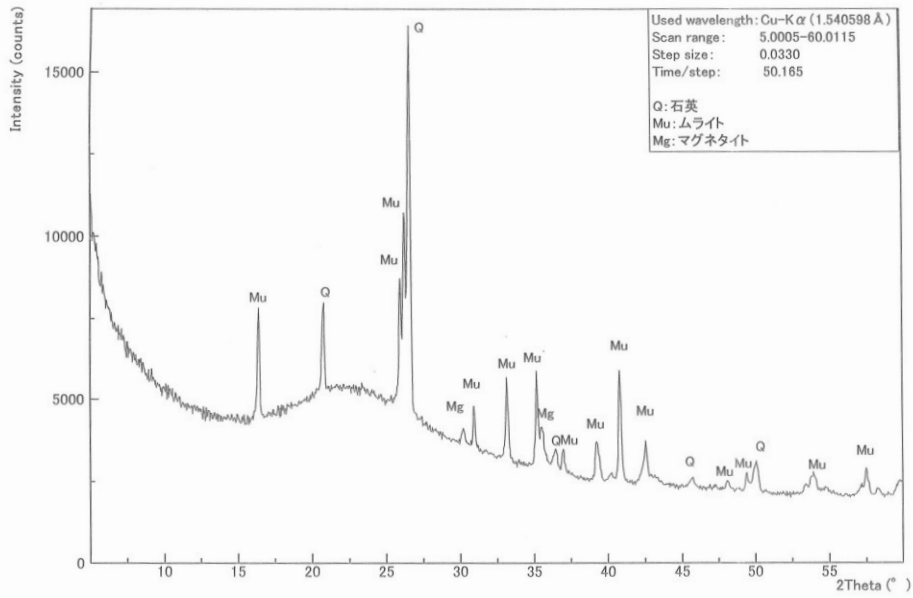
試料名		結晶質成分				ガラス質成分	合計
		石英	ムライト	マグネタイト	ライム		
七尾産	フライアッシュ原粉	5.4	26.7	2.0	0.8	65.1	100.0
	フライアッシュ分級品	5.0	20.6	1.0	0.2	73.2	100.0
敦賀産	フライアッシュ原粉	9.9	22.0	1.4	0.0	66.6	100.0
	フライアッシュ分級品	8.7	19.0	0.7	0.0	71.6	100.0



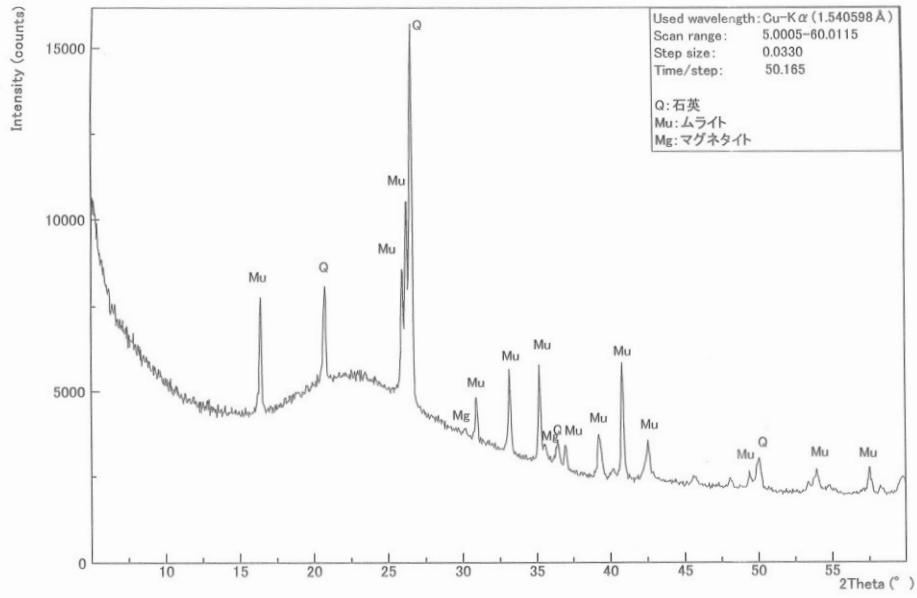
図－2.21 フライアッシュ原粉（七尾産）の粉末 X 線回折結果



図－2.22 フライアッシュ分級品（七尾産）の粉末 X 線回折結果



図－2.23 フライアッシュ原粉（敦賀産）の粉末Ｘ線回折結果



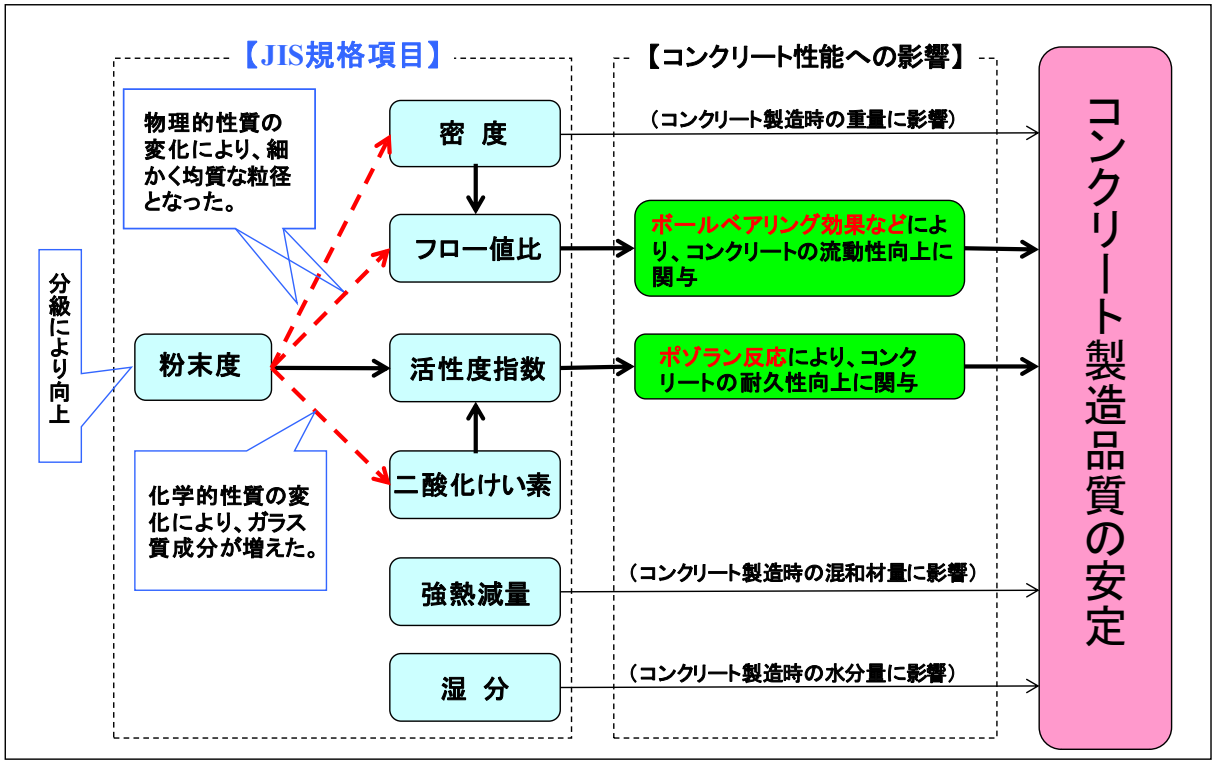
図－2.24 フライアッシュ分級品（敦賀産）の粉末Ｘ線回折結果

2.4.3 北陸産分級フライアッシュの分級効果

分級効果確認試験により得られた，フライアッシュ原粉とフライアッシュ分級品の密度，フロー値比，活性度指数を**表-2.8** に示す。**表-2.8** の分級前後での数値の変化に着目すると，分級により，JIS 規格項目の密度，フロー値比，活性度指数の 3 項目すべての値が大きくなっている。これは，前述のフライアッシュの物理的性質および化学的性質の変化による考察を踏まえると，**図-2.25** に示すように，密度とフロー値比が向上する理由としては，分級による物理的性質の変化により，フライアッシュ粒子が均一で細かくなることによるボールベアリング効果などの向上が寄与していると考えられる。また，活性度指数が向上する理由としては，ブレーン比表面積の増加に加え，分級による化学的性質の変化（二酸化けい素のガラス質成分の増加）によるポゾラン反応性の向上が関わっていると考えられる。さらに，分級効果確認試験での分級前後の値の変化は，実際の七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所の品質管理データの分級前後の値の変化と同程度である。従って，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる重要な指標である密度，フロー値比，活性度指数の 3 項目の品質の向上は，主として分級効果によるものと考えられる。

表－2.8 分級による密度、フロー値比および活性度指数の変化

試料名		密度 (g/cm^3)	フロー値比 (%)	活性度指数(%)	
				材齢 28 日	材齢 91 日
七尾産	フライアッシュ原粉	2.36	101	83	95
	フライアッシュ分級品	2.43	106	91	104
敦賀産	フライアッシュ原粉	2.23	101	81	95
	フライアッシュ分級品	2.36	105	87	105



図－2.25 分級効果を考慮した JIS 規格項目の関連図

2.5 まとめ

本章では，北陸産分級フライアッシュの製造のポイントとなる，2 つの対策の詳細を説明し，さらに，コンクリート用フライアッシュの JIS 規格項目（JIS A6201）について，七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所の品質管理データの分析を行うとともに，炭種や燃焼条件が同じになるように，同一サンプルを用いた分級効果確認試験を実施し，これらの結果を総合的に評価することにより，北陸産分級フライアッシュの品質を検証した。

その結果，北陸産分級フライアッシュの品質は，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる粉末度，密度，フロー値比，活性度指数の 4 項目において，明確な品質の向上が認められ，かつ，その他の指標へも悪影響がないことが確認できた。従って，北陸産分級フライアッシュは，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」という 2 つの対策により，従来よりも高品質なフライアッシュになっていることを検証できた。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 分級装置の運用は，ブレーン比表面積を指標とし，フライアッシュ分級品のブレーン比表面積が，フライアッシュ原粉の値より 1,000cm²/g 程度高くなるように調整している。また，ブレーン比表面積は，活性度指数に影響を与え，さらに，活性度指数はコンクリートの耐久性に関わる重要な指標であることなどから，ブレーン比表面積を指標とすることは，合理的かつ効率的な運用であった。

(2) 七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所の品質管理データの分析により，北陸産分級フライアッシュは，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる重要な指標が向上し，その他の指標へも悪影響がないことから，従来よりも高品質なフライアッシュになっていると考えられた。

(3) 分級効果確認試験の結果から，フライアッシュの物理的性質の変化として，フライアッシュ原粉のブレーン比表面積を 1,000cm²/g 程度高くすることにより，フライアッシュ分級品の平均粒径がフライアッシュ原粉の平均粒径の約 1/3 になることが確認できた。

(4) 分級効果確認試験の結果から，密度とフロー値比が向上する理由としては，分級による物理的性質の変化により，フライアッシュ粒子が均一で細かくなることによるボールベアリング効果の向上が寄与していると考えられた。また，活性度指数が向上する理由としては，ブレーン比表面積の増加に加え，分級による化学的性質の変化（二酸化けい素のガラス質成分の増加）によるポゾラン反応性の向上が関わっていると考えられた。

(5) 品質管理データの分析結果および分級効果確認試験の結果から，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる重要な指標である密度，フロー値比，活性度指数の 3 項目の品質の向上は，主として分級効果によるものと考えられた。

【参考文献】

1) 日本フライアッシュ協会：フライアッシュコンクリートの特長，http://www.japan-flyash.com/fconcrete.html
2) 石井光裕：コンクリート混和材としての分級フライアッシュに関する研究，徳島大学博士論文，pp.17-33，1994.
3) 日本粉体工業会編：分級装置技術便覧，産業技術センター，p.352，1978.
4) T. Hashimoto and K. Torii: The development of highly durable concrete using classified fine fly ash in Hokuriku District, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.312-321, 2013.
5) T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh and K. Torii :A Development of Environmentally-friendly and Highly-durable concrete Using Classified Fly Ash, Concrete Innovation Conference CIC2014, CD-R12pages, 2014.
6) K. Torii, T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh : The effective utilization of classified fine fly ashes for production of highly-durable concrete mixtures, 3rd Inter. Conf. on Sustainable Construction Materials & Technologies, SCMT3 Prof.Hamada sessions, pp.109-118, 2013.
7) 橋本徹，参納千夏男，久保哲司，鳥居和之：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.133-138，2013.
8) 橋本徹，久保哲司，参納千夏男：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に向けた取組み，電力土木，No.361，pp.56-60，2012.
9) （財）日本規格協会：JIS ハンドブック⑩ 生コンクリート 2010，2010.
10) 日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック（第 5 版），基礎編，pp.28-32，2010.10.
11) （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.
12) 星野清一，平尾宙，山田一夫：非晶質混和材を含むセメント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.
13) 日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック（第 5 版），基礎編，pp.21-25，2010.10.
14) 内川浩，宇賀田俊一郎，羽原俊祐：セメント用混合材（スラグ，フライアッシュ，シリカフュ－ム，もみ殻灰）中の非晶質相の構造とその水和反応性，セメント技術年報，No.39，pp.36-40，1985.

第3章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質の検証

3.1 概　説

一般に，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効果などにより，フレッシュコンクリートの流動性が改善されることや，フライアッシュのポゾラン反応により，硬化コンクリートの耐久性が向上することが知られている[1~4)]。一方，北陸産分級フライアッシュは，「第2章　北陸産分級フライアッシュの品質の検証」で述べたように，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」により，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関係する，粉末度，密度，フロー値比，活性度指数の4つのJIS規格項目が向上し，従来よりも高品質なフライアッシュになっていることが確認されている。従って，この北陸産分級フライアッシュをコンクリートに混和した場合，コンクリートの品質が一層向上することが期待される。つまり，フレッシュコンクリートの流動性の改善は，コンクリートの配合における単位水量の減少などとして，硬化コンクリートの耐久性の向上は，圧縮強度試験や様々な耐久性試験のデータの改善などとしてあらわれると考えられる。しかしながら，実際に，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの品質が向上し，汎用コンクリート（普通セメントまたは高炉セメントを使用したコンクリート）と比べ，品質的に同等以上であるかどうかについては，まだ，十分な検証がなされていない。今後，北陸地方のコンクリートにフライアッシュが有効活用されるためには，実際の生コンクリート工場において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートが問題なく製造でき，そのコンクリートの品質が汎用コンクリートに対し同等以上であることを検証していく必要がある。

そこで本章では，まず，実際の生コンクリート工場において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの室内試験および実機試験を実施することにより，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合を決定し，この配合を用いたコンクリートが問題なく製造されることを確認する。次に，コンクリート製造における一般的な品質管理項目である施工性や強度発現性の観点から，この配合を用いたコンクリートと汎用コンクリートとの比較試験（室内試験）を実施し，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質が，汎用コンクリートに対し同等以上であるかどうかを検証する。さらに，強度発現性については，北陸産分級フライアッシュがコンクリートの強度発現にどのように関わっているのかを詳しく調べるため，室内試験として，W/Cを一定とした4ケースの試験体（セメント2種類と骨材2種類の計4ケース）を作製し，圧縮強度試験，細孔径分布測定，偏光反射顕微鏡および走査電子顕微鏡による分析結果などを考察することにより，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善メカニズムについても言及する。

なお，本章では，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの品質のうち，主として製造時の品質に関して，施工性と強度発現性の観点から検証することとし，コンクリートの耐久性については，後述する「第4章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性の検証」での検証となる。

3.2 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造

3.2.1 室内試験による配合検討

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合を作成するため，実際の生コンクリート工場において，北陸地方における代表的骨材を用いた室内試験を実施した。室内試験は，各生コンクリート工場が有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をもとに，フライアッシュを普通ポルトランドセメントの内割りで，質量比 15%の置換率とした。これは，JIS A5308 レディーミクストコンクリートにおいて，ASR 抑制対策として，フライアッシュの分量が質量比 15%以上と規定していることと[5)]，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最小限に抑えることなどを勘案したものである。実施ケース毎に，スランプ，空気量，圧縮強度を計測し，配合設計の基礎資料となる圧縮強度と B/W（B=C+F，ここに，B：結合材量，C：セメント量，F：フライアッシュ量）の関係，単位水量とスランプの関係および AE 剤添加量とフライアッシュ使用量の関係を確認した。なお，配合の決定は，各生コンクリート工場の配合設計の方法に従った。

(1) 使用材料

室内試験に使用した材料一覧を**表－3.1** に示す。使用骨材は，北陸 3 県で使用されている代表的骨材として，富山県の早月川産骨材，庄川産骨材，石川県の手取川産骨材，能登産骨材，福井県の九頭竜川産骨材，南条産骨材，今津産骨材を選定した。フライアッシュは，富山県と石川県の生コンクリート工場では七尾大田火力発電所から産出されるフライアッシュ（七尾産）を，福井県の生コンクリート工場では敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュ（敦賀産）を使用した。試験に使用したセメントと混和剤は，室内試験を実施した各生コンクリート工場で通常使用されているものとした。なお，AE 減水剤は，単位セメントと単位フライアッシュ量の合計の約 1%を添加した。使用したフライアッシュの JIS 規格項目の値を**表－3.2** に，各産地の代表的骨材の密度，吸水率，粗粒率を**表－3.3** に，試験に用いた混和剤の一覧を**表－3.4** に，各産地の骨材の特徴を**表－3.5** から**表－3.11** に示す。

表－3.1 使用材料一覧

項　目	富山県		石川県		福井県		
	早月川産	庄川産	手取川産	能登産	九頭竜川産	南条産	滋賀県今津産
普通・、高炉ｾﾒﾝﾄ	電気化学工業㈱	電気化学工業㈱	太平洋ｾﾒﾝﾄ㈱	住友大阪ｾﾒﾝﾄ㈱	宇部三菱ｾﾒﾝﾄ㈱	太平洋ｾﾒﾝﾄ㈱	太平洋ｾﾒﾝﾄ㈱
混和材 ﾌﾗｲｱｯｼｭ	七尾産 ﾌﾗｲｱｯｼｭ	七尾産 ﾌﾗｲｱｯｼｭ	七尾産 ﾌﾗｲｱｯｼｭ	七尾産 ﾌﾗｲｱｯｼｭ	敦賀産 ﾌﾗｲｱｯｼｭ	敦賀産 ﾌﾗｲｱｯｼｭ	敦賀産 ﾌﾗｲｱｯｼｭ
水	地下水	地下水	地下水	地下水	地下水	地下水	地下水
細骨材１ 5mm 以下	早月川水系 上市建材㈱	庄川水系 ㈱野手組、富士土石㈱	手取川水系 ㈱舟場組	2.5mm 以下 鳥屋産 鳥屋砂工業㈱	九頭竜川下流域(陸砂) 九頭竜砂利工業	南条産（砕砂） ㈱ﾌｪﾆｯｸｽ	1.2mm 以下 三国（陸砂） 福井砂採取事業協同組合
細骨材２	－	－	0.3mm 以下 高松産陸砂 たち建設㈱	石休場（砕砂） ㈱新出組	1.2mm 以下 あわら市内産(陸砂) 刀口	2.5mm 以下 あわら市内産(陸砂) 杉田建設興業㈱	葉原（砕砂） ㈱堀居組
粗骨材１	25mm～5mm 早月川水系 上市建材㈱	25mm～5mm 庄川水系 ㈱野手組、富士土石㈱	25mm～5mm 手取川水系 ㈱舟場組	25mm～5mm 石休場（砕石） ㈱新出組	10mm～5mm 九頭竜川下流域(陸砂利) 九頭竜砂利工業	10mm～5mm 南条産(砕石) ㈱ﾌｪﾆｯｸｽ	10mm 今津(砕石) 高島鉱建
粗骨材２	40mm～20mm 早月川水系 上市建材㈱	40mm～20mm 庄川水系 ㈱野手組	40mm～20mm 手取川水系 ㈱河野石産	40mm～20mm 石休場（砕石） ㈱新出組	25mm～10mm 九頭竜川下流域(陸砂利) 九頭竜砂利工業	20mm～10mm 南条産(砕石) ㈱ﾌｪﾆｯｸｽ	20mm 今津(砕石) 高島鉱建
粗骨材３	－	－	－	－	40mm～25mm 九頭竜川下流域(陸砂利) 九頭竜砂利工業	40mm～20mm 南条産(砕石) ㈱ﾌｪﾆｯｸｽ	40mm 今津(砕石) 高島鉱建
混和剤 AE 減水剤	ﾀﾞｰﾚｯｸｽ F-1 ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙｽﾞ㈱	ﾀﾞｰﾚｯｸｽ WRDA ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙｽﾞ㈱	ﾁｭｰﾎﾟｰﾙ EX60T 竹本油脂㈱	ﾌﾛｰﾘｯｸ S ㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ	90SE 山宗化学㈱	ﾌﾛｰﾘｯｸ SV10L ㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ	ﾘｸﾞｴｰｽ UA BASF ｼﾞｬﾊﾟﾝ㈱
混和剤 AE 剤	ﾀﾞｰﾚｯｸｽ AEA-FA ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙｽﾞ㈱	ﾀﾞｰﾚｯｸｽ AEA-FA ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙｽﾞ㈱	AE-300 竹本油脂㈱	ﾌﾛｰﾘｯｸ AE-4 ㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ	AE01 花王	ﾌﾛｰﾘｯｸ AE-9B ㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ	ﾏｲｸﾛｴｱ 303A BASF ｼﾞｬﾊﾟﾝ㈱

表－3.2 フライアッシュの JIS 規格値

フライアッシュの産地	JIS A6201 項目									備　考
	二酸化けい素(%)	湿分(%)	強熱減量(%)	密度(g/cm³)	粉末度		フロー値比(%)	活性度指数(%)		
					45μmふるい残分(%)	比表面積(cm²/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 月ﾃﾞｰﾀ
敦賀産	67.23	<0.1	3.3	2.26	1.7	4,740	100	84	99	H24 年 7 月ﾃﾞｰﾀ

表－3.3 代表的骨材の密度，吸水率，粗粒率

項目	早月川産		庄川産		手取川産		能登産		九頭竜川産		南条産		今津産	
	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材
密度(g/cm³)	2.69	2.65	2.61	2.59	2.60	2.57	2.64	2.53	2.65	2.59	2.70	2.67	2.83	2.60
吸水率(%)	0.74	1.03	1.19	1.58	1.84	2.09	1.43	2.05	1.37	1.85	1.46	2.16	0.50	1.78
粗粒率	6.90	2.67	6.88	2.70	6.84	2.60	6.89	2.46	5.95	2.90	6.04	3.42	6.40	1.82

表－3.4 試験に用いた混和剤の一覧

骨材の産地	減衰剤	種類	銘柄（生産者）	備　考
早月川産	AE剤	AE剤Ⅰ種	ﾀﾞｰﾚｯｸｽAEA-FA （ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙ㈱）	ﾌﾗｲｱｯｼｭ配合ｺﾝｸﾘｰﾄ用 特殊ｱﾆｵﾝ系/ﾉﾆｵﾝ系界面活性剤
	AE減水剤	AE減水剤標準形Ⅰ種	ﾀﾞｰﾚｯｸｽF-1 （ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙ㈱）	一般用 ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物
庄川産	AE剤	AE剤Ⅰ種	ﾀﾞｰﾚｯｸｽAEA-FA （ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙ㈱）	ﾌﾗｲｱｯｼｭ配合ｺﾝｸﾘｰﾄ用 特殊ｱﾆｵﾝ系/ﾉﾆｵﾝ系界面活性剤
	AE減水剤	AE減水剤標準形Ⅰ種	ﾀﾞｰﾚｯｸｽWRDA （ｸﾞﾚｰｽｹﾐｶﾙ㈱）	標準形 ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸塩
手取川産	AE剤	AE剤Ⅰ種	AE-300 （竹本油脂㈱）	樹脂酸塩系陰ｲｵﾝ界面活性剤
	AE減水剤	AE減水剤標準形Ⅰ種	ﾁｭｰﾎﾟｰﾙEX60T （竹本油脂㈱）	高機能ﾀｲﾌﾟ 変性ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物と ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸系化合物の複合体
能登産	AE剤	AE剤Ⅰ種	ﾌﾛｰﾘｯｸAE-4 （㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ）	樹脂酸塩系界面活性剤
	AE減水剤	AE減水剤標準形Ⅰ種	ﾌﾛｰﾘｯｸS(50) （㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ）	ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸塩/ｵｷｼｶﾙﾎﾞﾝ酸塩
九頭竜川産	AE剤	AE剤Ⅰ種	ﾏｲﾃｨｰAE01 （花王㈱）	特殊AE剤
	AE減水剤	AE減水剤標準形Ⅰ種	90SE （山宗化学㈱）	ﾘｸﾞﾆｽﾙﾎﾝ酸塩と特殊界面活性剤
南条産	AE剤	AE剤Ⅰ種	ﾌﾛｰﾘｯｸ AE-9B （㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ）	ﾌﾗｲｱｯｼｭ配合ｺﾝｸﾘｰﾄ用
	AE減水剤	AE減水剤標準形Ⅰ種	ﾌﾛｰﾘｯｸ SV10L （㈱ﾌﾛｰﾘｯｸ）	ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸塩、ｵｷｼｶﾙﾎﾞﾝ酸塩とﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸系化合物
今津産	AE剤	AE剤Ⅰ種	ﾏｲｸﾛｴｱ 303A （BASFｼﾞｬﾊﾟﾝ㈱）	ｱﾙｷﾙｴｰﾃﾙ系陰ｲｵﾝ界面活性剤
	AE減水剤	AE減水剤標準形Ⅰ種	ﾘｸﾞｴｰｽ UA （BASFｼﾞｬﾊﾟﾝ㈱）	無塩化ﾀｲﾌﾟ ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物と ｵｷｼｶﾙﾎﾞﾝ酸化合物の複合体

表－3.5 早月川産骨材の特徴

			種類・銘柄	粗粒率	特徴
早月川産	砂利	G1	早月川産川砂利 25～5mm	6.90	・主要な岩種は花崗岩、閃緑岩などの深成岩。 ・玉砕を混合しているため、角張ったものも混ざっている。
		G2	早月川産川砂利 40～20mm	—	・主要な岩種は花崗岩、閃緑岩などの深成岩。 ・玉砕を混合しているため、角張ったものも混ざっている。
		G1,G2 混合	早月川産川砂利 40～5mm	7.36	—
	砂	S1	早月川産川砂	2.67	・深成岩を起源とする石英、長石などの結晶を含んでおり、白っぽく角張った粒子が多い。

砂利(G1)

砂利(G2)

砂(S1)

表－3.6 庄川産骨材の特徴

			種類・銘柄	粗粒率	特徴
庄川産	砂利	G1	庄川産陸砂利 25mm	6.88	・多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含んでいる。 ・ほとんどのものは角が取れており、表面が滑らかである。
		G2	庄川産陸砂利 25mm		・多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含んでいる。 ・ほとんどのものは角が取れており、表面が滑らかである。
		G3	庄川産陸砂利 40mm	7.33	・多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含んでいる。 ・ほとんどのものは角が取れており、表面が滑らかである。
	砂	S1	庄川産陸砂 5mm	2.70	・さまざまな粒子を含んでおり、茶褐色。
		S2	庄川産陸砂 5mm		・さまざまな粒子を含んでおり、茶褐色。

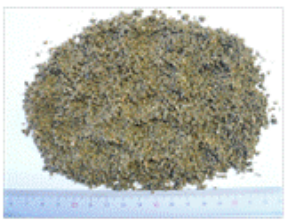
砂利(G1)

砂利(G2)

砂利(G3)

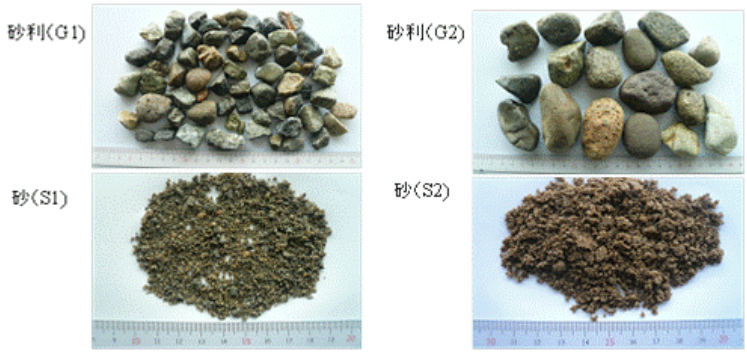
砂(S1)

砂(S2)



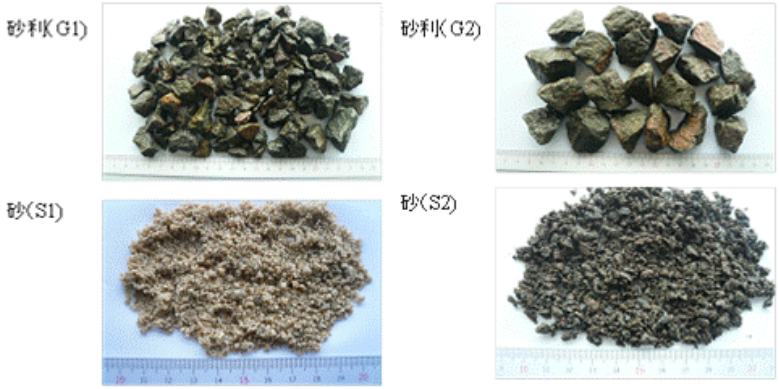
表－3.7 手取川産骨材の特徴

			種類・銘柄	粗粒率	特徴
手取川産	砂利	G1	手取川産陸砂利 25～5mm	6.84	・多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含んでいる。 ・角が取れているものが多い。
		G2	手取川産陸砂利 40～25mm	－	・多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含んでいる。 ・角が取れているものが多い。
		G1,G2 混合	手取川産陸砂利 40～5mm	7.26 (G1:G2=60:40)	－
	砂	S1	手取川産陸砂 5mm(粗砂)	2.60 (G1:G2=80:20)	・様々な粒子を含んでおり、黒っぽい。
		S2	高松産陸砂 0.3mm(細砂)		・細かい粒子からなり、茶褐色。



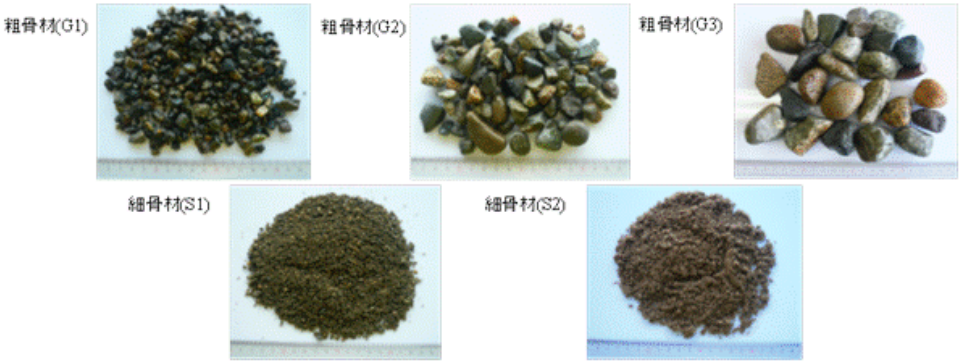
表－3.8 能登産骨材の特徴

			種類・銘柄	粗粒率	特徴
能登産	砂利	G1	石休場産砕石 25～5mm	6.89	・岩種は安山岩。 ・砕石なので角張っている。
		G2	石休場産砕石 40～20mm	7.94	・岩種は安山岩。 ・砕石なので角張っている。
		G1,G2 混合	石休場産砕石 40～5mm	7.31 (G1:G2=60:40)	－
	砂	S1	鳥屋産山砂 2.5mm 以下	2.46	・様々な粒子を含んでおり、白っぽい。
		S2	石休場産砕砂 5mm 以下	3.42	・安山岩の砕砂であり、黒っぽく角張っている。



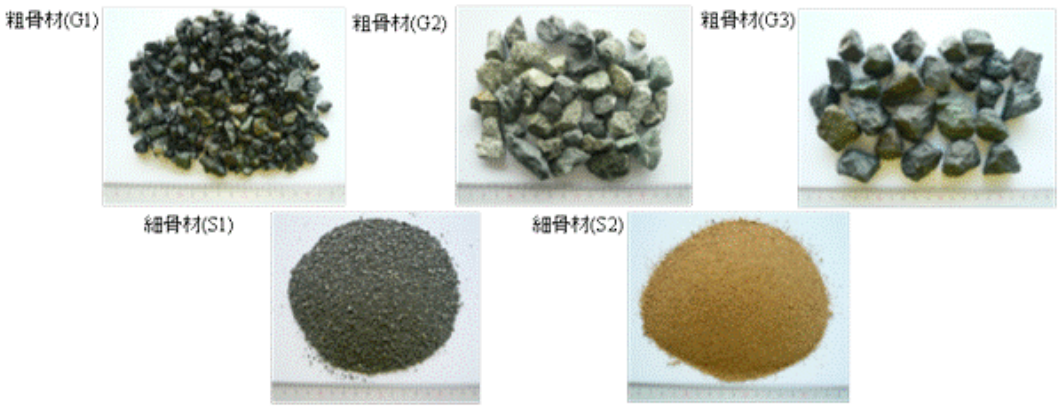
表－3.9 九頭竜川産骨材の特徴

			種類・銘柄	粗粒率	特徴
九頭竜川産	粗骨材	G1	九頭竜川下流域(陸砂利) 10mm～5mm	5.95	・多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含んでいる。 ・角が取れているものが多い。
		G2	九頭竜川下流域(陸砂利) 25～10mm	7.05	
		G3	九頭竜川下流域(陸砂利) 40～25mm	7.31 (40～5mm)	
九頭竜川産	細骨材	S1	九頭竜川下流域(陸砂) 5mm	2.90	・様々な粒子を含んでおり、黒っぽい。
あわら市内産		S2	あわら市内産(陸砂) 1.2mm	1.70	・細かい粒子からなり、茶褐色。



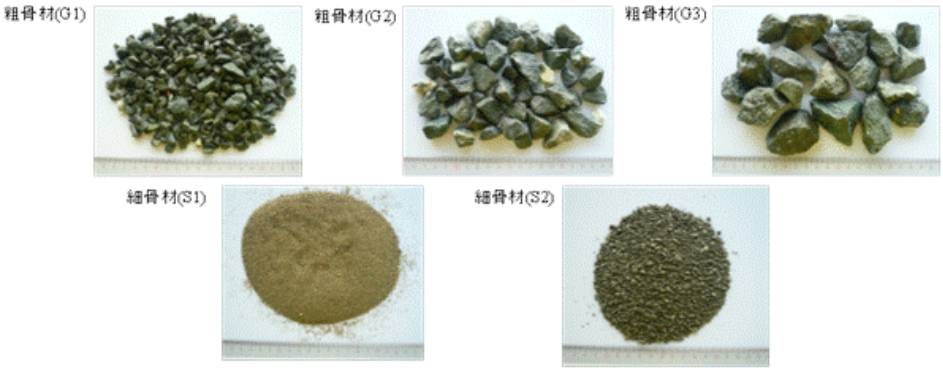
表－3.10 南条産骨材の特徴

			種類・銘柄	粗粒率	特徴
南条産	粗骨材	G1	南条産(砕石) 10～5mm	6.04	・チャートが主要な岩種の砕石で、角張っている。 ・少量の閃緑岩もしくは輝緑岩を含む。
		G2	南条産(砕石) 20～10mm	7.01	
		G3	南条産(砕石) 40～20mm	7.97	
南条産	細骨材	S1	南条産(砕砂) 5mm	3.42	・チャートの砕砂であり、黒っぽく角張っている。
あわら市内産		S2	あわら市内産(陸砂) 2.5mm	1.80	・細かい粒子からなり、茶褐色。



表－3.11 今津産骨材の特徴

			種類・銘柄	粗粒率	特徴
今津産	砂利	G1	今津産砕石 10mm	6.40	・砂岩（凝灰岩質）の砕石で、角張っている。
		G2	今津産陸砕石 20mm	7.20	
		G3	今津産陸砕石 40mm	8.00	
三国産	砂	S1	三国産陸砂(細砂) 1.2mm	1.82	・細かい粒子からなり、茶褐色。
		S2	葉原産(粗砂) 5mm	3.42	・硬質砂岩の砕砂であり、黒っぽく角張っている。



(2)　実施ケース

室内試験の実施ケースを**表－3.12** に示す。基本配合は，W/B：60，50，40%，スランプ※1：8，12，15，18cm，粗骨材の最大寸法 25mm（20mm），45mm，空気量※2：4.5%とし，各工場の配合設計の方法に従い実施した。

※1 早月川産，庄川産，手取川産，九頭竜川産，南条産，今津産のスランプは，荷卸し地点でのスランプロスを考慮し，基本配合のスランプ(8，12，15，18)+1cm とした。
※2 早月川産，庄川産，手取川産，九頭竜川産，南条産，今津産の空気量は，荷卸し地点での空気量ロスを考慮し，基本配合の空気量(4.5)+0.5%とした。

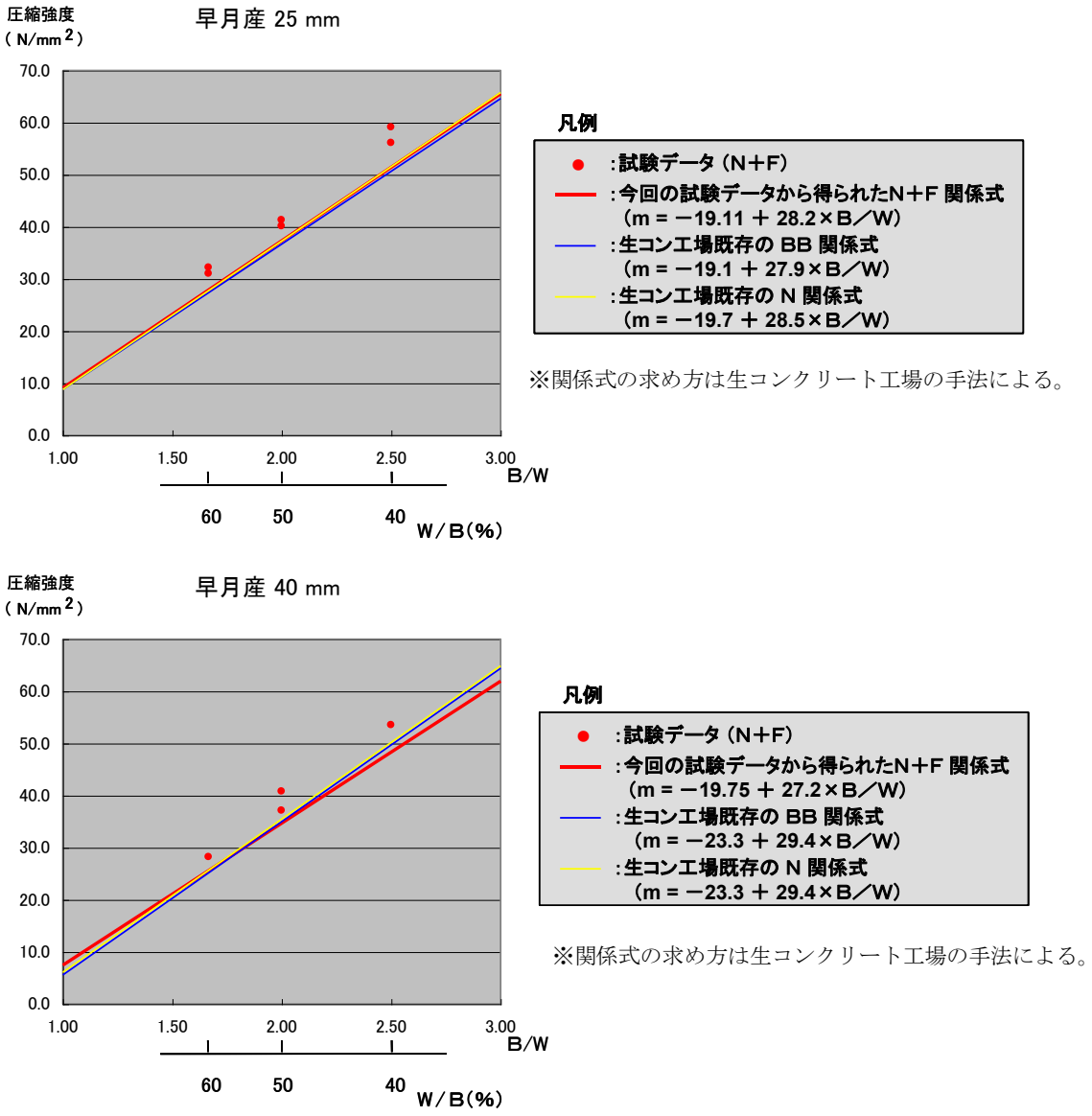
表－3.12 室内試験の実施ケース一覧

骨材の産地	実施ケース	実施日	備　考
早月川産	最大骨材寸法 25mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm 最大骨材寸法 40mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 16cm　**計１０ケース**	平成23年 5月11日	管理基準 スランプ 9,16,19±1cm 空気量 5.0±1%
庄川産	最大骨材寸法 25mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm 最大骨材寸法 40mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 16cm　**計１０ケース**	平成23年 4月27日	管理基準 スランプ 9,16,19±1cm 空気量 5.0±1%
手取川産	最大骨材寸法 25mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm 最大骨材寸法 40mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 13cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 13cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 13cm **計１２ケース**	平成23年 4月20	管理基準 スランプ 9,13,19±1cm 空気量 5.0±1%
能登産	最大骨材寸法 25mm W/B 60.5%-ｽﾗﾝﾌﾟ 8cm、W/B 49.0%-ｽﾗﾝﾌﾟ 8cm、W/B 40.6%-ｽﾗﾝﾌﾟ 8cm、 W/B 60.5%-ｽﾗﾝﾌﾟ 18cm、W/B 49.0%-ｽﾗﾝﾌﾟ 18cm、W/B 40.6%-ｽﾗﾝﾌﾟ 18cm 最大骨材寸法 40mm W/B 60.5%-ｽﾗﾝﾌﾟ 8cm、W/B 49.0%-ｽﾗﾝﾌﾟ 8cm、 W/B 60.5%-ｽﾗﾝﾌﾟ 15cm、49.0%-ｽﾗﾝﾌﾟ 15cm　**計１０ケース**	平成23年 4月12日 4月13日	管理基準 スランプ 8,15,18±1cm 空気量 4.5±1%
九頭竜川産	最大骨材寸法 25mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm 最大骨材寸法 40mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 16cm　**計１０ケース**	平成24年 9月14日 9月15日	管理基準 スランプ 9,16,19±1cm 空気量 5.0±1%
南条産	最大骨材寸法 20mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm 最大骨材寸法 40mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 16cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 16cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 16cm **計１２ケース**	平成24年 9月12日	管理基準 スランプ 9,16,19±1cm 空気量 5.0±1%
今津産	最大骨材寸法 20mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 19cm 最大骨材寸法 40mm W/B 60%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、W/B 40%-ｽﾗﾝﾌﾟ 9cm、 W/B 50%-ｽﾗﾝﾌﾟ 16cm　**計１０ケース**	平成24年 9月7日	管理基準 スランプ 9,16,19±1cm 空気量 5.0±1%

(3)　室内試験結果

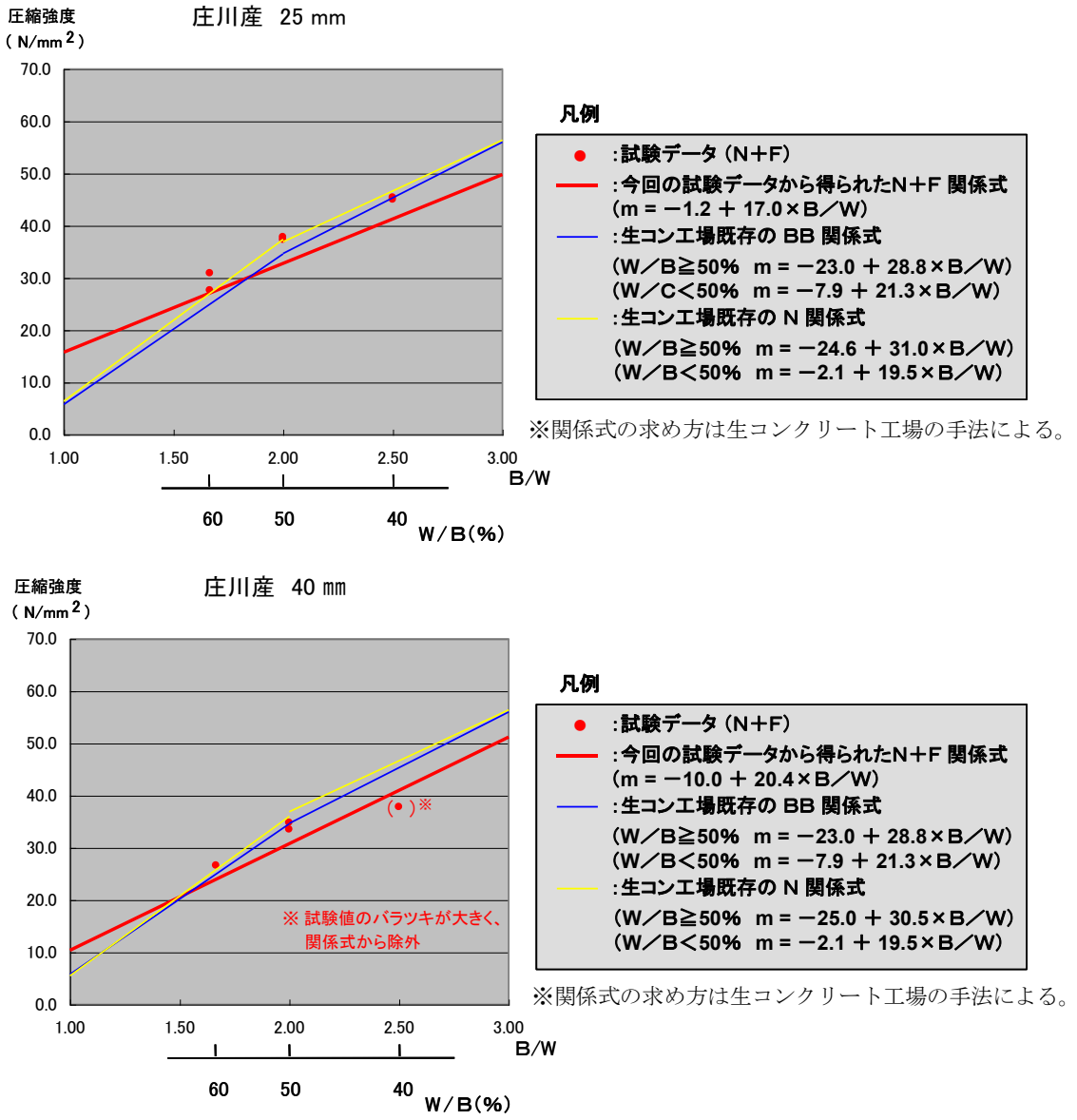
a．圧縮強度と B/W の関係

各生コンクリート工場で通常算出している方法で求めた，圧縮強度と B/W との関係を**図－3.1** から**図－3.7** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の圧縮強度は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）の圧縮強度と同等，もしくは，少し低くなる程度であった。これは，Ｎ＋Ｆの配合が，Ｎの配合に対し単位セメント量が約 15%少ないことを考慮すると，北陸産分級フライアッシュのポゾラン反応性の向上を反映したものと考えられる。



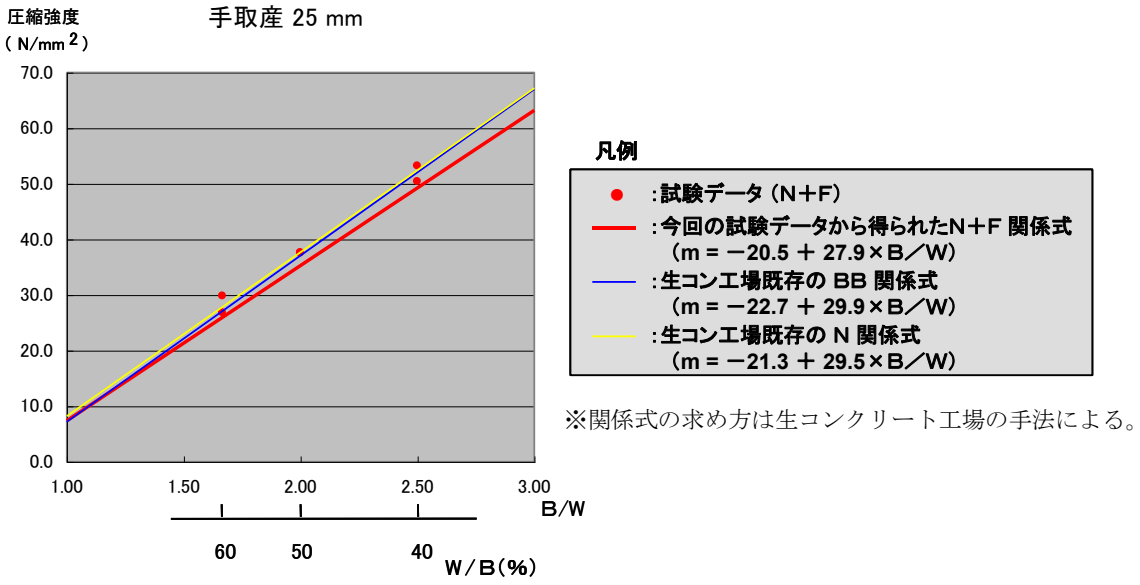
（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，Ｎ＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

図－3.1 早月川産骨材における圧縮強度と B/W の関係

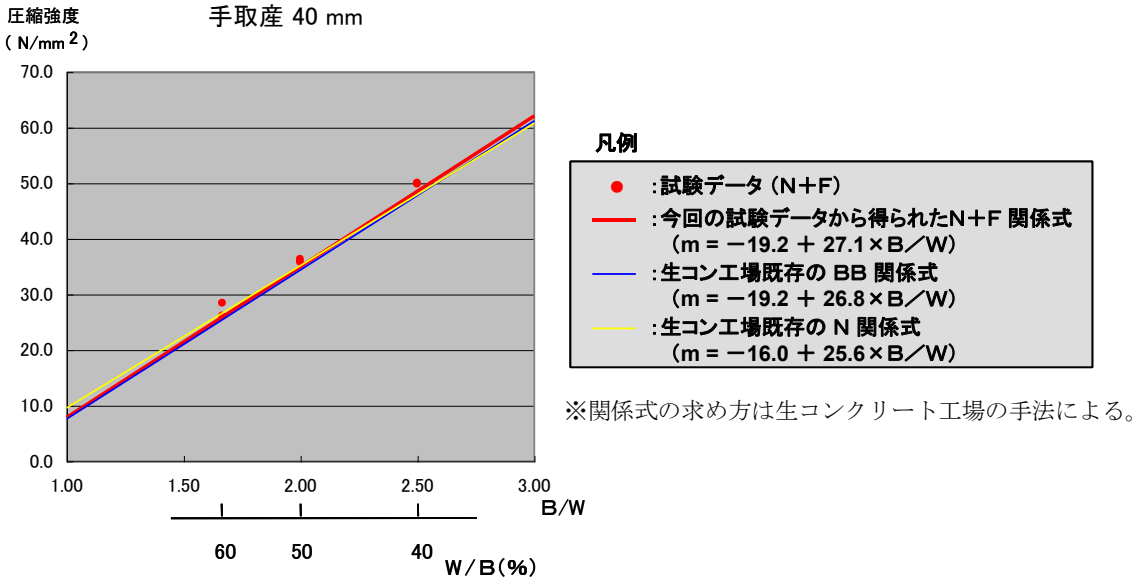


（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

図－3.2 庄川産骨材における圧縮強度と B/W の関係



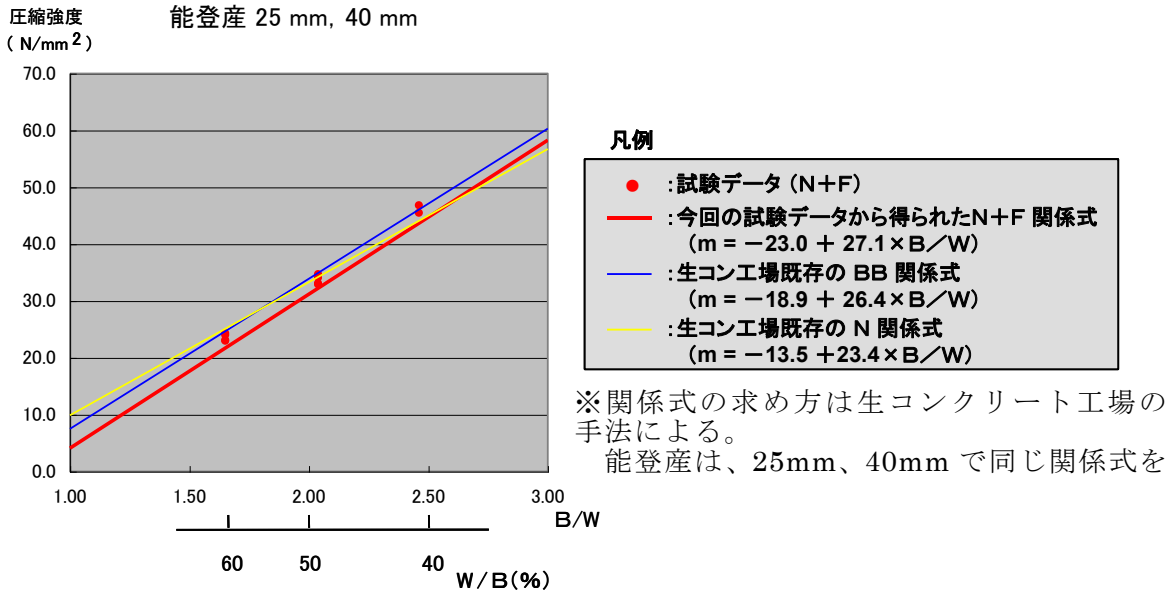
※関係式の求め方は生コンクリート工場の手法による。



※関係式の求め方は生コンクリート工場の手法による。

（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(内割り)）

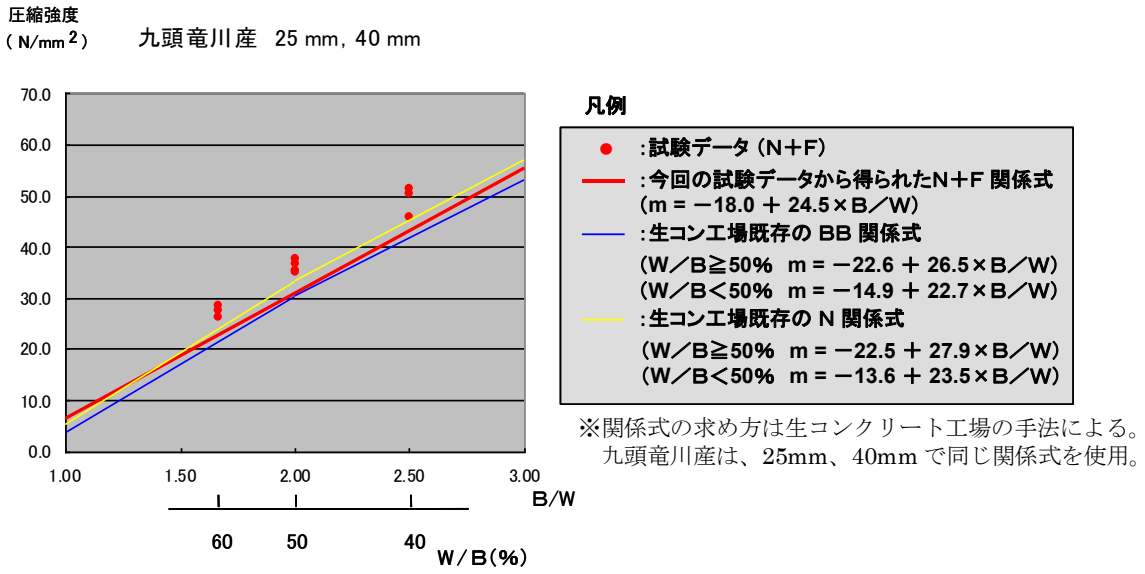
図－3.3 手取庄川産骨材における圧縮強度と B/W の関係



※関係式の求め方は生コンクリート工場の手法による。
能登産は、25mm、40mm で同じ関係式を

(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(内割り))

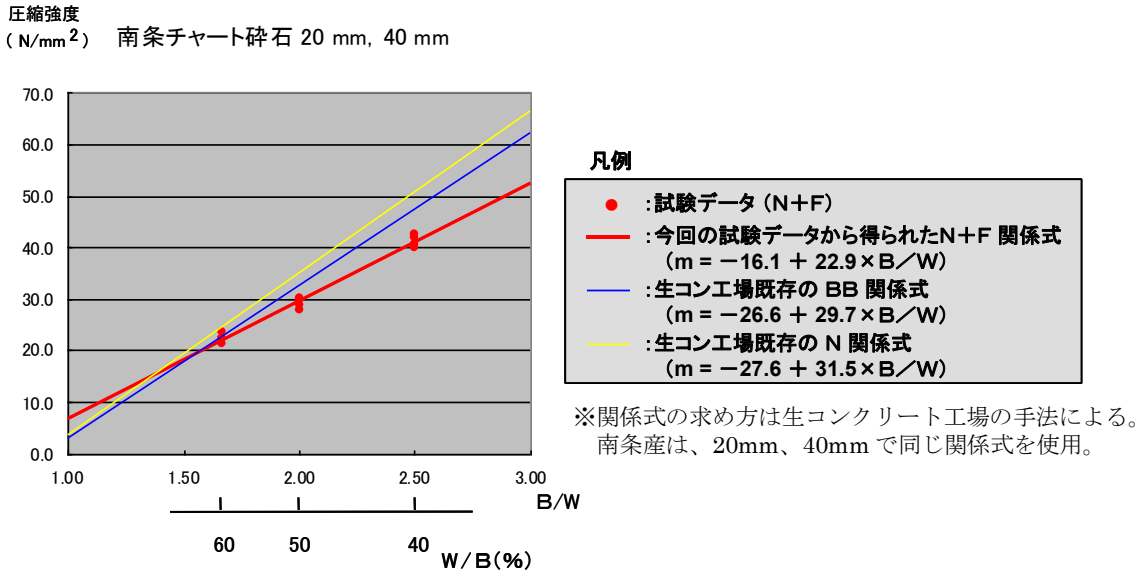
図－3.4 能登産骨材における圧縮強度と B/W の関係



※関係式の求め方は生コンクリート工場の手法による。
九頭竜川産は、25mm、40mm で同じ関係式を使用。

(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(内割り))

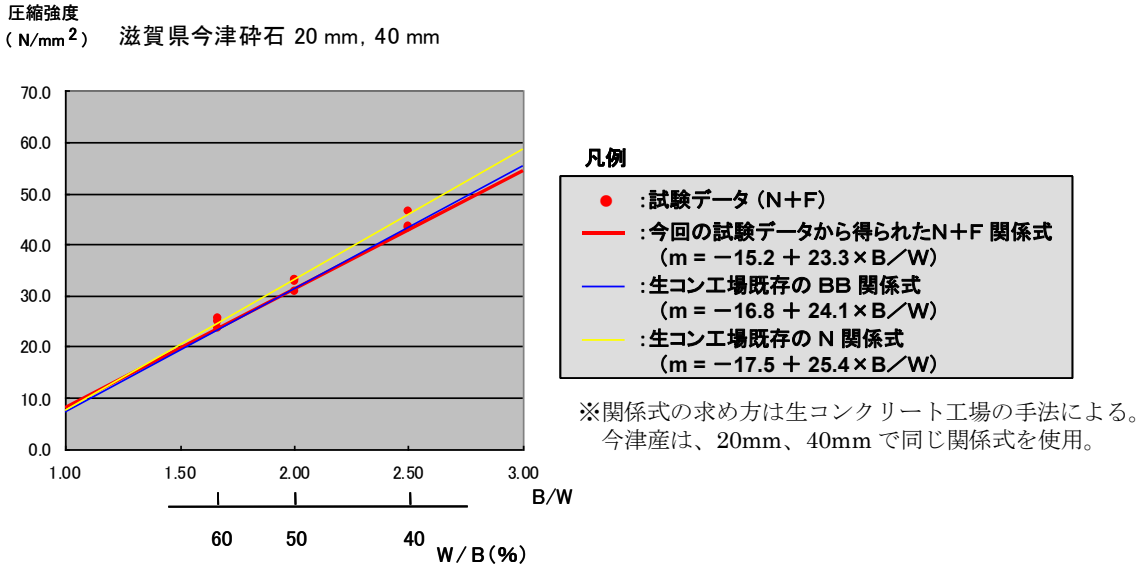
図－3.5 九頭竜川産骨材における圧縮強度と B/W の関係



※関係式の求め方は生コンクリート工場の手法による。
南条産は、20mm、40mm で同じ関係式を使用。

（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(内割り)）

図－3.6 南条産骨材における圧縮強度と B/W の関係



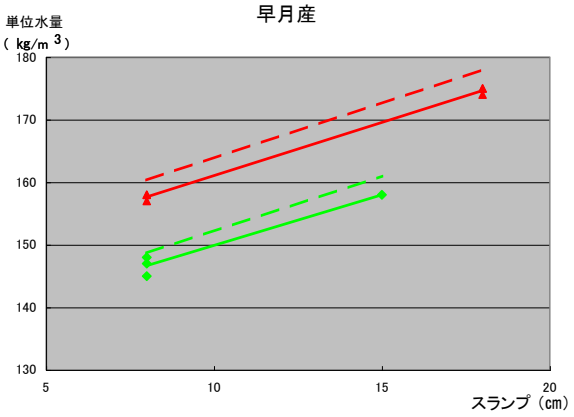
※関係式の求め方は生コンクリート工場の手法による。
今津産は、20mm、40mm で同じ関係式を使用。

（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(内割り)）

図－3.7 今津産骨材における圧縮強度と B/W の関係

b. 単位水量とスランプの関係

単位水量とスランプとの関係を**図－3.8**から**図－3.14**に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）では，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ）と同等のスランプを得るのに必要な単位水量を，0～12kg/m^{3}低減することができた。これは，骨材との組み合わせにより程度の差はあるものの，北陸産分級フライアッシュのボールベアリング効果の改善を反映したものと考えられる。



配合	単位水量(kg/m^3)		
	N+F	N	差
60－8－25	158	162	－4
50－8－25	157	159	－2
40－8－25	158	160	－2
60－18－25	175	180	－5
50－18－25	174	177	－3
40－18－25	175	177	－2
60－8－40	148	150	－2
50－8－40	147	149	－2
40－8－40	145	147	－2
50－15－40	158	161	－3

※N+F の単位水量は、今回の試験データ
　N の単位水量は、生コン工場既存の配合表の値

凡例
- :N 最大骨材 25 mm の関係式（目安）
- :N+F 最大骨材 25 mm の関係式（目安）
- :N+F 最大骨材25 mm の試験データ
- :N 最大骨材 40 mm の関係式（目安）
- :N+F 最大骨材 40 mm の関係式（目安）
- :N+F 最大骨材 40 mm の試験データ

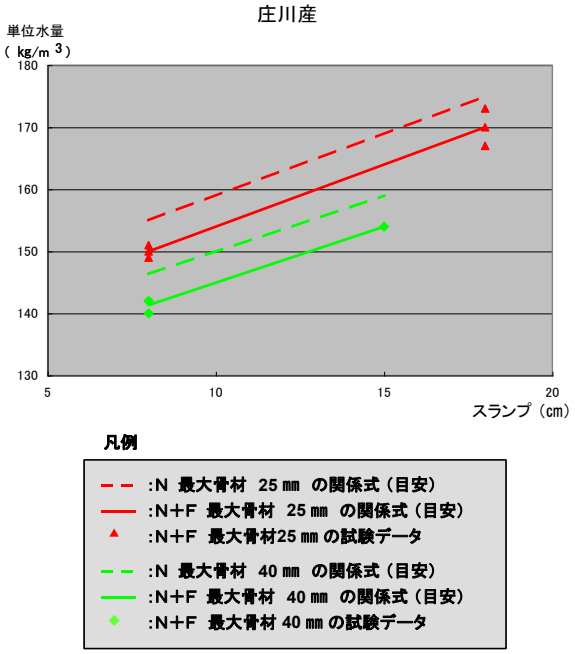
配合※	50-8-25
スランプ(cm)	10.0
空気量(%)	4.5

配合※	50-18-25
スランプ(cm)	19.0
空気量(%)	4.7

※水結合材比－スランプ－粗骨材の最大寸法

（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(内割り)）

図－3.8 早月川産骨材における単位水量とスランプの関係



配合	単位水量(kg/m³)		
	N+F	N	差
60−8−25	149	154	−5
50−8−25	150	155	−5
40−8−25	151	156	−5
60−18−25	167	172	−5
50−18−25	170	175	−5
40−18−25	173	178	−5
60−8−40	142	147	−5
50−8−40	140	145	−5
40−8−40	142	147	−5
50−15−40	154	159	−5

※ N+F の単位水量は、今回の試験データ
　N の単位水量は、生コン工場既存の配合表の値

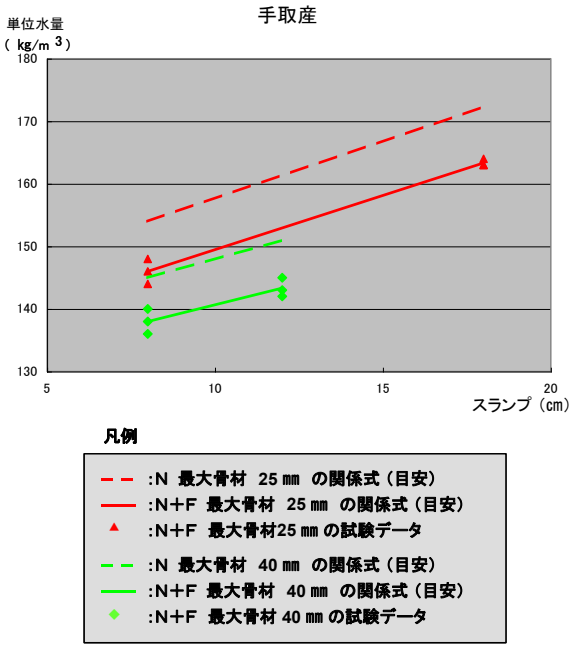
配合※	50-8-25
スランプ(cm)	9.5
空気量(%)	5.4

配合※	50-18-25
スランプ(cm)	19.5
空気量(%)	5.2

※水結合材比－スランプ－粗骨材の最大寸法

（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(内割り)）

図－3.9 庄川産骨材における単位水量とスランプの関係



配合	単位水量(kg/m³)		
	N+F	N	差
60−8−25	148	156	−8
50−8−25	144	152	−8
40−8−25	146	154	−8
60−18−25	164	173	−9
50−18−25	163	172	−9
40−18−25	163	172	−9
60−8−40	138	145	−7
50−8−40	136	143	−7
40−8−40	140	147	−7
60−12−40	143	151	−8
50−12−40	142	149	−7
40−12−40	145	153	−8

※ N+F の単位水量は、今回の試験データ
N の単位水量は、生コン工場既存の配合表の値

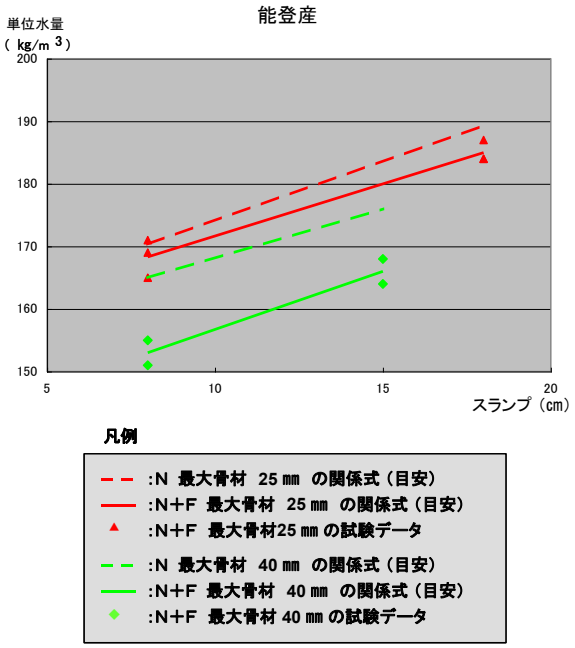
配合※	50-8-25
スランプ(cm)	9.5
空気量(%)	4.7

配合※	50-18-25
スランプ(cm)	19.0
空気量(%)	4.2

※水結合材比－スランプ－粗骨材の最大寸法

（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(内割り)）

図－3.10 手取川産骨材における単位水量とスランプの関係



配合	単位水量(kg/m³)		
	N+F	N	差
60.5−8−25	171	173	−2
49.0−8−25	169	170	−1
40.6−8−25	165	168	−3
60.5−18−25	187	193	−6
49.0−18−25	184	189	−5
40.6−18−25	184	186	−2
60.5−8−40	155	167	−12
49.0−8−40	151	163	−12
60.5−15−40	168	178	−10
49.0−15−40	164	174	−10

※ N+F の単位水量は、今回の試験データ
　N の単位水量は、生コン工場既存の配合表の値

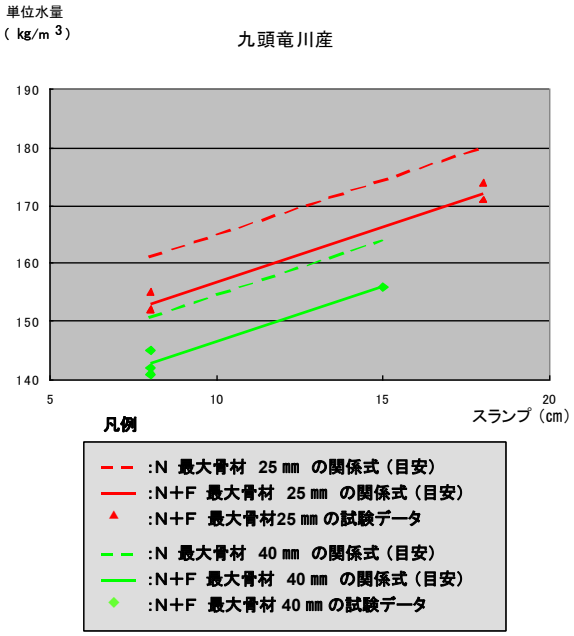
配合※	49-8-25
スランプ(cm)	8.0
空気量(%)	4.3

配合※	49-18-25
スランプ(cm)	18.5
空気量(%)	4.9

※水結合材比－スランプ－粗骨材の最大寸法

（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(内割り)）

図－3.11 能登産骨材における単位水量とスランプの関係



配合	単位水量(kg/m³)		
	N+F	N	差
60−8−25	152	160	−8
50−8−25	152	160	−8
40−8−25	155	163	−8
60−18−25	171	179	−8
50−18−25	171	179	−8
40−18−25	174	182	−8
60−8−40	141	149	−8
50−8−40	142	150	−8
40−8−40	145	153	−8
50−15−40	156	164	−8

※N+F の単位水量は、今回の試験データ
N の単位水量は、生コン工場既存の配合表の値

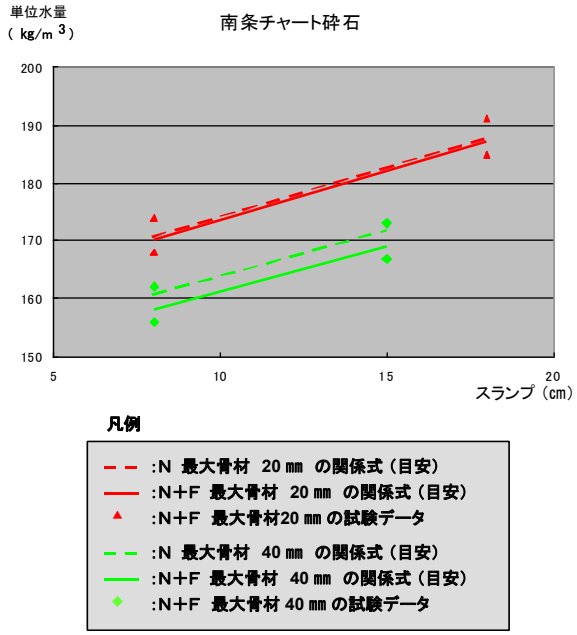
配合※	50-8-25
スランプ(cm)	9.0
空気量(%)	4.7

配合※	50-18-25
スランプ(cm)	19.0
空気量(%)	4.3

※水結合材比ースランプー粗骨材の最大寸法

(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(内割り))

図－3.12 九頭竜川産骨材における単位水量とスランプの関係



配合	単位水量(kg/m³)		
	N+F	N	差
60−8−20	168	168	0
50−8−20	168	168	0
40−8−20	174	176	−2
60−18−20	185	185	0
50−18−20	185	185	0
40−18−20	191	193	−2
60−8−40	156	158	−2
50−8−40	156	158	−2
40−8−40	162	166	−4
60−15−40	167	169	−2
50−15−40	167	169	−2
40−15−40	173	177	−4

※ N+F の単位水量は、今回の試験データ
N の単位水量は、生コン工場既存の配合表の値

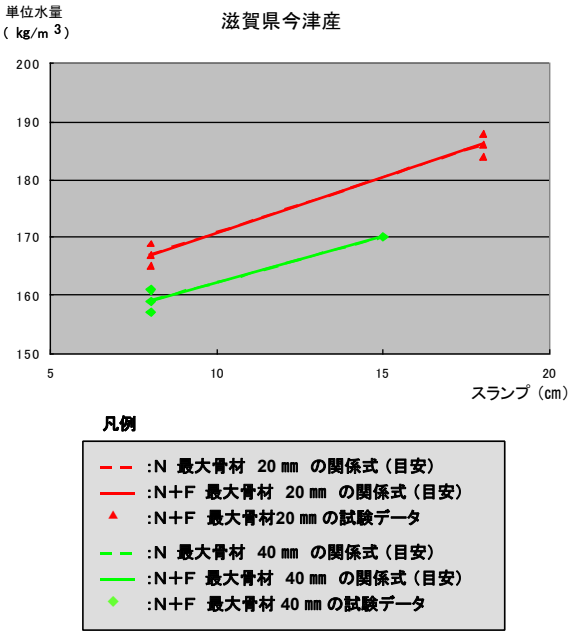
配合※	50-8-20
スランプ(cm)	9.5
空気量(%)	5.5

配合※	50-18-20
スランプ(cm)	18.5
空気量(%)	5.2

※水結合材比ースランプー粗骨材の最大寸法

（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(内割り)）

図－3.13 南条産骨材における単位水量とスランプの関係



配合	単位水量(kg/m³)		
	N+F	N	差
60−8−20	167	167	0
50−8−20	165	165	0
40−8−20	169	169	0
60−18−20	186	186	0
50−18−20	184	184	0
40−18−20	188	188	0
60−8−40	159	159	0
50−8−40	157	157	0
40−8−40	161	161	0
50−15−40	170	170	0

※ N+F の単位水量は、今回の試験データ
　N の単位水量は、生コン工場既存の配合表の値

配合※	50-8-20
スランプ(cm)	10.0
空気量(%)	5.0

配合※	50-18-20
スランプ(cm)	19.0
空気量(%)	5.1

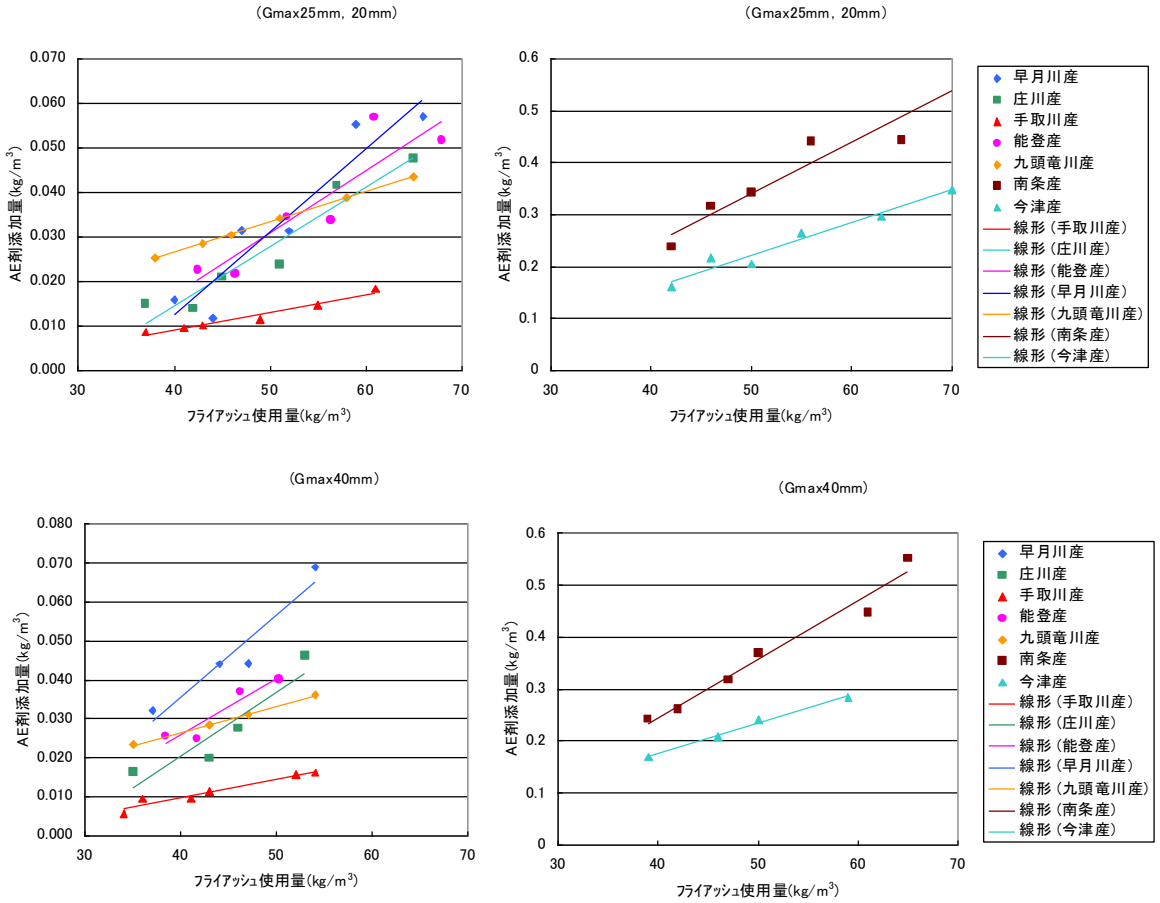
※水結合材比ースランプー粗骨材の最大寸法

（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(内割り)）

図－3.14 今津産骨材における単位水量とスランプの関係

c.　AE 剤添加量とフライアッシュ使用量との関係

AE 剤添加量とフライアッシュ使用量との関係を**図－3.15** に示す。図より，AE 剤の添加量がフライアッシュの使用量と比例関係にあり，各工場で通常使用している AE 剤により，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの空気量の調整が可能であった。これは，北陸産分級フライアッシュの強熱減量が 2%から 3%程度であり，値そのものが小さいためと考えられる。



骨材種類	Gmax20,25mm		Gmax40mm	
	関係式	相関係数(R^2)	関係式	相関係数(R^2)
早月川産	y=0.0019x−0.0612	0.8922	y=0.0021x−0.0484	0.9164
庄川産	y=0.0013x−0.0380	0.9217	y=0.0017x−0.0457	0.8623
手取川産	y=0.0004x−0.0068	0.9527	y=0.0005x−0.0094	0.9422
能登産	y=0.0014x−0.0393	0.8186	y=0.0014x−0.0306	0.8910
九頭竜川産	y=0.0007x−0.0006	0.9996	y=0.0007x−0.0001	0.9982
南条産	y=0.0098x−0.1472	0.9338	y=0.0112x−0.2028	0.9694
今津産	y=0.0062x−0.0899	0.9570	y=0.0058x−0.0548	0.9894

図－3.15 AE 剤添加量とフライアッシュ使用量との関係

ｄ．配　合

室内試験の結果，得られた配合表（24-8-25 かつ W/B　55%以下の場合）を**表－3.13** から**表－3.19** に，配合における単位水量の比較を**図 3.16** に，配合における単位セメント量の比較を**図 3.17** に，配合における単位結合材量の比較を**図 3.18** に示す。**図 3.16** より，単位水量は，河川砂利を用いている早月川産，庄川産，手取川産，九頭竜川産の骨材については，フライアッシュを混和することで，汎用コンクリートに対して 1～12kg/m^3 低減することができた。一方，砕石を用いている能登産，南条産，今津産の骨材については，元々の単位水量が河川砂利を使用したものより多く，河川砂利を使用した場合にみられた単位水量の減衰効果はみられなかった。これは，砕石の場合には，骨材の形状が角張っており，骨材同士の噛み合わせによる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 3.17** より，単位セメント量は，汎用コンクリートに対して 20～60kg/m^3 低減することができた。また，**図 3.18** より，単位結合材量は，圧縮強度発現が小さかった南条産では少し単位結合材量が多くなっているが，骨材毎のばらつきが大きく，全体的には顕著な傾向はみられなかった。

表－3.13 早月川産骨材における配合表

	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 ad (kg/m^3)	備　考
N	54.5	44.8	292	－	159	831	1044	2.92	27N/mm^{2}配合
BB	53.9	44.4	293	－	158	821	1050	2.93	27N/mm^{2}配合
N＋F	54.5	44.8	245	43	157	828	1044	2.88	27N/mm^{2}配合

（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(内割り)）

表－3.14 庄川産骨材における配合表

	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 ad (kg/m^3)	備　考
N	53.8	44.2	286	－	154	814	1034	2.86	27N/mm^{2}配合
BB	51.5	42.8	297	－	153	782	1052	2.97	27N/mm^{2}配合
N＋F	50.0	43.5	255	45	150	795	1038	3.00	27N/mm^{2}配合

（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(内割り)）

表－3.15 手取川産骨材における配合表

	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 ad (kg/m^3)	備　考
N	54.7	44.0	285	－	156	802	1036	2.85	27N/mm^{2}配合
BB	53.7	43.4	287	－	154	789	1044	2.87	27N/mm^{2}配合
N＋F	53.3	45.8	230	40	144	851	1021	2.43	27N/mm^{2}配合

（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(内割り)）

表－3.16 能登産骨材における配合表

	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)	備　考
N	52.3	42.7	331	－	173	732	1024	3.31	27N/mm²配合
BB	51.5	41.5	326	－	168	714	1051	3.59	27N/mm²配合
N＋F	54.6	43.0	266	47	171	742	1024	3.13	24N/mm²配合
N＋F	51.2	41.5	284	50	171	725	1024	3.34	27N/mm²配合

（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(内割り)）

表－3.17 九頭竜川産骨材における配合表

	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)	備　考
N	54.0	45.0	297	－	160	810	1023	3.20	24N/mm²配合
BB	51.0	43.2	308	－	157	774	1049	3.31	24N/mm²配合
N＋F	51.0	43.5	253	45	152	799	1039	2.98	24N/mm²配合

（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(内割り)）

表－3.18 南条産骨材における配合表

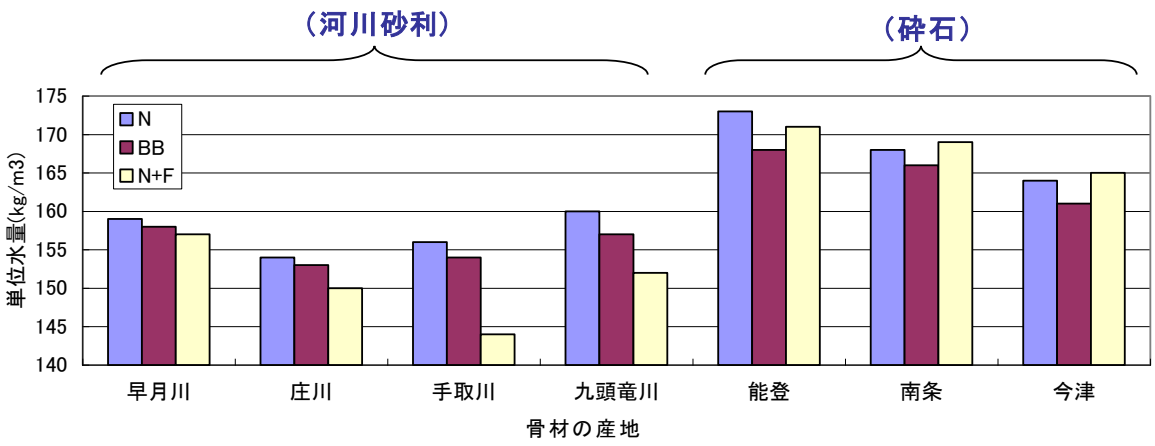
	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)	備　考
N	54.0	46.7	312	－	168	845	1023	3.12	24N/mm²配合
BB	52.0	46.3	320	－	166	835	1049	3.20	24N/mm²配合
N＋F	49.0	45.1	293	52	169	795	1039	3.45	24N/mm²配合

（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(内割り)）

表－3.19 今津産骨材における配合表

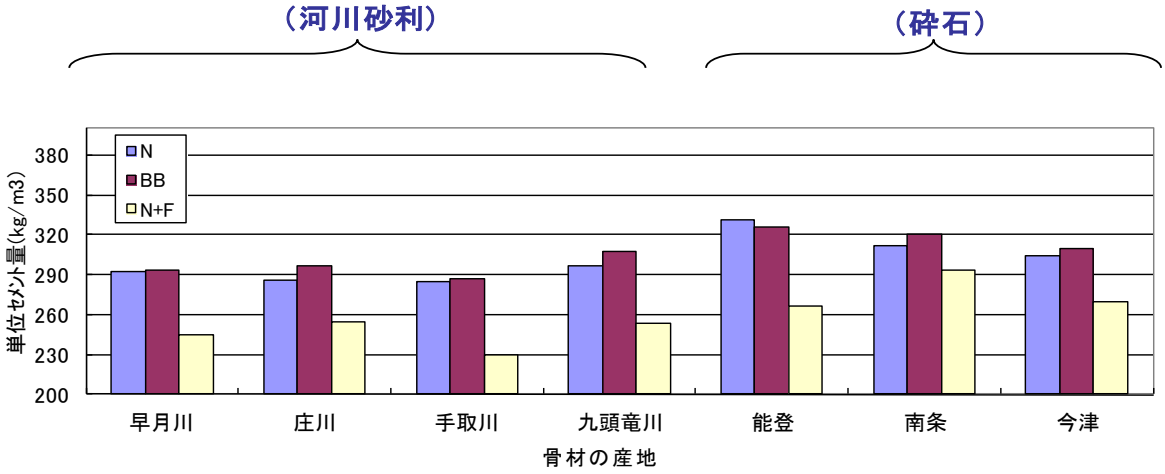
	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)	備　考
N	53.9	43.6	304	－	164	822	1065	3.83	24N/mm²配合
BB	51.9	42.3	310	－	161	796	1085	3.91	24N/mm²配合
N＋F	51.9	42.6	270	48	165	791	1068	4.01	24N/mm²配合

（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(内割り)）



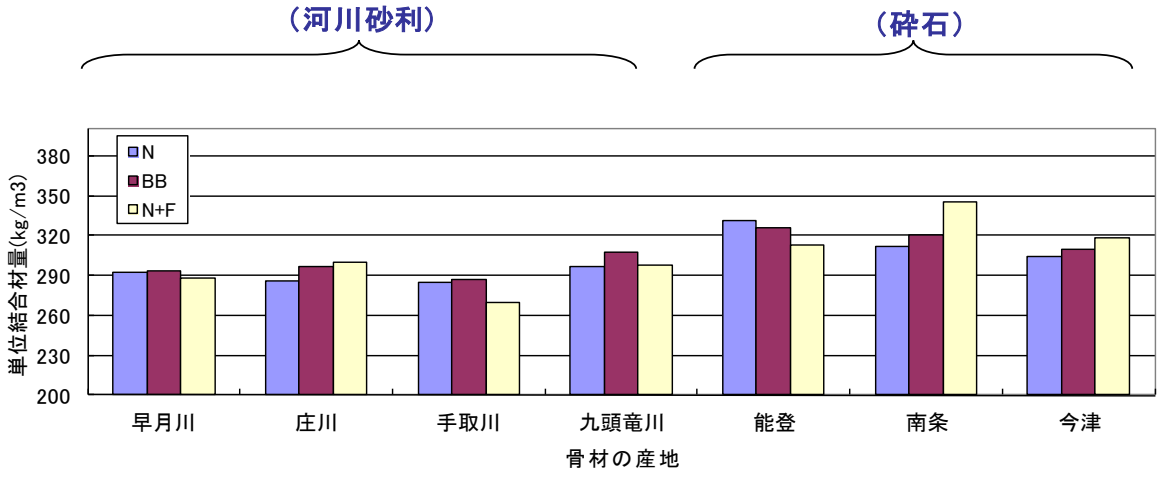
（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

図－3.16 配合における単位水量の比較



（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(内割り)）

図－3.17 配合における単位セメント量の比較



（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(内割り)）

図－3.18 配合における単位結合材量の比較

3.2.2 実機試験による配合検討

実機試験は，室内試験結果から得られた配合（**表－3.13** から**表－3.19**）をもとに，実際の生コンクリート工場にある実機によりコンクリートを製造し，圧縮強度，スランプロスおよび空気量ロスを確認した。

(1) 使用材料

実機試験で使用した材料は，室内試験と同様である。

(2) 実施ケース

実機試験の実施ケースを**表－3.20** に示す。配合は，呼び強度 24，スランプ※1 8cm，粗骨材の最大寸法 25mm(24-8-25)かつ W/B 55%以下を満足する配合とし，W/B 55%以下を満足しない場合には，呼び強度を 27 とした。なお，空気量※2 は 4.5%とした。

※1 製造直後のスランプの管理基準は、荷卸し地点でのスランプロスを考慮し、9±1.5cm とした。
※2 製造直後の空気量の管理基準は、荷卸し地点での空気量ロスを考慮し、基本配合の空気量 5.0±1%とした。

表－3.20 実機試験の実施ケース一覧

	実施ケース	実施日	備　考
早月川産 デンカ生コン富山㈱	①N＋F：27-8-25 ②BB　：27-8-25 ③N　　：27-8-25	平成 23 年 6 月 11 日	管理基準（製造直後） スランプ 9±1.5cm 空気量 5.0±1.0%
手取川産 日本海生コン㈱	①N＋F：27-8-25 ②BB　：27-8-25 ③N　　：27-8-25	平成 23 年 6 月 14 日	管理基準（製造直後） スランプ 9±1.5cm 空気量 5.0±1.0%
能登産 ㈱新出組	①N＋F：24-8-25 ②BB　：27-8-25 ③N　　：27-8-25	平成 23 年 6 月 14 日	管理基準（製造直後） スランプ 9±1.5cm 空気量 5.0±1.0%
九頭竜川産 福井宇部生コン㈱	①N＋F：24-8-25 ②BB　：24-8-25 ③N　　：24-8-25	平成 24 年 10 月 18,19 日	管理基準（製造直後） スランプ 9±1.5cm 空気量 5.0±1.0%
南条産 武生小野田レミコン㈱	①N＋F：24-8-20 ②BB　：24-8-20 ③N　　：24-8-20	平成 24 年 10 月 17,18 日	管理基準（製造直後） スランプ 9±1.5cm 空気量 5.0±1.0%

（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(内割り)）

(3) 実機試験結果

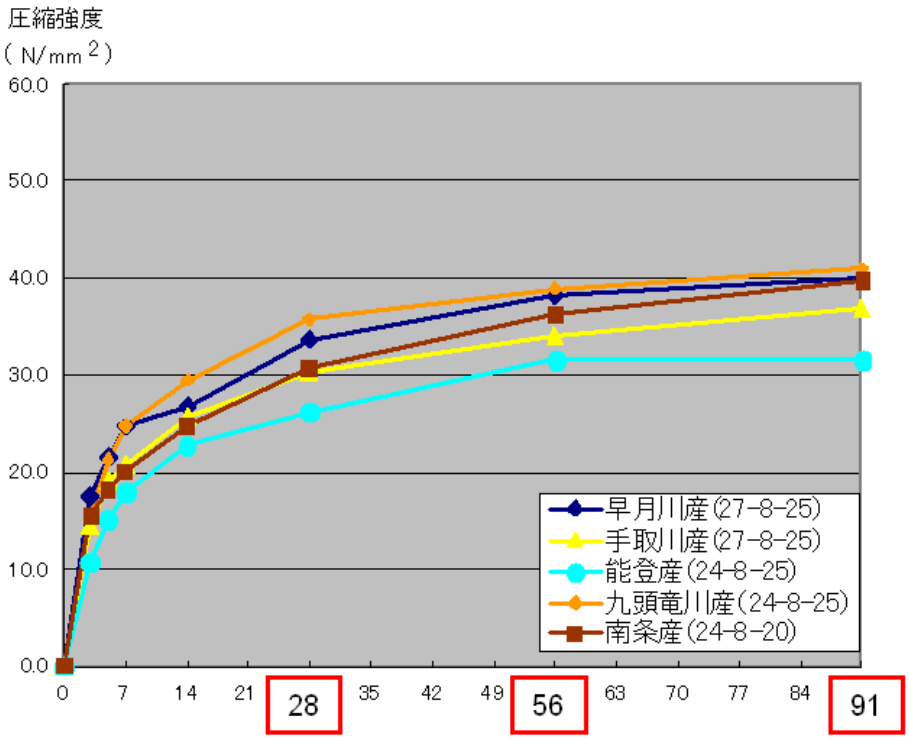
a. 圧縮強度

圧縮強度と材齢との関係を**図－3.19** に示す。図より，いずれの骨材においても，管理材齢 28 日において呼び強度を満足している。また，材齢 3 日の強度は，いずれの骨材も 10N/mm² を超え，柱，壁，はりの側面の型枠を取り外してよい時期の参考値 5N/mm² を満足し[6]，材齢 54 日，材齢 91 日における長期強度増進は伸び率で 15 から 20%確認された。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，強度発現性に関して，現配合で問題ないと考えられる。

(N/mm²)

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)※	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)※	14.4	19.1	20.9	25.6	30.3	34.0	36.9	12.2%	21.8%
能登産(24-8-25)※	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)※	15.6	21.2	24.8	29.5	35.7	39.0	41.0	9.2%	14.8%
南条産(24-8-20)※	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－スランプ－粗骨材の最大寸法

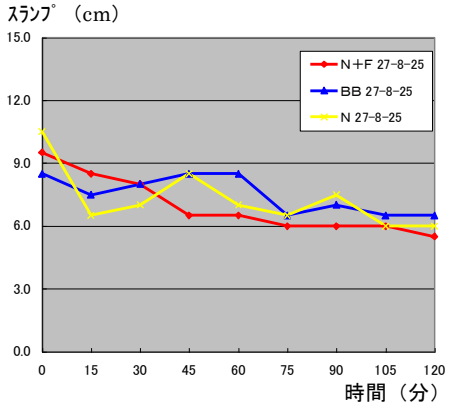


図－3.19 圧縮強度と材齢との関係

b. スランプロス

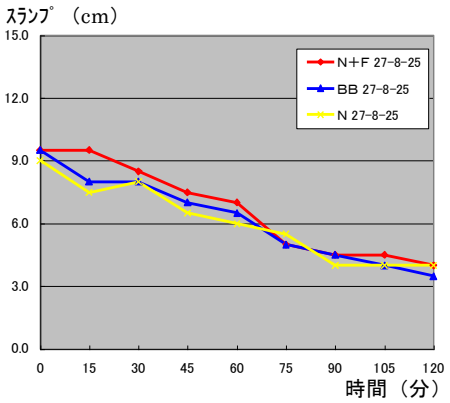
使用骨材毎のスランプロスの試験結果を**図－3.20** から**図－3.24** に，スランプ状況写真を**表－3.21** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（N＋F）のスランプロスは，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同程度であるが，経過１時間以降，ロスが大きい傾向がみられた。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，経過１時間以内での施工が推奨される。

時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F27-8-25	9.5	8.5	8.0	6.5	6.5	6.0	6.0	6.0	5.5
BB27-8-25	8.5	7.5	8.0	8.5	8.5	6.5	7.0	6.5	6.5
N27-8-25	10.5	6.5	7.0	8.5	7.0	6.5	7.5	6.0	6.0



図－3.20 早月川産骨材のスランプロス

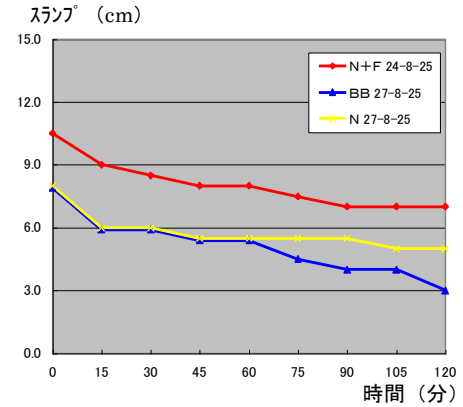
時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F27-8-25	9.5	9.5	8.5	7.5	7.0	5.0	4.5	4.5	4.0
BB27-8-25	9.5	8.0	8.0	7.0	6.5	5.0	4.5	4.0	3.5
N27-8-25	9.0	7.5	8.0	6.5	6.0	5.5	4.0	4.0	4.0



（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(内割り)）

図－3.21 手取川産骨材のスランプロス

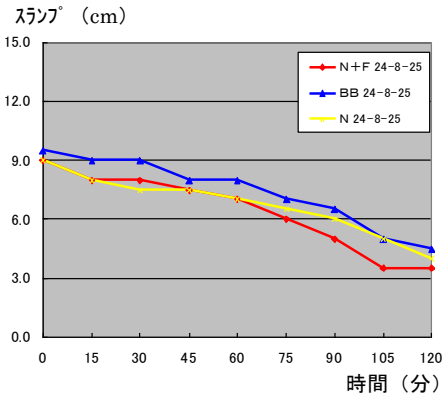
時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F24-8-25	10.5	9.0	8.5	8.0	8.0	7.5	7.0	7.0	7.0
BB27-8-25	8.0	6.0	6.0	5.5	5.5	4.5	4.0	4.0	3.0
N27-8-25	8.0	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.0	5.0



（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(内割り)）

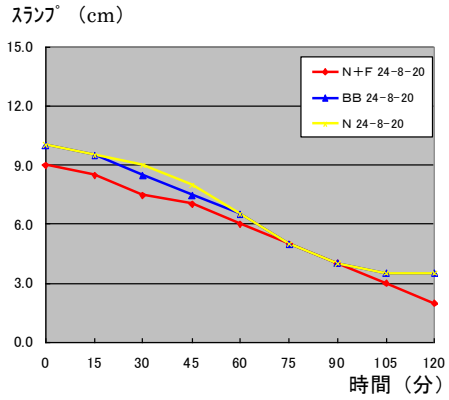
図－3.22 能登産骨材のスランプロス

時間（分）	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F24-8-25	9.0	8.0	8.0	7.5	7.0	6.0	5.0	3.5	3.5
BB24-8-25	9.5	9.0	9.0	8.0	8.0	7.0	6.5	5.0	4.5
N24-8-25	9.0	8.0	7.5	7.5	7.0	6.5	6.0	5.0	4.0



図－3.23 九頭竜川産骨材のスランプロス

時間（分）	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F24-8-20	9.0	8.5	7.5	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0
BB24-8-20	10.0	9.5	8.5	7.5	6.5	5.0	4.0	3.5	3.5
N24-8-20	10.0	9.5	9.0	8.0	6.5	5.0	4.0	3.5	3.5

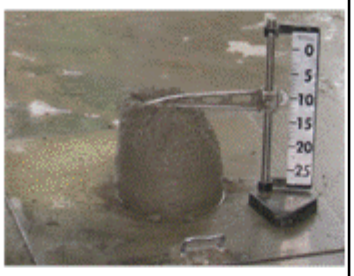
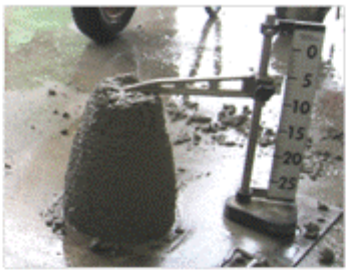
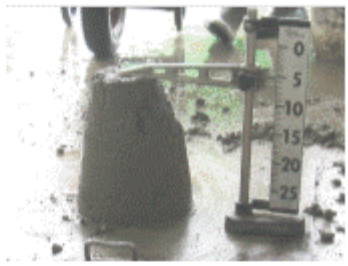
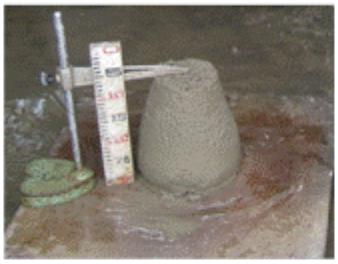
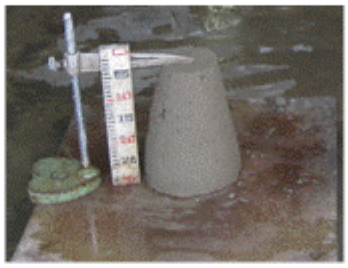
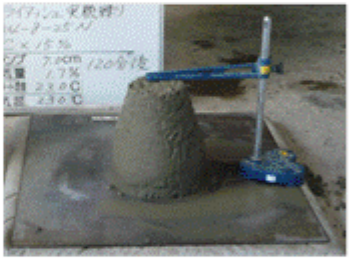
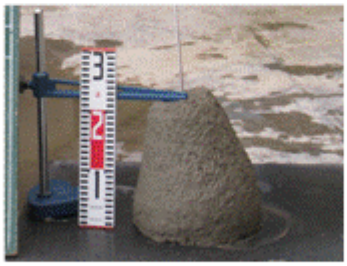
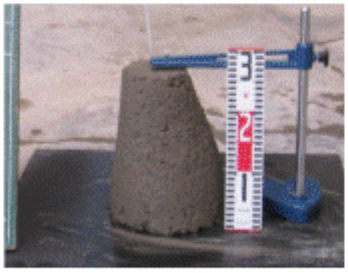
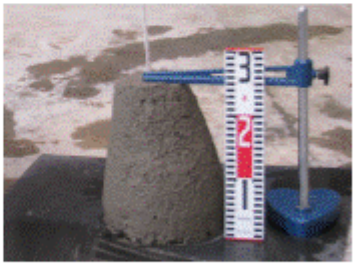
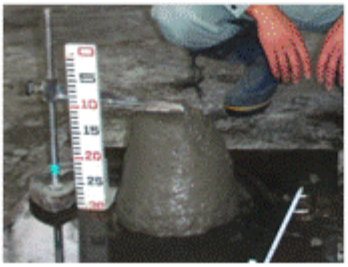
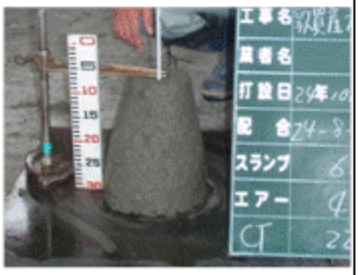


図－3.24 南条産骨材のスランプロス

（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(内割り)）

表－3.21 実機試験でのスランプ状況

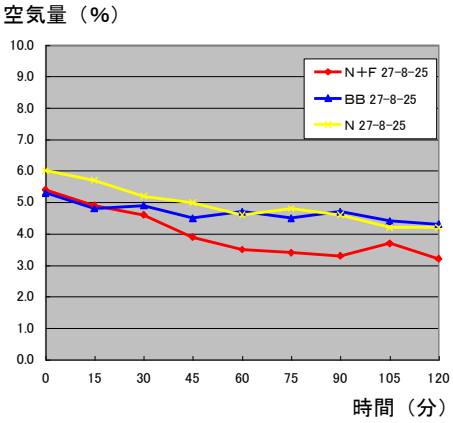
凡例：スランプ－空気量－コンクリート温度

骨材	配合※	直後 状態	経時 60 分 状態	経時 120 分 状態
早月川産	27－8－25	 9.5-5.4-23.0	 6.5-3.5-23.0	 5.5-3.2-23.0
手取川産	27－8－25	 9.5-4.7-23.0	 7.0-3.3-23.0	 4.0-2.6-23.0
能登産	27－8－25	 10.5-5.7-22.0	 8.0-3.8-22.0	 7.0-1.7-22.0
九頭竜川産	27－8－25	 9.0-5.5-20.0	 7.0-4.6-22.0	 3.5-2.6-20.0
南条産	27－8－25	 9.0-5.2-21.0	 6.0-4.0-22.0	 2.0-3.5-22.0

c. 空気量ロス

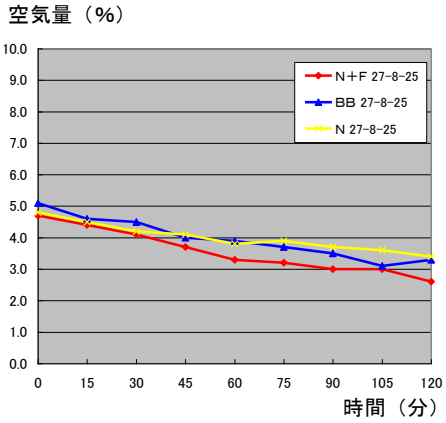
使用骨材毎の空気量ロスの試験結果を**図－3.25** から**図－3.29** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の空気量ロスは，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同程度であるが，経過１時間以降，ロスが大きい傾向がみられた。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，経過１時間以内での施工が推奨される。

時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F27-8-25	5.4	4.9	4.6	3.9	3.5	3.4	3.3	3.7	3.2
BB27-8-25	5.3	4.8	4.9	4.5	4.7	4.5	4.7	4.4	4.3
N27-8-25	6.0	5.7	5.2	5.0	4.6	4.8	4.6	4.2	4.2



図－3.25 早月川産骨材の空気量ロス

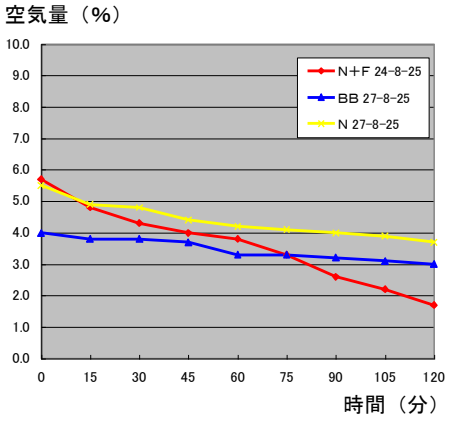
時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F27-8-25	4.7	4.4	4.1	3.7	3.3	3.2	3.0	3.0	2.6
BB27-8-25	5.1	4.6	4.5	4.0	3.9	3.7	3.5	3.1	3.3
N27-8-25	4.8	4.5	4.2	4.1	3.8	3.9	3.7	3.6	3.4



図－3.26 手取川産骨材の空気量ロス

（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(内割り)）

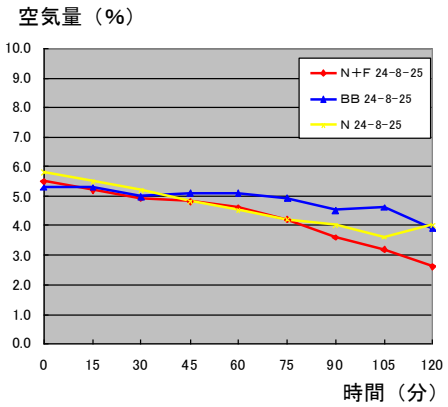
時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F24-8-25	5.7	4.8	4.3	4.0	3.8	3.3	2.6	2.2	1.7
BB27-8-25	4.0	3.8	3.8	3.7	3.3	3.3	3.2	3.1	3.0
N27-8-25	5.5	4.9	4.8	4.4	4.2	4.1	4.0	3.9	3.7



（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(内割り)）

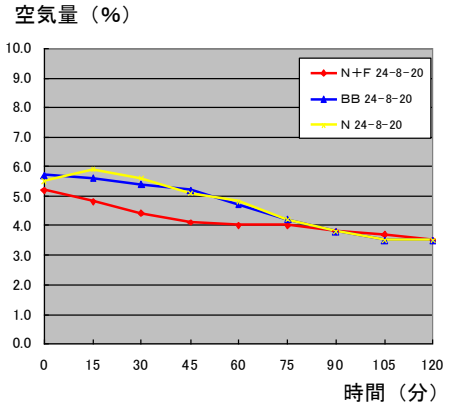
図－3.27 能登産骨材の空気量ロス

時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F27-8-25	5.5	5.2	4.9	4.8	4.6	4.2	3.6	3.2	2.6
BB27-8-25	5.3	5.3	5.0	5.1	5.1	4.9	4.5	4.6	3.9
N27-8-25	5.8	5.5	5.2	4.8	4.5	4.2	4.0	3.6	4.0



図－3.28 九頭竜川産骨材の空気量ロス

時間(分)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
N+F27-8-25	5.2	4.8	4.4	4.1	4.0	4.0	3.8	3.7	3.5
BB27-8-25	5.7	5.6	5.4	5.2	4.7	4.2	3.8	3.5	3.5
N27-8-25	5.5	5.9	5.6	5.1	4.8	4.2	3.8	3.5	3.5



図－3.29 南条産骨材の空気量ロス

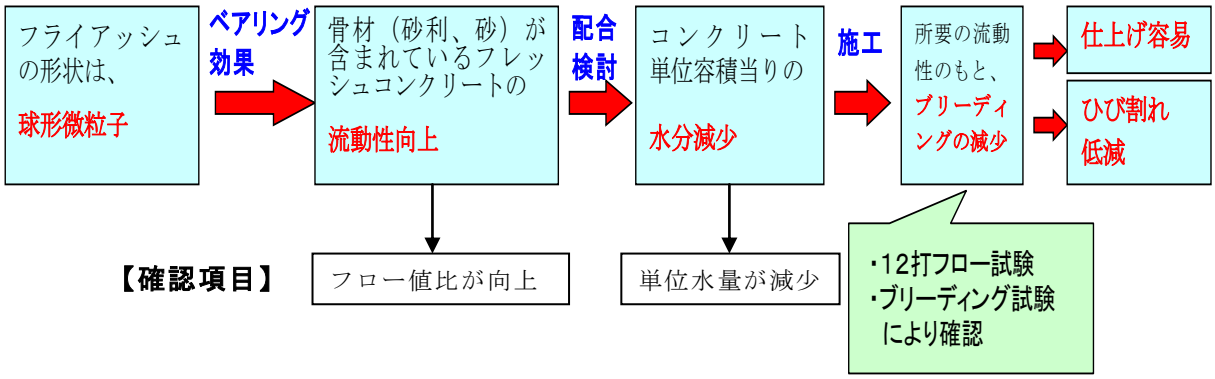
（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，Ｎ＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

3.3 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質 [7)]

3.3.1 施工性についての検討

北陸産分級フライアッシュは，分級により角張った粒子や中空の粒子が少なくなり，細かく均等な粒子となったことから，フロー値比が向上しており，フライアッシュのボールベアリング効果によるコンクリートの流動性の向上が期待された。実際に，この北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合検討では，同一のスランプを得るために必要な水量が減り，河川砂利を骨材とする場合には，配合における単位水量を 1～12kg/m^3 低減することができた。一般的に，コンクリートの水和反応に必要な水の量はセメント重量の約 30%といわれており [8)]，これ以外の水は，基本的にコンクリートの施工のための水であり，硬化コンクリートの強度発現に対しては不要な水である。従って，配合における単位水量の低減は，大局的にはコンクリート品質の向上につながると考えられる。一方，コンクリートの施工性の観点からみると，**図－3.30** に示すように，単位水量が低減されたコンクリートを用いて施工した場合，コンクリートの所要の流動性の確保を条件として，ブリーディングの減少に伴う仕上げ時間の短縮や沈降ひび割れの減少などの施工面・品質面での向上が期待できる。

そこで，コンクリートの施工性に関して，コンクリートの所要の流動性が確保されているか，また，ブリーディングが減少しているかを確認するため，**表－3.13** から**表－3.19** の配合により，12 打フロー試験とブリーディング試験による汎用コンクリートとの比較を実施した。

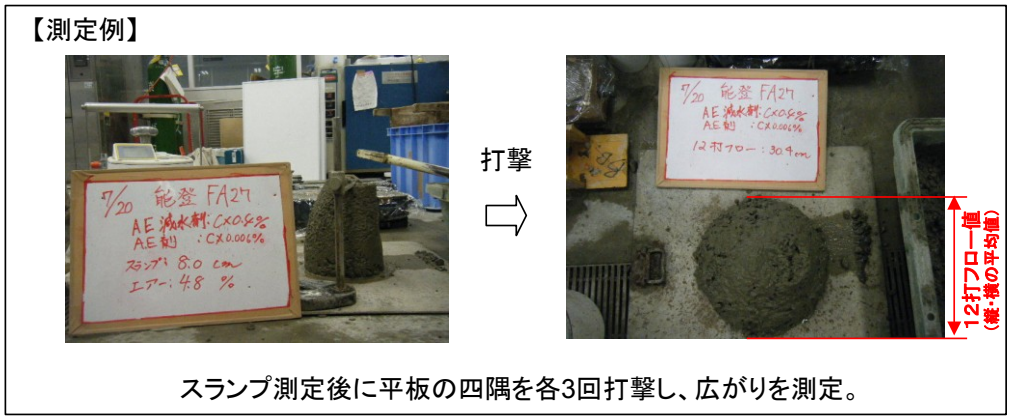


図－3.30 コンクリートの施工性に関するフロー

(1) 12 打フロー試験

a. 試験方法

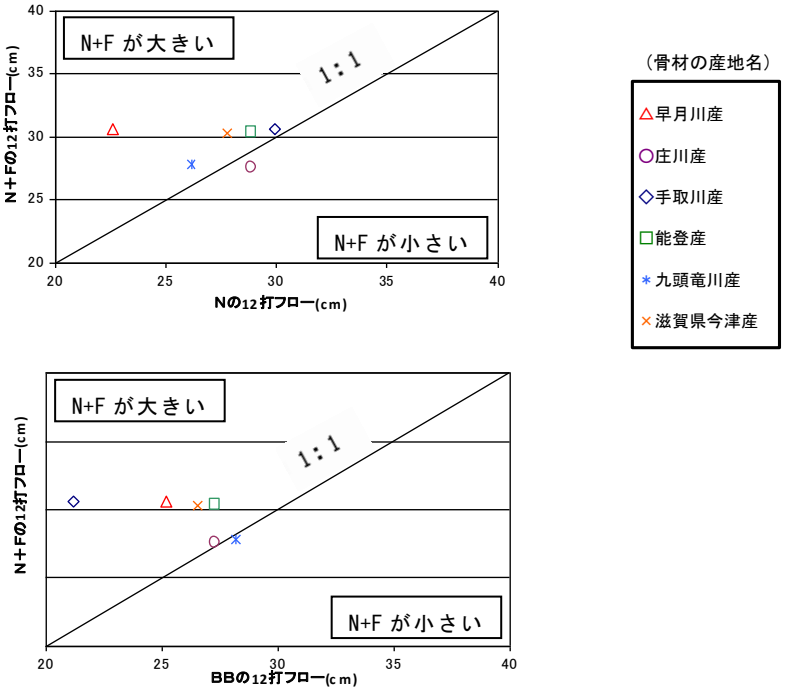
スランプ測定後に，スランプ測定用の平板の四隅を各 3 回打撃し，コンクリートの平面的な広がりを測定する。試験状況写真を**図－3.31** に示す。



図－3.31 試験の状況写真

b. 試験結果

１２打フロー試験結果を**図－3.32** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の流動性は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）に比べ，同等もしくは大きい。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，汎用コンクリート以上の流動性が確保されているといえる。



(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(内割り))

図－3.32 12 打フロー試験結果

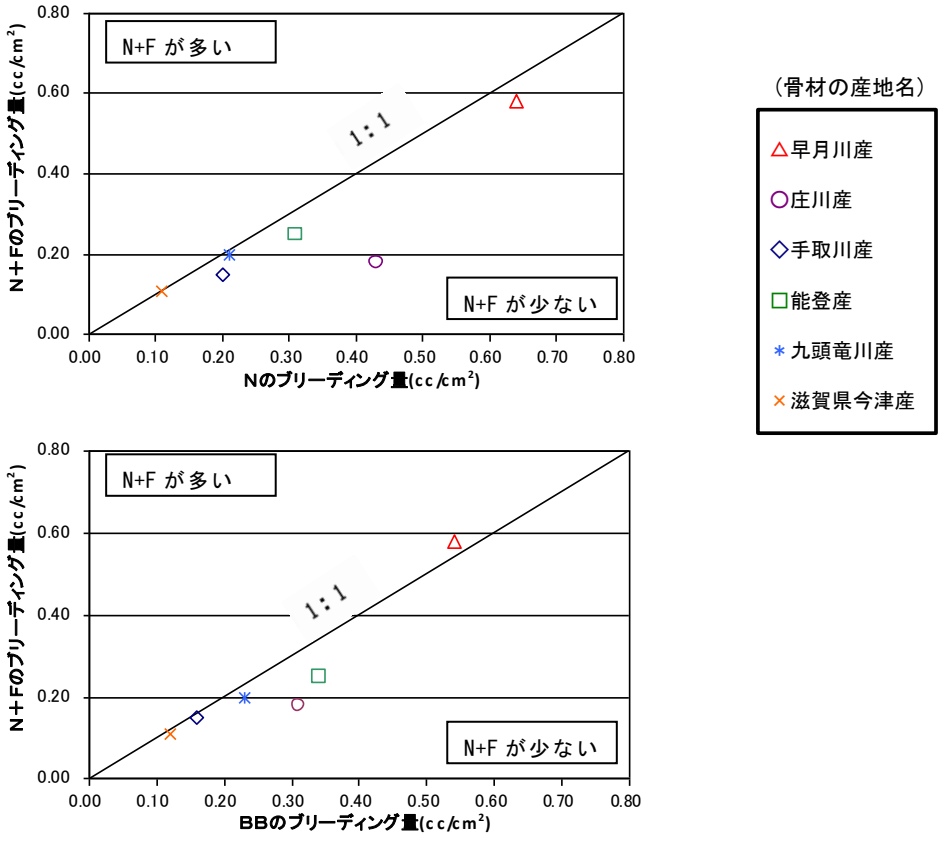
(2) ブリーディング試験

a. 試験方法

JIS A1123（コンクリートのブリーディング試験方法）に準拠し，コンクリート上面に浸み出した水をスポイトで吸い取り，水量を計測する，記録した最初の時間から 60 分間は 10 分ごとに測定し，その後は 30 分ごとに測定する。なお，試料の容器は，水を吸い取る時は除き蓋をしておく。

b. 試験結果

ブリーディング試験結果を**図－3.33** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（N＋F）のブリーディングは，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）に比べ，同等もしくは少ない。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，前述のとおり流動性が確保されており，ブリーディングの減少に伴う仕上げ時間の短縮や沈降ひび割れの減少などの効果が期待できる。



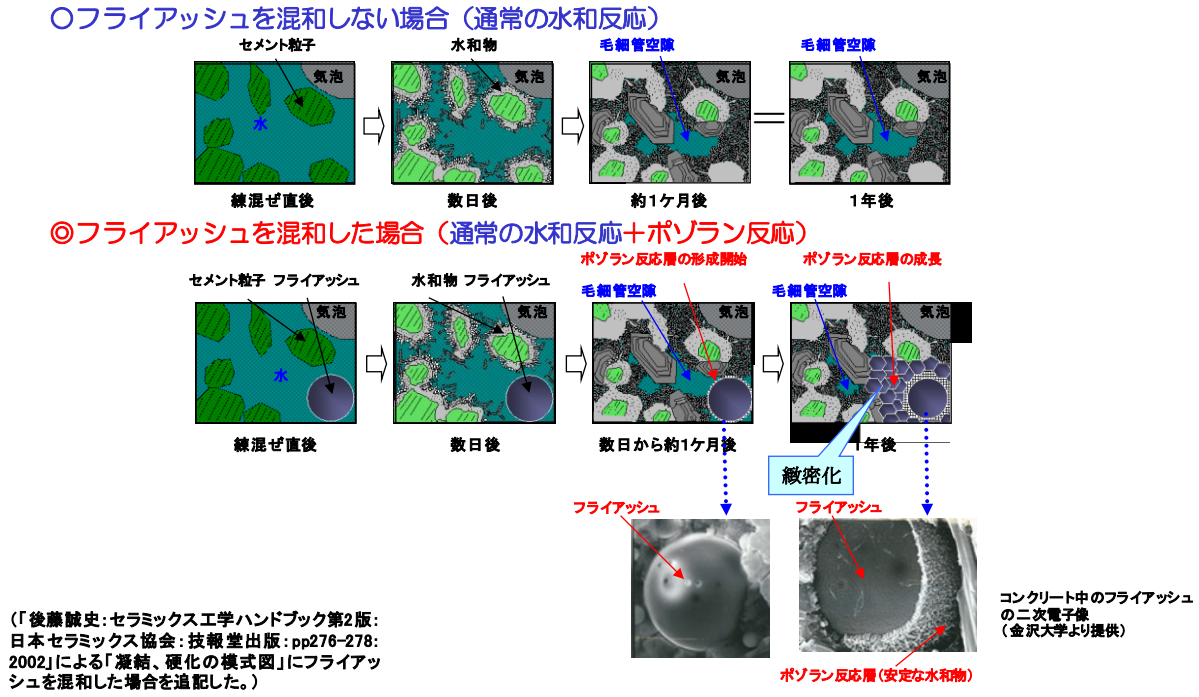
（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

図－3.33 ブリーディング試験結果

3.3.2 強度発現性についての検討

北陸産分級フライアッシュは，分級により，その平均粒径がフライアッシュ原粉の約 1/3 と細かくなり，その形状も均等な粒子となったことから，活性度指数が向上しており，フライアッシュのポゾラン反応によるコンクリートの耐久性の向上が期待された。実際に，この北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合検討では，汎用コンクリートと遜色ない強度発現性が確認されている。一般的に，フライアッシュのポゾラン反応は，**図－3.34** に示すように，コンクリート組織が緻密となり，コンクリートの長期強度の増進や耐久性につながるといわれているが，初期材齢から長期材齢に至る強度発現性については十分な検討がなされていない。

そこで，コンクリートの強度発現性に関して，初期材齢から長期材齢に至る強度発現性を確認するため，**表－3.13** から**表－3.19** の配合により，圧縮強度試験と静弾性係数試験による汎用コンクリートとの比較を実施した。



図－3.34 ポゾラン反応の概念図

1) 圧縮強度試験

a. 試験方法

JIS A1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠し，圧縮試験機により供試体の圧縮強度を測定する。測定は，3，5，7，14，28，56，91 日材齢の供試体にて実施する。

b. 試験結果

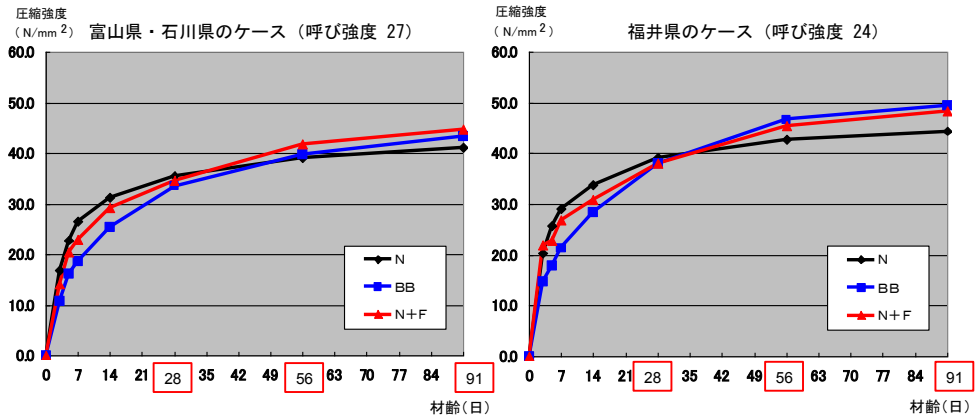
呼び強度 27 の富山県・石川県の骨材についての圧縮強度結果および呼び強度 24 の福井県の骨材について，呼び強度毎に平均した圧縮強度結果を**図－3.35** に，骨材毎の圧縮強度試験結果を**図－3.36** に示す。各骨材を平均した圧縮強度結果では，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の初期の強度発現（材齢 3 日，5 日強度）は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ）より若干小さく，高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）より大きい。これは，実機試験結果と同様，材齢 3 日の強度は，いずれの骨材も 10N/mm² を超えているため，型枠の取り外し時期などの実質的な問題はないと考えられる。また，Ｎ＋Ｆの長期強度増進（28 日→56 日伸び率および 28 日→91 日伸び率）は，Ｎより大きく，ＢＢと同等であった。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，Ｎに対する初期強度発現を除いて，強度発現性に関して，汎用コンクリートに比べ，同等以上であるといえる。

富山県・石川県のケース（呼び強度 27）　　(N/mm²)

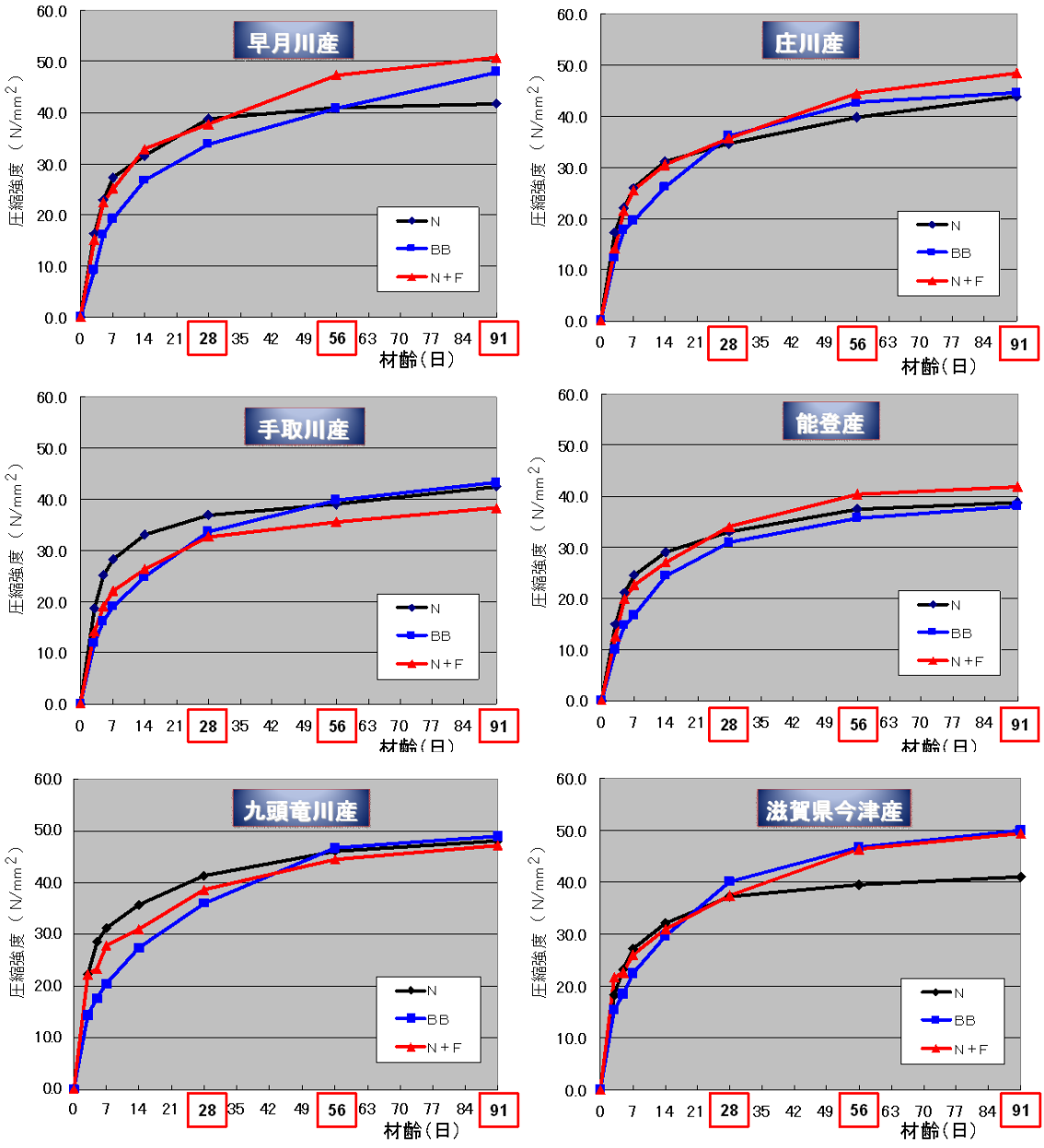
	3日強度	5日強度	7日強度	14日強度	28日強度	56日強度	91日強度	28日→56日の伸び率	28日→91日の伸び率
N	16.8	22.9	26.6	31.2	35.7	39.1	41.2	9.5%	15.4%
BB	10.9	16.2	18.7	25.5	33.6	39.8	43.4	18.5%	29.2%
N+F	14.1	20.5	23.0	29.3	34.8	41.9	44.9	20.4%	29.0%

福井県のケース（呼び強度 24）　　(N/mm²)

	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
N	20.3	25.8	29.2	33.9	39.3	42.8	44.5	8.9%	13.2%
BB	14.8	18.0	21.4	28.5	38.0	46.7	49.4	22.9%	30.0%
N+F	21.9	22.9	26.9	31.0	38.1	45.4	48.4	19.2%	27.0%



図－3.35 圧縮強度試験結果（平均）



図－3.36 圧縮強度試験結果（骨材毎）

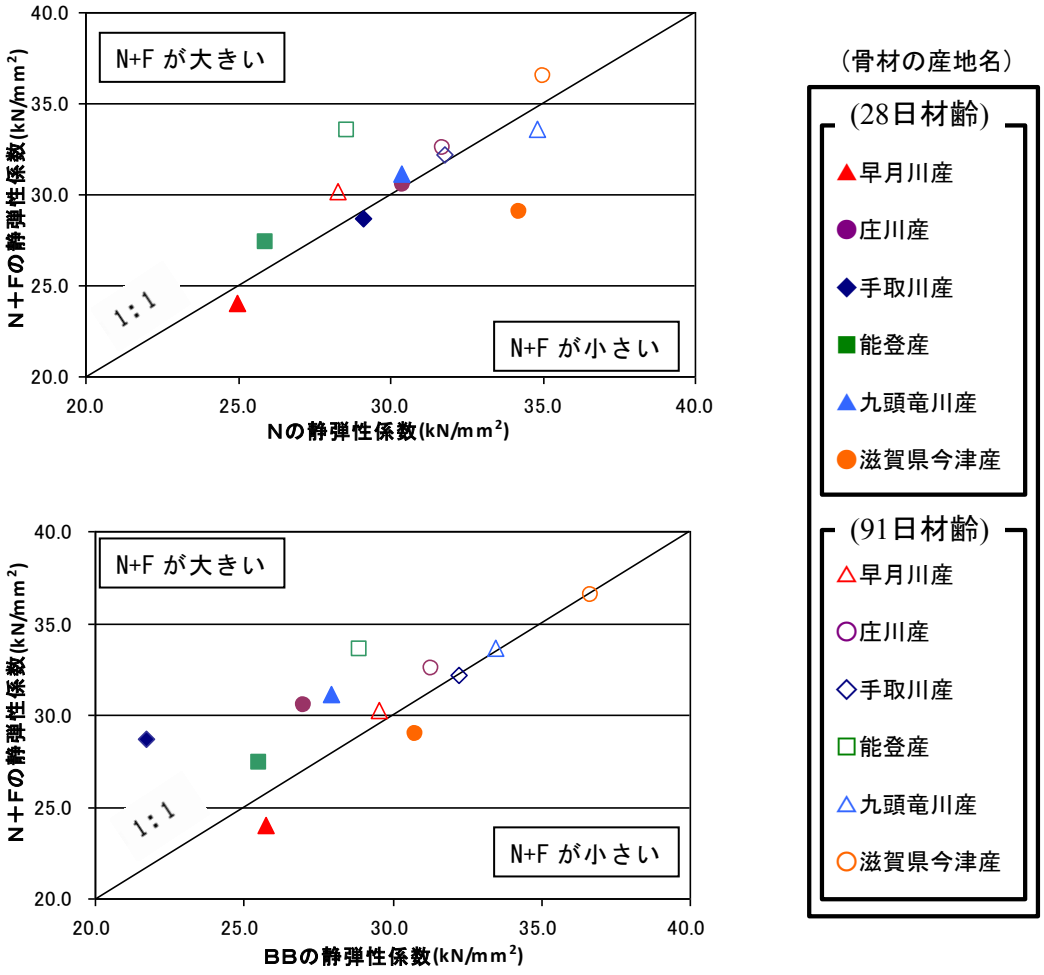
2) 静弾性係数試験

a. 試験方法

JIS A1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に準拠し，ひずみ測定器を用いてひずみを測定する。測定は 28，91 日材齢の供試体にて実施する。

b. 試験結果

静弾性係数結果を**図－3.37** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の静弾性係数は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同等であった。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，変形特性に関して，汎用コンクリートと同等であるといえる。



図－3.37 静弾性係数試験結果

3.4. 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善メカニズム [9),10)]

「3.3.2 強度発現性についての検討」での比較検討は，実際の生コンクリート工場において，所定の呼び強度となる配合を用いての比較であるため，各コンクリートの配合において，W/C が一定となっていない。そこで，北陸産分級フライアッシュがコンクリートの強度発現にどのように関わっているのかを詳しく調べるため，W/C を一定とした比較試験（室内実験）を行い，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善のメカニズムについて考察した。

3.4.1 実験概要

(1) 使用材料および検討ケース

使用材料の概要および検討ケースを**表－3.22** に示す。検討ケースとして，W/C=50%一定とし，セメントを普通ポルトランドセメント（OPC）とフライアッシュセメントＢ種（FB）の２種類，細骨材と粗骨材の組合せを「山砂(S1)と陸砂利（G)」と「山砂(S2)と石灰石砕石（LS)」の２種類とした計４ケースの試験体を作製した。なお，フライアッシュセメントB 種（FB）に用いた北陸産分級フライアッシュは七尾産とし，石灰石骨材に含まれる石灰石微粉末の微粒分量は約 2%，平均粒径は約 9μm で，粒径 10μm 以下の粒度分布は分級フライアッシュとほぼ同様であった。

表－3.22 使用材料および検討ケース

ｹｰｽ	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
ｹｰｽ1 OPC-G	50	41.0	165	OPC 330	S1 706	G1 1068	2.640
ｹｰｽ2 OPC-LS	50	43.5	161	OPC 322	S2 765	G2 1056	2.576
ｹｰｽ3 FB-G	50	41.0	163	FB 326	S1 702	G1 1063	2.608
ｹｰｽ4 FB-LS	50	43.5	156	FB 312	S2 767	G2 1059	2.496

種　別		概　　要
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm^3
	FB	フライアッシュセメントB種, 密度:2.97g/cm^3
細骨材	G	山砂(石川県産), F.M.=2.66, 密度=2.51g/cm^3, 吸水率=1.86%
	S2	山砂(石川県産), F.M.=2.56, 密度=2.54g/cm^3, 吸水率=2.56%
粗骨材	G1	陸砂利(富山県産), Gmax=25mm, F.M.=6.87, 密度=2.64g/cm^3, 吸水率=1.53%
	G2	石灰石砕石(新潟県産), Gmax=20mm, F.M.=6.77, 密度=2.70g/cm^3, 吸水率=0.50%
混和剤	LS	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体

(2) 試験項目

試験項目として，各検討ケースについて，圧縮強度試験，水銀圧入式ポロシメータによるセメントペースト部の細孔径分布測定，偏光反射顕微鏡による観察および走査電子顕微鏡（SEM ：Scanning Electron Microscope）による分析を実施した。圧縮強度試験は，φ100mm×200mm の円柱供試体を作製し，水中標準養生（20℃）にて材齢 7 日，28 日，91 日の 3 材齢について，JIS A1108 に準拠し実施した。細孔径分布測定は，圧縮強度試験と同様に作製された材齢 28 日，91 日の供試体を用いて，長軸方向の中央部より 5mm 角程度のモルタル片を切り出し，付着水を取り除く目的でアセトンに浸漬した後，凍結乾燥

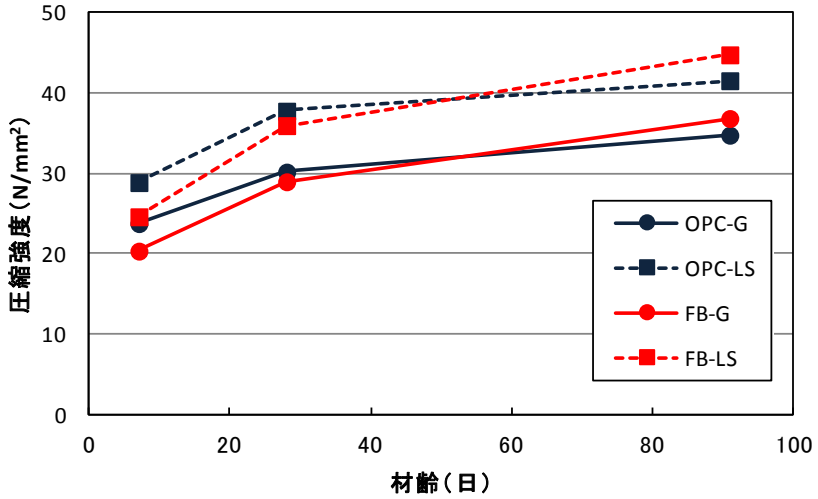
機などを用いて乾燥し，細孔径 0.003μm から 400μm の範囲を測定した。偏光反射顕微鏡による観察および SEM-EDS による分析は，圧縮強度試験と同様に作製された材齢 28 日の供試体を用いて，長軸方向の中央部より供試体の上下がわかるように横 30mm×縦 20mm×厚さ 5mm 程度の小片を切り出し，これを樹脂で包囲しスライドガラスに貼り付けた後，可視光が透過する程度の厚さ（15μm 程度）まで研磨した鏡面研磨薄片を作製し，観察や分析に供した。

3.4.2 実験結果

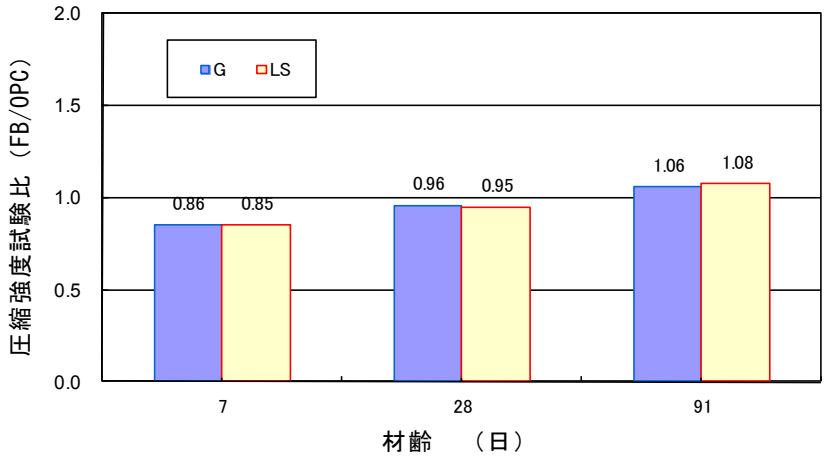
(1) 圧縮強度試験の結果

今回検討した４ケースについての圧縮強度と材齢の関係を**図－3.38** に示す。また，同一粗骨材でのセメント種類別の強度比（FB/OPC）と同一セメントでの粗骨材種類別の強度比（LS/G）を，それぞれ**図－3.39** と**図－3.40** に示す。まず，同一粗骨材でのセメント種類別の比較をした場合，FB は OPC に対し，初期強度（材齢 7 日）は約 85%と低いが，管理材齢（材齢 28 日）になるとその差は約 95%と縮まり，長期強度（材齢 91 日）では約 107%と OPC の強度を上回っている。このことは，FB に含まれる分級フライアッシュの比率が 17%±2%で管理されていることやポゾラン反応に関する既往の知見 [11,12] を踏まえると，材齢 7 日では分級フライアッシュのポゾラン反応がコンクリートの強度にあまり寄与していないが，材齢 7 日から 28 日ではポゾラン反応が大きく進行し，材齢 28 日から 91 日においてもゆっくり寄与し続けているものと推察された。次に，同一セメントでの粗骨材種類別の比較をした場合，LS は G に対し，材齢に関わらず約 1.2 倍の強度発現であった。このことは，石灰石骨材および石灰石微粉末に関する既往の知見 [13~16] を踏まえると，材齢 3 日までのごく初期でのカルシウムシリケート相（C_3S）の水和反応の促進により C-S-H の生成量が増加し，コンクリートの強度発現に寄与したと推察された。一方，材齢 7 日以降のカーボネート水和物の生成は，水和物の粒径とその形状のために強度発現にあまり寄与していないものと推察された。

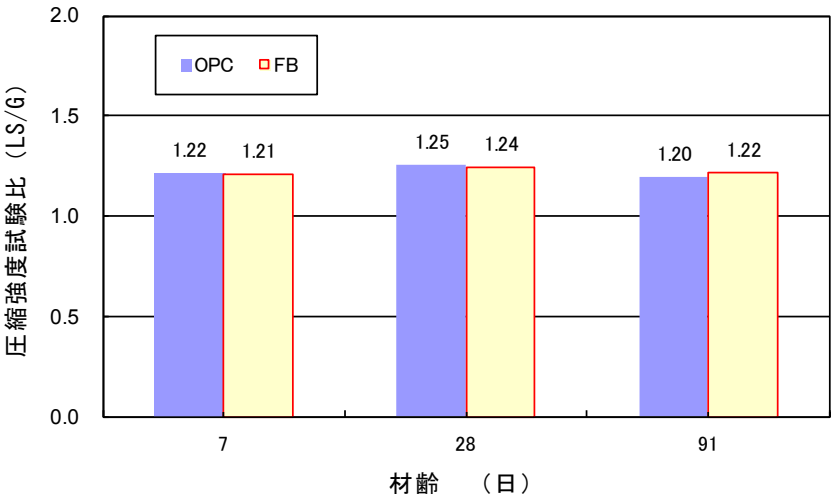
これらの結果より，北陸産分級フライアッシュと石灰石骨材を使用したコンクリートの強度特性に関して，セメントの水和反応とともに，材齢 7 日までの初期強度の発現は，主として石灰石骨材および石灰石微粉末によるカルシウムシリケート相の水和反応によって生成される C-S-H の生成量の増加が寄与し，材齢 7 日から 91 日の強度増進は，主として分級フライアッシュによるポゾラン反応が寄与することが示唆された。



図－3.38 圧縮強度試験結果



図－3.39 圧縮強度試験比(FB/OPC)



図－3.40 圧縮強度試験比(LS/G)

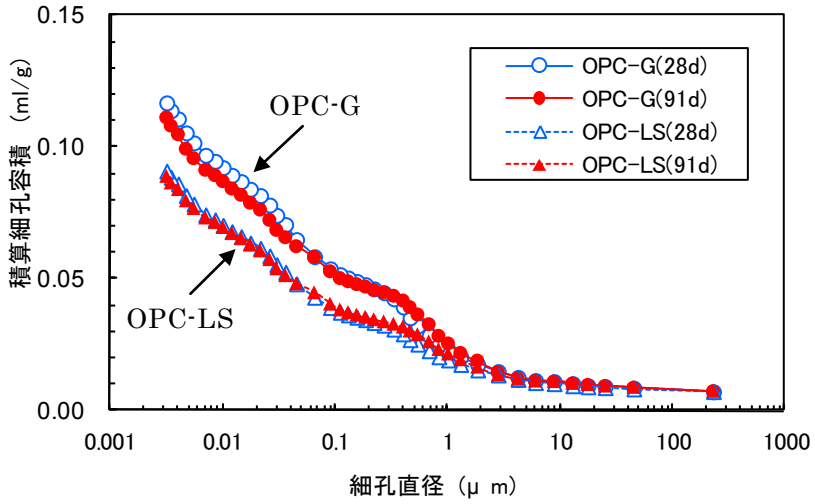
(2) 細孔径分布の測定結果

各ケースの細孔率（細孔率 (%)＝細孔径 0.003μm から 400μm の範囲の積算細孔容積×かさ密度×100）を**表－3.23** に示す。また，OPC-G，OPC-LS と FB-G，FB-LS に対する積算細孔容積分布（材齢 28 日および材齢 91 日）を，それぞれ**図－3.41** と**図－3.42** に示す。まず，細孔率については，材齢 28 日および材齢 91 日ともに，粗骨材として LS を用いている OPC-LS，FB-LS は，G を用いている OPC-G，FB-G より小さくなることから判断すると，G より LS の方がコンクリートの内部組織(ペースト部分)が緻密であると考えられた。次に，材齢 28 日から 91 日での積算細孔容積の変化については，粗骨材として LS を用いている OPC-LS，FB-LS のうち，OPC-LS ではほとんど変化がなく，材齢 28 日以降でのコンクリートの内部組織(ペースト部分)の緻密化がほとんど進行していないと考えられた。また，FB-LS では細孔径 20 から 80nm の細孔容積が減少しており，フライアッシュのポゾラン反応により細孔径 10 から 50nm の細孔量が減少するとする小早川ら[17]とほぼ一致していた。一方，粗骨材として G を用いている OPC-G，FB-G では，細孔容積が減少しており，その傾向は FB-G でとくに顕著であった。これは，G を用いたコンクリートの内部組織が LS に比べ緻密でなく，OPC-G ではセメントの水和反応，FB-G ではセメントの水和反応とともに分級フライアッシュのポゾラン反応により，コンクリートの内部組織（ペースト部分）の緻密化がより進んだためと推察された。

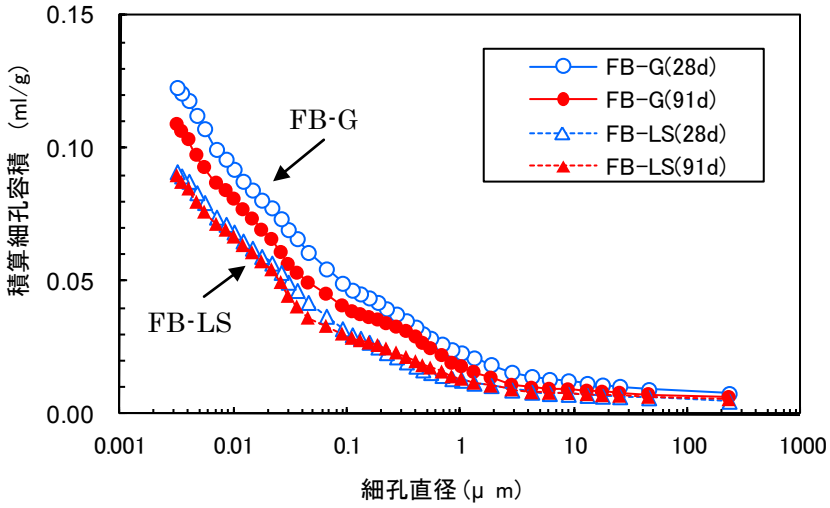
これらの結果より，分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの内部組織（ペースト部分）の緻密化に関して，石灰石骨材および石灰石微粉末は，材齢 28 日までの緻密化には寄与するが，それ以降の緻密化にはほとんど寄与しないことが明らかになった．これに対して，分級フライアッシュは，材齢 28 日以降の緻密化に寄与し，これまでの反応で緻密化できなかった細孔径 20 から 80nm の緻密化が可能であった。

表－3.23 細孔率一覧

試料	ケース 1 (OPC-G)	ケース 2 (OPC-LS)	ケース 3 (FB-G)	ケース 4 (FB-LS)
28days (%)	21.77	18.10	22.82	18.63
91days (%)	20.75	17.58	20.69	17.89



図－3.41 積算細孔容積分布(OPC-G, OPC-LS)

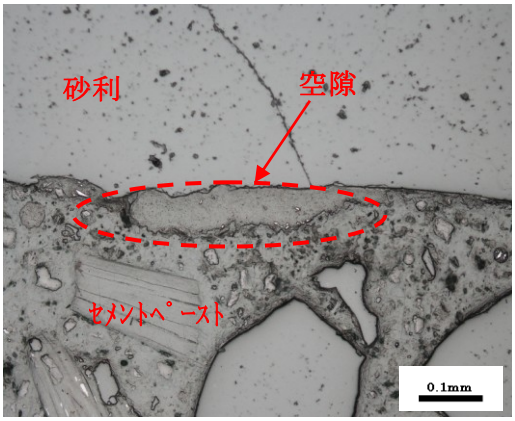


図－3.42 積算細孔容積分布(FB-G, FB-LS)

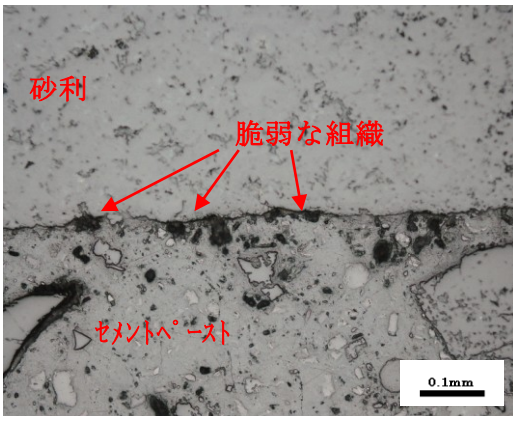
(3) 偏光反射顕微鏡による観察結果

4ケースの供試体（材齢28日）から薄片研磨試料を作製し，主として粗骨材とセメントペーストの界面に存在する50μm程度といわれている遷移帯(ITZ:Interfacial Transition Zone)[18]の観察を実施した。それぞれのケースの偏光反射顕微鏡による観察例を**写真－3.1**から**写真－3.4**に示す。OPC-Gでは，粗骨材とセメントペーストの境界面に沿って，大きな空隙が頻繁に観察された(**写真－3.1(a)**)。また，そのような空隙がない場合であっても界面は荒れており，空疎な組織または脆弱なためにセメントペーストの一部が薄片作製時に脱落したものと考えられた(**写真－3.1(b)**)。OPC-LSでは，石灰石骨材とセメントペーストとが密着した部分では荒れのない緻密な組織が多く見られたが(**写真－3.2(a)**)，OPC-Gと同様に，大きな空隙が頻繁に観察された(**写真－3.2(b)**)。一方，FB-Gでは分級フライアッシュの混入により流動性が向上し，砂利とセメントペーストとの界面に大きな空隙は少ないものの，微細な脱落または空疎な組織が多く，界面は脆弱であることが推察された(**写真－3.3**)。これらに対して，FB-LSでは石灰石骨材とセメントペーストとの界面に沿った大きな空隙，ならびに小さな脱落または空疎な組織による界面の荒れのいずれとも少なく(**写真－3.4**)，界面が強固に結合しているものと思われた。また，**写真－3.3**と**写真－3.4**にみられるように分級フライアッシュは非常に微細であるため，複雑な凹凸のある骨材表面に対し，より多くのフライアッシュ粒子が接近または接触できていることが確認された。

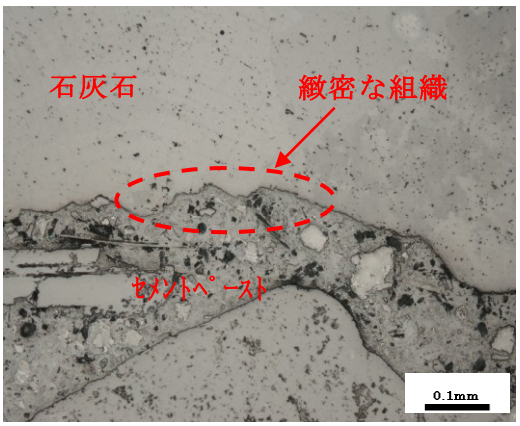
これらの観察結果より，分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートのITZの改善効果に関しては，石灰石骨材を用いる場合は粗骨材とセメントペーストとの境界面が強固に結合していることが示唆され，ITZの改善効果についての既往の知見[19]とも一致していた。また，分級フライアッシュを混和した場合は，粒径10μm以下の分級フライアッシュがセメントペーストとともに粗骨材界面を十分に充填することにより，分級フライアッシュのポゾラン反応が材齢とともに進行し，長期にわたりITZの改善効果（緻密化と付着力の増大）が期待できることが示唆された。



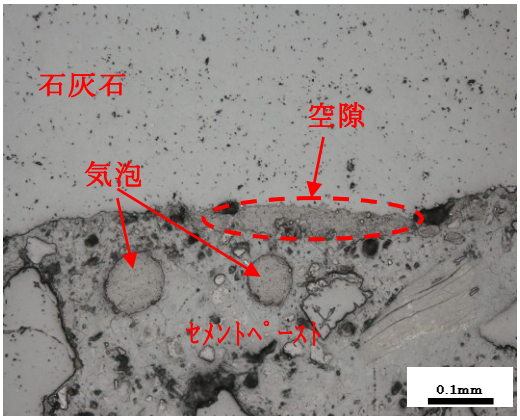
写真－3.1(a)　反射電子像(OPC-G)



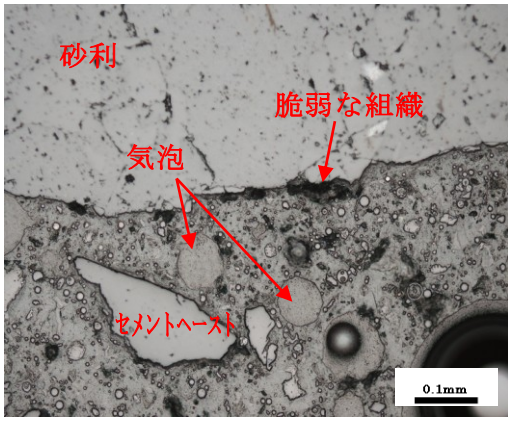
写真－3.1(b)　反射電子像(OPC-G)



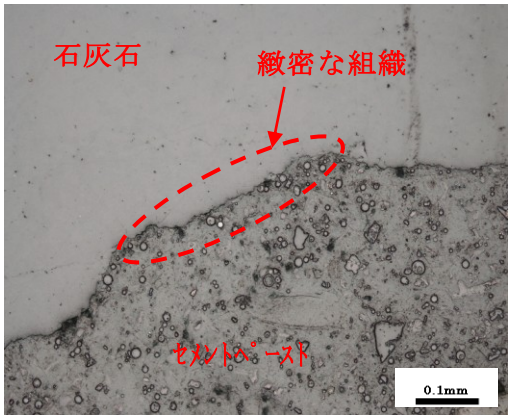
写真－3.2(a)　反射電子像(OPC-LS)



写真－3.2(b)　反射電子像(OPC-LS)



写真－3.3 反射電子像 (FB-G)



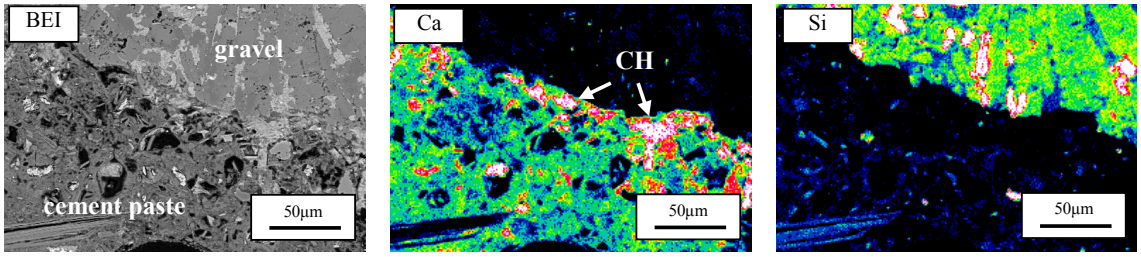
写真－3.4 反射電子像 (FB-LS)

(4) 走査電子顕微鏡による分析結果

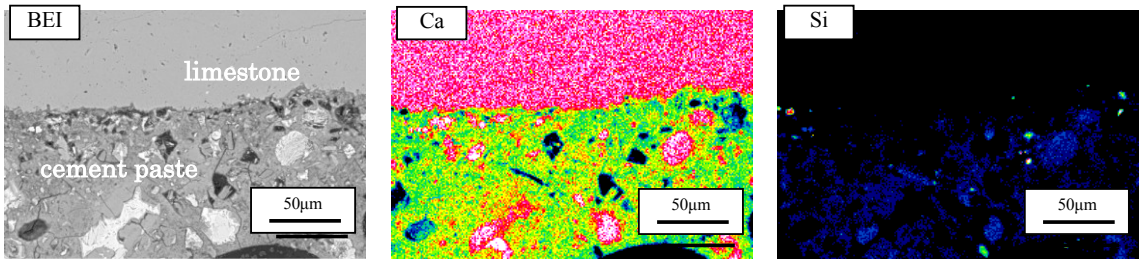
(3)の偏光・反射顕微鏡の研磨試料（材齢 28 日）について，骨材界面と周囲のセメントペーストを中心に SEM-EDS（Scanning Electron Microscope－Energy Dispersive Spectroscopy）による観察および分析を行った。なお，FB-G および FB-LS は FA 粒子にも着目し観察した。反射電子像および EDS の面分析結果を**写真－3.5** から**写真－3.8** に示す。OPC-G では，粗骨材とセメントペーストの界面に，10 から 30μm の水酸化カルシウム(CH)の析出が認められた。また，粗大な空隙も散見されていることから，CH が結晶成長しやすい空間が水和初期に形成されていた可能性が考えられた。OPC-LS では，OPC-G で認められたような粗大な CH の析出は認められず，空隙はわずかに認められる程度であった。また，周囲のセメントペーストにも空隙は少なく，OPC-G と比較すると組織が緻密であると推定された。この結果は，(2)の細孔径分布の結果とも一致する。FB-G および FB-LS も同様に，粗大な空隙や CH の析出は認められなかった．フライアッシュ粒子は，骨材近傍にも多く観察された。FB-G および FB-LS の骨材近傍のカルシウム(Ca) の画像に着目すると，FB-G では X 線強度が低く青～緑色で示されているのに対し，FB-LS では X 線強度がやや高い緑～黄色で示されていた。これより，FB-G では骨材界面に水和物が存在するものの，比較的脆弱な組織であり，一方，FB-LS では緻密な組織が形成されていると推察された。フライアッシュ粒子に着目すると，FB-G および FB-LS ともに，粒子の周囲にポゾラン反応相が認められ，近傍の C-S-H を定量した結果，Ca/Si は 0.8～1.3 であった[20]。骨材界面において，粗大な CH の析出が認められなかったのは，フライアッシュのポゾラン反応により消費されたことも一因と考えられた。また，フライアッシュの反応相の状況から，材齢 28 日で分級フライアッシュのポゾラン反応がすでにかなり進行していることが推察された。

これらの観察結果より，北陸産分級フライアッシュや石灰石骨材を用いた場合には，骨材界面に粗大な空隙が形成されにくいこと，また，その両者を用いた場合には，ポゾラン反応による組織の緻密化が期待できることが示唆された。

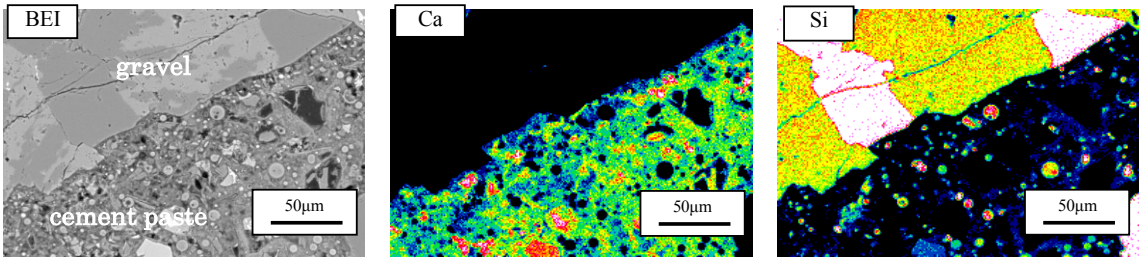
また，別途実施した，W/C=50%一定とし，今回と同じ 4 ケースでのモルタルによる試験体の化学組成分析結果（**図－3.43**）から，細骨材として砂利を用いている OPC-G,FB-G ではエトリンガイトが反応し，モルサルフェートとして検出されているが，細骨材として石灰石骨材を用いている OPC-LS,FB-LS ではエトリンガイトの反応がモノカーボネートやヘミカーボネートの生成により抑制されていることがわかった。このことは，エトリンガイトからモルサルフェートへの反応が骨材界面の空隙の生成に関連していることを考慮すると，石灰石骨材による ITZ の改善には，カルシウムシリケート相の水和反応に加え，カーボネート水和物の生成も関与していることを示唆している。なお，この実験では Weerdt ら[21]が示したフライアッシュと石灰石骨材微粉末による相乗効果は確認できなかった。



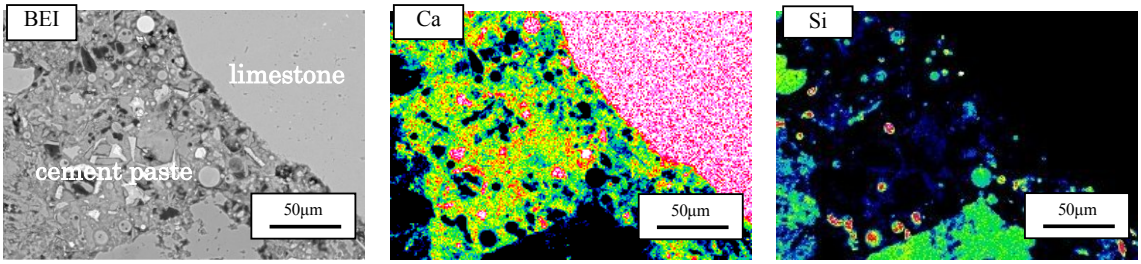
写真－3.5 反射電子像および EDS の面分析結果 (OPC-G)



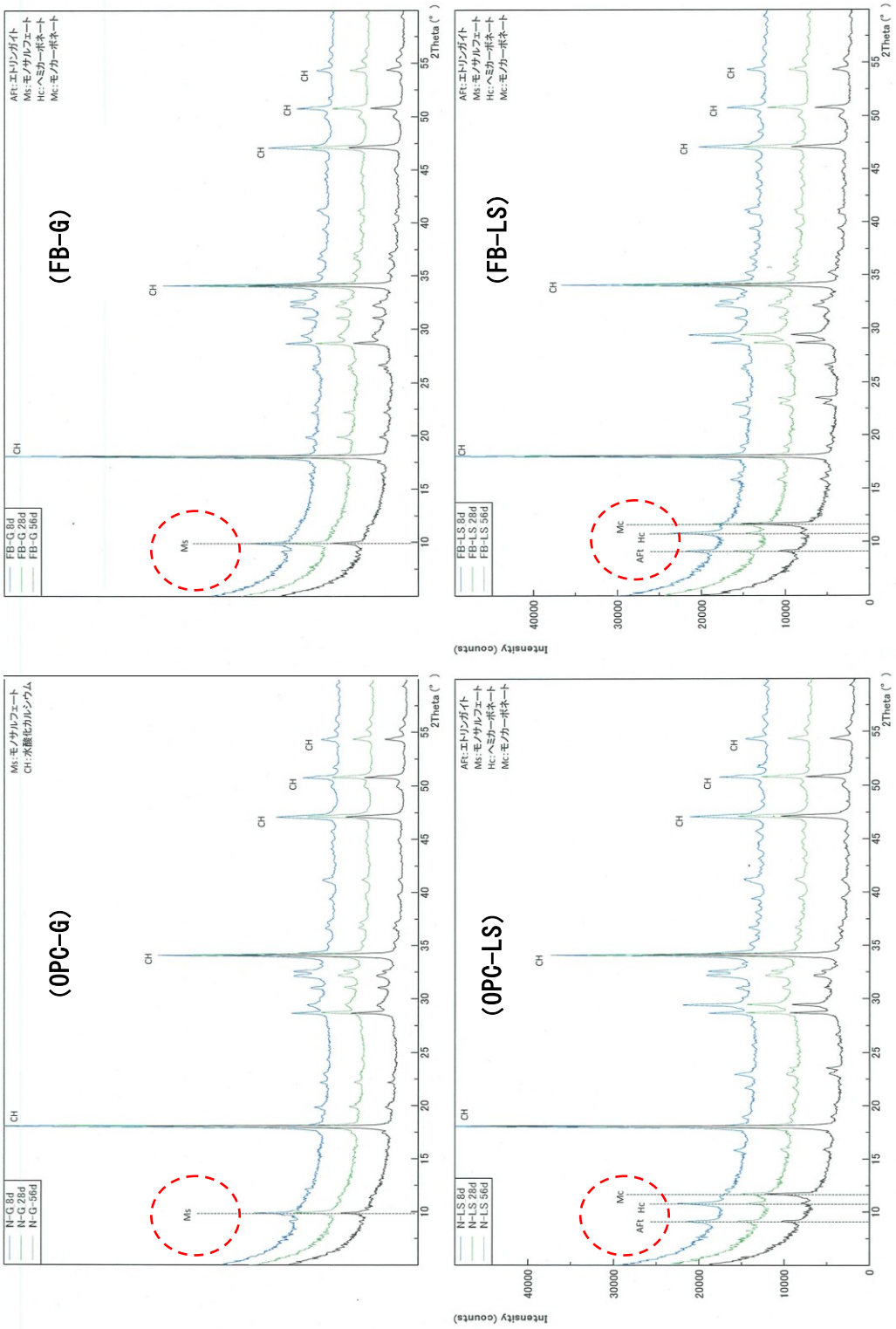
写真－3.6 反射電子像および EDS の面分析結果 (OPC-LS)



写真－3.7 反射電子像および EDS の面分析結果 (FB-G)



写真－3.8 反射電子像および EDS の面分析結果 (FB-LS)



図－3.43 モルタル試験体の化学組成分析結果

3.4.3 強度改善メカニズムの考察

北陸産分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善メカニズムを把握するために，分級フライアッシュと石灰石骨材をそれぞれ用いる場合と用いない場合の４ケースでの圧縮強度試験，細孔径分布測定，偏光反射顕微鏡および走査電子顕微鏡による観察を実施した。

その結果，材齢 7 日までの初期段階においては，セメントの水和反応と石灰石骨材および石灰石微粉末によるカルシウムシリケート相の水和反応などが，初期強度の発現に寄与すると考えられた。また，材齢 7 日における圧縮強度は通常の普通ポルトランドセメントと砂利を用いた場合（OPC-G）と同程度であり，フライアッシュコンクリートの欠点である初期強度の発現に関して，フライアッシュのセメント置換（約 17%）による初期強度の低下を石灰石骨材の使用により補完できると考えられた。

材齢 7 日から 28 日においては，主としてセメント（C_3S）の水和反応と北陸産分級フライアッシュのポゾラン反応により，さらにコンクリートの組織の緻密化や ITZ の改善が進み，圧縮強度の発現が増加すると考えられた。なお，石灰石微粉末によるカーボネート水和物の生成に関しては，水和生成物の粒径とその形状のために強度発現に対する寄与が少なかったと考えられた。一方，今回用いた北陸産分級フライアッシュは，ポゾラン反応性が高く，材齢 28 日以前の強度発現にも寄与する [20]とされており，セメントの水和反応とともに，この期間の強度発現に大きく寄与していると考えられた。

材齢 28 日以後の長期材齢においては，セメント（C_3S）の水和反応が低下し，北陸産分級フライアッシュのポゾラン反応が主体となり，これまでの反応で緻密化できなかった細孔径 20 から 80nm の細孔量の減少や粗骨材とセメントペーストの境界面付近に存在する分級フライアッシュのポゾラン反応により ITZ が改善されることにより，コンクリートの長期強度の増進に寄与していると考えられた。

以上の結果より，分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善については，初期および長期材齢にて，それぞれの強度発現上の欠点を補完し，長期材齢においては，分級フライアッシュのポゾラン反応により，コンクリートの内部組織（ペースト部分）の緻密化や ITZ の改善が発揮されると考えられた。

3.5 まとめ

本章では，実際の生コンクリート工場において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合を室内試験および実機試験により決定し，この配合を用いたコンクリートが問題なく製造できることを確認した。また，施工性や強度発現性の観点から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質が，汎用コンクリートに対し同等以上であるかどうかを検証した。さらに，強度発現性については，北陸産分級フライアッシュとコンクリートの強度発現との関係を調べるため，W/C を一定とした室内試験を実施し，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善メカニズムの解明を試みた。

その結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質は，施工性や強度発現性の観点から，Ｎに対する初期強度発現を除いて，汎用コンクリートよりも品質的に同等以上であることが検証できた。なお，初期の強度発現は，Ｎより小さいが，型枠の取り外し時期などの実質的な問題がない範囲であった。また，この強度発現は，フライアッシュのポゾラン反応性に関して，従来からいわれているコンクリート内部組織の緻密化だけでなく，粒径 10μｍ以下の北陸産分級フライアッシュがセメントペーストとともに粗骨材界面を十分に充填することにより，材齢 7 日以降の長期にわたり，ITZ が改善される効果もあることが示唆された。一方，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，スランプロスや空気量ロスが経過 1 時間以降に大きくなる傾向があるため，経過 1 時間以内での施工が推奨された。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 実際の生コンクリート工場での室内試験結果から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合は，北陸産分級フライアッシュのボールベアリング効果の改善やポゾラン反応性の向上を反映し，河川砂利を用いた骨材の場合，単位水量は汎用コンクリートより 1～12kg/m^3 低減することができた。また，すべての骨材について，単位セメント量は汎用コンクリートより 20～60kg/m^3 低減することができた。

(2) 実際の生コンクリート工場での実機試験結果から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，経過 1 時間以降，スランプロスや空気量ロスが，大きくなる傾向があるため，経過 1 時間以内での施工が推奨された。

(3) 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの施工性について，所要のコンクリートの流動性が確保され，ブリーディングの減少に伴う仕上げ時間の短縮や沈降ひび割れの減少などが期待された。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，施工性に関して，汎用コンクリートよりも品質面で同等以上であると考えられた。

(4) 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度発現性について，初期の強度発現は，Ｎより小さいが，型枠の取り外し時期などの実質的な問題がない範囲であった。また，長期強度の増進は，Ｎより大きく，ＢＢと同等であった。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，強度発現性に関して，Ｎに対する初期強度発現を除いて，汎用コンクリートに比べ，同等以上であると考えられた。

(5) 北陸産分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度特性として，セメントの水和反応とともに，材齢 7 日までの初期強度の発現は，主として石灰石骨材および石灰石微粉末によるカルシウムシリケート相の水和反応によって生成される C-S-H の生成量の増加が寄与し，材齢 7 日から 91 日の強度増進は，主として北陸産分級フライアッシュによるポゾラン反応が寄与していた。

(6) 北陸産分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの内部組織（ペースト部分）の緻密化に関して，石灰石骨材および石灰石微粉末は，材齢 28 日までの緻密化には寄与するが，それ以降の緻密化にはほとんど寄与しないことが明らかになった．これに対して，分級フライアッシュは，材齢 28 日以降の緻密化に寄与し，これまでの反応で緻密化できなかった細孔径 20 から 80nm の緻密化が可能であった。

(7) 北陸産分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの ITZ の改善に関して，石灰石骨材界面の偏光反射顕微鏡および走査電子顕微鏡による観察結果より，粗骨材とセメントペーストとの境界面が良く密着し CH の析出が抑制されており，カルシウムシリケート相の水和反応などにより，粗骨材周辺の組織がより緻密であることが確認された。また，粒径 10μm 以下の北陸産分級フライアッシュがセメントペーストとともに粗骨材界面を十分に充填することにより，分級フライアッシュのポゾラン反応が材齢とともに進行し，長期にわたり ITZ の改善効果が期待できることが示唆された。

(8) 北陸産分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善については，初期および長期材齢にて，それぞれの強度発現上の欠点を補完し，長期材齢においては，分級フライアッシュのポゾラン反応により，コンクリートの内部組織（ペースト部分）の緻密化や ITZ の改善が発揮されると考えられた。

【参考文献】

1) V.M.Malhotra, P.K.Mehta：High-Performance High-Volume Fly Ash 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) （財）日本規格協会：JIS ハンドブック⑩　生コンクリート　2010, pp.34-35, 2010.
6) （社）土木学会：コンクリート標準示方書［施工編], p.58, 2002.
7) 橋本徹, 参納千夏男, 久保哲司, 鳥居和之：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.133-138, 2013.
8) （社）コンクリート工学会：コンクリート工学会　ホームページ, コンクリート Q&A http://www.jci-net.or.jp/j/public/faq/index.html
9) 橋本徹, 白根勇二, 高橋晴香, 鳥居和之：分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善メカニズムに関する一考察, 材料, Vol.63, 2014.（印刷中）
10) 白根勇二, 橋本徹, 高橋晴香, 鳥居和之：分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度発現の改善効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.190-195, 2014.
11) K. Ogawa, H. Uchikawa and K. Takemoto, “The mechanism of the hydration in the system C_3S-pozzolan”, Cement and Concrete Research , Vol.10, pp.683-696,1980.
12) A.L.A. Fraay and Y.M. Haan, “The role of fly ash in concrete. A critical examination”, Cement and Concrete Research , Vol.19, pp.235-246,1989.
13) 石灰石鉱業協会：石灰石骨材とコンクリート 増補版, pp.21-23, 2002.
14) V. S. Ramachandran and Z. Chun-mei, “Influence of $CaCO_3$ on Hydration and Microstructural Characteristics of Tricalcium Silicate”, Ⅱ Cemento, Vol.3, pp.129-152, 1986.
15) 坂井悦郎, 中村明則, 大場陽子, 李琮揆, 大門正機：カルシウムアルミネートの水和反応におよぼす石灰石微粉末の影響, 無機マテリアル, Vol.4, pp.126-131, 1997.
16) 星野清一, 山田一夫, 平尾宙, 山下弘樹：石灰石微粉末を添加したセメントの X 線回折/リートベルト法による水和反応解析と強度発現機構に関する検討, セメント・コンクリート論文集, No.10, pp.47-54, 2006.
17) 小早川真, 羽原俊祐：フライアッシュのポゾラン反応による硬化体の空隙組織の変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.97-102, 2001.
18) 川村満紀, S.チャタジー：コンクリートの材料科学, pp.81-93, 森北出版, 2004.
19) P.J.M. Monteiro and P.K.Mehta, “Interaction between carbonate rock and cement paste”, Cement and Concrete Research , Vol.16, pp.127-134 , 1986.

20)広野真一,鳥居和之:ASTMC1260によるフライアッシュ含有モルタルのASR抑制効果、材料, Vol.62, No.8, pp.498-503, 2013.
21)K. De Weerdt, K.O. Kjellsen, E. Sellevold and H. Justnes: Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements, Cement & Concrete Composites, 33, pp.30-38, 2011.

第 4 章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性の検証 [1)～6)]

4.1 概　説

北陸地方のコンクリート構造物の特徴は，序論の「1.1.1 北陸地方が抱える深刻な ASR 問題」や「1.1.4 北陸地方のコンクリート構造物の長寿命化」で述べたように，全国的にみても ASR や塩害などの被害が多いことであり，この地域のコンクリート構造物は大変厳しい環境に曝されているといえる。従って，この地域のコンクリート構造物は，ASR や塩害に対する耐久性はもとより，複合的な劣化も考慮すると，その他の劣化要因に対しても高い耐久性が求められている。一方，今回，実用化の対象としている北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，分級などによりフライアッシュのポゾラン反応性などが高められており，従来のものよりも，コンクリートの耐久性などが一層向上することが期待される。しかしながら，実際に，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性が向上し，汎用コンクリート（普通セメントまたは高炉セメントを使用したコンクリート）と比べ，同等以上の耐久性を有するかどうかについては，まだ，十分な検証がなされていない。今後，北陸地方のコンクリートにフライアッシュが有効活用されるためには，汎用コンクリートに対し同等以上の耐久性を有することを検証していく必要がある。

そこで本章では，コンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる変状として，有害な「ひび割れ」に着目し，この「ひび割れ」を誘発する要因に対しての抑制性能の観点から，汎用コンクリートとの各種比較試験（室内試験）を実施し，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性について検証する。検証する項目は，日本コンクリート工学会の「コンクリート診断技術」[7)]に記載されている劣化要因を参考に，初期段階での「ひび割れ」に関連するものとして，収縮性能と水和発熱性能の 2 項目，劣化機構の過程において発生する「ひび割れ」に関連するものとして，ASR 抑制性能，遮塩性能，中性化抑制性能，凍害抵抗性能の 4 項目のあわせて 6 項目について比較評価する。ここに，初期段階での「ひび割れ」に関連する 2 項目は，主としてコンクリートの配合に起因するものを選出し，劣化機構に関連する 4 項目は，主として北陸地方の地域特性やこの地域のコンクリート構造物全体に及ぼす影響度合いなどを勘案し選出した。これら 6 項目の比較評価の結果を踏まえ，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートが，汎用コンクリートに比べ，同等以上の耐久性を有するかどうかを検証する。

なお，前述の「第 3 章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質の検証」では，主としてコンクリート製造時の品質についての検証を実施した。そこで，本章では，主としてコンクリート構造物の長期的な品質（耐久性）と使用性について検証する。

4.2 使用材料および配合

4.2.1 使用材料

比較試験（室内試験）に使用した材料は**表－3.1** と同様である。ただし，セメントは，**表－3.1** に記載のセメントメーカー4 社のセメントを等量ずつ混合して使用した。試験に使用したフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の JIS 規格値を**表－4.1** および**表－4.2** に示す。

表－4.1 フライアッシュの JIS 規格値

フライアッシュの産地	JIS A6201 項目									備　考
	二酸化けい素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm³)	粉末度		フロー値比 (%)	活性度指数(%)		
					45μm ふるい残分 (%)	比表面積 (cm²/g)		材齢 28 日	材齢 91 日	
七尾産	53.35	0.1	2.0	2.44	0.8	4,870	106	91	99	H23 年 4 月ﾃﾞｰﾀ
敦賀産	67.23	<0.1	3.3	2.26	1.7	4,740	100	84	99	H24 年 7 月ﾃﾞｰﾀ

表－4.2 高炉スラグ微粉末の JIS 規格値

骨材	JIS A6206 項目										備　考
	密度 (g/cm³)	比表面積 (cm²/g)	活性度指数(%)			フロー値比(%)	酸化ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ (%)	三酸化硫黄(%)	強熱減量 (%)	塩化物イオン (%)	
			材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日						
①	2.90	4,120	73	103	108	101	5.29	1.97	0.97	0.007	H23 年 3 月ﾃﾞｰﾀ
②	2.90	3,940	68	98	114	102	5.26	1.99	1.04	0.006	H24 年 8 月ﾃﾞｰﾀ

①：富山・石川県の骨材を用いた試験に使用

②：福井県の骨材を用いた試験に使用

4.2.2 配　合

比較試験（室内試験）に使用した配合を**表－4.3** から**表－4.8** に示す。配合は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），高炉セメント B 種を使用したコンクリート（BB），普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 42%内割りにしたコンクリート（N+B），普通ポルトランドセメントに北陸産分級フライアッシュを 15%内割りにしたコンクリート（N+F）の 4 種類である。早月川産，庄川産，手取川産，能登産の骨材については，実際の各生コンクリート工場での呼び強度 27，スランプ 8cm（±2cm），粗骨材の最大寸法 25mm(27-8-25)の配合，九頭竜川産，今津産の骨材については，呼び強度 24，スランプ 8cm（±2cm），粗骨材の最大寸法 25，20mm(24-8-25，20)の配合とした。なお，空気量は 4.5%（±1.5%）とした。

表－4.3 早月川産骨材における配合表（27-8-25）

種類	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	54.5	44.8	292	－	－	159	831	1044	2.92
BB	53.9	44.4	293	－	－	158	821	1050	2.93
N+B	54.5	44.4	169	－	123	159	831	1044	2.92
N+F	54.5	44.8	245	43	－	157	828	1044	2.88

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメント B 種，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

表－4.4 庄川産骨材における配合表（27-8-25）

種類	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	53.8	44.2	286	－	－	154	814	1034	2.86
BB	51.5	42.8	297	－	－	153	782	1052	2.97
N+B	51.5	42.8	153	－	125	153	782	1052	2.97
N+F	50.0	43.5	255	45	－	150	795	1038	3.00

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメント B 種，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

表－4.5 手取川産骨材における配合表（27-8-25）

種類	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	54.7	44.0	285	－	－	156	802	1036	2.85
BB	53.7	43.4	287	－	－	154	789	1044	2.87
N+B	53.7	43.4	166	－	121	154	789	1044	2.87
N+F	53.3	45.8	230	40	－	144	851	1021	2.43

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメント B 種，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

表－4.6 能登産骨材における配合表（27-8-25）

種類	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	52.3	42.7	331	－	－	173	732	1024	3.31
BB	51.5	41.5	326	－	－	168	714	1051	3.59
N+B	51.5	41.5	189	－	137	168	714	1051	3.59
N+F	51.2	41.5	284	50	－	171	725	1024	3.34

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

表－4.7 九頭竜川産骨材における配合表（24-8-25）

種類	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	53.9	44.2	297	－	－	160	810	1023	3.18
BB	51.0	42.5	308	－	－	157	774	1049	3.30
N+B	53.9	44.2	172	－	125	160	810	1023	3.18
N+F	51.0	43.5	253	45	－	152	799	1039	2.98

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

表－4.8 今津産骨材における配合表（24-8-20）

種類	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	53.9	43.6	304	－	－	164	822	1065	3.83
BB	51.9	42.3	310	－	－	161	796	1085	3.91
N+B	53.9	43.6	176	－	128	164	822	1065	3.83
N+F	51.9	42.6	270	48	－	165	791	1068	3.82

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

4.3 収縮性能

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性を検証するため，収縮性能に関連する乾燥収縮試験と自己収縮試験により，比較評価を実施した。

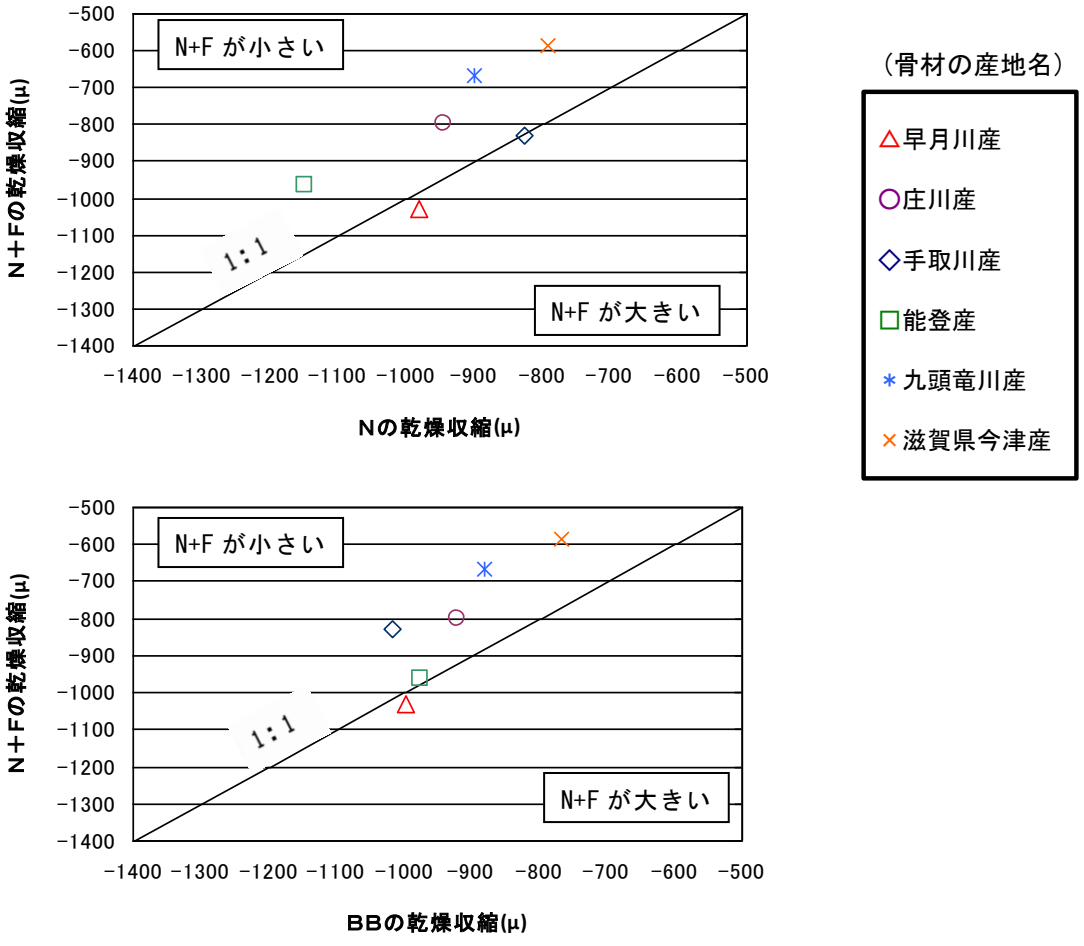
4.3.1 乾燥収縮試験

(1) 試験方法

JIS A1129-2（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法　第 2 部：コンタクトゲージ方法）に準拠し，材齢 91 日までの供試体の側面の長さをコンタクトストレインゲージで測定することにより，乾燥収縮ひずみを算出する。

(2) 試験結果

乾燥収縮試験についての汎用コンクリートとの比較結果（呼び強度 27）を**図－4.1** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の乾燥収縮は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）に比べ，同等もしくは小さい。



（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）

図－4.1 乾燥収縮試験結果

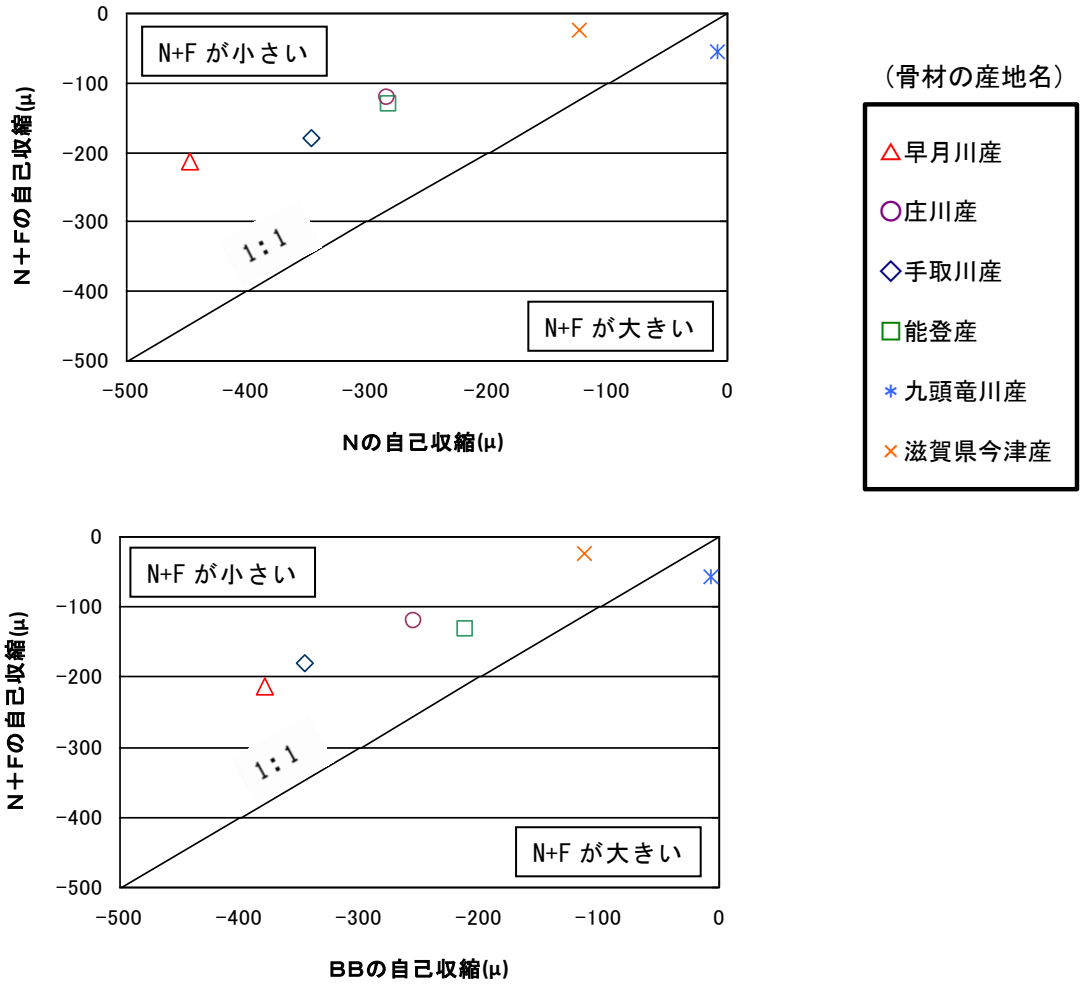
4.3.2 自己収縮試験

(1) 試験方法

JCI-SAS3-2（コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)）に準拠し，鉄筋中心部のリブと節を除去した部分（30cm）にひずみ計を貼り付け，コンクリート打設を行った後，温度湿度一定の養生を行い，供試体にひび割れが発生するまでのひずみを測定する。

(2) 試験結果

自己収縮試験についての汎用コンクリートとの比較結果を**図－4.2** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の自己収縮は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート(Ｎ),高炉セメントＢ種を使用したコンクリート(ＢＢ）に比べ，同等もしくは小さい。



（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）

図－4.2 自己収縮試験結果

4.3.3 収縮性能に関する評価

コンクリートの収縮性能は，従来，コンクリートの配合条件に単位水量の上限値を設けるなどの対策により性能の確保を図っていたが，最近では，骨材の種類や品質がコンクリートの乾燥収縮に大きな影響を及ぼすことを背景に，(社)土木学会 [8]では，「コンクリートの乾燥収縮ひずみの標準値を 1,200μ（自己収縮　200μを含む)」とし，また，(社)建築学会 [9]では，「計画供用期間が長期または超長期の場合は乾燥収縮率 800μ以下」とするなど，コンクリートの乾燥収縮の影響に関心が高まっている [10)～12)]。

今回の試験結果では，乾燥収縮については，いずれの骨材も土木学会の標準値 1,200μを満足しているが，建築学会の標準値 800μについては満足していない骨材が多い。今後，建築構造物に適用していく際には，さらに，配合などの調整や検討が必要である。また，自己収縮については，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートでは，ほぼ標準値 200μを満足しているが，汎用コンクリートではほとんどの骨材で満足していない。従って，今後，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，高流動コンクリートなどの自己収縮の考慮が必要なコンクリートへの適用が期待される。実際に，近年，トンネルの覆工コンクリートを対象として，高充填コンクリートや中流動コンクリートの開発が盛んに行われている [13),14)]。

汎用コンクリートとの比較試験結果では，乾燥収縮試験，自己収縮試験ともに，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの方が，汎用コンクリートに比べ，コンクリートの収縮が同等もしくは小さいことが確認された。これは，(社)セメント協会「コンクリート専門委員会報告書」[15)]では，単位水量が多くなるほど乾燥収縮率が大きくなる傾向があるとされており，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合において，単位水量が低減されたことと整合している。また，文献 [16)]において，水結合材比 50%の配合条件での乾燥収縮試験および自己収縮試験を実施した結果から，フライアッシュのひび割れ抑制効果が示されている。

以上のことから，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，収縮性能の観点において，汎用コンクリートに比べ，品質的に優れていると評価できる。また，今後，この性能を活かし，高流動コンクリート，中流動コンクリート，高充填コンクリートなどへの適用が大いに期待される。

4.4 水和発熱性能

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性を検証するため，水和発熱性能に関連する簡易断熱温度上昇試験と完全断熱温度上昇試験により，比較評価を実施した。なお，簡易断熱温度上昇試験はすべての骨材について，完全断熱温度上昇試験は早月産骨材を代表として実施した。

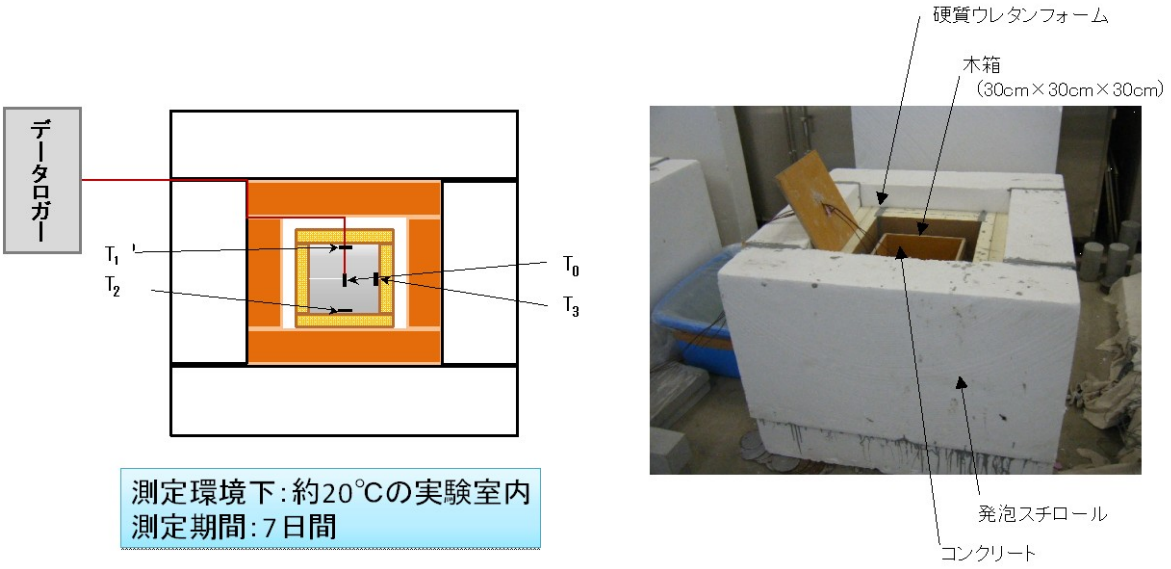
4.4.1 簡易断熱温度上昇試験

(1) 試験方法

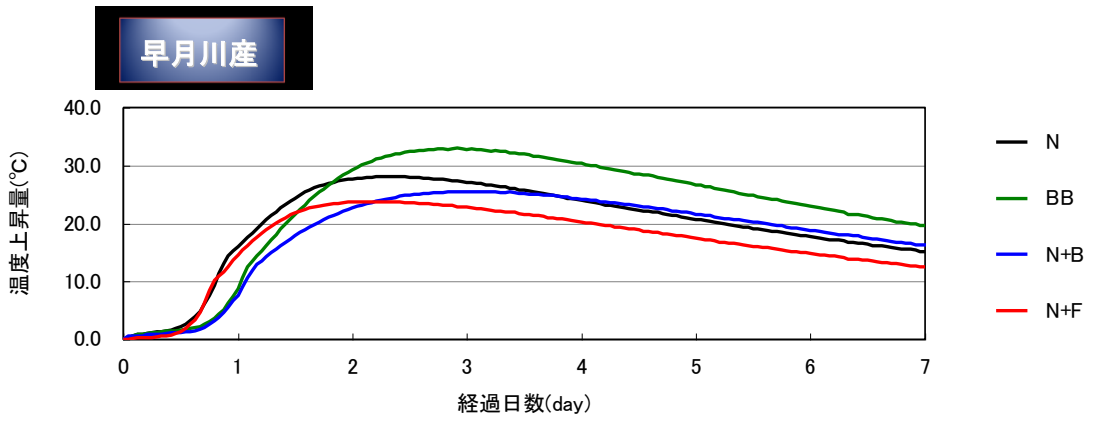
簡易断熱温度上昇試験装置にて，温度センサー（T_0～T_3）によりコンクリート温度上昇量を測定する。簡易断熱温度上昇試験装置の概要を**図－4.3** に示す。

(2) 試験結果

簡易断熱温度上昇試験の結果（T_0:コンクリート中心部の温度の履歴）を**図－4.4** から**図－4.9** に，それぞれの温度履歴におけるピーク温度の比較を**図－4.10** に示す。図より，いずれの骨材においても，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の温度上昇量（ピーク温度）は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）に比べ，同等もしくは小さい。

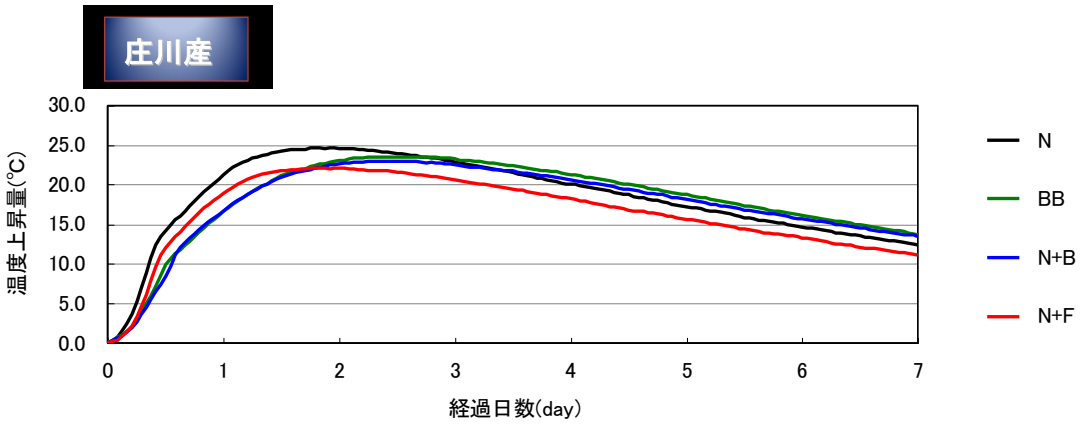


図－4.3 簡易断熱温度上昇試験装置の概要



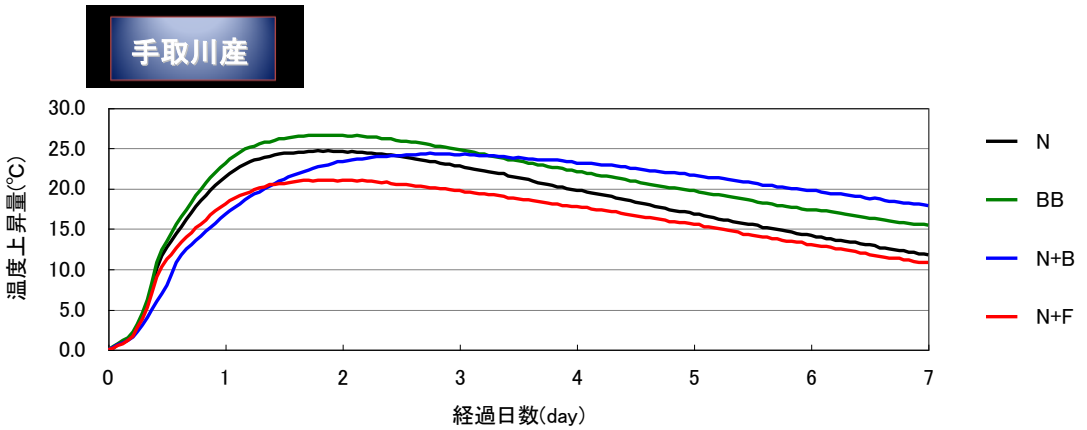
（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｂ：高炉スラグ微粉末 42%置換，Ｎ＋Ｆ：フライアッシュ 15%置換）

図－4.4 簡易断熱温度上昇試験結果（早月川産骨材）



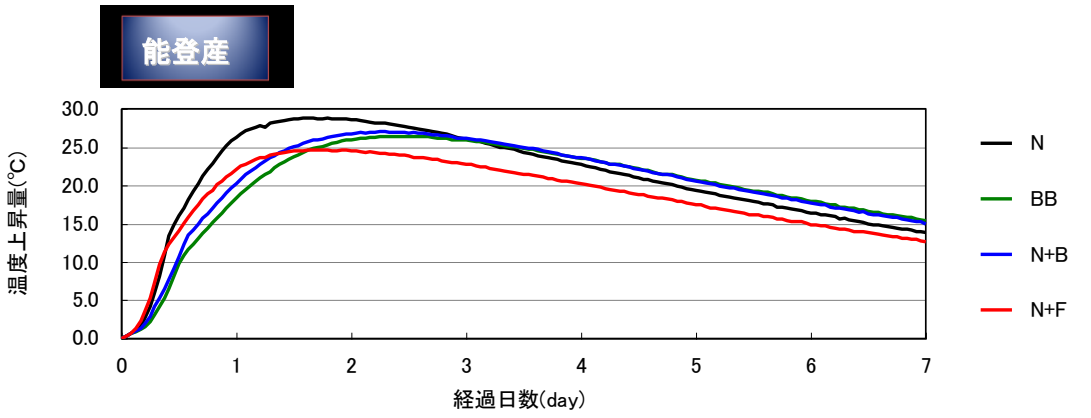
（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｂ：高炉スラグ微粉末 42%置換，Ｎ＋Ｆ：フライアッシュ 15%置換）

図－4.5 簡易断熱温度上昇試験結果（庄川産骨材）



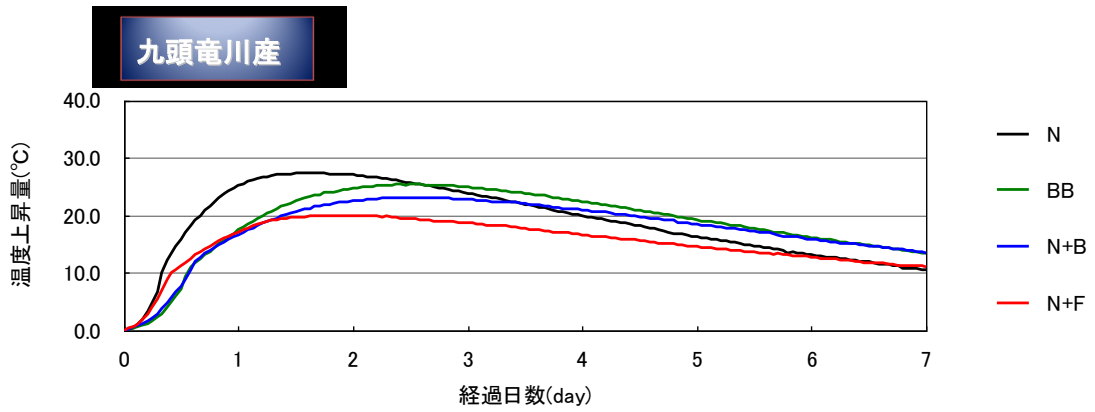
（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｂ：高炉スラグ微粉末 42%置換，Ｎ＋Ｆ：フライアッシュ 15%置換）

図－4.6 簡易断熱温度上昇試験結果（手取川産骨材）



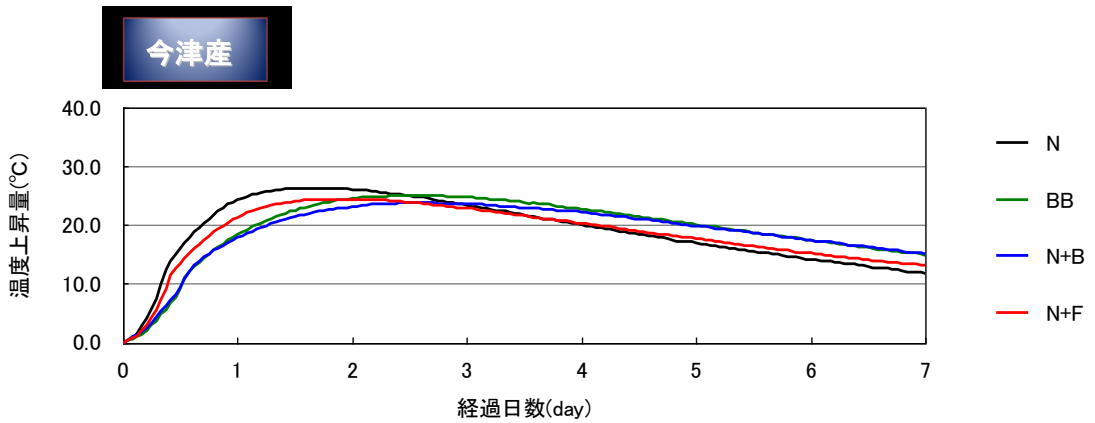
（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｂ:高炉スラグ微粉末 42%置換，Ｎ＋Ｆ:フライアッシュ 15%置換）

図－4.7 簡易断熱温度上昇試験結果（能登産骨材）



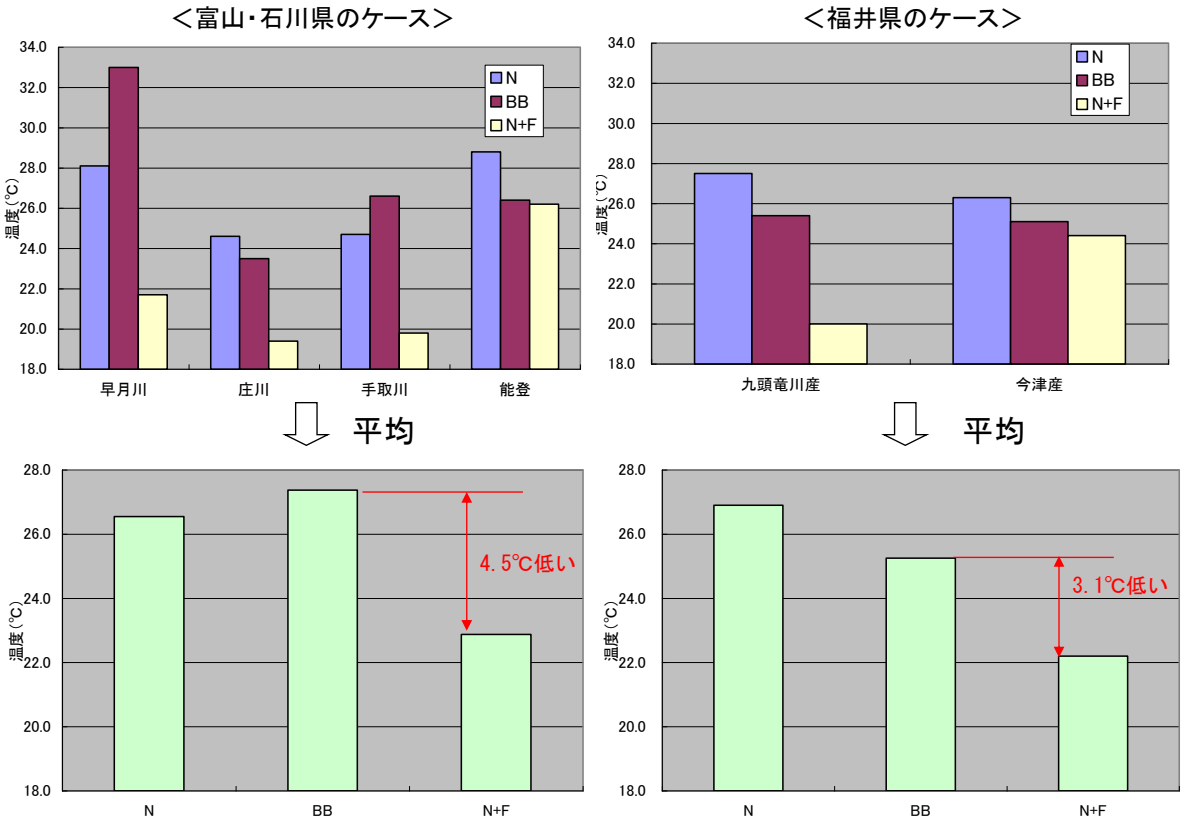
（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｂ:高炉スラグ微粉末 42%置換，Ｎ＋Ｆ:フライアッシュ 15%置換）

図－4.8 簡易断熱温度上昇試験結果（九頭竜川産骨材）



（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｂ:高炉スラグ微粉末 42%置換，Ｎ＋Ｆ:フライアッシュ 15%置換）

図－4.9 簡易断熱温度上昇試験結果（今津産骨材）



（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）

図－4.10 簡易断熱温度上昇試験結果（ピーク温度）

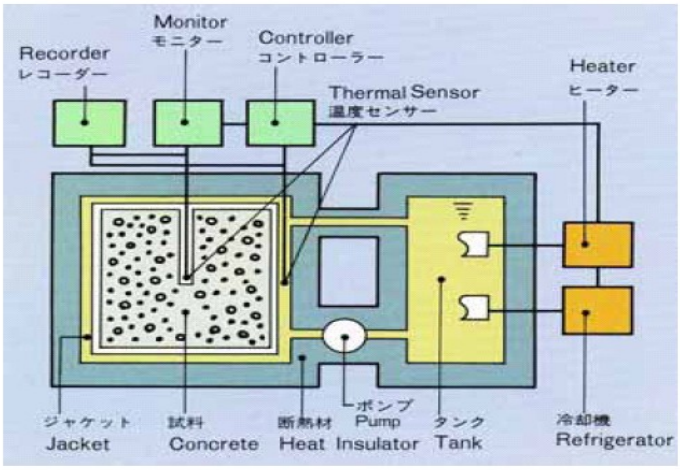
4.4.2 完全断熱温度上昇試験

(1) 試験方法

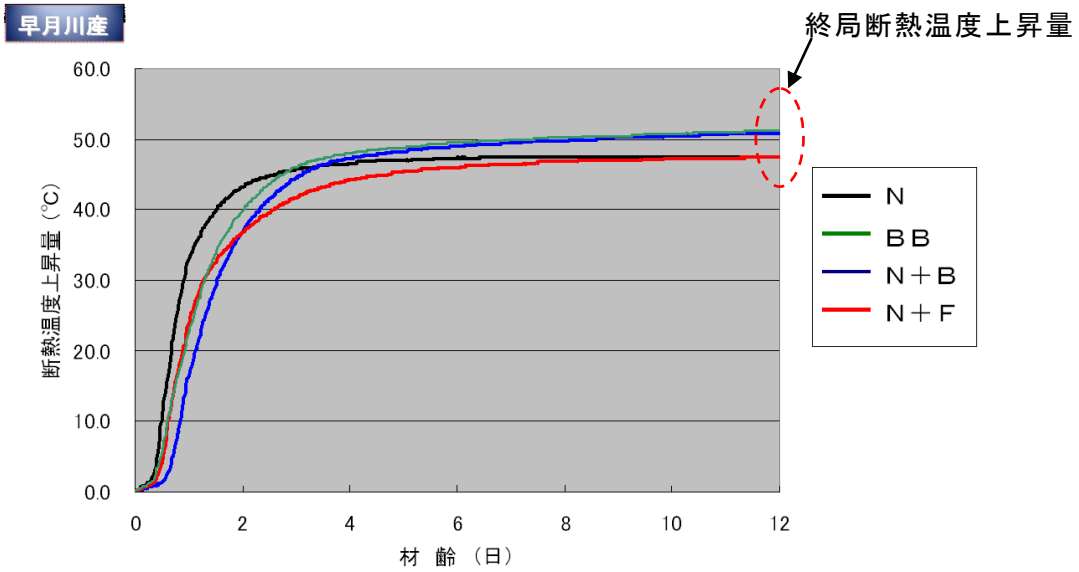
完全断熱温度上昇試験装置にて，コンクリート温度上昇量を測定する。装置の概要を**図－4.11** に示す。

(2) 試験結果

完全断熱温度上昇試験の結果を**図－4.12** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の終局断熱温度上昇量は，高炉セメントＢ種を使用したコンクリート(ＢＢ),普通ポルトランドセメントに高炉スラグを置換したコンクリート(Ｎ＋Ｂ）に比べ小さく，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ）と同程度であった。



図－4.11 完全断熱温度上昇試験装置の概要



(N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｂ:高炉スラグ微粉末 42%置換，Ｎ＋Ｆ:フライアッシュ 15%置換)

図－4.12 完全断熱温度上昇試験結果（早月川産骨材）

4.4.3 水和発熱性能に関する評価

コンクリートの温度ひび割れには,内部拘束ひび割れと外部拘束ひび割れの 2 つがある。内部拘束ひび割れは，コンクリート温度の上昇過程において，部材表面温度は大気への放熱により小さくなるため，この部材内外の温度差により生じるひび割れである。一方，外部拘束ひび割れは，コンクリート温度の下降過程において，コンクリートが収縮し，地盤や既設コンクリートなどにより拘束されたときに発生するひび割れである。このような温度ひび割れは，まったく発生さないようにするためには多大な費用を伴うため，ひび割れをある程度許容しているのが現状である。しかしながら，一度，有害なひび割れを発生させれば，コンクリート構造物の耐久性そのものに影響が生じるため，温度ひび割れを少しでも抑制する努力が必要である。一般的に，温度ひび割れを抑制する方法として，コンクリートの配合や材料などを変更し,コンクリート温度の上昇を抑えることが効果的である。コンクリート温度の上昇が抑えられれば，同時にコンクリート温度の下降も小さくなり，内部拘束や外部拘束により，コンクリートに発生する引張応力も低減できる。従って，温度ひび割れを抑制するためには，コンクリート温度の上昇（ピーク温度）を抑える配合や材料などを選ぶことが肝要となる。

今回の試験結果では，簡易断熱温度上昇試験の結果から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは,汎用コンクリートに比べ,すべての骨材でピーク温度が小さく，平均で 3 から 4℃低いことが確認された。この値は，(社)セメント協会「コンクリート専門委員会報告書」で示されている断熱温度上昇量と単位セメント量の関係式で換算すると，汎用コンクリートに対し，単位セメント量を 20 から 30kg/m^3 低減できることとなる。また，同報告書では，単位セメント量が多くなるほどコンクリートの発熱量が大きくなる傾向があるとされており，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合において，単位セメント量が低減されたことと整合している。さらに，完全断熱温度上昇試験の結果についても，終局断熱温度上昇量は，簡易断熱温度上昇試験の結果と傾向は同じであった。

以上のことから，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，水和発熱性能の観点において，汎用コンクリートに比べ，品質的に優れていると評価できる。ただし，実際に，コンクリート構造物に温度ひび割れが発生するかどうかの定量的な判断は，コンクリートの強度発現性や構造物の拘束条件などの影響もあるため，さらに，温度応力解析による検討が必要である。この点については,「第 5 章 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証」にて，さらに，検証する。

4.5 ASR 抑制性能

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性を検証するため，ASR 抑制性能に関連する化学法（JIS A1145），モルタルバー法（JIS A1146）およびモルタルバー法（デンマーク法）により，比較評価を実施した。なお，判定結果においては，JR 東日本の基準（**図－1.2** 参照）をあわせて採用した。

4.5.1 化学法（JIS A1145）

(1) 試験方法

JIS A 1145（骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法））に準拠し，各骨材（各産地の中で特に反応性が高いと考えられる骨材を選定）の反応性を測定する。

(2) 試験結果

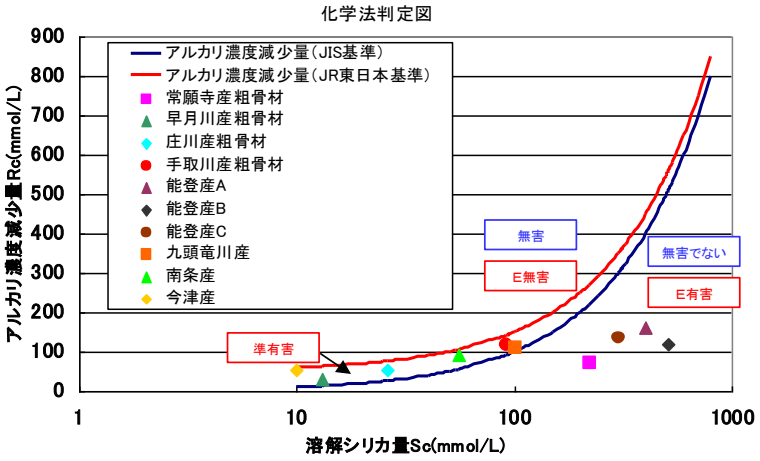
試験に使用した骨材の特徴を**表－4.9** に，化学法の結果を**表－4.10** に，化学法の判定図を**図－4.13** に示す。化学法では，常願寺川産骨材と能登産（A，B，C）の骨材が JIS の基準では「無害でない」，JR 東日本の基準では「E 有害」であり，どちらの基準においても反応性のある骨材の判定であった。また，早月川産，庄川産，手取川産，九頭竜川産，南条産，今津産の骨材は，JIS の基準では「無害」の判定であるが，JR 東日本の基準では「準有害」の判定であった。

表－4.9 骨材の特徴（骨材の産地毎）

骨材の産地名	岩種	反応性鉱物の特徴
常願寺川産（川砂利）	主要な岩種は火成岩で安山岩を 40%程度含む	安山岩中に反応性鉱物：クリストバライト、トリディマイト、オパール、火山ガラス
早月川産（川砂利）	主要な岩種は花崗岩、閃緑岩などの深成岩	反応性鉱物はあまり含まない
庄川産（川砂利）	多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含む	安山岩中に反応性鉱物：クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス（少）
手取川産（川砂利）	多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含む	安山岩中に反応性鉱物：クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス（少）
能登産A（砕石）	安山岩	反応性鉱物：火山ガラス（少）
能登産B（砕石）	安山岩	反応性鉱物：火山ガラス（中）
能登産C（砕石）	安山岩	反応性鉱物：火山ガラス（多）
九頭竜川産（川砂利）	多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含む	安山岩中に反応性鉱物：クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス（少）
南条産（砕石）	チャート、閃緑岩（若しくは輝緑岩）	反応性鉱物は含まない
今津産（砕石）	凝灰岩	反応性鉱物は含まない

表－4.10 化学法の結果（骨材の産地毎）

骨材の産地名	アルカリ濃度減少量：Ｒｃ（ｍｍｏｌ／Ｌ）	溶解シリカ量：Ｓｃ（ｍｍｏｌ／Ｌ）
常願寺川産	７２	２４２
早月川産	２９	１３
庄川産	５４	２６
手取川産	１１８	９２
能登産Ａ	１６０	４９５
能登産Ｂ	１１９	５２９
能登産Ｃ	１３６	３２１
九頭竜川産	１１２	１０２
南条産	９１	５５
今津産	５４	１０



判定方法

＜ＪＩＳ＞
溶解シリカ量（Ｓｃ）がアルカリ濃度減少量（Ｒｃ）未満の場合は「無害」とし、ＳｃがＲｃ以上の場合は「無害でない」とする。
＜ＪＲ東日本「土木工事標準仕様書」＞
Ｓｃに50を加えた値がＲｃ未満の場合は「Ｅ無害」、ＳｃがＲｃ以上の場合は「Ｅ有害」とし、その中間を「準有害」とする。

図－4.13 化学法の判定図（骨材の産地毎）

4.5.2 モルタルバー法（JIS A1146）

(1) 試験方法

JIS A1146（骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法））に準拠し，化学法で用いた骨材（各産地の中で特に反応性が高いと考えられる骨材を選定）のうち，JIS基準またはJR東日本基準でそれぞれ「無害」もしくは「E無害」と判定されなかった骨材により作製された供試体(フライアッシュは15%､高炉スラグは42%置換したモルタルバー)の膨張率を算出する。なお，JIS A1146においては，セメントの全アルカリ量がNa_2Oeqで1.2%となるようにNaOH水溶液を添加することとなっており，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，**表－4.11**のとおりアルカリ量を調整する。

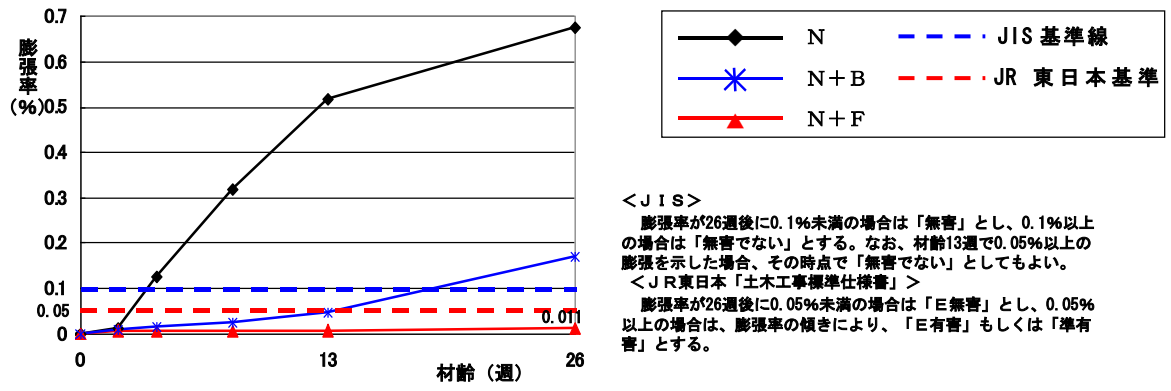
(2) 試験結果

モルタルバー法（JIS A1146）の結果を**図－4.14**から**図－4.16**に示す。図より，常願寺川産の場合，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），普通ポルトランドセメントに高炉スラグを置換したコンクリート（N＋B）では「無害でない」，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（N＋F）では「無害」であった。また，それ以外の骨材の場合，いずれも「無害」であった。従って，N＋Fは，常願寺川産の中でも特に反応性が高いと考えられる骨材に対しても膨張が抑制され，ＡＳＲ抑制に極めて有効であると考えられる。

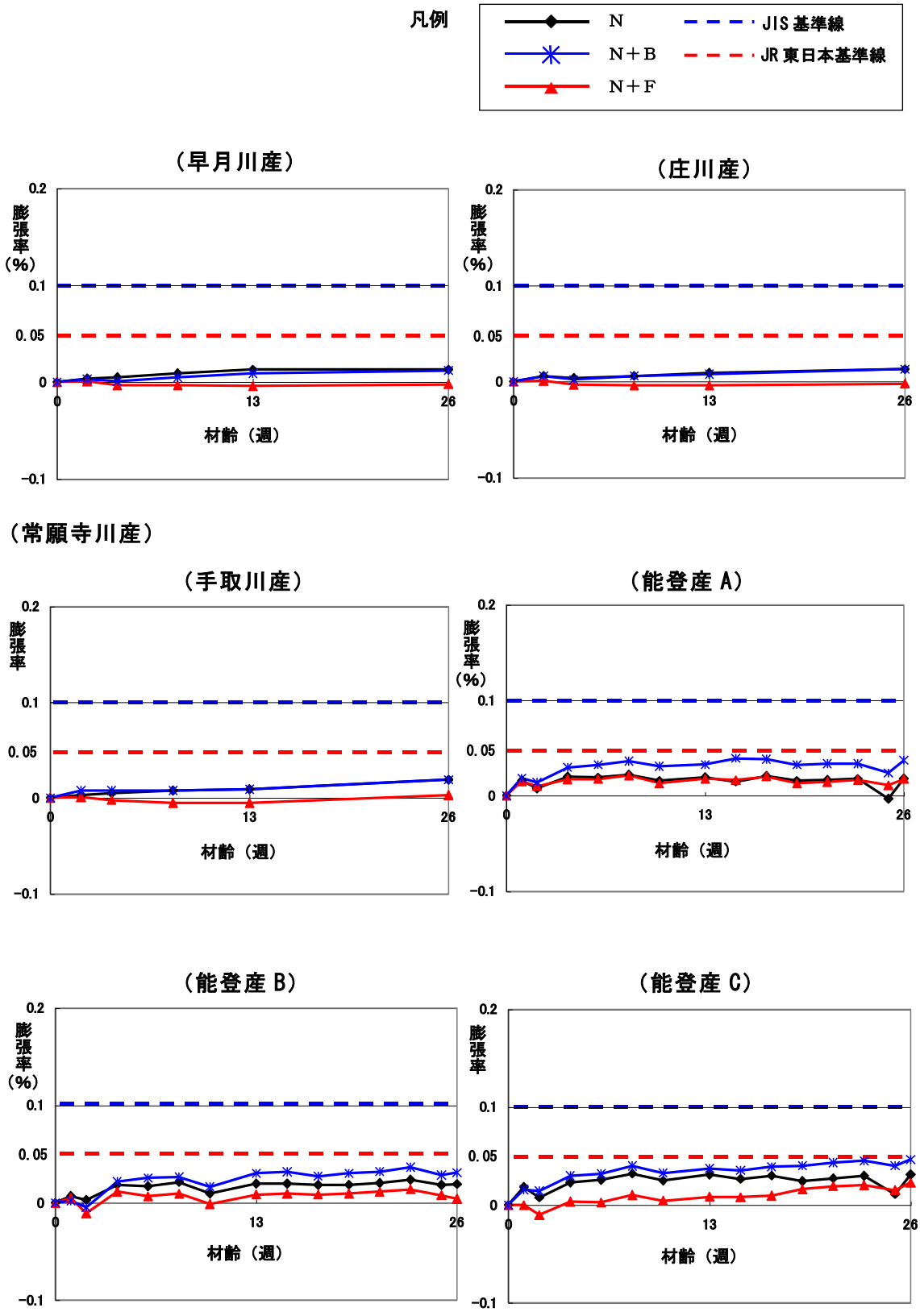
表－4.11 アルカリ量の調整（富山・石川の例）

種類	材料のアルカリ量	材料の添加量		項目	全体	セメント分	フライアッシュ分	高炉スラグ分	NaOH分（添加量）
N	ｾﾒﾝﾄ:0.55%	ｾﾒﾝﾄ:600g		Na_2Oeq量(g)	7.2	3.3	－	－	3.9
				割合(%)	1.2	0.55	－	－	0.65
N＋B	ｾﾒﾝﾄ:0.55% 高炉ｽﾗｸﾞ:0.43%	ｾﾒﾝﾄ:348g 高炉ｽﾗｸﾞ:252g		Na_2Oeq量(g)	7.2	1.9	－	1.1	4.2
				割合(%)	1.2	0.32	－	0.18	0.70
N＋F	ｾﾒﾝﾄ:0.55% ﾌﾗｲｱｯｼｭ:1.14%	ｾﾒﾝﾄ:510g ﾌﾗｲｱｯｼｭ:90g		Na_2Oeq量(g)	7.2	2.8	1.0	－	3.4
				割合(%)	1.2	0.47	0.17	－	0.56

（N:普通ポルトランドセメント，N＋B:高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F:フライアッシュ 15%置換）

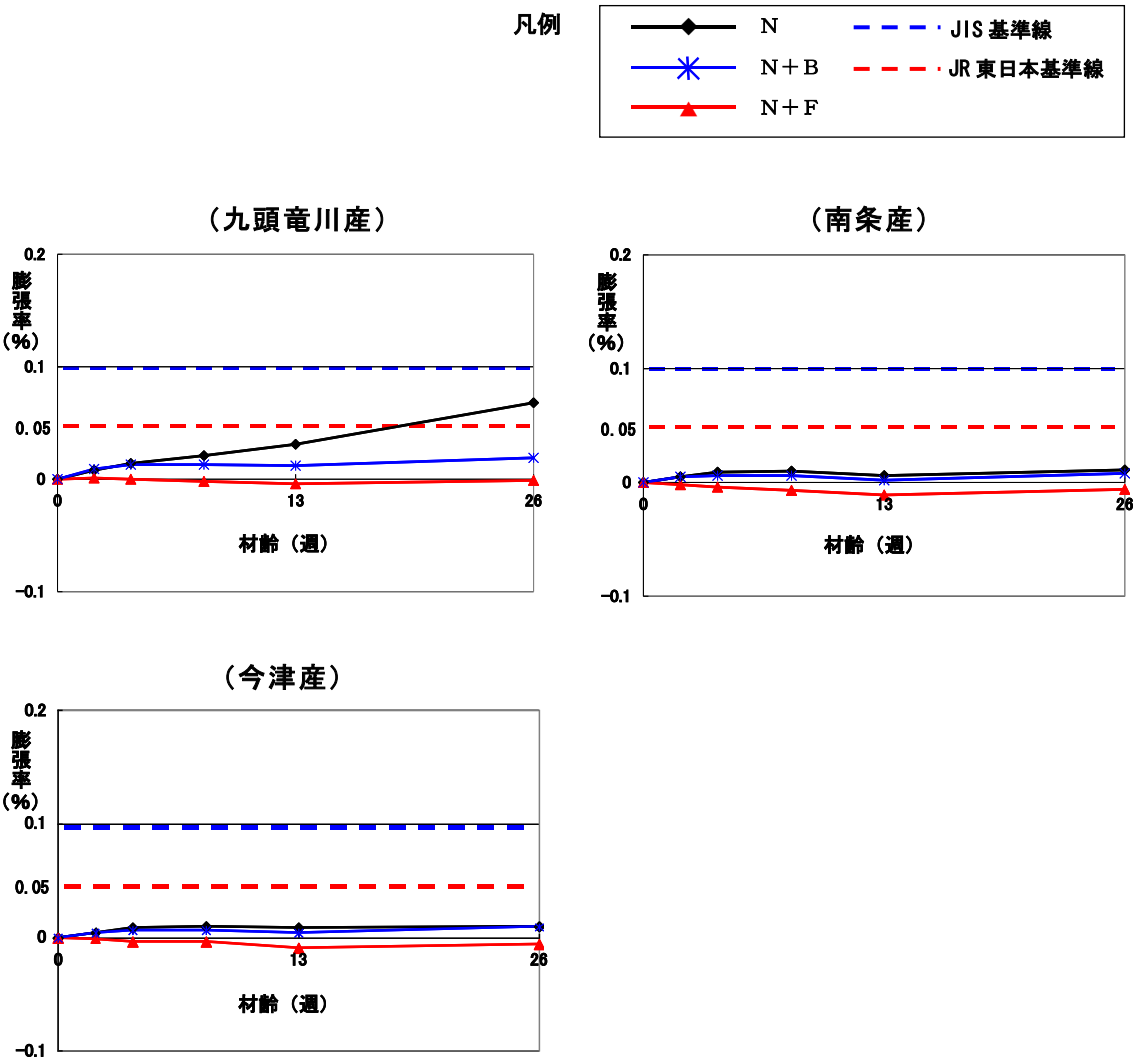


図－4.14 モルタルバー法の結果（常願寺川産骨材）



（N：普通ポルトランドセメント，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

図－4.15 モルタルバー法の結果（早月川産，庄川産，手取川産，能登産 A，B，C の骨材）



（N：普通ポルトランドセメント，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

図－4.16 モルタルバー法の結果（九頭竜川産，南条産，今津産の骨材）

4.5.3 モルタルバー法（デンマーク法※）

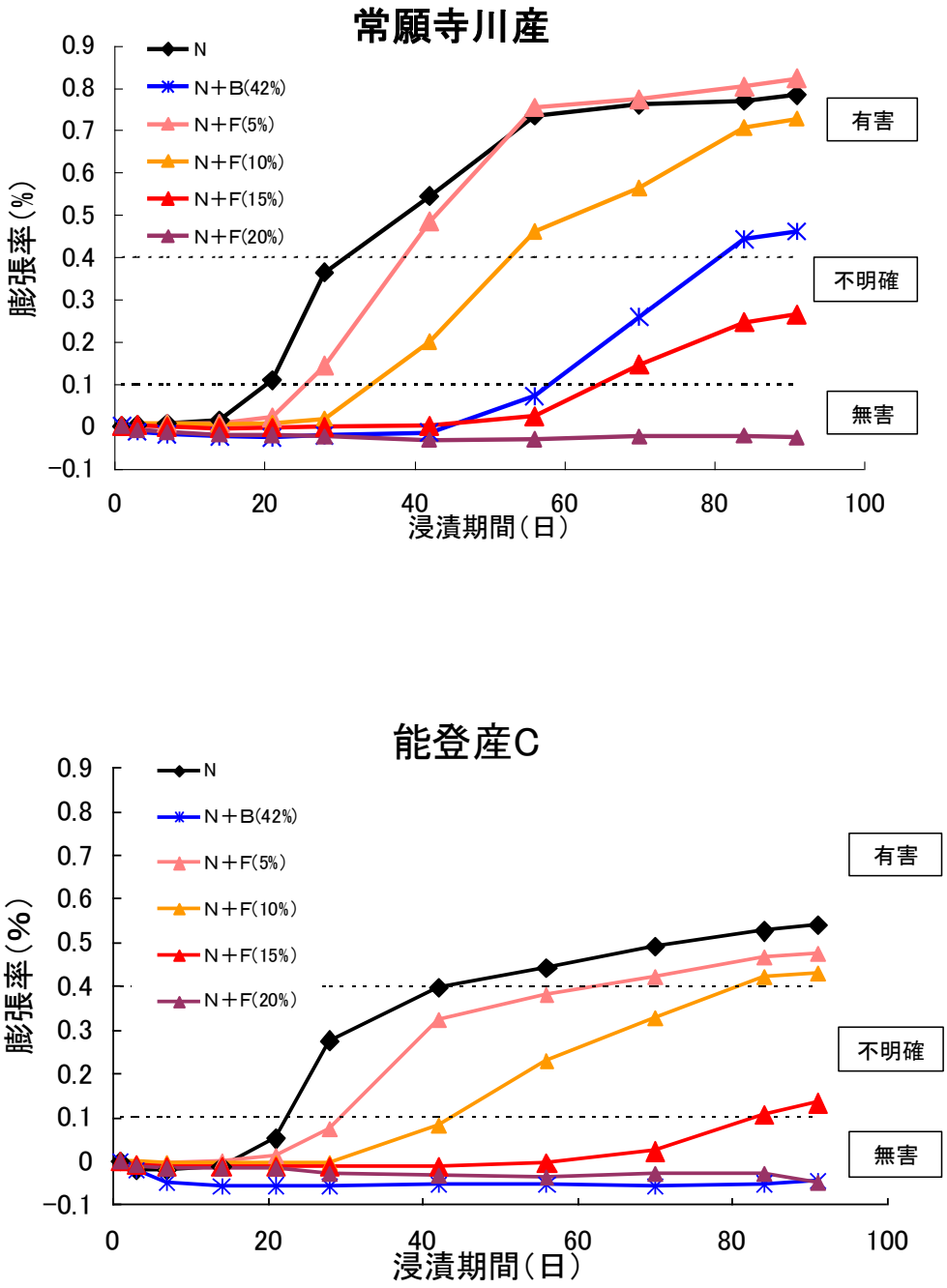
(1) 試験方法

デンマーク法により，化学法で用いた富山県，石川県の骨材（各産地の中で特に反応性が高いと考えられる骨材を選定）のうち，JIS 基準または JR 東日本基準でそれぞれ「無害でない」もしくは「E 有害」と判定された骨材により作製された供試体（モルタルバー）を用いて膨張率を算出する。フライアッシュの置換率は，5%，10%，15%，20%，高炉スラグの置換率は 42%とした。また，デンマーク法終了後の供試体から薄片（縦約 20mm×横約 40mm，厚さ約 20μm）を作製し，偏光顕微鏡観察を行う。

※デンマーク法においては，40mm×40mm×160mm の供試体を作製し，20℃にて 28 日間水中養生後，供試体を 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬し，3 箇月間の膨張量の経時変化を測定する。なお，モルタル中のアルカリ量は調整しない。判定は 3 箇月後の膨張率が 0.1%未満の場合は「無害」，0.1～0.4%の場合は「不明確」，0.4%以上の場合は「有害」とする。

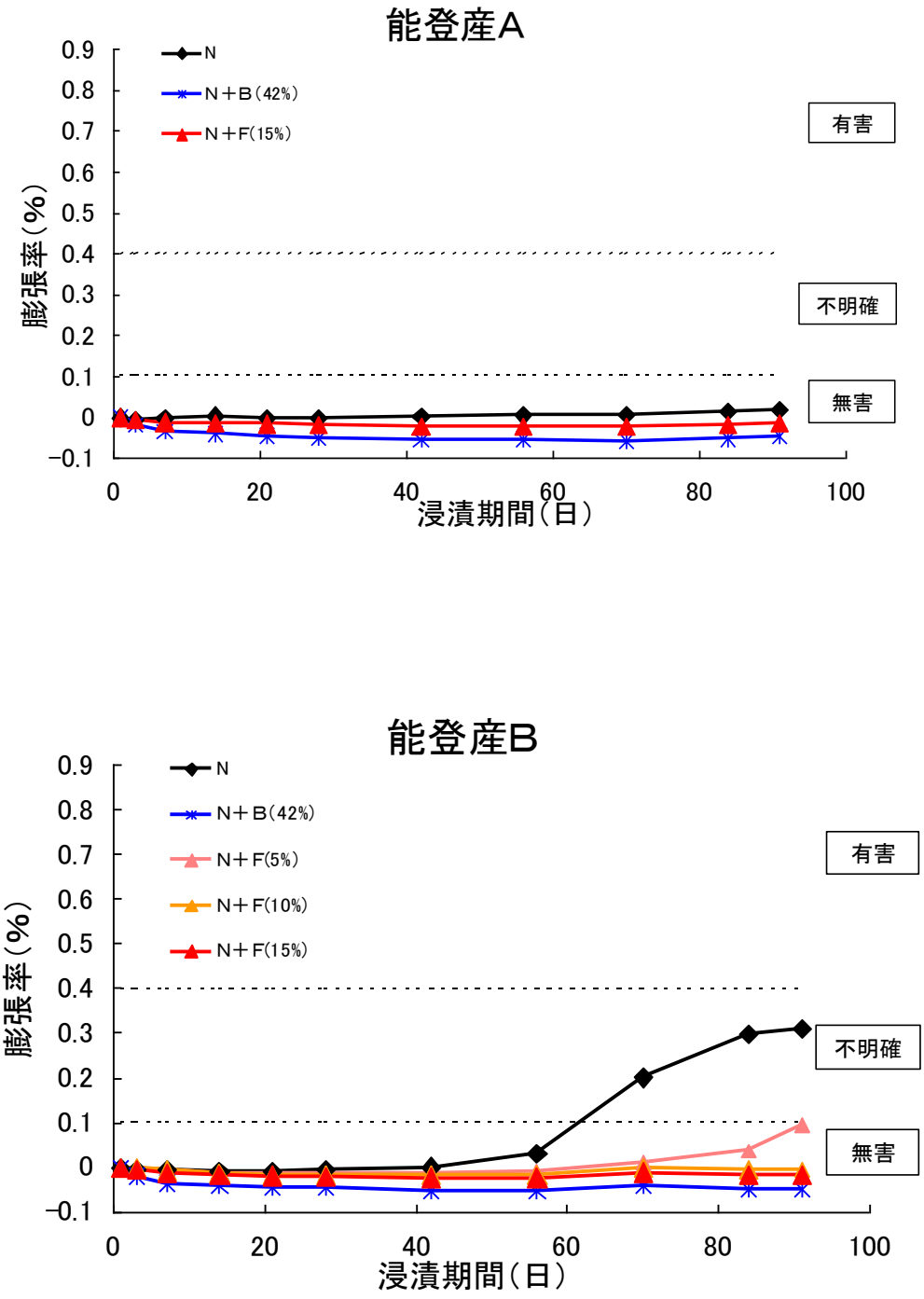
(2) 試験結果

デンマーク法の結果を**図－4.17** および**図－4.18** に示す。図より，常願寺川産の場合，JIS A1146 同様，Ｎ，Ｎ＋Ｂで「有害」，Ｎ＋Ｆ(15%以上)で「不明確」もしくは「無害」であった。門前産の場合，Ｎで「有害」，Ｎ＋Ｂで「無害」，Ｎ＋Ｆ(15%以上)で「不明確」もしくは「無害」，それ以外の骨材の場合，いずれも「不明確」もしくは「無害」であった。従って，Ｎ＋Ｆ(15%以上)は，Ｎで「有害」と判定された常願寺川産，門前産ともに，膨張が抑制され，ＡＳＲ抑制に極めて有効であると考えられる。また，デンマーク法終了後の偏光顕微鏡観察結果を**図－4.19**[17]に示す。図より，デンマーク法により「有害」と判定されたものには，ＡＳＲゲルを伴う比較的大きなひび割れが見られたが，「不明確」もしくは「無害」と判定されたもののひび割れは軽微であった。



（N：普通ポルトランドセメント，N＋B：高炉スラグ微粉末を置換，N＋F：フライアッシュを置換）

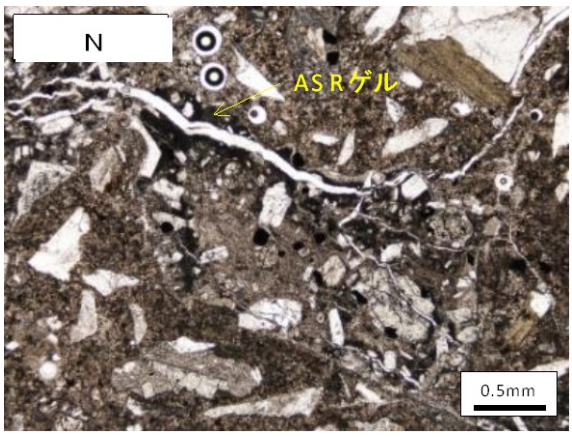
図－4.17 モルタルバー法（デンマーク法）の結果（常願寺産，能登産Ｃの骨材）



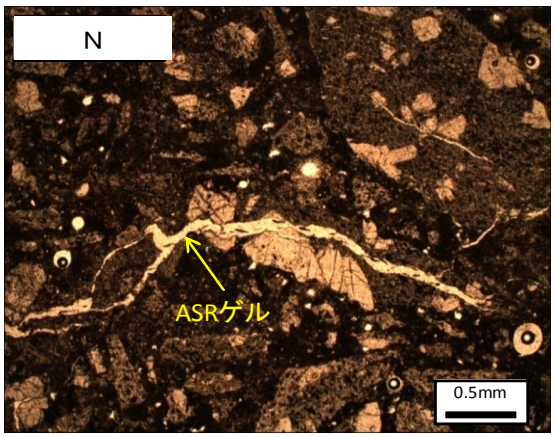
（N：普通ポルトランドセメント，N＋B：高炉スラグ微粉末を置換，N＋F：フライアッシュを置換）

図－4.18 モルタルバー法（デンマーク法）の結果（能登産 A,B の骨材）

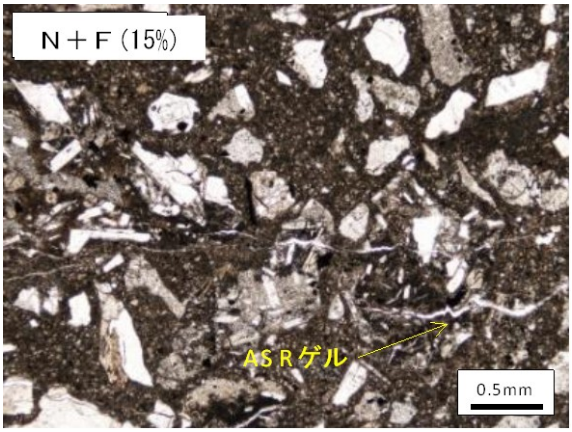
【常願寺川産】　　**【能登産 C】**



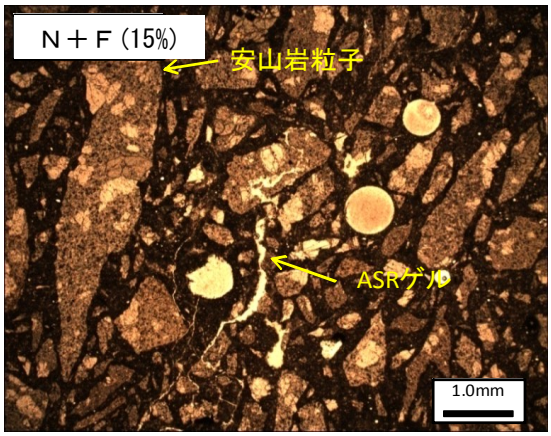
（デンマーク法で「有害」）



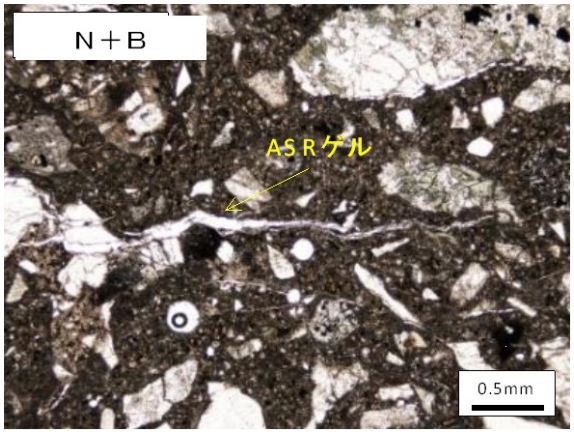
（デンマーク法で「有害」）



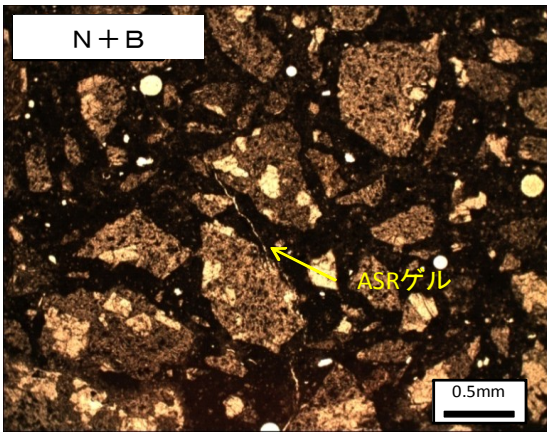
（デンマーク法で「不明確」）



（デンマーク法で「不明確」）



（デンマーク法で「有害」）



（デンマーク法で「無害」）

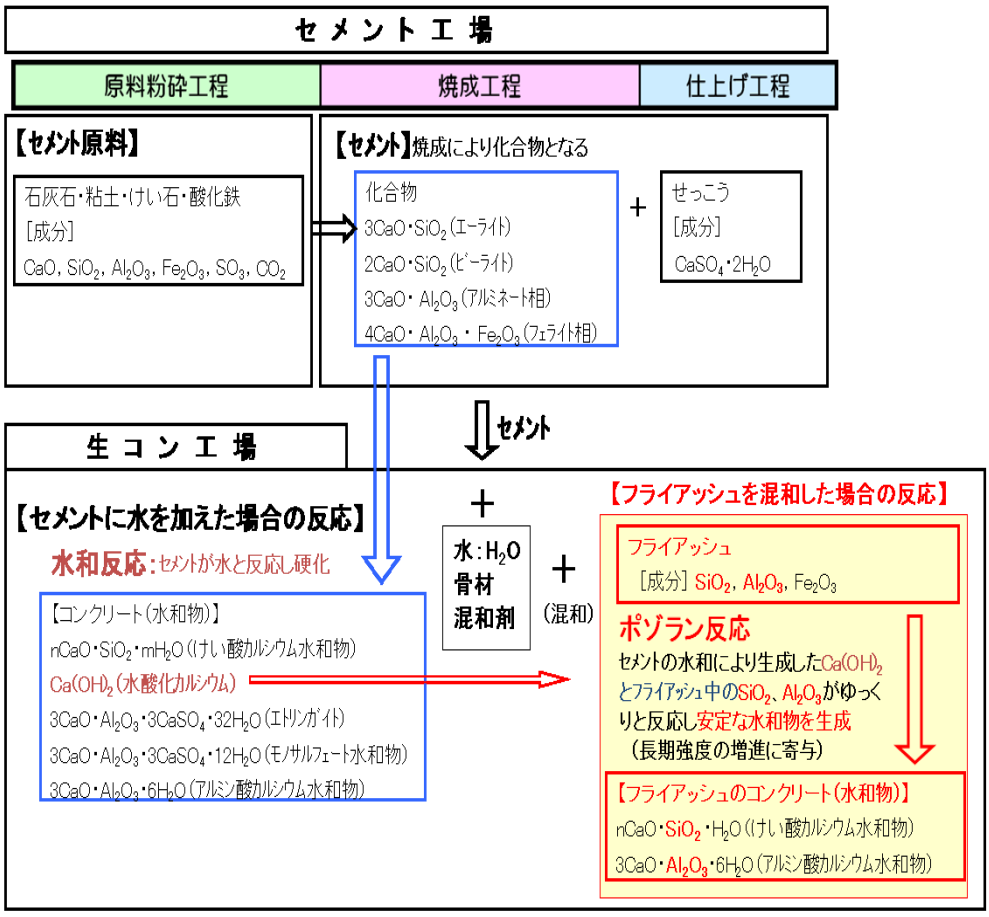
（N：普通ポルトランドセメント，N＋B：高炉スラグ微粉末を 42%置換，N＋F：フライアッシュを 15％置換）

図－4.19 偏光顕微鏡観察結果（常願寺川産，能登産 C の骨材）[17)]

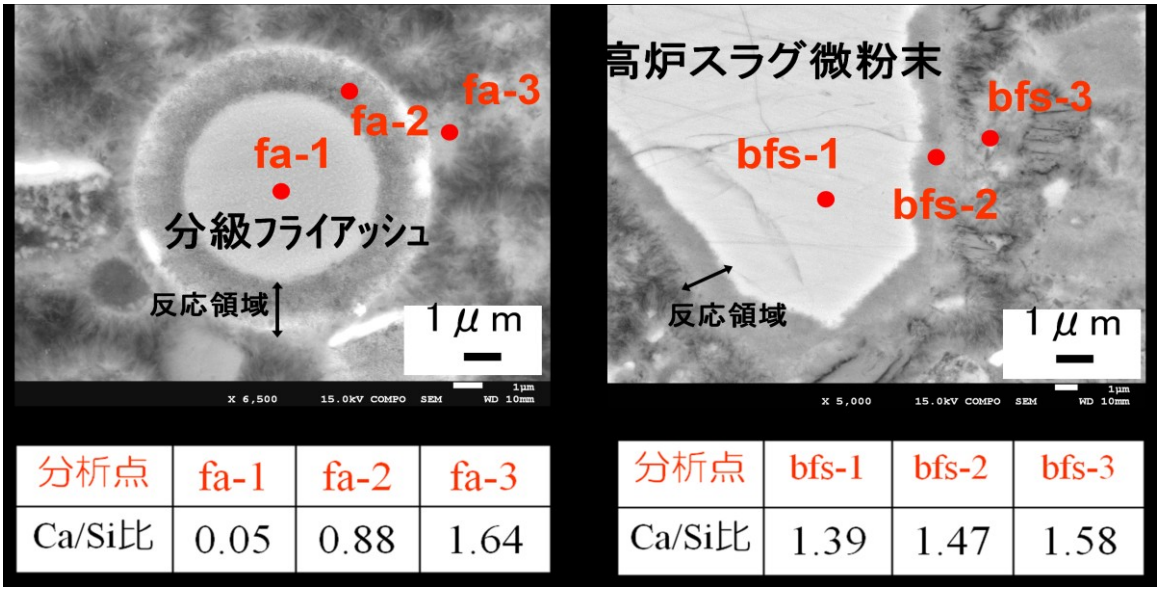
4.5.4 ASR 抑制性能に関する評価

常願寺川産骨材を用いたモルタルバー法（JIS A1146）の試験結果（**図－4.14**）およびモルタルバー法（デンマーク法）の試験結果（**図－4.17**）によって，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは， ASR 抑制性能の観点において，汎用コンクリートより明らかに優位であることが確認できた。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，ASR 抑制性能の観点において，汎用コンクリートに比べ，品質的に優れていると評価できる。

このフライアッシュによる ASR の抑制メカニズムについては，様々な反応機構が関わっているが，近年，コンクリート内部組織にある「細孔溶液からのアルカリの除去」による効果が注目されている。フライアッシュによるポゾラン反応の概要を**図－4.20** に，フライアッシュと高炉微粉末の SEM-EDS 結果を**図－4.21**[18]に示す。図より，フライアッシュのポゾラン反応は，セメントの水和反応により生じる $Ca(OH)_2$ との反応であるため，細孔溶液からのアルカリを除去する効果がある。その証拠として，フライアッシュの反応相の Ca/Si 比はその近傍より小さいのに対し，高炉スラグ微分末の反応層の Ca/Si 比は近傍の値と変わらないことが示されている。このことは，ASR の抑制効果に対するフライアッシュの優位性を示唆していると考えられる。



図－4.20 フライアッシュによるポゾラン反応の概要



分析点	fa-1	fa-2	fa-3
Ca/Si比	0.05	0.88	1.64

分析点	bfs-1	bfs-2	bfs-3
Ca/Si比	1.39	1.47	1.58

図－4.21 フライアッシュと高炉スラグ微粉末の SEM-EDS 結果 [18)]

4.6 遮塩性能

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性を検証するため，遮塩性能に関連する塩化物イオン浸透深さ測定，電気泳動試験および鉄筋腐食試験により，比較評価を実施した。

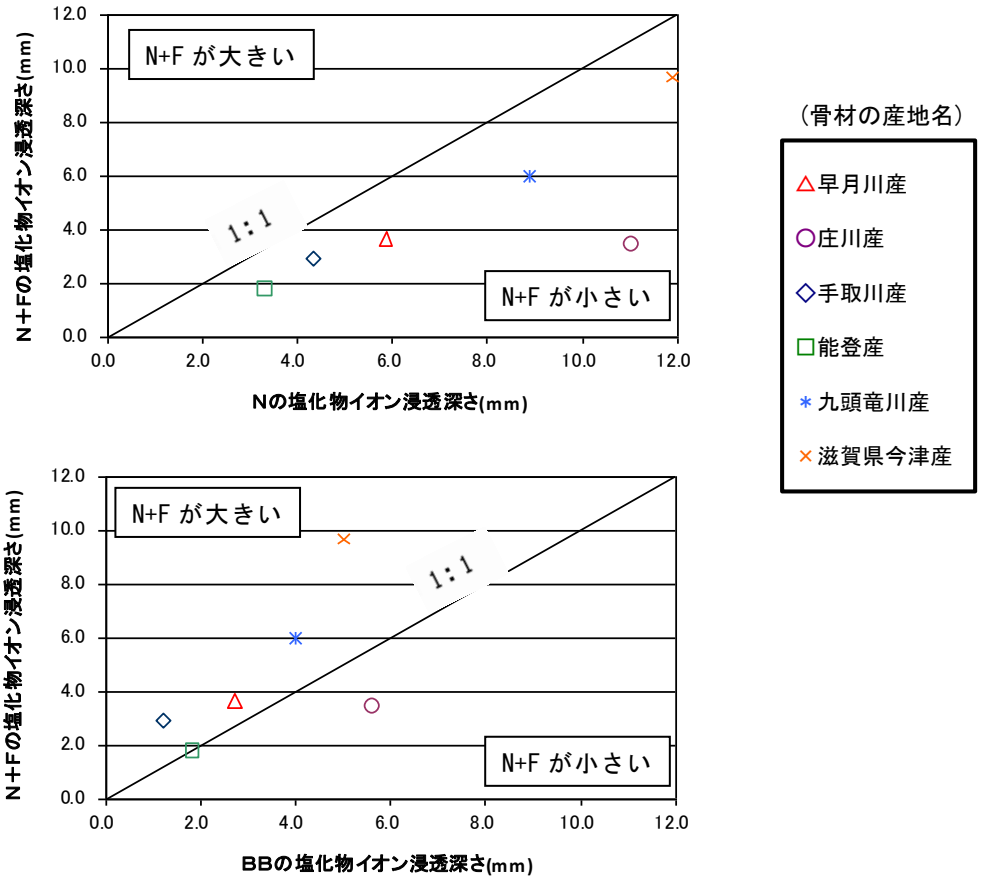
4.6.1 塩化物イオン浸透深さ測定

(1) 試験方法

塩水に浸漬した供試体のＣl⁻浸透深さを測定する。供試体は材齢 91 日以降の供試体を使用し，暴露面以外はエポキシ樹脂にて被覆し，3%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，発色法により塩化物イオンの浸透深さを測定する。

(2) 試験結果

塩化物イオン浸透深さの測定結果を**図－4.22** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の塩化物イオン浸透深さは，骨材によりばらつきはあるものの，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ）よりも小さく，高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同等であった。



（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(内割り)）

図－4.22 塩化物イオン浸透深さ測定結果

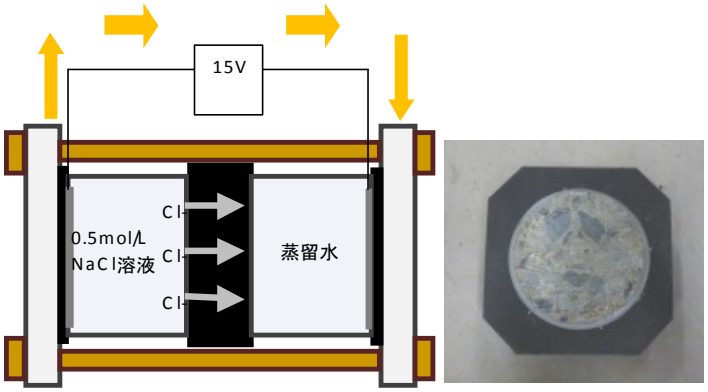
4.6.2 電気泳動試験

(1) 試験方法

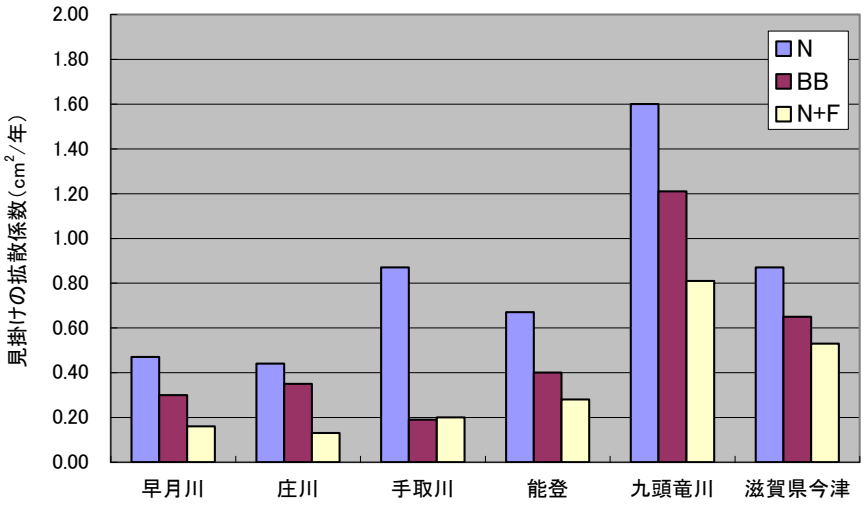
JSCE-G-571-2007（電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)） に準拠し，直流定電圧を用いた電気泳動法により，コンクリート中で定常状態にある塩化物イオンの実効拡散係数を計測し，さらに換算により見掛けの拡散係数を算出する。電気泳動試験装置の概要を**図－4.23** に示す。なお，見掛けの拡散係数は，鉄筋位置での塩化物イオン濃度を求めるために実施する拡散予測式に用いる係数である。

(2) 試験結果

見掛けの拡散係数の算出結果を**図－4.24** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の見掛けの拡散係数は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ）よりも小さく，高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同等もしくは小さい。



図－4.23 電気泳動試験装置の概要



(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(内割り))

図－4.24 見掛けの拡散係数の算出結果

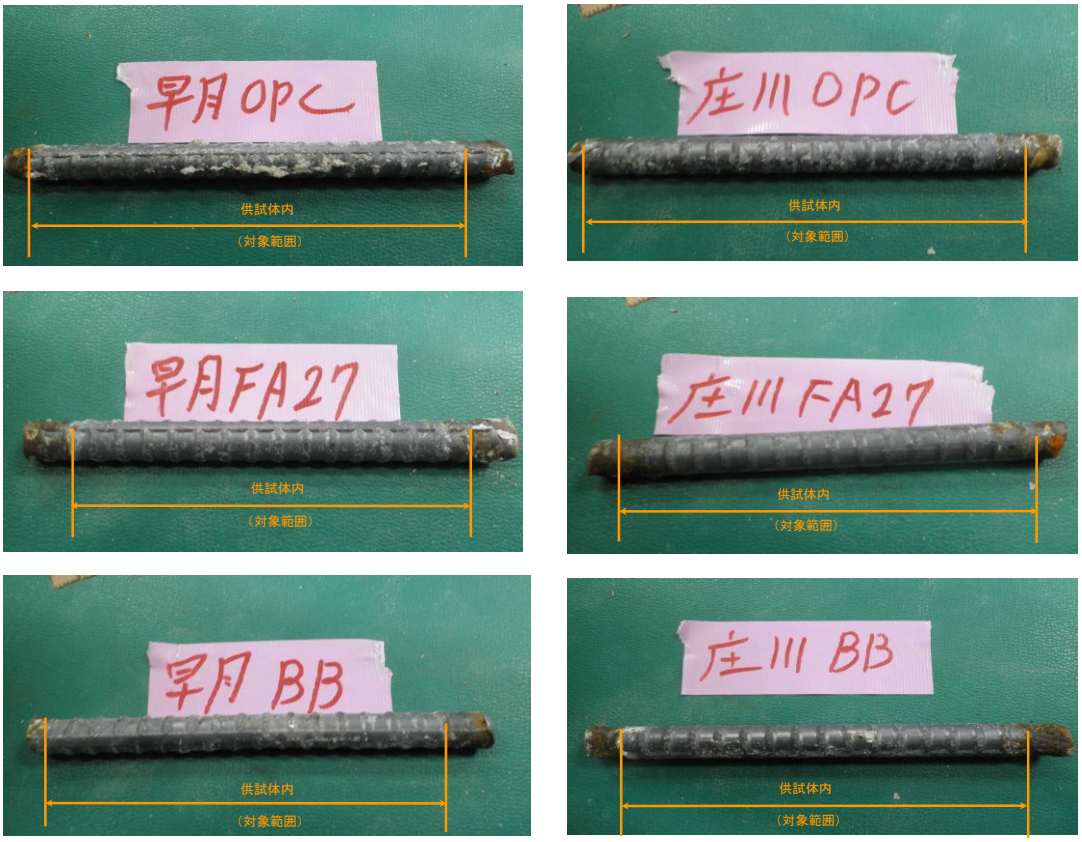
4.6.3 鉄筋腐食試験

(1) 試験方法

腐食促進環境下に供試体を暴露して，供試体の鉄筋腐食状況を観察する。供試体は材齢 91 日以降の供試体を使用し，温度 40℃，3%NaCl 水溶液に 12 時間浸漬，温度 40℃，RH60%以下で 72 時間乾燥を繰り返す。試験終了後には，供試体を割裂し，鉄筋の腐食状況を観察する。

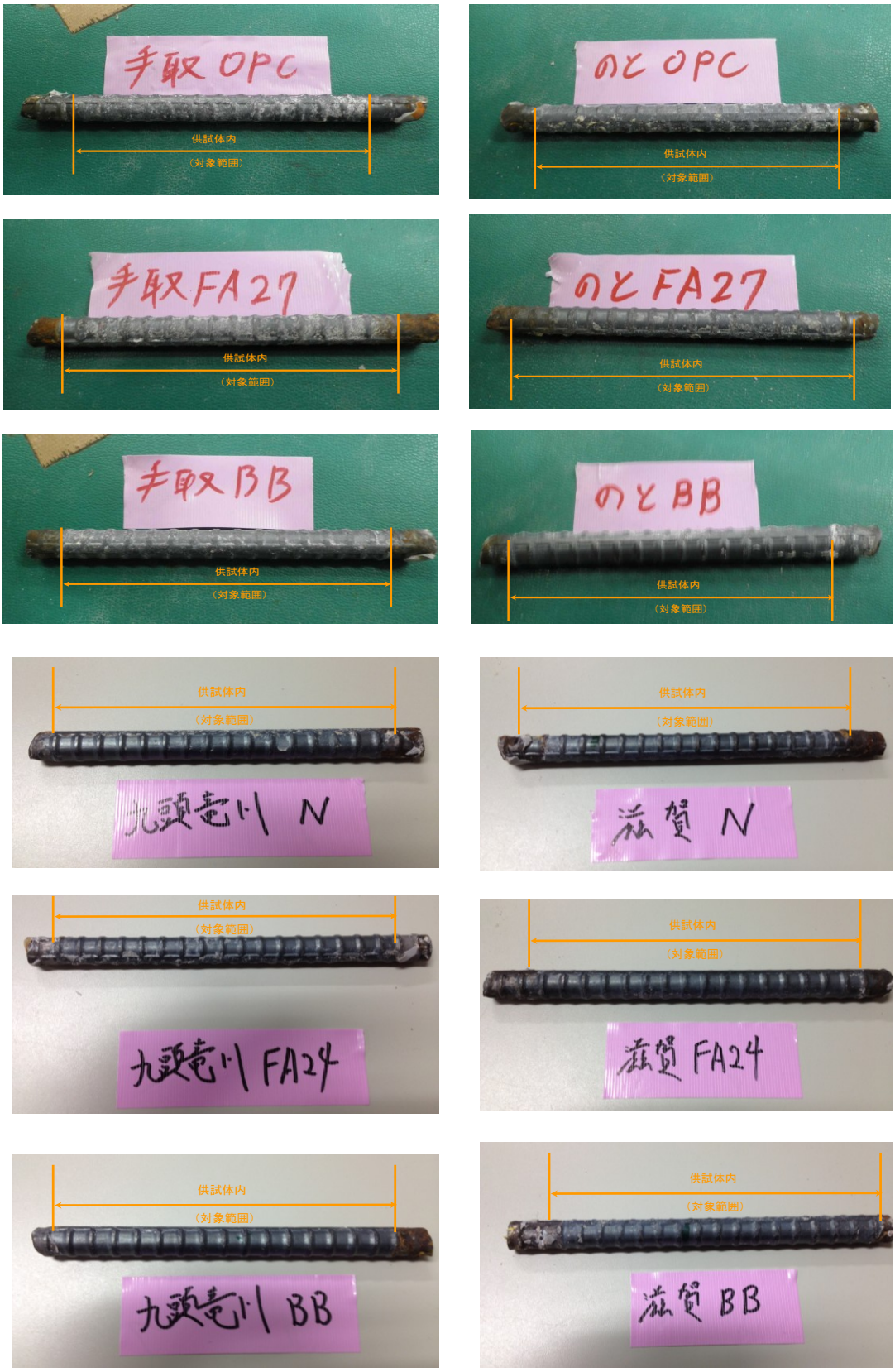
(2) 試験結果

鉄筋の腐食状況写真（暴露 91 日経過）を**写真－4. 1** に示す。写真より，いずれも 91 日経過時点では腐食に至っていないことが確認できた。（写真の端部の腐食は対象範囲外）



（OPC：普通ポルトランドセメント，BB：高炉スラグ微粉末を 42%置換，FA27：フライアッシュを 15%置換）

写真－4. 1　鉄筋の腐食状況（その１）

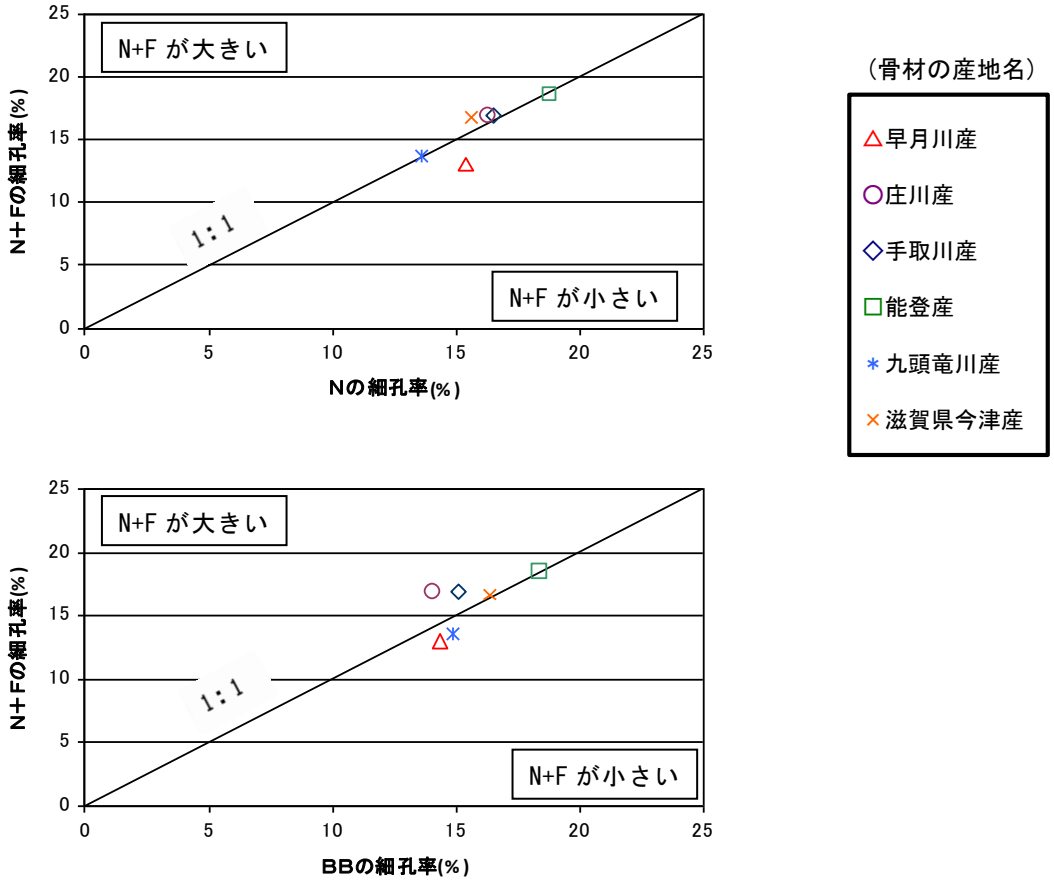


（OPC,N：普通ポルトランドセメント，BB：高炉スラグ微粉末を 42%置換，FA：フライアッシュを 15％置換）

写真－4．1　鉄筋の腐食状況（その 2）

4.6.4 遮塩性能に関する評価

塩化物イオン浸透深さ測定，電気泳動試験および鉄筋腐食試験の結果から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，遮塩性能の観点において，汎用コンクリートに比べ，品質的に優れていると評価できる。これは，北陸産分級フライアッシュのポゾラン反応によるコンクリート組織の緻密化や骨材界面の改善が関与していると考えられる。また，材齢 91 日の供試体について，水銀圧入式ポロシメータにより測定した細孔率での比較図（**図－4.25**）では，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の細孔率は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同等であったことを考慮すると，「3.4 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善メカニズム」で考察した，北陸産分級フライアッシュによる骨材界面の改善の寄与がより大きいものと推察される。



（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）

図－4.25 細孔率の測定結果

4.7 中性化抑制性能

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性を検証するため，中性化抑制性能に関連する中性化深さ測定により，比較評価を実施した。

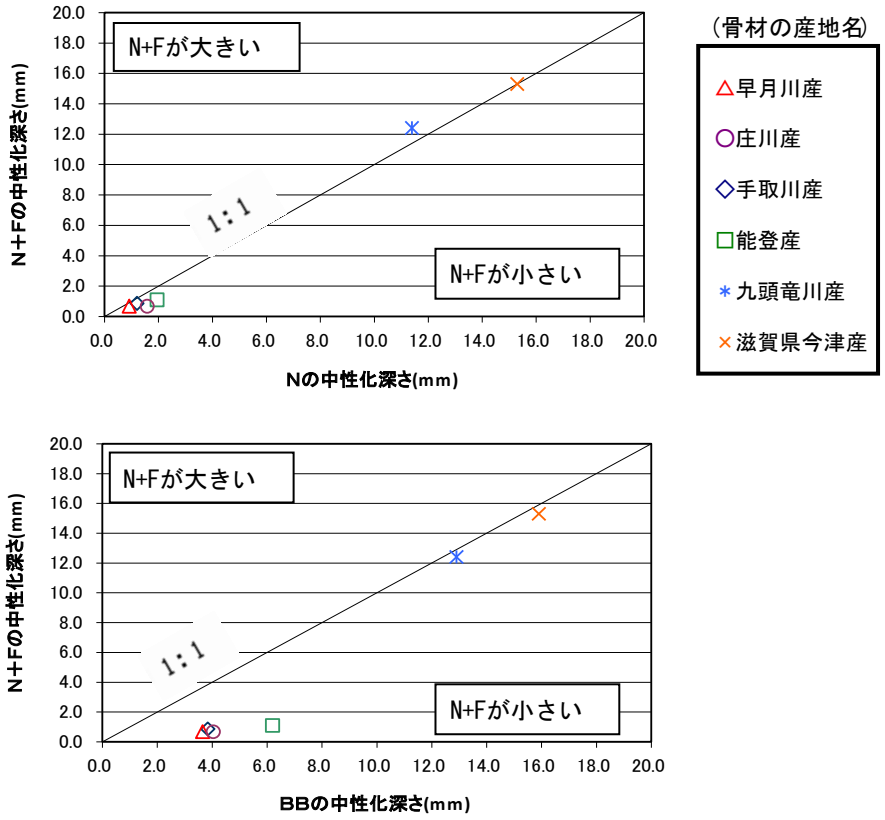
4.7.1 中性化深さ測定

(1) 試験方法

中性化促進環境下に供試体を暴露して，中性化深さを測定する。供試体は材齢 91 日以降の供試体を使用し，暴露面以外はエポキシ樹脂にて被覆後，温度 20℃，湿度 60%，CO_2 濃度 5% （JIS A1153）の条件下に 91 日間静置する。暴露後，エポキシ樹脂をはがし，フェノールフタレイン法（JIS A1152）により断面にフェノールフタレイン 1%エタノール溶液を噴霧し，中性化深さを測定する。

(2) 試験結果

中性化深さの測定結果を**図－4.26** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の中性化深さは，骨材によりばらつきはあるものの，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）に比べ，同等である。



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

図－4.26 中性化深さ測定結果

4.7.2 中性化抑制性能に関する評価

従来，フライアッシュを混和したコンクリートでは，中性化速度が早いと報告されている[19]。また，土木学会コンクリート標準示方書設計編では，耐久性照査に必要な中性化深さ y(mm)の予測値は，以下の式で求めることとなっている。

$$y = (-3.57+9.0W/B)\sqrt{t}$$

ここに，W/B:有効水結合材比　＝W/(C_P+k・A_d)

C_P:単位体積当たりのポルトランドセメントの質量

A_d：単位体積当たりの混和材の質量

k：混和材の種類により定まる定数

（フライアッシュの場合:k=0，高炉スラグ微粉末の場合：k=0.7）

この式において，有効水結合材比を算出するための k 値は，普通ポルトランドセメントを基準(k=1)とした場合の混和材の中性化抑制効果に対する貢献度である。この示方書では，上式に示されているように,フライアッシュを用いる場合の k 値を 0 としている。これは，フライアッシュが中性化速度の低減にまったく貢献しないことを意味しており，フライアッシュに中性化速度の低減効果を過小評価していることから，近年の土木学会ライブラリーでは，水結合材比と k 値の関係や初期養生期間と k 値の関係などにより，フライアッシュが中性化速度の低減に少なからず貢献していることが示されている[20]。

今回の中性化深さ試験の結果においても，実用化段階の比較試験として，汎用コンクリートと比較したところ，中性化抑制性能の観点において，骨材によりばらつきはあるものの，品質的に同等であると評価できる。これは，北陸産分級フライアッシュは粒子が細かくポゾラン反応性が高いことなどにより，前述の遮塩性能同様，組織の緻密化とともに骨材界面の改善が進んだためと推察される。

なお，現実的な問題として，中性化による鉄筋コンクリート構造物の劣化は，中性化深さが，構造物のかぶり厚さ以上となり鉄筋が腐食することにより生じる。一般土木構造物を対象とした場合，かぶり厚さが 10cm 程度であり，構造物の耐用年数を通しての中性化の影響はほとんど問題とならない。一方，一般建築構造物のかぶり厚さは，床スラブで 3cm から 4cm，柱・梁・耐力壁で 4cm から 5cm と小さいが，上式に t=100 年，W/B=0.6 を入力しても中性化深さは 2cm 程度である。従って，中性化の本質的な問題として，材料や配合上の問題だけでなく，施工上のかぶり厚さ不足，初期ひび割れ，漏水などの問題が混在していることを考慮すべきであると考える。

4.8 凍害抵抗性能

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性を検証するため，凍害抵抗性能に関連する凍結融解試験により，比較評価を実施した。

4.8.1 凍結融解試験

(1) 試験方法

JIS A1148（コンクリートの凍結融解試験方法，気中凍結水中融解試験方法（B 法））に準拠し，凍結と融解を 300 サイクルに亘り行った供試体（100㎜×100㎜×400㎜）の相対動弾性係数と質量減少率を測定し，凍害抵抗性を評価する。凍害抵抗性は，たわみ振動の一次共鳴振動数より産出した相対動弾性係数（式１）および質量減少率（式２）により評価する。

$$P_n = \frac{f_n^{\,2}}{f_0^{\,2}} \times 100 \qquad \cdots（式１）$$

Ｐn：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数(%)

f_n：凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数（Hz）

f_0：凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数（Hz）

$$W_n = \frac{w_n}{w_0} \times 100 \qquad \cdots（式２）$$

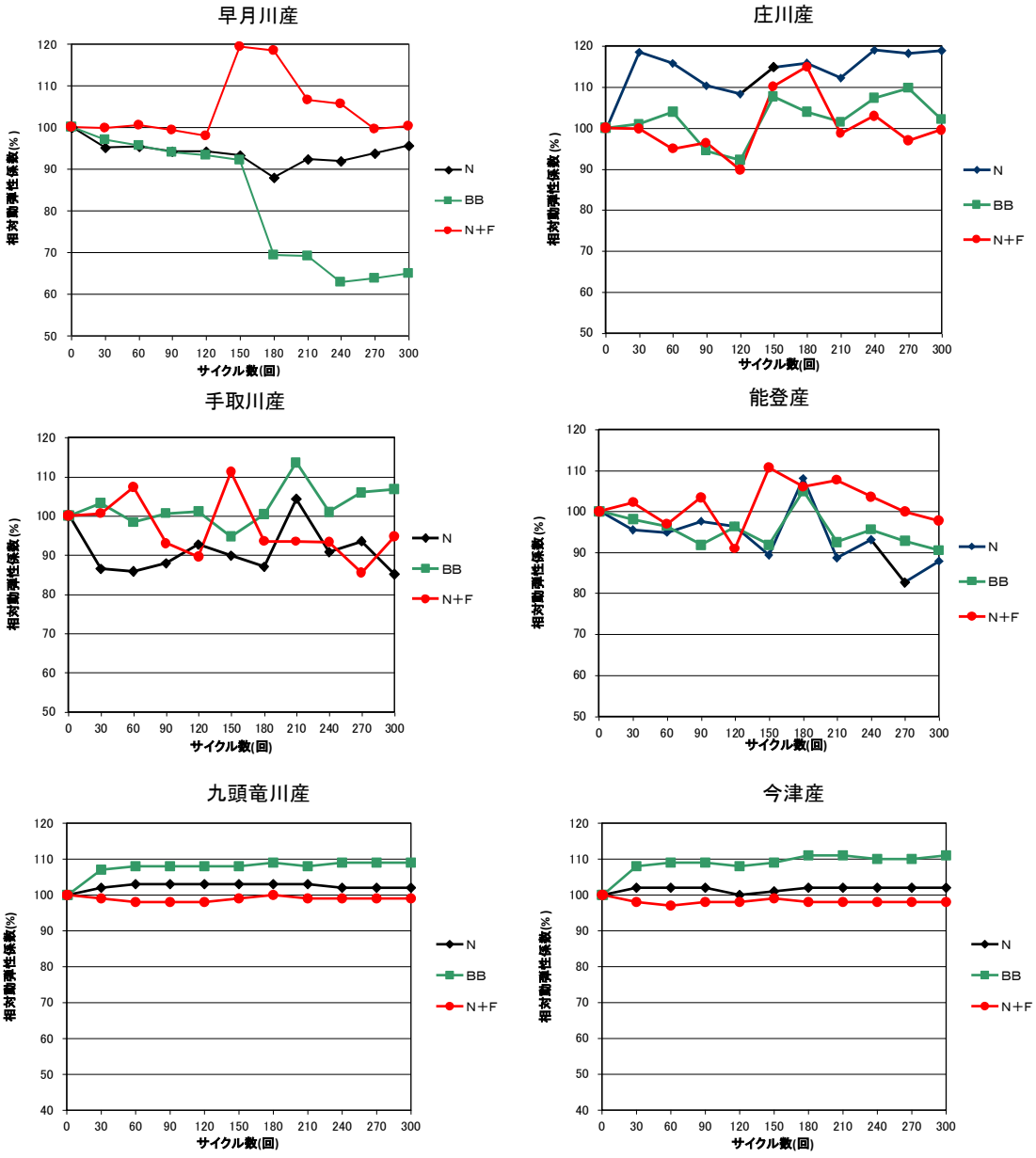
Wn：凍結融解 n サイクル後の質量減少率(%)

w_n：凍結融解 n サイクル後の供試体の質量（g）

w_0：凍結融解 0 サイクルにおける供試体の質量（g）

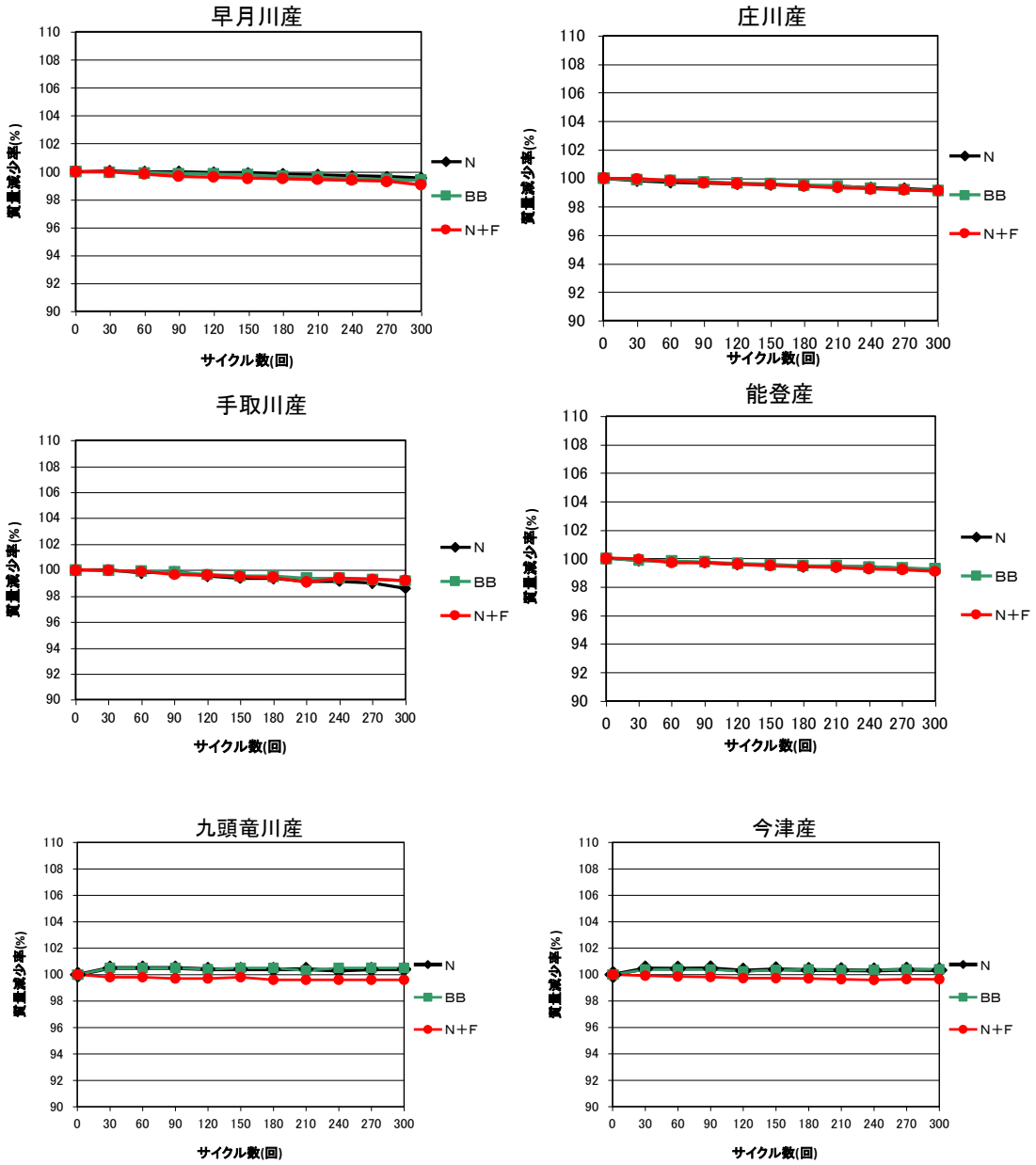
(2) 試験結果

相対動弾性係数の測定結果を**図－4.27** に，質量減少率の測定結果を**図－4.28** に示す。図より，いずれの骨材においても凍害抵抗性に対する限界値[21)]である相対動弾性係数 60%を満足しており，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の凍結抵抗性能は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（Ｎ），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同等であった。



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

図－4.27 相対弾性係数の測定結果

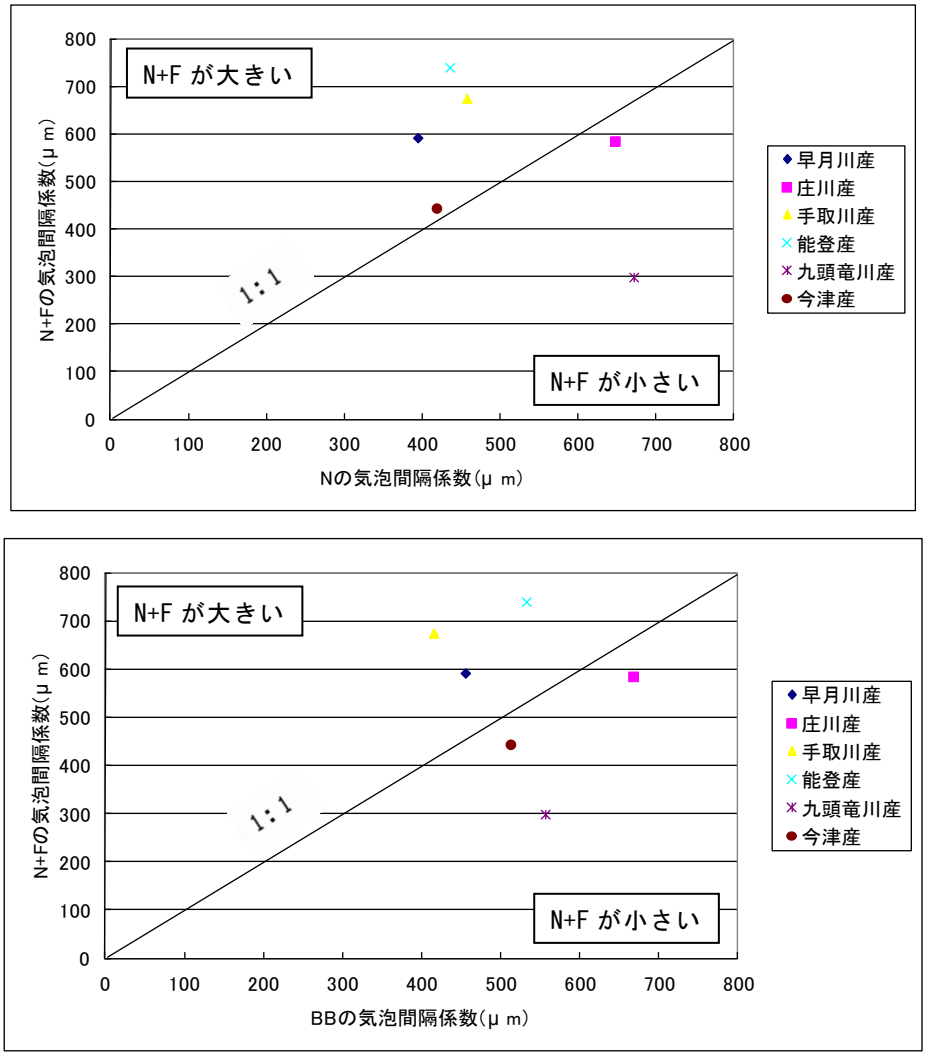


（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，FA:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

図－4.28 質量減少率の測定結果

4.8.3 凍害抵抗性能に関する評価

凍結融解試験の結果から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，凍害抵抗性能の観点において，汎用コンクリートに比べ，品質的に同等であると評価できる。参考として，ASTMC 457－98(顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムによるパラメータと空気量の測定方法)により算出した気泡間隔係数の比較図を**図－4.29** に示す。図より，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）の気泡間隔係数は，骨材毎のばらつきはあるものの，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート(Ｎ)，高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と同等であった。なお，この気泡間隔係数は，凍結融解に対する抵抗性の指標 200μm 以下[22]に対し，汎用コンクリートも含め，いずれの骨材も満足していないため，同一条件における汎用コンクリートとの比較として参考に示した。



図－4.29 気泡間隔係数の測定結果

4.9 まとめ

本章では，コンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる有害な「ひび割れ」を誘発する要因として，収縮性能，水和発熱性能，ASR 抑制性能，遮塩性能，中性化抑制性能，凍害抵抗性能の 6 項目により，汎用コンクリートとの各種比較試験（室内試験）を実施し，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性が，汎用コンクリートに比べ，同等以上であるかどうかを検証した。

その結果，**表－4.12** に示すように，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性は，収縮性能，水和発熱性能，ASR 抑制性能，遮塩性能の 4 項目に対し品質的に優れ，中性化抑制性能，凍害抵抗性能の 2 項目に対し品質的に同等であることが確認できた。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，汎用コンクリートに比べ，同等以上の耐久性および使用性を有することを検証できた。

表－4.12 耐久性に関しての汎用コンクリートとの比較結果

比較項目		試験項目	性能評価
初期段階の「ひび割れ」に関わる項目	(1)収縮抑制性能	・乾燥収縮試験	・品質的に優れている
		・自己収縮試験	
	(2)水和発熱性能	・簡易断熱上昇試験	・品質的に優れている
		・完全断熱上昇試験	
劣化機構の過程で「ひび割れ」に関わる項目	(3)ASR 抑制性能	・モルタルバー法（JIS A1146）	・品質的に優れている
		・モルタルバー法（デンマーク法）	
	(4)遮塩性能	・塩化物イオン浸透深さ	・品質的に優れている
		・電気泳動試験	
		・鉄筋腐食試験	
	(5)中性化抑制性能	・中性化深さ測定	・品質的に同等
	(6)凍害抵抗性能	・凍結融解試験	・品質的に同等

【参考文献】

1) T. Hashimoto and K. Torii: The development of highly durable concrete using classified fine fly ash in Hokuriku District, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.312-321, 2013.
2) T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh and K. Torii :A Development of Environmentally-friendly and Highly-durable concrete Using Classified Fly Ash, Concrete Innovation Conference CIC2014, CD-R12pages, 2014.
3) K. Torii, T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh : The effective utilization of classified fine fly ashes for production of highly-durable concrete mixtures, 3rd Inter. Conf. on Sustainable Construction Materials & Technologies, SCMT3 Hamada sessions, pp.109-118, 2013.
4) 橋本徹，久保哲司，参納千夏男：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に向けた取組み，電力土木，No.361，pp.56-60，2012.
5) 宮里心一，鳥居和之，伊藤始：北陸産分級フライアッシュによるコンクリートの遮塩性向上効果に関する地域特性を踏まえた評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.163-168，2013.
6) 田端辰伍，宮里心一，橋本徹，渡辺将之：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.151-156，2013.
7) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術‘03　基礎編，pp.5-67，2003.
8) (社)土木学会：コンクリート標準示方書設計編（2007年度制定），2007.
9) (社)建築学会：建築工事共通仕様書 JASS5(2009年2月改訂)，2009.
10) 上原元樹，鶴田孝司，水野清，佐藤隆恒：コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材の物理・化学的性質，鉄道総研報告，Vol.26，No.12，pp.5-10，2012.
11) 都築正則，酒井正樹，神代泰道，平田隆祥：石灰石骨材および収縮低減材料を使用したコンクリートのひび割れ抑制評価，大林組技術研究所報，No.76，pp.1-7，2012.
12) 黒岩秀介，並木哲，飯島眞人：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ対策に関する検討，大成建設技術センター報，第42号，pp.1-8，2009.
13) 佐藤貴史，萩原秀樹，秋田勝次，桜井邦昭：フライアッシュを用いた覆工用高充填コンクリートの開発，トンネルと地下，第44巻，10号，pp.43-52，2013.
14) 白根勇二，蛯谷祐至，森英治，伊藤毅浩：フライアッシュを積極的に用いた粉黛系中流動コンクリートの開発，前田技術研究所報，Vol.1，No.53，2012.
15) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会　委員会報告ダイジェスト版，2011.3.
16) 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，第Ⅴ部門，pp.429-430，2008.
17) 広野真一，鳥居和之：北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.499-506，2012.
18) 広野真一，安藤陽子，大代武志，鳥居和之：フライアッシュと高炉スラグ微粉末によるASR抑制効果の比較，セメント・コンクリート論文集，Vol.67，pp.441-447，2013.

19）（社）日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，pp.162-163，1999.
20）(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.
21）(社)土木学会：コンクリート標準示方書施工編（2007 年度制定），2007.
22）(社)日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，1996.

第 5 章　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証[1)～5)]

5.1 概　説

これまで，第 2 章において，北陸産分級フライアッシュの品質が，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」により，従来よりも高品質になったことを検証し，このフライアッシュを使用したコンクリートの流動性や耐久性の向上が期待された。そして，第 3 章，第 4 章において，実際の生コンクリート工場で製造された北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの品質が，施工性や強度発現性の観点から，汎用コンクリートに比べ品質的に同等以上であること，また，コンクリートの耐久性においても，収縮性能，水和発熱性能，ASR 抑制性能，遮塩性能，中性化抑制性能，凍害抵抗性能の 6 項目に対して，汎用コンクリートに比べ品質的に同等以上であることを検証した。しかしながら，実際に，汎用コンクリートとして実構造物に適用できるかどうかについては，まだ，十分な検証がなされていない。今後，北陸地方のコンクリートにフライアッシュが有効活用されるためには，試験施工などによる実構造物での検証が不可欠である。このような状況を受けて，フライアッシュ委員会に参画している富山県，石川県，福井県および国交省から，実構造物による「試験施工」の提供と，試験施工での結果を踏まえて，富山県，石川県から，「モデル工事」の提供があった。

そこで本章では，富山県，石川県，福井県および国交省の「試験施工」において，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）との実構造物での比較試験を実施し，その施工性，強度発現性および耐久性（初期ひび割れ，水和発熱性能）の観点から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証を行う。さらに，コンクリート構造物の品質は，その種類や配合，および，施工環境に影響を受けやすいことから，様々な構造物や異なる施工時期において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートでの「モデル工事」を実施し，その施工性，強度発現性および耐久性（初期ひび割れ）の観点から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物への適用に問題ないかどうかを検証する。

なお，「第 3 章 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質の検証」の結果を踏まえ，「試験施工」と「モデル工事」は 1 時間以内の施工を原則とした。

5.2 北陸3県および国交省の試験施工による比較検討

5.2.1 試験施工の実施概要および試験項目

試験施工の実施概要一覧を**表－5.1**に，調査項目の一覧を**表－5.2**に示す。

表－5.1 試験施工の実施概要一覧

官公庁	工事件名	施工場所	構造物概要（打設日）	備考
富山県	呉羽町袋線街路贈号交付金（富山大橋）道路改良その４工事	富山市安野屋	逆Ｔ型擁壁 H=3.9～5.2m、L=16m （H23.11.23、11.29、12.9、12.14）	ＢＢとＮ＋Ｆの２ブロックで比較する。（各約３０m³）
石川県	小原土清水線道路改良工事	金沢市別所町	重力式擁壁 H=2～3m、L=20m （H23.10.12、10.20）	ＢＢとＮ＋Ｆの２ブロックで比較する。（各約２５m³）
福井県	（県単）交通安全施設整備工事主要地方道武生美山線	越前市北町	重力式擁壁 H=1.0m、L=20m （H24.11.16、11.19）	ＢＢとＮ＋Ｆの２ブロックで比較する。（各約７m³）
国交省	常願寺川水橋護岸その６工事	富山市水橋	六脚ブロック（4t×117個） 0.64m×0.64m×0.64m （H24.9.7、9.14）	ＢＢとＮ＋Ｆの２ブロックで比較する。（各約１．８m³） Ｎ＋Ｆは合計２１５m³使用
			元付けコンクリート H=0～2.15m、L=8.3m （H25.1.9）	ＢＢとＮ＋Ｆの２ブロックで比較する。（各約２６m³）

（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）

表－5.2 試験施工の調査項目一覧

調　査　項　目	呉羽町袋線街路贈号交付金（富山大橋）道路改良その4工事 逆Ｔ型擁壁工 （スラブ、壁）	小原土清水線道路改良工事 重力式擁壁工	（県道）交通安全施設整備工事主要地方道武生美山線 重力式擁壁工	常願寺川水橋護岸その6工事 六脚ブロック 元付け工
フレッシュコンクリートの性状 ・製造時、荷卸時等のスランプ、空気量等を計測	○	○	○	○
コンクリートの圧縮強度 ・荷卸時に採取し、標準養生にて、材齢 3 日、7 日、28 日、56 日、91 日の圧縮強度を計測	○	○	○	○
ポンプ圧送性 ・筒先の性状を目視で確認、 ・ポンプ圧力をポンプ車圧力計で計測	○	○	－ （シュート打ちのため）	－ （バケット打ちのため）
コンクリートの打設状況 ・コンクリートの流動状況を目視で確認 ・ブリーディングの発生状況およびブリーディング量の測定 ・コテ仕上げの施工性を目視で確認	○	○	○	○
構造物の外観状況 ・ひび割れ、色むらの発生状況を確認	○	○	○	○
コンクリート温度特性等 ・埋め込み式温度センサーによる計測 ・埋め込み式ひずみ計による計測	○	○	○	○
温度応力解析の実施	○	○	○	○
現場代理人の感想	○	○	○	○

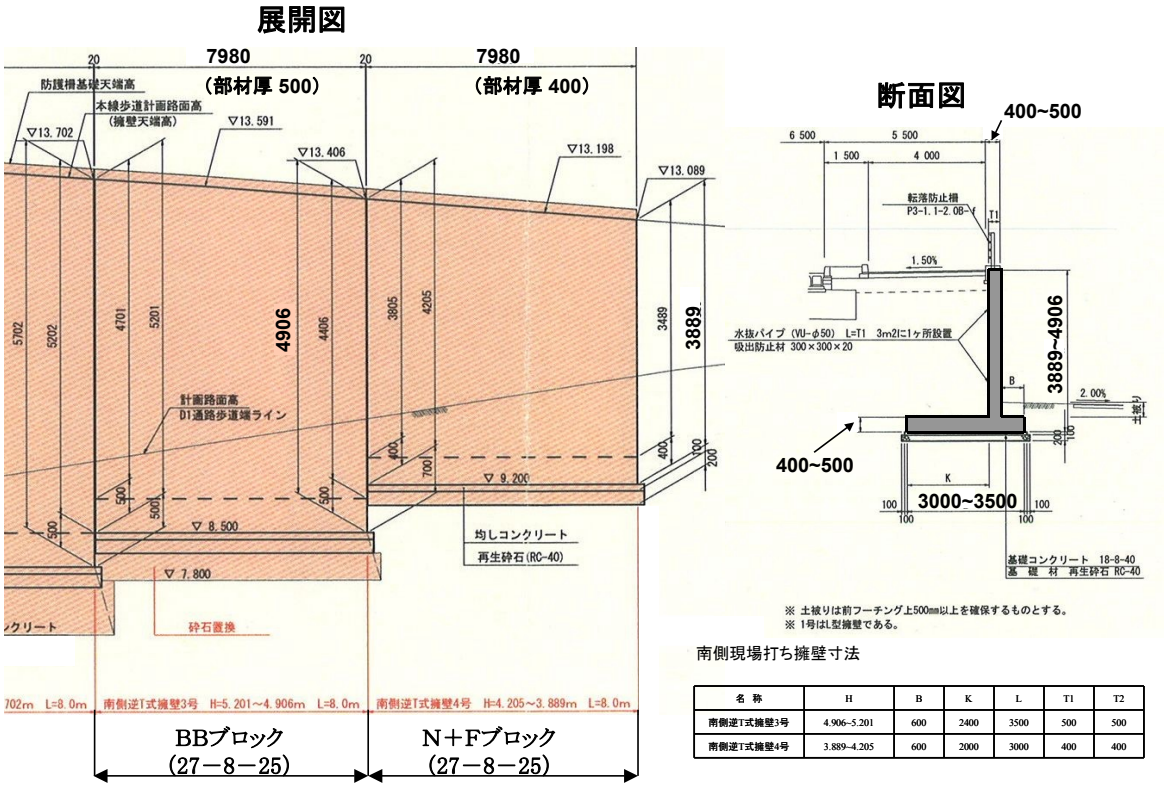
○：実施　－：未実施

5.2.2 富山県の試験施工による比較

富山県（富山市）で実施した試験施工の概要と結果を以下に示す。

(1) 試験施工の概要

試験施工の概要図を**図－5.1** に，配合表を**表－5.3** に示す。富山県発注の富山大橋道路改良工事の逆Ｔ型擁壁２ブロックを，各々高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）で試験施工を実施した。



名 称	H	B	K	L	T1	T2
南側逆T式擁壁3号	4.906~5.201	600	2400	3500	500	500
南側逆T式擁壁4号	3.889~4.205	600	2000	3000	400	400

図－5.1 試験施工の概要図

表－5.3 配合表

種類	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備　考
BB	54.0	44.4	293	－	158	821	1050	2.93	27N/mm² 配合
N＋F	52.0	44.2	257	45	157	814	1047	3.02	27N/mm² 配合

（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）

(2) 試験施工の結果

a. 施工性の比較

まず，フレッシュコンクリートの性状を**表－5.4** に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，所定のスランプ（8±2.5cm），空気量（4.5±1.5％）を確保できており，いずれも所要の施工性を満足している。

次に，ポンプ圧送性を**表－5.5** に示す。表より，ポンプ圧送性については，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，ポンプ最大圧力に対し，十分余裕をもって施工できた。一般に，フライアッシュコンクリートは粉体量が増えるため粘り気があり，ポンプ圧送性への影響が懸念されたが，ポンプ車を横付けにした通常の打設には問題ないと考えられる。

最後に，コンクリートの打設状況であるが，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，コンクリートの打設が効率的に行われ，流動性もよく，型枠の隅々や鉄筋等の周囲に密実なコンクリートをゆきわたらせることができた。ブリーディングの発生状況を**表－5.6** に示す。表より，構造物全体としてみると，Ｎ＋ＦブロックはＢＢブロックに比べてブリーディングが少なかった。Ｎ＋Ｆのベースではブリーディングの発生がほとんどなく，仕上げ作業時間の短縮につながった。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，施工性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

b. 強度発現性の比較

コンクリートの圧縮強度試験結果を**表－5.7** に示す。表より，実機試験結果同様，Ｎ＋Ｆブロックの初期強度発現（材齢3日、材齢7日）は，ＢＢブロックに比べて大きいことが確認できた。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，強度発現性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

c. 耐久性（初期ひび割れ）の比較

構造物の外観状況を**図－5.2** に示す。図より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，収縮等によるひび割れはみられなかった。また，Ｎ＋Ｆブロックでは若干全体的に色が濃かったが，色むらはみられなかった。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，耐久性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と品質的に同等と考えられる。

表－5.4 フレッシュコンクリートの性状

種　類		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 ・呼び強度 27 N/mm² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	ベース	11月23日 8:46～ 11:42	晴れ	12 ℃	一台目	製造時	－	－	－	－
						荷卸時	**8:40**	**９．０**	**４．９**	**１４．０**
	壁体	11月29日 9:09～ 12:00	晴れ	11～ 15 ℃	一台目	製造時	－	－	－	－
						荷卸時	**8:54**	**９．５**	**４．０**	**１４．０**
					最終車	製造時	－	１０．０	５．３	－
						荷卸時	10:39	９．５	５．５	１５．０
						終了時	10:49	９．５	５．２	１５．０
N＋Fブロック ・呼び強度 27 N/mm² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	ベース	12月9日 13:55～ 15:37	雨	6 ℃	一台目	製造時	－	－	－	－
						荷卸時	**13:42**	**１０．０**	**４．２**	**１４．０**
	壁体	12月14日 8:59～ 11:00	晴れ	4～ 10 ℃	一台目	製造時	－	－	－	－
						荷卸時	**8:41**	**９．５**	**４．５**	**１０．０**
					最終車	製造時	－	１０．５	４．５	－
						荷卸時	9:50	１０．０	３．９	１０．０
						終了時	10:19	９．５	３．３	１２．０

表－5.5 ポンプ圧送性

ベースはバケット打設のため、壁体打設時に計測

（単位：kgf/cm²）

種　類		ポンプ圧力	ポンプ能力
BBブロック	通常圧送時	40 ～ 120	最大圧力 315
	切替え瞬時	170 ～ 240	
N＋Fブロック	通常圧送時	55 ～ 110	
	切替え瞬時	120 ～ 200	

ポンプ圧力計

表－5.6 ブリーディング発生状況

種　類		ブリーディング水採集量（ℓ）	打設量(m³)	1m³当りのブリーディング量（ℓ/m³）
BBブロック	ベース	29．7	14．0	2．0
	壁体	8．0	18．2	0．4
	全体	**37．7**	**32．2**	**1．2**
N＋Fブロック	ベース	0．0	9．6	0．0
	壁体	19．0	12．1	1．3
	全体	**19．0**	**21．7**	**0．9**

ブリーディングの発生状況写真（○内は溜り水）

BBブロック ベース

N＋Fブロック ベース

BBブロック 壁体

N＋Fブロック 壁体

表－5.7 コンクリートの圧縮強度試験結果

（単位：N/mm^2）

種　類	部　位	3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
ＢＢブロック	ベース	－	２１．４	３９．２	－	－
	壁体	１１．４	２０．７	３９．４	４４．７	４７．６
Ｎ＋Ｆブロック	ベース	－	２４．２	３６．１	－	－
	壁体	１２．９	２３．６	３３．９	４０．４	４４．０

N＋Fブロック 壁体（南面：化粧型枠使用）

N＋Fブロック 壁体（北面：普通型枠使用）

BBブロック壁体（南面：化粧型枠使用）

BBブロック壁体（北面：普通型枠使用）

図－5.2 構造物の外観状況

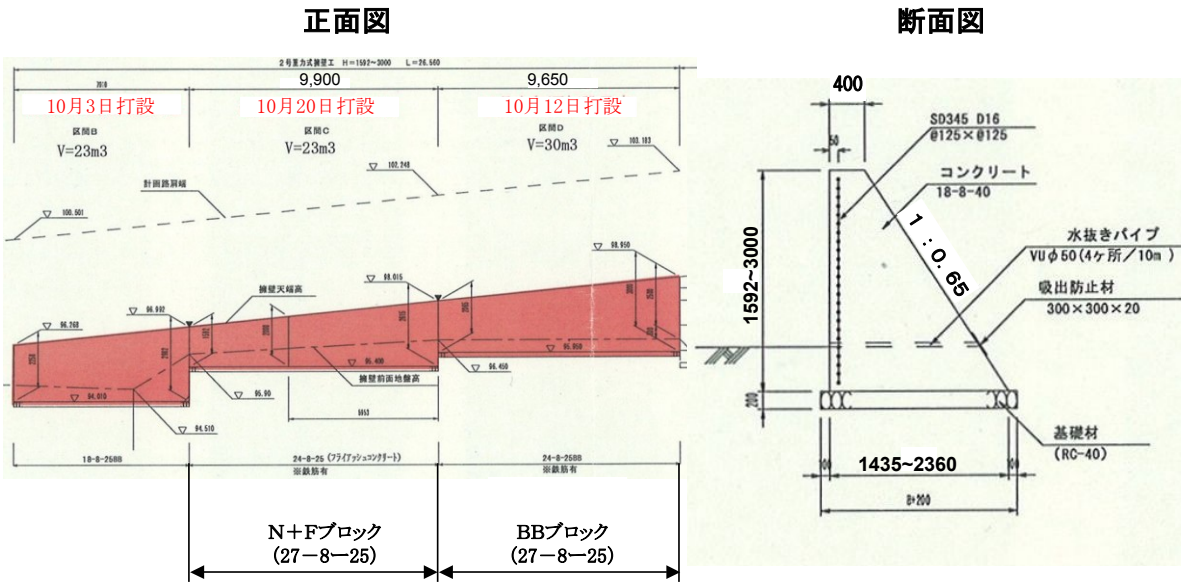
5.2.3 石川県の試験施工による比較

石川県（金沢市）で実施した試験施工の概要と結果を以下に示す。

(1) 試験施工の概要

試験施工の概要図を**図－5.3** に，配合表を**表－5.8** に示す。石川県発注の小原土清水線道路改良工事の重力式擁壁２ブロックを，各々高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）で試験施工を実施した。

BBブロック(高炉セメントB種)　　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



図－5.3 試験施工の概要図

表－5.8 配合表

種　類	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad1 (kg/m³)	混和剤 Ad2 (kg/m³)	備　考
BB	53.7	43.4	287	－	154	789	1044	2.87	－	27N/mm² 配合
N＋F	53.3	45.8	230	40	144	851	1021	3.51	7.16	27N/mm² 配合

（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）

※細骨材の混合割合　5mm 以下：0.3mm 以下＝80：20

(2)試験施工の結果

a. 施工性の比較

まず，フレッシュコンクリートの性状を**表－5.9** に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，所定のスランプ（8±2.5cm），空気量（4.5±1.5％）を確保できており，いずれも所要の施工性を満足している。

次に，ポンプ圧送性を**表－5.10** に示す。表より，ポンプ圧送性については，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，ポンプ最大圧力に対し，十分余裕をもって施工できた。

最後に，コンクリートの打設状況であるが，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，コンクリートの打設が効率的に行われ，流動性もよく，型枠の隅々や鉄筋等の周囲に密実なコンクリートをゆきわたらせることができた。ブリーディングの発生状況を**表－5.11** 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。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，施工性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

b. 強度発現性の比較

コンクリートの圧縮強度試験結果を**表－5.12** に示す。表より，実機試験結果同様，Ｎ＋Ｆブロックの初期強度発現（材齢３日、材齢７日）は，ＢＢブロックに比べて大きいことが確認できた。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，強度発現性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

c. 耐久性（初期ひび割れ）の比較

まず，構造物の外観状況を**図－5.4** に示す。図より，Ｎ＋Ｆブロックでは表面気泡が比較的多くみられたが，耐久性に影響をおよぼすと考えられる初期ひび割れはみられなかった。一方，ＢＢブロックでは砂すじやセパ近傍の短い沈降ひび割れが比較的多く見られたが，Ｎ＋Ｆブロック同様，耐久性に影響をおよぼすと考えられる初期ひび割れはみられなかった。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，耐久性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と品質的に同等と考えられる。

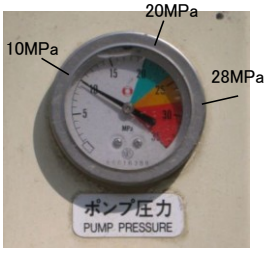
表－5.9 フレッシュコンクリートの性状

種　類	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 ・呼び強度 27 N/mm² ・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 ℃	一台目	製造時	8:50	9．5	5．5	19
					荷卸時	9:20	8．5	5．1	20
				最終車	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 ・呼び強度 27 N/mm² ・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 ℃	一台目	製造時	8:50	9．0	5．1	19
					荷卸時	9:15	8．5	4．8	21
				最終車	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

表－5.10 ポンプ圧送性

（単位：MPa）

種　類		ポンプ圧力	ポンプ能力
BBブロック	通常圧送時	7．5 ～ 10．1	最大圧力 28．0
	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	



ポンプ圧力計

表－5.11 ブリーディングの発生状況

種　類	ブリーディング水採集量（ℓ）	打設量(m³)	1m³当たりのブリーディング量（ℓ/m³）
BBブロック	21．8	32．0	0．7
N＋Fブロック	0．0	24．5	0．0

BBブロックでの採取状況

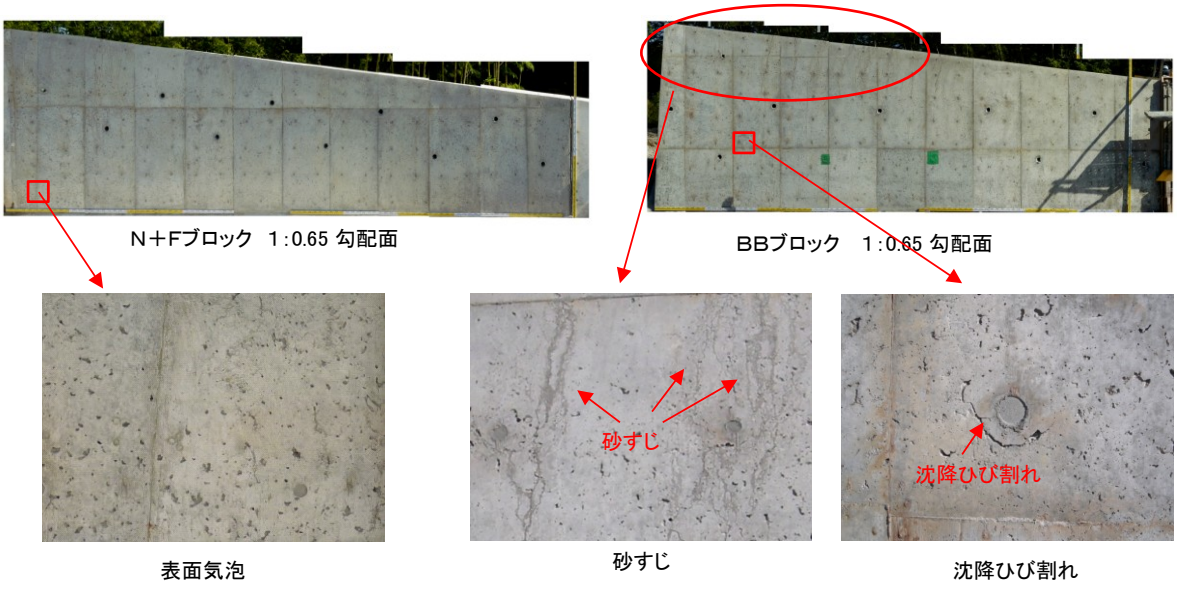
BBブロックのブリーディング水

N＋Fブロックの打設状況

表－5.12 コンクリートの圧縮強度試験結果

（単位：N/mm^2）

種　類	3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
ＢＢブロック	１１．４	１９．８	３２．８	３４．８	３９．３
Ｎ＋Ｆブロック	１５．８	２４．１	３１．７	３４．９	３８．１



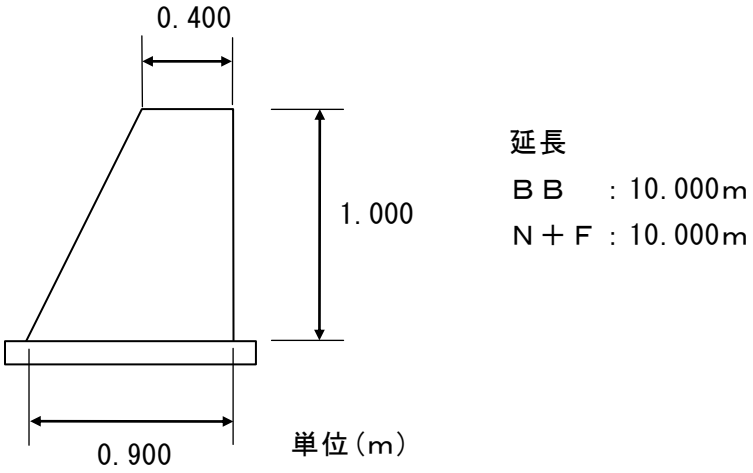
図－5.4 構造物の外観状況

5.2.4 福井県の試験施工による比較

福井県（越前市）で実施した試験施工の概要と結果を以下に示す。

(1) 試験施工の概要

試験施工の概要図を**図－5.5** に，配合表を**表－5.13** に示す。福井県発注の武生美山線交通安全施設整備工事の重力式擁壁２ブロックを，各々高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）で試験施工を実施した。



断面図

図－5.5 試験施工の概要図

表－5.13 配合表

種　類	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備　考
BB	59.0	40.9	265	－	156	766	1137	2.65	18N/mm² 配合
N＋F	58.0	40.6	229	40	156	758	1137	2.69	18N/mm² 配合

（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）

※細骨材の混合割合　5mm 以下：2.5mm 以下＝60：40

(2)試験施工の結果

a. 施工性の比較

まず，フレッシュコンクリートの性状を**表－5.14**に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，所定のスランプ（8±2.5cm），空気量（4.5±1.5％）を確保できており，いずれも所要の施工性を満足している。

次に，コンクリートの打設状況であるが，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，コンクリートの打設が効率的に行われ，流動性もよく，型枠の隅々や鉄筋等の周囲に密実なコンクリートをゆきわたらせることができた。ブリーディングの発生状況を**表－5.15**に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともにブリーディングはほとんどみられなかった。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，施工性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と品質的に同等と考えられる。

b. 強度発現性の比較

コンクリートの圧縮強度試験結果を**表－5.16**に示す。表より，実機試験結果同様，Ｎ＋Ｆブロックの初期強度発現（材齢3日、材齢7日）は，ＢＢブロックに比べて大きいことが確認できた。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，強度発現性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

c. 耐久性(初期ひび割れ)の比較

まず，構造物の外観状況を**図－5.6**に示す。図より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，収縮等によるひび割れはみられなかった。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，耐久性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と品質的に同等と考えられる。

表－5.14 フレッシュコンクリートの性状

種　類	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 ・呼び強度 18 N/mm² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	11月19日 13:05～14:05	曇り	13～14 ℃	一台目	製造時	12:50	９．５	５．２	１５．０
					荷卸時	13:05	８．５	４．０	１４．０
				最終車	製造時	13:50	９．０	４．９	１５．０
					荷卸時	14:05	８．０	３．９	１５．０
N＋Fブロック ・呼び強度 18 N/mm² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	11月16日 8:30～9:50	曇り	9～10 ℃	一台目	製造時	8:12	１０．５	５．１	１２．０
					荷卸時	8:30	８．５	３．４	１３．０
				最終車	製造時	9:38	１０．５	６．０	１４．０
					荷卸時	9:50	８．０	４．５	１４．０

表－5.15 ブリーディングの発生状況

種　類		ブリーディング水採集量(ℓ)	打設量(m³)	1m³当たりのブリーディング量(ℓ/m³)
BBブロック	擁壁	0.0	8.0	0.0
N＋Fブロック	擁壁	0.0	9.0	0.0

N＋Fブロック

BBブロック

表－5.16 コンクリートの圧縮強度試験結果

（単位：N/mm^2）

種　類	部　位	3 日	7 日	28 日	56 日	91 日
ＢＢブロック	擁　壁	７．７	１２．０	２５．０	３１．１	３６．１
Ｎ＋Ｆブロック	ベース	１１．０	１６．７	２５．１	３１．２	３４．４

N＋Fブロック 擁壁脱枠時（勾配面）

BBブロック 擁壁脱枠時（勾配面）

図－5.6 構造物の外観状況

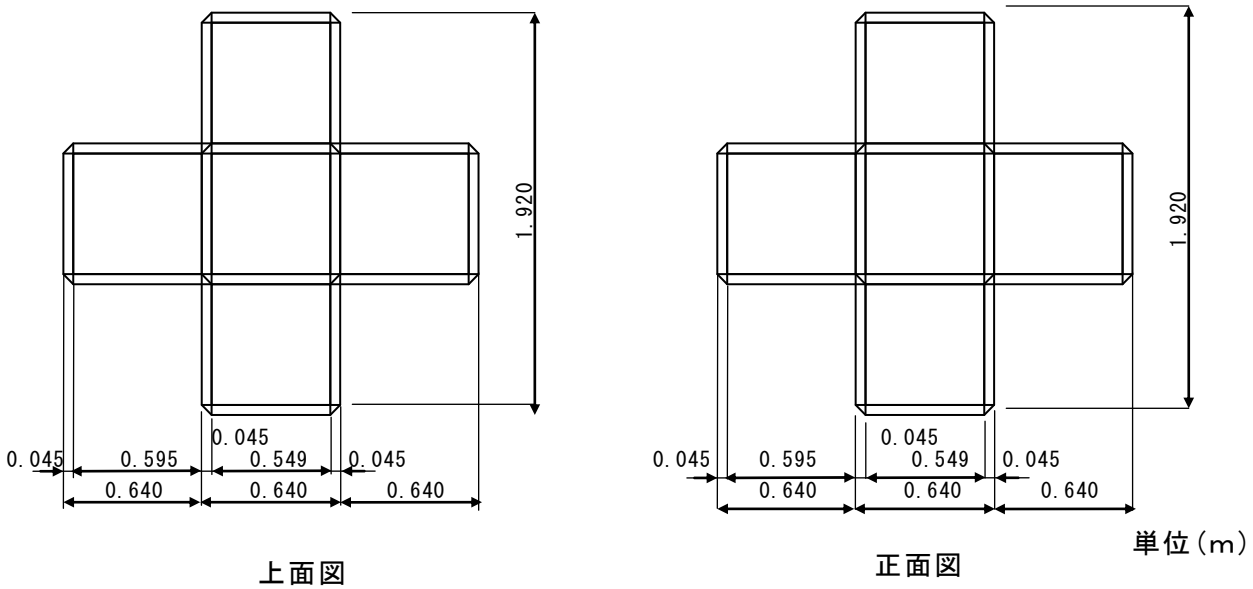
5.2.5 国交省の試験施工による比較

富山市で実施した試験施工の概要と結果を以下に示す。

(1) 六脚ブロック

a. 試験施工の概要

試験施工の概要図を**図－5.7** に，配合表を**表－5.17** に示す。国土交通省発注の常願寺川水橋護岸その６工事の六脚ブロック２ブロックを，各々高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）で試験施工を実施した。なお，両ブロックは同日に施工した。



図－5.7 試験施工の概要

表－5.17 配合表

種類	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備　考
BB	57.5	40.0	260	－	149	755	1145	2.60	21N/mm² 配合
N＋F	57.0	41.2	219	39	147	781	1129	2.06	21N/mm² 配合

（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）

b. 試験施工の結果

(a) 施工性の比較

まず，フレッシュコンクリートの性状を**表－5.18** に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，所定のスランプ（8±2.5cm），空気量（4.5±1.5％）を確保できており，いずれも所要の施工性を満足している。

次に，コンクリートの打設状況であるが，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，コンクリートの打設が効率的に行われ，流動性もよく，型枠の隅々や鉄筋等の周囲に密実なコンクリートをゆきわたらせることができた。ブリーディングの発生状況を**表－5.19** に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともにブリーディングの発生はほとんどなかった。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，施工性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と品質的に同等と考えられる。

(b) 強度発現性の比較

コンクリートの圧縮強度試験結果を**表－5.20** に示す。表より，実機試験結果同様，Ｎ＋Ｆブロックの初期強度発現（材齢３日、材齢７日）は，ＢＢブロックに比べて大きいことが確認できた。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，強度発現性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

(c) 耐久性（初期ひび割れ）の比較

構造物の外観状況を**図－5.8** に示す。図より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，収縮等によるひび割れはみられなかった。表面の状況も両ブロックともに良好であるが，Ｎ＋Ｆブロックでは表面気泡が比較的多くみられた。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，耐久性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と品質的に同等と考えられる。

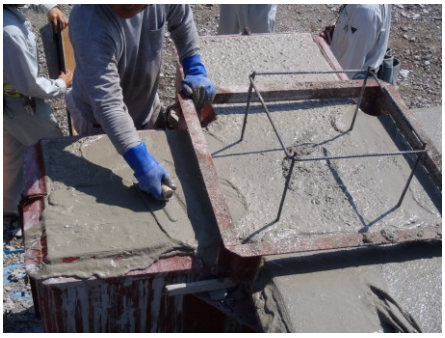
表－5.18 フレッシュコンクリートの性状

種　類	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 ・呼び強度 21N/mm² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	9月14日 10:10～11:38	晴れ	28～30 ℃	一台目	製造時	9:50	10.0	4.9	30.0
					荷卸時	10:08	9.5	4.4	30.0
				最終車	製造時	10:55	10.0	4.7	30.0
					荷卸時	11:27	9.5	4.5	31.0
					終了時	11:40	8.5	4.3	31.0
N＋Fブロック ・呼び強度 21N/mm² ・スランプ 8±2.5cm ・空気量 4.5±1.5%	9月7日 9:15～11:18	晴れ	28～33 ℃	一台目	製造時	8:45	10.5	5.4	28.0
					荷卸時	9:11	8.0	4.7	28.0
				最終車	製造時	10:30	9.0	5.7	29.0
					荷卸時	11:00	7.0	4.8	30.0
					終了時	11:24	7.0	5.2	30.0

表－5.19 ブリーディングの発生状況

種　類	ブリーディング水採集量（ℓ）	打設量(m^3)	1m^3当たりのブリーディング量（ℓ/m^3）
BBブロック	0.0	1.8	0.0
N＋Fブロック	0.0	1.8	0.0

N＋Fの状況写真



BBの状況写真

表－5.20 コンクリートの圧縮強度試験結果

（単位：N/mm^2）

種　類	3日	7日	28日	56日	91日
ＢＢブロック	９．５	１５．７	２６．７	３１．４	３３．５
Ｎ＋Ｆブロック	１４．９	２０．９	３１．９	３６．１	３８．７

六脚ブロック（左 N＋F、右 BB）

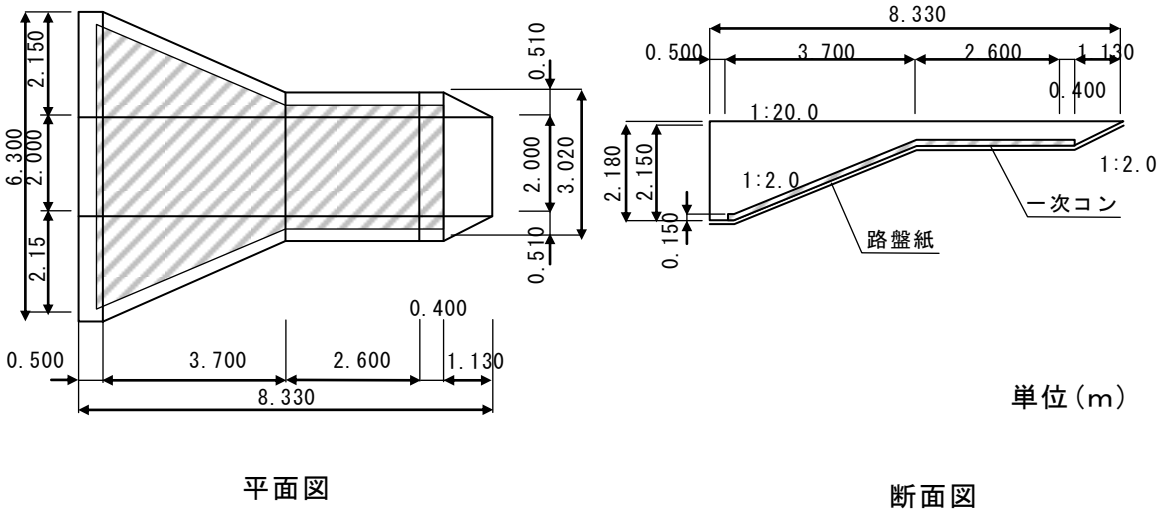
無筋ブロック（左 N＋F、右 BB）

図－5.8 構造物の外観状況

(1) 元付け工

a. 試験施工の概要

試験施工の概要図を**図－5.9** に，配合表を**表－5.21** に示す。国土交通省発注の常願寺川水橋護岸その６工事の元付け工２ブロックを，各々高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）と北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）で試験施工を実施した。なお，両ブロックは同日に並行して施工した。



図－5.9 試験施工の概要図

表－5.21 配合表

種類	水結合材比 W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備　考
BB	57.5	40.4	254	－	146	768	1145	2.54	21N/mm² 配合
N＋F	57.0	41.2	219	39	147	781	1129	2.06	21N/mm² 配合

（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）

b. 試験施工の結果

(a) 施工性の比較

まず，フレッシュコンクリートの性状を**表－5.22**に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，所定のスランプ（8±2.5cm），空気量（4.5±1.5%）を確保できており，いずれも所要の施工性を満足している。

次に，コンクリートの打設状況であるが，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，コンクリートの打設が効率的に行われ，流動性もよく、型枠の隅々や鉄筋等の周囲に密実なコンクリートをゆきわたらせることができた。ブリーディングの発生状況を**表－5.23**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。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，施工性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

(b) 強度発現性の比較

コンクリートの圧縮強度試験結果を**表－5.24**に示す。表より，Ｎ＋Ｆブロックの初期強度発現（材齢3日，材齢7日）は，ＢＢブロックに比べて大きいことが確認できた。また，標準養生と現場養生の強度発現状況を**図－5.10**に示す。図より，Ｎ＋Ｆブロックの初期の強度発現は，ＢＢブロックに比べ，標準養生（材齢3日）と現場養生（材齢3日から材齢7日）で約2倍であった。現場養生の温度が0℃から7℃であることを考慮すると，特に，冬期の施工において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは有利であると考えられる。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，強度発現性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）に比べ，品質的に同等以上と考えられる。

(c) 耐久性（初期ひび割れ）の比較

構造物の外観状況を**図－5.11**に示す。図より，Ｎ＋Ｆブロック，ＢＢブロックともに，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に良好であるが，Ｎ＋Ｆブロックでは表面気泡が比較的多くみられた。

従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，耐久性の観点から，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と品質的に同等と考えられる。

表－5.22 フレッシュコンクリートの性状

種　類	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	1月9日 9:05～12:34	曇り	3～ 4 ℃	一台目	製造時	8:15	8.0	4.9	8.0
					荷卸時	9:05	7.0	4.1	7.0
				最終車	製造時	11:45	7.5	4.8	8.0
					荷卸時	12:34	7.5	4.1	8.0
					終了時	13:00	6.5	3.6	8.0
N＋Fブロック	1月9日 8:55～12:42	曇り	3～ 4 ℃	一台目	製造時	8:10	7.5	5.5	8.0
					荷卸時	8:55	6.5	5.0	8.0
				最終車	製造時	11:30	9.0	5.9	8.0
					荷卸時	12:15	8.5	4.9	8.0
					終了時	12:42	7.0	4.0	8.0

表－5.23 ブリーディングの発生状況

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

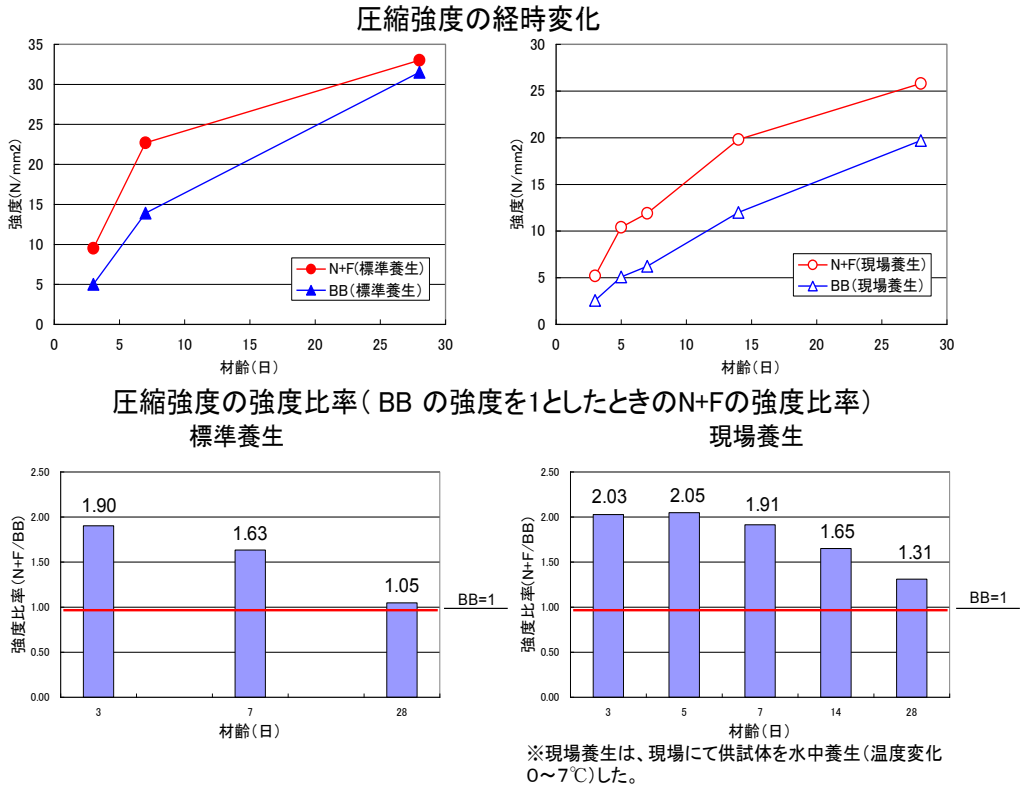
N＋Fの状況写真

BBの状況写真

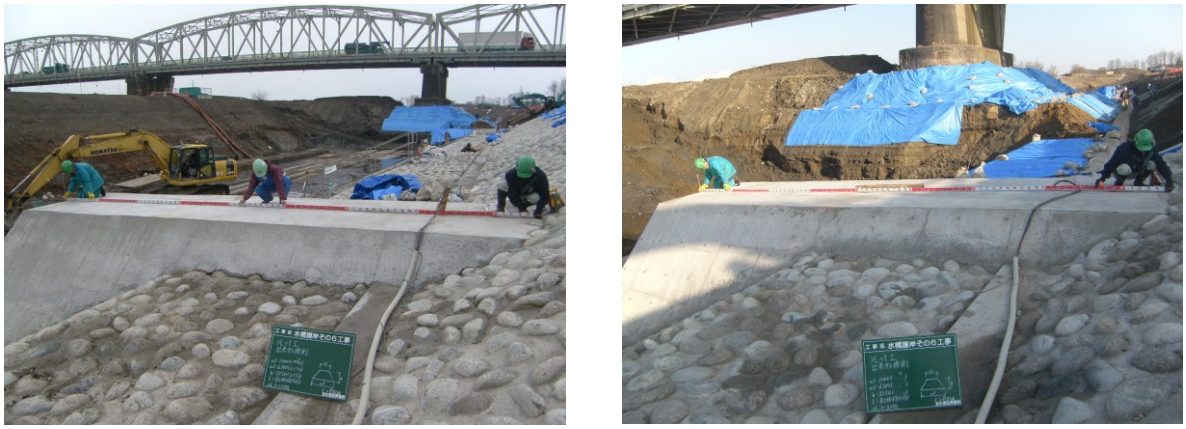
表－5.24 コンクリートの圧縮強度試験結果

（単位：N/mm^2）

種　類	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	９．３	２３．６	３５．１	４１．１	４５．５



図－5.10 標準養生と現場養生での強度発現性の比較



N＋Fブロック　　BBブロック

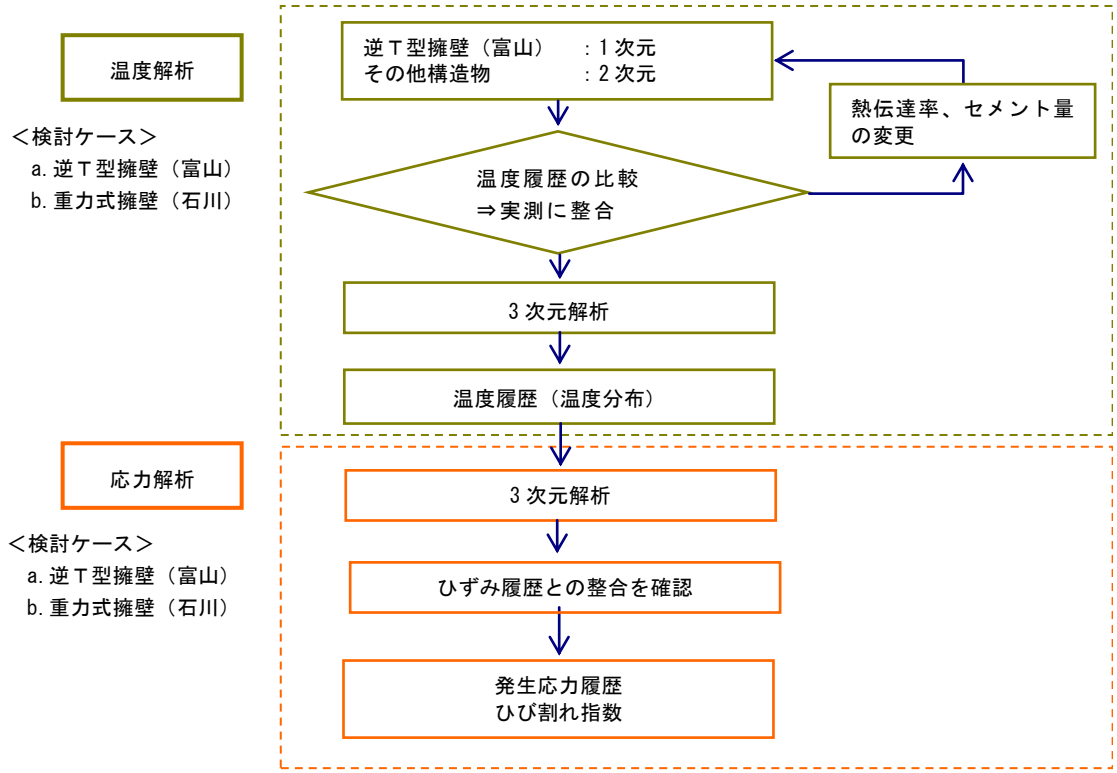
図－5.11 構造物の外観状況

5.2.6 試験施工の温度応力解析 [6)]

富山県の逆Ｔ型擁壁，石川県の重力式擁壁について，試験施工時に得られた計測結果をもとに，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリート（Ｎ＋Ｆ）と高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（ＢＢ）それぞれの実施工の条件（躯体寸法，使用コンクリート，外気温等の環境）での温度応力解析を行い，その整合性を確認するとともに，解析において施工条件を同じにした比較検討を行った。

(1) 解析方法

温度解析では，土木学会標準示方書〔施工編〕の算定方法 [7)]に準拠したパラメータ解析を行い，熱伝導率，セメント量を見直すことで計測値との整合をとった。応力解析では，温度解析の温度履歴から換算したひずみ履歴と計測値との整合を確認し，発生応力履歴，ひび割れ指数を算出した。解析のフローを**図－5.12** に示す。



図－5.12 温度応力解析のフロー図

(2) 逆Ｔ型擁壁（富山県試験施工）

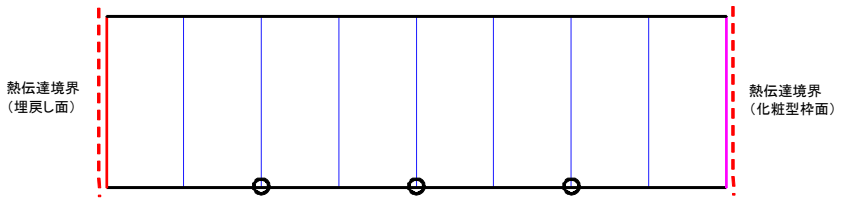
a. 温度解析

温度解析の条件を**表－5.25** に，計測値と解析値の比較結果を**図－5.13** および**図－5.14** に，3 次元解析による温度履歴の 1 例として材齢 2 日の温度分布を**図－5.15** に示す。土木学会標準示方書〔設計編〕の算定手法[8]に準拠して，熱伝達境界として化粧型枠面と埋戻し面の熱伝達率を変更したこと，および，給熱 2 日間，15℃一定と仮定したことにより，計測値と解析値の整合をとることができた。

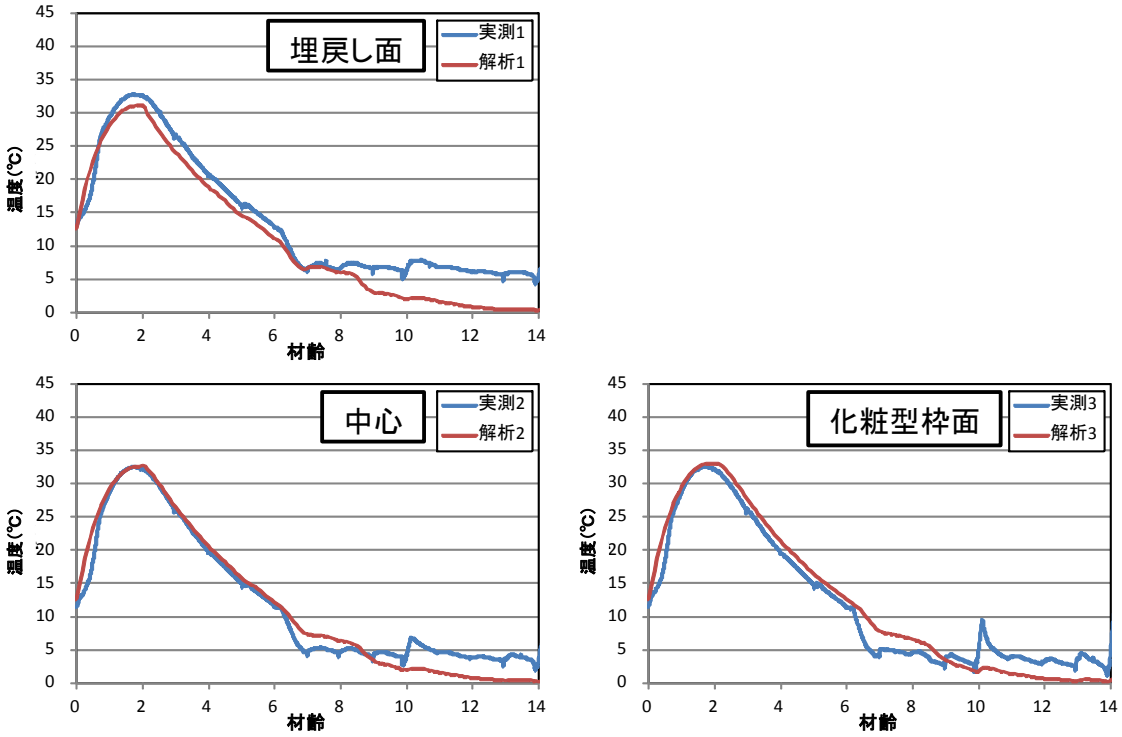
表－5.25 温度解析の条件

項　　目					N+F	BB
熱物性	設定条件		―	―	土木学会の標準値	
	熱伝導率		kx	W/m℃	2.7	
	比熱		c	kJ/kg℃	1.15	
	単位体積重量		ρ	kg/m³	2300	
温度上昇特性	設定条件		―	―	土木学会の算定式を用い、単位セメント量と打込み温度で補正	
					フライアッシュセメントB種	高炉セメントB種
	打込み温度		TO	℃	12.6	17.5
	単位セメント量		C	kg/m³	302	293
	終局断熱温度上昇量		K	℃	48.42	50.32
	温度上昇速度		α	―	0.530	0.610
熱伝達境界	化粧型枠面側	熱伝達率	η	W/m²℃	0日～8日：1.0 8日～：6.0	0日～10日：1.0 10日～：6.0
		外気温	Tair	℃	実測した履歴	
	埋戻し面側	熱伝達率	η	W/m²℃	0日～6日：6.0 6日～9日：14.0 9日～：2.0	6.0
		外気温	Tair	℃	0日～2日：15℃ 2日以降：実測	実測した履歴
	地盤側	熱伝達率	η	W/m²℃	2	
		外気温	Tair	℃	13.7	

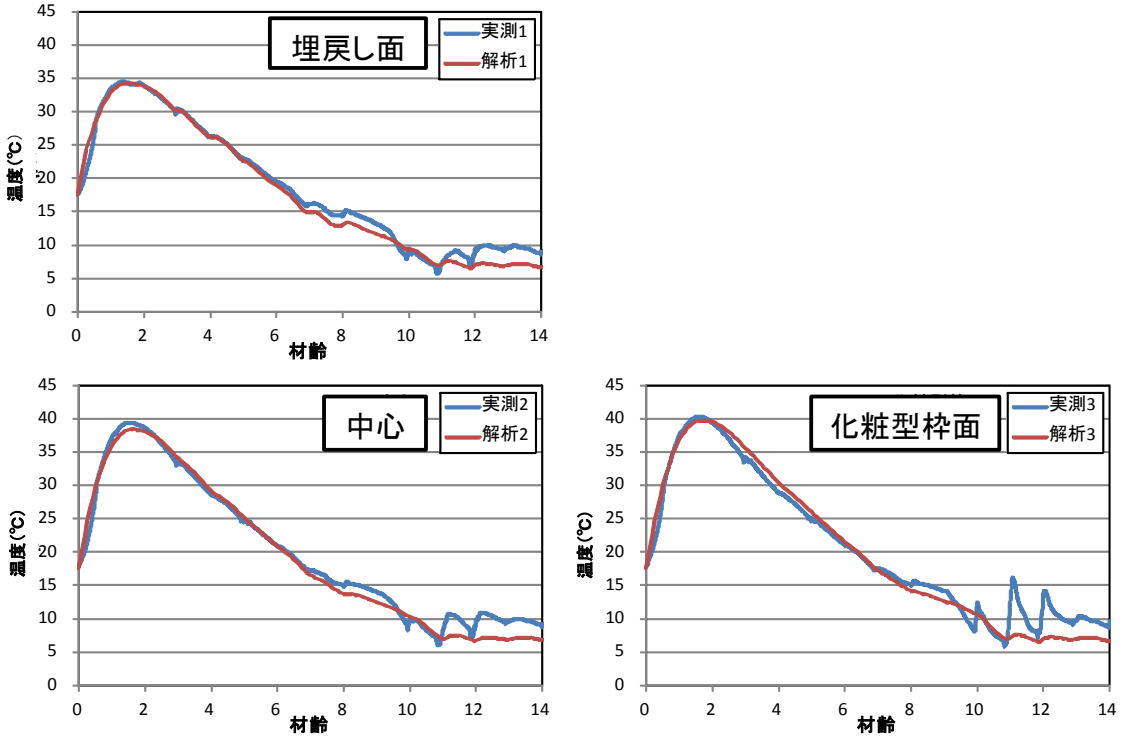
※着色部は適当な温度履歴が得られるように境界条件を仮定した。　熱伝達境界・地盤側の値は応力解析



（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）

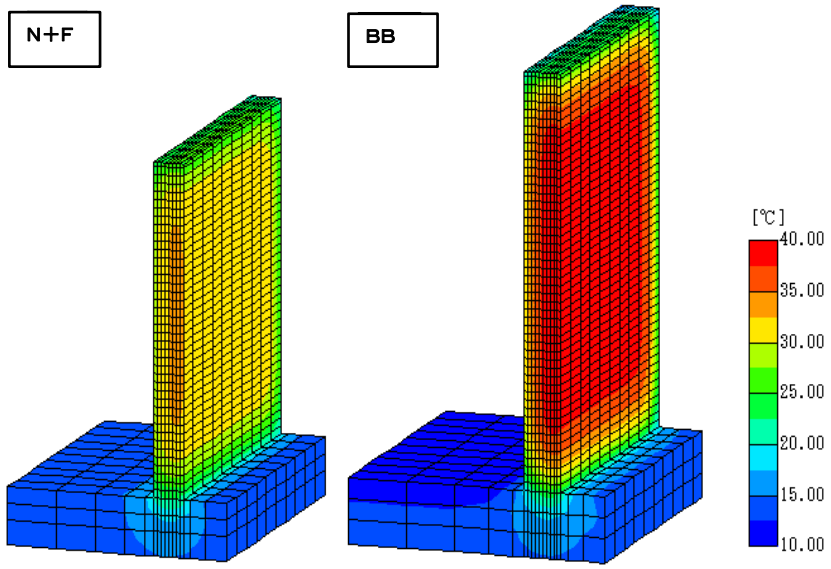


図－5.13 計測値と解析値の比較結果（N+F）



図－5.14 計測値と解析値の比較結果（BB）

（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）



図－5.15 3 次元解析による温度分布（材齢 2 日）

（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）

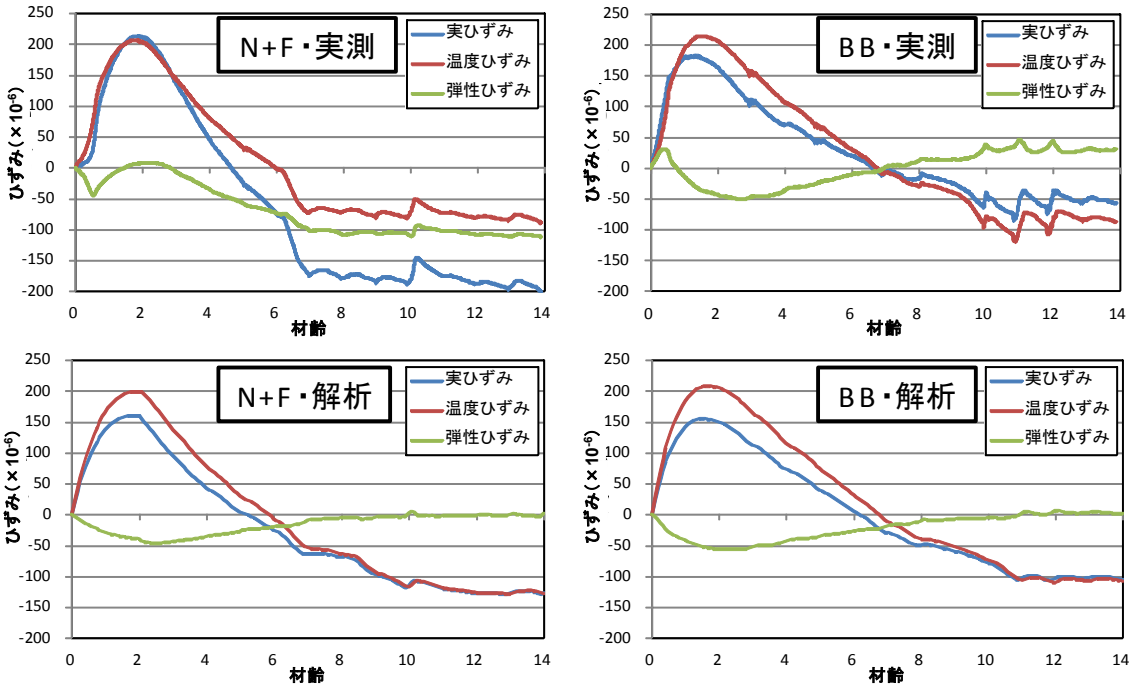
b. 応力解析

応力解析の条件を**表－5.26** に，ひずみ履歴の解析結果を**図－5.16** に示す。図より，ＢＢについては，実ひずみ，温度ひずみ，弾性ひずみの実測値と解析値がほぼ整合しているが，Ｎ＋Ｆについては，弾性ひずみが初期に膨張側に反転しており，通常の傾向とは異なっている。これは，材齢初期に給熱養生したため，コンクリート外部と内部の温度差が少なくなり，弾性ひずみが膨張側に反転したものと考えられる。また，その後はコンクリート表面の乾燥収縮により，弾性ひずみは収縮傾向になったと考えられる。発生応力とひび割れ指数の分布を**図－5.17** に示す。図より，逆Ｔ型擁壁上部の表面は内部拘束型，下部は外部拘束型の応力が発生している。なお，実際の施工においては，Ｎ＋Ｆ，ＢＢとも発熱によるひび割れはみられなかった。

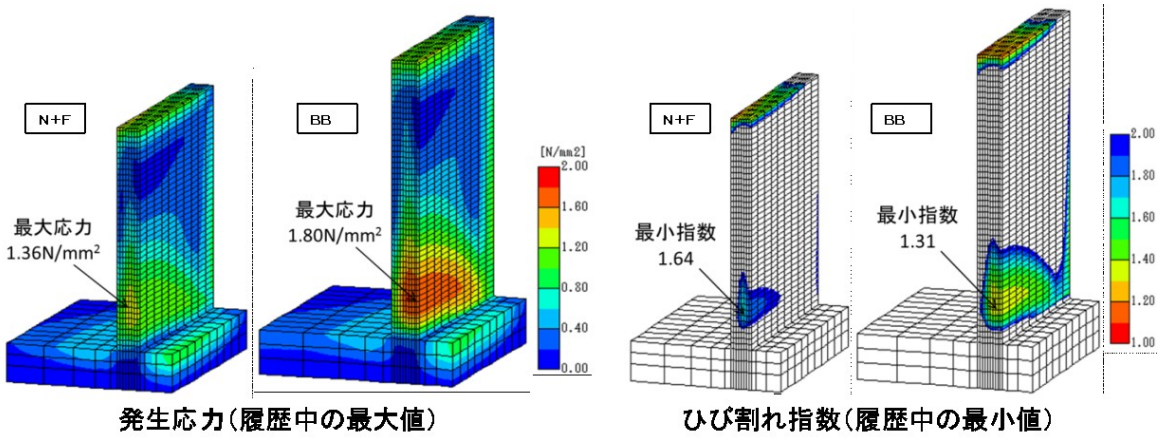
表－5.26 応力解析の条件

項　　目				逆Ｔ型擁壁（富山）		備考
				Ｎ＋Ｆ	ＢＢ	
力学特性	ヤング係数	Ec	N/mm²	圧縮強度より算定		土木学会・示方書に準拠
	引張強度	ft	N/mm²	圧縮強度より算定		
	ポアソン比	ν	－	0.2		
	線膨張係数	α	1/℃	10×10^{-6}		
	初期クリープ	Φ	－	有効弾性係数法		
圧縮強度の発現	設定条件	－	－	現場採取時の圧縮強度データ		
	圧縮強度 3 日	fc	N/mm²	12.9	11.4	
	圧縮強度 7 日			23.6	20.7	
	圧縮強度 28 日			33.9	39.4	

（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）



図－5.16 ひずみ履歴の解析結果（逆Ｔ型擁壁）



図－5.17 発生応力とひび割れ指数の分布（逆Ｔ型擁壁）

（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）

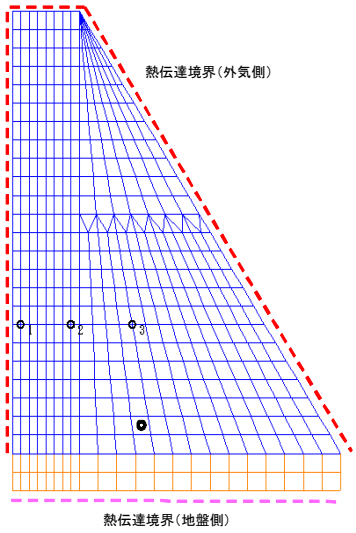
(3) 重力式擁壁（石川県試験施工）

a. 温度解析

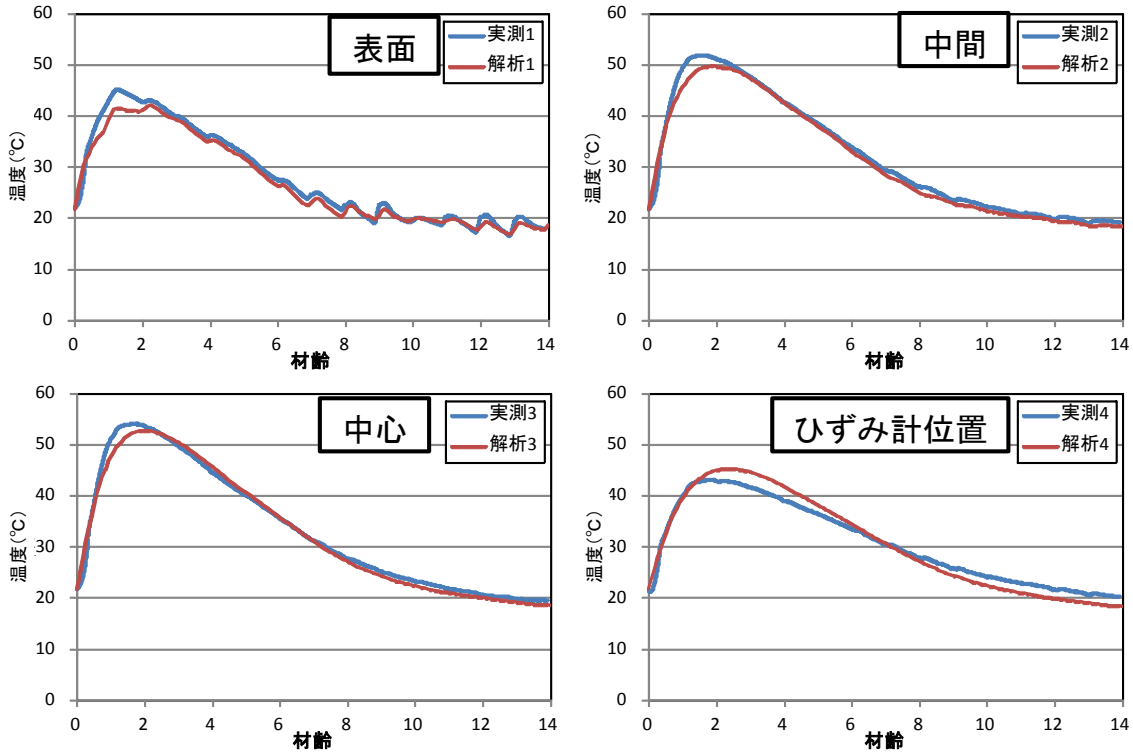
温度解析の条件を**表－5.27** に，計測値と解析値の比較結果を**図－5.18** および**図－5.19** に，3 次元解析による温度履歴の 1 例として材齢 2 日の温度分布を**図－5.20** に示す。図より，土木学会標準示方書〔設計編〕の算定方法に対して温度上昇特性としてセメント量を 1.1 倍としたこと，および，熱伝達境界として外気側の熱伝達率を 8.0（合板型枠相当）から 6.0（シート養生相当）としたことにより，計測値と解析値の整合をとることができた。

表－5.27 温度解析の条件

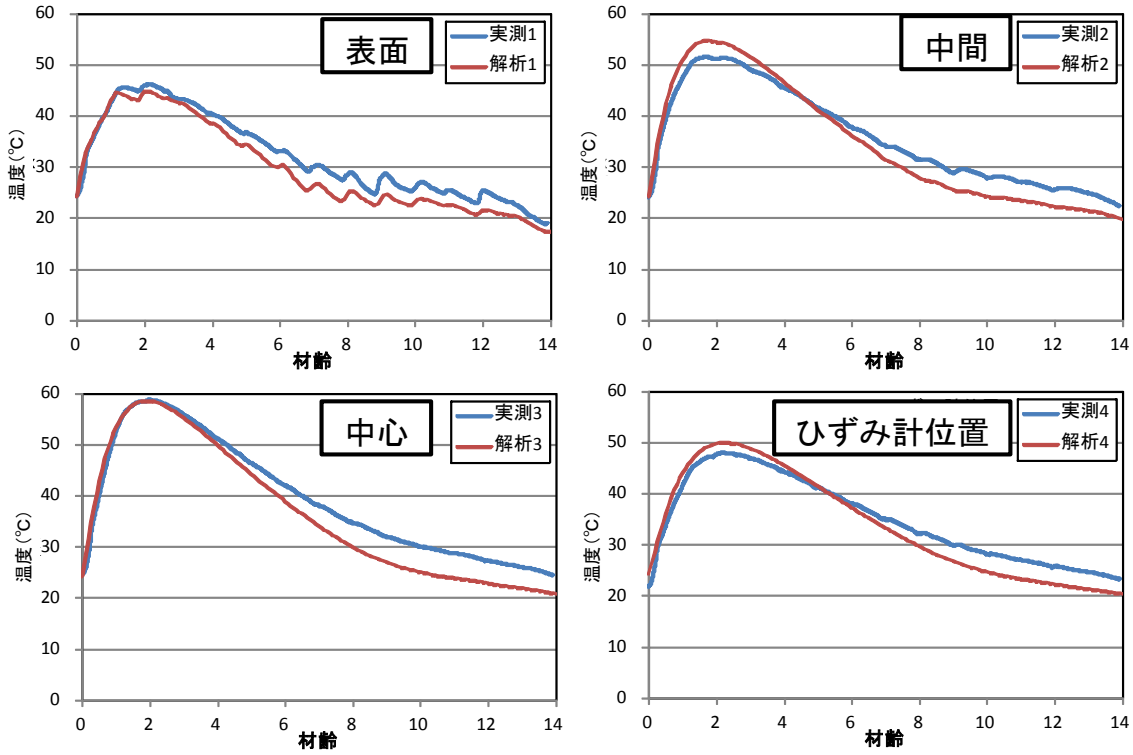
項目					N＋F	BB
熱物性	設定条件		—	—	土木学会の標準値	
	熱伝導率		kx	W/m℃	2.7	
	比熱		c	kJ/kg℃	1.15	
	単位体積重量		ρ	kg/m³	2300	
温度上昇特性	設定条件		—	—	土木学会の算定式を用い、単位セメント量と打込み温度で補正	
					フライアッシュセメントB種	高炉セメントB種
	打込み温度		TO	℃	21.8	24.2
	C×1.0	単位セメント量	C	kg/m³	270	287
		終局断熱温度上昇量	K	℃	42.30	48.79
		温度上昇速度	α	—	0.829	0.829
セメント量10%増加 ⇨	C×1.1	単位セメント量	C	kg/m³	297	316
		終局断熱温度上昇量	K	℃	46.08	52.56
		温度上昇速度	α	—	0.885	0.887
熱伝達境界	外気側	熱伝達率	η	W/m²℃	6	
		外気温	Tair	℃	実測した履歴	
	地盤側	熱伝達率	η	W/m²℃	2	
		外気温	Tair	℃	14.3	



(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)

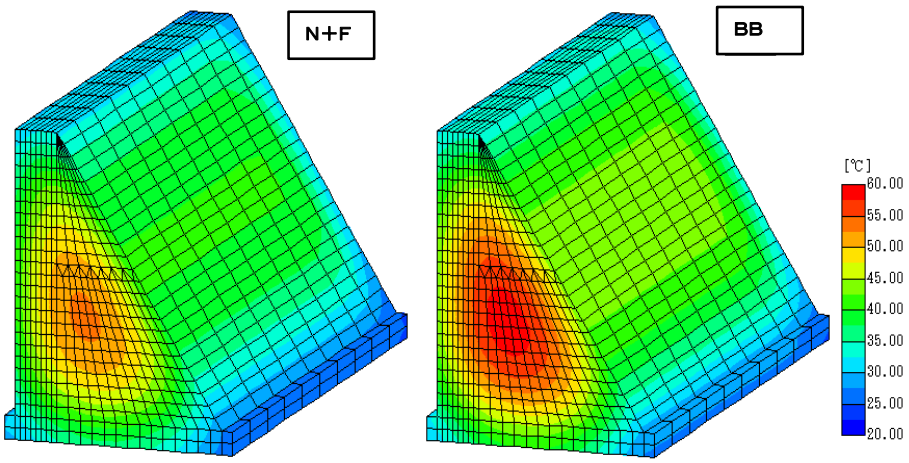


図－5.18 計測値と解析値の比較結果（N+F）



図－5.19 計測値と解析値の比較結果（BB）

（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）



図－5.20 3 次元解析による温度分布（材齢 2 日）

（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）

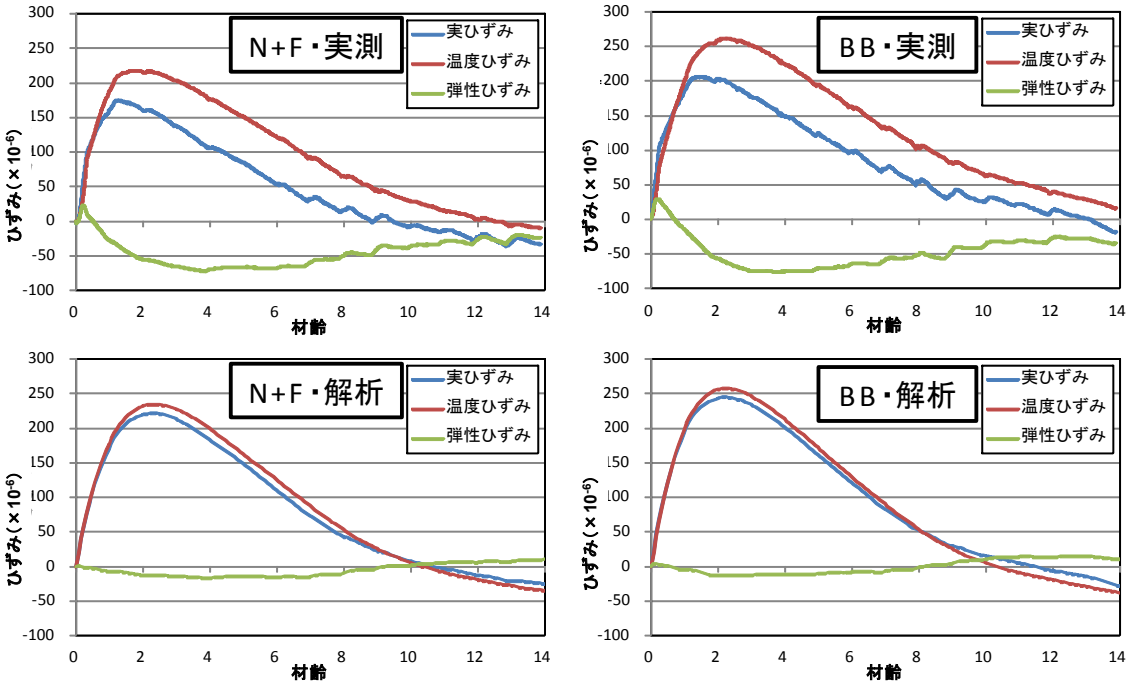
b. 応力解析

応力解析の条件を**表－5.28** に，ひずみ履歴の解析結果を**図－5.21** に示す。図より，地盤の境界条件の違いにより，解析値より実測値の方が大きくなっているが，ＢＢ，Ｎ＋Ｆそれぞれ実ひずみ，温度ひずみ，弾性ひずみの傾向は同様でほぼ整合している。発生応力とひび割れ指数の分布を**図－5.22** に示す。図より，重力式擁壁の表面は内部拘束型，内部は外部拘束型の応力が発生している。なお，実際の施工においては，Ｎ＋Ｆ，ＢＢとも発熱によるひび割れは見られなかった。

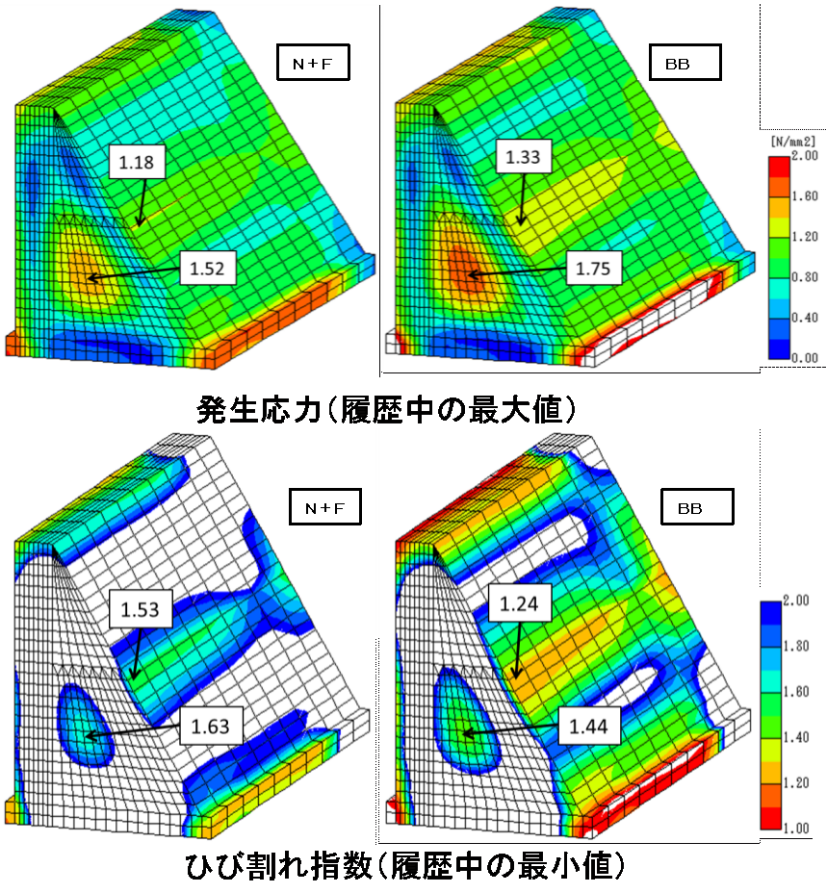
表－5.28 応力解析の条件

項目					重力式擁壁（石川）		備考
					Ｎ＋Ｆ	ＢＢ	
力学特性	ヤング係数		Ec	N/mm^2	圧縮強度より算定		土木学会・示方書に準拠
	引張強度		ft	N/mm^2	圧縮強度より算定		
	ポアソン比		ν	－	0.2		
	線膨張係数		α	1/℃	10×10^{-6}		
	初期クリープ		Φ	－	有効弾性係数法		
圧縮強度の発現	設定条件		－	－	現場採取時の圧縮強度データ		
	圧縮強度	3 日	fc	N/mm^2	15.8	11.4	
		7 日			24.1	19.8	
		28 日			31.7	32.8	

（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）



図－5.21 ひずみ履歴の解析結果（重力式擁壁）



図－5.22 発生応力とひび割れ指数の分布（重力式擁壁）

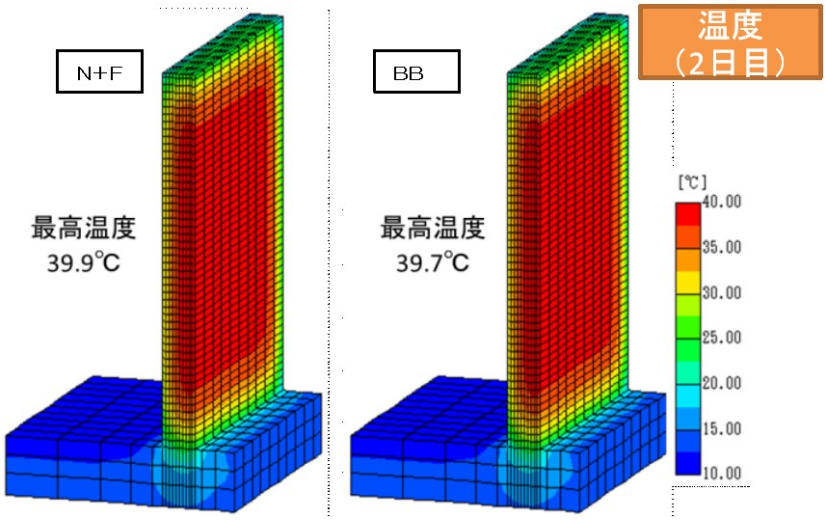
（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｆ:フライアッシュ 15%置換）

(4) 試験条件を合わせた温度応力解析による比較

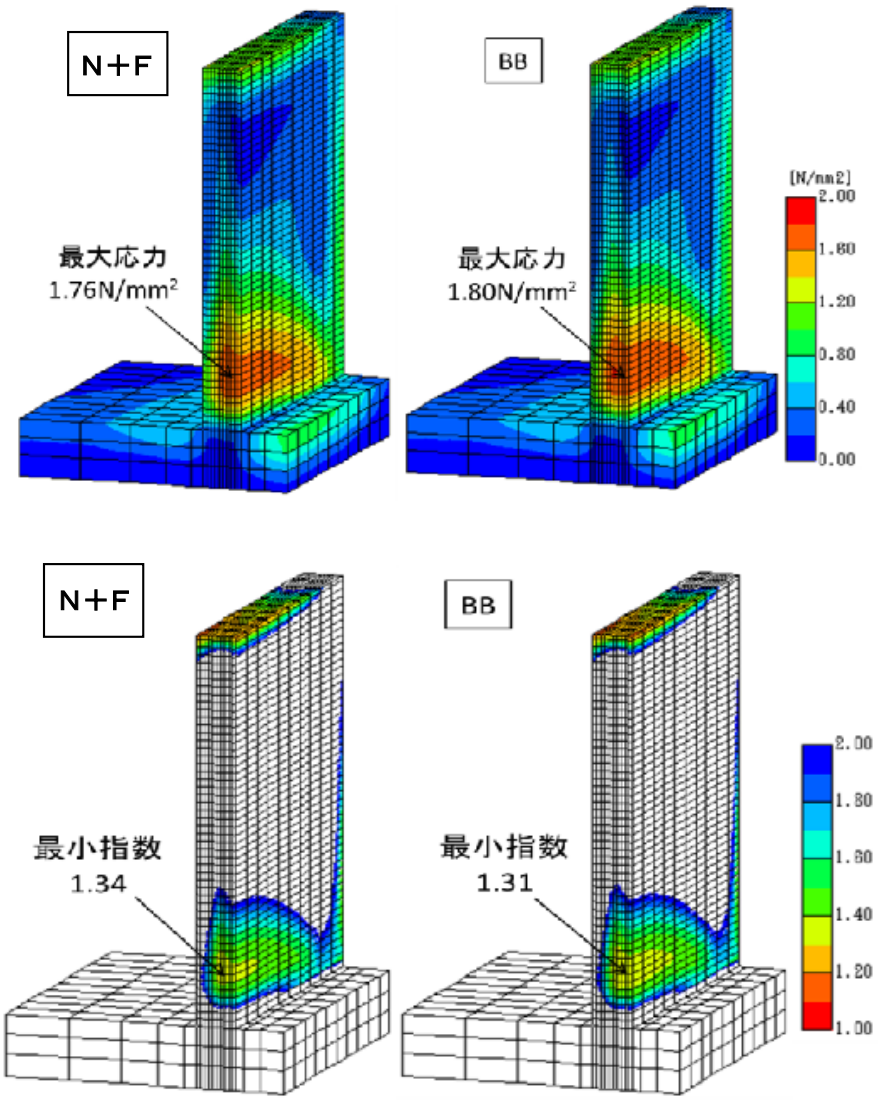
試験施工においては，Ｎ＋ＦとＢＢの躯体の寸法や打設条件などが異なっていたため，それらの条件を合わせた比較検討を行った。その結果，重力式擁壁などのマスコンクリートでは，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートが温度ひび割れに対し極めて有利であることが確認できた。

a. 逆Ｔ型擁壁

ＢＢブロックとＮ＋Ｆブロックでは，躯体寸法，打設日，外気温等の環境条件が異なることから，ＢＢブロックの躯体寸法，環境条件にあわせたＮ＋Ｆの３次元解析を行い，コンクリート材料による影響を比較した。逆Ｔ型擁壁の 3 次元解析による温度分布（材齢 2 日）を**図－5.23** に，発生応力とひび割れ指数の分布を**図－5.24** に示す。図より，Ｎ＋ＦブロックとＢＢブロックでは，すべての項目で，ほぼ同じ値になった。これは，部材厚さが小さく，断熱温度特性の影響が小さいため，フライアッシュを用いたコンクリートの温度ひび割れに対する有意性がみられなかったと考えられる。



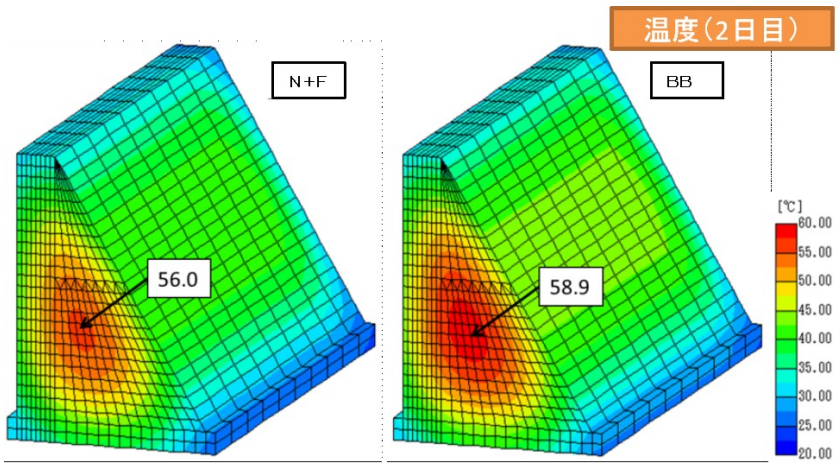
図－5.23 3 次元解析による温度分布（重力式擁壁）



図－5.24 発生応力とひび割れ指数の分布

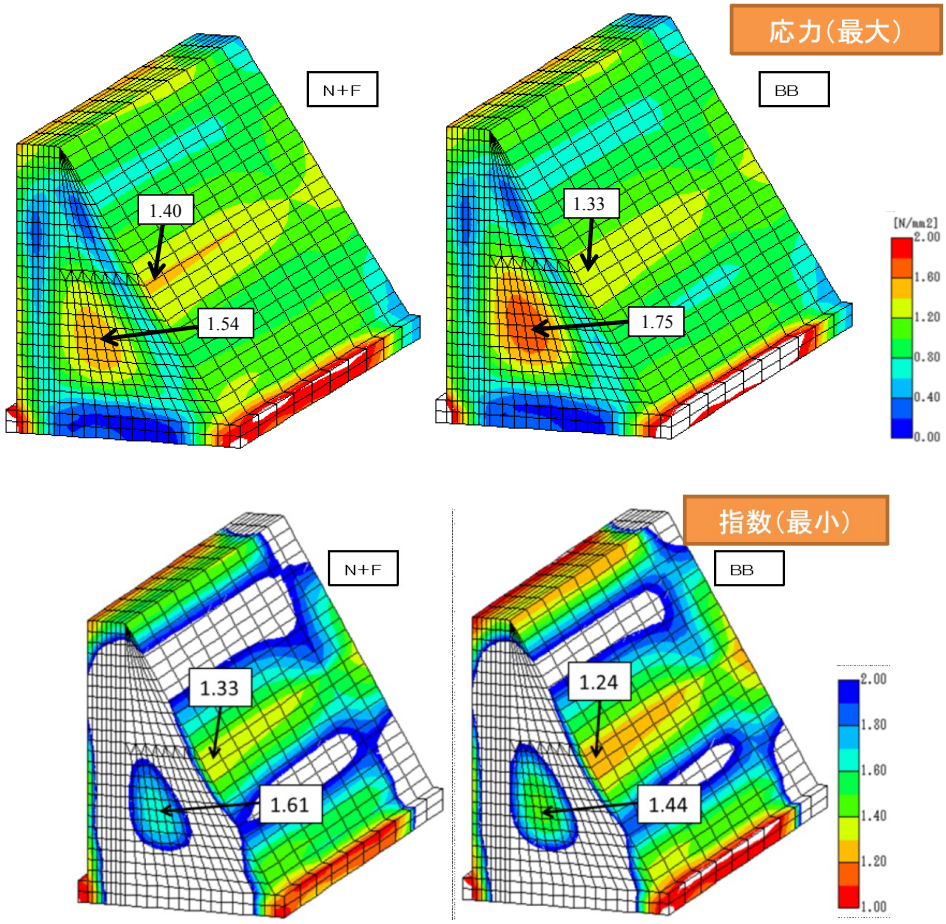
b．重力式擁壁

ＢＢブロックとＮ＋Ｆブロックでは，躯体寸法，打設日，外気温等の環境条件が異なることから，ＢＢブロックの躯体寸法，環境条件にあわせたＮ＋Ｆの３次元解析を行い，コンクリート材料による影響を比較した。重力式擁壁の３次元解析による温度分布（材齢２日）を**図－5.25** に，発生応力とひび割れ指数の分布を**図－5.26** に示す。図より，材齢２日での温度分布は，Ｎ＋Ｆブロックの方が小さく，また，フライアッシュを用いたコンクリートの初期強度が大きいことや発生応力が小さいことで，ひび割れ指数が大きくなっている。これらのことから，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，温度ひび割れに対し極めて有利であるといえる。



（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）

図－5.25 3 次元解析による温度分布（材齢 2 日）



図－5.26 発生応力とひび割れ指数の分布

5.3 モデル工事による各種構造物への適用検討

5.3.1 富山県のモデル工事への適用

平成24年度において，富山県によるモデル工事を実施した。富山県によるモデル工事の概要を**表－5.29**に，モデル工事の実施状況を**表－5.30**から**表－5.39**に示す。その結果，いずれのモデル工事においても，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの施工面，品質面での問題はなかった。

表－5.29 富山県のモデル工事の概要

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設時期	調査内容
1	小川水系南尻無谷砂防護岸工工事	朝日町 山崎	砂防堰堤流路工 垂直壁等	112	9～10月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・仕上り状況
2	(一)三箇吉島線道路改良工事	魚津市 吉島	道路側溝工	7	12月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・仕上り状況
3	(一)上滝山室線(太田本郷橋)上部工工事	富山市 太田	橋梁上部工 地覆等	3	8月	・施工者聞き取り
4	(一)湯八尾線道路改良工事	富山市 八尾町竹ノ内	ブロック積擁壁工 胴込等	2	12月	・打設状況 ・仕上り状況
5	神通川水系合場川護岸工工事	富山市 八尾町深谷	環境ブロック護岸工 天端ｺﾝｸﾘｰﾄ等	16	10～11月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・仕上り状況
6	神通川水系黒川護岸工工事	富山市牧野	石積護岸工 基礎等	18	12～2月	・打設状況 ・仕上り状況
7	白岩川樋門工工事	富山市 水橋畠等	樋門工 ボックスカルバート 重力式擁壁	67 67	12月 2～3月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・ひずみ計測等 ・仕上り状況
8	(主)高岡小杉線道路標識設置工事その1	射水市 橋下条	大型案内標識工 基礎	5	10月	
9	(主)高岡小杉線道路標識設置工事その2	射水市 橋下条	大型案内標識工 基礎	9	11月	・打設状況
10	(主)富山戸出小矢部線消雪配管工工事	高岡市 常国	道路消雪工 保護コンクリート	3	9月	
			計	309		

表－5.30 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設時期
1	小川水系南尻無谷砂防 護岸工工事	朝日町 山崎	砂防堰堤流路工 垂直壁等	112	9～10 月

【配合表 (21-5-40)】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
ＦＢ	56.5	41.8	243	―	137	810	1156	2.43	

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート 温度(℃)
垂直壁第１ﾘﾌﾄ	９月 26 日	荷卸時(1 回目)	５．５	３．９	２３．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	４．５	３．９	２４．０
		(基準)	３．５～６．５	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】 (N/mm^2)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
垂直壁第１ﾘﾌﾄ	１２．０	１７．９	２７．３	３１．１	３４．８

表－5.31 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
２	（一）三箇吉島線道路改良工事	魚津市 吉島	道路側溝工	7	12 月

【配合表（21-8-25）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
ＦＢ	56.5	45.3	271	―	153	850	1050	2.71	

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
側壁	12 月 21 日	荷卸時（1 回目）	９．５	４．５	８．０
		（基準）	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】

(N/mm^2)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
側壁	５．１	１６．９	２８．８	３４．５	３８．２

表－5.32 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
３	（一）上滝山室線（太田本郷橋）上部工工事	富山市 太田	橋梁上部工 地覆等	3	８月

【配合表（27-8-25）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
N＋F	52.0	44.2	257	45	157	814	1047	3.02	

表－5.33 モデル工事の実施状況

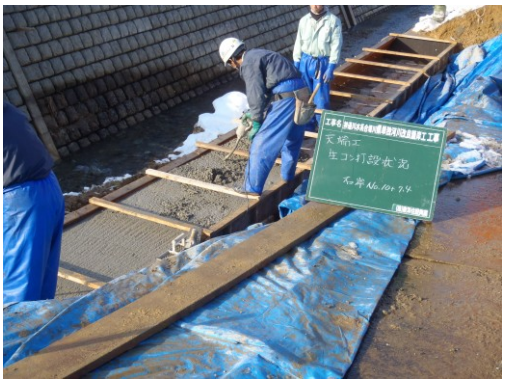
番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設時期
4	(一)湯八尾線道路改良工事	富山市 八尾町竹ノ内	ブロック積擁壁工 胴込等	3	12 月

【配合表 (21-8-25)】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
N＋F	59.0	43.8	213	47	153	817	1067	2.60	

表－5.34 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
５	神通川水系合場川護岸工工事	富山市 八尾町深谷	環境ブロック護岸工 天端ｺﾝｸﾘｰﾄ等	20	11 月中旬



【配合表（21-8-25）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
N＋F	59.0	43.8	213	47	153	817	1067	2.60	

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
天端	12 月 13 日	荷卸時（1 回目）	９．０	５．３	９．０
		（基準）	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】

(N/mm^2)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
天端	８．８	１９．１	３０．２	３５．１	３８．９

表－5.35 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
６	神通川水系黒川護岸工 工事	富山市牧野	石積護岸工 基礎等	20	12 月中旬 以降

【配合表（21-8-40）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
Ｎ＋Ｆ	57.0	40.4	205	45	142	770	1154	2.50	

表－5.36 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設時期
7	白岩川樋門工工事	富山市 水橋畠等	樋門工 ボックスカルバート 重力式擁壁	67 67	12 月 2～3 月

【配合表（24-8-40）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備考
N＋F	53.0	40.1	235	41	146	760	1154	2.76	ＢＯＸ

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート 温度(℃)
底版	12 月 14 日	荷卸時(1 回目)	７．０	５．８	１０．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	９．０	５．２	１０．０
側壁・頂版	12 月 27 日	荷卸時(1 回目)	８．５	５．５	７．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	８．０	５．３	８．０
		(基準)	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】

(N/mm²)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
底版	１０．９	２２．４	３３．１	３６．０	３８．８
側壁・頂版	５．４(2 日)	２１．８(8 日)	２９．７	３２．１	３５．０

【配合表（21-8-40）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備考
N＋F	58.0	43.1	209	43	146	824	1111	2.52	擁壁１
N＋F	54.5	40.8	222	46	146	773	1142	2.68	擁壁２

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
擁壁１	２月 20 日	荷卸時(１回目)	９．０	３．７	６．０
〃	〃	荷卸時(２回目)	８．５	３．９	７．５
擁壁２	３月２日	荷卸時(１回目)	１０．０	５．８	９．０
〃	〃	荷卸時(２回目)	１０．０	５．１	１０．０
		(基準)	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】

(N/mm²)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
擁壁１	７．３	１８．９	２９．５	３２．１	３４．３
擁壁２	４．６	１４．５(６日)	２６．３	２８．６	３２．８

表－5.37 モデル工事の実施状況

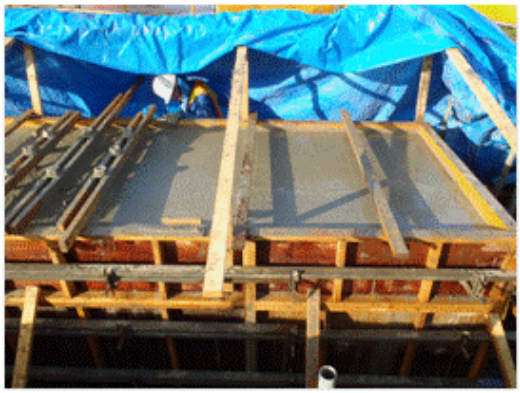
番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
８	（主）高岡小杉線道路標識設置工事その１	射水市 橋下条	大型案内標識工 基礎	5	10 月

【配合表（18-8-40）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
N＋F	60.0	38.4	198	36	140	735	1208	2.34	

表－5.38 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
９	（主）高岡小杉線道路 標識設置工事その２	射水市 橋下条	大型案内標識工 基礎	9	11 月



【配合表（27-8-25）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
Ｎ＋Ｆ	51.0	43.6	252	44	151	798	1038	2.96	

表－5.39 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
１０	（主）富山戸出小矢部線 消雪配管工工事	高岡市 常国	道路消雪工 保護コンクリート	3	９月

【配合表（30-8-25）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
N＋F	48.0	43.1	268	47	151	779	1038	4.10	

5.3.2 石川県のモデル工事への適用

平成24年度において，石川県によるモデル工事を実施した。石川県によるモデル工事の概要を**表－5.40**に，モデル工事の実施状況を**表－5.41**から**表－5.46**に示す。その結果，いずれのモデル工事においても，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの施工面，品質面での問題はなかった。

表－5.40 モデル工事の概要

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設日	調査内容
1	風呂谷川通常砂防工事	白山市 小柳町	砂防堰堤工 堰堤本体	425	11～12月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・ひずみ計測等 ・仕上り状況
2	(主)金沢田鶴浜線地方道改築工事（４車線化　内灘海浜橋Ａ１橋台工）	内灘町 字大根布 地内	逆Ｔ式橋台 橋台	312	12～2月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 (ﾌｰﾁﾝｸﾞ及び壁) ・仕上り状況
3	(主)金沢田鶴浜線地方道改築工事（４車線化　内灘海浜橋Ａ２橋台工）	内灘町 字大根布 地内	逆Ｔ式橋台 橋台	448	12～1月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 (ﾌｰﾁﾝｸﾞ及び壁) ・仕上り状況
4	一般国道249号国道改築5類工事（その１）、（その２）、（その３）	七尾市 国分町地内	函渠工 ボックスカルバート	1421	11～1月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・ひずみ計測等 ・仕上り状況
5	一般県道七尾鳥屋線いしかわ交流広域交流幹線軸道路整備5類工事（改良工その１）	七尾市 白馬町地内	函渠工 ボックスカルバート	900	12～3月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・仕上り状況
6	谷内川通常砂防工事	輪島市杉平町 地内	砂防堰堤工 堰堤 流路工	67 238	12～3月	・打設状況 ・ｺﾝｸﾘｰﾄ性状 ・仕上り状況
			計	3,811		

表－5.41 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設時期
1	風呂谷川通常砂防工事	白山市 小柳町	砂防堰堤工 堰堤本体	425	11～12 月

【配合表（21-5-40）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備考
N＋F	58.2	40.4	208	36	142	763	1134	2.44	第２ﾘﾌﾄ
N＋F	58.2	40.8	204	35	139	773	1134	2.39	第３ﾘﾌﾄ

【フレッシュコンクリートの性状】

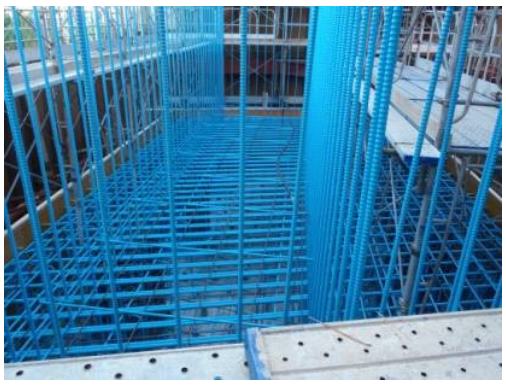
打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート 温度(℃)
第２ﾘﾌﾄ	12 月 10 日	荷卸時(1 回目)	５．５	４．９	９．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	６．５	４．５	１２．０
第３ﾘﾌﾄ	12 月 17 日	荷卸時(1 回目)	６．０	５．３	９．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	５．５	５．０	１１．０
		(基準)	３．５～６．５	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】　(N/mm²)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
第２ﾘﾌﾄ	１１．３	１８．５	２７．９	３０．６	３１．９
第３ﾘﾌﾄ	１０．５	１９．４	２８．４	３０．０	３１．５

表－5.42 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m³)	打設時期
2	(主)金沢田鶴浜線地方道改築工事 (４車線化　内灘海浜橋Ａ１橋台工)	内灘町 字大根布地内	逆Ｔ式橋台 橋台	312	12～2 月



【配合表（底版：30-8-40、躯体：30-8-20)】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備考
Ｎ＋Ｆ	48.1	39.6	233	58	140	743	1146	2.91	底版
Ｎ＋Ｆ	45.2	48.2	264	66	149	877	964	1.98	躯体

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート 温度(℃)
底版	12 月 3 日	荷卸時(1 回目)	８．０	４．５	１１．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	９．５	４．５	１３．０
躯体	12 月 26 日	荷卸時(1 回目)	１０．５	４．８	６．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	１０．５	５．３	７．０
		(基準)	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】　(N/mm²)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
底版	１３．０	２６．６	３８．９	４５．６	４８．７
躯体	１２．９	３０．３	４２．２	５１．２	４８．５

表－5.43 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量（m^3）	打設時期
３	（主）金沢田鶴浜線地方道改築工事 （４車線化　内灘海浜橋Ａ２橋台工）	内灘町 字大根布地内	逆Ｔ式橋台 橋台	448	12～1 月

【配合表（底版：30-8-40、躯体：30-8-20）】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
Ｎ＋Ｆ	48.1	39.6	233	58	140	743	1146	2.91	底版
Ｎ＋Ｆ	45.2	48.2	264	66	149	877	964	1.98	躯体

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
底版	12 月 7 日	荷卸時(1 回目)	８．０	５．５	１０．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	８．５	４．３	１１．０
躯体	12 月 27 日	荷卸時(1 回目)	９．０	４．９	８．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	９．５	４．５	１０．０
		(基準)	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】　(N/mm^2)

	３日	７日	２８日	５６日	９１日
底版	１０．４	２１．７	３５．２	３８．８	４３．１
躯体	１４．６	３１．８	４６．７	５３．６	５８．７

表－5.44 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設時期
４	一般国道 249 号 国道改築５類工事 （その１）、（その２）、 （その３）	七尾市 国分町地内	函渠工 ボックスカルバート	1421	11～1 月

【配合表（24-8-40)】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
Ｎ＋Ｆ	50.8	41.8	236	42	141	755	1100	2.78	

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート 温度(℃)
底版	12 月 7 日	荷卸時(1 回目)	７．５	４．３	１５．０
側壁	12 月 17 日	荷卸時(1 回目)	７．０	３．７	１０．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	９．５	４．２	１３．０
		(基準)	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】　(N/mm^2)

	２日	８日	２８日	５６日	９１日
側壁	５．５	２１．４	３１．０	３４．５	３８．２

表－5.45 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m^3)	打設時期
５	一般県道七尾鳥屋線いしかわ交流広域交流幹線軸道路整備５類工事（改良工その１）	七尾市 白馬町地内	函渠工 ボックスカルバート	900	12～3 月

【配合表（24-8-40)】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m^3)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m^3)	水 W (kg/m^3)	細骨材 S (kg/m^3)	粗骨材 G (kg/m^3)	混和剤 Ad (kg/m^3)	備考
N＋F	50.8	41.8	236	42	141	755	1100	2.78	

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
底版	1 月 23 日	荷卸時(1 回目)	８．５	３．９	７．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	７．０	４．１	１０．０
側壁・頂版	3 月 2 日	荷卸時(1 回目)	６．５	４．２	８．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	６．５	４．６	９．０
		(基準)	5.5～10.5	３．０～６．０	

【コンクリートの圧縮強度試験】　(N/mm^2)

	３日	６日	２８日	５６日	９１日
側壁・頂版	６．７	１８．８	３０．９	３５．９	３７．３

表－5.45 モデル工事の実施状況

番号	工事件名	工事場所	構造物の名称 打設箇所	数量(m³)	打設時期
６	谷内川通常砂防工事	輪島市 杉平町地内	砂防堰堤工 堰堤・流路工	67 238	12～3 月

【配合表 (24-5-40)】

	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備考
N＋F	54.6	40.1	235	42	151	723	1118	2.77	

【フレッシュコンクリートの性状】

打設部位	打設日	試験時期	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート 温度(℃)
垂直壁第２ﾘﾌﾄ	２月 28 日	荷卸時(1 回目)	５．０	４．８	８．０
〃	〃	荷卸時(2 回目)	４．５	５．０	９．５
		(基準)	３．５～６．５	３．０～６．０	

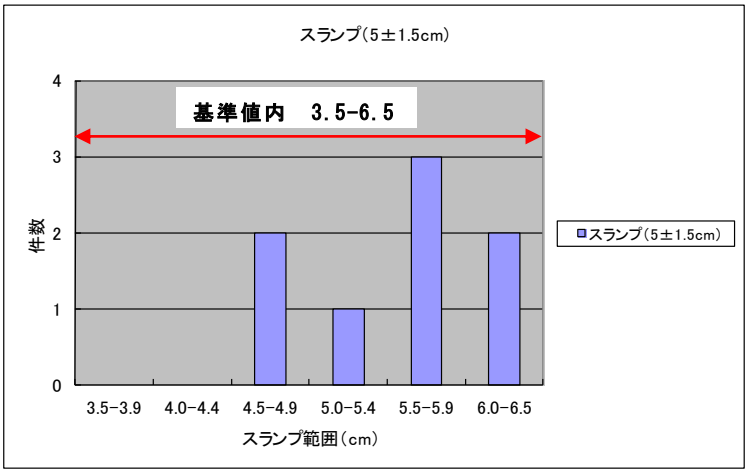
【コンクリートの圧縮強度試験】　(N/mm²)

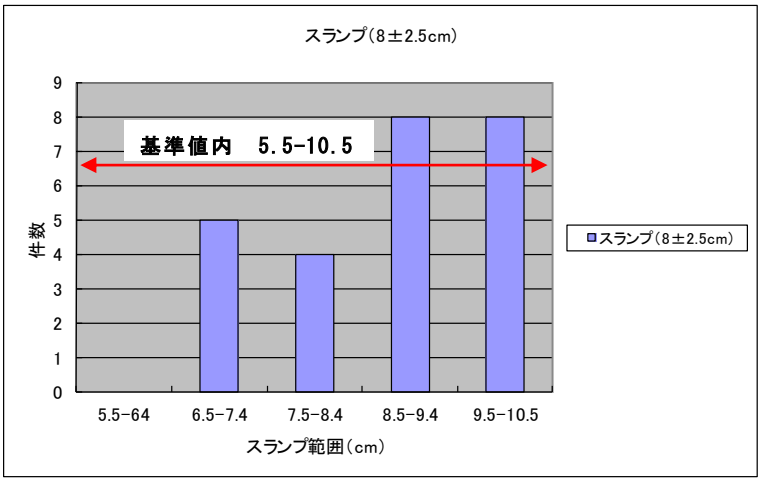
	３日	７日	２８日	５６日	９１日
垂直壁第２ﾘﾌﾄ	９．２	１８．７	３０．２	３４．６	３６．３

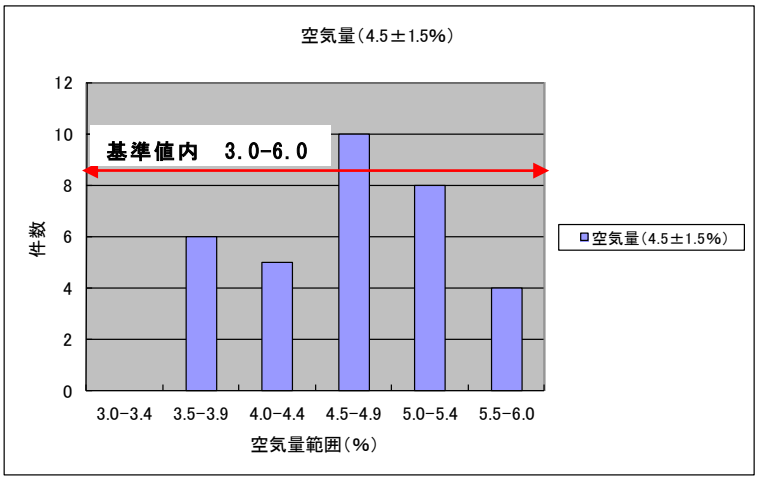
5.3.3 モデル工事の施工性と強度発現性

(1) 施工性の検討

富山県と石川県で実施されたモデル工事のスランプ，空気量のヒストグラムを**図－5.27**に示す。図より，いずれも基準値内であり，試験施工同様，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの施工性における問題はない。



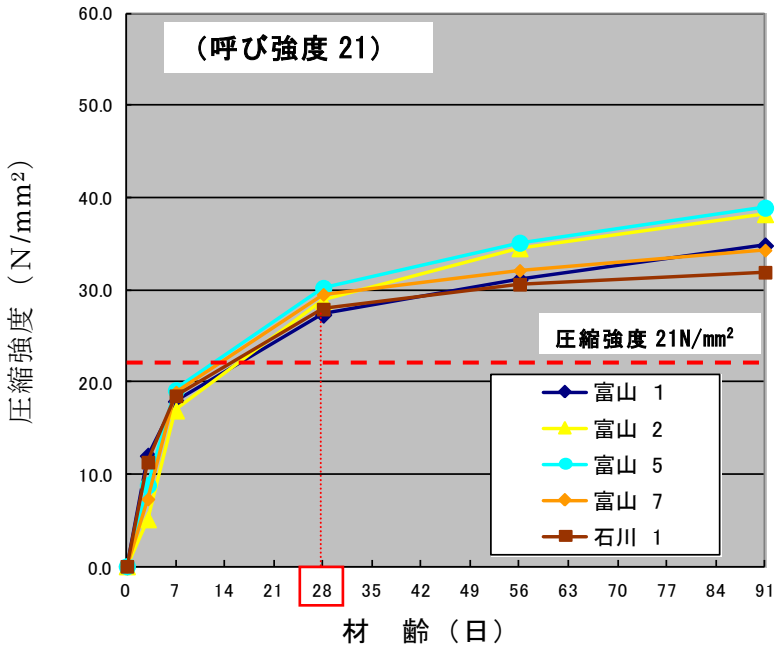


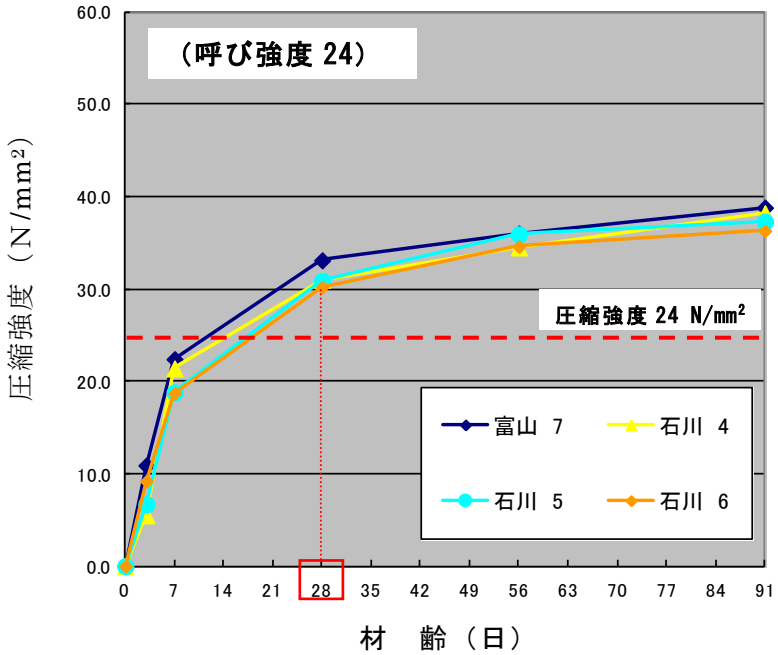


図－5.27 スランプ，空気量のヒストグラム

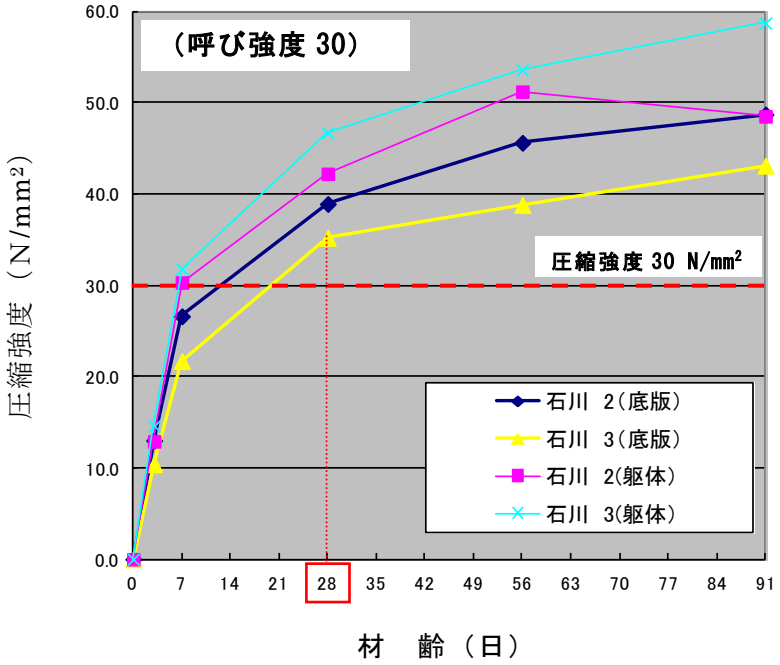
(2) 強度発現性の検討

富山県と石川県で実施されたモデル工事の呼び強度 21, 24, 30 の圧縮強度と材齢の関係を**図－5.28** に示す。図より, 材齢 28 日での呼び強度は満足しており, 実機試験結果同様, 初期強度の発現や長期強度の増進がみられる。従って, 試験施工同様, 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度発現性に問題はない。ただし, 呼び強度 30 の配合は, 強度がかなり大きいため, 今後, 単位セメント量を低減するなどの配合の調整が必要である。





図－5.28(a) 圧縮強度と材齢の関係（呼び強度 21, 24）



図－5.28(b) 圧縮強度と材齢の関係（呼び強度 30）

5.3.4 夏期施工工事への適用検討

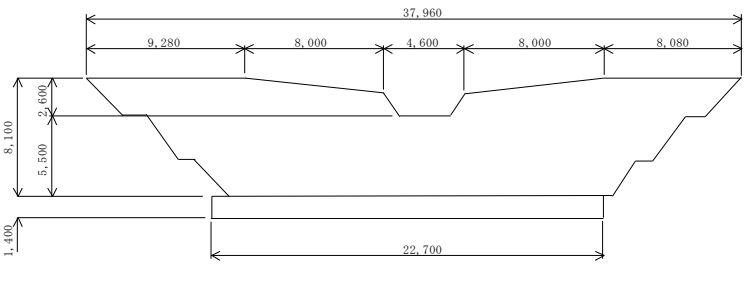
平成 24 年度の富山県・石川県によるモデル工事は，秋から冬にかけての工事であったため，平成 25 年度の石川県のモデル工事で夏期施工工事を実施した。

石川県（輪島市）で実施したモデル工事の概要と結果を以下に示す。

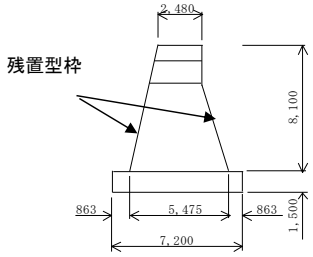
(1) モデル工事（夏期施工工事）の概要

モデル工事（夏期施工工事）の概要図を**図－5.29** に，配合表を**表－5.46** に示す。石川県発注の谷内川通常砂防工事（砂防堰堤:コンクリート数量 828m³）について，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートでの夏期施工工事として各種調査を実施した。

正　面　図



縦断面図



図－5.29 モデル工事（夏季施工工事）の概要図

表－5.46 モデル工事（夏季施工工事）の配合表

配　合	種　類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 Ad (kg/m³)	備　考
24-5-40	N＋F	54.6	40.1	235	42	151	723	1,118	2.77	

N＋F:フライアッシュ15%置換(内割り)

(2) モデル工事（夏期施工工事）の結果

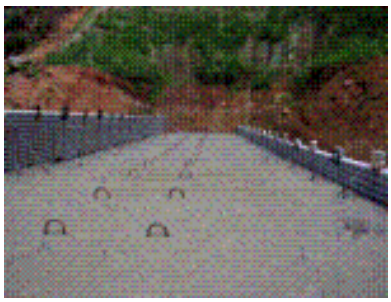
フレッシュコンクリートの性状を**表－5.47** に，コンクリートの圧縮強度試験結果を**表－5.48** に示す。表より，所定のスランプ（8±2.5cm），空気量（4.5±1.5%）を確保できており，施工性に関しての問題はない。また，コンクリートの打設状況は，少し粘り気がありバケット口が詰まりやすい状況がみられたが，特段の問題もなく施工ができた。ブリーディングの発生がほとんどなく，仕上げ作業時間の短縮につながった。コンクリートの圧縮強度試験結果より，十分な強度発現が確認できた。構造物の外観には，収縮などによるひび割れは見られなかった。

以上より，夏期施工において，施工面・品質面での特段の問題はみられなかった。

表－5.47 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（℃）
11ブロック ・呼び強度 24 ・スランプ 5±1.5cm ・空気量 4.5±1.5%	7月30日 8:30～12:00	曇り	24～30℃	製造時	8:10	5.5	4.9	28.0
				荷卸時	8:30	4.5	3.5	27.0
				製造時	10:25	6.0	5.0	28.0
				荷卸時	10:35	4.5	3.2	28.0
				終了時	11:05	4.0	3.0	29.0
13ブロック ・呼び強度 24 ・スランプ 5±1.5cm ・空気量 4.5±1.5%	8月6日 8:40～12:00	曇り	26～31℃	製造時	8:20	4.5	3.9	29.0
				荷卸時	8:40	4.0	3.0	29.5
				製造時	11:25	5.0	3.7	29.0
				荷卸時	11:40	4.5	3.0	30.0
				終了時	12:00	4.0	2.4	32.0
					（基準）	3.5～6.5	3.0～6.0	

コンクリート打設状況



ブリーディングの状況写真

表－5.48 コンクリートの圧縮強度試験結果

（単位：N/mm²）

	3日	7日	28日	56日	91日
11ブロック	15.0	20.1	28.7	32.9	34.9
13ブロック	13.9	18.1	27.5	30.7	33.0

5.4 まとめ

本章では，富山県，石川県，福井県および国交省の「試験施工」において，汎用コンクリートとの実構造物での比較試験を実施し，その施工性，強度発現性および耐久性（初期ひび割れ，水和発熱性能）の観点から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証を行った。また，様々な構造物や施工時期をとおして，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートでの「モデル工事」を実施し，試験施工と同様の観点から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物への適用に問題がないかどうかを検証した。

その結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，その施工性，強度発現性および耐久性の観点から，実構造物への適用に問題がないことを検証できた。

本章で得られた主な知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 北陸 3 県および国交省の試験施工による比較検討の結果，その施工性，強度発現性および耐久性（初期ひび割れ，水和発熱性能）の観点において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，汎用コンクリート（高炉セメントを使用したコンクリート）と比べ，品質的に同等以上であった。

(2) 試験施工時に得られた計測データにもとづき，施工条件をあわせた温度応力解析を実施した結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，特に，重力式擁壁などのマスコンクリートの温度ひび割れに対し極めて有利であった。

(3) 様々な構造物や異なる施工時期で実施したモデル工事での調査の結果，いずれの工事においても施工性や強度発現性の基準を満足し，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，実構造物への適用に問題がなかった。

(4) 標準養生と現場養生での強度発現性の確認試験の結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，初期の強度発現が汎用コンクリートの約 2 倍であり，その傾向は冬期での現場養生で顕著であった。

(5) 夏期施工工事での調査の結果，施工性や強度発現性の基準を満足し，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，夏期における実構造物への適用に特段の問題はなかった。

【参考文献】

1) T. Hashimoto and K. Torii: The development of highly durable concrete using classified fine fly ash in Hokuriku District, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.312-321, 2013.
2) T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh and K. Torii :A Development of Environmentally-friendly and Highly-durable concrete Using Classified Fly Ash, Concrete Innovation Conference CIC2014, CD-R12pages, 2014.
3) K. Torii, T. Hashimoto, T. Kubo and C. Sannoh : The effective utilization of classified fine fly ashes for production of highly-durable concrete mixtures, 3rd Inter. Conf. on Sustainable Construction Materials & Technologies, SCMT3 Hamada sessions, pp.109-118, 2013.
4) 橋本徹，久保哲司，参納千夏男：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に向けた取組み，電力土木，No.361，pp.56-60，2012.
5) 伊藤始，大野宏樹，橋本徹，宮里心一：分級フライアッシュの混和によるコンクリートの温度ひび割れ抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1267-1272，2013.
6) (社)日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.
7) (社)土木学会：コンクリート標準示方書施工編（2007 年度制定），2007.
8) (社)土木学会：コンクリート標準示方書設計編（2007 年度制定），2007.

第6章　結　　論

6.1 本研究のまとめ

本研究では，北陸の地域特性を踏まえ，「地産地消」，「エネルギーセキュリティー」および「コンクリート構造物の長寿命化」の 3 つの観点から，「北陸地方のコンクリートにフライアッシュの活用を標準化するべきである」との理念にもとづき，北陸地方において設立されたフライアッシュ委員会の活動の一環として,「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートを実社会において活用すべきかどうか」について多面的な検証を実施した。検証の手順としては，まず，北陸産分級フライアッシュの品質が，その製造の分級過程などにより物理的・化学的性質が改善され，コンクリート品質に対し，従来よりも高品質になっていることを検証した。次に，このフライアッシュを使用したコンクリートが，実際の生コンクリート工場において製造ができ，その製造品質が汎用コンクリートに対し同等以上であることを検証した。さらに，このフライアッシュを使用したコンクリートが，耐久性に関する各種比較試験において，汎用コンクリートに対し同等以上であることを検証した。最後に，このフライアッシュを使用したコンクリートを様々な種類の実構造物に適用し，施工面・品質面において問題がないことを検証した。

以上の検証結果を踏まえ，本研究では，北陸産分級フライアッシュの品質，このフライアッシュを使用したコンクリートの製造品質，耐久性および実構造物への適用性の観点から,「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートを実社会において活用すべきである」との結論を得た。

以下に，各章の内容および得られた結果を総括する。

「第 1 章 序論」では，北陸地方が抱える深刻な ASR 問題を提起し，北陸の地域特性を踏まえた「地産地消」，「エネルギーセキュリティー」および「コンクリート構造物の長寿命化」の 3 つの観点から，「北陸地方のコンクリートに，フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュの使用を標準化する」という対策が推奨されることについて述べた。また，本研究の役割は，フライアッシュ委員会における実用化検討にあり，本研究の目的は，フライアッシュ委員会で蓄積された膨大なデータによる多面的な検証であることを述べた。

「第 2 章 北陸産分級フライアッシュの品質の検証」では，北陸産分級フライアッシュの製造のポイントとなる，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」の 2 つの対策の詳細を説明し，さらに，コンクリート用フライアッシュの JIS 規格項目（JIS A6201）について，七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所の品質管理データの分析を行うとともに，炭種や燃焼条件が同じになるように,同一サンプルを用いた分級効果確認試験を実施した。

その結果，北陸産分級フライアッシュの品質は，フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる粉末度，密度，フロー値比，活性度指数の 4 項目において，明確な品質の向上が認められ，かつ，その他の指標へも悪影響がないことから，従来よりも高品質なフライアッシュになっていることを検証した。また，分級効果確認試験の結果から，北陸産分級フライアッシュの品質が従来よりも高品質となったのは，主として

分級によるフライアッシュの物理的・化学的性質の改善効果であることを確認した。

「第 3 章 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質の検証」では，実際の生コンクリート工場において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合を室内試験および実機試験により決定し，この配合を用いたコンクリートが問題なく製造できることを確認した。また，この配合を用いたコンクリートの製造品質に関して，汎用コンクリートとの各種比較試験（室内試験）を実施し，施工性と強度発現性の観点から，比較評価を行った。さらに，強度発現性については，北陸産分級フライアッシュがコンクリートの強度発現性に対しどのように関与しているのかを調べるため，W/C を一定とした各種比較試験（室内試験）を実施し，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの強度改善メカニズムの解明を試みた。

その結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質は，施工性と強度発現性の観点から，Nに対する初期強度発現を除いて，汎用コンクリートよりも品質的に同等以上であることを検証した。なお，初期強度発現は，Nより小さいが，型枠の取り外し時期などの実質的な問題がない範囲であった。また，この強度発現は，フライアッシュのポゾラン反応性に関して，従来からいわれているコンクリート内部組織の緻密化だけでなく，粒径 10μm 以下の北陸産分級フライアッシュがセメントペーストとともに粗骨材界面を十分に充填することにより，材齢 7 日以降の長期にわたり，ITZ が改善される効果もあることが示めされた。一方，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，スランプロスや空気量ロスが経過 1 時間以降に大きくなる傾向がみられるため，経過 1 時間以内での施工が推奨された。

「第 4 章 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性の検証」では，コンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる有害な「ひび割れ」を誘発する要因として，収縮性能，水和発熱性能，ASR 抑制性能，遮塩性能，中性化抑制性能，凍害抵抗性能の 6 項目を選出し，これらの項目に関して汎用コンクリートとの各種比較試験（室内試験）を実施した。

その結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性は，収縮性能，水和発熱性能，ASR 抑制性能，遮塩性能，中性化抑制性能，凍害抵抗性能の 6 項目に対し，汎用コンクリートに比べ同等以上であることを検証した。

「第 5 章 北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証」では，富山県，石川県，福井県および国交省の「試験施工」において，汎用コンクリートとの各種比較試験（実構造物）を実施し，その施工性，強度発現性および耐久性（初期ひび割れ，水和発熱性能）の観点から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証を行った。また，様々な構造物や異なる施工時期において，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートでの「モデル工事」を実施した。

その結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，その施工性，強度発現性および耐久性の観点から，実構造物への適用に問題がないことを検証した。

6.2 今後の課題と展望

本研究では，北陸産分級フライアッシュの品質，このフライアッシュを使用したコンクリートの製造品質，耐久性，実構造物への適用性の観点から，「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートを実社会において活用すべきである」との結論を得た。以下，この結論を補足するための今後の課題と，フライアッシュ委員会での利用方策の検討を踏まえた今後の展望について述べる。

6.2.1 今後の課題

(1) 北陸産分級フライアッシュの品質の継続的改善

北陸産分級フライアッシュの品質は，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」の 2 つの対策により，従来よりも高品質なフライアッシュとなっている。しかし，いくら高品質であっても，その品質のばらつきが大きくなると，コンクリート製造業者にとっては，やはり，扱いにくいフライアッシュとなってしまう。以前の「トラウマ」の復活である。従って，フライアッシュの生産者が，北陸産分級フライアッシュの品質変動を小さくするため，フライアッシュ品質の継続的改善を行うことが必要である。すなわち，七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所には，膨大な品質管理データがあり，炭種や燃焼条件などでの分析や分級品の取り出し方法などには，さらに，改善の余地があると思われる。このような改善の積み重ねが，コンクリート製造業者の負担の軽減につながり，さらに，北陸産分級フライアッシュのブランド化につながっていくものと考える。

(2) コンクリートの製造品質および施工品質の改善

北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，汎用コンクリートに比べ，経過 1 時間以降，スランプロスや空気量ロスが大きい傾向がみられた。従って，今回の試験施工やモデル工事では，生コンクリート工場から 1 時間以内での施工が可能となる工事が選定されている。本研究では，各生コンクリート工場が通常用いている混和剤を使用し，AE 剤添加量とフライアッシュ使用量との関係性をもとに，スランプや空気量の調整が可能であったが，今後，1 時間を超える施工範囲においても使用できるように，各生コンクリート工場において，最適な AE 減水剤と AE 剤の組み合わせを検討することが必要と考える。

また，各生コンクリート工場では，標準期，夏期，冬期での配合が必要となることから，施工者の理解を得ることも含め，夏期や冬期での施工実績を蓄積することが必要である。本研究では，冬期での施工実績を中心に蓄積することができたが，夏期での施工実績は少ない。年間を通じて実績を重ねることにより，コンクリート製造者による配合の改善や施工者による施工品質の改善が可能となる。かつて，普通セメントを使用したコンクリートから，高炉セメントを使用したコンクリートに変更したときもそうであったように，当初の不慣れは，絶えず改善していくことにより，自信のもてる製品となっていく。まさに，技術者の腕のみせどころと考える。

さらに，コンクリートの製造品質および施工品質に関して，これまでに得たノウハウの蓄積と周知が必要である。各生コンクリート工場では，異なる骨材の使用や配合設計の考え方の違いなどにより，全国一律の考え方とはいかないが，最低限のノウハウは全工場に周知すべきと考える。例えば，AE 剤の添加方法については，空気量の管理が容易となる

ように別添方式が望ましい。また，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートでは，ブリーディングが少なく，汎用コンクリートの感覚でコテ仕上げの時期を考えると，既にコンクリートが硬くなっており，仕上げのタイミングを逸することになる。フライアッシュ委員会では，委員会活動を通して得られた，このようなノウハウや知見を「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(案)」として取りまとめ，講習会や北陸電力のホームページで周知している。このマニュアルについても，コンクリート製造者や施工者などの意見に耳を傾け，発注者サイドとの調整を行いながら，適宜，改訂していくことが大切である。

(3) フライアッシュコンクリートの価格の問題

フライアッシュコンクリートは，生コンクリート工場において，フライアッシュを混和材として使用する場合とフライアッシュセメントとして使用する場合の 2 通りの方法がある。後者の場合は，セメント工場において，フライアッシュセメントを製造する必要があるが，セメント工場では，大規模なキルンを運用する関係上，相当量のフライアッシュセメントの需要が約束されない限り，本格的な製造には踏み切れないといった事情がある。従って，当面のフライアッシュコンクリートの製造は，前者のフライアッシュを混和材として使用する方法が主体となる。この場合，フライアッシュコンクリートを $1m^3$ 製造するのに，トン当たり 1 万数千円のセメントを，運搬費を含めて数千円のフライアッシュに置き換わることで材料費は減少するが，フライアッシュを貯蔵するためのサイロやフライアッシュを計量するための計量装置などの固定費が必要となる。従って，やはりある程度の需要創出が約束されないと，生コンクリート工場オーナーもフライアッシュ用設備にかかる固定費を支出し，フライアッシュコンクリートの製造工場（JIS 認証工場）に改造する判断が出来ない状況がある。そのため，現状のフライアッシュコンクリートの価格は，汎用コンクリートに対し，数百円から数千円高い価格設定となっている。この問題の解決策としては，官公庁による「需要の創出」と，生コンクリート工場オーナーによる「JIS 認証工場の拡大」を一体として進めることが必要である。フライアッシュ委員会では，実用化検討によりフライアッシュコンクリートの優位性を明らかにし，まずは，試験施工やモデル工事として，官公庁からの「需要の創出」を図り，それに連動する形で「JIS 認証工場の拡大」を図ることに成功した。今後は，フライアッシュコンクリートと汎用コンクリートとの価格差を解消するため，更なる「需要の創出」と「JIS 認証工場の拡大」を一体として進め，バランスをとりながら継続していくことが重要であると考える。

6.2.2 今後の展望

本研究の第4章でも述べたが，大手のゼネコンなどでは，フライアッシュを使用したコンクリートの収縮性能や充填性の優位性に着目し，トンネルの覆工コンクリートなどを対象に，高充填コンクリートや中流動コンクリートなどの開発が既に始まっている。また，コンクリート二次製品の会社などにおいても,フライアッシュのポゾラン反応性に着目し，PC桁やPCa製品の高耐久化を図っている。身近なところでは,北陸地域の電柱の一部には，ASRが原因と考えられるひび割れが確認されており，今後，電柱（PC柱）などへのフライアッシュの活用を検討していきたいと考えている。このように，北陸地方においては，フライアッシュ委員会の活動も後押しとなって，フライアッシュの活用が様々な建設分野への広がりをみせている[1)～7)]。

一方，フライアッシュ委員会では，平成 26 年度から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの利用に向けた，各県の施策が開始されている。富山県では「富山県土木部発注の土木工事を対象に，発注者が指定したモデル工事に加え，施工者がフライアッシュコンクリートの使用を希望する場合においても，発注者が承認すればモデル工事と位置付けて実施する」，石川県では「石川県七尾地区をモデル地区に指定し，石川県土木部発注の土木工事に用いる生コンクリートを原則フライアッシュコンクリートとする」,福井県では「福井県嶺北地区および敦賀市を推進地区に指定し，施工者にフライアッシュコンクリートの使用を推奨するとともに，施工者が使用する場合の手続きを簡素化（手続きはＢＢと同程度）する」という施策である。この中で最も注目しているのは，石川県の「七尾地区をモデル地区指定」する施策である。これは，**図-6.1**に示すように，七尾大田火力発電所で産出されるフライアッシュを，地元の生コンクリート工場で混和材としてコンクリートに使用し，地元のコンクリート構造物の長寿命化に貢献するという，地域で完結する循環型社会が形成されるからである。このような取り組みが石川県全体へ，そして，北陸全体に広がっていくことを強く期待している。このためには，前述した課題の解決を着実に実行し，足元をしっかりと固めるとともに，全国に向けての情報発信や情報交換を行い，全国の模範となるプロジェクトとなるよう，今後とも努力をしていく所存である。

最後に，冒頭に掲げた「北陸地方のコンクリートにフライアッシュの活用を標準化するべきである」との理念の実現は，まだ，道半ばであるが，フライアッシュ委員会での活動を通じ,着実に前進しており,本研究の成果がこの理念の推進の一助となれば幸いである。

図－6.1 フライアッシュコンクリートの新たな展開（石川県七尾地区）

【参考文献】

1）佐藤貴史，萩原秀樹，秋田勝次，桜井邦昭：フライアッシュを用いた覆工用高充填コンクリートの開発，トンネルと地下，第 44 巻，10 号，pp.43-52，2013.

2）白根勇二，蛯谷祐至，森英治，伊藤毅浩：フライアッシュを積極的に用いた粉黛系中流動コンクリートの開発，前田技術研究所報，Vol.1，No.53，2012.

3）板坂匠, Irfan Prasetia，多田茂夫，鳥居和之：分級フライアッシュによるプレストレストコンクリートの ASR 抑制効果，コンクリート工学年次論文集, Vol.35，No.1，pp.439-444，2013.

4）吉田匠吾，板坂匠, Irfan Prasetia，鳥居和之：PC 桁・PCa 製品の ASR 抑制効果としての分級フライアッシュの効果，コンクリート工学年次論文集, Vol.35，No.1，pp.985-990，2013.

5）山村智，鈴木雅博，小林和弘，鳥居和之：分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 桁への適用に関する検討，コンクリート工学年次論文集, Vol.35，No.1，pp.181-186，2013.

6）横関康祐：土木分野におけるフライアッシュの適用事例，コンクリート工学, Vol.52，No.5，pp.439-444，2014.

7）山本武志：石炭火力産微粒子（フライアッシュ）の利用拡大に向けて，コンクリート工学, Vol.52，No.5，pp.468-471，2014.